

321007-02

작물별 실증을 위한 영농형 태양광
시스템 구축 및 표준 설계서 개발

2022

농림축산식품부
농림식품기술기획평가원

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호(O)
농업에너지 자립형산업모델 기술개발사업 2022년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004394-01

작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발

2023.05.25.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단
협동연구기관 / 두원산업(주)

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발”(개발기간 : 2021. 04. 01. ~ 2022. 12. 31.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 05. 25



주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 (김재영) (인)

협동연구기관명 : 두원산업(주) (김원각) (인)



주관연구책임자 : 최 원

협동연구책임자 : 김 원 각

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

최종보고서										보안등급		
										일반[<input checked="" type="checkbox"/>], 보안[<input type="checkbox"/>]		
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		사업명		농업에너지 자립형산업 모델 기술개발			
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원			사업명		내역사업명 (해당 시 작성)		에너지저장·관리			
공고번호		제 농축2021-27호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		321003-02					
					연구개발과제번호		321007-02					
기술 분류	국가과학기술 표준분류	EF0601	50%	LB0901		30%	EI1206		20%			
	농림식품과학기술분류	CA0201	50%	RA0102		50%						
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문	작물별 생산성을 고려한 영농형 태양광 표준모델 개발 및 실증									
		영문	Development and Demonstration of Agrophotovoltaics Standard Model Considering Productivity by Crops									
연구개발과제명		국문	작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발									
		영문	Establishment of agrophotovoltaic system and development of standard design for demonstrative cultivation of various crops									
주관연구개발기관		기관명	서울대학교 산학협력단		사업자등록번호		119-82-03684					
		주소	(08826)서울특별시 관악구 관악 로 1 서울대학교 942동 5층		법인등록번호		114371-0009224					
연구책임자		성명	최원		직위		부교수					
		연락처	직장전화			휴대전화						
			전자우편			국가연구자번호						
연구개발기간		전체	2021. 04. 01 - 2022. 12. 31 (1년 9개월)									
		단계 (해당 시 작성)	1단계									
			n단계									
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비	그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금	
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계		900,000	82,500					900,000	82,500	982,500		
1단계		1년차	400,000	50,000				400,000	50,000	450,000		
		2년차	500,000	32,500				500,000	32,500	532,500		
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고					
		공동연구개발기관	두원산업(주)	김원각	대표이사			역할	기관유형			
연구개발담당자 실무담당자		성명	이상익		직위		연구원					
		연락처	직장전화			휴대전화						
			전자우편			국가연구자번호						

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2023년 5월 25일

연구책임자: 최 원

주관연구개발기관의 장: 김 재 영

공동연구개발기관의 장: 김 원 각



(직인)



(직인)



농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명	농업에너지 자립형산업모델 기술개발	총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)	321003-02				
내역사업명 (해당 시 작성)	에너지저장 · 관리	연구개발과제번호	321007-02				
기술 분류	국가과학기술 표준분류	EF0601	50%	LB0901	30%	EI1206	20%
	농림식품 과학기술분류	CA0201	50%	RA0102	50%		
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	작물별 생산성을 고려한 영농형 태양광 표준모델 개발 및 실증						
연구개발과제명	작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발						
전체 연구개발기간	2021. 04. 01 - 2022. 12. 31 (1년 9개월)						
총 연구개발비	총 982,500천원 (정부지원연구개발비: 900,000천원, 기관부담연구개발비: 82,500천원)						
연구개발단계	기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]	기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()			
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내 영농형 태양광 사업의 안전성 확보 및 효율성 향상과 표준화를 위하여 현재까지 영농형 태양광 구조에서 고려되지 못했던 농업시설물 특화 안전성 해석을 수행하고, 이에 관한 종합 설계기준을 구축하여, 다양한 작물에 적용 가능한 표준모델 설계서 개발 및 시공을 목표로 함 ○ 영농형 태양광 모듈과 상부구조물의 형태 및 규모, 그리고 영농지역의 지반조건 및 하부기초 형식에 따른 최적 설계법을 개발하여 다양한 국내 농업 지역에 적용 가능한 한국형 영농형 태양광 시스템의 표준 설계기술 개발 ○ 확률통계 기반 외부하중 분석, 지반 특성을 반영한 구조 신뢰성 수치해석을 수행하여, 영농형 태양광 시설물에 특화된 상부구조물 및 하부기초를 개발하고, 다양한 현장 설치 구조기준 적합성 검토 ○ 다양한 협업 시나리오 구성을 통해 총괄 · 협업과제와의 상호 유기적 협력 체계를 구축하여 영농형 태양광 시스템의 작물별 실증 재배 운영을 도모하고, 이에 관한 체계적 모니터링 시스템 구축 방안 도출 					
	전체 내용	<p>(1) 영농형 태양광 시스템의 국내 현황 조사 및 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 시스템 종합 현황 및 유지관리 · 운영방안 조사 - 국내 영농형 태양광 설계기술 및 표준화 현황 조사 - 태양광 발전 시스템 상부구조물 및 기초 설계 기본자료 조사 <p>(2) 영농형 태양광 시스템 구축을 위한 설치 후보지 현장조사 및 기본설계</p> <ul style="list-style-type: none"> - 협업 시나리오에 따른 협업체계 구축을 통한 설치 후보지 선정 - 현장조사를 통한 대상지역 기상 및 토질특성 분석과 태양광 시설을 위한 환경특성 파악 - 영농형 태양광 상부구조물 및 기초 관련 기본자료 및 안정성 평가 방법 정립 <p>(3) 영농형 태양광 시스템의 현장 설치를 위한 표준모델 검토 및 실시설계</p> <ul style="list-style-type: none"> - 다양한 하중 조건과 설치 지역의 특성을 반영한 표준모델의 구조 안정성 평가 - 복합 시뮬레이션 기법을 이용한 구조해석 모델 개발 					

		<ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 상부구조물 및 하부기초의 형식 및 규모에 따른 안정성 해석 (4) 작물별 현장실증 및 장기 성능 모니터링을 위한 영농형 태양광 시스템 시공 <ul style="list-style-type: none"> - 설치대상지 지질조사에 따른 토목공사 및 구조물 기초공사와 인발재하시험 - 영농형 태양광 시스템의 지지 구조물 및 태양광 모듈 시공 - 전기공사 및 모니터링 설비 시공과 영농형 태양광 시스템 구축 (5) 영농형 태양광 유형별 현장 적용성 평가와 표준 설계서 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 현장 시험을 통한 영농형 태양광 시스템 시설의 현장 적용성 확인 - 하중 재현기간별 최적화 상부구조물 설계 및 하부기초 유형 제시 - 다양한 환경에 적용 가능한 작물별 영농형 태양광 시스템의 종합 표준 설계서 개발 (6) 통합 플랫폼 구성을 위한 영농형 태양광 시스템 특화 모니터링 시스템 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 시스템의 모니터링 특화 모니터링 체계 수립 - 모니터링 데이터의 실시간 계측을 위한 최적화 설치 방법 검토 - 협업과제와의 협의를 통한 모니터링 데이터의 활용 방안 모색 - 영농형 태양광 플랫폼 연계를 위한 데이터 송수신 등의 원격 모니터링 네트워크 구축
1년차	목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내 현황 조사 및 설치 후보지 선정 ○ 대상지역 현장조사 및 영농형 태양광 기본설계 ○ 영농형 태양광 표준모델 검토 및 기본설계 ○ 작물별 지역특성을 고려한 실시설계 및 현장 설치
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 국내 영농형 태양광 시스템의 종합 현황 및 설계·유지관리 현황 심층 조사와 시설 운영방식 분석 - 협동 시나리오를 통한 설치 후보지 선정 - 대상지역 기상 및 토양특성에 관한 현장조사 및 분석 - 구조물 및 기초 기본자료와 안정성 평가 방법 정립 - 지반조사 및 재하·인발시험을 통한 토질특성 분석 - 구조 및 기초 종합 안정성 평가를 통한 표준모델 검토 - 설치 지역의 다양한 하중 조건을 반영한 구조 안정성 및 지반 조건에 따른 기초 지지력 평가 - 지역 환경특성을 고려한 작물별 영농형 태양광 실시설계 - 지질조사에 따른 토목공사, 구조물 기초공사 및 영농형 태양광 시스템의 표준모델 시공
2년차	목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 영농형 태양광 구조물 특화 설계기준 개발 ○ 영농형 태양광 현장 적용성 확인과 운영 ○ 모니터링 시스템 구축 및 데이터 활용방안 검토 ○ 영농형 태양광 시스템의 종합 표준 설계서 개발
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - FEM 복합 시뮬레이션 기법을 이용한 상부구조물과 기초의 면밀한 추가 안정성 검토 - 영농형 태양광 발전 특화 설계, 시공 및 테스트 - 다양한 환경특성을 고려한 영농형 태양광 시스템의 설치에 따른 현장 적용성 확인 - 유지관리 및 연구방향에 따른 시스템 운영과 검토

			<ul style="list-style-type: none"> - 모니터링 데이터에 관한 분류 및 정의와 활용방안 검토 - 총괄·협업과제와의 시나리오 구성을 통한 작물별 실증 재배 운영 원격 모니터링 시스템 구축과 플랫폼 연계 - 재현 기간별 하중을 고려한 최적화 상부구조물 설계 및 기초 유형 개발 - 영농형 태양광 시스템의 표준 설계도 및 시방서 작성
--	--	--	--

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ SCI 논문 총 1건, 비SCI 논문 총 2건, 학술발표 총 8건 ○ 특허출원 총 1건: 태양광 발전설비 구조물 ○ 특허등록 총 1건: 태양광 발전설비 구조물 ○ 시스템 구축: 영농형 태양광 시스템 설치 및 운영 ○ 자료발간 총 3건 <ul style="list-style-type: none"> - 국내 영농형 태양광 현황 및 설계관련 조사 보고서 - 학술기술기사 - 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안) ○ 포상 및 수상 1건
--------	--

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 한국형 영농형 태양광 시스템의 표준 설계기술 확보로 국가 농업 경쟁력 강화 ○ 친환경 신재생 에너지 생산 시설의 안정성 확보와 시설 보급의 가속화 ○ 영농형 태양광 시설의 표준 도입을 통한 시공의 효율성 및 경제성 강화 ○ 새로운 에너지 산업 모델을 제시하고 이와 관련한 전문 인력의 양성을 도모 ○ 영농지역 태양광 발전을 통하여 농가 수입을 증대시키고 새로운 농가 소득원 창출로 농촌 지역사회의 활성화 및 프로토타입 제시 ○ 농업 생산과 에너지 발전의 융합을 통하여 토지 이용 효율 제고 ○ 농업 분야에서 추가적 수입원을 창출하여, 새로운 융복합 영농 모델 확보 ○ 친환경 신재생 에너지 생산을 통하여 환경을 적극적으로 보호하는 방안 마련 ○ 신재생 에너지 기술 보급 및 전파로 화석 연료 자원의 사용을 획기적으로 절감 ○ 태양에너지 공유 개념의 영농형 태양광 시스템 개발로 기존 발전 시설의 위험성 배제 및 자연파괴 등의 환경문제 완화
---------------------	--

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	3	2	1									
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	영농형 태양광			표준 설계서		구조해석		설계 및 시공		모니터링 시스템		
영문핵심어 (5개 이내)	Agro-photovoltaic			Standard design		Structural analysis		Design & construction		Monitoring system		

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	7
(1) 연구개발의 배경	7
(2) 연구개발의 필요성	7
(3) 연구개발의 중요성	9
(4) 최종목표	10
(5) 종합연구개발 흐름도	10
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	11
제1장 영농형 태양광 시스템 현황 조사 및 분석	11
1.1 영농형 태양광 시스템 개요	11
1.2 영농형 태양광 시스템 개념 및 현황	11
1.3 영농형 태양광 시스템 설계 현황	12
제2장 영농형 태양광 시스템 구축을 위한 설치 후보지 선정 및 현장조사	15
2.1 협업 시나리오에 따른 영농형 태양광 설치 후보지 선정	15
2.2 현장조사를 통한 대상지역 토질특성 분석	15
제3장 영농형 태양광 구조 및 기초 안전성 평가 방법 정립	20
3.1 상부구조물 구조안전성 검토 및 구조 설계 방안	20
3.2 하부 기초 안전성 검토 및 기초 설계 방안	31
제4장 영농형 태양광 시스템 기본설계	45
4.1 재식간격 및 농작업을 고려한 시스템 설계	45
4.2 차광률 및 기초 형태를 고려한 시스템 기본설계	47
4.3 영농형 태양광 기본설계안	49
제5장 구조안전성 검토 및 안전설계기준 분석	56
5.1 검토하중 및 하중조합	56
5.2 3차원 유한요소 모델 구축 및 구조해석	68
5.3 부재 단면 검토 및 구조안전성 평가	86
5.4 지진해석 및 내진설계	99
5.5 안전적실심, 안전풍속 분석 및 최적화 설계	105
5.6 설치조건에 따른 안전설계기준 및 시스템 변수 분석	107
제6장 하부기초 특성에 따른 기초 안전성 평가 및 분석	111
6.1 기초 안전성 평가를 위한 이론적 지지력 산정 방법의 검토	111
6.2 기초 형태별 지지력 특성 분석을 위한 모형시험 구축	119
6.3 이론적 산정식을 통한 말뚝기초의 지지력 산정	127
6.4 현장시험을 통한 말뚝기초의 지지력 산정	132
6.5 수치해석을 이용한 말뚝기초의 침하량 및 지지력 산정	141
6.6 영농형 태양광 기초 형태 및 지반조건별 최소 근입깊이 분석	163
제7장 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준설계서(안)	167
7.1 시스템 구축 개요	167
7.2 시공 프로세스에 따른 시스템 구축 및 실증 재배	168

7.3 영농형 태양광 시스템 인허가 프로세스 구축.....	173
7.4 영농형 태양광 시방서.....	174
7.5 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안).....	177

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도.....	181
(1) 연구수행 결과.....	181
1) 정성적 연구개발성과.....	181
2) 정량적 연구개발성과.....	182
3) 세부 정량적 연구개발성과.....	182
(2) 목표 달성 수준.....	187
4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도.....	188
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획.....	189
(1) 연구개발성과의 활용방안.....	189
(2) 연구개발성과의 기대효과.....	190

별첨 자료

- [별첨 1] 자체평가의견서
- [별첨 2] 연구성과 활용계획서
- [별첨 3] 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)

1. 연구개발과제의 개요

(1) 연구개발의 배경

- ▶ 태양광 에너지를 이용한 발전은, 초기 적은 투자비용으로 전기를 곧바로 생산할 수 있는 친환경 에너지 생산 방법이며, 면적에 비례하여 태양광 모듈 설치 대수를 증가시킴으로써, 그에 따른 발전량과 효율을 극대화시킬 수 있음.
- ▶ 최근에는 농작물 재배지 상부에 태양광 모듈을 설치하여 **작물 성장과 태양광 발전을 동시에 성취**할 수 있는 영농형 태양광 시스템이 주목받고 있음.
- ▶ 논, 밭, 과수원 등의 넓은 면적의 평지에 균일하게 도달하는 태양에너지를 농작물의 생육 뿐만 아니라 태양광 발전에 함께 **공유**함으로써, 태양에너지를 더욱 효율적으로 이용할 수 있음.
- ▶ 뿐만 아니라 식물의 광합성량은 광포화점을 초과하면 더 이상 증가하지 않으며, 오히려 식물과 토양의 수분을 증발시켜 작물 생육에 부정적인 영향을 초래할 수 있기 때문에, 적절한 태양광 패널의 설치를 통해 작물에 불필요한 광포화점 이상의 일사량을 조절하여 성장에 도움을 줄 수 있고, 추가적으로 비가림막의 역할도 수행할 수 있음.
- ▶ 따라서 작물 생육에 **필요한 광포화점 이상의 일사량은 확보**하면서, 동시에 태양광 발전도 효율적으로 활용하는 **상호 공조의 방법**을 마련하는 것은 매우 중요함.

(2) 연구개발의 필요성

▶ 영농형 태양광의 현황

- 농지에 설치되는 태양광 발전은 농가에 새로운 소득을 가능케 하여 농촌 지역의 활성화를 촉진시킬 수 있으며, 우리나라의 에너지 부족 문제 해결에도 큰 도움을 줄 수 있는 친환경 신재생 에너지 생산 방법임.
- 일본과 유럽을 비롯한 **국외에서는 실증과정을 거친 영농형 태양광의 실제 운영과 관련 제도 제정**이 이루어졌으며, 현재 실용화를 위한 연구가 활발히 진행 중임. 특히 일본에서는 영농형 태양광을 위한 농지전용 허가가 2013년부터 2017년까지 1,269건으로 해마다 크게 증가하고 있으며, 정부는 이를 통한 태양광 발전과 농가 소득 증대를 위해 제도적 지원책을 마련함.
- 그러나 국내에서는 영농형 태양광 운영단지가 40여 곳에 불과하고, 이와 관련한 연구와 제도적 지원이 해외에 비하여 매우 미흡한 실정이며, 국내 현장에 특화된 시스템 연구개발이 절실함.
- 국외에서 영농형 태양광 구조물이 설치되는 재배 환경은 국내와 상당히 다르며, 이에 따라 **국외에서 개발된 영농형 태양광 기술 및 설계를 국내에 그대로 적용하기에는 다소 어려움**이 있음. 뿐만 아니라 영농형 태양광 시설을 위한 **표준 설계방법 및 규격의 확보**는 국내뿐 아니라 해외에서도 아직까지 미흡한 실정임.

▶ 영농형 태양광 구조물 특화 설계기술의 필요성

- 영농형 태양광 시설물의 설치 시 상부구조물 및 태양광 모듈의 형태가 다양하고 이에 관한

표준이 정립되어있지 않아, 하부기초와 지반에 영향을 미치는 구조안전성 문제가 다양하게 나타날 수 있음.

- 일반적인 지반과 다르게 농작물 재배지 토양은 해마다 일정 깊이로 표토 개량작업을 실시하고, 강우량의 증가에 따른 수분 함량이 순간 증가할 수 있으며, 간척지 환경과 유사한 연약지반 및 산림 환경과 유사한 경사지에 설치될 수도 있기 때문에 **일반 구조물과 차별화된 지반과 기초에 관한 면밀한 안정성 분석**이 반드시 수행되어야 함.
- 뿐만 아니라 경작 효율성 및 면적을 최대한 확보하기 위하여 영농형 태양광 구조물 기초 형태는 최소화해야 하지만, 이는 반대로 기초 안정성 문제를 야기할 수 있기에, 이에 따른 **구조안전성 평가 및 기초 형태에 대한 가이드라인**이 반드시 필요함.

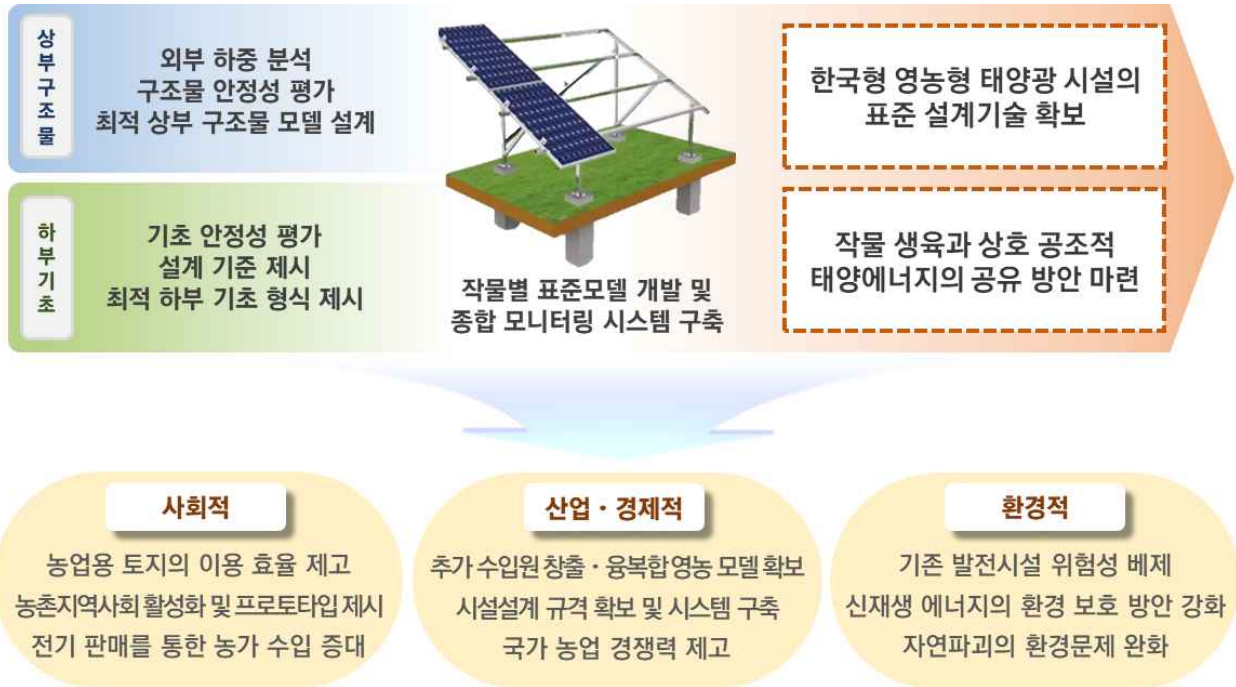
▶ 영농형 태양광 모니터링 시스템의 필요성

- 영농형 태양광 시스템의 설치는 기존 재배지역에 작물 생육환경의 변화를 가져오며, 특히 태양광 패널에 의해 하부에 도달하는 일사량을 감소시킬 수 있어 이에 따른 **수확량과 재배 특성 변화에 관한 면밀한 검토**가 필수적임.
- 국내 영농형 태양광 시설 하부의 차광율, 온도, 습도, 강수량 등에 관한 기상데이터는 충분히 확보되지 못하고 있어, 태양광 패널 하부에서 작물의 생장 양상을 예측하기 어렵고, 모듈 설치 조건과 작물의 수확량 간의 관계를 파악하는 데에 한계가 있음.
- 또한 태양광 발전에 있어 발전량은 수익과 직결되며 이를 높이기 위해서는 효율적인 운영 관리 방안이 확보되어야 하며, 이를 위해 **발전량에 관한 체계적 모니터링과 중장기적 데이터의 확보**가 필요함.

▶ 한국형 영농형 태양광 시스템 개발의 필요성

- 현재 국내에서는 해외의 설계 및 연구 결과만을 바탕으로 시범단지를 건설하고 전력 생산량과 작물 수확량에 관한 단순 모니터링으로 국내 적용 가능성을 검토하는 단계에 머물러 있으며, 영농형 태양광 시스템에 특화된 설계기준의 정립은 미흡한 실정임.
- 따라서 국내 농작물 재배지 환경에 적합한 영농형 태양광 시설의 안전성을 확보하기 위하여 상부구조물과 하부기초의 안정성 해석과 최적의 표준 형식 및 작물별 설계기준 등에 대한 연구개발이 절실히 요구되고 있음.
- 이에 따라 본 연구에서는 영농형 태양광 시스템의 표준모델 개발 및 현장 설치를 수행하고 설계기준, 설계도 및 시방서에 관한 종합 표준 설계서를 작성하여 국내에 최적화된 **한국형 영농형 태양광 시설의 표준 설계기술을 확보**하고자 함.
- 태양광 발전뿐만 아니라 **작물 생육과 상호 공조적인 태양에너지의 공유 방안**을 마련하기 위해 협업체계를 통한 다양한 작물의 실증재배와 모니터링 시스템도 구축하고자 함.

○ 연구개발 개념도



(3) 연구개발의 중요성

▶ 사회적 측면

- 농업 생산과 에너지 발전을 실시간으로 융합하여 토지의 이용 효율을 제고함.
- 영농지역에 설치된 태양광 발전을 통한 전기 판매로 농가 수입을 증대.
- 새로운 농가 소득원의 창출로 농촌 지역사회의 활성화 및 프로토타입을 제시함.
- 전 세계적으로 이슈화되고 있는 탄소 배출량을 절감하여 OECD 선진국으로 진입.

▶ 산업, 경제적 측면

- 한국형 영농형 태양광 시스템의 표준 설계기술 확보로 국가 농업 경쟁력을 제고함.
- 국내 환경에 적합한 종합 시설설계 규격을 확보하고 체계적으로 이를 보급할 수 있는 시스템을 구축.
- 농업 분야에서 추가적 수입원을 창출하여, 새로운 융복합 영농 모델을 확보함.
- 새로운 에너지 산업 모델을 제시하고 이와 관련한 전문 인력의 양성을 도모.

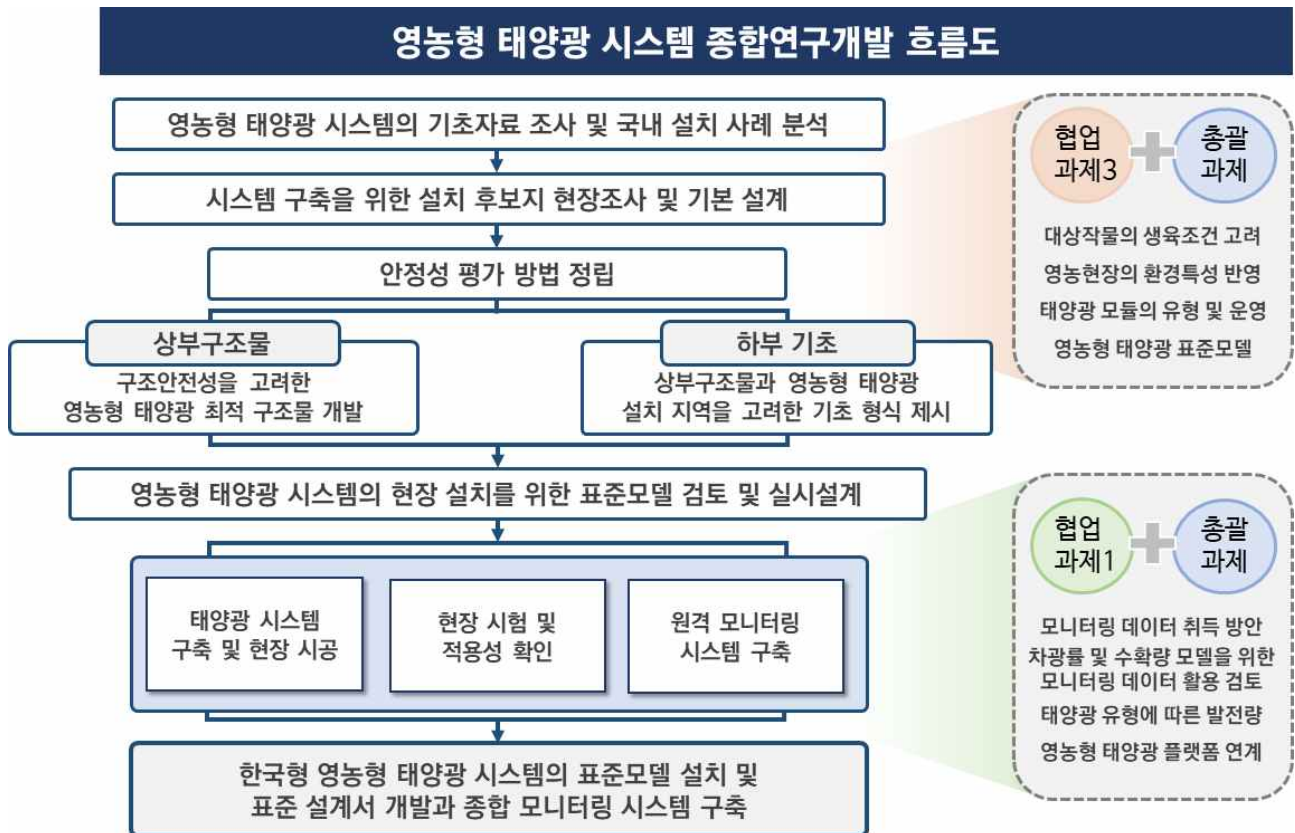
▶ 환경적 측면

- 친환경 신재생 에너지 생산을 통하여 환경을 적극적으로 보호하는 방안을 마련함.
- 태양에너지 공유 개념의 영농형 태양광 시스템 개발로 기존 발전 시설의 위험성 배제 및 자연파괴 등의 환경문제도 동시에 완화.
- 신재생 에너지 기술을 보급 및 전파하며 화석 연료 자원의 사용을 획기적으로 절감.

(4) 최종목표

- ▶ 본 연구는 국내 영농형 태양광 사업의 안전성 확보 및 효율성 향상과 표준화를 위하여 현재까지 영농형 태양광 구조에서 고려되지 못했던 **농업시설물 특화 안전성 해석**을 수행하고, 이에 관한 종합 설계기준을 구축하여, **다양한 작물에 적용 가능한 표준모델 설계서 개발 및 시공**을 목표로 함.
- ▶ 영농형 태양광 모듈과 상부구조물의 형태 및 규모, 그리고 영농지역의 지반조건 및 하부기초 형식에 따른 최적 설계법을 개발하여 **다양한 종류의 국내 농업 지역에 적용 가능한 한국형 영농형 태양광 시스템의 표준 설계기술** 개발을 수행.
- ▶ **확률통계 기반 외부하중 분석**, 지반 특성을 반영한 구조 신뢰성 수치해석을 수행하여, 영농형 태양광 시설물에 특화된 **상부구조물 및 하부기초**를 개발하고, 다양한 현장 설치 구조 기준 적합성도 검토함.
- ▶ 다양한 **협업 시나리오 구성**을 통해 총괄·협업과제와의 상호 유기적 협력 체계를 구축하여 영농형 태양광 시스템의 작물별 실증 재배 운영을 도모하고, 이에 관한 **체계적 모니터링 시스템 구축** 방안을 도출함.

(5) 종합연구개발 흐름도



2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

제1장 영농형 태양광 시스템 현황 조사 및 분석

1.1 영농형 태양광 시스템 개요

- 전 세계적으로 기후변화, 탄소중립 등이 키워드로 주목받고 있으며 195개 국가가 참여한 파리협정이 2016년 11월 발효되어 우리나라 정부도 그에 맞는 정책을 제시하고 있음.
- 정부는 UN에 “2030 국가온실가스감축목표 (NDC)”를 제출, 관계부처합동으로 “2050년 장기저탄소발전전략 (LEDS)”을 수립하여 온실가스 감축 시나리오 및 탄소중립 이행전략의 방향성을 밝힌 바 있음.
- 이와 관련해 산업통상자원부에서는 “재생에너지 3020 이행계획(안)”을 발표하였으며 2017년 기준 5.7 GW 규모인 태양광 에너지 부문을 2030년까지 36.5 GW 규모로 보급한다는 내용이 포함됨.
- 특히 농촌지역 태양광 활성화를 위한 구체적인 이행방안으로 염해간척지, 농업진흥지역 이외의 농지 등에 태양광 시스템을 설치하고 농사와 태양광 발전을 병행하는 영농형 태양광 모델을 신규 도입하여 2030년까지 10 GW 규모의 태양광 시스템을 보급하겠다는 계획을 발표함.
- 영농형 태양광 모델은 태양광 발전과 농작물이 일사량을 공유하여 에너지 생산과 농업을 병행하는 시스템으로, 농지에 태양광 발전 시스템을 설치할 경우 농지면적이 감소하고 발전수익이 외지로 유출되는 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있음.

1.2 영농형 태양광 시스템 개념 및 현황

1.2.1 영농형 태양광 시스템 개념

- 영농형 태양광은 작물의 광포화점을 초과하는 일사량을 태양광 발전에 이용하여 농업과 태양광 발전을 병행하고자 하는 발전시스템으로, 작물이 충분히 생육할 수 있는 환경에서 남은 일사량을 활용하기 때문에 동일 부지에서 농업과 전기 생산이 가능함.
- 여기서 광포화점이란 식물이 광합성을 할 때 빛이 강해져도 광합성량이 증가하지 않게 되는 지점을 말함. 즉, 광포화점 이상의 빛을 받게 되면 식물은 더 이상 녹말을 만드는 작용을 하지 않으며, 이는 엽록체에 손상을 가져올 수 있으므로 과한 빛은 작물의 생육에 도움이 되지 못함.
- 따라서 농지에 재배되고 있는 작물의 특성을 고려하여 최적화된 생육 환경을 조성할 수 있도록 태양광 발전 시설을 설치하게 되면 잉여 일사량을 발전에 활용할 수 있어 농작물만 재배하는 것보다 수익성을 크게 높일 수 있음.
- 영농형 태양광 시스템은 효율적인 토지 이용뿐만 아니라 상부 구조물과 태양광 패널의 존재로 인해 과도한 강수 및 강설을 일부 막아주고, 찬바람을 어느 정도 막아 냉해를 줄이며 새들에 의한 농작물 훼손을 다소 방지할 수 있으며 (정재학, 2020), 강민성 등 (2021)은 영농형 태양광 시설 하부 농업환경을 관측하여 일반 노지 논과 비교하여 벼를 경작할 경우 물 소비량이 절감되고 온실가스 배출량이 줄어들 수 있음을 확인한 바 있음.

1.2.2 영농형 태양광 시스템 종합 현황

- 영농형 태양광 개념의 시초는 1980년대 독일의 Goetzberger와 Zastrow에 의해 농업과 태양광 발전 병행 시스템의 개념으로 알려지게 되었으며, 본격적으로 활성화되기 시작한 것은 2004년 일본의 Nagashima가 솔라셰어링 (Solar sharing)이라는 이름으로 특허를 내고

이를 공개한 이후임.

- 일본은 지금까지 영농형 태양광을 활성화하기 위한 노력을 하여 이미 관련 법령이 제정되어 2019년 기준으로 약 3,000개소가 운용 중임.
- 그 외 국가로는 독일, 프랑스 등 유럽권에서 영농형 태양광 시스템 관련 연구와 실증사업이 활발하게 진행되고 있으나, 일본과 같이 상용화가 가능한 단계는 아님.
- 우리나라도 마찬가지로 영농형 태양광 관련 연구와 실증재배가 이루어지고 있으나 그 수가 매우 부족하며, 비싼 초기 설치비용, 농지법의 한계, 농민의 부정적 인식, 설계기준의 부재 등의 문제에 가로막혀 상용화에는 쉽게 이르지 못하고 있는 실정임.

1.2.3 영농형 태양광 시스템 국내 적용 사례 및 현황

- 국내에서는 2016년 농업회사법인 솔라팜(주)이 최초로 영농형 태양광 발전시스템을 설치하여 벼 재배에 성공하였으며, 이후 한국남동발전(주), 한국수력원자력(주), 한국동서발전(주), 전남농업기술원, 녹색에너지연구원(재), 등에서 실증사업을 추진하여 2020년 기준 전국 44개, 총 3.2 MW 규모의 영농형 태양광 시스템이 운용되고 있음 (오수영 등, 2021).
- 현재까지 재배된 영농형 태양광 대상 작물로는 벼, 보리, 배추, 감자, 마늘, 참깨, 무루, 포도, 양파, 녹차, 배, 콩, 옥수수, 사료작물 등이 있으며, 대부분 논과 밭에 집중되어 있고 각각의 발전 규모는 작게는 10 kW에서 100 kW까지 존재함.
- 농지 부지 면적 대비 태양광 모듈의 면적으로 표현되는 차광률은 시스템 하부의 작물에 도달하는 일사량을 결정하는 주요 요인으로, 국내에 설치된 대부분의 영농형 태양광 시스템에서 약 30%의 차광률로 설계됨.
- 영농형 태양광 시스템의 구조 형식은 프레임을 기본으로 한 분산형 지지대 형태가 주로 적용되었으며, 이는 강구조 및 강관을 이용한 시스템 동바리와 유사한 형태임.
- 일부 시스템의 경우에는 독립지주형 (독립기초형) 혹은 분산형과 독립지주형을 혼합한 하이브리드형의 구조 형식을 가지고 있음.
- 국내의 영농형 태양광 시스템은 다양한 연구개발사업과 실증사업을 통해 점진적으로 발전하고 있으나, 현재 농지법의 한계와 전기 생산 인프라 부족 등의 문제로 보급과 확산이 지연되고 있으며, 일반 농민이 구축한 사례는 논 100 kW급 1건에 불과한 실정임 (김근호, 2020).

1.3 영농형 태양광 시스템 설계 현황

1.3.1 영농형 태양광 시스템 설계 기본 개요

- 현재 국내에는 영농형 태양광 시스템 설계기준이 마련되어 있지 않아 다양한 측면에서 시설물과 지반에 미치는 영향을 고려할 필요성이 있음.
- 이를 위해 일반적으로 태양광 시스템을 구성하는 태양광 패널 및 모듈, 지지대, 기초, 발전 및 기계 설비를 영농형 태양광의 특수성을 고려해 설계해야 하며, 작물의 재식간격, 농작업 공간의 확보, 차광률 또한 설계에 반드시 반영해야 함.
- 뿐만 아니라 현재는 시설물 설치를 위해 임의의 설계 및 단순 구조 검토에 머무르고 있고 설계기준 및 표준도가 존재하지 않아 일반 농가에 보급하기 위한 설계자료의 제공 필요성이 대두되고 있음.

1.3.2 영농형 태양광 시스템 모듈 설계

- 영농형 태양광의 모듈로는 일반적으로 적용되는 73cell 타입의 모듈의 half-size인 36cell 타입의 모듈이 개발되어 영농형 태양광 시스템에 적용한 바 있으며 (김근호, 2020), 일본

- 의 경우 고부가가치 과수를 대상으로 24cell 타입의 모듈을 적용한 사례가 있다고 보고함.
- 또한 영농형 태양광 시스템에 적용할 모듈은 하부 작물에 그림자가 발생하는 것을 최소화 하고 빗물이 모듈 하단 모서리로 모여 낙수가 되는 것을 방지하기 위해 일반적으로 사용되는 모듈에 비해 폭이 좁은 것을 적용하기도 함.
- 태양광 모듈의 설치 형태는 크게 고정형, 경사가변형, 추적형으로 구분할 수 있으며, 고정형의 경우 발전효율이 다른 형태에 비해 다소 떨어지나, 초기 설치비용이 저렴하고 구조적으로 안전성이 쉽게 확보되는 장점이 있음.
- 경사가변형과 추적형은 강풍이나 태풍에 의한 피해를 줄이며 고정형에 비해 유리한 발전효율을 확보할 수 있으나, 구조적 안전성을 확보하기 까다롭고 설치 범위가 넓다는 단점이 존재함.

1.3.3 영농형 태양광 시스템 구조물 설계

- 영농형 태양광 시스템은 일반 농업구조물에 비해 파괴 위험도와 시설물의 중요도가 높은 동시에 사람의 주거공간이 아닌 농지에 설치되기 때문에, 그 구조물은 재배지의 환경조건, 재배작물의 종류, 구조적 안전성, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 설계해야 함.
- 국내에 설치된 영농형 태양광 시스템의 구조 형식은 80% 이상 동바리 형태의 분산형 지지대 형식이며, 이는 강구조를 기반으로 한 프레임 구조물로서 넓은 지역에 일괄적인 시공이 가능하여 효율적으로 구조적 안전성을 확보할 수 있어 주로 사용되고 있음.
- 그러나 해당 구조 설계를 위해 영농의 특성을 고려한 설계기준 및 표준설계안은 전무한 실정이며, 지역별 재현기간에 따른 외부하중 조건을 단순 적용하여 일반건축구조물과 차별화되지 않은 단순 구조 계산에 머무르고 있음.
- 이는 한정적인 지역과 장소에 대해서는 구조안전성을 확보할 수 있을지라도 농지에 설치되는 특성을 충분히 고려하지 못하고, 구조물 설계에 있어서 일반 농가로의 보급을 위한 표준화가 부족한 실정임.
- 또한 시공의 편의를 위해 하부에서 조립 후 상부로 리프팅하여 고소작업을 최소화하는 방식 등 효율적인 시공 방안을 채택하고, 추후 농지의 원상복구가 용이하며 내식성이 우수한 구조 부재를 채택해야 함.
- 하부 기둥으로 이용되는 지지대는 주로 용융아연 또는 스테인리스 스틸, 알루미늄합금 등의 재질이 사용되며 영농형 태양광 시스템의 특성상 농업용수와의 접촉으로 인한 부식방지를 위해 지면에서 하부로 20 cm 이상, 상부로 30 cm 이상을 PVC, PE, FRP 등의 표면보호 소재로 피복해야 함.

1.3.4 영농형 태양광 시스템 기초 설계

- 상부구조물과 마찬가지로 영농형 태양광 시스템의 하부 기초에 관한 설계기준 및 시방서는 전무하며, 시공 현장에 대한 일회적인 기초 인발 실험만이 수행되고 있음.
- 특히 농작물 재배지 토양은 일반적인 지반과 달리 해마다 일정 깊이로 표토 개량작업을 실시하고, 강우량의 증가에 따른 수분 함량이 순간 증가할 수 있음.
- 뿐만 아니라 영농형 태양광 시스템이 간척지 환경과 유사한 연약지반 및 산림 환경과 유사한 경사지에 설치될 수도 있기 때문에 일반 구조물과 차별화된 지반 및 기초에 관한 면밀한 안정성 분석이 반드시 수행되어야 함.
- 영농형 태양광 구조물은 작물 재배지 상부에 설치되기 때문에 기초의 면적을 최소화할 필요가 있어, 직접기초보다는 말뚝기초를 사용하는 것이 유리하며 현재에도 말뚝기초의 형태가 주로 시공되고 있음.

- 하지만 영농형 태양광 구조물의 하중은 다른 일반적인 콘크리트 구조물에 비하여 매우 경량이기 때문에 말뚝의 직경이 매우 작고 지지방식 또한 안전한 지반까지 관입하여 선단지 지력을 극대화하기보다는 말뚝의 주면에서 발생하는 말뚝과 지반 사이의 마찰에 의하여 지지되는 마찰말뚝의 형태로 주로 시공되고 있음.
- 현재 영농형 태양광 시스템 시공 시 주로 이용되는 말뚝은 콘크리트 또는 강관으로 이루어진 기성말뚝이며, 추가로 말뚝과 지반 사이의 마찰저항을 증가시킬 수 있는 형태로 변형된 말뚝이나 마찰저항을 증가시킬 수 있는 보강 공법을 추가하는 방안을 고려해볼 수 있음.
- 마찰저항을 증가시키도록 변형된 말뚝은 helical pile, spiral pile, screw pile 등으로 불리는 날개를 가지는 형태의 말뚝이며, 이들은 간척지 등의 연약지반에서 구조물의 기초로 이용되고 편리한 시공성으로 인하여 경사면이나 협소지역에서도 이용되며, 기존에 존재하는 구조물 기초의 보강용도로도 이용되고 있음.
- 이러한 형태의 말뚝기초는 회전관입을 통한 시공과정에서 소음과 진동이 적고 추가적인 마찰 저항력을 얻을 수 있다는 장점으로 곳곳에서 이용되고 있으나, 일반적 형태의 말뚝기초와 달리 현장시험을 통한 데이터가 충분이 축적되지 않아 지지력, 침하량 등의 산정에 대한 합의된 기준이 마련되어있지 않음.
- 따라서 영농형 태양광 시스템에서 이러한 기초를 사용할 때는 현장시험을 통하여 지지력과 말뚝의 거동 특성을 직접적으로 구해야 함.
- 그러나 지반의 불균질성과 환경적 특성에 의한 지지력 변화 등이 구조물 기초의 안전성에 부정적인 영향을 끼칠 수 있기 때문에 기초 설계에 대한 적절한 기준과 예시가 필요하므로 체계적인 실험과 분석 과정을 거쳐 회전식 말뚝의 지지 및 거동 특성을 파악할 필요가 있음.
- 기초공사의 경우 토질상태와 지반여건 등을 고려하여 현장에 적합한 기초 공법을 선정해야 하며, 영농형 태양광 시스템의 경우 콘크리트 기초물은 농산물 인증취소 및 토질악화 등의 우려가 있으므로 사용하지 않는 것을 원칙으로 하고 있음.

제2장 영농형 태양광 시스템 구축을 위한 설치 후보지 선정 및 현장조사

2.1 협업 시나리오에 따른 영농형 태양광 설치 후보지 선정

- 본 연구의 협업과제인 <총괄과제> 및 <협업과제 3>과의 적극적인 협업체계를 구축하여 영농형 태양광 설치 후보지를 선정함.
- 다양한 기상환경과 작목, 품종, 재배 방법을 반영할 수 있도록 논, 밭, 과수 등 다양한 후보지를 선정하였으며, 특히 작목과 품종에 따라 재배 방법 및 시기 등이 상이하기 때문에 이를 종합적으로 고려한 후보지를 선정함.
- 기존 영농형 태양광 설치 계획 중, 총괄팀의 제안 (농림식품기술기획평가원과의 협의 완료)에 따라, 2개소의 경우 <총괄과제> 연구팀에서 부지 확보 및 시스템 구축을 수행하였으며, 이에 따라 본 연구팀 <협업과제 2>에서는 밭작물을 대상으로 설치 후보지를 최종 선정하였음.
- 서울대학교 수원캠퍼스 농장과의 긴밀한 협업체계를 구축하여, 영농형 태양광 설치 후보지를 확보하였으며, 태양광 발전을 위한 발전사업 허가 신청 등의 절차를 완료함.
- 대조구 부지의 경우 동일한 밭작물을 재배하여 영농형 태양광 시스템의 영향을 정량적으로 평가하고자 하였으며, 태양광 발전을 위한 전기배선의 경우, 서울대학교 내부 규정에 따라, 지중 매설로 진행하여 농장에 추가적인 전기배선 및 전신주 설치를 배제하도록 하였음. 또한 기존 실험 부지에 영농형 태양광 시스템을 설치함에 따라 추가적인 부대시설 관련 토목공사 등도 추가적으로 진행함.



(a) 영농형 태양광 실험구 및 대조구

(b) 실증 후보지 전경

그림 1 서울대학교 수원캠퍼스 농장 영농형 태양광 실증 후보지

2.2 현장조사를 통한 대상지역 토질특성 분석

- 영농형 태양광 구조물의 기초와 지반 안전성 평가 및 설계와 시공에 앞서 현장조사를 통하여 물리·역학적 토질 특성을 파악하기 위한 현장조사를 수행함.
- 현장조사 시 1 m 깊이로 지반의 굴착을 수행하고 Drive cylinder method (ASTM D 2937)를 이용하여 깊이별로 현장밀도와 현장 함수비를 측정함.



그림 2 현장밀도 시험 및 샘플링

- 깊이 별 현장밀도 및 현장함수비 시험 결과는 표 1과 같이 나타남. 깊이 별로 서로 다른 3종류의 토양이 분포하고 있었으며 이를 A, B, C로 표시함. 토양 A는 지표면으로부터 약 40 cm 깊이까지 분포하고 있었으며 토양 C는 A와 B의 경계부에 일부 분포하였고 50 cm 아래로는 토양 B가 분포하는 것으로 조사됨.

표 1 깊이에 따른 현장밀도 및 현장함수비 시험 결과

깊이 (cm)	γ_d (t/m ³)	ω (%)	토성
0-10	1.38	24.28	A
10-20	1.52	20.48	A
20-30	1.52	24.35	A
30-40	1.48	28.43	A
40-50	1.58	23.59	B + C
50-60	1.63	16.95	B

- 각 토양 종류에 따라 입도분포, 비중, 액소성한계 시험 등 물리적 특성 시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같음.

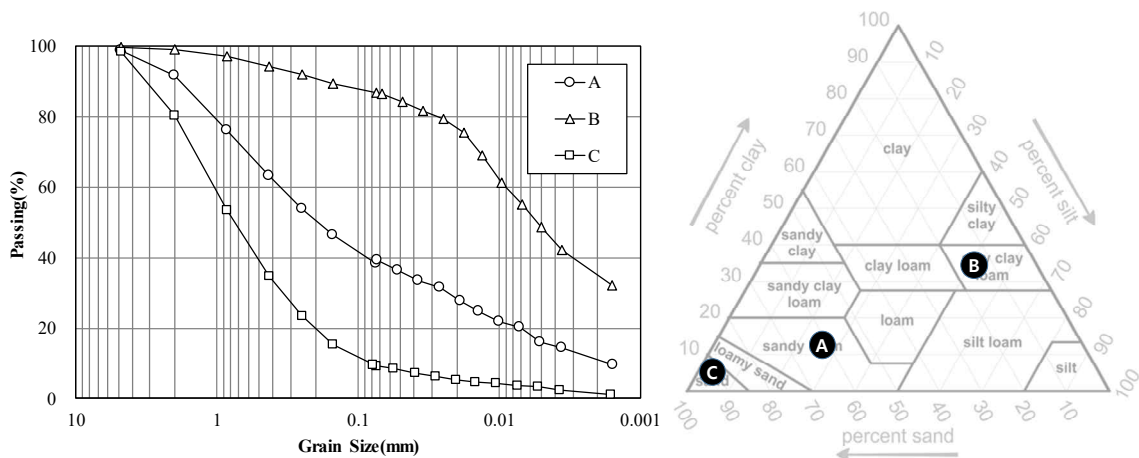


그림 3 토성별 입도분포

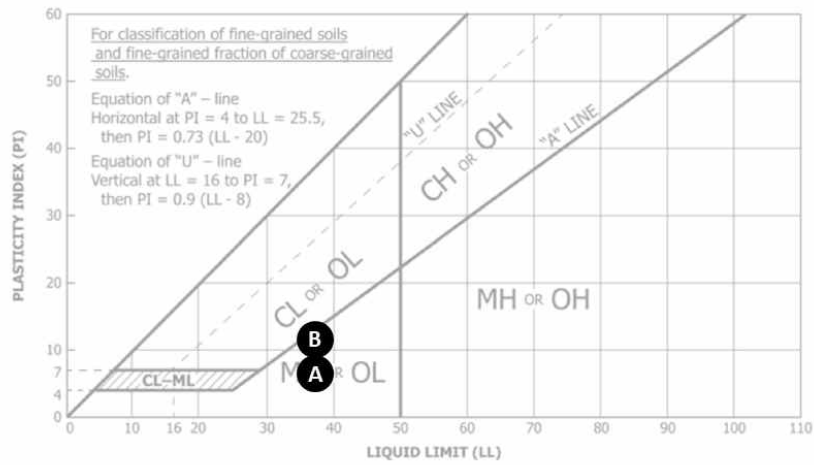


그림 4 액소성 시험 결과에 따른 소성도

표 2 실내시험 결과 및 현장 토양의 공학적 분류

Sample	Passing % finer than 0.075mm	Gs	LL (%)	PL (%)	PI (%)	USCS soil classification	USDA soil texture
A	38.48	2.61	35.68	27.96	7.72	SM	사양토
B	86.88	2.54	36.11	25.45	10.65	ML	미사질식양토
C	9.29	2.64	N.P.	N.P.	-	SW-SM	사토

- 실험 및 분석 결과, 토양 A는 작물의 재배에 이용되는 밭토양으로 판단되며, 토양 B는 점토질인 것으로, 토양 C는 모래인 것으로 확인됨.
- 농장 조성 시 작물 재배 지역에 밭토양을 복토한 것으로 판단되며, 대상 지반은 본 연구의 구조물 시공에 적절한 것으로 판단됨.
- 토양 C의 경우 지반 굴착 결과 종단면에서 거의 찾아볼 수 없어 대상지의 지반을 구성하는 토양은 토양 A와 B로 판단되어 토양 A와 B에 대한 역학적 특성 시험을 수행함.



그림 5 시스템 구축 대상지 토양 구분

- 다짐시험 결과 토양 A의 경우 최대건조밀도 1.85 t/m^3 , 최적함수비 12.12%, 토양 B의 경우 최대건조밀도 1.79 t/m^3 , 최적함수비 12.52%로 산정됨.

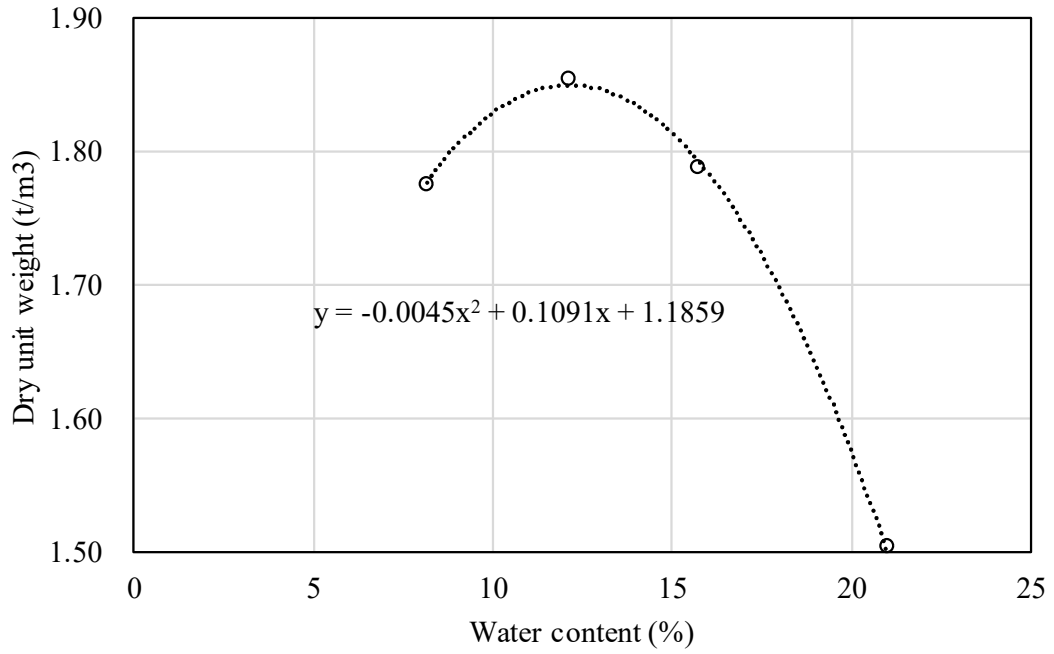


그림 6 토양 A의 다짐시험 결과

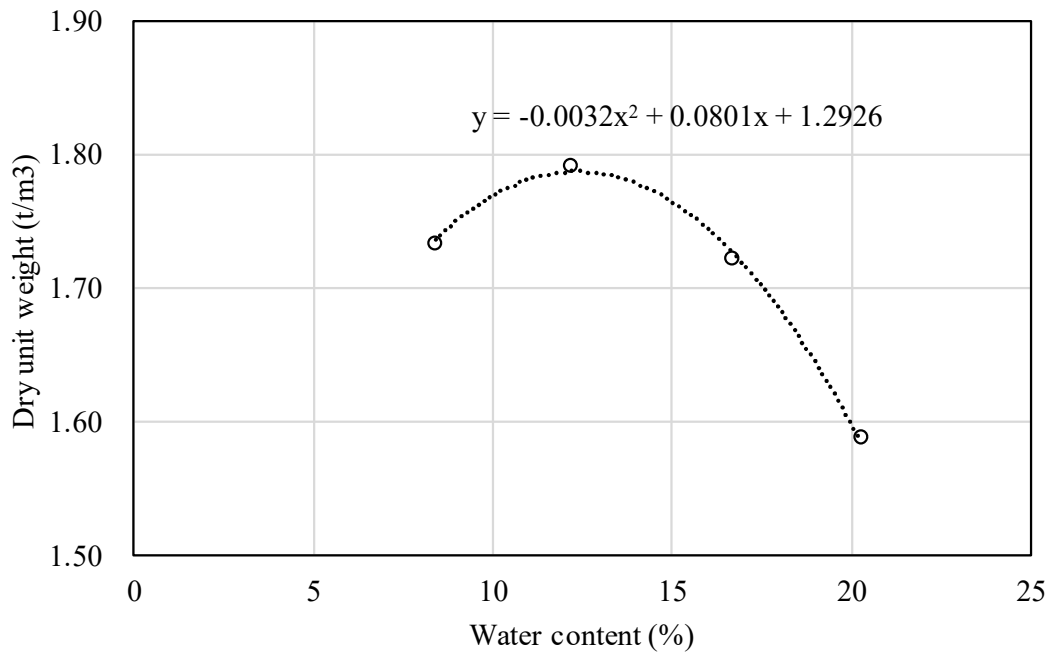


그림 7 토양 B의 다짐시험 결과

- 삼축압축시험 결과 토양 A의 경우 점착력 2.94 kPa, 내부마찰각 32.7° , 토양 B의 경우 점착력 31.09 kPa, 내부마찰각 31.1° 로 산정됨.

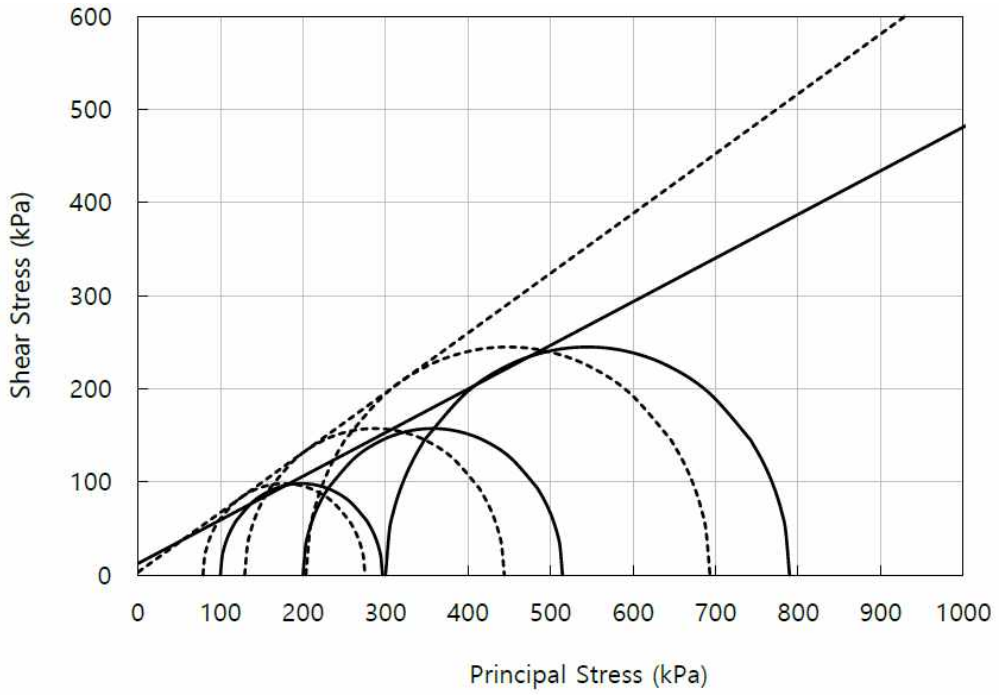


그림 8 토양 A의 삼축압축시험 결과

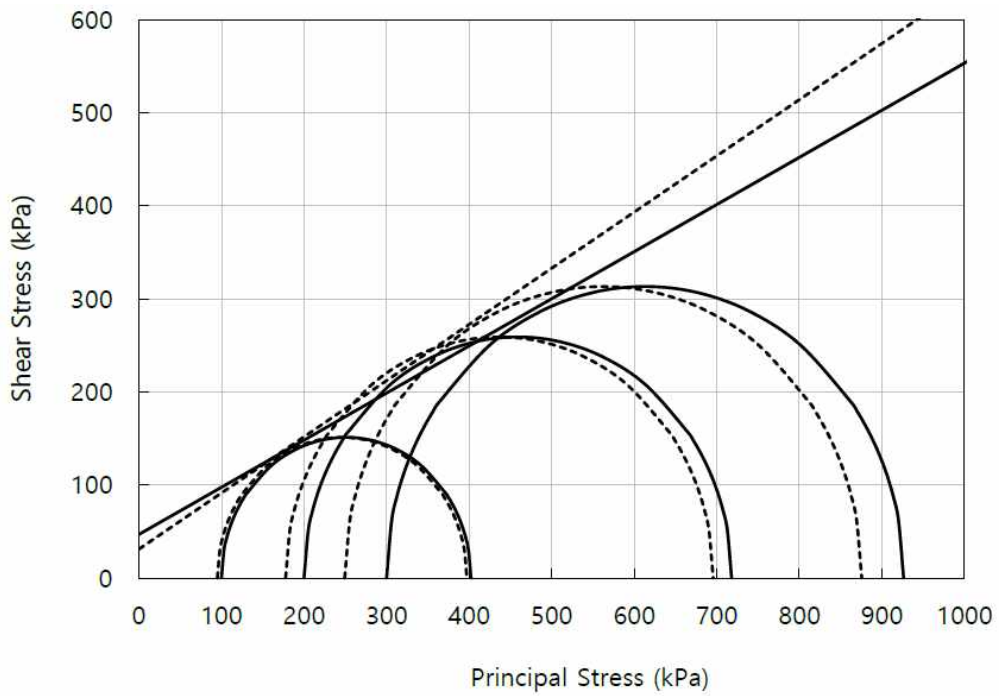


그림 9 토양 B의 삼축압축시험 결과

제3장 영농형 태양광 구조 및 기초 안정성 평가 방법 정립

3.1 상부구조물 구조안전성 검토 및 구조 설계 방안

3.1.1 허용응력설계법 (Allowable Stress Design; ASD)

- 허용응력설계법은 부재가 탄성 범위 이내에 있도록 하기 위해 재료에 안전율을 적용하는 탄성 설계법으로, 사용하는 부재 재료가 탄성한도 이내에 있다면 파괴되지 않고 안전하다고 판단하여 설계 및 부재를 선정하는 방법임.
- 탄성해석에서 작용하중에 의한 부재 거동은 각 하중을 개별적으로 작용시켜 그 효과를 합친 것과 같은 중첩원리가 성립되므로 그 중 가장 불리한 응력상태가 정해진 허용응력을 넘지 않도록 부재 단면을 선정함.
- 주요 검토 사항으로는 인장 (부재의 세장비 고려), 압축 (부재의 세장비 고려), 휨, 조합력, 전단에 관한 부재력이 있으며, 각각에 대하여 하중 작용 시 부재의 발생응력이 안전율을 고려한 허용응력을 넘지 않도록 설계함.
- 관련 건축구조기준으로는 KDS 14 30 00 강구조 설계기준 (허용응력설계법)이 존재하며, 변수의 변동률이 높은 농업토목 구조물에 주로 적용되고 있으며, 대표적으로는 비닐하우스 구조 설계 시 적용 가능.
- 허용응력설계법의 하중조합은 표 3을 따르며, 강구조물 설계 시 허용응력은 기본적으로 구조물별 및 하중조합별로 정해진 허용응력 보정계수를 적용하고, 특별한 설계조건으로 판단되는 경우 허용응력 보정계수를 상향 혹은 하향 조정하며, 관련 구조물이 없을 경우, 다른 구조물을 참고하여 합리적으로 결정함.

표 3 허용응력설계 하중조합

하중의 종류	하중의 작용상태	하중조합
장기하중	평상시	D + L
단기하중	적설시	D + L + S
	폭풍시	D + L + W
	지진시	D + L + E

단, D:고정하중, L:적재하중, S:적설하중, W:풍하중, E:지진하중

① 세장비

- 압축재의 세장비 KL/r 은 200을 초과하지 않아야 함.
- 인장재의 세장비 L/r 은 300 이하로 함.

② 인장부재 설계

- 허용인장응력 F_t 는 총단면적에 대해서는 $0.6F_y$ 를, 유효순단면적에 대해서는 $0.5F_u$ 로 함.

$$F_t = \begin{cases} 0.6F_y & : \text{총단면적에 대한 검토} \\ 0.5F_u & : \text{유효단면적에 대한 검토} \end{cases}$$

$$\text{단, } \frac{L}{r} \leq 300$$

여기서, F_t : 인장부재의 기본허용응력 (MPa)

F_y : 강재의 항복강도 (MPa)

F_u : 강재의 인장강도 (MPa)

L : 부재의 길이 (mm)

r : 단면의 회전반경 (mm)

③ 압축부재 설계

- 허용압축응력 F_c 는 다음 식에 따라 산정함.

- $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}\right]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

- $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

여기서, F_c : 허용압축응력 (MPa)

C_c : 한계세장비 ($= \sqrt{2\pi^2 E_s / F_y}$)

KL : 좌굴길이 (mm)

r : 단면 회전반경 (mm)

E_s : 강재의 탄성계수 (MPa)

F_y : 강재의 항복강도 (MPa)

④ 휨부재 설계

- 강축휨을 받는 H형강 및 C형강의 경우 조밀단면과 비조밀 단면으로 구분하며, 각각에 대한 허용휨응력은 다음과 같음.

- 조밀단면

$$F_b = 0.66F_y$$

- 비조밀단면

$$F_b = F_y \left[0.79 - 0.00076 \left(\frac{b_f}{2t_f} \right) \sqrt{F_y} \right]$$

- 박스형 단면, 각형강관, 원형강관에 대해서는 조밀단면과 비조밀 단면에 대해 각각 다음의 허용휨응력을 적용함.

- 조밀단면

$$F_b = 0.66F_y$$

- 비조밀단면

$$F_b = 0.6F_y$$

⑤ 전단부재 설계

- 전단면적에 대한 허용전단응력은 다음과 같이 산정함.

$$F_v = 0.4F_y$$

⑥ 조합력을 받는 부재 설계

- 축압축과 휨을 함께 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함.

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx}f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ex}}\right)F_{bx}} + \frac{C_{my}f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ey}}\right)F_{by}} \leq 1.0$$

$$\frac{f_c}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

- 다만, $f_c/F_c \leq 0.15$ 일 경우 아래의 식을 적용할 수 있음.

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

- 축인장과 휨을 함께 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함.

$$\frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

여기서, F_t : 허용인장응력 (MPa)

f_t : 축인장응력 (MPa)

f_b : 휨인장응력 (MPa)

3.1.2 한계상태설계법 (Limit State Design; LSD)

- 한계상태설계법은 응력중심의 허용응력설계법과 같은 탄성설계법과 달리 확률론적 수학 모델을 접목하여, 구조부재나 상세요소의 극한내력, 또는 사용성한계, 피로강도와 같은 각종 한계상태에 바탕을 두고 극한 또는 한계하중에 의한 부재력이 부재의 극한 또는 한계상태내력을 초과하지 않도록 하는 설계법임.
- 한계상태는 구조물 혹은 요소가 그 목적을 달성하기에 부적합하게 되거나 구조적 기능을 상실한 상태를 칭하며, 그 중 강도한계상태는 구조물의 일부분 또는 전체의 붕괴와 관련되는 한계상태로 매우 낮은 발생확률을 가지고, 사용한계상태는 구조물의 용도상 구조적 기능이 저하, 손상된 한계상태로 강도한계상태보다는 더 큰 발생확률을 허용할 수 있음.
- 하중에 대해서는 하중안전계수를 적용하여 특성 하중이라 하고 실제 하중이 특성 하중 이상이 될 확률이 5% 이내가 되는 수치를 구하며, 재료에 대해서도 재료안전계수를 곱하여 특성 강도라 하고 실제 강도가 특성 강도 이하가 될 확률이 5% 이내가 되는 수치를 확률적으로 구하여 구조설계를 수행함.
- 관련 건축기준으로는 KDS 41 31 00 건축물 강구조 설계기준이 존재하며, 건축물의 강구조 설계 시 적용되고, 하단에 명시되어 있지 않은 설계기준의 경우 해당 건축설계기준을 따르거나 설계자의 합리적 판단을 통해 결정할 수 있도록 함.
- 한계상태설계법을 통한 구조물 설계 시에는 고정하중 D , 활하중 L , 적설하중 S , 풍하중

W , 지진하중 E 을 고려할 경우 아래의 하중조합으로 소요강도를 구하며, 가장 불리한 하중 조합을 선택함.

$$\begin{aligned}
 &1.4D \\
 &1.2D+1.6L+0.5S \\
 &1.2D+1.6S+0.65W \\
 &1.2D+1.3W+0.5S \\
 &1.2D+1.0E+0.2S \\
 &0.9D+1.3W \\
 &0.9D+1.0E
 \end{aligned}$$

① 인장부재 설계

- 인장재의 설계인장강도 $\phi_t P_n$ 은 총단면의 항복한계상태와 유효순단면의 파단한계상태에 대해 아래의 식에 의해 산정된 값들 중 작은 값으로 하며, 최대세장비 제한은 없으나, 가급적 300을 넘지 않도록 함.

- 총단면의 항복한계상태

$$\begin{aligned}
 P_n &= F_y A_g \\
 \phi_t &= 0.90
 \end{aligned}$$

- 유효순단면의 파단한계상태

$$\begin{aligned}
 P_n &= F_u A_e \\
 \phi_t &= 0.90
 \end{aligned}$$

여기서, A_g : 부재의 총단면적 (mm^2)

A_e : 유효순단면적 (mm^2)

F_y : 항복강도 (MPa)

F_u : 인장강도 (MPa)

P_n : 공칭인장강도 (N)

② 압축부재 설계

- 설계압축강도 $\phi_c P_n$ 은 아래에 따라 산정하며, 공칭압축강도 P_n 은 휨좌굴, 비틀림좌굴, 휨-비틀림좌굴의 한계상태 중 가장 작은 값으로 하고, 부재의 세장비 KL/r 은 가급적 200을 넘지 않도록 함.

$$\begin{aligned}
 \phi_c &= 0.90 \\
 P_n &= F_{cr} A_g
 \end{aligned}$$

- 휨좌굴에 대한 압축강도 ($KL/r \leq 4.71 \sqrt{E/F_y}$ 또는 $F_y/F_e \leq 2.25$ 인 경우)

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y$$

- 휨좌굴에 대한 압축강도 ($KL/r > 4.71 \sqrt{E/F_y}$ 또는 $F_y/F_e > 2.25$ 인 경우)

$$F_{cr} = 0.877 F_e$$

여기서, F_e : 탄성좌굴응력 (MPa)

- A_g : 부재의 총단면적 (mm^2)
- E : 강재의 항복강도 (MPa)
- F_y : 항복강도 (MPa)
- KL : 유효좌굴길이 (mm)
- r : 좌굴축에 대한 단면2차반경 (mm)

- 비틀림좌굴, 휨-비틀림좌굴에 대한 압축강도의 경우 (1) 쌍꺾형강 또는 T형강압축부재 및 (2) 그 외의 경우로 구분하며, 이에 적합한 휨좌굴응력을 각각 산정하도록 함.

③ 휨부재 설계

- 설계휨강도 $\phi_b M_n$ 의 경우 단면의 형상 및 설계조건에 따라 상이한 값을 산정하며, ϕ_b 의 경우 아래 기준을 적용함.

$$\phi_b = 0.90$$

- 횡좌굴강도 산정 시, 적용할 횡좌굴모멘트수정계수 C_b 는 다음과 같음.

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3.0$$

여기서, M_{\max} : 비지지구간에서 최대모멘트 절댓값 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)

M_A : 비지지구간에서 1/4지점의 모멘트 절댓값 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)

M_B : 비지지구간에서 중앙부의 모멘트 절댓값 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)

M_C : 비지지구간에서 3/4지점의 모멘트 절댓값 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)

R_m : 단면형상계수

I_y : y 축에 대한 단면2차모멘트 (mm^4)

I_{yc} : y 축에 대한 압축플랜지의 단면2차모멘트 (mm^4)

- 강축휨을 받는 2축대칭 H형강 또는 \square 형강 콤팩트부재의 경우, 다음 한계상태 중 최솟값으로 함.

- 소성휨모멘트

$$M_n = M_p = F_y Z_x$$

여기서, F_y : 강재의 항복강도 (MPa)

Z_x : x 축에 대한 소성단면계수 (mm^3)

- 횡좌굴강도

$L_b \leq L_p$ 의 경우 횡좌굴강도를 고려하지 않음

$L_p < L_b \leq L_r$ 의 경우,

$$M_n = C_b [M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)] \leq M_p$$

$L_b > L_r$ 의 경우,

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p$$

여기서, L_b : 보의 비지지길이 (mm)

- L_p : 소성한계 비지지길이 (mm)
- L_r : 탄성한계 비지지길이 (mm)
- E : 강재의 탄성계수 (MPa)
- J : 단면비틀림상수 (mm^4)
- S_x : 강축에 대한 탄성단면계수 (mm^3)

- 강축힘을 받는 2축대칭 H형강 (콤팩트웨브, 비콤팩트플랜지 또는 세장판플랜지) 부재의 경우, 다음 한계상태 중 최솟값으로 함.

• 횡좌굴강도

$L_b \leq L_p$ 의 경우 횡좌굴강도를 고려하지 않음

$L_p < L_b \leq L_r$ 의 경우,

$$M_n = C_b [M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)] \leq M_p$$

$L_b > L_r$ 의 경우,

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p$$

여기서, L_b : 보의 비지지길이 (mm)

L_p : 소성한계 비지지길이 (mm)

L_r : 탄성한계 비지지길이 (mm)

E : 강재의 탄성계수 (MPa)

J : 단면비틀림상수 (mm^4)

S_x : 강축에 대한 탄성단면계수 (mm^3)

• 압축플랜지 국부좌굴강도

비콤팩트플랜지의 경우,

$$M_n = [M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right)]$$

세장판요소단면의 경우,

$$M_n = \frac{0.9E k_c S_x}{\lambda^2}$$

여기서, λ : $b_f/2t_f$

λ_{pf} : 콤팩트단면의 한계세장비

λ_{rf} : 비콤팩트단면의 한계세장비

$$k_c : \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, 0.35 \leq f_c \leq 0.76$$

- 콤팩트웨브 또는 비콤팩트웨브를 갖는 강축힘을 받는 H형강부재의 경우와 강축힘을 받는 세장판 웨브단면의 1축 또는 2축대칭 H형강부재의 경우, 공칭휨강도 M_n 은 각각 압축플랜지항복강도, 횡좌굴강도, 플랜지국부좌굴강도, 인장플랜지항복강도 한계상태 중 최솟값으로 함.

- 약축힘을 받는 H형강 또는 \square 형강부재의 경우 공칭휨강도 M_n 은 항복강도 (전소성모멘트),

플랜지국부좌굴강도의 한계상태 중 최솟값으로 함.

- 정사각형 및 직사각형 각형강관의 경우 공칭휨강도 M_n 은 항복강도 (전소성모멘트), 플랜지국부좌굴강도, 웨브국부좌굴강도의 한계상태 중 최솟값으로 함.

- 항복강도

$$M_n = M_p = F_y Z$$

여기서, Z : 소성단면계수 (mm^3)

- 플랜지국부좌굴강도

컴팩트플랜지의 경우 고려하지 않음.

비컴팩트플랜지의 경우,

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left(3.57 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4.0 \right) \leq M_p$$

세장판플랜지의 경우,

$$M_n = F_y S_{eff}$$

여기서, S_{eff} : 압축플랜지의 유효폭에 대한 유효단면계수

- 웨브국부좌굴강도

컴팩트웨브의 경우 고려하지 않음.

비컴팩트웨브의 경우,

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S_x) \left(0.305 \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 0.738 \right) \leq M_p$$

- 원형강관의 경우 공칭휨강도 M_n 은 항복강도 (전소성모멘트), 국부좌굴강도를 산정하여 이들 중 적은 값으로 함.

- 항복강도

$$M_n = M_p = F_y Z$$

- 국부좌굴강도

컴팩트단면의 경우 고려하지 않음.

비컴팩트단면의 경우,

$$M_n = \left(\frac{0.021E}{D} + F_y \right) S$$

세장판단면의 경우,

$$M_n = F_{cr} S$$

여기서, S : 탄성단면계수 (mm^2)

- 그 외 T형강 및 쌍꺾형강, 단일꺾형강, 각형 또는 원형강봉, 그리고 비대칭단면의 경우 각각 항복강도 (전소성모멘트), 횡좌굴강도, 국부좌굴강도의 한계상태 중 작은 값으로 함.

④ 전단부재 설계

- 설계전단강도 $\phi_v V_n$ 은 부재의 좌굴 이후 강도를 이용하지 않거나 인장역작용을 이용하여 산정하며, 일부 압연 H형강의 웨브를 제외하면 다음과 같이 산정됨.

$$\phi_v = 0.90$$

- 비구속 또는 구속웨브를 갖는 부재의 경우, 공칭전단강도 V_n 은 전단항복과 전단좌굴의 한계상태에 따라 다음과 같이 산정함.

$$V_n = 0.6F_y A_w C_v$$

- $h/t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$ 인 압연 H형강의 웨브

$$\phi_v = 1.00$$

$$C_v = 1.0$$

- 원형강관을 제외한 모든 2축 대칭단면, 1축 대칭단면 및 π 형강의 전단상수 C_v 는 다음과 같이 산정함.

$$h/t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E/F_y} \text{ 일 경우,}$$

$$C_v = 1.0$$

$$1.10\sqrt{k_v E/F_y} < h/t_w \leq 1.37\sqrt{k_v E/F_y} \text{ 일 경우,}$$

$$C_v = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w}$$

$$h/t_w > 1.37\sqrt{k_v E/F_y} \text{ 일 경우,}$$

$$C_v = \frac{1.51Ek_v}{(h/t_w)^2 F_y}$$

여기서, A_w : 부재 전체춤 d 와 웨브의 두께 t_w 의 곱 (mm^2)

- 웨브판좌굴계수 k_v 는 다음과 같이 산정함.

T형강의 스템을 제외한 $h/t_w < 260$ 인 비구속지지된 판요소웨브의 경우,

$$k_v = 5$$

$h/t_w < 260$ 인 T형강 스템의 경우,

$$k_v = 1.2$$

구속판요소웨브의 경우,

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}$$

여기서, a : 수직스티프너의 순간격 (mm)

h : 압연형강 플랜지간 순거리에서 필릿 또는 코너반경을 뺀 거리 (mm)

- 인장역작용을 이용한 공칭전단강도 V_n 은 인장역 항복의 한계상태에 따라 다음과 같이 산정함.

- $h/t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E/F_{yw}}$ 일 경우,

$$V_n = 0.6F_{yw} A_w$$

- $h/t_w > 1.10\sqrt{k_v E/F_{yw}}$ 일 경우,

$$V_n = 0.6F_{yw}A_w \left(C_v + \frac{1 - C_v}{1.15\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right)$$

- 단일 ㄱ형강 다리의 공칭전단강도 V_n 은 다음의 식을 이용하여 산정함.

$$C_v = 1.0$$

$$A_w = bt$$

여기서, b : 전단력을 저항하는 ㄱ형강다리의 폭 (mm)

$$k_v : 1.2$$

- 각형강관 및 상자형단면의 공칭전단강도 V_n 은 아래의 값을 적용하여 산정함.

여기서, $A_w : 2ht$

h : 코너반경 안쪽의 플랜지간 순거리 (mm)

$$t_w : t$$

$$k_v : 5.0$$

- 원형강관의 공칭전단강도 V_n 은 전단항복 및 전단좌굴의 한계상태에 따라 산정함.

$$V_n = F_{cr}A_g/2$$

여기서, F_{cr} 은 다음 중 큰 값을 사용하되 $0.6F_y$ 의 값을 초과해서는 안됨.

$$F_{cr} = \frac{1.60E}{\sqrt{\frac{L_v}{D} \left(\frac{D}{t} \right)^{\frac{5}{4}}}}$$

$$F_{cr} = \frac{0.78E}{\left(\frac{D}{t} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

여기서, A_g : 강관의 전단면적 (mm^2)

D : 강관의 외경 (mm)

L_v : 최대전단력작용점과 전단력이 0인 점 사이의 거리 (mm)

t : 강관의 두께 (mm)

- 1축 또는 2축 대칭단면 약축전단의 경우 공칭전단강도 V_n 은 다음을 적용하여 산정함.

$$A_w = b_f t_f$$

$$k_v = 1.2$$

⑤ 조합력 및 비틀림을 받는 부재 설계

- 압축력과 힘을 받는 1축 및 2축 대칭단면부재의 경우 아래의 식에 의해 제안됨.

$$\cdot \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \text{인 경우,}$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

• $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$ 인 경우,

$$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

여기서, P_r : 소요압축강도 (N)

P_c : 설계압축강도 (N)

M_r : 소요휨강도 (N·mm)

M_c : 설계휨강도 (N·mm)

- 힘과 축력을 받는 비대칭단면부재 및 기타 부재의 경우 아래의 규정을 사용할 수 있음.

$$\left| \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bw}}{F_{bw}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} \right| \leq 1.0$$

여기서, f_a : 소요축방향응력 (MPa)

F_a : 설계축방향응력 (MPa)

f_{bw}, f_{bz} : 부재단면의 특정 위치에서의 소요휨응력 (MPa)

F_{bw}, F_{bz} : 설계휨응력 (MPa)

- 비틀림을 받는 원형 및 각형강관의 설계비틀림강도 $\phi_T T_n$ 과 비틀림항복과 비틀림좌굴 한계 상태에 의한 공칭비틀림강도 T_n 은 다음과 같이 산정함.

$$\phi_T = 0.90$$

$$T_n = F_{cr} C$$

여기서, C : 강관의 비틀림상수

F_{cr} 은 아래와 같이 산정

• 원형강관의 경우 다음 중 큰 값을 사용하되 $0.6F_y$ 의 값을 초과할 수는 없음.

$$F_{cr} = \frac{1.23E}{\sqrt{\frac{L}{D} \left(\frac{D}{t} \right)^{\frac{5}{4}}}}$$

$$F_{cr} = \frac{0.60E}{\left(\frac{D}{t} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

여기서, L : 부재의 길이 (mm)

D : 외경 (mm)

• 각형강관 $h/t \leq 2.45\sqrt{E/F_y}$ 의 경우,

$$F_{cr} = 0.6F_y$$

• 각형강관 $2.45\sqrt{E/F_y} < h/t \leq 3.07\sqrt{E/F_y}$ 의 경우,

$$F_{cr} = 0.6F_y (2.45\sqrt{E/F_y}) / (h/t)$$

• 각형강관 $3.07\sqrt{E/F_y} < h/t \leq 260$ 의 경우,

$$F_{cr} = 0.458\pi^2 E / (h/t)^2$$

- 비틀림, 휨, 전단력, 축력을 동시에 받는 강관의 경우, 아래의 식에 의해 제한됨.

$$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_r}{M_c}\right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c}\right)^2 \leq 1.0$$

여기서, P_r : 소요축강도 (N)

P_c : 설계축방향 압축 또는 인장강도 (N)

M_r : 소요휨강도 (N · mm)

M_c : 설계휨강도 (N · mm)

V_r : 소요전단강도 (N)

V_c : 설계전단강도 (N)

T_r : 소요비틀림강도 (N · mm)

T_c : 설계비틀림강도 (N · mm)

- 비틀림과 조합응력을 받는 비강관부재의 설계비틀림강도 $\phi_T F_n$ 은 다음 여러 한계상태 중 가장 작은 값을 선택함.

$$\phi_T = 0.90$$

• 수직응력항복한계상태

$$F_n = F_y$$

• 전단응력항복한계상태

$$F_n = 0.6F_y$$

• 좌굴한계상태

$$F_n = F_{cr}$$

⑥ 변형과 횡변위 제한

- 지진하중을 고려한 내진설계 시, 설계층간변위 Δ 는, x 층에서의 층고 h_{sx} 에 대해 어느 층에서도 아래의 표에서 규정한 허용층간변위 Δ_a 를 초과할 수 없음.

표 4 내진등급에 따른 허용층간변위 (KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준)

내진등급	특	I	II
허용층간변위 (Δ_a)	$0.010h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.020h_{sx}$

3.2 하부 기초 안전성 검토 및 기초 설계 방안

3.2.1 기초 설계기준

- 국내 구조물 기초의 설계는 건축물 기초구조 설계기준 KDS 41 20 00 : 2019 (건축물 기초 구조 설계기준), 구조물 기초설계기준 (국토교통부, 2016) 등을 따르도록 하고 있음.
- 주로 허용응력설계법을 기준으로 지반 및 말뚝의 안전성을 검토하도록 규정하고 있으나, 성능에 기반을 둔 강도설계나 한계상태설계법의 적용이 가능하도록 하고 있음.
- 기초는 상부구조의 하중을 안전하게 지반에 전달하도록 설계되어야 하며 지반조사, 지지지반 선정, 기초형식 선정, 지지력과 침하량의 산정 등을 통하여 설계를 수행함.
- 기초의 형식은 지지 방식에 따라 직접기초와 말뚝기초 등으로 나뉘며, 기초의 형식에 따라 지지력, 침하량 등의 산정 방법을 다르게 적용함.

3.2.1.1 건축물 기초구조 설계기준 (KDS 41 20 00 : 2019)

- 지반의 지지력은 다음 식을 적용하여 산정함.

$$q_a = \frac{1}{3}(\alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_r + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q)$$

여기서, q_a : 허용지지력 (kN/m²)

c : 기초저면 하부지반의 점착력 (kN/m²)

γ_1 : 기초저면 하부지반의 단위체적중량 (kN/m³)

γ_2 : 기초저면 상부지반의 단위체적중량 (kN/m³)

(γ_1, γ_2 : 지하수위 위치를 고려하여 단위체적중량 값을 환산한다.)

α, β : 형상계수

N_c, N_r, N_q : 지지력계수 내부마찰각 ϕ 의 함수

D_f : 기초에 근접한 최저지반에서 기초저면까지의 깊이 (m)

B : 기초저면의 최소폭 (m), 원형일 때에는 지름

표 5 기초 형상에 따른 형상계수

기초저면의 형상	연속	정방형	장방형	원형
α	1.0	1.3	$1.0 + 0.3B/L$	1.3
β	0.5	0.4	$0.5 - 0.1B/L$	0.3

B : 장방형 기초의 단변길이

L : 장방형 기초의 장변길이

표 6 내부마찰각에 따른 지지력 계수

내부마찰각, ϕ	N_c	N_r	N_q
0°	5.7	0.0	1.0
5°	7.3	0.5	1.6
10°	9.6	1.2	2.7
15°	12.9	2.5	4.4
20°	17.7	5.0	7.4
25°	25.1	9.7	12.7
30°	37.2	19.7	22.5
35°	57.8	42.4	41.4
40°	95.7	100.4	81.3
45°	172.3	297.5	173.3
48°	258.3	780.1	287.9
50°	347.5	1153.2	415.1

- 이는 Terzaghi(1943)의 지지력 공식을 적용한 것으로, 지반의 지지력을 소정의 안전율을 적용하여 하부 지반의 지내력을 산정하는 데 이용되며 이에 따라 기초의 규모를 결정할 수 있음.
- 지반의 지지력은 평판재하시험 등 현장재하시험 및 경험적인 방법을 통하여 결정할 수도 있으며, 지반의 침하량은 즉시침하량과 압밀침하량의 합으로 산정할 수 있음.
- 즉시침하량은 지반을 탄성체로 보고 탄성이론에 기초한 지반의 탄성계수와 포아송비를 적절히 설정하여 다음 식에 따라 산정함.

$$S_E = I_S(1-\nu^2)qB/E_S$$

여기서, S_E : 즉시침하량 (m)

I_S : 기초저면의 형상과 강성에 따라 정해지는 계수

q : 기초에 작용하는 단위면적당 하중 (kN/m²)

B : 기초의 단변길이(원형의 경우는 지름) (m)

L : 기초의 장변길이 (m)

E_S : 지반의 탄성계수 (kN/m²)

ν : 지반의 포아송비

- 압밀침하량은 다음 식을 따름.

$$S = \int \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot dz$$

여기서, S : 침하량 (m)

Z : 침하량을 산정하는 점에서 연직하방으로 측정된 깊이 (m)

e_1 : 응력 σ_{1Z} 에 대응하는 간극비

e_2 : 응력 $\sigma_{2Z}(=\sigma_{1Z} + \Delta\sigma_Z)$ 에 대응하는 간극비

σ_{1Z} : 건물시공 이전의 Z점에서 유효지중응력 (kN/m²)

$$= \gamma H_1 + \gamma'(Z_s - H_1)$$

σ_{2Z} : 건물시공 이후의 Z점에서 유효지중응력 (kN/m²)

$$= \sigma_{1Z} + \Delta\sigma_Z$$

여기서, γ : 지반의 습윤단위체적중량 (kN/m³)

γ' : 지반의 수중단위체적중량 (kN/m³)

H_1 : 지하수위(지표면에서 지하수위 상단까지의 깊이 (m))

Z_s : 지표면에서 임의의 점까지의 깊이 (m)

- 이 때 압축지수, C_c , 압밀계수 를 알 수 있는 경우 압밀이론에 따라 다음과 같이 산정함.

$$\Delta H = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

여기서, ΔH : 압밀침하량 (m)

H : 토층의 두께

C_c : 압축지수

C_v : 압밀계수

e_0 : 초기 공극비

p_0 : 초기 상재하중

Δp : 연직하중의 증가량

3.2.1.2 구조물 기초설계기준

- 구조물의 지반공학적 중요도에 따라 1~3등급으로 분류하여 정의하며, 구조물 설계를 위한 항목은 구조물의 등급에 따라 달라질 수 있음.

- (1) 1등급 구조물 : 지반공학적으로 중요도 1등급에 포함되는 구조물은 대규모 구조물, 매우 큰 위험성을 내포한 구조물, 매우 다루기 힘든 지반 또는 하중조건, 지진 빈도가 높은 지역에서 시공되는 구조물 등이 있음.

- (2) 2등급 구조물 : 지반공학적으로 중요도 2등급에 포함되는 구조물은 특별한 위험성이 없고 특수한 지반 및 재하 조건이 없는 일반적인 토목구조물, 건축구조물의 기초를 말하며 다음의 구조물들이 포함됨.

- ① 확대기초
- ② 전면기초
- ③ 말뚝기초
- ④ 복합기초
- ⑤ 옹벽 또는 차수벽체
- ⑥ 교량의 교각과 교대
- ⑦ 소규모 댐 및 제방(해안 및 해상제방 포함)
- ⑧ 앵커 구조물
- ⑨ 비교적 큰 규모의 터파기

- (3) 3등급 구조물 : 소규모이고 상대적으로 단순한 구조물 또는 이에 준하는 규모의 구조물로서 인명과 재산 손괴의 가능성이 적은 다음의 구조물이 포함됨.

- ① 소규모 확대기초 또는 말뚝기초로 시공되며, 최대설계하중이 기둥에서는 250 kN이하, 벽체에서는 100 kN/m 이하인 단순한 1~2 층 건물

- ② 높이가 2 m를 넘지 않는 옹벽과 토류시설
- ③ 관망 등과 같은 배수시설을 위한 소규모 굴착에서 지하수위 하부 굴착이 없거나, 지하수위 하부 굴착이 예정되었다 하더라도 경험적으로 쉽게 시공할 수 있는 경우
- 영농형 태양광은 3등급 구조물에 해당한다고 볼 수 있으며, 이에 따라 구조물 설계를 위한 항목을 선정할 수 있음.

3.2.1.3 말뚝기초의 정역학적 지지력 공식

- 직접기초의 경우 기초 저면 하부지반의 지내력을 그대로 적용할 수 있으며, 말뚝기초의 경우 기초 저면의 지반이 가지는 지지력은 선단지지력으로 적용하고 지반 조건과 말뚝의 종류에 따라 마찰말뚝, 부마찰력, 무리말뚝 등의 영향을 고려하여 극한지지력을 최종적으로 산정함.
- Terzaghi의 말뚝지지력 공식에서는 말뚝을 얇은기초로 간주하고 기초폭을 말뚝의 직경, 근입깊이를 말뚝의 관입깊이로 간주하여 얇은기초에 대한 지지력공식으로부터 다음과 같이 말뚝지지력을 산정함.

$$Q_u = (acN_c + \frac{1}{2}\beta\gamma_2BN_r + \gamma_1LN_q)A_p + ULf_s$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)

U : 말뚝의 둘레길이 (m)

L : 말뚝의 관입깊이 (m)

B : 말뚝의 직경 또는 폭 (m)

A_p : 말뚝선단의 지지면적 (m^2)

α, β : 기초의 형상계수

C : 흙의 점착력 (kN/m^2)

f_s : 평균주면마찰력

γ_1 : 말뚝선단 하부지반의 단위중량 (kN/m^2)

γ_2 : 말뚝주변 지반의 단위중량 (kN/m^2)

N_c, N_r, N_q : 말뚝선단 하부지반의 수정지지력계수

- Terzaghi의 지지력 계수는 얇은기초의 지지력계수와 같은 값을 이용하지만 Meyerhof는 근입깊이가 깊어짐에 따라 변화되는 소성영역과 활동선으로 인하여 지지력계수의 수정을 제안하고 다음과 같이 제시함.

Bearing Capacity Factors for Deep Foundations (Meyerhof, 1976)

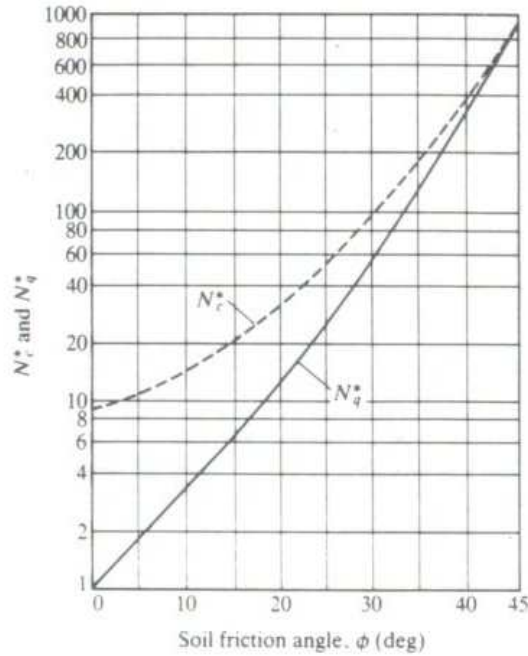


그림 10 깊은 기초의 지지력 계수 (Meyerhof)

- Dörr의 말뚝지지력공식은 토압론에 기인한 고전적 방법에 의하여 말뚝주변에 작용하는 수평토압에 의한 주면마찰저항과 점착력에 의한 주면점착저항 및 말뚝선단에 작용하는 수동토압의 합에 의해 결정됨. 이 식은 주로 마찰말뚝에 적용하고 현장타설말뚝과 같이 주변지반을 압축하지 않는 말뚝에는 적용하지 않으며 다음과 같음.

$$Q_u = \frac{1}{2} U \gamma L^2 K \tan \delta + U c L + A_p \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \gamma L$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)

U : 말뚝의 둘레길이 (m)

L : 말뚝의 관입길이 (m)

A_p : 말뚝선단의 지지면적 (m^2)

C : 흙의 점착력 (kN/m^2)

γ : 흙의 단위중량 (kN/m^3)

ϕ : 흙의 내부마찰각 ($^\circ$)

K : 토압계수 ($k = \sec^2 \phi$)

δ : 말뚝주변과 지반 사이의 벽마찰각 ($^\circ$)

- Caquot와 Kerisel은 말뚝의 지지력 공식을 다음과 같이 제안함.

$$Q_u = A [N_q (\gamma L + P) + c N_c] + \frac{1}{2} U \gamma L^2 K_a \tan \delta$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)

A : 말뚝의 단면적 (m^2)

L : 말뚝의 길이 (m)

P : 지표등분포 상재하중 (kN/m^2)

K_a : 주동토압계수

δ : 말뚝주변마찰각 ($^\circ$)

N_c, N_q : 말뚝선단 하부지반의 수정지지력계수

- 위와 같이 강도정수를 이용한 지지력의 산정식뿐만 아니라 표준관입시험 시 얻을 수 있는 N-value를 이용한 다양한 경험적 지지력 공식이 존재함.
- 본 연구에서 이용하는 말뚝의 길이는 1.5 m 내외로 표준관입시험 시 약 2회 정도의 측정만이 가능하여 정확성이 떨어질 수 있으며, 3등급 구조물에 해당하는 영농형 태양광 구조물에서는 표준관입시험이 경제적으로 비효율적이고 많은 데이터를 얻을 수 없어 구조물 기초의 지지력 분석에 적합하지 않음.
- 따라서 영농지역에서 나타날 수 있는 다양한 강도정수를 이용하여 기초의 지지력을 산정하고 기초 안전성을 평가함 .
- 회전식 말뚝에 대한 지지력 산정은 많은 연구가 이루어지지 않음. FHWA (Federal Highway Administration)에서 발간된 연속회전오거말뚝에 대한 보고서가 있으나, 주로 현장시험을 통하여 지지력을 산정하는 방법을 제시하고 있음.
- Coleman and Arcement (2002)가 수행한 말뚝재하시험의 결과로부터 도출 식은 다음과 같음

$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

여기서, $f = \beta \sigma_0' \leq 200 \text{ kN/m}^2$

$\beta = 2.27z_m^{-0.67}$ or $10.72z_m^{-1.3}$, $0.2 \leq \beta \leq 2.5$ (각각 실트질, 모래질)

$f = \alpha c_u$ (점토질)

$L = 15 \sim 20D$

3.2.1.4 말뚝기초의 인발저항력

- 말뚝기초의 인발저항력은 말뚝과 지반 사이의 마찰저항력에 의하여 결정되며 이를 인발저항력으로 적용함. 말뚝의 주면 마찰저항력은 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$Q_s = \sum p \Delta L f$$

여기서, p : 말뚝 단면의 윤편

ΔL : 단위주면마찰력이 일정한 구간의 길이

f : 단위주면마찰력

- 단위주면마찰력은 말뚝의 근입깊이, 관입 방법, 지반의 상태 등에 따라 산정방법이 달라짐.
- 근입깊이가 깊어질수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이다가 한계 깊이에 도달하면 일정해지며, 한계 깊이는 말뚝 직경의 15~20배 정도로 알려져 있음. 한계깊이를 보수적으로 선정할 경우 일반적으로 15D를 적용함.
- 사질토 지반에서 타입식 말뚝의 경우 진동에 의해 말뚝 주변에서 지반의 밀도가 높아져 단위주면마찰력이 크게 나타남. 이 때 사질토가 조밀해지는 범위는 말뚝 직경의 2.5배 정도로 알려져 있음.

- 사질토 지반에서의 단위주면마찰력은 토압계수, 유효연직응력, $\tan(\text{흙-말뚝 접촉 마찰각})$ 의 곱으로 결정할 수 있으며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같음.

$$f = K\sigma'_0 \tan\delta'$$

- 또한 표준관입시험, 콘관입시험 등의 현장시험 결과를 이용한 경험적 공식을 통하여 결정하는 방법이 제시되어 있음.
- 점성토 지반에서는 말뚝과 점토 사이에서 발생하는 부착력에 의하여 단위주면마찰력이 결정되므로, 말뚝의 근입길이에 대한 유효연직응력과 경험적 부착력 계수 또는 토압계수 등을 이용하여 단위주면마찰력을 결정할 수 있음.

3.2.2 영농형 태양광 구조물의 기초

3.2.2.1 영농형 태양광 구조물 기초의 조건

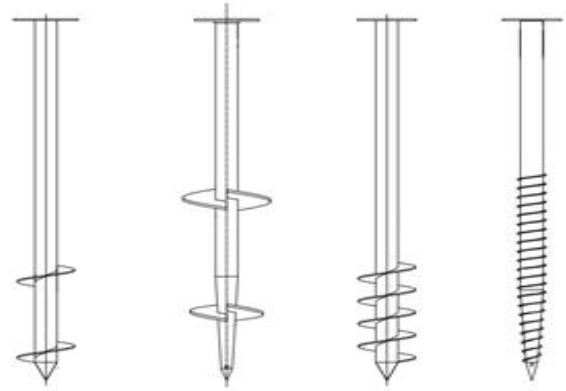
- 영농형 태양광 구조물은 작물 재배지역 바로 옆에 설치되는 구조물로, 작물 생육에 영향을 최소화하도록 설계할 필요가 있음.
- 특히 구조물의 재료에 따라 토양 오염을 일으키는 경우 심각한 문제가 발생할 수 있어 기초 구조물의 재료 선정에 주의를 기울여야함.
- 반대로 영농 지역에서는 작물 생육을 위하여 지속적인 관개를 실시하고 비료 등의 이온성 물질이 토양에 다량 처리되기 때문에 지반 내에 위치하는 기초 구조물의 경우 부식에 굉장히 취약하여 내부식성 재료를 이용해야할 것으로 판단됨.
- 직접기초를 사용하거나 직경이 큰 말뚝기초를 사용하는 경우 기초가 차지하는 면적이 넓어져 영농 면적이 줄어들고 영농 작업을 위한 자동화 기계의 통행과 운용에 장애를 끼칠 수 있음.
- 국내 영농형 태양광 사업은 주로 농민들이 개인 소유의 땅에 시행하기 때문에 영농형 태양광의 활성화를 위해서는 농가의 전기 발전량과 설치비용의 고려가 필수적이므로 적절한 경제성을 갖출 수 있는 기초와 기초의 시공 방법을 선정해야함.
- 작물 생육 시에는 토양 내에 적당한 공극이 필요하기 때문에 영농지에서 구조물 기초의 지지반은 다짐 등을 통하여 강도를 증진시킬 수 없음.
- 따라서 일반적으로 이용되는 기초가 다양한 조건을 만족시킴과 동시에 충분한 지지력을 확보하는 적절한 기초의 형식을 선정해야함.

3.2.2.2 영농형 태양광 구조물 기초 후보 선정

- 전면기초 및 콘크리트 말뚝 기초는 지반 내에 콘크리트를 타설하여 작물 생육에 영향을 미칠 수 있고 영농 면적을 축소시키기 때문에 영농형 태양광 구조물의 기초에서 제외함.
- 소형 구조물의 기초로 가장 흔히 사용되는 주춧돌 형태의 직접기초는 현장 여건에 따라 사용할 수 있으나, 굴착 및 다짐을 통하여 지지력을 확보해야하므로 영농형 태양광 구조물의 기초에서 제외함.
- 말뚝기초 중 단면적이 작으면서 충분한 강도를 가지는 강관말뚝과 강관말뚝의 변형 형태라고 할 수 있는 날개를 가진 회전식 말뚝을 연구대상으로 선정하고 영농형 태양광 구조물 기초로의 이용 가능성에 대하여 분석을 수행하고자 함.
- 영농 면적과 영농 활동의 편의성을 고려하여 말뚝의 두께는 최대 100 mm로 제한하고자 하였으며, 강관말뚝과 회전식 말뚝의 구조적 안전성을 평가함과 동시에 시공성과 경제성을 함께 판단하고자 함.



(a) 강관말뚝

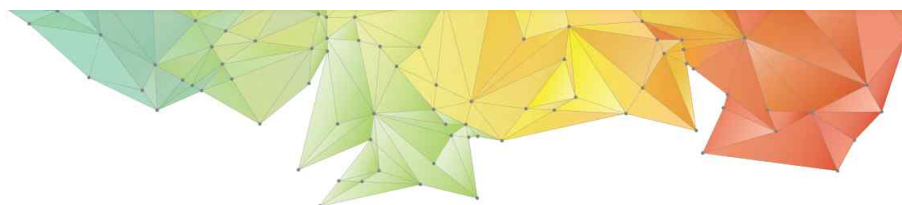


(b) 회전식 말뚝

그림 11 영농형 태양광 구조물 기초 후보

3.2.3 수치해석을 통한 기초 안전성 평가

- 지반의 조건, 기초의 형상과 재료에 따른 다양한 해석을 수행하기 위하여 지반과 구조물의 상호 거동을 해석하는 유한요소해석 (Finite element method) 프로그램인 Midas GTS/NX 를 이용하여 구조물의 침하량과 기초 구조물 부재에 작용하는 응력을 계산하여 기초의 안전성 평가를 수행함.
- GTS/NX는 기하모델링, 요소망 생성, 해석조건의 부여, 해석, 결과분석의 순서로 해석이 진행됨.
- 기하모델링 단계에서 말뚝의 형태를 변형시켜 말뚝의 종류에 따른 단일말뚝의 특성을 확인할 수 있으며, 특히 스크류 파일을 모델링하여 나선이 기초 안전성에 미치는 영향을 확인할 수 있음.
- 해석 조건의 부여 시 재료의 물성을 적용하며 특히 이 단계에서 지반과 기초 구조물 사이의 거동을 정의하여 재료조건, 기초의 정착 조건 등에 따른 기초 안전성을 분석할 수 있음.



GTS NX
Geo-Technical analysis System New eXperience

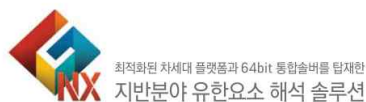
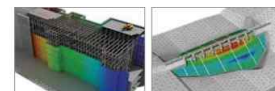


그림 12 지반 구조물 상호 거동 해석을 위한 Midas GTS/NX

3.2.4 현장시험을 통한 기초 안전성 평가

3.2.4.1 일반사항

- 영농형 태양광 구조물의 기초로서 이용 가능성 평가를 실시할 말뚝기초의 현장시험을 통한 안전성 평가는 말뚝재하시험을 통해 이루어짐.
- 말뚝재하시험은 압축재하, 인발재하, 횡방향재하시험으로 분류할 수 있음.
- 말뚝재하시험의 목적은 지지력 확인, 변위량 추정, 건전도 확인, 시공방법과 장비의 적합성, 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화, 주면 마찰력, 하중전이 특성 등의 평가에 있음.
- 관입된 말뚝의 허용지지력을 결정하는 요인은 관입깊이, 종류, 크기 등 말뚝 제원과 말뚝 관입 시 향타기 종류, 햄머 크기, 종류, 관입된 말뚝 주변 토질, 선단지지층의 토질상태 등의 다양한 요소들이 복합적으로 작용하여 말뚝의 허용지지력을 결정하며, 관입된 말뚝의 지지력은 주면마찰력과 선단지지력의 합으로 결정됨.
- 본 연구에서 해석 대상으로 선정한 말뚝은 말뚝기초 중 강관말뚝으로 분류됨.
- 관입 깊이가 상대적으로 얇아 주면 마찰력에 의하여 지지력이 대부분 결정되며 영농형 태양광 구조물 상부의 풍하중에 의해 인장력을 받기 때문에 압축재하시험 (수직재하시험)과 인발재하시험을 모두 수행하여 주면마찰력과 선단지지력을 나누어 분석하고자 함.

3.2.4.2 압축재하시험 (수직재하시험)

- 연직으로 설치된 외말뚝의 말뚝머리에 정적인 축방향 압축력을 가하여 말뚝의 저항을 정하는데 적용되며, KS F 2445 : 2016 (말뚝의 압축 정재하 시험방법)을 통해 규정되어 있으며 관련 기준으로는 ASTM D 1143 : 2020 (Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load)가 있음.
- 정적하중에 대한 말뚝의 극한 연직지지력 특성에 대한 설계자료를 구하고자 하는 재하 시험 (설계목적시험)과 이미 정해진 말뚝의 설계 연직지지력을 확인하는 것을 목적으로 하는 재하 시험 (설계확인시험)으로 나눌 수 있음.

- | | |
|------------------|--------------------------|
| a) 시간 | f) 말뚝머리의 수평변위량 |
| b) 하중 | g) 반력장치의 변위량 |
| c) 말뚝머리의 변위량 | h) 그 외 (기준보의 온도, 외기온도, 주 |
| d) 선단 및 중간부의 변위량 | 변지반의 변위량 및 말뚝부근의 지중변 |
| e) 말뚝재료의 변형량 | 위량, 말뚝주변지반의 간극수압 등) |

- a) ~ c)의 항목은 필수요소이며, 설계목적시험의 경우는 주면마찰력, 선단저항력과 지반 정수와의 상관적인 자료를 얻기 위해 필수요소에 추가하여 d) ~ g)의 측정항목이 필요함.

표 7 수직재하시험법의 종류

시험법	하중단계	재하하중유지	재하종료	재하하중
완속재하 시험법	8단계 (설계하중의 25% 부터 200%까지 25% 간격으로)	최소 30분 유지 후 말뚝머리 침하율이 시간당 0.25mm 이하가 될 때까지 (최대 2시간)	설계하중의 200%에서 침하율이 시간당 0.25mm 이하 시 12시간, 그 이상인 경우 24시간 유지	시험하중의 25%씩 단계별로 1시간씩 간격을 두어 재하
완속재하방법의 초과하중재하	완속재하 시험의 초과하중 전까지는 설계하중의 50% 씩, 이후 최대시험까지는 설계하중의 10%	완속재하 시험의 최대 하중까지는 완속재하시험을 따르고 이후 최대시험하중까지는 20분씩	최대 요구하중 또는 파괴 (말뚝지름의 15% 침하) 시까지 재하, 파괴 안 될 경우 2시간 유지	시험하중의 25%씩 단계별로 20분씩 간격을 두어 재하
반복하중재하시험법	완속재하방법과 동일	50%, 100%, 150% 하중단계에서 1시간씩 하중을 유지시키고 나머지 하중단계에서는 20분 유지하면서 재하하중이 완전히 재하되면 50%씩 단계 재하하되 20분씩 유지하면서 재하	완속재하방법과 동일	완속재하방법과 동일
급속재하 시험법	각 단계의 하중이 설계하중의 10 ~ 15%	각 단계별 2.5분 ~ 15분 (보통 5분) 유지하고, 2차례 ~ 4차례 침하량 기록	극한하중 또는 허용범위까지 재하 후 2.5분 ~ 15분 (보통 5분) 유지	4번 정도 나눠 5분씩 유지하면서 재하
일정시간간격시험법	설계하중의 20%씩 8단계 재하	각 하중단계 당 1시간씩 유지	설계하중의 200%에서 1시간 유지	설계하중의 20%씩 재하하되 각 단계별 1시간씩 유지
일정침하율 시험법	단계별로 일정침하율 (0.25 ~ 2.5mm/분 내)이 된 후 다음 단계 재하	점성토: 0.25 ~ 1.25mm/분 사질토: 0.75 ~ 2.5mm/분	최종 시험하중 또는 총 침하량 50 ~ 75mm, B(말뚝의 지름 or 대각선 길이)의 15%	총하중 재하, 재하 후 1시간 기록
일정침하량 시험법	침하량이 말뚝지름 1% 정도 되는 하중을 각 단계별 하중으로 결정	소정의 침하량이나 재하하중 변화율이 시간당 총 재하하중의 1% 미만에 이를 때	총침하량이 B(말뚝의 지름 또는 대각선 길이)의 10%에 도달할 때 또는 시험하중	4번 정도 나누어 재하하되 각 단계의 리바운드율이 B의 0.3%이내가 된 후 재하

- 극한지지력의 판정은 관입저항이 최대로 될 때의 하중으로 하나 선단변위량은 선단지름의 10%이하의 범위로 함.
- 말뚝머리의 연직스프링 정수는 P-S 곡선의 활선구배에 의해 산정함.
- 말뚝의 변형률을 측정할 경우 축방향 변형률분포, 축방향력 분포 등에 대해 도시하며 축방향력 분포로부터 구간별 주면저항력 특성 및 선단저항력 특성에 대해 평가.

3.2.4.3 인발재하시험 (ASTM D 3689)

- 인발재하시험은 지반에 수직이나 경사방향으로 설치된 말뚝의 정적 인발저항력을 측정하기 위해 수행됨. 인발재하시험은 말뚝 설계 시 풍하중 또는 인발하중에 저항하는 인발저항력 산정에도 중요하지만 압축재하시험 결과의 보완, 주면마찰력 크기의 규명 등을 위해서도 효과적임.
- 본 연구에서는 말뚝의 지지력 뿐만 아니라 풍하중에 의한 수평방향 외력이 발생시킬 수 있는 인발하중에 대한 저항력 산정에도 초점이 맞춰져 있기 때문에 인발재하시험을 수행함.
- 말뚝의 인발시험은 재하방향이 반대인 것을 제외하면 압축재하시험과 비슷한 방법으로 시행하며 (구조물 기초설계기준 해설, 국토교통부), 관련 기준으로는 ASTM D 3689 : 2013 (Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load)가 있음.
- 시험을 통해 극한하중이 결정되었을 경우 허용인발력 산정에 문제가 없으나, 극한하중이 확인되지 않을 경우 정적압축재하시험 분석에 적용되는 항복하중 판정법이나 Fuller (1983)가 제안한 방법을 통해 허용인발력을 구해냄.
- 말뚝의 허용인발력은 말뚝의 극한인발력을 안전율로 나눈 후 말뚝의 유효중량을 더한 값으로 구하되, 이는 말뚝의 재료허용인장하중보다 작아야 하며 일반적으로 말뚝의 유효중량은 무시함.

