

최 종  
연구보고서

# 시설하우스 에너지절감을 위한 고효율 단열(재) 시스템 개발

Development of High Efficient Insulation System  
of Glass House for Energy Saving

연구기관

한국에너지기술연구원

(위탁기관 : 전남대학교 농과대학)

농 립 부

# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “시설하우스 에너지절감을 위한 고효율 단열(재) 시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002년 12월 20일

주관연구기관명 : 한국에너지기술연구원

총괄연구책임자 : 김 홍 제  
(2000. 9.~2002. 12.)

총괄연구책임자 : 윤 중 호  
(1999. 12.~2000. 9.)

연 구 원 : 이 진 국

연 구 원 : 백 남 춘

연 구 원 : 이 의 준

연 구 원 : 이 동 원

연 구 원 : 윤 응 상

연 구 원 : 주 문 창

연 구 원 : 김 기 세

위탁연구기관명 : 전남대학교

위탁연구책임자 : 정 순 주

# 요 약 문

## I. 제 목

시설하우스 에너지절감을 위한 고효율 단열(재) 시스템 개발

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

### 1. 목 적

유리온실 외피의 단열성능 및 차광성능을 혁신적으로 개선하기 위해, 온실 측벽 및 천장용으로 구분된 고효율 가동성 열반사 단열(재) 시스템을 개발함

### 2. 연구개발의 중요성

지금까지 보급된 유리온실의 거의 모든 시설은 첨단장비로 투자되어 농사물의 고품질 생산, 노동력 절감 및 자동화에 치중하여 왔으나 상대적으로 매우 중요 요소중의 하나인 에너지 절약에 대한 투자는 소홀하여 왔다. 즉 농촌구조 개선 사업의 일환으로 시작된 유리온실 사업은 충분한 국내실정의 제고없이 성급히 도입되어 현재 많은 사회적 문제를 일으키고 있다. 유리온실은 재배작물의 생산량을 크게 증가시켰으며, 특히 농산물의 동절기 생산 및 출하로 농가 소득증대에 크게 이바지하였으나 최근 유가의 상승에 따른 난방비 부담으로 겨울 재배를 포기하는 농가가 속출하고 있는 실정이다. 따라서 온실의 야간단열 시스템의 개발 및 적용은 저렴한 초기투자 비용으로 확실한 절감효과를 기대할 수 있는 매우 명확한 기반기술이라 하겠다.

유리온실 기술은 국내에 본격적으로 보급되기 시작한 90년도 초부터 주로 유럽을 중심으로 한 외국기술이 적극 도입되었다. 그리고 이때부터 알루미늄 계통의 열반사 단열재를 이용한 단열스크린이 국내에도 보급되기 시작하여 그동안

국내 여러 업체의 노력을 통하여 열반사 단열스크린의 국산화 제품이 상용화되어 있다. 그러나 현재 국내 단열스크린 모델의 대부분은 외국산을 단순 모방한 수준이며, 유리온실의 효율을 높이기 위한 다중 스크린 시스템에 대한 정보나 유리온실의 열관류율 및 효율 등과 같은 경제성과 관련한 정확한 데이터도 갖고 있지 못한 실정이다. 따라서 농가의 소득증대에 이바지할 수 있는 고효율의 반사단열 스크린 시스템의 개발이 시급히 필요하다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

#### [유리온실의 에너지성능평가 컴퓨터 모델링]

- 기존 유리온실의 에너지 소비실태 현장 모니터링
- 유리온실의 시간별 에너지 성능평가 컴퓨터 모델 구축
- 야간단열(재)의 성능예측 해석을 통한 시스템 최적화 컴퓨터 모델링

#### [고효율 열반사 단열(재) 시스템 개발]

- 축벽용 관류 및 열반사 단열(재) 시스템 설계 및 제작
- 천정용 열반사 단열(재) 시스템 설계 및 제작
- 고효율 열반사 단열(재) 시스템 구동을 위한 시스템화 연구

#### [온실 단열성능 검증 실험 및 성능지수 표준화 연구]

- 온실용 단열 시스템의 열성능 측정방법 및 성능지수 표준화 방법 수립
- 열반사 단열(재) 시스템의 단열성능(열관류율) 측정 실험
- 열반사 단열시스템의 온실 적용 에너지성능(온실 열손실율) 검증 실험

#### [수광형태에 따른 작물 생태 평가 연구]

- 열반사 단열시스템의 음영에 의한 수관내 환경변화와 작물의 성장반응
- 열반사 단열(재) 시스템의 반사광 활용에 의한 작물 생태 영향 연구
- 피복재의 광투과율 차이에 따른 온실내 작물의 생리/생태적 영향 및 온실내 최적 환경조건에 대한 기준수립



