

최 종
연구보고서

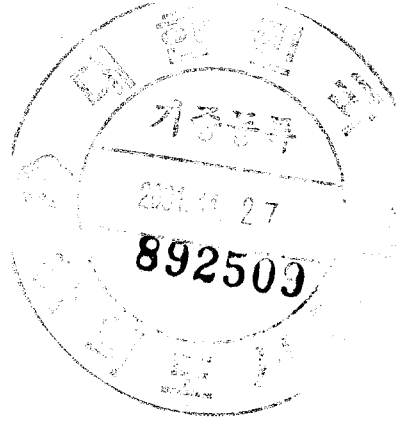
631.34
L2937

자갈축열 태양열 온실의 냉·난방 에너지 절감 방안

Saving methods of cooling and heating energy in the
solar heated underground rock storage greenhouse

주관연구기관
경북대학교

농 립 부



제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “자갈축열 태양열 온실의 냉난방에너지 절감 방안” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2001년 9월 28일

주관연구기관명 : 경북대학교

총괄연구책임자 : 이 석 건

연 구 원 : 이 현 우

연 구 원 : 이 중 원

연 구 원 : 김 란 속

요 약 문

I. 제목 : 자갈축열 태양열 온실의 난방에너지 절감 방안

II. 연구개발의 목적 및 중요성

온실재배에서 지상부의 환경조절 요인은 온도, 습도, 광, CO₂, 풍속 등이며 적정환경조건을 유지하기 위한 수단으로는 난방, 냉방, 환기, 차광, 보온, CO₂ 공급, 공기유동 등의 방법이 이용되고 있다. 이 중 적정온도 유지를 위한 난방과 냉방은 온실재배에 있어서 필수적인 조건이며 특히 난방에 소요되는 에너지 비용은 지역에 따라 다소 상이하지만 총경영비 중에서 20%~60%를 차지하고 있기 때문에 시설원예의 소득과 직접적인 관계가 있다. 현재 국내의 원예시설 면적 중에서 주년재배를 목적으로 난방을 하고 있는 시설은 약 20%정도이다. 특히 최근의 농업용 난방연료비의 급등은 시설원예를 근본적으로 위협하고 있으며 난방용 연료를 거의 전량 수입에 의존하고 있는 우리의 실정을 감안한다면 시설원예용 에너지문제는 발등에 떨어진 불과 같이 시급한 대책이 요구되는 문제이다.

온실난방에 사용되고 있는 화석에너지를 대체할 수 있는 에너지원으로는 자연에너지(태양에너지, 지열, 바이오매스 등)와 폐자원에너지(왕겨, 폐목재, 축분, 폐타이어, 폐유, 가연성 쓰레기 등) 및 산업폐열로 대별할 수 있으나, 자원의 부존 현황이나 이용시스템의 설비투자, 이용과정에 발생하는 환경문제, 경제성 등을 감안할 때 태양에너지의 축열에 의한 방법이 가장 바람직하다고 판단된다.

태양열 이용형 온실에 사용되는 축열재로는 물, 돌(자갈), 공기 등의 현열축열

재와 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 등의 잠열축열재가 사용되고 있으며 축열재는 사용목적, 가격, 축열성능, 축열시스템 등을 고려하여 선택해야 한다. 대표적인 태양열 축열온실은 일본의 시설원예 농가에 많이 보급되어 있는 토양축열에 의한 지중열교환온실이며 대조온실에 비하여 12°C 정도의 난방효과가 있는 것으로 보고되어 있다. 따라서 일본에서는 농가에 보급되어 있는 태양열온실의 절반이상이 지중열교환온실이며 이에 관한 연구가 활발히 수행된 바 있으며 국내에서도 이에 관한 연구가 부분적으로 수행된 바 있다. 그러나 토양축열에 의한 지중열교환온실은 토양을 축열재로 사용하고 있기 때문에 토양의 공극율이 작기 때문에 공기와 토양간의 원활한 열교환을 위하여 많은 량의 파이프를 지하에 매설하여야 하지만 본 과제에서는 공극율이 30~50%인 자갈을 사용함으로써 지하에 매설해야 할 파이프의 량을 절감할 수 있는 동시에 축열 및 방열효율이 토양에 비하여 우수할 것으로 판단된다.

한편, 최근에는 유류파동으로 인하여 온실의 난방비 문제가 핫 이슈로 거론되고 있지만 96년 하반기 유가상승 이전만 하더라도 「온실에서 난방은 기름만 태우면 되므로 문제가 없고 하절기의 고온억제가 문제이다」라는 이야기가 공감대를 형성했던 사실을 쉽게 기억할 수 있다. 그러나 채소류의 년 중 공급을 전제로 발달해 온 시설원예는 주년재배를 위한 여름철의 재배환경을 도외시할 수 없다. 따라서 여름철 온실내부 온도의 과다상승억제 방법에 관한 지속적인 연구개발이 요청된다. 온실의 고온억제를 위한 냉방법에는 Pad & Fan, Mist & Fan, Fog & Fan, 지붕살수, 차광 등의 방법이 이용되고 있으며 이들 모두 5°C 내외의 냉방효과가 인정되고 있으나 설치비, 과습, 온실구조의 제한 등의 문제가 있으며 냉방과 난방에 설비를 겸용할 수가 없다. 그러나 본 과제에서는 바닥 자갈층의 태양열 축열로 냉·난방에 미치는 효과를 동시에 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

본 과제는 온실바닥에 염가로 쉽게 구할 수 있는 자갈 또는 쇠석층을 깔아 무토양 재배온실에서 태양에너지를 이용한 냉난방에너지 절감효과를 규명하고 농가보급형 자갈축열온실의 표준설계서를 제작하여 농가에 보급함으로써 농가 소득 증대에 기여하고자 한다.

본 과제의 중요성을 기술적, 경제·산업적 및 사회·문화적인 측면에서 요약 하면 다음과 같다.

① 기술적 측면

온실난방용 유류대가 불안정한 국내의 실정을 감안할 때, 가격이 저렴한 축열 재를 이용한 저비용 태양열 축열 온실시스템의 냉난방에너지 절감방안에 관한 연구가 요청된다.

② 경제·산업적 측면

유류를 전량 수입하고 있는 국내실정을 감안할 때 油價가 적정수준이라 하더라도 국내 온실산업의 건전한 발전과 국제경쟁력 확보를 위해서는 온실난방을 위한 저비용 대체에너지 이용기술의 개발은 필수적이다.

③ 사회·문화적 측면

6·25이후의 최대위기라고 하는 IMF시대에도 신선채소가 년중 공급되지 못할 경우에 우리의 식생활은 상상할 수 없을 뿐 만 아니라 이는 다른 사회적인 문제를 유발시킬 것으로 예상되어 유류대가 천장부지로 치솟아도 시설원예를 통한 신선채소류의 주년공급은 불가피한 현실이다. 따라서 난방용 유류를 전량 수입하고 있는 우리의 처지이지만 온실재배에서 적정 재배온도 유지를 위한 냉난방 소요에너지의 투입은 피할 수 없는 실정임을 고려할 때 저비용 태양열 이용

시스템에 관한 기술개발의 필요성은 강조될 수 밖에 없는 명제이다. 그리고, 화석에너지 사용에 따른 환경오염과 화석에너지의 고갈 등을 감안할 때 온실용 태양열 이용시스템에 관한 연구는 매우 중요하다.

이러한 국내의 상황을 감안하여 본 과제는 온실재배에 소요되는 냉·난방에너지를 절감할 수 있는 자갈축열 태양열온실의 개발과 설계에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행하였으며, 주요 연구목적을 요약하면 다음과 같다.

- ① 축열재로서의 자갈의 물리적, 열적 특성 분석
- ② 자갈축열층의 모형실험을 통하여 공기유동성 및 축방열특성 분석
- ③ 자갈축열 태양열온실의 냉·난방효과 분석
- ④ 자갈축열 태양열온실의 냉·난방에너지 절감효과 분석
- ⑤ 자갈축열 태양열온실의 냉·난방효과를 근거로 건축비, 내구연한, 난방연료비, 설정온도 등을 감안하여 경제성 검토
- ⑥ 자갈축열 태양열온실의 설계자료 제시

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

자갈축열 태양열온실의 난방에너지 절감효과를 규명하기 위해서 수행한 주요 연구내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

연구개발목표	세부연구개발 내용 및 범위
1. 자갈 축열층의 물리적, 열적 특성 분석	①축열용 자갈의 공극율 분석 ②자갈의 열적 특성 분석 ③축열자갈층의 축열량 분석 ④축열자갈층의 적정 두께 결정 ⑤단열재 및 콘크리트의 적정 두께 결정 ⑥자갈 축열 모형 실험장치의 설계
2. 자갈축열온실의 설계 및 제작을 위한 모형 실험	①모형의 제작 및 측정시스템 구성 ②자갈층의 공기순환용 파이프 설치 여부 판정 ③자갈축열 모형 실험장치의 온·습도 측정 및 분석 ④자갈축열 모형 실험장치의 축열 및 방열성능 분석
3. 자갈축열온실의 설계 및 제작	①자갈축열온실의 설계 및 제작
4. 난방기간중 자갈축열 태양열 온실의 난방효과 분석	①난방시 효율적인 공기순환방식의 검토 ②난방효과 분석을 위한 자갈축열온실시스템의 구성 ③자갈축열온실의 축열 및 방열특성 분석 ④난방을 위한 축열 및 방열시간대 결정 ⑤온실내외 및 자갈층의 온습도 측정 ⑥자갈축열온실의 난방성능 분석 ⑦자갈축열온실의 난방에너지 절감효과 분석
5. 냉방기간중 자갈축열 태양열 온실의 냉방효과 분석	①자갈축열온실의 축열 및 방열특성 분석 ②냉방시 효율적인 공기순환방식의 검토 ③냉방을 위한 축열 및 방열시간대 결정 ④온실내외 및 자갈층의 온습도 측정 ⑤자갈축열온실의 냉방성능 분석 ⑥자갈축열온실의 고온억제 효과 분석
6. 자갈축열 태양열온실의 경제성 분석	①건축비, 내구연한, 난방연료비, 냉방효과를 감안한 경제성 분석
7. 자갈축열 태양열온실의 설계자료 제시	①농가보급형 자갈축열온실시스템의 설계에 필요한 자료 제시

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구 개발 결과

자갈축열 태양열 온실의 냉·난방에너지 절감 효과를 분석하기 위하여 축열 자갈층 모델 및 실험용 자갈축열 태양열 온실을 설계 및 제작하여 실험을 수행하여 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자갈입자의 형상, 유입유체온도, 순환유체의 유량 및 자갈의 공극을 등을 고려하여 축열 자갈층의 두께를 산정할 수 있었다.
2. 자갈축열층의 단열재의 두께는 최소한 6cm이상이 되어야 한다.
3. 자갈축열층내 공기유동속도는 공기순환방식에 상관없이 유입구에서 멀어질수록 감소하다가 자갈축열층 중앙에서 유출구 방향으로 갈수록 다시 증가하는 경향으로 나타났으며 동일한 유량으로 순환팬을 작동할 경우에는 유출구보다는 유입구의 유량을 증가시키는 것이 축열성능을 향상시키는데 유리한 것으로 나타났다.
4. 동일한 유량으로 유입팬을 작동하는 것이 유출팬을 작동하는 것에 비해 자갈축열층의 온도상승효과는 약 1.3배, 축열량 증가속도는 약 1.5배 향상되는 것으로 분석되었다. 그리고, 유입유량이 최대일 때 유출유량의 증가에 따른 자갈축열층의 평균온도 및 축열량의 증가속도는 미소하게 나타나 자갈축열층의 온도와 축열량은 공기순환시스템의 유출유량보다는 유입유량의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다.

5. 난방기간중 축열층의 내부습도는 축·방열시 유입공기의 영향을 많이 받아 온실내부습도 변화와 유사하게 나타났다.
6. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 평균 6.1℃의 난방효과가 있었다.
7. 난방을 위한 공기순환시스템의 제어방식은 온실내부온도, 주·야간난방설정 온도 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.
8. 무환기·무차광시 축열온실은 일반온실보다 주간동안 평균 3.3℃의 승온억제 효과가 있었으며, 자연환기와 차광을 하였을 경우에는 평균 2.4℃ 승온억제 효과가 있었다. 그러나, 공기순환방식의 개선을 통하여 냉방효과를 평균 2℃ 이상 향상시킬 수 있었다.
9. 냉방기간중 축열층 습도는 유입공기의 영향을 많이 받으며 유입구에서 멀어질수록 높게 나타났다. 그리고, 온실 내부습도는 외기의 영향을 받아 외부습도 변화와 유사하게 나타났으나 축열온실의 경우 축열층의 영향을 5~10% 정도 상이하게 나타났다.
10. 냉방을 위한 공기순환시스템의 제어방식은 온실내·외부온도, 온실내부 목표온도 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.
11. 자갈축열 태양열온실은 냉·난방장치의 보조수단으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구 결과 활용에 대한 건의

IMF 이후 시설원예분야에 있어 생에너지화, 에너지 절약형 재배기술 및 자재 개발, 대체에너지 개발 등의 요구가 강력히 제기되고 있다. 이는 시설원예 난방 에너지원의 대부분을 수입에 의존함에 따라 국제 원유가 상승 및 환율변동에 따른 유가의 상승으로 인한 온실경영의 어려움을 단적으로 보여주고 있는 것이라 하겠다. 따라서, 난방연료비의 상승에 대응하여 시설원예의 안정적인 유지 발전과 장기적으로 환경보존이라는 측면에서 난방에너지를 줄이고 대체에너지의 개발 등을 통한 난방비 부담의 감소와 안정된 생산기술을 확립하여야 한다. 온실난방에 사용되고 있는 화석에너지를 대체할 수 있는 에너지원중에서 환경문제, 경제성 등을 감안할 때 태양에너지의 축열에 의한 방법이 바람직하다고 판단된다. 태양열을 이용한 축열식 난방방식은 크게 현열이용형 축열방법과 잠열이용형 축열방법이 있다. 현재 국내에는 잠열축열재과 토양축열을 이용한 지중열교환온실에 대한 연구는 다소 수행되고 있으나 이들 시스템은 겨울철 난방 에너지의 절감을 목적으로 하고 있으므로 여름철 냉방시 별도의 시스템을 구비하여야 한다. 따라서, 원예시설의 해결과제중 시급하고 중요한 냉·난방에너지 문제의 해결책을 모색하고자 자갈을 축열재로 이용하여 난방기간중 주간 온실내로 입사된 태양에너지를 자갈축열층에 축열하여 야간에 난방에너지를 사용하는 동시에 고온기인 여름철에는 자갈축열로 인하여 주간 온실내부 온도의 과다상승을 방지할 목적으로 수행한 본 연구를 수행하였다.

본 과제의 연구결과를 효율적으로 활용하여 기대효과를 극대화시키기 위한 방안은 다음과 같다.

- ① 연구결과보고서를 관련연구기관 또는 개인수요자에게 배부하여 홍보한다.
- ② 연구결과와 일부를 특허출원하여 연구개발결과를 공식화하고 기술을 체계화시켜 온실설계와 직접 관련된 정부산하기관, 시공업체 등에 유·무상으로 기술이전을 도모한다.
- ③ 본 연구에서 개발된 실험용 자갈축열 태양열온실의 실용화 및 표준화를 통한 확대 개발·보급을 위해서는 현장실증작업이 필요하며 지역별, 규모별 실용화 접근 연구가 필요하다. 따라서, 농림부기획과제로 하여 태양열이용시스템 개발의 실용화 또는 집대성과정이 필요하다.
- ④ 관련분야 국내외 학술지에 연구결과를 발표하고 각종 학술회의에 발표한다.



SUMMARY

I. Subject

Saving methods of cooling and heating energy in the solar heated underground rock storage greenhouse

II. Objectives and importance of the research

1. Objectives

The objectives of this study are summarized as follows:

- ① Analysis of physical and thermal characteristic of rock.
- ② Analysis of air flow and heat storage efficiency in rock storage model.
- ③ Analysis of saving efficiency of cooling energy in the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ④ Analysis of saving efficiency of heating energy in the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ⑤ Analysis of the economical efficiency of the solar heated underground rock storage greenhouse with regards to the cost of building, the durability, the cost of heating, the set temperature and so forth.
- ⑥ Suggestion of design data of the solar heated underground rock storage greenhouse.

- ⑦ The construction of the basic design of the solar heated underground rock storage greenhouse to spread to the horticulture farmers.

2. Importance

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

- ① Technological point of view.

Considering the real state within the country where the oil price for greenhouse heating is unstable, the research on the saving methods of energy for cooling and heating the solar heated greenhouse by using low-priced heat storage material is required.

- ② Economical·industrial point of view

Considering the real state within the country where all of oil is imported, regardless of the oil price in order to ensure the preferred development and the international competitiveness of greenhouse industry of the country the development of the low-costed alternative energy technology for greenhouse heating is essential.

- ③ Social·cultural point of view

As it is expected that the insufficient supply of fresh vegetables all the year around causes not only the dietary life inferior but also another social

problems, even during the IMF crisis which is so called the greatest crisis since Korean Conflict, the supply of fresh vegetables all the year by horticulture is inevitable. So it is not too excessive to emphasize on the necessity of technical development about the low-costed solar heat system with regards to the real state that it is inevitable of inputting of the heating and cooling energy consumed for maintaining the proper growing temperature in greenhouse even though all of the oil is imported in the country. And with regards to the environmental pollution by using the fossil fuel and the drying out of the fossil fuel the research on solar heat system for greenhouse is very important.

III. Scopes of the research

The main research contents and scopes made to examine the saving effects of cooling and heating energy of the solar heated underground rock storage greenhouse are summarized as follows.

- 1) The analysis of physical and thermal characteristic of the underground rock storage.
 - ① The analysis of the aperture of the rock storage for heat storing.
 - ② The analysis of thermal characteristic of the rocks.
 - ③ The analysis of the amount of the heat stored in the underground rock storage.

- ④ The determination of the proper height of the underground rock storage.
 - ⑤ The determination of the proper thickness of the insulator and concrete of the underground rock storage.
 - ⑥ The designing of the experimental rock storage model.
- 2) The model experiment for design and construction of the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ① The constructing model and preparing measurement system.
 - ② The decision whether to use or not the pipe for air circulation in the rock storage.
 - ③ The measurement and analysis of the temperature and humidity of the experimental rock storage model.
 - ④ The analysis of the heat storing and radiating performance of the experimental rock storage model.
- 3) The design and construction of the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ① The design of the solar heated underground rock storage greenhouse.
 - ② The construction of the solar heated underground rock storage greenhouse.
- 4) The analysis of the heating efficiency of the solar heated underground

rock storage greenhouse during the heating season.

- ① The overview of the efficient air circulation methods for heating.
 - ② The preparing of the solar heated underground rock storage greenhouse system for analyzing the heating efficiency.
 - ③ The analysis of the heat storing and radiating characteristic of the underground rock storage.
 - ④ The determination of the heat storing and radiating time zone for heating.
 - ⑤ The measurement of the temperature and humidity of the inside and outside of the greenhouse and rock storage.
 - ⑥ The analysis of the heating efficiency of the solar heated underground rock storage greenhouse.
 - ⑦ The analysis of the saving efficiency of heating energy in the solar heated underground rock storage greenhouse.
- 5) The analysis of the cooling efficiency of the solar heated underground rock storage greenhouse during the cooling season.
- ① The analysis of the heat storing and radiating characteristic of the underground rock storage.
 - ② The overview of the efficient air circulation methods for cooling.
 - ③ The determination of the heat storing and radiating time for cooling.
 - ④ The measurement of the temperature and the humidity of the inside

and outside of the greenhouse and rock storage.

- ⑤ The analysis of the cooling efficiency of the solar heated underground rock storage greenhouse.
 - ⑥ The analysis of the efficiency of the solar heated underground rock storage greenhouse on controlling high temperature down.
- 6) The analysis of the economical efficiency of the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ① The analysis of the economical efficiency with regards to the construction cost, the durability, the heating fuel cost, and the cooling effect.
- 7) The suggestion of design data of the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ① The suggestion of the data needed for the designing of the solar heated underground rock storage greenhouse to spread to the horticulture farmers.
- 8) The construction of the basic design of the solar heated underground rock storage greenhouse.
- ① The construction of the basic design of the solar heated underground rock storage greenhouse to spread to the horticulture farmers.

IV. Results and utilization

The solar heated underground rock storage greenhouse was constructed and the performance of the system for heating and cooling evaluated.

1. The factors used for calculating the height of rock storage were rock shape, inflow air temperature, air flow rate and porosity.
2. It was shown that the proper thickness of insulator of rock storage was over 6cm by considering the minimum thermal resistance value proposed by Walton and domestic standard insulators.
3. Operation of inlet fan increased 1.3 times the temperature of rock storage and 1.5 times the heat storage rate above outlet fan operation at the same air flow rate. It was estimated that the temperature and heat amount stored in the rock storage were more affected by inflow air than outflow air.
4. The nighttime temperature in the solar heated greenhouse was the average 6°C higher than in the non solar heated greenhouse during heating season.
5. It was concluded that the inside temperature of greenhouse, setpoint temperature and mean temperature of the rock storage should be taken

into consideration to select the operation method of air circulation fan for heating of the solar heated underground rock storage greenhouse.

6. The average daytime temperature in the solar-heated greenhouse was the average 3.3°C lower than in the non-solar-heated greenhouse without natural ventilation and shading, on the other hand was the average 2.4°C on the condition of natural ventilation and shading during cooling season. The average nighttime temperature of two greenhouses was nearly the same.
7. The result showed that the humidity in the rock storage was very much influenced by that of inflow air.
8. It was concluded that the inside and outside temperature of greenhouse, control target temperature and mean temperature of rock storage should be taken into consideration to select the operation method of air circulation fan for cooling of the solar heated underground rock storage greenhouse.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	27
1-1. Objectives and importance of the research	27
1-2. Contents and scopes of the research	30
1-3. Research trend inside and outside the country	33
Chapter 2. Basic theory on heat storage system	35
2-1. Introduction	35
2-2. Objective and method of heat storage	36
1. Latent heat storage	38
2. Sensible heat storage	41
2-3. Theoretical background of heat storage	46
1. Principle of heat storage	46
2. Heat storage of rock by sensible heat	47
3. Efficiency of heat storage	49
2-4. Solar heated rock storage system	51
Chapter 3. Design of solar heated underground rock storage greenhouse	54
3-1. Heat storage characteristic of rock	54
1. Aperture of rock storage	54
2. Variation of the heat amount stored on rock along aperture	57
3. Thermal characteristic of rock	60

3-2. Model experiment of rock storage and theoretical analysis	70
1. Construction of rock storage experimental model	70
2. Experiment on air flow	71
3. Temperature and humidity measurement system in rock storage model	79
4. Heat storing and radiating characteristic of rock storage model	83
5. Theoretical analysis on rock storage model	100
3-3. Conclusion	114

Chapter 4. Components of solar heated underground rock
 storage greenhouse

4-1. Introduction	117
4-2. Upper structure of solar heated underground rock storage greenhouse	118
1. Greenhouse structure	118
2. Selection of capacity of air circulation fan	121
3. Air circulation system	124
4-3. Lower structure of solar heated underground rock storage greenhouse	127
1. Decision of proper height of underground rock storage	127
2. Decision of proper thickness of insulator and concrete	131
3. Design and construction of rock storage	143

Chapter 5. Efficiency of heat storage, heating and cooling of solar
 heated underground rock storage greenhouse

5-1. Measurement system to analyze heat storage, heating and cooling efficiency	147
1. Measurement of outside environmental factors of greenhouse	147
2. Measurement of inside temperature and humidity of greenhouse and rock storage	148
3. Measurement of inside air flow of greenhouse and rock storage	150
5-2. Efficiency of air flow and heat storage of solar heated underground rock storage greenhouse	151
1. Components of solar heated underground rock storage greenhouse to analyze heat storage efficiency	151
2. Experimental method	152
3. Air flow characteristic	153
4. Heat storage efficiency of rock storage depending on operation method of air circulation fan	156
5-3. Heating efficiency of solar heated underground rock storage greenhouse	165
1. Components of solar heated underground rock storage greenhouse to analyze heating efficiency	165
2. Variation of temperature and humidity of inside and outside of greenhouse and rock storage	166
3. Heat storing and radiating characteristic	201
4. Efficient method of air circulation for heating	207
5. Decision of heat storing and radiating time zone for heating	208
6. Heating efficiency	209
5-4. Cooling efficiency of solar heated underground rock storage greenhouse	210

1. Components of solar heated underground rock storage greenhouse to analyze cooling efficiency	210
2. Variation of temperature and humidity of inside and outside of greenhouse and rock storage	211
3. Heat storing and radiating characteristic	219
4. Efficient method of air circulation for cooling	223
5. Cooling efficiency	224
6. Decision of heat storing and radiating time zone for cooling	227
5-5. Conclusions	228
Chapter 6. Heating and cooling energy of solar heated underground rock storage greenhouse	236
6-1. Saving efficiency of heating and cooling energy	236
1. Saving efficiency of heating energy	236
2. Saving efficiency of cooling energy	244
6-2. Economic analysis	244
6-3. Conclusions	248
Chapter 7. Conclusions	249
References	251
Appendix	255

목 차

제 출 문	1
요 약 문	2
SUMMARY	11
CONTENTS	19
목 차	23
제 1 장 서 론	27
제1절 연구 개발의 목적 및 중요성	27
제2절 연구 개발의 내용 및 범위	30
제3절 국내·외 연구 동향	33
제 2 장 축열시스템의 기초이론	35
제1절 축열의 목적 및 효과	35
제2절 축열방법	36
1. 잠열축열	38
2. 현열축열	41
제3절 축열의 이론적 배경	46
1. 축열의 원리	46
2. 현열이용 자갈축열	47
3. 축열효율	49
제4절 태양열 축열시스템	51

제 3 장	자갈축열 태양열 온실의 설계를 위한 자갈축열층 모형 실험	54
제1절	자갈의 축열특성	54
1.	자갈의 공극율	54
2.	자갈의 공극율별 축열량 변화	57
3.	자갈의 열적 특성	60
제2절	자갈축열층 모형실험 및 이론적 해석	70
1.	축열 자갈층의 모형제작	70
2.	공기유동성 실험	71
3.	축열 자갈층내의 온·습도 측정시스템	79
4.	모형 자갈축열층의 축·방열 특성	83
5.	모형 자갈축열층의 이론적 해석	100
제3절	결 론	114
제 4 장	자갈축열 태양열온실의 구성	117
제1절	개 요	117
제2절	자갈축열 태양열온실의 상부구조	118
1.	온실구조	118
2.	실험용 자갈축열 태양열온실의 환기팬 적정 용량 결정	121
3.	공기순환시스템	124
제3절	자갈축열 태양열온실의 하부구조	127
1.	모의축열층을 이용한 축열 자갈층의 적정 두께 결정	127
2.	단열재 및 콘크리트의 적정두께 결정	131
3.	자갈축열층의 설계 및 제작	143
제 5 장	자갈축열 태양열온실의 축열 및 냉·난방성능	147

제1절 축열 및 냉·난방성능 분석을 위한 측정시스템	147
1. 온실외부 환경계측	147
2. 온실내부 및 자갈축열층 온·습도 계측	148
3. 온실내부 및 자갈축열층의 공기유동성 계측	150
제2절 자갈축열 태양열온실의 공기유동성 및 축열성능	151
1. 축열성능 분석을 위한 자갈축열 태양열온실시스템의 구성	151
2. 실험방법	152
3. 자갈축열 태양열온실시스템의 공기유동성	153
4. 공기순환팬 작동방식에 따른 자갈축열층의 축열성능	156
제3절 자갈축열 태양열온실의 난방효과	165
1. 난방효과 분석을 위한 자갈축열 태양열온실시스템의 구성	165
2. 온실내외 및 자갈축열층 온·습도변화	166
3. 축열 및 방열 특성	201
4. 난방시 효율적인 공기순환방식	207
5. 난방을 위한 축열 및 방열시간대 결정	208
6. 자갈축열 태양열 온실의 난방효과	209
제4절 자갈축열 태양열온실의 냉방효과	210
1. 냉방효과 분석을 위한 자갈축열 태양열온실시스템의 구성	210
2. 온실내·외부 및 자갈축열층 온·습도변화	211
3. 축열 및 방열 특성	219
4. 냉방시 효율적인 공기순환방식	223
5. 자갈축열 태양열 온실의 고온억제 및 냉방효과	224
6. 냉방을 위한 축열 및 방열시간대 결정	227
제5절 요약 및 결론	228

제 6 장	자갈축열 태양열온실의 냉·난방에너지	236
제1절	냉·난방에너지 절감 효과	236
1.	자갈축열 태양열온실의 난방에너지 절감효과	236
2.	자갈축열 태양열온실의 냉방에너지 절감효과	244
제2절	자갈축열 태양열온실의 경제성 분석	244
제3절	요약 및 결론	248
제 7 장	종합결론	249
참 고 문 헌	251
부 록	255

제 1 장 서 론

제1절 연구 개발의 목적 및 중요성

온실재배에서 지상부의 환경조절 요인은 온도, 습도, 광, CO₂, 풍속 등이며 적정환경조건을 유지하기 위한 수단으로는 난방, 냉방, 환기, 차광, 보온, CO₂ 공급, 공기유동 등의 방법이 이용되고 있다. 이 중 적정온도 유지를 위한 난방과 냉방은 온실재배에 있어서 필수적인 조건이며 특히 난방에 소요되는 에너지 비용은 지역에 따라 다소 상이하지만 총경영비 중에서 20%~60%를 차지하고 있기 때문에 시설원예의 소득과 직접적인 관계가 있다. 현재 국내의 원예시설 면적 중에서 주년재배를 목적으로 난방을 하고 있는 시설은 약 20%정도이다. 특히 최근의 농업용 난방연료비의 급등은 시설원예를 근본적으로 위협하고 있으며 난방용 연료를 거의 전량 수입에 의존하고 있는 우리의 실정을 감안한다면 시설원예용 에너지문제는 발등에 떨어진 불과 같이 시급한 대책이 요구되는 문제이다.

온실난방에 사용되고 있는 화석에너지를 대체할 수 있는 에너지원으로는 자연에너지(태양에너지, 지열, 바이오매스 등)와 폐자원에너지(왕겨, 폐목재, 축분, 폐타이어, 폐유, 가연성 쓰레기 등) 및 산업폐열로 대별할 수 있으나, 자원의 부존 현황이나 이용시스템의 설비투자, 이용과정에 발생하는 환경문제, 경제성 등을 감안할 때 태양에너지의 축열에 의한 방법이 가장 바람직하다고 판단된다.

태양열 이용형 온실에 사용되는 축열재로는 물, 돌(자갈), 공기 등의 현열축열재와 Na₂SO₄·10H₂O, Na₂CO₄·10H₂O, CaCl₂·6H₂O 등의 잠열축열재가 사용되고 있으며 축열재는 사용목적, 가격, 축열성능, 축열시스템 등을 고려하여 선택해야

한다. 대표적인 태양열 축열온실은 일본의 시설원예 농가에 많이 보급되어 있는 토양축열에 의한 지중열교환온실이며 대조온실에 비하여 12℃정도의 난방효과가 있는 것으로 보고되어 있다. 따라서 일본에서는 농가에 보급되어 있는 태양열온실의 절반이상이 지중열교환온실이며 이에 관한 연구가 활발히 수행된 바 있으며 국내에서도 이에 관한 연구가 부분적으로 수행된 바 있다. 그러나 토양축열에 의한 지중열교환온실은 토양을 축열재로 사용하고 있기 때문에 토양의 공극율이 작기 때문에 공기와 토양간의 원활한 열교환을 위하여 많은 량의 파이프를 지하에 매설하여야 하지만 본 과제에서는 공극율이 30~50%인 자갈을 사용함으로써 지하에 매설해야 할 파이프의 량을 절감할 수 있는 동시에 축열 및 방열효율이 토양에 비하여 우수할 것으로 판단된다.

한편, 최근에는 유류파동으로 인하여 온실의 난방비 문제가 핫 이슈로 거론되고 있지만 96년 후반기 유가상승 이전만 하더라도 「온실에서 난방은 기름만 태우면 되므로 문제가 없고 하절기의 고온억제가 문제이다」 라는 이야기가 공감대를 형성했던 사실을 쉽게 기억할 수 있다. 그러나 채소류의 년 중 공급을 전제로 발달해 온 시설원예는 주년재배를 위한 여름철의 재배환경을 도외시킬 수 없다. 따라서 여름철 온실내부 온도의 과다상승억제 방법에 관한 지속적인 연구개발이 요청된다. 온실의 고온억제를 위한 냉방법에는 Pad & Fan, Mist & Fan, Fog & Fan, 지붕살수, 차광 등의 방법이 이용되고 있으며 이들 모두 5℃ 내외의 냉방효과가 인정되고 있으나 설치비, 과습, 온실구조의 제한 등의 문제가 있으며 냉방과 난방에 설비를 겸용할 수가 없다. 그러나 본 과제에서는 바닥 자갈층의 태양열 축열로 냉·난방에 미치는 효과를 동시에 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 온실바닥에 염가로 쉽게 구할 수 있는 자갈 또는 쇠석층을 깔아 무토양 재배온실에서 태양에너지를 이용한 냉·난방에너지 절감효과를 규명하고 농가보급형 자갈축열 태양열온실의 설계에 필요한 기초자료를 제시하

여여 농가소득 증대에 기여하고자 한다.

본 과제의 중요성을 기술적, 경제·산업적 및 사회·문화적인 측면에서 요약하면 다음과 같다.

① 기술적 측면

온실난방용 유류대가 불안정한 국내의 실정을 감안할 때, 가격이 저렴한 축열재를 이용한 저비용 태양열 축열 온실시스템의 난방에너지 절감방안에 관한 연구가 요청된다.

② 경제·산업적 측면

유류를 전량 수입하고 있는 국내실정을 감안할 때 油價가 적정수준이라 하더라도 국내 온실산업의 건전한 발전과 국제경쟁력 확보를 위해서는 온실난방을 위한 저비용 대체에너지 이용기술의 개발은 필수적이다.

③ 사회·문화적 측면

6·25이후의 최대위기라고 하는 IMF시대에도 신선채소가 년중 공급되지 못할 경우에 우리의 식생활은 상상할 수 없을 뿐 만 아니라 이는 다른 사회적인 문제를 유발시킬 것으로 예상되어 유류대가 천장부지로 치솟아도 시설원예를 통한 신선채소류의 주년공급은 불가피한 현실이다. 따라서 난방용 유류를 전량 수입하고 있는 우리의 처지이지만 온실재배에서 적정 재배온도 유지를 위한 난방 소요에너지의 투입은 피할 수 없는 실정임을 고려할 때 저비용 태양열 이용 시스템에 관한 기술개발의 필요성은 강조될 수 밖에 없는 명제이다. 그리고, 화석에너지 사용에 따른 환경오염과 화석에너지의 고갈 등을 감안할 때 온실용 태양열 이용시스템에 관한 연구는 매우 중요하다.

이러한 국내의 상황을 감안하여 본 과제는 온실재배에 소요되는 냉·난방에너지 절감할 수 있는 자갈축열 태양열온실의 개발과 설계에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행하였으며, 주요 연구목적을 요약하면 다음과 같다.

- ① 자갈축열층의 모형실험을 통하여 공기유동성 및 축방열특성 파악
- ② 자갈축열 태양열온실의 냉·난방효과 분석
- ③ 자갈축열 태양열온실의 난방에너지 절감효과 분석
- ④ 자갈축열 태양열온실의 냉·난방효과를 근거로 건축비, 내구연한, 난방연료비, 설정온도 등을 감안하여 경제성 검토
- ⑤ 자갈축열 태양열온실의 설계자료 제시
- ⑥ 농가보급형 자갈축열 태양열온실의 기본설계서를 제작하여 농가에 보급함으로써 시설농가의 소득증대에 기여

제2절 연구 개발의 내용 및 범위

본 과제는 온실바닥에 염가로 쉽게 구할 수 있는 자갈 또는 쇠석층을 깔아 무토양 재배온실에서 난방기간중 주간에 축열재인 자갈 또는 쇠석층에 축열된 태양에너지를 야간에 난방에너지로 사용하는 동시에 고온기인 여름철에는 자갈축열로 인하여 주간에 온실내부 온도의 과다상승을 방지하는 효과를 분석하여 자갈축열 태양열온실의 냉난방에너지 절감효과를 규명하여 농가보급형 자갈축열 태양열온실의 표준설계서를 작성하고 농가에 보급함으로써 시설원에 농가의 소득증대에 기여하고자 한다.

그림 1-1은 자갈축열 태양열 온실의 단면을 도시한 것으로 순환팬은 공기유

동팬 역할을 겸용할 수 있도록 배치한다. 공기의 흐름은 순환팬 A에 의하여 온실상부의 더운 공기가 유입하여 자갈축열층을 통과하면서 자갈층에 축열한 후 다시 순환팬 B에 의하여 온실상부로 이동한다. 그리고, 그림 1-2는 자갈축열 태양열온실의 축열 및 방열시간 설정 예이며 겨울철 난방기간동안 주간에는 태양에너지가 자갈층에 축열되고 야간에는 주간 축열량이 온실내부로 방열된다. 그리고, 여름철 냉방기간동안에는 주간에 자갈층에 축열된 열은 야간에 온실외부로 방열된다.

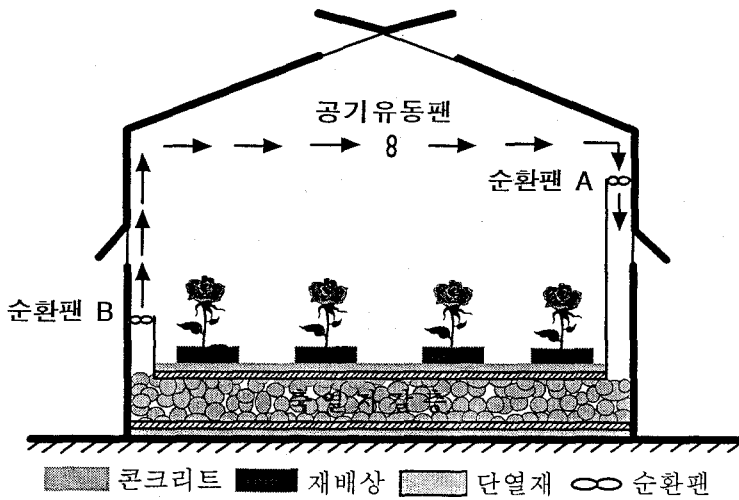


그림 1-1. 자갈축열 태양열온실 단면

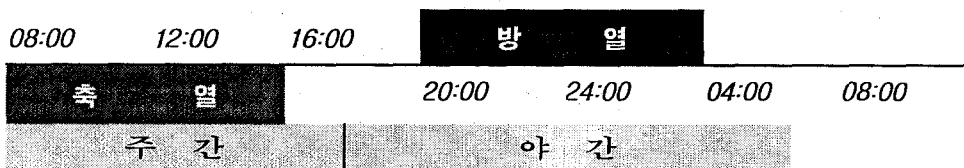


그림 1-2. 자갈축열 태양열온실의 축열 및 방열 시간대 설정 예

자갈축열 태양열온실의 냉난방에너지 절감효과를 규명하기 위해서 수행한 주요 연구내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

연구 개발 목표	세부연구개발 내용 및 범위
1. 자갈 축열층의 물리적, 열적 특성 분석	①축열용 자갈의 공극율 분석 ②자갈의 열적 특성 분석 ③축열자갈층의 축열량 분석 ④축열자갈층의 적정 두께 결정 ⑤단열재 및 콘크리트의 적정 두께 결정 ⑥자갈 축열 모형 실험장치의 설계
2. 자갈축열온실의 설계 및 제작을 위한 모형 실험	①모형의 제작 및 측정시스템 구성 ②자갈층의 공기순환용 파이프 설치 여부 판정 ③자갈축열 모형 실험장치의 온·습도 측정 및 분석 ④자갈축열 모형 실험장치의 축열 및 방열성능 분석
3. 자갈축열온실의 설계 및 제작	①자갈축열온실의 설계 및 제작
4. 난방기간중 자갈축열 태양열 온실의 난방효과 분석	①난방시 효율적인 공기순환방식의 검토 ②난방효과 분석을 위한 자갈축열온실시스템의 구성 ③자갈축열온실의 축열 및 방열특성 분석 ④난방을 위한 축열 및 방열시간대 결정 ⑤온실내외 및 자갈층의 온습도 측정 ⑥자갈축열온실의 난방성능 분석 ⑦자갈축열온실의 난방에너지 절감효과 분석
5. 냉방기간중 자갈축열 태양열 온실의 냉방효과 분석	①자갈축열온실의 축열 및 방열특성 분석 ②냉방시 효율적인 공기순환방식의 검토 ③냉방을 위한 축열 및 방열시간대 결정 ④온실내외 및 자갈층의 온습도 측정 ⑤자갈축열온실의 냉방성능 분석 ⑥자갈축열온실의 고온억제 효과 분석
6. 자갈축열 태양열온실의 경제성 분석	①건축비, 내구연한, 난방연료비, 냉방효과를 감안한 경제성 분석
7. 자갈축열 태양열온실의 설계자료 제시	①농가보급형 자갈축열온실시스템의 설계에 필요한 자료 제시

제3절 국내·외 연구 동향

국내의 시설원예는 단기간에 양적, 질적으로 많은 발전을 해왔으나 에너지 절감형, 자연에너지 이용형 온실개발분야에서는 기초적인 자료나 연구결과가 미흡한 실정이다.

화석에너지는 그 부존량이 제한되어 있는 관계로 에너지 관련분야의 연구자들은 일찍이 태양에너지의 이용기술 개발연구에 진력해 왔으며 온실의 난방분야도 예외가 아니다. 태양에너지는 에너지 분포밀도가 낮기 때문에 집열 및 축열방법이 태양에너지 이용에 있어서 문제의 핵심이다. 온실의 태양열 이용과 관련된 연구는 외부집열관을 이용하는 분야와 축열재(현열 또는 잠열축열재)를 이용하는 분야로 대별된다. 전자는 미국이나 유럽 등지에서 후자는 일본에서 활발한 연구가 이루어져 왔다.

본 과제와 관련된 축열재 이용형 태양열온실의 대표적인 형태는 일본의 시설원예 농가에 많이 보급되어 있는 지중열교환온실이며 이는 대조온실에 비하여 12℃정도의 난방효과가 있는 것으로 보고되어 있다. 따라서 일본에서는 농가에 보급되어 있는 태양열온실의 절반이상이 지중열교환온실이며 이에 관한 연구가 활발히 수행된 바 있으며 국내에서도 이에 관한 연구가 부분적으로 수행되어 왔다. 그러나 이 형식의 지중열교환온실은 공극율이 작은 토양을 축열재로 사용하고 있기 때문에 고온의 공기와 토양간의 원활한 열교환을 위해서는 많은 량의 파이프를 지하에 매설하고 순환팬을 필요로 한다. 또한 토양중의 수분이 온실내부로 유입하여 과습으로 인한 병충해의 발생이 문제시 되고 있다.

한편 자갈축열을 이용한 온실에 관해서도 많은 연구가 수행된 바 있으나 자갈

축열부를 외부 또는 온실내부 벽면에 설치하여 축열된 열의 이용효율이나 온실 면적 이용율이 떨어지는 단점이 있다. 자갈축열층을 지하에 설치하는 경우에는 굴착경비가 소요될뿐더러 배수불량이나 과습이 문제된다.

따라서 본 과제에서는 온실의 바닥면에 공극율이 30~50%인 자갈축열층을 설치함으로써 토양축열에 의한 지중열교환온실에 비하여 지하에 매설해야 할 파이프의 량을 절감할 수 있는 동시에 축열 및 방열효율이 토양에 비하여 우수하고 공사비나 과습문제에 있어서 우수할 것으로 판단된다.

제 2 장 축열시스템의 기초이론

제1절 축열의 목적 및 효과

여러 가지 형태의 에너지 중 본 연구에서 취급 할 열에너지는 저장이 가능하기 때문에 축열시스템을 이용함으로써 에너지를 효율적으로 이용할 수 있다. 축열시스템을 이용함으로써 전력소비의 평준화, 열원기기의 고효율 운전 및 열회수 등의 에너지절약 방법을 효과적으로 응용할 수 있다. 에너지 저장은 에너지 이용시스템의 성능과 효율을 증대시키기 위해 널리 사용될 뿐 아니라 에너지 절약에도 중요한 역할을 담당한다.

각종 폐열이나 태양열과 같이 발생이 불안정한 열에너지를 유효하게 이용하기 위해서는 조절장치가 필요하며, 축열시스템은 열에너지의 조절장치로서 적절한 역할을 할 수 있을 것이다.

축열시스템은 그림 2-1과 같이 열에너지의 수급을 조절하는 것이 목적이다. 에너지 저장은 에너지 이용시스템의 성능 및 효율증대를 위해 널리 사용될 뿐 아니라 에너지 절약에 중요한 역할을 담당한다. 특히, 태양에너지와 같은 주기적이며 간헐적인 에너지를 이용할 때 수요와 공급의 시간적 또는 공간적 위상 차가 존재하기 때문에 이와 같은 불연속적인 현상을 유연하게 완충해주기 위해서는 열원과 이용부하간에 열저장 장치가 필연적이다. 이와 같이 에너지 저장은 수요와 공급의 차이를 보충시켜 줄 수 있으며 그에 따른 시설투자비의 절감 및 연료절감 효과를 가져다주는 잠재력을 지니고 있다.

따라서, 경제성 있는 고농축 장기 열저장 시스템은 태양에너지를 유효하게 이용하기 위해서는 개발되어야 할 중요한 과제라 볼 수 있다. 이와 같이 연구의 초

점이 되고 있는 축열장치의 열공학적 측면과 경제적 효과 면에서의 의미는 다음과 같다.

- ① 주기적이며 간헐적인 열원의 양적 및 질적 변동을 흡수 저장하여 이용 열 부하를 안정된 상태에서 지속적으로 공급한다.
- ② 이용부하 측면에서 일시적으로 일어나는 과수요를 완화시킨다.
- ③ 열에너지 공급과 이용 장치간의 생기는 시간적 차이를 조절하여 준다.
- ④ 폐열화된 열에너지를 흡수하여 이용부에 유용한 에너지로 공급함으로써 에너지 절약효과를 제공한다.

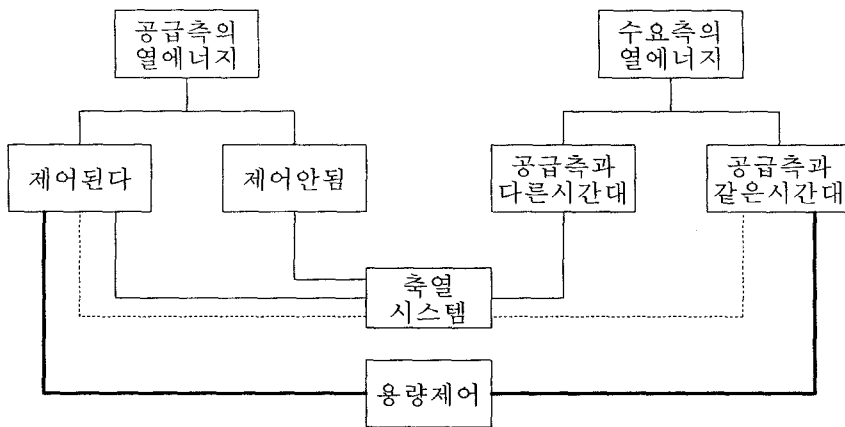


그림 2-1. 열에너지의 수급과 축열시스템

제2절 축열방법

에너지 저장기술은 저장되는 기간에 따라 단기저장과 장기저장으로 구분하며, 저장온도에 따라 저온저장과 고온저장으로 분류한다.

저장시스템의 최적 규모는 용도에 따라 다르며 저장온도, 재료, 열손실, 저장재의 가격, 열교환 및 펌프, 열부하 및 외기온도 등에 따라 설정되어야 한다. 에너지 저장기술은 대단히 넓은 분야에 걸쳐 이용되고 있다.

그림 2-2에서 보는 바와 같이, 열 저장 방법은 고체 또는 액체의 현열을 이용하는 현열축열과 용융, 응고, 결정전이, 승화 등의 상변화에 따른 잠열을 이용하는 잠열축열 및 흡착, 탈착, 용해, 회석, 화학반응과 같이 화학열을 이용하는 화학축열 등의 있다. 현재 가장 널리 보급되고 있는 축열기술인 물, 자갈 및 세라믹 등을 사용하는 현열축열법이 보편적으로 이용되고 있으며, 현열축열은 온도차와 열용량을 이용하여 축열하는 방법이다.

열에너지를 저장하는 매체를 축열재라 부르는데 축열재가 갖추어야 하는 조건은 일반적으로 그림 2-3과 같다. 그러나, 현실적으로 그림 2-3에서 제시하는 특성을 모두 만족시키는 축열재는 극히 드물다. 따라서 목적에 따라 필수조건을 산정하고 결점을 보완하는 방법을 축열재를 선정하여야 한다.

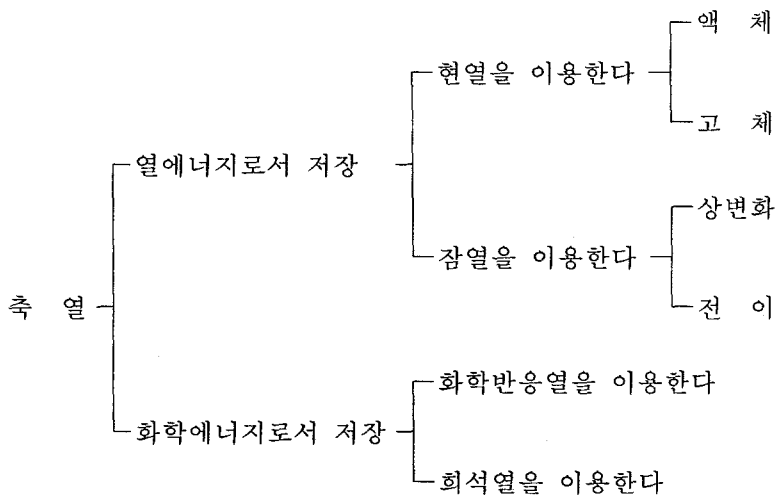


그림 2-2. 축열의 방법

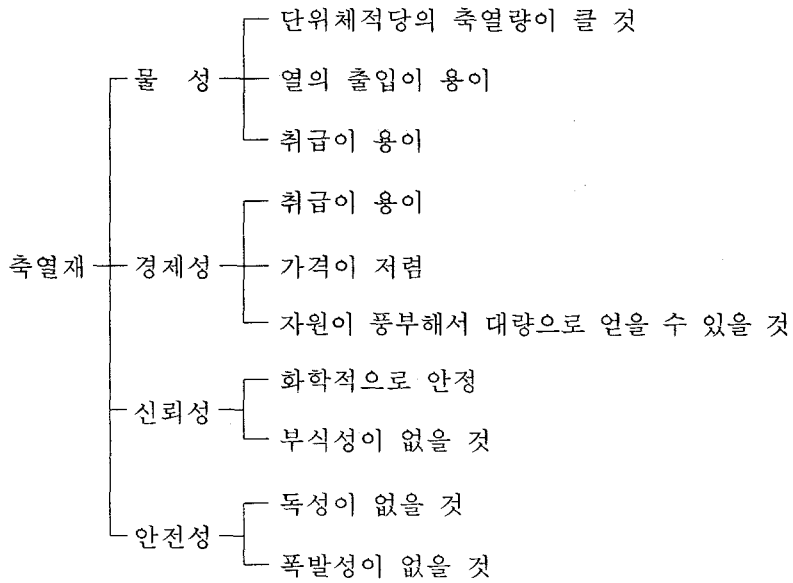


그림 2-3. 축열재가 구비해야 할 조건

1. 잠열축열

잠열축열은 물질의 상변화 또는 전이과정에서 발생하는(또는 필요로 하는) 잠열을 이용하여 열을 저장하는 방법이다. 물질의 상변화 과정에서는 주위와 비교적 높은 열교환이 일어나면서도 온도변화가 없으며, 필요로 하는 일정한 온도로 축열 및 방열을 할 수 있다. 에너지 저장량은 축열량과 축열 재질량의 축적으로 나타내어진다. 잠열축열의 특징은 출력 열에너지의 온도가 일정하며 축열밀도가 현열축열에 비해서 커지만 사용하는 잠열재에 따라 운전온도의 범위가 한정되어 있으며, 일반적인 잠열재가 갖고 있는 부식성과 상변화시 발생하는 부피변화 등에 대응할 수 있는 용기가 필요하다는 큰 단점이 있다. 즉, 잠열재는 용기 내에 충전하고 이를 축열조에 넣어 사용하기 때문에, 용기 내 잠열재와 전열유체 간의 열교환이 필요하며 경우에 따라 발생할 수 있는 용기파손과 이에 따른 잠

열재 누출에 의한 환경문제를 고려해야 하는 추가적인 단점도 있다. 또한 축열 및 방열과정의 반복 횟수가 증가함에 따라 상분리와 과냉각 현상이 발생하여 효율이 저하되는 것이 일반적이므로, 이를 방지하기 위한 증점제나 조핵제의 개발이 필수적이며 고체화시 열이동 속도가 작고 축열재의 비용이 고가이다. 그리고, 열교환기가 필요한 경우가 있으며 과냉각 등의 결점이 있다.

잠열축열의 축열재로서는 유기물(파라핀 등), 무기염(저온역 : NaOH, 고온역 : NaCl, MgCl), 무기수화물($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 등) 및 공용혼합물 등이 있으며 일반적으로 황산나트륨10수화물($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$: 이하 망초라고 함)를 사용하고 있다. 망초는 비조화용융점(Incongruent melting point)를 가진 무기수화물이기 때문에 상분리현상과 과냉각현상이 발생한다.

잠열축열의 장·단점과 잠열축열재에 요구되는 일반성질을 요약하면 다음과 같다.

가. 잠열축열의 장점

- 1) 축열밀도가 크기 때문에 축열조의 용적과 중량을 작게 할 수 있다.
- 2) 용점의 일정온도에서 열의 출입이 가능하기 때문에 부속기기의 운전효율을 높일 수 있다.
- 3) 열용량이 크고, 장치규모가 크게됨에 따라 경제성이 상대적으로 높일 수 있는 것이 예상된다.

나. 잠열축열의 단점

- 1) 용점 전후의 운전에서는 적당하지만, 이 온도를 크게 벗어난 온도범위에서

의 운전에서는 비효율적이기 때문에 운전조건 범위가 한정되어 있다.

- 2) 열매체와 축열체를 다른 것으로 할 필요가 있으며 열교환의 조작성이 필요하고, 장치가 복잡하게 되면 열효율이 저하된다.
- 3) 잠열축열재는 일반적으로 화학물질을 사용하기 때문에 독성이나 인화성 등 환경문제를 고려할 필요가 있다.
- 4) 잠열축열재는 상변화에 따른 체적변화를 일으키기 때문에 장치의 구조설계에 애로사항이 많으며 용융염등 부식성이 강한 물질을 사용할 경우에는 사용재료의 선택이 한정된다.
- 5) 잠열축열재의 열전도도는 일반적으로 작기 때문에 전열특성이 나쁘고, 열에너지의 출입시간적 특징이 좋지 않다.
- 6) 과냉각이나 상분리의 문제가 있다.

다. 잠열축열재의 조건

1) 열적성질

- 가) 사용목적에 알맞은 융점
- 나) 높은 용융잠열량
- 다) 양호한 열전도성

2) 물리적 성질

- 가) 양호한 상평형 관계
- 나) 낮은 증기압
- 다) 용해시 최적변화가 작아야 한다.
- 라) 고밀도

3) 속도적 성질

- 가) 과냉이 없고 응점에서 응고
- 나) 결정화 속도가 커야 한다.

4) 화학적 성질

- 가) 장기간에 걸쳐 내구성이 있어야 한다.
- 나) 낮은 부식성, 낮은 인화성, 낮은 가연성
- 다) 독성이 없어야 한다.
- 라) 약취, 그 외 다른 공해성이 없어야 한다.

5) 경제성

- 가) 대량으로 존재
- 나) 구입이 용이하여야 하며 비용이 적합하여야 한다.

2. 현열축열

현재 가장 널리 사용되고 있으며, 기술적으로 높은 수준에 있는 가장 단순한 저장시스템이다. 현열축열재는 액체와 고체로 구별되며, 열용량과 온도변화를 이용하는 것으로 열을 흡수하여 축열재의 온도를 승온 시켰다가 필요시 사용하는 것이다. 즉 온도차와 열용량을 이용한 축열방법으로 이들 관계를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$Q_s = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dt \quad (2-1)$$

$$= v \int_{T_1}^{T_2} \rho C_p dt \quad (2-2)$$

여기서, Q_s : 축열량(kcal), m : 축열재 무게(kgf), v : 체적(m^3),

C_p : 축열재 비열(kcal/kgf·°C), T : 축열온도(°C), ρ : 밀도(kgf/ m^3)

따라서, 현열이용 축열재의 단위용적당 축열량은 식 (2-3)과 같다.

$$q_s = \int_{T_1}^{T_2} C_p \rho dt \quad (2-3)$$

여기서, q_s : 단위용적당 축열량(kcal/ m^3), C_p : 축열재 비열(kcal/kgf·°C)

T : 축열온도(°C), ρ : 축열재의 밀도(kgf/ m^3)

물질의 비열과 비중량은 온도에 의해서 변화하나 축열재로서 사용하는 온도 범위에서는 일정하다고 보면, 식 (2-3)은

$$q_s = C_p \rho \Delta T \quad (2-4)$$

가 되며, 축열재의 축열량은 온도차 ΔT 에 비례하게 된다. 그리고, 축열재의 밀도와 비열이 클수록 적은 체적으로 많은 양의 에너지를 저장할 수 있으며, 특히 축열시스템에 영향을 주는 요소로서 작동온도, 밀도, 열전도도, 증기압, 안정성 및 가격 등이 고려되어야 한다. 실제로 이용할 수 있는 열량은 축열재의 온도분포가 동일하지 않거나 평균온도차 ΔT 를 얻을 수 없다는 열손실 등에 의해서 일반적으로 감소하게 된다.

가. 액체 축열재

액체 축열재는 풍부하고 경제성이 있는 축열재이며 물리적 특성은 표 2-1과 같다. 물은 비교적 저온에 사용되고 있는 가장 좋은 액체축열재로 지금까지 가장 많이 사용되어지고 있다. 물은 축열재로 이용하는 기술적인 기본연구는 확립되었으나, 물 저장용기의 경제적 제작방법 등은 더 연구되어야 한다.

물은 고온 영역에서 사용코자할 때는 압력용기가 필요하며 특히 대수층에 저장하여 사용할 수 있다면 보다 경제적으로 활용될 수가 있다. 비교적 고온축열을 위한 액체축열재로는 압력수, 비등점이 높은 기름류, 용융염, 액체금속류 등이 있으나 조작성이나 용기, 축열용량, 가격이 비싸 보급에 제한을 주며 기름류 및 용융염 등은 고온의 태양열발전 시스템의 축열재로 주로 사용한다.

표 2-1. 액체 현열축열재의 물리적 특성

Medium	Fluid Type	Temperature Range (°C)	Density (kg/m ³)	Heat capacity (J/Kg·K)	Thermal conductivity (W/m°C)
Water	-	0 ~ 100	1000	4190	0.63(38°C)
Water	-	-	1050	3470	-
Ethylene					
Glycol 50/50					
Ethylene Glycol	-	-	1116	2382	0.249(20°C)
Hitec	Molten salt	142 ~ 540	1680	1560	0.61
Engine Oil	Oil	160이상	888	1880	0.145
Draw Salt	Molten salt	220 ~ 540	1733	1550	0.57
Lithium	Liquid salt	180 ~ 1300	510	4190	38.1
Sodium	"	100 ~ 760	960	1300	67.5
Ethanol	Organic liquid	78이상	790	2400	-
Propoanol	"	97이상	800	2500	-
Butanol	"	118이상	809	2400	-
Isobutanol	"	100이상	808	3000	-
Isopentanol	"	148이상	831	2200	-
Octance	"	126이상	704	2400	-

나. 고체 축열재

고체 축열재로는 자갈, 암석, 토양, 내화벽돌, 콘크리트 블록, 금속 등이 이용되고 있으며 균일한 크기의 덩어리로 형성된 고체 축열매체는 열저장매체와 열교환기 역할을 동시에 할 수 있기 때문에 별다른 열교환기가 필요 없어 제작비용을 절감시킬 수 있다. 고체 축열재는 액체 축열재보다 최대 허용 열저장온도 범위가 크기 때문에 저온뿐만 아니라 고온축열이 가능하다. 그러므로 평판형 태양열 집열기에 의하여 집열된 저온열을 저장할 수 있는 동시에 집광식 집열기에 의하여 집열된 고온열을 저장할 수 있다. 고체 축열재의 물리적 특성은 표 2-2와 같으며 일반적으로 비열 및 열전도도가 낮지만 고온범위에서 낮은 증기압을 갖으며 화학적으로 안정적이다. 따라서, 용기상의 문제점이 없고 비용이 저렴하다.

축열재의 밀도와 비열은 축열성능에 큰 영향을 미치며, 철 등의 금속축열재는 물과 거의 비슷한 열용량을 나타내고 있으나 가격이 자갈 또는 벽돌보다 고가이므로 경제성이 떨어진다. 고체 축열재료로서는 자갈이 주로 이용되고 있으며 열교환 효율도 높고 자갈의 열전도도가 매우 낮아 공기의 유동이 없는 한 열손실을 최소화시킬 수 있다. 자갈 축열재는 자갈 크기, 형태, 밀도 및 열전달 유체 등과 같은 물리적 성질에 크게 의존하며 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 가격이 저렴하고 대량 구입이 용이
- 2) 설비비가 잠열이용형보다 저렴
- 3) 토양보다 공극율을 높고 열전도성이 우수
- 4) 독성 및 부식성이 적음
- 5) 구입단가 및 단열시공면에서 타 축열재보다 월등히 우수하여 초기설비비가 적음

- 6) 순환유체(공기)와의 열교환이 직접 이루어짐
- 7) 환경오염에 대한 우려가 없음.

표 2-2. 고체 현열축열재의 물리적 특성

Medium	Density (kg/m ³)	Heat capacity (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m℃)
Aluminium	2,707	896	240(20℃)
Aluminium oxide	3,900	840	
Aluminium sulfate	2,710	750	
Brick	1,698	840	0.69(20℃)
Brick magnesia	3,000	1130	5.07
Concrete(sand&gravel)	2,240	1130	0.9~1.3
Cast Iron	7,900	837	29.3
Pure Iron	7,897	452	73.0 (20℃)
Calcium choride	2,510	670	-
Copper	8,954	383	386 (20℃)
Earth Wet	1,700	2093	2.51
Earth dry	1,260	795	0.25
Sodium carbonate	2,510	1090	-
Sodium chloride	2,170	920	-
sodium sulfate	2,700	920	-
Stone, granite	2,640	820	1.73 ~ 3.98
Stone, Limestone	2,500	900	1.26 ~ 1.33
Stone, marble	2,600	800	2.07 ~ 2.94
Stone, sandstone	2,200	710	1.83

제3절 축열의 이론적 배경

1. 축열의 원리

축열조는 표 2-3의 기능이 요구된다. 이러한 기능을 위해서는 축열조의 특성을 정적인 것과 동적인 것으로 분류하여 고려하여야 한다.

표 2-3. 축열조의 기능

운 전 모 드	부 하 상 태	기 능
축 열 운 전	열원능력 > 부 하 량	잉여열량을 축열조에 저장
방 열 운 전	부 하 량 > 열원능력	필요열량을 흡출한다.

가. 정특성

축열시스템에서의 이용열량은 식 (2-5)와 같이 표현할 수 있다.

$$[\text{이용열량}] = [\text{저장된열량}] - [\text{방열손실}] \quad (2-5)$$

따라서, 축열시스템의 효율을 높이기 위해서는 방열손실을 최소화하여야 한다. 축열조의 방열손실을 최소화하기 위해서는 다음사항을 고려하여야 한다.

- ① 공법·재료·내구성 등을 고려하여 필요한 부분의 단열을 완벽히 실시한다.
- ② 운전시스템을 적절하게 하여 축열된 상태로 장시간 방치하는 일이 없도록 한다.

축열시스템에서 방열손실을 최소화하는 성능을 정특성이라 하며 이들의 영향은 특별한 경우를 제외하면 실제로는 수 퍼센트로 별로 크지 않는 것이 보통이다.

나. 동특성

문헌 등에 의하면 축열시스템의 축열효율이 일반적으로 50~60%, 최대로 80% 정도로 알려져 있다. 따라서, 축열시스템에서는 방열손실 이외의 손실이 있으며 더구나 그 손실이 크다는 것을 알 수 있다. 방열손실 이외의 손실이란 다음의 두가지의 경우이다.

- ① 열량으로서는 축열조에 저장되어 있음에도 불구하고 그것을 유효하게 사용할 수 없다.
- ② 축열조에는 아직 축열의 여유가 있으며 열원에도 여유가 있는데 축열운전을 할 수가 없다.

이러한 것은 축열조의 구조 등 축열조 자체에도 물론 관계가 있으나 시스템의 설계 여하에도 밀접하게 관계된다. 따라서, 이러한 손실을 최소화하기 위해서는 축열시스템 설계시 아래의 사항을 고려하여야 한다.

- ① 축열조 자체의 특성을 압출한 흐름에 가까운 것으로 하고 조내의 온도분포를 점진적으로 증가하는 상태로 접근시킨다.
- ② 입·출구온도, 부하 송수온도, 환수온도 등과 제어법 등을 적절히 설정한다.

2. 현열이용 자갈축열

현열이용 자갈축열시스템에서 순환유체가 축열조를 통과하는 동안의 열전달은 강제대류열전달이며, 이 경우 자갈층내의 열이동은 계 전체를 통하여 초기상

태에서는 순환유체와 축열재 사이에 열적으로 평형상태로 있다가 순환유체의 온도상승에 따라 열전달이 일어난다. 자갈층내에서 일어나는 열전달 문제는 순환유체와 축열재 사이의 비정상 강제대류열전달로 이는 이미 Schiuman과 Rize 등 여러 학자들에 의해 연구되어왔다. 따라서 대류열전달이 있는 열전도 문제를 단순화시키면 아래의 식으로 기술된다.

$$q = h \cdot A \cdot \{T_a - T_s(\theta)\} \quad (2-6)$$

여기서, h : 대류열전달계수(kcal/m²hr°C), A : 축열재의 표면적(m²)

T_a : 공기온도(°C), $T_s(\theta)$: 시간함수에 따른 축열재의 표면온도(°C)

자갈축열층과 같은 고체 입자의 축열층은 열교환기 또는 열에너지의 충전용으로 사용할 수 있다. 자갈축열층은 그 층을 통과하는 뜨거운 유체에 의해 가열되고, 자갈에 저장되는 에너지는 그 층을 통과하는 차가운 유체가 지나감으로 인해 빼앗기게 된다. 이와 같은 목적은 단순히 한 유체에서 다른 유체로 열을 전달시키는 것이이므로 열에너지를 특정시간 동안 저장하는 것이다. 이러한 자갈축열층은 열교환기로서 재생열교환기로 해석할 수 있다. 자갈축열층의 유체 흐름의 특성을 결정짓는 Reynolds수는 다음 식에서 산정 할 수 있다.

$$Re = \frac{\nu L \rho}{\mu} \quad (2-7)$$

여기서, μ : 점성계수 (kg/m·s)

$$\nu : \text{특성속도} = \frac{\dot{m}}{\rho \epsilon_v A_c}$$

\dot{m} : 질량유량 (kg/s)

ρ : 밀도 (kg/m³)

ϵ_v : 공극율 (일반적으로 0.3 ~ 0.5)

A_c : 축열층의 단면적 (m²)

$$\mathcal{L} : \text{특성길이} = d_p \left(\frac{\epsilon_v}{1 - \epsilon_v} \right)$$

d_p : 자갈의 입경

ϵ_v : 공극율 (일반적으로 0.3 ~ 0.5)

식 (2-7)에서 자갈축열층 내의 순환유체의 흐름특성을 파악할 수 있으며 등온면으로부터의 열전달을 고려한 자갈축열층의 순환유체에 적당한 강제대류 열전달 상관식은 식 (2-8)과 같다.

$$\text{Nu} = (0.5\text{Re}^{1/2} + 0.2\text{Re}^{2/3})\text{Pr}^{1/3}; \quad 20 < \text{Re} < 10^4 \quad (2-8)$$

여기서, Nu : Nusselt수

Re : Reynolds 수

Pr : Prandtl 수-동점성계수와 열확산계수의 비, 즉 운동량 확산율과 열 확산율의 비

3. 축열효율

축열시스템의 축열효율은 두 가지 관점에서 정의할 수 있다. 첫 번째는 축열

조에 축열된 열량중 어느 정도가 유효하게 사용되었는가 하는 것이며, 두 번째로는 축열조의 용적에서 정해지는 본래 축열 가능한 열량에 대해서 얼마정도의 열량이 축열되는가 하는 관점에서 사용되는 것이다.

첫 번째의 의미에서 축열효율은 축열시스템의 정특성에 관련된 것으로, 이 경우의 손실(효율이 100%에 미치지 않는 부분)은 직접적으로 방열손실 즉, 에너지의 손실을 의미한다. 또 하나의 축열효율은 직접적인 에너지 손실을 의미하는 것이 아니라, 주로 축열조의 설치공간의 유효이용도를 표시하는 것이다.

축열시스템의 정특성과 관련한 축열효율은 축열시스템의 단열정도와 밀접한 관계가 있으며 식 (2-9)과 같다. 따라서, 축열조 외벽은 완벽한 단열시공을 하여야 하며, 축열재의 크기는 축열조 체적에 따라 적당한 크기로 되어야 축열효율이 높아진다.

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_i} = 1 - \frac{Q_o}{Q_i} \quad (2-9)$$

여기서, η : 축열효율

Q_i : 유입열량 (= $m_a \cdot C_{pa} \cdot T_{inlet}$, kcal/hr)

Q_o : 유출열량 (= $m_a \cdot C_{pa} \cdot T_{outlet}$, kcal/hr)

Q_s : 축열열량 (kcal/hr)

m_a : 순환유체의 질량유량 (kg/s)

C_{pa} : 순환유체의 정압비열 (kcal/kg·°C)

T_{inlet} : 유입유체온도 (°C)

T_{outlet} : 유출유체온도 (°C)

축열시스템의 동특성과 관련된 축열효율은 필요한 축열량에 따른 축열조의

규모를 결정하는 것으로 식 (2-10)과 같이 표시된다.

$$\eta = \frac{Q_r}{Q_{th}} \quad (2-10)$$

여기서, Q_r : 실제로 축열 및 방열된 열량

Q_{th} : 이상상태로 축열이 가능한 열량

식 (2-9)에서 정의하는 축열효율은 축열조 자체뿐만 아니라 주변의 시스템을 포함한 효율이므로 완전히 같은 축열조라 하여도 주위의 시스템에 따라 효율의 값은 상당히 다르다는 사실에 주의하여야 한다.

제4절 태양열 축열시스템

국내의 주요 에너지원인 화석연료는 대부분을 수입에 의존하고 있는 국내여건상 국제원유가의 변동에 큰 영향을 받고 있다. 따라서, 필요한 에너지의 원활한 공급을 위한 대체에너지 기술개발이 절실히 요구되고 있는 실정이며, 생산비의 40%이상이 난방비로 소요되고 있는 시설원예의 경우 난방에너지 절감 및 화석연료의 대체에너지 개발은 시급한 해결과제이다. 따라서, 최근에 지구상에 무한히 공급되는 태양열에너지를 대체에너지로 개발 및 응용하려는 연구들이 건축, 농산물 건조 및 농업시설 분야 등 다양한 방면에서 활발히 진행되고 있으며, 잠열축열재와 토양축열을 이용한 지중열교환온실이 대표적인 예이다. 하지만, 이러한 시스템은 겨울철 난방에너지의 절감만을 목적으로 하고 있으므로 여

름철 냉방에너지의 절감에는 다소 문제점이 있다.

자연에너지중 하나인 태양에너지를 이용하는 태양열 시스템은 태양열을 흡수하는 집열부와 흡수된 열을 저장하는 축열부 및 열을 사용하는 이용부로 구성되어 있다. 이들 구성부사이의 열이동에 있어서 강제순환방식에 의한 것이 설비형(Active Type)이고 자연순환방식을 적용한 것이 자연형(Passive Type)이다.

태양열시스템의 분류와 구체적인 예는 표 2-4와 같다.

태양 복사열을 집열하는 방법으로 주로 집열기를 사용하고 있으며 집열기에는 평판형 집열기, 집광형 집열기 및 자연형 집열기로 구분할 수 있다.

평판형 집열기의 형식은 개방유하식, 공기식 및 액체식 집열기로 구분할 수 있으며 집광형 집열기의 형식은 선형식과 반구형 집열기로 구분할 수 있다. 그리고, 자연형 집열기로는 창문, 온실 등과 같은 입사형 트랩과 지붕, 벽체 및 태양열못 등과 같은 자연대류형으로 구분할 수 있다.

자연형 집열기중 대표적인 예인 온실의 집열율은 20%~30%로 낮은 것으로 알려져 있다. 그러나, 겨울철 평판형 집열기의 효율이 40%이하로 감소하는 것과 저온축열의 이용이 가능한 온실재배와 관련하여 볼 때 온실을 집열기로 이용할 수가 있을 것으로 판단된다. 온실은 건물의 창문보다 집열면적이 커서 집열에는 유리하나 단열이 제대로 되어있지 않은 관계로 주간에 입사된 태양 복사열은 아주 빨리 손실되어 야간에는 사용할 열을 거의 남겨두지 않는다. 따라서, 주간에 온실내로 입사되는 태양 복사열을 저장할 수 있는 축열부가 필요하다. 이러한 축열부를 현열이용형 자갈을 이용하여 구성할 수 있으며 자갈축열시스템은 온실내로 입사되는 태양복사열을 저장함으로써 외부기상여건에 따라 냉·난방효과를 얻을 수 가 있다.

표 2-4. 시스템의 분류와 구체적인 예

		집열매체	축열매체		방열방식	보조열 에너지원 (예)
			집열측	방열측		
			저온측	고온측		
수동적 (Passive) 시스템	직접일사이용	건물자체		자 연	없거나 또는 별도	
	옥상 못	옥상못 水 袋		자 연		
		창문축열	창측 물탱크			자 연
	콘크리트벽					
	잠열, 커튼 벽					
온실			자 연			
능동적 (Active) 시스템	태양열 직접 난방시스템	공기	쇄 석	온 풍	가스난로	
			잠열체			
		물, 부동액	물		온풍, 바닥난방	기름온수보일러, 전열기
			물	쇄 석	온 풍	가스
				쇄석과 흙	자연+바닥패널	기름온수보일러
			모 래		자 연	-
	콘크리트		자 연	-		
	잠 열 체		팬 코일	전기히트		
	태 양 열 히트펌프 냉(난)방 시 스템	공기	쇄 석	-		
				쇄 석	온 풍	히트펌프
				잠열체		
			잠열체	물		
쇄 석						
잠열체				온 풍	-	
물, 부동액		물	-		바닥난방 팬코일	가스 히트펌프
			물		팬코일	공기열히트펌프
			물		온 풍	물 히트펌프자체
		구조체		바닥패널	전열기	
		쇄 석				
		쇄석	-		바닥패널	물 히트펌프자체
쇄 석						
-			물	-		

제 3 장 자갈축열 태양열 온실의 설계를 위한 자갈축열층 모형 실험

제1절 자갈의 축열특성

자갈축열 태양열온실의 기본원리는 주간에 일사로 데워진 온실내부공기를 자갈축열층사이로 순환시켜 이때 자갈층에 축열된 에너지를 이용하는 것이므로 축열층 사이로 충분한 공기순환이 이루어져야 한다. 축열되는 에너지의 양과 시공단가에 직접적으로 영향을 주는 것으로 예상되는 축열재 자갈의 크기 및 자갈층의 두께 결정과 관련하여 수행한 연구결과는 다음과 같다.

1. 자갈의 공극율

자갈축열층내의 순환유체의 유동과 밀접한 관계가 있는 자갈의 공극율 분석을 위하여 쇄석 및 자갈의 입경별로 KSF 203, 2505 및 간이실험를 수행하였다. 실험결과는 다음과 같다.

가. 한국산업규격에 의한 실험

그림 3-1은 자갈층의 공극율 산정을 위한 실험장치이며, 자갈 및 쇄석의 공극율 측정을 위하여 굵은 골재 비중 및 공극율 시험(KSF 2503, 2505)을 통한 축열재의 비중 및 공극율을 산정한 결과는 그림 3-2와 같다.

그림 3-2에서 보는 바와 같이 자갈의 크기에 따른 공극율의 차이는 미소한 것으로 나타났으며 쇄석의 경우는 자갈에 비해 다소 높게 나타났다.

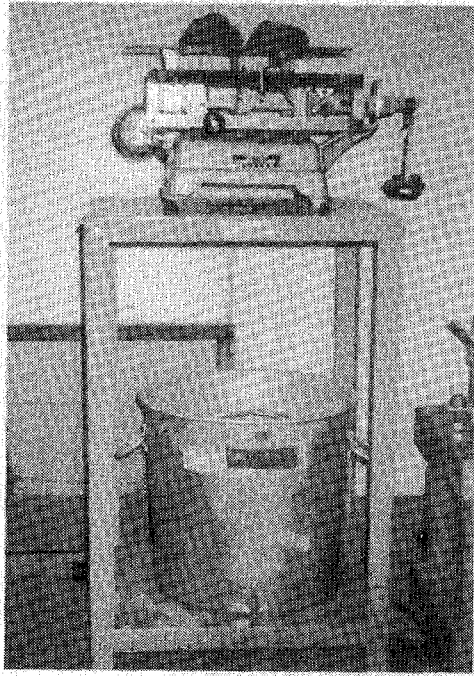


그림 3-1. 굵은골재 비중 측정장치

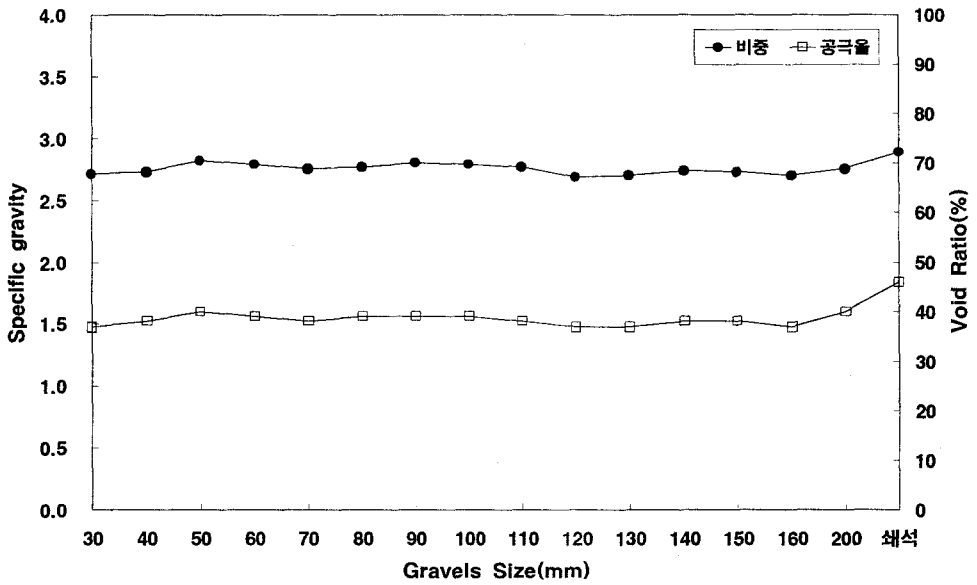


그림 3-2. 자갈 및 쇄석의 비중 및 공극율

쇄석이 강자갈보다 공극율이 5~7%정도 높게 나타난 것은 쇄석의 입도가 고르지 못하기 때문인 것으로 분석된다. 그림 3-2에서 알 수 있는 바와 같이 공기가 통과할 수 있는 공극율은 자갈의 크기와는 큰 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 자갈의 입도가 고르지 못하며 형상이 일정하지 못하기 때문이다.

나. 간이실험에 의한 방법

그림 3-3에서 보는 바와 같이 일정한 크기(0.8m×0.95m×1.8m)의 탱크에 자갈을 채운후 유입되는 물의 양을 측정하여 자갈의 공극율을 산정하였다. 간이실험에 의해 자갈의 공극율을 구한 결과는 표 3-1과 같으며 KSF의 실험에서와 마찬가지로 자갈의 입경에 따른 공극율은 뚜렷한 차이가 없는 것을 나타났다. 그러나, KSF의 실험결과와 비교하였을 경우에는 평균 4%정도 공극율이 높게 나타났다.

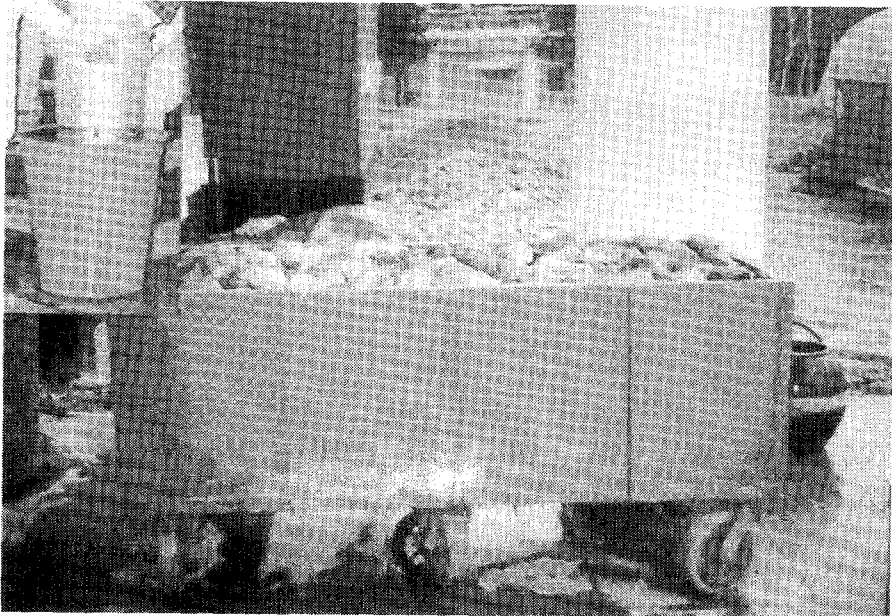


그림 3-3. 자갈의 공극율 분석을 위한 간이실험

표 3-1. 쇠석 및 강자갈의 크기별 공극율

구 분	쇠 석		강 자 갈			
	30mm이하	50 ~ 100mm	30mm이하	50 ~ 100mm	150 ~ 200mm	30 ~ 300mm
공극율(%)	41.9	45.9	32.2	43.1	44.8	40.8

2. 자갈의 공극율별 축열량 변화

축열 자갈층은 그 층을 통과하는 뜨거운 유체에 의해 가열되고, 자갈에 저장되는 에너지는 그 층을 통과하는 차가운 유체가 지나감으로 인해 빼앗기게 된다. 축열층의 열전달 면적은 자갈의 크기와 형태, 공극율에 관계되며, 일반적인 자갈층의 공극율 ϵ_v 는 0.3~0.5 범위 이다. 따라서, 식 (3-1) ~ (3-4)를 이용하여 자갈층의 공극율 변화에 따른 축열량을 산정하였으며, 계산에 이용된 자갈의 물리적 특성은 표 3-2와 같다.

$$\text{축열층의 공극율 } \epsilon_v = \frac{\text{축열층 체적} - \text{축열재 체적}}{\text{축열층 체적}} \quad (3-1)$$

단위 축열층에 대한 열전달 면적 또는 친수성 면적인 축열층의 비표면적 a [m^{-1}]는 다음과 같다.

$$a = \frac{\text{입자의 총 표면적}}{\text{축열층 체적}} \quad (3-2)$$

만일, 축열층에 이용된 입자의 체적이 V_p 이 표면적이 A_p 일 때, 비표면적은 다음과 같다.

$$a = \frac{A_p}{V_p}(1 - \epsilon_v) \quad (3-3)$$

예를 들면,

직경이 d_p 인 구입자에 대한 비표면적은 $A_p/V_p = \pi d_p^2 / (1/6)\pi d_p^3 = 6/d_p$,
 $a = 6(1 - \epsilon_v)/d_p$ 이다.