표 8 인발재하시험법의 종류

시험법	하중단계	재하하중유지	재하종료	재하하중 제거
Quick Test (급속재하방법)	항복하중의 5%씩 증가시키며 하중을 가함	하중 증가에 대해 4 ~ 15분 사이의 동일한 시간간격 동안 유지	항복하중이 되면 재하 중지	재하 종료시에도 4 ~ 15 분 사이의 일정 시간간격을 두고 5 ~ 10단계로 제거함
Maintained Test (완속재하방법)	8단계 (설계하중의 25% 부터 200%까지 25% 간격으로)	최소 30분 유지 후 말뚝머리 침하율이 시간당 0.25mm (0.01in.) 이하가 될 때까지 (최대 2시간)	설계하중의 200%에서 축방향 변위가 시간당 0.25mm 이하 시 12시간, 그 이상인 경우 24시간 유지	시험하중의 25%씩 단계별로 1시간씩 간격을 두어 하중 제거
Loading in Excess of the Maintained Test (완속재하방법의 초과하중 재하)	완속재하 시험의 초과하중 전까지는 설계하중의 50% 씩, 이후 최대시험까지는 설계하중의 10%	완속재하 시험의 최대 하중까지는 완속재하시험을 따르고 이후 최대시험하중까지는 20분씩	최대 요구하중 또는 파괴 (말뚝지름의 15% 침하) 시까지 재하, 파괴 안 될 경우 2시간 유지	시험하중의 25% 씩 단계별로 20분 씩 간격을 두어 하중 제거
Constant Time Interval Loading Test (일정시간간격 시험법)	설계하중의 20%씩 8단계 재하	각 하중단계 당 1시간씩 유지	설계하중의 200%에서 1시간 유지	최대 하중의 25%씩 단계별로 1시간씩 간격을 두어 하중 제거
Constant Rate of Uplift Test (일정인장변형을 시험법)	단계별로 일정한 인장변형을 0.5 ~ 1.0 mm/분이 된 이후 다음 단계 재하		말뚝 직경 혹은 너비의 15% 이상 인발 될 때까지 하중 유지	
Cyclic Loading Test (반복하중재하시험법)	완속재하방법과 동일	50%, 100%, 150% 하중단계에서 1시간씩 하중을 유지시키고 나머지 하중단계에서는 20분 유지하면서 재하 하중이 완전히 재하되면 50%씩 단계 재하하되 20분씩 유지하면서 재하	완속재하방법과 동일	완속재하방법과 동일

3.2.4.4 시험 결과의 예시 및 해석

- 말뚝재하시험으로부터 허용지지력을 결정하기 위해서는 상부 구조물의 파괴가 일어나지 않아야 하며, 설치될 구조물의 총하중이 재하되었을 때 인발량이 설계 시 가정한 허용 범위 이내여야 한다는 두 가지 조건이 만족되어야 함.
- 실제 재하시험을 통해 극한하중을 찾는 것은 용이하지 않으므로 통상 파일의 변형이 급격히 발생하는 항복점 (Yield Load)를 통해 허용지지력을 평가하거나 변형량의 절대기준을 정해 전변형량과 잔류변형량 (압축재하시험의 경우 침하량, 인장재하시험의 경우 인장량)을 시험 파일의 변형량과 비교, 검토하여 파일의 지지력을 평가함.
- 말뚝기초의 극한 또는 항복하중을 결정할 수 있으며, 이를 위해서는 하중 - 전침하량, 하중 - 잔류침하량, 하중-시간-침하량관계 등을 분석하여 결정함.
- 말뚝기초의 극한하중에 안전율을 고려하여 허용하중을 결정하는데 극한하중은 그림 13에서 세로축과 평행한 직선상태로, 하중의 증가가 없는 상태에서 침하량이 무한대로 증가하는 상태에 도달할 때의 하중을 의미하나, 그림 13과 같이 명확하게 극한하중이 규명되는 경우는 매우 드물게 나타남.

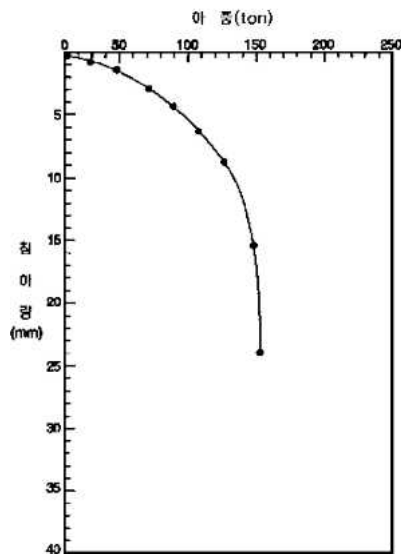


그림 13 하중-침하량 곡선 예시

- 항복하중을 판정하는 방법에는 하중(p)-시간(t)-침하(s) 곡선, p-s 곡선 분석, log P-log S 곡선 분석, S-log t 분석, $dS/d(\log t) - P$ 분석 등 다양한 방법이 있음 .
- “구조물 기초설계 기준” 해설편에서는 극한하중이 확인되지 않은 경우 항복하중에 의하도록 하고 ① S-log t 분석 ② $ds/d(\log t)-P$ 분석 ③ log P-log S 분석과 ④ 잔류침하량 측정에 의한 log P-log S 방법을 권장하고 있으며, 항복하중의 1.5배를 극한하중으로 가정하나 이 방법에 의한 극한하중이 실제 극한하중보다 크지 않도록 주석을 두어 항복하중에 의한 분석을 안전하게 하는 장치를 하고 있음.
- S-log t 분석 : 각 재하단계에 대해 경과시간을 대수 눈금에, 말뚝머리의 침하량을 산수 눈금에 표시했을 때, 각 하중단계의 관계선이 직선이 되지 않는 점의 하중을 항복하중으로 함.
- log P - log S 분석법 : 하중 P와 말뚝머리 침하량 S를 모두 대수 눈금으로 표시하고 각 점을 연결하여 얻어지는 선이 꺾어지는 점의 하중을 항복하중으로 함.

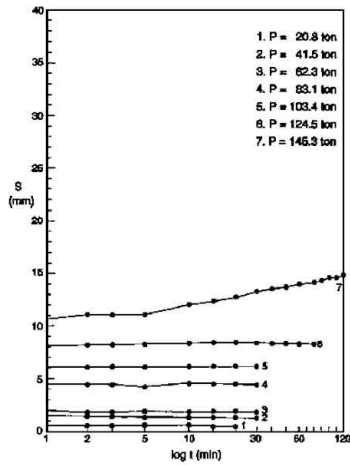


그림 14 S - log t 분석

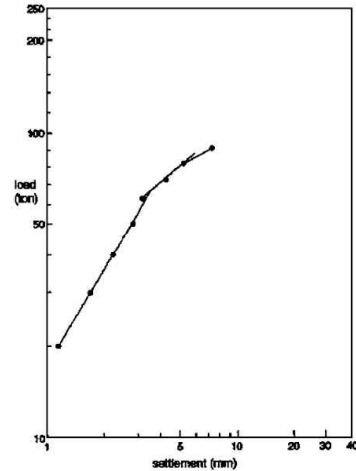


그림 15 log P - log S 분석

- $dS/d(\log t) - P$ 분석법 : 각 하중 단계에서 일정시간 (10분 이상) 후의 대수침하속도 $dS/d(\log t)$ 즉, S-log t 곡선의 기울기를 구하고 이를 하중에 표시하여 연결하여 구한 선이 급격히 구부러지는 점의 하중을 항복하중으로 함.
- Davission 분석방법 : 말뚝의 전침하량과 말뚝직경, 단면적, 탄성계수 및 말뚝길이 등을 고려한 순침하량 판정을 복합적으로 적용한 것으로 최근 국내외에서 합리적인 말뚝 허용하중 판정법으로 인정받고 있음.

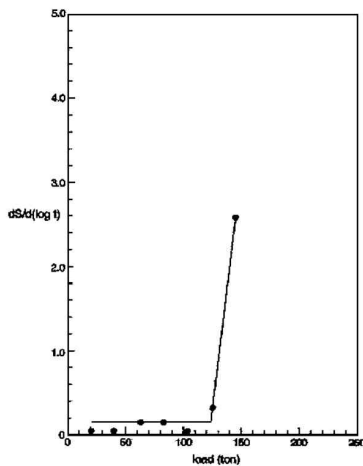


그림 16 $dS/d(\log t) - P$ 분석

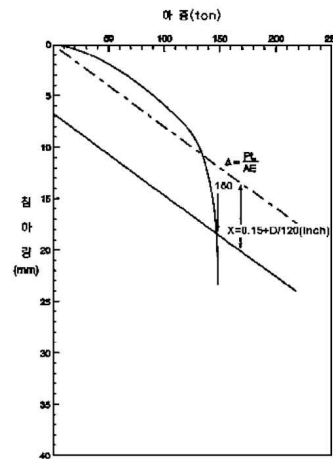


그림 17 Davission 분석방법

- 전침하량 기준방법은 극한하중으로 인해 하중 증가 없이 침하량이 무한대로 증가하는 상태는 대부분의 말뚝재하시험에서 확인되지 않기 때문에 인위적으로 규정된 침하량에 도달하면 그 때의 하중을 극한하중으로 인정하는 방법으로 적용됨.
- 전침하량의 절대값만으로 말뚝의 설계하중을 결정하는 것은 말뚝의 길이와 재료특성으로부터 결정되는 탄성압축량 값의 영향을 고려할 수 없다는 것과, 말뚝의 지지력이 지반조건, 말뚝설치방법에 따라 선단지지력 또는 주면마찰력의 비율이 상이하게 되고 말뚝의 하중-침하량 거동이 결정되는 점을 감안할 수 없다는 단점이 있음.
- 전침하량, 잔류침하량 기준 분석 곡선 방법은 침하량 (혹은 인장량)을 P-S 곡선에 대입하여 시험최대하중에서의 전침하량, 잔류침하량이 기준치 내로 측정되는지를 분석하는 방법.

제4장 영농형 태양광 시스템 기본설계

4.1 재식간격 및 농작업을 고려한 시스템 설계

4.1.1 작물별 재식간격

- 작물 재식간격에 따라 영농형 태양광 시스템의 기둥 및 보의 간격 설계가 이루어져야 하며, 특히 과수의 경우 재식 이후 다년간 과수가 유지되기 때문에 해당 간격에 적합한 시스템 설계가 이루어져야 함.
- 밭의 경우 실제 현장의 이랑 및 고랑 간격을 우선적으로 고려한 기둥 간격 설계가 이루어져야 하며, 이에 따라 실시설계 및 실제 시공 시 기둥의 간격이 조정될 수 있음.
- 본 연구에서 기본 대상으로 하고 있는 밭작물 배추 및 과수작물 포도에 관한 재식간격은 다음과 같으며 기본설계안 작성을 위해 이를 반영함.
- 배추의 경우, 1줄 재배 시 이랑 너비 60~90 cm, 2줄 재배 시 이랑 너비 120~150 cm를 제안하고 있으며 (농촌진흥청, 농사로), 농촌진흥청에서 발간한 농업기술 길잡이 213 (주요 원예·특용작물 재배력)의 경우에는 45×75 cm로 제안되고 있음.
- 또한, 농업기술 길잡이 128 (배추)의 경우 숙기에 따라 조생종 60×35 cm, 중생종 60×45 cm, 만생종 65×45 cm으로 제시되어 있으며, 영농형 태양광을 이용한 배추 재식 선행연구 (조윤섭 등, 2019)에서는 가을배추 45×45 cm가 채택된 바 있음.
- 뿐만 아니라 품종이나 농업기술 변화로, 이랑과 고랑의 폭이 같은 외골로 재식되고 있으며, 봄배추의 경우 60×35 cm, 가을배추의 경우 60×40 cm가 추천되고 있음.
- 따라서 계절 및 작형과 수확 시의 크기에 따른 재식간격은 상이하며 위의 기준을 토대로 기본적인 이랑간격 (이랑+고랑의 너비)을 90~120 cm로 설정하여 이에 따른 기둥 간격을 현장에 맞게 설계할 수 있도록 하였음.

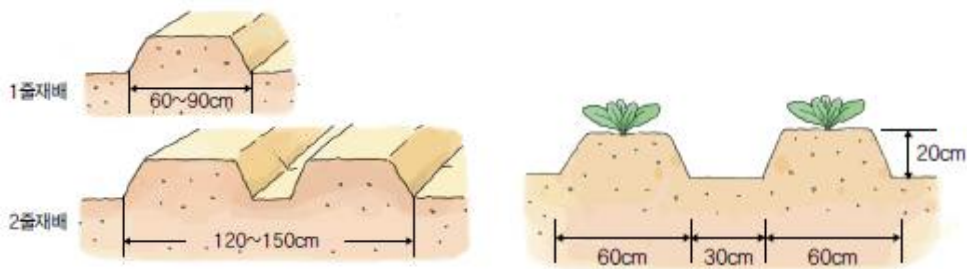


그림 18 배추 이랑 및 고랑 간격 (농촌진흥청, 농사로)

- 포도의 경우, 나무가 모두 자란 성목에 대해 가운을 통한 축성재배를 위한 시설재배 시, 캠벨얼리 품종의 경우 5~7 m, 거봉의 경우 10~12 m의 재식간격이 제안된 바 있으며 (농촌진흥청, 농사로), 일반적으로 보고되는 캠벨얼리 품종에 대해 2.5~3.0 m의 재식간격을 가지고 있음.
- 기둥 간격 설계에 있어 과수의 재식간격은 그 배수로 간격을 고려하거나 최소 재식간격으로 반영될 수 있도록 함.
- 그러나 실제 현장의 밭과 과수의 경우 제안되고 있는 재식간격과 상이한 경우가 다수이기 때문에, 제안되는 재식간격을 고려한 영농형 태양광 기본설계를 진행한 후, 기둥 간격 조정 및 부재 변경 등 다양한 규격 조정 시공에 따른 구조안전성을 검토하고, 이들에 관한 종합적인 안전설계기준과 표준도를 제시할 수 있도록 함.

4.1.2 농기계 제원 분석 및 농작업 공간 확보

- 영농형 태양광 시스템 하부에서 농기계를 이용한 농작업이 가능하도록 기둥의 간격과 높이를 선정해야하며, 이를 위해 국내에서 대표적으로 이용되는 트랙터 및 콤바인의 제원을 조사 및 분석함.
- 특히 트랙터의 경우 시스템 내부에서 작업을 위한 선회가 가능해야하며 선회반경 및 편브레이크 선회반경을 고려함.

표 9 국내 트랙터 제원 (대동)

마력 (HP)	폭 (mm)	높이 (mm)	길이 (mm)
40-50	1,655-1,680	2,188-2,550	3,297-3,453
85	1,960	2,655	3,915
125-140	2,200-2,527	2,755-2,820	4,500-4,620

표 10 국내 트랙터 선회반경 (대동)

마력 (HP)	선회반경 (m)	편브레이크 선회반경 (m)
40-50	2.70-3.30	2.40-3.00
85	4.11	3.62
125-140	5.00	4.40

표 11 국내 콤바인 제원 (대동)

구분	폭 (mm)	높이 (mm)	길이 (mm)
4조	1,910	3,130	4,445
5조	2,115	2,820	4,800
6조	2,345	2,804	4,980

- 콤바인의 조수는 한 번에 몇 줄을 수확할 수 있는지를 나타내는 구분이며, 선회반경의 경우는 트랙 밀림 등의 문제로 측정은 따로 하지 않음.
- 현재 국내에서 대표적으로 이용되고 있는 트랙터는 대부분 50마력이며, 최근에는 85마력의 트랙터가 주로 도입되고 있음.
- 트랙터의 편브레이크 선회반경은 뒷바퀴 브레이크를 별도로 제어하여 뒷바퀴 1개를 기준으로 선회할 때의 회전반경을 나타냄.
- 최대 높이는 트랙터의 경우 약 2.8 m, 콤바인의 경우 약 3.1 m, 이앙기의 경우 2.5 m임에 따라 여유폭을 고려해 3.3 m 이상의 영농형 태양광 높이를 확보해야 하며, 콤바인과 이앙기의 작업이 필요하지 않은 밭의 경우 여유폭을 고려해 3.0 m 이상의 영농형 태양광 높이를 확보해야 하는 것으로 분석됨.
- 최대 전폭은 트랙터의 경우 약 2.5 m, 콤바인의 경우 약 2.4 m, 이앙기의 경우 약 3.0 m를 나타내며 해당 전폭보다 넓은 기둥 간격을 확보하되, 선회반경과 여유폭을 고려하여 간격 설계를 진행해야 함.

- 국내에서 대표적으로 이용되는 85마력의 트랙터 제원을 기준으로 선회반경을 고려한 작업 공간을 분석한 결과는 그림 19와 같음.

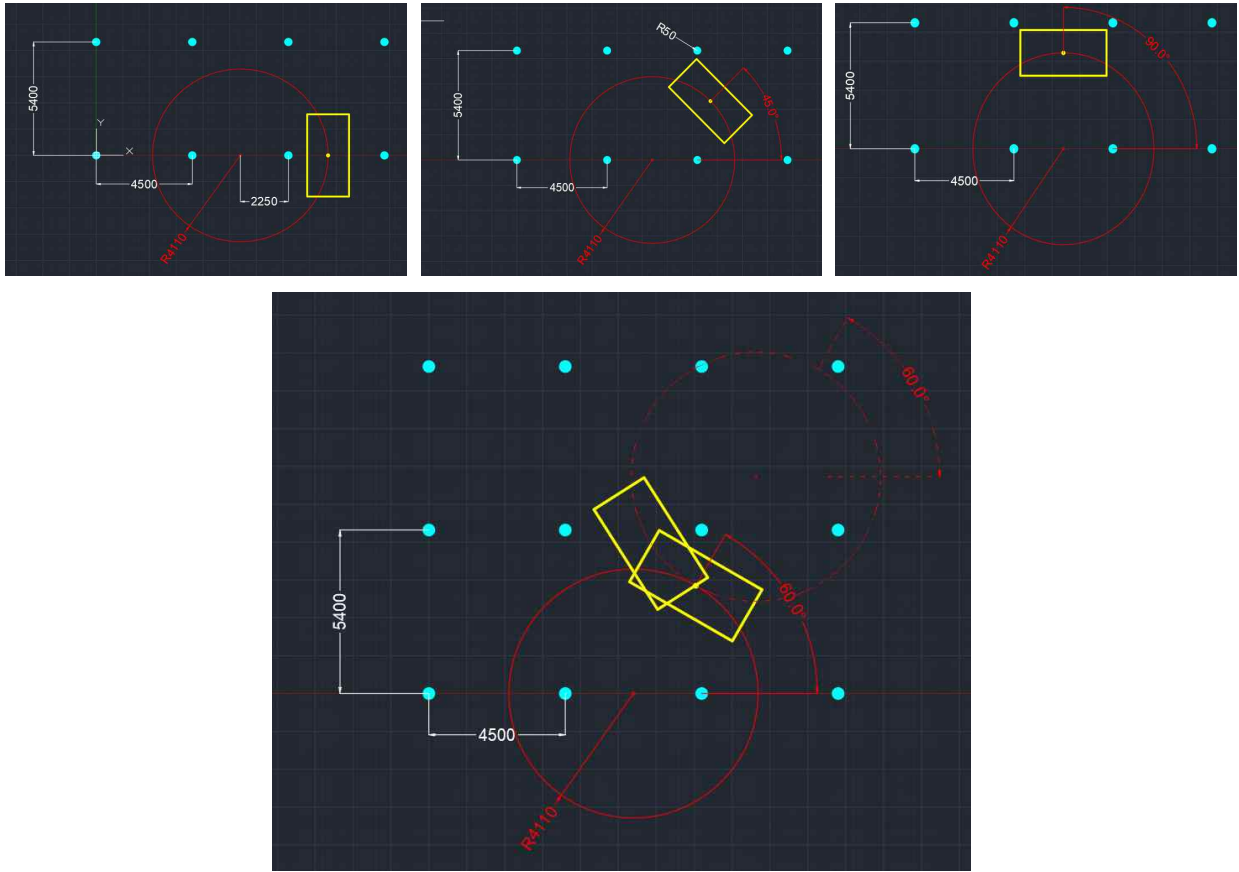


그림 19 트랙터 제원 및 선회반경을 고려한 영농형 태양광 시스템 하부 농작업 분석

- 85마력 트랙터의 선회반경 4.11 m를 고려하였을 때, 4.5×5.4 m로 설계된 기둥 간격 하부에서 충분한 농작업이 가능한 것으로 나타났으며, 편브레이크를 이용한 선회반경 3.62 m를 고려할 시에도, 폭에 대한 여유 공간만을 이미 확보할 경우 충분한 농작업이 가능한 것으로 분석됨.
- 따라서 트랙터의 최대 전폭 및 기타 농기계의 최대 전폭을 고려하여 기둥 간의 간격은 3.0 m 이상으로 확보될 수 있도록 함.

4.2 차광률 및 기초 형태를 고려한 시스템 기본설계

4.2.1 태양광 모듈에 의한 차광률

- 영농형 태양광 시스템 설치 시, 상부의 태양광 모듈에 따라 하부에 도달하는 일사량이 감소하며, 태양광 발전과 작물 생육을 동시에 성취하기 위해서는 감소하는 일사량에 관한 고려가 필요함.
- 하부에 도달하는 일사량의 감소는 영농형 태양광 시스템에 의한 차광률에 따라 상이하하며, 본 연구에서는 태양광 모듈 표면의 면적을 농지의 면적으로 나눈 것으로 정의함.

$$\text{차광률 (\%)} = \frac{\text{영농형 태양광 모듈 면적 (m}^2\text{)}}{\text{영농형 태양광 농지 면적 (m}^2\text{)}}$$

- 영농형 태양광이 처음 고안되었던 일본의 경우 일반적인 양지식물을 기준으로 차광률 33%를 초과하지 않는 것을 권장하고 있음.

- 국내의 경우 현재 운영되고 있는 영농형 태양광 시스템에서 20~40%의 차광률을 나타내고 있으며, 일반적으로 30% 이하의 차광률을 가지도록 설치되고 있음.

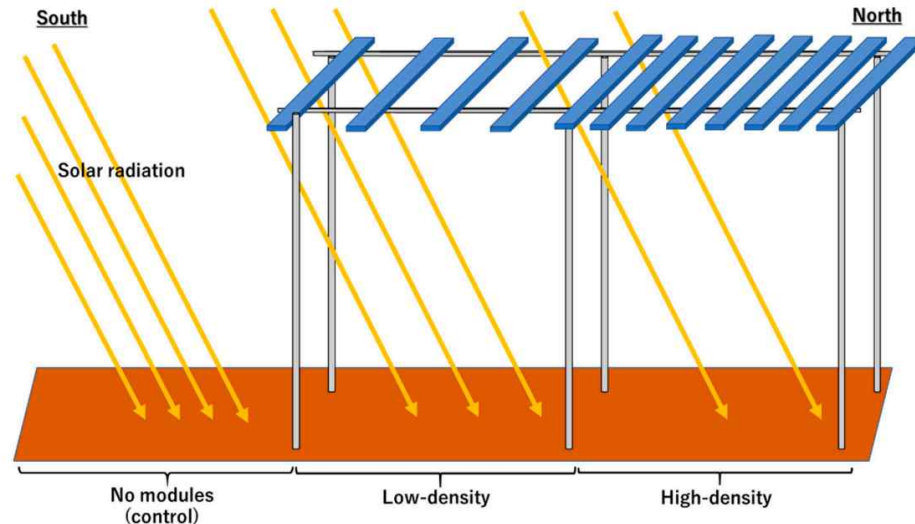


그림 20 태양광 모듈 간격에 따른 하부 도달 일사량 및 차광률 차이
(Sekiyama and Nagashima, 2019)

- 본 연구에서는 차광률 30%를 기준으로 영농형 태양광 시스템을 설계하되, 해당 기준은 기본설계안을 구축하기 위한 기준안으로서 다양한 모듈 배치와 작물 종류 등에 따라 상이하게 적용할 수 있을 것으로 판단됨.
- 특히 작물의 종류에 따라 필요한 일사량 및 광포화점은 상이하고, 모듈의 다양한 배치 및 발전용량과 크기에 따라 하부의 일사량 분포는 상이할 수 있음. 따라서 해당 기준에 관한 충분한 고찰과 향후 연구가 지속되어야 할 것으로 사료됨.
- 뿐만 아니라 다양한 모듈 배치에 따른 차광률 변화 및 이에 따른 실증재배 수행을 통해, 작물별 감수율에 관한 검토 및 고찰이 필요할 것으로 판단됨.

4.2.2 기초 기본 형태

- 일반 태양광 발전 시설의 경우, 안정성 확보를 위해 콘크리트 기초를 사용하는 경우가 많으나, 영농형 태양광의 경우 콘크리트 기초 설치 시 영구 구조물로 간주되어, 농지에 설치가 어려우며 추후 사후 관리에도 문제가 발생할 수 있음.
- 뿐만 아니라 농지에 콘크리트 타설 시, 작물 재배에 영향을 줄 수 있고 영농 면적이 감소하기 때문에 이를 배제할 필요가 있음.
- 따라서 영농 면적을 최대한 확보하고, 토양 영향을 최소화 하며, 농업용 임시 구조물 개념으로의 시스템 설치를 위해 스크류 파일 형태의 기초를 기본으로 채택함.
- 스크류 파일 기초는 기존 파일 기초의 경량성과 쉬운 사후관리의 장점을 확보하면서도 나선형의 날개를 추가하여 인발에 대한 저항력을 증대시켜 안정성을 확보함.
- 특히 터파기 공정 없이 비굴착 방식으로 기후나 온도, 지반상태 등에 관계없이 시공이 가능하며, 영농형 태양광 시스템을 단기간에 시공할 수 있는 장점이 있음.
- 뿐만 아니라 콘크리트 기초의 경우 연약지반에 시공이 어려우나, 스크류 파일 기초의 경우 연약지반에도 시공이 가능하며, 땅의 기울기나 다양한 높낮이도 손쉽게 조절이 가능함.

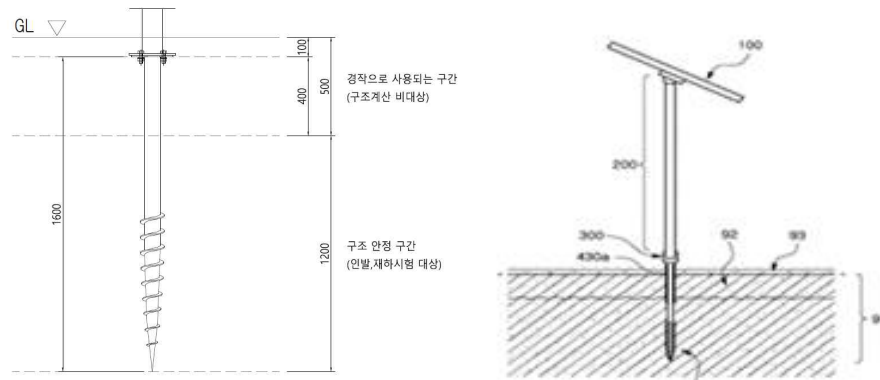


그림 21 스크류 파일 기초

4.3 영농형 태양광 기본설계안

- 앞선 고려사항을 반영한 프레임 형식의 기본설계안을 도출하였으며, 이에 필요한 시스템 설계변수 및 설계방법 등에 관한 전반은 전문가 협의와 자문을 통하여 결정함.
- 전문가 협의 및 자문을 위한 회의는 아래와 같이 수행되었으며, 이를 통한 의견수렴을 바탕으로 영농형 태양광 설계의 신뢰성을 제고함.

표 12 영농형 태양광 시스템 설계를 위한 전문가 회의 개최

순번	전문가 회의 개최 내역	
1	일자	2021.06.16.(수)
	참석자	이정재 명예교수 (서울대학교), 김한중 교수 (한경대학교), 윤성수 교수 (충북대학교), 이준구 부장 (농어촌연구원), 최원 교수 (서울대학교)
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 농업구조물의 대표적 예시인 일반 비닐하우스의 경우 적설하중에 의한 파괴가 65%, 풍하중에 의한 파괴가 30%를 차지하며 이러한 파괴는 대부분 충분한 인발강도를 확보하지 못함에 따라 발생 - 최근 나선형, 십자형 등의 다양한 형태를 가지는 기초가 개발되고 있으며, 영농형 태양광의 경우에도 다양한 기초 형태를 고려하고, 충분한 인발강도를 확보할 수 있는 보강 및 강도 실험이 필수적일 것으로 판단 - 영농형 태양광 시스템은 구조물의 특성상 적설하중의 영향은 적을 것으로 판단되며, 풍하중에 취약할 것으로 판단 - 설계빈도의 경우 일반적인 태양광 발전의 경우 20년, 비닐온실의 경우 30년이기 때문에 해당 범주 내에서 산정 - 기술적 문제뿐만 아니라, 농민들이 실질적으로 느낄 수 있는 수확량 감소 및 환경 문제 등과 같은 다양한 문제에 관한 종합적인 해결방안이 설계요소에 함께 반영

2	일자	2022.08.18.(목)
	참석자	김한중 교수 (한경대학교), 윤성수 교수 (충북대학교), 정남수 교수 (공주대학교), 최원 교수 (서울대학교), 이상익, 이종혁, 정영준 연구원 (서울대학교)
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 설계에 앞서 국내에서 사용되는 트랙터, 콤바인 등 농기계에 관한 제원 확인과 이에 따른 기둥 간격 설계 필요 - 구조 형식의 경우 트러스가 아닌 프레임으로의 설계 및 구조해석이 진행되어야 할 것으로 요구 - 태양광 모듈이 옅히며 축방향으로 설치되는 부재의 경우, 중간에 별다른 지지대가 없으므로 반드시 프레임으로 설계하며, 브레싱과 같은 보강용 부재의 경우 트러스로의 해석도 가능 - 영농형 태양광에 이용되는 스크류 기초 사용 시 모형시험, 현장시험, 수치해석 등 다양한 시험결과를 바탕으로 지반조건에 따라 필요한 근입깊이가 제시되어야 하며, 이때 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 함께 고려
3	일자	2022.12.19.(월)
	참석자	김한중 교수 (한경대학교), 정남수 교수 (공주대학교), 이준구 부장 (농어촌연구원), 최원 교수 (서울대학교), 이상익, 이종혁, 정영준, 김동수, 서예진 연구원 (서울대학교)
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 구조물의 높이가 높지 않기 때문에 지진에 대한 해석과 설계가 필수적이지는 않을 것으로 사료되나, 설계자의 판단에 의해 내진설계를 포함 - 지진하중 구조검토 결과, 경량형의 구조물이기 때문에 충분히 안전 측에 해당하지만, 지진이 잦은 지역에 설치되거나 추후 엔지니어가 필요하다고 판단 시 추가적인 검토도 고려 필요
4	일자	2023.01.06.(금)
	참석자	이정재 명예교수 (서울대학교), 김한중 교수 (한경대학교), 윤성수 교수 (충북대학교), 정남수 교수 (공주대학교), 최원 교수 (서울대학교), 이상익, 이종혁, 정영준, 김동수, 서예진 연구원 (서울대학교)
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광이 설치되는 지반은 영농을 기반으로 하기에 지역이나 계절에 따라서 다양한 상태로 존재 - 영농형 태양광 구조물은 항복응력과 극한응력이 뚜렷한 재료로 이루어진 강관으로 주로 구성되며, 일반 구조물에 비해 경량의 형태 - 지반 관련 계수의 변동성과 구조물 특성을 고려하여 구조설계 방법은 허용응력설계법을 기본으로 하지만, 설계자 혹은 발주자의 판단에 따라 한계상태설계법 등 다른 설계법을 적용 가능

4.3.1 기본설계안 1 (태양광 모듈 가로 배치형)

- 기본설계안 1은 프레임 형식을 바탕으로, 태양광 모듈을 길이가 긴 가로 방향으로 이어지도록 배치한 형식이며, 2×2 기둥 간격의 배치를 하나의 설계 단위 unit으로 설정함.
- 하부 기둥의 간격은 4,100×5,500 mm으로 22.55 m²이며, 높이는 3,800 mm로 설계함.
- 태양광 모듈은 450 W (2,115×1,052×40 mm) 규격 모듈을 이용하였으며, 1 unit 당 발전 용량은 20 EA×450 W = 9.0 kW임.
- 이에 따른 차광률은 39.4%로 나타나 기준 차광률 30%를 초과하는 것으로 나타났으나, 하부 기둥의 간격 조절을 통해 차광률의 다양한 설정이 가능하며, 이에 관한 배치도, 측면도, 배면도 및 입체도는 다음과 같음.

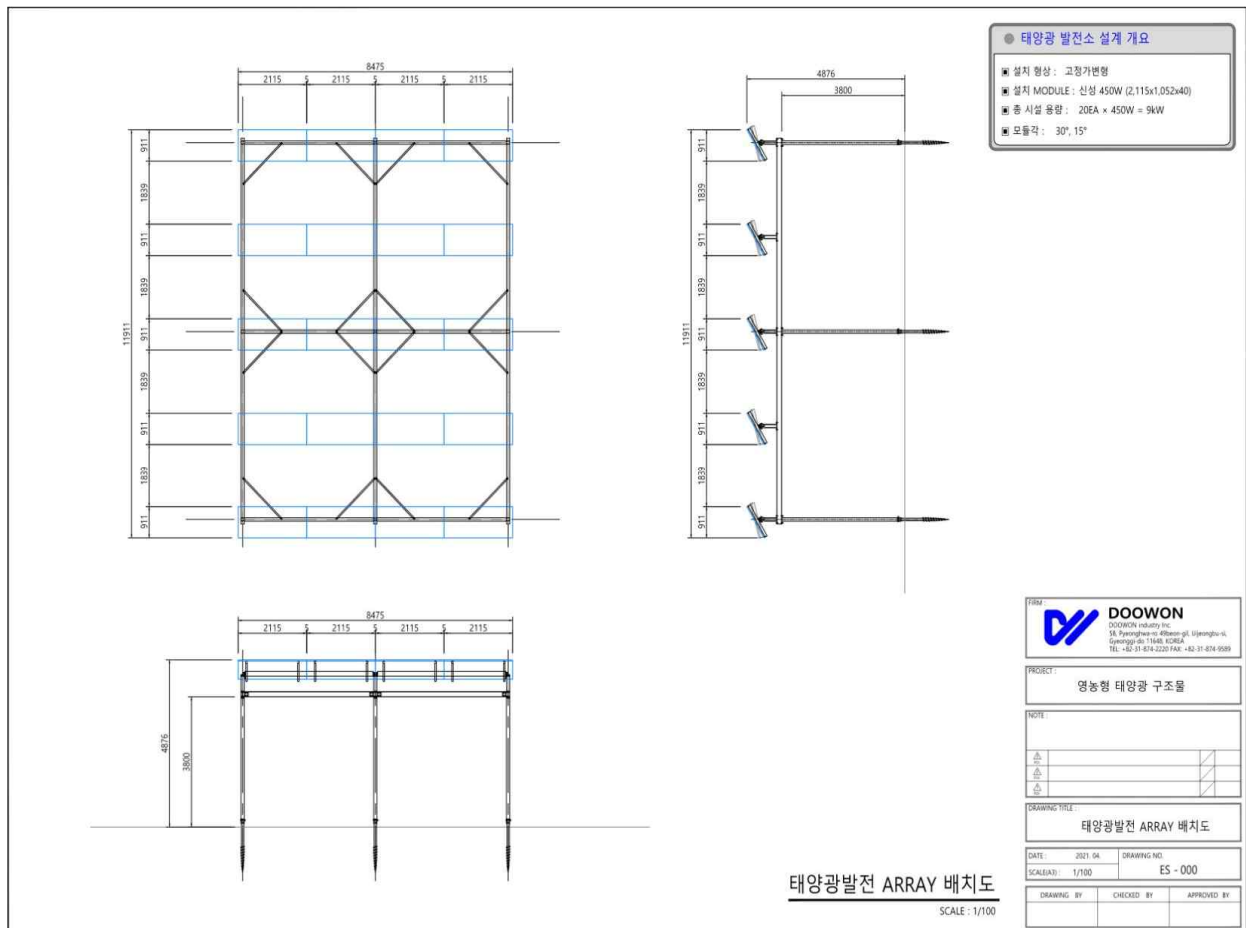


그림 22 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 배치도

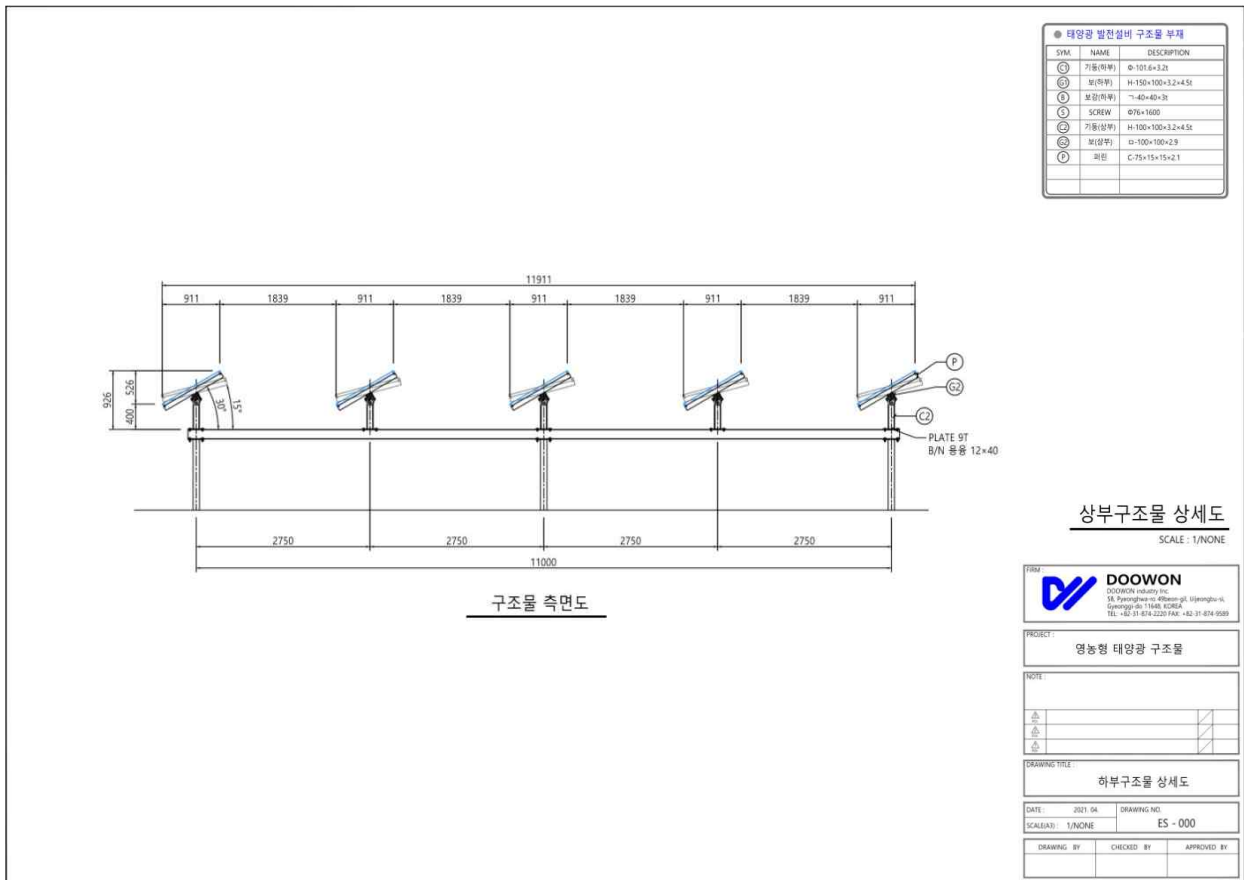


그림 23 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 측면도

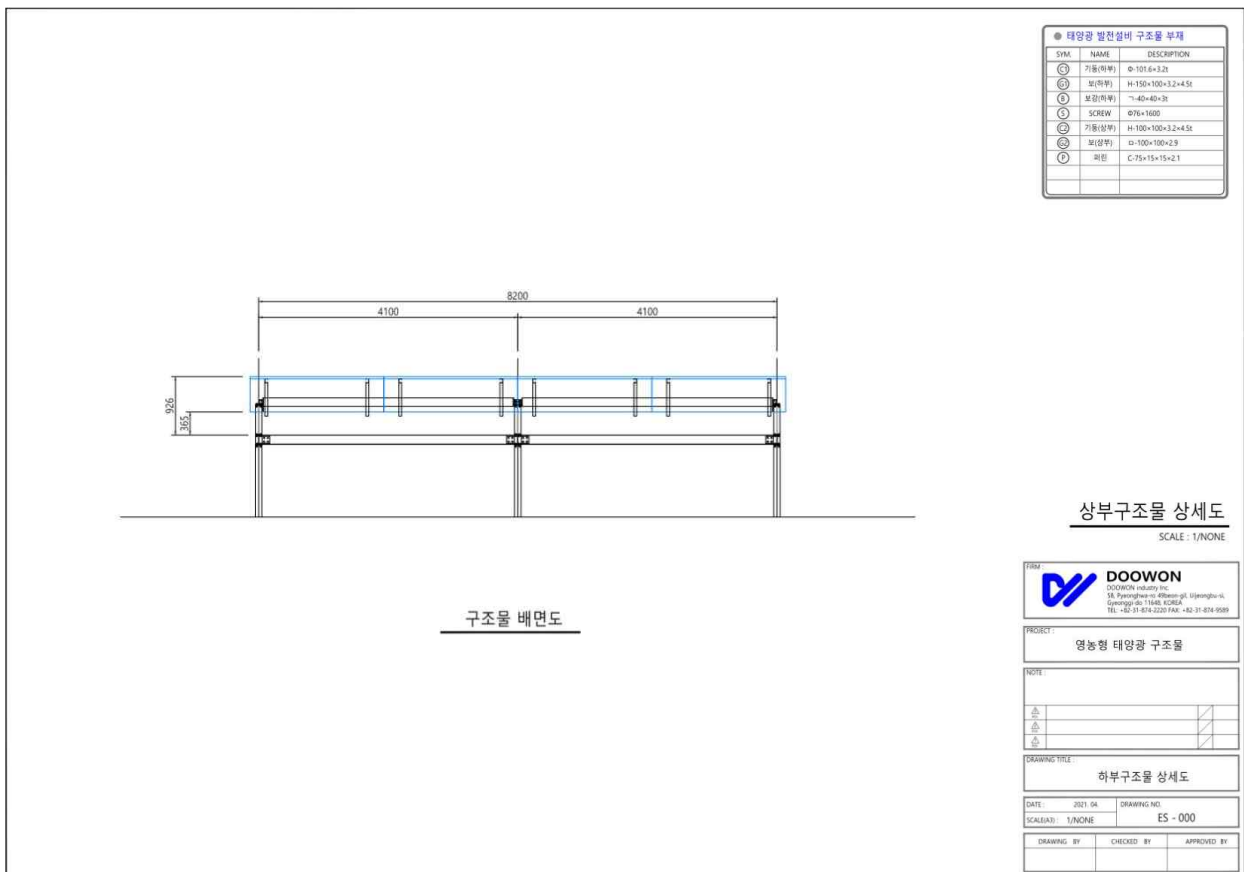


그림 24 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 배면도

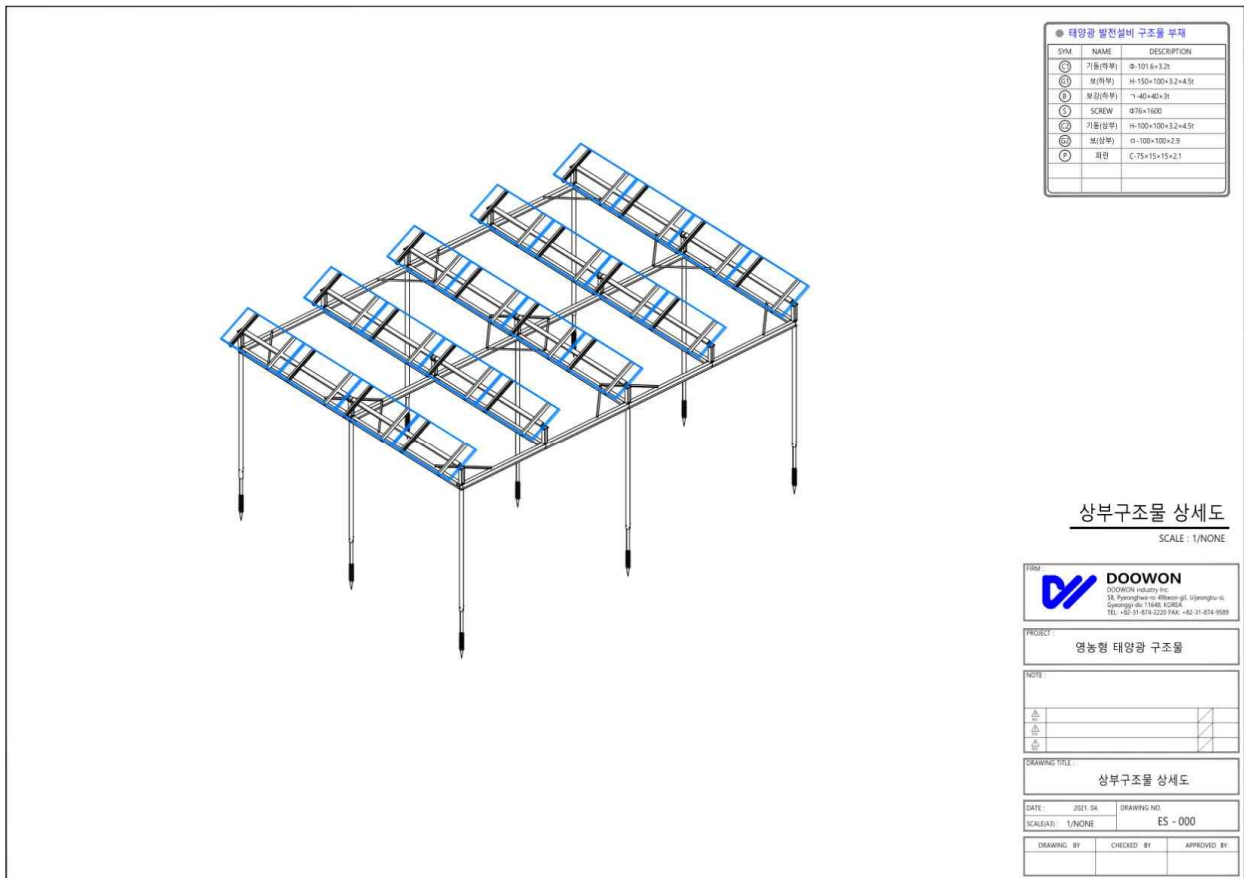


그림 25 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 입체도

4.3.2 기본설계안 2 (태양광 모듈 세로 배치형)

- 기본설계안 2는 프레임 형식을 바탕으로, 태양광 모듈을 길이가 짧은 세로 방향으로 간격을 두어 배치하여 하부 작물에 도달하는 일사량을 보다 고르게 분포하도록 하였음.
- 2×2 기둥 간격의 배치를 하나의 설계 단위 unit으로 설정하였으며, 하부 기둥의 간격은 5,100×4,500 mm으로 넓이는 22.95 m², 높이는 3,800 mm로 설계함.
- 태양광 모듈은 580 W (2,416×1,134×35 mm) 규격 모듈을 이용하였으며, 1 unit 당 발전 용량은 15 EA×580 W = 8.7 kW임.
- 이에 따른 차광률은 29.8%로 나타나 기준 차광률 30%를 만족하였으며, 하부 기둥의 간격 조절을 통해 차광률의 다양한 설정이 가능함. 특히 기본설계안 1 과 다르게, X축 방향과 Y축 방향으로의 기둥 간격 변화 모두가 차광률에 영향을 미치는 것으로 나타남.
- 이때 시스템 구축 예정 부지 30×30 m에 맞도록 설계한 배치도, 측면도, 배면도 및 입체도는 다음과 같음.

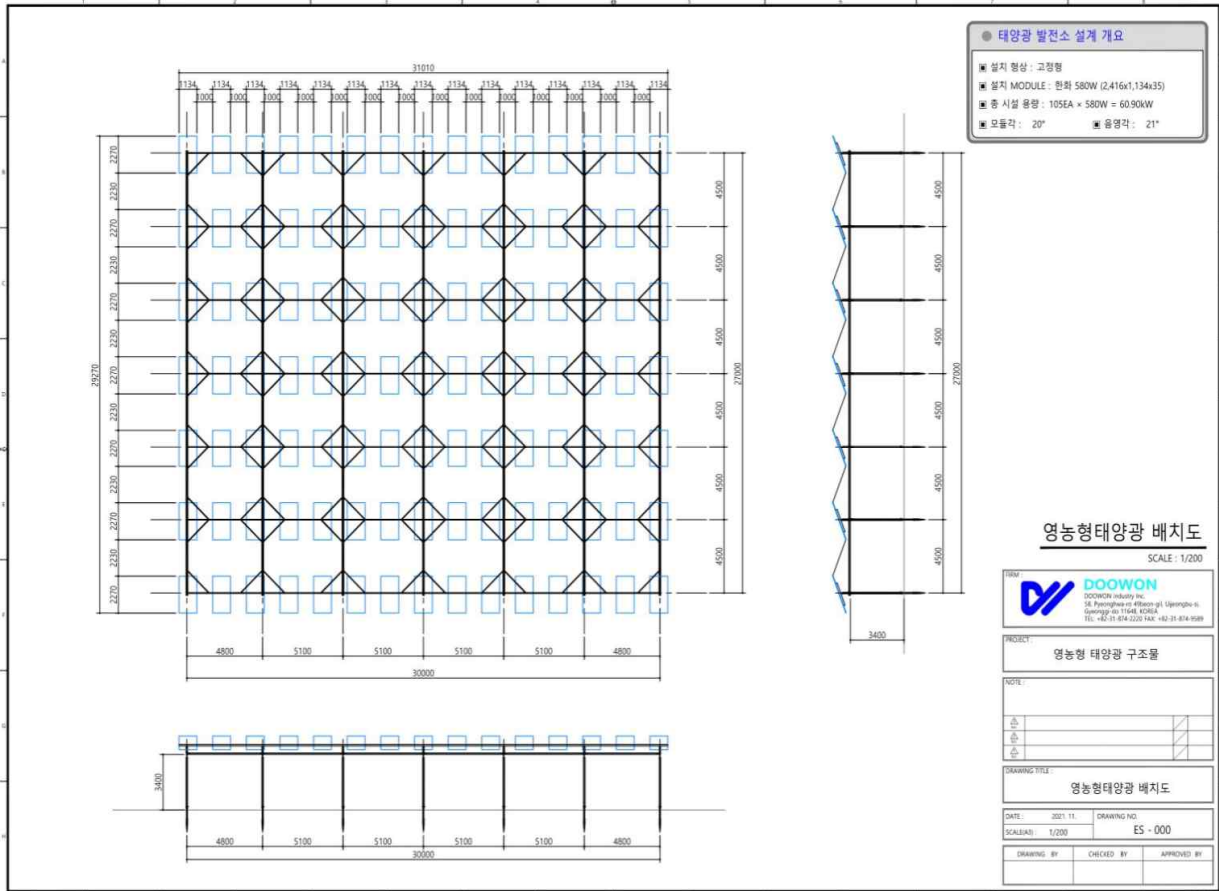


그림 26 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 배치도

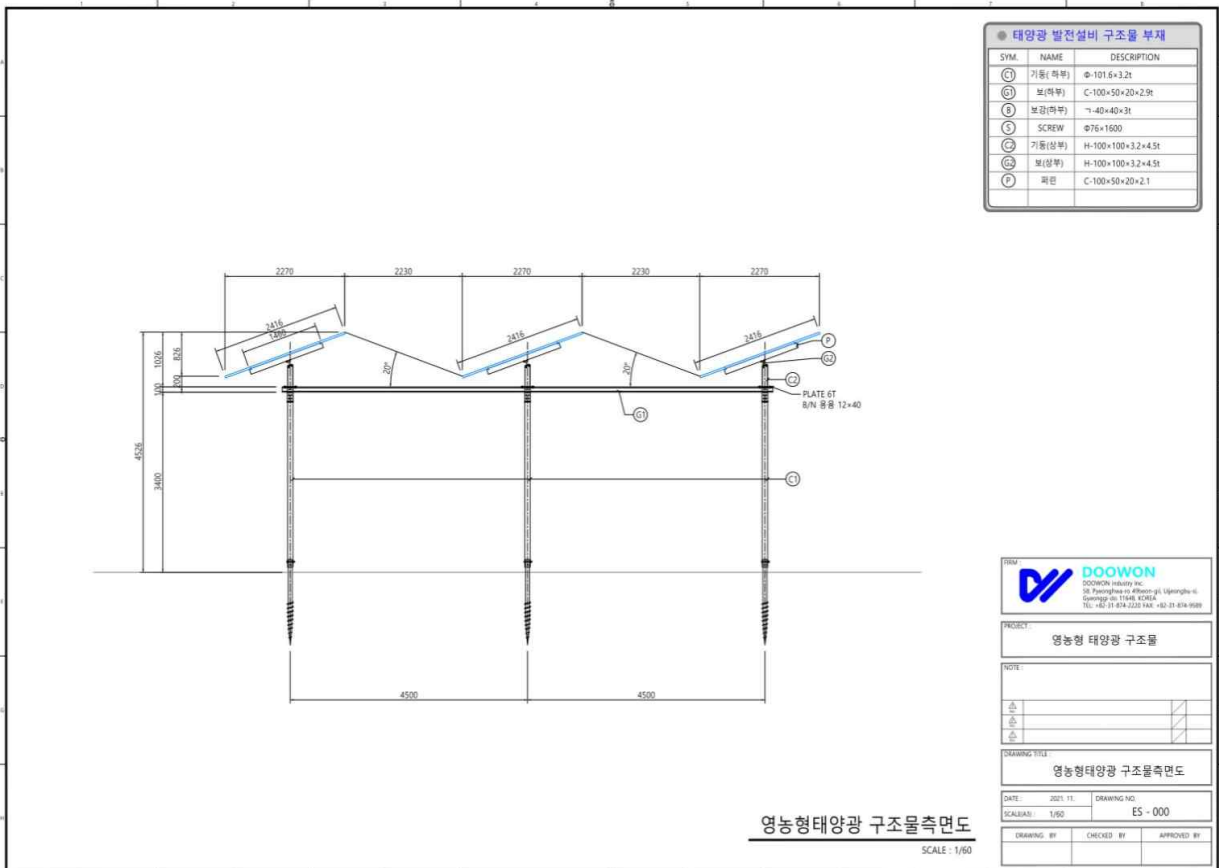


그림 27 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 측면도

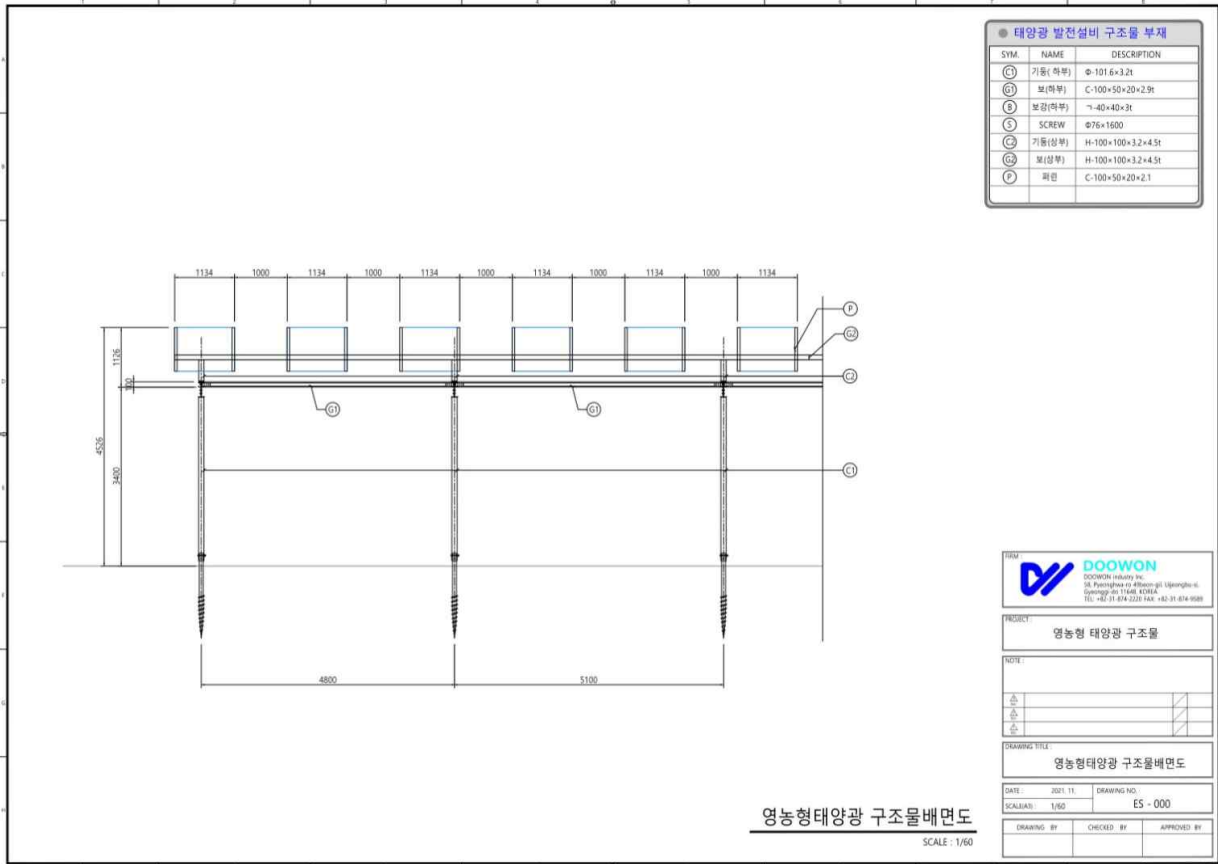


그림 28 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 배면도

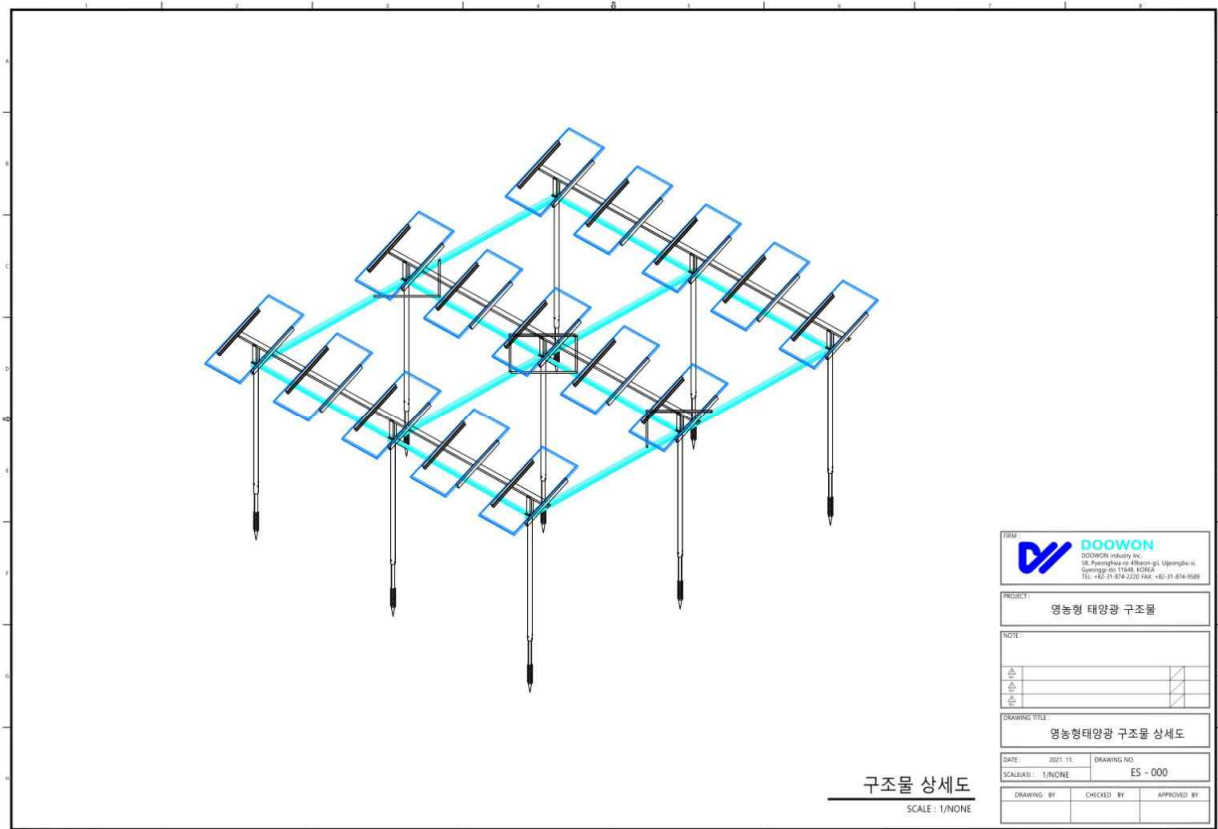


그림 29 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 입체도

제5장 구조안전성 검토 및 안전설계기준 분석

5.1 검토하중 및 하중조합

5.1.1 고정하중

- 강재 SS275 단위중량 : 76.980 kN/m³
- 태양광 패널 및 설비 연직 하중 : 0.2 kN/m²
- 부재별 단면적 및 형태를 고려한 단위중량을 계산하고 이에 따른 자중을 반영.

5.1.2 적설하중

- 구조물의 형태, 기울기 등에 따라 KDS 41 10 15에서 규정하는 경사지붕적설하중 기준에 따라 다음의 식을 통해 산정하였으며, 이와 관련된 계수는 구조물 형태에 따라 적용.

$$S_s = C_s \times S_f \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

- C_s : 경사도계수 (눈이 미끄러지지 않는 상태로 가정하여 1.0 적용)
- S_f : 평지붕 적설하중

$$S_f = C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

- C_b : 기본 지붕 적설하중 계수이며, 일반적으로 0.7로 적용 (KDS 41 10 15, 2019).
- C_e : 노출계수 (바람에 의한 눈의 제거 및 하중 감소를 기대할 수 없는 위치이며, 1.00 적용)

표 13 노출계수 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

주변 환경	C_e
A. 지형, 높은 구조물, 나무 등 주변환경에 의해 모든 면이 바람막이가 없이 노출된 지붕이 있는 거센바람 부는 지역	0.8
B. 약간의 바람막이가 있는 거센바람 부는 지역	0.9
C. 바람에 의한 눈의 제거가 지형, 높은 구조물 또는 근처의 몇몇 나무들 때문에 지붕 하중의 감소를 기대할 수 없는 위치	1.0
D. 바람의 영향이 많지 않은 지역 및 지형과 높은 구조물 또는 몇몇 나무들에 의하여 지붕에 바람막이가 있는 지역	1.1
E. 바람의 영향이 거의 없는 조밀한 숲 지역으로서, 촘촘한 침엽수 사이에 위치한 지붕	1.2

- C_t : 온도계수 (비난방 구조물은 1.20 적용)

표 14 온도계수 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

난 방 상 태	C_t
난방구조물 (적설하중 제어구조)	1.0
비난방구조물 (적설하중 비제어구조)	1.2

- I_s : 중요도계수 (중요도(특), (1) 및 (3)에 해당하지 않는 건축물 및 방음터널은 1.00 적용)
- S_g : 기본지상적설하중 (그림 30 및 표 15에 따르며 최소 지상적설하중은 0.5 kN/m^2 로 산정됨. 이에 따라 수원 지역의 기본지상적설하중은 0.5 kN/m^2 (적설심 50 cm에 해당) 적용)

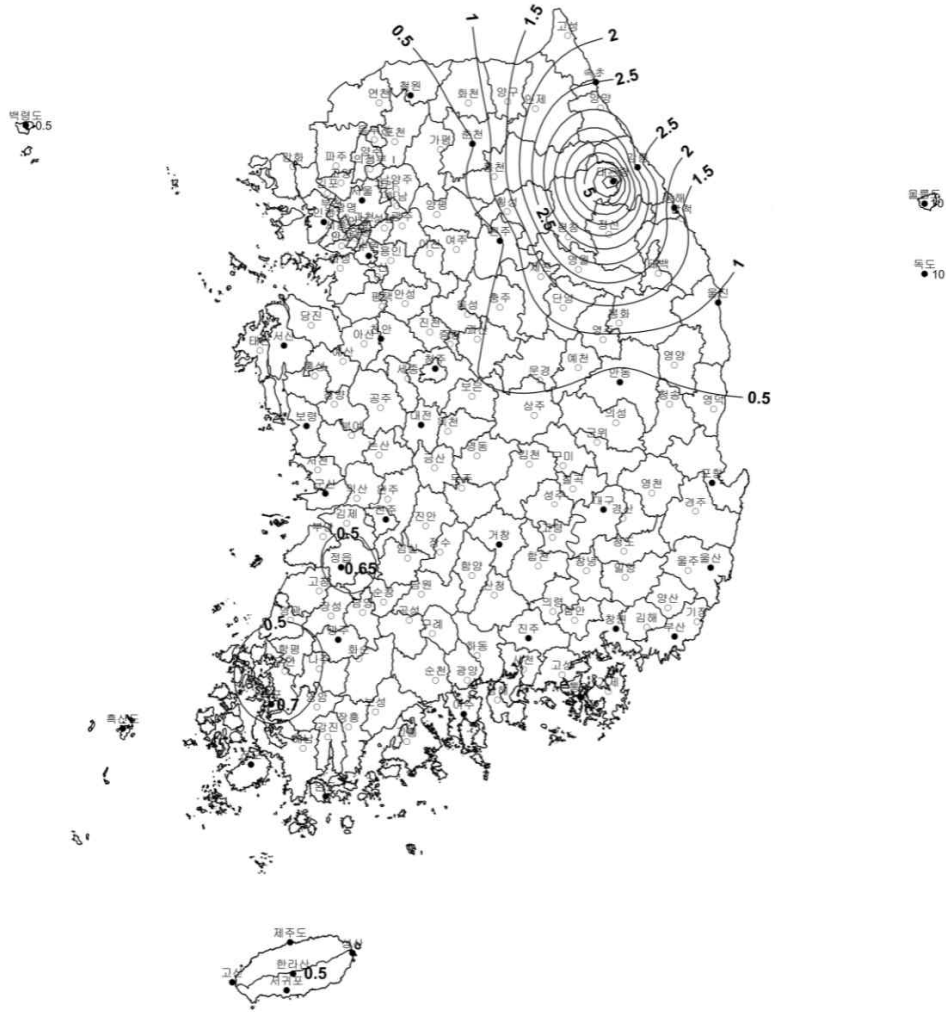


그림 30 기본지상적설하중 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중) S_g (kN/m^2)

표 15 기본지상적설하중 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

주변 환경	S_g (kN/m^2)
서울, 수원, 춘천, 서산, 충주, 대전, 추풍령, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부여, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포, 진주, 이천	0.5
정읍, 울진	0.65
인천	0.8
속초	2.00
강릉	3.00
울릉도, 대관령	7.00

- 이에 따라 적설하중은 다음과 같이 0.42 kN/m²로 산정

$$S_s = C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g$$

$$= 0.7 \times 1.0 \times 1.2 \times 1.0 \times 0.5 = 0.42 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

5.1.3 풍하중

- 구조물에 작용하는 풍하중은 다음 식에 따라 산정.

$$P_f = \frac{1}{2} \rho \times V_d^2 \times G_f \times C_f \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

- ρ : 공기 밀도 (균일하게 1.22 kg/m³ 적용 (KDS 41 10 15))
- V_d : 설계 풍속

$$V_d = V_0 \times K_{zt} \times K_{zt} \times I_w \text{ (m/s)}$$

- V_0 : 지역별 기본 풍속 (그림 31 및 표 16에 따라 산정하며, 본 설계에서는 수원 지역의 경우 26 m/s 적용)

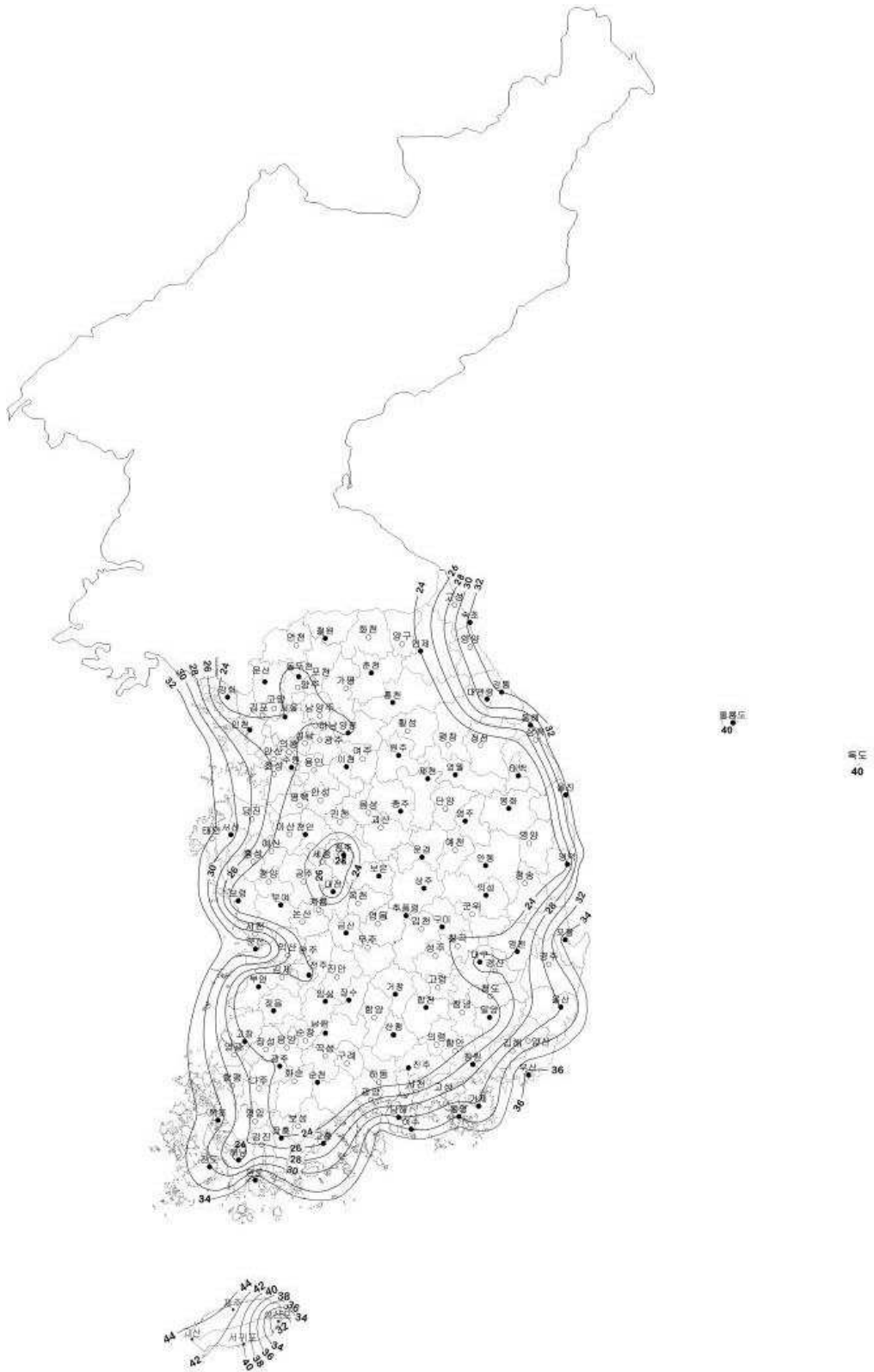


그림 31 기본풍속 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

표 16 지역별 기본풍속 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

	지역	V_0 (m/s)
서울특별시 인천광역시 경기도	용진	30
	인천, 강화, 안산, 시흥, 평택	28
	서울, 김포, 구리, 수원, 군포, 오산, 화성, 의왕, 부천, 고양, 안양, 과천, 광명, 의정부, 동두천, 양주, 파주, 포천, 남양주, 가평, 하남, 성남, 광주, 양평, 용인	26
	안성, 연천, 여주, 이천	24
강원도	속초, 양양, 강릉, 고성	34
	동해, 삼척, 홍천, 정선, 인제	30
	양구	26
	철원, 화천, 춘천, 횡성, 원주, 평창, 영월, 태백	24
대전광역시 충청남북도	서산, 태안	34
	당진	32
	서천, 보령, 홍성, 청주, 청원	30
	예산, 세종, 대전, 공주, 부여	28
	아산, 계룡, 진천	26
	천안, 증평, 청양, 논산, 금산, 음성, 충주, 제천, 단양, 괴산, 보은, 영동, 옥천	24
부산광역시 대구광역시 울산광역시 경상남북도	울릉(독도)	40
	부산	38
	포항, 경주, 기장, 통영, 거제	36
	양산, 김해, 남해, 울산, 울주	34
	영덕, 고성	32
	울진, 창원, 사천, 영천	30
	청송, 대구, 경산, 청도, 밀양, 하동	28
	영양, 군위, 칠곡, 성주, 달성, 함안, 고령, 창녕, 진주	26
	봉화, 영주, 예천, 문경, 상주, 추풍령, 안동, 의성, 구미, 김천, 의령, 거창, 산청, 함천, 함양	24
광주광역시 전라남북도	완도, 해남	36
	진도, 여수, 고흥, 신안, 무안, 장흥	34
	목포, 부안, 영암, 강진	32
	영광, 함평, 나주	30
	익산, 김제, 순천, 고창, 광양	28
	광주, 보성, 완주, 전주, 장성	26
	무주, 진안, 장수, 임실, 정읍, 순창, 남원, 담양, 곡성, 구례	24
제주도	서귀포, 제주	44

- K_{zr} : 풍속고도분포계수 (주변 지역의 지표면 상태에 따르며 수원지역은 1.00 적용)

표 17 지표면 조도구분 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

지표면 조도구분	주변지역의 지표면 상태
A	대도시 중심부에서 고층건축물 (10층 이상)이 밀집해 있는 지역
B	수목·높이 3.5 m 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있는 지역 중층건물 (4~9층)이 산재해 있는 지역
C	높이 1.5~10 m 정도의 장애물이 산재해 있는 지역 수목·저층건축물이 산재해 있는 지역
D	장애물이 거의 없고, 주변 장애물의 평균높이가 1.5 m 이하인 지역 해안, 초원, 비행장

표 18 평탄한 지역에 대한 풍속고도분포계수

지표면으로부터의 높이 z (m)	지표면조도구분			
	A	B	C	D
$z \leq z_b$	0.58	0.81	1.0	1.13
$z_b < z \leq Z_g$	$0.22z^\alpha$	$0.45z^\alpha$	$0.71z^\alpha$	$0.98z^\alpha$

표 19 대기경계층 시작 높이 z_b , 기준경도풍 높이 Z_g , 풍속고도분포지수 α

지표면조도구분	A	B	C	D
z_b (m)	20 m	15 m	10 m	5 m
Z_g (m)	550 m	450 m	350 m	250 m
α	0.33	0.22	0.15	0.10

- K_{zt} : 지형계수 (산, 언덕 및 경사지의 영향을 받지 않는 평탄한 지역의 경우 1.0 적용)

- I_w : 중요도계수 (초고층건축물, 중요도(특), (1) 및 (3)에 해당하지 않는 건축물의 경우 0.95 적용)

- 이에 따라 설계풍속은 아래와 같이 24.7 m/s 적용

$$V_d = V_0 \times K_{zr} \times K_{zt} \times I_w$$

$$= 26 \times 1.00 \times 1.0 \times 0.95 = 24.7 \text{ (m/s)}$$

- G_f : 가스트 영향 계수 (저층건물이 산재해 있는 지역의 경우 1.9 적용)

- C_f : 풍력계수 (태양광 모듈의 경우 경사져 설치되기 때문에 사각형 단면 대각선풍으로 1.1, 기둥 부재의 경우 원형 단면으로 1.2 적용)

- 이에 따라 풍하중은 아래와 같이 0.778 kN/m²로 산정

$$P_f = \frac{1}{2} \rho \times V_d^2 \times G_f \times C_f$$

$$= \frac{1}{2} \times 1.22 \times 24.7^2 \times 1.9 \times 1.1 = 777.8 \text{ (N/m}^2\text{)} = 0.778 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

5.1.4 지진하중

- 지진하중의 산정을 위해 응답스펙트럼 해석법을 이용하며, 이는 ‘고유진동수 혹은 주기’와 ‘최대응답 혹은 가속도’와의 관계를 나타내는 지진응답스펙트럼 그래프를 이용해 최대 응답을 산정함 (그림 32). 또한, 모달 해석을 통해 모드별 최대 응답을 결정하며, 각 모드의 조합별 구조물의 최대 거동을 분석함.
- 지진응답스펙트럼 그래프는 건축물의 내진설계 중요도계수, 지반의 분류 및 지반종류, 지진구역계수 등을 고려해 결정되며, 각 주기별 스펙트럼가속도를 계산하고 다음 식을 통해 지진하중을 산정함.

$$F = S_C \times M$$

- F : 지진하중
- S_C : 설계응답스펙트럼가속도
- M : 건축물 중량

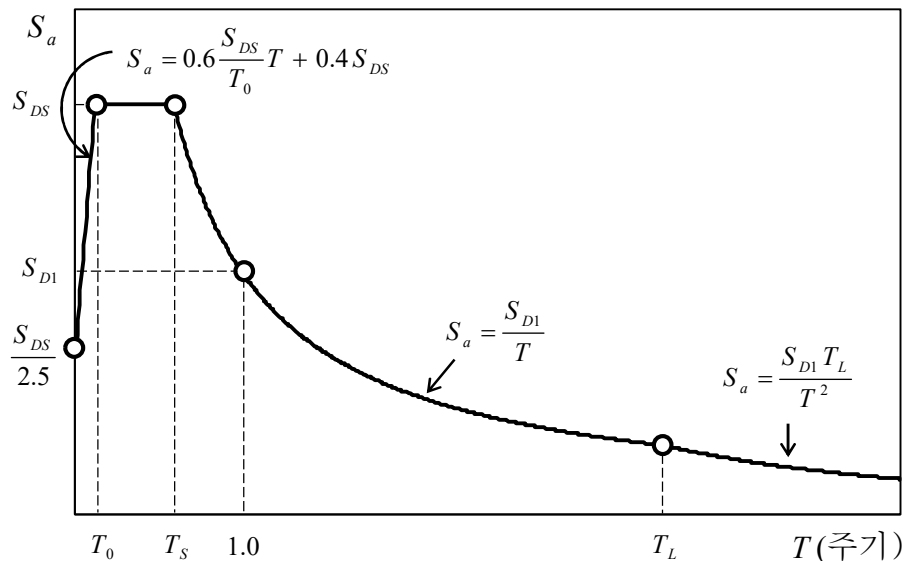


그림 32 설계응답가속도스펙트럼 그래프 (KDS 41 17 00)

- 설계응답스펙트럼은 다음 식에 따라 구한 후 그래프를 작성함.

$$T \leq T_0 : S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS}$$

$$T_0 < T \leq T_S : S_a = S_{DS}$$

$$T_S < T \leq T_L : S_a = \frac{S_{D1}}{T}$$

$$T > T_L : S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$$

- T : 구조물의 고유주기 (초)

$$T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}$$

$$T_S = S_{D1} / S_{DS}$$

$$T_L = 5 \text{ 초}$$

- S_{DS} : 단주기 설계스펙트럼가속도
- S_{D1} : 주기 1초의 설계스펙트럼가속도

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3$$

- 이때 F_a 와 F_v 는 각각 아래의 표에서 규정된 지반종류에 따른 지반증폭계수임.

표 20 단주기 지반증폭계수 (F_a)

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S=0.2$	$S=0.3$
S_1	1.12	1.12	1.12
S_2	1.4	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3
S_4	1.6	1.4	1.2
S_5	1.8	1.3	1.3

표 21 1초주기 지반증폭계수 (F_v)

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S=0.2$	$S=0.3$
S_1	0.84	0.84	0.84
S_2	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.6	1.5
S_4	2.2	2.0	1.8
S_5	3.0	2.7	2.4

- 지반종류는 KDS 17 10 00 <내진설계 일반> 규정을 준수하여 선정함.

표 22 지반의 분류 (KDS 17 10 00 <내진설계 일반>)

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층평균전단파속도, $V_{s, soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	-
S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

- KDS 41 10 05 <건축구조기준 총칙>에 따른 건물의 중요도를 고려하여 건물의 내진등급과 내진설계 중요도계수를 결정함. 이때 건물의 중요도는 용도 및 규모에 따라 다음과 같이 중요도(특), 중요도(1), 중요도(2) 및 중요도(3)으로 구분함.
- 중요도(특) : (1) 연면적 1,000 m² 이상인 위험물 저장 및 처리시설, (2) 연면적 1,000 m² 이상인 국가 또는 지방자치단체의 청사·외국공관·소방서·발전소·방송국·전신전화국, (3) 종합병원, 수술시설이나 응급시설이 있는 병원, (4) 지진과 태풍 또는 다른 비상시의 긴급대피수용시설로 지정한 건축물
- 중요도(1) : (1) 연면적 1,000 m² 미만인 위험물 저장 및 처리시설, (2) 연면적 1,000 m² 미만인 국가 또는 지방자치단체의 청사·외국공관·소방서·발전소·방송국·전신전화국, (3) 연면적 5,000 m² 이상인 공연장·집회장·관람장·전시장·운동시설·판매시설·운수시설(화물터미널과 집배송시설은 제외함), (4) 아동관련시설·노인복지시설·사회복지시설·근로복지시설, (5) 5층 이상인 숙박시설·오피스텔·기숙사·아파트, (6) 학교, (7) 수술시설과 응급시설 모두 없는 병원, 기타 연면적 1,000 m² 이상인 의료시설로서 중요도(특)에 해당하지 않는 건축물
- 중요도(2) : (1) 중요도(특), (1), (3)에 해당하지 않는 건축물
- 중요도(3) : (1) 농업시설물, 소규모창고, (2) 가설구조물
- 건물의 중요도에 따른 내진등급과 중요도계수는 KDS 41 17 00 <건축물 내진설계기준>에 따라 다음과 같이 산정하며, 이에 따라 영농형 태양광 구조물의 내진설계 중요도계수는 1.0을 산정함.

표 23 내진등급과 중요도계수 (KDS 41 17 00 <건축물 내진설계기준>)

건축물의 중요도	내진등급	내진설계 중요도계수 (I_E)
중요도(특)	특	1.5
중요도(1)	I	1.2
중요도(2), (3)	II	1.0

- 지진구역 및 지진구역계수는 아래의 표와 같으며 이에 따라 지진구역계수 0.11을 선정함.

표 24 지진구역 (KDS 17 10 00 <내진설계 일반>)

지진구역	행정구역	
	I	시
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부 ¹
II	도	강원 북부 ² , 제주

1 강원 남부 (군, 시) : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

2 강원 북부 (군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

표 25 지진구역계수 (KDS 17 10 00 <내진설계 일반>)

지진구역	I	II
지진구역계수, Z	0.11	0.07

5.1.5 하중조합

- 본 설계에서는 허용응력 및 한계상태 설계법을 바탕으로, KDS 41 10 15 <건축구조기준 설계하중> 및 KDS 14 30 05 <강구조 설계 일반사항, 허용응력 설계법>에 따른 고정하중 (D), 설하중 (SL), 풍하중 (WL), 지진하중 (E)에 관한 하중조합을 고려함.
- 풍하중의 경우 +X 방향 (WX), -X 방향 (-WX), +Y 방향 (WY), -Y 방향 (-WY)을 고려함.
- 허용응력 설계에서는, 국토교통부에서 제시한 KDS 14 30 05 <강구조 설계 일반사항, 허용응력 설계법>의 기준을 적용하고, 부재 단면 검토를 위한 허용응력 보정계수를 1.25로 설정하며, 하중조합은 표 26과 같이 설정함.
- 본 설계에서는 허용응력 보정계수만큼 허용응력을 증가시키는 대신, 작용하중을 증가계수만큼 감하여 적용하였으며, 하중조합 중 가장 불리한 값을 구조안전성 검토에 이용함.

표 26 허용응력설계법 (ASD) 하중조합

구분	하중조합	허용응력 보정계수	하중 보정계수
LCB1-ASD	고정하중	1.00	1.00
LCB2-ASD	고정하중 + 설하중	1.25	0.80
LCB3-ASD	고정하중 + 풍하중 (+X방향)	1.25	0.80
LCB4-ASD	고정하중 + 풍하중 (-X방향)	1.25	0.80
LCB5-ASD	고정하중 + 풍하중 (+Y방향)	1.25	0.80
LCB6-ASD	고정하중 + 풍하중 (-Y방향)	1.25	0.80
LCB7-ASD	고정하중 + 설하중 + 풍하중 (+X방향)	1.25	0.80
LCB8-ASD	고정하중 + 설하중 + 풍하중 (-X방향)	1.25	0.80
LCB9-ASD	고정하중 + 설하중 + 풍하중 (+Y방향)	1.25	0.80
LCB10-ASD	고정하중 + 설하중 + 풍하중 (-Y방향)	1.25	0.80

- 한계상태 설계에서는, 국토교통부에서 제시한 KDS 41 10 15 <건축구조기준 설계하중> 기준을 적용하여, 부재 단면 검토를 위한 하중조합은 표 27과 같이 설정함.
- 해당 하중저항계수를 적용한 하중조합 중 가장 불리한 값을 구조안전성 검토에 이용함.

표 27 한계상태설계법 (LSD) 하중조합

구분	하중조합
LCB1-LSD	1.4D
LCB2-LSD	1.2D + 1.6SL + 0.65WL(X)
LCB3-LSD	1.2D + 1.6SL + 0.65WL(Y)
LCB4-LSD	1.2D + 1.6SL - 0.65WL(X)
LCB5-LSD	1.2D + 1.6SL - 0.65WL(Y)
LCB6-LSD	1.2D + 1.3WL(X) + 0.5SL
LCB7-LSD	1.2D + 1.3WL(Y) + 0.5SL
LCB8-LSD	1.2D - 1.3WL(X) + 0.5SL
LCB9-LSD	1.2D - 1.3WL(Y) + 0.5SL
LCB10-LSD	0.9D + 1.3WL(X)
LCB11-LSD	0.9D + 1.3WL(Y)
LCB12-LSD	0.9D - 1.3WL(X)
LCB13-LSD	0.9D - 1.3WL(Y)

- 지진해석 및 내진설계를 위한 지진하중의 경우, 응답스펙트럼해석법으로부터 산정된 지진하중 (E)에 대해 X 및 Y방향으로의 100 : 30법을 적용한 ($\pm 1.0E_x \pm 0.3E_y$) 및 ($\pm 1.0E_y \pm 0.3E_x$)의 총 8가지 조합을 고려함.
- 허용응력설계 및 한계상태설계에서의 지진하중에 관한 하중조합은 표 28과 같이 설정하였으며, 이 중 가장 불리한 값을 이용하여 지진해석 및 내진설계를 수행함.

표 28 지진해석 및 내진설계 지진하중조합

구분	하중조합	비고
LCB1E-ASD	$1.0D + 1.0E_x + 0.3E_y$	허용응력설계 하중조합 $1.0D \pm 1.0E$ $E = \pm 1.0E_x \pm 0.3E_y$ or $\pm 1.0E_y \pm 0.3E_x$
LCB2E-ASD	$1.0D + 1.0E_x - 0.3E_y$	
LCB3E-ASD	$1.0D + 0.3E_x + 1.0E_y$	
LCB4E-ASD	$1.0D - 0.3E_x + 1.0E_y$	
LCB5E-ASD	$1.0D - 1.0E_x - 0.3E_y$	
LCB6E-ASD	$1.0D - 1.0E_x + 0.3E_y$	
LCB7E-ASD	$1.0D - 0.3E_x - 1.0E_y$	
LCB8E-ASD	$1.0D + 0.3E_x - 1.0E_y$	
LCB1E-LSD	$1.2D + 1.0E_x + 0.3E_y + 0.2SL$	한계상태설계 하중조합 $1.2D \pm 1.0E + 0.2SL$ $E = \pm 1.0E_x \pm 0.3E_y$ or $\pm 1.0E_y \pm 0.3E_x$
LCB2E-LSD	$1.2D + 1.0E_x - 0.3E_y + 0.2SL$	
LCB3E-LSD	$1.2D + 0.3E_x + 1.0E_y + 0.2SL$	
LCB4E-LSD	$1.2D - 0.3E_x + 1.0E_y + 0.2SL$	
LCB5E-LSD	$1.2D - 1.0E_x - 0.3E_y + 0.2SL$	
LCB6E-LSD	$1.2D - 1.0E_x + 0.3E_y + 0.2SL$	
LCB7E-LSD	$1.2D - 0.3E_x - 1.0E_y + 0.2SL$	
LCB8E-LSD	$1.2D + 0.3E_x - 1.0E_y + 0.2SL$	
LCB9E-LSD	$0.9D + 1.0E_x + 0.3E_y$	한계상태설계 하중조합 $0.9D \pm 1.0E$ $E = \pm 1.0E_x \pm 0.3E_y$ or $\pm 1.0E_y \pm 0.3E_x$
LCB10E-LSD	$0.9D + 1.0E_x - 0.3E_y$	
LCB11E-LSD	$0.9D + 0.3E_x + 1.0E_y$	
LCB12E-LSD	$0.9D - 0.3E_x + 1.0E_y$	
LCB13E-LSD	$0.9D - 1.0E_x - 0.3E_y$	
LCB14E-LSD	$0.9D - 1.0E_x + 0.3E_y$	
LCB15E-LSD	$0.9D - 0.3E_x - 1.0E_y$	
LCB16E-LSD	$0.9D + 0.3E_x - 1.0E_y$	

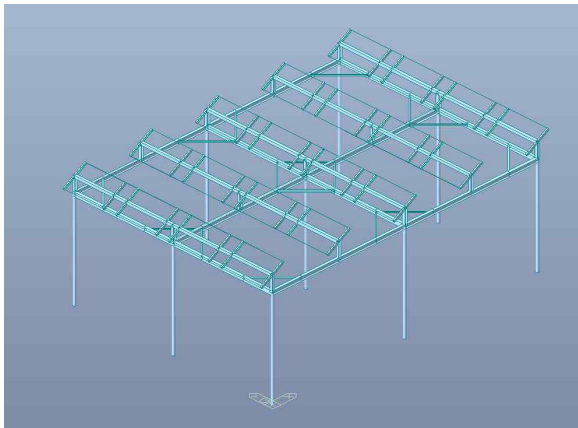
5.2 3차원 유한요소 모델 구축 및 구조해석

5.2.1 기본설계안 1 구조해석

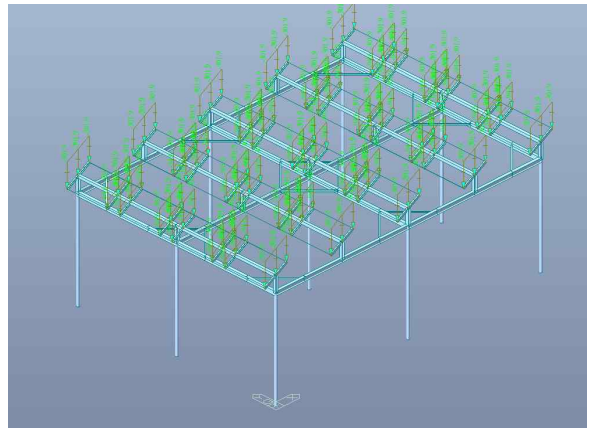
- 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1의 부재는 하부 기둥, 하부 보, 퍼린 (태양광 모듈 거치용 거더), 브레싱 (보강용 냉간성형강), 상부 기둥, 상부 보로 구성됨 (표 29).
- Midas Gen을 이용하여 기본설계안 1에 대한 구조해석 모델링을 수행하였으며, 적설하중은 -Z 방향으로 태양광 모듈에, 풍하중은 $\pm X$ 및 $\pm Y$ 방향으로 태양광 모듈 및 기둥에 작용하도록 하였음 (그림 33).
- 고정하중은 부재의 단위중량을 고려하여 -Z 방향으로 작용하도록 하였으며, 태양광 모듈에 작용하는 적설하중과 풍하중은 투영면적에 대해 작용하도록 설정하였음.

표 29 영농형 태양광 시스템 사용 부재

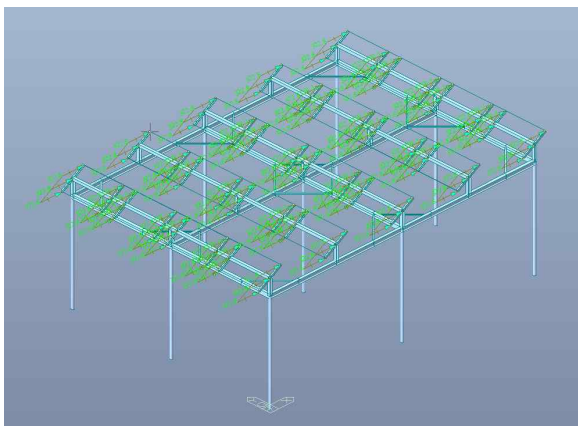
부재 이름	부재 규격	부재 재질
하부 기둥	ϕ -101.6×4.0t	SS275
하부 보	H-150×100×3.2×4.5t	SS275
퍼린	C-75×15×15×2.1t	SS275
브레싱	Γ -40×40×3t	SS275
상부 기둥	H-100×100×3.2×4.5t	SS275
상부 보	\square -100×100×2.9t	SS275



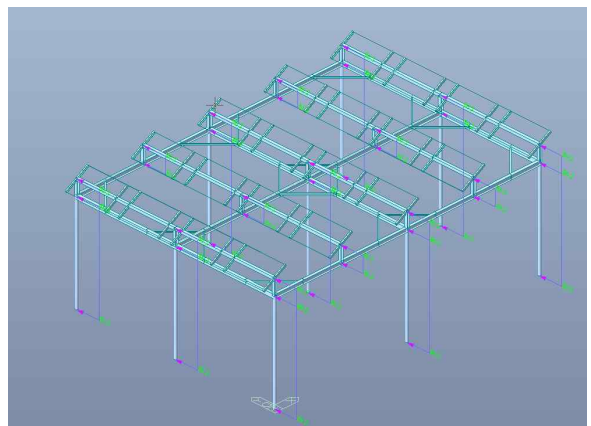
(a) 3차원 모델링



(b) 적설하중 재하



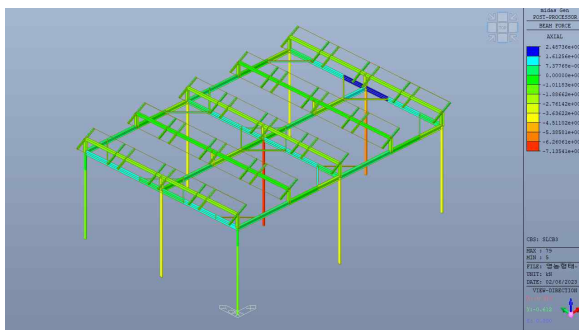
(c) 풍하중 재하 (+X 방향)



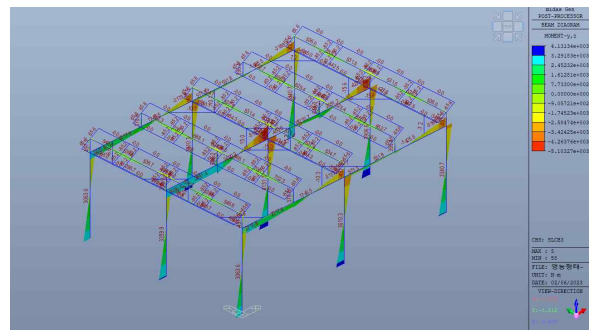
(d) 풍하중 재하 (+Y 방향)

그림 33 기본설계안 1 구조해석 모델링 및 하중 재하

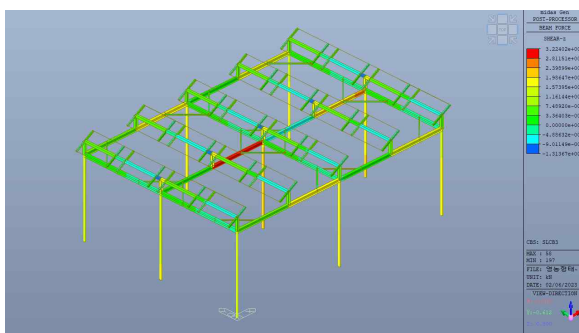
- 앞서 산정한 적설하중 및 풍하중에 대한 허용응력설계 및 한계상태설계 기반 하중조합을 바탕으로 구조해석을 수행하였으며, 각 부재에서 발생하는 하중조합별 최대 축력, 모멘트, 전단력을 결과는 그림 34-35 및 표 30-35와 같음.
- 하부 기둥의 경우, 다른 부재들보다 축력이 크게 발생하였으며, 특히 적설하중보다 X 방향으로 작용하는 풍하중에 의한 영향이 주요하였음.
- 하부 보의 경우, 다른 부재들보다 모멘트가 크게 발생하였으며, 특히 풍하중보다 Z 방향으로 작용하는 적설하중 및 고정하중의 영향이 주요한 것으로 나타남.
- 퍼린, 브레싱, 상부 기둥, 상부 보는 구조 보강 및 하중 전달의 역할을 수행하는 부재로서, 주요 부재인 하부 기둥 및 하부 보의 경우보다 현저히 작은 부재력이 발생하였음.
- 따라서 풍하중에 대한 구조물의 구조안전성은 하부 기둥에 의해 결정되며, 적설하중에 대한 구조안전성은 하부 보에 의해 결정되는 것으로 분석됨.
- 이때 큰 모멘트와 축력이 발생하여 구조물의 안전성을 결정하는 주요 부재인 하부 기둥 및 하부 보에서, 허용응력설계 적용 시에는 LCB7-ASD로 나타난 ‘고정하중 + 설하중 + 풍하중 (+X방향)’의 하중조합을 적용하였을 때, 한계상태설계 적용 시에는 LCB8-LSD로 나타난 하중조합 ($1.2D - 1.3WL(X) + 0.5SL$)에서 가장 큰 최대 축력과 최대 모멘트가 나타남.



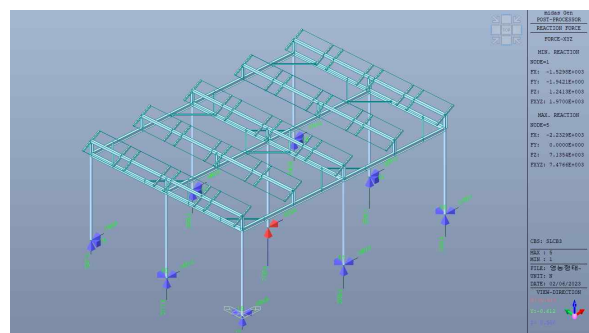
(a) 축력도



(b) 모멘트도

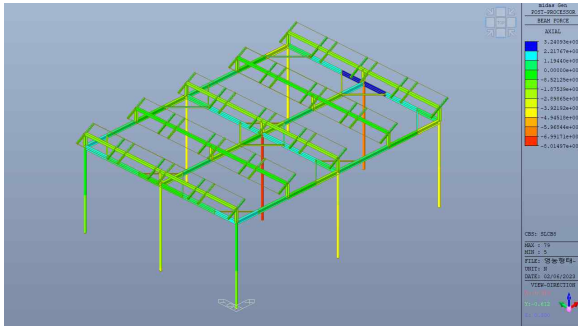


(c) 전단력도

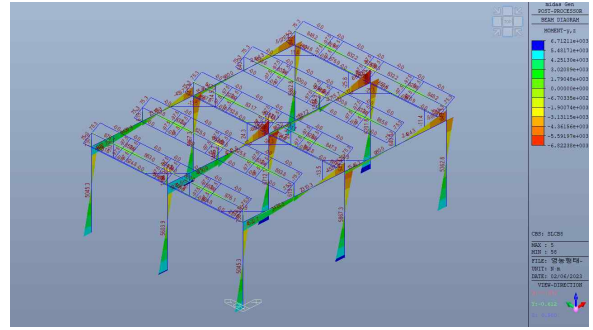


(d) 반력도

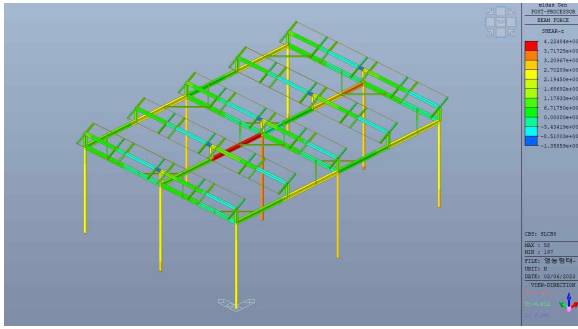
그림 34 기본설계안 1 구조해석 결과 (LCB7-ASD 적용 시)



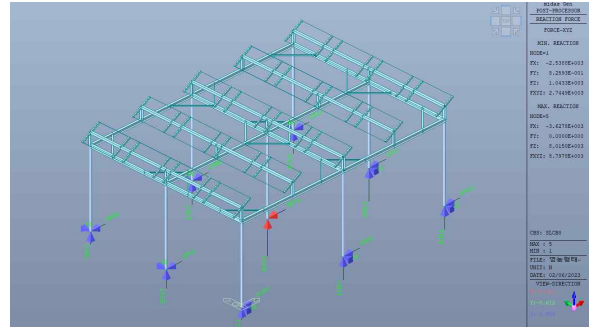
(a) 축력도



(b) 모멘트도



(c) 전단력도



(d) 반력도

그림 35 기본설계안 1 구조해석 결과 (LCB8-LSD 적용 시)

표 30 기본설계안 1 하부 기둥 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
하부 기둥	LCB1-ASD	-5.058	0.001	0.000	0.000	0.000	
	LCB2-ASD	-7.120	0.002	0.000	0.000	0.001	
	LCB3-ASD	-4.061	4.130	0.000	0.000	2.232	
	LCB4-ASD	-4.031	-4.128	0.000	0.000	-2.231	
	LCB5-ASD	-4.046	0.001	-0.497	-0.346	0.001	
	LCB6-ASD	-4.046	0.001	0.497	-0.346	0.001	
	LCB7-ASD	-7.135	4.131	0.000	0.000	2.233	
	LCB8-ASD	-7.105	-4.127	0.000	0.000	-2.231	
	LCB9-ASD	-7.120	0.002	-0.497	-0.346	0.001	
	LCB10-ASD	-7.120	0.002	0.497	0.346	0.001	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-7.081	0.002	0.000	0.000	0.000	
	LCB2-LSD	-12.230	3.359	0.000	0.000	1.815	
	LCB3-LSD	-12.218	0.004	-0.404	-0.281	0.002	
	LCB4-LSD	-12.206	-3.351	0.000	0.000	-1.811	
	LCB5-LSD	-12.218	0.004	0.404	0.281	0.002	
	LCB6-LSD	-8.015	6.712	0.000	0.000	3.628	
	LCB7-LSD	-7.991	0.002	-0.808	-0.562	0.001	
	LCB8-LSD	-7.966	-6.708	0.000	0.000	-3.625	
	LCB9-LSD	-7.991	0.002	0.808	0.562	0.001	
	LCB10-LSD	-4.576	6.711	0.000	0.000	3.627	
	LCB11-LSD	-4.552	0.001	-0.808	-0.562	0.001	
LCB12-LSD	-4.528	-6.709	0.000	0.000	-3.626		
LCB13-LSD	-4.552	0.001	0.808	0.562	0.001		

표 31 기본설계안 1 하부 보 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
하부 보	LCB1-ASD	-0.328	-1.819	0.000	0.000	1.225	
	LCB2-ASD	-0.522	-2.744	0.000	0.000	1.859	
	LCB3-ASD	0.018	-3.815	0.000	0.000	2.246	
	LCB4-ASD	-0.542	0.904	0.000	0.000	-0.286	
	LCB5-ASD	-0.262	-1.455	-0.003	0.009	0.980	
	LCB6-ASD	-0.262	-1.455	0.003	-0.009	0.980	
	LCB7-ASD	-0.242	-5.103	0.000	0.000	3.125	
	LCB8-ASD	-0.802	-0.385	0.000	0.000	0.593	
	LCB9-ASD	-0.522	-2.744	-0.003	0.009	1.859	
	LCB10-ASD	-0.522	-2.744	0.003	-0.009	1.859	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-0.459	-2.547	0.000	0.000	1.888	
	LCB2-LSD	-0.685	-6.677	0.000	0.000	4.405	
	LCB3-LSD	-0.913	-4.760	-0.003	0.007	3.377	
	LCB4-LSD	-1.140	-2.844	0.000	0.000	2.348	
	LCB5-LSD	-0.913	-4.760	0.003	-0.007	3.377	
	LCB6-LSD	-0.101	-6.822	0.000	0.000	4.225	
	LCB7-LSD	-0.556	-2.989	-0.005	0.014	2.168	
	LCB8-LSD	-1.011	0.894	0.000	0.000	0.111	
	LCB9-LSD	-0.556	-2.989	0.005	-0.014	2.168	
	LCB10-LSD	0.160	-5.471	0.000	0.000	3.271	
	LCB11-LSD	-0.295	-1.637	-0.005	0.014	1.214	
	LCB12-LSD	-0.750	2.196	0.000	0.000	-0.843	
LCB13-LSD	-0.295	-1.637	0.005	-0.014	1.214		

표 32 기본설계안 1 퍼린 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
퍼린	LCB1-ASD	0.052	0.024	0.002	-0.003	-0.089	
	LCB2-ASD	0.105	0.048	0.003	-0.006	-0.181	
	LCB3-ASD	-0.076	0.037	-0.027	0.051	-0.139	
	LCB4-ASD	0.159	0.001	0.030	-0.056	-0.004	
	LCB5-ASD	0.041	0.019	0.001	-0.002	-0.071	
	LCB6-ASD	0.041	0.019	0.002	-0.003	-0.071	
	LCB7-ASD	-0.013	0.066	-0.025	0.048	-0.249	
	LCB8-ASD	0.222	0.030	0.031	-0.059	-0.114	
	LCB9-ASD	0.105	0.048	0.002	-0.005	-0.181	
	LCB10-ASD	0.105	0.048	0.003	-0.007	-0.181	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	0.052	0.091	-0.042	-0.030	0.158	
	LCB2-LSD	0.117	0.120	-0.131	-0.037	0.497	
	LCB3-LSD	0.128	0.245	-0.112	-0.065	0.425	
	LCB4-LSD	0.139	0.371	-0.093	-0.092	0.352	
	LCB5-LSD	0.128	0.245	-0.112	-0.064	0.425	
	LCB6-LSD	0.079	-0.121	-0.098	0.017	0.371	
	LCB7-LSD	0.071	0.130	-0.059	-0.039	0.226	
	LCB8-LSD	0.093	0.381	-0.021	-0.093	0.081	
	LCB9-LSD	0.070	0.130	-0.059	-0.037	0.226	
	LCB10-LSD	0.072	-0.192	-0.065	0.036	0.247	
	LCB11-LSD	0.034	0.059	-0.027	-0.020	0.102	
	LCB12-LSD	0.071	0.310	0.011	-0.075	-0.043	
LCB13-LSD	0.033	0.059	-0.027	-0.019	0.102		

표 33 기본설계안 1 브레싱 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
브레싱	LCB1-ASD	-0.159	-0.005	0.001	0.001	-0.018	
	LCB2-ASD	-0.271	-0.003	0.001	0.002	-0.014	
	LCB3-ASD	-1.248	-0.017	0.007	0.012	-0.022	
	LCB4-ASD	0.993	0.010	-0.001	-0.010	-0.007	
	LCB5-ASD	-0.084	-0.004	0.001	0.001	-0.014	
	LCB6-ASD	-0.171	-0.004	0.000	0.001	-0.014	
	LCB7-ASD	-1.391	-0.016	0.007	0.013	-0.021	
	LCB8-ASD	0.849	0.009	-0.005	-0.009	-0.007	
	LCB9-ASD	-0.227	-0.003	0.002	0.003	-0.014	
	LCB10-ASD	-0.315	-0.003	0.000	0.002	-0.014	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-0.223	-0.005	0.006	0.002	-0.025	
	LCB2-LSD	-1.388	-0.006	0.015	0.013	-0.026	
	LCB3-LSD	-0.443	-0.002	0.005	0.004	-0.020	
	LCB4-LSD	0.432	0.006	-0.007	-0.005	-0.014	
	LCB5-LSD	-0.514	0.002	-0.005	0.003	-0.020	
	LCB6-LSD	-2.101	-0.011	0.026	0.020	-0.033	
	LCB7-LSD	-0.210	-0.003	0.006	0.003	-0.021	
	LCB8-LSD	1.540	0.013	0.013	-0.016	-0.010	
	LCB9-LSD	-0.352	-0.004	0.004	0.002	-0.021	
	LCB10-LSD	-1.964	-0.010	0.025	0.019	-0.028	
	LCB11-LSD	-0.072	-0.002	0.005	0.002	-0.016	
	LCB12-LSD	1.677	0.014	0.014	-0.017	-0.005	
LCB13-LSD	-0.214	-0.004	0.003	0.000	-0.016		

표 34 기본설계안 1 상부 기둥 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
상부 기둥	LCB1-ASD	-0.628	0.021	0.283	-0.685	0.005	
	LCB2-ASD	-1.084	0.036	0.473	-1.066	0.009	
	LCB3-ASD	-0.545	0.442	-0.109	-0.603	0.664	
	LCB4-ASD	-0.548	-0.404	-0.091	-0.493	-0.656	
	LCB5-ASD	-0.514	0.017	0.248	-0.528	0.004	
	LCB6-ASD	-0.492	0.017	0.206	-0.569	0.004	
	LCB7-ASD	-1.082	0.079	0.497	-1.121	0.669	
	LCB8-ASD	-1.085	-0.006	0.449	-1.011	-0.651	
	LCB9-ASD	-1.095	0.036	0.494	-1.046	0.009	
	LCB10-ASD	-1.073	0.036	0.452	-1.087	0.009	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-0.880	0.030	0.397	-0.959	0.007	
	LCB2-LSD	-1.915	0.098	0.852	-1.903	0.518	
	LCB3-LSD	-1.925	0.064	0.850	-1.808	0.015	
	LCB4-LSD	-1.917	0.029	0.814	-1.813	-0.488	
	LCB5-LSD	-1.907	0.064	0.816	-1.908	0.015	
	LCB6-LSD	-1.115	0.106	0.533	-1.236	1.015	
	LCB7-LSD	-1.135	0.037	0.528	-1.046	0.009	
	LCB8-LSD	-1.120	-0.032	0.455	-1.056	-0.997	
	LCB9-LSD	-1.100	0.038	0.460	-1.246	0.009	
	LCB10-LSD	-0.612	0.709	-0.127	-0.707	1.011	
	LCB11-LSD	-0.583	0.019	0.289	-0.517	0.005	
	LCB12-LSD	-0.617	-0.666	-0.097	-0.527	-1.001	
LCB13-LSD	-0.548	0.019	0.221	-0.717	0.005		

표 35 기본설계안 1 상부 보 구조해석 결과

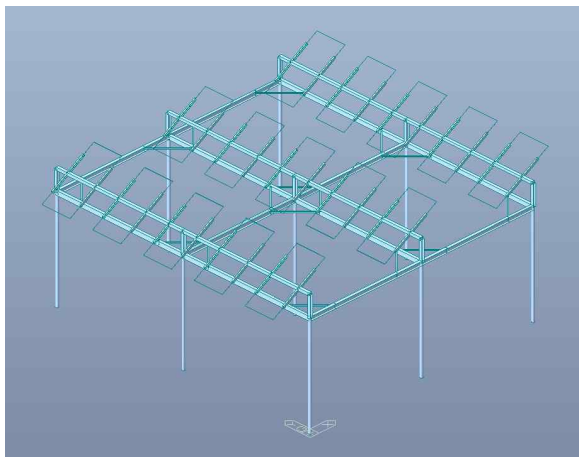
부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
상부 보	LCB1-ASD	-0.230	0.379	0.008	-0.004	0.244	
	LCB2-ASD	-0.392	0.669	0.014	-0.006	0.495	
	LCB3-ASD	-0.136	0.336	0.523	0.337	0.183	
	LCB4-ASD	-0.232	0.270	-0.510	-0.342	0.208	
	LCB5-ASD	-0.179	0.302	0.006	-0.003	0.200	
	LCB6-ASD	-0.189	0.305	0.007	-0.003	0.191	
	LCB7-ASD	-0.344	0.702	0.530	0.334	0.483	
	LCB8-ASD	-0.440	0.636	-0.503	-0.346	0.508	
	LCB9-ASD	-0.387	0.668	0.013	-0.006	0.500	
	LCB10-ASD	-0.397	0.671	0.014	-0.006	0.491	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-0.957	-0.665	-0.050	0.007	1.001	
	LCB2-LSD	-1.883	-1.459	-0.307	0.603	2.207	
	LCB3-LSD	-1.903	-1.462	-0.108	0.016	2.213	
	LCB4-LSD	-1.822	-1.426	0.091	-0.572	2.203	
	LCB5-LSD	-1.803	-1.424	-0.108	0.016	2.196	
	LCB6-LSD	-1.203	-0.876	-0.461	1.184	1.283	
	LCB7-LSD	-1.243	-0.881	-0.063	0.009	1.297	
	LCB8-LSD	-1.082	-0.809	0.335	-1.166	1.275	
	LCB9-LSD	-1.043	-0.804	-0.063	0.009	1.261	
	LCB10-LSD	-0.676	-0.460	-0.430	1.180	0.648	
	LCB11-LSD	-0.715	-0.465	-0.032	0.005	0.661	
	LCB12-LSD	-0.554	-0.394	0.366	-1.170	0.639	
LCB13-LSD	-0.515	-0.389	-0.032	0.005	0.626		

5.2.2 기본설계안 2 구조해석

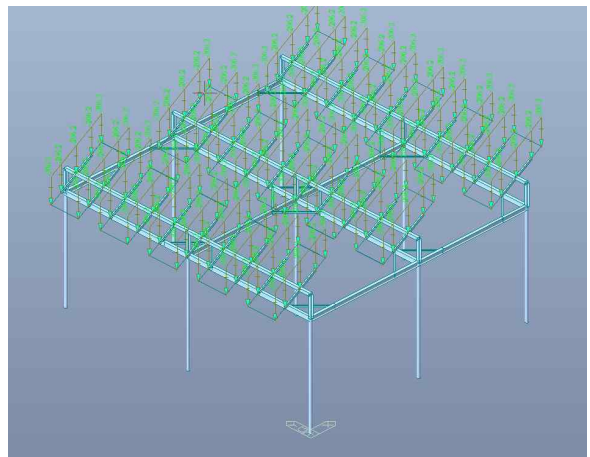
- 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1의 부재는 하부 기둥, 하부 보, 퍼린 (태양광 모듈 거치용 거더), 브레싱 (보강용 냉간성형강), 상부 기둥, 상부 보로 구성됨 (표 36).
- Midas Gen을 이용하여 기본설계안 2에 대한 구조해석 모델링을 수행하였으며, 적설하중은 -Z 방향으로 태양광 모듈에, 풍하중은 $\pm X$ 및 $\pm Y$ 방향으로 태양광 모듈 및 기둥에 작용하도록 하였음 (그림 36).
- 고정하중은 부재의 단위중량을 고려하여 -Z 방향으로 작용하도록 하였으며, 태양광 모듈에 작용하는 적설하중과 풍하중은 투영면적에 대해 작용하도록 설정하였음.