## IV. 연구개발의 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구에서는 반사 단열스크린을 이용하여 유리온실의 외피 단열성능을 향상시키기 위하여 온실의 측벽 및 천장용으로 구분되는 고효율 열반사 단열(재) 시스템을 개발하고자 하였다. 본 열반사 단열스크린 시스템은 기존 시스템과 비교하여 개선된 시스템으로 경제성이 있고 시설하우스 농가 소득 증대에 이바지할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

유리온실의 열반사 단열재로 사용되는 대부분의 반사단열 스크린은 0.6 이상의 표면방사율을 갖는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 알루미늄이 공기중에 직접 노출될 경우에 발생하는 부식이나 스크린 자체의 내구성 증대를 위해 알루미늄 표면위에 또 다른 PE계 필름을 코팅하기 때문인 것으로 나타났다. 그러나 열반사 단열스크린이 가지는 복사차단 성능을 보다 효과적으로 이용하기 위해서는 표면방사율이 약 0.25 이하의 저방사 영역을 유지하는 것이 효율적인 것으로 사료된다. 열반사 단열스크린과 조합된 단열시스템의 열관류율 측정실험 결과 총괄 열관류율은 표면방사율이 작아짐에 따라 약 30~70% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

유리온실 예비실험 결과 유리온실과 같은 기밀화 시공이 어려운 경량외피 건물일수록 침기 및 환기 등이 난방부하에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었으며, 온실 내부의 과열방지 및 원활한 공기순환 등을 위해 설치한 측창 및 천장 그리고 개구부 등이 침기 및 환기부하 측면에서는 불리하게 작용하는 것으로 나타났다. 또한 열반사 단열시스템의 성능은 스크린의 표면방사율과 온실외피와 스크린 사이에 형성된 정체 공기층의 적절한 조합에 의해 복합적으로 작용하는 것으로 분석되었다.

스크린-유리, 스크린-부직포 사이의 간격이 유리온실의 열관류 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 시뮬레이션을 행한 결과 간격이 커질수록 열관류율이 점차 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 그 값이 특정한 값 이상이 되면 총괄 열관류율은 변화가 없이 거의 일정한 값을 나타낸다. 그리고 그 값은 측벽부의 경우 약 2 cm(스크린-유리 및 스크린-부직포 간격 동일한 경향을 나타냄), 천장부의

경우는 약 8 cm 정도가 되는 것으로 각각 나타난다. 또한 계산 결과 측벽부의 경우는 스크린-부직포 사이의 간격이 2 cm 이상이 유지되면 단열성능이 약 6~7% 정도 향상된다. 한편 천장부의 경우는 스크린-부직포 간격이 10 cm 정도 충분히 떨어져 있는 것이 효과적이며, 그렇지 않은 경우에 비해 약 10% 정도 단열성능이 향상된다.

단열스크린이 미설치된 유리온실로만 있는 경우에 총괄 열관류율은 일반적으로  $5.2 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$  정도로 크게 나타난다. 그러나 표면방사율에 따라 1중 반사단열 스크린이 설치된 유리온실의 측벽부 총괄 열관류율은  $2.3\sim 1.2 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ , 그리고 천정부 총괄 열관류율은  $2.9\sim 1.7 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$  정도로 각각 낮게 나타난다. 이는 유리온실의 열손실량을 약 40~80% 정도까지 크게 낮출 수 있는 수치를 나타내는 것이다. 따라서 반사단열 스크린 시스템은 매우 유용한 설비로서 유리온실을 가진 시설농가에서는 반드시 갖춰야 할 것으로 평가된다.

1중 단열스크린 온실과 2중 단열스크린 온실을 비교해 보면 단열스크린이 없는 유리온실의 총괄 열관류율을  $5.2 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 이라 할 때, 1중 단열스크린 설치 온실로 바뀔 경우 측벽부의 총괄 열관류율은  $1.7 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ , 천장부는  $2.3 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 로 각각 저하된다. 그러나 1중 단열스크린 온실에서 2중 단열스크린 온실로 바뀔 경우에 측벽부는  $1.0 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ , 천장부는  $1.6 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$  정도로 총괄 열관류율의 감소폭이 현저하게 줄어든다. 따라서 이러한 경향으로부터 유추해 볼 때 총괄 열관류율은 2중 단열스크린 이상의 다중 스크린 시스템이 되더라도 열관류율이 비례적으로 감소하지 않을 것으로 예상되며, 따라서 다중 스크린 시스템의 설치로 인한 에너지 절감효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

한편 1중 반사스크린 시스템과 2중 반사스크린 시스템을 상호 비교해 보면 본 시뮬레이션 결과 표면방사율이 0.3으로 동일한 1중 반사단열 스크린 시스템을 기준으로 할 때 2중 시스템은 1중 시스템보다 측벽부의 경우 약 40%, 천장부의 경우에는 약 30% 정도의 에너지절감 효과가 각각 나타날 것으로 예측된다.