일반적으로 입자의 형상과 공극율을 알 때 비표면적을 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\dot{Q} = Q_i - Q_o = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \quad (3-4)$$

여기서, \dot{Q} : 축열열량 (kcal/hr)

Q_i : 유입열량 (kcal/hr)

Q_o : 유출열량 (kcal/hr)

\dot{m} : 질량유량 (kg/s)

C_p : 정압비열 (kcal/kg·°C, J/kg·K)

T_{in} : 입구유체온도 (°C, K)

T_{out} : 출구유체온도 (°C, K)

표 3-2. 자갈의 물리적 특성

열전도율 (kcal/m·hr·°C)	밀도 (kg/m ³)	비열 (kcal/kg·°C)	열용량 (kcal/m ³ ·°C)	열확산율 (m ² /hr × 10 ⁻⁴)
0.5263	1,850	0.2	370	14.2

※건축실계자료집 -환경계획편-, 대한건축학회, 1994

※열확산율 = 열전도율 / 밀도 × 비열

축열층내 자갈의 공극율 변화와 순환팬 용량에 따른 축열량을 산정한 결과는 그림 3-4와 같다. 계산에 이용된 축열층의 제원은 표 3-3과 같이 가정하였다.

표 3-3. 축열층의 제원 및 가정조건

축열층 규모	자갈층의 공극율	입 구 유체온도	초기출구 유체온도	순환팬 용량 (Q, m ³ /min)
폭(5m)×길이(9m)×높이(1m)	0.3 ~ 0.5	30℃(일정)	5.3℃	50, 75, 100

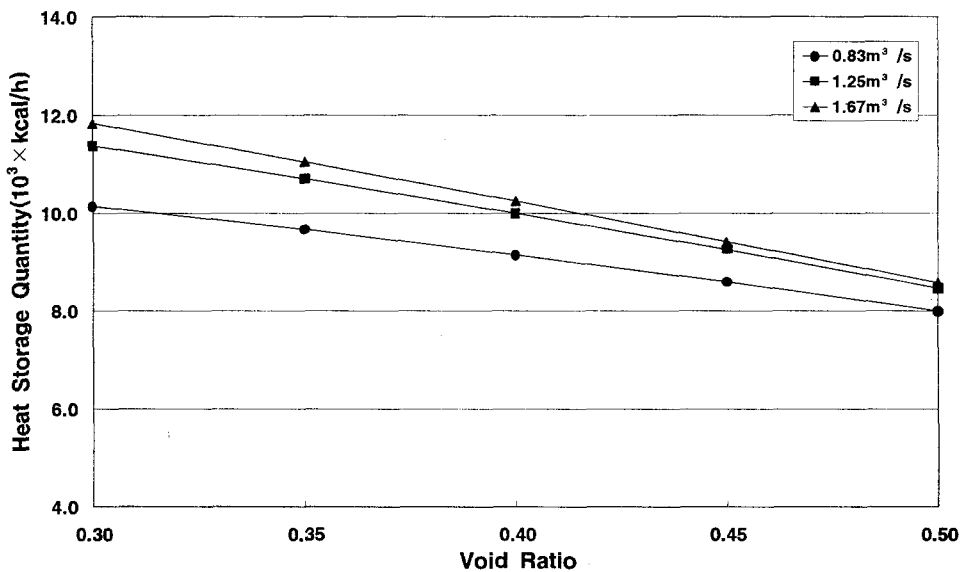


그림 3-4. 축열층의 공극율 변화에 따른 축열량

그림 3-4에서 보는 바와 같이 축열량은 축열층내 자갈의 공극율 변화에 따라 상당한 차이를 보이고 있으며, 이러한 결과는 축열재의 체적이 축열량에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 축열층내 자갈의 크기를 결정하는데 있어 공기순환 및 축열용량을 동시에 고려하여야 한다.

3. 자갈의 열적 특성

가. 자갈 및 토양의 열전도율 측정

축열재로 사용될 자갈의 열적성질을 파악하기 위하여 그림 3-5의 열전도계수 측정장치인 QTM-500을 이용하여 자갈과 흙의 열전도계수를 측정한 결과는 표 3-4와 같다. 표 3-4에서 보는 바와 같이 자갈은 흙에 비하여 열전도가 우수한 것으로 나타났다.

표 3-4. 흙, 자갈 및 쇠석의 열전도계수

구 분	흙		강 자 갈		쇠 석
	자연상태 (함수비 14%)	완전건조상태 (함수비 0%)			
열전도계수 (W/m·K)	0.9398(35℃)	0.6325(31℃)	2.557(30℃)	2.7106(32℃)	1.6783(31℃)

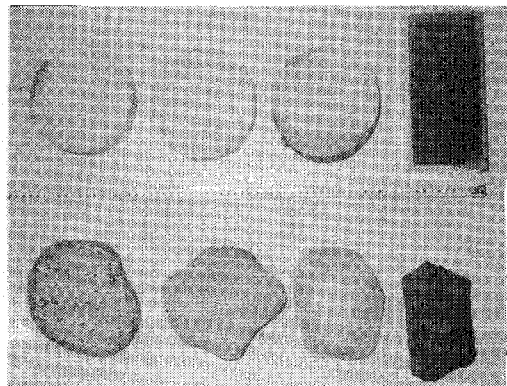
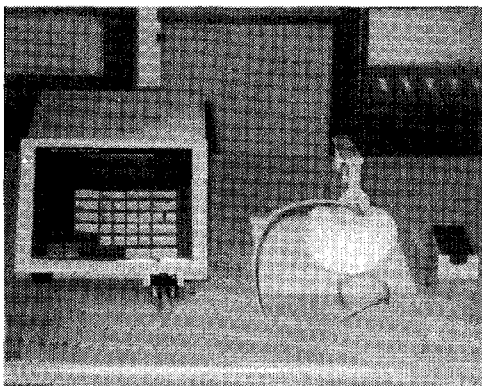


그림 3-5. 열전도계수 측정 장치 및 시료

나. 자갈의 축·방열 특성

1) 자갈의 축열 특성

항온항습기내에서 가온가습이 이루어지면 자갈 및 쇄석내부에는 열전달이 일어나며 축열이 이루어진다. 축열과정을 파악하기 위해서는 자갈의 표면부에서부터 중심부까지의 온도변화를 계측하여야 하나 자갈내부에 센서를 설치할 수 가 없다. 따라서, 그림 3-6과 같이 항온항습기내에서의 가온가습 상황을 CFD모형에 적용하여 자갈의 입경에 따른 축열특성 및 공기유동속도에 따른 자갈내부 온도변화를 분석하였다. 자갈의 축열특성을 파악하기 위해 CFD 모형에 적용한 조건은 표 3-5와 같다.

표 3-5. CFD 모형에 적용 조건

자갈의 초기조건	유입공기성질
① 직경 : 250mm(구형) 250mm×150mm(타원형) ② 초기상태 : 온도 10℃(283K), 습도 40% ③ 물리적 성질(표 3-3 참조)	① V=0.2m/s, ② Ta=40℃(313K), 60% ③ $\rho = 1.1181 \text{ kg/m}^3$, ④ $C_p = 1.0075 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ⑤ $\mu = 190.74 \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ ⑥ $\nu = 17.20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ⑦ $\kappa = 27.26 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ⑧ $\alpha = 24.42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ⑨ Pr = 0.7052

자갈의 축열특성을 분석한 결과는 그림 3-7~그림 3-11과 같다. 그림 3-7은 축열시간에 따른 자갈단면의 열전달과정을 나타낸 것으로서, 축열시간이 경과할수록 자갈의 중심부의 온도가 높아짐을 알 수 있으며 입경이 작을수록 온도변화가 빠르게 일어남을 알 수 있으며 자갈 표면부의 열이 중심부로 확산이 되면

서 자갈내부의 온도가 상승함을 알 수 있다. 그리고, 그림 3-8은 가온가습시 자갈주위의 공기속도 및 유동장을 나타낸 것으로서 공기흐름은 난류의 특성을 나타내고 있으나 축열층 내부의 공기흐름 특성은 유입공기의 속도와 축열재의 채움정도에 따라 상이하게 나타날 것으로 예상되며 축열층 제원에 따른 레이놀드수의 계산결과에 따라 축열층내의 공기흐름 특성은 결정될 수 있다.

그림 3-9는 축열시간에 따른 자갈의 내부온도 변화를 분석한 것으로서, 축열시간이 경과함에 따라 자갈의 표면 및 중심부의 온도는 증가하였으며 입경이 작은 타원형의 자갈내부 온도가 빠르게 상승하였으나 단위입자당 축열량은 동일함을 알 수 있다. 그리고, 그림 3-10은 유입공기속도변화에 따른 자갈표면의 온도변화로서, 축열시간 10분후의 자갈표면부의 온도를 나타낸 것이다. 유입공기속도가 증가할수록 자갈표면의 온도 역시 증가하는 것으로 나타나 유입공기속도와 자갈표면부의 온도는 비례하는 것으로 분석되었다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, 축열층 설계시 축열시간에 따른 자갈입경 또는 축열용량을 고려하여야 하는 사실을 알 수 있다.

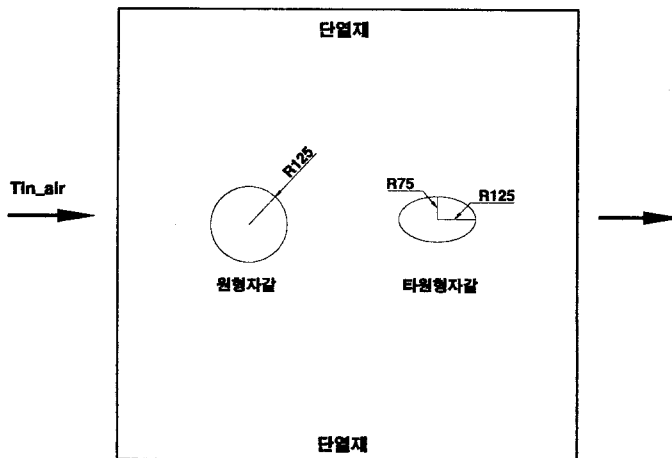
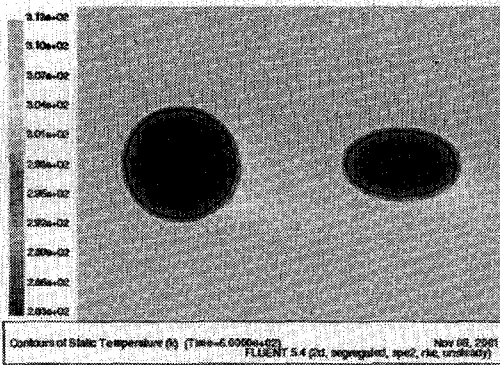
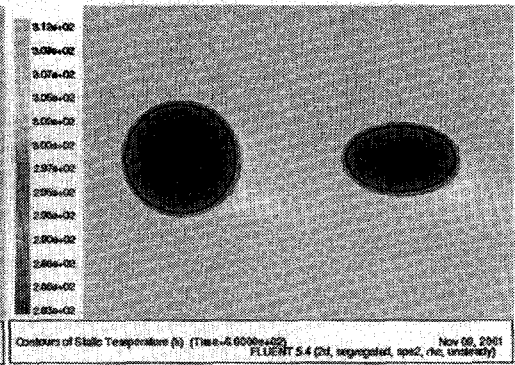


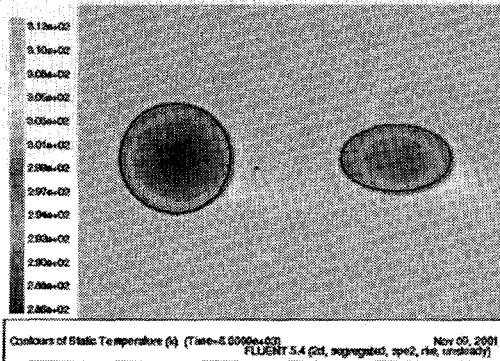
그림 3-6. 자갈의 축열 모형



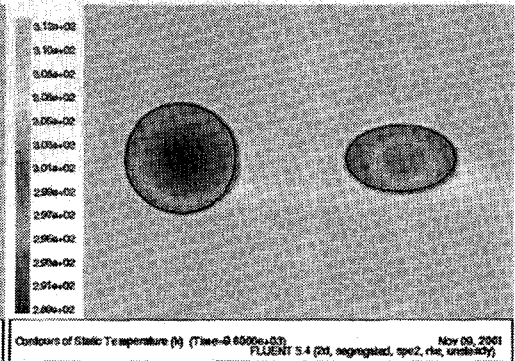
(a) 가온 5분후



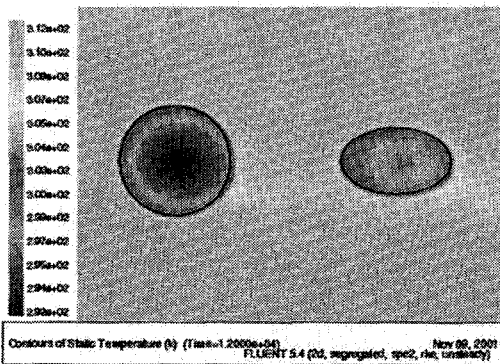
(b) 가온 10분후



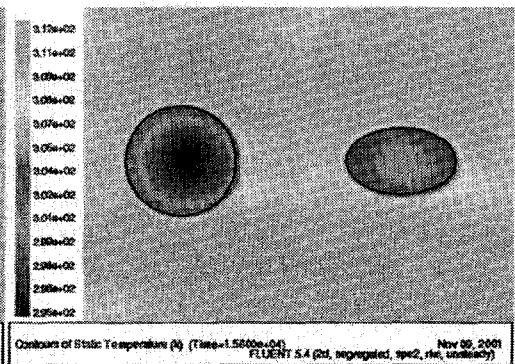
(c) 가온 1시간후



(d) 가온 2시간후



(e) 가온 3시간후



(f) 가온 4시간후

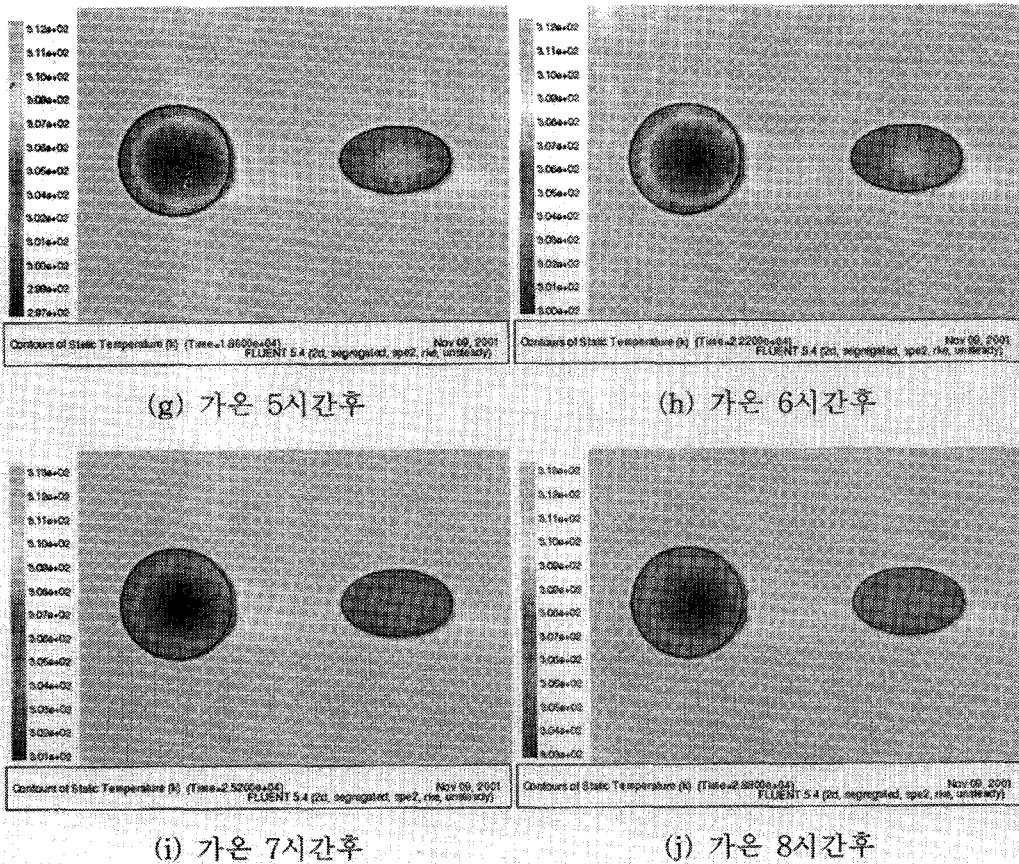


그림 3-7 . 축열시 자갈내부의 온도변화

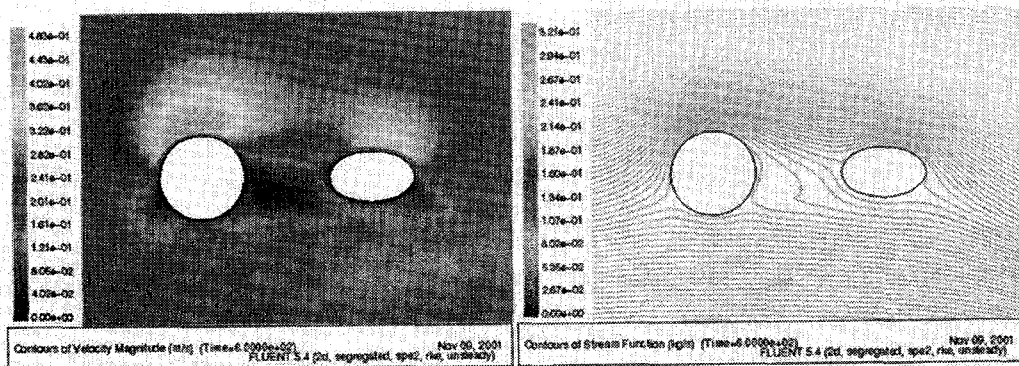
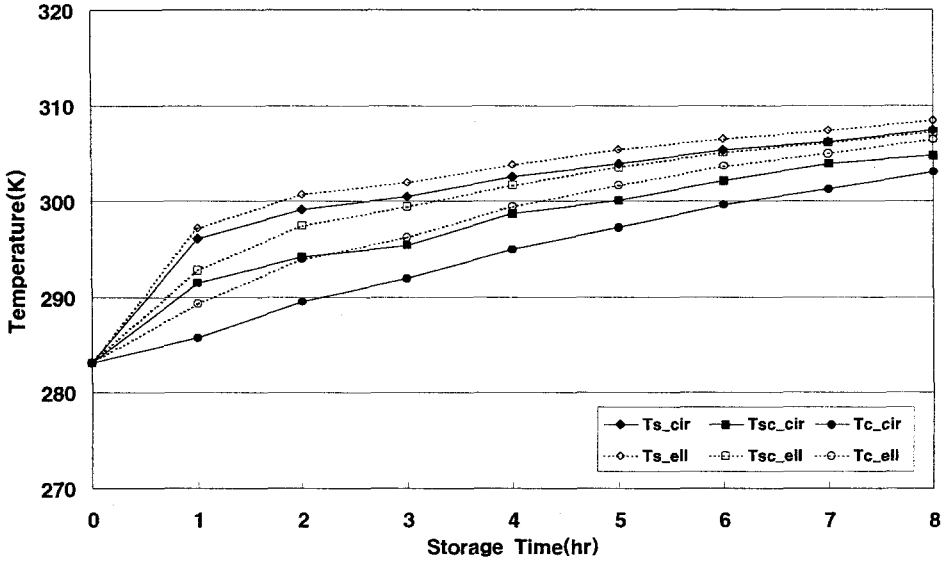


그림 3-8 . 축열시 자갈주위의 공기속도 및 유동장



Ts_cir(ell) : 원형 및 타원형 자갈의 표면부 온도
 Tsc_cir(ell) : 원형 및 타원형 자갈의 표면과 중심부의 가운데 온도
 Tc_cir(ell) : 원형 및 타원형 자갈의 중심부 온도

그림 3-9. 축열시간에 따른 자갈내부의 온도변화

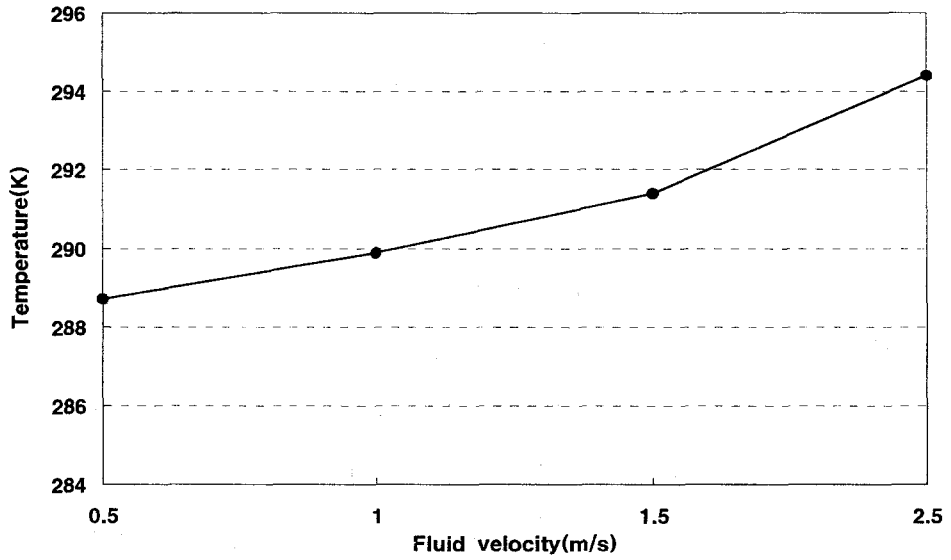


그림 3-10. 유입공기속도변화에 따른 자갈표면의 온도변화

2) 자갈의 방열 특성

자갈의 방열특성을 파악하기 위해 입경이 80~250mm이내인 강자갈과 쇠석을 그림 3-11과 같이 항온항습기를 이용하여 온도 40℃, 습도 25%로 24시간 가온 및 가습후 외기온이 16~17℃인 실내에서 자갈 및 쇠석의 온도변화를 측정하였다. 측정시스템은 그림 3-12에서 보는 바와 같이 자갈과 쇠석의 표면에 온도센서를 부착하여 표면온도를 계측하였으며 적외선 열화상장치를 이용하여 자갈 및 쇠석의 방열특성을 분석하였다.

일반적으로 물체의 온도계측에는 열전대, 전기저항, 열팽창, 그리고 복사 등의 원리를 응용한 센서를 이용한 계측법이 널리 사용되고 있다. 이러한 계측은 실시간 현장분석이 어려우므로 현장에서 계측한 후 실험실에서 분석이 이루어질 뿐만 아니라 센서부착위치에 따라 자갈 및 쇠석의 표면 한 점만을 계측할 수 있다. 그러나, 적외선 열화상장치를 이용할 경우 표면 전체에 대한 온도변화를 분석할 수 있으며 실시간으로 자갈 및 쇠석의 온도변화를 시각적으로 파악할 수 있다. 이러한 온도변화는 영상데이터로 저장이 가능하며 분석용 프로그램을 이용하여 영상데이터로부터 물체표면의 평균 온도값과 표면지점별로 온도를 분석할 수 있다.

온도센서 및 적외선 열화상장치를 이용하여 자갈 및 쇠석의 축·방열특성을 분석한 결과는 그림 3-13 및 그림 3-14와 같다.

그림 3-13에서 보는 바와 같이, 입경이 다른 자갈 및 쇠석을 항온항습기를 이용하여 온도 40℃, 습도 25%로 24시간 가온 및 가습후 외기온이 16~17℃인 실내에서 방열을 하였을 경우, 방열속도는 쇠석이 가장 빠르게 나타났으며 자갈의 경우에는 평균입경이 작을수록 방열속도가 빠른 것으로 나타났다.

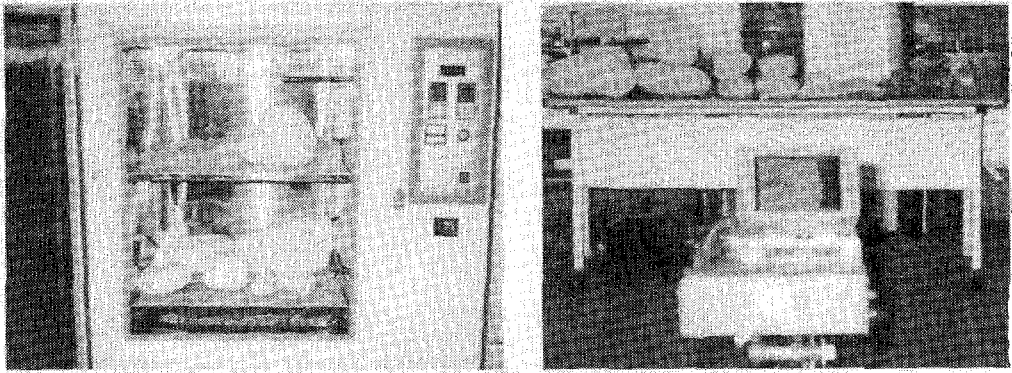


그림 3-11. 자갈 및 쇠석의 가온장치 그림 3-12. 자갈 및 쇠석의 방열 실험

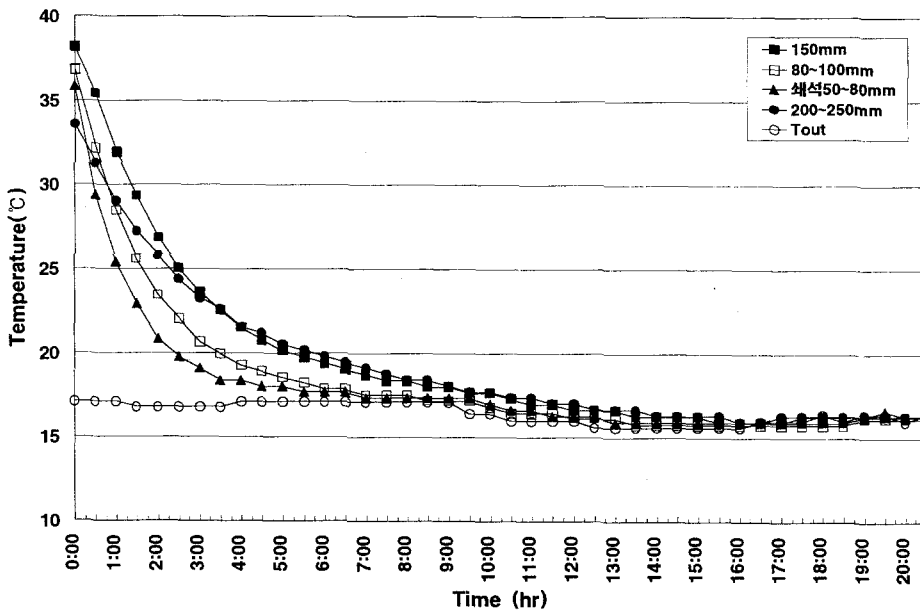


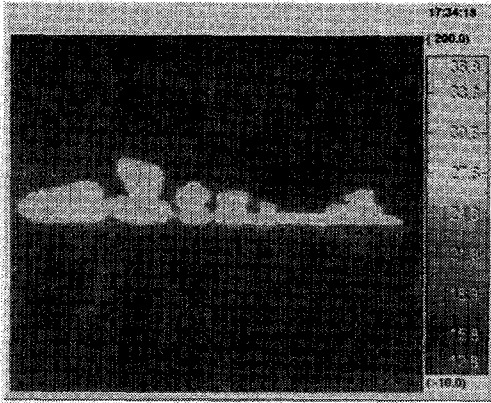
그림 3-13. 시간변화에 따른 자갈크기별 방열 특성

평균입경이 50~80mm인 쇠석과 평균입경이 80~100mm인 자갈의 표면온도가 주변온도와 동일하게 되는 시간은 방열후 약 8시간 이후인 것으로 나타났으나 평균입경이 150mm이상인 자갈의 경우에는 표면온도가 주변온도와 유사하게 되

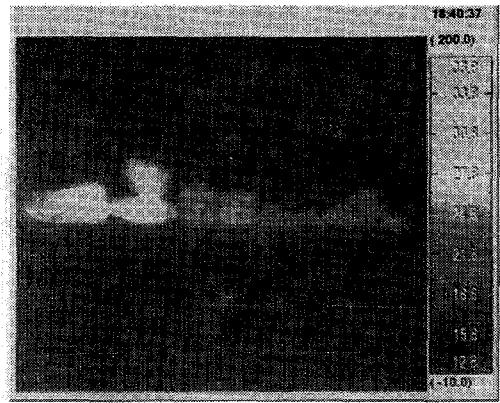
는 시간은 방열후 14시간 이후인 것으로 나타났다. 따라서, 평균입경이 클수록 방열은 완만하게 이루어짐을 알 수 있었으며 이는 자갈의 입경에 따른 축열량이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 쇄석은 강자갈보다 방열속도가 빠른 것으로 나타났으며, 강자갈의 경우 방열시간과 속도는 입경에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 그리고, 평균 최대방열지속시간은 입경에 따라 상이한 것으로 나타났다.

그림 3-14는 가온된 자갈 및 쇄석의 방열 경과시간에 따라 적외선 열화상장치를 이용하여 자갈 및 쇄석의 표면을 촬영한 열화상 단면이다. 그림 3-14에서 보는 바와 같이 입경이 작을수록 방열이 빠른 속도로 진행되었으며 방열 3시간 후에는 입경이 150mm이상인 자갈을 제외하고는 자갈 및 쇄석의 표면온도가 주위온도와 유사하게 나타났으며 방열 8시간 후에는 입경이 150mm이상인 자갈의 표면온도가 주위온도와 유사하게 나타났으나 표면평균온도를 열화상분석 프로그램을 이용하여 분석한 결과 주위온도보다 2~3℃정도 높게 나타나 온도센서를 자갈표면에 부착하여 측정된 결과와 동일하게 나타났다.



(a) 측정개시



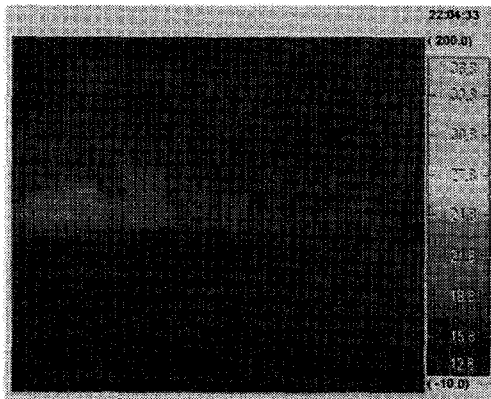
(b) 측정 65분 경과



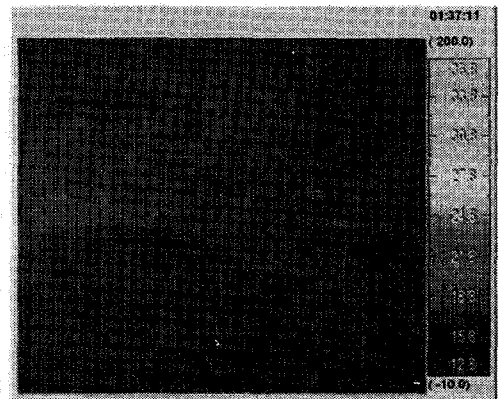
(c) 측정 1시간 46분 경과



(d) 측정 3시간 13분 경과



(e) 측정 4시간 29분 경과



(f) 측정 8시간 2분 경과

그림 3-14. 자갈의 크기별 방열 화상 (외기온 16~17℃)

제2절 자갈축열층 모형실험 및 이론적 해석

1. 축열 자갈층의 모형제작

축열 자갈층내의 공기순환용 파이프 매설여부, 자갈층내 온·습도계측시스템 구성, 축열 및 방열 특성을 구명하기 위한 기초실험으로서 그림 3-15와 같이 폭(1.2m)×길이(9.0m)×높이(0.9m)인 모형 축열층을 직접 설계·제작하여 축열 및 방열 실험을 수행하였다.

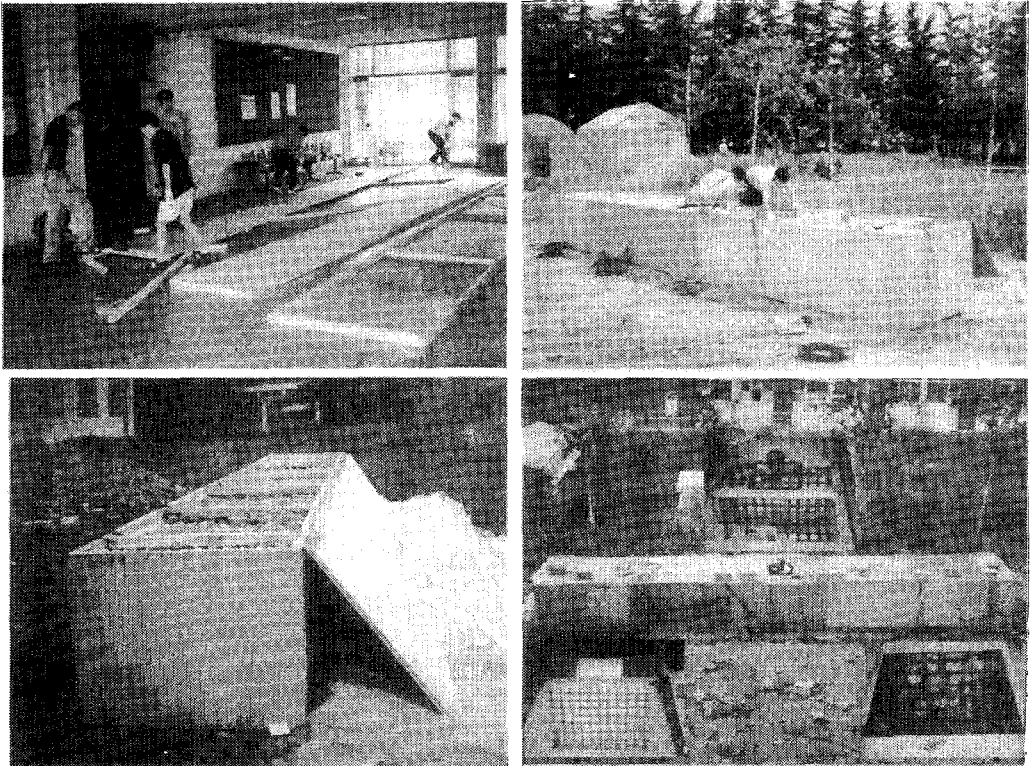


그림 3-15. 자갈 축열층의 모형제작

그림 3-15에서 보는 바와 같이 모형 축열층의 단열을 위해 축열층 내부에 두께 6cm의 폴리스티렌 폼을 부착하였으며 모형 축열층의 제원은 표 3-6과 같다. 공기순환팬이 위치하는 곳의 덮개를 이중으로 하여 순환팬의 부착위치를 자유롭게 할 수 있도록 하였으며, 순환팬을 축열층의 중앙에 부착하였을 경우 좌우로 공기가 유출되도록 좌·우측에 유출구를 제작하였다.

표 3-6. 모형 자갈축열층 제원

축열층 제원	축열자갈 크기	자갈층 공극율	단 열 재	송풍팬 용량
폭 (1.2m) 길이(9.0m) 높이(0.9m)	50mm~150mm	0.43	보온판 4호 밀도 : 15kg/m ³ 두께 : 6cm	1.25m ³ /s

2. 공기유동성 실험

축열층내의 열이동은 초기상태에서는 공기와 축열재 사이에 열적으로 평형상태로 있다가 일사에 의해 더운 온실내의 공기가 유입되면서부터 축열층내 순환 유체의 온도상승에 따라 열전달이 일어난다. 따라서 축열층내의 공기순환은 매우 중요한 문제이며 축열효율과도 관계가 된다. 공기흐름방향의 열전도성에 의한 축열재의 표면과 공기간의 열이동, 파이프 설치로 인한 축열용량의 감소, 시공상의 문제, 축열재인 자갈의 공극율 및 더운 공기와 축열재간의 열교환 효율 등을 감안하여 볼 때 축열층내의 파이프 설치가 불필요할 것으로 판단되나 공기순환용 파이프 설치 여부에 대한 추가적인 검증을 위해 본 실험을 수행하였다.

가. 실험장치 및 방법

축열 자갈층내의 공기유동성을 파악하기 위하여 공기순환팬을 축열층의 중앙

과 좌·우측에 각각 설치하여 유출구쪽의 공기유동속도를 축열층 바닥에서 25cm, 55cm, 80cm 높이에 다점풍속센서를 설치하여 측정하였다. 공기순환은 최대정압 18mmAq이고 최대풍량 75m³/min인 팬에 의해 이루어지며 공기유동속도 측정시스템 및 센서설치위치는 그림 3-16 및 그림 3-17과 같다. 축열층내 공기순환용 파이프 매설여부를 검증하기 위해 그림 3-17과 같이 축열층내에 풍속센서 6점을 설치하여 자갈축열층내의 공기유동성을 분석하였다. 그리고, 유입구에 순환팬을 설치하여 압출식으로 자갈축열층내로 공기순환시켰을 경우에는 축열층 가운데와 유출구에 높이별로 3점의 센서를 각각 설치하였으며 유출구에 순환팬을 설치하여 흡인식으로 공기를 유동시켰을 경우에는 유입구에 높이별로 센서를 3점, 축열층 가운데와 유출구에 센서 1점을 각각 설치하여 공기유동성을 계측하였다.

그림 3-18에서와 같이 축열층 가운데에 공기순환팬을 설치하여 축열층 좌우로 공기유동이 이루어지도록 공기순환시스템을 구성하여 공기순환팬 하부에 축열자갈이 없을 경우, 자갈을 1/2 채웠을 경우 및 완전히 채웠을 경우에 대하여 공기유동성을 분석하였다. 그리고, 그림 3-19~그림 3-20에서와 같이 축열층 유입구와 유출구에 공기순환팬을 각각 설치하여 공기순환방식(압출식 및 흡인식)에 따른 공기유동성을 분석하였다.

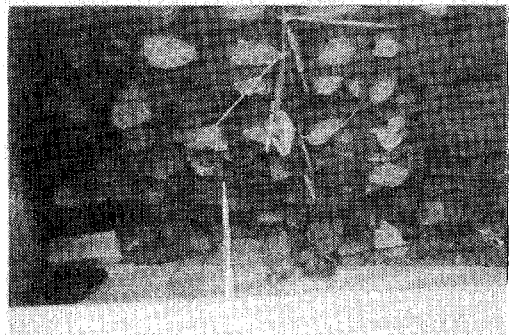
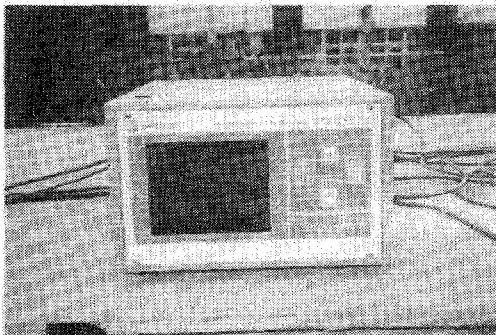


그림 3-16. 순환유체의 유동속도 계측시스템

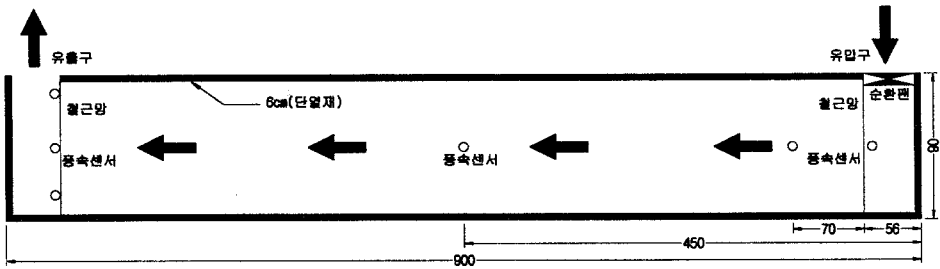


그림 3-17. 모형축열층내의 다점풍속센서 설치 위치

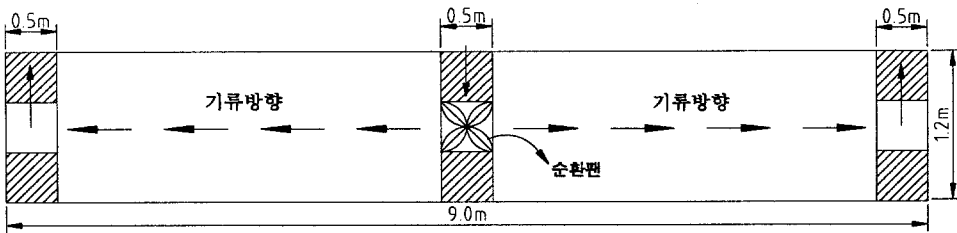


그림 3-18. 공기순환팬 설치 평면도(I)

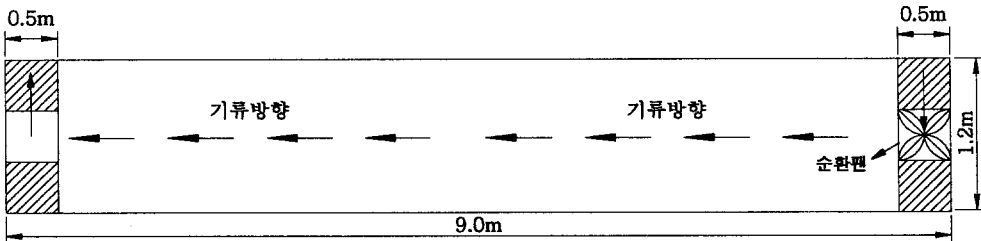


그림 3-19. 공기순환팬 설치 평면도(II)

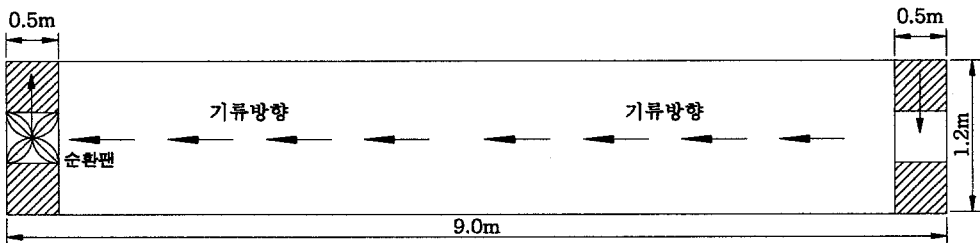


그림 3-20. 공기순환팬 설치 평면도(III)

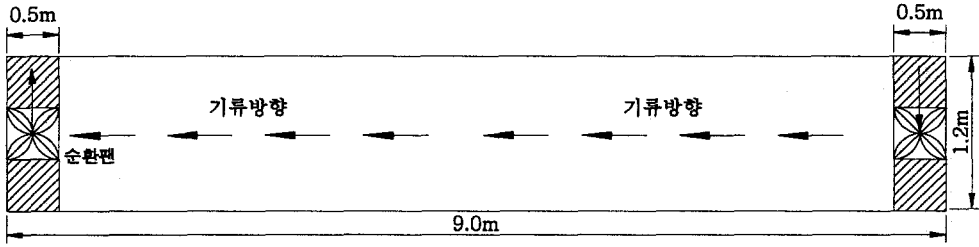


그림 3-21. 공기순환팬 설치 평면도(Ⅲ)

나. 모형축열층의 공기유동 실험결과

1) 공기순환팬을 축열층 가운데 설치한 경우

그림 3-18에서와 같이 축열층의 중앙에 순환팬을 설치하여 좌우 출구방향의 풍속을 순환팬하부에 축열자갈이 없을 경우, 1/2 채웠을 경우, 완전히 채웠을 경우에 대하여 측정하였으며, 측정결과는 그림 3-22, 그림 3-23 및 표 3-7과 같다.

표 3-7. 순환팬을 축열층 중앙에 설치한 경우 축열층 높이별 평균유속

구 분		높 이 (cm)								
		CASE1			CASE2			CASE3		
		80	55	25	80	55	25	80	55	25
평균유속 (m/s)	좌측	0.39	0.12	0.25	0.23	1.62	0.63	0.19	1.20	0.51
	우측	0.76	0.90	0.16	0.90	0.12	0.24	0.64	0.08	0.19

- * CASE1 : 순환팬 하부에 축열자갈이 없을 경우
- CASE2 : 순환팬 하부에 축열자갈을 1/2 채웠을 경우
- CASE3 : 순환팬 하부에 축열자갈을 완전히 채웠을 경우

공기순환팬을 축열층 가운데 설치하여 공기를 순환시킬 경우, 축열층 좌우에 설치되어 있는 유출구의 공기유동속도는 대칭적으로 나타날 것으로 예상하였으

나 좌우 유출구로 순환되는 공기의 유동속도는 비대칭적으로 나타났으며 축열층 높이별로도 공기유동속도의 차이가 있었다. 이러한 현상은 모형축열층내 자갈의 입경에 따라 채움정도가 균일하지 못하기 때문인 것으로, 모형축열층내 자갈의 채움상태를 조정하여 좌우 출구방향의 유속차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

축열층 좌측 유출구의 공기유동속도는 그림 3-22에서 보는 바와 같이, 공기순환팬 하부에 자갈을 채우지 않은 경우를 제외하고는 바닥에서 55cm되는 높이의 유동속도가 가장 양호한 것으로 나타났으며 높이별로 다소 차이는 있었으나 공기순환팬 하부에 자갈을 채우는 것이 채우지 않는 것보다 공기유동을 더욱 양호한 것으로 나타났다. 그러나, 축열층 우측 유출구의 경우에는 공기순환팬 하부에 자갈을 채우지 않는 것이 공기유동에 유리한 것으로 나타나 공기순환팬 하부에 자갈의 채움여부는 공기유동에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 그리고, 축열층 우측 유출구의 높이별 공기유동속도는 바닥에서 80cm되는 곳이 전반적으로 높게 나타났으며 이러한 원인은 자갈층 표면이 불균일하여 자갈층과 축열층의 덮개 사이에 많은 틈새가 발생하였기 때문인 것으로 분석되었다. 따라서 자갈 축열층을 온실에 적용할 경우 기밀성에 유의하여야 할 것으로 판단된다.

모형축열층의 가운데에 공기순환팬을 설치하여 순환팬 하부에 자갈의 채움여부에 따른 공기유동성을 분석한 결과, 좌측 유출구의 경우에는 공기순환팬 하부에 자갈을 1/2정도 채운 상태에서 높이 55cm되는 점의 공기유동속도가 1.62m/s로 가장 높게 나타났으며 우측 유출구의 경우에는 공기순환팬 하부에 자갈을 채우지 않은 상태에서 높이 55cm되는 곳의 공기유동속도가 0.9m/s로 가장 높게 나타났다. 따라서, 공기순환팬 하부에 자갈의 채움여부는 축열층의 공기유동성에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

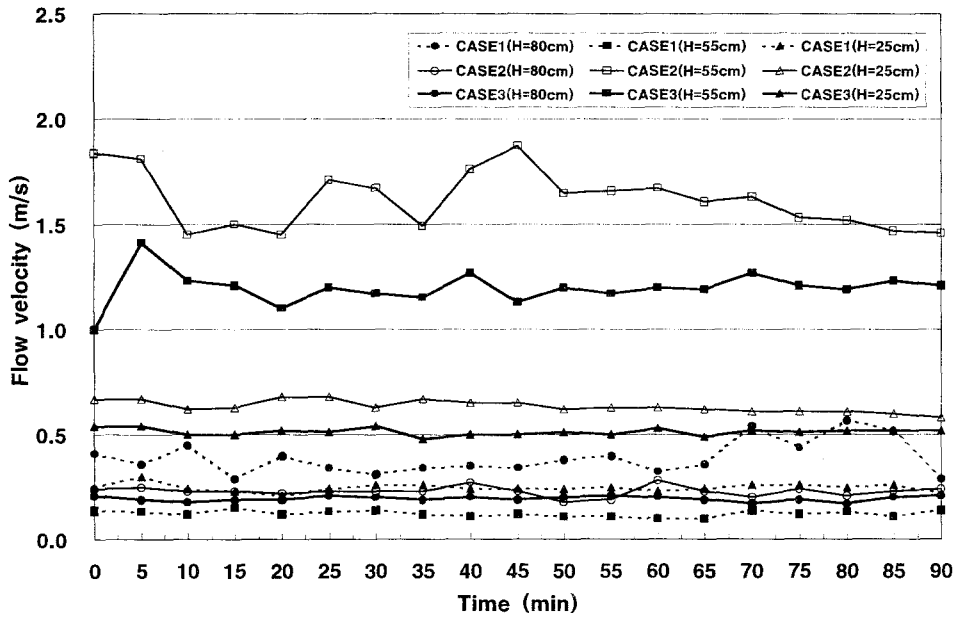


그림 3-22. 순환팬을 축열층 중앙에 설치한 경우 좌측출구의 유속변화

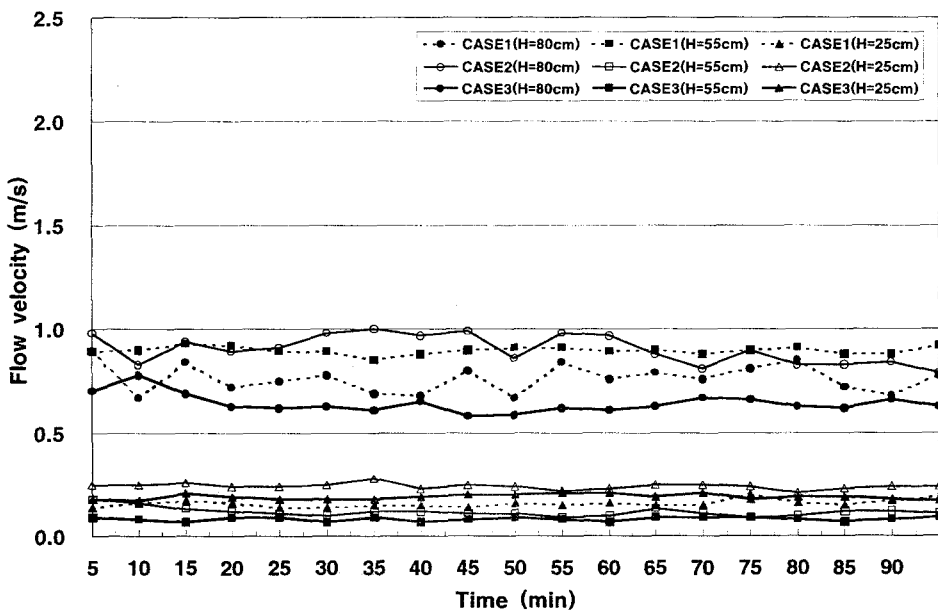


그림 3-23. 순환팬을 축열층 중앙에 설치한 경우 우측출구의 유속변화

2) 공기순환방식에 따른 모형축열층의 공기유동성

그림 3-19~3-21에서 보는 바와 같이, 공기순환방식에 따른 모형축열층의 공기 유동성을 분석하기 위하여 축열층 중앙부위와 유출구에 풍속센서를 높이별로 설치하여 공기유동속도를 계측한 결과는 표 3-8, 표 3-9, 그림 3-24 및 그림 3-25 과 같다.

표 3-8. 순환팬을 우측에 설치한 경우 축열층 높이별 평균유속

구 분	좌측높이(cm)			중앙높이 (cm)	
	80	55	25	55	25
공기유동속도 (m/s)	0.61	0.13	0.53	0.27	0.96

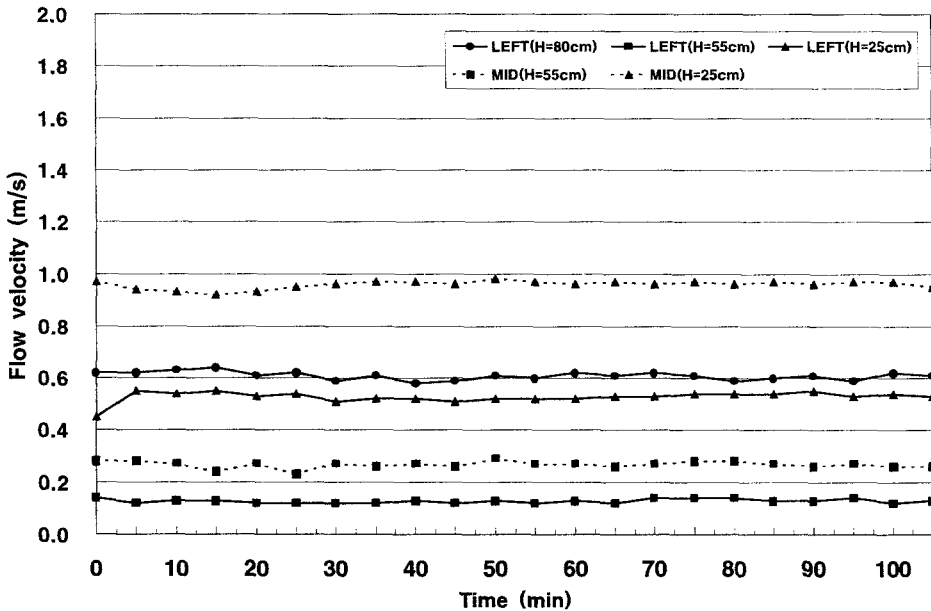


그림 3-24. 순환팬을 축열층 우측에 설치한 경우 유속변화

표 3-8과 그림 3-24에서 보는 바와 같이, 공기순환팬을 축열층의 유입구에 설치하여 공기를 순환시켰을 경우에는 축열층 높이가 25cm되는 곳의 공기유동성이 양호한 것으로 나타났으며 축열층 높이가 80cm되는 곳의 공기유동이 축열층 높이 55cm되는 곳보다 양호한 것으로 나타났다.

표 3-9. 공기순환방식에 따른 모형축열층내 유속변화

구 분	압출식	흡인식	압출+흡인 병행
공기유동속도(m/s)	0.14 ~ 1.50	0.15 ~ 0.90	0.23 ~ 2.28m

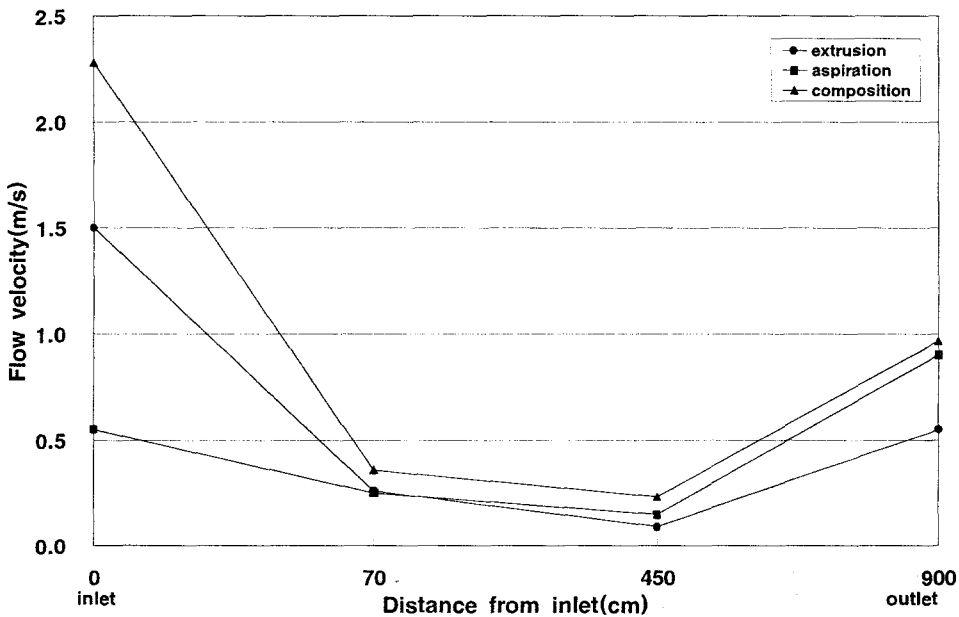


그림 3-25. 공기순환방식에 따른 축열층내의 공기유동속도 변화

공기순환방식에 따른 자갈축열층내의 공기유동성을 분석한 결과는 그림 3-25과 같으며, 그림 3-25에서 보는 바와 같이 공기순환방식에 관계없이 유입구에서 멀어질수록 풍속이 감소하다가 축열층 중앙에서 유출구 방향으로 갈수록 다

시 풍속이 증가하는 경향을 나타냈다. 표 3-9에서 보는 바와 같이, 압출식으로 공기를 순환시켰을 경우에는 축열층내 공기유동은 0.09~1.50m/s(평균 0.60m/s) 범위, 흡인식으로 공기를 순환시켰을 경우 축열층내 공기유동은 0.15~0.90m/s(평균 0.46m/s)범위에서 변화하였으며 유출입구에 모두 공기순환팬을 설치하였을 때는 축열층내 공기유동은 1.23~2.28m/s범위에서 변화하였다. 평균유속은 압출식이 높게 나타났으나 축열층 가운데에서는 흡인식이 약 0.06m/s정도 높게 나타났다.

모형축열층의 공기유동성을 분석한 결과, 축열층의 높이별로 공기유동속도는 다소 차이가 있었으나 축열층내 공기순환이 원활히 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 공기순환용 파이프의 설치는 불필요하며 또한 더운 공기와 축열자갈의 열전달 효율을 고려하여 불 때도 공기순환용 파이프의 설치는 불필요한 것으로 판단되어진다. 그러나 축열시간에 따른 축열량을 고려할 경우 공기순환량이 부족한 것으로 분석되어 순환팬의 용량과 공기출구방향의 순환팬 설치를 재검토할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

3. 축열 자갈층내의 온·습도 측정시스템

자갈 축열 태양열 온실의 성능을 분석하기 위해서는 자갈축열층내의 온·습도 환경을 계측할 필요가 있다. 축열층내의 온·습도환경 계측을 위해서는 축열층내에 온습도센서를 매설할 필요가 있으나 센서를 축열층내에 매설할 경우에는 센서의 파손과 관리에 불편함이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 센서의 유입이 자유로우며 센서 파손의 염려가 없는 시스템을 구성하여야 한다. 따라서, 자갈 축열층내로 각종 센서를 안전하게 유입시킬 수 있는 보조시스템이 필요하다.

그림 3-26에서 보는 바와 같이, 자갈축열층의 온도 분포를 측정하기 위해 자갈층내에 매설하여 각종센서를 삽입시킬 수 있는 파이프를 제작하였다. 파이프의 내경은 50mm이며 파이프에 원활한 공기유동성을 보장하기 위해 10mm 간격으로 직경 10mm의 공기통로를 형성하였다.

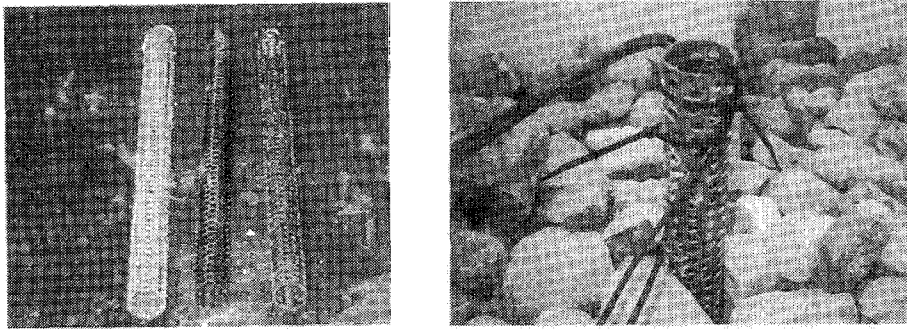


그림 3-26. 축열자갈층내의 온·습도 계측을 위한 파이프

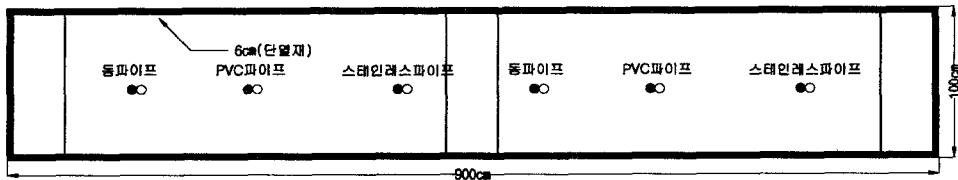


그림 3-27. 자갈축열층내 센서 설치 단면도

축열층내에 매설된 파이프로 삽입된 센서와 직접 매설된 센서의 계측데이터를 검정하기 위해 모형축열층내에 동, 스테인레스 및 PVC 등 재질이 각각 다른 파이프를 매설하였다. 파이프 매설 위치는 그림 3-27과 같으며 파이프내에 축열층 깊이별로 두점의 센서를 설치하여 직접 자갈층에 직접 매설한 센서의 측정값과 비교·분석하였다. 그리고, 파이프는 표 3-10에서 보는 바와 같이 재질에 따라 가격이 상이하다.

표 3-10. 파이프 종류별 단가

구 분	동파이프	스테인레스	PVC	비 고
단가 (원)	9,800	11,700	2,950	내경 5cm, 길이 100cm

※ 시중단가 기준(1999년도 기준)

그림 3-23 ~ 3-24에서 보는 바와 같이 파이프내의 온도와 자갈층의 온도가 재질에 관계없이 유사하게 나타나 파이프의 가격을 고려하여 자갈축열 태양열 온실의 축열층내의 온습도 계측을 위한 센서 보호용 파이프는 저렴한 PVC 파이프를 결정하였다.

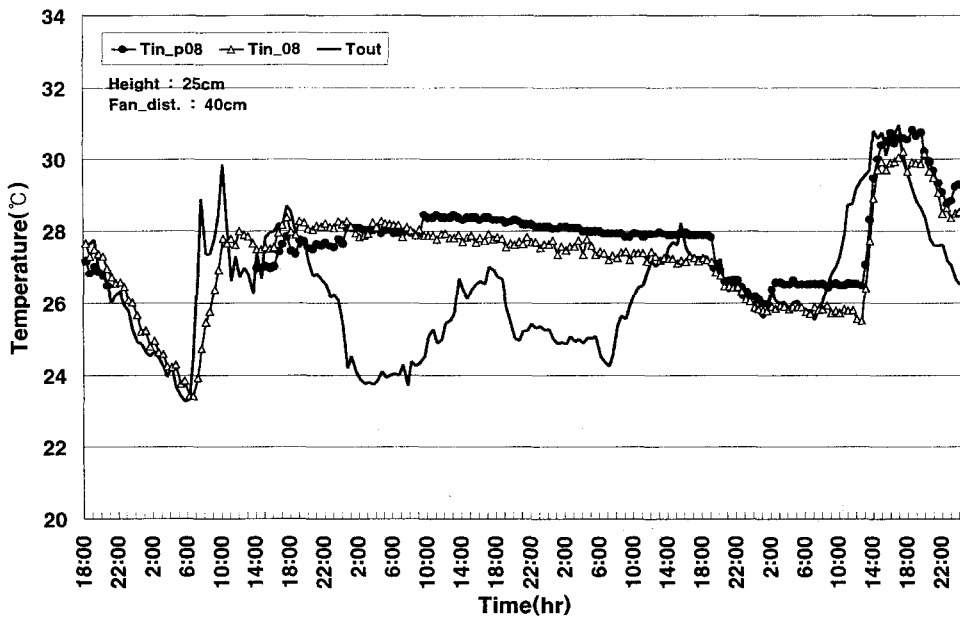


그림 3-28. 축열층 및 동파이프내의 온도 변화

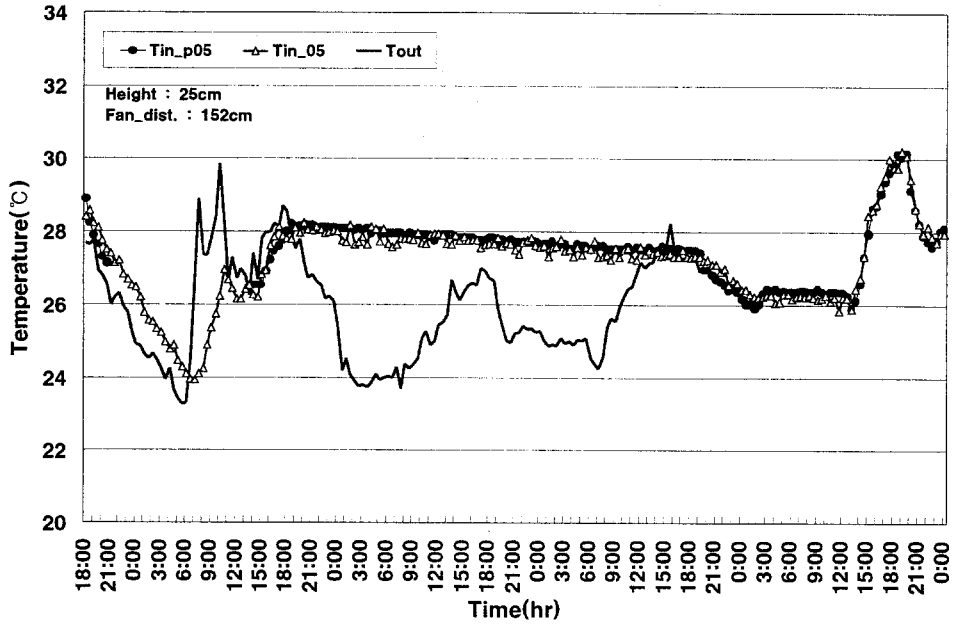


그림 3-29. 축열층 및 PVC 파이프내의 온도 변화

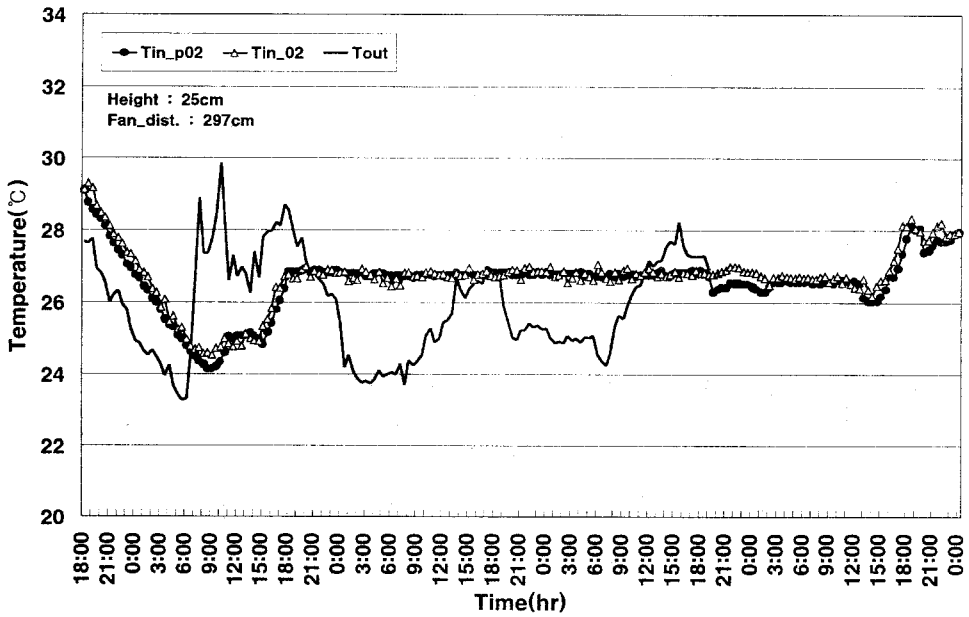


그림 3-30. 축열층 및 스테인레스 파이프내의 온도 변화

4. 모형 자갈축열층의 축·방열 특성

자갈 축열층은 그 층을 통과하는 뜨거운 유체에 의해 가열되고, 자갈에 저장되는 에너지는 축열층을 통과하는 차가운 유체가 지나감으로 인해 빼앗기게 된다. 이러한 자갈축열층의 축·방열 특성을 분석하기 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다.

가. 실험방법 및 장치

공기순환방식에 따른 모형 자갈축열층의 축·방열특성을 분석하기 위해 그림 3-31과 같이 모형 자갈축열층과 공기순환시스템을 구성하였다.

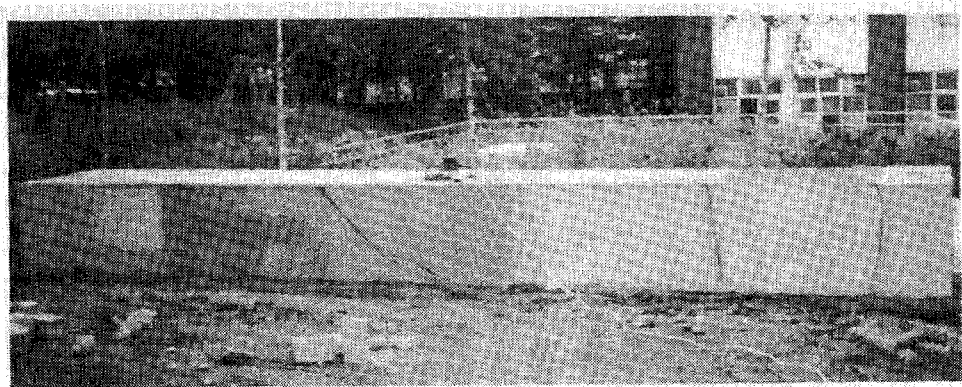


그림 3-31. 모형 자갈축열층 및 공기순환시스템

공기순환팬을 축열층 중앙에 설치하여 모형 자갈축열층의 좌우측 유출구쪽으로 공기를 순환시켰을 경우와 모형 자갈축열층의 우측에 팬을 설치하여 좌측의 유출구쪽으로 공기를 순환시켰을 경우에 대하여 축열층내 온·습도 변화를 분석하기 위해 주·야간으로 순환팬을 작동하여 외기를 축열층내로 유입시켜 공기순환경로에 따른 축열층내의 온·습도변화를 계측하였다. 그리고, 그림 3-32와 같이 모형 자갈

축열층의 축열성능을 분석하기 위해 열풍기를 이용하여 일정한 온도의 공기를 축열층내로 유입시켜 축열시간에 따른 자갈축열층내의 온·습도 및 순환유체의 유동속도를 계측하여 모형 자갈축열층의 축열성능을 분석하였다. 계측시스템은 그림 3-33과 같이 축열층내에 온도센서를 29점, 습도센서를 16점 설치하였다.

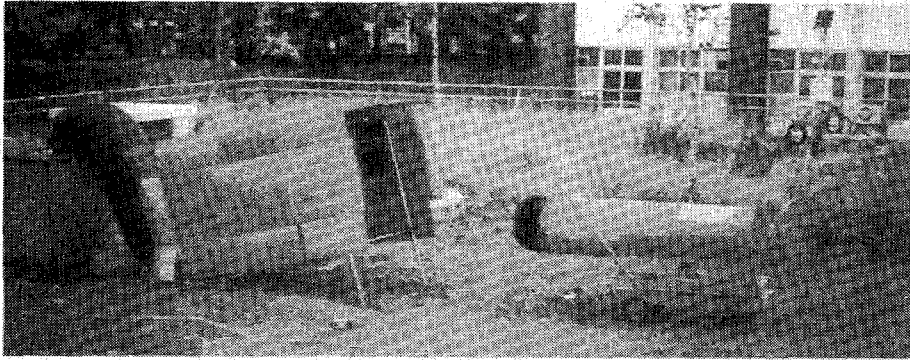
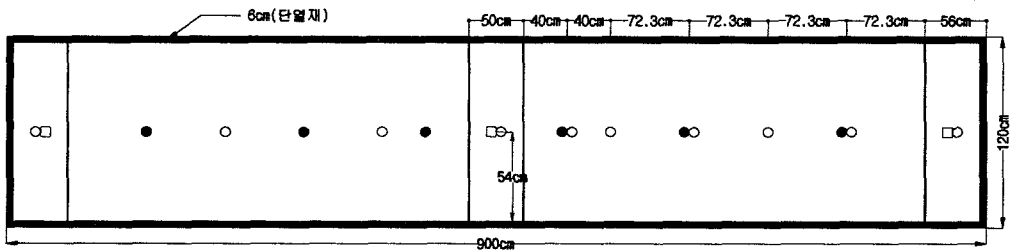
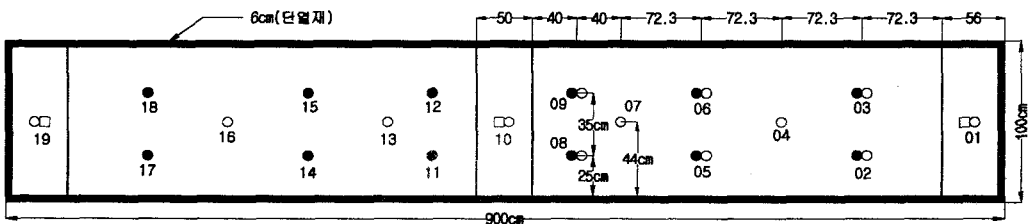


그림 3-32. 모형 자갈축열층의 축열장치



(a) 센서 설치 평면도



(b) 센서 설치 단면도

그림 3-33. 모형 자갈축열층내 센서 설치도

나. 실험결과

1) 공기순환팬에 의한 유입공기의 열손실

자갈축열층의 공기순환은 팬에 의해 이루어지며 더운 공기가 팬을 통과하여 자갈축열층내로 유입되거나 축열층에서 외부로 유출된다. 따라서, 축·방열시 팬에 의해 유출·입공기의 열손실이 발생할 수 있다.

모형 자갈축열층에 있어 공기순환팬에 의한 유입공기의 열손실을 분석하기 위해 유입전 순환유체의 온도와 팬을 통과한 직후의 온도를 계측하였다. 공기순환팬에 의한 유입공기의 열손실을 분석한 결과는 그림 3-34와 같다.

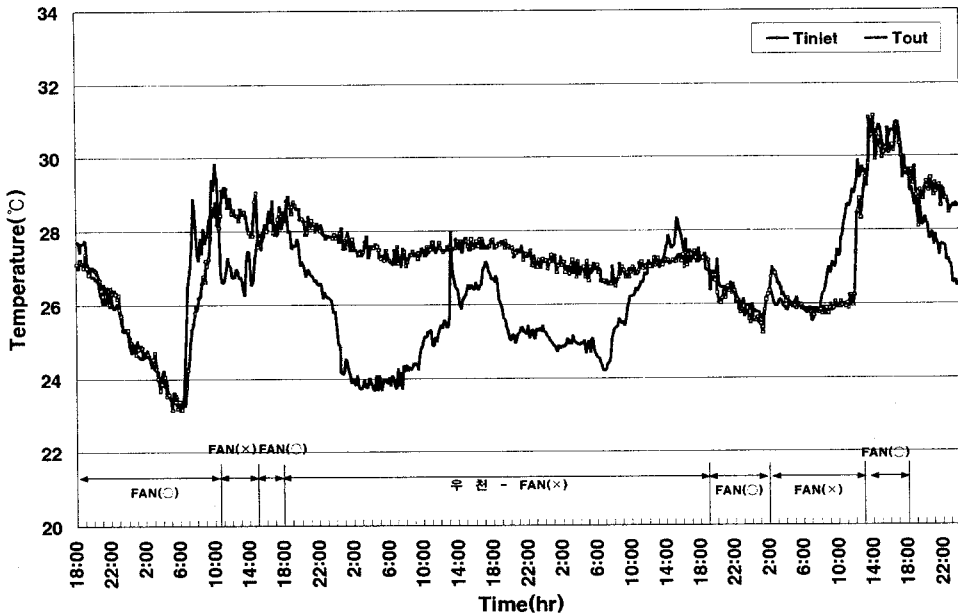


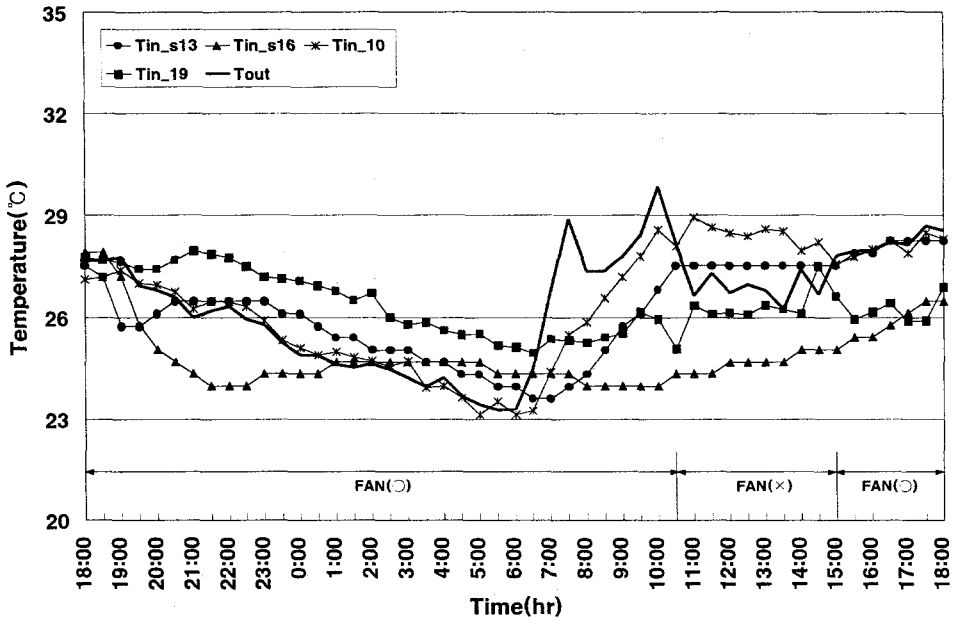
그림 3-34. 유입전 및 팬 통과후 공기 온도

그림 3-34는 유입공기의 온도와 순환팬을 통과한 후의 순환공기의 온도를 비교·분석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 팬을 작동하였을 경우에 유입되는 외기온과 팬을 통과한 공기의 온도는 편차가 1℃미만으로 유사하게 나타나 모형축열층의 공기순환팬에 의한 열손실량은 극히 미소함을 알 수 있었다.

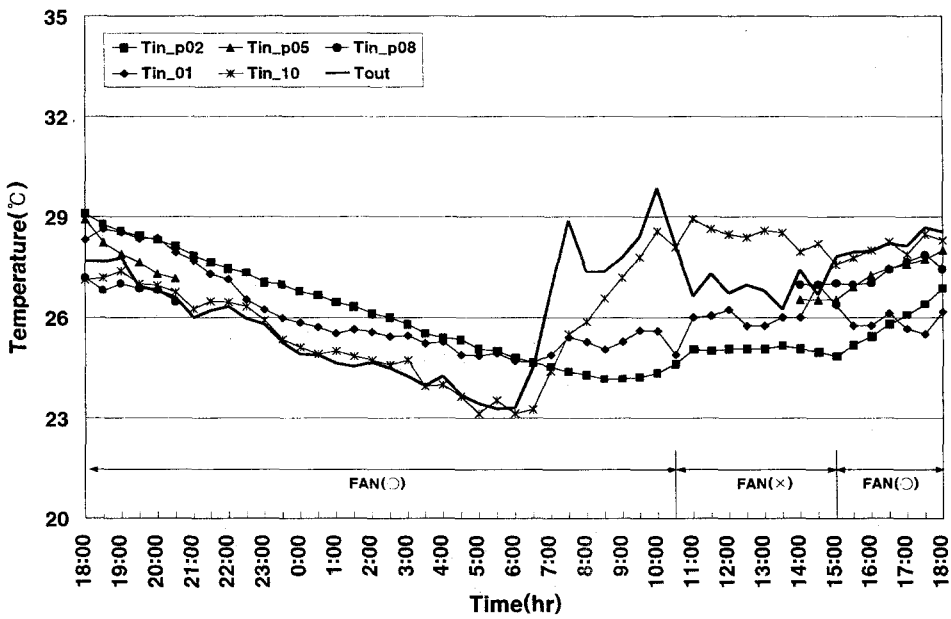
2) 외기유입에 따른 모형 축열자갈층의 온습도 변화

일기온의 편차가 심한 주·야간에 모형 축열자갈층에 외기를 유입시켜 축열층 높이와 공기순환경로에 따라 축열층내의 온·습도 변화를 분석한 결과는 그림 3-35 및 그림 3-36과 같다. 그림 3-35와 그림 3-36은 공기순환팬을 축열층 가운데 설치하여 좌우의 유출구방향으로 공기를 순환시켰을 때, 외기유입에 따른 모형 자갈축열층내의 온습도변화를 나타낸 것이다.