표 36 영농형 태양광 시스템 사용 부재

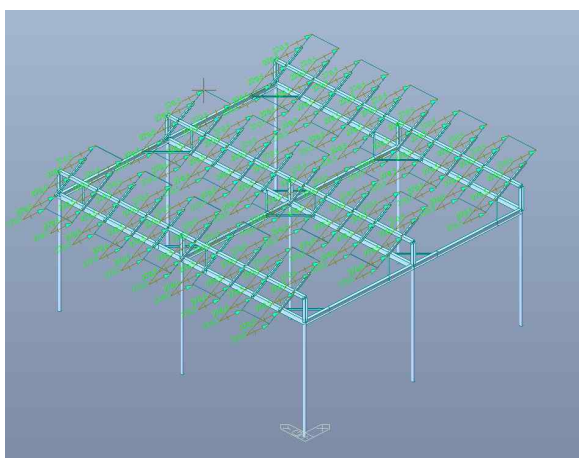
부재 이름	부재 규격	부재 재질
하부 기둥	\emptyset -101.6×4.0t	SS275
하부 보	H-150×100×3.2×4.5t	SS275
퍼린	C-75×45×15×2.1t	SS275
브레싱	ㄱ-40×40×3t	SS275
상부 기둥	H-100×100×3.2×4.5t	SS275
상부 보	□-100×100×2.9t	SS275



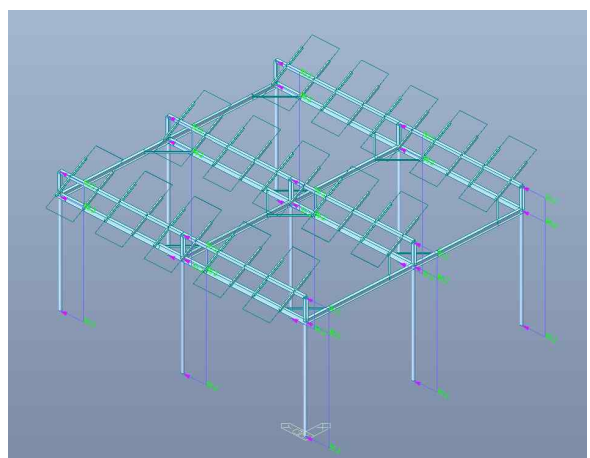
(a) 3차원 모델링



(b) 적설하중 재하



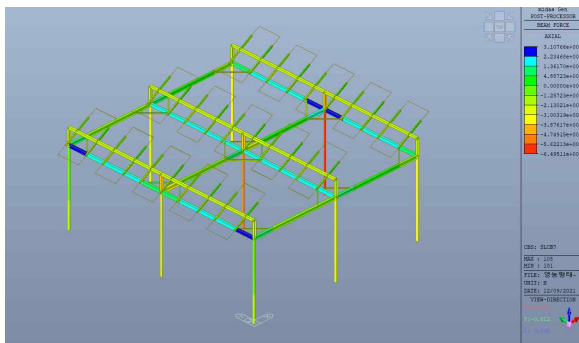
(c) 풍하중 재하 (+X 방향)



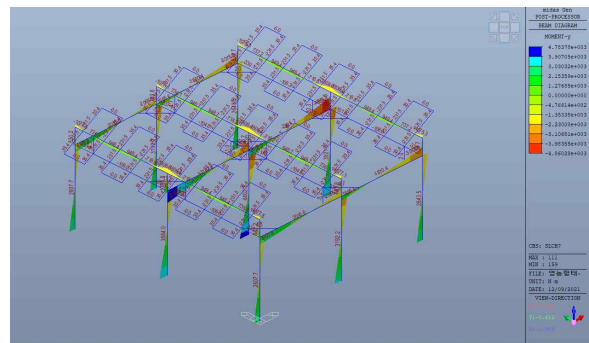
(d) 풍하중 재하 (+Y 방향)

그림 36 기본설계안 2 구조해석 모델링 및 하중 재하

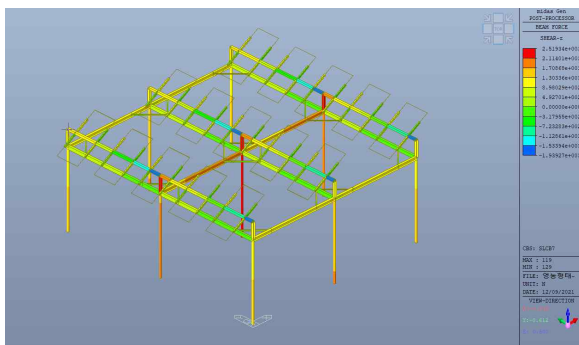
- 앞서 산정한 적설하중 및 풍하중에 대한 허용응력설계 및 한계상태설계 기반 하중조합을 바탕으로 구조해석을 수행하였으며, 각 부재에서 발생하는 하중조합별 최대 축력, 모멘트, 전단력을 분석한 결과는 그림 37-38 및 표 37-42와 같음.
- 하부 기둥의 경우, 기본설계안 1에서와 같이 다른 부재들보다 축력이 크게 발생하였으며, 특히 적설하중보다 X 방향으로 작용하는 풍하중에 의한 영향이 주요하였음.
- 하부 보의 경우, 다른 부재들보다 모멘트가 크게 발생하였으며, 특히 풍하중보다 Z 방향으로 작용하는 적설하중 및 고정하중의 영향이 주요한 것으로 나타남.
- 퍼린, 브레싱, 상부 기둥, 상부 보는 구조 보강 및 하중 전달의 역할을 수행하는 부재로서, 주요 부재인 하부 기둥 및 하부 보의 경우보다 작은 부재력이 발생하였음.
- 따라서 풍하중에 대한 구조물의 구조안전성은 하부 기둥에 의해 결정되며, 적설하중에 대한 구조안전성은 하부 보에 의해 결정되는 것으로 분석됨.
- 이때 큰 모멘트와 축력이 발생하여 구조물의 안전성을 결정하는 주요 부재인 하부 기둥 및 하부 보에서, 허용응력설계 적용 시, LCB7-ASD로 나타난 ‘고정하중 + 설하중 + 풍하중 (+X방향)’의 하중조합을 적용하였을 때, 한계상태설계 적용 시, LCB8-LSD로 나타난 하중 조합 (1.2D + 1.3WL(X) + 0.5SL)에서 가장 큰 최대 축력과 최대 모멘트가 나타남.



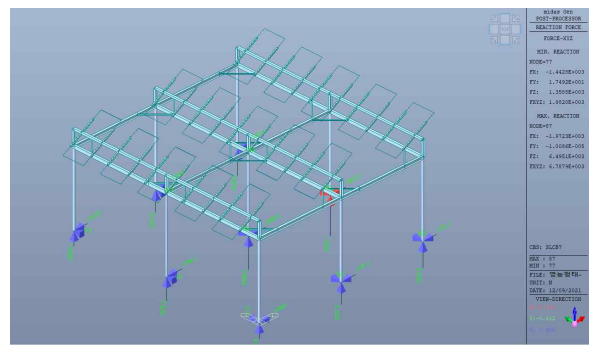
(a) 축력도



(b) 모멘트도

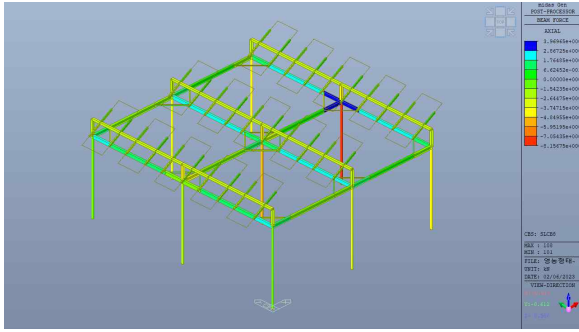


(c) 전단력도

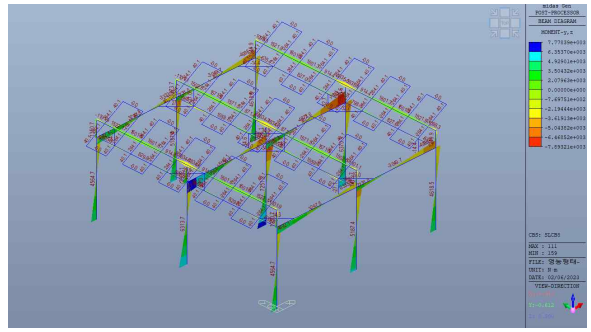


(d) 반력도

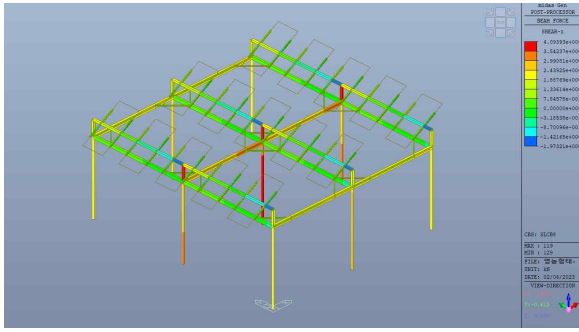
그림 37 기본설계안 2 구조해석 결과 (LCB7-ASD 적용 시)



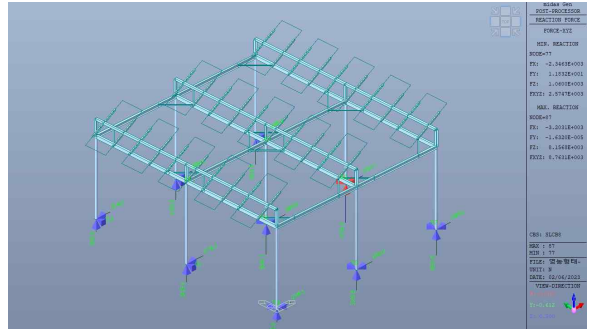
(a) 축력도



(b) 모멘트도



(c) 전단력도



(d) 반력도

그림 38 기본설계안 2 구조해석 결과 (LCB8-LSD 적용 시)

표 37 기본설계안 2 하부 기둥 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
하부 기둥	LCB1-ASD	-3.796	0.000	0.000	0.000	0.000	
	LCB2-ASD	-5.099	0.000	0.000	0.000	0.000	
	LCB3-ASD	-3.037	4.462	0.000	0.000	2.400	
	LCB4-ASD	-3.037	-4.462	0.000	0.000	-2.400	
	LCB5-ASD	-3.037	0.000	-0.461	-0.326	0.000	
	LCB6-ASD	-3.037	0.000	0.461	0.326	0.000	
	LCB7-ASD	-5.099	4.462	0.000	0.000	2.400	
	LCB8-ASD	-5.099	-4.462	0.000	0.000	-2.400	
	LCB9-ASD	-5.099	0.000	-0.461	-0.326	0.000	
	LCB10-ASD	-5.099	0.000	0.461	0.326	0.000	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-5.315	0.000	0.000	0.000	0.000	
	LCB2-LSD	-8.679	3.626	0.000	0.000	1.950	
	LCB3-LSD	-8.679	0.000	-0.374	-0.265	0.000	
	LCB4-LSD	-8.679	-3.626	0.000	0.000	-1.950	
	LCB5-LSD	-8.679	0.000	0.374	0.265	0.000	
	LCB6-LSD	-5.844	7.251	0.000	0.000	3.901	
	LCB7-LSD	-5.844	0.000	-0.749	-0.530	0.000	
	LCB8-LSD	-5.844	-7.251	0.000	0.000	-3.901	
	LCB9-LSD	-5.844	0.000	0.749	0.530	0.000	
	LCB10-LSD	-3.417	7.251	0.000	0.000	3.901	
	LCB11-LSD	-3.417	0.000	-0.749	-0.530	0.000	
LCB12-LSD	-3.417	-7.251	0.000	0.000	-3.901		
LCB13-LSD	-3.417	0.000	0.749	0.530	0.000		

표 38 기본설계안 2 하부 보 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
하부 보	LCB1-ASD	-0.024	-0.048	0.000	0.000	0.217	
	LCB2-ASD	-0.024	-0.038	0.000	0.000	0.173	
	LCB3-ASD	2.189	-4.860	0.000	0.000	1.939	
	LCB4-ASD	-2.228	4.784	0.000	0.000	-1.593	
	LCB5-ASD	-0.019	-0.038	0.000	0.000	0.173	
	LCB6-ASD	-0.019	-0.038	0.000	0.000	0.173	
	LCB7-ASD	2.184	-4.860	0.000	0.000	1.939	
	LCB8-ASD	-2.233	4.784	0.000	0.000	-1.593	
	LCB9-ASD	-0.024	-0.038	0.000	0.000	0.173	
	LCB10-ASD	-0.024	-0.038	0.000	0.000	0.173	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-0.034	0.163	0.000	0.000	0.158	
	LCB2-LSD	1.755	-3.975	0.000	0.000	1.694	
	LCB3-LSD	-0.039	0.139	0.000	0.000	0.134	
	LCB4-LSD	-1.833	3.861	0.000	0.000	-1.176	
	LCB5-LSD	-0.039	0.139	0.000	0.000	0.134	
	LCB6-LSD	3.556	-7.893	0.000	0.000	3.129	
	LCB7-LSD	-0.032	0.140	0.000	0.000	0.135	
	LCB8-LSD	-3.621	7.778	0.000	0.000	-2.610	
	LCB9-LSD	-0.032	0.140	0.000	0.000	0.135	
	LCB10-LSD	3.567	-7.879	0.000	0.000	3.065	
	LCB11-LSD	-0.022	0.105	0.000	0.000	0.101	
	LCB12-LSD	-3.610	7.793	0.000	0.000	-2.675	
LCB13-LSD	-0.022	0.105	0.000	0.000	0.101		

표 39 기본설계안 2 퍼린 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
퍼린	LCB1-ASD	0.053	-0.079	0.079	0.000	0.000	
	LCB2-ASD	0.113	-0.1632	0.167	0.000	0.000	
	LCB3-ASD	0.087	0.121	0.127	0.000	0.000	
	LCB4-ASD	0.004	-0.2481	-0.001	0.000	0.000	
	LCB5-ASD	0.043	-0.0636	0.063	0.000	0.000	
	LCB6-ASD	0.043	-0.0636	0.063	0.000	0.000	
	LCB7-ASD	0.155	0.02134	0.232	0.000	0.000	
	LCB8-ASD	0.072	-0.3478	0.103	0.000	0.000	
	LCB9-ASD	0.113	-0.1632	0.167	0.000	0.000	
	LCB10-ASD	0.113	-0.1632	0.167	0.000	0.000	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	0.075	0.111	0.110	0.000	0.000	
	LCB2-LSD	0.240	0.145	0.355	0.000	0.000	
	LCB3-LSD	0.207	0.295	0.303	0.000	0.000	
	LCB4-LSD	0.175	0.445	0.251	0.000	0.000	
	LCB5-LSD	0.207	0.295	0.303	0.000	0.000	
	LCB6-LSD	0.178	-0.142	0.264	0.000	0.000	
	LCB7-LSD	0.109	0.158	0.160	0.000	0.000	
	LCB8-LSD	0.044	0.458	0.055	0.000	0.000	
	LCB9-LSD	0.109	0.158	0.160	0.000	0.000	
	LCB10-LSD	0.120	-0.228	0.175	0.000	0.000	
	LCB11-LSD	0.048	0.071	0.071	0.000	0.000	
	LCB12-LSD	0.028	0.371	-0.034	0.000	0.000	
LCB13-LSD	0.048	0.071	0.071	0.000	0.000		

표 40 기본설계안 2 브레싱 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
브레싱	LCB1-ASD	0.004	-0.005	0.000	0.000	0.016	
	LCB2-ASD	0.008	-0.004	0.000	0.000	0.013	
	LCB3-ASD	1.426	0.013	-0.008	0.019	0.001	
	LCB4-ASD	-1.419	-0.021	0.008	-0.018	0.024	
	LCB5-ASD	0.004	-0.004	0.000	0.000	0.013	
	LCB6-ASD	0.004	-0.004	0.000	0.000	0.013	
	LCB7-ASD	1.430	0.013	-0.008	0.019	0.001	
	LCB8-ASD	-1.415	-0.020	0.008	-0.018	0.024	
	LCB9-ASD	0.008	-0.004	0.000	0.000	0.013	
	LCB10-ASD	0.008	-0.004	0.000	0.000	0.013	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	0.006	-0.005	0.005	0.000	0.232	
	LCB2-LSD	1.169	0.010	0.010	0.015	-0.021	
	LCB3-LSD	0.013	-0.004	0.004	0.000	0.019	
	LCB4-LSD	-1.143	-0.009	0.018	-0.015	0.028	
	LCB5-LSD	0.013	-0.004	0.004	0.000	0.019	
	LCB6-LSD	2.319	0.021	0.020	0.030	-0.030	
	LCB7-LSD	0.008	-0.004	0.004	0.000	0.019	
	LCB8-LSD	-2.304	-0.014	0.033	-0.030	0.038	
	LCB9-LSD	0.008	-0.004	0.004	0.000	0.019	
	LCB10-LSD	2.316	0.021	0.020	0.030	-0.027	
	LCB11-LSD	0.004	-0.003	0.003	0.000	0.014	
	LCB12-LSD	-2.308	-0.013	0.032	-0.030	0.033	
LCB13-LSD	0.004	-0.003	0.003	0.000	0.014		

표 41 기본설계안 2 상부 기둥 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
상부 기둥	LCB1-ASD	-0.944	0.000	0.611	-1.090	0.000	
	LCB2-ASD	-1.679	0.000	1.076	-1.830	0.000	
	LCB3-ASD	-0.755	0.090	0.490	-0.877	0.906	
	LCB4-ASD	-0.755	-0.090	0.487	-0.867	-0.906	
	LCB5-ASD	-0.764	0.000	0.509	-0.829	0.000	
	LCB6-ASD	-0.747	0.000	0.468	-0.915	0.000	
	LCB7-ASD	-1.679	0.090	1.078	-1.835	0.906	
	LCB8-ASD	-1.679	-0.090	1.075	-1.825	-0.906	
	LCB9-ASD	-1.687	0.000	1.097	-1.787	0.000	
	LCB10-ASD	-1.670	0.000	1.056	-1.873	0.000	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-1.322	0.000	0.855	-1.526	0.000	
	LCB2-LSD	-2.980	0.074	1.909	-3.228	0.781	
	LCB3-LSD	-2.987	0.000	1.925	-3.189	0.000	
	LCB4-LSD	-2.980	-0.073	1.908	-3.220	-0.736	
	LCB5-LSD	-2.973	0.000	1.892	-3.259	0.000	
	LCB6-LSD	-1.710	0.147	1.102	-1.915	1.472	
	LCB7-LSD	-1.724	0.000	1.134	-1.837	0.000	
	LCB8-LSD	-1.710	-0.146	1.098	-1.899	-1.472	
	LCB9-LSD	-1.696	0.000	1.067	-1.976	0.000	
	LCB10-LSD	-0.915	1.351	-0.234	-0.989	1.561	
	LCB11-LSD	-0.864	0.000	0.583	-0.911	0.000	
	LCB12-LSD	-0.915	-1.350	-0.225	-0.973	-1.561	
LCB13-LSD	-0.836	0.000	0.516	-1.050	0.000		

표 42 기본설계안 2 상부 보 구조해석 결과

부재	Load case	F_x (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_y (kN)	F_z (kN)	
	허용응력설계법 (ASD)						
상부 보	LCB1-ASD	-1.096	-1.008	0.000	0.000	1.087	
	LCB2-ASD	-1.836	-1.806	0.000	0.000	1.939	
	LCB3-ASD	-0.877	-0.806	-0.899	1.232	0.869	
	LCB4-ASD	-0.877	-0.806	0.899	-1.232	0.869	
	LCB5-ASD	-0.919	-0.829	0.000	0.000	0.878	
	LCB6-ASD	-0.834	-0.783	0.000	0.000	0.861	
	LCB7-ASD	-1.836	-1.806	-0.899	1.232	1.939	
	LCB8-ASD	-1.836	-1.806	0.899	-1.232	1.939	
	LCB9-ASD	-1.878	-1.829	0.000	0.000	1.947	
	LCB10-ASD	-1.793	-1.783	0.000	0.000	1.930	
	한계상태설계법 (LSD)						
	LCB1-LSD	-1.534	-1.411	0.000	0.000	1.522	
	LCB2-LSD	-3.233	-3.210	-0.730	1.001	3.443	
	LCB3-LSD	-3.267	-3.229	0.000	0.000	3.450	
	LCB4-LSD	-3.233	-3.210	0.730	-1.001	3.443	
	LCB5-LSD	-3.198	-3.191	0.000	0.000	3.436	
	LCB6-LSD	-1.914	-1.835	-1.461	2.002	1.973	
	LCB7-LSD	-1.984	-1.872	0.000	0.000	1.986	
	LCB8-LSD	-1.914	-1.835	1.461	-2.002	1.973	
	LCB9-LSD	-1.845	-1.797	0.000	0.000	1.959	
	LCB10-LSD	-0.986	-0.907	-1.461	2.002	0.978	
	LCB11-LSD	-1.056	-0.944	0.000	0.000	0.992	
	LCB12-LSD	-0.986	-0.907	1.461	-2.002	0.978	
LCB13-LSD	-0.917	-0.869	0.000	0.000	0.964		

5.3 부재 단면 검토 및 구조안전성 평가

5.3.1 기본설계안 1 부재 단면 검토

- 영농형 태양광 시스템의 구조안전성을 평가하기 위해 허용응력설계 및 한계상태설계 기반의 부재 단면 검토를 모든 부재에 대해 수행하였으며, 기본설계안 1에 관한 구조안전성 평가를 시행함 (표 43-44).
- 구조해석 결과에서 큰 축력과 휨응력이 발생하였던 주요 부재 (하부 기둥 및 하부 보) 뿐만 아니라, 모든 부재의 단면에 대해 주어진 하중 및 하중조합에 대해 허용응력설계 및 한계상태설계를 검토한 결과 안전한 것으로 평가되었음.
- 허용응력설계의 경우, 허용응력 대비 발생응력의 비율인 응력비가 가장 크게 발생한 부재는 하부 기둥으로, 압축과 휨에 관한 합성응력에 대해 0.860의 응력비가 나타남.
- 한계상태설계의 경우, 설계강도 대비 소요강도의 비율인 강도비가 가장 크게 발생한 부재는 하부 기둥으로, 압축력과 휨모멘트에 관한 조합력에 대해 0.737의 강도비가 나타남.
- 이에 따라 하부 기둥 부재에 관한 주요 설계 변수 변경을 통해 영농형 태양광 시스템 구조물의 설계 및 최적화가 가능할 것으로 판단됨.
- 허용응력설계 결과, 하부 보의 경우 합성응력에 대해 0.390, 브레싱의 경우 합성응력에 대해 0.389, 퍼린의 경우 합성응력에 대해 0.081, 상부 기둥의 경우 합성응력에 대해 0.182, 상부 보의 경우 합성응력에 대해 0.213의 응력비가 각각 도출됨.
- 한계상태설계 결과, 하부 보의 경우 조합력에 대해 0.344, 브레싱의 경우 조합력에 대해 0.192, 퍼린의 경우 조합력에 대해 0.081, 상부 기둥의 경우 조합력에 대해 0.166, 상부 보의 경우 조합력에 대해 0.179의 강도비가 각각 도출됨.

표 43 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 부재 단면 검토 결과 요약 (ASD)

부재	검토사항	해석 응력 결과 (MPa)	허용응력 (MPa)	Ratio	판정
하부 기둥	축방향 압축응력	5.820	85.911	0.068	O.K
	휨응력 (M_y)	143.748	181.500	0.792	O.K
	휨응력 (M_z)	0.000	165.000	0.000	O.K
	합성응력*	0.860	1.000	0.860	O.K
	전단응력	1.821	110.000	0.017	O.K
하부 보	축방향 압축응력	0.179	138.965	0.001	O.K
	휨응력 (M_y)	69.464	178.740	0.389	O.K
	휨응력 (M_z)	0.000	165.000	0.000	O.K
	합성응력*	0.390	1.000	0.390	O.K
	전단응력	6.717	110.000	0.061	O.K
브레싱	축방향 압축응력	5.955	23.947	0.249	O.K
	휨응력 (M_y)	17.737	165.000	0.107	O.K
	휨응력 (M_z)	20.042	158.994	0.126	O.K
	합성응력*	0.389	1.000	0.389	O.K
	전단응력	0.261	110.000	0.002	O.K
퍼린 (냉간 형성 채널)	축방향 압축응력	0.013 (kN)	137.075 (kN)	0.000	O.K
	휨응력 (FBC)	0.066 (kN·m)	1.523 (kN·m)	0.043	O.K
	휨응력 (FBT)	0.025 (kN·m)	0.669 (kN·m)	0.038	O.K
	합성응력*	0.081	1.000	0.081	O.K
	전단응력	0.045	1.000	0.045	O.K
상부 기둥	축방향 압축응력	0.909	155.261	0.006	O.K
	휨응력 (M_y)	1.747	178.740	0.010	O.K
	휨응력 (M_z)	33.138	199.351	0.166	O.K
	합성응력*	0.182	1.000	0.182	O.K
	전단응력	2.090	110.000	0.019	O.K
상부 보	축방향 압축응력	0.305	144.738	0.002	O.K
	휨응력 (M_y)	19.822	165.000	0.120	O.K
	휨응력 (M_z)	14.969	165.000	0.091	O.K
	합성응력*	0.213	1.000	0.213	O.K
	전단응력	1.031	110.000	0.009	O.K

* 합성응력의 경우 압축과 휨에 관한 응력비로 계산

표 44 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 부재 단면 검토 결과 요약 (LSD)

부재	검토사항	소요강도	설계강도	Ratio	판정
하부 기둥	축방향 압축력 (kN)	8.015	154.691	0.052	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	6.712	9.436	0.711	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.000	9.436	0.000	O.K
	조합력*	0.737	1.000	0.737	O.K
	전단력 (kN)	3.627	91.030	0.040	O.K
하부 보	축방향 압축력 (kN)	0.101	290.341	0.000	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	6.822	19.815	0.344	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.000	5.523	0.000	O.K
	조합력*	0.344	1.000	0.344	O.K
	전단력 (kN)	4.224	71.280	0.062	O.K
브레싱	축방향 압축력 (kN)	2.101	11.559	0.182	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	0.010	0.478	0.023	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.026	0.336	0.078	O.K
	조합력*	0.192	1.000	0.192	O.K
	전단력 (kN)	0.032	17.820	0.002	O.K
퍼린 (냉간 형성 채널)	축방향 압축력 (kN)	0.013	137.075	0.000	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	0.066	1.523	0.043	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.025	0.669	0.038	O.K
	조합력*	0.081	1.000	0.081	O.K
	전단력 (kN)	0.045	1.000	0.045	O.K
상부 기둥	축방향 압축력 (kN)	1.915	285.311	0.007	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	0.098	12.112	0.008	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.852	5.515	0.155	O.K
	조합력*	0.166	1.000	0.166	O.K
	전단력 (kN)	1.080	47.52	0.023	O.K
상부 보	축방향 압축력 (kN)	1.883	278.109	0.007	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	1.459	10.060	0.145	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.306	10.060	0.030	O.K
	조합력*	0.179	1.000	0.179	O.K
	전단력 (kN)	2.206	78.636	0.028	O.K

* 조합력의 경우 압축력과 휨모멘트의 소요/설계강도의 비율로 계산

5.3.1.1 기본설계안 1 주요 부재 (하부 기둥) 단면 검토

- 특히 큰 최대 축력 및 최대 휨모멘트가 발생하였던 주요 부재인 하부 기둥에 관한 허용응력설계 기반의 부재 단면 검토 상세 결과는 다음과 같으며, 구조안전성을 확인함.

① 단면 제원

- 기본설계안 1 하부 기둥에 이용된 지름 101.6 mm, 두께 4.0 mm의 강관 부재 단면 제원은 아래의 표와 같으며, 210,000 MPa의 탄성계수와 275 MPa 항복강도를 가짐.

표 45 기본설계안 1 하부 기둥 단면 제원

부재 규격	∅-101.6×4.0t	부재 재질	SS275
단면적 (A)	1,226 mm ²	전단면적 (A_s)	613 mm ²
단면2차모멘트 (I_{yy})	1,460,000 mm ⁴	단면2차모멘트 (I_{zz})	1,460,000 mm ⁴
단면2차 반경 (r_y)	34.5 mm	단면2차반경 (r_z)	34.5 mm
탄성계수 (E)	210,000 MPa	항복강도 (F_y)	275 MPa

② 세장비

- 좌굴 길이 계수 K : 1
- 좌굴 길이 L : 3,800 mm
- 단면 회전 반경 r : 34.5 mm
- 세장비 검토

$$KL/r = 110.1 < 200.0 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

③ 축방향 압축응력

- 한계 세장비

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_s}{F_y}} = 122.77$$

- 허용 압축응력

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} = 85.911 \text{ MPa } (\because KL/r < C_c)$$

- 압축응력 검토

$$f_c = F_x/A = 5.820 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_c}{F_c} = 0.068 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

④ 휨응력

- 허용 휨응력

$$F_b = 0.66 \times F_y = 181.5 \text{ MPa}$$

- 휨응력 검토

$$f_{by} = \frac{M_y \cdot y}{I_{yy}} = -143.748 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_{by}}{F_b} = 0.792 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑤ 합성응력 (축력, 휨)

- 합성응력 검토

$$\frac{f_c}{F_c} < 0.15$$

$$R_{\max} = \frac{f_c}{F_c} + \sqrt{\left(\frac{f_{by}}{F_{by}}\right)^2 + \left(\frac{f_{bz}}{F_{bz}}\right)^2} = 0.860 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑥ 전단응력

- 허용 전단응력

$$F_v = 0.40 \times F_y = 110 \text{ MPa}$$

- 전단응력 검토

$$F_{vv} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} = 2.233 \text{ kN}$$

$$f_v = F_{vv} / A = 1.821 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_v}{F_v} = 0.017 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

5.3.1.2 기본설계안 1 주요 부재 (하부 보) 단면 검토

- 큰 최대 축력 및 최대 휨모멘트가 발생하였던 주요 부재인 하부 보에 관한 허용응력설계 기반의 부재 단면 검토 상세 결과는 다음과 같으며, 구조안전성을 확인함.

① 단면 제원

- 기본설계안 1 하부 보에 이용된 H-beam 부재 단면 제원은 아래의 표와 같으며, 210,000 MPa의 탄성계수와 275 MPa 항복강도를 가짐.

표 46 기본설계안 1 하부 보 단면 제원

부재 규격	H-150×100×3.2×4.5t	부재 재질	SS275
단면적 (A)	1,351 mm ²	전단면적 (A_{sz})	480 mm ²
단면2차모멘트 (I_{yy})	5,510,000 mm ⁴	단면2차모멘트 (I_{zz})	750,000 mm ⁴
단면2차 반경 (r_y)	63.9 mm	단면2차반경 (r_z)	23.6 mm
탄성계수 (E)	210,000 MPa	항복강도 (F_y)	275 MPa

② 세장비

- 좌굴 길이 계수 K : 1
- 좌굴 길이 L : 1,190 mm
- 단면 회전 반경 r : 23.6 mm
- 세장비 검토

$$KL/r = 50.4 < 200.0 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

③ 축방향 압축응력

- 한계 세장비

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_s}{F_y}} = 122.77$$

- 허용 압축응력

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} = 138.965 \text{ MPa } (\because KL/r < C_c)$$

- 압축응력 검토

$$f_c = F_x/A = -0.179 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_c}{F_c} = 0.001 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

④ 휨응력

- 허용 휨응력

$$F_b = F_y \left[0.79 - 0.00076 \left(\frac{b_f}{2t_f} \right) \sqrt{F_y} \right] = 178.740 \text{ MPa } (\because \text{비조밀 단면})$$

- 휨응력 검토

$$f_{by} = \frac{M_y \cdot y}{I_{yy}} = -69.464 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_{by}}{F_b} = 0.389 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑤ 합성응력 (축력, 휨)

- 합성응력 검토

$$\frac{f_c}{F_c} < 0.15$$

$$R_{\max} = \frac{f_c}{F_c} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} = 0.390 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑥ 전단응력

- 허용 전단응력

$$F_v = 0.40 \times F_y = 110 \text{ MPa}$$

- 전단응력 검토

$$F_z = 3.224 \text{ kN}$$

$$f_v = F_z / A_{sz} = 6.717 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_v}{F_v} = 0.061 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

5.3.2 기본설계안 2 부재 단면 검토

- 영농형 태양광 시스템의 구조안전성을 평가하기 위해 허용응력설계 및 한계상태설계 기반의 부재 단면 검토를 모든 부재에 대해 수행하였으며, 기본설계안 2에 관한 구조안전성 평가를 시행함 (표 47-48).
- 구조해석 결과에서 큰 축력과 휨응력이 발생하였던 주요 부재 (하부 기둥 및 하부 보) 뿐만 아니라, 모든 부재의 단면에 대해 주어진 하중 및 하중조합에 대해 허용응력설계 및 한계상태설계를 통해 안전한 것으로 평가되었음.
- 허용응력설계의 경우, 허용응력 대비 발생응력의 비율인 응력비가 가장 크게 발생한 부재는 하부 기둥으로, 압축과 휨에 관한 합성응력에 대해 0.904의 응력비가 나타남.
- 한계상태설계의 경우, 설계강도 대비 소요강도의 비율인 강도비가 가장 크게 발생한 부재는 하부 기둥으로, 압축력과 휨모멘트에 관한 조합력에 대해 0.787의 강도비가 나타남.
- 응력비 혹은 강도비가 가장 크게 나타났던 부재는 하부 기둥이었으며, 하부 보와 상부 기둥 및 상부 보에서도 기본설계안 1과 비교하여 비교적 큰 최대 축력 및 최대 휨모멘트가 발생함.

표 47 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 부재 단면 검토 결과 요약 (ASD)

부재	검토사항	해석 응력 결과 (MPa)	허용응력 (MPa)	Ratio	판정
하부 기둥	축방향 압축응력	4.159	85.911	0.048	O.K
	휨응력 (M_y)	155.263	181.500	0.855	O.K
	휨응력 (M_z)	0.000	165.000	0.000	O.K
	합성응력*	0.904	1.000	0.904	O.K
	전단응력	1.976	110.000	0.018	O.K
하부 보	축방향 압축응력	1.620	165.000	0.010	O.K
	휨응력 (M_y)	66.157	178.740	0.370	O.K
	휨응력 (M_z)	0.000	165.000	0.000	O.K
	합성응력*	0.380	1.000	0.380	O.K
	전단응력	0.000	110.000	0.000	O.K
브레싱	축방향 압축응력	6.075	33.911	0.179	O.K
	휨응력 (M_y)	22.489	165.000	0.136	O.K
	휨응력 (M_z)	25.874	158.994	0.163	O.K
	합성응력*	0.355	1.000	0.355	O.K
	전단응력	0.304	110.000	0.003	O.K
퍼린 (냉간 형성 채널)	축방향 압축응력	0.021 (kN)	63.905 (kN)	0.000	O.K
	휨응력 (FBC)	0.232 (kN·m)	1.495 (kN·m)	0.155	O.K
	휨응력 (FBT)	0.000 (kN·m)	0.669 (kN·m)	0.000	O.K
	합성응력*	0.155	1.000	0.155	O.K
	전단응력	0.151	1.000	0.151	O.K
상부 기둥	축방향 압축응력	1.410	150.970	0.009	O.K
	휨응력 (M_y)	2.008	178.740	0.011	O.K
	휨응력 (M_z)	71.834	199.351	0.360	O.K
	합성응력*	0.381	1.000	0.381	O.K
	전단응력	3.121	110.000	0.028	O.K
상부 보	축방향 압축응력	1.630	159.715	0.010	O.K
	휨응력 (M_y)	50.984	165.000	0.309	O.K
	휨응력 (M_z)	25.369	165.000	0.154	O.K
	합성응력*	0.473	1.000	0.473	O.K
	전단응력	3.358	110.000	0.031	O.K

* 합성응력의 경우 압축과 휨에 관한 응력비로 계산

표 48 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 부재 단면 검토 결과 요약 (LSD)

부재	검토사항	소요강도	설계강도	Ratio	판정
하부 기둥	축방향 압축력 (kN)	5.844	154.691	0.038	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	7.251	9.435	0.768	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.000	9.435	0.000	O.K
	조합력*	0.787	1.000	0.787	O.K
	전단력 (kN)	3.900	91.030	0.043	O.K
하부 보	축방향 압축력 (kN)	3.556	334.373	0.011	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	7.893	19.815	0.398	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.000	5.523	0.000	O.K
	조합력*	0.404	1.000	0.404	O.K
	전단력 (kN)	3.129	71.280	0.044	O.K
브레싱	축방향 압축력 (kN)	2.303	14.932	0.154	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	0.013	0.517	0.027	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.032	0.336	0.098	O.K
	조합력*	0.202	1.000	0.202	O.K
	전단력 (kN)	0.037	17.820	0.002	O.K
퍼린 (냉간 형성 채널)	축방향 압축력 (kN)	0.021	63.905	0.000	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	0.232	1.495	0.155	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.000	0.669	0.000	O.K
	조합력*	0.155	1.000	0.155	O.K
	전단력 (kN)	0.151	1.000	0.151	O.K
상부 기둥	축방향 압축력 (kN)	2.980	278.808	0.011	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	0.073	12.112	0.006	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	1.909	5.515	0.346	O.K
	조합력*	0.358	1.000	0.358	O.K
	전단력 (kN)	0.780	47.520	0.033	O.K
상부 보	축방향 압축력 (kN)	3.233	275.627	0.012	O.K
	휨모멘트 -y (kN·m)	3.210	10.060	0.319	O.K
	휨모멘트 -z (kN·m)	0.730	10.060	0.073	O.K
	조합력*	0.398	1.000	0.398	O.K
	전단력 (kN)	3.442	78.636	0.044	O.K

* 조합력의 경우 압축력과 휨모멘트의 소요/설계강도의 비율로 계산

5.3.2.1 기본설계안 2 주요 부재 (하부 기둥) 단면 검토

- 특히 큰 최대 축력 및 최대 휨모멘트가 발생하였던 주요 부재인 하부 기둥에 관한 허용응력설계 기반의 부재 단면 검토 상세 결과는 다음과 같으며, 구조안전성을 확인함.

① 단면 제원

- 기본설계안 2 하부 기둥에 이용된 지름 101.6 mm, 두께 4.0 mm의 강관 부재 단면 제원은 아래의 표와 같으며, 210,000 MPa의 탄성계수와 275 MPa 항복강도를 가짐.

표 49 기본설계안 2 하부 기둥 단면 제원

부재 규격	∅-101.6×4.0t	부재 재질	SS275
단면적 (A)	1,226 mm ²	전단면적 (A _s)	613 mm ²
단면2차모멘트 (I _{yy})	1,460,000 mm ⁴	단면2차모멘트 (I _{zz})	1,460,000 mm ⁴
단면2차 반경 (r _y)	34.5 mm	단면2차반경 (r _z)	34.5 mm
탄성계수 (E)	210,000 MPa	항복강도 (F _y)	275 MPa

② 세장비

- 좌굴 길이 계수 K : 1
- 좌굴 길이 L : 3,800 mm
- 단면 회전 반경 r : 34.5 mm
- 세장비 검토

$$KL/r = 110.1 < 200.0 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

③ 축방향 압축응력

- 한계 세장비

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_s}{F_y}} = 122.77$$

- 허용 압축응력

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} = 85.911 \text{ MPa } (\because KL/r < C_c)$$

- 압축응력 검토

$$f_c = F_x/A = 4.159 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_c}{F_c} = 0.048 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

④ 휨응력

- 허용 휨응력

$$F_b = 0.66 \times F_y = 181.5 \text{ MPa}$$

- 휨응력 검토

$$f_{by} = \frac{M_y \cdot y}{I_{yy}} = 155.263 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_{by}}{F_b} = 0.855 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑤ 합성응력 (축력, 휨)

- 합성응력 검토

$$\frac{f_c}{F_c} < 0.15$$

$$R_{\max} = \frac{f_c}{F_c} + \sqrt{\left(\frac{f_{by}}{F_{by}}\right)^2 + \left(\frac{f_{bz}}{F_{bz}}\right)^2} = 0.904 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑥ 전단응력

- 허용 전단응력

$$F_v = 0.40 \times F_y = 110 \text{ MPa}$$

- 전단응력 검토

$$F_{vv} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} = 2.42 \text{ kN}$$

$$f_v = F_{vv} / A = 1.976 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_v}{F_v} = 0.018 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

5.3.2.2 기본설계안 2 주요 부재 (하부 보) 단면 검토

- 큰 최대 축력 및 최대 휨모멘트가 발생하였던 주요 부재인 하부 보에 관한 허용응력설계 기반의 부재 단면 검토 상세 결과는 다음과 같으며, 구조안전성을 확인함.

① 단면 제원

- 기본설계안 2 하부 보에 이용된 H-beam 부재 단면 제원은 아래의 표와 같으며, 210,000 MPa의 탄성계수와 275 MPa 항복강도를 가짐.

표 50 기본설계안 2 하부 보 단면 제원

부재 규격	H-150×100×3.2×4.5t	부재 재질	SS275
단면적 (A)	1,351 mm ²	전단면적 (A_{sz})	480 mm ²
단면2차모멘트 (I_{yy})	5,510,000 mm ⁴	단면2차모멘트 (I_{zz})	750,000 mm ⁴
단면2차 반경 (r_y)	63.9 mm	단면2차반경 (r_z)	23.6 mm
탄성계수 (E)	210,000 MPa	항복강도 (F_y)	275 MPa

② 세장비

- 좌굴 길이 계수 K : 1
- 좌굴 길이 L : 1,000 mm
- 단면 회전 반경 r : 23.6 mm
- 세장비 검토

$$KL/r = 105.9 < 200.0 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

③ 축방향 인장응력

- 허용 인장응력

$$F_t = 0.60 \times F_y = 165 \text{ MPa}$$

- 인장응력 검토

$$f_c = F_x/A = 1.620 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_c}{F_c} = 0.010 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

④ 휨응력

- 허용 휨응력

$$F_b = F_y \left[0.79 - 0.00076 \left(\frac{b_f}{2t_f} \right) \sqrt{F_y} \right] = 178.740 \text{ MPa} \quad (\because \text{비조밀 단면})$$

- 휨응력 검토

$$f_{by} = \frac{M_y \cdot y}{I_{yy}} = 66.157 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_{by}}{F_b} = 0.370 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑤ 합성응력 (축력, 휨)

- 합성응력 검토

$$\frac{f_c}{F_c} < 0.15$$

$$R_{\max} = \frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} = 0.380 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

⑥ 전단응력

- 허용 전단응력

$$F_v = 0.40 \times F_y = 110 \text{ MPa}$$

- 전단응력 검토

$$F_z = 1.94 \text{ kN}$$

$$f_v = F_z / A_{sz} = 4.04 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_v}{F_v} = 0.037 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

5.3.3 구조설계법 비교 및 분석

- 기본설계안에 관한 허용응력설계 및 한계상태설계 기반의 구조안전성 검토를 수행한 결과, 기본설계안 1에서는 허용응력설계 시 최대응력비가 0.860, 한계상태설계 시 최대강도비가 0.737로 나타났으며, 기본설계안 2에서는 허용응력설계 시 최대응력비가 0.904, 한계상태설계 시 최대강도비가 0.787로 나타남.
- 두 가지 설계법 모두, 하부 기둥의 검토 시, 가장 큰 비율 (응력비 혹은 강도비)이 나타났으며, 다른 부재에서도 산정된 비율의 양상은 비슷.
- 하부 기둥의 경우 한계상태기반 설계 시, 전반적으로 더 적은 강도비를 나타냄.
- 이에 따라 한계상태 설계법을 적용할 경우 경제성을 다소 확보한 구조설계가 가능할 것으로 보임.
- 허용응력설계법을 이용할 경우는 비교적 큰 안전율을 적용되어 보다 안전측의 설계가 가능할 것으로 분석됨.
- 한편, 적설하중에 취약한 보의 경우 한계상태 설계법을 적용하면, 허용응력 설계법보다 더 큰 강도비가 나타났으며, 이는 설계방법에 따른 하중조합의 차이인 것으로 분석됨.
- 한계상태에서의 하중조합계수를 살펴보면, 풍하중보다 적설하중에 대해 더 큰 계수를 적용함을 확인할 수 있음.
- 영농형 태양광 시설물은 항복응력 및 극한응력이 뚜렷한 재료로 이루어진 강관으로 주로 구성되며, 일반 구조물에 비해 경량형 구조물임. 또한, 영농형 태양광 발전 시스템이 설치되는 지반은 영농 (논, 밭, 과수 등)을 기반으로 하기에 지역이나 계절에 따라서 다양한 지반 상태로 존재할 수 있음.
- 따라서 지반 관련 계수의 변동성과 구조물 특성 및 폭설과 태풍에 대한 안전측 설계를 고려해 허용응력설계법을 기본으로 적용하도록 함. 이때 발주자 및 설계자의 판단에 따라 안전성과 경제성을 함께 고려하여 한계상태설계도 함께 적용할 수 있도록 함.

5.4 지진해석 및 내진설계

5.4.1 설계응답가속도스펙트럼 및 모달 해석

- 지진하중 산정법에 따라 영농형 태양광 시스템 구조물을 대상으로 작성된 설계응답가속도 스펙트럼 그래프는 그림 39와 같으며, 이를 위한 내진설계 관련 변수는 아래와 같음.

- 지진구역 : I
- 지진구역계수 : 0.11
- 내진설계 중요도 : 중요도(3)
- 내진설계 중요도계수 : 1.0
- 지반의 분류 : S_3 (깊고 연약한 지반)
- 단주기 지반증폭계수 F_a : 1.30
- 1초주기 지반증폭계수 F_v : 2.64

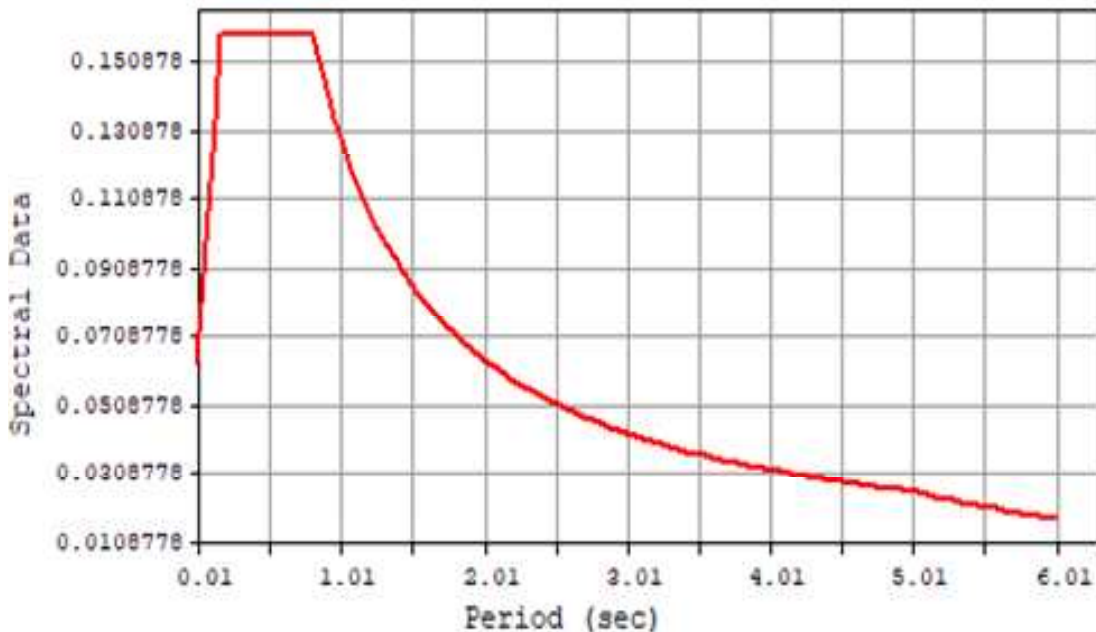


그림 39 영농형 태양광 시스템 지진해석을 위한 설계응답가속도스펙트럼 그래프

- 기본설계안 1 및 기본설계안 2에 대해 설계응답가속도스펙트럼에 따른 지진하중을 적용하여 지진해석 및 내진설계를 수행함.
- 지진하중 재하는 100 : 30법을 적용한 orthogonal effect를 고려하며, 이에 따라 다음과 같이 지진하중을 재하함.

$$E = \pm 1.0E_x \pm 0.3E_y \text{ or } \pm 0.3E_x \pm 1.0E_y$$

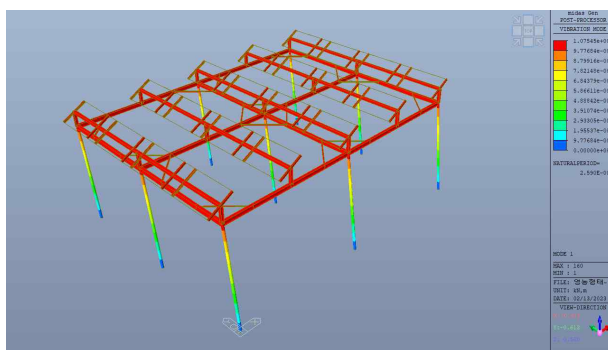
- 다양한 진동수 혹은 주기에 관한 모드에 대해, 질량참여율이 전체 자중의 90% 이상에 해당되는 주요 모드를 결정함.
- 다양한 하중조합에 대해서는 주요 모드의 조합별로 나타나는 구조물의 최대 거동을 분석하며, 층간변위 분석을 통해 지진하중에 대한 구조안전성을 검토함.

5.4.1.1 기본설계안 1 모달 해석

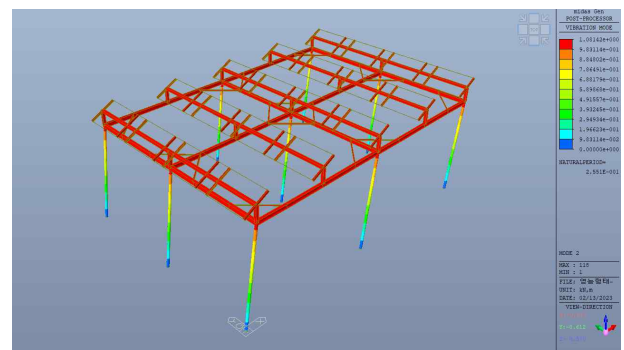
- 기본설계안 1의 모달 해석 결과, mode 1, 2, 3에서 각각 3.861, 3.920, 4.789 (cycle/sec)의 진동수 및 0.259, 0.255, 0.209 (sec)의 주기에서 전체 자중 90% 이상의 질량참여율이 나타나 mode 1, 2, 3가 주요 모드로 분석됨.
- 이에 따라 해당 구조물에서 1차 모드는 Y방향 이동성분, 2차 모드는 X방향 이동성분, 3차 모드에서는 Z축에 대한 회전성분이 각각 지배적임을 확인함.

표 51 기본설계안 1 모달 해석을 통한 진동수 및 주기에 따른 질량참여율 분석 결과

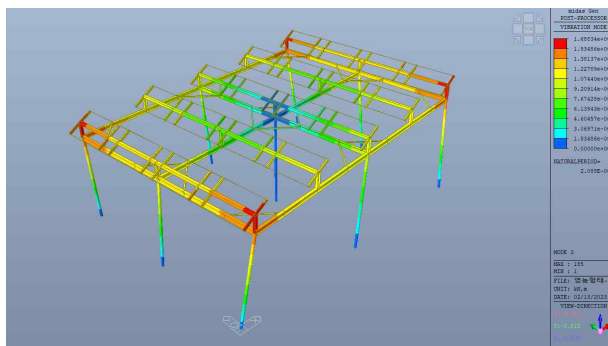
Mode No.	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
			Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	3.861	0.259	0.000	0.000	99.998	99.998	0.000	0.000
2	3.920	0.255	99.994	99.994	0.000	99.998	0.000	0.000
3	4.789	0.209	0.000	99.994	0.000	99.998	99.995	99.995
4	45.235	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995
5	45.321	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995
6	45.587	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995
7	45.589	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995
8	45.592	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995
9	46.368	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995
10	46.368	0.022	0.000	99.994	0.000	99.998	0.000	99.995



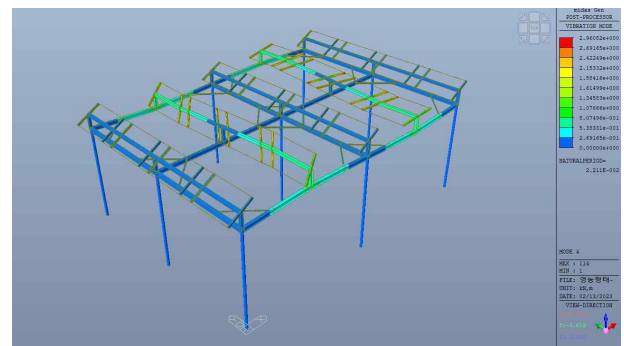
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

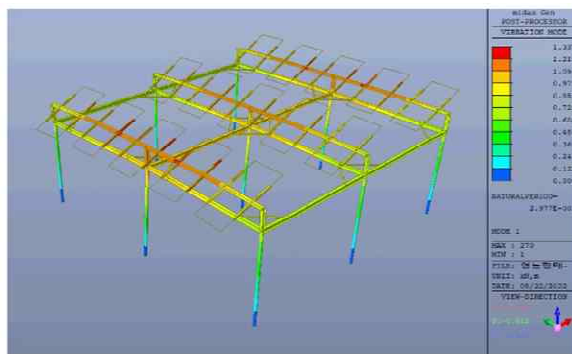
그림 40 기본설계안 1 지진하중 모드에 따른 구조물 거동 양상

5.4.1.2 기본설계안 2 모달 해석

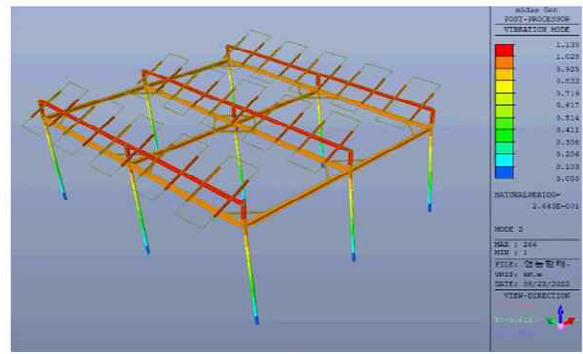
- 기본설계안 2의 모달 해석 결과, mode 1, 2, 3에서 각각 3.359, 3.782, 4.126 (cycle/sec)의 진동수 및 0.297, 0.264, 0.242 (sec)의 주기에서 전체 자중 90% 이상의 질량참여율이 나타나 mode 1, 2, 3가 주요 모드로 분석됨.
- 이에 따라 해당 구조물에서 1차 모드는 X방향 이동성분, 2차 모드는 Y방향 이동성분, 3차 모드에서는 Z축에 대한 회전성분이 각각 지배적임을 확인함.

표 52 기본설계안 2 모달 해석을 통한 진동수 및 주기에 따른 질량참여율 분석 결과

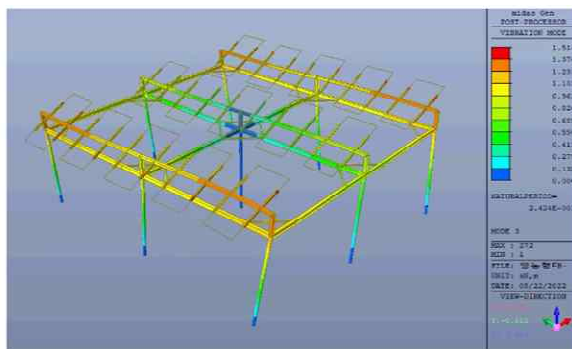
Mode No.	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
			Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	3.359	0.297	97.692	97.692	0.000	0.000	0.000	0.000
2	3.782	0.264	0.000	97.692	99.977	99.977	0.000	0.000
3	4.126	0.242	0.000	97.692	0.000	99.977	97.627	97.628
4	5.157	0.193	0.000	97.692	0.000	99.977	0.175	97.803
5	6.603	0.151	0.000	97.692	0.000	99.977	0.020	97.824
6	6.611	0.151	0.000	97.692	0.000	99.977	0.000	97.824
7	6.632	0.150	0.000	97.692	0.000	99.977	0.000	97.824
8	8.754	0.114	0.144	97.837	0.000	99.977	0.000	97.824
9	8.852	0.113	0.000	97.837	0.000	99.977	0.000	97.824
10	9.248	0.108	1.613	99.450	0.000	99.977	0.000	97.824



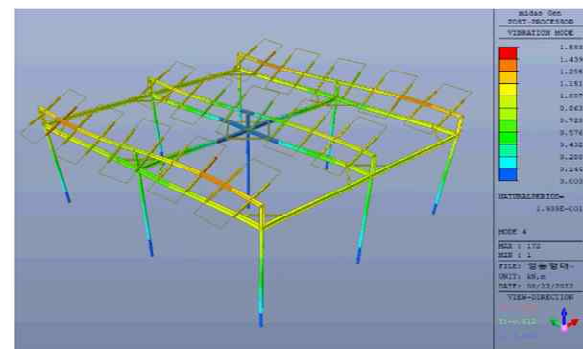
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

그림 41 기본설계안 2 지진하중 모드에 따른 구조물 거동 양상

5.4.2 층간변위 분석 및 지진 안전성 검토

5.4.2.1 기본설계안 1 지진 안전성 검토

- 기본설계안 1에 대해 지진하중이 포함된 하중조합별 층간변위를 분석한 결과, 하중조합 LCB1E-LSD 및 LCB3E-LSD에서 0.0039, LCB5E-LSD 및 LCB7E-LSD에서 -0.0039 m의 가장 큰 층간변위가 나타남 (표 53).
- 건축물 중요도에 따른 허용층간변위 $\Delta_a = 0.020h_{sx}$ ($h_{sx} = 3.80$ m)과 비교하여 더 작은 층간변위가 발생해 해당 시스템 구조물의 지진하중에 대한 안전성을 확인함.
- 층간변위에 대한 해석값과 허용값의 비율은 0.051 (5.1%)로 나타났으며, 풍하중 혹은 적설하중에 의해 발생한 구조물의 응력비 혹은 강도비와 비교해 매우 작은 것으로 나타남.
- 이는 영농형 태양광 시스템의 시설물이 강관으로 이루어진 경량의 프레임 구조물이기 때문에, 구조물의 중량에 의해 지배적으로 영향을 받는 지진하중에 대해서는 다른 설계하중과 비교해 구조 안전성에 주는 영향이 크지 않은 것으로 분석됨.
- 본 구조물의 경우, 지진하중 관련 구조계산 검토 결과, 충분히 안전 측에 속하지만, 지진의 잦은 발생이 예상되거나 추후 엔지니어가 필요하다고 판단 시 추가적인 검토도 고려되어야 할 것으로 판단됨.

5.4.2.2 기본설계안 2 지진 안전성 검토

- 기본설계안 2에 대해 지진하중이 포함된 하중조합별 층간변위를 분석한 결과, 하중조합 LCB5E-LSD 및 LCB7E-LSD에서 가장 큰 -0.0044 m의 층간변위가 나타남 (표 54).
- 건축물 중요도에 따른 허용층간변위 $\Delta_a = 0.020h_{sx}$ ($h_{sx} = 3.80$ m)과 비교하여 더 작은 층간변위가 발생해 해당 시스템 구조물의 지진하중에 대한 안전성을 확인함.
- 층간변위에 대한 해석값과 허용값의 비율은 0.058 (5.8%)로 나타났으며, 풍하중 혹은 적설하중에 의해 발생한 구조물의 응력비와 비교해 매우 작은 것을 의미함.
- 이는 영농형 태양광 시스템의 시설물이 강관으로 이루어진 경량의 프레임 구조물이기 때문에, 구조물의 중량에 의해 지배적으로 영향을 받는 지진하중에 대해서는 다른 설계하중과 비교해 구조 안전성에 주는 영향이 크지 않은 것으로 분석됨.
- 본 구조물의 경우, 지진하중 관련 구조계산 검토 결과, 충분히 안전 측에 속하지만, 지진의 잦은 발생이 예상되거나 추후 엔지니어가 필요하다고 판단 시 추가적인 검토도 고려되어야 할 것으로 판단됨.

표 53 기본설계안 1 지진하중에 따른 층간변위

Load case	Story height (m)	Maximum drift of all vertical elements		Drift at center of mass	
		Story drift (m)	Story drift ratio	Story drift (m)	Story drift ratio
Ex	0.60	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001
	3.80	0.0030	0.0008	0.0027	0.0007
Ey	0.60	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001
	3.80	0.0030	0.0008	0.0027	0.0007
LCB1E -LSD	0.60	0.0012	0.0021	0.0001	0.0002
	3.80	0.0039	0.0010	0.0035	0.0009
LCB2E -LSD	0.60	0.0011	0.0018	0.0001	0.0001
	3.80	0.0021	0.0006	0.0019	0.0005
LCB3E -LSD	0.60	0.0012	0.0021	0.0001	0.0002
	3.80	0.0039	0.0010	0.0035	0.0009
LCB4E -LSD	0.60	0.0011	0.0018	0.0001	0.0001
	3.80	0.0021	0.0006	0.0019	0.0005
LCB5E -LSD	0.60	-0.0012	-0.0020	-0.0001	-0.0002
	3.80	-0.0039	-0.0010	-0.0035	-0.0009
LCB6E -LSD	0.60	-0.0011	-0.0018	-0.0001	-0.0001
	3.80	-0.0021	-0.0006	-0.0019	-0.0005
LCB7E -LSD	0.60	-0.0012	-0.0020	-0.0001	-0.0002
	3.80	-0.0039	-0.0010	-0.0035	-0.0009
LCB8E -LSD	0.60	-0.0011	-0.0018	-0.0001	-0.0001
	3.80	-0.0021	-0.0006	-0.0019	-0.0005

표 54 기본설계안 2 지진하중에 따른 층간변위

Load case	Story height (m)	Maximum drift of all vertical elements		Drift at center of mass	
		Story drift (m)	Story drift ratio	Story drift (m)	Story drift ratio
Ex	0.79	0.0004	0.0005	0.0002	0.0003
	3.80	0.0034	0.0009	0.0026	0.0007
Ey	0.79	0.0004	0.0005	0.0002	0.0003
	3.80	0.0034	0.0009	0.0026	0.0007
LCB1E -LSD	0.79	0.0007	0.0009	0.0003	0.0004
	3.80	0.0043	0.0011	0.0033	0.0009
LCB2E -LSD	0.79	0.0004	0.0006	0.0002	0.0002
	3.80	0.0023	0.0006	0.0018	0.0005
LCB3E -LSD	0.79	0.0007	0.0009	0.0003	0.0004
	3.80	0.0043	0.0011	0.0033	0.0009
LCB4E -LSD	0.79	0.0004	0.0006	0.0002	0.0002
	3.80	0.0023	0.0006	0.0018	0.0005
LCB5E -LSD	0.79	-0.0007	-0.0009	-0.0003	-0.0004
	3.80	-0.0044	-0.0012	-0.0033	-0.0009
LCB6E -LSD	0.79	-0.0004	-0.0006	-0.0002	-0.0002
	3.80	-0.0024	-0.0006	-0.0018	-0.0005
LCB7E -LSD	0.79	-0.0007	-0.0009	-0.0003	-0.0004
	3.80	-0.0044	-0.0012	-0.0033	-0.0009
LCB8E -LSD	0.79	-0.0004	-0.0006	-0.0002	-0.0002
	3.80	-0.0024	-0.0006	-0.0018	-0.0005

5.5 안전적설심, 안전풍속 분석 및 최적화 설계

5.5.1 기본설계안 1 안전설계기준 분석 및 최적화 설계

- 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1의 구조안전성이 확보되는 한계에서 적용될 수 있는, 최대 적설하중 및 풍하중을 분석하여 안전적설심 및 안전풍속을 도출함.
- 최대 적설하중 및 풍하중을 분석하기 위해서는 ① 고정하중 + 적설하중, ② 고정하중 + 풍하중의 하중조건을 고려하였으며 각각 적설시, 강풍 시의 상황을 가정함.
- 안전적설심은 적설하중에 취약한 하부 보에 대해 구조안전성이 최대로 만족되는 적설 조건을 분석하고, 안전풍속은 풍하중에 취약한 하부 기둥에 대해 구조안전성이 최대로 만족되는 풍속 조건을 분석하였으며, 두 가지 하중을 다른 모든 부재에 대해서도 확인함.
- 이때 눈의 평균 단위중량은 <건축물의 구조기준 등에 관한 규칙>에 따라 아래와 같이 고려하였으며, 중간값은 직선 보간법으로 계산함.
- 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1의 안전적설심은 176 cm, 안전풍속은 28.6 m/s로 분석되었으며, 해당 적설심 적용 시에는 하부 보에서, 풍속 적용 시에는 하부 기둥에서 최대 응력비가 나타남.

표 55 눈의 평균 단위중량 (건축물의 구조기준 등에 관한 규칙)

수직최심적설깊이 (cm)	평균 단위중량 (적설량 1 cm 당 kg/m ²)
50 이하	1.0
100	1.5
150	2.0
200 이상	3.0

- 주어진 수원 지역의 기본적설심 50 cm (기본지상적설하중 0.5 kN/m²)와 기본풍속 26 m/s에 대해 기본설계안의 최적화 설계를 진행하기 위해 다양한 KS21 부재 규격 변경에 따른 구조안전성을 검토하였음.
- 이때 주요 부재 단면인 하부 기둥 및 하부 보를 포함한 모든 부재 단면에 대하여, 휨응력과 압축응력의 조합인 합성응력을 이용하여, 구조물 안정성을 검토하였음.
- 이에 따라 하부 보의 부재 단면 (H-150×100×3.2×4.5t → H-100×100×3.2×4.5t), 상부 기둥의 부재 단면 (H-100×100×3.2×4.5t → H-100×60×3.2×4.5t), 상부 보의 부재 단면 (□-100×100×2.9t → □-50×50×2.9t)을 절감하여 구조안전성을 확보하면서도 부재 물량을 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었음.
- 최적화 설계를 통해 기존 부재 이용 대비 구조 부재의 물량은 1.56 ton에서 1.28 ton으로 (기둥 간격 2×2 단위 기준) 18.1% 감소시킬 수 있는 것으로 나타남.

표 56 영농형 태양광 시스템 기본설계안 1 최적화 설계에 따른 부재 규격

부재 이름	기존 부재 규격	변경 부재 규격	부재 변경 시 최대 응력비
하부 기둥	∅-101.6×4.0t	∅-101.6×4.0t	0.933
하부 보	H-150×100×3.2×4.5t	H-100×100×3.2×4.5t	0.587
퍼린	C-75×15×15×2.1t	C-75×15×15×2.1t	0.176
브레싱	ㄱ-40×40×3t	ㄱ-40×40×3t	0.615
상부 기둥	H-100×100×3.2×4.5t	H-100×60×3.2×4.5t	0.560
상부 보	□-100×100×2.9t	□-50×50×2.9t	0.865

5.5.2 기본설계안 2 안전설계기준 분석 및 최적화 설계

- 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2의 구조안전성이 확보되는 한계에서 적용될 수 있는 최대 적설하중 및 풍하중을 분석하여 안전적설심 및 안전풍속을 도출함.
- 최대 적설하중 및 풍하중을 분석하기 위해서는 ① 고정하중 + 적설하중, ② 고정하중 + 풍하중의 하중조건을 고려하였으며 각각 적설시, 강풍시의 상황을 가정함.
- 안전적설심 및 안전풍속은 기본설계안 1에서와 동일한 방법으로 도출하였음.
- 그 결과 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2의 안전적설심은 121 cm, 안전풍속은 27.6 m/s로 분석되었으며, 해당 적설심 적용 시에는 상부 보에서, 풍속 적용 시에는 하부 기둥에서 최대 응력비가 나타남.
- 또한, 주어진 수원 지역의 기본적설심 50 cm (기본지상적설하중 0.5 kN/m²)와 기본풍속 26 m/s에 대해 기본설계안의 최적화 설계를 진행하기 위해 다양한 KS21 부재 규격 변경에 따른 구조안전성을 검토하였음.
- 이때 주요 부재 단면인 하부 기둥 및 하부 보를 포함한 모든 부재 단면에 대하여, 휨응력과 압축응력의 조합인 합성응력을 이용하여, 구조물 안정성을 검토하였음.
- 이에 따라 하부 보의 부재 단면 (H-150×100×3.2×4.5t → H-100×100×3.2×4.5t), 상부 기둥의 부재 단면 (H-100×100×3.2×4.5t → H-100×60×3.2×4.5t), 상부 보의 부재 단면 (□-100×100×2.9t → □-75×75×2.9t)을 절감하여 구조안전성을 확보하면서도 부재 물량을 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었음.
- 최적화 설계를 통해 기존 부재 이용 대비 구조 부재의 물량은 1.45 ton에서 1.29 ton으로 (기둥 간격 2×2 단위 기준) 11.2% 감소시킬 수 있는 것으로 나타남.

표 57 영농형 태양광 시스템 기본설계안 2 최적화 설계에 따른 부재 규격

부재 이름	기존 부재 규격	변경 부재 규격	부재 변경 시 최대 응력비
하부 기둥	∅-101.6×4.0t	∅-101.6×4.0t	0.994
하부 보	H-150×100×3.2×4.5t	H-100×100×3.2×4.5t	0.559
퍼린	C-75×15×15×2.1t	C-75×15×15×2.1t	0.155
브레싱	ㄱ-40×40×3t	ㄱ-40×40×3t	0.545
상부 기둥	H-100×100×3.2×4.5t	H-100×60×3.2×4.5t	0.805
상부 보	□-100×100×2.9t	□-75×75×2.9t	0.862

5.6 설치조건에 따른 안전설계기준 및 시스템 변수 분석

5.6.1 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전풍속

- 기본설계안 1의 경우 태양광 모듈이 이어져 설치되는 폭 방향으로의 하부 기둥 간격 변경과 부재 규격 변경에 따른 안전적설심 및 안전풍속을 분석함.
- 그 결과, 다양한 기둥 간격 및 부재 규격에 따른 안전적설심은 최대 232 cm, 안전풍속은 최대 46 m/s로 나타났으며, 특히 해당 구조물은 적설하중보다 비교적 풍하중에 취약한 것으로 분석되었음.
- 적설하중에 대해서는 모든 경우에서 117 cm 이상의 적설심에 대한 강도를 확보할 수 있었으며, 이에 따라 적설하중에 대해 비교적 안전한 것으로 나타남.
- 영농형 태양광 시스템의 구조물은 일반 태양광 구조물과 달리 시스템 하부에서 작물의 생육과 농작업을 고려해야 하므로 비교적 높은 높이를 가지는 기둥으로 설계되며, 태양광 모듈 면에 작용하는 풍하중에 의해 하부 기둥에서 큰 휨모멘트가 발생하는 것으로 분석됨.

표 58 기본설계안 1 부재 변경 및 규격 조정 시공에 따른 안전적설심 및 안전풍속

하부 기둥 간격 (m)	부재 규격									
	∅101.6×4.0t		∅114.3×3.2t		∅114.3×4.5t		∅139.8×3.6t		∅139.8×4.5t	
	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)
3.0	218	33	220	34	225	39	230	42	232	46
3.5	191	31	192	31	193	36	196	39	197	42
4.0	178	29	179	29	181	33	182	36	183	39
4.5	167	27	168	27	170	31	173	33	173	36
5.0	159	25	160	25	162	28	164	30	165	33

- 기본설계안 2의 경우 태양광 모듈이 간격을 두고 설치되는 폭 방향으로의 하부 기둥 간격 변경과 기둥의 부재 규격 변경에 따른 안전적설심 및 안전풍속을 분석함.
- 그 결과, 다양한 기둥 간격 및 부재 규격에 따른 안전적설심은 최대 154 cm, 안전풍속은 최대 38 m/s로 나타났고, 특히 해당 구조물은 풍하중에 취약한 것으로 분석되었으며, 적설하중에 대해 기본설계안 1과 비교하여 다소 취약한 것으로 분석됨.
- 또한, 기본설계안 2의 경우 적설하중 작용 시 하부 기둥이 아닌 상부 기둥에서 가장 큰 응력비 혹은 강도비가 나타났으며 이에 따라 하부 기둥 규격 변경에 따라서는 안전적설심이 유의미하게 변화하지 않은 것을 확인함. 따라서 추후 해당 설계안의 보강을 진행할 경우 상부의 기둥 및 보에 대한 구조 보강을 고려해야 할 것으로 분석됨.

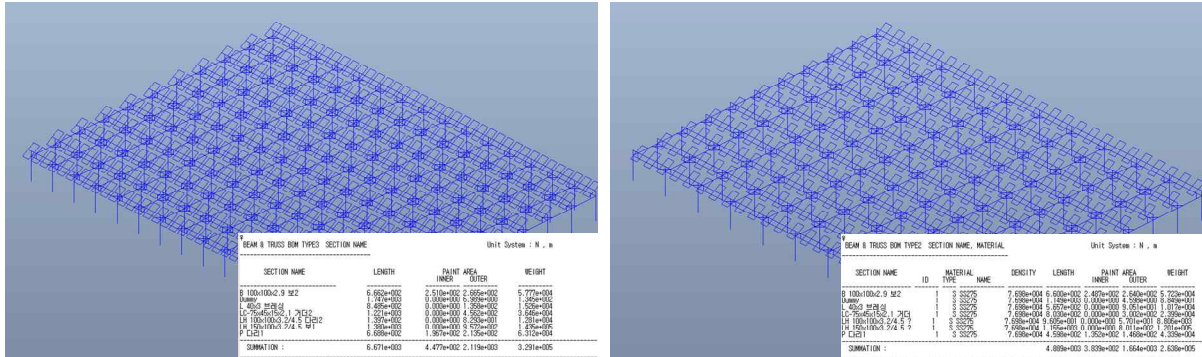
표 59 기본설계안 2 부재 변경 및 규격 조정 시공에 따른 안전적설심 및 안전풍속

하부 기둥 간격 (m)	부재 규격									
	ø101.6×4.0t		ø114.3×3.2t		ø114.3×4.5t		ø139.8×3.6t		ø139.8×4.5t	
	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)
4.0	151	29	151	29	151	33	151	35	151	38
4.5	136	28	136	28	136	32	136	34	136	37
5.0	122	27	122	27	122	31	122	33	122	36
5.5	111	27	111	27	111	30	111	32	111	35
6.0	102	26	102	26	102	30	102	32	102	34

- 하부 기둥 간격 조정 시공에 따른 안전적설심 및 안전풍속을 참고하여, 실제 영농형 태양광 시스템이 시공되는 현장에서, 설계안의 변경을 가능토록 하였음.
- 뿐만 아니라 지역별로 상이한 기본적설하중 및 기본풍속을 고려해, 다양한 기둥 간격에 따른 안전설계기준을 만족한다면, 구조물 설치가 가능하도록 제시함.
- 실제 영농형 태양광 시스템이 시공되는 현장은 상황에 따라 다양한 기둥 간격과 부재 규격이 고려되어야 하므로, 실제 시공 시 간격 및 부재의 변경은 제시되는 안전설계기준 범위 및 제안되는 기둥 간격 이하로 하여 구조안전성을 확보하도록 해야 할 것으로 판단됨.
- 이때, 본 연구에서 적용한 기본설계안과 상이한 형태의 구조물을 적용할 경우에는 실제 여건에 적합하도록 구조 검토를 시행하여, 안전적설심 및 안전풍속을 수정하도록 적용해야 함.

5.6.2 기둥 간격에 따른 시스템 변수 분석

- 하부 기둥의 간격에 따라 동일 면적 (1,000 m²)을 기준으로, 기본설계안 1 및 기본설계안 2의 구조 부재 물량 (그림 42), 차광률, 발전용량을 검토하였으며, 이들 간의 관계에 관한 trade-off 분석을 수행함.



(a) 기둥 간격 4.0 m

(a) 기둥 간격 6.0 m

그림 42 하부 기둥 간격에 따른 구조 부재 물량 분석

- 동일 면적에 관한 영농형 태양광 설계 시, 하부 기둥 간격이 증가함에 따라 부재 물량, 차광률, 발전용량은 모두 감소하는 경향을 나타내어 해당 시스템 변수 간 trade-off 관계가 있음을 확인함 (그림 43).
- 기본설계안 1의 경우, 하부 기둥 간격 3.0, 4.0, 5.0 m에 대한 부재 물량은 각각 19.0, 18.0, 15.3 ton으로 분석되었으며, 기본설계안 2의 경우, 하부 기둥 간격 4.0, 5.0, 6.0 m에 대한 부재 물량은 각각 13.2, 12.0, 11.2 ton으로 분석됨.
- 이에 따라 하부 기둥 간격을 증가시킬수록 구조 부재 물량을 감소시킬 수 있으며, 이는 시스템 구축비용의 상당 부분을 차지하는 부재량을 감축시킴으로써 경제성을 크게 확보하도록 하고, 차광률 또한 낮출 수 있는 것으로 분석됨.
- 그러나 기둥 간격 증가에 따라 구조물의 안전성이 감소하며, 발전용량 또한 감소될 우려가 있기에 이들 간의 trade-off에 관한 면밀한 검토와 설계자의 적합한 판단이 필요할 것으로 사료됨.
- 또한, 토지등가비율 (Land Equivalent Ratio; LER) 등을 이용한 평가를 통해 토지이용효율을 극대화시킬 수 있을 것으로 판단되며, 이는 작물별 혹은 지역별 최적 설치조건 분석과 함께 고려되어야 할 것으로 판단됨.

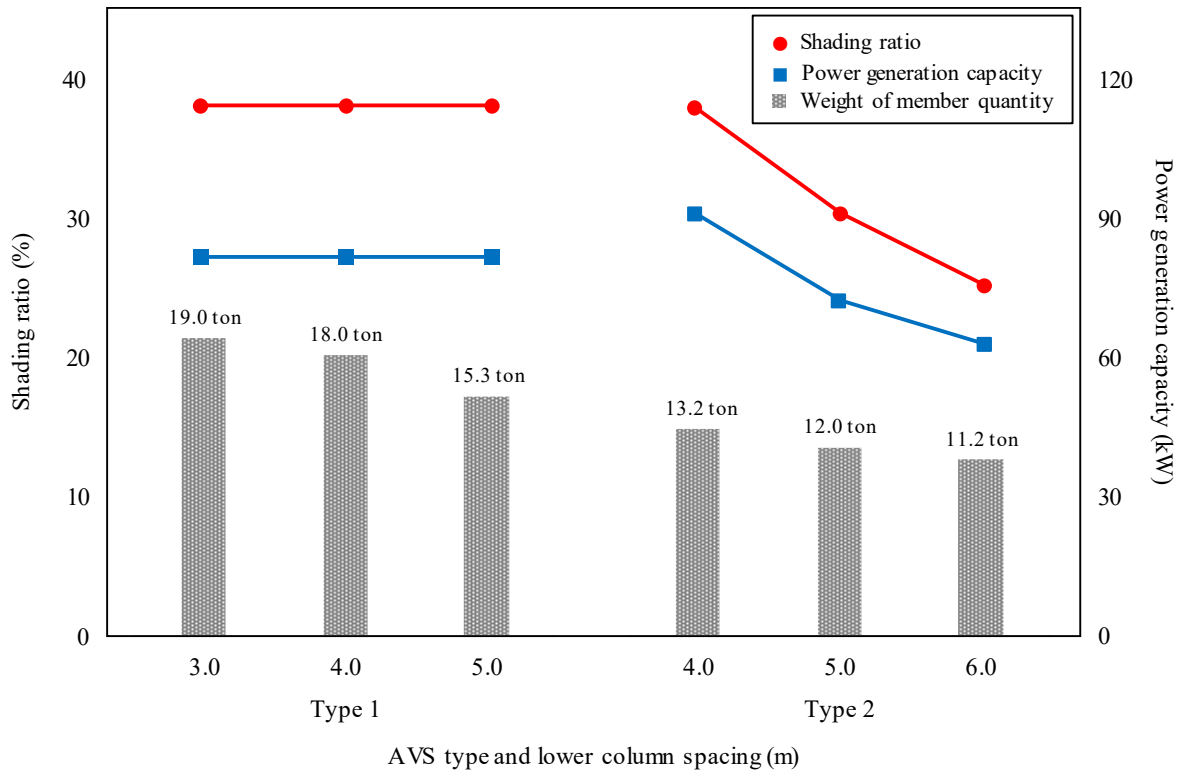


그림 43 영농형 태양광 기둥 간격에 따른 시스템 변수 trade-off 분석

제6장 하부기초 특성에 따른 기초 안전성 평가 및 분석

6.1 기초 안전성 평가를 위한 이론적 지지력 산정 방법의 검토

6.1.1 국내 지반 특성 분석

- 영농형 태양광 기초의 이론적 지지력 산정을 위한 지반의 물리적·역학적 특성은 국내 논, 밭토양의 일반적인 값 범위 내에서 선정함.
- Cho et al. (2012)은 국내 전국 농경지 토양의 물리적 특성을 조사함. 주로 작물의 생육을 위한 토양의 질에 대한 평가로 표토심, 용적밀도, 경도, 유기물 함량 등을 조사함. 밀도에 대한 연구 결과 논토양은 표토가 약 1.2 t/m³, 하부가 약 1.4~1.5 t/m³를 나타내고 있으며 밭토양은 표토가 약 1.3 t/m³, 하부가 약 1.5~1.56 t/m³를 나타냄.
- 전단강도는 현장의 상태 (토성, 밀도, 포화도 등)에 따라 변화하는 값이며, 영농지역 토양의 경우 전단강도에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않아 전체적으로 요약된 데이터를 확보할 수가 없기 때문에, 일반적으로 적용되는 점착력과 내부마찰각을 적용함.
- 따라서 위 범위 내에서 다양한 case를 선정하여 안전성 평가에 적용하였고, 각각의 case는 표 60과 같이 구성함.

표 60 기초 안전성 평가 case

밀도 (t/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부마찰각 (°)
1.3	4	24
1.4	6	28
1.5	8	32
1.6	10	36

6.1.2 말뚝의 종류와 특성

- 말뚝은 앞 절에서 기술한 바와 같이 강관말뚝과 회전식 말뚝을 분석 대상으로 선정함.
- 강관말뚝은 일반 구조용 강관이 주로 이용되고 있으며 국내 규격 (KS D 3566)에 따르면 그 직경은 21.7 mm부터 1016.0 mm까지 다양하게 존재하며 (그림 45), 회전식 말뚝은 현재 국내 영농형 태양광 사업에서 주로 이용되는 형태 중 외경 76.3mm의 나선형태 말뚝을 적용하여 분석함 (그림 44).

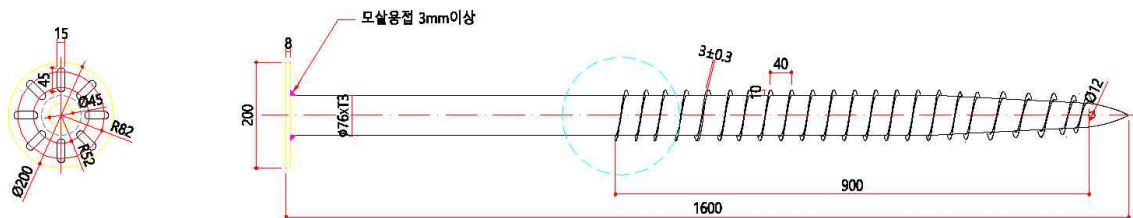


그림 44 스크류 파일 도면

바깥지름 mm	두께 mm	단위 무게 kg/m	참고			
			단면적 cm ²	단면 2차 모멘트 cm ⁴	단면 계수 cm ³	단면 2차 반지름 cm
21.7	2.0	0.972	1.238	0.607	0.560	0.700
27.2	2.0	1.24	1.583	1.26	0.930	0.890
	2.3	1.41	1.799	1.41	1.03	0.880
34.0	2.3	1.80	2.291	2.89	1.70	1.12
42.7	2.3	2.29	2.919	5.97	2.80	1.43
	2.5	2.48	3.157	6.40	3.00	1.42
48.6	2.3	2.63	3.345	8.99	3.70	1.64
	2.5	2.84	3.621	9.65	3.97	1.63
	2.8	3.16	4.029	10.6	4.36	1.62
	3.2	3.58	4.564	11.8	4.86	1.61
60.5	2.3	3.30	4.205	17.8	5.90	2.06
	3.2	4.52	5.760	23.7	7.84	2.03
	4.0	5.57	7.100	28.5	9.41	2.00
76.3	2.8	5.08	6.465	43.7	11.5	2.60
	3.2	5.77	7.349	49.2	12.9	2.59
	4.0	7.13	9.085	59.5	15.6	2.58
89.1	2.8	5.96	7.591	70.7	15.9	3.05
	3.2	6.78	8.636	79.8	17.9	3.04
101.6	3.2	7.76	9.892	120	23.6	3.48
	4.0	9.63	12.26	146	28.8	3.45
	5.0	11.9	15.17	177	34.9	3.42
114.3	3.2	8.77	11.17	172	30.2	3.93
	3.5	9.58	12.18	187	32.7	3.92
	4.5	12.2	15.52	234	41.0	3.89
139.8	3.6	12.1	15.40	357	51.1	4.82
	4.0	13.4	17.07	394	56.3	4.80
	4.5	15.0	19.13	438	62.7	4.79
	6.0	19.8	25.22	566	80.9	4.74
165.2	4.5	17.8	22.72	734	88.9	5.68
	5.0	19.8	25.16	808	97.8	5.67
	6.0	23.6	30.01	952	115	5.63
	7.1	27.7	35.26	110×10	134	5.60
190.7	4.5	20.7	26.32	114×10	120	6.59
	5.3	24.2	30.87	133×10	139	6.56
	6.0	27.3	34.82	149×10	156	6.53
	7.0	31.7	40.40	171×10	179	6.50
	8.2	36.9	47.01	196×10	206	6.46
216.3	4.5	23.5	29.94	168×10	155	7.49
	5.8	30.1	38.36	213×10	197	7.45
	6.0	31.1	39.64	219×10	203	7.44
	7.0	36.1	46.03	252×10	233	7.40
	8.0	41.1	52.35	284×10	263	7.37
	8.2	42.1	53.61	291×10	269	7.36

그림 45 일반 구조용 강관의 규격

- 강관말뚝과 회전식 말뚝의 안전성 평가 결과를 엄밀하게 비교분석하기 위하여 강관말뚝의 직경을 76.3 mm로 선정함.
- 앞서 선정한 말뚝은 암반면까지 관입하지 않고 말뚝의 직경이 매우 작기 때문에 대형 구조물의 기초에 비하여 비교적 선단지지력이 작아 주면마찰력이 지지력에 영향을 크게 미치는 마찰말뚝 형태임.
- 주면마찰력은 말뚝의 근입깊이에 따라 크게 달라지는 값이기 때문에 말뚝의 근입깊이를 여러 단계로 나누어 해석을 수행함.

6.1.3 현장조건을 적용한 강관말뚝의 지지력 산정식 검토

6.1.3.1 Terzaghi 공식에 따른 지지력 산정

- 일반적으로 정역학적 지지력 산정은 주로 Terzaghi와 Meyerhof 공식을 사용하며 누적된 데이터가 많아 신뢰성이 확보됨.
- 현장에서 채취한 시료의 분류는 통일분류법 상 Sand, 삼각좌표분류법 상 사양토 및 사토이기 때문에, 사질토에 적용되는 공식을 이용하였으며, 따라서 점착력이 없는 토양으로 간주하여 지지력을 산정함.
- 선단지지력은 Terzaghi의 지지력 공식을 적용하고, 단위주면마찰력은 Coyle and Castello (1981)에 따라 산정하여 주면마찰력을 산정하고, 그 합을 극한지지력으로 함.
- 지지력 산정에 이용된 강관말뚝의 제원은 표 61과 같음.

표 61 강관말뚝의 제원

직경	두께	내경	길이
76.3 mm	3.0 mm	70.3 mm	0.5~2.5 m

- 지지력 산정에 이용된 지반정수와 이에 따른 지지력은 표 62 및 그림 46과 같음 ($\delta=0.8\phi$, $K=1.5$, $L=16$ 적용).

표 62 지반의 밀도와 강도정수에 따른 지지력 산정 (Terzaghi 식 적용)

밀도 (t/m^3)	내부마찰각 ($^\circ$)	말뚝-흙 마찰각 ($^\circ$)	선단지지력, Q_p (ton)	주면마찰력, Q_s (ton)	극한지지력, Q_u (ton)
1.3	24	19.2	0.204	0.208	0.411
	28	22.4	0.378	0.246	0.624
	32	25.6	0.770	0.286	1.056
	36	28.8	1.598	0.328	1.926
1.4	24	19.2	0.219	0.224	0.443
	28	22.4	0.407	0.265	0.672
	32	25.6	0.830	0.308	1.138
	36	28.8	1.721	0.353	2.074
1.5	24	19.2	0.235	0.240	0.475
	28	22.4	0.436	0.284	0.720
	32	25.6	0.889	0.330	1.219
	36	28.8	1.844	0.379	2.222
1.6	24	19.2	0.250	0.256	0.506
	28	22.4	0.465	0.303	0.768
	32	25.6	0.948	0.352	1.300
	36	28.8	1.966	0.404	2.370

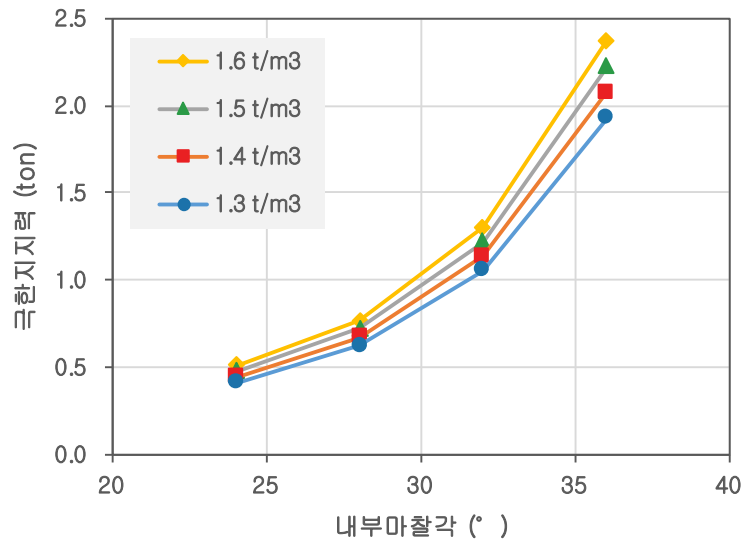


그림 46 지반의 밀도와 강도정수에 따른 지지력 산정 (Terzaghi 식 적용)

- 내부마찰각의 증가에 따라 지지력이 증가하며, 이때 증가율 또한 급속하게 상승.
- 동일 지반에서 밀도가 증가할수록 내부마찰각이 증가하기 때문에, 다짐 등에 의한 지반 밀도 증가 시 지지력이 큰 폭으로 상승할 것으로 예상됨. 또한 이때 밀도 자체보다는 밀도 증가에 따른 내부마찰각의 증가가 지지력 변화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있음.
- 말뚝 길이에 따른 지지력 변화는 표 63 및 그림 47과 같음.

표 63 말뚝 길이에 따른 지지력 산정 (Terzaghi 식 적용)

말뚝길이 (m)	밀도 1.5 t/m ³		내부마찰각 32°	
	Q_p (ton)	Q_s (ton)	Q_s (ton)	Q_u (ton)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.200	0.111	0.005	0.005	0.116
0.300	0.167	0.012	0.012	0.178
0.500	0.278	0.032	0.032	0.310
0.800	0.444	0.083	0.083	0.527
1.000	0.556	0.129	0.129	0.685
1.526	0.848	0.301	0.301	1.149
2.000	1.111	0.488	0.488	1.599
2.500	1.389	0.685	0.685	2.074

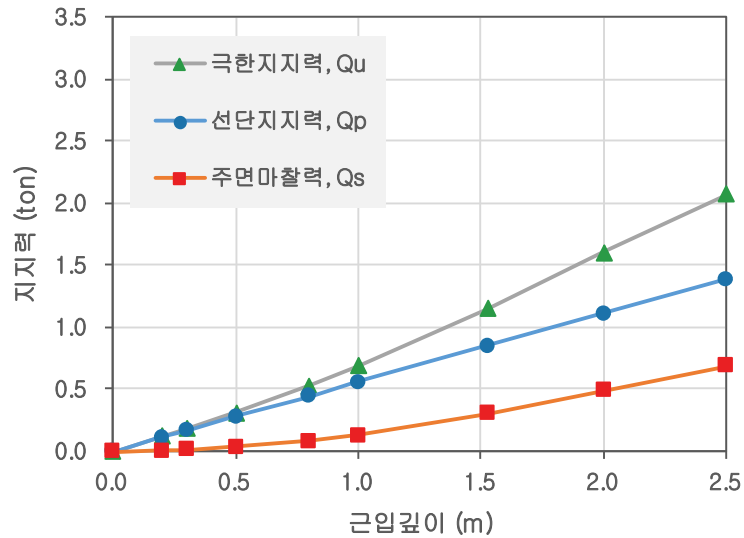


그림 47 말뚝 길이에 따른 지지력 산정 (Terzaghi 식 적용)

- 말뚝의 근입깊이에 따라 지지력이 증가하는 것을 확인함. 이때 선단지지력은 선형적으로 증가하나, 주면마찰력은 서서히 증가하다가 한계깊이 (1.526 m)까지 도달하면 선형적으로 증가하는 것으로 나타남.
- 한계깊이는 말뚝의 직경에 따라 결정되는 값으로, 말뚝의 직경이 클수록 깊어지기 때문에 주면마찰력을 고려한 설계 시 말뚝의 직경이 지지력에 큰 영향을 미칠 수 있음.

6.1.3.2 DÓrr 공식에 따른 지지력 산정

- 일반적으로 주로 사용되는 정역학적 지지력 산정식은 Terzaghi, Meyerhof 공식 등이지만 본 연구에서 적용하는 말뚝은 마찰말뚝으로, DÓrr 공식을 통하여 지지력을 산정함.
- DÓrr 공식에서는 말뚝-지반 사이의 마찰각에 의한 주면마찰항과 흙의 내부마찰각에 의한 선단지지항 뿐만 아니라, 점착력에 의한 주면마찰항이 추가로 존재하여, 점착력과 마찰각에 의한 영향을 모두 고려한 지지력을 산정할 수 있음.
- 지지력 산정에 이용된 강관말뚝의 제원은 위에서 제시한 강관말뚝 제원과 같음.
- 지지력 산정에 이용된 지반정수와 이에 따른 지지력은 다음과 같음 ($\delta=0.8\phi$, $K=1.5$, $L=16$, $L'=20D$ 적용).

표 64 밀도에 따른 지지력 산정 (DÓrr 식 적용)

밀도 (t/m^3)	점착력 4 kN/m^2		내부마찰각 32°	
	Q_p (ton)	Q_s (ton)	Q_s (ton)	Q_u (ton)
1.3	0.031	1.800	1.800	1.831
1.4	0.033	1.820	1.820	1.854
1.5	0.036	1.841	1.841	1.876
1.6	0.038	1.861	1.861	1.899

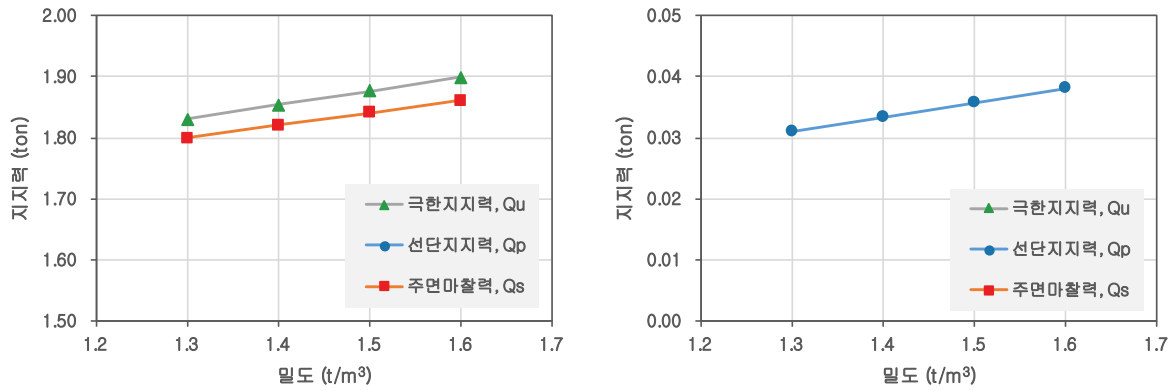


그림 48 밀도에 따른 지지력 산정(DÖrr 식 적용)

- 밀도에 따라 선단지지력과 주면마찰력이 모두 선형적으로 증가함.
- 선단지지력에 비하여 주면마찰력의 절대적인 크기가 50배 이상 큰 것으로 나타나며 증가 폭 또한 주면마찰력이 약 8.6배 정도 큼.
- 내부마찰각과 점착력의 크기에 따라 증가 폭의 차이가 달라질 수 있으나, 마찰말뚝에서는 주면마찰력이 지지력에 미치는 절대적인 영향과 함께 밀도에 따른 변동 또한 큰 것으로 나타남.

표 65 내부마찰각에 따른 지지력 산정 (DÖrr 식 적용)

내부마찰각 (°)	밀도 1.5 t/m ³	점착력 4 kN/m ²	Q_p (ton)	Q_s (ton)	Q_u (ton)
24			0.026	1.726	1.752
28			0.030	1.777	1.808
32			0.036	1.841	1.876
36			0.042	1.921	1.963

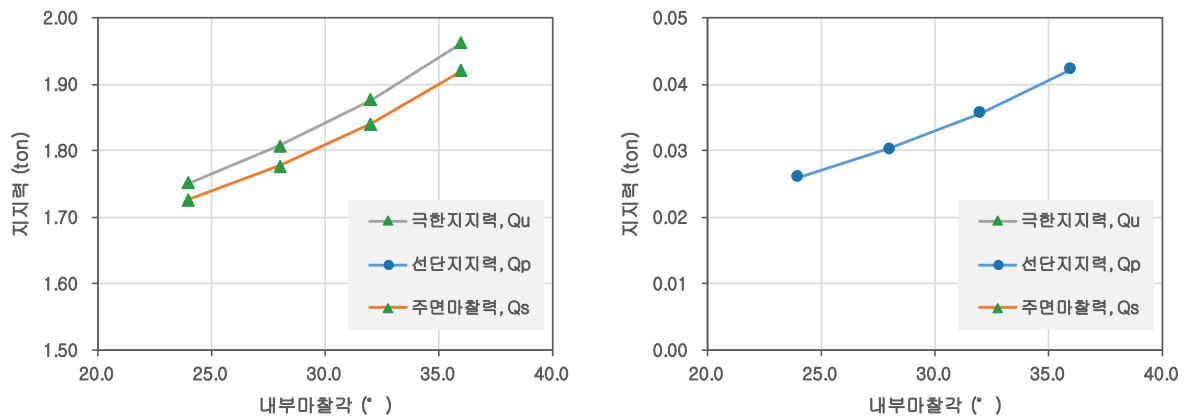


그림 49 내부마찰각에 따른 지지력 산정 (DÖrr 식 적용)

- 내부마찰각의 증가에 따라 선단지지력과 주면마찰력 모두 비선형적으로 증가하며, 내부마찰각이 커질수록 증가폭이 커짐.
- 밀도에 의한 영향보다 증가폭이 큰 것으로 나타나며, Meyerhof의 지지력 공식을 적용한 경

우와 마찬가지로, 동일 지반에서 밀도가 증가할 경우 내부마찰각의 증가로 인하여 큰 폭으로 지지력이 상승할 것으로 판단됨.

표 66 점착력에 따른 지지력 산정 (Dórr 식 적용)

밀도 1.5 t/m ³		내부마찰각 32°	
점착력 (kN/m ²)	Q_p (ton)	Q_s (ton)	Q_u (ton)
4	0.036	1.841	1.876
6	0.036	2.608	2.643
8	0.036	3.375	3.411
10	0.036	4.142	4.178

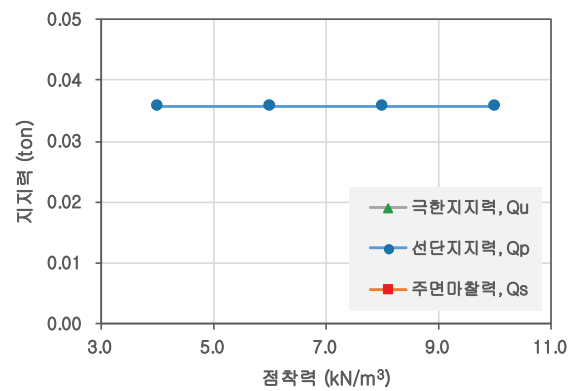
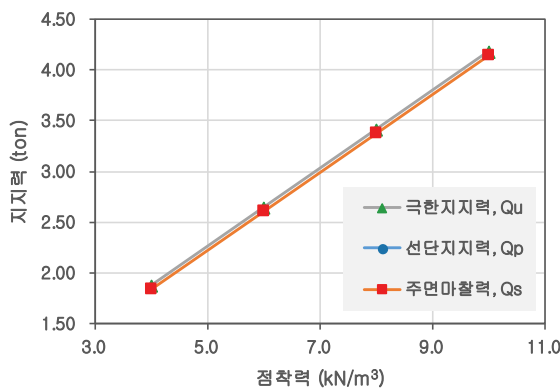


그림 50 점착력에 따른 지지력 산정 (Dórr 식 적용)

- 점착력의 증가에 따라 주면마찰력은 크게 증가하지만, 선단지지력의 경우 내부마찰각에만 지배되기 때문에 점착력에 따른 변화가 나타나지 않음.
- 지지력 산정 시 선정한 지반 강도정수의 범위가 일반적인 영농지역 토양을 대표한다고 가정할 때, 실제로 내부마찰각보다 점착력의 영향이 더 큰 것으로 나타남.
- 말뚝 길이에 따른 지지력 변화는 다음과 같음 (표 67, 그림 51).

표 67 말뚝 길이에 따른 지지력 산정 (Dórr 식 적용)

밀도 1.5 t/m ³	점착력 4 kN/m ²	내부마찰각 32°	
말뚝 길이 (m)	Q_p (ton)	Q_s (ton)	Q_u (ton)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.200	0.004	0.197	0.201
0.300	0.007	0.298	0.305
0.500	0.011	0.509	0.521
0.800	0.018	0.844	0.862
1.000	0.022	1.079	1.101
1.526	0.034	1.742	1.776
2.000	0.045	2.397	2.441
2.500	0.056	3.146	3.201

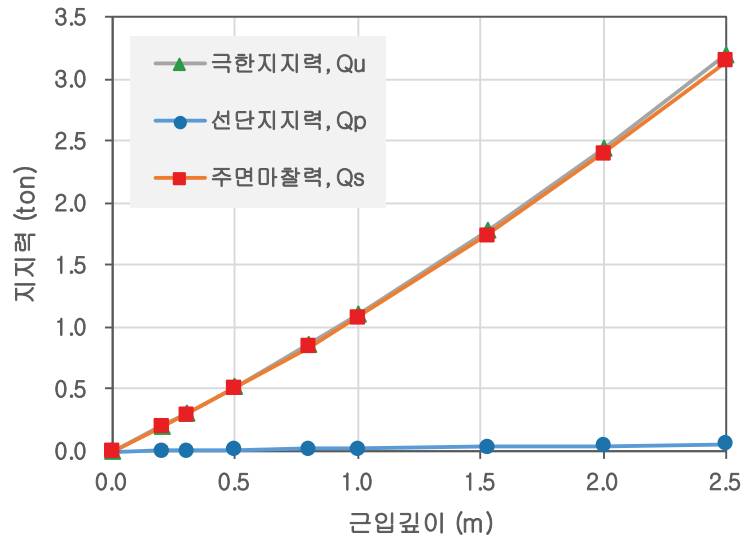


그림 51 말뚝길이에 따른 지지력 산정 (Dórr 식 적용)

6.1.4 회전식 말뚝의 지지력 산정식 검토

- 앞서 검토한 Coleman and Arcement (2002)에 의하여 제시된 지지력 산정식에서는 대형 회전식 오거 말뚝을 대상으로 하고 있어, 본 연구에서 적용한 말뚝의 형태에 대한 지지력 산정식으로는 적합하지 않음.
- 회전식 말뚝에 관한 연구는 주로 helix가 1~3개인 헬리컬 파일 (helical pile)을 대상으로 하고 있으며, 지지력 산정에 관한 이론 또한 주로 이러한 헬리컬 파일에 대하여 발전되어 옴.
- 따라서 현재 본 연구에서 적용한 스크류 파일의 지지력 산정식은 기존에 존재하는 기준 및 연구 결과를 그대로 적용할 수 없음.
- 이에 본 연구에서는 모형시험 및 현장시험 결과를 토대로 스크류 파일에 대한 정역학적 지지력 산정식의 수정된 형태를 개발하여 6.3.2에서 제시함.

6.2 기초 형태별 지지력 특성 분석을 위한 모형시험 구축

6.2.1 모형시험 장비

- 모형시험은 토조를 이용하여 수행하였으며 토조의 규격은 1.0 m×0.5 m×0.7 m이며 직경 76 mm의 말뚝에 대한 시험이 가능하도록 제작됨.
- 하중재하기 및 로드셀은 5 tonf의 용량으로 압축과 인장시험이 모두 가능하도록 선정함.
- 성토높이는 0.6 m로 하였으며, 모형토조의 조성은 최대한 균질한 지반조건을 얻기 위하여 0.1 m씩 6층 다짐을 수행함.



(a) 모형토조의 정면

(b) 모형지반 조성 결과

그림 52 모형토조의 형상 및 모형지반 조성 결과

- 말뚝의 시공 방법으로 매입말뚝은 천공 및 배토 이후에 정착시키고, 타입말뚝은 주로 항타에 의하여 토체를 양옆, 아래로 밀어내며 관입되는 형태임.
- 영농형 태양광 현장에서는 타입식으로 시공하는데, 일반적으로 사용하는 항타식을 모형시험에 적용하면, 지반이 심하게 교란되고 말뚝의 정착까지 긴 시간이 요구됨.
- 따라서 시험을 위한 말뚝 설치는 모형지반의 조성 후 압력에 의한 관입을 통하여 수행함.
- 스크류파일의 경우 압력에 의하여 수직으로 관입 시 스크류 날개에 의한 지반 파괴가 발생하여 회전관입을 통하여 시험을 수행함.
- 회전관입은 지반의 교란을 최대한 억제하기 위해 저속으로 수행함. 수직 변위량은 분당 5 mm로 설정하고 회전속도는 스크류 날개 간격을 고려하여 분당 450°로 설정함.



