

최 종
연구보고서

온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 및 설계시스템 개발

Development of Optimum Model and Design
Systems for Saving Structural Material and
Improving Safety of Greenhouse Structure

주 관 연구 기 관
경 북 대 학 교
협 동 연구 기 관
영 진 전 문 대 학
위 탁 연구 기 관
시 설 원 예 시 험 장

농림자료실



0013415

농 림 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 및 설계시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2007년 5월 24일

주관연구기관명 : 경북대학교

총괄연구책임자 : 이 석 건

세부연구책임자 : 이 현 우

연 구 원 : 이 종 원

협동연구기관명 : 영진전문대학

협동연구책임자 : 박 춘 욱

위탁연구기관명 : 시설원예시험장

위탁연구책임자 : 이 시 영

요 약 문

I. 제목 : 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 및 설계시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

국내의 시설재배면적은 온실이 널리 보급되기 시작한 1990년에 25,450ha에서 2000년에는 52,189ha로 10년동안 2배 이상 증가하여 2005년말 현재 우리나라의 원예시설 면적은 52,022ha로 중국, 일본에 이어 세계 3위를 차지하고 있다. 작목별로는 채소재배 시설이 48,574ha로 93%, 화훼재배 시설이 3,448.4ha로 7%를 차지하고 있으며 시설 유형별로는 비닐하우스 49,476.4ha, 유리온실 315.8ha, 경질판온실 267.3ha, 기타 1,962.9ha 이며 이 중 채소를 재배하는 단동 비닐하우스의 면적은 41,263ha로 전체 시설면적의 79.3%를 차지하고 있다.

국내에 보급되어 있는 온실은 구조안전성, 환경조절 및 자동화설비의 도입 수준에 따라 자동화 유리온실, 농가보급형 자동화 플라스틱온실 및 농가지도형 비닐하우스로 대별할 수 있다. 이러한 온실의 구조는 안전성, 환경조절의 효율성, 경제성 및 시공성 등의 조건을 구비해야 한다. 온실의 구조안전성은 구조설계의 적정성, 사용자재 및 시공의 신뢰성, 유지·관리의 적절성 등에 의하여 결정되므로 각 단계에서 면밀하게 검토하면 설계하중 범위내에 충분한 안전성을 확보할 수 있다. 그러나 이 중 한 단계만이라도 소홀할 경우에는 구조안전성에 문제가 발생하게 되어 매년 강풍이나 폭설로 원예시설이 파괴되어 막대한 피해를 입고 있는 실정이다. 원예시설의 구조는 안전성이 지나치게 강조되면 과잉설계가 되어 자재의 낭비를 초래하고 안전성이 확보되지 않으면 강풍이나 폭설시 파손으로 인한 막대한 피해를 입게 된다. 따라서, 온실의 설계는 안전한 구조, 적정환경조절, 소요에너지의 절감, 용이한 시공 등을 고려해야 한다.

국내 시설재배면적의 대부분을 차지하고 있는 단동 비닐하우스(터널형 및 비가림 시설 포함)는 시공의 간편성과 시설비의 저렴성으로 농가에서 선호하고 있는 실정이나 구조의 경량성으로 인하여 기상재해에 취약한 실정이며, 지역 및 재배작물에 따라

온실의 형태 또한 다양하여 규격화 및 표준화가 어려운 실정이다. 2001년의 기상재해 이후 단동비닐하우스의 구조안정성 검토가 일부 수행되어 농가지도형 비닐하우스 설계서가 제작되었으나 지역별 기상조건을 고려한 구조설계가 이루어지지 않았으며, 경제적인 설계에 관한 구체적인 연구자료 또한 미비하여 하우스의 설치가 관행적으로 이루어지고 있다. 그리고, 벤로형 및 한국 유리온실의 경우에는 구조의 안전성 문제에 큰 비중을 두고 있어 최적설계에 의한 경제적인 설계가 필요한 실정이다. 따라서, 온실산업과 시설원예의 경쟁력을 강화하기 위해서는 단동비닐하우스의 안정성을 향상시킬 수 있는 구조공학적인 연구와 연동온실의 사용자재를 절감할 수 있는 최적설계가 필요한 실정이다. 지역적 기상조건 및 특성으로 고려한 안정성 향상과 자재절감을 위한 온실모델 개발과 최적설계시스템의 개발이 시급하며, 기술적, 경제·사회적인 측면에서 본 과제의 중요성을 요약하면 다음과 같다.

1. 기술적 측면

국내에 보급되어 있는 원예시설을 구조안전성, 환경조절 및 자동화설비의 도입 수준에 따라 구분하면 자동화 유리온실, 농가보급형 자동화 온실(1-2W형) 및 농가지도형 비닐하우스로 대별할 수 있다. 이러한 각종 원예시설의 표준도면이 작성되어 관련 기관 및 농가에 보급되고 있으나 표준설계도면은 설치지역의 기상조건 및 특성을 고려하지 못한 일반화된 모델이므로 지역별로 적용할 수 있는 기준이 불명확하며 과잉 설계된 부재 및 과소설계된 구조 등의 일부 문제점을 유발하고 있어 시공시 많은 애로사항을 초래하고 있는 실정이다. 실례로, 이 등(2002)은 단동비닐하우스의 경우에 동일한 규격과 골조재를 사용할 때 측벽구조에 따라 부재에 발생하는 최대휨모멘트가 풍하중은 17%, 적설하중은 36%를 감소시킬 수 있는 것으로 보고하였다. 그리고, 이 등(2003)은 온실의 폭, 측벽높이 및 지붕높이에 따라 구조안전성을 분석한 결과, 아치형 단동비닐하우스의 경우, 폭과 측고비가 증가할수록 풍하중 및 설하중에 불리하며, 온실부재에 발생하는 최대모멘트가 약 245% 증가하여 온실의 폭과 측벽높이/지붕높이비에 따라 부재에 발생하는 최대단면력이 상이하게 나타나고, 동일한 부재를 사용할 경우에는 온실의 측벽을 낮게 하는 것이 기상하중에 유리한 것으로 보고하였다. 또한, 김 등은 연동형온실의 최적설계를 통하여 자재의 절감과 구조개선방향을 제시하였다. 따라서, 국내에 설치된 단동온실의 형태(아치형, 지붕형, 복숭아형)에 대하여 다양한 폭에 대한 측고높이 및 지붕높이의 검토가 필요하며 이러한 연구를 통하여 기

상재해로부터의 안전성이 향상된 단동비닐하우스 모델의 개발과 최적설계기법을 도입하여 자재의 절감 및 온실형상 최적화를 통하여 구조적 성능이 향상되고 경제적인 온실구조의 설계를 통하여 안정적인 시설원예의 기반을 조성할 필요가 있다.

온실시공에 필요한 설계는 지역별 기상하중 및 기타 조건을 고려하여 구조해석을 수행하여 구조해석결과를 기초로 설계서를 작성하는 것이 일반적이다. 현재, 구조해석에 사용되고 있는 프로그램은 대부분이 외국의 상용프로그램들이며 최근 국내에서 개발된 프로그램들이 일부 있다. 이러한 프로그램들은 고가의 시스템이며 다양하고 우수한 기능에 비하여 구성이 복잡하게 이루어져 있어 온실설계에 적용하기에는 경제적 문제와 전문지식이 필요하며, 구조물의 최적화에 있어 구조해석 프로그램과 최적설계 프로그램이 별도로 구성이 되어 있어 이원화 시스템으로 온실구조의 최적설계가 이루어지고 있는 실정이다. 그러나, 온실의 구조해석시 요구되는 전문지식은 전산D/B 구성을 통하여 해결할 수 있으므로 사용이 간편하며 저렴한 온실의 구조해석용 프로그램의 개발이 가능하다. 따라서, 온실의 구조의 안전성을 확보하고 시공비를 최소화할 수 있는 온실의 구조해석, 부재단면 및 구조형상 최적화가 동시에 일률적으로 수행되어 설계도면이 자동출력되는 최적설계프로그램의 개발이 시급한 실정이다.

2. 경제·산업적 측면

국내 시설원예의 전체면적인 52,135.2ha중 유리온실이 330ha로 0.6%, 철골 경질판 온실이 77.4ha로 0.2%이고, 아연도강관의 파이프 골조로 시공된 비닐하우스 면적이 51,727.8ha로 99.2%를 차지하고 있다.

2000년도 정부지원사업의 평당 온실 건축비는 유리온실이 50만원, 철골 경질판 온실이 31만원, 자동화 비닐온실이 12만3천원으로 파이프 골조 온실은 상대적으로 설치비가 저렴한 편이고, 비교적 견고하며 보온과 통풍이 양호하고 가격에 비하여 우수한 성능이 인정되어 수출이 증대되고 있는 등 많은 장점을 가지고 있는 반면에, 구조의 취약성으로 가지고 있다. 전체 원예시설 중에서 거의 대부분을 차지하고 있는 파이프 골조 온실은 지역적 기상조건 및 특성을 고려한 설계나 시공이 고려되지 않아 피해가 극심하여 시설복구에 막대한 인력과 예산이 소모되며 이러한 상황은 매년 되풀이되고 있는 실정이다. 실례로, 1994년 2월 12일의 폭설 및 2월 21의 강풍, 1995년 7월의 태풍 페이, 1997년 11월의 나주지역의 돌풍, 1999년 8월의 태풍 올가 및 2001년 1월과 2월의 폭설 등에 의한 비닐하우스의 피해가 발생하였다. 최근 2001년 1월 7일~9일 동

안의 폭설로 인하여 비닐하우스 3,418ha(2,228억원)의 피해가 발생하였으며 2월 15일에는 1,518ha의 비닐하우스가 파손되었다. 이러한, 피해요인으로는 불안정한 구조설계, 부실시공 및 자재의 불량 등을 들 수 있으며 그 중 주요 피해요인은 지역적 기상조건을 고려한 온실의 안전모델의 부재와 관리소홀 등이다. 온실의 표준설계도면이 있으나 관련기관의 인력부족 및 담당자의 전문성 결여 등으로 인하여 지역별 적용에 있어 체계적인 지원이 이루어지지 않아 온실시공은 시설농가의 관례적인 자가시공과 관련업체에서 일률적인 시공이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서, 설치지역의 기상조건 및 특성을 고려한 원예시설의 안전모델의 연구가 시급하며, 시설농가, 관련업체 및 관련기관 등의 인력부족 및 전문성 결여 등을 보완할 수 있는 온실 자동설계시스템의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

3. 사회·문화적 측면

매년 반복되고 있는 기상재해에 따른 원예시설의 피해는 시설원예산업의 기반을 위협할 뿐만 아니라 국가적으로도 경제적 손실이 막대한 실정이다. 정부는 피해농가를 대상으로 피해보상 기준을 확립하고 복구시 온실표준설계도면에 따라 시공할 것을 권고하고 있다. 하지만, IMF를 겪으면서 기업 및 관련기관 등에서는 경쟁력 강화를 위한 조직 및 인원에 대한 구조조정을 단행하여 관련기관의 종사자의 급격한 감소와 관련기관 종사자들의 전문성 결여로 인한 현장지도가 체계적으로 이루지고 있지 못한 실정이다. 따라서, 기상재해로 인한 원예시설의 피해는 매년 반복될 수 밖에 없으며 그 결과, 시설농가의 경쟁력 향상과 관련분야의 발전을 기대할 수 없다. 그리고, 시설현대화를 통한 생산비절감과 고품질 농산물의 생산을 목표로 하고 있는 시설원예사업을 추진함에 있어서, 가장 중요한 것은 시설의 구조안전성을 확보하는 것이다. 따라서, 설치지역의 기후조건하에서 자동환경조절이 용이하고 생산에너지 비용을 절감시킬 수 있는 온실구조의 최적설계법이 제시되어야 하는 동시에 자재의 규격화 및 국산화와 지역별, 작물별 온실모델 개발에 필요한 구체적인 자료가 요청된다. 한편 시설원예의 국제경쟁력을 확보하고 효율적인 경영을 위한 집단화사업과 농림정보화사업이 정책적으로 추진되고 있는 바, 시설원예의 기술적 기반을 강화하는 동시에 장래 시설원예산업의 전산정보화를 통한 인프라구축을 위해서는 온실설계에 관한 종합적이고 체계적인 연구의 추진이나 시설농가의 지도에 필요한 기술개발이 정립되어야 한다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구의 목표는 온실구조설계용 최적기법을 개발하여 지역별 기상조건 및 특성을 고려한 원예시설의 안전구조 모델을 정립하고, 온실용 구조해석 S/W의 개발을 통하여 설치지역에 따른 온실의 구조의 최적설계가 가능한 프로그램을 개발하는 것이다. 그리고, 설계조건(설치지역, 온실형태, 재배작물 등)을 단순화하여 수요자(관련업체, 관련기관, 설계자 및 시설농가)가 용이하게 이용할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다.

1. 기존 온실모델에 대한 구조 현황 및 문제점 분석

- 가. 풍·설해에 의한 온실피해 양상 및 원인 규명 : 피해원인의 구조공학적 모델 정립
- 나. 기존 온실모델에 대한 구조공학적 검토 및 분석
 - : 자료수집 및 기초연구 비교 분석 : 수정·보완내용 검토
- 다. 지역별, 재배작물별 온실구조 특성 분석

2. 온실 최적설계시스템 개발

가. 온실용 구조해석 S/W 개발

- 지역별, 재배작물별 설계하중 산정 알고리즘 구축
- 지역별 기상자료 전산 D/B화 및 구조해석 알고리즘 구축
- 사용자 중심의 인터페이스 구축을 통한 구조해석 입력자료의 전산 D/B화
- Pre/Post Processor 프로그램 개발
- 온실용 구조해석 프로그램 개발 및 검증
- 지역별, 온실형태별 시방서 작성에 필요한 자료 수집 및 전산 D/B화

나. 온실 최적설계시스템 개발

- 온실구조의 최적설계에 필요한 자료 및 알고리즘 구축
- 온실설계용 최적설계기법 및 프로그램 개발
- 프로그램의 성능 검증

3. 안전성 향상 및 자재절감을 위한 온실모델 개발

- 가. 기상재해로부터의 피해를 경감시킬 수 있는 단동온실모델 개발
 - 최적화 제약조건 정립

- 온실자재의 부재 최적화를 통한 경제적 설계
- 온실단면의 형상최적화 → 안정성 향상을 위한 온실모델 정립
- 지역별, 재배작물별 온실 형상, 폭, 측고/동고비 결정

나. 자재절감을 위한 연동형 온실모델 개발

- 자재절감을 위한 최적화 제약조건 정립
- 사용부재단면 및 온실구조형상(단면형상)의 최적화

4. 개발된 온실모델의 구조 성능 및 경제성 평가

가. 온실형상별 구조성능 및 경제성 비교·분석

- 재하하중별 위험부재 결정
- 온실형상에 따른 부재 변위 및 응력 실험
- 기존온실과의 구조성능 비교 및 경제성 평가

나. 개발된 온실의 현장 적용성 검토

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

국내 온실의 대부분을 차지하고 있는 단동 비닐하우스(터널형 및 비가림 시설 포함)는 시공의 간편성과 시설비의 저렴성으로 농가에서 선호하고 있는 실정이나 구조의 경량성으로 인하여 기상재해에 취약한 실정이며, 지역 및 재배작물에 따라 온실의 형태 또한 다양하여 규격화 및 표준화가 어려운 실정이다. 매년 반복되는 기상재해로 인하여 단동비닐하우스의 구조안정성 검토가 일부 수행되어 농가지도형 비닐하우스 설계서가 제작되었으나 피해보상 모델을 정립하기 위하여 농가에서 사용하고 있는 온실형태를 조합한 것으로서 지역별 기상조건을 고려한 구조설계가 이루어지지 않았다. 그리고, 벨로형 및 한국형 유리온실의 경우에는 구조의 안전성 문제에 큰 비중을 두고 있어 경제적인 설계가 필요한 실정이다.

따라서 본 과제는 온실산업과 시설원예의 경쟁력을 강화하기 위해서는 단동비닐하우스의 안정성을 향상시킬 수 있는 온실의 설계와 연동온실의 사용자재를 절감할 수 있는 최적설계에 필요한 구체적인 자료를 제공하고 지역적 기상조건 및 특성으로 고려한 안정성 향상과 자재절감을 위한 온실모델 개발과 최적설계시스템을 개발하고자 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 자재절감 및 안전성 향상을 위한 온실모델 개발(세부과제 1 : 주관연구기관)

- 1) 국내 온실모델에 대한 구조 현황을 조사·분석하였으며 기존 온실모델에 대한 구조해석을 수행하여 구조안전성을 검토하였다.
- 2) 지역별, 재배작물별 온실구조 특성을 분석하여 구조안전성을 검토하였다.
- 3) 기상재해에 따른 온실의 피해현황 및 양상을 분석하여 피해원인을 구조해석 등을 통하여 규명하였다.
- 4) 단동온실에 대하여 풍하중 및 설하중을 모의재하하여 부재 변위 및 파괴하중을 측정하여 구조해석에 필요한 기초의 구속조건을 검토한 결과, 30cm 지하고정으로 하는 것이 타당한 것으로 분석되었다.
- 5) 온실의 폭, 처마 및 지붕높이가 온실의 구조안전성에 미치는 영향을 분석하고 온

실의 단면형상에 따른 구조안전성 향상 방안을 모색하고자 크기가 상이한 2,176개의 온실모델에 대하여 구조해석을 통하여 단위풍하중 및 적설하중을 재하시켰을 때 발생하는 최대휨모멘트를 산정하였다.

- 가) 온실의 단면형상별로 단위풍하중을 작용시켰을 때 발생하는 최대휨모멘트는 처마높이가 증가할수록 증가하였으나 곡부높이가 증가할수록 감소하는 경향으로 나타나 처마높이는 낮게하고 곡부높이는 높게하는 것이 풍하중에 유리한 것으로 나타났다. 그리고, 온실 폭이 증가할 수록 최대휨모멘트도 증가하였으나 처마높이별 최대휨모멘트의 변화는 온실 폭에 관계없이 일정한 것으로 나타났으며 온실 폭별로 최대휨모멘트의 최대 및 최소값은 일정하게 변화하였다.
 - 나) 단위풍하중 재하시 온실의 폭, 처마 및 곡부높이별로 발생하는 최대휨모멘트를 산정할 수 있는 식을 유도하였으며 온실의 폭과 최대휨모멘트의 최소 및 최대값의 상관관계를 분석하였다.
 - 다) 단동온실에 단위적설하중을 작용시켰을 때 폭, 처마 및 곡부높이 변화에 따라 발생하는 최대휨모멘트는 처마높이가 증가할수록 증가하였으나 곡부높이가 증가할수록 감소하는 경향으로 나타나 단위풍하중 재하시와 유사한 경향으로 나타났으나 변화폭은 적은 것으로 나타났다.
 - 라) 단위 적설하중 재하시 온실의 처마 및 곡부높이 변화에 따라 발생하는 최대휨모멘트의 최소 및 최대값은 온실의 폭과 비례하는 것으로 나타났으며 최대휨모멘트의 최대 및 최소값의 차이는 온실의 폭에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
 - 마) 단동온실의 폭, 처마 및 곡부높이의 개선을 통하여 구조 안전성을 향상시킬 수 있는 것으로 나타나 재배환경 및 작업공간에 지장을 주지 않는 범위내에서 온실의 단면형상을 제한함으로써 기상재해에 대한 온실 피해를 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 기상재해로부터 피해를 경감시킬 수 있는 단동온실모델을 개발하고자 농가지도형 비닐하우스 10개 유형별로 설계풍속 및 적설심에 따른 사용자재 및 서까래 간격을 결정할 수 있는 도표 및 회귀식을 작성하였다.
 - 7) 자재절감을 위한 연동온실을 개발하고자 구조해석을 수행하고 부재단면 및 설치 간격에 따른 사용자재의 절감률을 비교분석하였다.
 - 8) 설해 경감을 위한 온실 보강방법을 강구하고자 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보

강효과를 분석한 결과, 보강을 한 온실의 구조안전성이 매우 높게 향상되는 것으로 나타났으나 재료비, 작업공간 확보 등을 고려할 경우에는 강선을 이용한 보강 방법이 타당할 것으로 판단된다. 그리고, 강선을 이용하여 수평 및 X형 브레이싱에 의한 보강을 실시할 경우에는 작업에 지장을 주지 않는 범위에서 낮게 설치하는 것이 유리한 것으로 분석되었다.

- 9) 폭설에 의한 피해 경감을 위한 단동비닐하우스 모델을 개발하기 위하여 농가지 동형 I형 단동비닐하우스를 기본형하여 사용부재의 단면과 보강방법별로 적설량 25cm에 해당하는 적설하중에 대하여 구조해석을 수행하여 적정 서까래 간격, 사용 재료량과 골조율 등을 분석하였다. 설계하중에 따라 구조해석을 수행하여 얻어지는 최대단면력과 온실 부위별 변형제한을 동시에 고려하여 서까래 간격을 결정하여야 하며 적설량 25cm를 대비하여 서까래를 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관을 사용하는 온실보다 $\phi 27.2 \times 2.3\text{mm}$ 구조용 탄소강관이나 $\phi 31.8 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관을 사용하여 온실을 설치할 경우에는 약 40%정도의 재료 절감과 골조율이 피복면적 대비 4%, 바닥면적 대비 약 6~7% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, $\phi 3.2\text{mm}$ 강선과 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관을 이용하여 보강할 경우에도 사용 재료량과 골조율이 감소하는 것으로 나타났다.

나. 온실 전용 구조해석 프로그램 개발(세부과제 2 : 주관연구기관)

- 1) 구조해석 입력자료의 자동화를 위한 알고리즘을 구축하여 최소한의 입력조건(온실폭, 처마높이, 동고, 설치지역, 사용자재, 안전율)으로 구조해석을 수행할 수 있는 전처리기와 구조해석기를 개발하였다.
- 2) 입력조건이 하고 사용이 간편하여 전문적 지식이 부족하더라도 온실설계를 수행할 수 있는 온실 자동설계프로그램인 GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design)를 개발하였다. 개발된 프로그램은 상용 구조해석 프로그램의 결과 비교하였을 때 동일한 결과를 얻을 수 있어 GreenSAD를 이용하여 지역별 기상조건을 고려한 온실의 설계자료를 쉽게 제공할 수 있으며 다양한 형태의 단동온실의 규격화 및 표준화에 이바지 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 온실 및 농업시설물의 구조해석이 가능한 구조해석 프로그램인 MAAS(Modeling and Analysis Program for Agricultural Structures) 초기버전을 개발하여 상용 프로그램과 결과를 비교·검증한 결과, 동일한 구조해석 결과를 얻을 수 있었다.

- 4) 농업시설의 구조설계에 적용할 지역별로 재현기간별 설계적설심 및 설계풍속을 최근 기상자료가 포함된 값으로 제시하였고 등설계적설심도와 등설계풍속도를 작성하였다.

다. 온실 최적설계시스템 개발(협동연구과제 : 협동연구기관)

본 연구에서는 기존 단순 유전자 알고리즘을 개선, 확장하여 단동 및 연동플라스틱온실 그리고 와이드 스펀형과 벤로형 유리온실의 구조해석과 단면 이산화 최적설계를 동시에 일괄적으로 수행 할 수 있는 통합시스템화 된 프로그램을 개발하였다. 제시한 알고리즘 사용성을 확인하기 위하여 본 연구에서 개발한 최적설계 프로그램으로 강구조 한계상태 설계 기준을 근거로 한 조합력, 세장비, 폭-두께비, 처짐 등의 제약조건식으로하고, 목적함수는 구조물의 중량으로 하여 각 온실구조에 대하여 단면 이산화 최적설계를 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 유전자 알고리즘을 이용하여 온실용 구조에 대한 구조해석 그리고 단면이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하고 통합시스템화 된 프로그램을 개발하였다.
- 2) 설계 예를 들어 본 연구에서 제시한 프로그램으로 수행한 결과와 표준도면과 비교·고찰함으로써 타당성 및 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 3) 본 연구의 프로그램을 적용함으로써 표준 도면보다 더 경제적인 부재사이즈를 찾을 수 있었고, 설계환경과 설계자의 요구에 따라 구조해석 및 단면 이산화 최적설계가 가능함을 알 수 있다. 또한 다양한 형강 단면 및 강재의 종류를 임의로 선택할 수 있어 범용성이 높음을 알 수 있다.
- 4) 본 연구에서 Pre/Post Processor, 구조해석, 단면 최적 설계 모듈을 상호연결 시키는 통합 시스템을 개발하여 보다 편리하게 실제설계업무에 효율적으로 적용될 수 있으며, 최적설계의 실용화를 유도할 수 있다고 판단된다.

라. 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 및 설계시스템의 평가

(위탁과제 : 위탁연구기관)

- 1) 온실 자동 설계프로그램인 GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design)를 이용한 온실설계 결과와 상용프로그램의 설계결과를 비교한 결과 일치하는 것으로 분석되었다.

- 2) 입력조건의 간소화를 통하여 온실의 설계가 용이하여 관련기관 등에서 영농자료 등으로 활용이 가능할 것으로 판단되며 활용성을 높일 수 있는 방안에 대한 추가적인 고려가 필요하다.
- 3) 본 연구에서 개발된 프로그램에서 적용한 온실구조설계 기준과 2007. 4월에 농림부에서 지정고시한 '원예특작시설 내재해 기준'과 다소 상이한 부분이 있으므로 풍하중과 적설하중의 산정방법 등에 대한 검토와 2006. 12월에 개정된 KSD3760 (비닐하우스용 도금 강관)에 대한 검토가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 농가지도형 비닐하우스 유형별로 설계풍속과 적설심에 따른 온실의 사용부재별 서까래 간격을 결정할 수 있는 식과 그림을 활용할 경우, 제시된 설계자료를 이용하여 사용자재별로 온실형태에 따른 안전설계가 용이할 것으로 판단되어 영농자료로 활용이 가능할 것으로 사려된다.
- 5) 사용부재 및 서까래간격을 고려한 단동온실의 최적모델은 경제성과 광환경등이 우수한 것으로 나타났으나 시공에 따른 부속자재의 개발이 필요하다.
- 6) 본 연구에서 제시된 최적설계프로그램을 이용한 최적설계 자료를 활용하여 연동 온실설계시 최소 11%-25%정도 경제적인 것으로 나타났으나 최적설계조건중 설계풍하중 및 적설심을 상향조정하여 최적설계를 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

2. 연구결과 활용에 대한 건의

국내 온실의 대부분을 차지하고 있는 플라스틱 온실은 구조공학적인 설계에 대한 인식이 부족하고 설계기준이나 구조안전지침 등의 미비로 매년 큰 재해를 입고 있다. 매년 반복되고 있는 기상재해에 따른 온실의 피해를 경감시킬 수 있는 방안을 모색하고 해결책을 제시하고자 수행한 본 과제의 연구결과를 효율적으로 활용하여 기대효과를 극대화시키기 위한 활용방안 및 활용에 대한 건의는 다음과 같다.

가. 본 연구 결과의 효율적인 활용으로 온실구조설계에 대한 필요성과 중요성을 부각시킬 수 있으며 온실 구조물의 안전도 및 내구성 향상, 구조역학적인 연구 및 농

업시설물의 최적설계에 대한 관심 유도 및 관련 기술개발 촉진 등이 기대된다. 그리고, 관련 종사자(농민, 업체, 관련기관 등)들이 보다 쉽게 온실의 구조설계를 수행할 수 있어 기상재해에 따른 온실피해의 경감을 통한 자원절약 및 안정적인 시설원에 생산기반 조성에 기여할 것으로 판단된다.

- 나. 이를 위하여 연구결과보고서를 관련기관, 농민단체 또는 개인수요자에게 배부하여 홍보한다.
- 다. 온실 및 농업시설물의 구조설계기준의 보완 및 개정이 절실히 요구되고 있으며 온실의 구조설계기준의 경우에는 파이프온실과 철골온실로 구분하여 구조설계기준 및 시공지침이 별도로 작성되어야 한다. 이러한 구조설계기준 및 시공지침 수정 및 작성시에 본 연구 결과를 적극적으로 활용할 수 있다.
- 라. 본 연구에서 개발된 프로그램(GreenSAD, MAAS) 등은 소프트웨어 등록 등을 통하여 지적재산권을 확보하여 연구결과를 공식화하고 기술을 체계화시켜 온실설계와 직접 관련된 정부산하기관, 시공업체 등에 유·무상으로 기술이전을 도모한다.
- 마. 시설원예에 종사하는 농민, 관련 업체 및 기관 등을 대상으로 교육을 실시하여 기상재해 경감을 위한 본 연구결과를 활용할 수 있는 방안 등을 홍보한다.
- 바. 온실 시공과 직접적인 관련된 정부산하기관, 시공업체 및 자재생산 업체의 관련자를 대상으로 연구 결과를 홍보하고, 관련 정책 및 의사결정시 자료로 활용할 수 있도록 한다.
- 사. 관련 분야 학술단체의 학술지에 연구결과를 발표하고, 각종 세미나 및 학술회의에 발표한다.
- 아. 본 연구결과를 활용을 위해서는 온실의 구조설계기준 및 농업시설물의 구조설계기준에 대한 체계적이고 종합적인 보완 및 개정작업이 우선되어야 하며 이에 부합하도록 연구결과를 보완하면 기상재해에 따른 온실 및 농업시설물의 피해경감을 위한 영농자료 및 설계지침으로 활용할 수 있다.
- 자. 본 연구결과를 적극적인 활용을 위해서는 관련 정책담당부서 및 기관의 담당자와의 긴밀한 협조 및 체계적인 의사소통체계가 정립되어야 한다.

SUMMARY

I. Title

Development of Optimum Model and Design Systems for Saving Structural Material and Improving Safety of Greenhouse Structure

II. Objectives and necessities of the research

1. Objectives

The objectives of this study are summarized as follows :

- 1) Analysis of structural shape and problems of existing greenhouse models.
- 2) Development of optimum design system of greenhouse.
- 3) Development of greenhouse model to be able to save quantity of required material for construction and improve safety of greenhouse.
- 4) Estimation of structural performance and economical efficiency for developed greenhouse model.

2. Necessity

The single-span plastic greenhouse is very weak to strong wind and heavy snow due to very light weight, but which is very favored by farmers because of easy construction and low cost. The single-span greenhouse drawings to spread out farmers for construction has been printed since big meteorological disaster in 2001, but which were designed without considering meteorological condition regionally. Due to insufficient of specific data for efficient design, the most of greenhouse has been constructed customarily up to recently. The optimum design technology to be able to improve structural safety of single-span and save

structural material of multi-span greenhouse is required for strengthening competitiveness of domestic protected horticultural industry. Considering all of these problems, it is very urgent to develop greenhouse model and optimum design system for improving structural safety and saving structural material according to meteorological characteristics regionally.

The necessities of this study are summarized as follows from the technological, economical·industrial and social · cultural points of view.

1) Technological point of view

Because technical knowledge required for structural analysis can be acquired from computer database composed in advance, the simple and cheap structural analysis program of greenhouse can be developed easily by using the database. So, the optimum design program which can do structural analysis, optimize the size of frame member section and structural shape simultaneously and then prints drawings automatically, has to be developed as soon as possible.

2) Economical · industrial point of view

Although there are standard design drawings for greenhouse construction, farmers or construction companies construct the greenhouse conventionally by themselves because they can not get systematic support from experts. So, the study on safety greenhouse model considering meteorological condition is urgently called for, and development of automatic greenhouse design system to be able to design greenhouse structure without help by experts is necessary.

3) Social · cultural point of view

Because the collectivization and informationization of agriculture is driving by nation's policy in order to secure competitive power internationally and manage more effectively in protected horticulture industry recently, synthetic and systematic research on greenhouse design should be conducted and the technology to be able to guide farmers easily should be developed to intensify technical

infrastructure.

III. Scopes of the research

1. The analysis of structural shape and problems of existing greenhouses.

- 1) Examination of damage phase and cause of greenhouse by strong wind and heavy snow.
- 2) Structural analysis and examination for existing greenhouses.
- 3) Analysis of structural characteristics of greenhouse by region and crop.

2. Development of optimum design system of greenhouse.

1) Development of software for structural analysis of greenhouse.

- (1) Construction of algorithms for calculation of design load by region and crop.
- (2) Construction of database for weather data regionally.
- (3) Construction of algorithms for structural analysis of greenhouse.
- (4) Construction of database of input data for structural analysis through building user-friendly interface.
- (5) Development of pre and post processor program for structural analysis.
- (6) Development and verification of structural analysis program for greenhouse.
- (7) Collection of data needed for drawing up a design specification by region and shape of greenhouse.

2) Development of optimal design system for greenhouse.

- (1) Construction of database and algorithms needed for optimum design of greenhouse structure.
- (2) Development of optimum design techniques and program for greenhouse design. : Development of program for shape optimization and structural material saving in greenhouse.
- (3) Verification of performance for the developed program.

3. Development of greenhouse model to reduce quantity of structural material required for construction and improve safety of greenhouse against meteorological damage.
 - 1) Development of single-span greenhouse model to be able to reduce damage by meteorological disaster.
 - (1) Establishment of constraint condition for optimization.
 - (2) Economical design through optimizing the cross section size of frame member in greenhouse.
 - (3) Establishment of greenhouse model to increase structural safety through optimizing greenhouse shape.
 - (4) Decision of the optimal shape, width, ratio of eave to ridge height by region and crop.
 - 2) Development of multi-span greenhouse model to reduce quantity of structural material required for construction.
 - (1) Establishment of constraint condition for optimizing quantity of structural material required for construction.
 - (2) Optimization of frame shape and cross section size of structural member in greenhouse.
4. Estimation of structural performance and economical efficiency for the developed greenhouse model.
 - 1) Comparison and analysis of structural performance and economical efficiency each of greenhouse type.
 - (1) Decision of unsafe member each of acting load.
 - (2) Experiment for measuring displacement and stress occurred on frame member by greenhouse shape.
 - (3) Investigation of field adaptability for the developed greenhouse.

IV. Results

The research results to develop optimum model and design systems for saving structural material and improving safety of greenhouse structure are summarized as follows;

1. Development of greenhouse model to reduce quantity of structural material required for construction and improve safety of greenhouse against meteorological damage.

- 1) Actual state of domestic greenhouse model types was investigated and analyzed, and structural safety for existing greenhouse was examined.
- 2) Structural safety was examined through analysis of structural characteristics of greenhouse by region and crop.
- 3) The greenhouse damage status and type by meteorological disaster was analyzed, and the cause of damage was examined by structural analysis.
- 4) It was proper that the constraint condition of foundation was 30cm underground fixed condition by experiment measuring displacements and breaking load for virtual wind and snow load acting on structure.
- 5) The experiment which acted unit wind and snow load on single-span greenhouse was conducted. By the results, maximum bending moment about each case of wind and snow load was different according to width, eave and roof height of greenhouse. Therefore, it was expected to be able to improve structural safety by optimizing width, eave and roof height of greenhouse.

2. Development of structural analysis program for greenhouse structure

- 1) The pre-processor and structural analyzer to be able to conduct structural analysis by inputting minimum data through constructing automatic input algorithm of data were developed.
- 2) The simple and cheap automatic greenhouse structural analysis program of GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design) was developed.
- 3) The first version of MAAS(Modeling and Analysis Program for Agricultural

Structures) program to be able to conduct structural analysis for greenhouse and agricultural structures was developed.

- 4) Wind speed and snow depth according to return periods for design load estimation were calculated by frequency analysis using the weather data(maximum instantaneous wind speed, maximum wind speed, maximum depth of snow cover and fall) of 68 regions in Korea. Equations for estimating maximum instantaneous wind speed with maximum wind speed were developed for all, inland and seaside regions. The results were about the same as the current equation in general. Design wind speed and snow depth according to return periods were calculated and local design wind and snow load depending on return periods were presented together with iso-wind speed and iso-snow depth maps.

3. Development of optimum design system of greenhouse

For the optimum design, the objective function is the weight of structures and the constraints are limits on loads and serviceability. The basic search method for the optimum design is the genetic algorithm. The algorithm is known to be very efficient for the discrete optimization.

The genetic algorithms consists of genetic process and evolutionary process. The genetic process selects the next design points based on the survivability of the current design points. The evolutionary process evaluates the survivability of the design points selected from the genetic process.

In the genetic process of the simple genetic algorithm, there are three basic operators: reproduction, cross-over, and mutation operators. To improve the efficiency of the simple genetic algorithm, this study shows that organization of size discrete optimization using improved simple genetic algorithms.

- 1) The objective of this study is the development of a size discrete optimum design algorithm for greenhouse structures, which is based on the genetic algorithm. The algorithm can perform section optimum designs of single and

multi span greenhouse and wide-span, venlo glasshouse structures. The developed GA algorithm of greenhouse was implemented in a computer program.

- 2) Combining pre/post process, structural analysis and discrete optimum of member size into the genetic algorithms is what makes the practical discrete optimum design of complex single and multi span greenhouse and wide-span, venlo glasshouse structures possible.
 - 3) The efficiency and validity of the developed discrete optimum design algorithm was verified by applying the algorithm to various optimum design examples: single and multi span greenhouse and wide-span, venlo glasshouse structures.
 - 4) The result of the study indicates that the proposed optimal design program is more efficient than traditional design method currently used in practice.
4. The estimation of optimum greenhouse model and design system developed for reducing quantity of structural material required for construction and improving safety of greenhouse against meteorological damage.
- 1) The results analyzed by GreenSAD were same as the analysis results by commercial program currently used in practice.
 - 2) Because input condition of program was simplified, the program could be utilized easily by user.
 - 3) It was decided that the additional structural analysis was necessary for KSD3760(galvanized steel pipe) revised in 2006.
 - 4) It was shown that the safety structural design each different greenhouse type could be conducted by using the developed formula and figure to be able to decide the frame interval of greenhouse.
 - 5) It was shown that the economical efficiency and light environments of the optimum single-span greenhouse model developed in this study were excellent.
 - 6) It was shown that the result designed by using the optimum design program developed in this study was more 11% - 25% profitable than the result designed by existing program.

CONTENTS

Chapter 1. Overviews of the research	27
Section 1. Objectives and necessities of the research	27
Section 2. Contents and scopes of the research	30
Chapter 2. Status of the technology development at home and abroad	33
Chapter 3. Research contents and results	36
Section 1. Improving existing model and developing optimum model in greenhouse	36
1. Status of domestic greenhouse	36
2. Status of meteorological disaster of agricultural structure	37
3. Cases and types of meteorological disaster in horticultural facilities	39
4. Design loads	49
5. Status of structural types in domestic greenhouse	54
6. Characteristics of structural types by region and crop	63
7. Structural safety of plastic greenhouse type to guide farmers	67
8. Safety analysis along greenhouse structural type	70
9. Development of structural reinforcement method for reducing snow damage in single-span plastic greenhouse	83
10. Experiment on critical load by reinforcing methods	93
11. Analysis of structural complementary points in existing greenhouse model	95
10. Development of simple design method in single-span greenhouse	109
Section 2. Development of structural analysis program for greenhouse	129
1. Analysis of weather data for greenhouse design	129
2. Load acting test in greenhouse	173

3. Calculation of Wind Load Coefficient Using CFD	186
4. Development of structural analysis program for greenhouse	187
 Section 3. Development of optimum design system for reducing quantity of structural material required for construction and improving safety of greenhouse against meteorological damage	 197
1. Introduction	197
2. Optimum design technique	203
3. Development of discrete optimum design program	233
4. Example of optimum design and discussion on research results of greenhouse structure	 239
5. conclusions	276
Section 4. Estimation of optimum design system for reducing quantity of structural material required for construction and improving safety of greenhouse against meteorological damage	 277
Section 5. Conclusions	283
 Chapter 4. Achievement and contribution to related fields	 289
Section 1. Achievement	289
Section 2. Contribution to related fields	289
 Chapter 5. Application of the results	 291
 Chapter 6. Overseas technology information collected during the research	 293
 Chapter 7. References	 296
 Appendix	 300

목 차

제 출 문	1
요 약 문	2
SUMMARY	14
CONTENTS	21
목 차	24
제1장 연구개발과제의 개요	27
제1절 연구개발의 목적 및 필요성	27
제2절 연구개발의 내용 및 범위	30
제2장 국내외 기술개발 현황	33
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	36
제1절 기존 온실의 개선 및 최적모델개발	36
1. 국내 온실 현황	36
2. 농업시설의 기상재해 현황	37
3. 원예시설의 기상재해 사례 및 피해 양상	39
4. 설계하중	49
5. 국내 단동온실의 구조 현황	54
6. 지역별, 재배작물별 온실구조의 특성	63
7. 농가지도형 비닐하우스의 구조안전성	67
8. 온실의 구조에 따른 안전성 분석	70

9. 단동비닐하우스의 설해 경감을 위한 보강방법 개발	83
10. 보강방법별 한계하중 실험	93
11. 기존 온실모델에 있어서 구조적 보완사항 분석	95
12. 단동온실의 간이 설계방법 개발	109
제2절 온실용 구조해석 프로그램 개발	129
1. 온실 설계용 기상자료 분석	129
2. 온실의 하중 재하시험	173
3. CFD를 이용한 풍력계수 산정	186
4. 온실 전용 구조해석 프로그램 개발	187
제3절 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적설계시스템 개발	197
1. 온실구조설계에 최적화 기법 도입 타당성 검토	197
2. 최적설계기법	203
3. 이산최적설계프로그램 개발	233
4. 온실구조물의 최적설계 예 및 결과고찰	239
5. 결 론	276
제4절 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적 모델 및 설계시스템 평가	277
1. 온실 설계용 프로그램의 평가	277
2. 온실 최적설계자료의 사용성 및 현장 적용 방안	281
3. 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 평가	282
제5절 결론	283
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	289
제1절 연구개발 목표달성도	289

제2절	관련분야 기술발전의 기여도	289
제5장	연구개발 결과의 활용 계획	291
제6장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	293
제7장	참고문헌	296
부	록	300

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 목적 및 필요성

국내의 시설재배면적은 온실이 널리 보급되기 시작한 1990년에 25,450ha에서 2000년에는 52,189ha로 10년동안 2배 이상 증가하여 2005년말 현재 우리나라의 원예시설 면적은 52,022ha로 중국, 일본에 이어 세계 3위를 차지하고 있다. 작목별로는 채소재배 시설이 48,574ha로 93%, 화훼재배 시설이 3,448.4ha로 7%를 차지하고 있으며 시설 유형별로는 비닐하우스 49,476.4ha, 유리온실 315.8ha, 경질판온실 267.3ha, 기타 1,962.9ha 이며 이 중 채소를 재배하는 단동 비닐하우스의 면적은 41,263ha로 전체 시설면적의 79.3%를 차지하고 있다.

국내에 보급되어 있는 온실은 구조안전성, 환경조절 및 자동화설비의 도입 수준에 따라 자동화 유리온실, 농가보급형 자동화 플라스틱온실 및 농가지도형 비닐하우스로 대별할 수 있다. 이러한 온실의 구조는 안전성, 환경조절의 효율성, 경제성 및 시공성 등의 조건을 구비해야 한다. 온실의 구조안전성은 구조설계의 적정성, 사용자재 및 시공의 신뢰성, 유지·관리의 적절성 등에 의하여 결정되므로 각 단계에서 면밀하게 검토하면 설계하중 범위내에 충분한 안전성을 확보할 수 있다. 그러나 이 중 한 단계만이라도 소홀할 경우에는 구조안전성에 문제가 발생하게 되어 매년 강풍이나 폭설로 원예시설이 파괴되어 막대한 피해를 입고 있는 실정이다. 원예시설의 구조는 안전성이 지나치게 강조되면 과잉설계가 되어 자재의 낭비를 초래하고 안전성이 확보되지 않으면 강풍이나 폭설시 파손으로 인한 막대한 피해를 입게 된다. 따라서, 온실의 설계는 안전한 구조, 적정환경조절, 소요에너지의 절감, 용이한 시공 등을 고려해야 한다.

국내 시설재배면적의 대부분을 차지하고 있는 단동 비닐하우스(터널형 및 비가림 시설 포함)는 시공의 간편성과 시설비의 저렴성으로 농가에서 선호하고 있는 실정이나 구조의 경량성으로 인하여 기상재해에 취약한 실정이며, 지역 및 재배작물에 따라 온실의 형태 또한 다양하여 규격화 및 표준화가 어려운 실정이다. 2001년의 기상재해 이후 단동비닐하우스의 구조안전성 검토가 일부 수행되어 농가지도형 비닐하우스 설계서가 제작되었으나 지역별 기상조건을 고려한 구조설계가 이루어지지 않았으며, 경제적인 설계에 관한 구체적인 연구자료 또한 미비하여 하우스의 설치가 관행적으로 이루어지고

있다. 그리고, 벤로형 및 한국 유리온실의 경우에는 구조의 안전성 문제에 큰 비중을 두고 있어 최적설계에 의한 경제적인 설계가 필요한 실정이다. 따라서, 온실산업과 시설원예의 경쟁력을 강화하기 위해서는 단동비닐하우스의 안정성을 향상시킬 수 있는 구조공학적인 연구와 연동온실의 사용자재를 절감할 수 있는 최적설계가 필요한 실정이다. 지역적 기상조건 및 특성으로 고려한 안정성 향상과 자재절감을 위한 온실모델 개발과 최적설계시스템의 개발이 시급하며, 기술적, 경제·사회적인 측면에서 본 과제의 필요성을 요약하면 다음과 같다.

1. 기술적 측면

국내에 보급되어 있는 원예시설을 구조안전성, 환경조절 및 자동화설비의 도입 수준에 따라 구분하면 자동화 유리온실, 농가보급형 자동화 온실(1-2W형) 및 농가지도형 비닐하우스로 대별할 수 있다. 이러한 각종 원예시설의 표준도면이 작성되어 관련 기관 및 농가에 보급되고 있으나 표준설계도면은 설치지역의 기상조건 및 특성을 고려하지 못한 일반화된 모델이므로 지역별로 적용할 수 있는 기준이 불명확하며 과잉설계된 부재 및 과소설계된 구조 등의 일부 문제점을 유발하고 있어 시공시 많은 애로사항을 초래하고 있는 실정이다. 실례로, 이 등(2002)은 단동비닐하우스의 경우에 동일한 규격과 골조재를 사용할 때 측벽구조에 따라 부재에 발생하는 최대휨모멘트가 풍하중은 17%, 적설하중은 36%를 감소시킬 수 있는 것으로 보고하였다. 그리고, 이 등(2003)은 온실의 폭, 측벽높이 및 지붕높이에 따라 구조안전성을 분석한 결과, 아치형 단동비닐하우스의 경우, 폭과 측고비가 증가할수록 풍하중 및 설하중에 불리하며, 온실부재에 발생하는 최대모멘트가 약 245% 증가하여 온실의 폭과 측벽높이/지붕높이비에 따라 부재에 발생하는 최대단면력이 상이하게 나타나고, 동일한 부재를 사용할 경우에는 온실의 측벽을 낮게 하는 것이 기상하중에 유리한 것으로 보고하였다. 또한, 김 등은 연동형온실의 최적설계를 통하여 자재의 절감과 구조개선방향을 제시하였다. 따라서, 국내에 설치된 단동온실의 형태(아치형, 지붕형, 복숭아형)에 대하여 다양한 폭에 대한 측고높이 및 지붕높이의 검토가 필요하며 이러한 연구를 통하여 기상재해로부터의 안전성이 향상된 단동비닐하우스 모델의 개발과 최적설계기법을 도입하여 자재의 절감 및 온실형상 최적화를 통하여 구조적 성능이 향상되고 경제적인 온실구조의 설계를 통하여 안정적인 시설원예의 기반을 조성할 필요가 있다.

온실시공에 필요한 설계는 지역별 기상하중 및 기타 조건을 고려하여 구조해석을

수행하여 구조해석결과를 기초로 설계서를 작성하는 것이 일반적이다. 현재, 구조해석에 사용되고 있는 프로그램은 대부분이 외국의 상용프로그램들이며 최근 국내에서 개발된 프로그램들이 일부 있다. 이러한 프로그램들은 고가의 시스템이며 다양하고 우수한 기능에 비하여 구성이 복잡하게 이루어져 있어 온실설계에 적용하기에는 경제적 문제와 전문지식이 필요하며, 구조물의 최적화에 있어 구조해석 프로그램과 최적설계 프로그램이 별도로 구성이 되어 있어 이원화 시스템으로 온실구조의 최적설계가 일부 이루어지고 있는 실정이다. 그러나, 온실의 구조해석시 요구되는 전문지식은 전산D/B 구성을 통하여 해결할 수 있으므로 사용이 간편하며 저렴한 온실의 구조해석용 프로그램의 개발이 가능하다. 따라서, 온실의 구조의 안전성을 확보하고 시공비를 최소화할 수 있는 온실의 구조해석, 부재단면 및 구조형상 최적화가 동시에 일괄적으로 수행되어 설계도면이 자동출력되는 최적설계프로그램의 개발이 시급한 실정이다.

2. 경제·산업적 측면

국내 시설원예의 전체면적인 52,135.2ha중 유리온실이 330ha로 0.6%, 철골 경질판 온실이 77.4ha로 0.2%이고, 아연도강관의 파이프 골조로 시공된 비닐하우스 면적이 51,727.8ha로 99.2%를 차지하고 있다.

2000년도 정부지원사업의 평당 온실 건축비는 유리온실이 50만원, 철골 경질판 온실이 31만원, 자동화 비닐온실이 12만3천원으로 파이프 골조 온실은 상대적으로 설치비가 저렴한 편이고, 비교적 견고하며 보온과 통풍이 양호하고 가격에 비하여 우수한 성능이 인정되어 수출이 증대되고 있는 등 많은 장점을 가지고 있는 반면에, 구조의 취약성으로 가지고 있다. 전체 원예시설 중에서 거의 대부분을 차지하고 있는 파이프 골조 온실은 지역적 기상조건 및 특성을 고려한 설계나 시공이 고려되지 않아 피해가 극심하여 시설복구에 막대한 인력과 예산이 소모되며 이러한 상황은 매년 되풀이되고 있는 실정이다. 실례로, 1994년 2월 12일의 폭설 및 2월 21의 강풍, 1995년 7월의 태풍 페이, 1997년 11월의 나주지역의 돌풍, 1999년 8월의 태풍 올가 및 2001년 1월과 2월의 폭설 등에 의한 비닐하우스의 피해가 발생하였다. 최근 2001년 1월 7일~9일 동안의 폭설로 인하여 비닐하우스 3,418ha(2,228억원)의 피해가 발생하였으며 2월 15일에는 1,518ha의 비닐하우스가 파손되었다. 이러한, 피해요인으로는 불안정한 구조설계, 부실시공 및 자재의 불량 등을 들 수 있으며 그 중 주요 피해요인은 지역적 기상조건을 고려한 온실의 안전모델의 부재와 관리소홀 등이다. 온실의 표준설계도면이 있으

나 관련기관의 인력부족 및 담당자의 전문성 결여 등으로 인하여 지역별 적용에 있어 체계적인 지원이 이루어지지 않아 온실시공은 시설농가의 관례적인 자가시공과 관련 업체에서 일률적인 시공이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서, 설치지역의 기상조건 및 특성을 고려한 원예시설의 안전모델의 연구가 시급하며, 시설농가, 관련업체 및 관련기관 등의 인력부족 및 전문성 결여 등을 보완할 수 있는 온실 자동설계시스템의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

3. 사회·문화적 측면

매년 반복되고 있는 기상재해에 따른 원예시설의 피해는 시설원예산업의 기반을 위협할 뿐만 아니라 국가적으로도 경제적 손실이 막대한 실정이다. 정부는 피해농가를 대상으로 피해보상 기준을 확립하고 복구시 온실표준설계도면에 따라 시공할 것을 권고하고 있다. 하지만, IMF를 겪으면서 기업 및 관련기관 등에서는 경쟁력 강화를 위한 조직 및 인원에 대한 구조조정을 단행하여 관련기관의 종사자의 급격한 감소와 관련기관 종사자들의 전문성 결여로 인한 현장지도가 체계적으로 이루지고 있지 못한 실정이다. 따라서, 기상재해로 인한 원예시설의 피해는 매년 반복될 수 밖에 없으며 그 결과, 시설농가의 경쟁력 향상과 관련분야의 발전을 기대할 수 없다. 그리고, 시설현대화를 통한 생산비절감과 고품질 농산물의 생산을 목표로 하고 있는 시설원예사업을 추진함에 있어서, 가장 중요한 것은 시설의 구조안전성을 확보하는 것이다. 따라서, 설치지역의 기후조건하에서 자동환경조절이 용이하고 생산에너지 비용을 절감시킬 수 있는 온실구조의 최적설계법이 제시되어야 하는 동시에 자재의 규격화 및 국산화와 지역별, 작물별 온실모델 개발에 필요한 구체적인 자료가 요청된다. 한편 시설원예의 국제경쟁력을 확보하고 효율적인 경영을 위한 집단화사업과 농림정보화사업이 정책적으로 추진되고 있는 바, 시설원예의 기술적 기반을 강화하는 동시에 장래 시설원예산업의 전산정보화를 통한 인프라구축을 위해서는 온실설계에 관한 종합적이고 체계적인 연구의 추진이나 시설농가의 지도에 필요한 기술개발이 정립되어야 한다.

제2절 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 목표는 온실구조설계용 최적기법을 개발하여 지역별 기상조건 및 특성을

고려한 원예시설의 안전구조 모델을 정립하고, 온실용 구조해석 S/W의 개발을 통하여 설치지역에 따른 온실 구조의 최적설계가 가능한 프로그램을 개발하는 것이다. 그리고, 설계조건(설치지역, 온실형태, 재배작물 등)을 단순화하여 수요자(관련업체, 관련기관, 설계자 및 시설농가)가 용이하게 이용할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다.

온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적 모델 및 설계시스템을 개발하기 위해 주관 및 협동연구기관이 수행한 연구내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

1. 자재절감 및 안전성 향상을 위한 온실모델 개발(주관:세부1)

가. 기존 온실모델에 대한 구조 현황 및 개선점 분석

- 풍·설해에 의한 피해온실 유형별 조사 : 문헌 및 현장조사
- 지역별, 재배작물별 온실구조 특성 분석 : 현장조사
- 기존 온실모델에 대한 구조공학적 검토 및 분석
→ 피해양상의 구조공학적 모델 정립 : 구조해석 실시

나. 온실 구조물의 지점 및 절점 조건 분석

- 온실 구조해석시 지점 및 가로대 연결부위의 절점 조건 결정
: 온실형상과 재하하중에 따른 부재 변위 및 응력 실험

다. 안전성 향상 및 자재절감을 위한 온실모델 개발

- 기상재해로부터의 피해를 경감시킬 수 있는 단동온실모델 개발
: 온실단면의 형상최적화 → 안정성 향상을 위한 온실모델 정립
: 구조해석 수행 → 지역별, 재배작물별 온실 형상, 폭, 측고/동고비 결정

라. 자재절감을 위한 연동형 온실모델 개발

- 사용부재단면 및 온실구조형상(단면형상)의 최적화

2. 온실 전용 구조해석 프로그램 개발(주관:세부2)

가. 온실의 설계하중 산정 알고리즘 구축

- 사용자 중심의 인터페이스 구축을 통한 구조해석 입력자료의 자동화 : 지역별 기상자료 및 설계하중, 구조해석 모델생성 등

나. 온실용 구조해석 프로그램 개발 및 검증

다. 지역별, 온실형태별 시방서 작성에 필요한 자료 수집 및 전산 D/B화

3. 온실 최적설계시스템 개발(협동)

가. 온실용 최적설계시스템의 연동을 위한 구조해석 프로그램 개발

나. 온실 최적설계시스템 개발

- 온실구조의 최적설계에 필요한 자료 및 알고리즘 구축
- 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적화 제약조건식 및 목적함수 정립
- 최적기법별 최적화 비교 분석
- 온실설계용 최적설계기법 및 프로그램 개발
- 최적화 제약조건 및 목적함수 정립, 프로그램의 성능 검증

다. 국내 유리온실(벤로, 와이드, 한국형) 및 플라스틱온실(1-2W형, 단동온실)의 최적화 수행

4. 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 및 설계시스템의 평가(위탁)

가. 온실 설계용 구조해석 프로그램의 평가

- 기존 구조해석 프로그램과의 비교·검증을 통한 신뢰성 분석
- 프로그램의 사용 편의성 평가

나. 온실 최적설계시스템의 성능 분석 : 사용성 및 현장 적용성 평가

다. 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적 모델 평가

- 개선된 온실모델의 구조성능 및 경제성 평가, 현장적용성 평가
- 기존온실과의 구조성능 비교 및 경제성 평가

제2장 국내외 기술개발 현황

시설재배는 제한된 공간내에서 작물의 재배가 이루어지므로 이의 성패를 좌우하는 요인은 경제적인 시설구조의 안전설계, 적정내부환경의 유지, 적합한 작물의 선정 및 재배기술의 개발이라 할 수 있다. 이 중 파이프하우스나 철골온실을 포함한 원예시설의 구조는 강풍이나 적설 등으로 인한 구조의 파손방지나 환경조절 및 자동화 설비의 설치에 직접적인 영향을 주는 중요한 요인이 된다.

원예시설 구조안전기준과 관련된 국외의 연구동향으로써, 일본은 1968년부터 園藝用施設安全構造基準 설정을 위한 기초조사를 시작하여 수십명의 관련분야 연구진이 참여하여 장기간의 신중한 연구와 검토를 한 후, 1974년에 園藝用施設安全構造基準(案), 1976년에 園藝用施設安全構造基準(暫定基準), 1977년에 園藝用施設安全構造基準(暫定基準, 追補)을 작성하였고, 그 후 4년간의 검토·보완하여 1981년에 園藝用施設安全構造基準(暫定基準, 改訂)을 마련하여 현재 적용하고 있다. 아울러, 이와 관련하여 1970년에 園藝用プラスチックハウスの設計, 製作および施工手引, 1976년 溫室(ガラス室, 하우스)保守管理手引, 1988년에 地中押し み式パイプハウス安全構造指針, 1990년에 園藝用鐵骨補強パイプハウス安全構造指針을 제정하여 원예시설의 설계기준 및 유지관리의 기준으로 삼고 있다. 또한, 미국에서는 1968년에 The National Greenhouse Manufacturers Association(NGMA)가 Greenhouse Construction Standards-Structural Load Standard을 처음으로 마련한 후 7년 뒤인 1975년에 개정안을 만들어 The American National Standards Institute(ANSI)에 등록하여 원예시설의 설계하중에 관한 자료로 활용하고 있으며, 시설원예의 선진국인 네델란드도 1978년에 Greenhouse Structural Requirements를 제정하여 원예시설구조의 파손으로 인한 재해의 방지 및 경제적인 원예시설설계의 기준으로 삼고 있는 실정이다.

최근 일본의 경우에는 태풍이나 폭설로 인한 하우스의 피해현황 및 특징을 파악하여 피해양상별 피해요인을 분석하여 실험, 구조해석에 의한 하우스의 피해 메카니즘에 대한 연구가 진행되고 있으며 하우스의 기상재해대책을 수립하고 있는 실정이다.

국내의 경우에는 1993년부터 원예시설의 구조안전기준과 설계에 관한 연구가 본격적으로 시작되어 1995년에 원예시설 구조안전기준이 정립되었으며 농가보급형 자동화 하우스 표준설계서, 한국형 유리온실 표준설계서가 마련되었다. 그리고, 농가지도형 비닐하우스의 경우에는 1999년 태풍 올가에 의한 하우스피해 복구시에 하우스 규격의

하한선을 제시하였으며 2001년 1월과 2월에 두 차례에 걸쳐 단시간에 내린 50년, 30년 만의 폭설로 인한 원예시설의 피해가 증가함에 따라 기상재해에 따른 원예시설의 피해를 최소화하기 위한 농가지도형 비닐하우스 모델이 10여가지 제시되고 있으나, 이러한 복구용 모델은 기존의 피해 농가의 플라스틱 하우스가 복구지원 범위에 들어갈 수 있도록 하기 위하여 현재 사용되는 규모와 형태를 다소 변형시켜 모델화 한 것으로 체계적인 연구는 아직 부족한 실정이다.

지역적 기상조건 및 특성을 고려한 구조안전성을 확보하고 경제적인 온실구조를 설계할 수 있는 최적설계기법은 컴퓨터 기술의 급속한 발전과 함께 1970년 이후 국내·외에서 활발하게 연구가 진행되고 있다. 항공 및 조선분야의 설계에서는 최적설계가 실시되고 있으며, 건설분야에서도 최적설계가 일부 사용되고 있으나 원예시설분야에 있어 최적설계는 전무한 상태이다.

구조물의 최적화기법은 구조물의 단면이나 중량과 체적에 대한 최적화 및 구조물의 형상최적화가 독립적으로 이루어지는 실정이며, 최근 들어 응력해석, 부재단면 및 구조형상 최적화가 동시에 수행되는 최적화기법이 연구되고 있는 실정이다. 이러한, 구조물의 최적설계로 건축구조물의 경우 일반 구조설계보다 10~30% 이상의 재료는 물론 골조공사비가 절감되는 것으로 보고되고 있어, 최적설계기법을 원예시설에 접목하면 지역별 기상조건에 안전한 구조모델을 개발할 수 있으며 자재의 최적화를 통한 시공비의 절감을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 온실구조설계에 이용되는 구조해석S/W는 대부분이 외국에서 개발된 프로그램이며, 최근 들어 국내에서도 구조해석 S/W가 개발되어 보급되고 있으나 가격이 고가이며 전문적인 지식을 요구하고 있다. 적용분야를 원예시설로 국한할 경우, 사용이 간편하고 손쉽게 활용할 수 있는 온실 전용구조해석 S/W의 개발이 가능할 것으로 판단되며, 현재까지는 원예시설용 구조해석 S/W는 전무한 상태이다. 따라서, 원예시설의 경쟁력 강화를 위한 안전한 온실구조설계를 통한 생산기반 안정화를 고려할 때 온실의 최적화 설계프로그램의 개발과 구조해석 및 설계 S/W의 개발은 시급한 과제라 판단된다.

매년 반복되고 있는 기상재해로 인하여 온실피해를 경감시킬 수 있는 온실의 안전 구조모델의 개발에 대한 필요성이 요구되고 있으며, 농림정보화정책에 따른 원예시설 분야의 웹서비스 요구 또한 다양하게 제기될 것이다. 그리고, 시설원예의 경쟁력 강화를 위해서는 시설농가, 관련업체 및 관련기관의 체계적인 협력 및 지도가 필요하므로 관련분야에 종사하는 전문인력의 부족을 보완할 수 있는 방안이 계속적으로 요구될 것이다.

시설원에 선진국에서는 기상재해로 인한 온실의 피해경감을 위해 구조해석에 의한 하우스의 피해 메카니즘에 대한 연구가 진행되고 있으며 하우스의 기상재해대책을 수립하고 있는 실정이지만, 뚜렷한 방안을 제시하고 있지 못한 상태이며 현재 관련연구를 활발히 진행중에 있으나 표준화된 온실모델에 대한 전산화 및 자동설계에 대한 연구는 미진한 상태이다. 그리고, 온실은 설치지역의 기상조건 및 특성을 고려하여 설계가 이루어지므로 외국의 관련기술을 도입할 수가 없는 실정이며, 온실의 설치지역의 기상조건을 고려한 구조해석 및 최적설계가 가능한 프로그램은 아직 개발되지 않은 상태이다. 따라서, 온실의 최적설계프로그램의 도입은 불가능하며, 국내실정에 맞는 기상재해로부터의 구조성능이 향상된 온실모델의 개발과 최적설계시스템의 개발이 국내에서 수행되어야 한다.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 기존 온실의 개선 및 최적모델개발

1. 국내 온실 현황

우리나라의 대표적인 농업시설인 온실은 1980년부터 본격적인 비닐하우스 보급과 더불어 백색혁명의 원동력이 되었으며 1990년대 초 정부의 시설 현대화 지원사업으로 시설의 현대화가 크게 진척되었고 시설면적도 급속하게 확대되어 1990년 25,450ha에서 2000년에는 52,189ha로 10년동안 2배 이상 증가하였다.

2005년말 현재 우리나라의 원예시설 면적은 52,022ha로 중국, 일본에 이어 세계 3위를 차지하고 있으며, 작목별 재배면적은 채소 48,574ha로 93%, 화훼가 3,448.4ha로 7%를 차지하고 있으며 시설 유형별로는 비닐하우스 49,476.4ha, 유리온실 315.8ha, 경질관온실 267.3ha, 기타 1,962.9ha 등으로 플라스틱 파이프온실이 전체 온실면적의 98.9%를 차지하고 있다.

표 1. 시설 유형별 온실설치 면적(2005년 기준)

구 분	계(ha)	비닐하우스(ha)		유리온실(ha)	경질관온실(ha)	기타(ha)
		단동	연동			
채소	48,574	41,263	5,265	213	48	1,785
화훼	3,448.4	2948.4		102.8	219.3	177.9
합계 (%)	52,022.4 (100)	49,476.4 (95.1)		315.8 (0.6)	267.3 (0.5)	1,962.9 (3.8)

※자료 : 2005 채소생산실적 및 화훼생산현황(농림부, 2006)

국내에 보급되고 있는 온실은 농촌진흥청의 농가지도형 비닐하우스 12종, 농가보급형 자동화하우스(1-2W형) 4종, 유리온실 5종이 농림부 표준모델로 되어 있으며 민간업체서 보급하고 있는 비표준화모델 등이 있다.

2. 농업시설의 기상재해 현황

최근 기후변동의 폭이 커지고 잦은 이상기상으로 기상재해가 빈발하여 농업 생산기반 자체를 파괴하여 농업생산에 큰 영향을 주고 있는 실정이다. 특히, 태풍과 폭설로 인한 농업시설의 피해는 빈번하고 매년 반복되고 있으며 구체적인 피해현황은 표 3과 같다.

표 2. 최근 년도별 기상재배 현황(1999~2005)

재해 종류	발생 년도	시설종류별 피해 규모			
		비닐하우스	축 사	인삼재배시설	버섯재배시설
폭설	'01	4,891ha	8,183동	338ha	4.0ha
				4,097ha*	
	'03	8ha	30동	4ha	-
	'04	2,230ha	8,904동	4,652ha	-
	'05	1,348ha	7,300동	1,113ha	3.1ha
소계	8,477ha	24,417동	6,107ha	7.1ha	
태풍	'00	541ha	179동	-	-
	'02	1,227ha	1,587동	2,685ha	-
	'03	1,705ha	2,285동	106ha	-
	'04	160ha	13동	-	-
	소계	3,633ha	4,064동	2,791ha	-
총 계	12,110ha	28,481동	5,582ha	7.1ha	
			4,097ha*		
년평균	2,422ha	5,696동	1,937ha		

*인삼 및 버섯재배시설을 통합 조사한 결과임

2000년 8월 23일~9월 1일의 태풍 '프리피룬', 9월 12일~16일의 태풍 '사오마이'의 영향으로 흑산도의 최대풍속 58.3m/s, 서산 33.6m/s의 강풍이 불어 541ha의 온실이 파손되고, 축사 179동이 파손되었다.

2001년 1월 7일~9일 사이에는 대관령 98.2cm, 대전지방 24.8cm 등 경기, 강원, 충청지방을 중심으로 내린 폭설과 2월 15일에 강화 27.2cm, 춘천 25.2cm 등의 폭설로 인하여 온실 4,891ha, 축사 8,183동, 인삼 및 버섯재배시설 4,439ha의 피해가 발생하였

다.

2002년 8월 30일~9월 1일의 태풍 '루사'는 한반도를 길게 관통하면서 초속 30~50m의 강풍과 일 최고 강수량 871mm라는 경이적인 기록을 세우며 전국을 초토화 시켰다. 그 영향으로 제주도의 최대풍속 56.7m/s, 목포 37.8m/s의 강풍이 불어 온실 1,227ha, 축사 1,587동 및 인삼재배시설 2,685ha의 피해가 발생하였다.

2003년 9월 12일~13일에는 태풍 '매미'의 내습으로 제주도 북제주군 기상대에서 순간최대풍속 60.0m/s가 관측되어 우리나라 기록사상 최고치를 경신하였다. 그 영향으로 여수의 최대풍속 49.2m/s, 부산 42.7m/s의 강풍이 불어 온실 1,705ha, 축사 2,285동 및 인삼재배시설 106ha의 피해가 발생하였다.

2004년 3월 4일~5일에는 청원 41cm, 논산 45cm, 부여 49cm, 문경 49cm, 상주 38cm 등 강원, 경기, 충남, 충북, 경북지방을 중심으로 100년만의 기록적인 폭설이 내려 온실 2,230ha, 축사 8,904동 및 인삼재배시설 4,652ha의 피해가 발생하였으며, 8월 17일~19일에는 태풍 '메기'로 인하여 온실 160ha, 축사 13동의 피해가 발생하였다.

2005년 1월 15일~16일과 3월 4일~6일에는 동해 90cm, 속초 55cm, 강릉 54cm, 태백 38cm, 영덕 68cm, 울진 58cm, 부산 37cm, 울산 18cm의 폭설이 내렸으며 12월 3일~22일에는 2주 이상 충청과 전남북지방에 집중적으로 폭설이 내렸다. 특히, 장흥 36.3cm, 정읍 34.6cm, 해남 35.2cm, 목포 30.0cm 등 호남지방을 중심으로 하루에 30cm 이상 많은 눈이 내렸으며 장흥, 정읍, 해남, 광주 등에서 기상관측 이래 최심신적설 극값 1위를 경신하였다. 12월 21일에도 충남서해안과 전남북지방을 중심으로 전국적으로 다시 눈이 내려 정읍 45.6cm, 부안 39.0cm, 광주 35.2cm, 순천 31.6cm의 폭설이 내렸다. 이러한 폭설로 인하여 온실 1,348ha, 축사 7,300동, 인삼재배시설 1,113ha 및 버섯재배시설 3.1ha의 피해가 발생하였다. 그리고, 최근 2007년 3월 28일에는 순간 최대풍속 25m/s의 돌풍으로 인하여 경북북부지역의 비닐하우스 10,000여동이 파손되었다. 그 밖에 호우, 우박 등으로 인한 피해 등이 기록되고 있으나 태풍이나 폭설에 비하면 그 피해규모가 매우 작은 수준이며 집중호우로 인한 침수피해는 대부분의 경우 작물과 동물만 피해를 입고 구조물에는 큰 피해가 없으므로 농업시설의 기상재해는 주로 태풍과 폭설에 의한 것이라 볼 수 있다.

최근 5년간 기상재해로 인한 농업시설의 총 피해규모는 온실은 12,110ha, 축사 28,481동, 인삼 및 버섯재배시설 9,686.1ha로 매년 평균적으로 온실은 2,422ha, 축사 5,696동, 인삼 및 버섯재배시설은 1,937ha의 피해가 반복적으로 발생하였다. 이러한 기상재해로 인한 농업부문 피해복구액은 4조 5,550억원으로 이 가운데 온실 피해복구액

은 1조 1,130억원, 인삼재배시설 등의 피해복구액은 3,822억원이었다. 따라서, 매년 피해복구에 소요된 예산은 온실 2,260억원, 인삼재배시설 401억원, 기타시설 363억원인 것으로 나타났다.

3. 원예시설의 기상재해 사례 및 피해 양상

폭설이나 강풍으로 인한 온실의 피해양상은 시설의 일부가 파괴된 것으로부터 시설 전체가 파괴된 것까지 피해양상이 다양하며 그림 1과 같이 강풍으로 인한 파손양상은 폭설로 인한 파손양상보다 훨씬 더 복잡하다. 이는 시설에 작용하는 설하중은 연직하중임에 비하여 풍하중은 풍향에 따라 하중의 작용방향이 변화하고 항력과 양력을 동시에 발생시키기 때문이다.



(a) 폭설로 인한 파손 예



(b) 강풍으로 인한 파손 예

그림 1. 폭설 및 강풍으로 인한 원예시설의 파손 양상의 비교

가. 폭설피해

원예시설의 설해 양상은 그림 2(a)에서와 같이 지붕에 쌓인 눈의 하중이 과대하게 되거나 그림 2(b)에서와 같이 바람에 날린 눈이 쌓여 편하중이 작용하게 되면 원예시설은 변형되거나 파괴되게 된다. 강설후 체설이 늦어지면 그림 2(c)와 같은 눈의 침강력이나 그림 2(d)와 같은 측압이 발생하여 시설이 파괴되게 된다. 또한 연동의 원예시설에는 그림 2(e)와 같이 곡부에 눈이 쌓이기 쉽기 때문에 이로 인하여 과대설하중이 작용하여 시설이 파괴될 수 있다. 그림 3은 단동온실의 폭설 피해양상을 나타낸 것으

로 폭설에 의한 단동온실의 피해 양상은 어느 지역을 막론하고 그림 2(a), 그림 2(c)와 같이 지붕의 과대 설하중에 의해 지붕 서까래가 파손되면서 M자 형태로 주저앉았다. 그림 4는 그림 3의 단동온실의 규격과 비슷한 농가지도형 비닐하우스 B형과 G형의 서까래 간격별 한계적설심을 결정할 수 있는 그래프이다.

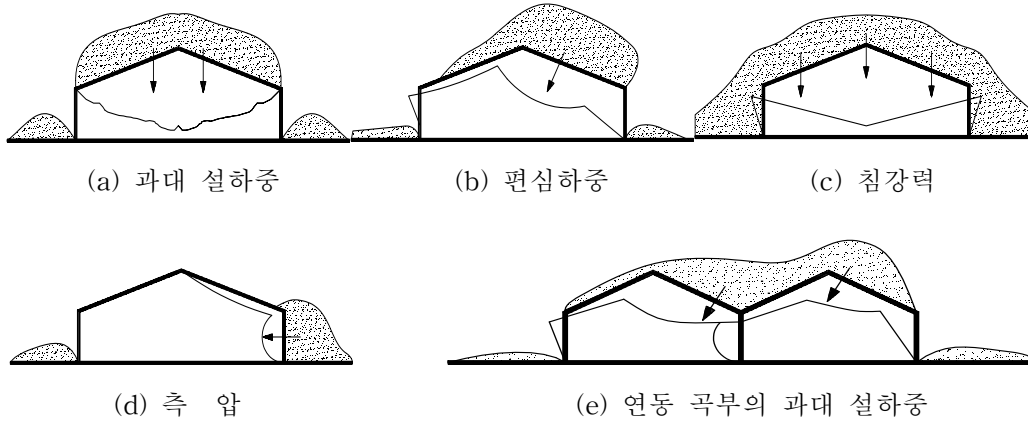


그림 2. 원예시설의 설해 양상




		
<ul style="list-style-type: none"> • 온실폭 : 5.3m, • 온실높이 : 2.5m • 서까래 간격 : 70cm • 가로대 수 : 5개 • 파이프 : $\phi 25.4 \times 1.5t$ 	<ul style="list-style-type: none"> • 폭 : 5.7m, • 높이 : 2.4m • 서까래 간격 : 80cm • 가로대 수 : 5개 • 파이프 : $\phi 25.4 \times 1.5t$ 	<ul style="list-style-type: none"> • 폭 : 8.0m, • 높이 : 3.0m • 서까래 간격 : 90cm • 가로대 수 : 7개 • 파이프 : $\phi 31.8 \times 2.1t$

그림 3. 폭설로 붕괴된 단동온실 모습

그림 4의 상단 그래프는 부재의 허용응력에 의해 한계적설심을 결정할 수 있는 그림이며, 하단 그래프는 온실의 변형제한값을 이용하여 한계적설심을 결정할 수 있는 그

림이다. 그림 4(a)에서 폭이 5.4m이고 동고가 2.6m인 단동온실의 서까래 부재를 $\phi 25.4 \times 1.5t @ 700$ 으로 설치하였을 때 허용응력에 의한 한계적설심은 약 18cm, 온실 부재의 변형제한값에 의한 한계적설심은 약 14.5cm임을 알 수 있다. 그리고, 그림 4(b)에서 폭이 8.2m, 동고가 3.5m인 단동온실의 서까래 부재를 $\phi 31.8 \times 2.1t @ 900$ 으로 설치하였을 경우 허용응력에 의한 한계적설심은 약 12.2cm, 변형제한값에 의한 한계적설심은 9.3cm임을 알 수 있다. 그림 3과 같은 단동온실의 한계적설심 이상으로 눈이 내릴 경우에는 온실의 파괴가 발생하는 것은 당연한 결과이므로 온실의 한계적설심을 향상시킬 수 있는 구조설계가 이루어져야 한다.

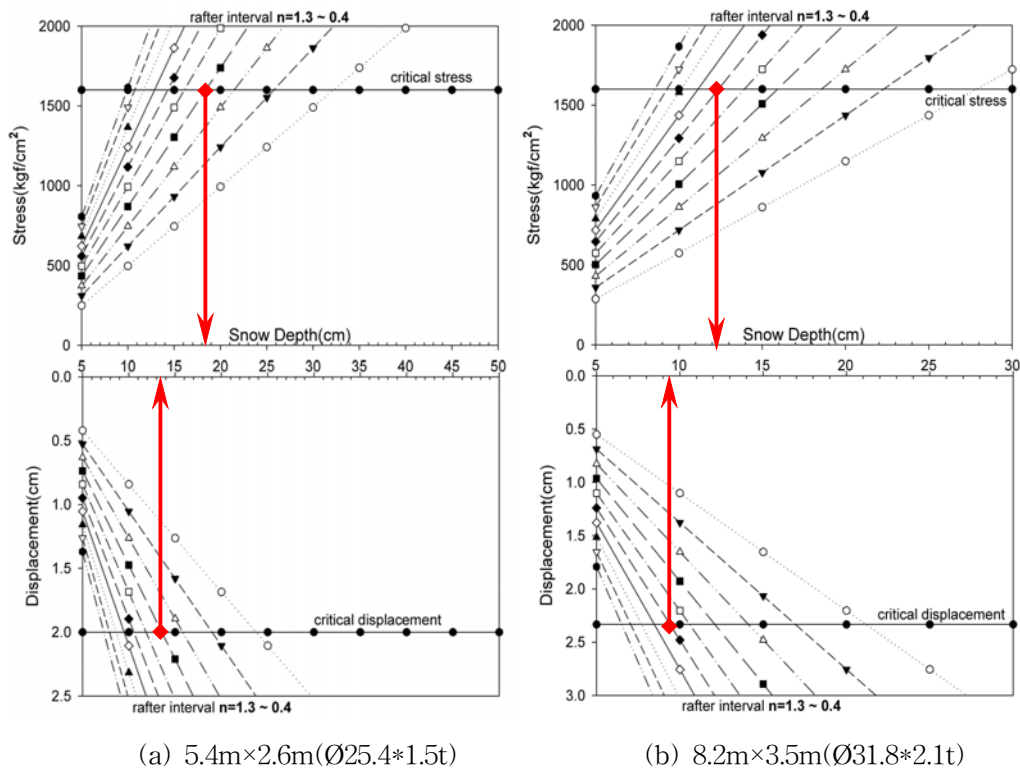


그림 4. 서까래 간격에 따른 한계적설심 분석

폭설에 의한 연동온실의 피해양상(그림 5)은 그림 2(d)와 같이 곡부에 과대 설하중이 작용하여 서까래가 늘리면서 기둥이 꺾이고 기울어진 형태로 파손되었으며, 일부는 서까래는 정상인데 기둥이 좌굴하거나 기둥과 연동곡부 연결부위가 파손되면서 붕괴되는 사례도 있다.




		
<ul style="list-style-type: none"> • 온실폭 : 7.0m, • 온실높이 : 4.6m • 서까래 : ø31.8×1.5t@600 • 기 등 : ø48.6×1.8t@2000 	<ul style="list-style-type: none"> • 온실폭 : 7.0m, • 온실높이 : 4.6m • 서까래 : ø25.4×1.5t@600 • 기 등 : ø48.6×1.8t@2000 	<ul style="list-style-type: none"> • 온실폭 : 7.0m, • 온실높이 : 4.8m • 서까래 : ø25.4×1.5t@600 • 기 등 : ø48.6×1.8t@2000

그림 5. 폭설로 붕괴된 연동온실의 모습

나. 강풍피해 양상

시설에 작용하는 풍하중은 풍향과 풍속이 일정하지 않고 항력과 양력을 동시에 발생시키기 때문에 강풍으로 인한 시설의 파손양상은 파손부위나 파손양상이 다양하고 복잡하다. 원예시설의 강풍피해 현장을 통하여 피해유형을 분석한 결과는 표 2와 같이 피복재의 파열, 기초의 인발, 골조의 변형 또는 만곡, 결합부의 이탈 또는 파손으로 구분할 수 있고, 기초, 골조 또는 접합부의 일부 파손은 대부분 전파로 진전될 가능성이 많으며 파손 예는 그림 7~그림 10과 같다.

표 2. 강풍으로 인한 원예시설의 피해유형 및 원인

파괴부위	피해유형	파괴원인	대 책
피복재	파열	피복재의 인장강도 부족	<ul style="list-style-type: none"> • 골조 간격 조절 • 인장강도가 강한 피복재 사용 • 피복재의 손상부위 보수
기 초	기초노출후 쓰러짐 완전인발	기초단면 또는 토양점착력 부족	<ul style="list-style-type: none"> • 기초단면의 확대 • 배수철저
골 조	골조재의 파손 또 는 만곡	골조재 강도 부족	<ul style="list-style-type: none"> • 설계시 골조재의 안전성 확보 • 국부풍력 수압면의 보강
접합부	이탈 또는 파손	접합부 강도 부족	<ul style="list-style-type: none"> • 설계시 접합부의 안전성 확보 정확한 시공

원예시설에 사용되는 기초의 종류는 그림 6과 같이 연속기초, 독립기초, 말뚝기초 등이 있다. 원예시설은 자중이 적으므로 강풍시 양력으로 기초가 인발되어 큰 피해가 발생하는 경우가 많기 때문에 충분히 검토해야 한다. 태풍은 많은 비를 동반하기 때문에 시설의 형태에 관계없이 원예시설의 기초지반은 거의 포화상태에 달하는 것으로 생각할 수 있고, 또 파이프 자체의 고유진동수 때문에 하우스 전체가 고유진동수로 진동하게 되어 지반과 기초와의 마찰력의 거의 기대할 수 없을 정도로 감소하게 된다. 윤(1992)의 연구결과에 의하면 연동하우스의 부재별 고유진동수는 다르지만 대략 20Hzwjsgn이고 또한 건조한 모래지반에 있는 콘크리트 기초를 일정 진동수로 진동시키면 인발저항력은 90%이상 감소하는 경우도 있었다. 그림 10은 돌풍이나 태풍에 의한 기초의 파손 예이며 태풍이 내습할 경우에는 시설 및 지반의 거동을 고려한 후 인발저항력을 산정하여야 한다.



그림 6. 온실의 기초 종류



그림 7. 강풍에 의한 온실의 기초 파손

그림 8은 강풍에 의한 피복재의 파손 사례이며 피복재의 파손은 특히 국부풍압을 받는 부분에서 많이 발생하게 된다. 태풍시 피복이 없었던 시설에서는 구조적 피해가 없었으나 피복이 있는 경우 피복의 어느 한 부분이 훼손되면 하우스는 치명적인 피해를 입게 된다. 초기에 국부 풍압을 받는 쪽의 피복이 훼손되면서 부양력이 커져 기초가 뽑히면서 온실은 전파된다. 그림 9 태풍으로 기초가 뽑히면서 구조물 전체가 전된 모습이다. 피복재의 파손이 구조물 파괴의 직접적인 원인이 되므로 피복재 관리에 주의해야 한다.



그림 8. 강풍에 의한 온실의 피복재 파손



그림 9. 강풍에 의한 온실의 기초인발로 인한 전파 모습

그림 10은 강풍에 의해 온실의 구조가 파손된 모습으로 위에서 아래로 풍하중이 작용하여 지붕면의 서까래가 유선형으로 휘어졌으며 온실의 측면과 지붕면에 작용하여 하우스가 완전히 지면에 압착되어 붕괴된 모습이다.

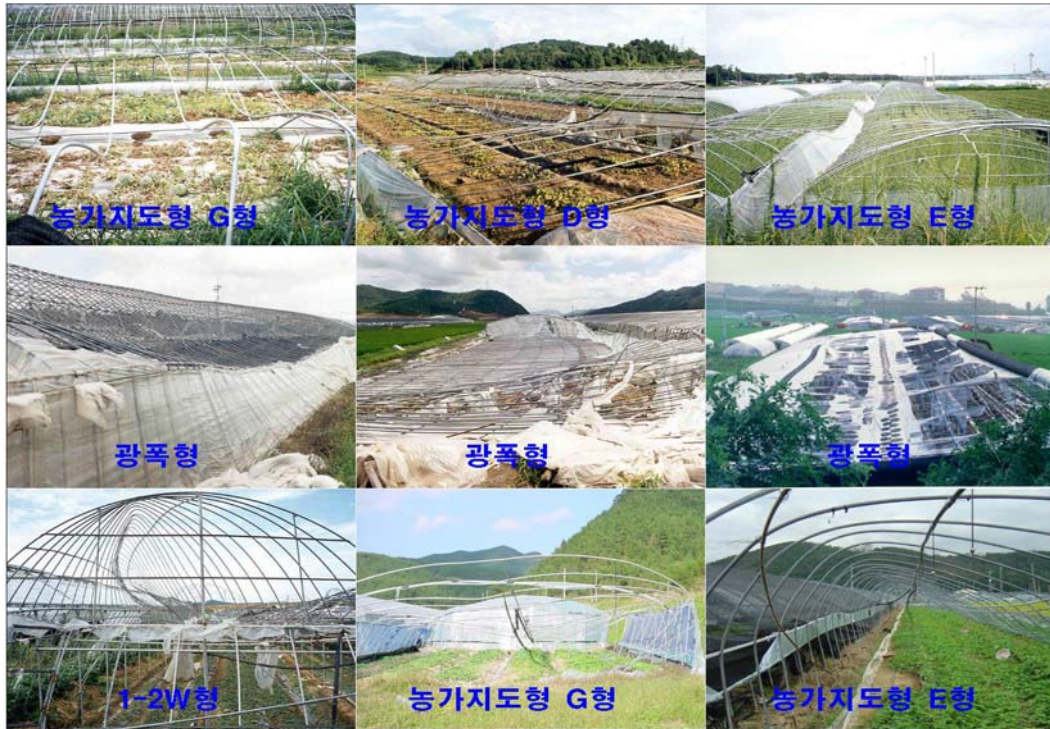
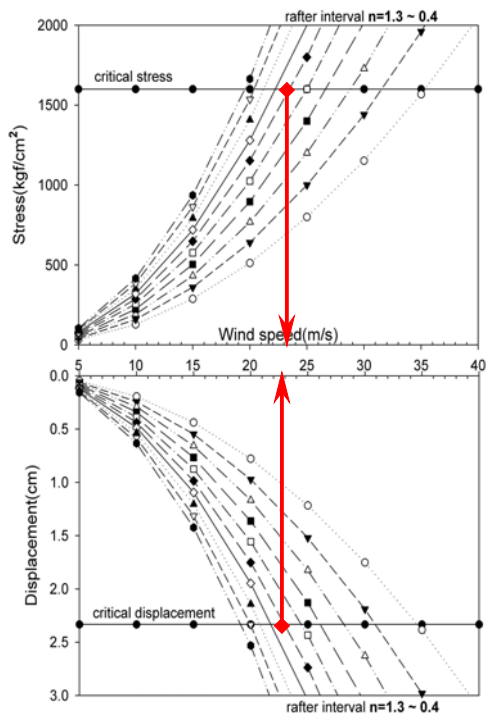
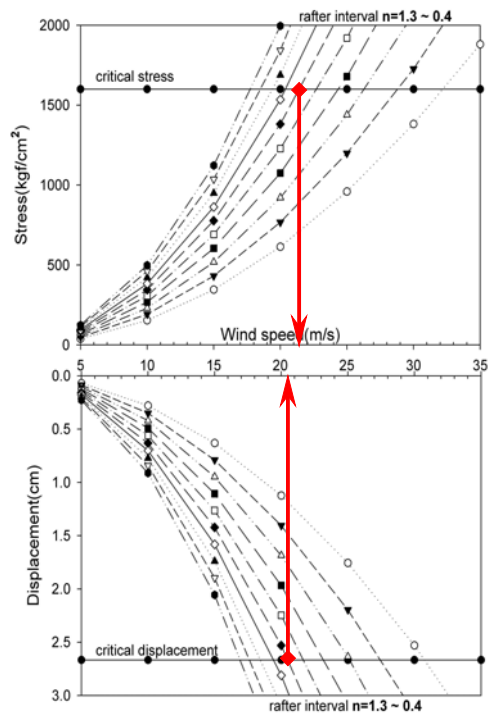


그림 10. 강풍으로 인한 온실 골조의 파손

그림 11은 그림 10의 단동온실의 규격과 비슷한 농가지도형 비닐하우스 E형과 G형의 서까래 간격별 한계풍속을 결정할 수 있도록 구조해석 결과를 도시한 그래프이다. 상단 그래프는 부재의 허용응력에 의해 한계풍속을 결정할 수 있으며, 하단 그래프는 온실의 변형제한값을 이용하여 한계풍속을 결정할 수 있다. 그림 14(a)에서 폭이 7.0m이고 동고가 2.8m인 단동온실의 서까래 부재를 $\phi 31.8 \times 1.5t @ 900$ 으로 설치하였을 때 허용응력에 의한 한계풍속을 산정하면 약 23.2m/s이며 온실 부재의 변형제한값에 의한 한계적설심은 약 23m/s임을 알 수 있다. 그리고, 그림 14(b)에서 폭이 8.2m, 동고가 3.5m인 단동온실의 서까래 부재를 $\phi 31.8 \times 1.5t @ 900$ 으로 설치하였을 경우 허용응력에 의한 한계풍속은 약 21.5m/s, 변형제한값에 의한 한계풍속은 20.6m/s임을 알 수 있다. 그림 13와 같은 단동온실의 한계풍속을 초과하여 25m/s~30m/s의 돌풍이나 강풍이 불 경우에 온실 골조의 파손이 발생하는 것은 당연한 결과로 볼 수 있으며 온실의 한계풍속을 향상시킬 수 있는 구조설계가 이루어져야 한다.



(a) 7.0m×2.8m(Ø31.8*1.5t)



(b) 8.2m×3.5m(Ø31.8*1.5t)

그림 11. 서까래 간격 따른 한계풍속 분석

그림 12는 온실의 부재별 접합부가 파손된 모습으로 접합부의 연결상태가 불량하거나 접합을 위해 부재에 별도의 구멍을 만들게 되면 응력집중 등으로 인하여 부재의 원래 강도를 발휘하지 못하는 결과를 초래하므로 부재별 접합부에 대한 정확한 시공과 평소의 유지관리가 요구된다.



그림 12. 강풍에 의한 온실의 접합부 파손

최근 6년(2001년~2006년)동안 발생한 지역별 최대순간풍속 및 최심적설심을 분석하여 보면 그림 13 및 그림 14와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 최근 6년동안 지역별로 최소한 1회 이상으로 발생한 최대순간풍속은 20m/s~42m/s 범위였으며 최심적설심은 100cm이상의 폭설이 내린 대관령지역을 제외하고는 18cm~42cm 범위였다. 35cm이상의 폭설이 내린 지역은 강원지역, 대전, 경북 북부 및 동해안지역, 전남 해안지역, 전북 일부지역이었으며 이러한 지역에서는 폭설로 인한 온실의 피해가 빈번하거나 많은 면적의 피해가 발생하였음을 알 수가 있다. 최근 발생한 최대순간풍속 및 최심적설심은 단동비닐하우스의 한계풍속 및 적설심을 훨씬 초과하는 것으로 온실의 피해가 발생하는 것은 당연하지만 폭설에 대비하여 보강지주를 설치하거나 난방 등의 적극적인 대응으로 피해가 경미한 농가도 있는 것을 파악되어 보강대책 및 폭설에 대한 농민들의 적극적인 대응으로 기상재해에 따른 온실의 피해를 최소화할 수 있는 것으로 사려된다.

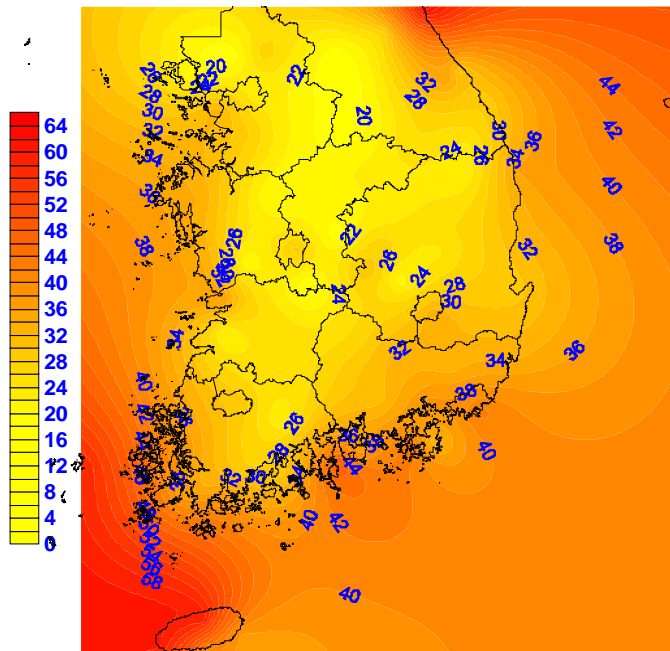


그림 13. 최근 발생한 지역별 최대순간풍속(2001년~2006년)

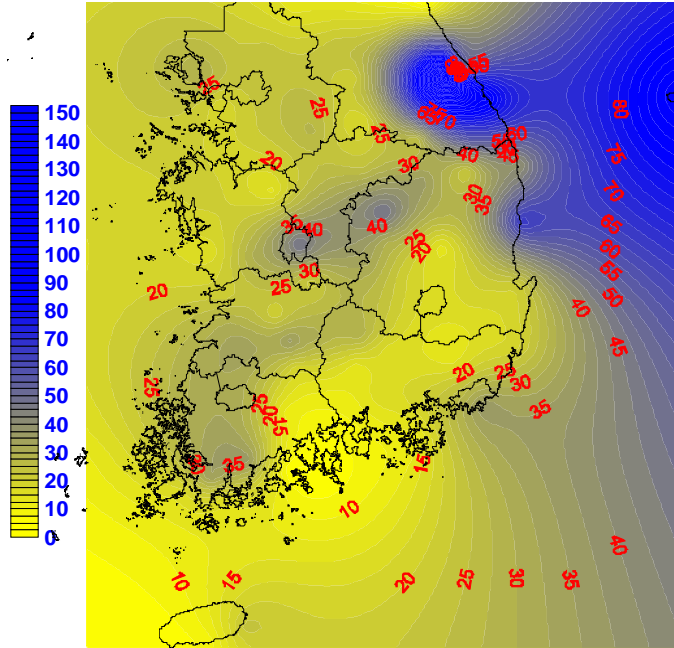


그림 14. 최근 발생한 지역별 최심적설일(2001년~2006년)

다. 호우에 의한 침수피해

집중호우에 의한 제방붕괴나 농경지의 배수불량으로 인하여 침수피해를 입는 경우가 자주 있다. 온실이 침수되는 경우에는 구조물에는 거의 영향이 없고 피복재가 파손되는 정도이며 대부분 작물과 토양이 유실되거나 내부설비의 고장을 유발시키는 피해 등을 입는다. 그림 15는 집중호우로 침수피해를 입은 농업시설물의 모습이며, 온실의 경우에는 침수 후 많은 물이 빠지면서 토양의 유실과 함께 온실 기초부분의 흙이 유실되는 경우가 많으므로 배수가 완전히 이루어지고 난 후에는 기초부분에 흙을 채우고 잘 다져주어야 한다.



그림 15. 집중호우로 침수 및 파손된 농업시설의 모습

4. 설계하중

가. 풍하중

1) 풍하중 산정

시설의 지붕면이나 벽면에 작용하는 풍압력은 식 (1)로 구하고, 풍하중은 풍압력에 유효수압면적을 곱하여 식 (2)로 계산한다.

$$W_v = c q \quad (1)$$

여기서, W_v 는 풍압력(kg/m^2), c 는 풍력계수, q 는 속도압(kg/m^2)이다.

$$P = W_v A \quad (2)$$

여기서, P 는 풍하중(kg), W_v 는 풍압력(kg/m^2), A 는 유효수압면적(m^2)이다.

속도압(velocity pressure)은 동압(dynamic pressure)으로서 바람의 운동에너지이며, 바람의 동압은 식 (2.3)으로 표시된다.

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

여기서, q 는 동압(kg/m^2), v 는 풍속(m/s), ρ 는 공기의 밀도($\approx 1/8 \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)이다.

또, 지면으로부터 높이변화에 따른 풍속의 연직방향의 변화는 식(4)로 표시된다.

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^a \quad (4)$$

여기서, v 는 높이 $h(\text{m})$ 에서의 풍속(m/s), v_0 는 높이 $h_0(\text{m})$ 에서의 풍속(기준풍속, m/s), a 는 지표면 조도에 따른 정수($1/8 \sim 1$)이다.

$a=1$, $h_0=10\text{m}$ (설계풍속의 기준높이)로 하여 식(2.3)과 식(2.4)를 정리하면, 속도압은 식(2.5)와 같이, 풍속의 제곱과 높이의 평방근에 비례하여 증가하기 때문에 높이에 따라 차이가 있다. 그러나 설계시 시설의 높이별로 산정된 풍속을 고려할 수 없기 때문에 일반적으로 棟高와 벽체 높이의 평균높이에 대한 속도압을 산정하여 사용한다.

$$q \approx 0.0197 v_0^2 \sqrt{h} \quad (5)$$

2) 지면높이별 풍속변화

농업시설물의 높이는 대부분이 5m 미만인 시설이 대부분이며 일반 건축물에 비해 높이가 매우 낮은 편이다. 풍속에 따른 속도압과 풍하중을 산정할 때 설계풍속의 기준높이(10m)에 대하여 지면높이별 풍속변화는 식 (4)에 의해 산정을 하고 있으며 설계 시 시설의 높이별로 산정된 풍속을 고려할 수 없기 때문에 일반적으로 棟高와 벽체 높이의 평균높이에 대한 속도압을 산정하여 사용한다.

본 연구에서는 지면높이별 풍속변화를 측정하여 농업시설물의 풍하중 산정에 필요한 자료를 제공하고자 실제 온실이 설치되는 지역에 그림 16과 같이 풍속센서를 설치하여 지면높이별 풍속변화를 측정하였다.

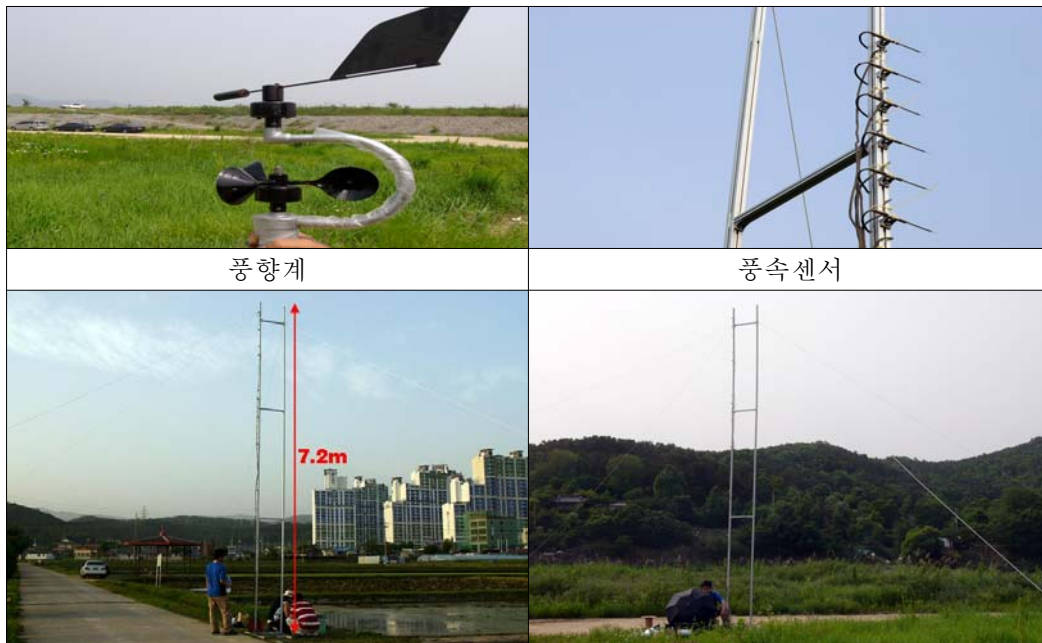


그림 16. 지면높이별 풍속측정 장치

지면높이별로 풍속을 측정한 결과는 그림 17과 같으며 측정높이 5m에서 측정된 풍속 값을 이용하여 식 (4)로 높이별로 계산한 풍속과 실제 측정된 풍속은 일치하지 않는 것으로 나타났으며 풍속 측정높이 범위(2m~7m)에서는 지면높이별 풍속의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

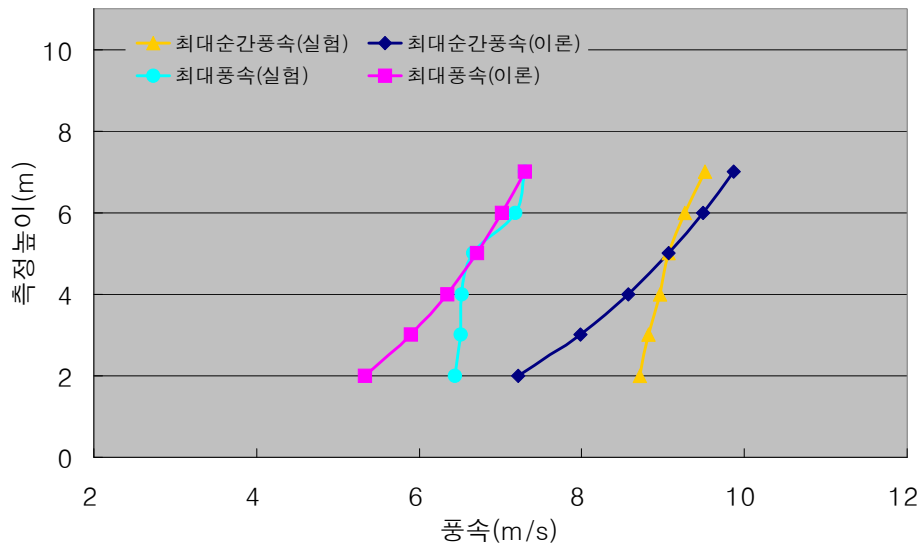


그림 17. 측정높이별 풍속변화

따라서, 온실의 설계시 곡부높이와 벽체높이의 평균높이에 따라 속도압을 산정하고 있으나 그림 18과 같이 일정한 높이(약 5m)까지는 동일한 풍속을 적용하여 속도압을 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

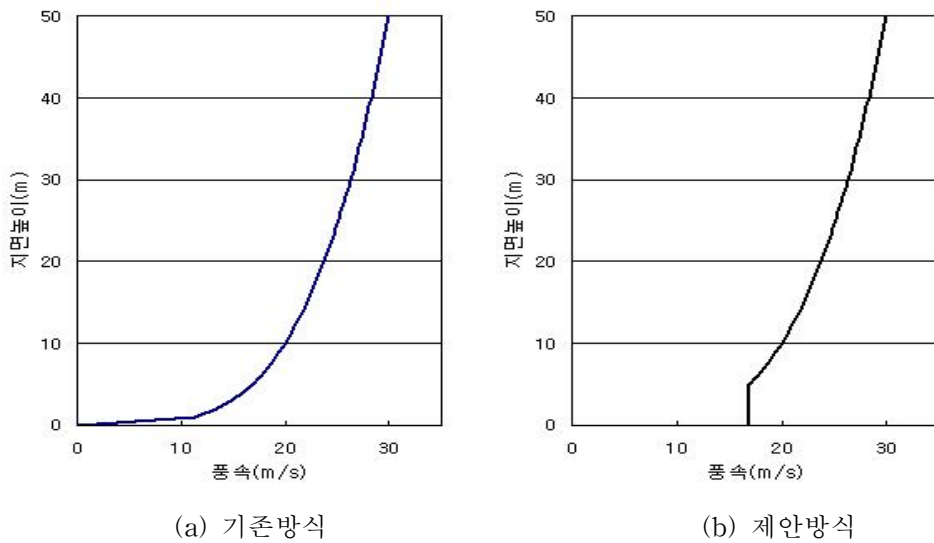


그림 18. 지면높이별 풍속변화

나. 적설하중

시설의 지붕위에 작용하는 적설하중은 식 (5)로 구한다.

$$W_s = \rho D \alpha \quad (5)$$

여기서, W_s 는 적설하중(kg/m^2), ρ 는 적설의 단위체적중량($\text{kg/cm} \cdot \text{m}^2$), D 는 설계적설심(cm), α 는 지붕경사 및 피복재의 종류에 따른 절감계수이다.

적설의 단위체적중량은 수평면에 대한 중량을 의미하며, 적설심별 중량은 표 3을 기준으로 하고 중간값은 직선보간법으로 계산한다. 지붕경사에 따른 절감계수는 표 4를 기준으로 한다.

표 3 적설의 단위체적중량

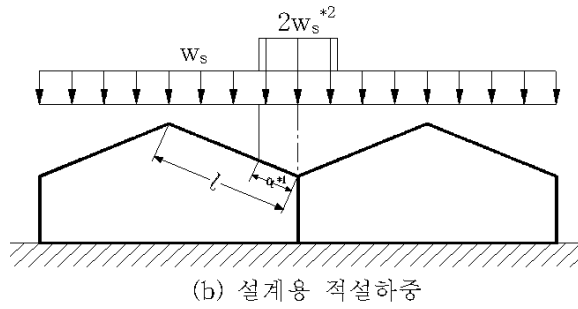
수직최심적설깊이 (cm)	50이하	100	150	200이상
평균단위중량($\text{kg/cm} \cdot \text{m}^2$)	1.0	1.5	2.0	3.0

(주) : 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙

표 4 지붕경사에 따른 적설하중의 절감계수⁴³⁾

지붕경사(°)	10°~20°	20°~30°	30°~40°	40°~60°	60° 이상
절감계수	0.90	0.75	0.50	0.25	0.00

또, 연동의 꼭부에는 그림 2.18의 (a)와 같이 많은 눈이 쌓이므로, 그림 (b)와 같이 꼭부의 설계용 적설하중은 할증율을 곱하여 증가시키도록 해야 한다.



- *1. a는 $l/3$ 또는 3m중 작은값.
- *2. 설계 적설심이 40cm이하 일때는 $1.5w_s$

그림 19. 연동 곡부의 적설

다. 시설의 표준내용년수와 안전율

플라스틱하우스를 설계함에 있어서 기상요소에 의한 설계하중을 산정할 때에는 재현기간에 맞는 설계자료를 이용해야 한다. 이때, 재현기간은 시설의 표준내용년수와 안전율로부터 결정되는 것으로 이들 사이의 관계는 식 (6)로 주어진다.

$$\frac{Q}{100} = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^R \quad (6)$$

여기서, Q는 안전율(%), R은 표준내용년수(년), T는 재현기간(년)이다.

표준내용년수는 골격자재, 피복재의 종류에 따라 구분되며, 안전도는 구조물의 용도, 공공성, 투자액 등에 따라 구분된다. 이를 근거로 식 (1)에 의하여 산출한 재현기간은 표 5와 같다. 또한, 각 내용년수 별로 재현기간과 안전도의 관계를 도표로 나타내면 그림 16과 같다. 따라서, 설치하고자 하는 플라스틱하우스의 내용년수와 안전도가 정해지면, 구조설계에 적용하는 적설하중과 풍하중을 산정하는데 필요한 설계풍속과 설계적설심을 결정할 수 있는 재현기간을 그림 16에서 구할 수가 있다.

표 5. 원예시설의 표준내용년수 및 안전도

구	분	표준내용년수	안전도(%)	재현기간
파 이 프 스	소형,이동식	10	50	15
	대형,고정식	10	50	15
			70	30
철골온실	플라스틱 필름	15	50	22
			70	43
	유 리	20	70	57

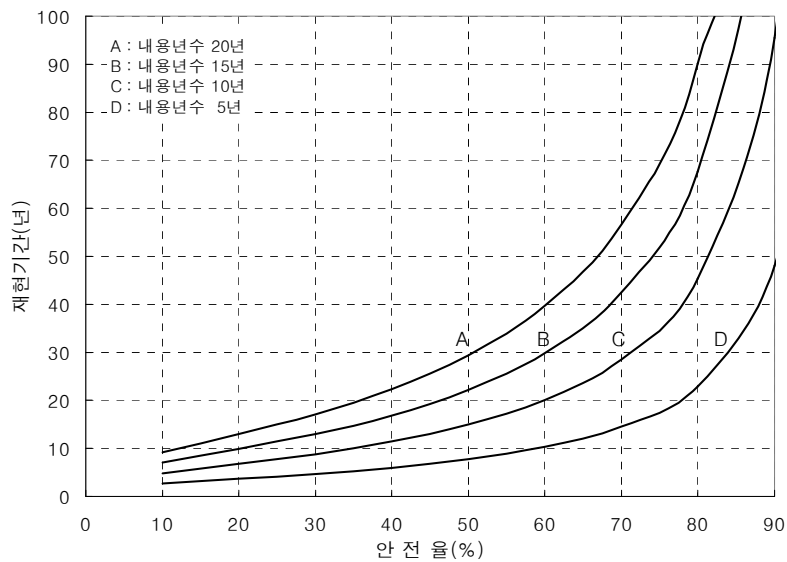


그림 20. 안전도 변화에 따른 재현기간의 변화

5. 국내 단동온실의 구조 현황

국내 단동온실을 대상으로 단면형상, 폭, 지붕높이, 처마높이, 처마기울기 및 서까래 간격을 분석한 결과는 표 6~표 11에서 보는 바와 같다.

표 6. 온실의 단면형상

단면형상	반원형	아치형	양지붕형	복숭아형	기타
동수(%)	476(3)	7073(45)	483(3)	7,706(48)	126(1)

표 7. 온실 폭

폭 (m)	< 5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	≥10
동수(%)	4,580(29)	5,660(35)	4,366(28)	579(4)	496(4)	37(0.5)	29(0.5)

표 8. 온실의 처마높이

처마높이(m)	none	< 1.00	1.00~1.20	1.20~1.40	1.40~1.60	1.60~1.80	1.80~2.00
동수(%)	2,263(14)	2,949(19)	3,474(22)	5,001(32)	1,543(10)	405(2)	112(1)

표 9. 온실의 지붕높이

지붕높이(m)	< 2.00	2.00~2.20	2.21~2.40	2.41~2.60	2.61~2.80	2.81~3.00	≥3.00
동수(%)	2,460(15)	4,901(31)	3,078(20)	2,539(16)	1,212(8)	1,214(8)	343(2)

표 10. 온실의 처마 기울기

기울기(°)	none	0~4.9	5.0~9.9	10.0~14.9	15~19.9	≥ 20
동수(%)	476(3)	4,593(29)	5,873(37)	2,994(19)	1,394(9)	417(3)

표 11. 서까래 간격

간격	50~59	60~69	70~79	80~89	90~99	100~109	110~119	120~129	≥ 130
동수(%)	158(1)	698(5)	1306(8)	2774(18)	2423(15)	5111(32)	1442(9)	933(6)	902(6)

가. 온실 폭 및 지붕높이

지역별로 설치되어 있는 온실의 폭은 10m이하의 범위에서 다양하게 나타났으나 온실

의 폭을 7m미만으로 시공하는 농가가 92%로 대부분을 차지하고 있었으며 지붕높이는 지역별로 300cm미만의 범위에서 다양하게 나타났다. 강원 및 경기지역의 온실 지붕높이는 221~240cm범위가 가장 많았으며, 충북, 전북 및 전남지역은 241~260cm 범위가 가장 많은 것으로 나타났고, 충남지역은 220~300cm 범위에서 다양하게 나타났다. 그리고, 경남 및 경북지역은 200~220cm 범위가 가장 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과로 농가에서 선호하고 있는 온실의 지붕높이는 200~220cm, 221~240cm 범위임을 알 수 있다. 재배작물에 관계없이 온실의 폭은 5~7m가 가장 많은 것으로 나타났고, 동고는 엽채류의 경우 200~249cm와 250~299cm 범위의 온실 수가 유사하게 나타났으나 과채류의 경우에는 200~249cm 범위가 가장 많은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 겨울철 보온과 난방을 용이하게 하기 위한 것으로 판단된다.

나. 처마높이 및 기울기

단동비닐하우스에서는 여름철 하우스내 환경조절을 위하여 측벽을 권취개방하여 환기를 수행하게 되므로 일정한 높이의 측벽이 있어야 한다. 그리고, 하우스내에서의 농기계작업을 할 수 있는 처마높이가 확보되어야 한다. 충남 및 전북 일부지역의 반원형 하우스의 경우에는 측벽이 없는 관계로 여름철 작물재배가 어려운 실정이다. 강원 및 전남지역을 제외한 지역에서는 농민들이 선호하는 처마높이는 120~139cm범위인 것으로 조사되었으나 강원, 전남지역은 측벽높이가 100~119cm범위인 것이 많은 것으로 나타났다. 지역별로 측벽의 기울기를 조사한 결과로, 충남 및 전북 일부지역을 제외하고는 측벽의 기울기는 지역에 관계없이 0°~27°범위에서 다양하게 나타났으나 하우스의 설계시 측벽의 기울기에 대한 구조적인 검토는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이며 측벽의 기울기에 따라 우천시 빗물이 하우스내로 유입되는 등 재배상의 애로사항이 유발되므로 시공시 주의할 필요가 있다.

다. 서까래 간격

단동비닐하우스의 경우에는 적설하중 및 풍하중을 모두 서까래가 받게 되므로 서까래 간격은 단동비닐하우스의 구조 안전에 많은 영향을 미치게 된다. 비닐하우스의 설계에 직접적인 영향을 미치게 되는 풍하중과 적설하중은 지역별 재현기간에 따라 설계풍속 및 적설심이 상이함에도 불구하고 서까래 간격은 지역에 관계없이 50~130cm

범위에서 다양하게 나타나 일정한 규칙성을 발견하기는 힘든 실정이다. 따라서, 지역별 재현기간에 따른 설계풍속 및 적설심에 따른 서까래 간격을 일정하게 적용할 수 있는 기준이 필요할 것으로 판단된다.

라. 가로대 설치 개수

국내 단동비닐하우스에 설치되어 있는 가로대의 개수는 대부분 3개이하인 것으로 조사되었다. 경기, 충북 및 경남 일부지역에는 가로대를 설치하지 않는 온실도 다수 있었으며, 강원 및 경북지역의 비닐하우스는 대부분 가로대를 1개 설치하는 것으로 나타났다. 농가지도형 비닐하우스의 표준설계서(농촌진흥청, 2000)에 의하면 가로대의 권장설치 개수는 5~7개이나 가로대의 설치 개수가 증가함에 따라 시공비가 증가할 뿐만 아니라 골조율 증가, 결로현상에 의해 발생한 물방울이 가로대에 따라 재배이랑에 떨어짐으로 인하여 작물의 병해 발생 등의 작물재배상 애로점을 유발시키므로 가로대의 설치를 농가에서 기피하는 경향으로 나타났다. 그리고, 가로대가 비닐하우스의 구조안전에 미치는 영향을 검토한 연구자료가 거의 없는 실정이므로 가로대의 적정 설치위치와 개수를 결정할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

마. 파이프 매입깊이

국내에 설치되어 있는 비닐하우스의 파이프 매입깊이는 30~49cm 범위였으나 경기, 경상도의 일부지역에서 50cm이상 매입하는 경우도 있는 것으로 나타났다.

바. 온실의 폭과 처마높이, 지붕높이 관계

그림 21과 그림 22는 온실의 폭과 처마높이, 지붕높이 사이의 관계를 분석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온실의 폭과 지붕높이 및 처마높이 사이에는 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며, 지붕높이와 처마높이 또는 매우 밀접한 관계를 갖고 있어 선형적으로 변하고 있는 것을 알 수 있다. 단동비닐하우스의 처마높이는 지붕높이의 0.19~0.628배인 것으로 분석되었다.

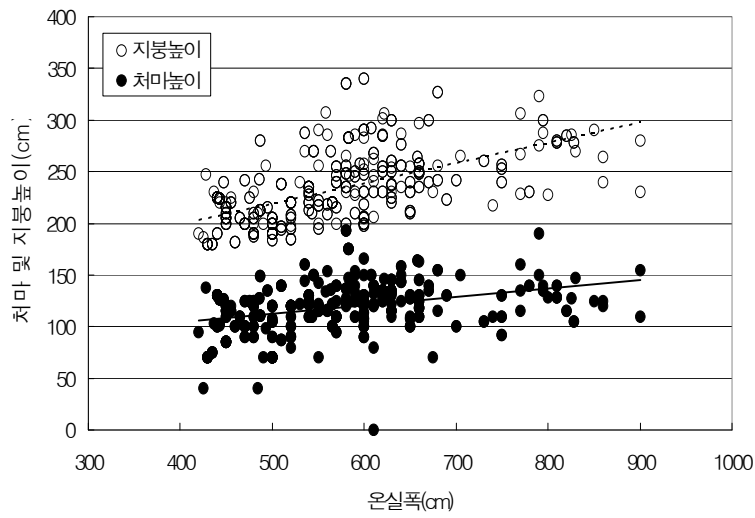


그림 21. 온실 폭, 지붕높이 및 처마높이 관계

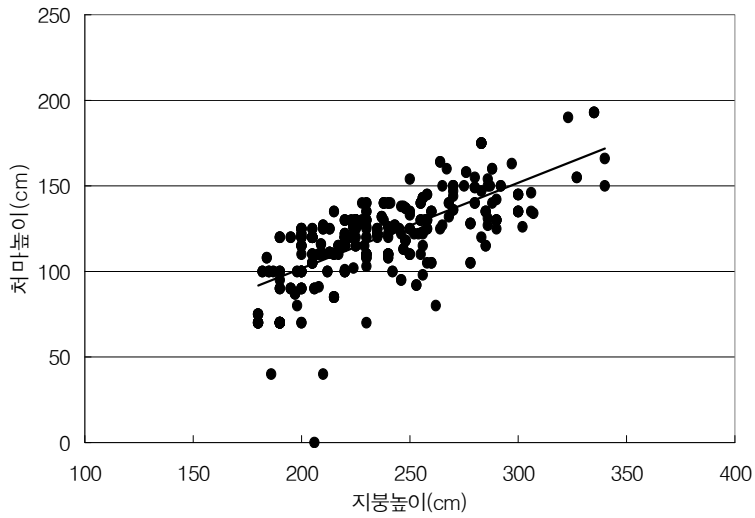


그림 22. 온실의 지붕높이와 처마높이의 관계

표 12 및 그림 23은 재배작물별 온실의 폭과 처마높이, 지붕높이 사이의 관계를 분석한 것이며, 표 13 및 그림 24는 지역별 온실의 폭과 처마높이, 지붕높이 사이의 관계를 분석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온실의 폭과 지붕높이 및 처마높이 사이의 관계는 조사온실 전체의 경향과 유사한 것으로 나타났다. 단동비닐하우스의 폭

은 엽채류의 경우에는 5~7m, 과채류는 4.3~7m, 근채류는 5~6m범위의 것이 대부분인 것으로 나타났으며, 과채류의 경우에는 다양하게 분포하는 것으로 나타났다.

표 12. 재배작물별 지붕높이, 처마높이 및 온실 폭 비

구 분	엽 채 류	과 채 류	근 채 류	전 체
지붕높이/폭	0.368~0.578	0.256~0.575	0.391~0.495	0.256~0.578
처마높이/폭	0.180~0.333	0.083~0.306	0.197~0.275	0.083~0.333
처마높이/지붕높이	0.417~0.628	0.190~0.632	0.448~0.556	0.190~0.628

충남, 전북, 전남지역에서는 온실의 폭이 5m미만의 소형비닐하우스는 거의 없었으며, 경남(밀양), 전남(순천, 광양일부) 일부지역에는 온실의 폭이 10m이상인 광폭형 단동비닐하우스가 있는 것으로 조사되었다. 그리고, 경남지역에는 온실의 폭이 4.3~7m 범위에서 다양하게 있는 반면에 경북지역에서는 5m미만이 온실이 많은 것으로 조사되었다. 단동비닐하우스의 구조유형을 분석한 결과, 온실의 폭과 처마높이 및 지붕높이는 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났으며 선형적인 변화를 보였다.

표 13. 지역별 지붕높이, 처마높이 및 온실 폭 비

구 분	강원	경기	충남	충북	전남	전북	경남	경북
지붕높이/폭	0.465 ~0.575	0.368 ~0.578	0.337 ~0.492	0.376 ~0.550	0.307 ~0.447	0.356 ~0.511	0.212 ~0.467	0.293 ~0.495
처마높이/폭	0.199 ~0.306	0.180 ~0.333	0.123 ~0.247	0.169 ~0.300	0.127 ~0.249	0.166 ~0.275	0.083 ~0.275	0.140 ~0.275
처마높이/ 지붕높이	0.383 ~0.532	0.417 ~0.628	0.305 ~0.587	0.407 ~0.618	0.378 ~0.621	0.440 ~0.541	0.190 ~0.632	0.350 ~0.600

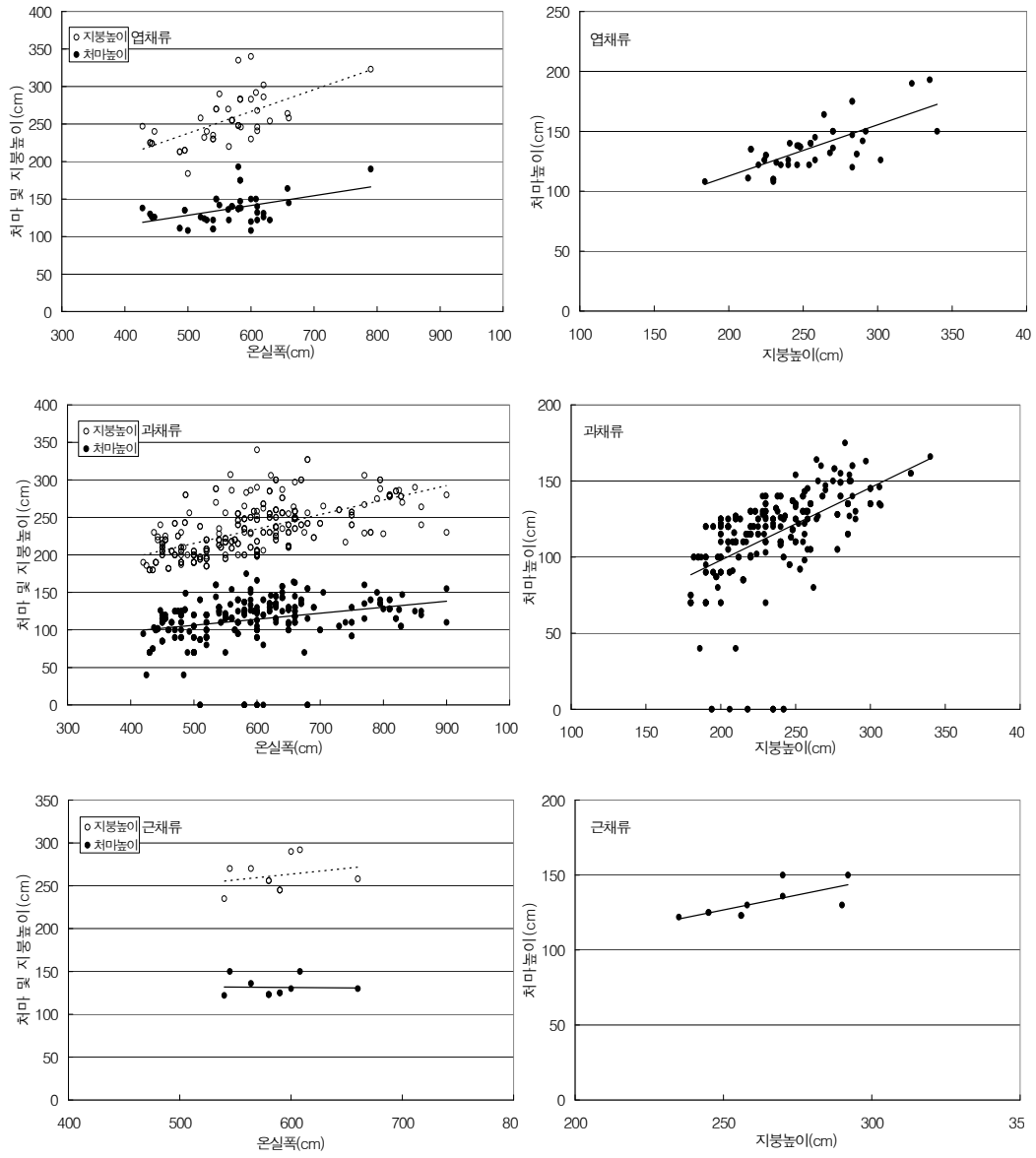
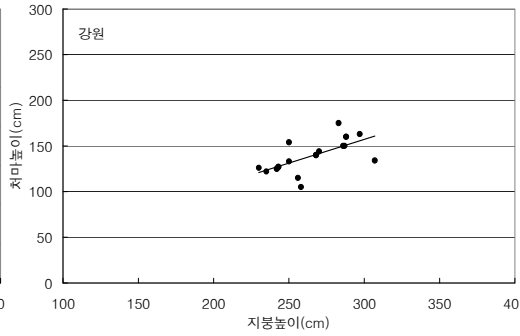
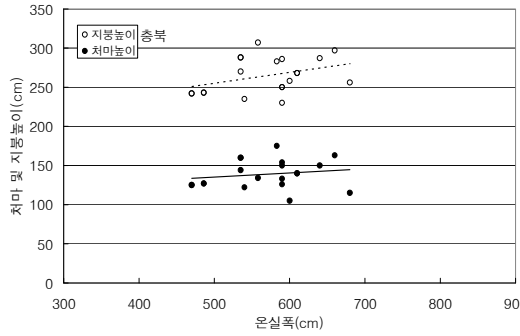
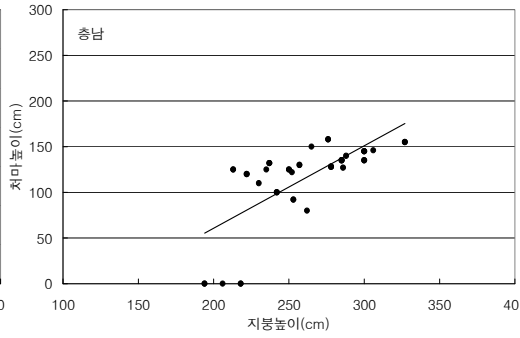
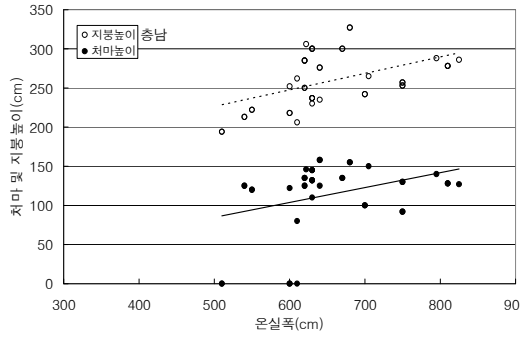
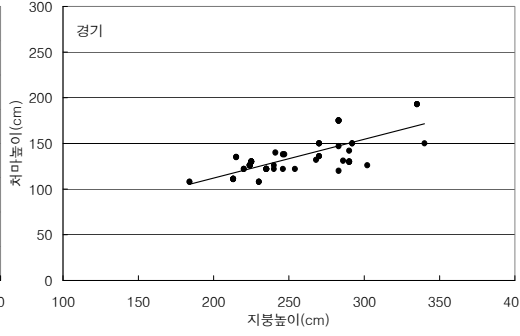
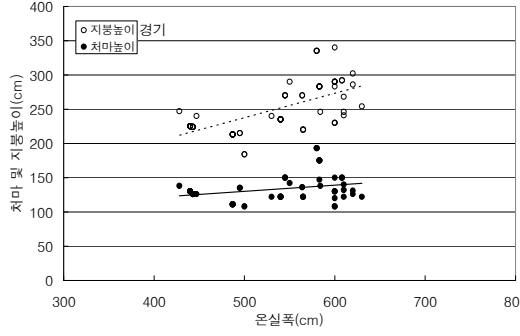
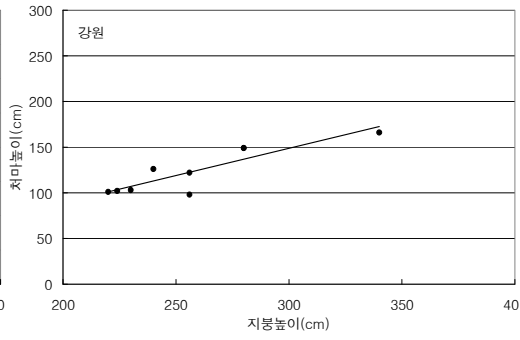
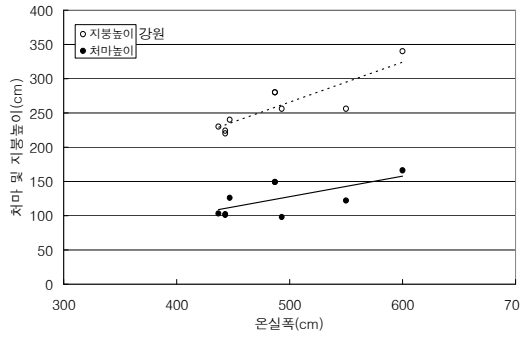


그림 23. 재배작물별 온실의 폭, 지붕높이 및 처마높이의 관계



(계속)

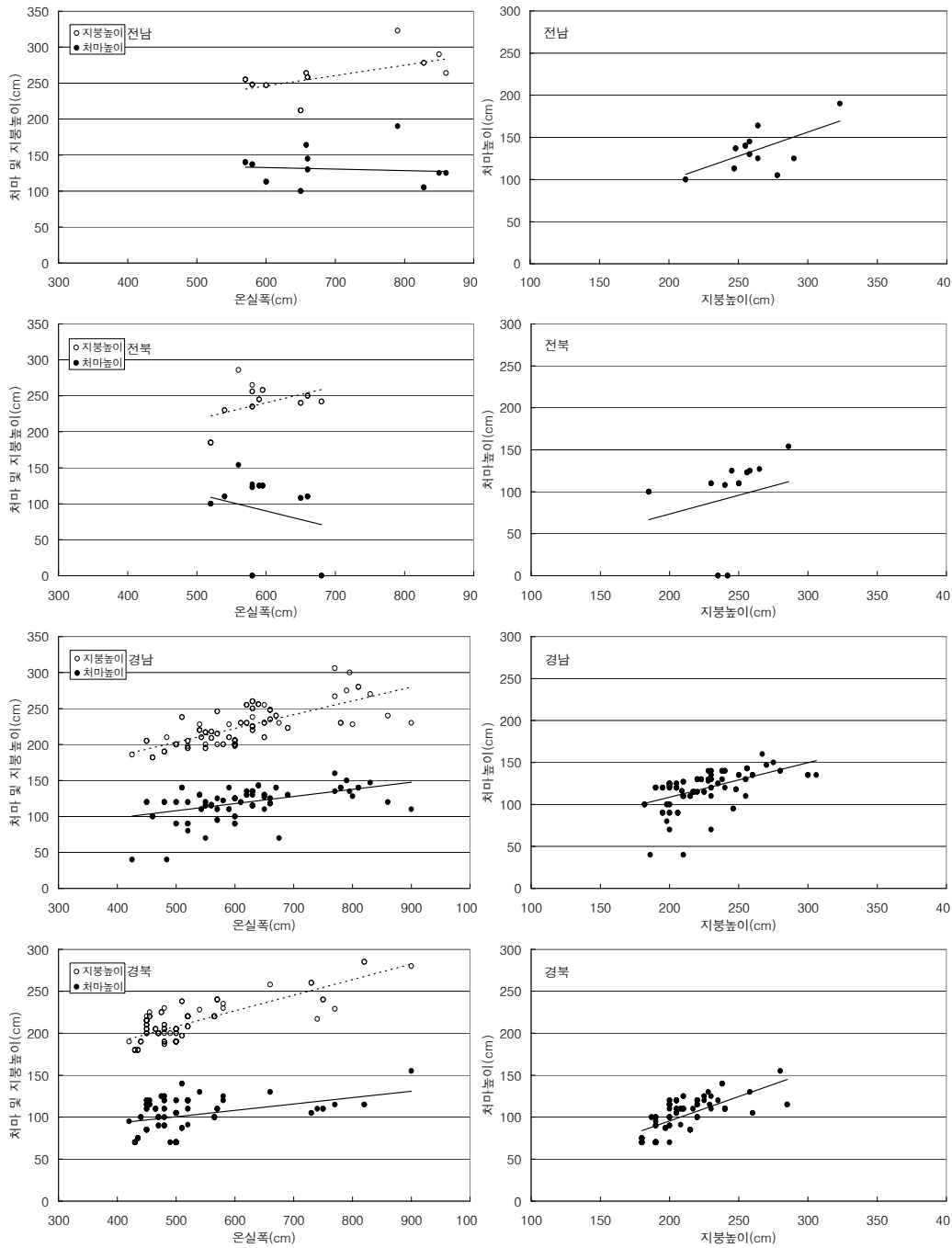


그림 24. 지역별 온실의 폭, 지붕높이 및 처마높이의 관계

6. 지역별, 재배작물별 온실구조의 특성

표 13과 표 14는 재배작물별 및 지역별 단동비닐하우스의 대표적인 규격을 분석한 결과이다.

표 13. 재배작물별 단동 비닐하우스의 대표적인 규격

재배작물	온실형상	폭 (m)	처마높이 (m)	지붕높이 (m)	서까래간격 (m)	매잎깊이 (m)
엽채류	복숭아형	5.48	1.37	2.55	1.06	0.4
과채류	복숭아형	5.62	1.14	2.30	0.99	0.4
근채류	아 치 형	6.00	1.25	2.50	0.71	0.4

표 14. 지역별 단동 비닐하우스의 대표적인 규격

지 역	강원	경기	충남	충북	전남	전북	경남	경북
온실형태	아치형	복숭아형	복숭아형	아치형	복숭아형	복숭아형	아치형	복숭아형
온실폭 (m)	4.80	5.50	6.50	5.5/6.5	6.50	5.50	5.5/6.5	4.8/5.5
지붕높이 (m)	2.54	2.56	2.58	2.62/2.76	2.53	2.28	2.13/2.32	2.04/2.18
처마높이 (m)	1.22	1.35	1.13	1.38/1.43	1.32	1.16	1.13/1.23	0.99/1.04
서까래 간격(m)	1.25	0.95	0.85	0.85	0.70	0.75	0.90	1.05

국내에 설치되어 있는 원예시설중 가장 많은 면적을 차지하고 있는 단동비닐하우스의 기상재해로 인한 피해를 경감시킬 수 있는 모델 개발에 필요한 기초자료를 제공하고자 지역 및 재배작물별 대표적인 단동온실의 안전풍속과 적설심을 구한 후 재현기간 8년에 해당하는 지역의 설계풍속 및 적설심과 비교하여 온실의 구조 안전성을 분석하였다. 지역별 단동비닐하우스의 대표적인 규격에 대하여 단위풍하중과 설하중에 대하여 구조해석을 한 결과와 이를 이용하여 안전풍속 및 안전적설심을 구한 결과는 표 15~표 16과 같으며, 재배작물별 단동비닐하우스의 대표적인 규격에 대하여 구한 결과는 표 17~표 18과 같다.

단동 비닐하우스 구조물에 단위하중을 작용시켜 구조해석을 실시하여 최대 단면력을 구한 결과는 표 15와 같다.

실제 풍속이 $v(m/s)$ 이고, 골조의 간격이 $S(m)$ 인 경우의 단면력은 표의 값에 식 (7)의 값을 곱하여 구한다.

$$0.0197v^2\sqrt{h}\times\frac{S}{100} (kgf/cm) \quad (7)$$

여기서, h : 온실의 평균높이(m)

그리고, 실제 적설심이 $D(cm)$ 이고, 골조의 간격이 $S(cm)$ 인 경우의 단면력은 표 7의 값에 식 (8)의 값을 곱하여 구한다.

$$\rho\times D\times\alpha\times\frac{S}{100} (kgf/cm) \quad (8)$$

여기서, ρ : 적설의 단위체적중량(적설심 50cm까지 1.0kgf/cm³ 적용)

α : 지붕경사에 따른 적설하중 절감계수(지붕경사 20~30°일 때 0.75 적용)

표 15. 단위하중 작용시 최대 단면력(지역별 대표온실)

구분	지역	모멘트(kgf·cm)		반 력(kgf)		측방향력(kgf)		전단력(kgf)	
		풍하중	설하중	풍하중	설하중	풍하중	설하중	풍하중	설하중
A	강원	-7,800.75	10239.62	-121.12	285.61	121.12	-285.61	-114.89	120.88
B	경기	-10,892.92	14476.63	-139.31	303.43	139.31	-303.43	-147.34	163.32
C	충남	-12,395.25	19882.73	-163.20	354.73	163.20	-387.95	-168.42	228.13
D-1	충북	-10,322.23	13452.52	-139.70	310.73	139.70	-310.73	-140.97	146.69
D-2	충북	-13,319.58	19375.00	-164.34	360.01	164.34	-360.01	-168.98	204.95
E	전남	-14,990.72	21151.41	-195.06	342.33	195.06	-360.60	-201.56	241.48
F	전북	-9,701.91	14237.86	-138.72	299.58	138.72	-317.58	-143.11	181.59
G-1	경남	-10,248.34	14049.36	-164.80	298.54	164.80	-325.51	-153.89	181.30
G-2	경남	-13,596.85	19926.81	-194.52	348.75	194.52	-394.07	-189.21	237.63
H-1	경북	-7,225.92	10774.62	-120.80	264.55	120.80	-279.27	-118.82	153.33
H-1	경북	-8,761.13	14225.10	-138.07	300.41	138.07	-327.74	-137.69	191.77

표 16. 단위풍하중 작용시 최대 단면력(재배작물별 대표온실)

구 분	모멘트(kgf·cm)		반 력(kgf)		측방향력(kgf)		전단력(kgf)	
	풍하중	설하중	풍하중	설하중	풍하중	설하중	풍하중	설하중
엽채류	-11,111.43	14,584.33	-139.12	306.17	139.12	-301.21	-148.86	161.51
과채류	-9,693.61	14,366.29	-144.16	306.76	141.42	-329.37	-144.16	189.78
근채류	-10,859.38	16,480.88	-151.42	333.46	151.42	-366.16	-150.81	191.31

지역별 대표 단동온실의 안전풍속은 서까래 간격에 따라 15.0~31.1m/s 범위였으며 안전풍속이 가장 큰 온실은 경북지역 대표온실(H-1)이고, 안전풍속이 가장 작은 온실은 전남지역(E) 대표온실인 것으로 나타났으나 재현기간 8년의 설계풍속을 모두 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 그리고, 안전적설심은 5.8~22.1cm범위였으며 눈으로 인한 적설하중에 가장 불리한 온실은 전남지역 대표온실(E)이고 안전적설심이 가장 큰 온실은 강원지역의 대표온실(A)인 것으로 나타났다. 서까래 간격을 고려하여 볼 때 경남지역을 제외한 나머지 전지역의 온실은 재현기간 8년의 적설하중에 대하여 불안정한 것으로 나타나 보강대책을 강구해야 할 것으로 판단된다.

표 17. 서까래 간격에 따른 안전풍속 및 적설심

구분	지역	서까래 간격, S(cm)											
		60		70		80		90		100		110	
		풍속 (m/s)	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)	적설심 (cm)
A	강원	28.4	22.1	26.3	18.9	24.6	16.6	23.2	14.7	22.0	13.2	20.9*	12.0*
B	경기	23.8	15.6	22.0	13.4	20.6	11.7	19.4	10.4	18.4*	9.4*	17.6	8.5
C	충남	22.6	11.4	20.9	9.7	19.6	8.5	18.4*	7.6*	17.5	6.8	16.7	6.2
D-1	충북	24.3	16.8	22.5	14.4	21.0	12.6	19.8*	11.2*	18.8	10.1	17.9	9.2
D-2	충북	21.1	11.7	19.6	10.0	18.3	8.7	17.3*	7.8*	16.4	7.0	15.6	6.4
E	전남	20.3	10.7	18.8*	9.2*	17.6	8.0	16.6	7.1	15.8	6.4	15.0	5.8
F	전북	26.0	15.9	24.1	13.6	22.5*	11.9*	21.2	10.6	20.1	9.5	19.2	8.7
G-1	경남	25.6	16.1	23.7	13.8	22.2	12.1	20.9*	10.7*	19.9	9.7	18.9	8.8
G-2	경남	21.8	11.3	20.2	9.7	18.9	8.5	17.8*	7.6*	16.9	6.8	16.1	6.2
H-1	경북	31.1	21.0	28.8	18.0	26.9	15.7	25.4	14.0	24.1	12.6	23.0*	11.4*
H-2	경북	27.8	15.9	25.8	13.6	24.1	11.9	22.7	10.6	21.6	9.5	20.5*	8.7*

*지역별 평균 서까래 간격에 해당하는 한계풍속 및 적설심

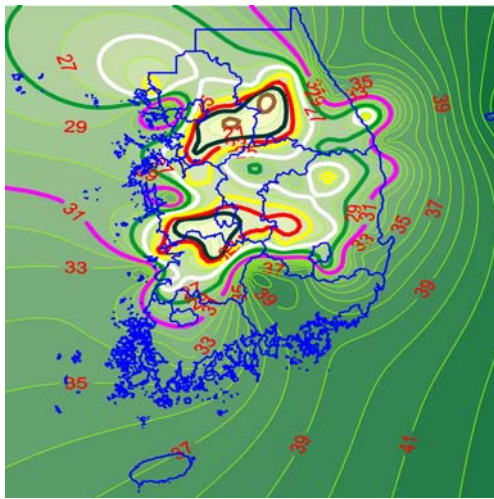
재배작물별 대표온실에 단위풍하중을 적용한 결과, 최대 단면력은 과채류, 근채류, 엽채류 온실 순으로 크게 나타났으며 재배작물별 서까래 간격을 고려한 안전풍속은 엽채류 온실이 17.7m/s, 과채류 온실이 20.2m/s, 근채류 온실이 22.3m/s로 나타나 지역별 8년 빈도의 설계풍하중과 비교하였을 때 홍천, 이천, 성주지역을 제외하고는 대부분의 지역에 있어서 불안정한 것으로 나타났다. 그리고, 단위 적설하중을 적용한 결과, 근채류 온실의 최대 단면력이 가장 크게 나타났으나 재배작물별 서까래 간격을 고려한 안

전적설심은 엽채류 온실이 8.8cm, 과채류 온실이 9.4cm, 근채류 온실이 11.8cm인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 지역별 8년 빈도의 적설하중과 비교하였을 때 경남지역 일부를 제외하고는 대부분의 지역에 있어서 불안정한 것으로 분석되었다.

표 18. 서까래 간격에 따른 안전풍속 및 적설심

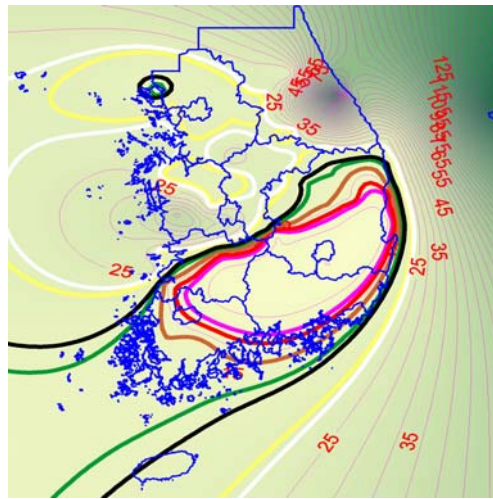
구 분	서까래 간격, S(cm)											
	60		70		80		90		100		110	
	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)	풍속 (m/s)	적설심 (cm)
엽채류 온실	23.5	15.5	21.2	13.3	20.4	11.6	19.2	10.3	18.2*	9.3*	17.4	8.5
과채류 온실	26.0	15.7	24.1	13.5	22.5	11.8	21.2	10.5	20.2*	9.4*	19.2	8.6
근채류 온실	24.1	13.7	22.3*	11.8*	20.8	10.3	19.6	9.1	18.6	8.2	17.8	7.5

*평균 서까래 간격에 해당하는 한계풍속 및 적설심



- 온실 D-2, E 만족
- 온실 C, G-2 만족
- 온실 C 만족
- 온실 B, D-1 만족
- 온실 F, G-1 만족
- 온실 A, H-1 만족
- 온실 H-2 만족

그림 25. 등풍속선도(재현기간 8년)



- 온실 C, E, G-2 만족
- 온실 D-2 만족
- 온실 G-1 만족
- 온실 B, F, H-2 만족
- 온실 D-1 만족
- 온실 H-1 만족
- 온실 A 만족

그림 26. 등적설심도(재현기간 8년)

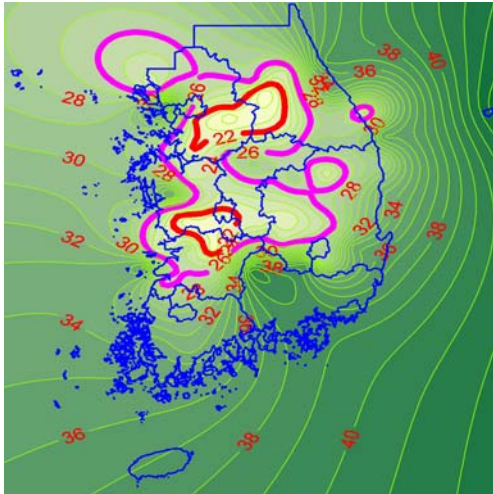


그림 27. 등풍속선도(재현기간 8년)

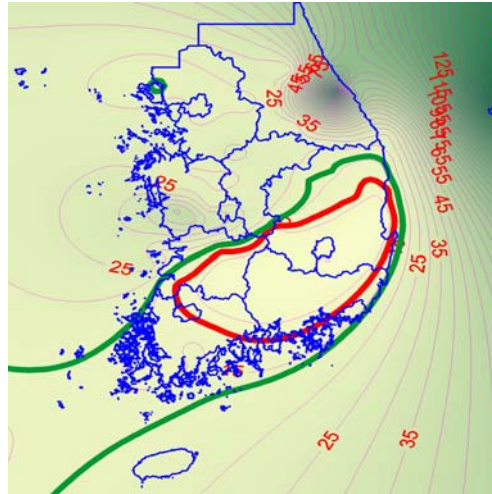


그림 28. 등적설심도(재현기간 8년)

7. 농가지도형 비닐하우스의 구조안전성

매년 기상재해로 인한 비닐하우스의 피해가 반복되면서 피해복구지원기준을 정립하고자 2001년말에는 농가지도형 비닐하우스 모델 10종을 제안하였으며 이후 수정·보완을 통하여 현재 보급되고 있는 농가지도형 철재 비닐하우스의 기본모델로 표준설계도는 13종이 제시되고 있는 실정이다. 이 가운데 연동형인 K형과 지주보강형인 A-1형과 B-1형을 제외하면 표 19와 같이 10개의 기본모델로 분류할 수 있으며 농가지도형 철재 비닐하우스 기본모델의 단면형상은 그림 28과 같다.

표 19. 농가지도형 비닐하우스의 폭, 처마 및 지붕높이 비

	A형	B형	C형	D형	E형	F형	G형	H형	I형	J형
폭(m)	4.8	5.4	6	6.5	7	7.8	8.2	5.4	6	7.5
서까래간격(m)	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.5	0.6	0.7
처마높이(m)	1.1	1.2	1.3	1.6	1.4	1.4	1.6	1.6	1.7	1.6
지붕높이(m)	2.3	2.6	2.9	3	2.8	3.1	3.5	3	3.3	3.9
처마/지붕높이	0.23	0.22	0.22	0.25	0.20	0.18	0.20	0.30	0.28	0.21
처마높이/폭	0.48	0.48	0.48	0.46	0.40	0.40	0.43	0.56	0.55	0.52
지붕높이/폭	0.48	0.46	0.45	0.53	0.50	0.45	0.46	0.53	0.52	0.41

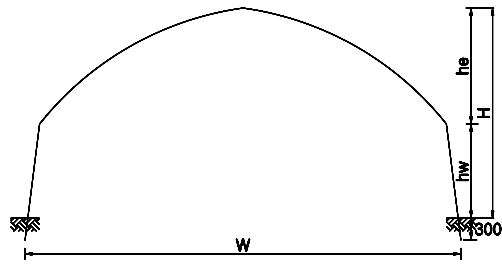


그림 28. 농가지도형 비닐하우스의 형상

표 20에서 보는 바와 같이, 농가지도형 비닐하우스의 안전풍속은 유형별로 16.9m/s~25.7m/s 범위였으며 안전적설심은 11.3cm~22.3cm 범위인 것으로 분석되었다. 농가지도형 단동비닐하우스의 안전풍속 및 안전적설심이 일정하지 못한 것은 국내 연동 온실의 경우에는 건축설계기준에 준하여 풍하중과 적설하중 기준이 정립되어 있으나 단동비닐하우스의 설계기준은 부재하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 내재형 하우스 모델인 H형, I형, J형의 경우 안전적설심은 타 온실에 비해 높게 나타났으나 안전풍속은 그러하지 못한 것으로 나타났다.

표 20. 농가지도형 비닐하우스의 안전풍속 및 적설심

	서까래 간격(cm)								서까래 간격(cm)							
	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110		
	안전풍속(m/s)								안전적설심(cm)							
A형	29.1	26.5	24.6	23.0	21.7	20.6	19.6	20.8	17.3	14.8	13.0	11.5	10.4	9.4		
B형	33.3	30.4	28.1	26.3	24.8	23.5	22.4	35.1	29.3	25.1	22.0	19.5	17.6	16.0		
C형	30.1	27.5	25.4	23.8	22.4	21.3	20.3	28.3	23.6	20.3	17.7	15.8	14.2	12.9		
D형	22.7	20.7	19.2	18.0	16.9	16.1	15.3	21.9	18.3	15.7	13.7	12.2	11.0	10.0		
E형	30.3	27.7	25.6	24.0	22.6	21.4	20.4	30.3	25.2	21.6	18.9	16.8	15.1	13.8		
F형	29.2	26.6	24.6	23.0	21.7	20.6	19.7	24.9	20.8	17.8	15.6	13.8	12.5	11.3		
G형	26.4	24.0	22.3	20.9	19.7	18.7	17.8	22.6	18.8	16.1	14.1	12.6	11.3	10.3		
H형	19.7	18.0	16.7	15.6	14.7	14.0	13.3	20.7	17.2	14.8	12.9	11.5	10.3	9.4		
I형	23.1	21.1	19.5	18.3	17.2	16.4	15.6	26.8	22.3	19.2	16.8	14.9	13.4	12.2		
J형	30.4	27.8	25.7	24.1	22.7	21.5	20.5	29.1	24.3	20.8	18.2	16.2	14.6	13.2		

일정한 하중조건에서 온실의 구조안전성을 결정하는 것은 사용부재와 부재의 설치 간격이다. 특히, 단동온실의 경우에는 서까래 간격이 구조안전성에 밀접한 관계가 있으나 너무 조밀하게 설치할 경우에는 골조울의 증대로 인하여 광투과 환경을 불량하

게 할 수 있으므로 서까래 간격을 결정할 때는 골조율 변화를 고려하여야 한다. 그림 29는 길이 95m인 온실에 대하여 사용부재별 서까래 간격에 따른 골조율 변화를 분석한 것으로 서까래 간격이 증가할 수록 골조율은 감소하는 것으로 나타나 서까래 간격은 구조안전성에 문제가 없는 범위에서 넓게 하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 서까래 간격이 0.1m에서 0.4~0.5m까지 증가함에 따른 골조율의 감소는 급격하게 변화하였으나 그 이후부터는 완만한 감소를 나타내었다. 따라서, 온실의 최소 서까래 간격은 0.4m~0.5m 이상으로 하는 것이 온실의 광환경에 유리함을 알 수 있다.