그림 3-35에서 보는 바와 같이, 축열층의 온도변화는 유입되는 공기온도에 많은 영향을 받으며 유입구에서 유출구방향으로 갈수록 온도변화 속도가 완만하게 나타났다. 즉, 축열층으로 유입되는 공기는 유입구에서 가장 가까운 자갈층에 먼저 에너지를 빼앗기고 유출구쪽으로 가면서 잉여의 에너지를 자갈층에 빼앗기는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 축열층내의 온도는 유입구에서 멀어질수록 유입공기의 영향을 적게 많음을 알 수가 있었다. 따라서, 자갈축열 태양열온실에 있어서는 낮동안 온실내로 투과되는 일사에너지를 최대한 활용할 수 있는 유입구의 설치가 요망된다. 그리고, 순환팬을 축열층의 중앙 부위에 부착하여 좌우로 공기를 유동시켰을 경우 축열층내의 좌우 온도분포가 불균일함을 알 수 있다. 이러한 현상은 축열층내에서 자갈의 입경이 균일하지

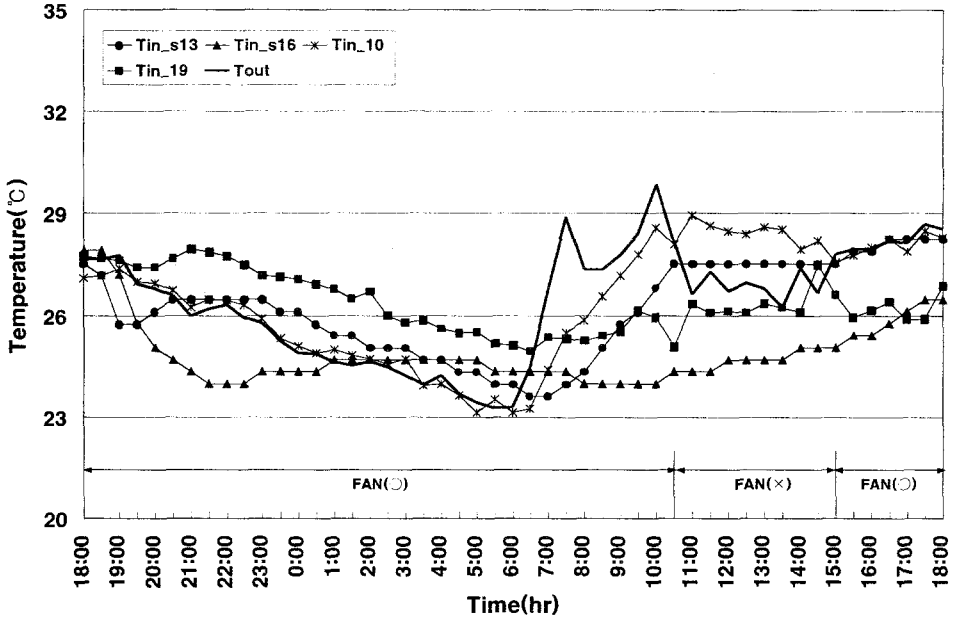


(a) 순환팬 좌측

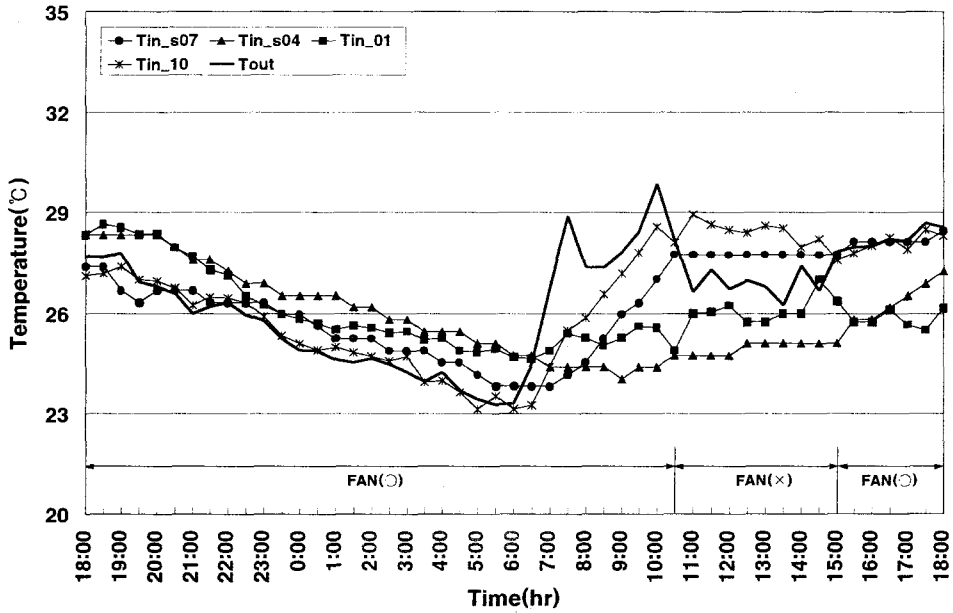


(b) 순환팬 우측

(a) 축열자갈층 깊이 55cm

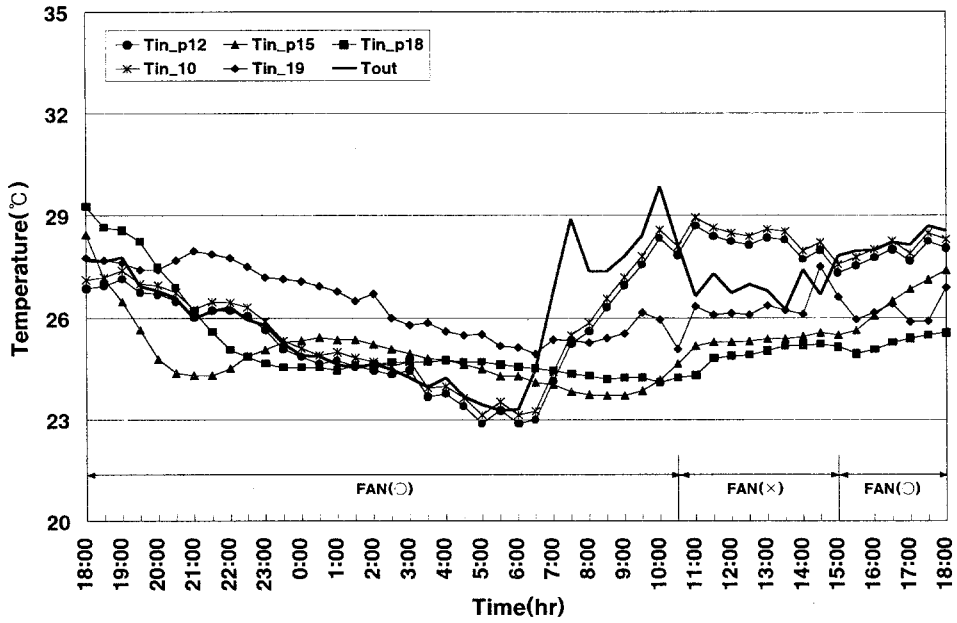


㉠ 순환팬 좌측

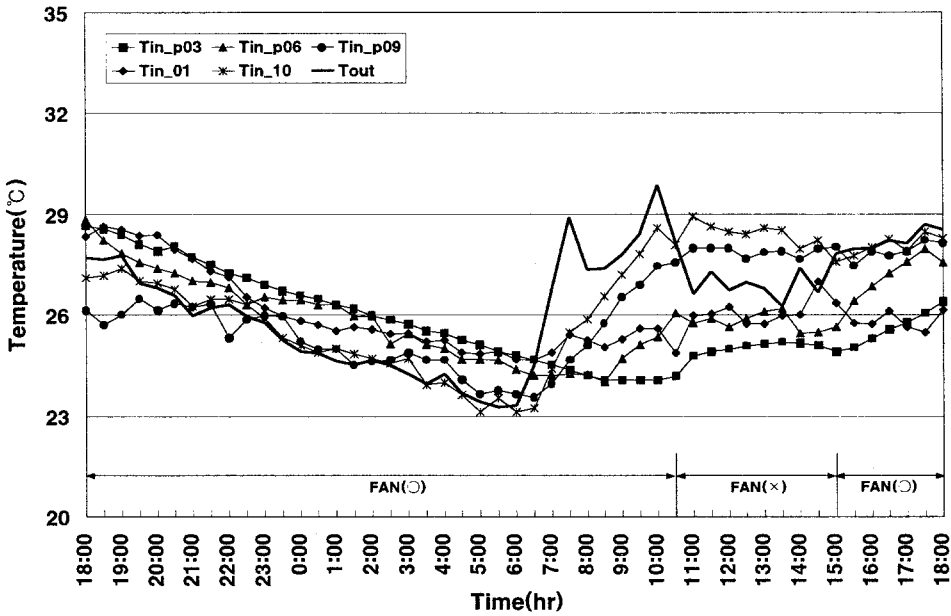


㉡ 순환팬 우측

(b) 축열자갈층 깊이 40cm



㉠ 순환팬 좌측



㉡ 순환팬 우측

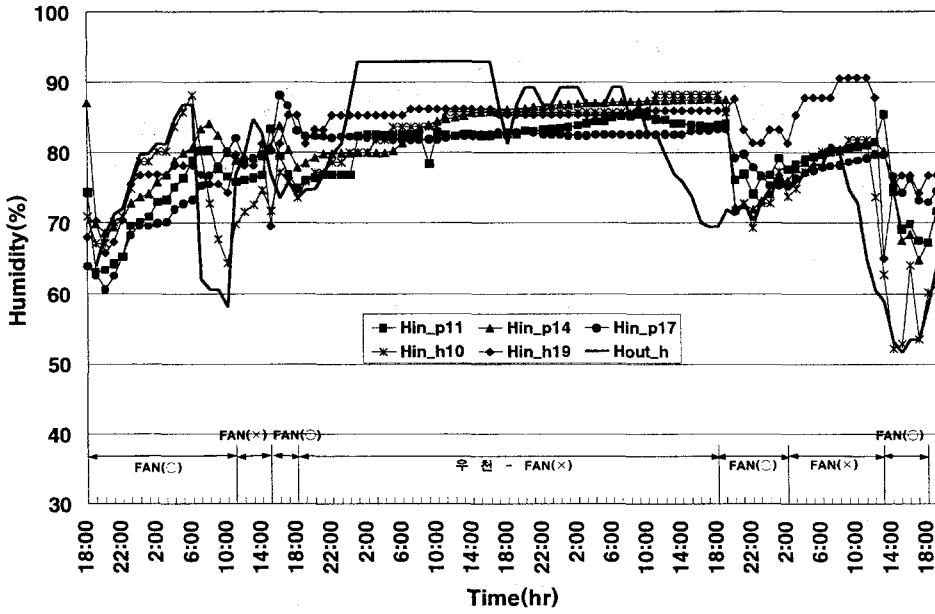
(c) 축열자갈층 깊이 20cm

그림 3-35. 양방향 공기순환시 축열자갈층의 온도 변화

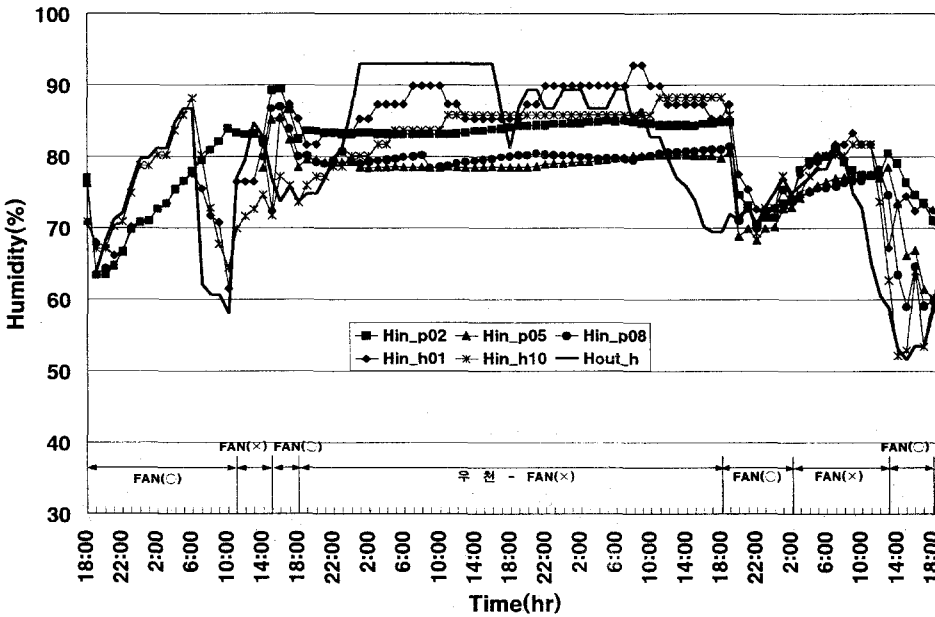
않아 자갈의 채움상태가 상이하여 좌우 유출구방향으로의 공기유동이 균일하지 못한 것에 기인한다. 따라서, 순환팬을 축열층 중앙부위에 설치할 경우에는 자갈축열층내의 자갈의 공극율을 고르게 할 수 있도록 자갈을 매설하여야 할 필요성이 있다. 하지만, 축열층을 자갈의 형상 및 크기를 고려하여 균일하게 층을 형성하는 것은 많은 경비와 인력이 소요됨으로 거의 불가능하다. 따라서, 축열층내의 불균일한 온도변화를 최소화하기 위해 공기순환방식이 검토되어야 한다. 그리고, 축열층 중앙에 공기순환팬을 설치하여 좌우 유출구로 공기를 순환시키는 방식을 온실에 적용할 경우에는 온실의 이용면적이 감소할 뿐만 아니라 작업성 또한 떨어져 많은 단점을 유발시킬 수 있다.

그림 3-36은 축열층 깊이별로 축열층내 습도 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 측정위치에 관계없이 축열층내의 습도는 유입공기의 습도에 많은 영향을 받는 것으로 나타나, 자갈축열 태양열온실에 있어 여름철 온실내부의 고온억제를 위하여 축열층내로 고온다습한 온실내부 공기를 유입시키면 축열층내 습도가 과다하게 상승할 것으로 예상된다. 그리고 자갈축열층에 의한 냉방성능을 최대한 발휘하기 위해서는 주간에 축열된 에너지 및 다습한 공기를 야간에 외부로 방출할 필요가 있다. 따라서, 축열층과 온실외부와의 공기순환이 이루어질 수 있는 별도의 공기순환시스템을 구성하여야 한다.

그림 3-37 및 그림 3-38은 모형축열층의 좌우측에 공기의 유출·입구를 형성하여 우측에 공기순환팬을 부착하여 외부공기를 축열층내로 유입시켜 좌측의 유출구로 공기를 순환시켰을 때 모형 자갈축열층의 온·습도 변화를 나타낸 것이다.

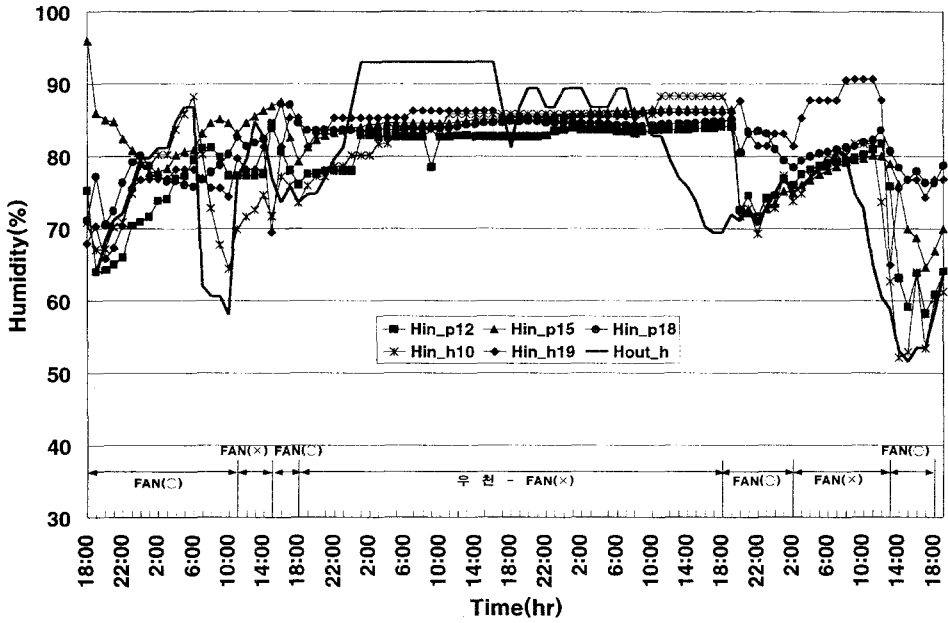


㉠ 순환팬 좌측

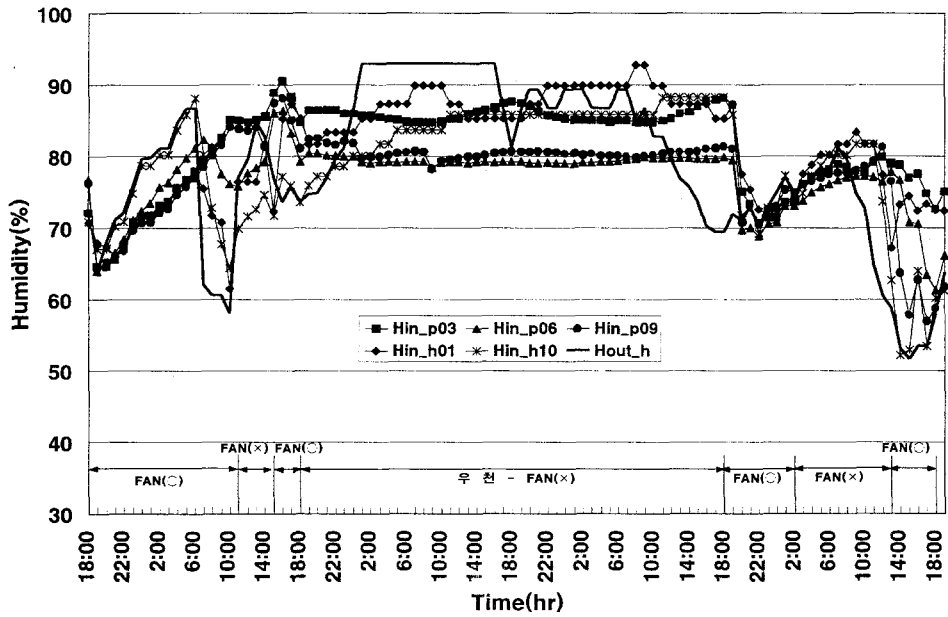


㉡ 순환팬 우측

(a) 축열자갈층 깊이 55cm



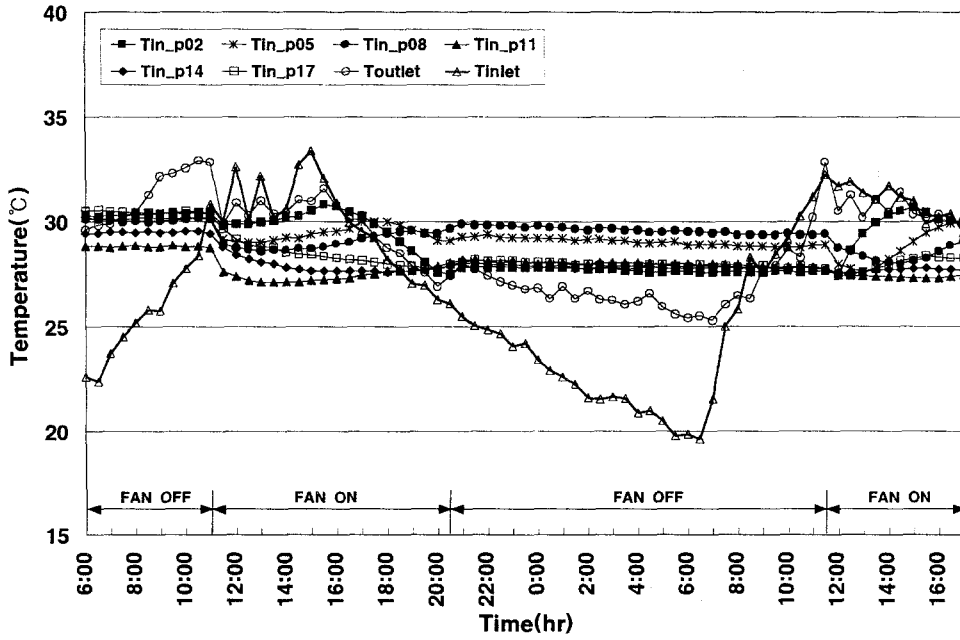
㉠ 순환팬 좌측



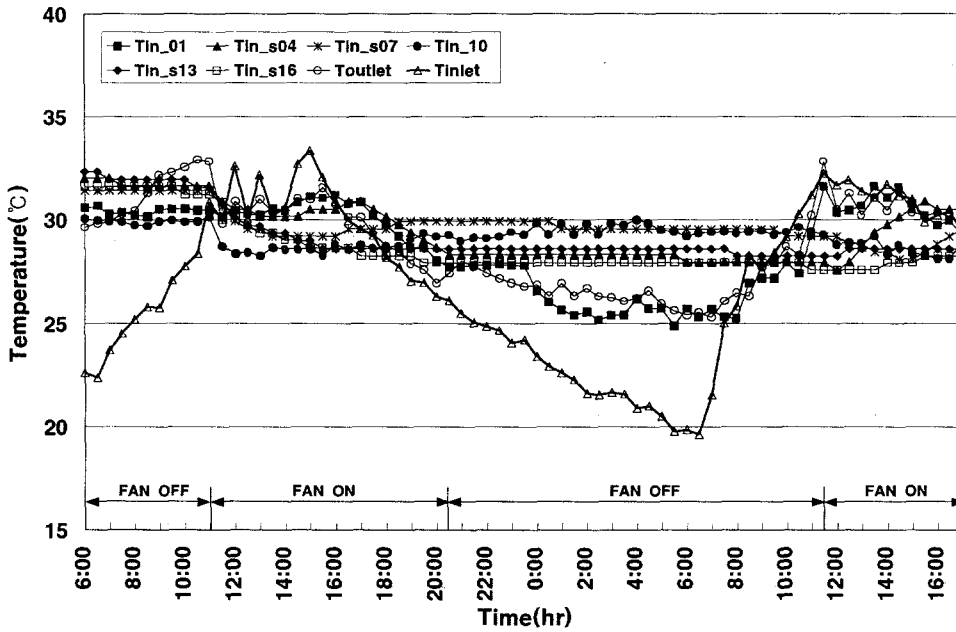
㉡ 순환팬 우측

(b) 축열자갈층 깊이 20cm

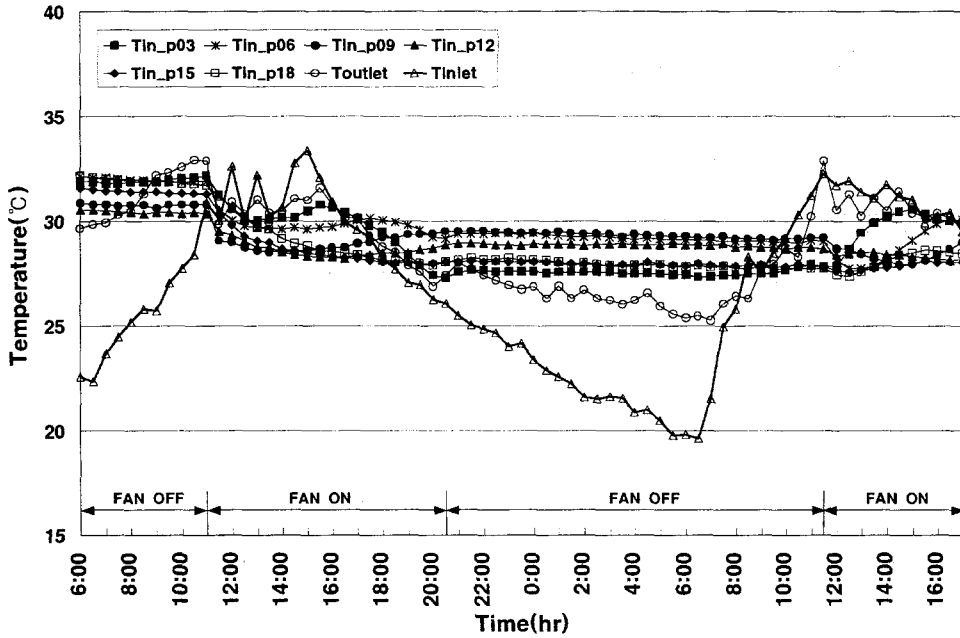
그림 3-36. 양방향 공기순환시 축열자갈층의 습도 변화



(a) 축열자갈층 깊이 20cm



(b) 축열자갈층 깊이 45cm



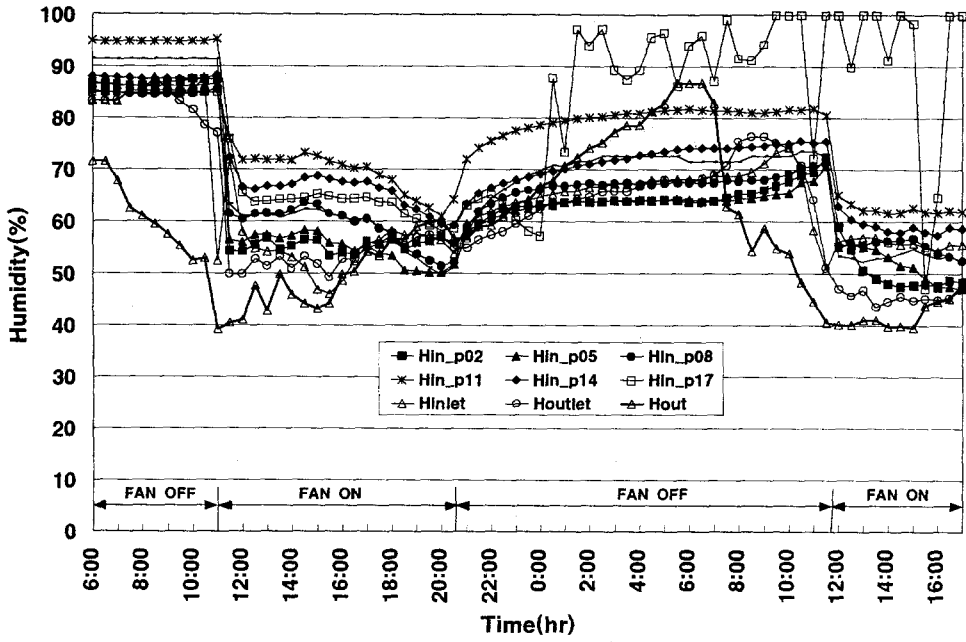
(c) 축열자갈층 깊이 60cm

그림 3-37. 일방향 공기순환시 자갈축열층의 온도변화

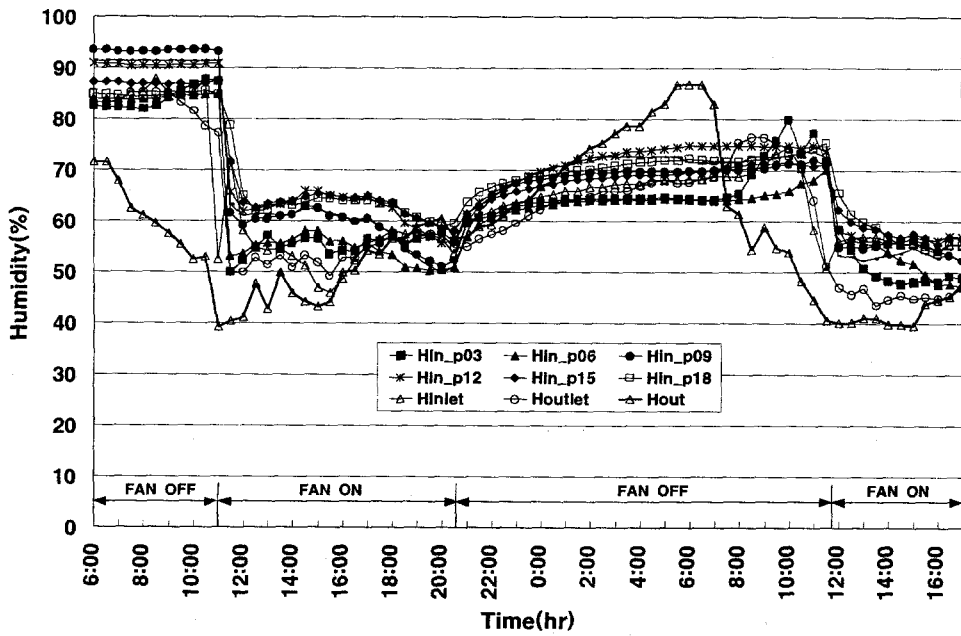
그림 3-37에서 알 수 있듯이, 축열층 우측의 유입구에서 좌측의 유출구쪽으로 일방향으로 공기순환을 시켰을 경우에도 유입구에서 멀어질수록 외기의 영향을 적게 받아 온도변화가 완만하게 나타났으며 자갈축열층 높이별로는 거의 동일한 온도변화를 보였다.

팬을 작동하지 않은 경우에는 외기와 인접해 있는 유출·입구의 온도를 제외하고는 자갈축열층내의 온도는 외기온에 상관없이 일정하게 유지하였다. 팬을 작동하지 않은 경우, 축열층내의 온도가 일정하게 유지되는 것으로부터 모형 자갈축열층의 단열이 우수함을 알 수 있었으며 시간이 경과하여도 축열층내의 온도가 일정하게 유지되어 축열층내의 열이동은 대류에 의한 열전달이 대부분이며 자갈과 자갈사이의 전도에 의한 열전달은 미비한 것으로 나타났다.

외기유입에 따른 모형 자갈축열층의 습도변화는 그림 3-38에서 보는 바와 같이,



(a) 축열자갈층 깊이 25cm



(b) 축열자갈층 깊이 60cm

그림 3-37. 일방향 공기순환시 자갈축열층의 습도변화

온도변화와 유사한 경향을 나타내어 축열층내로 유입되는 공기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며 유입구에 가까울수록 외기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 그리고, 팬을 작동하지 않은 경우에는 습도의 변화 또한 없는 것으로 나타났다.

3) 모형 자갈축열층의 축열성능

자갈축열층의 축열성능을 분석하기 위해 열풍기를 이용하여 평균 41℃로 가열된 공기를 자갈축열층내로 유입시켰다. 축열과정은 9시간동안 이루어졌으며 축열이후에는 열풍기를 정지시키고 평균 5℃의 외기온을 축열층내로 유입시켜 방열을 수행하였다. 축·방열시 자갈축열층의 온습도변화를 분석한 결과는 그림 3-39와 그림 3-40과 같다.

그림 3-39에서 보는 바와 같이, 유입구에서 가까운 곳의 자갈축열층의 온도 상승은 급격하게 이루어지는 반면, 유입구에서 멀어질수록 자갈축열층의 온도 상승은 완만하게 이루어졌다. 9시간동안 축열하는 과정에서 유입구에 약 3m 떨어진 곳의 자갈축열층의 온도는 유입공기의 평균온도인 41℃에 도달하였으나 유입구에서 3m이상 떨어진 자갈축열층의 온도는 유입공기의 평균온도에 미치지 못하였다. 그리고, 방열과정에서도 유입구에서 3m 이내로 떨어진 축열층의 온도는 방열직후 차가운 유입공기의 영향으로 급격히 하강하였으나 유입구에서 3m이상 떨어진 자갈축열층의 온도는 지점에 방열과정에서도 상승하다가 방열 시간이 지속됨에 따라 서서히 하강하는 경향으로 나타났다.

그림 3-40은 축·방열시 공기순환경로에 따른 모형 자갈축열층의 습도변화를 나타낸 것이다.

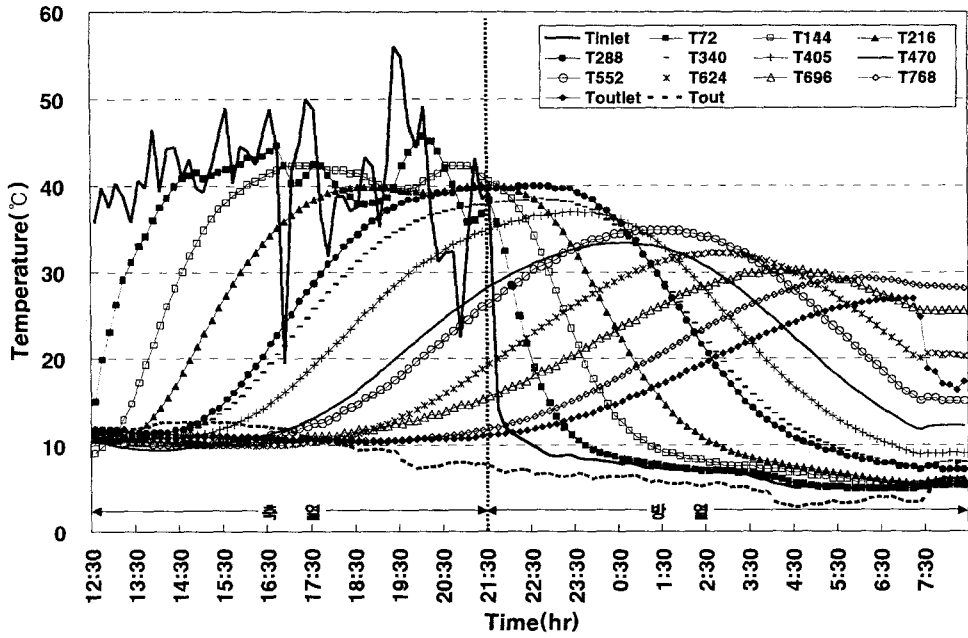


그림 3-39. 축·방열시 자갈축열층내 온도변화

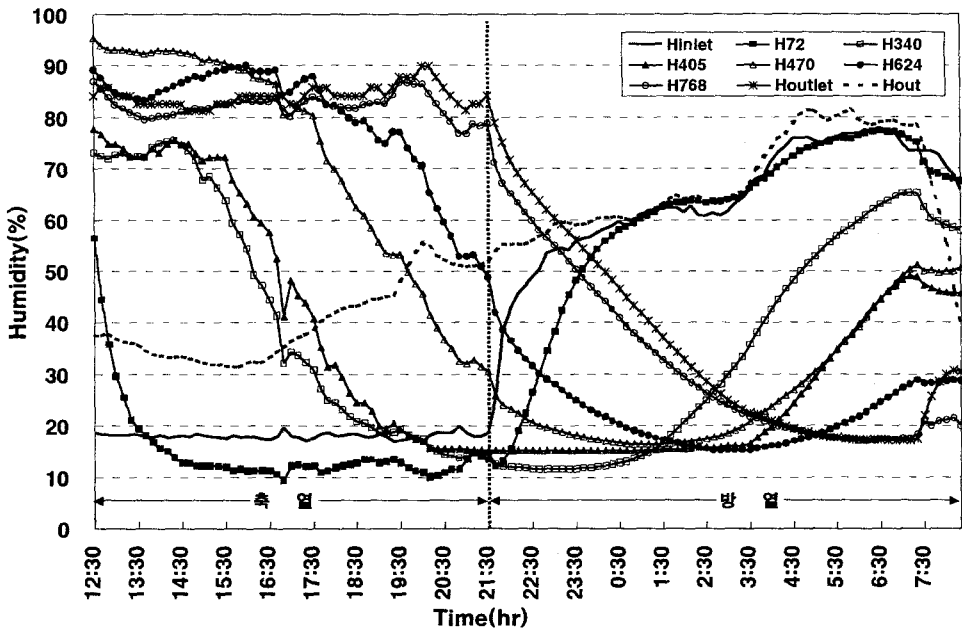


그림 3-40. 축·방열시 자갈축열층내 습도변화

그림 3-40에서 보는 바와 같이, 축열시 외기의 습도가 32%~55%범위에서 변화하였으나 자갈축열층으로 유입되는 공기의 습도는 열풍기의 영향으로 평균 19%였다. 평균습도가 19%인 공기가 축열층 내부로 유입됨에 따라 축열층 내부 습도는 전반적으로 축열시간에 따라 감소하였다. 유입구에서 약 7m 떨어진 곳의 자갈축열층의 습도는 유입공기의 영향으로 축열시간에 따라 감소하였지만 7m이상 떨어진 곳의 습도는 유입공기의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그리고, 유입구에 가까울수록 유입공기의 영향을 많이 받아 습도의 감소가 급격히 이루어졌으며 유입구에서 멀어질수록 자갈축열층의 습도는 완만하게 감소하였다.

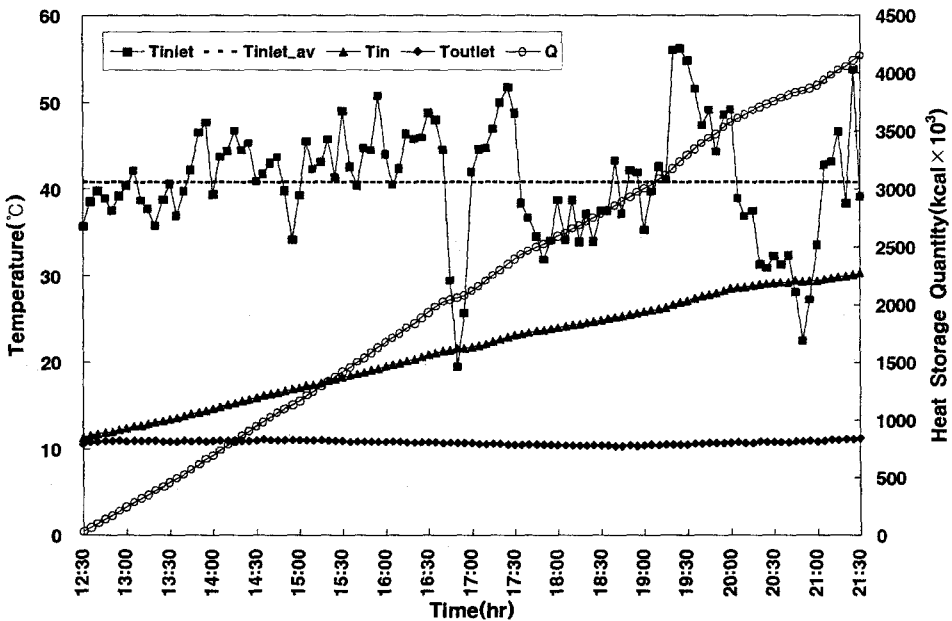
9시간동안 열풍기에 의해 가열된 공기를 유입시키면서 축열한 후 곧바로 열풍기의 작동을 정지하고 외기를 축열층내로 유입시키는 방열과정을 수행하였다.

방열시에는 축열층내로 유입되는 공기의 습도는 외기 습도의 영향으로 서서히 증가하여 방열 3시간이후부터는 외기습도와 거의 동일하게 하게 나타났다. 그리고, 유입공기의 습도가 증가함에 따라 유입구에서 4m이내의 자갈축열층 습도는 유입공기의 영향으로 방열시작과 동시에 증가하였으나 유입구에서 4m이상 떨어지 곳의 자갈축열층의 습도는 일정시간 감소하다가 다시 증가하는 경향으로 나타났으나 유입구에서 7.5m이상 떨어진 곳과 유출구의 습도는 방열과정 동안 계속 감소하는 경향으로 나타났다. 이는 자갈축열층의 공기흐름이 유입구에서 유출구쪽으로 이루어지므로 유입구쪽 자갈축열층의 건조한 공기가 유출구쪽의 자갈축열층으로 이동하기 때문이다. 유입구에서 72cm떨어진 곳의 자갈축열층 습도는 방열 5시간만에 유입공기의 습도범위까지 증가하였으나 72cm이상 떨어진 곳의 자갈축열층 습도는 방열이 진행되는 동안 유입공기의 습도범위까지 증가하지 못하였다. 따라서, 자갈축열층의 습도는 온도변화와 마찬가지로, 유

입구에서 유출구쪽으로 갈수록 유입공기의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

9시간동안 열풍기에 의해 가열된 공기를 모형 자갈축열층내로 유입시켜 축열하는 동안 자갈층의 축열량을 분석한 결과는 그림 3-41과 같다.

축열층의 초기온도가 약 10°C일 때 평균온도가 41°C인 공기를 9시간동안 유입시키면 축열층 평균온도는 30.3°C로 약 19.1°C 증가하였으며 모형 자갈축열층의 축열성능은 461,000kcal/hr인 것으로 나타났다.



(Tinlet : 유입공기온도, Tinlet_av : 유입공기평균온도, Tin : 자갈축열층온도, Toutlet : 유출공기온도, Q : 축열량)

그림 3-41. 축열시 모형 자갈축열층의 축열량

5. 모형 자갈층의 이론적 해석

문헌에 의하면 자갈의 크기에 관계없이 유입되는 더운 공기의 유량이 증가할 수록 축열시간이 빠르고, 순환공기의 유동속도가 일정한 경우에는 축열재의 공극율이 작을수록 축열량이 높은 것으로 나타나 있다. 이러한 결과는 공극율이 작을수록 축열용량이 증가하여 축열량이 높게 나타나는 것으로 자갈층의 두께는 축열시간, 순환팬의 유속 및 축열량에 따라 달라지며 초기설치비에 큰 영향을 주기 때문에 신중히 결정하여야 한다. 따라서, 모의 축열층을 이용한 기초실험과 이론적인 해석을 동시에 수행하였다.

가. 기초이론

자갈층의 축열량을 평가하는데 필요한 이론들은 식 (3-5)~(3-9)와 같다. 식 (3-5)~(3-8)은 축열 자갈층의 유입공기온도와 초기 축열층 온도에 따른 출구온도를 추정하는 식들이며, 식 (3-9)는 자갈층의 축열량을 산정하는 식이다.

입자의 여러 가지 형상에 따라 압력 강하와 열전달을 파악하기 위해서는 특성길이 \mathcal{L} 과 축열층 공극사이로 흐르는 유체의 평균속도인 특성속도 v 로 표현되는 상관관계식이 요구된다. 축열층을 통한 압력 강하는 Ergun 방정식인 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{150\mu v}{\mathcal{L}^2} + \frac{1.75\rho v^2}{\mathcal{L}} ; 1 < Re < 10^4 \quad (3-5)$$

여기서, μ : 점성계수 (kg/m·s)

$$v : \text{특성속도} = \frac{\dot{m}}{\rho \epsilon_v A_c}$$

m : 질량유량 (kg/s)

ρ : 밀도 (kg/m³)

ϵ_v : 공극율 (일반적으로 0.3 ~ 0.5)

A_c : 축열층의 단면적 (m²)

$$\mathcal{L} : \text{특성길이} = d_p \left(\frac{\epsilon_v}{1 - \epsilon_v} \right)$$

d_p : 자갈의 입경,

ϵ_v : 공극율 (일반적으로 0.3 ~ 0.5)

식 (3-5)에서 첫번째 항은 점성력이고 두번째 항은 형상력을 나타낸다. 상수는 입자의 여러 가지 모양에 대한 실험 자료를 근거로 사용되었다. 따라서 식 (3-5)은 구형 입자에 대해 정확한 값을 계산할 수 있다.

자갈축열층의 기체유동에 적당한 열전달 상관관계식은 식 (3-6)와 같다.

$$\text{Nu} = (0.5\text{Re}^{1/2} + 0.2\text{Re}^{2/3})\text{Pr}^{1/3}; \quad 20 < \text{Re} < 10^4 \quad (3-6)$$

여기서, Re : Reynolds 수 = $\frac{v\mathcal{L}\rho}{\mu}$

v : 특성속도

\mathcal{L} : 특성길이

ρ : 밀도 (kg/m³)

μ : 점성계수 (kg/m·s)

Pr : Prandtl 수 - 동점수 계수와 열확산 계수의 비, 즉 운동량 확산율과 열 확산율의 비

물성 변화 영향은 $n=-0.14$ 일때 점성비를 사용함으로 보정할 수 있다. 축열층의 경우 입구 영향을 무시할 수 있으므로 식 (3-6)를 이용하여 국소 Nusselt수와 평균 Nusselt수를 구할 수 있다. 따라서, 축열층에서 특성 열전달 면적은 열전달 접수 길이(transfer perimeter) \mathcal{F} 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\mathcal{F} = \frac{\text{입자의 총 표면적}}{\text{축열층 길이}} = aA_c \quad (3-7)$$

여기서, a : 축열층의 비표면적(m^{-1}) = $\frac{\text{입자의 총 표면적}}{\text{충전층 (bed) 체적}} = \frac{A_p}{V_p}(1 - \varepsilon_v)$

V_p : 축열자갈의 체적

A_p : 축열자갈의 표면적

A_c : 충전층의 단면적을 의미한다.

유입공기의 온도에 따른 출구온도의 산정은 식 (3-8)을 이용할 수 있다.

$$T_{b,out} = T_s - (T_s - T_{b,in})e^{-h_c 2\pi RL/mC_p} \quad (3-8)$$

여기서, $T_{b,out}$: 축열층의 출구온도

T_s : 초기 자갈층의 온도

$T_{b,in}$: 유입공기온도

축열재인 자갈에 저장되는 축열량 Q 는 자갈층의 온도와 순환유체에 의하여 공급되는 열량으로 구할 수 있으며 이것을 식을 나타내면 식 (3-9)와 같다.

$$Q = Q_{in} - Q_{out} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (3-9)$$

여기서, Q : 축열량 (kW), Q_{in} : 유입 열량 (kW), Q_{out} : 유출 열량 (kW)

\dot{m} : 질량유량 (kg/s), C_p : 공기의 정압비열 (J/kg·K)

T_{in} : 유입온도 (K), T_{out} : 유출온도 (K)

나. 이론값과 계측값의 비교

표 3-11과 같은 모형 자갈축열층에 대해 온도를 검증하기 위해 계측값과 계산값을 비교·분석하였다.

모형 자갈축열층으로 평균온도가 41℃인 공기를 유입시켰을 때 축열층내 공기순환경로에 따라 온도가 상이하게 나타났으나 계측된 축열층 평균온도와 이론에 의해 계산된 평균온도를 비교·분석한 결과는 그림 3-42와 같다.

표 3-11. 모형 자갈축열층의 제원

축열층 제원	자갈크기	자갈층 공극율	단 열 재	순환팬 유량
폭 (1.2m) 길이(9.0m) 높이(0.9m)	50mm~150mm	0.43	보온판 4호 밀도 : 15kg/m ³ 두께 : 6cm	1.25m ³ /s

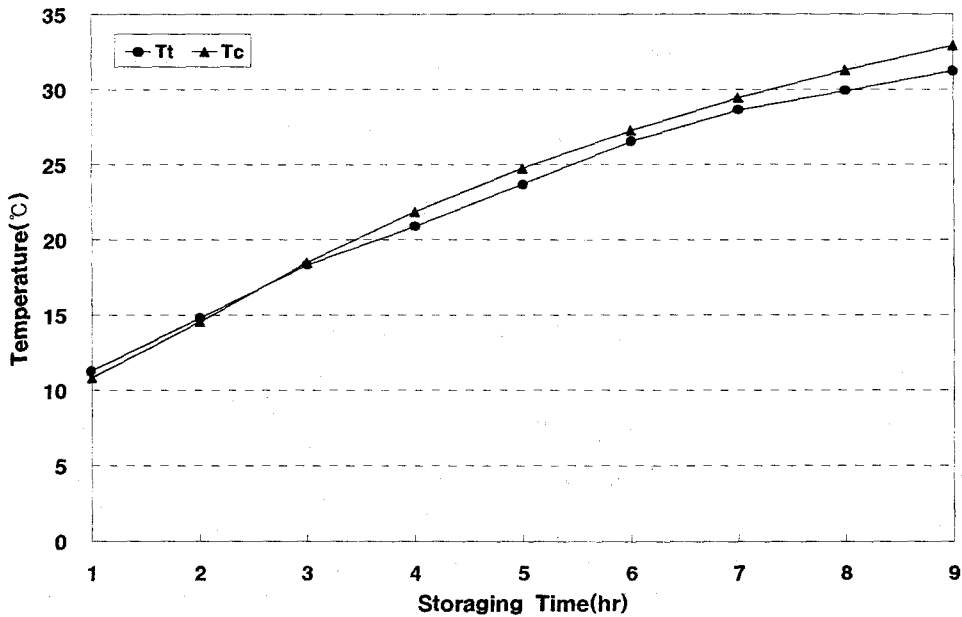


그림 3-42. 모형 자갈축열층 온도의 계산값과 실측값의 비교

그림에서 알 수 있듯이, 계산값이 실측값보다 높게 나타났으나 온도편차가 평균 1°C미만이였다. 실측값이 계산값보다 낮게 나타난 것은 모형 자갈축열층으로 유입되는 공기의 온도가 일정하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 자갈의 공극율, 축열층의 두께 및 유입공기의 유동속도에 따른 축열량과 축열층의 온도변화를 예측할 수 있을 것으로 판단되며 이는 자갈축열 태양열 온실의 축열층을 설계하는 기초자료로 활용할 수 있다.

다. 자갈축열층의 이론적 해석

이론적 해석은 폭 5m×길이 9m의 모의축열층의 깊이를 0.3m~1.0m범위에서 변화시켜 자갈층의 온도변화와 축열시간에 따른 축열량을 산정하였다. 이때 유입온도는 30°C의 등온상태로 가정하였으며, 초기축열층내의 자갈온도는 표 3-12를 참고하여 5.3°C로 하였다. 그리고, 순환팬의 용량은 75m³/min, 축열자갈층의 공극율 ϵ_v 는 0.43으로 가정하여 축열시간에 따른 자갈층의 온도와 축열량의 변화를 분석하였으며 분석결과는 그림 3-43 ~ 3-47에서 보는 바와 같다.

표 3-12. 대구지역의 난방설계용 지중온도

구분	지표면 온도(°C)		불역층온도(°C) ($T_{min}+T_{max}$)/2	지 중 온 도(°C)					
	최저 T_{min})	최고 (T_{max})		지표면에서 땅속깊이(m)					
				0.3	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0
대구	-0.2	29.2	14.5	2.1	3.5	7.0	10.4	13.2	15.6

※ 한국기후표 제1권 중앙기상대, 1982

1) 이론적 해석의 기본가정

- 축열층의 제원 : 폭(5m)×길이(9m)×깊이(1m)
- 자갈의 직경 : 8cm, 자갈층의 공극율 : 0.43
- 자갈층의 초기온도 : $5.3^{\circ}\text{C}=(3.5+7.0)/2$
- 유입공기 : 1기압, 30°C
- 질량유량 : 0.97kg/s, 1.46kg/s, 1.95kg/s
- 공기의 물성치 : 축열층에서 공기의 물성치들은 평균유체온도($(T_i+T_o)/2$)

에서 평가

κ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m·s)	ν (m ² /s)	C_p (J/kg·K)	Pr
0.02616	1.2157	18.061×10^{-6}	14.859×10^{-6}	1006.8	0.69

2) 계산 결과

① 특성속도(characteristic velocity)

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_c \cdot \epsilon_v} = \frac{1.46}{1.2157 \times 5 \times 1 \times 0.43} = 0.5586 \text{ m/s}$$

② 특성길이(characteristic length)

$$\mathcal{L} = d_p \left(\frac{\epsilon_v}{1 - \epsilon_v} \right) = \frac{0.08 \times 0.43}{1 - 0.43} = 0.06035 \text{ m}$$

③ Reynolds 수 $Re = \frac{v \mathcal{L} \rho}{\mu} = \frac{0.5586 \times 0.06035 \times 1.2157}{18.061 \times 10^{-6}} = 2269.14$

④ Nusselt 수

$$\begin{aligned} Nu &= (0.5Re^{1/2} + 0.2Re^{2/3})Pr^{1/3} \\ &= [0.5(2269.14)^{1/2} + 0.2(2269.14)^{2/3}](0.69)^{1/3} = 51.56 \end{aligned}$$

⑤ 물성변화 영향을 고려하여 수정

$$\mu_b = 18.061 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$\mu_s = 17.504 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_b/\mu_s)^{-0.14} = (18.061/17.504)^{-0.14} = 1.0044$$

$$Nu = (1.0044)(51.56) = 51.79$$

$$h_c = (k/L)Nu = (0.02616/0.06035)51.79 = 22.45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

⑥ $t=0$ 일 때 자갈층의 온도는 일정하다. 열전달단위수

$$Nu = h_c 2\pi RL/mC_p \rightarrow h_c \mathcal{F} L/mC_p$$

⑦ 비표면적 $a = \frac{6(1-\varepsilon_v)}{d_p} = \frac{6(1-0.43)}{0.08} = 40.5 \text{ m}^{-1}$

⑧ 전달 접수 길이 $\mathcal{F} = aA_c = 40.5 \times 5 \times 1 = 202.5 \text{ m}$

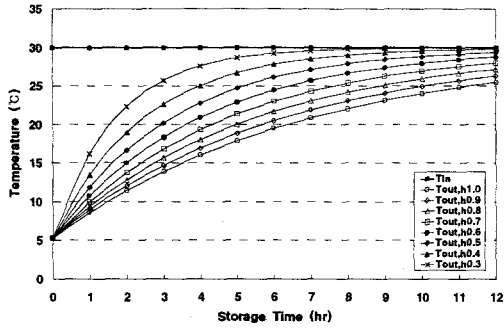
⑨ $Nu = \frac{22.45 \times 202.5 \times 9}{1.46 \times 1006.8} = 27.83$

⑩ $Nu=27.83$ 을 식 (9)에 대입하면

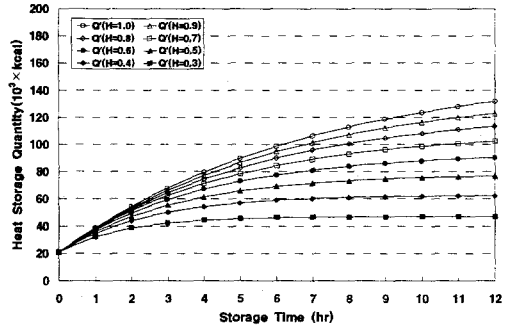
$$\begin{aligned} T_{b,out} &= T_s - (T_s - T_{b,in})e^{-h_c 2\pi RL/mC_p} \\ &= 5.3 - (5.3 - 30)e^{-27.83} \approx 5.3 \text{ (가정이 타당)} \end{aligned}$$

⑪ (10)을 이용하여 축열량을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= Q_{in} - Q_{out} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \\ &= 1.46 \times 1006.8 \times 24.7 = 36.3072 \text{ kW} \end{aligned}$$

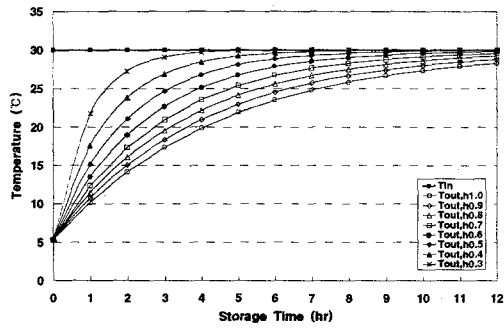


㉑ 축열층내 자갈의 온도 변화

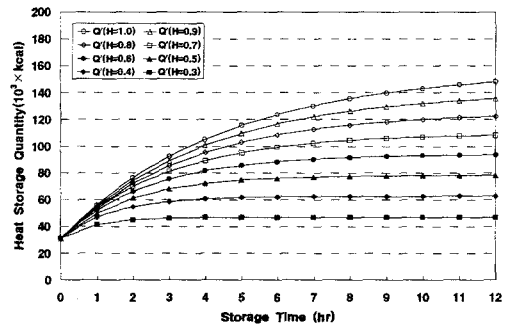


㉒ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(a) 풍량 50m³/min

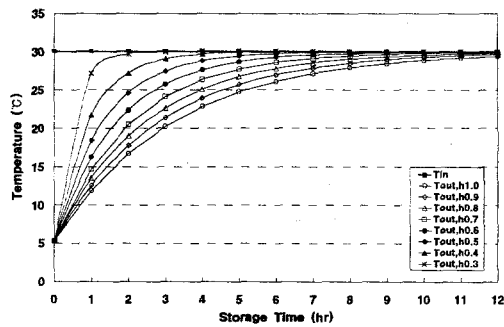


㉓ 축열층내 자갈의 온도 변화

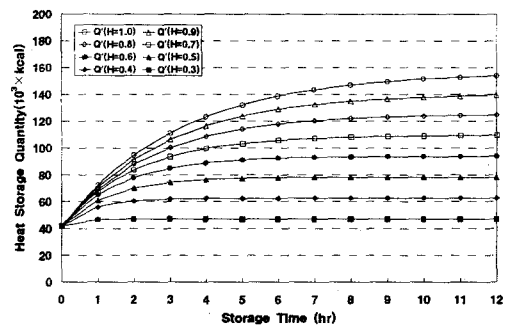


㉔ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(b) 풍량 75m³/min



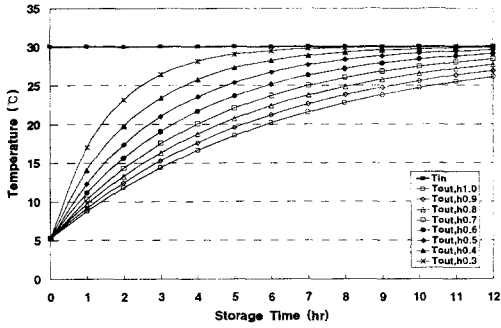
㉕ 축열층내 자갈의 온도 변화



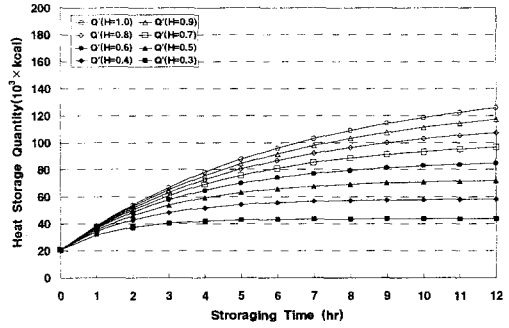
㉖ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(c) 풍량 100m³/min

그림 3-43. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화 ($\epsilon_v=0.3$)

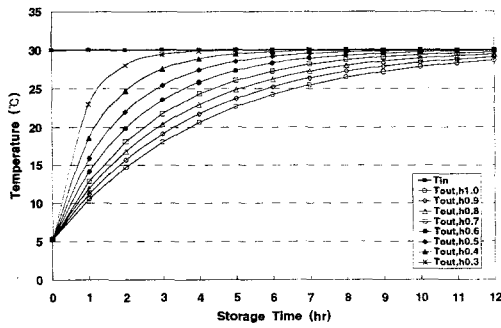


㉑ 축열층내 자갈의 온도변화

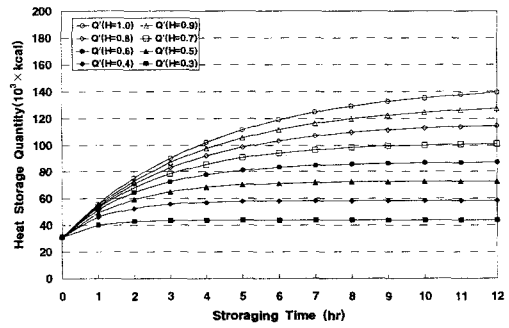


㉒ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(a) 풍량 50m³/min

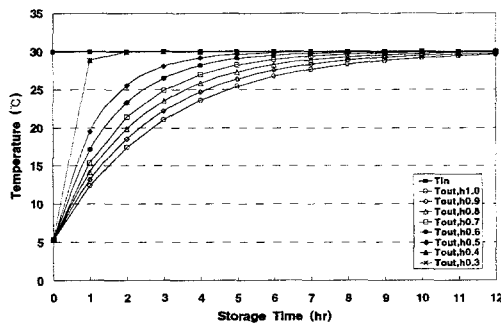


㉓ 축열층내 자갈의 온도변화

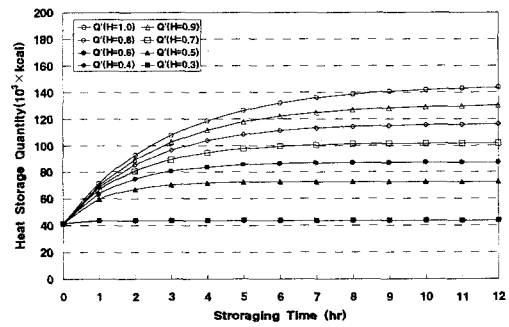


㉔ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(b) 풍량 75m³/min



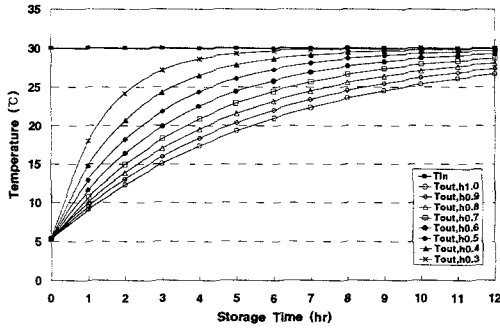
㉕ 축열층내 자갈의 온도변화



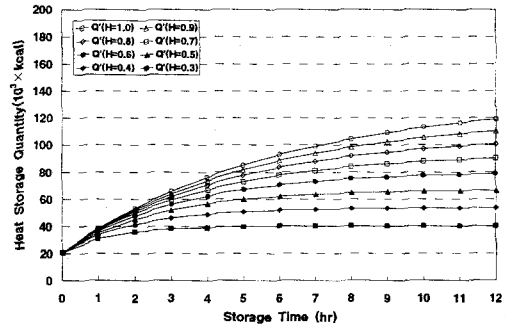
㉖ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(c) 풍량 100m³/min

그림 3-44. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화 ($\epsilon_p=0.35$)

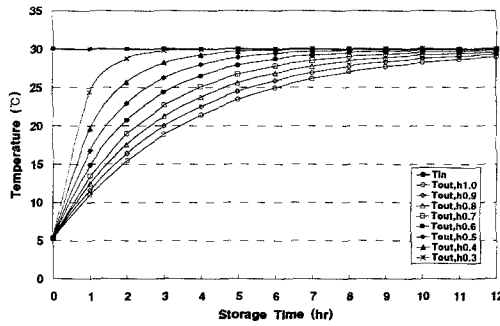


㉑ 축열층내 자갈의 온도변화

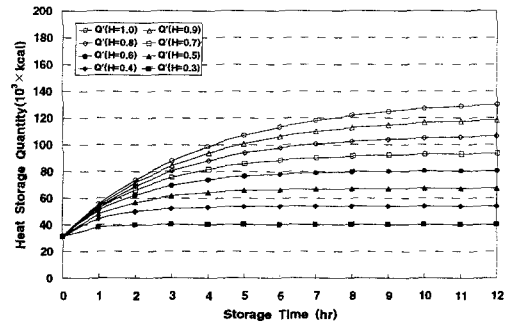


㉒ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(a) 풍량 50m³/min

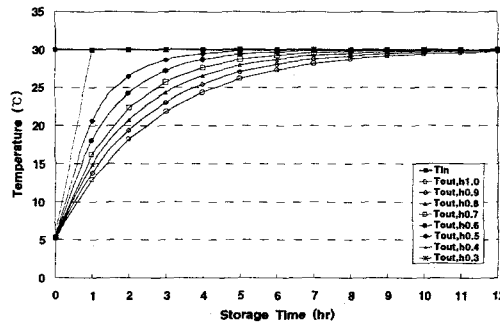


㉓ 축열층내 자갈의 온도변화

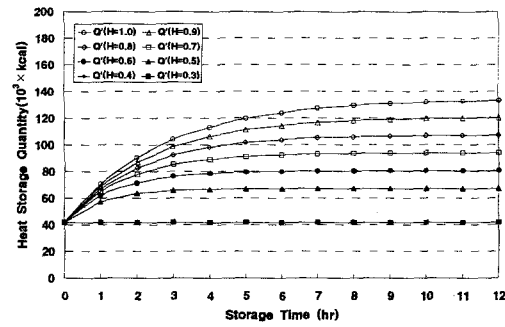


㉔ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(b) 풍량 75m³/min



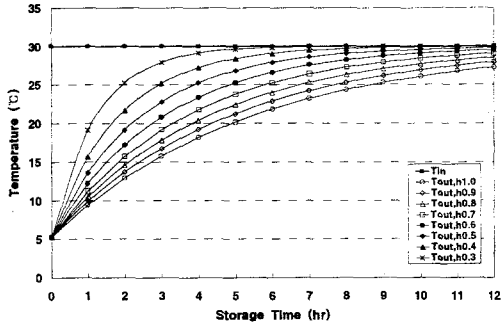
㉕ 축열층내 자갈의 온도변화



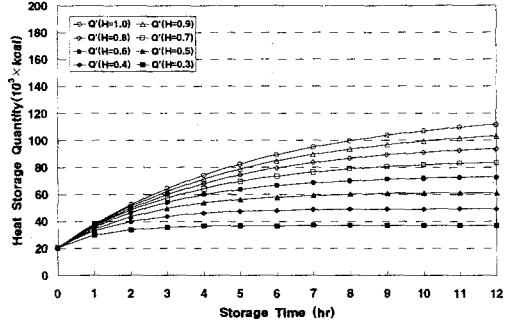
㉖ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(c) 풍량 100m³/min

그림 3-45. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화 ($\epsilon_v=0.4$)

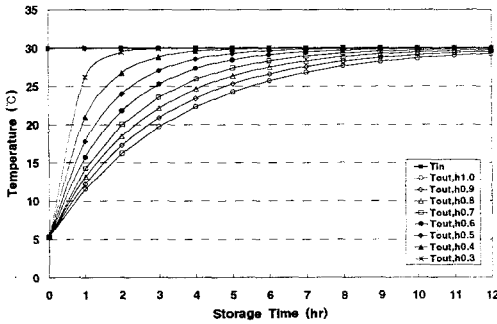


㉑ 축열층내 자갈의 온도변화

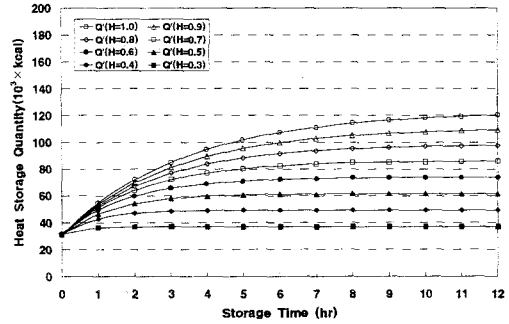


㉒ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(a) 풍량 50m³/min

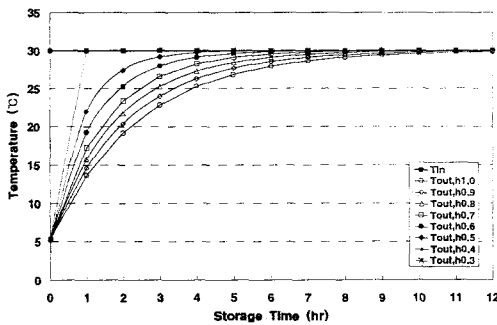


㉓ 축열층내 자갈의 온도변화

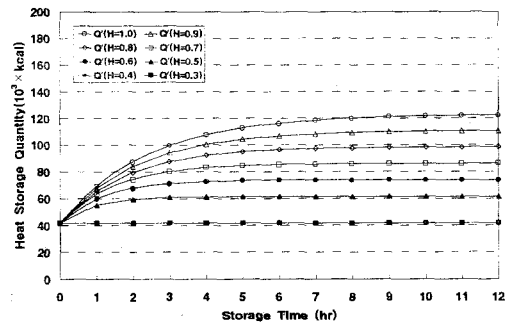


㉔ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(b) 풍량 75m³/min



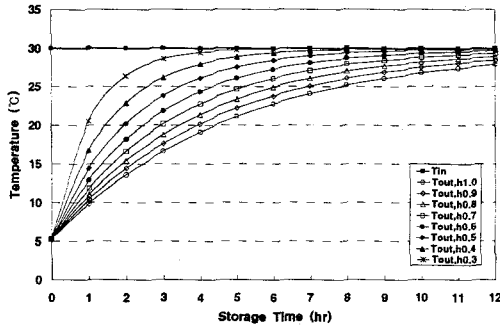
㉕ 축열층내 자갈의 온도변화



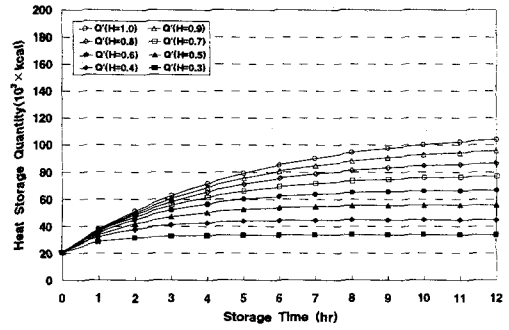
㉖ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(c) 풍량 100m³/min

그림 3-46. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화 ($\epsilon_p=0.45$)

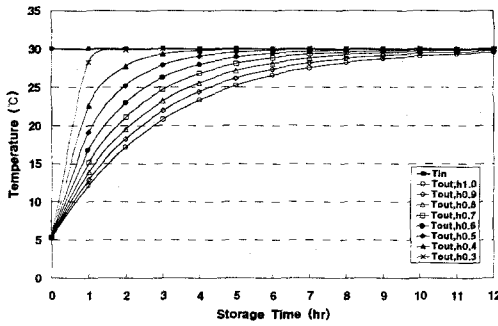


㉑ 축열층내 자갈의 온도변화

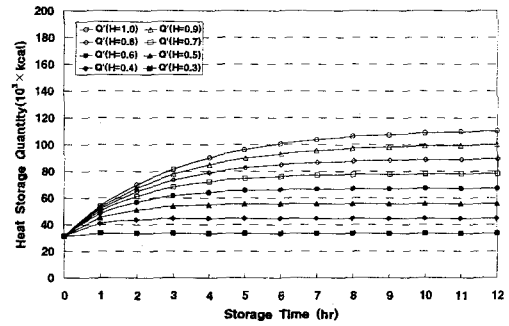


㉒ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(a) 풍량 50m³/min

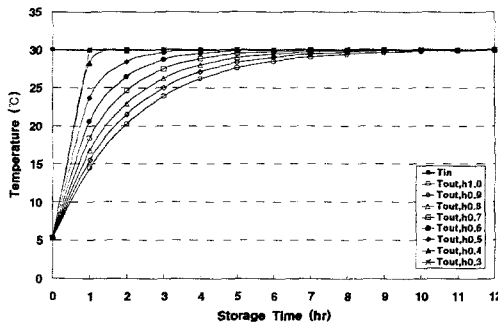


㉓ 축열층내 자갈의 온도변화

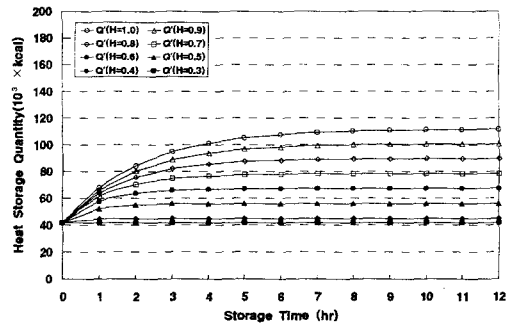


㉔ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

(b) 풍량 75m³/min



㉕ 축열층내 자갈의 온도변화



㉖ 축열시간에 따른 자갈층의 축열량

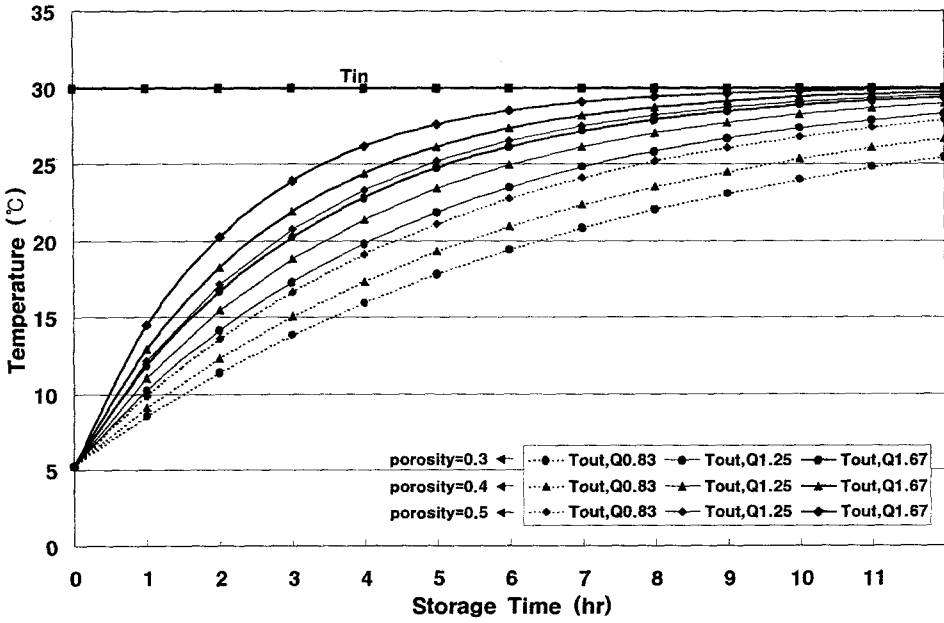
(c) 풍량 100m³/min

그림 3-47. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화 ($\epsilon_v=0.5$)

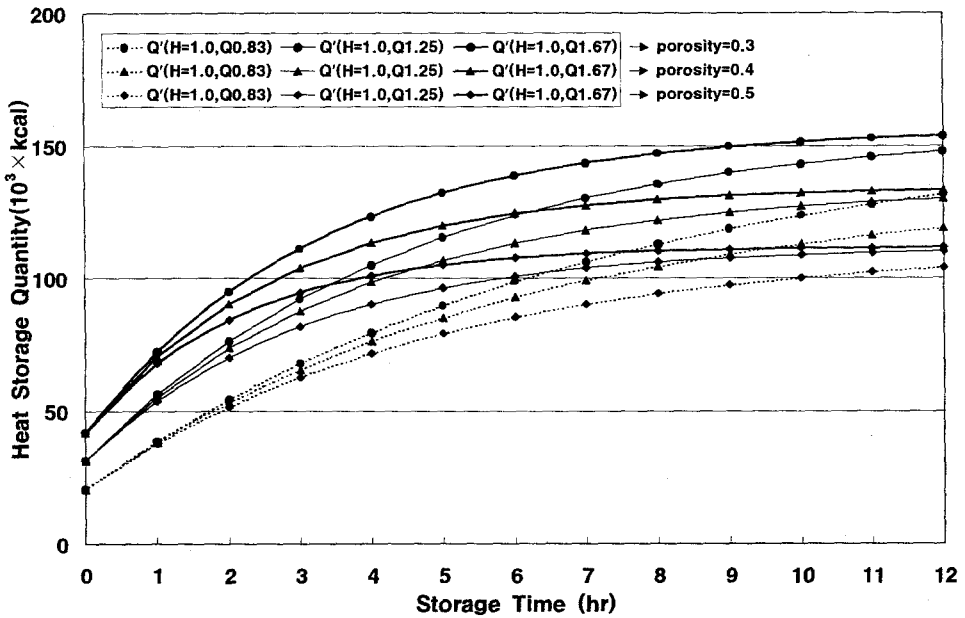
그림 3-43~그림 3-47은 자갈층의 공극율에 따른 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량을 계산에 의한 구한 결과로서, 축열 자갈층의 공극율에 따른 동일한 온실바닥(축열적 바닥)면적에 대한 깊이별로 축열시간에 따른 자갈층의 온도와 축열량 변화를 나타낸 것이다.

동일한 축열시간에 대해 축열자갈층의 공극율이 클수록, 축열층 깊이가 낮을수록 축열층 온도상승은 빠르게 일어나지만 저장할 수 있는 축열량은 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, 순환팬의 용량이 증가할수록 축열층 온도상승은 빠르게 일어났고 축열층에 저장되는 열량이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 이용하여 온실에 필요한 난방부하량에 따른 적정 축열층의 체적을 결정할 수 있다. 그림 3-48은 순환팬 용량에 따른 자갈층의 온도 및 축열량의 변화를 분석한 결과이며, 축열시간, 자갈의 공극율, 축열층의 규모 및 필요 축열량에 따른 순환팬의 용량을 결정할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 축열시간에 따른 순환팬 용량별 자갈층의 온도변화



(b) 축열시간에 따른 순환팬 용량별 자갈층의 축열량

그림 3-48. 축열시간에 따른 순환팬 용량별 자갈층의 온도 및 축열량 변화

제3절 결 론

1. 자갈축열층내 순환유체의 유동과 밀접한 관계가 있는 자갈의 공극율을 분석한 결과, KSF에 의한 실험에서의 자갈의 공극율은 39~41%범위로 자갈의 크기에 따라 공극율의 차이는 미소한 것으로 나타났으며 쇄석이 강자갈보다 6%정도 높게 나타났다. 그리고, 간이실험에서는 쇄석의 공극율은 입경이 30mm이하에서는 42%, 50~100mm는 46%로 나타났으며 강자갈의 공극율은 입경이 30mm이하에서 32.2%, 50~100mm는 43.1%, 150~200mm는 44.8%, 30~300mm는 40.8%로 나타났다.
2. 자갈축열층에 있어 축열량은 자갈의 공극율과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.
3. 흙과 자갈의 열전도율을 측정한 결과, 자갈의 열전도성이 흙에 비해 약 3~4배정도 우수한 것으로 나타났다.
4. 축열시간이 경과함에 따라 자갈의 표면 및 중심부의 온도는 증가하였으며 입경이 작은 타원형의 자갈내부 온도가 빠르게 상승하였으나 단위입자당 축열량은 동일함을 알 수 있다. 그리고, 유입공기속도와 자갈표면부의 온도는 비례하는 것으로 분석되었다.
쇄석은 강자갈보다 방열속도가 빠른 것으로 나타났으며, 강자갈의 경우 입경이 클수록 방열이 완만하게 일어났다.
5. 자갈축열층의 모형실험을 통해 축열자갈층내의 공기순환용 파이프 매설은

불필요한 것으로 판단된다.

6. 공기순환팬 하부에 자갈의 채움여부는 축열층의 공기유동성과는 큰 상관관계가 없었으며 공기순환방식에 관계없이 유입구에서 멀어질수록 풍속이 감소하다가 축열층 중앙에서 유출구 방향으로 갈수록 다시 풍속이 증가하는 경향이였다. 그리고, 축열층의 높이별로 공기유동속도는 미소한 차이가 있었다.
7. 자갈축열층내의 온·습도 및 순환유체의 유동속도를 계측할 수 있는 시스템을 구성하였다.
8. 모형 자갈축열층의 공기순환팬을 작동하였을 경우, 팬 통과전의 기온과 통과후의 기온차가 1℃미만으로 나타나 공기순환팬에 의한 열손실량은 극히 미소함을 알 수 있었다.
9. 축열층의 온·습도변화는 유입되는 공기의 영향을 많이 받으며, 유입구에서 유출구방향으로 갈수록 축열층내 온·습도는 완만하게 변화하였다. 그리고, 자갈축열 태양열 온실에 있어 자갈축열층에 의한 냉방성능을 최대한 발휘하기 위해서는 축열층과 온실외부와의 공기순환이 이루어질 수 있는 별도의 공기순환시스템으로 주간에 축열된 에너지 및 다습한 공기를 제거할 필요가 있다.
10. 모형 자갈축열층의 단열성능이 우수하여 시간이 경과하여도 축열층내의 온도가 일정하게 유지하여 축열층내의 열이동은 대류에 의한 열전달이 대부분

분이며 자갈과 자갈사이의 전도에 의한 열전달은 미비한 것으로 나타났다.

11. 모형 자갈축열층의 초기온도가 약 10℃일 때 평균온도가 41℃인 공기를 9시간동안 유입시키면 축열층 평균온도는 30.3℃로 약 19.1℃ 증가하였으며 모형 자갈축열층의 축열성능은 약 461,000kcal/hr인 것으로 나타났다.

12. 계산과 실측으로 얻어진 모형 자갈축열층의 온도는 편차가 평균 1℃미만으로 유사하게 나타나, 자갈축열층의 이론적 해석을 통하여 자갈의 공극율, 축열층의 두께 및 유입공기의 유동속도에 따른 축열량과 축열층의 온도변화를 예측할 수 있을 것으로 판단되며 이는 자갈축열 태양열 온실의 축열층을 설계하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

제 4 장 자갈축열 태양열온실의 구성

제1절 개 요

시설원예에 있어 생산비 절감을 통한 생산성 향상과 고품질 농산물의 주년생산을 위해서는 우리 나라 기상여건상 냉·난방에너지의 인위적인 투입이 불가피한 실정이다. 그러나, 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 국내여건상 원예시설에 투입되는 에너지의 절감은 시설원예산업에 있어 해결하여야 할 시급한 당면과제이다.

더욱이 국제 유가의 폭등, 환율변동 등으로 인한 국내 유가의 불안정은 시설원예산업의 위축과 시설원예농가의 불안을 초래하고 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 해결하고자 시설원예에 있어 생산비에 큰 비중을 차지하고 있는 냉·난방비의 절감을 위한 연구들이 수행되고 있는 실정이다. 일례로, 시설원예에 투입되고 있는 화석에너지를 대체할 수 있는 에너지원중 태양에너지를 이용한 방법이 있다. 겨울철의 밝은 날에는 온실 내부온도가 35℃까지 상승하여 온실내에는 잉여의 태양에너지가 존재한다. 이러한 잉여의 태양에너지를 저장하였다가 야간의 난방에 이용하는 방법으로, 현재 국내에는 잠열축열재과 토양축열을 이용한 지중열교환온실에 대한 연구는 다소 수행되고 있으나 이들 시스템은 겨울철 난방에너지의 절감만을 목적으로 하고 있다. 하지만, 여름철 고온기에 휴작하는 온실이 많을 뿐만 아니라 냉방장치와 이에 소요되는 에너지 비용 등으로 인하여 고품질의 농산물의 생산과 주년재배가 어려운 실정인 국내여건을 고려하면 냉난방에너지를 동시에 절감할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 현재, 온실재배에 투입되는 냉난방에너지를 절감할 수 있는 연구들이 많이 수행

되고 있으며 일부 실용화되고는 있지만 아직 명확한 해결책이 제시된 것은 아니다. 따라서, 원예시설의 해결과제중 시급하고 중요한 난방에너지 문제의 해결책을 모색하고자 자갈을 축열재로 이용하여 난방기간중 주간에 온실내로 입사된 태양에너지를 자갈축열층에 축열하여 야간에 난방에너지로 사용하는 동시에 고온기인 여름철에는 자갈축열로 인하여 주간에 온실 내부온도의 과다상승을 방지할 목적으로 자갈축열 태양열 온실을 개발하고자 본 연구를 수행하였다.

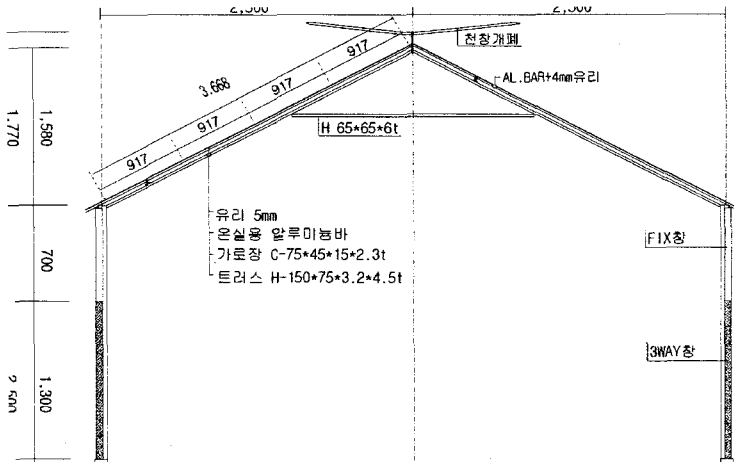
자갈축열 태양열온실의 기본원리는 주간에 일사로 데워진 온실내부공기를 공기순환팬을 이용하여 자갈축열층사이로 순환시켜 자갈층에 축열된 에너지를 난방에 이용하는 것이므로 축열층 사이로 충분한 공기순환이 이루어져야 한다. 그리고, 여름철 난방기간동안에는 고온의 온실 내부공기를 자갈축열층으로 유입시키고 축열층내의 찬 공기를 온실내로 공급함으로써 난방효과를 얻을 수 있다. 하지만, 주간에는 고온다습한 온실 내부공기를 자갈축열층으로 순환시키므로 축열층 내부환경은 고온다습하게 되므로 야간에는 자갈축열층 공기를 외부로 배출시킬 필요가 있다. 따라서, 냉·난방효과를 고려한 자갈축열 태양열 온실의 개발과 설계자료 제시를 위해 다음과 같이 실험용 자갈축열 태양열 온실을 제작하였다. 자갈축열 태양열 온실시스템은 상부구조와 하부구조를 나누어 진다.

제2절 자갈축열 태양열온실의 상부구조

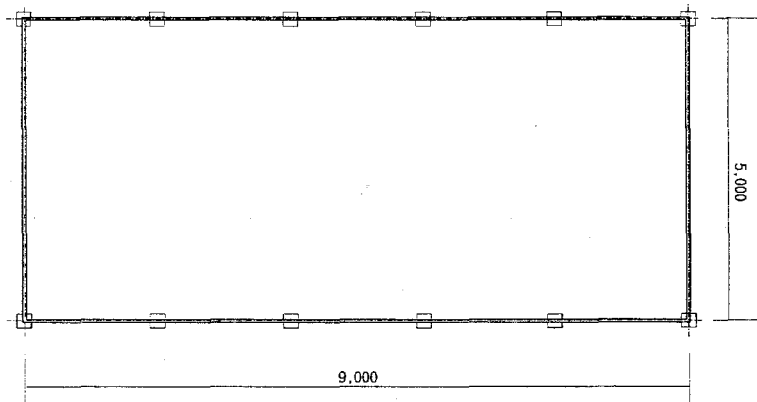
1. 온실구조

실험용 자갈축열 태양열온실시스템은 경북대학교내 부속농장에 건축하였으며 자갈축열 태양열 온실의 상부구조에 해당하는 온실은 일반적인 온실형태로 그림 4-1에서 보는 바와 같이 폭(7m)×길이(11m)×동고(4.1m)의 양지붕형 유리

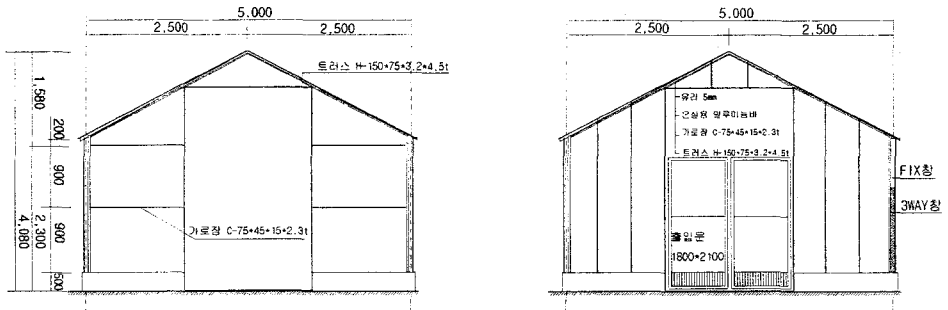
온실이다. 건설방위는 동서동이며 천창과 3-way방식의 측창이 설치되어 있으며 내부에는 차광율 55%인 알루미늄 스크린과 보온커튼이 설치되어 있다. 그리고, 천창, 차광재 및 보온재는 자동으로 개폐가 가능하며 온실바닥은 콘크리트로 마감되어 있다.