시뮬레이션과 실험 간의 비교는 전남대의 실제온실을 대상으로 행해졌다. 여기서 시뮬레이션은 대상온실의 측벽 및 천정부와 지중면에 대한 계산을 실시한 후 이를 합산하는 방법에 의해 유리온실의 총 열손실량을 산출하였으며, 실험은 난

방이 필요한 야간시간대(저녁 5시~익일 아침 9시)에 등유 보일러를 이용하여 난방한후 그 사용량으로부터 총 열손실량을 산출하였다. 그 결과 시뮬레이션과 실험은 상호 잘 일치함을 보였으며, 이때 최대 오차는 15% 정도였다.

측벽 및 천정을 통한 열손실은 단열이 안된 일반 유리온실의 경우에 전체 열손실량의 약 85% 정도였으며, 1중 스크린 시스템의 경우는 70%, 그리고 2중 스크린 시스템의 경우는 약 60%로 점차 감소하였다. 따라서 이는 반사단열 스크린 시스템의 효율성을 나타내는 것으로 지중으로의 열손실 비율이 점차 높아지는 결과를 가져온다.

본 연구에서는 기존 유리온실의 천장부분 평면스크린에 적용되던 다중스크린 시스템을 측벽부에도 적용할 수 있도록 설계하였으며, 이를 대상온실에 적용하였다. 또한 시스템의 운용상 문제점을 해결하고 경제성이 좋은 알루미늄 스크린-부직포 조합의 2중 반사단열 스크린 시스템을 개발, 제시하였다.

2중 플라스틱 패널 온실은 총괄 열관류율이 반사단열 스크린이 미설치된 일반 유리온실에 비해 약 30% 정도 낮게 나타났으며, 이는 1중 반사단열 스크린이 설치된 유리온실의 단열성능과 거의 유사한 것으로 나타났다. 플라스틱 패널 온실은 최근 유럽을 비롯한 많은 나라에서 설치사용을 상용화하는 중에 있기 때문에 향후 국내에서도 플라스틱을 온실외피로 사용하려는 시도와 실증실험을 통한 문제점 해결에 적극 나설 필요가 있다 하겠다.

본 연구에서는 서울, 대전, 광주 및 제주 지역을 대상으로 과세유 및 면세유에 대한 경제성 검토를 실시하였다. 그 결과 1중 단열스크린은 2중 단열스크린 시스템과 경제성이 거의 유사한 것으로 나타났다. 즉 과세유를 기준으로 하였을 때 경제성이 서울, 대전, 광주 지역에서는 약 2년, 기후조건이 우수한 제주 지역에서는 약 3년 정도인 것으로 나타났다. 그리고 이는 면세유를 기준하였을 때 서울, 대전지역은 약 2.7년, 광주지역은 약 3년, 그리고 제주지역은 약 4.5년인 것으로 각각 나타났다. 이러한 결과는 2중 반사스크린에서 부직포로 인한 추가비용이 연간 에너지 절감비용과 거의 동일하게 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

일반적으로 알루미늄 스크린으로 제작된 단열스크린의 사용연한이 5년에서 7년 정도인 것으로 조사되고 있다. 따라서 사용연한을 7년으로 할 때 초기투자비

를 모두 회수하고도 파세유 기준으로는 4~5년, 면세유 기준으로는 약 2.5~4.3년 동안 에너지를 절감효과를 기대할 수 있다.

광반사 단열스크린의 설치는 주간에 재배작물내의 광환경을 개선시켜주고, 야간에 단열을 통한 보온으로 시설내 온도를 높여 양액재배시 작물의 성장과 과실의 품질 향상 및 수량을 증가시킬 수 있으며, 난방비의 절감에도 기여하는 것으로 분석되었다.

# SUMMARY

## I. TITLE

Development of High Efficient Insulation System of Glass House  
for Energy Saving

## II. OBJECTIVES AND NECESSITY OF THE STUDY

### 1. Purpose

Development of the high efficient thermal screen system for the side wall and the roof of the glass house to improve the insulation performance of the envelope of the glass house

### 2. Necessity

Until now, almost facilities of the glass house come into wide use were invested to the advanced equipment and they were concentrated to high quality production, labor reduction and automation etc.. Therefore the investment for energy saving which was one of importance elements have been inattentive.

The glass house was constructed as a kind of the structure improvement business of agricultural villages. But it was introduced without the sufficient investigation for domestic circumstances. So recently it was made many social problems.