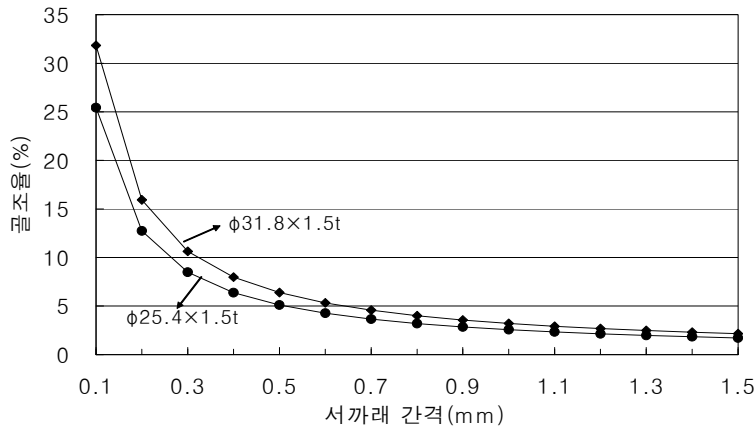
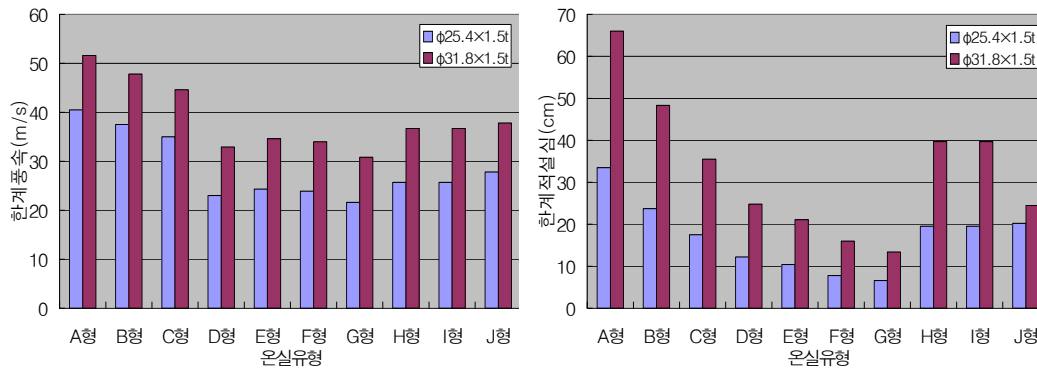


그림 29. 사용부재별 서까래 간격에 따른 골조율 변화

그림 30은 분석모델에 대한 구조안전성을 평가하기 위하여 모델별로 동일한 서까래 간격과 부재를 사용하였을 때 한계최대풍속 및 한계최대적설심을 구한 결과이다. 그림 30(a)에서 보는 바와 같이 한계최대풍속이 큰 순으로 모델을 나열하면 A형, B형, C형, J형, H형, I형, E형, F형, D형, G형 순이며 부재단면이 Ø25.4x1.5t에서 Ø31.8x1.5t로 증가하면 한계풍속은 약 25% 증가하는 것을 나타냈다. 그리고, 그림 30(b)에서 보는 바와 같이 한계최대적설심이 큰 순으로 모델을 나열하면 A형, B형, J형, H형, I형, C형, D형, E형, F형, G형 순이며 부재단면이 Ø25.4x1.5t에서 Ø31.8x1.5t로 증가하면 한계최대적설심은 J형을 제외하고는 약 100% 증가하는 것을 나타냈다. J형의 경우에는 부재단면 증가에 따라 한계최대적설심은 약 25% 증가하는 것으로 나타났는데 이는 설하중이 온실에 작용하였을 때 발생하는 온실의 변형이 타 모델에 비해 크게 나타났기 때문이다.



(a) 한계풍속

(b) 한계적설심

그림 30. 온실 모델별 한계최대풍속 및 최대적설심

온실의 구조안전성은 온실의 형상, 파이프 규격 및 서까래 간격에 따라 다르게 나타나며 농가지도형 비닐하우스 기본모델의 경우에는 서까래 간격과 파이프 규격이 한정되어 있어 농가에서 선택할 수 있는 모델이 제한적이다. 농가지도형 비닐하우스의 기본모델의 활용도를 증대시키고 농가에서 사용할 수 있는 범위를 확대시키기 위해서는 모델별로 파이프 규격과 서까래 간격 변화에 따른 온실의 구조안전성을 분석할 필요성이 있다.

8. 온실의 구조에 따른 안전성 분석

가. 온실 형태별 구조안전성

온실의 단면형상이 구조안전성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 온실형태(아치형, 복숭아형, 양지붕형)별로 단위풍하중 및 적설하중을 적용하여 구조해석을 수행하여 그림 31과 같이 최대휨모멘트를 비교하였다. 단위풍하중에 대하여 아치형과 복숭아형에 비해 양지붕형이 매우 불리한 것으로 나타났으며, 적설하중의 경우에는 아치형, 복숭아형, 양지붕형 순으로 불리한 것으로 나타났다. 적설하중에 대하여 유리한 단동비닐하우스 구조로 개발된 복숭아형이 아치형보다 불리한 것으로 나타났다. 이는 구조해석 수행시 적설하중을 온실구조물에 재하할 때 지붕경사각(처마와 동고를 연결하는 선이 수평선과 이루는 각)에 따른 절감계수를 온실형태에 관계없이 일률적으로 적용

하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 적설하중을 재하할 때는 그림 32와 33에서 보는 바와 같이, 온실의 형태별로 지붕의 경사각을 4등분하여 이에 대한 절감계수를 고려하여 구조해석을 수행한 결과는 그림 34와 같다.

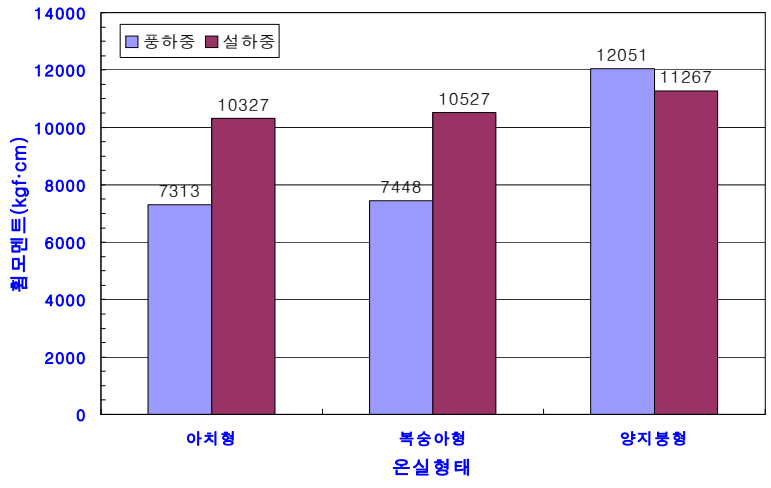


그림 31. 단위하중 작용시 온실형태별 최대휨모멘트

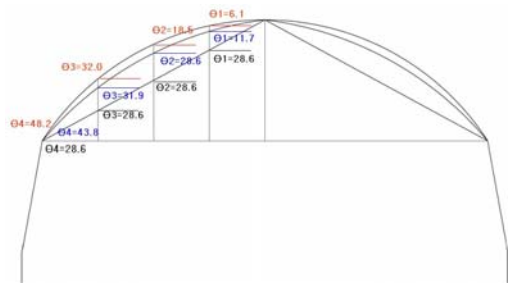


그림 32. 온실형태별 지붕경사각

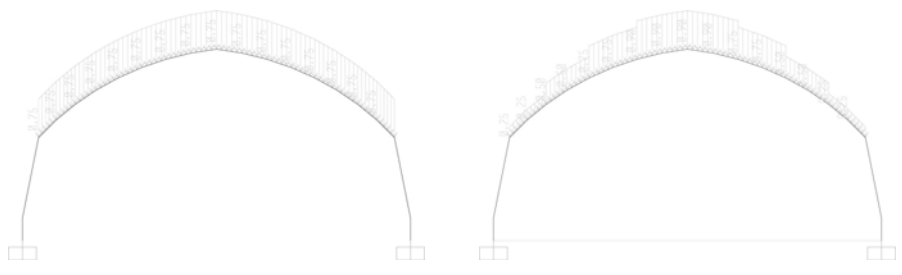


그림 33. 적설하중 재하 모식도

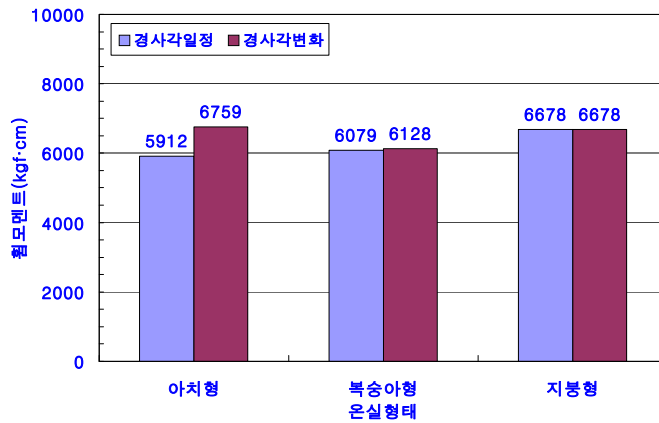


그림 34. 단위 적설하중 작용시 온실형태별 최대휨모멘트

나. 온실의 폭, 동고 및 측고가 구조안전에 미치는 영향

국내외적으로 단동비닐하우스에 있어 폭, 측고 및 동고비가 구조안전에 미치는 영향을 분석한 연구자료는 거의 찾아보기 힘들며, 구조공학적인 연구가 수행된 바가 없으며 관련자료 또한 미비한 실정이다. 따라서, 온실의 폭, 측고 및 동고비가 구조안전에 미치는 영향을 분석하여 단동비닐하우스의 최적구조모델을 개발하고 소형비닐하우스의 구조표준화를 위한 기초자료를 제공하고자 그림 35와 같은 온실형태에 폭, 측고 및 동고비가 각각 다른 온실에 대하여 구조해석을 수행하였다

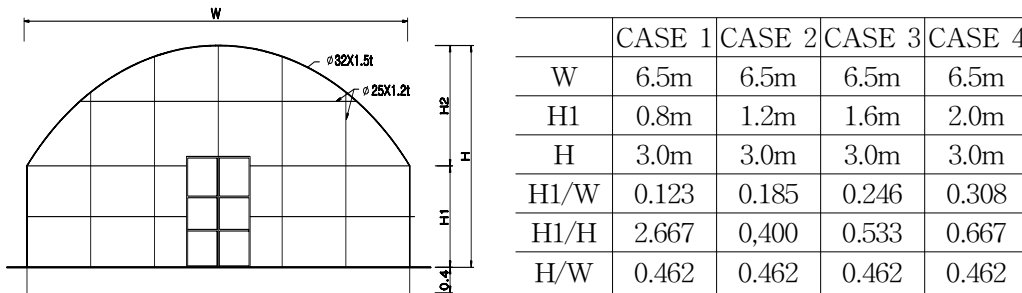


그림 35. 구조해석 하우스 모델

구조해석시 동일한 풍하중과 설하중을 적용하였을 때 하우스 부재에 발생하는 최대 단면력을 산정하였으며 하우스의 구조해석은 SAP2000를 이용하였다. 그리고, 구조해석 조건과 하우스의 골조재로 사용되는 파이프의 물리적 특성과 정수는 표 21 및 표 22와 같다.

표 21. 구조해석 조건

서까래 간격	설계풍속	설계적설심	지점조건	측벽기울기(°)
80cm	26.6m/s	22.2cm	지하 20cm 힌지	0

표 22. 골조재의 물리적 특성 및 정수

직경	두께	단면계수	항복응력	영계수
31.8mm	1.5mm	1.643cm ³	2400kgf/cm ²	17.2×10 ⁶ kgf/cm ²

온실의 폭, 측고 및 동고 비에 따른 최대단면력을 산정한 결과는 표 23, 그림 36 및 그림 37과 같다. 표 및 그림에서 보는 바와 같이 폭과 측고비가 증가할수록 하중에 대한 구조안전성을 불리한 것으로 나타나, 풍하중의 경우에는 측고비가 0.123인 경우와 0.308인 경우의 하우스 부재에 발생하는 최대단면력을 비교하면 휨모멘트는 245%, 축방향력은 123% 및 전단력은 189% 증가하는 것으로 분석되었다. 그리고, 설하중의 경우에는 휨모멘트는 122% 증가하였으나 축방향력과 전단력은 감소하는 것으로 나타났다.

표 23. 온실의 측고/폭 비 변화에 따른 최대단면력

측고 / 폭		0.123	0.185	0.246	0.308
풍하중	모멘트(kgf·m)	18.06	24.12	30.87	44.27
	축방향력(kgf)	-30.11	-31.05	-31.88	-37.71
	전단력(kgf)	-21.50	-26.17	-30.52	-40.70
설하중	모멘트(kgf·m)	22.89	25.98	27.79	27.83
	축방향력(kgf)	-67.60	-63.60	-57.97	-52.29
	전단력(kgf)	-31.14	-30.70	-29.40	-27.20

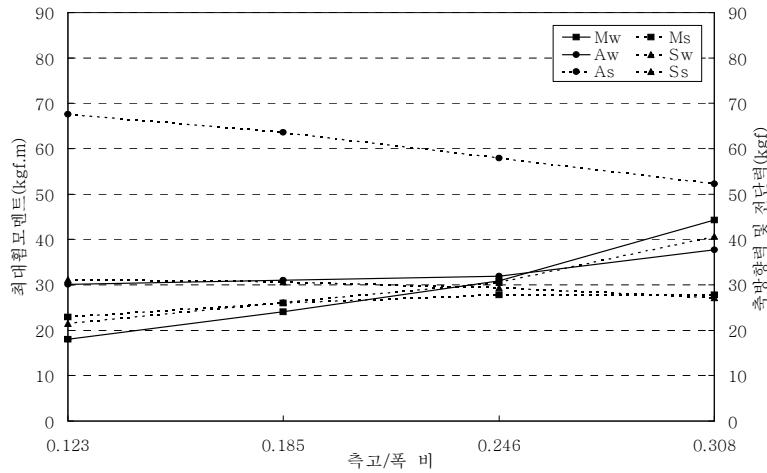
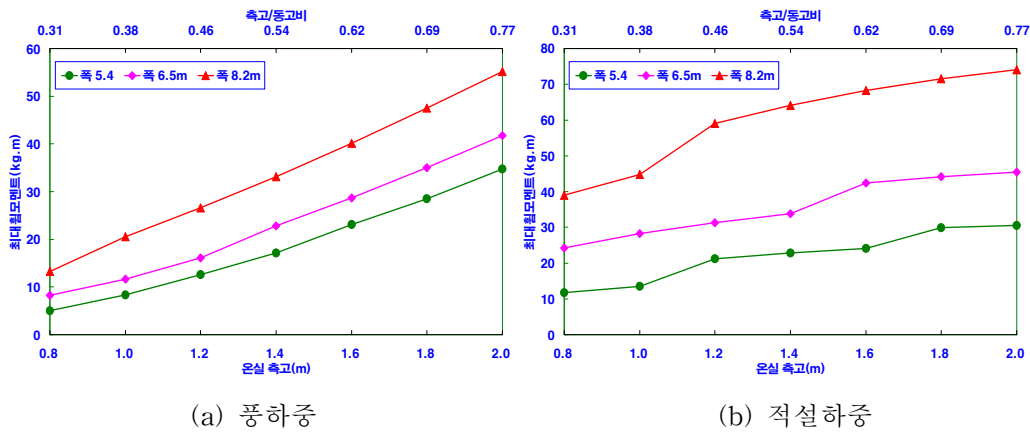


그림 36. 온실의 측고/폭 비에 따른 최대단면력 변화



(a) 풍하중

(b) 적설하중

그림 37. 단위하중 작용시 최대휨모멘트

아치형 단동비닐하우스의 경우, 폭과 측고비가 증가할수록 풍하중 및 설하중에 불리한 것으로 나타났으며 설계풍속이 26.6m/s일 때 하우스 부재에 발생하는 최대휨모멘트는 245% 증가하는 것으로 나타나 측고/폭 비를 감소시키는 것이 유리할 것으로 판단된다. 그리고, 국내에 설치된 단동온실의 형태(아치형, 지붕형, 복숭아형)에 대하여 다양한 폭에 대한 측고 높이의 검토가 필요하며, 검토된 결과는 단동비닐하우스의 최적설계와 구조표준화의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

다. 측벽 기울기가 소형비닐하우스의 구조안전에 미치는 영향

국내 원예시설면적의 80%를 차지하고 있는 파이프 단동비닐하우스는 대부분이 농가에서 자가인력을 이용하여 설치를 하고 있는 실정이며 골조용 파이프의 성형은 지역농협이나 작목반 등에서 보유하고 있는 활대를 이용하고 있다. 따라서, 농가에서 보유하고 있는 활대의 형상에 따라 하우스의 단면형태가 결정이 되며 하우스의 시공시 활대와 시공자에 따라 측벽의 기울기가 상이하게 나타난다. 따라서, 측벽 기울기가 단동비닐하우스의 구조안전에 미치는 영향을 분석하여 단동비닐하우스의 구조적 안정성을 향상시킬 수 있는 기준을 마련하고자 본 연구를 수행하였다.

측벽 기울기가 하우스의 구조안전에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 38과 같이 폭(8.2m)×동고(3.5m)×측고(1.6m)인 하우스 모델에 대하여 표 24와 같은 조건을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 폭, 동고 및 측고의 외형적 요소를 동일하게 한 후 측벽 기울기를 0°, 3°, 5°, 10°, 15°, 20°로 변화시켰을 때 하우스 부재에 발생하는 최대단면력을 산정하였으며 하우스의 구조해석은 SAP2000를 이용하였다.

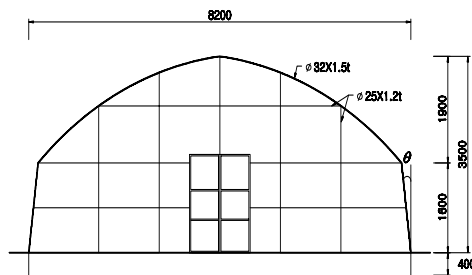


그림 38. 구조해석 하우스 모델

표 24. 구조해석 조건 및 파이프의 물리적 특성

서까래 간격	설계풍속	설계적설심	지점조건	측벽 기울기(°)
80cm	26.6m/s	22.2cm	지하 40cm 고정	0,3,5,10,15,20
직경	두께	단면계수	항복응력	영계수
31.8mm	1.5mm	1.643cm ³	2400kgf/cm ²	17.2×10 ⁶ kgf/cm ²

측벽 기울기가 하우스 구조안전에 미치는 영향을 분석한 결과는 표 25 및 그림 39와 같다.

표 25. 측벽의 기울기 변화에 따른 최대단면력

기울기 (θ)	풍 하 중				설 하 중			
	휨모멘트 (kg·cm)	반력 (kgf)	축방향력 (kgf)	전단력 (kgf)	휨모멘트 (kg·cm)	반력 (kgf)	축방향력 (kgf)	전단력 (kgf)
0°	-2,526.9	35.4	27.6	-35.4	3,987.4	37.0	-66.1	36.9
3°	-2,315.7	36.5	28.3	-33.7	3,579.8	41.7	-73.8	33.2
5°	-2,372.1	36.2	28.1	-34.1	3,743.4	40.7	-75.1	34.8
10°	-2,228.9	37.0	28.9	-33.0	3,354.5	43.2	-76.9	31.1
15°	-2,155.4	37.8	29.0	-32.2	2,949.3	45.8	-78.7	27.1
20°	-2,096.6	38.5	29.3	-31.5	2,523.1	48.5	-80.6	23.0

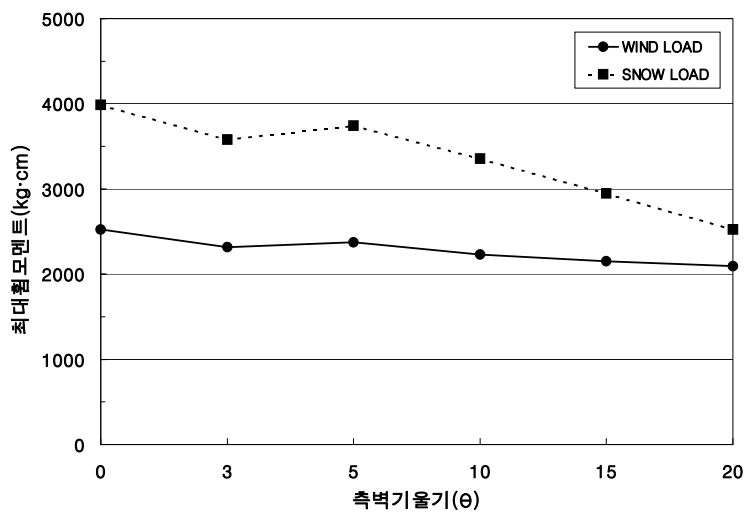


그림 39. 측벽기울기에 따른 최대휨모멘트 변화

표 25는 단동비닐하우스의 측벽 기울기 변화에 따라 동일한 풍하중과 적설하중을 적용하였을 때 하우스 부재에 발생하는 최대단면력을 비교·분석한 결과이다. 표에서 보는 바와 같이, 동일한 하중이 작용하더라도 측벽의 기울기에 따라 부재에 발생하는 최대단면력이 상이하게 나타났으며 측벽 기울기가 증가할수록 부재에 발생하는 최대 휨모멘트와 전단력은 감소하는 경향으로 나타났으며 반력과 축방향력은 증가하는 것으로 나타났다. 그림 39는 풍하중과 적설하중별로 측벽 기울기 변화에 따른 발생 최대 휨모멘트를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 풍하중과 적설하중 모두 측벽의

기울기가 3°에서 5°로 증가하면 발생최대휨모멘트는 증가하여 하우스 구조안전에 불리한 것으로 나타났으나 기울기가 5°인 경우를 제외하고는 측벽 기울기가 증가할수록 발생최대휨모멘트는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, 동일한 하우스 규격과 골조재를 사용하더라도 측벽구조에 따라 부재에 발생하는 최대휨모멘트를 풍하중의 경우에는 17%, 적설하중의 경우에는 36%를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되어 추가적인 연구를 통하여 경제적인 단동하우스의 구조를 개발할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 40(a)은 단동온실에 있어 처마구조가 안전성에 미치는 영향을 분석한 것으로 동일한 지붕폭일 때 처마기울기 변화에 따른 최대휨모멘트를 구한 결과이며, 그림 40(b)는 동일한 지붕높이에서 처마높이 변화에 따른 최대휨모멘트를 구한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 동일한 하중이 작용하더라도 측벽의 기울기에 따라 부재에 발생하는 최대단면력이 상이하게 나타났으며 풍하중과 적설하중 모두 측벽의 기울기가 증가할수록 발생최대휨모멘트는 감소하여 구조안전에 유리한 것으로 나타났다. 그리고, 동일한 지붕높이에 대하여 처마높이가 증가할수록 발생 최대휨모멘트는 증가하여 구조안전에 불리한 것으로 나타났다. 따라서, 동일한 하우스 규격과 골조재를 사용하더라도 처마구조에 따라 부재에 발생하는 최대휨모멘트를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

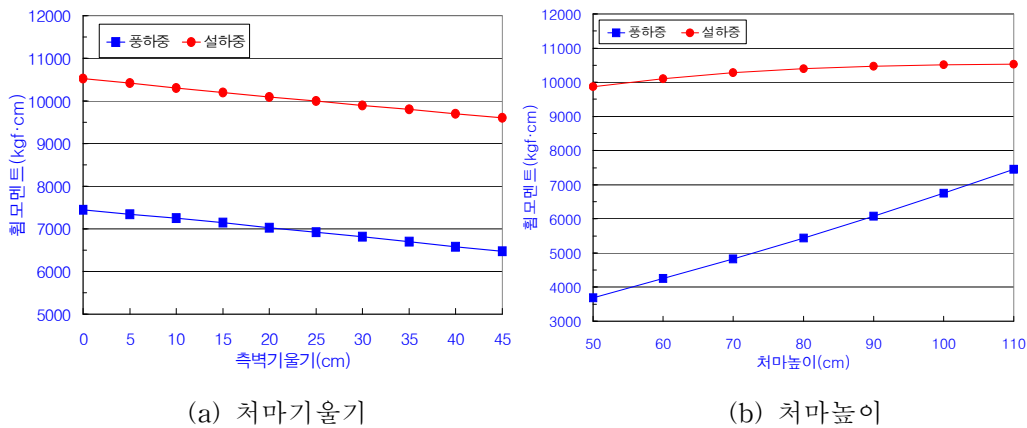


그림 40. 단동비닐하우스의 처마구조에 따른 최대휨모멘트 비교

라. 온실의 크기 변화가 구조안전성에 미치는 영향

온실의 폭, 처마높이 및 곡부높이 변화에 따른 구조안전성을 분석하고자 그림 41과 같은 단동온실에 대하여 온실 폭(W)를 450cm부터 900cm까지 30cm씩 증가시킨 16개 모델에 대하여 처마높이(hw)를 80cm~220cm 범위에서 증가폭을 20cm로 하고 곡부높이(he)는 80cm~240cm 범위에서 증가폭을 10cm로 변화시킨 총 2,176개의 온실모델에 대하여 구조해석을 수행하였다.

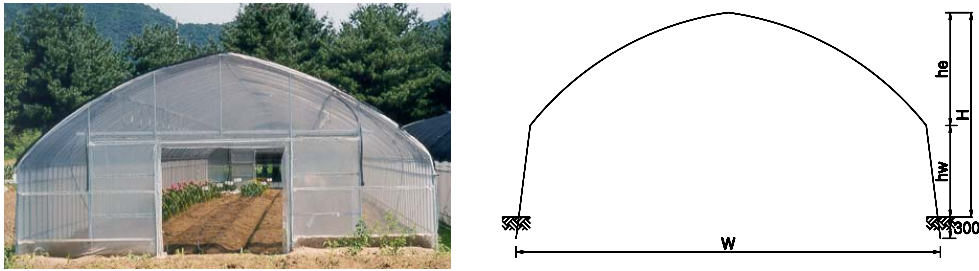


그림 41. 단동온실의 형상

1) 온실 크기별 단위풍하중 재하시 최대휨모멘트 변화

그림 42~그림 44는 온실의 단면형상별로 단위풍하중을 작용시켰을 때 발생하는 최대휨모멘트를 계산한 예이다.

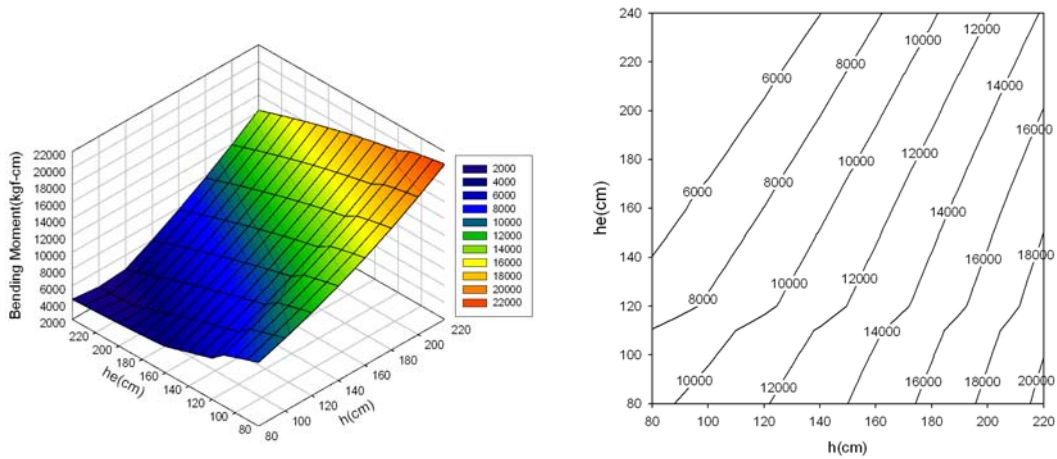


그림 42. 단위풍하중 작용시 최대휨모멘트 변화

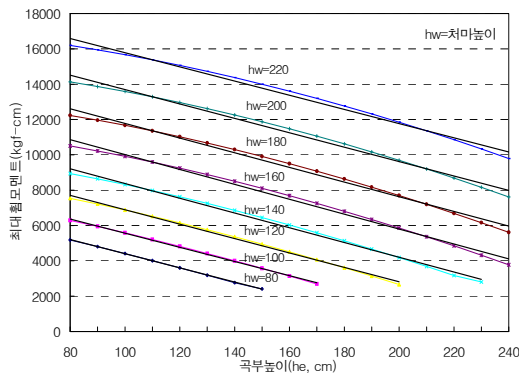
그림 42는 온실 폭(W)이 570cm인 단동온실에 단위풍하중을 작용시켰을 때 처마 및 곡부높이별 발생하는 최대휨모멘트를 도시한 것으로 부재에 발생하는 최대휨모멘트는 처마높이가 증가할수록 증가하였으나 곡부높이가 증가할수록 감소하는 경향으로 나타났다. 온실 폭이 다른 경우에도 이와 유사한 경향으로 나타나 단동온실의 처마높이는 낮게하고 곡부높이는 높게하는 것이 풍하중에 유리한 것으로 나타났다.

그림 43은 온실의 곡부높이 변화에 따른 처마높이별 최대휨모멘트를 도시한 것으로 동일한 곡부높이에서는 처마높이가 증가할 수록 최대휨모멘트는 증가하며 동일한 처마높이에서는 곡부높이가 증가할 수록 최대휨모멘트는 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고, 온실 폭이 증가할 수록 최대휨모멘트도 증가하는 것으로 나타났으나 처마높이별 최대휨모멘트의 변화는 온실 폭에 관계없이 일정한 것으로 나타났다. 따라서, 단위 풍하중 재하시 발생하는 최대휨모멘트와 온실의 곡부 및 처마높이의 상관관계를 분석한 결과는 식 (9)와 같다.

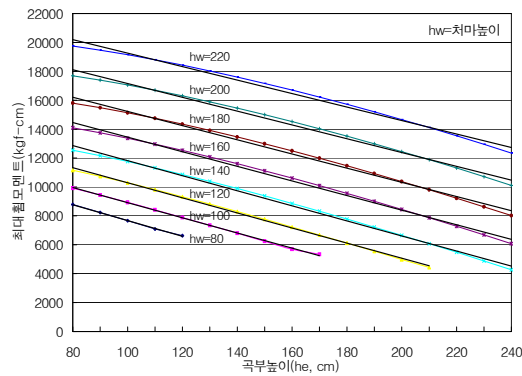
$$M_{\max} = a(ax + b) \quad (9)$$

여기서, Mmax는 최대휨모멘트(kgf-cm), a는 온실폭에 따른 계수, x는 처마높이(cm), a, b는 다음과 같다.

hw	80	100	120	140	160	180	200	220
a	-401.31	-400.89	-407.88	-417.65	-421.8	-414.74	-407.82	-401.15
b	5,603	6,771	8,115	9,633	11,281	13,021	14,922	16,989



(a) 온실 폭(W)=450cm



(b) 온실 폭(W)=600cm

그림 43. 곡부높이 변화에 따른 처마높이별 최대휨모멘트 변화

그림 44는 단위 풍하중 재하시 온실의 폭 변화에 따른 처마 및 곡부높이별로 발생되는 최대휨모멘트를 도시한 것으로서 온실의 폭에 따라 발생되는 최대휨모멘트의 최소 및 최대값은 일정하게 변화하는 것으로 나타나 온실의 폭과 최대휨모멘트의 최소 및 최대값의 상관관계를 분석한 결과는 식 (10) 및 식 (11)과 같다. 단위 풍하중 재하시 온실의 처마 및 곡부높이 변화에 따라 발생되는 최대휨모멘트의 최소 및 최대값은 온실의 폭과 비례하는 것으로 나타났으며 온실의 폭별로 최대휨모멘트의 최대 및 최소값의 차이는 일정한 것으로 나타났다.

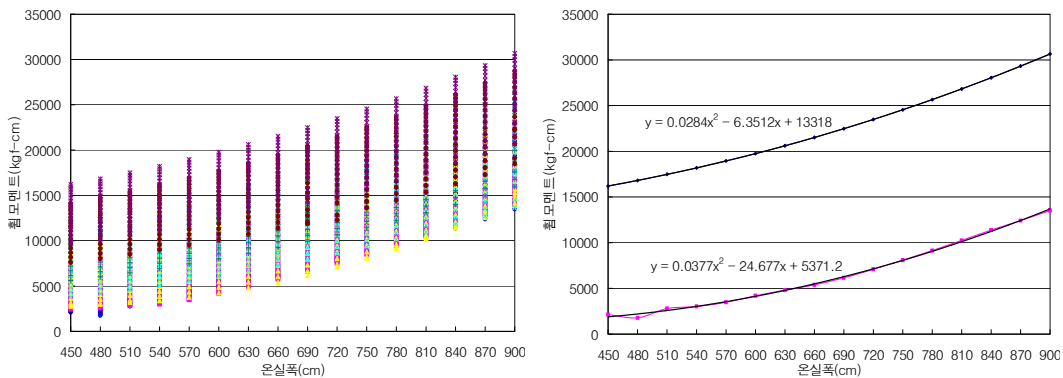


그림 44. 단위풍하중 작용시 온실규격에 따른 최대휨모멘트

$$M_{\max} = 0.0284 W^2 - 6.3512W + 13318 \quad (10)$$

$$M_{\min} = 0.0377W^2 - 24.677W + 5371.2 \quad (11)$$

여기서, M_{\max} , M_{\min} 은 최대휨모멘트의 최대, 최소값이며 W 는 온실의 폭이다.

2) 온실 크기별 단위적설하중 재하시 최대휨모멘트 변화

온실의 크기에 따라 단위적설하중을 작용시켰을 때 발생되는 최대휨모멘트를 계산한 결과는 그림 45 및 그림 46과 같다. 그림 45는 온실 폭(W)이 570cm인 단동온실에 단위적설하중을 작용시켰을 때 처마 및 곡부높이별 발생되는 최대휨모멘트를 도시한 것으로 부재에 발생하는 최대휨모멘트는 처마높이가 증가할수록 증가하였으나 곡부높이가 증가할수록 감소하는 경향으로 나타나 단위풍하중 재하시와 유사한 경향으로 나타났다. 변화폭은 적은 것으로 나타났다.

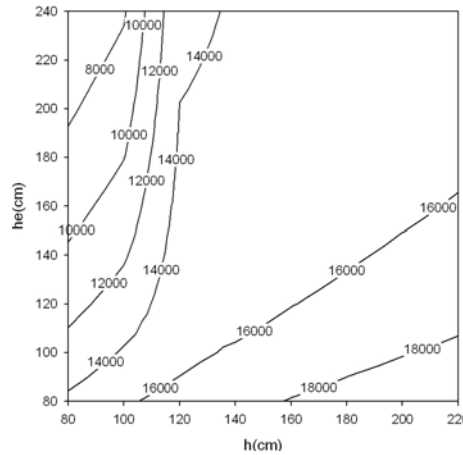
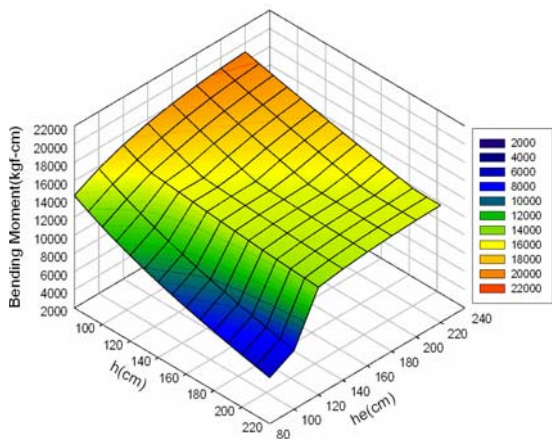
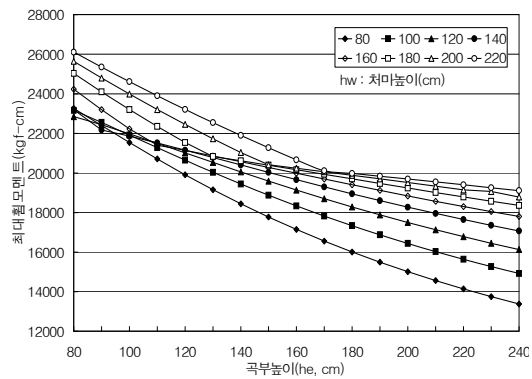
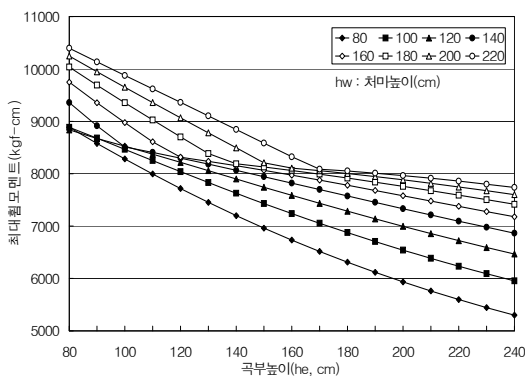


그림 45. 단위적설하중 작용시 최대휨모멘트 변화

그림 46은 온실의 곡부높이 변화에 따른 처마높이별 최대휨모멘트를 도시한 것으로 동일한 곡부높이에서는 처마높이가 증가할 수록 최대휨모멘트는 증가하며 동일한 처마높이에서는 곡부높이가 증가할 수록 최대휨모멘트는 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) 온실 폭(W)=480cm

(b) 온실 폭(W)=720cm

그림 46. 곡부높이 변화에 따른 처마높이별 최대휨모멘트 변화

그리고, 온실 폭이 증가할 수록 최대휨모멘트도 증가하는 것으로 나타났으나 처마높이별 최대휨모멘트의 변화는 온실 폭에 관계없이 유사한 경향으로 나타났다. 부재의 최대휨모멘트가 지점에서 발생하는 처마높이 80cm와 100cm를 제외하고는 곡부높이

가 처마높이의 1.3배될때까지는 최대휨모멘트는 계속 감소하다가 이후 기울기가 감소하는 경향으로 나타났다. 그리고, 동일한 곡부높이에서 처마높이이 증가에 따른 최대휨모멘트의 증가량은 점차적으로 작아졌으며 곡부높이 변화에 따른 최대휨모멘트 감소량보다는 적은 것으로 나타났다. 따라서, 단동온실의 구조안전도를 향상시키기 위해서는 곡부높이가 우선적으로 고려되어야 하며, 동일한 지붕높이의 하우스에 있어서 최소한 곡부높이와 처마높이비가 1.3배 이상이 되는 것이 유리함을 알 수 있다.

그림 47은 단위 적설하중 재하시 온실의 폭 변화에 따른 처마 및 곡부높이별로 발생하는 최대휨모멘트를 도시한 것으로서 온실의 폭에 따라 발생하는 최대휨모멘트의 최소 및 최대값을 분석한 결과이다. 온실의 폭과 최대휨모멘트의 최소 및 최대값의 상관관계를 분석한 결과는 식 (12) 및 식 (13)과 같다. 단위 적설하중 재하시 온실의 처마 및 곡부높이 변화에 따라 발생하는 최대휨모멘트의 최소 및 최대값은 온실의 폭과 비례하는 것으로 나타났으며 최대휨모멘트의 최대 및 최소값의 차이는 온실의 폭에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

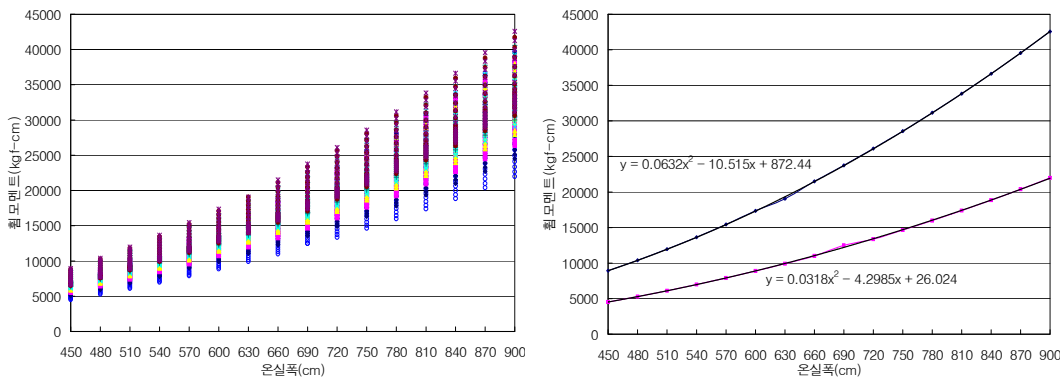


그림 47. 단위적설하중 작용시 온실크기별 최대휨모멘트 변화

$$M_{\max} = 0.0632W^2 - 10.515W + 872.44 \quad (12)$$

$$M_{\min} = 0.0318W^2 - 4.2985W + 26.024 \quad (13)$$

여기서, Mmax, Mmin은 최대휨모멘트의 최대, 최소값이며 W는 온실의 폭이다.

3) 온실의 처마 및 곡부높이별 한계하중 분석

온실의 폭이 6.5m, 처마 및 곡부높이가 각각 1.6m, 1.4m인 농가지도형 비닐하우스 D형과 온실의 폭은 동일하고 처마 및 곡부높이를 각각 1.4m, 1.6m로 개선하였을 경우에 단동온실이 견딜 수 있는 한계하중을 구한 결과는 그림 48과 같다.

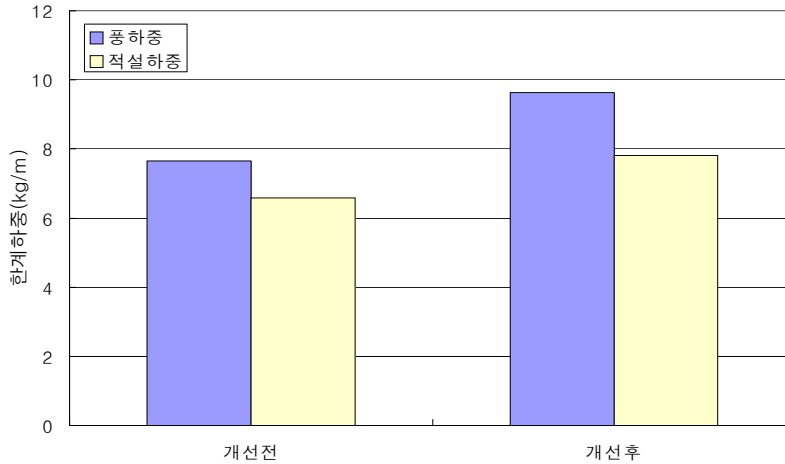


그림 48. 온실의 처마 및 곡부높이 변화에 따른 한계하중

곡부높이를 처마높이 1.4m보다 높게 1.6m로 개선하면 한계하중이 풍하중은 26%, 적설하중은 19% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 단동온실의 폭, 처마 및 곡부높이의 개선을 통하여 구조 안전성을 향상시킬 수 있는 것으로 나타나 재배환경 및 작업 공간에 지장을 주지 않는 범위내에서 온실의 단면형상을 제한함으로써 기상재해에 대한 온실 피해를 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

9. 단동비닐하우스의 설해 경감을 위한 보강방법 개발

단동비닐하우스의 설계적설심은 내용년수 5년과 안전율 50%에 의해 설치지역의 재현기간 8년에 해당하는 적설심으로 결정된다. 따라서, 이러한 피해를 줄이기 위해서는 내용년수와 안전율을 증가시켜 이에 해당하는 설계적설심으로 온실을 설계하여야 한다. 설계적설심 증가에 따라 파이프의 단면을 증가시키거나 서까래 간격을 줄이는 방법이 있으나 시공비와 골조율 증가 등의 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 골조율 증가의 최소화와 경제적으로 단동비닐하우스의 구조적 안전성을 향상시킬 수 있는 방

법을 모색하고자 여러 형태의 보강방법에 대하여 구조해석을 실시하여 보강효과를 분석하였다.

가. 단동비닐하우스의 모델

본 연구에서는 다소 구조 안정성이 높은 농가지도형 I형 비닐하우스를 분석모델로 선정하였으며 비닐하우스의 규격은 그림 49와 같으며, 여러 형태의 보강방법별로 단위적설하중을 적용하였을 때의 부재 절점별로 발생하는 처짐량과 휨모멘트를 분석하였다. 그리고, 분석시 이용된 부재의 절점번호는 그림50과 같으며 구조해석 조건과 비닐하우스의 주서까래로 사용된 파이프와 보강강선의 물리적 특성과 정수는 표 26 및 표 27과와 같다.

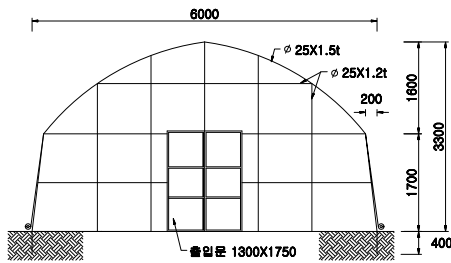


그림 49. 농가지도형 I형 비닐하우스

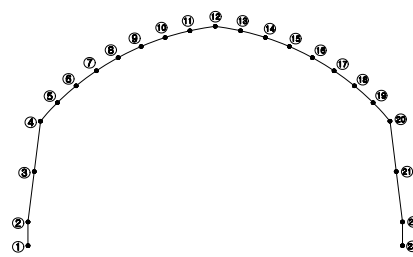


그림 50. 해석모델의 부재 절점번호

표 26. 구조해석 조건

서까래 간격	가로대수	지점조건	적설심	적설하중(W_s)
100cm	7개	지하 40cm 고정	1cm	1kg/m

표 27. 파이프 및 강선의 물리적 특성 및 정수

부재	직경 (mm)	두께 (mm)	단면계수 (cm^3)	항복응력 (kgf/cm^2)	탄성계수 (kgf/cm^2)
서까래	25.4	1.5	0.636	2,400	1.72×10^6
보강용 강선	3.2	-	0.03217	5,400	5.74×10^4

나. 구조해석 모델

농가지도형 I형 단동비닐하우스를 기본모델(A형)로 하여 보강 방법과 재료별로 그림 51과 같이 구조해석 모델을 선정하였으며, 단위 적설하중에 대한 구조해석 결과를 비교분석하여 부재 절점별로 발생하는 처짐과 단면력이 최소가 되는 모델을 선정하였다.

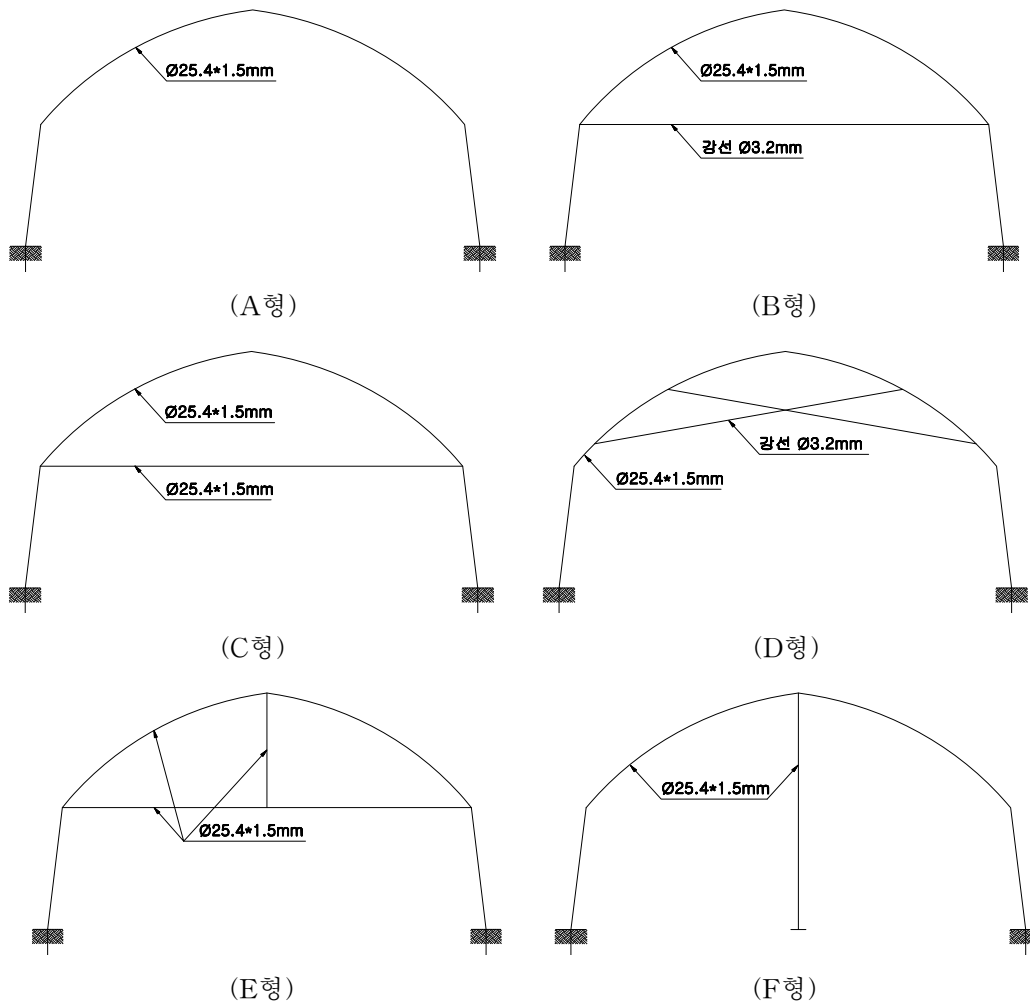


그림 51. 단동온실의 보강형태별 구조해석 모델

브레이싱에 의한 보강 단동비닐하우스 B형과 D형의 경우에 보강재의 위치가 너무

낮으면 하우스 내부의 작업에 많은 지장을 초래할 수 있으므로 그림 52 및 그림 53과 같이 보강재의 위치변화에 따라 분석모델을 구분하였다. 수평 브레이싱의 경우에는 보강재가 절점 ①과 ①에 위치하면 1-1모델, 절점 ②-②에 위치하면 2-2모델 등으로 8개의 분석모델로 구분하였으며, X형 브레이싱의 경우에는 보강재가 절점 ①-②, ②-①에 위치하면 1-2모델, 절점 ②-③, ③-②에 위치하면 2-3모델 등으로 구분하여 7개의 모델에 대하여 구조해석을 수행하였다.

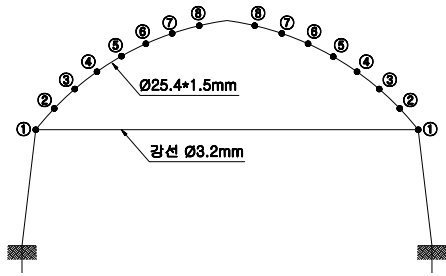


그림 52. 수평 브레이싱에 의한 보강

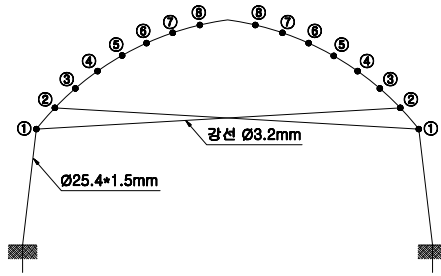


그림 53. X형 브레이싱에 의한 보강

다. 적설하중

구조해석에 이용된 기본형 비닐하우스의 지붕경사각은 그림 54와 같으며, 하중은 단위적설심 1cm에 대하여 지붕경사에 따른 절감계수를 고려한 단위적설하중(1kg/m)을 그림 55과 같이 적용하였다.

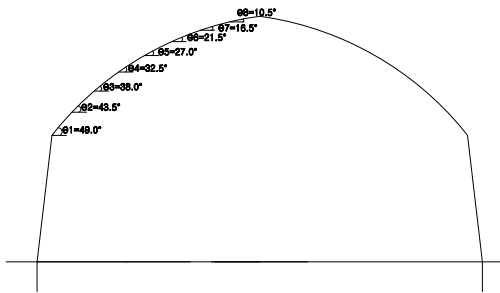


그림 54. 지붕경사각

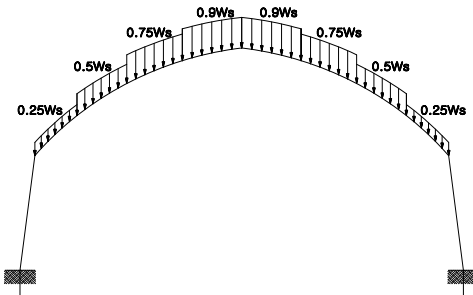


그림 55. 적설하중 분포도

라. 보강형태에 따른 온실의 변형 및 휨모멘트

그림 49와 같은 온실 모델에 대하여 그림 55와 같이 단위적설하중을 적용시켜 구조 해석을 수행하였을 때 온실의 변형도와 부재 절점별로 발생하는 휨모멘트는 그림 56과 그림 57과 같다. 그림 56에서 보는 바와 같이, 보강을 하지 않은 A형 온실의 변형이 가장 크게 발생하였으며 보강한 온실의 경우에는 변형이 거의 발생하지 않았다. 그리고, 부재 절점별로 발생하는 휨모멘트는 보강유무에 관계없이 지점, 처마 및 천정 절점에서 최대 휨모멘트가 발생하였고 최대변위는 최대휨모멘트가 발생하는 처마 및 천정 절점에서 나타났으며 보강을 하지 않은 온실에 비해 보강을 한 온실의 부재에 발생하는 휨모멘트가 감소하는 경향으로 나타났다. F형의 경우에는 천정부위의 ⑫번 절점에서 휨모멘트가 갑자기 증가하는 것으로 나타나 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

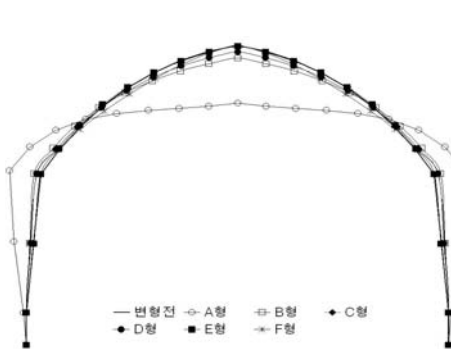


그림 56. 단위하중 작용시 변형도

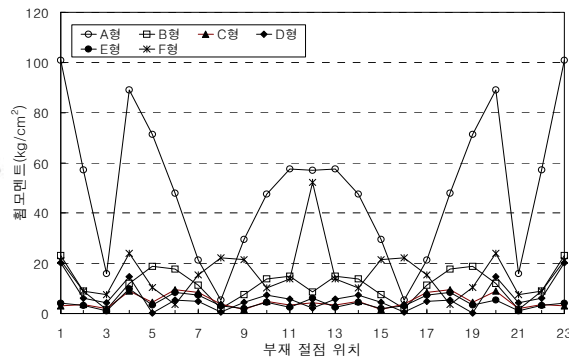


그림 57. 단위하중 작용시 절점별 휨모멘트

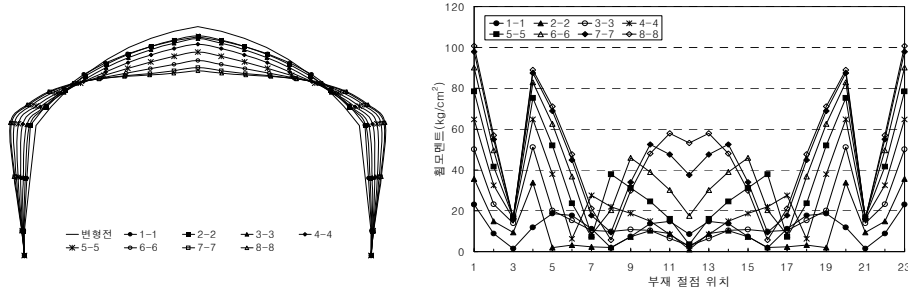
표 3은 보강형태별로 온실부재에 발생하는 최대 수평·수직변위량과 휨모멘트를 비교한 것으로, 기본온실 A형에 비해 보강을 한 온실에서의 최대 변위량과 휨모멘트가 급격한 감소를 한 것을 알 수 있었으며, 가장 유리한 보강형태는 C형과 E형으로 나타났으나 재료의 추가소요로 시공비가 상승하는 단점이 있다. 그리고, F형과 같이 지주를 이용하는 것은 비교적 효과적인 보강방법이나 작업공간을 확보하는데 다소 어려움이 발생하므로 B와 D형의 보강방법이 유리할 것으로 판단된다.

표 28. 보강 형태별 최대 변위량 및 휨모멘트

분석모델		A형	B형	C형	D형	E형	F형
최대 변위 (mm)	수평	4.4	0.9	0.1	0.5	0.1	0.5
	수직	7.2	1.6	0.2	0.8	0.1	0.8
최대휨모멘트 (kg/cm ²)		100.9365	23.1305	9.5491	20.2893	9.8718	52.231

마. 브레이싱 위치변화에 따른 온실의 변형 및 휨모멘트

브레이싱에 의한 보강방법은 적설에 의한 온실의 변형 및 부재에 발생하는 휨모멘트의 감소에는 유리하지만 보강재의 위치가 낮으면 온실내부에서의 작업에 지장을 초래할 수 있으므로 설치위치에 유의하여야 한다. 따라서, 수평 및 X형 보강재 설치위치에 따른 온실의 변형 및 부재별 휨모멘트를 구한 결과는 그림 58, 59 및 표 29, 30과 같다. 그림 58은 수평 보강재 위치에 따른 온실의 변형 및 부재에 발생하는 휨모멘트를 도시한 것으로, 수평 보강재의 위치가 천정쪽으로 이동할수록 온실의 수평·수직변위량과 휨모멘트는 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 수평 보강재가 절점 ④번에 위치한 '4-4형'부터는 급격한 변형이 발생하였다.



(a) 온실의 변형도

(b) 부재 절점별 휨모멘트

그림 58. 수평 보강재 위치에 따른 온실의 변형 및 발생 휨모멘트

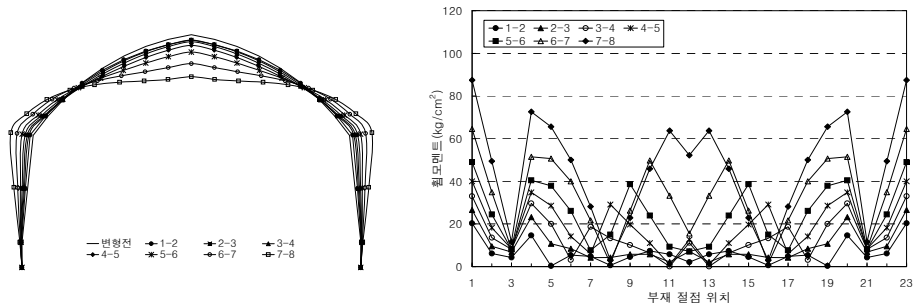
표 29는 수평 보강재 위치에 따라 최대변위량과 최대휨모멘트를 분석한 결과로 보강재 위치에 따라 최대변위량은 약 440~490%의 차이를 보였으며 최대휨모멘트는 약

435%의 차이가 나타나는 것으로 분석되어 수평 보강재에 의한 온실의 보강시에는 작업환경에 지장을 주지 않는 범위에서 낮게 설치하여 주는 것이 유리한 것으로 나타났다.

표 29. 수평 브레이싱의 위치에 따른 최대 변위량 및 휨모멘트

분석모델	1-1형	2-2형	3-3형	4-4형	5-5형	6-6형	7-7형	8-8형
최대 변위 (mm)	수평	0.9	1.1	1.6	2.3	3.0	3.7	4.4
	수직	1.6	1.5	1.9	2.8	4.1	5.5	7.1
최대 휨모멘트 (kg/cm ²)	23.1305	35.6661	51.1972	64.7947	78.4693	90.1318	97.8718	100.6893

그림 59와 표 30은 X형 보강재 위치에 따라 온실의 변형 및 부재에 발생하는 휨모멘트를 비교한 것으로, 온실의 수평·수직 변위량과 부재에 발생하는 휨모멘트는 수평 보강재의 경우와 마찬가지로 X형 보강재의 위치가 천정쪽으로 이동할수록 증가하였으며, 특히 수평 보강재가 절점 ⑤, ⑥에 위치한 '5-6형'부터는 증가폭이 다소 높게 나타났다.



(a) 온실의 변형도

(b) 부재 절점별 휨모멘트

그림 59. X형 보강재 위치에 따른 온실의 변형 및 발생 휨모멘트

표 30에서 보는 바와 같이, X형 보강재 위치에 따라 최대변위는 약 800%, 최대휨모멘트는 약 430%정도 차이가 있는 것으로 나타나 보강재 설치시 작업환경을 고려하여 낮게 설치하는 것이 유리한 것으로 분석되었다.

표 30. X형 브레이싱의 위치에 따른 최대 변위량 및 휨모멘트

분석모델		1-2형	2-3형	3-4형	4-5형	5-6형	6-7형	7-8형
최대변위 (mm)	수평	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	2.9	4.0
	수직	0.8	0.9	1.2	1.8	2.8	4.6	6.7
최대휨모멘트 (kg/cm ²)		20.2893	26.5697	33.0359	40.0012	49.0154	64.5573	87.4681

바. 설해 경감을 위한 단동비닐하우스 개발

농가지도형 I형 단동비닐하우스를 기본모델(A형)로 하여 보강 방법과 재료별로 표 31과 그림 60과 같이 9가지의 구조해석 모델을 선정하였다. A형~E형은 기본모델에 서까래용 파이프의 재료를 각각 달리한 것이며 F와 G형은 수평 브레이싱을 이용하여 보강한 온실로 보강재를 $\phi 3.2\text{mm}$ 강선과 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관을 사용한 온실이다. 그리고, H형은 $\phi 3.2\text{mm}$ 강선을 이용하여 X형 브레이싱으로 보강한 온실이며 H형은 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관으로 수평 브레이싱과 중도리 받침으로 보강한 온실이다.

표 31. 파이프 및 강선의 물리적 특성 및 정수

부재	직경 (mm)	두께 (mm)	단면적 (cm ²)	단면계수 (cm ³)	항복응력 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
서까래용 파이프	25.4	1.5	1.126	0.636	2,400	1.72×10^6
	25.4	1.7	1.266	0.703	2,400	1.72×10^6
	27.2	2.0	1.583	0.930	2,400	2.10×10^6
	27.2	2.3	1.799	1.030	2,400	2.10×10^6
	31.8	1.5	1.428	1.033		1.72×10^6
강선	3.2	-	0.080	0.032	5,400	5.74×10^4

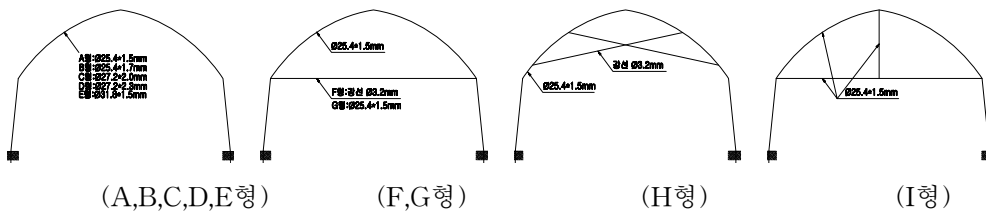


그림 60. 구조해석 모델

원예시설은 일반 건축구조물에 비하여 경량구조이며 수직방향의 설하중과 수평방향의 풍하중을 받기 때문에 변형에 대하여 고려해야 한다. 플라스틱 하우스의 부위별 변형형태 및 변형량은 그림 61과 같으며, 부재 및 구조체의 변형량은 표 32의 값을 만족시켜야 한다.

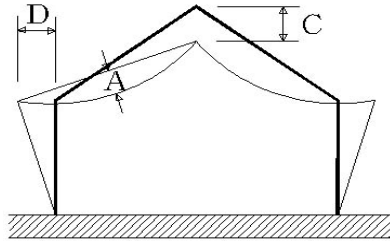


그림 61. 변형형태 및 변형량

표 32. 온실의 변형제한

부재	플라스틱하우스	변형량
보	$\leq \ell/150$	A
서까래	$\leq L/100$	C
기둥	$\leq h/150$	D

※ ℓ : 보의 스패น(cm)
 L : 주서까래의 스패น(cm)
 h : 기둥 길이(cm)

구조해석을 통해 얻은 최대휨모멘트(M_{max})와 축하중(X)을 이용하여 최대응력(σ_{max})은 식 (14)와 같이 계산한다.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} + \frac{X}{A} \quad (14)$$

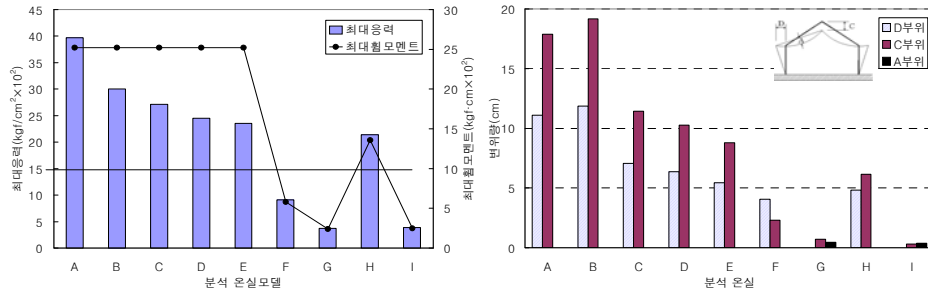
여기서, Z 는 부재의 단면계수이며, A 는 부재의 단면적이다. 하지만 축하중에 의한 응력(X/A)은 최대휨모멘트에 의한 응력(M_{max}/Z)에 비해 극히 미소하므로 본 연구에서 무시하여 식 (15)에 의해 최대응력을 산정하였다.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} \quad (15)$$

분석 모델의 서까래 간격을 단위길이 1m로 하여 구조해석을 얻은 최대응력(σ_{max}), 최대변위(δ_{max}), 부재의 허용응력($\sigma_a=1,600\text{kgf/cm}^2$) 및 그림 6과 표 3에서의 부위별 변형량(δ_a)을 이용하여 적정 서까래 간격은 식 (4)에 의해 결정하였다.

$$S = \frac{\sigma_a}{\sigma_{max}} \quad \text{or} \quad S = \frac{\delta_a}{\delta_{max}} \quad (16)$$

그림 60와 같은 온실 모델에 대하여 서까래 간격을 1m로 하여 적설량 25cm에 해당하는 적설하중을 적용시켜 구조해석을 수행하였을 때 온실 형태별 최대휨모멘트와 부위별 변형량을 나타낸 것은 그림 62와 같다.



(a) 최대휨모멘트 및 최대응력 (b) 부위별 변위량

그림 62. 서까래 간격 1m일 때 최대휨모멘트, 최대응력 및 부위별 변위량

그림에서 보는 바와 같이, 서까래 간격을 1m로 하였을 때 적설량 25cm의 적설하중에 안전하기 위해서는 F형, G형 및 I형을 제외하고는 서까래 간격 감소 및 부재의 단면 증가 등이 필요한 것으로 나타났다. 따라서, 식 (16)에 의해서 온실 형태별로 적설량 25cm에 안전한 서까래 간격을 산정한 결과는 표 33과 같으며, 적정 서까래 간격은 온실 형태와 변형제한 고려 유무에 따라서 상당한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 적설량 25cm에 안전한 서까래 간격은 G형, I형, F형, H형, E형, D형, C형, B형, A형 순으로 감소하였다. 보강을 하지 않은 A형~E형 온실의 경우에는 적설량 25cm에 안전한 서까래 간격은 0.25~0.51m로 나타나 현장에 적용하기에는 과도한 재료 소요와 조밀한 서까래 간격으로 인한 광투율감소 등의 문제로 인하여 다소 무리가 따를 것으로 판단된다. 그리고, 일반적으로 단동비닐하우스 설계시에 부재의 변형을 고려하지 않고 최대응력과 허용응력비로 서까래 간격과 단면을 결정하고 있으므로 부재별 변형제한을 고려한 설계가 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

표 33. 적설량 25cm에 대비한 온실형태별 적정 서까래 간격

온실형태		A형	B형	C형	D형	E형	F형	G형	H형	I형
서까래 간격 (m)	변형무시	0.40	0.53	0.58	0.65	0.68	1.75	4.26	0.74	4.12
	변형고려	0.25	0.23	0.40	0.44	0.51	0.69	4.26	0.58	4.12

표 34는 적설량 25cm에 대비하여 온실 부위별 변형제한을 고려한 서까래 간격으로 농가지도형 I형 단동비닐하우스를 길이 90m로 설치하였을 때 사용되는 재료의 총중

량과 골조율을 분석한 결과이다. 비닐하우스용 아연도 강관 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 파이프로 설치하는 것보다 $\phi 27.2 \times 2.3\text{mm}$ 구조용 탄소강관이나 $\phi 31.8 \times 1.5\text{mm}$ 파이프로 설치할 경우에는 약 40% 정도의 재료 절감과 피복면적 대비 골조율이 4%, 바닥면적 대비 골조율이 약 6~7% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, $\phi 3.2\text{mm}$ 강선을 이용하여 보강한 F형과 H형의 경우에는 약 60% 정도의 재료 절감과 골조면적이 피복면적 대비 5.7~6.4%, 바닥면적 대비 10.2~11.4% 정도 감소하는 것으로 나타났으며 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 파이프 보강한 G형과 I형의 경우에는 약 90% 정도의 재료 절감과 약 10% 이상의 골조율이 감소하는 것으로 나타나 추가적인 재료비와 시공비를 고려하여 서까래 간격 3~4m 마다 보강재를 설치할 경우에는 기존 온실의 구조적 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 단순한 구조해석에 의한 결과이므로 추후 실험을 통하여 결과를 검증할 필요성이 있을 것으로 사려된다.

표 34. 온실형태별 사용부재의 전체중량 및 골조율

온실형태	A형	B형	C형	D형	E형	F형	G형	H형	I형
전체중량(kg)	31,764	34,033	20,250	18,202	15,606	11,621	1,901	13,752	1,966
A형 대비	1.00	1.07	0.64	0.57	0.49	0.37	0.06	0.43	0.06
골조/피복면적(%)	10.0	10.7	6.8	6.1	6.1	3.6	0.6	4.3	0.6
골조/바닥면적(%)	18.0	19.3	12.3	11.0	11.1	6.6	1.1	7.8	1.1

10. 보강방법별 한계하중 실험

폭이 4.8m이고 높이 2.3m인 단동온실에 대하여 보강방법에 따른 보강효과를 분석하고자 그림 63과 같이 보강방법을 가지주에 의한 보강과 유인줄에 의한 수평 브레이싱으로 보강한 온실에 대하여 모의 적설하중을 재하시켜 보강방법별 한계하중을 측정하였다. 한계하중을 분석한 결과는 그림 64와 같으며 아무런 보강을 하지 않은 온실은 재하하중 36kgf에서 파괴가 일어났으며 가지주로 보강한 온실은 재하하중 62kgf, 수평브레이싱으로 보강한 온실은 49kgf에서 파괴가 일어나 가지주에 의한 보강효과는 약 72%, 수평브레이싱에 의한 보강효과는 36%로 나타났다.

가지주로 보강한 온실의 경우에는 편심하중으로 인하여 보강지주가 지지대 역할을 하지 못하여 파괴가 발생하였으므로 실제 온실에서의 보강효과는 72% 이상의 효과가

있을 것으로 판단되며 유인줄로 온실 상부에 수평브레이싱 형태로 보강할 경우에도 상당한 보강효과가 있는 것으로 나타나 농가에서 쉽게 사용할 수 있을 것으로 판단된다



(a) 지지대 보강

(b) 상단 수평브레이싱 보강

그림 63. 보강방법별 한계하중 실험

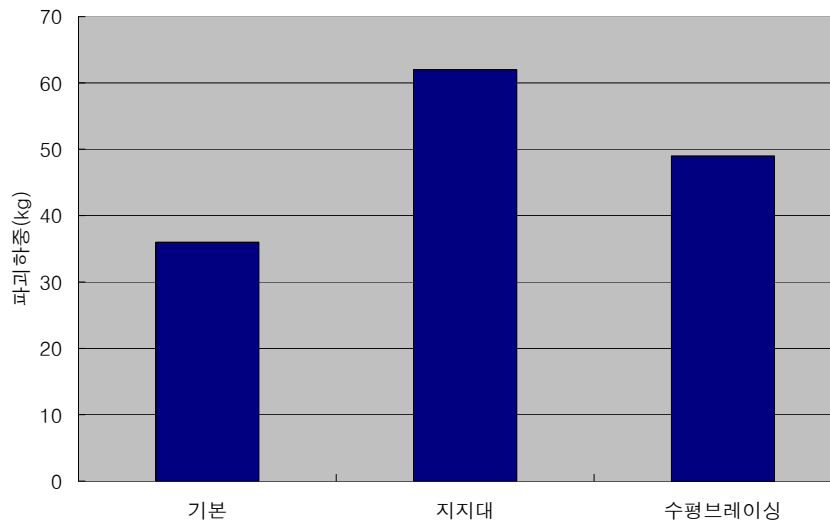


그림 64. 보강방법별 한계하중

11. 기존 온실모델에 있어서 구조적 보완사항 분석

가. 사용자재 및 서까래 간격에 따른 단동온실의 구조안전성

그림 65와 같은 단동온실에 대하여 표 35와 같은 온실 규격별로 구조안전성을 분석하였다. 단위 풍하중과 단위 적설하중을 적용하여 구조해석을 실시하여 사용자재별로 구조물이 견딜 수 있는 안전풍속과 안전적설심을 구하였다.

구조해석을 실시한 단동 비닐하우스에 사용된 골조재의 종류 및 골조간격은 표 36과 같으며, 비닐하우스용 아연도강관의 단면 및 역학적 성질은 표 37 같다. 비닐하우스의 내구년수가 비교적 짧고 인명피해에 대한 염려가 거의 없으며 적설하중과 풍하중이 단기하중으로 작용한다. 본 연구에 사용된 비닐하우스용 아연도강관의 허용응력은 표 37에서 나타 난 항복응력(2,200~2,600kgf/cm²)의 평균값인 2,400kgf/cm²의 67%인 1,600kg/cm²으로 하였다.

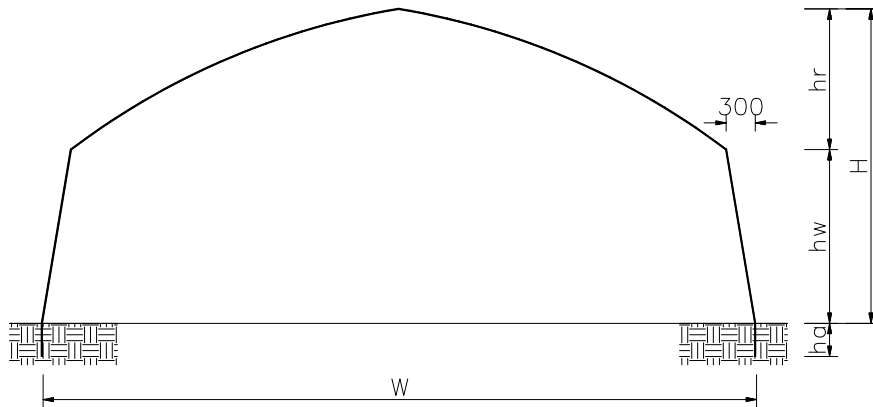


그림 65. 구조해석 온실모형

표 35. 구조해석을 실시한 단동 비닐하우스의 규격

온실형태	폭(m)	처마높이(m)	지붕높이(m)	서까래간격(m)	매일깊이(m)
1	6.0	1.6	3.1	0.9	0.4
2	6.0	1.3	2.4	0.9	0.4
3	8.6	2.1	3.8	0.7	0.4
4	8.2	2.0	3.7	0.7	0.4

표 36. 골조재의 종류 및 서까래 간격

구 분	직 경(mm)	두께(mm)	골조간격(m)	동 길이(m)
1, 2형	25.4	1.5	0.9	95
3, 4형	31.8	1.7	0.7	95

표 37. 비닐하우스용 아연도강관의 단면 및 역학적 성질

직경 (mm)	두께 (mm)	단면적 (cm ²)	단면계수 (cm ³)	탄성계수 (kgf/cm ²)	항복응력 (kgf/cm ²)
22.2	1.2	0.7841	0.3944	1.72×10 ⁶	2,200~2,600 (평균 2,400)
25.4	1.5	1.1263	0.6357		
31.8	1.7	1.6076	1.1487		

단위하중을 적용하여 해석모델에 대하여 구조해석을 수행한 결과는 표 38과 같으며 부재의 허용응력을 초과하지 않는 범위에서 비닐하우스가 견딜 수 있는 안전풍속 및 적설심을 산정한 결과는 표 39와 같다.

부재단면이 증가할수록 안전풍속과 적설심은 증가하며 서까래의 간격이 클수록 안전풍속과 적설심은 감소하는 것으로 나타났다.

표 38. 단위하중 작용시 단동 비닐하우스의 최대 단면력

구 분		모멘트(kgf·cm)	반 력(kgf)	축방향력(kgf)	전단력(kgf)
1형	풍하중	12,483.04	-146.39	156.07	-159.77
	설하중	15148.45	331.36	-347.06	165.45
2형	풍하중	11,671.66	-173.65	186.17	169.93
	설하중	15308.12	317.01	-351.56	-193.43
3형	풍하중	21,987.04	-199.60	236.91	-243.47
	설하중	27496.57	434.24	-473.53	-274.93
4형	풍하중	21,388.81	-199.39	215.95	228.89
	설하중	28,433.02	434.24	-452.54	-260.90

표 39. 서까래 간격에 따른 한계풍속(m/s)

구 분		서까래 간격, S(cm)							
		40	50	60	70	80	90	100	110
1형	Ø22.2×1.2t	20.4	18.2	16.7	15.4	14.4	13.6	12.9	12.3
	Ø25.4×1.5t	25.9	23.1	21.1	19.6	18.3	17.3	16.4	15.6
	Ø31.8×1.5t	33.0	29.5	26.9	24.9	23.3	22.0	20.8	19.9
2형	Ø22.2×1.2t	22.4	20.0	18.3	16.9	15.8	14.9	14.1	13.5
	Ø25.4×1.5t	28.4	25.4	23.2	21.5	20.1	18.9	18.0	17.1
	Ø31.8×1.5t	36.1	32.3	29.5	27.3	25.6	24.1	22.9	21.8
3형	Ø22.2×1.2t	14.5	13.0	11.9	11.0	10.3	9.7	9.2	8.8
	Ø25.4×1.5t	18.4	16.5	15.0	13.9	13.0	12.3	11.7	11.1
	Ø31.8×1.5t	23.5	21.0	19.2	17.7	16.6	15.7	14.8	14.2
4형	Ø22.2×1.2t	14.9	13.3	12.1	11.2	10.5	9.9	9.4	9.0
	Ø25.4×1.5t	18.9	16.9	15.4	14.3	13.3	12.6	11.9	11.4
	Ø31.8×1.5t	24.0	21.5	19.6	18.2	17.0	16.0	15.2	14.5

표 40. 서까래 간격별 한계적설심(cm)

구 분		서까래 간격, S(cm)							
		40	50	60	70	80	90	100	110
1형	Ø22.2×1.2t	13.7	11.0	9.2	7.8	6.9	6.1	5.5	5.0
	Ø25.4×1.5t	22.1	17.7	14.7	12.6	11.0	9.8	8.8	8.0
	Ø31.8×1.5t	35.8	28.6	23.9	20.4	17.9	15.9	14.3	13.0
2형	Ø22.2×1.2t	13.6	10.9	9.1	7.8	6.8	6.0	5.4	4.9
	Ø25.4×1.5t	21.9	17.5	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	8.0
	Ø31.8×1.5t	35.4	28.3	23.6	20.2	17.7	15.7	14.2	12.9
3형	Ø22.2×1.2t	7.6	6.1	5.1	4.3	3.8	3.4	3.0	2.8
	Ø25.4×1.5t	12.2	9.8	8.1	7.0	6.1	5.4	4.9	4.4
	Ø31.8×1.5t	19.8	15.8	13.2	11.3	9.9	8.8	7.9	7.2
4형	Ø22.2×1.2t	7.3	5.9	4.9	4.2	3.7	3.3	2.9	2.7
	Ø25.4×1.5t	11.8	9.5	7.9	6.8	5.9	5.3	4.7	4.3
	Ø31.8×1.5t	19.2	15.3	12.8	10.9	9.6	8.5	7.7	7.0

각 온실형태별 서까래 간격에 따른 안전풍속 및 안전적설심에 따라 구조물에 걸리는 최대 인발력 및 최대 연직하중은 표 41 및 표 42와 같다. 최대 인발력과 최대 연직하중은 기초의 설계를 위한 중요한 제원이다. 표에서 보는 바와 같이, 비닐하우스에 풍하중 및 적설하중 작용시 발생하는 최대 인발력과 최대 연직하중은 온실형태에 따라 다소 차이가 나타났으나 서까래 간격에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

표 41. 서까래 간격에 따른 최대 인발력 (kgf/개소)

온실형태	서까래 간격, S(cm)					
	60	70	80	90	100	110
1형	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8
2형	15.1	15.1	15.0	15.1	15.1	15.0
3형	16.6	16.6	16.6	16.6	16.7	16.5
4형	17.0	17.4	17.5	17.3	17.3	17.4

* 표 39의 안전풍속에 대한 값임.

표 42. 서까래 간격에 따른 최대 연직하중(kgf/개소)

온실형태	서까래 간격, S(cm)					
	60	70	80	90	100	110
A-1형	22.2	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1
A-2형	21.0	21.0	20.9	20.9	20.9	20.9
B-1형	28.9	29.0	28.9	29.0	29.0	29.0
B-2형	29.1	29.2	29.1	29.0	29.2	29.1

* 표 40의 안전적설심에 대한 값임.

직경 25.4mm 파이프를 30cm 매설할 경우 인발저항력은 연한 논지반에서 39.2kgf, 보통의 밭지반에서 74.6kgf 정도이고, 지지력은 연한지반 44.4kgf, 보통의 밭지반 99.3kgf 정도로 보고되어 있다(김 과 남, 1995). 따라서, 구조적으로 안전한 풍속과 적설심에 대하여는 기초도 안전한 것으로 판단된다. 그러나 대부분의 경우에 안전풍속과 안전적설심이 매우 작기 때문에 폭설이나 강풍에 대비한 보강이 필요하며, 보강에 의해 안전풍속과 안전적설심이 증가할 경우에는 파이프의 매설깊이 만으로 최대 인발력 및 최대 연직하중에 저항할 수 없으므로 파이프에 수직하게 철근 등을 용접하거나 나선형 철근말뚝을 박아서 끈으로 고정하는 등의 추가적이 대책이 필요하다.

나. 연동온실의 구조안전성 분석

1) 1-2W형 연동온실 1

그림 66과 그림 67과 같은 1-2W형 기본형과 개량형 연동온실에 대하여 구조해석을 수행하여 개량에 따른 구조안전성을 평가하였다.

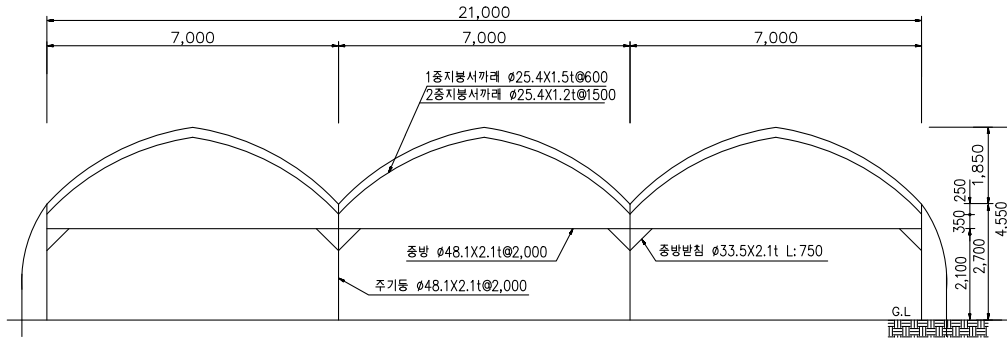


그림 66. 1-2W형 기본형

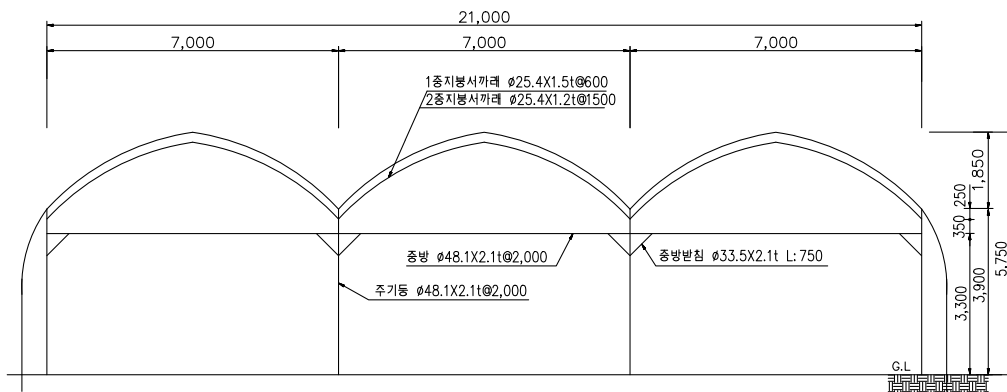


그림 67. 1-2W형 개량형

연동온실에 단위 풍하중을 작용시켜 구조해석을 실시하여 최대 단면력 및 한계풍속을 구한 결과는 표 43과 같으며, 하중재하도, 구조물의 변형도 및 모멘트 단면력도는

그림 68~73과 같다.

표 43. 단위풍하중 작용시 연동온실의 부재별 최대단면력 및 한계풍속

부재	최대모멘트 (kgf-cm)	축방향력 (kgf)		한계풍속 (m/s)			
		기본형	개량형	기본형	개량형		
1중서까래	Ø25.4×1.5@600	4652.1	10211.1	104.4	204.3	31.03	19.52
2중서까래	Ø25.4×1.5@1500	517.9	951.9	1.8	2.7	59.04	40.55
기둥	Ø48.1×2.1@2000	6390.7	8689.2	348.2	356.0	32.74	26.33
중방	Ø48.1×2.1@2000	3384.3	5393.1	229.5	244.7	44.78	33.37
중방받침	Ø33.5×2.1@2000	1296.8	1755.6	27.0	89.9	49.90	39.71

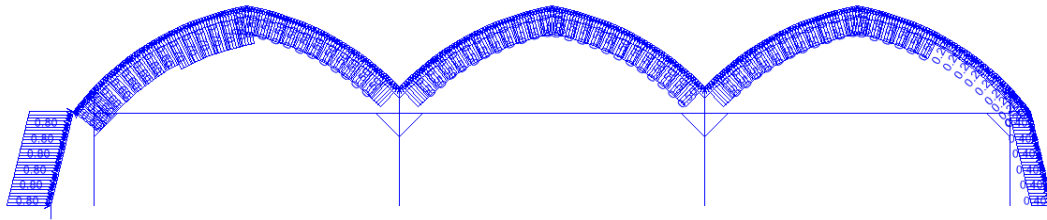


그림 68. 풍하중 재하도(기본형)

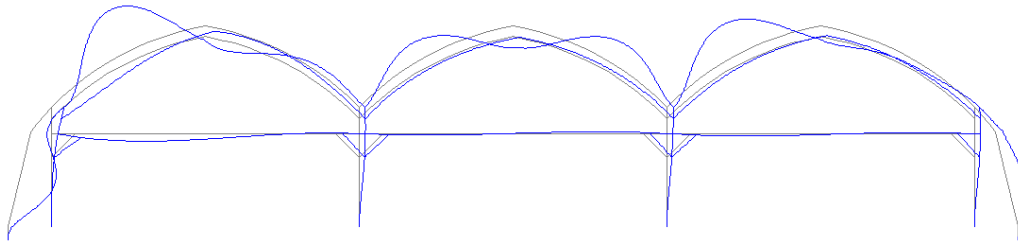


그림 69. 풍하중 작용시 구조의 변형도(기본형)

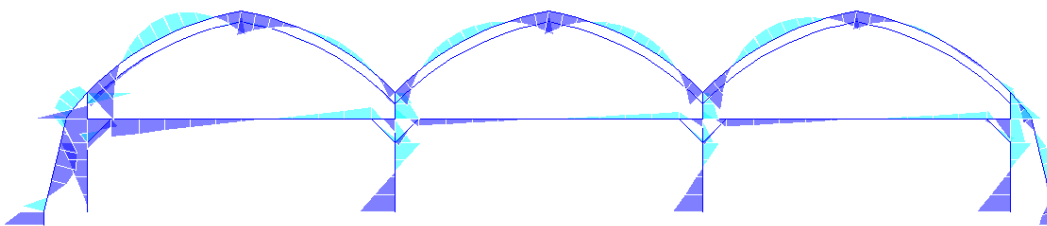


그림 70. 풍하중 작용시 휨모멘트 단면력도(기본형)

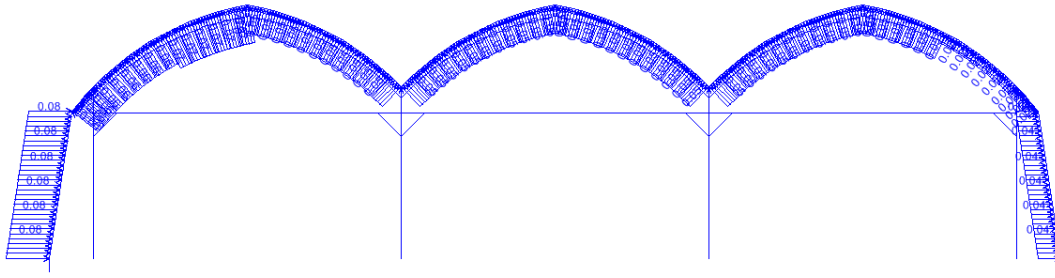


그림 71. 풍하중 재하도(개량형)

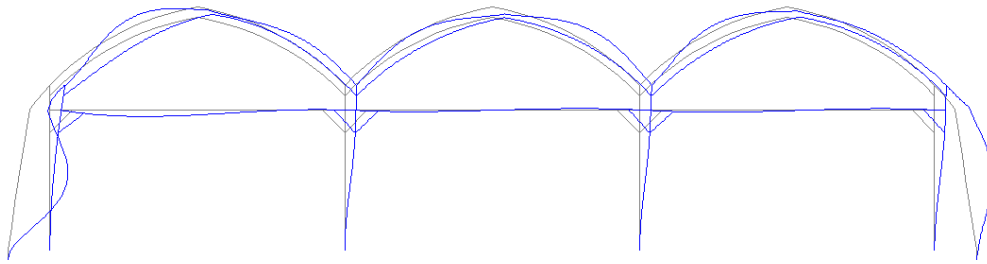


그림 72. 풍하중 작용시 구조물의 변형도(개량형)

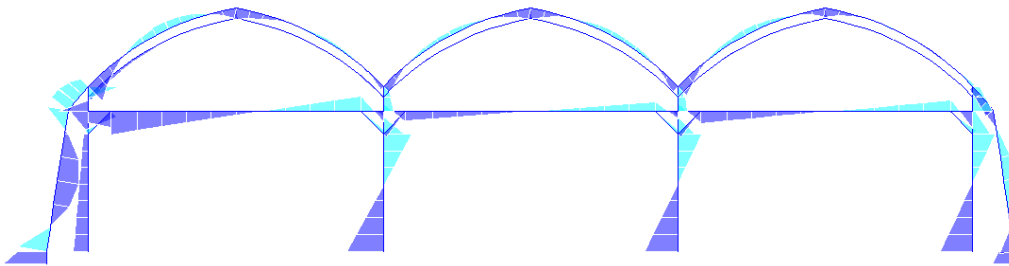


그림 73. 풍하중 작용시 휨모멘트 단면력도(개량형)

연동온실에 단위적설하중을 작용시켜 구조해석을 실시하여 최대단면력을 구한 결과는 표 44와 같으며, 하중재하도, 온실의 변형도 및 휨모멘트 단면력도는 그림 74~79와 같다.

표 44. 단위설하중 작용시 연동온실의 부재별 최대단면력 및 한계풍속

부재	최대모멘트 (kgf-cm)	축방향력 (kgf)		한계풍속 (m/s)			
		기본형	개량형	기본형	개량형		
1중서까래	Ø25.4×1.5@600	4293.8	4295.6	374.6	374.6	50.17	50.15
2중서까래	Ø25.4×1.5@1500	710.5	966.2	2.1	2.9	127.0	93.41
기둥	Ø48.1×2.1@2000	12644.2	12830.3	282.2	303.5	27.54	27.10
중방	Ø48.1×2.1@2000	7387.5	7249.2	333.6	358.8	46.00	46.67
중방받침	Ø33.5×2.1@2000	2517.4	2739.9	140.1	94.3	62.31	58.13

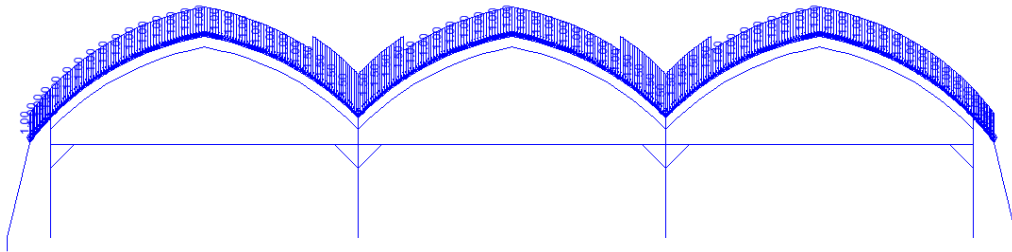


그림 74. 1-2W 기본형 3연동온실의 단위적설하중 재하도

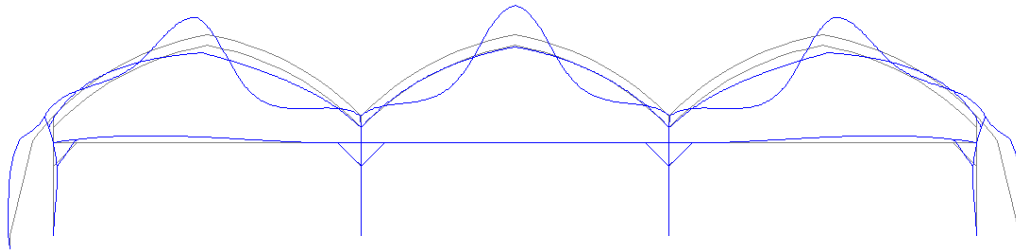


그림 75. 1-2W 기본형 3연동온실의 변형도

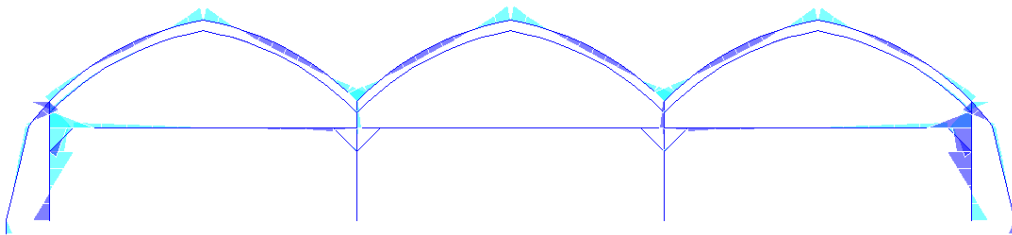


그림 76. 1-2W 기본형 3연동온실의 휨모멘트 단면력도

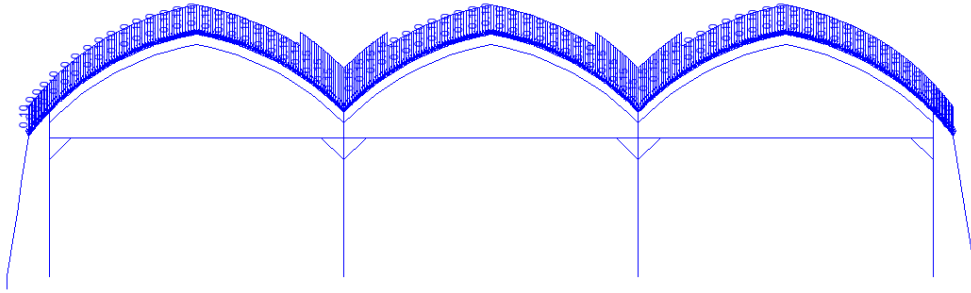


그림 77. 1-2W 개량형 3연동온실의 단위적설하중 재하도

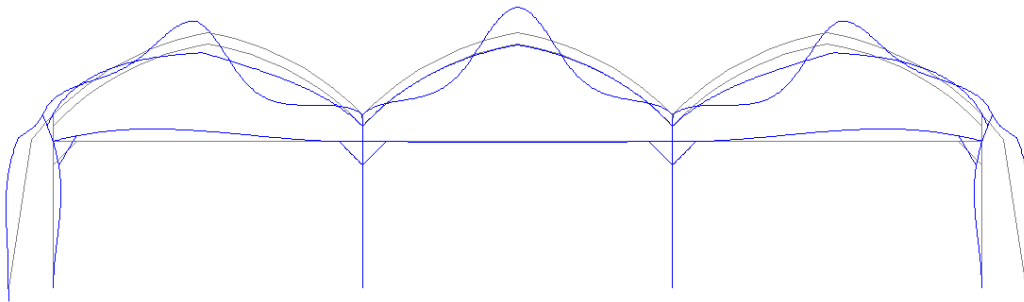


그림 78. 1-2W 개량형 3연동온실의 변형도

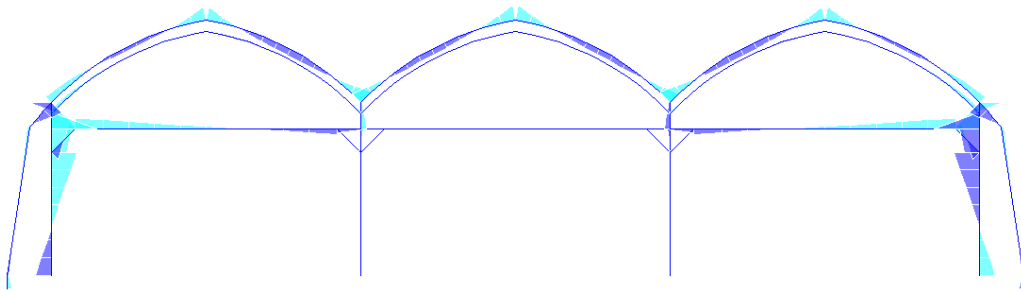


그림 79. 1-2W 개량형 3연동온실의 휨모멘트 단면력도

1-2W형 기본형 온실의 기둥을 1.2m 높였을 경우에 구조물이 견딜 수 있는 한계적 설심의 변화는 거의 없으나 한계풍속은 31.03m/s에서 19.52m/s로 감소하여 풍속에 대한 구조물의 안전성이 약 27%정도 감소하는 것으로 나타났다.

2) 1-2W형 연동온실 2

1-2W형의 기본형과 다소 차이가 나는 1-2W형 온실의 구조안전성을 검토하기 위한 온실은 그림 80과 81에서 보는 바와 같으며 규격은 표 45와 같다. 구조해석을 실시한 온실에 사용된 골조재의 종류 및 간격은 표 46과 같으며, 부재의 단면 및 역학적 성질은 표 47과 같다.

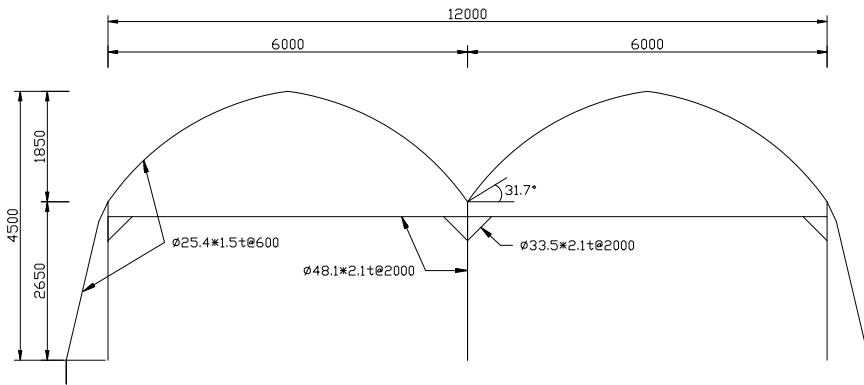


그림 80. 1-2W형 플라스틱 2연동 온실단면

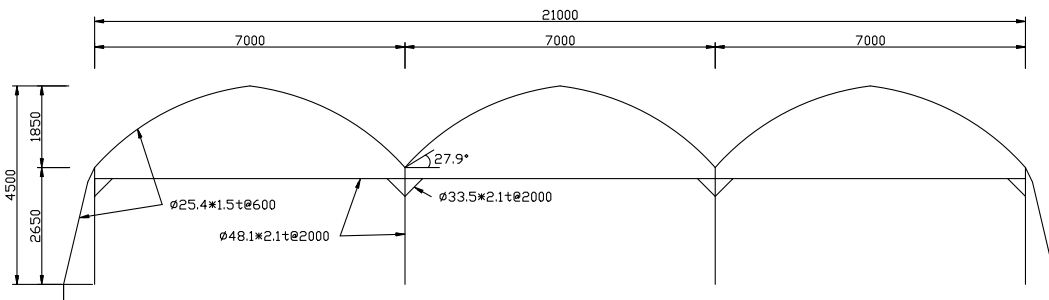


그림 81. 1-2W형 플라스틱 3연동 온실단면

표 45. 구조해석을 실시한 온실의 규격 (단위:m)

온실형태	폭	기둥 높이	지붕 높이	부재간격			
				서까래	기둥	중방	중방받침
1-2W형 2연동온실	6.0	2.65	4.5	0.6	2.0	2.0	2.0
1-2W형 2연동온실	7.0	2.65	4.5	0.6	2.0	2.0	2.0

표 46. 온실용 부재의 단면 및 역학적 성질

부 재	단면적(cm ²)	단면계수(cm ³)	비 고
ø25.4×1.5t@600	1.1263	0.6357	1-2W형 온실 서까래
ø33.5×2.1t@2000	2.0716	1.5311	1-2W형 온실 중방받침
ø48.1×2.1t@2000	3.0348	3.3446	1-2W형 온실 기둥, 중방

온실 구조물에 단위 풍하중 및 적설하중을 작용시켜 구조해석을 실시하여 단위설계 하중에 따른 최대 단면력을 구한 결과는 표 47 및 표 48과 같으며 부재의 허용응력을 초과하지 않는 범위에서 비닐하우스가 견딜 수 있는 안전풍속 및 적설심을 구한 결과는 표 49와 같다.

표 47. 단위하중 작용시 1-2W형 2연동 플라스틱온실의 최대 단면력

		기둥	서까래	중방	중방받침
자 중	휨모멘트(kgf·cm)	338.46	-80.98	-628.11	-126.91
	반 력(kgf)	29.93	6.58	-	-
	축방향력(kgf)	-29.93	6.9	31.23	-38.99
	전 단 력(kgf)	13.71	1.25	17.8	3.5
풍 하 중	휨모멘트(kgf·cm)	-7420.82	4975.41	4187.79	-1395.29
	반 력(kgf)	-343.9	160.45	-	-
	축방향력(kgf)	383.04	195.22	-215.78	-174.31
	전 단 력(kgf)	244.27	91.74	145.87	-37.51
설 하 중	휨모멘트(kgf·cm)	-2320.9	-2330.53	-1326.37	492.39
	반 력(kgf)	418.18	87.75	-	-
	축방향력(kgf)	-421.47	-252.79	125.69	25
	전 단 력(kgf)	-121.82	29.75	-30.39	15.81

표 48. 단위하중 작용시 1-2W형 3연동 플라스틱온실의 최대 단면력

		기둥	서까래	중방	중방받침
자 중	휨모멘트(kgf·cm)	497.03	-104.55	-804.57	-161.12
	반 력(kgf)	32.27	-7.61	-	-
	축방향력(kgf)	-32.27	10.26	37.85	-48
	전 단 력(kgf)	20.04	2.59	22.72	4.32
풍 하 중	휨모멘트(kgf·cm)	-9098.59	6845.23	4368.26	-1357.65
	반 력(kgf)	-364.61	127.28	-	-
	축방향력(kgf)	365	251.31	-341.26	-199.19
	전 단 력(kgf)	260.35	127.28	-160.96	-35.83
설 하 중	휨모멘트(kgf·cm)	2330.53	-976.09	-1326.37	492.39
	반 력(kgf)	418.18	87.75	-	-
	축방향력(kgf)	-421.47	-252.79	125.69	25
	전 단 력(kgf)	-121.82	29.75	-30.39	15.81

표 49. 온실별 안전 풍속 및 적설심

온 실	안전풍속(m/s)	안전적설심(cm)
1-2W형 2연동	23.0	24.7
1-2W형 3연동	23.8	19.6

3) 연동형 유리온실

연동형 유리온실의 구조안전성을 검토하기 위한 온실은 그림 82와 83에서 보는 바와 같으며 구조해석을 실시한 온실의 규격 및 사용된 골조재의 종류 및 간격은 표 50과 같으며, 부재의 단면 및 역학적 성질은 표 51과 같다.

표 50. 구조해석을 실시한 온실의 규격 (단위:m)

온실형태	폭	기둥 높이	지붕 높이	부재간격			
				서까래	기둥	중방	타이바
2연동 유리온실	8.5	3.3	5.5	3.0	3.0	3.0	3.0
3연동 유리온실	8.2	2.0	3.7	0.7	0.4	3.0	3.0

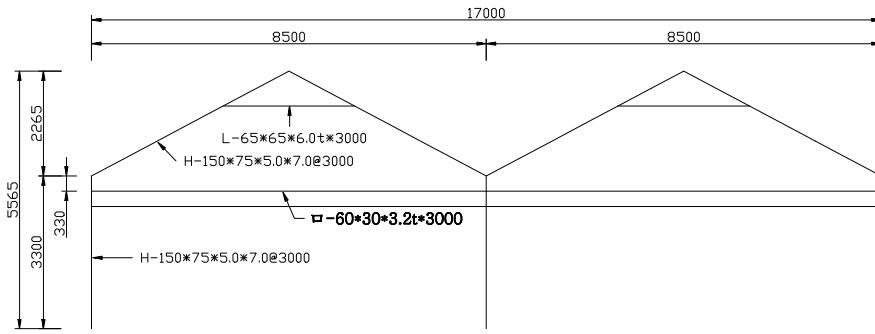


그림 82. 2연동 유리온실 단면

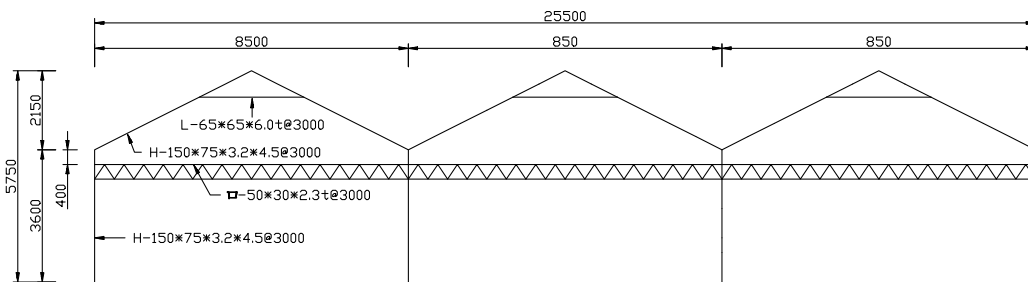


그림 83. 3연동 유리온실 단면

표 51. 온실용 부재의 단면 및 역학적 성질

부재	단면적(cm ²)	단면계수(cm ³)	비고
H-150×75×5.0×7.0@3000	17.8500	88.8000	2연동온실 서까래,기둥
H-150×75×3.2×4.5@3000	11.2620	49.2917	3연동온실 서까래,기둥
□-60×30×3.2t@3000	5.0870	7.1500	2연동온실 중방
□-50×30×2.3t@3000	3.7920	5.6100	3연동온실 중방
L-65×65×6.0t@3000	7.5270	6.2600	타이바

온실 구조물에 단위 풍하중 및 적설하중을 작용시켜 구조해석을 실시하여 단위설계 하중에 따른 최대 단면력을 구한 결과는 표 51 및 표 52와 같으며 부재의 허용응력을

초과하지 않는 범위에서 비닐하우스가 견딜 수 있는 안전풍속 및 적설심을 구한 결과는 표 53과 같다.

표 51. 단위설계하중 작용시 2연동 유리온실의 최대 단면력

		기둥	서까래	중방	사-보
자중	휨모멘트(kgf·cm)	1219.16	-1157.42	-2527.68	-392.32
	반력(kgf)	263.53	-	-	-
	축방향력(kgf)	-263.53	-116.54	49.87	-70.12
	전단력(kgf)	92.99	-20.95	-17.83	-8.27
풍하중	휨모멘트(kgf·cm)	21701.46	13125.2	-417.28	292.76
	반력(kgf)	382.18	-	-	-
	축방향력(kgf)	383.11	232.35	-118.14	162.92
	전단력(kgf)	200.63	-117.02	-9.61	-13.78
설하중	휨모멘트(kgf·cm)	11630.3	-12640.8	-76.03	-47.05
	반력(kgf)	834.51	-	-	-
	축방향력(kgf)	-834.51	-724.12	334.76	-306.3
	전단력(kgf)	-541.54	-207.29	-4.82	108.44

표 52. 단위설계하중 작용시 3연동 유리온실의 최대 단면력

		기둥	서까래	중방	사-보
자중	휨모멘트(kgf·cm)	-1929.16	-827.52	-71.74	-390.09
	반력(kgf)	222.94	-	-	-
	축방향력(kgf)	-222.94	-54.09	190.38	-35.26
	전단력(kgf)	-45.12	-6.97	-1.09	-8.3
풍하중	휨모멘트(kgf·cm)	25120.52	14528.74	-596.29	-1214.73
	반력(kgf)	266.05	-	-	-
	축방향력(kgf)	409.95	269.35	-704.26	241.37
	전단력(kgf)	-589.42	-199.75	121.61	39.69
설하중	휨모멘트(kgf·cm)	-11448.22	-12139.35	-51.07	-52.08
	반력(kgf)	811.06	-	-	-
	축방향력(kgf)	-811.06	-605.21	631.76	-364.47
	전단력(kgf)	-446.07	167.59	-118.63	-1.33

표 53. 온실별 안전 풍속 및 적설심

	안전풍속(m/s)	안전적설심(cm)
2연동 유리온실	48.0	46.4
3연동 유리온실	42.0	42.1

12. 단동온실의 간이 설계방법 개발

가. 도표를 이용한 방법

농가지도형 단동비닐하우스 기본모델 10종에 대하여 구조해석을 수행하여 서까래 간격과 부재단면에 따른 한계풍속 및 한계적설심을 구한 결과는 표 54 및 표 55와 같다. 그리고, 지면높이 5m 전후까지는 지면높이별로 풍속의 변화가 없이 거의 일정하게 분포한다는 본 연구결과를 적용하여 모델별 한계하중을 구한 결과는 표 56과 표 57과 같다. 강재의 허용응력과 단동온실의 변형제한에 의하여 한계풍속 및 적설심을 결정하였으며 표를 이용하면 쉽게 온실형태와 서까래 간격에 따른 한계풍속 및 적설심을 파악할 수 있다.

표 54. 농가지도형 비닐하우스의 한계하중(사용부재 허용응력 = 1,600kg/cm²)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
A형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	40.6	36.3	33.1	30.7	28.7	27.0	25.7	24.5	23.4	22.5
		Ø25.4×1.7t	42.7	38.2	34.8	32.3	30.2	28.5	27.0	25.7	24.6	23.7
		Ø31.8×1.5t	51.6	46.2	42.2	39.0	36.5	34.4	32.7	31.1	29.8	28.6
		Ø31.8×1.7t	54.5	48.7	44.5	41.2	38.5	36.3	34.4	32.8	31.4	30.2
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	40.9	32.7	27.2	23.3	20.4	18.2	16.3	14.9	13.6	12.6
		Ø25.4×1.7t	45.2	36.2	30.1	25.8	22.6	20.1	18.1	16.4	15.1	13.9
		Ø31.8×1.5t	66.1	52.9	44.0	37.8	33.0	29.4	26.4	24.0	22.0	20.3
		Ø31.8×1.7t	73.5	58.8	49.0	42.0	36.7	32.7	29.4	26.7	24.5	22.6
B형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	36.6	32.7	29.9	27.6	25.9	24.4	23.1	22.0	21.1	20.3
		Ø25.4×1.7t	38.5	34.4	31.4	29.1	27.2	25.6	24.3	23.2	22.2	21.3
		Ø31.8×1.5t	52.1	41.7	34.7	29.8	26.1	23.2	20.8	18.9	17.4	16.0
		Ø31.8×1.7t	49.1	43.9	40.1	37.1	34.7	32.7	31.0	29.6	28.3	27.2
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	32.2	25.8	21.5	18.4	16.1	14.3	12.9	11.7	10.7	9.9
		Ø25.4×1.7t	35.6	28.5	23.8	20.4	17.8	15.8	14.3	13.0	11.9	11.0
		Ø31.8×1.5t	52.1	41.7	34.7	29.8	26.1	23.2	20.8	18.9	17.4	16.0
		Ø31.8×1.7t	62.8*	50.2*	41.8*	35.9*	31.4*	27.9*	25.1*	22.8*	20.9*	19.3*

* : 단동온실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

(계속)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
C형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	33.2	29.7	27.1	25.1	23.5	22.2	21.0	20.0	19.2	18.4
		Ø25.4×1.7t	35.0	31.3	28.5	26.4	24.7	23.3	22.1	21.1	20.2	19.4
		Ø31.8×1.5t	42.1	33.7	28.1	24.1	21.1	18.7	16.8	15.3	14.0	13.0
		Ø31.8×1.7t	44.6	39.9	36.4	33.7	31.5	29.7	28.2	26.9	25.8	24.7
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	26.0	20.8	17.3	14.9	13.0	11.6	10.4	9.5	8.7	8.0
		Ø25.4×1.7t	28.8	23.0	19.2	16.5	14.4	12.8	11.5	10.5	9.6	8.9
		Ø31.8×1.5t	42.1	33.7	28.1	24.1	21.1	18.7	16.8	15.3	14.0	13.0
		Ø31.8×1.7t	46.8	37.5	31.2	26.8	23.4	20.8	18.7	17.0	15.6	14.4
D형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	25.2	22.5	20.6	19.0	17.8	16.8	15.9	15.2	14.5	14.0
		Ø25.4×1.7t	26.5	23.7	21.6	20.0	18.7	17.7	16.8	16.0	15.3	14.7
		Ø31.8×1.5t	32.8	26.2	21.9	18.7	16.4	14.6	13.1	11.9	10.9	10.1
		Ø31.8×1.7t	33.8	30.2	27.6	25.6	23.9	22.5	21.4	20.4	19.5	18.8
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	20.2	16.2	13.5	11.6	10.1	9.0	8.1	7.4	6.7	6.2
		Ø25.4×1.7t	20.9*	16.7*	13.9*	11.9*	10.4*	9.3*	8.4*	7.6*	7.0*	6.4*
		Ø31.8×1.5t	32.8	26.2	21.9	18.7	16.4	14.6	13.1	11.9	10.9	10.1
		Ø31.8×1.7t	36.5	29.2	24.3	20.8	18.2	16.2	14.6	13.3	12.2	11.2
E형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	26.3	23.6	21.5	19.9	18.6	17.6	16.7	15.9	15.2	14.6
		Ø25.4×1.7t	27.7	24.8	22.6	20.9	19.6	18.5	17.5	16.7	16.0	15.4
		Ø31.8×1.5t	27.8	22.3	18.6	15.9	13.9	12.4	11.1	10.1	9.3	8.6
		Ø31.8×1.7t	35.4	31.6	28.9	26.7	25.0	23.6	22.4	21.3	20.4	19.6
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	17.2	13.8	11.5	9.8	8.6	7.6	6.9	6.3	5.7	5.3
		Ø25.4×1.7t	17.8*	14.3*	11.9*	10.2*	8.9*	7.9*	7.1*	6.5*	5.9*	5.5*
		Ø31.8×1.5t	27.8	22.3	18.6	15.9	13.9	12.4	11.1	10.1	9.3	8.6
		Ø31.8×1.7t	31.0	24.8	20.6	17.7	15.5	13.8	12.4	11.3	10.3	9.5
F형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	25.3	22.6	20.7	19.1	17.9	16.9	16.0	15.3	14.6	14.0
		Ø25.4×1.7t	26.6	23.8	21.7	20.1	18.8	17.7	16.8	16.1	15.4	14.8
		Ø31.8×1.5t	22.9	18.3	15.3	13.1	11.5	10.2	9.2	8.3	7.6	7.1
		Ø31.8×1.7t	34.0	30.4	27.7	25.7	24.0	22.7	21.5	20.5	19.6	18.9
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	13.5*	10.8*	9.0*	7.7*	6.8*	6.0*	5.4*	4.9*	4.5*	4.2*
		Ø25.4×1.7t	13.5*	10.8*	9.0*	7.7*	6.8*	6.0*	5.4*	4.9*	4.5*	4.2*
		Ø31.8×1.5t	22.9	18.3	15.3	13.1	11.5	10.2	9.2	8.3	7.6	7.1
		Ø31.8×1.7t	25.5	20.4	17.0	14.6	12.7	11.3	10.2	9.3	8.5	7.8

* : 단둥은실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

(계속)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
G형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	22.9	20.5	18.7	17.3	16.2	15.3	14.5	13.8	13.2	12.7
		Ø25.4×1.7t	24.1	21.6	19.7	18.2	17.0	16.1	15.2	14.5	13.9	13.4
		Ø31.8×1.5t	20.8	16.6	13.9	11.9	10.4	9.2	8.3	7.6	6.9	6.4
		Ø31.8×1.7t	30.8	27.5	25.1	23.3	21.8	20.5	19.5	18.6	17.8	17.1
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	11.3*	9.1*	7.5*	6.5*	5.7*	5.0*	4.5*	4.1*	3.8*	3.5*
		Ø25.4×1.7t	11.3*	9.1*	7.5*	6.5*	5.7*	5.0*	4.5*	4.1*	3.8*	3.5*
		Ø31.8×1.5t	20.8	16.6	13.9	11.9	10.4	9.2	8.3	7.6	6.9	6.4
		Ø31.8×1.7t	23.0*	18.4*	15.3*	13.2*	11.5*	10.2*	9.2*	8.4*	7.7*	7.1*
H형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	27.7	24.8	22.6	21.0	19.6	18.5	17.5	16.7	16.0	15.4
		Ø25.4×1.7t	29.2	26.1	23.8	22.1	20.6	19.5	18.5	17.6	16.8	16.2
		Ø31.8×1.5t	49.6	39.7	33.0	28.3	24.8	22.0	19.8	18.0	16.5	15.3
		Ø31.8×1.7t	37.2	33.3	30.4	28.2	26.3	24.8	23.6	22.5	21.5	20.7
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	30.6	24.5	20.4	17.5	15.3	13.6	12.3	11.1	10.2	9.4
		Ø25.4×1.7t	33.5*	26.8*	22.3*	19.1*	16.7*	14.9*	13.4*	12.2*	11.2*	10.3*
		Ø31.8×1.5t	49.6	39.7	33.0	28.3	24.8	22.0	19.8	18.0	16.5	15.3
		Ø31.8×1.7t	55.1	44.1	36.8	31.5	27.6	24.5	22.1	20.0	18.4	17.0
I형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	25.6	22.9	20.9	19.4	18.1	17.1	16.2	15.4	14.8	14.2
		Ø25.4×1.7t	26.9	24.1	22.0	20.4	19.0	18.0	17.0	16.2	15.5	14.9
		Ø31.8×1.5t	39.9	31.9	26.6	22.8	19.9	17.7	16.0	14.5	13.3	12.3
		Ø31.8×1.7t	34.4	30.8	28.1	26.0	24.3	22.9	21.7	20.7	19.9	19.1
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	24.5*	19.6*	16.3*	14.0*	12.2*	10.9*	9.8*	8.9*	8.2*	7.5*
		Ø25.4×1.7t	24.5*	19.6*	16.3*	14.0*	12.2*	10.9*	9.8*	8.9*	8.2*	7.5*
		Ø31.8×1.5t	39.9	31.9	26.6	22.8	19.9	17.7	16.0	14.5	13.3	12.3
		Ø31.8×1.7t	44.4	35.5	29.6	25.3	22.2	19.7	17.7	16.1	14.8	13.6
J형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	26.3	23.5	21.5	19.9	18.6	17.5	16.6	15.9	15.2	14.6
		Ø25.4×1.7t	27.7	24.8	22.6	20.9	19.6	18.5	17.5	16.7	16.0	15.4
		Ø31.8×1.5t	26.7	21.3	17.8	15.2	13.3	11.9	10.7	9.7	8.9	8.2
		Ø31.8×1.7t	35.3	31.6	28.9	26.7	25.0	23.6	22.3	21.3	20.4	19.6
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	13.7*	11.0*	9.2*	7.8*	6.9*	6.1*	5.5*	5.0*	4.6*	4.2*
		Ø25.4×1.7t	13.7*	11.0*	9.2*	7.8*	6.9*	6.1*	5.5*	5.0*	4.6*	4.2*
		Ø31.8×1.5t	26.7	21.3	17.8	15.2	13.3	11.9	10.7	9.7	8.9	8.2
		Ø31.8×1.7t	27.9*	22.3*	18.6*	16.0*	14.0*	12.4*	11.2*	10.2*	9.3*	8.6*

* : 단둥온실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

표 55. 농가지도형 비닐하우스의 한계하중(사용부재 허용응력 = 2,150kg/cm²)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
A형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	47.0	42.1	38.4	35.6	33.3	31.4	29.7	28.4	27.2	26.1
		Ø25.4×1.7t	49.5	44.3	40.4	37.4	35.0	33.0	31.3	29.8	28.6	27.4
		Ø31.8×1.5t	59.9	53.5	48.9	45.3	42.3	39.9	37.9	36.1	34.6	33.2
		Ø31.8×1.7t	63.1	56.5	51.5	47.7	44.6	42.1	39.9	38.1	36.4	35.0
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	54.9	43.9	36.6	31.4	27.4	24.4	22.0	20.0	18.3	16.9
		Ø25.4×1.7t	57.5*	46.0*	38.4*	32.9*	28.8*	25.6*	23.0*	20.9*	19.2*	17.7*
		Ø31.8×1.5t	88.8	71.0	59.2	50.7	44.4	39.5	35.5	32.3	29.6	27.3
		Ø31.8×1.7t	98.7	79.0	65.8	56.4	49.4	43.9	39.5	35.9	32.9	30.4
B형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	42.4	37.9	34.6	32.0	30.0	28.3	26.8	25.6	24.5	23.5
		Ø25.4×1.7t	44.6	39.9	36.4	33.7	31.5	29.7	28.2	26.9	25.7	24.7
		Ø31.8×1.5t	53.9	48.2	44.0	40.8	38.1	36.0	34.1	32.5	31.1	29.9
		Ø31.8×1.7t	56.7*	50.7*	46.3*	42.9*	40.1*	37.8*	35.9*	34.2*	32.7*	31.5*
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	40.7*	32.6*	27.1*	23.3*	20.4*	18.1*	16.3*	14.8*	13.6*	12.5*
		Ø25.4×1.7t	40.7*	32.6*	27.1*	23.3*	20.4*	18.1*	16.3*	14.8*	13.6*	12.5*
		Ø31.8×1.5t	70.0	56.0	46.7	40.0	35.0	31.1	28.0	25.5	23.3	21.5
		Ø31.8×1.7t	62.8*	50.2*	41.8*	35.9*	31.4*	27.9*	25.1*	22.8*	20.9*	19.3*
C형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	38.5	34.5	31.5	29.1	27.2	25.7	24.4	23.2	22.2	21.4
		Ø25.4×1.7t	40.5	36.3	33.1	30.6	28.7	27.0	25.6	24.4	23.4	22.5
		Ø31.8×1.5t	49.0	43.9	40.0	37.1	34.7	32.7	31.0	29.6	28.3	27.2
		Ø31.8×1.7t	51.7	46.3	42.2	39.1	36.6	34.5	32.7	31.2	29.9	28.7
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	29.9*	24.0*	20.0*	17.1*	15.0*	13.3*	12.0*	10.9*	10.0*	9.2*
		Ø25.4×1.7t	29.9*	24.0*	20.0*	17.1*	15.0*	13.3*	12.0*	10.9*	10.0*	9.2*
		Ø31.8×1.5t	56.6	45.3	37.7	32.3	28.3	25.1	22.6	20.6	18.9	17.4
		Ø31.8×1.7t	60.9*	48.7*	40.6*	34.8*	30.4*	27.1*	24.4*	22.1*	20.3*	18.7*
D형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	28.0*	25.0*	22.8*	21.1*	19.8*	18.6*	17.7*	16.9*	16.1*	15.5*
		Ø25.4×1.7t	28.0*	25.0*	22.8*	21.1*	19.8*	18.6*	17.7*	16.9*	16.1*	15.5*
		Ø31.8×1.5t	37.2	33.2	30.4	28.1	26.3	24.8	23.5	22.4	21.5	20.6
		Ø31.8×1.7t	39.2	35.1	32.0	29.6	27.7	26.1	24.8	23.6	22.6	21.7
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	20.9*	16.7*	13.9*	11.9*	10.4*	9.3*	8.4*	7.6*	7.0*	6.4*
		Ø25.4×1.7t	20.9*	16.7*	13.9*	11.9*	10.4*	9.3*	8.4*	7.6*	7.0*	6.4*
		Ø31.8×1.5t	42.5*	34.0*	28.3*	24.3*	21.2*	18.9*	17.0*	15.4*	14.2*	13.1*
		Ø31.8×1.7t	42.5*	34.0*	28.3*	24.3*	21.2*	18.9*	17.0*	15.4*	14.2*	13.1*

* : 단둥온실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
E형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	30.1*	27.0*	24.6*	22.8*	21.3*	20.1*	19.1*	18.2*	17.4*	16.7*
		Ø25.4×1.7t	30.1*	27.0*	24.6*	22.8*	21.3*	20.1*	19.1*	18.2*	17.4*	16.7*
		Ø31.8×1.5t	38.9	34.8	31.7	29.4	27.5	25.9	24.6	23.4	22.4	21.6
		Ø31.8×1.7t	41.0	36.7	33.5	31.0	29.0	27.3	25.9	24.7	23.7	22.7
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	17.8*	14.3*	11.9*	10.2*	8.9*	7.9*	7.1*	6.5*	5.9*	5.5*
		Ø25.4×1.7t	17.8*	14.3*	11.9*	10.2*	8.9*	7.9*	7.1*	6.5*	5.9*	5.5*
		Ø31.8×1.5t	36.3*	29.0*	24.2*	20.7*	18.1*	16.1*	14.5*	13.2*	12.1*	11.2*
		Ø31.8×1.7t	36.3*	29.0*	24.2*	20.7*	18.1*	16.1*	14.5*	13.2*	12.1*	11.2*
F형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	29.2*	26.1*	23.8*	22.0*	20.6*	19.4*	18.4*	17.6*	16.8*	16.2*
		Ø25.4×1.7t	29.2*	26.1*	23.8*	22.0*	20.6*	19.4*	18.4*	17.6*	16.8*	16.2*
		Ø31.8×1.5t	37.4	33.4	30.5	28.2	26.4	24.9	23.6	22.5	21.6	20.7
		Ø31.8×1.7t	39.4	35.2	32.2	29.8	27.9	26.3	24.9	23.8	22.7	21.9
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	13.5*	10.8*	9.0*	7.7*	6.8*	6.0*	5.4*	4.9*	4.5*	4.2*
		Ø25.4×1.7t	13.5*	10.8*	9.0*	7.7*	6.8*	6.0*	5.4*	4.9*	4.5*	4.2*
		Ø31.8×1.5t	27.5*	22.0*	18.3*	15.7*	13.7*	12.2*	11.0*	10.0*	9.2*	8.5*
		Ø31.8×1.7t	27.5*	22.0*	18.3*	15.7*	13.7*	12.2*	11.0*	10.0*	9.2*	8.5*
G형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	25.6*	22.9*	20.9*	19.3*	18.1*	17.0*	16.2*	15.4*	14.8*	14.2*
		Ø25.4×1.7t	25.6*	22.9*	20.9*	19.3*	18.1*	17.0*	16.2*	15.4*	14.8*	14.2*
		Ø31.8×1.5t	33.8	30.2	27.6	25.6	23.9	22.5	21.4	20.4	19.5	18.8
		Ø31.8×1.7t	35.7	31.9	29.1	27.0	25.2	23.8	22.6	21.5	20.6	19.8
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	11.3*	9.1*	7.5*	6.5*	5.7*	5.0*	4.5*	4.1*	3.8*	3.5*
		Ø25.4×1.7t	11.3*	9.1*	7.5*	6.5*	5.7*	5.0*	4.5*	4.1*	3.8*	3.5*
		Ø31.8×1.5t	23.0*	18.4*	15.3*	13.2*	11.5*	10.2*	9.2*	8.4*	7.7*	7.1*
		Ø31.8×1.7t	23.0*	18.4*	15.3*	13.2*	11.5*	10.2*	9.2*	8.4*	7.7*	7.1*
H형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	31.2*	27.9*	25.5*	23.6*	22.1*	20.8*	19.8*	18.8*	18.0*	17.3*
		Ø25.4×1.7t	31.2*	27.9*	25.5*	23.6*	22.1*	20.8*	19.8*	18.8*	18.0*	17.3*
		Ø31.8×1.5t	40.9	36.6	33.4	31.0	29.0	27.3	25.9	24.7	23.6	22.7
		Ø31.8×1.7t	43.2	38.6	35.3	32.6	30.5	28.8	27.3	26.0	24.9	24.0
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	33.5*	26.8*	22.3*	19.1*	16.7*	14.9*	13.4*	12.2*	11.2*	10.3*
		Ø25.4×1.7t	33.5*	26.8*	22.3*	19.1*	16.7*	14.9*	13.4*	12.2*	11.2*	10.3*
		Ø31.8×1.5t	66.6	53.3	44.4	38.1	33.3	29.6	26.6	24.2	22.2	20.5
		Ø31.8×1.7t	68.0*	54.4*	45.4*	38.9*	34.0*	30.2*	27.2*	24.7*	22.7*	20.9*

* : 단동온실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

(계속)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
I형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	28.*	25.4*	23.2*	21.5*	20.1*	18.9*	18.0*	17.1*	16.4*	15.8*
		Ø25.4×1.7t	28.4*	25.4*	23.2*	21.5*	20.1*	18.9*	18.0*	17.1*	16.4*	15.8*
		Ø31.8×1.5t	37.8	33.8	30.9	28.6	26.7	25.2	23.9	22.8	21.8	21.0
		Ø31.8×1.7t	39.9	35.7	32.5	30.1	28.2	26.6	25.2	24.0	23.0	22.1
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	24.5*	19.6*	16.3*	14.0*	12.2*	10.9*	9.8*	8.9*	8.2*	7.5*
		Ø25.4×1.7t	24.5*	19.6*	16.3*	14.0*	12.2*	10.9*	9.8*	8.9*	8.2*	7.5*
		Ø31.8×1.5t	49.8*	39.9*	33.2*	28.5*	24.9*	22.1*	19.9*	18.1*	16.6*	15.3*
		Ø31.8×1.7t	49.8*	39.9*	33.2*	28.5*	24.9*	22.1*	19.9*	18.1*	16.6*	15.3*
J형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	30.5	27.3	24.9	23.1	21.6	20.3	19.3	18.4	17.6	16.9
		Ø25.4×1.7t	32.1	28.7	26.2	24.3	22.7	21.4	20.3	19.4	18.5	17.8
		Ø31.8×1.5t	38.8	34.7	31.7	29.4	27.5	25.9	24.6	23.4	22.4	21.5
		Ø31.8×1.7t	41.0	36.6	33.4	31.0	29.0	27.3	25.9	24.7	23.6	22.7
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	13.7*	11.0*	9.2*	7.8*	6.9*	6.1*	5.5*	5.0*	4.6*	4.2*
		Ø25.4×1.7t	13.7*	11.0*	9.2*	7.8*	6.9*	6.1*	5.5*	5.0*	4.6*	4.2*
		Ø31.8×1.5t	27.9*	22.3*	18.6*	16.0*	14.0*	12.4*	11.2*	10.2*	9.3*	8.6*
		Ø31.8×1.7t	27.9*	22.3*	18.6*	16.0*	14.0*	12.4*	11.2*	10.2*	9.3*	8.6*

* : 단둥온실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

(계속)

표 56. 농가지도형 비닐하우스의 한계하중(지붕높이 5m, 허용응력 = 1,600kg/cm²)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
A형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	31.0	27.7	25.3	23.4	21.9	20.7	19.6	18.7	17.9	17.2
		Ø25.4×1.7t	32.6	29.2	26.6	24.6	23.0	21.7	20.6	19.7	18.8	18.1
		Ø31.8×1.5t	39.4	35.3	32.2	29.8	27.9	26.3	24.9	23.8	22.8	21.9
		Ø31.8×1.7t	41.6	37.2	34.0	31.4	29.4	27.7	26.3	25.1	24.0	23.1
B형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	28.7	25.7	23.4	21.7	20.3	19.1	18.2	17.3	16.6	15.9
		Ø25.4×1.7t	30.2	27.0	24.7	22.8	21.4	20.1	19.1	18.2	17.4	16.8
		Ø31.8×1.5t	36.5	32.7	29.8	27.6	25.8	24.4	23.1	22.0	21.1	20.3
		Ø31.8×1.7t	38.5	34.5	31.5	29.1	27.2	25.7	24.4	23.2	22.2	21.4
C형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	26.8	23.9	21.8	20.2	18.9	17.8	16.9	16.1	15.4	14.8
		Ø25.4×1.7t	28.1	25.2	23.0	21.3	19.9	18.8	17.8	17.0	16.3	15.6
		Ø31.8×1.5t	34.1	30.5	27.8	25.7	24.1	22.7	21.5	20.5	19.7	18.9
		Ø31.8×1.7t	35.9	32.1	29.3	27.2	25.4	23.9	22.7	21.7	20.7	19.9
D형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	20.7	18.5	16.9	15.7	14.7	13.8	13.1	12.5	12.0	11.5
		Ø25.4×1.7t	21.8	19.5	17.8	16.5	15.4	14.5	13.8	13.2	12.6	12.1
		Ø31.8×1.5t	26.4	23.6	21.6	20.0	18.7	17.6	16.7	15.9	15.2	14.6
		Ø31.8×1.7t	27.8	24.9	22.7	21.1	19.7	18.6	17.6	16.8	16.1	15.4
E형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	21.2	19.0	17.3	16.0	15.0	14.1	13.4	12.8	12.2	11.8
		Ø25.4×1.7t	22.3	19.9	18.2	16.9	15.8	14.9	14.1	13.4	12.9	12.4
		Ø31.8×1.5t	27.0	24.1	22.0	20.4	19.1	18.0	17.1	16.3	15.6	15.0
		Ø31.8×1.7t	28.5	25.5	23.2	21.5	20.1	19.0	18.0	17.2	16.4	15.8
F형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	20.7	18.5	16.9	15.7	14.7	13.8	13.1	12.5	12.0	11.5
		Ø25.4×1.7t	21.8	19.5	17.8	16.5	15.4	14.5	13.8	13.1	12.6	12.1
		Ø31.8×1.5t	26.4	23.6	21.6	20.0	18.7	17.6	16.7	15.9	15.2	14.6
		Ø31.8×1.7t	27.8	24.9	22.7	21.0	19.7	18.6	17.6	16.8	16.1	15.4
G형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	19.4	17.3	15.8	14.6	13.7	12.9	12.2	11.7	11.2	10.7
		Ø25.4×1.7t	20.4	18.2	16.6	15.4	14.4	13.6	12.9	12.3	11.8	11.3
		Ø31.8×1.5t	24.7	22.1	20.1	18.6	17.4	16.4	15.6	14.9	14.2	13.7
		Ø31.8×1.7t	26.0	23.3	21.2	19.7	18.4	17.3	16.4	15.7	15.0	14.4
H형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	22.8	20.4	18.6	17.3	16.2	15.2	14.4	13.8	13.2	12.7
		Ø25.4×1.7t	24.0	21.5	19.6	18.2	17.0	16.0	15.2	14.5	13.9	13.3
		Ø31.8×1.5t	29.1	26.0	23.8	22.0	20.6	19.4	18.4	17.5	16.8	16.1
		Ø31.8×1.7t	30.7	27.4	25.0	23.2	21.7	20.4	19.4	18.5	17.7	17.0
I형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	21.5	19.3	17.6	16.3	15.2	14.4	13.6	13.0	12.4	11.9
		Ø25.4×1.7t	22.6	20.3	18.5	17.1	16.0	15.1	14.3	13.7	13.1	12.6
		Ø31.8×1.5t	27.4	24.5	22.4	20.7	19.4	18.3	17.3	16.5	15.8	15.2
		Ø31.8×1.7t	28.9	25.9	23.6	21.9	20.4	19.3	18.3	17.4	16.7	16.0
J형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	22.7	20.3	18.5	17.1	16.0	15.1	14.3	13.7	13.1	12.6
		Ø25.4×1.7t	23.8	21.3	19.5	18.0	16.9	15.9	15.1	14.4	13.8	13.2
		Ø31.8×1.5t	28.9	25.8	23.6	21.8	20.4	19.2	18.2	17.4	16.7	16.0
		Ø31.8×1.7t	30.4	27.2	24.8	23.0	21.5	20.3	19.2	18.3	17.6	16.9

표 57. 농가지도형 비닐하우스의 한계하중(지붕높이 5m, 허용응력 = 2,150kg/cm²)

모델	하 중	사용부재	서까래 간격(n, m)									
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
A형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	35.9	32.1	29.3	27.1	25.4	23.9	22.7	21.7	20.7	19.9
		Ø25.4×1.7t	37.8	33.8	30.8	28.6	26.7	25.2	23.9	22.8	21.8	21.0
		Ø31.8×1.5t	45.7	40.9	37.3	34.6	32.3	30.5	28.9	27.6	26.4	25.4
		Ø31.8×1.7t	48.2	43.1	39.4	36.4	34.1	32.1	30.5	29.1	27.8	26.7
B형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	33.3	29.8	27.2	25.2	23.5	22.2	21.0	20.1	19.2	18.5
		Ø25.4×1.7t	35.0	31.3	28.6	26.5	24.8	23.3	22.1	21.1	20.2	19.4
		Ø31.8×1.5t	42.4	37.9	34.6	32.0	29.9	28.2	26.8	25.5	24.5	23.5
		Ø31.8×1.7t	44.5*	39.8*	36.4*	33.7*	31.5*	29.7*	28.2*	26.9*	25.7*	24.7*
C형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	31.0	27.7	25.3	23.4	21.9	20.7	19.6	18.7	17.9	17.2
		Ø25.4×1.7t	32.6	29.2	26.6	24.7	23.1	21.8	20.6	19.7	18.8	18.1
		Ø31.8×1.5t	39.5	35.3	32.2	29.8	27.9	26.3	25.0	23.8	22.8	21.9
		Ø31.8×1.7t	41.6	37.2	34.0	31.5	29.4	27.8	26.3	25.1	24.0	23.1
D형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	23.0*	20.6*	18.8*	17.4*	16.3*	15.4*	14.6*	13.9*	13.3*	12.8*
		Ø25.4×1.7t	23.0*	20.6*	18.8*	17.4*	16.3*	15.4*	14.6*	13.9*	13.3*	12.8*
		Ø31.8×1.5t	30.6	27.4	25.0	23.1	21.6	20.4	19.4	18.5	17.7	17.0
		Ø31.8×1.7t	32.3	28.9	26.4	24.4	22.8	21.5	20.4	19.5	18.6	17.9
E형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	24.3*	21.7*	19.8*	18.3*	17.2*	16.2*	15.3*	14.6*	14.0*	13.5*
		Ø25.4×1.7t	24.3*	21.7*	19.8*	18.3*	17.2*	16.2*	15.3*	14.6*	14.0*	13.5*
		Ø31.8×1.5t	31.3	28.0	25.6	23.7	22.1	20.9	19.8	18.9	18.1	17.4
		Ø31.8×1.7t	33.0	29.5	26.9	24.9	23.3	22.0	20.9	19.9	19.1	18.3
F형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	23.9*	21.4*	19.5*	18.0*	16.9*	15.9*	15.1*	14.4*	13.8*	13.2*
		Ø25.4×1.7t	23.9*	21.4*	19.5*	18.0*	16.9*	15.9*	15.1*	14.4*	13.8*	13.2*
		Ø31.8×1.5t	30.6	27.4	25.0	23.1	21.6	20.4	19.4	18.5	17.7	17.0
		Ø31.8×1.7t	32.3	28.9	26.3	24.4	22.8	21.5	20.4	19.5	18.6	17.9
G형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	21.6*	19.3*	17.6*	16.3*	15.3*	14.4*	13.7*	13.0*	12.5*	12.0*
		Ø25.4×1.7t	21.6*	19.3*	17.6*	16.3*	15.3*	14.4*	13.7*	13.0*	12.5*	12.0*
		Ø31.8×1.5t	28.6	25.6	23.3	21.6	20.2	19.1	18.1	17.2	16.5	15.9
		Ø31.8×1.7t	30.1	27.0	24.6	22.8	21.3	20.1	19.1	18.2	17.4	16.7
H형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	25.7*	23.0*	21.0*	19.4*	18.2*	17.1*	16.3*	15.5*	14.8*	14.3*
		Ø25.4×1.7t	25.7*	23.0*	21.0*	19.4*	18.2*	17.1*	16.3*	15.5*	14.8*	14.3*
		Ø31.8×1.5t	33.7	30.2	27.5	25.5	23.8	22.5	21.3	20.3	19.5	18.7
		Ø31.8×1.7t	35.6	31.8	29.0	26.9	25.1	23.7	22.5	21.4	20.5	19.7
I형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	23.9*	21.4*	19.5*	18.1*	16.9*	15.9*	15.1*	14.4*	13.8*	13.3*
		Ø25.4×1.7t	23.9*	21.4*	19.5*	18.1*	16.9*	15.9*	15.1*	14.4*	13.8*	13.3*
		Ø31.8×1.5t	31.8	28.4	26.0	24.0	22.5	21.2	20.1	19.2	18.4	17.6
		Ø31.8×1.7t	33.5	30.0	27.4	25.3	23.7	22.3	21.2	20.2	19.4	18.6
J형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	26.3	23.5	21.5	19.9	18.6	17.5	16.6	15.8	15.2	14.6
		Ø25.4×1.7t	27.6	24.7	22.6	20.9	19.5	18.4	17.5	16.7	16.0	15.3
		Ø31.8×1.5t	33.4	29.9	27.3	25.3	23.7	22.3	21.2	20.2	19.3	18.6
		Ø31.8×1.7t	35.3	31.5	28.8	26.7	24.9	23.5	22.3	21.3	20.4	19.6

* : 단동온실의 변형제한에 의해 한계풍속 및 적설심 결정

나. 그래프에 의한 방법

별첨자료는 농가지도형 단동온실에 대하여 서까래 간격별 적설하중 변화에 따른 부재에 발생하는 최대응력을 산정하여 그래프로 도시한 것이다.