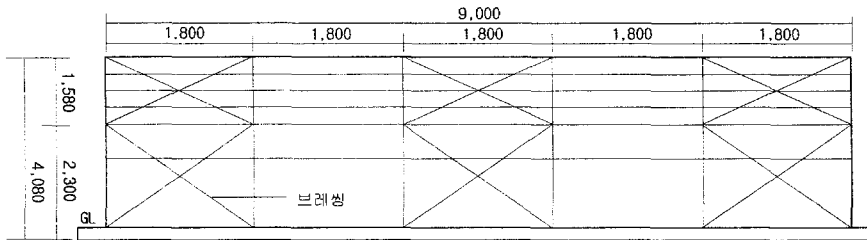
(a) 주단면도



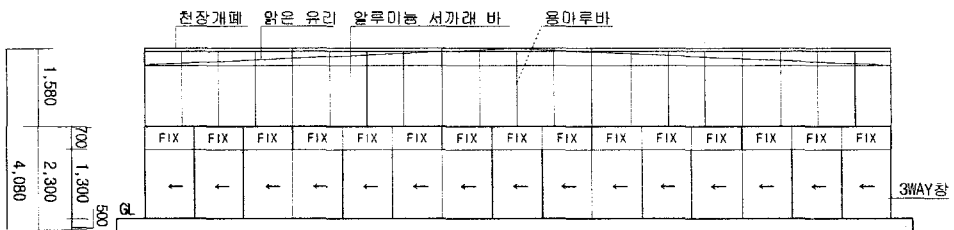
(b) 기초평면도



(c) 전·후면 골조도 및 정·배면도



(d) 좌·우측 골조도



(e) 좌·우 측면도

그림 4-1. 자갈축열 태양열온실의 구조도

2. 실험용 자갈축열 태양열온실의 환기팬 적정 용량 결정

온실에 있어 환기팬의 적정 용량은 필요환기량과 자연환기량의 차로써 산정할 수 있다. 따라서, 실험용 자갈축열 태양열온실의 환기방식을 결정하기 위해서는 아래와 같이 이상적인 환기곡선을 작성하여야 한다.

가. 필요환기량 산정

필요환기량은 각종 환경기준치를 만족시키기 위한 환기량으로써, 실내온도, 오염물질농도, 풍속 등을 일정하게 유지하는데 필요한 환기량을 말한다. 따라서 실제환기량이 필요환기량에 못미칠 경우는 다양한 방법으로 환기량을 증가시켜야 한다. 예를 들면, 작물의 생육적정온도까지 온실내 기온을 저하시키거나 실내의 탄산가스 농도를 높이기 위해서 창문을 개폐하거나 환기팬의 작동하는 경우가 있다. 이상적인 환기를 위해서는 모든 환경요인의 필요환기량을 만족시킬 수 있는 이상 환기곡선을 작성하여 이것에 근거하여 환기를 실시하여야 한다.

1) 온도제어를 위한 필요환기량

온도제어를 위한 필요환기량은 정도에 따라서 여러 방법으로 계산할 수 있으며, 일사량이 존재하는 온실에 대한 개략적인 계산 방법은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ 환기량 : } Q \approx \frac{1}{C_v} \left[\frac{\alpha t S (1-f) A_f}{\Delta t} - k A_c \right]$$

$$\textcircled{2} \text{ 환기율} : q \approx \frac{1}{C_v} \left[\frac{\alpha \tau S (1-f)}{\Delta t} - k \frac{A_c}{A_f} \right]$$

여기서, C_v : 용적비열(정압비열 \times 밀도 $\approx 0.3 \text{ kcal/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$)

α : 수열면적보정율(1.0~1.3)

τ : 일사투과율(여름철 0.65)

S : 실외수평면일사량(여름철 약 $12 \text{ kcal/m}^2/\text{min}$)

f : 순복사열의 증발잠열에의 변환비(0.5~0.65)

Δt : 내·외기온차,

k : 피복면 열관류율(약 $0.08 \text{ kcal/m}^2\text{min}^\circ\text{C}$)

A_c : 피복재면적

2) 탄산가스제어를 위한 필요환기량

원예시설내의 탄산가스농도를 일정하게 유지하기 위하여 필요한 환기량은 다음과 같이 구할 수 있다. 단위를 ppm으로 고치고, 순광합성 속도 및 토양면의 탄산가스 발생속도를 고려하면 환기율은 다음과 같다.

$$q = \frac{8.48(P_n - S_i)}{C_0 - C_i} \quad (4-1)$$

여기서, P_n : 단위면적당 순광합성속도($\text{g/m}^2\text{hr}$)

S_i : 토양면의 탄산가스발생속도($\text{g/m}^2\text{hr}$)

C_0, C_i : 실외 및 실내의 탄산가스농도(ppm)

3) 습도제어를 위한 필요환기량

원예시설내의 습도를 일정하게 유지하기 위하여 필요한 환기량은 다음과 같이

구할 수 있다. 수분 발생량을 단위면적당에 대해 계산한 환기율은 다음 식과 같다.

$$q = \frac{W}{\gamma(x_i - x_o)} = \frac{W}{1.2(x_i - x_o)} \quad (4-2)$$

여기서, W : 수분발생량(kg/m²/h)

x_i, x_o : 실내외 절대습도(kg'/kg)

γ : 공기의 비중(1.2 kg'/m³)

4) 적정 필요 환기량

이상환기곡선에서 고려할 사항은 온도평형을 위한 환기량, 수분평형을 위한 환기량, 탄산가스 평형을 위한 최저환기량 및 오염물질제거를 위한 환기량 등을 열거할 수 있다. 이론적으로 열거된 필요환기량을 계산하여 모든 필요 환기량을 만족하는 최대환기량을 설정하여야 한다(그림 4-2).

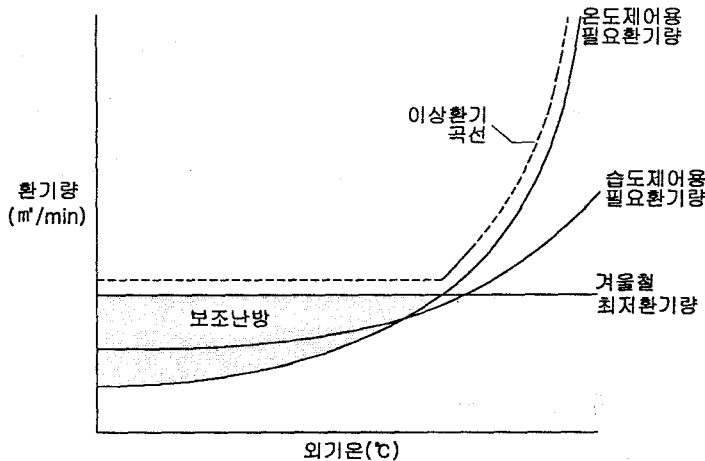


그림 4-2. 필요환기량의 결정

나. 실험용 자갈축열 태양열온실의 환기방식의 결정

실험온실의 필요환기량과 자연환기량을 산정한 결과, 자연환기량이 필요환기량보다 크게 나타나 측창과 천창을 통한 자연환기를 최대한 이용할 수 있으므로 환기팬의 설치는 불필요한 것으로 판단된다.

3. 공기순환시스템

자갈축열 태양열온실의 축·방열은 팬에 의한 강제대류에 의해 이루어진다. 그림 4-3 및 그림 4-5에서 보는 바와 같이, 온실내부에는 자갈축열층과 공기순환이 될 수 있도록 내부공기 유·출입시스템이 설치되어 있으며 온실외부에는 외부공기가 자갈축열층으로 순환될 수 있도록 외기 유·출입시스템이 설치되어 있다.

온실내부에 설치되어 있는 공기순환시스템은 유·출입팬으로 구성되어 있으며 유입구에는 온실내의 더운 공기를 자갈축열층으로 유입시킬 수 있도록 높이 조절이 가능한 유입덕트와 팬이 설치되어 있으며 팬의 공기흐름을 제어할 수 있는 개폐밸브가 부착되어 있다. 그리고, 유출구에는 덕트와 개폐밸브가 설치되어 있다.

순환팬의 용량은 설계외기온과 온실내부의 설정온도차에 의한 최대난방부하량과 관계되는 것으로 식 (4-3), 식 (4-4) 및 식 (4-5)에 의해서 산정할 수 있다.

$$Q = \{A_g(H_t + H_{ven}) + A_s \cdot H_{so}\}f_w \quad (4-3)$$

여기서, Q : 난방에 필요한 열량

A_g : 온실피복면적 (m^2)

H_t : 관류열량 = $h_t(\theta_{in} - \theta_{out})(1 - f_r)$

h_t : 열관류율 ($=5.0\text{Kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

θ_{in} : 실내기온 ($=10\text{C}$)

θ_{out} : 실외기온 ($=-5\text{C}$)

f_r : 내부피복재의 열감소율

H_{ven} : 환기전열량

A_s : 온실바닥면적 (m^2)

H_{so} : 지중전열량 ($=-15\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$) (무시)

f_w : 풍속보정계수

위 식에서 $H_{ven}=0$, $f_w=1$, $f_r=0.5$, $H_{so}=0$ 로 가정하면 식 (4-3)은 식 (4-4)로 요약할 수 있다.

$$Q = A_g \cdot h_t (\theta_{in} - \theta_{out}) \times 0.5 \quad (4-4)$$

온실의 난방부하량을 고려한 순환팬 용량은 덕트의 풍량을 산정하는 식 (4-5)에 의하여 구할 수 있다.

$$Q_f = \frac{H_s}{C_p \times \gamma \times 60 \times \Delta T} \times k \quad (4-5)$$

여기서, C_p = 공기의 정압비열 ($\approx 0.24\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{C}$)

γ = 공기의 비중량 ($\approx 1.2\text{kg}/\text{m}^3$)

ΔT = 실온과 취출공기의 온도차 ($T_{in}-T_{out}$)

k = 할증계수 (누설이나 열손실에 의한 것= $1.05\sim 1.1$)

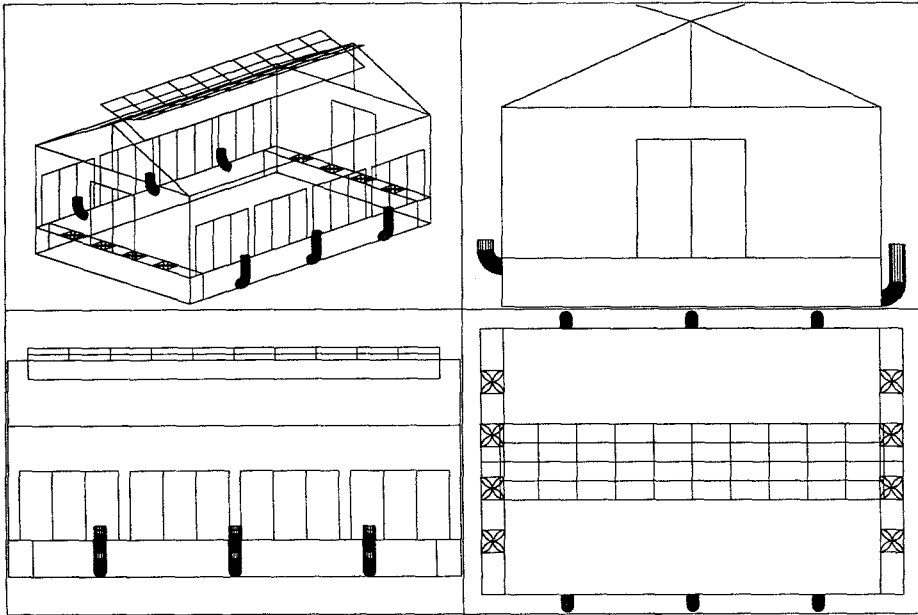
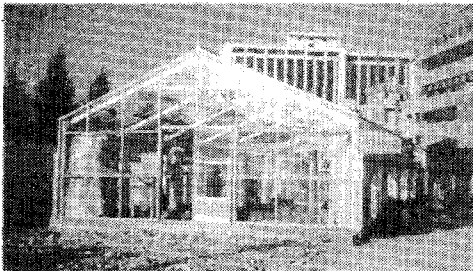


그림 4-3. 자갈축열 태양열 온실의 개략도



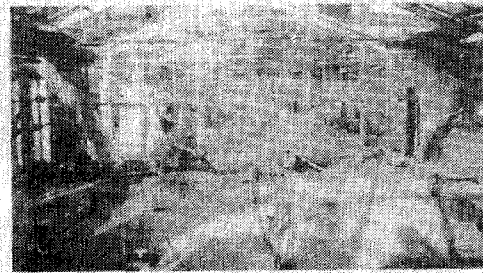
(a) 자갈축열 태양열 온실



(b) 외기 유입구 및 배기팬



(c) 온실 내부공기 유입구



(d) 자갈축열층 내부공기 유출구

그림 4-4. 자갈축열 태양열온실 전경

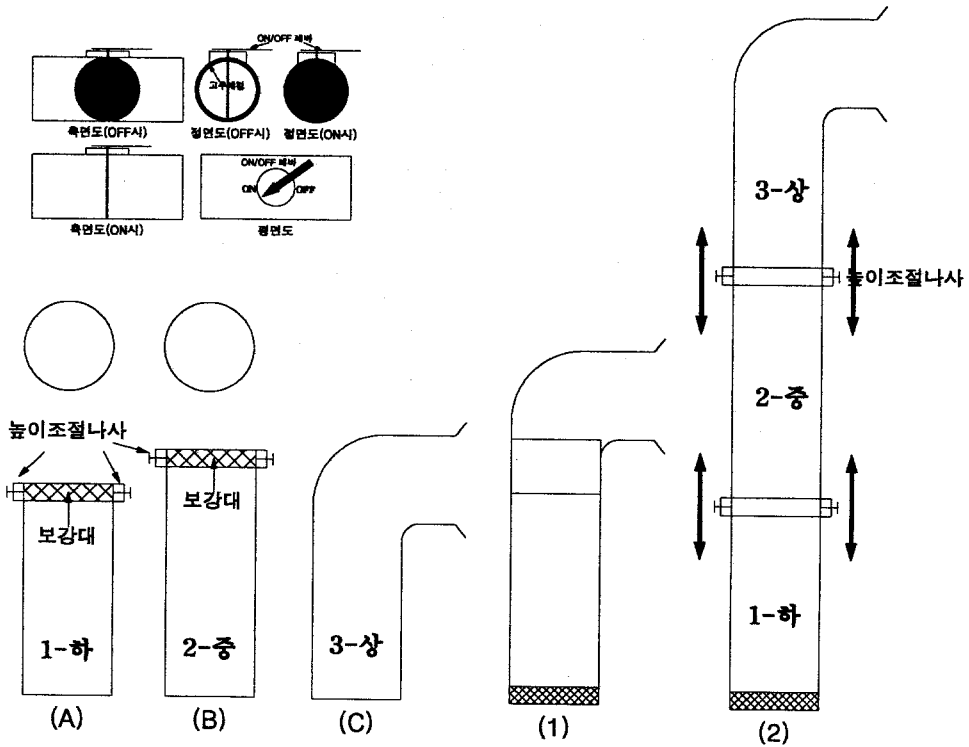


그림 4-5. 자갈축열태양열온실의 공기유입 덕트 및 개폐밸브 상세도

제3절 자갈축열 태양열온실의 하부구조

1. 모의축열층을 이용한 축열 자갈층의 적정 두께 결정

축열층의 필요축열량은 주로 설계외기온에 따른 온실내부 설정온도에 의해 결정된다. 문헌에 의하면 자갈의 크기에 관계없이 유입되는 더운 공기의 유량이 증가할수록 축열시간이 빠르고, 순환공기의 유동속도가 일정한 경우에는 축열재

의 공극율이 작을수록 축열량이 높은 것으로 나타나 있다. 이러한 결과는 공극율이 작을수록 축열용량이 증가하여 축열량이 높게 나타나는 것으로 자갈층의 두께는 축열시간, 순환팬의 유속 및 축열량에 따라 달라지며 초기설치비에 큰 영향을 주기 때문에 신중히 결정하여야 한다. 따라서, 모의 축열층을 이용한 이론적인 해석을 수행하였다.

이론적 해석은 폭 5m×길이 9m의 모의축열층에 깊이를 0.3m에서 1.0m까지 0.1m 만큼 변화시켜 자갈층의 온도변화와 축열시간에 따른 축열량을 산정하였다. 이때 유입온도는 30℃의 등온상태로 가정하였으며, 초기축열층내의 자갈온도는 표 4-1을 참고하여 5.3℃로 하였다. 그리고, 순환팬의 용량은 75m³/min, 축열자갈층의 공극율 ϵ_v 는 0.43으로 가정하여 축열시간에 따른 자갈층의 온도와 축열량의 변화를 분석하였으며 분석결과는 그림 4-6 및 그림 4-7과 같다.

표 4-1. 대구지역의 난방설계용 지중온도

구분	지표면 온도(℃)		불역층온도(℃) ($T_{min}+T_{max}$)/2	지 중 온 도(℃)					
	최저 T_{min}	최고 (T_{max})		지표면에서 땅속깊이(m)					
				0.3	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0
대구	-0.2	29.2	14.5	2.1	3.5	7.0	10.4	13.2	15.6

※ 한국기후표 제1권 중앙기상대, 1982

그림 4-6은 축열시간에 따른 축열층내 자갈의 온도변화를 도시한 것으로, 유입유체온도가 30℃의 등온상태이며 동일한 면적(45m²)에 대하여 축열층 두께를 0.3m~1.0m로 변화시켰을 때 축열층내의 온도변화를 분석한 결과이다. 축열층의 두께가 감소할수록 유입유체온도에 도달하는 시간이 감소함을 알 수가 있었으며, 이는 축열층의 두께가 감소할수록 축열층의 축열용량이 감소함을 의미한다.

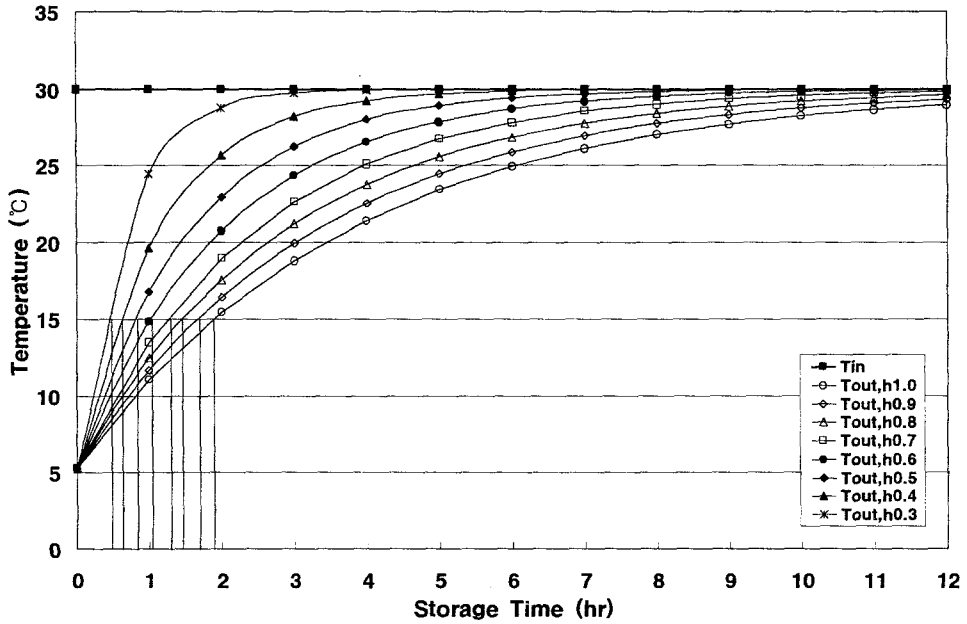


그림 4-6. 축열시간에 따른 축열층내 자갈의 온도변화

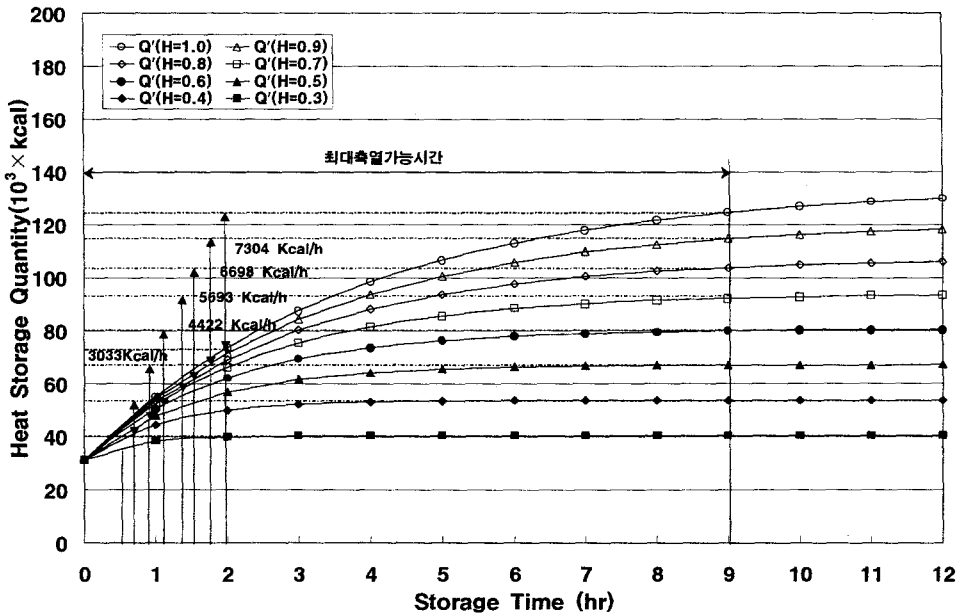


그림 4-7. 축열시간에 따른 축열 자갈층의 축열량 변화

그림 4-7은 자갈축열층의 깊이별 축열시간에 따른 축열 자갈층의 축열량을 나타낸 것으로서 축열층의 두께가 증가할수록 축열용량이 커짐을 알 수가 있었다. 또한 축열층의 두께가 너무 적을 경우 단시간에 최대축열량에 도달하여 최대축열가능시간대에 더 이상의 축열이 일어나지 않았다. 따라서, 축열가능시간을 고려하여 적절한 축열층의 깊이를 결정하여야 한다. 축열초기에는 축열속도가 빠르게 진행되다가 이정한 시간이 경과한 후에는 완만하게 축열이 일어남을 알 수 있다. 그림 4-6과 그림 4-7를 이용하여 축열 자갈층의 적정두께를 산정할 수가 있으며 축열 자갈층의 적정두께를 결정하기 위한 작업순서는 다음과 같다. 먼저, 그림 4-6에서 온실내부 설정온도에 도달하는 축열시간을 찾은 후 그림 4-7에서 온실내부 설정온도에 도달하는 축열시간이후의 축열량을 산정하여 필요한방부하량을 고려하여 축열 자갈층의 두께를 결정하게 된다. 예를 들어 바닥면적이 $45\text{m}^2(5\text{m} \times 9\text{m})$, 축벽높이가 2.5m, 동고가 3.7m인 유리온실에 대하여 난방설계의기온이 -10°C , 온실내부 설정온도가 15°C 인 경우의 난방부하량은 6,663 kcal/hr가 된다. 따라서, 그림 4-7에서 난방부하량을 고려하여 50%의 보조열원으로서 축열 자갈층의 두께를 결정하면 최소 50cm이상이 된다. 실제 자갈 축열온실의 경우에는 자갈입자의 형상, 유입유체온도, 순환팬의 용량 및 자갈의 공극율 등을 고려하여 축열용량의 여유값 $\alpha(1.1 \sim 1.15)$ 를 곱하면 58cm이상이 되어야 할 것으로 판단된다. 하지만, 동일한 제원의 자갈축열층에 대해서도 유입유체의 유동속도가 변화하면 축열시간에 따른 축열량의 변화가 예상되므로, 실험용 자갈축열 태양열온실시스템의 자갈축열층 깊이를 80cm로 하여 공기순환팬의 용량을 다양하게 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2. 단열재 및 콘크리트의 적정두께 결정

가. 축열층의 단열재 두께 결정

1) 온도경사도에 의한 두께 결정

축열층의 주변온도와의 온도차로 인한 열손실이 발생되면 축열효율이 떨어지기 때문에 축열효율을 극대화하기 위해서는 축열층의 외벽과 온실바닥에 대한 단열처리가 필요하다. 단열처리와 관련하여 단열재 및 콘크리트 바닥의 적정두께를 결정하기 위하여 그림 4-8과 같이 열흐름 모식도를 작성하였다.

일반적으로 콘크리트는 많은 량의 열을 흡수할 수 있으나 열전달을 억제하는 능력은 극히 작으며, 반면에 유리섬유나 폴리스틸렌 등은 열전도를 억제하는 능력은 매우 크나 열에너지를 흡수하거나 열전달을 지연시키는 능력은 극히 작아 단열재로 많이 사용된다. 따라서 단열재로는 저렴하고 단열성능이 뛰어난 폴리스틸렌 폼을 선정하였다. 단열재 두께 산정을 위하여 바닥 단면에 대한 온도경사도를 작성하였다.

벽체나 바닥 단면에 대한 온도경사도는 벽을 통한 열의 이동현상을 나타낼 뿐만 아니라 사용된 단열재의 단열효과를 명확히 보여준다. 따라서 축열층과 온실바닥 두께에 따른 온도경사도를 구한 결과는 표 4-2, 표 4-3, 그림 4-9 및 그림 4-10과 같다.

자갈축열층의 내외부 온도차에 의한 온도경사도에서 알 수 있듯이 자갈축열층의 단열재에 의한 온도변화는 급격하게 일어나는 반면에 콘크리트에 의한 온도경사는 완만하게 나타났다. 따라서, 축열층의 열손실을 최소화하기 위해서는

콘크리트보다는 단열재의 두께를 증가시켜야 됨을 알 수 있었다. 그러나, 온도 경사도에서 단열재의 두께 변화에 따른 온도경사도의 뚜렷한 차이점을 찾을 수가 없었다.

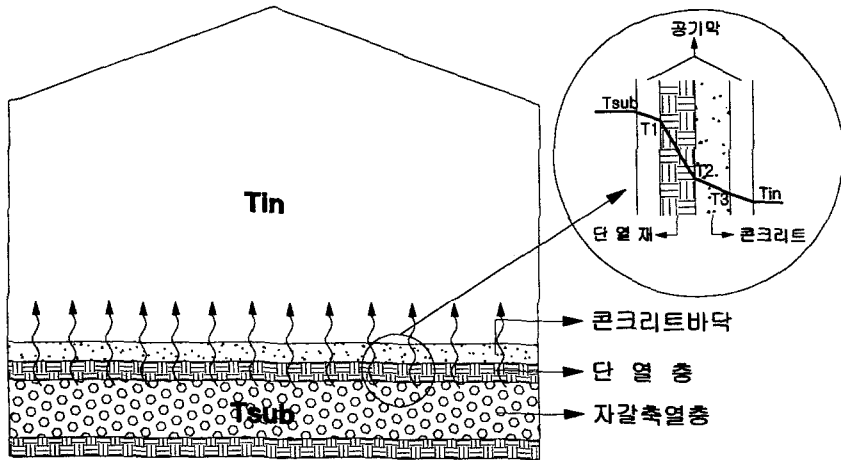


그림 4-8. 단열재 및 콘크리트 바닥 두께 결정을 위한 열흐름 모식도

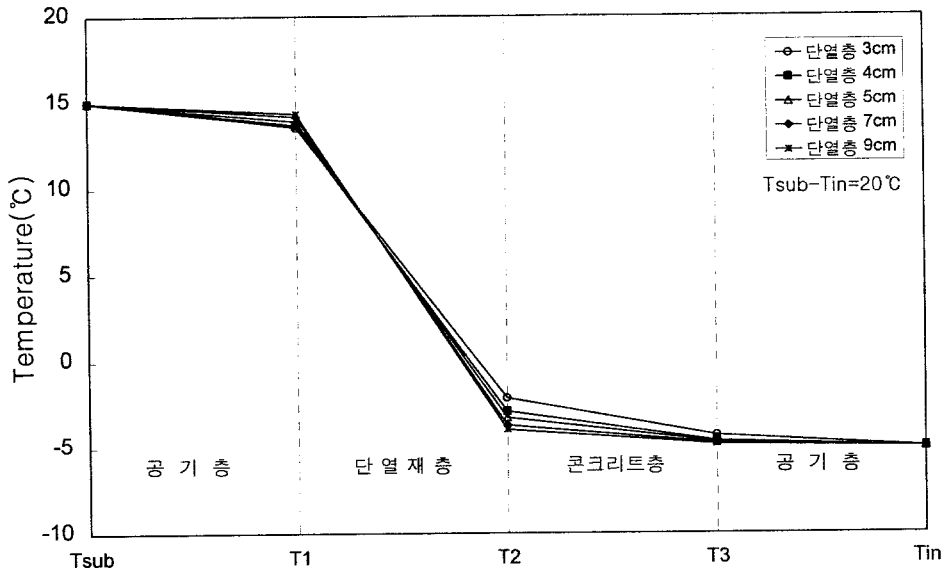
표 4-2. 온실바닥을 통한 온도경사 (°C)

폴리스틸렌 두께(cm)	콘크리트 두께(cm)	축열층 및 온실바닥면 공기막 무시		전도열전달만 고려	
		$T_{sub}-T_{in}=20^{\circ}C$	$T_{sub}-T_{in}=25^{\circ}C$	$T_{sub}-T_{in}=20^{\circ}C$	$T_{sub}-T_{in}=25^{\circ}C$
		T_1	T_1	T_1	T_1
4	5	-4.0	-3.7	-4.3	-4.2
	7	-3.6	-3.3	-4.1	-3.9
	9	-3.3	-2.8	-3.8	-3.6
	11	-2.9	-2.4	-3.6	-3.3
	13	-2.6	-2.0	-3.4	-3.0
	15	-2.3	-1.6	-3.2	-2.7
5	5	-4.2	-4.0	-4.5	-4.3
	7	-3.9	-3.6	-4.3	-4.1
	9	-3.6	-3.2	-4.1	-3.8
	11	-3.3	-2.9	-3.9	-3.6
	13	-3.0	-2.5	-3.7	-3.4
	15	-2.7	-2.2	-3.5	-3.1
6	5	-4.3	-4.1	-4.6	-4.4
	7	-4.1	-3.8	-4.4	-4.2
	9	-3.8	-3.5	-4.2	-4.0
	11	-3.6	-3.2	-4.1	-3.8
	13	-3.3	-2.9	-3.9	-3.6
	15	-3.1	-2.6	-3.7	-3.4
7	5	-4.4	-4.3	-4.6	-4.5
	7	-4.2	-4.0	-4.5	-4.3
	9	-4.0	-3.7	-4.3	-4.2
	11	-3.8	-3.4	-4.2	-4.0
	13	-3.5	-3.2	-4.0	-3.8
	15	-3.3	-2.9	-3.9	-3.6
8	5	-4.5	-4.4	-4.7	-4.6
	7	-4.3	-4.1	-4.5	-4.4
	9	-4.1	-3.9	-4.4	-4.3
	11	-3.9	-3.6	-4.3	-4.1
	13	-3.7	-3.4	-4.2	-3.9
	15	-3.5	-3.2	-4.0	-3.8
9	5	-4.5	-4.4	-4.7	-4.6
	7	-4.4	-4.2	-4.6	-4.5
	9	-4.2	-4.0	-4.5	-4.3
	11	-4.0	-3.8	-4.4	-4.2
	13	-3.8	-3.6	-4.2	-4.1
	15	-3.7	-3.4	-4.1	-3.9
10	5	-4.6	-4.5	-4.7	-4.7
	7	-4.4	-4.3	-4.6	-4.5
	9	-4.3	-4.1	-4.5	-4.4
	11	-4.1	-3.9	-4.4	-4.3
	13	-4.0	-3.7	-4.3	-4.1
	15	-3.8	-3.5	-4.2	-4.0

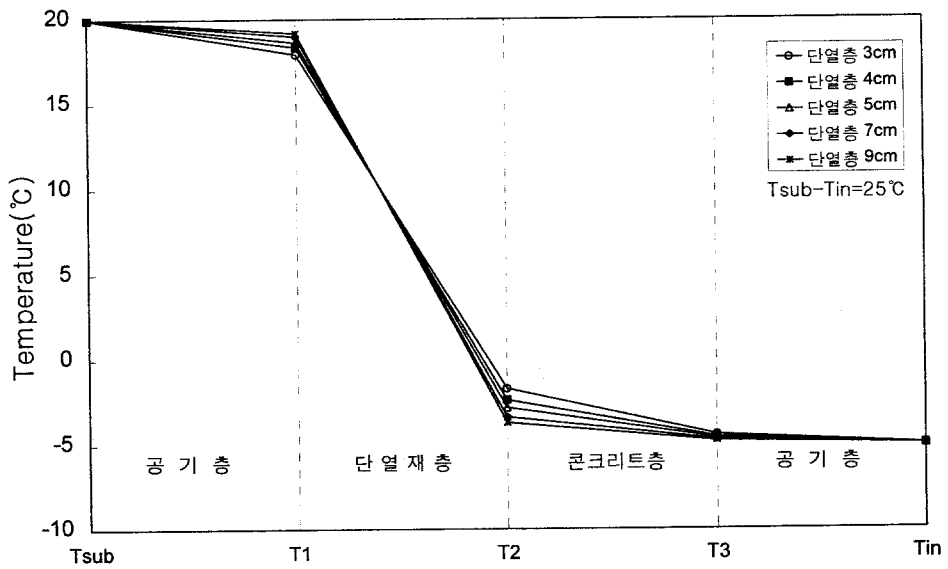
폴리스틸렌 두께(cm)	콘크리트 두께(cm)	실 내 외 공 기 막 고 려					
		$T_{sub} - T_{in} = 20^{\circ}C$			$T_{sub} - T_{in} = 25^{\circ}C$		
		T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
4	5	13.6	-3.7	-4.6	18.3	-3.4	-4.5
	7	13.6	-3.4	-4.6	18.3	-3.0	-4.5
	9	13.7	-3.0	-4.6	18.3	-2.6	-4.5
	11	13.7	-2.7	-4.6	18.4	-2.2	-4.6
	13	13.7	-2.4	-4.7	18.4	-1.8	-4.6
5	15	13.7	-2.1	-4.7	18.4	-1.4	-4.6
	5	13.9	-3.9	-4.7	18.6	-3.7	-4.6
	7	13.9	-3.7	-4.7	18.6	-3.3	-4.6
	9	13.9	-3.4	-4.7	18.6	-3.0	-4.6
	11	13.9	-3.1	-4.7	18.6	-2.6	-4.6
6	13	13.9	-2.9	-4.7	18.7	-2.3	-4.6
	15	13.9	-2.6	-4.7	18.7	-2.0	-4.6
	5	14.0	-4.1	-4.7	18.8	-3.9	-4.7
	7	14.1	-3.9	-4.7	18.8	-3.6	-4.7
	9	14.1	-3.6	-4.7	18.8	-3.3	-4.7
7	11	14.1	-3.4	-4.7	18.8	-3.0	-4.7
	13	14.1	-3.2	-4.8	18.9	-2.7	-4.7
	15	14.1	-2.9	-4.8	18.9	-2.4	-4.7
	5	14.2	-4.2	-4.8	19.0	-4.0	-4.7
	7	14.2	-4.0	-4.8	19.0	-3.8	-4.7
8	9	14.2	-3.8	-4.8	19.0	-3.5	-4.7
	11	14.2	-3.6	-4.8	19.0	-3.2	-4.7
	13	14.2	-3.4	-4.8	19.0	-3.0	-4.7
	15	14.2	-3.2	-4.8	19.0	-2.8	-4.7
	5	14.3	-4.3	-4.8	19.1	-4.1	-4.7
9	7	14.3	-4.1	-4.8	19.1	-3.9	-4.8
	9	14.3	-3.9	-4.8	19.1	-3.7	-4.8
	11	14.3	-3.8	-4.8	19.1	-3.4	-4.8
	13	14.3	-3.6	-4.8	19.1	-3.2	-4.8
	15	14.3	-3.4	-4.8	19.1	-3.0	-4.8
10	5	14.3	-4.4	-4.8	19.2	-4.2	-4.8
	7	14.3	-4.2	-4.8	19.2	-4.0	-4.8
	9	14.4	-4.0	-4.8	19.2	-3.8	-4.8
	11	14.4	-3.9	-4.8	19.2	-3.6	-4.8
	13	14.4	-3.7	-4.8	19.2	-3.4	-4.8
10	15	14.4	-3.6	-4.8	19.2	-3.2	-4.8
	5	14.4	-4.4	-4.8	19.3	-4.3	-4.8
	7	14.4	-4.3	-4.8	19.3	-4.1	-4.8
	9	14.4	-4.1	-4.8	19.3	-3.9	-4.8
	11	14.4	-4.0	-4.8	19.3	-3.7	-4.8
10	13	14.4	-3.8	-4.8	19.3	-3.5	-4.8
	15	14.4	-3.7	-4.8	19.3	-3.4	-4.8

표 4-3. 콘크리트 바닥 및 단열재를 통한 열손실량 (kcal/hr)

폴리스틸렌 두께(cm)	콘크리트 두께(cm)	공기막무시		공기막고려		전도열전달	
		$T_{sub}-T_{in}=20^{\circ}\text{C}$	$T_a=25^{\circ}\text{C}$	$T_a=20^{\circ}\text{C}$	$T_a=25^{\circ}\text{C}$	$T_a=20^{\circ}\text{C}$	$T_a=25^{\circ}\text{C}$
4	5	11.8	14.7	10.8	13.4	15.8	19.8
	7	11.6	14.4	10.6	13.2	15.6	19.5
	9	11.3	14.2	10.4	13.0	15.4	19.2
	11	11.1	13.9	10.2	12.7	15.2	19.0
	13	10.9	13.6	10.0	12.5	15.0	18.8
	15	10.7	13.4	9.8	12.3	14.8	18.5
5	5	9.5	11.9	8.8	11.0	12.7	15.9
	7	9.4	11.7	8.7	10.9	12.6	15.7
	9	9.2	11.5	8.6	10.7	12.5	15.6
	11	9.1	11.4	8.5	10.6	12.3	15.4
	13	8.9	11.2	8.3	10.4	12.2	15.3
	15	8.8	11.0	8.2	10.3	12.1	15.1
6	5	8.0	10.0	7.5	9.4	10.7	13.3
	7	7.9	9.9	7.4	9.3	10.6	13.2
	9	7.8	9.7	7.3	9.1	10.5	13.1
	11	7.7	9.6	7.2	9.0	10.4	13.0
	13	7.6	9.5	7.1	8.9	10.3	12.9
	15	7.5	9.4	7.1	8.8	10.2	12.8
7	5	6.9	8.6	6.5	8.1	9.2	11.4
	7	6.8	8.5	6.4	8.1	9.1	11.4
	9	6.7	8.4	6.4	8.0	9.0	11.3
	11	6.6	8.3	6.3	7.9	9.0	11.2
	13	6.6	8.2	6.2	7.8	8.9	11.1
	15	6.5	8.1	6.2	7.7	8.8	11.0
8	5	6.0	7.6	5.8	7.2	8.0	10.0
	7	6.0	7.5	5.7	7.1	8.0	10.0
	9	5.9	7.4	5.6	7.1	7.9	9.9
	11	5.9	7.3	5.6	7.0	7.9	9.8
	13	5.8	7.3	5.5	6.9	7.8	9.8
	15	5.7	7.2	5.5	6.9	7.8	9.7
9	5	5.4	6.7	5.2	6.5	7.2	8.9
	7	5.3	6.7	5.1	6.4	7.1	8.9
	9	5.3	6.6	5.1	6.3	7.1	8.8
	11	5.2	6.6	5.0	6.3	7.0	8.8
	13	5.2	6.5	5.0	6.2	7.0	8.7
	15	5.2	6.4	4.9	6.2	6.9	8.7
10	5	4.9	6.1	4.7	5.8	6.4	8.1
	7	4.8	6.0	4.6	5.8	6.4	8.0
	9	4.8	6.0	4.6	5.8	6.4	8.0
	11	4.7	5.9	4.6	5.7	6.3	7.9
	13	4.7	5.9	4.5	5.7	6.3	7.9
	15	4.7	5.8	4.5	5.6	6.3	7.9

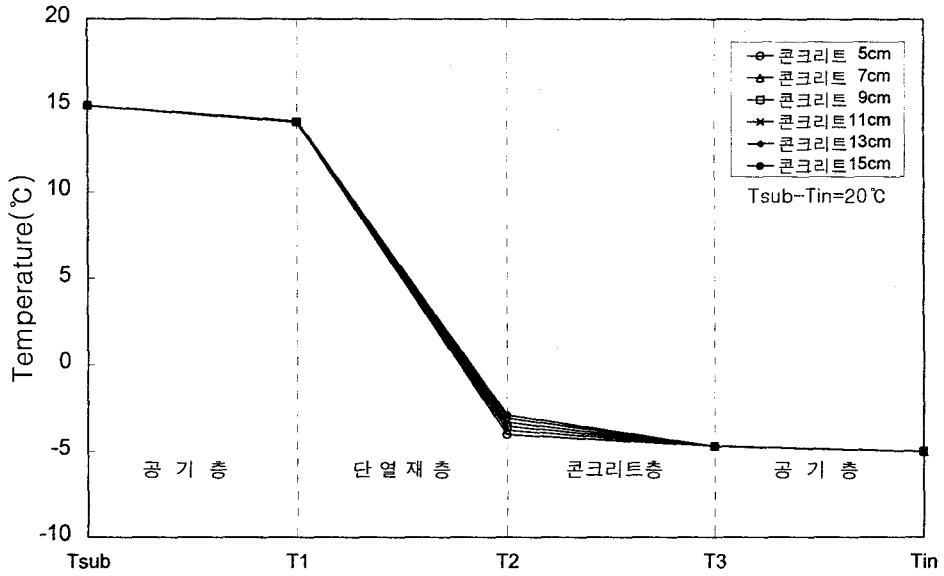


(a) $T_{sub}-T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ 인 경우

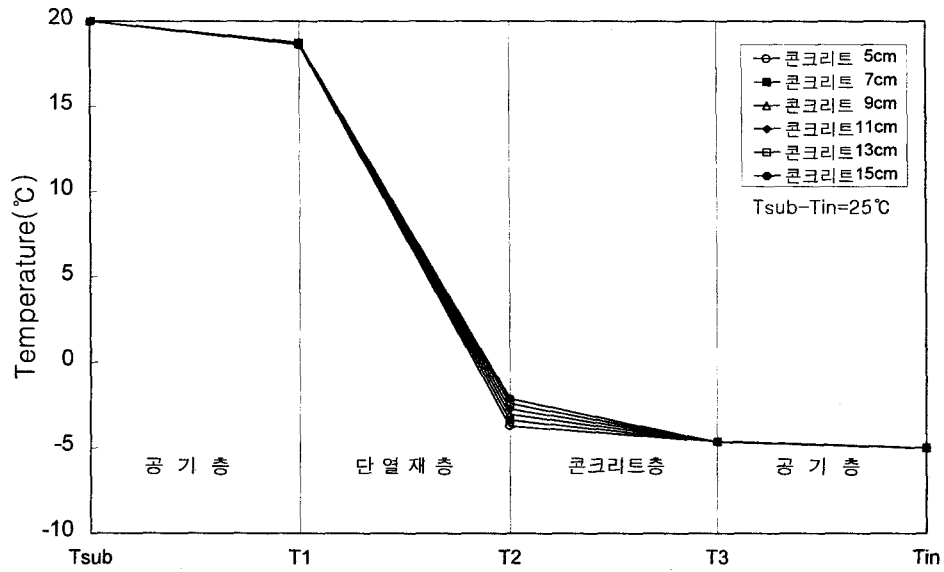


(b) $T_{sub}-T_{in}=25^{\circ}\text{C}$ 인 경우

그림 4-9. 단열층 두께에 따른 온도경사도



(a) $T_{sub}-T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ 인 경우



(b) $T_{sub}-T_{in}=25^{\circ}\text{C}$ 인 경우

그림 4-10. 콘크리트 두께에 따른 온도경사도

2) 자갈축열층 구조에 따른 열전달량

자갈축열층의 벽체, 바닥 및 덮개는 축열층의 열손실을 최소화할 수 있는 구조가 되어야 한다. 따라서, 자갈축열층에는 단열재를 사용하여야 하며 경제성을 고려하여 단열재의 두께를 결정하여야 한다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 단열재는 폴리스틸렌 폼으로서 타 단열재보다는 가격이 저렴하다.

단열재의 두께를 결정하기 위하여 콘크리트 두께별로 폴리스틸렌 폼의 두께를 다양하게 변화시켜 열전달량을 구한 결과는 그림 4-11~ 4-13과 같다.

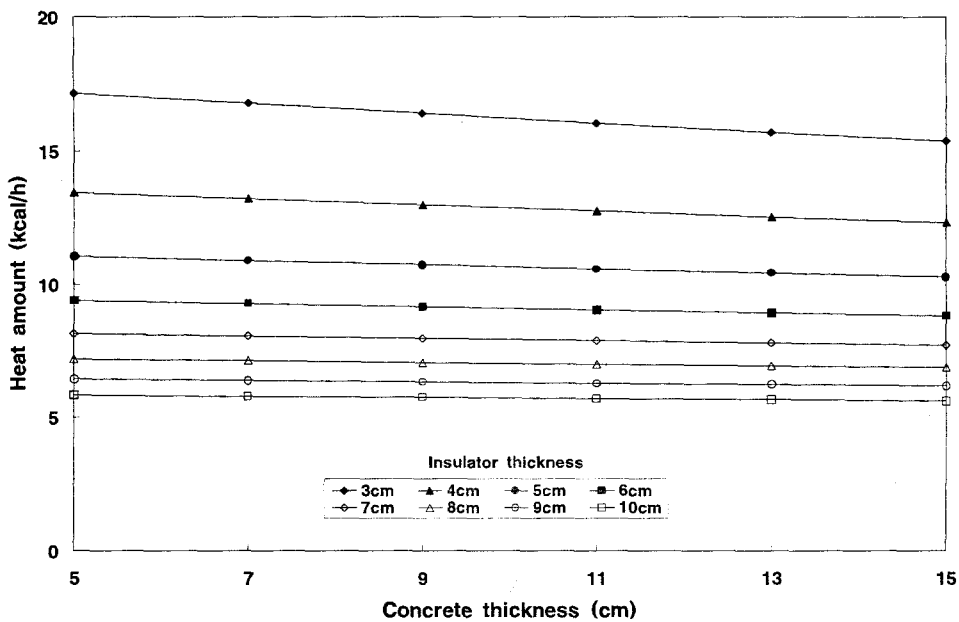


그림 4-11. 자갈축열층 구조 변화에 따른 열전달량 ($T_{sub}-T_{in}=25^{\circ}C$)

그림 4-11은 자갈축열층의 내외온도차를 $25^{\circ}C$ 로 가정하였을 때 벽체구조에 따른 열전달량을 구한 결과로써, 열전달량은 벽체구조에 따라 $5.62 \sim 17.16kcal/hr$ 범위에서 벽체가 두꺼워질수록 감소하는 경향으로 나타났다.

콘크리트의 두께 변화에 따른 열전달 감소량은 0.22~1.80kcal/hr이었으나 단열재 두께 변화에 따른 열전달 감소량은 9.74~11.32kcal/hr로 나타났다.

그림 4-12는 축열층과 온실내부 온도차를 20℃, 25℃로 가정하여 단열재 두께별로 전도전열량을 구한 결과로서, 그림 4-11과 마찬가지로 단열재의 두께가 증가할수록 전열량이 감소함을 알 수 있었다. 또한 단열재 두께가 9cm부터는 전열량의 변화가 완만하게 일어남을 확인할 수 있었다.

그림 4-11~그림 4-12에서 알 수 있듯이 자갈축열층 구조체의 열전달량은 콘크리트 두께보다는 단열재의 두께에 밀접한 영향을 받는 것을 나타냈으며, 단열재의 두께가 증가할수록 열전달량이 감소하였다. 따라서, 온도경사도에서와 같이 콘크리트보다는 폴리스티렌 폼이 축열층의 열손실에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

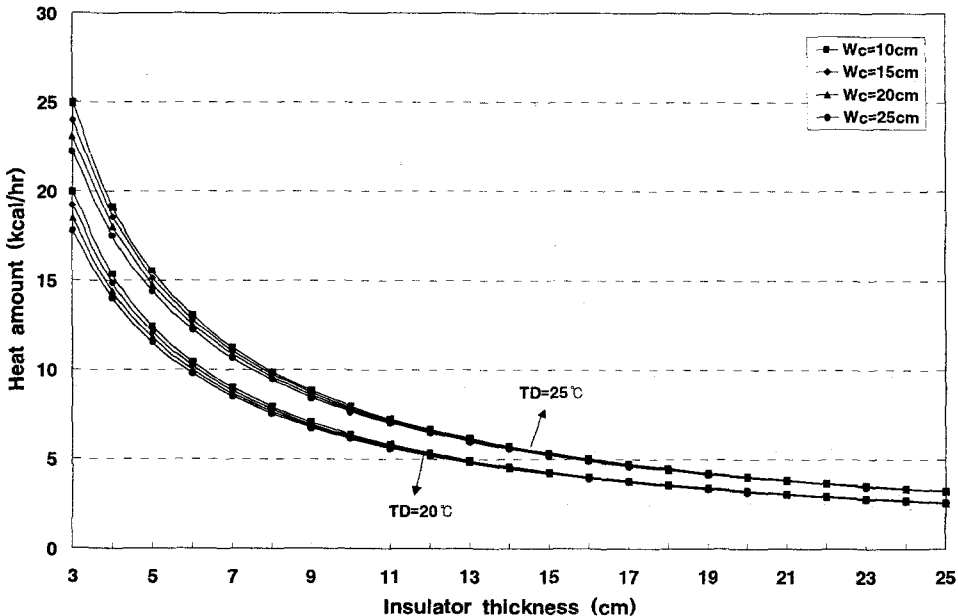
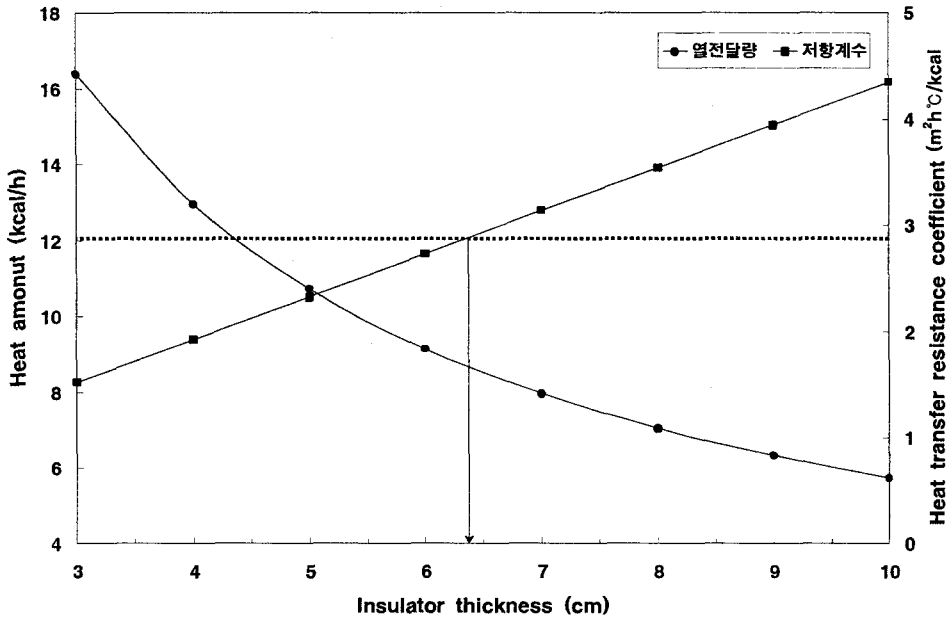


그림 4-12. 단열재 두께별 전도전열량

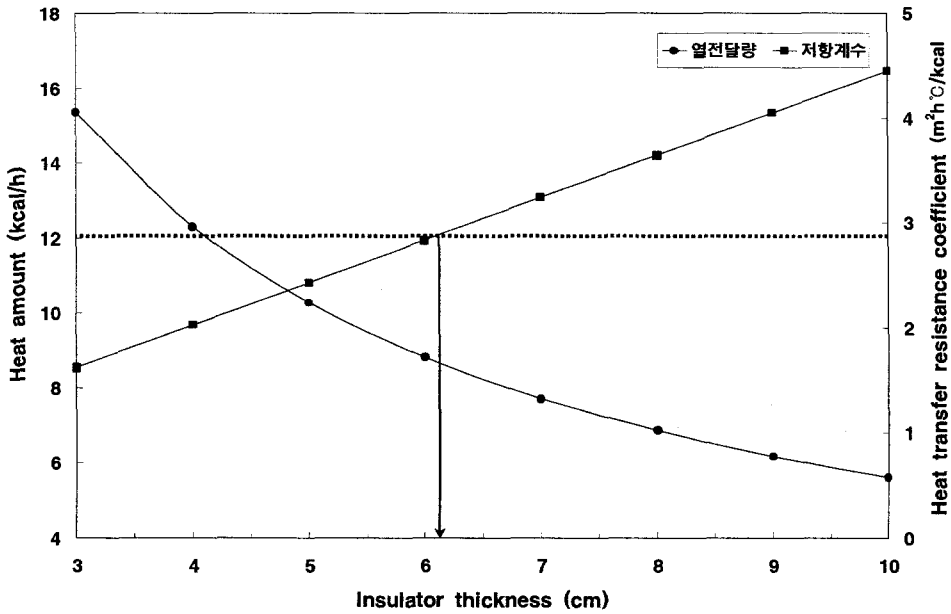
그림 4-13은 자갈축열층의 벽체, 바닥 및 덮개를 9cm, 15cm 콘크리트로 하고 폴리스틸렌 폼의 두께를 최소 3cm에서 1cm씩 변화시켜 축열층과 외부의 열전달량과 열저항계수를 도기한 것이다. 단열재의 두께가 증가할수록 열전달량은 완만하게 감소하는 경향으로 나타났다. 따라서, 단열재 두께가 1cm씩 증가하였을 경우 감소하는 열전달량과 단열재의 구입경비 등을 고려하여 볼 때 축열층의 단열재 두께는 8cm이상으로 결정하면 될 것으로 판단된다.

Walton 등의 연구결과에 의하면, $2.66\text{m} \times 1.12\text{m} \times 0.76\text{m}$ 크기의 자갈축열층에 있어 열손실은 40%이상 발생되며 축열층의 열손실을 최소화하기 위해서는 축열층의 열저항은 최소 $2.88\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ 이상이 되어야 하는 것으로 나타나 있다. 그리고, 자갈축열층의 단열에 있어 중요한 것은 축열층의 체적에 대한 표면적의 비율을 최소화하는 것이 무엇보다 중요하며 동일한 형태의 축열층에 있어서는 축열층의 체적에 대한 표면적이 작을수록 즉, 축열층의 규모가 클수록 축열층의 최소열저항값은 감소하는 것으로 보고하였다.

Walton 등이 제시한 자갈축열층의 최소열저항값을 그림 4-13에서 분석하여 보면, 자갈축열층의 바닥, 덮개 및 벽체의 콘크리트 두께를 9~15cm로 하면 폴리스틸렌 폼의 두께가 6.1~6.4cm가 된다. 따라서, 자갈축열층의 단열은 폴리스틸렌 폼으로 6cm이상으로 형성하면 되는 것으로 나타났으나 시중에 생산되고 있는 폴리스틸렌 폼의 규격을 감안하여 실험용 자갈축열층의 단열재는 두께 10cm인 폴리스틸렌 폼을 결정하였다.



(a) 콘크리트두께 9cm



(b) 콘크리트두께 15cm

그림 4-13. 단열재 두께 변화에 따른 열저항계수 및 열전달량

나. 자갈축열층의 콘크리트 두께 결정을 위한 구조계산

그림 4-11 ~ 4-13에서 보는 바와 같이, 자갈축열층의 바닥, 덮개 및 벽체의 단열성능은 단열재의 두께변화 밀접한 영향을 받는 것으로 나타나, 자갈축열층의 바닥, 덮개 및 벽체는 하중에 대한 구조적 안정성과 시공성을 고려하여 콘크리트의 두께를 결정하여야 할 것으로 판단되어 축열층의 구조적 안정성을 설계 단면에 대하여 검토하였다.

축열층의 구조해석을 위한 축열층 단면은 그림 4-14와 같으며 고려하여야 할 하중은 다음과 같다.

① 사하중 - CASE 1 :

㉞ 상부 SLAB, 내측채움재 ㉞ 벽체 ㉞ 하부 SLAB : 슬래브

② 측벽토압 - CASE 2

③ 수 압 - CASE 3 : 측벽과 하부 슬라브에 작용하는 수압

④ 상면 재하 등분포 활하중 - CASE 4 : 등분포 활하중 $0.5t/m^2$ 으로 한다.

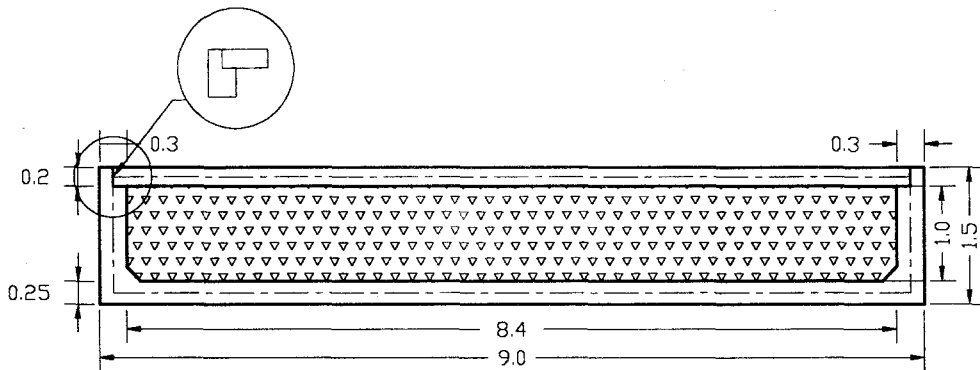


그림 4-14. 자갈축열 온실의 하부구조 단면

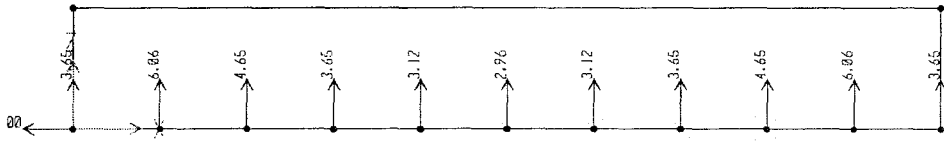
자갈축열층의 구조해석은 SAP2000을 이용하여 수행하였으며, 구조해석 결과는 그림 4-15와 같다. 자세한 구조해석 결과 및 설계자료는 붙임자료에 나타내었다.

3. 자갈축열층의 설계 및 제작

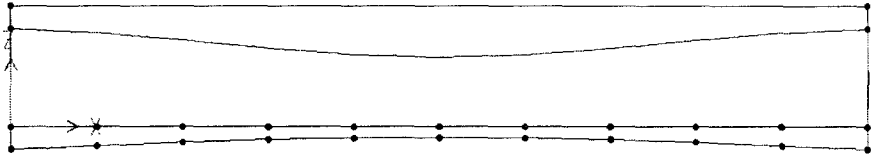
그림 4-16과 그림 4-17은 자갈축열 태양열온실시스템의 하부구조인 자갈축열층의 평면과 단면을 도시한 것이다. 자갈축열층은 온실 내부공기와의 순환을 통해 열을 저장하는 곳으로서, 폭(7m)×길이(11m)×깊이(0.8m)의 규모로 온실하부에 설치되어 있으며 축열재는 10~250mm의 강자갈을 사용하였다.

축열층의 주변온도와의 온도차로 인한 열손실이 발생되면 축열효율이 떨어지기 때문에 축열효율을 극대화하기 위해서는 축열층의 외벽과 온실바닥에 대한 단열처리가 필수적이다. 따라서, 축열층의 벽면, 바닥 및 덮개부위에 스티로폼 100mm로 단열처리를 하였다. 단열재 설치시 유의사항은 단열재와 단열재의 결합이 이루어지는 모서리부분의 단열시공이 중요하므로 단열재와 단열재의 결합이 이루어지는 곳에는 액체 폴리스틸렌 폼을 이용하여 틈새로 인한 열손실을 최소화하였다.

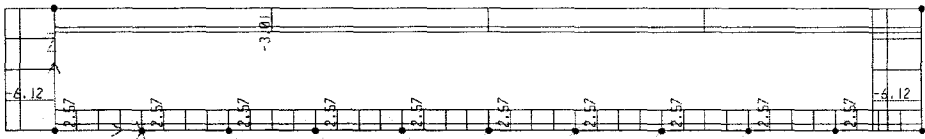
모형자갈축열층에서 알 수 있듯이 축열층에서 발생하는 열손실은 공기순환팬이 설치되어 있는 유출입구에서 많이 발생하므로 공기순환팬이 설치되는 곳과 팬으로 발생하는 열손실을 최소화하기 위해 팬주위의 단열을 위해 팬설치부위에는 액체 폴리스틸렌 폼으로 밀폐하였으며 유출입에 공기의 유출입을 차단할 수 있는 개폐밸브를 부착하였다.



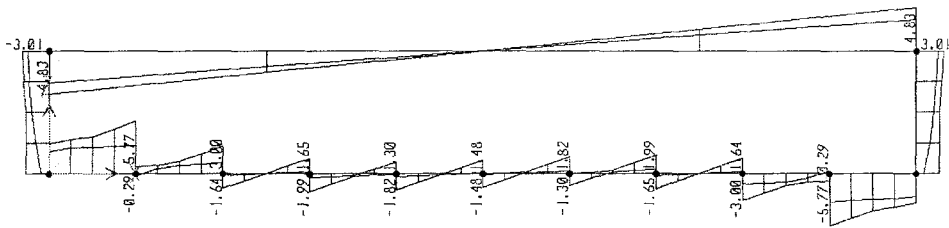
(a) Spring forces



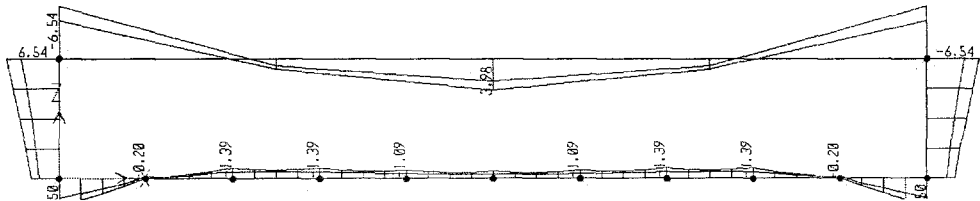
(b) deflection curve



(c) A.F.D.



(d) S.F.D.



(e) B.M.D.

그림 4-15. 축열자층의 구조해석 결과

그리고, 자갈축열층 내로 외부의 습기가 유입되면 자갈의 축열성능을 저하시키므로 자갈축열층의 바닥, 덮개 및 벽체의 외벽과 단열재사이에 폴리에틸렌 필름을 이용하여 방수층을 형성하였으며 자갈축열층내에도 액체방수층을 형성하여 외부의 습기가 유입되지 않도록 하였다(그림 4-18 참조).

그림 4-16에서 보는 바와 같이, 여름철 주간 축냉운전으로 인하여 자갈축열층 내로 유입된 고온다습한 공기를 외부의 공기와 순환시킬 수 있도록 자갈축열층 벽면에 외기 유출입구가 설치되어 있으며 유출구에는 외기 유입을 강제할 수 있는 팬이 부착되어 있다. 그리고, 외기 유출구로 인한 자갈축열층의 열손실을 최소화하기 위해 유출입구에 유리솜으로 단열을 하였으며 외기의 유출입을 제어할 수 있는 개폐밸브가 설치되어 있다.

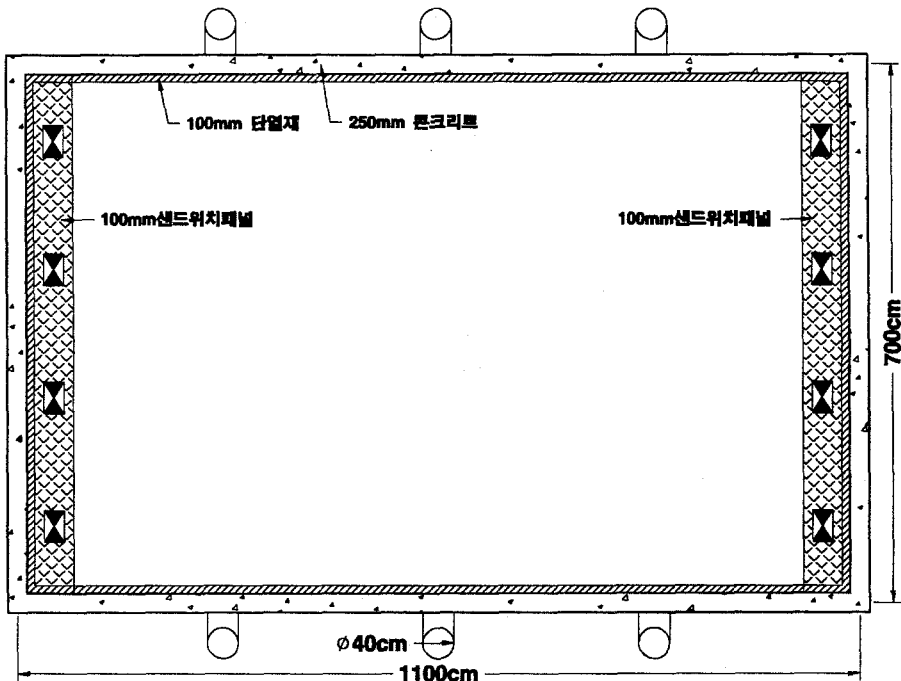
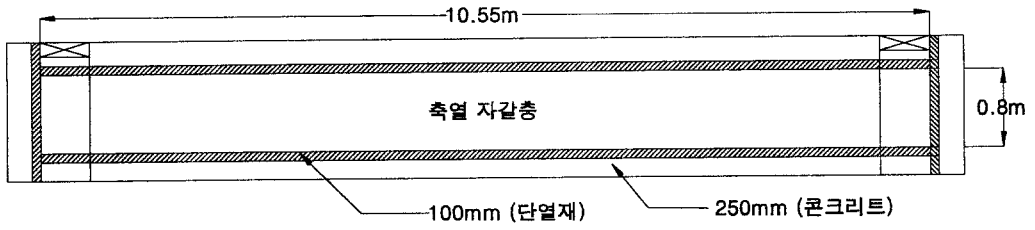
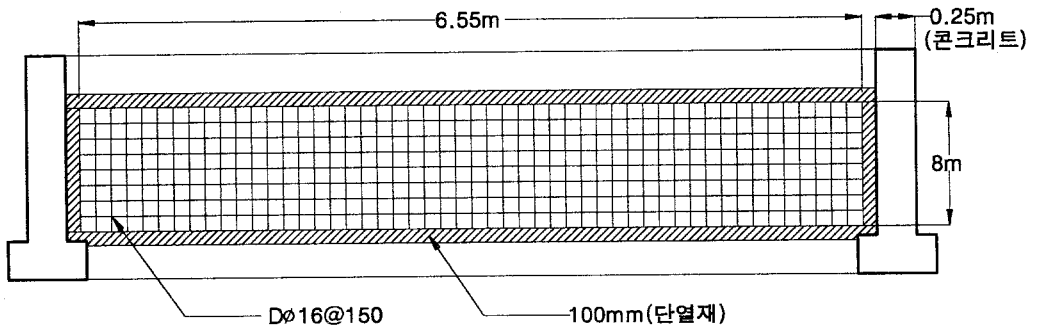


그림 4-16. 자갈축열층의 평면도



(a) 자갈축열층의 측면도



(b) 자갈축열층의 정면도

그림 4-17. 실험온실 및 축열층의 설계도면

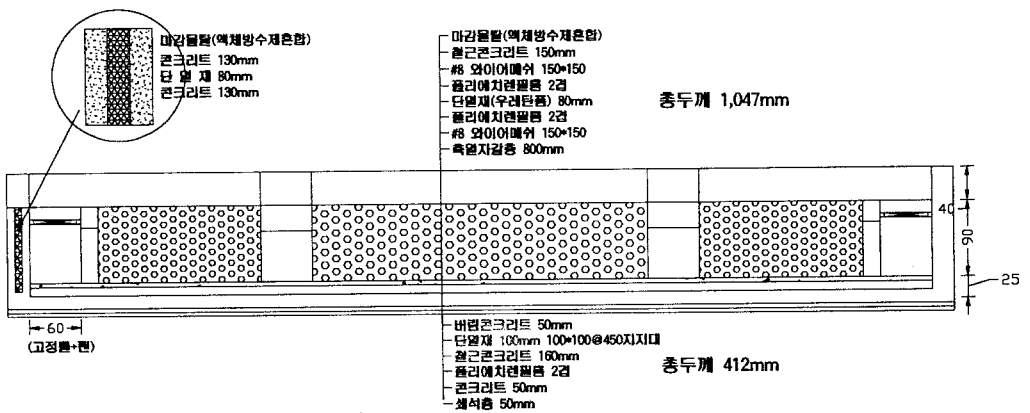


그림 4-18. 자갈축열층의 단면도

제 5 장 자갈축열 태양열온실의 축열 및 냉·난방성능

제1절 축열 및 냉·난방성능 분석을 위한 측정시스템

1. 온실외부 환경계측

온실외부의 기상환경계측은 경북대학교 부속농장내에 설치된 종합기상관측장비를 이용하여 측정하였으며 온·습도 계측간격은 15분이며 자동으로 기록이 가능하며 그림 5-1은 종합기상관측장치와 여기에 사용된 CR10X Micro-logger를 나타낸 것이다.

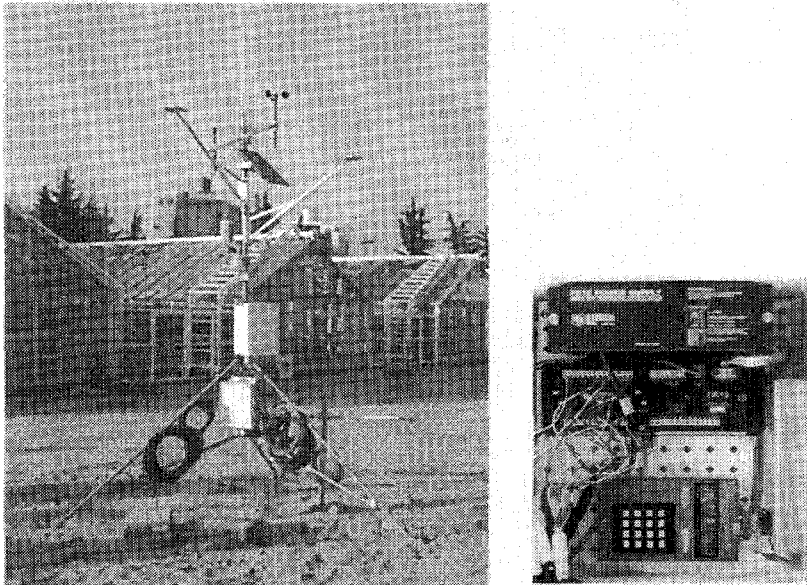


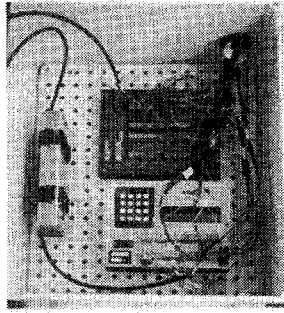
그림 5-1. 종합기상관측장비

2. 온실내부 및 자갈축열층 온·습도 계측

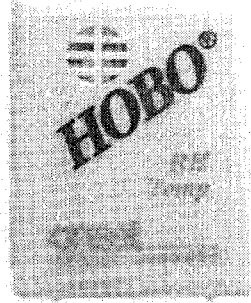
자갈축열 태양열 온실에 있어 효과적인 냉·난방에너지 절감을 위해서는 주간동안 일사에 의해 더워진 온실내부 공기를 자갈축열층 내부로 유입시켜 많은 에너지를 축열층 내부에 저장할 필요가 있다. 주·야간에 공기순환팬 작동방식을 각각 다르게 하였을 때 온실내부의 온·습도환경이 축열층 내부의 온·습도환경에 미치는 영향을 파악하고, 냉·난방기간중 자갈축열 태양열 온실시스템의 축열성능 및 냉·난방효과를 분석하기 위해 온실내부 및 축열층내의 온·습도 환경을 계측할 필요가 있다. 따라서 온실내외 및 자갈층의 온·습도 측정을 위해 계측시스템은 그림 5-2와 같다. 온실내부의 온·습도 변화를 분석하기 위해 사용된 온·습도센서는 HOBO H8 RH/Temp Logger로서 주요특징은 표 5-1과 같다. 이 온·습도센서의 장점은 설치가 용이하며 정전시에도 측정이 가능할 뿐만 아니라, 비휘발성 메모리를 사용하므로 배터리가 방전시에도 측정시간의 간격에 따라 0.5초~9시간까지 데이터의 보존이 가능한 장점을 지니고 있다. 그리고, 자갈축열층내의 온·습도 변화는 21XL Micro-logger와 HMP35C 온·센서를 사용하여 계측하였다. 이 시스템은 최고 64채널까지 측정이 가능하며 측정범위는 온도는 -20℃~56℃(오차범위 $\leq \pm 0.2^\circ\text{C}$)이며 습도는 0%~100%($\pm 2\% \sim \pm 3\%$)이다. 센서 설치는 그림 5-3과 같다.

표 5-1. 온·습도센서 제원

구 분	온 도	습 도
측 정 범 위	-20℃ ~ 70℃	25% ~ 95%
정 확 도	$\pm 0.7^\circ\text{C}$ (-20℃ ~ 70℃)	$\pm 5\%$ (5℃ ~ 50℃)
센 서 크 기	6.10cm × 4.83cm × 2.03cm	
Data 저장용량	8K(7,944measurements)	
Time accuracy	± 1 min/week	
측 정 간 격	sec, min, hour	
Data 호환성	Lotus, Excel, etc.	
бат 데 리 수 명	1 year	



(a) 21XL



(b) HOBO

그림 5-2. 온실내부 및 자갈축열층 온·습도 계측시스템

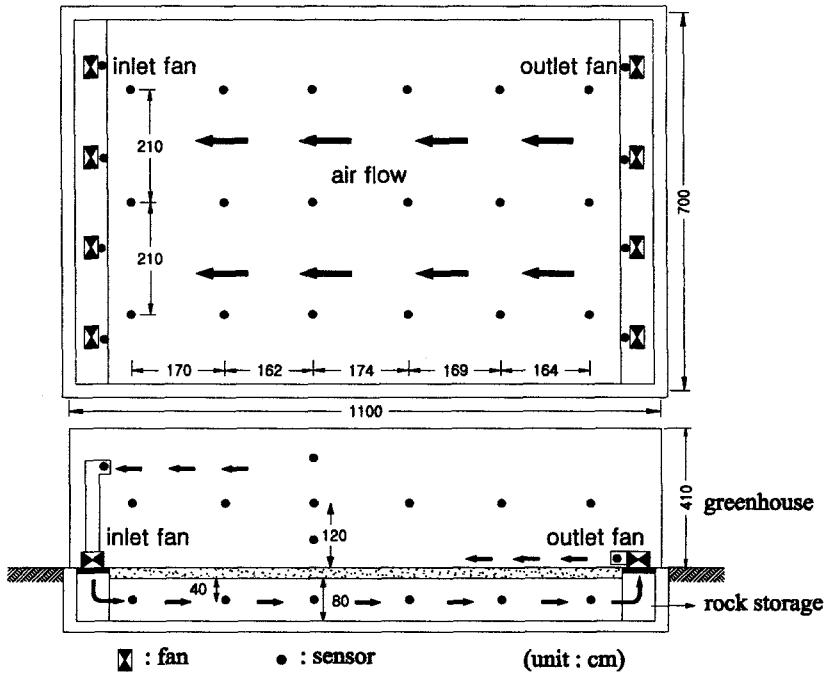


그림 5-3. 실험온실 및 자갈축열층 내부의 센서 설치도

그림 5-3에서 보는 바와 같이, 자갈축열 태양열온실시스템의 축열성능 및 냉난방효과를 분석하기 위해 축열온실 내부에 온실길이방향으로 6점, 폭방향으로

3점의 온·습도센서를 지면에서 120cm되는 곳에 18점, 지면에서 60cm, 280cm되는 곳에 각각 3점씩 설치하였다. 그리고, 공기순환시스템의 유출·입구에 각각 4점씩 설치하였으며 자갈축열층내에는 깊이 20cm, 40cm되는 곳에 각각 18점씩 설치하였다. 냉·난방효과를 분석하기 위해 대조온실에는 축열온실내부와 동일한 위치에 24점의 온·습도센서를 설치하였다.

3. 온실내부 및 자갈축열층의 공기유동성 계측

자갈축열 태양열온실 내부와 자갈축열층의 순환유체 유동속도는 24점이 동시 측정이 가능한 KANOMAX사의 다점풍속계를 이용하여 측정하였다. 이 다점풍속계의 측정범위는 0.01m/s~25m/s이며, 온실내부에 지면높이별(30, 100, 170cm)로 24점씩 총 72점과 축열층내 18점에 대하여 순환공기의 유동속도를 계측하였다.

제2절 자갈축열 태양열온실의 공기유동성 및 축열성능

1. 축열성능 분석을 위한 자갈축열 태양열온실시스템의 구성

자갈축열 태양열온실은 주간에 일사로 데워진 온실 내부공기를 공기순환시스템을 이용하여 자갈축열층사이로 순환시켜 이때 자갈층에 에너지를 축열시켜 야간에 난방에 이용하며, 여름철 주간에는 온실내부의 더운 공기를 자갈축열층으로 유입시키면서 자갈축열층내의 찬공기를 온실내부로 순환시키면서 고온역제효과를 도모하는 시스템이다. 이 과정에서 온실내 공기가 축열층을 통과하는 동안의 열전달은 강제대류열전달이며, 축열층내의 열이동은 축열층내 공기와 자갈표면온도가 초기에는 열적으로 평형상태로 존재하다가 순환유체의 온도상승에 따라 열전달이 일어나게 된다. 따라서, 유입공기의 온도가 일정할 경우 자갈축열층내로 순환되는 공기의 유동속도는 축열층의 축열성능과 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다.

공기순환방식에 따른 온실내부와 자갈축열층의 공기유동성 및 실험용 자갈축열 태양열온실의 축열성능을 분석하기 위해 그림 5-4와 같이 자갈축열 태양열 온실 시스템을 구성하였다.

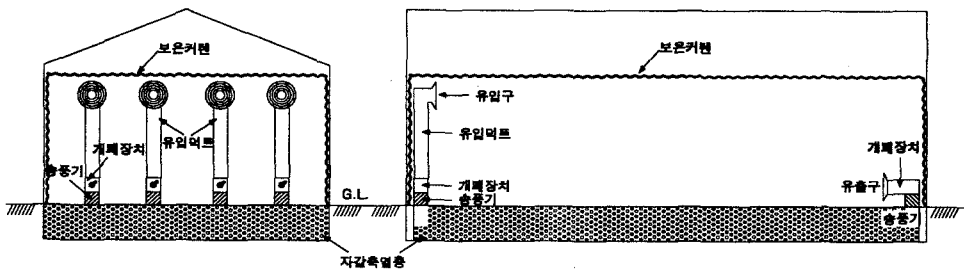


그림 5-4. 축열성능 분석을 위한 자갈축열 태양열 온실

축열재를 100~250mm의 강자갈을 사용한 폭(6.5m)×길이(9.5m)×높이(0.8m)의 규모로 자갈축열층과 온실내부의 원활한 공기순환을 위하여 온실내부에 최대유량이 53m³/min인 공기순환팬(유출·입팬)이 각각 4대씩 설치되어 있으며 공기순환팬은 유량을 각각 60단계로 구분하여 작동할 수 있다. 그리고, 자갈축열층내로 유입되는 순환유체의 일정한 온도유지를 위해 실험온실내에 설치되어 있는 보온커튼을 이용하여 단열을 실시하여 온실외부로의 열손실을 최소화하였다.

2. 실험방법

난방보일러를 이용하여 자갈축열 태양열온실 내부의 난방설정온도를 30℃로 일정하게 유지하면서 공기순환시스템의 유출·입팬 속도를 각각 다르게 하여 온실내부와 자갈축열층내의 순환유체의 유동속도와 온도변화를 측정하였다. 공기순환방식은 유입과 유출팬의 유량을 0:106m³/min, 106:0m³/min, 106: 106m³/min, 0:212m³/min, 212:0m³/min, 212:212m³/min으로 하였다.

자갈축열층의 축열성능은 자갈축열층으로 유입되는 유체온도와 온실내로 유출되는 유체온도를 측정한 후 식 (5-1)에 의해 축열량을 산정하여 분석하였으며 이때 이용된 자갈의 물리적 특성과 축열층의 제원은 표 5-2 및 표 5-3과 같다.

$$\dot{Q} = Q_i - Q_o = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{out}) \quad (5-1)$$

여기서, \dot{Q} : 축열열량 (kcal/hr),

Q_i : 유입열량 (kcal/hr)

Q_o : 유출열량 (kcal/hr),

\dot{m} : 질량유량 (kg/s)

T_{in} : 입구유체온도 (°C),

T_{out} : 출구유체온도 (°C)

C_p : 정압비열 (kcal/kgf·°C, J/kgf·K),

표 5-2. 자갈의 물리적 특성

열전도율 (kcal/m·hr·°C)	밀도 (kgf/m ³)	비열 (kcal/kgf·°C)	열용량 (kcal/m ³ ·°C)	열확산율 (m ² /hr×10 ⁻⁴)
0.5263	1,850	0.2	370	14.2

※ 건축실계자료집 -환경계획편-, 대한건축학회, 1994

표 5-3. 축열시스템의 제원

자갈축열층 규모	자갈축열층 공극율	자갈직경	유입공기	공기순환팬 (Q, m ³ /min)
폭(6.5m)×길이(9.5m) ×높이(0.8m)	0.382	100~250mm	1기압, 30°C(일정)	유입 및 유출구에 53m ³ /min×4대 60단계로 풍량조절 가능

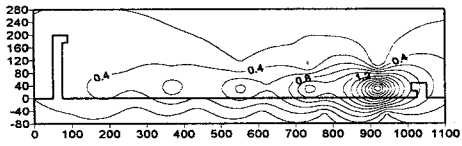
3. 자갈축열 태양열온실시스템의 공기유동성

공기순환방식에 따른 온실내부 및 자갈축열층내의 공기유동성을 분석한 결과는 그림 5-5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이, 공기순환시스템의 작동에 따른 자갈축열 태양열 온실내부의 공기유동성은 유출팬의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 유출팬의 작동유무에 따라 유출구쪽의 유동속도는 2배정도의 차이가 있었다. 그리고, 유출·입팬의 작동방식에 관계없이 유출구쪽의 유동속도가 높게 나타났으며 지면에서 온실상부로 올라갈수록 공기유동속도는 감소하는 것

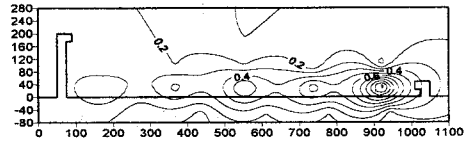
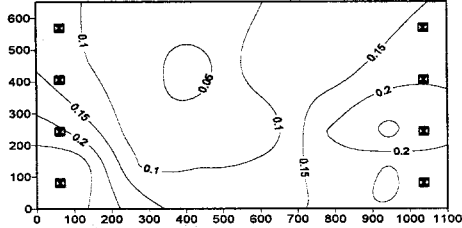
으로 나타났다. 이는 유출구가 지면에서 약 50cm되는 곳에 위치하면서 유출구의 방향이 전면을 향하기 때문인 것으로 분석된다. 따라서, 축열효과를 높이기 위해서는 온실상부에 있는 더운공기를 자갈축열층내로 많이 유입시키는 것이 필요하므로 온실상부의 공기유동속도를 증가시킬 필요가 있다. 온실상부의 공기유동속도를 향상시키기 위해서는 유출구의 방향과 위치의 개선이 요구되며 온실상부의 공기를 원활히 순환시킬 수 있는 순환팬의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

자갈축열층내의 공기유동성은 공기순환방식에 관계없이 유입구에서 멀어질수록 순환유체의 유동속도가 감소하다가 축열층 중앙에서 유출구 방향으로 갈수록 다시 유동속도가 증가하는 경향으로 나타났다.