(a) 강관파일

(b) 스크류파일

그림 53 모형시험을 위한 말뚝의 관입

- 말뚝 설치 후 시험은 수평력을 발생시키지 않도록 지그를 이용하여 하중을 재하함.



그림 54 지그를 이용한 하중 재하

6.2.2 모형시험 case 선정

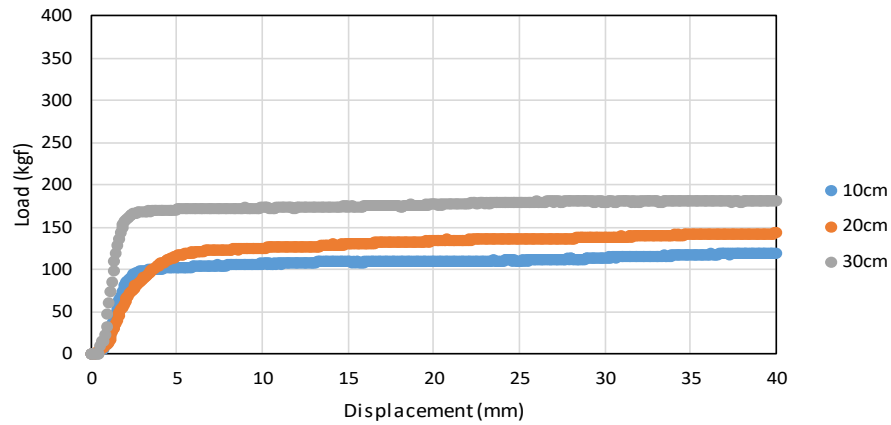
- 모형시험은 서울대학교 수원캠퍼스 농장 영농형 태양광 실증 부지의 대상 토양에 대하여 수행함. 대상 토양은 통일분류법 상 SM, 삼각분류법 상 사양토로 국내 밭토양 중 대표적인 분류를 나타냄.
- 동일한 토성에서도 지반의 밀도와 함수비에 따라 흙의 역학적 특성이 변화하기 때문에, 기초의 지지력 및 안전성도 이에 따라 크게 변화할 수 있어, 지반의 단위중량과 함수비를 고려하여 case를 선정함.
- 현장조사결과를 바탕으로 지반의 건조단위중량은 1.4, 1.5, 1.6 t/m³로, 지반의 함수비는 20%로 모형 지반을 조성함.
- 또한 기초의 형식 별 지지력 특성을 확인하기 위하여 기초의 종류는 일반 강관파일과 스크류파일을 적용
- 근입깊이 case는 하중 재하 시 벽면 및 바닥면에 의한 지지력 과대평가를 방지하기 위하여 10, 20, 30 cm로 선정 (모형토조 크기를 고려).

표 68 모형시험 조건

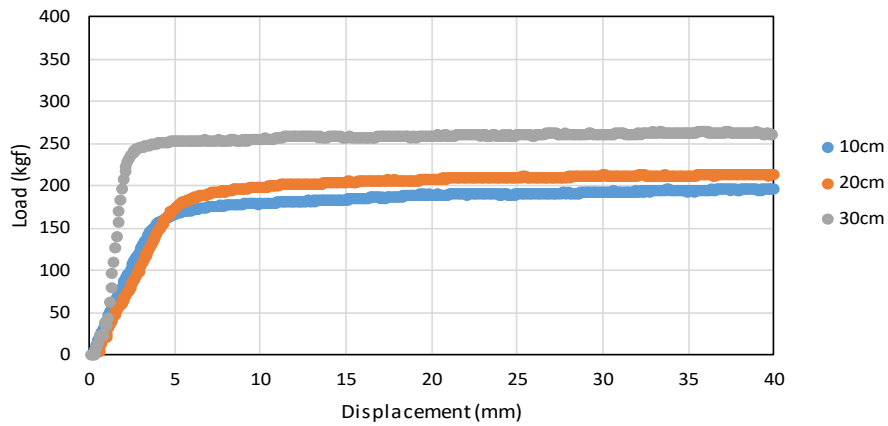
토양 분류	함수비	건조단위중량 (t/m ³)	근입깊이 (cm)
SM	20%	1.4	10
		1.5	20
		1.6	30

6.2.3 압축지지력 시험 결과

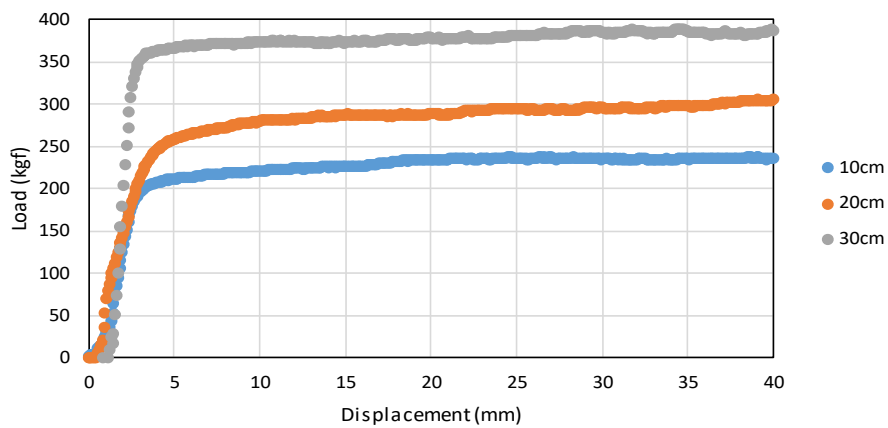
- 강관파일의 압축지지력 시험 결과는 그림 55와 같음.
- 건조단위중량과 근입깊이가 깊어질수록 압축지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 모든 case에서 하중-변위 곡선상의 극한하중을 확인할 수 있음.



(a) 건조단위중량 1.4t/m³



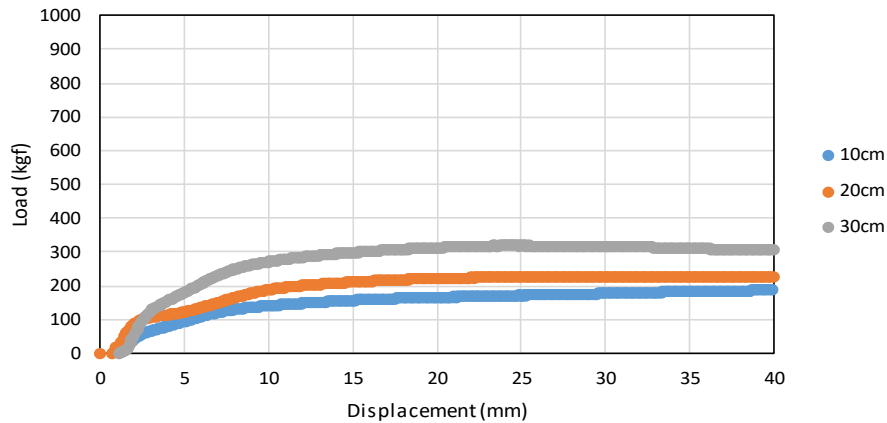
(b) 건조단위중량 1.5 t/m³



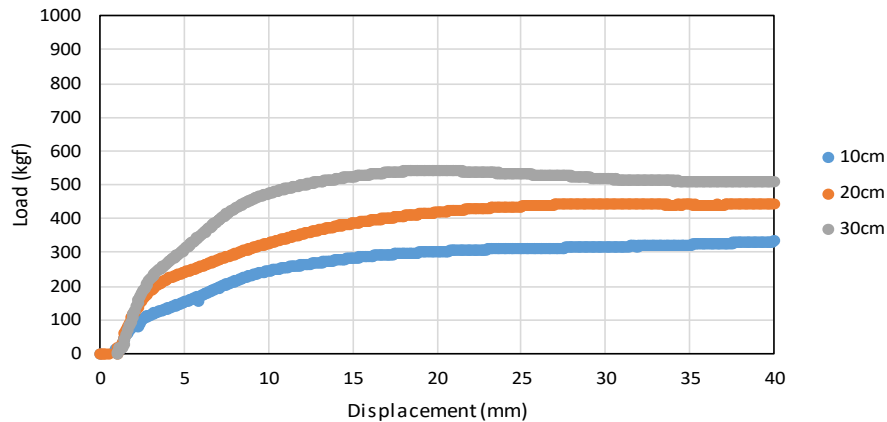
(c) 건조단위중량 1.6 t/m³

그림 55 강관파일 압축시험 결과

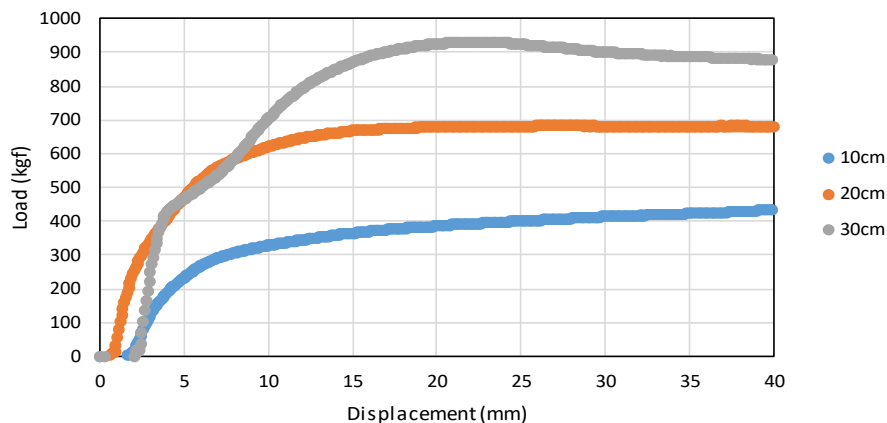
- 스크류파일의 압축지지력 시험 결과는 그림 56과 같음.
- 건조단위중량과 근입깊이가 깊어질수록 압축지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 대부분의 case에서 하중-변위 곡선상의 극한하중을 확인할 수 있었으나, 근입깊이 30 cm 인 경우에는 peak 하중이 나타나 지반이 파괴된 것을 확인할 수 있음.
- 스크류파일의 압축 재하 시 일반적인 말뚝과 달리 변곡점이 뚜렷하게 2개 생기는 것을 확인할 수 있음.
- 이는 스크류 날개에 의하여 지지력을 획득하지만, 한계 하중에 도달하면 변위가 발생하며 지반이 파괴되는 메커니즘과 연관이 있는 것으로 판단됨.



(a) 건조단위중량 1.4t/m³



(b) 건조단위중량 1.5 t/m³

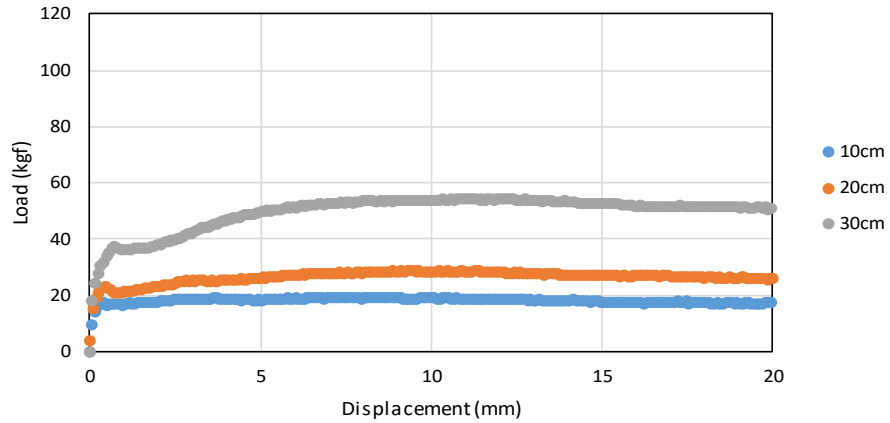


(c) 건조단위중량 1.6 t/m³

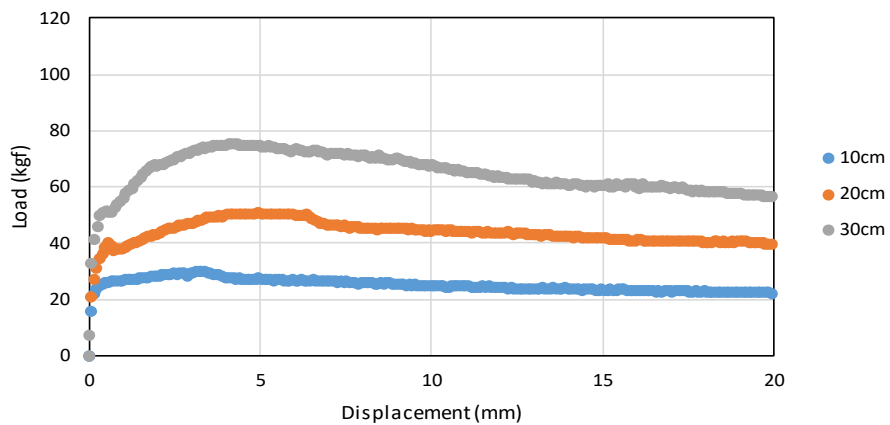
그림 56 스크류파일 압축시험 결과

6.2.4 인발지지력 시험 결과

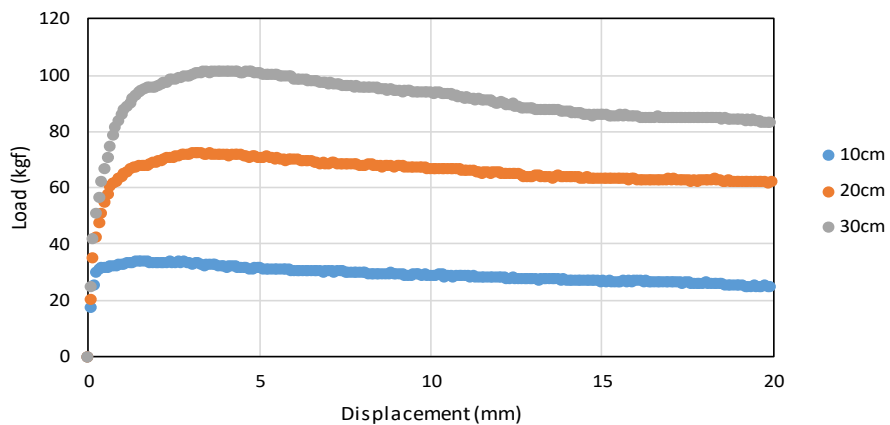
- 강관파일의 인발지지력 시험 결과는 그림 57과 같음.
- 건조단위중량과 근입깊이가 깊어질수록 인발지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 모든 case에서 peak 하중을 확인할 수 있었으며, 이후 변위 증가 시 인발저항력이 감소하여 잔류인발저항에 도달 후 일정하게 유지됨.



(a) 건조단위중량 1.4t/m³



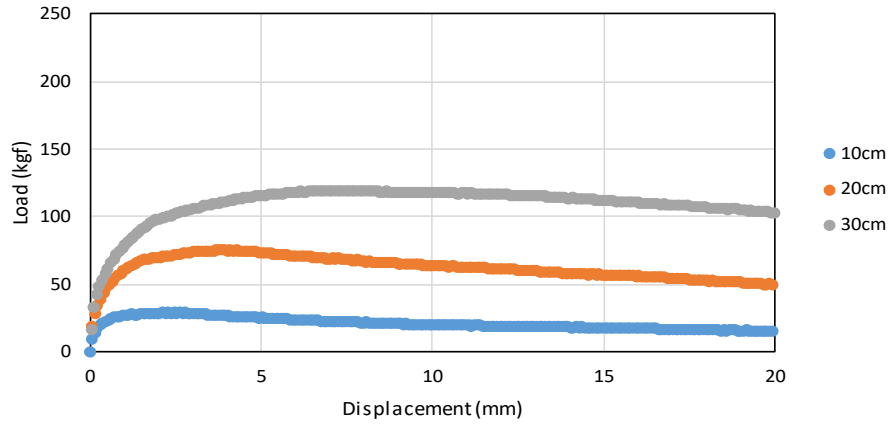
(b) 건조단위중량 1.5 t/m³



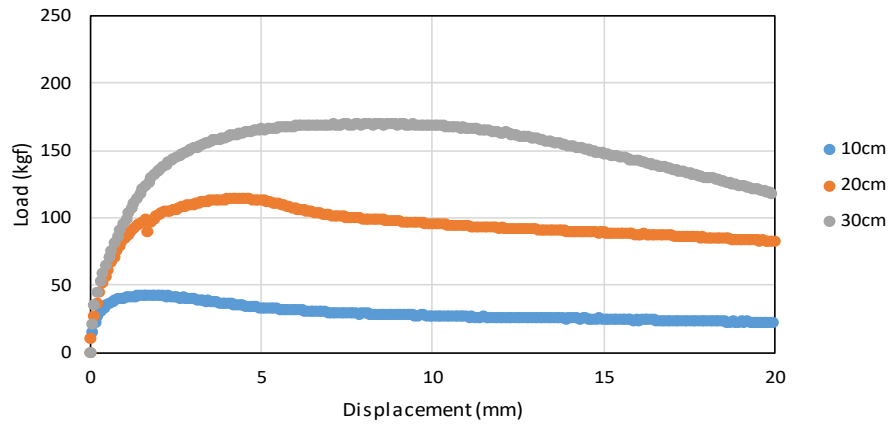
(c) 건조단위중량 1.6 t/m³

그림 57 강관파일 인발시험 결과

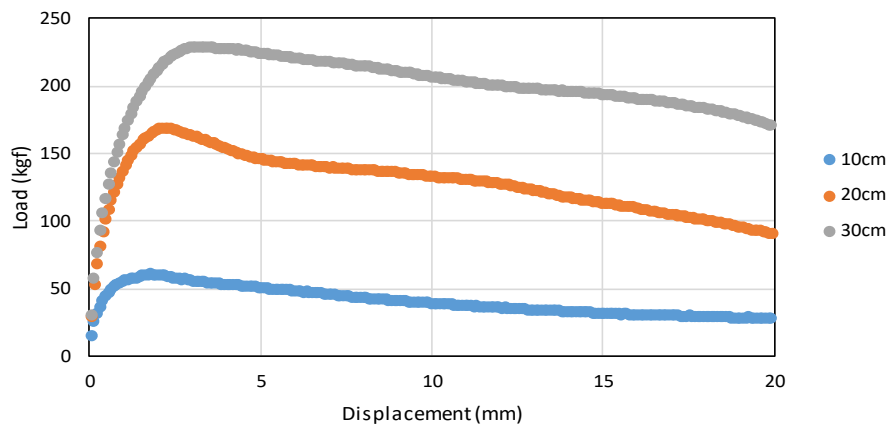
- 스크류파일의 인발지지력 시험 결과는 그림 58과 같음.
- 건조단위중량과 근입깊이가 깊어질수록 인발지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 하중-변위 곡선의 형태는 강관파일의 하중-변위 곡선과 유사하나, peak 하중 도달 이후 잔류인발저항에 도달하지 못하고 불안정한 곡선 형태가 나타남.
- 이는 인발저항을 발생시키는 상부 토양이 심하게 파괴되어 나타나는 것으로, 스크류 파일의 경우 안정적인 잔류인발저항을 기대할 수 없음.



(a) 건조단위중량 1.4t/m^3



(b) 건조단위중량 1.5 t/m^3

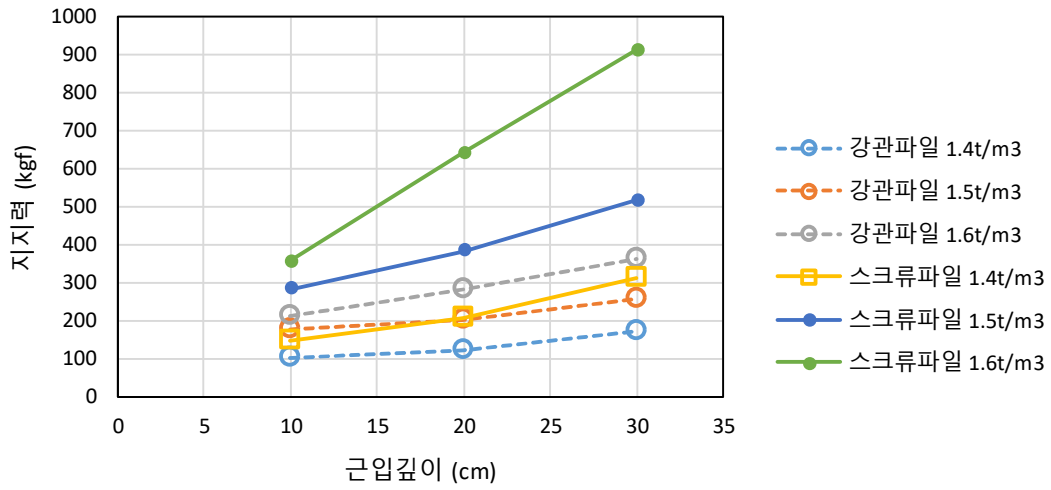


(c) 건조단위중량 1.6 t/m^3

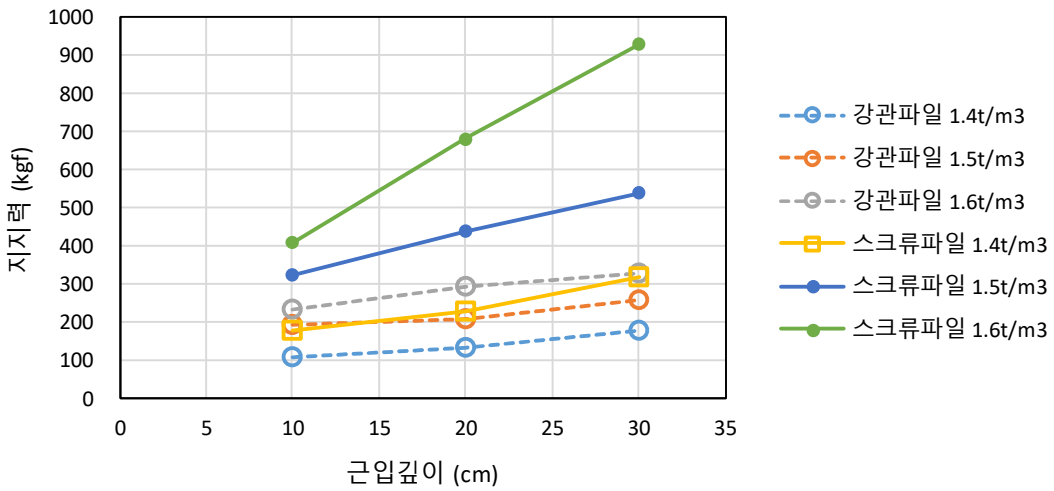
그림 58 스크류파일 인발시험 결과

6.2.5 모형시험을 통한 지지력 평가

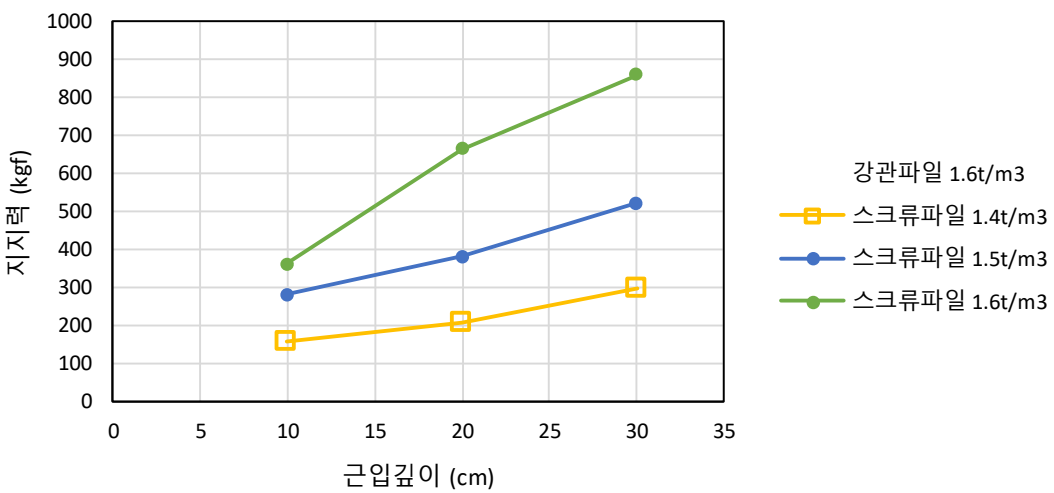
- 전침하량 분석법 중 말뚝 직경의 10% 및 25.4 mm 침하량 기준에 따라 강관파일과 스크류파일의 극한하중을 확인함.
- 하중-변위 곡선에서 강관파일의 경우 Terzaghi/Peck과 뉴욕시 기준 등에서 정하고 있는 25.4 mm 기준을 적용할 때 극한하중과 거의 동일한 값을 얻을 수 있었으며 말뚝 직경의 10%인 7.6 mm의 침하량에서는 극한하중에 비하여 다소 작은 값으로 산정됨.
- 하중-변위 곡선에서 스크류파일의 경우 25.4 mm에서는 지반이 파괴되어 하중값이 감소하는 case가 존재하며, 말뚝직경의 10%인 9.63 mm에서는 지반이 압축되면서 지지력이 충분히 증가하지 못하는 것으로 나타남.
- 헬리컬 파일에 대한 최근의 연구들은, helix 날개를 포함한 말뚝 직경의 5~20%에 해당하는 침하량을 극한하중의 기준으로 제시하고 있으나, 본 연구에서 이용된 스크류 파일의 경우는 약 20%에서 극한하중이 나타남.
- 일반적으로 현장시험 수행 시에는 극한하중을 확인할 수 없는 경우가 대부분이므로, 모형시험을 통해 획득한 하중-변위 곡선을 이용하여 항복하중을 산정함.
- 항복하중은 L1-L2 방법을 이용하여 산정하였으며, 강관파일의 경우 극한하중과 항복하중이 큰 차이가 나타나지 않으나, 스크류파일의 경우 다소 차이나는 것으로 나타남.
- 강관파일의 경우 항복하중은 변위 약 3 mm에서 즉시 발생하나, 스크류 파일의 경우 두 개의 변곡점을 거쳐 말뚝직경의 약 15%에서 항복하중이 발생하는 것으로 나타남.
- 강관파일과 스크류파일 모두 근입깊이 증가에 따라 지지력이 증가하는 것으로 나타남.



(a) PS curve 분석법에 따른 지지력



(b) 침하량 25.4 mm 기준에 따른 지지력



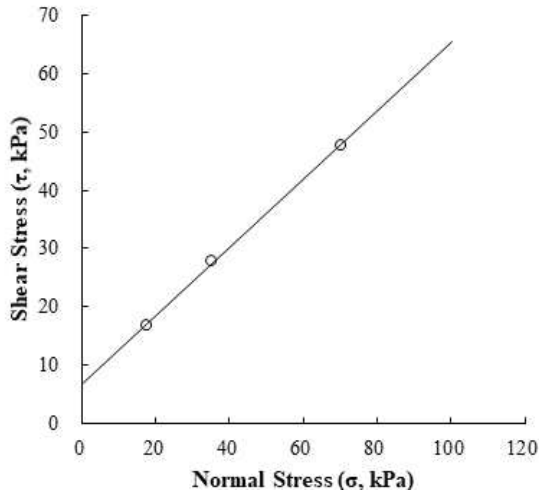
(c) 스크류 직경의 15% 침하량 기준에 따른 지지력

그림 59 강관 파일 및 스크류 파일의 지지력 산정 결과

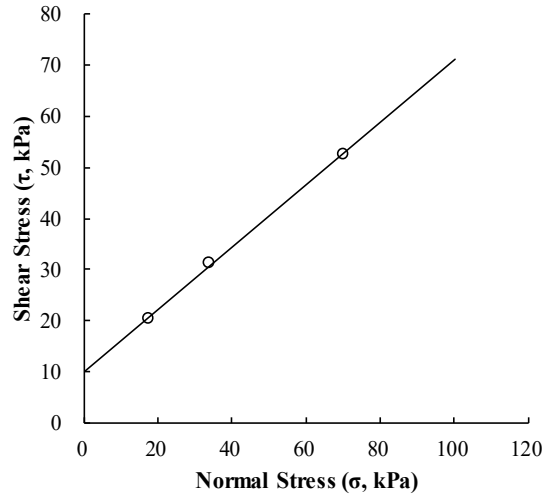
6.3 이론적 산정식을 통한 말뚝기초의 지지력 산정

6.3.1 모형시험 조건을 적용한 직접전단시험 및 전단강도 산정

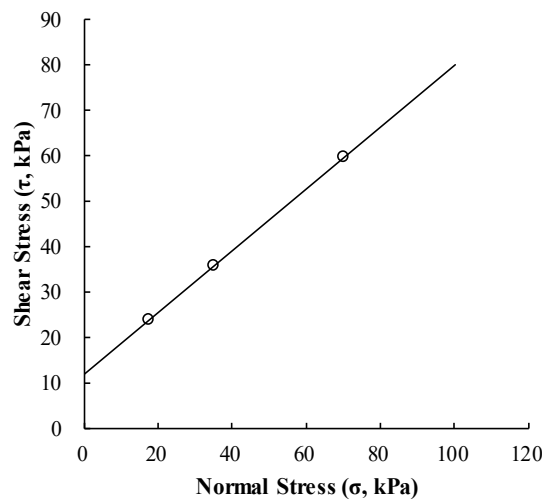
- 건조단위중량에 따른 모형시험 조건을 적용한 직접전단시험 결과는 그림 60과 같이 나타났으며, 이에 따른 전단강도는 표 69와 같이 분석됨.



(a) 건조단위중량 1.4 t/m³



(b) 건조단위중량 1.5 t/m³



(c) 건조단위중량 1.6 t/m³

그림 60 모형시험 조건을 적용한 직접전단시험 결과

표 69 모형시험 조건에 따른 흙의 전단강도

건조단위중량 (t/m ³)	1.4	1.5	1.6
점착력 (C, kPa)	6.946655	10.0602	12.02218
내부마찰각 (ϕ , °)	30.32731	31.35887	34.18716

6.3.2 강관파일의 지지력 산정식

- 앞서 검토한 Dórr 공식의 적용 시 주면마찰력이 선단지지력에 비하여 매우 큰 값으로 산정됨.
- 모형시험 결과 말뚝의 인발지지력이 압축지지력에 비하여 매우 작게 나타나는데, 말뚝의 인발지지력은 주면마찰에 의하여 발생하는 것으로, Dórr 공식을 통한 산정 결과와는 반대되는 결과로 판단됨.
- 반면 모형시험 결과는 Terzaghi 이론식과 일치하기 때문에, Terzaghi 식을 적용하여 선단 지지력을 산정함.

$$Q_u = (\alpha CN_c + \frac{1}{2}\beta\gamma_2 BN_r + \gamma_1 LN_q)A_p + ULf_s$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)

U : 말뚝의 둘레길이 (m)

L : 말뚝의 근입깊이 (m)

B : 말뚝의 직경 또는 폭 (m)

A_p : 말뚝선단의 지지면적 (m²)

α, β : 기초의 형상계수

C : 흙의 점착력 (kN/m²)

f_s : 평균주면마찰력 (kN/m²)

γ_1 : 말뚝선단 하부지반의 단위중량 (kN/m³)

γ_2 : 말뚝주변 지반의 단위중량 (kN/m³)

N_c, N_r, N_q : 말뚝선단 하부지반의 수정지지력계수

- 이 때, 주면마찰력은 말뚝과 흙의 경계면에서 발생하는 내부마찰각에 의한 힘 및 점착력에 의한 힘의 합으로 계산함.

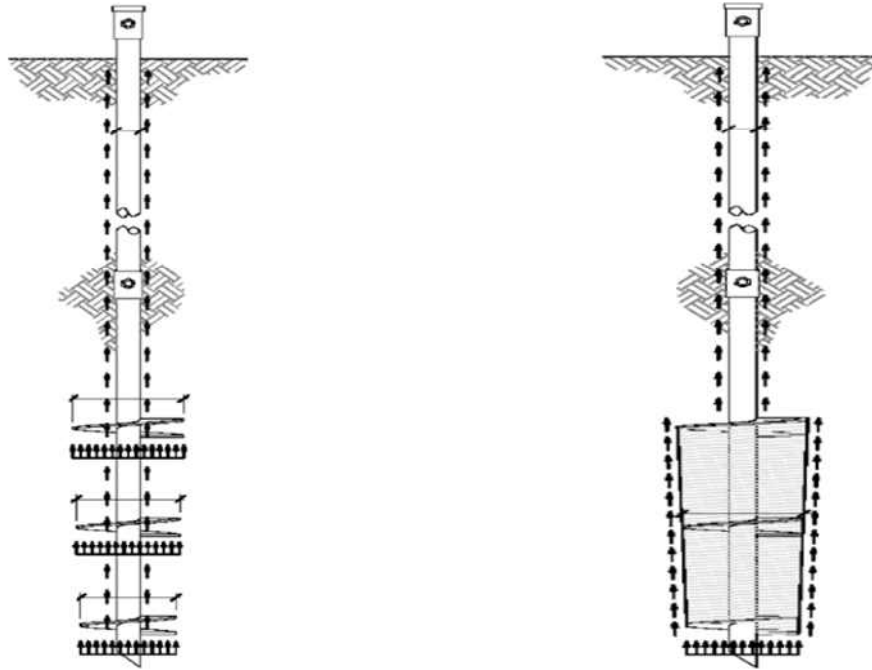
$$Q_s = \frac{1}{2}U\gamma L^2 K \tan \delta + UCL$$

여기서, K : 토압계수

δ : 말뚝-흙 마찰각 (°)

6.3.3 스크류파일의 지지력 산정식

- 스크류 파일의 지지력 산정은 헬리컬 파일의 지지력 산정 방법을 참고하여 기존 지지력 산정식을 변형하여 적용함.
- 헬리컬 파일의 지지력 산정 방법은 Individual bearing method와 Cylindrical shear method가 있음.



(a) Individual bearing method

(b) Cylindrical shear method

그림 61 헬리컬 파일의 지지력 산정 (Perco, 2009)

- Individual bearing method는 각각의 원판 또는 날개가 각각 선단지지력을 발휘하여 모든 선단지지력과 주면마찰력의 합으로 지지력을 결정함.
- Cylindrical shear method는 원판 또는 날개 사이에 있는 지반이 하나의 기둥과 같이 거동하여 말뚝 선단부의 선단지지력과 흙 기둥과 지반 사이의 마찰, 말뚝과 지반 사이의 마찰력의 합으로 지지력을 결정함.
- 본 연구에서 사용한 screw pile은 나선 날개 사이의 간격이 일반적인 헬리컬 파일에 비하여 매우 좁고 날개의 폭도 좁음. 현장 지반 조건은 함수비가 높은 점토질의 연약지반이 아닌 실트질 모래로 이루어진 양호한 지반임.
- 따라서 Cylindrical shear method가 더욱 적합한 것으로 판단되어 이를 적용하여 스크류파일의 지지력을 계산함.
- 얇은 깊이에서 스크류 파일의 인발 시, 상부에서 지반이 파괴되고 원뿔 형태의 토체가 분리되어 들어올리며, 이때 토체의 중량이 인발저항력에 영향을 미침.
- 스크류파일의 근입깊이가 깊어지더라도 원뿔 형태의 토체 크기는 근입깊이와 동일하게 증가할 수 없으며, 그림 62와 같이 말뚝이 토체를 들어올리는 주면마찰력 F_s 와 토체의 중량 W 가 일치하는 깊이인 $H_{soilcone}$ 까지 증가함.

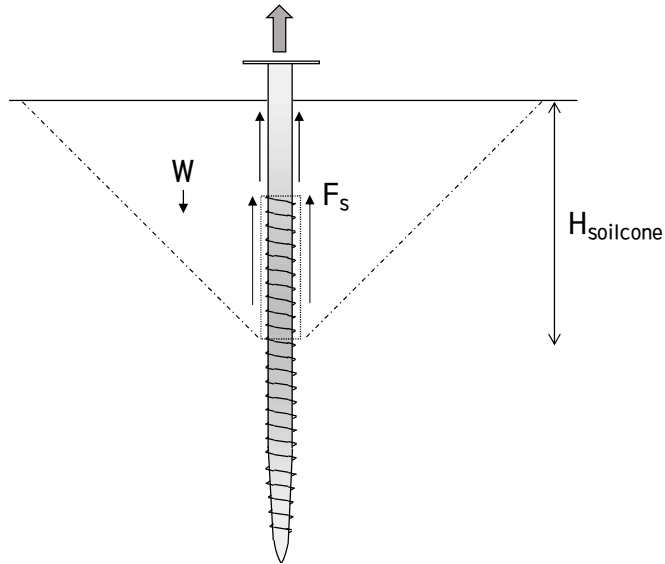


그림 62 스크류파일의 인발에 따른 soilcone 형성

- 모형시험을 통해 확인한 스크류파일의 거동 특성에 따라 지지력 산정식을 수정하여 적용함.
- 압축지지력 산정식은 다음과 같음.

$$Q_u = (aCN_c + \frac{1}{2}\beta\gamma_2 B_{screw} N_r + \gamma_1 L N_q) A_{p.screw} + U_{screw} L f_s$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)

U_{screw} : 스크류 직경을 포함한 말뚝의 둘레길이 (m)

B_{screw} : 스크류 날개를 포함한 말뚝의 직경 (m)

$A_{p.screw}$: 스크류 날개를 포함한 말뚝선단의 지지면적 (m²)

- 인발지지력 산정식은 다음과 같음.

$$Q_{uplift} = Q_s + Q_{soilcone} + Q_{bearing}$$

$$Q_s = \frac{1}{2} U_{screw} \gamma L^2 K \tan \phi + U_{screw} CL$$

$$Q_{soilcone} = \frac{\gamma_2}{3} \pi L^3$$

여기서, Q_{uplift} : 말뚝의 극한지지력 (kN)

$Q_{soilcone}$: 원뿔형 토체의 중량 (kN)

$Q_{bearing}$: 인발 저항으로 발생하는 스크류 날개에 의한 압축지지력 (kN)

6.3.4 이론적 지지력 산정 결과 및 모형시험과의 비교를 통한 검증

- 압축지지력 산정 결과 강관파일과 스크류파일 모두 높은 정확도로 지지력을 산정할 수 있음을 확인함.
- 압축지지력의 이론적 산정 시 모형시험 결과에 비하여 다소 큰 값으로 나타나나, 이는 지지력이 증가할수록 무시할 수 있는 수준임.
- 본 연구에서 수행한 시험은 최대 근입깊이가 30 cm로, 실제 현장에서는 이보다 깊게 파일을 관입하기 때문에 제시된 압축지지력의 이론적 산정식은 실제 현장에 대한 지지력 산정 및 예측에 적합한 것으로 판단됨.

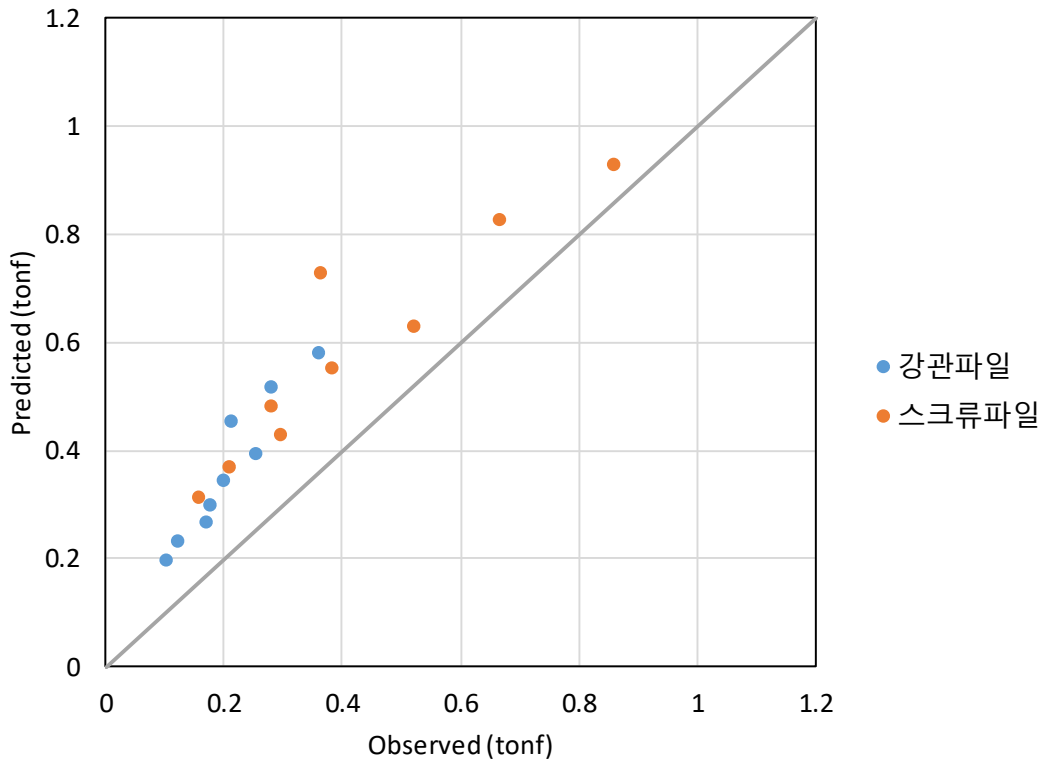


그림 63 압축지지력 산정 결과 비교 (이론적 산정식 및 모형시험)

- 인발지지력 산정 결과 강관파일과 스크류파일 모두 매우 높은 정확도로 지지력을 산정할 수 있음을 확인함.
- 인발지지력 산정 결과와 모형시험 결과를 도시한 결과 1:1 직선 위에서 거의 벗어나지 않았으며 편향된 경향을 보이지 않아 제시된 인발지지력의 이론적 산정식은 실제 파일의 거동을 정확하게 반영한 것으로 판단됨.

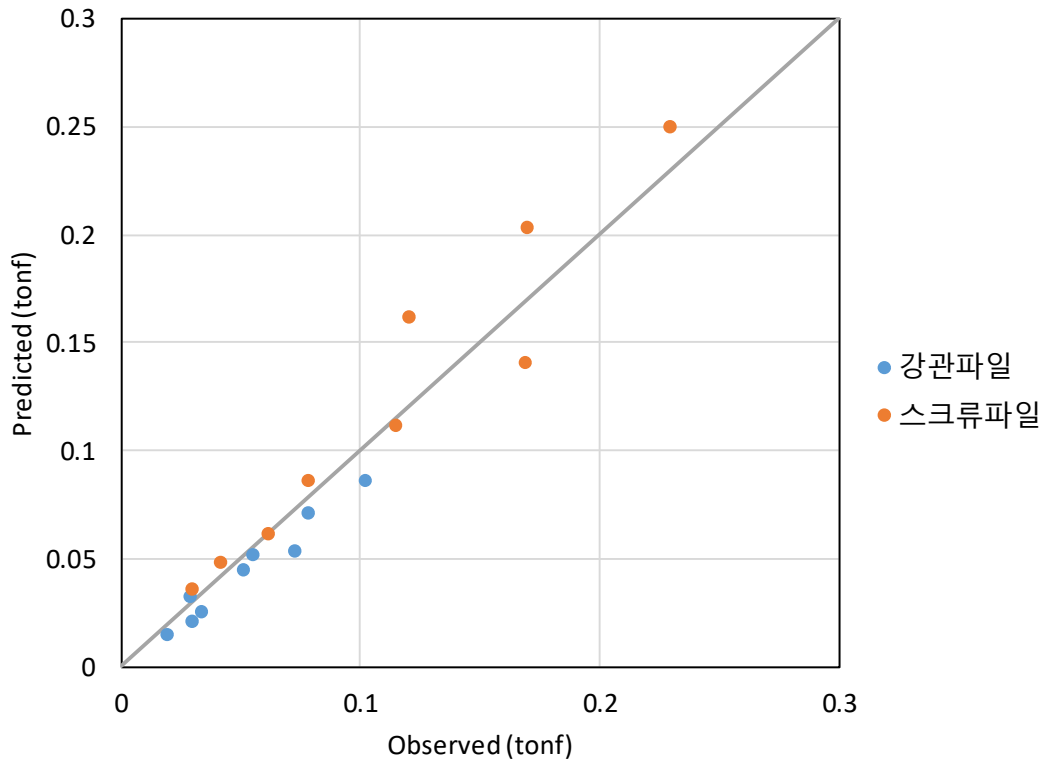


그림 64 인발지지력 산정 결과 비교 (이론적 산정식 및 모형시험)

6.4 현장시험을 통한 말뚝기초의 지지력 산정

6.4.1 현장시험 case 선정

- 현장시험은 이론적 지지력 산정 결과 및 수치해석 결과의 검증을 위하여 다양한 case에 대하여 수행하였으며, 현장시험 case는 그림 65 및 표 70과 같음.
- 현장시험 case는 영농형 태양광 구조물의 특성을 고려하여 압축재하시험과 인발재하시험을 각각 실시함.

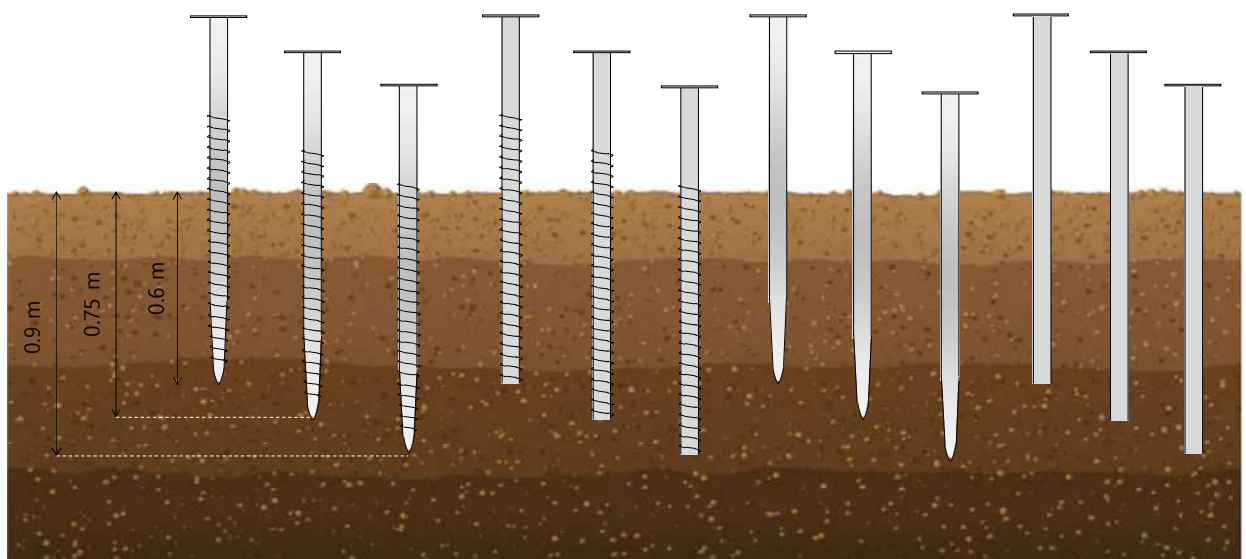


그림 65 지지력 산정을 위한 현장시험 case

표 70 지지력 산정을 위한 현장시험 case 구분

압축재하 시험	말뚝 주면부 형태	나선형						직선형					
	선단부 형태	원뿔형			원기둥형			원뿔형			원기둥형		
	근입깊이 (cm)	60	75	90	60	75	90	60	75	90	60	75	90
	Case 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
인발재하 시험	말뚝 주면부 형태	나선형						직선형					
	선단부 형태	원뿔형			원기둥형			원뿔형			원기둥형		
	근입깊이 (cm)	60	75	90	60	75	90	60	75	90	60	75	90
	Case 번호	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

- 본 연구에서 적용한 말뚝은 일반적으로 사용되는 강관 말뚝과 달리, 말뚝 선단부가 월뿔형 이고 말뚝 주면에 나선이 존재하여, 나사와 같이 회전관입할 수 있는 형태임.
- 따라서 현장시험을 통하여 말뚝 선단의 침단부와 말뚝 주면의 나선이 말뚝의 지지력에 미 치는 영향을 평가하고 기초의 안전성뿐만 아니라 경제성을 고려하여 가장 효율적인 기초 형태를 제시할 수 있도록 적절한 말뚝의 규모를 선정하고자 함.
- 특히 영농지역에 설치되는 말뚝임을 고려하여 영농지역 지반의 특성과 환경조건 등을 고려 하여 현장시험을 실시하고 분석하고자 함.

6.4.2 현장시험 환경

- 서울대학교 수원캠퍼스의 실증 부지에, 총 24개의 말뚝을 설치하고 2주간의 안정화 기간 을 거친 후 현장시험을 수행함.



그림 66 현장시험을 위한 말뚝 설치 전경

- 압축재하시험에 사용한 장비의 제원 및 시험 전경은 다음과 같음.

표 71 압축재하시험 장비 제원

구분	품명	용량	수량	비고
재하장치	유압잭 및 펌프	30 ton	1식	유압식
	재하대	0.2 ton	1식	
	기타부수장비	-	1식	Steel bar&plate
측정장치	Dial Indicator	50.00 mm	2EA	정도 1/100 mm
	Indicator	30.0 ton	1식	100 kgf
	Magnetic Holder	-	2EA	자석식
	기타부수장비	-	1식	초시계, 지지대 등



그림 67 압축재하시험 전경

- 인발재하시험에 사용한 장비의 제원 및 시험 전경은 다음과 같음.

표 72 인발재하시험 장비 제원

구분	품명	용량	수량	비고
재하장치	유압잭 및 펌프	30 ton	1식	유압식
	재하대	0.2 ton	1식	
	기타부수장비	-	1식	Steel bar&plate
측정장치	Digital Indicator	100.00 mm	2EA	정도 1/100 mm
	Magnetic Holder	-	2EA	자석식
	기타부수장비	-	1식	초시계, 지지대 등

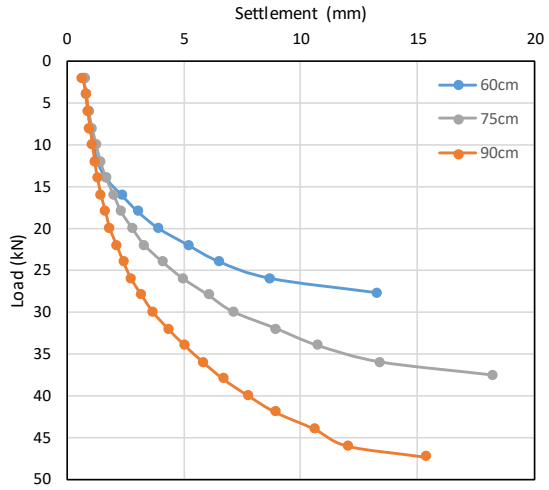


그림 68 인발재하시험

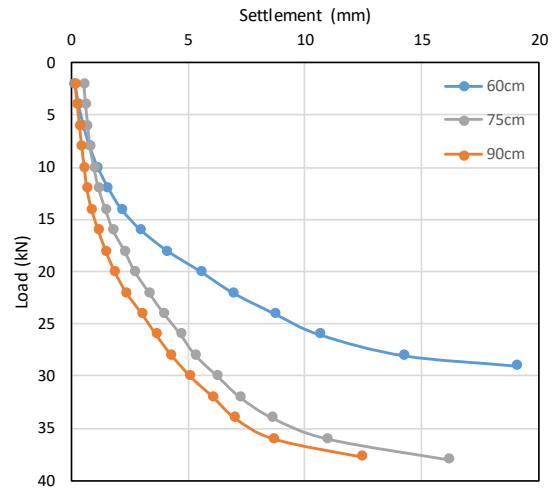
6.4.3 현장 재하시험 결과

6.4.3.1 압축재하시험 결과

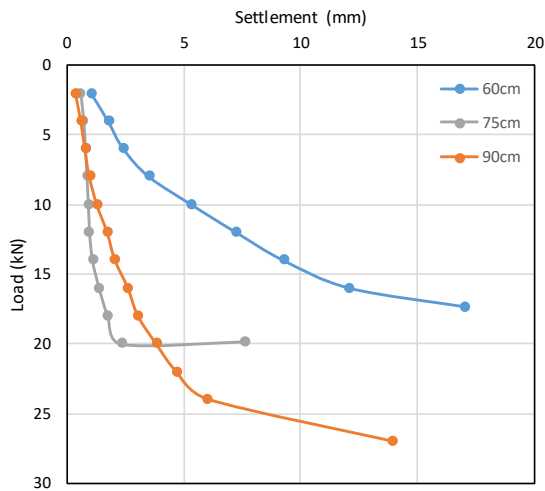
- 현장 압축재하시험의 case 별 P-S Curve는 다음과 같음.



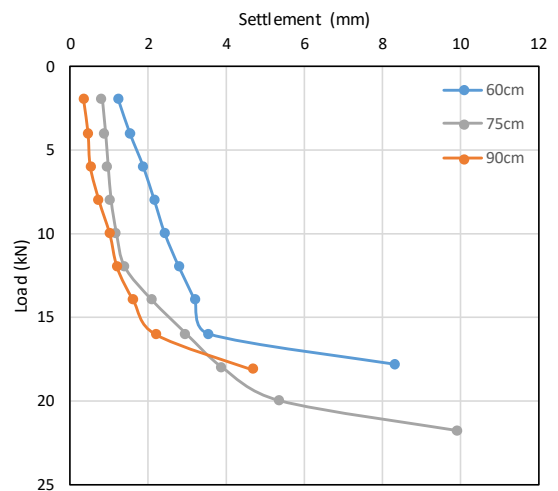
(a) Case 1, 2, 3



(b) Case 4, 5, 6



(c) Case 7, 8, 9

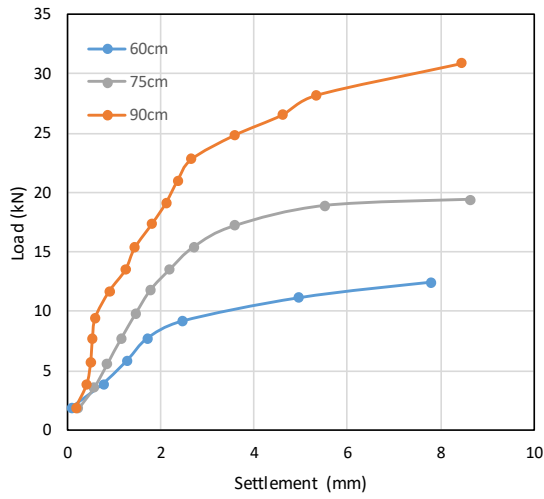


(d) Case 10, 11, 12

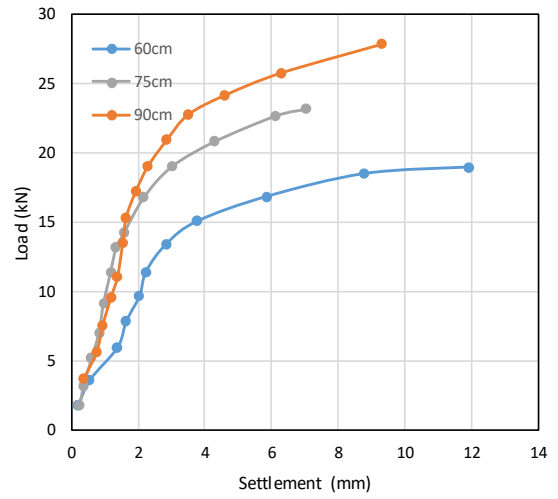
그림 69 현장 압축재하시험 결과 (P-S Curve)

6.4.3.2 인발재하시험 결과

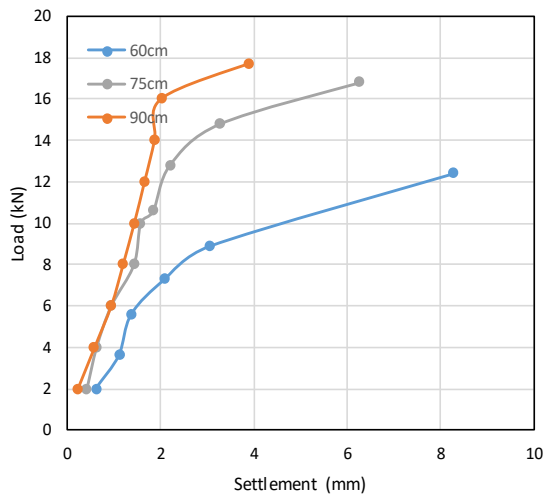
- 현장 인발재하시험의 case 별 P-S Curve는 다음과 같음.



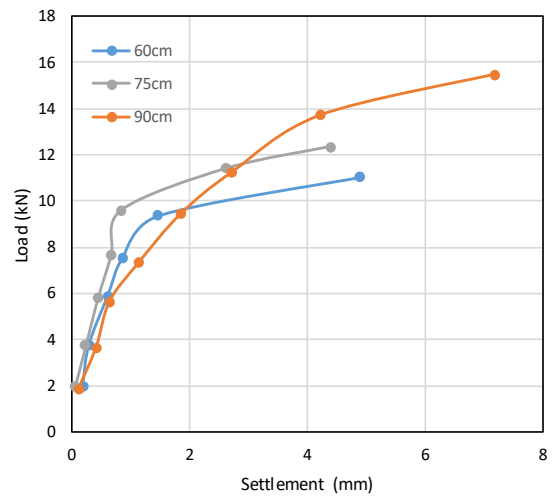
(a) Case 13, 14, 15



(b) Case 16, 17, 18



(c) Case 19, 20, 21



(d) Case 22, 23, 24

그림 70 현장 인발재하시험 결과 (P-S Curve)

6.4.4 현장 재하시험 결과를 이용한 지지력 산정

6.4.4.1 현장시험을 통한 압축지지력 산정

- 현장재하시험 결과로부터 P-S curve 분석법 및 logP-logS curve 분석법에 따라 압축지지력 및 인발지지력을 산정함.
- 기초 case 및 근입깊이별 압축지지력 산정 결과는 그림 71과 같음.

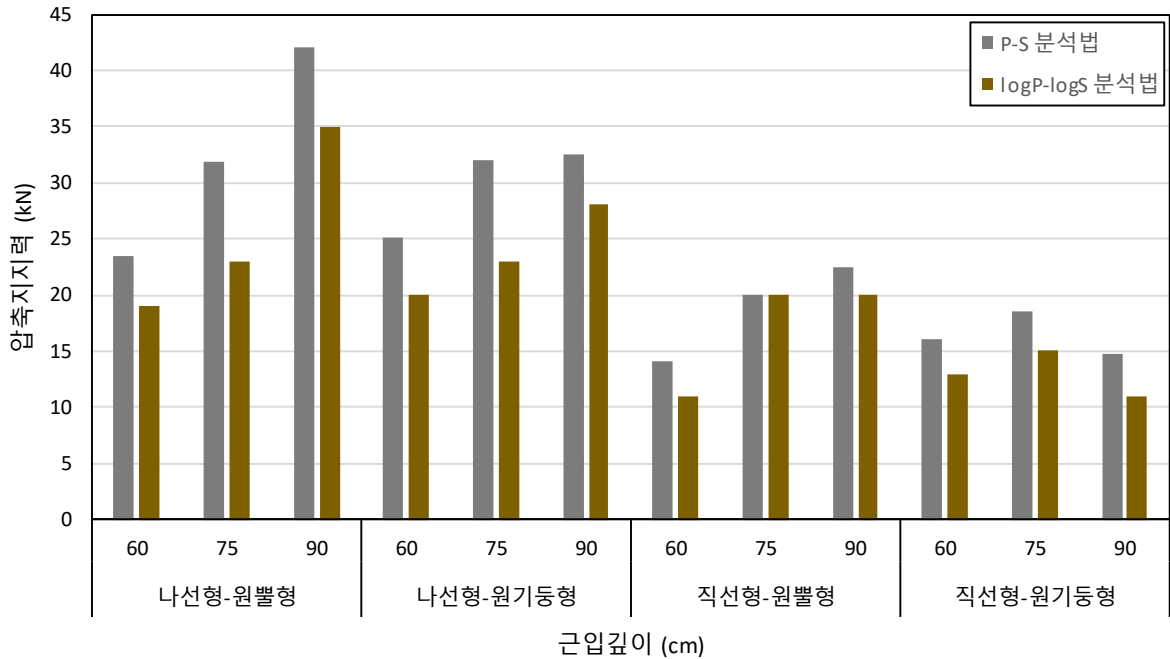


그림 71 현장 압축재하시험 결과를 이용한 압축지지력 산정

- 대부분의 case에서 근입깊이가 증가할수록 압축지지력이 증가하는 경향을 보임.
- Case 12 (직선형-원기둥형 90 cm)는 일관된 경향에서 벗어나 근입깊이 60, 75 cm에 비하여 낮은 압축지지력이 측정됨.
- 이는 현장에서 발생하는 지반의 불균일성, pile 관입 시 발생할 수 있는 지반 교란에 따른 연약화, 현장재하시험 시 발생할 수 있는 시험 상의 오차 등에 의한 것으로 판단됨.
- 나선형/직선형 비교 시 나선형 pile의 지지력이 더 크게 측정되며, 근입깊이에 따른 지지력 증가량 또한 더 큰 것으로 나타남.
- 원기둥형/원뿔형 비교 시 압축지지력의 크기에 있어서는 큰 차이가 나타나지 않으나 근입깊이에 따른 지지력 증가량은 원뿔형에서 더 큰 것으로 판단됨.
- 압축지지력에 뚜렷하게 영향을 미치는 인자는 나선형/직선형의 구분과 근입깊이임. 더 높은 지지력을 확보하기 위해서는 스크류파일이 유리하며 근입깊이가 깊어질수록 지지력을 빠르게 증가시킬 수 있을 것으로 판단됨.

6.4.4.2 현장시험을 통한 인발지지력 산정

- 현장 인발재하시험 결과를 이용한 기초 case 및 근입깊이별 인발지지력 산정 결과는 그림 72와 같음.

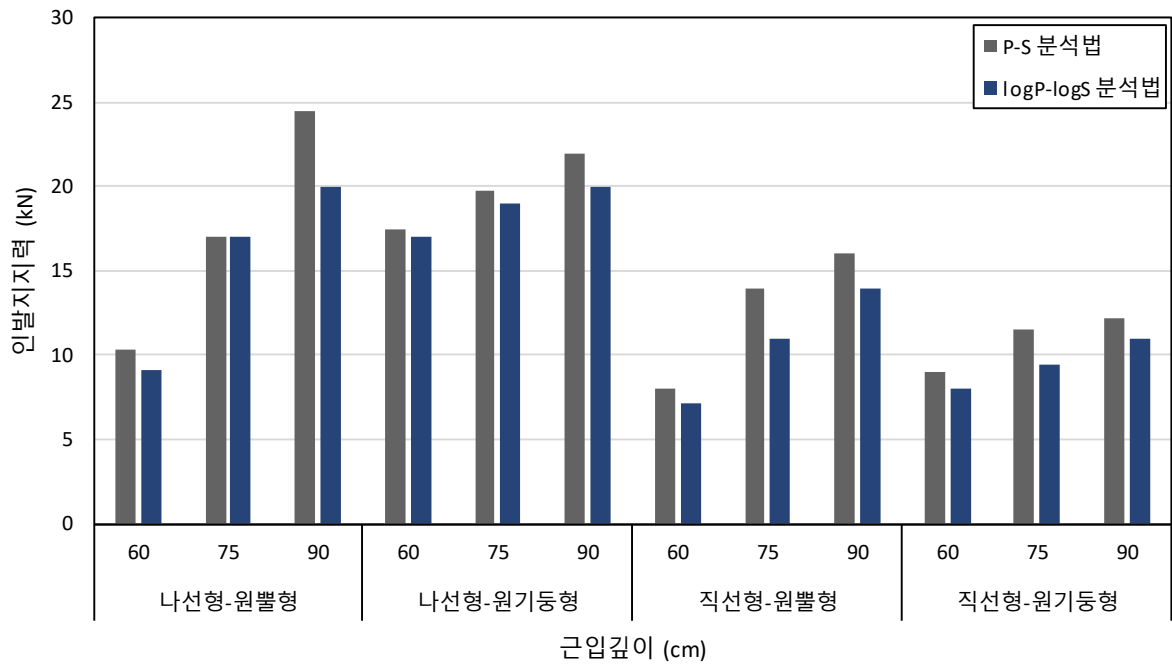
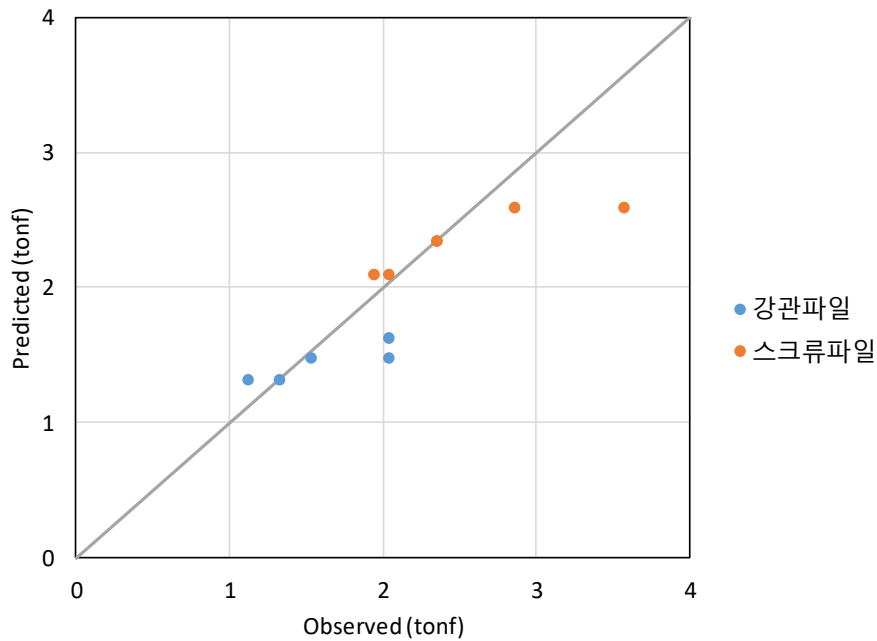


그림 72 현장 인발재하시험 결과를 이용한 인발지지력 산정

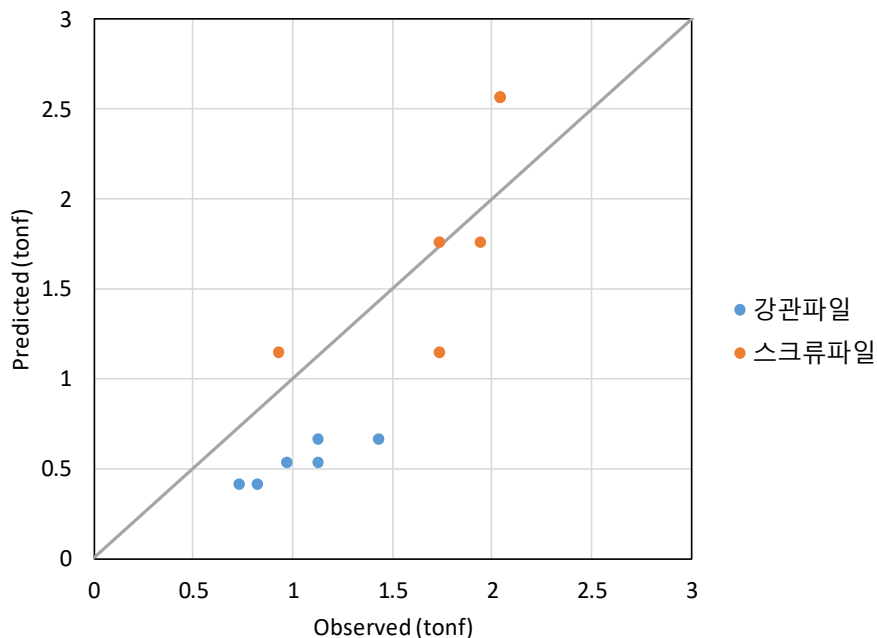
- 모든 case에서 근입깊이가 증가할수록 인발지지력이 증가하는 것으로 나타남.
- 나선형/직선형 비교 시 나선형의 인발지지력이 뚜렷하게 높은 것으로 나타났으며 근입깊이에 따른 지지력 증가량 또한 상승폭이 더 큰 것으로 나타남.
- 원기둥형/원뿔형 비교 시 압축지지력과 마찬가지로 인발지지력 또한 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 나타남.
- 인발지지력에 뚜렷하게 영향을 미치는 인자는 나선형/직선형의 구분과 근입깊이임. 더 높은 지지력을 확보하기 위해서는 말뚝 종류는 스크류파일이 유리하며 근입깊이가 깊어질수록 지지력을 빠르게 증가시킬 수 있을 것으로 판단됨.
- 압축재하시험 결과와의 종합을 통하여 영농형 태양광 구조물과 같이 얇은 근입깊이를 가지는 말뚝을 설치할 경우에는 선단부의 모양에 따라 지지력 차이가 나타나지 않는 것으로 판단됨.
- 따라서 지반조건, 시공성, 경제성 등을 고려하여 말뚝의 선단부 모양을 변형하는 것은 기초 안전성 측면에서 문제가 되지 않을 것으로 판단됨.

6.4.5 현장시험 및 이론적 산정식을 이용한 지지력 비교·분석

- 현장재하시험 결과와 현장조건을 적용한 이론적 지지력 산정 결과를 비교하면 다음과 같음. 이때 이론적 지지력 산정은 모형시험 결과를 토대로 구성된 강관 및 스크류파일에 대한 지지력 산정식을 적용함.
- 원기둥형과 원뿔형의 지지력 차이가 유의미하지 않다는 결론에 따라 각각을 하나의 case로 적용하여 강관파일 6 cases와 스크류파일 6 cases의 압축 및 인발재하시험 결과를 구성함.
- 압축지지력의 경우 두 종류의 말뚝에서 모두 지지력을 잘 예측하는 것으로 나타남.
- 인발지지력의 경우 다소 오차가 발생하였으나 경향성이 일치하여, 현장 적용성을 확인함 (참고로 모형시험 결과에서는 매우 높은 정확도로 예측).



(a) 압축지지력



(b) 인발지지력

그림 73 지지력 산정 결과 비교 (현장시험 및 이론적 산정식)

6.5 수치해석을 이용한 말뚝기초의 침하량 및 지지력 산정

6.5.1 수치해석 모델 구축

- 말뚝기초의 수치해석을 위한 모델은 앞선 모형시험 및 현장시험과 같이 76.3 mm의 직경을 가지는 말뚝을 모사하여 구성하였으며, 기초 case는 그림 74 (a)와 같이 선단부 모양과 나선의 유무에 따라 총 4개로 구성함.
- 지반은 깊이 3 m, 가로·세로 5 m의 정방형인 단일 지반 형태로 모사하였으며 (그림 74 (b)), 지반조건은 기초 안전성 평가를 위한 case (표 60)를 적용함.

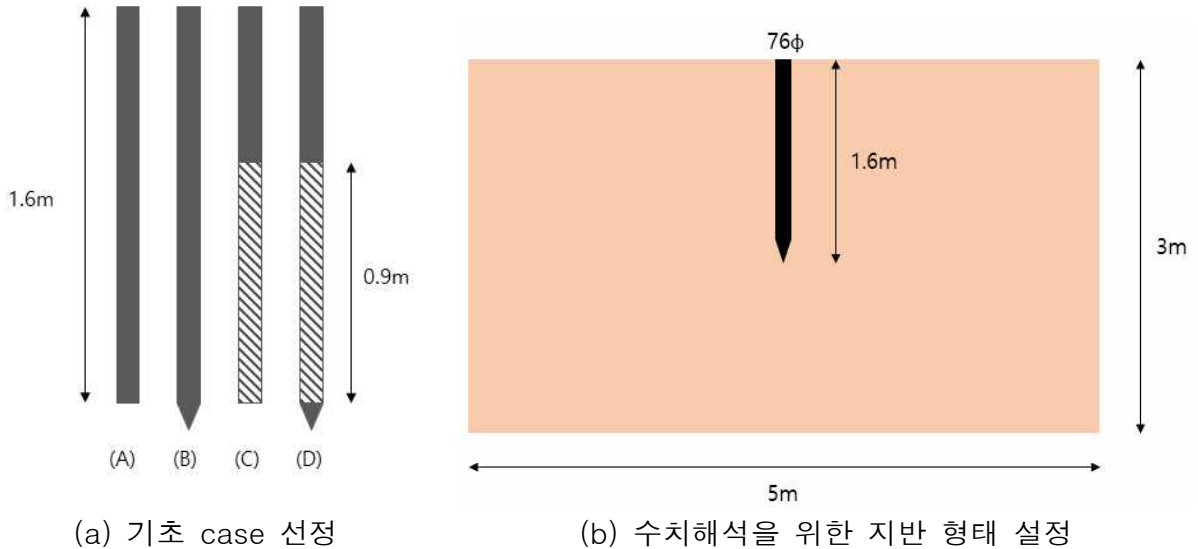


그림 74 수치해석 모델 구축을 위한 기초 case 및 지반 형태

- 수치해석 모델은 3D로 구성하였고, 첨단선단부와 나선부를 실제와 동일하게 적용하였으며, 구성 결과 예시는 그림 75와 같음.

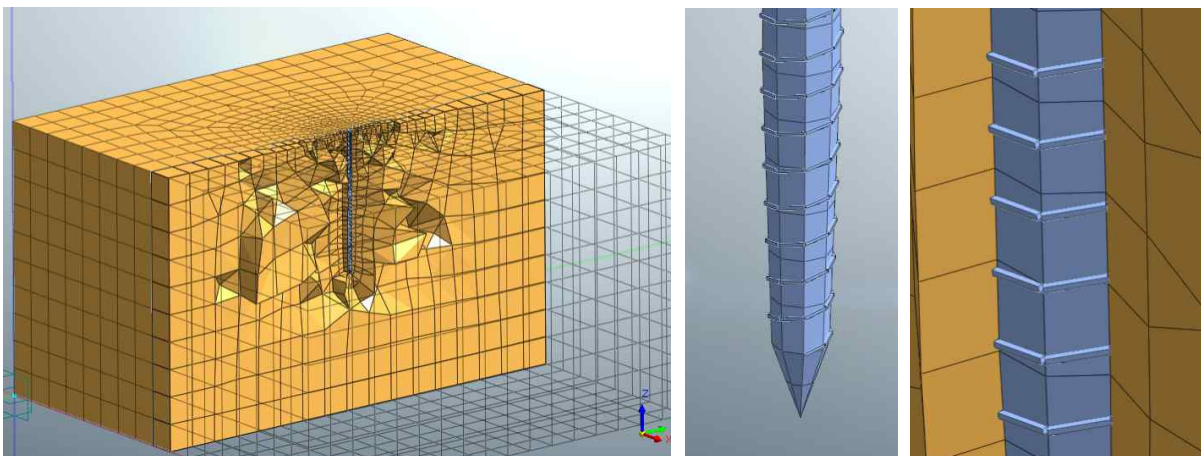
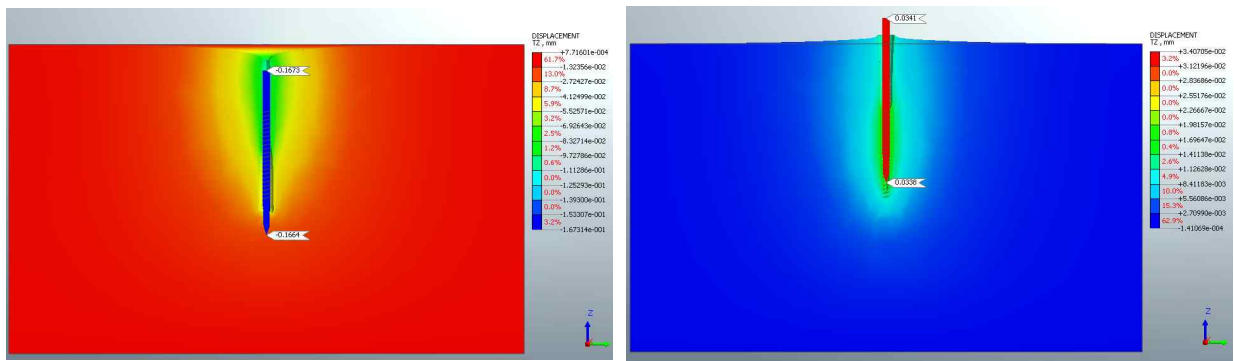


그림 75 수치해석 모델 구성 (첨단선단부, 나선)

- 임의로 말뚝 머리의 중앙부에 100 kgf의 압축하중과 20 kgf의 인발하중을 집중하중 형태로 재하함
- 말뚝의 형태와 지반조건에 따라 말뚝의 침하량을 산정 (말뚝의 침하량은 말뚝 머리의 변위를 의미)

6.5.2 수치해석 모델을 통한 지반조건 및 말뚝의 형태 별 거동 분석

- 수치해석 프로그램을 통해서 말뚝의 거동을 대략적으로 확인하며, 모델의 지오메트리와 입력조건에 따른 결과 값 차이를 이해하기 위해, 임의의 물성치를 입력하여 사전 테스트를 시행함 (1차년도)
- 밀도 1.6 t/m^3 , 점착력 4 kN/m^2 , 내부마찰각 24° , 침단선단부, 나선형의 조건에 대한 침하량 분석 결과 예시는 그림 76과 같으며, 다양한 지반조건에 따른 침하량 분석 결과는 표 73 및 그림 77, 78과 같음.



(a) 압축하중에 따른 침하량

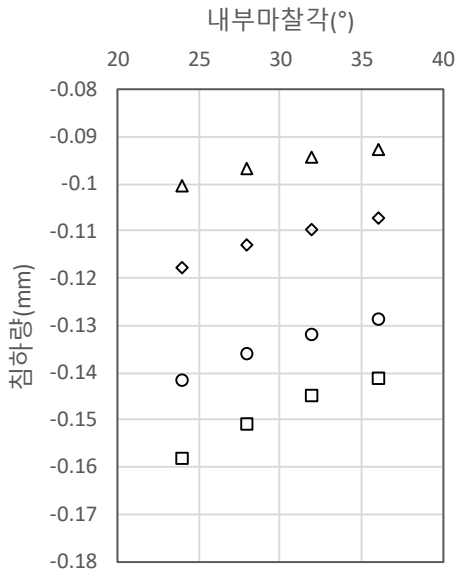
(b) 인발하중에 따른 침하량

그림 76 수치해석을 통한 압축 및 인발하중에 따른 침하량 분석 결과 예시

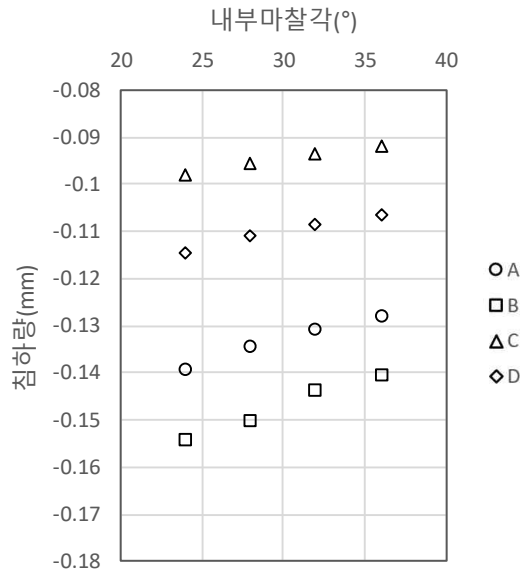
- 다양한 기초 case에 따른 침하량 분석 결과, 내부마찰각과 점착력의 증가에 따라 침하량이 감소하는 결과가 일관적으로 나타남.
- 주어진 강도정수의 범위 내에서 지반의 물성보다는 말뚝의 형태가 침하량에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타남.
- 나선의 유무가 침하량에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 일반 강관 말뚝에 나선부가 존재할 경우 침하량이 약 1.3~1.4배가량 감소함.
- 선단부의 형태가 뾰족할 경우 압축하중과 인발하중 모두에서 침하량이 더 크게 나타났으나, 나선이 있는 경우 인발시에는 침하량의 차이가 거의 없는 것으로 나타남 (C, D case 비교 결과).
- 뾰족한 선단부의 경우 선단지지력에는 크게 영향을 미치지만, 주면마찰력과는 큰 관계가 없기 때문으로 판단됨.
- 인발하중 시에는 주면마찰의 영향만을 받기 때문에 말뚝 주면부의 나선 형태가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단됨.

표 73 강도정수에 따른 침하량 산정

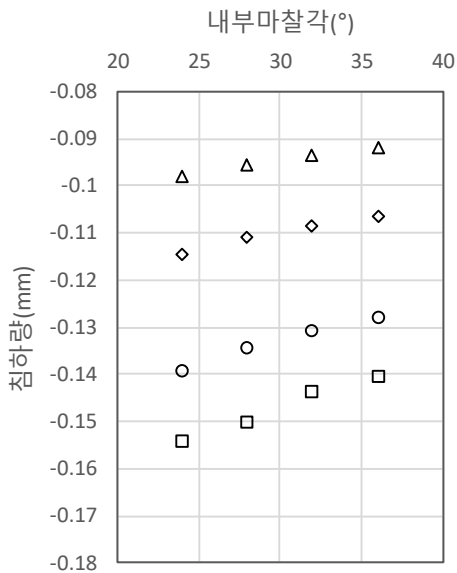
밀도 (t/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부 마찰각 (°)	침하량 (mm)							
			Pile case A		Pile case B		Pile case C		Pile case D	
			압축	인발	압축	인발	압축	인발	압축	인발
1.5	4	24	-0.1418	0.0307	-0.1584	0.0330	-0.1004	0.0203	-0.1178	0.0228
		28	-0.1363	0.0298	-0.1512	0.0317	-0.0970	0.0197	-0.1132	0.0224
		32	-0.1320	0.0285	-0.1451	0.0310	-0.0946	0.0192	-0.1100	0.0219
		36	-0.1290	0.0275	-0.1415	0.0300	-0.0928	0.0188	-0.1075	0.0217
	6	24	-0.1389	0.0294	-0.1540	0.0327	-0.0980	0.0193	-0.1144	0.0220
		28	-0.1342	0.0284	-0.1501	0.0308	-0.0953	0.0189	-0.1108	0.0217
		32	-0.1305	0.0274	-0.1436	0.0297	-0.0932	0.0185	-0.1082	0.0214
		36	-0.1277	0.0268	-0.1403	0.0291	-0.0916	0.0185	-0.1063	0.0211
	8	24	-0.1363	0.0286	-0.1511	0.0317	-0.0957	0.0187	-0.1117	0.0218
		28	-0.1321	0.0276	-0.1450	0.0312	-0.0934	0.0183	-0.1085	0.0220
		32	-0.1288	0.0268	-0.1408	0.0305	-0.0917	0.0181	-0.1066	0.0212
		36	-0.1258	0.0259	-0.1375	0.0294	-0.0905	0.0179	-0.1048	0.0212
	10	24	-0.1332	0.0293	-0.1495	0.0314	-0.0934	0.0184	-0.1098	0.0222
		28	-0.1291	0.0287	-0.1430	0.0306	-0.0923	0.0182	-0.1071	0.0219
		32	-0.1263	0.0281	-0.1408	0.0299	-0.0911	0.0170	-0.1050	0.0220
		36	-0.1253	0.0274	-0.1367	0.0296	-0.0895	0.0178	-0.1030	0.0221



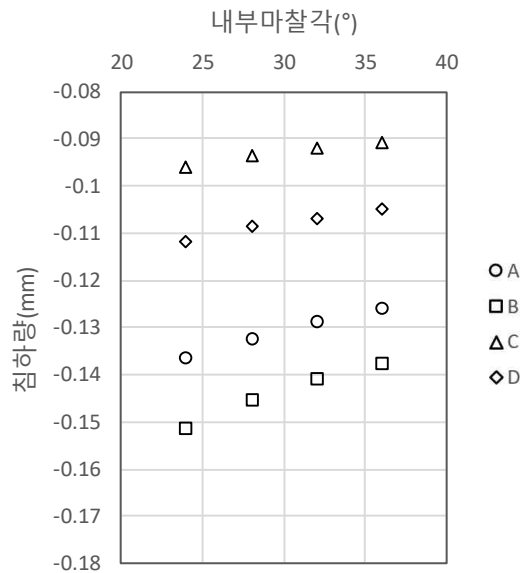
$C = 4kN/m^3$



$C = 6kN/m^3$

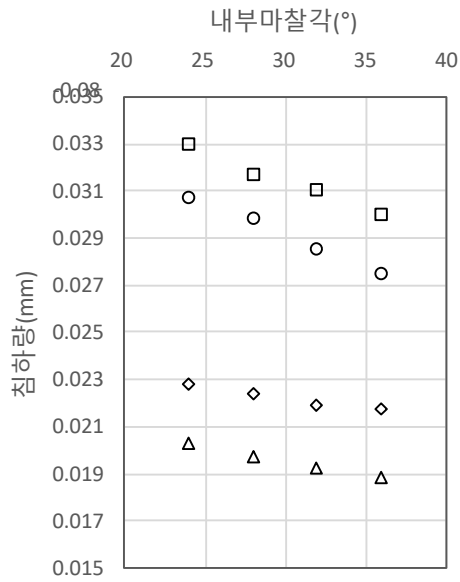


$C = 8kN/m^3$

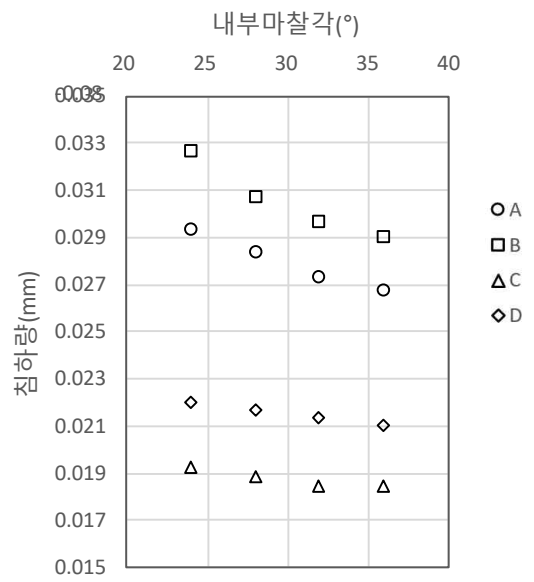


$C = 10kN/m^3$

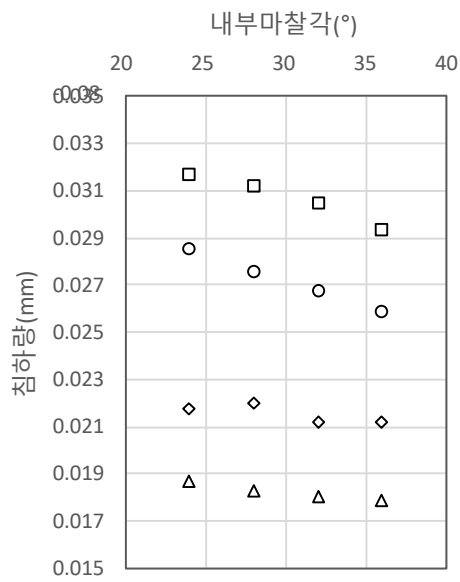
그림 77 압축하중 (100 kgf) 재하 시 case 별 말뚝의 침하량



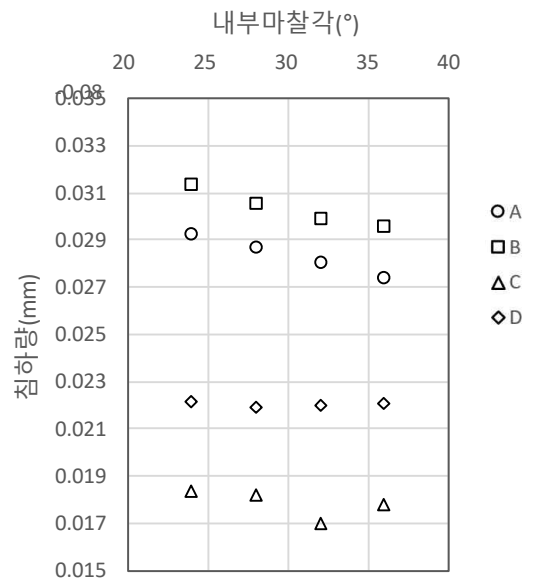
$$C = 4kN/m^3$$



$$C = 6kN/m^3$$



$$C = 8kN/m^3$$



$$C = 10kN/m^3$$

그림 78 인발하중 (20 kgf) 재하 시 case 별 말뚝의 침하량

6.5.3 모형시험 조건을 적용한 수치해석 모델링

- 기초물성시험 및 역학시험 결과를 통해서 얻은 값들을, 1차년도에 테스트한 수치모델 (6.5.2절)을 바탕으로 2차년도에 진행.
- 모형시험 모델의 지오메트리는 모형시험 시 이용한 말뚝의 형태 및 크기와 동일하게 구성
- 말뚝 주면부, 선단부의 침하 및 응력 분포를 자세하게 확인하기 위하여 말뚝 주변의 격자를 세분화하여 1cm 격자 크기로 구성함 (그림 79).

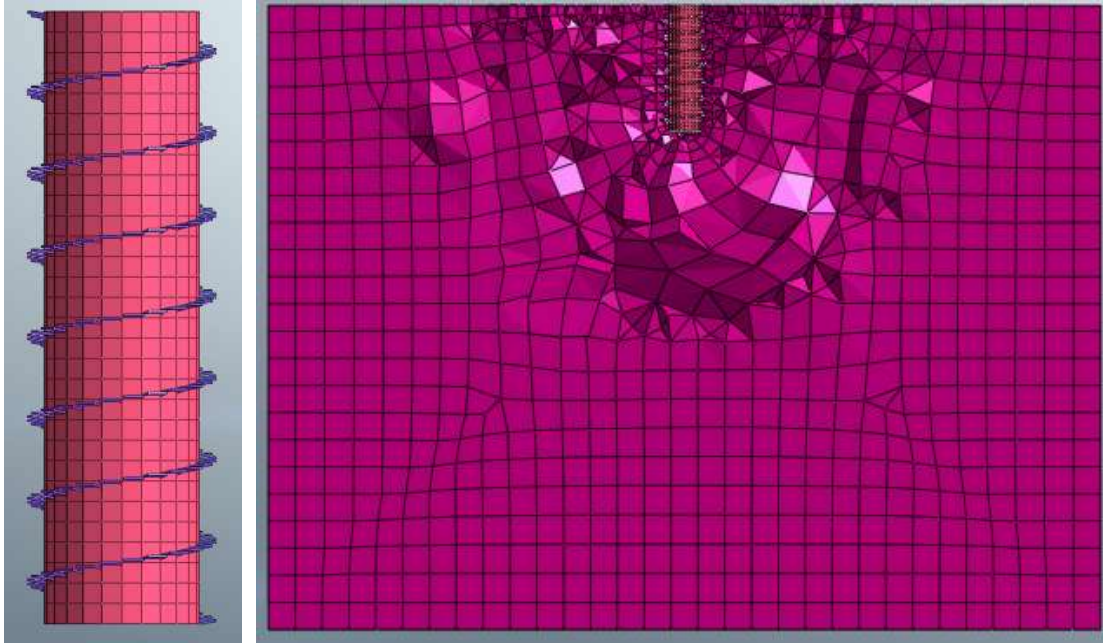


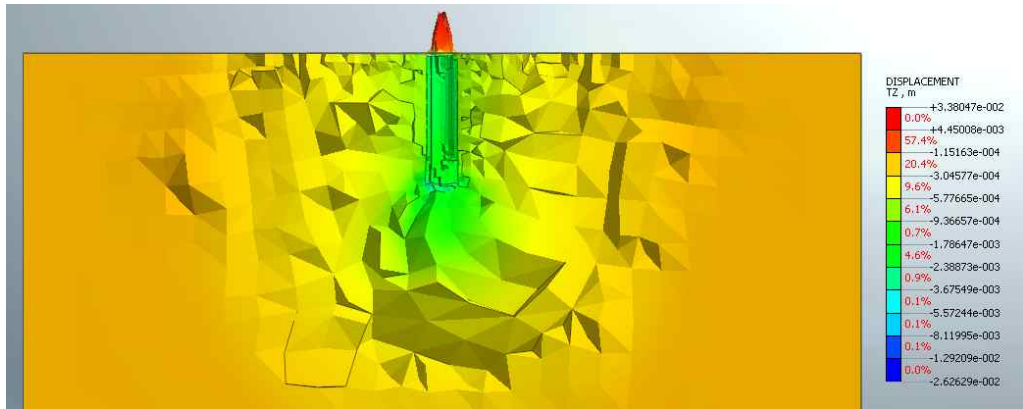
그림 79 모형시험 case에 대한 수치해석 모델링 예시

- 지반조건은 모형시험 결과 분석 시 수행한 실내시험 결과를 그대로 적용함 (표 74).
- 모형시험 시 수행한 하중-변위 곡선의 분석 결과에 따라 강관파일은 25.4 mm, 스크류파일은 14.45 mm의 변위를 발생시키고 이에 대한 반력을 통하여 말뚝의 지지력을 산정함 (그림 80-83).

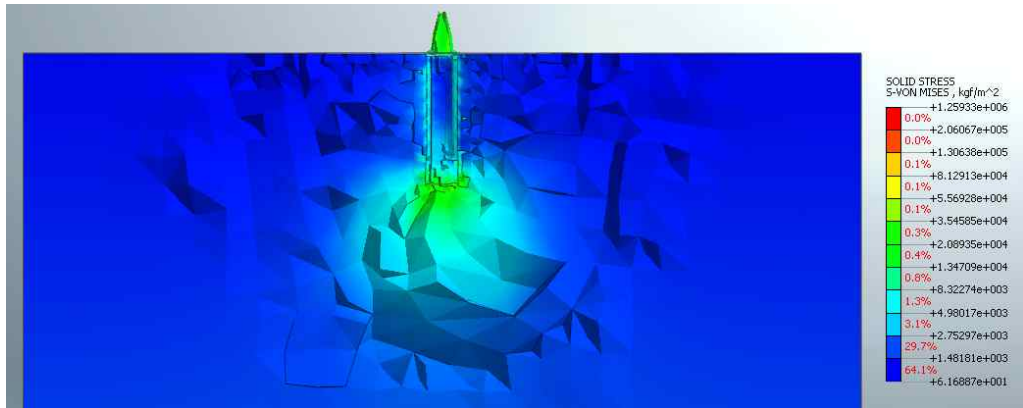
표 74 모형시험 case에 따른 수치해석 입력조건

함수비	건조밀도 (t/m ³)	습윤밀도 (t/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
20%	1.4	1.68	6.95	30.33
	1.5	1.80	10.06	31.36
	1.6	1.92	12.02	34.19

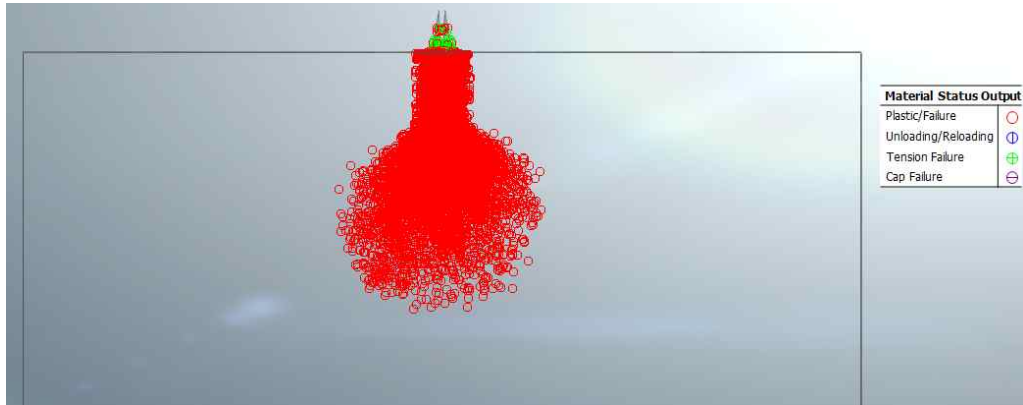
- 강관파일의 압축재하시험에 대한 수치해석 결과 예시는 다음과 같음.



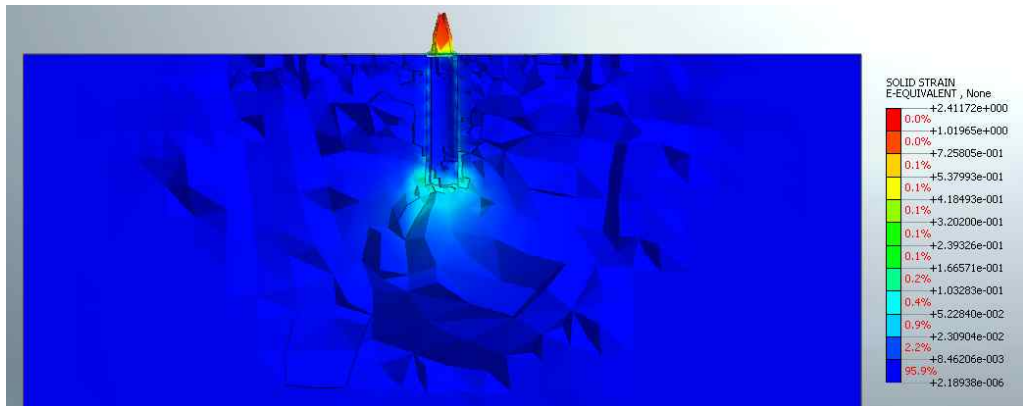
(a) 지반침하량



(b) 등가응력



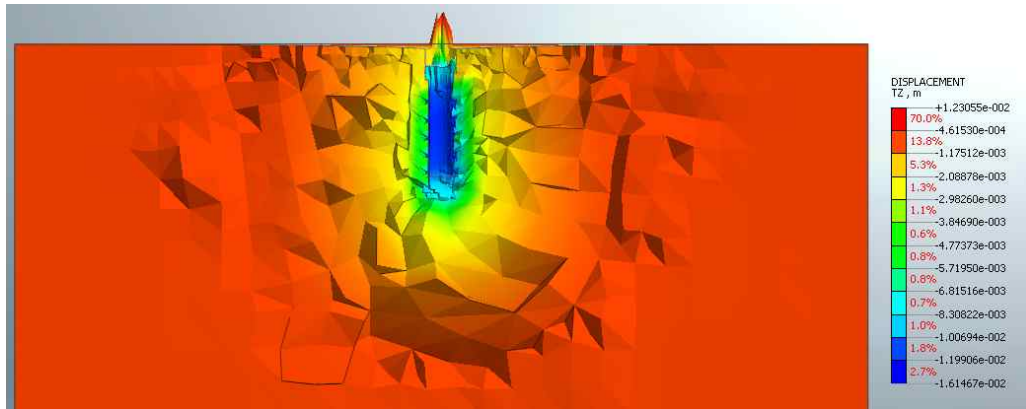
(c) 소성 파괴 검토



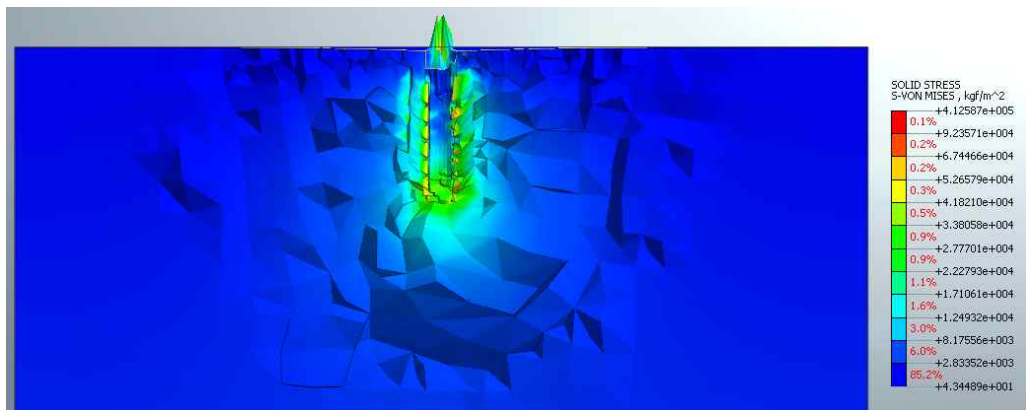
(d) 등가변형률

그림 80 강관파일의 압축재하시험에 대한 수치해석 결과 (건조밀도 1.6 t/m³).

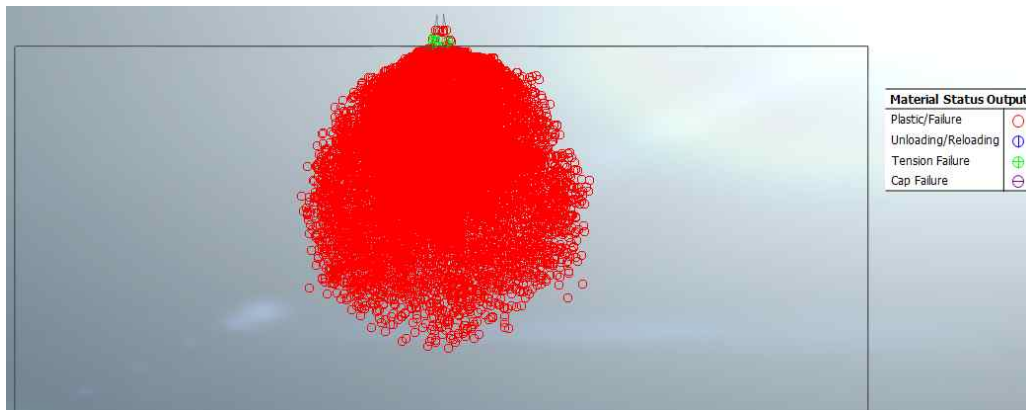
- 스크류파일의 압축재하시험에 대한 수치해석 결과 예시는 다음과 같음.



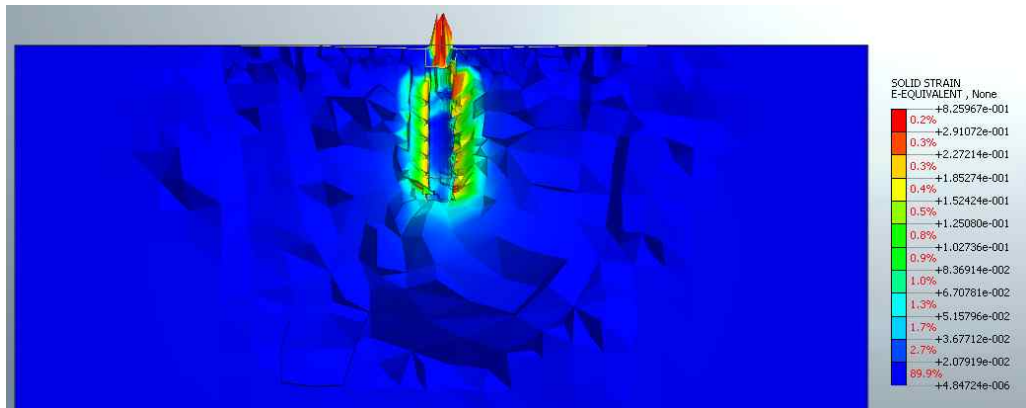
(a) 지반침하량



(b) 등가응력



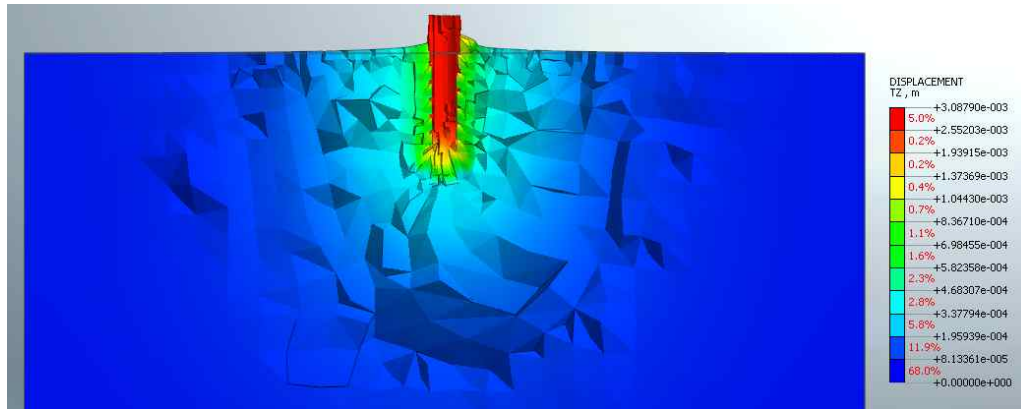
(c) 소성파괴 검토



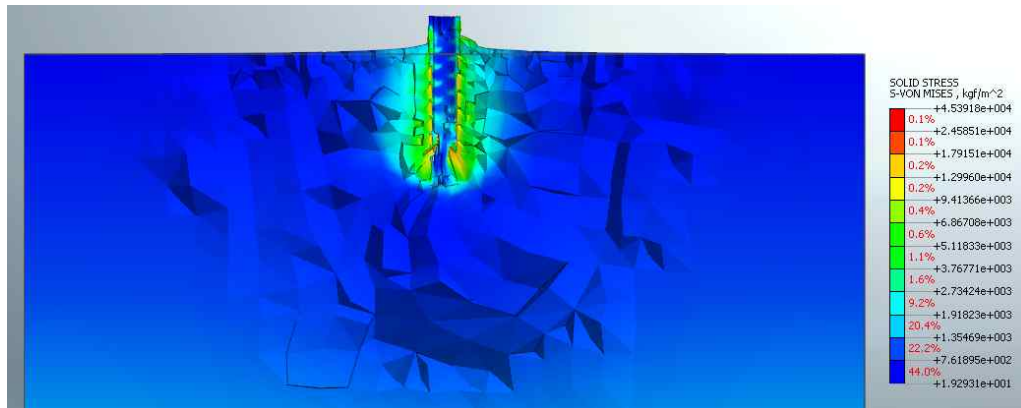
(d) 등가변형률

그림 81 스크류파일의 압축재하시험에 대한 수치해석 결과 (건조밀도 1.6t/m³)

- 강관파일의 인발재하시험에 대한 수치해석 결과 예시는 다음과 같음.



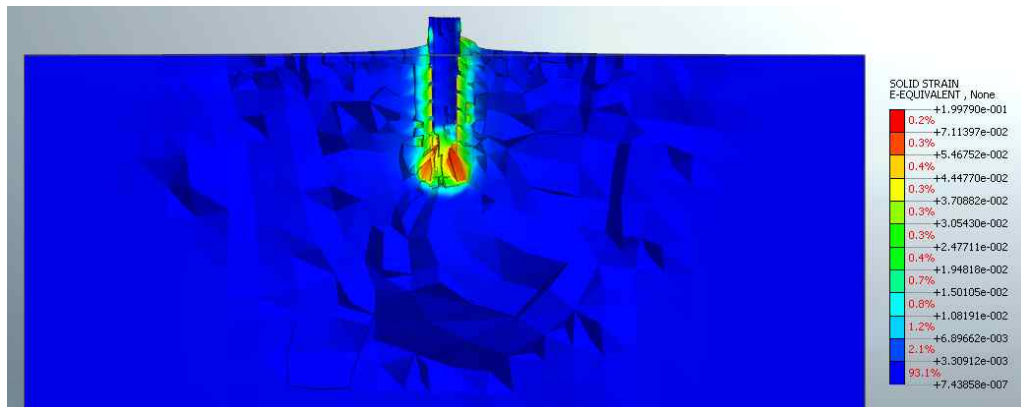
(a) 지반침하량



(b) 증가응력



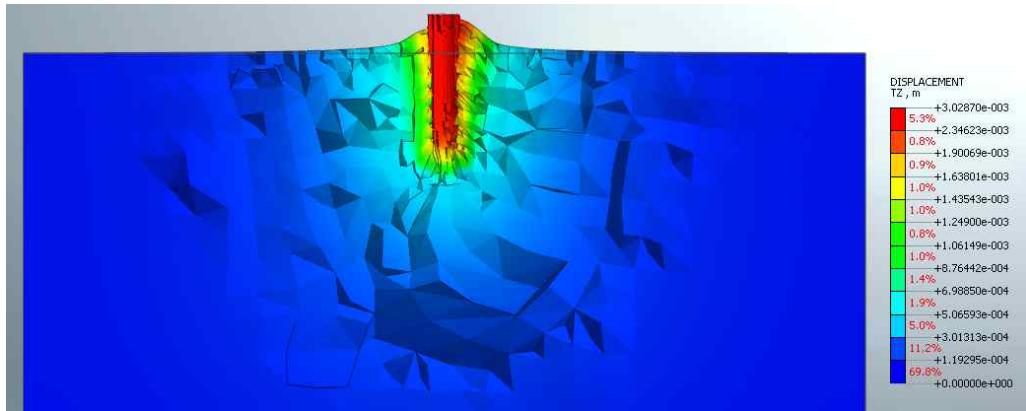
(c) 소성파괴 검토



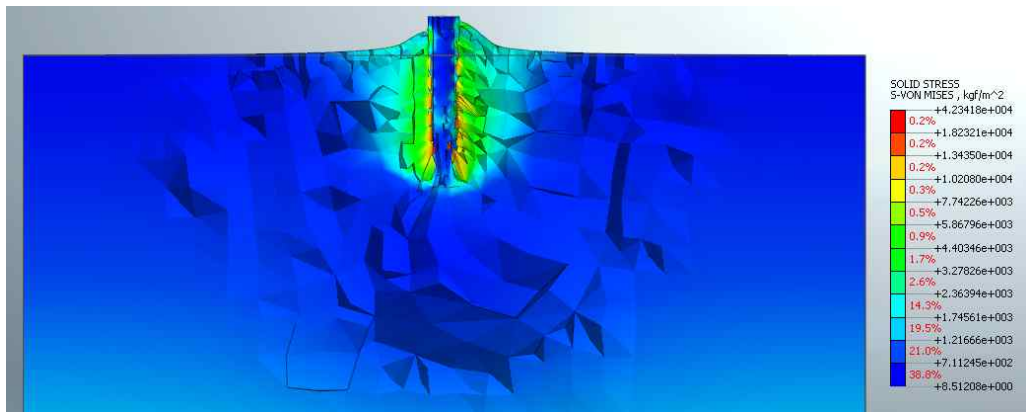
(d) 증가변형률

그림 82 강관파일의 인발재하시험에 대한 수치해석 결과 (건조밀도 1.6t/m³)

- 스크류파일의 인발재하시험에 대한 수치해석 결과 예시는 다음과 같음.