활용방법)

1) 적설하중

가) A형 온실을 서까래 간격 90cm로 설치하였을 때 한계하중 산정방법

- (1) 서까래 간격에 맞는 그래프를 선택(왼쪽에서 5번째)
(상단그래프 - 허용응력, 하단그래프 - 변형제한)
- (2) 상단 그래프에서 부재의 허용응력과 교차점 ㉠, ㉡에서 아래쪽으로 선을 작도하여 선이 X축과 만나는 점의 적설심을 읽음
 - 강재의 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용 : 약 18.2cm
 - 강재의 허용응력이 2100kg/cm²인 파이프 사용 : 약 24.4cm
- (3) 하단 그래프에서 변형제한값과의 교차점 ㉢에서 위쪽으로 선을 작도하여 선이 X축과 만나는 점의 적설심을 읽음 : 약 26.2cm
- (4) (2)와 (3)과정에서 찾은 값중 작은 값이 한계적설하중이 된다
 - 강재의 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용 : **약 18.2cm**
 - 강재의 허용응력이 2150kg/cm²인 파이프 사용 : **약 24.4cm**

나) 35cm의 설계적설심으로 단동온실을 설계하는 방법

- (1) 온실형태 및 크기에 따른 도표선택(A형 선택)
- (2) 설계적설심 35cm에 해당하는 점①에서 상단그래프에 선을 작도하여 사용자 재별 허용응력과 교차되는 점 ② 또는 ③에 해당하는 서까래 간격을 결정
 - 강재의 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용(점 ②)
: 교차점 ②는 서까래간격 0.4m와 0.5m사이에 있으며 그 값은 약 0.46m
 - 강재의 허용응력이 2150kg/cm²인 파이프 사용(점 ③)
: 교차점 ③은 서까래간격 0.6m와 0.7m사이에 있으며 그 값은 약 0.62m
- (3) 설계적설심 35cm에 해당하는 점①에서 하단그래프에 선을 작도하여 변형제한값과 교차되는 점 ④에 해당하는 서까래 간격을 결정
: 서까래간격 0.6m와 0.7m사이에 있으며 그 값은 약 0.65m
- (4) (2)와 (3)과정에서 찾은 값중 작은 값이 최소 서까래 간격이 된다
 - 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용시 서까래 간격 : **약 0.46m**
 - 허용응력이 2150kg/cm²인 파이프 사용시 서까래 간격 : **약 0.62m**

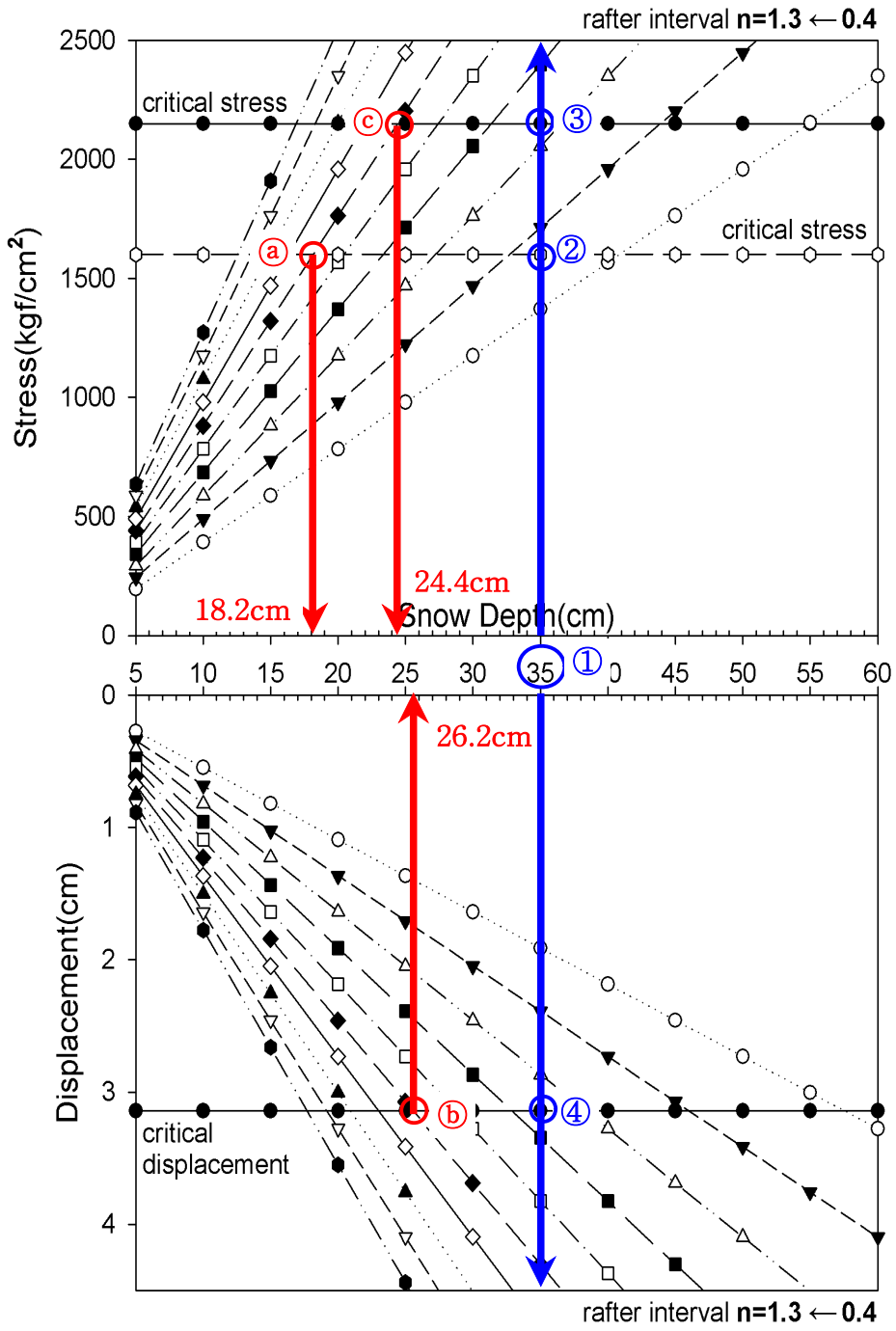


그림 84. 서까래 간격별 한계적설심(A형, Ø25.4×1.5t)

2) 풍하중

가) A형 온실을 서까래 간격 90cm로 설치하였을 때 한계하중 산정방법

- (1) 설치하고자 하는 온실형태 및 크기에 해당하는 그래프(별첨자료) 선택
- (2) 서까래 간격에 맞는 그래프를 선택(왼쪽에서 5번째)
(상단그래프 - 허용응력, 하단그래프 - 변형제한)
- (2) 상단 그래프에서 부재의 허용응력과 교차점 ㉠, ㉡에서 아래쪽으로 선을 작도하여 선이 X축과 만나는 점의 풍속을 읽음
 - 강재의 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용 : 약 27.0m/s
 - 강재의 허용응력이 2100kg/cm²인 파이프 사용 : 약 31.4m/s
- (3) 하단 그래프에서 변형제한값과의 교차점 ㉢에서 위쪽으로 선을 작도하여 선이 X축과 만나는 점의 적설심을 읽음 : 약 37.0m/s
- (4) (2)와 (3)과정에서 찾은 값중 작은 값이 한계적설하중이 된다
 - 강재의 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용 : 약 27.0m/s
 - 강재의 허용응력이 2150kg/cm²인 파이프 사용 : 약 31.4m/s

나) 40m/s의 설계풍속으로 단동온실을 설계하는 방법

- (1) 온실형태 및 크기에 따른 도표선택(A형 선택)
- (2) 설계풍속 40m/s에 해당하는 점①에서 상단그래프에 선을 작도하여 사용자재별 허용응력과 교차되는 점 ② 또는 ③에 해당하는 서까래 간격을 결정
 - 강재의 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용(점 ②)
: 교차점 ②는 서까래간격 0.4m와 0.5m사이에 있으며 그 값은 약 0.41m
 - 강재의 허용응력이 2150kg/cm²인 파이프 사용(점 ③)
: 교차점 ③은 서까래간격 0.5m와 0.6m사이에 있으며 그 값은 약 0.55m
- (3) 설계풍속 40m/s에 해당하는 점①에서 하단그래프에 선을 작도하여 변형제한값과 교차되는 점 ④에 해당하는 서까래 간격을 결정
: 서까래간격 0.7m와 0.8m사이에 있으며 그 값은 약 0.78m
- (4) (2)와 (3)과정에서 찾은 값중 작은 값이 설계풍속에 안전한 최소서까래간격이 된다
 - 허용응력이 1600kg/cm²인 파이프 사용시 서까래 간격 : 약 0.41m
 - 허용응력이 2150kg/cm²인 파이프 사용시 서까래 간격 : 약 0.55m

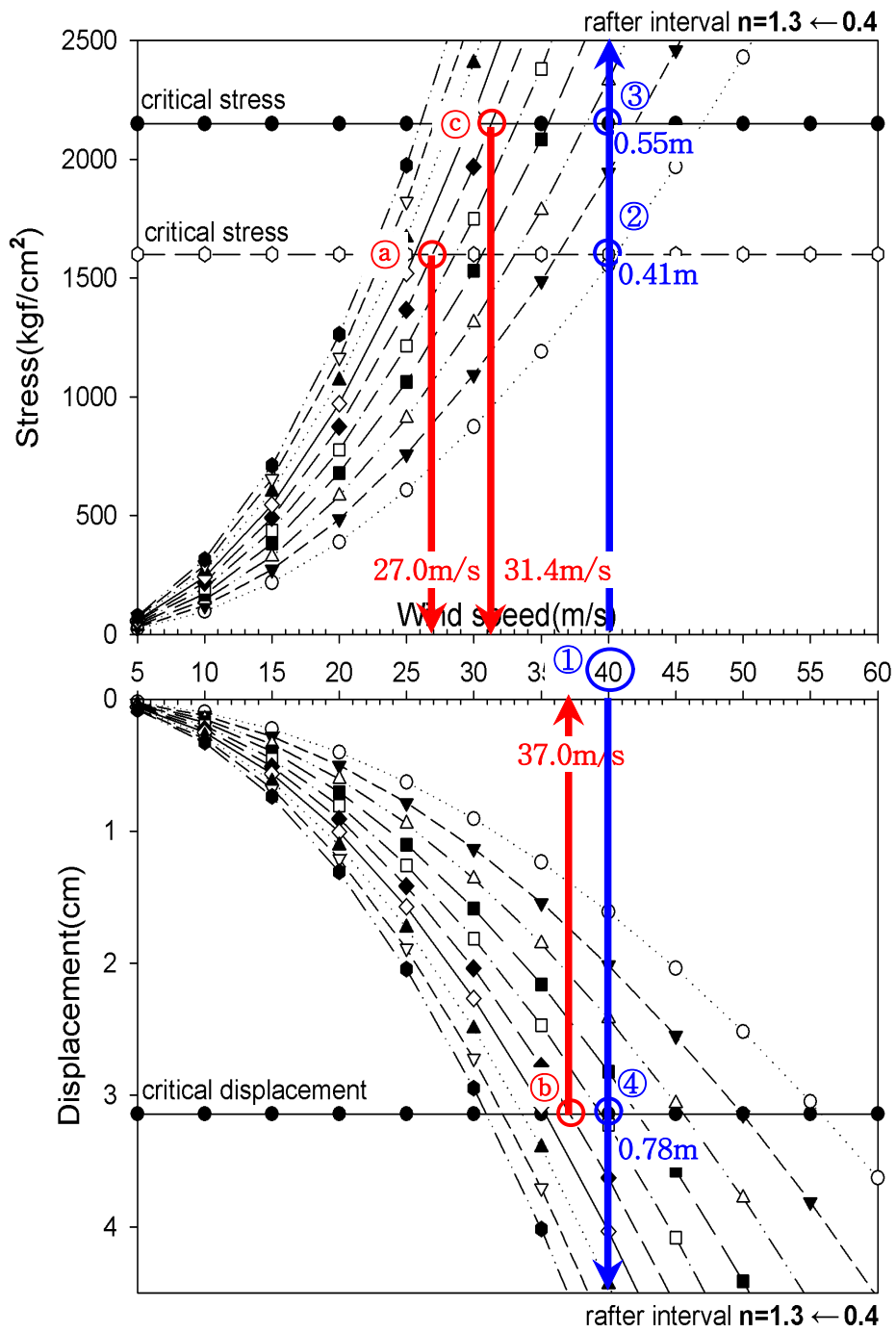


그림 85. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø25.4×1.5t)

다. 회귀식에 의한 방법

표 58과 표 59는 온실형태별로 사용부재 및 서까래 간격에 따른 한계하중을 산정할 수 있는 식을 나타낸 것이다. 표 58은 온실의 평균지붕높이로 풍속을 환산하여 산정한 결과이며 표 59는 온실의 평균지붕높이 5m까지는 풍속이 일정하게 작용한다는 본 연구결과를 적용하여 산정한 결과이다. 본 연구에서 유도된 아래의 식을 이용하면 온실설계에 필요한 기본자료를 얻을 수 있을 것으로 판단되며 활용하면 방법은 다음과 같다.

1) 풍하중 산정

식 (17)과 (18)은 농가지도형 비닐하우스 A형(온실 폭 4.8m, 처마높이 1.1m, 곡부높이 1.2m, 전체높이 2.3m)에 대하여 부재의 허용응력에 의한 풍하중 산정과 변형제한을 고려한 풍하중 산정식을 나타낸 것이다.

$$X_w = \sqrt{\frac{\sigma}{2.43n}} \text{ (부재허용응력 고려)} \quad (17)$$

$$X_w = \sqrt{\frac{h}{35 \times 0.00252n}} \text{ (변형제한 고려)} \quad (18)$$

여기서, X_w 는 설계풍속(m/s), σ 는 사용부재의 허용응력(kgf/cm²), n 은 서까래 간격(m), h 는 온실의 처마높이(cm) 이다.

식 (17)과 (18)에서 풍속에 따른 서까래 간격을 결정할 수 있는 식 (19), (20)을 유도할 수 있다.

$$n = \frac{\sigma}{2.43X_w^2} \text{ (부재허용응력 고려)} \quad (19)$$

$$n = \frac{h}{0.0882X_w^2} \text{ (변형제한 고려)} \quad (20)$$

A형 단동온실을 부재의 허용응력이 1,600kgf/cm²인 일반 농업용 파이프로 서까래 간격을 0.5m로 설치할 경우에 최대안전풍속은 다음과 같다.

식 (17)과 (18)을 이용하여 부재의 허용응력과 온실의 변형제한값에 의한 풍속을 산정하면

$$X_w = \sqrt{\frac{\sigma}{2.43n}} = \sqrt{\frac{1600}{2.43 \times 0.5}} = 36.3\text{m/s}$$

$$X_w = \sqrt{\frac{h}{35 \times 0.00252n}} = \sqrt{\frac{110}{0.0882 \times 0.5}} = 49.9\text{m/s} \text{ 가 된다.}$$

위의 계산 값에서 적은 값이 한계풍속이 되므로 최대안전풍속은 36.3m/s가 된다.

그리고, 설계풍속 35m/s로 A형 온실을 설계할 경우에는 식 (19)와 (20)을 이용하여 사용부재별 서까래 간격을 결정할 수 있다.

$$n = \frac{\sigma}{2.43X_w^2} = \frac{1600(2150)}{2.43 \times 35^2} = 0.537(0.722)\text{m} = 53.7(72.2)\text{cm}$$

$$n = \frac{h}{0.0882X_w^2} = 1.01\text{m/s} = 101\text{cm}$$

위의 계산 값에 적은 값이 서까래 간격이 되므로 사용부재별 서까래 간격은 부재의 허용응력이 1600kg/cm²인 경우에는 53.7cm, 허용응력이 2150kgf/cm²인 경우에는 72.2cm가 된다.

2) 설하중 산정

식 (21)과 (22)는 농가지도형 비닐하우스 A형(온실 폭 4.8m, 처마높이 1.1m, 곡부높이 1.2m, 전체높이 2.3m)에 대하여 부재의 허용응력에 의한 풍하중 산정과 변형제한을 고려한 풍하중 산정식을 나타낸 것이다.

$$X_s = \frac{\sigma}{97.91n} \text{ (부재허용응력 고려)} \quad (21)$$

$$X_s = \frac{h}{35 \times 0.13658n} \text{ (변형제한 고려)} \quad (22)$$

여기서, X_s 는 설계적설심(cm), σ 는 사용부재의 허용응력(kgf/cm²), n 은 서까래 간격(m), h 는 온실의 처마높이(cm) 이다.

식 (21)과 (22)에서 풍속에 따른 서까래 간격을 결정할 수 있는 식 (23), (24)을 유도할 수 있다.

$$n = \frac{\sigma}{97.91X_s} \text{ (부재허용응력 고려)} \quad (23)$$

$$n = \frac{h}{4.7803X_s} \text{ (변형제한 고려)} \quad (24)$$

A형 단동온실을 부재의 허용응력이 1,600kgf/cm²인 일반 농업용 파이프로 서까래 간격을 0.5m로 설치할 경우에 최대안전풍속은 다음과 같다.

식 (21)과 (22)를 이용하여 부재의 허용응력과 온실의 변형제한값을 고려한 한계적설심을 산정하면

$$X_s = \frac{\sigma}{97.91n} = \frac{1600}{97.91 \times 0.5} = 32.6\text{cm}$$

$$X_s = \frac{h}{35 \times 0.13658n} = \frac{110}{0.13658 \times 0.5} = 46.0\text{cm} \text{ 가 된다.}$$

위의 계산 값에서 적은 값이 한계적설심이 되므로 최대안전적설심 32.6cm가 된다.

그리고, 설계적설심 40cm로 A형 온실을 설계할 경우에는 식 (23)와 (24)을 이용하여 사용부재별 서까래 간격을 결정할 수 있다.

$$n = \frac{\sigma}{97.91X_s} = \frac{1600(2150)}{97.91 \times 40} = 0.4(0.54)\text{m}$$

$$n = \frac{h}{4.7803X_s} = \frac{110}{4.7803 \times 40} = 0.57\text{m}$$

위의 계산 값에 적은 값이 서까래 간격이 되므로 사용부재별 서까래 간격은 부재의 허용응력이 1600kg/cm²인 경우에는 0.4m, 허용응력이 2150kgf/cm²인 경우에는 0.57m가 된다.

표 58. 농가지도형 비닐하우스의 설계하중 산정식(지붕평균높이 고려 풍속 산정)

모델	하 중	사용부재	설계하중 회귀식	
			부재 허용응력 고려	변형제한 고려
A형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/2.43n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00252n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/2.20n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00252n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/1.50n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00124n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/1.35n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00124n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/97.91n)$	$X_s = h/(35*0.13658n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/88.46n)$	$X_s = h/(35*0.13658n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/60.54n)$	$X_s = h/(35*0.06720n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/54.44n)$	$X_s = h/(35*0.06720n)$
B형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/2.99n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00351n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/2.70n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00351n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/1.85n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00173n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/1.66n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00266n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/124.20n)$	$X_s = h/(35*0.21060n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/112.22n)$	$X_s = h/(35*0.21060n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/76.76n)$	$X_s = h/(35*0.10358n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/54.45n)$	$X_s = h/(35*0.13658n)$
C형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/3.62n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00477n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/3.27n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00477n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/2.23n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00235n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/2.01n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00235n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/153.72n)$	$X_s = h/(35*0.31013n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/138.90n)$	$X_s = h/(35*0.31013n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/94.99n)$	$X_s = h/(35*0.15248n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/85.41n)$	$X_s = h/(35*0.15248n)$

(계속)

주) X_w : 풍속(m/s), X_s : 적설심(cm), σ : 부재 허용응력(kgf/cm²),
 n : 서까래 간격(m), h : 온실 처마높이(cm)

모델	하 중	사용부재	설계하중 회귀식	
			부재 허용응력 고려	변형제한 고려
D형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/6.31n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01462n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/5.70n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01462n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.89n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00719n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/3.50n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00719n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/197.64n)$	$X_s = h/(35*0.54728n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/178.59n)$	$X_s = h/(35*0.54728n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/122.02n)$	$X_s = h/(35*0.26903n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/109.72n)$	$X_s = h/(35*0.26903n)$
E형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/5.77n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01101n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/5.21n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01101n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.56n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00541n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/3.20n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00541n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/232.71n)$	$X_s = h/(35*0.56048n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/210.28n)$	$X_s = h/(35*0.56048n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/143.64n)$	$X_s = h/(35*0.27555n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/129.16n)$	$X_s = h/(35*0.27555n)$
F형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/6.24n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01177n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/5.64n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01177n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.85n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00579n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/3.46n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00579n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/282.79n)$	$X_s = h/(35*0.74063n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/255.54n)$	$X_s = h/(35*0.74063n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/174.53n)$	$X_s = h/(35*0.36413n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/156.95n)$	$X_s = h/(35*0.36413n)$
G형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/7.62n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01751n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/6.89n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01751n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/4.70n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00861n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/4.23n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00861n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/311.81n)$	$X_s = h/(35*1.00995n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/281.77n)$	$X_s = h/(35*1.00995n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/192.42n)$	$X_s = h/(35*0.49650n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/173.03n)$	$X_s = h/(35*0.49650n)$

(계속)

모델	하 중	사용부재	설계하중 회귀식	
			부재 허용응력 고려	변형제한 고려
H형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/5.20n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01172n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/4.70n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01172n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.21n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00576n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/2.88n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00576n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/130.59n)$	$X_s = h/(35*0.34163n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/118.00n)$	$X_s = h/(35*0.34163n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/80.70n)$	$X_s = h/(35*0.16800n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/72.56n)$	$X_s = h/(35*0.16800n)$
I형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/6.10n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01504n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/5.51n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01504n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.76n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00740n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/3.38n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00740n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/162.35n)$	$X_s = h/(35*0.49590n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/146.70n)$	$X_s = h/(35*0.49590n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/100.29n)$	$X_s = h/(35*0.24375n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/90.18n)$	$X_s = h/(35*0.24375n)$
J형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/5.77n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01101n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/5.22n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01101n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.56n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00541n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/3.20n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00541n)^{0.5}$
	설하중 (cm)	Ø25.4×1.5t	$X_s = (\sigma/242.90n)$	$X_s = h/(35*0.83235n)$
		Ø25.4×1.7t	$X_s = (\sigma/219.48n)$	$X_s = h/(35*0.83235n)$
		Ø31.8×1.5t	$X_s = (\sigma/150.00n)$	$X_s = h/(35*0.40920n)$
		Ø31.8×1.7t	$X_s = (\sigma/134.88n)$	$X_s = h/(35*0.40920n)$

표 59. 농가지도형 비닐하우스의 설계풍하중 산정식(지붕평균높이 5m까지 풍속 일정)

모델	하 중	사용부재	설계풍하중 회귀식	
			응력	변위
A형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/49.51n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.05134n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/3.77n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00432n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/2.57n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00212n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/2.31n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00212n)^{0.5}$
B형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/59.50n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.06976n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/4.39n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00569n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.00n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00280n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/2.69n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00432n)^{0.5}$
C형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/70.14n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.09247n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/5.05n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00737n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/3.45n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00362n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/3.10n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00362n)^{0.5}$
D형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/96.96n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.22464n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/8.41n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.02155n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/5.74n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01060n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/5.16n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01060n)^{0.5}$
E형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/8.90n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01698n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/8.04n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01698n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/5.49n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00835n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/4.94n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00835n)^{0.5}$

(계속)

주) X_w : 풍속(m/s), σ : 부재 허용응력(kgf/cm²)
 n : 서까래 간격(m), h : 온실 처마높이(cm)

모델	하 중	사용부재	설계풍하중 회귀식	
			부재 허용응력 고려	온실 변형제한 고려
F형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/98.04n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.18476n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/8.41n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01754n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/5.74n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00863n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/5.16n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00863n)^{0.5}$
G형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/118.68n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.27258n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/9.65n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.02451n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/6.58n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01205n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/5.92n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01205n)^{0.5}$
H형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/93.98n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.21176n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/6.93n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01728n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/4.73n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00849n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/4.25n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00849n)^{0.5}$
I형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/108.34n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.26711n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/7.80n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.02128n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/5.32n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01046n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/4.78n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01046n)^{0.5}$
J형	풍하중 (m/s)	Ø25.4×1.5t	$X_w = (\sigma/7.79n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01485n)^{0.5}$
		Ø25.4×1.7t	$X_w = (\sigma/7.04n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.01485n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.5t	$X_w = (\sigma/4.80n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00730n)^{0.5}$
		Ø31.8×1.7t	$X_w = (\sigma/4.32n)^{0.5}$	$X_w = (h/35*0.00730n)^{0.5}$

제2절 온실용 구조해석 프로그램 개발

1. 온실 설계용 기상자료 분석

생물생산시설의 안전성을 확보하기 위해서는 안전한 구조물의 해석과 농업정보가 필요하며, 특히 시설물 설계에 이용되는 기초자료중 가장 일상적인 재해원인인 기상자료의 분석이 필요하다. 생물생산시설의 구조물 설계에 이용되는 하중으로는 상시하중(고정하중, 작물하중, 장비하중)과 비상시하중(적설하중, 풍하중, 지진력) 등이 있으나 우리나라에서는 풍하중 및 적설하중이 가장 큰 비중을 차지한다. 적설하중과 풍하중은 기상하중으로 확률분포함수를 이용한 빈도분석을 실시하여 얻어지는 설계적설심과 풍속이며 시설의 표준내용년수와 안전도로부터 구해지는 재현기간별로 상이하다. 이러한 적설하중과 풍하중의 산정은 광범위한 기상자료의 분석이 필요하며, 이미 분석된 자료가 있으나 관측년수가 최대 1994년까지의 기상자료를 활용하였기 때문에 최근 기상자료를 포함한 설계기상하중을 제시할 필요가 있다. 그리고, 실내난방과 온실의 곡부제설을 전제로 한 설계적설하중은 최대적설심이 아닌 최대신적설심을 이용하였기 때문에 난방을 하지 않는 단동온실이나 제설작업을 수행하지 못하는 생물생산시설물에 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 생물생산시설의 구조 안전성을 확보하기 위하여 지역별 년 최대순간풍속, 최심신적설심 및 최심적설심 자료를 빈도분석하여 재현기간에 따른 설계풍속 및 설계적설심을 산정하였다.

가. 기상자료 및 풍속보정

본 연구에 사용된 자료는 전국 84개 기상 관측소 자료중 17년 이상의 관측자료가 있는 70개 지역을 선정하여 년 최대치 계열의 풍속, 신적설심 및 적설심을 기상청으로부터 제공받아 사용하였으며 분석지점의 기상관측소의 위치는 그림 85와 같다.

기상자료의 정확성을 확보하기 위하여 기상청에서 제공받은 년 최대치 자료와 각년도별 월별 기상자료, 기상청 인터넷자료 등을 서로 비교하여 자료가 서로 다른 경우에는 자료중 최대값은 년 최대값으로 하였다.

구조물 설계에 사용되는 기본풍속은 보통 지상 10m 높이에서의 평균풍속을 사용하고 있으나 국내 관측소의 풍속 관측높이는 표 60에서 보는 바와 같이, 지역과 관측년

도에 따라 일정하지 않아 식 (25)에 의해 보정하였다.

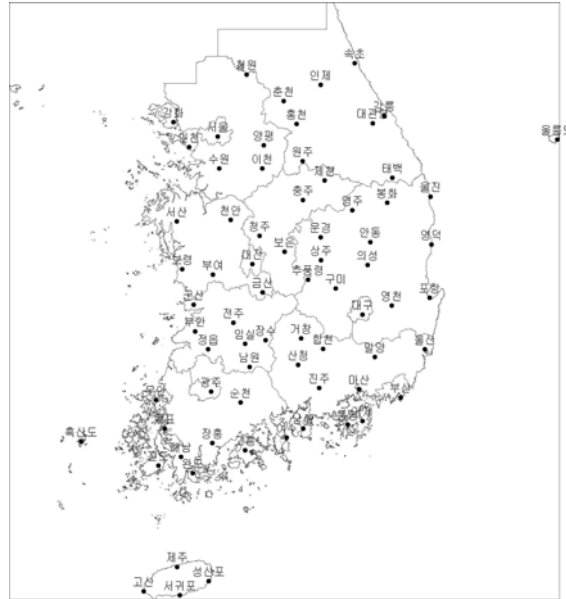


그림 85. 분석지점의 기상관측소 위치

$$V_o = V_z \left(\frac{Z_o}{Z} \right)^{0.25} \quad (25)$$

여기서, V_z 는 고도 Z 에서의 평균풍속, V_o 는 기준고도 $Z_o(10m)$ 에서의 평균풍속이다. 그리고 최대순간풍속이 결측된 지역의 최대순간풍속은 일반적으로 해당지역의 최대풍속으로 이용하여 식 (26)에 의해 보정을 하고 있으나, 본 연구에서는 지역별로 관측된 최대풍속과 최대순간풍속을 이용하여 내륙과 해안지역을 구분하여 새로운 변환관계식을 유도하여 사용하였다.

$$V_{max} = 1.1V + N \quad (26)$$

여기서, V_{max} 은 최대순간풍속, V 는 최대풍속이고 N 은 상수(0~15, 일반적으로 $N=7$ 사용)이다. 그리고, 국내 기상청 자동기상관측장비의 풍속계는 정도가 높으며 평가시간 3초의 최대순간풍속이 측정됨으로 어느 시각의 최대순간풍속 V_{max} 과 최대풍속 V 의 비인 거스트계수(G)를 구하여 다음과 같이 최대순간풍속을 계산할 수 있다.

$$V_{max} = GV \quad (27)$$

표 60. 기상자료 수집지역 및 사용년수 및 풍속관측높이

지 점	위 도	경 도	년수*			Ha**(m)
			풍 속	신적설	구적설	
속 초	38° 15'	128° 34'	39	39	39	8.9 ~ 15.1(11.8)
철 원	38° 09'	127° 18'	19	19	19	12.3 ~ 15(12.9)
대관령	37° 41'	128° 46'	36	35	35	10 ~ 10(10)
춘 천	37° 54'	127° 44'	41	41	41	9.8 ~ 13(9.8)
강 릉	37° 45'	128° 54'	95	65	65	9.8 ~ 14.5(13.8)
서 울	37° 34'	126° 58'	97	67	67	10 ~ 11.5(10)
인 천	37° 28'	126° 38'	85	58	58	11 ~ 14(14)
원 주	37° 20'	127° 57'	36	34	34	10 ~ 16(10)
울릉도	37° 29'	130° 54'	69	69	69	7.7 ~ 10.3(10)
수 원	37° 16'	126° 59'	43	43	43	9.8 ~ 20(20)
충 주	36° 58'	127° 57'	35	34	34	6 ~ 10(10)
서 산	36° 46'	126° 30'	39	39	39	6.5 ~ 20.2(6.5)
울 진	36° 59'	129° 25'	36	35	1	13 ~ 13.6(13)
청 주	36° 38'	127° 27'	40	39	39	10 ~ 19(10)
대 전	36° 22'	127° 22'	38	38	38	8 ~ 22.8(22.8)
추풍령	36° 13'	128° 00'	64	55	55	10 ~ 20.7(10)
안 동	36° 34'	128° 43'	10	30	30	10 ~ 15.5(15.5)
포 향	36° 02'	129° 23'	58	54	54	10.8 ~ 15.2(15.2)
군 산	35° 59'	126° 42'	39	39	39	14.5 ~ 18(15.3)
대 구	35° 53'	128° 37'	100	70	70	10 ~ 23.6(10)
전 주	35° 49'	127° 09'	89	70	70	8.9 ~ 18.4(18.4)
울 산	35° 33'	129° 19'	70	60	60	10.8 ~ 16.4(12.4)
마 산	35° 11'	128° 34'	22	20	20	12.3 ~ 19.5(17.6)
광 주	35° 10'	126° 54'	68	67	67	15.4 ~ 17.5(17.5)
부 산	35° 06'	129° 02'	103	45	45	17.8 ~ 17.8(17.8)
통 영	34° 51'	128° 26'	39	39	39	11.5 ~ 15.2(15.2)
목 포	34° 49'	126° 23'	103	70	70	15.5 ~ 15.8(15.5)
여 수	34° 44'	127° 45'	65	64	64	10.5 ~ 20.8(20.8)
흑산도	34° 41'	125° 27'	10	10	10	10 ~ 13.2(10)
완 도	34° 24'	126° 42'	36	34	34	15.4 ~ 15.4(15.4)
제 주	33° 31'	126° 32'	84	70	70	10.5 ~ 15(15)
고 산	33° 17'	126° 10'	19	19	19	6 ~ 10(10)
서귀포	33° 15'	126° 34'	46	46	46	8.9 ~ 10(10)

(계속)

주) 년수* : 측정시작~2006년 동안 풍속(WS), (신)적설심(SD) 관측년수

Ha** : 측정시작~2006년 동안 풍속속관측높이 범위(현재 관측높이)

지 점	위 도	경 도	년수*			Ha**(m)
			풍 속	신적설	구적설	
진 주	35° 12'	128° 07'	38	36	36	6 ~ 10(10)
강 화	37° 42'	126° 27'	35	34	34	5.5 ~ 9.7(9.7)
양 평	37° 29'	127° 30'	35	34	34	6 ~ 10.3(10.3)
이 천	37° 16'	127° 29'	35	34	34	6 ~ 10(10)
인 제	38° 03'	128° 10'	35	34	34	6 ~ 10(9.7)
홍 천	37° 41'	127° 53'	35	34	34	6 ~ 13(12.5)
태 백	37° 10'	128° 59'	22	22	22	10 ~ 16(16)
제 천	37° 09'	128° 12'	35	34	34	6 ~ 13.3(13.3)
보 은	36° 29'	127° 44'	35	34	34	6 ~ 10(10)
천 안	36° 47'	127° 07'	35	34	34	6 ~ 22(22)
보 령	36° 19'	126° 34'	35	34	34	6 ~ 22(22)
부 여	36° 16'	126° 55'	35	34	34	6 ~ 10(10)
금 산	36° 06'	127° 29'	35	34	34	6 ~ 10(10)
부 안	35° 44'	126° 43'	35	35	35	6 ~ 10.1(10.1)
임 실	35° 37'	127° 17'	34	34	34	6 ~ 11(10)
정 읍	35° 34'	126° 52'	35	36	36	6 ~ 18.4(18.4)
남 원	35° 24'	127° 20'	35	35	35	6 ~ 10(10)
장 수	35° 39'	127° 31'	19	19	19	6 ~ 10(10)
순 천	35° 04'	127° 14'	35	35	35	10 ~ 14(14)
장 흥	34° 41'	126° 55'	35	35	35	6 ~ 14.3(14.3)
해 남	34°33'	126° 34'	36	35	35	6 ~ 10(10)
고 흥	34° 37'	127° 17'	35	33	33	6 ~ 10(10)
성산포	33° 23'	126° 53'	35	34	34	6 ~ 10.2(10.2)
봉 화	36° 56'	128° 55'	19	19	19	6 ~ 13(13)
영 주	36° 52'	128° 31'	34	34	34	6 ~ 10(10)
문 경	36° 37'	128° 09'	35	34	34	6 ~ 10(10)
영 덕	36° 32'	129° 25'	35	34	34	6 ~ 10(10)
의 성	36° 21'	128° 41'	34	34	34	6 ~ 10(10)
구 미	36° 08'	128° 19'	34	34	34	6 ~ 10(10)
영 천	35° 58'	128° 57'	35	34	34	6 ~ 10(10)
거 창	35° 40'	127° 55'	35	34	34	10 ~ 10(10)
합 천	35° 34'	128° 10'	34	34	34	6 ~ 10.5(10)
밀 양	35° 29'	128° 45'	34	34	34	6 ~ 10(10)
산 청	35° 25'	127° 53'	35	34	34	10 ~ 10(10)
거 제	34° 53'	128° 36'	35	34	34	9.6 ~ 12.3(10)
남 해	34° 49'	127° 56'	35	35	35	6 ~ 16(10)

나. 확률분포함수 및 재현기간

본 연구에 사용된 확률분포함수는 년 최대값 계열의 빈도분석에 많이 사용되는 Type-I 극치분포형을 선정하였으며, 식 (28)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{a} - \exp\left(-\frac{(x-x_0)}{a}\right)\right] \quad (28)$$

여기서 $a > 0$ 는 축척계수이며 x_0 는 최대확률의 발생위치를 표시하며 $-\infty < x < \infty$ 이다. 그리고, 생물생산시설 등의 구조물 설계에 있어서 기상요소에 의한 설계하중을 산정할 때에는 재현기간에 따른 설계자료를 이용하여야 한다. 이때, 재현기간은 시설의 표준내용년수와 안전도로부터 결정되는 것으로 이들 사이의 관계는 식 (29)로 주어진다.

$$\log P_s - 2 = N \log\left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (29)$$

여기서, P_s 는 안전도(%), N 은 표준내용년수이며 T 는 재현기간(년)이다. 식 (29)에 의해 생물생산시설물의 표준내용년수를 5, 10, 15, 20년으로 하고 안전도를 50, 70%로 하였을 때 재현기간은 8, 15, 22, 30, 43, 57년이 된다.

다. 최대풍속과 최대순간풍속 관계

기상청 자동기 상관측장비의 풍속계는 0.25초 간격으로 관측을 하고 있어 0.25초마다 10초 동안 표본수집된 40개의 풍속자료를 평균하여 현재풍속을 구하며, 6개의 현재풍속자료를 평균하여 1분 평균풍속을 산정한다. 10개의 1분 평균풍속을 평균하여 10분 평균풍속을 구하며, 매정시 풍속으로는 정시 10분전부터 관측된 10분 평균풍속자료가 이용된다. 12개의 0.25초 자료를 1초 간격으로 이동시키면서 평균하고, 이동평균값 중에서 최대값을 1분 최대돌풍속으로 하며 1분씩 이동평균값으로 산출된 1,440개의 10분 평균값 중에서 최대값을 일최대풍속으로 정하며, 매분 최대돌풍속을 이용하여 1시간 최대돌풍속을 구한다. 일평균풍속은 1,440개의 매분풍속을 평균한 값이 되며, 1분 기상자료의 최대풍속 자료에서 10분 단위 이동평균 중 최대값이 일최대풍속으로 산출된다. 따라서, 일최대풍속은 일계 내의 10분간 평균풍속의 최대값이며 최대순간풍속은 일계 내의 순간풍속의 최대값이 된다. WMO(세계기상기구) 규정에 따라, 3초동안 관측한 12개(초당 4회*3초) 자료를 이동평균한 값이 순간풍속이며, 이 중 하루동안 가장 큰 값이 일 최대순간풍속으로 정의하고 있다.

최대순간풍속 관측치가 있는 80개 관측소의 기상자료를 이용하여 최대순간풍속과 최대풍속과의 관계를 분석한 결과는 그림 86과 같으며, 관계식은 식 (30)과 같다.

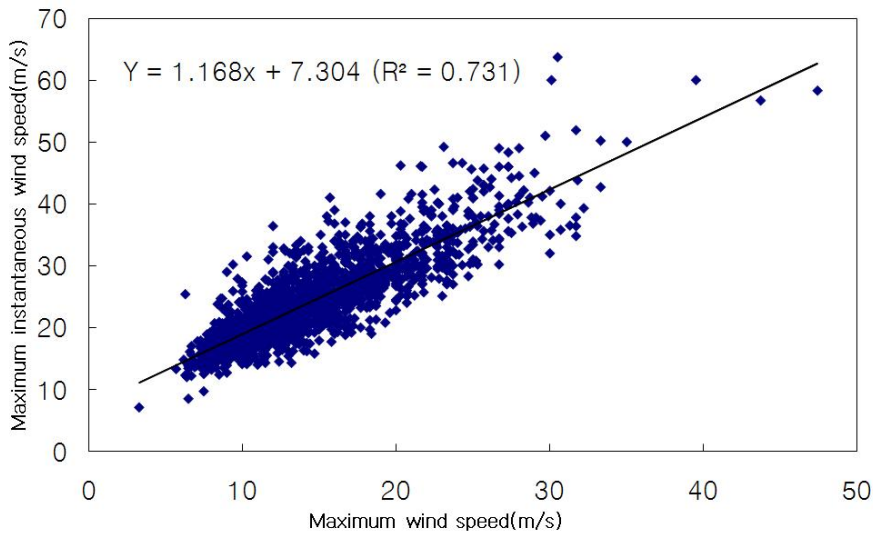


그림 86. 최대순간풍속과 최대풍속 관계(전지역)

$$V_{\max} = 1.168V + 7.304 \quad (R^2 = 0.731) \quad (30)$$

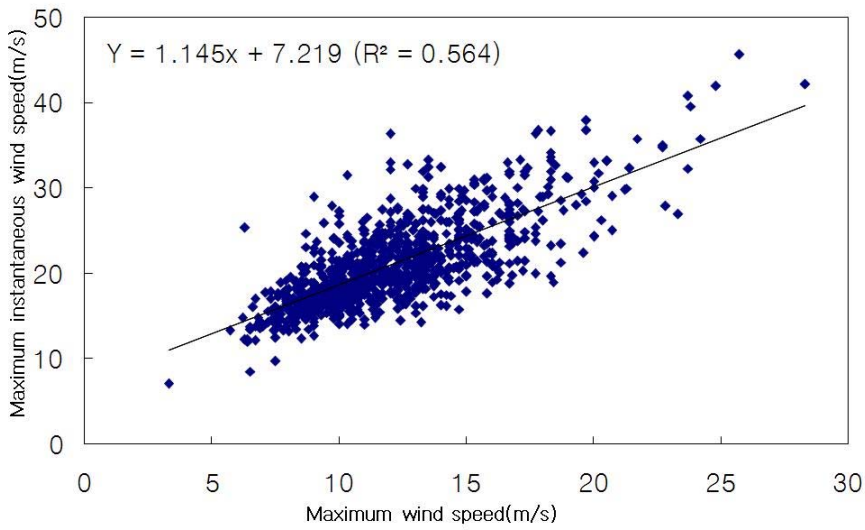
여기서, V_{\max} 는 최대순간풍속(m/s), V 는 최대풍속(m/s) 이다.

일반적으로 사용하고 있는 최대순간풍속 보정식인 식 (26)과 유사한 경향을 보이고 있으며, 지역적 특성을 고려하여 내륙지역과 해안지역으로 구분하여 최대순간풍속과 최대풍속과의 관계를 분석한 결과는 그림 87과 같으며, 유도된 관계식은 식 (31) 및 (32)와 같다.

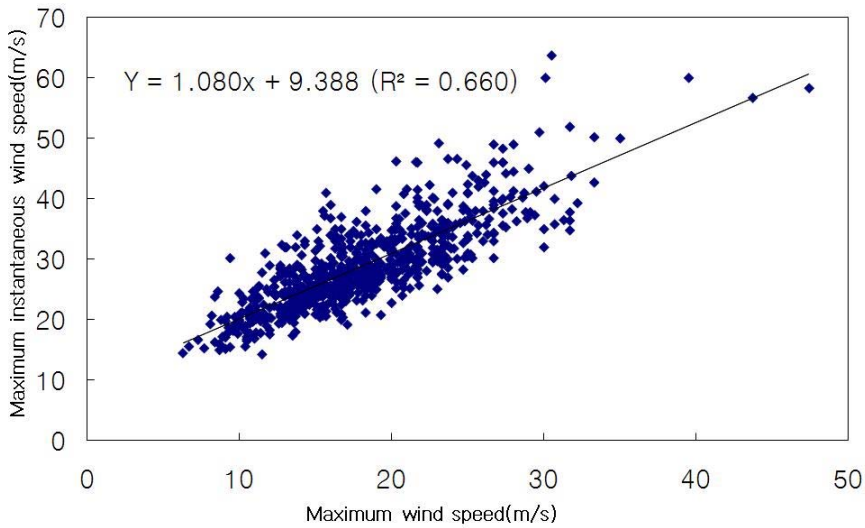
$$\text{내륙} \quad V_{\max} = 1.14V + 7.219 \quad (R^2 = 0.564) \quad (31)$$

$$\text{해안} \quad V_{\max} = 1.08V + 9.388 \quad (R^2 = 0.660) \quad (32)$$

내륙지역의 관계식은 전체 관계식과 유사하게 나타났으나, 해안지역의 관계식은 식 (30)에 비해 감소하는 것으로 나타났다.



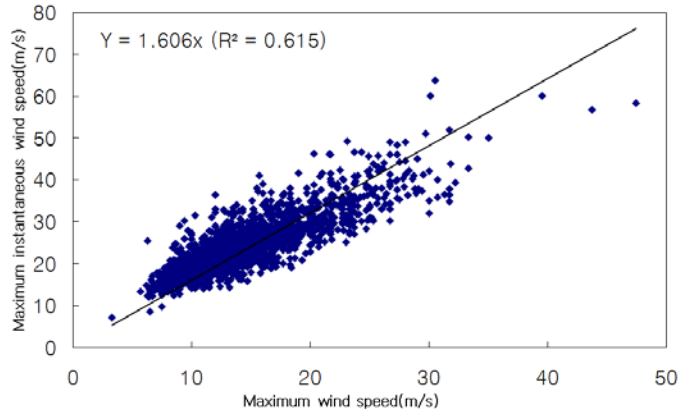
(a) 내륙지역



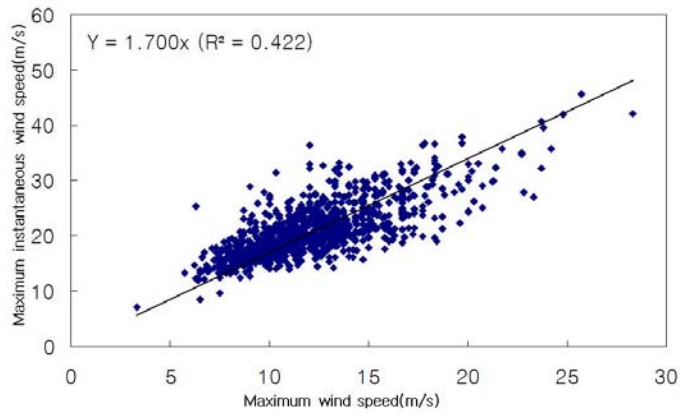
(b) 해안지역

그림 87. 지역별 최대순간풍속과 최대풍속 관계

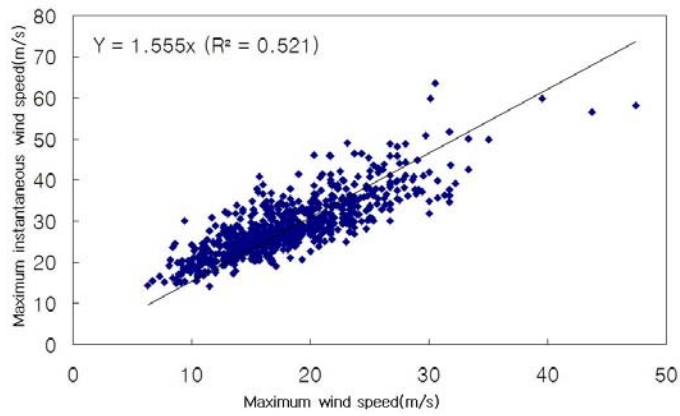
그림 87은 최대순간풍속과 순간풍속의 관계를 유도하는 가스트계수를 추정한 것으로 거스트 계수를 이용한 최대순간풍속 추정식의 G는 전체가 1.606($R^2=0.615$), 내륙이 1.70($R^2=0.422$), 해안이 1.555($R^2=0.521$)으로 건축법규에서의 1.75, 1.50와 유사한 경향을 나타냈으나 결정계수가 본 연구에서 추정된 식의 결정계수보다 낮게 나타났다.



(a) 전지역



(b) 내륙지역



(b) 해안지역

그림 88. 지역별 가스트 계수 추정식

라. 재현기간별 설계풍속 및 적설심

재현기간에 따른 확률 최대풍속 및 최대적설심은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$X_T = \mu + K_T \cdot \sigma \quad (33)$$

여기서, X_T 는 재현기간 T 년에서의 확률 최대풍속 또는 확률 최대적설심이고, μ 와 σ 는 년 최대값의 관측자료의 평균 및 표준편차, K_T 는 관측자료의 표본크기와 재현기간에 따른 빈도계수이다.

식 (33)에 의해 지역별 재현기간에 따른 설계풍속, 설계신적설심 및 설계적설심을 구한 결과는 표 61, 표 63 및 표 65과 같으며, 재현기간별 설계하중을 산정할 수 있는 계수는 표 62, 표 64, 및 표 66과 같다. 그리고, 재현기간과 설계하중과의 관계는 그림 89, 그림 96 및 103과 같으며 관측지역의 위도, 경도를 TM 좌표로 변환하여 지도로 작성하고, Surfer의 내사법에 의해 재현기간별로 등풍속선도, 등신적설심선도 및 등구적설심선도를 작성하여 그림 90~그림 95, 그림 97~그림 102, 그림 104~그림 109에 도시하였다.

현재 국내 생물생산시설중 단동비닐하우스의 설계기준인 재현기간 8년의 설계풍속을 살펴보면 내륙지역 보다는 해안지역이 전반적으로 높은 분포의 풍속을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 강원도 해안지역의 풍속분포가 크게 나타났다. 강원도 내륙지역은 12.7~40.2m/s, 해안지역은 34.0~36.7m/s의 풍속분포를 보이며, 경기·충청지역의 내륙지역은 15.2~41.2m/s, 해안지역은 19.1~30.6m/s의 풍속분포를 보였다. 또한 전라도 내륙지역은 18.1~30.3m/s, 해안지역은 19.0~36.0m/s의 풍속분포를, 경상도 내륙지역은 19.6~38.8m/s, 해안지역은 22.5~36.0m/s, 제주도는 24.5~50.0m/s의 풍속분포로 나타났다. 기존 연구결과와 비교하였을 경우에는 대부분의 지역에서 설계풍속이 증가한 것으로 분석되었다. 그리고, 년 최대신적설심을 이용한 설계적설심을 살펴보면 강원도 지역은 13.2~73.5cm, 경기·충청도 지역은 14.0~21.8cm, 전라도 지역은 6.1~20.6cm, 경상도 지역은 6.0~24.5cm, 울릉도 58.8cm, 제주도 지역은 3.7~12.0cm의 범위인 것으로 분석되었다. 이러한 값은 년 최대적설심을 이용한 설계적설심과 비교하여 보면 구적설심을 이용한 설계적설심은 강원도는 18~96%, 경기·충청도는 9~34%, 전라도는 7~71%, 경상도는 2~29%, 울릉도는 94%, 제주도는 14~47%범위에서 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 지역별 적설하중을 산정할 경우에는 온실의 난방유무와 제설정도, 지역특성을 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

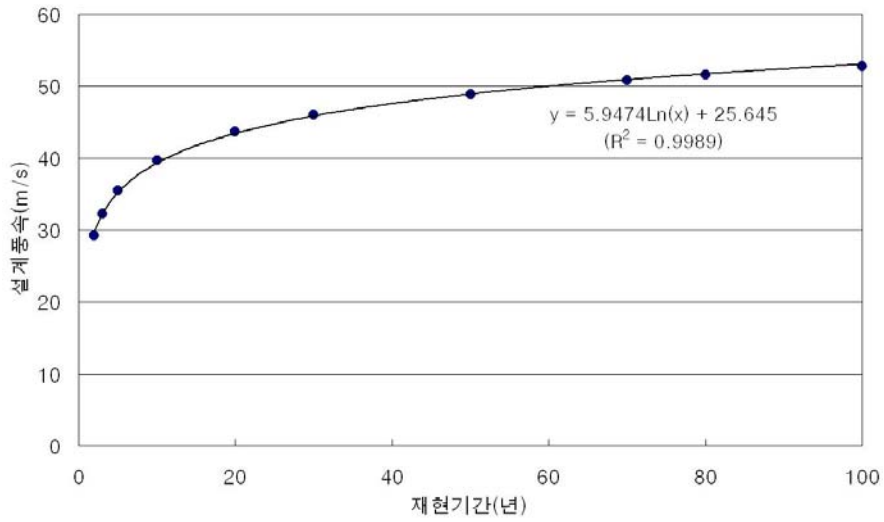
표 61. 지역별 재현기간에 따른 설계풍속(단위 : m/sec)

지 역	평균	재현기간(년)					
		8	15	22	30	43	57
속 초	30.4	38.0	41.8	44.0	45.9	48.0	49.7
철 원	20.7	25.5	27.8	29.2	30.4	31.7	32.8
대관령	33.3	38.1	40.5	41.9	43.0	44.4	45.4
춘천	21.3	26.7	29.3	30.9	32.2	33.7	34.9
강릉	30.3	37.0	40.2	42.2	43.8	45.6	47.1
서울	22.6	26.1	27.8	28.8	29.7	30.6	31.4
인천	27.8	33.4	36.1	37.8	39.2	40.7	42.0
원주	17.9	20.9	22.4	23.3	24.0	24.9	25.6
울릉도	38.9	46.5	50.3	52.5	54.4	56.5	58.2
수원	18.7	22.0	23.6	24.5	25.3	26.2	26.9
충주	20.0	22.9	24.3	25.2	25.9	26.8	27.4
서산	22.7	27.1	29.2	30.5	31.5	32.7	33.7
울진	30.7	37.7	41.1	43.2	44.9	46.8	48.4
청주	19.7	23.7	25.7	26.9	27.8	29.0	29.8
대전	21.3	25.6	27.7	29.0	30.1	31.3	32.3
추풍령	24.1	27.0	28.4	29.2	29.9	30.8	31.4
안동	19.4	22.5	24.0	24.9	25.7	26.6	27.2
포항	26.5	34.4	38.3	40.6	42.5	44.7	46.5
군산	27.4	31.6	33.6	34.8	35.8	37.0	37.9
대구	20.5	24.0	25.7	26.8	27.6	28.6	29.4
전주	20.6	23.9	25.5	26.5	27.3	28.3	29.0
울산	25.1	29.7	32.0	33.4	34.5	35.8	36.8
마산	23.0	28.4	31.1	32.7	34.0	35.6	36.7
광주	22.3	26.8	28.9	30.3	31.4	32.6	33.6
부산	27.2	31.7	33.9	35.3	36.4	37.7	38.7
통영	28.8	34.2	36.9	38.5	39.9	41.4	42.6
목포	30.7	37.7	41.0	43.1	44.8	46.7	48.2
여수	30.5	36.8	39.9	41.7	43.2	45.0	46.4
완도	25.5	32.1	35.4	37.4	39.0	40.9	42.4
제주	32.8	39.2	42.3	44.3	45.8	47.6	49.0
고산	37.8	46.5	50.9	53.5	55.6	58.1	60.0
서귀포	31.1	37.6	40.8	42.7	44.3	46.1	47.5
진주	22.5	27.5	29.9	31.4	32.6	34.0	35.1
강화	20.6	24.4	26.3	27.5	28.4	29.5	30.3

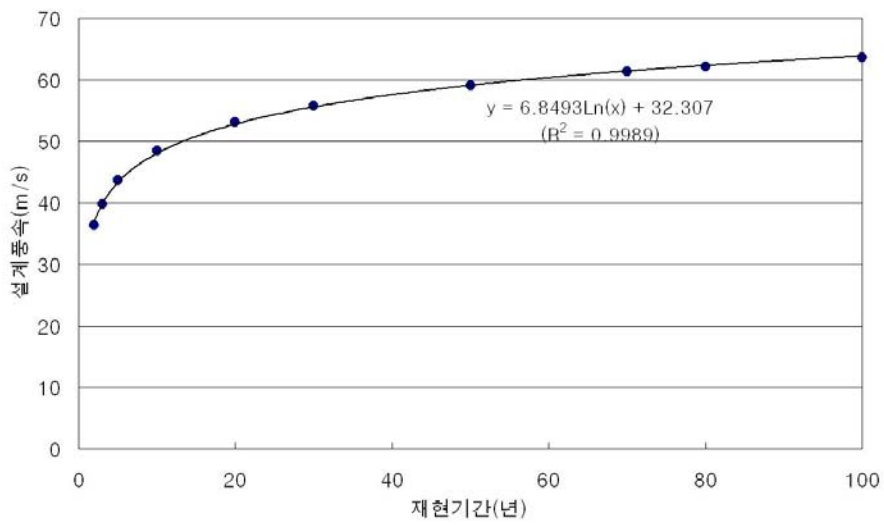
(계속)

지역	평균	재현기간(년)					
		8	15	22	30	43	57
양평	20.0	23.8	25.6	26.8	27.7	28.8	29.6
이천	17.7	20.0	21.1	21.8	22.3	23.0	23.5
인제	21.8	24.7	26.1	26.9	27.6	28.4	29.1
홍천	17.3	19.5	20.6	21.3	21.9	22.5	23.0
삼척	21.1	23.7	25.0	25.8	26.4	27.2	27.7
태백	21.1	24.2	25.7	26.6	27.4	28.2	28.9
제천	19.7	23.3	25.0	26.1	26.9	27.9	28.7
보은	19.4	22.3	23.8	24.6	25.3	26.2	26.8
천안	19.8	24.1	26.2	27.5	28.5	29.7	30.7
보령	22.8	28.4	31.1	32.8	34.1	35.7	36.9
부여	20.0	24.0	26.0	27.1	28.1	29.2	30.1
금산	19.4	22.4	23.9	24.8	25.5	26.4	27.0
부안	22.1	25.9	27.7	28.9	29.8	30.8	31.7
임실	19.1	22.3	23.8	24.8	25.5	26.4	27.1
정읍	17.6	21.4	23.3	24.4	25.3	26.4	27.2
남원	20.4	23.1	24.4	25.2	25.9	26.6	27.2
장수	20.4	23.0	24.3	25.0	25.6	26.4	26.9
순천	17.7	20.7	22.1	23.0	23.7	24.5	25.2
장흥	24.0	27.5	29.3	30.3	31.2	32.2	33.0
해남	25.6	29.8	31.8	33.0	34.0	35.2	36.1
고흥	22.6	26.4	28.3	29.4	30.3	31.4	32.2
성산포	27.3	32.9	35.6	37.3	38.7	40.2	41.5
봉화	18.4	21.2	22.6	23.4	24.1	24.9	25.5
영주	25.4	29.4	31.4	32.5	33.5	34.6	35.5
문경	21.3	25.5	27.5	28.7	29.7	30.9	31.8
영덕	26.1	30.6	32.8	34.1	35.2	36.5	37.5
의성	20.4	23.7	25.4	26.4	27.2	28.1	28.9
구미	23.0	28.2	30.8	32.4	33.7	35.2	36.3
영천	21.1	24.9	26.7	27.8	28.7	29.7	30.6
거창	20.7	23.7	25.2	26.1	26.9	27.8	28.4
합천	19.9	23.6	25.4	26.6	27.5	28.5	29.4
밀양	22.4	26.7	28.7	30.0	31.0	32.2	33.1
산청	22.0	25.2	26.7	27.6	28.4	29.3	29.9
거제	23.4	26.9	28.5	29.5	30.4	31.3	32.1
남해	22.8	27.6	29.9	31.4	32.5	33.9	34.9

지역별로 재현기간에 따른 설계풍속은 그림 89에서 보는 바와 같이 로그함수 관계를 가지고 있어 회귀분석을 통하여 상관관계식을 구하면 표 62와 같다. 지역별로 표 61에 나타나지 않은 재현기간에 따른 설계풍속은 표 62를 이용하여 구할 수 있다.



(a) 속초



(b) 제주고층(고산)

그림 89. 재현기간별 설계풍속 회귀식

표 62. 지역별 재현기간별 설계풍속 산정식 계수

지 역	a	b	지 역	a	b
속 초	5.947	25.645	양 평	2.968	17.609
철 원	3.724	17.737	이 천	1.798	16.231
대관령	3.704	30.427	인 제	2.247	19.989
춘 천	4.194	17.933	홍 천	1.769	15.847
강 룡	5.163	26.219	삼 척	2.045	19.480
서 울	2.728	20.381	태 백	2.379	19.272
인 천	4.362	24.320	제 천	2.752	17.562
원 주	2.364	15.995	보 은	2.266	17.633
울릉도	5.955	34.141	천 안	3.349	17.116
수 원	2.523	16.722	보 령	4.359	19.289
충 주	2.285	18.156	부 여	3.087	17.591
서 산	3.365	20.068	금 산	2.328	17.602
울 진	5.442	26.372	부 안	2.930	19.811
청 주	3.133	17.165	임 실	2.468	17.142
대 전	3.378	18.600	정 읍	2.952	15.256
추풍령	2.256	22.272	남 원	2.098	18.723
안 동	2.406	17.502	장 수	1.977	18.919
포 향	6.144	21.639	순 천	2.311	15.852
군 산	3.225	24.867	장 흥	2.769	21.771
대 구	2.714	18.391	해 남	3.225	23.067
진 주	2.594	18.523	고 흥	2.961	20.240
울 산	3.599	22.253	성산포	4.362	23.820
마 산	4.227	19.658	봉 화	2.197	16.635
광 주	3.466	19.562	영 주	3.087	22.991
부 산	3.541	24.342	문 경	3.219	18.764
통 영	4.249	25.403	영 덕	3.491	23.339
목 포	5.368	26.500	의 성	2.621	18.275
여 수	4.867	26.693	구 미	4.125	19.655
완 도	5.208	21.298	영 천	2.899	18.831
제 주	5.001	28.803	거 창	2.394	18.748
고 산	6.849	32.307	합 천	2.930	17.511
서귀포	5.055	27.105	밀 양	3.287	19.825
진 주	3.854	19.489	산 청	2.438	20.089
강 화	2.990	18.224	거 제	2.660	21.320
			남 해	3.730	19.840

주) $Y = a \ln(X) + b$

여기서, Y : 재현기간별 설계풍속(m/s), X : 재현기간(년)

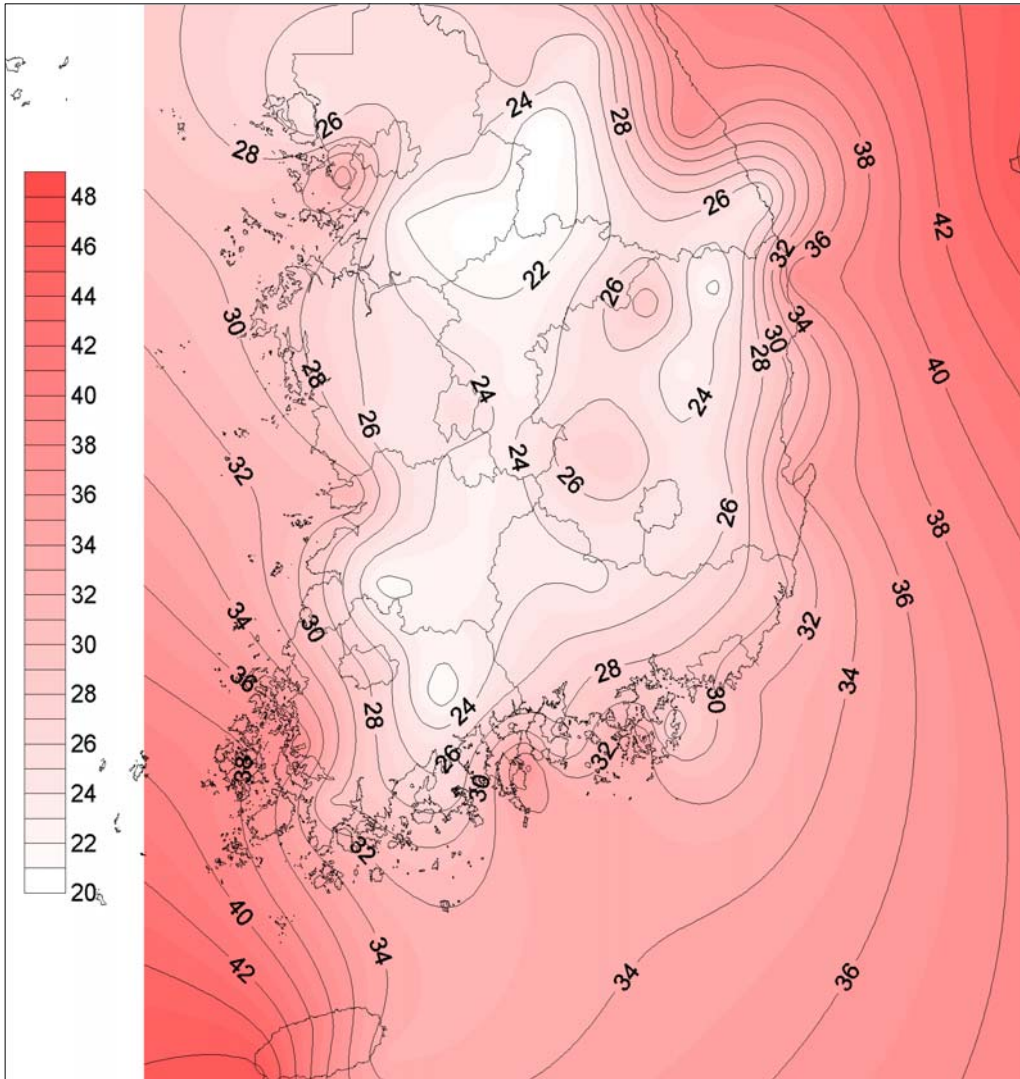


그림 90. 등풍속선도(재현기간 8년)

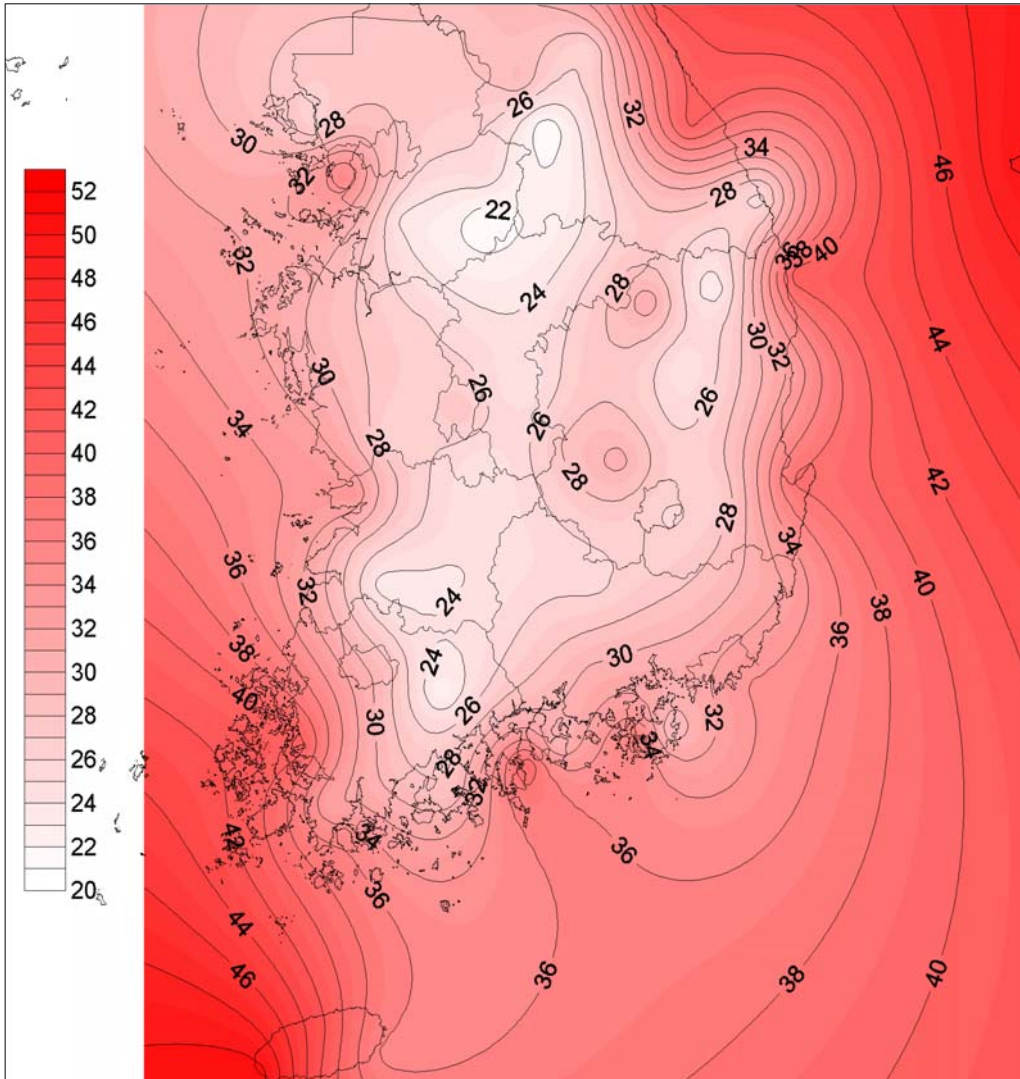


그림 91. 등풍속선도(재현기간 15년)

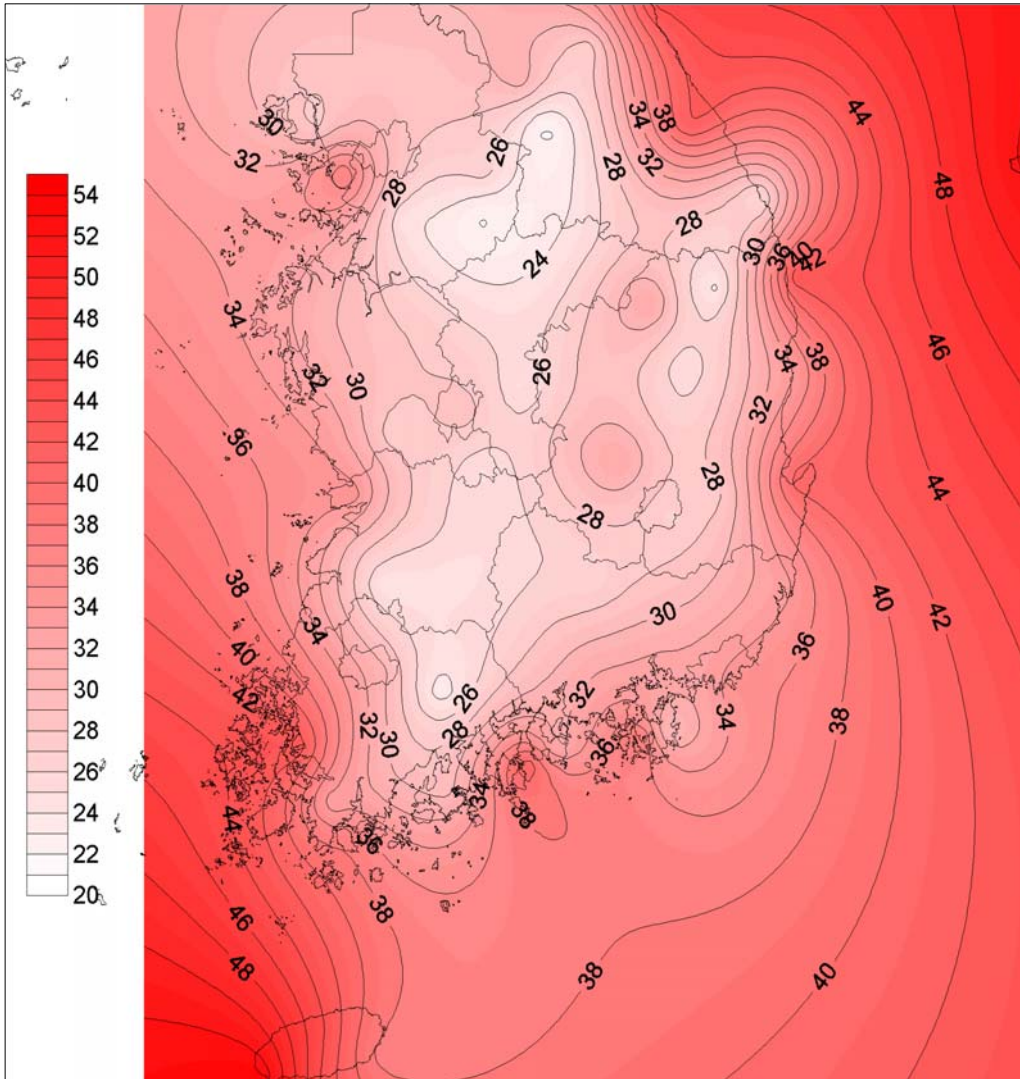


그림 92. 등풍속선도(재현기간 22년)

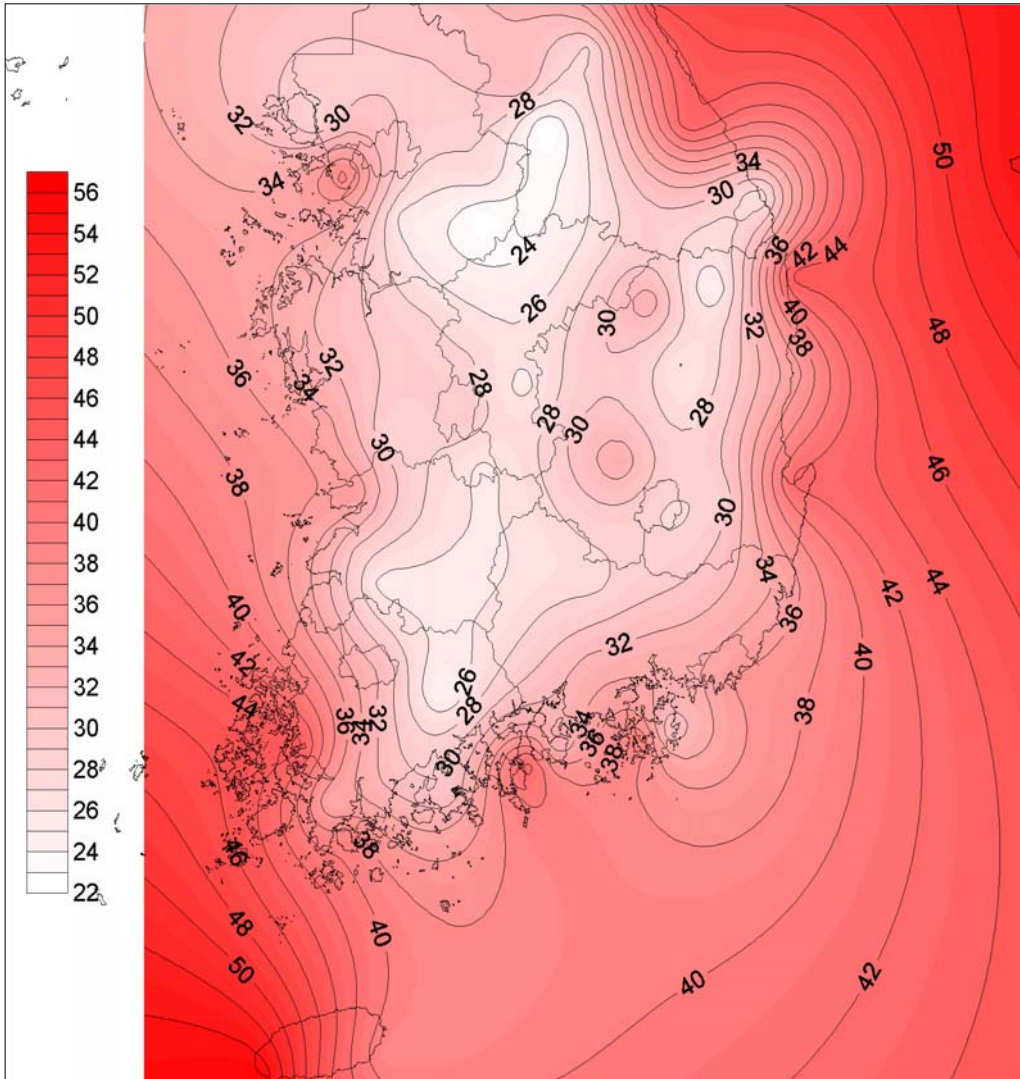


그림 93. 등풍속선도(재현기간 30년)

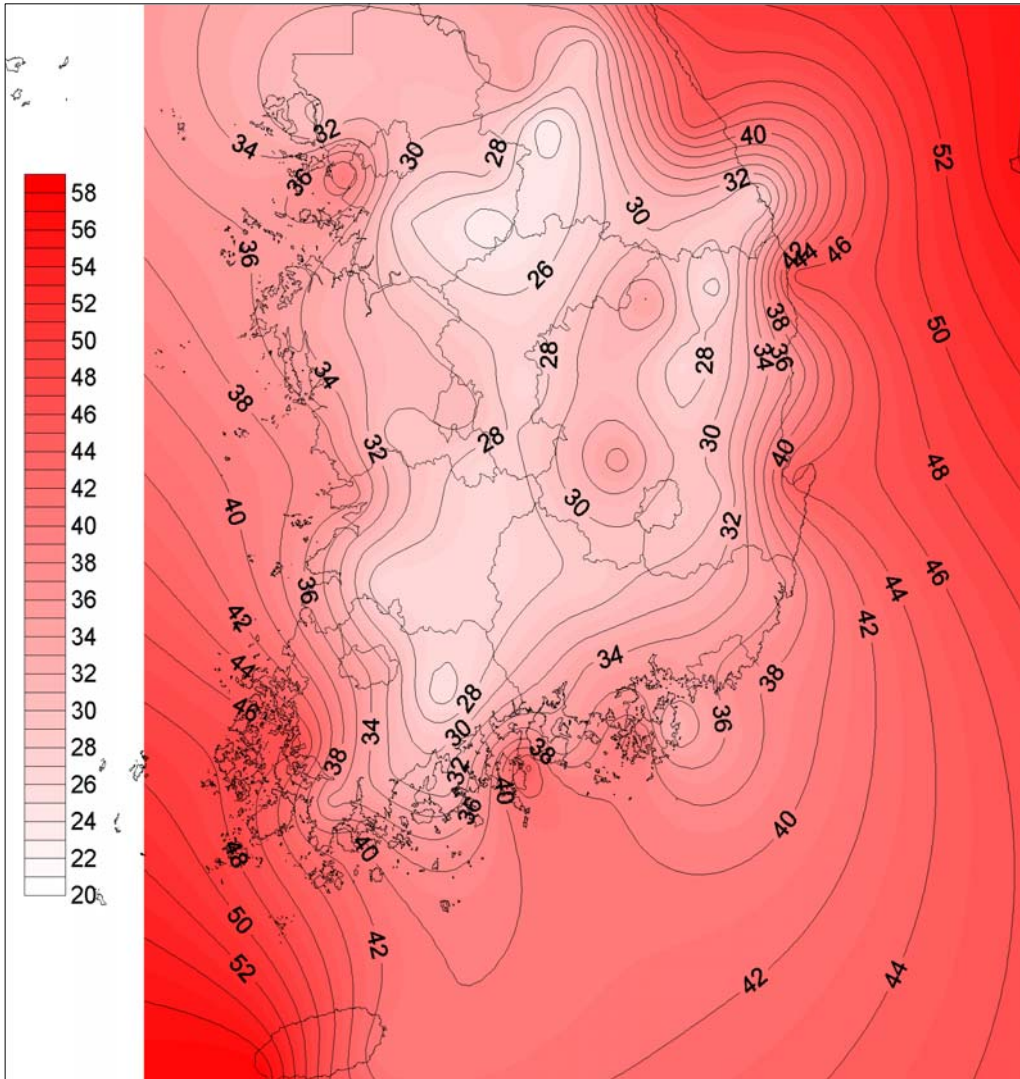


그림 94. 등풍속선도(재현기간 43년)

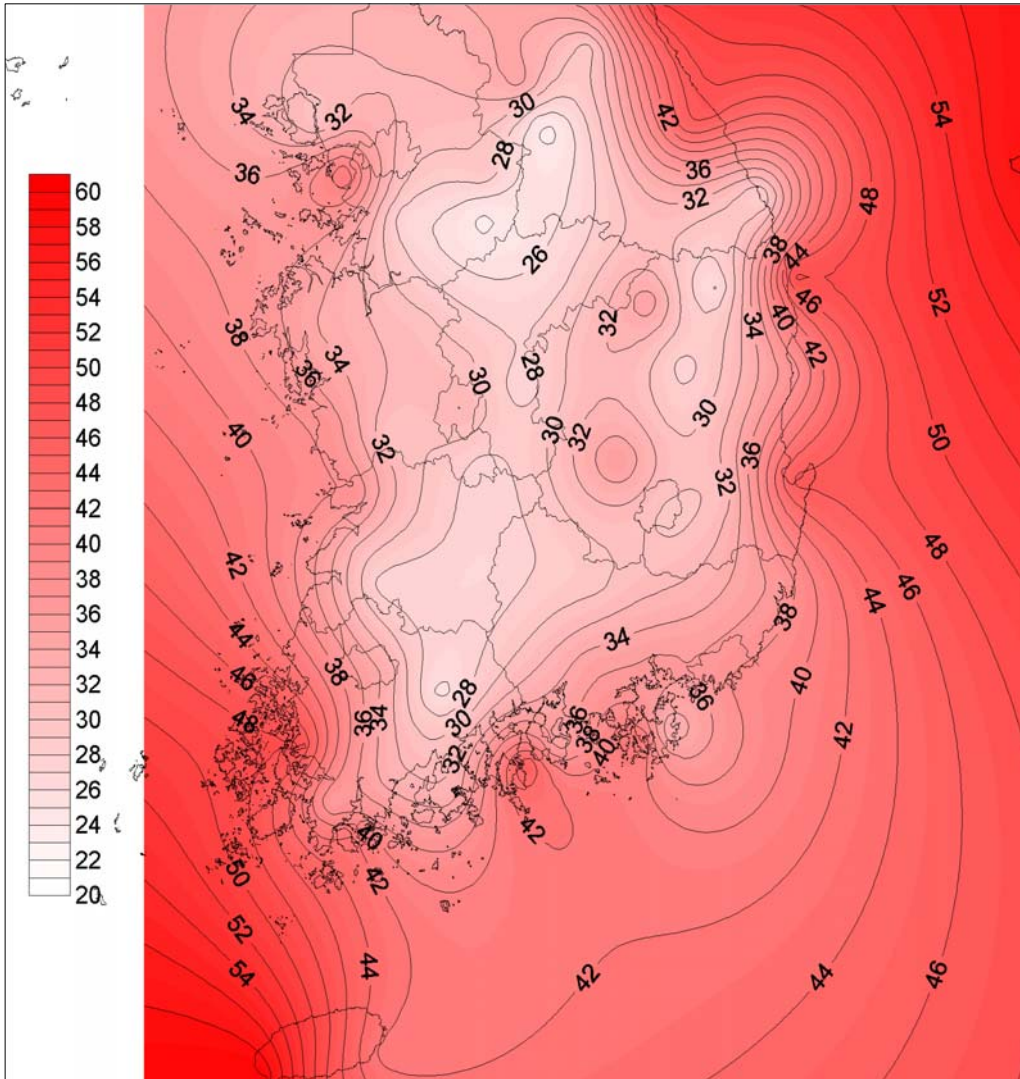


그림 95. 등풍속선도(재현기간 57년)

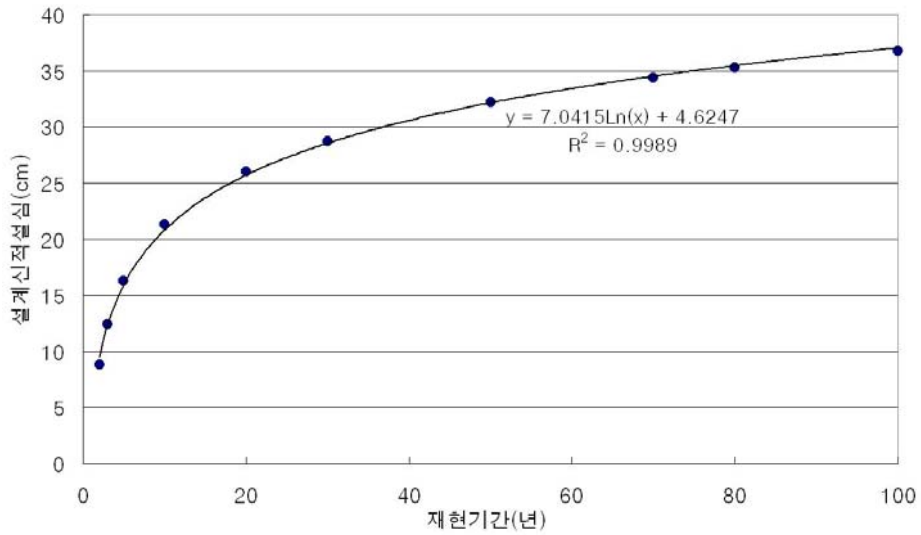
표 63. 지역별 재현기간에 따른 설계적설심(신적설)

지역	평균	설계적설심(cm)					
		재현기간(년)					
		8	15	22	30	43	57
속초	25.5	64.3	78.7	87.4	94.5	102.8	109.2
철원	8.3	12.3	14.2	15.4	16.4	17.5	18.4
대관령	44.3	68.2	79.9	87.0	92.8	99.5	104.8
춘천	11.6	17.9	20.9	22.8	24.3	26.1	27.5
강릉	27.3	43.9	52.0	56.9	60.9	65.6	69.2
서울	9.0	14.2	16.7	18.3	19.5	21.0	22.1
인천	8.6	13.9	16.6	18.1	19.4	20.9	22.1
원주	10.1	15.5	18.2	19.8	21.1	22.7	23.8
울릉도	41.3	68.8	82.3	90.5	97.1	104.9	110.9
수원	8.9	13.6	16.0	17.4	18.5	19.8	20.9
충주	9.5	14.9	17.5	19.2	20.5	22.0	23.2
서산	10.6	16.3	19.0	20.7	22.1	23.7	24.9
울진	11.5	19.4	23.3	25.6	27.5	29.7	31.5
청주	11	18.6	22.3	24.5	26.3	28.4	30.1
대전	10.2	19.3	23.7	26.4	28.6	31.1	33.1
추풍령	11.4	18.2	21.5	23.5	25.1	27.0	28.5
안동	7.9	14.0	17.0	18.9	20.3	22.1	23.4
포항	4.1	9.3	11.8	13.3	14.6	16.0	17.1
군산	11.4	17.1	19.9	21.6	23.0	24.6	25.9
대구	6.7	14.6	18.5	20.8	22.8	25.0	26.7
전주	9.7	15.0	17.5	19.1	20.4	21.9	23.0
울산	2.3	5.2	6.7	7.5	8.2	9.1	9.7
마산	4.1	9.9	12.8	14.5	15.9	17.5	18.8
광주	10.4	15.1	17.4	18.8	20.0	21.3	22.3
부산	2.8	8.2	10.8	12.4	13.7	15.2	16.4
통영	2.6	6.6	8.6	9.8	10.7	11.9	12.7
목포	10.7	20.3	25.0	27.9	30.2	32.9	35.0
여수	2.9	6.6	8.4	9.5	10.4	11.4	12.2
완도	3.6	5.8	6.9	7.6	8.2	8.8	9.3
제주	4.1	7.1	8.5	9.4	10.2	11.0	11.7
고산	1.1	2.7	3.4	3.9	4.2	4.7	5.0
서귀포	3.7	6.7	8.1	9.0	9.7	10.6	11.2
진주	5	10.5	13.3	14.9	16.2	17.8	19.0

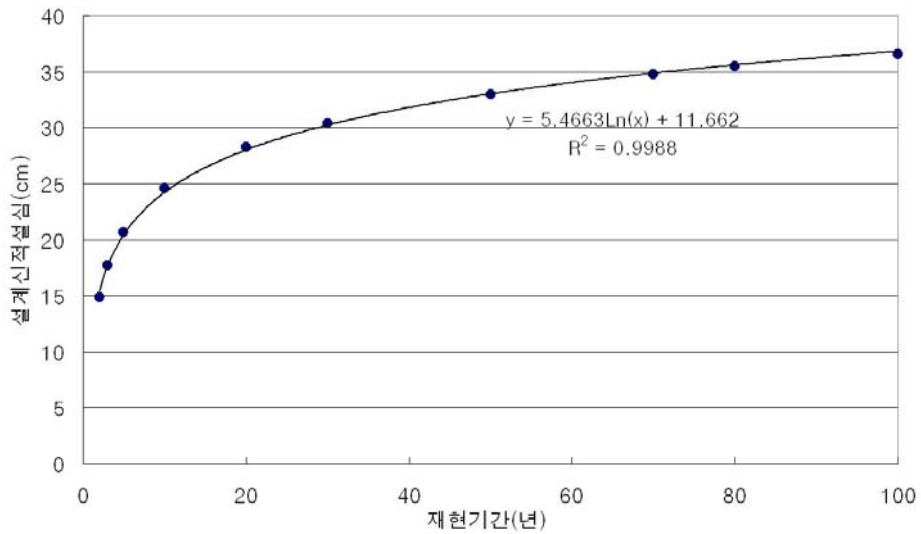
(계속)

지역	평균	설계적설심(cm)					
		재현기간(년)					
		8	15	22	30	43	57
강화	8.5	14.1	16.8	18.5	19.8	21.4	22.6
양평	9.7	15.2	18.0	19.6	21.0	22.6	23.8
이천	10.2	16.4	19.5	21.4	22.9	24.7	26.0
인제	10.4	14.8	17.0	18.4	19.4	20.7	21.7
홍천	10.8	16.4	19.2	20.8	22.2	23.8	25.0
태백	25.5	44.1	53.1	58.6	63.1	68.3	72.4
제천	10.8	15.5	17.9	19.3	20.5	21.8	22.9
보은	11.4	19.0	22.7	25.0	26.8	28.9	30.6
천안	10	15.7	18.4	20.1	21.5	23.1	24.4
보령	9.1	13.0	14.9	16.0	17.0	18.0	18.9
부여	11.2	17.0	19.8	21.5	22.9	24.5	25.8
금산	10.1	15.6	18.3	19.9	21.2	22.8	24.0
부안	14.1	19.3	21.8	23.4	24.6	26.1	27.2
임실	15.6	21.3	24.1	25.8	27.2	28.8	30.0
정읍	16	23.0	26.5	28.6	30.3	32.2	33.8
남원	11.6	17.2	20.0	21.7	23.1	24.7	25.9
장수	13.9	19.3	22.0	23.6	24.9	26.4	27.6
순천	7.3	11.3	13.3	14.5	15.4	16.6	17.4
장흥	5.6	9.2	11.0	12.0	12.9	13.9	14.7
해남	5.8	8.4	9.7	10.5	11.1	11.8	12.4
고흥	3.3	7.6	9.8	11.1	12.1	13.4	14.3
성산포	6.1	10.7	12.9	14.2	15.3	16.6	17.6
봉화	10.1	16.4	19.4	21.3	22.8	24.6	25.9
영주	10.4	18.4	22.4	24.8	26.7	29.0	30.7
문경	11.3	21.7	26.8	29.9	32.4	35.4	37.7
영덕	7.5	19.2	25.0	28.5	31.3	34.6	37.2
의성	7.2	12.9	15.6	17.3	18.7	20.3	21.5
구미	7.6	14.0	17.1	19.0	20.6	22.4	23.8
영천	6.3	11.4	13.9	15.4	16.6	18.1	19.2
거창	10.4	16.5	19.5	21.3	22.8	24.5	25.8
합천	6.4	11.9	14.5	16.2	17.5	19.0	20.2
밀양	4.1	8.0	9.9	11.1	12.0	13.1	14.0
산청	8.6	14.1	16.8	18.5	19.8	21.3	22.6
거제	3.2	7.7	9.9	11.2	12.3	13.6	14.5
남해	4.7	11.1	14.2	16.1	17.7	19.5	20.9

지역별로 재현기간에 따른 설계(신)적설심은 그림 96에서 보는 바와 같이 로그함수 관계를 가지고 있어 회귀분석을 통하여 상관관계식을 구하면 표 64와 같다. 지역별로 표 63에 나타나지 않은 재현기간에 따른 설계(신)적설심은 표 64를 이용하여 구할 수 있다.



(a) 대전



(b) 정읍

그림 96. 재현기간별 설계적설심 회귀식

표 64. 지역별 재현기간별 설계(신)적설심 산정식 계수

지 역	a	b	지 역	a	b
속 초	22.897	16.661	양 평	4.346	6.208
철 원	3.082	5.897	이 천	4.887	6.286
대관령	18.624	29.479	인 제	3.480	7.603
춘 천	4.884	7.706	홍 천	4.376	7.310
강 릉	12.913	17.011	태 백	14.423	14.066
서 울	4.042	5.778	제 천	3.728	7.796
인 천	4.149	5.314	보 은	5.918	6.692
원 주	4.227	6.758	천 안	4.431	6.441
울릉도	21.422	24.283	보 령	3.020	6.686
수 원	3.684	5.986	부 여	4.483	7.647
충 주	4.233	6.069	금 산	4.266	6.733
서 산	4.387	7.159	부 안	4.042	10.869
울 진	6.144	6.639	임 실	4.409	12.175
청 주	5.868	6.366	정 읍	5.466	11.662
대 진	7.042	4.625	남 원	4.409	8.075
추풍령	5.283	7.167	장 수	4.211	10.562
안 동	4.788	4.055	순 천	3.121	4.811
포 향	4.002	0.955	장 흥	2.784	3.426
군 산	4.468	7.812	해 남	2.021	4.238
대 구	6.191	1.713	고 흥	3.408	0.553
진 주	4.106	6.431	성산포	3.528	3.321
울 산	2.266	0.533	봉 화	4.864	6.262
마 산	4.522	0.514	영 주	6.256	5.433
광 주	3.644	7.563	문 경	8.137	4.770
부 산	4.179	-0.502	영 덕	9.146	0.230
통 영	3.117	0.144	의 성	4.399	3.714
목 표	7.474	4.770	구 미	4.980	3.633
여 수	2.873	0.627	영 천	3.972	3.122
완 도	1.765	2.167	거 창	4.759	6.571
제 주	2.340	2.205	합 천	4.233	3.069
고 산	1.189	0.202	밀 양	3.025	1.743
서귀포	2.314	1.873	산 청	4.296	5.186
진 주	4.310	1.585	거 제	3.504	0.371
강 화	4.343	5.077	남 해	4.988	0.720

주) $Y = a \ln(X) + b$

여기서, Y : 재현기간별 설계(신)적설심(cm), X : 재현기간(년)

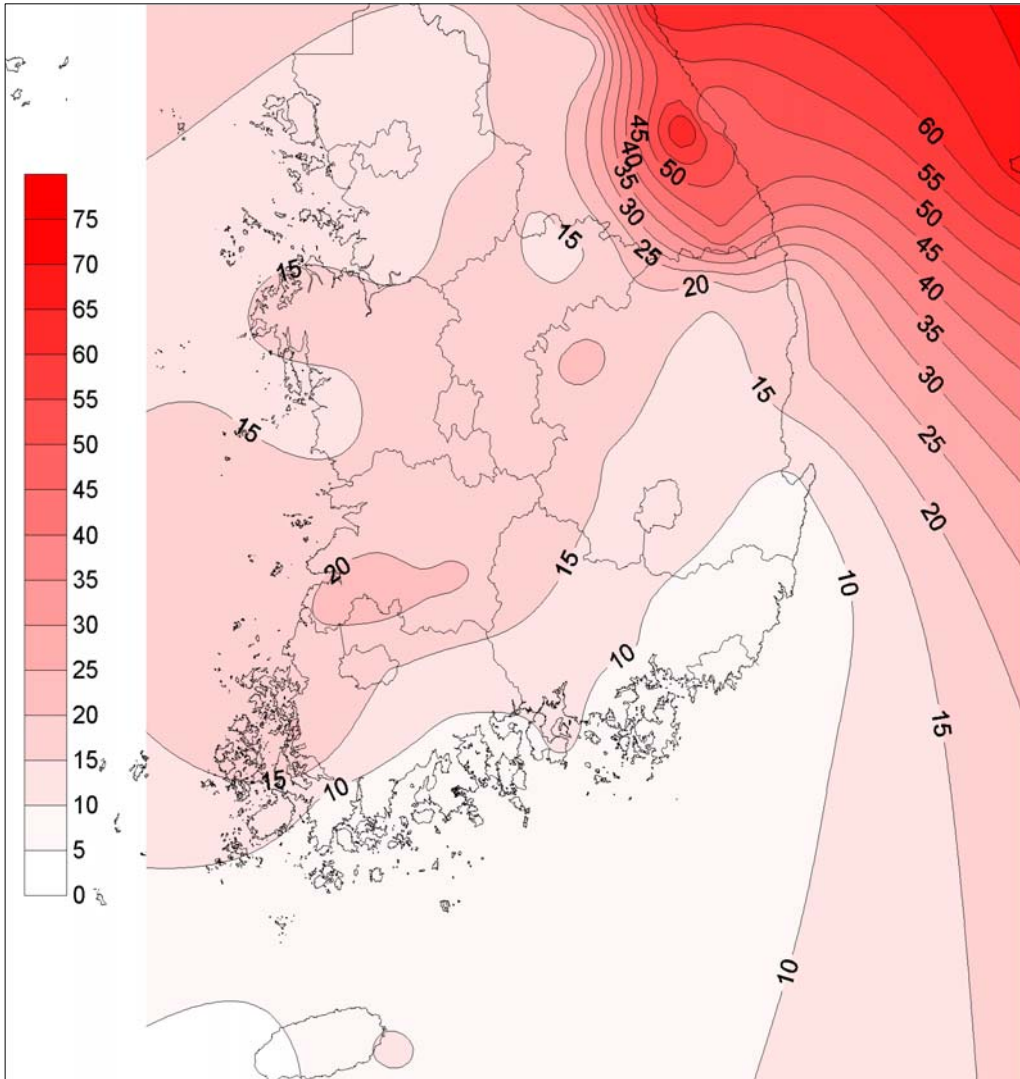


그림 97. 등신적설심선도(재현기간 8년)

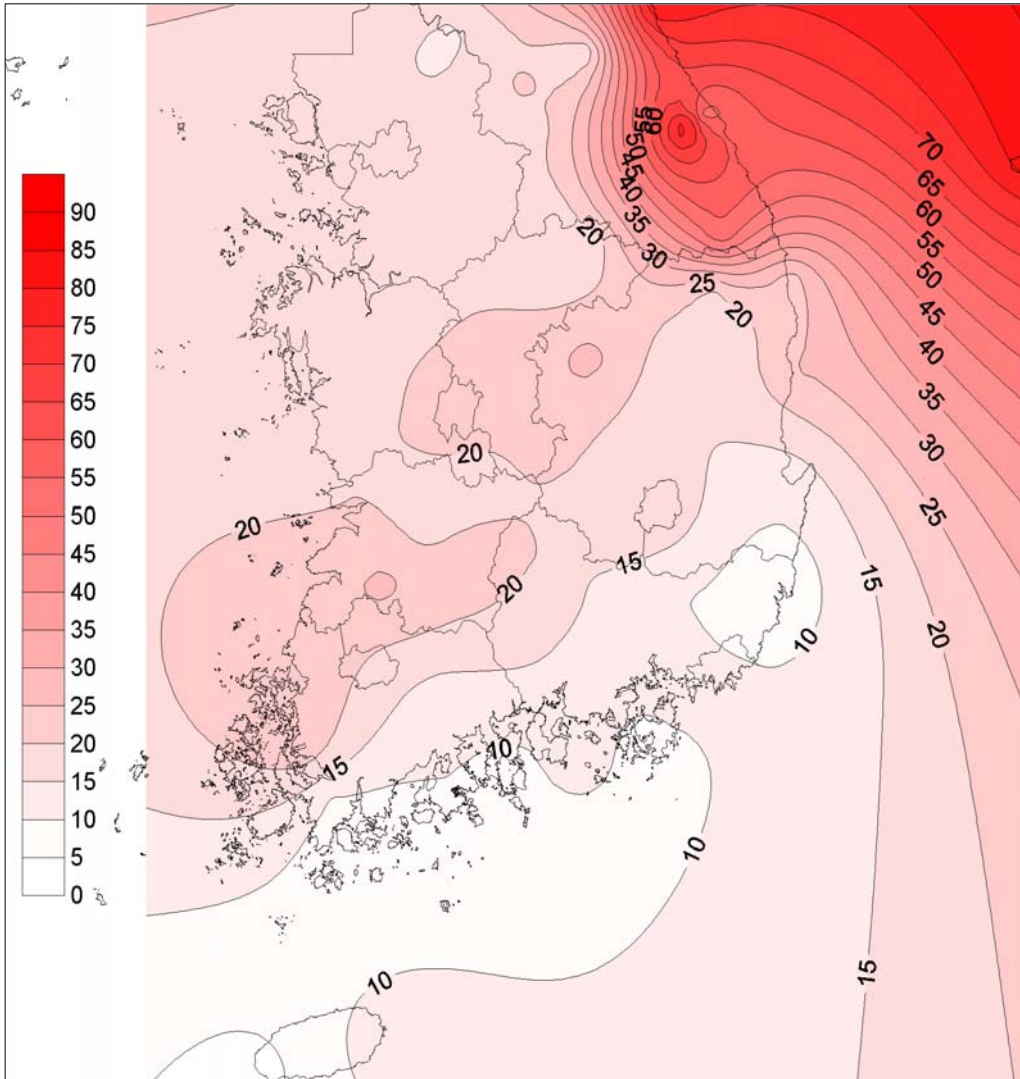


그림 98. 등신적설일수선도(재현기간 15년)

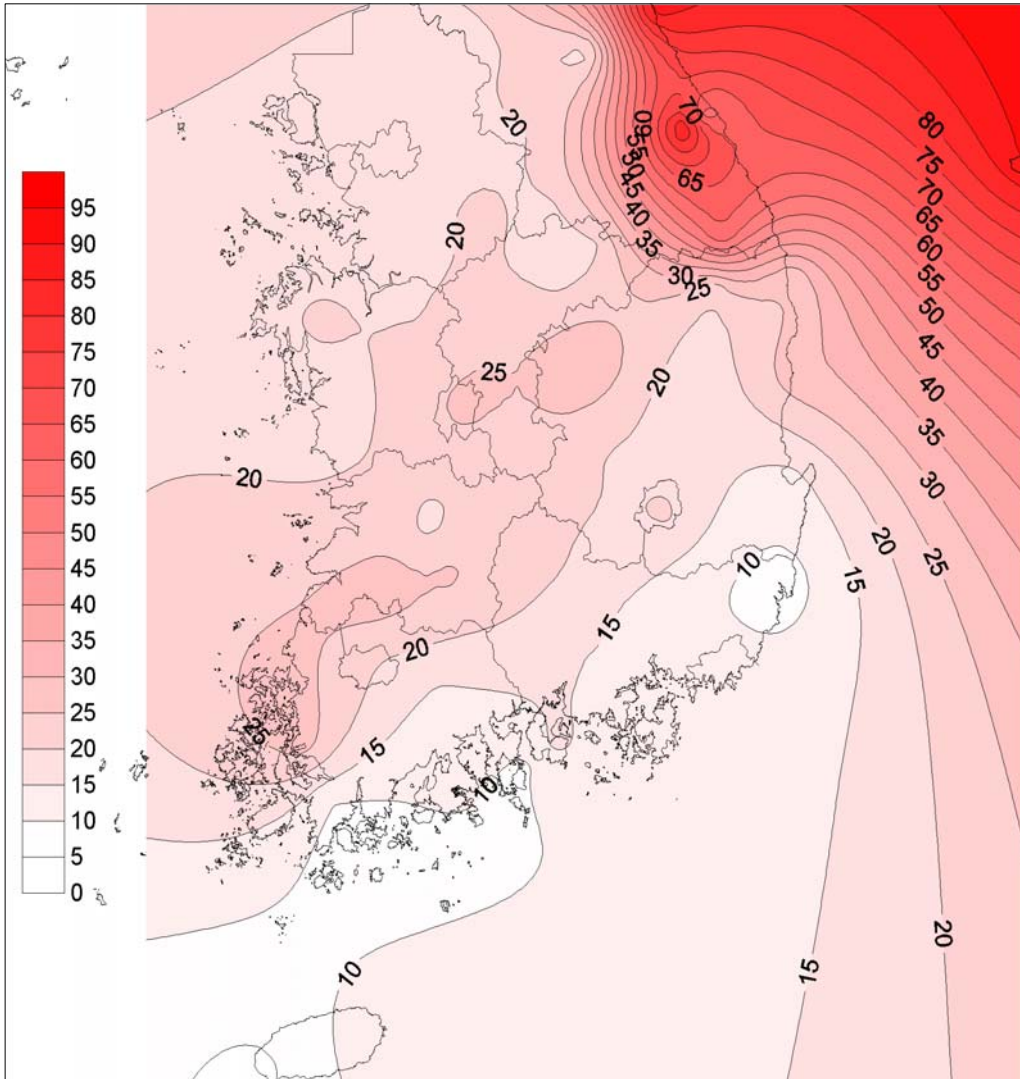


그림 99. 등신적설심선도(재현기간 22년)

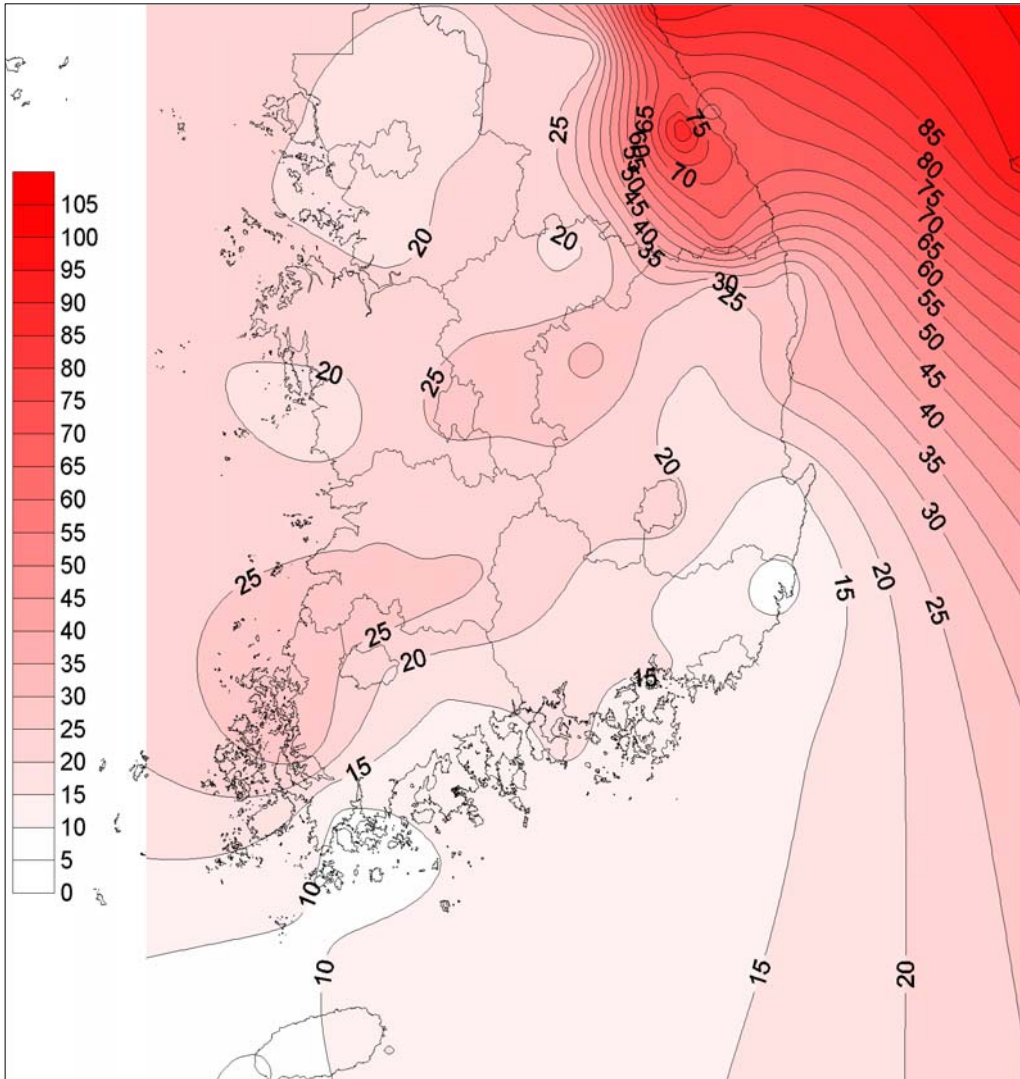


그림 100. 등신적설심선도(재현기간 30년)

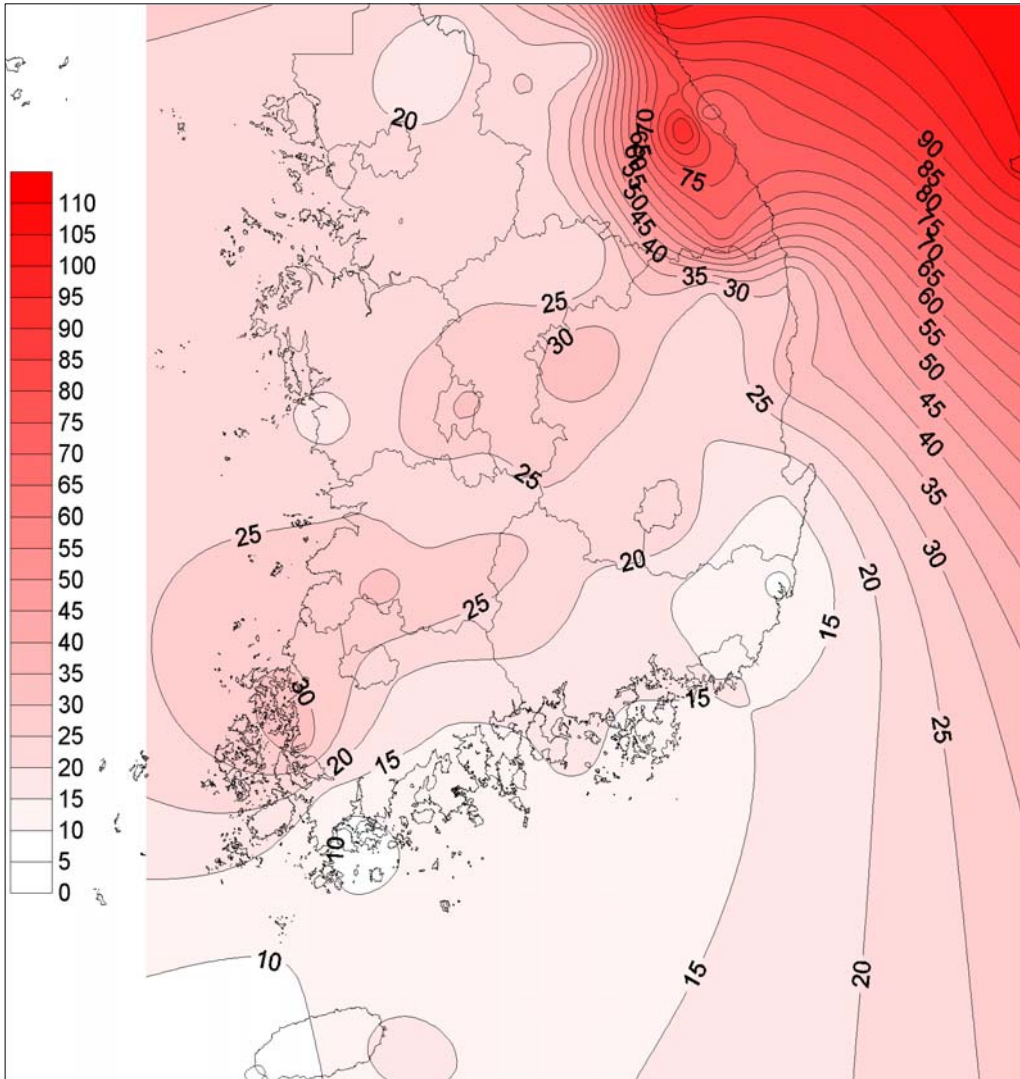


그림 101. 등산적설심선도(재현기간 43년)

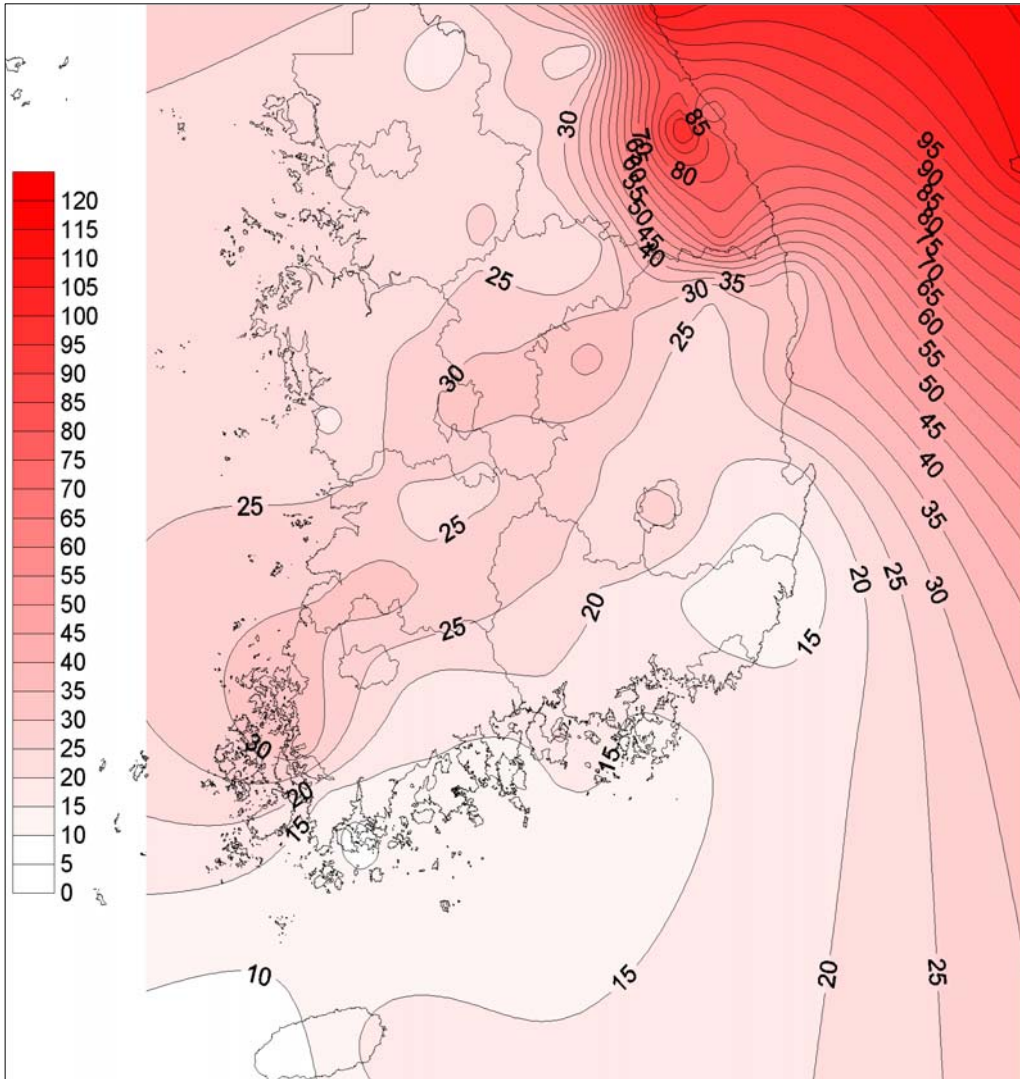


그림 102. 등신적설심선도(재현기간 57년)

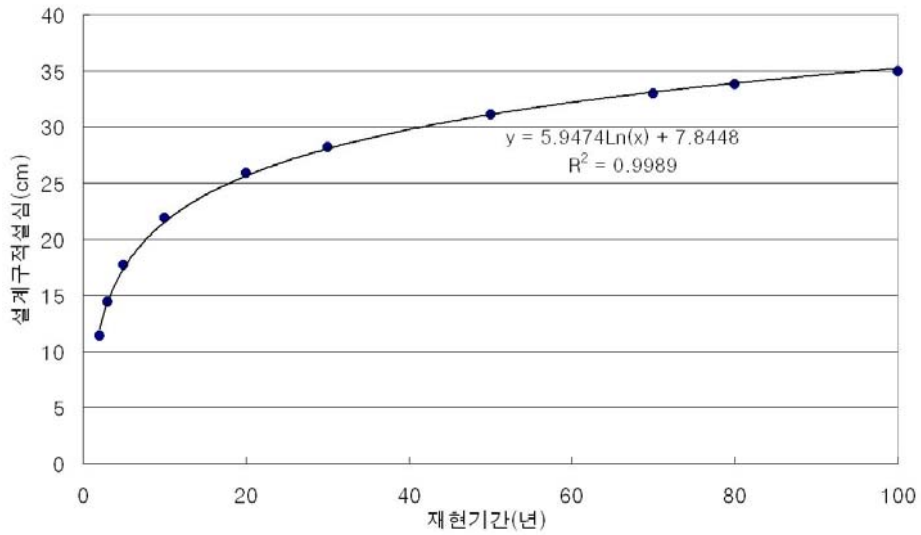
표 65. 지역별 재현기간에 따른 설계적설심(구적설심)

지역	평균	설계(구)적설심(cm)					
		재현기간(년)					
		8	15	22	30	43	57
속초	34.8	64.3	78.7	87.4	94.5	102.8	109.2
철원	10.2	15.7	18.3	19.9	21.3	22.8	24.0
대관령	81.6	132.3	157.0	172.1	184.4	198.6	209.7
춘천	13.8	22.0	26.0	28.5	30.5	32.8	34.6
강릉	36.0	62.6	75.7	83.6	90.0	97.5	103.3
서울	10.3	16.5	19.5	21.3	22.8	24.5	25.9
인천	9.8	16.3	19.5	21.5	23.0	24.9	26.3
원주	11.8	19.1	22.8	25.0	26.7	28.8	30.4
울릉도	83.6	148.2	179.8	199.1	214.7	232.8	247.0
수원	10.2	16.4	19.4	21.2	22.7	24.4	25.8
충주	11.0	18.3	21.9	24.1	25.9	28.0	29.6
서산	13.3	20.7	24.3	26.5	28.3	30.3	31.9
청주	14.0	24.1	29.0	32.0	34.5	37.3	39.5
대전	11.1	20.4	25.0	27.8	30.0	32.6	34.7
추풍령	13.9	22.7	27.0	29.6	31.7	34.2	36.1
안동	8.9	15.6	18.9	21.0	22.6	24.5	25.9
포항	4.6	10.5	13.4	15.1	16.5	18.2	19.5
군산	15.6	24.0	28.1	30.6	32.6	35.0	36.8
대구	7.3	16.1	20.4	23.1	25.2	27.7	29.6
전주	11.2	17.3	20.3	22.1	23.6	25.3	26.6
울산	2.7	6.5	8.3	9.4	10.3	11.4	12.2
마산	4.2	10.0	12.9	14.6	16.0	17.6	18.9
광주	13.8	20.7	24.0	26.0	27.7	29.6	31.1
부산	3.0	9.4	12.6	14.5	16.0	17.8	19.3
통영	2.8	7.0	9.0	10.3	11.3	12.5	13.4
목포	13.8	24.5	29.7	32.9	35.5	38.5	40.8
여수	3.2	7.6	9.8	11.1	12.1	13.4	14.3
완도	4.7	8.4	10.3	11.4	12.3	13.4	14.2
제주	5.7	10.8	13.3	14.8	16.0	17.4	18.5
고산	1.2	2.7	3.5	4.0	4.4	4.8	5.2
서귀포	5.0	11.0	13.9	15.7	17.1	18.8	20.1
진주	5.6	11.6	14.6	16.3	17.8	19.5	20.8
강화	9.9	15.7	18.6	20.3	21.7	23.4	24.7

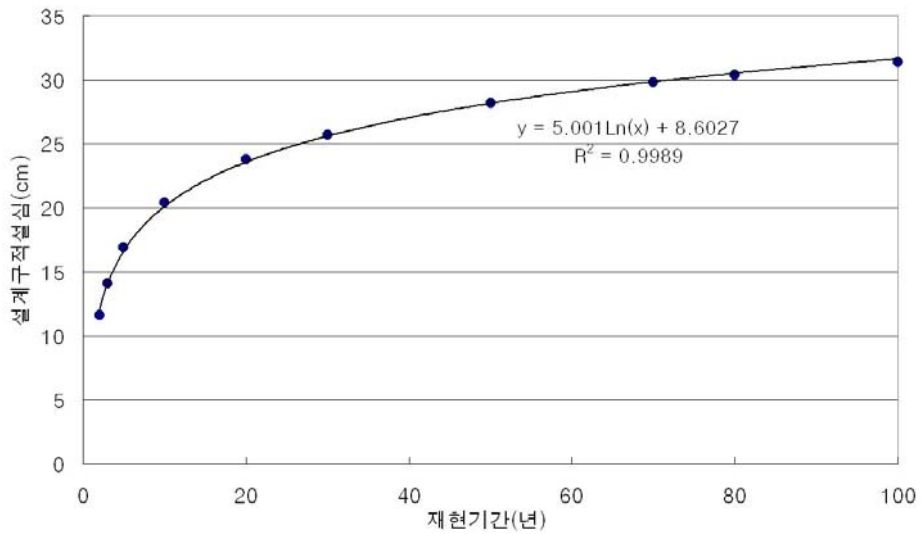
(계속)

지 역	평균	최심구적설심					
		재현기간(년)					
		8	15	22	30	43	57
양 평	10.6	16.7	19.7	21.5	23.0	24.7	26.0
이 천	11.3	18.9	22.6	24.8	26.6	28.8	30.4
인 제	13.0	21.0	24.9	27.3	29.2	31.4	33.2
홍 천	12.6	20.2	24.0	26.2	28.1	30.2	31.9
태 백	34.0	57.6	69.1	76.1	81.8	88.4	93.6
제 천	12.5	19.1	22.4	24.4	26.0	27.8	29.3
보 은	13.4	22.2	26.4	29.0	31.1	33.6	35.5
천 안	11.7	17.7	20.6	22.4	23.8	25.5	26.8
보 령	11.6	17.2	20.0	21.7	23.1	24.6	25.9
부 여	12.6	19.0	22.1	24.1	25.6	27.4	28.8
금 산	11.7	18.1	21.3	23.2	24.7	26.5	27.9
부 안	20.5	32.0	37.6	41.0	43.8	47.0	49.5
임 실	21.0	30.2	34.7	37.5	39.7	42.3	44.3
정 읍	22.7	35.8	42.2	46.1	49.3	53.0	55.9
남 원	14.5	21.5	24.9	27.0	28.6	30.6	32.1
장 수	19.6	27.9	31.9	34.3	36.3	38.6	40.4
순 천	8.6	12.9	15.0	16.3	17.3	18.5	19.5
장 홍	7.4	14.4	17.9	19.9	21.6	23.6	25.1
해 남	8.3	14.5	17.6	19.4	20.9	22.7	24.0
고 홍	3.7	8.3	10.5	11.9	13.0	14.3	15.3
성산포	8.0	14.5	17.7	19.6	21.2	23.0	24.4
봉 화	10.6	16.7	19.7	21.5	23.0	24.7	26.0
영 주	11.0	19.1	23.1	25.5	27.4	29.7	31.5
문 경	12.4	23.7	29.3	32.6	35.4	38.6	41.1
영 덕	8.3	21.5	27.9	31.9	35.1	38.7	41.6
의 성	8.1	14.0	16.9	18.7	20.1	21.8	23.1
구 미	8.6	16.0	19.6	21.8	23.6	25.7	27.3
영 천	7.2	13.3	16.2	18.0	19.5	21.2	22.5
거 창	12.2	20.9	25.2	27.7	29.8	32.3	34.2
합 천	7.4	14.2	17.5	19.5	21.1	23.0	24.5
밀 양	4.6	9.0	11.2	12.5	13.5	14.8	15.8
산 청	9.5	16.1	19.4	21.4	23.0	24.8	26.3
거 제	3.3	8.0	10.2	11.6	12.7	14.0	15.0
남 해	5.1	11.7	14.9	16.8	18.4	20.3	21.7

지역별로 재현기간에 따른 설계(구)적설심은 그림 103에서 보는 바와 같이 로그함수 관계를 가지고 있어 회귀분석을 통하여 상관관계식을 구하면 표 66과 같다. 지역별로 표 65에 나타나지 않은 재현기간에 따른 설계(신)적설심은 표 64를 이용하여 구할 수 있다.



(a) 홍천



(b) 홍천

그림 103. 재현기간별 설계(구)적설심 회귀식

표 66. 지역별 재현기간별 설계(구)적설심 산정식 계수

지 역	a	b	지 역	a	b
속 초	22.897	16.661	양 평	4.759	6.771
철 원	4.245	6.823	이 천	5.894	6.602
대관령	39.427	50.272	인 제	6.238	7.986
춘 천	6.406	8.664	홍 천	5.947	7.845
강 릉	20.729	19.521	태 백	18.332	19.470
서 울	4.808	6.456	제 천	5.192	8.303
인 천	5.062	5.814	보 은	6.779	8.064
원 주	5.748	7.189	천 안	4.643	8.011
울릉도	50.298	43.617	보 령	4.401	8.088
수 원	4.784	6.438	부 여	5.001	8.603
충 주	5.742	6.386	금 산	5.004	7.705
서 산	5.718	8.805	부 안	8.951	13.359
청 주	7.861	7.737	임 실	7.186	15.283
대 전	7.246	5.366	정 읍	10.213	14.578
추풍령	6.827	8.491	남 원	5.410	10.247
안 동	5.248	4.732	장 수	6.403	14.542
포 향	4.581	0.951	순 천	3.333	5.981
군 산	6.499	10.511	장 흥	5.439	3.132
대 구	6.886	1.800	해 남	4.828	4.500
전 주	4.734	7.484	고 흥	3.563	0.880
울 산	2.936	0.353	성산포	5.072	3.926
마 산	4.513	0.631	봉 화	4.737	6.855
광 주	5.296	9.650	영 주	6.327	5.925
부 산	5.009	-0.992	문 경	8.830	5.355
통 영	3.257	0.223	영 덕	10.247	0.199
목 표	8.317	7.194	의 성	4.603	4.467
여 수	3.408	0.553	구 미	5.765	3.979
완 도	2.919	2.372	영 천	4.715	3.461
제 주	3.945	2.590	거 창	6.749	6.880
고 산	1.243	0.145	합 천	5.244	3.271
서귀포	4.651	1.298	밀 양	3.439	1.851
진 주	4.692	1.845	산 청	5.192	5.303
강 화	4.552	6.245	거 제	3.605	0.465
		5.077	남 해	5.119	1.009

주) $Y = a \ln(X) + b$

여기서, Y : 재현기간별 설계(구)적설심(cm), X : 재현기간(년)

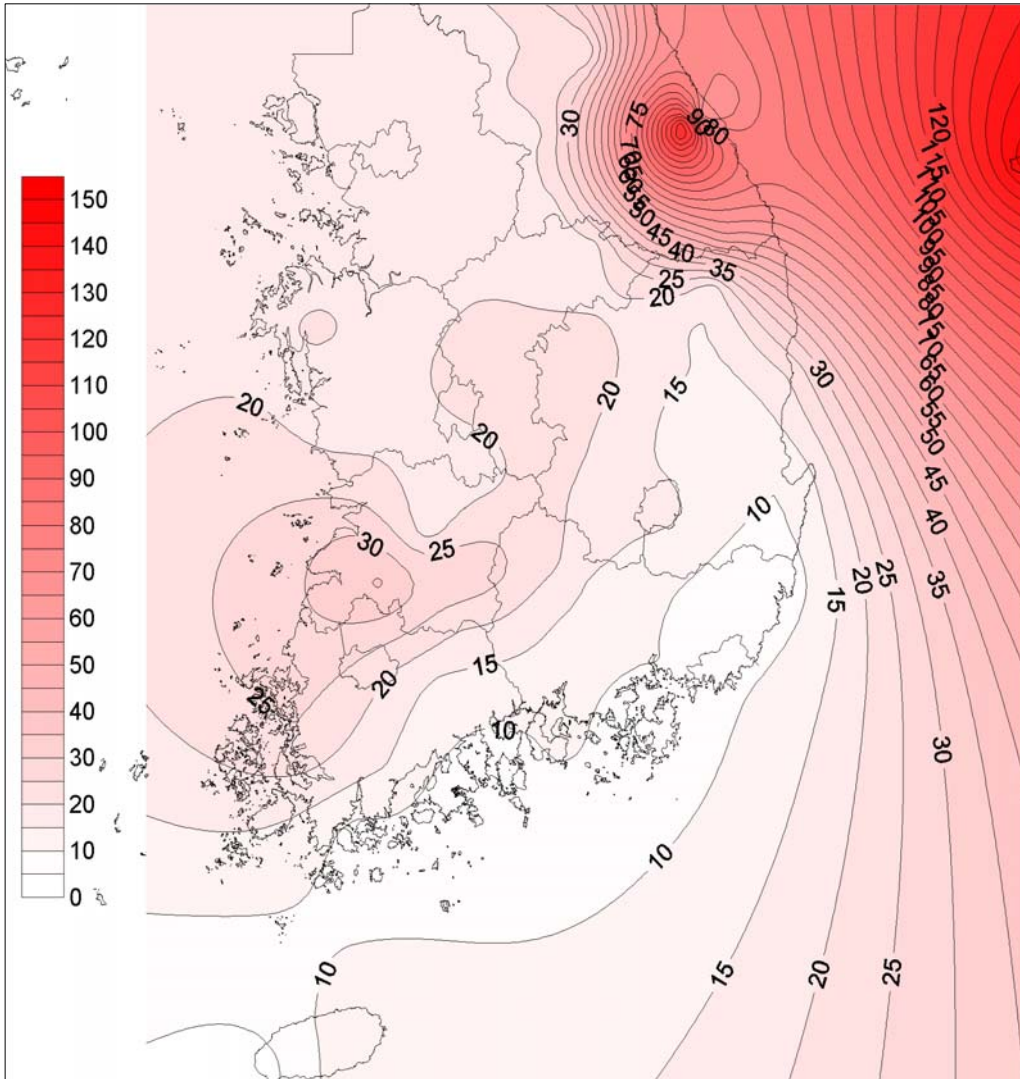


그림 104. 등(구)적설심선도(재현기간 8년)

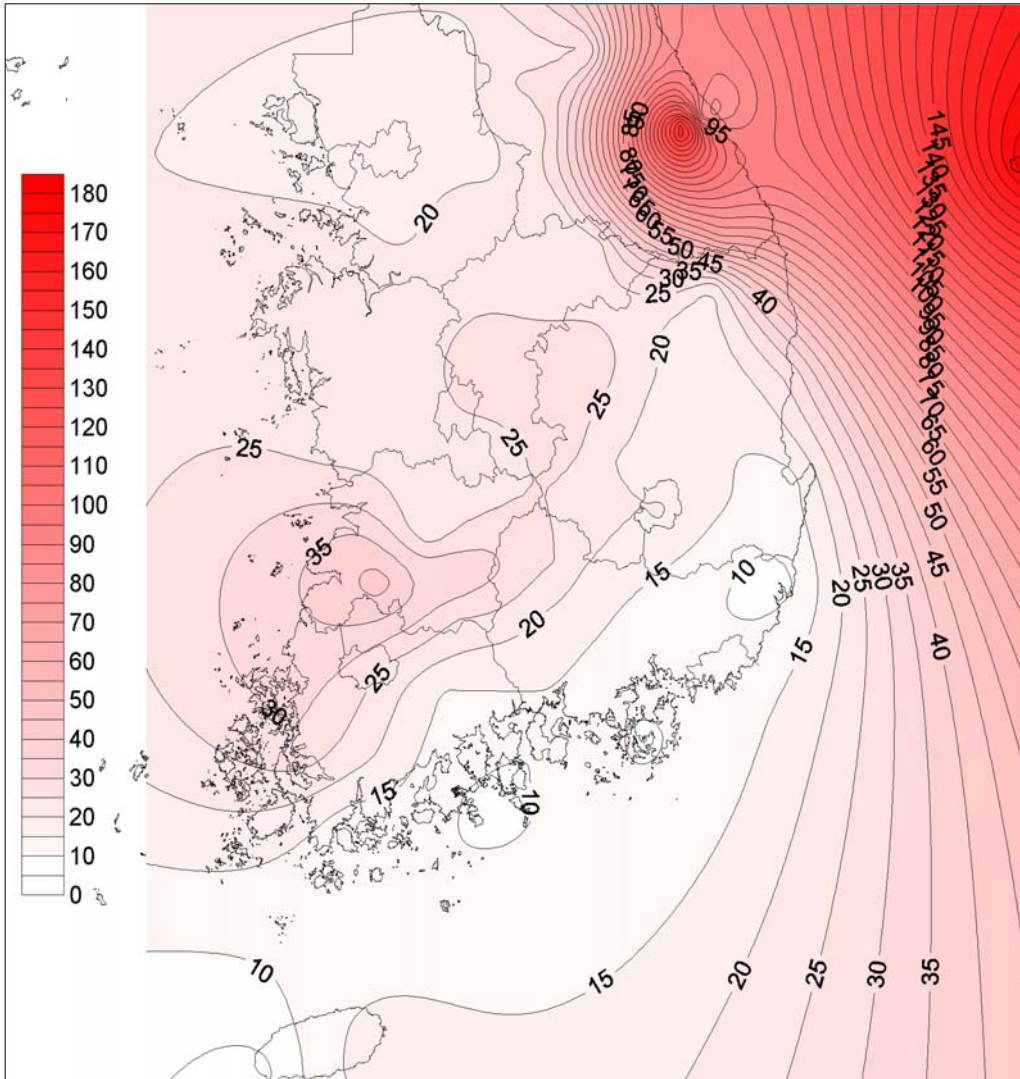


그림 105. 등(구)적설심선도(재현기간 15년)

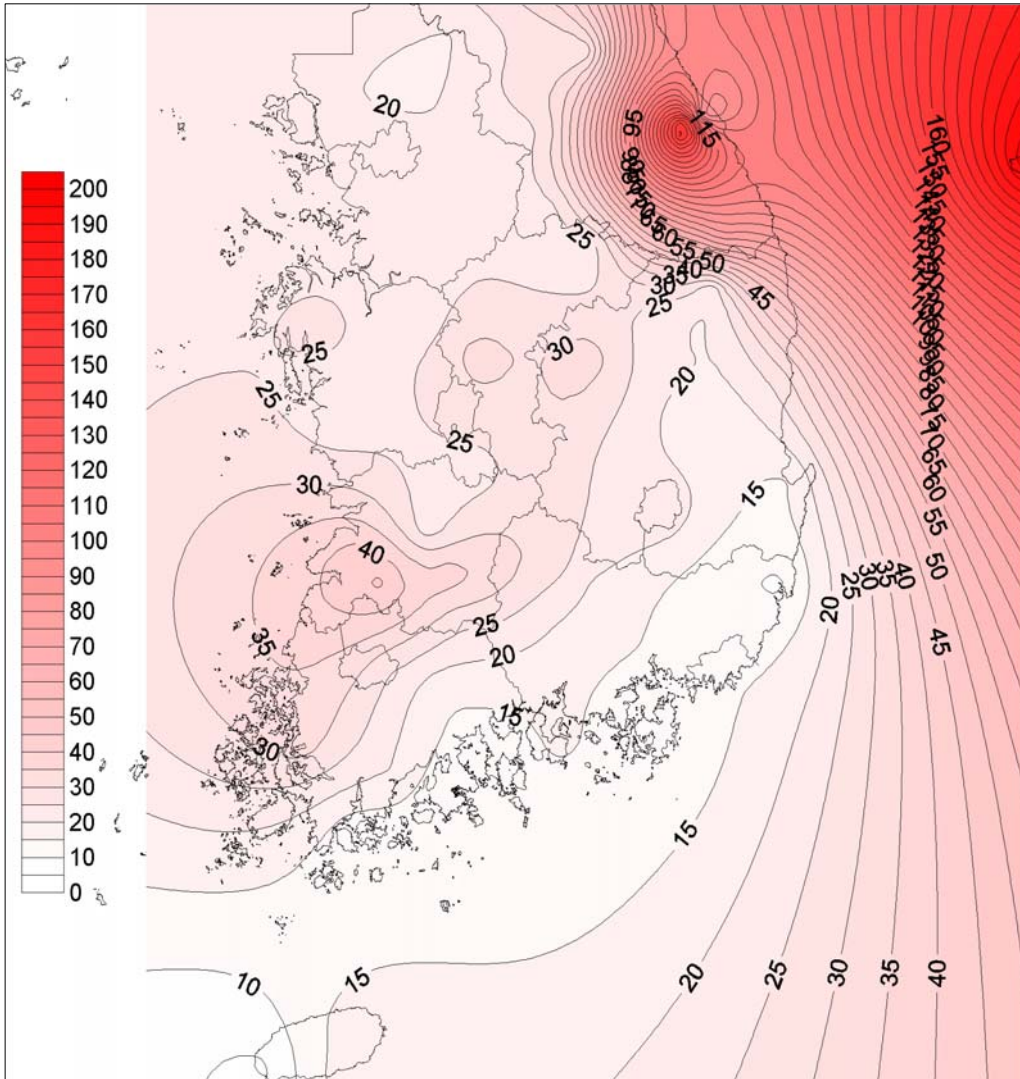


그림 106. 등(구)적설심선도(재현기간 22년)

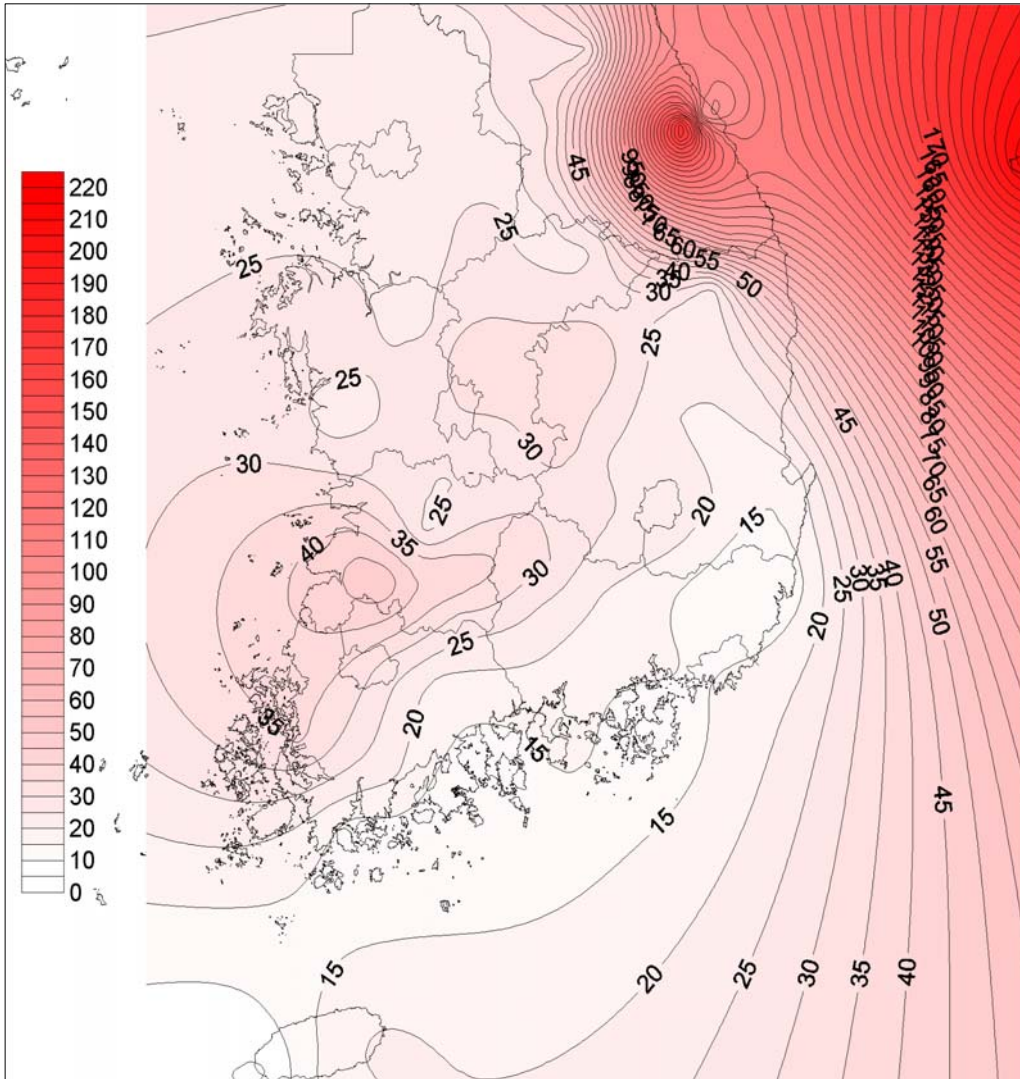


그림 107. 등(구)적설심선도(재현기간 30년)

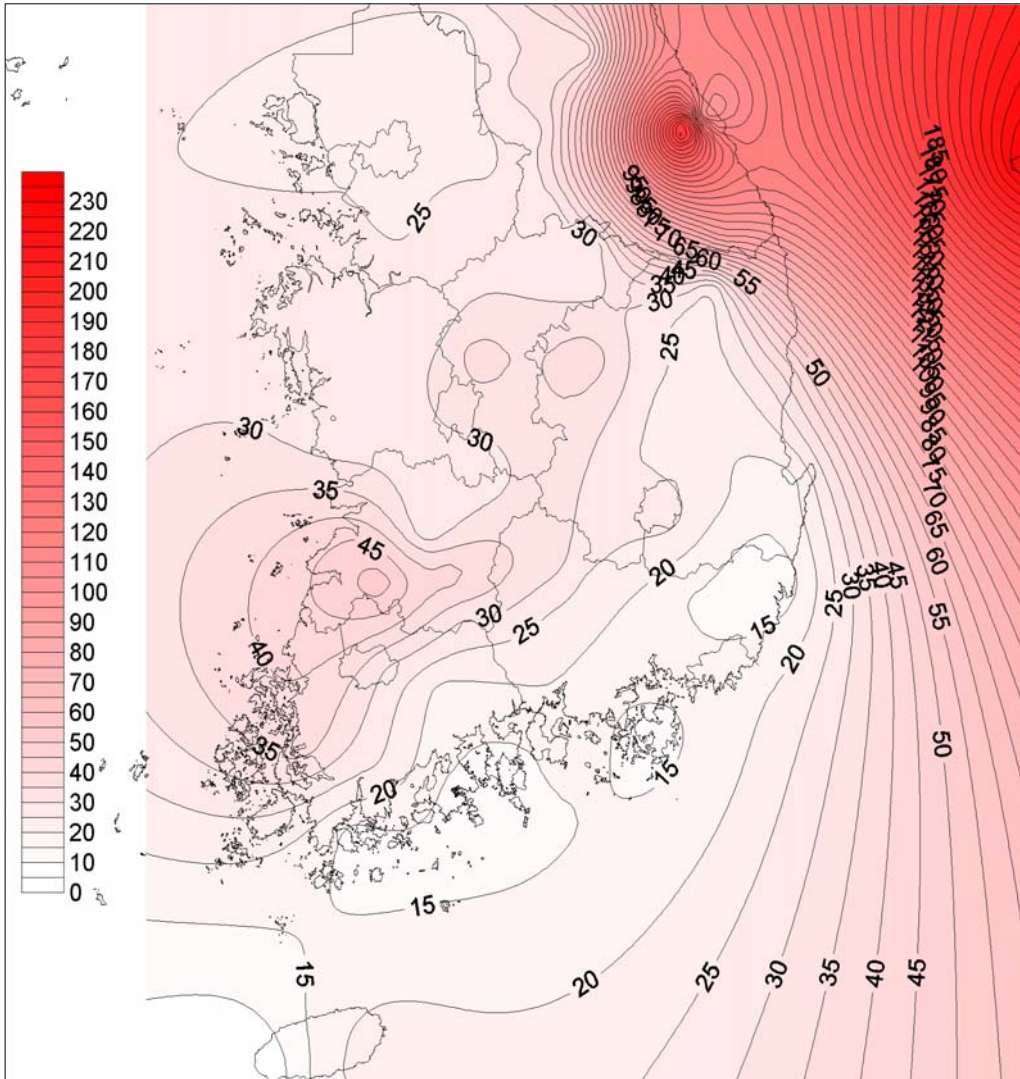


그림 108. 등(구)적설심선도(재현기간 43년)

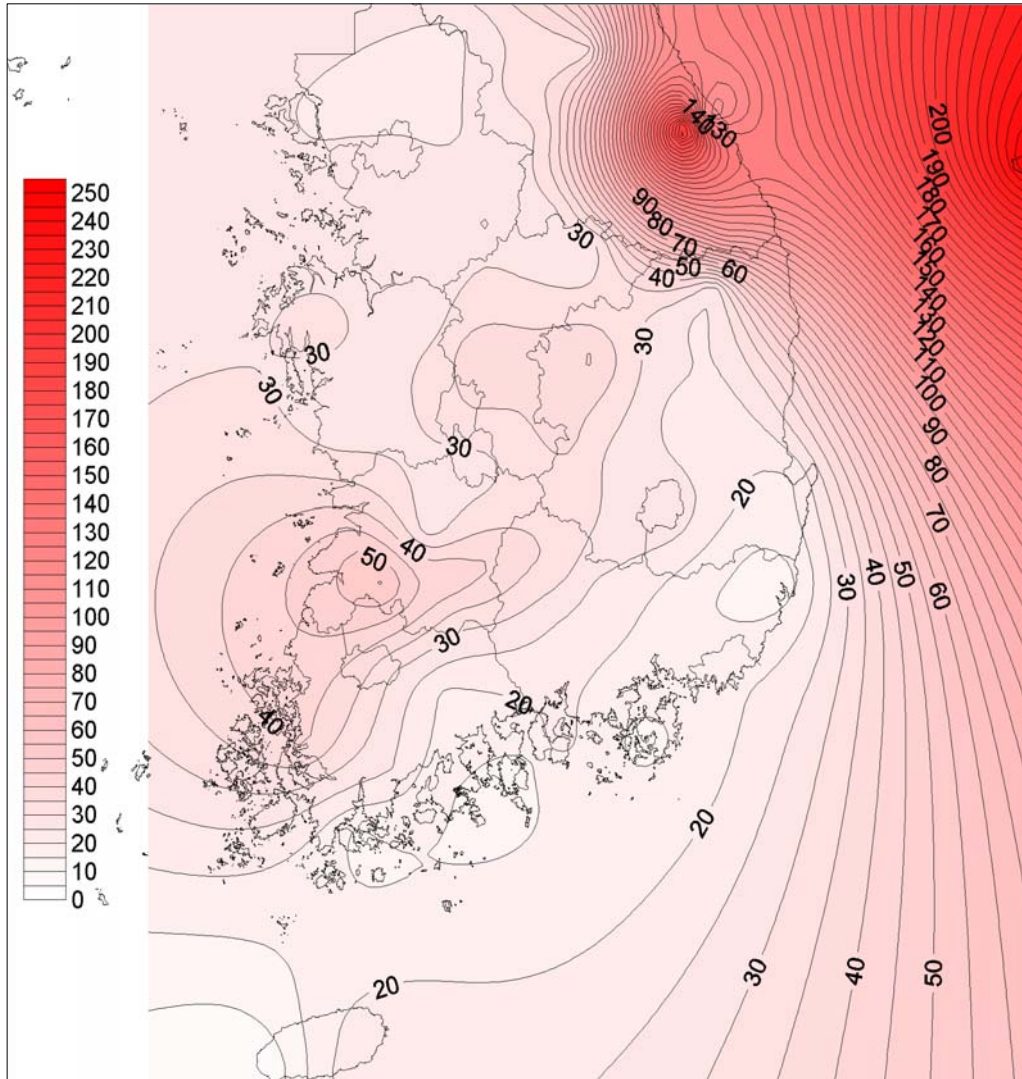


그림 109. 등(구)적설심선도(재현기간 57년)

마. 규준별 설계하중 비교

1) 규준별 설계하중

현재 온실의 설계시 사용되고 있는 지역별 재현기간에 따른 설계풍속 및 설계하중은 ‘원예시설의 구조안전기준 작성’(1995년, 한국농어촌공사 보고서)의 설계하중은 1992년까지의 기상자료만 포함되어 있으며 건축구조설계기준의 기본풍속은 1995년까지의 기상자료를 포함하고 있다. 기본풍속은 지역별로 재현기간 100년에 해당하는 최대풍속으로 산정하여 5m/s 간격으로 나타나 있으며 재현기간에 따른 설계풍속을 환산계수를 사용하여 설계에 활용하고 있어 지역에 따라 과다설계 할 우려가 있다. 그리고, 최대풍속을 최대순간풍속에 의한 풍하중으로 환산하기 위하여 가스트 영향계수를 사용하고 있다.

그림 110은 재현기간 22에 해당하는 설계풍속을 지역별로 비교한 그림으로 본 연구에서 작성한 설계풍속이 높게 나타났으며 이는 최근 이상기상으로 인한 강풍 등의 최근 자료를 포함하여 본 연구에서는 설계풍속을 산정하였기 때문이다.

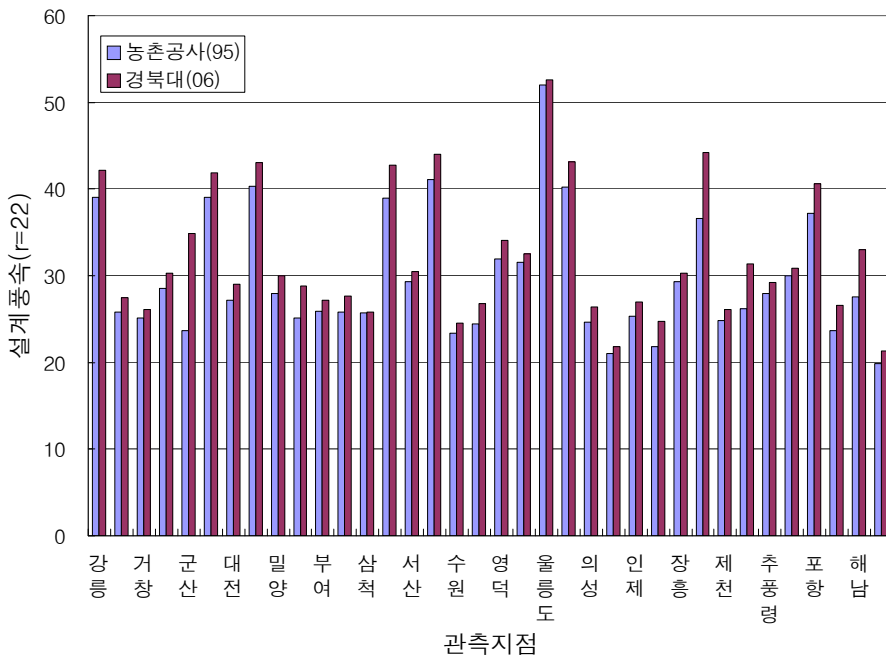


그림 110. 지역별 설계풍속 비교(재현기간 22년)

그림 111은 신적설심과 구적설심의 기상자료를 활용하여 설계적설심을 산정한 결과에서 눈이 많은 정읍지역과 눈이 적게 내리는 대구지역의 설계적설심별로 비교한 결과이다. 신적설심과 구적설심의 차이는 눈이 적게 내리는 대구지역의 경우에는 재현기간별로 2.1~3.9cm의 차이를 보이나 다설지역인 정읍의 경우에는 15.4~27.2cm의 차이를 보였다. 현재 사용되는 설계적설심은 신적설심을 이용하여 산정한 것이므로 구적설심에 의한 설계적설심을 산정한 결과를 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

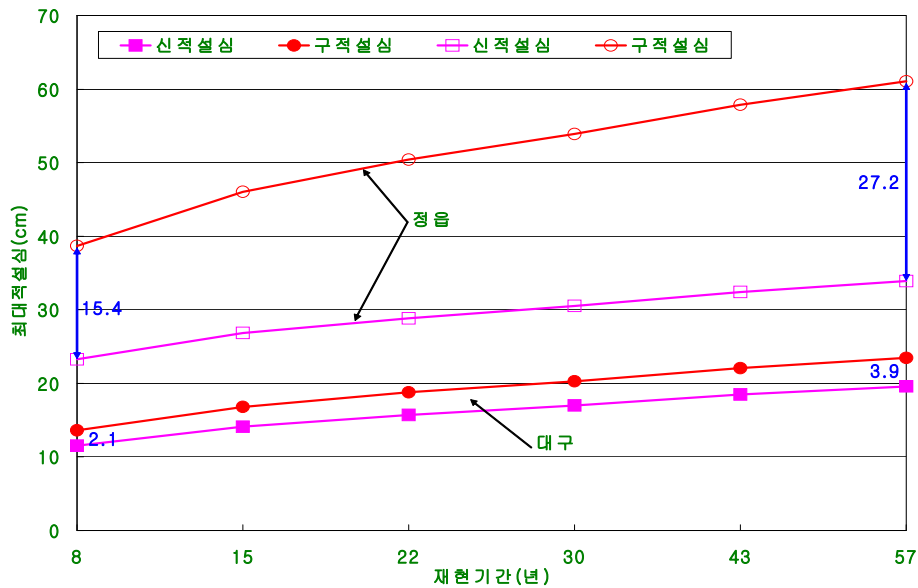


그림 111. 신적설심과 구적설심 비교

그림 112는 건축구조설계기준에서 명시하고 있는 지역별 기본풍속을 재현기간별 환산계수로 재현기간 22년에 해당하는 설계풍속을 산정하여 본 연구결과와 비교한 것이다. 모든 지역에서 건축구조설계기준의 설계풍속이 높게 나타나 이를 이용하여 온실 등의 농업시설물을 설계할 경우 과다설계의 우려가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 112에서 보는 바와 같이 비교지역 46개소중 7곳은 거의 비슷하게 나타났으나 36곳은 0.46m/s~17.8m/s(평균 7.4m/s)의 범위에서 기본풍속이 높게 산정되었다. 따라서, 실제 지역별 기상자료를 이용하여 분석한 설계풍속을 활용하는 것이 합리적인 것으로 나타났다.

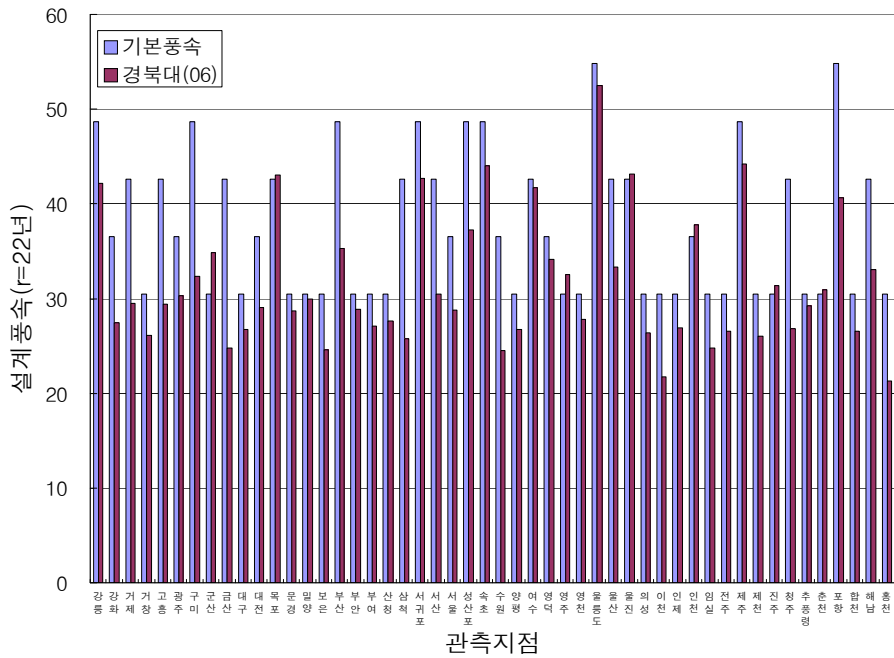


그림 112. 지역별 설계풍속 비교(재현기간 22년)

2) 재현기간 환산계수

현재 농업시설 구조설계시 풍하중 산정에 이용되고 있는 기본풍속은 지역별 재현기간 100년에 해당하는 최대풍속을 이용하고 있으며 재현기간별로 표 67과 같은 환산계수와 가스트 영향계수를 고려하여 사용하고 있다.

표 67. 재현기간 환산계수

재현기간(년)	15	22	30	43	57
환산계수	0.84	0.87	0.90	0.93	0.95

재현기간 환산계수는 식 (34)에 의하여 구할 수 있으며, 재현기간 r년의 설계풍속 U(r)은 식 (35)에 의하여 산정할 수 있다.

$$U(r) = R \cdot U(100) \quad (34)$$

여기서, R : 재현기간환산계수

U(100) : 재현기간 100년의 풍속

U(r) : 재현기간 r년의 설계풍속(a, b : 관측점간의 정수)

$$U(r) = -\frac{1}{a} \ln \left\{ \ln \left(\frac{r}{r-1} \right) \right\} + b \quad (35)$$

식 (35)에서 r=100일 때 즉, 재현기간 100년의 풍속 U(100)은 식 (36)로 나타낼 수 있다.

$$U(100) = -\frac{1}{a} \ln \left\{ \ln \left(\frac{100}{100-1} \right) \right\} + b = \frac{4.6}{a} + b \quad (36)$$

식 (35), (36)을 식 (34)에 대입하면 식 (4)와 같이 환산계수 R을 산정할 수 있는 식을 구할 수가 있다.(단, ab=K)

$$R = \frac{-\ln[\ln\{r/(r-1)\}] + ab}{4.6 + ab} = -\frac{\ln[\ln\{r/(r-1)\}] + K}{4.6 + K} \quad (37)$$

최근 기상자료(2006년까지)가 포함된 각 지역의 재현기간별 설계풍속을 분석하여 지역별 K값을 분석한 결과는 표 65와 같으며 규준화 변수 σ 는 표 66과 같다.