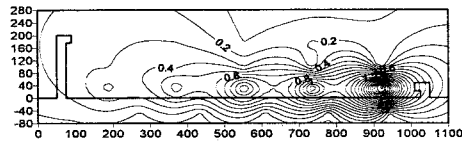
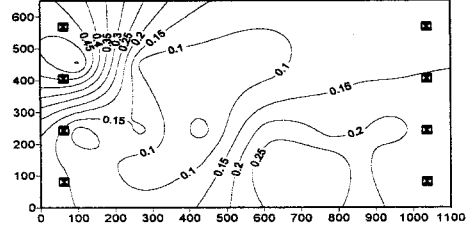
유량을 $106\text{m}^3/\text{min}$ 으로 동일하게 유입팬만을 작동한 경우에 축열층내 공기의 유동속도는 $0.07\sim 0.26\text{m/s}$ (평균 0.168m/s)범위였으나 유출팬만을 작동하였을 경우에는 축열층내 공기의 유동속도는 $0.07\sim 0.20\text{m/s}$ (평균 0.134m/s)범위였다. 그리고, 유량을 $212\text{m}^3/\text{min}$ 로 유입팬만을 작동한 경우 축열층내 공기유동속도는 $0.18\sim 0.55\text{m/s}$ (평균 0.338m/s)범위였으나 유출팬만을 작동하였을 경우에는 축열층내 공기유동속도는 $0.08\sim 0.54\text{m/s}$ (평균 0.252m/s)범위로 나타났다. 또한, 유입 및 유출팬을 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 로 작동하였을 경우에는 축열층내 공기유동속도는 $0.26\sim 0.74\text{m/s}$ (평균 0.48m/s)으로 나타나 동일한 풍량으로 유출·입팬을 모두 작동하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 이러한 결과로 볼 때, 동일한 유량으로 유입팬을 작동시키는 것이 유출팬을 작동시키는 것보다 자갈축열층내 공기유동속도를 약 1.3배 증가시키는 것으로 나타나 축열층내 공기유동성은 유입공기의 유량과 유입팬의 작동유무에 많은 영향을 받은 것으로 나타났다. 따라서, 자갈축열층의 축열성능을 향상시키기 위해서는 동일한 유량에서는 유출팬보다 유입팬의 속도를 증가시키는 것이 유리한 것으로 분석되었다.



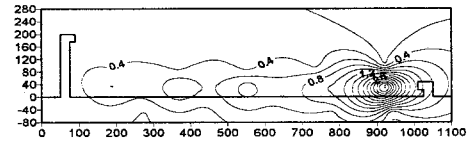
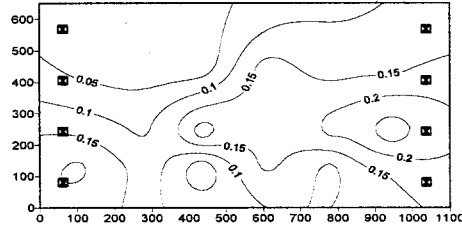
(a) 유입·출입 유량 0 : 106m³/min



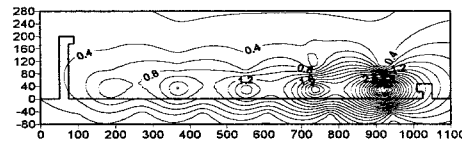
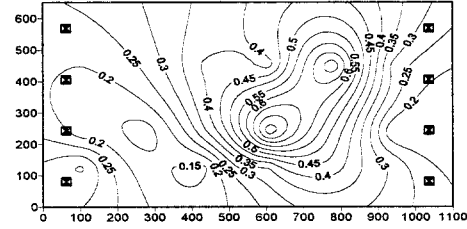
(b) 유입·출입 유량 106 : 0m³/min



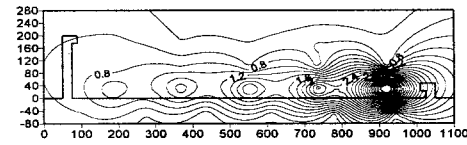
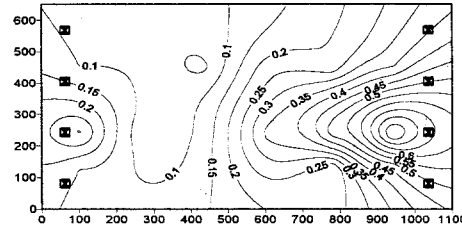
(c) 유입·출입 유량 106 : 106m³/min



(d) 유입·출입 유량 212 : 0m³/min



(e) 유입·출입 유량 0 : 212m³/min



(f) 유입·출입 유량 212 : 212m³/min

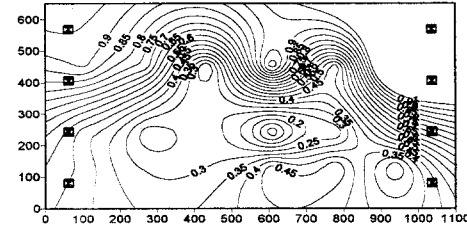


그림 5-5. 공기순환방식에 따른 축열온실내부 및 축열층 순환유체의 유동속도

4. 공기순환팬 작동방식에 따른 자갈축열층의 축열성능

자갈축열 태양열온실 내부의 난방설정온도를 30℃로 일정하게 하고 공기순환시스템의 유출·입팬 속도를 각각 다르게 하여 자갈축열층내의 온도 및 축열량 변화를 분석한 결과는 그림 5-6~그림 5-11과 같다.

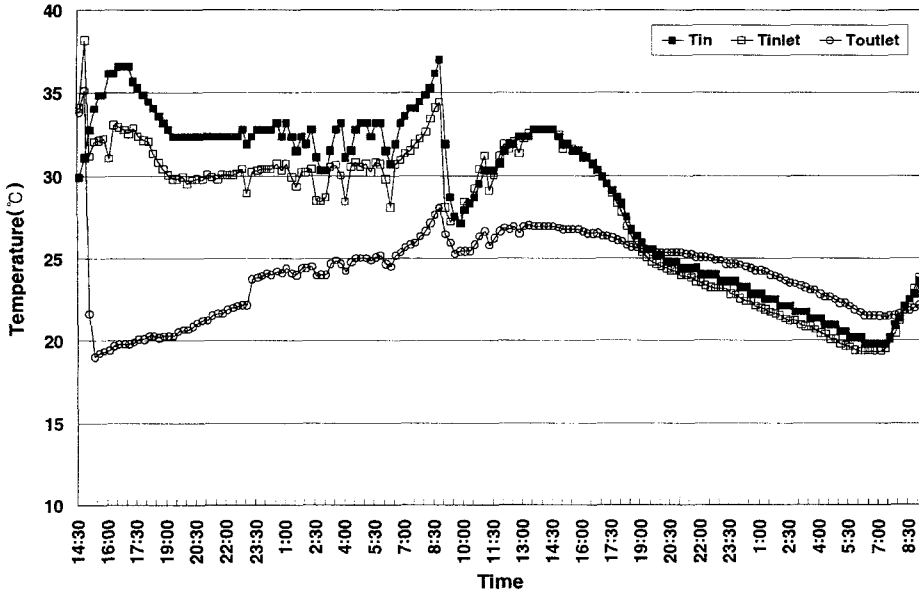


그림 5-6. 축열시간에 따른 유출입 공기의 온도변화

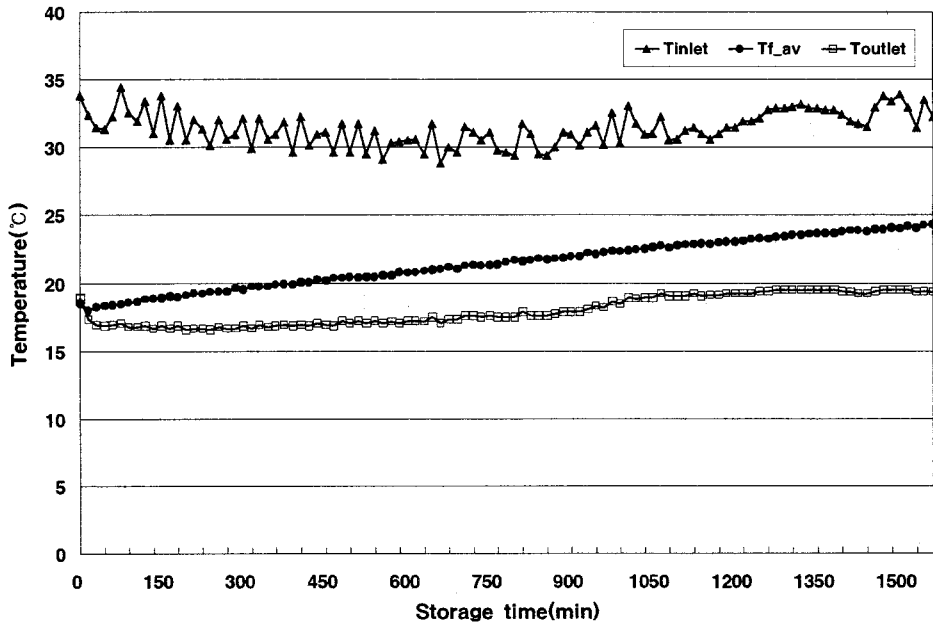
그림 5-6은 온실내부온도 및 자갈축열층의 유입 및 유출 유체온도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 온실내부의 공기를 이용하여 축열하였을 경우에 자갈축열층의 공기유입구측과 유출구측의 내부온도는 약 12℃정도 차이가 있었으며 축열시스템의 유입구로 유입되는 공기의 온도는 온실 내부온도에 비해 평균 2.5℃정도 낮게 나타났다. 그 이유는 온실 내부공기가 자갈축열층으로 유입되면서 유입덕트와 팬에 의한 열손실이 일어나기 때문인 것으로 판단되며, 모형 자갈축열층 실험에서의 결과와는 상이한 것이다. 따라서, 난방기간중 주간에 자

갈축열 태양열온실의 최대축열가능시간은 자갈축열층 평균온도보다 온실 내부 온도가 최소한 2.5℃ 높을 때 까지는 축열이 가능하며 그 이후에는 축열효과가 없을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 공기순환팬의 작동을 제어할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

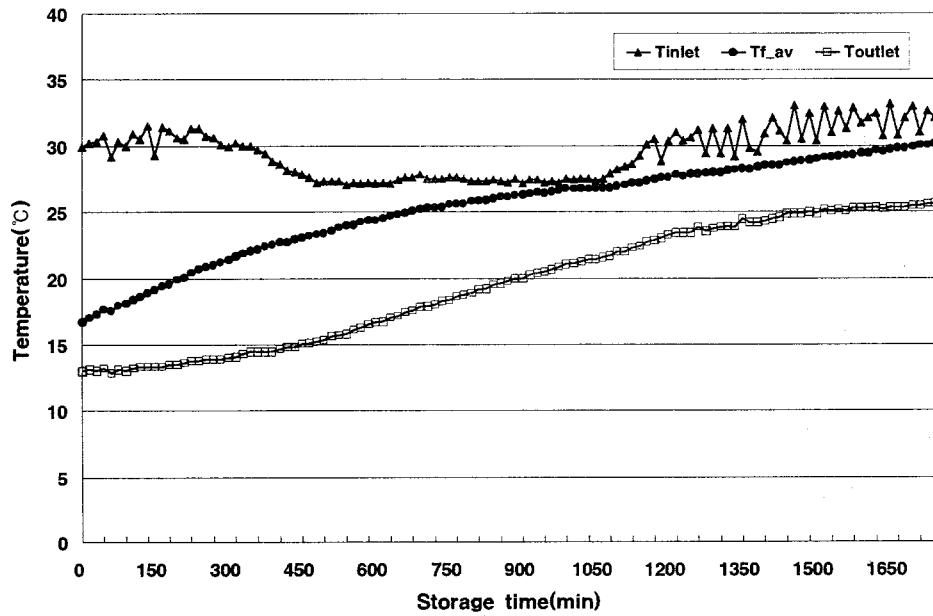
유출·입팬을 각각 212m³/min의 유량으로 평균기온이 33℃인 온실내부 공기를 16시간 축열하였을 경우에는 유입구와 유출구측의 온도차는 평균 5.2℃로 감소하였으며 축열층(61.6m³)의 평균온도는 약 9.3℃ 증가하였다. 그리고, 야간에 방열을 하였을 경우에는 자갈축열층에서 온실내부로 유출되는 공기의 기온은 온실내부 기온에 비해 평균 약 3~4℃ 높게 나타났으며 유입 유체온도보다 유출 유체온도가 높은 것으로 나타났다.

그림 5-7은 자갈축열 태양열온실의 공기순환방식에 따른 자갈축열층의 유입 및 유출 유체온도와 축열층의 평균온도를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 자갈축열층내로 유입되는 유량이 증가할수록 자갈축열층의 온도상승 속도는 증가하는 경향으로 나타났다. 그리고, 축열시간에 따라 유입 및 유출 유체온도의 변화를 계측한 결과는 공기순환작동방식에 따른 자갈축열 태양열온실의 축열성능을 분석하는데 이용하였다.

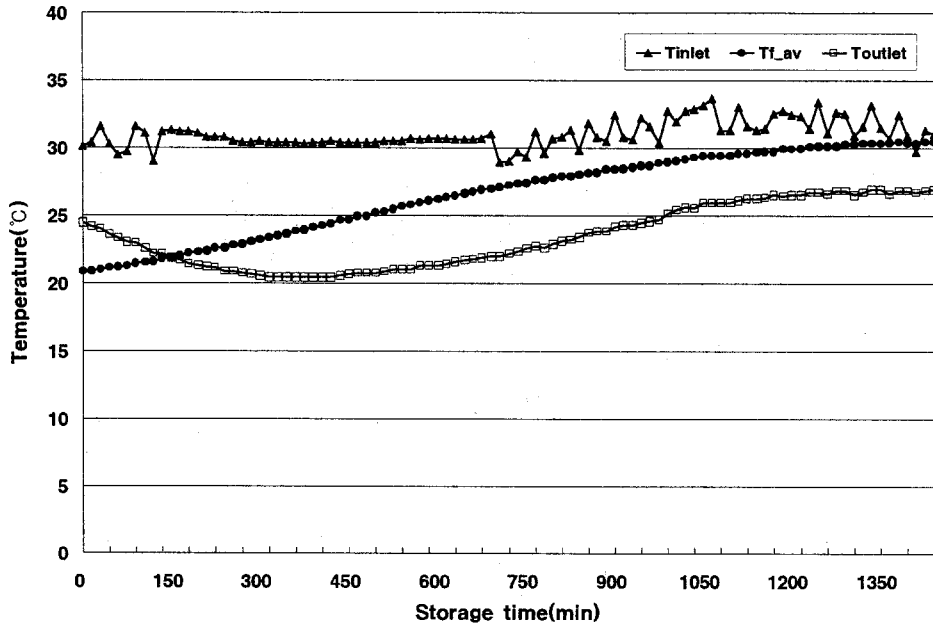
그림 5-8과 그림 5-9는 자갈축열층 유입 유체온도가 평균 33℃로 일정할 때 축열시간에 따른 자갈축열층 내부온도 변화를 도시한 것으로서, 모형실험 결과와 마찬가지로 유입구에서 멀어질수록 축열층 온도상승 속도는 감소하는 경향으로 나타났다. 그림 5-8에서 보는 바와 같이, 축열전의 자갈축열층의 온도는 유입구측과 유출구측의 온도가 약 13~14℃ 차이가 있었으나 축열이 진행되면서 온도차는 점차 감소하였다. 그러나, 그림 5-9에서와 같이, 축열전 유입구측과 유출구측의 자갈축열층 온도의 차이가 없더라도 축열이 진행되면서부터 유입구측 자갈축열층의 온도가 먼저 상승하여 유출구측으로 갈수록 온도상승 속도는 감소하여 축열 6시간 30분후에는 유입 및 유출구측의 온도차는 평균 4~5℃였다.



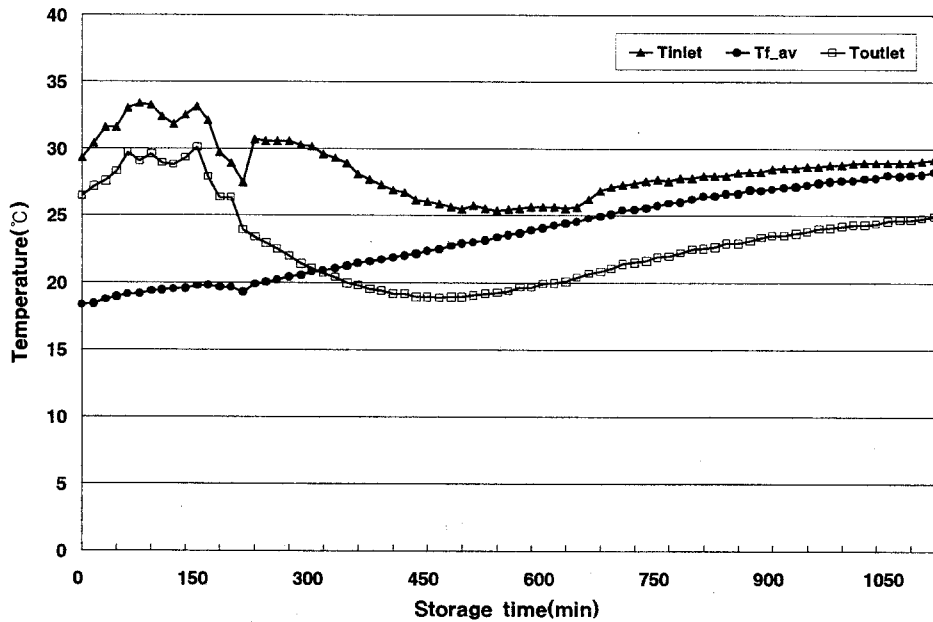
(a) 유입·출입 유량 106 : 0m³/min



(b) 유입·출입 유량 0 : 212m³/min



(c) 유입·출입 유량 212 : 0m³/min



(d) 유입·출입 유량 212 : 212m³/min

그림 5-7. 공기순환방식에 따른 축열층의 온도변화

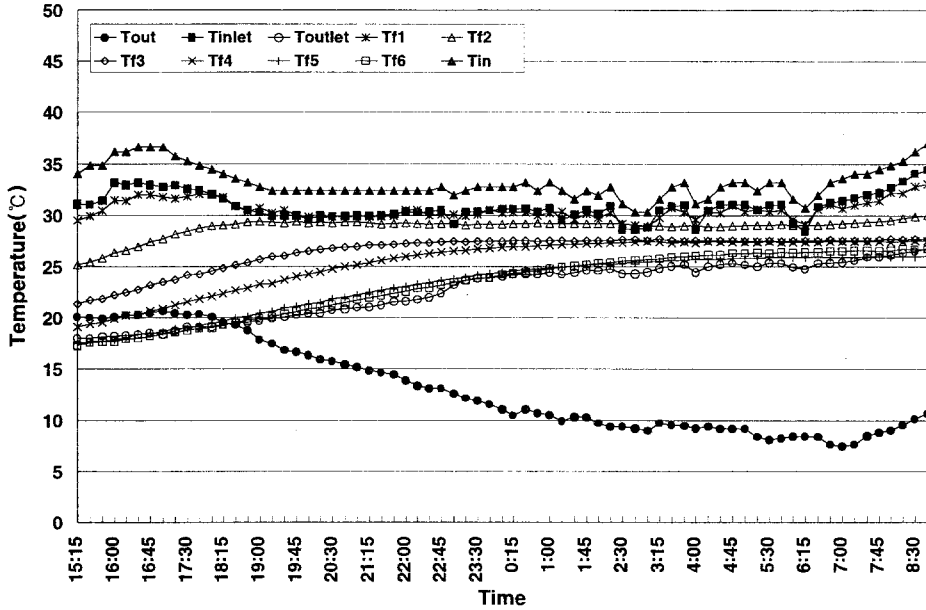
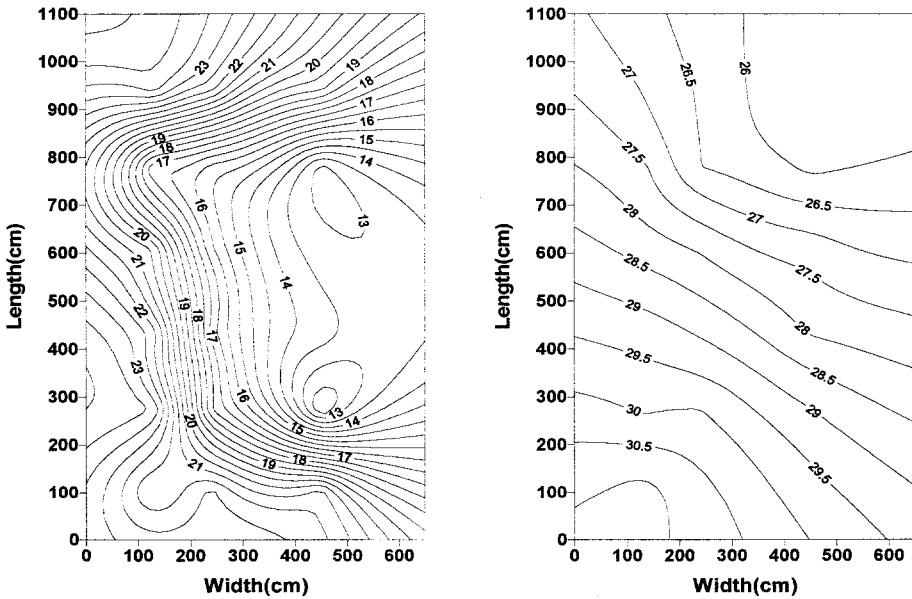


그림 5-8. 축열시간에 따른 축열층의 온도변화



(a) 축열전

(b) 축열 6시간 30분후

그림 5-9. 자갈축열층내 온도분포

그림 5-10과 그림 5-11은 공기순환방식에 따른 축열층내의 온도 및 축열량변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 공기순환방식에 따라 축열층내 온도변화의 양상이 다르게 나타났으며 순환공기의 유동속도가 감소함에 따라 축열층내 온도는 완만하게 상승하였으며, 유입풍량의 증가와 유출팬보다는 유입팬의 작동유무에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고, 실험용 자갈축열 태양열온실에 있어 공기순환방식에 따른 자갈축열층의 평균온도는 축열시간에 비례하여 직선적인 변화를 나타내었으며 자갈축열층의 초기평균온도와 축열시간을 이용하여 자갈축열층의 평균온도를 예측할 수 있는 회귀식을 분석하였다. 공기순환방식별 축열시간과 자갈축열층 평균온도의 상관식은 다음과 같다.

$$T_f = A \cdot T + T_o \quad (5-2)$$

여기서, T_f : 자갈축열층의 평균온도(°C)

A : 자갈축열층의 온도증가율

T : 축열시간(min)

T_o : 자갈축열층의 초기평균온도(°C)

축열시간에 따른 자갈축열층 평균온도의 증가율을 나타내는 기울기 A 는 유입유량이 증가할수록 높게 나타나, 유입 및 유출팬의 유량비가 106:0, 106:106, 0:212, 212:0, 212:212일 때 각각 0.0642, 0.0711, 0.1392, 0.1816, 0.1982로 나타났다. 공기순환시스템의 유입유량이 106m³/min으로 일정하고 유출유량이 증가하여도 자갈축열층의 온도 증가는 미소한 것으로 나타났으나 유입유량은 없고 유출유량이 유입유량의 2배인 212m³/min으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 106m³/min인 경우보다 자갈축열층의 온도 증가율은 약 1.7~1.8배 증가하는 것

으로 나타났다. 또한, 유출유량은 없고 유입유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 자갈축열층 평균온도 증가율은 약 2.6~2.8배 증가하였으며 유입 및 유출유량이 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 자갈축열층 평균온도 증가율은 약 2.8~3.1배 증가하였다. 동일한 유량으로 유입 팬을 작동하는 것이 유출팬을 작동하는 것에 비해 약 1.3배의 자갈축열층 온도 상승효과가 더 있는 것으로 나타났다. 그리고, 유입유량이 최대일 때 유출유량의 증가에 따른 자갈축열층의 평균온도 증가율은 미소한 것으로 나타났다.

그럼 5-11은 공기순환방식별 축열시간에 따른 자갈축열층의 축열량을 분석한 것이다. 유입팬의 유량을 $106\text{m}^3/\text{min}$ 으로 동일하게 작동한 경우에는 유출팬의 작동여부와는 관계없이 축열시간 735분동안 축열량은 35,290~39,700kcal로 유사하게 나타났으나 유출구의 풍량을 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 하여 유출팬만을 작동하였을 경우에는 축열량이 69,451kcal로 약 1.8배 증가하였고 유출팬의 작동없이 유입팬의 유량을 $212\text{m}^3/\text{min}$ 로 작동하였을 경우에는 축열량이 95,135kcal로 약 2.4배 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 유입 및 유출팬의 풍량을 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 로 작동하였을 경우에는 축열량이 107,494kcal로 나타났다.

실험용 자갈축열 태양열온실에 있어 공기순환방식에 따른 자갈축열층의 축열량은 축열시간에 비례하여 직선적인 변화를 나타내었으며 축열시간에 따른 자갈축열층의 축열량을 예측할 수 있는 상관식은 식 (5-3)과 같다.

$$Q = A' \cdot T \quad (5-3)$$

여기서, Q : 자갈축열층의 평균온도(°C)

A' : 자갈축열층의 축열량 증가율

T : 축열시간(min)

축열시간에 따른 자갈축열층의 축열량 증가율을 나타내는 기울기 A'는 유입 유량이 증가할수록 높게 나타나, 유입 및 유출팬의 유량비가 106:0, 106:106, 0:212, 212:0, 212:212일 때 각각 0.7614, 0.7893, 1.3562, 2.0598, 2.1193로 나타났다. 유입유량이 $106\text{m}^3/\text{min}$ 이고 유출유량이 0와 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우에 축열량 증가율은 미소한 차이가 있었으나 유입유량은 없고 유출유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 축열량 증가율은 약 1.7~1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 유출유량은 없고 유입유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 축열량 증가율은 약 2.6~2.7배 증가하였으며 유입 및 유출유량이 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 축열량 증가율은 약 2.7~2.8배 증가하였다. 동일한 유량으로 유입팬을 작동하는 것이 유출팬을 작동하는 것에 비해 축열량 증가속도가 약 1.5배 더 있는 것으로 분석되었다. 그리고, 유입유량이 최대일 때 유출유량의 증가에 따른 자갈축열층의 축열량 증가율은 미소한 것으로 나타났다. 따라서, 실험용 자갈축열 태양열온실에 있어 자갈축열층의 온도와 축열량은 공기순환시스템의 유출유량 보다는 유입유량의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다.

이러한 결과로 볼 때, 공기순환방식에 따른 자갈축열 태양열 온실의 축열성능은 공기순환시스템의 유출팬보다 유입팬의 작동유무와 유량에 밀접한 관계가 있는 것으로 나타나 동일한 유량의 공기순환시스템에서는 유입팬의 유량을 증가시키는 것이 자갈축열 태양열온실의 축열성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

이러한 축열실험을 통하여 공기순환시스템의 작동방식과 자갈축열층의 축열성능을 파악할 수 있었으며, 자갈축열 태양열 온실의 축열효율을 분석할 수 있는 기초자료로 활용할 수가 있을 것으로 판단된다. 또한, 현열이용형 태양열 온실의 축·방열성능 시뮬레이션을 수행할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

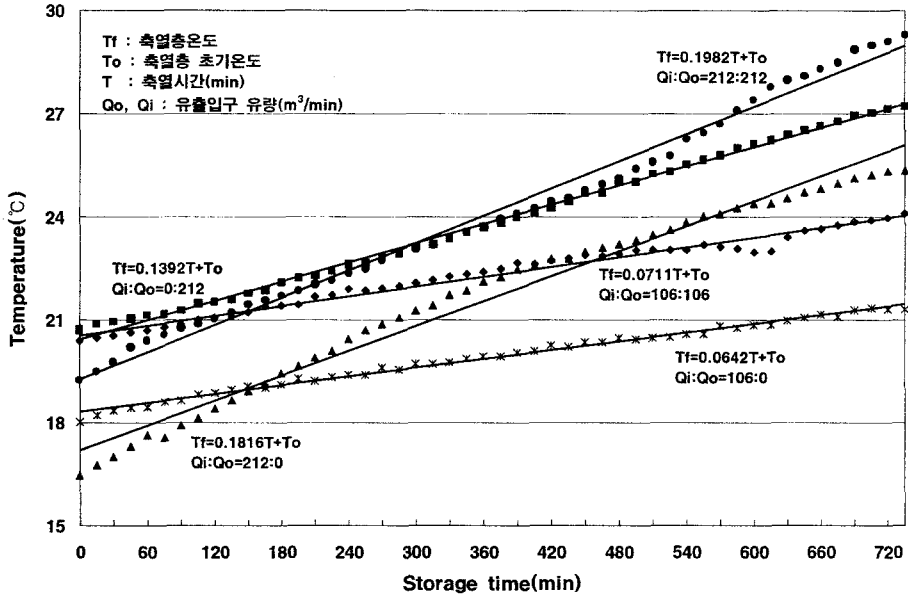


그림 5-10. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화

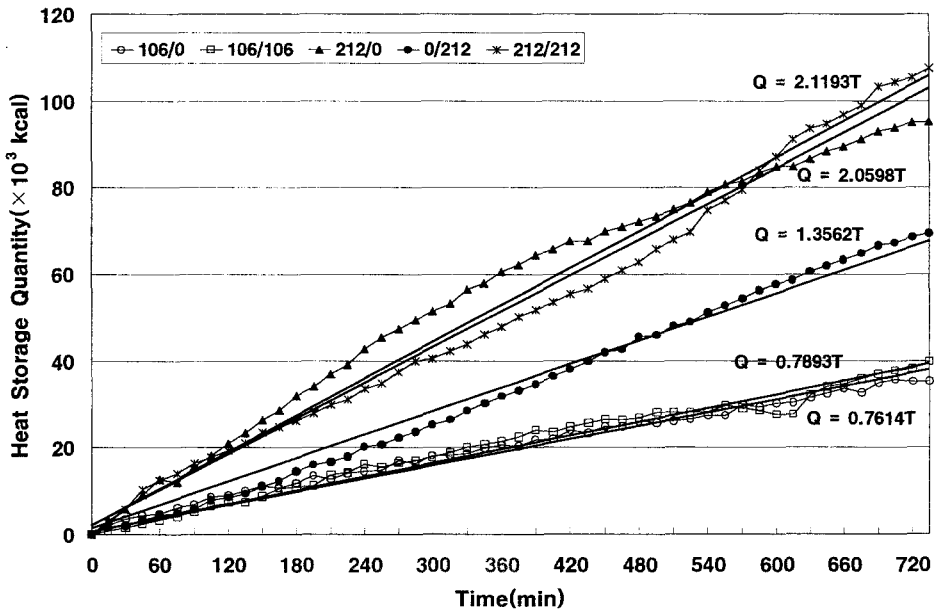


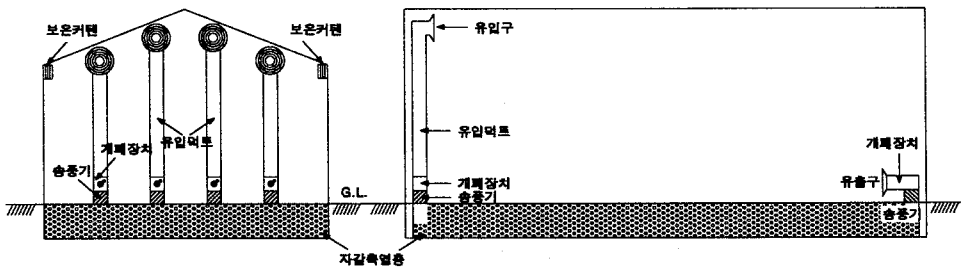
그림 5-11. 축열시간에 따른 자갈층의 온도 및 축열량 변화

T_{out} : 외기온, T_{inlet} : 유입공기온도, T_{outlet} : 유출공기온도, $T_{in,s}$: 자갈축열온실의 내부온도
 $T_{f1} \sim T_{f6}$: 유입구측에서 유출구방향의 자갈축열층 내부온도

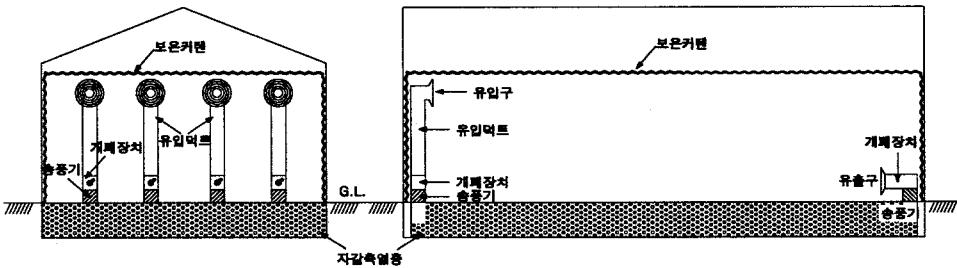
제3절 자갈축열 태양열온실의 난방효과

1. 난방효과 분석을 위한 자갈축열 태양열온실시스템의 구성

자갈축열 태양열온실의 난방효과를 분석하기 위한 시스템의 구성은 그림 5-12와 같으며, 난방기간중 주간 축열시에는 온실상부에 존재하는 더운 공기를 자갈축열층내로 유입시키기 위해 공기순환시스템의 유입구에 설치되어 있는 유입덕트의 높이를 조절하여 온실내 더운 공기를 자갈축열층으로 순환시킬 수 있도록 하였으며, 야간에는 난방을 위해 보온커튼 아래로 유입덕트의 높이를 조절하여 방열할 수 있도록 하였다.



(a) 주간 축열시



(b) 야간 방열시

그림 5-12. 난방기간중 자갈축열 태양열 온실시스템

난방기간(11월말~3월초순)중 주간에는 온실내로 투과되는 태양에너지에 의해 더워진 온실내부 공기를 자갈축열층으로 순환시켜 축열하면서 자갈축열층의 찬 공기를 온실내부로 순환시켜 고온억제효과를 도모하고, 야간에는 자갈축열층의 더운 공기를 온실내로 순환시켜 방열을 하여 난방효과를 도모하고자 한다.

2. 온실내외 및 자갈축열층 온·습도변화

그림 5-13과 그림 5-14는 난방기간중 온실내외 및 자갈축열층의 온·습도변화를 나타낸 것이다. 그림 5-13에서 보는 바와 같이, 온실내부의 습도변화는 외부 습도의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으나, 축열온실의 내부습도가 일반온실에 비해 높게 나타나는 것은 온실 내·외부의 기온차에서 발생하는 결로현상때문인 것으로 판단된다.

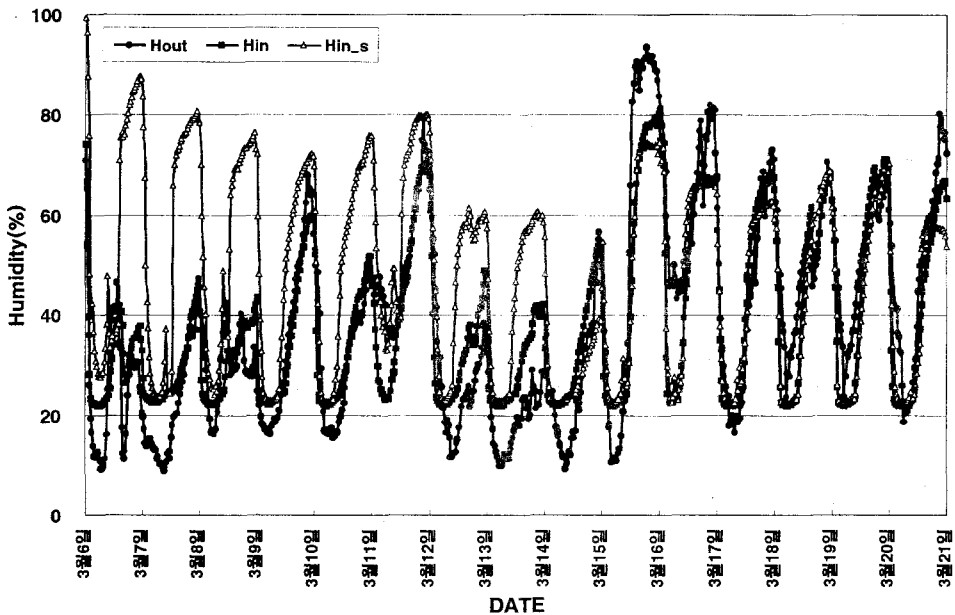


그림 5-13. 난방기간중 온실내·외부 습도변화

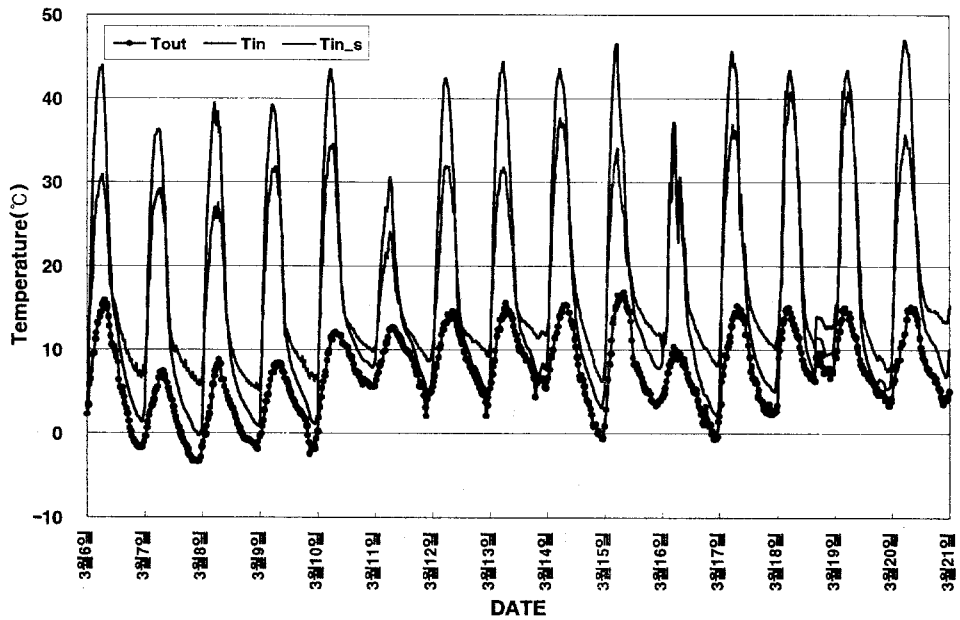
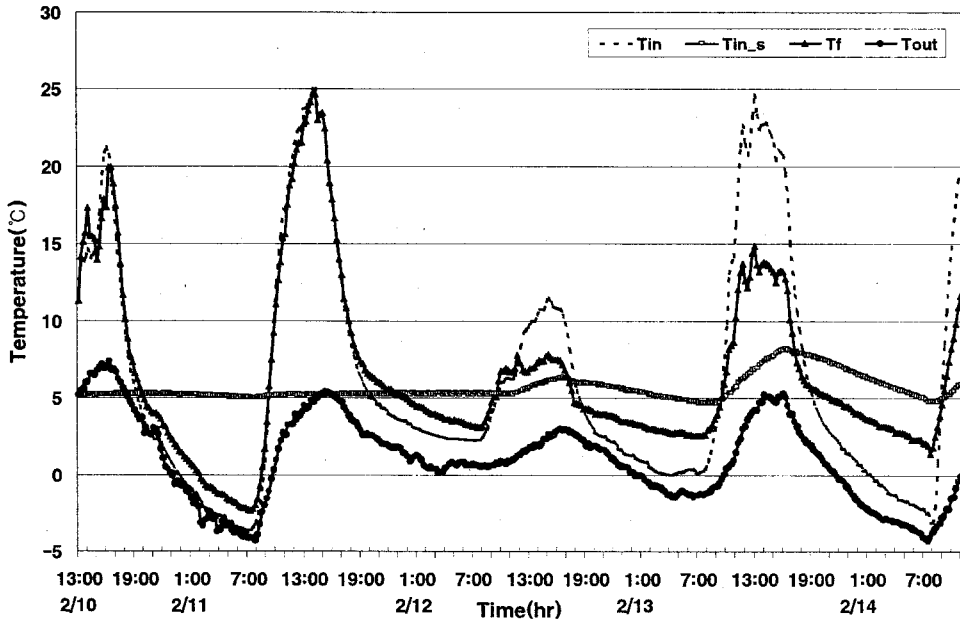


그림 5-14. 난방기간중 은실내·외부 및 축열층 온도변화

그림 5-14와 같이 온실내부의 기온변화는 외기온의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으나 축열온실의 경우, 주간에는 자갈축열층의 축열로 인하여 일반온실에 비해 내부온도가 낮게 나타났으며 야간에는 자갈축열층의 방열로 인하여 일반온실에 비해 내부온도가 다소 높게 나타났다.

축열층의 내부온도는 공기순환시스템의 작동방식에 따라 상이하게 나타났으며 공기순환시스템의 작동이 없을 경우에는 일정한 온도범위를 유지하는 것으로 나타나 자갈축열층의 단열성능이 우수함을 알 수 있었다. 자갈축열층의 축열량에 따라 야간의 내부온도 역시 상이하게 나타났으나 전반적으로 일반온실보다는 높게 나타났다. 주간에 자갈축열 태양열온실(이하, 축열온실)의 내부온도가 일반온실에 비해 최고 11℃ 이상 낮게 나타나는 것은 온실내부의 더운공기가 자갈축열층내로 유입되면서 자갈축열층내의 찬공기가 온실내부로 순환되는 과정에서 온실내부의 열손실이 발생하기 때문이다. 반대로, 야간에는 온실내부의 기온보다 높은 자갈축열층의 더운공기가 온실내부로 유입되면서 일반온실의 내부온도보다 높게 유지되는 것이다.

가. 자갈축열층의 온·습도변화

1) 축·방열시 자갈축열층의 온도변화

그림 5-15는 10:00~17:00(99. 3. 2)까지 축열시스템을 작동하여 자갈축열층을 축열한 후 22:00~08:00까지 방열하였을 때 자갈축열층내의 온도변화를 분석한 결과이다. 그림 5-15에서 보는 바와 같이 축열시 축열온실 내부온도가 18.3~25.1℃ 범위에서 변화할 때 자갈축열층 내부온도는 5.5~18.6℃에서 변화하였으며 유입구에서 멀어질수록 낮게 나타났고 온도상승 속도 또한 감소하는 경향으로 나타났다. 그리고, 축열 7시간 동안 평균 6℃ 정도의 온도상승이 있는 것으로 나타났다.

그림 5-18에서 보는 바와 같이, 자갈축열층의 온도는 공기순환팬의 작동유무와 외기온에 의한 축열온실 내부온도에 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

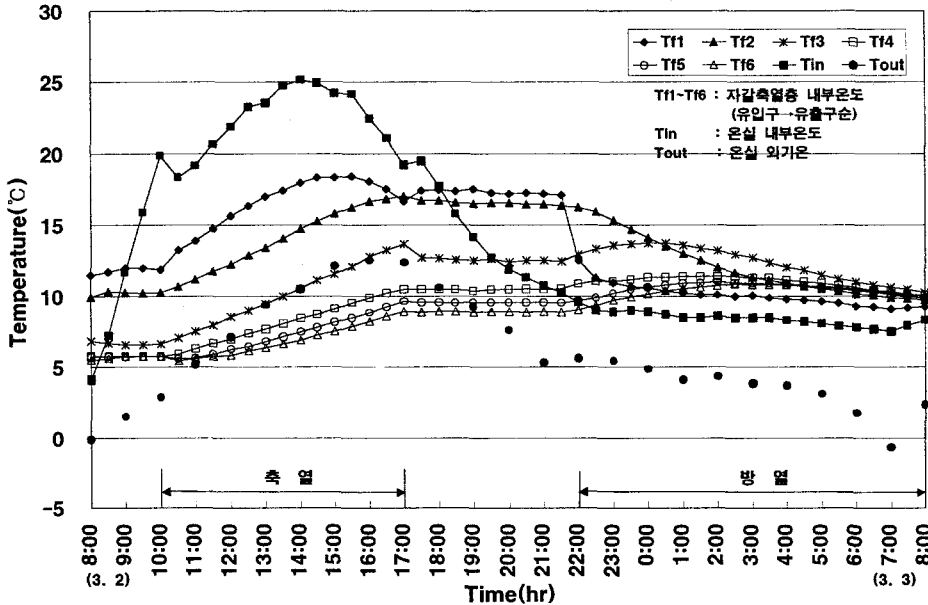
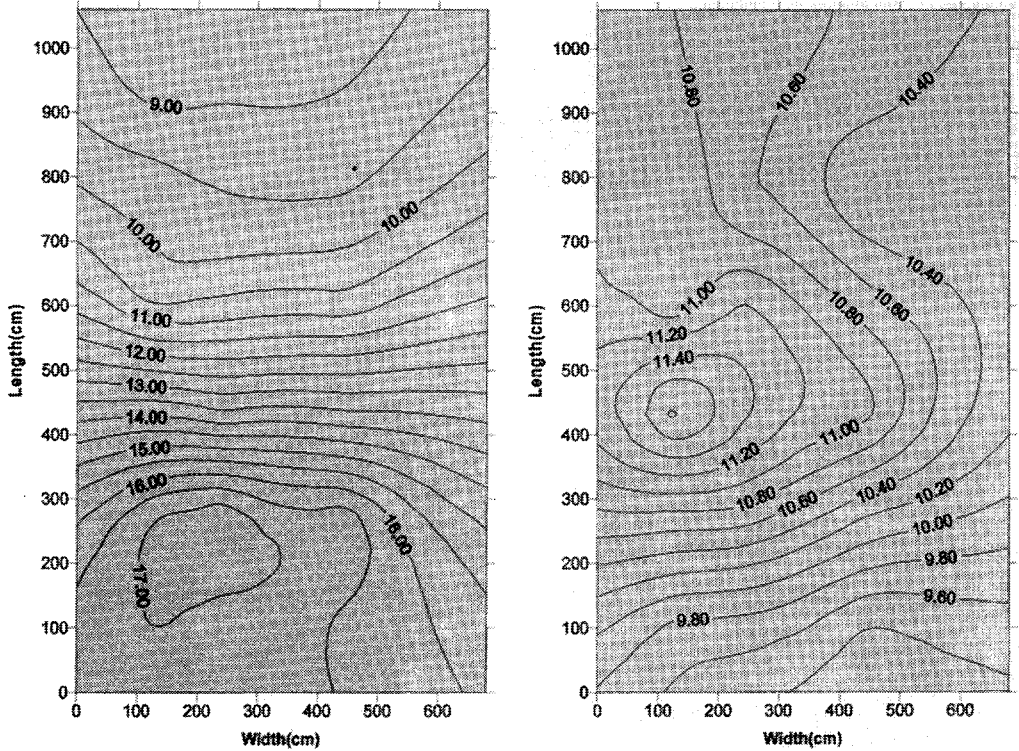


그림 5-15. 자갈축열층 내부온도 변화(유입팬 : 212m³/min, 유출팬 : 106m³/min)

방열시 축열층 내부온도는 축열층내로 유입되는 온실 내부공기 온도의 영향을 직접적으로 받는 것으로 나타났으며 시간이 경과함에 따라 축열층 내부온도는 감소하였으며 방열 7시간후에는 거의 일정한 온도를 유지하였다.

그림 5-16은 주간(10:00~17:00)에 7시간동안 축열하였을 경우와 야간(22:00~익일 08:00)에 방열하였을 때의 자갈축열층 내부온도 분포를 나타낸 것으로서, 7시간동안 축열한 후 축열층 내부온도는 공기의 흐름방향에 따라 최고 9°C 온도편차가 있었으나 방열 7시간후에는 축열층 내부온도 편차가 1°C미만으로 일정한 분포를 나타내고 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 방열시 자갈축열층의

유입구측의 열이 강제대류로 인하여 유출구측으로 열손실이 발생함을 알 수 있다 따라서, 효율적인 난방효과를 위해서는 방열시 유입구측의 자갈축열층의 공기를 온실내부로 유출할 수 있는 공기순환방식의 검토가 필요할 것으로 판단된다.



(a) 7시간동안 축열(17:00)

(b) 방열 7시간후(익일 05:00)

그림 5-16. 축열시 자갈축열층의 온도분포

2) 축·방열시 자갈축열층의 습도변화

그림 5-17은 주간(10:00~17:00)에 축열시스템을 작동하여 자갈축열층을 축열한 후 야간(22:00~익일 08:00)에 방열하였을 경우 자갈축열층내의 습도변화를 나타낸

것으로서, 외부습도가 14.4%~70.5%(평균 38.5%)범위에서 변화할 때 자갈축열 내부습도는 28.7%~100%(평균 65.8%)범위였으며 유입구측의 자갈축열층의 내부습도는 45.1%~91.0%(평균 71.8%)범위였고 유출구측의 내부습도는 82.4%~98.9%(평균 96.9%)범위에서 변화하였다. 자갈축열층 내부습도가 높게 나타나는 것은 제작과정에서 유입된 수분에 의한 것으로, 그림 5-18에서 보는 바와 같이 연속적 축열시스템의 운전으로 인하여 자갈축열층의 습도가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고, 축점에 관계없이 축열층의 내부습도는 온실의 내부습도에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었고 축열시에는 유입구에서 멀어질수록 온실 내부습도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며 방열시에는 온실내외 기온차로 인한 온실내부의 결로현상으로 인해 다습한 온실내부 공기가 자갈축열층 내부로 유입되면서 축열층 내부습도가 증가하는 것으로 나타났다.

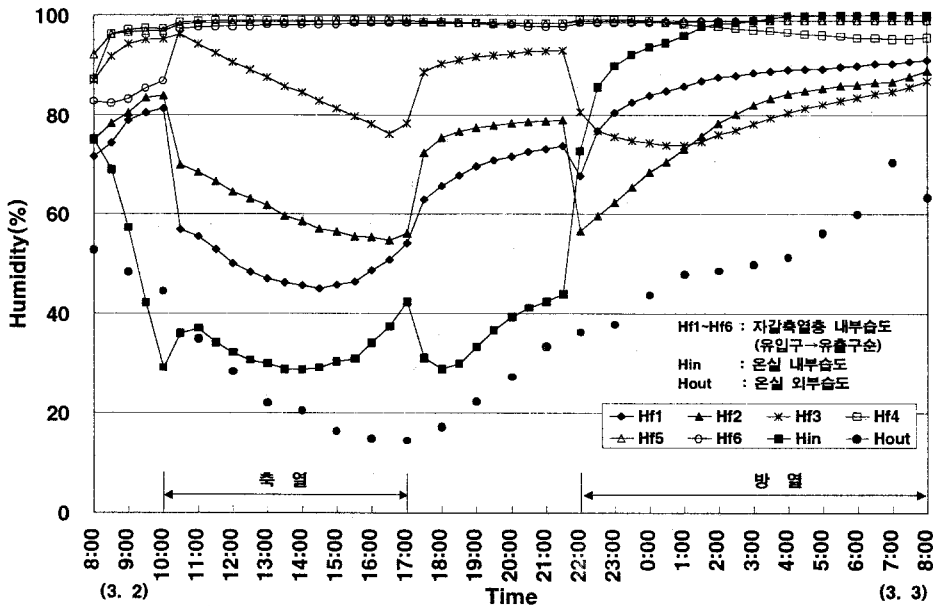
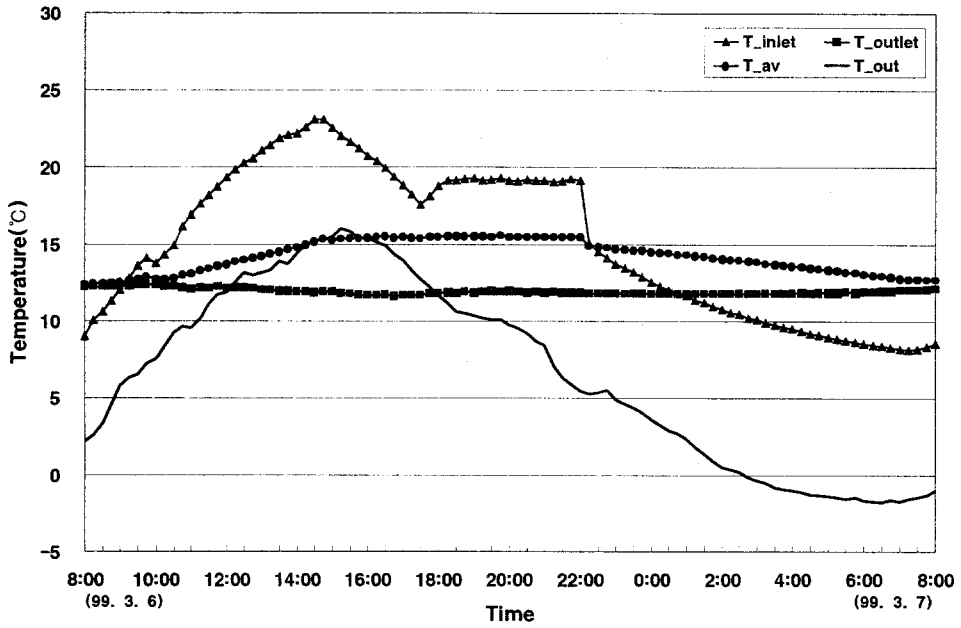
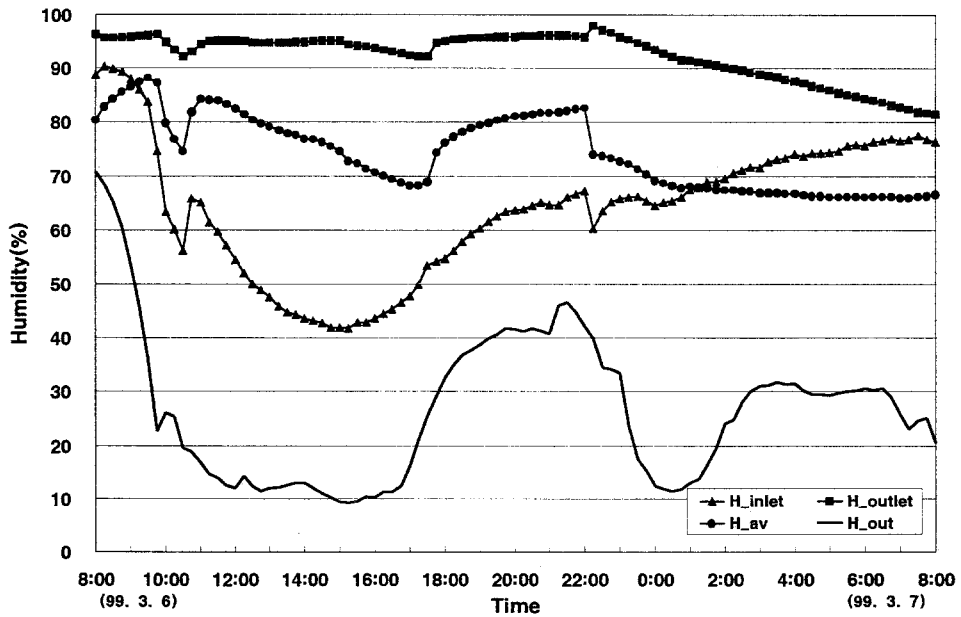


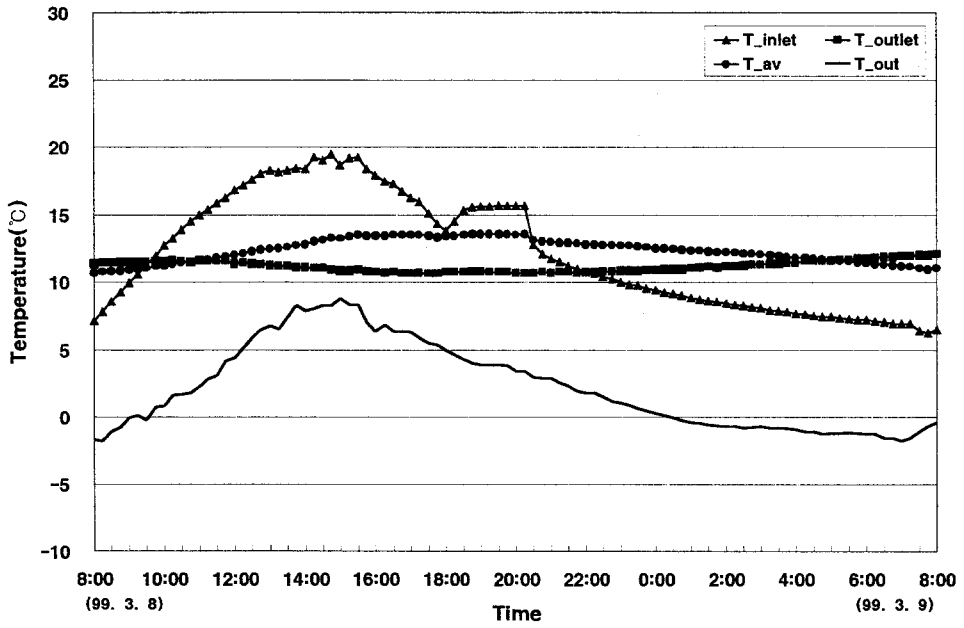
그림 5-17. 자갈축열층 내부습도 변화(유입팬 : 212m³/min, 유출팬 : 106m³/min)



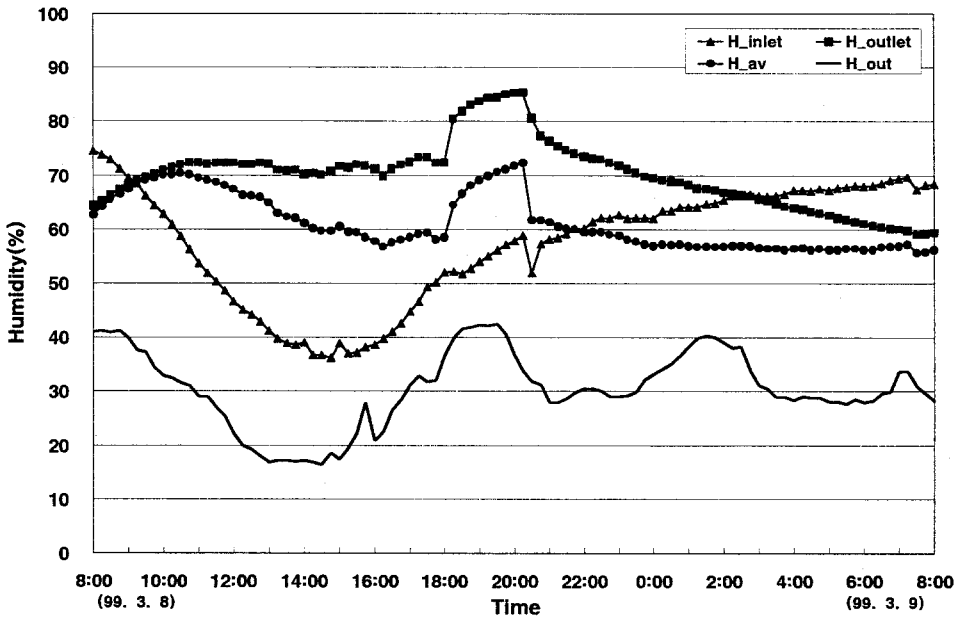
(a) 자갈축열층 온도변화(3월 6일 08:00 ~ 익일 08:00)



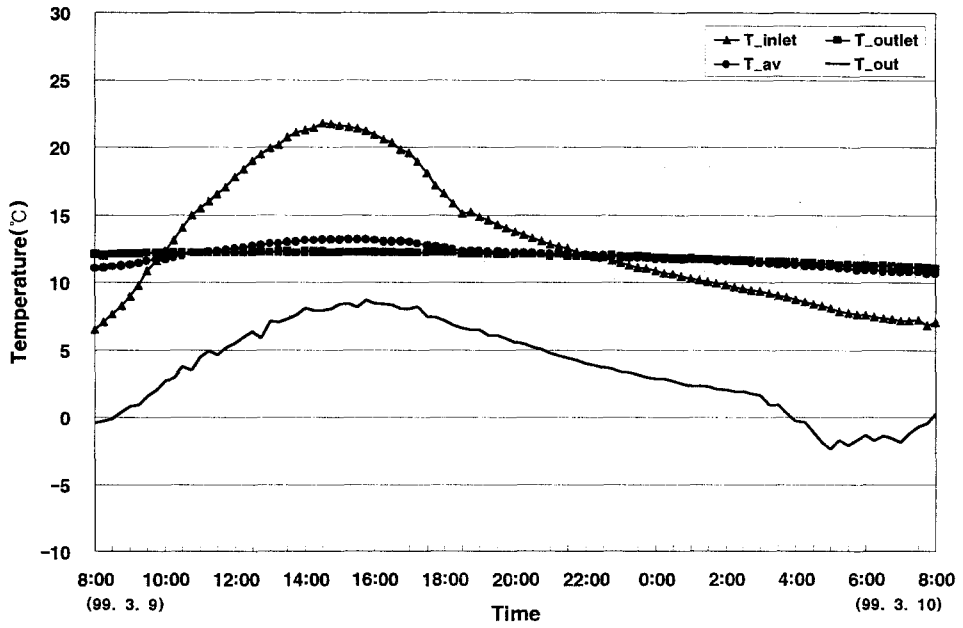
(b) 자갈축열층 습도변화(3월 6일 08:00 ~ 익일 08:00)



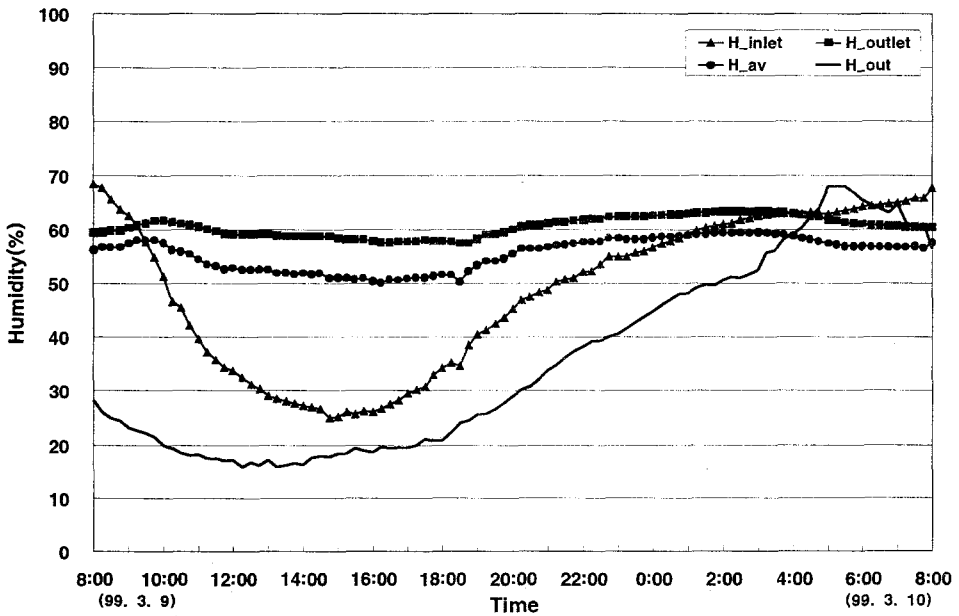
(c) 자갈축열층 온도변화(3월 8일 08:00 ~ 익일 08:00)



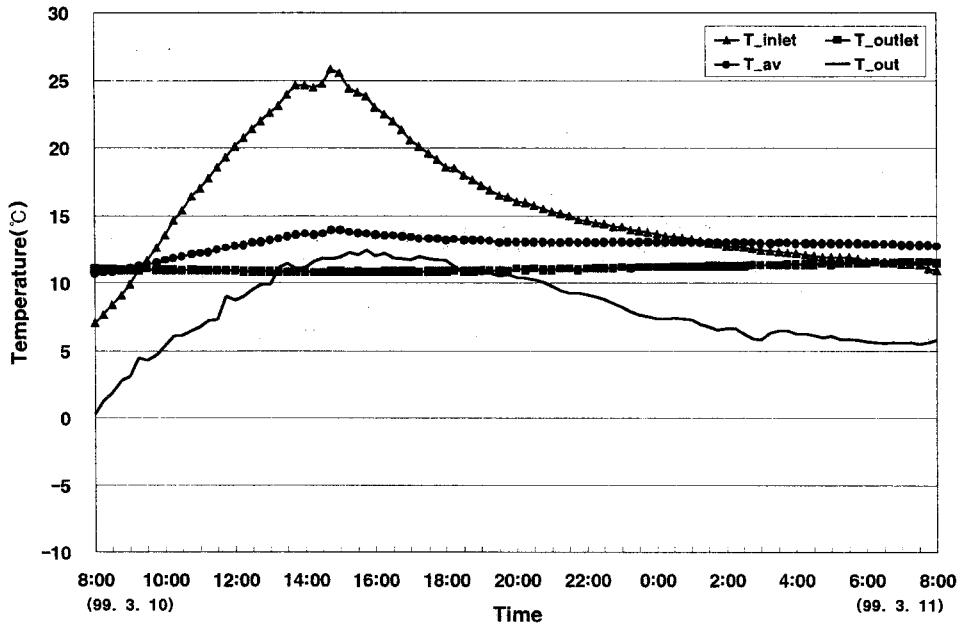
(d) 자갈축열층 습도변화(3월 8일 08:00 ~ 익일 08:00)



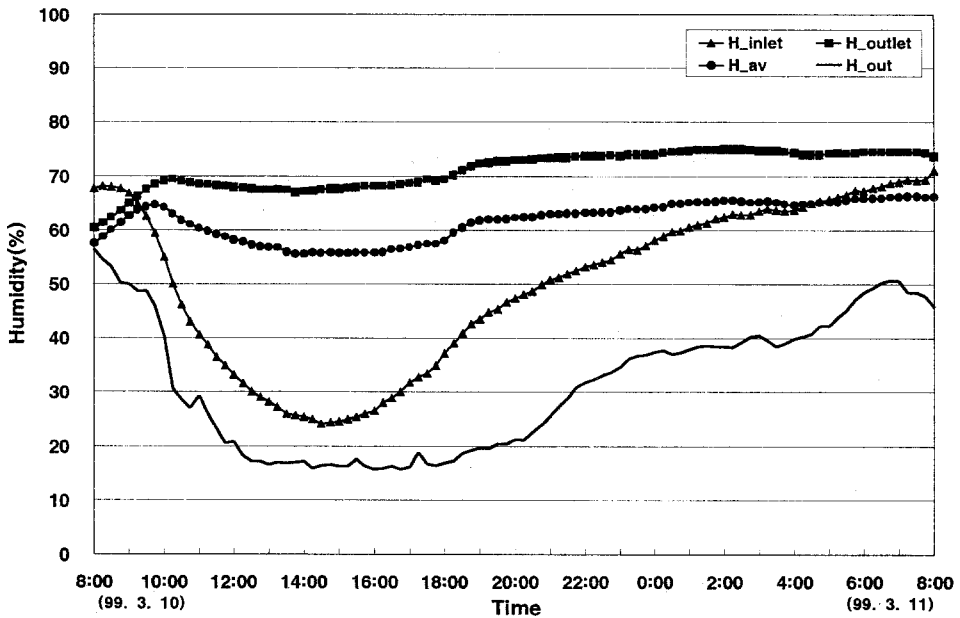
(e) 자갈축열층 온도변화(3월 9일 08:00 ~ 익일 08:00)



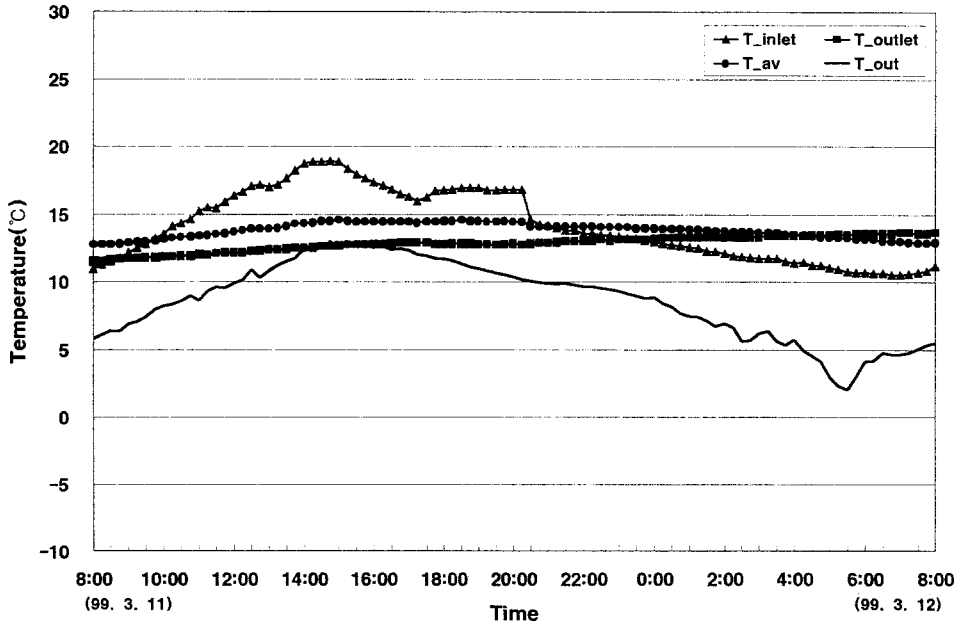
(f) 자갈축열층 습도변화(3월 9일 08:00 ~ 익일 08:00)



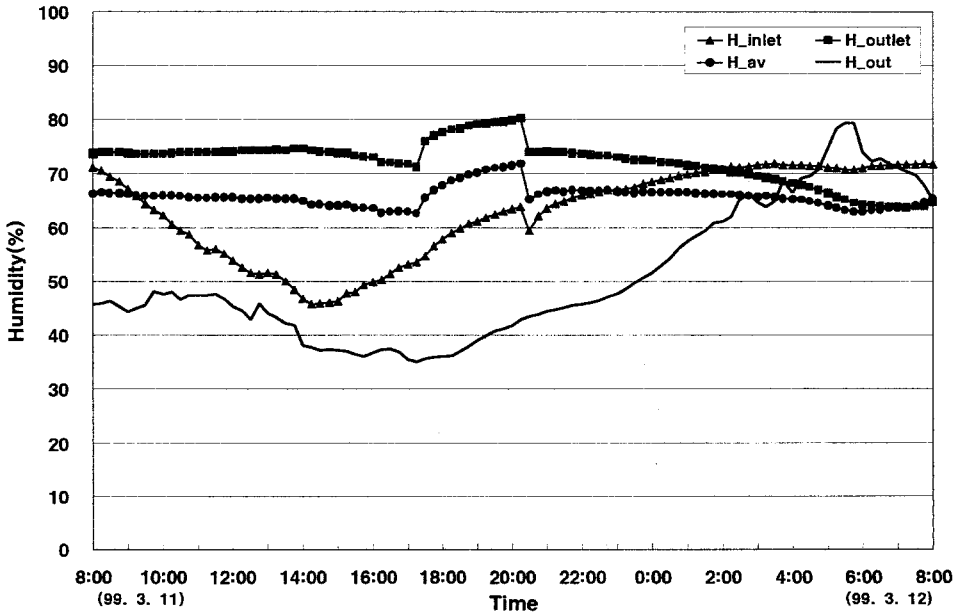
(g) 자갈축열층 온도변화(3월 10일 08:00 ~ 익일 08:00)



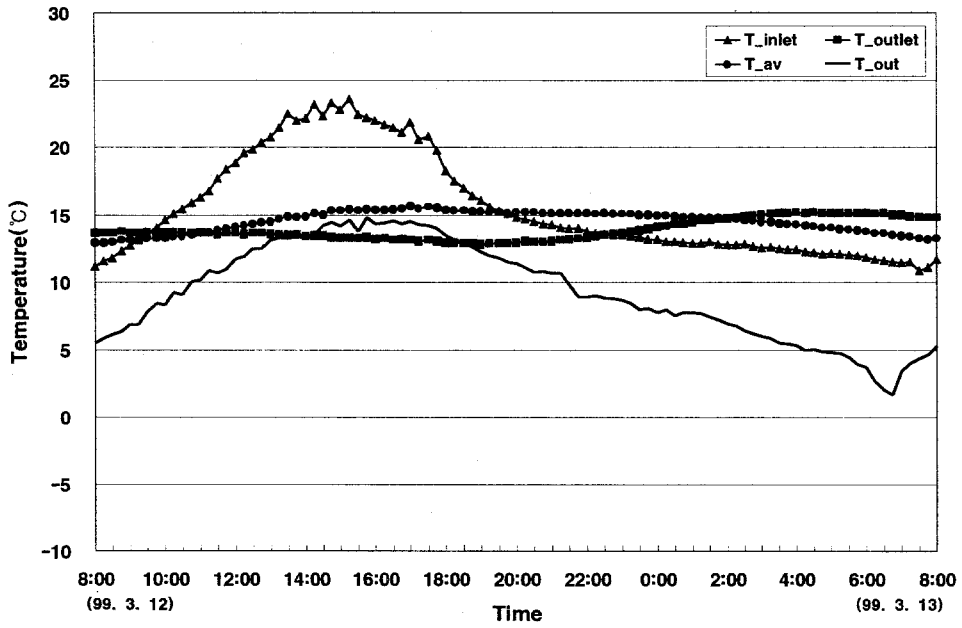
(h) 자갈축열층 습도변화(3월 10일 08:00 ~ 익일 08:00)



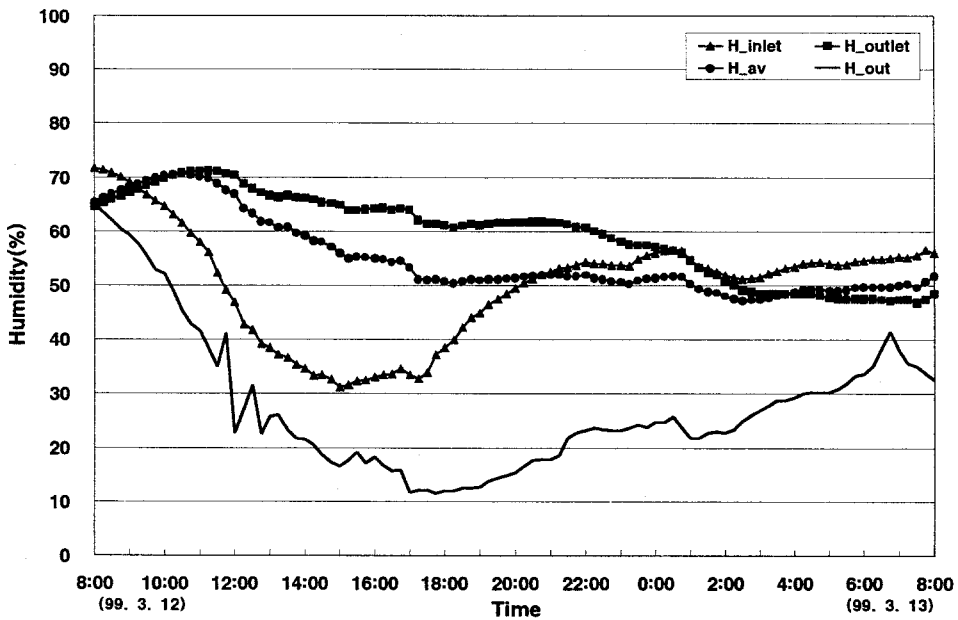
(i) 자갈축열층 온도변화(3월 11일 08:00 ~ 익일 08:00)



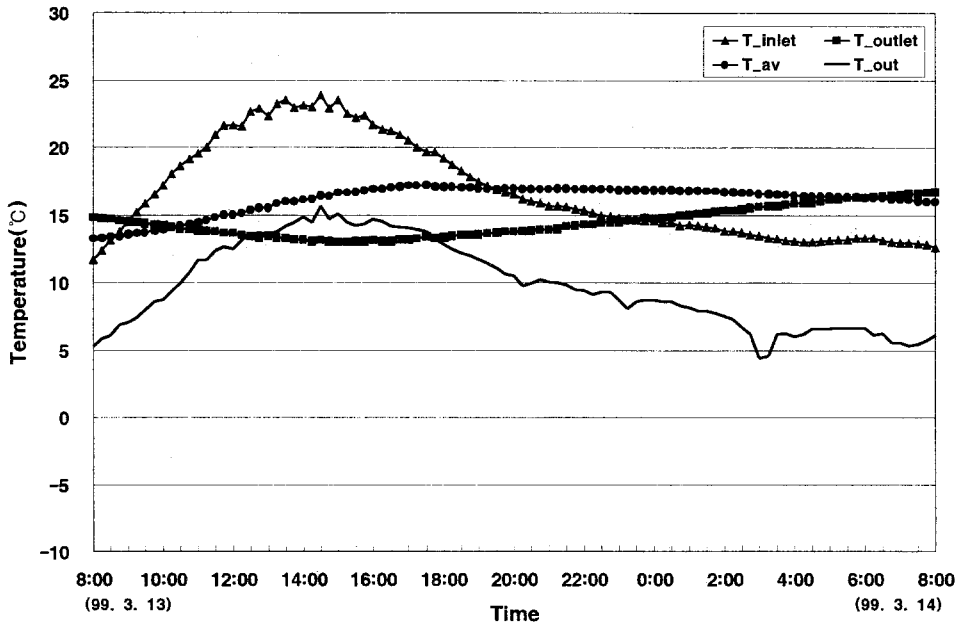
(j) 자갈축열층 습도변화(3월 11일 08:00 ~ 익일 08:00)



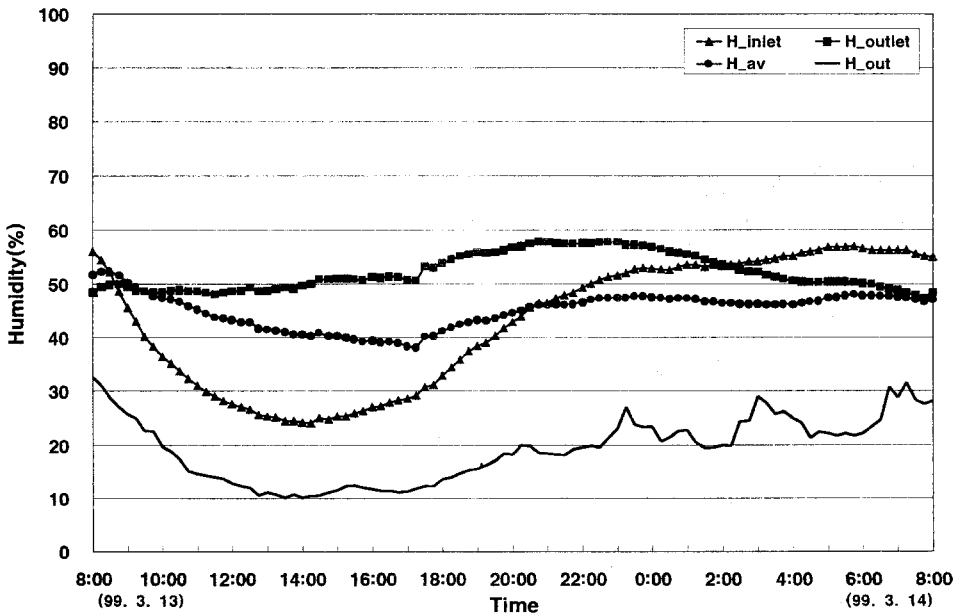
(k) 자갈축열층 온도변화(3월 12일 08:00 ~ 익일 08:00)



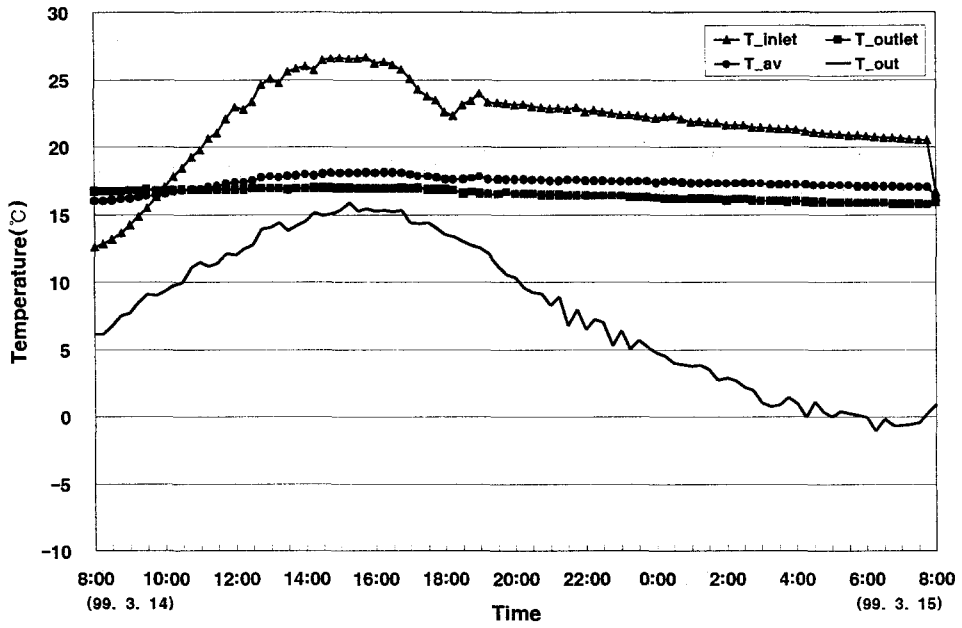
(l) 자갈축열층 습도변화(3월 12일 08:00 ~ 익일 08:00)



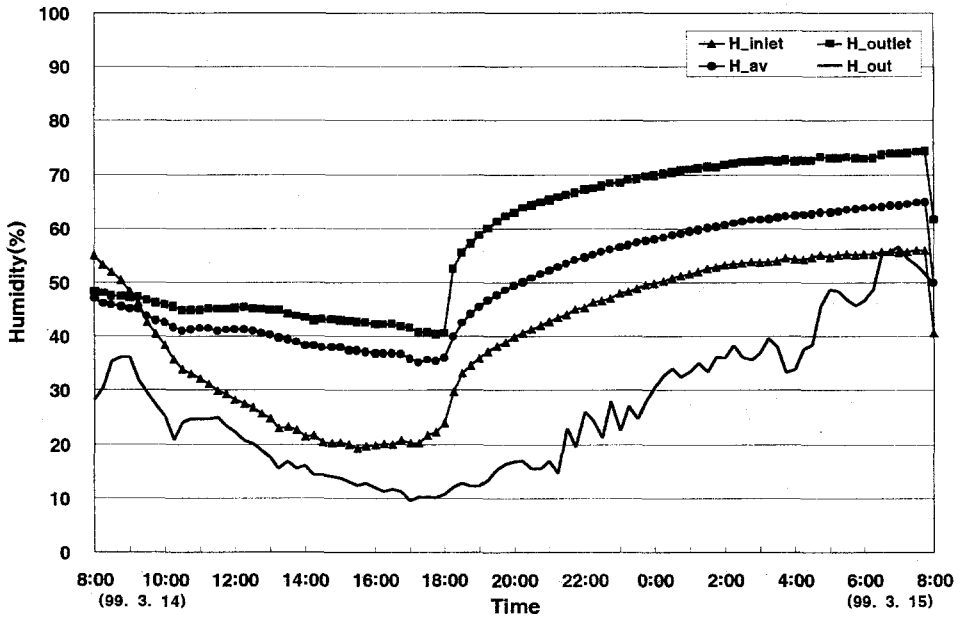
(m) 자갈축열층 온도변화(3월 13일 08:00 ~ 익일 08:00)