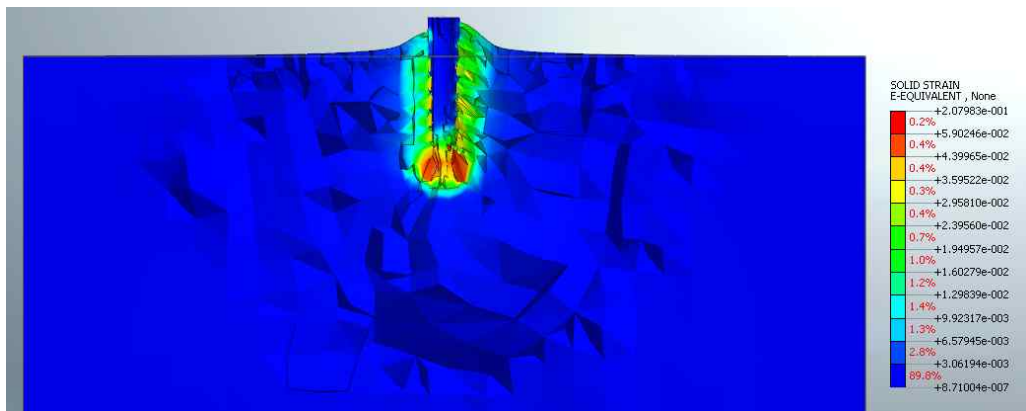
(a) 지반침하량



(b) 등가응력



(c) 소성파괴 검토



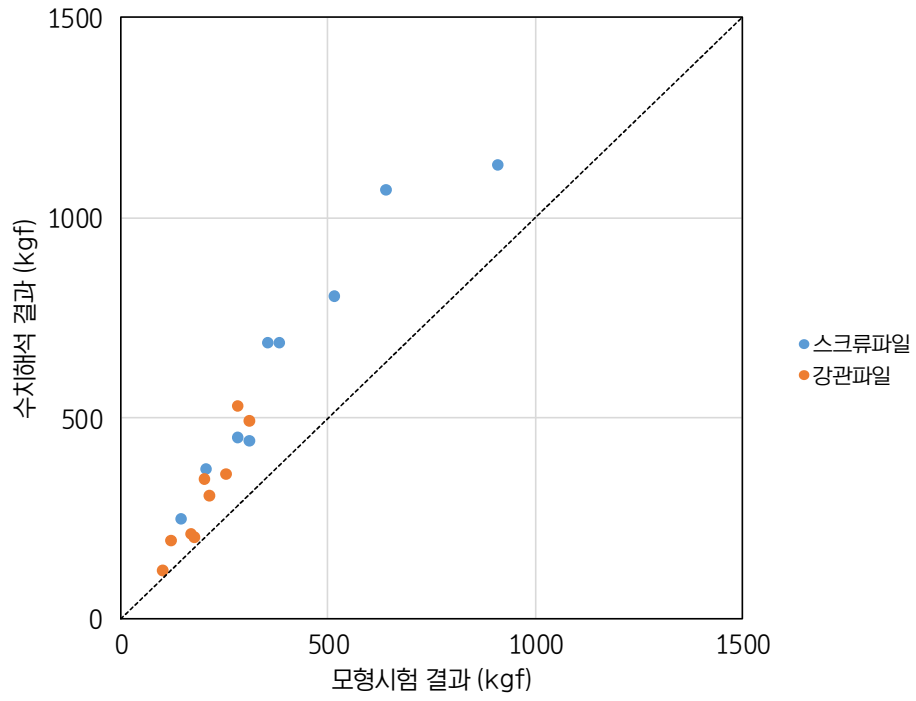
(d) 등가변형률

그림 83 스크류파일의 인발재하시험에 대한 수치해석 결과 (건조밀도 1.6t/m³)

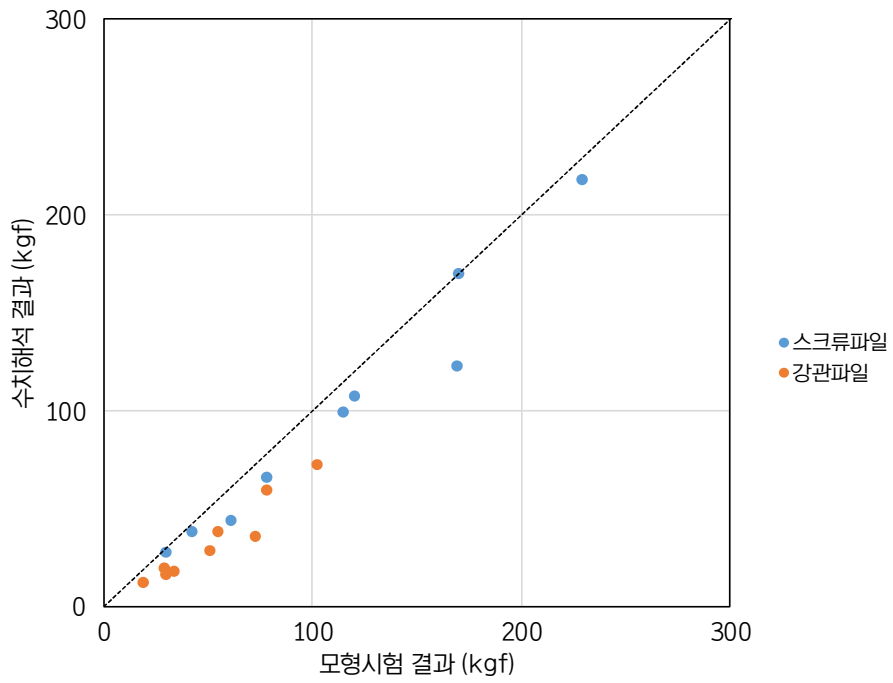
- 압축재하시험에 대한 수치해석 결과 강관파일과 스크류파일의 거동이 상이하게 나타남.
- 강관파일의 경우 말뚝 주면부에서는 응력 및 변형이 크게 발생하지 않고 말뚝 선단부에서 지반 변형, 응력이 크게 발생하며, 이는 말뚝의 지지력이 말뚝 선단부에서 대부분 발생한다는 것을 나타냄.
- 스크류파일의 경우 스크류 날개에 의하여 날개 사이의 토체에 대한 응력과 변형이 크게 발생하며 이는 말뚝의 직경이 넓어진 것과 유사한 효과를 가져옴.
- 따라서 스크류파일의 경우 강관파일과 다르게 말뚝 선단부뿐만 아니라 말뚝 주면부에서도 응력과 변형이 크게 발생하여, 말뚝 주면마찰력이 지지력에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있음.
- 인발재하시험에 대한 수치해석 결과 강관파일과 스크류파일의 거동이 유사하게 나타남.
- 두 종류의 말뚝 모두 인발저항력은 말뚝 주면부에서 발생하는 주면마찰력에 의하여 발생하며 응력, 변형, 파괴형태 또한 유사한 모양으로 나타남.
- 이때 스크류파일의 변형 및 파괴 면적은 스크류 날개에 의하여 강관파일보다 넓게 형성되며 이에 따라 인발지지력의 차이가 발생하는 것으로 판단됨.

6.5.4 수치해석 모델의 검증

- 압축재하시험 및 인발재하시험의 수치해석 결과와 모형시험 결과를 도시한 그래프는 그림 84와 같음.
- 압축재하시험 및 인발재하시험의 수치해석 결과와 이론적 지지력 산정 결과를 도시한 그래프는 그림 85와 같음.
- 수치해석 결과는 모형시험 결과 및 이론적 산정 결과와 일치하는 것으로 나타남.
- 압축재하시험의 수치해석 결과는 모형시험 결과에 비하여 다소 큰 값을 보였으나 오차 범위가 크지 않고 이론적 산정 결과와 잘 일치하는 것으로 나타나 수치해석 결과의 신뢰성을 검증함.
- 인발재하시험 case에서는 수치해석 결과가 모형시험 결과 및 이론적 지지력 산정 결과와 잘 일치하여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증함.

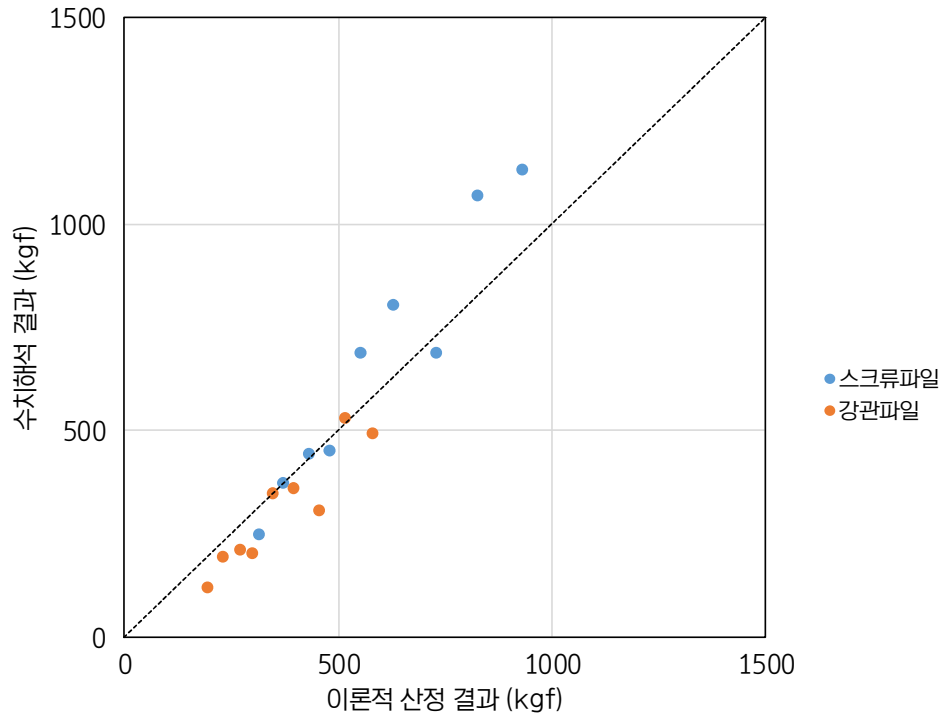


(a) 압축재하시험 결과의 비교

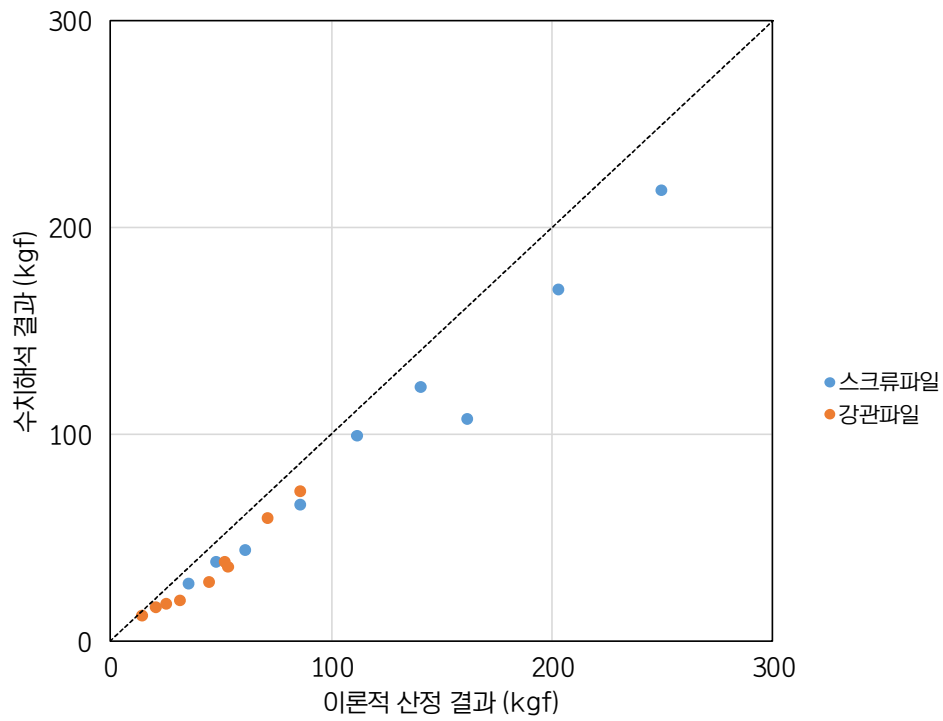


(b) 인발재하시험 결과의 비교

그림 84 지지력 산정 결과 비교 (수치해석 및 모형시험)



(a) 압축재하시험 결과의 비교



(b) 인발재하시험 결과의 비교

그림 85 지지력 산정 결과 비교 (수치해석 및 이론적 산정식)

6.5.5 수치해석을 이용한 지반조건에 따른 지지력 산정

- 수치해석 모델이 실제 말뚝의 거동을 잘 모사하는 것으로 판단되어, 수치해석을 통하여 다양한 지반조건에서의 말뚝 지지력을 산정함.
- 모형시험 대상 토양의 다양한 현장조건을 고려하여 단위중량과 함수비에 따른 case를 선정함 (표 75).

표 75 다양한 지반조건 case에 따른 전단강도 시험 결과

건조단위중량 (t/m ³)		1.4		1.5		1.6	
		C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)
함수비 (%)	10	9.96	33.71	12.15	36.08	14.12	37.63
	15	8.76	31.24	11.55	32.39	13.51	36.48
	20	6.95	30.33	10.06	31.36	12.02	34.19

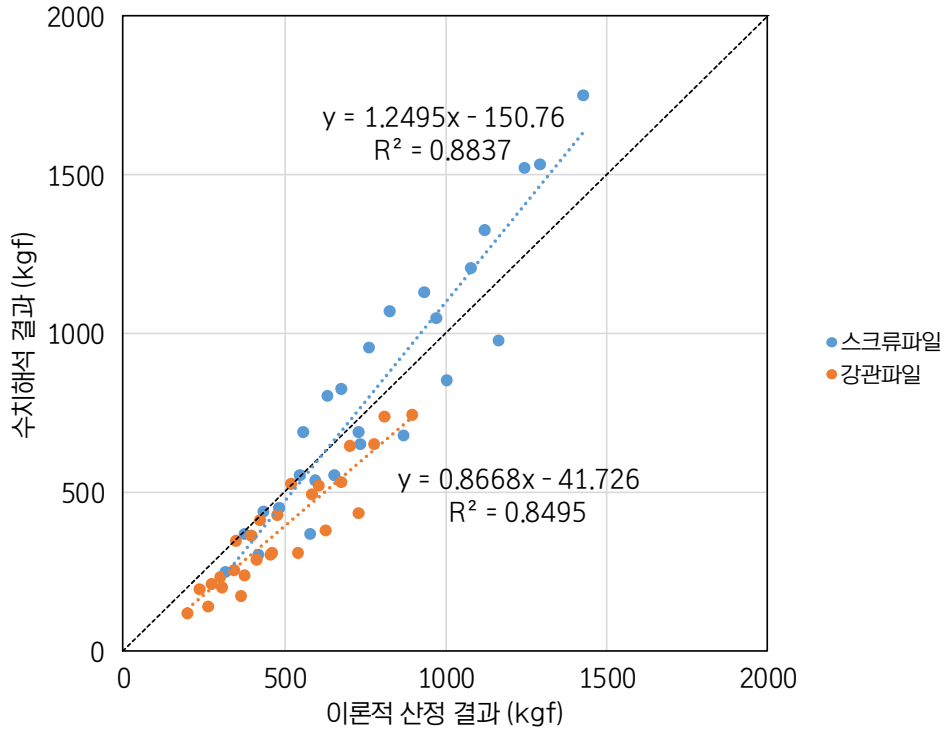
- 함수비 조건을 추가하였으며 이에 따라 지반 조건은 9가지이며 말뚝의 형태와 근입깊이에 따라 수치해석을 수행함.
- 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 이론적 산정식을 통하여 산정된 지지력과의 비교를 수행함.
- 압축재하 및 인발재하조건에 대한 결과의 비교 시 수치해석 결과와 이론적 산정 결과는 잘 일치하는 것으로 나타남.
- 추가적으로 수행된 case (함수비 10, 15%)에 대한 수치해석 결과는, 기존 (함수비 20%) 수치해석 결과와 동일한 경향을 나타내고 있음.
- 함수비가 감소할수록 흙의 전단강도가 커지며, 이는 더 단단한 지반을 의미하는 것으로 수치해석을 통하여 산정된 말뚝의 지지력 또한 더욱 커지는 것으로 나타남.
- 동일한 지반에서도 현장의 상태에 따라 변화하는 건조밀도와 함수비 조건에 의하여 지반의 강도가 변화할 수 있으며 이는 말뚝의 지지력을 크게 변화시킬 수 있음.
- 지반의 강도가 가장 강한 case인 1.6 t/m³-10%와 1.4 t/m³-20% 조건의 30 cm 근입깊이에 대한 해석 결과를 비교하면 스크류파일의 압축지지력은 최대 1753.07 kgf, 최소 441.10 kgf, 인발지지력은 최대 249.78 kgf, 107.51 kgf로 산정되었으며 강관파일의 압축지지력은 최대 741.60 kgf, 최소 211.36 kgf, 인발지지력은 최대 81.31 kgf, 38.26 kgf로 산정됨.
- 현장조건에 따라 압축지지력은 약 4배, 인발지지력은 약 2.3배까지 차이가 나는 것으로 나타났으며 이보다 큰 현장조건의 변화가 발생할 경우 지지력 차이는 더욱 커질 것으로 판단됨. 따라서 현장의 지반 조건을 고려하여 기초의 형식과 근입깊이 등을 결정하는 것은 필수적임.

표 76 다양한 지반조건 case에 따른 압축재하시험의 수치해석 결과

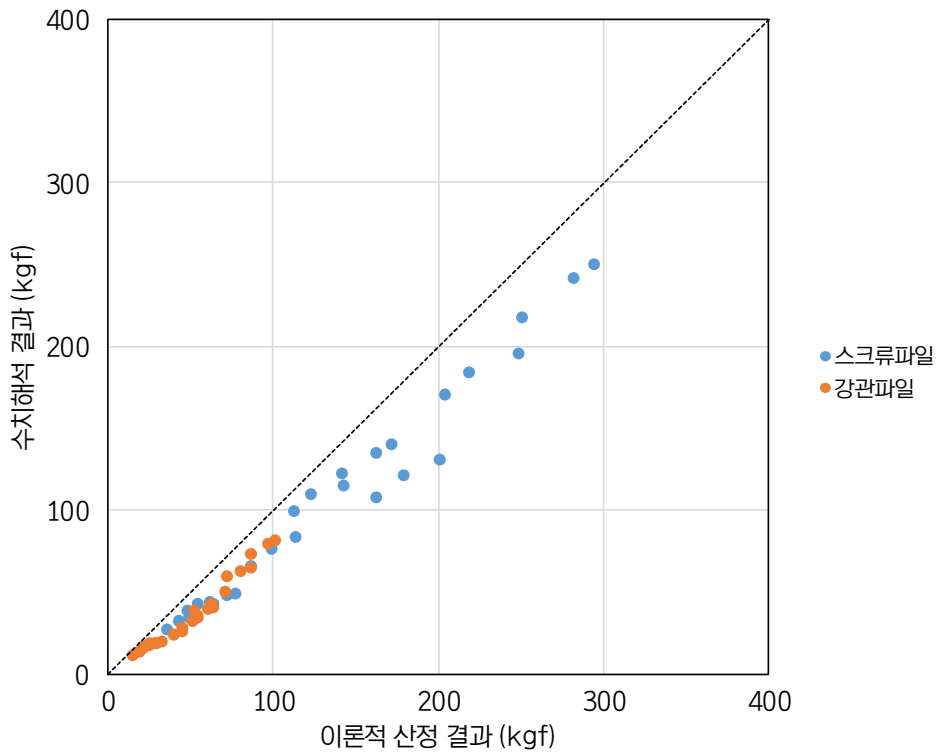
지반조건 case			압축지지력 (kgf)			
건조밀도 (t/m ³)	함수비 (%)	근입깊이 (cm)	스크류파일		강관파일	
			수치해석	계산결과	수치해석	계산결과
1.4	10	10	367.97	576.45	174.27	360.59
1.5	10	10	678.74	864.90	308.04	540.90
1.6	10	10	980.77	1163.15	434.64	727.31
1.4	10	20	556.03	653.41	284.82	408.93
1.5	10	20	1046.96	967.96	518.62	605.58
1.6	10	20	1535.09	1291.60	740.95	807.89
1.4	10	30	651.13	734.86	311.40	459.98
1.5	10	30	1206.59	1076.58	531.41	673.61
1.6	10	30	1753.07	1426.58	741.60	892.38
1.4	15	10	300.65	416.55	141.67	260.58
1.5	15	10	537.10	593.44	239.79	371.39
1.6	15	10	851.85	1000.57	378.77	625.66
1.4	15	20	451.95	480.16	232.47	300.57
1.5	15	20	823.40	673.59	409.97	421.78
1.6	15	20	1327.21	1119.11	646.71	700.04
1.4	15	30	553.57	547.82	255.76	343.01
1.5	15	30	957.51	758.38	425.98	474.98
1.6	15	30	1521.07	1244.01	651.29	778.24
1.4	20	10	248.02	315.42	118.14	197.15
1.5	20	10	450.67	481.69	202.43	301.35
1.6	20	10	688.82	728.47	305.12	455.55
1.4	20	20	371.06	371.40	193.34	232.32
1.5	20	20	687.09	554.15	345.74	346.90
1.6	20	20	1068.57	826.47	528.00	517.09
1.4	20	30	441.10	431.36	211.36	269.92
1.5	20	30	804.52	631.16	361.34	395.22
1.6	20	30	1132.80	930.24	492.76	582.11

표 77 다양한 지반조건 case에 따른 인발재하시험의 수치해석 결과

지반조건 case 건조밀도-함수비-근입깊이 (t/m ³) (%) (cm)	인발지지력 (kgf)			
	스크류파일		강관파일	
	수치해석	계산결과	수치해석	계산결과
1.4-10-10	34.65	49.29	15.22	20.83
1.5-10-10	42.53	63.29	18.30	25.42
1.6-10-10	48.73	76.63	18.74	29.57
1.4-10-20	83.58	112.74	26.25	44.38
1.5-10-20	115.36	142.51	34.72	54.17
1.6-10-20	139.74	170.86	40.91	63.04
1.4-10-30	130.84	200.04	50.33	70.65
1.5-10-30	195.84	248.03	64.74	86.27
1.6-10-30	249.78	293.75	81.31	100.41
1.4-15-10	31.67	42.10	13.66	18.36
1.5-15-10	42.58	53.73	17.93	23.98
1.6-15-10	47.47	71.84	18.40	28.32
1.4-15-20	76.20	98.35	23.45	39.19
1.5-15-20	109.50	122.94	31.91	50.79
1.6-15-20	135.03	161.61	39.32	60.45
1.4-15-30	121.05	178.88	42.28	62.47
1.5-15-30	184.58	218.47	62.79	80.41
1.6-15-30	242.10	280.86	79.86	96.39
1.4-20-10	27.13	35.82	11.70	14.80
1.5-20-10	38.31	48.08	16.34	21.06
1.6-20-10	43.78	61.44	17.61	25.25
1.4-20-20	65.59	86.18	19.56	32.04
1.5-20-20	98.83	112.01	28.40	44.88
1.6-20-20	122.71	140.70	35.40	53.97
1.4-20-30	107.51	161.64	38.26	51.71
1.5-20-30	170.21	203.12	59.08	71.48
1.6-20-30	217.55	249.87	72.53	86.18



(a) 압축재하조건에 대한 결과의 비교



(b) 인발재하조건에 대한 결과의 비교

그림 86 다양한 지반조건 case에 대한 수치해석 결과와 이론적 산정 결과의 비교

6.5.6 수치해석을 이용한 말뚝기초 형태에 따른 지지력 산정

- 말뚝 형태의 변형에 따라 말뚝의 거동 및 지지력 특성이 달라지기에, 이를 확인하기 위한 수치해석 모델을 구성하고 해석을 수행함.
- 실제 현장의 시공 조건을 고려하여 말뚝의 근입깊이를 1.0 m로 하고, 더 큰 지지력을 확보하기 위하여 스크류 날개의 폭을 증가시켜 해석을 수행함.
- 또한 스크류 날개 간격이 증가할 경우 보다 경제적으로 말뚝을 생산할 수 있으므로 이에 대한 검토를 수행함.
- 최종적으로 검토된 말뚝의 형태는 앞서 분석한 스크류파일의 형태와 이를 변형하여 날개의 폭을 2배로 하는 스크류 파일, 날개의 간격을 4배로 하는 스크류파일 2종으로, 말뚝 형태에 따른 해석 조건 별 case 모식도는 그림 87과 같으며, 이에 대한 수치해석 모델은 그림 88과 같음.

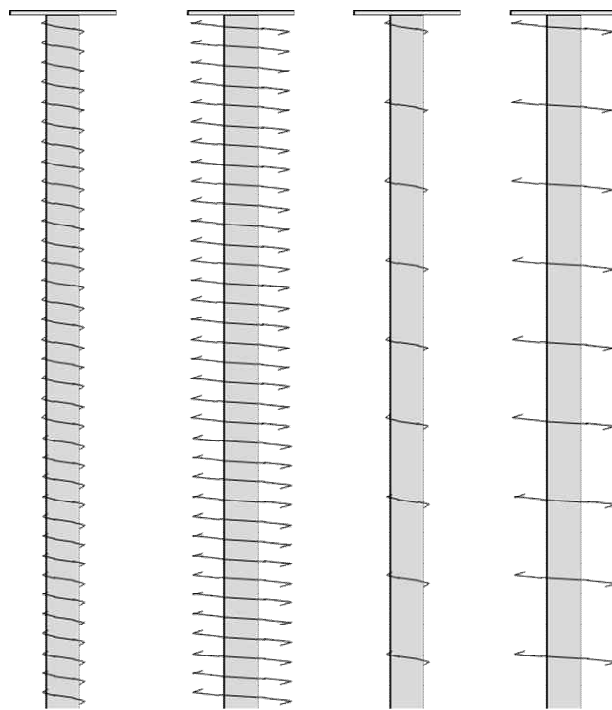


그림 87 말뚝기초 형태 case 모식도

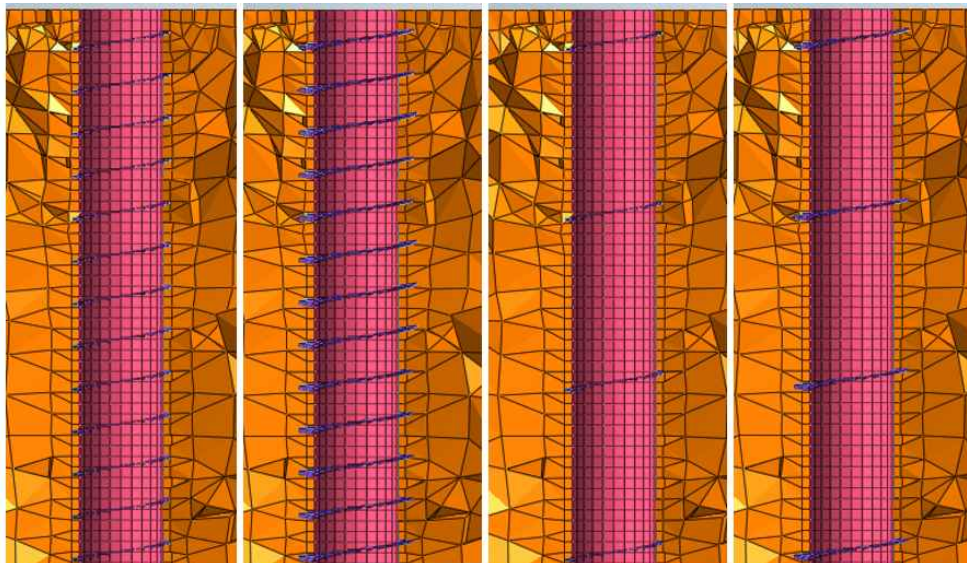


그림 88 말뚝기초 형태별 수치해석 모델

- 기초 형태에 따른 압축재하시험에 대한 수치해석 결과는 다음과 같음.

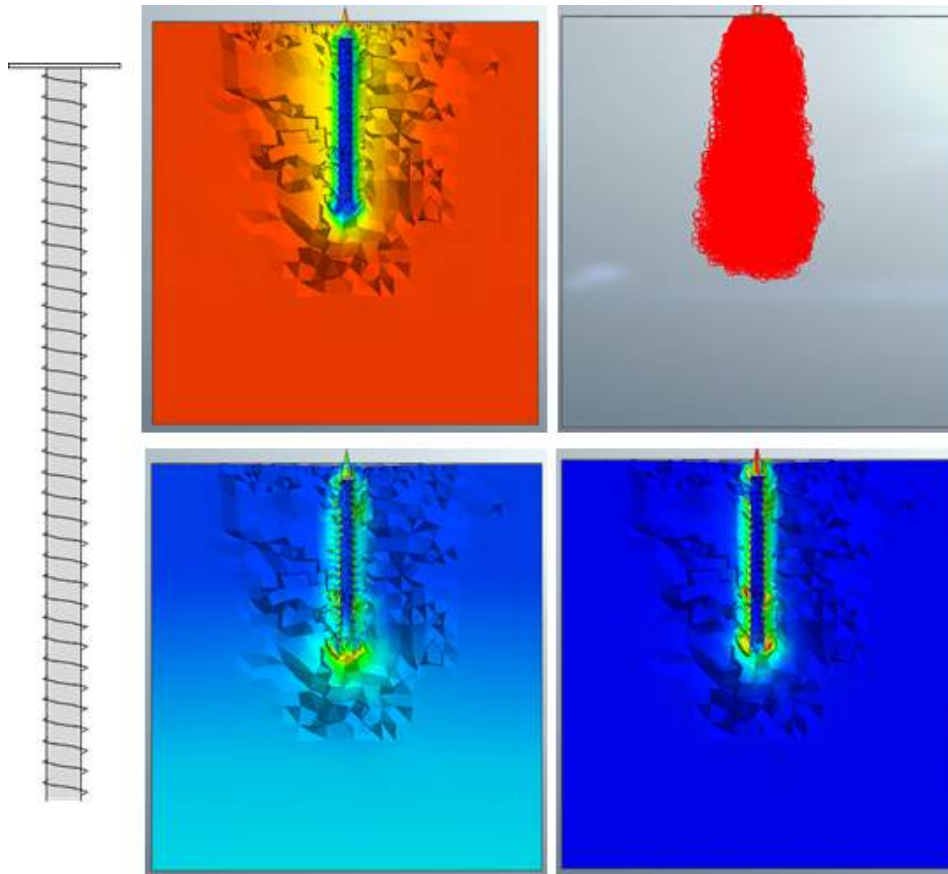


그림 89 스크류파일 압축재하시험 수치해석 결과 (기본 날개)

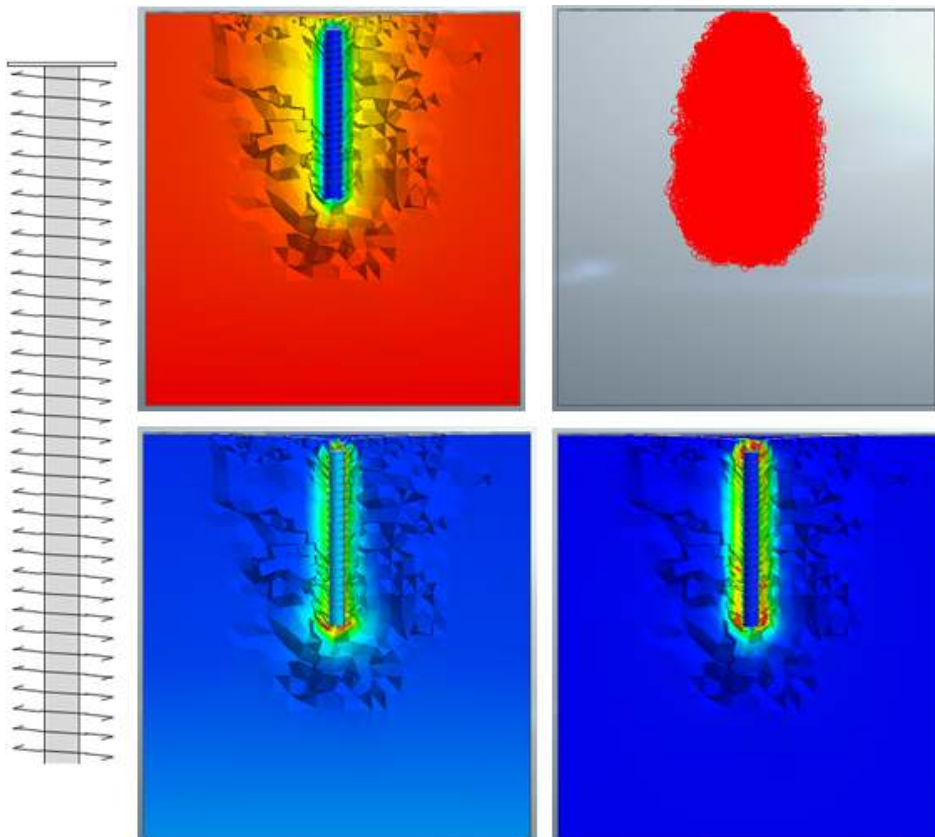


그림 90 스크류파일 압축재하시험 수치해석 결과 (날개폭 2배)

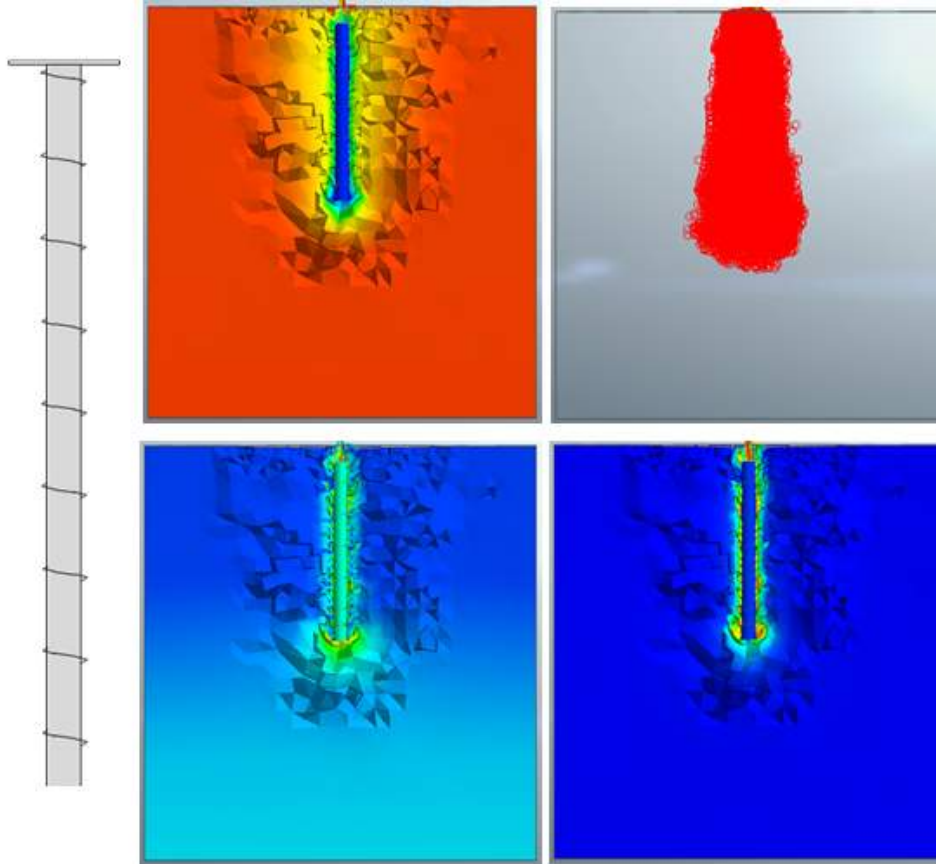


그림 91 스크류파일 압축재하시험 수치해석 결과 (날개간격 4배)

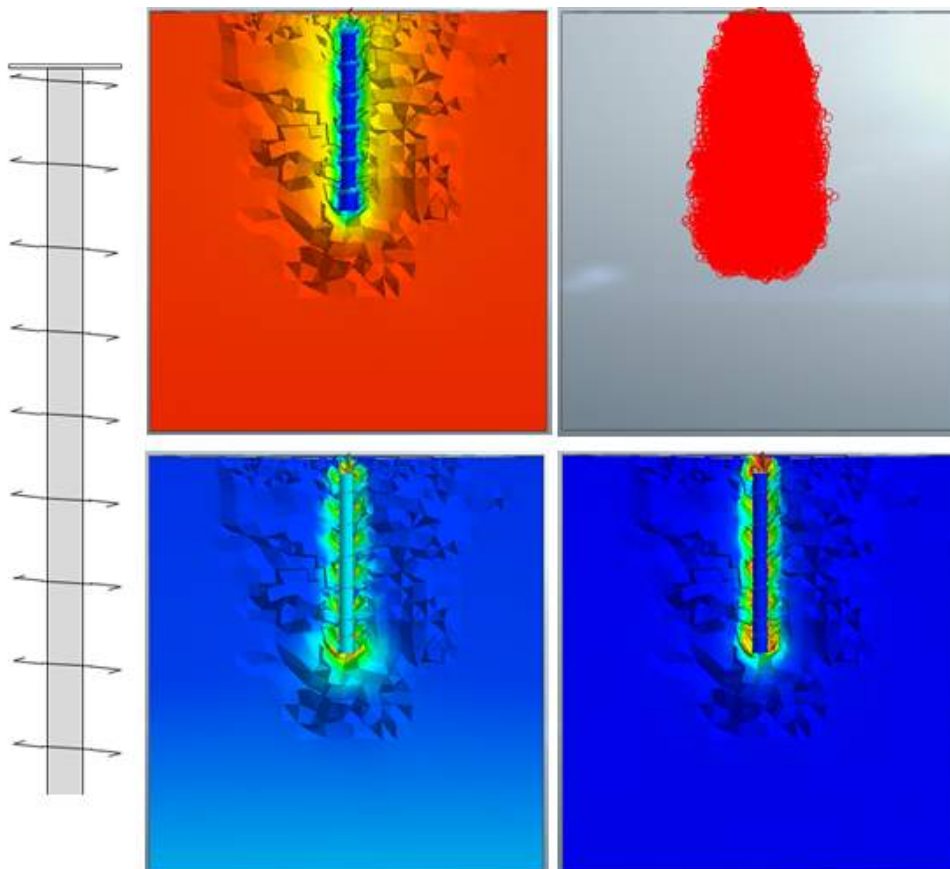


그림 92 스크류파일 압축재하시험 수치해석 결과 (날개폭 2배, 날개간격 4배)

- 기초 형태에 따른 인발재하시험에 대한 수치해석 결과는 다음과 같음.

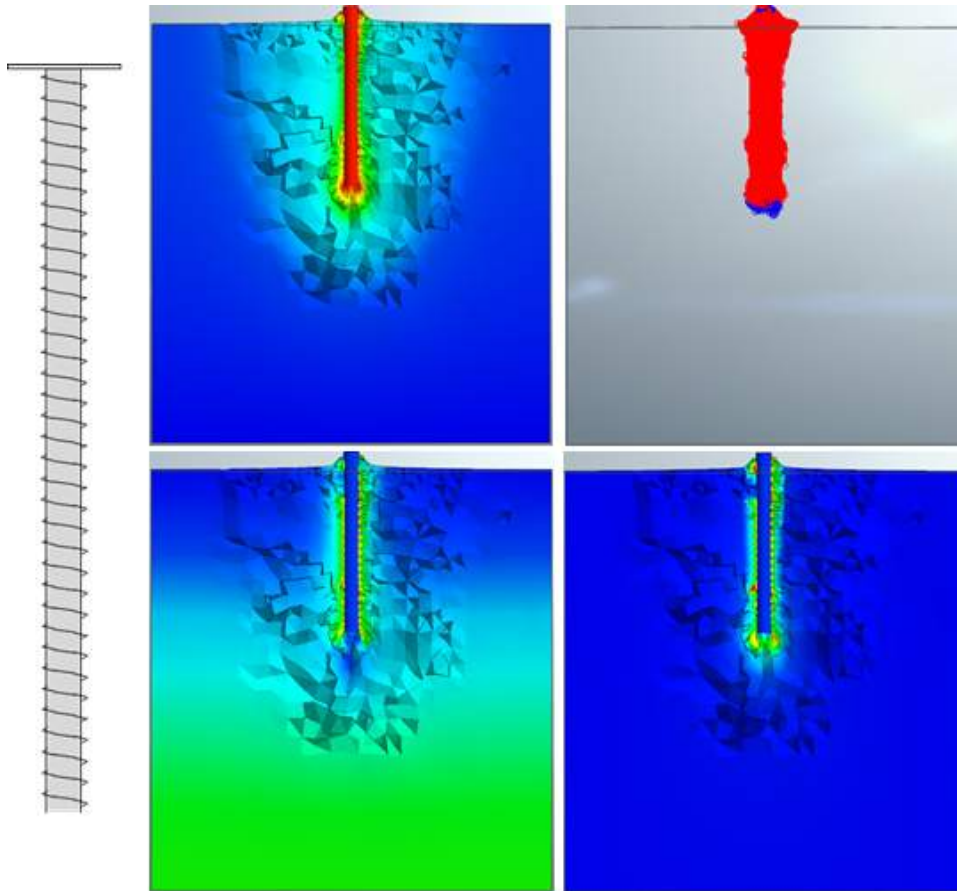


그림 93 스크류파일 인발재하시험 수치해석 결과 (기본 날개)

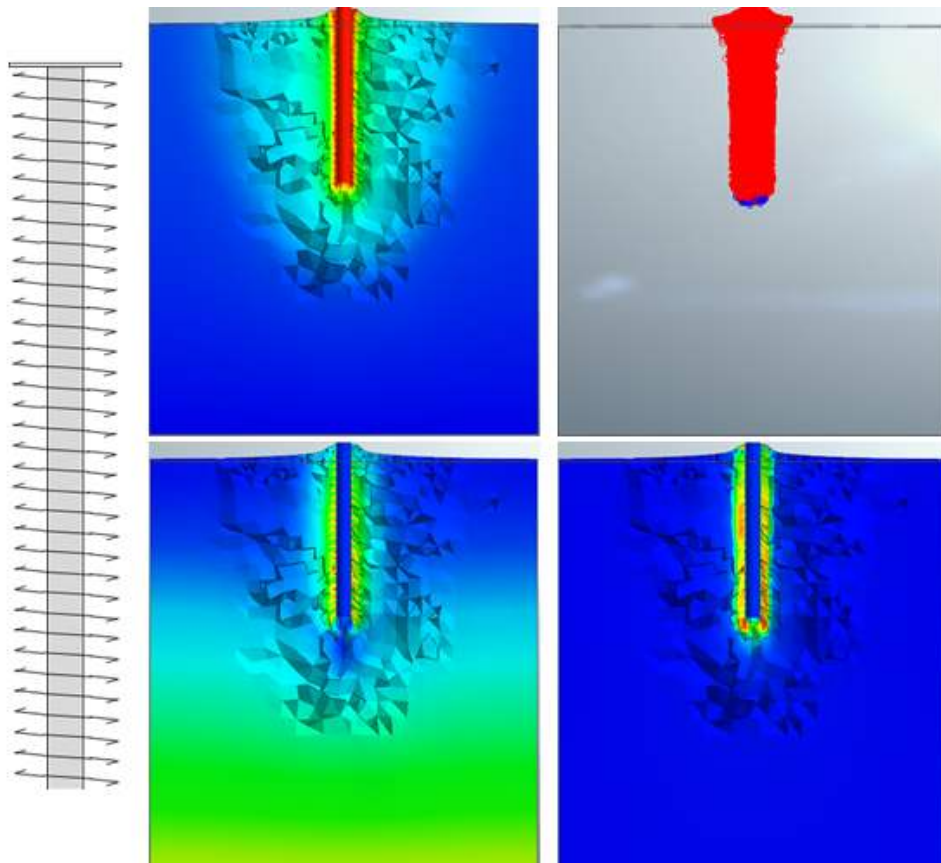


그림 94 스크류파일 인발재하시험 수치해석 결과 (날개폭 2배)

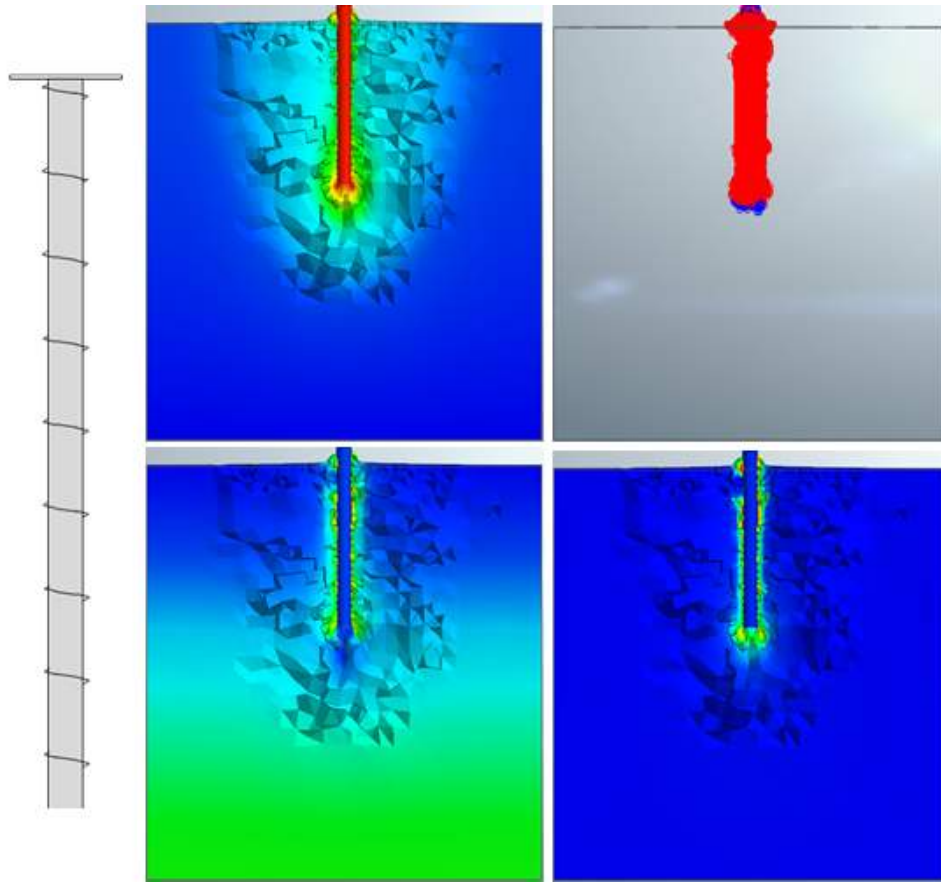


그림 95 스크류파일 인발재하시험 수치해석 결과 (날개간격 4배)

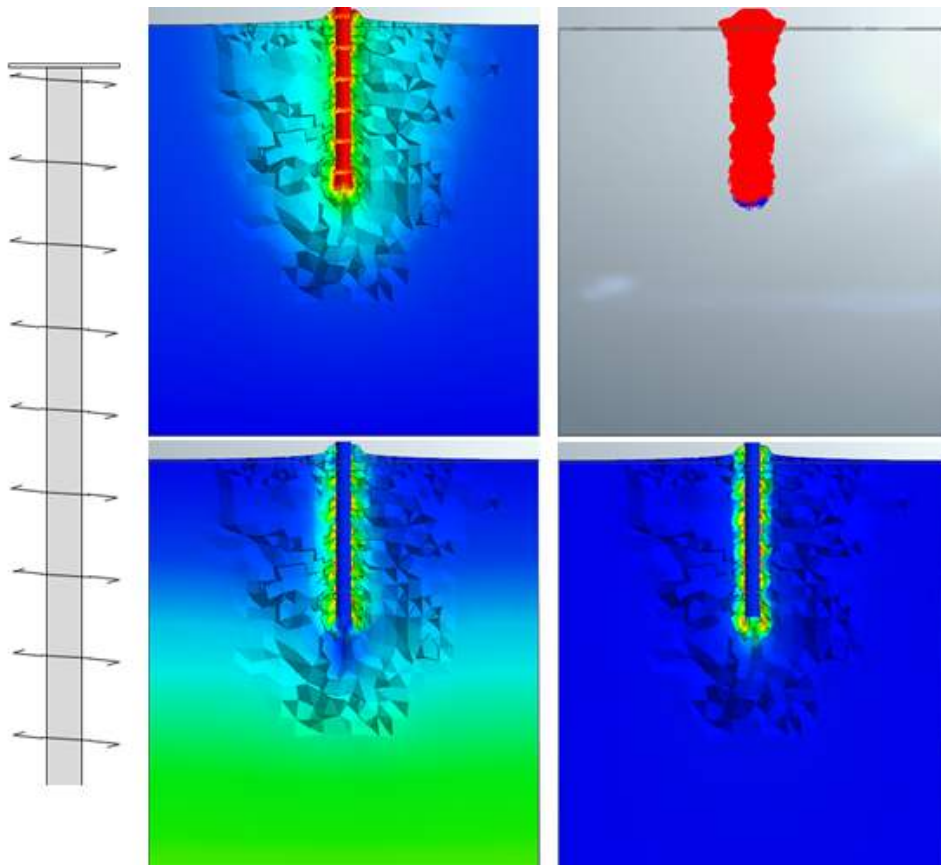


그림 96 스크류파일 인발재하시험 수치해석 결과 (날개폭 2배, 날개간격 4배)

- 말뚝 형태에 따른 수치해석 결과 말뚝의 거동은 모두 스크류파일의 날개에 의한 특성이 뚜렷하게 반영됨.
- 날개폭이 클수록 응력 및 변형의 발생 범위가 커지고 날개간격 증가 시 응력 및 변형 발생 경향이 유사하나 날개간격 사이에서 균일하게 발생하지는 않음.
- 압축지지력 산정 결과 스크류파일은 1044.96 kgf, 날개폭 2배의 경우 1601.07 kgf, 날개간격 4배의 경우 562.52 kgf, 날개폭 2배 날개간격 4배의 경우 1044.59 kgf로 산정됨
- 인발지지력 산정 결과 스크류파일은 331.02 kgf, 날개폭 2배의 경우 469.3823 kgf, 날개간격 4배의 경우 237.91 kgf, 날개폭 2배 날개간격 4배의 경우 359.80 kgf로 산정됨.
- 날개폭이 증가할수록 압축지지력과 인발지지력이 증가하고 날개간격이 증가할수록 압축지지력과 인발지지력이 감소함.
- 스크류파일의 형태는 압축지지력과 인발지지력 모두에 큰 영향을 미치기에, 지반조건과 현장 여건에 따라서 말뚝 형태를 변형시킨다면, 본 수치해석은 향후 효율적인 설계를 도와줄 수 있을 것으로 판단됨.

6.6 영농형 태양광 기초 형태 및 지반조건별 최소 근입깊이 분석

6.6.1 하중 조건에 따른 말뚝 형태와 규격 제시

- 상부 구조물 해석에서 선정된 가로 배치형과 세로 배치형의 두 가지 형태에 대한 말뚝의 형태별 규격을 제시함.
- 본 절에서 제시하는 구조물 기초는 경기도 수원지역의 서울대학교 농장에 설치한 것으로, 해당 지역의 30년 빈도 재현기간의 풍하중 및 적설심에 따라 상부 구조해석으로 산정된 기초 전달 하중을 고려하여 최소 근입깊이를 산정함.
- 모듈 가로 배치형의 구조해석 결과, 기초에 전달되는 최대압축하중은 698.8 kgf로 산정되었으며 인발하중은 상부구조물의 자중으로 인하여 발생하지 않는 것으로 나타남.
- 앞서 제시한 지지력 산정식에 따라 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 각각 1.377 m 및 0.626 m로 산정됨.
- 모듈 세로 배치형의 구조해석 결과, 기초에 전달되는 최대압축하중은 520.8 kgf로 산정되었으며 인발하중은 상부구조물의 자중으로 인하여 발생하지 않는 것으로 나타남.
- 앞서 제시한 지지력 산정식에 따라 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 각각 0.877 m 및 0.253 m로 산정됨.

6.6.2 지반 조건 별 말뚝 형태와 규격 제시

- 앞서 상부 구조물의 종류별로 제시된 기초의 최소 근입깊이는 경기도 수원지역의 서울대학교 농장에 마련된 영농형 태양광 구조물 실증부지의 지반정수를 적용하여 산정된 결과임.
- 상부 구조물의 경우 지역별 설계 풍하중 및 적설심, 구조물의 형태를 고려하여 지역별로 표준 설계안을 제시할 수 있으나 기초의 경우 지반조건이 한 지역 내에서도 서로 상이하여 요구되는 기초의 최소 규격 선정이 어려움.
- 따라서 본 절에서는 제시된 상부 구조물에 의한 기초 전달 하중에 대하여 지반조건별 기초의 최소 규격을 제시함.
- 실제 현장에서 시공 시 필요한 근입깊이는 최소 1 m로 제시되고 있어 기초의 최소 근입깊이가 1 m 이하인 경우 1 m로 제시함.

- 모듈 가로 배치형의 경우 지반조건 별 기초의 최소 근입깊이는 다음과 같이 산정됨.

표 78 모듈 가로 배치형의 지반조건에 따른 강관 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

건조단위중량 (t/m ³)	1.6	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	4.448	3.376	2.553
	30	3.627	2.768	2.075
	35	2.843	2.119	1.505
건조단위중량 (t/m ³)	1.8	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	4.165	3.203	2.451
	30	3.385	2.612	1.980
	35	2.638	1.985	1.424
건조단위중량 (t/m ³)	2.0	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.927	3.053	2.361
	30	3.180	2.478	1.896
	35	2.465	1.870	1.352

표 79 모듈 가로 배치형의 지반조건에 따른 스크류 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

건조단위중량 (t/m ³)	1.6	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.573	2.176	1.452
	30	2.601	1.723	1.158
	35	2.117	1.299	1.000 (0.750)*
건조단위중량 (t/m ³)	1.8	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.331	2.083	1.412
	30	2.431	1.641	1.120
	35	1.951	1.223	1.000 (0.709)*
건조단위중량 (t/m ³)	2.0	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.126	2.000	1.376
	30	2.286	1.569	1.084
	35	1.812	1.156	1.000 (0.673)*

* 괄호 내 숫자의 경우 실제 산출된 값이지만, 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 고려해 강관 및 스크류 기초는 1.0 m 이상 확보 추천. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정 필요.

- 모듈 세로 배치형의 경우 지반 조건 별 기초의 최소 근입깊이는 다음과 같이 산정됨.

표 80 모듈 세로 배치형의 지반조건에 따른 강관 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

건조단위중량 (t/m ³)	1.6	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.773	2.713	1.936
	30	3.049	2.190	1.521
	35	2.354	1.619	1.009
건조단위중량 (t/m ³)	1.8	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.530	2.577	1.863
	30	2.841	2.067	1.454
	35	2.179	1.514	1.000 (0.954)*
건조단위중량 (t/m ³)	2.0	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	3.324	2.457	1.798
	30	2.665	1.961	1.394
	35	2.032	1.424	1.000 (0.906)*

* 괄호 내 숫자의 경우 실제 산출된 값이지만, 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 고려해 강관 및 스크류 기초는 1.0 m 이상 확보 추천. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정 필요.

표 81 모듈 세로 배치형의 지반조건에 따른 스크류 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

건조단위중량 (t/m ³)	1.6	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	2.995	1.703	1.092
	30	2.193	1.342	1.000 (0.814)*
	35	1.723	1.000 (0.951)*	1.000 (0.364)*
건조단위중량 (t/m ³)	1.8	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	2.787	1.633	1.065
	30	2.046	1.279	1.000 (0.779)*
	35	1.583	1.000 (0.895)*	1.000 (0.343)*
건조단위중량 (t/m ³)	2.0	점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각 (°)	25	2.612	1.571	1.039
	30	1.921	1.223	1.000 (0.748)*
	35	1.467	1.000 (0.839)*	1.000 (0.325)*

* 괄호 내 숫자의 경우 실제 산출된 값이지만, 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 고려해 강관 및 스크류 기초는 1.0 m 이상 확보 추천. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정 필요.

- 본 연구에서 제시된 상부 구조물의 형태와 경기도 수원지역의 설계 하중 조건에 따라 기초에는 인발하중이 발생하지 않았으나, 구조물의 형태가 인발하중이 발생하기 쉬운 경우나 설계 풍하중의 크기가 큰 지역에서는 인발하중이 발생할 수 있음.
- 인발하중이 발생하는 경우에는 압축지지력 뿐만 아니라 인발지지력 산정식을 이용하여 인발하중을 견딜 수 있도록 최소 근입깊이를 설정할 필요가 있음.
- 점착력이 낮은 사질 지반에서는 말뚝의 인발저항력이 크게 낮아지고 특히 강관파일의 경우 인발저항력이 매우 낮기 때문에 반드시 인발하중에 대한 검토가 필요함.

제7장 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준설계서(안)

7.1 시스템 구축 개요

- 위치: 경기도 수원시 권선구 서둔동 103-2 (서울대학교 농업생명과학대학 수원 농장)
- 면적: 30 × 30 m
- 발전 용량: 105 ea × 580 W = 60.9 kW
- 시스템에 설치되는 태양광 모듈에 의한 차광 효과를 독립적으로 고려하도록 주변 구조물 및 시설로부터 그림자가 생기지 않는 노지 선정.
- 생산되는 전기를 자체 이용하거나 판매할 수 있도록 수배전반과 전신주가 설치된 지역 인근으로 선정하였으며, 태양광 발전에 유리한 남향에 가까운 방향으로 모듈이 설치될 수 있는 부지 대상지 선정함.



그림 97 영농형 태양광 - 수원 시스템 구축 대상지

- 총괄연구팀 및 협업연구팀과의 협력을 통해 구축된 총 3개소의 영농형 태양광 시스템은 인천, 경북, 수원에 각각 위치함.



(a) 인천 옹진군 영흥면
(원광전력 협력)

(b) 경북 경산시 영남대학교
농장

(c) 경기도 수원시
서울대학교 농장

그림 98 영농형 태양광 시스템 실증재배지 구축

7.2 시공 프로세스에 따른 시스템 구축 및 실증 재배



그림 99 영농형 태양광 시스템 현장 설치 및 시공 종합 흐름도

7.2.1 지지 구조물 시공

- 금속 지지대 및 금속 기초는 용융아연 등으로 도금된 형강, 스테인리스 스틸, 알루미늄합금 등의 재질을 사용하고, 지지대간 연결, 모듈-지지대 연결 및 지지대-기초 연결은 볼트로 체결함.
- 지지대 및 기초는 부식방지를 위해 농업용수와 직접 접촉하지 않도록 표면보호 소재(PVC, PE, FRP 등)로 피복함. 부식과 관련된 추가 실험은 총괄연구팀에서 선 진행하여, 중복된 사항임으로, 본 연구에서는 포함하지 않으며, 해당 연구결과 및 자료를 참조.
- 트랙터 등 농작업에 필요한 기기를 효율적으로 이용하기 위한 공간이 확보되도록 하고, 설비 주변 부지의 이용이나 농업용 배수시설의 기능에 지장을 주지 않도록, 구조물의 높이 및 간격을 달리하여 시공함.
- 시공 작업 중 고소작업을 최소화하기 위해 하부에서 조립 후 상부로 리프팅하고, 태양광 모듈로 인한 차광비율을 고려하여 설계된 높이 및 간격에 따라 설치함.

7.2.2 태양광 모듈 시공

- 태양광 모듈은 KS에 따른 인증제품을 설치하며, 하부부지에서 적절한 영농이 지속되기 위하여 농작물의 생육에 적절한 일조량이 확보되도록 설계된 모듈의 각도, 폭에 따라 설치하며, 충분한 일조시간을 확보하도록 설치함.
- 고정형일 경우 모듈의 일조면을 되도록 정남향 배치가 될 수 있도록 시공하는 것이 필요하며, 각도 조절이 가능한 모듈의 형태도 함께 고려될 수 있음.



그림 100 영농형 태양광 시스템 구조물 시공 기본 프로세스

7.2.3 인버터 및 접속함 설치

- 인버터는 태양광 모듈에서 발생된 직류전력을 고효율 교류로 변환하여 부하 및 잉여전력의 계통연계가 가능하게 하며, 태양광 모듈의 출력을 감시하고 자동적으로 기동·정지 제어가 가능하게 함.
- 인버터는 사람과 지속적으로 접촉되지 않고 이동에 방해되지 않는 장소에 설치하되 실내 및 실외용을 구분하여 설치하며, 실내용은 직사광선에 노출되지 않고 환기가 잘 되는 장소에 설치하고, 실외용은 지면에서 최소 1.5 m 이상의 높이에 설치하여 침수피해가 발생하지 않도록 함.
- 접속함은 역전류방지 다이오드, 계측모듈, 퓨즈홀드, 감시모듈, 단자대, 차단기 등으로 구성된 설비로, 태양광 모듈과 인버터 사이에 사용되고, 모듈에서 발생하는 직류전력을 시스템에서 필요로 하는 전력으로 집합시키며, 인버터 보호, 모듈 간의 충돌 방지 및 보호기능을 함.
- 접속함은 KS 인증제품을 사용하여 적정 높이에 설치하고, 실외 설치의 경우 방진방수등급 IP54 이상의 제품을 사용하여, 인버터의 설치 높이 이상으로 설치함.



그림 101 영농형 태양광 시스템 전기 및 모니터링 설비 종합 구성도

7.2.4 전기배선 및 케이블 설치

- 전기케이블은 방수 및 난연성이 확보되는 케이블을 사용하고, 가능한 음영지역에 농기계 작업에 장애를 주지 않는 높이로 공중배선 하며 빗물이 고이지 않도록 함.
- 모듈 간 배선은 바람에 흔들림이 없도록 코팅된 와이어 또는 동등한 내구성 재질의 타이로 단단히 고정하고, 안전강화를 위해 적절한 접지공사가 이루어지도록 함.
- 영농의 작업성 및 안전성 확보를 위해 저압 (전기사업법 시행규칙 제2조, 직류 750 볼트 이하, 교류 600 볼트 이하)으로 직/병렬을 구성함.
- 모듈에서 인버터 입력단 간 및 인버터 출력단과 계통연계점 간의 전압강하는 각 3%를 초과하지 않도록 함.



(a) 기둥 및 보 부재 시공



(b) 상부 보 및 가대 시공



(c) 태양광 모듈 설치

그림 102 영농형 태양광 구조물 및 태양광 모듈 시공 작업



그림 103 스크류 기초 시공 및 평탄화 작업

7.2.5 영농형 태양광 시스템 실증 재배

- 봄배추 2022.04.26. ~ 2022.06.22.



그림 104 영농형 태양광 시스템 - 수원 봄배추 재식

- 가을배추 2022.09.25. ~ 2022.11.29



그림 105 영농형 태양광 시스템 - 수원 가을배추 재식

7.3 영농형 태양광 시스템 인허가 프로세스 구축

- 영농형 태양광 시스템 구축을 위한 필요 인허가 프로세스 정립

- ① 발전사업허가 (관할 지자체), 개발행위허가, 공작물축조신고 (한전 PPA/전력거래 신청)
- ② 설계감리 배치 (설계 감리 업체), 공사계획신고 (관할 지자체)
- ③ 전기안전관리자 선임 및 정밀안전진단 실시
- ④ 사용 전 검사 (한국전기안전공사), 계량기 봉인 (한국전력공사)
- ⑤ 상업운영 계약체결 (한국전력공사 및 전력거래소), 설비 확인 신청 (한국에너지공단)
- ⑥ 사업개시 신고 (관할 지자체), 개발행위 및 공작물축조 준공 (관할 지자체)

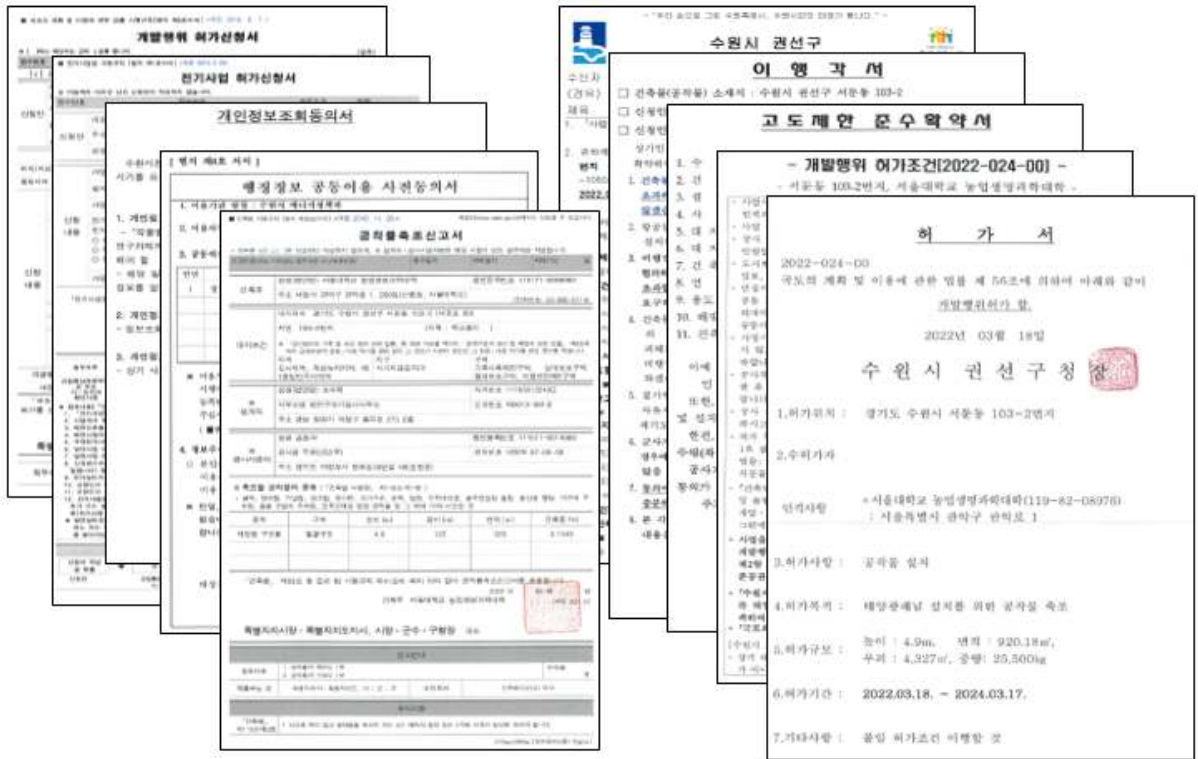


그림 106 영농형 태양광 시스템 구축을 위한 인허가 프로세스 및 자료

- 공작물 축조신고 : 건축법 시행규칙, 위임장, 법인인감증명서 및 사용인감계 등
- 공사계획신고 및 전기사업허가 : 전기사업법 시행규칙, 행정정보 공동이용 사전동의서, 고도제한 준수확약서 등
- 개발행위허가 : 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행규칙, 법인인감증명서 및 사용인감계, 개인정보조치동의서 등
- 실시계획인가 : 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행규칙, 도시군계획 시설사업 실시계획 인가신청서 등
- 고도제한 준수확약서 및 이행각서 : “태양광발전시설 개발행위허가”를 위한 태양광 발전설비 5.0 m 제한 고도 (수원시도시계획조례 제 22조의 2)
- 그 외 기타 기관별, 지역별 필요 인허가 자료 구축을 통하여 일반 농가 시스템 보급 시 기초 자료로서 제공

7.4 영농형 태양광 시방서

7.4.1 일반사항

7.4.1.1 적용범위

- 본 시방서는 기술규격, 설계도면 등에 포함된 의무와 관련하여 영농형 태양광 발전설비에 공급되는 태양광 발전시스템의 기자재 제작, 시험 및 설치에 대하여 적용함.

7.4.1.2 적용규격

- 모든 기자재는 관련 법규 및 규정에 저촉되지 않도록 제작, 설치되어야 함.
- KS 인증 받은 설비를 우선 설치하여야 함.

7.4.1.3 공급조건

- 위치 : 해발 1,000 m 이하
- 온도 : -25℃에서 90℃ 이상
- 습도 : 45 ~ 95%
- 풍속 : 각 지방 지역풍속

7.4.1.4 주요납품자재

① 태양전지 모듈

- 태양광을 받아 직류전원을 발전시켜 부하전원을 공급함.
- 경량의 냉간 압연강판 또는 경금속 특수 알루미늄 재질을 사용하여 밀봉 처리되어 습기 침투를 방지한 제품을 사용함.
- 재료적 특성이 환경 및 사용성 측면에서 충분한 검증이 완료되고 20년 이상의 수명이 보장된 패널을 사용함.

② 인버터 및 접속반

- 인버터는 태양전지 모듈 군으로부터 발전된 직류전원을 공급받아 교류전력으로 바꾸고 계통연계가 가능하며 항상 안정된 전력을 공급함.
- 접속반은 모듈 군으로부터 전류를 모아서 안정된 전력으로 인버터에 공급함.
- 인버터는 방열 및 통풍이 용이하며, 계통에 사고발생시 신속하고 안전하게 정지하고, 출력 및 상태를 감시하여 항상 최적의 상태로 동작되어야 함.
- 접속반은 전력을 공급하는 동안 각종 스위치의 조작이 용이해야 하며, 태양전지판의 각 채널별 전류 및 전압에 맞는 퓨즈를 사용하여야 함.

③ 구조물

- 농지 위에 태양전지 모듈을 고정하면서 농기계의 출입 또한 용이한 태양광 지지 구조물이어야 함.
- 구조물 제작은 설계도면에 의거 제작하여 시공함.

④ 전기배선

- 모듈에서 인버터에 이르는 배선을 위해 케이블을 사용함.
- 모듈 전용선 또는 난연성 케이블 (TFR-CV, F-CV, FR-CV 등)을 사용해야 하며 케이블이 지면 위에 설치되거나 포설되는 경우에는 피복에 손상이 발생하지 않게 조치하여야 함.

⑤ 시험 및 검사

- 설비제작에 사용되는 주요부품은 시험 후 자체성적서나 시험성적서 제출을 원칙으로 함.
- 현장에 설치 후 관련법규에 의한 절연상태 및 접지저항 등을 시험함.

⑥ 감독원

- 감독원이라 함은 발주자가 지정한 관계직원 또는 감독원을 말함.

7.4.2 설계 일반

- 구조물은 영농을 영위할 수 있는 태양광 구조물로써 높이와 폭을 결정하며, 농기계의 출입과 작업이 원활하여야 함.
- 태양광 모듈의 배치는 농작물의 생육에 필요한 적정량의 일사량을 고려하여 배치함.
- 발전효율 향상을 위하여 계절별 각도조절을 위한 가변형으로 설치할 수 있음.
- 가변형 구동기계장치는 지면에서 충분한 높이에 설치하여 농기계의 작업으로 손상되지 않도록 함.
- 지지대 및 구조 설계는 수평면에 설치하는 것을 원칙으로 함.
- 구조물의 설계는 설치지역의 설계하중을 적용한 구조기술사의 구조계산값을 적용하여 설계함.
- 어레이는 설치된 다음에 자중이나, 적설, 풍압, 지진 등으로 인한 진동에 충분히 견딜 수 있는 기계적 강도를 가지고 있어야 함.
- 어레이를 구성하는 패널은 취급이 쉽고 점검 정비가 용이한 구조로 구성되어야 함.

7.4.3 구조물 제작

- 구조물은 강관·각관·H빔·T형강·C형강 등의 형강을 사용하며 볼트접합으로 조립 형성할 수 있도록 제작함.
- 구조물의 용접은 숙련공의 시행으로 액상침투탐상검사 이상의 품질시험에 합격한 제품이여야 함.
- 강재의 절단은 쇠톱 절단 및 프레스절단 위주로 하며, 열을 가하는 산소 절단은 하지 않음.
- 형상 강재는 SS 275 이상의 제품으로 제작함.
- 구조물의 부식은 용융도금 처리 및 포스맥 제품 등을 사용하여 방지하며, 용융도금 전 용접검사·용접후 슬래그 제거검사·치수검사 등을 철저히 하여 용융도금에 불량이 없도록 함.

7.4.4 자재 운송

- 자재의 운반 및 보관은 무리한 적재로 자재의 휨이나 손상이 가지 않도록 함.
- 자재 적재시에는 적당한 침목을 받쳐서 자재의 오염이나 변형을 방지함.

7.4.5 기초 설치

- 기초 시공은 시공 전 지반조사를 하여 적정 정착 깊이를 정한 후 시공에 임함.
- 스크류 파일 시공은 오거드릴을 이용하여 정위치에 나선시공으로 정착시킴.
- 스크류 파일 정착은 지면하단 0.1 m 지점까지 마감한 후, 구조물과 연결조립하여 흙을 채워 매립함.
- 기초 시공 후 인발 및 재하시험으로 구조계산서상의 적정치 값을 충족시킴.

7.4.6 구조물 및 모듈 설치

- 구조물의 조립은 주기동 설치 → 주보 설치 → 보조보 설치 → 태양광지지기동·보 설치 → 퍼린 설치 → 모듈 설치 순으로 하여 마감함.
- 각 구조물을 체결 접합하는 볼트 및 너트는 용융도금 또는 SUS 제품이여야 함.
- 구조물 볼트의 조임은 $\Phi 12 \text{ mm} = 428 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{cm}$ 이상, $\Phi 8 \text{ mm} = 127 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{cm}$ 이상, $\Phi 6 \text{ mm} = 53 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{cm}$ 이상 등의 각 규격 적정 토크값을 지켜서 체결함.
- 태양전지모듈 설치시는 극성에 유의하여 모듈 결선 시에는 전원 구성을 정확히 한 후 도면에 따라 연결함.
- 군별로 연결된 태양전지 출력선에 대하여 위치를 확인할 수 있도록 표시하여야 하고, 준공 시 감독관의 입회 하에 단락 전류 및 개방 전압 등을 확인하여 이상 없도록 하여야 함.

7.4.7 전기공사

- 공사에 사용되는 전선관은 설계도상에 명기한 종류와 굵기에 맞는 전선관 사용을 원칙으로 함.
- 전선 및 케이블을 전선관 및 케이블 트레이 내부로 입선시 전선간 및 케이블 트레이 내부에 있는 이물질 및 수분을 완전히 제거한 후 입선하여야 함.
- 전선의 접속은 전선로의 전기저항이 증가하거나 절연저항 및 인장강도가 감소하지 않도록 시행함.
- 전선의 접속을 위하여 절연물을 제거할 때에는 전선의 심선이 손상을 받지 않도록 와이어 스트리퍼 등으로 제거함.
- 전기설비기술에서 정하고 있는 접기저항값이 유지될 수 있도록 현장에 맞는 접지공사를 함.
- 접지극은 가능한 한 습기가 있고 부식의 우려가 없는 장소에 매설 또는 타입함.
- 접지선에는 퓨즈 등의 과전류 차단기를 설치해서는 안 됨.
- 맨홀 및 핸드홀의 크기, 구조는 설계도에 따라 케이블의 인입 및 굴곡에 충분한 것으로 하고, 구조는 통상 콘크리트 제품으로 하고, 지정 개소에 배수설비를 함.
- 뚜껑은 가능한 물이 침입하지 못하는 구조의 것으로 하고, 차량 기타 중량물의 압력을 받을 우려가 있는 장소에서는 이에 견디는 구조로 한다. 맨홀의 벽에는 케이블 및 접속부를 지지하기 위하여 벽에 지지물을 견고하게 설치하고, 지지금물에 지지대를 설치함.
- 관로의 매입 또는 관통은 감독원의 지시에 따라 구조물의 구조 및 강도에 지장이 없도록 함.
- 관 상호간의 접속은 카프링 또는 나사없는 카프링을 사용하고 결합을 단단히 함.
- 관과 박스 또는 분전반, 폴박스 등과의 접속이 나사로 되어 있지 않은 것은 내외면에 로크 너트를 사용하여 접속부분을 조이고 다시 관끝에는 붓싱을 설치함.
- 관 상호 및 박스 또는 분전반, 폴박스 등과의 접속부분에서 전기적 접속이 불완전해질 우려가 있는 경우는 동선 본드를 사용함.
- 노출 금속관 공사에서는 박스 및 부속품과 관의 나사들간 접속으로 결합을 견고히 함.
- 배관의 1구간이 20 m를 넘는 경우 또는 기술상 필요로 하는 곳은 중간 박스 (폴박스 또는 조인트박스 등)를 설치함.

7.4.8 배전설비 설치

- 변압기는 반입 및 설치 시 충격을 받지 않도록 주의해야 하며, 통신 전에 변압기류의 절연 내력 시험 등을 해야 함.
- 교류 차단기는 바닥에 수평이 되도록 볼트로 완전히 고정시키고 조작기구 및 접속 부분의 조정 등은 정확히 하여야 함.
- 개폐기, 단로기 등을 가내에 설치할 때는 조작할 때의 하중으로 빔 등이 처지지 않도록 견고히 고정함.

7.5 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안)

- 영농형 태양광 설계기준(안), 영농형 태양광 표준설계(안), 시방서 및 구조검토계산서를 종합한 <영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)> 작성 및 자료발간 수행.
- 본 설계서는 영농형 태양광 발전 시스템의 기본설계, 구조 및 기초설계, 시공 등에 관한 안전기준을 정립하고, 시설물의 구조안전성과 기초안전성을 확보한 설계도면과 시방서를 제시하는데 목적이 있으며, 프레임 형태의 영농형 태양광 표준모델을 다양한 현장 조건에 적용할 수 있는 방안도 제안함.

<h3>영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)</h3> <p>2022.12.</p> <p>서울대학교</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> <p>본 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)는 농림축산식품부 농림식품기술기획평가원에서 수행된 농업에너지 자립형 산업모델 기술개발 연구사업의 결과물로서 협의를 통한 고시 및 발간되기 이전의 내용으로 참고사항으로 이용해 주시기 바랍니다.</p> </div>																																																																																																																																								
<h3>목 차</h3>	<table border="0"> <tr> <td>계1장 총칙</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>1.1 일반사항</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>1.2 적용범위</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>1.3 기본사항</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>1.4 관련 기준 및 인용사항</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>1.5 주요기호</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>계2장 영농형 태양광 설계기준(안)</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.1 영농형 태양광 기본설계</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.1.1 일반사항</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.1.2 좌물 재식간격</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.1.3 농기계 및 농작업</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.1.4 좌광물</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.1.5 기초 기본 형태</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>2.2 구조 설계기준</td> <td style="text-align: right;">6</td> </tr> <tr> <td>2.2.1 설계하중</td> <td style="text-align: right;">6</td> </tr> <tr> <td>2.2.2 인장부재 설계</td> <td style="text-align: right;">15</td> </tr> <tr> <td>2.2.3 압축부재 설계</td> <td style="text-align: right;">15</td> </tr> <tr> <td>2.2.4 휨부재 설계</td> <td style="text-align: right;">16</td> </tr> <tr> <td>2.2.5 전단부재 설계</td> <td style="text-align: right;">16</td> </tr> <tr> <td>2.2.6 조합벽을 받는 부재 설계</td> <td style="text-align: right;">17</td> </tr> <tr> <td>2.3. 기초 설계기준</td> <td style="text-align: right;">18</td> </tr> <tr> <td>2.3.1 지반조사</td> <td style="text-align: right;">18</td> </tr> <tr> <td>2.3.2 절토사항</td> <td style="text-align: right;">19</td> </tr> <tr> <td>2.3.3 화중</td> <td style="text-align: right;">19</td> </tr> <tr> <td>2.3.4 말뚝기초의 압축지지력</td> <td style="text-align: right;">19</td> </tr> <tr> <td>2.3.5 말뚝기초의 인발지지력</td> <td style="text-align: right;">24</td> </tr> <tr> <td>2.3.6 말뚝기초의 휨하</td> <td style="text-align: right;">24</td> </tr> <tr> <td>2.3.7 직립기초의 압축지지력</td> <td style="text-align: right;">26</td> </tr> <tr> <td>2.3.8 직립기초의 휨하</td> <td style="text-align: right;">33</td> </tr> <tr> <td>2.3.9 비움침하량</td> <td style="text-align: right;">37</td> </tr> <tr> <td>2.3.10 기초의 설계</td> <td style="text-align: right;">37</td> </tr> <tr> <td>계3장 영농형 태양광 표준설계(안)</td> <td style="text-align: right;">40</td> </tr> <tr> <td>3.1 설계 개요</td> <td style="text-align: right;">40</td> </tr> <tr> <td>3.1.1 관련 설계 변수</td> <td style="text-align: right;">40</td> </tr> <tr> <td>3.1.2 기타사항</td> <td style="text-align: right;">41</td> </tr> <tr> <td>3.2 구조 정보</td> <td style="text-align: right;">42</td> </tr> <tr> <td>3.2.1 모듈 가로 배치형</td> <td style="text-align: right;">42</td> </tr> <tr> <td>3.2.2 모듈 세로 배치형</td> <td style="text-align: right;">43</td> </tr> <tr> <td>3.3 구조물 설계도</td> <td style="text-align: right;">44</td> </tr> <tr> <td>3.3.1 모듈 가로 배치형</td> <td style="text-align: right;">44</td> </tr> <tr> <td>3.3.2 모듈 세로 배치형</td> <td style="text-align: right;">46</td> </tr> <tr> <td>3.4 기초 설계도</td> <td style="text-align: right;">50</td> </tr> <tr> <td>3.4.1 모듈 가로 배치형</td> <td style="text-align: right;">52</td> </tr> <tr> <td>3.4.2 모듈 세로 배치형</td> <td style="text-align: right;">55</td> </tr> <tr> <td>3.5 하부 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전중속</td> <td style="text-align: right;">56</td> </tr> <tr> <td>3.5.1 모듈 가로 배치형</td> <td style="text-align: right;">56</td> </tr> <tr> <td>3.5.2 모듈 세로 배치형</td> <td style="text-align: right;">59</td> </tr> <tr> <td>3.6 기초 설치 조건에 따른 최소 근입깊이</td> <td style="text-align: right;">59</td> </tr> <tr> <td>3.6.1 모듈 가로 배치형</td> <td style="text-align: right;">60</td> </tr> <tr> <td>3.6.2 모듈 세로 배치형</td> <td style="text-align: right;">61</td> </tr> <tr> <td>계4장 영농형 태양광 시방서</td> <td style="text-align: right;">62</td> </tr> <tr> <td>4.1 일반사항</td> <td style="text-align: right;">62</td> </tr> <tr> <td>4.1.1 적용범위</td> <td style="text-align: right;">62</td> </tr> <tr> <td>4.1.2 적용규격</td> <td style="text-align: right;">62</td> </tr> <tr> <td>4.1.3 공급조건</td> <td style="text-align: right;">62</td> </tr> <tr> <td>4.1.4 주요납품차계</td> <td style="text-align: right;">62</td> </tr> <tr> <td>4.1.5 시험 및 검사</td> <td style="text-align: right;">63</td> </tr> <tr> <td>4.1.6 감독된</td> <td style="text-align: right;">63</td> </tr> <tr> <td>4.2 설계 일반</td> <td style="text-align: right;">63</td> </tr> <tr> <td>4.3 구조물 제작</td> <td style="text-align: right;">63</td> </tr> <tr> <td>4.4 자재 운송</td> <td style="text-align: right;">64</td> </tr> <tr> <td>4.5 기초 설치</td> <td style="text-align: right;">64</td> </tr> <tr> <td>4.6 구조물 및 모듈 설치</td> <td style="text-align: right;">64</td> </tr> <tr> <td>4.7 전기공사</td> <td style="text-align: right;">64</td> </tr> <tr> <td>4.8 배관설비 설치</td> <td style="text-align: right;">65</td> </tr> <tr> <td>부록</td> <td></td> </tr> <tr> <td>[부록 1] 구조검토계산서 (모듈 가로 배치형)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>[부록 2] 구조검토계산서 (모듈 세로 배치형)</td> <td></td> </tr> </table>	계1장 총칙	1	1.1 일반사항	1	1.2 적용범위	1	1.3 기본사항	1	1.4 관련 기준 및 인용사항	1	1.5 주요기호	1	계2장 영농형 태양광 설계기준(안)	5	2.1 영농형 태양광 기본설계	5	2.1.1 일반사항	5	2.1.2 좌물 재식간격	5	2.1.3 농기계 및 농작업	5	2.1.4 좌광물	5	2.1.5 기초 기본 형태	5	2.2 구조 설계기준	6	2.2.1 설계하중	6	2.2.2 인장부재 설계	15	2.2.3 압축부재 설계	15	2.2.4 휨부재 설계	16	2.2.5 전단부재 설계	16	2.2.6 조합벽을 받는 부재 설계	17	2.3. 기초 설계기준	18	2.3.1 지반조사	18	2.3.2 절토사항	19	2.3.3 화중	19	2.3.4 말뚝기초의 압축지지력	19	2.3.5 말뚝기초의 인발지지력	24	2.3.6 말뚝기초의 휨하	24	2.3.7 직립기초의 압축지지력	26	2.3.8 직립기초의 휨하	33	2.3.9 비움침하량	37	2.3.10 기초의 설계	37	계3장 영농형 태양광 표준설계(안)	40	3.1 설계 개요	40	3.1.1 관련 설계 변수	40	3.1.2 기타사항	41	3.2 구조 정보	42	3.2.1 모듈 가로 배치형	42	3.2.2 모듈 세로 배치형	43	3.3 구조물 설계도	44	3.3.1 모듈 가로 배치형	44	3.3.2 모듈 세로 배치형	46	3.4 기초 설계도	50	3.4.1 모듈 가로 배치형	52	3.4.2 모듈 세로 배치형	55	3.5 하부 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전중속	56	3.5.1 모듈 가로 배치형	56	3.5.2 모듈 세로 배치형	59	3.6 기초 설치 조건에 따른 최소 근입깊이	59	3.6.1 모듈 가로 배치형	60	3.6.2 모듈 세로 배치형	61	계4장 영농형 태양광 시방서	62	4.1 일반사항	62	4.1.1 적용범위	62	4.1.2 적용규격	62	4.1.3 공급조건	62	4.1.4 주요납품차계	62	4.1.5 시험 및 검사	63	4.1.6 감독된	63	4.2 설계 일반	63	4.3 구조물 제작	63	4.4 자재 운송	64	4.5 기초 설치	64	4.6 구조물 및 모듈 설치	64	4.7 전기공사	64	4.8 배관설비 설치	65	부록		[부록 1] 구조검토계산서 (모듈 가로 배치형)		[부록 2] 구조검토계산서 (모듈 세로 배치형)	
계1장 총칙	1																																																																																																																																								
1.1 일반사항	1																																																																																																																																								
1.2 적용범위	1																																																																																																																																								
1.3 기본사항	1																																																																																																																																								
1.4 관련 기준 및 인용사항	1																																																																																																																																								
1.5 주요기호	1																																																																																																																																								
계2장 영농형 태양광 설계기준(안)	5																																																																																																																																								
2.1 영농형 태양광 기본설계	5																																																																																																																																								
2.1.1 일반사항	5																																																																																																																																								
2.1.2 좌물 재식간격	5																																																																																																																																								
2.1.3 농기계 및 농작업	5																																																																																																																																								
2.1.4 좌광물	5																																																																																																																																								
2.1.5 기초 기본 형태	5																																																																																																																																								
2.2 구조 설계기준	6																																																																																																																																								
2.2.1 설계하중	6																																																																																																																																								
2.2.2 인장부재 설계	15																																																																																																																																								
2.2.3 압축부재 설계	15																																																																																																																																								
2.2.4 휨부재 설계	16																																																																																																																																								
2.2.5 전단부재 설계	16																																																																																																																																								
2.2.6 조합벽을 받는 부재 설계	17																																																																																																																																								
2.3. 기초 설계기준	18																																																																																																																																								
2.3.1 지반조사	18																																																																																																																																								
2.3.2 절토사항	19																																																																																																																																								
2.3.3 화중	19																																																																																																																																								
2.3.4 말뚝기초의 압축지지력	19																																																																																																																																								
2.3.5 말뚝기초의 인발지지력	24																																																																																																																																								
2.3.6 말뚝기초의 휨하	24																																																																																																																																								
2.3.7 직립기초의 압축지지력	26																																																																																																																																								
2.3.8 직립기초의 휨하	33																																																																																																																																								
2.3.9 비움침하량	37																																																																																																																																								
2.3.10 기초의 설계	37																																																																																																																																								
계3장 영농형 태양광 표준설계(안)	40																																																																																																																																								
3.1 설계 개요	40																																																																																																																																								
3.1.1 관련 설계 변수	40																																																																																																																																								
3.1.2 기타사항	41																																																																																																																																								
3.2 구조 정보	42																																																																																																																																								
3.2.1 모듈 가로 배치형	42																																																																																																																																								
3.2.2 모듈 세로 배치형	43																																																																																																																																								
3.3 구조물 설계도	44																																																																																																																																								
3.3.1 모듈 가로 배치형	44																																																																																																																																								
3.3.2 모듈 세로 배치형	46																																																																																																																																								
3.4 기초 설계도	50																																																																																																																																								
3.4.1 모듈 가로 배치형	52																																																																																																																																								
3.4.2 모듈 세로 배치형	55																																																																																																																																								
3.5 하부 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전중속	56																																																																																																																																								
3.5.1 모듈 가로 배치형	56																																																																																																																																								
3.5.2 모듈 세로 배치형	59																																																																																																																																								
3.6 기초 설치 조건에 따른 최소 근입깊이	59																																																																																																																																								
3.6.1 모듈 가로 배치형	60																																																																																																																																								
3.6.2 모듈 세로 배치형	61																																																																																																																																								
계4장 영농형 태양광 시방서	62																																																																																																																																								
4.1 일반사항	62																																																																																																																																								
4.1.1 적용범위	62																																																																																																																																								
4.1.2 적용규격	62																																																																																																																																								
4.1.3 공급조건	62																																																																																																																																								
4.1.4 주요납품차계	62																																																																																																																																								
4.1.5 시험 및 검사	63																																																																																																																																								
4.1.6 감독된	63																																																																																																																																								
4.2 설계 일반	63																																																																																																																																								
4.3 구조물 제작	63																																																																																																																																								
4.4 자재 운송	64																																																																																																																																								
4.5 기초 설치	64																																																																																																																																								
4.6 구조물 및 모듈 설치	64																																																																																																																																								
4.7 전기공사	64																																																																																																																																								
4.8 배관설비 설치	65																																																																																																																																								
부록																																																																																																																																									
[부록 1] 구조검토계산서 (모듈 가로 배치형)																																																																																																																																									
[부록 2] 구조검토계산서 (모듈 세로 배치형)																																																																																																																																									

그림 107 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안) 작성 및 자료발간

제1장 총칙

1.1 일반사항

본 설계서는 영농형 태양광 발전 시스템의 기본설계, 구조 및 기초설계, 시공 등에 관한 안전기준을 정립하고, 시설물의 구조안전성과 기초안전성을 확보하며, 설계도면과 시방서를 제시하는데 목적이 있다.

1.2 적용범위

본 설계서에서 제시되는 기준 및 시방서는 농지에 설치되는 태양광 발전 시설인 영농형 태양광 발전 시스템의 시설물에 적용한다.

1.3 기본사항

영농형 태양광 발전 시스템이 설치되는 지반은 영농(논, 밭, 과수 등)을 기반으로 하기에 지역이나 계절에 따라서 다양한 지반 상태로 존재할 수 있다. 따라서 지반 관련 계수의 변동성을 고려하여 구조설계 방법은 허용응력설계법을 기본으로 한다. 하지만, 설계자 혹은 발주자의 판단에 따라 한계상태설계법 등 다른 설계법을 적용할 수도 있다. 또한 영농형 태양광 시설물은 항복응력 및 극한응력이 뚜렷한 재료로 이루어진 강관으로 주로 구성되며, 일반 구조물에 비해 경량의 구조물이기에, 항복점 이후의 연성 변형은 없는 구조로 간주한다.

1.4 관련 기준 및 인용사항

- 본 설계서에서 인용한 국내 설계기준 및 참고문헌은 다음과 같다.
- 강구조 설계 일반사항 (허용응력설계법) KDG 14 30 05
 - 강구조 부재 설계기준 (허용응력설계법) KDG 14 30 10
 - 건축구조기준 총칙 KDS 41 10 05
 - 건축구조기준 설계하중 KDS 41 10 15
 - 건축물 내진설계기준 KDS 41 17 00
 - 건축물 강구조 설계기준 KDS 41 31 00
 - 건축물 기초구조 설계기준 KDS 41 19 00
 - 구조물기초설계기준 해설 (국토교통부 계정)

1.5 주요기호

- A_f : 기초판의 지면적 (m²)
- A_b : 말뚝단단 지지면적 (m²)

제2장 영농형 태양광 설계기준(안)

2.1 영농형 태양광 기본설계

2.1.1 일반사항

영농형 태양광 발전 시스템의 시설물 기본설계를 위한 고려사항을 반영하여 시설물 기둥의 간격과 높이, 보의 간격 등 기본 설계인자를 결정한다.

2.1.2 작물 재식간격

작물 재식간격을 반영한 영농형 태양광 시스템의 기둥 및 보의 간격을 설계한다. 특히 과수의 경우 재식 이후 다년간 과수가 유지되기 때문에 해당 간격을 고려한 시스템 기본설계를 수행한다. 밭의 경우 실제 현황의 이랑 및 고랑 간격을 우선적으로 반영하여 기둥 간격을 설계한다. 이때 기본설계 이후 현장의 여건에 따라 실시설계 및 설계 시공 시 기둥의 간격이 조정될 수 있다.

2.1.3 농기계 및 농작업

영농형 태양광 시스템 하부에서 농기계를 이용한 농작업이 가능하도록 충분한 공간이 확보된 기둥의 간격과 높이를 선정한다. 트랙터의 경우 시스템 내부에서 작업을 위한 신호가 가능해야하며 신뢰반경 및 컨트롤러 신뢰반경을 함께 고려한다. 특히 설치 농기에서 보유하거나 실제 사용 가능한 농기계의 제원을 반영하도록 한다.

2.1.4 차광률

영농형 태양광 발전 시스템 설치 시, 상부의 태양광 모듈에 따라 하부에 도달하는 일사량이 감소하게 되어 작물 생육에 영향을 미치게 된다. 하부에 도달하는 일사량의 감소를 나타내는 차광률은 태양광 모듈 전체 면적을 영농형 태양광 농지의 면적으로 나눈 비율로 정의한다. 작물 종류에 따라 필요한 일사량 및 광포화점은 상이하므로 설계자의 판단과 실증 재배 연구 및 가이드라인 등을 참조하여 차광률을 결정한다.

2.1.4 기초 기본 형태

기초는 스크립, 스퀘어파일 파일 등의 말뚝 기초를 기본으로 한다. 기초에 따른 영농 면적의 감소와 토양 영향을 최소화 하도록 한다. 이때 콘크리트 기초를 이용할 경우, 설치 및 철거 시 농지에 영향을 주지 않는 방식으로 진행하며, 분쇄하지 않도록 한다.

2.3 기초 설계기준

2.3.1 지반조사

영농형 태양광 구조물의 기초 설계 및 시공에 필요한 지반정보를 제공하기 위하여 현장 조사와 실내시험 및 현장시험을 실시하며, 조사 및 시험은 국내 기준에 따라 수행하거나 국제적으로 공인된 방법을 따른다. 소형 경량인 영농형 태양광 구조물의 특성을 고려하여 시공 현장의 육안조사와 얇은 깊이의 시험굴조사를 실시하며 설계자의 판단에 따라 관입시험 및 시추조사를 수행한다.

2.3.1.1 조사 범위

지반조사의 범위는 보링 또는 샘플링 수와 종류, 시료채취에 사용하는 장비, 원위치 시험장비 및 실내시험계획 등을 포함한다.

2.3.1.2 예비조사

예비조사에서는 영농형 태양광 기본설계에 따라 구조물이 설치되는 농지의 현장 여건 파악, 기존 자료조사 및 개략적 지하수위 조사를 통하여 기초 형식을 결정하고 본조사 계획 수립을 실시한다.

2.3.1.3 본조사

기초 설계 및 시공 시 필요한 제반 자료 획득을 위해 시행하며, 지반구성과 기초 지지력, 침하 및 시공에 영향을 받을 수 있는 범위 내의 지반 정질 등을 조사한다.

(1) 조사간격, 조사지점 및 조사깊이는 예비조사에서 추정되는 지반상징과 영농형 태양광 구조물의 규모, 종류에 따라 정하는 것으로 한다.

(2) 지반 상황에 따라서 적절한 원위치시험과 토질시험을 하고, 지지력 및 침하량의 계산과 기초 설계에 필요한 지반의 성질을 구하는 것으로 한다.

2.3.1.4 조사 조건

- (1) 지반조사는 아래 (2) ~ (4)의 규정에 따라 수행하여야 한다.
- (2) 토질의 분류는 KS F 2324의 규정에 따르며, KDS 11 10 10 2.3 지반의 분류를 참고할 수 있다.
- (3) 지반의 분류, 강도, 압축성이 불확실하거나 지지력이 이 기준에서 규정한 지지력 값보다 상당히 큰 값을 적용할 경우에는 감독은 지반조사를 요구할 수 있다.
- (4) 팽창성 토질이 있을 가능성이 있는 지역에서는 팽창성 토질이 있는 위치를 결정하기 위해 토질시험을 수행하여야 하며, 아래 항목 중 어느 하나라도 해당되는 토질은 팽창성 토질로 분류할 수 있다.
- ① KS F2303에 따라 결정된 소성지수 (PI, Plasticity Index)가 15 이상인 흙
- ② KS F2302에 따라 결정된 세번호 200 (0.075 mm)을 통과한 토립자가 10% 를 초과한 흙

제3장 영농형 태양광 표준설계(안)

3.1 설계 개요

태양광 모듈 배치에 따른 두 가지의 프레임 형식 구조물 설계(안)을 제시한다. 모듈 가로 배치형의 경우, 태양광 모듈의 길이가 긴 가로 방향으로 이어져 설치되는 형식이며, 모듈 세로 배치형의 경우, 태양광 모듈의 길이가 짧은 세로 방향으로 간격을 두어 설치되는 형식이다.

3.1.1 관련 설계 변수

3.1.1.1 설계 대상지

본 설계(안)에서는 경기도 수원시를 대상으로 하였으며, 이에 따른 지역별 기본풍속과 기본지상 적설하중을 적용하여 구조 설계를 진행하고, 이와 상이한 대상지에 대해서는 2.2.1절을 참조하여 설계를 수행한다.

3.1.1.2 사용 부재

- (1) 부재 품spec
- 부재 재질 : S275
 - 탄성계수 : 205,000 MPa
 - 포아송비 : 0.3
 - 항복강도 : 275 MPa
- (2) 부재 규격

영농형 태양광 시스템에 사용되는 부재의 세부 규격은 표 22를 참고한다.

표 22 영농형 태양광 시스템 사용 부재 규격

부재 이름	부재 규격 (mm)
하부 기둥	ø-101.6×4.0t
하부 보	H-150×100×3.2×4.5t
피린	C-75×15×15×2.1t
브래킷	∟-40×40×2t
상부 기둥	H-100×100×3.2×4.5t
상부 보	∟-100×100×2.9t

3.1.1.3 토양 강도계수

본 설계(안)에서의 기초 설계를 위한 토양 강도계수는 영농형 태양광 설치 대상지의 현장 지반조사를 통해 측정된 아래의 강도계수를 대상으로 하였으며, 이와 상이한 지

그림 108 영농형 태양광 설계기준(안) 및 표준설계(안) 구성

3.3.2 모듈 세로 배치형

본 설계(안)의 구조 검토 결과 (3.2.2절)에 따라서 모듈 세로형의 배치도, 측면도, 배면도, 입체도는 다음과 같다.

3.3.2.1 구조물 배치도

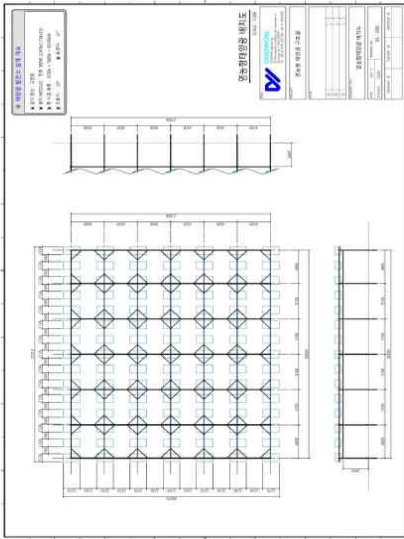


그림 15 영농형 태양광 모듈 세로 배치형 배치도

3.3.2.4 구조물 입체도

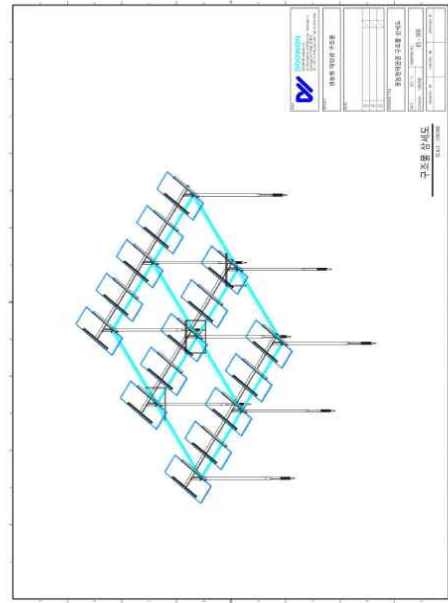


그림 16 영농형 태양광 모듈 세로 배치형 입체도

3.4.1.2 강관 기초 상세도

모듈 가로 배치형의 강관 기초 상세도는 그림 19와 같다.

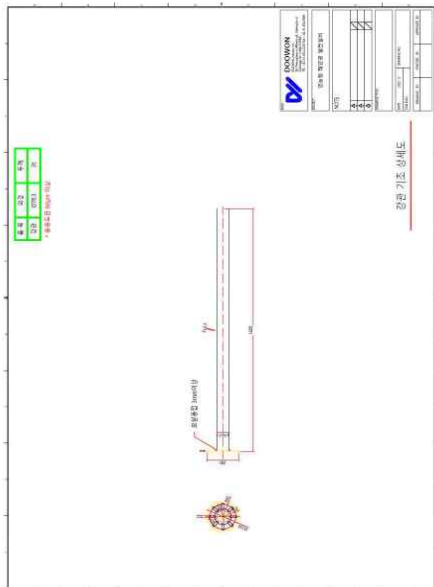


그림 19 모듈 가로 배치형의 강관 기초 상세도

3.4.1.3 스크류 기초 상세도

모듈 가로 배치형의 스크류 기초 상세도는 그림 20과 같다.

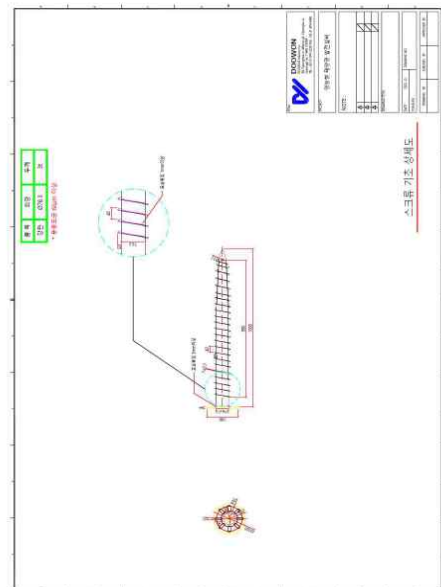


그림 20 모듈 가로 배치형의 스크류 기초 상세도

그림 109 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)의 설계도면 구성

3.5 하부 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전풍속

본 설계서에서 제시되는 설계(안)를 적용하여, 현장 여건에 따라 하부 기둥 간격과 부재 규격 조정 시에는 지역별 설계적설심과 설계풍속이 제시되는 안전적설심 및 안전풍속을 초과하지 않도록 한다. 최종 계산된 결과는 3.5.1절 및 3.5.2절을 참고하도록 한다. 상이한 구조 형태를 적용할 경우에는 설계 여건에 적합하도록 구조 검토를 시행하여, 안전적설심 및 안전풍속을 수정하도록 한다.

3.5.1 모듈 가로 배치형

모듈 가로 배치형의 하부 기둥 간격과 부재 규격의 변화에 따른 안전적설심 및 안전풍속은 표 25와 같다.

표 25 영농형 태양광 모듈 가로 배치형의 안전적설심 및 안전풍속

기 둥 간 격 (m)	부재 규격									
	φ 101.6×4.0t		φ 114.3×3.2t		φ 114.3×4.5t		φ 139.0×3.6t		φ 139.0×4.5t	
	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)
3.0	218	33	220	34	225	39	230	42	232	46
3.5	191	31	192	31	193	36	196	39	197	42
4.0	178	29	179	29	181	33	182	36	183	39
4.5	167	27	168	27	170	31	173	33	173	36
5.0	159	25	160	25	162	28	164	30	165	33

3.6.1 모듈 가로 배치형

모듈 가로 배치형에서 설계하중 작용 시 발생하는 최대압축하중 698.0 kgf를 바탕으로 산정된 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 표 27 및 표 28과 같다.

표 27 모듈 가로 배치형의 지반조건에 따른 강관 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

1.6 t/m ²	평חק비 (kN/m ²)			
	0	10	20	
내부마찰각	25°	4.448	3.376	2.553
	30°	3.627	2.786	2.075
	35°	2.843	2.119	1.505
1.8 t/m ²	평חק비 (kN/m ²)			
	0	10	20	
내부마찰각	25°	4.155	3.203	2.451
	30°	3.355	2.612	1.980
	35°	2.638	1.985	1.424
2.0 t/m ²	평חק비 (kN/m ²)			
	0	10	20	
내부마찰각	25°	3.927	3.053	2.351
	30°	3.130	2.478	1.886
	35°	2.465	1.870	1.352

표 28 모듈 가로 배치형의 지반조건에 따른 스크류 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

1.6 t/m ²	평חק비 (kN/m ²)			
	0	10	20	
내부마찰각	25°	3.573	2.176	1.452
	30°	2.601	1.723	1.156
	35°	2.117	1.299	1.000 (0.750)*
1.8 t/m ²	평חק비 (kN/m ²)			
	0	10	20	
내부마찰각	25°	3.331	2.083	1.412
	30°	2.431	1.641	1.120
	35°	1.951	1.223	1.000 (0.709)*
2.0 t/m ²	평חק비 (kN/m ²)			
	0	10	20	
내부마찰각	25°	3.126	2.000	1.376
	30°	2.256	1.569	1.084
	35°	1.812	1.156	1.000 (0.673)*

* 괄호 내 숫자의 경우 실제 산출된 값이지만, 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 고려해 강관 및 스크류 기초는 1.0 m 이상 확보 추천. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지저리에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정 필요.

제4장 영농형 태양광 시방서

4.1 일반사항

4.1.1 적용범위

본 시방서는 기술규격, 설계도면 등에 포함된 업무와 관련하여 영농형 태양광 발전설비에 공급되는 태양광 발전시스템의 기자재 제작, 시공 및 설치에 대하여 적용한다.

4.1.2 적용규격

- (1) 모든 기자재는 관련 법규 및 규정에 저촉되지 않도록 제작, 설치되어야 한다.
- (2) KS 인증 받은 설비를 우선 설치하여야 한다.

4.1.3 공급조건

- 위치 : 해방 1,000 m 이하
- 온도 : -25℃에서 90℃ 이상
- 습도 : 45 ~ 95%
- 풍속 : 각 지방 지역풍속

4.1.4 주요납품장제

4.1.4.1 태양전지 모듈

- (1) 태양광을 받아 직류전원을 발전시켜 부하전원을 공급한다.
- (2) 경량의 냉각 압연강판 또는 경금속 특수 알루미늄 재질을 사용하여 밀봉 처리되어 습기 침투를 방지한 제품을 사용한다.

4.1.4.2 인버터 및 접속반

- (1) 인버터는 태양전지 모듈 군으로부터 발전된 직류전원을 공급받아 교류전력으로 바꾸고 계통연계가 가능하며 항상 안정된 전력을 공급한다.
- (2) 접속반은 모듈 군으로부터 전류를 모아서 안정된 전력으로 인버터에 공급한다.
- (3) 인버터는 방열 및 통풍이 용이하며, 계통에 사고발생 시 신속하고 안전하게 정지하고, 출력 및 상태를 감시하여 항상 최적의 상태로 동작되어야 한다.
- (4) 접속반은 전력을 공급하는 동안 각종 스위치의 조작이 용이해야 하며, 태양전지판의 각 채널별 전류 및 전압에 맞는 퓨즈를 사용하여야 한다.

4.1.4.3 구조물

- (1) 농지 위에 태양전지 모듈을 고정하면서 농기계의 출입 또한 용이한 태양광 지지구조물이어야 한다.
- (2) 구조물 제작은 설계도면에 의거 제작하여 시공한다.

문서번호

구조 검토 계산서

태양광 구조물 (풍속 26m/s)

영농형 태양광 발전소 모듈 세로 배치형

2022. 04

			작성자	검토자
			이완아	조기연
1	2022-04-22	날짜	내용	

(주)홍익하이테크
Hongik High-Tech. Co., Ltd.