식 (37)에 K=6.85(평균값) 적용하면 재현기간별로 환산계수를 산정할 수 있는 식 (37)를 구할 수 있다.

$$R = 0.684 - 0.069 \ln[\ln\{r/(r-1)\}] \quad (37)$$

식 (37)에 재현기간(r) 22년을 대입하면 환산계수는 0.89가 된다.

이러한 환산계수는 관측지점별 정수인 K값은 지역별로 최소 3.78, 최대 10.3으로 차이가 많으므로 K의 평균값을 사용한 설계풍속은 지역별로 실제 분석한 결과와 많은

차이가 발생하게 된다. 지역따라 작게 또는 높게 설계풍속이 산정될 수 있는 오류를 발생하므로 지역별 기상자료를 이용하여 재현기간별 설계풍속을 산정한 본 연구결과를 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

표 68. 지역별 K 분석

최소값	평균값-표준편차	평균값	평균값+표준편차	최대값	표준편차
3.776	5.337	6.847	8.793	10.303	1.510

표 69. 표준화 변수 σ

r \ K	3.78	5.34	6.85	8.79	10.30
8	0.69	0.74	0.77	0.81	0.83
15	0.77	0.81	0.83	0.86	0.87
22	0.82	0.85	0.87	0.89	0.90
30	0.85	0.88	0.89	0.91	0.92
43	0.90	0.91	0.93	0.94	0.94
57	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96

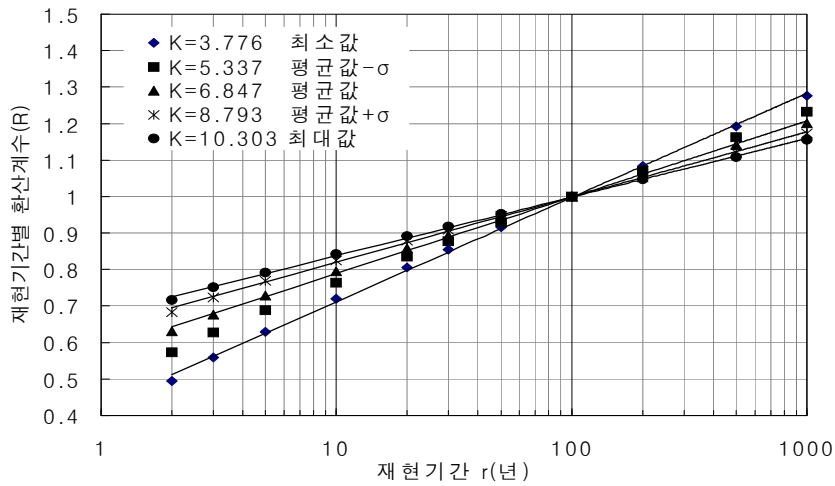


그림 112. 재현기간별 환산계수

2. 온실의 하중 재하시험

가. 실험용 온실 골조 및 측정방법

모의 설하중과 풍하중 재하실험을 위한 온실골조의 크기와 스트레인게이지 부착 위치는 그림 113 및 그림 114와 같고 하중 재하방법은 그림 115와 같다. 그림 114에서 보는 바와 같이 실험온실 A는 온실골조를 1m간격으로 2개를 설치하여 가로대를 연결하여 가로대에 가력을 할 수 있도록 시스템을 구성하였으며 실험온실 B는 온실 골조에 직접 가력을 할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

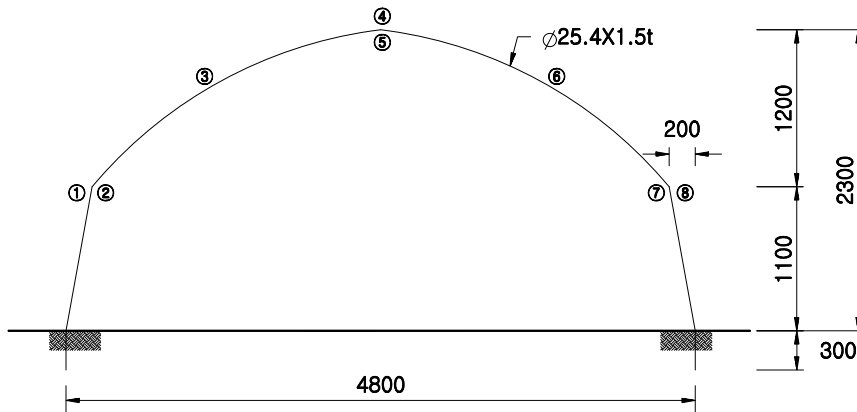


(a) 실험온실 A



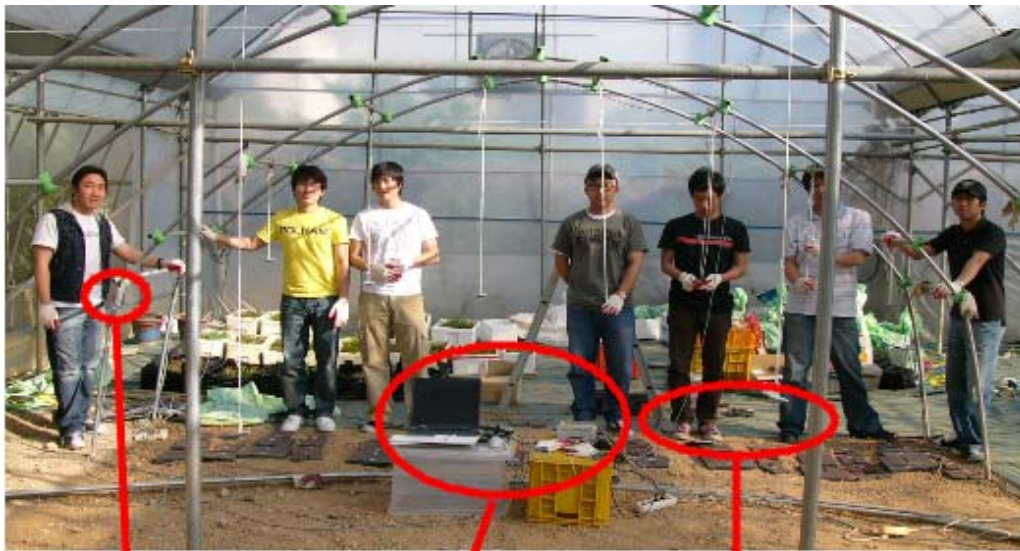
(b) 실험온실 B

그림 113. 모의 기상하중 재하 실험온실 골조



①②③④⑥⑥⑦⑧ : 스트레인게이지 부착 위치

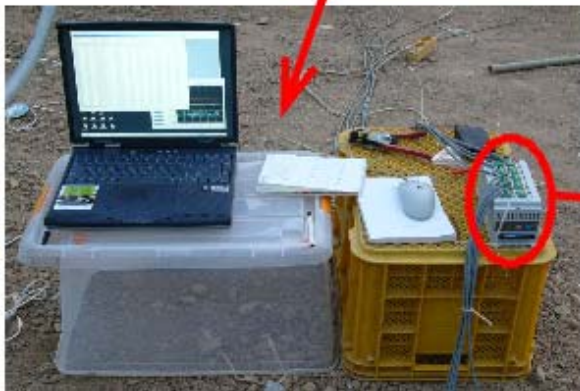
그림 114. 실험온실의 크기와 스트레인게이지 부착위치



센서부착 모습



하중판 재하전 모습



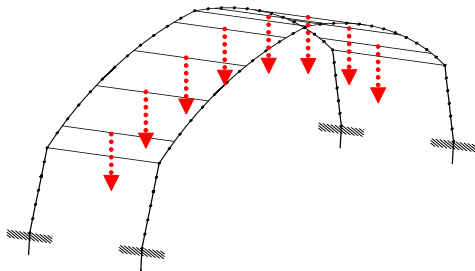
스트레인 게이지 데이터

그림 115. 실험온실 및 측정장치

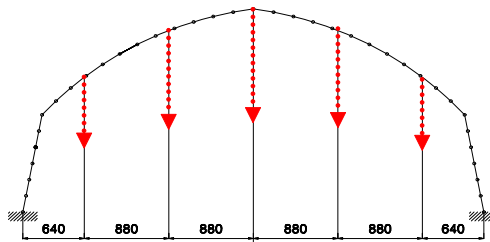
그림 116는 모의 설하중 재하방법을 나타낸 것으로 가력 A방법은 서까래를 1m 간격으로 설치하여 가로대에 하중을 재하시킨 것이며 가력 B방법은 단일 서까래에 직접 하중을 재하시킨 것이다. 하중은 표 70에서와 같이 1kgf에서부터 온실 골조가 파괴될 때까지 순차적으로 재하시켰다.

표 70. 모의 설하중 재하하중(kgf)

순서	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
가력A	1	5	10	15	16	17	18	26	29	31	34	37	40	43
가력B	5	10	15	17	18	19	20	21	22	23	24	30	35	37



(a) 모의 설하중 가력도 A



(b) 모의 설하중 가력도 B

그림 116. 모의 설하중 재하방법

그림 117은 모의 풍하중 재하방법을 나타낸 것으로 가력 A방법은 서까래를 1m 간격으로 설치하여 가로대에 하중을 재하시킨 것이며 가력 B방법은 단일 온실골조에서 하중을 서까래에 직접 재하시킨 것이다. 실제 온실에 작용하는 풍하중은 그림 115와 같이 구조물의 위치별 풍력계수를 고려한 등분포하중으로 작용을 하므로 본 실험에서

는 풍하중이 작용하는 구조물의 수압면적을 고려하여 그림 116과 같이 집중하중으로 환산하여 순차적으로 부위별 재하하중의 배수만큼 적용시켰으며 재하방법은 그림 117과 같다.

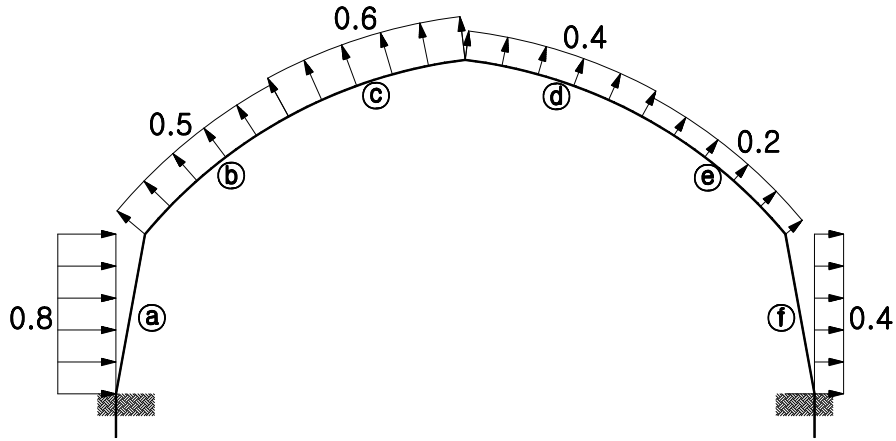


그림 117. 온실의 풍력계수

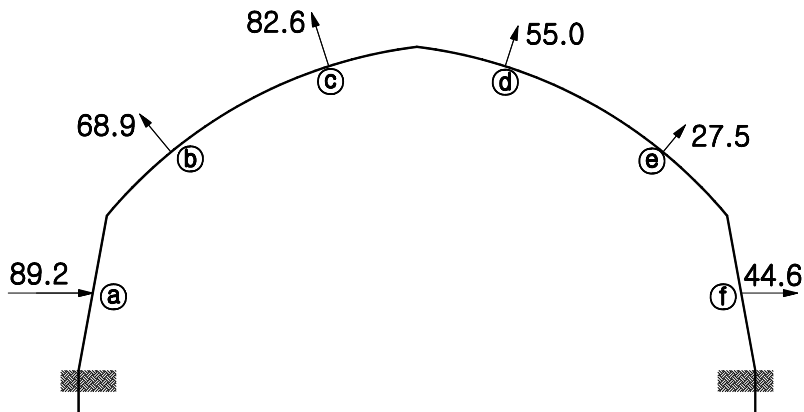
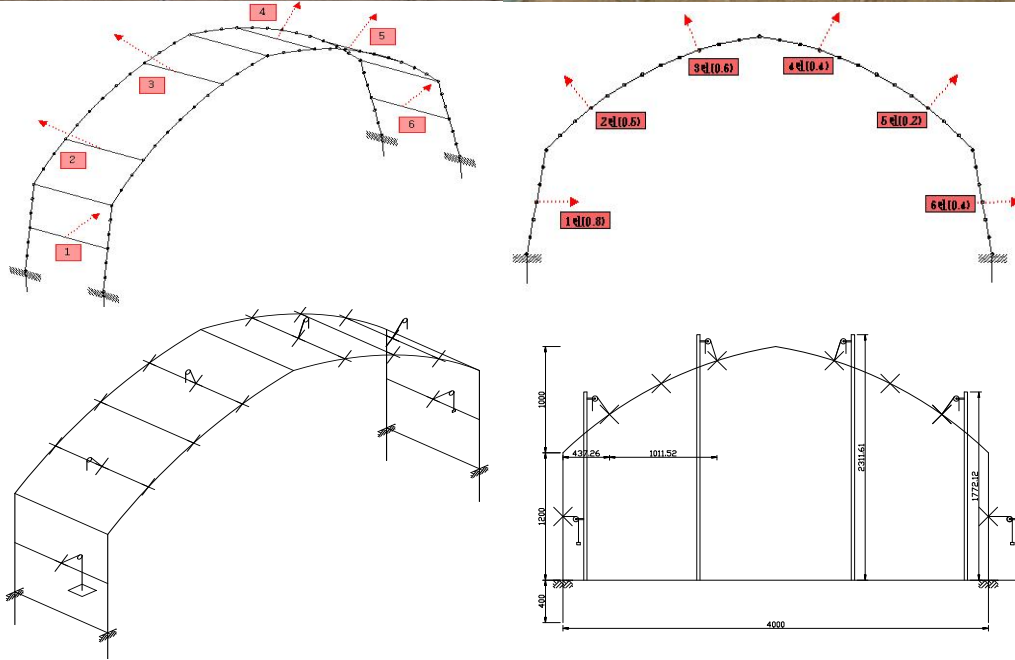


그림 118. 위치별 모의 풍하중의 재하하중



모의 설하중 가력도 A

모의 설하중 가력도 B

그림 119. 모의 풍하중 재하방법

나. 실험결과

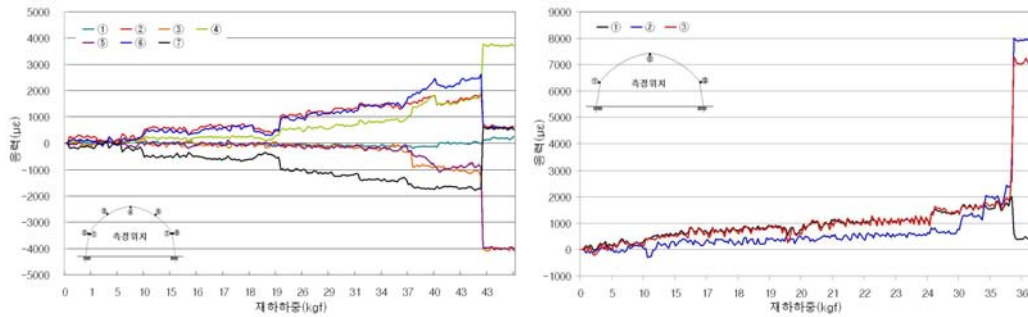
1) 모의 설하중 재하실험

그림 120은 모의 설하중을 재하시켰을 때 온실이 파괴된 모습을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 모의 설하중 가력방법 A와 B에 재하위치별로 각각 43kgf, 36kgf를 재하시켰을 때 파괴가 일어났다.



그림 120. 모의 설치중 재하시 파괴 형상

모의 설하중을 재하하였을 때의 구조재의 변형도를 측정하기 위하여 최대 수평변위와 수직변위가 발생하는 곳을 구조해석을 통하여 분석하여 처마끝(측벽과 지붕이 만나는 점), 곡부 중간 및 천정부위에 스트레인 게이지와 변위센서를 설치하여 응력 및 변위를 측정하였다. 그림 121은 모의 설하중 재하시 서까래 부재의 변형을 측정한 결과를 나타낸 것으로 처마끝단과 천정부위의 변형이 가장 크게 일어났으며 측정위치에 따라 정·부의 변형이 연속적으로 일어났다. 이는 가력 방법에 관계없이 유사하게 나타났으며 재하중이 증가함에 따라 증가하다가 파괴하중에 도달하였을 때는 부재의 파괴에 따라 크게 변화하다가 변형이 일정하게 유지되었다. 그리고, 가력 A에 의한 파괴하중은 약 43kfg이었으며 가력 B에 의한 파괴하중은 약 36kfg임을 알 수 있었다.

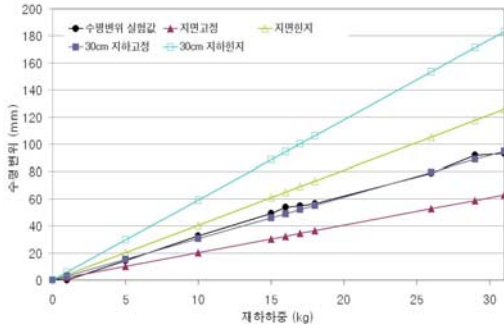


(a) 가력 A

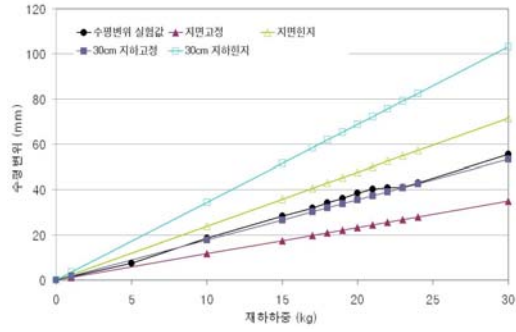
(b) 가력 B

그림 121. 모의 설하중에 의한 부재의 응력 변화

그림 122 및 그림 123은 모의 설하중 재하시에 부재에 발생하는 최대 수평변위와 수직변위를 실험값과 계산값을 비교한 것이다. 계산시 지점의 조건을 지하 30cm 힌지, 지하 30cm 고정, 지면고정, 지면힌지로 구분하여 재하 하중별로 최대 수평변위와 수직변위를 실험값과 비교하였다. 가력방법 A, B에 구분없이 실험값은 지하 30cm 고정으로 하였을 때의 계산값과 거의 유사한 경향을 나타내어 구조해석시 지하 30cm 고정으로 하여 계산을 수행하는 것이 경제적인 것으로 나타났다.

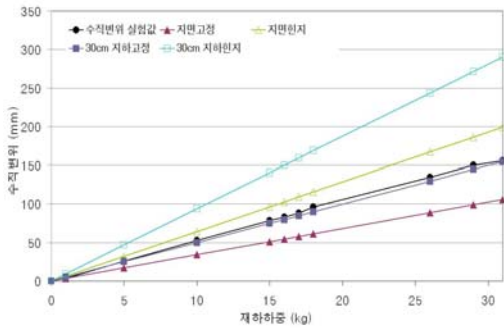


(a) 가력방법 A

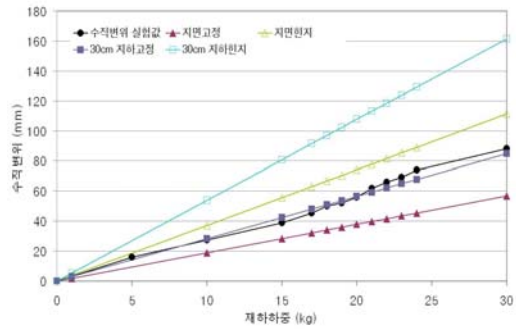


(b) 가력방법 B

그림 122. 모의 설하중 재하에 따른 수평변위 변화



(a) 가력방법 A



(b) 가력방법 B

그림 123. 모의 설하중 재하에 따른 수직변위 변화

2) 모의 풍하중 재하실험

그림 124는 모의 풍하중을 준비된 모든 하중판을 재하시켰을 때 서까래 부재의 변형 모습을 나타낸 것이다. 모의 풍하중을 각 부위별 풍력계수를 고려한 하중을 재하시켰을 때 온실의 변형은 모의 설하중을 재하시켰을 때와는 다르게 나타났으며 풍상측 측벽의 재하하중이 178.4kgf가 되도록 각 부위별로 하중을 재하시켰을 때의 가력방법 A에서는 온실의 변형을 육안으로는 확인할 수가 없었으며 가력방법 B에서는 온실의 변형을 육안으로도 확인할 수 있었으나 파괴는 되지 않았다. 더 이상 준비된 하중판의 부족으로 모의 풍하중 재하로 온실의 파괴가 발생하는 파괴하중은 확인할 수 없었다.

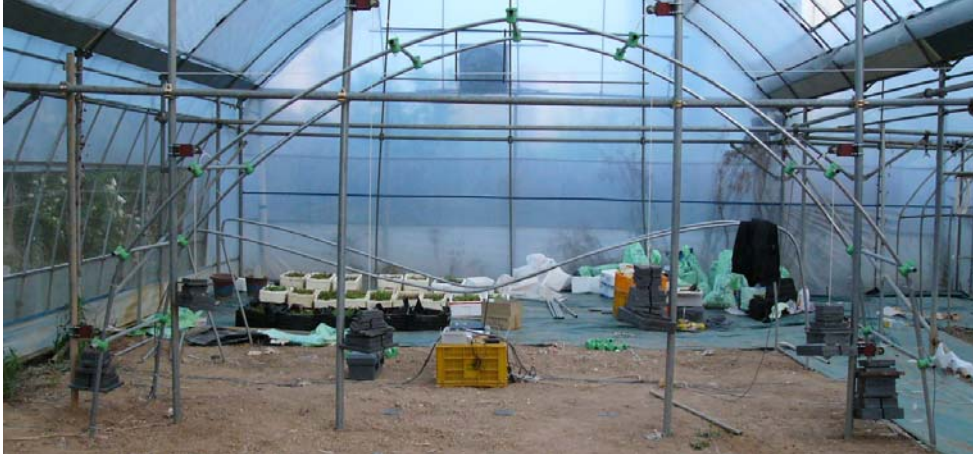
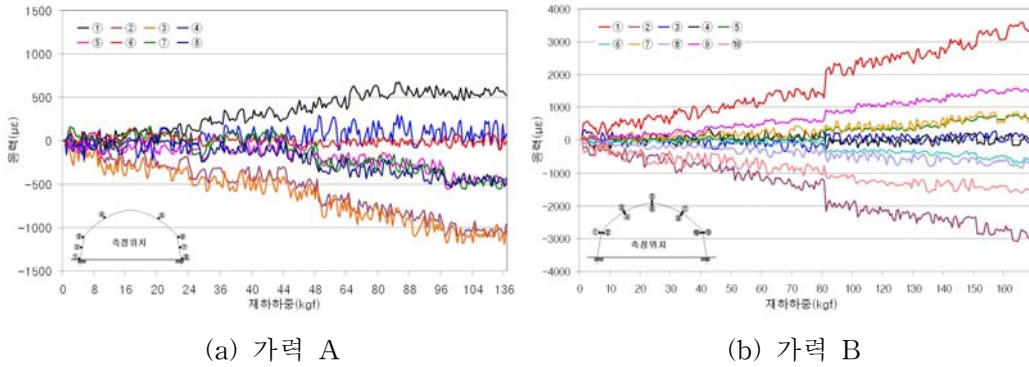


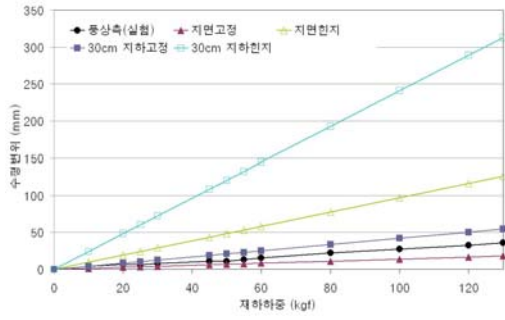
그림 124. 모의 최대풍하중(풍상측 178kgf) 재하 모습

그림 125는 모의 풍하중을 가력방법 A, B에 의해 재하시켰을 때 서까래 부재의 위치별로 변형도를 측정된 결과로 풍상측의 지면부위와 처마끝이 가장 큰 변형을 보였으며 다음으로 풍하측의 처마끝과 풍하측 곡부의 가운데가 변형이 크게 발생하여 시뮬레이션을 통한 변형정도와 거의 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

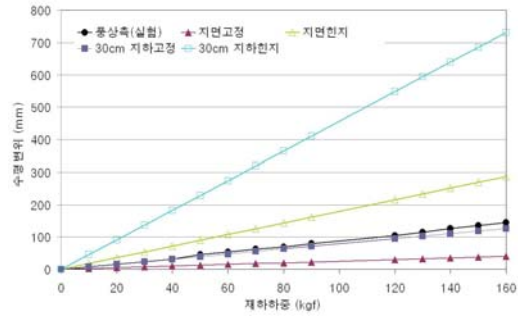


(a) 가력 A (b) 가력 B
그림 123. 모의 풍하중에 의한 부재의 응력변화

그림 126, 그림 127 및 그림 128은 모의 풍하중 재하시에 부재에 발생하는 최대 수평변위와 수직변위를 실험값과 계산값을 비교한 것이다. 계산시 지점의 조건을 지하 30cm 힌지, 지하 30cm 고정, 지면고정, 지면힌지로 구분하여 최대 수평변위와 수직변위를 실험값과 비교하였다. 동일한 하중조건에서 지점조건별로 부재의 변위값이 크게 차이가 나타나 30cm 지하힌지 조건으로 계산하였을 때의 변위값이 가장 크게 나타났다. 그림 126에서 보는 바와 같이 풍상측 측벽의 수평변위는 가력방법 A에서는 지면고정과 30cm 지하고정 조건의 중간값이었으며 가력방법 B에서는 30cm 지하고정 조건과 유사하게 나타났다. 그림 127은 풍하측 측벽의 최대수평변위값을 비교한 것으로 풍하측의 수평변위가 30cm 지하힌지조건을 제외하고는 실험값과 거의 유사하게 낮으나 가력방법 A에서는 지면고정, 가력방법 B에서는 지면고정, 30cm 지하고정 조건일 때의 수평변위와 유사하게 나타났다. 그림 128은 최대수직변위를 계산값과 실험값을 비교한 것으로 가력방법에 관계없이 지면고정 조건일 때와 유사한 값을 나타내어 모의 설하중과는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 풍상측의 최대수평변위는 30cm 지하고정 조건일 때, 최대수직변위는 지면고정 조건일 때 실험값과 계산값이 유사한 것으로 나타나 풍하중에 대한 구조해석을 수행할 경우 지점조건에 유의하여야 할 것으로 판단된다.

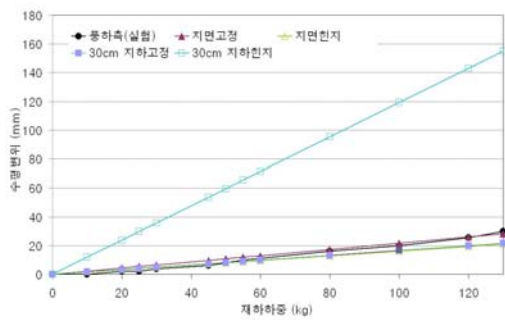


(a)가력방법 A

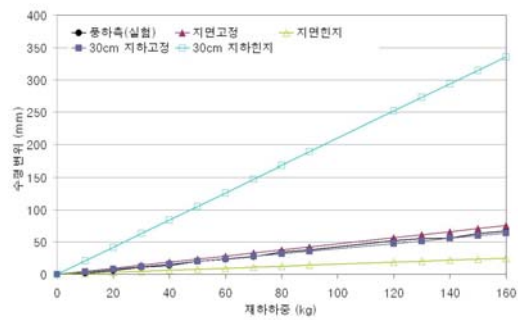


(b)가력방법 B

그림 126. 모의 풍하중 재하에 따른 최대수평변위 변화(풍상측)



(a)가력방법 A



(b)가력방법 B

그림 127. 모의 풍하중 재하에 따른 최대수평변위 변화(풍하측)

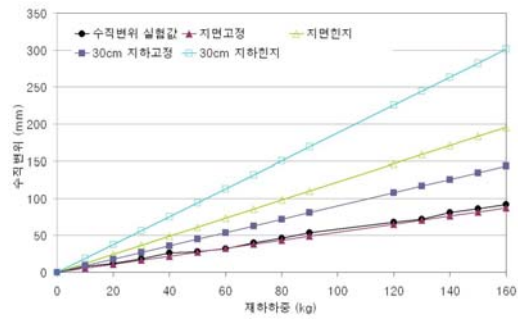
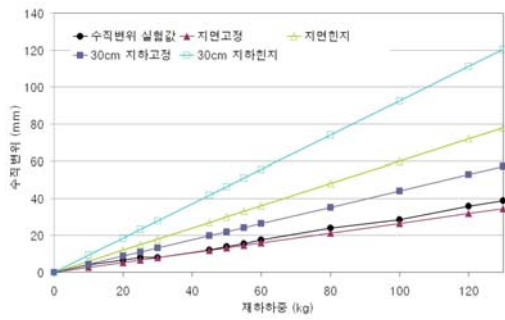


그림 128. 모의 풍하중 재하에 따른 최대수직변위 변화(지붕상단)

3) 파이프 휨가공에 따른 파괴하중

파이프 골조 온실의 처마높이 상단 등 파이프를 휘어서 사용할 때 주파이프 휨가공의 최소 곡률반경(R)은 파이프 직경(D)의 10배 이상으로 하고 그 미만의 휨가공 부분에서는 휨모멘트를 전달시키는 것이 불가능하다. 휨가공에 의하여 파이프의 단면 형상이 변화하고, 단면2차모멘트(I)나 단면계수(Z)가 현저하게 저하할 염려가 있다.

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - D_i^4) \quad (38)$$

$$Z = \frac{\pi(D^4 - D_i^4)}{32D} \quad (39)$$

휨가공에 의해서 단면형상이 그림 129과 같이 변화하는 것으로 하면 짧은 직경변화율 $(D - D_{\min})/D$ 가 0.05일 때 I 및 Z 의 감소비율은 각각 약 80%, 85%로 된다.

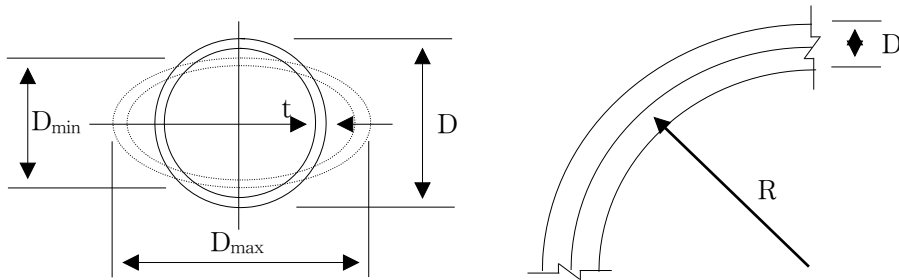


그림 129. 파이프 휨가공시 단면형상 변화

여기서 이 정도의 감소를 허용한도로 볼 때의 R과 D의 관계를 구하면 파이프 직경 22.2mm, 두께 1.2mm인 경우 $D/2R$ 이 0.04가 된다(프레스 가공 편람 참조). 따라서 파이프의 휨 가공시 최소 $R \geq 10D$ 로 하는 것이 좋다. 보통 파이프 골조 온실의 지붕과 처마의 경계 부분에서 서까래 파이프의 휨 가공은 곡률반경 $30D \sim 50D$ 정도이다.

파이프의 휨 가공은 적절한 도구를 사용하고 구조 내력상의 유해한 국부변

형이 생기지 않도록 주의하여 소정의 각도로 휘고 제조된 파이프를 상온에서 가공하여 각각의 온실 형식에 맞도록 휨 가공하도록 하며 지붕과 처마의 경계 부분은 적설이나 강풍시에 응력이 최대가 되는 부분이므로 강도저하가 현저하게 되지 않도록 적절한 도구를 사용하여 휨 가공하도록 권장하고 있다.

일반적으로 농가에서는 그림 130에서 보는 바와 같이 성형틀을 이용하여 파이프를 휘고 있으며 천정부위의 곡부는 1회 휨 후 2차적으로 한번 더 휨가공을 하여 복숭아형태의 온실 골조로 성형하고 있다.



그림 130. 파이프의 휨 가공부위와 성형틀

그림 131은 지붕과 처마의 경계부분의 휨으로 인한 단면감소에 따른 강도저하를 파악하고자 $\varnothing 25.4\text{mm}$ 파이프의 곡부직경이 25.2mm, 24.1mm 및 23.5mm인 서까래 골조에 대하여 모의 설하중을 재하시켜 파괴하중을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 파이프를 휘면서 거의 직경변화가 없는 서까래 골재의 파괴 재하하중은 36kgf인 것으로 나타났으나 성형과정에서 곡부 단면의 직경이 1.1mm 감소한 경우에는 17%, 직경이 1.9mm 감소한 경우에는 25%의 강도저하가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 파이프의 성형시 곡부의 단면변화가 오지 않도록 주의하여야 하며 가급적 유압을 이용한 성형기를 이용하여 성형을 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

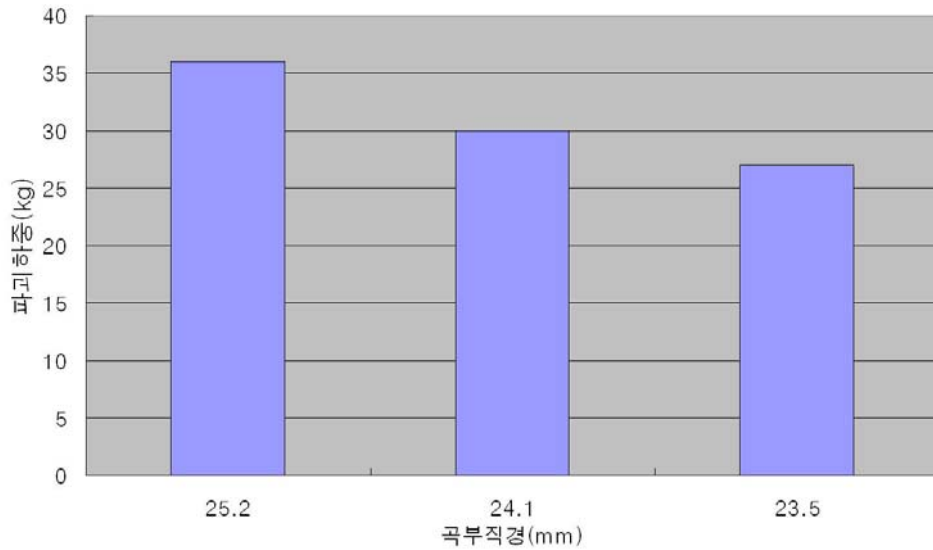


그림 131. 곡부 단면의 파이프 직경별 파괴하중

3. CFD를 이용한 풍력계수 산정

온실의 설계과정에서 수행되는 구조해석시 온실구조에 작용하는 풍하중은 풍력계수와 속도압의 곱으로 산정된다. 이러한 풍력계수는 풍동실험에 의해서 산정할 수 있으며 온실의 형상과 지붕의 경사각에 따라 상이하게 나타난다. 현재 사용되고 있는 풍력계수는 양지붕형과 아치형 온실에 대해서만 산정되어 있어 국내에서 많이 시공되고 있는 복숭아형 온실에 대해서는 풍력계수가 없어 아치형 온실에 준하여 풍하중을 산정하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 정확한 풍하중의 계산을 위하여 복숭아 형태의 온실단면에 대한 풍력계수를 산정하고자 CFD를 이용하여 이론적으로 양지붕형 온실에 대하여 풍력계수를 산정하였다. 산정된 결과가 기존의 풍동실험으로 산정한 풍력계수와 일치하면 이론적 시뮬레이션으로 복숭아형 온실의 풍력계수를 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 132는 CFD를 이용하여 k-ε 난류모델로 양지붕형 온실의 풍력계수를 분석한 그림으로 기존의 연구결과와 약간의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 일반적으로 난류 해석 모델(k-ε, SST, LES 등)에 따라 온실주위 속도 및 온실벽면의 변동 풍압력이 상이하게 나타나므로 해석모델을 다양하게 하여 분석한 결과의 추가적인 검증이 필요하다. 추가적인 연구를 통하여 기존의 풍력계수와 시뮬레이션 결과가 동일하게 나올

경우에 시뮬레이션을 통하여 온실의 지붕이 복숭아형태의 구조물에 대한 풍력계수, 온실의 측벽기울기에 따른 풍력계수 및 온실 동간격에 따른 풍력계수를 산정할 수 있을 것으로 판단되며 풍동실험과 시뮬레이션을 이용하여 국내 온실에 적용할 수 있는 풍력계수의 산정이 필요하며 이를 위해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

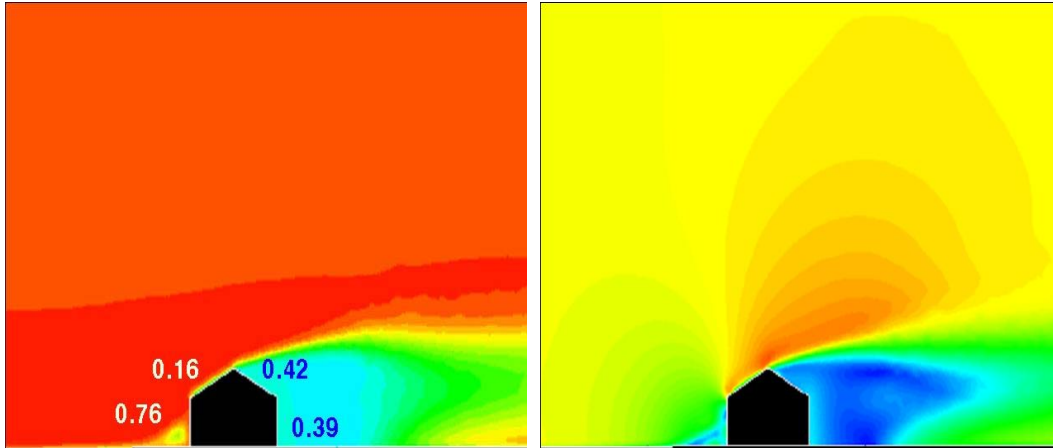


그림 132. 양지붕형 온실의 풍력계수 산정

4. 온실 전용 구조해석 프로그램 개발

가. 온실의 구조해석 알고리즘 구축

온실의 구조해석은 유한요소법을 이용하였으며 트러스와 프레임 요소에 대하여 집중하중, 등분포하중(풍하중, 설하중)에 대한 정적해석을 수행할 수 있도록 하였다. 그림 133에서 보는 바와 같이 트러스요소는 두개의 절점 I, J로 정의되는 선형요소이다. 이 요소의 국지좌표계(element local coordinate system) S는 절점 I에서 절점 J를 잇는 방향벡터이다. 절점의 자유도는 직선변위(translational displacement)뿐이며, 모든 회전변위(rotational displacement)는 구속되어야 한다. 그리고, 프레임 요소는 각 절점에서 축방향, 횡방향, 휨방향의 거동의 축방향 요소와 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 6자유도(D.O.F)로 구성된 3차원 요소는 그림 133(b)와 같다. 각 절점에서 축방향 요소의 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 6자유도(D.O.F)로 구성된다. 여기서, 프레임 요소의 각요소 절점에서 축방향, 횡방향, 휨방향의 거동만을 고려한 3

자유도(D.O.F)로 구성된 2차원 요소는 그림 133(c)와 같다.

일반적으로 프레임 구조는 보와 기둥이 평면 또는 입체적으로 결합되어 형성된 구조이므로 그림과 같은 요소의 강성 매트릭스를 유도하기 위해서는 요소의 경사각 ϕ 가 0인 보요소의 경우에 대해서 강성 매트릭스를 구하고 이 강성 매트릭스를 좌표변환 매트릭스를 이용하여 변환시킴으로써 요소의 강성 매트릭스를 형성할 수 있다. 프레임 구조를 형성하고 있는 각요소의 강성 매트릭스를 프레임 구조의 기하학적 구성에 따라 조합함으로써 전체 뼈대 구조의 정적 해석을 수행하게 된다.

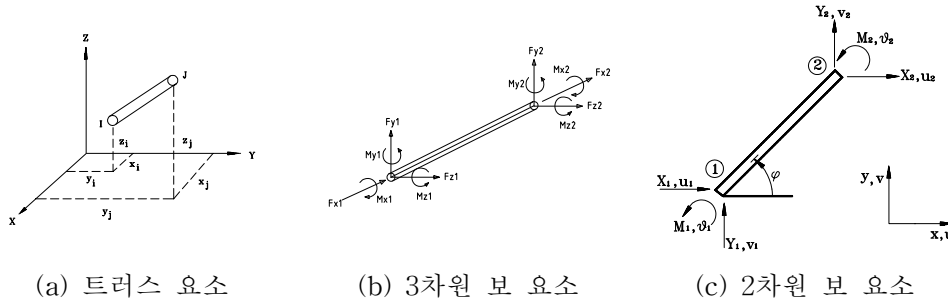


그림 133. 트러스 및 보 요소

그림 133과 같은 3자유도를 갖는 요소에 대해 그림 134와 같이 인장 및 압축만 받는 축방향 변위요소와 두 축을 중심으로 하는 휨방향 변위요소로 나누어 각각에 대해서 요소 강성도 행렬을 구하면 식 (40) 및 식 (41)과 같다.

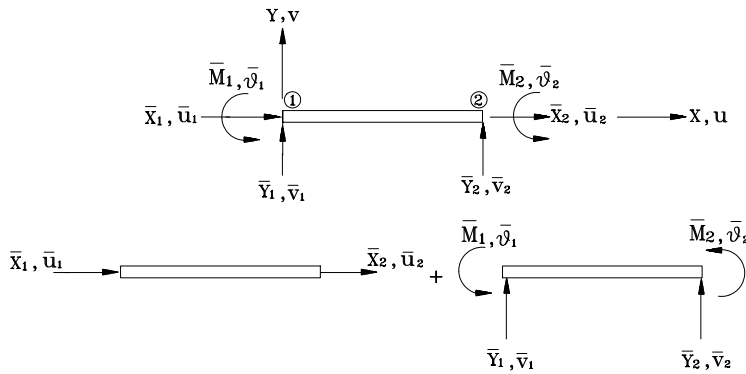


그림 134. 국부 좌표계에서 보 및 기둥요소

$$[K_t] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$[K_m] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{AL^2}{I} & & & & & \\ 0 & 12 & & & & \\ & & \text{symmetric} & & & \\ 0 & 6L & 4L^2 & & & \\ -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & \frac{AL^2}{I} & & \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

유한요소법에서 좌표축 변환은 전체구조에 적용하는 전체좌표계(Global axis)과 요소 내에서만 적용되는 국부좌표계(Local axis)사이에 이루어지는 것이 보통이며 유한요소법의 전 과정에서 이를 좌표의 상호 변환은 강성 행렬과 하중 벡터의 조합 과정에서 각요소별로 변환하는 부분이다. 국부좌표계에서 구한 요소별 강성행렬을 전체요소의 국지좌표계에서의 행렬 방정식의 일반적인 형태는 식 (42)와 같으며 국부좌표계의 절점력을 전체좌표계의 절점력으로 변환하면 식 (43)과 같다.

$$[\bar{k}] \{\bar{u}\} = \{\bar{F}\} \quad (42)$$

$$\bar{X}_1 = X_1 \cos \phi + Y_1 \sin \phi$$

$$\bar{Y}_1 = -X_1 \sin \phi + Y_1 \cos \phi$$

$$\bar{X}_2 = X_2 \cos \phi + Y_2 \sin \phi \quad (43)$$

$$\bar{Y}_2 = -X_2 \sin \phi + Y_2 \cos \phi$$

$$\bar{\theta}_1 = \theta_1 \quad \bar{\theta}_2 = \theta_2$$

여기서, \bar{X} , \bar{Y} , \bar{M} : 국부좌표계에서의 절점력, \bar{u} , \bar{v} , $\bar{\theta}$: 국부좌표계에서의 변위
 X , Y , M : 전체좌표계에서의 절점력, u , v , θ : 전체좌표계에서의 변위

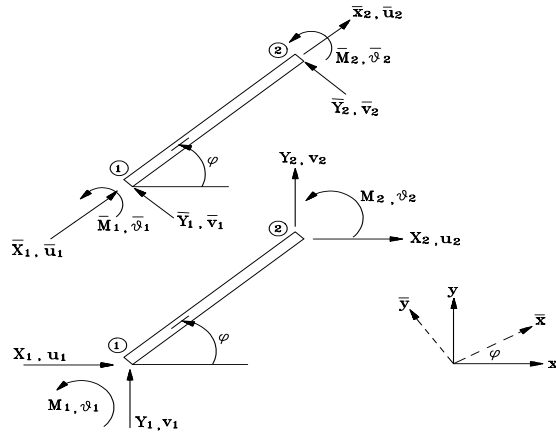


그림 135. 국부좌표계(\bar{x}, \bar{y})에서 전체좌표계 (x, y)의 좌표 변환

전체좌표계에 대한 2차원 프레임 요소의 단면력과 변위와의 관계식으로부터 각 구조 요소에 대한 강성도 방정식은 식 (44)와 같이 정식화할 수 있다. 그리고, 본 연구에서 사용한 구조해석 프로그램의 흐름도는 그림 136과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ M_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ M_2 \end{bmatrix} = \frac{EL}{L} \begin{bmatrix} R\lambda^2 + \frac{12}{L^2} \mu^2 & & & & & \\ (R - \frac{12}{L^2})\lambda\mu & R\mu^2 + \frac{12}{L^2} \lambda^2 & & & & \\ -\frac{6}{L} \mu & \frac{6}{L} \lambda & 4 & & & \\ -R\lambda^2 - \frac{12}{L^2} \mu^2 & (-R + \frac{12}{L^2})\lambda\mu & \frac{6}{L} \mu & R\lambda^2 + \frac{12}{L^2} \lambda^2 & & \\ (-R + \frac{12}{L^2})\lambda\mu & -R\mu^2 - \frac{12}{L^2} \lambda^2 - \frac{6}{L} \lambda & \frac{(R-12)}{L^2} \lambda\mu & R\mu^2 + \frac{12}{L^2} \lambda^2 & & \\ -\frac{6}{L} \mu & \frac{6}{L} \mu & 2 & \frac{6}{L} \mu & -\frac{6}{L} \lambda & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (44)$$

여기서 $R = A/I$, A : 단면적, I : 단면 2차 모멘트

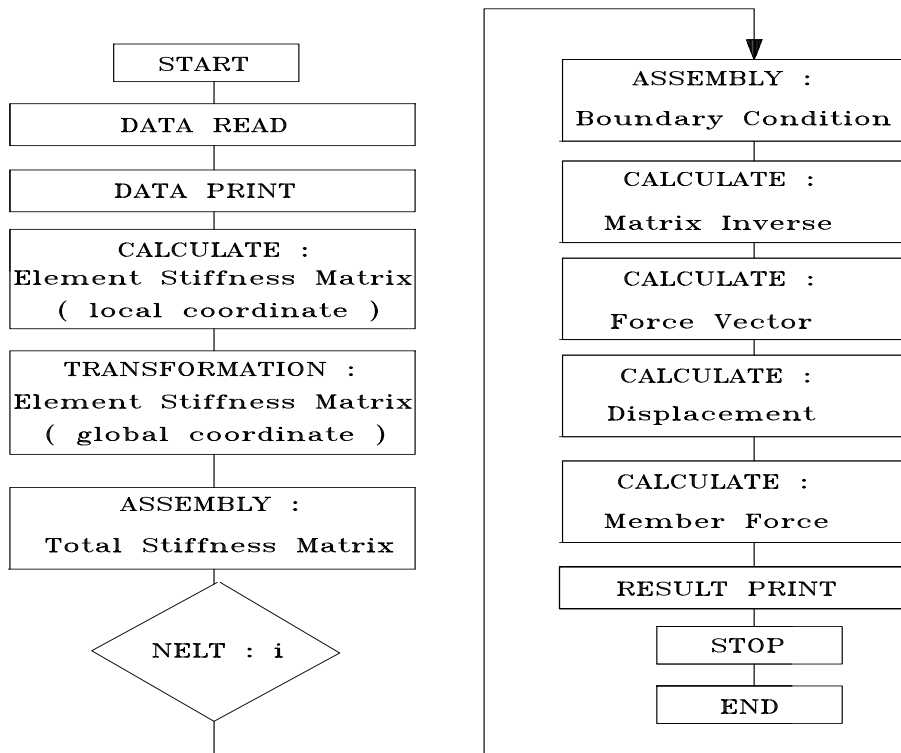


그림 136. 응력해석 프로그램의 흐름도

나. 구조해석용 입력자료의 자동화를 위한 알고리즘 개발

구조해석을 위한 온실 구조의 모델링에 필요한 좌표생성 및 경계조건을 단순화하여 사용자의 입력자료에 따라 자동으로 구조해석 모델이 생성되도록 하였으며 사용자의 입력자료는 다음과 같다.

- 온실형태 : 반원형, 아치형, 복숭아형, 양지붕형 중 선택
- 온실폭, 처마높이, 지붕높이, 처마기울기
- 설치지역, 재현기간(or 안전율과 내용년수) 선택 → 설치지역에 따른 재현기간별 설계하중 자동생성(설계 풍속 및 적설심을 직접 입력 가능)
- 사용자재 선택

입력자료에 따른 구조해석용 좌표생성결과를 AutoCAD로 작도하여 모델링한 좌표

와 비교하여 검증하였으며, 설치지역에 따른 재현기간별 설계풍속 및 적설심을 전산 D/B화 하였다.

그림 137은 아치형의 단둥온실모델로서 식 (45)~식 (48)를 이용하여 입력자료(온실 폭, 처마높이, 지붕높이)로 자동으로 좌표를 구성하였다.

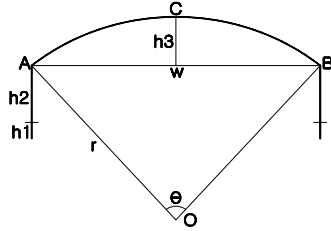


그림 137. 아치형 단둥온실 모델

$$r = \sqrt{(r - h_3)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}, \quad \theta = 2 \cos^{-1}\left(\frac{r - h_3}{r}\right) \quad (45)$$

$$L = 2 \times h_1 + 2 \times h_2 + 2\pi r \times \frac{\theta}{360} \quad (46)$$

$$X_n = X_{n-1} + \frac{h_2}{n}, \quad Y_n = 0 \text{ or } w \quad (47)$$

$$X_n' = R \cos \Delta \theta, \quad Y_n' = R \sin \Delta \theta \quad (48)$$

여기서, X_n, Y_n : 기둥 X, Y좌표, X_n', Y_n' : 아치곡부 X, Y좌표, r : 아치곡부의 반지름, h_1 : 매입깊이, h_2 : 처마(측벽)높이, h_3 : 곡부높이, L : 파이프 총길이 이다.

지역별 재현기간에 따른 설계풍속과 설계적설심을 이용하여 식 (49) 및 (50)을 이용하여 설계하중을 산정하여 온실 각 부위별로 자동 적용하도록 하였다.

$$P = C 0.0197 V^2 \sqrt{h} A \quad (49)$$

여기서, P : 풍하중(kg), C : 풍력계수, V : 설계풍속(m/s), h : 평균지붕높이(m), A : 유효수압면적(m^2) 이다.

$$W_s = \rho D \alpha \quad (50)$$

여기서, W_s : 적설하중(kg/m^2), ρ : 적설의 단위체적중량($kg/cm \cdot m^2$), D : 설계적설심(cm), α : 지붕경사 및 피복재의 종류에 따른 절감계수이다.

다. 온실 설계 및 구조해석 프로그램 개발 및 검증

본 연구에서 개발된 온실용 설계 프로그램 GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design)과 구조해석 프로그램 MAAS(Modeling and Analysis Program for Agricultural Structures)은 그림 139와 그림 140과 같으며 프로그램 순서도는 그림 138과 같다. GreenSAD는 구조역학 등의 전문지식이 없더라도 쉽게 단동온실 및 연동 온실을 설계할 수 있도록 개발된 것이며 MAAS는 구조역학 등의 다소 전문지식이 있는 사용자 및 연구자 들을 위해 개발 된 것이다.

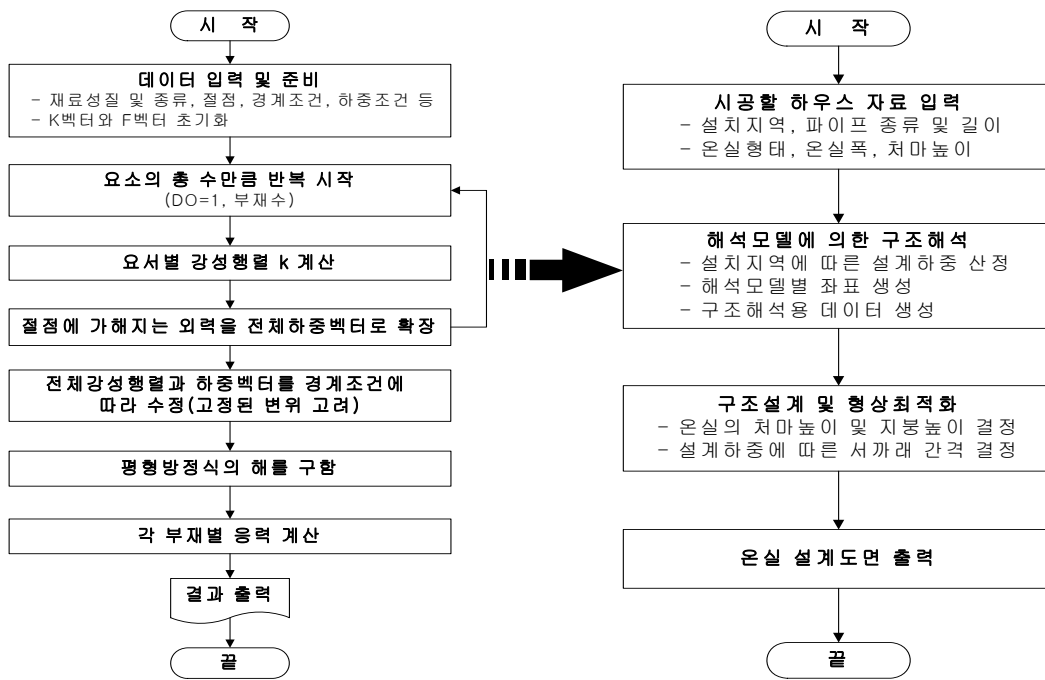
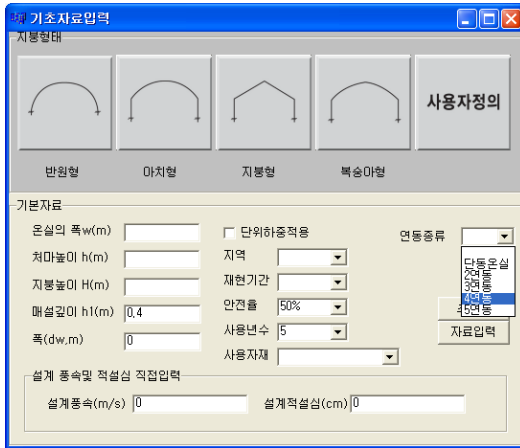


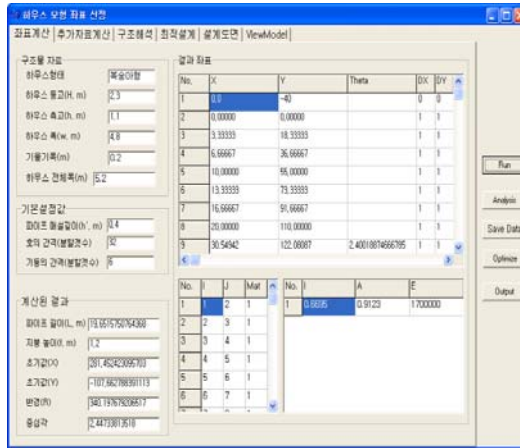
그림 138. GreenSAD 순서도

온실용 설계 프로그램인 GreenSAD의 입력자료는 온실형태, 폭, 처마 및 지붕높이, 처마기울기, 설치지역 및 재현기간(or 안전율과 내용년수), 사용자재로 구조해석에 필요한 입력자료를 단순화하였으며 구조해석 모델링과 설계하중 등이 자동으로 생성되도록 하였다. 그리고, 설치지역, 재현기간, 사용자재 등은 사용자가 선택할 수 있도록

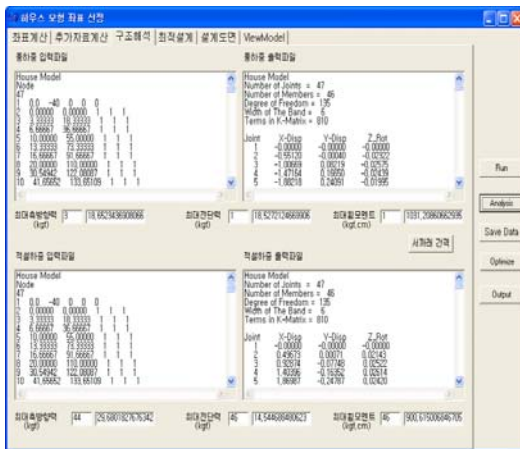
하여 편이성을 도모하였으며 설치지역에 따른 재현기간별 설계하중을 자동계산을 이용할 수도 있지만 직접 설계풍속 및 적설심을 입력할 수 있도록 하였다. 입력값에 따라 구조해석 온실모델을 자동생성하고 부재별 설계하중을 계산한 후 구조해석을 수행하도록 되어있다. 구조해석 결과를 이용하여 서까래 간격 및 온실형태를 최적화하여 설계도면을 출력할 수 있다.



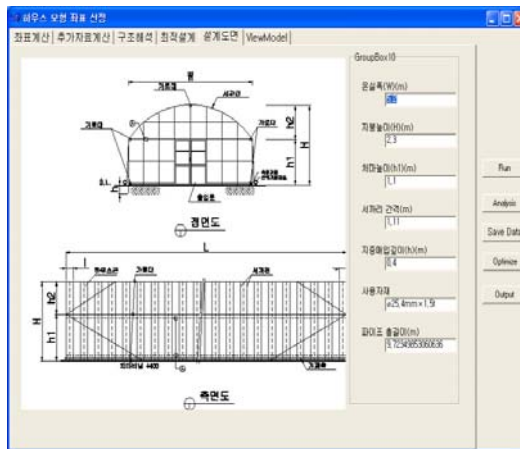
(a) 자료입력



(b) 좌표 및 설계하중 산정



(c) 구조해석 결과



(d) 결과 출력

그림 139. GreenSAD 실행 화면

상용 구조해석 프로그램인 SAP2000, MIDAS 등은 고가의 소프트웨어로 온실관련 업체나 관련기관 등에서 활용하기에는 경제적 한계가 있으므로 온실 등의 농업시설물들의 구조해석을 수행할 수 있는 온실용 구조해석 프로그램인 MAAS를 개발하였다.

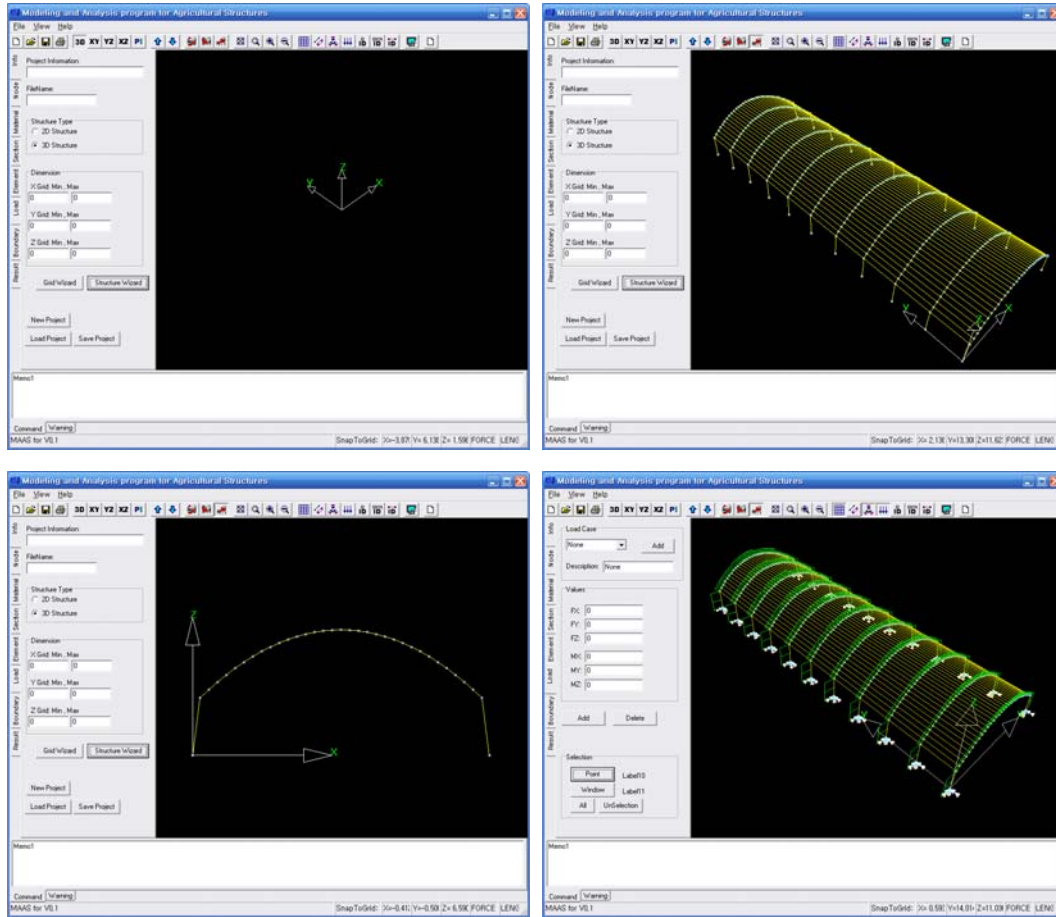
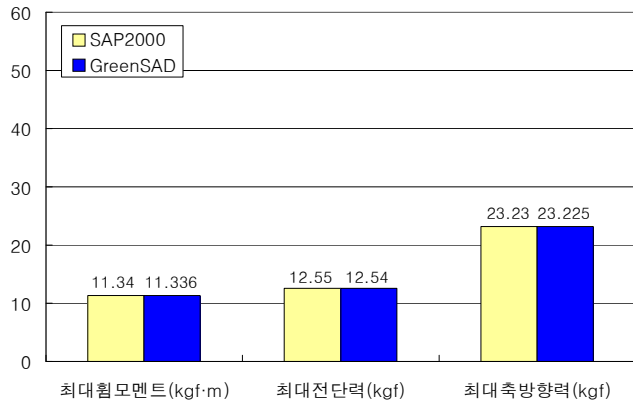
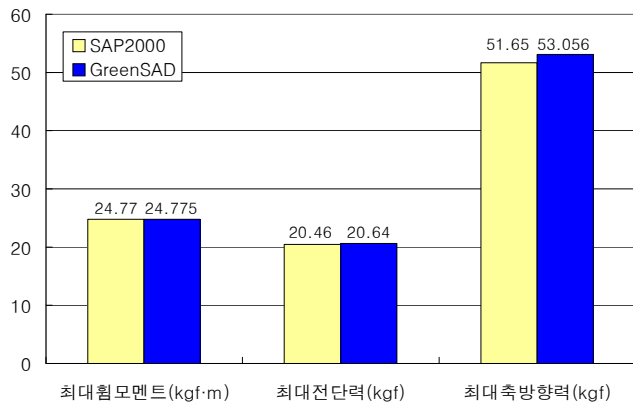


그림 140. MAAS의 실행화면

본 연구에서 개발된 GreenSAD와 MAAS에 이용된 구조해석기의 검증을 위하여 동일한 설계하중을 작용시켰을 때 발생하는 최대단면력을 상용프로그램인 SAP2000과 비교한 결과는 그림 141과 같다. 그림에서 보는 바와 같이, GreeSAD와 SAP2000의 구조해석 결과가 동일하게 나타나 GreenSAD를 이용한 단동비닐하우스의 설계가 가능할 것으로 판단된다.



(a) 풍하중



(b) 설하중

그림 141. 프로그램별 최대단면력 비교

제3절 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적설계시스템 개발

1. 온실구조설계에 최적화 기법 도입 타당성 검토

구조물을 설계할 때 고려되는 것은 효율성, 안전성 및 경제성 등이며, 공학설계에서 이상적인 구조물의 최적설계라 함은 주어진 제 기능과 필요한 성능을 만족하면서 안전하고도 경제적인 구조물 설계를 의미한다. 이러한 구조물의 설계를 위해서는 정확한 구조해석 방법과 최적설계기법의 활용이 필요하다. 구조해석 방법으로는 유한요소법, 소성힌지법 및 재료 및 기하학적 비선형을 고려한 해석법 등이 있으며 이러한 해석방법은 그 응용범위와 해석의 정도가 만족할만한 상태까지 발전하였다.

공학설계에서 구조물의 최적설계의 목적은 주어진 조건을 만족하면서 최소의 비용을 요구하거나 최상의 효과를 가지는 설계를 찾고자 하는 것이다. 이와 같이 최적설계기법을 사용한 경제적인 설계의 필요성은 오래 전부터 요구되어 왔으나, 종전의 설계방법으로는 이러한 요구를 충족하지 못했다. 이것은 종전의 설계가 설계자의 경험에 의한 시행착오적인 반복설계를 통하여 이루어져 왔기 때문에 구조물의 형상이 복잡한 경우에는 계산상의 어려움과 반복계산을 되풀이해야 하는 번거로움 때문이었다. 그러나 최근의 컴퓨터의 발전으로 인해 최적설계 과정의 복잡한 계산이나 반복계산을 수치적인 개념으로 그리고 빠른 속도로 처리할 수 있어 이러한 문제를 해결할 수 있게 되었고, 아울러 구조물의 최적설계(structural Optimization)에도 많은 발전이 이루어 졌다. 그리고, 공학설계에서 이상적인 구조물의 설계라 함은 주어진 제기능과 필요한 성능을 만족하며, 안전하고 경량이며 저가인 구조물을 의미한다. 이러한 구조물의 설계를 위해서는 정확한 구조해석 방법과 최적설계기법의 활용이 필요하다. 구조해석 방법으로는 유한요소법에 의한 해석법, 소성 힌지법에 의한 해석법, 재료 및 기하학적 비선형을 고려한 해석법 등의 발전으로 그 응용범위와 해석의 정도가 만족할만한 상태까지 발전해 왔고, 이러한 해석 결과를 토대로 구조물이 만족해야 할 여러 제약조건들을 모두 만족하는 설계 변수들의 집합 중에서 최적해를 구하는 방법에 대해서는 많이 연구되어 왔으나 아직 농업시설인 온실구조설계에는 최적설계 관련된 연구가 아직 미비한 것으로 생각되며 다양한 최적설계기법에 따른 온실구조에 적합한 안전기준 분석과 전용자재의 규격화 연구개발이 필요한 상태 이다.

지금까지의 구조물의 최적설계는 주로 설계자의 직감, 경험, 및 숙련도에 의존한 시행착오적인 설계가 대부분이었으며 구조물의 형상이 복잡한 경우에는 계산상의 어려움과 반복계산을 되풀이 해야하는 번거로움 때문에 과다하게 설계되는 경우가 많았다. 따라서, 이러한 설계시스템은 복잡한 구조물인 경우 사용성, 경제성, 역학적인 안전성에 문제가 제기된다. 재래식 설계법의 장점은 설계자의 직감이나 경험이 설계 시스템에서 개념적인 변화에 바로 적용될 수 있거나 설계과정 중에 부가적인 기준을 만들 수 있다는 것인데 이런 경우 설계자는 특별한 구조적인 요소의 크기를 제약 조건을 만족시키는 범위 내에서 변화시키는 것이 매우 어렵고 비경제적이 되거나 설계 기간이 연장되는 경우가 많아진다. 그러나 최근 컴퓨터의 비약적인 발전으로 설계과정 시 필요한 복잡한 계산이나 반복적인 계산을 수치적인 개념으로 빠른 속도로 처리할 수 있게 되므로써 구조물의 최적설계도 많은 발전을 하여 모든 설계 분야에 적용할 수 있다.

구조물들은 그 활용의 다양성과 복잡성 때문에 해석 및 설계까지의 모든 절차를 수작업으로 하기에는 많은 어려움을 겪게 되었다. 특히 온실과 같은 특수 구조물은 정식화의 특이성으로 인하여 수작업으로 해석 및 설계를 한다는 것은 더더욱 어려운 실정이다. 최근 유한요소법등이 도입된 구조해석 및 설계 프로그램의 개발로 인하여 구조물 해석 및 설계시 소요되는 시간의 절약과 그 정확도가 많이 향상된 것은 사실이다. 하지만 일반적으로 이러한 구조해석 및 설계 프로그램은 사용자 편의를 위한 다양한 종류의 메뉴와 해석 및 설계기능을 동시에 가지고 있어야 하나, 구조해석 및 설계 프로그램 개발에 전통적으로 사용되어 온 FORTRAN과 같은 절차적 언어로 작성된 기존의 프로그램들은 단지 정확하고 신속한 처리에만 주력하고 있을 뿐 메뉴의 선택이 다양하지 못하고 프로그램의 부분적인 추가 및 수정 등이 용이하지 않는 등 사용자와 개발자 측면에서 여러 가지 문제점들을 내포하고 있다. 그리고, 종래의 구조설계에서는 응력제약조건 등에 확실적인 안전율을 적용하여 왔으나 이것은 기술자의 경험과 직관적 판단에 의한 것으로 구조물의 사용기간 동안에 추정되는 최대하중과 최소강도의 조건이 동시에 발생된다고 보아 결정적(deterministic) 값으로 사용되고 있는데 그 결정과정에서 합리성의 결함이 지적되고 있다. 따라서, 정확한 해석과 최적설계가 온실구조에도 적용함이 타당할 수 있다.

온실 구조물은 타 건축 및 토목구조물에 비해 구조가 단순하며 사용자재 또한 다양하지 못한 특성을 가지고 있으며 구조는 프레임과 트러스 요소로 구성되어 있다. 그리고, 온실의 단면형상에 따라 구조특성이 상이하게 나타나는 특징이 있다. 따라서,

최적설계를 통하여 보다 안전한 온실의 단면형상을 찾을 수 있으며, 재현기간에 따른 지역별 설계하중이나 설계기준등에 가장 경제적인 부재단면을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 종류의 문제에 적용할 수 있고, 신뢰성과 범용성이 좋으며, 설계변수로서 이산화된 코드를 사용하므로 조합최적화 문제에 적용이 매우 용이한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, 이하 GAs)과 비선형 최적화에 적합한 축차 무제약 최소화 기법(Sequential Unconstrained Minimization Technique, 이하 SUMT)을 이용하여 다양한 단동 및 연동온실에 대한 연속최적설계와 이산최적설계를 수행함으로써 온실구조의 안전성과 경제성을 평가하고 실용적이면서도 효율적인 최적 설계프로그램을 개발하고자 한다.

가. 관련 연구 동향

1) Genetic Algorithms

유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GAs)은 1970년대에 미시간 대학에서 John Holland와 그의 연구진들에 의해 연구가 시작되었으며 1975년에 출판된 Holland의 저서 “Adaptation in Natural and Artificial Systems”를 통하여 학문적으로 유전자 알고리즘이 처음 소개되었다.

유전자 알고리즘에 관한 국제학술세미나(International Conference on Genetic Algorithms, ICGA)는 1985년 미국 카네기 멜론대학에서 처음으로 개최되어 유전자 알고리즘에 관한 심도 있는 연구의 터전을 만들었고 그 후 2년마다 개최되고 있다. 또한 유전자 알고리즘의 개최에 대한 강습회(Workshop on Foundation of Genetic Algorithms, FOGA)와 유전자 프로그래밍 학술 발표회(Genetic Programming Conference, GP)와 같은 국제회의가 개최되고 있어 지속적인 유전자 알고리즘에 대한 관심과 발전이 거듭될 전망이다.

공학 분야에서는 1983년 Goldberg에 의해 가스 송유관의 최적 설계가 최초로 시도된 이래 많은 발전이 있었다. 그 뒤 Adeli와 Cheng은 토너먼트 선택방법을 이용한 구조물의 최적화를 수행하였으며, Feng, Liu와 Burns는 시공절차에 관한 최적화 문제를 검토하였다. 또한 실수형 유전자 알고리즘에 의한 최적 설계와 유전자 알고리즘을 이용하여 신경망구조를 최적화한 논문도 발표되었다. 1991년에 Jenkins는 여러 가지 구

조물의 최소중량설계와 트러스 구조물의 기하학적 형상 최적설계(geometrical optimization)를 행하였다. 1992년에는 Rajeev와 Krishnamoorthy은 이산화 설계 변수를 가지는 여러 형태의 트러스 구조물에 대해 GAs를 사용하여 최적설계를 수행하였다. Arora와 Huang은 이산화 최적 설계에서 유전자 알고리즘과 담금질 법에 대한 비교평가를 하였다.

Grefenstette는 유전자 알고리즘에 의한 최적설계시 사용되는 설계상수의 여러 가지 조합에 대해 몇몇 수학적 함수를 대상으로 최적화를 행하여 각 설계상수가 지닌 기본 성질과 효율적으로 유전자 알고리즘을 사용하기 위한 설계상수의 활용도에 관한 연구를 행하였다.

Hajela는 설계공간이 non-convex한 형태로 된 구조 최적 설계모델에 대하여 유전자 알고리즘을 사용하여 최적 설계를 수행하였다. 1991년 Deb[48]은 유전자 알고리즘을 사용하여 용접된 보에 대한 최소비용설계를 행하여 기존의 타 방법들과 비교 검토를 하였다.

1992년 Lin등은 정수와 이산화 설계변수로 구성된 여러 가지의 최적 설계 문제에 대하여 구조물 최적 설계를 수행하였다. Rajan은 이산화 및 연속 변수를 사용하여 공간 트러스 구조에 대하여 단면, 형상 및 위상이 고려된 최적 설계를 수행하였다.

유전자알고리즘과 관련된 국내문헌에서는 1998년 허현행이 simple GAs를 이용하여 평면트러스의 위상최적화를 시도하였고, 1996년 이준배는 GAs와 전체기준방법(GCM)을 결합하여 다목적최적화를 수행하였다. 또한 1999년 김기홍은 GAs와 인공신경망을 이용하여 평면 철골프레임과 트러스을 이산화최적설계를 시도하였다.

2) SUMT((Sequential Unconstrained Minimization Technique)

1950년대 이전에는 최소변형에너지 설계, 최소중량설계, Uniform strength design 등이 주류를 이루다가. 1950년대 에는 소성 이론에 의한 선형계획이 주류가 되었다. 그리고 목적 함수가 선형이 된다면, 뼈대 구조물의 최소 중량 설계가 선형 계획의 문제로 취급될 수 있음이 입증되었다. 다른 한편으로는 탄성이론에 의한 최적화 문제는 일반적으로 비선형 문제의 최적 설계가 된다는 것을 알아냈다.

1960년대에 이르러서는 컴퓨터 기술과 수학적 설계기법의 급격한 발전에 자극을 받아 최적화 이론도 매우 큰 발전을 이루게 되었다. 이들 발전과정과 문헌은 Sheu, Prager, Schmit의 논문에 잘 소개되고 있다. 1967년 Ridha는 최초로 뼈대 구조물의

비선형목적함수를 형성 하므로써 큰 관심을 끌었으나 그의 목적 함수는 재료비와 부재의 연결비만을 고찰하고, 기타의 여러 건설공비는 건설입지 조건에 따라 다르고 정량화하기가 곤란하여 실제와는 차이가 있었다. 그리고 본 연구에서 최적화의 한 기법으로 사용한 SUMT에 관한 그 연구 동향을 살펴보면, Kalaba, Razani and Goble and Desanti는 연속보와 플레이트 거더 등의 구조 설계에 동적 계획법을 최초로 도입하였으며, Porter Goff는 트러스 구조의 형상 최적화에 동적 계획법을 이용하였고, 이 분야의 더 많은 연구는 Palmer, Sheppard, Palmer and Sheppard, Sheppard and Palmer 등에 의해서 이루어 졌다. Parmer는 동적 계획법을 고층 뼈대 구조물의 최적화에 처음으로 적용하였으며, Reitman, Swiszcowski, Distefano and Rath, Twisdale and Khachaturian, Kirsch, Ho, Jendo 및 Marks 등에 의해서 많은 발전을 보게 되었다.

Pochtman 과 Baranenکو는 보와 막구조 및 관구조 등에 동적 계획법을 적용했으며, Raj 와 Durrant는 송전탑과 같은 구조물 등의 실제적인 최적화에 동적 계획법을 적용할 경우 아주 유용하게 이용할 수 있음을 증명하였고 Blachut는 압축력을 받는 유연한 보에 동적 계획법을 적용하여 최적화를 시도하였으며 Vitiello는 대규모 구조시스템에 있어서 단일 단면 보에 대한 부재군의 최적의 수를 결정할 때 이 기법을 적용하는 방법을 제시하였다. 동적 계획법을 적용하는데 있어서 새로운 가능성은 Distefano 와 Samartin에 의해서 제시되었는데 유한 요소 방정식을 형성해서 해를 구하는데 이 기법을 이용하였다.

문헌 조사결과 지금까지 대부분의 연속 및 이산화 최적설계는 철근콘크리트, 트러스 및 라멘 철골 구조 등에 대해서만 최적설계연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 거의 시도되지 않았던 온실구조물의 구조해석과 단면 연속 및 이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 프로그램을 개발 하고자한다.

다. 연구목적

지금 까지 연구된 국내외 많은 구조물 연구들이 실제 구조물에 바로 적용되기에는 많은 어려움이 있다. 또 실제 온실 구조물 설계의 경우 초기 부재단면을 가지고 우선 구조를 해석한 후 구조물의 구조적인 응답이 온실 규준이나 경험에 의해 제시되는 성능 기준에 대하여 만족하는지를 검토하게 된다. 이러한 기준에 위배되거나 과도할 경우 부재 단면의 크기가 다시 설정되고 구조물은 다시 해석된다. 이러한 과정은 합리적인 설계가 얻어질 때까지 반복된다. 그러나 이러한 수행의 최종설계는 설계 가능

범위에 있을지는 몰라도 최적성에 대한 보장을 할 수는 없고, 또한 시간적인 제약과 설계 예산상의 제약 때문에 구조물의 최적 설계는 전통적인 설계반복 과정으로서는 얻기가 힘들다.

이러한 재래식 설계개념과 최적 설계의 개념을 비교하면 그 주된 차이점은 세가지로 요약할 수 있다. 첫째는, 재래식 설계가 설계자의 직관과 경험에 의존하여 반복 시행적으로 진행되는 반면, 최적 설계에서는 목적함수로 귀결되는 어떤 최적화기준에 의해 설계가 자동적으로 일정한 방향으로 진행된다. 둘째는, 재래식 설계가 주로 전응력설계를 목표로 주요 응력제약 조건만을 고려하여 부재를 결정하고 다른 제약조건은 안전여부를 검사하는 정도에 그치는 반면, 최적 설계는 모든 설계제약조건을 모두 만족시키며 동시에 중량을 최소화 하는 과학적이고 합리적인 설계라는 것이다. 셋째는, 설계변수의 결정과정에서 재래식 설계가 부재치수를 가정하고 재해석 및 검사라는 반복시행과정에 의해 간접적으로 결정하는 반면, 최적설계는 최적화 과정을 통하여 자동적으로 직접 결정된다는 것이다. 즉, 종래의 설계법이 구조해석 결과를 바탕으로 설계결과의 구조적 성능과 효율성의 판단을 기술자의 직관과 경험에 의존하는 것과 비교하면, 최적 설계법은 구조해석과 구조설계를 종합적, 합리적으로 처리하는 ‘구조적 종합(Structural Synthesis)’ 이라고 할 수 있다.

SUMT는 어떠한 단면형상에서도 적용이 가능하고 다제약 설계변수를 갖는 비선형문제를 무제약 최소화문제로 전환하여 탐색하는 축차무제약 최소화 기법으로써 본 연구의 연속최적설계기법으로 사용되었다.

GAs는 자연유전학과 자연선택을 기초로 하는 탐색 과정으로 넓은 범위의 탐색 범위에서 랜덤(random)하게 코드화된 파라메타(parameter)들을 형성하여 자연으로부터 추론된 유전연산자(genetic operator)와 인위적 생존 경쟁의 적합도에 의한 복제연산자(reproduction operator)를 이용하여 새로운 자손 파라메타를 병렬적으로 형성하면서 부모 파라메타를 대체하는 진화적 구조를 갖는다. 이러한 구조는 많은 국부 최소(최대)치가 존재하는 문제에서도 전역 최소(최대)치로 수렴하는 강력한 탐색 구조를 갖고 있으며, 이러한 장점을 이용하여 GAs을 온실구조의 단면 최적문제의 탐색 알고리즘에 적용하므로 문제탐색 영역의 복잡함에 관계없이 전역 최소(최대)인 최적의 경로를 구현할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 단동 및 다양한 연동온실구조의 최적설계를 연속최적기법과 이산최적기법을 적용하여 구조해석과 강구조 한계상태설계기준(2001)에 따른 한계상태설계기준으로 단면최적설계를 손쉽게 수행할 수 있는 최적 알고리즘을 개발하여 다

양한 온실구조의 단면 최적화 문제의 동시탐색 최적알고리즘으로 적용하여 보다 신뢰성 있고 효율성이 있는 통합 시스템화 된 최적설계 프로그램의 개발을 목적으로 한다.

2. 최적설계기법

설계 변수의 존재 영역에 따라서 구분하는 연속 최적 설계와 이산화 최적 설계가 있다. 인간 생활에 있어서는 거의 모든 경우에 대하여 정수의 체계가 일반화되어 있는데 이것은 공학에서 실제로 사용하는 숫자의 유효자리는 5자리를 초과하지 않는다는 것에서도 알 수 있다. 크기에 대한 제한은 없지만 하나의 집합으로 표시가 가능해야 하는 것이 불연속 수이며 집합으로 표시가 불가능한 것이 연속수가 된다.

가. 축차 무제약 최소화 기법에 의한 연속최적설계

최소 경비 문제에 대한 최적화 기법으로는 주로 축차선형계획법(Successive Linear Programing, SLP)과 SUMT법등이 많이 이용되고 있다. 이 중 본 연구에서 사용한 SUMT법은 다 설계변수와 다제약조건을 갖는 비선형 최적화 문제를 일련의 penalty parameter들을 사용하여 무제약 최소화 문제로 변형시킨 목적함수의 최소 해를 가능해의 영역 안에서부터 지배적인 제약조건의 경계부로 연속적으로 접근시켜 최적해를 구하는 방법으로서 다음과 같은 방법이 있다.

1) Interior penalty function method

초기치 $\alpha^r = \alpha^1$ 과 $G_j(X^r) \leq 0$ 인 실행 가능한, 즉 제약조건을 만족하는 초기 설계점 $X = X^0$ 가 주어지면 일련의 설계점 X^r 은 식 (51)과 같은 무제약 함수의 최소치를 구하는 문제로 된다.

$$\text{Min. } \Phi (X, \alpha^r) \quad (51)$$

위 식에서 $\Phi (X, \alpha^r)$ 는 식 (52)와 같이 정식화 되어진다.

$$\Phi (X, \alpha^r) = C(x) + \alpha^r \sum_{j=1}^m \frac{1}{G_j(X)} \quad (52)$$

여기서 α^r : 벌칙 매개변수(Penalty Parameter), $C(x)$: 목적함수(object function)

식 (52)와 같은 벌칙함수(Penalty function)를 이용하는 방법을 내부 벌칙 함수법 (Interior Penalty Function Method)이라고 한다.

2) Exterior penalty function method

초기치 $t^r = \alpha^1$ 로 작은 값을 취하고 초기설계시 $X = X^0$ 을 사용하여 식 (52)과 같은 일련의 무제약 함수의 최소치를 구함으로서 설계점 X^r 을 구할 수 있다.

$$\text{Min. } \Phi'(X, \alpha^r) \quad (53)$$

위 식에서 $\Phi'(X, \alpha^r)$ 는 식 (54)와 같이 정식화된다.

$$\Phi'(X, \alpha^r) = C(x) + t^r \sum_{j=1}^m \max.[G_j(X), 0]^2 \quad (54)$$

여기서 $G_j(X) = \begin{pmatrix} G_j(X) : G_j(X) < 0 \\ 0 : G_j(X) < 0 \end{pmatrix}$

식 (54)와 같은 벌칙함수(Penalty function)를 사용한 방법을 외부 벌칙 함수법 (Exterior Penalty Function Method)이라고 한다.

3) Mixed interior-exterior function method

앞에서 정의된 매개변수 t^r 및 α^r 을 이용하여 무제약함수의 최소치를 식 (55)와 같이 구함으로서 일련의 설계점 X^r 을 구할 수 있다.

$$\text{Min. } \Phi'(X, \alpha^r, t^r) \quad (55)$$

위 식에서 $\Phi'(X, \alpha^r, t^r)$ 은 식 (56)과 같이 정식화된다.

$$\Phi'(X, \alpha^r, t^r) = C(X) + \alpha^r \sum_{j=1}^m \frac{1}{G_j(X)} + t^r \sum_{j=1}^m \max.[G_j(X), 0]^2 \quad (56)$$

식 (56)과 같은 벌칙함수(Penalty function)를 사용하는 방법을 내·외부 혼합 벌칙 함수법(Mixed Interior and Exterior Penalty Function Method)이라 한다. 설계가능 영역안에서 최적해를 탐색해 가는 내부벌칙 함수(Interior Penalty Function)이 외부벌칙 함수(Exterior Penalty Function)보다 효율적으로 최적해에 수렴하는 과정에서도 항상 설계변수들이 사용 가능 영역 내에 있는 장점을 가지고 있다.

4) 온실 구조물의 연속 최적화 알고리즘

설하중 및 풍하중을 받는 온실구조물의 최적화문제는 다제약 다변수를 갖는 비선형 계획문제로 된다. 이런 비선형 계획문제의 해를 구하는 기법으로 SUMT기법을 이용하여 서까래, 기둥 등의 각각의 최적해를 구하였는데 전체적인 알고리즘의 흐름도는 그림 142와 같이 나타낼 수 있다.

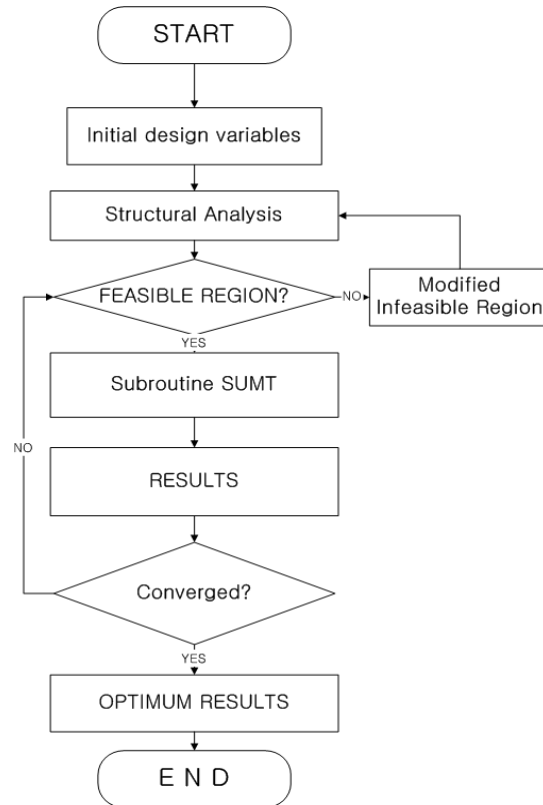


그림 142. 연속 최적화 알고리즘의 흐름도

5) 목적함수의 형성

구조물의 요소가 적절하게 결정되고 설계 변수와 목적함수 및 제약조건 등이 결정 되면 다음 식(57), 식(58)과 같은 일반적인 형태로 최적 설계 문제가 형성된다.

$$\text{Minimize } F(X) \quad (57)$$

$$\text{subject to } G_j(X) \geq 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, i) \quad (58)$$

여기서, X : 설계변수, $F(X)$: 목적함수, $G_j(X)$: 제약조건식 이다.

최적설계에서는 목적함수가 식(57)로, 제약조건식 식(58)이 주어질 때 $F(X)$ 가 최소로 되도록 설계변수 X 를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 다설계변수와 다제약조건식을 갖는 비선형 최적화 문제를 일련의 벌칙매개변수(penalty parameter)들을 사용하여 무제약 최소화 문제로 변형시켜 목적함수의 최소해를 가능해의 영역안에서 부터 지배적인 제약조건의 경계부로 연속적으로 접근시켜 최적해를 구하는 SUMT를 사용하기로 한다. 최적해에 접근하는데 소요되는 시간이나 값의 정도는 벌칙변수 α^r 및 설계변수의 변화량에 크게 좌우되지만, α^r 값에 따라 최적해에 수렴하지 않을 수도 있기 때문에 초기 설계치는 반드시 실행가능 설계치를 선택해야 하는 어려움이 있다. 초기치 t^r 및 α^r 를 이용하여 무제약 함수의 최소치를 식 (59)와 같이 구함으로써 일련의 설계점 X^r 을 구할 수 있으며 식 (59)에서 $\phi(X, \alpha^r, t^r)$ 은 식 (60)과 같이 정식화 된다.

$$\text{Min } \phi(X, \alpha^r, t^r) \quad (59)$$

$$\phi(X, \alpha^r, t^r) = C(X) + \alpha^r \sum_{j=0}^m \frac{1}{G_j(X)} + t^r \sum_{j=1}^m \max. [G^j(X), 0]^2 \quad (60)$$

식 (60)을 penalty function으로 사용하는 방법을 Mixed interior-exterior penalty function method라 하며 본 연구에서는 이 기법을 사용하여 최적화 문제를 형성하였다.

나. 유전자알고리즘에 의한 이산최적설계기법

1) 유전자 알고리즘의 기본개념

GAs(Genetic Algorithms)은 다아윈이 주장한 자연진화의 법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연선택(natural selection)의 원리를 토대로 하여 정립된 최적화 알고리즘이다.

자연 진화의 법칙에 의하면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그

환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률은 크게 가지며, 교배(crossover)와 돌연변이(mutation) 등의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정을 통해 점차 도태되어 간다. 이와 같이, 진화의 과정을 되풀이 해 가면 결국 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들로 형성될 것이라는 것이 주요 내용이다.

GAs는 Holland에 의해 개발되고 Goldberg에 의해 공학 분야에 응용되기 시작한 검색 알고리즘이다. GAs의 기본적인 최적해 탐색 방법은 주어진 일정한 조건에 대하여 적합도가 높은 형질의 개체가 다른 개체에 비해 생존할 확률이 높으며 적합도의 통계적 분석으로 계산된 생존확률에 따라 생존한 개체들은 복제와 서로간의 교배를 통하여 더 적합성이 높은 개체를 만들어 낸다는 것이다. 이러한 과정을 반복하여 수행함으로써 주어진 조건에 대하여 적합성이 낮은 개체는 점차 생존 확률이 낮아져서 도태되며 적합성이 높은 개체들은 교배를 통하여 점차 적합도가 높은 개체를 생성하게 되어 결국에는 주어진 조건에 가장 적합한 개체를 검색하게 된다는 이론이다.

GAs는 확률론적인 병렬직접탐색기법이며 이산화 최적설계의 전역최적설계가능성이 높은 검색방법으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

GAs가 Holland에 의해 처음으로 소개된 이후, 기법 면에서 여러 가지 형태로 많이 발전되어 왔지만, 이 기법이 발전 속에 파생되어 나온 용어가 혼용되어 사용되고 있기 때문에 많은 혼동을 준다.

불투명한 용어의 정립과 GAs에 기본적인 내용의 이해를 위해 유전학에 근원을 둔 GAs의 기본 용어를 살펴본다. 유전학(genetics)은 현 세계에 존재하는 생물의 생명과 진화에 관계된 학문으로써 생물의 염색체와 DNA의 구조를 파악하여 생명체의 본질을 파악하는 학문이다.

이에 근거하여 GAs은 현 세계의 생태 질서를 면밀히 관찰하여 생태 질서의 규칙성을 파악한 후 컴퓨터의 구조 시스템에 적합하도록 만든 기법으로 유전학에 근원을 두었다. 표 71에서 보여 주듯이 구성 요소와 연산 방법에 따라 유전학과 GAs을 비교 설명하였다.

표 71. 유전학과 유전자 알고리즘의 비교

	유전학(genetics)	유전자 알고리즘(GAs)
분류	환경(environment)	적합도 함수, 확률
	염색체(chromosome)	한 개체의 전체 비트(individual), 문자열(string)
구성요소	유전자(gene)	비트로 코드화 된 설계 변수
	유전자의 정보를 담고 있는 형질	비트(bit)
연산방법	적자생존(survival of fittest)	개체 전체의 복제 연산
	자손생성	설계 변수의 교배 연산
	돌연변이(mutation)	비트의 돌연변이 연산

구성 요소에 따라 분류하면, 유전학에서 설명되는 환경은 생물이 살아가는 주변 상황으로 GAs에서는 설계점(design point)을 평가하는 적합도 함수와 설계점을 평가 할 때 필요한 확률 값으로 표현 될 수 있다.

생물이 환경에 의해 지배를 받듯이 설계점도 적합도 함수(fitness function)와 확률로 평가가 가능하기 때문이다. 또한 유전학에서 염색체는 염기(nucleotide)로 구성된 물리적인 실체이지만 GAs에서는 한 개체가 포함하는 전체 비트(bit)인 1차원 스트링(string) 배열로 표현되며, 유전자는 비트로 코드화 된 설계 변수(design variable)를 의미한다. 그리고 유전자의 정보를 담고 있고 실체로서 존재하는 유전자의 형질은 유전자 알고리즘에서는 1차원 스트링 배열 중에 한 개의 비트이다.

연산 방법에 따라 분류하면, 주변환경에 잘 적응하는 개체만이 살아남는다는 적자생존의 개념은 GAs에서는 복제 연산으로 표현된다. 환경에 잘 적응하는 강한 개체의 집단이 점점 다음 세대를 지배하듯이 복제 연산은 현 세대에 존재하는 모든 개체의 적합도 값을 계산하여 값이 큰 개체를 일정한 복제 확률에 따라 복제하여 적합도 없이 큰 개체가 다음 세대에 많이 생성되게 하는 연산 방법이다. 그리고 두 부모 개체에 의해 생성된 자손에 대해 임의로 선택한 교배 점에 따라 서로 정보를 바꾸는 교배 연산으로 개체가 생성된다.

염색체의 이상으로 생기는 돌연변이 현상은 GAs에서는 돌연변이 확률에 따라 비트 값인 0을 1로 혹은 1을 0으로 변화시키는 돌연변이 연산으로 표현된다.

2) 유전자 알고리즘의 장점

GAs는 설계 모델에 대한 조건이 없고 어떠한 종류의 문제에 대해서도 적용이 가능한 최적치 검색 알고리즘이다. 유전적인 절차는 기본적으로 동일한 내용이므로 설계 모델의 진화적(evolutionary) 절차만을 프로그래밍 하면 적용이 가능하므로 프로그램의 작성이 용이하다. GAs을 최적 설계 문제에 적용할 때의 얻을 수 있는 장점은 다음과 같이 세 가지로 요약할 수 있다.

- ① 수학적인 어려운 이론이 없다.
- ② 많은 세대의 진화를 통하여 전역 검색의 가능성을 높일 수 있다.
- ③ 어떠한 문제에도 적용하기가 쉽다.

GAs는 직접 검색을 사용하므로 목적함수 값만을 요구하며 확정적 기법의 최적화 알고리즘들과 같이 미분치 등을 요구하지 않는다. 또한, 초기값에 따른 국소 최적값으로 수렴현상을 극복할 수 있으며, 이산 및 정수 설계변수 처리 한계성을 해결할 수 있다. 따라서 기존의 확정적인 접근방법으로는 해결이 어렵거나 또는 불가능한 문제를 풀이할 수 있으며 이러한 가능성으로 인하여 공학의 다양한 분야에서의 접근이 시도되고 있으며 효과적인 결과를 얻어내고 있다.

3) 유전자 알고리즘의 특징

GAs는 임의로 생성된 유전자의 적합도를 계산해야 하는 진화적 절차와 진화를 거쳐 생존한 유전자를 이용하여 다음 세대의 유전자를 생성하는 유전적 절차로 나누어진다. Goldberg[1] 는 GAs과 기존의 전통적인 확정적인 최적 설계 방법의 차이를 다음과 같이 나타내고 있다.

- ① 수치 자체를 사용하지 않고 코드화된 해석 집합을 사용한다.
유전적 절차 내부에서는 탐색에 사용되는 모든 설계 변수들이 실제 수치가 아닌 설계에 실제로 적용이 가능한 수치만으로 구성된 배열의 색인번호를 사용한다.
- ② 하나의 해를 탐색하지 않고 해의 집단을 사용한다.
하나의 설계점 만을 참조하여 다음을 찾아내는 눈먼 검색을 하는 것이 아니라

집단에서 최적의 탐색치를 찾아서 참조하는 방법을 통하여 전역을 탐색하므로 국소 최적해(local optimum)에 빠지지 않으며 전역 최적해(global optimum)를 찾을 수 있다.

- ③ 미분치등의 다른 부수적인 자료를 사용하지 않고 목적함수만을 사용한다.
오로지 목적함수만을 사용하여 적합도를 계산하여 직접 비교 검색하는 방법이므로 여타의 방법과 같은 미분치를 찾아내는 일은 없지만 직접 탐색으로 인하여 상당한 시간이 소요된다.
- ④ 정해진 규칙을 사용하지 않고 확률적으로 변화하는 규칙을 사용한다.
다음 세대의 염색체를 선택하는 모든 결정에 있어서 확률적으로 변화하는 선택 조건을 사용함으로써 기존의 확정적인 방법을 사용하는 것보다 탐색의 범위가 넓어지며 어떤 영역이라도 탐색의 대상에서 제외되지 않는다.

4) 단순 유전자알고리즘

GAs를 이용하여 문제를 해결하기 위해서는 문제 해결을 위한 방법을 스트링(string)에 기술한다. 이 때 주로 이진코드를 사용하여 기술하며, 이렇게 만들어진 스트링을 '염색체(chromosomes)'라고 한다. 이들 염색체의 집단(개체군, population)을 대상으로 각 염색체의 문제 해결 능력을 평가 한 후 문제 해결 능력이 높은 염색체들끼리 교배시켜 얻어진 새로운 염색체들로 구성된 집단을 만든다. 이 과정에 작용하는 연산자로서는 복제(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)등이 있다.

예를 들어서, 그림 143에서는 가장 왼쪽이 초기 집단이다. 이 경우에 염색체의 길이는 3이고, 개체의 수는 4인 집단이 생성되어 있는 것이다. 이러한 도중에 개체의 수를 결정하는 것이나 염색체의 길이, 코딩 방법 등은 GAs연구의 중심적인 과제이기는 하지만, 현실적으로는 직관적인 감으로 결정되고 있는 실정이다. 이렇게 해서 초기집단이 생성되고 나면, 각각의 개체에 대한 적응도의 평가를 수행한다. 이것은 해결하고자 하는 문제에 따라서 그 방법이 달라지게 될 것이다. 예를 들어서 그림 2.2에서 원형이 많은 쪽이 적응도가 높은 평가를 받는다고 하자. 이 경우에 왼쪽의 위에서부터 두 번째의 개체가 가장 높은 적응도를 얻게 되고, 그 이외에는 모두 원형이 한 개이기 때문에 낮은 적응도를 얻게 된다. 기본 아이디어는 보다 좋은 개체가 높은 적응도의 평가를 받도록 하는 것이다.

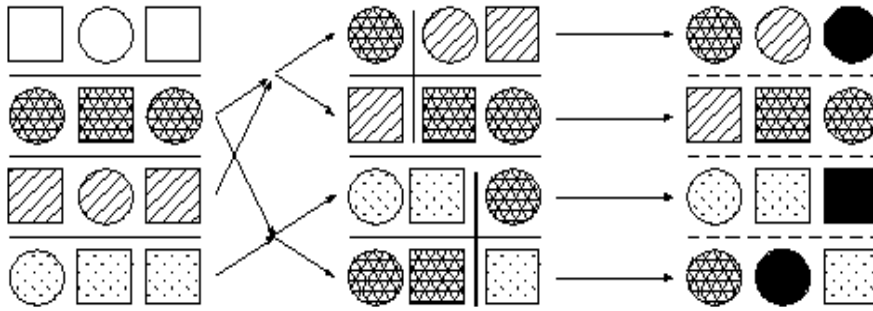


그림 143. 유전자 알고리즘의 개념도

각각의 개체에 대해서 적응도가 결정되면, 그것을 기반으로 선택하여 교차시키는 조작을 수행한다. 기본적으로 적응도가 높은 개체가 보다 많은 자손을 남기도록 한다. 이와 같이 함으로써, 보다 좋은 개체를 형성하는 유전자가 집단 중에 확산되게 된다. 이 예에서는 위에서부터 두 번째의 개체와 세 번째의 개체가 교차되고, 두 번째의 개체와 네 번째의 개체가 교차되고 있다.

선택교차를 수행할 개체의 쌍이 결정되었다면 염색체의 교차를 수행한다. 교차의 방법도 여러 가지가 제안되어 있다. 기본적으로는 쌍방의 염색체로부터 일부분씩을 취하여 자손의 염색체를 만든다. 그림 2.2의 중간부분이 교차를 종료한 상태이다. 종선으로 교차위치를 나타내고 있다.

다음으로 돌연변이를 추가로 수행한다. 이것은 어떤 확률로 염색체의 일부 값을 변경시키는 조작이다. 그림 143의 오른쪽에 돌연변이를 거친 개체집단의 상태를 보여주고 있다. ●과 ■ 이 돌연변이된 부분이다. 이러한 조작이 종료되면 새로운 세대의 개체집단이 생성되게 된다. 그리고 이러한 새로운 집단에 대해서 또다시 적응도 평가, 선택교차, 돌연변이를 수행함으로써 다음의 새로운 세대를 만들어 간다.

이렇게 여러 세대(generation)를 거치는 동안 집단의 문제 해결 능력이 높아지게 된다. 단순 GAs 및 흐름도는 그림 144와 같으며 단순 GAs에 의한 최적치 탐색과정은 그림 144와 같이 복제, 교배, 돌연변이 등 유전 연산자의 반복과정을 통해 이루어진다.

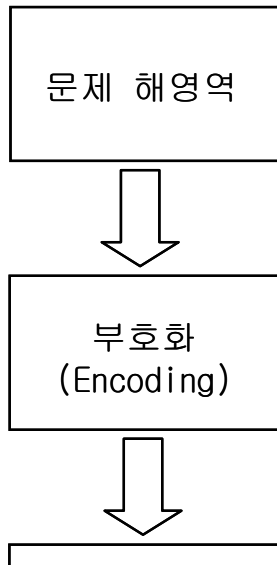


그림 144. 단순 GAs의 탐색과정

5) 유전자 알고리즘의 구성요소

가) 유전자형의 표현

GAs를 수행하기 위한 첫단계는 문제의 잠재해를 유전적 표현 즉, 개체로 표현해야 한다. 이 유전적 표현은 GAs의 다른 절차 즉, 적합도 및 유전자 연산자 작용등에 영향을 주므로 문제의 특성을 잘 반영할 수 있어야 한다. 일반적으로 GAs에서 풀고자하는 문제의 변수값을 이진 스프링(binary string)으로 코딩(coding)하게 된다. 이 코딩 방법은 문제의 변수가 이산치를 갖는 경우에 특히 자연스러운 표현방법이다. 만약 문제가 부동점 값을 가질 경우에는 이진화된 정수 형태로 변화하여 사용한다. 문제의 한 변수에 대한 최소값과 최대값을 알고 변수 x_i 를 이진 스트링에서 십진수로 매핑(mapping)하기 위해 식 (61)과 같은 디코딩(decoding)방식에 의해 각 이진 스트링에 대한 실수값(real number)을 구할 수 있다.

$$x_i = decimal_{bin} \frac{\max - \min}{2^n - 1} + \min \quad (61)$$

여기서, $decimal_{bin}$: 이진스트링에 대한 십진수 정수의 값

n : 이 변수에 배정된 스트링의 길이

GAs는 십진수로 표현된 매개변수를 일정한 길이의 문자열로 변환시켜 사용하는데 주로 이진스트링을 사용한다. 예를 들어 매개변수 x 를 10비트의 길이로 코딩(coding)할 경우 x_{\min} 값은 0000000000에 대응되고 x_{\max} 값은 1111111111에 대응된다. 이때 x_{\min} 및 x_{\max} 값의 변경으로 매개변수의 범위를 조절할 수 있고 스트링의 길이를 바꿈으로써 사용자가 원하는 매개변수의 정밀도도 정할 수 있다. 매개변수가 여러 개일 경우 코딩된 매개변수들을 직렬로 연결함으로써 하나의 개체를 형성하게 된다. 길이 l 개 스트링이 생성된다면 2^l 개의 매개변수 집합을 표현할 수 있다.

나) 선택 메커니즘

선택연산자는 잘 적응한 해들은 살아남고 잘 적응하지 못한 해들은 도태되도록 유도함으로써 자연선택(natural selection)현상을 모델링 한다. 선택의 기반이 되는 것은 적합도함수이며 여러 가지선택방법들이 존재하지만 그 기본원리는 더 좋은 개체들에게 특권을 부여한다는 것에 있어서 공통적이다. 일반적으로 널리 사용되는 선택방법으로는 다음과 같은 것이 있다.

(1) 기본 모델

적합도 비례선택(proportionate selection), 룰렛선택법(roulette selectoin)이 있으며, 각 개체 s_i 의 적합도 $f(s_i)$ (>0), $i=1, \dots, N$ 의 총합을 구해, 각 개체 s_i 의 선택 확률을 식 (62)와 같이 정하는 방법이다.

$$p_i = \frac{f(s_i)}{\sum_{j=0}^N f(s_j)} \quad (62)$$

(2) 기대치 선택법(expected-value selection)

적합도 비례선택의 문제점은 개체군의 크기가 크지 않을 경우에 적합도가 정확히 반영되지 않을 가능성이 있다. 이런 문제점의 대안으로 제안된 것이 기대치 선택 법이다. 적합도에 대한 각 개체의 확률적인 재생 개체 수를 구하여 선택하는 것이 기본적인 방법이다. 표 72는 기대치 선택의 한 예를 보여준다.

표 72. 기대치 선택법 재생의 예

적합도	6	1	10	11	17	32	4	12	5	2
기대치	0.6	0.1	1	1.1	1.7	3.2	0.4	1.2	0.5	0.2
재생수	1	0	1	1	2	3	0	1	1	0

(3) 순위 선택법(ranking selection)

적합도 비례 선택과 기대치 선택 법은 적합도의 값을 가지고 재생할 개체 수를 정하게 된다. 이것은 합리적인 것과 같이 생각되지만 반드시 좋은 경우만 있는 것은 아니다. 예를 들어 오차의 역수를 적합도를 선택을 할 경우 적합도가 특히 높은 개체가 발생하면 그 개체의 영향으로 전체의 개체가 유사해지게 되고, 반대로 적합도의 차가 거의 없으면 개체의 선택 확률은 거의 균등해지는 문제가 발생한다. 따라서 순위 선택 법은 적합도의 크기순서에 따라 순위를 매긴 후 순위에 따라 다음세대에 자손을 남길 확률을 결정하는 방법이다.

Baker는 선형 순위 선택 법으로 각 개체의 순위가 i 일 때 개체 s_i 의 선택확률을식 (6)과 같은 방법을 제안하였다

$$p_i = \frac{1}{N} (n^+ - (n^+ - n^-) \times \frac{i-1}{N-1}) \quad (63)$$

이때 $1 \leq n^+ \leq 2$, $n^- = 2 - n^+$ 로 하였고 n^+ 와 n^- 는 각각 최대 기대치와 최소기대치를 나타낸다. 또한 Michalewicz는 비선형 순위 선택 법으로 식(64)를 제안하였다.

$$p_i = c \times (1 - c)^{i-1} \quad (64)$$

이때 c 는 순위가 1인 개체가 선택될 확률을 나타낸다.

표 73은 선형 순위 선택 법에서 $n^+ = 2$ 로 했을 때의 예를 보여준다.

표 73. 순위 선택 법에 의한 재생의 예

적합도	32	17	12	11	10	6	5	4	2	1
순위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
재생수	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0

(4) 토너먼트 선택법(tournament selection)

개체군 중에서 일정한 개수의 개체를 임의로 선택하여 그 중에 최고의 적합도를 가지는 개체를 다음 세대에 남기는 방법이다.(토너먼트방식) 이것은 다음 세대의 개체수가 모두 찰 때까지 반복적으로 계속한다.

(5)엘리트 보존 선택(elitist preserving selection)

확률에 따라 개체를 선택하여 교배 및 돌연변이의 결과로 특별히 좋은 해가 소실되는 것을 막기 위하여 가장 좋은 해를 보존하여 다음 세대에 남기는 방법이다. 일반적으로 다른 선택 방법과 융합하여 사용한다. DeJung[65]은 엘리트 선택을 다음과 같이 정의하였다. 「 $s^*(t)$ 를 세대 t 의 가장 좋은 개체라 하자, 또 $X(t+1)$ 을 보통의 방법으로 생성할 때 $X(t+1)$ 중에 $s^*(t)$ 가 존재하지 않으면 $s^*(t)$ 를 $X(t+1)$ 의 $N+1$ 번째 개체로 추가한다.」

이것은 가장 좋은 해를 잃지 않고 보존하는 대신 엘리트 개체의 유전자가 개체군 전체로 급속히 퍼져나갈 가능성이 높기 때문에 국소적인 해로 수렴할 위험을 가지고 있다.

다) 알고리즘 제어 파라메타

GAs에 의한 탐색 또는 최적화 문제의 해결에 있어서 미지의 영역에 대한 탐색(exploitation)과 획득한 정보의 유효한 이용(exploitation)의 조화가 중요하다. 획득한 정보의 유효한 이용은 기존의 등고선법(hill-climbing)과 유사해지며, 미지의 영역에 대한 탐색이 강조 될수록 랜덤 탐색(random search)과 같은 특성을 나타내게 된다. GAs는 이러한 두 가지의 조건을 함께 제어할 수 있는 매력적인 알고리즘이다. 이를 제어하기 위한 파라메터에는 여러 가지가 있으나 중요한 것 3가지만 들자면 개체군의 크기(population size : M), 교배확률(probability of crossover : p_c), 돌연변이 확률(probability of mutation : p_m)이다.

일반적으로 큰 p_c 와 p_m 의 값은 알고리즘의 탐색 능력을 향상시킴으로 진화의 초기에 적합도가 높은 탐색공간을 찾는 데 유리하게 작용하지만, 동시에 탐색 능력을 저하시킴으로써 어느 정도 좋은 해를 찾는 후에는 이 탐색공간 내에서 최적해로 수렴하

는 데 있어서는 수렴속도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 작은 p_c 와 p_m 의 값은 반대의 특성을 나타낸다. 한편, 개체군의 크기 M 이 작으면 적합도 계산에 필요한 시간을 절약할 수 있으나 개체간의 다양성의 빠른 손실로 인해 최적의 해를 구하기 전에 수렴할 위험성을 내포한다. 반면에 개체군의 크기가 크면 최적해에 도달할 확률은 높으나 많은 기억용량과 계산시간을 필요로 한다. 이 둘의 성능 평가 항목을 모두 만족시켜 주는 최적의 개체군의 크기를 정하는 방법은 문제의 성격과 다른 제어 파라미터들의 값에 따라 다르다.

6) 유전자알고리즘 연산자

가) 교배 연산자

교배 연산자는 두 부모가 갖는 유전자를 조합하여 자손을 생성하는 과정으로, 적응도가 높은 개체들을 빠르게 결합하여 현재의 집단 전역에 확산시키는 역할을 하며, 다른 최적화 알고리즘에 없는 유전자 알고리즘에서 가장 중요하고 독특한 과정이다. 이를 위해서 교배는 부모의 좋은 형질이 가능한 파괴되지 않고 자손에 상속할 수 있어야 한다.

(1) 일점 교배

그림 145와 같은 일점 교배(Single point crossover)는 가장 일반적인 교배방법으로 두개의 부모 스트링의 유전인자를 임의의 교배위치에서 절단하여 두 부모의 절단된 한 부분의 스트링씩을 상속받아 자손을 생산하는 방법이다.

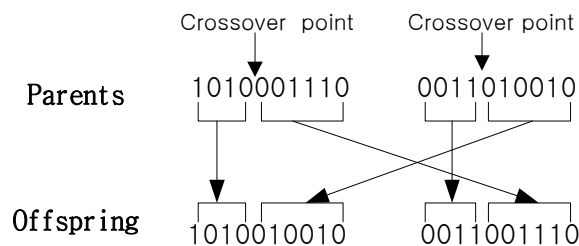


그림 145. 일점 교배

(2) 이점 교배

일점 교배가 한 개의 절단점을 갖는데 반하여 그림 146과 같이 이점 교배(two point crossover)는 두 개의 절단점을 갖는다. 원소사이의 두 절단점을 임의로 잡고 두 개의 절단점에 의해 나뉜 앞, 중간, 뒷부분에 있는 원소 중에서 앞과 뒷부분은 한 부모로부터 상속받고 중간부분은 상대부모로부터 상속받는 방법이다. 이것은 그림 2.5에서 나타나듯이 유전자의 배열이 서로의 끝이 연결된 링(ring) 상태의 유전자 배열로 취급한 후, 이 링 상에 두 점의 교배위치를 무작위로 설정하고, 링을 두 개의 부분으로 분할하여 각 부분을 교체한다.

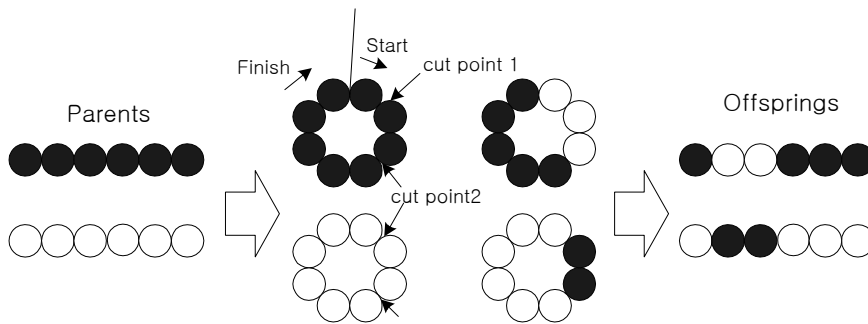


그림 146 이점 교배

나) 돌연변이연산자

돌연변이연산자는 개체에 새로운 유전자가 생성되는 것으로, 한 개체에서 아주 작은 수의 유전자를 임의로 변화시키는 과정이다.

따라서 복제와 교배과정은 현재가지고 있는 정보들을 이용해서 탐색하는 것에 비해 돌연변이 과정은 현재집단에 존재하지 않는 새로운 정보를 제공해준다.

유전자알고리즘에 돌연변이는 해 공간을 다양하게 탐색하는 역할을 한다. 이 과정은 과거에 잃어버렸던 중요한 정보를 되찾을 수 있으며 탐색의 방향이 국부 최적해(local optimum)로 향할 경우 여기서 벗어나도록 도움을 준다. 그림 147은 유전자열중에서 하나의 유전자에 대해 돌연변이를 수행하는 것을 나타내고 있다. 여기서 돌연변이확률을 너무 크게 잡으면 최적해 탐색시 방향성을 잃어버릴 수 있고 너무 적으면 국부해에서 벗어날 수 없기 때문에 적당한 돌연변이확률을 사용한다. 일반적으로 많이

사용되는 변이확률 p_m 은 다음 식(65)와 같다.

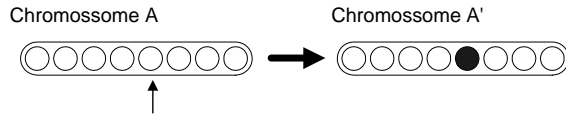


그림 147. 돌연변이과정

$$P_m = \frac{N_c}{N_t} \times 100 (\%) \quad (65)$$

여기서, N_c : 변화고자하는 비트수,

N_t : 초기집단의 총 비트수

다) 복제 연산자

각 설계점의 적합성의 크기에 따라 교배와 변이의 과정에서 선택될 확률을 부여한다. 즉, 적합성이 큰 설계점은 많이 선택되도록 하고 나쁜 설계점은 적게 선택되도록 한다. 그림 148에서 보여주듯이 부모집단을 I라 하고 자손집단을 O라하면 O집단은 I집단에 존재하는 각 개체의 적합도값에 따라 복제된다. 적합도값이 상대적으로 높은 개체는 낮은 개체보다 많이 복제되어 O집단에서 높은 점유율을 갖게된다. 여기서 복제되지 못한 개체는 소멸되며 이 과정을 도태라 한다.

일반적으로 비례선택(proportionate selection)을 많이 사용하여 복제연산을 수행한다. 이 방법을 룰렛휠선택(roulette wheel selection)이라고도 하고, 각 개체의 적합도값에 비례하여 복제한다. 개체가 복제될 확률 p_i 는 다음 식(66)과 같다.

$$P_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^n F(x_i)} \times 100 (\%) \quad (66)$$

여기서, n : 전체 설계점의 수

$F(x_i)$: 설계점 x_i 에서의 적합도

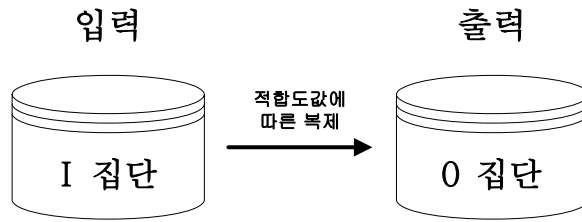


그림 148. 복제연산

표 74는 4개의 개체에 대한 확률특성을 보여준다.

표 74 룰렛휠 선택에 의한 복제수

개체번호	초기집단	정수값	적합도함수	선택확률	기대값	복제수
1	01101	13	169	0.14	0.58	1
2	11000	24	576	0.49	1.97	2
3	01000	8	64	0.06	0.22	0
4	10011	19	361	0.31	1.23	1

7) 유전자알고리즘의 탐색기법

GAs은 한번에 여러 설계점의 목적함수 값을 조사하는 병렬 직접 탐색방법을 가장 기본적인 탐색 기법으로 사용한다. 탐색의 기준이 되는 적합도 함수와 제약 조건식의 적용 방법 및 검색의 종료 기준에 대하여 살펴본다.

가) 적합도 함수

선택된 설계점에서 산정된 목적함수와 제약조건들을 근거로 적합도를 계산하는 함수를 적합도 함수라고 한다. 유전자 알고리즘에서 적합도는 염색체의 생존 확률 계산의 기준이 되는 매우 중요한 요소이다. 식 (67)은 최대화 문제에 대하여 사용되어지는 적합도 함수이며 식 (68)은 최소화 문제에 대한 적합도 함수이다.

최대화의 경우

$$\text{Maximize } F(X) \quad (67)$$

$$\text{Fitness}(X) = F(X)$$

최소화의 경우

$$\text{Minimize } F(X) \quad (68)$$

$$\text{Fitness}(X) = \frac{1}{F(X)}$$

GAs에서 사용되는 기본적인 연산인 복제는 적합도에 비례하는 확률을 기초로 하여 선택하게 되므로 적합도가 높아야 다음 세대에 나타날 확률이 높아지게 된다. 따라서 적합도를 계산하는 방법은 GAs에서는 검색기법과 함께 가장 중요한 문제로 취급된다. 구조물의 최적 설계와 같은 분야에서는 많은 제약조건식과 제약식 간의 상관관계에 따른 정확한 평가가 가능한 적합도 평가 방식을 찾아서 사용해야 한다.

적합도는 다른 최적화 알고리즘의 목적함수와는 많은 차이점을 가지고 있다. 다른 최적화 기법의 경우 최소화와 최대화의 변화를 목적함수의 부호를 이용하여서 간단하게 문제를 수정하여 풀이한다. 그러나 GAs의 적합도는 다음 세대를 복제할 때 가중치로 사용되기 때문에 음의 적합도는 발생할 수 없으며 양의 적합도로 표현되어야 한다.

본 연구에서 GAs을 이용한 최적설계의 수행에 사용된 적합도는 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 식(69)와 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다.

$$\text{Fitness} = \frac{\text{Object}_{\text{Max}}}{\text{Object}_{\text{Sum}}} \quad (69)$$

$$\text{Object}_{\text{Max}} = \sum_{i=1}^n A_{\text{max}} \times L_i$$

$$\text{Object}_{\text{Sum}} = \sum_{i=1}^n A_i \times L_i$$

여기서, A_{max} : 검색에 사용되는 단면 데이터 베이스의 단면적중 가장 큰 값

A_i : i 번째 부재의 단면적

L_i : i 번째 부재의 길이

나) 제약 조건식의 적용

최적설계 문제에서 설계변수에 제약 조건식이 있는 경우 유전자 알고리즘에서는 여러 가지의 방법을 사용하여 제약 조건식을 최적화에 적용시키는데 주로 사용되는 방법은 벌칙함수를 사용하는 것이다. 식 (70)과 같은 최대치를 구하는 최적화 문제에서 제약 조건식을 적용시켜서 변환시킨 대응되는 목적함수는 식(71) 및 식(72)와 같이 나타내어진다.

$$\text{Maximize } F(X) \quad (70)$$

$$\text{Subject to } G_i(X) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{Eqw}(X) = F(X) + P(X) \quad (71)$$

$$P(X) = 0 \quad \text{if } X \text{ is feasible}$$

$$P(X) < 0 \quad \text{otherwise}$$

$$\text{Eqw}(X) = F(X) \times P(X) \quad (72)$$

$$P(X) = 1 \quad \text{if } X \text{ is feasible}$$

$$0 < P(X) \leq 1 \quad \text{otherwise}$$

여기서, $G_j(X)$: 제약 조건식

m : 제약 조건식의 개수

식 (71)은 목적 함수에 벌칙 함수를 더하여 목적 함수를 수정하는 것으로 제약식을 위반하는 경우 위반된 제약식을 기준으로 만들어진 벌칙 함수가 더해진다.

본 연구에서 사용되는 벌칙 함수는 식 (73)과 같이 구성되어 있으며 이때 사용되는 벌칙함수 변수는 Kavilie와 Moe 가 추천한 식 (74)를 사용하였다.

$$P(x) = \alpha \sum_{i=1}^m \frac{1}{G_i(X)} \quad (73)$$

$$\alpha = \frac{\Phi(X)}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{G_i(X)}} \quad (74)$$

다) 검색 종료 기준

GAs에서는 최대 적합도의 향상이 없거나 전체 세대의 적합도의 평균이 더 이상 향상되지 않으면 수렴이 이루어진 것으로 판정한다. 검색의 종료는 수렴이 이루어지는 경우와 최대 세대수까지의 검색이 이루어진 경우에 발생하게 된다.

본 연구에서는 모든 예제에 대하여 3회의 반복 검색을 수행하였으며 각각의 검색에서 최대 세대수를 50~3,00세대로 설정하였으며 더 이상의 검색이 필요한 경우 최대 10,00 세대까지의 검색을 수행하였다.

8) 유전자 알고리즘의 부호화 및 구조해석 공간

GAs는 그림 149와 같이 해석공간과 부호화 공간으로 나누어지는데, 해석공간에서는 변수의 실제 값이 사용되어서 적합도가 계산되며 부호화공간은 부호화된 염색체를 가공하여 다음세대의 염색체를 만들어내는 유전적 처리를 한다.

본 연구에서는 해석공간에서 사용되는 실제수치를 부호화공간에서 사용되는 부호화자료로 변환시켜주는 작업은 필수이며, 이때 실제수치와 부호화 자료의 일대일대응을 통하여 이루어지도록 하였다.

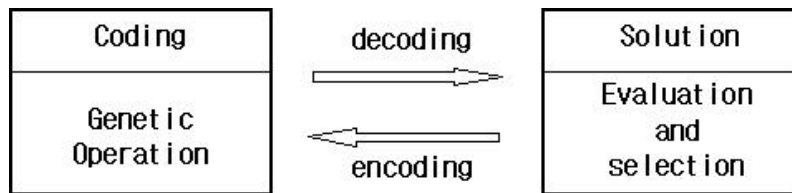


그림 149. GAs의 구조해석 공간과 부호화 공간

다. 최적설계 정식화

일반적으로 구조물의 설계에서는 무수한 설계 가능해 들이 존재한다. 그 중에서 최적해를 발견하기 위해서는 여러 설계 가능해들을 서로 비교하는데 필요한 기준이 되는 목적함수를 설정하며, 최적화 과정에서 이 값이 최소 또는 최대가 되는 설계변수의 값이 최적해이다.

그리고 제약조건으로는 응력, 변위, 좌굴, 세장비 및 설계변수에 대한 상·하한값 등이 될 수 있다. 구조물의 기하학적 형태와 하중 조건이 주어지고 필요한 설계변수와 목적함수 및 제약조건 등이 결정되면 식 (75), 식(76)과 같은 형식으로 최적설계의 문제를 정식화 할 수 있다.

$$\text{Minimize } F(X) \quad (75)$$

$$\text{Subject to } \begin{aligned} g_i(X) &\leq b_i & i=1,2,\dots,p \\ g_j(X) &\geq b_j & j=1,2,\dots,q \end{aligned} \quad (76)$$

여기서, $F(X)$: 목적 함수식, X : 설계변수, $g_i(X)$: i 번째 제약식, $g_j(X)$: j 번째 제약식, b_i : i 번째 제약식의 상한값, b_j : j 번째 제약식의 하한값 이다.

1) 목적함수식

온실 구조물의 최적설계에 있어서 목적함수를 사용부재의 중량으로 하는 경우는 부재의 단면적에 비례하여 설계값이 결정되므로 변수는 부재의 단면적이 되며, 중량에 대한 목적함수식은 식 (77)와 같다.

$$W = \rho V_{tot} = \rho \left[\sum_{i=1}^{nelt} (A_i L_i) \right] \quad (77)$$

여기서, W : 온실 구조물의 전체중량 (kgf)

ρ : 재료의 단위중량 (kgf/cm^3)

V_{tot} : 온실 구조물의 전체 체적 (cm^3)

$nelt$: 온실의 부재 수

A_i : i 번째 부재의 단면적의 단면적(cm^2) ($i=1,2,\dots,nelt$)

L_i : i 번째 부재의 길이(cm) ($i=1,2,\dots,nelt$)

2) 제약 조건식

한계상태설계기준을 기준으로 하여 인장 및 압축응력도, 휨-인장 및 휨-압축응력도, 세장비, 처짐에 대한 제약식과 부재를 원형강관으로 사용할 경우의 국부좌굴 및 부재

의 두께와 지름에 대한 제약식은 다음과 같다.

가) 인장강도 제약 조건식

전단면의 항복일 경우의 인장강도의 제약식은 식 (78)과 같다.

$$(\Phi_t P_n)_i \geq (P_u)_i \quad (78)$$

여기서, Φ_t : 인장 저항계수(=0.9)

$(P_u)_i$: i 번째 부재의 소요 축력

$(P_n)_i$: i 번째 부재의 공칭 인장강도

$$P_n = A_g F_y$$

A_g : 부재의 총 단면적(cm^2)

F_y : 항복강도 (tf/cm^2)

나) 압축강도 제약 조건식

압축부재의 설계는 국부 좌굴에 저항하여 전체강도를 발휘할 수 있는 콤팩트 단면(compact section)이 되도록 설계하였다. 강 부재가 국부 좌굴 없이 자신이 전체의 압축강도를 발휘하도록 하는 경우를 콤팩트 단면이라고 하며, 국부 좌굴이 발생하기 전까지 초기 항복에 대응하도록 하는 경우를 비콤팩트 단면이라고 한다. 압축부재의 압축강도 제약 조건식은 식 (79)와 같다.

$$\Phi_c (P_n)_i \geq (P_u)_i \quad (79)$$

여기서, Φ_c : 압축 저항계수(=0.85)

$(P_u)_i$: i 번째 부재의 소요 축력

$(P_n)_i$: i 번째 부재의 공칭 압축 강도

식(79)중에서 $P_n = A_g F_{cr}$ 이며, 압축력을 받는 부재의 한계압축응력 F_{cr} 은 세장비에 따라 다음의 식(80)과 식(81)에 의해 산정되며, 부재의 세장비는 식(82)와 같다.

$\lambda_c \leq 1.5$ 일 때

$$F_{cr} = (0.65^{\lambda_c^2}) F_y \quad (80)$$

$\lambda_c > 1.5$ 일 때

$$F_{cr} = \left(\frac{0.85}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (81)$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\gamma \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (82)$$

여기서, K : 유효길이계수, L : 부재의 비지지 길이, γ : 좌굴축에 대한 단면2차반경

다) 조합력 제약 조건식

휨과 인장 및 압축을 동시에 받는 부재의 경우 인장, 압축-휨강도 조합에 대한 제약조건식을 만족해야 하는데 다음의 식 (83), 식 (84)와 같다.

$$\left(\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \right) \text{인 경우} : \frac{(P_u)_i}{\phi(P_n)_i} + \frac{8}{9} \left[\frac{(M_{ux})_i}{\phi_b(M_{nx})_i} \right] \leq 1.0 \quad (83)$$

$$\left(\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2 \right) \text{인 경우} : \frac{(P_u)_i}{2\phi(P_n)_i} + \left[\frac{(M_{ux})_i}{\phi_b(M_{nx})_i} \right] \leq 1.0 \quad (84)$$

여기서, ϕ_b : 휨 저항 계수(0.9)

$(M_u)_i$: i 번째 부재의 소요휨강도

$(M_n)_i$: i 번째 부재의 공칭휨강도

라) 세장비 제약 조건식

압축부재의 세장비에 대한 제약 조건식은 다음 식 (85)와 같다.

$$200 \geq \frac{KL}{\gamma} \quad (85)$$

마) 판 폭-두께에 대한 제약 조건식

강관에서의 판 폭-두께비에 대한 제약 조건식은 식(86)에 의해 정립된다.

$$\text{(압축재)인 경우} : \frac{240}{F_y} > \frac{D_i}{t_i} \quad (86)$$

여기서, D_i : i 번째 강관의 직경 및 폭, t_i : i 번째 강관의 두께

바) 변위 제약식

(1) 비닐하우스 온실구조

플라스틱온실구조에 대한 변위 제약 조건식은 식 (87), (88)에 의해 정립된다.

$$\delta_{\max} - \frac{L}{100} \leq 0 \quad (87)$$

$$\delta_x - \frac{H}{60} \leq 0 \quad (88)$$

여기서, δ_{\max} : 서까래 최대수직변위, δ_x : 기둥 최대수평변위

L : 구조물의 길이, H : 기둥높이

(2) 유리 온실구조

유리 온실구조에 대한 변위 제약 조건식은 식 (89) ~ 식 (91)에 의해 정립된다.

$$\delta_{\max} - \frac{L}{150} \leq 0 \quad (89)$$

$$\delta_x - \frac{H}{100} \leq 0 \quad (\text{와이드스팬형}) \quad (90)$$

$$\delta_x - \frac{H}{80} \leq 0 \quad (\text{벤로형}) \quad (91)$$

여기서, δ_{\max} : 서까래 최대수직변위, δ_x : 기둥 최대수평변위

L : 서까래의 스패, H : 기둥높이

라. 온실구조물에 대한 유한요소 해석

1) 기본요소의 정식화

구조해석은 유한요소법을 이용하였으며 x축방향으로 인장 및 압축, y축방향으로의 힘(전단력)과 z축에 대한 휨모멘트를 받는 일반적인 프레임요소에 대해 해석을 실시했다. 그림 150과 같이 프레임 요소는 각 절점에서 축방향, 횡방향, 휨방향 거동의 축방향 요소와 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 6 자유도 (D.O.F)로 구성된 3차원 요소이며, 각 절점에서 축방향 요소와 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 6

자유도 (D.O.F)로 구성된다.

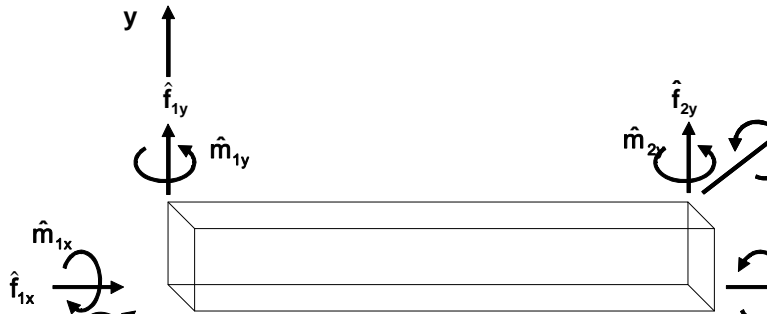


그림 150. 6자유도로 구성된 3차원에서 임의의 방향에 위치한 보요소

축방향 요소행렬 (2×2), 비틀 요소행렬 (2×2), xy면의 휨 요소행렬 (4×4), xz면의 휨 요소행렬 (4×4)의 4가지를 독립적으로 고려하면 전체 강성도 행렬 (12×12)이 만들어 지게 된다.

2) 요소 강성도 행렬의 형성

그림 151과 같은 인장 및 압축만 받는 축요소인 봉요소의 유한요소해석을 위한 요소강성도행렬 $[\bar{K}_t]$ 은 변형률-변위와 응력-변형률 관계로 부터 식 (92)와 같이 정식화 된다.

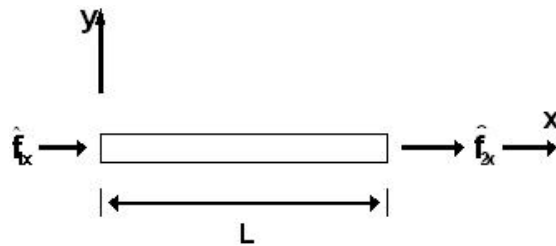


그림 151. 축방향 요소

$$[\bar{K}_t] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (92)$$

그림 152와 같은 x축에 대한 비틀림 모멘트와 z축에 관한 굽힘 모멘트를 받는 비틀 요소의 요소 강성도행렬 $[\overline{K}_b]$ 는 식 (93)과 같다.

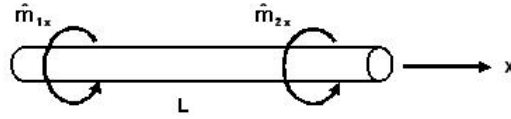


그림 152. 비틀 요소

$$[\overline{K}_b] = \frac{GJ}{L} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (93)$$

그림 153과 같은 두축을 중심으로 하는 휨(굽힘)요소의 유한요소해석을 위한 요소 강성도 행렬 $[\overline{K}_m]$ 는 식 (94)와 같다.

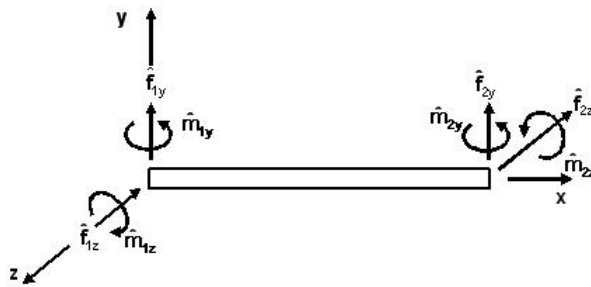


그림 153. 휨(굽힘)요소

$$[\overline{K}_m] = \frac{EI}{L^4} \begin{bmatrix} 12L & -6L^2 & -12L & -6L^2 \\ & 4L^3 & 6L^2 & 2L^3 \\ & & 12L & 6L^2 \\ \text{Symmetry} & & & 4L^3 \end{bmatrix} \quad (94)$$

전술한 바와 같이 축방향 요소행렬(2×2), 비틀 요소행렬(2×2), 휨 요소행렬(4×4)로 구성된 그림 150과 같은 3차원에서 임의의 방향에 위치한 보 요소의 국부좌표계에 대한 강성도 행렬은 한 절점에서 6개의 자유도를 가지므로 한 부재의 보요소의 12×12의 요소 강성도 행렬 $[\overline{K}_e]$ 이 되어 식 (95)와 같이 정식화 된다.

$$\left[\begin{array}{cccccc|cccccc}
 \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\
 & & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
 & & & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\
 & & & & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & -\frac{2EI_y}{L} & 0 \\
 & & & & & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\
 \hline
 & & & & & & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & & & & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\
 & & & & & & & & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
 & & & & & & & & & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\
 & & & & & & & & & & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\
 & & & & & & & & & & & \frac{4EI_z}{L}
 \end{array} \right] \quad (95)$$

3) 요소 좌표변환 행렬의 형성

그림 154(a)와 154(b)는 축방향 요소와 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 3차원 보요소이다. 이 국부좌표의 변위벡터 $\{\overline{v}_i\}$ 에서 전체좌표에서의 변위벡터 $\{v_i\}$ 로

의 좌표변환을 위해 사용되어진 요소좌표변환행렬 $[\overline{T}_i]$ 는 식 (96)과 같이 정식화 된다.

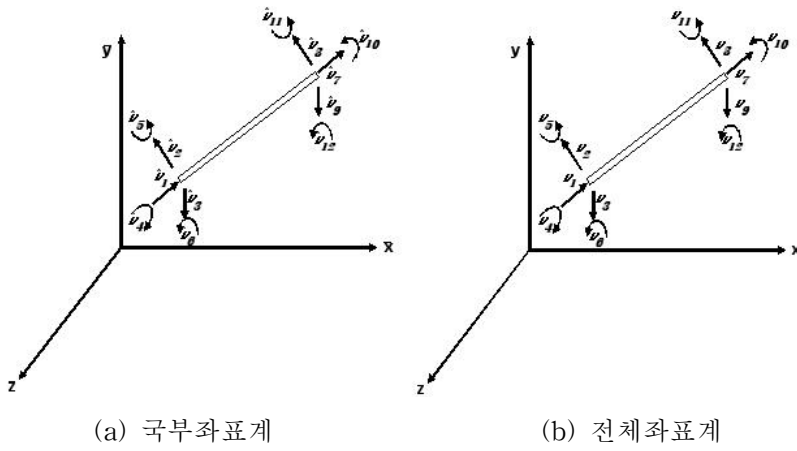


그림 154. 공간상에서의 요소의 변환

$$[\overline{T}_i] = \begin{bmatrix} \overline{\lambda}_{3 \times 3} & & & \\ & \overline{\lambda}_{3 \times 3} & & \\ & & \overline{\lambda}_{3 \times 3} & \\ & & & \overline{\lambda}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (96)$$

$$\overline{\lambda}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l & m & n \\ -\frac{m}{D} & \frac{l}{D} & 0 \\ -\frac{ln}{D} & -\frac{mn}{D} & D \end{bmatrix} \quad (97)$$

여기서, $l = \cos \Theta_{x\bar{x}} = \frac{x_2 - x_1}{L}$, $m = \cos \Theta_{y\bar{x}} = \frac{y_2 - y_1}{L}$

$$n = \cos \Theta_{z\bar{x}} = \frac{z_2 - z_1}{L}, \quad D = (l^2 + m^2)^{\frac{1}{2}}$$

식 (96)과 식 (97)에 의해 국부좌표계에서 전체좌표계로의 변환은 식 (98)과 같다.

$$[K_i] = [\overline{T}_i]^T [\overline{K}_i] [\overline{T}_i] \quad (98)$$

4) 평형 방정식

하중을 받는 구조물을 다자유도를 갖는 유한요소로 해석할 경우 전체 좌표에서의 평형방정식은 식 (99)와 같다.

$$\{ F \} = [K] \{ v \} \quad (99)$$

여기서 $\{ F \}$ 는 전체 좌표에서의 절점에 작용하는 정적하중벡터,
 $[K]$ 는 전체 좌표에서의 조합된 강성도 행렬,
 $\{ v \}$ 는 전체 좌표에서의 정하중에 의한 변위벡터이다.

5) 유한 요소 해석

식(99)의 평형방정식으로부터 유한요소법에 의해 전체좌표에서의 정적 하중에 의한 변위는 식 (100)과 같이 변위법에 의해 산정된다.

$$\{ v \} = [K]^{-1} \{ F \} \quad (100)$$

여기서, $\{ F \}$ 는 전체 좌표에서의 절점에 작용하는 정적하중벡터,
 $[K]$ 는 전체 좌표에서의 조합된 강성도 행렬,
 $\{ v \}$ 는 전체 좌표에서의 정하중에 의한 변위벡터 이다

6) 부재력의 산정

국부좌표에서의 임의의 i 번째 부재의 내부에 발생하는 내부 부재력은 정적하중의 요소평형조건에 의해 구할수 있다. 따라서 정적 부재력은 다음의 식 (101)과 같이 구할수 있다.

$$\{ S_i \} = [\overline{K}_i] \{ v_i \} \quad (101)$$

여기서, $\{ S_i \}$ 는 i 번째 부재의 부재력,
 $[\overline{K}_i]$ 는 i 번째 부재의 강성도 행렬,
 $\{ v_i \}$ 는 i 번째 부재의 정하중에 의한 변위벡터 이다

7) 구조해석 프로그램의 흐름도 및 구성

구조해석 프로그램의 구성은 크게 입력부분과 입력받은 데이터를 바탕으로 부재 각각에 대해 강성 행렬을 구성하는 부분 그리고 구성된 각 부재 강성행렬을 전체 행렬로 확장하는 부분, 전체행렬과 입력받은 힘과의 관계에서 우리가 원하는 결과값을 구하는 부분으로 나눌 수 있다.

그림 155는 앞서 나타낸 모든 행렬식을 근거로 작성한 구조해석 프로그램의 흐름도이며 데이터 입력 및 초기화 부분, 강성 행렬 계산부분, 결과값 계산 및 출력부분의 3부분으로 나눌수 있다.

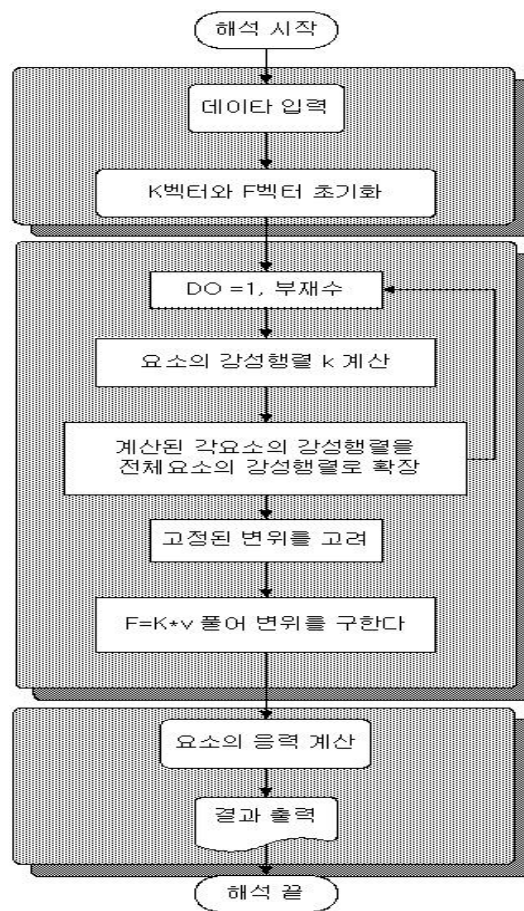


그림 155. 구조해석 프로그램의 흐름도

3. 이산최적설계프로그램 개발

그림 156은 본 연구에서 GAs 적용절차를 도시화한 것으로 GAs은 초기화절차와 진화적 절차 및 유전적 절차의 세 가지 절차로 구성된다.

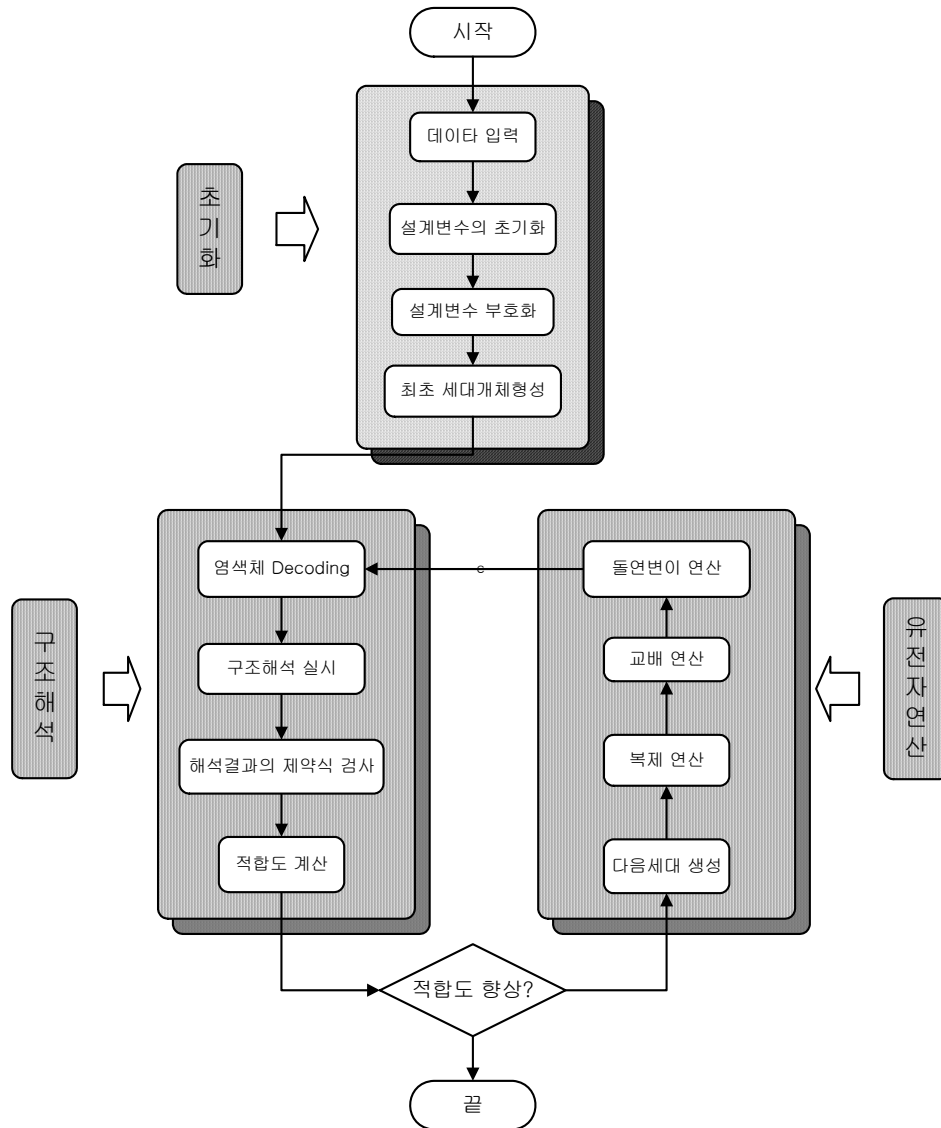
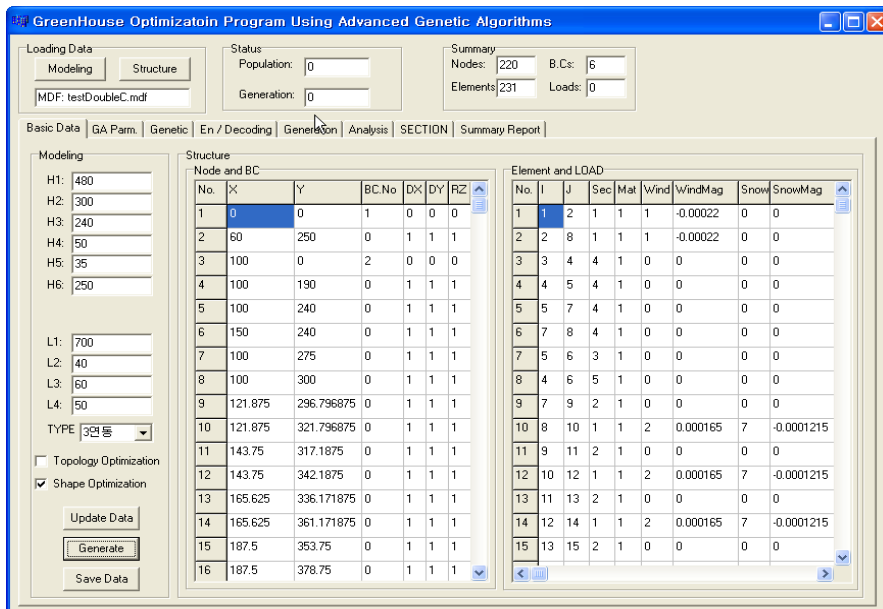


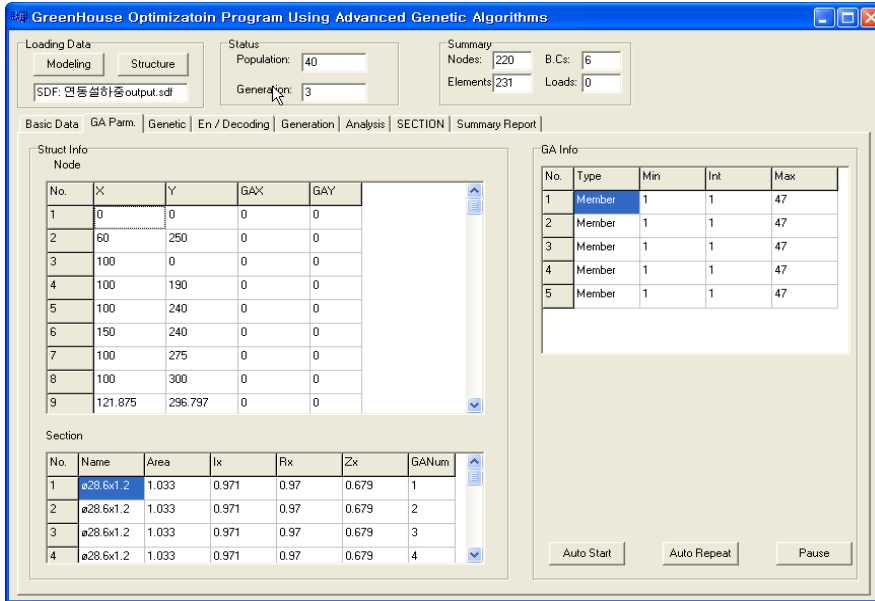
그림 156. 이산 최적화 프로그램의 흐름도

그림 156의 초기화 작업에서 GAs은 임의의 난수를 발생시켜 한 세대의 개체 수만큼의 염색체를 생성해 내어야 한다. 이때 본 연구에서 적용한 단면이산최적설계를 수행하기 위해 검색할 데이터의 간격을 결정한다. 이렇게 생성된 염색체들은 진화적 절차에 전달되며 디코딩(decoding) 수치화 작업을 통하여 실제 설계 변수에 사용될 수치로 변환되며, 얻어진 설계 변수들을 사용하여 구조 해석을 수행한다. 진화적 절차는 구조 해석의 결과를 분석하여 염색체의 적합도를 계산하며 계산된 적합도를 유전적 절차에 전달한다.