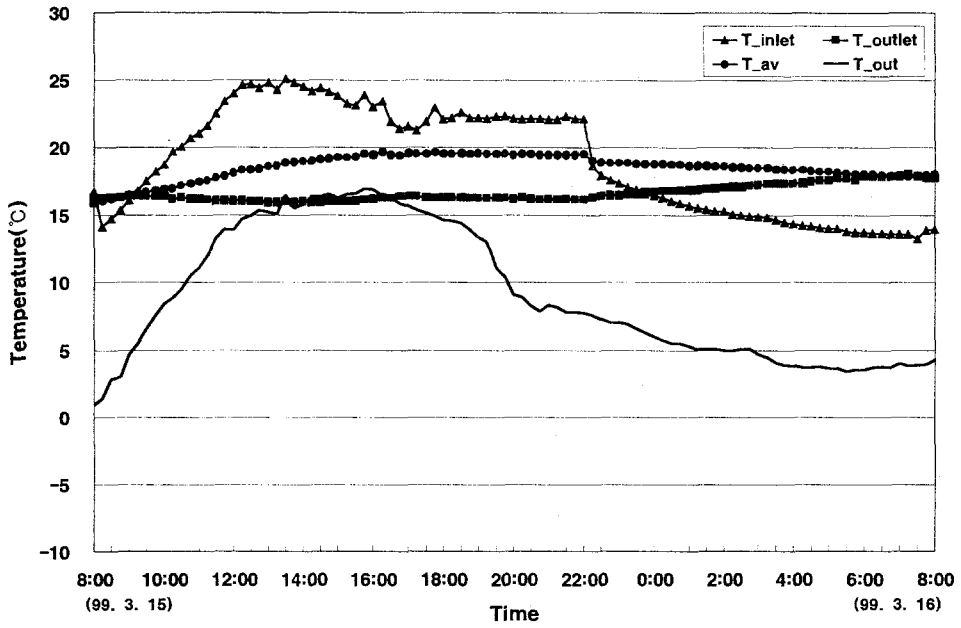
(n) 자갈축열층 습도변화(3월 13일 08:00 ~ 익일 08:00)



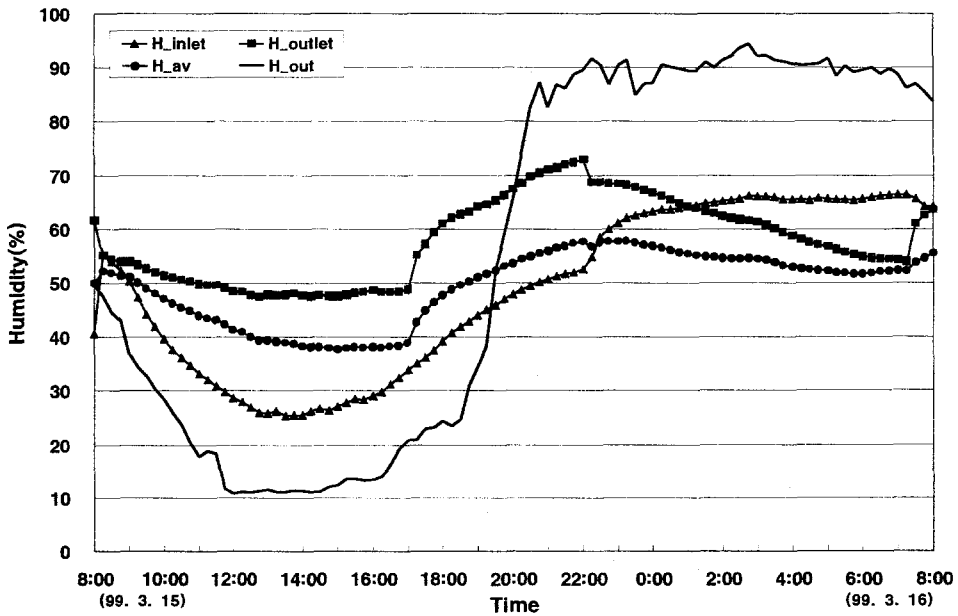
(o) 자갈축열층 온도변화(3월 14일 08:00 ~ 익일 08:00)



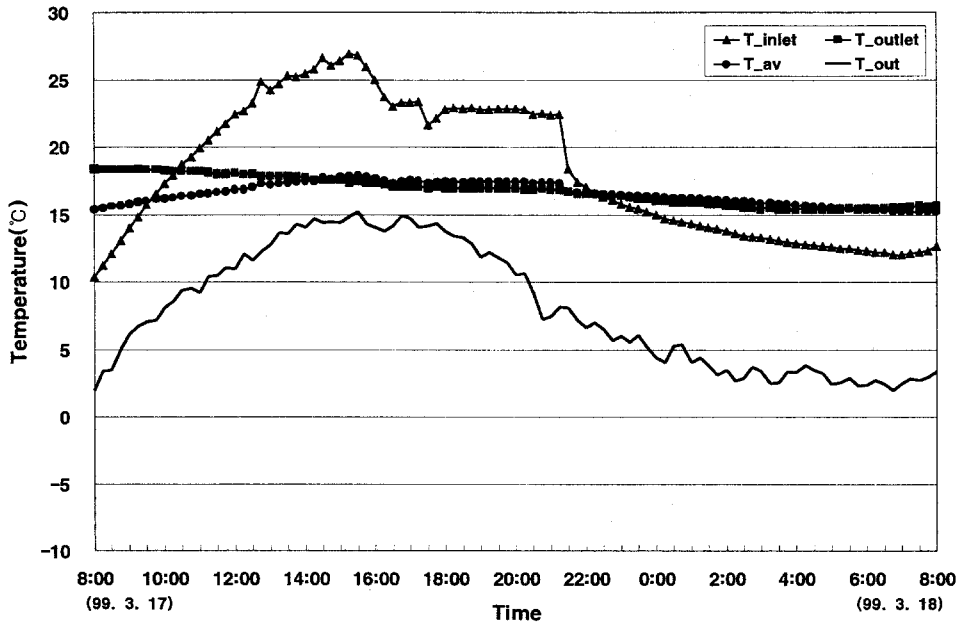
(p) 자갈축열층 습도변화(3월 14일 08:00 ~ 익일 08:00)



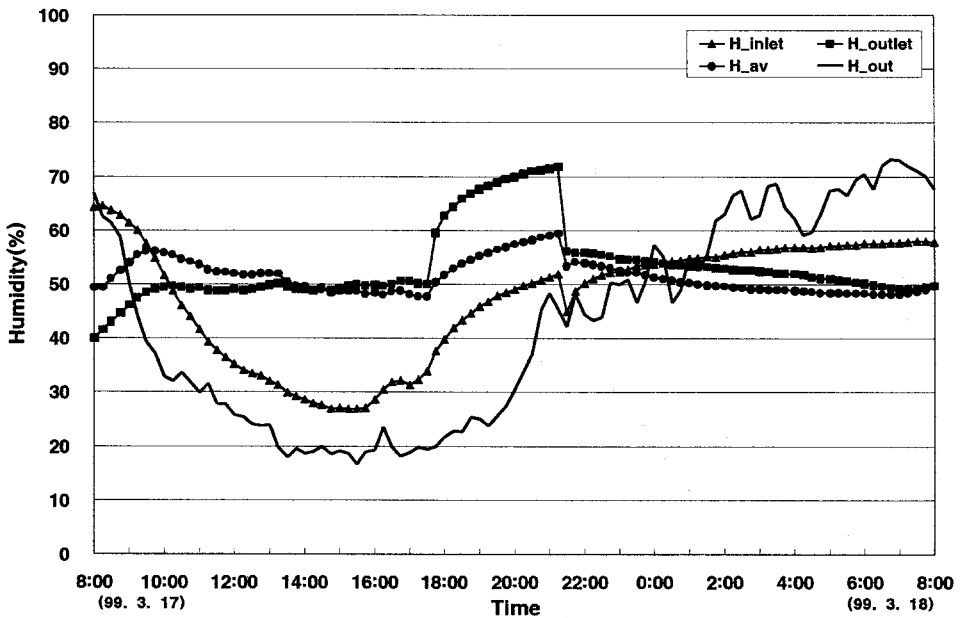
(q) 자갈축열층 온도변화(3월 15일 08:00 ~ 익일 08:00)



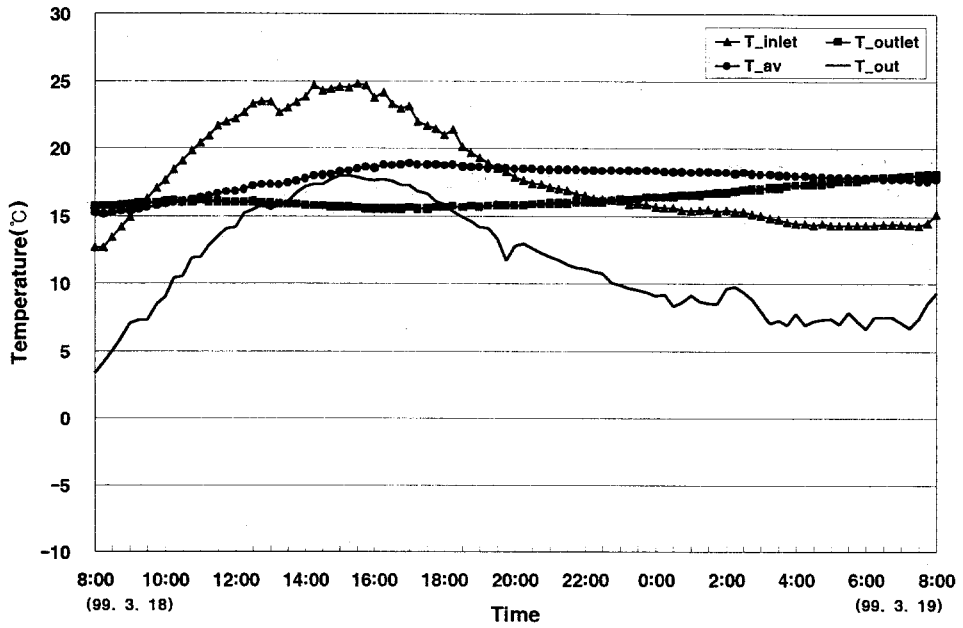
(r) 자갈축열층 습도변화(3월 15일 08:00 ~ 익일 08:00)



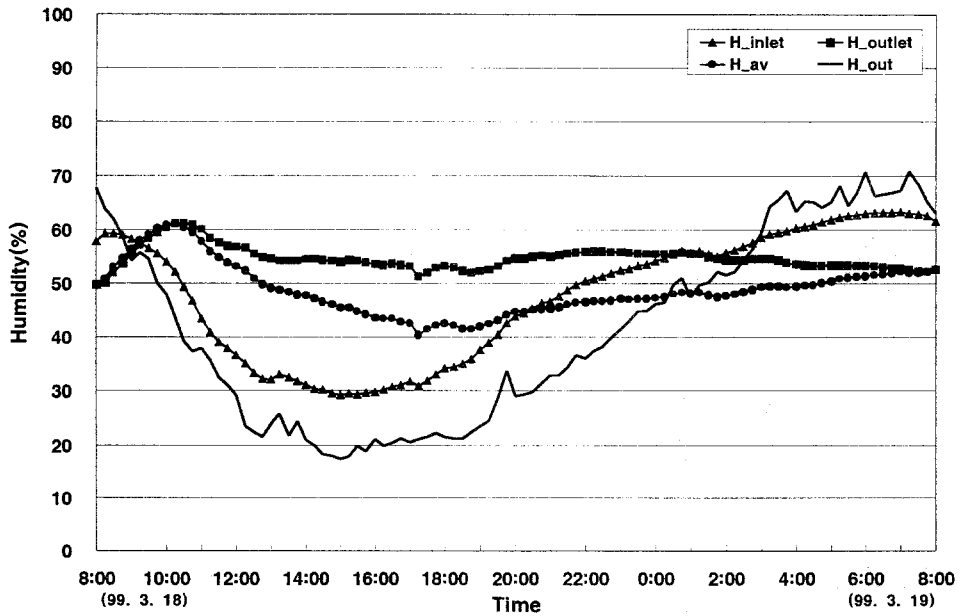
(s) 자갈축열층 온도변화(3월 17일 08:00 ~ 익일 08:00)



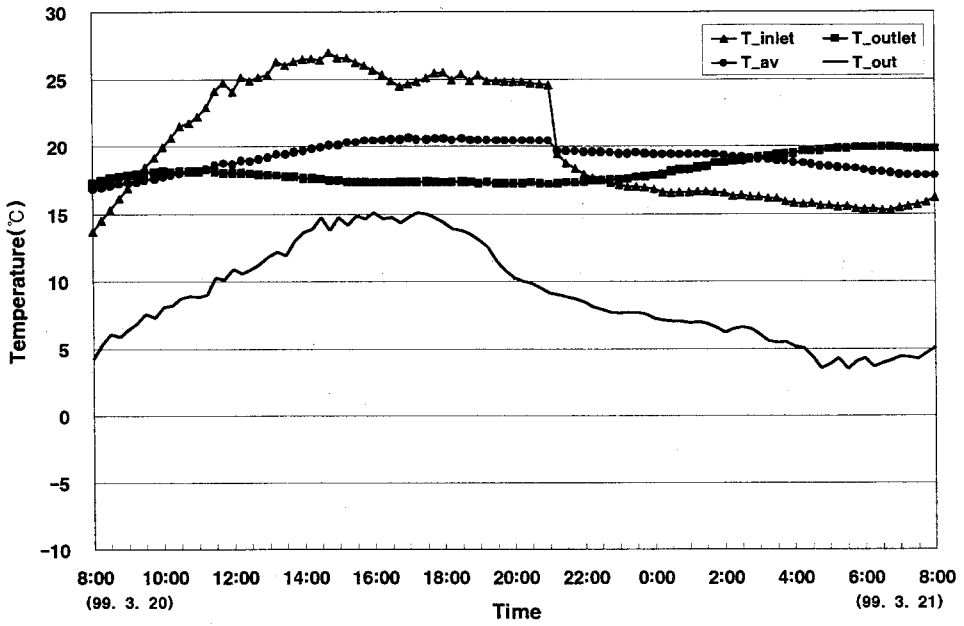
(t) 자갈축열층 습도변화(3월 17일 08:00 ~ 익일 08:00)



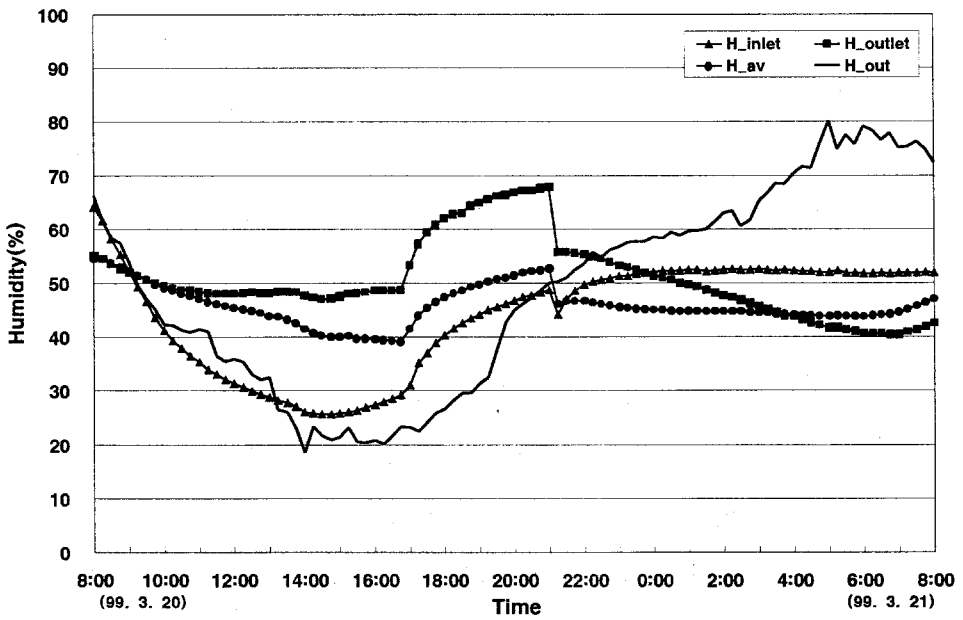
(u) 자갈축열층 온도변화(3월 18일 08:00 ~ 익일 08:00)



(v) 자갈축열층 습도변화(3월 18일 08:00 ~ 익일 08:00)



(w) 자갈축열층 온도변화(3월 6일 08:00 ~ 익일 08:00)



(x) 자갈축열층 습도변화(3월 20일 08:00 ~ 익일 08:00)

그림 5-18. 자갈축열층의 내부온·습도 변화

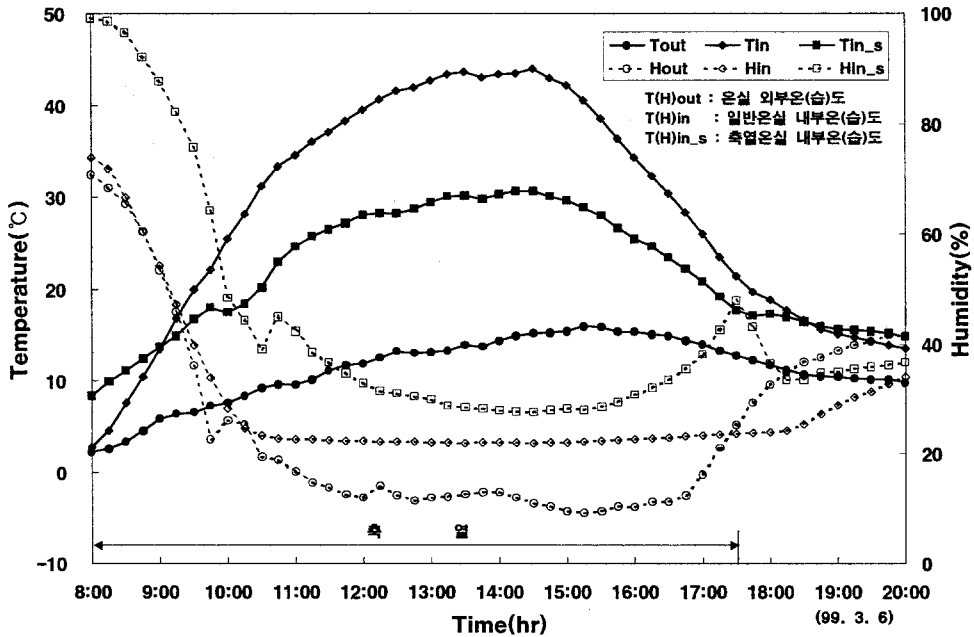
나. 자갈축열 태양열 온실의 내부온·습도 변화

1) 주간(08:00~20:00)에 있어 온실내부 온·습도 변화

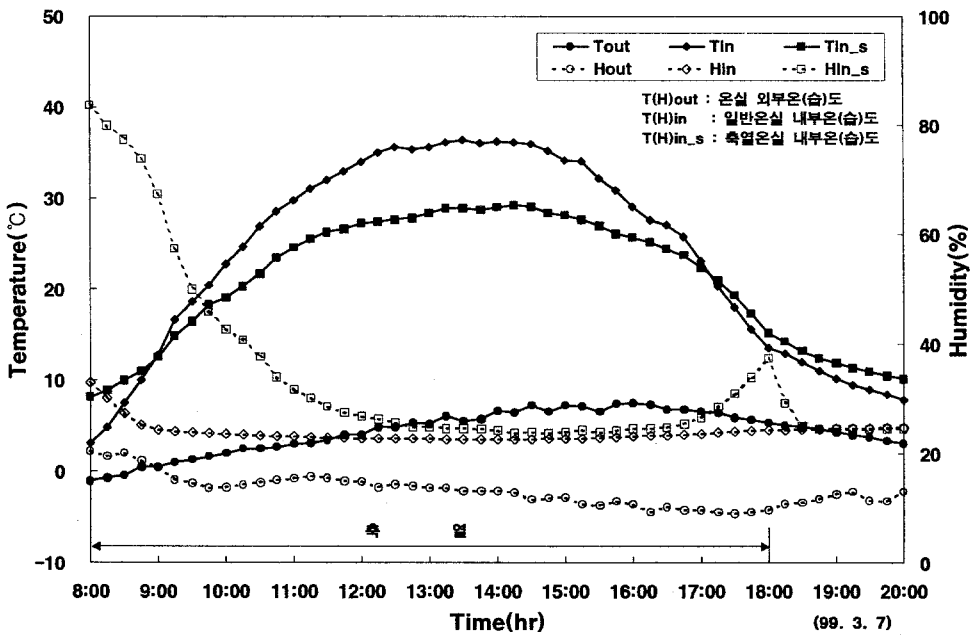
그림 5-19는 주간(08:00~20:00)에 자갈축열 태양열 온실 및 대조온실의 내부 온·습도 변화를 분석한 결과로서, 그림 5-19(a)는 공기유입팬을 최대유량($212\text{m}^3/\text{min}$)으로 작동시켰을 경우이며 그림 5-19(b)는 공기유입팬을 최대유량의 $1/2(106\text{m}^3/\text{min})$ 로 작동시켰을 때의 자갈축열 태양열 온실과 대조온실의 내부온·습도 변화를 나타낸 것이다.

그림 5-19(a)에서 보는 바와 같이 유입팬의 최대용량으로 축열하였을 경우, 외기온이 $2.2^\circ\text{C} \sim 16.1^\circ\text{C}$ (평균온도 11.3°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 $8.3^\circ\text{C} \sim 30.9^\circ\text{C}$ (평균 22.0)범위였으며 대조온실 내부온도는 $2.7^\circ\text{C} \sim 44.1^\circ\text{C}$ (평균 28.6°C)범위에서 변화하였다. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 주간(08:00~20:00)에 최고 13.2°C , 평균 6.6°C 의 승온억제효과가 있었다. 그리고, 내부습도는 외부습도가 $9.2\% \sim 70.8\%$ (평균 24.8%)범위에서 변화할 때 자갈축열 태양열 온실의 내부습도는 $27.6\% \sim 99.3\%$ (평균 42.7%)범위였으며 대조온실의 내부습도는 $22.0\% \sim 74.0\%$ (평균 29.0%)범위에서 변화하여 축열온실의 내부습도가 대조온실과 비교하여 평균 18.7% 정도 높게 나타났다.

그림 5-19(b)는 공기유입팬을 최대유량의 $1/2$ 로 축열하였을 경우 온실내부의 온·습도 변화를 분석한 것으로서, 외기온이 $-1.0^\circ\text{C} \sim 7.6^\circ\text{C}$ (평균온도 4.4°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 $8.1^\circ\text{C} \sim 29.4^\circ\text{C}$ (평균 21.1)범위였으며 대조온실 내부온도는 $3.1^\circ\text{C} \sim 36.5^\circ\text{C}$ (평균 24.0°C)범위에서 변화하였다. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실과 비교하여 주간(08:00~20:00)에 최고 7.1°C , 평균 2.9°C 의 승온억제효과가 있었다. 그리고, 내부습도는 외부습도가 $8.9\% \sim 20.5\%$ (평균 13.1%)범위에서 변화할 때 자갈축열 태양열 온실의 내부습도는 $23.7\% \sim 83.6\%$ (평균 33.5%)범위



(a) 순환팬을 최대유량(212m³/min)으로 작동



(b) 순환팬을 최대유량 1/2(106m³/min)으로 작동

그림 5-19. 온실의 내부온·습도 변화(주간, 08:00~20:00)

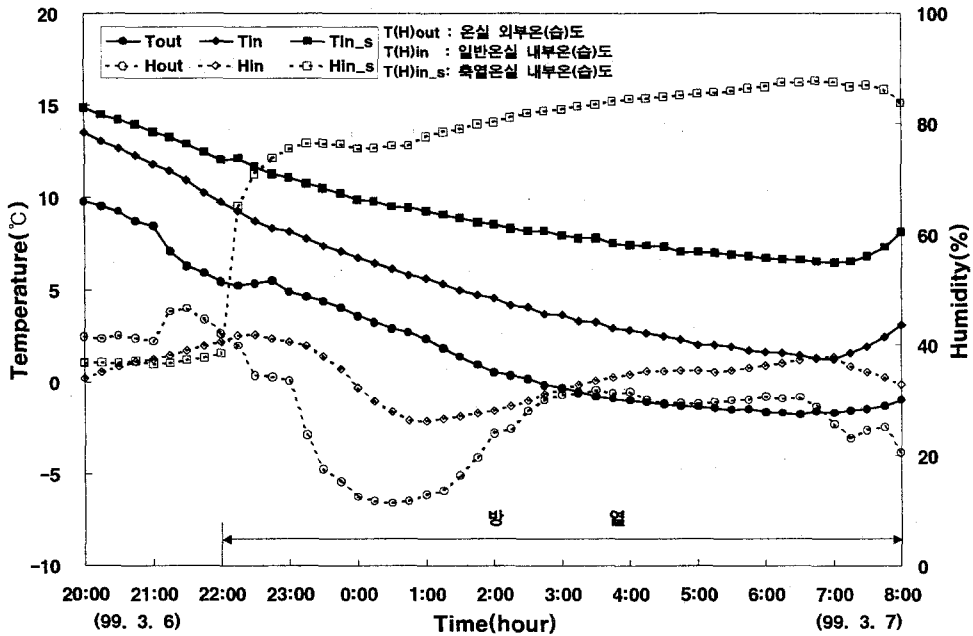
였으며 대조온실의 내부습도는 22.5%~32.9%(평균 23.8%)범위에서 변화하여 축열온실의 내부습도가 대조온실에 비해 평균 9.7%정도 높게 나타났다.

따라서, 주간외부의 외부일사에 의해 대조온실의 내부온도는 시간이 경과함에 따라 급격하게 상승하였으나 축열온실의 내부온도는 완만하게 상승하였으며 대조온실의 내부습도는 외부습도에 많은 영향을 받으나 축열온실의 경우에는 온실내부와 축열층의 공기순환으로 인하여 축열층 내부습도의 영향을 받는 것으로 분석되었다.

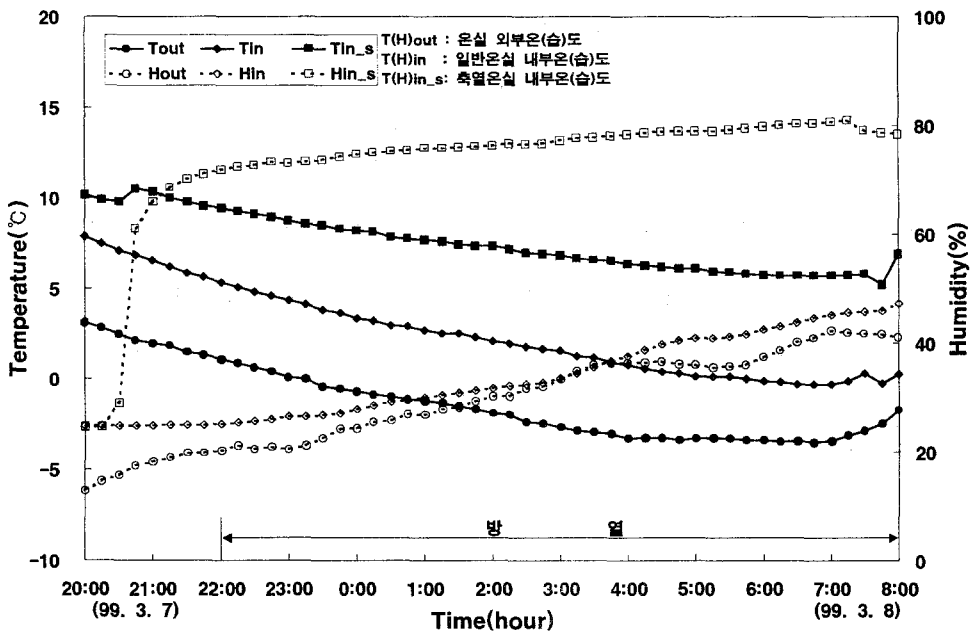
2) 야간에 있어 온실내부의 온·습도 변화

그림 5-20은 야간(20:00~익일08:00)에 자갈축열 태양열 온실 및 대조온실의 내부온·습도 변화를 분석한 결과로서, 그림 5-20(a)는 공기유입팬을 최대용량($212\text{m}^3/\text{min}$)으로 작동시켰을 경우이며 그림 5-20(b)는 공기유입팬을 최대용량의 $1/2(106\text{m}^3/\text{min})$ 로 작동시켰을 때의 자갈축열 태양열 온실과 대조온실의 내부온·습도 변화를 나타내고 있다.

그림 5-20(a)에서 보는 바와 같이 공기유입팬을 최대용량으로 방열하였을 경우, 외기온이 $-1.8^{\circ}\text{C}\sim 9.8^{\circ}\text{C}$ (평균온도 2.0°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 $6.5^{\circ}\text{C}\sim 14.9^{\circ}\text{C}$ (평균 9.3°C)범위였으며 대조온실 내부온도는 $1.1^{\circ}\text{C}\sim 13.5^{\circ}\text{C}$ (평균 5.5°C)범위에서 변화하였다. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 평균 3.8°C 의 난방효과가 있었다. 그리고, 내부습도는 외부습도가 11.2%~46.8%(평균 28.7%)범위에서 변화할 때 자갈축열 태양열 온실의 내부습도는 36.3%~87.8%(평균 73.5%)범위였으며 대조온실의 내부습도는 26.3%~42.0%(평균 34.7%)범위에서 변화하여 축열온실의 내부습도가 대조온실에 비해 평균 45.8% 정도 높게 나타났다.



(a) 순환팬을 최대용량($212\text{m}^3/\text{min}$)

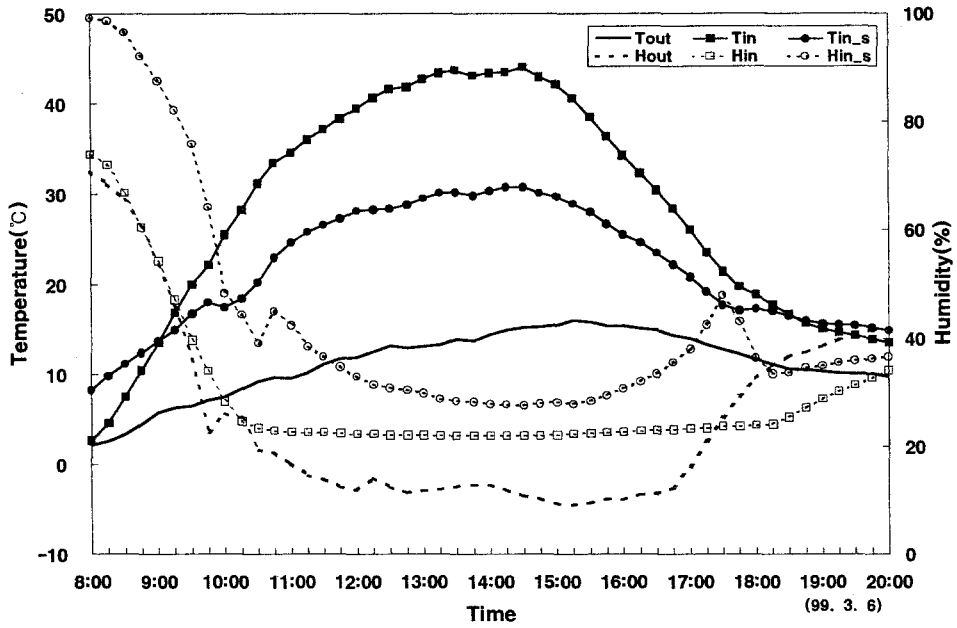


(b) 순환팬을 최대용량 1/2($106\text{m}^3/\text{min}$)

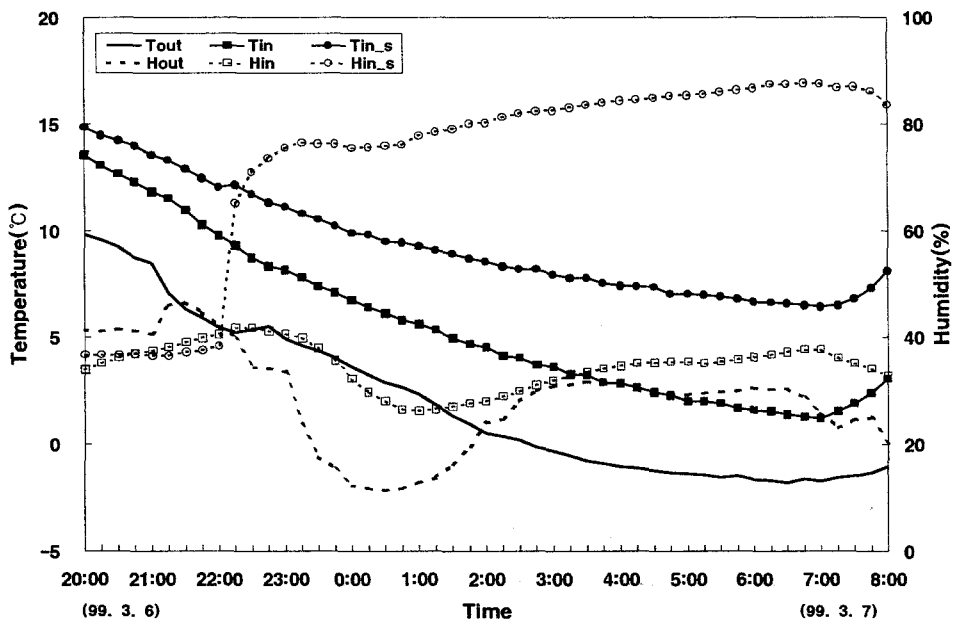
그림 5-20. 온실의 내부온·습도 변화(야간, 20:00~익일 08:00)

그림 5-20(b)에서 보는 바와 같이 공기유입팬을 최대용량의 1/2로 방열하였을 경우 외기온이 $-3.5^{\circ}\text{C} \sim 3.1^{\circ}\text{C}$ (평균온도 -1.3°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 $5.1^{\circ}\text{C} \sim 10.5^{\circ}\text{C}$ (평균 7.5°C)범위였으며 대조온실 내부온도는 $-0.3^{\circ}\text{C} \sim 7.9^{\circ}\text{C}$ (평균 2.5°C)범위에서 변화하였다. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 평균 5°C 의 난방효과가 있었다. 그리고, 내부습도는 외부습도가 $12.9\% \sim 42.4\%$ (평균 29.4%)범위에서 변화할 때 자갈축열 태양열 온실의 내부습도는 $24.5\% \sim 81.0\%$ (평균 73.3%)범위였으며 대조온실의 내부습도는 $24.7\% \sim 47.2\%$ (평균 33.4%)범위에서 변화하여 축열온실의 내부습도가 대조온실에 비해 39.9% 정도 높게 나타났다.

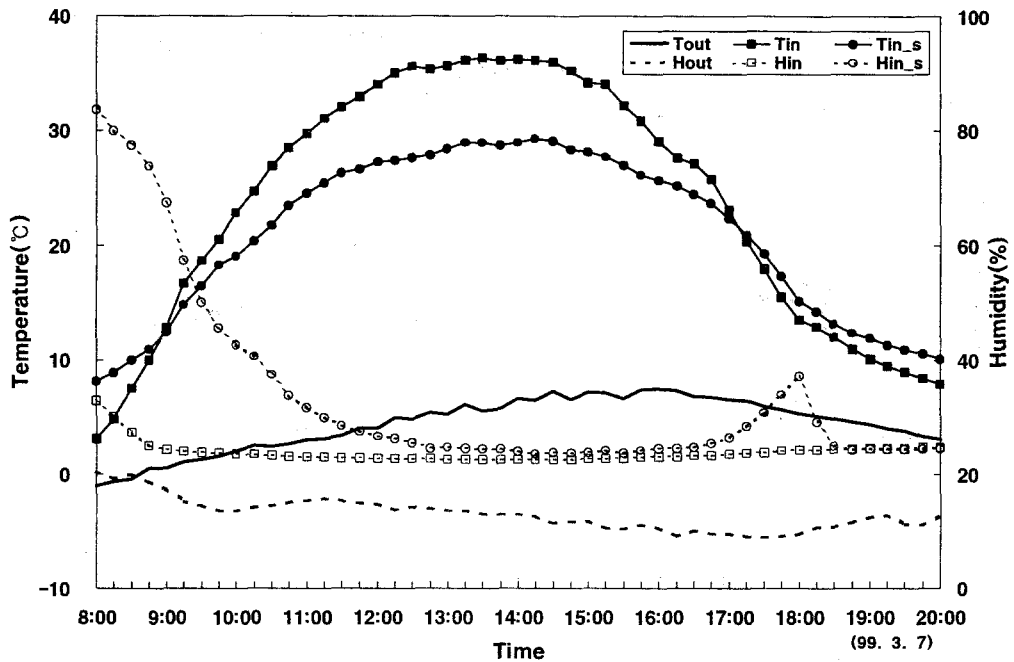
그림 5-21은 난방기간중 주·야간 온실내부 온·습도를 측정한 결과로서, 주간에는 자갈축열층의 축열효과로 축열온실 내부온도가 일반온실에 비해 낮게 나타났으며, 야간에는 자갈축열층의 방열로 인하여 축열온실의 내부온도가 일반온실에 비해 높게 나타났다. 공기순환방식과 외기온 변화에 따라 자갈축열층의 축열온도가 변화함에 따라 난방효과 또한 상이한 것으로 분석되었다. 그리고, 야간에 자갈축열 태양열온실은 대조온실에 비해 순환팬 작동방식에 따라 평균 $3.8^{\circ}\text{C} \sim 6.0^{\circ}\text{C}$ 의 난방효과가 있었으며 야간에 축열온실의 내부습도가 다소 높게 나타나는 것은 온실내외 기온차에 의해 온실내부에 결로현상이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.



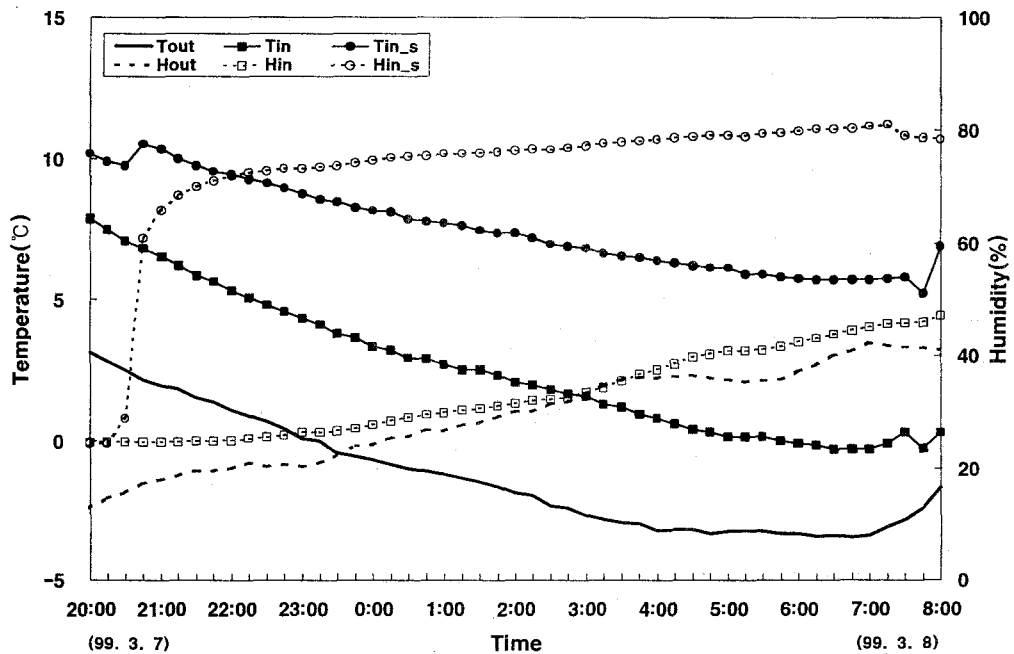
(a) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 6, 08:00~20:00)



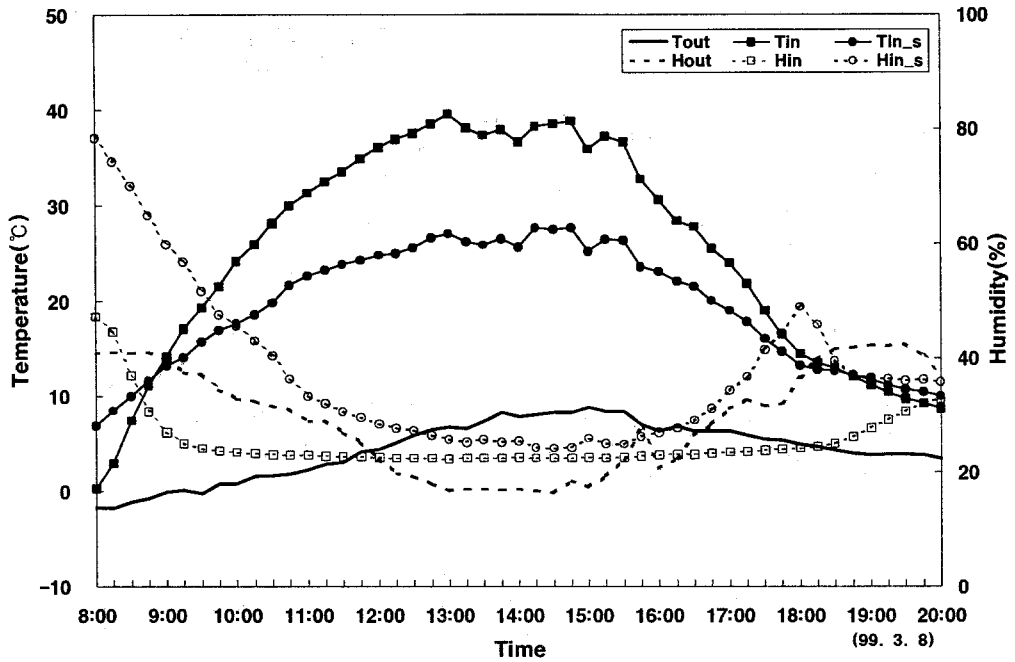
(b) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 6, 20:00~익일 08:00)



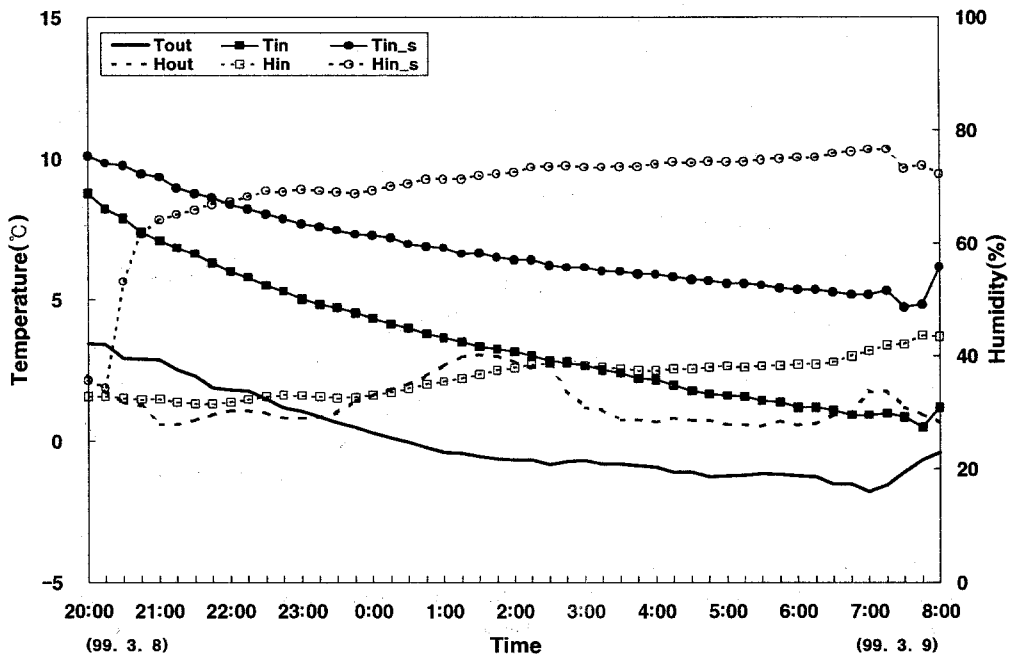
(c) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 7, 08:00~20:00)



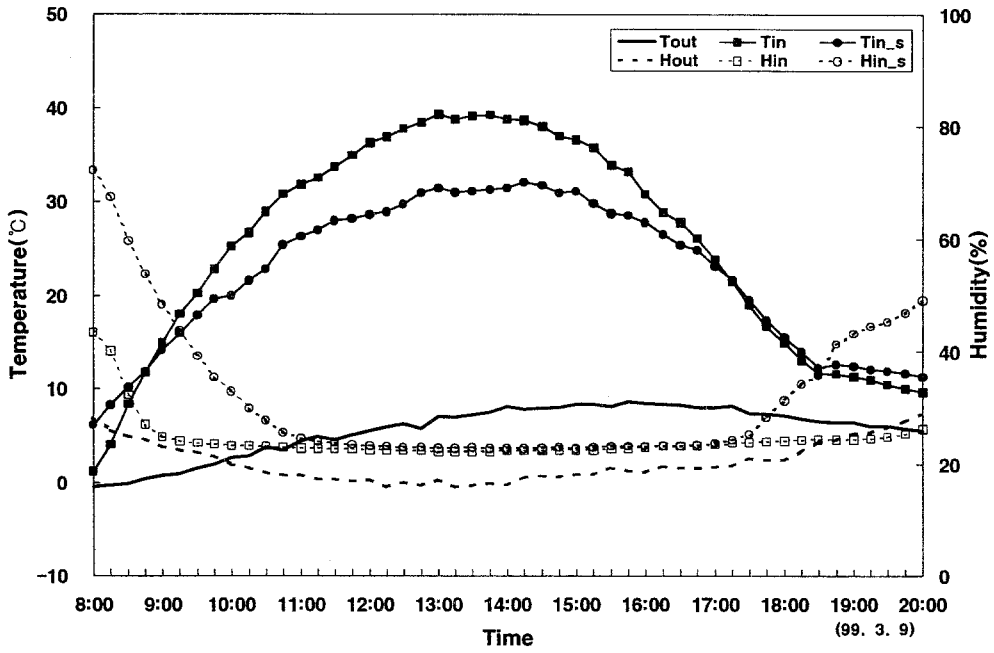
(d) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 7, 20:00~익일 08:00)



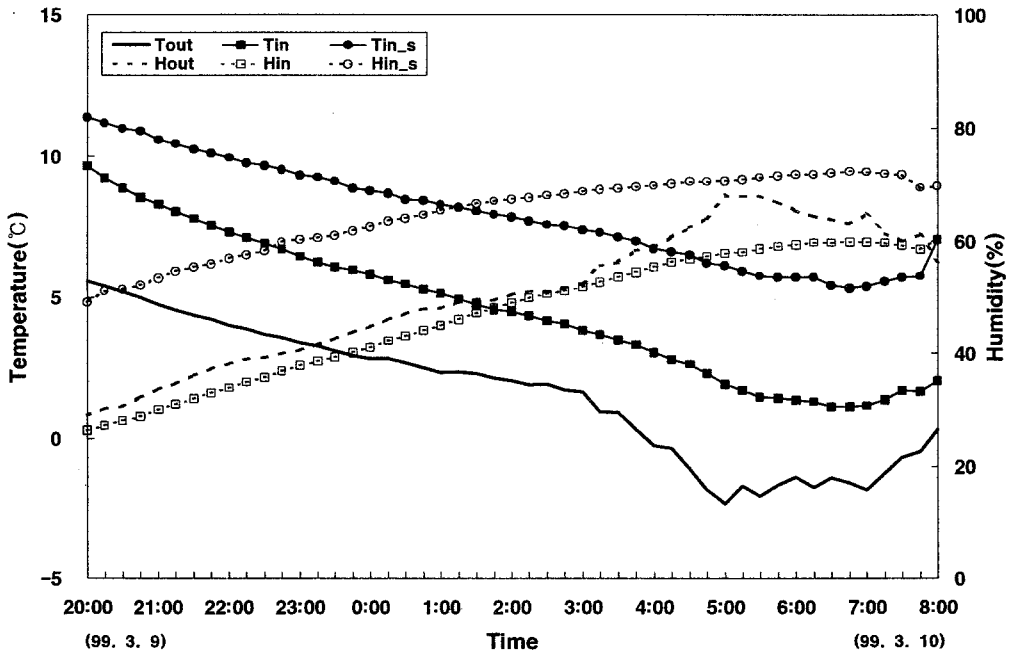
(e) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 8, 08:00~20:00)



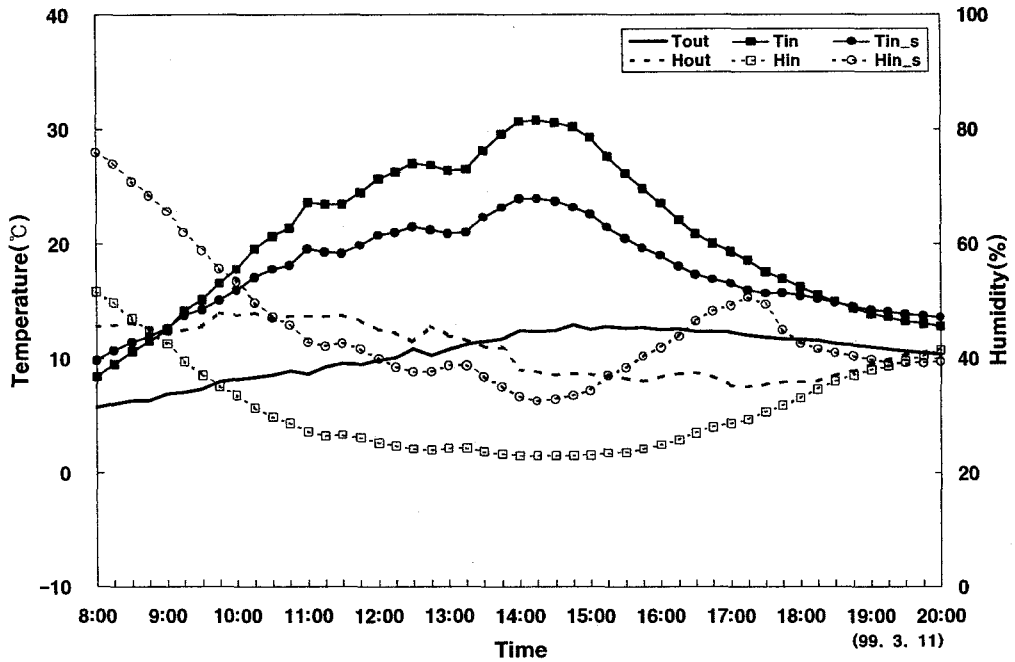
(f) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 9, 08:00~익일 08:00)



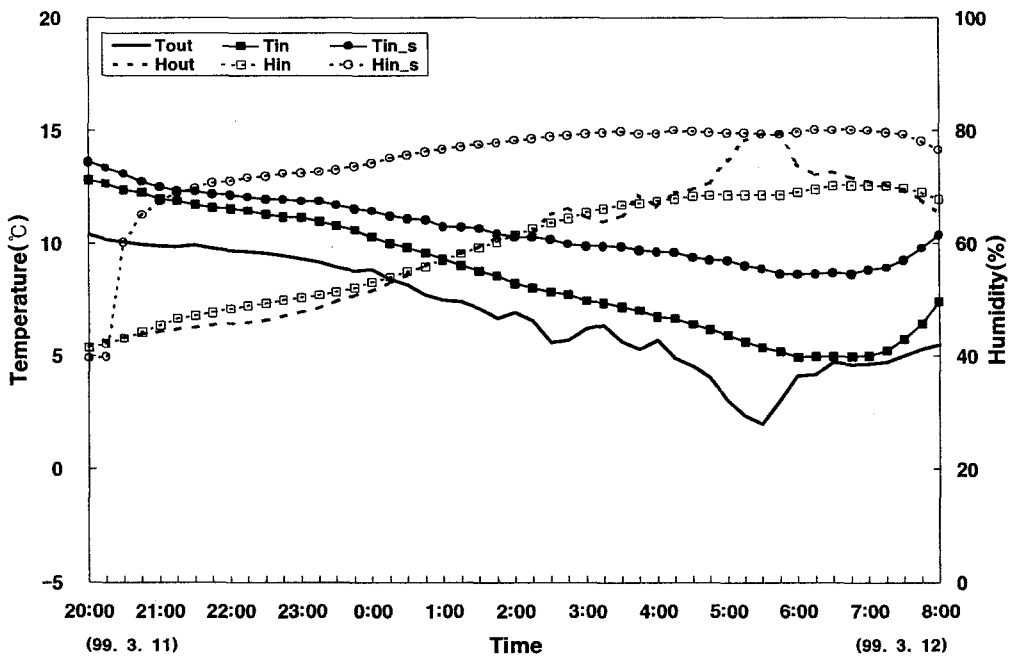
(g) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 9, 08:00~20:00)



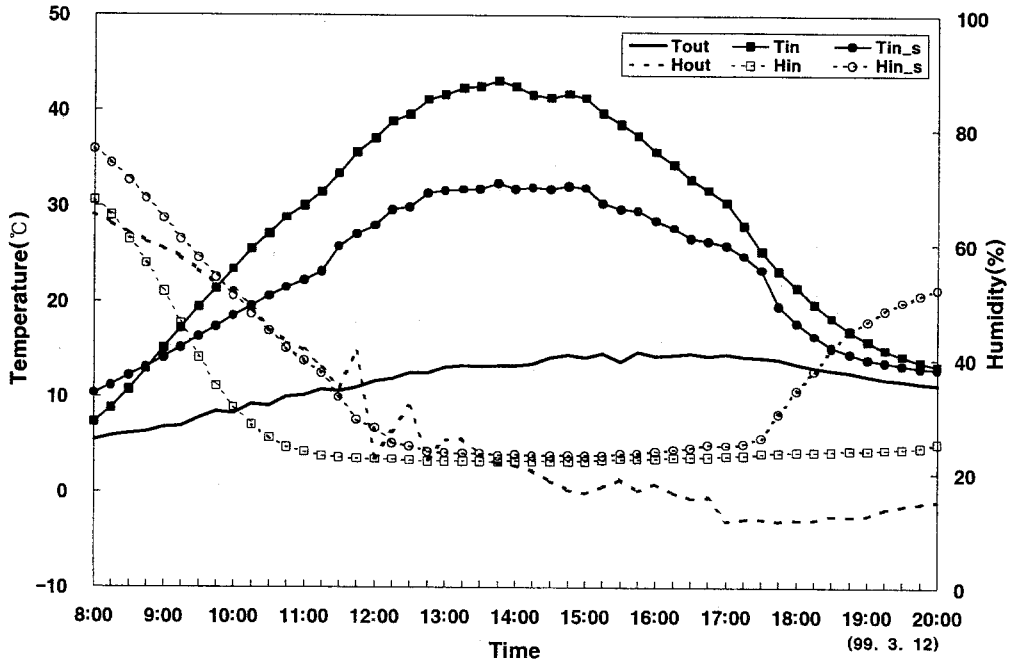
(h) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 10, 08:00~익일 08:00)



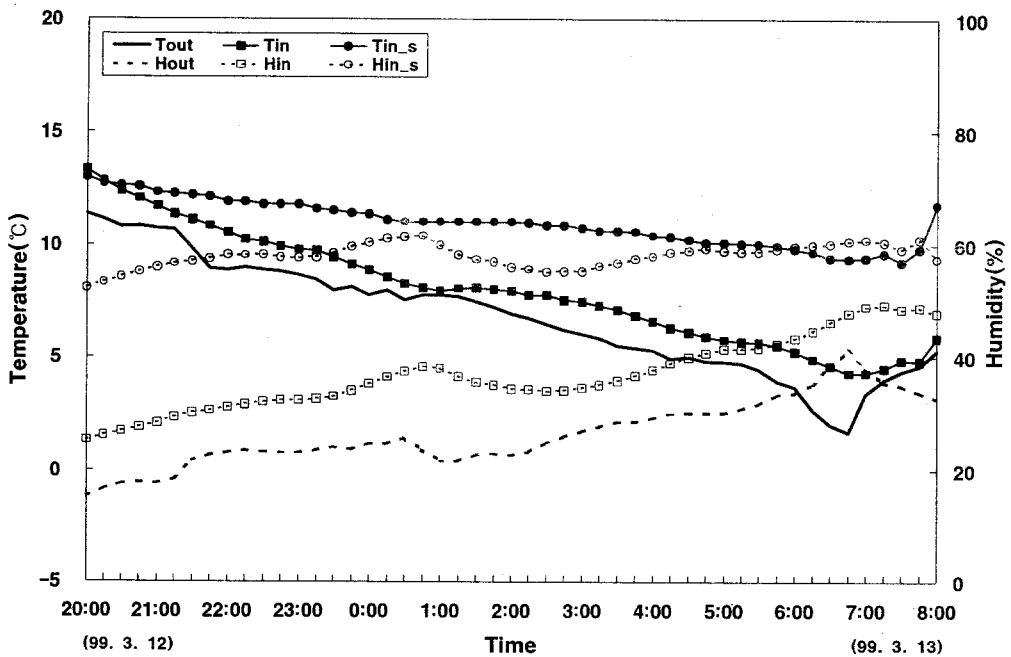
(i) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 11, 08:00~20:00)



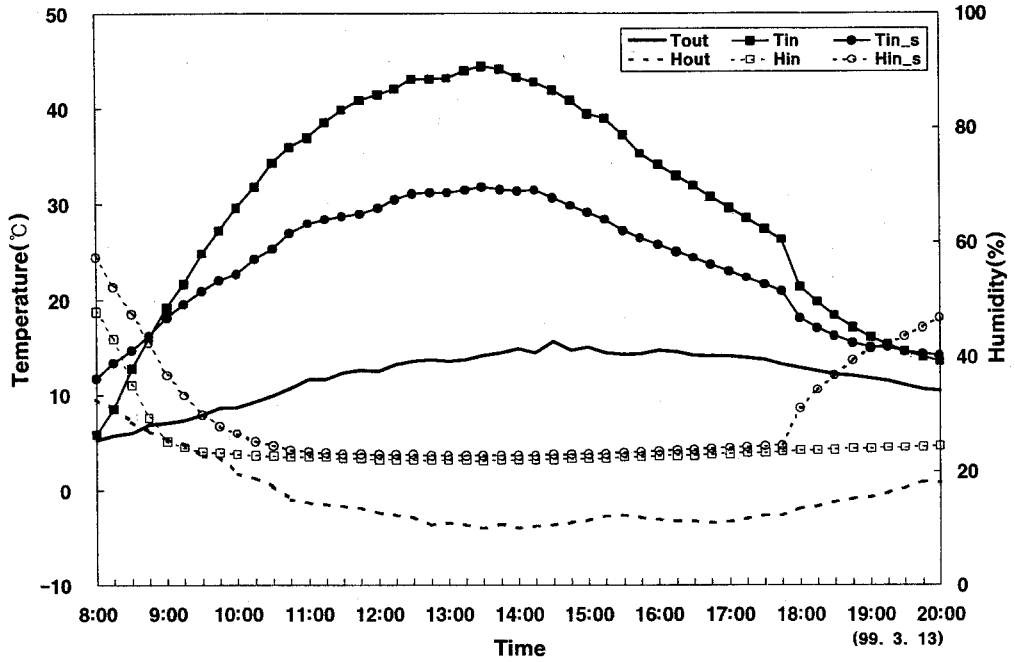
(j) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 11, 20:00~익일 08:00)



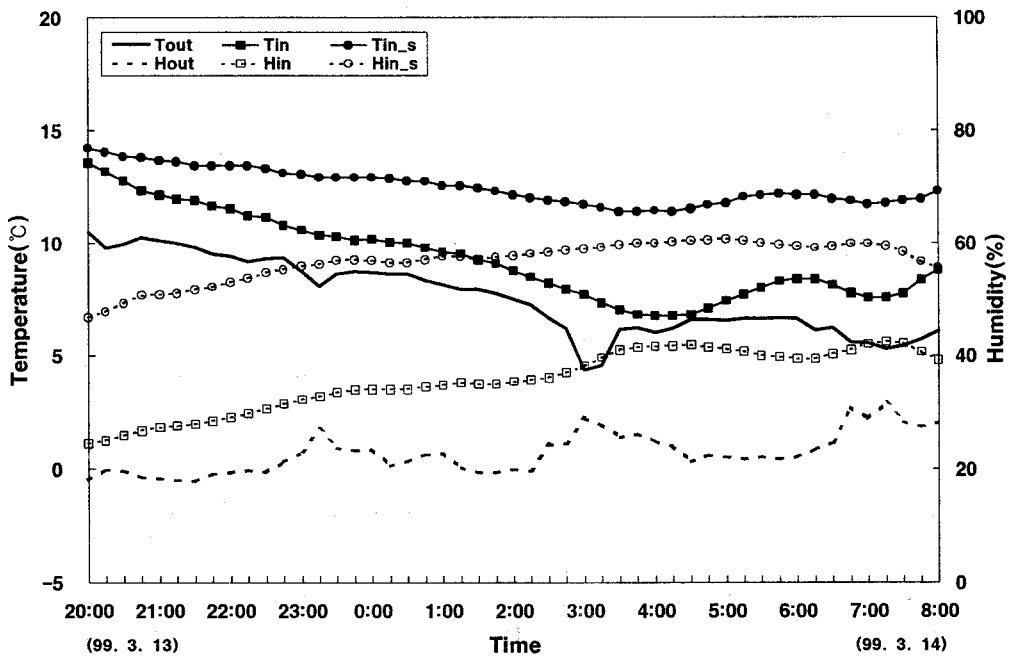
(k) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 12, 08:00~20:00)



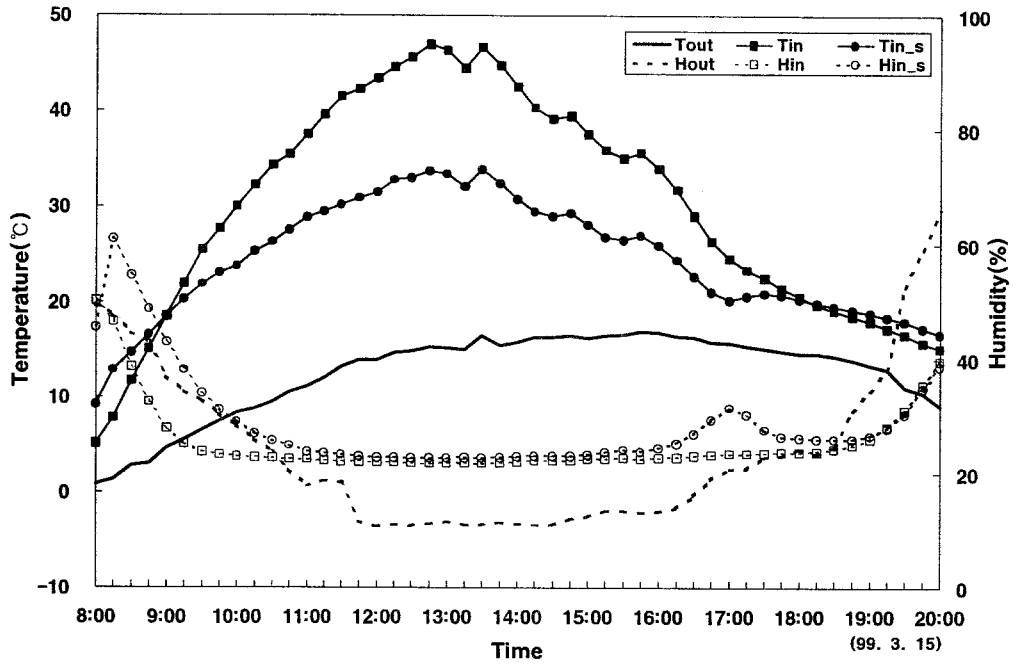
(l) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 12, 20:00~익일 08:00)



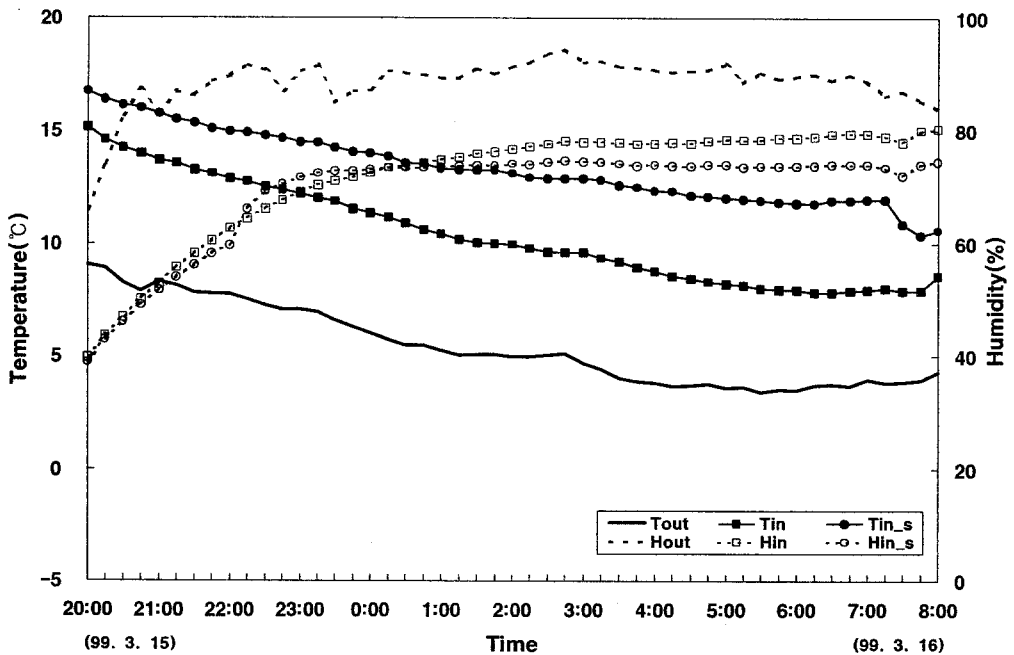
(m) 주간 의 온실내부 온·습도 변화(3. 13, 08:00~20:00)



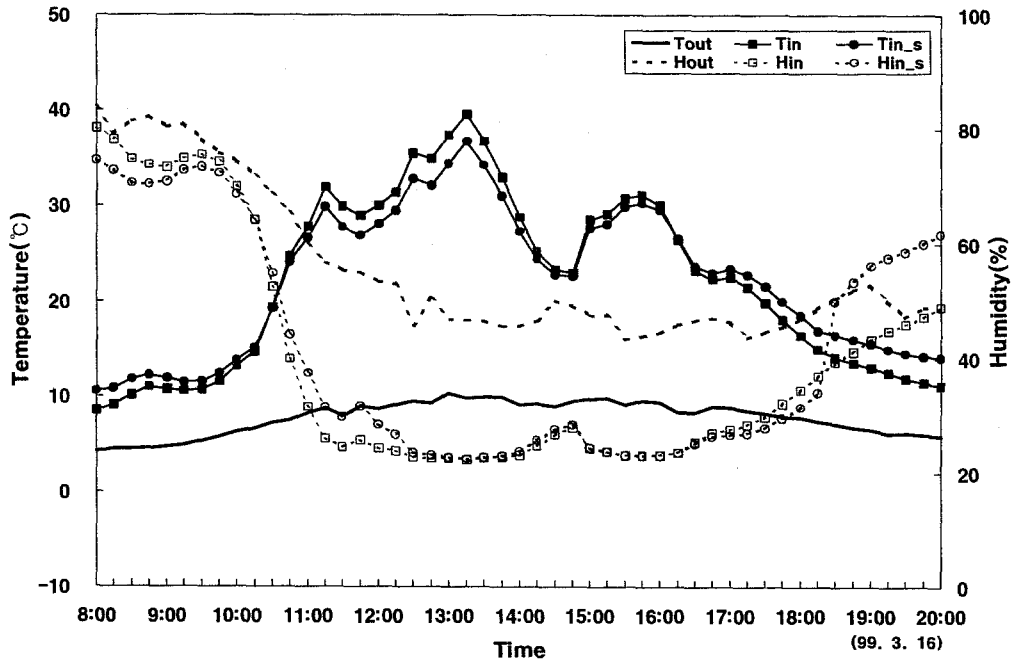
(n) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 13, 20:00~익일 08:00)



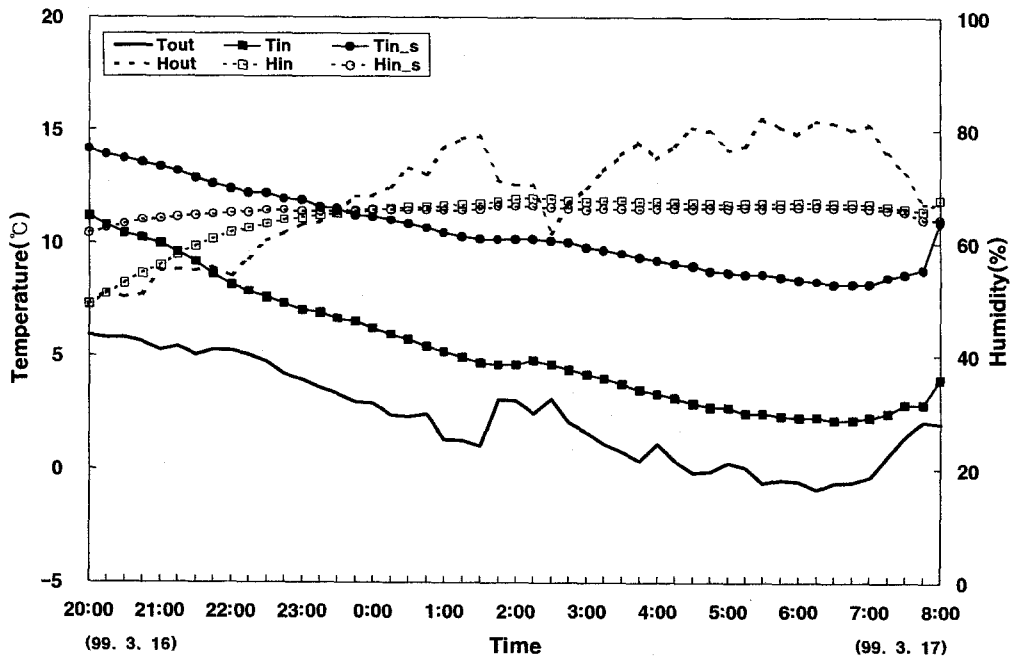
(o) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 15, 08:00~20:00)



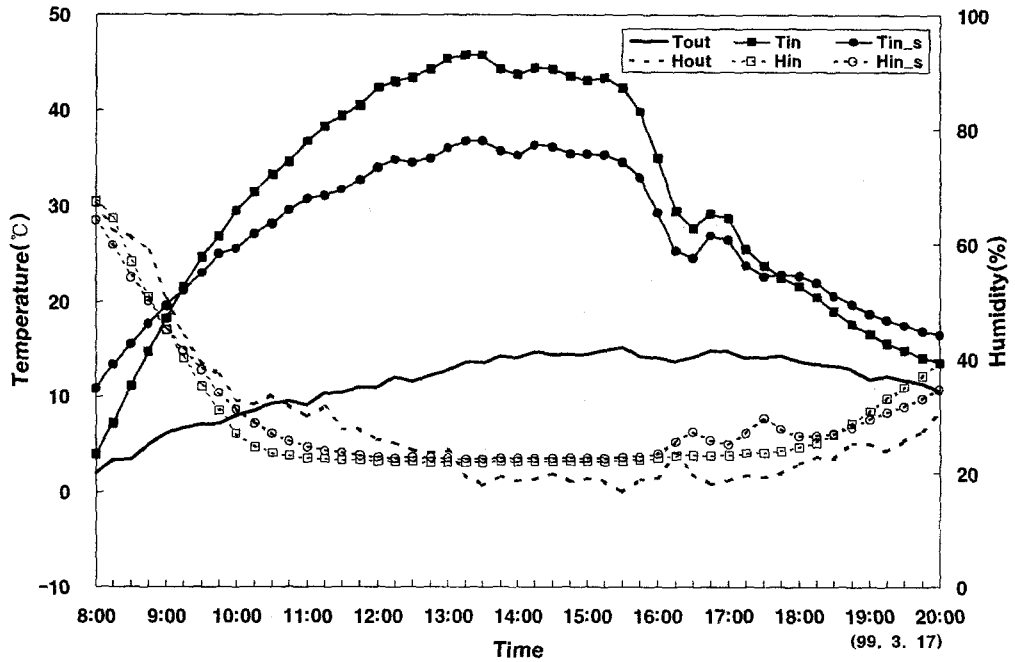
(p) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 15, 20:00~익일 08:00)



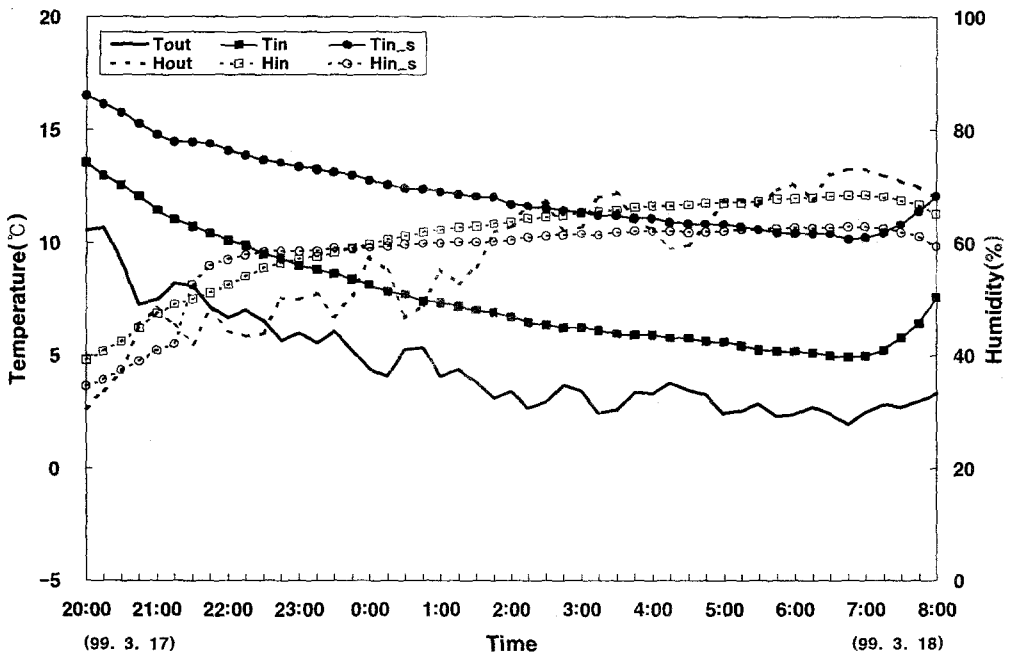
(q) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 16, 08:00~20:00)



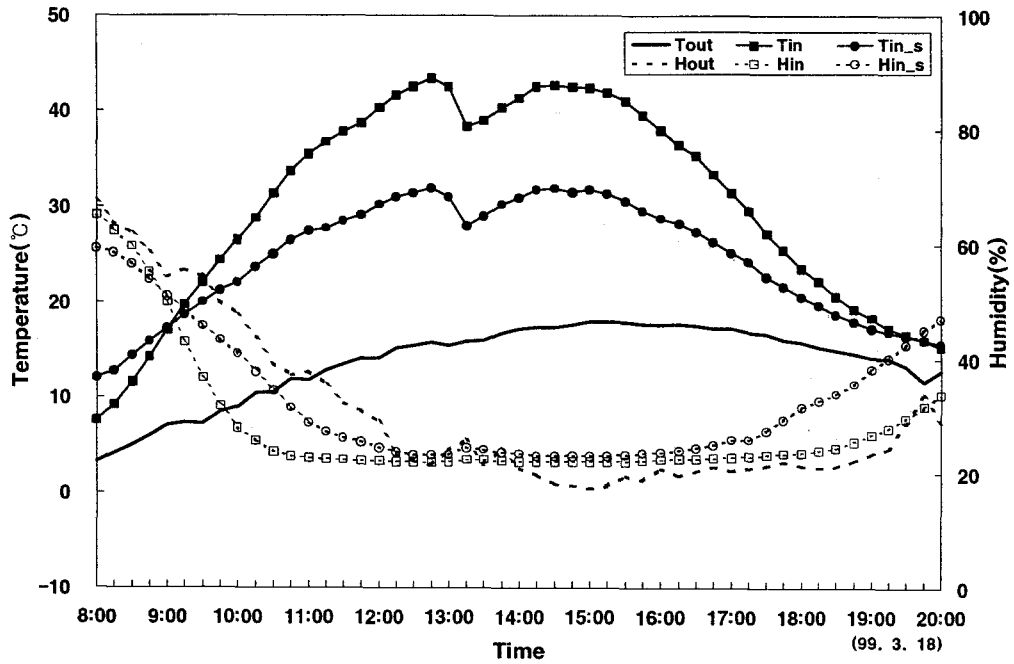
(r) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 16, 20:00~익일 08:00)



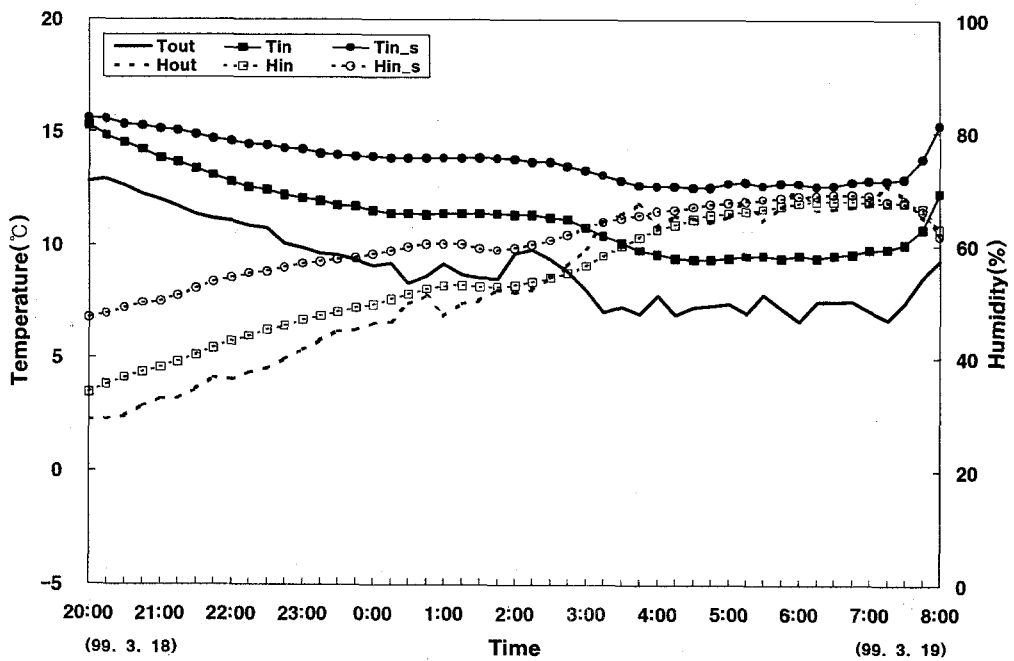
(s) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 17, 08:00~20:00)



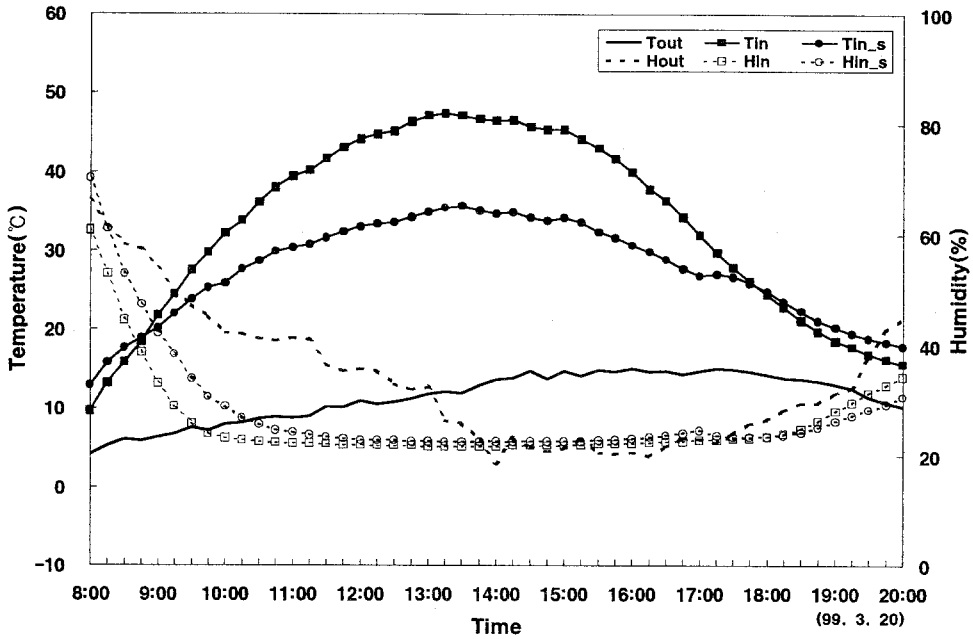
(t) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 17, 20:00~익일 08:00)



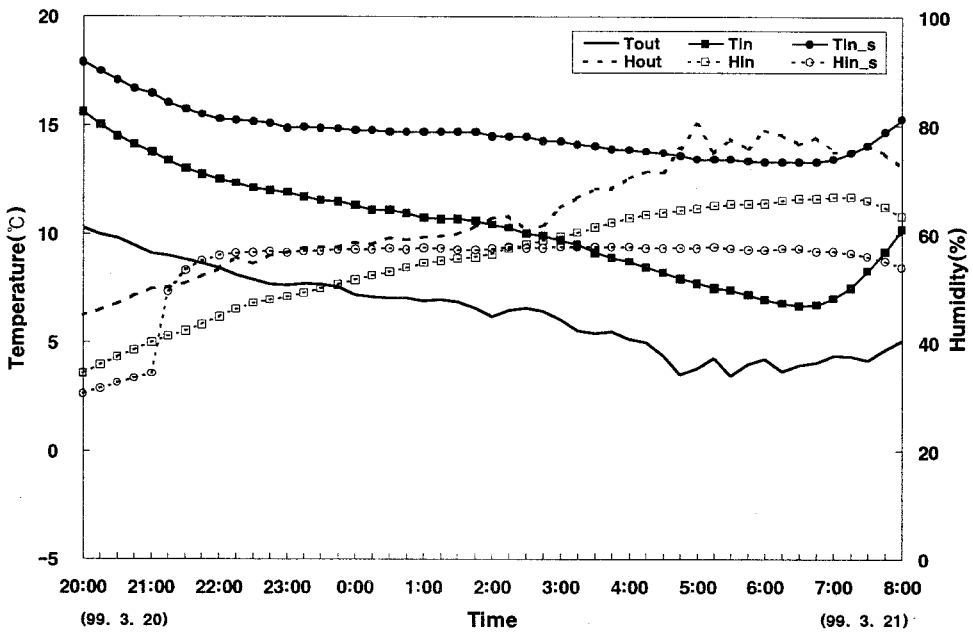
(u) 주간(의 온실내부 온·습도 변화(3. 18, 08:00~20:00))



(v) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 18, 20:00~익일 08:00)



(w) 주간 온실내부 온·습도 변화(3. 20, 08:00~20:00)



(x) 야간의 온실내부 온·습도 변화(3. 20, 20:00~익일 08:00)

그림 5-21. 주·야간 온실의 내부온·습도 변화

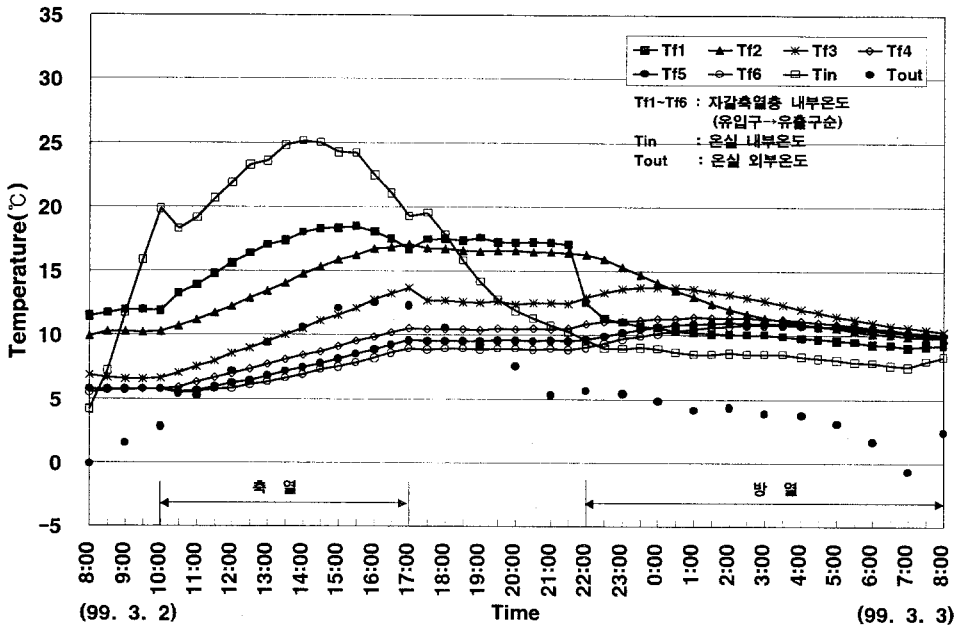
3. 축열 및 방열 특성

난방기간중 자갈축열 태양열 온실에 있어 축열은 주간에 외부 일사에 의해 데워진 온실내부공기를 축열층으로 순환시켜 온실 내부온도가 급격히 하강하는 일몰후 난방에 이용할 에너지를 자갈축열층에 저장하는 과정이다. 따라서, 공기순환팬 작동방식과 시간에 따른 축열특성이 상이할 것으로 판단되어 공기순환팬 작동방식에 따른 자갈축열층내의 온도분포를 분석하였다.