서울특별시 성동구 용답동 235-10 숭실빌딩 9층
TEL. 02-567-5204
FAX. 02-445-0443
E-mail hongik5204@naver.com

건축구조기술사
김 재 욱

그림 110 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)의 안전설계기준, 시방서, 구조검토계산서 구성

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

(1) 연구수행 결과

1) 정성적 연구개발성과

- (1) 영농형 태양광 시스템 현황 조사 및 분석
 - 영농형 태양광 시스템 국내 적용 사례, 현황 조사 및 분석
 - 영농형 태양광 시스템 설계 (모듈, 구조물, 기초 등) 현황 조사 및 분석
 - (2) 영농형 태양광 시스템 구축을 위한 설치 후보지 선정 및 현장조사
 - 협업 시나리오에 따른 영농형 태양광 설치 후보지 선정
 - 태양광 발전 사업을 위한 발전사업 및 개발행위 인허가 프로세스 수행
 - 현장조사를 통한 대상지역 토질특성 분석
 - (3) 영농형 태양광 구조물 및 기초 기본 설계자료 조사 및 안정성 평가 방법 정립
 - 상부구조물 구조안전성 검토 및 구조 설계 방안 정립 (허용응력설계법 및 한계상태설계법 기반 구조설계법)
 - 하부 기초 안전성 검토 및 기초 설계 방안 정립 (기초 설계기준 및 말뚝기초의 정역학적 지지력, 인발저항력 산정 방법 정립)
 - 영농형 태양광 특화 기초 분석 및 선정
 - 수치해석 및 현장시험을 통한 기초 안전성 평가 방법 정립
 - (4) 영농형 태양광 시스템 기본설계
 - 재식 간격 및 농작업을 고려한 시스템 설계
 - 차광률 및 기초 형태를 고려한 시스템 설계
 - 태양광 모듈 설치 형태에 따른 영농형 태양광 기본설계안 작성
 - (5) 구조안전성 검토 및 안전설계기준 분석
 - 설계하중 산정과 및 하중조합 선정
 - 기본설계안에 따른 구조해석 모델 구축 및 구조해석 수행
 - 허용응력설계 및 한계상태설계 기반 부재 단면 검토 및 구조안전성 평가
 - 지진하중 해석 및 내진설계
 - 안전적설심, 안전풍속 분석 및 최적화 설계
 - 간격 조정, 시공 및 부재 (KS21) 변경에 따른 안전설계기준 분석
 - 설치조건에 따른 구조 부재 물량, 차광률, 발전용량에 관한 설계 변수 trade-off 분석
 - (6) 하부기초 특성에 따른 기초 안전성 평가 및 분석
 - 기초 안전성 평가를 위한 이론적 지지력 산정 방법의 검토
 - 모형시험을 통한 기초 형태별 지지력 특성 분석과 지지력 예측
 - 현장시험을 통한 말뚝기초의 지지력 산정
 - 수치해석 프로그램을 이용한 말뚝기초의 모델링 방법 검토
 - 영농형 태양광 기초의 형태 및 지반조건에 따른 최소 근입깊이 분석
 - (7) 시스템 구축 및 현장 적용성 평가와 표준설계서(안) 작성
 - 연구팀 협업을 통한 시스템 구축과 시공 프로세스에 따른 시스템 현장 구축
 - 영농형 태양광 시스템 실증 재배
 - 영농형 태양광 시스템 인허가 프로세스 구축
 - <영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)> 작성 및 자료발간
-

2) 정량적 연구개발성과

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1차년도	2차년도	계	가중치 (%)
			(2021)	(2022)		
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	논문 SCI	목표(단계별)		1	1	
		실적(누적)		1	1	
	논문 비SCI	목표(단계별)	1	1	2	
		실적(누적)	0	2	2	
	특허 출원	목표(단계별)	1		1	10
		실적(누적)	1		1	
	특허 등록	목표(단계별)		1	1	15
		실적(누적)		1	1	
	학술발표	목표(단계별)	2	3	5	10
		실적(누적)	4	4	8	
	실적(누적)					
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	제품화 (시스템 구축)	목표(단계별)	3	0	3	40
		실적(누적)	0	3	3	
	기타 (자료발간)	목표(단계별)	1	1	2	25
		실적(누적)	1	2	3	
	포상 및 수상	목표(단계별)	0		0	
		실적(누적)	1		1	
		목표(단계별)				
		실적(누적)				
계	목표(단계별)	8	7	15		
	실적(누적)	6	13	19		

3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	영농형 태양광 발전 시설 하부의 일사량 분포 모의	한국농공 학회논문 집	정영준	64(2)	대한민국	한국농공 학회	비SCIE (KCI)	2022.03.31	1738-3692	100
2	한국형 영농형 태양광 스마트팜 시스템의 종합설계 및 구조해석을 통한 안전성 검토	한국농공 학회논문 집	이상익	64(4)	대한민국	한국농공 학회	비SCIE (KCI)	2022.07.31	1738-3692	100
3	Hybrid cooling techniques to improve the performance of solar photovoltaic modules	Solar Energy	Ahmed Fawzy Eid, Sang-ik Lee	245	USA	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	SCIE	2022.09.22	0038-092X	100

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The 10th Congress of the Asian Association of Environmental and Resource Economics	Sangik Lee, Jaesung Park, Jonghyuk Lee, Youngjoon Jeong, Dongsu Kim, Won Choi	2021.08.21.	Seoul National University, Korea	South Korea
2	2021년도 한국농림기상학회 연차 학술대회	이상익, 이종혁, 정영준, 서병훈, 김동수, 서예진, 최원	2021.08.27.	서울대학교 농업생명과학대학	South Korea
3	2021 한국농공학회 학술발표회	김태진, 김동근, 전지훈, 손영환	2021.11.04.	전라남도 진도군	South Korea
4	2021 한국농공학회 학술발표회	이상익, 이종혁, 이드아함드파지, 정영준, 서병훈, 김동수, 서예진, 최원	2021.11.04.	전라남도 진도군	South Korea
5	Agrivoltaics2022 Conference & Exhibition	Sang-ik Lee	2022.06.17	Piacenza, Italy	Italy
6	ASABE 2022 Annual International Meeting	Sang-ik Lee	2022.07.19	Houston, Texas, USA	USA
7	2022 한국농공학회 학술발표회	이상익,	2022.10.13	대구광역시	South Korea
8	2022 한국농공학회 학술발표회	김태진, 김동근, 전지훈, 조상범, 손영환	2022.10.14	대구광역시	South Korea

기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호
2021	연차보고서	2022.01.01.	-

생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	태양광 발전설비 구조물	대한민국	두원산업(주)	2021.12.13	10-2021-0177944					100	○
2	태양광 발전설비 구조물	대한민국				두원산업(주)	2022.06.29	10-2416418-0000		100	○

○ 지식재산권 활용 유형

* 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

- * 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	영농형 태양광 시스템 - 수원	2022.06.07	두원산업(주)	경기도 수원시 서울대학교	시스템 구축 및 현장 적용성 평가, 실증재배			
2	영농형 태양광 시스템 - 경산	2022.05.01.	주식회사 모든솔라	경상북도 경산시 영남대학교	시스템 구축 및 현장 적용성 평가, 실증재배			
3	영농형 태양광 시스템 - 인천	2022.04.01	원광전력(주)	인천시 옹진군 영흥면	시스템 구축 및 현장 적용성 평가, 실증재배			

기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

- * 1) 기술이전 또는 자기실시
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
- * 3) 국내 또는 국외

매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
국외					
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

고용 효과

구분		고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황																
			학위별				성별		지역별										
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타						

산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	수상	우수논문발표상	2021년도 한국농공학회 학술발표회 우수논문발표상	이상익, 이종혁, 이드아함드 파지, 정영준, 서병훈, 김동수, 서예진, 최원	2021.11.05	사단법인 한국농공학회

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과]

- 자료발간 - <국내 영농형 태양광 시스템 현황과 표준 설계서 개발을 위한 기본설계 및 검토>
 자료발간 - 학술기술기사 (전원과 자원)
 자료발간 - <영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)>

(2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 영농형 태양광 설치 후보지 선정 및 대상지역 현장조사	○ 협업을 통한 시스템 후보지 선정 및 토질특성에 관한 현장조사 수행	○ 100
○ 설계 고려사항을 반영한 영농형 태양광 시스템 기본설계	○ 차광률, 작물 재식거리, 시스템 하부 영농작업 등에 관한 고려사항 도출과 이를 반영한 기본설계안 도출	○ 100
○ 영농형 태양광 구조물 설계를 위한 구조안전성 검토 및 특화 설계기준 정립	○ 허용응력설계법 및 한계상태설계법에 관한 검토와 이를 활용한 설계하중 및 내진설계를 포함한 구조해석 방법론과 구조설계기준 확립.	○ 100
○ 기초 설계를 위한 기초 안전성 검토 및 설계기준 정립	○ 기초 설계를 위한 모형시험, 현장시험 및 수치해석 기반의 기초 조건별 지지력, 침하량 분석	○ 100
○ 현장 여건을 고려한 실시설계 및 시스템 설치	○ 시공 프로세스에 따른 시스템 현장 구축과 시스템 구축에 필요한 인허가 프로세스 정립	○ 100
○ 영농형 태양광 현장 적용성 확인과 운영	○ 실증재배를 통한 현장 적용성 확인과 시스템 운영을 통한 구조 및 기초 안전성 추가 검토	○ 100
○ 영농형 태양광 시스템의 종합 표준설계서 개발	○ 설계기준(안), 설계도면, 시방서, 구조검토계산서를 종합한 표준설계서(안) 작성	○ 100

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- ▶ 영농형 태양광 시설물의 구조 및 기초 안전성을 확보하기 위한 설계기준이 전무한 실정이었으나, 이에 관한 체계적인 안전 검토 방안과 농업시설물 특화 해석방안을 정립함.
- ▶ 영농형 태양광 시스템 설계를 위한 기본 고려사항으로 차광률, 작물 재식거리, 시스템 하부 영농작업 등을 분석하였으며, 이를 바탕으로 다양한 형태별 기본설계안을 작성 및 제시함.
- ▶ 현장 상황을 반영한 다양한 설치조건을 고려하여 풍하중, 적설하중에 관한 안전설계기준을 정립하고, 지진해석 및 내진설계를 통해 구조물의 안전성을 확보할 수 있도록 함.
- ▶ 일반 농가로의 보급이 용이할 수 있도록 설계도면, 시방서를 포괄한 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안) 및 가이드라인을 개발하였으며, 특히 실제 시스템 구축 시 기여할 수 있도록, 시공 프로세스와 필요한 인허가 프로세스를 정립하여, 기본 자료로서 제공될 수 있도록 함.
- ▶ 설계기준, 설계도면, 시방서를 종합한 표준설계서(안)을 활용하여 국내 다양한 농업 지역에 영농형 태양광 시스템의 보급을 용이하게 하며, 표준 설계기준 제시를 통하여 영농형 태양광 시설물의 체계적 설계와 관리를 가능하도록 함.
- ▶ 다양한 실제 현장조건을 반영한 영농형 태양광 시스템 표준모델 제시를 통해 설비의 경제적 이점을 확보하고, 시스템 시공의 효율성을 증진함.
- ▶ 본 연구를 통해 구축된 표준설계서(안), 가이드라인, 시공 및 인허가 프로세스가 일반 농가로의 영농형 태양광 시스템 보급이 가능하도록, 시스템 설계 및 시공 시 기본 자료로서 제공함.
- ▶ 본 연구에서 대상으로 한 프레임 형태의 시설물 외, 추후 다양한 형태의 표준모델 개발 시, 안전성·경제성·시공 효율성 확보를 위해 영농형 태양광 농업시설물 특화 설계기술이 활용되도록 함.
- ▶ 연구개발성과에 대한 기관별 기술 기여도는 하단 표와 같으며, 산정 근거는 국가연구개발 과제 협약서를 바탕으로 함.

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
작물별 생산성을 고려한 영농형 태양광 표준모델 개발 및 실증	작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발	서울대학교 산학협력단	대학 (비영리)	620	620	1.000	신규 기술개발	해당 없음	-
	영농형 태양광 실시 설계 및 현장 시공과 모니터링 시스템 구축	두원산업 (주)	중소기업 (영리)	362.5	280	77.241	신규 기술개발	협약	50.00
계				982.5	900	-	-	-	-

5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

(1) 연구개발성과의 활용방안

○ 연구개발결과의 활용분야에 따른 활용방안

▶ 국가기관

- 친환경 신재생 에너지 생산 시설의 안정성 확보
- 태양광 구조물 표준 규격 확립을 통한 시설 보급 가속화
- 에너지 생산을 통한 범국가적 에너지 부족 문제 완화
- 새로운 국가 친환경 에너지 산업 형태 제시 및 경쟁력 강화

▶ 정부 산하단체

- 농지조성사업비 절감 효과를 통한 효율적 사업 수행
- 간척지 농작물 생산성 분석을 통한 중·장기적 농업계획 수립
- 새로운 농가 수익 모델 제시를 통한 중·장기적 농촌계획 수립
- 농촌 소득 증대를 통한 농업 및 농촌 경쟁력 강화

▶ 지방 자치단체

- 농촌의 소득 증대를 통한 인구 유입 기대 효과
- 지역 특성화 사업으로의 발전 가능성 확보
- 농업과 에너지 생산의 병행을 통한 토지 활용의 효율화

○ 기업화 및 현장적용 방안

- ▶ 영농형 태양광 시설의 표준 도입을 통한 시공의 효율성 및 경제성 강화
- ▶ 토양특성 및 현장 조건을 고려한 영농형 태양광 시스템 설치 방법 확립
- ▶ 영농형 태양광 구조물의 구조안전성 검토 및 보강

○ 연구개발 관련 추가연구 및 기술이전

- ▶ 농경지 구조물 특화 기초 설계 표준안 제시
- ▶ 현장에 맞는 영농형 태양광 시스템 설계 프로그램 개발
- ▶ 영농형 태양광 구조물이 설치된 지역에서의 작물 성장 모델 개발
- ▶ 일반 태양광 구조물의 구조해석 및 최적화 설계로 기술이전 가능

○ 사업 활성화 및 보급을 위한 산업화

- ▶ 구조물 모듈화를 통한 제작 과정 분업으로 적은 비용과 시간이 소요되는 구조물 설계
- ▶ 기자재를 제외하면 총 70~80%에 이르는 구조물비 및 인건비에 대해 규격화된 표준 생산과 조립식 시공의 절감으로 영농형 태양광 시스템의 경제성 실현
- ▶ 중간기술자 정도의 인력이 매뉴얼 만을 보고도 충분히 시공할 수 있는 구조물로 설계

(2) 연구개발성과의 기대효과

○ 기대성과

- ▶ 표준 설계기준 제시를 통한 영농형 태양광 시설의 체계적 관리 가능
- ▶ 영농형 태양광 시설의 표준 제시를 통한 설비의 경제적 이점 확보
- ▶ 영농형 태양광 시설 시공의 효율성 증진
- ▶ 친환경 신재생 에너지의 지속적이고 안정적인 생산원 확보
- ▶ 친환경 신재생 에너지 생산을 통한 환경 보전에 기여
- ▶ 태양광 발전 시설 설치로 인한 산림 및 임야 지역의 훼손 억제

○ 파급효과

- ▶ 기술적 측면
 - 하부기초 및 상부구조물의 종합적 해석을 통한 통합 설계 기술 확보
 - 현장 특성에 부합하는 시스템 설계 기법 개발
 - 한국형 농업시설물 설계기술 확보
- ▶ 경제적·산업적 측면
 - 새로운 에너지 산업 모델 제시 및 전문 인력 양성 가능
 - 농촌 수입 증대로 인한 전통적 산업구조 개선과 지역사회 활성화
 - 영농형 태양광 시스템의 체계적 시설 설계 규격 확보 및 표준화
 - 친환경 신재생 에너지 산업을 통한 국가 농업 경쟁력 제고
- ▶ 환경적 측면
 - 화석 연료 절감 및 친환경 에너지 생산을 통한 환경 보호
 - 영농형 태양광 발전으로 인한 기존 산림 및 임야 등의 자연파괴 및 환경문제 완화
 - 친환경 신재생 에너지 생산을 통한 적극적인 환경 보호 방안 제시

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
사업화	시제품개발					
	상품출시					
	기술이전					
	공정개발					
	매출액(단위 : 천원)	0	0	0	0	0
	기술료(단위 : 천원)	0	0	0	0	0

* 본 연구과제의 경우, 초기 협약 당시 기술기여도를 산정하였으나, 과제의 성격상 별도의 매출액이 발생하지 않음.

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 자체평가의견서 2) 연구성과 활용계획서 3) 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)
2.	1) 2)

[별첨 1]

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		321007-02	
사업구분	농업에너지 자립형산업모델 기술개발사업				
연구분야	에너지저장·관리		과제구분	단위	
사업명	농업에너지 자립형산업모델 기술개발사업			주관	
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발		과제유형	개발	
연구개발기관	서울대학교 산학협력단		연구책임자	최원	
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2021.04.01.- 2021.12.31	400,000	50,000	450,000
	2차년도	2022.01.01.- 2022.12.31	500,000	32,500	532,500
	계	2021.04.01.- 2022.12.31	900,000	82,500	982,500
참여기업	두원산업(주)				
상대국			상대국연구개발기관		

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2023.02.15

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
서울대학교 산학협력단	부교수	최원

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	
----	---

I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수

- 국내 영농형 태양광 시스템의 안전성 확보 및 효율성 향상을 위해 현재까지 고려되지 못했던 농업시설물 특화 안전성 해석을 수행하고, 이에 관한 종합 설계기준을 구축하여, 다양한 현장에 적용 가능한 표준설계서(안)을 제시함.
- 영농형 태양광 모듈과 상부구조물의 형태 및 규모, 영농지역의 지반조건 및 하부기초 형식에 따른 설계법을 정립하여, 국내 농업 지역에 적합한 한국형 영농형 태양광의 종합 설계기술을 개발함.

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수

- 표준 설계기준 제시를 통하여 영농형 태양광 시설물의 체계적 설계와 관리를 가능케 하며, 설계기준, 설계도면, 시방서를 종합한 표준설계서(안)을 활용하여 국내 다양한 농업 지역에 영농형 태양광 시스템의 보급을 용이하도록 함.
- 영농형 태양광 시설의 다양한 실제 현장조건을 반영한 시스템 표준모델 제시를 통해 설비의 경제적 이점을 확보하고, 시스템 시공의 효율성을 증진함.

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수

- 본 연구를 통해 구축된 표준설계서(안), 가이드라인, 시공 및 인허가 프로세스가, 일반 농가로의 영농형 태양광 시스템의 보급에 수월하도록, 시스템 설계 및 시공 시 기본 자료로서 제공되도록 함.
- 본 연구에서 대상으로 한 프레임 형태의 시설물 외, 추후 다양한 형태의 표준모델 개발 시, 안전성·경제성·시공 효율성 확보를 위하여 영농형 태양광 농업시설물의 특화 설계기술이 활용되도록 함.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수

- 영농형 태양광 시스템을 구축한 실증 재배 대상지 협력기관과 긴밀한 협업체계를 구축하여 시스템의 운영과 영농 재배를 성실히 수행하였으며, 이에 따른 피드백과 개선사항을 도출하고 설계 고려사항으로 충분히 반영될 수 있도록 함.
- 총괄 및 공동연구기관 간의 주기적 세미나 개최와 상호 협력을 통해 연구를 성실히 추진하였으며, 유기적인 연구 결과를 도출하도록 함.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수

- 국제전문학술지에 1편의 SCI 논문과 국내전문학술지에 2편의 KCI 논문을 발간하였으며, 영농형 태양광 구조물과 관련한 1건의 특허등록 및 1건의 특허출원을 수행하였고, 설계기준, 설계도면, 시방서를 종합한 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안)을 구축함.
- 국제 및 국내 저명 학술회의에서 다수의 발표를 통해 한국형 영농형 태양광 시스템 설계를 소개하였으며, 학술대회 우수논문발표상 (추가성과 - 수상실적, 사단법인 한국농공학회)도 수상한 바 있음.

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
영농형 태양광 설치 후보지 선정 및 대상지역 현장조사	10	100	협업을 통한 실증 재배 후보지를 선정하고 구조 시스템을 설치하였으며, 대상지의 토질특성에 관한 현장조사 수행
설계 고려사항을 반영한 영농형 태양광 시스템 기본설계	10	100	기본설계를 위한 고려사항 (차광률, 작물 재식거리, 시스템 하부 영농작업 등)을 도출하고, 이를 반영한 다양한 형태의 영농형 태양광 시스템 기본설계안 도출
영농형 태양광 구조물 설계를 위한 구조안전성 검토 및 특화 설계기준 정립	15	100	구조안전성 적용을 위한 허용응력설계법 및 한계상태설계법에 관한 검토를 수행하고, 이를 활용하여 농업시설구조물 특성에 적합한 설계하중 및 내진설계를 포함한 구조해석 방법론과 구조설계기준을 확립
기초 설계를 위한 기초 안전성 검토 및 설계기준 정립	15	100	기초 설계를 위해 수치해석 및 현장시험을 통하여 기초 조건별 지지력과 침하량을 분석하였으며, 토질 특성에 따른 근입깊이를 제시하여 기초 안전성 검토를 위한 설계기준 제시
현장 여건을 고려한 실시설계 및 시스템 설치	15	100	시공 프로세스에 따른 실증 시스템의 현장 구축과 시스템 구축에 필요한 인허가 프로세스 정립
영농형 태양광 현장 적용성 확인과 운영	15	100	실증 재배를 통한 현장 적용성 확인과 시스템 운영을 통한 구조물 및 기초 안전성 추가 검토
영농형 태양광 시스템의 종합 표준설계서 개발	20	100	설계기준(안), 설계도면, 시방서, 구조검토계산서를 포괄하는 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안) 작성 및 자료발간
합계	100점		

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 본 연구에서는 다양한 국내 농업 현장을 고려할 수 있는 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안)를 작성하였으며, 이는 설계기준, 설계도면, 시방서 등 설계 및 시공에 필요한 모든 사항을 포괄하여, 실제 농업 현장에 시스템의 보급을 용이하게 하고, 시설물의 체계적 관리를 가능하도록 함.
- 영농형 태양광 시스템 설계를 위한 기본 고려사항으로 차광률, 작물 재식거리, 시스템 하부 영농작업 등을 분석하였으며, 이를 바탕으로 다양한 형태의 영농형 태양광 기본설계안을 작성 및 제시함.
- 실제 현장 상황을 반영한 다양한 설치조건을 고려하여 풍하중, 적설하중에 관한 안전설계기준을 정립하고, 지진해석 및 내진설계를 통해 구조물의 충분한 안전성을 확보할 수 있는 설계기술을 개발함.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 영농형 태양광 시설물의 구조 및 기초 안전성을 확보하기 위한 설계기준이 전무한 실정에서, 이에 관한 체계적 안전성 검토 방안과 농업시설물 특화 해석·설계방안을 정립함.
- 본 연구에서는, 일괄적 시공이 가능하며 효율적으로 구조 안전성을 확보할 수 있는 대표적 영농형 태양광 시설물 형식인 프레임 타입을 대상으로 기본설계안을 작성하고 표준모델을 활용하였으며, 추후 개발될 수 있는 다양한 표준모델에 대해서도, 본 연구의 농업시설물 특화 설계방법을 적용할 수 있음.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안)를 바탕으로 보다 다양한 형태의 시스템 표준모델을 개발하고 실제 농가의 보급에 활용될 수 있도록 함.
- 영농형 태양광 시스템 구축 대상지에 관한 유기적 운영 및 관리를 통하여 전기 생산량과 작물 재배환경에 관한 지속적인 모니터링과 유지보수를 수행함.

IV. 보안성 검토

- 해당사항 없음

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 연구책임자의 의견

- 본 연구개발과제의 보안등급은 일반에 해당함.

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

- 본 연구개발과제의 보안등급은 일반에 해당함.

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야	에너지저장·관리	
연구과제명	작물별 실증을 위한 영농형 태양광 시스템 구축 및 표준 설계서 개발			
주관연구개발기관	서울대학교 산학협력단	주관연구책임자	최원	
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	900,000,000원	82,500,000원	-	982,500,000원
연구개발기간	2021.04.01. ~ 2022.12.31. (1년 9개월)			
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input checked="" type="checkbox"/> 기타(설계서 및 표준모델 개발) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:)			

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 영농형 태양광 설치 후보지 선정 및 대상지역 현장조사	협업을 통한 시스템 후보지 선정 및 토질특성에 관한 현장조사 수행
② 설계 고려사항을 반영한 영농형 태양광 시스템 기본설계	차광률, 작물 재식거리, 시스템 하부 영농작업 등에 관한 고려사항 도출과 이를 반영한 기본설계안 도출
③ 영농형 태양광 구조물 설계를 위한 구조안전성 검토 및 특화 설계기준 정립	허용응력설계법 및 한계상태설계법에 관한 검토와 이를 활용한 설계하중 및 내진설계를 포함한 구조해석 방법론과 구조설계기준 확립
④ 기초 설계를 위한 기초 안전성 검토 및 설계기준 정립	기초 설계를 위한 수치해석 및 현장시험 기반 기초 조건별 지지력, 침하량 분석
⑤ 현장 여건을 고려한 실시설계 및 시스템 설치	시공 프로세스에 따른 시스템 현장 구축과 시스템 구축에 필요한 인허가 프로세스 정립
⑥ 영농형 태양광 현장 적용성 확인과 운영	실증재배를 통한 현장 적용성 확인과 시스템 운영을 통한 구조물 및 기초 안전성 추가 검토
⑦ 영농형 태양광 시스템의 종합 표준설계서 개발	설계기준(안), 설계도면, 시방서, 구조검토계산서에 관한 표준설계서(안) 작성

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표								
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과			교육지 도	인력양 성	정책 활용·홍 보		기타 (타연구 활용 등) * 자 료가
	특 허 출 원	특 허 등 록	품 종 등 록	S M A R T	건 수	기 술 료	제 품 화 * 시 스 템 구 축	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논 문		학 술 발 표			정 책 활 용	홍 보 전 시	
													S C I	비 S C I						
단위	건	건	건	평 균 단 위 수	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건		건	명	건	건		
가중치	10	15				40								10					25	
최종 목표	1	1				3						1	2	5					2	
당해 년도	목표	1	1			3						1	2	5					2	
	실적	1	1			3						1	2	8					3	
달성률 (%)	100	100				100						100	100	160					150	

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	영농조건을 고려한 영농형 태양광 시스템 기본설계안 및 시공방법 제시
②	영농형 태양광 농업구조물 특화 구조해석 및 기초 안전성 설계기술
③	국내 농업 현장에 적합한 한국형 영농형 태양광 시스템 표준설계서(안)

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복 제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장으로 해 결	정책 자료	기타
①의 기술					v					v
②의 기술				v						v
③의 기술		v								v

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	<ul style="list-style-type: none"> 차광률, 작물 재식거리, 시스템 하부 농작업 등 시스템 변수의 통합설계 현장 조건을 반영한 영농형 태양광 시스템의 실시설계 효율성 증진
②의 기술	<ul style="list-style-type: none"> 추후 개발될 수 있는 다양한 형태 표준모델의 안전성 확보를 위한 기술 제공 영농형 태양광 시설 설비의 경제적 이점 확보 및 시공 효율성 증진
③의 기술	<ul style="list-style-type: none"> 영농형 태양광의 실제 농가 보급을 위한 설계기준, 설계도면, 시방서의 제공 중간기술자 및 실제 농가에서도 충분히 활용할 수 있는 표준모델 설계자료 구축

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표							
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구 활용등)
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T 평 규 판 등급	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출		투 자 유 치	논문				학 술 발 표	정 책 활 용	
											SCI		비 SCI	논 문 평 균 IF					
단위	건	건	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	명	건	건		
가중치																			
최종목표																			
연구기간내 달성실적																			
연구종료후 성과창출 계획																			

[별첨 3] 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)

영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)

2022.12.

서울대학교

본 영농형 태양광 발전 시스템 표준설계서(안)는
농림축산식품부 농림식품기술기획평가원에서 수행된
농업에너지 자립형 산업모델 기술개발 연구사업의 결과물로서
협의를 통한 고시 및 발간되기 이전의 내용으로 참고사항으로
이용해 주시기 바랍니다.

목 차

제1장 총칙	1
1.1 일반사항	1
1.2 적용범위	1
1.3 기본사항	1
1.4 관련 기준 및 인용사항	1
1.5 주요기호	1
제2장 영농형 태양광 설계기준(안)	5
2.1 영농형 태양광 기본설계	5
2.1.1 일반사항	5
2.1.2 작물 재식간격	5
2.1.3 농기계 및 농작업	5
2.1.4 차광률	5
2.1.5 기초 기본 형태	5
2.2 구조 설계기준	6
2.2.1 설계하중	6
2.2.2 인장부재 설계	15
2.2.3 압축부재 설계	15
2.2.4 휨부재 설계	16
2.2.5 전단부재 설계	16
2.2.6 조합력을 받는 부재 설계	17
2.3. 기초 설계기준	18
2.3.1 지반조사	18
2.3.2 검토사항	19
2.3.3 하중	19
2.3.4 말뚝기초의 압축지지력	19
2.3.5 말뚝기초의 인발지지력	24
2.3.6 말뚝기초의 침하	24
2.3.7 직접기초의 압축지지력	26
2.3.8 직접기초의 침하	33
2.3.9 허용침하량	37
2.3.10 기초의 설계	37

제3장 영농형 태양광 표준설계(안)	40
3.1 설계 개요	40
3.1.1 관련 설계 변수	40
3.1.2 기타사항	41
3.2 구조 검토	42
3.2.1 모듈 가로 배치형	42
3.2.2 모듈 세로 배치형	43
3.3 구조물 설계도	44
3.3.1 모듈 가로 배치형	44
3.3.2 모듈 세로 배치형	48
3.4 기초 설계도	50
3.4.1 모듈 가로 배치형	52
3.4.2 모듈 세로 배치형	55
3.5 하부 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전풍속	58
3.5.1 모듈 가로 배치형	58
3.5.2 모듈 세로 배치형	59
3.6 기초 설치 조건에 따른 최소 근입깊이	59
3.6.1 모듈 가로 배치형	60
3.6.2 모듈 세로 배치형	61
제4장 영농형 태양광 시방서	62
4.1 일반사항	62
4.1.1 적용범위	62
4.1.2 적용규격	62
4.1.3 공급조건	62
4.1.4 주요납품자재	62
4.1.5 시험 및 검사	63
4.1.6 감독원	63
4.2 설계 일반	63
4.3 구조물 제작	63
4.4 자재 운송	64
4.5 기초 설치	64
4.6 구조물 및 모듈 설치	64
4.7 전기공사	64
4.8 배전설비 설치	65

부록

[부록 1] 구조검토계산서 (모듈 가로 배치형)

[부록 2] 구조검토계산서 (모듈 세로 배치형)

제1장 총칙

1.1 일반사항

본 설계서는 영농형 태양광 발전 시스템의 기본설계, 구조 및 기초설계, 시공 등에 관한 안전기준을 정립하고, 시설물의 구조안전성과 기초안전성을 확보하며, 설계도면과 시방서를 제시하는데 목적이 있다.

1.2 적용범위

본 설계서에서 제시되는 기준 및 시방서는 농지에 설치되는 태양광 발전 시설인 영농형 태양광 발전 시스템의 시설물에 적용한다.

1.3 기본사항

영농형 태양광 발전 시스템이 설치되는 지반은 영농 (논, 밭, 과수 등)을 기반으로 하기에 지역이나 계절에 따라서 다양한 지반 상태로 존재할 수 있다. 또한, 영농형 태양광 시설물은 항복응력 및 극한응력이 뚜렷한 재료로 이루어진 강관으로 주로 구성되며, 일반 구조물에 비해 경량의 구조물이다. 따라서 지반 관련 계수의 변동성과 구조물 특성을 고려하여 구조설계 방법은 허용응력설계법을 기본으로 한다. 하지만, 설계자 혹은 발주자의 판단에 따라 한계상태설계법 등 다른 설계법을 적용할 수도 있다.

1.4 관련 기준 및 인용사항

본 설계서에서 인용한 국내 설계기준 및 참고문헌은 다음과 같다.

- 강구조 설계 일반사항 (허용응력설계법) KDS 14 30 05
- 강구조 부재 설계기준 (허용응력설계법) KDS 14 30 10
- 건축구조기준 총칙 KDS 41 10 05
- 건축구조기준 설계하중 KDS 41 10 15
- 건축물 내진설계기준 KDS 41 17 00
- 건축물 강구조 설계기준 KDS 41 31 00
- 건축물 기초구조 설계기준 KDS 41 19 00
- 구조물기초설계기준 해설 (국토교통부 제정)

1.5 주요기호

- A_f : 기초판의 저면적 (m^2)
- A_p : 말뚝선단 지지면적 (m^2)
- A_s : 말뚝 주면적 (m^2)

- B : 말뚝의 폭 또는 직경 (m)
- B : 푸팅의 최소폭 (m)
- B : 기초의 단변길이 (m)
- B_1 : 재하판의 폭 (m)
- C_b : 기본 지붕 적설하중 계수
- C_c : 한계세장비
- C_e : 노출계수
- C_f : 풍력계수
- C_p : 흙의 종류와 말뚝시공법에 따른 경험계수
- C_S : 경사도계수
- C_t : 온도계수
- c : 말뚝지지층의 점착력
- c_a : 말뚝주면과 주변 흙 사이의 부착력
- D : 고정하중
- D_f : 지표면에서 기초 저면까지의 깊이 (m)
- D_f : 근입깊이 (m)
- E : 지진하중
- E_s : 강재의 탄성계수 (MPa)
- E_S : 지반의 탄성계수 (kN/m^2)
- E_p : 말뚝의 탄성계수 (MPa)
- F_a : 단주기 지반증폭계수
- F_b : 허용휨응력 (MPa)
- F_c : 허용압축응력 (MPa)
- F_t : 허용인장응력 (MPa)
- F_u : 강재의 인장강도 (MPa)
- F_v : 허용전단응력 (MPa)
- F_v : 1초주기 지반증폭계수
- F_y : 강재의 항복강도 (MPa)
- FS : 안전율
- f_b : 휨응력 (MPa)
- f_c : 축압축응력 (MPa)
- f_e : 허용지내력 (kN/m^2)
- f_c : 콘주면마찰저항치 (kPa)
- f_s : 단위면적당 극한주면마찰력 (kN/m^2)

- f_t : 축인장응력 (MPa)
- G_f : 가스트 영향 계수
- H_1 : 지하수위 (m)
- I : 영향계수
- I_S : 기초저면의 형상과 강성에 따라 정해지는 계수
- I_{S1} : 재하판의 침하계수
- I_{S2} : 기초의 침하계수
- I_s : 중요도계수
- I_w : 중요도계수
- K_d : 깊이 계수
- K_{zr} : 풍속고도분포계수
- K_{zt} : 지형계수
- K_s : 말뚝면에 작용하는 범선토압계수
- KL : 좌굴길이 (mm)
- L : 부재의 길이 (mm)
- L : 말뚝길이 (m)
- L : 기초의 장변길이 (m)
- L_b : 말뚝의 근입깊이 (m)
- M : 건축물 중량
- N : 표준관입시험 관입치
- N_{60} : 말뚝선단부 부근의 N 값 (해머의 타격에너지효율을 60%로 보정한 N 값)
- N_c : 깊은기초 지지력계수
- N_q : 깊은기초 지지력계수
- P : 기초자중을 포함한 기초판에 작용하는 수직하중 (kN)
- P_c : 지표면에 작용하는 연직집중하중 (kN)
- Q_p : 극한선단지지력
- Q_s : 극한주면마찰력
- Q_t : 축방향 허용압축지지력 (kN)
- Q_u : 축방향 극한압축지지력 (kN)
- q : 기초에 작용하는 단위면적당 하중 (kN/m²)
- q_{all} : 허용지지력 (kN)
- q_c : 콘선단저항치 (kN)
- q_p : 단위면적당 극한선단지지력
- q_{ult} : 극한지지력 (kN)
- R : 하중의 작용점에서 임의의 점까지의 거리 (m)

- r : 단면의 회전반경 (mm)
- S : 적설하중
- S : 침하량 (m)
- S_1 : 평판의 침하량 (m)
- S_2 : 기초의 침하량 (m)
- S_C : 설계응답스펙트럼가속도
- S_{DS} : 단주기 설계스펙트럼가속도
- S_{D1} : 주기 1초의 설계스펙트럼가속도
- S_E : 즉시침하량 (m)
- S_f : 평지붕 적설하중 (kN/m²)
- S_g : 기본지상 적설하중 (kN/m²)
- T : 구조물의 고유주기 (초)
- V_d : 설계 풍속 (m/s)
- V_0 : 지역별 기본 풍속 (m/s)
- W : 풍하중
- Z : 지진구역계수
- Z : 침하량을 산정하는 점에서 연직하방으로 측정된 깊이 (m)
- Z_s : 지표면에서 임의의 점까지의 깊이 (m)
- α : 하중의 편심과 저면의 형상으로 정해지는 접지압계수
- α : 기초형상계수
- α_s : 말뚝 주면마찰력 분포에 따른 계수
- β : 기초형상계수
- γ : 지반의 습윤단위체적중량 (kN/m³)
- γ' : 지반의 수중단위체적중량 (kN/m³)
- γ_1 : 기초저면 상부 지반의 단위중량 (kN/m³)
- γ_2 : 기초저면 하부 지반의 단위중량 (kN/m³)
- δ : 말뚝과 주변 흙 사이의 마찰각
- ρ : 공기 밀도 (kg/m³)
- σ_e : 설계용접지압 (kN/m²)
- σ'_v : 말뚝선단 깊이의 유효상재압
- $\overline{\sigma'_v}$: 말뚝주변 지층의 평균 유효상재압
- $\Delta\sigma_z$: 지층의 임의점에서의 연직응력증분 (kN/m²)
- ν : 포아송비
- ϕ : 내부마찰각 (°)

제2장 영농형 태양광 설계기준(안)

2.1 영농형 태양광 기본설계

2.1.1 일반사항

영농형 태양광 발전 시스템의 시설물 기본설계를 위한 고려사항을 반영하여 시설물 기둥의 간격과 높이, 보의 간격 등 기본 설계인자를 결정한다.

2.1.2 작물 재식간격

작물 재식간격을 반영한 영농형 태양광 시스템의 기둥 및 보의 간격을 설계한다. 특히 과수의 경우 재식 이후 다년간 과수가 유지되기 때문에 해당 간격을 고려한 시스템 기본설계를 수행한다. 밭의 경우 실제 현장의 이랑 및 고랑 간격을 우선적으로 반영하여 기둥 간격을 설계한다. 이때 기본설계 이후 현장의 여건에 따라 실시설계 및 실제 시공 시 기둥의 간격이 조정될 수 있다.

2.1.3 농기계 및 농작업

영농형 태양광 시스템 하부에서 농기계를 이용한 농작업이 가능하도록 충분한 공간이 확보된 기둥의 간격과 높이를 선정한다. 트랙터의 경우 시스템 내부에서 작업을 위한 선회가 가능해야하며 선회반경 및 편브레이크 선회반경을 함께 고려한다. 특히 설치 농가에서 보유하고거나 실제 사용 가능한 농기계의 제원을 반영하도록 한다.

2.1.4 차광률

영농형 태양광 발전 시스템 설치 시, 상부의 태양광 모듈에 따라 하부에 도달하는 일사량이 감소하게 되어 작물 생육에 영향을 미치게 된다. 하부에 도달하는 일사량의 감소를 나타내는 차광률은 태양광 모듈 전체 면적을 영농형 태양광 농지의 면적으로 나누는 비율로 정의한다. 작물 종류에 따라 필요한 일사량 및 광포화점은 상이하므로 설계자의 판단과 실증 재배 연구 및 가이드라인 등을 참조하여 차광률을 결정한다.

2.1.4 기초 기본 형태

기초는 스크류, 스파이럴 파일 등의 말뚝 기초를 기본으로 한다. 기초에 따른 영농 면적의 감소와 토양 영향을 최소화 하도록 한다. 이때 콘크리트 기초를 이용할 경우, 설치 및 철거 시 농지에 영향을 주지 않는 방식으로 진행하며, 분쇄하지 않도록 한다.

2.2 구조 설계기준

2.2.1 설계하중

영농형 태양광 시설물의 구조계산에 이용되는 설계하중은 고정하중 (D), 적설하중 (S), 풍하중 (W), 지진하중 (E)을 고려한다.

2.2.1.1 하중조합

(1) 구조설계를 위한 하중조합은 허용응력설계법에 따라 산정한다. 이때 지역에 따라 폭설과 강풍이 동시에 발생할 수 있을 것으로 예상되는 곳에서는 설계자의 판단에 따라 적설하중과 풍하중을 함께 고려하여 안전측으로 설계한다.

$$\text{평상시} : D \quad (2.1)$$

$$\text{폭설시} : D + S \quad (2.2)$$

$$\text{강풍시} : D + W \quad (2.3)$$

$$\text{지진시} : D + E \quad (2.4)$$

(2) 한계상태설계법을 이용한 구조설계 시에는 다음의 하중저항계수를 적용한 하중조합 중 가장 불리한 값을 이용한다.

$$1.4D \quad (2.5)$$

$$1.2D + 1.6L + 0.5S \quad (2.6)$$

$$1.2D + 1.6S + 0.65W \quad (2.7)$$

$$1.2D + 1.3W + 0.5S \quad (2.8)$$

$$1.2D + 1.0E + 0.2S \quad (2.9)$$

$$0.9D + 1.3W \quad (2.10)$$

$$0.9D + 1.0E \quad (2.11)$$

2.2.1.2 고정하중

영농형 태양광 구조물에 이용된 강재의 단위중량과 그 위에 적재되는 태양광 모듈 및 설비의 연직 하중을 고려해 산정한다.

2.2.1.3 적설하중

(1) 구조물의 형태, 기울기 등에 따른 경사지붕적설하중 기준에 따라 다음의 식을 통해 적설하중을 산정한다. 이와 관련된 계수는 규정 및 구조물 형태에 따라 적용한다.

$$S_s = C_s \times S_f \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.12)$$

- C_s : 경사도계수 (눈이 미끄러지지 않는 상태로 가정하여 1.0 적용)
- S_f : 평지붕 적설하중

$$S_f = C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (2.13)$$

- C_b : 기본 지붕 적설하중 계수이며, 일반적으로 0.7로 적용
- C_e : 노출계수

표 1 노출계수

주변 환경	C_e
A. 지형, 높은 구조물, 나무 등 주변환경에 의해 모든 면이 바람막이가 없이 노출된 지붕이 있는 거센바람 부는 지역	0.8
B. 약간의 바람막이가 있는 거센바람 부는 지역	0.9
C. 바람에 의한 눈의 제거가 지형, 높은 구조물 또는 근처의 몇몇 나무들 때문에 지붕 하중의 감소를 기대할 수 없는 위치	1.0
D. 바람의 영향이 많지 않은 지역 및 지형과 높은 구조물 또는 몇몇 나무들에 의하여 지붕에 바람막이가 있는 지역	1.1
E. 바람의 영향이 거의 없는 조밀한 숲 지역으로서, 촘촘한 침엽수 사이에 위치한 지붕	1.2

- C_t : 온도계수 (비난방 구조물은 1.20 적용)

표 2 온도계수

난 방 상 태	C_t
난방구조물 (적설하중 제어구조)	1.0
비난방구조물 (적설하중 비제어구조)	1.2

- I_s : 중요도계수 (중요도(특), (1) 및 (3)에 해당하지 않는 건축물 및 방음터널 등 1.00 적용)
- S_g : 기본지상 적설하중

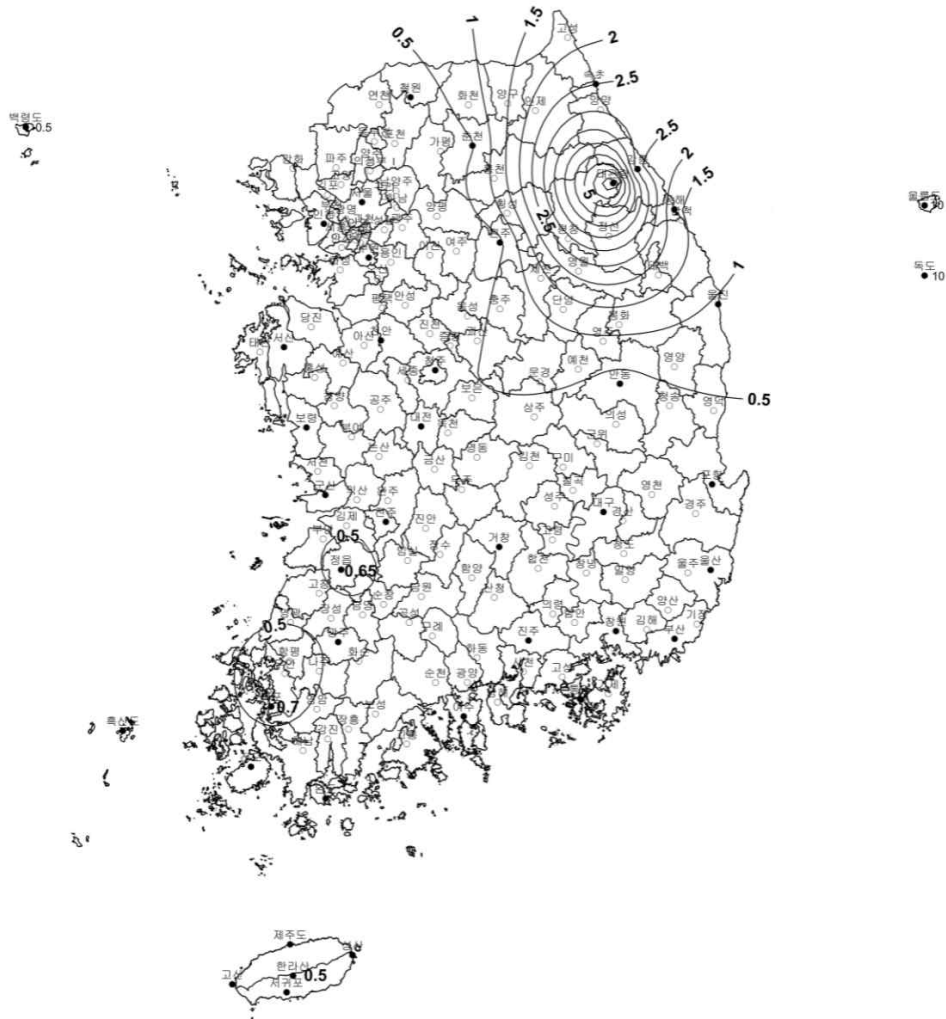


그림 1 기본지상 적설하중 S_g (kN/m²)

표 3 기본지상 적설하중

주변 환경	S_g (kN/m ²)
서울, 수원, 춘천, 서산, 충주, 대전, 추풍령, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부여, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포, 진주, 이천	0.50
정읍, 울진	0.65
인천	0.80
속초	2.00
강릉	3.00
울릉도, 대관령	7.00

2.2.1.4 풍하중

(1) 구조물에 작용하는 풍하중은 다음 식에 따라 산정한다.

$$P_f = \frac{1}{2} \rho \times V_d^2 \times G_f \times C_f \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.14)$$

- ρ : 공기 밀도 (균일하게 1.22 kg/m³ 적용)
- V_d : 설계 풍속

$$V_d = V_0 \times K_{zr} \times K_{zt} \times I_w \quad (\text{m/s}) \quad (2.15)$$

- V_0 : 지역별 기본 풍속

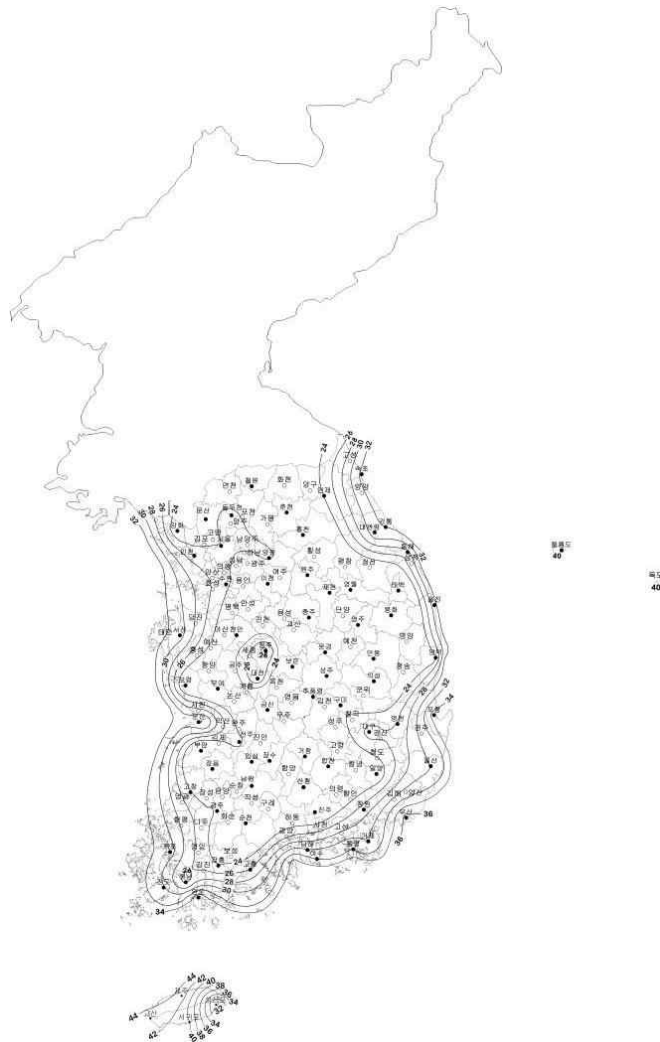


그림 2 기본풍속 V_0 (m/s)

표 4 지역별 기본풍속 (KDS 41 10 15 건축구조기준 설계하중)

	지역	V_0 (m/s)
서울특별시 인천광역시 경기도	용진	30
	인천, 강화, 안산, 시흥, 평택	28
	서울, 김포, 구리, 수원, 군포, 오산, 화성, 의왕, 부천, 고양, 안양, 과천, 광명, 의정부, 동두천, 양주, 파주, 포천, 남양주, 가평, 하남, 성남, 광주, 양평, 용인	26
	안성, 연천, 여주, 이천	24
강원도	속초, 양양, 강릉, 고성	34
	동해, 삼척, 홍천, 정선, 인제	30
	양구	26
	철원, 화천, 춘천, 횡성, 원주, 평창, 영월, 태백	24
대전광역시 충청남도	서산, 태안	34
	당진	32
	서천, 보령, 홍성, 청주, 청원	30
	예산, 세종, 대전, 공주, 부여	28
	아산, 계룡, 진천	26
	천안, 증평, 청양, 논산, 금산, 음성, 충주, 제천, 단양, 괴산, 보은, 영동, 옥천	24
부산광역시 대구광역시 울산광역시 경상남도	울릉(독도)	40
	부산	38
	포항, 경주, 기장, 통영, 거제	36
	양산, 김해, 남해, 울산, 울주	34
	영덕, 고성	32
	울진, 창원, 사천, 영천	30
	청송, 대구, 경산, 청도, 밀양, 하동	28
	영양, 군위, 칠곡, 성주, 달성, 함안, 고령, 창녕, 진주	26
	봉화, 영주, 예천, 문경, 상주, 추풍령, 안동, 의성, 구미, 김천, 의령, 거창, 산청, 함천, 함양	24
광주광역시 전라남도	완도, 해남	36
	진도, 여수, 고흥, 신안, 무안, 장흥	34
	목포, 부안, 영암, 강진	32
	영광, 함평, 나주	30
	익산, 김제, 순천, 고창, 광양	28
	광주, 보성, 완주, 전주, 장성	26
	무주, 진안, 장수, 임실, 정읍, 순창, 남원, 담양, 목성, 구례	24
제주도	서귀포, 제주	44

- K_{zr} : 풍속고도분포계수 (주변 지역의 지표면 상태에 따름)

표 5 지표면 조도구분

지표면 조도구분	주변지역의 지표면 상태
A	대도시 중심부에서 고층건축물 (10층 이상)이 밀집해 있는 지역
B	수목 · 높이 3.5 m 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있는 지역 중층건물 (4~9층)이 산재해 있는 지역
C	높이 1.5~10 m 정도의 장애물이 산재해 있는 지역 수목 · 저층건축물이 산재해 있는 지역
D	장애물이 거의 없고, 주변 장애물의 평균높이가 1.5 m 이하인 지역 해안, 초원, 비행장

표 6 평탄한 지역에 대한 풍속고도분포계수

지표면으로부터의 높이 z (m)	지표면조도구분			
	A	B	C	D
$z \leq z_b$	0.58	0.81	1.0	1.13
$z_b < z \leq Z_g$	$0.22z^\alpha$	$0.45z^\alpha$	$0.71z^\alpha$	$0.98z^\alpha$

표 7 대기경계층 시작 높이 z_b , 기준경도풍 높이 Z_g , 풍속고도분포지수 α

지표면조도구분	A	B	C	D
z_b (m)	20 m	15 m	10 m	5 m
Z_g (m)	550 m	450 m	350 m	250 m
α	0.33	0.22	0.15	0.10

- K_{zt} : 지형계수 (산, 언덕 및 경사지의 영향을 받지 않는 평탄한 지역의 경우 1.0 적용)
- I_w : 중요도계수 (초고층건축물, 중요도(특), (1) 및 (3)에 해당하지 않는 건축물의 경우 0.95 적용)
- G_f : 가스트 영향 계수 (저층건물이 산재해 있는 지역의 경우 1.9 적용)
- C_f : 풍력계수 (태양광 모듈의 경우 경사져 설치되므로 사각형 단면 대각선풍으로 1.1, 기둥 부재의 경우 원형 단면으로 1.2 적용 등)

2.2.1.5 지진하중

- (1) 지진하중의 산정을 위해 응답스펙트럼 해석법을 이용한다. 고유진동수 혹은 주기와 최대응답 혹은 가속도와 관계를 나타내는 지진응답스펙트럼 그래프를 이용해 최대 응답을 산정한다. 모달 해석을 통해 모드별 최대 응답을 결정하며, 각 모드의 조합별 구조물의 최대 거동을 분석한다.
- (2) 지진응답스펙트럼 그래프는 건축물의 내진설계 중요도계수, 지반의 분류 및 지반종류, 지진구역계수 등을 고려해 산정된다. 각 주기별 스펙트럼가속도를 산정하여 다음 식을 통해 지진하중을 산정한다.

$$F = S_C \times M \quad (2.16)$$

- F : 지진하중
- S_C : 설계응답스펙트럼가속도
- M : 건축물 중량

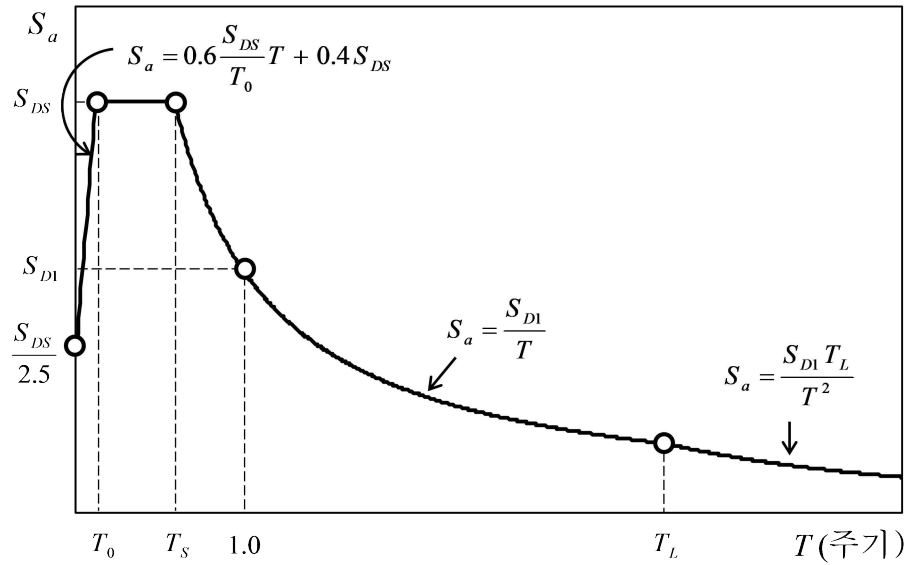


그림 3 설계응답가속도스펙트럼 그래프

$$T \leq T_0 : S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \quad (2.17)$$

$$T_0 < T \leq T_S : S_a = S_{DS} \quad (2.18)$$

$$T_S < T \leq T_L : S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.19)$$

$$T > T_L : S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.20)$$

- T : 구조물의 고유주기 (초)

$$T_o = 0.2 S_{D1} / S_{DS} \quad (2.21)$$

$$T_S = S_{D1} / S_{DS} \quad (2.22)$$

$$T_L = 5 \text{ 초} \quad (2.23)$$

- S_{DS} : 단주기 설계스펙트럼가속도
- S_{D1} : 주기 1초의 설계스펙트럼가속도

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \quad (2.24)$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3 \quad (2.25)$$

(3) 이때 F_a 와 F_v 는 각각 아래의 표에서 규정된 지반종류에 따른 지반증폭계수이다.

표 8 단주기 지반증폭계수, F_a

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S=0.2$	$S=0.3$
S_1	1.12	1.12	1.12
S_2	1.4	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3
S_4	1.6	1.4	1.2
S_5	1.8	1.3	1.3

표 9 1초주기 지반증폭계수, F_v

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S=0.2$	$S=0.3$
S_1	0.84	0.84	0.84
S_2	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.6	1.5
S_4	2.2	2.0	1.8
S_5	3.0	2.7	2.4

표 10 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층평균전단파속도, $V_{s, soil}$ (m/s)
S_1	압반 지반	1 미만	-
S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

- (4) KDS 41 10 05 <건축구조기준 총칙>에 따른 건물의 중요도를 고려하여 건물의 내진 등급과 내진설계 중요도계수를 결정한다. 이때 건물의 중요도는 용도 및 규모에 따라 다음과 같이 중요도(특), 중요도(1), 중요도(2) 및 중요도(3)으로 구분한다.
- (5) 건물의 중요도에 따른 내진등급과 중요도계수는 KDS 41 17 00 <건축물 내진설계기준>에 따라 다음과 같이 산정하며, 이에 따라 영농형 태양광 구조물의 내진설계 중요도계수는 1.0로 산정한다.

표 11 내진등급과 중요도계수

건축물의 중요도	내진등급	내진설계 중요도계수 (I_E)
중요도(특)	특	1.5
중요도(1)	I	1.2
중요도(2), (3)	II	1.0

(6) 지진구역 및 지진구역계수는 아래의 표에 따라 산정한다.

표 12 지진구역

지진구역	행정구역	
	I	시
도		경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부 ¹
II	도	강원 북부 ² , 제주

1 강원 남부 (군, 시) : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

2 강원 북부 (군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

표 13 지진구역계수

지진구역	I	II
지진구역계수, Z	0.11	0.07

2.2.2 인장부재 설계

허용인장응력 F_t 는 총단면적에 대해서는 $0.6F_y$ 를, 유효순단면적에 대해서는 $0.5F_u$ 로 한다.

$$F_t = \begin{cases} 0.6F_y & : \text{총단면적에 대한 검토} \\ 0.5F_u & : \text{유효순단면적에 대한 검토} \end{cases} \quad (2.26)$$

단, $\frac{L}{r} \leq 300$

여기서, F_t : 인장부재의 기본허용응력 (MPa)

F_y : 강재의 항복강도 (MPa)

F_u : 강재의 인장강도 (MPa)

L : 부재의 길이 (mm)

r : 단면의 회전반경 (mm)

2.2.3 압축부재 설계

허용압축응력 F_c 는 다음 식에 따라 산정한다.

- $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \quad (2.27)$$

- $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2} \quad (2.28)$$

여기서, F_c : 허용압축응력 (MPa)

C_c : 한계세장비 ($= \sqrt{2\pi^2 E_s / F_y}$)

KL : 좌굴길이 (mm)

r : 단면 회전반경 (mm)

E_s : 강재의 탄성계수 (MPa)

F_y : 강재의 항복강도 (MPa)

2.2.4 휨부재 설계

(1) 강축휨을 받는 H형강 및 ㄷ형강의 경우 조밀단면과 비조밀 단면으로 구분하며, 각각에 대한 허용휨응력은 다음과 같다.

- 조밀단면

$$F_b = 0.66F_y \quad (2.29)$$

- 비조밀단면

$$F_b = F_y \left[0.79 - 0.00076 \left(\frac{b_f}{2t_f} \right) \sqrt{F_y} \right] \quad (2.30)$$

(2) 박스형 단면, 각형강관, 원형강관에 대해서는 조밀단면과 비조밀 단면에 대해 각각 다음의 허용휨응력을 적용한다.

- 조밀단면

$$F_b = 0.66F_y \quad (2.31)$$

- 비조밀단면

$$F_b = 0.6F_y \quad (2.32)$$

2.2.5 전단부재 설계

전단면적에 대한 허용전단응력은 다음과 같이 산정한다.

$$F_v = 0.4F_y \quad (2.33)$$

2.2.6 조합력을 받는 부재 설계

(1) 축압축과 휨을 함께 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{m,x}f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ex}}\right)F_{bx}} + \frac{C_{m,y}f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ey}}\right)F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.34)$$

$$\frac{f_c}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.35)$$

(2) 다만, $f_c/F_c \leq 0.15$ 일 경우 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.36)$$

(3) 축인장과 휨을 함께 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.37)$$

여기서, F_t : 허용인장응력 (MPa)

f_t : 축인장응력 (MPa)

f_b : 휨인장응력 (MPa)

2.3 기초 설계기준

2.3.1 지반조사

영농형 태양광 구조물의 기초 설계 및 시공에 필요한 지반정보를 제공하기 위하여 현장조사와 실내시험 및 현장시험을 실시하며, 조사 및 시험은 국내 기준에 따라 수행하거나 국제적으로 공인된 방법을 따른다. 소형 경량인 영농형 태양광 구조물의 특성을 고려하여 시공 현장의 육안조사와 얇은 깊이의 시험굴조사를 실시하며 설계자의 판단에 따라 관입시험 및 시추조사를 수행한다.

2.3.1.1 조사 범위

지반조사의 범위는 보링 또는 샘플링 수와 종류, 시료채취에 사용하는 장비, 원위치 시험장비 및 실내시험계획 등을 포함한다.

2.3.1.2 예비조사

예비조사에서는 영농형 태양광 기본설계에 따라 구조물이 설치되는 농지의 현장 여건 파악, 기존 자료조사 및 개략적 지하수위 조사를 통하여 기초 형식을 결정하고 본조사 계획 수립을 실시한다.

2.3.1.3 본조사

기초 설계 및 시공 시 필요한 제반 자료 획득을 위해 시행하며, 지반구성과 기초 지지력, 침하 및 시공에 영향을 받을 수 있는 범위 내의 지반 성질 등을 조사한다.

- (1) 조사간격, 조사지점 및 조사깊이는 예비조사에서 추정되는 지반상황과 영농형 태양광 구조물의 규모, 종류에 따라 정하는 것으로 한다.
- (2) 지반 상황에 따라서 적절한 원위치시험과 토질시험을 하고, 지지력 및 침하량의 계산과 기초 설계에 필요한 지반의 성질을 구하는 것으로 한다.

2.3.1.4 조사 조건

- (1) 지반조사는 아래 (2) ~ (4)의 규정에 따라 수행하여야 한다.
- (2) 토질의 분류는 KS F 2324의 규정에 따르며, KDS 11 10 10 2.3 지반의 분류를 참고할 수 있다.
- (3) 지반의 분류, 강도, 압축성이 불확실하거나 지지력이 이 기준에서 규정한 지지력 값보다 상당히 큰 값을 적용할 경우에는 감독은 지반조사를 요구할 수 있다.
- (4) 팽창성 토질이 있을 가능성이 있는 지역에서는 팽창성 토질이 있는 위치를 결정하기 위해 토질시험을 수행하여야 하며, 아래 항목 중 어느 하나라도 해당되는 토질은 팽창성 토질로 분류할 수 있다.
 - ① KS F2303에 따라 결정된 소성지수 (PI, Plasticity Index)가 15 이상인 흙
 - ② KS F2302에 따라 결정된 체번호 200 (0.075 mm)을 통과한 토립자가 10 % 를 초과한 흙

- ③ KS F2302에 따라 결정된 크기 0.005 mm 미만인 토립자가 10 %를 초과하는 흙
- ④ KS F2316에 따라 결정된 팽창지수가 20을 초과하는 흙

2.3.2 검토사항

- (1) 기초의 지지력은 작용하중에 대해 구조물별로 정해진 안전율을 확보하여야 한다.
- (2) 기초의 변위는 상부구조물에 유해한 영향을 주지 않아야 하며, 축방향 및 횡방향 변위에 대해서도 검토하여야 한다.
- (3) 기초의 설계는 안정성 외에 경제성, 시공성, 환경영향 등을 검토하여야 한다.
- (4) 기초의 설계는 그 시공방법 (타입공법, 매입공법)을 고려하여 검토하여야 한다.
- (5) 기초의 형태는 설치와 제거가 용이하도록 해야 하며, 본 기준에서는 말뚝기초의 형태를 기본으로 한다.
- (6) 농지의 특성에 따라 기초에 콘크리트를 이용하고자 할 경우에는 농지에 환경적 영향이 없어야하며 제거 시 콘크리트 잔여물을 남기지 않는 공법을 적용하여야 한다.

2.3.3 하중

- (1) 기초구조물에 작용하는 하중은 그 지속시간에 따라 지속하중과 일시하중으로 구분하며, 지속하중은 구조물 자중, 지속적으로 작용하는 토압 및 수압 (침투압 포함) 등을 포함하고, 일시하중은 변화가 가능한 토압, 수압, 빙압 등을 포함한다. 시공 중 발생하는 하중, 재하중 변화 또는 지하수위 강하에 의해 발생하는 하중은 지속시간에 따라 지속하중 또는 일시하중으로 구분한다.
- (2) 기초의 지지력 및 침하량 계산 시, 기초구조물 상부에 작용하는 연직하중, 기초구조물 자중, 기초구조물 바닥에 작용하는 수압, 수평하중 등을 고려한다.

2.3.4 말뚝기초의 압축지지력

이 기준은 영농형 태양광 구조물에서 이용되는 말뚝 기초의 설계에 적용되며, 이 기준의 2.3.2를 검토하여 결정하여야 한다.

2.3.4.1 말뚝기초의 축방향 지지력

- (1) 말뚝기초의 축방향 허용지지력은 말뚝본체의 허용압축하중과 말뚝기초의 허용압축 지지력 중 작은 값으로 한다.

2.3.4.2 말뚝본체의 허용압축하중

- (1) 강말뚝 본체의 허용압축하중은 강재의 허용 압축응력에 본체의 유효단면적을 곱한 값에 세장비 (말뚝 직경에 대한 길이의 비) 및 말뚝이음에 의한 지지하중 감소를 고려하여 결정한다.
- (2) 세장비가 큰 말뚝에 있어서 그 말뚝의 재질, 단면의 형상, 지반상황 및 시공방법에 따라 식 (2.38)로 산정되는 μ (%)에 해당하는 비율만큼 말뚝재료의 허용압축응력을

저감한다.

$$\mu = \frac{L}{d} - n \quad (2.38)$$

여기서, μ : 세장비에 대한 저감률(%)

L/d : 말뚝의 세장비

n : 재료의 허용압축응력을 저감하지 않아도 되는 세장비의 한계값

표 14 세장비에 따른 허용응력 감소의 한계값

말뚝 종류	n	세장비의 상한값 ¹
RC말뚝	70	90
PC말뚝	80	105
PHC말뚝	85	110
강관 말뚝	100	130
현장타설콘크리트말뚝	60	80

세장비에 따른 말뚝재료의 허용응력 감소를 감안하더라도 세장비의 상한값 이상의 긴 말뚝은 설계하지 않는 것이 좋다.

- (3) 이음말뚝에 있어서 이음의 종류와 개수에 따라 말뚝재료의 허용압축응력을 저감한다.

표 15 말뚝이음에 의한 허용하중 감소율

이음방법	용접이음	볼트식 이음	비고
감소율	5% / 개소	10 % / 개소	매입말뚝인 경우에는 이음부 손상이 거의 없으므로 이음방법별 감소율을 절반으로 적용

- (4) 스크류 파일의 허용압축하중은 스크류 파일의 나선부를 제외한 기둥부분과 동일한 형상의 강말뚝 본체가 가지는 허용압축하중으로 결정한다.

2.3.4.3 말뚝기초의 축방향 허용압축지지력

외말뚝 조건에서 축방향 허용압축지지력은 축방향 극한압축지지력을 소정의 안전율로 나눈 값으로 한다. 안전율은 축방향 극한압축지지력을 산정하는 방법의 신뢰도에 따라 적용한다.

$$Q_t = Q_u / FS \quad (2.39)$$

여기서, Q_t : 축방향 허용압축지지력
 Q_u : 축방향 극한압축지지력
 FS : 안전율

말뚝의 축방향 압축지지력은 다음과 같이 결정한다.

- (1) 시험시공말뚝을 설치하여 압축재하시험으로부터 축방향 허용압축지지력을 확인하며, 하중전이특성을 고려한 말뚝의 하중지지거동을 파악하여 허용압축지지력을 평가하는데 이용한다.
- (2) 제반 여건상 시험시공말뚝 설치와 압축재하시험이 곤란한 경우에는 지반조사와 토질시험 결과를 이용한 지지력 산정식을 이용하거나, 표준관입시험, 정적관입시험, 공내재하시험 등과 같은 원위치시험 결과를 이용한 경험식에 의하여 축방향 극한지지력을 계산할 수 있다,
- (3) 경험식에 의한 축방향 압축지지력 산정방법은 신뢰도가 낮기 때문에 공사 초기에 실제 말뚝을 대상으로 압축재하시험을 실시하여 축방향 허용압축지지력을 확인하여야 한다.
- (4) 말뚝의 지지력은 시공의 영향이 크므로 본말뚝 시공 전에 시험시공말뚝을 설치하고 그 결과를 검토하여 설계심도, 말뚝길이, 시공방법 등의 적정성을 확인하여 결정한다.

2.3.4.4 재하시험에 의한 축방향 허용압축지지력 결정

- (1) 말뚝기초의 압축재하시험은 고정하중을 적재하거나 지반앵커의 인발저항력 또는 반력말뚝의 마찰력을 이용한 압축 정재하시험, 말뚝본체에 미리 설치된 가압재 (또는 가압셀)을 이용한 양방향재하시험, 동재하시험 방법 등이 있다.
- (2) 이 기준에서는 압축 정재하시험을 통해 영농형 태양광 기초의 허용압축지지력을 산정한다.
- (3) 말뚝의 압축지지력은 지반조건에 따라 말뚝을 시공한 후 경과한 시간에 따라 변화하므로 이에 대한 확인이 필요한 경우 동일한 말뚝에 대하여 시공 후 일정한 시간이 경과한 조건에서 압축재하시험을 실시한다.
- (4) 재하시험에 의한 허용압축지지력은 항복하중의 1/2 및 극한하중의 1/3 중 작은 값으로 하고, 재하시험을 하지 않는 경우에는 지지력 산정식에 의해 구해지는 극한지지력의 1/3 중에서 가장 작은 값으로 한다.
- (5) (4)와 같은 안전율 적용은 비경제적인 경우도 있으므로 지반조건, 시공의 정밀도, 말뚝거동의 특성 및 말뚝재하시험 수량 등을 고려하여 적절한 폭으로 안전율을 낮출 수 있으며, 이 경우에도 극한지지력에 대하여 2보다 낮은 안전율은 적용하지 않

는다.

2.3.4.5 지지력 산정식에 의한 극한지지력 산정

- (1) 말뚝기초의 정역학적 지지력 공식은 현장 조건과 말뚝의 형태를 고려하여 결정한다. 말뚝기초의 축방향 극한지지력은 선단지지력과 주변마찰력의 합으로 산정한다.

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p A_p + \Sigma f_s A_s \quad (2.40)$$

여기서, Q_p : 극한선단지지력
 Q_s : 극한주면마찰력
 A_p : 말뚝선단 지지면적
 A_s : 말뚝 주면적
 q_p : 단위면적당 극한선단지지력
 f_s : 단위면적당 극한주면마찰력

식 (2.47)의 단위면적당 극한선단지지력 및 극한주면마찰력은 식 (2.41) 및 (2.42)와 같다.

$$q_p = \sigma'_v N_q + c N_c \quad (2.41)$$

$$f_s = c_a + K_s \overline{\sigma'_v} \tan \delta \quad (2.42)$$

여기서, σ'_v : 말뚝선단 깊이의 유효상재압
 N_q, N_c : 깊은기초의 지지력계수
 c : 말뚝지지층의 점착력
 c_a : 말뚝주면과 주변 흙 사이의 부착력
 K_s : 말뚝면에 작용하는 범선토압계수
 $\overline{\sigma'_v}$: 말뚝주변 지층의 평균 유효상재압
 δ : 말뚝과 주변 흙 사이의 마찰각

- (2) 스크류 파일의 축방향 극한지지력은 식 (2.43)을 적용한다. 일반적으로 스크류파일의 선단면적은 나선을 포함하는 것으로 하며 단위주면마찰은 나선부와 기둥부분을 다르게 적용하여 식 (2.44)과 같이 산정한다.

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p A_{p.screw} + \Sigma f_s A_s + \Sigma f_{s.screw} A_{s.screw} \quad (2.43)$$

$$f_{s.screw} = c + K_s \overline{\sigma'_v} \tan \phi \quad (2.44)$$

여기서, $A_{p.screw}$: 나선부를 포함한 말뚝선단 지지면적
 $A_{s.screw}$: 나선부까지를 직경으로 하는 말뚝의 주면적
 $f_{s.screw}$: 나선부의 단위면적당 극한주면마찰력

극한선단지지력과 극한주면마찰력의 산정은 2009 International Building Code, 2006 Canadian Foundation Engineering Manual 등 국제 기준을 참고할 수 있으며, 나선의 형태 및 길이비율에 따라 설계자의 판단에 따른 지지력 산정식을 적용할 수 있다.

2.3.4.6 경험식에 의한 극한지지력 산정

(1) 표준관입시험 (SPT; Standard Penetration Test) N 값을 이용하여 극한지지력을 산정하는 데는 Meyerhof (1976)가 제안한 식 (2.45)이 이용된다.

$$Q_u = mN_{60}A_p + n\overline{N}_{60}A_s \quad (2.45)$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)
 m : 극한선단지지력을 결정하는 계수
 n : 극한주면마찰력을 결정하는 계수
 A_p : 말뚝선단면적 (m^2)
 A_s : 사질토지반에 묻힌 말뚝의 겉면적 (m^2)
 N_{60} : 말뚝선단부 부근의 N 값 (해머의 타격에너지효율을 60%로 보정한 N 값)
 \overline{N}_{60} : 말뚝주면부 사질토지반의 평균 N 값 (해머의 타격에너지효율을 60%로 보정한 N 값)

① 타입말뚝의 경우 식 (2.46) 및 (2.47)를 이용하여 식 (2.45)의 계수를 결정할 수 있다.

$$m = 60\left(\frac{L_B}{D}\right) \leq 300 \quad (mN_{60} \leq 15,000kPa) \quad (2.46)$$

$$n = 2 \quad (n\overline{N}_{60} \leq 100kPa) \quad (2.47)$$

② 매입말뚝 (선굴착말뚝, 선굴착기성말뚝 등의 통칭이며 이후 매입말뚝으로 통일)의 지지력을 타입말뚝에 대해 제시된 식을 이용하여 계산할 때에는 선굴착 직경, 주면고정 및 선단부 고정을 위한 시멘트풀 주입 여부, 최종 항타 정도 등에 따라 상이한 계수 m , n 이 사용되고 있다. 이에 매입말뚝의 선단지지력 및 주면마찰력을 SPT N 값을 이용하여 산정할 때에는 표 16의 범위에서 참고하여 산정할 수 있다.

표 16 표준관입시험 결과를 이용한 매입말뚝의 지지력 산정 방법

단위면적당 극한선단지지력 q_p (kN/m ²)	단위면적당 극한주면마찰력 f_s (kN/m ²)	비고
$200N$ ($N \leq 12,000$) (사질토) $6c_u$ ($c_u \leq 12,000$) (점성토)	$2.5N$ ($N \leq 50$) (사질토) $0.8c_u$ ($c_u \leq 125$) (점성토)	도로교설계기준해설 (2008) 및 건축구조설계기준 (2005)
$250N$ ($N \leq 60$)	$2.0N_s$ (사질토) $5.0q_u$ (점성토)	대한주택공사 말뚝기초설계 개선지침 (2008)

c_u : 비배수전단강도 (kPa), N_s : 말뚝 주면지반의 평균 N 값, q_u : 일축압축강도 (kPa)

(2) 정적콘관입시험 (CPT; Cone Penetration Test)은 시험원리가 하중을 받는 말뚝의 거동과 유사하므로 말뚝지지력 추정에 가장 적당한 현장시험법이라 할 수 있다. 적용지반은 치밀한 사질토층이나 자갈층을 제외한 대부분의 사질토 및 점성토지반에 적용한다. 정적콘관입시험 결과를 이용한 타입말뚝의 단위면적당 선단지지력과 주면마찰력은 각각 식 (2.48) 및 (2.49)를 통해 구할 수 있다. 허용지지력은 안전율 3.0을 적용한다.

$$q_p = q_c (\leq 15,000kPa) \quad (2.48)$$

$$f_s = f_c (\leq 100kPa) \quad (2.49)$$

여기서, q_c : 콘선단저항치

f_c : 콘주면마찰저항치

2.3.5 말뚝기초의 인발지지력

- (1) 말뚝의 허용인발저항력은 지반의 축방향 허용인발저항력에 말뚝의 무게를 더한 값과 말뚝본체의 허용인발하중 중 작은 값으로 한다.
- (2) 지반의 축방향 허용인발저항력은 인발재하시험을 실시하여 결정한다.
- (3) 인발재하시험 결과를 얻을 수 없는 경우에는 압축재하시험 결과로부터 얻어진 극한압축주면마찰력으로부터 허용인발저항력을 추정할 수 있다.

2.3.6 말뚝기초의 침하

말뚝두부 침하량 (s)은 말뚝 자체의 길이방향 변형 (s_s)과 말뚝 선단부 침하량의 합이며, 말뚝 선단부 침하량은 말뚝 선단부에 가해지는 하중에 의한 침하량 (s_p)과 주면마

찰력에 의하여 지반에 전달된 하중에 의한 침하량 (S_{ps})의 합으로 식 (2.50)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = S_s + S_p + S_{ps} \quad (2.50)$$

외말뚝의 말뚝두부 침하량을 구성하는 3가지 성분 S_s , S_p , S_{ps} 는 식 (5.51), (5.52), (5.53)과 같은 경험식으로 구할 수 있다.

$$S_s = (Q_{ps} + \alpha_s Q_{fs})L/A_p E_p \quad (2.51)$$

여기서, Q_{ps} : 말뚝에 설계하중이 재하되었을 때 말뚝선단부에 전달되는 하중

Q_{fs} : 말뚝에 설계하중이 재하되었을 때 말뚝주면부의 하중

L : 말뚝길이

A_p : 말뚝의 단면적 (재료의 순단면적)

E_p : 말뚝의 탄성계수

α_s : 말뚝 주면마찰력 분포에 따른 계수

Vesic (1977)은 균등 분포 또는 포물선 분포의 주면마찰력의 경우 $\alpha_s = 0.5$, 지표면에서 0, 말뚝선단부에서 최대인 삼각형 분포의 경우 $\alpha_s = 0.67$ 을 적용하도록 권장하고 있다. 실제 주면마찰력 분포는 계측장치가 설치된 말뚝재하시험 결과로부터 얻는 것이 가장 좋지만, SPT N 값을 이용하여 개략적인 주면마찰력 분포를 추정할 후 $\alpha_s = 0.5$ 또는 $\alpha_s = 0.67$ 을 적용한다.

$$S_p = C_p Q_{ps} / B q_p \quad (2.52)$$

여기서, C_p : 흙의 종류와 말뚝시공법에 따른 경험계수 (표 17 참조)

Q_{ps} : 말뚝에 설계하중이 재하되었을 때 말뚝선단부에 전달되는 하중

B : 말뚝의 폭 또는 직경

q_p : 말뚝의 단위면적당 극한선단지지력

표 17 흙의 종류 및 말뚝관입 방법에 따른 C_p 값

흙의 종류	타입말뚝	굴착말뚝
모래 (조밀 ~ 느슨)	0.02 ~ 0.04	0.09 ~ 0.18
점토 (굳은 ~ 연약)	0.02 ~ 0.03	0.03 ~ 0.06
실트 (조밀 ~ 느슨)	0.03 ~ 0.05	0.09 ~ 0.12

$$S_{ps} = C_s Q_{fs} / L_b q_p \quad (2.53)$$

여기서, $C_s = (0.93 + 0.16 \sqrt{L_b/B}) C_p$

Q_{fs} : 말뚝에 설계하중이 재하되었을 때 말뚝주면부의 하중

L_b : 말뚝의 근입깊이

하지만, 위와 같은 계산은 말뚝 선단지지층이 충분히 깊어 선단부 아래쪽으로 말뚝 직경의 10배 이상이 되며 충분히 견고한 경우를 가정한 방법이므로, 선단부 아래의 지반 조건이 이와 다를때는 적용할 수 없다.

2.3.7 직접기초의 압축지지력

영농형 태양광 구조물에서 직접기초를 사용할 경우 작물재배 및 농기계 이용을 고려하여 독립기초 형태를 이용하며, 설계 시 이 기준을 적용할 수 있다. 직접기초는 예상 최대하중에 대해서 상부구조가 파괴되거나 전도되지 않아야 하고, 일상적으로 작용하는 하중상태에서는 구조물의 사용성이나 내구성에 지장을 주는 과도한 침하나 변형이 발생되지 않도록 하여야 한다.

2.3.7.1 접지압

(1) 독립기초 기초판 저면의 도심에 수직하중의 합력이 작용할 때에는 접지압이 균등하게 분포된 것으로 가정하여 식 (2.54)로 산정할 수 있다.

$$\sigma_e = \frac{P}{A_f} \leq f_e \quad (2.54)$$

여기서, σ_e : 설계용접지압 (kN/m²)

P : 기초자중을 포함한 기초판에 작용하는 수직하중 (kN)

A_f : 기초판의 저면적 (m²)

f_e : 허용지내력 (kN/m²)

(2) 독심하중을 받는 독립기초판의 접지압은 직선적으로 분포된다고 가정하여 식 (2.55)으로 산정할 수 있다.

$$\sigma_e = \alpha \cdot \frac{P}{A_f} \leq f_e \quad (2.55)$$

여기서, σ_e : 설계용접지압 (kN/m²)

α : 하중의 편심과 저면의 형상으로 정해지는 접지압계수

P : 기초자중을 포함한 기초판에 작용하는 수직하중 (kN)

A_f : 기초판의 저면적 (m²)

f_e : 허용지내력 (kN/m²)

2.3.7.2 지지력 산정식에 의한 극한지지력 산정

(1) 얇은기초의 허용지지력은 극한지지력을 소정의 안전율로 나누어 결정한다.

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{FS} \quad (2.56)$$

여기서, q_{all} : 허용지지력

q_{ult} : 극한지지력

FS : 안전율

(2) 얇은기초의 극한지지력은 파괴 형태에 따라 식 (2.57) 및 (2.61)으로 산정한다.

① 전반전단파괴

$$q_{ult} = \alpha c N_c + q N_q + \beta \gamma_w B N_\gamma \quad (2.57)$$

여기서, q : $\gamma_1 D_f$

D_f : 지표면에서 기초 저면까지의 깊이

γ_1 : 기초저면 상부 지반의 단위중량

γ_2 : 기초저면 하부 지반의 단위중량

α, β : 형상계수 (shape factor) (표 18 참조)

표 18 Terzaghi의 기초형상계수

형상계수	연속기초	원형기초	정사각형기초	직사각형기초
α	1.0	1.3	1.3	1+0.3B/L
β	0.5	0.3	0.4	0.5-0.1B/L

B는 푸팅의 폭, L은 푸팅의 길이

N_c , N_q , N_γ 는 전반전단파괴에 대한 지지력계수로 식 (2.58), (2.59), (2.60)로 계산하거나 표 19, 그림 4로부터 구할 수 있다.

$$N_c = \cot\phi \left[\frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)} \tan\phi}{2\cos^2(45 + \phi/2)} - 1 \right] = \cot\phi(N_q - 1) \quad (2.58)$$

$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)} \tan\phi}{2\cos^2(45 + \phi/2)} \quad (2.59)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left[\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2\phi} - 1 \right] \tan\phi \approx \frac{2(N_q + 1)\tan\phi}{1 + 0.4\sin(4\phi)} \quad (2.60)$$

② 국부전단파괴

국부전단파괴에 대한 산정식이 제시되어 있지 않으므로 전반전단파괴에 대한 극한지지력 산정식을 식 (2.61)과 같이 변형시킨 후 극한지지력을 산정한다.

$$q_{ult} = \alpha c' N_c' + q N_q' + \beta \gamma_w B N_\gamma' \quad (2.61)$$

c' , ϕ' 을 각각 점착력 및 내부마찰각의 감소강도정수라 하며, 식 (2.62), (2.63)과 같이 산정한다. N_c' , N_q' , N_γ' 는 식 (2.68)을 통해 감소된 내부마찰각을 이용하여 구한다.

- 감소점착력

$$c' = \frac{2}{3}c \quad (2.62)$$

- 감소내부마찰각

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3} \tan\phi \right) \quad (2.63)$$

표 19 Terzaghi의 지지력계수 (전반전단파괴/국부전단파괴)

내부마찰각(°)	N_c/N'_c	N_q/N'_q	N_γ/N'_γ	$K_{p\gamma}$
0	5.7/5.7	1.0/1.0	0.0/0.0	10.8
5	7.3/6.7	1.6/1.4	0.5/0.2	12.2
10	9.6/8.0	2.7/1.9	1.2/0.5	14.7
15	12.9/9.7	4.5/2.7	2.5/0.9	18.6
20	17.7/11.8	7.4/3.9	4.0/1.7	25.0
25	25.1/14.8	12.7/5.6	9.7/3.2	35.0
30	37.2/19.0	22.5/8.3	19.7/5.7	52.0
35	57.8/25.2	41.4/12.6	42.5/10.1	82.0
40	95.7/34.9	81.3/20.5	100.4/18.8	141.0
45	172.3/51.2	173.3/35.1	297.5/37.7	298.0
48	258.3/66.8	287.9/50.5	780.1/60.4	-
50	347.5/81.3	415.1/65.6	1153.2/87.1	800.0

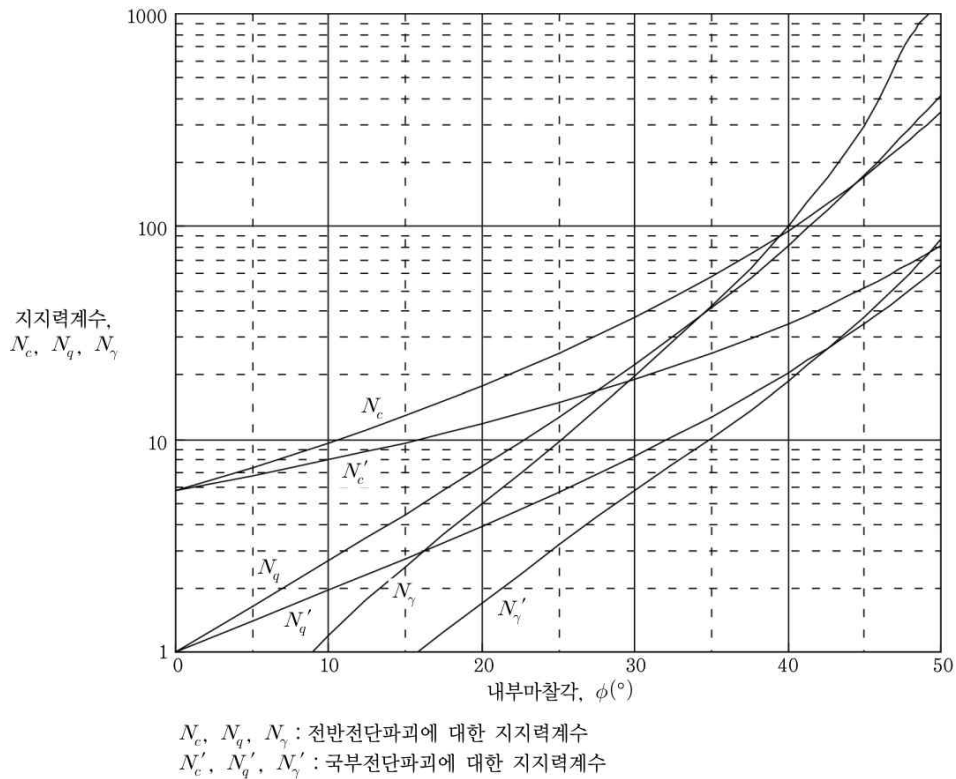


그림 4 Terzaghi의 지지력계수 (전반전단파괴/국부전단파괴)

2.3.7.3 경험식에 의한 극한지지력 산정

(1) 평판재하시험의 결과를 이용하여 하중-침하곡선, 시간-하중곡선, 시간-침하량곡선을 얻을 수 있으며, 이들 곡선으로부터 지지력을 산정할 수 있다.

① 극한하중 결정

원칙적으로 하중-침하곡선의 최대곡률점을 찾아서 극한지지력을 구한다 (그림 5). 최대곡률점이 찾아지지 않거나 재하량이 부족하여 극한지지력이 구해지지 않는 경우에는 측정치를 S-log t, P-dS/d(log t), log P-log S 등의 곡선을 그려서 이들 곡선의 꺾이는 부분을 항복하중으로 하고 항복하중의 1.5배를 취하여 극한하중으로 하거나 재하판 직경의 10%, 즉 0.1B의 하중강도를 극한하중으로 한다.

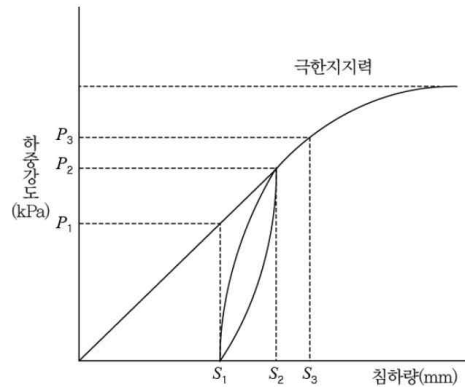


그림 5 평판재하시험 결과를 이용한 항복하중 결정 방법

② 허용지지력 결정

허용지지력은 장기허용지지력과 단기허용지지력으로 구분한다. 허용지지력은 극한하중을 안전율로 나누어 구한다. 단기허용지지력은 항복하중강도로 하며 장기허용지지력은 항복하중강도를 안전율 2로 나눈 값과 극한지지력을 안전율 3으로 나눈 값을 비교하여 작은 값을 취한다. 구조물 기초 폭의 2배에 해당하는 깊이까지 균질한 지반인 경우 식 (2.64), (2.65)와 같이 지지력을 정할 수 있다 (구조물기초설계기준 해설 (2018)의 건물에 해당하는 식 참조).

- 장기허용지지력

$$q_a = P + \frac{1}{3} N'_q \cdot \gamma \cdot D_f \quad (2.64)$$

- 단기허용지지력

$$q_a = P' + \frac{1}{3} N'_q \cdot \gamma \cdot D_f \quad (2.65)$$

③ 사용시 유의사항

지반의 지지력은 지반 성질 이외에도 기초의 근입깊이와 형상, 폭, 길이 및 지하수위 등에 의해 영향을 받으므로 다음의 영향에 유의한다.

- 재하판의 크기
- 지하수위
- 기초의 크기효과

(2) 표준관입시험 결과를 이용하여 기초의 허용지지력을 산정할 수 있으며 유효상재하중, 룯드 길이 등에 대한 N 값의 보정은 필요한 경우에만 수행한다. Terzaghi and Peck 방법, 수정 Meyerhof 방법, N 값으로 구한 내부마찰각을 이용하는 방법 등이 있다.

① Terzaghi and Peck 방법

사질토 지반의 허용지지력 (최대침하량 25 mm를 전제로 한 것임), q_{all} 는 표준관입시험 결과로부터 그림 6과 같이 N 값과 푸팅 폭과의 관계로부터 추정할 수 있다. 이와 같이 결정한 q_{all} 값은 지하수위가 기초저면아래 매우 깊은 곳에 위치하는 경우의 허용지지력이다. 만약 지하수위가 기초저면까지 상승한다면 그림 6에서 얻은 허용지지력의 50%를 사용한다 (Peck et al., 1974).

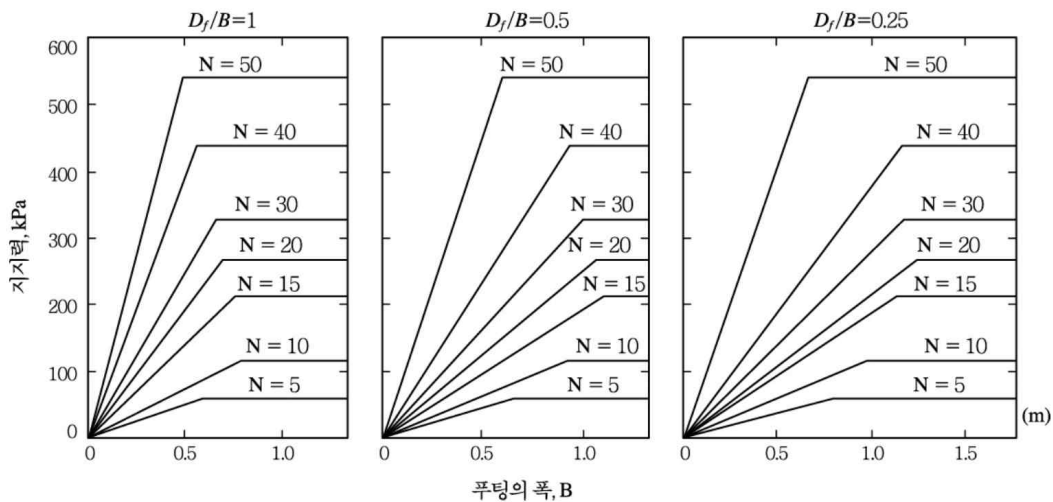


그림 6 사질토 위의 푸팅 설계표 (Peck et al., 1974)

② 수정 Meyerhof 방법

Meyerhof (1965)는 식 (2.66), (2.67), (2.68)와 같이 표준관입시험 N 값으로부터 최대침하량 25 mm를 전제로 한 허용지지력을 추정하는 공식을 제시하였다.

$$q_{all} = 19NK_d, B < 1.2m \text{인 경우} \quad (2.66)$$

$$q_{all} = 12NK_d \left(\frac{B+0.3}{B}\right)^2, B \geq 1.2m \text{인 경우} \quad (2.67)$$

여기서, q_{all} : 허용지지력 (kPa)

N : SPT 관입치

K_d : 깊이 계수

$$K_d = 1 + 0.33D_f/B \leq 1.33 \quad (2.68)$$

여기서, D_f : 근입깊이 (m)

B : 푸팅의 최소폭 (m)

③ N 값으로 구한 내부마찰각을 이용하는 방법

기초 저판 아래 기초폭만큼의 깊이 이내에서 평균한 N' 값으로 표 20에서 $\bar{\phi}$ 를 추정하고 지지력 공식을 사용하여 지지력을 계산한다.

표 20 N' 값을 사용한 $\bar{\phi}$ 의 추정

N'	$\bar{\phi}$
5	28
10	30
20	33
40	39
60	43

④ 사용시 유의사항

표준관입시험은 많은 오류를 수반하므로 N 값의 신뢰도가 높지 못하다. N 값과 내부마찰각의 상관관계가 우수하지 못한 이유도 여기에 있다. 신중을 기하여 허용지지력을 추정해야 하며, N 값 뿐만 아니라 시추 주상도를 참조하여 보다 신뢰할 수 있는 공학적 판단을 내려 기초 설계에 임해야 한다. N 값은 점성토 지반의 지지력 추정에는 적합한 방법이 아니다.

(3) 콘관입시험 (CPT) 결과로부터 기초의 허용지지력을 추정할 수 있으며, 조밀한 지반이나 자갈이 섞여 있는 지반에서는 주의하여 적용한다. 사용하는 표준 콘은 단면적이 10 cm^2 이고 콘의 각도는 60° 이다. 근입깊이 1m의 얕은기초에서 허용지지력은 식 (2.69)과 같은 관계에서 추정할 수 있다. 하지만, 이 식은 신중하게 사용하여야

하고 간단한 경우에만 사용한다. 그 밖의 다른 경우에는 그림 7에서 추정한다. CPT 결과는 SPT만큼 오차가 크지 않다.

$$q_{all} = 0.1q_c \quad (2.69)$$

여기서, q_{all} : 허용지지력
 q_c : 콘의 선단저항치

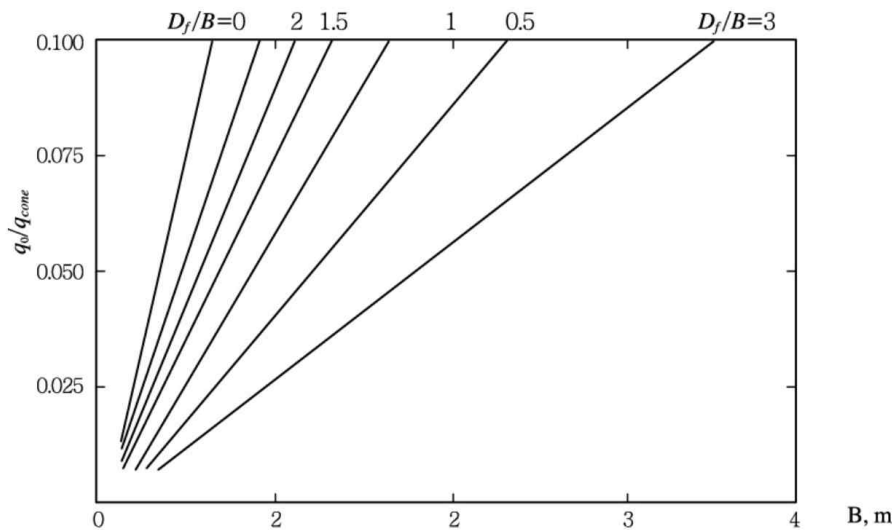


그림 7 콘 관입시험에 의한 허용지지력

2.3.8 직접기초의 침하

2.3.8.1 지중응력

기초의 연직하중에 따라 생기는 지중응력의 연직방향증분은 하중의 형태에 따라 식 (2.70), (2.71), (2.72)로 산정한다.

집중하중에서, 지반 내 임의 지점에서의 연직응력 증가는 식 (2.41)과 같다.

$$\Delta\sigma_z = \frac{P_c \cdot 3Z_s^3}{2\pi \cdot R^5} \quad (2.70)$$

여기서, $\Delta\sigma_z$: 지중의 임의점에서의 연직응력증분 (kN/m^2)

P_c : 지표면에 작용하는 연직집중하중 (kN)

Z_s : 지표면에서 임의의 점까지의 깊이 (m)

R : 하중의 작용점에서 임의의 점까지의 거리 (m)

구형등분포하중에서, 꼭짓점 아래 깊이 z 에서 연직응력 증가는 식 (2.135)와 같다.

$$\sigma_z = q_0 \cdot I \quad (2.71)$$

여기서, σ_z : 꼭짓점 아래 임의 깊이 z 에서 연직응력 증가량

q_0 : 등분포하중 강도

I : 영향계수 (식 (2.136)과 같고, 그림 8에서 구할 수 있음)

$$I = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \cdot \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \right] \quad (2.72)$$

여기서, $m = B/z$, $n = L/z$: 구형면적의 폭과 길이를 깊이로 무차원화한 계수

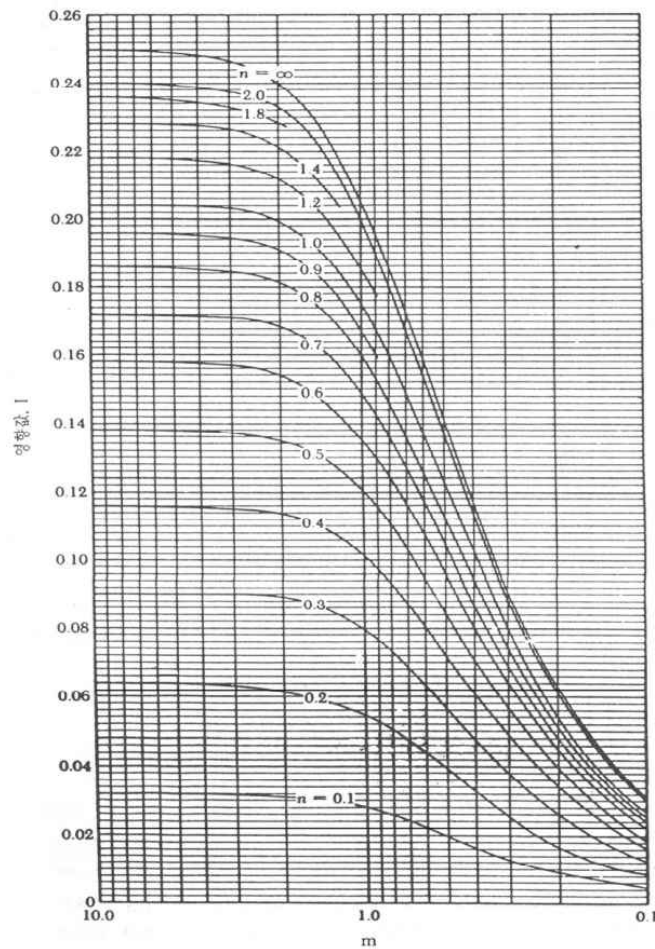


그림 8 구형등분포하중의 영향계수

식 (2.71)에서 산정하는 응력증가량은 구형등분포면적의 꼭짓점 아래 깊이 z 에서의 연직응력 증가량이다. 재하면적 안이나 밖에서의 응력 계산은 그림 9와 같이 응력중첩법을 적용하여 그 점이 꼭짓점이 되도록 재하면적을 작은 구형면적으로 분할하여 각 구형의 꼭짓점 아래서의 응력증가를 구하여 더한다.

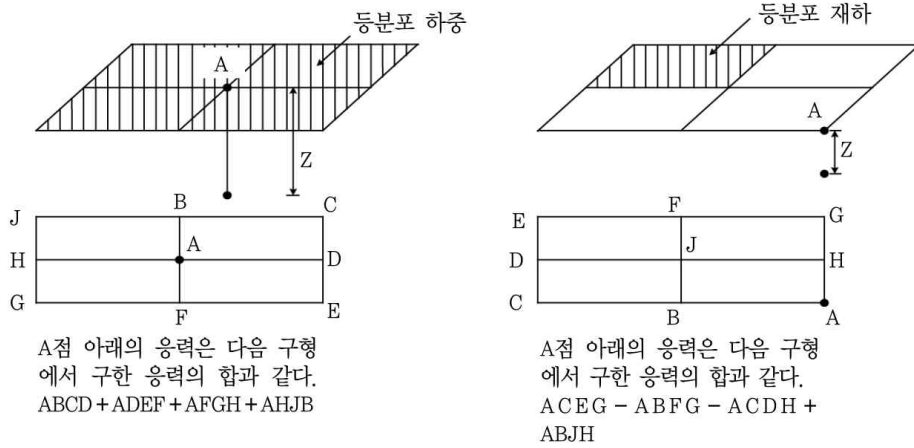


그림 9 연직응력 계산을 위한 구형 분할법

원형등분포일 때의 연직응력 증가량은 식 (2.73)과 같으며, R 은 원형면적의 반경이다. 또한 그림 10과 같이 σ_z/q_0 와 z/R 관계에서 연직응력을 산출할 수 있다.

$$\sigma_z = q_0 \cdot I, \quad I = \left[1 - \frac{1}{[1 + (R/z)^2]^{3/2}} \right] \quad (2.73)$$

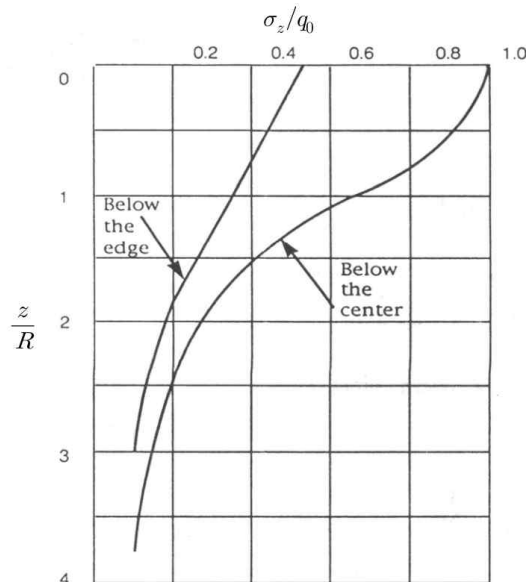


그림 10 원형등분포하중에 의한 응력 증가

2.3.8.2 즉시침하량

즉시침하량은 지반을 탄성체로 보고 탄성이론에 기초한 지반의 탄성계수와 포아송비를 적절히 설정하여 식 (2.74)에 따라 산정하거나, 평판재하시험의 하중과 침하량의 관계식 식 (2.75)를 이용하여 추정한다.

$$S_E = I_S(1 - \nu^2)qB/E_S \quad (2.74)$$

여기서, S_E : 즉시침하량 (m)

I_S : 기초저면의 형상과 강성에 따라 정해지는 계수, (표 21) 참조

q : 기초에 작용하는 단위면적당 하중 (kN/m²)

B : 기초의 단변길이 (원형의 경우는 지름) (m)

L : 기초의 장변길이 (m)

E_S : 지반의 탄성계수 (kN/m²)

ν : 지반의 포아송비

표 21 침하계수 I_S (유연한 기초의 경우)

기초저면 형상		기초저면 상의 위치	I_S
원형(지름 B)		중앙	1.00
장방형($B \times L$)	$L/B=1$	중앙	1.12
	1.5		1.36
	2.0		1.52
	2.5		1.68
	3.0		1.78
	4.0		1.96
	5.0		2.10
	10.0		2.54

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{I_{S2} \cdot B_2}{I_{S1} \cdot B_1} \quad (2.75)$$

여기서, S_1 : 평판의 침하량 (m)

S_2 : 기초의 침하량 (m)

I_{S1} : 재하판의 침하계수, (표 21) 참조

I_{S2} : 기초의 침하계수, (표 21) 참조

B_1 : 재하판의 폭 (m)

B_2 : 기초의 폭 (m)

2.3.8.3 압밀침하량

압밀침하량 산정은 식 (2.76)에 따른다. 단, 압축지수 C_c , 압밀계수 C_v 를 알 수 있는 경우 침하량을 별도 식으로 산정할 수 있다.

$$S = \int \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot dz \quad (2.76)$$

여기서, S : 침하량 (m)

Z : 침하량을 산정하는 점에서 연직하방으로 측정된 깊이 (m)

e_1 : 응력 σ_{1Z} 에 대응하는 간극비

e_2 : 응력 $\sigma_{2Z}(=\sigma_{1Z} + \Delta\sigma_Z)$ 에 대응하는 간극비

σ_{1Z} : 건물시공 이전의 Z점에서 유효지중응력 (kN/m²)

$$= \gamma H_1 + \gamma'(Z_s - H_1)$$

σ_{2Z} : 건물시공 이후의 Z점에서 유효지중응력 (kN/m²)

$$= \sigma_{1Z} + \Delta\sigma_Z$$

γ : 지반의 습윤단위체적중량 (kN/m³)

γ' : 지반의 수중단위체적중량 (kN/m³)

H_1 : 지하수위 (지표면에서 지하수위 상단까지의 깊이, m)

Z_s : 지표면에서 임의의 점까지의 깊이 (m)

2.3.9 허용침하량

- (1) 허용침하량은 상부구조물의 특성, 지반의 조건, 기초의 형식, 주위상황들을 고려하여 정한다.
- (2) 기초의 추정 침하량이 허용침하량을 초과하는 경우 적당한 개소에 신축조인트를 두거나 상부구조의 강성을 크게 하여 유해한 부등침하가 생기지 않도록 하여야 한다.
- (3) 영농형 태양광 구조물은 주로 탄성재료로 구성되어 침하에 강한 특성이 있으나 상부구조의 재료와 규모에 따라 설계자가 판단하여 허용침하량을 검토하여야 한다.

2.3.10 기초의 설계

- (1) 기초에 작용하는 압축, 인장, 전단, 휨응력이 모두 허용응력 범위 안에 있어야 한다.

- (2) 기초와 기초 푸팅의 연결부, 기초와 상부구조물의 이음부 등은 확실하게 시공할 수 있도록 설계한다.
- (3) 기초의 부식, 풍화, 화학적 침해 대하여 적합한 대책을 강구한다.
- (4) 침식, 세굴 또는 인접지반의 굴착, 지하수 변동 등에 대한 검토와 대책을 수립한다.
- (5) 시공 시 발생할 수 있는 소음, 진동 등은 환경기준을 만족하여야 한다.
- (6) 지반의 액상화 가능성에 대하여 검토한다.
- (7) 기초종류 선정, 시공장비 선택, 시공법 선정, 지지층 선정, 시멘트풀 보강 여부 등에 대하여 검토한다.

2.3.10.1 기초 간격과 기초 배열

- (1) 기초 간격은 안전적설심 및 안전풍속을 고려한 하부 기둥 간격에 따르며, 기초 중심간 간격은 최소 기초지름의 2.5배 이상, 기초 측면과 기초중심 간의 거리는 최소 기초지름의 1.25배 이상으로 한다.

2.3.10.2 기초의 설계절차

기초의 설계는 다음의 절차를 거쳐 수행한다.

- (1) 예비설계
- (2) 검증시험
- (3) 예비설계의 보완

검증시험이란 해당공사에서 말뚝의 시공방법 설정, 말뚝지지력의 평가, 말뚝의 길이 결정, 말뚝의 하중지지거동의 확인 등을 위하여 실시하는 시험을 말한다. 설계단계에서 시험시공말뚝을 이용한 시험이 곤란할 경우에는 시공초기에 설계확인 및 본시공 관리기준의 설정을 위하여 재하시험을 계획한다.

2.3.10.3 재하시험

- (1) 기초의 재하시험으로는 압축재하시험, 인발재하시험, 횡방향재하시험 등이 있으며, 압축재하시험은 정재하시험을 원칙으로 하되 시험목적, 공사의 규모와 중요도, 실시수량, 현장여건 등 실시조건을 고려하여 동재하시험을 선택적으로 적용할 수 있다.
- (2) 재하시험은 아래의 사항들을 고려하여 목적에 맞도록 계획한다.
 - ① 관련시험규정
 - ② 지지력
 - ③ 변위량
 - ④ 건전도
 - ⑤ 시공방법과 장비의 적합성
 - ⑥ 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화

- ⑦ 부주면마찰력
- ⑧ 하중전이 특성
- ⑨ 시험횟수와 방법
- ⑩ 시험실시 시기
- ⑪ 시험 및 결과분석 요원의 신뢰도

- (3) 압축재하시험을 동재하시험방법으로 적용할 경우 시공장비의 성능 확인, 장비의 적합성 판정, 지반조건 확인, 기초의 건전도 판정, 지지력 확인 등을 목적으로 실시하여야 한다.
- (4) 압축재하시험의 최소 실시수량은 지반조건에 큰 변화가 없는 경우 전체 기초 수량의 1% 이상 (100개 미만인 경우에도 최소 1개)을 실시하되, 시설물별 기준에서 별도의 실시수량을 정하고 있는 경우 해당 기준을 따른다.
- (5) 지형 및 지반조건, 시공장비, 기초종류 등 제반 시공조건이 변경될 때는 시험횟수를 추가하도록 시방서에 명시하여야 하며, 구조물의 종류와 특성, 중요도 등을 고려하여 발주처와 협의하여 실시수량을 별도로 정할 수 있다.

제3장 영농형 태양광 표준설계(안)

3.1 설계 개요

태양광 모듈 배치에 따른 두 가지의 프레임 형식 구조물 설계(안)을 제시한다. 모듈 가로 배치형의 경우, 태양광 모듈의 길이가 긴 가로 방향으로 이어져 설치되는 형식이며, 모듈 세로 배치형의 경우, 태양광 모듈의 길이가 짧은 세로 방향으로 간격을 두어 설치되는 형식이다.

3.1.1 관련 설계 변수

3.1.1.1 설계 대상지

본 설계(안)에서는 경기도 수원시를 대상지로 하였으며, 이에 따른 지역별 기본풍속과 기본지상 적설하중을 적용하여 구조 설계를 진행하고, 이와 상이한 대상지에 대해서는 2.2.1절을 참조하여 설계를 수행한다.

3.1.1.2 사용 부재

(1) 부재 물성치

- 부재 재질 : SS275
- 탄성계수 : 205,000 MPa
- 포아송비 : 0.3
- 항복강도 : 275 MPa

(2) 부재 규격

영농형 태양광 시스템에 사용되는 부재의 세부 규격은 표 22를 참고한다.

표 22 영농형 태양광 시스템 사용 부재 규격

부재 이름	부재 규격 (mm)
하부 기둥	∅ -101.6×4.0t
하부 보	H-150×100×3.2×4.5t
퍼린	C-75×15×15×2.1t
브레싱	└-40×40×3t
상부 기둥	H-100×100×3.2×4.5t
상부 보	□-100×100×2.9t

3.1.1.3 토양 강도정수

본 설계(안)에서의 기초 설계를 위한 토양 강도정수는 영농형 태양광 설치 대상지의 현장 지반조사를 통해 측정된 아래의 강도정수를 대상으로 하였으며, 이와 상이한 지

반조건에서의 기초 설계는 2.3절 및 3.6절을 참조한다.