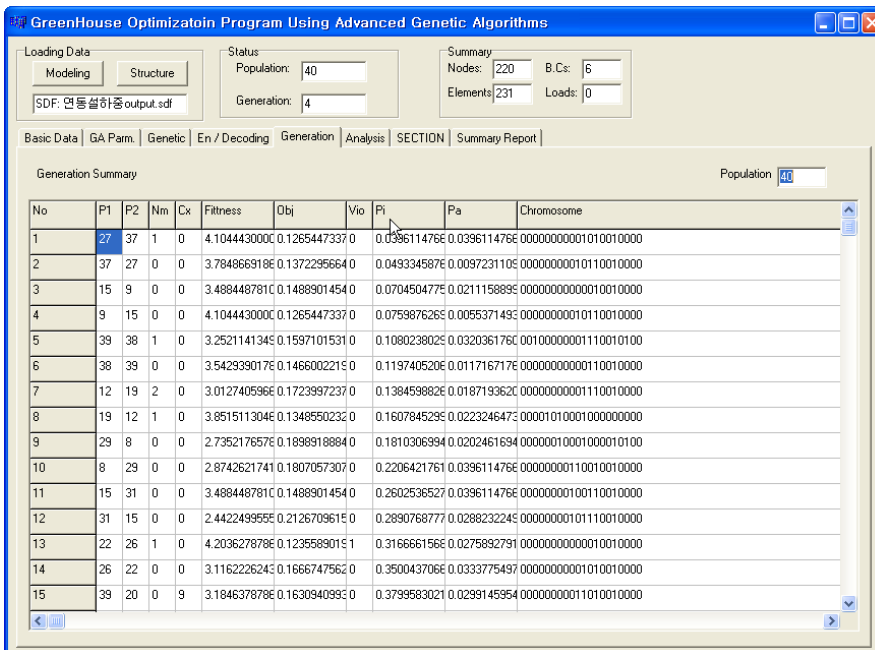
유전적 절차에서는 GAs의 연산자인 복제와 교배 및 돌연변이 등을 통하여 다음 세대의 유전자를 생성하게 되며 다시 진화적 절차에 전달한다. 그림 157(a) ~ 157(g)는 본 연구에서 개발한 구조해석과 단면 및 형상최적설계를 동시에 수행할 수 있는 통합시스템화 된 이산화 최적설계프로그램의 초기화면 및 각 절차의 실행과정화면이다.



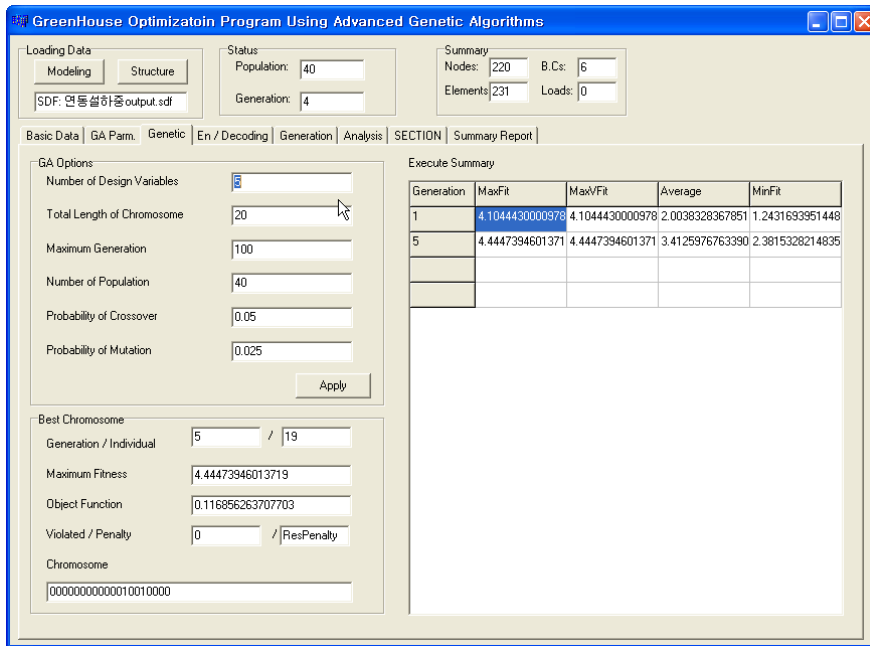
(a) 초기화면



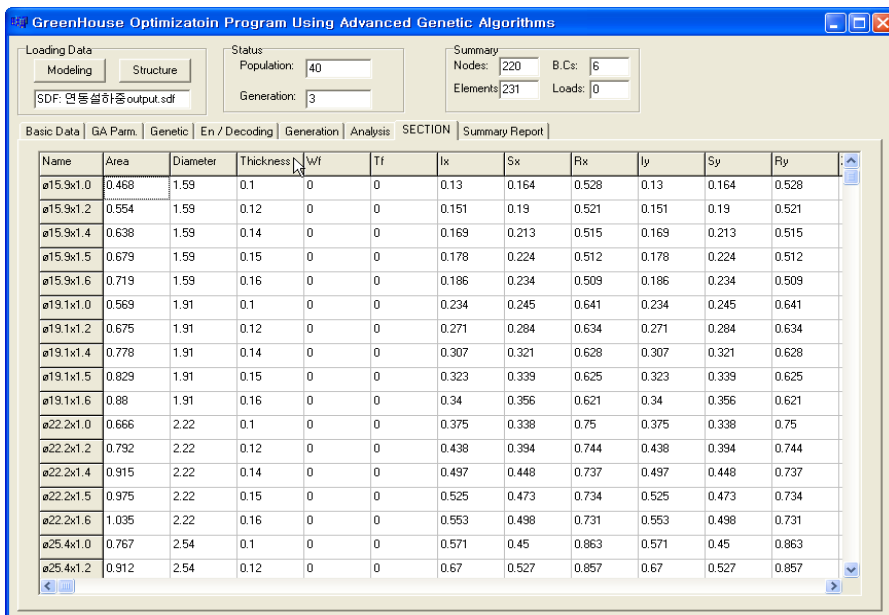
(b) 모델링 제어화면



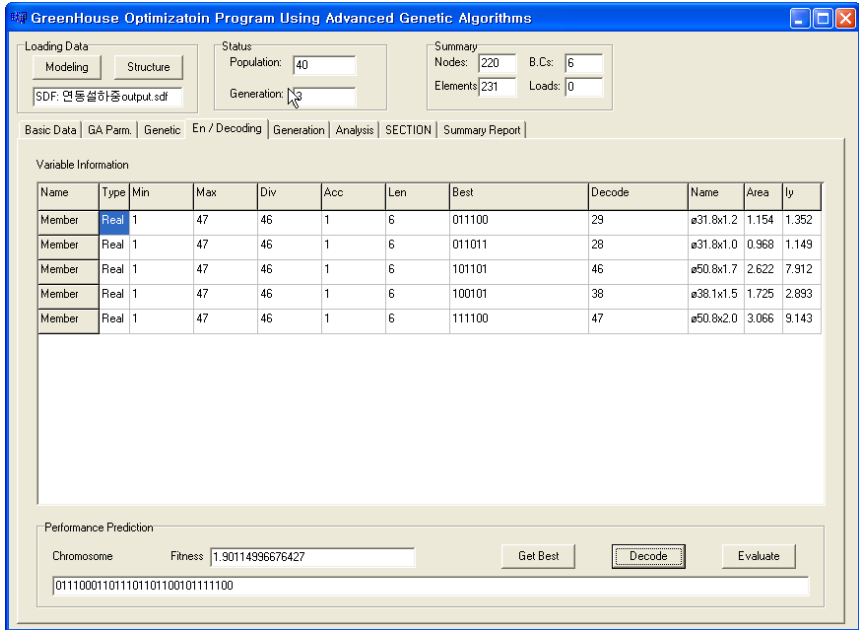
(c) 유전자 알고리즘 절차에 따른 연산과정



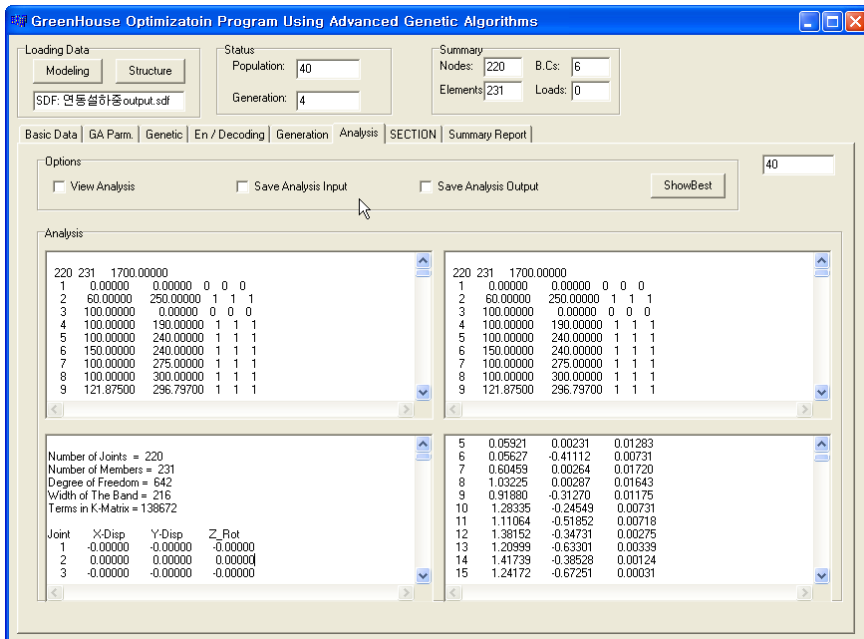
(d) 세대별에 따른 적합도 산출



(e) GAs에 적용되는 이산자료 데이터



(f) 최종수렴결과에 따른 Decoding과정



(g) 구조해석 과정

그림 157. 통합시스템 최적설계프로그램의 실행과정

가. Pre-Post Processor

본 연구에서 개발된 Pre-Post Processor는 다음과 같은 3가지영역으로 구성된다. 첫 번째 구조물형상 Display영역으로 구조물의 형상을 입체 및 평면으로 화면에 Display하는 기능을 가지고 있다 두 번째는 형상 최적설계과정에서 얻어진 수치데이터를 이용하여 초기유한요소모델 및 형상최적설계후의 모델 및 변형모습을 나타낼 수 있는 기능을 제공하고 있다. 세 번째는 구조물의 형상을 여러 각도에서 확인하고 입력데이터가 정확한지를 검사할 수 있도록 구조물의 회전, 확대 및 축소, 이동을 마우스조작으로 손쉽게 사용할 수 있는 사용자 도구를 제공하고 있다.

그림 158 ~ 그림 160은 Pre-Post Processor의 실행화면이다.

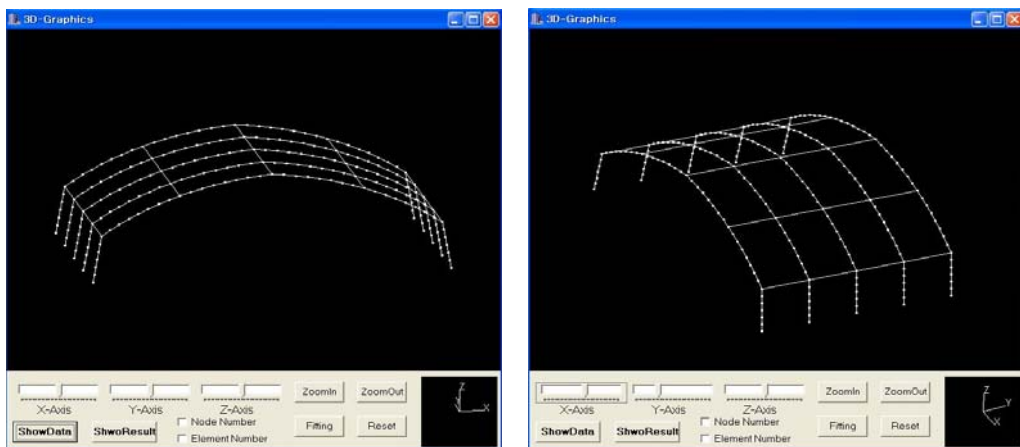


그림 158. 구조물의 회전 화면

그림 158은 형상 Display영역의 사용자도구 중 X, Y, Z축으로 마우스 조작에 의해 입체형상을 회전시켜 사용자가 원하는 방향에서 구조물의 형상을 보는 화면이다(Pan기능). 그림 159는 형상 Display영역의 사용자 도구중에서 구조물 확대, 축소 기능의 실행화면으로 메뉴 In / Out 기능을 선택하면 사용자가 원하는 부분을 자세히 보기 위해 입체구조물 형상을 확대해서 보는 화면이며 그림 160은 절점번호 및 부재번호의 자동생성과정 화면이다.

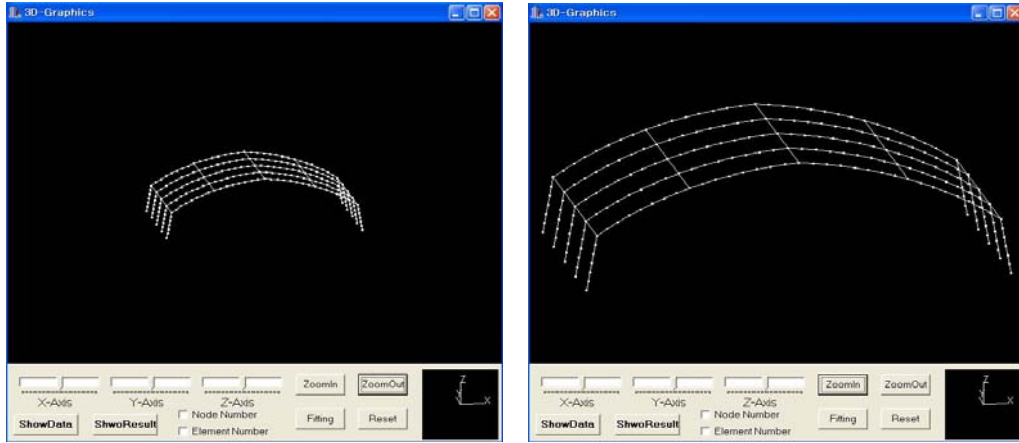


그림 159. 구조물의 확대 / 축소화면

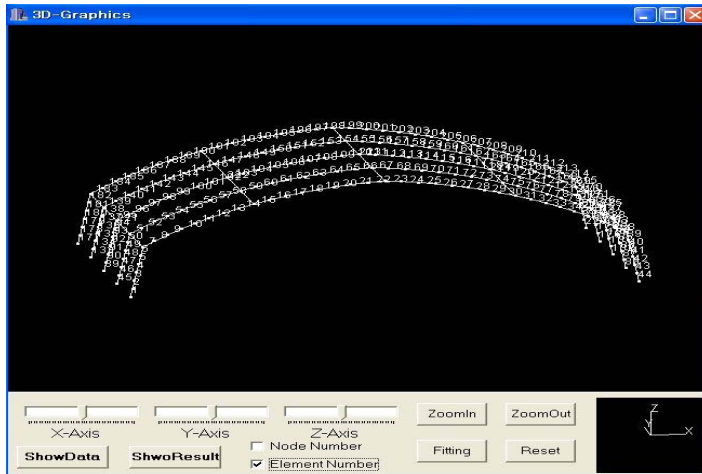


그림 160. 구조물의 절점 및 부재번호생성

4. 온실구조물의 최적설계 예 및 결과고찰

단동 및 연동온실 구조물과 유리온실의 구조해석과 단면 이산화최적설계를 수행하고 상호 비교 고찰하였으며 구조해석은 탄성유한요소로 해석하였다. 본 연구에서 개발한 이산화최적설계 프로그램을 이용하여 구조해석과 단면을 동시에 고려하는 구조물의 최적설계문제를 수행하여, 그 계산 결과를 비교 분석하였다. 또한 기존 온실표준도면결과와 상호 비교하였다. 적용 온실구조물은 단동 비닐하우스, 3연동 비닐하우스,

벤로형 유리온실, 와이드스팬형 유리온실을 예제로 비교 분석하였다.

가. 최적설계조건

GAs을 이용한 단면 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KSD 3760 농업용 아연도 강관과 유리온실에는 KSD 3568 각형강관 과 강봉에 대한 단면 성질을 사용하여 최적화를 수행하였다. 구조물의 중량을 목적 함수로 사용하였으며, 제약 조건으로는 대한건축학회의 강구조 한계상태설계기준(1998)을 기준으로 하여 인장 및 압축력 ,조합력, 세장비 등에 대한 강도 제약 조건과 단면 형상에 대한 사용성 및 변위 제약 사항 등을 사용하였다.

1) 이산자료 및 재질

최적설계에 적용되는 강재의 단면은 표 75 ~ 표 77과 같이 KSD 3760 농업용 아연도 강관과 KSD 3568 각형강관 , 강봉 등을 이산자료로 사용하였다.

표 75. 원형강관의 단면치수 및 단면성능

치수	단 면 적 (cm ²)	단면 2차모멘트 (cm ⁴)	단면계수 (cm ³)	단면 2차반경 (cm)
∅15.9 × 1.0	0.468	0.13	0.164	0.528
∅15.9 × 1.2	0.554	0.151	0.190	0.521
∅15.9 × 1.4	0.638	0.169	0.213	0.515
∅15.9 × 1.5	0.679	0.178	0.224	0.512
∅15.9 × 1.6	0.719	0.186	0.234	0.509
∅19.1 × 1.0	0.569	0.234	0.245	0.641
∅19.1 × 1.2	0.675	0.271	0.284	0.634
∅19.1 × 1.4	0.778	0.307	0.321	0.628
∅19.1 × 1.5	0.829	0.323	0.339	0.625
∅19.1 × 1.6	0.880	0.340	0.356	0.621
∅22.2 × 1.0	0.666	0.375	0.338	0.750
∅22.2 × 1.2	0.792	0.438	0.394	0.744
∅22.2 × 1.4	0.915	0.497	0.448	0.737
∅22.2 × 1.5	0.975	0.525	0.473	0.734
∅22.2 × 1.6	1.035	0.553	0.498	0.731

(계속)

치수	단 면 적 (cm ²)	단면 2차모멘트 (cm ⁴)	단면계수 (cm ³)	단면 2차반경 (cm)
∅25.4 × 1.0	0.767	0.571	0.450	0.863
∅25.4 × 1.2	0.912	0.670	0.527	0.857
∅25.4 × 1.4	1.056	0.763	0.600	0.850
∅25.4 × 1.5	1.126	0.807	0.636	0.847
∅25.4 × 1.6	1.196	0.851	0.670	0.843
∅25.4 × 1.7	1.266	0.893	0.703	0.840
∅28.6 × 1.0	0.867	0.827	0.578	0.976
∅28.6 × 1.2	1.033	0.971	0.679	0.970
∅28.6 × 1.4	1.196	1.109	0.776	0.963
∅28.6 × 1.5	1.277	1.176	0.822	0.960
∅28.6 × 1.6	1.357	1.241	0.868	0.956
∅28.6 × 1.7	1.437	1.305	0.912	0.953
∅31.8 × 1.0	0.968	1.149	0.722	1.090
∅31.8 × 1.2	1.154	1.352	0.851	1.083
∅31.8 × 1.4	1.337	1.548	0.973	1.076
∅31.8 × 1.5	1.428	1.643	1.033	1.073
∅31.8 × 1.6	1.518	1.735	1.091	1.069
∅31.8 × 1.7	1.608	1.826	1.149	1.066
∅31.8 × 2.0	1.872	2.088	1.313	1.056
∅38.1 × 1.0	1.166	2.007	1.053	1.312
∅38.1 × 1.2	1.391	2.370	1.244	1.305
∅38.1 × 1.4	1.614	2.722	1.429	1.298
∅38.1 × 1.5	1.725	2.893	1.519	1.295
∅38.1 × 1.6	1.835	3.061	1.607	1.292
∅38.1 × 1.7	1.944	3.227	1.694	1.288
∅38.1 × 2.0	2.268	3.706	1.946	1.278
∅50.8 × 1.2	1.870	5.754	2.265	1.754
∅50.8 × 1.4	2.173	6.633	2.611	1.747
∅50.8 × 1.5	2.323	7.065	2.781	1.744
∅50.8 × 1.6	2.473	7.491	2.949	1.740
∅50.8 × 1.7	2.622	7.912	3.115	1.737
∅50.8 × 2.0	3.066	9.143	3.60	1.727

표 76. 각형강관의 단면치수 및 단면성능

치수(mm)	단 면 적 (cm ²)	단면 2차모멘트 (cm ⁴)		단면계수 (cm ³)		단면 2차반경 (cm)	
		Ix	Iy	Zx	Zy	ix	iy
□30 × 20 × 1.2	1.105	1.34	0.711	0.890	0.711	1.10	0.802
□30 × 20 × 1.6	1.4317	1.66	0.879	1.11	0.879	1.80	0.784
□40 × 20 × 1.2	1.3453	2.73	0.923	1.36	0.923	1.42	0.828
□40 × 20 × 1.6	1.7517	3.43	1.15	1.72	1.15	1.40	0.810
□50 × 30 × 1.6	2.392	7.96	3.60	3.18	2.40	1.82	1.23
□50 × 30 × 2.3	3.332	10.6	4.76	4.25	3.17	1.79	1.20
□60 × 30 × 1.6	2.712	12.5	4.25	4.16	2.83	2.15	1.25
□60 × 30 × 2.3	3.792	16.8	5.65	5.61	3.76	2.11	1.22
□60 × 30 × 3.2	5.087	21.4	7.08	7.15	4.72	2.05	1.18
□75 × 45 × 1.6	3.672	28.4	12.9	7.56	5.75	2.78	1.88
□75 × 45 × 2.3	5.172	38.9	17.6	10.4	7.82	2.74	1.84
□75 × 45 × 3.2	7.007	50.8	22.8	13.5	10.1	2.69	1.80
□80 × 40 × 1.6	3.672	30.7	10.5	7.68	5.26	2.89	1.69
□80 × 40 × 2.3	5.172	42.1	14.3	10.5	7.14	2.85	1.66
□80 × 40 × 3.2	7.007	54.9	18.4	13.5	9.21	2.80	1.62
□100 × 40 × 4.2	10.60	120	27.6	24.0	10.6	3.36	1.61
□100 × 50 × 1.6	4.632	61.3	21.1	12.3	8.43	3.64	2.13
□100 × 50 × 2.3	6.552	84.8	29.0	17.0	11.6	3.60	2.10
□100 × 50 × 3.2	8.927	112	38.0	22.5	15.2	3.55	2.06
□100 × 50 × 4.5	12.17	147	48.9	29.3	19.5	3.47	2.00

표 77. 강봉의 단면치수 및 단면성능

치수	단 면 적 (cm ²)	단면 2차모멘트 (cm ⁴)	단면계수 (cm ³)	단면 2차반경 (cm)
D10	0.785	0.049	0.098	0.25
D12	1.131	0.101	0.169	0.30
D13	1.327	0.140	0.215	0.32
D14	1.539	0.188	0.269	0.35
D15	1.767	0.248	0.331	0.37
D16	2.011	0.321	0.402	0.40
D17	2.269	0.409	0.482	0.42
D18	2.544	0.515	0.572	0.45
D19	2.835	0.639	0.673	0.47
D20	3.141	0.785	0.785	0.50
D22	3.801	1.149	1.045	0.55
D24	4.523	1.628	1.357	0.60

2) 목적 함수

최적화를 위한 목적함수로 전체구조물이 최소중량의 설계가 되도록 최적화 문제를 수식 화하면 식 (102)와 같이 정식화한다.

$$\text{Minimize } W(X) \quad (102)$$

$$\text{Subject to } G(X) \geq 0$$

$$W(X) = \rho \sum_{i=1}^m V_i$$

$$V_i = A_i \times L_i$$

여기서, W : 목적함수, 구조물 중량(tf), X : 설계변수, G : 제약조건식

V_i : 설계부재의 부피(cm^3), A_i : 단면적(cm^2), L_i : 부재길이(cm)

ρ : 강재의 단위중량(tf/cm^3)

본 연구의 목적함수를 식 (73) 및 식 (74)를 근거로 벌칙함수를 적용시켜 무제약 비선형 최적문제로 식 (103)과 같이 전환한 뒤 GAs을 적용하였다.

$$\text{Minimize } \text{Object}(X) = W(X) + \alpha \sum_{j=1}^m \frac{1}{G_j(X)} \quad (103)$$

여기서, W : 목적함수, $G_j(X)$: 제약조건식, m : 제약조건식 수, X : 제약조건식 수

나. 단동 플라스틱온실의 최적설계

단동 플라스틱 온실에 대하여 본 연구에서 제시한 이산화최적설계방법을 이용하여 구조해석과 단면을 동시에 수행하여 그 결과를 비교. 검토하고자 한다.

1) 단동 플라스틱 온실의 이산화최적설계

그림 161과 같은 단동 온실구조에 대하여 GAs를 이용한 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 단면은 표 75와 같은 실제 공장에서 제작되는

상용제품인 KSD 3760 농업용 아연도 강관에 대한 단면 성질을 사용하여 최적설계를 수행하였다. 온실 구조의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약 조건으로는 식 (78)~식 (91)과 한계상태설계기준을 근거로 하였다. 하중조건과 염색체 길이 및 설계공간은 표 81과 같다. 교배확률과 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였으며, 설계집단은 40, 최대세대수는 50번으로 하였다. 강재의 기계적 성질은 표 78과와 같다.

표 78. 최적화 조건

부재의 항복강도 $F_y(\text{tf/cm}^2)$	탄성계수 $E(\text{tf/cm}^2)$	단위중량 $\rho(\text{tf/cm}^3)$
2.4	1700	7.85×10^{-6}

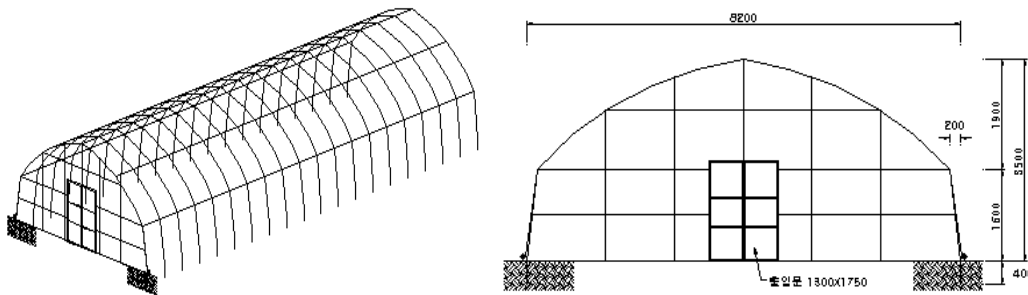


그림 161. 단동온실구조

단동온실구조에 작용하는 풍하중은 다음 식 (104)와 같다.

$$W_v = c \times q \times \alpha \times \beta \quad (\text{kg/m}^2) \quad (104)$$

여기서, c : 풍력계수, α : 지형이나 시설의 배치에 따른 할증계수,

β : 차폐물이 있는 경우의 절감계수, q : 속도압(kg/m^2)이다.

할증계수 α 와 절감계수 β 는 무시하였고, 풍력계수 c 는 그림 162와 같으며 속도압은 식 (105)로 구한다.

$$q = 0.0197v^2\sqrt{h} \quad (105)$$

여기서, v : 설계용 풍속(m/s), h : 지붕평균높이(m)

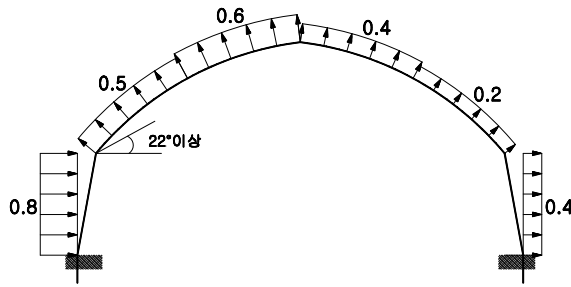


그림 162. 풍력계수 분포도

단동은실 구조의 지붕위에 작용하는 적설하중은 다음 식 (106)으로 구한다.

$$W_s = \rho \times D \times \alpha \quad (\text{kg/m}^2) \quad (106)$$

여기서, ρ : 적설의 단위체적중량($\text{kg/cm} \cdot \text{m}^2$),

D : 설계용 적설심(cm),

α : 지붕경사 및 피복재의 종류에 따른 절감계수이다.

적설의 단위체적중량은 수평면에 대한 중량을 의미하며, 적설심별 중량은 표 79를 기준으로 하고, 지붕경사에 따른 절감계수는 표 80을 기준으로 하였다. 적설하중의 분포형태는 그림 163과 같다.

표 79. 적설의 단위체적중량

적 설 심(cm)	50 이하	100 이하	200 이하	400 이하
단위체적중량($\text{kg/cm} \cdot \text{m}^2$)	1.0	1.5	2.2	3.5

표 80. 지붕경사에 따른 적설하중의 절감계수

지붕경사	10° ~ 20°	20° ~ 30°	30° ~ 40°	40° ~ 60°	60° 이상
절감계수	0.9	0.75	0.5	0.25	0

표 81. 단동은실구조의 하중조건

하중조건			이산최적설계 유전자 길이		
설계풍속 (m/s)	설계적설심 (cm)	서까래간격 (cm)	부재그룹	설계공간	유전자 길이 (bit)
30	20	60	1	47	6

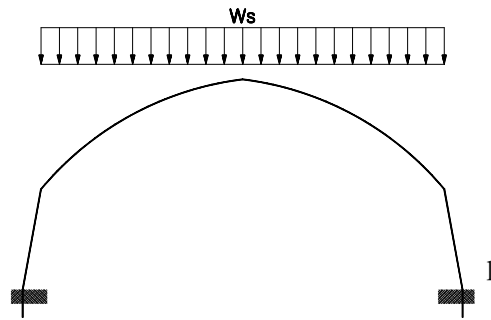


그림 163. 적설하중 분포도

GAs에서 염색체의 생존 확률 계산의 기준이 되는 매우 중요한 요소가 적합도이며, 본 연구에서는 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 (Kavlie, 1971)을 참조하여 식 (107)과 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다.

$$Fitness = \frac{Object_{Max}}{Object_{Sum}} \quad (107)$$

$$Object_{Max} = \sum_{i=1}^n A_{max} \times L_i \quad (108)$$

$$Object_{Sum} = \sum_{i=1}^n A_i \times L_i \quad (109)$$

여기서, A_{max} : 검색에 사용되는 단면 데이터베이스의 단면적중 가장 큰 값

A_i : i 번째 부재의 단면적, L_i : i 번째 부재의 길이

이산 최적설계를 수행한 결과는 표 82와 같으며, 적합도의 과정과 세대증가에 따른 기동수평최대변위의 과정은 각각 그림 164, 그림 165에 나타나 있다.

표 82. 단동 플라스틱 온실구조의 이산최적설계 결과

CASE	부재력(tf-cm)	size(mm)	단면적(cm ²)	목적함수(tf)	적합도
설 하 중	2.061	∅38.1×1.0	0.968	0.01109	2.6295
풍 하 중	1.817	∅38.1×1.5	1.725	0.01642	1.7772
결정단면	∅38.1×1.5				

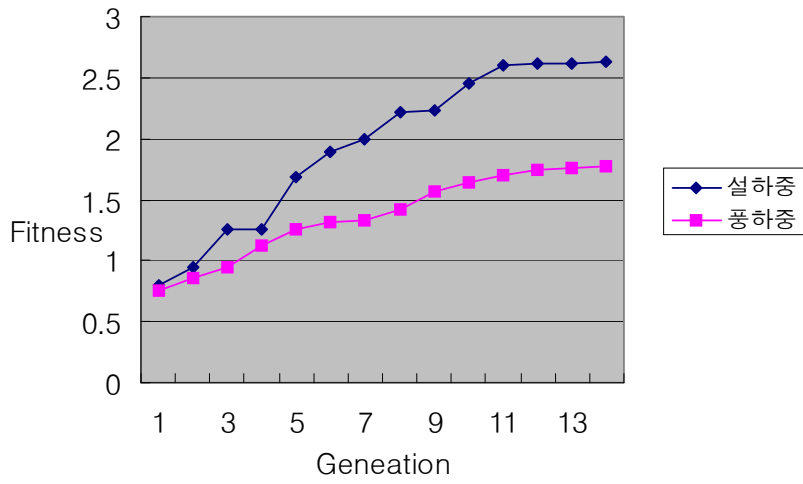


그림 164. 단동 플라스틱 온실구조의 적합도 함수변화

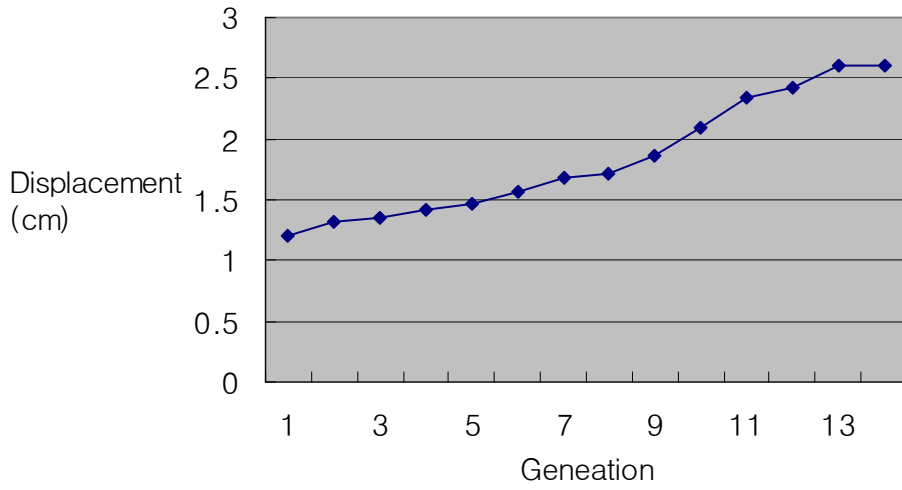


그림 165. 풍하중에 의한 세대증가에 따른 기둥 수평변위의 변화

그리고 표준도면에 제시된 기본사양 플라스틱온실 모델별 규격중 G형과 하중조건을 동일하게 하여 비교하였으며 하중조건은 농가지도형 비닐하우스설계서에 나타낸 것과 같이 다음 표 83과 같다.

표 83. 단둥은실구조의 하중조건

설계풍속(m/s)	설계 적설심(cm)	서까래 간격(cm)
17.4	9.5	100

이산 최적설계를 수행한 결과는 표 84와 같으며, 적합도의 과정과 세대증가에 따른 기동수평최대변위의 과정은 각각 그림 166, 그림 167에 나타나 있다.

표 84. 플라스틱 단둥은실구조의 표준도면 G형과 이산최적설계 결과비교

CASE	size(mm)	
	G형 모델	본 연구 이산최적결과
설 하 중	∅32.0×1.5 (1.4373cm ²)	∅38.1×1.0 (1.1655cm ²)
목적함수(tf)	0.013679	0.011097
풍 하 중	∅32.0×1.5 (1.4373cm ²)	∅38.1×1.0 (1.1655cm ²)
목적함수(tf)	0.013679	0.011097

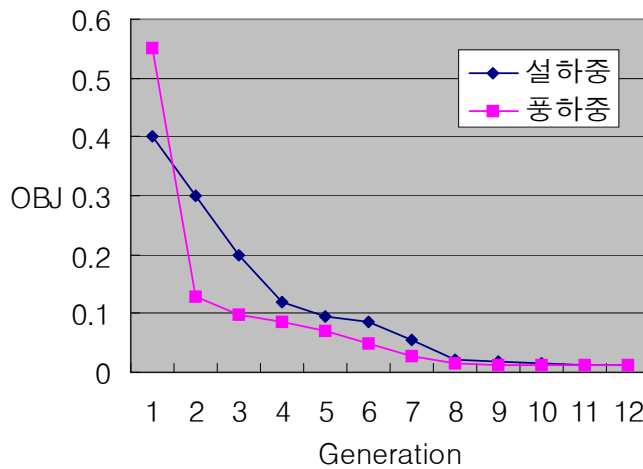


그림 166. 플라스틱 단둥은실구조의 목적함수 변화

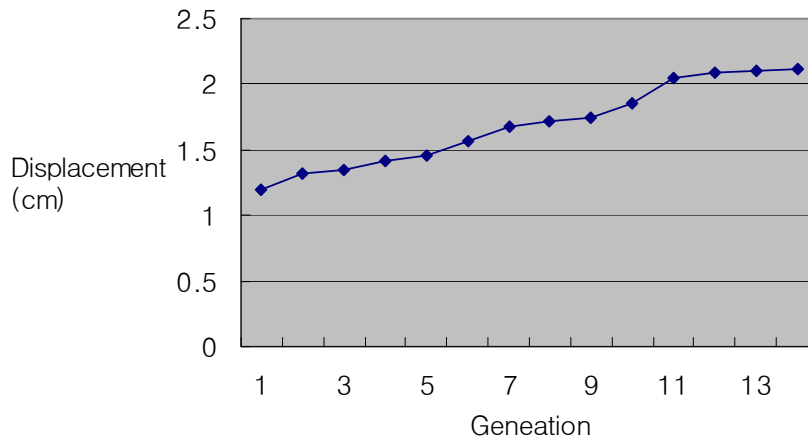


그림 167. 풍하중에 의한 세대증가에 따른 기둥 수평변위의 변화

표 84. 플라스틱 단동온실구조의 표준도면과 본 연구 이산최적설계 결과비교

	표준도면		이산최적결과	목적함수 비율
	size(mm)	단면적(cm ²)		
A형	size(mm)	Ø22×1.2	Ø31.8×1.0	+23.5%
	단면적(cm ²)	0.784		
B형	size(mm)	Ø25×1.5	Ø31.8×1.0	-12.6%
	단면적(cm ²)	1.107		
C형	size(mm)	Ø25×1.5	Ø31.8×1.0	-12.6%
	단면적(cm ²)	1.107		
D형	size(mm)	Ø25×1.5	Ø31.8×1.0	-12.6%
	단면적(cm ²)	1.107		
E형	size(mm)	Ø32×1.5	Ø31.8×1.2	-19.7%
	단면적(cm ²)	1.437		
F형	size(mm)	Ø32×1.5	Ø31.8×1.2	-19.7%
	단면적(cm ²)	1.437		
H형	size(mm)	Ø22×1.2	Ø31.8×1.0	+23.5%
	단면적(cm ²)	0.784		
I형	size(mm)	Ø25×1.5	Ø31.8×1.0	-12.6%
	단면적(cm ²)	1.107		
J형	size(mm)	Ø32×1.5	Ø38.1×1.0	-18.9%
	단면적(cm ²)	1.437		

본 연구에서 플라스틱 단동온실구조의 이산최적설계 문제를 유전자알고리즘을 이용하여 한계상태설계기준을 근거로 하여 구조해석과 이산최적설계를 각각 수행한 결과를 고찰하면 다음과 같다.

(1) 유전자알고리즘을 이용하여 구조해석과 이산최적설계를 동시에 고려할 수 있음을 그림 4.4 ~ 그림 4.7 과 표 4.9 ~ 표 4.11에서 알 수 있었다.

(2) 표 4.9에서 목적함수를 비교하여 보면 설하중에 의한 목적함수가 풍하중에 의한 목적함수가 적음을 알 수 있다. 이는 설하중에 비해 풍하중에 의한 단면설계가 결정됨으로 풍하중이 설하중 보다 더 지배적인 하중재하임을 알 수 있었다.

(3) 표 4.11에서는 표준도면 G형 단동온실과 본 연구의 이산최적설계결과를 비교 검토한 결과 약 18.9% 더 경제적임을 알 수 있었다.

(4) 표 4.12에서는 표준도면 A형~J형에 대하여 본연구의 이산최적설계결과와 비교한 결과 대부분 13% ~20%정도 경제적임을 알 수 있으나 A형과 H형은 24%정도 더 목적함수가 증가함을 알 수 있었다. 이는 하중조건과 형상 및 제약조건에 따라 다양한 최적설계결과가 나올 수 있음을 간접적으로 알 수 있다.

(5) 그림 4.4의 경우를 살펴보면 최적치 검색이 각각 13 과 14 세대에서 발생되었으며 이후세대가 증가되어도 종료될 때까지 더 이상의 적합도가 증가가 없는데 이는 설계공간에서 효율적으로 최적해가 검색됨을 간접적으로 증명하는 것이다.

(6) 그림 4.5 , 그림 4.7을 보면 세대의 증가에 따른 풍하중시 기동최대수평변위제한에 만족하면서 최적치를 검색함을 확인할 수 있었다.

이상의 설계 예에서 본 연구의 이산최적설계알고리즘에서 경제적인 최적설계가 가능함을 보였고, 다양한 최적설계정보를 얻는데 효과적임을 알 수 있었다.

다. 단동온실의 연속 및 이산화 최적설계 비교

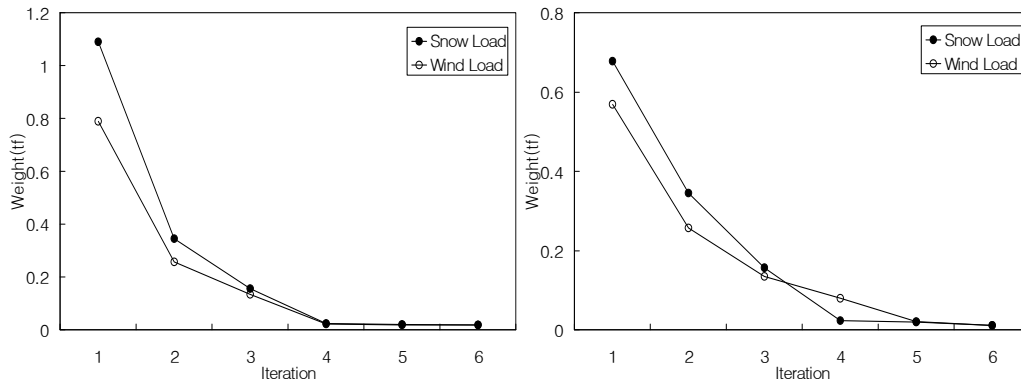
본 연구에서는 SUMT와 GAs을 이용하여 단동온실구조에 대하여 구조해석과 단면최적화를 동시에 수행하여 연속 및 이산화 최적설계문제를 수행하고, 그 결과를 비교·고찰하였다. 온실구조는 농가지도형 비닐하우스 G형으로 하였으며 하중조건은 설계풍속 30m/s, 설계적설심 20cm, 서까래 간격은 60cm로 하였다.

SUMT를 사용한 연속최적설계를 수행한 최적설계 결과는 표 85와 같다.

표 85. 변위제약에 따른 단둥온실구조의 연속최적설계 결과

CASE		부재력 (tf-cm)	직경(D) (cm)	두께(t) (cm)	단면적 (cm ²)	목적함수 (tf)
변형제한 고려	적설하중	2.635	3.989	0.159	1.924	0.0187
	풍 하 중	2.276	3.770	0.153	1.738	0.0169
	결정단면	∅39.89×1.6mm				
변형제한 미고려	적설하중	2.635	3.593	0.101	1.108	0.0108
	풍 하 중	2.276	3.347	0.100	1.028	0.0099
	결정단면	∅35.93×1.0mm				

최종 수렴하기 전까지 5번의 반복수행과정을 거쳤으며 반복횟수에 따른 목적함수의 수렴과정은 그림 168과 같다.



(a) 변위제약식 고려

(b) 변위제약식 미고려

그림 168. 연속최적설계값의 수렴과정

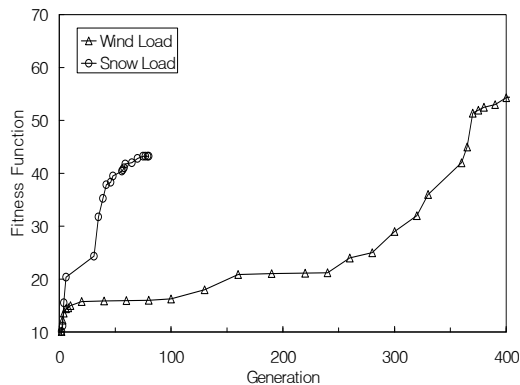
동일한 단둥온실에 GAs를 이용한 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 온실용 파이프는 KSD 3760 비닐하우스용 아연도 강관에 명시된 46개의 부재를 사용하였으며 강관에 대한 단면 성질은 프로그램에서 자동으로 계산이 수행되도록 하였다. 부재의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약 조건으로는 한계상태설계기준을 근거로 하였다. 탐색체길이 및 설계공간은 표 81과 같으며 교배확률과 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였으며, 설계집단은 60, 최대세대

수는 3000번으로 하였다. GAs에서 염색체의 생존 확률 계산의 기준이 되는 매우 중요한 요소가 적합도이며, 본 연구에서는 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 (Kavlie, 1971)을 참조하여 식 (107)과 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다.

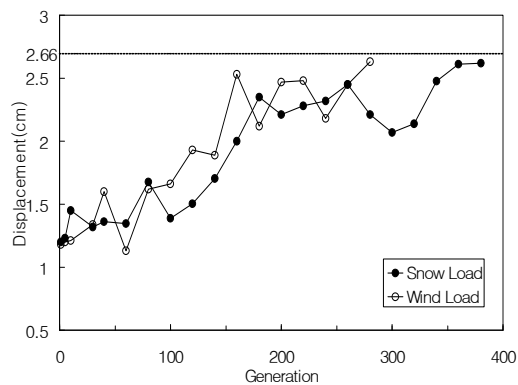
이산 최적설계를 수행한 결과는 표 86과 같으며, 적합도의 변화형상과 세대증가에 따른 기둥수평최대변위의 변화형상은 각각 그림 169에 나타나 있다.

표 86. 변위제약에 따른 단둥은실구조의 이산최적설계 결과

CASE		부재력 (tf-cm)	직경(D) (cm)	두께(t) (cm)	단면적 (cm ²)	목적함수 (tf)
변형제한 고려	적설하중	2.635	3.81	1.7	1.924	0.0189
	풍 하 중	2.531	3.81	1.5	1.738	0.0168
	결정단면	∅38.1×1.7mm				
변형제한 미고려	적설하중	2.635	3.81	1.4	1.337	0.0130
	풍 하 중	2.531	3.81	1.2	1.154	0.0112
	결정단면	∅31.8×1.4mm				



(a) 변위제약식 고려



(a) 변위제약식 무시

그림 169. 변위를 고려한 단둥은실구조의 적합도 함수 변화

이상의 연구결과에서 보는 바와 같이, 유전자알고리즘을 이용하여 구조해석과 단면 및 위상을 동시에 고려할 수 있으며, 변위제약식을 고려하여 목적함수를 비교하면 연

속최적설계결과가 이산최적설계결과 값에 비해 1.1%정도, 변위제약식을 고려하지 않은 경우는 10.9% 더 경제적임을 알 수 있으며 풍하중에 비해 설하중에 의한 최적 설계값이 결정됨으로 설하중에 의한 설계가 더 지배적임을 알 수 있었다. 그리고, 그림 7에서와 같이 최적치 검색이 각각 82와 400 세대에서 발생되었으며 이후세대가 증가되어도 종료될 때까지 더 이상의 적합도가 증가가 없는데 이는 설계공간에서 효율적으로 최적해가 검색됨을 간접적으로 증명하는 것이고, 세대의 증가에 따른 기동최대 수평변위제한이 만족함을 확인할 수 있었다. 따라서, 연속 및 이산최적설계알고리즘에서 경제적인 최적설계가 가능함을 보였고, 다양한 최적설계정보를 얻는데 효과적임을 알 수 있었다.

라. 연동 플라스틱온실의 최적설계

연동형 플라스틱온실에 대하여 본 연구에서 제시한 이산화 최적설계방법과 SUMT를 이용하여 구조해석과 단면최적설계를 동시에 수행하여 그 결과를 비교·검토하였다.

1) 3연동 플라스틱온실의 최적설계

그림 170과 같은 연동온실구조에 대하여 SUMT와 GAs를 이용한 최적설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 단면은 표 75와과 같은 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KSD 3760 농업용 아연도 강관에 대한 단면 성질을 사용하여 최적설계를 수행하였으며 강재의 기계적 성질은 표 87과 같다. 온실구조의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약조건으로는 식 (78)~식 (91)과 같이 한계상태설계기준을 근거로 하였다. 하중조건과 염색체길이 및 설계공간은 표 88과 같으며 교배확률과 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였고, 설계집단은 60, 최대세대수는 3000 번으로 하였다.

표 87. 강재의 기계적 성질

부재의 항복강도 $F_y(\text{tf/cm}^2)$	탄성계수 $E(\text{tf/cm}^2)$	단위중량 $\rho(\text{tf/cm}^3)$
2.4	1700	7.85×10^{-6}

표 88. 단동온실구조의 하중조건

하중조건			이산최적설계 유전자 길이		
설계풍속 (m/s)	설계적설심 (cm)	서까래간격 (cm)	부재그룹	설계공간	유전자 길이 (bit)
35	25	200	5	235	8

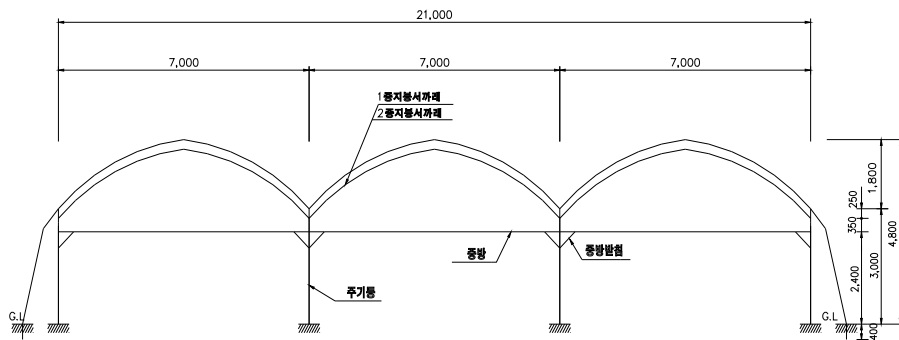
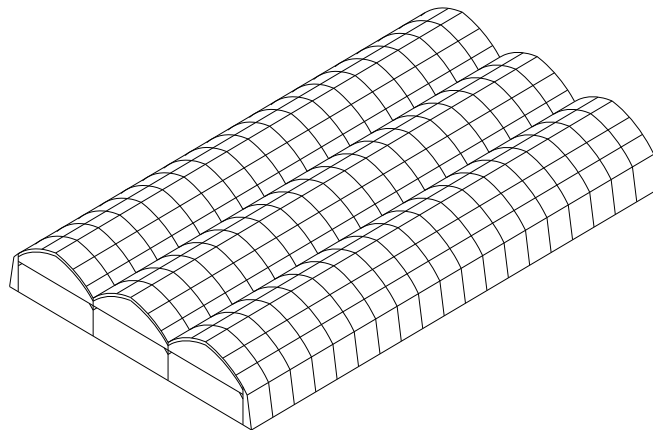


그림 170. 연동온실 구조

본 연구에서는 단동온실인 경우와 같이 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 식 (104)와 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다. 연동온실의 풍하중과 설하중은 단동온실의 경우와 동일하게 산정하였으며 연동온실의 풍력계수 분포는 그림 171과 같고 적설하중 분포도는 그림 172와 같다. 그림에서 a는 L/3또는 3m중 작은 값을 선택한다.

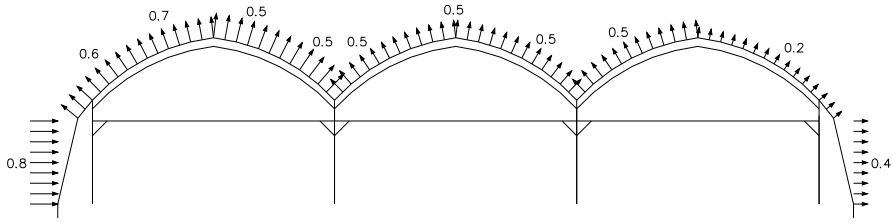


그림 171. 연동온실의 풍력계수 분포도

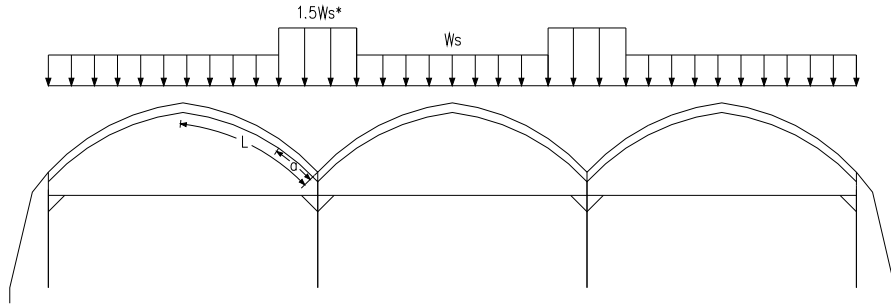


그림 172. 적설하중 분포도

가) 연속최적설계 결과

SUMT를 사용한 연속최적설계를 수행한 최적설계 결과는 표 89와 같으며 연속최적 설계결과에 따라 최종결정된 단면은 표 90과 같다.

표 89. 연동온실구조의 연속 최적설계 결과

CASE	표준도면 size(cm)		연속최적결과		
			직경(D,cm)	두께(t,cm)	단면적(A,cm ²)
설하중	1중서까래	∅3.18×0.15	3.29	0.14	1.385
	2중서까래	∅2.54×0.12	1.59	0.1	0.468
	주기둥	∅4.81×0.21	3.85	0.12	1.406
	중방	∅4.81×0.21	2.58	0.15	1.145
풍하중	1중서까래	∅3.18×0.15	3.10	0.14	1.301
	2중서까래	∅2.54×0.12	1.77	0.11	0.573
	주기둥	∅4.81×0.21	5.08	0.16	2.473
	중방	∅4.81×0.21	2.42	0.12	0.867

표 90. 연동은실구조의 연속 최적 설계 결과

	부재	직경(D, cm)	두께(t, cm)	단면적(A,cm ²)
최종단면	1중서까래	3.29	0.14	1.385
	2중서까래	1.77	0.11	0.573
	주기둥	5.08	0.16	2.473
	중방	2.58	0.15	1.145

그림 173에서는 표준도면의 설계단면의 목적함수값은 약 0.14tf이며, 연속최적결과의 목적함수값은 약 0.09tf으로서 약 35% 부재가 절감될 수 있음을 알 수 있다. 또한 최종 수렴하기 전까지 5번의 반복수행과정을 거쳤으며 반복횟수에 따른 목적함수의 수렴과정은 그림 174와 같다.

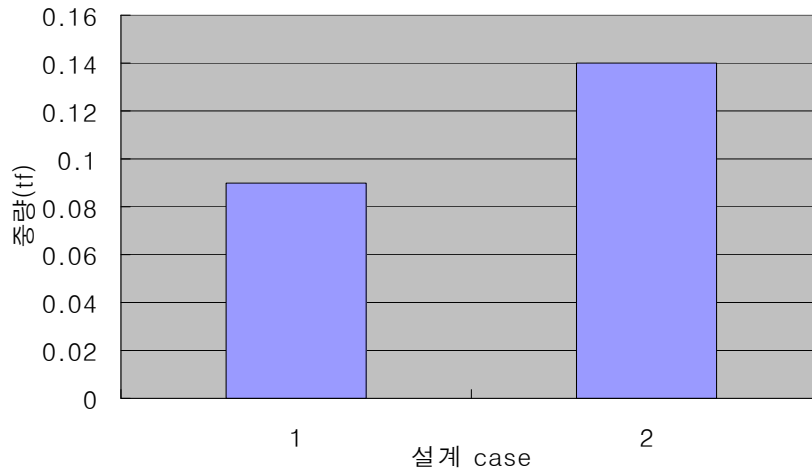


그림 173. 표준도면의 설계치와 연속최적설계에 따른 목적함수비교

1.2



그림 174. 플라스틱연동온실 연속최적설계 수립과정

나) 이산 최적설계 결과

이산 최적설계를 수행한 결과는 표 91 및 표 92와 같으며, 적합도의 과정과 세대증가에 따른 기동수평최대변위의 과정은 각각 그림 175 및 그림 176에 나타나 있다.

표 91. 연동온실구조의 하중별 이산최적설계 결과

CASE		size(mm)	
		1-2W형 표준도면	본 연구 이산최적결과
설하중	1중서까래	Ø48.1×2.1	Ø38.1×1.0
	2중서까래	Ø25.4×1.2	Ø31.8×1.0
	기둥	Ø48.1×2.1	Ø31.8×1.0
	중방	Ø48.1×2.1	Ø31.8×1.0
	중방받침	Ø33.5×2.1	Ø31.8×1.0
목적함수(tf)		0.17598	0.07558
풍하중	1중서까래	Ø48.1×2.1	Ø50.8×1.5
	2중서까래	Ø25.4×1.2	Ø31.8×1.0
	기둥	Ø48.1×2.1	Ø50.8×1.2
	중방	Ø48.1×2.1	Ø31.8×1.0
	중방받침	Ø33.5×2.1	Ø50.8×2.0
목적함수(tf)		0.17598	0.11893

표 92. 연동온실구조의 최종 이산최적설계와 표준도면 비교

CASE		size(mm)	
		1-2W형 표준도면	본 연구 이산최적결과
최종단면	1중서까래	∅48.1×2.1	∅50.8×1.5
	2중서까래	∅25.4×1.2	∅31.8×1.0
	기둥	∅48.1×2.1	∅50.8×1.2
	중방	∅48.1×2.1	∅31.8×1.0
	중방받침	∅33.5×2.1	∅50.8×2.0
목적함수(tf)		0.17598	0.13684

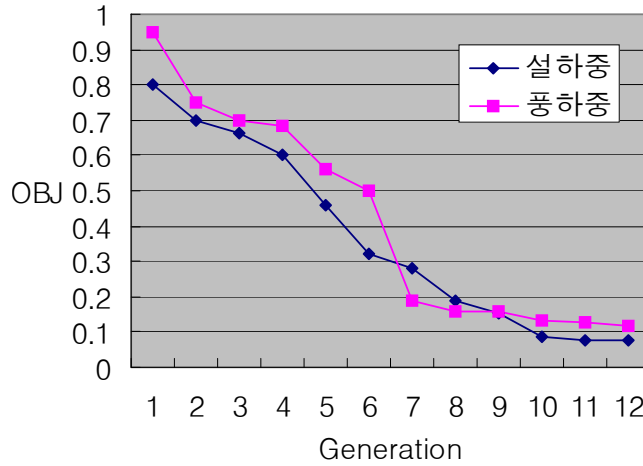


그림 175. 연동 플라스틱온실의 목적함수 변화

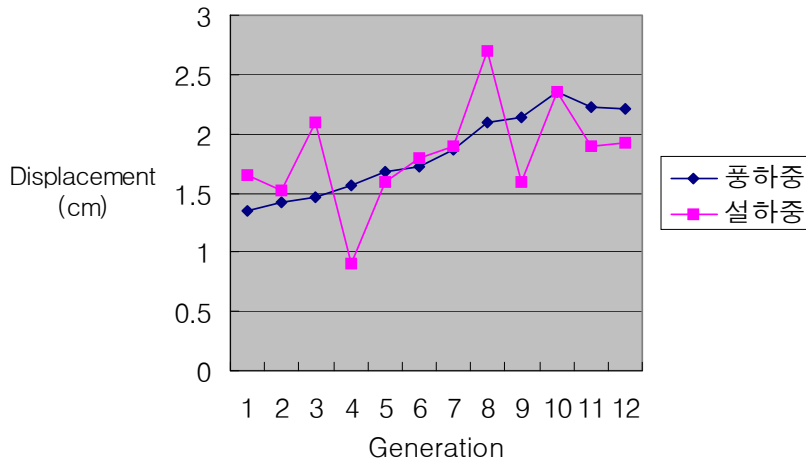


그림 176. 세대증가에 따른 기둥 수평변위의 변화

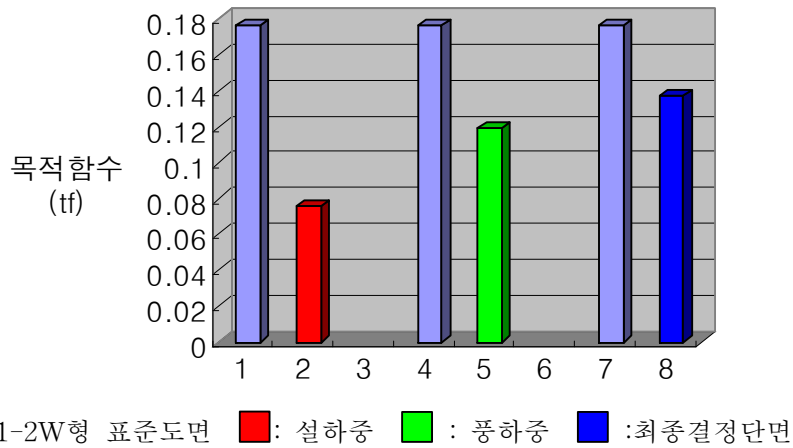


그림 177. 하중별 표준도면과 목적함수 비교

본 연구에서 연동플라스틱온실구조의 이산최적설계 문제를 유전자알고리즘을 이용하여 한계상태설계기준을 근거로 하여 구조해석과 이산최적설계를 각각 수행한 결과를 고찰하면 다음과 같다.

- (1) 유전자알고리즘을 이용하여 구조해석과 이산최적설계를 동시에 고려하여 최적설계를 할 수 있었다.
- (2) 표 91에서 목적함수를 비교하여 보면 설하중에 의한 목적함수가 풍하중에 의한 목적함수가 적음을 알 수 있다. 이는 설하중에 비해 풍하중에 의한 단면설계가 결정됨으로 풍하중이 설하중 보다 더 지배적인 하중재하임을 알 수 있었다. 또한, 1-2W형 표준도면 연동온실과 본 연구의 최종결정 이산최적설계결과를 비교 검토한 결과 약 22.2% 더 경제적임을 알 수 있었다.
- (3) 그림 175의 경우를 살펴보면 최적치 검색이 각각 12 와 13 세대에서 발생되었으며 이후세대가 증가되어도 종료될 때까지 더 이상의 목적함수가 감소가 없는데 이는 설계공간에서 효율적으로 최적해가 검색됨을 간접적으로 증명하는 것이다. 그리고, 그림 176을 보면 세대의 증가에 따른 풍하중시 기동최대수평변위 제한에 만족하면서 최적치를 검색함을 확인할 수 있었다.

이상의 설계 예에서 본 연구의 온실구조용 이산최적설계알고리즘에서 경제적인 최적설계가 가능함을 보였고, 다양한 최적설계정보를 얻는데 효과적임을 알 수 있었다.

마. 와이드 스펠형 연동유리온실의 최적설계

1) 와이드 스펠형 연동 유리온실의 최적설계 조건

그림 178과 같은 와이드 스펠형 유리온실구조에 대하여 GAs를 이용한 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 단면은 표 75~ 표77과 같은 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KSD 3568 각형강관 및 강봉 등을 이산자료에 대한 단면 성질을 사용하여 최적설계를 수행하였으며 강재의 기계적 성질은 표 93과 같다. 강구조의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약 조건으로는 한계상태설계기준을 근거로 하였다. 하중조건, 염색체길이 및 설계공간은 표 94와 같으며 교배확률과 돌연변이 확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였으며, 설계집단은 60, 최대세대수는 3000 번으로 하였다.

표 93. 강재의 기계적 성질

부재의 항복강도 $F_y(\text{tf/cm}^2)$	탄성계수 $E(\text{tf/cm}^2)$	단위중량 $\rho(\text{tf/cm}^3)$
2.4	2100	7.85×10^{-6}

표 94. 온실구조의 하중조건

하중조건			이산최적설계 유전자 길이		
설계풍속 (m/s)	설계적설심 (cm)	서까래간격 (cm)	부재그룹	설계공간	유전자 길이 (bit)
35	25	400	6	112	7

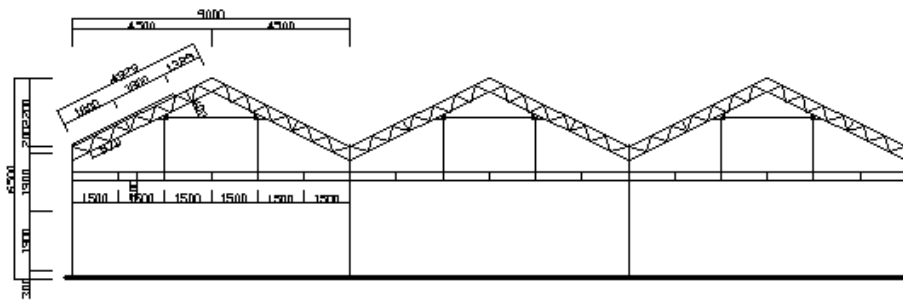


그림 178. 평면 와이드 스펠형 연동유리온실구조

풍하중 및 적설하중의 산정은 위의 방법과 동일하게 하였으며 온실의 풍력계수 분포는 그림 179와 같고 적설하중 분포도는 그림 180과 같다. 그림에서 a는 $L/3$ 또는 3m 중 작은 값을 선택한다.

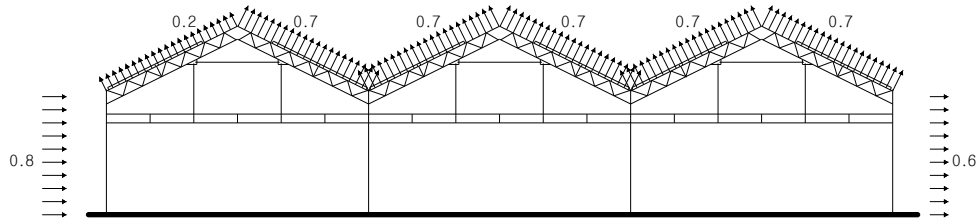


그림 179. 풍력계수 분포도

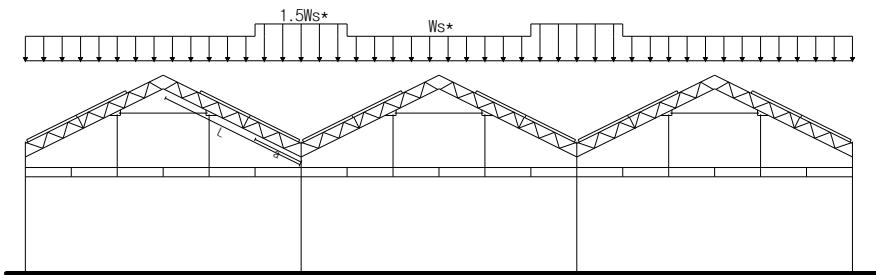


그림 180. 적설하중 분포도

2) 연속 최적설계 결과

SUMT를 사용한 연속최적설계를 수행한 최적설계 결과는 표 95와 같으며 연속최적설계결과에 따라 최종결정된 단면은 표 96과 같다.

표 95. 연동은실구조의 연속 최적 설계 결과

CASE	부재명		표준도면 단면	연속최적결과
설하중	트러스	상현재	□ - 50×30×3.2	□ - 20×20×1.2
		하현재	□ - 50×30×3.2	□ - 23×21×1.2
		사 재	∅16	∅14
	기 등		□ - 100×60×3.5	□ - 74×61×1.9
	중방 상현재		□ - 60×40×2.3	□ - 32×20×1.2
	중방 하현재		C - 60×30×10×2.0	C - 41×20×10×1.4
풍하중	트러스	상현재	□ - 50×30×3.2	□ - 27×23×1.2
		하현재	□ - 50×30×3.2	□ - 45×32×1.2
		사 재	∅16	∅14
	기 등		□ - 100×60×3.5	□ - 96×46×2.0
	중방 상현재		□ - 60×40×2.3	□ - 32×25×1.2
	중방 하현재		C - 60×30×3.2×10×2.0	C - 42×18×10×1.2

표 96. 유리연동은실구조의 연속 최적 설계 결과

	부재명		SIZE
최종단면	트러스	상현재	□ - 27×23×1.2
		하현재	□ - 45×32×1.2
		사 재	∅14
	기 등		□ - 96×61×2.0
	중방 상현재		□ - 32×25×1.2
	중방 하현재		C - 42×20×10×1.4

그림 181에서는 표준도면의 설계단면의 목적함수값은 약 0.63tf 이며, 연속최적결과
의 목적함수값은 약 0.38tf 으로서 약 39% 부재가 절감될 수 있음을 알 수 있다. 최종
수렴하기 전까지 5번의 반복수행과정을 거쳤으며 반복횟수에 따른 목적함수의 수렴과
정은 그림 182와 같다.

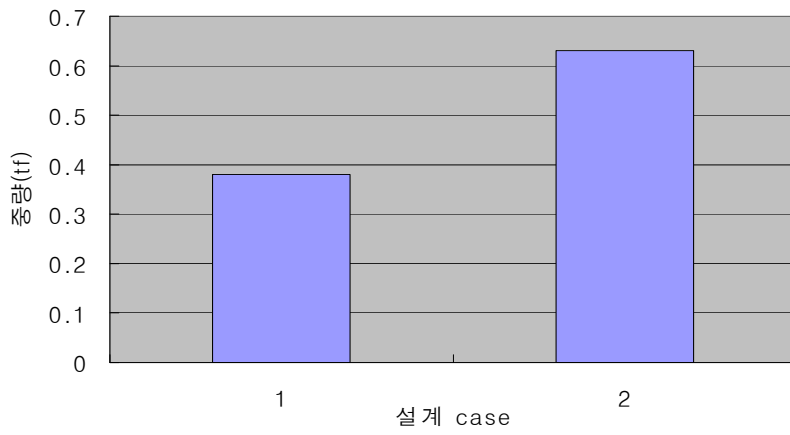


그림 181. 표준도면의 설계와 연속최적설계에 따른 목적함수비교

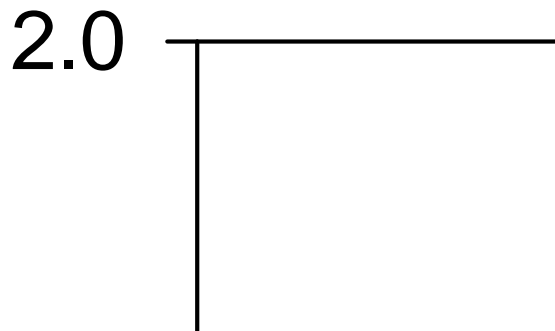


그림 182. 와이드스팬형 연동유리온실연속최적설계 수립과정

3) 이산 최적설계 결과

이산 최적설계를 수행한 결과는 표 97과 같으며, 하중별 표준도면과 이산최적설계의 목적함수를 비교한 결과는 그림 183과 같다.

표 97. 와이드 스펠형 연동유리온실구조의 이산최적설계 결과

CASE		size(mm)		
		표준도면	이산최적결과	
설하중	트러스	상현재	□-50×30×3.2	□-30×20×1.2
		하현재	□-50×30×3.2	□-30×20×1.2
		사재	φ16	φ22
	기둥		□-100×60×3.5	□-50×30×1.6
	중방상현재		□-60×40×2.3	□-30×20×1.2
	중방하현재		C-60×30×10×2	C-60×30×10×2
목적함수(tf)		0.5783	0.3000	
풍하중	트러스	상현재	□-50×30×3.2	□-30×20×1.2
		하현재	□-50×30×3.2	□-30×20×1.2
		사재	φ16	φ20
	기둥		□-100×60×3.5	□-75×45×1.6
	중방상현재		□-60×40×2.3	□-30×20×1.2
	중방하현재		C-60×30×10×2	C-60×30×10×2
목적함수(tf)		0.5783	0.2921	
최종결정 단면	트러스	상현재	□-50×20×2.3	
		하현재	□-50×20×2.3	
		사재	φ15	
	기둥		□-75×50×3.2	
	중방상현재		□-50×30×1.6	
	중방하현재		C-60×30×10×2	
목적함수(tf)		0.4239		

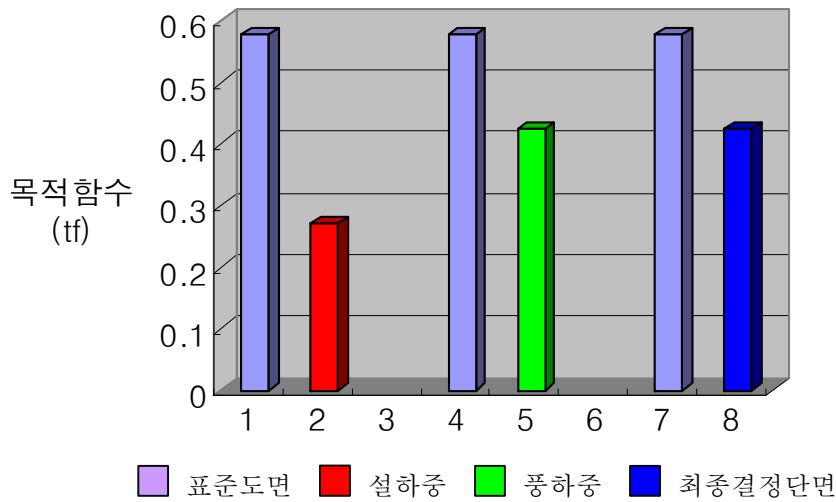


그림 183. 하중별 표준도면과 목적함수 비교

바. 벤로형 연동 유리온실의 최적설계

1) 벤로형 연동 유리온실의 최적설계 조건

그림 184와 같은 벤로형 유리온실구조에 대하여 SUMT를 이용한 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 먼저 부재에 대한 각부재의 초기 설계변수를 가정하여 평면 구조해석을 한 후 설계 제약조건식을 만족하는 각 단면에 대해서 최적화를 실시한다. 연동 온실구조 단면의 최적화가 이루어진 후, 목적함수의 값이 결정되면 바로 전단계의 목적함수값과 비교하여 허용범위에 수렴하지 않았을 경우는 다시 최적화 과정을 반복한다. 그리고, GAs를 이용한 이산화 최적설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 단면은 표 75~표77과 같은 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KSD 3568 각형강관 및 강봉 등을 이산자료에 대한 단면 성질을 사용하여 최적설계를 수행하였으며 강재의 기계적 성질은 표 93과 같다.

강구조의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약 조건으로는 한계상태설계기준을 근거로 하였다. 하중조건, 염색체길이 및 설계공간은 표 98과 같으며 교배확률과 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였으며, 설계집단은 60, 최대세대수는 3000번으로 하였다.

풍하중 및 적설하중의 산정은 위의 방법과 동일하게 하였으며 온실의 풍력계수 분포는 그림 185와 같고 적설하중 분포도는 그림 186과 같다. 그림에서 a는 L/3또는 3m 중 작은 값을 선택한다.

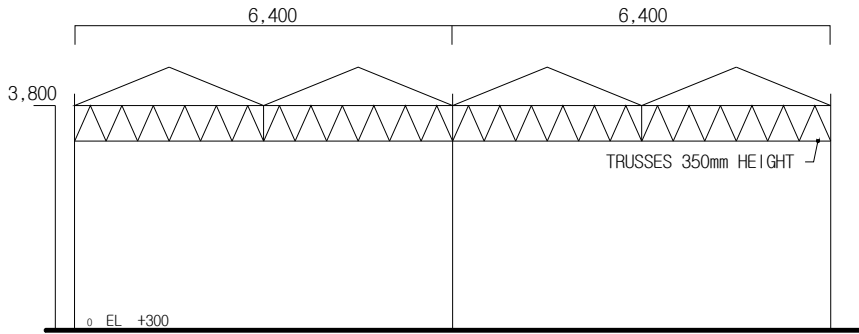


그림 184. 벤로형유리온실 구조

표 98. 온실구조의 하중조건

하중조건			이산최적설계 유전자 길이		
설계풍속 (m/s)	설계적설심 (cm)	서까래간격 (cm)	부재그룹	설계공간	유전자 길이 (bit)
35	25	400	4	212	8

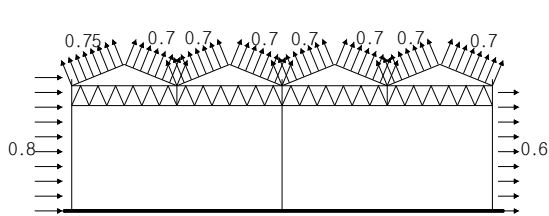


그림 185. 풍력계수 분포도

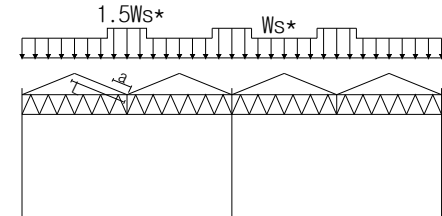


그림 186. 적설하중 분포도

2) 벤로형 연동 유리온실의 연속최적설계 결과

SUMT를 사용한 연속최적설계를 수행한 최적설계 결과는 표 99와 같다.

표 99. 벤로형 온실의 연속 최적 설계 결과

CASE	표준도면 단면		연속최적결과
설하중	트러스	상현재	□ - 23×17×1.2
		하현재	□ - 27×16×1.2
		사재	∅11
	기둥	□ - 100×50×3.2	□ - 47×20×1.2
풍하중	트러스	상현재	□ - 20×20×1.2
		하현재	□ - 24×22×1.3
		사재	∅11
	기둥	□ - 100×50×3.2	□ - 98×47×3.0
최종단면	트러스	상현재	□ - 23×20×1.2
		하현재	□ - 27×22×1.3
		사재	∅11
	기둥	□ - 98×47×3.0	

그림 187에서 표준도면의 설계단면의 목적함수값은 약 0.2tf 이며, 연속최적결과의 목적함수값은 약 0.12tf 으로서 약 15% 부재가 절감될 수 있음을 알 수 있다. 최종 수렴하기 전까지 5번의 반복수행과정을 거쳤으며 반복횟수에 따른 목적함수의 수렴과정은 그림 188과 같다.

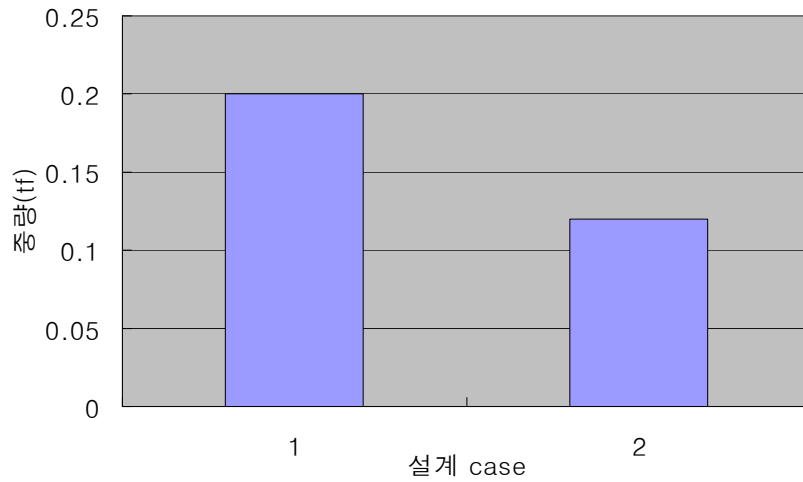


그림 187. 표준도면의 설계치와 연속최적설계에 따른 목적함수비교

1.2

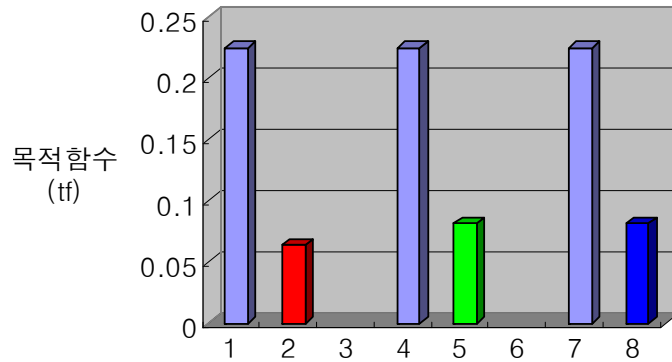
그림 188. 벤로형 연동유리온실 연속최적설계 수렴과정

3) 벤로형 연동유리온실의 이산최적설계

벤로형 연동온실의 이산 최적설계를 수행한 결과는 표 100과 같다.

표 99. 벤로형 온실의 이산최적설계 결과

CASE	표준도면 단면		연속최적결과	
설하중	트러스	상현재	□-50×30×3.2	□-40×20×1.2
		하현재	□-50×30×3.2	□-40×20×1.2
		사재	D13	D10
	기둥	□-100×60×3.5	□-40×20×1.2	
	목적함수	0.22493	0.063573	
풍하중	트러스	상현재	□-50×30×3.2	□-40×20×1.2
		하현재	□-50×30×3.2	□-40×20×1.2
		사재	D13	D10
	기둥	□-100×60×3.5	□-100×50×1.6	
	목적함수	0.22493	0.081932	
최종단면	트러스	상현재	□-40×20×1.2	
		하현재	□-40×20×1.2	
		사재	D10	
	기둥	□-100×50×1.6		
	목적함수	0.081932		



■ 벤로형 표준도면
 ■ 설하중
 ■ 풍하중
 ■ 최종결정단면

그림 189. 하중별 표준도면과 목적함수 비교

이상의 결과에서 목적함수를 비교하여 보면 최종결정단면이 설하중에 의한 설계단면보다 풍하중에 의한 설계단면이 결정되는 것을 보아 풍하중이 설하중 보다 더 지배적인 하중재하임을 알 수 있으며 최적설계가 표준도면과 비교하여 약 26.7% 경제적인임을 알 수 있다.

바. DOT를 이용한 온실구조의 최적설계 사례

수치해석에 의한 원예시설의 최적화가 수행되고 있으나 주로 온실에 사용되는 자재의 단면 최적화 등에 국한되어 있으며 설계풍속 및 적설심이 설계조건으로 주어진 경우에 사용자재의 설치간격이 고정된 상태에서의 사용자재의 단면 최적화가 수행되고 있다. 부재 단면과 설치간격을 동시에 설계변수로 고려하도록 하여 연속최적설계기법인 DOT를 이용하여 단동 및 연동온실의 최적설계를 수행한 결과를 소개하면 다음과 같다.

1) DOT(Design Optimization Tools)

DOT는 제약조건이 없는 비선형 계획문제 또는 제약조건이 있는 비선형 계획문제의 최적해를 구할 수 있는 범용 program으로서 미국의 Garret N Vanderplaats에 의하여 개발되었다. DOT는 비선형 계획문제의 최적해를 구할 수 있도록 여러개의 서브루틴으로 구성되어 있어 object code로 제공되기 때문에 사용자가 내용을 수정할 필요가 없으며 본 프로그램에서 사용자가 의도하는 최적화에 부합하는 목적함수와 제약조건식을 작성하면 된다.

2) 분석모델 및 설계조건

온실의 최적설계를 위한 분석모델은 그림 190에서 보는 바와 같이 단동온실의 경우에는 농가지도형 비닐하우스 I형 모델로 온실의 크기는 폭 6m, 처마높이 1.7m 및 동고 3.3m이며, 연동온실은 1-2W 각관 A형으로 온실의 크기는 폭 3m, 처마높이 2.4m 및 동고 4.8m인 3연동온실로 하였으며 온실의 길이는 90m이다. 설계풍속 및 적설심은 각각 30m/s, 25cm로 하였다.

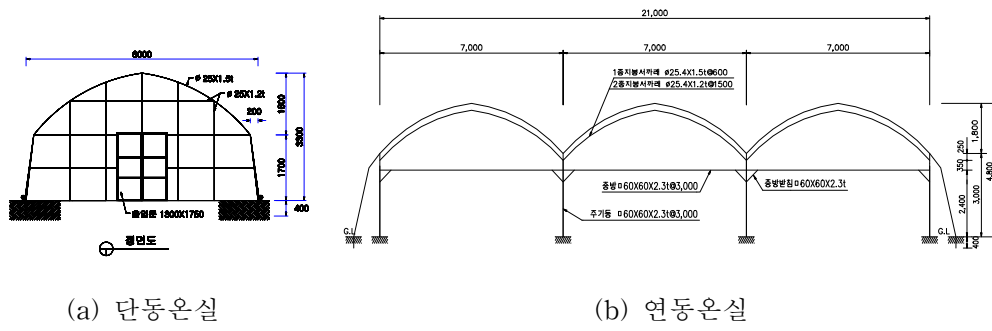


그림 190. 최적설계 모델

3) 최적화의 목적함수, 제약조건 및 설계변수

가) 목적함수

최적화를 위한 목적함수로 전체구조물이 최소중량의 설계가 되도록 강재의 중량함수를 사용하였으며 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\text{Minimize : } F(X)$$

$$F(X) = \sum_{i=1}^k \rho A_i L_i \quad (110)$$

여기서, $F(X)$: 목적함수, X : 설계변수, k : 구조물의 부재수, A_i : i 번째 부재의 단면적, L_i : i 번째 부재의 길이, ρ : 강재의 단위중량 이다.

나) 제약조건식

휨-압축응력도, 세장비, 처짐에 대한 제약식과 부재를 원형강관으로 사용할 경우의 국부좌굴 및 부재의 두께와 지름에 대한 제약식은 다음과 같다.

(1) 응력제약 조건식

$$n \left(\frac{M}{Z} + \frac{N}{A_g} \right) < \frac{F_y}{1.5} \quad (111)$$

여기서, n : 서까래 간격 및 부재 간격(m), M : 최대휨모멘트(kgf·cm), N : 축방향력(kgf), A_g : 부재의 단면적, F_y : 부재의 항복강도(2,400kgf/cm²) 이다.

(2) 폭두께비 및 세장비 제약조건식

압축력 또는 휨을 받는 원형강관과 각형강관의 폭두께비는 식 (112)와 같으며 세장

비에 대한 제약조건식은 식 (113)과 같다.

원형강관인 경우

$$\frac{240}{F_y} > \frac{D}{t} (\text{원형강관}), \quad \frac{74}{\sqrt{F_y}} > \frac{d}{t}, \quad \frac{110}{\sqrt{F_y}} > \frac{d}{t} \quad (\text{각형강관}) \quad (112)$$

여기서, D : 원형강관의 공칭 외경(cm), d : 각형강관 평판부분에 해당하는 길이(cm), t : 강관의 두께(cm), F_y : 강재의 항복강도(kgf/cm²) 이다.

$$200 - \frac{KL}{r} > 0 \quad (113)$$

여기서, K : 좌굴계수, L : 유효길이, r : 좌굴축에 대한 단면2차반경 이다.

(3) 사용성 제약조건식

단면의 사용성 및 단면형상에 대한 제약조건과 서까래 간격에 따른 골조율변화를 고려한 제약조건을 다음의 식으로 정식화 하였다.

$$D_i - 1.59 \geq 0 \quad (114)$$

$$6.05 - D_i \geq 0 \quad (115)$$

$$d - 2.00 \geq 0 \quad (116)$$

$$9.00 - d \geq 0 \quad (117)$$

$$t_i - 0.1 \geq 0 \quad (118)$$

$$0.4 - t_i \geq 0 \quad (119)$$

$$n - 0.4 > 0 \quad (120)$$

$$1.0 - n \geq 0 \quad \text{1중 서까래} \quad (121)$$

$$4.0 - n \geq 0 \quad (122)$$

여기서, D : 원형강관의 공칭 외경(cm), d : 각형강관 평판부분에 해당하는 길이(cm), t : 강관의 두께(cm), n : 사용부재의 설치간격(m) 이다.

(4) 변위 제약조건식

$$\delta_v - \frac{L}{100} < 0 \quad (123)$$

$$\delta_h - \frac{H}{60} < 0 \quad (124)$$

여기서, δ_v : 최대수직변위, δ_h : 기둥 최대수평변위, L : 온실의 폭, H : 처마높이 이다.

4) 목적함수의 수렴과정

설계풍속 및 적설심을 각각 30m/s, 25cm로 하여 DOT를 이용하여 제약조건 식 (111)~식 (124)를 만족하는 목적함수에 도달하기 까지의 수렴과정은 그림 191 및 그림 192와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 사용자재별 단면과 설치간격을 고려한 단동 온실의 최적화는 최종 수렴하기까지는 87번의 반복수행과정을 거쳤으며 연동온실의 최적화는 최종 수렴하기까지는 158번의 반복수행과정을 거쳤다.

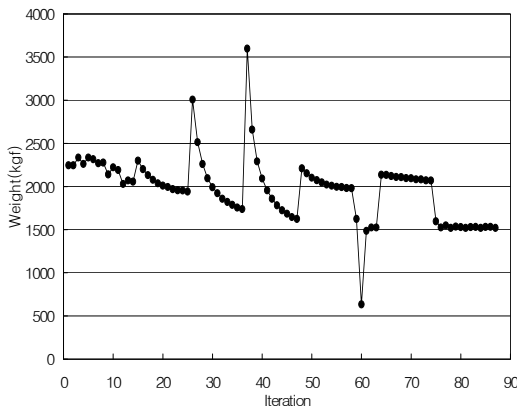


그림 191. 단동온실의 최적 수렴과정

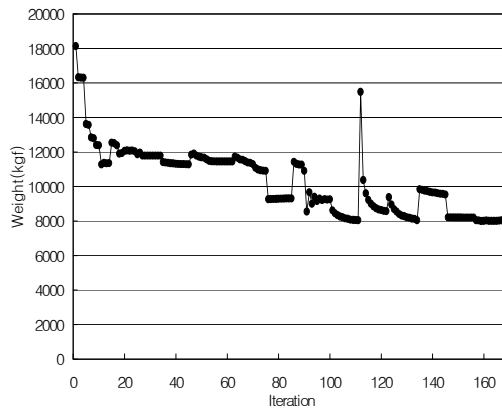


그림 192.. 연동온실이 최적 수렴과정

5). 단동온실의 최적설계

설계풍속 및 적설심을 각각 30m/s, 25cm로 하여 단동온실의 서까래 단면과 설치간격을 설계변수로 하여 제약조건를 만족하는 목적함수를 도출한 결과는 표 100과 같다. 표 100은 부재의 단면을 원형과 각형을 동시에 고려하여 순차적으로 목적함수를 도출한 결과로서 사용자재의 단면을 $\phi 31.8 \times 1.5t @ 470$ 을 기준으로 하여 자재절감 효과를 중량비로 분석하였다. $\square 50 \times 20 \times 1.6t @ 1,440$ 의 각형강관을 사용할 경우에는 약 44%, $\phi 50.8 \times 1.2t @ 1,030$ 의 원형강관을 사용할 경우에는 약 40%의 자재절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고, $\phi 25.4 \times 1.5t @ 290$ 의 원형강관의 경우에는 서까래 설치간격이 0.29m로 나타나 서까래 설치간격의 최소값을 만족하지 못하는 것으로 나타나 내재형 단동온실의 경우에는 $\phi 25.4 \times 1.5t$ 이하의 원형강관은 제외하여야 할 것으로 판단된다.

표 100. 연동은실의 최적설계 결과

순 위	사용부재 (mm)	간격 (m)	총중량 (kgf)	중량비	순 위	사용부재 (mm)	간격 (m)	총중량 (kgf)	중량비
1	□50×20×1.6t	1.44	1310.24	0.56	19	φ38.1×1.4t	0.65	1937.59	0.82
2	□50×20×2.3t	1.93	1372.60	0.58	20	φ38.1×1.5t	0.69	1948.53	0.83
3	φ50.8×1.2t	1.03	1427.42	0.60	21	□30.0×30×1.6	0.70	1958.69	0.83
4	□40×40×1.6t	1.32	1432.66	0.61	22	φ38.1×1.6t	0.73	1959.50	0.83
5	φ50.8×1.4t	1.19	1441.01	0.61	23	φ38.1×1.7t	0.77	1970.52	0.83
6	φ50.8×1.5t	1.26	1447.82	0.61	24	φ38.1×2.0t	0.89	2003.83	0.85
7	φ50.8×1.6t	1.34	1454.65	0.62	25	□30.0×20×1.2	0.41	2122.80	0.90
8	φ50.8×1.7t	1.42	1461.50	0.62	26	□30.0×20×1.6	0.51	2205.67	0.93
9	□50.0×20×1.6	1.11	1478.20	0.63	27	φ34.0×2.3t	0.78	2312.22	0.98
10	□50.0×20×2.3	1.46	1554.29	0.66	28	φ31.8×1.4t	0.45	2345.31	0.99
11	□40.0×20×1.2	0.62	1693.67	0.72	29	φ31.8×1.5t	0.47	2360.62	1.00
12	□40.0×20×1.6	0.78	1751.21	0.74	30	φ31.8×1.6t	0.50	2376.00	1.01
13	φ42.7×2.3t	1.28	1800.81	0.76	31	□25.0×25×1.6	0.47	2388.75	1.01
14	φ42.7×2.5t	1.37	1829.17	0.77	32	φ31.8×1.7t	0.53	2391.45	1.01
15	φ42.7×2.8t	1.50	1851.17	0.78	33	φ31.8×2.0t	0.60	2438.27	1.03
16	φ38.1×1.0t	0.48	1894.28	0.80	34	φ28.6×1.7t	0.42	2684.87	1.14
17	□30.0×30×1.2	0.56	1896.74	0.80	35	φ27.2×2.0t	0.43	2894.71	1.23
18	φ38.1×1.2t	0.57	1915.85	0.81	36	φ27.2×2.3t	0.47	2972.93	1.26

※ 중량비 : φ31.8×1.5t에 대한 중량비

6) 연동은실의 최적설계

설계풍속 및 적설심을 각각 30m/s, 25cm로 하여 DOT를 이용하여 연동은실의 사용
 자재별 단면과 설치간격을 설계변수로 하여 제약조건을 만족하도록 1-2W형 연동은실
 을 최적화한 결과는 표 101 및 표 102와 같다. 표 101은 1-2W형 연동은실의 1중 서
 까래용 부재의 단면을 원형과 각형을 동시에 고려하여 순차적으로 목적함수를 도출한
 결과로서 사용자재의 단면을 φ31.8×1.5t@850을 기준으로 하여 자재절감 효과를 중량
 비로 분석하였다.

표 101. 1-2W형 연동온실의 1중서까래 부재의 최적결과

순위	사용부재 (mm)	간격 (m)	총중량 (kgf)	중량비	순위	사용부재 (mm)	간격 (m)	총중량 (kgf)	중량비
1	□40×20×1.2	1.11	2685.96	0.73	21	φ31.8×1.7t	0.95	3753.36	1.01
2	□40×20×1.6	1.41	2778.58	0.75	22	φ31.8×2.0t	1.09	3827.73	1.03
3	φ38.1×1.0t	0.86	2990.18	0.81	23	φ28.6×1.0t	0.48	3992.85	1.08
4	□30×30×1.2	1.00	2996.37	0.81	24	φ28.6×1.2t	0.56	4050.95	1.09
5	φ38.1×1.2t	1.02	3025.61	0.82	25	φ28.6×1.4t	0.64	4109.68	1.11
6	φ38.1×1.4t	1.17	3061.27	0.83	26	φ28.6×1.5t	0.68	4139.28	1.12
7	φ38.1×1.5t	1.25	3079.19	0.83	27	φ28.6×1.6t	0.72	4169.02	1.13
8	□30×30×1.6	1.26	3095.37	0.84	28	φ28.6×1.7t	0.76	4198.93	1.13
9	φ38.1×1.6t	1.32	3097.16	0.84	29	φ27.2×2.0t	0.77	4520.36	1.22
10	φ38.1×1.7t	1.39	3115.19	0.84	30	□20×20×1.2	0.43	4530.02	1.22
11	□30×20×1.2	0.73	3338.09	0.90	31	□20×20×1.6	0.54	4534.71	1.22
12	□30×20×1.6	0.92	3468.07	0.94	32	φ25.4×1.2t	0.44	4586.44	1.24
13	φ31.8×1.0t	0.60	3583.61	0.97	33	φ27.2×2.3t	0.86	4642.15	1.25
14	□25×25×1.2	0.68	3589.44	0.97	34	φ25.4×1.4t	0.50	4660.04	1.26
15	φ31.8×1.2t	0.70	3631.56	0.98	35	φ25.4×1.5t	0.53	4697.18	1.27
16	φ34×2.3t	1.40	3640.31	0.98	36	φ25.4×1.6t	0.56	4734.54	1.28
17	φ31.8×1.4t	0.80	3679.96	0.99	37	φ25.4×1.7t	0.59	4772.13	1.29
18	φ31.8×1.5t	0.85	3704.32	1.00	38	φ22.2×1.6t	0.42	5486.50	1.48
19	φ31.8×1.6t	0.90	3728.78	1.01	39	φ21.7×2.0t	0.47	5828.35	1.57
20	□25×25×1.6	0.84	3746.89	1.01					

※ 중량비 : φ31.8×1.5t에 대한 중량비

□40×20×1.2t@1,110의 각형강관을 사용할 경우에는 약 27%, φ38.1×1.0t@860의 원형강관과 □30×30×1.2t@1000의 각형강관을 사용할 경우에는 약 19%의 자재절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고, φ25.4×1.5t@1200의 원형강관의 경우에는 기준이 되는 단면보다 약 27% 정도의 추가적인 자재가 소요되는 것으로 나타났다. 그리고, 기둥의 사용자재를 □60×60×2.3t@4,340로 하는 것 보다 □80×40×1.6t@3490의 강관을 사용할 경우에는 약 13%, □60×60×1.6t@3,160인 경우에는 약 4%정도의 자재절감효과가 있는 것으로 나타났으나 이러한 결과는 기존 온실 설계도에 명시된 기둥의 단면과 설치간격인 □60×60×2.3t@3,000과는 다소 상이하게 나타났다.

표 102. 연동은실의 기둥 부재의 최적결과

순위	사용부재 (mm)	간격 (m)	총중량 (kgf)	중량비	순위	사용부재 (mm)	간격 (m)	총중량 (kgf)	중량비
1	□80×40×1.6	3.49	925.68	0.87	30	φ48.6×3.2t	2.31	1719.88	1.62
2	□75×45×1.6	3.44	938.61	0.89	31	□40×20×1.2	0.65	1771.18	1.67
3	□60×60×1.6	3.16	1019.11	0.96	32	□40×20×1.6	0.82	1829.92	1.73
4	□60×60×2.3	4.34	1059.60	1.00	33	φ42.7×2.3t	1.33	1880.92	1.78
5	□75×20×1.6	2.17	1145.63	1.08	34	φ42.7×2.5t	1.43	1910.12	1.80
6	□75×20×2.3	2.93	1202.51	1.13	35	φ42.7×2.8t	1.57	1932.47	1.82
7	□50×50×1.6	2.18	1209.93	1.14	36	φ38.1×1.0t	0.50	1974.49	1.86
8	□60×30×1.6	1.93	1214.52	1.15	37	□30×30×1.2	0.58	1977.32	1.87
9	□50×50×2.3	2.95	1261.20	1.19	38	φ38.1×1.2t	0.59	1996.49	1.88
10	□60×30×2.3	2.62	1266.43	1.20	39	φ38.1×1.4t	0.68	2018.67	1.91
11	□50×50×3.2	3.81	1328.72	1.25	40	φ38.1×1.5t	0.73	2029.82	1.92
12	φ60.5×2.3t	2.76	1331.28	1.26	41	□30×30×1.6	0.74	2040.33	1.93
13	□60×30×3.2	3.34	1336.74	1.26	42	φ38.1×1.6t	0.77	2041.02	1.93
14	φ60.5×3.2t	3.67	1383.31	1.31	43	φ38.1×1.7t	0.81	2052.25	1.94
15	□50×20×1.6	1.49	1383.62	1.31	44	φ38.1×2.0t	0.93	2086.22	1.97
16	□50×20×2.3	2.00	1447.45	1.37	45	□30×20×1.2	0.43	2206.03	2.08
17	φ50.8×1.2t	1.07	1501.92	1.42	46	□30×20×1.6	0.53	2290.18	2.16
18	□40×40×1.6	1.37	1507.65	1.42	47	φ34×2.3t	0.82	2398.76	2.26
19	φ50.8×1.4t	1.23	1515.89	1.43	48	φ31.8×1.2t	0.41	2400.69	2.27
20	φ50.8×1.5t	1.31	1522.90	1.44	49	φ31.8×1.4t	0.47	2431.59	2.29
21	φ50.8×1.6t	1.39	1529.92	1.44	50	φ31.8×1.5t	0.50	2447.16	2.31
22	φ50.8×1.7t	1.47	1536.95	1.45	51	φ31.8×1.6t	0.53	2462.81	2.32
23	□50×20×1.6t	1.15	1553.62	1.47	52	□25×25×1.6	0.49	2475.47	2.34
24	φ50.8×2.0t	1.70	1558.14	1.47	53	φ31.8×1.7t	0.55	2478.53	2.34
25	□40×40×2.3	1.82	1582.80	1.49	54	φ31.8×2.0t	0.63	2526.14	2.38
26	□50×20×2.3	1.51	1631.03	1.54	55	φ28.6×1.6t	0.42	2756.39	2.60
27	φ48.6×2.3t	1.75	1652.56	1.56	56	φ28.6×1.7t	0.44	2775.71	2.62
28	φ48.6×2.5t	1.88	1664.79	1.57	57	φ27.2×2.0t	0.45	2988.31	2.82
29	φ48.6×2.8t	2.07	1689.07	1.59	58	φ27.2×2.3t	0.50	3067.74	2.90

※ 중량비 : □60×60×2.3t에 대한 중량비

5. 결 론

본 연구에서는 기존 단순 유전자 알고리즘을 개선, 확장하여 단동 및 연동플라스틱 온실 그리고 와이드 스펀형과 벤로형 유리온실의 구조해석과 단면 이산화 최적설계를 동시에 일괄적으로 수행 할 수 있는 통합시스템화 된 프로그램을 개발하였다. 제시한 알고리즘 사용성을 확인하기 위하여 본 연구에서 개발한 최적설계 프로그램으로 강구조 한계상태 설계 기준을 근거로 한 조합력, 세장비, 폭-두께비, 처짐등의 제약조건식으로하고, 목적함수는 구조물의 중량으로 하여 각 온실구조에 대하여 단면 이산화 최적설계를 수행한 결과는 다음과 같다.

가. 유전자 알고리즘을 이용하여 온실용 구조에 대한 구조해석 그리고 단면이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하고 통합시스템화 된 프로그램을 개발하였다.

나. 설계 예를 들어 본 연구에서 제시한 프로그램으로 수행한 결과와 표준도면과 비교·고찰함으로써 타당성 및 신뢰성을 확인할 수 있었다.

다. 본 연구의 프로그램을 적용함으로써 표준 도면보다 더 경제적인 부재사이즈를 찾을 수 있었고, 설계환경과 설계자의 요구에 따라 구조해석 및 단면 이산화 최적설계가 가능함을 알 수 있다. 또한 다양한 형강 단면 및 강재의 종류를 임의로 선택할 수 있어 범용성이 높음을 알 수 있다.

라. 본 연구에서 Pre/Post Processor, 구조해석, 단면 최적 설계 모듈을 상호연결 시키는 통합시스템을 개발하여 보다 편리하게 실제설계업무에 효율적으로 적용될 수 있으며, 최적설계의 실용화를 유도할 수 있다고 판단된다.

제4절 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적 모델 및 설계시스템 평가

1. 온실 설계용 프로그램의 평가

본 연구에서 개발된 온실 설계용 프로그램인 GreenSAD의 성능을 분석하고자 그림 193과 같은 폭이 540cm, 처마높이 120cm, 지붕높이 260cm인 단동온실에 대하여 설계 풍속 30m/s, 설계적설심 30cm에 대한 구조해석 및 설계과정에 따라 모델생성, 하중계산, 구조해석 결과 및 설계값 등에 대하여 검토하였으며 절점 및 부재번호는 그림 194와 같다.

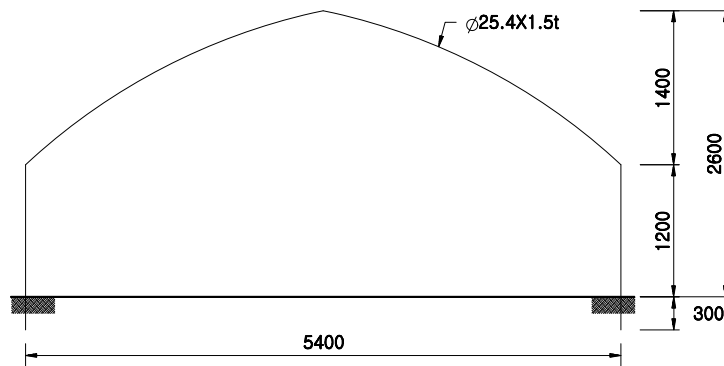


그림 193. 구조해석 온실

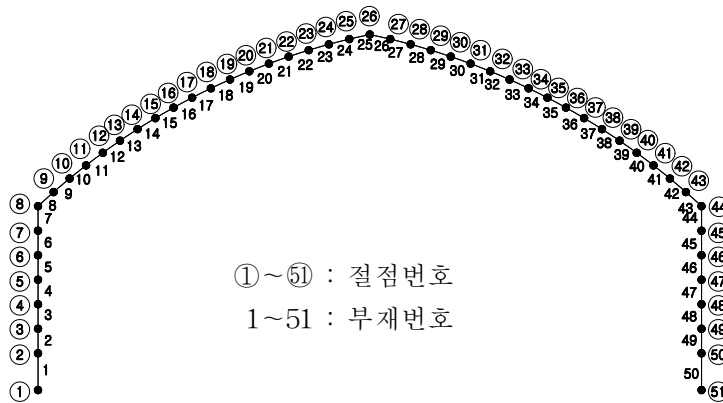


그림 194. 구조해석 온실의 절점 및 부재번호

가. 구조해석 모델 생성

온실의 구조해석을 위해서는 해석용 구조모델을 생성하여야 되며 일반적으로 구조 해석용 프로그램에서 모델을 작성한다. 아치형, 지붕형 등의 구조물은 모델링이 쉬우나 복숭아형 온실과 같이 지붕이 중심이 다른 두 개의 호로 된 구조물의 경우에는 CAD에서 모델링 작업을 하여 SAP2000 등의 구조해석 프로그램에서 DXF 파일 등을 Import시켜 모델링 작업을 한다. 이러한 과정은 단순하면서 많은 작업시간을 요구하게 되며 사용자에게 따라 모델링이 다소 차이가 날 수도 있다.

그림 193과 같은 온실의 구조해석을 위한 모델을 CAD에서 작업하여 SAP2000으로 전환시켰을 때의 좌표와 GreenSAD에서 자동생성한 모델을 각 절점의 좌표를 비교하여 정확성을 분석하였다. 분석한 결과는 그림 195에서와 같이 CAD로 작업한 모델과 GreenSAD에서 작업한 모델의 거의 일치하는 것으로 나타났으며 지붕곡부에서 다소 차이가 발생하였으나 이는 CAD에서 지붕아치의 좌표를 생성하는 과정에 오류가 발생한 것으로 GreenSAD에서 자동생성된 모델이 정확한 것으로 판단된다.

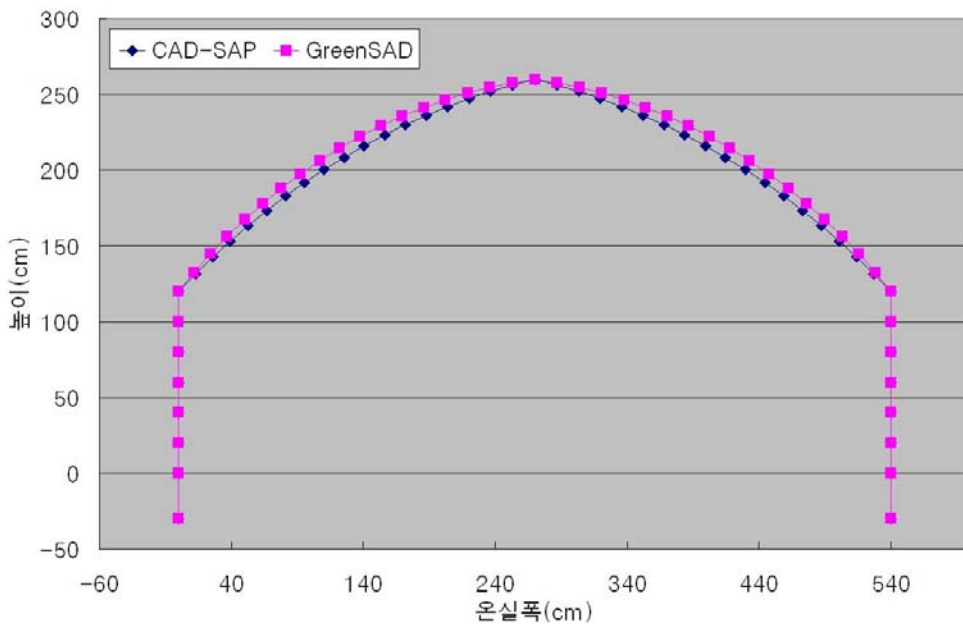


그림 195. 구조해석 모델링 좌표 비교

나. 설계풍속 및 적설심에 따른 하중 산정 결과

설계풍속이 주어지면 식 (110)에 의해 속도압을 산정하여 그림 196과 같이 풍하중 작용 부위별로 풍력계수를 곱하여 풍하중을 적용시키며, 설계적설심에 따른 적설하중은 식 (125)에 의해 산정하여 그림 197과 같이 분포시킨다.

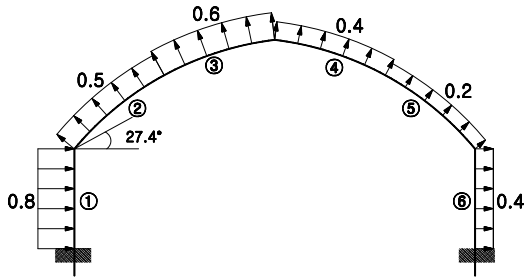


그림 196. 풍력계수 분포도

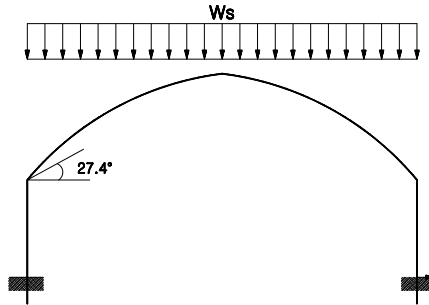


그림 197. 적설하중 분포도

$$q = 0.0197v^2\sqrt{h} \quad (125)$$

여기서, v : 설계용 풍속(m/s), h : 원예시설 각 부의 지표면으로부터의 높이(m)로서 본 연구에서는 처마높이와 지붕높이의 평균값으로 하였다.

$$W_s = \rho \times D \times \alpha \quad (\text{kg/m}^2) \quad (126)$$

여기서, ρ 는 설의 단위체적중량으로 본 연구에서는 $1.0\text{kg/cm} \cdot \text{m}^2$ 적용하였으며, D 는 설계용 적설심(cm)이고 α :지붕경사 및 피복재의 종류에 따른 절감계수로 0.75를 적용하였다.

그림 196에서 보는 바와 같이 부위별로 적용시킬 풍하중과 적설하중 수계산한 값과 GreenSAD에서 산정한 값을 비교한 결과는 표 103에서 보는 바와 같다. 표에서 보는 바와 같이 풍하중과 적설하중이 정확하게 계산됨을 알 수 있다.

표 103. 수계산 및 GreenSAD의 풍하중 및 적설하중 산정 결과

온실부위	Ws						Wv
	①	②	③	④	⑤	⑥	
수 계 산	0.19551	0.12220	0.14663	0.09775	0.04888	0.09775	0.225
GreenSAD	0.19552	0.12219	0.14663	0.09775	0.04887	0.09775	0.225

다. 구조해석 결과 및 설계 값

분석은실에 대하여 SAP2000과 GreenSAD으로 구조해석을 수행한 결과는 104와 같으며 최대단면력이 발생하는 위치는 모두 동일하였으며 최대휨모멘트에서 다소 차이가 발생하였으나 이는 구조해석 모델의 좌표가 동일하지 않은데서 발생하는 것으로 설하중시 휨모멘트가 약 9% 과다하게 발생되어 설계에는 별 문제가 없을 것으로 사려된다.

표 104. 구조해석 결과 비교

단면력	풍하중			설하중		
	모멘트	전단력	축방향력	모멘트	전단력	축방향력
SAP2000	1867.32	31.22	32.94	2710.7	35.58	-69.92
GreenSAD	1894.3	31.93	32.95	2966.8	36.98	-74.89

구조해석을 통해 얻은 최대휨모멘트(M_{max})와 축하중(P)를 이용하여 최대응력(σ_{max})은 식 (127)과 같이 계산한다.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} + \frac{P}{A} \quad (127)$$

여기서, Z는 부재의 단면계수이며, A는 부재의 단면적이다.

최대응력(σ_{max}), 부재의 허용응력($\sigma_a=1,600\text{kgf/cm}^2$)을 이용하여 적정 서까래 간격은 식 (103)에 의해 결정하였다.

$$S = \frac{\sigma_a}{\sigma_{max}} \quad (128)$$

분석 모델의 서까래 간격을 식 (128)로 산정한 결과는 표 105와 같다.

표 105. 해석방법별 서까래 간격

분석방법	풍하중	설하중
SAP2000	0.54	0.38
GreenSAD	0.53	0.35

2. 온실 최적설계자료의 사용성 및 현장 적용 방안

GreenSAD를 이용하여 온실을 설계할 경우에 입력 조건은 그림 105에서 보는 바와 같이 온실형태, 온실폭, 처마높이, 지붕높이, 매입깊이, 처마기울기, 설치지역, 재현기간 (또는 안전율 및 사용년수), 사용자재 등의 기본적인 조건만 입력을 하면 구조해석 및 설계가 수행되므로 전문적 지식이 부재한 사용자라도 쉽게 사용할 수 있을 것으로 판단되며 지역별 설계하중을 쉽게 업그레이드 할 수 있고 최근 기상자료가 포함된 설계하중을 적용함으로써 보다 안전한 온실의 설계가 가능할 것으로 사려된다.

프로그램을 이용하면 농가에서 보다 다양한 규모의 온실을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 관련기관 등에서는 영농자료로 쉽게 활용할 수 있다.

그림 198. GreenSAD의 입력 화면

3. 온실의 자체절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 평가

본 연구에서 도출된 연구결과들을 활용할 경우 기상재해에 보다 안전한 온실의 시공과 경제적인 온실의 설계가 가능할 것으로 생각되며 최근 기상자료가 포함된 지역별 재현기간별 설계하중을 제시하여 온실의 설계에 보다 정확한 하중을 적용함으로써 온실의 안전성을 향상시킬 수 있다. 그리고, 단동온실의 간이설계법 등을 쉽게 활용할 수 있어 다양한 규모의 온실을 안전하고 경제적으로 시공할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 직접적으로 영농자료로 활용할 수 있는 연구결과를 별도로 자료를 작성하여 농민, 관련기관 등의 종사자 들에게 제공함으로써 활용도를 높일 수 있다.

온실의 자체절감 및 안전성 향상을 위한 최적 모델 및 설계시스템의 평가에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 온실 자동 설계프로그램인 GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design)를 이용한 온실설계 결과와 상용프로그램의 설계결과를 비교한 결과 일치하는 것으로 분석되었다.

나. 입력조건의 간소화를 통하여 온실의 설계가 용이하여 관련기관 등에서 영농자료 등으로 활용이 가능할 것으로 판단되며 활용성을 높일 수 있는 방안에 대한 추가적인 고려가 필요하다.

다. 개발된 프로그램에서 적용한 온실구조설계 기준과 2007. 4월에 농림부에서 지정 고시한 '원예특작시설 내재해 기준'과 다소 상이한 부분이 있으므로 풍하중과 적설하중의 산정방법 등에 대한 검토와 2006. 12월에 개정된 KSD3760 (비닐하우스용 도금 강관)에 대한 검토가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

라. 농가지도형 비닐하우스 유형별로 설계풍속과 적설심에 따른 온실의 사용부재별 서까래 간격을 결정할 수 있는 식과 그림을 활용할 경우, 제시된 설계자료를 이용하여 사용자재별로 온실형태에 따른 안전설계가 용이할 것으로 판단되어 영농자료로 활용이 가능할 것으로 사려된다.

마. 사용부재 및 서까래간격을 고려한 단동온실의 최적모델은 경제성과 광환경등이

우수한 것으로 나타났으나 시공에 따른 부속자재의 개발이 필요하다.

바. 본 연구에서 제시된 최적설계프로그램을 이용한 최적설계 자료를 활용하여 연동 온실설계시 최소 11%-25%정도 경제적인 것으로 나타났으나 최적설계조건중 설계풍하중 및 적설심을 상향조정하여 최적설계를 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

제5절 결론

국내 온실의 대부분을 차지하고 있는 단동 비닐하우스(터널형 및 비가림 시설 포함)는 시공의 간편성과 시설비의 저렴성으로 농가에서 선호하고 있는 실정이나 구조의 경량성으로 인하여 기상재해에 취약한 실정이며, 지역 및 재배작물에 따라 온실의 형태 또한 다양하여 규격화 및 표준화가 어려운 실정이다. 매년 반복되는 기상재해로 인하여 단동비닐하우스의 구조안전성 검토가 일부 수행되어 농가지도형 비닐하우스 설계서가 제작되었으나 피해보상 모델을 정립하기 위하여 농가에서 사용하고 있는 온실형태를 조합한 것으로서 지역별 기상조건을 고려한 구조설계가 이루어지지 않았다. 그리고, 벤로형 및 한국형 유리온실의 경우에는 구조의 안전성 문제에 큰 비중을 두고 있어 경제적인 설계가 필요한 실정이다.

따라서 본 과제는 온실산업과 시설원예의 경쟁력을 강화하기 위해서는 단동비닐하우스의 안정성을 향상시킬 수 있는 온실의 설계와 연동온실의 사용자재를 절감할 수 있는 최적설계에 필요한 구체적인 자료를 제공하고 지역적 기상조건 및 특성으로 고려한 안정성 향상과 자재절감을 위한 온실모델 개발과 최적설계시스템을 개발하고자 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 자재절감 및 안전성 향상을 위한 온실모델 개발

- 1) 국내 온실모델에 대한 구조 현황을 조사·분석하였으며 기존 온실모델에 대한 구조해석을 수행하여 구조안전성을 검토하였다.
- 2) 지역별, 재배작물별 온실구조 특성을 분석하여 구조안전성을 검토하였다.

- 3) 기상재해에 따른 온실의 피해현황 및 양상을 분석하여 피해원인을 구조해석 등을 통하여 규명하였다.
- 4) 단동온실에 대하여 풍하중 및 설하중을 모의재하하여 부재 변위 및 파괴하중을 측정하여 구조해석에 필요한 기초의 구속조건을 검토한 결과, 30cm 지하고정으로 하는 것이 타당한 것으로 분석되었다.
- 5) 온실의 폭, 처마 및 곡부높이가 온실의 구조안전성에 미치는 영향을 분석하고 온실의 단면형상에 따른 구조안전성 향상 방안을 모색하고자 크기가 상이한 2,176개의 온실모델에 대하여 구조해석을 통하여 단위풍하중 및 적설하중을 재하시켰을 때 발생하는 최대휨모멘트를 산정하였다.
- 가) 온실의 단면형상별로 단위풍하중을 작용시켰을 때 발생하는 최대휨모멘트는 처마높이가 증가할수록 증가하였으나 곡부높이가 증가할수록 감소하는 경향으로 나타나 처마높이는 낮게하고 곡부높이는 높게하는 것이 풍하중에 유리한 것으로 나타났다. 그리고, 온실 폭이 증가할 수록 최대휨모멘트도 증가하였으나 처마높이별 최대휨모멘트의 변화는 온실 폭에 관계없이 일정한 것으로 나타났으며 온실 폭별로 최대휨모멘트의 최대 및 최소값은 일정하게 변화하였다.
- 나) 단위풍하중 재하시 온실의 폭, 처마 및 곡부높이별로 발생하는 최대휨모멘트를 산정할 수 있는 식을 유도하였으며 온실의 폭과 최대휨모멘트의 최소 및 최대값의 상관관계를 분석하였다.
- 다) 단동온실에 단위적설하중을 작용시켰을 때 폭, 처마 및 곡부높이 변화에 따라 발생하는 최대휨모멘트는 처마높이가 증가할수록 증가하였으나 곡부높이가 증가할수록 감소하는 경향으로 나타나 단위풍하중 재하시와 유사한 경향으로 나타났으나 변화폭은 적은 것으로 나타났다.
- 라) 단위 적설하중 재하시 온실의 처마 및 곡부높이 변화에 따라 발생하는 최대휨모멘트의 최소 및 최대값은 온실의 폭과 비례하는 것으로 나타났으며 최대휨

모멘트의 최대 및 최소값의 차이는 온실의 폭에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

- 마) 단동온실의 폭, 처마 및 곡부높이의 개선을 통하여 구조 안전성을 향상시킬 수 있는 것으로 나타나 재배환경 및 작업공간에 지장을 주지 않는 범위내에서 온실의 단면형상을 제한함으로써 기상재해에 대한 온실 피해를 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 기상재해로부터 피해를 경감시킬 수 있는 단동온실모델을 개발하고자 농가지도형 비닐하우스 10개 유형별로 설계풍속 및 적설심에 따른 사용자재 및 서까래 간격을 결정할 수 있는 도표 및 회귀식을 작성하였다.
- 7) 자재절감을 위한 연동온실을 개발하고자 구조해석을 수행하고 부재단면 및 설치 간격에 따른 사용자재의 절감률을 비교분석하였다.
- 8) 설해 경감을 위한 온실 보강방법을 강구하고자 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보강효과를 분석한 결과, 보강을 한 온실의 구조안전성이 매우 높게 향상되는 것으로 나타났으나 재료비, 작업공간 확보 등을 고려할 경우에는 강선을 이용한 보강방법이 타당할 것으로 판단된다. 그리고, 강선을 이용하여 수평 및 X형 브레이싱에 의한 보강을 실시할 경우에는 작업에 지장을 주지 않는 범위에서 낮게 설치하는 것이 유리한 것으로 분석되었다.
- 9) 폭설에 의한 피해 경감을 위한 단동비닐하우스 모델을 개발하기 위하여 농가지동형 I형 단동비닐하우스를 기본형하여 사용부재의 단면과 보강방법별로 적설량 25cm에 해당하는 적설하중에 대하여 구조해석을 수행하여 적정 서까래 간격, 사용 재료량과 골조율 등을 분석하였다. 설계하중에 따라 구조해석을 수행하여 얻어지는 최대단면력과 온실 부위별 변형제한을 동시에 고려하여 서까래 간격을 결정하여야 하며 적설량 25cm를 대비하여 서까래를 $\phi 25.4 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관을 사용하는 온실보다 $\phi 27.2 \times 2.3\text{mm}$ 구조용 탄소강관이나 $\phi 31.8 \times 1.5\text{mm}$ 아연도 강관을 사용하여 온실을 설치할 경우에는 약 40%정도의 재료 절감과 골조율이 피복면적 대비 4%, 바닥면적 대비 약 6~7% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고,

ø3.2mm 강선과 ø25.4×1.5mm 아연도 강관을 이용하여 보강할 경우에도 사용 재료량과 골조율이 감소하는 것으로 나타났다.

나. 온실 전용 구조해석 프로그램 개발

- 1) 구조해석 입력자료의 자동화를 위한 알고리즘을 구축하여 최소한의 입력조건(온실폭, 처마높이, 동고, 설치지역, 사용자재, 안전율)으로 구조해석을 수행할 수 있는 전처리기와 구조해석기를 개발하였다.
- 2) 입력조건이 하고 사용이 간편하여 전문적 지식이 부족하더라도 온실설계를 수행할 수 있는 온실 자동설계프로그램인 GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design)를 개발하였다. 개발된 프로그램은 상용 구조해석 프로그램의 결과 비교하였을 때 동일한 결과를 얻을 수 있어 GreenSAD를 이용하여 지역별 기상조건을 고려한 온실의 설계자료를 쉽게 제공할 수 있으며 다양한 형태의 단동온실의 규격화 및 표준화에 이바지 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 온실 및 농업시설물의 구조해석이 가능한 구조해석 프로그램인 MAAS(Modeling and Analysis Program for Agricultural Structures) 초기버전을 개발하여 상용 프로그램과 결과를 비교·검증한 결과, 동일한 구조해석 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 농업시설의 구조설계에 적용할 지역별로 재현기간별 설계적설심 및 설계풍속을 최근 기상자료가 포함된 값으로 제시하였고 등설계적설심도와 등설계풍속도를 작성하였다.

다. 온실 최적설계시스템 개발

본 연구에서는 기존 단순 유전자 알고리즘을 개선, 확장하여 단동 및 연동플라스틱온실 그리고 와이드 스펠형과 벤로형 유리온실의 구조해석과 단면 이산화 최적설계를 동시에 일괄적으로 수행할 수 있는 통합시스템화 된 프로그램을 개발하였다. 제시한 알고리즘 사용성을 확인하기 위하여 본 연구에서 개발한 최적설계 프로그램으로 강구조 한계상태 설계 기준을 근거로 한 조합력, 세장비, 폭-두께비, 처짐등의 제약조건식으로하고, 목적함수는 구조물의 중량으로 하여 각

온실구조에 대하여 단면 이산화 최적설계를 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 유전자 알고리즘을 이용하여 온실용 구조에 대한 구조해석 그리고 단면이산화 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하고 통합시스템화 된 프로그램을 개발하였다.
- 2) 설계 예를 들어 본 연구에서 제시한 프로그램으로 수행한 결과와 표준도면과 비교·고찰함으로써 타당성 및 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 3) 본 연구의 프로그램을 적용함으로써 표준 도면보다 더 경제적인 부재사이즈를 찾을 수 있었고, 설계환경과 설계자의 요구에 따라 구조해석 및 단면 이산화 최적설계가 가능함을 알 수 있다. 또한 다양한 형강 단면 및 강재의 종류를 임의로 선택할 수 있어 범용성이 높음을 알 수 있다.
- 4) 본 연구에서 Pre/Post Processor, 구조해석, 단면 최적 설계 모듈을 상호연결 시키는 통합 시스템을 개발하여 보다 편리하게 실제설계업무에 효율적으로 적용될 수 있으며, 최적설계의 실용화를 유도할 수 있다고 판단된다.

라. 온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적모델 및 설계시스템의 평가

- 1) 온실 자동 설계프로그램인 GreenSAD(Greenhouse Structure Auto Design)를 이용한 온실설계 결과와 상용프로그램의 설계결과를 비교한 결과 일치하는 것으로 분석되었다.
- 2) 입력조건의 간소화를 통하여 온실의 설계가 용이하여 관련기관 등에서 영농자료 등으로 활용이 가능할 것으로 판단되며 활용성을 높일 수 있는 방안에 대한 추가적인 고려가 필요하다.
- 3) 본 연구에서 개발된 프로그램에서 적용한 온실구조설계 기준과 2007. 4월에 농림부에서 지정고시한 '원예특작시설 내재해 기준'과 다소 상이한 부분이 있으므로 풍하중과 적설하중의 산정방법 등에 대한 검토와 2006. 12월에 개정된 KSD3760 (비닐하우스용 도금 강관)에 대한 검토가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판

단된다.

- 4) 농가지도형 비닐하우스 유형별로 설계풍속과 적설심에 따른 온실의 사용부재별 서까래 간격을 결정할 수 있는 식과 그림을 활용할 경우, 제시된 설계자료를 이용하여 사용자재별로 온실형태에 따른 안전설계가 용이할 것으로 판단되어 영농자료로 활용이 가능할 것으로 사려된다.
- 5) 사용부재 및 서까래간격을 고려한 단동온실의 최적모델은 경제성과 광환경등이 우수한 것으로 나타났으나 시공에 따른 부속자재의 개발이 필요하다.
- 6) 본 연구에서 제시된 최적설계프로그램을 이용한 최적설계 자료를 활용하여 연동온실설계시 최소 11%-25%정도 경제적인 것으로 나타났으나 최적설계조건중 설계풍하중 및 적설심을 상향조정하여 최적설계를 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에 의 기여도

제1절 연구개발 목표달성도

목 표	연구개발 수행내용	달성도
기존 온실의 개선 및 최적모델 개발	-풍·설해에 의한 온실의 피해양상의 구조공학적 모델 정립	100
	-기존 온실모델에 있어 구조적 보완사항 분석	100
	-기상재해로부터의 피해를 경감시킬 수 있는 온실모델 개발	100
	-온실형상, 폭, 측고/동고비 및 측벽기울기에 따른 구조안전도 분석	100
	-최근 기상자료가 포함된 온실 설계하중 산정	100
온실용 구조해석 프로그램 및 전후처리기 개발	-재하하중에 따른 온실골조의 변위 및 응력 계측	100
	-연동온실의 구조해석 알고리즘 및 입력자료의 전산화	100
	-온실용 구조해석 프로그램 수정 및 보완	100
	-구조해석 프로그램의 전후처리기 개발	100
연동온실의 자재절감 및 안전성 향상을 위한 최적설계시스템 개발	-온실구조설계에 최적화기법 도입 타당성 검토	100
	-최적화기법에 따른 온실 최적화 결과 비교	100
	-연동온실구조의 최적설계시스템 개발	100
	-자재절감 및 안전성 향상을 위한 연동온실의 최적화의 목적합수 및 제약조건식 정립	100
	-국내 연동형 온실의 부재단면 및 형상 최적화	100

제2절 관련분야 기술발전에 의 기여도

본 과제의 연구결과는 다음과 같이 관련분야 기술발전에 기여할 것으로 기대할 수 있다.

1. 기술적 측면

- 가. 기상재해로 인한 온실의 파괴양상, 원인 분석 및 대책 수립
: 연구결과는 온실에 국한된 연구결과가 아니라 버섯재배사, 축사 등의 농업시설물에 활용 가능
- 나. 최근 기상자료를 포함한 지역별 설계풍속 및 적설심 제시
: 최근 기상이변에 따른 기상자료를 포함한 설계하중으로 보다 안전하고 경제적인 농업시설물의 설계가 가능
- 다. 기상재해에 따른 온실피해 경감 대책으로 설계하중에 안전한 온실설계를 쉽고 간편하게 할 수 있는 설계법 제시와 보강방법에 따른 보강효과 구명
- 라. 온실 설계용 프로그램 작성 - 관련 분야에 대한 설계용 프로그램 및 농업시설물의 통합 설계용 프로그램 작성에 관한 자료 확보
- 마. 온실의 최적설계기법 제시
: 설계하중에 안전하면서 경제적인 설계가 가능하여 버섯재배사, 축사 등의 농업시설물의 최적설계 등에 대한 활용성 제고
- 바. 현재의 온실 구조설계기준의 보완 필요성 제고와 관련자료 제공
- 사. 농민, 관련업체 및 기관 등의 종사자들이 쉽게 활용할 수 있는 온실 설계 프로그램 작성으로 온실의 구조역학적인 설계가 가능
- 아. 지역별, 재배작물별 온실의 모델을 개발할 수 있는 자료 제시

2. 경제·산업적 측면

- 가. 기상재해에 보다 안전한 온실의 설계를 통한 생산기반의 안전성 확보
: 기상재해에 따른 온실의 피해를 경감시킬 수 있으므로 경제적 손실 감소
- 나. 온실 구조설계기준의 보완에 필요한 자료 제시를 통하여 국내 실정에 맞는 온실 구조설계기준의 재정립 제고
- 다. 본 연구결과를 활용한 온실설계를 통하여 기상재해에 따른 온실피해를 경감시킬 수 있어 재해복구에 따른 인력 및 예산 절감
- 라. 설계하중에 경제적인 온실모델의 보급으로 시설원예의 경쟁력 향상
- 마. 농가 및 업체 등에서 개발되는 온실의 인증절차 간소화 : 온실개발에 따른 구조해석 등의 절차 간소화

제5장 연구개발 결과의 활용 계획

국내 온실의 대부분을 차지하고 있는 플라스틱 온실은 구조공학적인 설계에 대한 인식이 부족하고 설계기준이나 구조안전지침 등의 미비로 매년 큰 재해를 입고 있다. 매년 반복되고 있는 기상재해에 따른 온실의 피해를 경감시킬 수 있는 방안을 모색하고 해결책을 제시하고자 수행한 본 과제의 연구결과를 효율적으로 활용하여 기대효과를 극대화시키기 위한 활용방안 및 활용에 대한 계획은 다음과 같다.

- 가. 본 연구 결과의 효율적인 활용으로 온실구조설계에 대한 필요성과 중요성을 부각시킬 수 있으며 온실 구조물의 안전도 및 내구성 향상, 구조역학적인 연구 및 농업시설물의 최적설계에 대한 관심 유도 및 관련 기술개발 촉진 등이 기대된다. 그리고, 관련 종사자(농민, 업체, 관련기관 등)들이 보다 쉽게 온실의 구조설계를 수행할 수 있어 기상재해에 따른 온실피해의 경감을 통한 자원절약 및 안정적인 시설원에 생산기반 조성에 기여할 것으로 판단된다.
- 나. 이를 위하여 연구결과보고서를 관련기관, 농민단체 또는 개인수요자에게 배부하여 홍보한다.
- 다. 온실 및 농업시설물의 구조설계기준의 보완 및 개정이 절실히 요구되고 있으며 온실의 구조설계기준의 경우에는 파이프온실과 철골온실로 구분하여 구조설계기준 및 시공지침이 별도로 작성되어야 한다. 이러한 구조설계기준 및 시공지침 수정 및 작성시에 본 연구 결과를 적극적으로 활용할 수 있다.
- 라. 본 연구에서 개발된 프로그램(GreenSAD, MAAS) 등은 소프트웨어 등록 등을 통하여 지적재산권을 확보하여 연구결과를 공식화하고 기술을 체계화시켜 온실설계와 직접 관련된 정부산하기관, 시공업체 등에 유·무상으로 기술이전을 도모한다.
- 마. 시설원예에 종사하는 농민, 관련 업체 및 기관 등을 대상으로 교육을 실시하여 기상재해 경감을 위한 본 연구결과를 활용할 수 있는 방안 등을 홍보한다.
- 바. 온실 시공과 직접적인 관련된 정부산하기관, 시공업체 및 자재생산 업체의 관련자를 대상으로 연구 결과를 홍보하고, 관련 정책 및 의사결정시 자료로 활용할 수 있도록 한다.
- 사. 관련 분야 학술단체의 학술지에 연구결과를 발표하고, 각종 세미나 및 학술회

의에 발표한다.

- 아. 본 연구결과의 활용을 위해서는 온실의 구조설계기준 및 농업시설물의 구조설계기준에 대한 체계적이고 종합적인 보완 및 개정작업이 우선되어야 하며 이에 부합하도록 연구결과를 보완하면 기상재해에 따른 온실 및 농업시설물의 피해경감을 위한 영농자료 및 설계지침으로 활용할 수 있다.
- 자. 본 연구결과의 적극적인 활용을 위해서는 관련 정책담당부서 및 기관의 담당자와의 긴밀한 협조 및 체계적인 의사소통체계가 정립되어야 한다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구와 관련하여 온실 구조설계기준에 관한 내용과 우리 나라와 기후조건이 유사한 일본의 기상재해 대책에 관한 자료를 수집한 결과는 다음과 같다.

1. 외국의 온실 구조설계기준 현황

가. 일본

1) 온실

1973년 8월 일본시설원예협회 주관으로 「원예용 하우스 및 유리온실의 적정구조에 관한 조사연구」 사업을 기초로 1974. 4 「원예용 시설안전구조기준(안)」을 결정하고 1976 원예용 시설안전 구조기준(잠정기준)으로 제정하고 1977년 보정, 1981년 개정, 1997년에 재개정하여 시설원예 시설의 구조설계기준으로 활용하고 있다. 그리고, 1998년 6월에 일본시설원예협회 주관으로 「지중매입식 파이프하우스의 안전구조지침」과 「원예용 철골보강 파이프하우스의 안전구조지침」 발간하였으며 2001년 3월에 「저비용 내후성 철골하우스 시공 매뉴얼」, 2002년 3월에 「저비용 내후성 하우스 시공 매뉴얼」을 발간하여 시행하고 있다.

2) 축사 및 퇴비사

1995년 건축설계기준의 규제완화 결정을 통하여 1997년 축사설계규준법을 제정하여 2000년 관련법 개정을 통하여 건축기준법의 적용대상에서 축사 및 퇴비사는 별도의 완화기준을 적용하다가 2004. 6 『축사·퇴비사의 건축설계에 관한 고시』 제정하여 시행하고 있다.

나. 미국

1968년 11월 미국온실협회(NGMA)는 협회구조기준을 최초로 채택하고 1975년 11월 개정기준을 『건축물과 기타 구조물의 최소설계하중에 대한 건축물 필요조건』인 ANSI A 58.1에 수용되도록 미국 표준화연구소(ANSI)에 제출 후 1979년 11월 ANSI

A 58.1의 기준과 부록에 채택되어 온실구조 및 그 구성부재의 설계에 필요한 하중기준으로 제공되고 있다.

다. 네델란드

수년간의 태풍재해로 인한 손실과 주거용이나 업무용 건물의 설계기준을 적용함에 따른 과다구조설계를 방지하고 경제적인 구조설계가 되도록 하고 작물재배농민, 온실 시공업체, 자재제조업체, 재정부담자, 보험회사 등이 상호 협조하여 이용하도록 1978년 NEN 3859 『Greenhouse structural Requirement』 기준을 제정하였으며 1990년과 1993년 개정하였고 1985년에는 이 기준의 해설서인 NPR 3860 Greenhouse, Recommendations for and examples of constructional performance base on NEN 3859를 보급하였다.

라. 유럽공동체

유럽연합 표준위원회에서는 유럽연합 국가의 상업용 온실에 적용할 EN XXXXX-1 『Greenhouses : Design and Construction, Part 1 : Commercial Production green houses』을 1996. 7 제정하였다.

2. 수집 해외과학기술정보

- 1) 일본, 원예용 시설안전구조기준(안)
- 2) 일본, 지중매입식 파이프하우스의 안전구조지침
- 3) 일본, 원예용 철골보강 파이프하우스의 안전구조지침
- 4) 일본, 저비용 내후성 철골하우스 시공 매뉴얼(풍대책)
- 5) 일본, 저비용 내후성 하우스 시공 매뉴얼(설대책)
- 6) 일본, 평장형 경사 하우스의 설계·시공 매뉴얼
- 7) 일본, 저비용 내후성 철골하우스 도입사례집
- 8) 일본, 축사·퇴비사의 건축설계에 관한 고시·해설
- 9) 일본, 저비용 축사 설계 사례집
- 10) 일본, 퇴비화 시설 설계 매뉴얼
- 11) 미국과 네델란드의 온실 구조설계 기준

제7장 참고문헌

1. 구봉근, '하중-저항계수법 (LRFD)에 의한 강구조물의 최적 설'계, 인하대학교 대학원(박사학위논문), 1-25, 1979.
2. 고창두, '유전자알고리즘을 이용한 로버스트 선박설계에 관한 연구' 부산대학교 대학원(박사학위논문), 2000
3. 강문명, 김승덕, 모재근, 조인기, 박춘욱, 손수덕, 1997, 공간트러스 구조에 대한 최적화 해석 프로그램, 강건재 학술발표 논문집, 제 6권, 제 6호, pp. 37-51.
4. 김기홍, 1999, 유전자알고리즘과 인공신경망을 이용한 강뼈대 구조물의 이산화 최적설계, 경북대학교 박사학위논문.
5. 김기화, 'Genetic Algorithms에 의한 다목적함수 최적구조설계' 서울대학교 대학원 (박사학위논문), 1994
6. 김문기, 고재균, 이신호, 1987, 플라스틱하우스의 구조실태의 조사연구, 한국농공학회지, 29(3), pp. 113~124.
7. 김문기, 1989, 원예시설의 구조적 안전성, 우리나라 시설원예의 발전방향모색, 경상대학교 부설 농업자원이용연구소, pp.79-90.
8. 김승억. 1997. 반강접 뼈대구조물의 직접설계, 대한토목학회논문집, 제17권, 제6호, pp. 909-916.
9. 김상식, '건축철골구조', 문운당,1993
10. 김완영, "다단계 다목적 함수 최적화 기법에 의한 트러스 구조물의 형상최적화에 관한 연구," 전북대학교 대학원 박사학위 논문, 1995, 8
11. 김종수. 1995. 개선된 소성힌지 해석에 의한 강뼈대 구조물의 임계하중 조합의 결정 및 최적설계, 석사학위논문, 경북대학교 대학원 토목공학과, 대구
12. 김진영, 2001, 비닐하우스 폭설피해 실태와 대응 방안, 원예과학 기술지, pp. 629~635.
13. 김홍룡, '이산형설계변수를 갖는 철근콘크리트 구조물의 최적설계', 충북대학교 대학원(박사학위논문), 1993.
14. 남상운, 유인호, 김종원, 2001, 파이프 골조 온실의 유지보수 보강 기술 개발, 농림부.
15. 남상운, 2003, 인삼재배 해가림 시설의 기상재해와 구조개선 대책, 한국농공학회지

- 45권 4호 : pp. 98~106.
16. 남상운, 2005, 농업시설의 기상재해 발생현황과 대책, 한국농공학회지 전원과 자원 47(3) : pp. 30~37.
 17. 농림부 · 농어촌진흥공사, 1999, 온실구조설계기준 및 해설
 18. 농림수산부 · 농어촌진흥공사, 1995, 온실구조설계기준
 19. 농림부 · 축협중앙회, 1998, '98가변형 축사표준설계도-설계설명서 및 시방서- : pp. 53~60.
 20. 농림부, 1998, 한국형 온실모델 설정을 위한 경량자재개발 및 규격화 보급방안 최종보고서 : pp. 26~33
 21. 농촌진흥청 원예연구소, 2005, 기상재해에 의한 원예시설의 피해양상과 대책 : pp. 37~87
 22. 대한건축학회, '강구조한계상태 설계기준 및 해설 작성에 관한 연구, 1995.
 23. 문창훈, 한상을, '트러스구조물의 형태해석에 유전자알고리즘의 응용', 한국전산구조공학회 봄학술발표회논문집, pp101~109, 1998
 24. 박성수, 박해영, 2001, "C++로 구현한 유전자알고리즘", 한울출판사.
 25. 박춘욱, 2001, 개선된 유전자 알고리즘에 의한 입체 트러스의 단면 및 형상 이산화 최적설계, 경북대학교 박사학위 논문.
 26. 박춘욱, 편해완, 김명선, 강문명, 1998, 구조물의 다목적 퍼지 최적화에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 제 14권 9호, pp. 13-34.
 27. 박춘욱, 조인기, 강문명. 2000. 유전자 알고리즘에 의한 철골연속보의 위상 및 이산화 최적설계, 대한건축학회 논문집 구조계, 제16권, 8호, pp. 3-30.
 28. 박춘욱, 편해완, 강문명. 2000. 구조물에 대한 다목적퍼지최적화, 한국강구조학회 논문집, 제12권 5호, pp. 503-513.
 29. 소방방재청, 2004, 2003 재해연보.
 30. 송영준, 민승재, 국지승, '유한요소법과 최적구조설계 CAE', 성안당, 1999.
 31. 삼성건설(주) 기술연구소, 'Membrane&Cable/Truss 구조물의 형상해석 및 응력-변형해석을 위한 범용프로그램의 개발', 2. 1995
 32. 신미영, 박성수, '유전자알고리즘에 의한 고층철골구조물의 최적설계', 대한건축학회 학술발표회논문집, 제20권, 제1호, pp.75~78, 2000.4
 33. 안지현, 이차돈, '유전자알고리즘에 의한 2차원 철근콘크리트 골조의 최적설계', 대한건축학회논문집, Vol.19, No.1, pp.183~188, 1999

34. 이규원, 변근주, 황학주, “SUMT에 의한 강재 트러스의 최적설계에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 제28권, 제4호, 1980. 8, pp. 119-130
35. 이석건, 이현우. 1992. 아치형 단동하우스의 풍력계수 분포에 관한 연구. 한국생물생산시설환경학회지 1(1) : 28-36.
36. 이석건 외 10인. 1995. 원예시설의 구조안전기준 작성(최종). 농어촌진흥공사.
37. 이석건, 이현우, 손정익, 이종원. 1994. 원예시설의 지붕형식에 따른 단면력의 비교 분석. 한국농공학회지 36(3) : 84-89.
38. 이석건, 2001, 원예시설의 강풍피해 양상과 구조안전 대책, 원예과학기술지, pp. 623~628.
39. 이준배, ‘유전자알고리즘을 이용한 전체/다목적 최적화알고리즘의 개발 ’한국과학기술원(박사학위논문), 1996
40. 이종원 외, 원예시설의 구조안전성 향상 방안 및 최적설계, 2006, 한국생물환경조절학회 추계학술대회 발표논문집15(2) : pp. 79~123..
41. 이시학, “철근콘크리트 구조설계”, 형설출판사, 2002
42. 이현우, 1991, 아치형 하우스의 풍력계수 분포에 관한 연구, 경북대 박사학위논문.
43. 양영순, 김기화, ‘전체최적화를 위한 확률론적 탐색기법’, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제5권 제2호, pp93~104, 1992.6
44. 양영순, 김기화, ‘실수형 Genetic Algorithms에 의한 최적설계’, 한국전산구조공학회 논문집, 제8권 제2호, pp123~132, 1995.6
45. 윤용철, 서원명, 윤충섭, 1995, 시설원예용 플라스틱 하우스의 태풍피해에 관한 연구, 생물생산시설환경학회지 4(2) : pp. 167~174.
46. 전남농업기술원, 2006, 2005년 농업분야 폭설 피해 보고서
47. 전희 외, 원예시설 기상재해 피해양상 및 대책, 2006, 한국생물환경조절학회 추계학술대회 발표논문집15(2) : pp. 3~58.
48. 정영식, 정석진, ‘유전자알고리즘을 이용한 강 뼈대 구조물의 최적설계’, 한국전산구조공학회 논문집, 제13권 제3호, pp.337~349, 2000
49. 조효남, ‘강뼈대 구조물의 이산형 최적 설계에 관한 연구’, 대한 토목학회지, 제21권, 제 3호, 107-120, 9, 1975.
50. 한상훈, 변근주, “아치구조의 형상최적화,” 대한토목학회 논문집, 제4권, 제4호, 1984, pp. 127-135
51. 허현행, ‘유전자알고리즘을 이용한 트러스 토폴로지 설계’, 홍익대학교 대학원(석사

- 학위논문), 1998
52. 황선일, 조홍동, 이상근, 한상훈, 'GA를 이용한 트러스 구조물의 이산최적설계', 한국전산구조공학회, 가을학술발표회논문집, pp. 301-308, 9, 1999.
 53. 최창근, "유한요소법", 테크노 프레스, 2002
 54. 北陸農試, 1981, 昭和56年 豪雪北陸地域雪害緊急調査報告, 北陸農試研究資料, 9, pp. 102.
 55. 金谷 豊·倉田 勇, 1985, 「59豪雪」による施設被害事例, 北陸農試研究資料, 12, pp. 174-179.
 56. 小林一雄, 1977, 施設園藝に對する防風防雪對策, 農業と園藝, 52, pp. 221-226.
 57. 高橋久三郎·小林一雄·寸松謙生·大沼匡之·鴨田福也, 1981, 園藝施設に對する積雪荷重とその軽減法, 北陸農試報, 23, pp. 197-234.
 58. 山下 進·小倉 力, 1982, 園藝施設の颱風による被害について, 農業土木試験場技報, A(28), pp. 61-84.
 59. 森山英樹, 松島健一, 藤本直也, 豊田裕道, 1999. 台風7號(1998)による園藝施設の被害狀況と施設構造の特性. 施設と園藝. 1999. 冬 vol. (107) pp.6-12.
 60. 三原義秋, 1983, 温室設計の基礎と實際, 養賢堂.
 61. 小林一雄, 1977, 施設園藝に對する防風防雪對策, 農業および園藝, 52(1), pp. 221-226.
 62. 日本施設園藝協會, 1981, 園藝用施設安全構造基準(暫定基準), 日本施設園藝協會, pp. 12-17.
 63. 羽倉弘人, 1977, ハウスの設計と安全基準の考え方, 農業および園藝, 52(1), pp. 165-171.
 64. 日本施設園藝協會, 1986, 温室(ガラス室·ハウス)保守管理手引.
 65. 豊田裕道, 森山英樹, 瀨能誠之, 前川孝昭, 1998. 園藝用プラスチックハウス等の風害發生事例とその特徴. 農業施設. 1998. 6. Vol. 29(1). pp.21-30.
 66. AISC LRFD, 1994, Load and Resistance Factor Design Specifications for Structural Steel Buildings, 2nd Ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
 67. American National Standards Institute, 1982, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI 58.1-1982, ANSI.
 68. American Society of Agricultural Engineers, 1976, Designing Building to Resist Snow and Wind Loads, ASAE R288.3, pp. 373-377.
 69. Chen, W.F. and Kim, S.E., 1997, LRFD Steel Design using Advanced Analysis, CRC Press, Boca Raton, FL.

70. Daryl L. Logan, "Logan의 유한요소법 첫걸음", 시그마 프레스, 1998
71. G.L. Nelson, 1988, Light Agricultural and Industrial Structures, AVI.
72. Goldberg, D.E., 1983, Computer-aided Gas Pipeline Operation using Genetic Algorithm and Rule Learning, Ph. D. thesis, Dept. Civil Eng., University of Michigan, Ann Arbor, MI.
73. H.J.Barre, 1987, Environmental and Functional Engineering of Agricultural Buildings, AVI.
74. Jenkins, W.M., 1991, Towards Structural Optimization via The Genetic Algorithm, Computers and Structures, Vol. 40, No. 5, pp. 1321~1327.
75. Liu, H., 1985, Aerodynamics of Buildings and Structures, Design of Concrete Buildings for Wind and Earthquake Forces, Seminar Course Manual, American Concrete Institute, pp. 59-82.
76. Louis F.G., Robert D.D., Reider B., 1994, Load and Resistance Factor Design of Steel Structure, Prentice Hall.
77. MWPS1, 1983, Structures and Environment Handbook.
78. Mathews, E.H. and J.P. Meyer, 1988, Computation of Wind Loads on a Semicircular Greenhouse, Advances in Wind Engineering, Part 2, pp. 225-233.
79. NGMA, 1975, Greenhouse Construction Standards -Structural Load Standard-.
80. NGMA, 1988, Design Loads in Greenhouse Structures.
81. NGSI, 1978, Greenhouse Structural Requirements(NEN 3859).
82. NRAES-33, 1989, Greenhouse Engineering.
83. Park, C.W., Pyen, H.W., Kim, M.S., Kim, H.S., Kang, M.M., 1998, Multi-Objective Fuzzy Optimization for Structural Design, Proceedings of the Australasian Conference of Structural Optimization, February 11-13, pp 393-400.
84. Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C.S. (1997). Discrete Optimization of Structures using Genetic Algorithm, Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(3), pp. 350~358.
85. Shimadzu corporation. 1990. Instruction manual UV-2201 recording spectrophotometer. Shimadzu corporation.
86. Simiu, E. and R. H. Scanlan, 1978, Wind Effects on Structures, John Wiley and Sons, pp. 1-70, pp. 318-342.