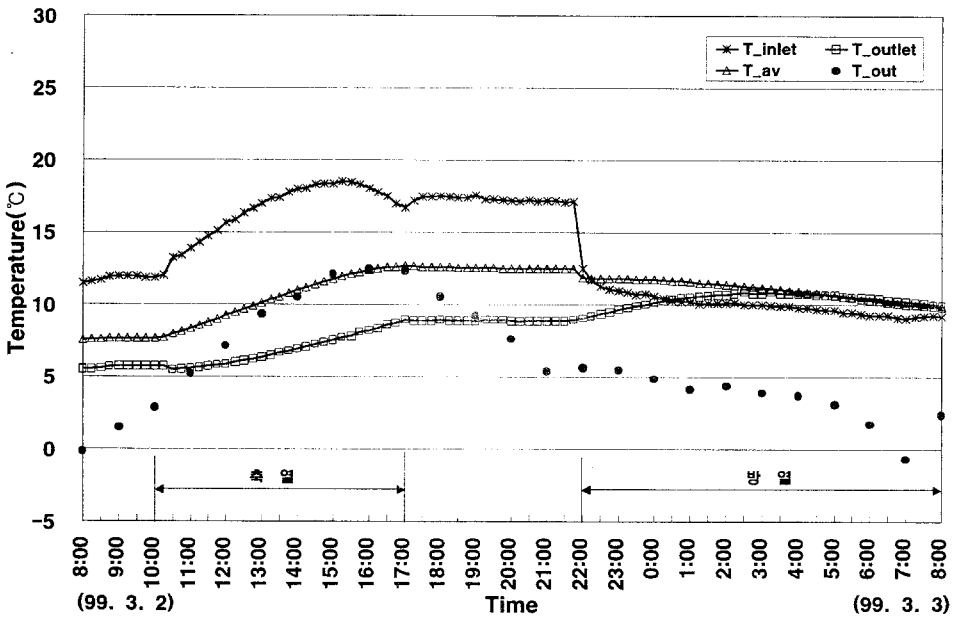
그림 5-22는 축열과 방열시 유출팬을 최대유량으로, 유입팬을 최대유량의 1/2로 작동시켰을 경우 온실내·외 기온에 따른 자갈축열층의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림 5-22(a)에서 보는 바와 같이, 주간에 순환팬을 작동시키면 자갈축열층의 내부온도가 측점에 관계없이 축열시간동안 증가함을 알 수 있으며, 유입구에서 멀어질수록 자갈축열층의 온도상승 속도는 감소하였다. 그리고, 그림 7(b)에서 주간(10:00~17:00)에 7시간 축열하였을 경우에 축열전 자갈축열층의 평균온도는 7.6℃에서 축열후 12.7℃로 상승하여 축열 7시간만에 5.1℃의 온도상승이 있었음을 알 수 있다.

그림 5-23은 축열시 유출팬을 최대용량의 1/2, 방열시에는 유입팬을 최대용량의 1/2로 작동시켰을 경우 온실내·외 기온에 따른 자갈축열층의 온도변화를 나타낸 것으로 그림 5-23(a)는 자갈축열층내의 측점별 온도변화를 도시한 것이며 그림 5-23(b)는 유입 및 유출구와 자갈층의 평균온도 변화를 도시한 것이다.

그림 5-23(a)에서 보는 바와 같이 주간에 순환팬을 작동시키면 자갈층의 내부온도는 유입구에 가까운 2개의 측점에서는 축열시간동안 증가하였으나 유입구에서 3번째 측점부터는 축열시간동안 온도의 증가가 거의 없음을 알 수 있었다. 그리고, 그림 5-23(b)에서 주간(09:00~18:00)에 8시간 축열하였을 경우, 축열전 축열층 온도는 12.7℃에서 축열후 13.6℃로 축열 8시간동안 0.9℃의 온도상승이 있었음을 알 수 있었다.

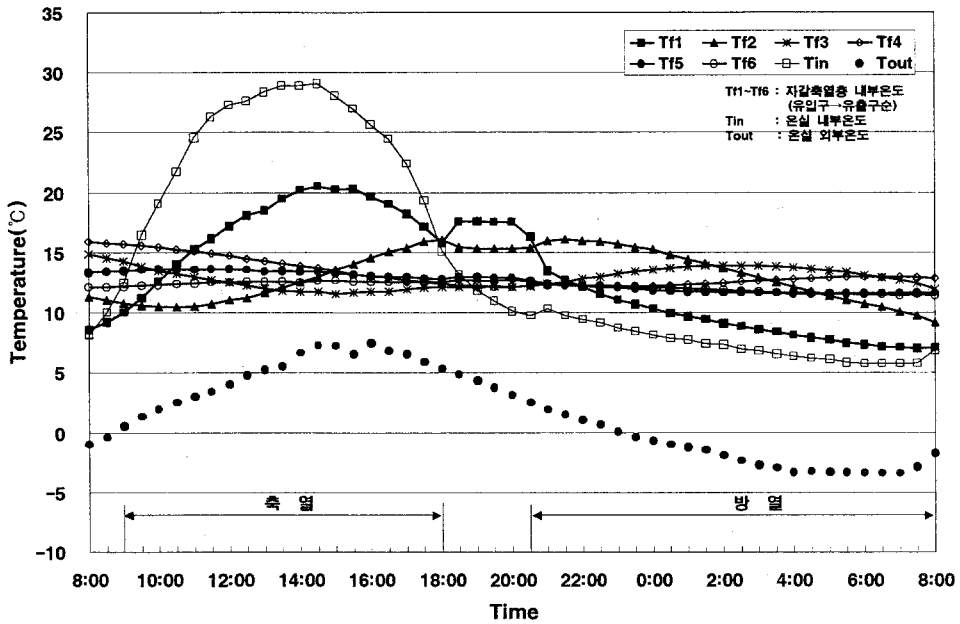


(a) 축열층내 측정별 온도변화

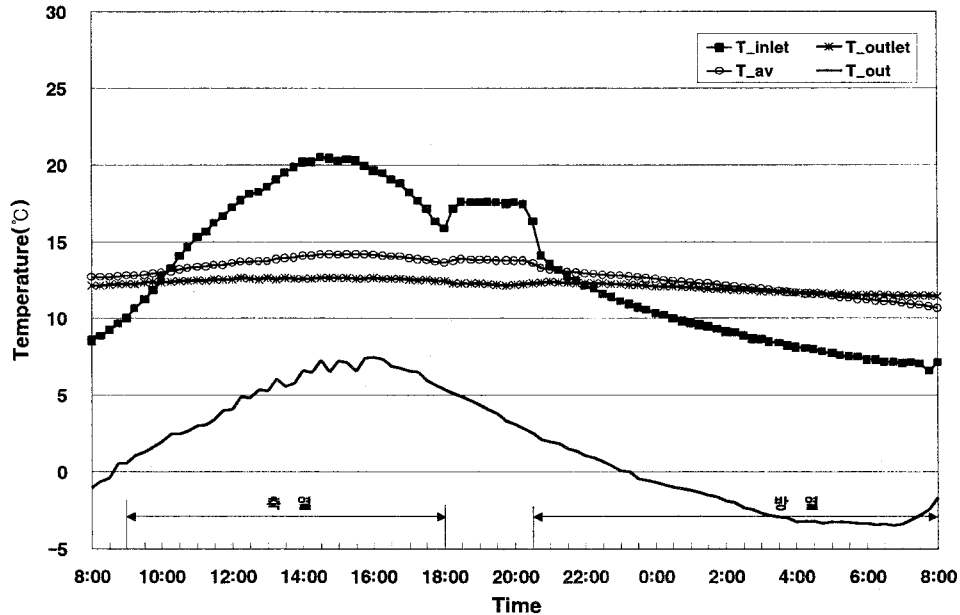


(b) 유입·출구 및 축열층 평균온도 변화

그림 5-22. 자갈축열 태양열 온실내부 및 자갈축열층 온도 변화
 (축·방열시 유출팬:212m³/min, 유입팬:106m³/min)

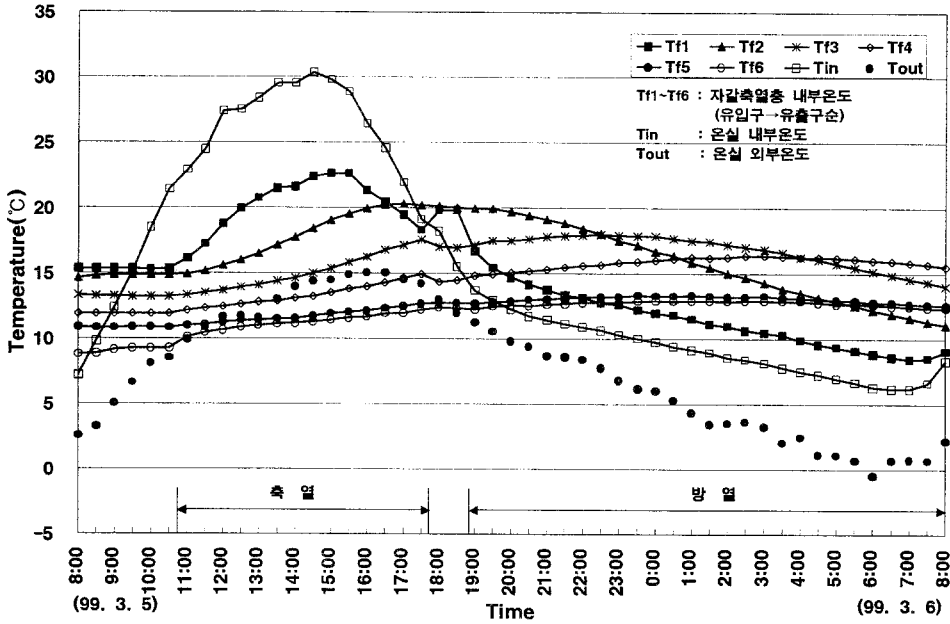


(a) 축열층내 측정별 온도변화

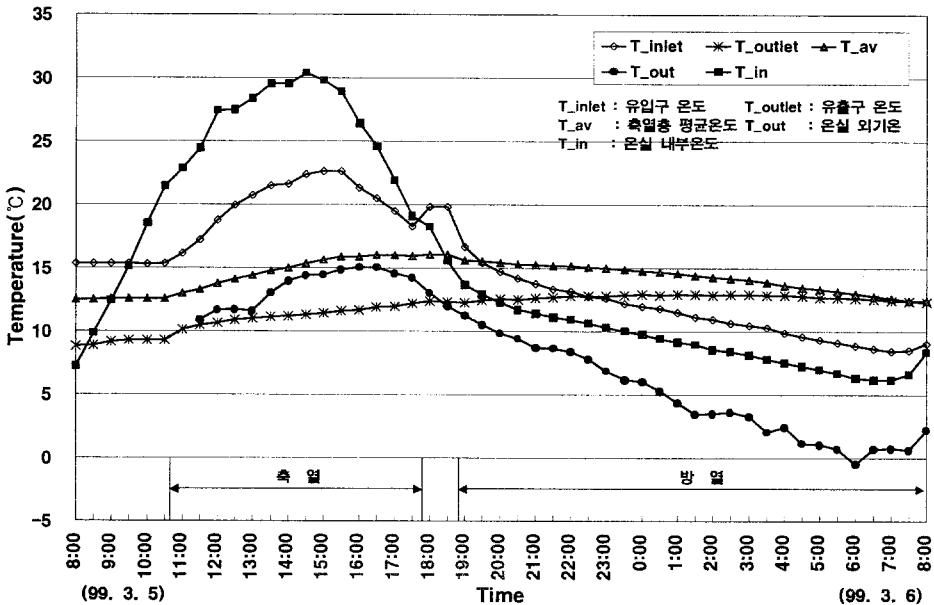


(b) 유입·출구 및 축열층 평균온도 변화

그림 5-23. 자갈축열 태양열 온실내부 및 자갈축열층 온도 변화
 (축열시 : 유출팬-106m³/min, 방열시 : 유입팬-106m³/min)



(a) 축열층내 축점별 온도변화



(b) 유입·출구 및 축열층 평균온도 변화

그림 5-24. 외기온에 따른 자갈축열층 및 온실내부 온도 변화

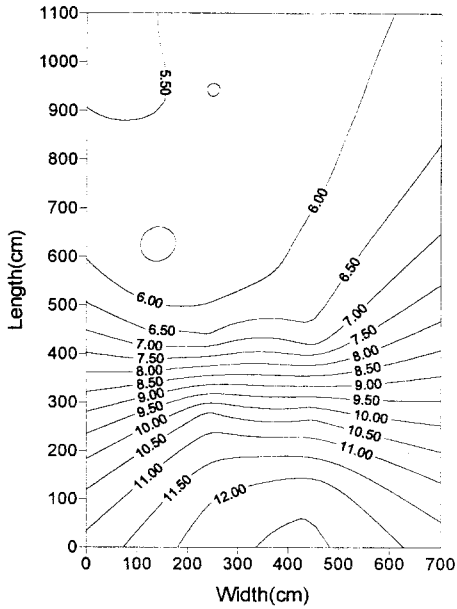
(축·방열시 : 유출팬-212m³/min)

따라서, 축열시 공기순환방식에 따라 온실내부와 자갈축열층의 온도변화는 상이하게 나타났으며 방열시에도 공기순환방식에 따라 온실 및 자갈축열층 내부 온도의 변화가 매우 다른 것으로 나타났다. 그리고, 온실내부에서 유입되는 공기의 영향을 직접적으로 받는 유입구측의 자갈축열층 온도가 가장 높은 것으로 나타났으며 유입구측에서 멀어질수록 자갈축열층에 전달되는 순환유체의 온도는 감소하였다.

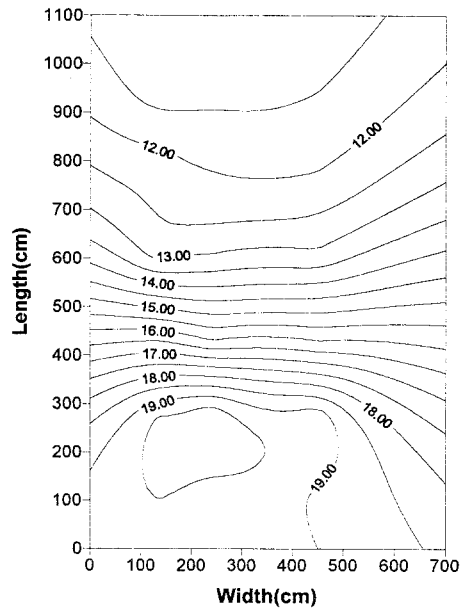
그림 5-25는 주간(09:00~17:00)에 온실내부에 설치되어 있는 공기순환팬을 작동(유입팬 : $212\text{m}^3/\text{min}$, 유출팬 : $106\text{m}^3/\text{min}$)시켰을 때 자갈축열층의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 축열전 축열층내의 온도편차는 6°C 내외였으며 주간에 7시간 축열한 후의 축열층 내부온도는 공기의 흐름방향에 따라 최고 9°C 온도편차가 있었다. 주간에 온실 내부온도가 상승하여 자갈축열층내로 유입되므로 자갈축열층내에서 온실 내부온도의 영향을 직접적으로 받는 유입구쪽의 온도가 높은 것으로 나타났으며 축열과정에서 대류에 의한 열전달을 확인할 수 있다.

난방시 주간에 온실내부와 자갈축열층의 공기순환으로 축열층에 저장된 에너지를 온실내부로 방열하여야 한다. 그림 5-26은 방열시 자갈축열층 내부온도 분포를 나타낸 것으로 축열이 끝나 공기순환팬의 작동이 없으면 방열을 하기전까지는 자갈축열층의 온도는 그대로 유지되는 것으로 나타나 자갈과 자갈사이의 전도에 의한 열전달은 거의 없음을 알 수 있다.

겨울철 야간에 온실 난방을 위하여 방열을 시작하면 자갈축열층 내부는 대류에 의한 열전달이 이루어지면서 온실내부로 에너지를 방출하게 된다. 따라서, 유입구측의 자갈축열층에 저장된 에너지는 유출구측의 자갈축열층 온도를 상승시키는데 많은 에너지를 소모하게 된다. 방열 9시간후에는 자갈축열층 내부온도 편차가 1°C 내외로 거의 일정한 분포를 나타내고 있다.

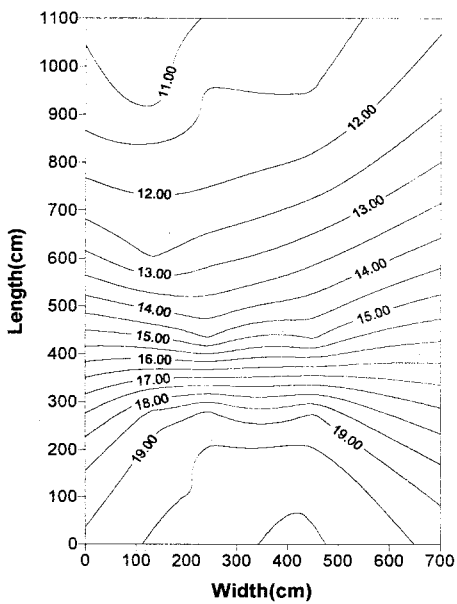


(a) 축열전(09:00)

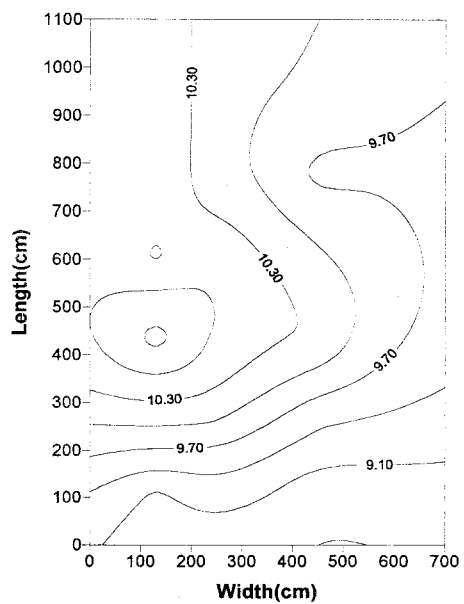


(b) 축열 7시간후(17:00)

그림 5-25. 축열시 자갈축열층 내부온도 분포도



(a) 방열전 (22:00)



(b) 방열 9시간후(익일 07:00)

그림 5-26. 방열시 자갈축열층 내부온도 분포도

4. 난방시 효율적인 공기순환방식

자갈축열 태양열 온실은 주간에는 온실내부로 투과되는 태양에너지에 의해 더워진 온실내부 공기를 공기순환팬에 의해 자갈축열층에 유급하여 자갈에 에너지를 저장하는 것으로 온실내부와 자갈축열층의 공기순환이 원활히 이루어져야 한다. 따라서, 난방성능을 최대로 발휘할 수 있는 공기순환방식의 검토가 필요하다.

자갈축열 태양열 온실의 축·방열 특성에서 알 수 있듯이 온실내부에서 자갈축열층으로 유입되는 순환유체의 온도는 유입구측의 자갈축열층에만 직접적인 영향을 주면서 대류에 의한 열손실이 발생하여 유출구측의 자갈축열층으로 갈수록 순환유체의 온도는 감소하게 된다. 자갈축열층의 온도상승 속도 또한 유출구쪽으로 갈수록 감소하여 축열이 종료된 시점에는 유입구측과 유출구측의 온도차가 약 9℃ 발생하였다. 방열시 축열과 동일한 공기순환방식으로 축열시스템을 운용할 경우에는 자갈축열층내에서 열전달이 일어나면서 많은 량의 에너지를 축열층내에서 소모하게 되어 저장된 에너지를 효율적으로 이용하지 못하게 된다. 따라서, 난방을 위한 방열시에는 공기순환방식이 축열과는 다르게 하여야 될 것으로 판단되며, 축·방열시 효율적인 공기순환경로는 다음과 같다.

- 축열시 공기순환경로

: 온실내부→유입덕트→유입팬→자갈축열층→유출팬→유출덕트→온실내부

- 방열시 공기순환경로

: 온실내부→유출덕트→유출팬→자갈축열층→유입팬→유입덕트→온실내부

겨울철 온실 난방에 필요한 열량을 확보하고 난방에 필요한 에너지를 공급함에 있어 공기순환팬의 유량은 매우 중요하며 순환팬의 유량에 따른 전기소비량 또한 경제성과 밀접한 관계가 있다. 축열시스템의 유출·입팬의 작동방식을 각각

다르게 하여 공기유동성 및 축열성능을 분석한 결과, 자갈축열층의 축열성능은 유출팬보다는 유입팬의 유량과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타나 동일한 제원의 팬을 사용할 경우에는 유입구쪽에 팬을 부착하는 것이 유리하며 유입유량을 크게 하는 것이 축열성능을 향상시키는 것으로 분석되었다.

5. 난방을 위한 축열 및 방열시간대 결정

겨울철 주간에는 온실내의 온도는 태양광의 입사로 인해 최고 35℃ 이상 상승하므로 온실 내부공기를 자갈축열층으로 순환시켜 효과적으로 축열하여야 한다. 또한, 야간에는 난방설정온도에 따라 지속적으로 난방할 수 있도록 자갈축열층을 방열시킬 필요가 있다. 따라서, 자갈축열 태양열 온실을 이용하여 겨울철에 축열효율을 높이고 난방성능을 향상시킬 수 있는 축열 및 방열시간대를 분석하였다. 자갈축열 태양열 온실에 있어 축열시스템의 운전을 통해 자갈축열층에 저장되는 에너지는 온실내부와 자갈축열층사이에서 이루어지는 공기순환에 의한 대류열전달에 의한 것이다. 따라서, 축·방열시 온실내부온도, 온실내부 설정온도, 난방설정온도 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 축열시스템을 작동하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 자갈축열 태양열 온실의 축열성능에서 알 수 있듯이 공기순환시스템의 유입덕트와 유입팬에 의한 열손실이 약 2.5℃가 발생하므로 공기순환시스템의 제어방식은 다음과 같다.

- ① 축열시작 : 자갈축열층 평균온도+2.5℃ < 온실내부온도
and 온실내부온도 > 주·야간난방설정온도
- ② 축열종료 : 자갈축열층 평균온도+2.5℃ ≥ 온실내부온도
or 온실내부온도 ≤ 주·야간난방설정온도
- ③ 방열시작 : 자갈축열층 평균온도 ≥ 난방설정온도

④ 방열종료 : 자갈축열층 평균온도 < 난방설정온도

6. 자갈축열 태양열 온실의 난방효과

야간(20:00~익일 08:00)에 유입팬만을 최대유량(212m³/min)으로 방열시켰을 때 외기온에 따른 자갈축열 태양열 온실 및 대조온실의 내부온·습도 변화는 그림 5-27과 같다. 외기온이 -4.8℃~1.8℃(평균온도 -2.6℃)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 6.5℃~12.1℃(평균 8.9℃)범위였으며 대조온실 내부온도는 -0.2℃~8.2℃(평균 2.8℃)범위에서 변화하였다. 따라서, 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 평균 6.1℃의 난방효과가 있는 것으로 분석되었다. 이러한 난방효과는 축열시스템의 공기순환방식을 개선함으로써 더욱 더 증대될 것으로 예상된다.

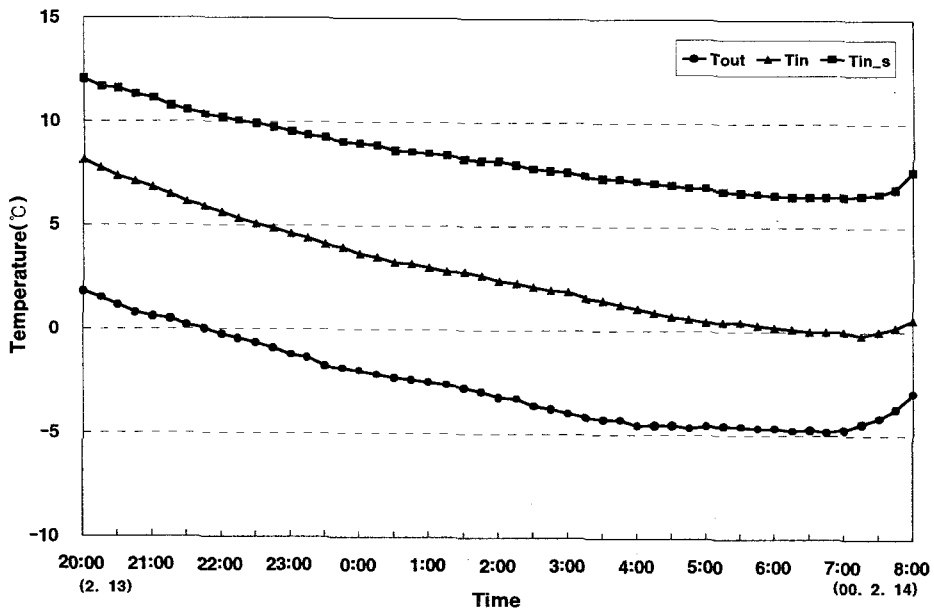
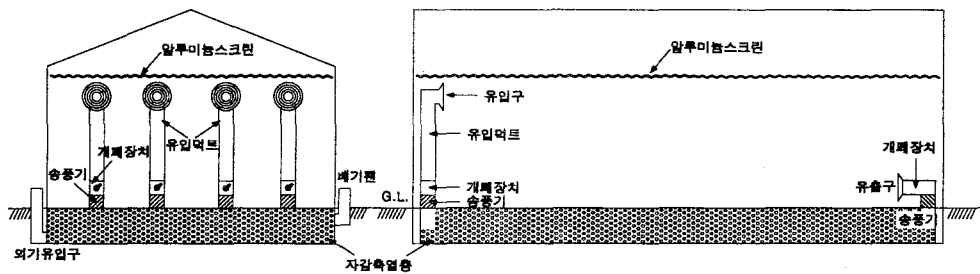


그림 5-27. 자갈축열 태양열 온실의 난방효과

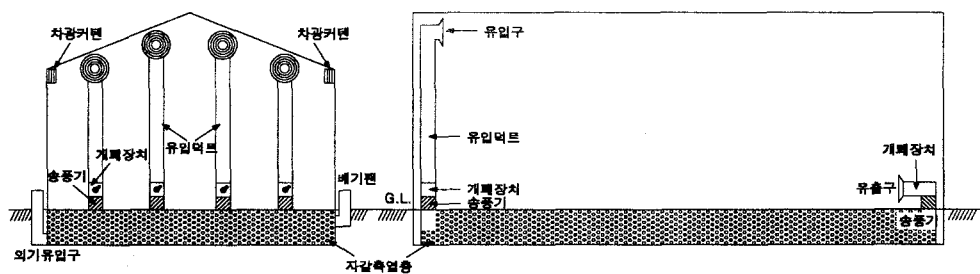
제4절 자갈축열 태양열온실의 냉방효과

1. 냉방효과 분석을 위한 자갈축열 태양열온실시스템의 구성

자갈축열 태양열온실의 냉방효과를 분석하기 위한 시스템의 구성은 그림 5-28과 같으며, 냉방기간중 주간 축열시에는 온실내로 유입되는 태양에너지를 차단하기 위해 차광재를 설치할 수 있도록 공기순환시스템의 유입구에 설치되어 있는 유입덕트의 높이를 조절하여 차광을 실시하면서 온실내 더운 공기를 자갈축열층으로 순환시켜 온실내부의 승온억제효과를 도모하며, 야간에는 주간 자갈축열층에 축열된 에너지를 온실외부로 방열할 수 있도록 외기유입구와 배기팬을 설치하였다.



(a) 주간 차광시



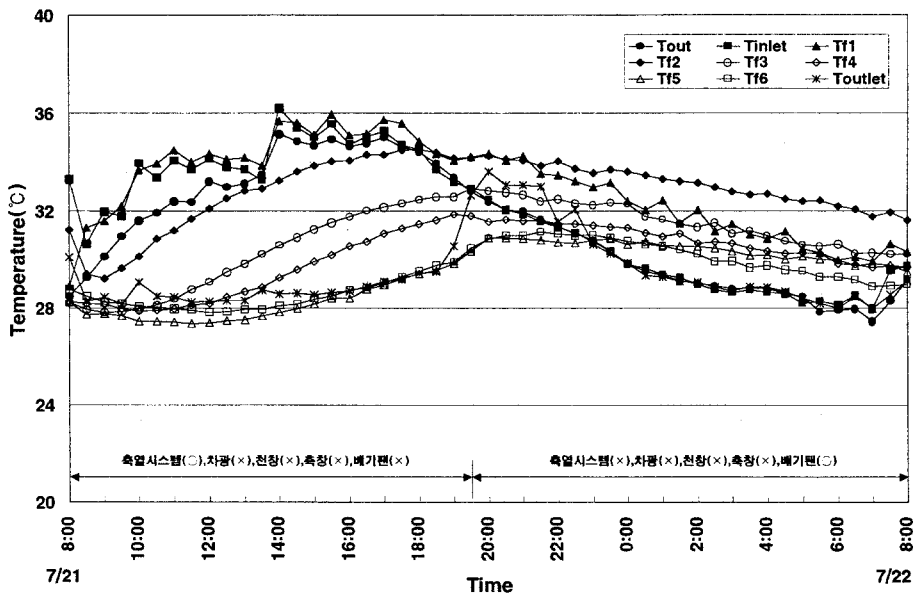
(b) 야간 방열시

그림 5-28. 냉방기간중 자갈축열 태양열 온실시스템

2. 온실내·외부 및 자갈축열층 온·습도변화

가. 자갈축열층의 온·습도변화

그림 5-29는 08:00~익일 08:00까지 자갈축열층내의 온도변화를 나타낸 것으로, 주간(08:00~19:30)에는 온실내부에 설치되어 있는 공기순환팬을 작동하고, 야간(19:30~익일 08:00)에는 온실외부에 설치된 배기구와 배기팬을 작동하였다.



(Tout : 외기온, Tinlet : 유입온도, Toutlet : 유출온도, T11~T16 : 유입→유출구순의 축열층내부온도)

그림 5-29. 자갈축열층 내부온도 변화 (유입·출팬 : 212m³/min)

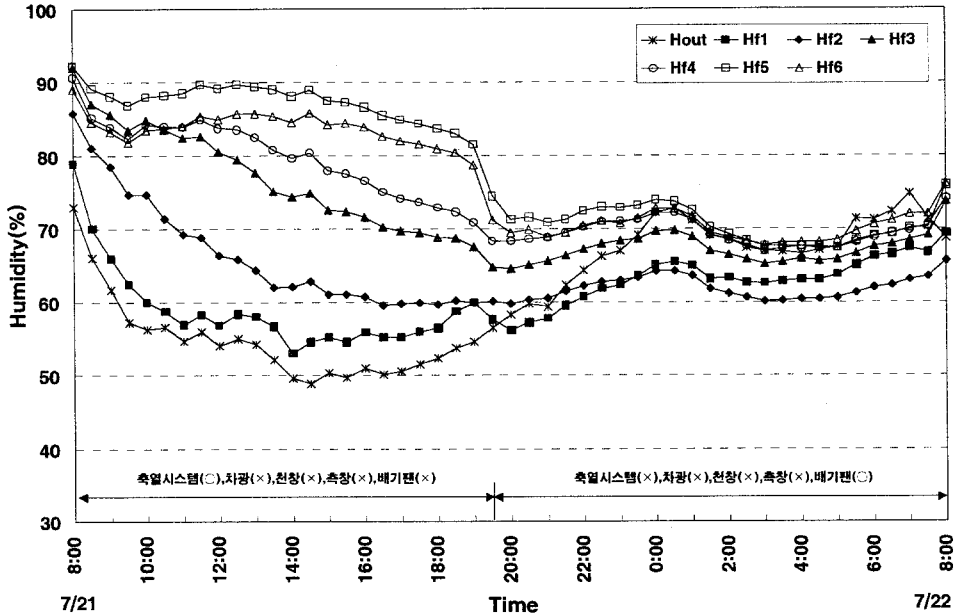
그림 5-29에서 보는 바와 같이, 주간(08:00~18:00)에 외기온이 28.5℃~35.3℃ (평균 33.1℃)범위에서 변화하고 자갈축열층내에 유입되는 공기의 온도가 30.5℃~36.2℃(평균 34.1℃)범위일 때 자갈축열층에서 온실내부로 유출되는 공기의 온도

는 28.2℃~30.1℃(평균 28.6℃)범위였으며 축열층 내부온도는 27.4℃~35.9℃(평균 30.3℃)범위였다. 또한, 10시간 축열시 자갈축열층 내부온도는 축점에 따라 1.7℃~7.0℃의 온도상승이 있었다. 그리고, 유입구에서 멀어질수록 축열층 온도는 낮게 나타났으며 온도상승 속도 또한 감소하는 경향으로 나타났다.

야간(18:00~익일 08:00)에 축열시스템을 작동하지 않고 배기팬만을 작동하였을 경우, 외기온이 27.4℃~34.4℃(평균 30.1℃)범위에서 변화할 때 자갈축열층 내부온도는 29.7℃~34.9℃(평균 31.4℃)범위였으며 온실외부에 설치되어 있는 배기구와 배기팬의 영향으로 축열층 내부온도는 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향으로 나타났으며 축점에 따라 2.2℃~5.1℃(평균 2.8℃)의 온도하강 효과가 있는 것으로 나타났다.

그림 5-30은 08:00~익일 08:00까지 자갈축열층내의 습도변화를 나타낸 것으로서, 주간(08:00~19:30)에는 온실내부에 설치되어 있는 축열시스템을 작동하고, 야간(19:30~익일 08:00)에는 온실외부에 설치되어 있는 배기구와 배기팬을 작동하였다.

그림 5-30에서 보는 바와 같이, 주간(08:00~18:00)에 외부습도가 48.1%~73.0%(평균 54.5%)범위에서 변화할 때 자갈축열층 내부습도는 53.1%~92.3%(평균 75.9%)범위였으며 10시간 축열시 자갈축열층 내부습도는 축점에 따라 8.1%~26.3%의 감소현상이 있었다. 또한, 유입구에서 멀어질수록 축열층 습도는 높게 나타났으며 습도감소 속도 또한 감소하는 경향으로 나타나 유입구에서 멀어질수록 외부습도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그리고, 야간(18:00~익일 08:00)에 축열시스템을 작동하지 않고 배기팬만을 작동하였을 경우, 외부습도가 52.4%~74.8%(평균 66.0%)범위에서 변화할 때 자갈축열층 내부습도는 55.7%~83.6%(평균 67.3%)범위였으며 배기시스템으로 유입되어지는 외기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

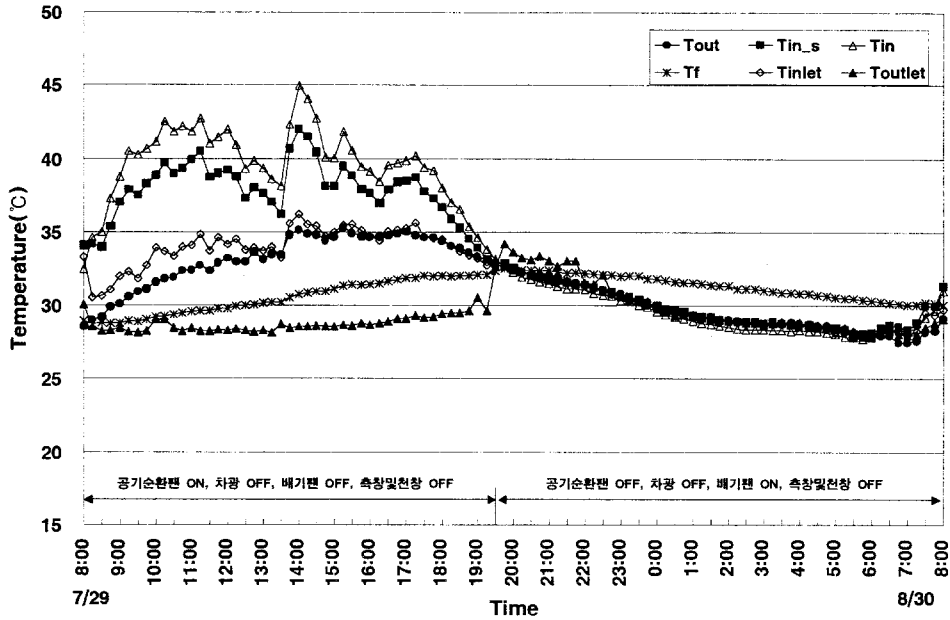


(Hout : 외부습도, Hf1~Hf6 : 유입→유출구순의 축열층 내부습도)

그림 5-30. 자갈축열층 내부습도 변화 (유입·출팬 : 212m³/min)

나. 온실내·외부 및 자갈층의 온도변화

공기순환·배기팬 작동방식과 차광·환기상태에 따른 온실 내부온도 변화를 분석하기 위하여 축열온실과 대조온실 내·외부에 센서를 설치하여 온도를 계측하였다. 그림 5-31은 축열온실 내부에 설치된 공기순환팬의 유입·출유량의 비를 106:212m³/min으로 08:00~19:30동안 작동하여 축열하고 19:30~익일 08:00까지는 공기순환팬(유출·입팬)을 정지시키고 온실외부에 설치된 외기유입구와 배기팬을 작동하여 방열시켰을 때 외기온에 따른 자갈축열 태양열 온실 및 대조온실의 내부온도를 계측한 결과이다. 이때 축열 및 대조온실은 무차광, 무환기상태이다.



(Tout : 외기온, Tin_s : 축열온실 내부온도, Tin : 대조온실 내부온도, Tf : 축열층 내부온도)

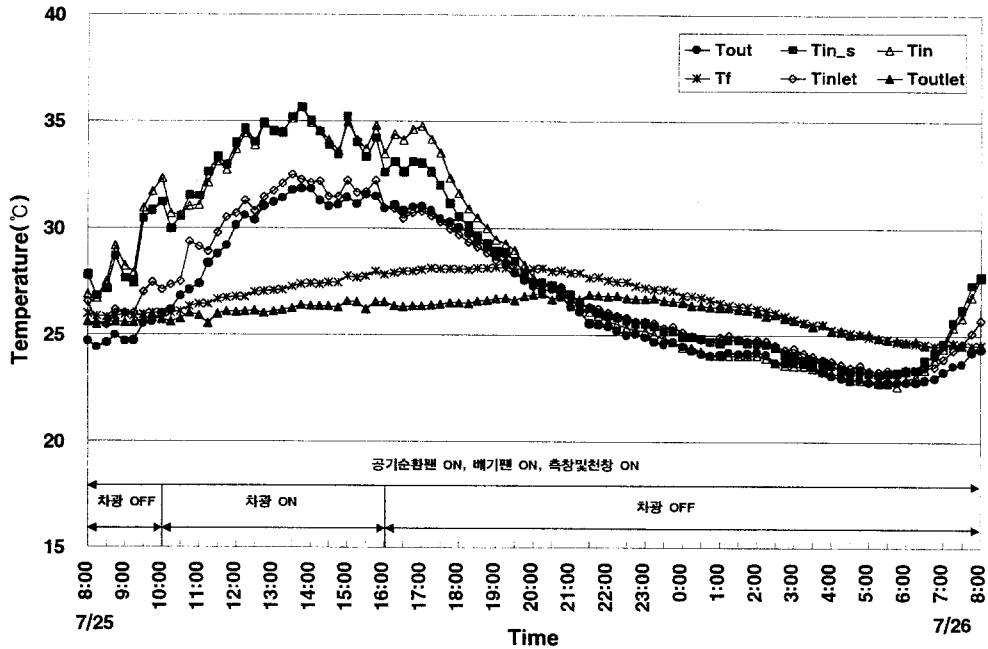
그림 5-31. 외기온 변화에 따른 온실 및 자갈축열층 내부온도

그림 5-31에서 보는 바와 같이, 주간(08:00~18:00)에 외기온이 28.5°C~35.3°C (평균온도 33.1°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 34.0°C~42.0°C(평균온도 36.4°C)범위, 대조온실 내부온도는 32.4°C~44.9°C(평균온도 39.7°C)범위에서 변화하였으며 자갈축열층 내부온도는 28.7°C~32.0°C(평균온도 30.3°C)범위에서 변화하였다. 그리고, 야간(18:00~익일 08:00)에는 외기온이 27.8°C~34.4°C(평균온도 30.4°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 28.1°C~36.7°C(평균온도 30.6°C)범위, 대조온실 내부온도는 27.7°C~38.0°C(평균온도 30.4°C)범위에서 변화하였으며 자갈축열층 내부온도는 30.3°C~32.5°C(평균온도 31.6°C)범위에 변화하였다. 따라서, 무차광·무환기상태에서 축열온실은 일반온실보다 주간동안 평균 3.3°C의 승온억제효과가 있었다. 그리고, 야간에는 축열 및 일반온실의 내

부온도 모두 외기온과 유사한 것으로 나타났다. 이는 축열온실에 있어 야간에 공기순환팬을 작동않아 축열온실 또한 일반온실과 같이 외기온의 영향을 직접 받은 결과로 분석된다.

그림 5-32는 주·야간(08:00~익일 08:00)에 축열온실 내부에 설치된 공기순환 팬과 온실외부에 설치된 배기팬을 연속적으로 작동하고 환기 및 차광(축열온실 차광율:55%, 대조온실 차광율:85%)을 하였을 때 외기온에 따른 자갈축열 태양 열 온실 및 대조온실의 내부온도를 계측한 결과이다.

그림 5-32에서 보는 바와 같이, 주간(08:00~18:00)에 외기온이 24.4℃~31.9℃(평균온도 29.1℃)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 26.8℃~35.7℃(평균 온도 32.3℃)범위, 대조온실 내부온도는 26.7℃~35.7℃(평균온도 32.6℃)범위에서 변화하였으며 자갈축열층 내부온도는 25.8℃~28.2℃(평균온도 27.0℃)범위에서 변화하였다. 그리고, 야간(18:00~익일 08:00)에는 외기온이 22.8℃~30.0℃(평균온도 25.1℃)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 23.2℃~30.5℃(평균온도 25.6℃)범위, 대조온실 내부온도는 22.6℃~31.6℃(평균온도 25.4℃)범위에서 변화하였으며 자갈축열층 내부온도는 24.7℃~28.2℃(평균온도 26.8℃)범위에 변화하였다. 계측된 결과에서 알 수 있듯이 차광을 실시한 경우에는 축열 및 일반 온실의 내부온도는 유사하게 나타났으나 차광이 끝난 시각부터는 축열온실의 내부온도가 일반온실에 비해 최고 1.7℃ 낮게 나타났다. 그리고, 야간에는 축열 온실의 내부온도는 자갈축열층의 영향을 받아 일반온실에 비해 최고 1.1℃, 평균 0.2℃정도 높게 나타났다. 따라서, 자연환기와 차광을 동시에 수행한 상태에서는 축열온실 내부온도와 일반온실 내부온도는 유사하게 나타났으나 연구결과에 따르면 내부차광율이 55%인 온실내부온도가 내부차광율 85%인 온실내부온도보다 평균 2.4℃ 높은 것으로 보고된 바 있으므로 축열온실의 승온억제효과는 내부차광율이 상이한 점을 고려한다면 평균 2.4℃이상일 것으로 예상된다.

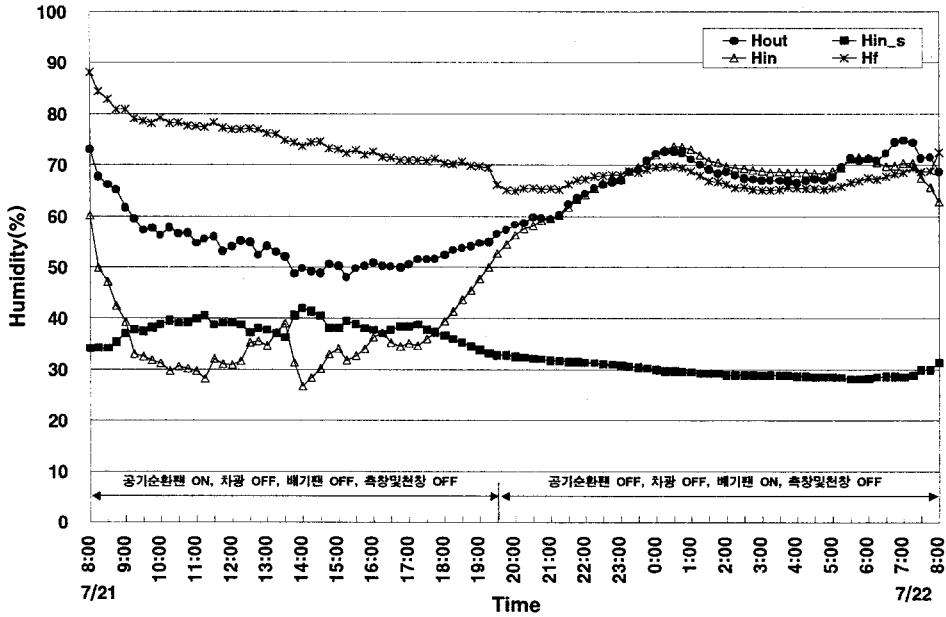


(Tout : 외기온, Tin_s : 축열온실 내부온도, Tin : 대조온실 내부온도, Tf : 축열층 내부온도)

그림 5-32. 외기온 변화에 따른 온실 및 자갈축열층 내부온도

다. 온실내·외부 및 자갈층의 습도변화

그림 5-33은 축열온실 내부에 설치된 공기순환팬(유출·입팬)을 최대유량 ($212\text{m}^3/\text{min}$)으로 08:00~19:30동안 작동하여 축열하고 19:30~익일 08:00까지는 공기순환팬(유출·입팬)을 정지시키고 온실외부에 설치된 외기유입구와 배기팬을 작동하여 방열시켰을 때 외부습도 변화에 따른 자갈축열 태양열 온실 및 대조 온실의 내부습도를 계측한 결과이다. 이때 축열 및 대조온실은 무차광, 무환기 상태이다.



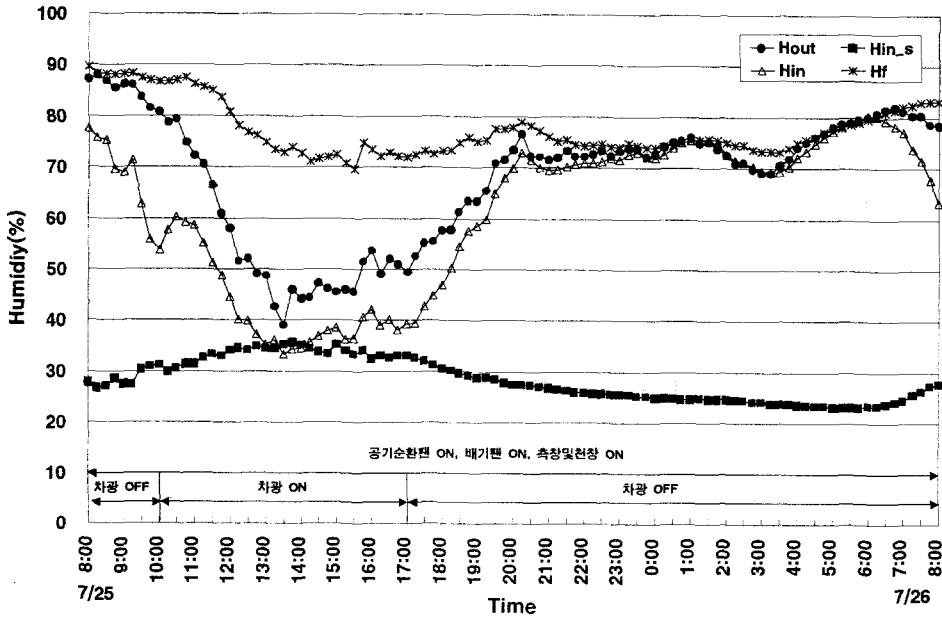
(Hout : 외부습도, Hin_s : 축열온실 내부습도, Hin : 대조온실 내부습도, Hf : 축열층 내부습도)

그림 5-33. 외부습도 변화에 따른 온실 및 자갈축열층 내부습도

주·야간(08:00~익일 08:00)에 외부습도가 48.1%~74.8%(평균습도 61.3%)범위에서 변화할 때 축열온실 내부습도는 31.6%~72.9%(평균온도 54.8%)범위, 대조온실 내부습도는 26.7%~73.6%(평균습도 52.4%)범위에서 변화하였으며 자갈축열층 내부습도는 64.9%~88.1%(평균습도 70.9%)범위에서 변화하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 주·야간에 축열온실과 대조온실의 내부습도는 모두 외기의 영향을 받아 외부습도와 유사한 경향으로 변화하였으나 주간에는 자갈축열층의 내부습도 영향으로 축열온실의 내부습도가 대조온실의 내부습도보다 평균 5.4% 정도 높게 나타났다.

그림 5-34는 주·야간(08:00~익일 08:00)에 축열온실 내부에 설치된 공기순환팬과 온실외부에 설치된 배기팬을 연속적으로 작동하고 환기 및 차광(축열온실

차광율:55%, 대조온실 차광율:85%)을 하였을 때 외기온에 따른 자갈축열 태양 열 온실 및 대조온실의 내부습도를 계측한 결과이다.



(Hout : 외부습도, Hin_s : 축열온실 내부습도, Hin : 대조온실 내부습도, Hf : 축열층 내부습도)

그림 5-34. 외부습도 변화에 따른 온실 및 자갈축열층 내부습도

주·야간(08:00~익일 08:00)에 외부습도가 39.1%~88.1%(평균습도 68.3%)범위에서 변화할 때 축열온실 내부습도는 35.9%~80.7%(평균온도 63.7%)범위, 대조온실 내부습도는 33.3%~80.3%(평균습도 61.5%)범위에서 변화하였으며 자갈축열층 내부습도는 69.6%~89.6%(평균습도 77.5%)범위에서 변화하였다. 이러한 결과에서 알 수 있듯이, 자연환기상태에서는 축열온실과 대조온실의 내부습도 모두 외기의 영향을 직접적으로 받는 것으로 나타났으나 외기에 비해 평균 10.5%~13.0% 낮았으며 야간에는 외부습도와 유사하였다.

3. 축열 및 방열 특성

자갈축열 태양열 온실에 있어 냉방효과는 주간에는 온실내부와 축열층 내부의 공기순환에 의한 축열과정에서 얻을 수 있다. 따라서, 자갈축열 온실의 축열 및 방열특성을 분석할 필요성이 있으며 자갈축열 태양열 온실에 있어 축열과 방열은 온실내부와 축열층 내부의 공기순환에 의한 것으로 온실 내부온도와 자갈축열층 내부온도는 밀접한 관계가 있다. 그러므로, 공기순환방식에 따라 축열 및 방열특성이 상이하게 나타날 것으로 예상되어 공기순환방식에 따른 온실내부와 축열층 내부의 온·습도변화를 분석하였다.

가. 축열 특성

자갈축열 태양열 온실에 있어 축열은 주간에는 외부 일사에 의해 데워진 온실 내부공기를 축열층으로 순환시켜 자갈축열층에 에너지를 저장하는 과정이다. 따라서, 공기순환팬 작동방식과 시간에 따른 자갈축열층 및 온실내부 온도변화를 살펴보면 다음과 같다.

그림 5-35는 주간(08:00~18:00)에 온실내부에 설치되어 있는 공기 유출입팬을 최대풍량($212\text{m}^3/\text{min}$)작동시켰을 때 자갈축열층의 온도변화를 나타낸 것이다. 이때, 온실외부에 설치되어 있는 외기 유입구와 배기팬은 작동하지 않은 상태이다.

주간에는 외기온이 $28.5^{\circ}\text{C} \sim 35.3^{\circ}\text{C}$ (평균 33.1°C)범위에서 변화하고 온실 내부온도가 $34^{\circ}\text{C}.0 \sim 42.0^{\circ}\text{C}$ (평균 38.1°C)범위에 변화할 때 자갈축열층 내부온도는 그림에서 보는 바와 같이 $25^{\circ}\text{C} \sim 34^{\circ}\text{C}$ 범위에 있었다. 공기순환팬을 작동시켰을 경우 고온의 온실내부 공기가 유입구를 통하여 축열층내로 유입되기 때문에 유입구

측에 온도가 높았으며 유출구 방향으로 갈수록 온도는 낮아지는 경향이 있었다 따라서, 유출구를 통하여 26℃~27℃의 축열층 내부공기가 축열온실로 공급됨을 알 수 있다. 그리고, 축열 10시동안 자갈축열층 내부온도는 평균 3℃정도 상승 하는 것으로 나타났다.

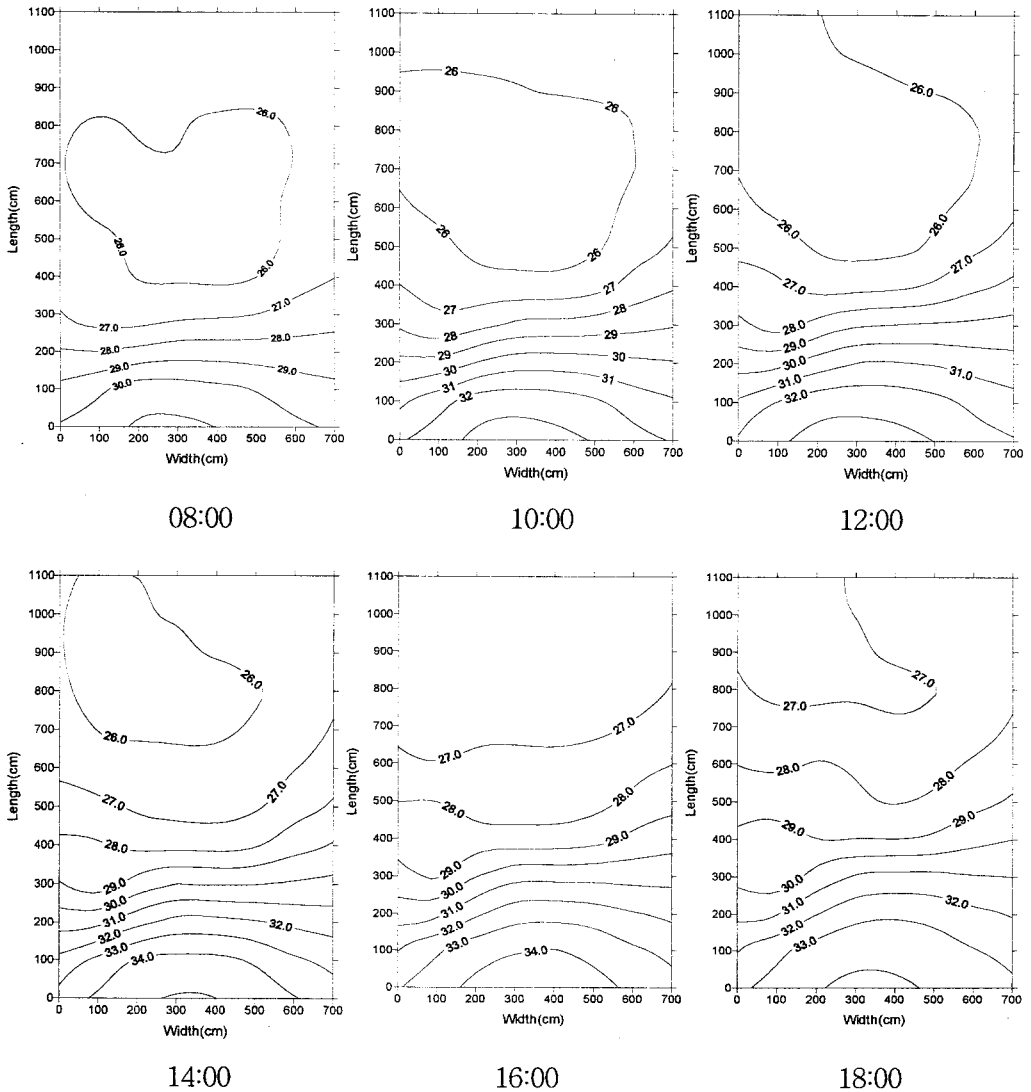


그림 5-35. 축열시 자갈축열층의 내부온도 변화(2000. 7. 21)

나. 방열 특성

자갈축열 태양열 온실에 있어 주간에 자갈축열층의 축열을 통하여 온실내부의 승온억제효과를 얻을 수 있으므로 자갈축열층에 축열된 에너지를 야간에 외부로 방출할 필요가 있다. 즉, 자갈축열층내로 외기의 유입과 축열층 내부공기의 배출을 통하여 축열층 내부온도를 낮추게 되는 것이다.

난방기간에 방열시 온실내부와 축열층의 공기순환이 이루어지는 것과는 달리 냉방기간에는 방열시 온실외부와 축열층사이에 공기순환이 이루어진다. 따라서, 온실외부에 설치된 축열층 배기팬의 작동방식에 따른 자갈축열층 내부온도 변화를 분석한 예를 살펴보면 다음과 같다.

그림 5-36은 야간(18:00~익일 06:00)에 온실외부에 설치된 배기팬을 작동시켰을 경우 자갈축열층의 온도변화를 나타낸 것이다. 이때, 온실내부에 설치되어 있는 공기순환팬은 작동하지 않은 상태이다. 외기온이 27.8℃~34.4℃(평균 30.4℃)범위에서 변화할 때 자갈축열층 내부온도는 그림에서 보는 바와 같이 27℃~34℃범위에 있었다. 배기팬 작동시간이 경과함에 따라 자갈축열층 내부온도가 감소하는 것을 알 수 있으며 방열 12시간동안 자갈축열층 내부온도는 평균 3℃~4℃정도 감소하는 것으로 나타났다.

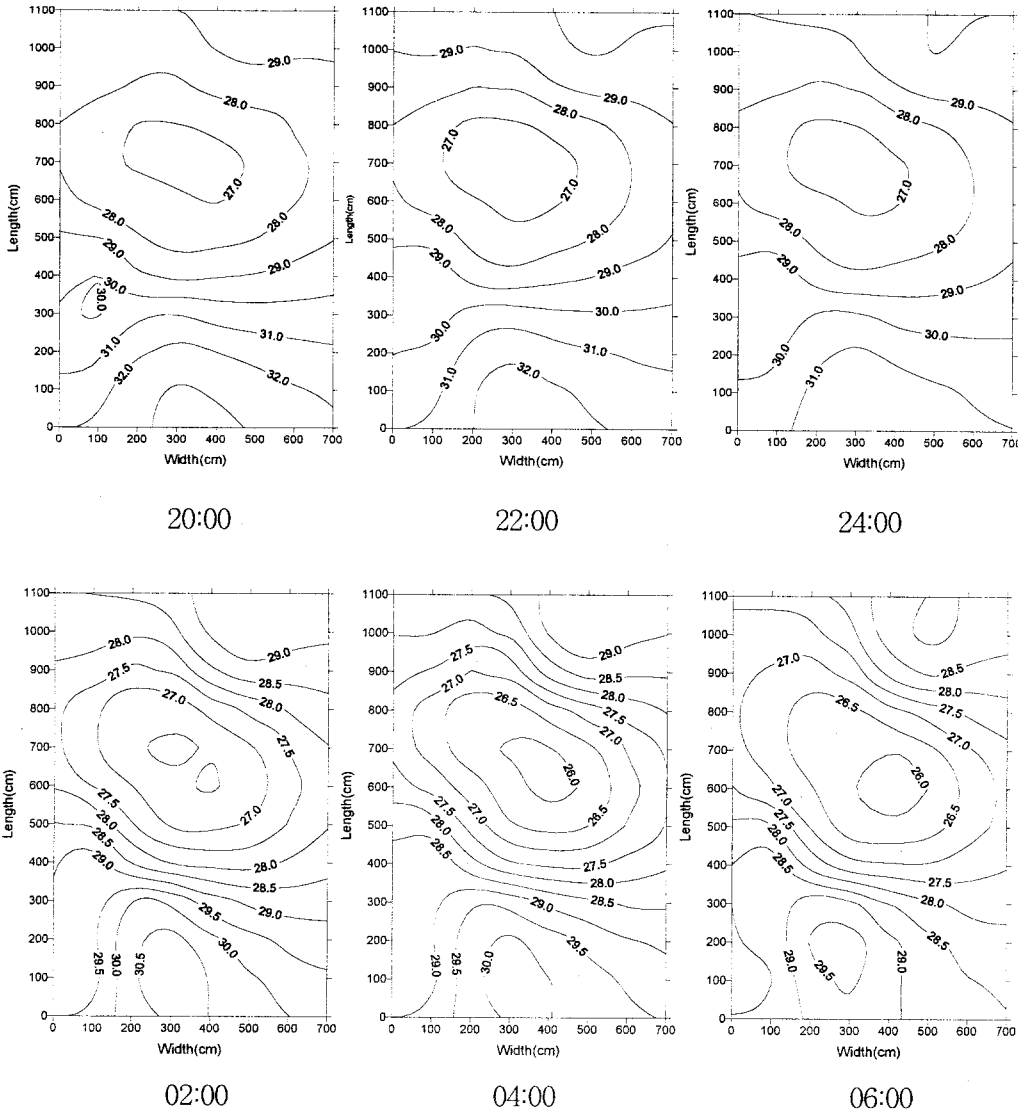
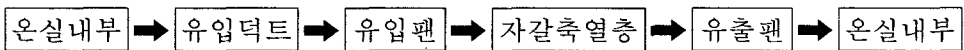


그림 5-36. 방열시 자갈축열층의 내부온도 변화(2000. 7. 21~22)

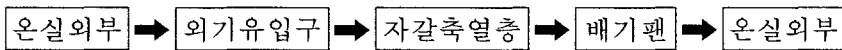
4. 냉방시 효율적인 공기순환방식

자갈축열 태양열 온실에 있어 여름철 냉방은 주간에는 온실내부로 투과되는 일사에 의해 데워진 온실내부 공기를 순환팬에 의해 자갈축열층에 공급하고 자갈축열층의 찬공기를 온실내로 공급하여 온실내부 온도를 낮추게 된다. 즉, 축열과정을 통하여 냉방성능을 발휘할 수 있으므로 온실내부와 자갈축열층의 공기순환이 원활히 이루어져야 하며, 주간에는 상승한 자갈축열층 온도를 외기와의 순환을 통해 식혀주어야 냉방성능을 최대화시킬 수 있다. 따라서, 냉방성능을 최대로 발휘할 수 있는 공기순환방식의 검토가 필요하며 축·방열시 공기순환경로를 살펴보면 다음과 같다.

- 축열시 공기순환경로



- 방열시 공기순환경로



자갈축열 태양열 온실의 냉방효과를 향상시키고자 그림 5-37과 같이 유출구의 방향을 전환하였으며 온실내부에 순환팬을 설치하여 온실내의 공기순환방식을 개선하였다.

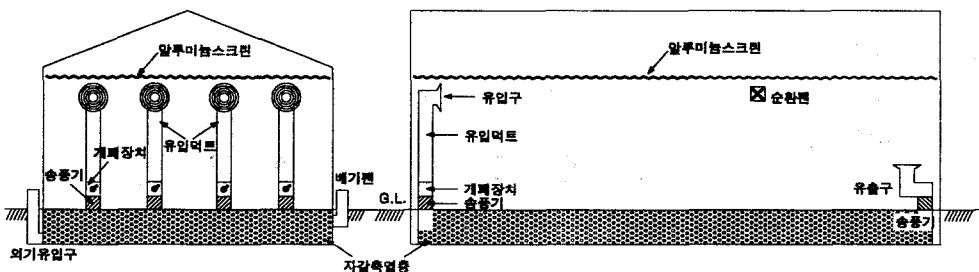


그림 5-37. 개선된 공기순환방식의 자갈축열 태양열 온실

5. 자갈축열 태양열 온실의 고온억제 및 냉방효과

여름철 냉방기간중 자갈축열 태양열 온실의 축열에 의한 냉방성능을 분석하고자, 축열시스템의 유입 및 유출유량을 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 운전하면서 환기 및 차광조건에 따른 축열온실의 내부온도를 계측하여 대조온실의 내부온도와 비교·분석하였으며, 분석된 결과는 그림 5-38 ~ 그림 5-41과 같다.

그림 5-38은 무환기, 무차광시의 온실내부 온도변화로서 주간(08:00~20:00)에 외기온이 $28.5^\circ\text{C} \sim 36.2^\circ\text{C}$ (평균온도 33.6°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 $32.4^\circ\text{C} \sim 40.4^\circ\text{C}$ (평균온도 37.2°C)범위였으며 대조온실 내부온도는 $32.2^\circ\text{C} \sim 44.9^\circ\text{C}$ (평균온도 41.0°C)범위에서 변화하였다. 따라서, 축열에 의한 냉방효과는 평균 3.8°C 인 것으로 나타났다.

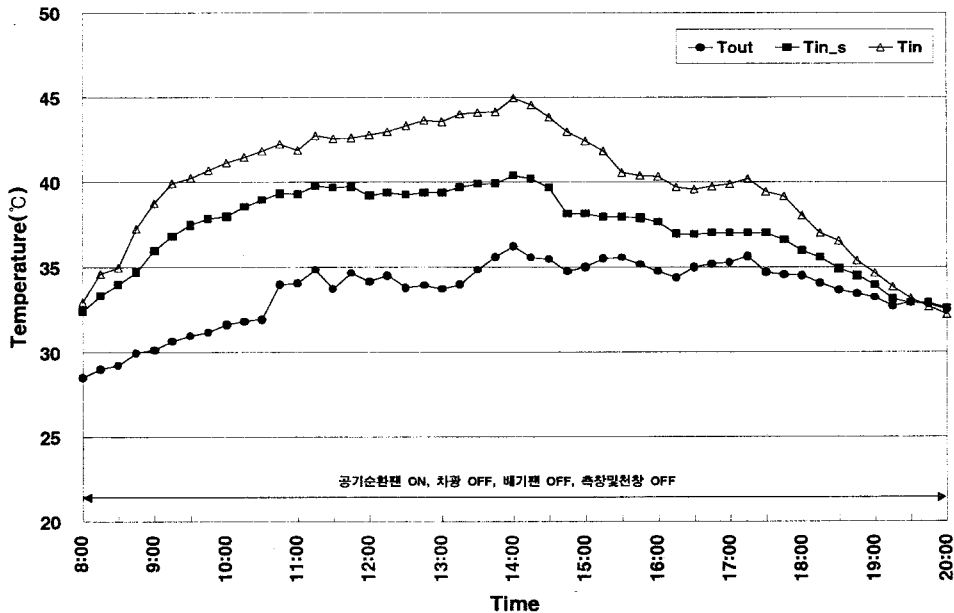


그림 5-38. 외기온에 따른 축열 및 대조온실 내부온도 변화

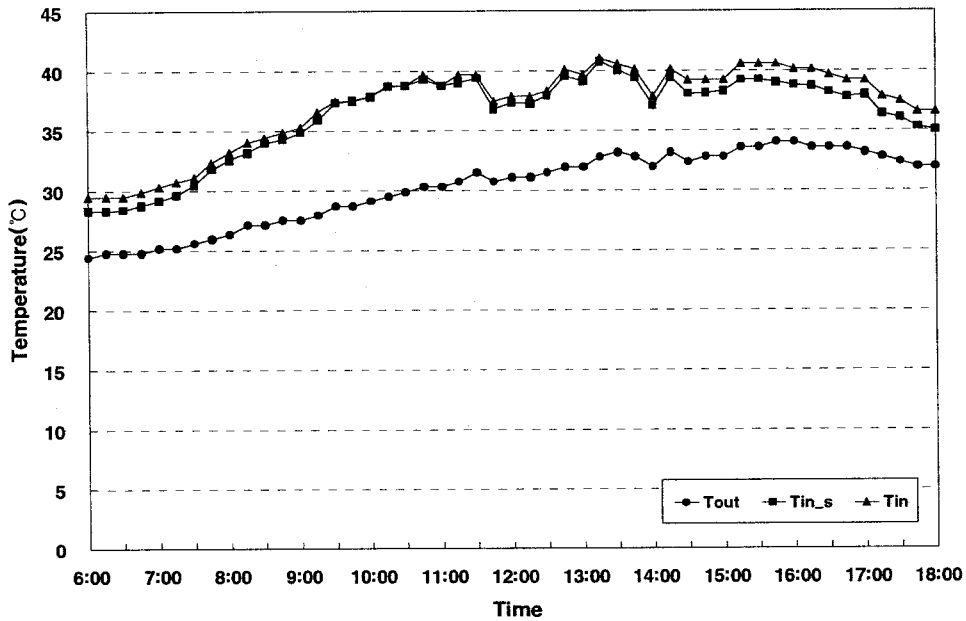


그림 5-39. 외기온에 따른 축열 및 대조온실 내부온도 변화

그림 5-39는 차광(축열온실 차광율 55%, 일반온실 차광율 85%)을 실시한 경우의 자갈축열 태양열 온실의 승온억제효과를 분석한 것으로서, 주간(06:00~18:00)에 외기온이 24.4°C~34.0°C(평균온도 30.2°C)범위에서 변화할 때 축열온실 내부온도는 28.3°C~40.8°C(평균온도 28.4°C)범위였으며 대조온실 내부온도는 29.5°C~41.1°C(평균온도 29.5°C)범위에서 변화하였다. 차광율 차이에 따른 차광효과를 고려하면 축열에 의한 냉방효과는 평균 3.5°C인 것으로 나타났다.

그림 5-40~그림 5-42는 차광을 실시하면서 공기순환방식을 그림 5-37과 같이 개선하여 축열시스템을 운전하였을 경우의 축열온실과 대조온실의 내부온도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 공기순환방식의 개선을 통하여 자갈축열 태양열 온실의 냉방효과가 약 2.5°C정도 향상시킬 수 있었다. 그러나, 축열온실 내부온도가 작물의 생육온도범위를 벗어나므로 추가적인 냉방장치가 필요하다.

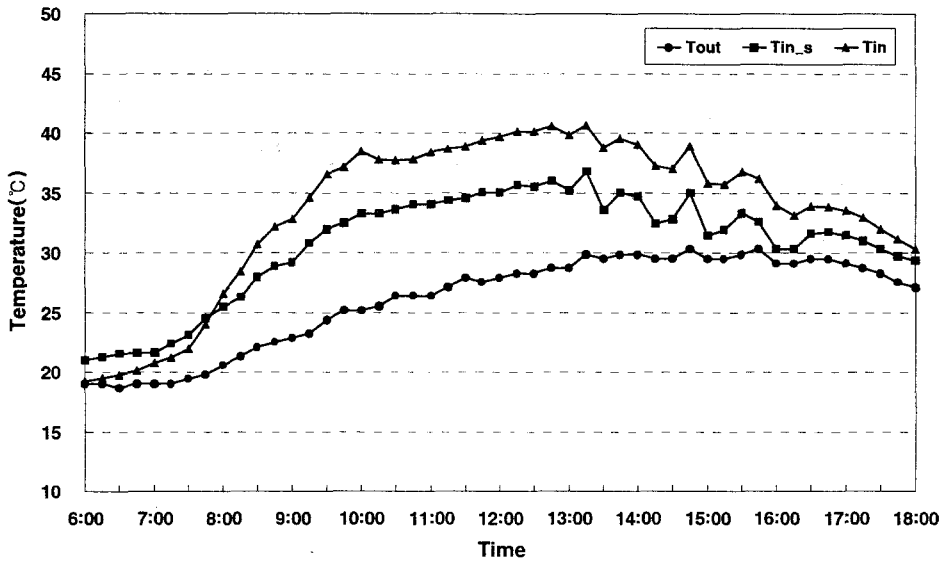


그림 5-40. 외기온에 따른 축열 및 대조온실 내부온도 변화

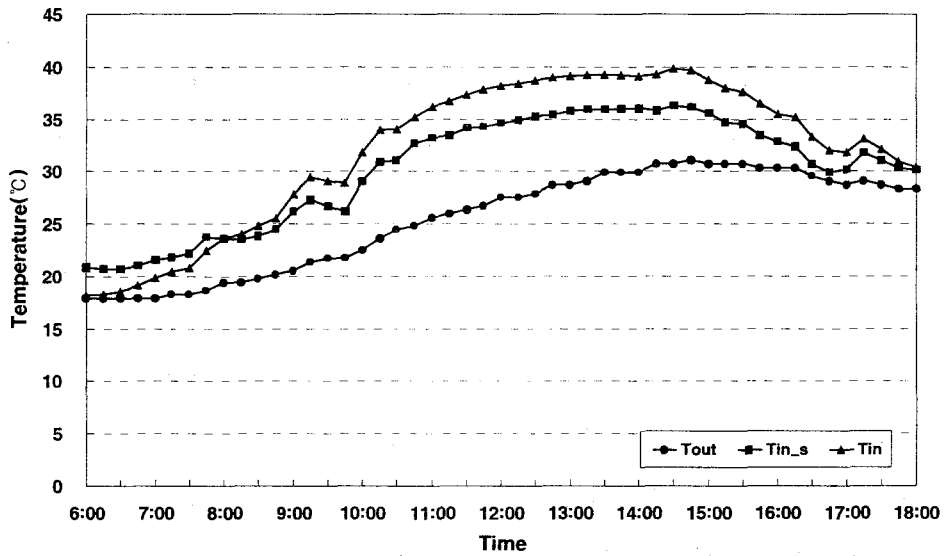
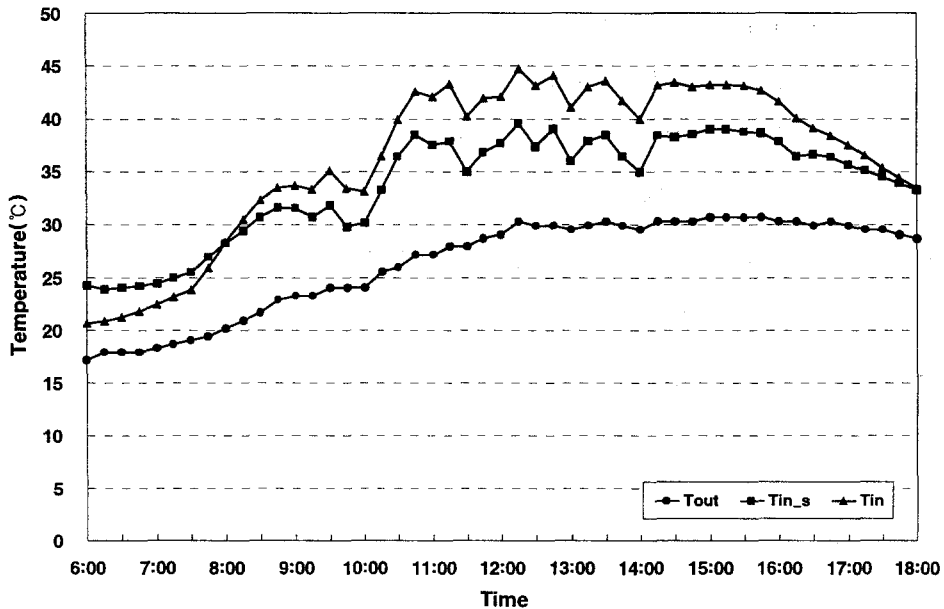


그림 5-42. 외기온에 따른 축열 및 대조온실 내부온도 변화



(Tout : 온실 외기온, Tin_s : 축열온실 내부온도, Tin : 대조온실 내부온도)

그림 5-43. 외기온에 따른 축열 및 대조온실 내부온도 변화

6. 냉방을 위한 축열 및 방열시간대 결정

자갈축열 태양열 온실의 냉방효과는 고온의 온실내부 공기를 자갈축열층으로 유입시키면서 자갈축열층의 찬공기를 온실내부로 공급하면서 이루어진다. 난방 기간중 축열은 자갈축열층 보다 많은 에너지를 저장하는 것이 목적이지만 냉방 기간중 축열은 자갈축열층의 찬공기를 온실내부로 공급하는 것이 목적이다. 따라서, 주간에 자갈축열층에 축열된 에너지를 외부로 방출하여야 냉방효과를 극대화할 수 있으므로 야간에는 외부공기를 자갈축열층으로 유입하여 자갈축열층의 열을 식힐 수 있는 방열과정이 필요하다.

냉방을 위한 축열 및 방열은 온실내·외부온도, 온실내부 설정온도, 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 축열시스템을 작동하는 것이 합리적이며 공기순환 시스템의 제어방식은 다음과 같다.

- ① 축열시작 : 자갈축열층 평균온도 < 온실내부온도
and 온실내부온도 > 온실내부 목표온도
- ② 축열종료 : 자갈축열층 평균온도 \geq 온실내부온도
or 온실내부온도 \geq 온실내부 목표온도
- ③ 방열시작 : 자갈축열층 평균온도 \geq 온실내부 목표설정온도
and 자갈축열층 평균온도 > 온실외부온도
- ④ 방열종료 : 자갈축열층 평균온도 < 온실외부온도

제5절 요약 및 결론

자갈축열 태양열 온실의 공기유동성, 축열 및 냉·난방성능을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자갈축열 태양열온실시스템의 공기유동성 및 축열성능

가. 자갈축열층내 풍속은 공기순환방식에 상관없이 유입구에서 멀어질수록 순환유체의 유동속도가 감소하다가 자갈축열층 중앙에서 유출구 방향으로 갈수록 다시 유동속도가 증가하는 경향으로 나타났으며 동일한 유량으로 순환팬을 작동할 경우에는 유출구보다는 유입구의 유량을 증가시키는 것이 축열성능을 향상시키는데 유리한 것으로 나타났다.

나. 축열층의 온도 및 축열량은 축열층내 유동속도가 증가함에 따라 증가하였으며 유입유량의 증가와 유출팬보다는 유입팬의 작동유무에 많은 영향을 받는 것으로 나타났나 자갈축열층의 유입구에서 멀어질수록 온도상승 속

도는 감소하였다.

다. 유출·입팬을 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 의 유량으로 평균기온이 33°C 인 온실 내부공기로 16시간 축열하였을 경우에는 자갈축열층(61.6m^3)의 평균온도는 약 9.3°C 증가하였다.

라. 공기순환시스템의 유입유량이 $106\text{m}^3/\text{min}$ 으로 일정하고 유출유량이 증가하여도 자갈축열층의 온도 증가율은 미소한 차이가 있었으나 유입유량은 없고 유출유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 자갈축열층의 온도 증가율은 약 1.7~1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 유출유량은 없고 유입유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 자갈축열층 평균온도 증가율은 약 2.6~2.8배 증가하였으며 유입 및 유출유량이 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 자갈축열층 평균온도 증가율은 약 2.8~3.1배 증가하였다.

마. 유입팬의 유량을 $106\text{m}^3/\text{min}$ 으로 동일하게 작동한 경우에는 유출팬의 작동여부와는 관계없이 축열시간 735분동안 축열량은 $35,290\sim 39,700\text{kcal}$ 로 유사하게 나타났으나 유출구의 풍량을 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 하여 유출팬만을 작동하였을 경우에는 축열량이 $69,451\text{kcal}$ 로 약 1.8배 증가하였으나 유출팬의 작동없이 유입팬의 유량을 $212\text{m}^3/\text{min}$ 로 작동하였을 경우에는 축열량이 $95,135\text{kcal}$ 로 약 2.4배 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 유입 및 유출팬의 풍량을 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 로 작동하였을 경우에는 $107,494\text{kcal}$ 로 축열되는 것으로 나타났다.

바. 유입유량이 $106\text{m}^3/\text{min}$ 이고 유출유량이 0와 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우에 축열량 증가율은 미소한 차이가 있었으나 유입유량은 없고 유출유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 축열량 증가속도는 약 1.7~1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 유출유량은 없고 유입유량이 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 유입 및 유출유량이 각각 $106\text{m}^3/\text{min}$ 인 경우보다 축열량 증가속도는 약 2.6~2.7배 증가하였으며 유입 및 유출유량이 각각 $212\text{m}^3/\text{min}$ 으로 증가하면 축열량 증가속도는 약 2.7~2.8배 증가하였다.

사. 동일한 유량으로 유입팬을 작동하는 것이 유출팬을 작동하는 것에 비해 자갈축열층의 온도상승효과는 약 1.3배, 축열량 증가속도는 약 1.5배 향상되는 것으로 분석되었다. 그리고, 유입유량이 최대일 때 유출유량의 증가에 따른 자갈축열층의 평균온도 및 축열량의 증가속도는 미소하게 나타나 자갈축열층의 온도와 축열량은 공기순환시스템의 유출유량보다는 유입유량의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다.

2. 자갈축열 태양열온실의 난방효과

가. 난방기간중 축열시 온실 내부온도가 $18.3^\circ\text{C} \sim 25.1^\circ\text{C}$ 범위에서 변화할 때 자갈축열층 내부온도는 $5.5^\circ\text{C} \sim 18.6^\circ\text{C}$ 에서 변화하였으며 유입구에서 멀어질수록 축열층 온도는 낮게 나타났으며 온도상승 속도 또한 감소하였다. 그리고, 축열 7시간 동안 평균 6°C 의 온도상승이 있었으며 공기의 흐름방향에 따라 최고 9°C 온도차가 발생하였다. 방열시 축열층 내부온도는 축열내로 유입되는 온실 내부공기의 온도 영향을 직접적으로 받는 것으로 나타

났으며 시간이 경과함에 따라 축열층 내부온도는 감소하여 방열 7시간후에는 축열층 내부온도차가 1℃미만으로 일정한 온도분포를 유지하였다.