- 토양 밀도: 1.6 t/m³
- 점착력: 31.09 kN
- 마찰각: 31.1°

3.1.1.4 시스템 규격

영농형 태양광 발전 시스템의 기본설계를 위해 2.1절에 제시된 고려사항을 반영하며, 그 외 태양광 모듈의 규격 등 현장 여건의 변동에 따라서, 구조물의 기둥 간격과 높이는 합리적으로 결정한다. 본 설계(안)의 형식을 이용하되 상이한 제원, 하중조건, 지반조건 등을 적용해야 할 경우 3.5절 및 3.6절을 참조하여 안전성을 확보하여야 한다.

(1) 모듈 가로 배치형

- 하부 기둥 간격 : 4,100×5,500 mm
- 하부 기둥 높이 : 3,800 mm
- 태양광 모듈 규격 : 450 W (2,115×1,052×40 mm)

(2) 모듈 세로 배치형

- 하부 기둥 간격 : 5,100×4,500 mm
- 하부 기둥 높이 : 3,800 mm
- 태양광 모듈 규격 : 580 W (2,416×1,134×35 mm)

3.1.2 기타사항

본 설계(안)에서 제시되는 영농형 태양광 시스템은 상기 제시된 설계 변수를 바탕으로 수행된 설계 결과 예시이며, 이와 상이한 대상지, 부재, 지반조건, 시스템 규격 등을 적용할 경우 설계 재검토가 요구된다. 본 구조물의 경우, 경량형 구조물이기 때문에 지진하중 관련 구조계산 검토 결과, 충분히 안전 측에 속하지만, 추후 엔지니어가 필요하다고 판단 시 추가적인 검토도 고려되어야 한다.

3.2 구조 검토

3.2.1 모듈 가로 배치형

본 설계(안)에 계산된 구조해석 및 부재 단면 검토 결과는 [부록 1]을 참조하도록 한다. 최종 정리된 구조 검토 결과는 표 23과 같다.

표 23 태양광 모듈 가로 배치형 구조 검토 결과

구분		결과	허용	RATIO	판정
다리					
속력 최대	축방향 압축 응력 검토	6.853	149.195	0.046	O.K
	휨응력 검토 (My)	0.000	165.000	0.000	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	66.523	165.000	0.403	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.452	1.000	0.452	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.445	1.000	0.445	O.K
	전단응력 검토	3.373	110.000	0.031	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	4.395	149.195	0.029	O.K
	휨응력 검토 (My)	0.000	165.000	0.000	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	67.831	165.000	0.411	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.443	1.000	0.443	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.438	1.000	0.438	O.K
	전단응력 검토	3.373	110.000	0.031	O.K
보					
속력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.598	153.620	0.004	O.K
	휨응력 검토 (My)	9.831	165.000	0.060	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.346	165.000	0.002	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.066	1.000	0.066	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.065	1.000	0.065	O.K
	전단응력 검토	4.154	110.000	0.038	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.171	153.620	0.001	O.K
	휨응력 검토 (My)	34.028	165.000	0.206	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.207	1.000	0.207	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.207	1.000	0.207	O.K
	전단응력 검토	4.154	110.000	0.038	O.K
브레싱					
속력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.698	41.151	0.017	O.K
	휨응력 검토 (My)	3.928	165.000	0.024	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.063	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.042	1.000	0.042	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.028	1.000	0.028	O.K
	전단응력 검토	0.156	110.000	0.001	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.004	41.151	0.000	O.K
	휨응력 검토 (My)	5.074	165.000	0.031	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.031	1.000	0.031	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.031	1.000	0.031	O.K
	전단응력 검토	0.156	110.000	0.001	O.K

3.2.2 모듈 세로 배치형

본 설계(안)에 계산된 구조해석 및 부재 단면 검토 결과는 [부록 2]를 참조하도록 한다. 최종 정리된 구조 검토 결과는 표 24와 같다.

표 24 태양광 모듈 가로 배치형 구조 검토 결과

구분		결과	허용	RATIO	판정
다리					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	5.107	99.068	0.052	O.K
	휨응력 검토 (My)	100.207	165.000	0.607	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.309	165.000	0.002	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.689	1.000	0.689	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.640	1.000	0.640	O.K
	전단응력 검토	3.235	110.000	0.029	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	4.722	99.068	0.048	O.K
	휨응력 검토 (My)	116.819	165.000	0.708	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.161	165.000	0.001	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.787	1.000	0.787	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.738	1.000	0.738	O.K
	전단응력 검토	3.235	110.000	0.029	O.K
보					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.930	154.336	0.006	O.K
	휨응력 검토 (My)	55.948	165.000	0.339	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	9.359	165.000	0.057	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.402	1.000	0.402	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.401	1.000	0.401	O.K
	전단응력 검토	1.848	110.000	0.017	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.001	154.336	0.000	O.K
	휨응력 검토 (My)	64.212	165.000	0.389	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.008	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.389	1.000	0.389	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.389	1.000	0.389	O.K
	전단응력 검토	1.848	110.000	0.017	O.K
브레싱					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	4.349	80.376	0.054	O.K
	휨응력 검토 (My)	12.849	165.000	0.078	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.976	165.000	0.006	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.143	1.000	0.143	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.110	1.000	0.110	O.K
	전단응력 검토	0.191	110.000	0.002	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.789	80.376	0.010	O.K
	휨응력 검토 (My)	19.969	165.000	0.121	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.346	165.000	0.002	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.134	1.000	0.134	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.128	1.000	0.128	O.K
	전단응력 검토	0.191	110.000	0.002	O.K

3.3 구조물 설계도

3.3.1 모듈 가로 배치형

본 설계(안)의 구조 검토 결과 (3.2.1절)에 따라서 모듈 가로형의 배치도, 측면도, 배면도, 입체도는 다음과 같다.

3.3.1.1 구조물 배치도

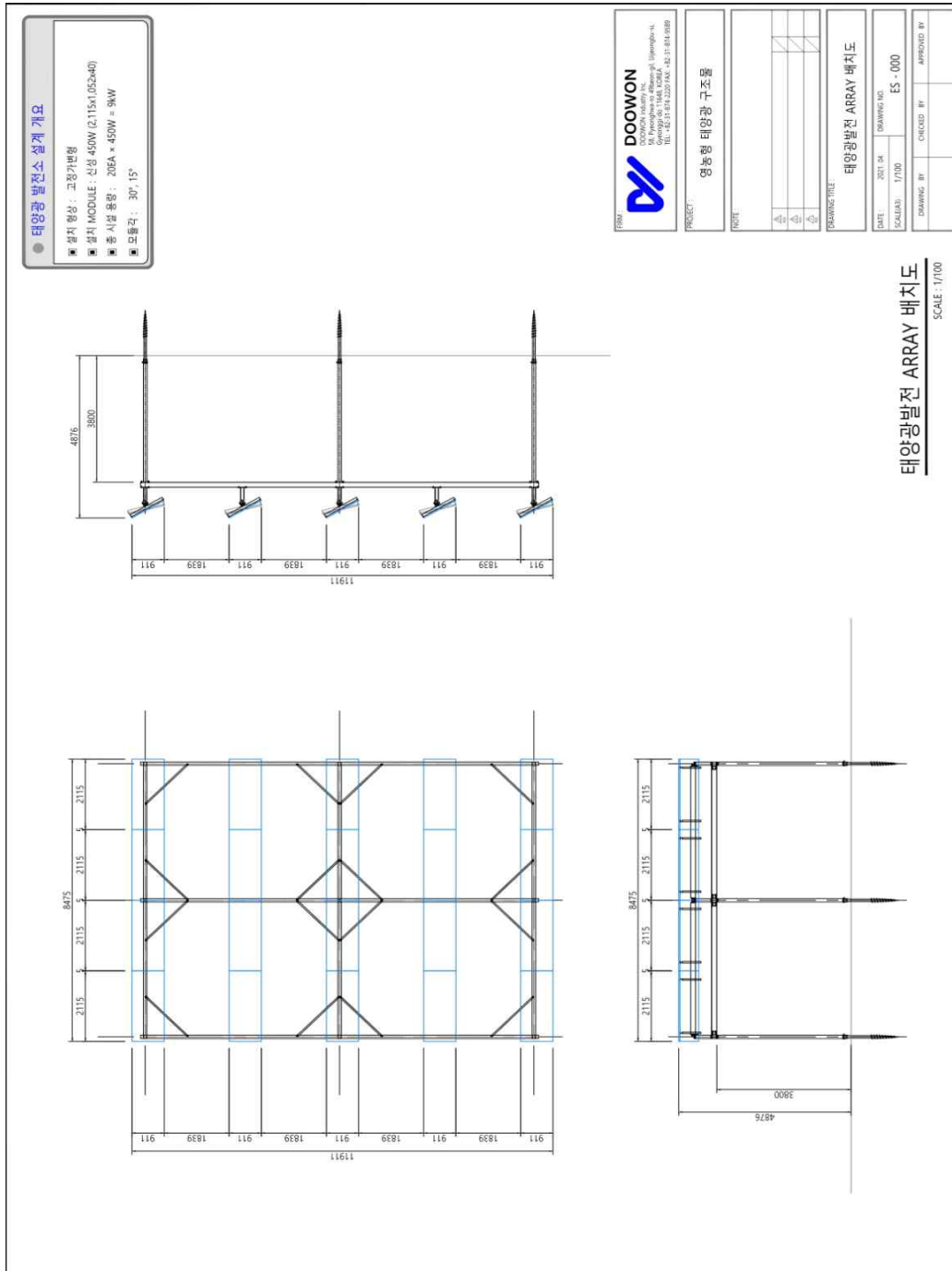


그림 11 영농형 태양광 모듈 가로 배치형 배치도

3.3.1.3 구조물 배면도

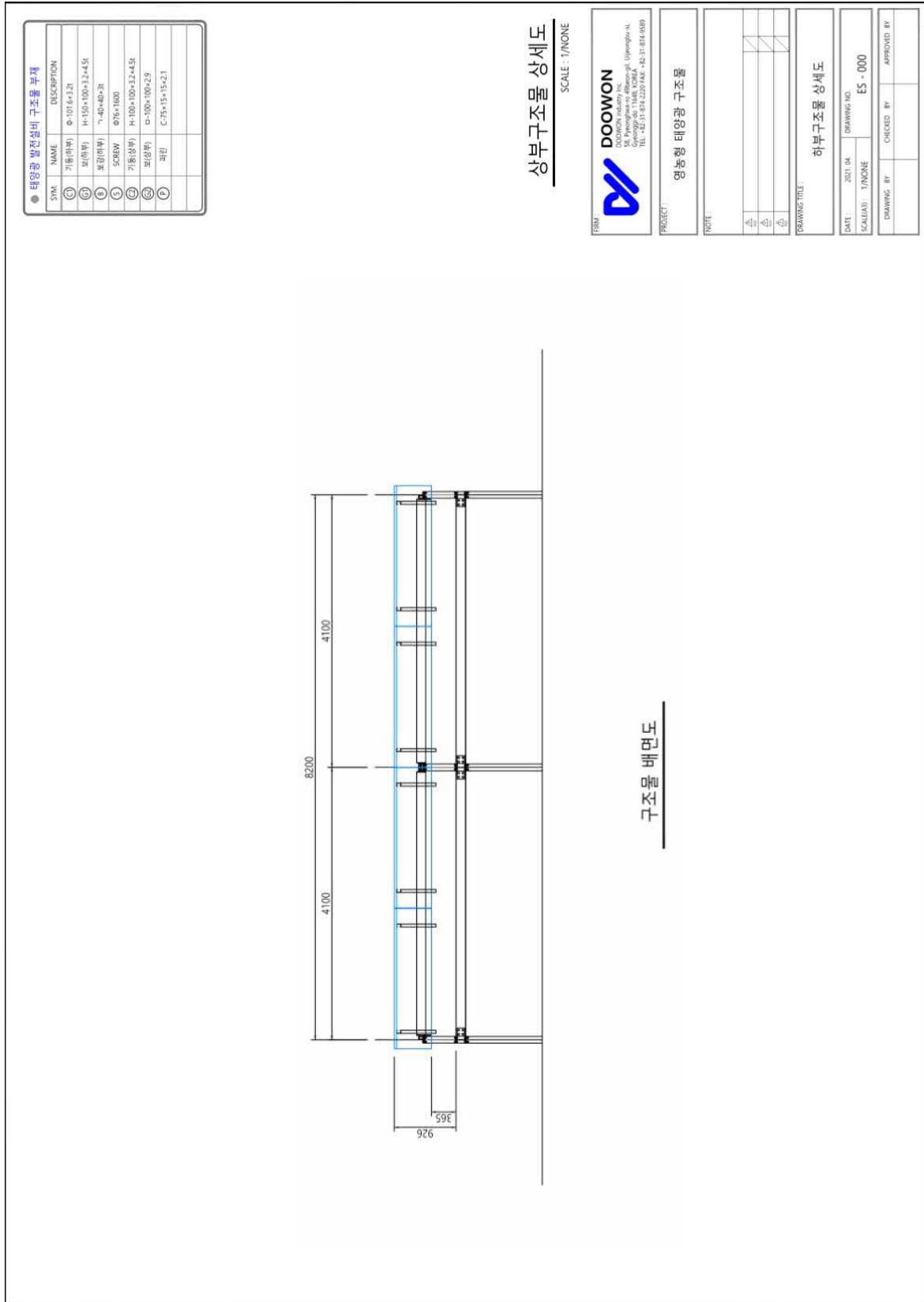


그림 13 영농형 태양광 모듈 가로 배치형 배면도

3.3.1.4 구조물 입체도

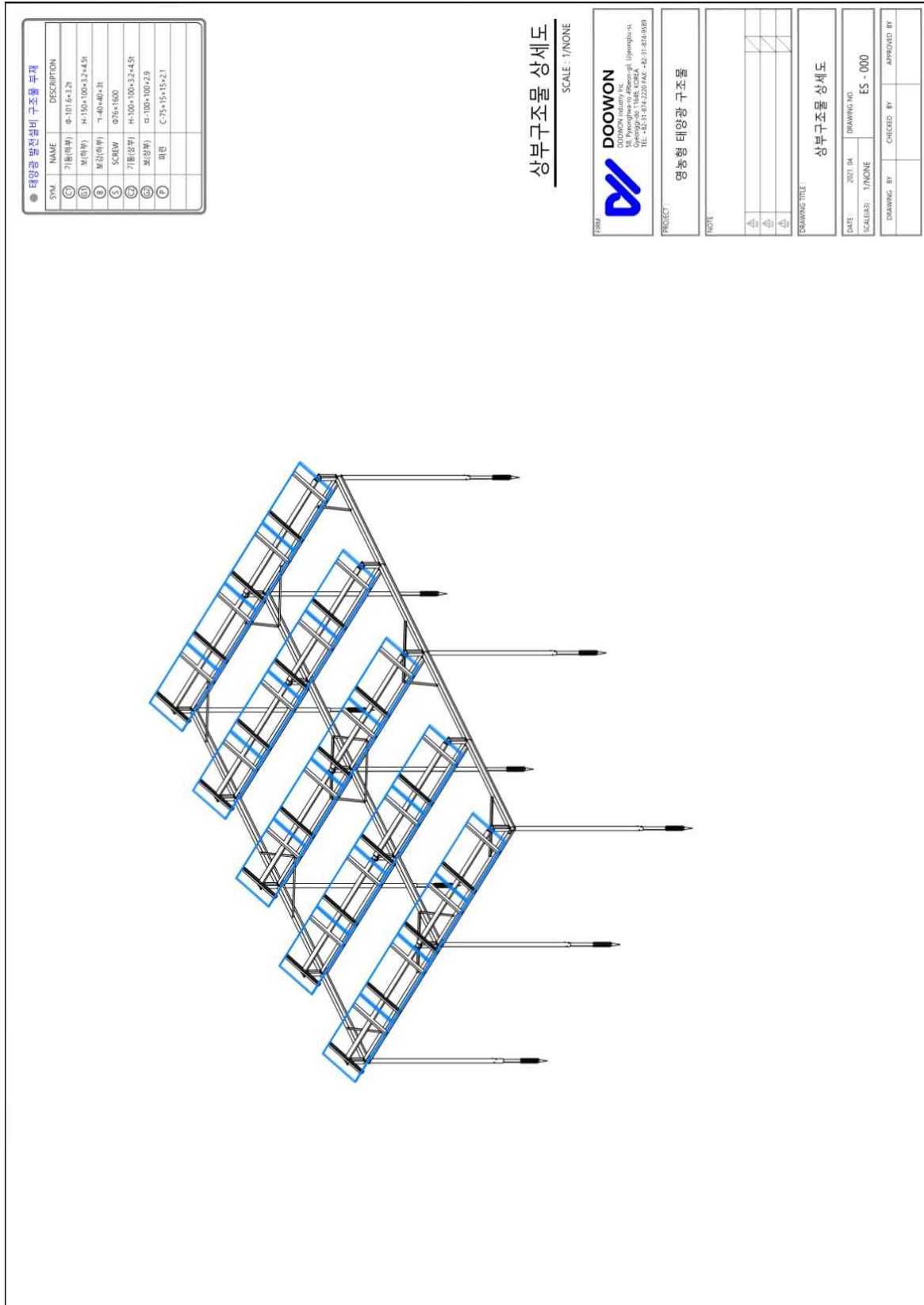


그림 14 영농형 태양광 모듈 가로 배치형 입체도

3.3.2 모듈 세로 배치형

본 설계(안)의 구조 검토 결과 (3.2.2절)에 따라서 모듈 세로형의 배치도, 측면도, 배면도, 입체도는 다음과 같다.

3.3.2.1 구조물 배치도

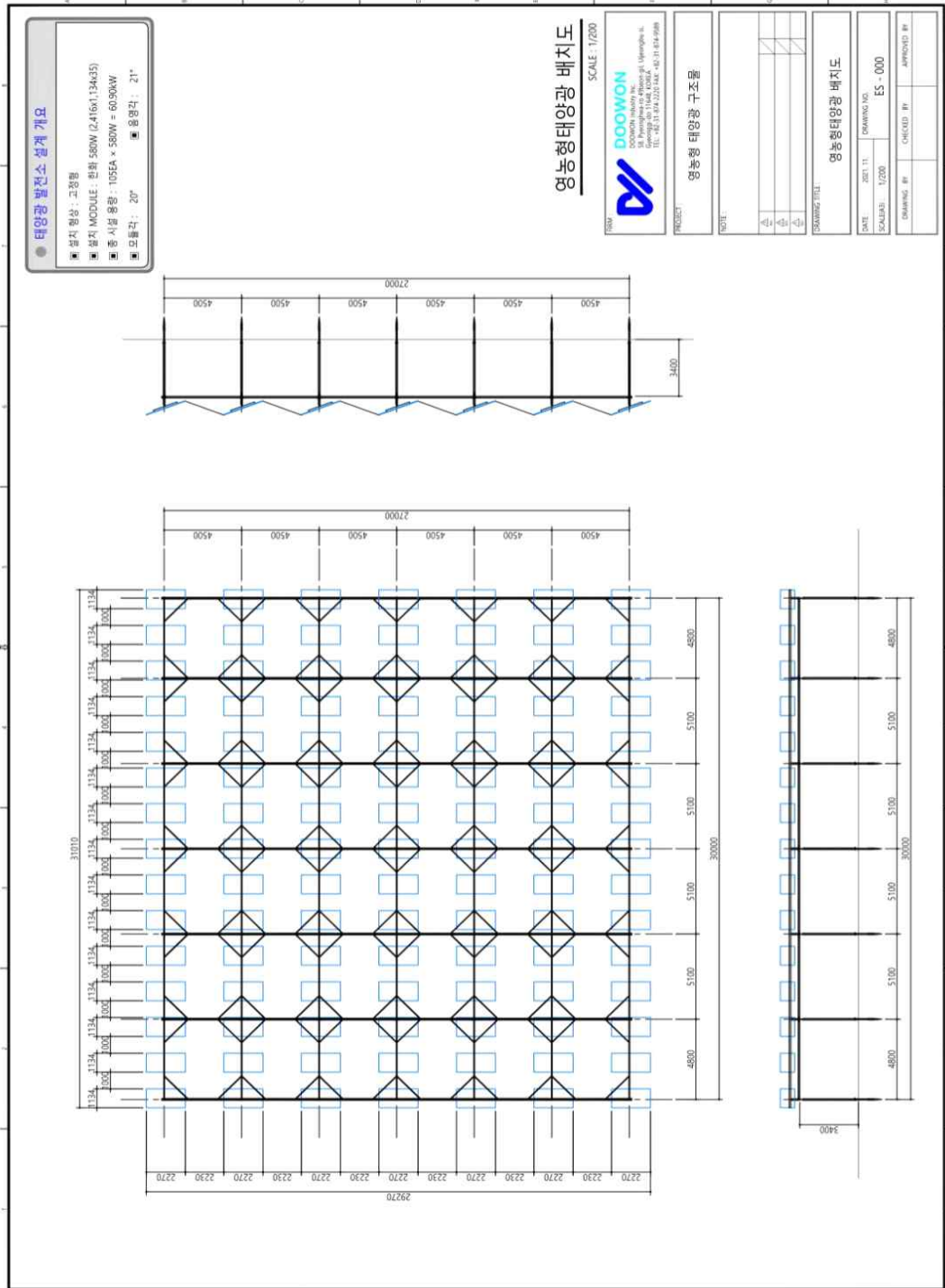


그림 15 영농형 태양광 모듈 세로 배치형 배치도

3.3.2.2 구조물 측면도

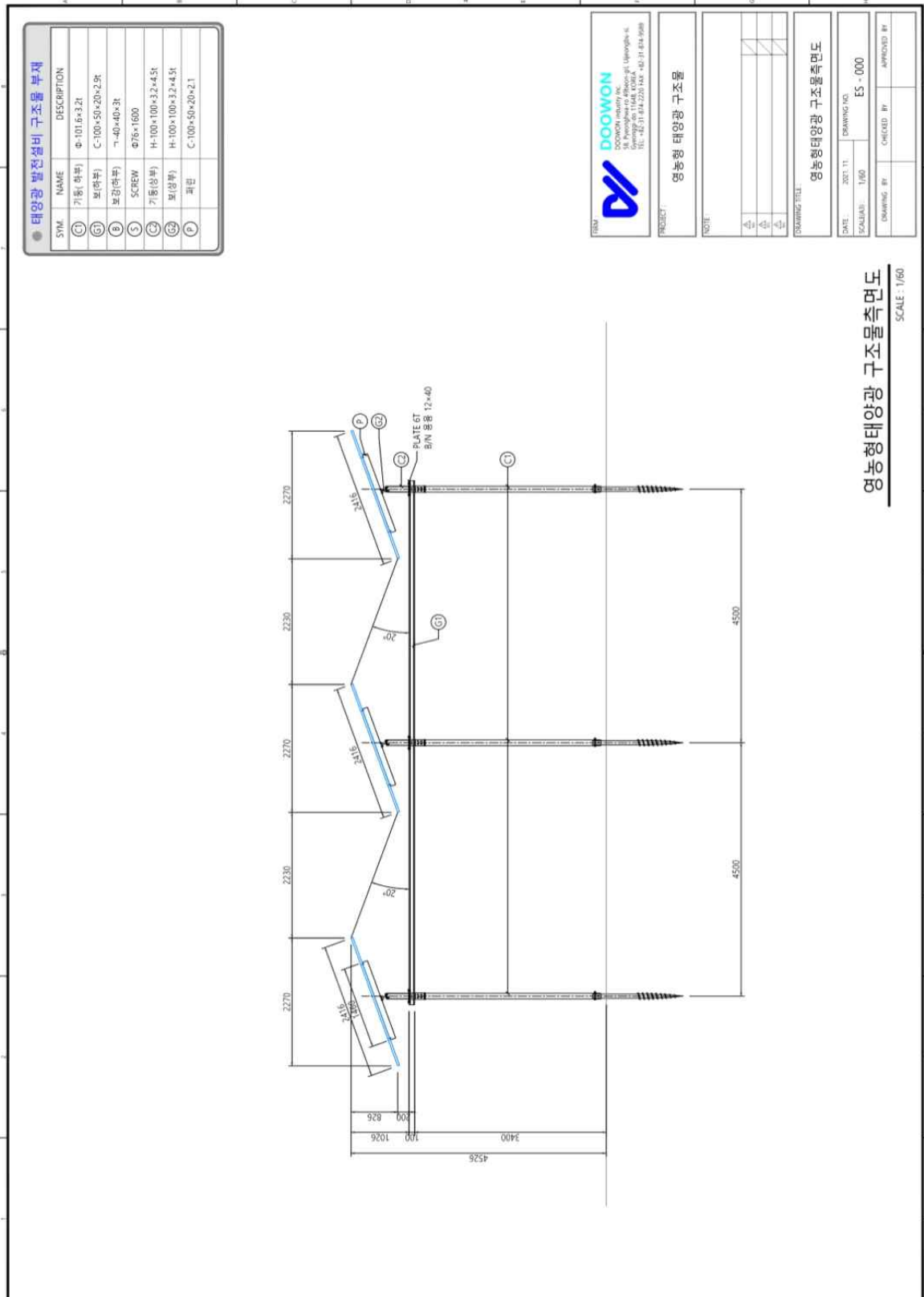


그림 16 영농형 태양광 모듈 세로 배치형 측면도

3.3.2.3 구조물 배면도

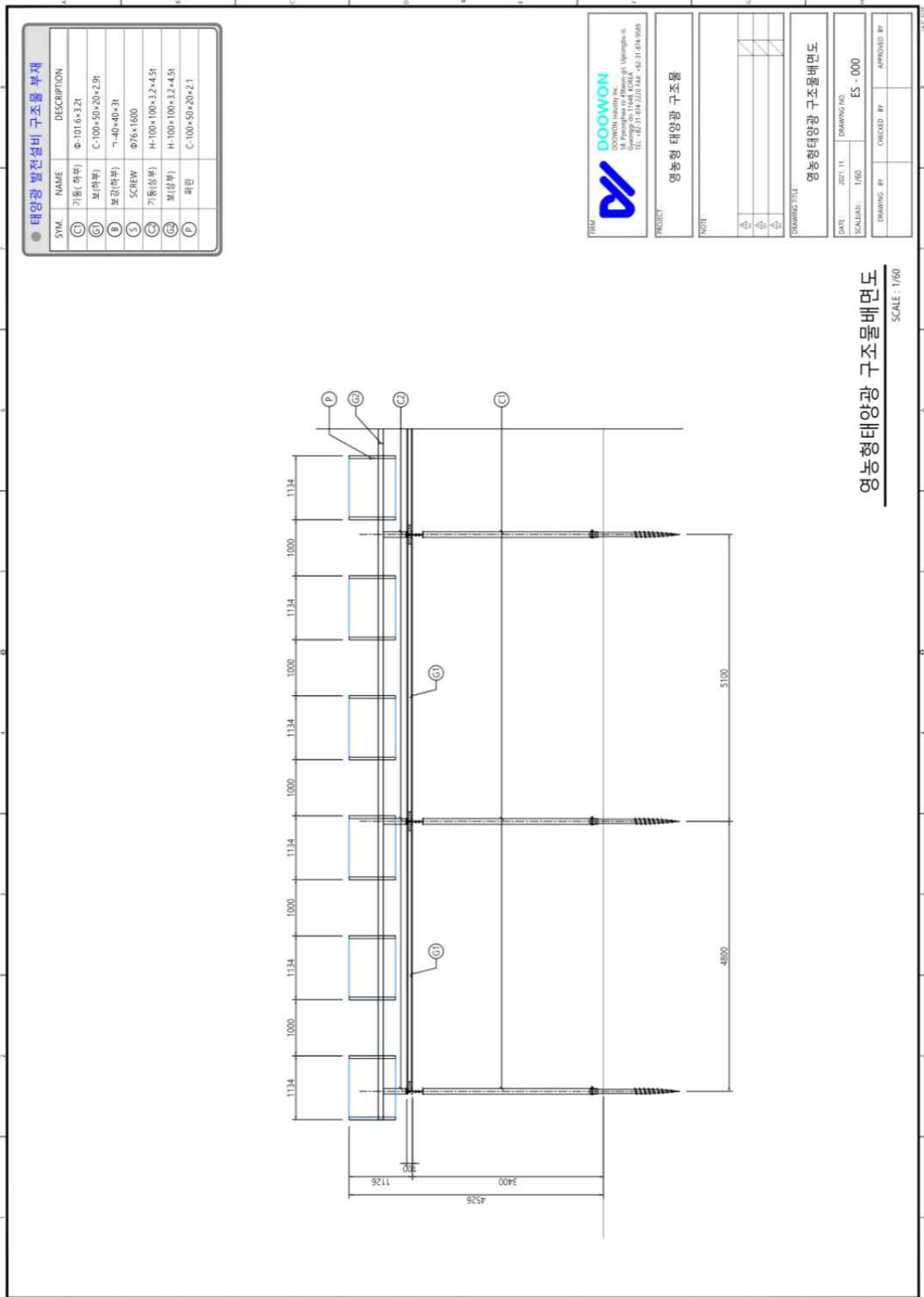


그림 17 영농형 태양광 모듈 세로 배치형 배면도

3.3.2.4 구조물 입체도

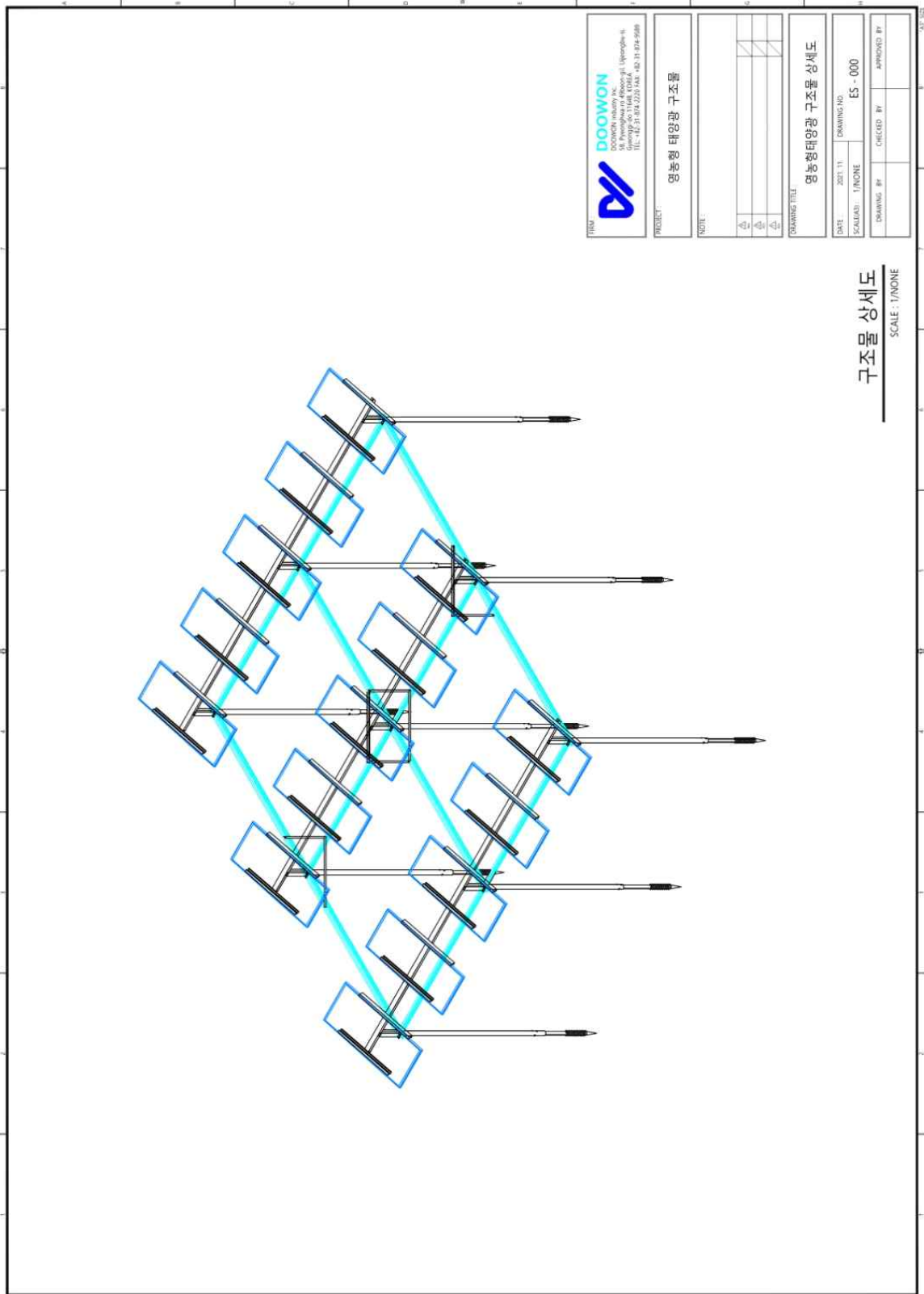


그림 18 영농형 태양광 모듈 세로 배치형 입체도

3.4 기초 설계도

3.4.1 모듈 가로 배치형

3.4.1.1 구조 검토

모듈 가로 배치형의 구조해석 결과, 기초 부분의 최대압축하중은 698.8 kgf로 산정되었다. 따라서, 본 표준설계서의 2.3절 (기초 설계기준) 및 3.1.1.3절 (토양 강도정수)에 근거하여 계산된 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 각각 1.377 m 및 0.626 m로 산정되었다. 하지만, 현장 시공 시 필요한 근입깊이는 강관 및 스크류 기초 모두 최소 1.0 m 이상 확보하는 것을 추천하기에, 최종 길이는 각각 1.4 m 및 1.0 m로 결정하였다. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정하는 것이 필요하다. 참고로 본 설계(안)의 경우 열린 구조 형태이기에 인발하중은 전 구간에서 발생하지 않는 것으로 검토되었지만, 구조물의 형태가 변경되면 풍하중에 의한 내·외부 압력이 변경되기 때문에, 농촌진흥청에서 발간한 온실 설계 기준이나 건축학회에서 발간한 건축구조설계 기준 등을 참고하여, 합리적으로 반영하여야 한다. 본 설계(안)의 구조해석 결과는 [부록 1]을 참고하도록 한다.

3.4.1.2 강관 기초 상세도

모듈 가로 배치형의 강관 기초 상세도는 그림 19와 같다.

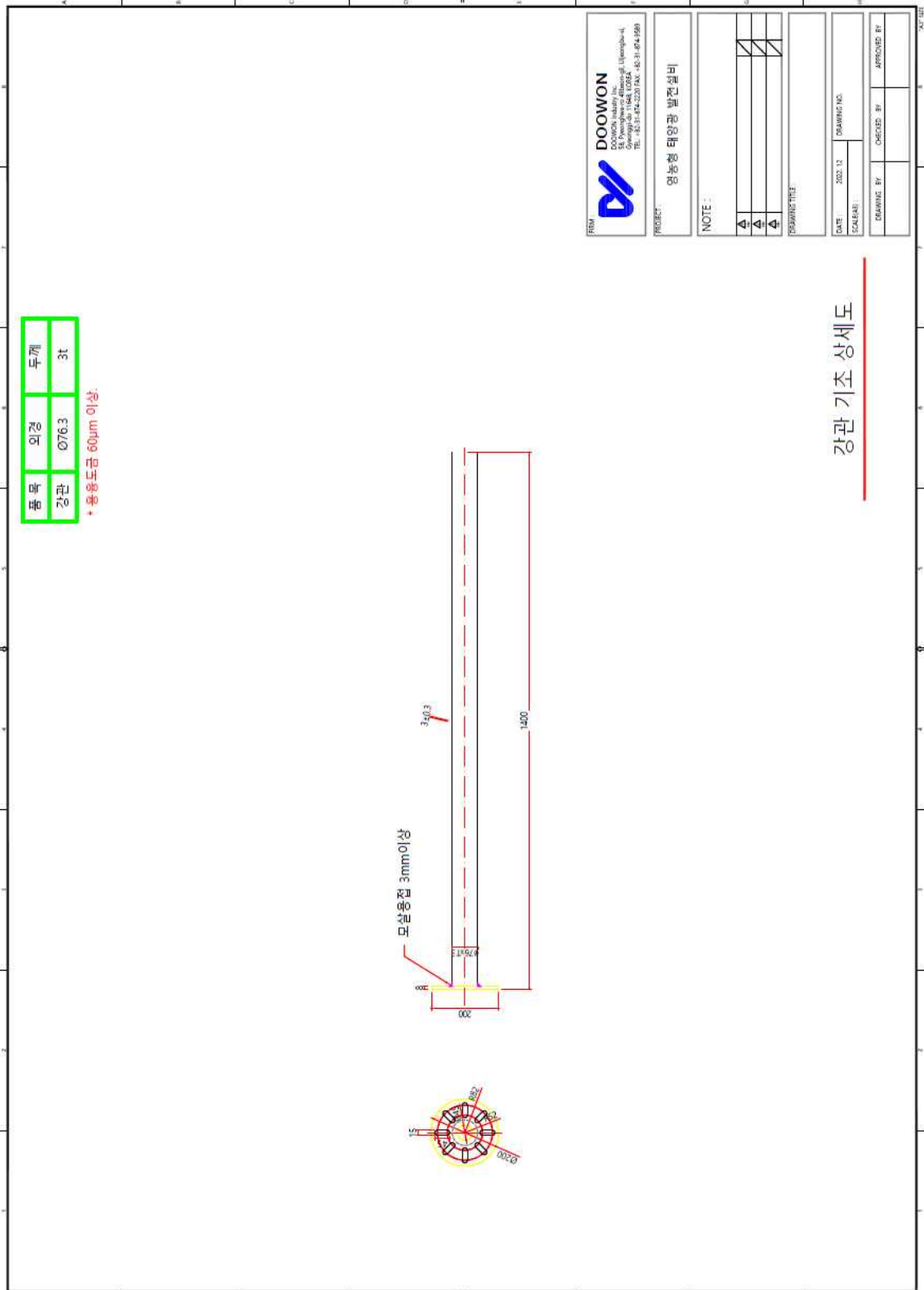


그림 19 모듈 가로 배치형의 강관 기초 상세도

3.4.1.3 스크류 기초 상세도

모듈 가로 배치형의 스크류 기초 상세도는 그림 20과 같다.

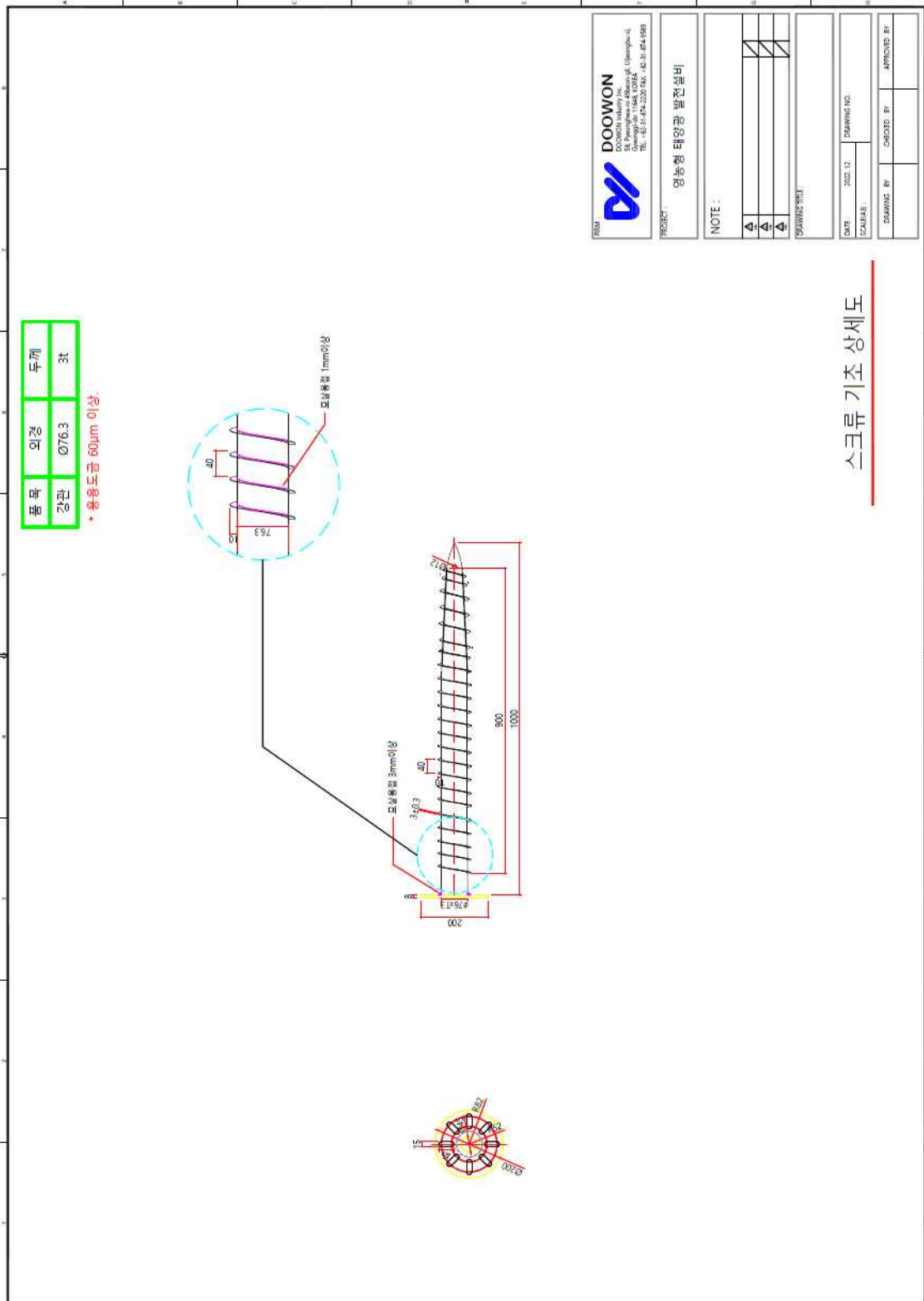


그림 20 모듈 가로 배치형의 스크류 기초 상세도

3.4.2 모듈 세로 배치형

3.4.2.1 구조 검토

모듈 세로 배치형의 구조해석 결과, 기초 부분의 최대압축하중은 520.8 kgf로 산정되었다. 따라서, 본 표준설계서의 2.3절 (기초 설계기준) 및 3.1.1.3절 (토양 강도정수)에 근거하여 계산된 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 각각 0.877 m 및 0.253 m로 산정되었다. 하지만, 현장 시공 시 필요한 근입깊이는 강관 및 스크류 기초 모두 최소 1.0 m 이상 확보하는 것을 추천하기에, 최종 길이는 모두 1.0 m로 결정하였다. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정하는 것이 필요하다. 참고로 본 설계(안)의 경우 열린 구조 형태이기에 인발하중은 전 구간에서 발생하지 않는 것으로 검토되었지만, 구조물의 형태가 변경되면 풍하중에 의한 내·외부 압력이 변경되기 때문에, 농촌진흥청에서 발간한 온실 설계 기준이나 건축학회에서 발간한 건축구조설계 기준 등을 참고하여, 합리적으로 반영하여야 한다. 본 설계(안)의 구조해석 결과는 [부록 2]를 참고하도록 한다.

3.4.2.2 강관 기초 상세도

모듈 세로 배치형의 강관 기초 상세도는 그림 21과 같다.

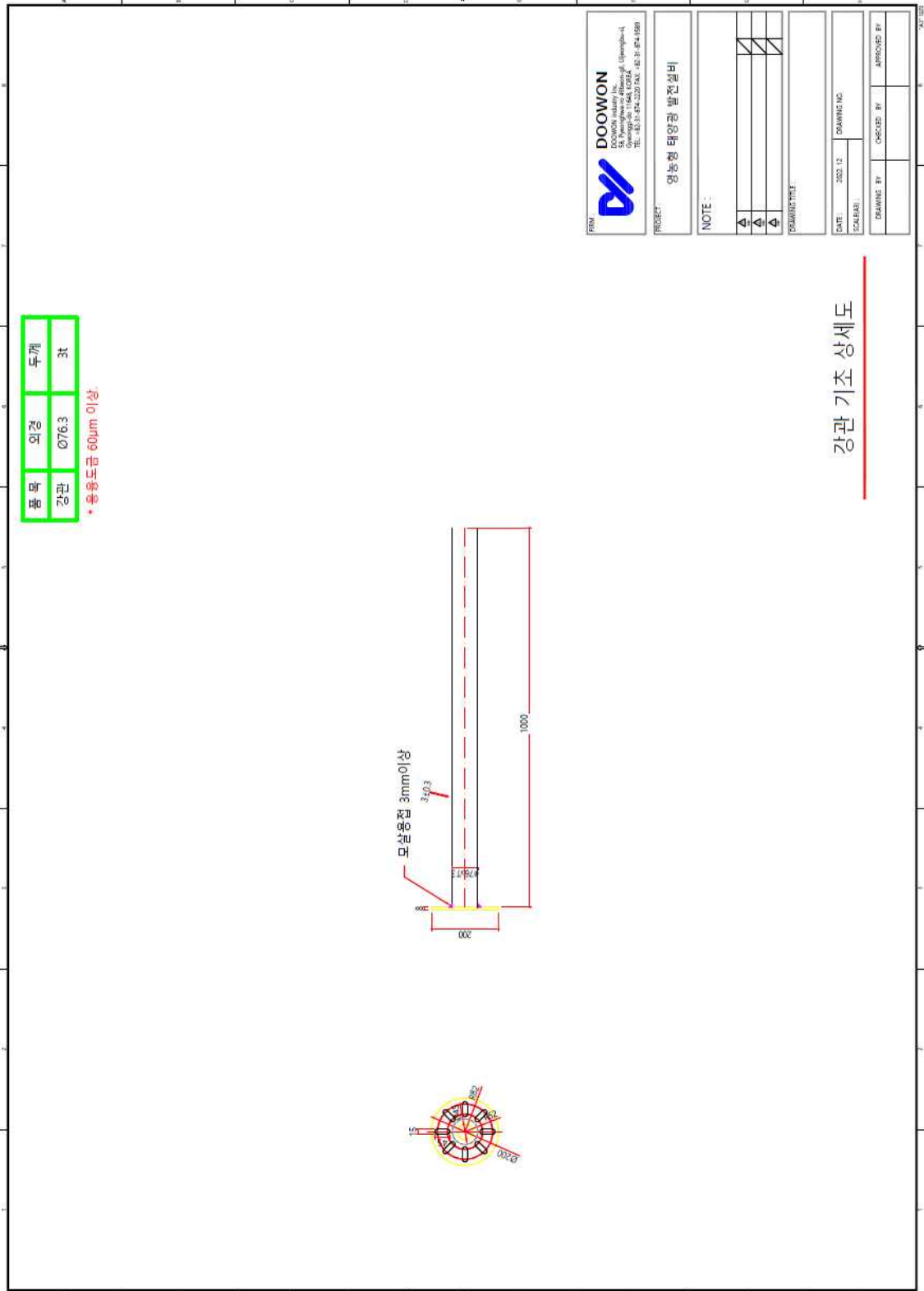


그림 21 모듈 세로 배치형의 강관 기초 상세도

3.4.2.3 스크류 기초 상세도

모듈 세로 배치형의 스크류 기초 상세도는 그림 22와 같다.

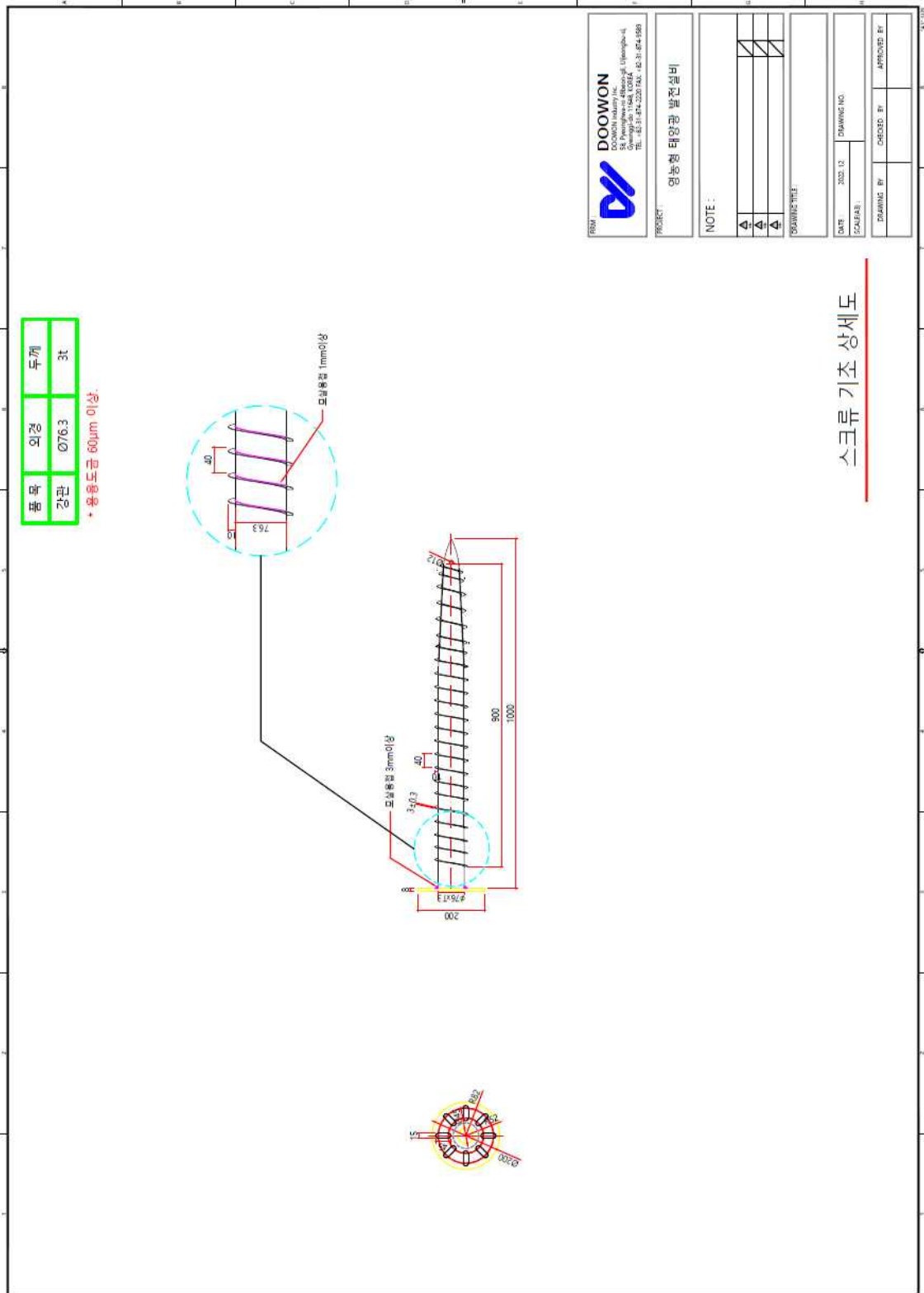


그림 22 모듈 세로 배치형의 스크류 기초 상세도

3.5 하부 기둥 간격 및 부재 규격 조정에 따른 안전적설심 및 안전풍속

본 설계서에서 제시되는 설계(안)을 적용하여, 현장 여건에 따라 하부 기둥 간격과 부재 규격 조정 시에는 지역별 설계적설심과 설계풍속이 제시되는 안전적설심 및 안전풍속을 초과하지 않도록 한다. 최종 계산된 결과는 3.5.1절 및 3.5.2절을 참고하도록 한다. 상이한 구조 형태를 적용할 경우에는 설계 여건에 적합하도록 구조 검토를 시행하여, 안전적설심 및 안전풍속을 수정하도록 한다.

3.5.1 모듈 가로 배치형

모듈 가로 배치형의 하부 기둥 간격과 부재 규격의 변화에 따른 안전적설심 및 안전풍속은 표 25와 같다.

표 25 영농형 태양광 모듈 가로 배치형의 안전적설심 및 안전풍속

기 둥 간 격 (m)	부재 규격									
	∅ 101.6×4.0t		∅ 114.3×3.2t		∅ 114.3×4.5t		∅ 139.8×3.6t		∅ 139.8×4.5t	
	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)
3.0	218	33	220	34	225	39	230	42	232	46
3.5	191	31	192	31	193	36	196	39	197	42
4.0	178	29	179	29	181	33	182	36	183	39
4.5	167	27	168	27	170	31	173	33	173	36
5.0	159	25	160	25	162	28	164	30	165	33

3.5.2 모듈 세로 배치형

모듈 세로 배치형의 하부 기둥 간격과 부재 규격의 변화에 따른 안전적설심 및 안전풍속은 표 26과 같다.

표 26 영농형 태양광 모듈 세로 배치형의 안전적설심 및 안전풍속

기 둥 간 격 (m)	부재 규격									
	ø 101.6×4.0t		ø 114.3×3.2t		ø 114.3×4.5t		ø 139.8×3.6t		ø 139.8×4.5t	
	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)
4.0	151	29	151	29	151	33	151	35	151	38
4.5	136	28	136	28	136	32	136	34	136	37
5.0	122	27	122	27	122	31	122	33	122	36
5.5	111	27	111	27	111	30	111	32	111	35
6.0	102	26	102	26	102	30	102	32	102	34

3.6 기초 설치 조건에 따른 최소 근입깊이

본 설계서에서 제시되는 설계(안)을 적용하여, 현장 조건에 따라 기초 종류 별 최소 근입 깊이를 제시한다. 기초의 종류는 영농형 태양광에서 이용될 수 있는 강관말뚝과 스크류 파일을 대상으로 하며, 각각에 대하여 일반적인 범위의 지반 강도 및 밀도에 따라 설계를 수행하였다. 설계 시 제시된 하중조건 또는 지반조건이 상이한 경우 현장 여건에 적합하도록 기초의 종류와 규격 등을 수정하여 적용하며, 필요시 현장시험도 병행한다. 기초의 경우 인발력이 발생하는 경우에는 최소 근입깊이를 산정할 시 반드시 반영하여야 한다. 최종 계산된 결과는 3.6.1절 및 3.6.2절을 참고하도록 한다.

3.6.1 모듈 가로 배치형

모듈 가로 배치형에서 설계하중 작용 시 발생하는 최대압축하중 698.8 kgf를 바탕으로 산정된 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 표 27 및 표 28과 같다.

표 27 모듈 가로 배치형의 지반조건에 따른 강관 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

1.6 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	4.448	3.376	2.553
	30°	3.627	2.768	2.075
	35°	2.843	2.119	1.505
1.8 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	4.165	3.203	2.451
	30°	3.385	2.612	1.980
	35°	2.638	1.985	1.424
2.0 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.927	3.053	2.361
	30°	3.180	2.478	1.896
	35°	2.465	1.870	1.352

표 28 모듈 가로 배치형의 지반조건에 따른 스크류 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

1.6 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.573	2.176	1.452
	30°	2.601	1.723	1.158
	35°	2.117	1.299	1.000 (0.750)*
1.8 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.331	2.083	1.412
	30°	2.431	1.641	1.120
	35°	1.951	1.223	1.000 (0.709)*
2.0 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.126	2.000	1.376
	30°	2.286	1.569	1.084
	35°	1.812	1.156	1.000 (0.673)*

* 괄호 내 숫자의 경우 실제 산출된 값이지만, 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 고려해 강관 및 스크류 기초는 1.0 m 이상 확보 추천. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정 필요.

3.6.2 모듈 세로 배치형

모듈 세로 배치형에서 설계하중 작용 시 발생하는 최대압축하중 520.8 kgf를 바탕으로 산정된 강관 및 스크류 기초의 최소 근입깊이는 표 29 및 표 30과 같다.

표 29 모듈 세로 배치형의 지반조건에 따른 강관 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

1.6 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.773	2.713	1.936
	30°	3.049	2.190	1.521
	35°	2.354	1.619	1.009
1.8 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.530	2.577	1.863
	30°	2.841	2.067	1.454
	35°	2.179	1.514	1.000 (0.954)*
2.0 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	3.324	2.457	1.798
	30°	2.665	1.961	1.394
	35°	2.032	1.424	1.000 (0.906)*

표 30 모듈 세로 배치형의 지반조건에 따른 스크류 기초의 최소 근입깊이 (단위: m)

1.6 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	2.995	1.703	1.092
	30°	2.193	1.342	1.000 (0.814)*
	35°	1.723	1.000 (0.951)*	1.000 (0.364)*
1.8 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	2.787	1.633	1.065
	30°	2.046	1.279	1.000 (0.779)*
	35°	1.583	1.000 (0.895)*	1.000 (0.343)*
2.0 t/m ³		점착력 (kN/m ²)		
		0	10	20
내부마찰각	25°	2.612	1.571	1.039
	30°	1.921	1.223	1.000 (0.748)*
	35°	1.467	1.000 (0.839)*	1.000 (0.325)*

* 괄호 내 숫자의 경우 실제 산출된 값이지만, 현장 시공 시 필요한 최소 근입깊이를 고려해 강관 및 스크류 기초는 1.0 m 이상 확보 추천. 기초의 최소 근입깊이는 지반조건과 지지력에 관한 추가적인 자료를 바탕으로 엔지니어가 합리적으로 결정 필요.

제4장 영농형 태양광 시방서

4.1 일반사항

4.1.1 적용범위

본 시방서는 기술규격, 설계도면 등에 포함된 역무와 관련하여 영농형 태양광 발전설비에 공급되는 태양광 발전시스템의 기자재 제작, 시험 및 설치에 대하여 적용한다.

4.1.2 적용규격

- (1) 모든 기자재는 관련 법규 및 규정에 저촉되지 않도록 제작, 설치되어야 한다.
- (2) KS 인증 받은 설비를 우선 설치하여야 한다.

4.1.3 공급조건

- 위치 : 해발 1,000 m 이하
- 온도 : -25℃에서 90℃ 이상
- 습도 : 45 ~ 95%
- 풍속 : 각 지방 지역풍속

4.1.4 주요납품자재

4.1.4.1 태양전지 모듈

- (1) 태양광을 받아 직류전원을 발전시켜 부하전원을 공급한다.
- (2) 경량의 냉간 압연강판 또는 경금속 특수 알루미늄 재질을 사용하여 밀봉 처리되어 습기 침투를 방지한 제품을 사용한다.

4.1.4.2 인버터 및 접속반

- (1) 인버터는 태양전지 모듈 군으로부터 발전된 직류전원을 공급받아 교류전력으로 바꾸고 계통연계가 가능하며 항상 안정된 전력을 공급한다.
- (2) 접속반은 모듈 군으로부터 전류를 모아서 안정된 전력으로 인버터에 공급한다.
- (3) 인버터는 방열 및 통풍이 용이하며, 계통에 사고발생시 신속하고 안전하게 정지하고, 출력 및 상태를 감시하여 항상 최적의 상태로 동작되어야 한다.
- (4) 접속반은 전력을 공급하는 동안 각종 스위치의 조작이 용이해야 하며, 태양전지판의 각 채널별 전류 및 전압에 맞는 퓨즈를 사용하여야 한다.

4.1.4.3 구조물

- (1) 농지 위에 태양전지 모듈을 고정하면서 농기계의 출입 또한 용이한 태양광 지지 구조물이어야 한다.
- (2) 구조물 제작은 설계도면에 의거 제작하여 시공한다.

4.1.4.4 전기배선

- (1) 모듈에서 인버터에 이르는 배선을 위해 케이블을 사용한다.
- (2) 모듈 전용선 또는 난연성 케이블 (TFR-CV, F-CV, FR-CV 등)을 사용해야 하며 케이블이 지면 위에 설치되거나 포설되는 경우에는 피복에 손상이 발생하지 않게 조치하여야 한다.

4.1.5 시험 및 검사

- (1) 설비제작에 사용되는 주요부품은 시험 후 자체성적서나 시험성적서 제출을 원칙으로 한다.
- (2) 현장에 설치 후 관련법규에 의한 절연상태 및 접지저항 등을 시험한다.

4.1.6 감독원

감독원이라 함은 발주자가 지정한 관계직원 또는 감독원을 말한다.

4.2 설계 일반

- (1) 구조물은 영농을 영위할 수 있는 태양광 구조물로써 높이와 폭을 결정하며, 농기계의 출입과 작업이 원활하여야 한다.
- (2) 태양광 모듈의 배치는 농작물의 생육에 필요한 적정량의 일사량을 고려하여 배치한다.
- (3) 발전효율 향상을 위하여 계절별 각도조절을 위한 가변형으로 설치할 수 있다.
- (4) 가변형 구동기계장치는 지면에서 충분한 높이에 설치하여 농기계의 작업으로 손상되지 않도록 한다.
- (5) 지지대 및 구조 설계는 수평면에 설치하는 것을 원칙으로 한다.
- (6) 구조물의 설계는 설치지역의 설계하중을 적용한 구조기술사의 구조계산값을 적용하여 설계한다.
- (7) 어레이는 설치된 다음에 자중이나, 적설, 풍압, 지진 등으로 인한 진동에 충분히 견딜 수 있는 기계적 강도를 가지고 있어야 한다.
- (8) 어레이를 구성하는 패널은 취급이 쉽고 점검 정비가 용이한 구조로 구성되어야 한다.

4.3 구조물 제작

- (1) 구조물은 강관·각관·H빔·T형강·C형강 등의 형강을 사용하며 볼트접합으로 조립 형성할 수 있도록 제작한다.
- (2) 구조물의 용접은 숙련공의 시행으로 액상침투탐상검사 이상의 품질시험에 합격한 제품이어야 한다.
- (3) 강재의 절단은 쇠톱 절단 및 프레스절단 위주로 하며, 열을 가하는 산소 절단은 하

지 않는다.

- (4) 형상 강재는 SS 275 이상의 제품으로 제작한다.
- (5) 구조물의 부식은 용융도금 처리 및 포스맥 제품 등을 사용하여 방지한다.
- (6) 용융도금 전 용접검사·용접후 슬래그 제거검사·치수검사 등을 철저히 하여 용융도금에 불량이 없도록 한다.

4.4 자재 운송

- (1) 자재의 운반 및 보관은 무리한 적재로 자재의 휨이나 손상이 가지 않도록 한다.
- (2) 자재 적재시에는 적당한 침목을 받쳐서 자재의 오염이나 변형을 방지한다.

4.5 기초 설치

- (1) 기초 시공은 시공 전 지반조사를 하여 적정 정착 깊이를 정한 후 시공에 임한다.
- (2) 스क्र류 파일 시공은 오거드릴을 이용하여 정위치에 나선시공으로 정착시킨다.
- (3) 스क्र류 파일 정착은 지면하단 0.1 m 지점까지 마감한 후, 구조물과 연결조립하여 흠을 채워 매립한다.
- (4) 기초 시공 후 인발 및 재하시험으로 구조계산서상의 적정치 값을 충족시킨다.

4.6 구조물 및 모듈 설치

- (1) 구조물의 조립은 주기둥 설치 → 주보 설치 → 보조보 설치 → 태양광지지기둥·보 설치 → 퍼린 설치 → 모듈 설치 순으로 하여 마감한다.
- (2) 각 구조물을 체결 접합하는 볼트 및 너트는 용융도금 또는 SUS 제품이어야 한다.
- (3) 구조물 볼트의 조임은 $\phi 12 \text{ mm} = 428 \text{ kg} \cdot \text{f/cm}$ 이상, $\phi 8 \text{ mm} = 127 \text{ kg} \cdot \text{f/cm}$ 이상, $\phi 6 \text{ mm} = 53 \text{ kg} \cdot \text{f/cm}$ 이상 등의 각 규격 적정 토크값을 지켜서 체결한다.
- (4) 태양전지모듈 설치시는 극성에 유의하여 모듈 결선 시에는 전원 구성을 정확히 한 후 도면에 따라 연결한다.
- (5) 균별로 연결된 태양전지 출력선에 대하여 위치를 확인할 수 있도록 표시하여야 하고, 준공시 감독관의 입회 하에 단락 전류 및 개방 전압 등을 확인하여 이상 없도록 하여야 한다.

4.7 전기공사

- (1) 공사에 사용되는 전선관은 설계도상에 명기한 종류와 굵기에 맞는 전선관 사용을 원칙으로 한다.
- (2) 전선 및 케이블을 전선관 및 케이블 트레이 내부로 입선시 전선간 및 케이블 트레이 내부에 있는 이물질 및 수분을 완전히 제거한 후 입선하여야 한다.
- (3) 전선의 접속은 전선로의 전기저항이 증가하거나 절연저항 및 인장강도가 감소하지

않도록 시행한다.

- (4) 전선의 접속을 위하여 절연물을 제거할 때에는 전선의 심선이 손상을 받지 않도록 와이어 스트리퍼 등으로 제거한다.
- (5) 전기설비기술에서 정하고 있는 접기저항값이 유지될 수 있도록 현장에 맞는 접지 공사를 한다.
- (6) 접지극은 가능한 한 습기가 있고 부식의 우려가 없는 장소에 매설 또는 타입한다.
- (7) 접지선에는 퓨즈 등의 과전류 차단기를 설치해서는 안된다.
- (8) 맨홀 및 핸드홀의 크기, 구조는 설계도에 따라 케이블의 인입 및 굴곡에 충분한 것으로 하고, 구조는 통상 콘크리트 제품으로 하고, 지정 개소에 배수설비를 한다. 뚜껑은 가능한 물이 침입하지 못하는 구조의 것으로 하고, 차량 기타 중량물의 압력을 받을 우려가 있는 장소에서는 이에 견디는 구조로 한다. 맨홀의 벽에는 케이블 및 접속부를 지지하기 위하여 벽에 지지물을 견고하게 설치하고, 지지금물에 지지대를 설치한다.
- (9) 관로의 매입 또는 관통은 감독원의 지시에 따라 구조물의 구조 및 강도에 지장이 없도록 한다.
- (10) 관 상호간의 접속은 카프링 또는 나사없는 카프링을 사용하고 결합을 단단히 한다. 관과 박스 또는 분전반, 폴박스 등과의 접속이 나사로 되어 있지 않은 것은 내외면에 로크너트를 사용하여 접속부분을 조이고 다시 관끝에는 붓싱을 설치한다.
- (11) 관 상호 및 박스 또는 분전반, 폴박스 등과의 접속부분에서 전기적 접속이 불완전해질 우려가 있는 경우는 동선 본드를 사용한다.
- (12) 노출 금속관 공사에서는 박스 및 부속품과 관의 나사들간 접속으로 결합을 견고히한다.
- (13) 배관의 1구간이 20 m를 넘는 경우 또는 기술상 필요로 하는 곳은 중간 박스 (폴박스 또는 조인트박스 등)를 설치한다.

4.8 배전설비 설치

- (1) 변압기는 반입 및 설치 시 충격을 받지 않도록 주의해야 하며, 통신 전에 변압기류의 절연내력 시험 등을 해야 한다.
- (2) 교류 차단기는 바닥에 수평이 되도록 볼트로 완전히 고정시키고 조작기구 및 접촉부분의 조정 등은 정확히 하여야 한다.
- (3) 개폐기, 단로기 등을 가내에 설치할 때는 조작할 때의 하중으로 빔 등이 처지지 않도록 견고히 고정한다.

[부록 1] 구조검토계산서 (모듈 가로 배치형)

문서번호

구조 검토 계산서

태양광 구조물 (풍속 26m/s)

영농형 태양광 발전소 모듈 가로 배치형

2022. 04

			작성자	검토자
			이한이	조기연
				
1	2022-04-22			
번호	날짜	내용		
<p>(주)홍익하이테크 Hongik High-Tech. Co., Ltd.</p> <p>서울특별시 성동구 용답동 235-10 승산빌딩 9층 TEL. 02-567-5204 FAX. 02-445-0443 E-mail hongik5204@naver.com</p>			건축구조기술사	
			김재욱	
				

구조 안전 확인서

1. 공 사 명 : 영농형 태양광 발전소
2. 위 치 : 경기 수원시 서둔동 103-2
3. 내 용 :

상기 태양광 발전설비에 대하여 국가 건설기준코드(KDS 41 10 05)에 의해 고정하중, 적설하중, 풍하중을 적용하여 구조검토를 수행하였으며, 그에 따라 시공 후 태양광 발전 시설이 구조적으로 안전함을 확인합니다.

건 축 구 조 기 술 사
자격번호

김 재 욱



목 차

검토 결과 요약

1. 검토 조건

구조물 설치 개요
검토 하중
검토 방법
검토 프로그램
참고 문헌
특기 사항

2. 설계 도면

3. 검토 하중

자 중
적설 하중
풍 하중
하중 조합

4. 구조 검토

구조해석 모델링
해석 결과
전산해석 결과 DATA
부재 단면 검토

첨 부

검토 결과 요약

0. 검토 결과 요약

태양광 발전 시설 부재 검토 결과 (Type1)

구분		결과	허용	RATIO	판정
다리					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	6.853	149.195	0.046	O.K
	휨응력 검토 (My)	0.000	165.000	0.000	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	66.523	165.000	0.403	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.452	1.000	0.452	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.445	1.000	0.445	O.K
	전단응력 검토	3.373	110.000	0.031	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	4.395	149.195	0.029	O.K
	휨응력 검토 (My)	0.000	165.000	0.000	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	67.831	165.000	0.411	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.443	1.000	0.443	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.438	1.000	0.438	O.K
	전단응력 검토	3.373	110.000	0.031	O.K
보					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.598	153.620	0.004	O.K
	휨응력 검토 (My)	9.831	165.000	0.060	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.346	165.000	0.002	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.066	1.000	0.066	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.065	1.000	0.065	O.K
	전단응력 검토	4.154	110.000	0.038	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.171	153.620	0.001	O.K
	휨응력 검토 (My)	34.028	165.000	0.206	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.207	1.000	0.207	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.207	1.000	0.207	O.K
	전단응력 검토	4.154	110.000	0.038	O.K
브레싱					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.698	41.151	0.017	O.K
	휨응력 검토 (My)	3.928	165.000	0.024	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.063	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.042	1.000	0.042	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.028	1.000	0.028	O.K
	전단응력 검토	0.156	110.000	0.001	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.004	41.151	0.000	O.K
	휨응력 검토 (My)	5.074	165.000	0.031	O.K
	휨응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.031	1.000	0.031	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.031	1.000	0.031	O.K
	전단응력 검토	0.156	110.000	0.001	O.K

구분		결과	허용	RATIO	판정
다리2					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	2.511	158.877	0.016	O.K
	힘응력 검토 (My)	0.036	165.000	0.000	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.016	1.000	0.016	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.015	1.000	0.015	O.K
	전단응력 검토	4.765	110.000	0.043	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	1.714	158.877	0.011	O.K
	힘응력 검토 (My)	19.312	165.000	0.117	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.128	1.000	0.128	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.127	1.000	0.127	O.K
	전단응력 검토	4.765	110.000	0.043	O.K
거더2					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.087	129.807	0.001	O.K
	힘응력 검토 (My)	3.446	165.000	0.021	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.214	165.000	0.001	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.023	1.000	0.023	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.023	1.000	0.023	O.K
	전단응력 검토	0.224	110.000	0.002	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.007	129.807	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	4.572	165.000	0.028	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.214	165.000	0.001	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.029	1.000	0.029	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.029	1.000	0.029	O.K
	전단응력 검토	0.224	110.000	0.002	O.K
보2					
축력 최대	축방향 압축 응력 검토	0.019	123.908	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	0.423	165.000	0.003	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.008	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.003	1.000	0.003	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.003	1.000	0.003	O.K
	전단응력 검토	0.076	110.000	0.001	O.K
모멘트 최대	축방향 압축 응력 검토	0.002	123.908	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	0.562	165.000	0.003	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.008	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.003	1.000	0.003	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.003	1.000	0.003	O.K
	전단응력 검토	0.076	110.000	0.001	O.K

1. 검토 조건

1. 검토 조건

1) 구조물 설치 개요

- 시설명 : 영농형 태양광 발전소 (1 TYPE)
- 설치 장소 : 경기 수원시 서둔동 103-2

2) 검토 하중

- 자중은 부재 재질 및 규격에 따라 프로그램에서 자동 재하
- 풍하중 및 설하중 계산은 국가 건설기준코드 KDS 41 10 05 (건축구조기준 설계하중)에 따름

3) 검토 방법

- 허용응력 설계법

4) 검토 프로그램

- MIDAS GEN

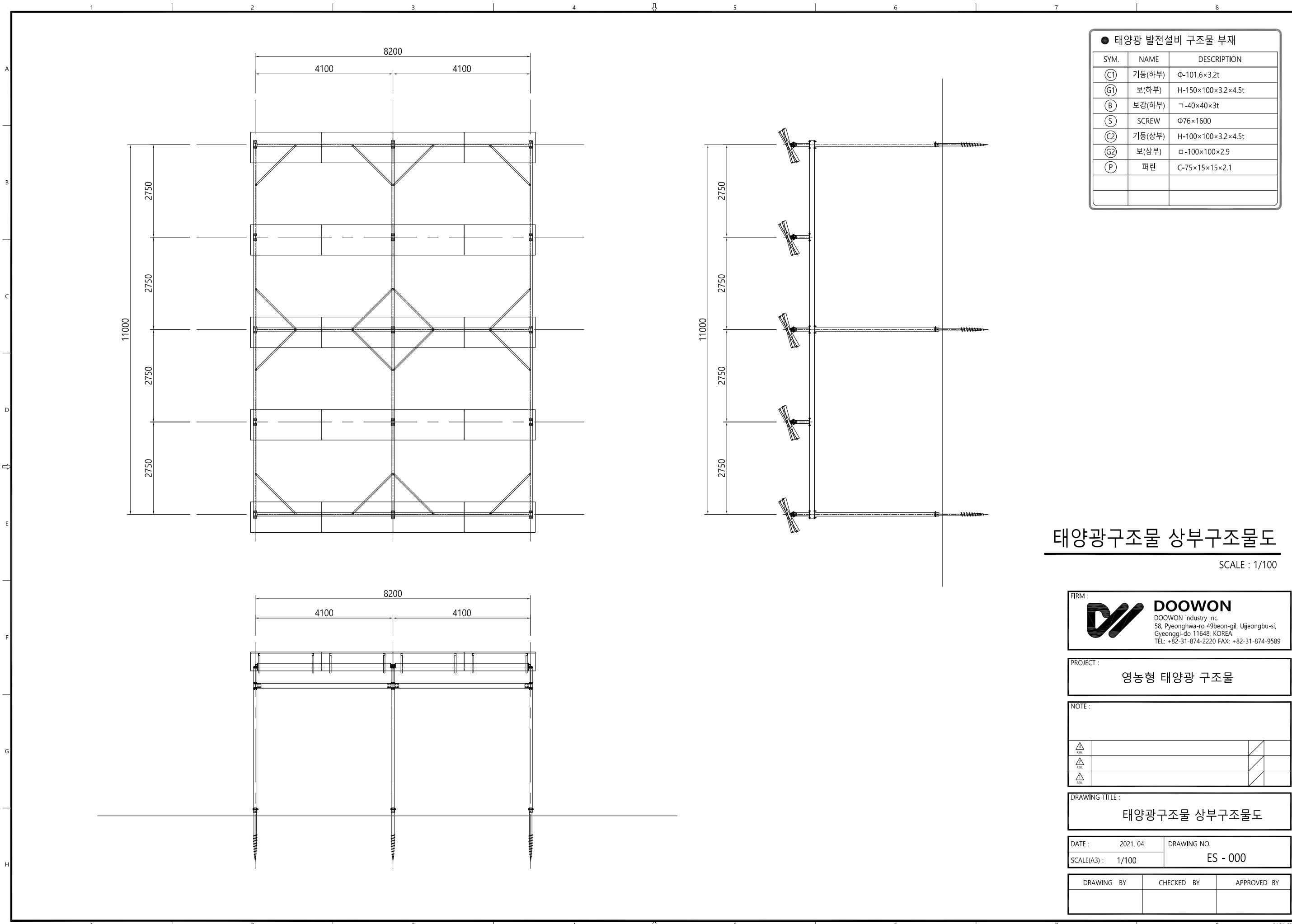
5) 참고 문헌

- 국가 건설기준 코드 강구조 설계(KDS 14 30) - 국토 교통부, 2019년
- 국가 건설기준 코드 건축구조기준 설계하중(KDS 14 10 15) - 국토 교통부, 2019년
- 국가 건설기준 코드 콘크리트용 앵커 설계기준(KDS 14 20 54) - 국토 교통부, 2016년

6) 특기 사항

- 부재 간 연결부 검토 및 변위 검토는 제외하였음
- MIDAS GEN 전산 해석 결과 부재력을 통해 태양광 구조물을 구성하는 각 부재의 안정성을 검토
- 시공시, 본 구조검토서에서 적용한 것과 상이한 조건이 발생할 경우, 설계자의 승인을 득한 후 시공하여야 함

2. 설계 도면



● 태양광 발전설비 구조물 부재

SYM.	NAME	DESCRIPTION
(C1)	기둥(하부)	Φ-101.6×3.2t
(G1)	보(하부)	H-150×100×3.2×4.5t
(B)	보강(하부)	ㄱ-40×40×3t
(S)	SCREW	Φ76×1600
(C2)	기둥(상부)	H-100×100×3.2×4.5t
(G2)	보(상부)	□-100×100×2.9
(P)	퍼런	C-75×15×15×2.1

태양광구조물 상부구조물도

SCALE : 1/100

FIRM : **DOOWON**
 DOOWON industry Inc.
 58, Pyeonghwa-ro 49beon-gil, Uijeongbu-si,
 Gyeonggi-do 11648, KOREA
 TEL: +82-31-874-2220 FAX: +82-31-874-9589

PROJECT :
영농형 태양광 구조물

NOTE :

△ REV		
△ REV		
△ REV		

DRAWING TITLE :
태양광구조물 상부구조물도

DATE : 2021. 04.	DRAWING NO. ES - 000
SCALE(A3) : 1/100	

DRAWING BY	CHECKED BY	APPROVED BY

3. 검토 하중

3. 검토 하중

1) 자중

- 해석 프로그램의 Self Weight 기능을 사용하여 재하
- 강재 단위중량 : 76.980 kN/m³ 적용
- 패널 단위중량 : 2.900 kN/m³ 적용

2) 적설하중

- 구조물의 형태, 기울기 등에 따라 KDS 41 10 15에서 규정하는 경사지붕적설하중 기준에 따라 다음 식에 따라 산정함

$$S_s = C_s \times S_f \quad (\text{kN/m}^2)$$

- C_s : 경사도계수

적설면의 표면 상태, 기울기, 눈이 미끄러지는 정도를 고려하여 정하며, 본 검토에서는 패널 위에서 눈이 미끄러지지 않는 상태로 가정하여 **경사도 계수 1.0** 으로 적용함

- S_f : 평지붕 적설하중

$$S_f = C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g \quad (\text{kN/m}^2)$$

- C_b : 기본 지붕 적설하중계수

기본지붕적설하중계수는 일반적으로 **0.7**로 함 (KDS 41 10 15, 2019, p.25)

- C_e : 노출계수

주 변 환 경	노출계수
A. 지형, 높은구조물, 나무 등 주변 현황에 의해 모든 면이 바람막이가 없어 노출된 지붕이 있는 거센 바람 부는 지역	0.80
B. 약간의 바람막이가 있는 거센 바람 부는 지역	0.90
C. 바람에 의한 눈의 제거가 지형, 높은 구조물 또는 근처의 몇몇 나무들 때문에 지붕 하중의 감소를 기대할 수 없는 위치	1.00
D. 바람의 영향이 많지 않은 지역 및 지형과 높은 구조물 또는 몇몇 나무들에 의하여 지붕에 바람막이가 있는 지역	1.10
E. 바람의 영향이 거의 없는 조밀한 숲 지역으로서, 촘촘한 침엽수 사이에 위치한 지붕	1.20

- C_t : 온도계수

주 변 환 경	온도계수
난방 구조물 (적설하중 제어구조)	1.00
비난방 구조물 (적설하중 비제어구조)	1.20

- I_s : 중요도계수

중요도	건축물의 용도 및 규모	중요도계수
특	· 연면적이 1,000㎡ 이상인 위험물 저장 및 처리시설, 종합병원, 병원, 방송국, 전신전화국, 발전소, 공공업무시설 및 노약자시설	1.20
1	· 연면적이 5,000㎡ 이상인 관람집회시설, 운동시설, 운수시설, 전시시설, 및 판매시설 · 5층 이상인 숙박시설, 오피스텔, 기숙사, 아파트 · 5층 이상의 학교	1.10
2	· 중요도(특), (1) 및 (3)에 해당하지 않는 건축물, 방음터널	1.00
3	· 가설 건축물, 농가 건축물 및 소규모 창고	0.80

- S_g : 기본지상적설하중 (kN/㎡)

지 역	기본지상 적설하중 (kN/㎡)
서울, 수원, 춘천, 서산, 충주, 대전, 추풍령, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부여, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포, 진주, 이천	0.50
정읍, 울진	0.65
인 천	0.80
속 초	2.00
강 릉	3.00
울릉도, 대관령	7.00

• 적설하중 산정

$$\begin{aligned}
 S_s &= C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g \\
 &= 0.7 \times 1.0 \times 1.2 \times 1.0 \times 0.5 = 0.42 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

3) 풍하중

- 구조물에 작용하는 풍하중은 다음 식에 따라 산정함

$$p_f = (1/2) \cdot \rho \cdot V_d^2 \cdot G_f \cdot C_f$$

- ρ : 공기 밀도로서 균일하게 1.22kg/m³으로 한다(KDS 41 10 15) = 1.22 kg/m³
- V_d : 설계 풍속으로 다음식에 따라 산정함

$$V_d = V_o \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_w$$

- V_o : 지역별 기본 풍속 (m/s) KDS 41 10 15 : 2019

지 역		풍속
서울특별시 인천광역시 경기도	웅진	30
	인천, 강화, 안산, 시흥, 평택	28
	서울, 김포, 구리, 수원, 군포, 오산, 화성, 의왕, 부천, 고양, 안양, 과천, 광명, 의정부, 동두천, 양주, 파주, 포천, 남양주, 가평, 하남, 성남, 광주, 양평, 용인	26
	안성, 연천, 여주, 이천	24
강원도	속초, 양양, 강릉, 고성	34
	동해, 삼척, 홍천, 정선, 인제	30
	양구	26
	철원, 화천, 춘천, 횡성, 원주, 평창, 영월, 태백	24
대전광역시 충청남북도	서산, 태안	34
	당진	32
	서천, 보령, 홍성, 청주, 청원	30
	예산, 세종, 대전, 공주, 부여	28
	아산, 계룡, 진천	26
부산광역시 대구광역시 울산광역시 경상남북도	천안, 증평, 청양, 논산, 금산, 음성, 충주, 제천, 단양, 괴산, 보은, 영동, 옥천	24
	울릉(독도)	40
	부산	38
	포항, 경주, 기장, 통영, 거제	36
	양산, 김해, 남해, 울산, 울주	34
	영덕, 고성	32
	울진, 창원, 사천, 영천	30
	청송, 대구, 경산, 청도, 밀양, 하동	28
	영양, 군위, 칠곡, 성주, 달성, 함안, 고령, 창녕, 진주	26
	봉화, 영주, 예천, 문경, 상주, 추풍령, 안동, 의성, 구미, 김천, 의령, 거창, 산청, 함천, 함양	24
광주광역시 전라남북도	완도, 해남	36
	진도, 여수, 고흥, 신안, 무안, 장흥	34
	목포, 부안, 영암, 강진	32
	영광, 함평, 나주	30
	익산, 김제, 순천, 고창, 광양	28
	광주, 보성, 완주, 전주, 장성	26
	무주, 진안, 장수, 임실, 정읍, 순창, 남원, 담양, 곡성, 구례	24
제주도	서귀포, 제주	44

- K_{zt} : 풍속고도분포계수로 주변 지역의 지표면상태에 따라 아래구분에 따라 정함

지표조도구분	주변 환경
A	대도시 중심부에서 고층건축물(10층 이상)이 밀집해 있는 지역
B	수목, 높이 3.5m 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있는 지역 중층 건물 (4~9층)이 산재해 있는 지역
C	높이 1.5~10m정도의 장애물이 산재해 있는 지역 수목, 저층건축물이 산재해 있는 지역
D	장애물이 거의 없고, 주변 장애물의 평균높이가 1.5m 이하인 지역 해안, 초원, 비행장

지표조도구분	A	B	C	D	비 고
z_b	20	15	10	10	대기 경계층 시작높이(m)
Z_g	550	450	350	350	기준경도풍높이(m)
α	0.33	0.22	0.15	0.15	풍속고도분포지수

지표면으로부터 높이 Z(m)	지표면 조도구분에 따른 풍속고도분포계수 K_{zt}			
	A	B	C	D
$z \leq Z_b$	0.58	0.81	1.0000	1.13
$Z_b < z \leq Z_g$	$0.22 z^\alpha$	$0.45 z^\alpha$	$0.71 z^\alpha$	$0.97 z^\alpha$

지표조도구분 C, 구조물의 지표로부터 높이 $z = 2.1m$ 로 위의 구분에 따라

풍속고도분포계수 K_{zt} = 1.00

- K_{zt} : 지형계수 = 1.0

산, 언덕 및 경사지의 영향을 받지 않는 평탄한 지역의 지형계수는 1.0 (KDS 14 10 15)

- I_w : 중요도계수로, KDS 41 10 05(건축구조기준 총칙)에서 정의한 건축물의
중요도 분류에 근거하여 아래 표에 따라 정함 (중요도 구분은 적설하중 참고)

중요도 분류	초고층건축물	특	1	2	3
중요도 계수 (I_w)	1.05	1.00		0.95	0.90

※ 초고층 건축물은 50층 이상 또는 200mm 이상인 건축물

- 설계 풍속 산정

$V_d = 26.0 \times 1.00 \times 1.0 \times 0.95 = 23.465 \text{ m/s}$

- G_f : 가스트 영향 계수

노풍도 구분	가스트 영향계수(G_f)	주변지역의 지표면 상태
A	2.5	대도시 중심부에서 10층이상의 대규모 고층건물이 밀집해 있는 지역
B	2.2	높이 3.5미터 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있는 지역과 중층건물이 산재해 있는 지역
C	1.9	높이 1.5~10미터 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있는 지역과 저층건물이 산재해 있는 지역
D	1.8	장애물이 거의 없고, 주변 장애물의 평균높이가 1.5미터 이하인 지역, 해안, 초원, 비행장

- C_f : 풍력 계수

단면형태	표준조건	C_f		
		$h_f/d=1$	$h_f/d=7$	$h_f/d=25$
사각형(면에 직각풍)	모든 경우	1.3	1.4	2.0
사각형(단면 대각선풍)	모든 경우	1.00	1.1	1.5
육각형 혹은 팔각형	모든 경우	1.00	1.2	1.4
원형($d\sqrt{qf} > 5.3$)	미끄러운 면	0.5	0.6	0.7
	거친 면($d'/d=0.02$)	0.7	0.8	0.9
	매우 거친 면($d'/d=0.08$)	0.8	1.00	1.2
원($d\sqrt{qf} \leq 5.3$)	모든 경우	0.7	0.8	1.2

- 풍하중 산정

$$\begin{aligned}
 p_f &= (1/2) \cdot \rho \cdot V_d^2 \cdot G_f \cdot C_f \\
 &= 0.5 \times 1.22 \times 23.5^2 \times 1.9 \times 1.1 = 701.968 \text{ N/m}^2 \\
 &= 0.702 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

4) 하중 조합

구분	하중조합	허용응력증가계수	하중 보정 계수
LC1	고정하중	1.00	1.00
LC2	고정하중 + 설하중	1.25	0.80
LC3-1	고정하중 + 풍하중(+X방향)	1.25	0.80
LC3-2	고정하중 + 풍하중(-X방향)	1.25	0.80
LC4-1	고정하중 + 풍하중(+Y방향)	1.25	0.80
LC4-2	고정하중 + 풍하중(-Y방향)	1.25	0.80
LC5-1	고정하중 + 설하중 + 풍하중(+X방향)	1.25	0.80
LC5-2	고정하중 + 설하중 + 풍하중(-X방향)	1.25	0.80
LC6-1	고정하중 + 설하중 + 풍하중(+Y방향)	1.25	0.80
LC6-2	고정하중 + 설하중 + 풍하중(-Y방향)	1.25	0.80

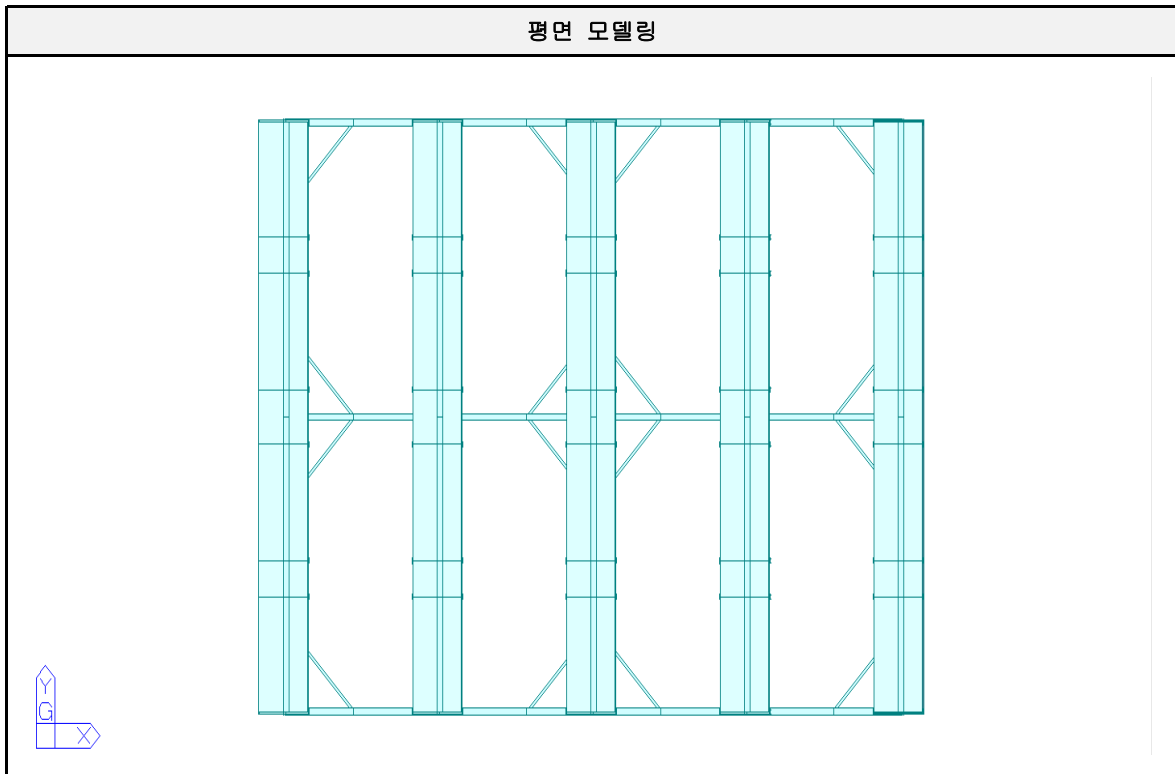
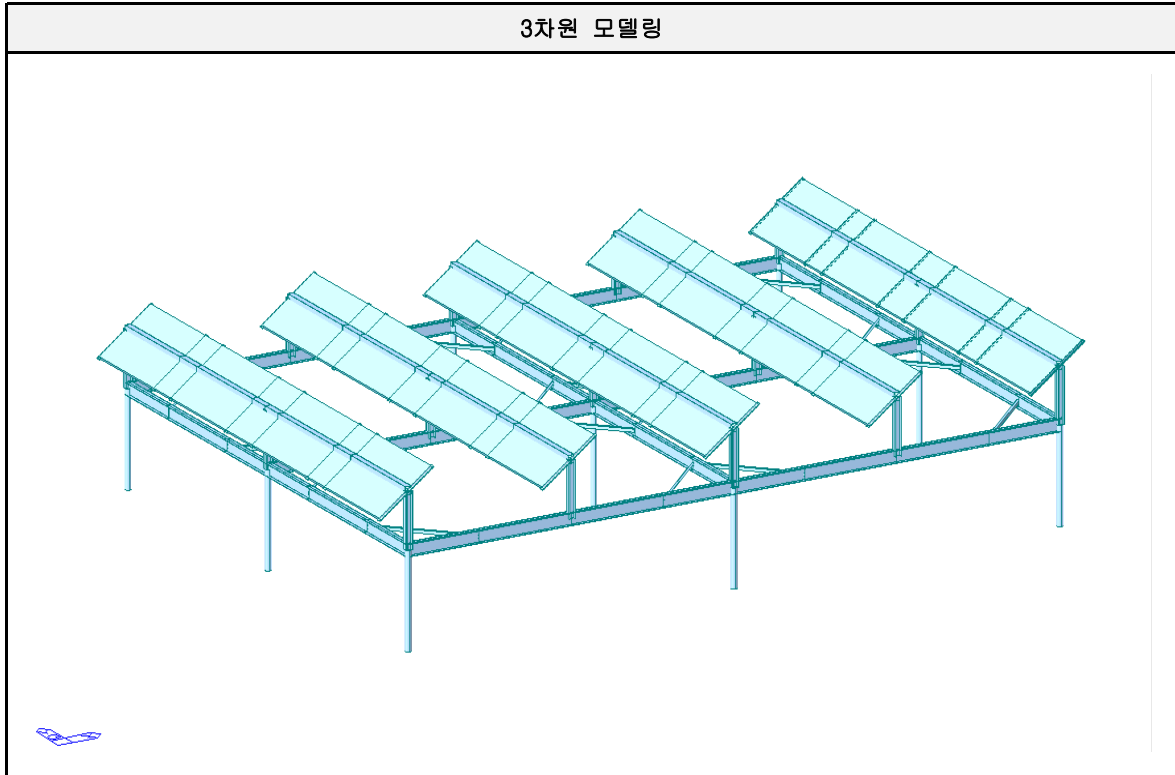
* 허용응력 증가계수는 국토교통부에서 제시한 KDS 14 30 05 (강구조 설계 일반사항, 허용응력 설계법)의 기준을 적용하였으며, 본 검토에서는 허용응력을 증가시키는 대신, 작용하중을 증가계수만큼 감하여 적용하였다.

4. 구조 검토

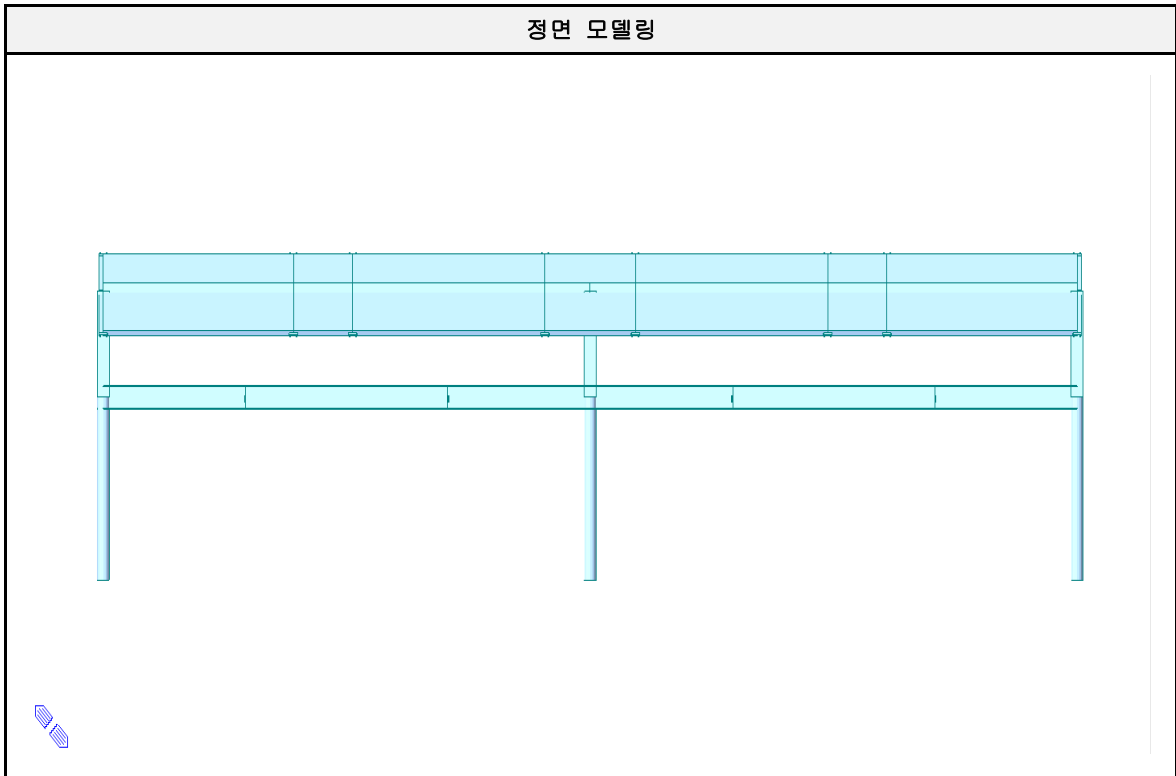
4 구조 검토

TYPE-1

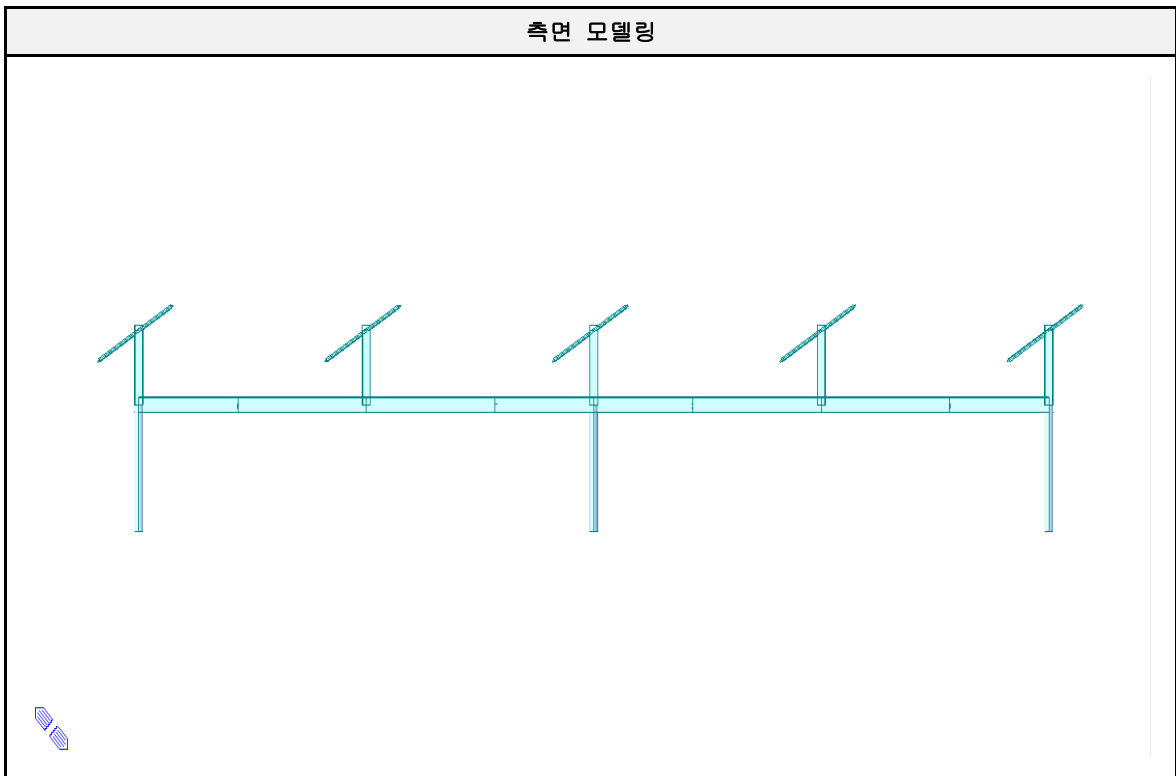
1) 구조해석 모델링(Type1)



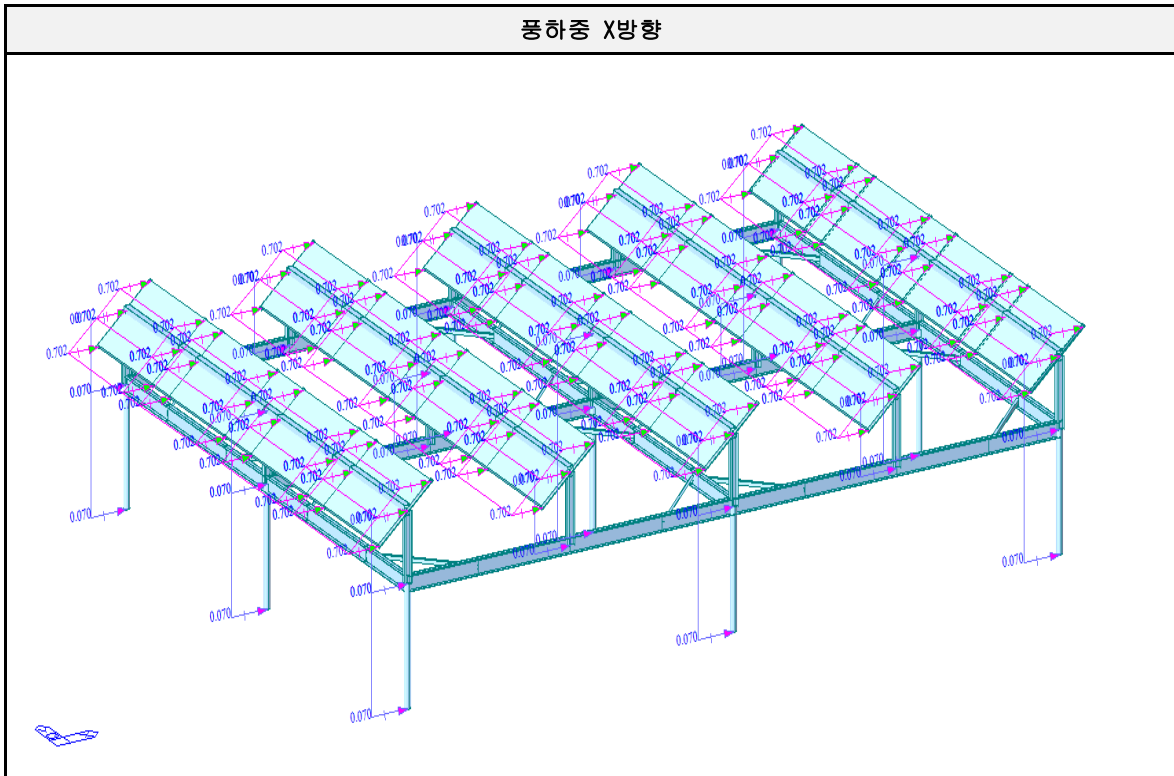
정면 모델링



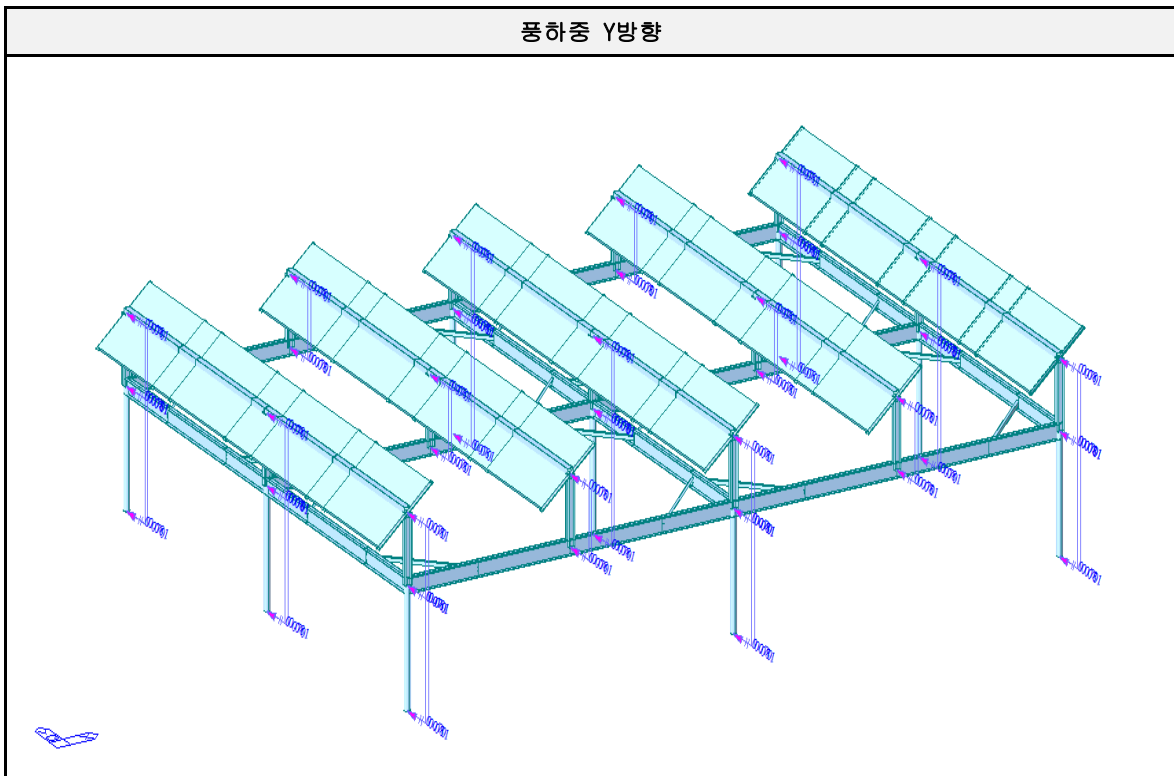
측면 모델링



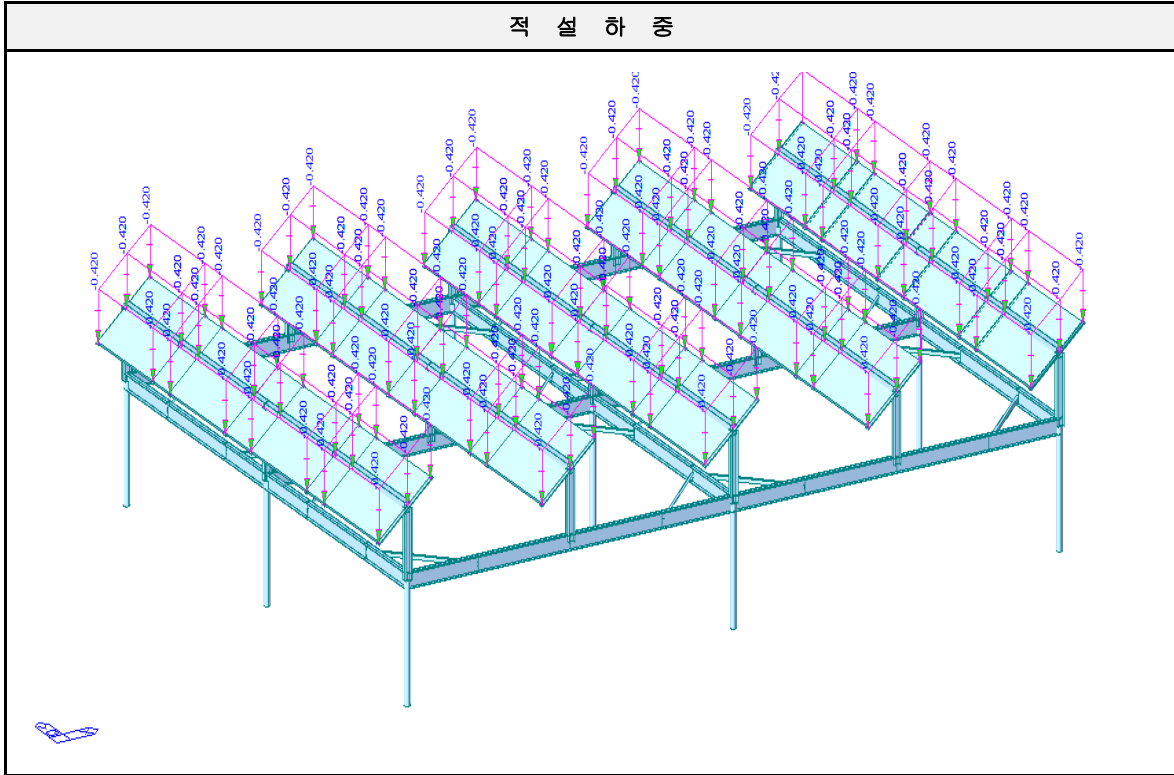
풍하중 X방향



풍하중 Y방향

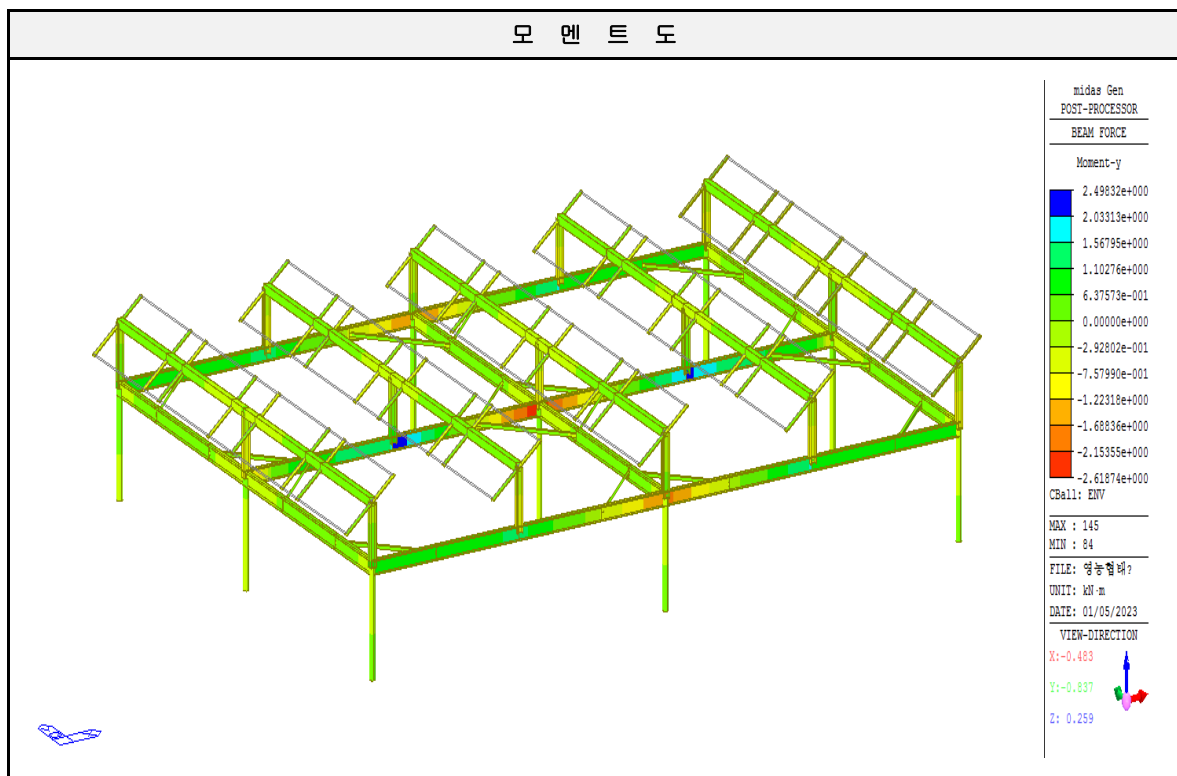
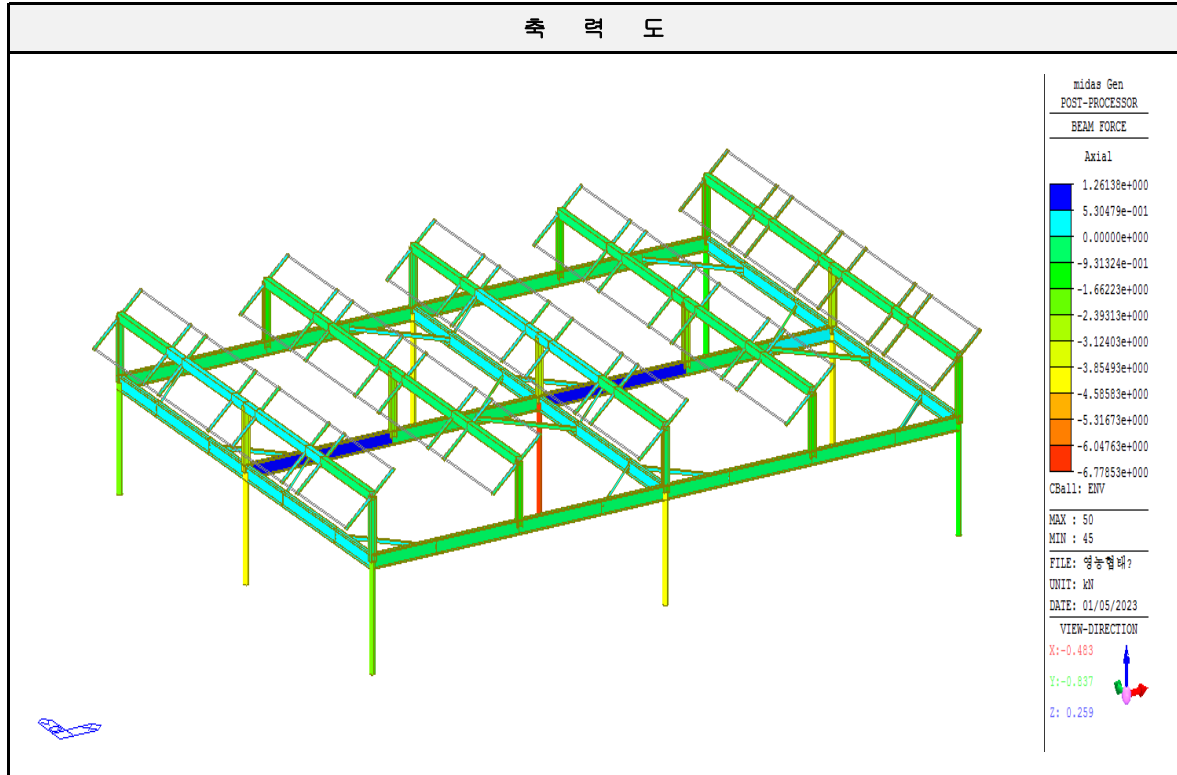