부 록

1. 서까래 간격별 한계적설심
2. 서까래 간격별 한계풍속
 - 평균지붕높이의 풍속 고려
 - 평균지붕높이 5m이하 풍속 일정

온실모델별 서까래 간격별 한계적설심

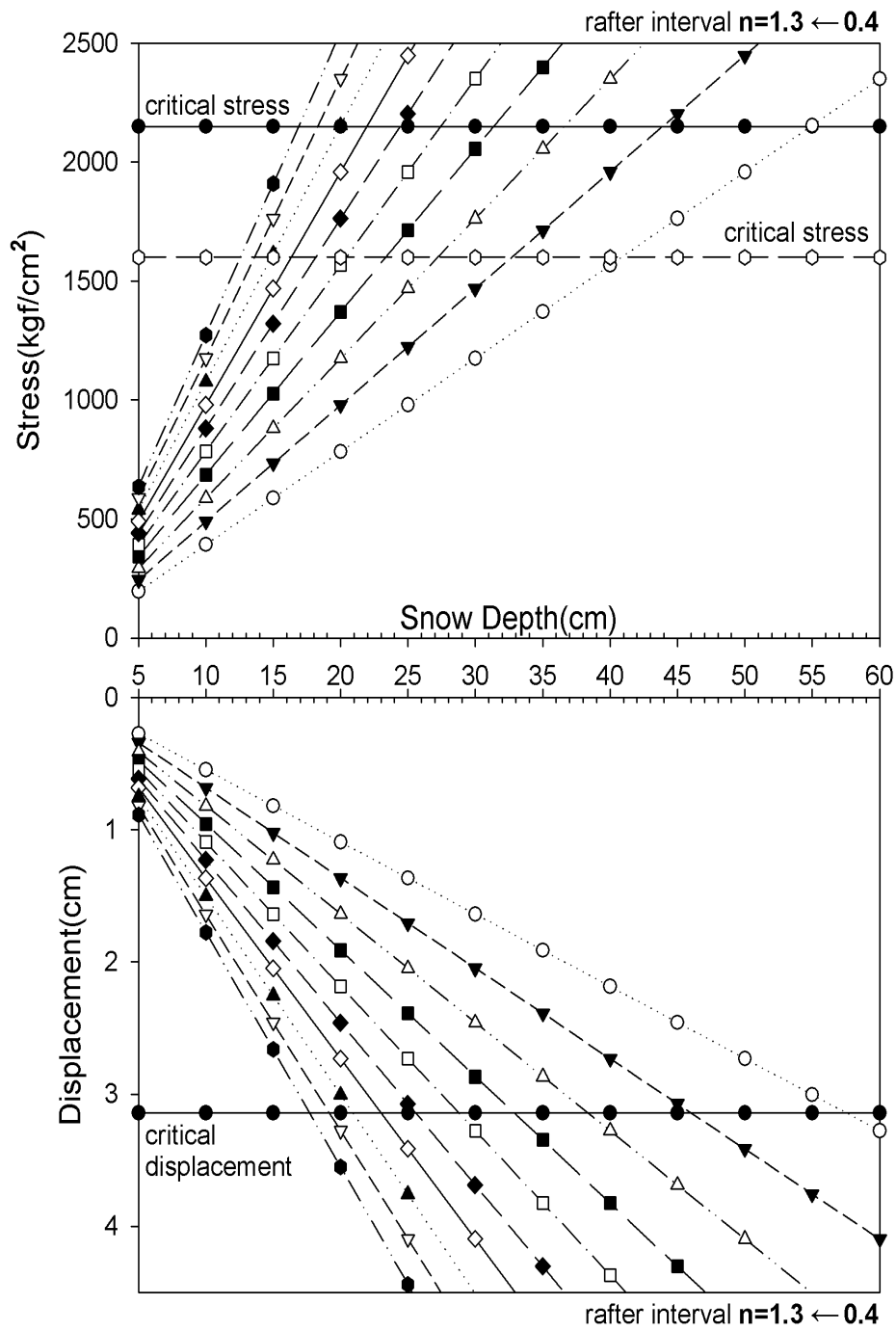


그림 1. 서까래 간격별 한계적설심(A형, Ø25.4×1.5t)

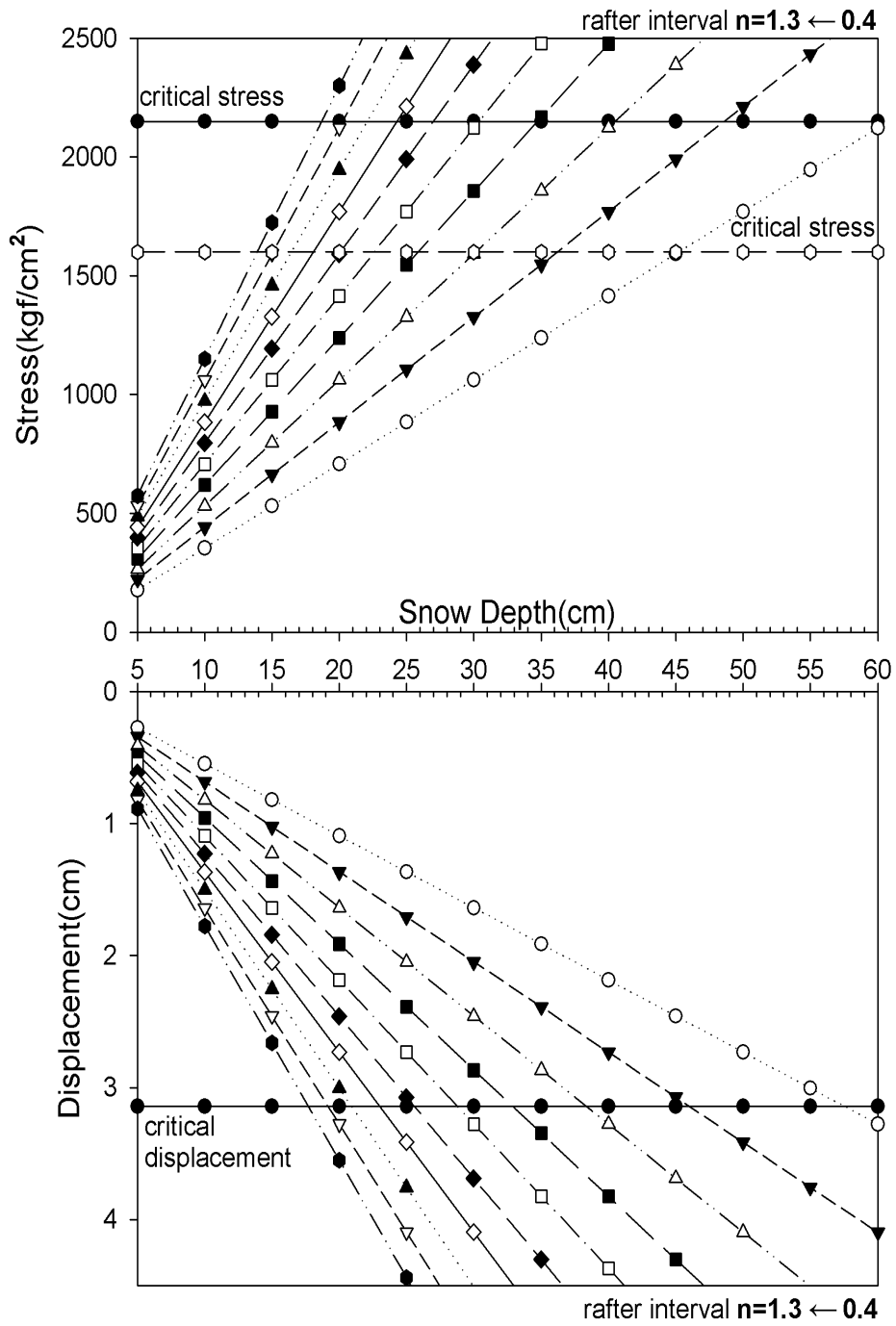


그림 2. 서까래 간격별 한계적설심(A형, Ø25.4×1.7t)

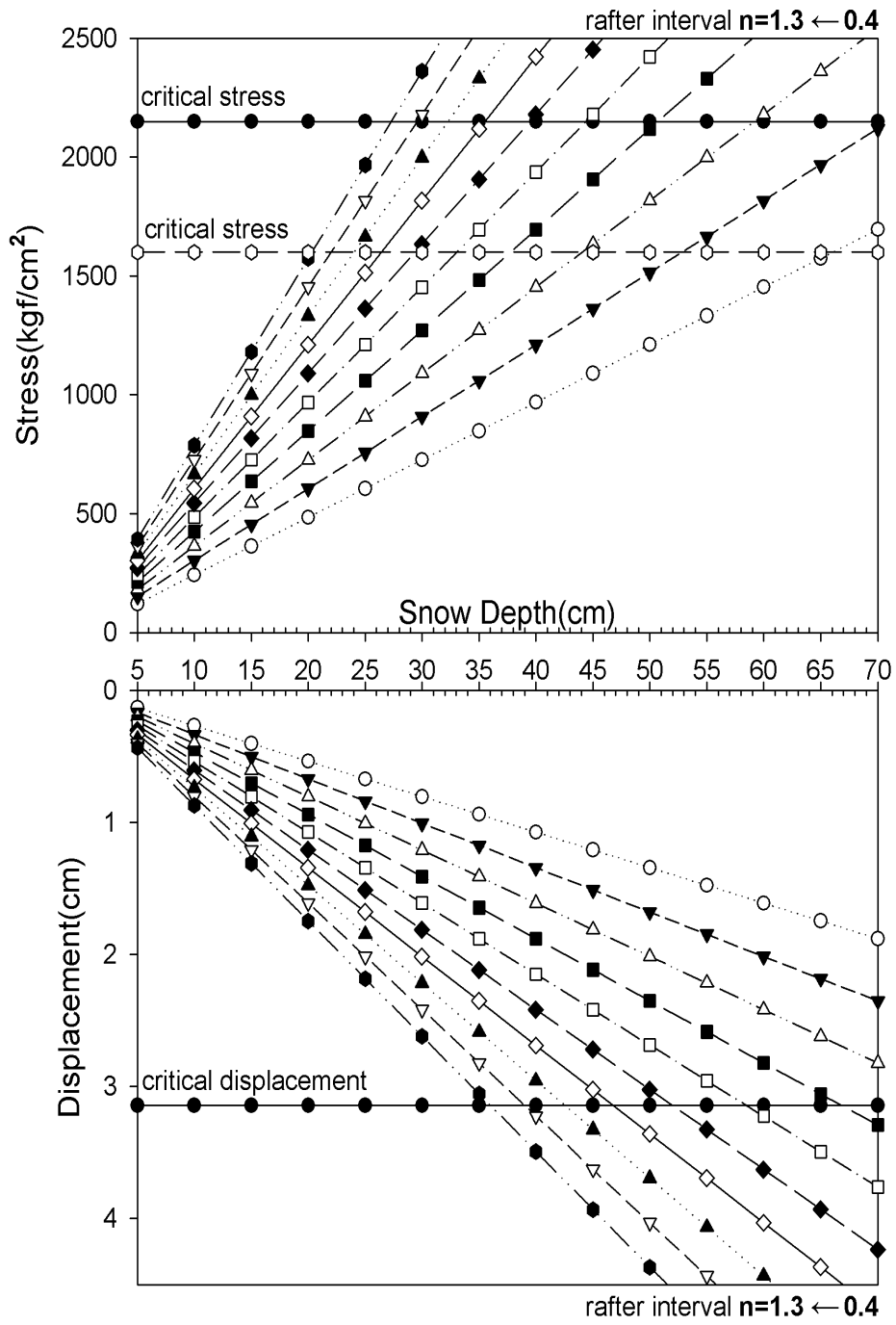


그림 3. 서까래 간격별 한계적설심(A형, Ø31.8×1.5t)

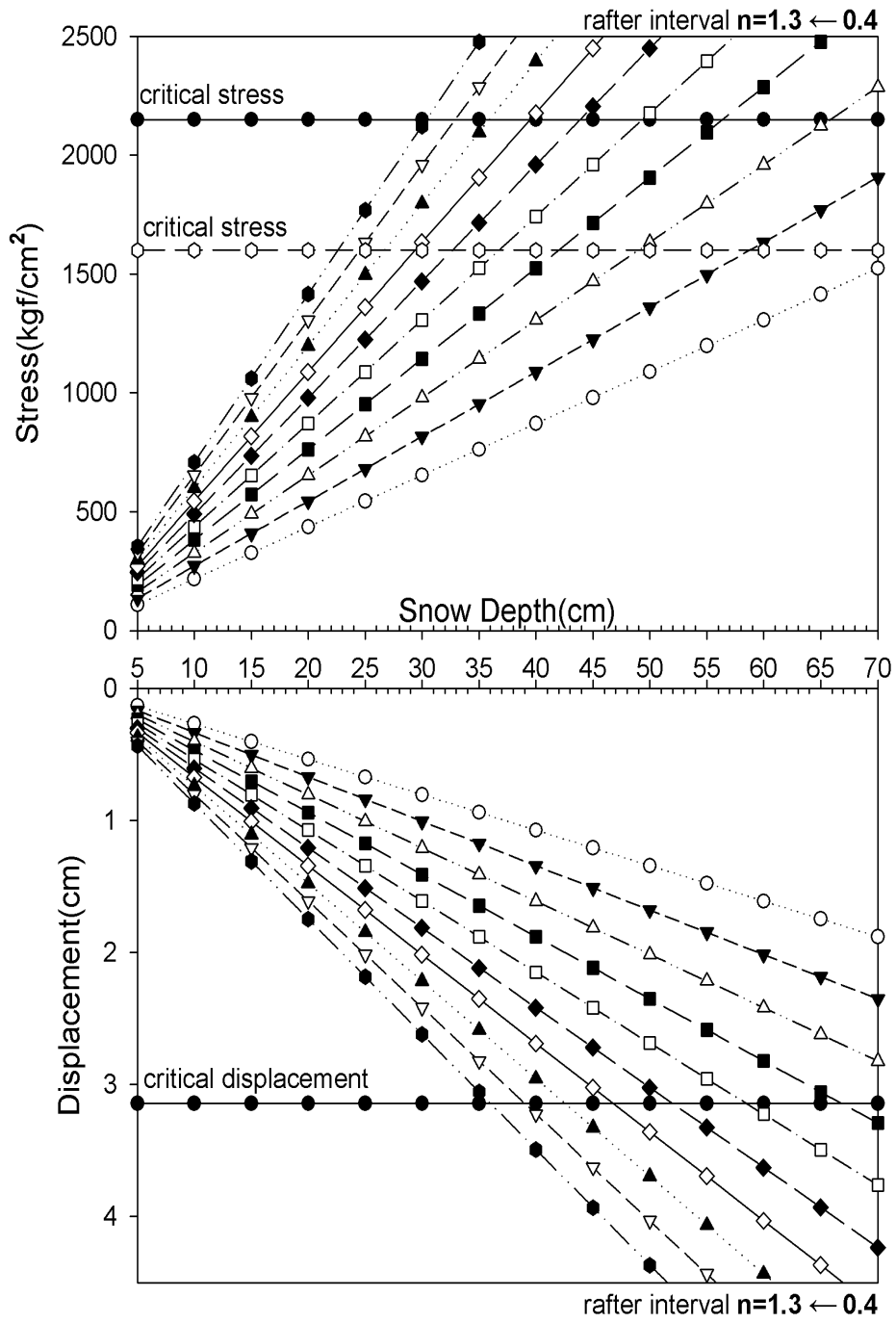


그림 4. 서까래 간격별 한계적설심(A형, Ø31.8×1.7t)

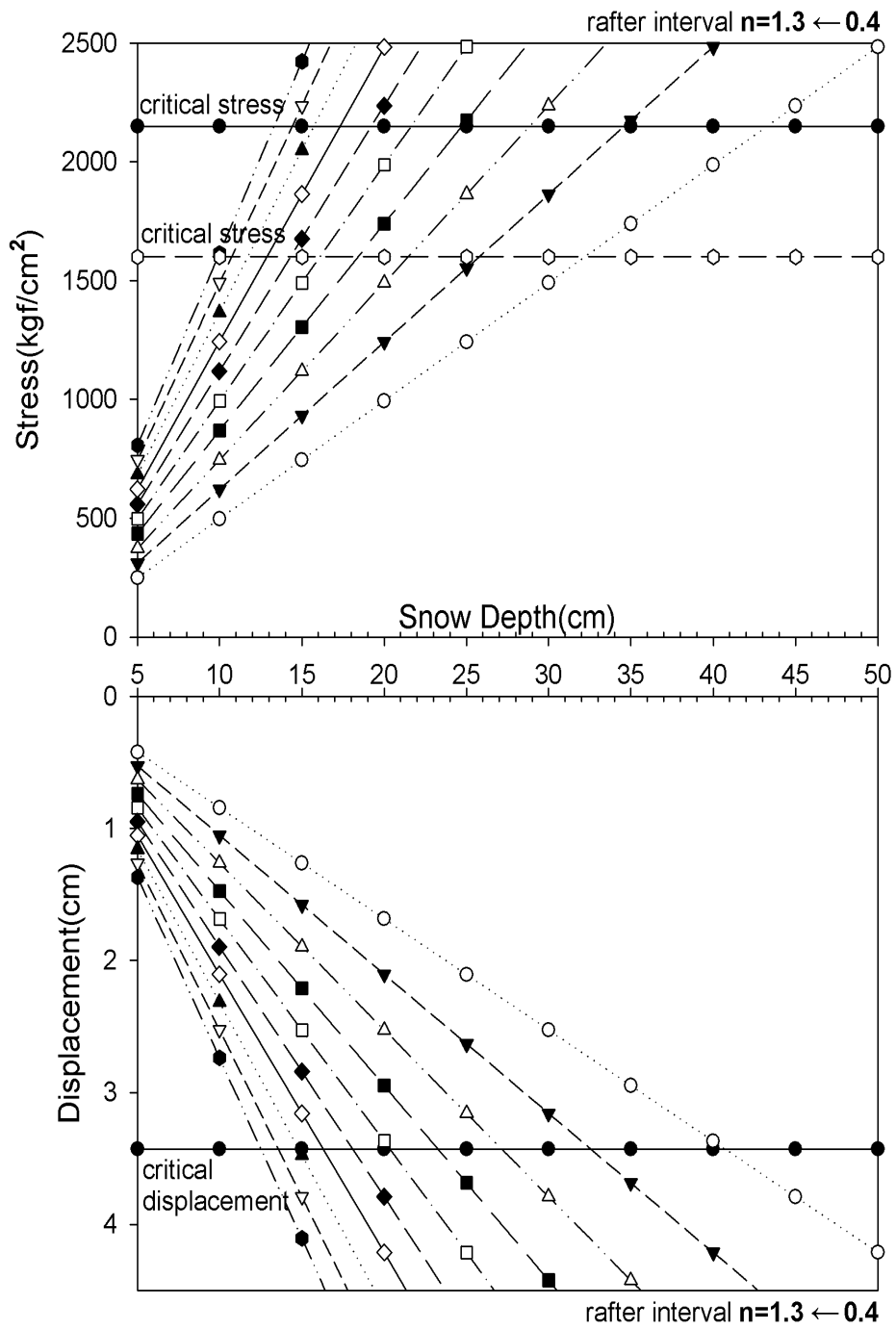


그림 5. 서까래 간격별 한계적설심(B형, Ø25.4×1.5t)

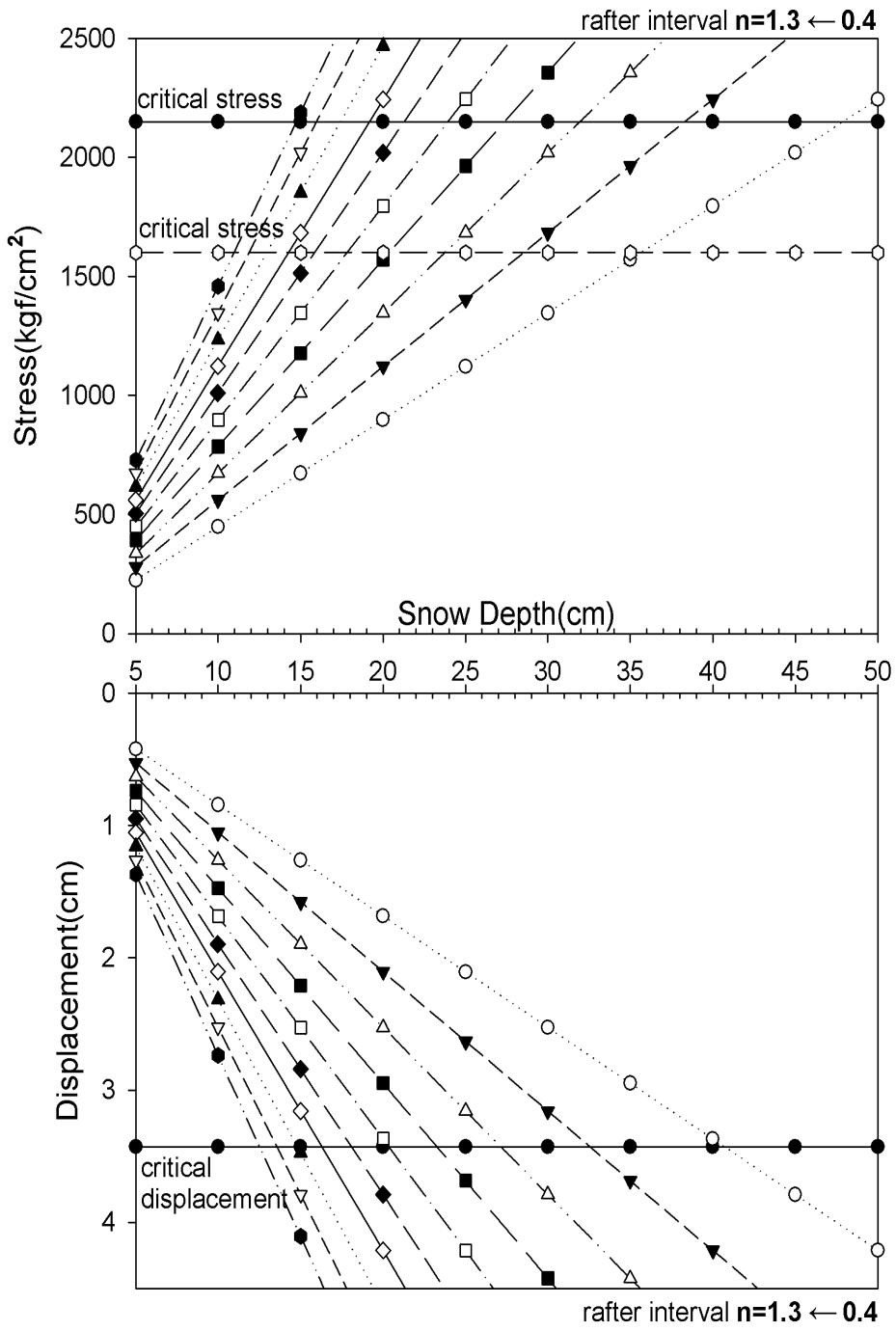


그림 6. 서까래 간격별 한계적설심(B형, Ø25.4×1.7t)

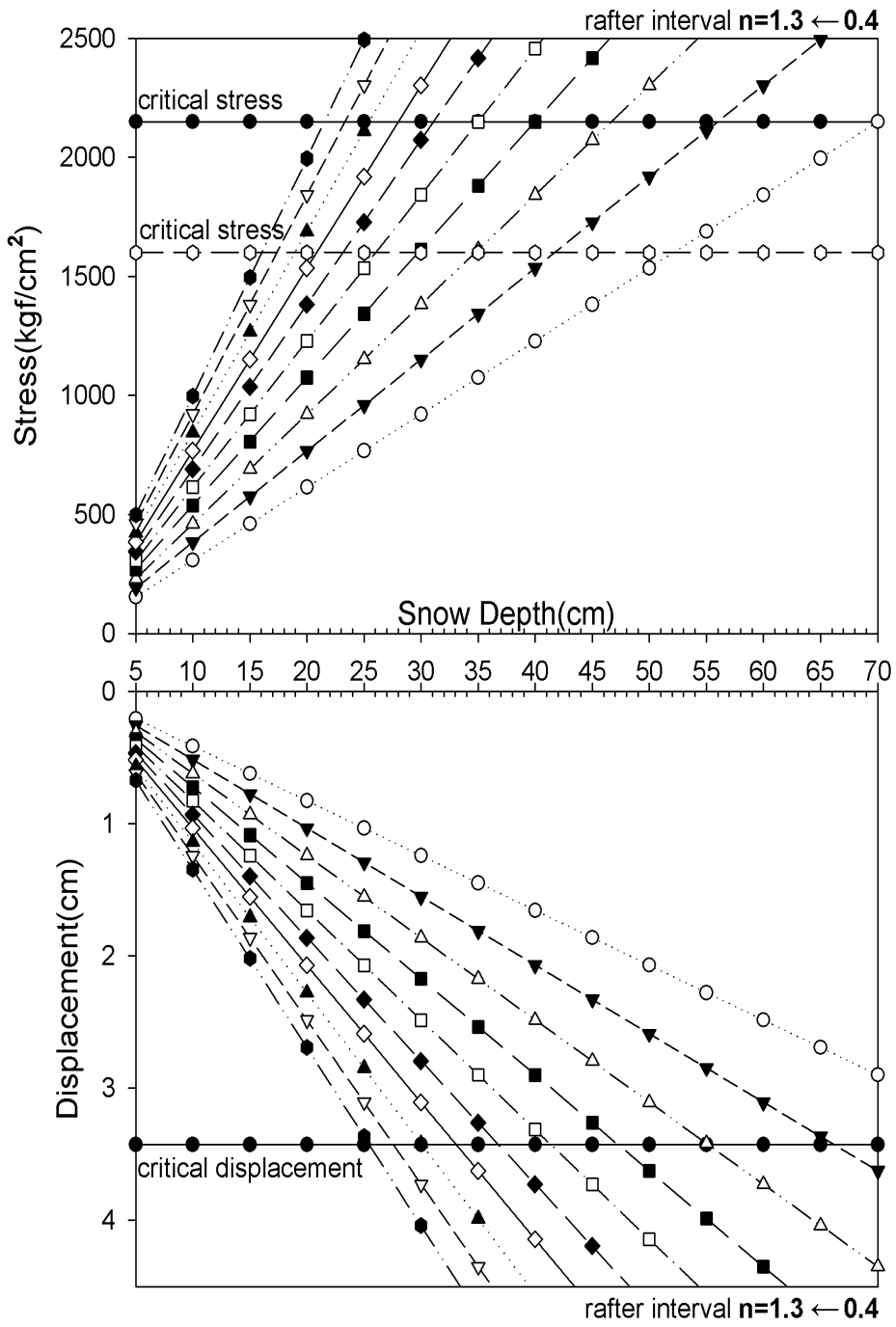


그림 7. 서까래 간격별 한계적설심(B형, Ø31.8×1.5t)

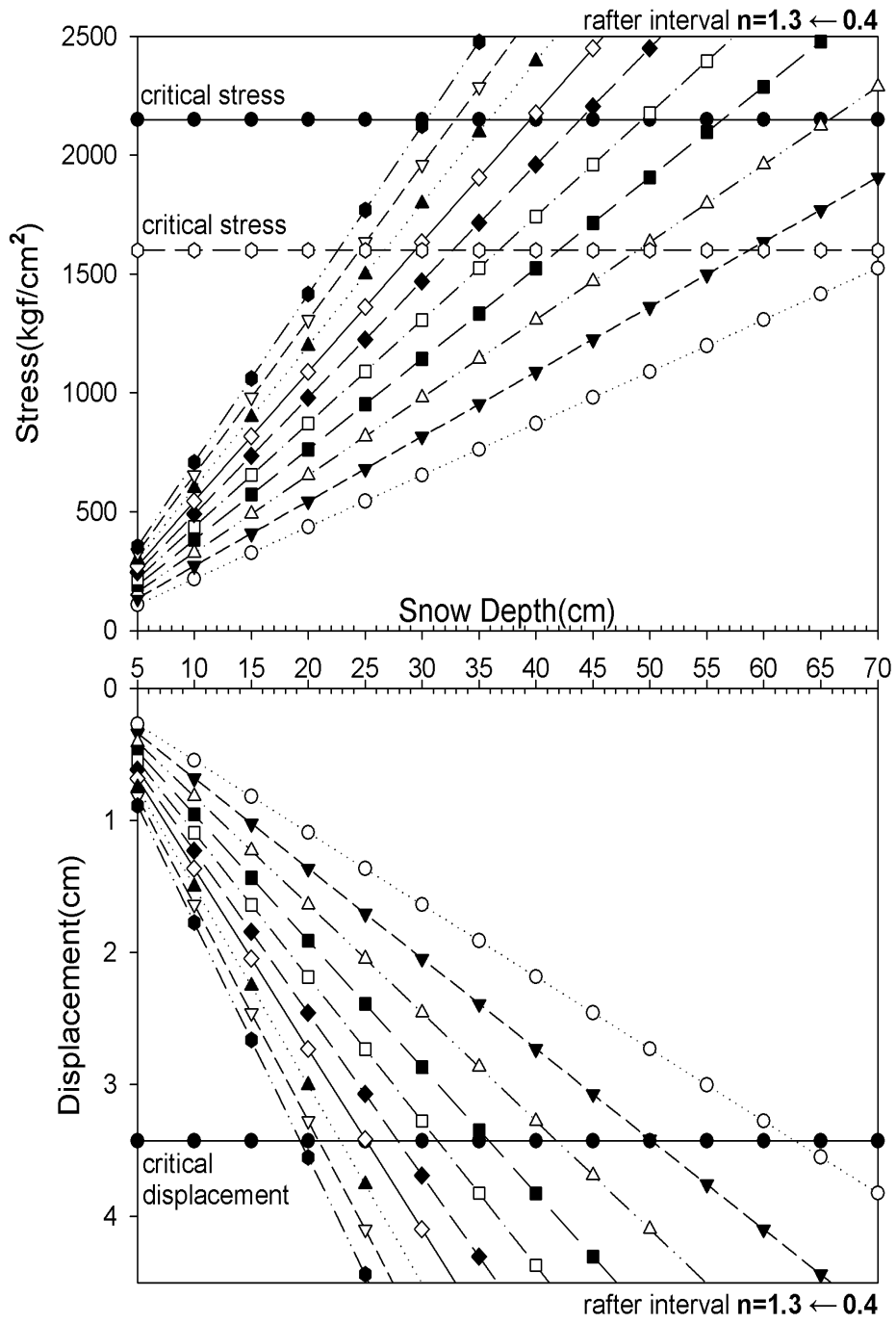


그림 8. 서까래 간격별 한계적설심(B형, Ø31.8×1.7t)

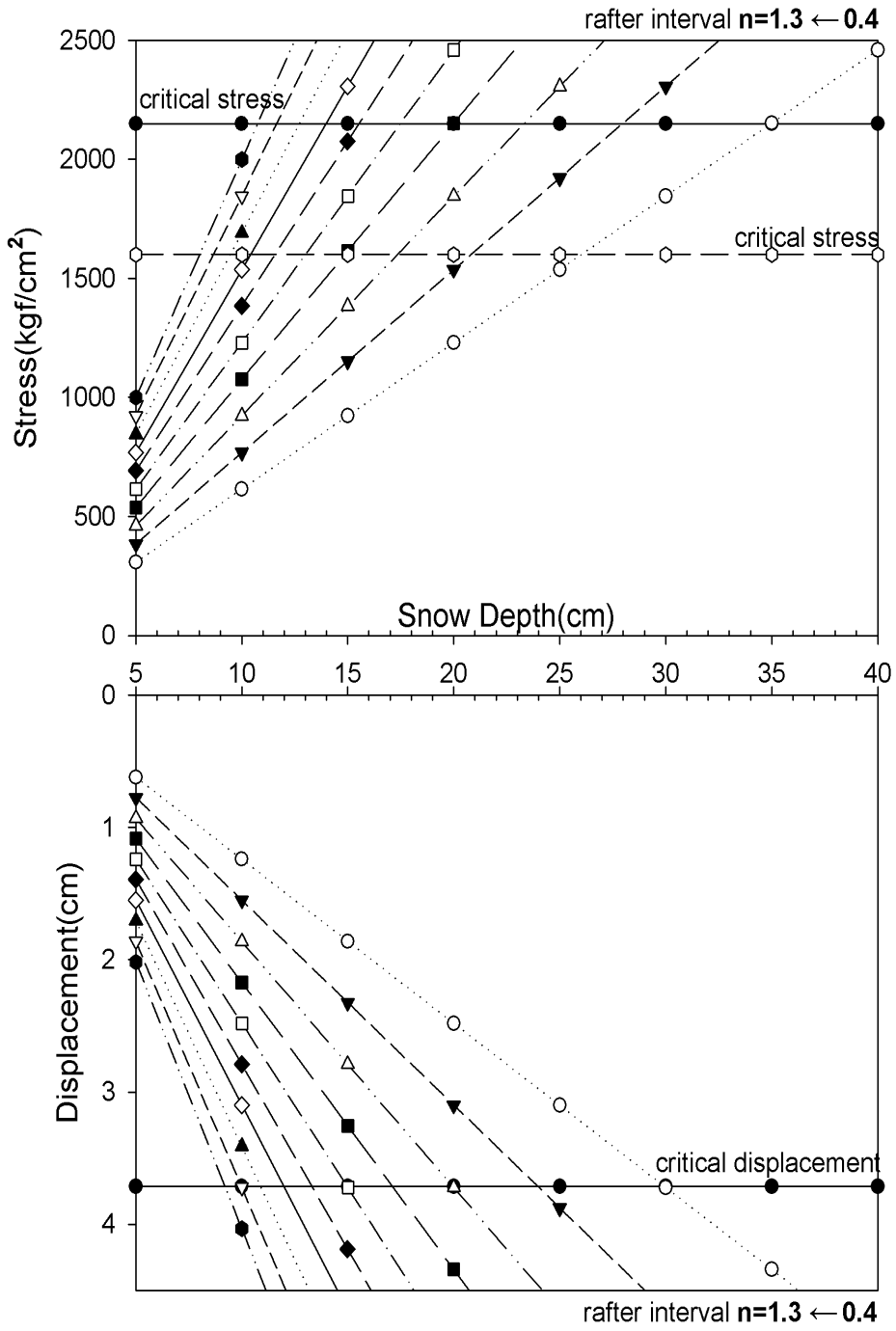


그림 9. 서까래 간격별 한계적설심(C형, Ø25.4×1.5t)

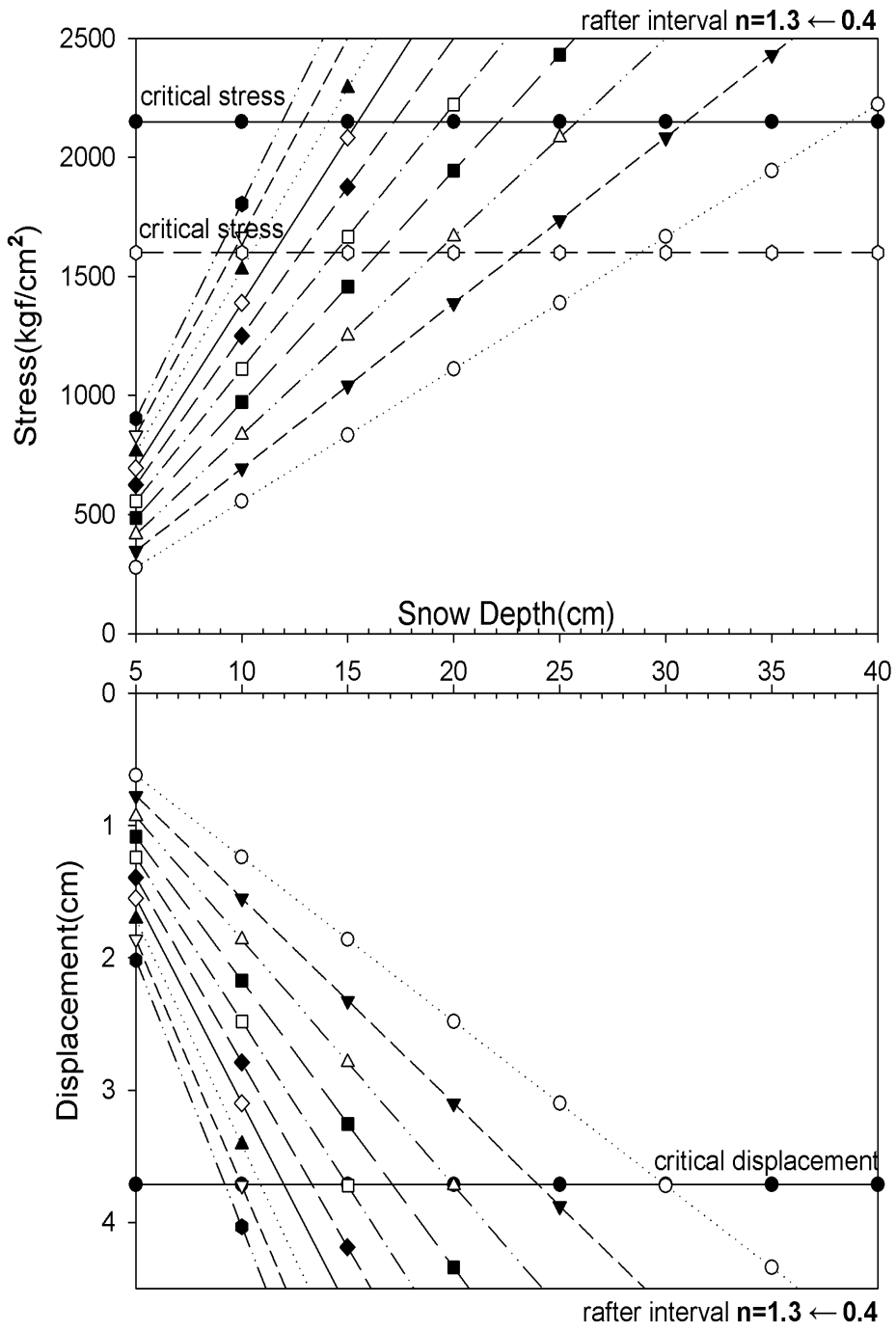


그림 10. 서까래 간격별 한계적설심(C형, Ø25.4×1.7t)

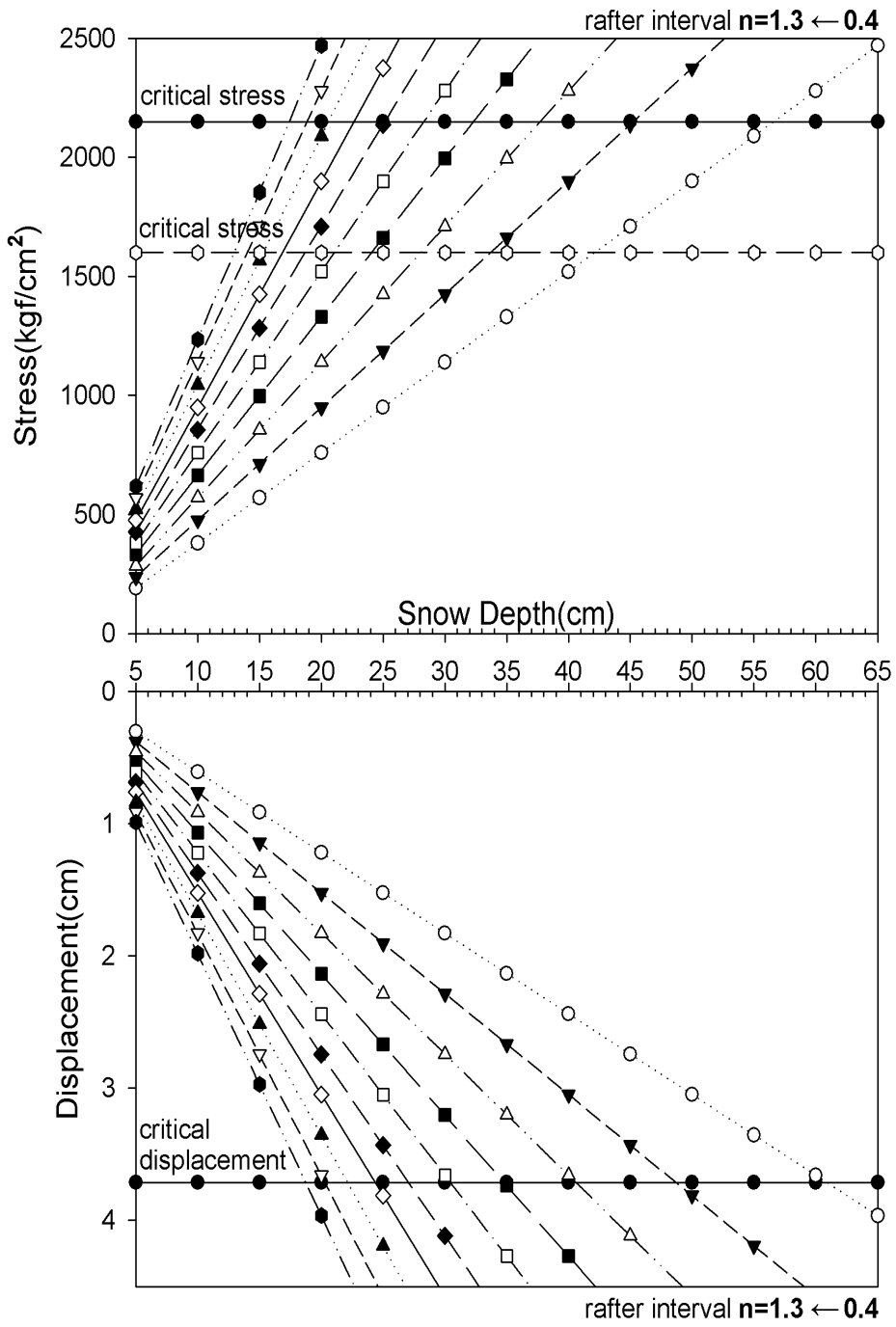


그림 11. 서까래 간격별 한계적설심(C형, Ø31.8×1.5t)

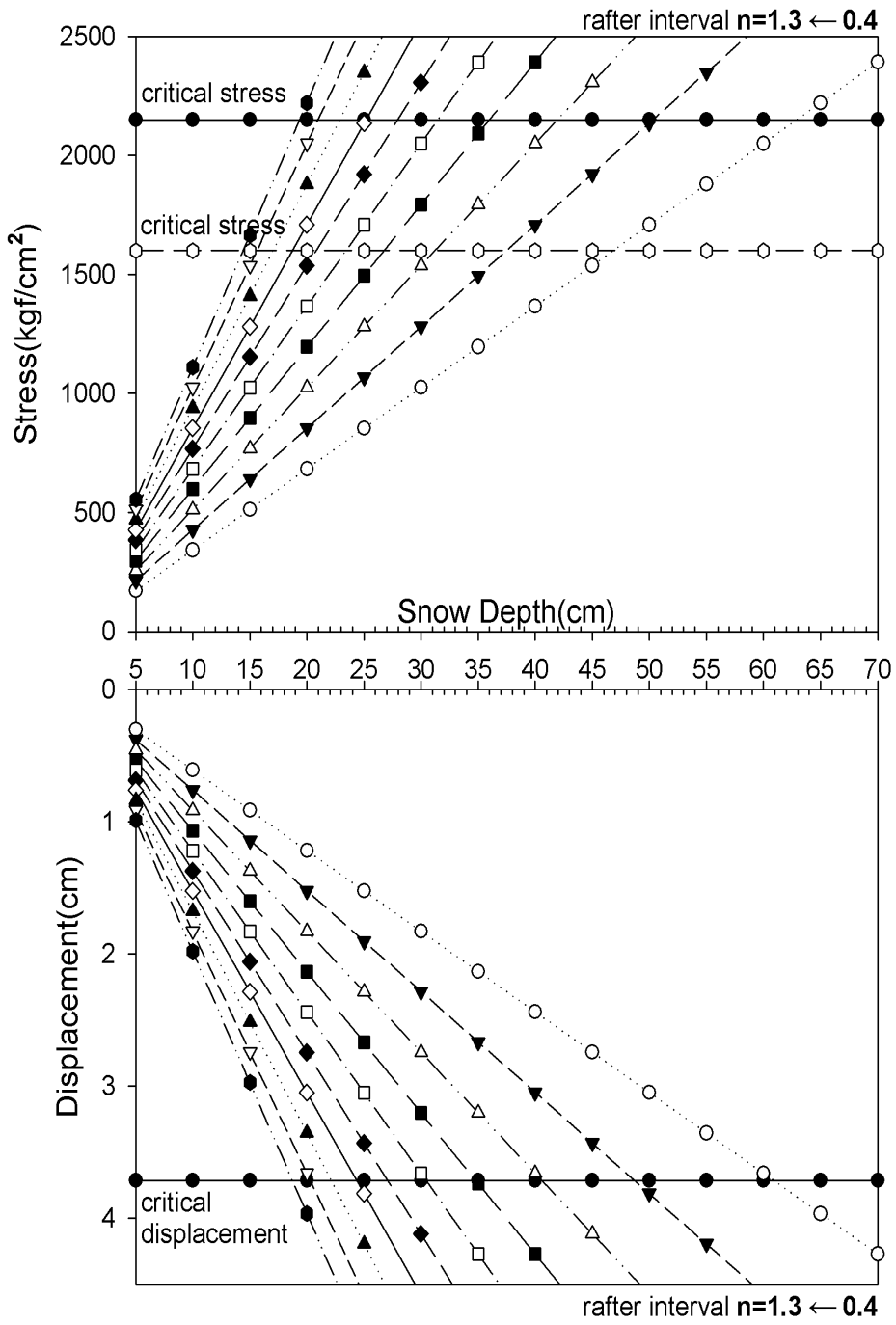


그림 12. 서까래 간격별 한계적설심(C형, Ø31.8×1.7t)

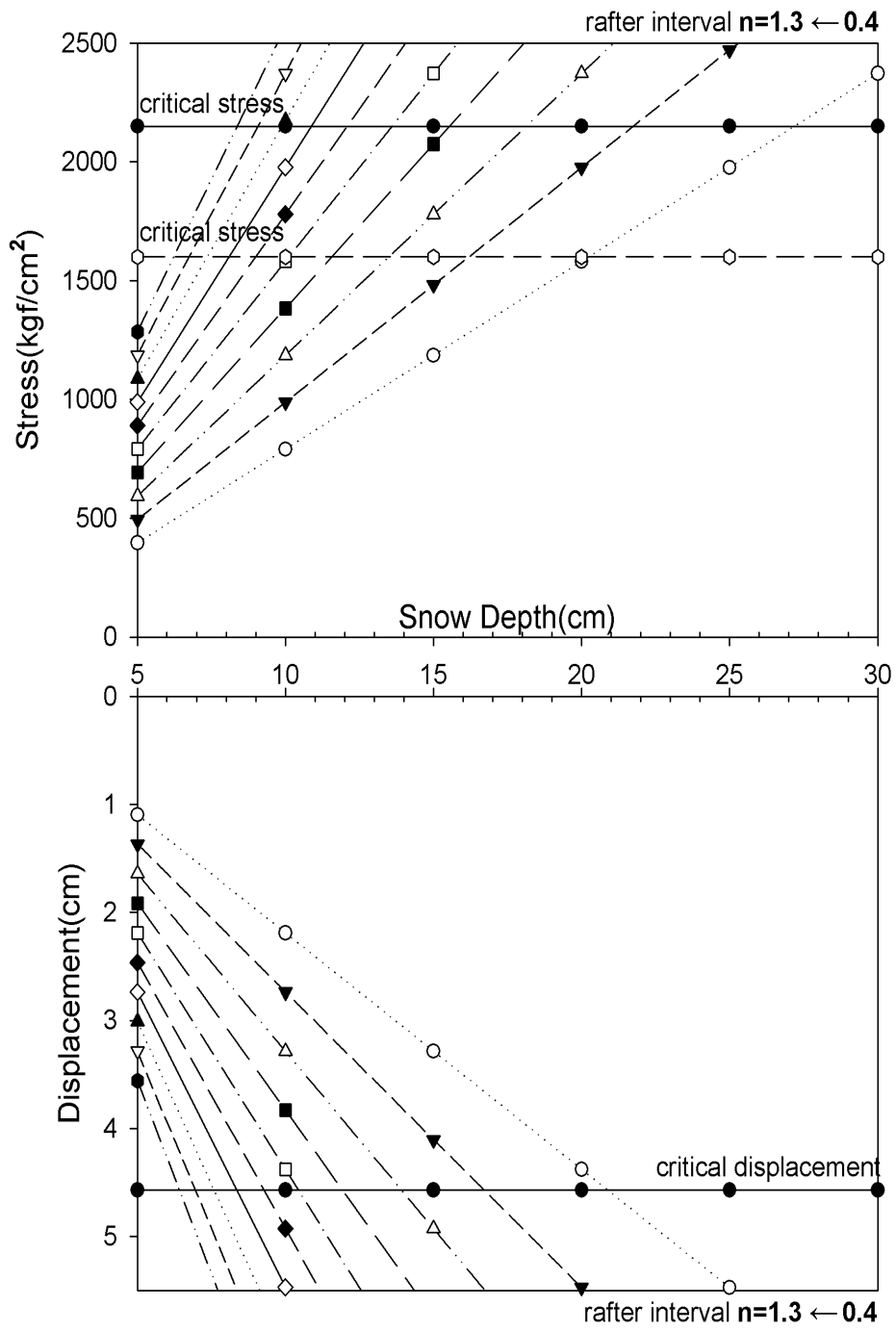


그림 13. 서까래 간격별 한계적설심(D형, Ø25.4×1.5t)

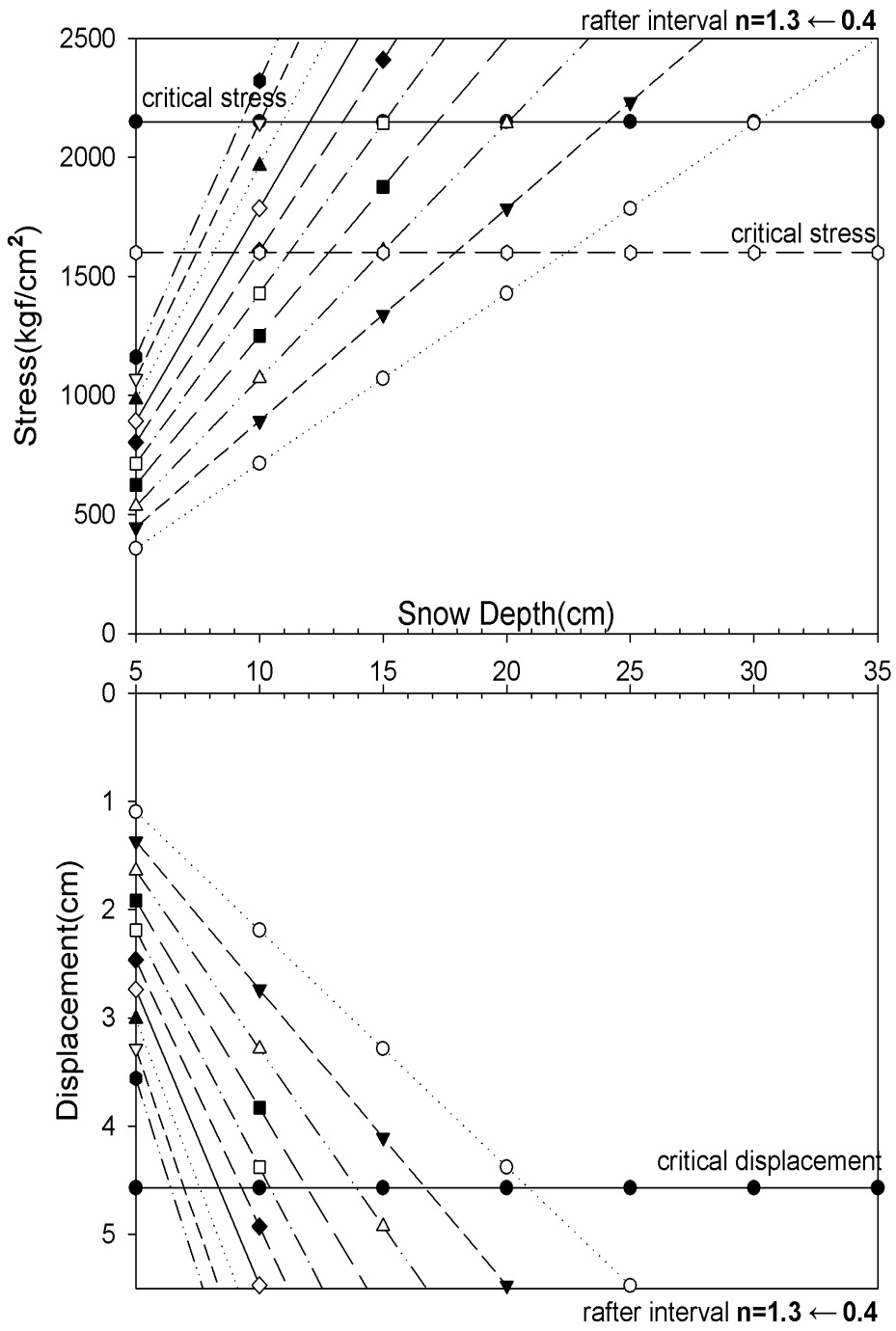


그림 14. 서까래 간격별 한계적설심(D형, Ø25.4×1.7t)

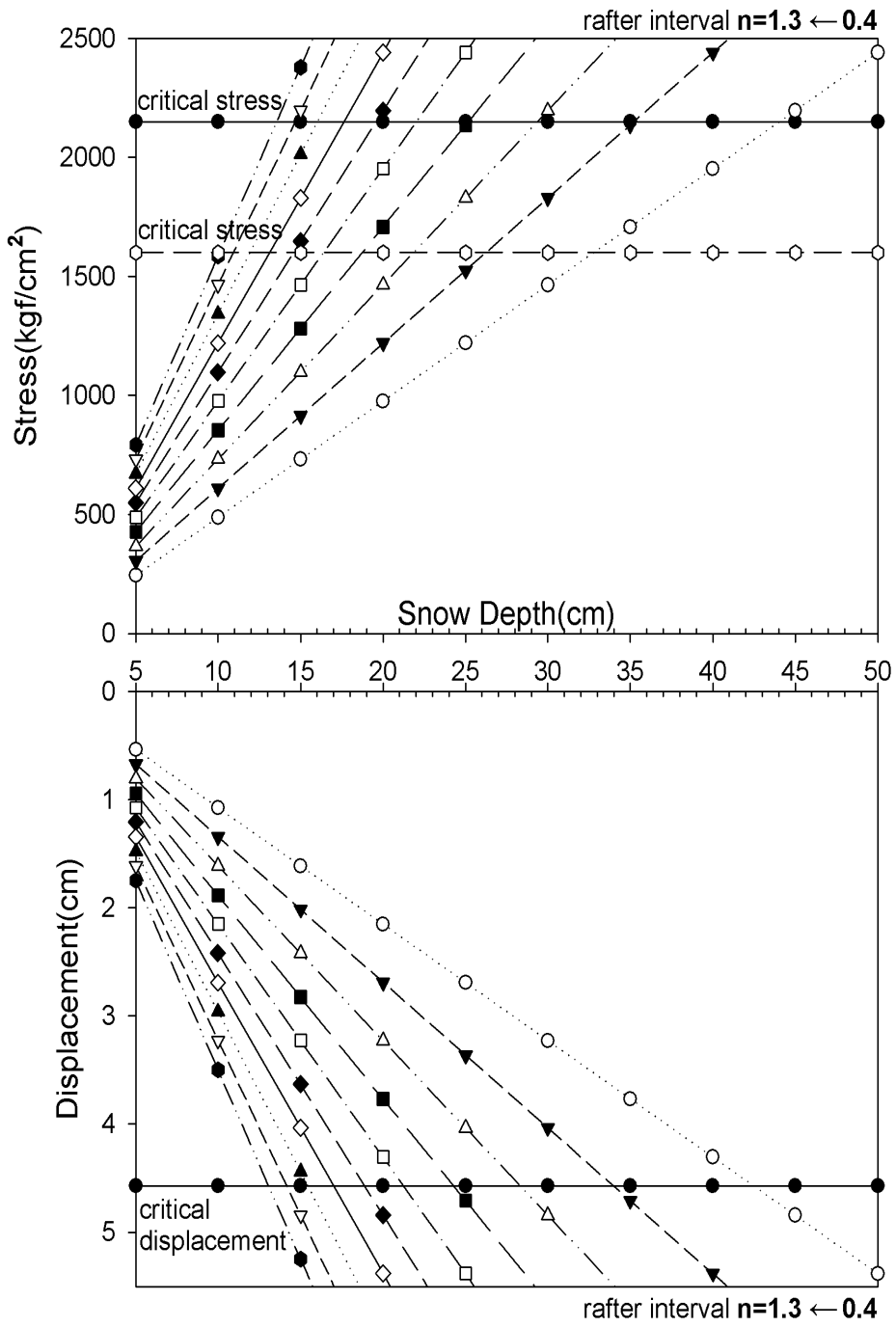


그림 15. 서까래 간격별 한계적설심(D형, Ø31.8×1.5t)

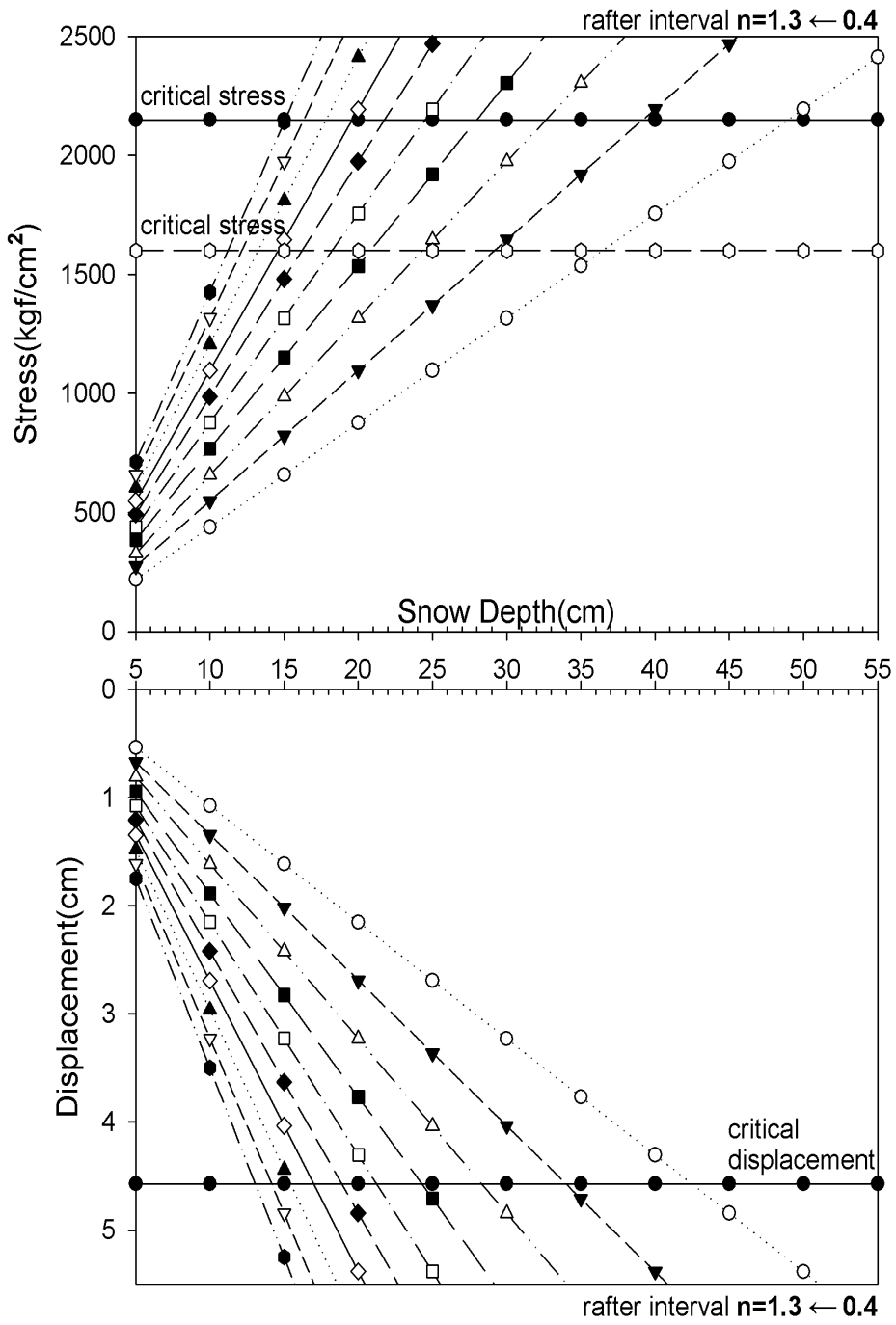


그림 16. 서까래 간격별 한계적설심(D형, Ø31.8×1.7t)

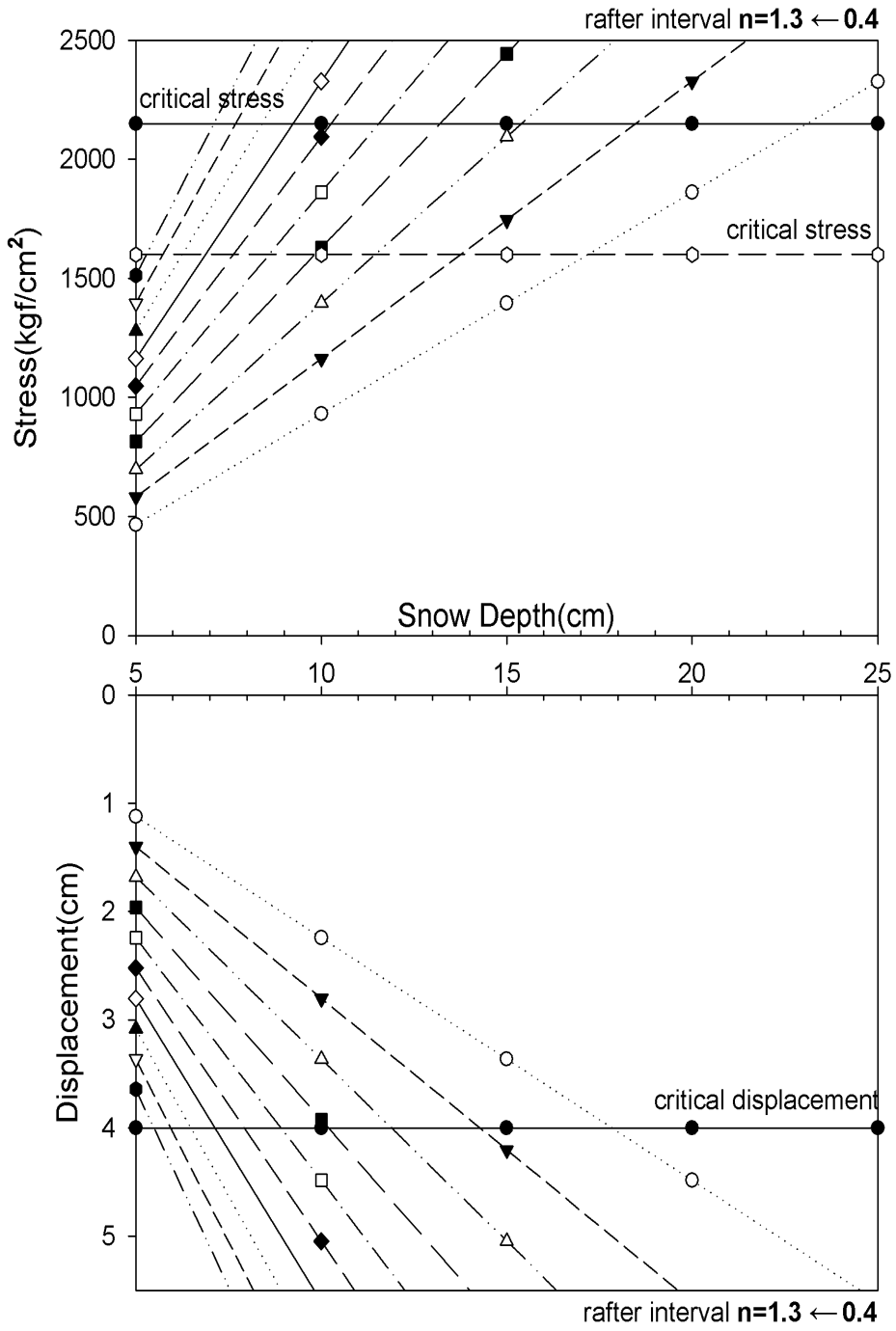


그림 17. 서까래 간격별 한계적설심(E형, Ø25.4×1.5t)

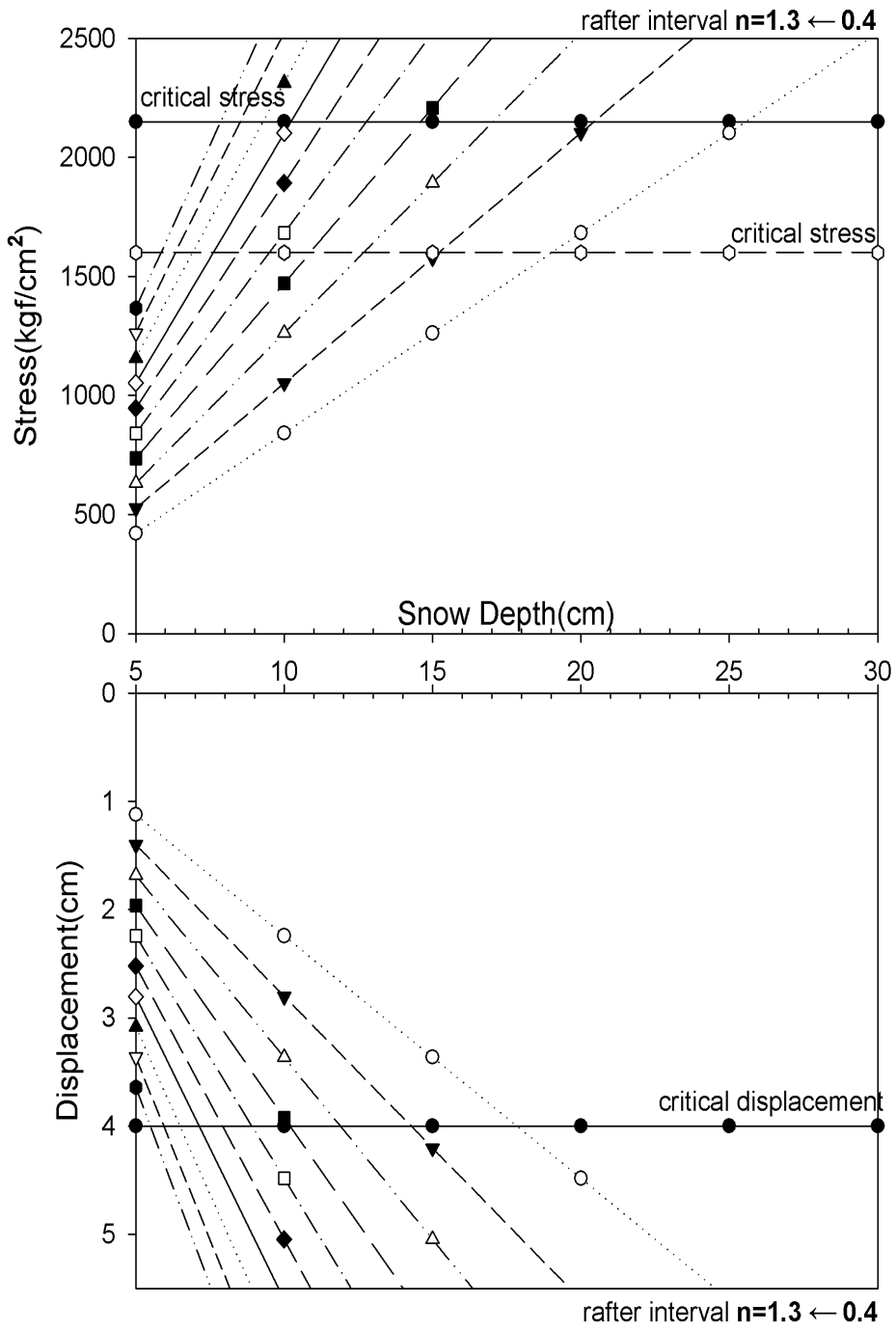


그림 18. 서까래 간격별 한계적설심(E형, Ø25.4×1.7t)

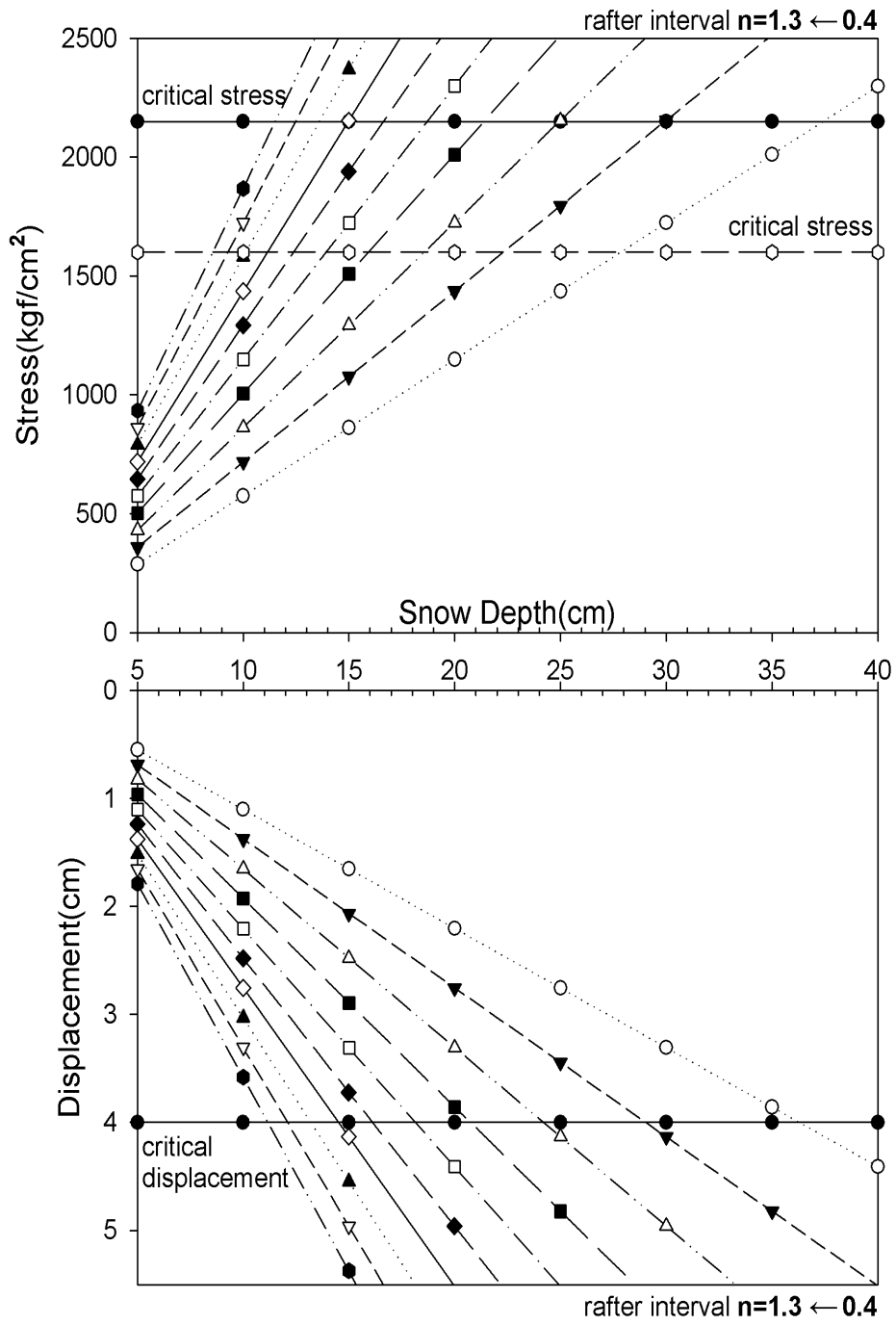


그림 19. 서까래 간격별 한계적설심(E형, Ø31.8×1.5t)

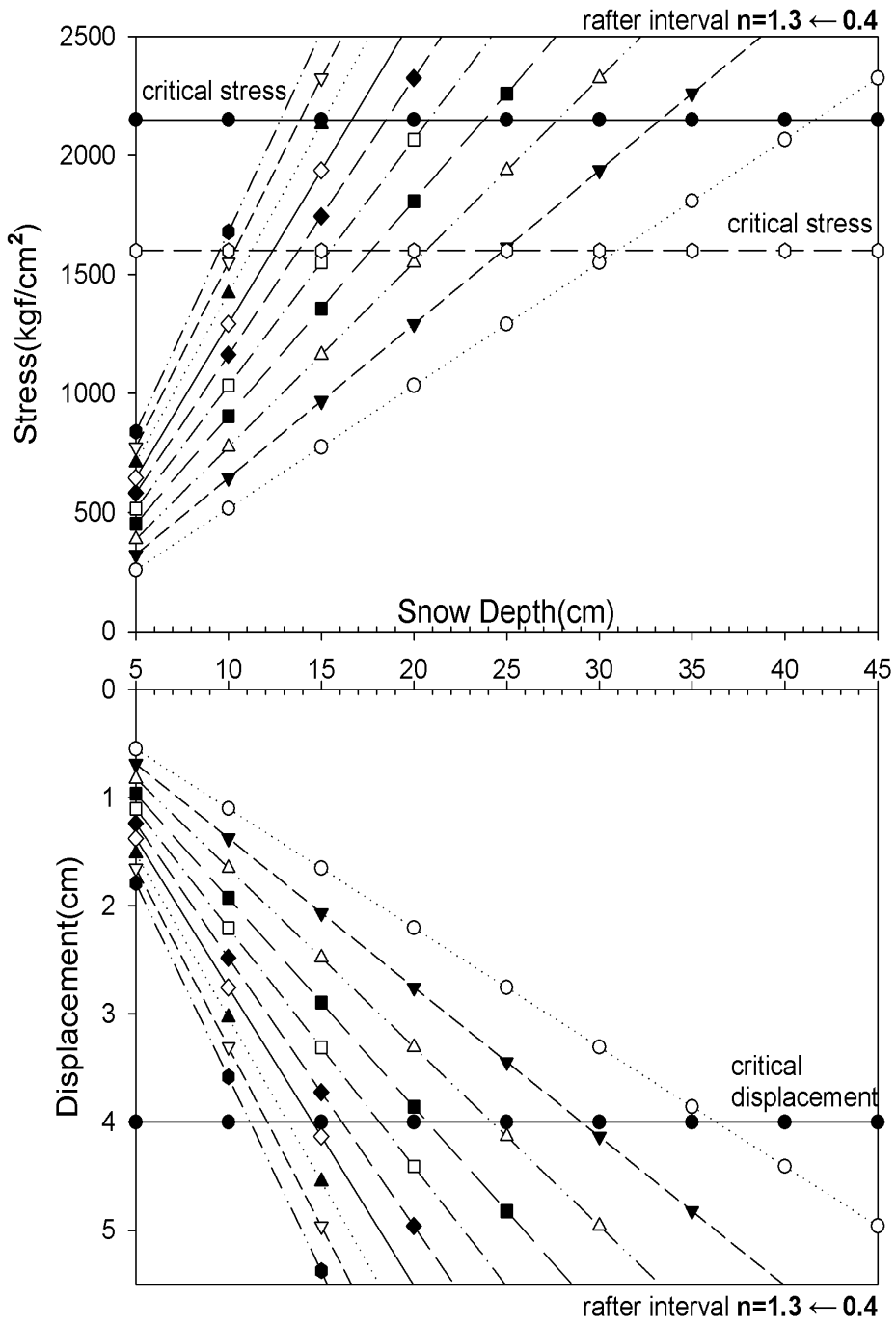


그림 20. 서까래 간격별 한계적설심(E형, Ø31.8×1.7t)

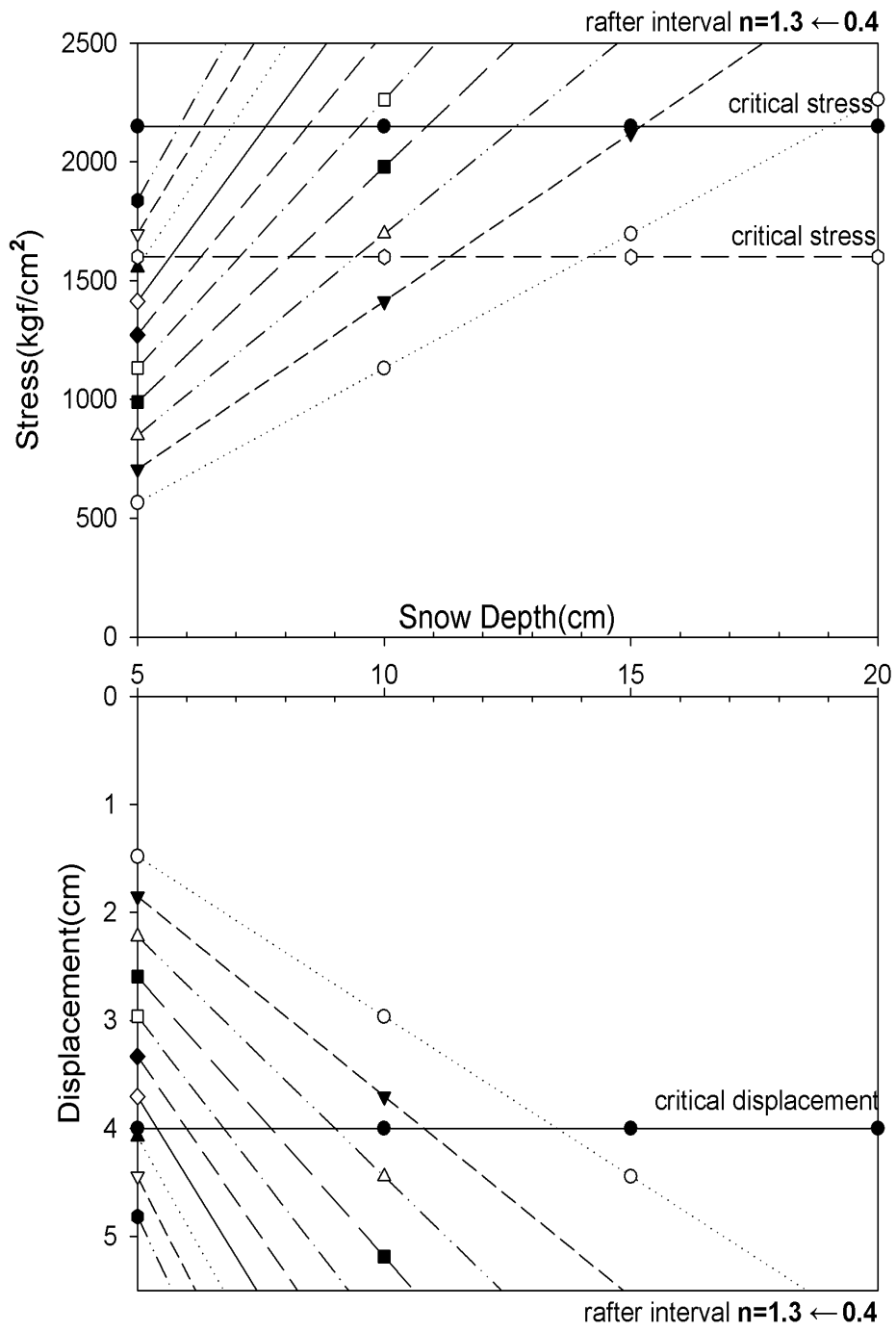


그림 21. 서까래 간격별 한계적설심(F형, Ø25.4×1.5t)

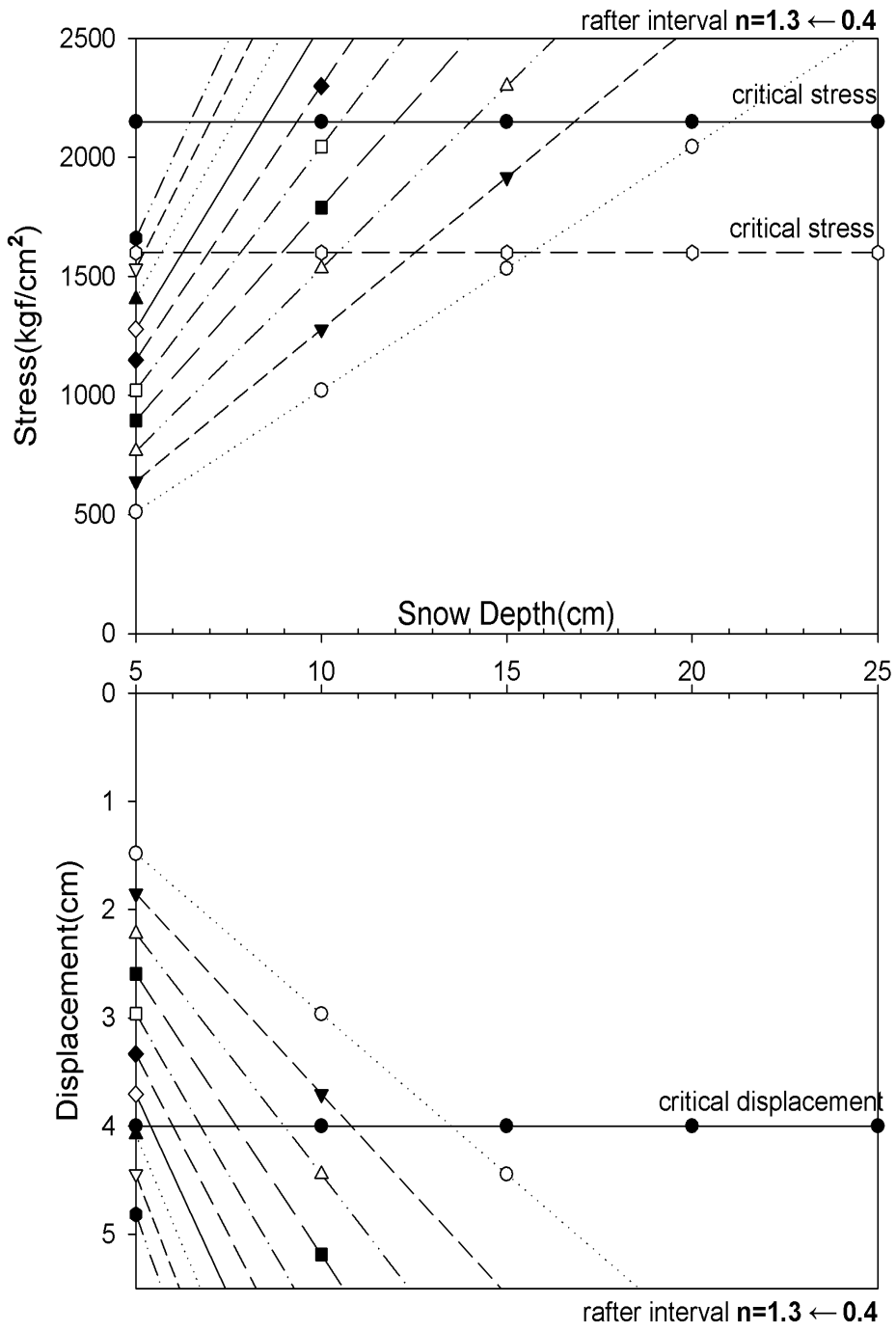


그림 22. 서까래 간격별 한계적설심(F형, Ø25.4×1.7t)

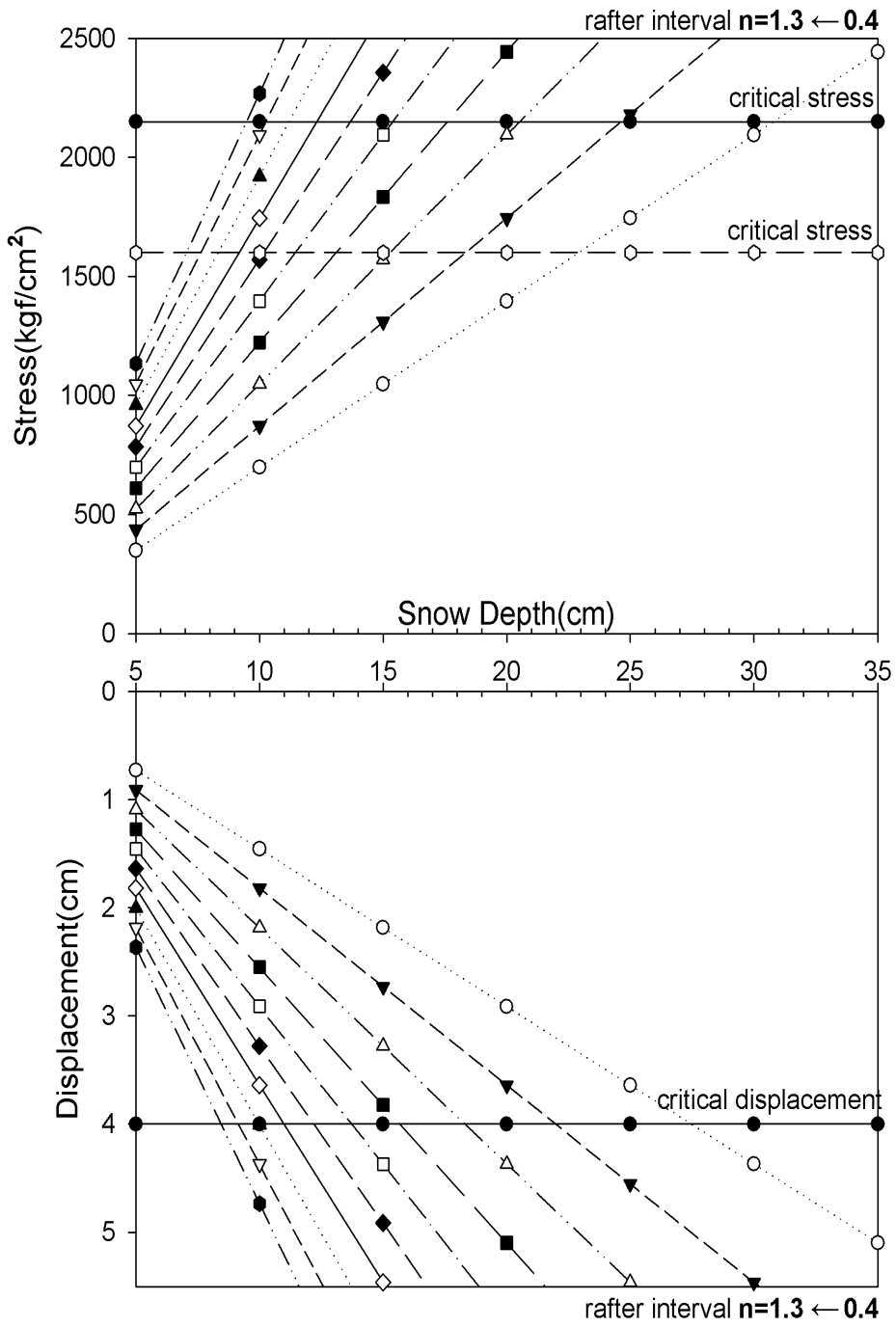


그림 23. 서까래 간격별 한계적설심(F형, Ø31.8×1.5t)

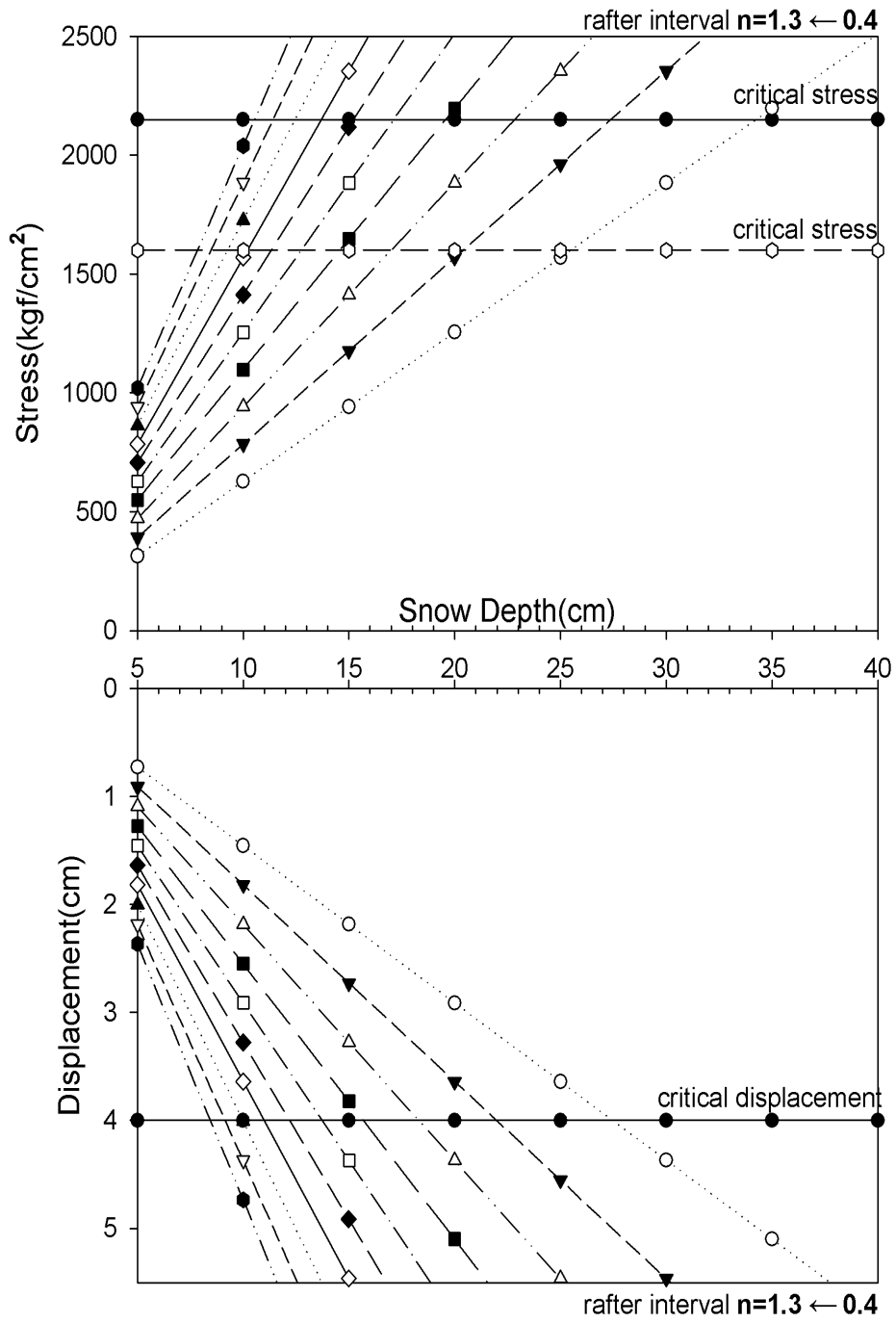


그림 24. 서까래 간격별 한계적설심(F형, Ø31.8×1.7t)

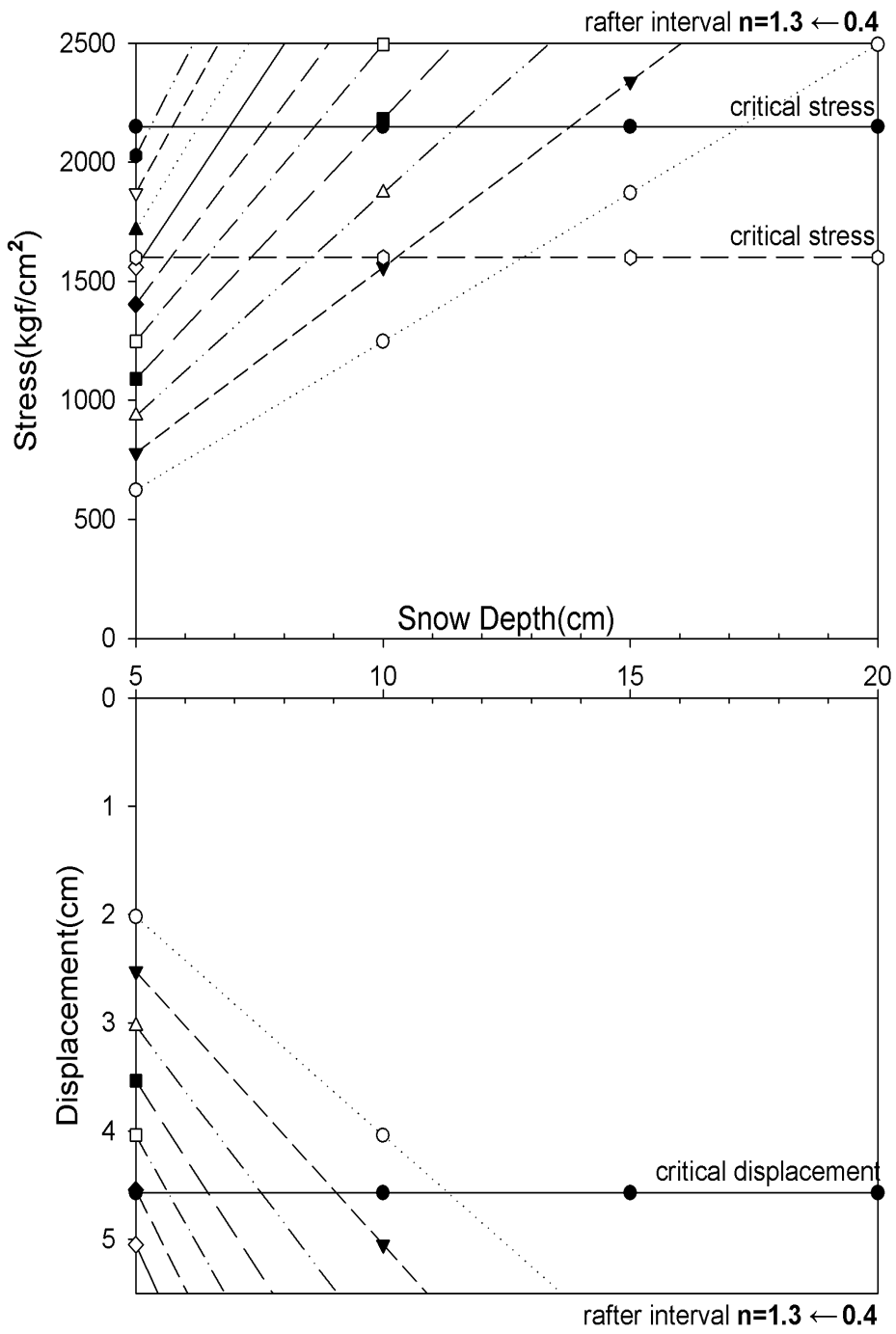


그림 25. 서까래 간격별 한계적설심(G형, Ø25.4×1.5t)

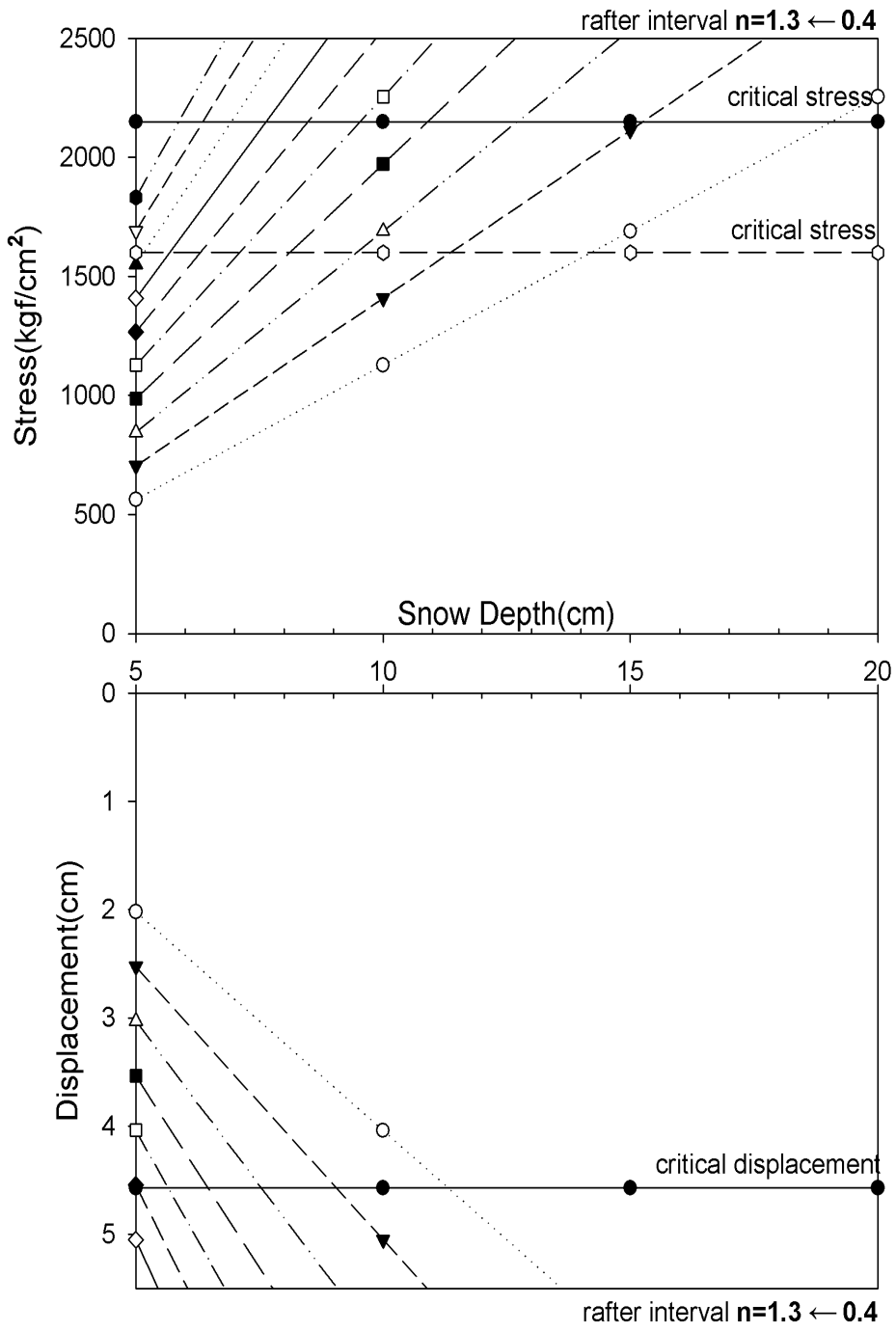


그림 26. 서까래 간격별 한계적설심(G형, Ø25.4×1.7t)

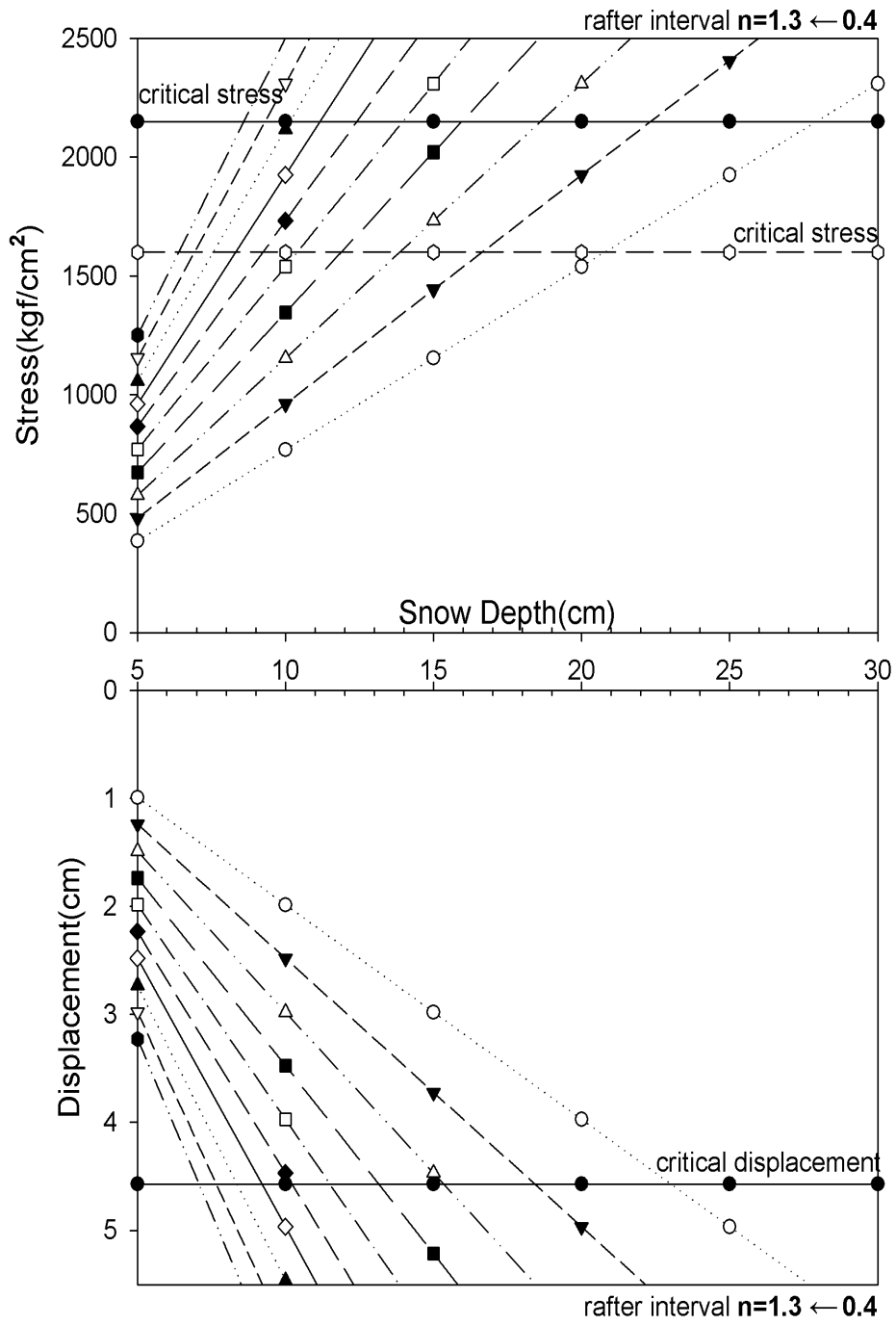


그림 27. 서까래 간격별 한계적설심(G형, Ø31.8×1.5t)

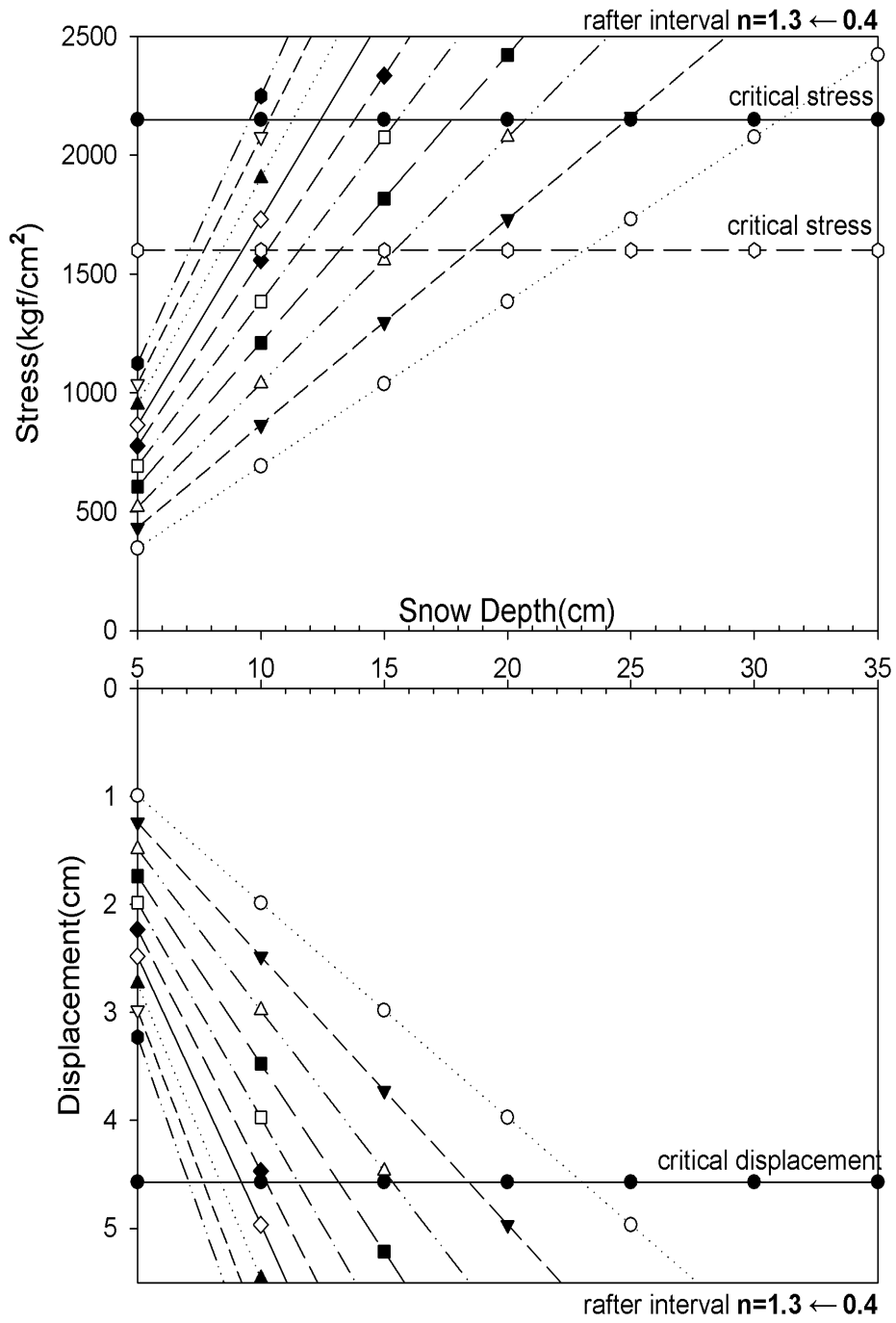


그림 28. 서까래 간격별 한계적설심(G형, Ø31.8×1.7t)

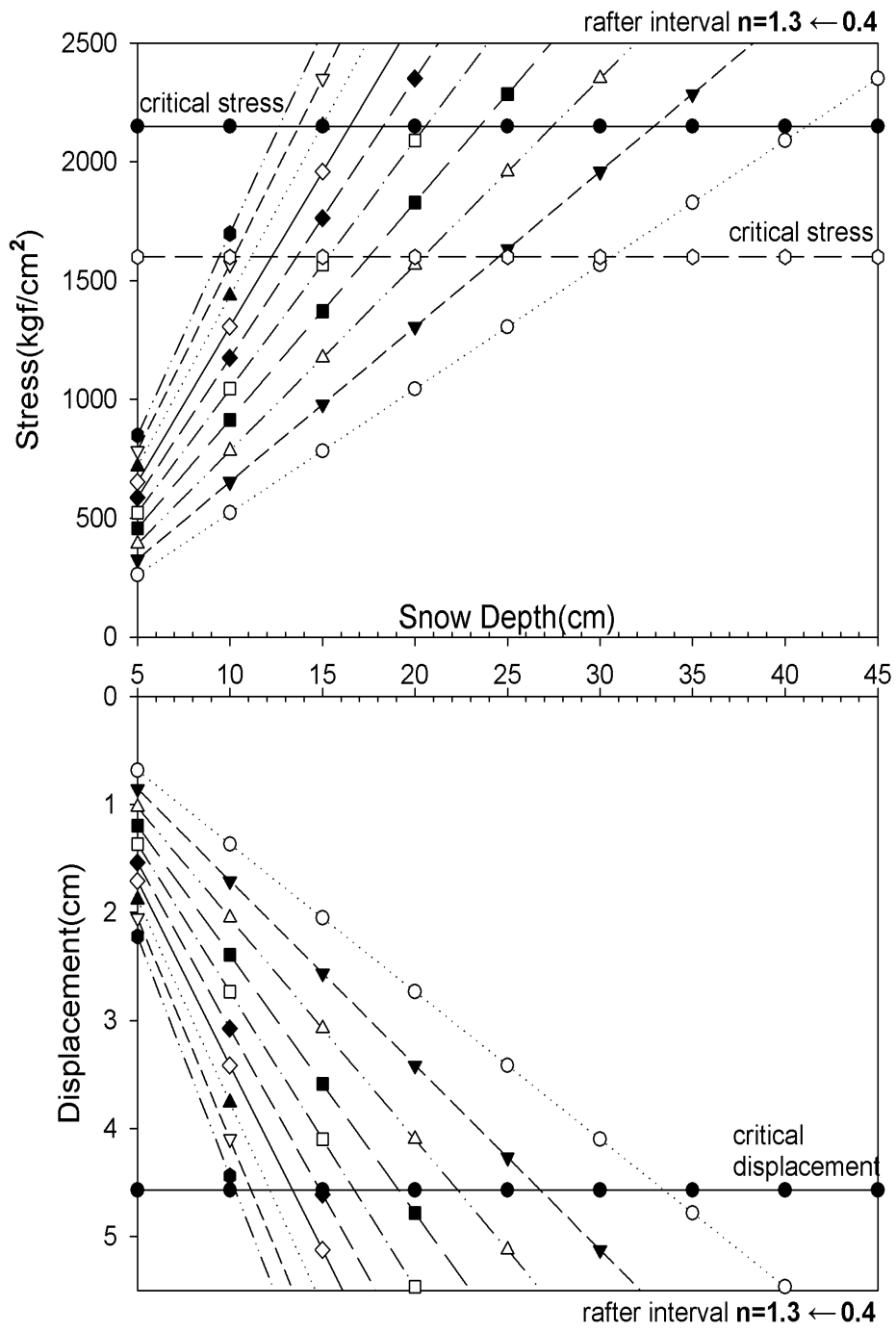


그림 29. 서까래 간격별 한계적설심(H형, Ø25.4×1.5t)

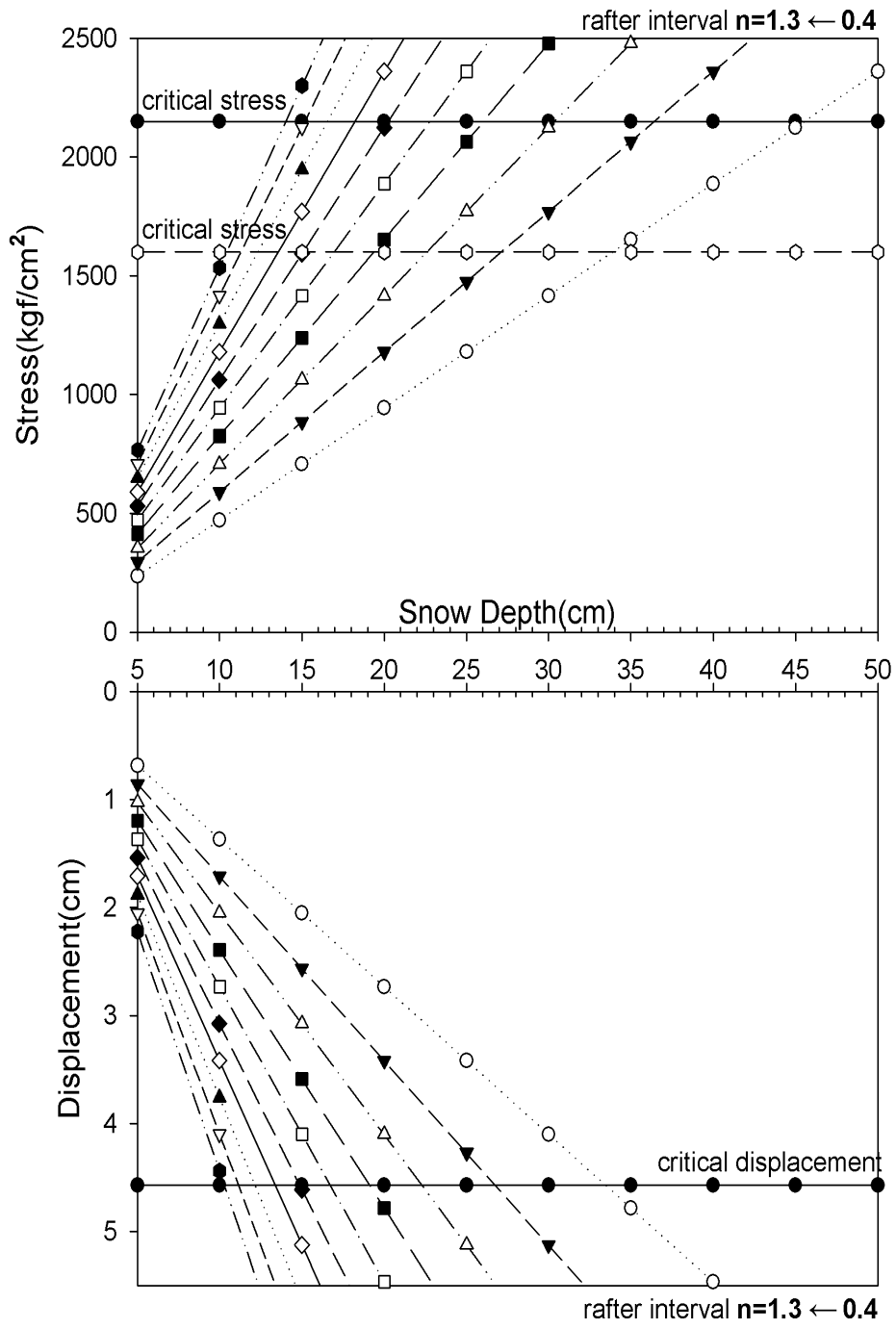


그림 30. 서까래 간격별 한계적설심(H형, Ø25.4×1.7t)

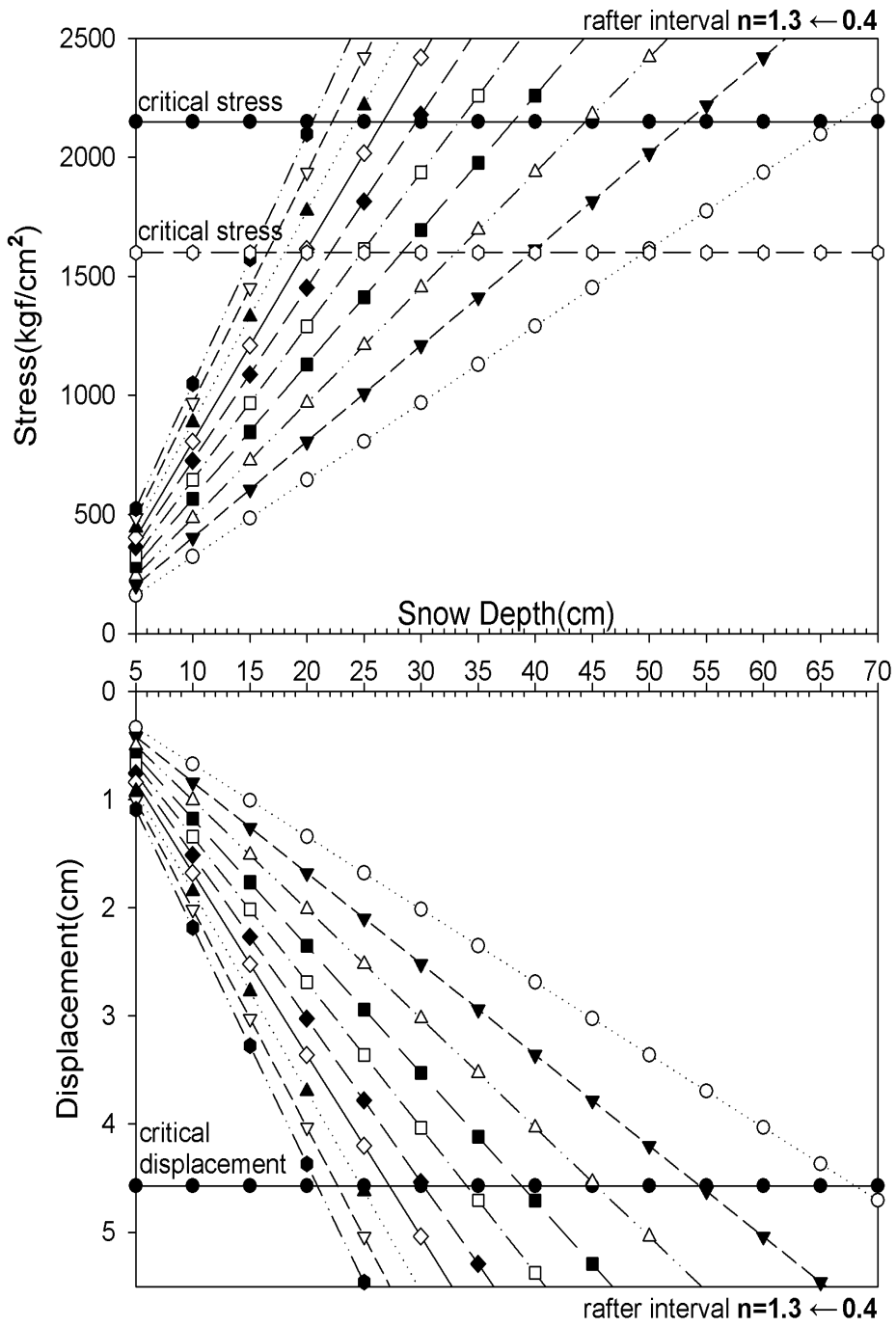


그림 31. 서까래 간격별 한계적설심(H형, Ø31.8×1.5t)

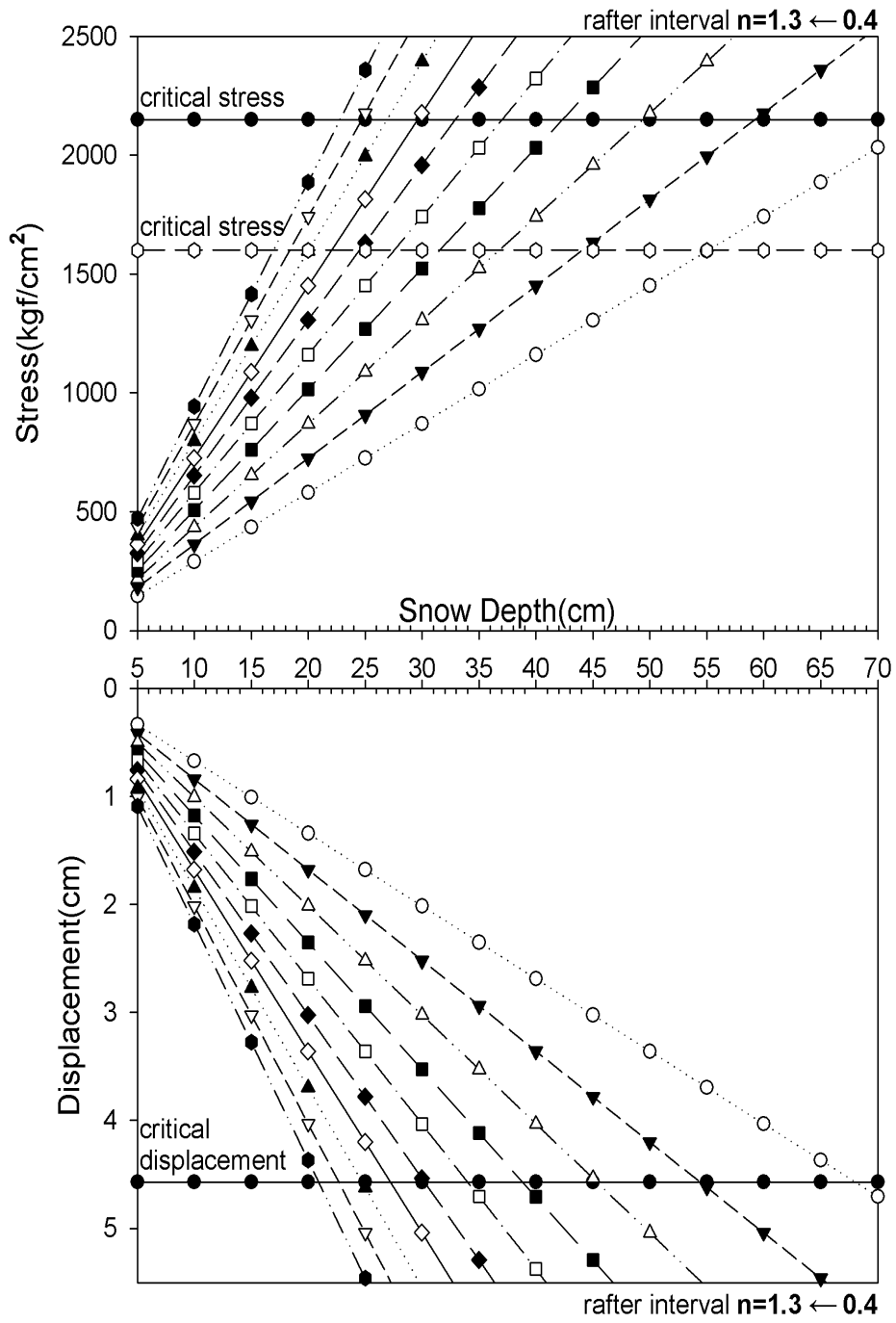


그림 32. 서까래 간격별 한계적설심(H형, Ø31.8×1.7t)

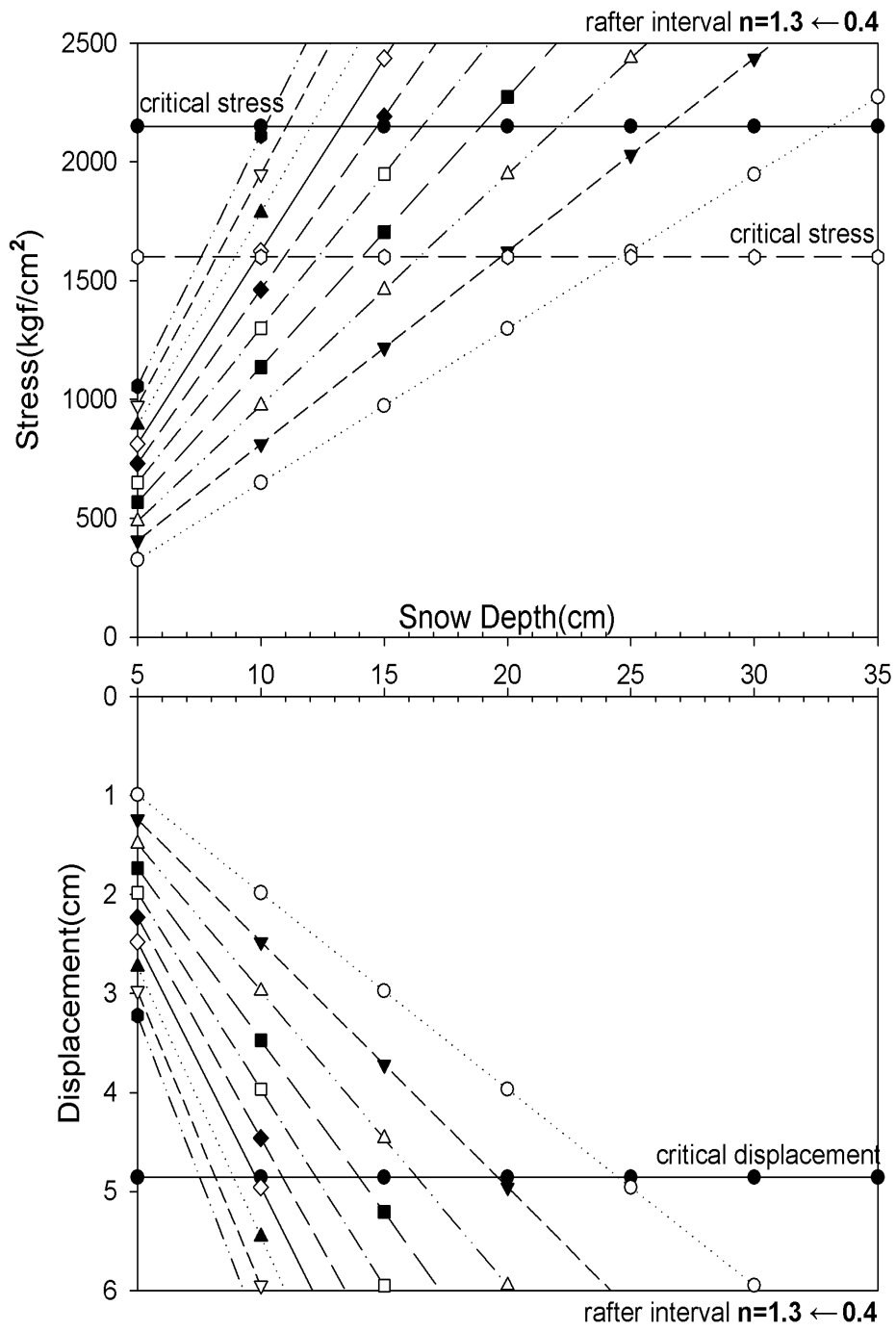


그림 33. 서까래 간격별 한계적설심(I형, Ø25.4×1.5t)

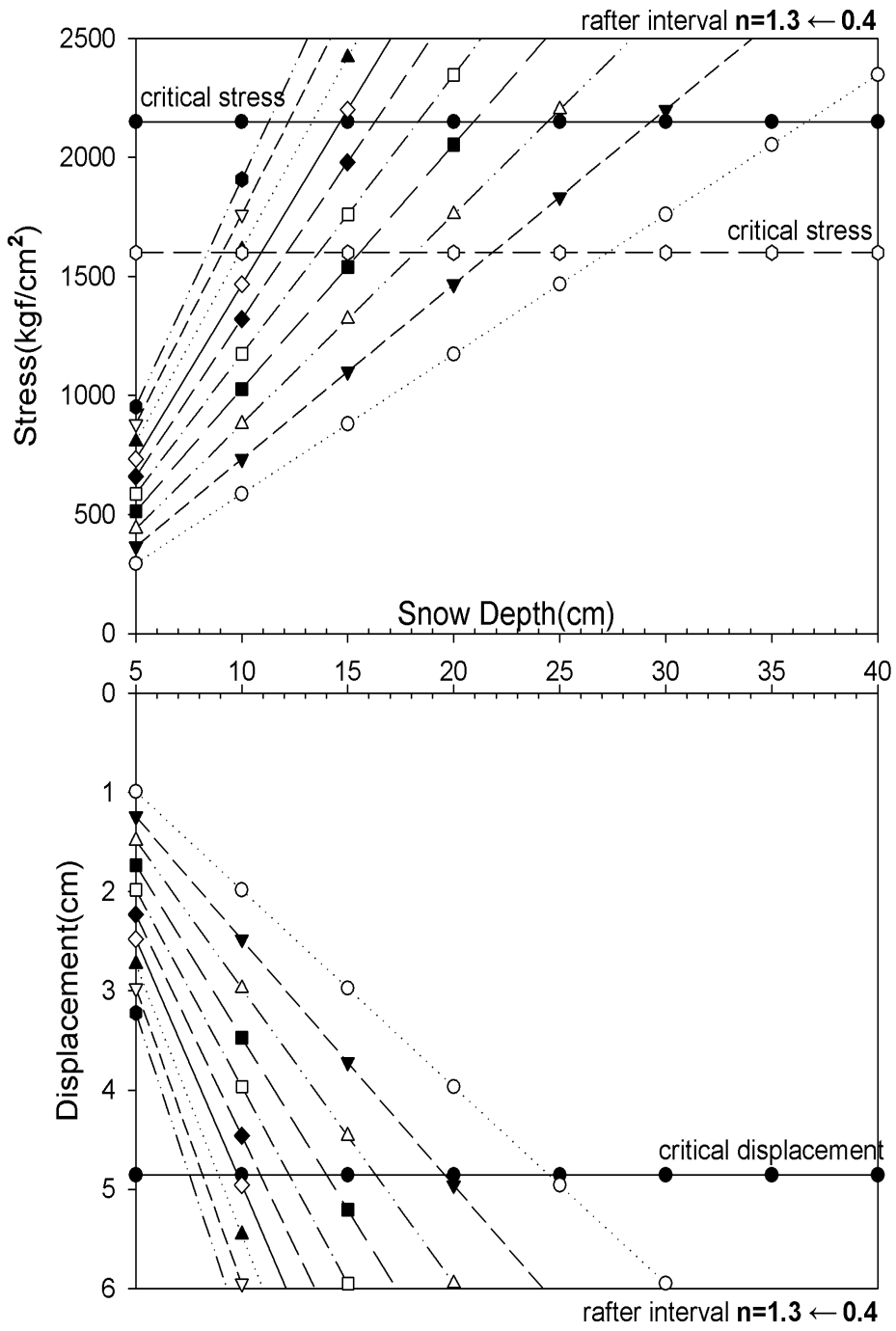


그림 34. 서까래 간격별 한계적설심(I형, Ø25.4×1.7t)

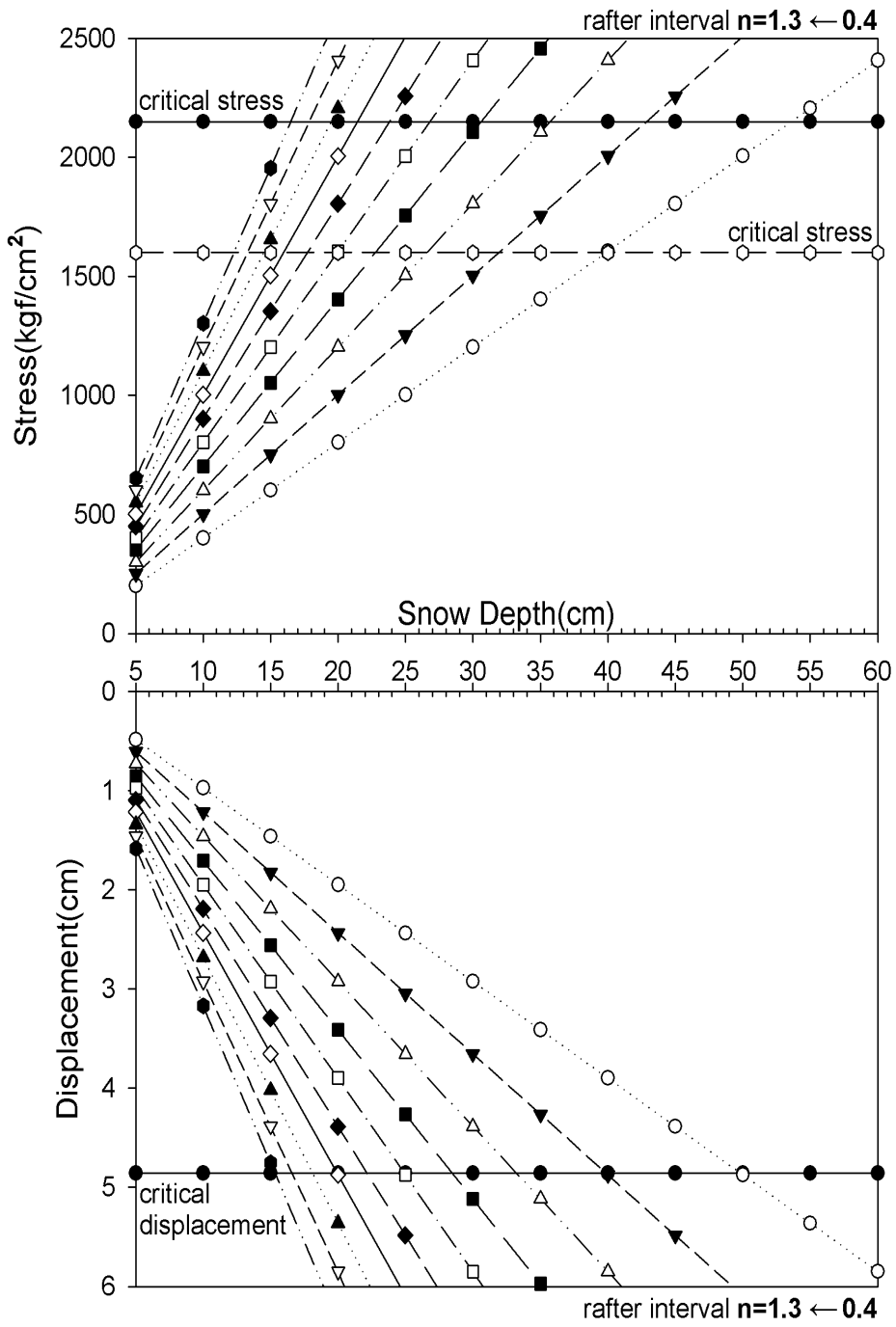


그림 35. 서까래 간격별 한계적설심(I형, Ø31.8×1.5t)

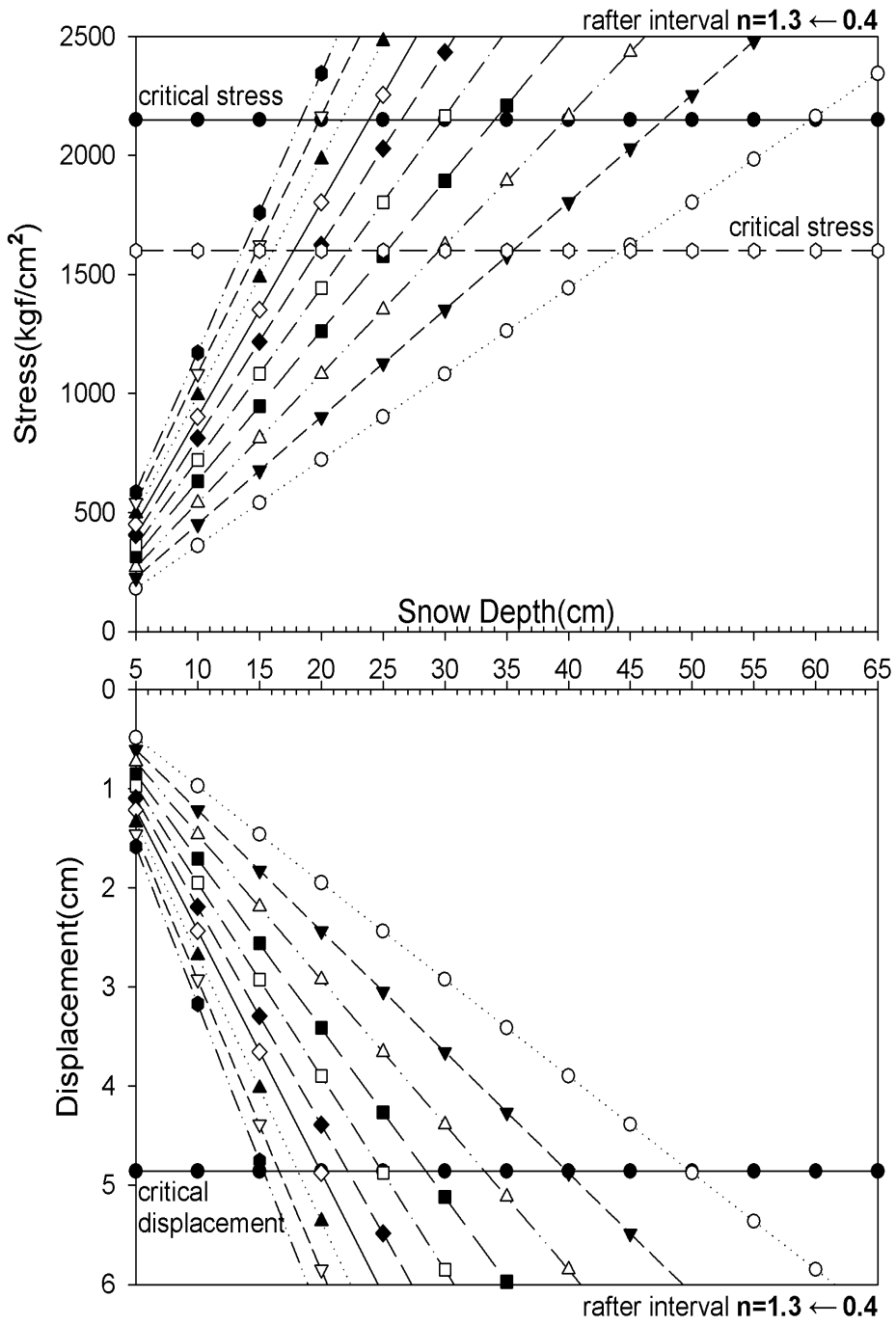


그림 36. 서까래 간격별 한계적설심(I형, Ø31.8×1.7t)

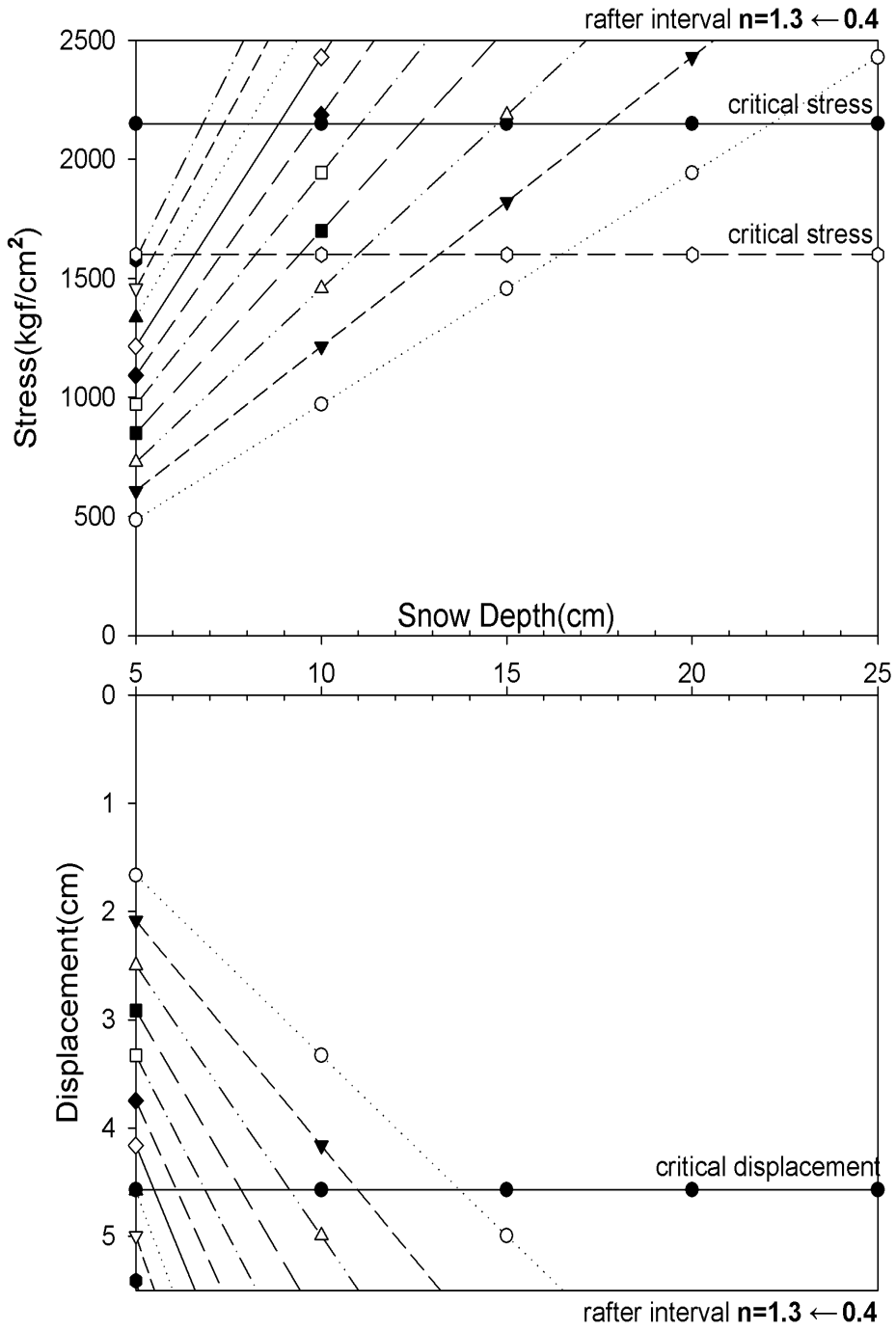


그림 37. 서까래 간격별 한계적설심(J형, Ø25.4×1.5t)

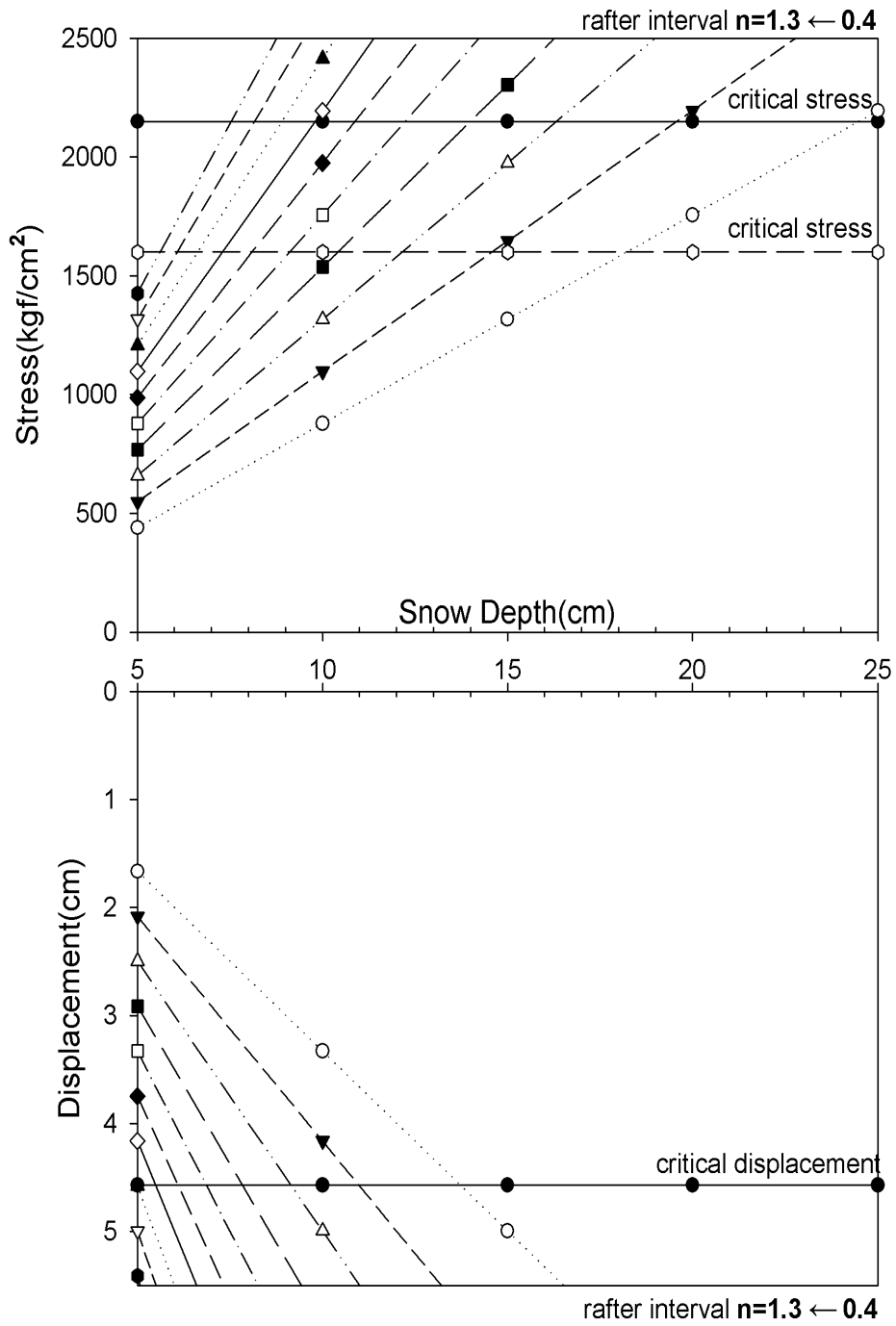


그림 38. 서까래 간격별 한계적설심(J형, Ø25.4×1.7t)

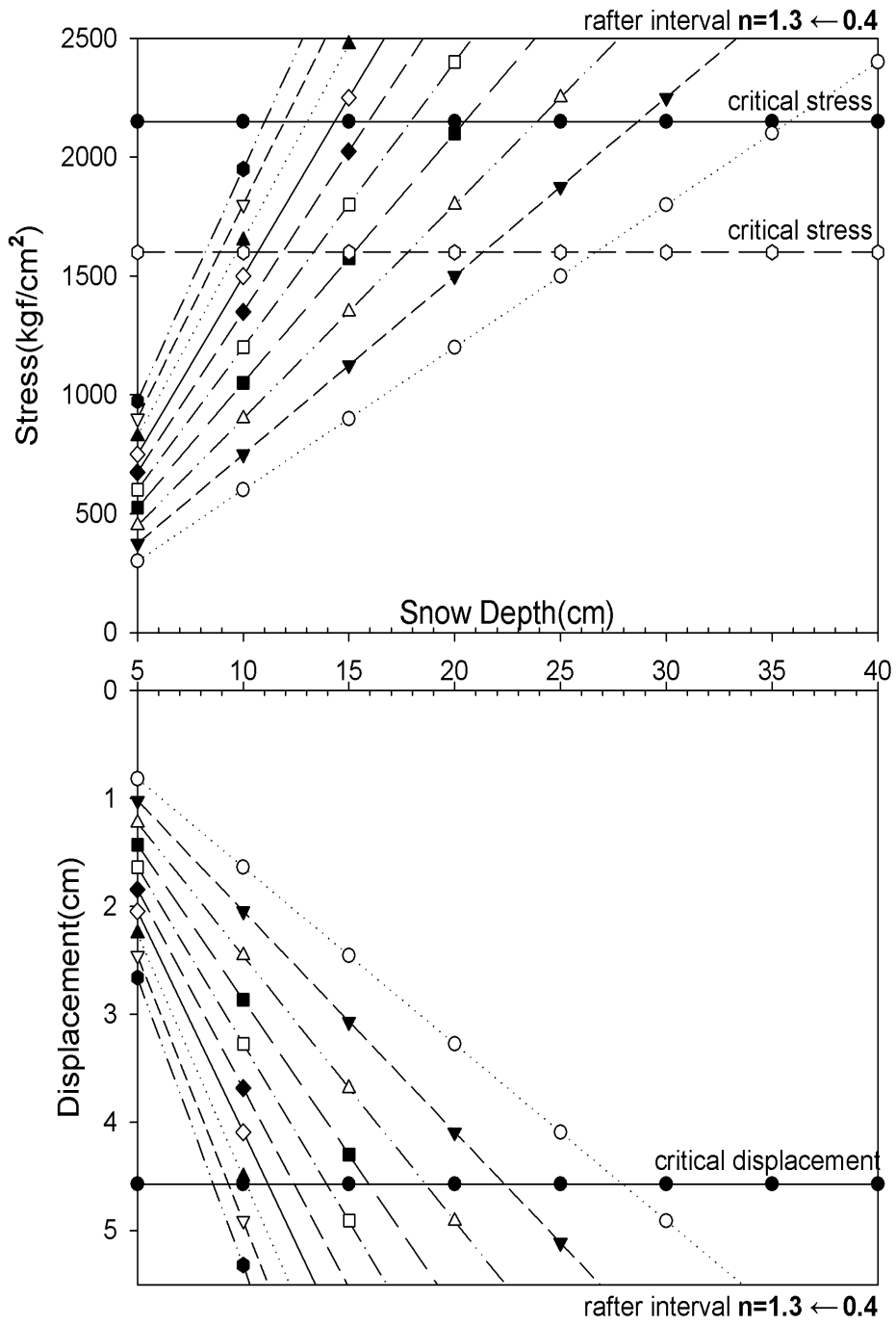


그림 39. 서까래 간격별 한계적설심(J형, Ø31.8×1.5t)

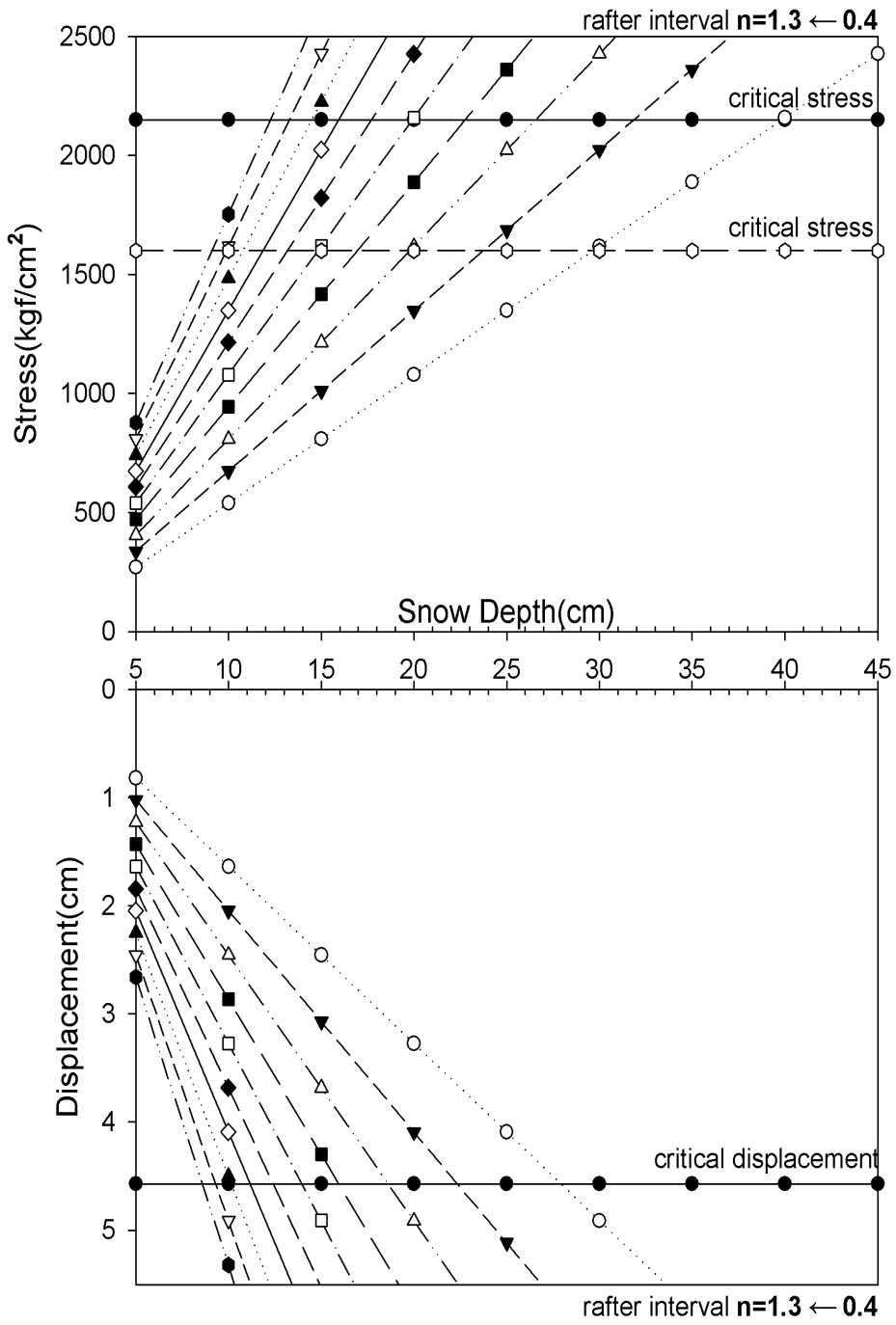


그림 40. 서까래 간격별 한계적설심(J형, Ø31.8×1.7t)