나. 축열층의 내부습도는 유입공기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

다. 공기유입팬의 최대유량으로 축열하였을 경우, 자갈축열 태양열 온실은 대조 온실에 비해 주간에 최고 13.2℃, 평균 6.6℃의 승온억제효과가 있었으며 내부습도는 대조온실과 비교하여 평균 18.7%정도 높게 나타났다. 그리고, 야간 방열시에는 자갈축열 태양열 온실 내부온도는 대조온실에 비해 공기순환방식에 따라 평균 3.8℃~6℃ 높게 나타났으며 내부습도는 대조온실에 비해 39.9%정도 높게 나타났다.

라. 난방시 효율적인 공기순환방식은 다음과 같다.

1) 축열시 공기순환경로

: 온실내부→유입덕트→유입팬→자갈축열층→유출팬→유출덕트→온실내부

2) 방열시 공기순환경로

: 온실내부→유출덕트→유출팬→자갈축열층→유입팬→유입덕트→온실내부

마. 난방을 위한 공기순환시스템의 제어방식은 온실내부온도, 온실내부 설정온도, 난방설정온도 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 축열시스템을 작동하는 것이 타당하다. 축열시 공기순환시스템의 유입덕트와 유입팬에 의한 열손실이 약 2.5℃가 발생하므로 공기순환시스템의 제어방식은 다음과 같다.

- 1) 축열시작 : 자갈축열층 평균온도+2.5℃ < 온실내부온도
and 온실내부온도 > 온실내부 설정온도
- 2) 축열종료 : 자갈축열층 평균온도+2.5℃ ≥ 온실내부온도
or 온실내부온도 ≤ 온실내부 설정온도
- 3) 방열시작 : 자갈축열층 평균온도 ≥ 온실내부 난방설정온도
- 4) 방열종료 : 자갈축열층 평균온도 < 온실내부 난방설정온도

바. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 평균 6.1℃의 난방효과가 있었다.

3. 자갈축열 태양열온실의 냉방효과

가. 주간에는 외기온이 28.5℃~35.3℃범위에서 변화할 때 자갈축열층내로 유입되는 공기의 온도는 30.5℃~36.2℃, 자갈축열층에서 온실내부로 유출되는 공기의 온도는 28.2℃~30.1℃, 축열층 내부온도는 27.4℃~35.9℃ 범위였다. 또한, 10시간 축열시 자갈축열층 내부온도는 축점에 따라 1.7℃~7.0℃의 온도상승이 있었으며 유입구에서 멀어질수록 축열층 온도는 낮게 나타났으며 온도상승 속도 또한 감소하는 경향으로 나타났다. 그리고, 야간에 축열 시스템을 작동하지 않고 배기팬만을 작동하였을 경우, 외기온이 27.4℃~34.4℃범위일 때 자갈축열층 내부온도는 29.7℃~34.9℃(평균 31.4℃)범위였으며 온실외부에 설치되어 있는 배기구와 배기팬의 영향으로 축열층 내부온도는 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향으로 나타났으며 축점에 따라 2.2℃~5.1℃(평균 2.8℃)의 온도하강 효과가 있는 것으로 나타났다.

나. 주간(08:00~18:00)에 외부습도가 48.1%~73.0%(평균 54.5%)범위에서 변화할 때 10시간 축열시 자갈축열층 내부습도는 측정점에 따라 8.1%~26.3%의 감소현상이 있었다. 또한, 유입구에서 멀어질수록 축열층 습도는 높게 나타났으며 습도감소 속도 또한 감소하는 경향으로 나타나 유입구에서 멀어질수록 외부습도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나, 야간에는 배기시스템의 영향으로 자갈축열층의 습도는 외기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

다. 무환기·무차광시 주간(08:00~18:00)에 평균 외기온이 33.1℃일 때 축열온실은 일반온실보다 주간동안 평균 3.3℃의 승온억제효과가 있었으며, 자연환기와 차광을 하였을 경우에는 평균 2.4℃ 승온억제효과가 있었다. 그리고, 야간에는 축열 및 일반온실의 내부온도 모두 외기온과 유사한 것으로 나타났다.

라. 환기·차광시 주간(08:00~18:00)에 평균 외기온이 29.1℃일 때 축열 및 대조온실의 내부온도는 32.3℃~32.6℃범위로 유사하게 나타났으나 차광이 끝나는 시각부터는 축열온실의 내부온도가 일반온실에 비해 최고 1.7℃ 낮게 나타났으며 야간에 축열시스템을 작동하였을 경우 축열온실의 내부온도는 자갈축열층의 내부온도 영향으로 대조온실에 비해 최고 1.1℃, 평균 0.2℃높게 나타났다. 하지만, 축열 및 일반온실의 상이한 차광율과 온실바닥 조건을 고려한다면 축열온실의 승온억제효과는 평균 2.4℃이상인 것으로 분석된다.

마. 무환기·무차광시 주·야간에 축열온실과 대조온실의 내부습도는 모두 외기

의 영향을 받아 외부습도와 유사한 경향으로 변화하였으나 주간에는 자갈 축열층의 내부습도 영향으로 축열온실의 내부습도가 대조온실의 내부습도보다 평균 5.4%정도 높게 나타났다.

바. 환기·차광시 축열온실과 대조온실의 내부습도는 모두 외기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으나 외기에 비해 평균 10.5%~13.0% 낮았으며 야간에는 외부습도와 유사하였다.

사. 냉방시 효율적인 공기순환경로는 다음과 같다.

1) 축열시 공기순환경로

: 온실내부→유입덕트→유입팬→자갈축열층→유출팬→온실내부

2) 방열시 공기순환경로

: 온실외부→외기 유입구→자갈축열층→배기팬→온실외부

아. 자갈축열 태양열 온실의 고온억제 및 냉방효과는 환기 및 차광조건에 따라 평균 3.5℃~3.8℃였으나 개선된 공기순환방식에 의한 승온억제효과를 약 2.5℃정도 더 있는 것으로 나타났다.

자. 냉방을 위한 축열 및 방열은 온실내·외부온도, 온실내부 설정온도, 및 자갈 축열층의 평균온도를 고려하여 축열시스템을 작동하는 것이 합리적이며 공기순환시스템의 제어방식은 다음과 같다.

1) 축열시작 : 자갈축열층 평균온도 < 온실내부온도

and 온실내부온도 > 온실내부 목표온도

- 2) 축열종료 : 자갈축열층 평균온도 \geq 온실내부온도
or 온실내부온도 \geq 온실내부 목표온도
- 3) 방열시작 : 자갈축열층 평균온도 \geq 온실내부 목표온도
and 자갈축열층 평균온도 $>$ 온실외부온도
- 4) 방열종료 : 자갈축열층 평균온도 $<$ 온실외부온도

제 6 장 자갈축열 태양열온실의 냉·난방에너지 절감 효과 및 경제성 분석

제1절 냉·난방에너지 절감 효과

1. 자갈축열 태양열온실의 난방에너지 절감효과

난방에너지 절감효과를 분석하는 방법은 실험에 의한 방법과 계산에 의한 방법이 있다. 실험에 의한 방법은 자갈축열 태양열 온실과 동일한 제원의 일반온실에서 난방설정온도에 따른 난방연료소모량을 비교·분석하는 것이며 계산에 의한 방법은 재배기간중 난방연료소비량을 기간난방부하량에 의해 결정하는 것이다. 실험용 자갈축열 태양열온실의 축열 및 난방성능에서 알 수 있듯이 자갈축열 태양열온실의 난방효과가 평균 6.1℃인 점을 고려하여 난방에너지 절감효과를 다음과 같이 분석하였다.

가. 기간난방부하에 따른 난방에너지 절감 효과

재배기간중 기간난방부하량에 따른 연료소비량을 산정하여 농업용 면세유가 변동에 따른 난방기간중 소요되는 난방비를 산출하였다. 기간난방부하 계산을 위한 대상온실은 표 6-1과 같으며 대구지역의 기상조건은 표 6-2와 같다.

표 6-1. 기간난방부하 계산을 위한 대상온실

온실 종류	온신평	용마루 높이	차 마 높이	온 실 길이	온 실 면 적	난방설정 온도	설치 지역
와이드스판	9m	6.5m	4.3m	100m	900m ² (273평)	15℃	대구근교
실험온실	7m	4.1m	2.7m	11m	77m ² (23.3평)	15℃	대구근교

표 6-2. 겨울철 온실재배기간중 대구지역의 기상조건

구 분	일평균기온(℃)	최고기온(℃)	최저기온(℃)	일조시간(hr/day)
1월	-0.2	5.0	-4.6	6.31
2월	2.0	7.2	-2.4	6.40
3월	6.6	12.3	1.8	6.35
4월	14.0	20.7	8.0	7.24
10월	15.4	21.7	10.2	6.40
11월	8.2	14.3	3.2	5.64
12월	2.1	7.8	-2.5	5.76

1) 기간난방부하 산정

재배기간중 난방연료 소비량은 기간난방부하에 의하여 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단되어 다음 식에 의하여 기간난방부하량을 산정하였다.

$$q_n = AU_1(1 - fr)DH_n \quad (6-1)$$

여기서, A : 온실 표면적(m²)

U₁ : 평균난방부하계수(0.75U)

U : 최대난방부하계수

fr : 보온피복에 의한 열절감률

DH_n : n × DH

n : 난방일수

DH : 일난방 degree-hour

2) 일난방 degree-hour

기간난방부하 계산에 필요한 일난방 degree-hour 산정은 三原의 실험식에 의하여 구하였으며 실험식은 다음과 같다.

- 난방설정온도 ≥ 일최고기온

$$DH = 24(T_{inc} - T_m) - S\{T_{inc} - (T_h + T_m)/2\} \quad (6-2)$$

- 난방설정온도 < 일최고기온

$$DH = \frac{24(T_h - T_m)(T_{inc} - T_l)^2}{(T_h - T_l)/2} - \frac{0.5S(T_{inc} - T_m)^2}{(T_h - T_m)} \quad (6-3)$$

여기서, T_m : 월평균외기온(°C)

T_l : 일최저외기온의 월평균값(°C)

T_h : 일최고외기온의 월평균값(°C)

T_{inc} : 난방설정온도(°C)

S : 일일 일조시간의 월평균값

3) 기간난방부하에 따른 연료소비량

기간난방부하를 연료의 발열량과 난방시스템의 열이용효율로 나누면 연료소비량이 구해진다. 연료소비량 추정식은 식 6-4와 같다.

$$V_f = \frac{q_n}{H \cdot \eta} \quad (6-4)$$

여기서, V_f : 연료소비량(l)

H : 연료의 평균발열량($kcal/l$)

η : 난방시스템의 열이용효율

식 (6-1)~식 (6-4)를 이용하여 겨울철 재배기간중 연료소비량을 추정한 결과는 표 6-3와 같다.

표 6-3. 겨울철 재배기간중 연료소비량

온실종류 \ 월	1월	2월	3월	4월	10월	11월	12월
유리온실(900m ²)	5,847	4,544	3,410	958	538	2,818	5,159
실험온실(77m ²)	687	666	426	113	63	335	748

※ 난방설정온도 : 15℃

※ 농업용 면세유가 : 450원('01. 10. 기준)

표 6-3의 월별 난방연료소비량을 이용하여 97년부터 99년까지 농업용 면세유의 가격변동에 따른 월 난방비를 산정한 결과는 그림 6-1과 같다.

그림 6-1에서 보는 바와 같이 IMF 초기에는 농업용 면세유가의 급등으로 월 난방비가 예년에 비해 2배정도 증가함을 알 수 있다. 온실 경영비중 난방비가 차지하는 비율이 약 30~40%가 된다는 점을 고려하면 농업용 면세유가 변동은 원예시설농가의 경쟁력 및 생산성 향상에 막대한 영향을 미치는 것이다. 농업용 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 국내실정을 감안하면 원예시설의 주년 재배를 위해서는 우선적으로 재배에 투입되는 에너지를 최소화할 수 있는 방안과 안정적인 에너지 수급대책이 절실히 필요하다. 따라서, 화석에너지의 대체에너지 개발 및 에너지 절감형 시설자재 등에 대한 연구가 활발히 이루어져야 한다.

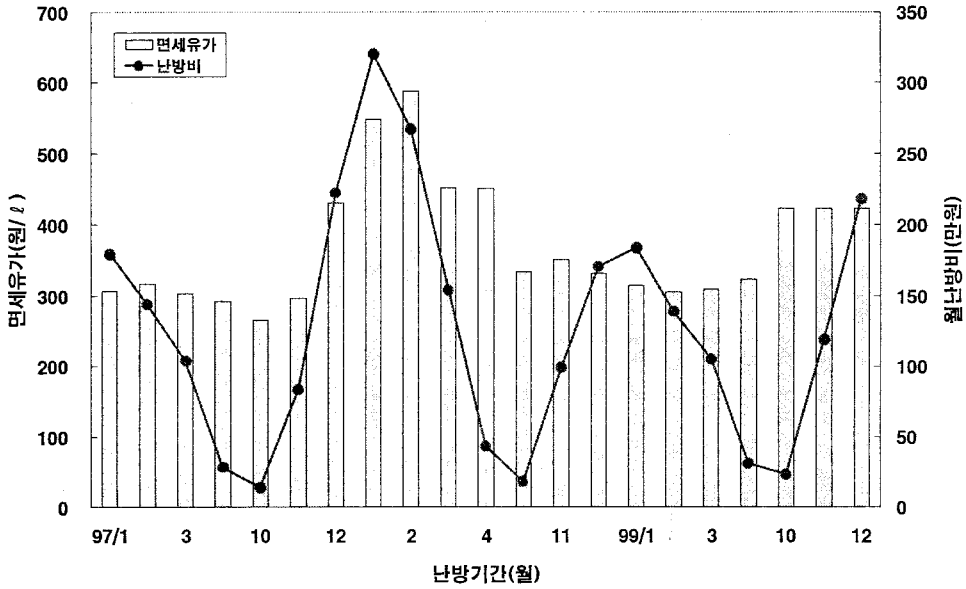
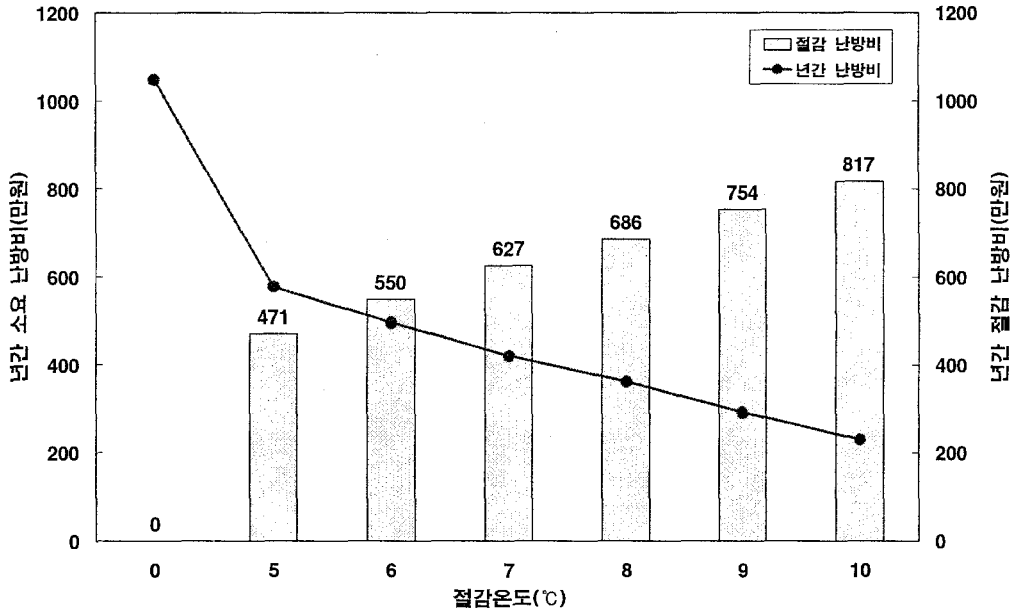


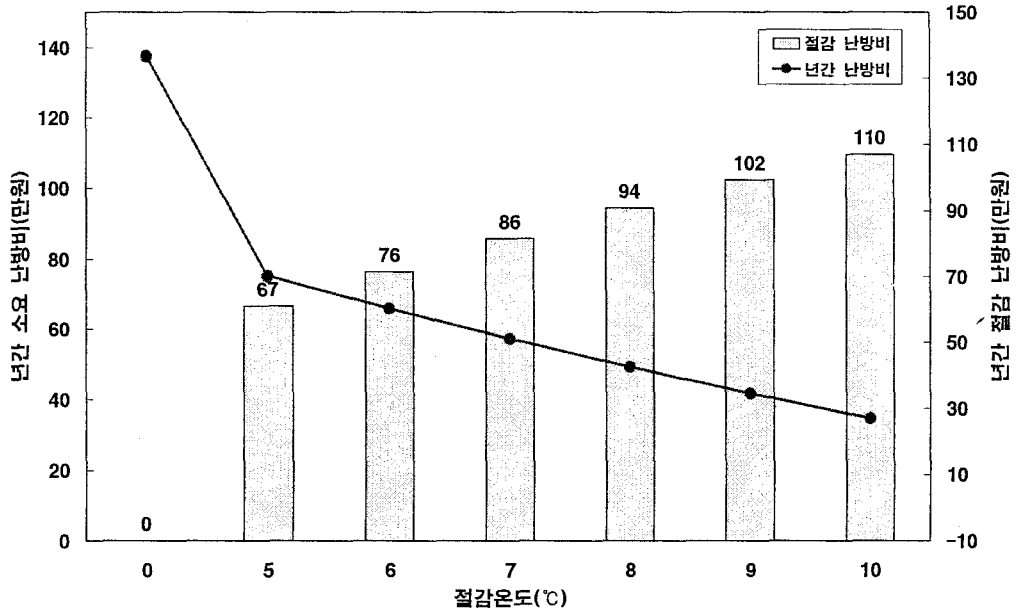
그림 6-1. 난방기간별 면세가격 현황 및 월난방비

그림 6-2는 자갈축열을 이용한 태양열 온실의 성능에 따른 연간 소요 난방비와 난방비 절감정도를 도시한 그림이다. 자갈축열 태양열 온실의 난방보조효과가 약 6°C정도 있는 것으로 나타났으므로, 와이드스판형 유리온실(면적 273평 기준)에 있어 연간 약 550만원의 난방비 절감효과가 있는 것으로 분석되었다. 그리고, 실험용 자갈축열 태양열온실은 연간 76만원의 난방에너지 절감효과 있는 것으로 나타났다.

자갈축열 태양열온실의 축열 및 난방실험 결과에서 알 수 있듯이, 주간에 축열된 자갈축열층의 내부온도는 유입구측과 유출구측의 온도차가 약 4~5°C 정도 있는 것으로 나타나, 방열시 유출구측의 공기를 온실내로 유입시킬 때의 난방보조효과가 평균 6°C인 점을 감안한다면 축열층내에서 온도가 다소 높은 자갈축열층의 공기를 우선적으로 온실내로 유입시킨다면 난방효과가 최소한 1~2°C는 향상될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Wide-span형 유리온실(900m²)



(b) 실험용 자갈축열 태양열 온실(77m²)

그림 6-2. 자갈축열 태양열온실의 난방에너지 절감효과

나. 실험에 의한 난방에너지 절감 효과

자연에너지원중 태양에너지를 이용한 자갈축열 태양열 온실에 있어 난방에너지 절감효과를 분석하고자, 자갈축열 태양열 온실과 동일한 제원의 대조온실에 있어 난방설정온도를 18℃로 설정한 경우에 자갈축열 태양열 온실과 대조온실의 난방연료소비량을 비교·분석하였다. 자갈축열 태양열 온실의 경우에는 난방 초기에는 연료가 대조온실에 비해 약 10%정도 더 소모가 되는 것으로 나타났으나 난방 2일이후에는 점차 난방연료소비량이 감소하는 경향으로 나타났다(그림 6-3). 이러한 현상은 자갈축열 태양열 온실의 경우 주간에는 온실로 투과되는 일사에 의해 축열이 이루어 지지만 야간에 난방을 할 경우에는 축열층의 온도가 설정온도에 도달할 때까지 축열이 이루어지기 때문인 것으로 분석되었다(그림 6-3). 3월 10일~3월 15일까지 6일동안 난방연료소비량은 대조온실의 경우에는 167ℓ 였으나, 자갈축열 태양열 온실은 109ℓ 로써 대조온실에 비해 약 35%정도 난방연료 절감효과가 있는 것으로 분석되었다(그림 6-4). 6일동안 난방후 자갈축열 태양열 온실에 난방을 하지 않은 상태에서 온실외부의 최저기온이 -2.4℃ 일 때 자갈축열 태양열 온실의 내부최저온도는 14℃를 유지하였으며 이후 계속 난방을 수행하지 않은 상태에서도 주간에 축열효과로 인하여 최저외기온이 3℃ 전후일 때 자갈축열 태양열 온실의 내부온도는 15℃를 유지하였으나 대조온실은 5℃ 전후였다. 그리고, 일기온차가 심한 3월말에는 난방설정온도가 18℃인 경우에 자갈축열 태양열 온실의 난방연료소비량이 대조온실에 비해 월등히 적음을 알 수 있었다(그림 6-3, 그림 6-4). 따라서, 3월에 난방할 경우에는 자갈축열 태양열 온실의 난방연료소비량은 대조온실에 비해 약 50%이상의 난방절감효과가 있는 것으로 나타났다.

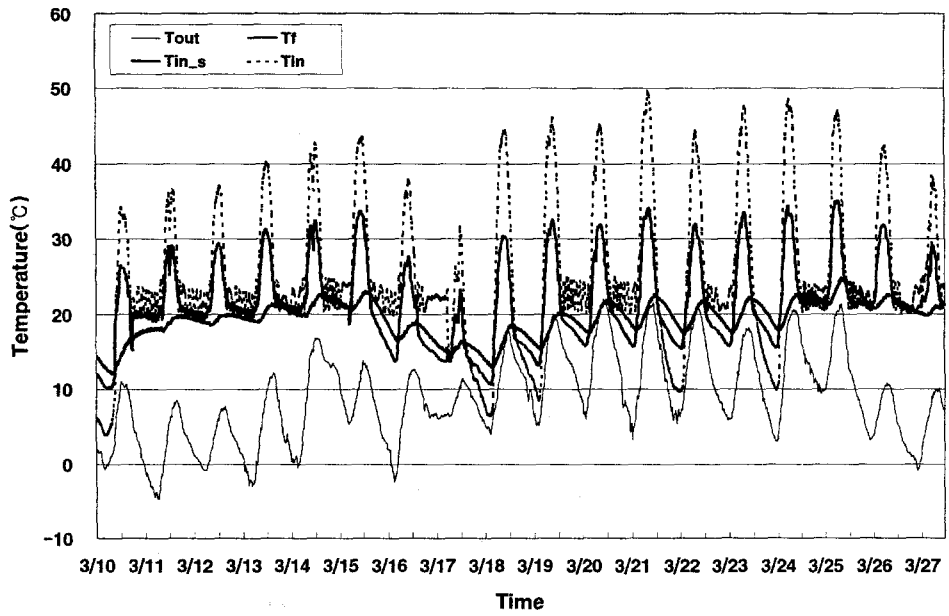


그림 6-3. 외기온 변화에 따른 내부온도 변화

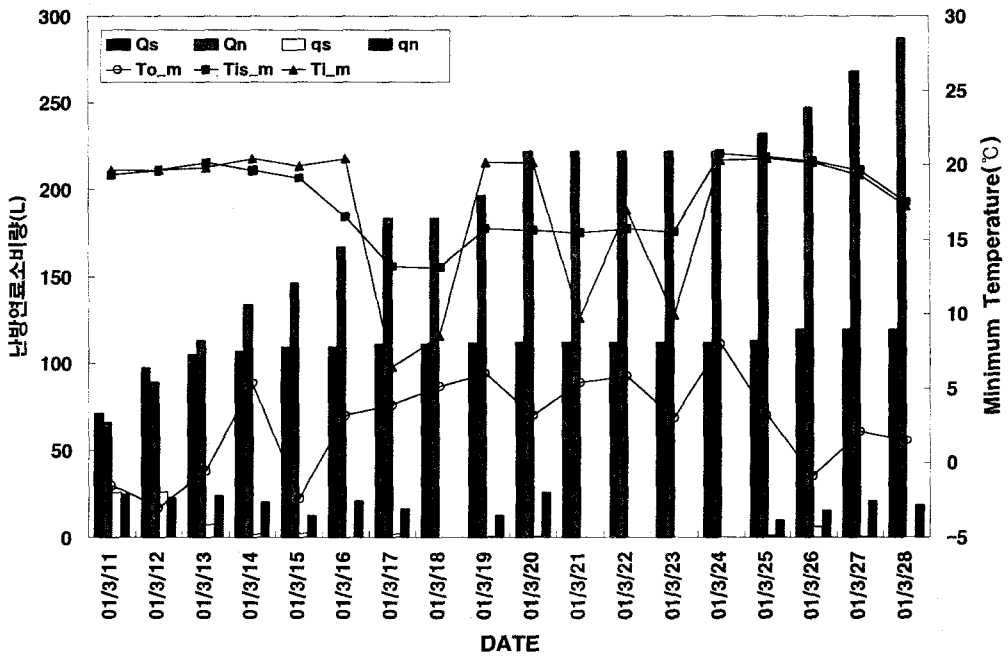


그림 6-4. 일 최저기온 및 난방연료소비량

2. 자갈축열 태양열온실의 냉방에너지 절감효과

자갈축열 태양열온실은 일반온실에 비해 약 6.3℃의 냉방효과가 있는 것으로 나타났으나, 외기온이 30℃ 이상 올라가면 자갈축열 태양열온실 내부온도는 식물의 생육적온범위를 벗어나므로 추가적인 냉방장치가 필요하다. 따라서, 자갈축열에 의한 냉방효과는 냉방장치의 보조수단으로 활용하여야 할 것으로 판단되며 자갈축열 태양열온실의 냉방효과는 차광율 55%의 차광효과보다 월등히 우수한 결과이므로 추가적인 냉방장치와 조합하여 사용한다면 온실의 냉방에 투여되는 냉방에너지의 절감 효과를 도모할 수 있을 것이다.

자갈축열에 의한 냉방효과를 이용하여 자갈축열 태양열온실의 냉방에너지 절감효과를 난방에너지처럼 정량적으로 분석하는데는 다소 어려움이 있어 실험에 의한 방법으로 에너지 절감효과를 분석할 필요가 있다. 따라서, 차후 자갈축열 태양열온실에 추가적인 냉방장치를 설치하여 자갈축열과 조합운전에 의한 냉방에너지 절감효과를 분석한 결과를 관련학회 등에 발표하고자 한다.

제2절 자갈축열 태양열온실의 경제성 분석

자갈축열 태양열온실의 경제성 분석은 난방효과만을 고려하여, 온실규모와 농업용 면세유의 가격변동에 따른 연간 절감되는 난방비를 분석하였다.

그림 6-5는 면적이 273평인 온실에 대하여 자갈축열 태양열온실의 난방효과 별로 농업용 면세유의 가격변동에 따른 연간절감난방비에 대해서 분석한 것이다. 난방효과를 향상시키거나 농업용 면세유의 가격이 오를수록 연간 절감되는 난방비는 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다.

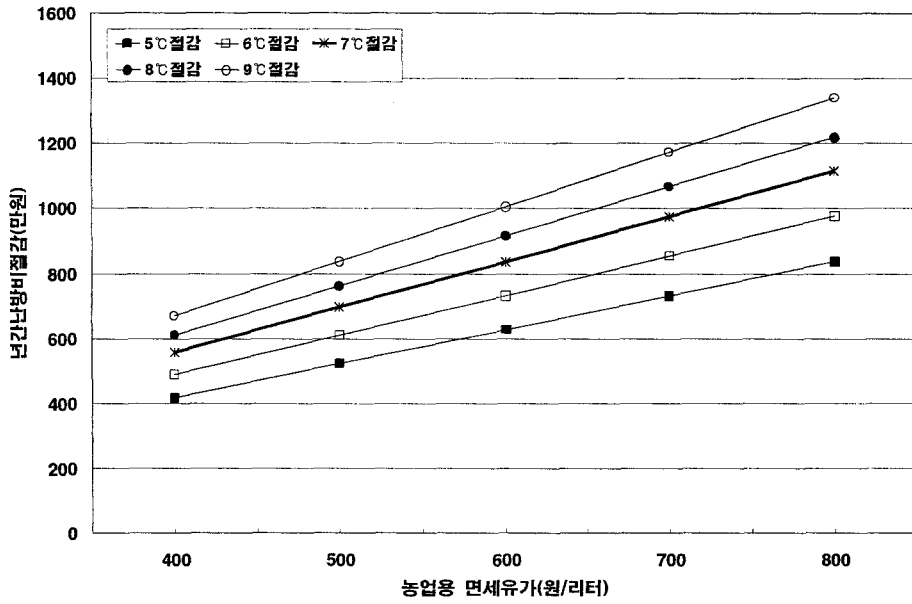


그림 6-5. 농업용 면세유가 변동에 따른 난방비 절감 효과

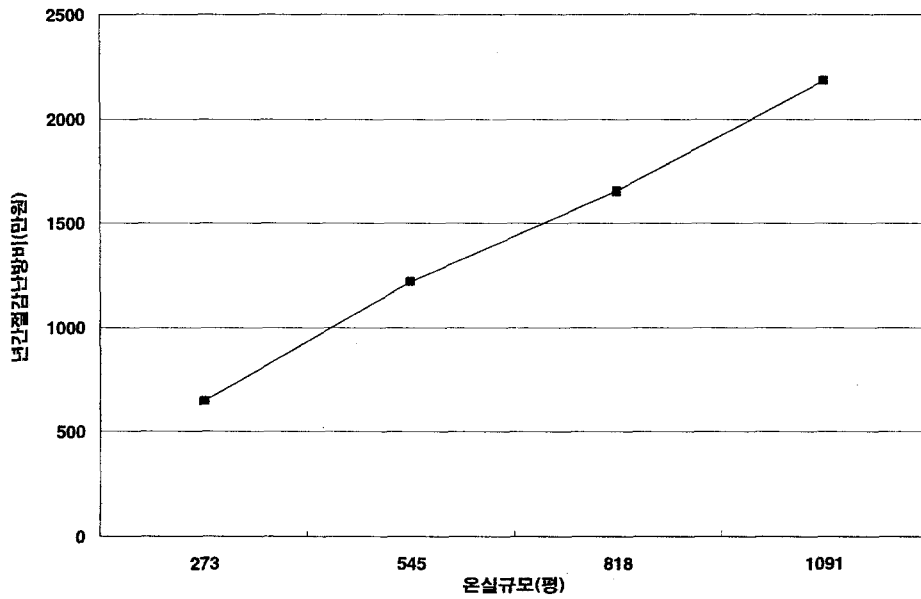


그림 6-6. 온실규모에 따른 난방비 절감 효과

그림 6-6은 실험용 자갈축열 태양열온실의 난방효과를 온실규모별로 적용하였을 경우에 연간 절감되는 난방비를 분석한 결과이다. 온실규모가 커질수록 난방에 소요되는 난방비 또한 증가하게 됨에 따라 난방효과에 따른 연간절감난방비도 비례적으로 증가하였다.

표 6-4는 실험용 자갈축열 태양열온실의 축열시스템을 구성하는데 투자된 경비이며, 난방효과에 따른 난방비 절감에 있어 공기순환시스템의 팬을 작동하는데 소요되는 경비를 감안하여 연간절감난방비를 산정하였다. 공기순환팬 작동에 소요되는 경비산정에 필요한 사항은 다음과 같다.

- 공기순환팬 소비전력 : 500W×4대
- 농업용 전기요금 : 30.7원/kWh

표 6-4. 실험용 자갈축열층 시공비

항 목	내 역	비 용
축열층 굴착 및 매설	폭(7m)×길이(11m)×깊이(1m) ×작업일수(2일)×300,000원/80m ³	600,000원
강자갈 구입	70m ³ ×18,000원	1,260,000원
콘크리트(온실기초제외)	25m ³ ×41,000원	1,025,000원
공기순환시스템	공기순환팬 8대 및 유출·입덕트	548,000원
축열시스템시공비		3,781,000원

그림 6-7은 실험용 자갈축열 태양열온실의 초기시공비와 난방비 절감 효과를 대비하여 시설 감가상각비를 산정한 결과로서, 실험용 자갈축열 태양열온실의

경우, 5년이후부터 난방비 절감으로 인한 소득증대가 예상되어진다. 이러한 경제성 분석은 난방비만으로 고려한 결과이므로 여름철 냉방에너지의 감소를 동시에 고려한다면 냉·난방에너지 절감에 따른 경영비 감소로 인한 농가의 소득증대를 예상할 수 있다. 또한, 자갈축열 태양열온실의 난방효과 증대에 따른 난방비 절감이 예상되고, 초기 시공비 산정은 실험온실을 기준하였으므로 평당 초기시공비가 다소 높게 책정된 점을 고려한다면 냉난방에너지 절감에 따른 시설투자비의 회수년수는 감소할 것으로 판단된다.

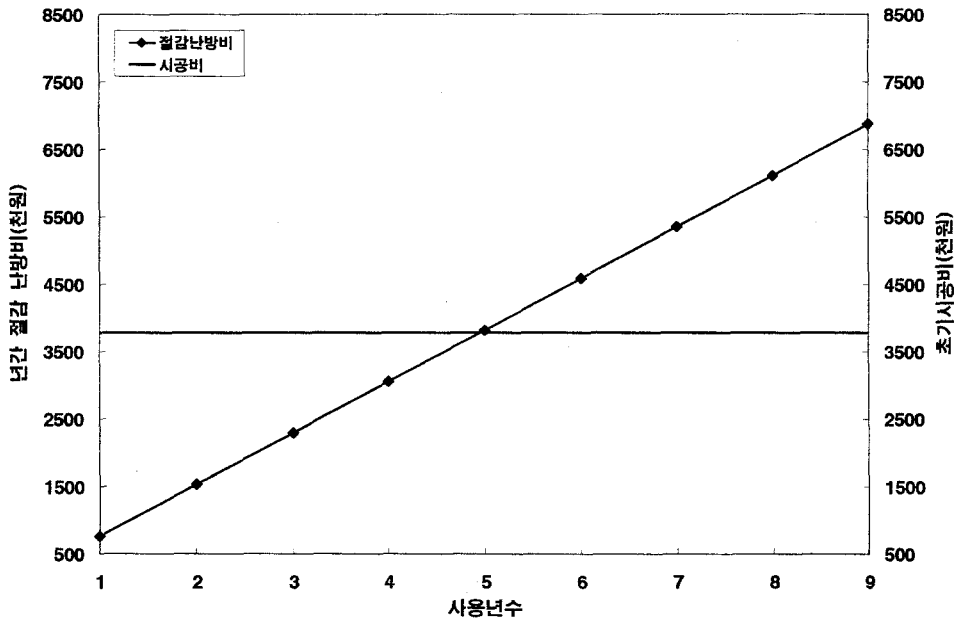


그림 6-7. 사용년한별 초기시공비 및 절감난방비 비교

제3절 요약 및 결론

자갈축열 태양열온실의 냉·난방에너지 절감효과와 경제성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실험온실에서 난방효과로 연간 절감되는 난방비는 76만원인 것으로 나타났으며 온실규모가 커질수록 난방에 소요되는 난방비 또한 증가하게 됨에 따라 난방효과에 따른 연간절감난방비도 비례적으로 증가하였다.
2. 자갈축열 태양열온실의 난방효과를 향상시키거나 농업용 면세유의 가격이 오를수록 연간 절감되는 난방비는 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다.
3. 난방설정온도가 18℃인 경우에 3월중 15일동안 자갈축열 태양열 온실의 연료소모량은 대조온실에 비해 약 51.4%의 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.
4. 자갈축열에 의한 냉방효과는 냉방장치의 보조수단으로 활용하여야 할 것으로 판단된다.
5. 난방효과만 고려할 경우 실험용 자갈축열 태양열온실의 시설투자비 회수년수는 5년으로 나타났다.

제 7 장 종합 결론

자갈축열 태양열 온실의 냉·난방에너지 절감 효과를 분석하기 위하여 축열 자갈층 모델 및 실험용 자갈축열 태양열 온실을 설계 및 제작하여 실험을 수행하여 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자갈입자의 형상, 유입유체온도, 순환유체의 유량 및 자갈의 공극율 등을 고려하여 축열 자갈층의 두께를 산정할 수 있었다.
2. 자갈축열층의 단열재의 두께는 최소한 6cm 이상이 되어야 한다.
3. 자갈축열층내 공기유동속도는 공기순환방식에 상관없이 유입구에서 멀어질수록 감소하다가 자갈축열층 중앙에서 유출구 방향으로 갈수록 다시 증가하는 경향으로 나타났으며 동일한 유량으로 순환팬을 작동할 경우에는 유출구보다는 유입구의 유량을 증가시키는 것이 축열성능을 향상시키는데 유리한 것으로 나타났다.
4. 동일한 유량으로 유입팬을 작동하는 것이 유출팬을 작동하는 것에 비해 자갈축열층의 온도상승효과는 약 1.3배, 축열량 증가속도는 약 1.5배 향상되는 것으로 분석되었다. 그리고, 유입유량이 최대일 때 유출유량의 증가에 따른 자갈축열층의 평균온도 및 축열량의 증가속도는 미소하게 나타나 자갈축열층의 온도와 축열량은 공기순환시스템의 유출유량보다는 유입유량의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다.
5. 난방기간중 축열층의 내부습도는 축·방열시 유입공기의 영향을 많이 받아 온실내부습도 변화와 유사하게 나타났다.

6. 자갈축열 태양열 온실은 대조온실에 비해 평균 6.1℃의 난방효과가 있었다.
7. 난방을 위한 공기순환시스템의 제어방식은 온실내부온도, 주·야간난방설정 온도 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.
8. 무환기·무차광시 축열온실은 일반온실보다 주간동안 평균 3.3℃의 승온억제 효과가 있었으며, 자연환기와 차광을 하였을 경우에는 평균 2.4℃ 승온억제 효과가 있었다. 그러나, 공기순환방식의 개선을 통하여 난방효과를 평균 2℃ 이상 향상시킬 수 있었다.
9. 난방기간중 축열층 습도는 유입공기의 영향을 많이 받으며 유입구에서 멀어질수록 높게 나타났다. 그리고, 온실 내부습도는 외기의 영향을 받아 외부습도 변화와 유사하게 나타났으나 축열온실의 경우 축열층의 영향을 5~10% 정도 상이하게 나타났다.
10. 난방을 위한 공기순환시스템의 제어방식은 온실내·외부온도, 온실내부 목표온도 및 자갈축열층의 평균온도를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.
11. 자갈축열 태양열온실은 냉·난방장치의 보조수단으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강정길 외, 1999, 공기조화설비설계, 기문당.
2. 김용현, 고태균, 김문기, 1990, 플라스틱 온실의 열저장 시스템 개발에 관한 연구(I), 한국농업기계학회지 15(1), pp. 14-22.
3. 과학기술처, 1990, 열저장 시스템용 축열재에 관한 기초연구 연구보고서.
4. 과학기술처, 1995, 첨단 식물 공장 복합 에너지 시스템 개발 및 실증 시범화 연구, 한국에너지기술연구소.
5. 권영삼, 1997, 난방에너지 절감기술과 대응방안, 시설원예연구회 세미나 자료, pp. 1-22.
6. 동력자원부, 1990, 태양열 및 지중열을 이용한 다목적 복합 비닐하우스 시스템 개발.
7. 동력자원부, 1991, 태양열 및 지중열을 이용한 다목적 복합 비닐하우스 시스템 개발.
8. 동력자원부, 1991, 태양열 지하 축열기술개발에 관한 연구(I).
9. 동력자원부, 1992, 자연형 태양열시스템의 최적화를 위한 3차원 열성능해석 및 설계표준화에 관한 연구(I).
10. 동력자원부, 1993, 자연형 태양열시스템의 최적화를 위한 3차원 열성능해석 및 설계표준화에 관한 연구(II).
11. 대한건축학회, 1994, 건축설계자료집 -환경계획편-, pp. 10~30.
12. 박정원외 2인, 1992, 자갈식 축열조의 축열특성에 관한 연구, 태양에너지 Vol. 12, No. 1. 1992
13. 송현갑, 유영선, 김영복, 1993, 온실 보온을 위한 상변화 물질의 축열 특성 연구, 한국태양에너지학회지 Vol. 13(2), pp. 65-78.
14. 신기술, 1994, 축열식 공조시스템.

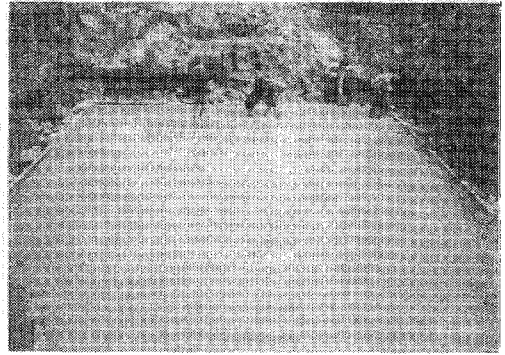
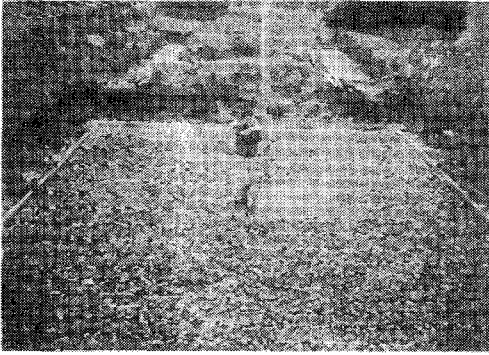
15. 이석건 역, 1992, 농업환경조절공학, 교보문고.
16. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 1999, 지중축열 온실설계를 위한 자갈의 열적 특성, 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 8(1), pp. 15~19.
17. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 1999, 태양열 온실 설계를 위한 축열자갈층의 모형 실험, 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, pp. 393~398.
18. 이석건, 이종원, 이현우, 1999, 모의 축열층의 공기유동 및 축열성능, 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 8(2), pp. 109~113.
19. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 1999, 자갈축열 태양열 온실의 내부온·습도 변화, 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 9(1), pp. 38~41.
20. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 1999, 자갈축열 태양열 온실의 축열층 온·습도 변화, 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 9(1), pp. 90~93.
21. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 2000, 여름철 자갈축열 태양열 온실의 축열층 온·습도변화, 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 9(2), pp. 128~131.
22. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 2000, 여름철 자갈축열 태양열 온실의 내부환경변화, 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, pp. 308~314.
23. 이석건, 이종원, 이현우, 자갈축열 태양열 온실의 공기유동 및 축열성능, 2001, 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, pp. 275~280.
24. 이석건, 이종원, 이현우, 김길동, 2001, 자갈축열 태양열 온실의 난방에너지 절감효과, 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 10(1), pp. 29~30.
25. 이종호, 박승제, 김용현, 김철수, 이중용, 1994, 지중열교환 온실의 축열 및 방열 특성, 한국농업기계학회지 Vol. 19(3), pp. 222-231.
26. 한국시설원예연구회, 1995, 국내외 원예시설의 특성과 시스템에 관한 심포지움 자료.
27. 한국에너지기술연구소, 1995, 첨단식물공장 복합에너지 시스템 개발 및 실증 시범화연구 연구보고서5
28. 山本雄二郎, 1966, 地中-空氣熱交換ハウスの溫度環境および熱特性, 農業氣

- 象, 29(1), pp. 11-15.
29. 高倉 直, 山川建一, 1981, 地中熱交換ハウスの設計 1, 定常一次元モデルによる解析, 農業氣象, 37(3), pp. 187-196.
 30. 池本 弘, 1981, 空調設備設計の實務, pp. 257~261
 31. 佐藤惠一, 1996, クリモグラフを利用した温室の適地性判定, 施設園藝 38(6), pp. 26-27.
 32. 板木利隆, 1983, 施設園藝 装置と栽培技術, 誠文堂新光社, pp. 497~566.
 33. 川井一之, 1980, 省エネルギーと農業, 名文書房.
 34. 農林水産技術情報協會, 1980, 施設園藝の省エネルギー新技術, 名文書房.
 35. 農林統計協會, 1981, 省エネルギー事例集, 名文書房.
 36. 小森友明, 1988, 温室の温水カーテンにおける熱移動の解析, 農業氣象 44(3), pp. 195~202.
 37. 三原義秋・古放弘, 1973, 温室の細霧冷房(Fog & Fan)法の実施例について, 農業氣象, 28(4), pp. 19~24.
 38. 河野徳義, 1985, 水蓄熱型太陽熱利用ハウスの熱的特性, 農業氣象, 4(91), pp. 63~68.
 39. 岡野利明・山本雄二郎, 1986, 水蓄熱式太陽熱温室, 農業氣象, 42(2), pp. 95~100.
 40. A. F. MILLS, 1995, BASIC HEAT MASS TRANSFER, Prentice Hall, pp. 323~328.
 41. G. SCHEPENS and D. MAHY, 1986, Solar Energy in Agriculture and Industry, D. Reidel Pub. Co.
 42. Henning Bredenbeck, 1984, ROCK BED STORAGE INSIDE OF GREENHOUSES, Acta Horticulturae 148, pp. 739~744.
 43. Kozai, T, 1985, Thermal performance of a solar greenhouse with underground heat storage system, Proc. of the international symposium on thermal application of solar energy, pp. 503-508.

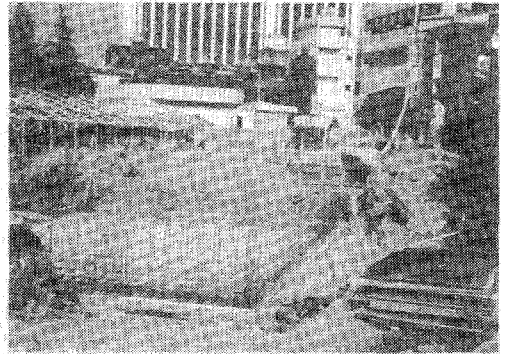
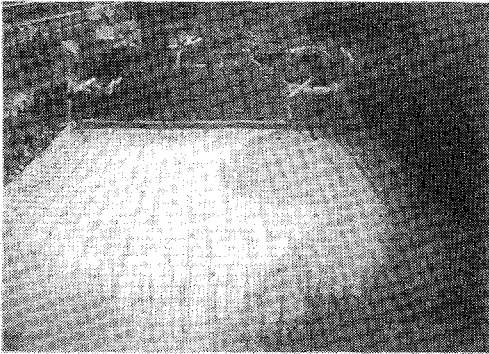
44. Kurata, K. and T. Takakura, 1985, Simulation of climate within a solar greenhouses equipped with underground heat storage units, Proc. of the international symposium on thermal application of solar energy, pp. 521-526.
45. Morris, L.G., E.S. Trickett, F.H. Vanstone, and Vells, D.A., 1958, The limitation of maximum temperature in a glasshouse by the use of a water film on the roof, J. Agr. Eng. Res., 3, pp. 121~130.
46. T. Boulard, E. Razafinjohany, A. Baille, A. Jaffrin, B. Fabre, 1990, Performance of a greenhouse heating system with a phase change material, Agricultural and Forest Meteorology Vol. 52, pp. 303-318.
47. T.Mori, 1978, UTILIZATION OF SOLAR ENERGY FOR WINTER CROPPING GREENHOUSE TOMATO, Acta Horticulturae 87, pp. 321~327.
48. Walton, L.R. et al., 1979, Storing solar energy in an underground rock bed, Transactions of the ASAE 22.

부 록

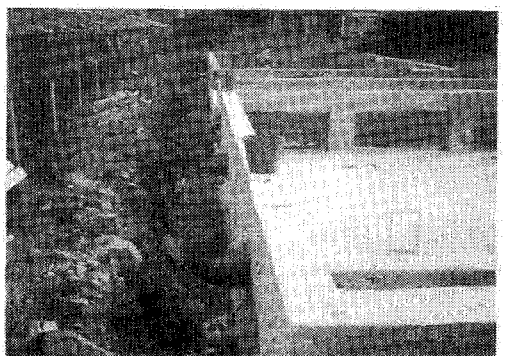
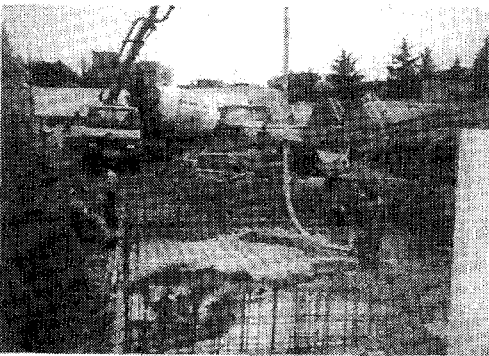
1. 자갈축열 태양열 온실의 시공과정
2. 자갈축열층 구조계산서



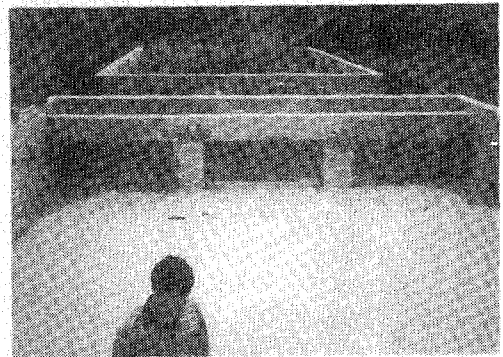
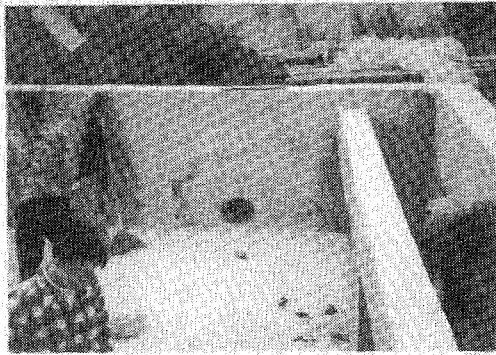
온실기초작업



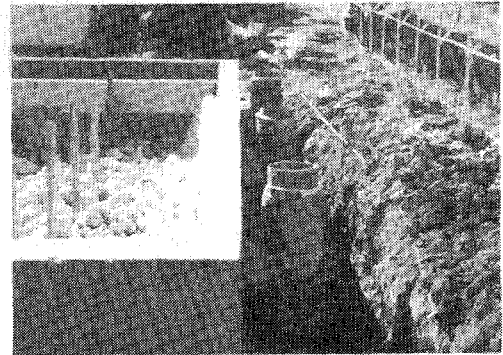
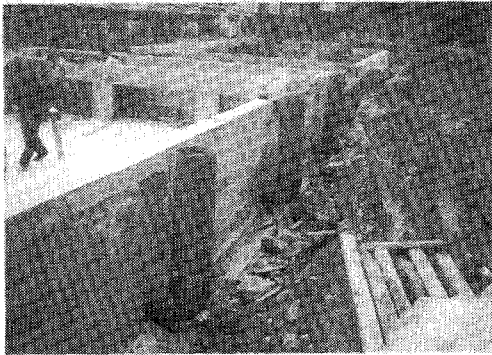
자갈축열층 바닥 철근배치작업



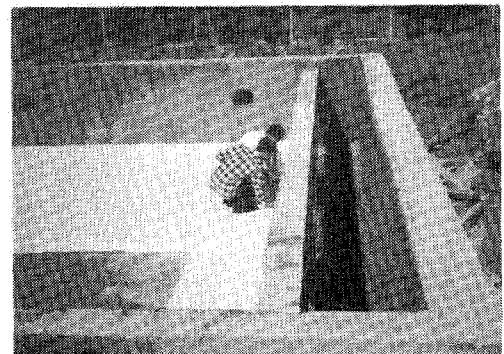
온실 기초 및 자갈축열층 바닥시공



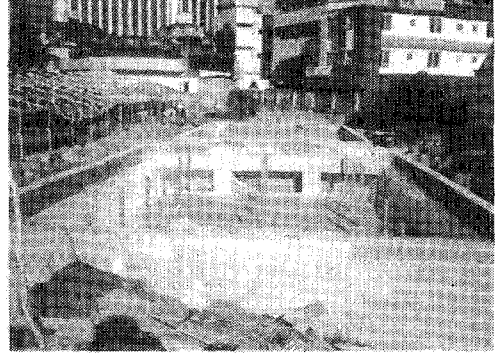
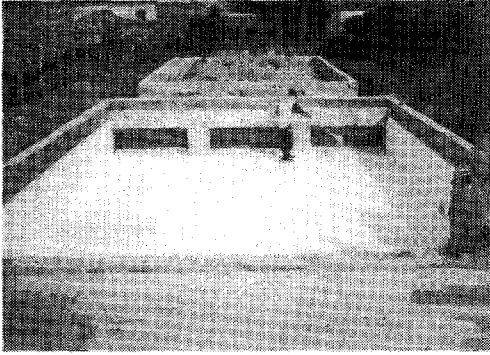
자갈축열층 방수작업



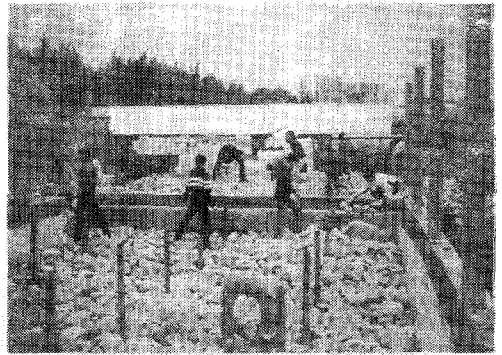
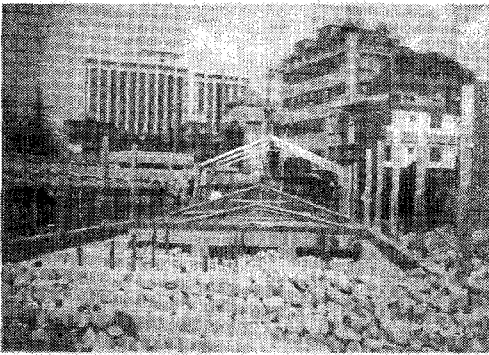
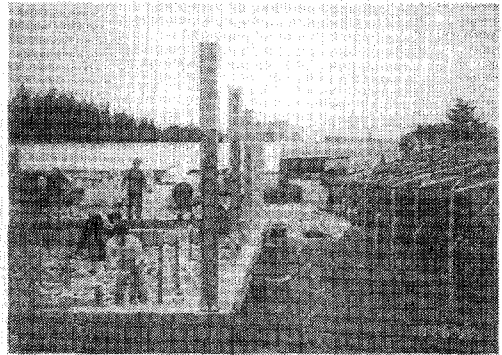
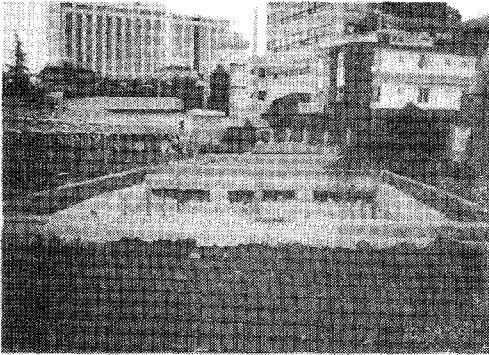
자갈축열층 외기유입구 및 배출구



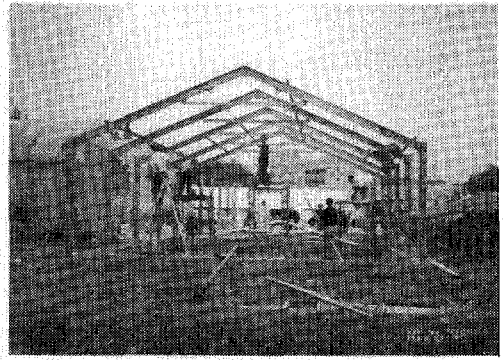
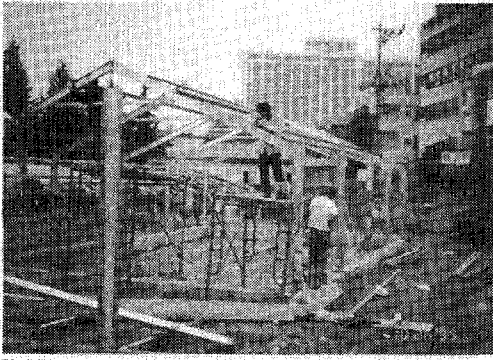
자갈축열층 단열작업



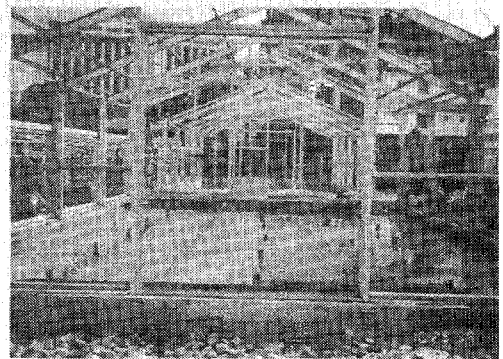
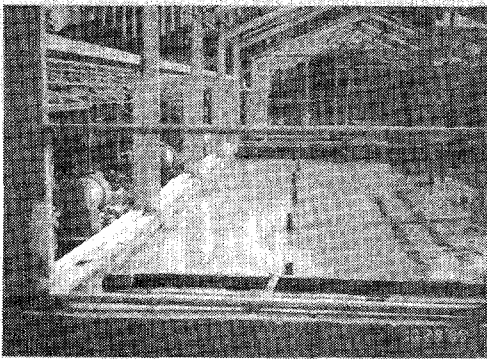
자갈축열층 단열 및 계측파이프 매설



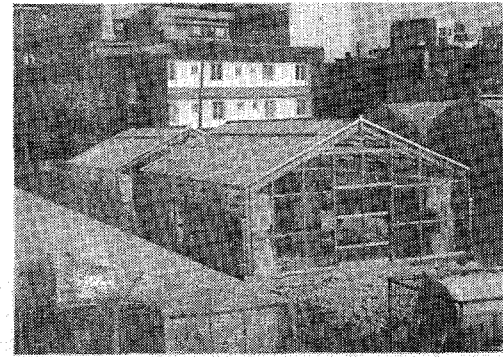
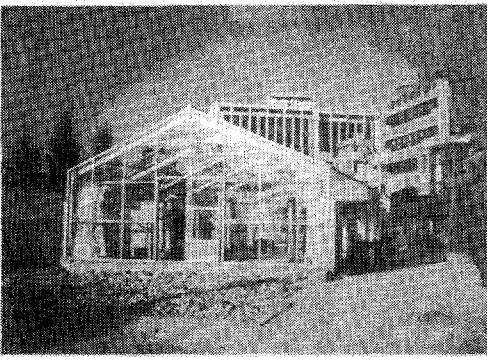
자갈축열층 축열재 채움



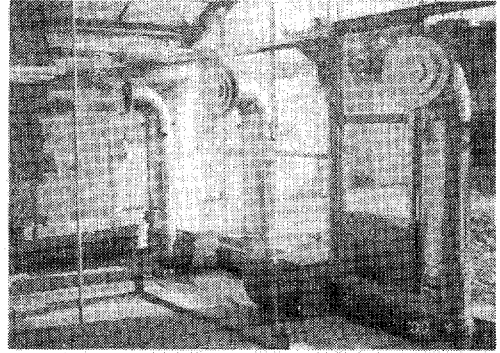
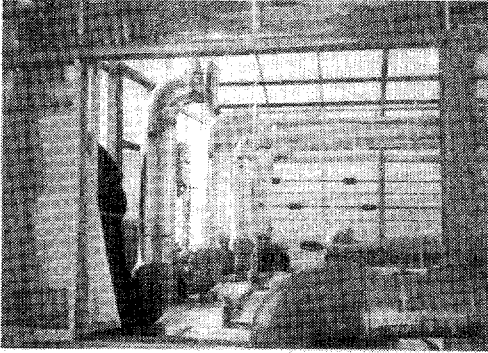
온실골조시공



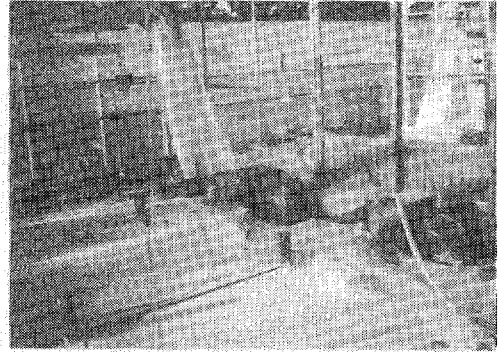
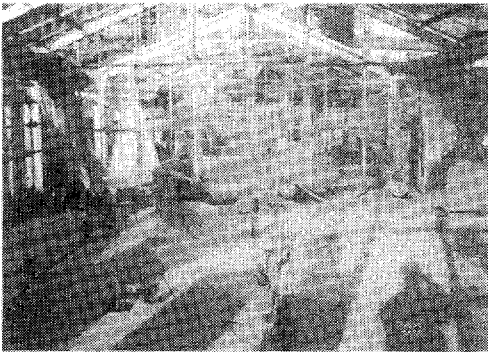
온실바닥 시공



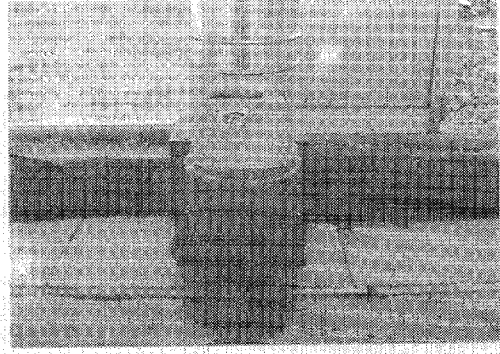
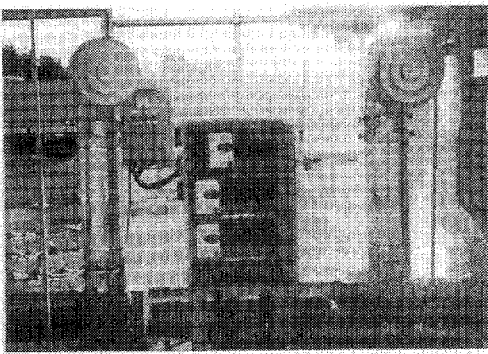
자갈축열 태양열온실 및 대조온실



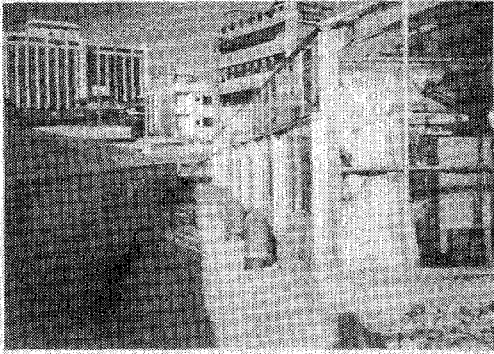
자갈축열층 공기유입시스템



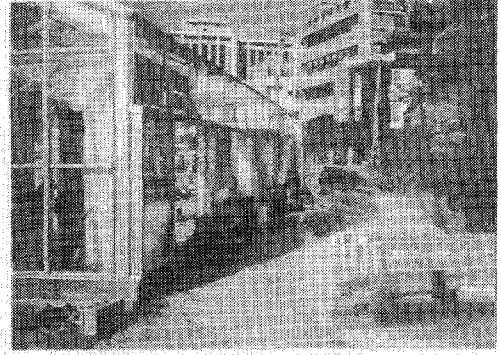
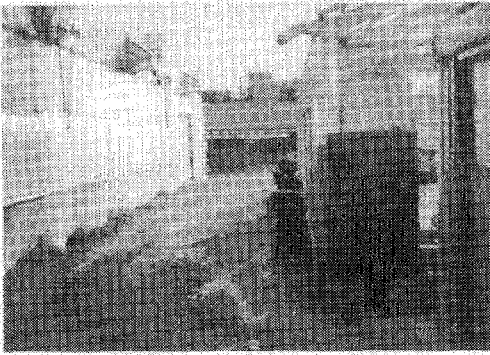
자갈축열층 공기유출시스템



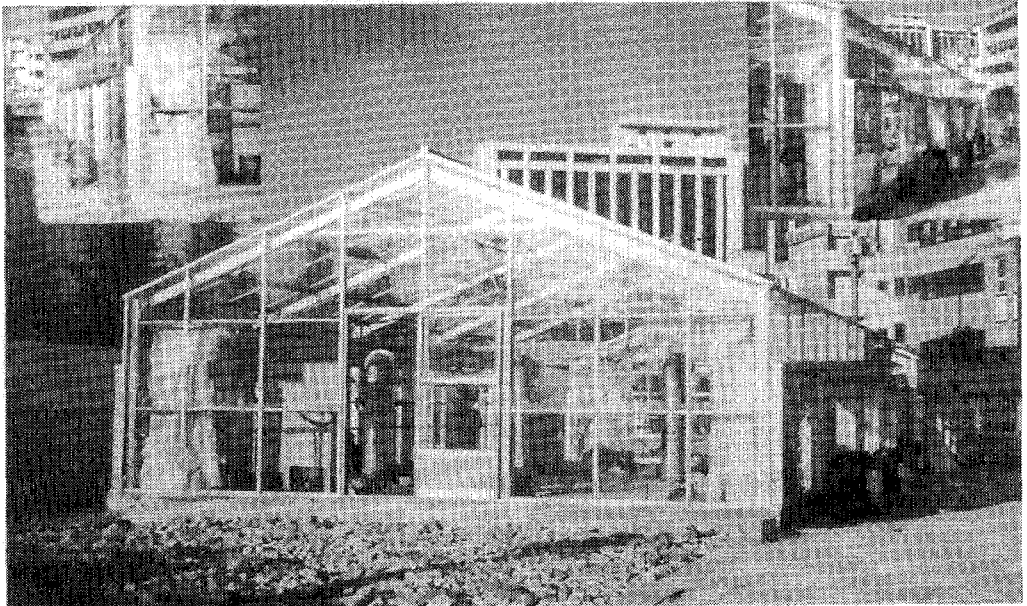
공기순환시스템 개폐밸브 및 제어장치



자갈축열층 외기유입구



자갈축열층 외기배출시스템



자갈축열층 구조계산서

■ 설계조건

1. 적용시방서

- 도로교 표준시방서 ○ 철근콘크리트 표준시방서 ○ 한국형 유리온실 표준설계도

2. 단위중량

- 철근콘크리트 : 2.50 t/m^3
- 뒷채움재 : 1.90 t/m^3
- 지하수 : 1.00 t/m^3
- 지하수 있을 경우 토사 단위중량 : $\gamma_t - 0.9$

3. 토압

- 일반토사의 내부 마찰각 $\phi = 30^\circ$
- 토압계수 : 정지 토압계수 $K_a = 1 - \sin \phi = 0.5$

4. 지하수위

GL 1.0m에 존재한다고 가정

5. BOX 하부지반조건

$\gamma_t = 1.9 \text{ t/m}^3$, $\phi = 30^\circ$, $C = 0.0 \text{ t/m}^2$, $N = 30$ 회 이상

6. 재료강도

(1) 콘크리트 설계기준강도

- 하부콘크리트 : $\sigma_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ (25mm)
- 버림콘크리트 : $\sigma_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ (40mm)

(2) 철근 항복응력 (SD 30)

- $\sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$

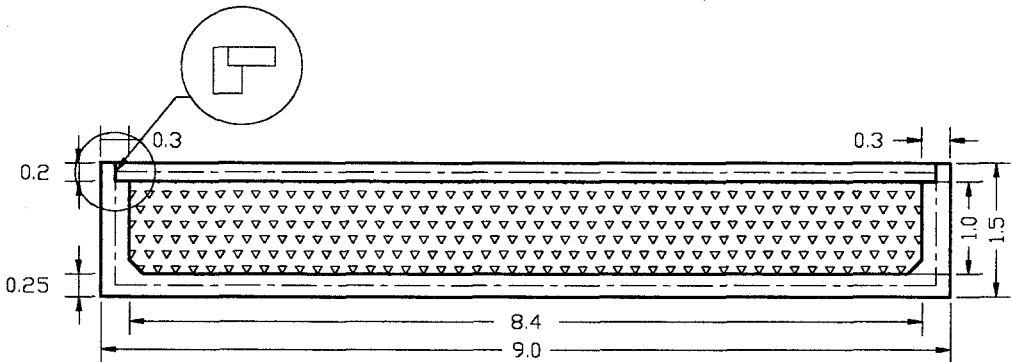
1. 단면제원

1.1. 절점좌표

절점	X	Z	절점	X	Z
1	0.000	0.000	8	6.090	0.000
2	0.870	0.000	9	6.960	0.000
3	1.740	0.000	10	7.830	0.000
4	2.610	0.000	11	8.700	0.000
5	3.480	0.000	12	0.000	1.225
6	4.350	0.000	13	8.700	1.225
7	5.220	0.000			

1.2. 단면형태

- ① $A = 0.2 \text{ m}^2$, $I = 1.0 \times (0.2)^3 / 12 = 0.00067$: 부재 13
- ② $A = 0.25 \text{ m}^2$, $I = 1.0 \times (0.25)^3 / 12 = 0.00130$: 부재 11,12
- ③ $A = 0.3 \text{ m}^2$, $I = 1.0 \times (0.3)^3 / 12 = 0.00225$: 부재 1 ~ 10



2. 하중계산

2.1 지하수는 GL -1.0m에 존재한다고 가정

(1) 사하중 - CASE 1

① 상부 SLAB

슬래브 : $0.2 \times 2.5 = 0.50 \text{ t/m}^2$

내측채움재 : $1.0 \times 1.9 = 1.90 \text{ t/m}^2$

② 벽체

(외벽) $P_1 = (0.3 \times 1.0 + 0.30 \times 0.30 \times 0.50) \times 2.5 = 0.863 \text{ t/m}^2$

③ 하부 SLAB

슬래브 : $0.25 \times 2.5 = 0.625 \text{ t/m}^2$

(2) 측벽토압 - CASE 2

$q_u = 0.5 \times (0.10 \times 1.9) = 0.095 \text{ t/m}^2$

$q_l = 0.095 + 0.5 \times (1.225 \times 1.9) = 1.259 \text{ t/m}^2$

2.3 수 압 - CASE 3

하부 슬라브에 작용하는 수압

측 벽 : $0.375 \times 1.0 = 0.375 \text{ t/m}^2$

바닥슬라브 : $1.0 \times 1.0 = 1.0 \text{ t/m}^2$

2.4 상면 재하 등분포 활하중 - CASE 4

등분포 하중 0.2t/m^2 으로 한다.(고정하중,적재하중(설비하중,작물하중),이동하중)

3. 지반반력 계수

3.1 연직 반력

$K_v = K_{v0} (B_v / 30)^{-3/4} = 12.8 \times K_{v0} \times B_v^{-3/4}$

$$K_{vo} = 1/30 \times a \times E_o \quad [a = 1.0, E_o = 28 N = 28 \times 30 = 840 kg/cm^2]$$

$$= 1/30 \times 1 \times 840$$

$$= 28 kg/cm^2$$

$$B_v = \sqrt{A_v} = \sqrt{9000 \times 100} = 948.68 cm$$

$$\therefore K_v = 12.8 \times 28 \times (948.68)^{-3/4} = 2.097 kg/cm^3 = 2097 t/m^3$$

$$K_1 = 2097 \times 0.87 \times 0.5 = 912.2 t/m$$

$$K_2 = 2097 \times 0.87 = 1824.4 t/m$$

3.2 수평 방향

수평방향 Spring 강성은 무한강성을 설치

4. Load Case

4.1 Case - 1 (사하중)

4.2 Case - 2 (토압)

4.3 Case - 3 (수압)

4.4 Case - 4 (상부 등분포 활하중)

5. 하중 조합

NAME=COMB1

LOAD=LOAD1 SF=1.5

LOAD=LOAD4 SF=1.8

NAME=COMB2

LOAD=LOAD1 SF=1.5

LOAD=LOAD2 SF=1.8

LOAD=LOAD3 SF=1.8

LOAD=LOAD4 SF=1.8

NAME=COMB3

LOAD=LOAD1 SF=0.9 (기타하중이 주하중으로 작용할 경우 : 철근콘크리트시방서)

LOAD=LOAD2 SF=1.8

LOAD=LOAD3 SF=1.8

LOAD=LOAD4 SF=1.8

6. 철근량 산정 및 단면검토

6.1. 하부슬래브 단부

6.1.1. Input Data

CON'C 설계기준강도 $\sigma_{ck} = 240.000 \text{ kg/cm}^2$

철근 항복강도 $\sigma_y = 3000.000 \text{ kg/cm}^2$

극한모멘트 $M_u = 6.980 \text{ t} \cdot \text{m}$ 강도감소계수(휨) $\phi_f = 0.8500$

극한전단력 $S_u = 7.950 \text{ t}$ 강도감소계수(전단) $\phi_s = 0.7000$

극한축하중 $N_u = 0.000 \text{ t}$ 강도감소계수(축력) $\phi_c = 0.6500$

단 면 폭 $b = 100.000 \text{ cm}$ 편심 거리 $e = 0.000 \text{ cm}$

단면 높이 $d = 32.000 \text{ cm}$ CON'C 덮개(압축부) $d' = 0.000 \text{ cm}$

6.1.2. 결과

1) 중립축 위치 결정(평형단면)

$$x_b = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \sigma_y / E_s} \cdot d = \frac{0.003}{0.003 + 3000 / (2.04 \times 10^6)} \times 32.00 = 21.47$$

$$x_{\max} = 0.85 \cdot x_b$$

x 가정 ($\frac{1}{2} x_{\max} < x < x_{\max}$)

$$x = 0.500 \cdot x_b = 0.500 \times 21.47 = 10.74 \text{ cm}$$

2) 압축철근 사용여부 결정

※ κ_1 결정

$$\sigma_{ck} \leq 280 \text{ kg/cm}^2 \text{ ----- } \kappa_1 = 0.85$$

$$280 \leq \sigma_{ck} \leq 560 \text{ kg/cm}^2 \text{ ----- } \kappa_1 = 0.85 - 0.05 \times (\sigma_{ck} - 280) / 70$$

$$\sigma_{ck} \geq 560 \text{ kg/cm}^2 \text{ ----- } \kappa_1 = 0.65$$

$$\therefore \kappa_1 = 0.85$$

$$a = \kappa_1 \cdot \chi = 0.85 \times 10.74 = 9.13 \text{ cm}$$

$$C_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot b \cdot a = 0.85 \times 240.0 \times 100.00 \times 9.13 = 186.177 \text{ t}$$

$$M_{n1} = C_c \cdot (d - a/2) = 186176.9 \times (32.00 - 9.13/2) = 51.081 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_u / \phi = 6.980 / 0.85 = 8.212 \text{ t} \cdot \text{m} < M_{n1}$$

\therefore 압축 철근 불필요

3) 철근량 산정

힘의 평형조건 \implies CON'C 압축력(C_c) = 철근 인장력(T)

$$C_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot b \cdot a$$

$$= 0.85 \times 240.0 \times 100.00 \times a$$

$$T = A_s \cdot \sigma_y = A_s \cdot 3000.0$$

$$\therefore a = A_s \cdot \sigma_y / (0.85 \sigma_{ck} \cdot b)$$

$$= A_s \cdot 3000.0 / (0.85 \times 240.0 \times 100.00) \dots \dots (1)$$

극한 모멘트(M_n)

$$M_n = C_c \cdot z = T \cdot z = A_s \cdot \sigma_y \cdot (d - a/2)$$

$$= A_s \cdot 3000.0 \times (32.00 - a/2) \dots \dots \dots (2)$$

(1)과 (2) 연립

$$\therefore \text{Req'd } A_s = 8.73 \text{ cm}^2 \quad a = 1.28 \text{ cm}$$

4) 사용 철근량

$$\text{Use } A_s \text{ D16} \times 8.000 = 15.888 \text{ cm}^2$$

5) 철근비 검토

$$\rho_{\min} = 0.467(\%) < A_s / bd = 0.497(\%) < \rho_{\max} = 2.909(\%)$$

6) 저항력 검토

순수 휨 상태 (단 철근 사용)

$$\text{철근 인장력 } T = A_s \cdot \sigma_y = 15.89 \times 3000.0 = 47.664 \text{ t}$$

$$\text{등가직사각형높이 } a = T / (0.85 \sigma_{ck} \cdot b)$$

$$= 47664.0 / (0.85 \times 240.0 \times 100.00) = 2.34 \text{ cm}$$

$$\text{중립축까지 거리 } c = a / \kappa_1 = 2.34 / 0.85 = 2.75 \text{ cm}$$

$$\text{CON'C 압축력 } C_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot b \cdot a$$

$$= 0.85 \times 240.0 \times 100.00 \times 2.34 = 47.664 \text{ t}$$

$$\text{공칭 MOMENT } M_n = A_s \cdot \sigma_y \cdot (d - a/2)$$

$$= 15.89 \times 3000.0 \times (32.00 - 2.34/2)$$

$$= 14.696 \text{ t} \cdot \text{m}$$

강도 검토

$$C_c = 47.664 \text{ t} \quad T = 47.664 \text{ t}$$

$$\phi M_n = 12.491 \text{ t} \cdot \text{m} > M_u = 6.980 \text{ t} \cdot \text{m} \quad \text{GOOD !!}$$

7) 전단 검토

$$S_u / \phi = 7.950 / 0.700 = 11.357 \text{ t}$$

$$S_c = (0.50 \sqrt{\sigma_{ck}} + 176 \cdot \rho \cdot S_u \cdot d / M_u) \cdot b \cdot d$$

$$= (0.50 \sqrt{240.0} + 176 \times 0.00497 \times 7950.0$$

$$\times 32.00 / 698000.0) \times 100.00 \times 32.00 = 25.806 \text{ t}$$

$$S_{cmax} = 0.93 \sqrt{\sigma_{ck}} \cdot b \cdot d$$

$$= 0.93 \sqrt{240.0} \times 100.00 \times 32.00$$

$$= 46.104 \text{ t}$$

$$S_c < S_{cmax} \text{ =====> } S_c = 25.806 \text{ t}$$

전 단 보 강 불 필 요 !

$$S_u = 7.950 \text{ t} < \phi S_c / 2 = 9.032 \text{ t}$$

6.2. 하부슬래브 중간부

6.2.1. 입력데이터

CON'C 설계기준강도 $\sigma_{ck} = 240.000 \text{ kg/cm}^2$

철근 항복강도 $\sigma_y = 3000.000 \text{ kg/cm}^2$

극한모멘트 $M_u = 2.380 \text{ t} \cdot \text{m}$ 강도감소계수(휨) $\phi_f = 0.8500$

극한전단력 $S_u = 0.000 \text{ t}$ 강도감소계수(전단) $\phi_s = 0.7000$

극한축하중 $N_u = 0.000 \text{ t}$ 강도감소계수(축력) $\phi_c = 0.6500$

단 면 폭 $b = 100.000 \text{ cm}$ 편심 거리 $e = 0.000 \text{ cm}$

단면 높이 $d = 22.000 \text{ cm}$ CON'C 덮개(압축부) $d' = 0.000 \text{ cm}$

6.1.2. 결과

1) 중립축 위치 결정(평형단면)

$$xb = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \sigma_y/E_s} \cdot d = \frac{0.003}{0.003 + 3000/2.04 \times 10^6} \times 22.00 = 14.76 \text{ cm}$$

$$\chi_{\max} = 0.85 \cdot \chi_b$$

χ 가정 ($\frac{1}{2} \chi_{\max} < \chi < \chi_{\max}$)

$$\chi = 0.500 \cdot \chi_b = 0.500 \times 14.76 = 7.38 \text{ cm}$$

2) 압축철근 사용여부 결정

※ κ_1 결정

$$\sigma_{ck} \leq 280 \text{ kg/cm}^2 \text{ ----- } \kappa_1 = 0.85$$

$$280 \leq \sigma_{ck} \leq 560 \text{ kg/cm}^2 \text{ ----- } \kappa_1 = 0.85 - 0.05 \times (\sigma_{ck} - 280)/70$$

$$\sigma_{ck} \geq 560 \text{ kg/cm}^2 \text{ ----- } \kappa_1 = 0.65$$

$$\therefore \kappa_1 = 0.85$$

$$a = \kappa_1 \cdot \chi = 0.85 \times 7.38 = 6.27 \text{ cm}$$

$$C_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot b \cdot a = 0.85 \times 240.0 \times 100.00 \times 6.27 = 127.997 \text{ t}$$

$$M_{n1} = C_c \cdot (d - a/2) = 127996.6 \times (22.00 - 6.27/2) = 24.144 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_u/\phi = 2.380/0.85 = 2.800 \text{ t} \cdot \text{m} < M_{n1}$$

∴ 압축 철근 불필요

3) 철근량 산정

힘의 평형조건 ==> CON'C 압축력(C_c) = 철근 인장력(T)

$$C_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot b \cdot a$$

$$= 0.85 \times 240.0 \times 100.00 \times a$$

$$T = A_s \cdot \sigma_y = A_s \cdot 3000.0$$

$$\therefore a = A_s \cdot \sigma_y / (0.85 \sigma_{ck} \cdot b)$$

$$= A_s \cdot 3000.0 / (0.85 \times 240.0 \times 100.00) \dots \dots \dots (1)$$

극한 모멘트(M_n)

$$M_n = C_c \cdot z = T \cdot z = A_s \cdot \sigma_y \cdot (d - a/2)$$

$$= A_s \cdot 3000.0 \times (22.00 - a/2) \dots \dots \dots (2)$$

(1)과 (2) 연립

$$\therefore \text{Req'd } A_s = 4.30 \text{ cm}^2 \quad a = 0.63 \text{ cm}$$

4) 사용 철근량

$$\text{Use } A_s \text{ D16} \times 8.000 = 15.888 \text{ cm}^2$$

5) 철근비 검토

$$\rho_{\min} = 0.467(\%) < A_s/bd = 0.722(\%) < \rho_{\max} = 2.909(\%)$$

6) 저항력 검토

순수 휨 상태 (단철근 사용)

철근 인장력 $T = A_s \cdot \sigma_y = 15.89 \times 3000.0 = 47.664 \text{ t}$

등가직사각형높이 $a = T / (0.85 \sigma_{ck} \cdot b)$
 $= 47664.0 / (0.85 \times 240.0 \times 100.00) = 2.34 \text{ cm}$

중립축까지 거리 $c = a / \kappa_1 = 2.34 / 0.85 = 2.75 \text{ cm}$

CON'C 압축력 $C_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot b \cdot a$
 $= 0.85 \times 240.0 \times 100.00 \times 2.34 = 47.664 \text{ t}$

공칭 MOMENT $M_n = A_s \cdot \sigma_y \cdot (d - a/2)$
 $= 15.89 \times 3000.0 \times (22.00 - 2.34/2)$
 $= 9.929 \text{ t} \cdot \text{m}$

강도 검토

$C_c = 47.664 \text{ t}$ $T = 47.664 \text{ t}$

$\phi M_n = 8.440 \text{ t} \cdot \text{m} > M_u = 2.380 \text{ t} \cdot \text{m}$ GOOD !!

7) 전단 검토

$S_u / \phi = 0.000 / 0.700 = 0.000 \text{ t}$

$S_c = (0.50 \sqrt{\sigma_{ck}} + 176 \cdot \rho S_u \cdot d / M_u) \cdot b \cdot d$
 $= (0.50 \sqrt{240.0} + 176 \times 0.00722 \times 0.0$
 $\times 22.00 / 238000.0) \times 100.00 \times 22.00 = 17.041 \text{ t}$

$S_{cmax} = 0.93 \sqrt{\sigma_{ck}} \cdot b \cdot d$
 $= 0.93 \sqrt{240.0} \times 100.00 \times 22.00$
 $= 31.696 \text{ t}$

$S_c < S_{cmax} \implies S_c = 17.041 \text{ t}$

전단보강 불필요!

$S_u = 0.000 \text{ t} < \phi S_c / 2 = 5.964 \text{ t}$

♣ 기둥과 주각은 표준설계도면 가-I 형에 준함.