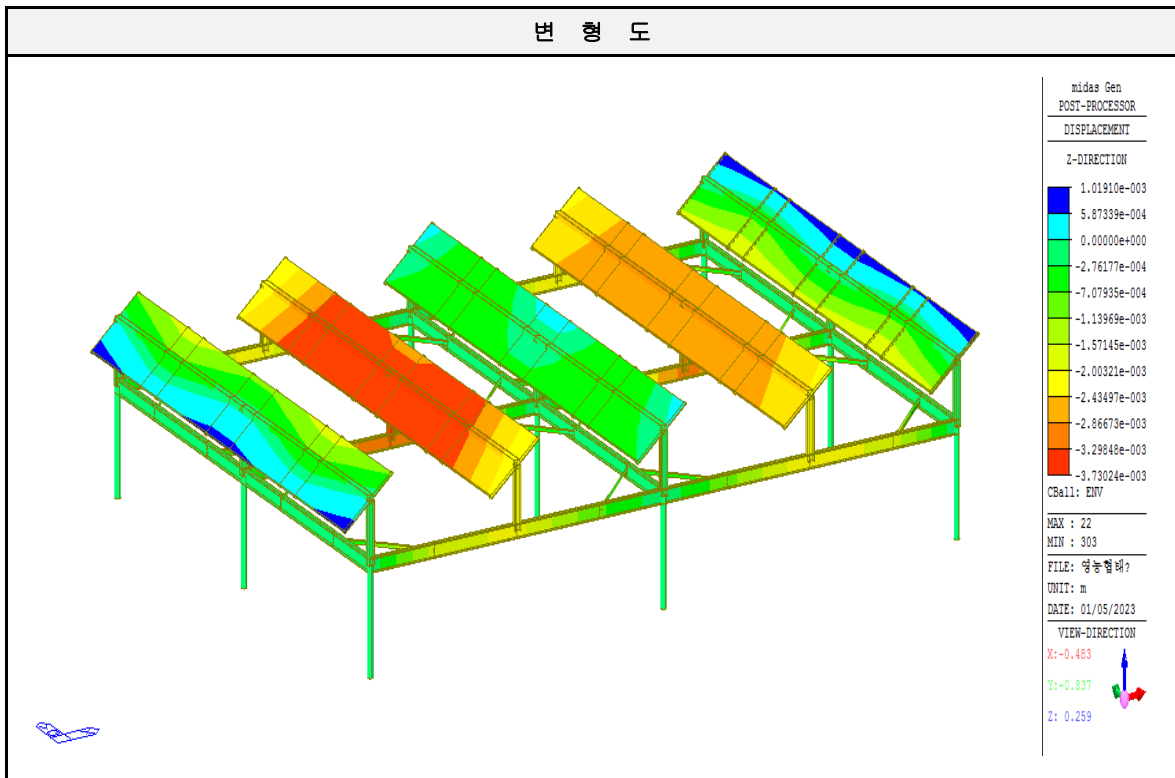
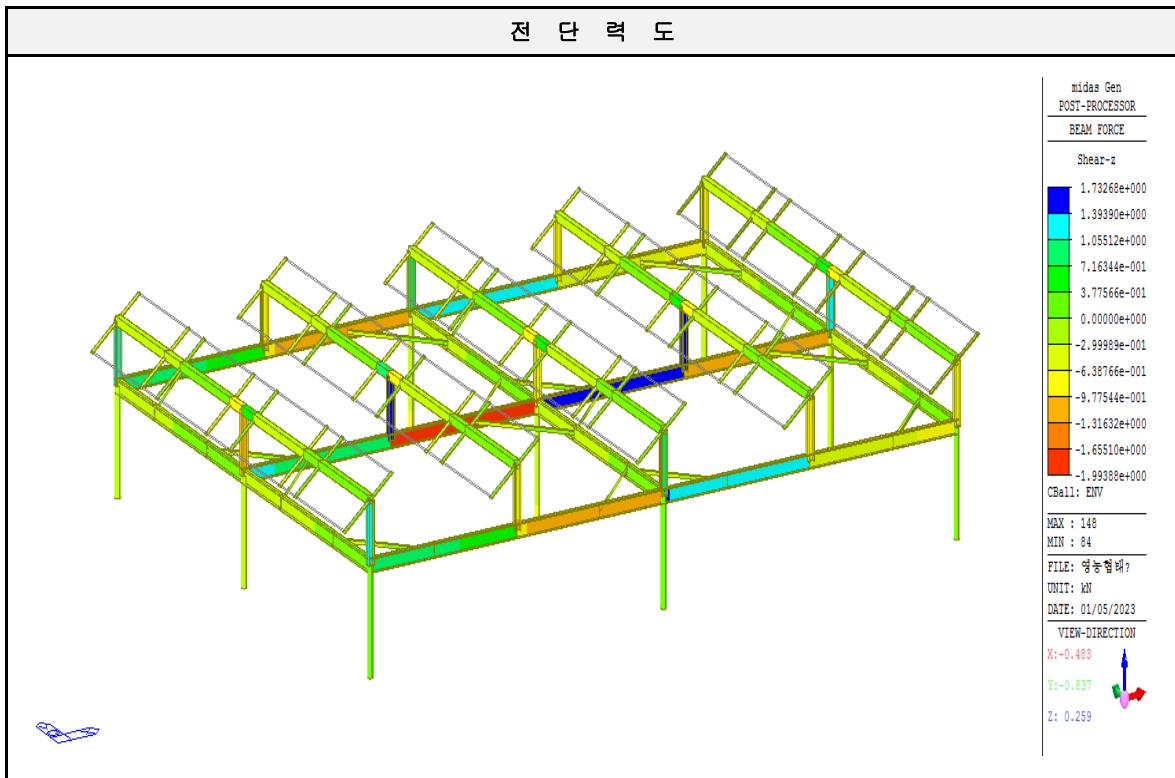
적 설 하 중

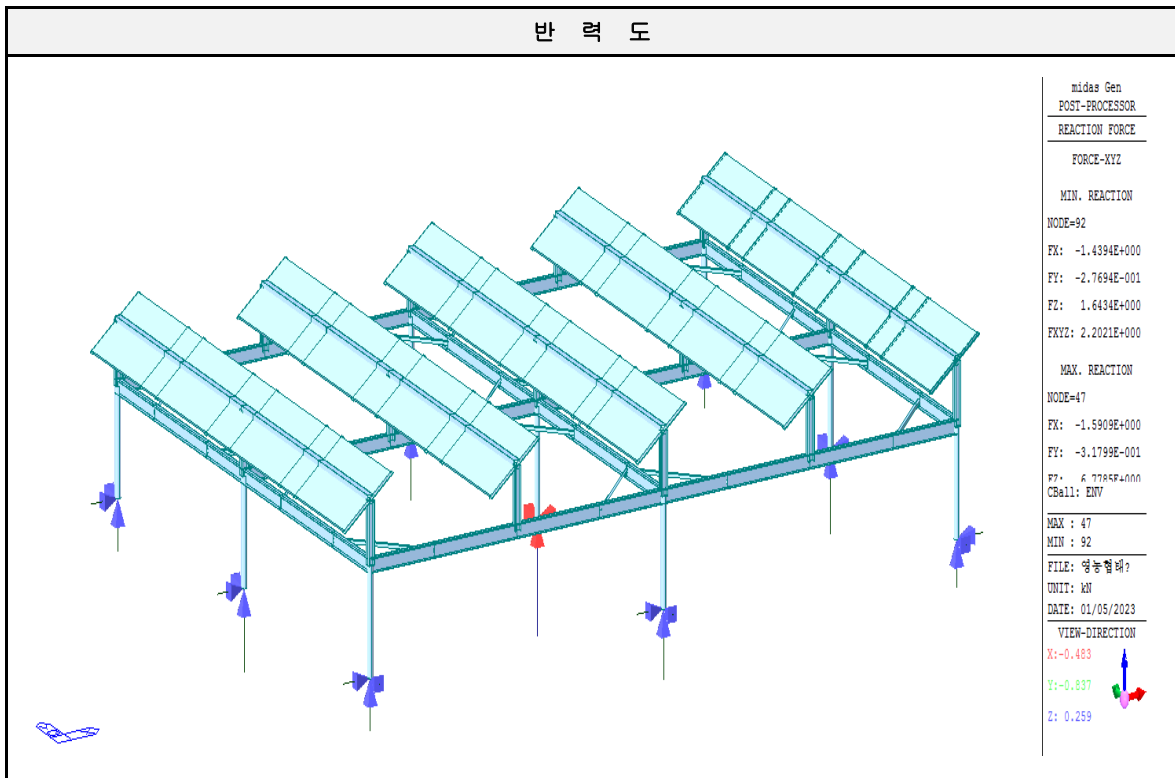
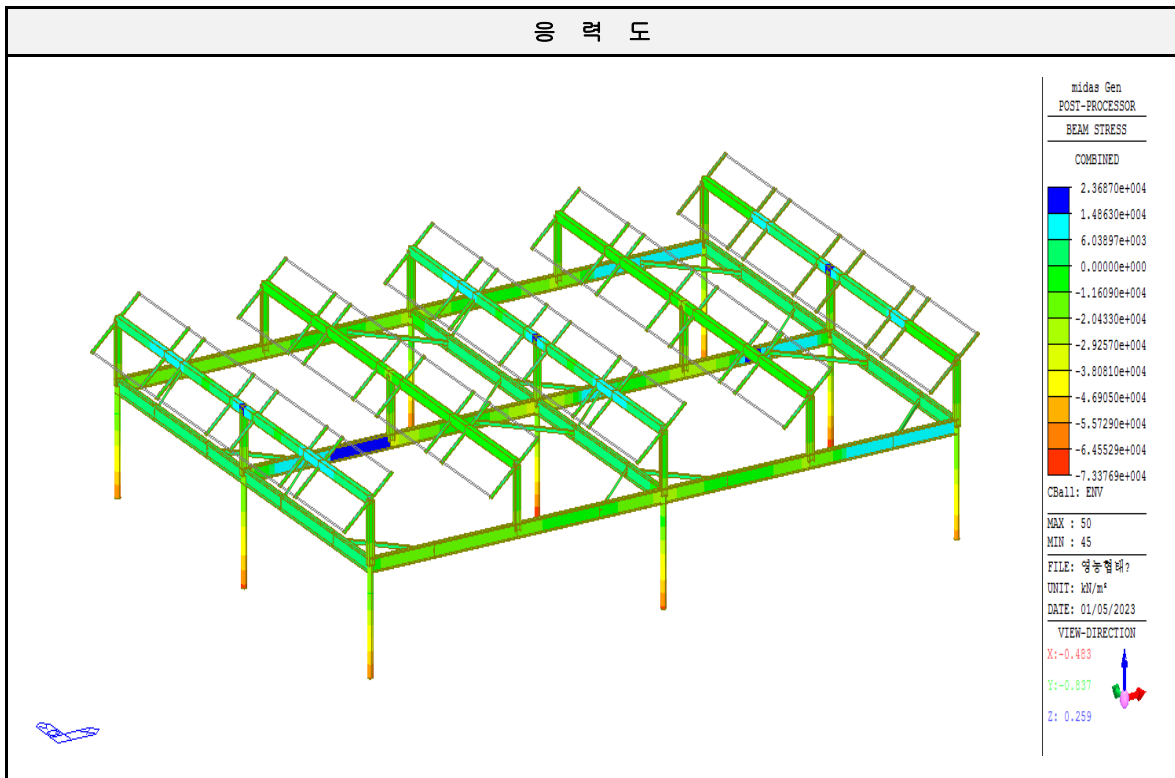


2) 해석 결과(Type1)

아래의 해석 결과는 각 하중 조합에 대해 최대 부재력이 발생할 경우의 값을 나타냄







3) 전산해석 결과 DATA (Type1)

구분	CASE	Fx (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
다리	축 력 최 대 시	LC1	3.808	0.000	0.039	0.129	0.010	
		LC2	6.114	0.000	0.083	0.233	0.008	
		LC3-1	3.711	0.000	1.519	1.538	0.008	
		LC3-2	2.382	0.000	1.457	1.475	0.008	
		LC4-1	3.047	0.254	0.031	0.103	0.323	
		LC4-2	3.047	0.254	0.031	0.103	0.323	
		LC5-1	6.779	0.000	1.571	1.668	0.008	
		LC5-2	5.450	0.000	1.405	1.537	0.008	
		LC6-1	6.114	0.254	0.083	0.233	0.323	
		LC6-2	6.114	0.254	0.083	0.233	0.323	
	최대값	6.779	0.000	1.571	1.668			
	모 멘 트 최 대 시	LC1	2.174	0.000	0.081	0.129	0.010	
		LC2	3.622	0.000	0.141	0.233	0.008	
		LC3-1	2.537	0.000	1.520	1.538	0.008	
		LC3-2	2.048	0.004	1.461	1.475	0.008	
		LC4-1	1.754	0.257	0.017	0.103	0.323	
		LC4-2	1.754	0.257	0.017	0.103	0.323	
		LC5-1	4.347	0.000	1.602	1.668	0.008	
		LC5-2	1.988	0.003	1.500	1.537	0.008	
		LC6-1	3.037	0.257	0.046	0.233	0.323	
LC6-2		3.037	0.257	0.046	0.233	0.323		
최대값	4.347	0.000	1.602	1.668				

구분	CASE	Fx (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
보	축 력 최 대 시	LC1	0.225	0.414	0.003	0.021	0.992	
		LC2	0.439	0.607	0.007	0.044	1.558	
		LC3-1	0.639	0.691	0.019	0.032	1.230	
		LC3-2	0.582	0.701	0.001	0.002	0.970	
		LC4-1	0.222	0.758	0.032	0.060	0.794	
		LC4-2	0.222	0.758	0.032	0.060	0.794	
		LC5-1	0.751	0.638	0.036	0.059	1.994	
		LC5-2	0.841	0.757	0.005	0.029	1.733	
		LC6-1	0.472	0.611	0.012	0.086	1.558	
		LC6-2	0.472	0.611	0.012	0.086	1.558	
	최대값	0.841	0.757	0.005	1.994			
	모 멘 트 최 대 시	LC1	0.001	1.331	0.000	0.021	0.992	
		LC2	0.001	2.242	0.000	0.044	1.558	
		LC3-1	0.267	1.557	0.000	0.032	1.230	
		LC3-2	0.352	1.258	0.000	0.002	0.970	
		LC4-1	0.001	1.064	0.011	0.060	0.794	
		LC4-2	0.001	1.064	0.011	0.060	0.794	
		LC5-1	0.240	2.619	0.000	0.059	1.994	
		LC5-2	0.148	2.436	0.000	0.029	1.733	
		LC6-1	0.001	2.242	0.011	0.086	1.558	
LC6-2		0.001	2.242	0.011	0.086	1.558		
최대값	0.240	2.619	0.000	1.994				

구분	CASE	Fx (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
브레싱	축 력 최 대 시	LC1	0.047	0.006	0.000	0.000	0.016	
		LC2	0.100	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC3-1	0.073	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC3-2	0.002	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC4-1	0.100	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC4-2	0.100	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC5-1	0.136	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC5-2	0.064	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC6-1	0.163	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC6-2	0.163	0.005	0.000	0.000	0.013	
	최대값	0.163	0.005	0.000	0.016			
	모 멘 트 최 대 시	LC1	0.001	0.006	0.000	0.000	0.016	
		LC2	0.001	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC3-1	0.001	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC3-2	0.001	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC4-1	0.078	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC4-2	0.078	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC5-1	0.001	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC5-2	0.001	0.005	0.000	0.000	0.013	
		LC6-1	0.075	0.005	0.000	0.000	0.013	
LC6-2		0.075	0.005	0.000	0.000	0.013		
최대값	0.001	0.006	0.000	0.016				

구분	CASE	Fx (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
다리2	축 력 최 대 시	LC1	1.246	0.180	0.000	0.125	0.257	
		LC2	2.652	0.405	0.000	0.139	0.557	
		LC3-1	1.473	0.262	0.000	0.122	1.192	
		LC3-2	0.520	0.550	0.000	0.079	0.822	
		LC4-1	0.997	0.144	0.036	0.175	0.206	
		LC4-2	0.997	0.144	0.036	0.175	0.206	
		LC5-1	3.129	0.002	0.000	0.160	1.525	
		LC5-2	2.176	0.811	0.000	0.118	1.173	
		LC6-1	2.652	0.405	0.036	0.214	0.557	
		LC6-2	2.652	0.405	0.036	0.214	0.557	
	최대값	3.129	0.002	0.000	1.525			
	모 멘 트 최 대 시	LC1	1.246	0.180	0.000	0.125	0.257	
		LC2	2.652	0.405	0.000	0.139	0.557	
		LC3-1	0.945	0.747	0.000	0.122	1.192	
		LC3-2	0.520	0.550	0.000	0.079	0.822	
		LC4-1	0.997	0.144	0.036	0.175	0.206	
		LC4-2	0.997	0.144	0.036	0.175	0.206	
		LC5-1	2.136	0.911	0.000	0.160	1.525	
		LC5-2	2.176	0.811	0.000	0.118	1.173	
		LC6-1	2.652	0.405	0.036	0.214	0.557	
LC6-2		2.652	0.405	0.036	0.214	0.557		
최대값	2.136	0.911	0.000	1.525				

구분	CASE	Fx (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
거더2	축 력 최 대 시	LC1	0.007	0.009	0.000	0.005	0.019	
		LC2	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		LC3-1	0.015	0.004	0.000	0.004	0.010	
		LC3-2	0.009	0.000	0.000	0.004	0.020	
		LC4-1	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC4-2	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC5-1	0.021	0.015	0.000	0.004	0.033	
		LC5-2	0.013	0.000	0.001	0.004	0.044	
		LC6-1	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		LC6-2	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		최대값	0.021	0.015	0.000	0.044		
	모 멘 트 최 대 시	LC1	0.007	0.009	0.000	0.005	0.019	
		LC2	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		LC3-1	0.003	0.005	0.000	0.004	0.010	
		LC3-2	0.001	0.009	0.000	0.004	0.020	
		LC4-1	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC4-2	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC5-1	0.021	0.015	0.000	0.004	0.033	
		LC5-2	0.002	0.020	0.000	0.004	0.044	
		LC6-1	0.012	0.018	0.000	0.004	0.039	
		LC6-2	0.012	0.018	0.000	0.004	0.039	
최대값	0.002	0.020	0.000	0.044				

구분	CASE	Fx (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
보2	축 력 최 대 시	LC1	0.007	0.009	0.000	0.005	0.019	
		LC2	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		LC3-1	0.015	0.004	0.000	0.004	0.010	
		LC3-2	0.009	0.000	0.000	0.004	0.020	
		LC4-1	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC4-2	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC5-1	0.021	0.015	0.000	0.004	0.033	
		LC5-2	0.013	0.000	0.001	0.004	0.044	
		LC6-1	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		LC6-2	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
	최대값	0.021	0.015	0.000	0.044			
	모 멘 트 최 대 시	LC1	0.007	0.009	0.000	0.005	0.019	
		LC2	0.012	0.017	0.000	0.004	0.039	
		LC3-1	0.003	0.005	0.000	0.004	0.010	
		LC3-2	0.001	0.009	0.000	0.004	0.020	
		LC4-1	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC4-2	0.005	0.007	0.000	0.004	0.015	
		LC5-1	0.021	0.015	0.000	0.004	0.033	
		LC5-2	0.002	0.020	0.000	0.004	0.044	
		LC6-1	0.012	0.018	0.000	0.004	0.039	
LC6-2		0.012	0.018	0.000	0.004	0.039		
최대값	0.002	0.020	0.000	0.044				

4) 부재단면검토 (Type1)

1 다리

1-1 단면 제원

- 부재 규격 : o-101.6*3.2T
- 재질 : SS275

단면적(A)	989.2	mm ²	전단면적(A)	494.6123	mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	1200000	mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	1200000	mm ⁴
단면2차반경(ry)	34.8	mm	단면2차반경(rz)	34.8	mm
탄성계수	205000	MPa	항복강도	275	MPa

1-2 검토하중

축력(kN)	휨모멘트-y(kN·m)	휨모멘트-z(kN·m)	전단력(kN)	비고
6.779	0.000	1.571	1.668	축력 최대시
4.347	0.000	1.602	1.668	모멘트 최대시

1-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

$$\text{좌굴 길이 계수 } K = 1$$

$$\text{좌굴 길이 } L = 1192 \text{ mm}$$

$$\text{단면 회전 반경 } r = 34.8 \text{ mm}$$

$$KL/r = 34.253$$

$$\text{한계 세장비 } C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r < C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 149.195 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

1-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 6779 / 989 = 6.853 \text{ MPa} < 149.195 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$\begin{aligned} f_{by} &= M_y / I \times y \\ &= 0 / 1200000 \times 50.800 \\ &= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK} \end{aligned}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$\begin{aligned} f_{bz} &= M_z / I \times y \\ &= 1571400 / 1200000 \times 50.800 \\ &= 66.523 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK} \end{aligned}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{6.853}{149.195} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{6.853}{899.732}\right) \times 165.000} \\ + \frac{1 \times 66.523}{\left(1 - \frac{6.853}{899.732}\right) \times 165.000} \\ = 0.452 < 1.0 \end{aligned}$$

∴ OK

$$\frac{6.853}{0.6 \times 275} + \frac{0.000}{165.000} + \frac{66.523}{165.000} = 0.445 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 34^2} = 899.732 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$\begin{aligned} f_v &= V / 0.5 A \\ &= 1668 / 495 = 3.373 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK} \end{aligned}$$

1-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 4347 / 989 = 4.395 \text{ MPa} < 149.195 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 0 / 1200000 \times 50.800 = 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 1602300 / 1200000 \times 50.800 = 67.831 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{4.395}{149.195} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{4.395}{899.732}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 67.831}{\left(1 - \frac{4.395}{899.732}\right) \times 165.000} = 0.443 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{4.395}{0.6 \times 275} + \frac{0.000}{165.000} + \frac{67.831}{165.000} = 0.438 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 34^2} = 899.732 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A$$

$$= 1668 / 495 = 3.373 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2 보

2-1 단면 제원

• 부재 규격 : H-150*100*3.2*4.5T • 재 질 : SS275

단면적(A)	1406.1381 mm ²	전단면적(A)	480 mm ²
단면2차모멘트(I _{yy})	5771861.425 mm ⁴	단면2차모멘트(I _{zz})	751138.8706 mm ⁴
단면2차반경(r _y)	64.1 mm	단면2차반경(r _z)	23.1 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

2-2 검토하중

축력(kN)	휨모멘트-y(kN·m)	휨모멘트-z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.841	0.757	0.005	1.994	축력 최대시
0.240	2.619	0.000	1.994	모멘트 최대시

2-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (F_t)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (F_c)

$$\text{좌굴 길이 계수 } K = 1$$

$$\text{좌굴 길이 } L = 1700 \text{ mm}$$

$$\text{단면 회전 반경 } r = 64.1 \text{ mm}$$

$$KL/r = 26.521$$

$$\text{한계 세장비 } C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$$

허용 압축응력 F_c (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r < C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 153.620 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (F_b)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (F_v)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

2-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 841 / 1406 = 0.598 \text{ MPa} < 153.620 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 756600 / 5771861 \times 75.000 = 9.831 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 5200 / 751139 \times 50.000 = 0.346 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.598}{153.620} + \frac{1 \times 9.831}{\left(1 - \frac{0.598}{1500.808}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.346}{\left(1 - \frac{0.598}{1500.808}\right) \times 165.000} = 0.066 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.598}{0.6 \times 275} + \frac{9.831}{165.000} + \frac{0.346}{165.000} = 0.065 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 27^2} = 1500.808 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 1994 / 480 = 4.154 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 240 / 1406 = 0.171 \text{ MPa} < 153.620 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 2618700 / 5771861 \times 75.000 = 34.028 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 0 / 751139 \times 50.000 = 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.171}{153.620} + \frac{1 \times 34.028}{\left(1 - \frac{0.171}{1500.808}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{0.171}{1500.808}\right) \times 165.000} = 0.207 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.171}{0.6 \times 275} + \frac{34.028}{165.000} + \frac{0.000}{165.000} = 0.207 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 27^2} = 1500.808 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 1994 / 480 = 4.154 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3 브레싱

3-1 단면 제원

- 부재 규격 : ㄱ-40*40*3T
- 재질 : SS275

단면적(A)	233.6	mm ²	전단면적(A)	100	mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	35300	mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	35300	mm ⁴
단면2차반경(ry)	12.3	mm	단면2차반경(rz)	12.3	mm
탄성계수	205000	MPa	항복강도	275	MPa

3-2 검토하중

축력(kN)	휨모멘트-y(kN·m)	휨모멘트-z(kN·m)	전단력(kN)	비고
0.163	0.005	0.000	0.016	축력 최대시
0.001	0.006	0.000	0.016	모멘트 최대시

3-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

$$\text{좌굴 길이 계수 } K = 1$$

$$\text{좌굴 길이 } L = 1970 \text{ mm}$$

$$\text{단면 회전 반경 } r = 12.3 \text{ mm}$$

$$KL/r = 160.163$$

$$\text{한계 세장비 } C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r > C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 41.151 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

3-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 163 / 234 = 0.698 \text{ MPa} < 41.151 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 4800 / 35300 \times 28.890 = 3.928 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 200 / 35300 \times 11.110 = 0.063 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.698}{41.151} + \frac{1 \times 3.928}{\left(1 - \frac{0.698}{41.151}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.063}{\left(1 - \frac{0.698}{41.151}\right) \times 165.000} = 0.042 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.698}{0.6 \times 275} + \frac{3.928}{165.000} + \frac{0.063}{165.000} = 0.028 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 160^2} = 41.151 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 16 / 100 = 0.156 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 1 / 234 = 0.004 \text{ MPa} < 41.151 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 6200 / 35300 \times 28.890 = 5.074 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 0 / 35300 \times 11.110 = 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.004}{41.151} + \frac{1 \times 5.074}{\left(1 - \frac{0.004}{41.151}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{0.004}{41.151}\right) \times 165.000} = 0.031 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.004}{0.6 \times 275} + \frac{5.074}{165.000} + \frac{0.000}{165.000} = 0.031 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 160^2} = 41.151 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 16 / 100 = 0.156 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4 다리2

4-1 단면 제원

• 부재 규격 : H-100*100*3.2*4.5T • 재 질 : SS275

단면적(A)	1246.1381 mm ²	전단면적(A)	320 mm ²
단면2차모멘트(I _{yy})	2359626.955 mm ⁴	단면2차모멘트(I _{zz})	751002.3373 mm ⁴
단면2차반경(r _y)	43.5 mm	단면2차반경(r _z)	24.5 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

4-2 검토하중

축력(kN)	휨모멘트-y(kN·m)	휨모멘트-z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
3.129	0.002	0.000	1.525	축력 최대시
2.136	0.911	0.000	1.525	모멘트 최대시

4-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (F_t)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (F_c)

$$\text{좌굴 길이 계수 } K = 1$$

$$\text{좌굴 길이 } L = 696 \text{ mm}$$

$$\text{단면 회전 반경 } r = 43.5 \text{ mm}$$

$$KL/r = 16.000$$

$$\text{한계 세장비 } C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$$

허용 압축응력 F_c (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r < C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 158.877 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (F_b)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (F_v)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

4-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 3129 / 1246 = 2.511 \text{ MPa} < 158.877 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 1700 / 2359627 \times 50.000 = 0.036 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 0 / 751002 \times 50.000 = 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{2.511}{158.877} + \frac{1 \times 0.036}{\left(1 - \frac{2.511}{4123.510}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{2.511}{4123.510}\right) \times 165.000} = 0.016 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{2.511}{0.6 \times 275} + \frac{0.036}{165.000} + \frac{0.000}{165.000} = 0.015 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 16^2} = 4123.510 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 1525 / 320 = 4.765 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 2136 / 1246 = 1.714 \text{ MPa} < 158.877 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y = 911400 / 2359627 \times 50.000 = 19.312 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y = 0 / 751002 \times 50.000 = 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.714}{158.877} + \frac{1 \times 19.312}{\left(1 - \frac{1.714}{4123.510}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{1.714}{4123.510}\right) \times 165.000} = 0.128 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{1.714}{0.6 \times 275} + \frac{19.312}{165.000} + \frac{0.000}{165.000} = 0.127 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 16^2} = 4123.510 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 1525 / 320 = 4.765 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

5 거더2

5-1 단면 제원

• 부재 규격 : LC-75*15*15*2.1T • 재 질 : SS275

단면적(A)	245.49 mm ²	전단면적(A)	195.685 mm ²
단면2차모멘트(I _{yy})	163234.8662 mm ⁴	단면2차모멘트(I _{zz})	7048.7685 mm ⁴
단면2차반경(r _y)	25.8 mm	단면2차반경(r _z)	5.4 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

5-2 검토하중

축력(kN)	휨모멘트-y(kN·m)	휨모멘트-z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.021	0.015	0.000	0.044	축력 최대시
0.002	0.020	0.000	0.044	모멘트 최대시

5-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (F_t)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (F_c)

$$\text{좌굴 길이 계수 } K = 1$$

$$\text{좌굴 길이 } L = 1600 \text{ mm}$$

$$\text{단면 회전 반경 } r = 25.8 \text{ mm}$$

$$KL/r = 62.016$$

$$\text{한계 세장비 } C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$$

허용 압축응력 F_c (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r < C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 129.807 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (F_b)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (F_v)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

5-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 21 / 245 = 0.087 \text{ MPa} < 129.807 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 15000 / 163235 \times 37.500 = 3.446 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times z$$

$$= 300 / 7049 \times 5.017 = 0.214 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.087}{129.807} + \frac{1 \times 3.446}{\left(1 - \frac{0.087}{274.477}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.214}{\left(1 - \frac{0.087}{274.477}\right) \times 165.000} = 0.023 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.087}{0.6 \times 275} + \frac{3.446}{165.000} + \frac{0.214}{165.000} = 0.023 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 62^2} = 274.477 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A$$

$$= 44 / 196 = 0.224 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

5-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 2 / 245 = 0.007 \text{ MPa} < 129.807 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 19900 / 163235 \times 37.500 = 4.572 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 300 / 7049 \times 5.017 = 0.214 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{m,x} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{m,y} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.007}{129.807} + \frac{1 \times 4.572}{\left(1 - \frac{0.007}{274.477}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.214}{\left(1 - \frac{0.007}{274.477}\right) \times 165.000} = 0.029 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.007}{0.6 \times 275} + \frac{4.572}{165.000} + \frac{0.214}{165.000} = 0.029 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 62^2} = 274.477 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 44 / 196 = 0.224 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

6 보2

6-1 단면 제원

- 부재 규격 : □-100*100*2.9T
- 재 질 : SS275

단면적(A)	1126.36 mm ²	전단면적(A)	580 mm ²
단면2차모멘트(I _{yy})	1771542.763 mm ⁴	단면2차모멘트(I _{zz})	1771542.763 mm ⁴
단면2차반경(r _y)	39.7 mm	단면2차반경(r _z)	39.7 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

6-2 검토하중

축력(kN)	휨모멘트-y(kN·m)	휨모멘트-z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.021	0.015	0.000	0.044	축력 최대시
0.002	0.020	0.000	0.044	모멘트 최대시

6-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (F_t)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (F_c)

$$\text{좌굴 길이 계수 } K = 1$$

$$\text{좌굴 길이 } L = 2750 \text{ mm}$$

$$\text{단면 회전 반경 } r = 39.7 \text{ mm}$$

$$KL/r = 69.270$$

$$\text{한계 세장비 } C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$$

허용 압축응력 F_c (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r < C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 123.908 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (F_b)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (F_v)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

6-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 21 / 1126 = 0.019 \text{ MPa} < 123.908 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 15000 / 1771543 \times 50.000 = 0.423 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 300 / 1771543 \times 50.000 = 0.008 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.019}{123.908} + \frac{1 \times 0.423}{\left(1 - \frac{0.019}{220.000}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.008}{\left(1 - \frac{0.019}{220.000}\right) \times 165.000} = 0.003 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.019}{0.6 \times 275} + \frac{0.423}{165.000} + \frac{0.008}{165.000} = 0.003 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 69^2} = 220.000 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A$$

$$= 44 / 580 = 0.076 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

6-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 압축응력 (Fx)

$$f_c = 2 / 1126 = 0.002 \text{ MPa} < 123.908 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y = 19900 / 1771543 \times 50.000 = 0.562 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y = 300 / 1771543 \times 50.000 = 0.008 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 힘을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.002}{123.908} + \frac{1 \times 0.562}{\left(1 - \frac{0.002}{220.000}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.008}{\left(1 - \frac{0.002}{220.000}\right) \times 165.000} = 0.003 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.002}{0.6 \times 275} + \frac{0.562}{165.000} + \frac{0.008}{165.000} = 0.003 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 69^2} = 220.000 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / 0.5 A = 44 / 580 = 0.076 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

[부록 2] 구조검토계산서 (모듈 세로 배치형)

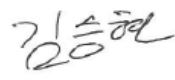
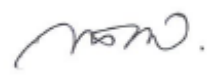

문서번호

구조 검토 계산서

태양광 구조물 (풍속 26m/s)

영농형 태양광 발전소 모듈 세로 배치형

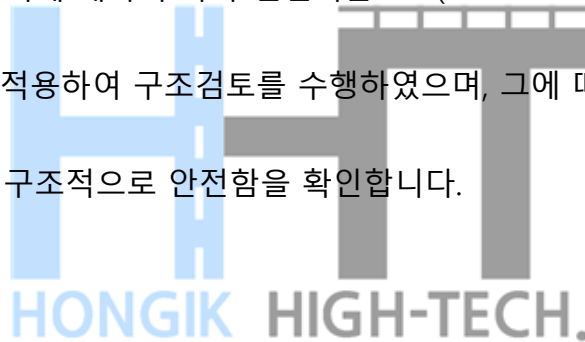
2023. 04

			작성자	검토자
			김승현	신상호
				
1	2023-04-12			
번호	날짜	내용		
(주)홍익하이테크 Hongik High-Tech. Co., Ltd. 서울특별시 성동구 용답동 235-10 승산빌딩 9층 TEL. 02-567-5204 FAX. 02-445-0443 E-mail hongik5204@naver.com			건축구조기술사	
			김재욱	
				

구조 안전 확인서

1. 공 사 명 : 영농형 태양광 발전소
2. 위 치 : 경기도 수원시 서둔동 103-2
3. 내 용 :

상기 태양광 발전설비에 대하여 국가 건설기준코드(KDS 41 10 15)에 의해 고정하중, 적설하중, 풍하중을 적용하여 구조검토를 수행하였으며, 그에 따라 시공 후 태양광 발전 시설이 구조적으로 안전함을 확인합니다.



건 축 구 조 기 술 사

자격번호

김 재 욱



목 차

1. 검토 조건

구조물 설치 개요
검토 하중
검토 방법
검토 프로그램
참고 문헌
특기 사항

2. 설계 도면

3. 검토 하중

자 중
적설 하중
풍 하중
하중 조합

4. 구조 검토

구조해석 모델링
해석 결과
전산해석 결과 DATA
부재 단면 검토

첨 부

1. 검토 조건

1. 검토 조건

1) 구조물 설치 개요

- 시설명 : 영농형 태양광 발전소
- 설치 장소 : 경기도 수원시 서둔동 103-2
- 하부 구조물 : 해당사항 없음

2) 검토 하중

- 자중은 부재 재질 및 규격에 따라 프로그램에서 자동 재하
- 풍하중 및 설하중 계산은 국가 건설기준코드 KDS 41 10 15 (건축구조기준 설계하중)에 따름

3) 검토 방법

- 허용응력 설계법

4) 검토 프로그램

- MIDAS GEN

5) 참고 문헌

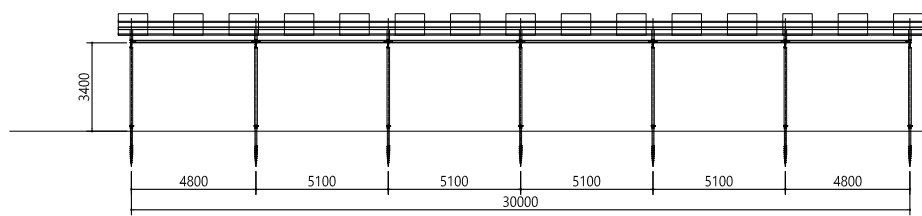
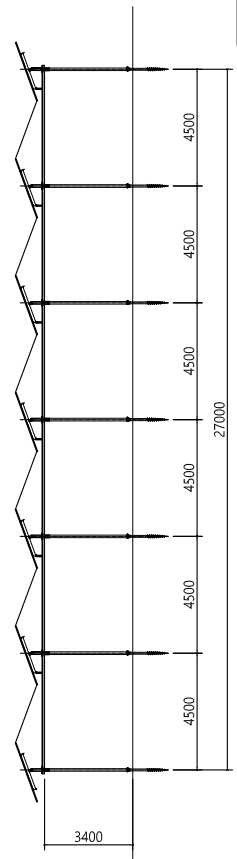
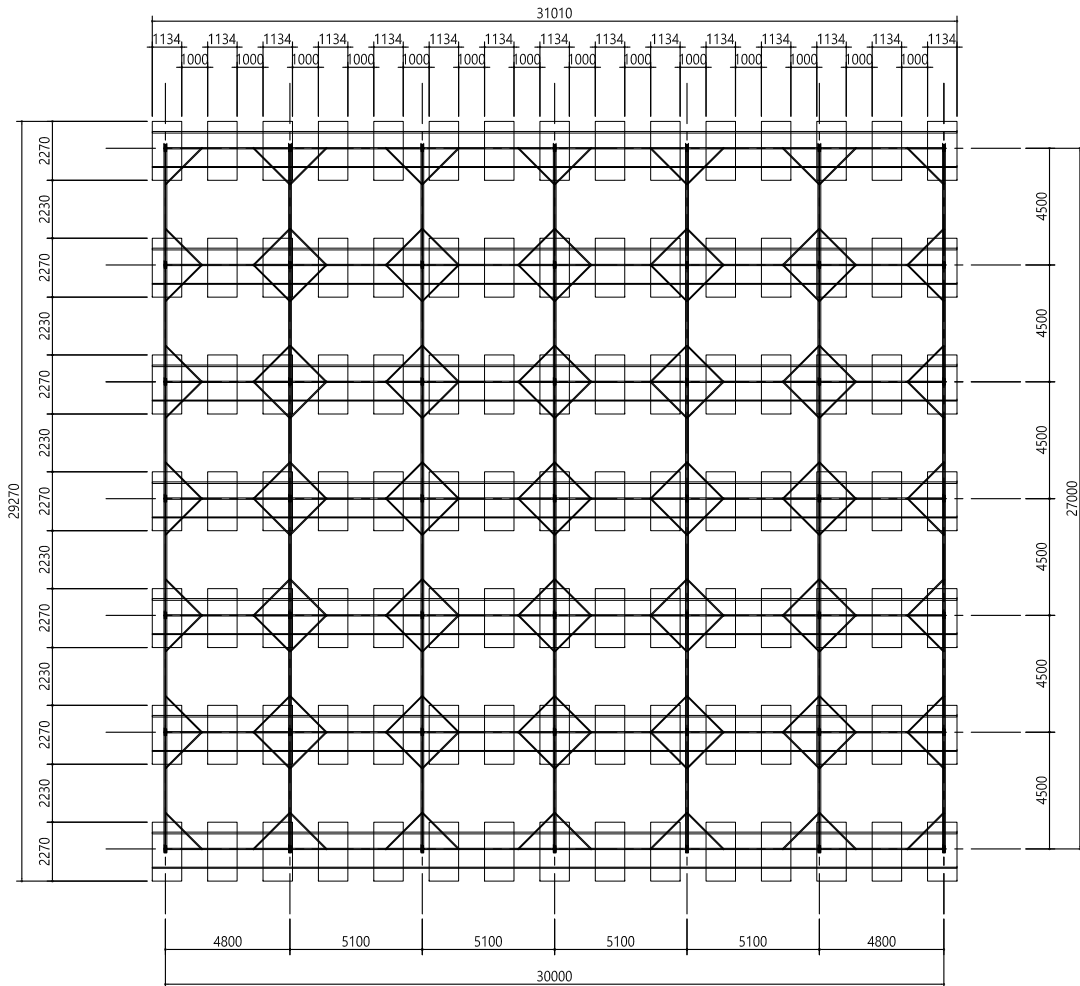
- 국가 건설기준 코드 강구조 설계(KDS 14 30) - 국토 교통부, 2019년
- 국가 건설기준 코드 건축구조기준 설계하중(KDS 41 10 15) - 국토 교통부, 2019년
- 국가 건설기준 코드 콘크리트용 앵커 설계기준(KDS 14 20 54) - 국토 교통부, 2016년

6) 특기 사항

- MIDAS GEN 전산 해석 결과 부재력을 통해 태양광 구조물을 구성하는 각 부재의 안정성을 검토
- 시공시, 본 구조검토서에서 적용한 것과 상이한 조건이 발생할 경우, 설계자의 승인을 득한 후 시공하여야 함
- 기존 건축물의 경우 부재 규격, 철근 배근 등은 제공받은 도면 또는 발주처가 가정요청한 바에 따라 적용 하였으며, 기존 구조물의 부식이나 결함여부는 고려하지 않았으므로, 실제 시공시 본 구조검토서 및 도면에 적용된 것과 상이한 부분이나 부식에 의한 파손/강도저하 등이 발견될 경우 즉시 공사를 중단하고, 이에 대한 적절한 조치를 취하여야 함.

2. 설계 도면

- 태양광 발전소 설계 개요
- 설치 형상 : 고정형
 - 설치 MODULE : 한화 580W (2,416x1,134x35)
 - 총 시설 용량 : 105EA × 580W = 60.90kW
 - 모듈각 : 20° ■ 음영각 : 21°






영농형태양광 배치도
SCALE : 1/200

FIRM :  **DOOWON**
DOOWON Industry Inc.
58, Pyeonghwa-ro 49beon-gil, Uijeongbu-si,
Gyeonggi-do 11648, KOREA
TEL: +82-31-874-2220 FAX: +82-31-874-9589

PROJECT : 영농형 태양광 구조물

NOTE :

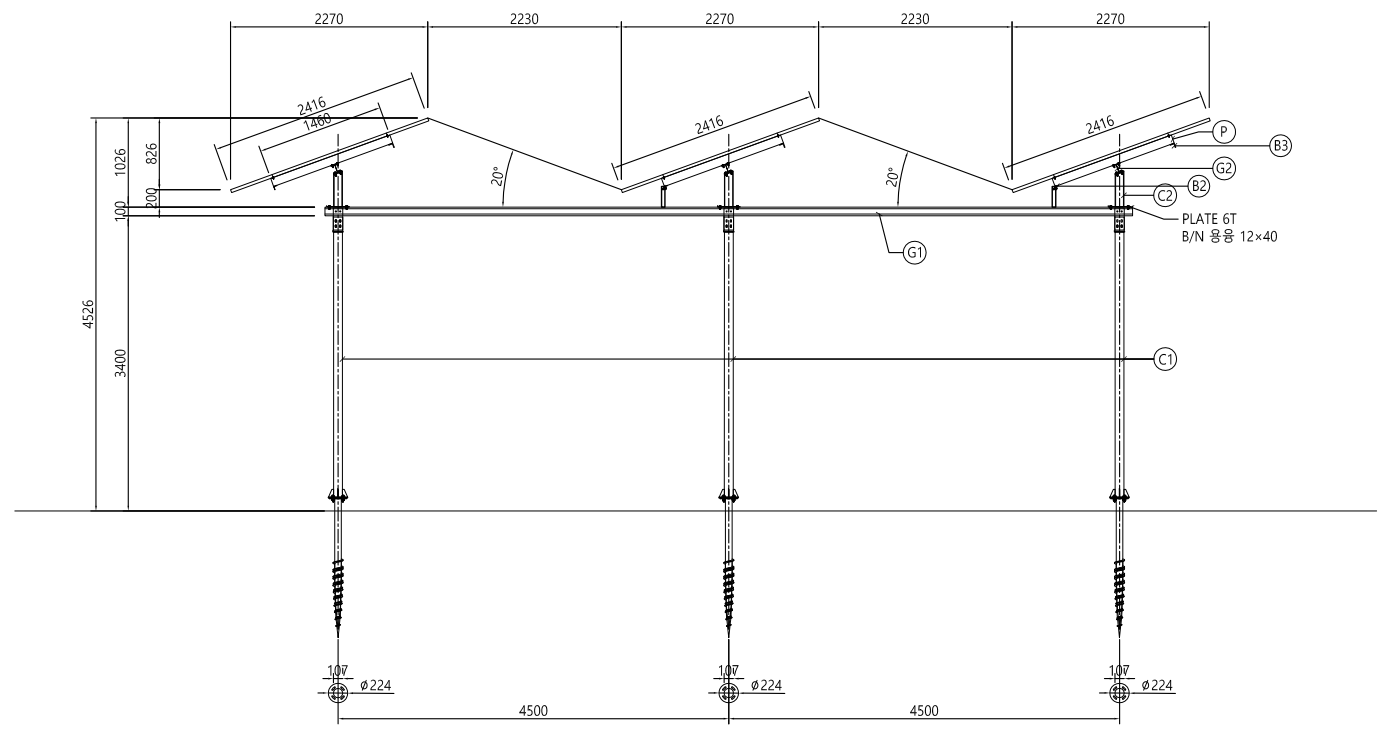
DRAWING TITLE : 영농형태양광 배치도

DATE : 2021. 11. DRAWING NO. ES - 000
SCALE(A3) : 1/200

DRAWING BY	CHECKED BY	APPROVED BY

● 태양광 발전설비 구조물 부재

SYM.	NAME	DESCRIPTION
(C1)	기둥(하부)	Φ-101.6×3.2t
(G1)	보(하부)	C-100×50×20×2.9t
(B)	보강(하부)	ㄱ-40×40×3t
(S)	SCREW	Φ76×1600
(C2)	기둥(상부)	H-100×100×3.2×4.5t
(G2)	보(상부)	H-100×100×3.2×4.5t
(P)	퍼런	C-100×50×20×2.1
(B2)	보강(상부)	포스맥 ㄱ-40×40×3t
(B3)	보강(상부)	포스맥 ㄱ-50×50×6t



FIRM :  **DOOWON**
 DOOWON Industry Inc.
 58, Pyeonghwa-ro 49beon-gil, Uijeongbu-si,
 Gyeonggi-do 11648, KOREA
 TEL: +82-31-874-2220 FAX: +82-31-874-9589

PROJECT : 영농형 태양광 구조물

NOTE :

△		
△		
△		

DRAWING TITLE : 영농형태양광 구조물측면도

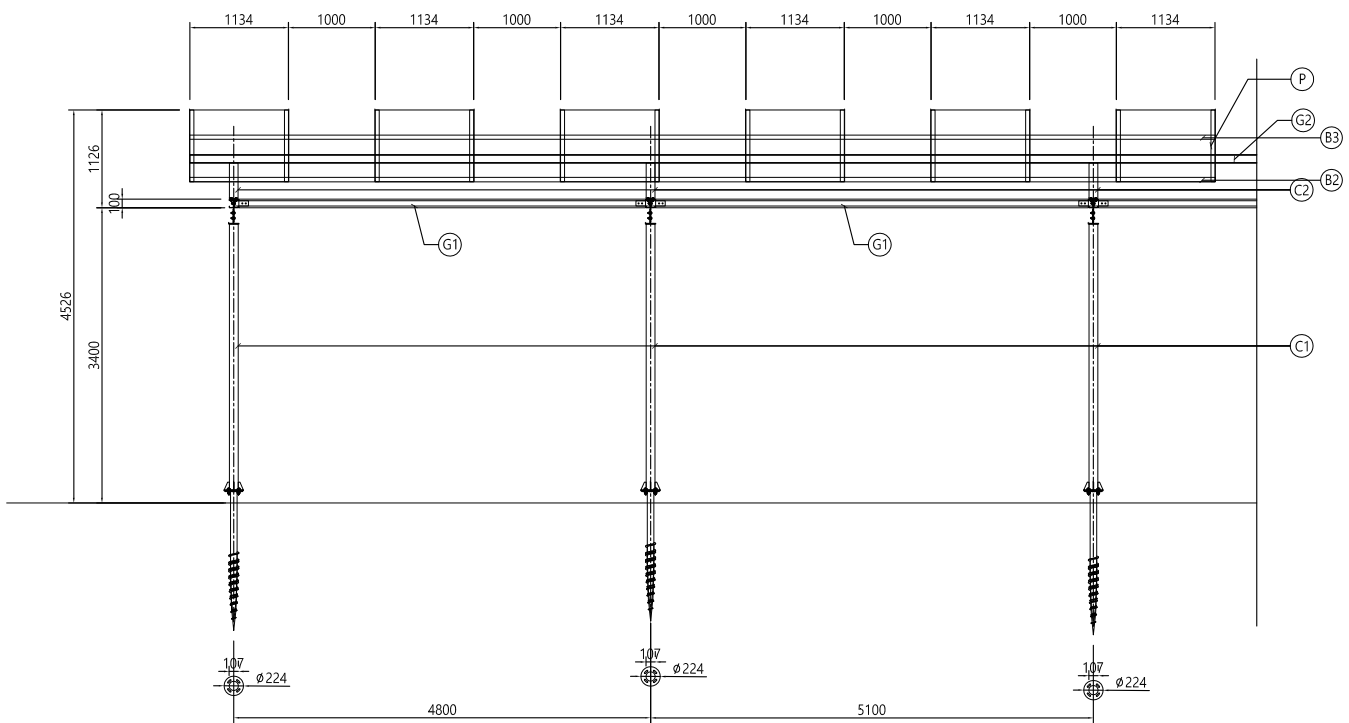
DATE : 2021. 11.	DRAWING NO. ES - 000
SCALE(A3) : 1/60	

DRAWING BY	CHECKED BY	APPROVED BY

영농형태양광 구조물측면도
 SCALE : 1/60

● 태양광 발전설비 구조물 부재

SYM.	NAME	DESCRIPTION
(C1)	기둥(하부)	Φ-101.6×3.2t
(G1)	보(하부)	C-100×50×20×2.9t
(B)	보강(하부)	ㄱ-40×40×3t
(S)	SCREW	Φ76×1600
(C2)	기둥(상부)	H-100×100×3.2×4.5t
(G2)	보(상부)	H-100×100×3.2×4.5t
(P)	퍼런	C-100×50×20×2.1
(B2)	보강(상부)	포스맥 ㄱ-40x40x3t
(B3)	보강(상부)	포스맥 ㄱ-50x50x6t



FIRM :



DOOWON
 DOOWON Industry Inc.
 58, Pyeonghwa-ro 49beon-gil, Uijeongbu-si,
 Gyeonggi-do 11648, KOREA
 TEL: +82-31-874-2220 FAX: +82-31-874-9589

PROJECT :
 영농형 태양광 구조물

NOTE :

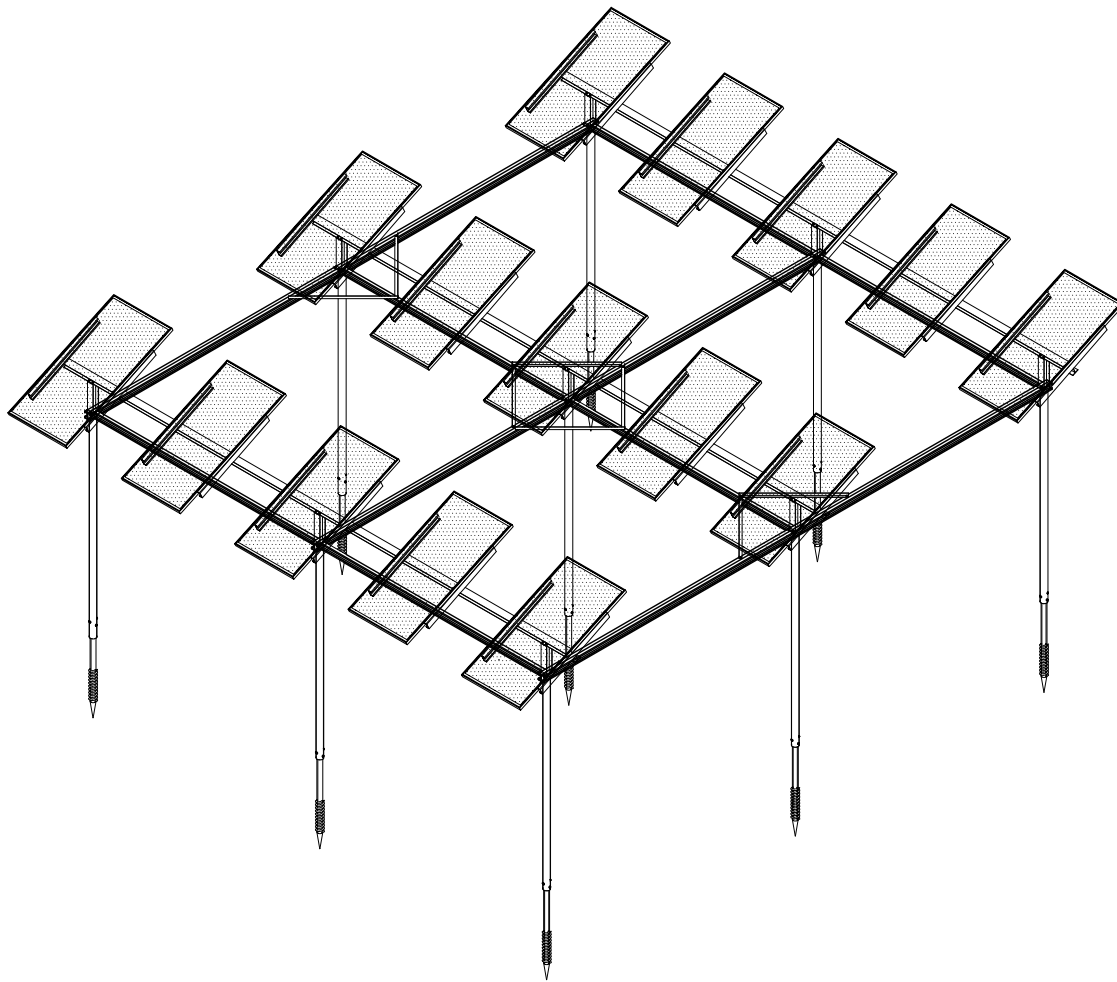
△	
△	
△	

DRAWING TITLE :
 영농형태양광 구조물배면도

DATE : 2021. 11.	DRAWING NO.
SCALE(A3) : 1/60	ES - 000

DRAWING BY	CHECKED BY	APPROVED BY

영농형태양광 구조물배면도
 SCALE : 1/60



구조물 상세도
SCALE : 1/NONE

FIRM :  DOOWON DOOWON industry Inc. 58, Pyeonghwa-ro 49beon-gil, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do 11648, KOREA TEL: +82-31-874-2220 FAX: +82-31-874-9589										
PROJECT : 영농형 태양광 구조물										
NOTE : <table border="1"> <tr> <td>△</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>△</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>△</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		△			△			△		
△										
△										
△										
DRAWING TITLE : 영농형태양광 구조물 상세도										
DATE : 2021. 11. SCALE(A3) : 1/NONE	DRAWING NO. ES - 000									
DRAWING BY	CHECKED BY	APPROVED BY								

3. 검토 하중

3. 검토 하중

1) 자중 및 고정하중

- 자중은 해석 프로그램의 Self Weight 기능을 이용하여 모델링에 자동 반영
- 골조 단위중량 : 27.200 kN/m³ (알루미늄 적용)
- 태양광 패널 중량 : 0.200 kN/m²

2) 적설하중

- 구조물의 형태, 기울기 등에 따라 KDS 41 10 15에서 규정하는 경사지붕적설하중 기준에 따라 다음 식에 따라 산정함

$$S_s = C_s \times S_f \quad (\text{kN/m}^2)$$

- C_s : 경사도계수

적설면의 표면 상태, 기울기, 눈이 미끄러지는 정도를 고려하여 정하며, 본 검토에서는 패널 위에서 눈이 미끄러지지 않는 상태로 가정하여 **경사도 계수 1.0** 으로 적용함

- S_f : 평지붕 적설하중

$$S_f = C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g \quad (\text{kN/m}^2)$$

- C_b : 기본 지붕 적설하중계수

기본지붕적설하중계수는 일반적으로 **0.7**로 함 (KDS 41 10 15, 2019, p.25)

- C_e : 노출계수

주 변 환 경	노출계수
A. 지형, 높은구조물, 나무 등 주변 현황에 의해 모든 면이 바람막이가 없어 노출된 지붕이 있는 거센 바람 부는 지역	0.80
B. 약간의 바람막이가 있는 거센 바람 부는 지역	0.90
C. 바람에 의한 눈의 제거가 지형, 높은 구조물 또는 근처의 몇몇 나무들 때문에 지붕 하중의 감소를 기대할 수 없는 위치	1.00
D. 바람의 영향이 많지 않은 지역 및 지형과 높은 구조물 또는 몇몇 나무들에 의하여 지붕에 바람막이가 있는 지역	1.10
E. 바람의 영향이 거의 없는 조밀한 숲 지역으로서, 촘촘한 침엽수 사이에 위치한 지붕	1.20

- C_t : 온도계수

주 변 환 경	온도계수
난방 구조물 (적설하중 제어구조)	1.00
비난방 구조물 (적설하중 비제어구조)	1.20

- I_s : 중요도계수

중요도	건축물의 용도 및 규모	중요도계수
특	· 연면적이 1,000㎡ 이상인 위험물 저장 및 처리시설, 종합병원, 병원, 방송국, 전신전화국, 발전소, 공공업무시설 및 노약자시설	1.20
1	· 연면적이 5,000㎡ 이상인 관람집회시설, 운동시설, 운수시설, 전시시설, 및 판매시설 · 5층 이상인 숙박시설, 오피스텔, 기숙사, 아파트 · 5층 이상의 학교	1.10
2	· 중요도(특), (1) 및 (3)에 해당하지 않는 건축물, 방음터널	1.00
3	· 가설 건축물, 농가 건축물 및 소규모 창고	0.80

- S_g : 기본지상적설하중 (kN/m²)

지 역	기본지상 적설하중 (kN/m ²)
서울, 수원, 춘천, 서산, 충주, 대전, 추풍령, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부여, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포, 진주, 이천	0.50
정읍, 울진	0.65
인 천	0.80
속 초	2.00
강 릉	3.00
울릉도, 대관령	7.00

• 적설하중 산정

$$\begin{aligned}
 S_s &= C_b \times C_e \times C_t \times I_s \times S_g \\
 &= 0.7 \times 1.0 \times 1.2 \times 1.0 \times 0.5 = 0.42 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

3) 풍하중

- 구조물에 작용하는 풍하중은 다음 식에 따라 산정함 (KDS 41 10 15)

$$W_D = q_h \cdot G_D \cdot C_D \quad (\text{N/m}^2)$$

- q_h : 설계속도압으로 다음식에 따라 산정함

$$q_h = 1/2 \cdot \rho \cdot V_H^2 \quad (\text{N/m}^2)$$

- ρ : 공기 밀도로서 균일하게 1.22kg/m³으로 한다(KDS 41 10 15) = 1.22 kg/m³

- V_H : 설계 풍속으로 다음식에 따라 산정함

$$V_H = V_o \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_w \quad (\text{m/s})$$

- V_o : 지역별 기본 풍속 (m/s)

KDS 41 10 15 : 2019

지 역		풍속
서울특별시 인천광역시 경기도	용진	30
	인천, 강화, 안산, 시흥, 평택	28
	서울, 김포, 구리, 수원, 군포, 오산, 화성, 의왕, 부천, 고양, 안양, 과천, 광명, 의정부, 동두천, 양주, 파주, 포천, 남양주, 가평, 하남, 성남, 광주, 양평, 용인	26
강원도	안성, 연천, 여주, 이천	24
	속초, 양양, 강릉, 고성	34
	동해, 삼척, 홍천, 정선, 인제	30
	양구	26
대전광역시 충청남도 충청북도	철원, 화천, 춘천, 횡성, 원주, 평창, 영월, 태백	24
	서산, 태안	34
	당진	32
	서천, 보령, 홍성, 청주, 청원	30
	예산, 세종, 대전, 공주, 부여	28
	아산, 계룡, 진천	26
	천안, 증평, 청양, 논산, 금산, 음성, 충주, 제천, 단양, 괴산, 보은, 영동, 옥천	24
부산광역시 대구광역시 울산광역시 경상남도 경상북도	울릉(독도)	40
	부산	38
	포항, 경주, 기장, 통영, 거제	36
	양산, 김해, 남해, 울산, 울주	34
	영덕, 고성	32
	울진, 창원, 사천, 영천	30
	청송, 대구, 경산, 청도, 밀양, 하동	28
	영양, 군위, 칠곡, 성주, 달성, 함안, 고령, 창녕, 진주	26
	봉화, 영주, 예천, 문경, 상주, 추풍령, 안동, 의성, 구미, 김천, 의령, 거창, 산청, 합천, 함양	24
광주광역시 전라남도 전라북도	완도, 해남	36
	진도, 여수, 고흥, 신안, 무안, 장흥	34
	목포, 부안, 영암, 강진	32
	영광, 함평, 나주	30
	익산, 김제, 순천, 고창, 광양	28
	광주, 보성, 완주, 전주, 장성	26
	무주, 진안, 장수, 임실, 정읍, 순창, 남원, 담양, 곡성, 구례	24
제주도	서귀포, 제주	44

본 검토구간은 수원 지역으로 기본 풍속 26m/s 를 적용함

- K_{zr} : 풍속고도분포계수로 주변 지역의 지표면상태에 따라 아래구분에 따라 정함

지표조도구분	주변 환경
A	대도시 중심부에서 고층건축물(10층 이상)이 밀집해 있는 지역
B	수목, 높이 3.5m 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있는 지역 중층 건물 (4~9층)이 산재해 있는 지역
C	높이 1.5~10m정도의 장애물이 산재해 있는 지역 수목, 저층건축물이 산재해 있는 지역
D	장애물이 거의 없고, 주변 장애물의 평균높이가 1.5m 이하인 지역 해안, 초원, 비행장

지표조도구분	A	B	C	D	비고
z_b	20	15	10	5	대기 경계층 시작높이(m)
Z_g	550	450	350	250	기준경도풍높이(m)
α	0.33	0.22	0.15	0.1	풍속고도분포지수

지표면으로부터 높이 Z(m)	지표면 조도구분에 따른 풍속고도분포계수 K_{zr}			
	A	B	C	D
$z \leq z_b$	0.58	0.81	1.00	1.13
$z_b < z \leq Z_g$	$0.22 z^\alpha$	$0.45 z^\alpha$	$0.71 z^\alpha$	$0.97 z^\alpha$

지표조도구분 C, 구조물의 지표로부터 높이 $z = 4.526\text{m}$ 로 위의 구분에 따라
 풍속고도분포계수 $K_{zr} = 1.00$

- K_{zt} : 지형계수 = 1.0

산, 언덕 및 경사지의 영향을 받지 않는 평탄한 지역의 지형계수는 1.0 (KDS 14 10 15)

- I_w : 중요도계수로, KDS 41 10 05(건축구조기준 총칙)에서 정의한 건축물의
 중요도 분류에 근거하여 아래 표에 따라 정함 (중요도 구분은 적설하중 참고)

중요도 분류	초고층건축물	특	1	2	3
중요도 계수 (I_w)	1.05	1.00		0.95	0.90

※ 초고층 건축물은 50층 이상 또는 200mm 이상인 건축물

- 설계 풍속 산정

$$V_H = 26.0 \times 1.00 \times 1.0 \times 0.95 = 23.465 \text{ m/s}$$

- G_D : 가스트 영향 계수로 다음 식에 따라 산정함

$$G_D = 1 + 4 \gamma_D \sqrt{B_D}$$

- $\gamma_D = (3+3\alpha) / (2+\alpha) \cdot I_H = 0.383$

여기서,

α : 풍속 고도분포지수 = 0.150

I_H : 기준높이에서의 난류 강도

$I_H = 0.1 (H / Z_g)^{-\alpha-0.05} = 0.239$

- B_D : 비공진 계수

$B_D = 1 - (1 / \{1 + 5.1 \cdot (L_H / \sqrt{HB})^{1.3} \cdot (B/H)^k\}^{1/3}) = 0.803$

여기서,

L_H : 기준높이에서의 난류 스케일(m)

$L_H = 100 (H / 30)^{0.5} = 38.842 \text{ m}$

B : 태양광 구조물 폭(m) = 1.1 m

H : 기준 높이(m) = 4.5 m

k : $k = 0.33 : H \geq B$

$k = -0.33 : H < B = 0.330$

- 가스트 영향계수 산정

$G_D = 1 + 4 \times 0.383 \times \sqrt{0.803} = 2.372$

- C_f : 풍력 계수

- 태양광 패널에 대한 풍력계수 : 아래 표에 따라 적용 = 1.000

패널 경사각 θ	D/B에 따른 C_f 값						
	5	3	2	1	1/2	1/3	1/5
10	0.20	0.25	0.30	0.45	0.55	0.70	0.75
15	0.35	0.45	0.50	0.70	0.85	0.90	0.85
20	0.50	0.60	0.75	0.90	1.00	0.95	0.90
25	0.70	0.80	0.95	1.15	1.10	1.05	0.95
30	0.90	1.00	1.20	1.30	1.20	1.10	1.00

여기서 D는 풍방향 태양광 패널 길이, B는 태양광패널 전체 폭

- 태양광 부재에 대한 풍력계수 : 부재 형상에 따라 적용 (KDS 41 10 15, 표5.7-13) = **2.100**

$C_x = C_y$	θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y		
1.2	0	2.1	0	0	2.4	0	0	2.1	0		
	45	1.6	1.6	45	1.6	0.7	30	2.1	-0.2		
				90	0	0.8	60	0.7	1.1		
θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y
0	1.2	0	0	1.1	0	0	2	0	0	1.9	2.2
45	0.8	0.8	45	0.8	0.7	45	1.8	0.1	45	2.3	2.3
90	0.6	0.5	90	0.9	0.5	90	0	0.1	90	2.2	1.9
135	-1.7	0.6	135	-2.3	0.6				135	-1.9	-0.6
180	-2.3	0	180	-2.5	0				180	-2	0.3
									225	-1.4	-1.4
θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y	θ	C_x	C_y	충실률(ϕ)	C_x	
0	2	1.1	0	2.1	0	0	2.6	0	0	2	
45	2.3	1.1	45	2.1	0.6	45	2	0.8	0.2	2	
90	1.8	0.8	90	± 0.6	0.7	90	± 0.6	0.8	0.6	2.7	
135	-1.7	0				135	-1.6	0.6	0.9이상(평판포함)	2	
180	-2	0.1				180	-2	0			
270	0.6	-0.8									
315	1.2	-0.2									

• 풍하중 산정

- 태양광 패널 풍하중

$$= 0.5 \times 1.22 \times 23.5^2 \times 2.372 \times 1.0 = 796.819 \text{ N/m}^2 = 0.797 \text{ kN/m}^2$$

- 태양광 부재 풍하중

$$= 0.5 \times 1.22 \times 23.5^2 \times 2.372 \times 2.1 = 1673.32 \text{ N/m}^2 = 1.673 \text{ kN/m}^2$$

4. 구조 검토

4 구조 검토

태양광 발전 시설 부재 검토 결과 (Type1)

구분		결과	허용	RATIO	판정
기동(하부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	0.717	165.000	0.004	O.K
	축방향 압축 응력 검토	4.434	96.152	0.046	O.K
	힘응력 검토 (My)	117.395	165.000	0.711	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.102	165.000	0.001	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.721	1.000	0.721	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.716	1.000	0.716	O.K
	전단응력 검토	2.477	110.000	0.023	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	0.717	165.000	0.004	O.K
	축방향 압축 응력 검토	4.209	96.152	0.044	O.K
	힘응력 검토 (My)	126.373	165.000	0.766	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.775	1.000	0.775	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.770	1.000	0.770	O.K
	전단응력 검토	2.477	110.000	0.023	O.K
보(하부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	1.288	165.000	0.008	O.K
	축방향 압축 응력 검토	1.344	103.886	0.013	O.K
	힘응력 검토 (My)	14.986	165.000	0.091	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	2.746	165.000	0.017	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.116	1.000	0.116	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.115	1.000	0.115	O.K
	전단응력 검토	1.240	110.000	0.011	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	1.288	165.000	0.008	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.151	103.886	0.001	O.K
	힘응력 검토 (My)	45.599	165.000	0.276	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.287	1.000	0.287	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.284	1.000	0.284	O.K
	전단응력 검토	1.240	110.000	0.011	O.K
보강(하부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	1.405	165.000	0.009	O.K
	축방향 압축 응력 검토	1.430	40.737	0.035	O.K
	힘응력 검토 (My)	4.256	165.000	0.026	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.315	165.000	0.002	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.037	1.000	0.037	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.036	1.000	0.036	O.K
	전단응력 검토	0.184	110.000	0.002	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	1.405	165.000	0.009	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.012	40.737	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	7.120	165.000	0.043	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.053	1.000	0.053	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.052	1.000	0.052	O.K
	전단응력 검토	0.184	110.000	0.002	O.K

구분		결과	허용	RATIO	판정
기둥(상부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	1.131	165.000	0.007	O.K
	축방향 압축 응력 검토	3.162	154.381	0.020	O.K
	힘응력 검토 (My)	2.604	165.000	0.016	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	2.906	165.000	0.018	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.040	1.000	0.040	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.040	1.000	0.040	O.K
	전단응력 검토	2.482	110.000	0.023	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	1.131	165.000	0.007	O.K
	축방향 압축 응력 검토	2.670	154.381	0.017	O.K
	힘응력 검토 (My)	10.565	165.000	0.064	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	1.776	165.000	0.011	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.082	1.000	0.082	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.082	1.000	0.082	O.K
	전단응력 검토	2.482	110.000	0.023	O.K
보(상부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	0.218	165.000	0.001	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.493	24.933	0.020	O.K
	힘응력 검토 (My)	29.265	165.000	0.177	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	14.964	165.000	0.091	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.272	1.000	0.272	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.269	1.000	0.269	O.K
	전단응력 검토	5.066	110.000	0.046	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	0.218	165.000	0.001	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.462	24.933	0.019	O.K
	힘응력 검토 (My)	29.279	165.000	0.177	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	15.549	165.000	0.094	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.275	1.000	0.275	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.273	1.000	0.273	O.K
	전단응력 검토	5.066	110.000	0.046	O.K
퍼린					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	2.310	165.000	0.014	O.K
	축방향 압축 응력 검토	1.999	150.169	0.013	O.K
	힘응력 검토 (My)	7.971	165.000	0.048	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.062	1.000	0.062	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.062	1.000	0.062	O.K
	전단응력 검토	1.447	110.000	0.013	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	2.310	165.000	0.014	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.002	150.169	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	12.152	165.000	0.074	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	5.302	165.000	0.032	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.120	1.000	0.120	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.120	1.000	0.120	O.K
	전단응력 검토	1.447	110.000	0.013	O.K

구분		결과	허용	RATIO	판정
보강(상부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	2.744	165.000	0.017	O.K
	축방향 압축 응력 검토	2.371	153.275	0.015	O.K
	힘응력 검토 (My)	130.944	165.000	0.794	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.812	1.000	0.812	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.810	1.000	0.810	O.K
	전단응력 검토	8.993	110.000	0.082	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	2.744	165.000	0.017	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.004	153.275	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	137.655	165.000	0.834	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.000	165.000	0.000	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.853	1.000	0.853	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.851	1.000	0.851	O.K
	전단응력 검토	8.993	110.000	0.082	O.K
보강(상부)					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	0.791	165.000	0.005	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.965	9.374	0.103	O.K
	힘응력 검토 (My)	19.274	165.000	0.117	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.478	165.000	0.003	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.136	1.000	0.136	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.125	1.000	0.125	O.K
	전단응력 검토	0.498	110.000	0.005	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	0.791	165.000	0.005	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.131	9.374	0.014	O.K
	힘응력 검토 (My)	29.723	165.000	0.180	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.642	165.000	0.004	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.206	1.000	0.206	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.189	1.000	0.189	O.K
	전단응력 검토	0.498	110.000	0.005	O.K
G1 더블					
축력 최대	축방향 인장 응력 검토	0.846	165.000	0.005	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.271	130.289	0.002	O.K
	힘응력 검토 (My)	4.200	165.000	0.025	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	1.843	165.000	0.011	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.042	1.000	0.042	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.042	1.000	0.042	O.K
	전단응력 검토	0.453	110.000	0.004	O.K
모멘트 최대	축방향 인장 응력 검토	0.846	165.000	0.005	O.K
	축방향 압축 응력 검토	0.001	130.289	0.000	O.K
	힘응력 검토 (My)	7.270	165.000	0.044	O.K
	힘응력 검토 (Mz)	0.461	165.000	0.003	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 1	0.052	1.000	0.052	O.K
	축압축 및 휨모멘트 검토 2	0.052	1.000	0.052	O.K
	전단응력 검토	0.453	110.000	0.004	O.K

3) 전산해석 결과 DATA

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
기둥(하부)	축력 최대 시	sLCB1	0.000	2.798	0.007	0.001	0.003	0.010	
		sLCB2	0.000	3.214	0.007	0.002	0.002	0.007	
		sLCB3	0.000	4.386	2.773	0.002	0.003	1.225	
		sLCB4	0.000	2.109	0.005	0.945	0.535	0.008	
		sLCB5	0.710	0.444	2.493	0.003	0.002	1.219	
		sLCB6	0.000	2.109	0.005	0.945	0.535	0.008	
		sLCB7	0.000	2.099	0.005	0.001	0.002	0.008	
		sLCB8	0.000	2.099	0.005	0.001	0.002	0.008	
		sLCB9	0.000	2.099	0.005	0.001	0.002	0.008	
		sLCB10	0.000	2.099	0.005	0.001	0.002	0.008	
	최대값	0.710	4.386	2.773	0.002	1.225			
	모멘트 최대 시	sLCB1	0.000	2.254	0.026	0.001	0.003	0.010	
		sLCB2	0.000	2.803	0.019	0.001	0.002	0.007	
		sLCB3	0.000	4.164	2.985	0.000	0.003	1.225	
		sLCB4	0.000	1.147	0.003	0.960	0.535	0.008	
		sLCB5	0.710	0.001	2.975	0.000	0.002	1.219	
		sLCB6	0.000	1.147	0.003	0.960	0.535	0.008	
		sLCB7	0.000	1.690	0.019	0.001	0.002	0.008	
		sLCB8	0.000	1.690	0.019	0.001	0.002	0.008	
		sLCB9	0.000	1.690	0.019	0.001	0.002	0.008	
		sLCB10	0.000	1.690	0.019	0.001	0.002	0.008	
최대값		0.710	4.164	2.985	0.000	1.225			

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고
축 력 최 대 시	sLCB1	0.028	0.196	0.072	0.002	0.053	0.166	
	sLCB2	0.031	0.156	0.055	0.002	0.038	0.126	
	sLCB3	0.247	0.842	0.283	0.032	0.142	0.447	
	sLCB4	0.021	0.149	0.054	0.008	0.050	0.125	
	sLCB5	0.807	0.241	0.575	0.087	0.133	0.427	
	sLCB6	0.021	0.149	0.054	0.008	0.050	0.125	
	sLCB7	0.021	0.147	0.054	0.001	0.040	0.125	
	sLCB8	0.021	0.147	0.054	0.001	0.040	0.125	
	sLCB9	0.021	0.147	0.054	0.001	0.040	0.125	
	sLCB10	0.021	0.147	0.054	0.001	0.040	0.125	
		최대값	0.807	0.842	0.283	0.032	0.142	0.447
보(하부)	sLCB1	0.028	0.029	0.135	0.001	0.053	0.166	
	sLCB2	0.031	0.031	0.102	0.001	0.038	0.126	
	sLCB3	0.247	0.094	0.862	0.000	0.142	0.447	
	sLCB4	0.021	0.024	0.101	0.001	0.050	0.125	
	sLCB5	0.807	0.001	0.805	0.000	0.133	0.427	
	sLCB6	0.021	0.024	0.101	0.001	0.050	0.125	
	sLCB7	0.021	0.022	0.101	0.000	0.040	0.125	
	sLCB8	0.021	0.022	0.101	0.000	0.040	0.125	
	sLCB9	0.021	0.022	0.101	0.000	0.040	0.125	
	sLCB10	0.021	0.022	0.101	0.000	0.040	0.125	
		최대값	0.807	0.094	0.862	0.000	0.142	0.447

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
보강(하부)	축력 최대 시	sLCB1	0.054	0.035	0.008	0.000	0.000	0.018	
		sLCB2	0.049	0.035	0.006	0.000	0.000	0.014	
		sLCB3	0.328	0.334	0.005	0.001	0.001	0.015	
		sLCB4	0.048	0.033	0.006	0.000	0.000	0.014	
		sLCB5	0.281	0.279	0.007	0.001	0.001	0.014	
		sLCB6	0.048	0.033	0.006	0.000	0.000	0.014	
		sLCB7	0.040	0.027	0.006	0.000	0.000	0.014	
		sLCB8	0.040	0.027	0.006	0.000	0.000	0.014	
		sLCB9	0.040	0.027	0.006	0.000	0.000	0.014	
		sLCB10	0.040	0.027	0.006	0.000	0.000	0.014	
	최대값	0.328	0.334	0.005	0.001	0.001	0.018		
	모 멘 트 최 대 시	sLCB1	0.054	0.003	0.009	0.000	0.000	0.018	
		sLCB2	0.049	0.009	0.007	0.000	0.000	0.014	
		sLCB3	0.328	0.043	0.007	0.001	0.001	0.015	
		sLCB4	0.048	0.019	0.007	0.000	0.000	0.014	
		sLCB5	0.281	0.068	0.007	0.001	0.001	0.014	
		sLCB6	0.048	0.019	0.007	0.000	0.000	0.014	
		sLCB7	0.040	0.002	0.007	0.000	0.000	0.014	
		sLCB8	0.040	0.002	0.007	0.000	0.000	0.014	
		sLCB9	0.040	0.002	0.007	0.000	0.000	0.014	
		sLCB10	0.040	0.002	0.007	0.000	0.000	0.014	
최대값	0.328	0.003	0.009	0.000	0.000	0.018			

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
기동(상부)	축력 최대시	sLCB1	0.000	1.829	0.059	0.026	0.370	0.152	
		sLCB2	0.000	2.490	0.042	0.025	0.413	0.114	
		sLCB3	0.000	4.039	0.126	0.044	0.555	0.794	
		sLCB4	0.000	1.374	0.044	0.047	0.341	0.114	
		sLCB5	1.445	0.000	0.235	0.083	0.046	0.783	
		sLCB6	0.000	1.374	0.044	0.047	0.341	0.114	
		sLCB7	0.000	1.372	0.044	0.019	0.278	0.114	
		sLCB8	0.000	1.372	0.044	0.019	0.278	0.114	
		sLCB9	0.000	1.372	0.044	0.019	0.278	0.114	
		sLCB10	0.000	1.372	0.044	0.019	0.278	0.114	
	최대값	1.445	4.039	0.126	0.044	0.794			
	모멘트 최대시	sLCB1	0.000	0.745	0.044	0.137	0.370	0.152	
		sLCB2	0.000	0.880	0.016	0.144	0.413	0.114	
		sLCB3	0.000	3.410	0.510	0.027	0.555	0.794	
		sLCB4	0.000	0.554	0.033	0.131	0.341	0.114	
		sLCB5	1.445	0.001	0.407	0.000	0.046	0.783	
		sLCB6	0.000	0.554	0.033	0.131	0.341	0.114	
		sLCB7	0.000	0.573	0.048	0.103	0.278	0.114	
		sLCB8	0.000	0.573	0.048	0.103	0.278	0.114	
		sLCB9	0.000	0.573	0.048	0.103	0.278	0.114	
		sLCB10	0.000	0.573	0.048	0.103	0.278	0.114	
최대값		1.445	3.410	0.510	0.027	0.794			

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
보(상부)	축 력 최 대 시	sLCB1	0.000	0.312	0.558	0.027	0.007	0.648	
		sLCB2	0.000	0.358	0.922	0.041	0.011	1.071	
		sLCB3	0.000	0.630	1.414	0.225	0.377	1.621	
		sLCB4	0.000	0.296	0.428	0.020	0.005	0.490	
		sLCB5	0.278	0.000	0.575	0.247	0.375	0.650	
		sLCB6	0.000	0.296	0.428	0.020	0.005	0.490	
		sLCB7	0.000	0.234	0.419	0.020	0.005	0.486	
		sLCB8	0.000	0.234	0.419	0.020	0.005	0.486	
		sLCB9	0.000	0.234	0.419	0.020	0.005	0.486	
		sLCB10	0.000	0.234	0.419	0.020	0.005	0.486	
		최대값	0.278	0.630	1.414	0.225	1.621		
보(상부)	모 멘 트 최 대 시	sLCB1	0.000	0.309	0.559	0.001	0.007	0.648	
		sLCB2	0.000	0.357	0.923	0.003	0.011	1.071	
		sLCB3	0.000	0.590	1.415	0.234	0.377	1.621	
		sLCB4	0.000	0.292	0.428	0.000	0.005	0.490	
		sLCB5	0.278	0.001	0.577	0.228	0.375	0.650	
		sLCB6	0.000	0.292	0.428	0.000	0.005	0.490	
		sLCB7	0.000	0.232	0.419	0.000	0.005	0.486	
		sLCB8	0.000	0.232	0.419	0.000	0.005	0.486	
		sLCB9	0.000	0.232	0.419	0.000	0.005	0.486	
		sLCB10	0.000	0.232	0.419	0.000	0.005	0.486	
		최대값	0.278	0.590	1.415	0.234	1.621		

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고
축력 최대 시	sLCB1	0.244	0.083	0.154	0.001	0.073	0.247	
	sLCB2	0.186	0.062	0.115	0.001	0.076	0.186	
	sLCB3	1.080	0.070	0.115	0.070	0.214	0.385	
	sLCB4	0.183	0.062	0.115	0.001	0.056	0.186	
	sLCB5	0.030	0.934	0.116	0.000	0.312	0.186	
	sLCB6	0.183	0.062	0.115	0.001	0.056	0.186	
	sLCB7	0.183	0.062	0.115	0.001	0.054	0.186	
	sLCB8	0.183	0.062	0.115	0.001	0.054	0.186	
	sLCB9	0.183	0.062	0.115	0.001	0.054	0.186	
	sLCB10	0.183	0.062	0.115	0.001	0.054	0.186	
		최대값	1.080	0.934	0.116	0.000	0.385	
모멘트 최대 시	sLCB1	0.244	0.082	0.154	0.000	0.073	0.247	
	sLCB2	0.186	0.061	0.116	0.000	0.076	0.186	
	sLCB3	1.080	0.001	0.176	0.049	0.214	0.385	
	sLCB4	0.183	0.062	0.116	0.000	0.056	0.186	
	sLCB5	0.030	0.044	0.043	0.154	0.312	0.186	
	sLCB6	0.183	0.062	0.116	0.000	0.056	0.186	
	sLCB7	0.183	0.062	0.116	0.000	0.054	0.186	
	sLCB8	0.183	0.062	0.116	0.000	0.054	0.186	
	sLCB9	0.183	0.062	0.116	0.000	0.054	0.186	
	sLCB10	0.183	0.062	0.116	0.000	0.054	0.186	
		최대값	1.080	0.001	0.176	0.049	0.385	

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고
보강(상부)	sLCB1	0.153	0.073	0.038	0.002	0.085	0.162	
	sLCB2	0.116	0.044	0.028	0.000	0.065	0.123	
	sLCB3	0.641	0.445	0.029	0.002	0.100	0.899	
	sLCB4	0.115	0.058	0.030	0.002	0.078	0.121	
	sLCB5	0.347	0.554	0.160	0.000	0.062	0.835	
	sLCB6	0.115	0.058	0.030	0.002	0.078	0.121	
	sLCB7	0.115	0.055	0.028	0.001	0.064	0.121	
	sLCB8	0.115	0.055	0.028	0.001	0.064	0.121	
	sLCB9	0.115	0.055	0.028	0.001	0.064	0.121	
	sLCB10	0.115	0.055	0.028	0.001	0.064	0.121	
		최대값	0.641	0.554	0.160	0.000	0.899	
모멘트 최대시	sLCB1	0.153	0.001	0.044	0.003	0.085	0.162	
	sLCB2	0.116	0.001	0.033	0.002	0.065	0.123	
	sLCB3	0.641	0.001	0.168	0.000	0.100	0.899	
	sLCB4	0.115	0.001	0.033	0.002	0.078	0.121	
	sLCB5	0.347	0.554	0.160	0.000	0.062	0.835	
	sLCB6	0.115	0.001	0.033	0.002	0.078	0.121	
	sLCB7	0.115	0.001	0.033	0.002	0.064	0.121	
	sLCB8	0.115	0.001	0.033	0.002	0.064	0.121	
	sLCB9	0.115	0.001	0.033	0.002	0.064	0.121	
	sLCB10	0.115	0.001	0.033	0.002	0.064	0.121	
		최대값	0.641	0.001	0.168	0.000	0.899	

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
보강(상부)	축력 최대 시	sLCB1	0.000	0.075	0.093	0.002	0.006	0.125	
		sLCB2	0.000	0.079	0.069	0.001	0.005	0.093	
		sLCB3	0.446	0.000	0.087	0.019	0.008	0.097	
		sLCB4	0.000	0.056	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB5	0.000	0.545	0.069	0.004	0.016	0.090	
		sLCB6	0.000	0.056	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB7	0.000	0.056	0.070	0.001	0.005	0.093	
		sLCB8	0.000	0.056	0.070	0.001	0.005	0.093	
		sLCB9	0.000	0.056	0.070	0.001	0.005	0.093	
		sLCB10	0.000	0.056	0.070	0.001	0.005	0.093	
		최대값	0.446	0.545	0.069	0.004	0.005	0.125	
보강(하부)	모멘트 최대 시	sLCB1	0.000	0.074	0.106	0.006	0.006	0.125	
		sLCB2	0.000	0.077	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB3	0.446	0.001	0.087	0.022	0.008	0.097	
		sLCB4	0.000	0.055	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB5	0.000	0.478	0.085	0.006	0.016	0.090	
		sLCB6	0.000	0.055	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB7	0.000	0.056	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB8	0.000	0.056	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB9	0.000	0.056	0.080	0.004	0.005	0.093	
		sLCB10	0.000	0.056	0.080	0.004	0.005	0.093	
		최대값	0.446	0.074	0.106	0.006	0.005	0.125	

구분	CASE	Fx(인장) (kN)	Fx(압축) (kN)	My (kN.m)	Mz (kN.m)	Fy (kN)	Fz (kN)	비 고	
G1 더블	축력 최대 시	sLCB1	0.459	0.000	0.196	0.001	0.016	0.263	
		sLCB2	0.481	0.000	0.149	0.001	0.017	0.196	
		sLCB3	0.953	0.000	0.150	0.020	0.194	0.197	
		sLCB4	0.408	0.000	0.211	0.003	0.016	0.234	
		sLCB5	0.279	0.305	0.149	0.020	0.177	0.198	
		sLCB6	0.408	0.000	0.211	0.003	0.016	0.234	
		sLCB7	0.345	0.000	0.147	0.000	0.012	0.197	
		sLCB8	0.345	0.000	0.147	0.000	0.012	0.197	
		sLCB9	0.345	0.000	0.147	0.000	0.012	0.197	
		sLCB10	0.345	0.000	0.147	0.000	0.012	0.197	
		최대값	0.953	0.305	0.149	0.020	0.263		
G1 더블	모 멘 트 최 대 시	sLCB1	0.459	0.001	0.234	0.006	0.016	0.263	
		sLCB2	0.481	0.001	0.176	0.006	0.017	0.196	
		sLCB3	0.953	0.001	0.060	0.202	0.194	0.197	
		sLCB4	0.408	0.001	0.258	0.005	0.016	0.234	
		sLCB5	0.279	0.001	0.070	0.175	0.177	0.198	
		sLCB6	0.408	0.001	0.258	0.005	0.016	0.234	
		sLCB7	0.345	0.001	0.175	0.004	0.012	0.197	
		sLCB8	0.345	0.001	0.175	0.004	0.012	0.197	
		sLCB9	0.345	0.001	0.175	0.004	0.012	0.197	
		sLCB10	0.345	0.001	0.175	0.004	0.012	0.197	
		최대값	0.953	0.001	0.258	0.005	0.263		

4) 부재단면검토

1 기둥(하부)

1-1 단면 제원

- 부재 규격 : P 101.6*3.2
- 재 질 : SS275

단면적(A)	989.2	mm ²	전단면적(A)	494.6123	mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	1200000	mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	1200000	mm ⁴
단면2차반경(ry)	34.8	mm	단면2차반경(rz)	34.8	mm
탄성계수	205000	MPa	항복강도	275	MPa

1-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.710	4.386	2.773	0.002	1.225	압축력 최대시
0.710	4.164	2.985	0.000	1.225	모멘트 최대시

1-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

$$\begin{aligned} \text{좌굴 길이 계수 } K &= 1 \\ \text{좌굴 길이 } L &= 3450 \text{ mm} \\ \text{단면 회전 반경 } r &= 34.8 \text{ mm} \\ KL/r &= 99.138 \\ \text{한계 세장비 } C_c &= \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304 \end{aligned}$$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$$KL/r < C_c \text{ 이므로 } F_c \text{ 는 } = 96.152 \text{ MPa}$$

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

1-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 710 / 989 = 0.717 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 4386 / 989 = 4.434 \text{ MPa} < 96.152 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 2773100 / 1200000 \times 50.800$$

$$= 117.395 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 2400 / 1200000 \times 50.800$$

$$= 0.102 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.717}{165.000} + \frac{1 \times 117.395}{\left(1 - \frac{0.717}{107.406}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.102}{\left(1 - \frac{0.717}{107.406}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.721 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.717}{0.6 \times 275} + \frac{117.395}{165.000} + \frac{0.102}{165.000}$$

$$= 0.716 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 99^2} = 107.406 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 1225 / 495 = 2.477 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

1-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 710 / 989 = 0.717 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 4164 / 989 = 4.209 \text{ MPa} < 96.152 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_{xy}$$

$$= 2985200 / 1200000 \times 50.800$$

$$= 126.373 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_{xz}$$

$$= 0 / 1200000 \times 50.800$$

$$= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.717}{165.000} + \frac{1 \times 126.373}{\left(1 - \frac{0.717}{107.406}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{0.717}{107.406}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.775 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{0.717}{0.6 \times 275} + \frac{126.373}{165.000} + \frac{0.000}{165.000}$$

$$= 0.770 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 99^2} = 107.406 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 1225 / 495 = 2.477 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2 보(하부)

2-1 단면 제원

- 부재 규격 : LC 100*50*20*2.9
- 재질 : SS275

단면적(A)	626.264 mm ²	전단면적(A)	360.2087 mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	945198.7631 mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	217809.6966 mm ⁴
단면2차반경(ry)	38.8 mm	단면2차반경(rz)	18.6 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

2-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비고
0.807	0.842	0.283	0.032	0.447	압축력 최대시
0.807	0.094	0.862	0.000	0.447	모멘트 최대시

2-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 1700 mm

단면 회전 반경 r = 18.6 mm

$KL/r = 91.398$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r < C_c$ 이므로 Fc 는 = 103.886 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

2-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 807 / 626 = 1.288 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 842 / 626 = 1.344 \text{ MPa} < 103.886 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y$$

$$= 283300 / 945199 \times 50.000$$

$$= 14.986 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y$$

$$= 32400 / 217810 \times 18.457$$

$$= 2.746 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.288}{165.000} + \frac{1 \times 14.986}{\left(1 - \frac{1.288}{126.367}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 2.746}{\left(1 - \frac{1.288}{126.367}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.116 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{1.288}{0.6 \times 275} + \frac{14.986}{165.000} + \frac{2.746}{165.000}$$

$$= 0.115 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 91^2} = 126.367 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 447 / 360 = 1.240 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 807 / 626 = 1.288 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 94 / 626 = 0.151 \text{ MPa} < 103.886 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 862000 / 945199 \times 50.000$$

$$= 45.599 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 0 / 217810 \times 18.457$$

$$= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.288}{165.000} + \frac{1 \times 45.599}{\left(1 - \frac{1.288}{126.367}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{1.288}{126.367}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.287 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{1.288}{0.6 \times 275} + \frac{45.599}{165.000} + \frac{0.000}{165.000}$$

$$= 0.284 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 91^2} = 126.367 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 447 / 360 = 1.240 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3 보강(하부)

3-1 단면 제원

- 부재 규격 : L 40*3
- 재 질 : SS275

단면적(A)	233.6	mm ²	전단면적(A)	100	mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	35300	mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	35300	mm ⁴
단면2차반경(ry)	12.3	mm	단면2차반경(rz)	12.3	mm
탄성계수	205000	MPa	항복강도	275	MPa

3-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.328	0.334	0.005	0.001	0.018	압축력 최대시
0.328	0.003	0.009	0.000	0.018	모멘트 최대시

3-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 1980 mm

단면 회전 반경 r = 12.3 mm

$KL/r = 160.976$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r > C_c$ 이므로 F_c 는 = 40.737 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

3-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 328 / 234 = 1.405 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 334 / 234 = 1.430 \text{ MPa} < 40.737 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y$$

$$= 5200 / 35300 \times 28.890$$

$$= 4.256 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y$$

$$= 1000 / 35300 \times 11.110$$

$$= 0.315 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.405}{165.000} + \frac{1 \times 4.256}{\left(1 - \frac{1.405}{40.737}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.315}{\left(1 - \frac{1.405}{40.737}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.037 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{1.405}{0.6 \times 275} + \frac{4.256}{165.000} + \frac{0.315}{165.000}$$

$$= 0.036 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 161^2} = 40.737 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 18 / 100 = 0.184 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 328 / 234 = 1.405 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 3 / 234 = 0.012 \text{ MPa} < 40.737 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 8700 / 35300 \times 28.890$$

$$= 7.120 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 0 / 35300 \times 11.110$$

$$= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.405}{165.000} + \frac{1 \times 7.120}{\left(1 - \frac{1.405}{40.737}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{1.405}{40.737}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.053 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{1.405}{0.6 \times 275} + \frac{7.120}{165.000} + \frac{0.000}{165.000}$$

$$= 0.052 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 161^2} = 40.737 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 18 / 100 = 0.184 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4 기둥(상부)

4-1 단면 제원

- 부재 규격 : H 100*100*3.2*4.5
- 재 질 : SS275

단면적(A)	1277.0407 mm ²	전단면적(A)	320 mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	2415518.151 mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	751811.9114 mm ⁴
단면2차반경(ry)	43.5 mm	단면2차반경(rz)	24.3 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

4-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
1.445	4.039	0.126	0.044	0.794	압축력 최대시
1.445	3.410	0.510	0.027	0.794	모멘트 최대시

4-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 610 mm

단면 회전 반경 r = 24.3 mm

$KL/r = 25.103$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r < C_c$ 이므로 F_c 는 = 154.381 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

4-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 1445 / 1277 = 1.131 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 4039 / 1277 = 3.162 \text{ MPa} < 154.381 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y$$

$$= 125800 / 2415518 \times 50.000$$

$$= 2.604 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y$$

$$= 43700 / 751812 \times 50.000$$

$$= 2.906 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.131}{165.000} + \frac{1 \times 2.604}{\left(1 - \frac{1.131}{1675.174}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 2.906}{\left(1 - \frac{1.131}{1675.174}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.040 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{1.131}{0.6 \times 275} + \frac{2.604}{165.000} + \frac{2.906}{165.000}$$

$$= 0.040 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 25^2} = 1675.174 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 794 / 320 = 2.482 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 1445 / 1277 = 1.131 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 3410 / 1277 = 2.670 \text{ MPa} < 154.381 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 510400 / 2415518 \times 50.000$$

$$= 10.565 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 26700 / 751812 \times 50.000$$

$$= 1.776 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{1.131}{165.000} + \frac{1 \times 10.565}{\left(1 - \frac{1.131}{1675.174}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 1.776}{\left(1 - \frac{1.131}{1675.174}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.082 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{1.131}{0.6 \times 275} + \frac{10.565}{165.000} + \frac{1.776}{165.000}$$

$$= 0.082 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 25^2} = 1675.174 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 794 / 320 = 2.482 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

5 보(상부)

5-1 단면 제원

- 부재 규격 : H 100*100*3.2*4.5
- 재 질 : SS275

단면적(A)	1277.0407 mm ²	전단면적(A)	320 mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	2415518.151 mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	751811.9114 mm ⁴
단면2차반경(ry)	43.5 mm	단면2차반경(rz)	24.3 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

5-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.278	0.630	1.414	0.225	1.621	압축력 최대시
0.278	0.590	1.415	0.234	1.621	모멘트 최대시

5-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 5000 mm

단면 회전 반경 r = 24.3 mm

$KL/r = 205.761$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r > C_c$ 이므로 F_c 는 = 24.933 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$

5-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 278 / 1277 = 0.218 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 630 / 1277 = 0.493 \text{ MPa} < 24.933 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y$$

$$= 1413800 / 2415518 \times 50.000$$

$$= 29.265 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y$$

$$= 225000 / 751812 \times 50.000$$

$$= 14.964 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.218}{165.000} + \frac{1 \times 29.265}{\left(1 - \frac{0.218}{24.933}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 14.964}{\left(1 - \frac{0.218}{24.933}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.272 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{0.218}{0.6 \times 275} + \frac{29.265}{165.000} + \frac{14.964}{165.000}$$

$$= 0.269 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 206^2} = 24.933 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 1621 / 320 = 5.066 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

5-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 278 / 1277 = 0.218 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 590 / 1277 = 0.462 \text{ MPa} < 24.933 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 1414500 / 2415518 \times 50.000$$

$$= 29.279 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 233800 / 751812 \times 50.000$$

$$= 15.549 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.218}{165.000} + \frac{1 \times 29.279}{\left(1 - \frac{0.218}{24.933}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 15.549}{\left(1 - \frac{0.218}{24.933}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.275 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{0.218}{0.6 \times 275} + \frac{29.279}{165.000} + \frac{15.549}{165.000}$$

$$= 0.273 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 206^2} = 24.933 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 1621 / 320 = 5.066 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

6 퍼린

6-1 단면 제원

- 부재 규격 : LC 100*50*20*2.1
- 재 질 : SS275

단면적(A)	467.4321 mm ²	전단면적(A)	266.1261 mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	725798.6681 mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	171044.2784 mm ⁴
단면2차반경(ry)	39.4 mm	단면2차반경(rz)	19.1 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

6-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
1.080	0.934	0.116	0.000	0.385	압축력 최대시
1.080	0.001	0.176	0.049	0.385	모멘트 최대시

6-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 623 mm

단면 회전 반경 r = 19.1 mm

$KL/r = 32.618$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r < C_c$ 이므로 Fc 는 = 150.169 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

6-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 1080 / 467 = 2.310 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 934 / 467 = 1.999 \text{ MPa} < 150.169 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y$$

$$= 115700 / 725799 \times 50.000$$

$$= 7.971 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y$$

$$= 0 / 171044 \times 18.544$$

$$= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{m,x} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{m,y} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{2.310}{165.000} + \frac{1 \times 7.971}{\left(1 - \frac{2.310}{992.196}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{2.310}{992.196}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.062 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{2.310}{0.6 \times 275} + \frac{7.971}{165.000} + \frac{0.000}{165.000}$$

$$= 0.062 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 33^2} = 992.196 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 385 / 266 = 1.447 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

6-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 1080 / 467 = 2.310 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 1 / 467 = 0.002 \text{ MPa} < 150.169 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 176400 / 725799 \times 50.000$$

$$= 12.152 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 48900 / 171044 \times 18.544$$

$$= 5.302 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{2.310}{165.000} + \frac{1 \times 12.152}{\left(1 - \frac{2.310}{992.196}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 5.302}{\left(1 - \frac{2.310}{992.196}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.120 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{2.310}{0.6 \times 275} + \frac{12.152}{165.000} + \frac{5.302}{165.000}$$

$$= 0.120 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 33^2} = 992.196 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 385 / 266 = 1.447 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

7 보강(상부)

7-1 단면 제원

- 부재 규격 : L 40*3
- 재 질 : SS275

단면적(A)	233.6	mm ²	전단면적(A)	100	mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	35300	mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	35300	mm ⁴
단면2차반경(ry)	12.3	mm	단면2차반경(rz)	12.3	mm
탄성계수	205000	MPa	항복강도	275	MPa

7-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.641	0.554	0.160	0.000	0.899	압축력 최대시
0.641	0.001	0.168	0.000	0.899	모멘트 최대시

7-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K	=	1	
좌굴 길이 L	=	334	mm
단면 회전 반경 r	=	12.3	mm
KL/r	=	27.154	
한계 세장비 Cc	= $\sqrt{2\pi^2 E_s/E_y}$	= 121.304	

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r < C_c$ 이므로 Fc 는 = 153.275 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

7-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 641 / 234 = 2.744 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 554 / 234 = 2.371 \text{ MPa} < 153.275 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_{xy}$$

$$= 160000 / 35300 \times 28.890$$

$$= 130.944 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_{xy}$$

$$= 0 / 35300 \times 11.110$$

$$= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{2.744}{165.000} + \frac{1 \times 130.944}{\left(1 - \frac{2.744}{1431.609}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{2.744}{1431.609}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.812 < 1.0$$

∴ OK

$$\frac{2.744}{0.6 \times 275} + \frac{130.944}{165.000} + \frac{0.000}{165.000}$$

$$= 0.810 < 1.0$$

∴ OK

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 27^2} = 1431.609 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 899 / 100 = 8.993 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

7-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 641 / 234 = 2.744 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 1 / 234 = 0.004 \text{ MPa} < 153.275 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 168200 / 35300 \times 28.890$$

$$= 137.655 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 0 / 35300 \times 11.110$$

$$= 0.000 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{2.744}{165.000} + \frac{1 \times 137.655}{\left(1 - \frac{2.744}{1431.609}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.000}{\left(1 - \frac{2.744}{1431.609}\right) \times 165.000} = 0.853 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{2.744}{0.6 \times 275} + \frac{137.655}{165.000} + \frac{0.000}{165.000} = 0.851 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 27^2} = 1431.609 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 899 / 100 = 8.993 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

8 보강(상부)

8-1 단면 제원

- 부재 규격 : L 50*6
- 재 질 : SS275

단면적(A)	564.4	mm ²	전단면적(A)	250	mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	126000	mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	126000	mm ⁴
단면2차반경(ry)	14.9	mm	단면2차반경(rz)	14.9	mm
탄성계수	205000	MPa	항복강도	275	MPa

8-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.446	0.545	0.069	0.004	0.125	압축력 최대시
0.446	0.074	0.106	0.006	0.125	모멘트 최대시

8-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 5000 mm

단면 회전 반경 r = 14.9 mm

$KL/r = 335.570$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r > C_c$ 이므로 F_c 는 = 9.374 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

8-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 446 / 564 = 0.791 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 545 / 564 = 0.965 \text{ MPa} < 9.374 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_{xy}$$

$$= 68800 / 126000 \times 35.298$$

$$= 19.274 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_{xz}$$

$$= 4100 / 126000 \times 14.702$$

$$= 0.478 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.791}{165.000} + \frac{1 \times 19.274}{\left(1 - \frac{0.791}{9.374}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.478}{\left(1 - \frac{0.791}{9.374}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.136 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{0.791}{0.6 \times 275} + \frac{19.274}{165.000} + \frac{0.478}{165.000}$$

$$= 0.125 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 336^2} = 9.374 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 125 / 250 = 0.498 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

8-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 446 / 564 = 0.791 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 74 / 564 = 0.131 \text{ MPa} < 9.374 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 106100 / 126000 \times 35.298$$

$$= 29.723 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 5500 / 126000 \times 14.702$$

$$= 0.642 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.791}{165.000} + \frac{1 \times 29.723}{\left(1 - \frac{0.791}{9.374}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 0.642}{\left(1 - \frac{0.791}{9.374}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.206 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{0.791}{0.6 \times 275} + \frac{29.723}{165.000} + \frac{0.642}{165.000}$$

$$= 0.189 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 336^2} = 9.374 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 125 / 250 = 0.498 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

9 G1 더블

9-1 단면 제원

- 부재 규격 : LC 100*50*20*2.9*2
- 재 질 : SS275

단면적(A)	1126.36 mm ²	전단면적(A)	580 mm ²
단면2차모멘트(Iyy)	1771542.763 mm ⁴	단면2차모멘트(Izz)	586755.5345 mm ⁴
단면2차반경(ry)	39.7 mm	단면2차반경(rz)	22.8 mm
탄성계수	205000 MPa	항복강도	275 MPa

9-2 검토하중

인장력(kN)	압축력(kN)	휨모멘트y(kN·m)	휨모멘트z(kN·m)	전단력(kN)	비 고
0.953	0.305	0.149	0.020	0.263	압축력 최대시
0.953	0.001	0.258	0.005	0.263	모멘트 최대시

9-3 허용 응력

1) 허용 축방향 인장응력 (Ft)

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$F_t = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

2) 허용 축방향 압축응력 (Fc)

좌굴 길이 계수 K = 1

좌굴 길이 L = 1400 mm

단면 회전 반경 r = 22.8 mm

$KL/r = 61.404$

한계 세장비 $C_c = \sqrt{2\pi^2 E_s/E_y} = 121.304$

허용 압축응력 Fc (KDS 14 30 10)

(1) $KL/r \leq C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}}$$

(2) $KL/r > C_c$ 일 때

$$F_c = \frac{12\pi^2 E_s}{23(KL/r)^2}$$

$KL/r < C_c$ 이므로 Fc 는 = 130.289 MPa

3) 허용 휨 압축응력 (Fb)

$$F_b = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$$

4) 허용 전단응력 (Fv)

$$F_v = 0.4 \times 275 = 110 \text{ MPa}$$

9-4 축력 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 953 / 1126 = 0.846 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 305 / 1126 = 0.271 \text{ MPa} < 130.289 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I_x y$$

$$= 148800 / 1771543 \times 50.000$$

$$= 4.200 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I_x y$$

$$= 20400 / 586756 \times 53.000$$

$$= 1.843 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.846}{165.000} + \frac{1 \times 4.200}{\left(1 - \frac{0.846}{279.976}\right) \times 165.000} + \frac{1 \times 1.843}{\left(1 - \frac{0.846}{279.976}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.042 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{0.846}{0.6 \times 275} + \frac{4.200}{165.000} + \frac{1.843}{165.000}$$

$$= 0.042 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 61^2} = 279.976 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 263 / 580 = 0.453 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

9-5 모멘트 최대 시 부재 응력 검토

1) 축방향 응력 (Fx)

$$f_t = 953 / 1126 = 0.846 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 1 / 1126 = 0.001 \text{ MPa} < 130.289 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

2) 휨 응력 (My)

$$f_{by} = M_y / I \times y$$

$$= 257600 / 1771543 \times 50.000$$

$$= 7.270 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

3) 휨 응력 (Mz)

$$f_{bz} = M_z / I \times y$$

$$= 5100 / 586756 \times 53.000$$

$$= 0.461 \text{ MPa} < 165.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

4) 합성응력 (축력 - 휨)

축압축과 휨을 받는 부재는 다음 식을 만족하여야 함 (KDS 14 30 10)

$$\frac{f_c}{F_c} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-1)$$

$$\frac{f_c}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4.6-2)$$

$$\frac{0.846}{165.000} + \frac{1 \times 7.270}{\left(1 - \frac{0.846}{279.976}\right) \times 165.000}$$

$$+ \frac{1 \times 0.461}{\left(1 - \frac{0.846}{279.976}\right) \times 165.000}$$

$$= 0.052 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

$$\frac{0.846}{0.6 \times 275} + \frac{7.270}{165.000} + \frac{0.461}{165.000}$$

$$= 0.052 < 1.0 \therefore \text{OK}$$

여기서,

Cm = 1 적용

Fe' = 안전율을 포함한 오일러 좌굴응력(MPa)

$$= \frac{12 \times \pi^2 \times 205000}{23 \times 61^2} = 279.976 \text{ MPa}$$

5) 전단응력 (Fyz)

$$f_v = V / A(\text{전단 단면적})$$

$$= 263 / 580 = 0.453 \text{ MPa} < 110.000 \text{ MPa} \therefore \text{OK}$$

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지 자립형산업모델 기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지 자립형 산업모델 기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.