온실모델별 서까래 간격별 한계풍속
(평균지붕높이 풍속 고려)

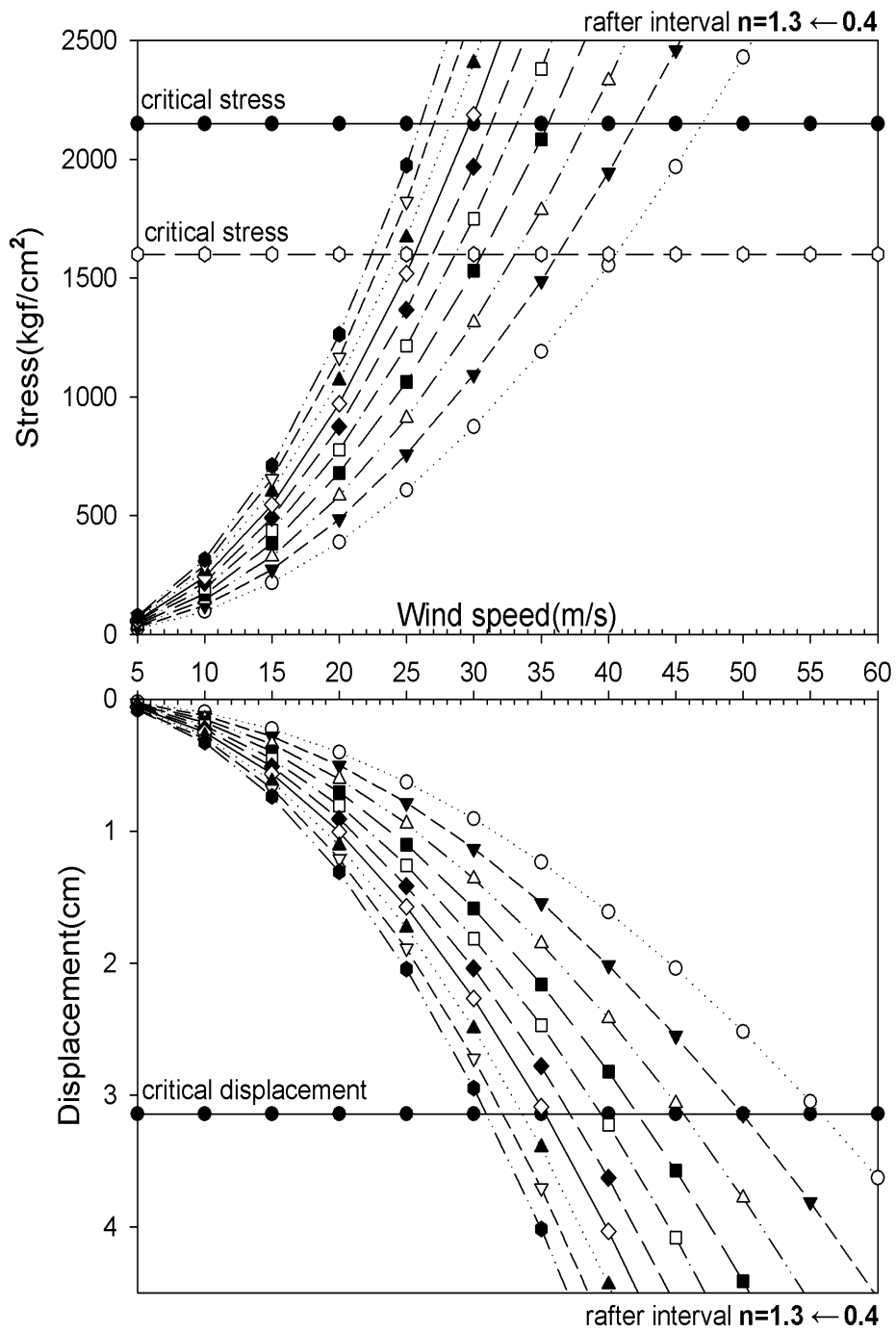


그림 41. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø25.4×1.5t)

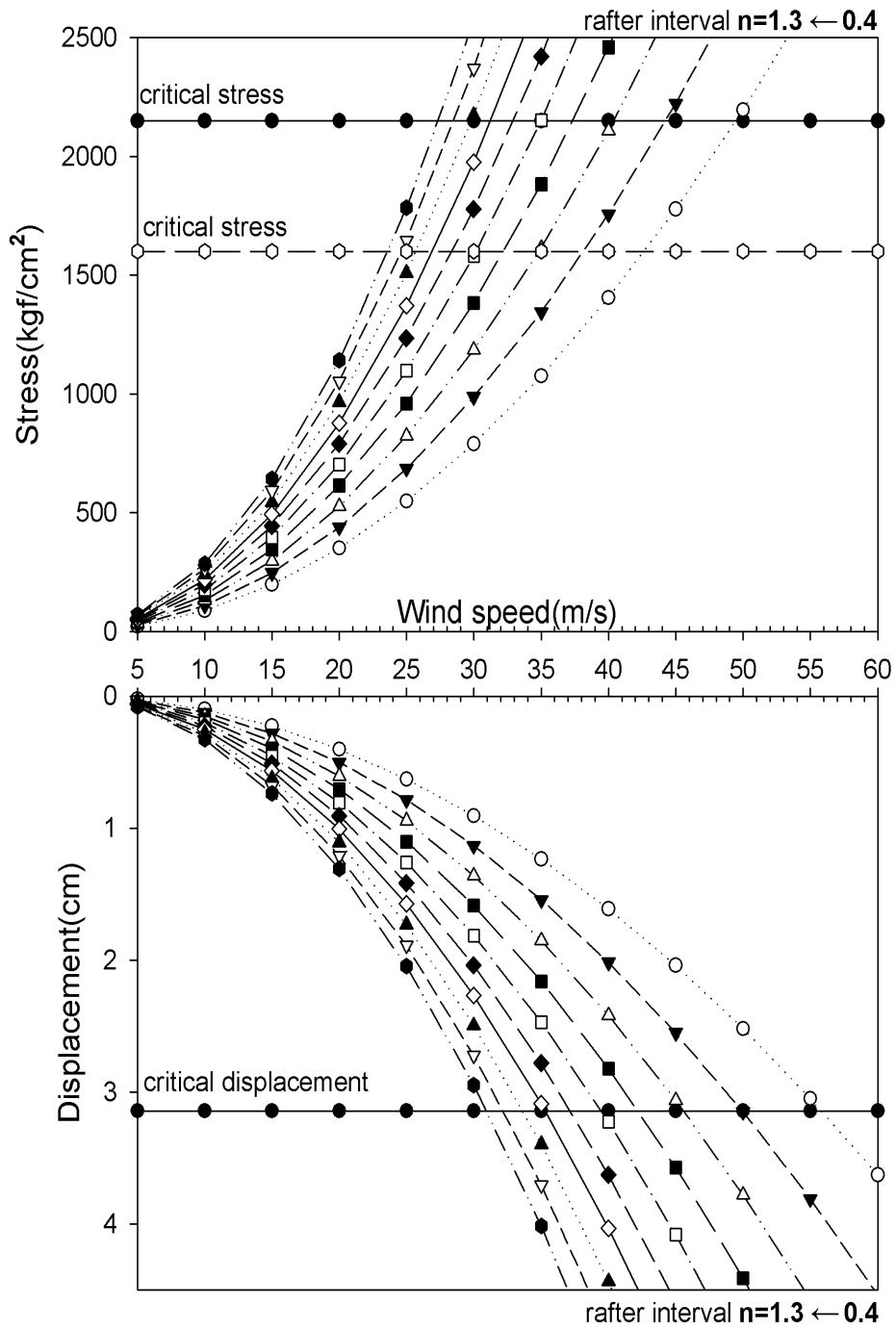


그림 42. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø25.4×1.7t)

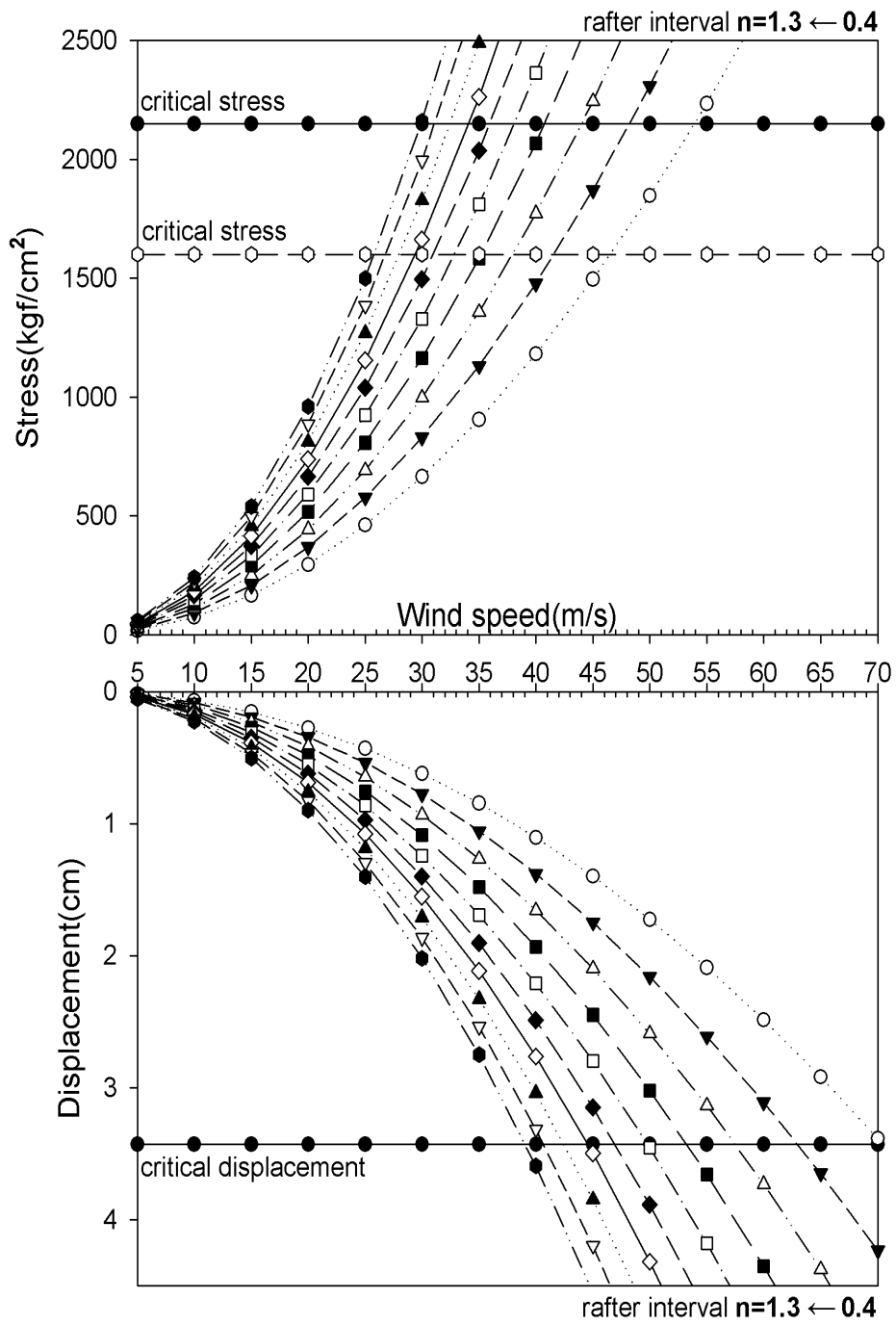


그림 43. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø31.8×1.5t)

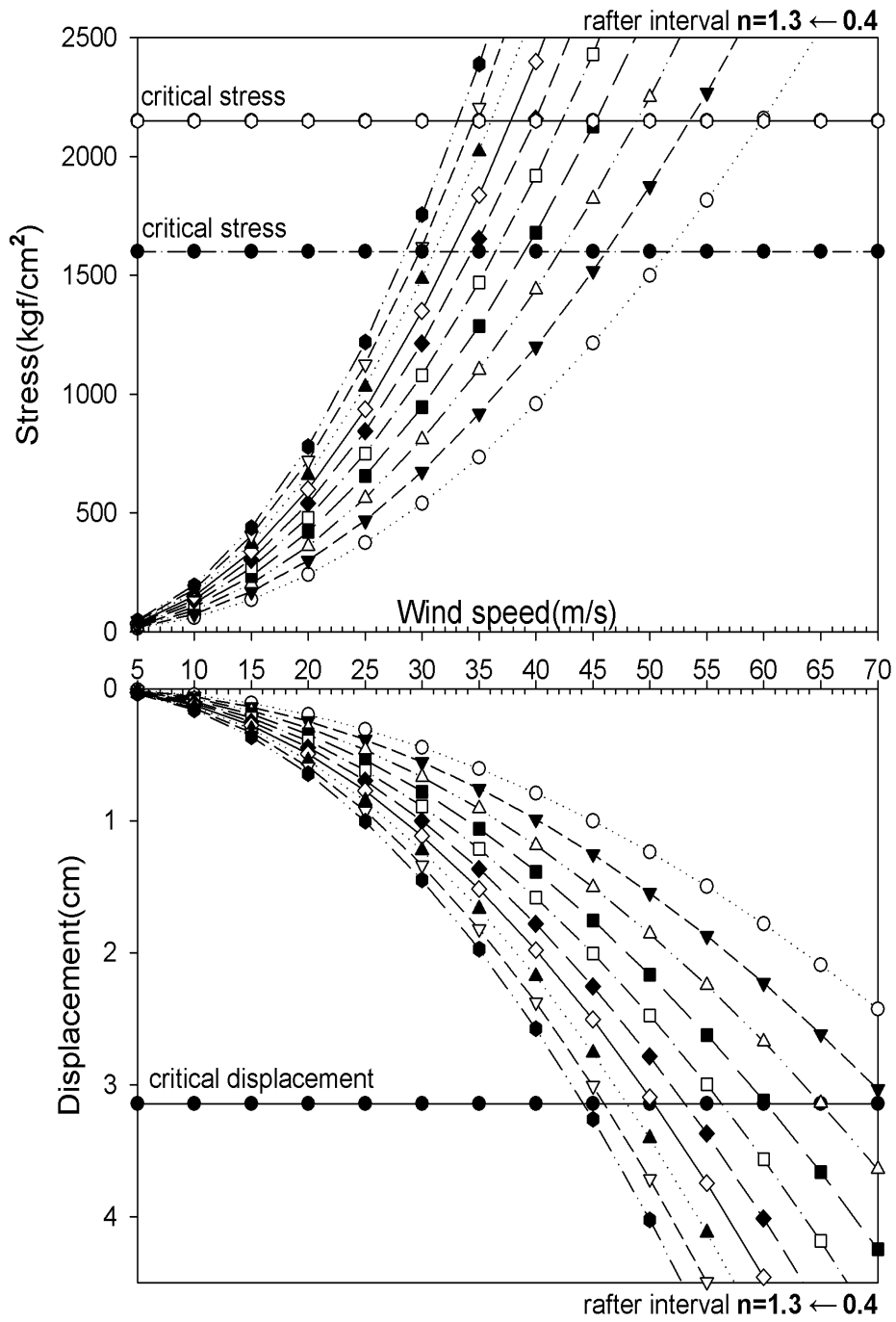


그림 44. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø31.8×1.7t)

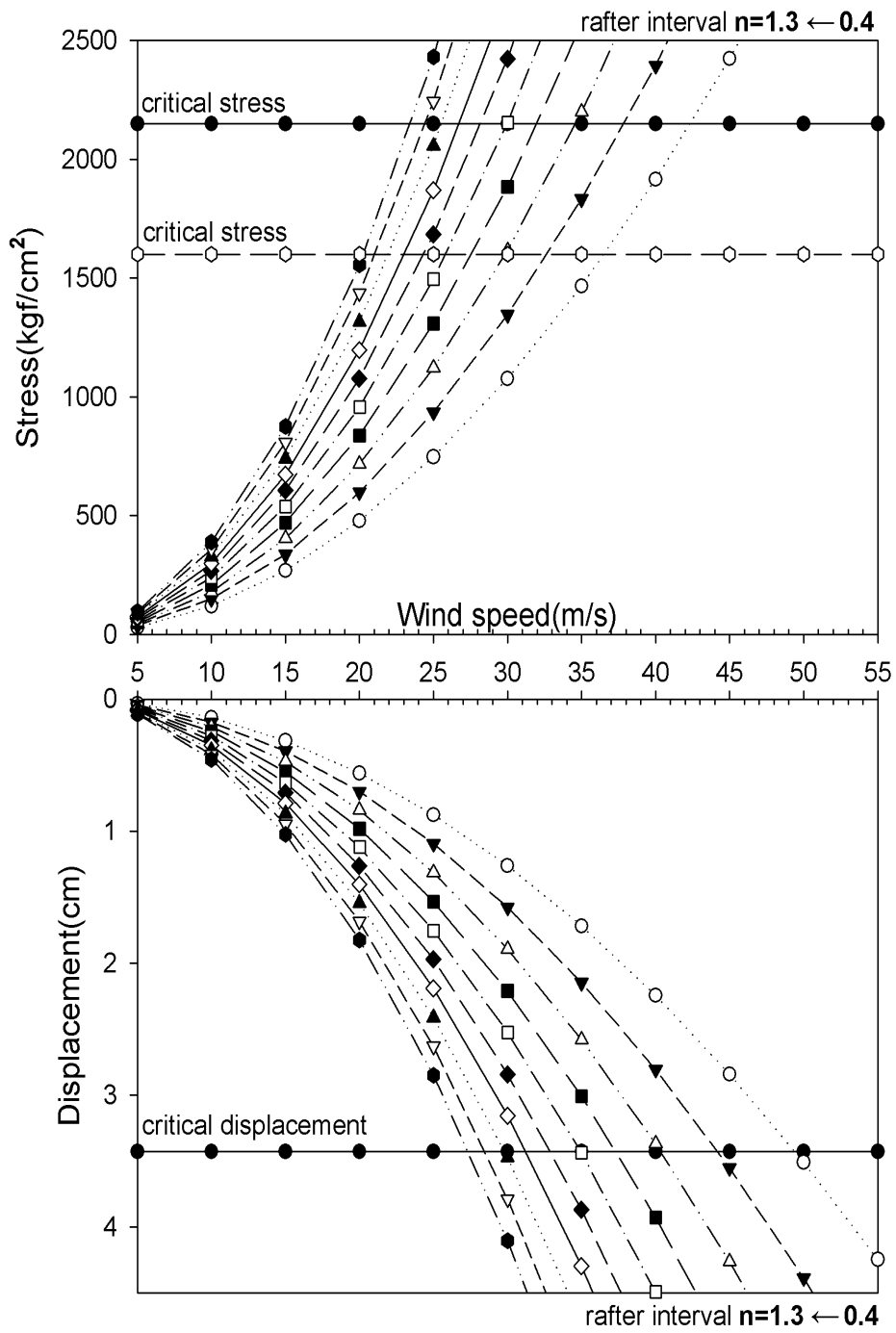


그림 45. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø25.4×1.5t)

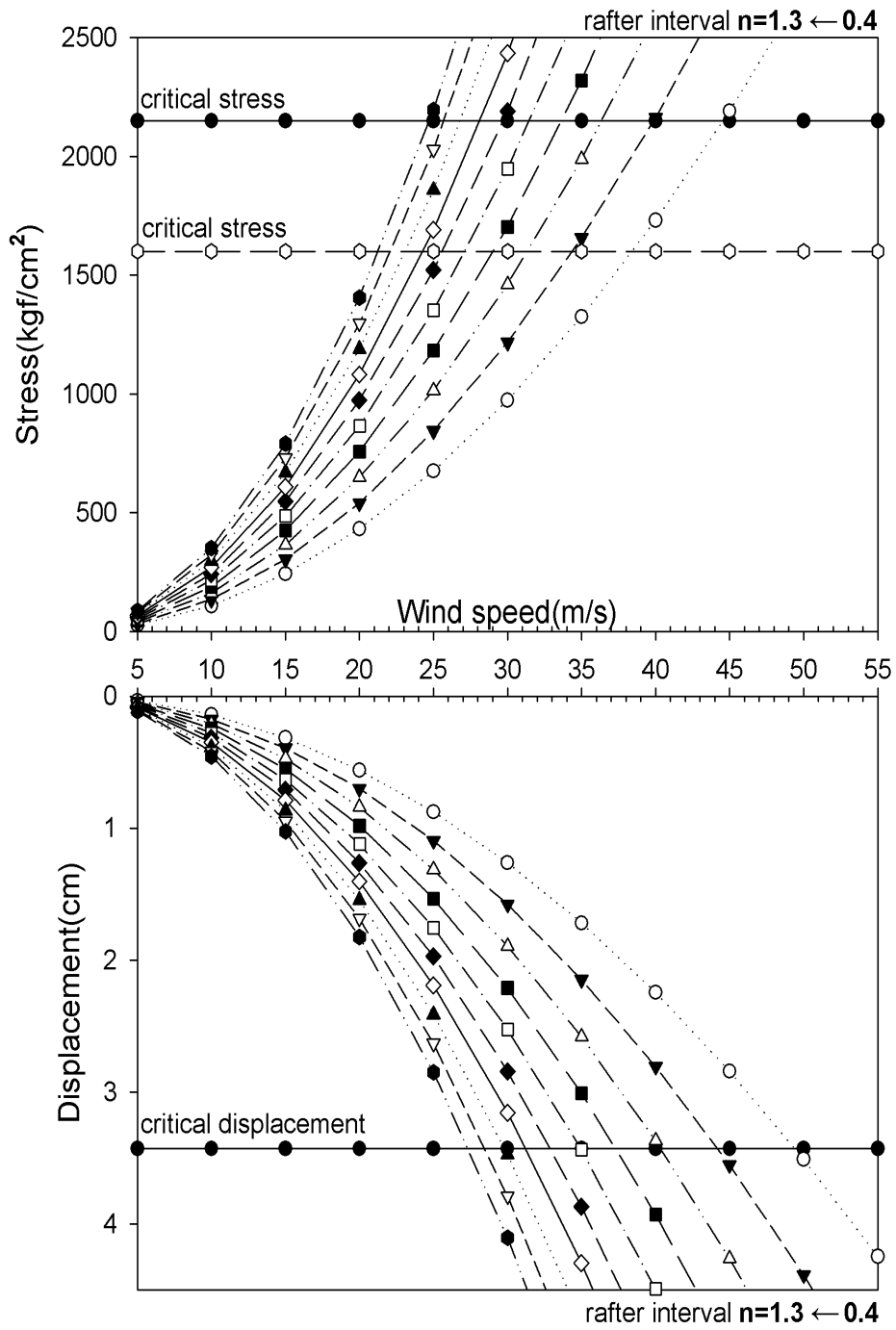


그림 46. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø25.4×1.7t)

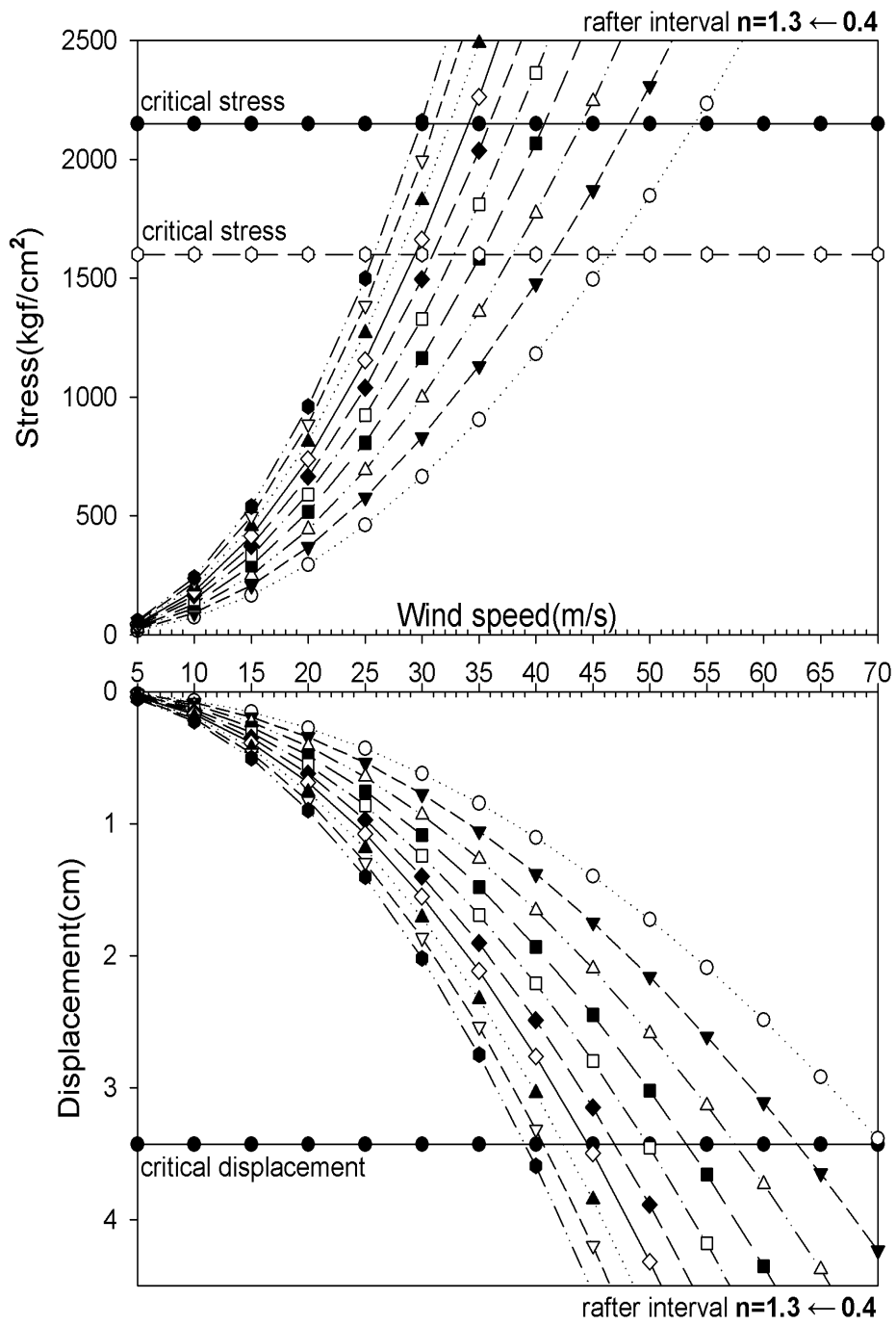


그림 47. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø31.8×1.5t)

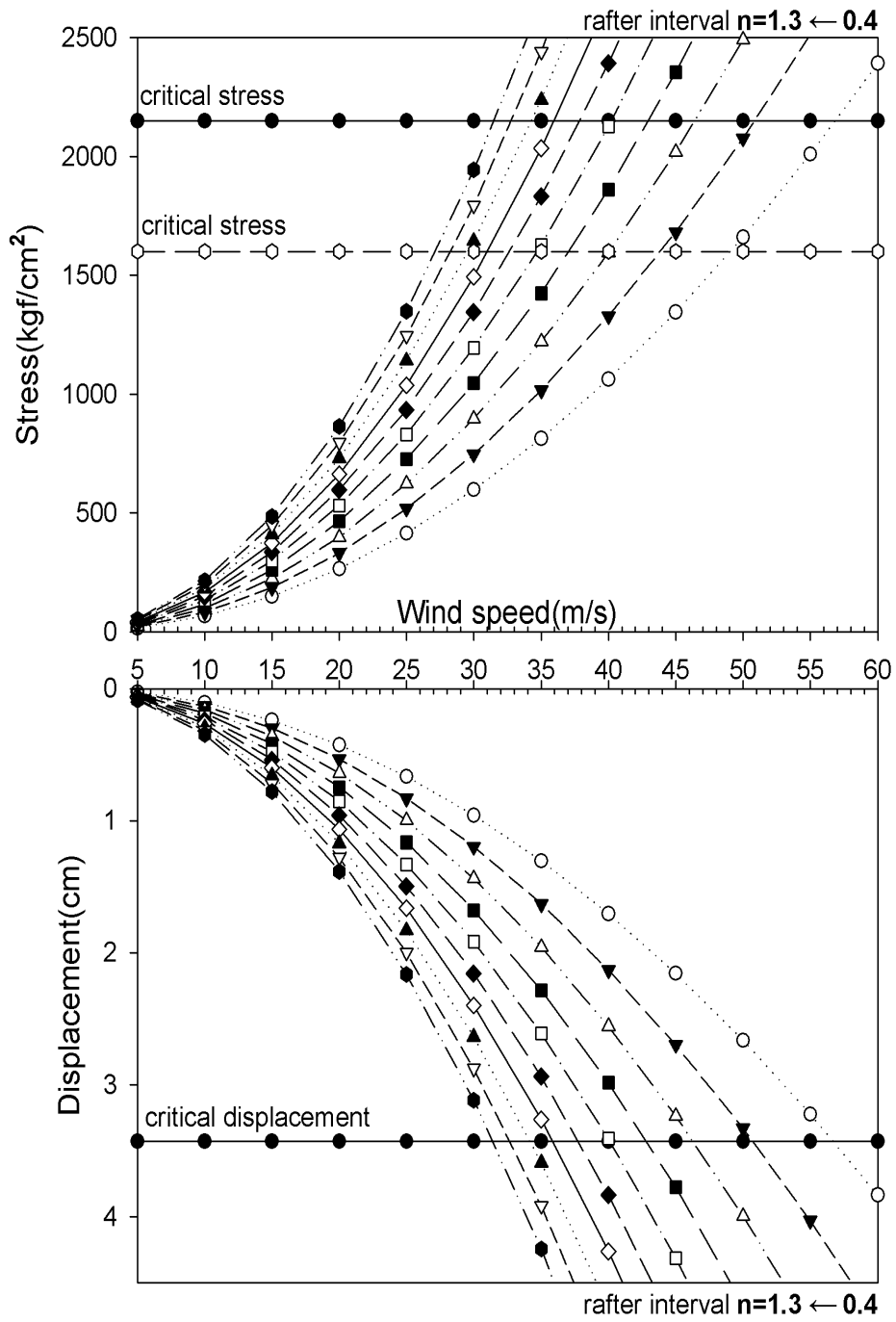


그림 48. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø31.8×1.7t)

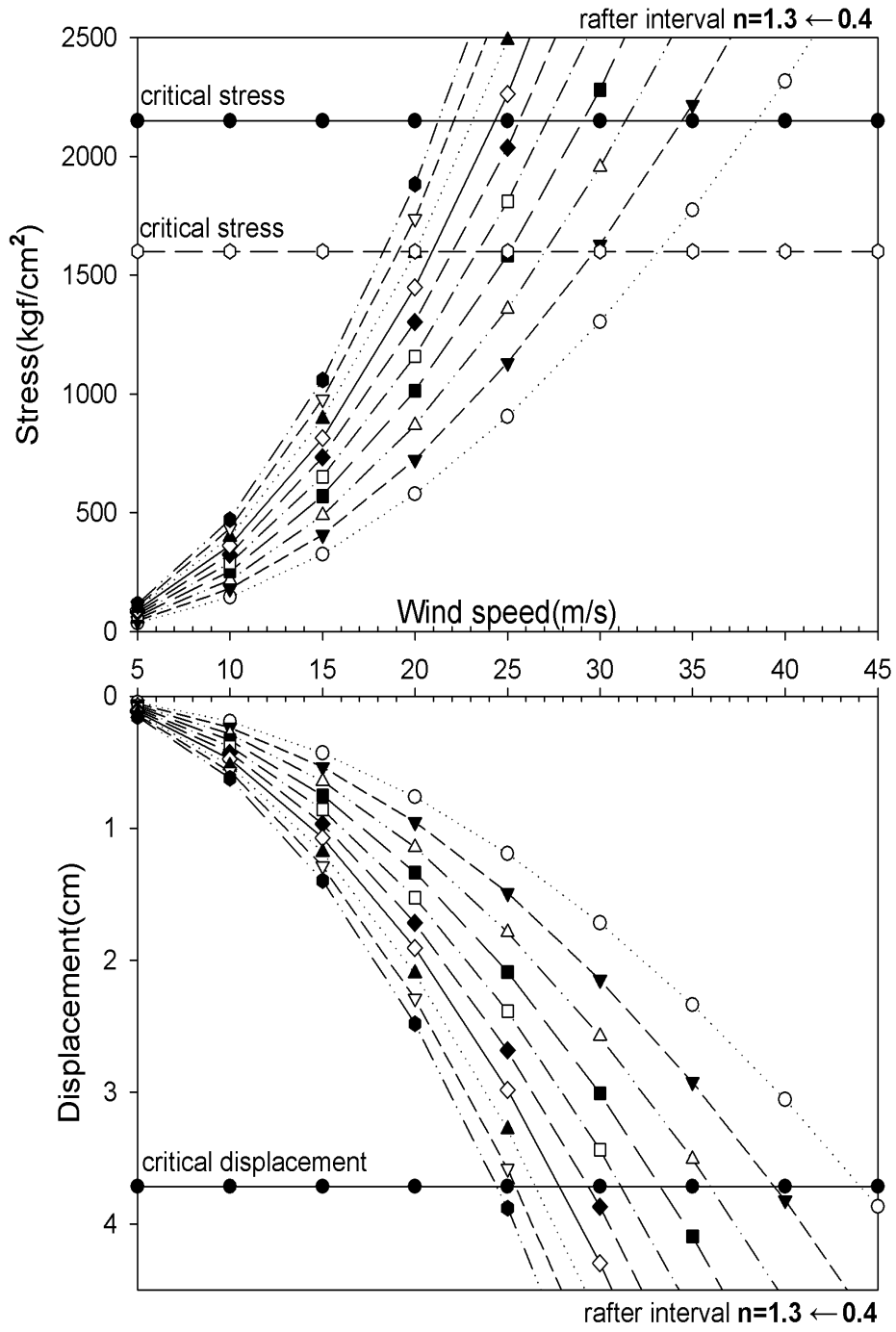


그림 49. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø25.4×1.5t)

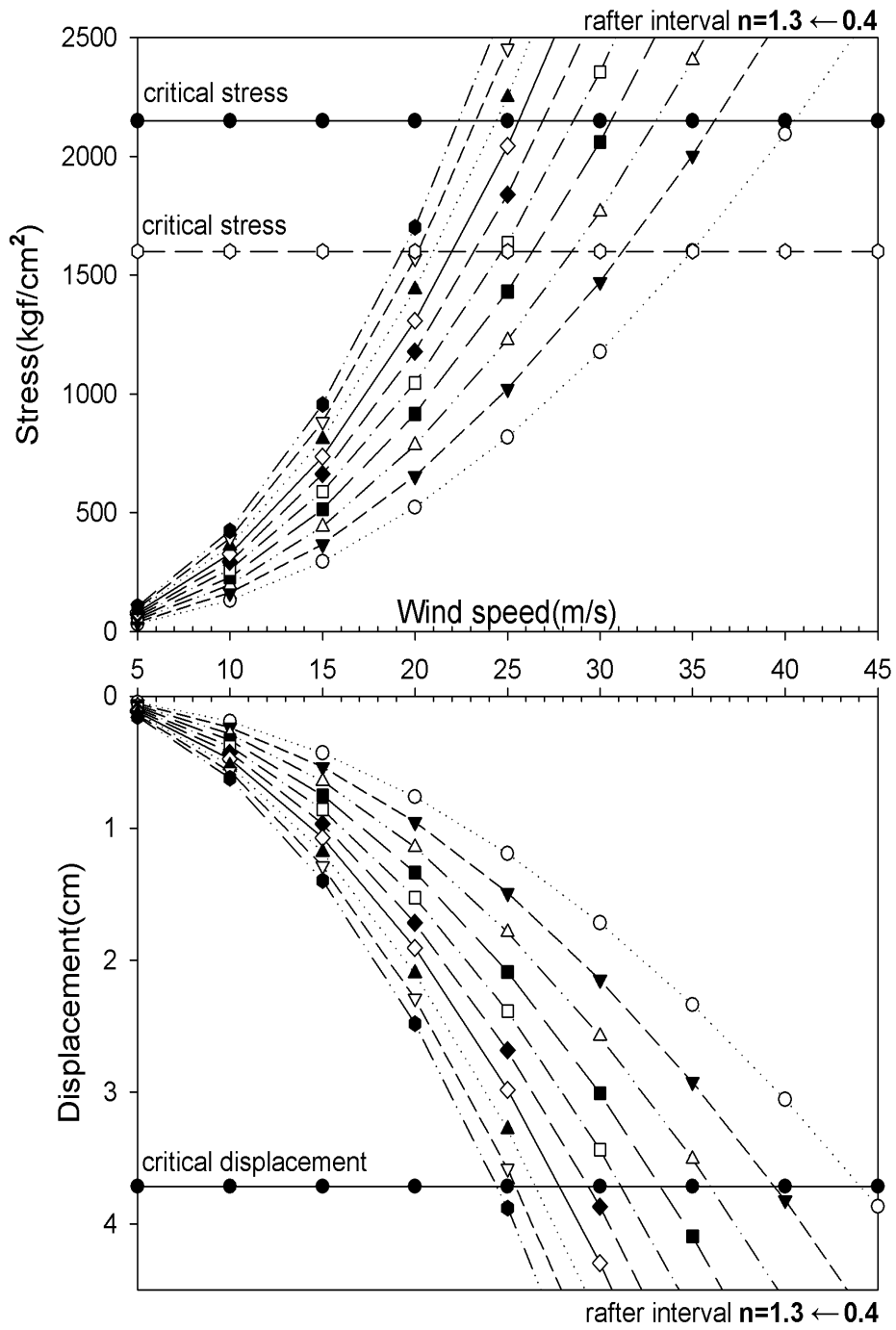


그림 50. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø25.4×1.7t)

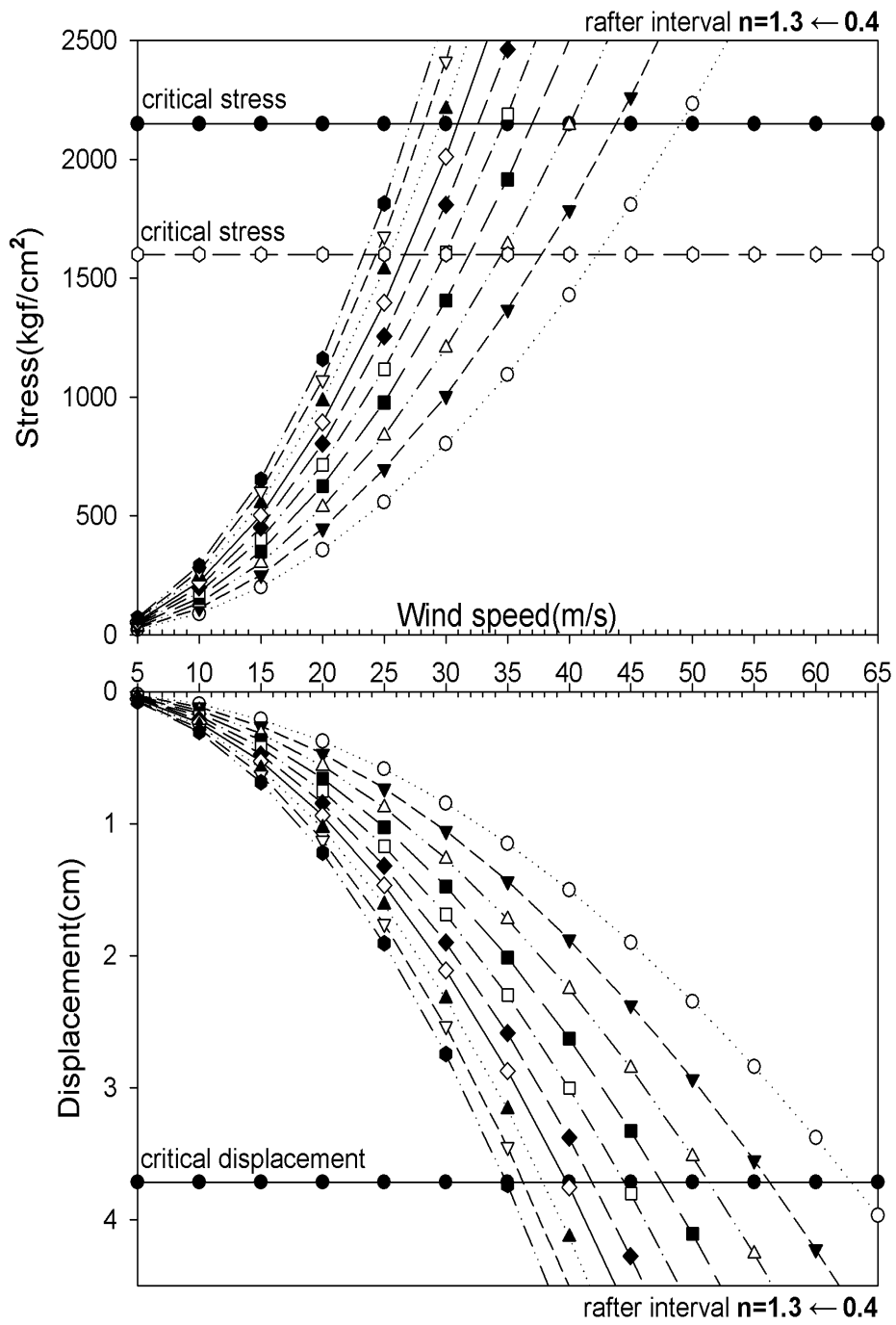


그림 51. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø31.8×1.5t)

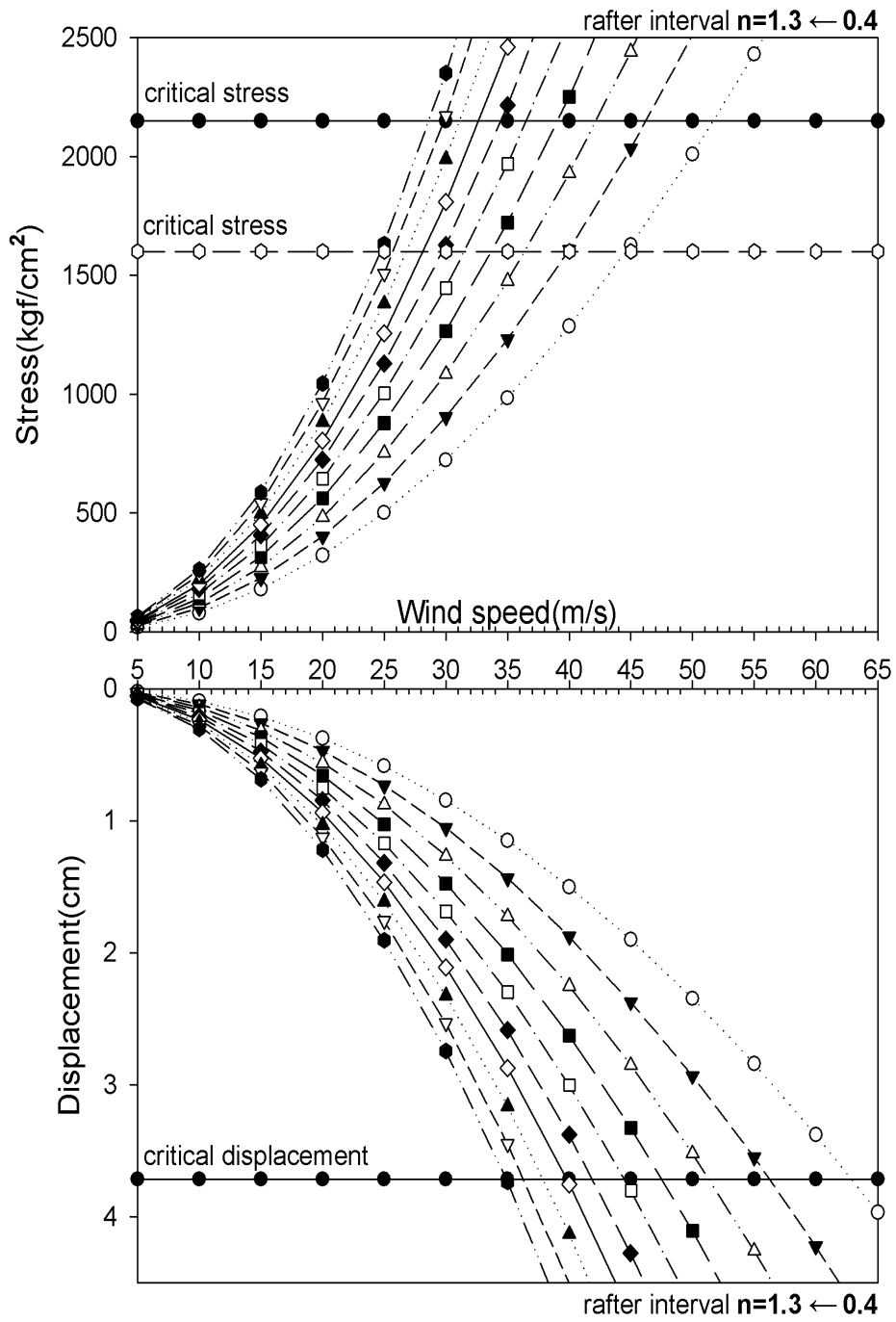


그림 52. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø31.8×1.7t)

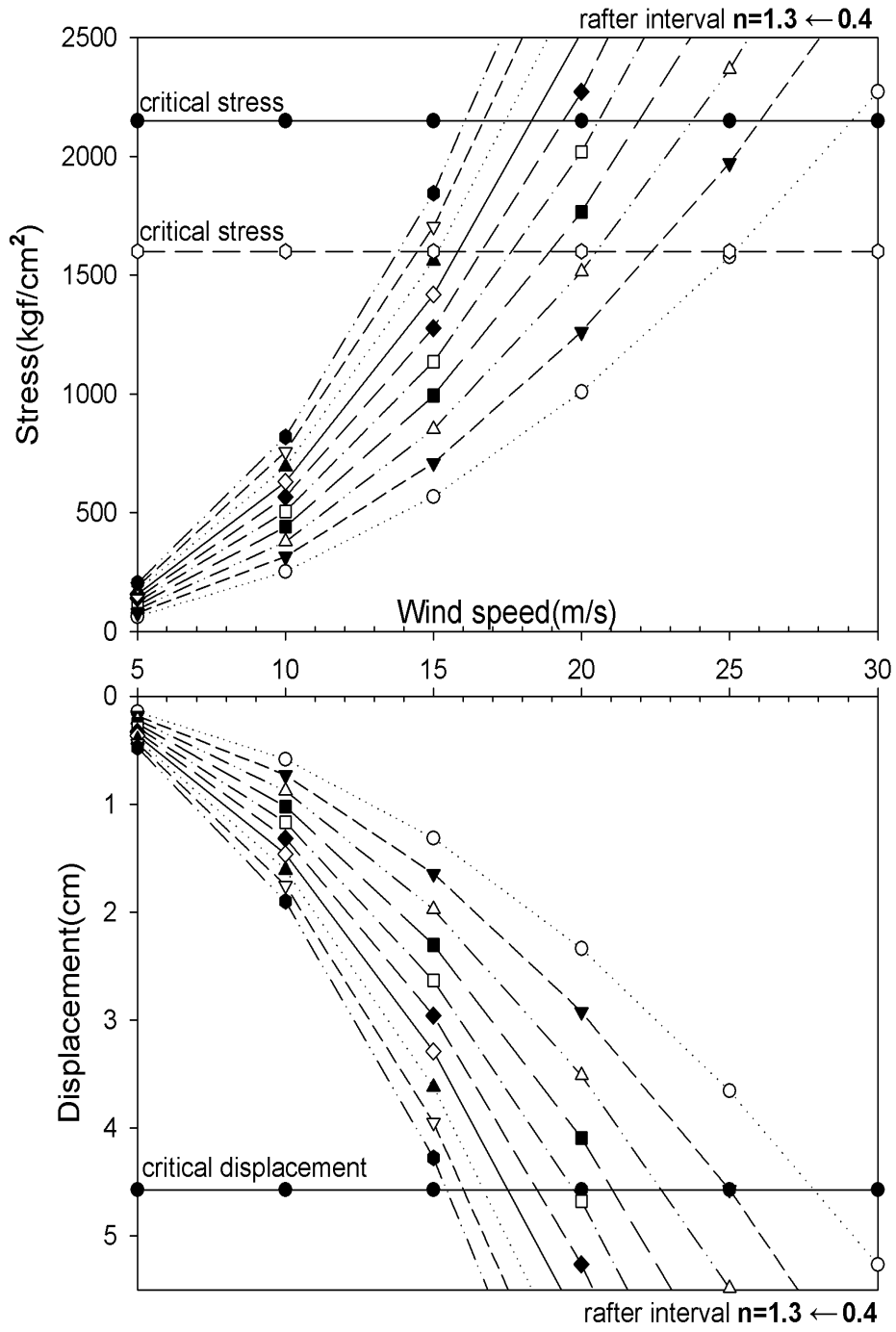


그림 53. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø25.4×1.5t)

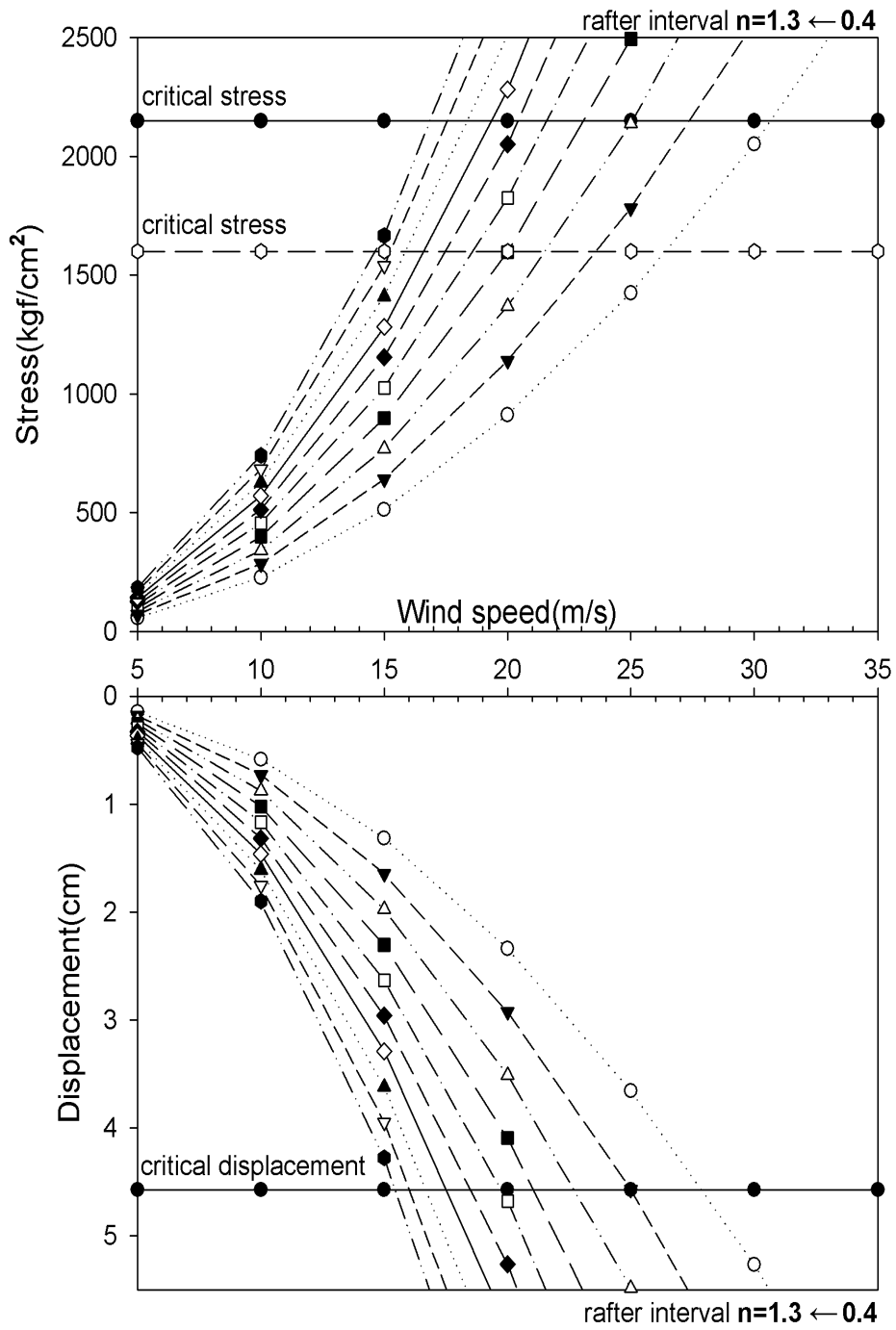


그림 54. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø25.4×1.7t)

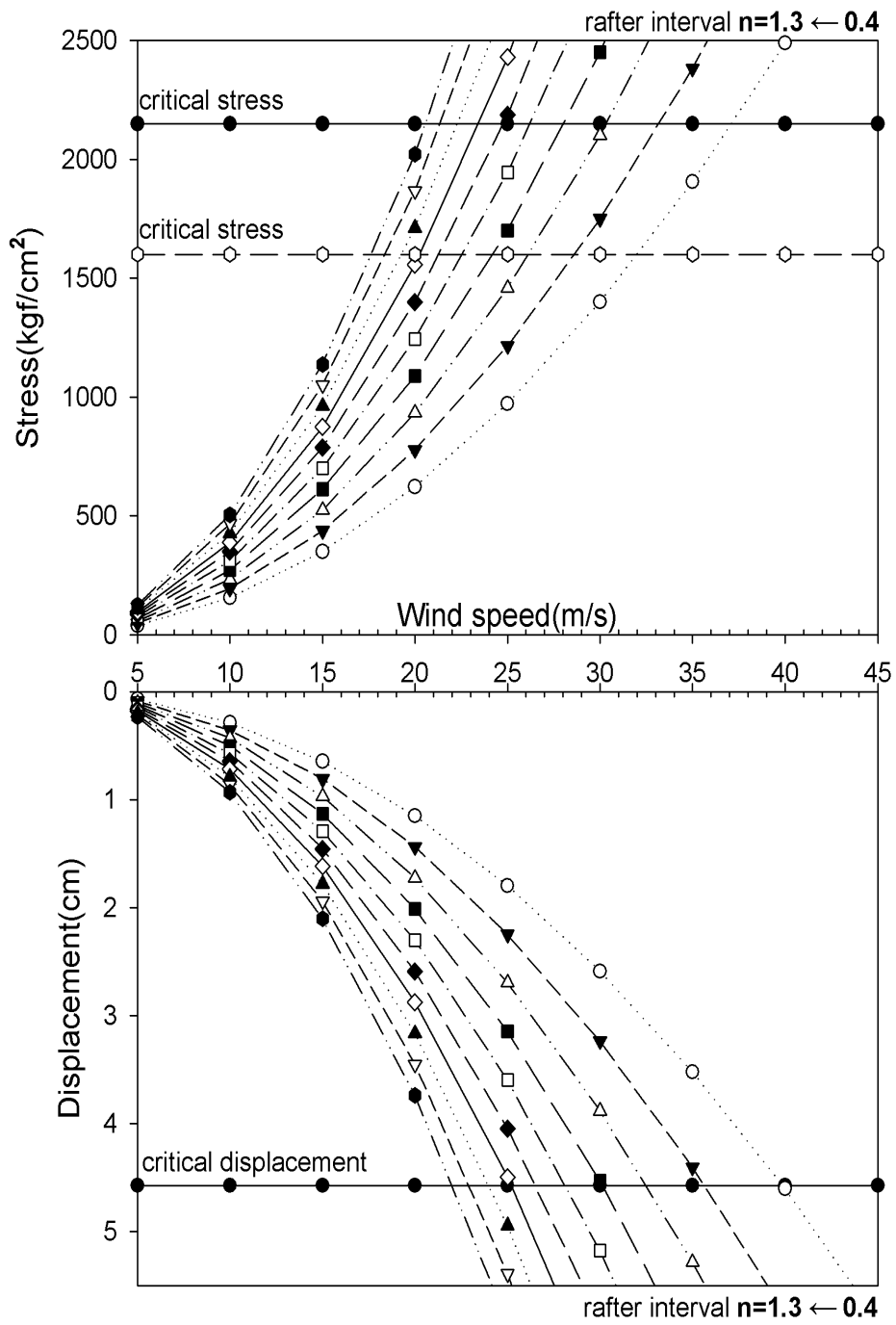


그림 55. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø31.8×1.5t)

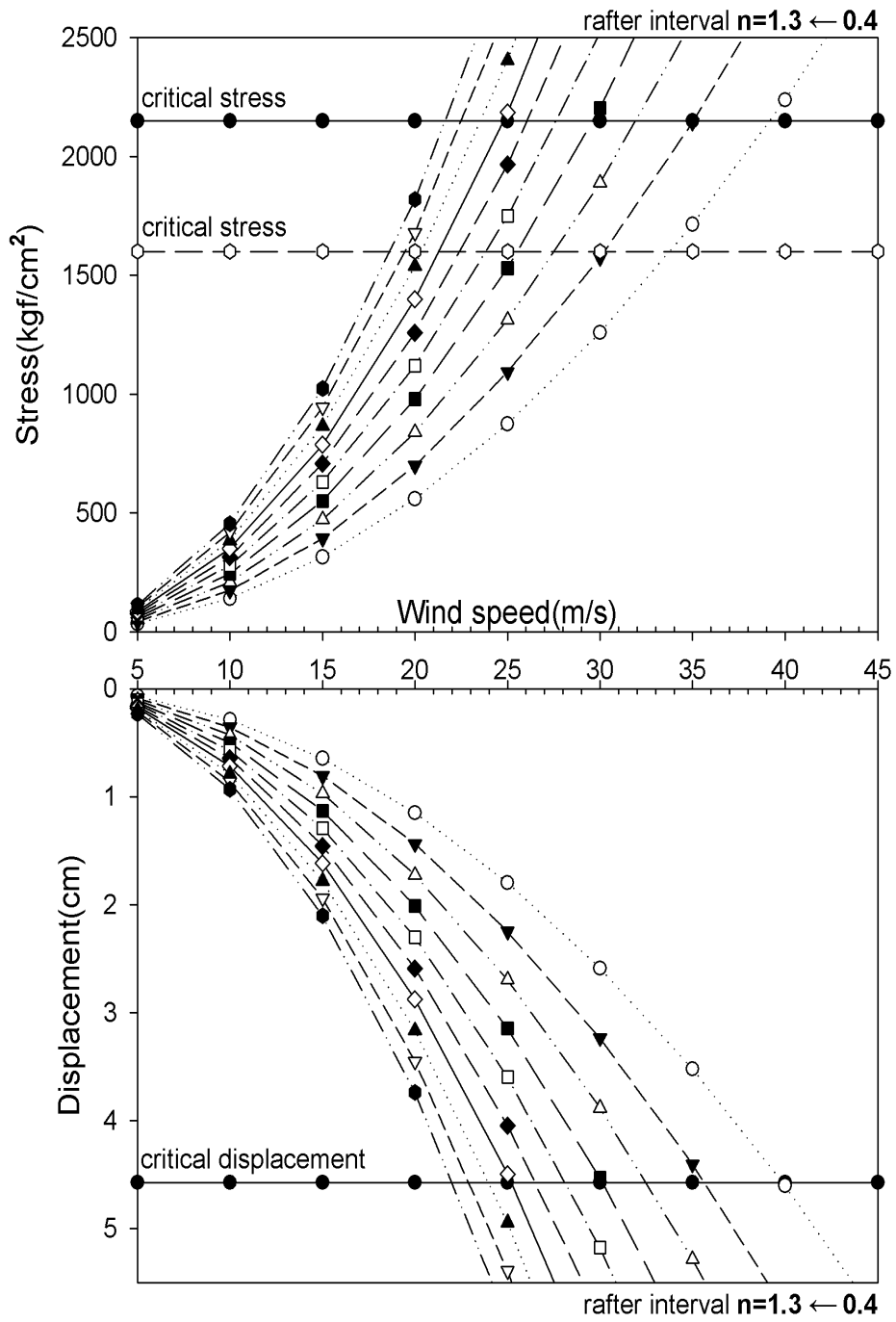


그림 56. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø31.8×1.7t)

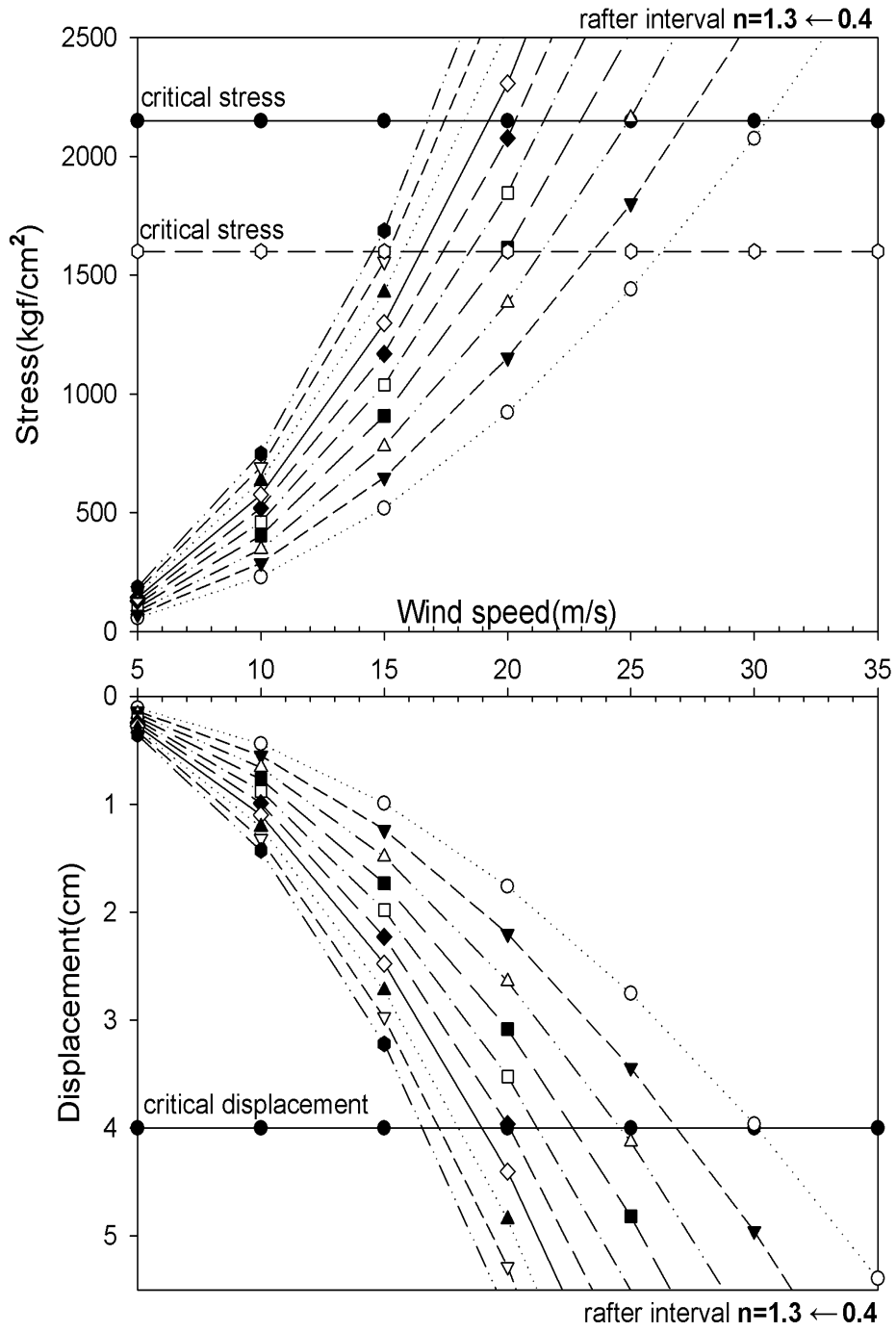


그림 57. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø25.4×1.5t)

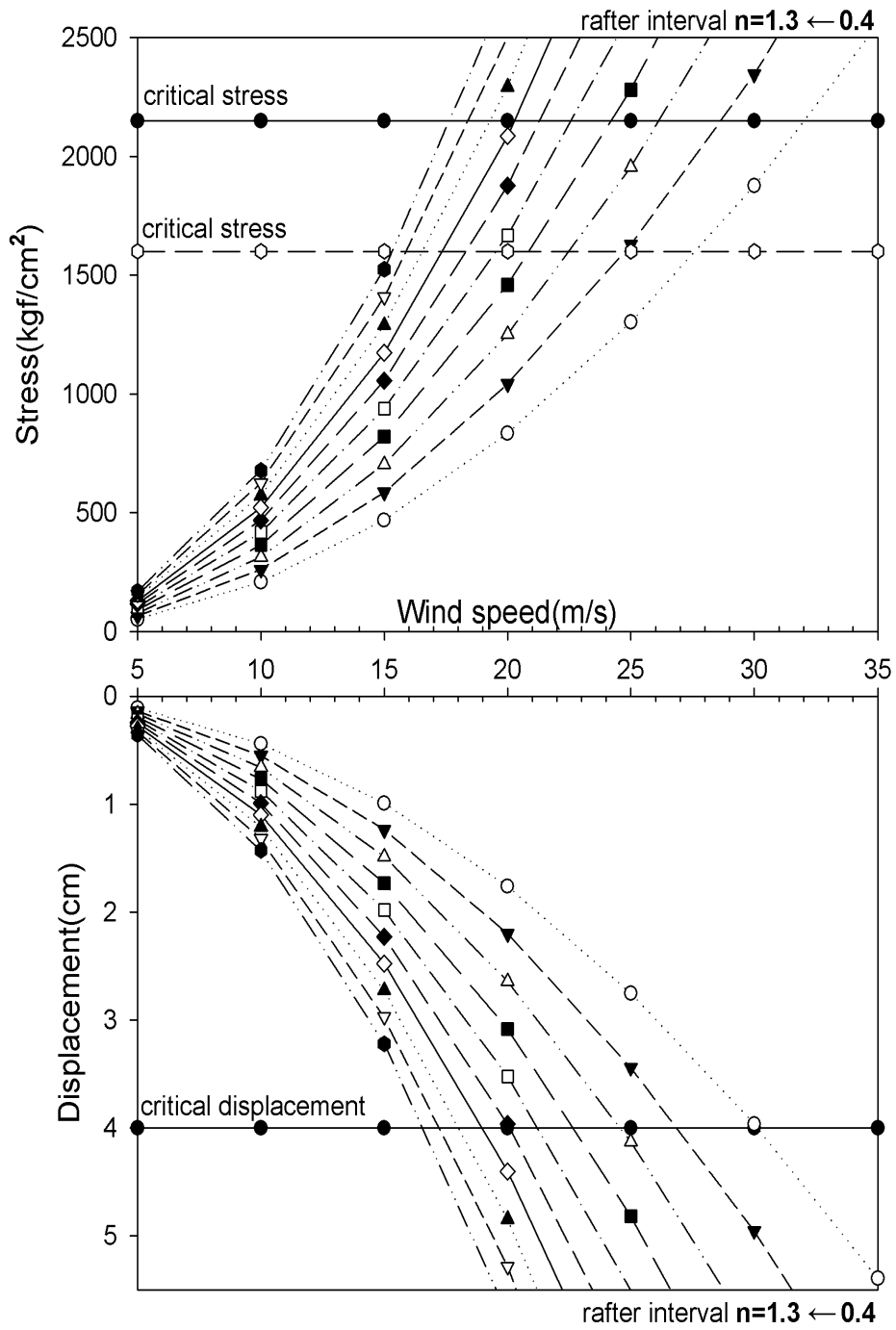


그림 58. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø25.4×1.7t)

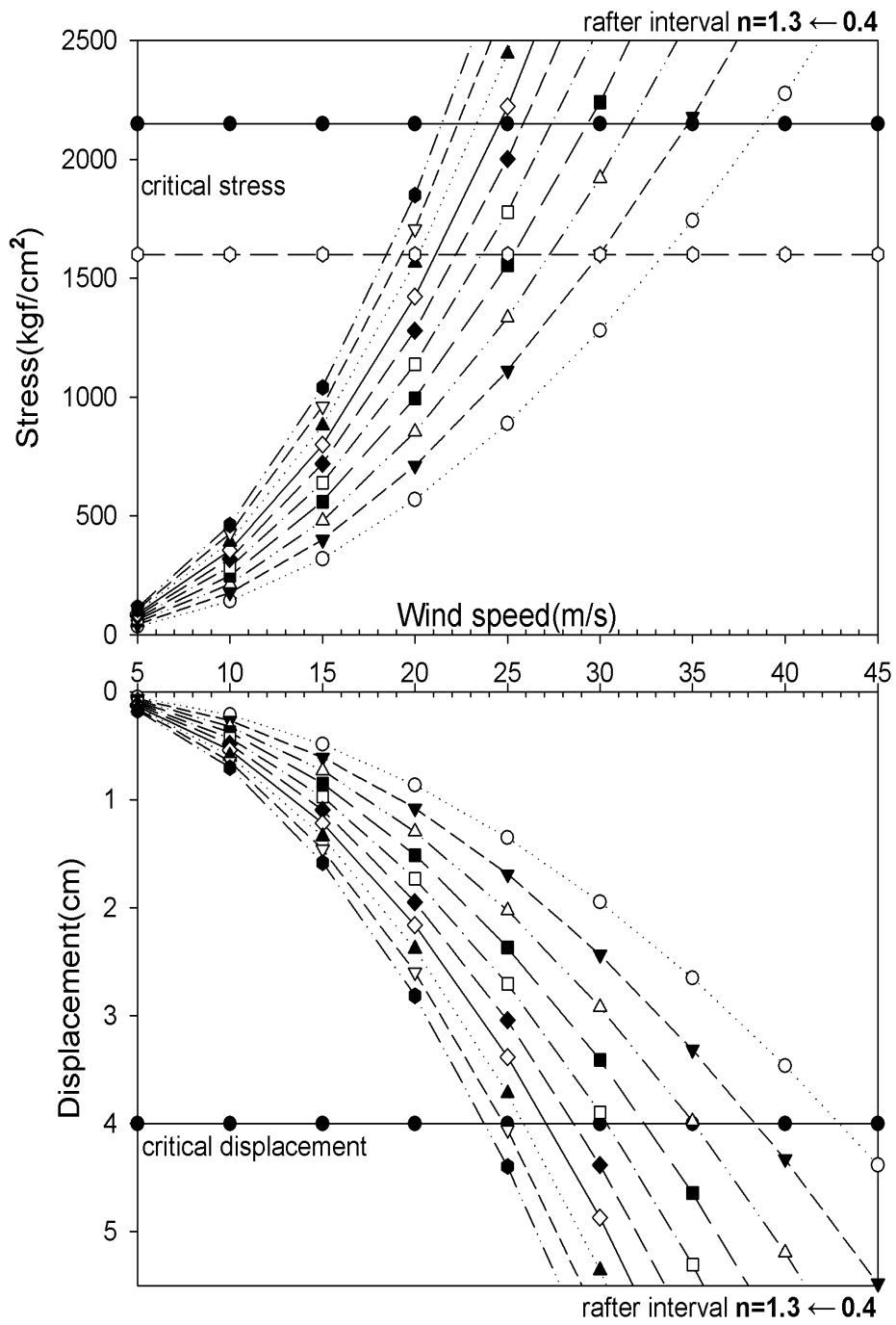


그림 59. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø31.8×1.5t)

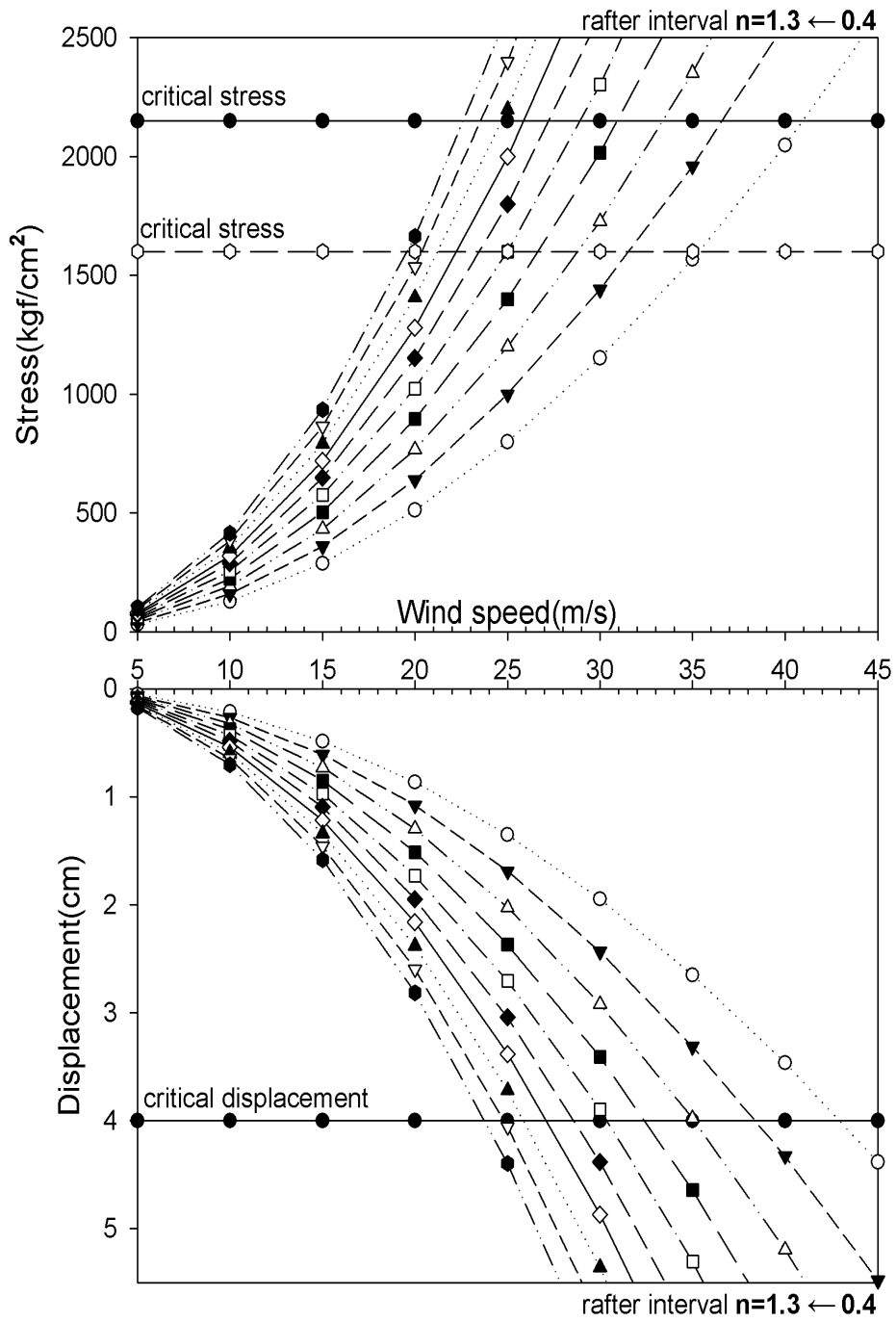


그림 60. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø31.8×1.7t)

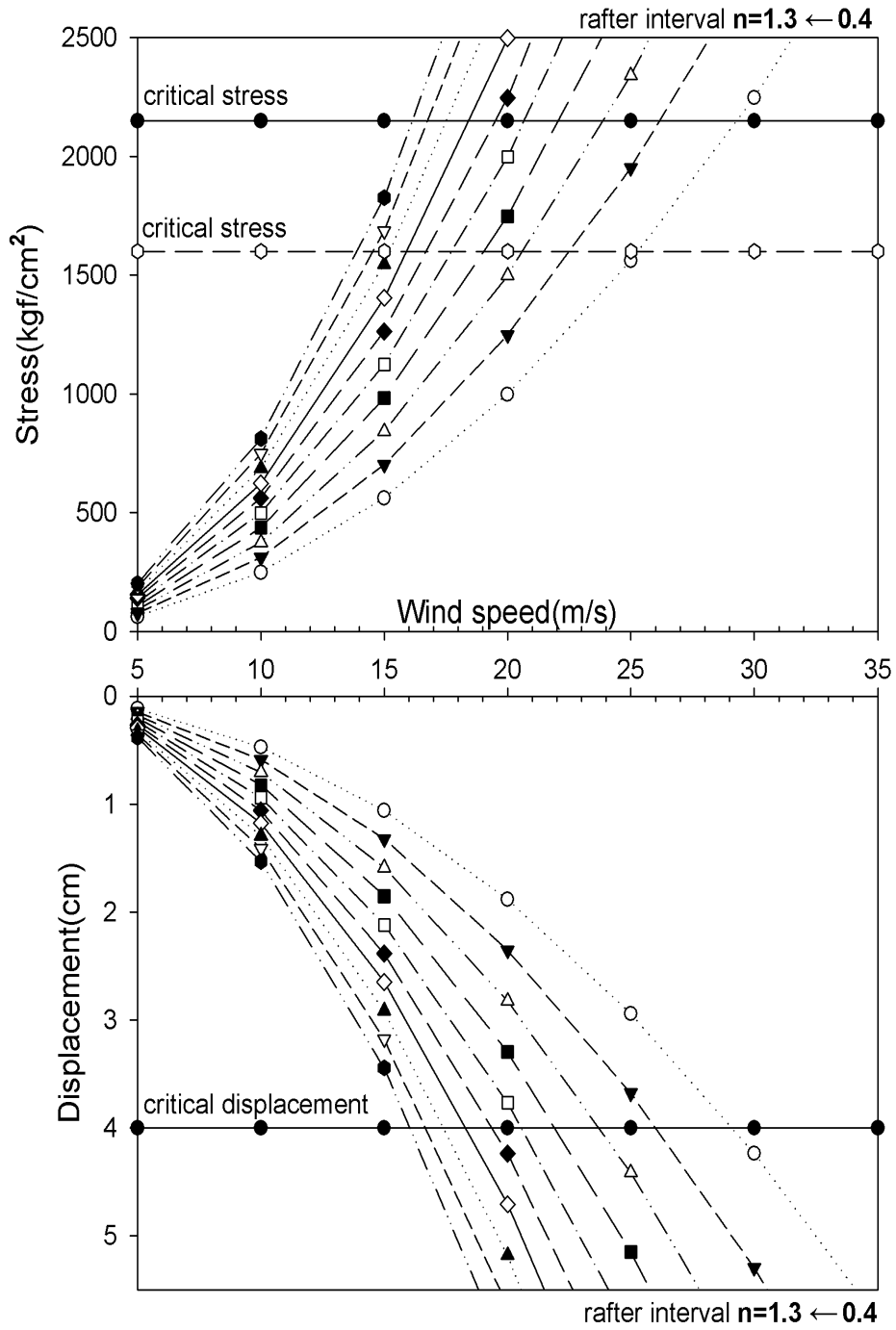


그림 61. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø25.4×1.5t)

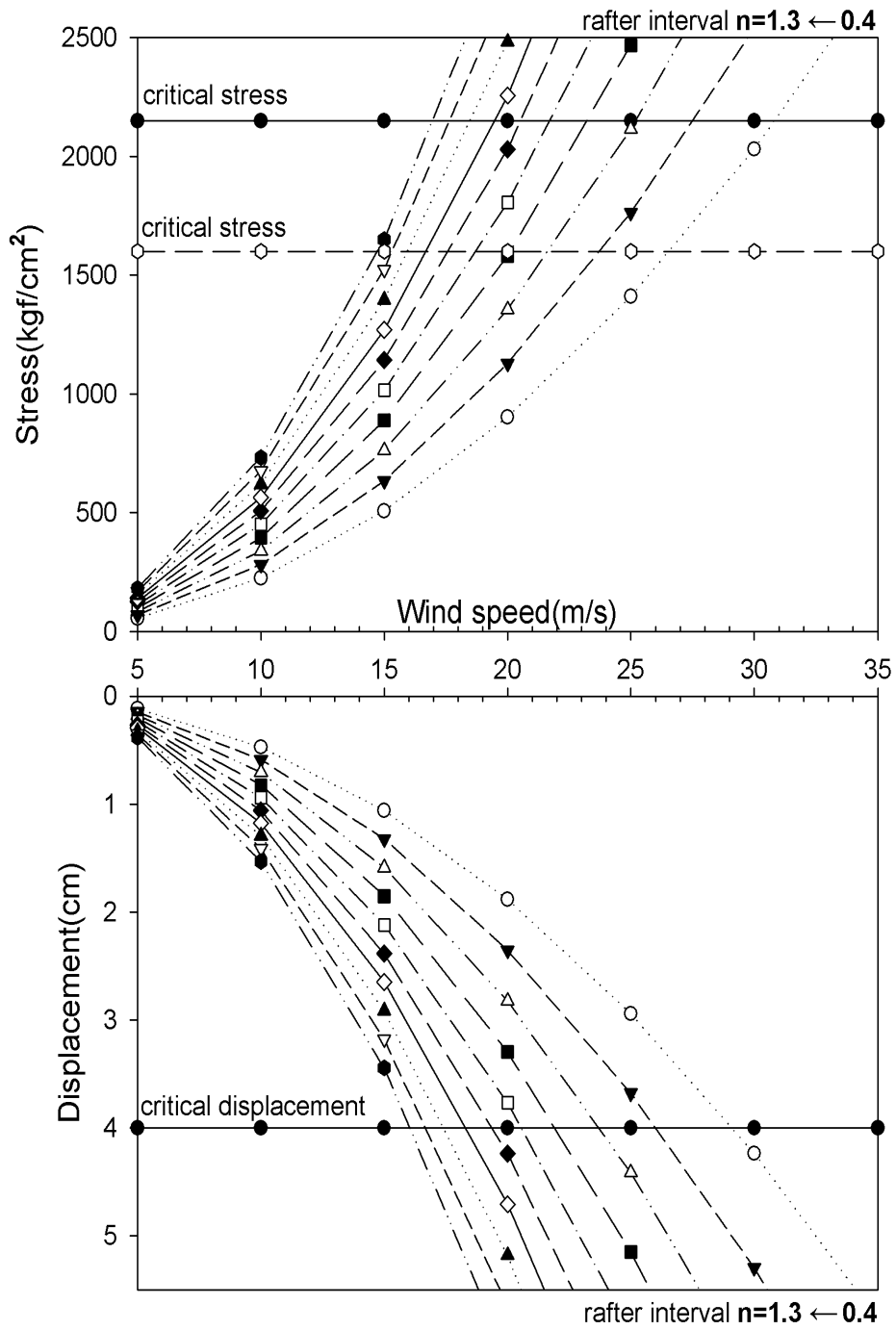


그림 62. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø25.4×1.7t)

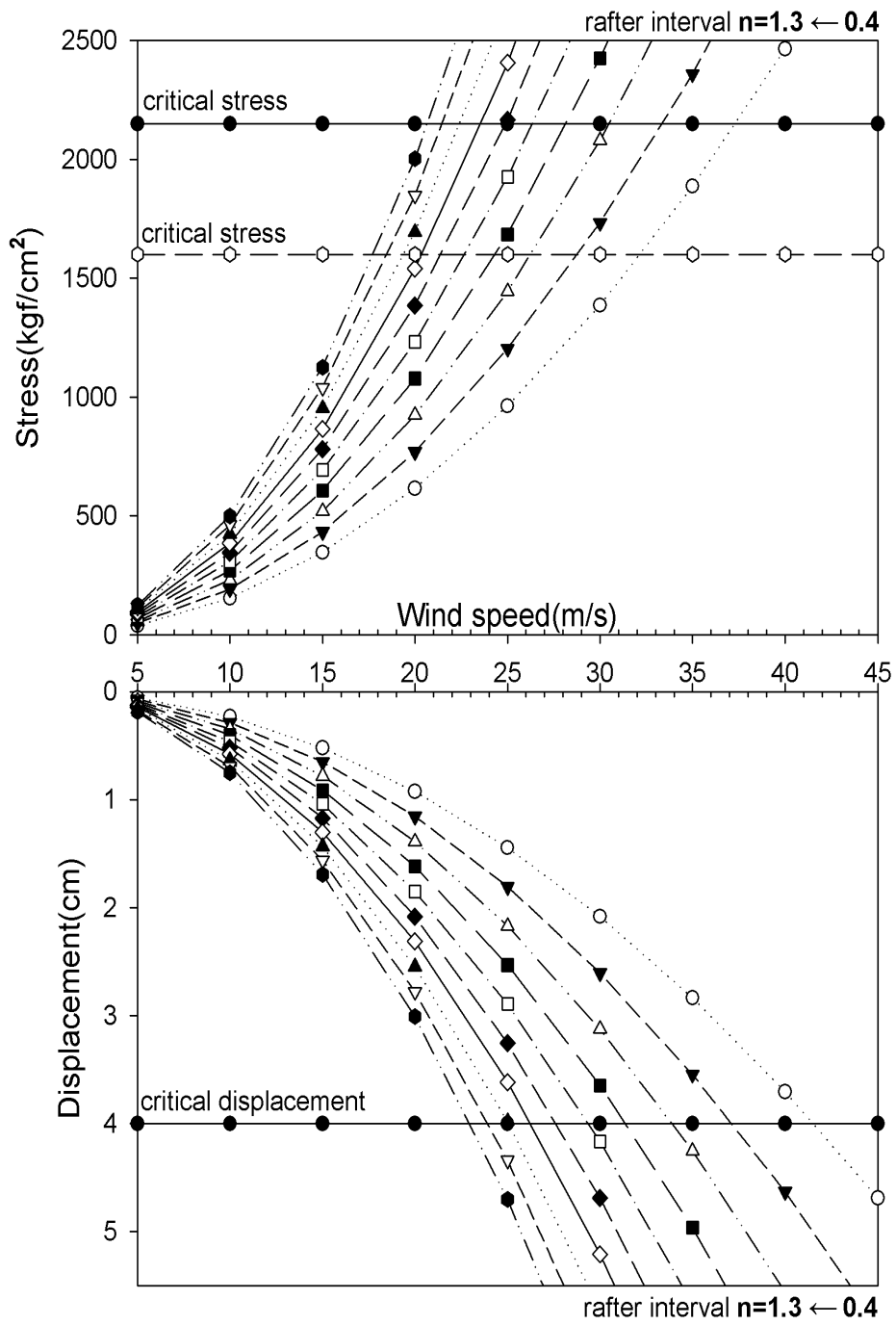


그림 63. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø31.8×1.5t)

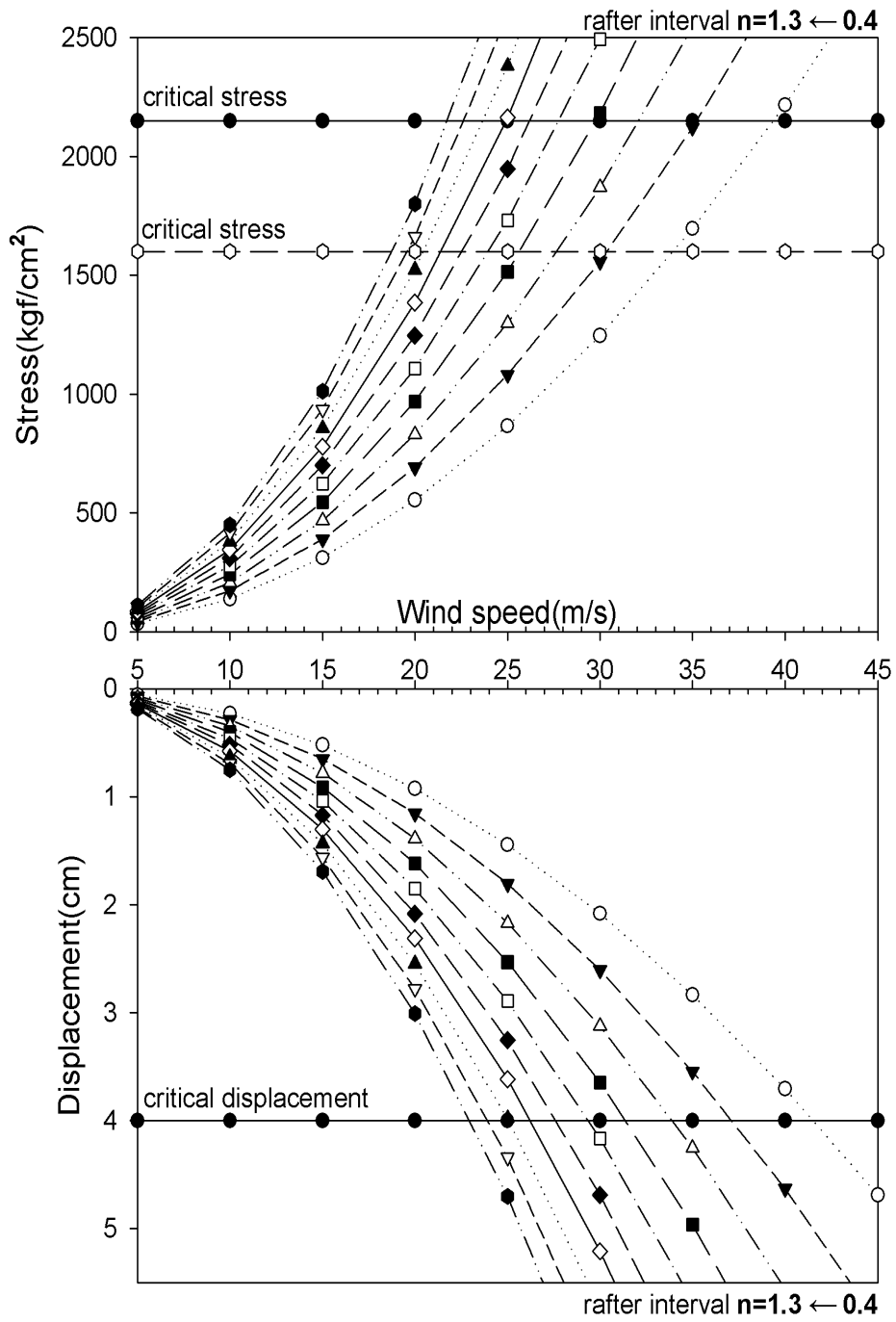


그림 64. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø31.8×1.7t)

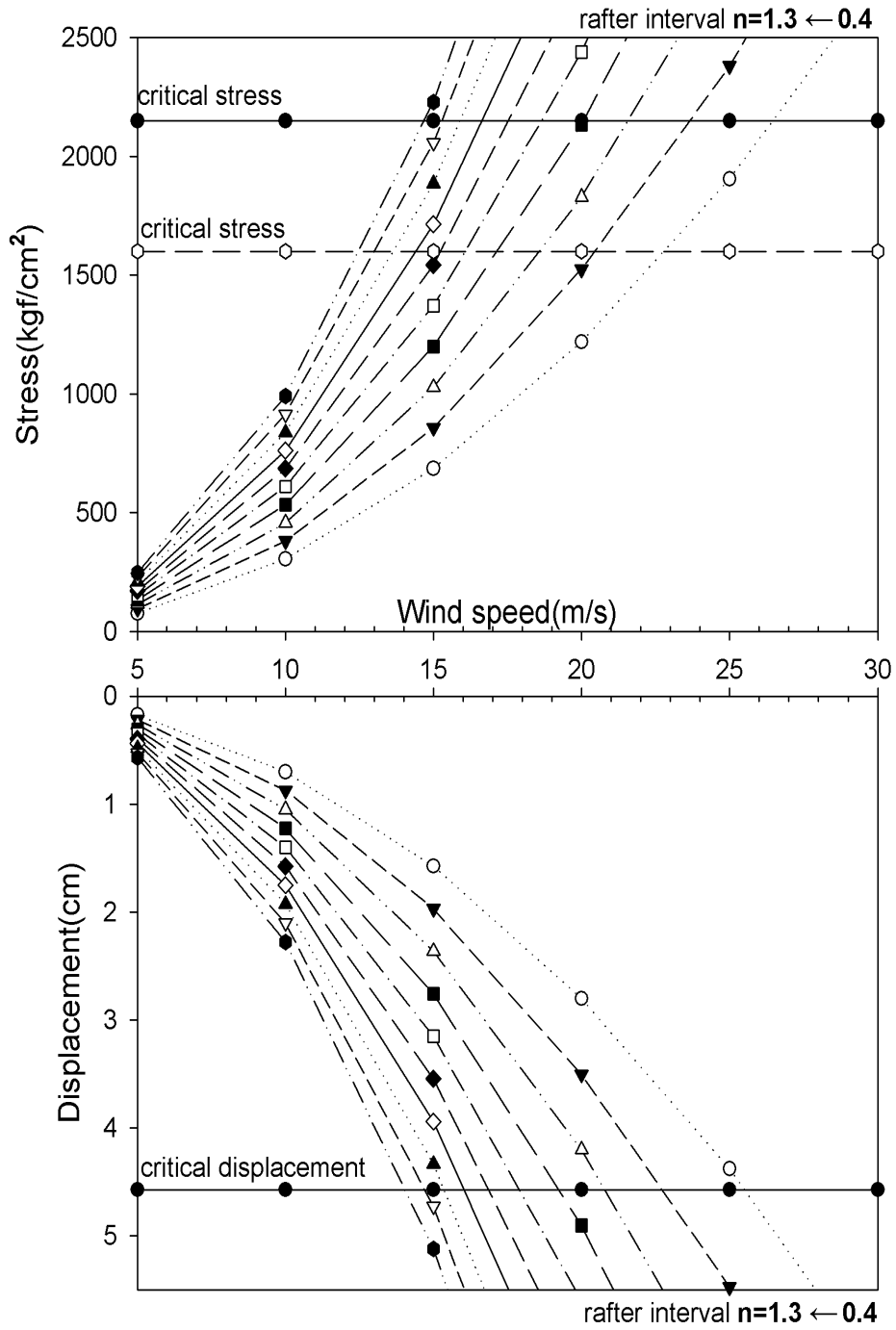


그림 65. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø25.4×1.5t)

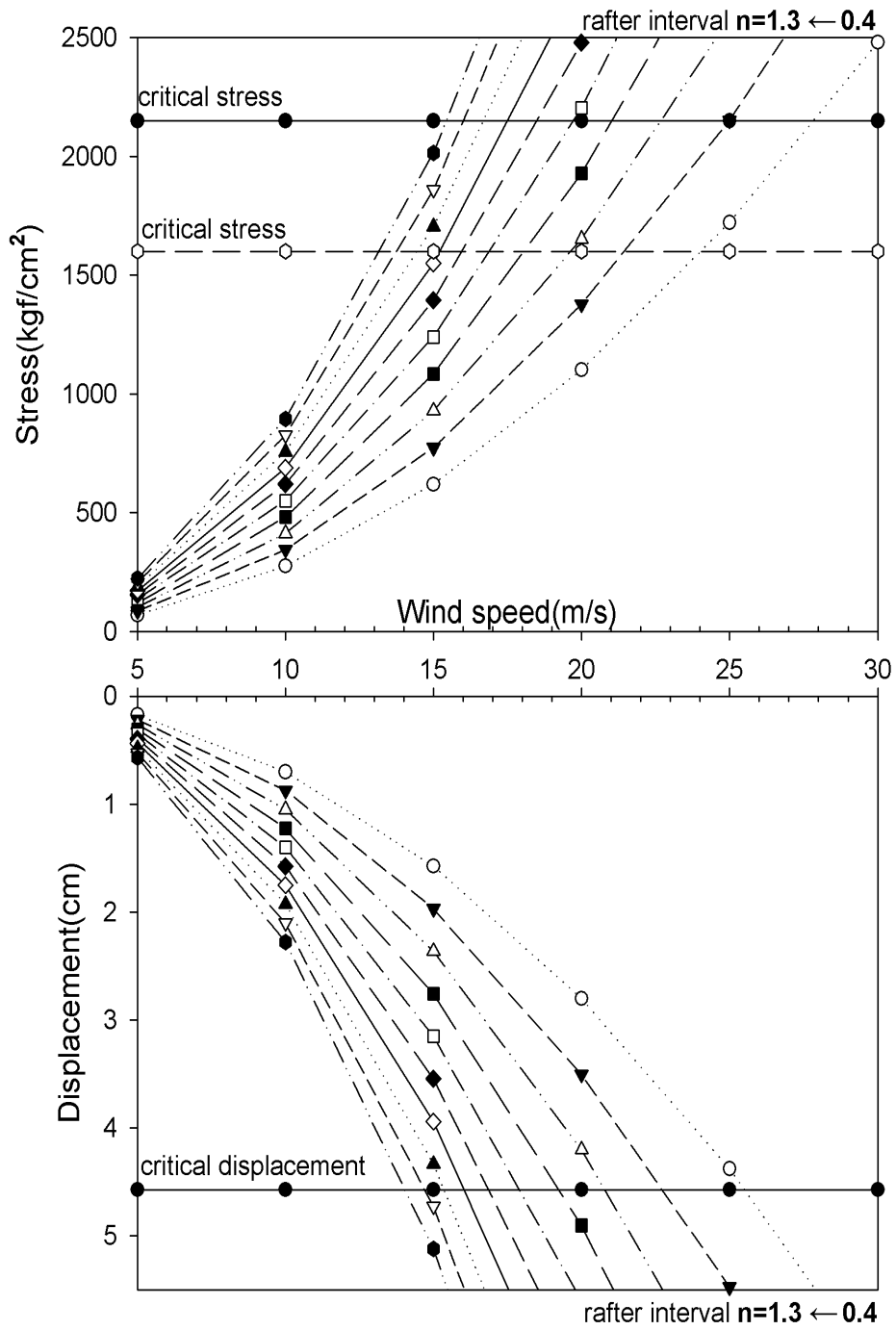


그림 66. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø25.4×1.7t)

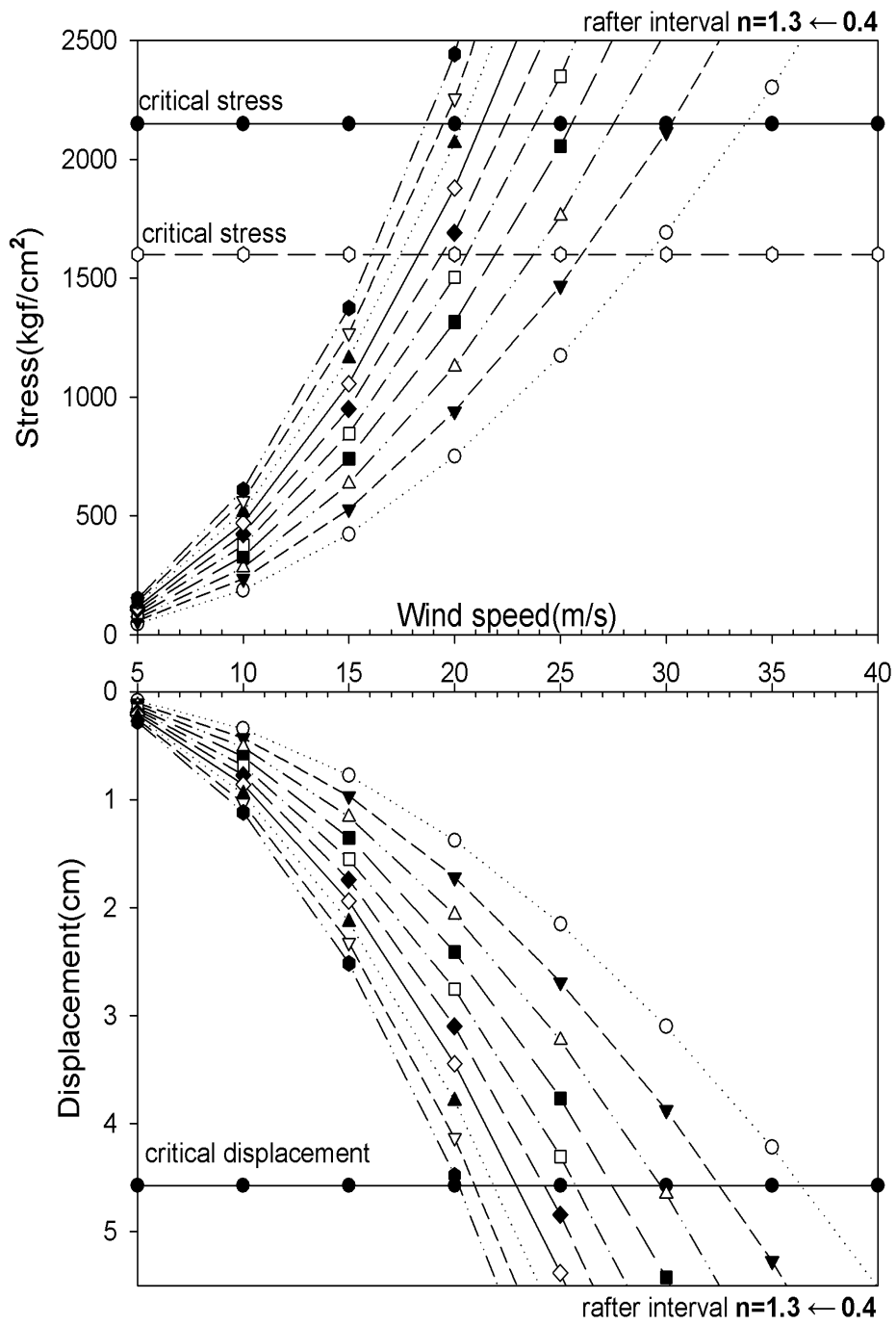


그림 67. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø31.8×1.5t)

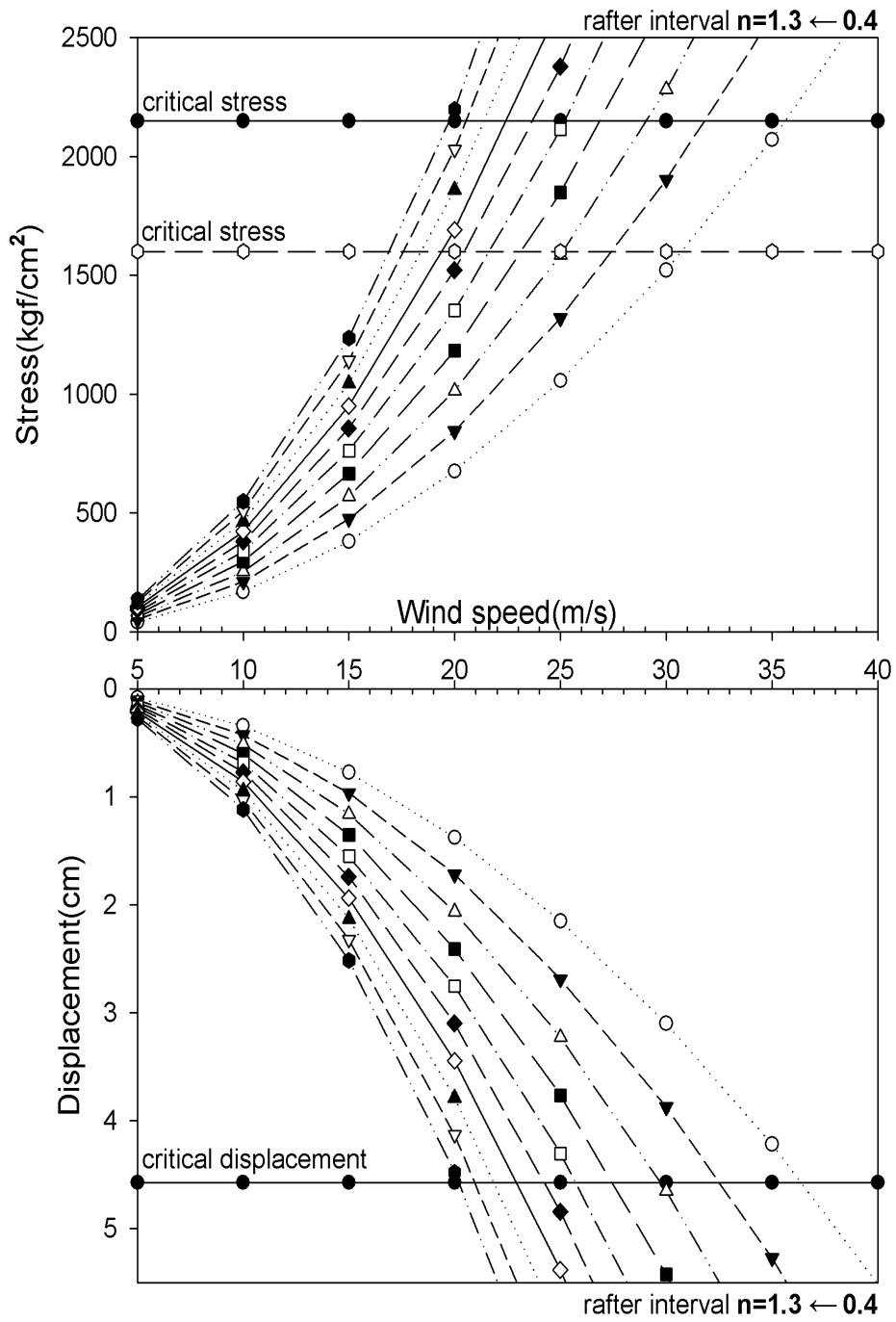


그림 68. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø31.8×1.7t)

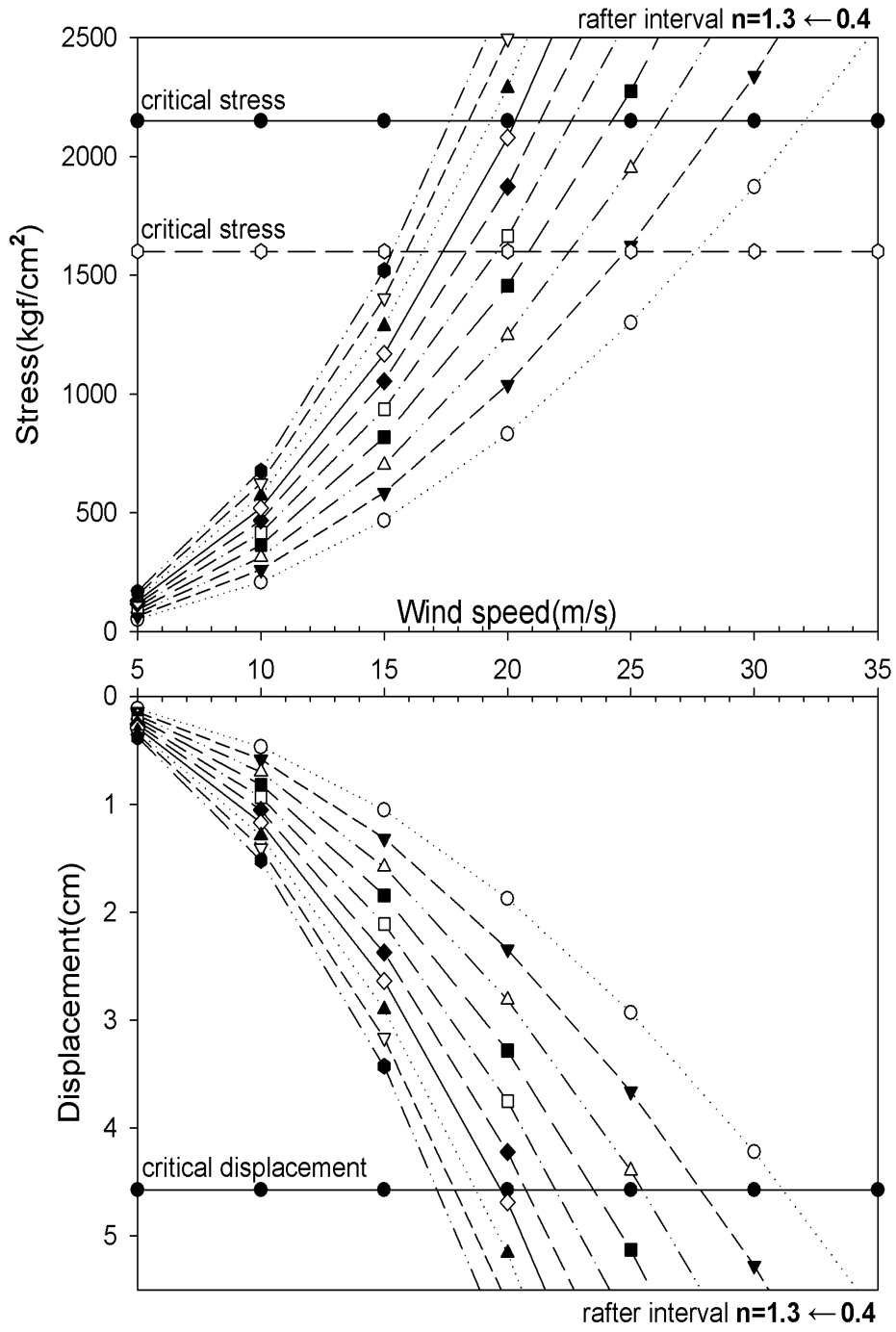


그림 69. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø25.4×1.5t)

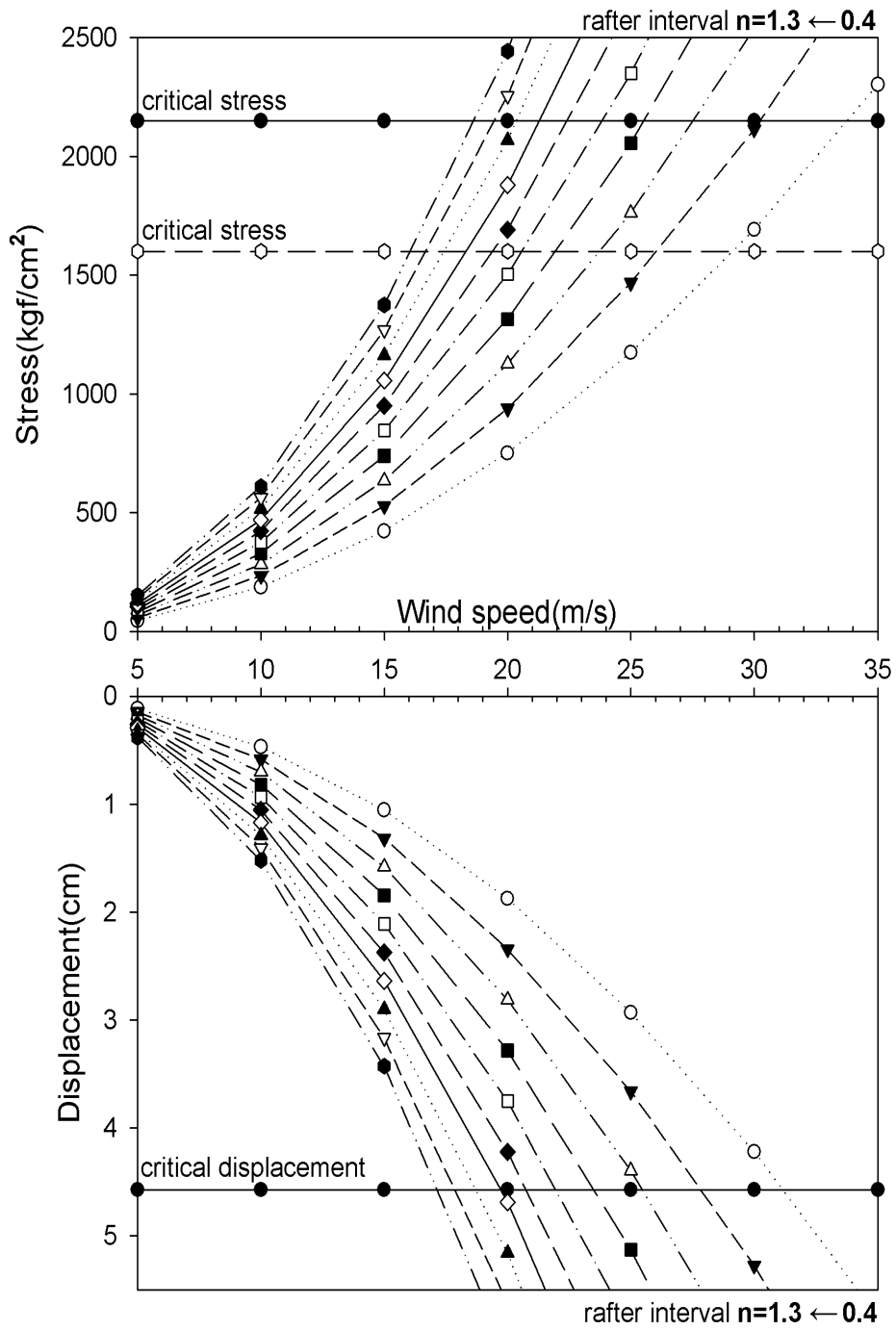


그림 70. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø25.4×1.7t)

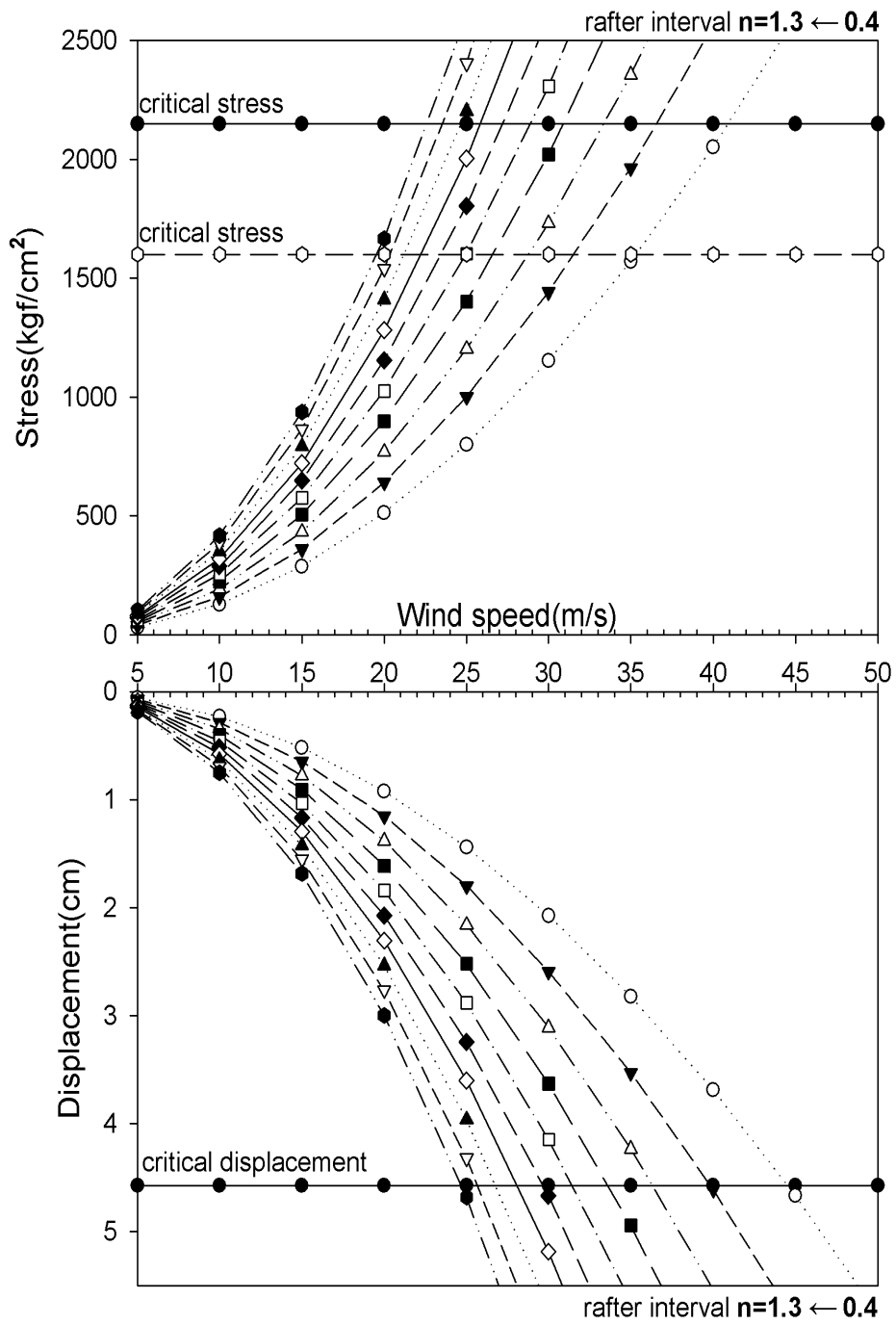


그림 71. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø31.8×1.5t)

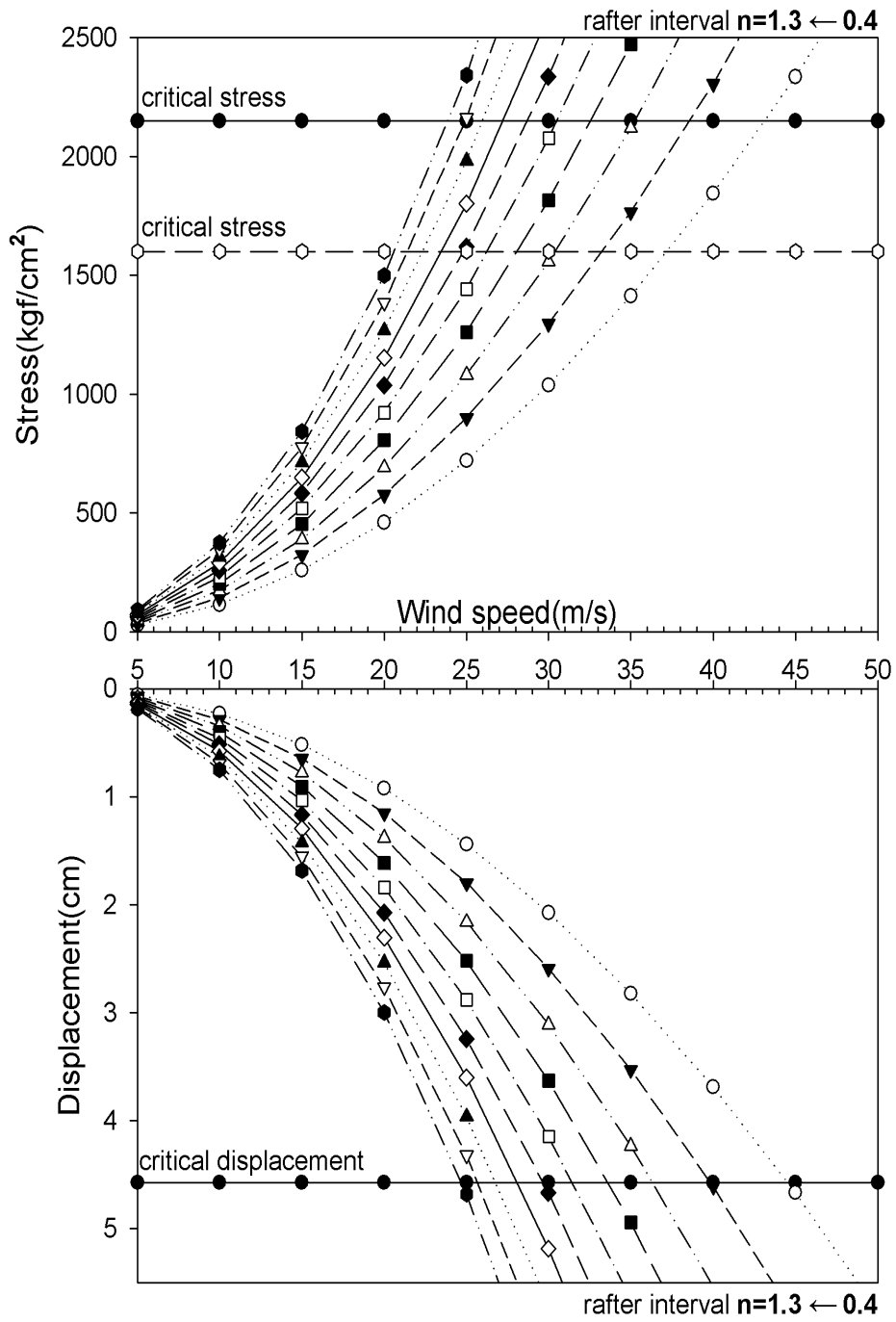


그림 72. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø31.8×1.7t)

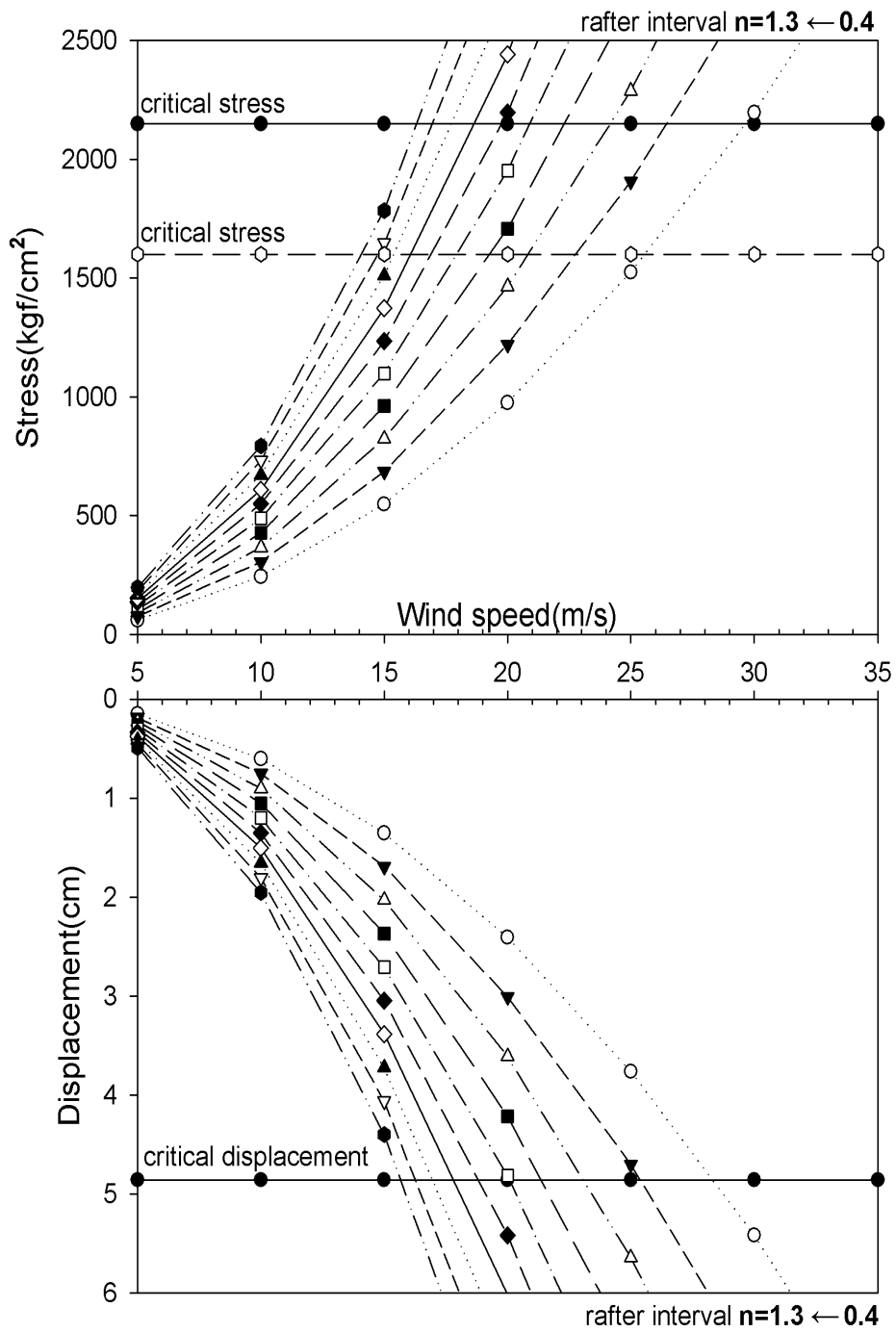


그림 73. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø25.4×1.5t)

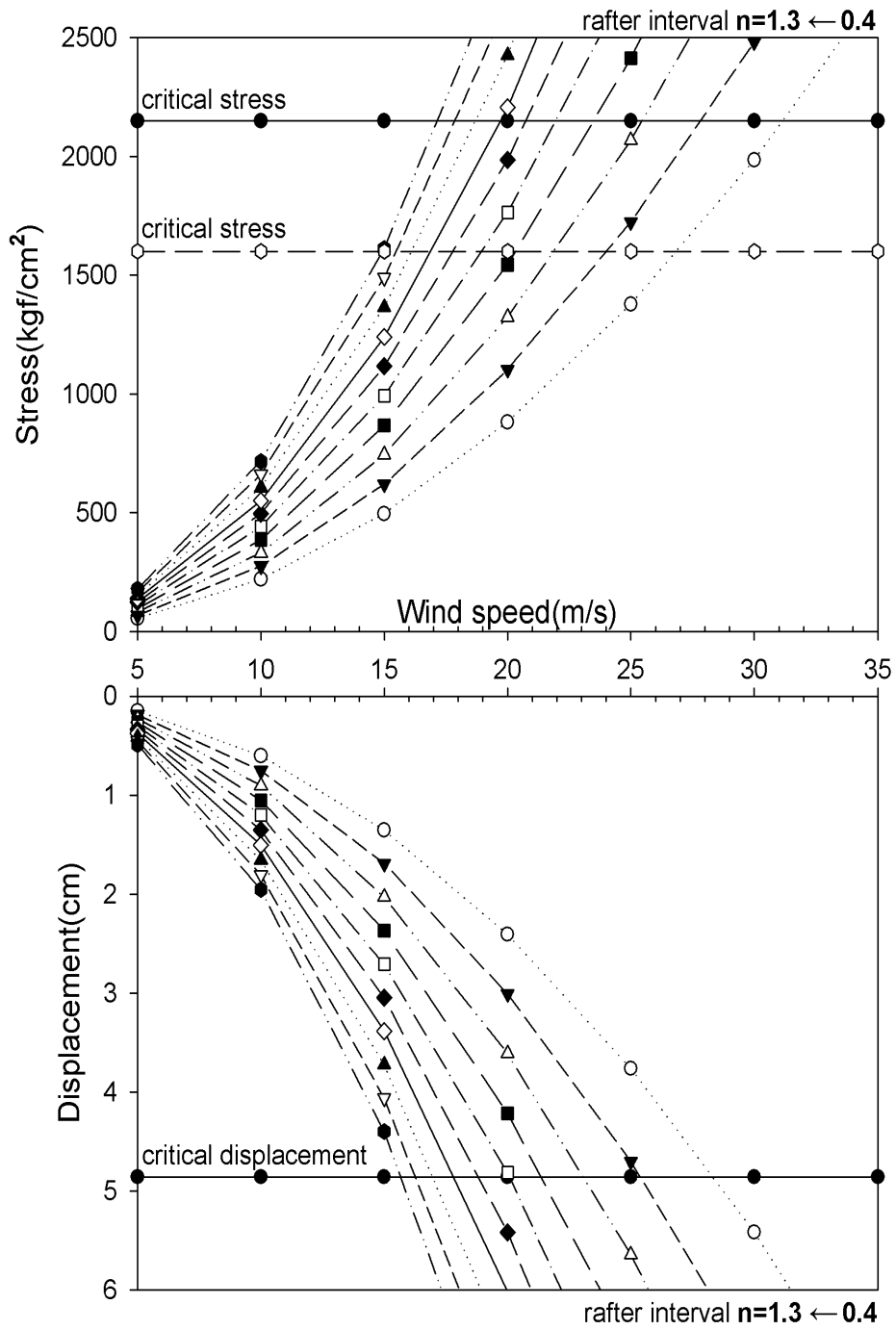


그림 74. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø25.4×1.7t)

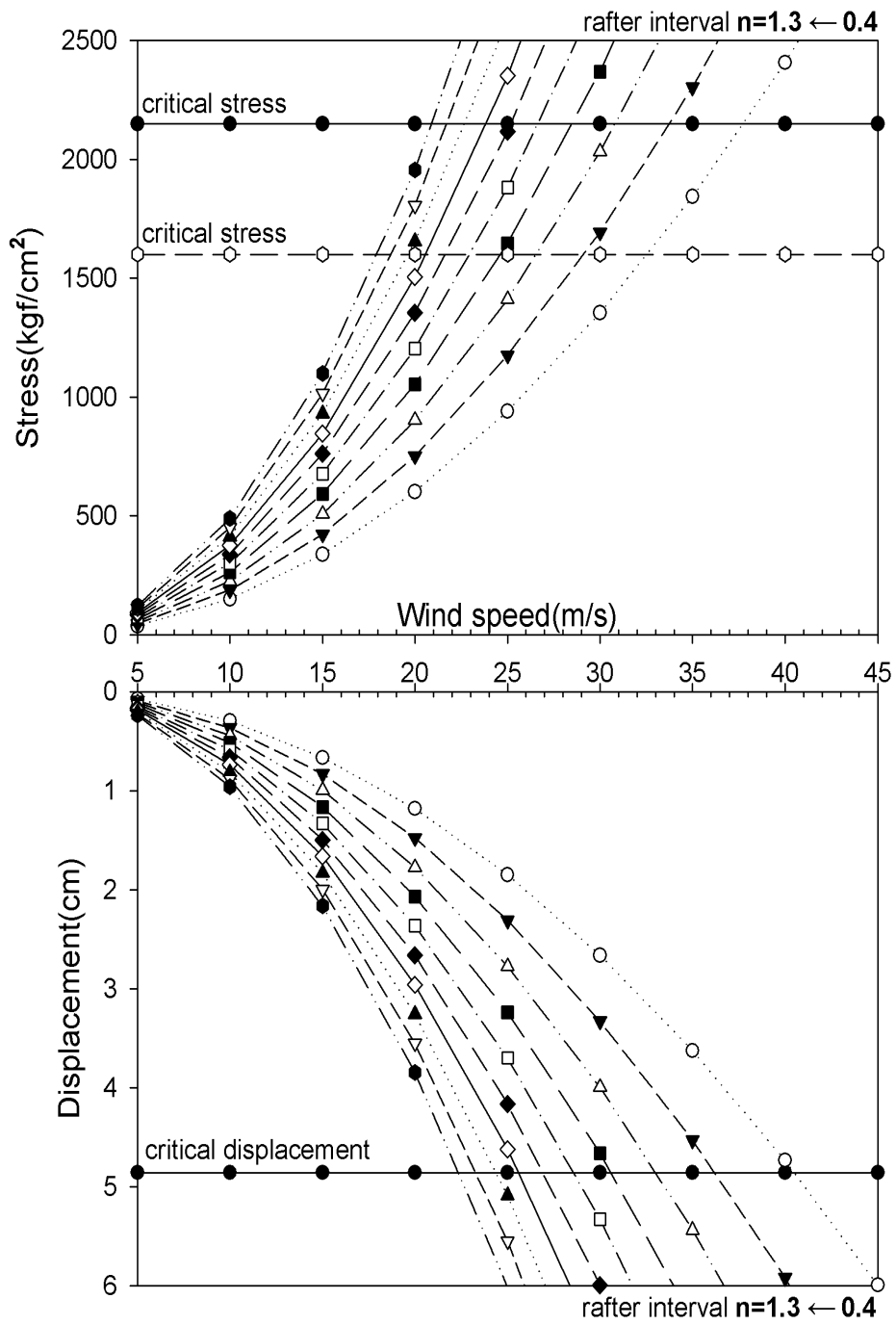


그림 75. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø31.8×1.5t)

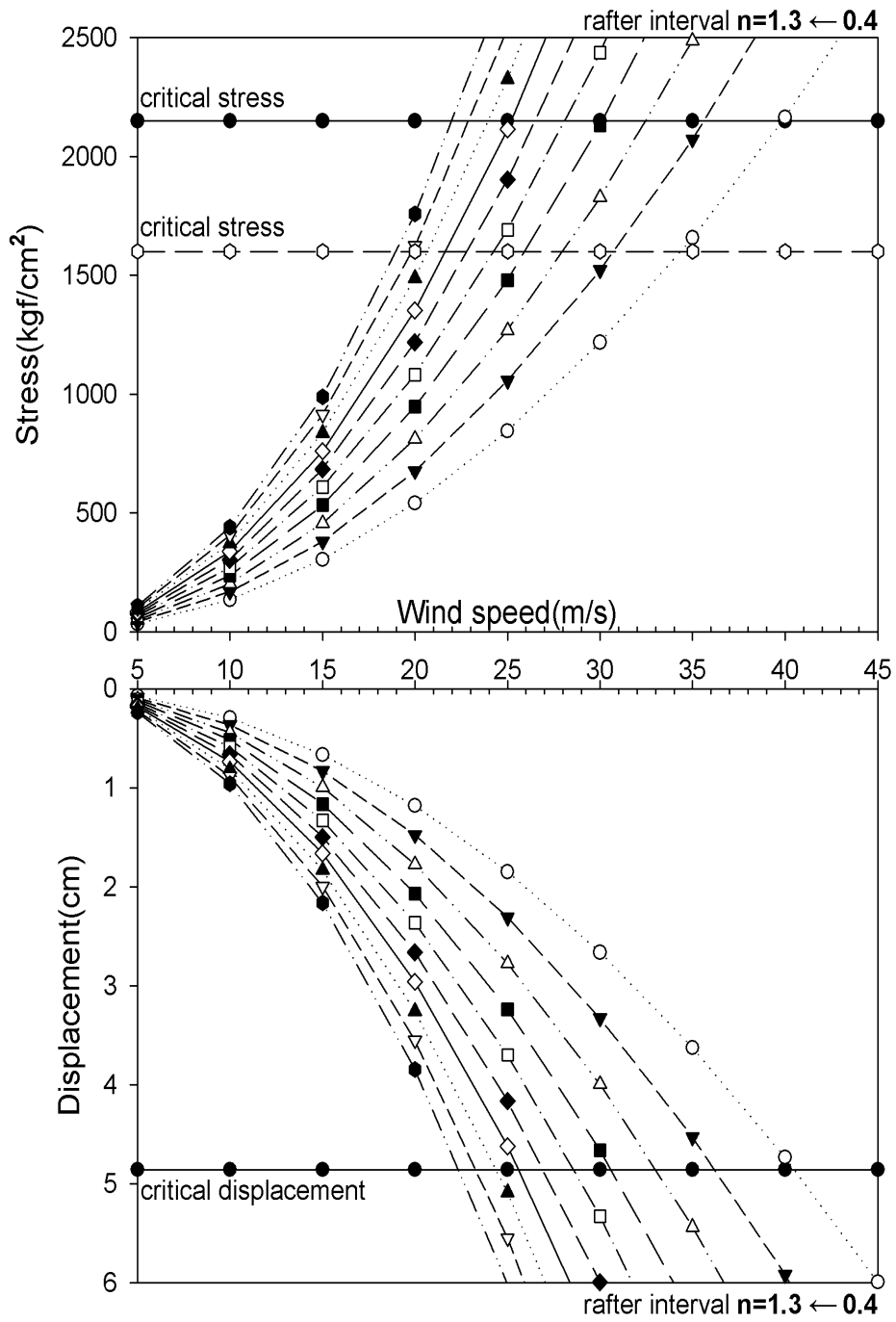


그림 76. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø31.8×1.7t)

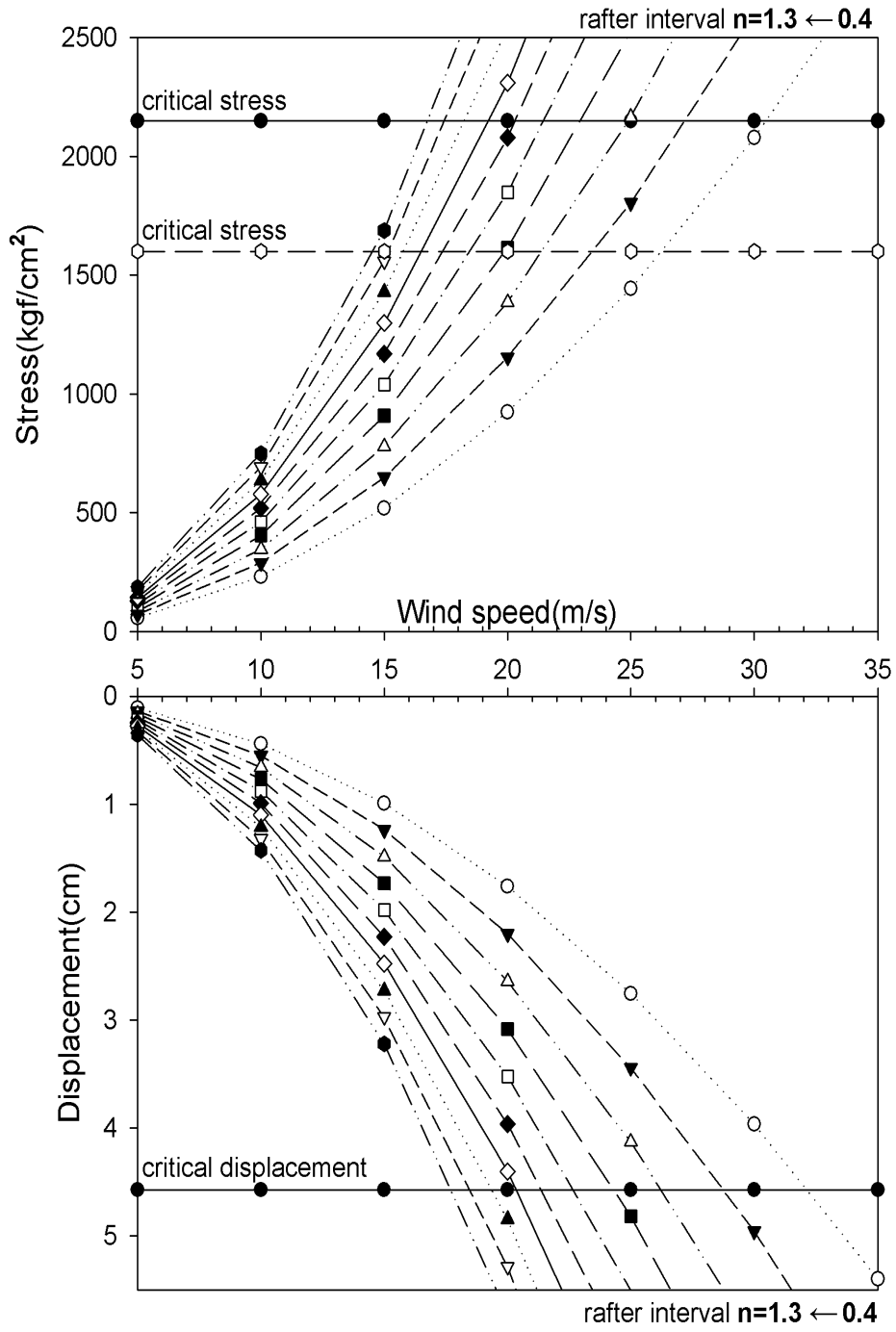


그림 77. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø25.4×1.5t)

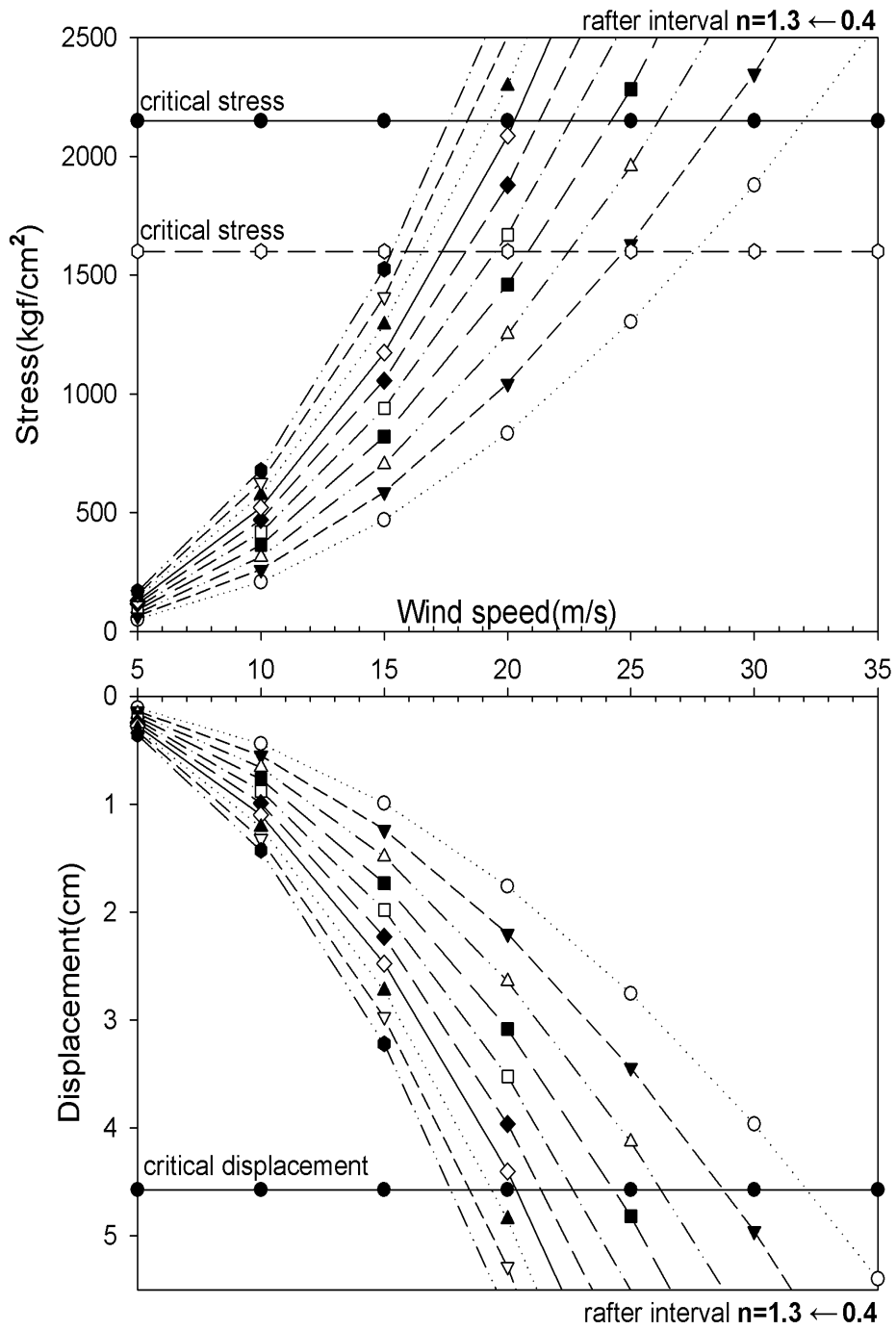


그림 78. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø25.4×1.7t)

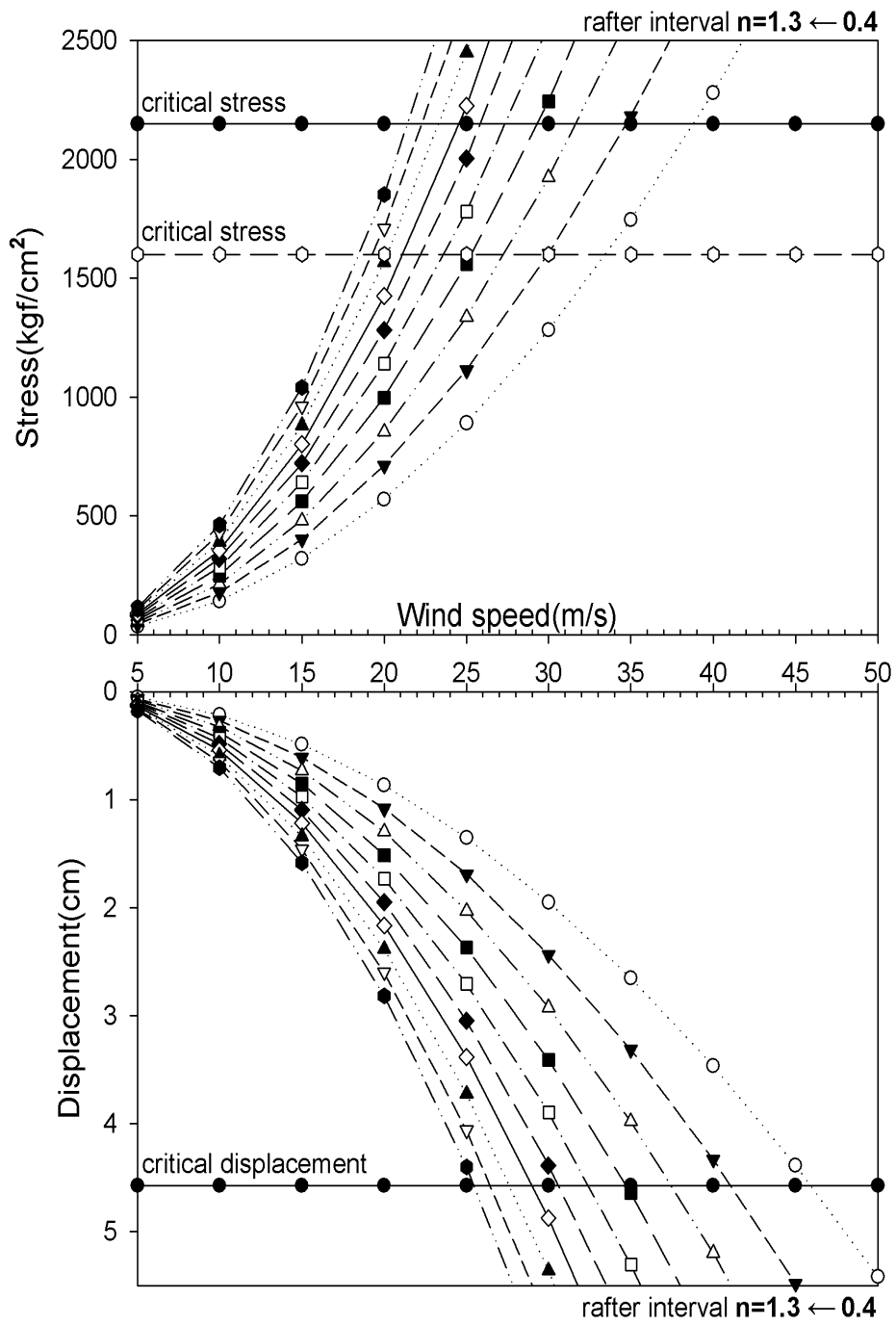


그림 79. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø31.8×1.5t)

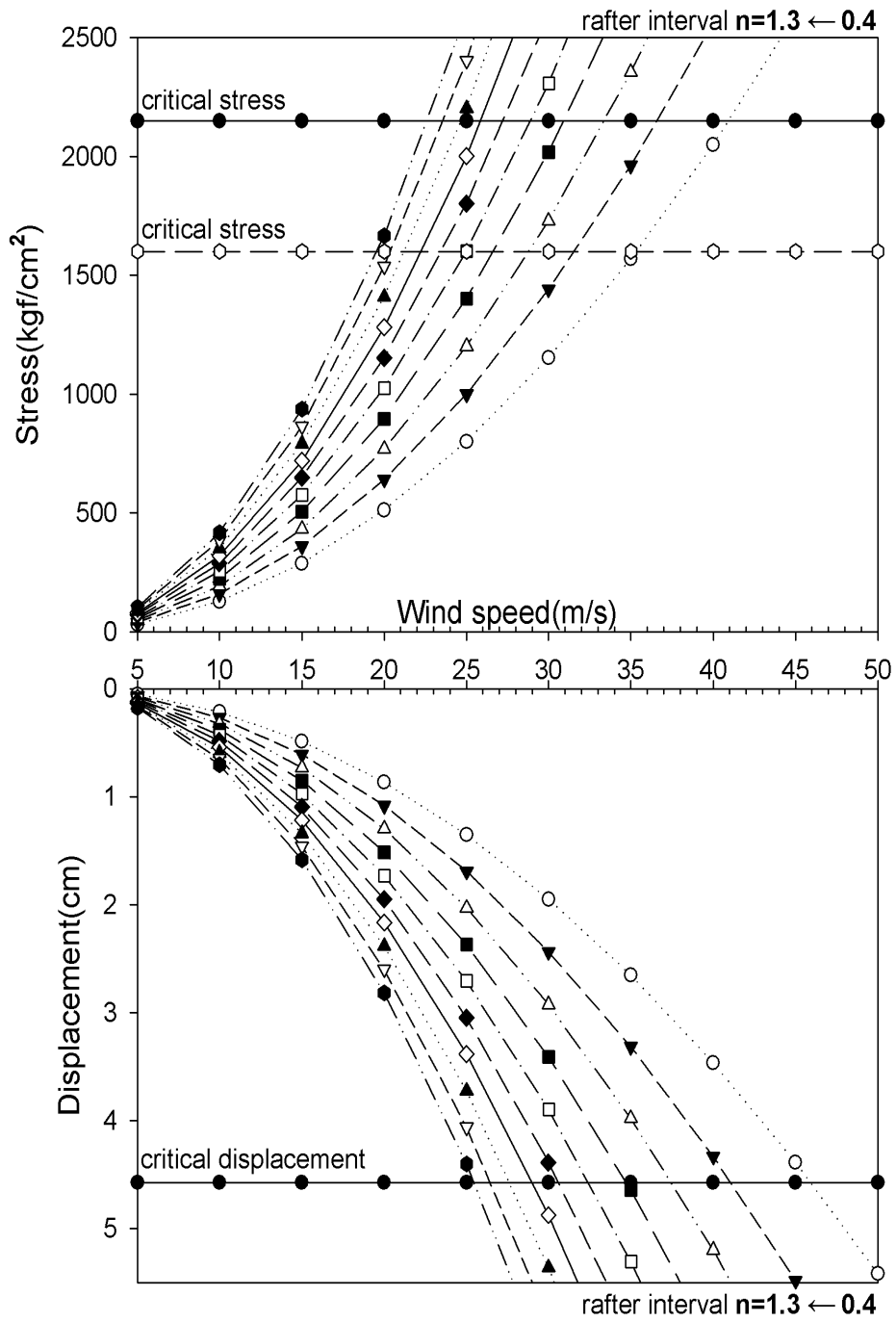


그림 80. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø31.8×1.7t)

온실모델별 서까래 간격별 한계풍속
(평균지붕높이 5m미만 풍속일정)

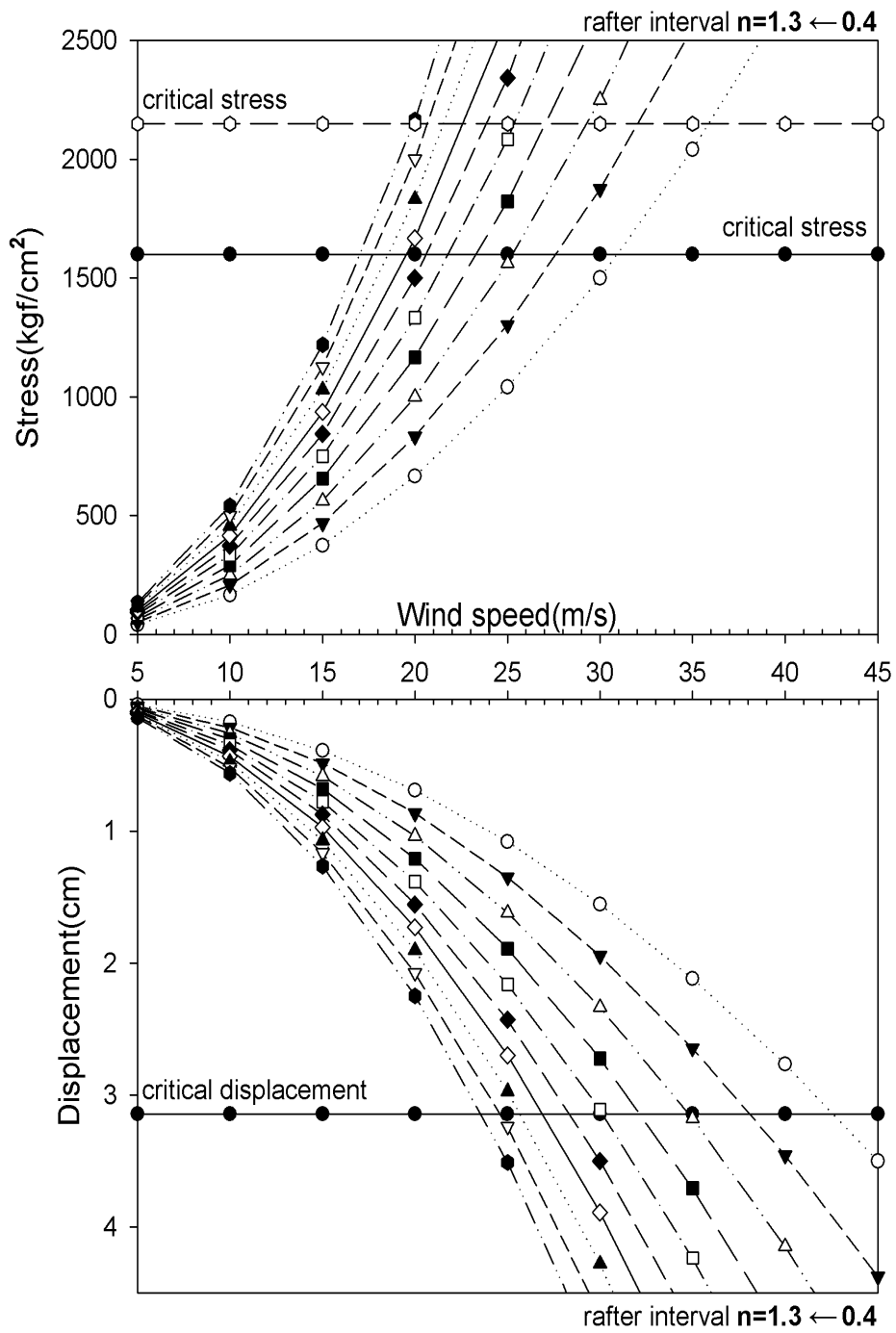


그림 81. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø25.4×1.5t)

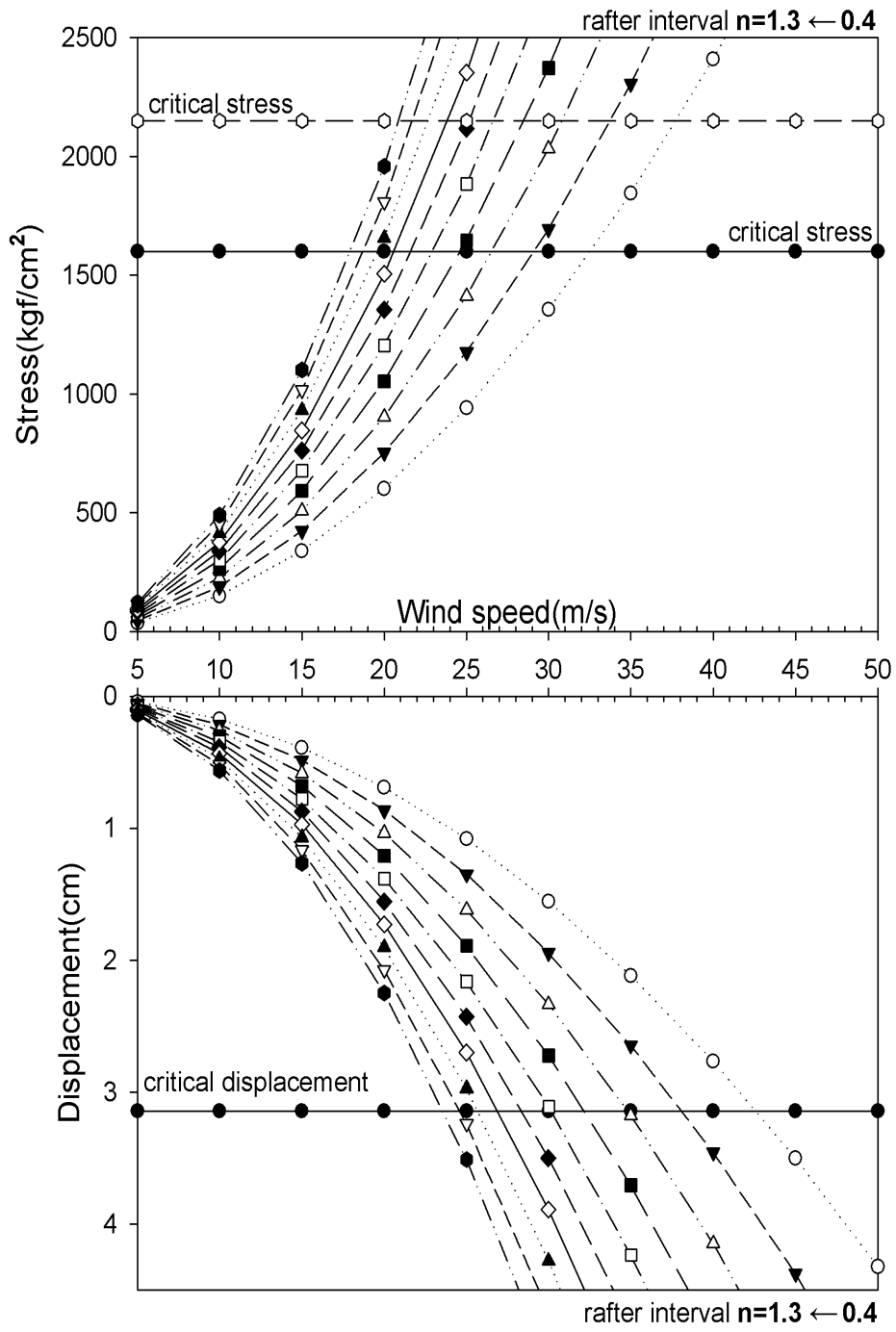


그림 82. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø25.4×1.7t)

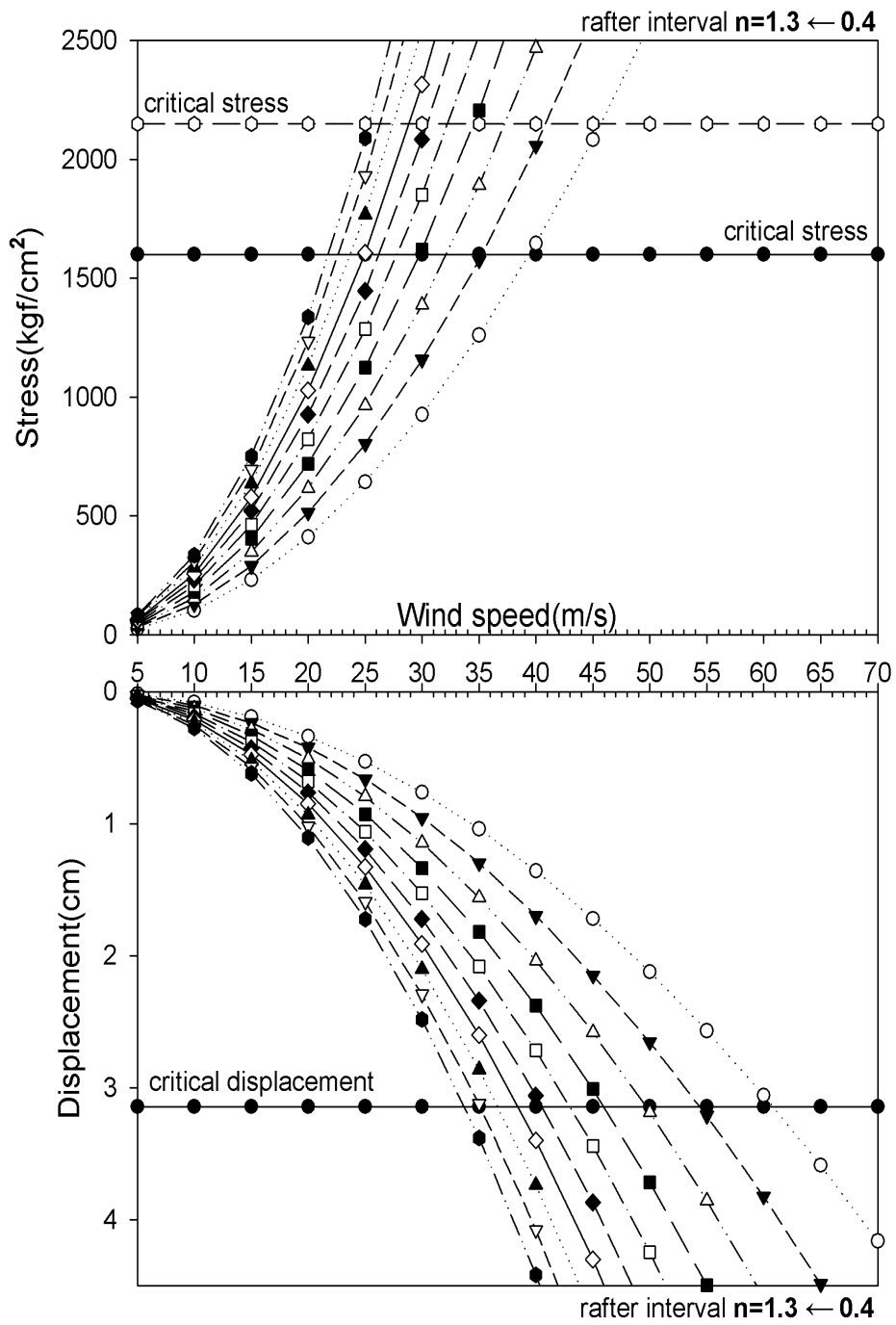


그림 83. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø31.8×1.5t)

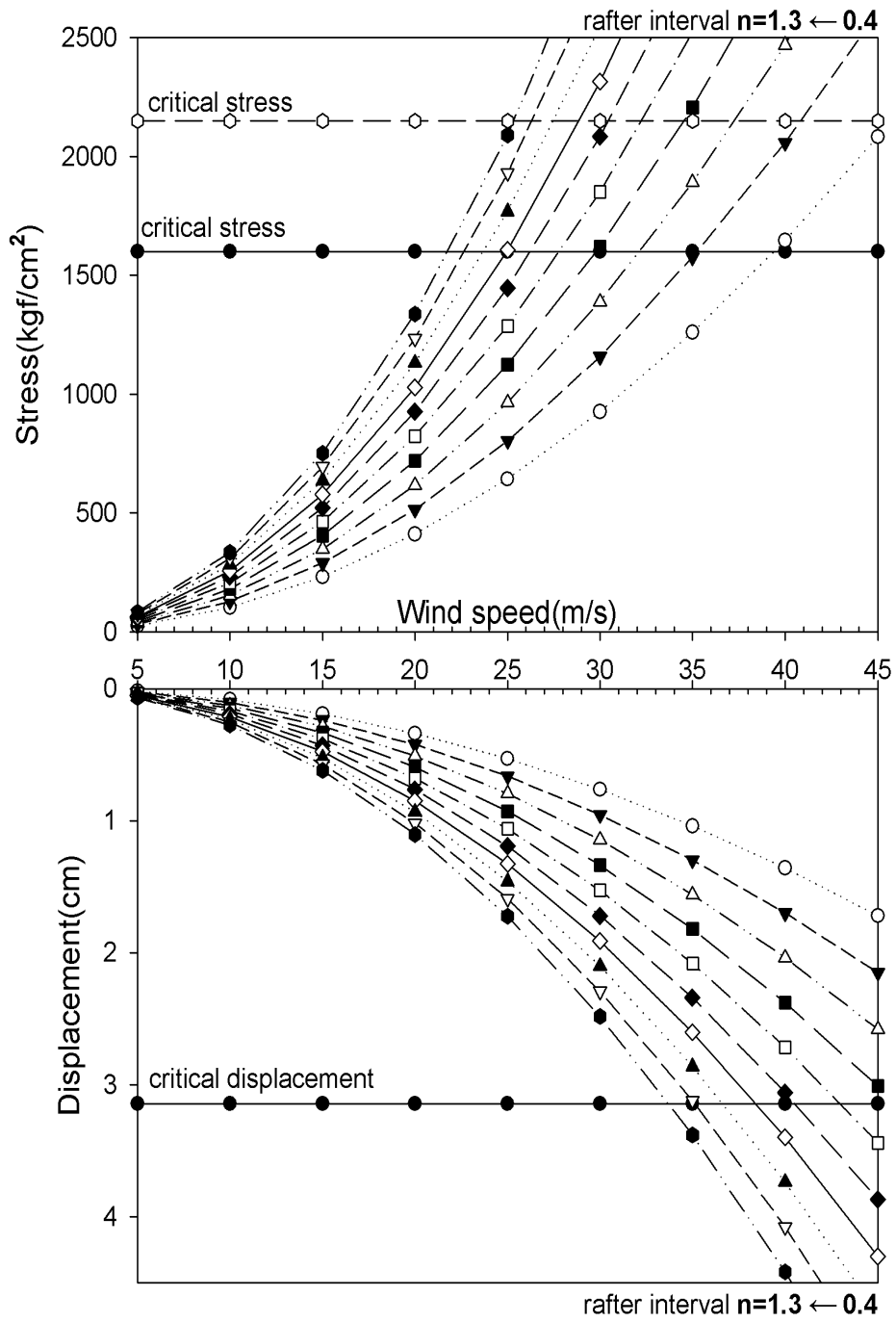


그림 84. 서까래 간격별 한계풍속(A형, Ø31.8×1.7t)

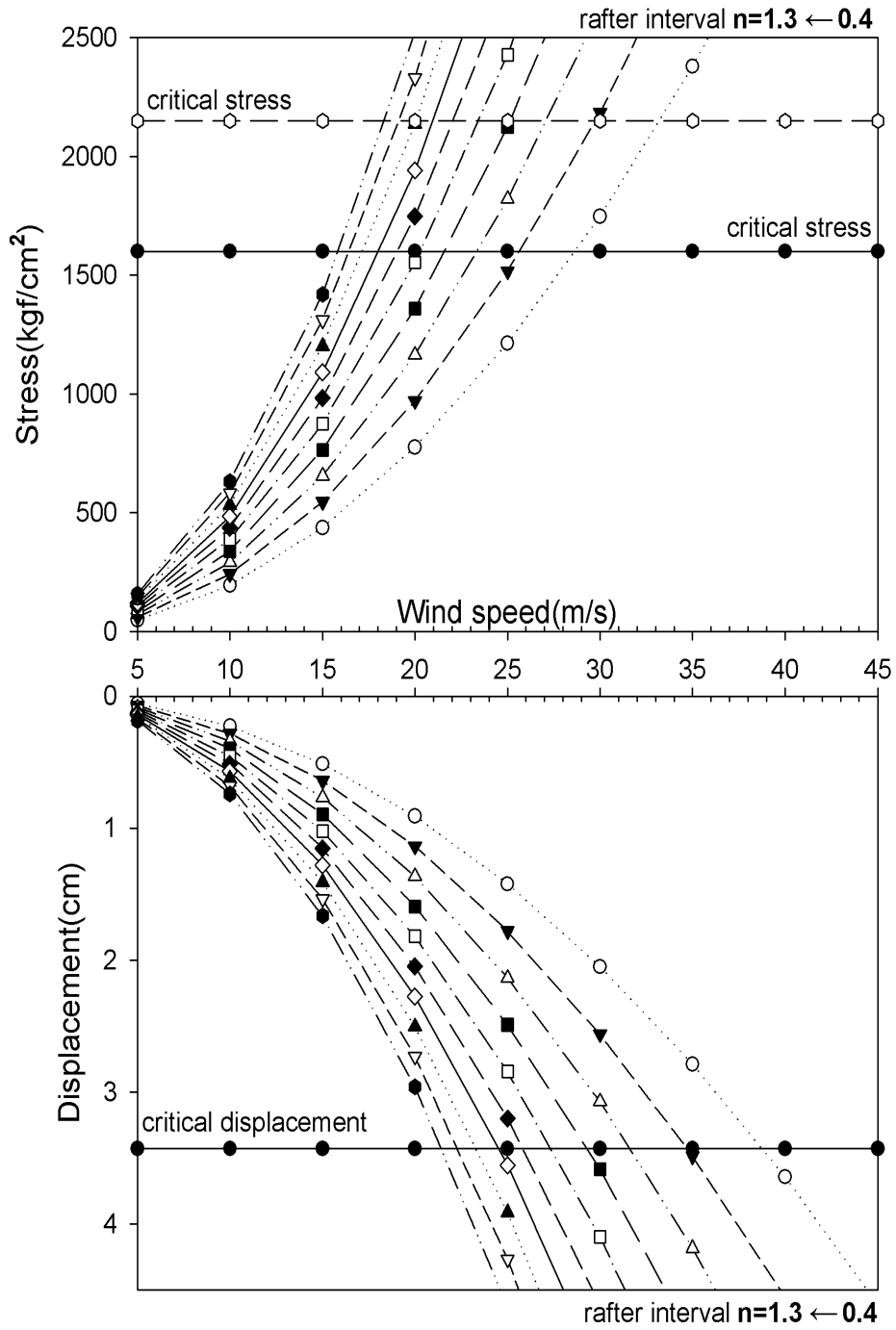


그림 85. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø25.4×1.5t)

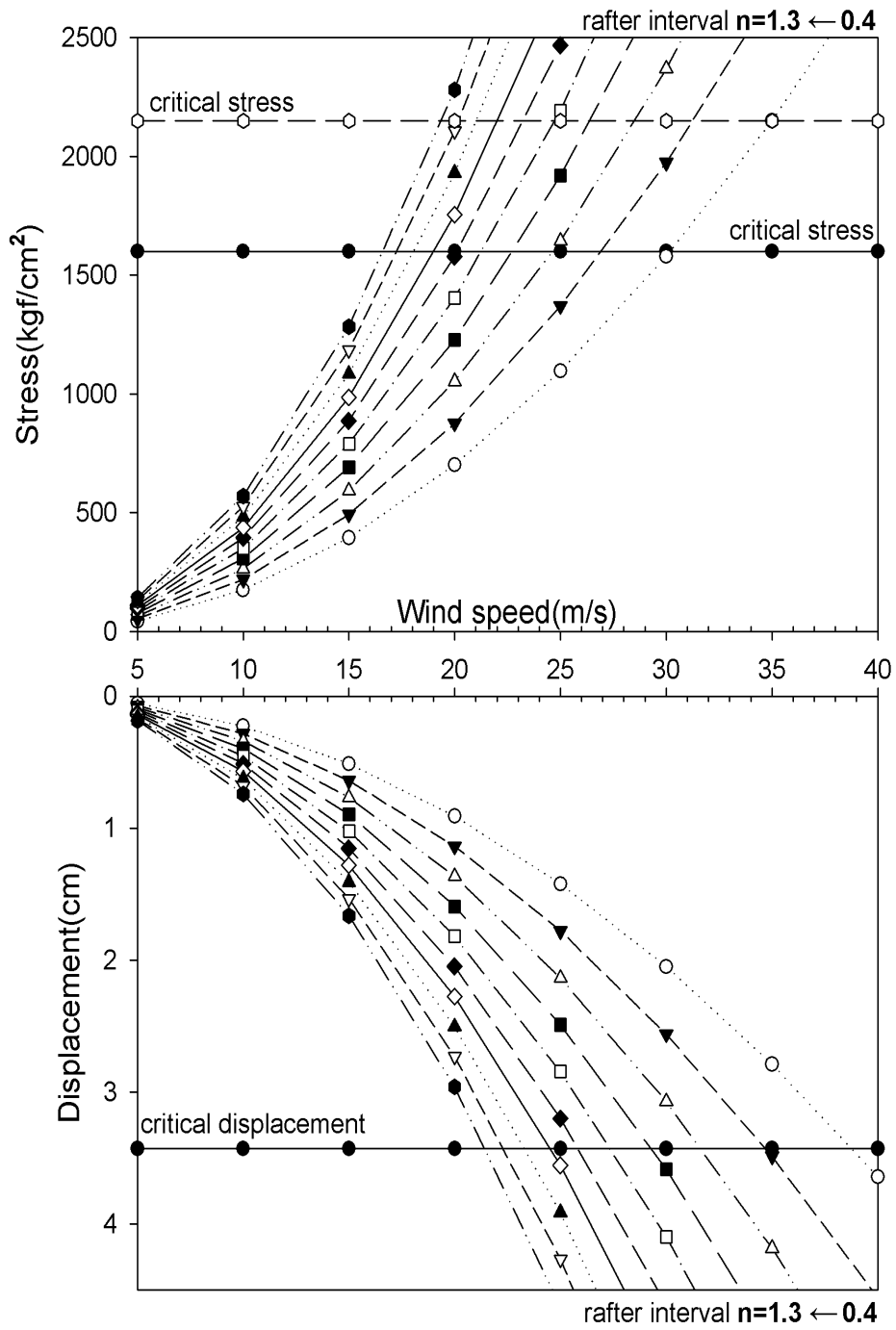


그림 86. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø25.4×1.7t)

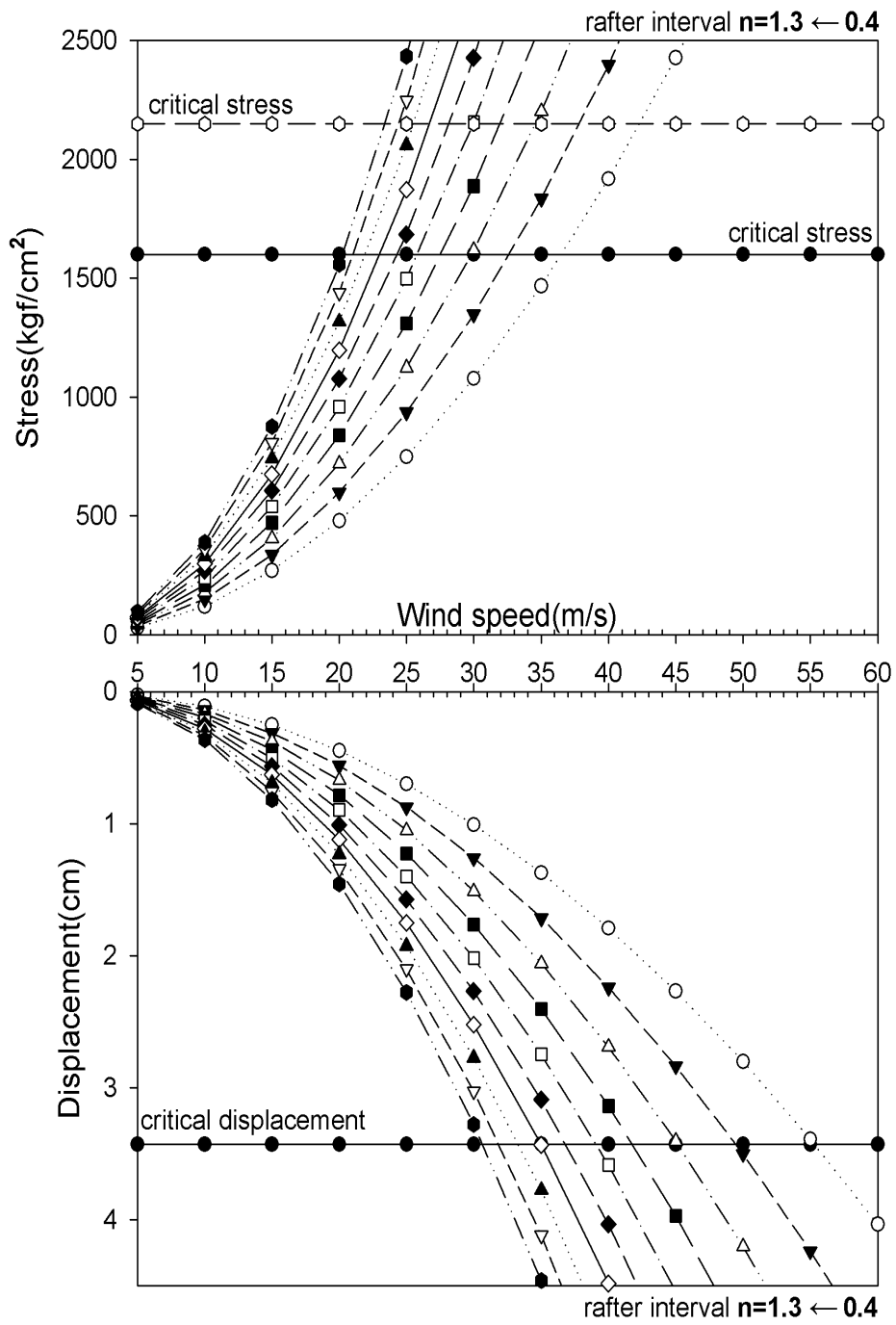


그림 87. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø31.8×1.5t)

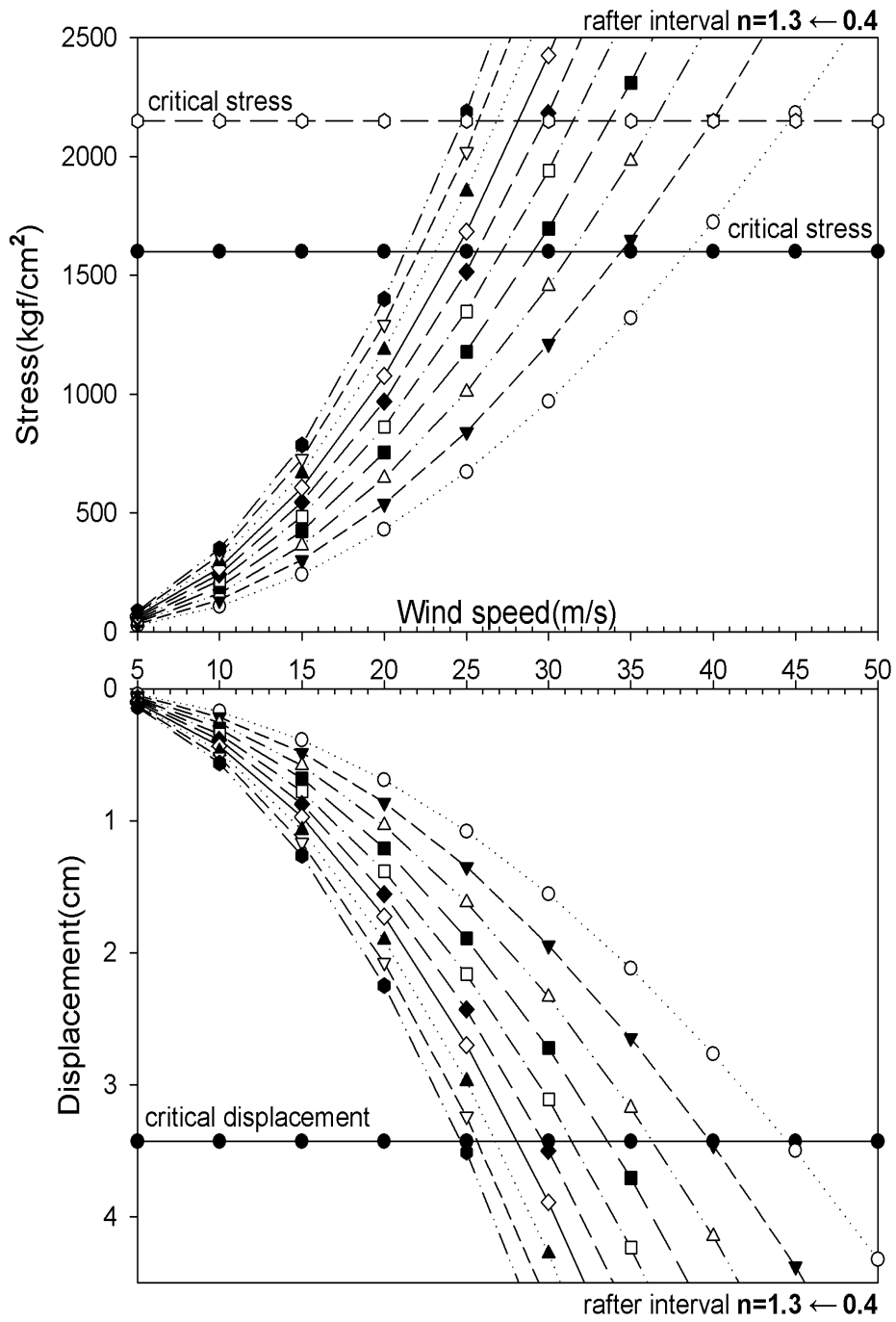


그림 88. 서까래 간격별 한계풍속(B형, Ø31.8×1.7t)

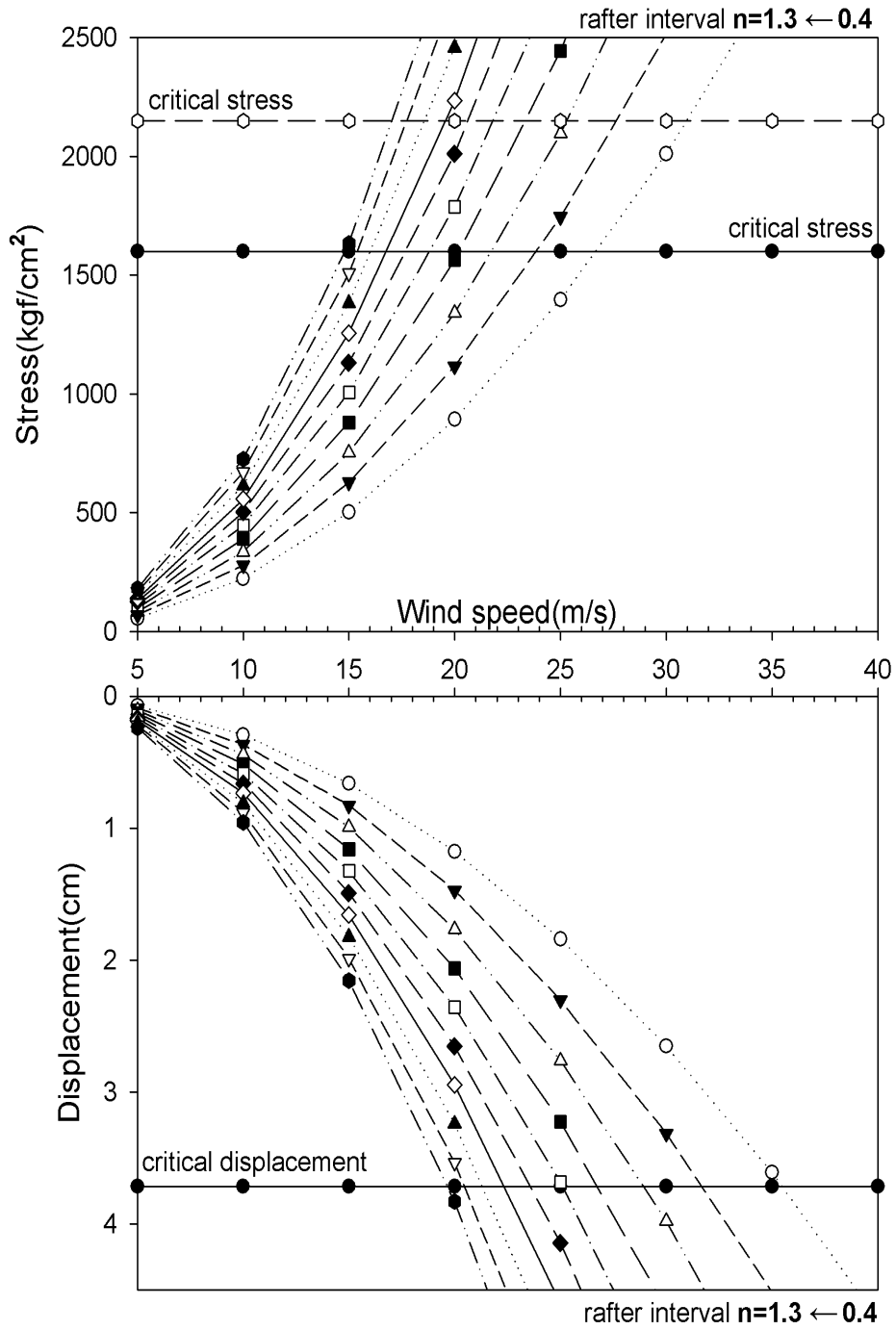


그림 89. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø25.4×1.5t)

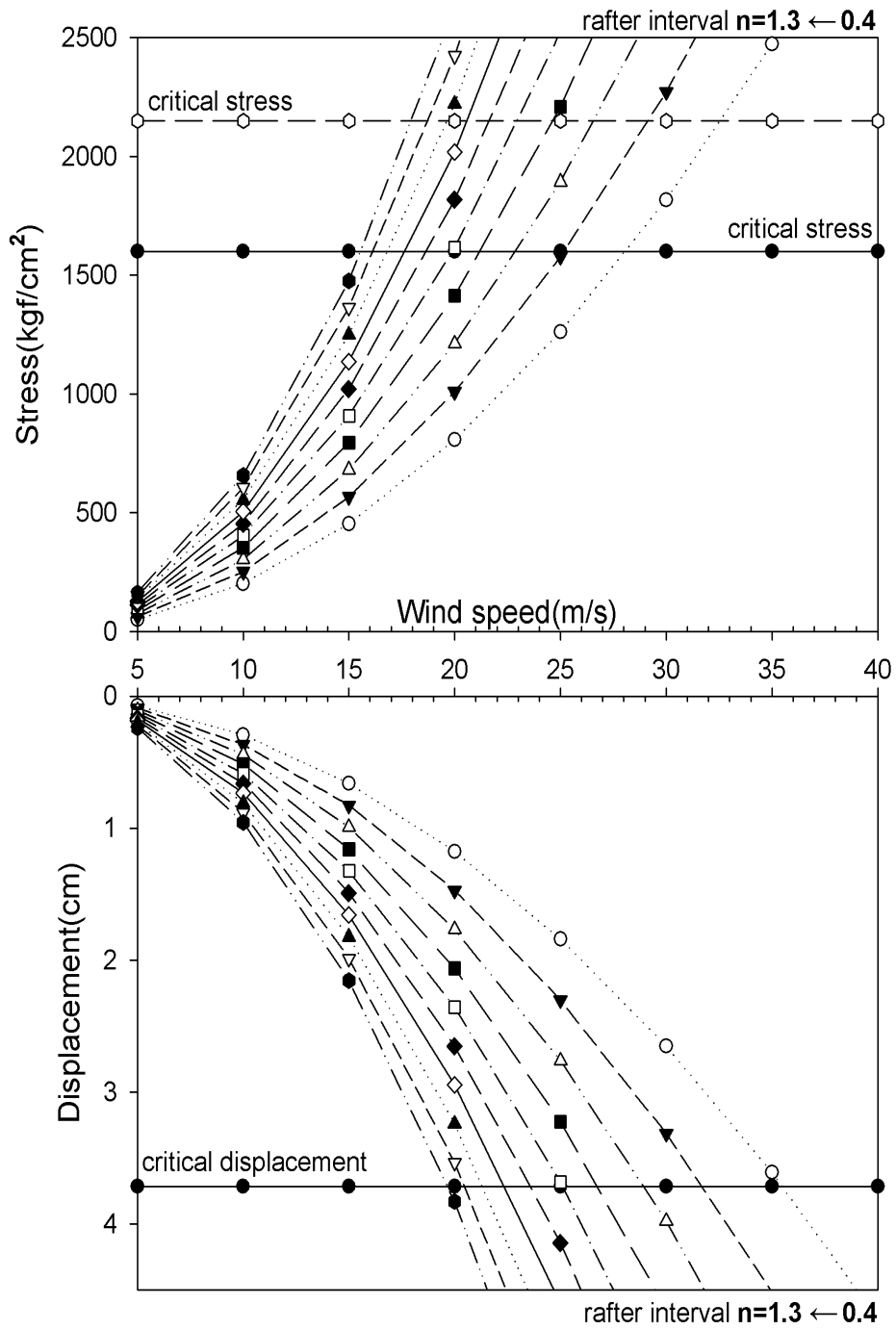


그림 90. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø25.4×1.7t)

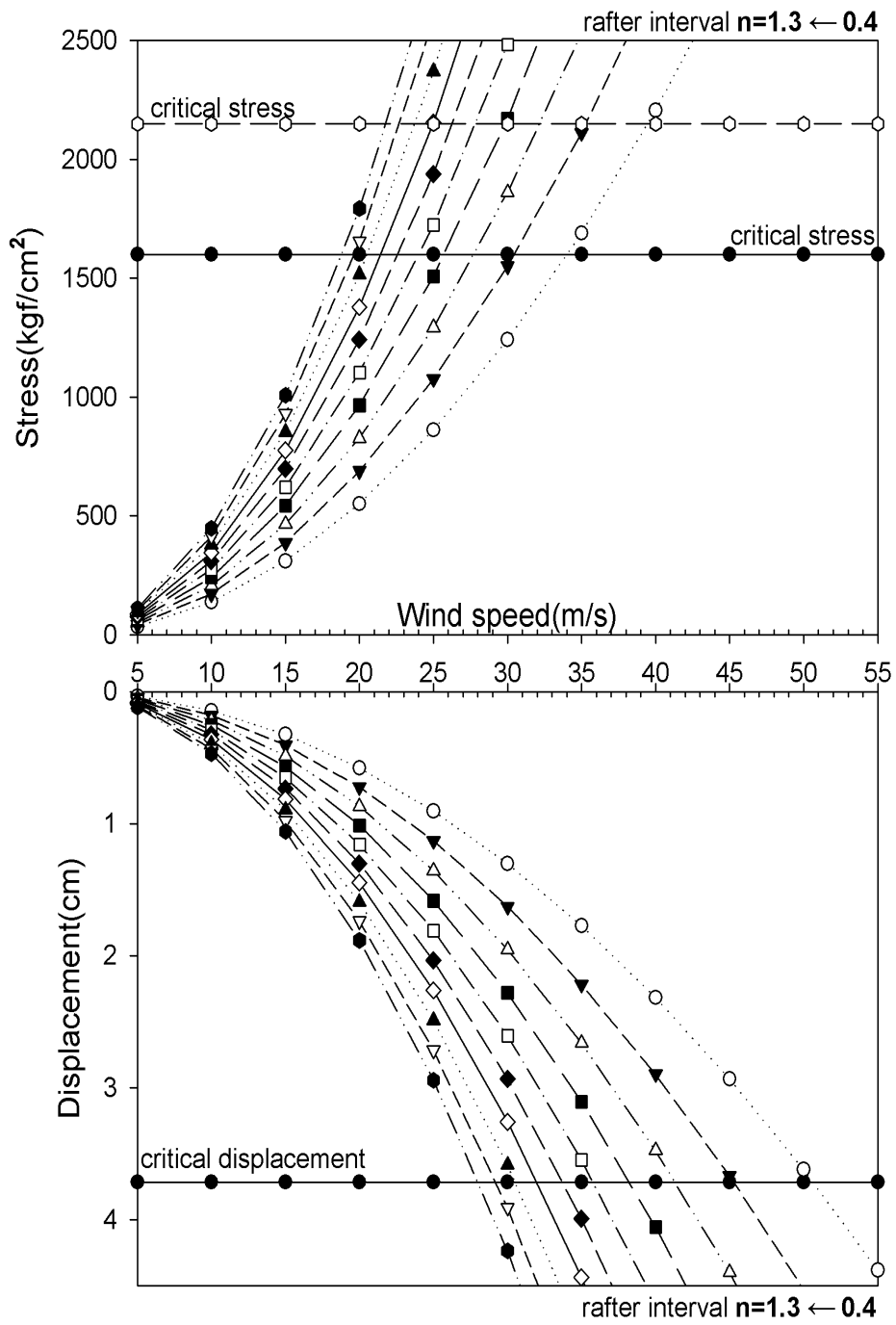


그림 91. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø31.8×1.5t)

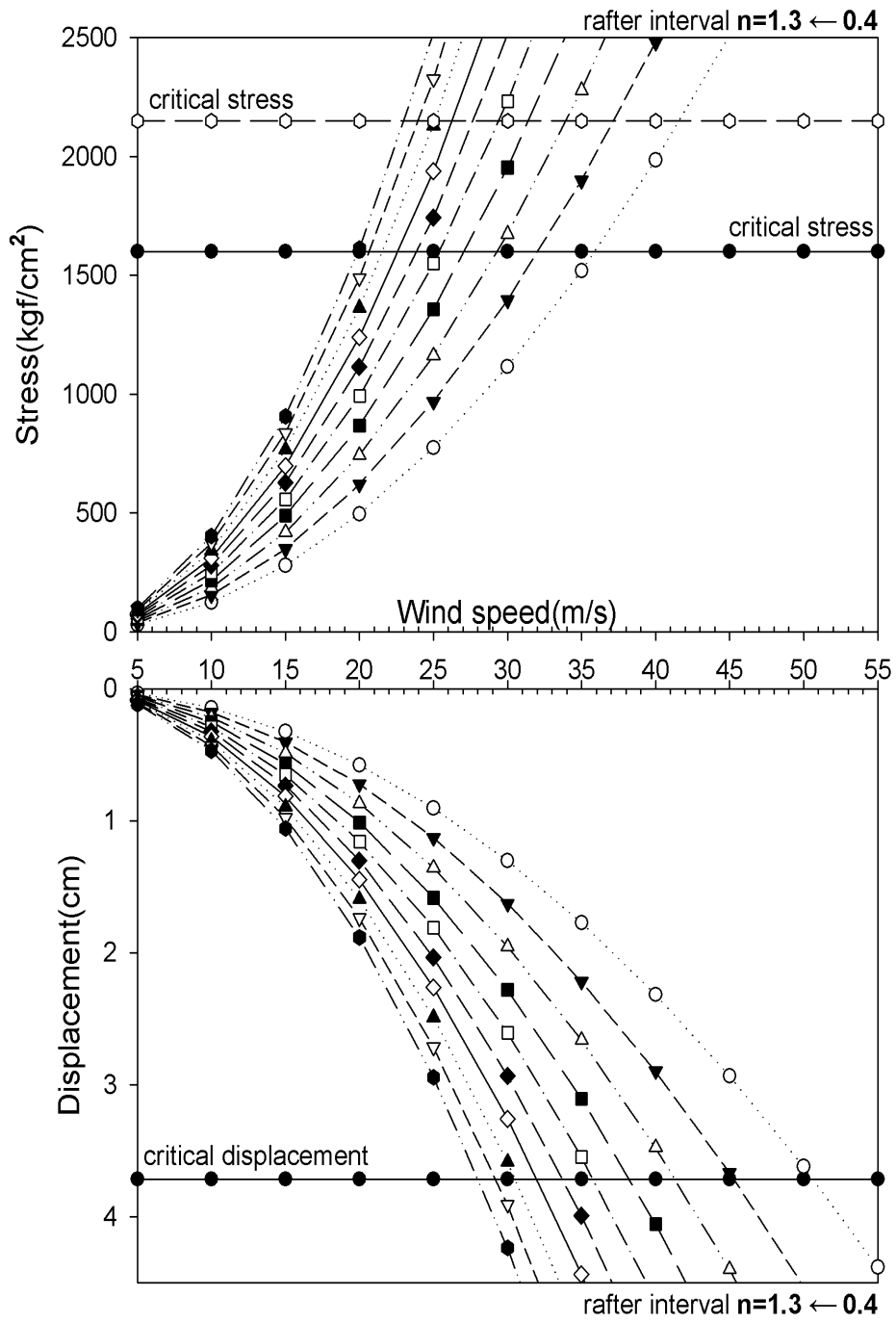


그림 92. 서까래 간격별 한계풍속(C형, Ø31.8×1.7t)

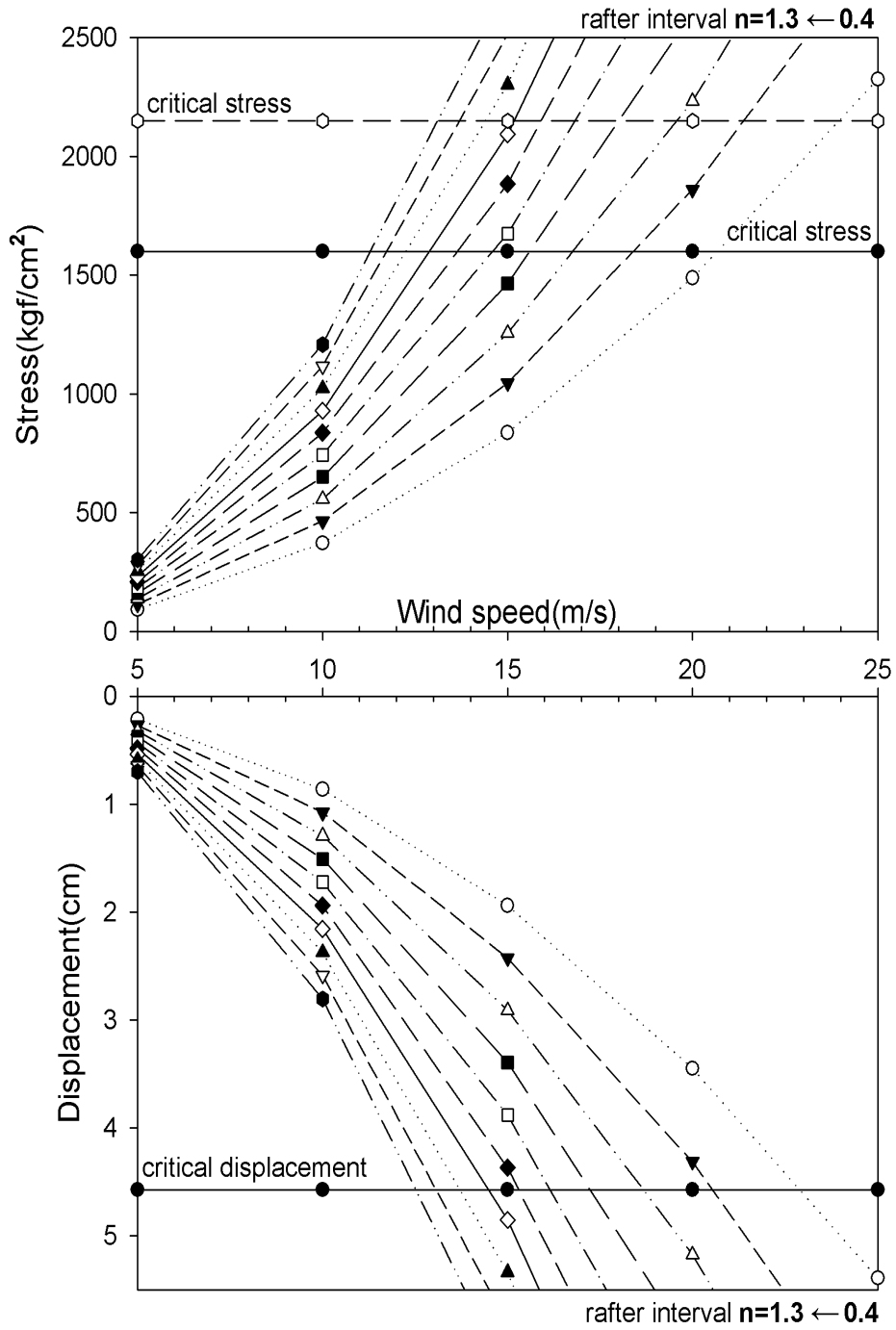


그림 93. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø25.4×1.5t)

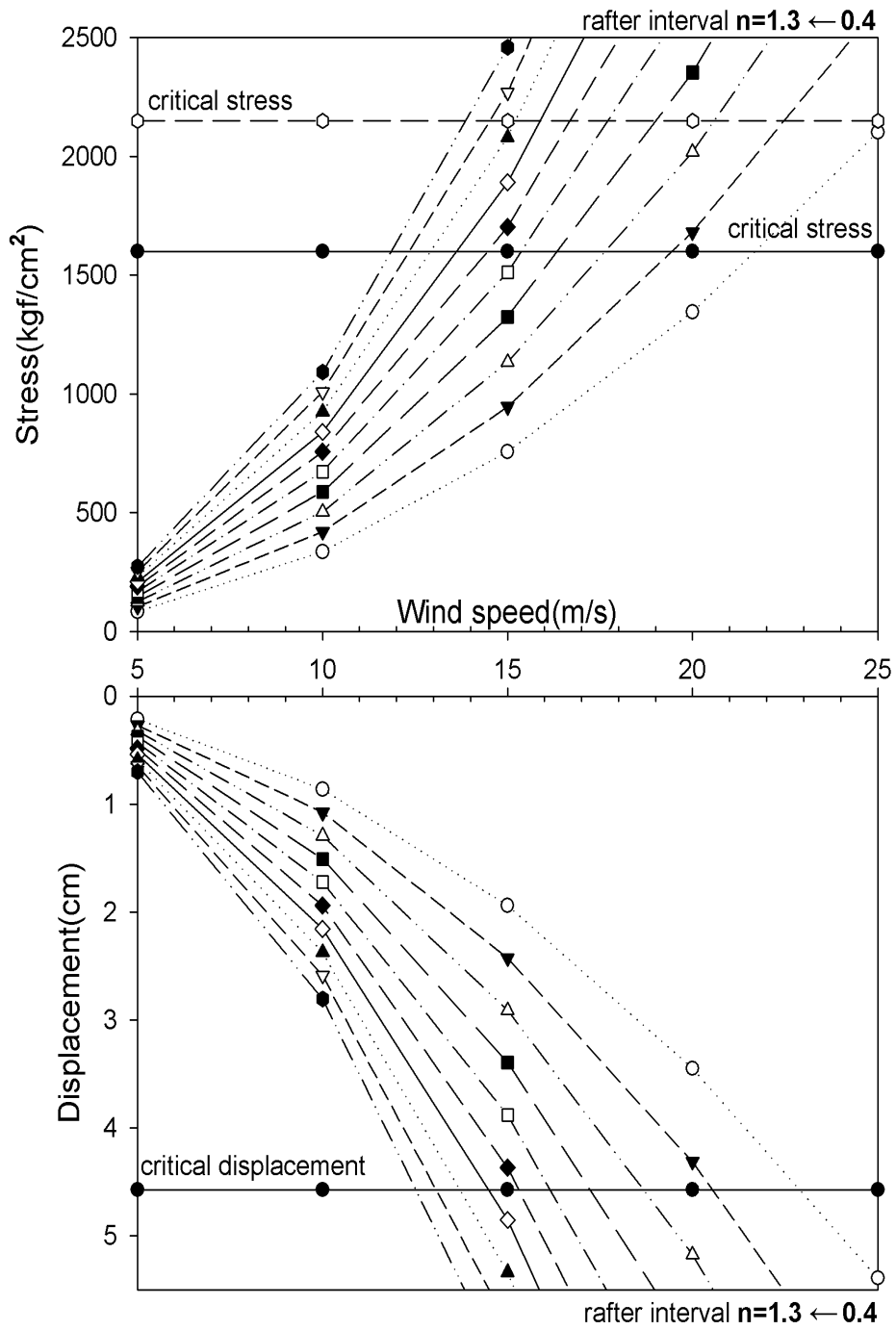


그림 94. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø25.4×1.7t)

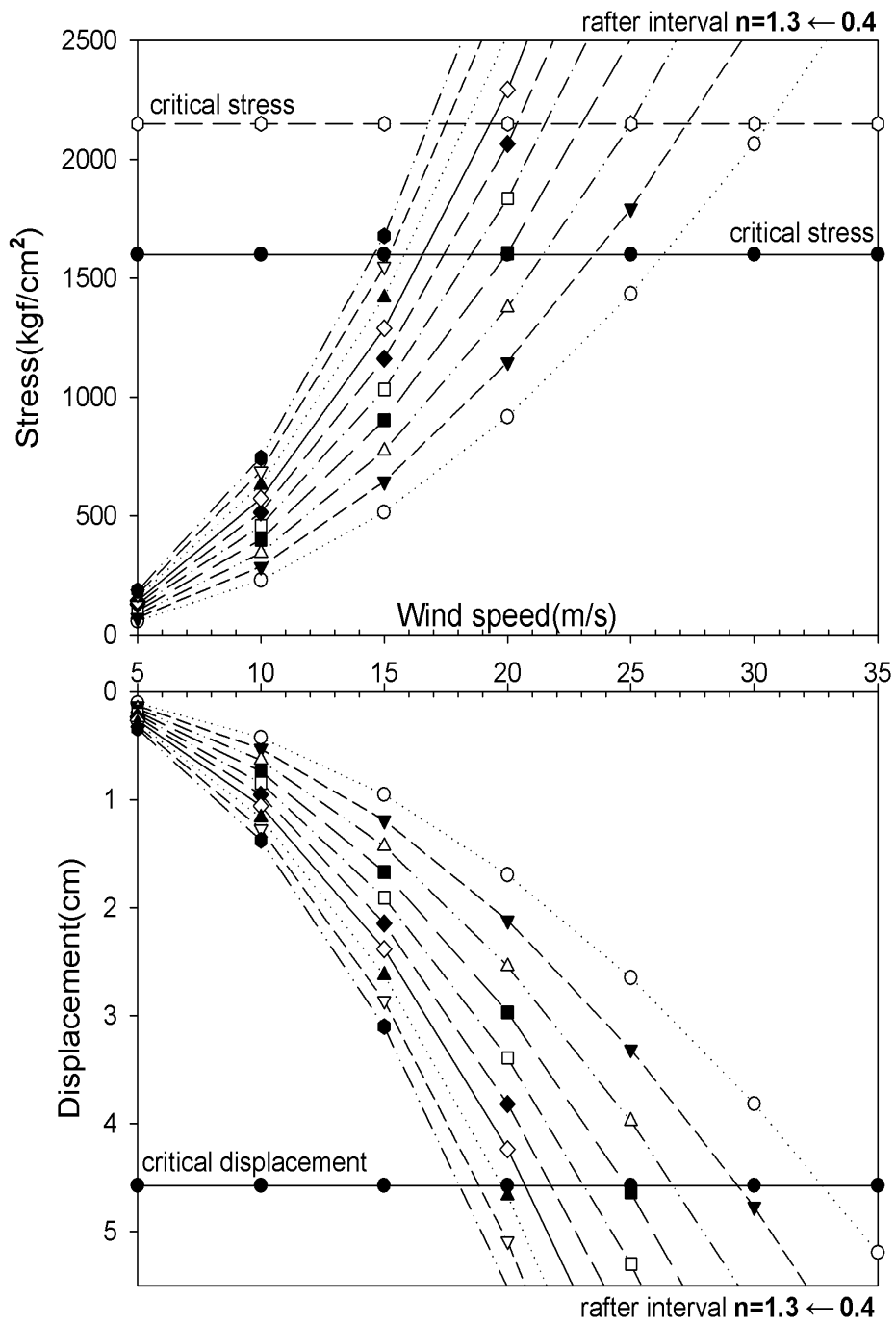


그림 95. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø31.8×1.5t)

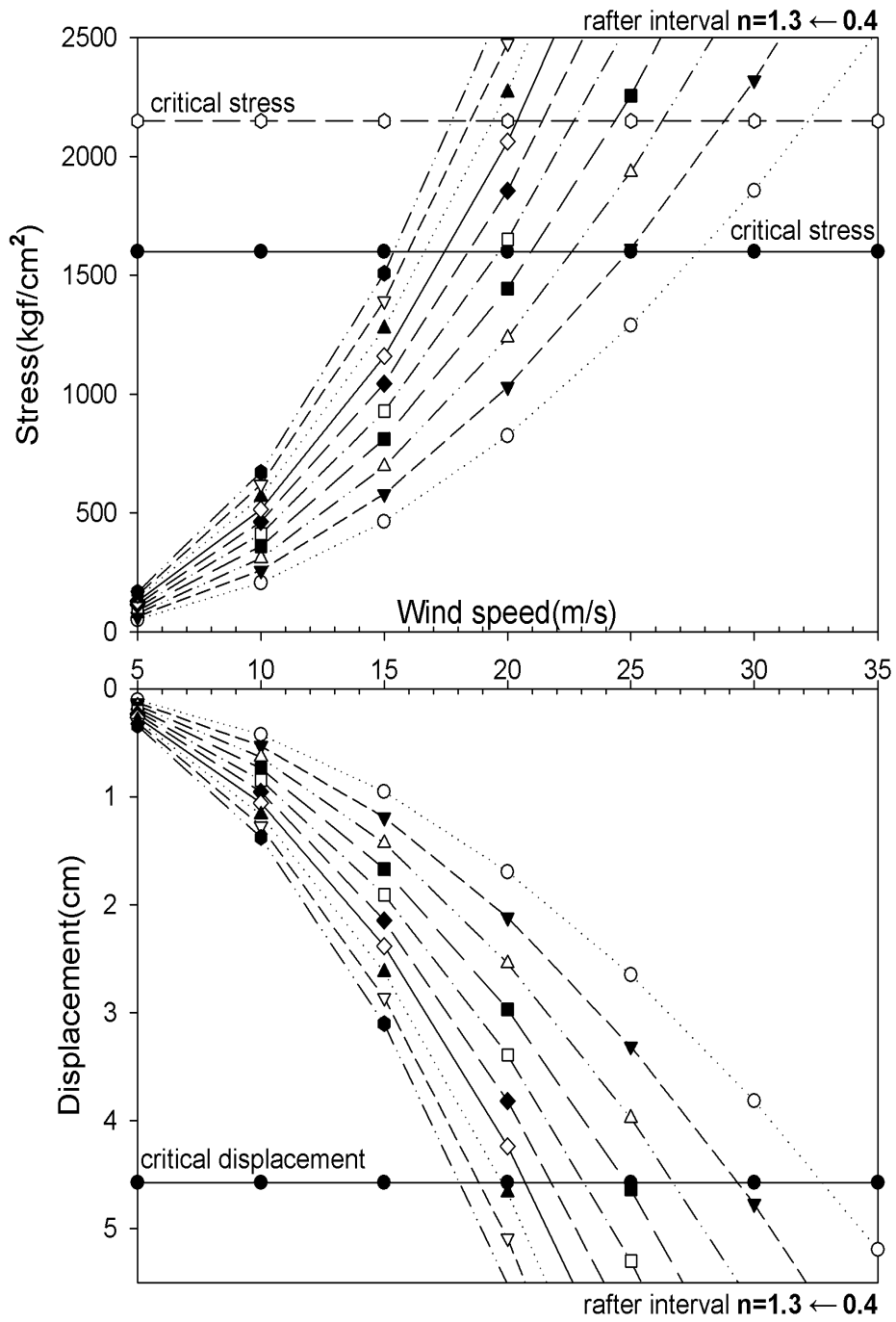


그림 96. 서까래 간격별 한계풍속(D형, Ø31.8×1.7t)

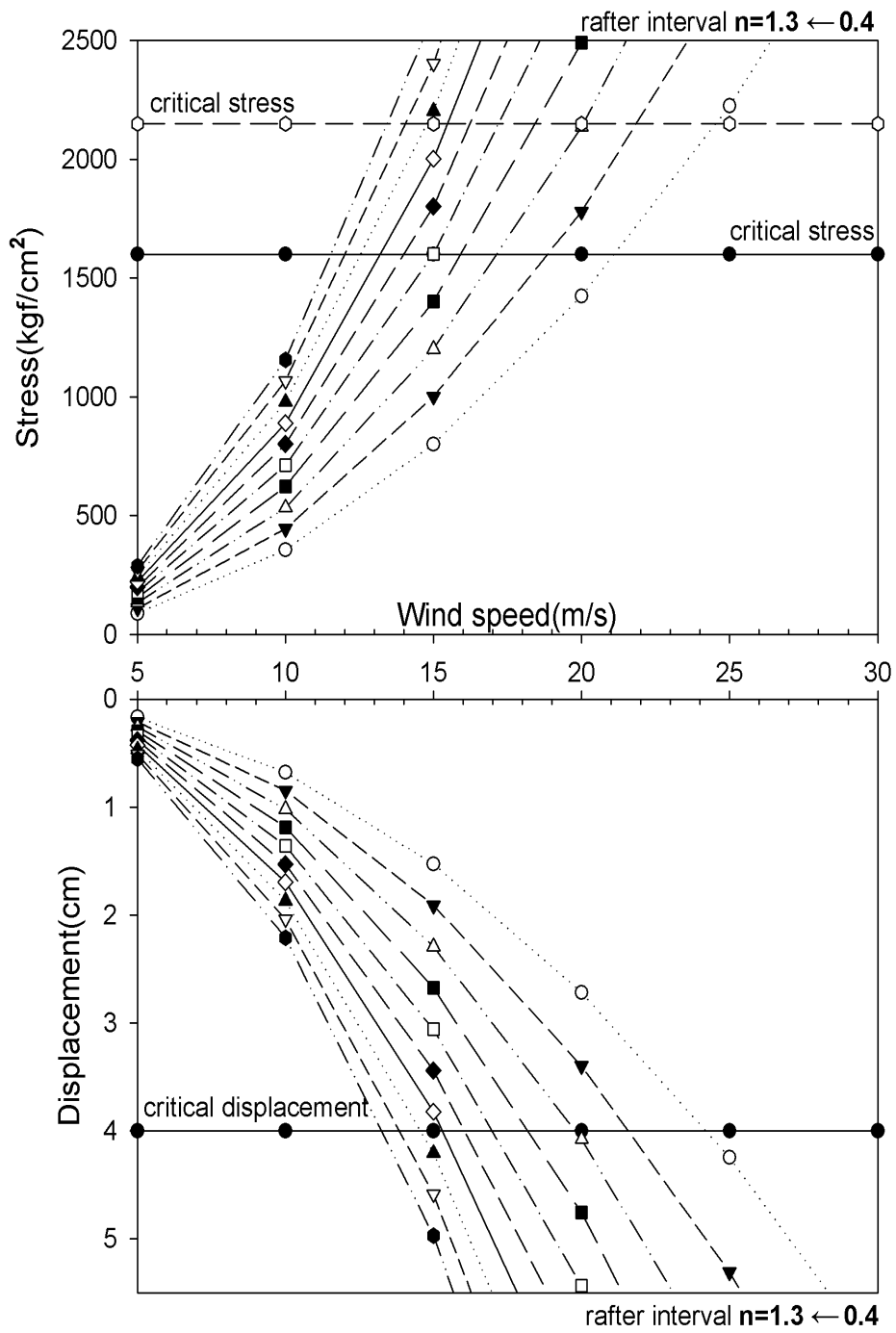


그림 97. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø25.4×1.5t)

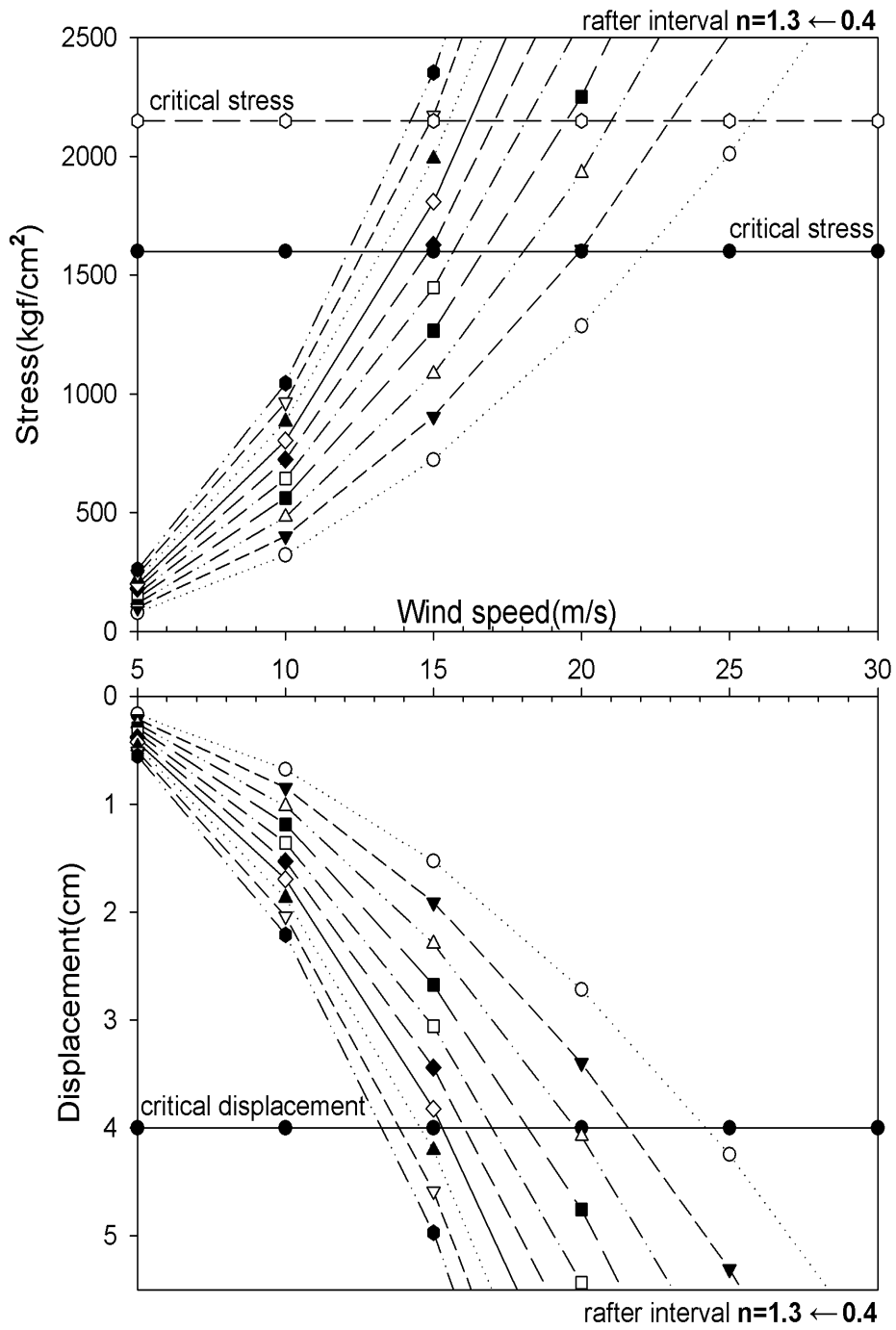


그림 98. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø25.4×1.7t)

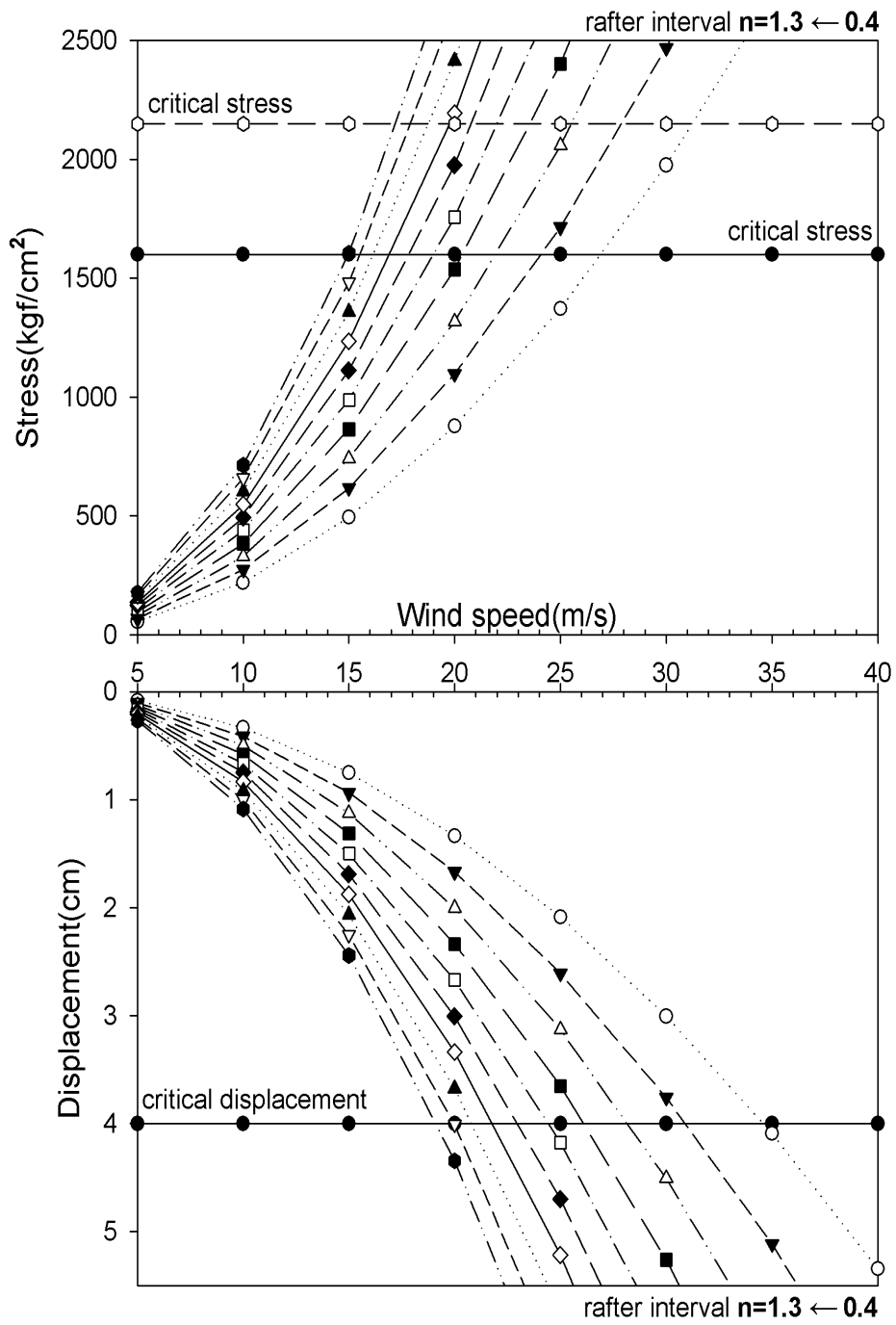


그림 99. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø31.8×1.5t)

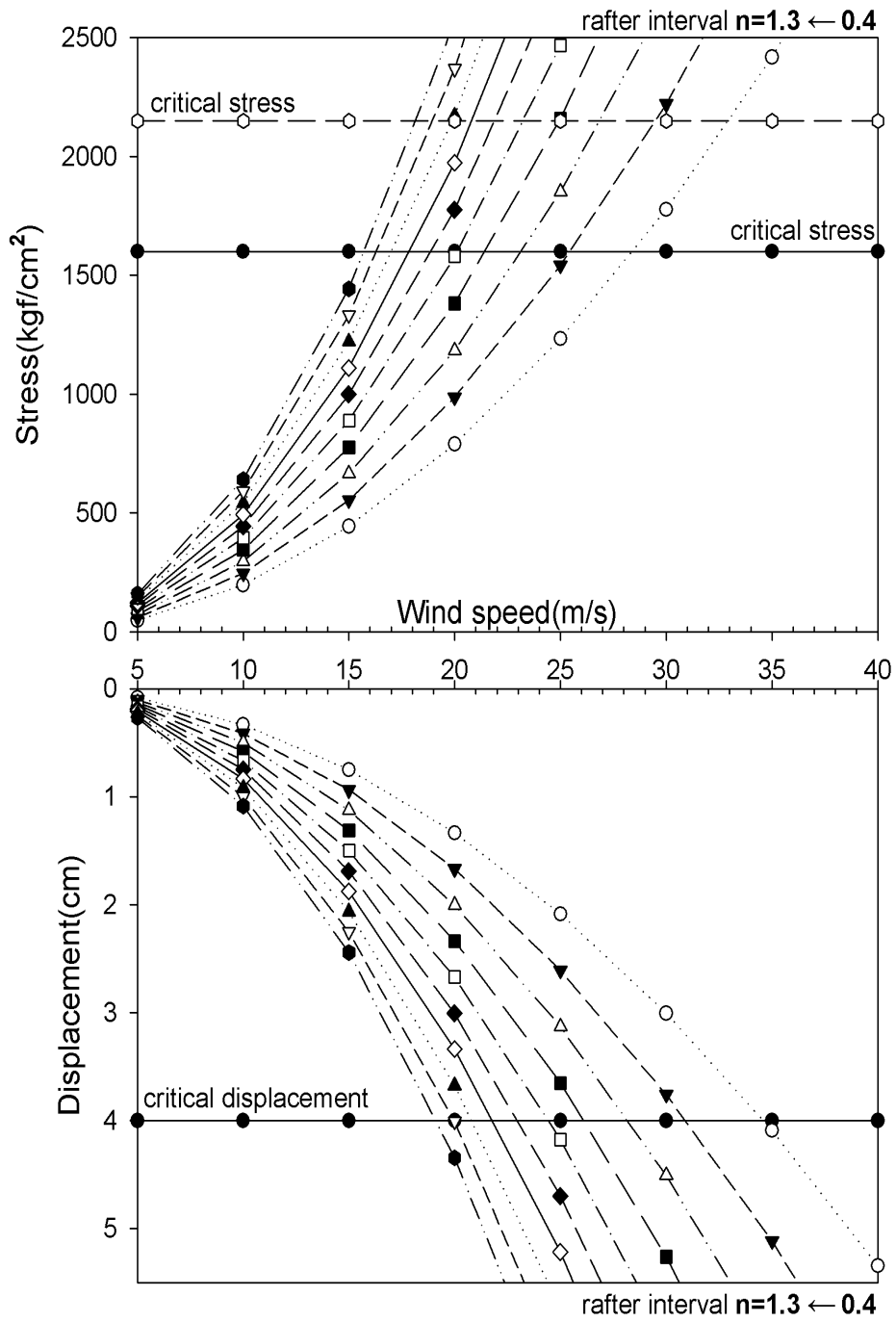


그림 100. 서까래 간격별 한계풍속(E형, Ø31.8×1.7t)

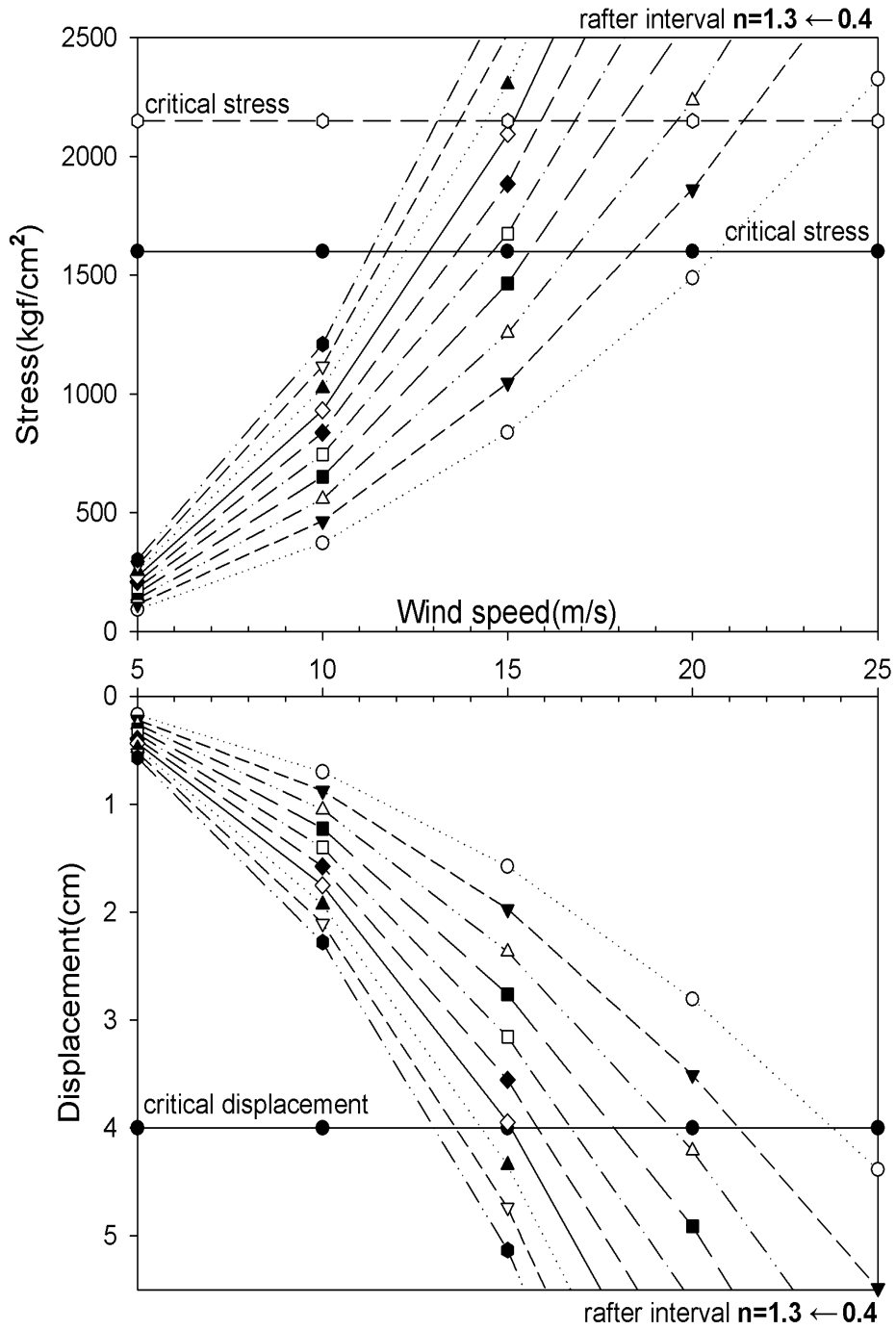


그림 101. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø25.4×1.5t)

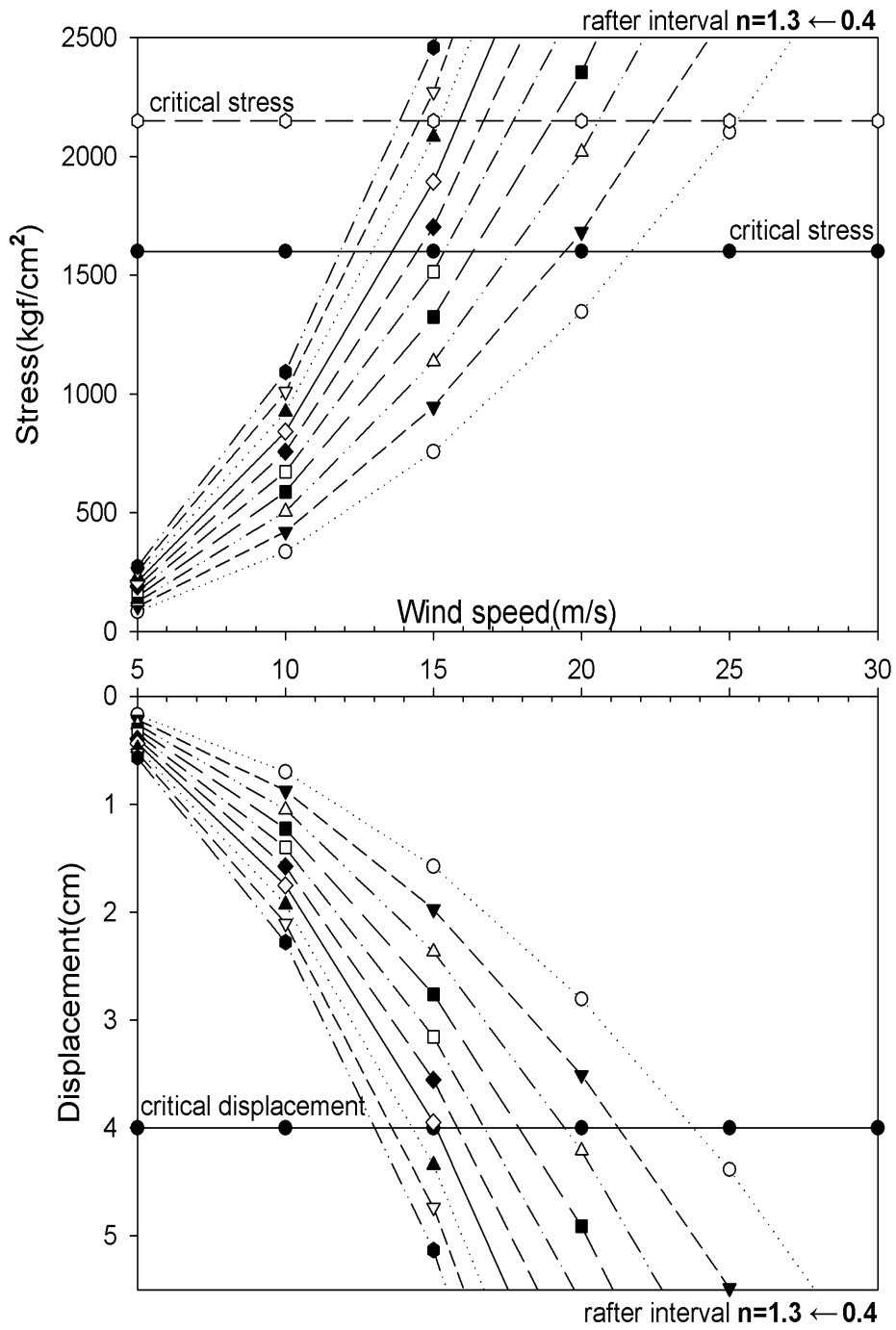


그림 102. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø25.4×1.7t)

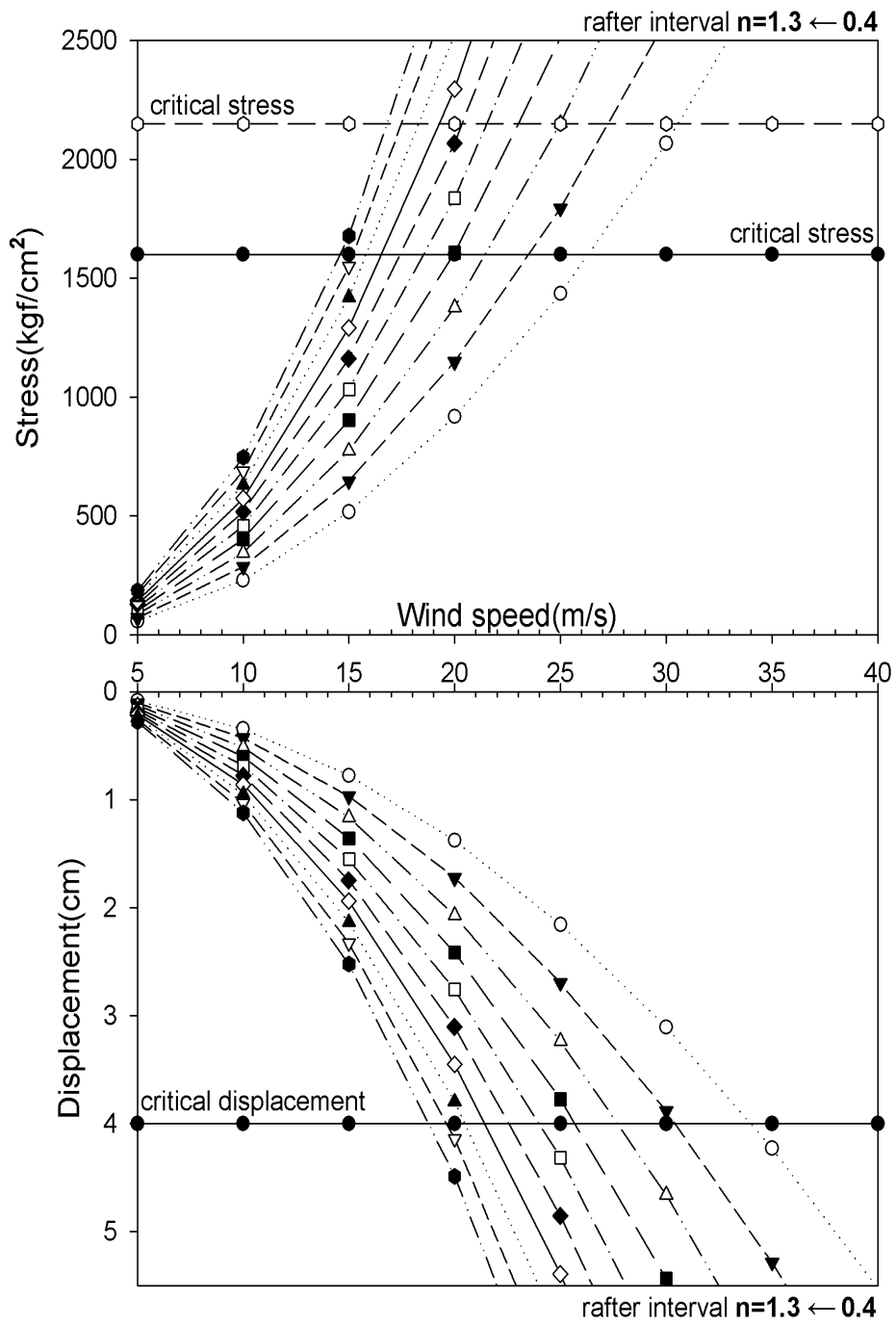


그림 103. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø31.8×1.5t)

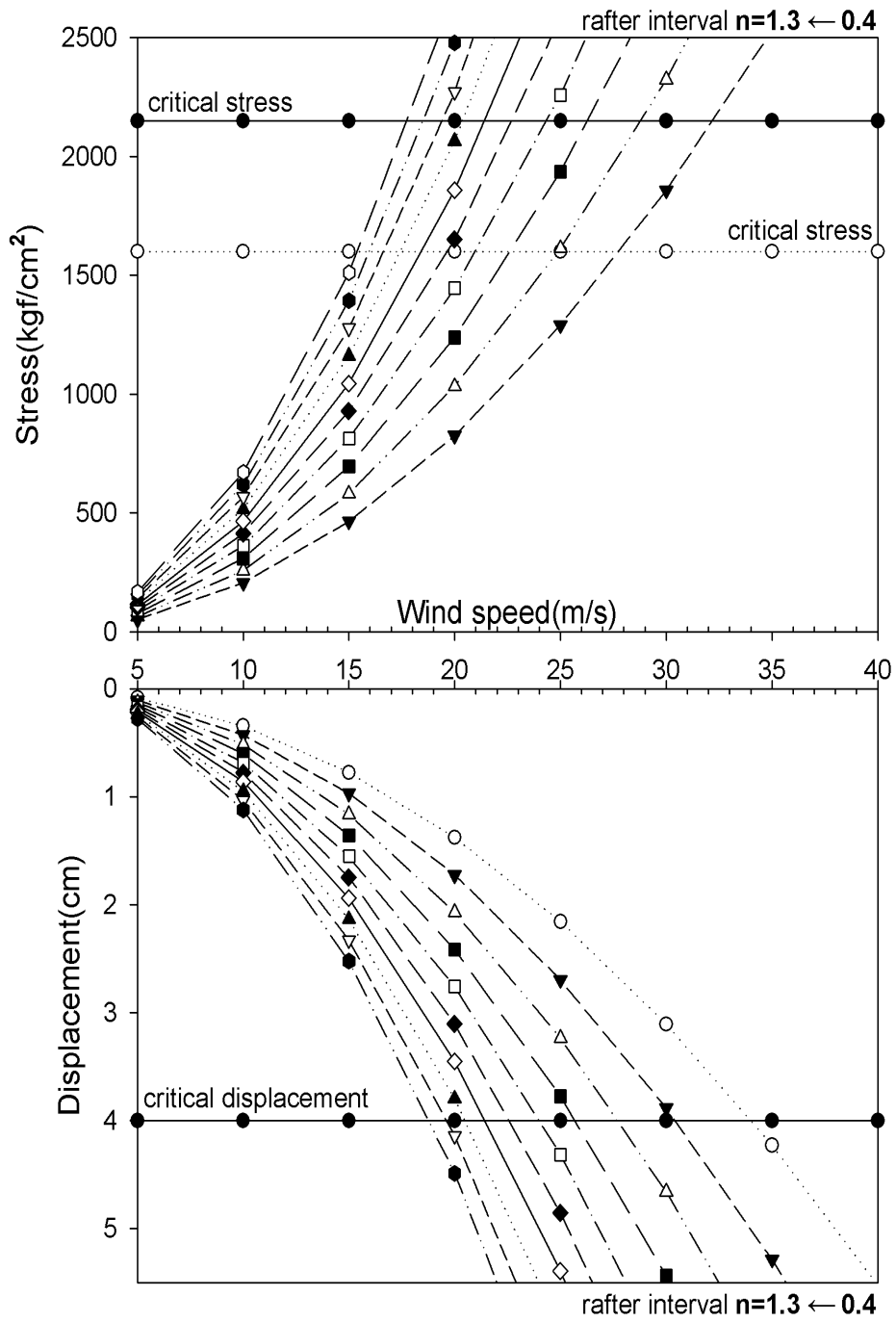


그림 104. 서까래 간격별 한계풍속(F형, Ø31.8×1.7t)

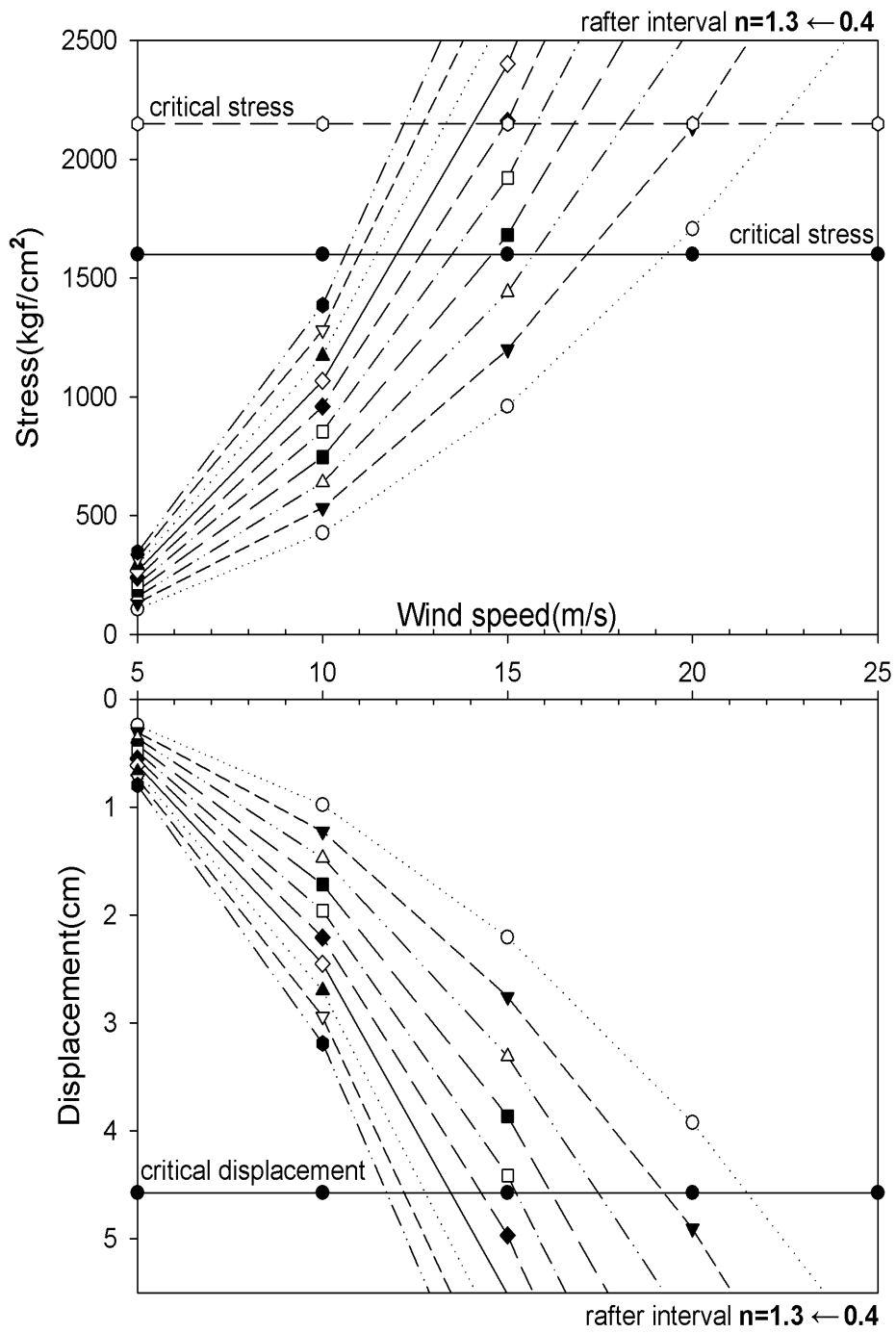


그림 105. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø25.4×1.5t)

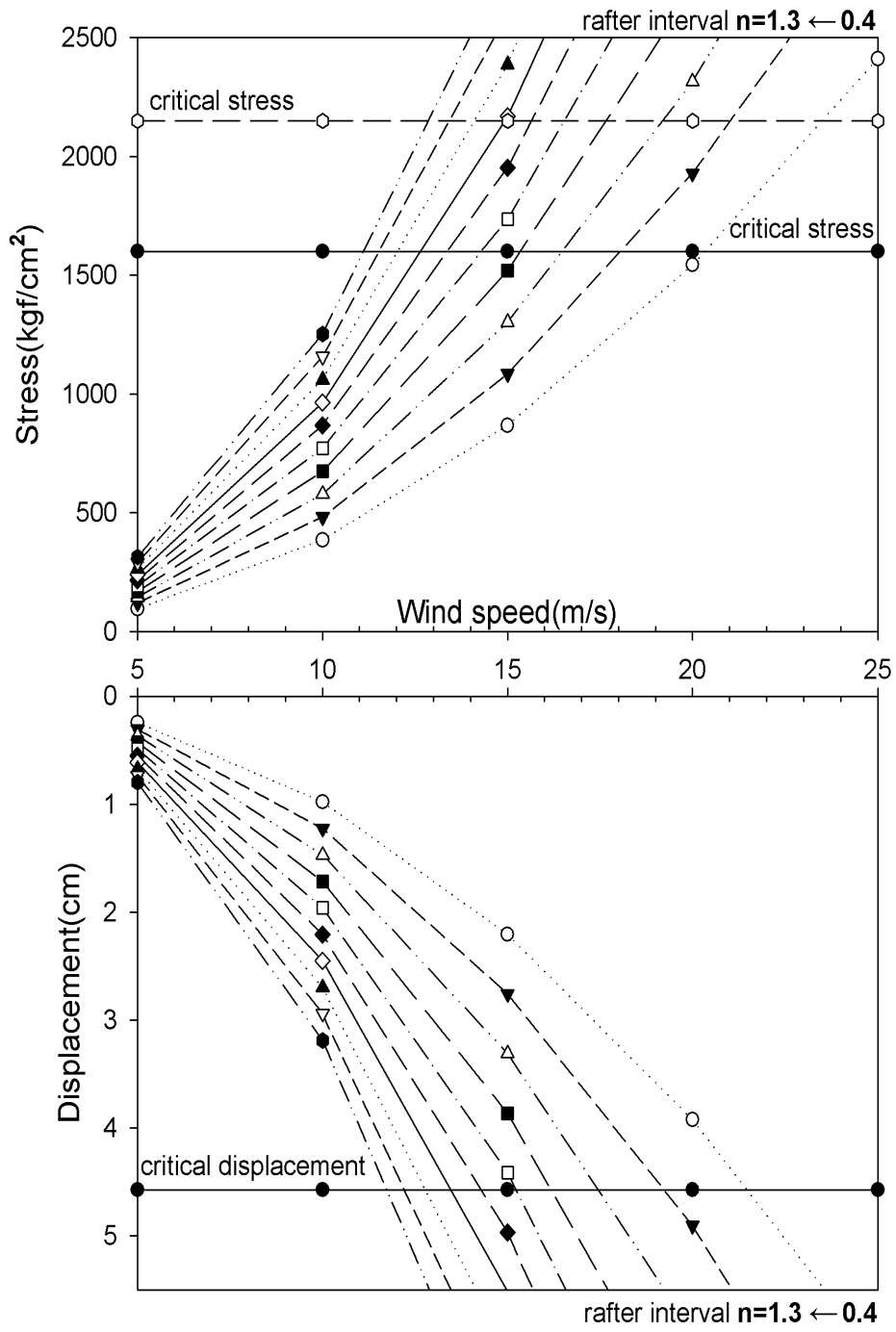


그림 106. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø25.4×1.7t)

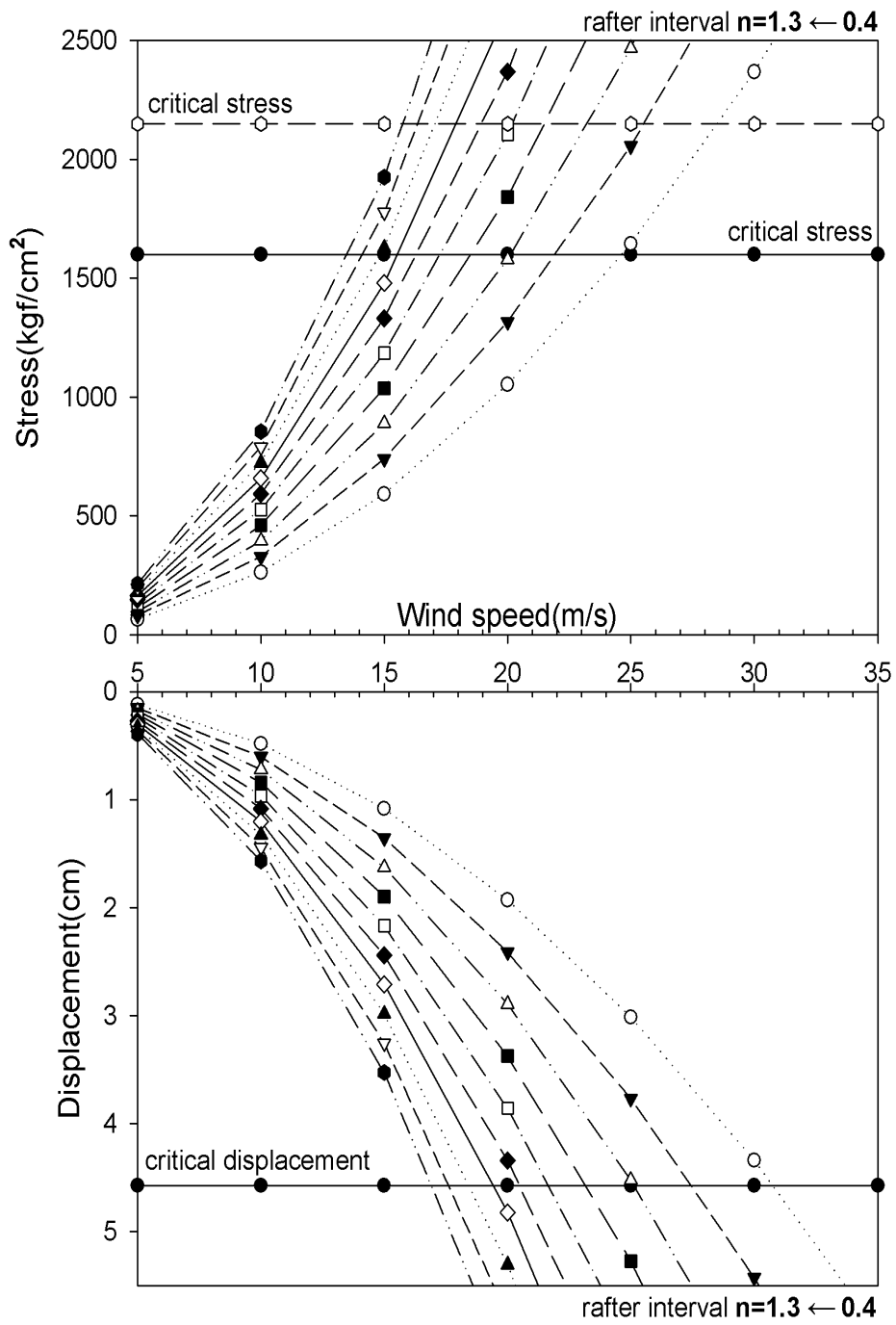


그림 107. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø31.8×1.5t)

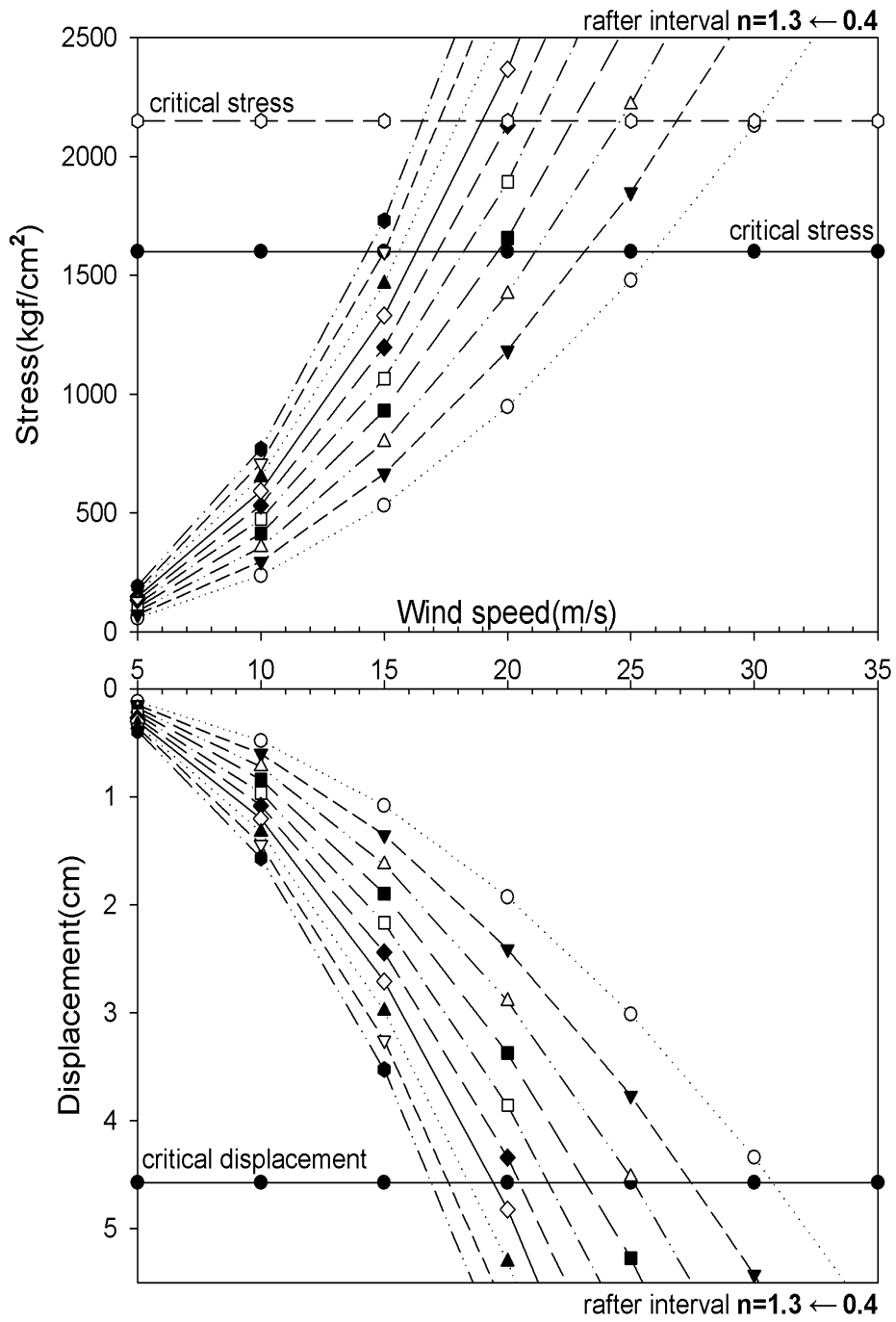


그림 108. 서까래 간격별 한계풍속(G형, Ø31.8×1.7t)

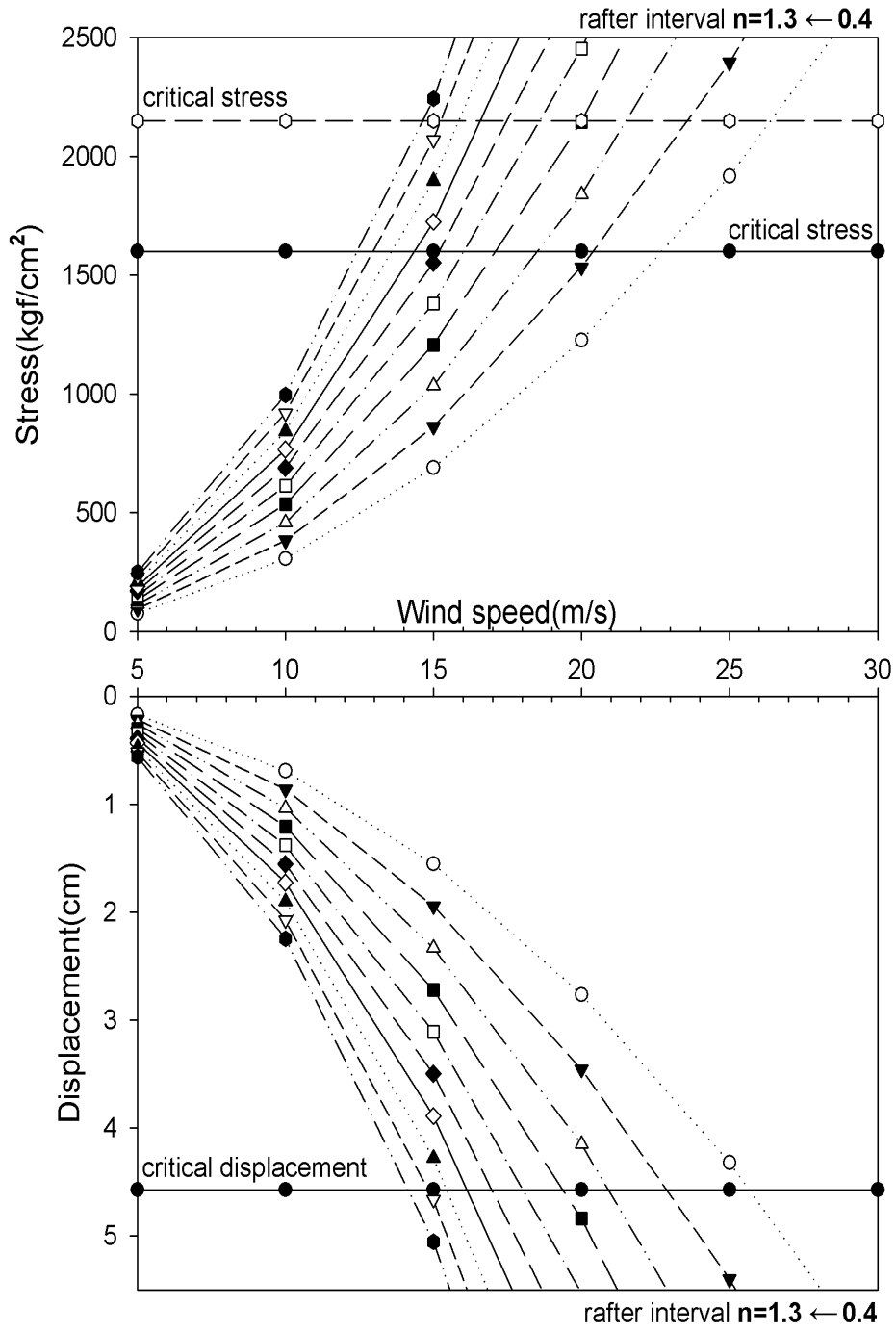


그림 109. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø25.4×1.5t)

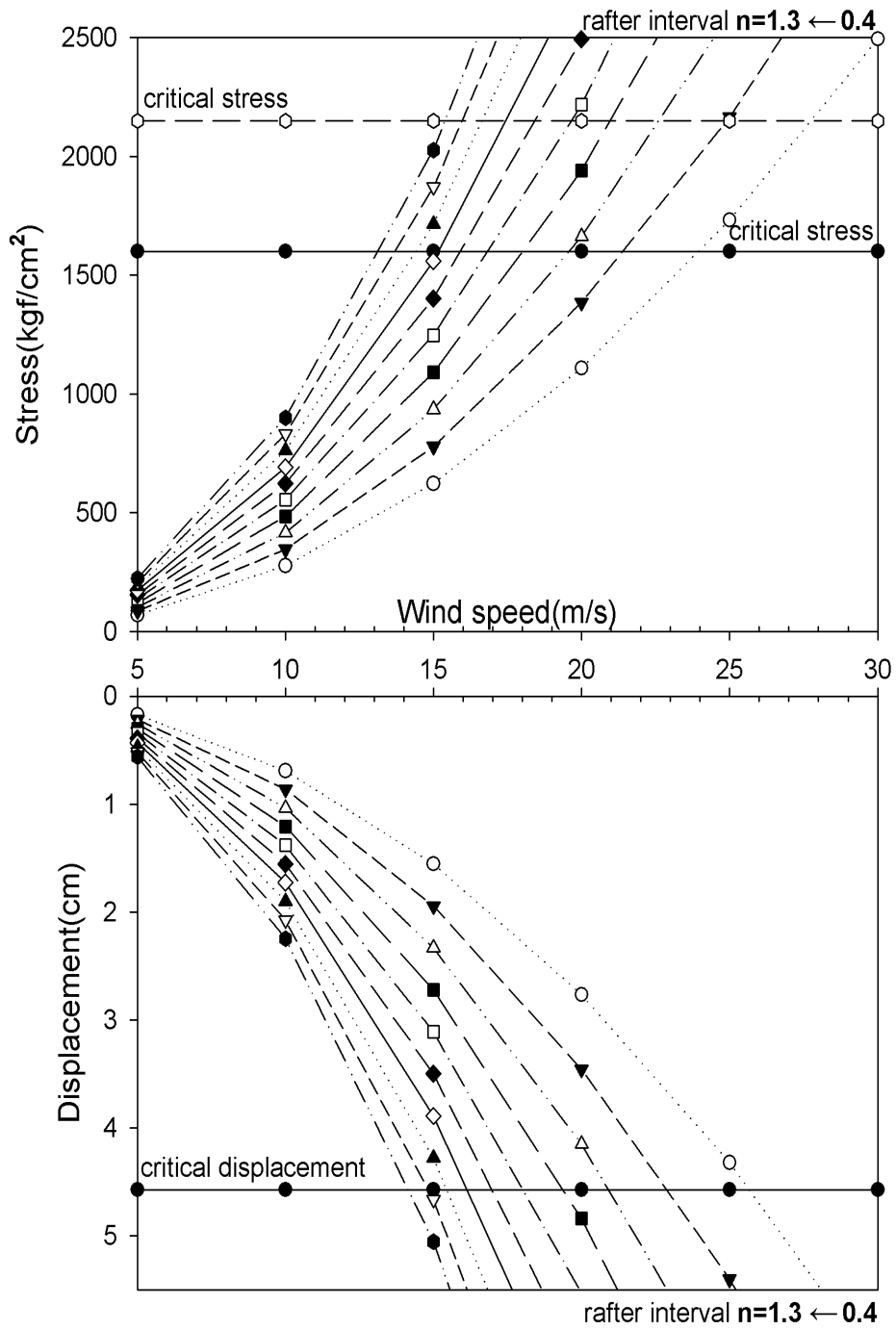


그림 110. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø25.4×1.7t)

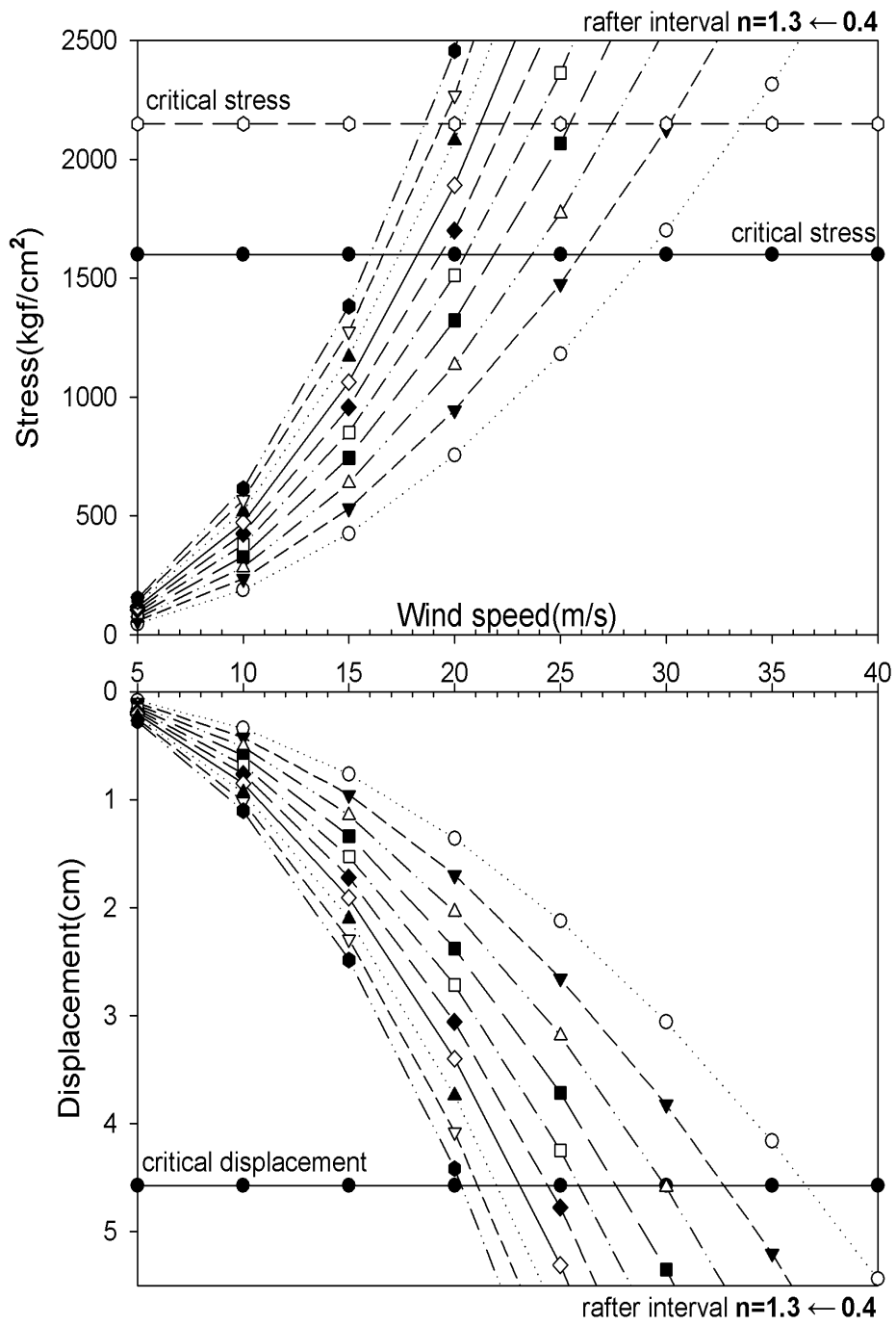


그림 111. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø31.8×1.5t)

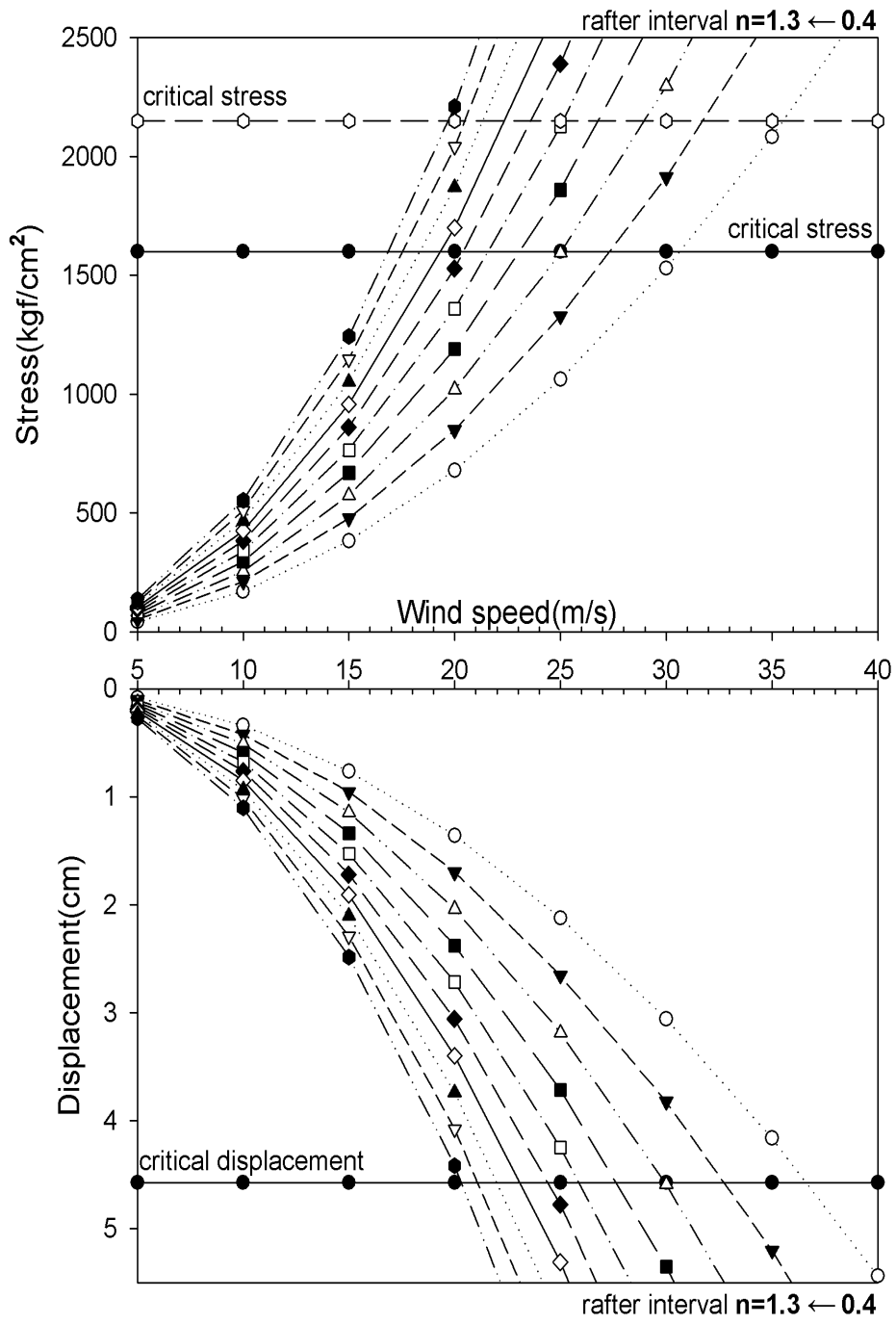


그림 112. 서까래 간격별 한계풍속(H형, Ø31.8×1.7t)

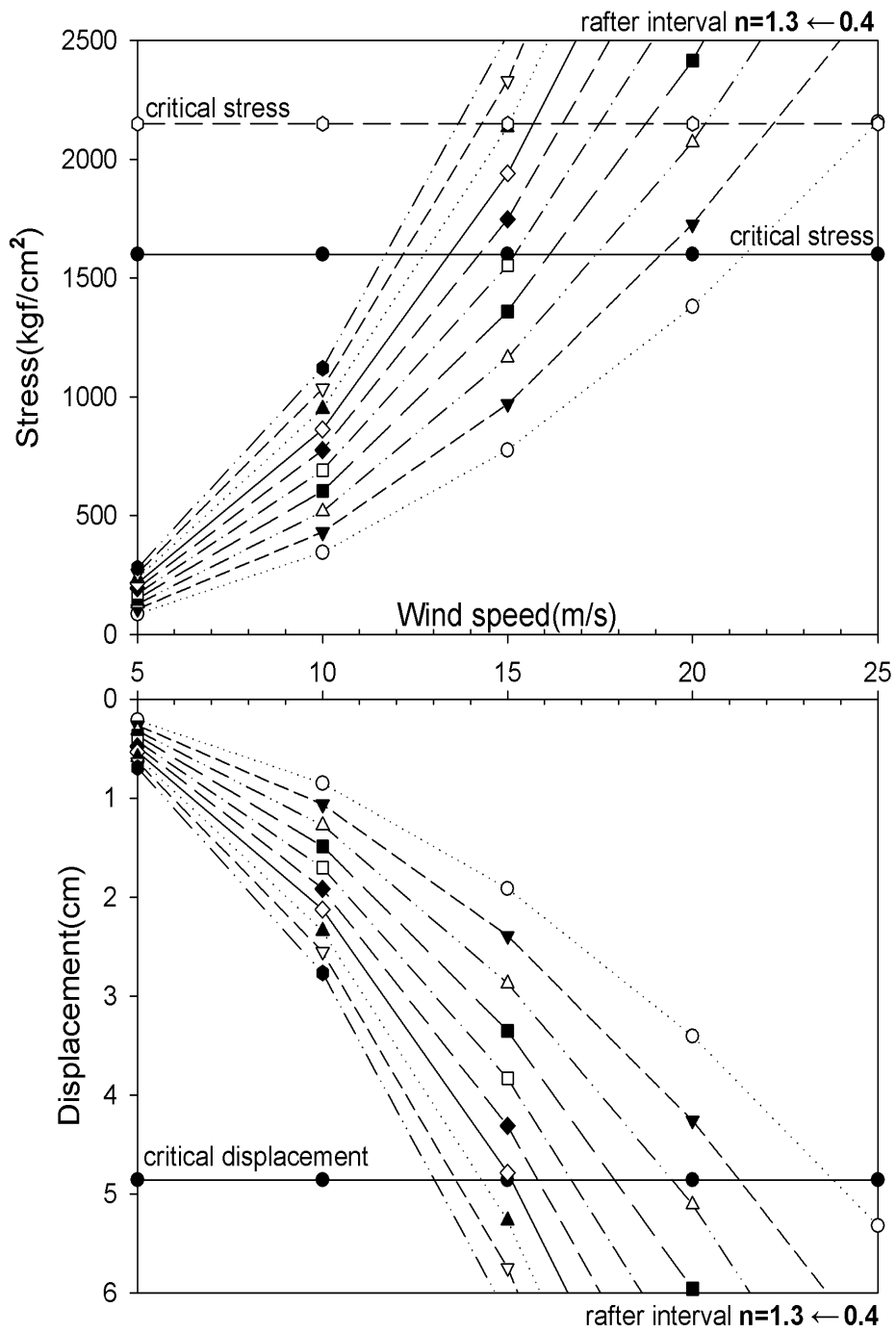


그림 113. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø25.4×1.5t)

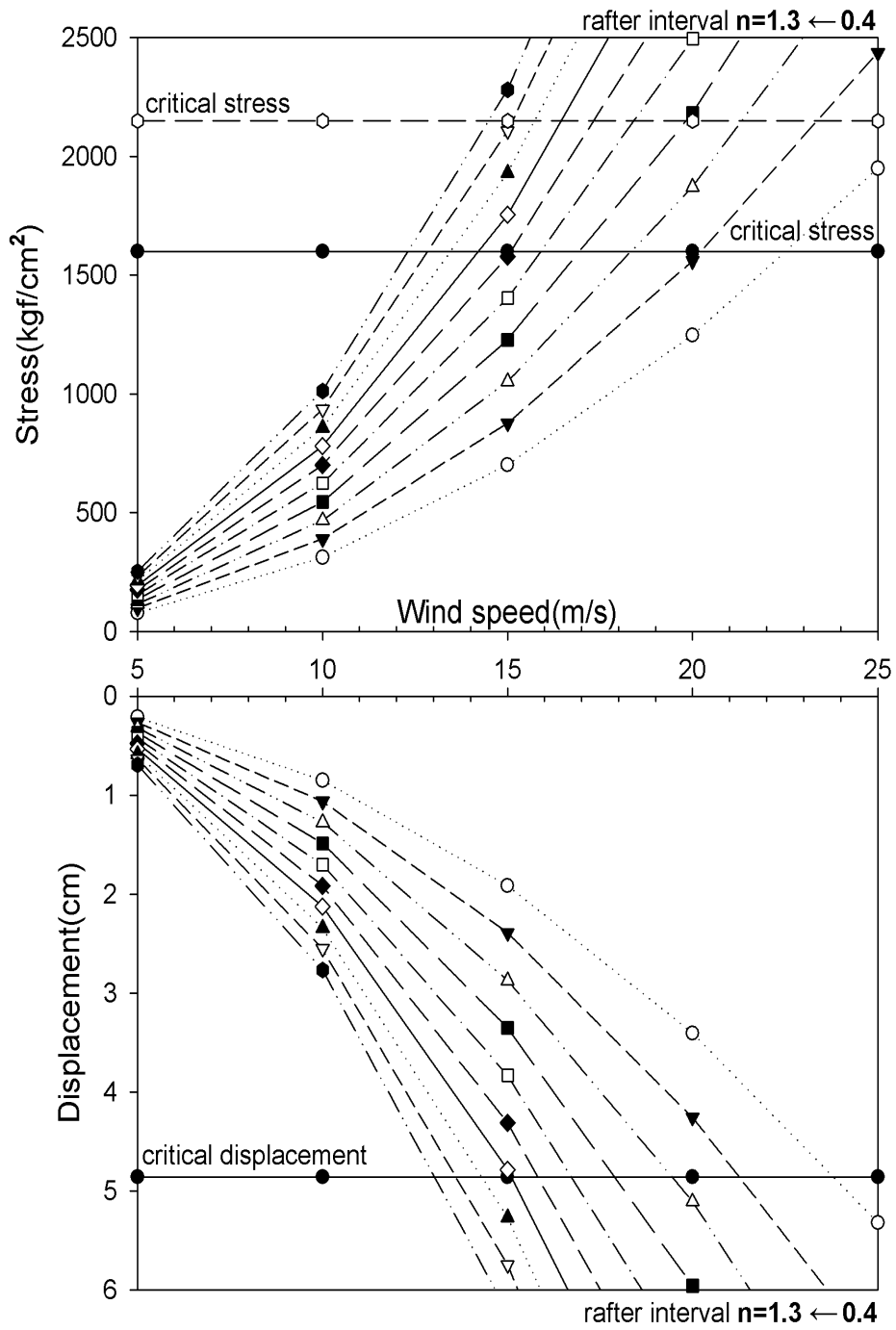


그림 114. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø25.4×1.7t)

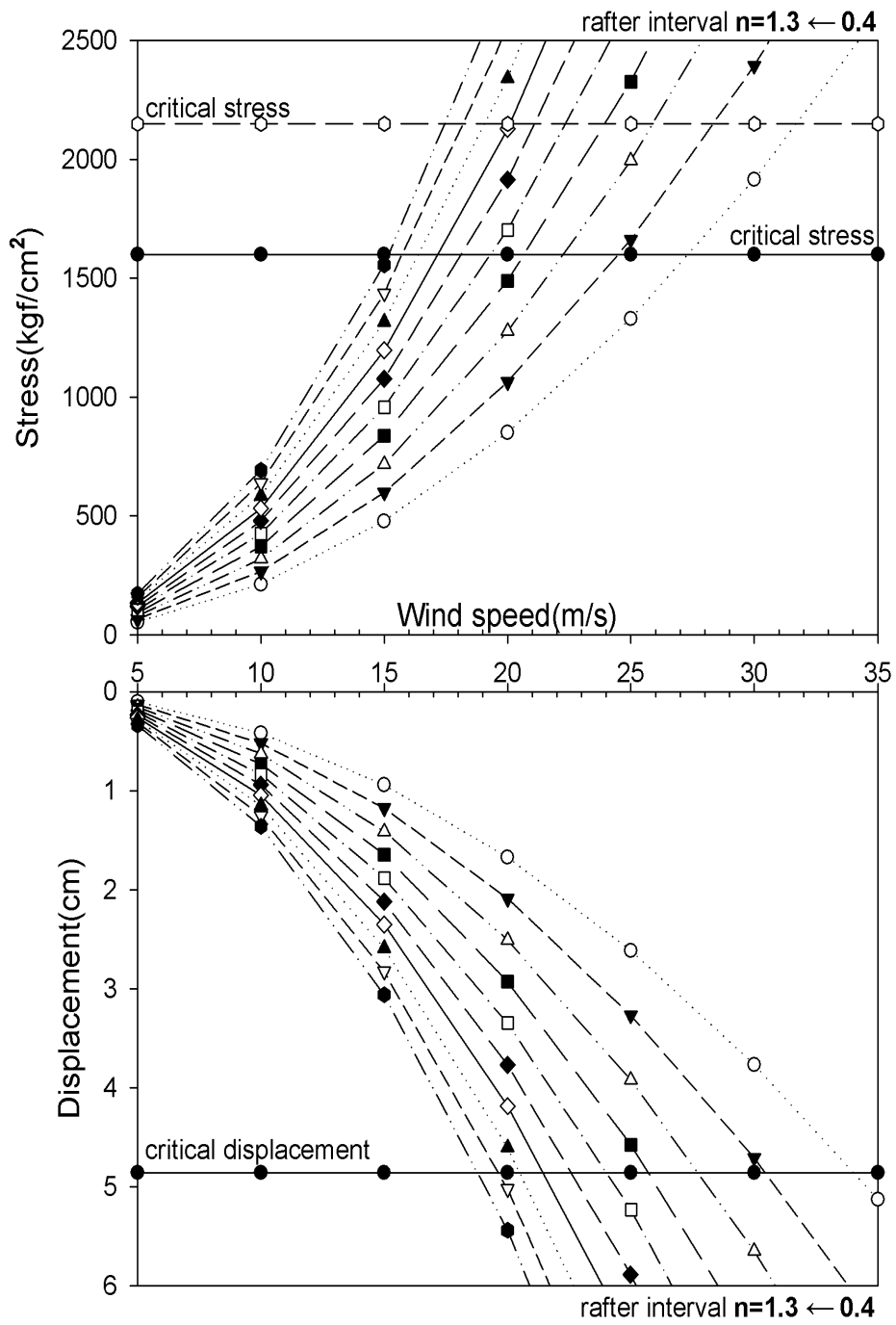


그림 115. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø31.8×1.5t)

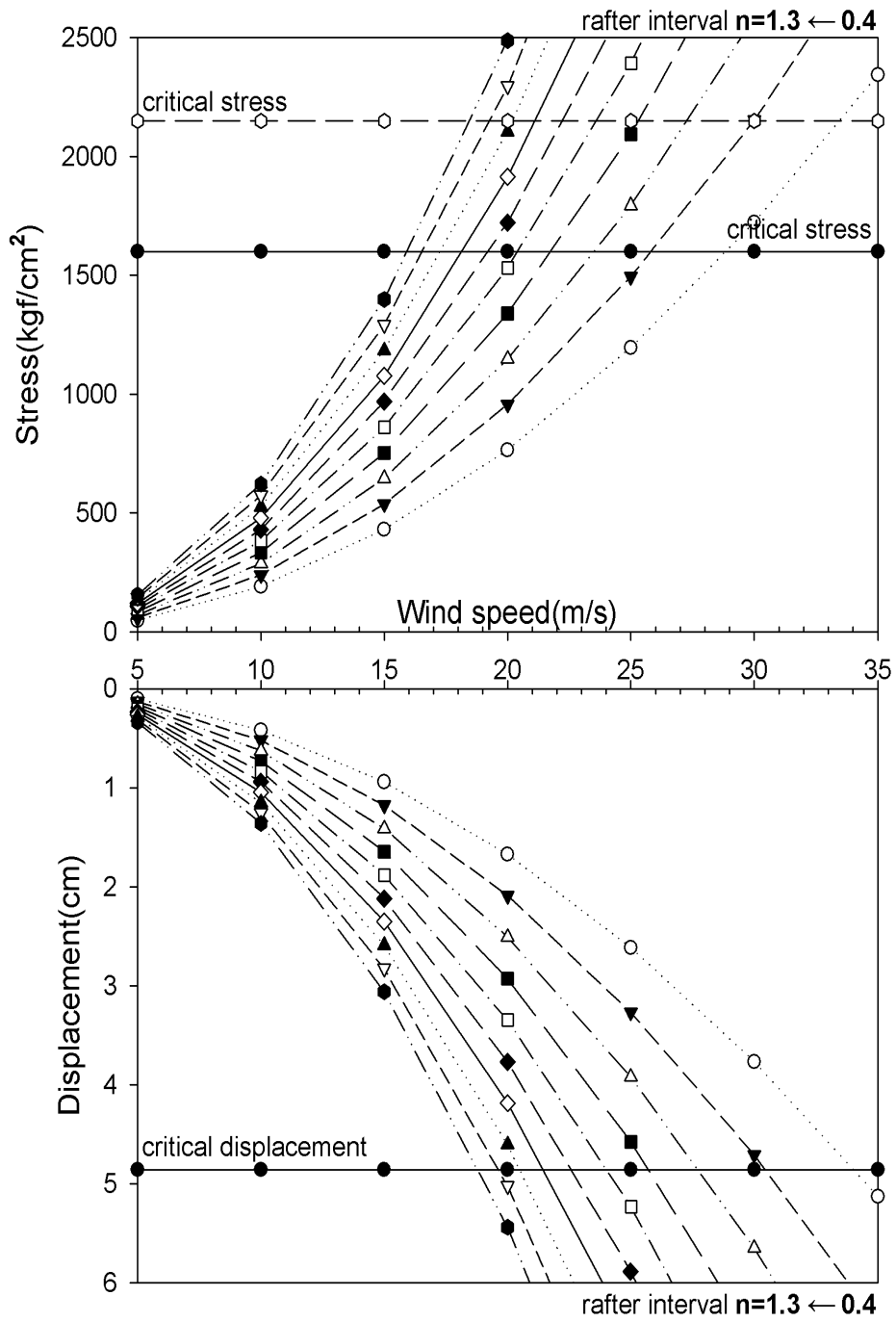


그림 116. 서까래 간격별 한계풍속(I형, Ø31.8×1.7t)

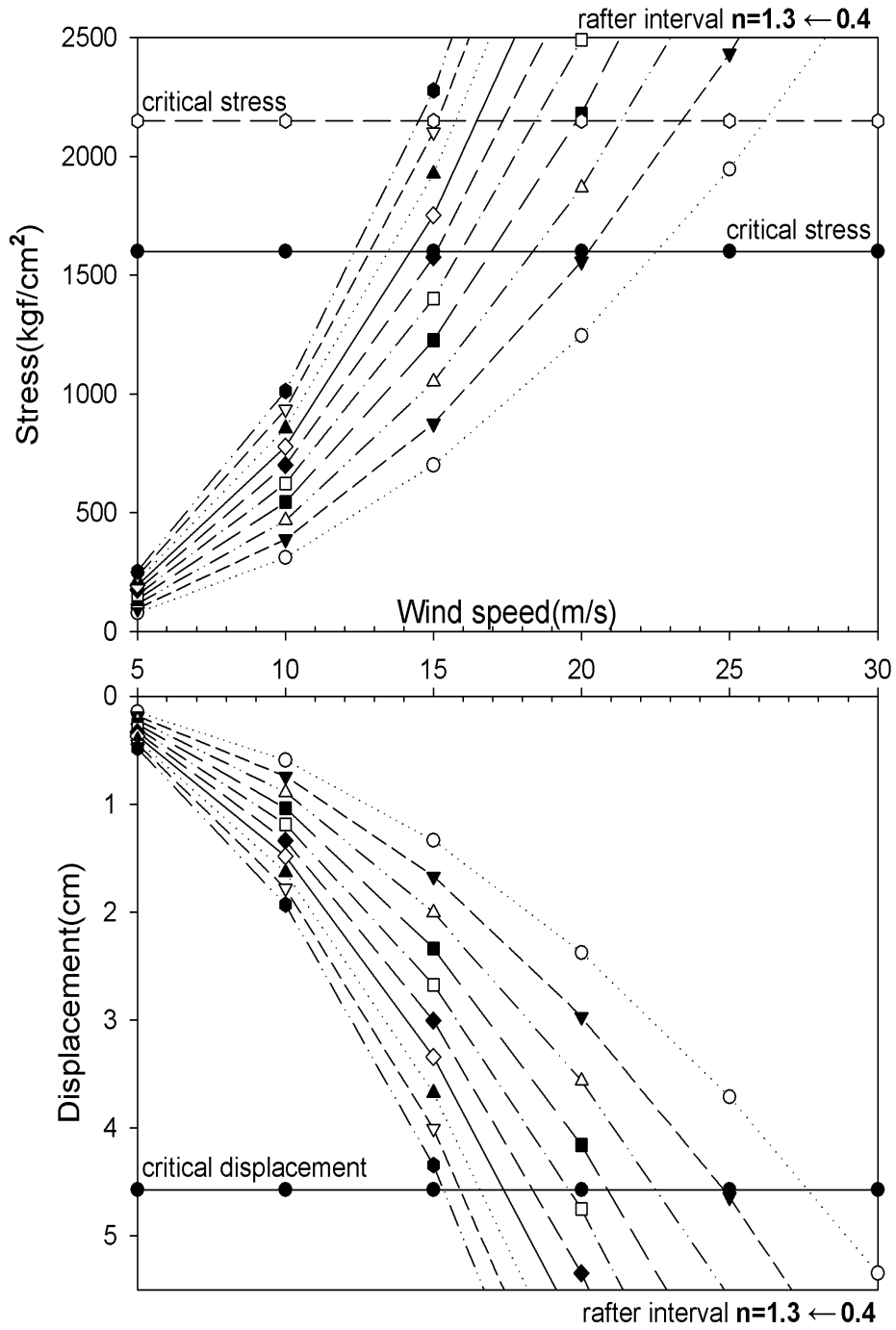


그림 117. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø25.4×1.5t)

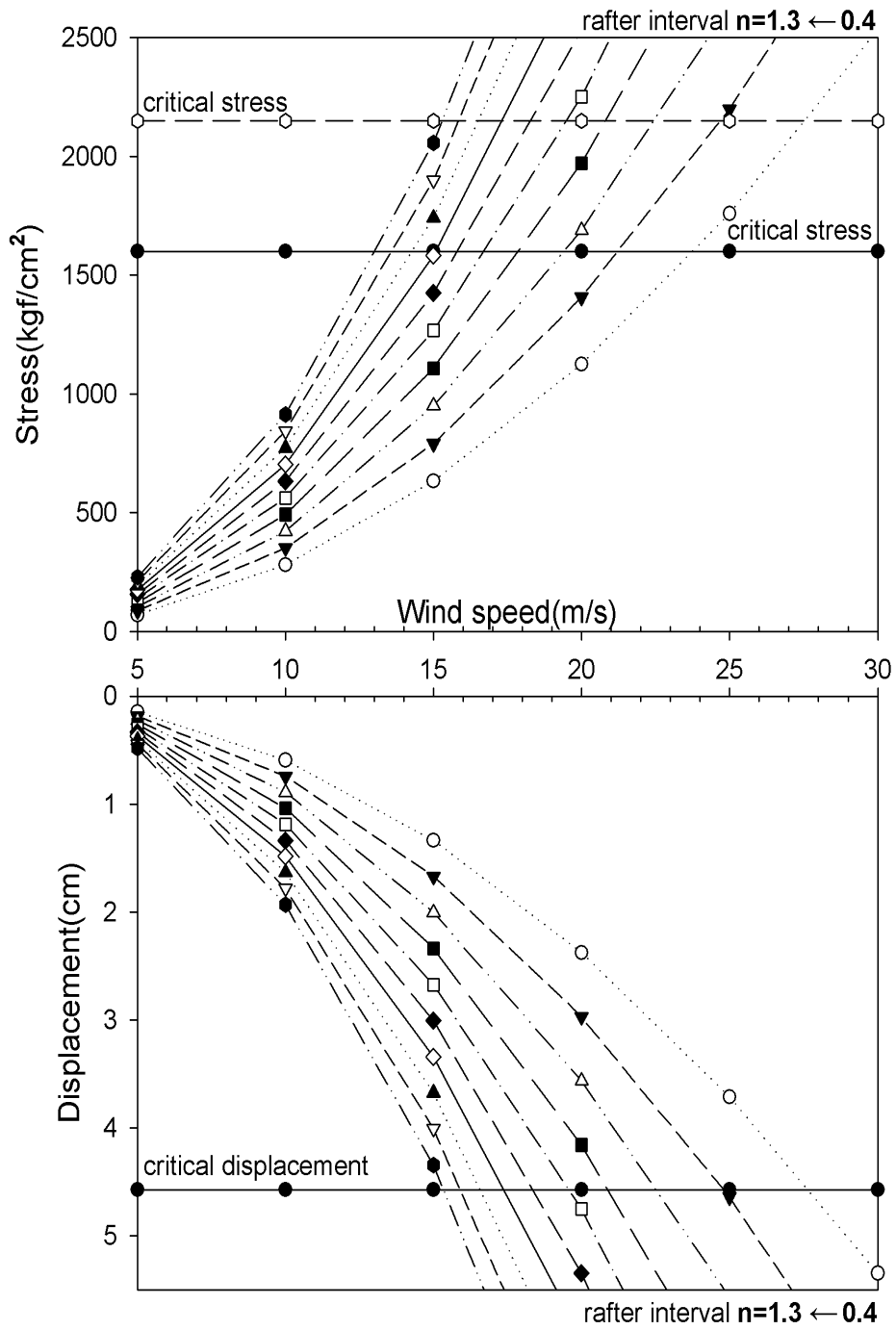


그림 118. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø25.4×1.7t)

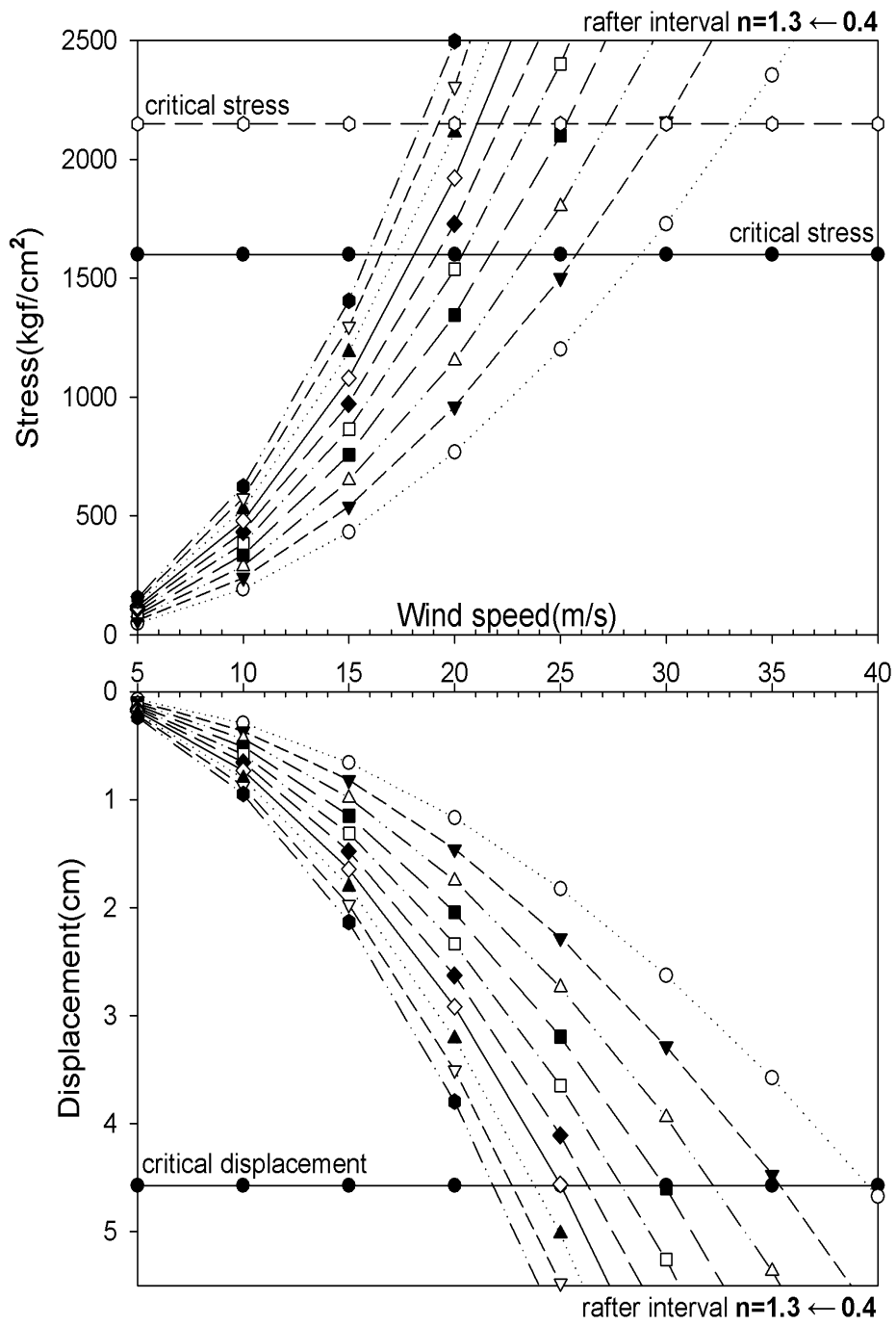


그림 119. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø31.8×1.5t)

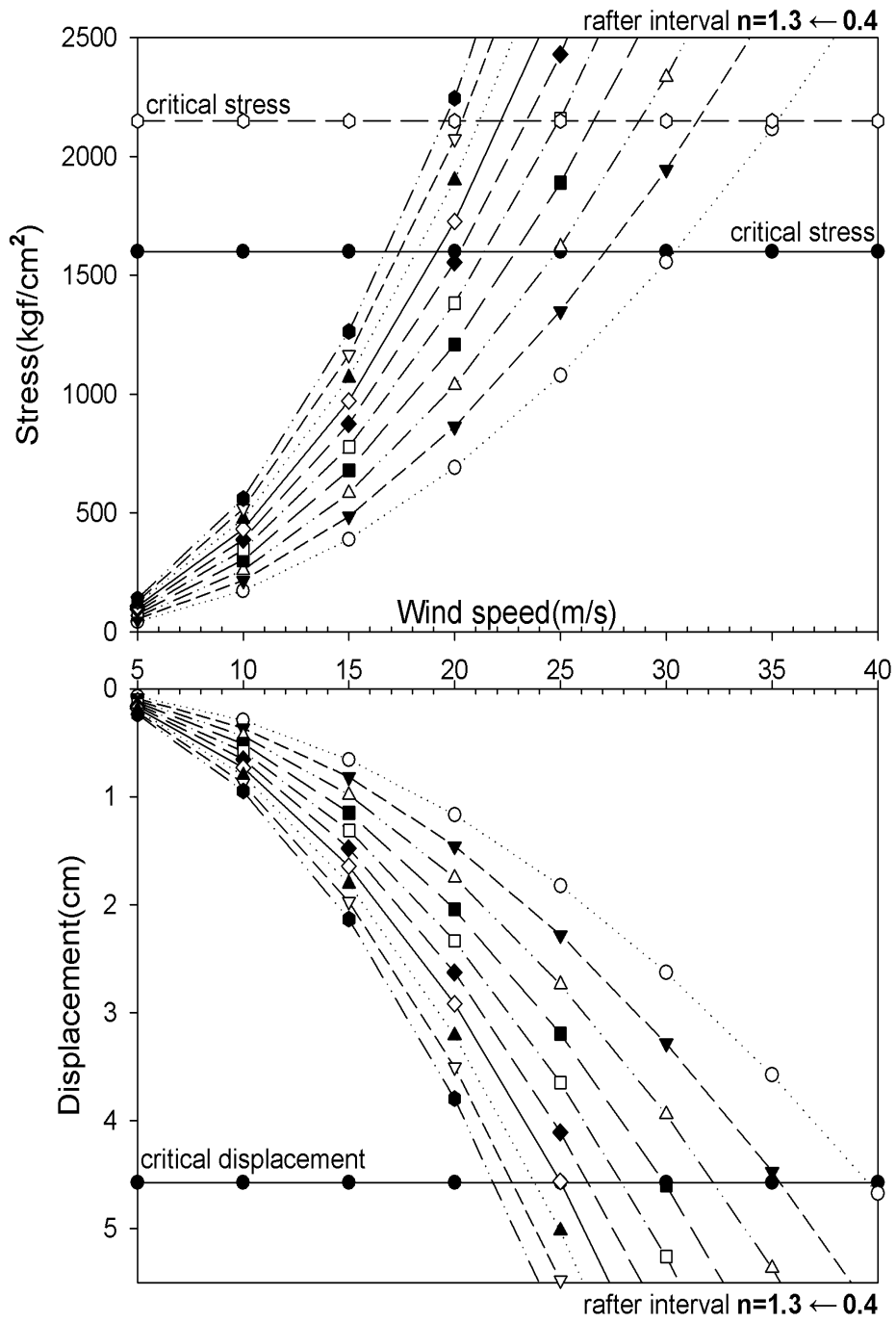


그림 120. 서까래 간격별 한계풍속(J형, Ø31.8×1.7t)