The glass house increased the amount of production of the

cultivation crops greatly. Especially it enlarged a farm income by the production in winter season and shipping of agricultural products in good quality. But recently farms give up a winter cultivation due to the rise of oil price.

Initial investment charge of nighttime insulation system in the glass house is cheap. Nighttime insulation is very effective for energy savings. It was early '90 that the glass house was come to the domestic use. At that time, foreign techniques around Europe were introduced and so the aluminized thermal screen began to use at the domestic.

Home productions of the reflective thermal screen are manufactured in several domestic companies in now. But greater part of the domestic thermal screens is currently in the level that the domestic production imitates in simple the foreign one. Therefore the technology of the multiple screen system is needed to improve the thermal efficiency for the glass house. But the detailed information about the economic analysis of the glass house is not kept now. So the development of the high efficient reflective thermal screen system needs urgently.

### **III. SCOPE OF THE STUDY**

- Computational modelling for evaluation of energy performance of the glass house
- Monitoring of energy consumption in the conventional glass house
- Computational model setup for the evaluation of energy performance per hour of the glass house
- Computational modelling for system optimization through performance analysis of the nighttime insulation system
- Development of the high efficient reflective screen system

- Design and manufacture of the reflective screen system for the side wall
- Design and manufacture of the reflective screen system for the roof
- A system research for control of the high efficient thermal screen system
- Experiment and standardization research of a performance index of the glass house
- Experimental Method and performance index standardization of the thermal screen system of the glass house
- Experiment of the insulation performance of the reflective thermal screen system
- Energy performance verification of the thermal screen system of the glass house
- Estimation of Crops physiology according to supply light condition
- Environment change and crop growth reaction due to shadow belt made by the light reflection screen
- Effect of the reflection light of the reflective thermal screen system on crops physiology
- Effect of light transmittance on crops physiology and ecology
- The criteria establishment for the optimum environment condition of glass house.

#### **IV. RESULTS OF THE STUDY**

High efficient thermal screen system applied to the side wall and the roof of the glass house was developed to improve the insulation performance of the envelope. The conclusions are as follows.

Almost of the reflective screen used in the glass house have surface emissivity over 0.6. This reason was due to coating of PE film to the aluminium surface to prevent the corrosion and improve the durability. As a experimental result, the thermal conductance decreased about 30~70% with decreasing emissivity.

As a result of pre-experiment, it was found that the infiltration and ventilation had a significant effect on the heating load of the glass house which was a light-weight envelope building not easy to be airtight due to the side windows, the ceiling and the doors etc..

The effects of the intervals of screen-glass window and fabric-screen on the overall thermal conductance of the system were investigated in the double layer reflective thermal screen system. As a result, the overall thermal conductance decreases with increasing interval within a certain value for the side wall and the roof. The overall thermal conductance does not show the change over 2cm interval for the side wall(This tendency is identical for the screen-glass window interval and the fabric-screen interval respectively). On the other hand, the overall thermal conductance does not change over 8~10cm interval for the roof. For the side wall, insulation performance is improved about 6~7% when the screen-fabric interval is over 2cm interval compared with the interval below 0.5cm. For the roof, insulation performance is enhanced about 10% by making the screen-fabric interval over 10cm.

In general, the overall thermal conductance of the glass house is about 5.2 kcal/m<sup>2</sup>hr°C. As results of simulation, the overall thermal conductance of the single layer thermal screen system is about 2.3~1.2 kcal/m<sup>2</sup>hr°C for the side wall and is about 2.9~1.7 kcal/m<sup>2</sup>hr°C for the roof respectively. By installation of the reflective thermal screen system, the amount of heat losses might lower up to 40~80%. Therefore, the



reflective insulation screen systems are very useful facilities which are needed to be established in the farmhouse.

The double layer thermal screen system is compared with the single layer thermal screen system. At first, the overall thermal conductance of the single layer thermal screen system falls rapidly to 1.7 kcal/m<sup>2</sup>hr°C for the side wall, and it is 2.3 kcal/m<sup>2</sup>hr°C for the roof. On the other hand, the overall thermal conductance of the double layer thermal screen system is 1.0 kcal/m<sup>2</sup>hr°C for the side wall, and it is 1.6 kcal/m<sup>2</sup>hr°C for the roof. Therefore, the overall thermal conductance can not lower in proportion to install the multiple thermal screen. And it is expected that the effect of energy reduction by installation of a multiple thermal screen system is not good. When the surface emissivity of thermal screen is assumed 0.3 in both systems, for the side wall, the amount of the energy consumption of the double layer thermal screen system is reduced about 40% compared with that of the single layer thermal screen system. For the roof, this tendency is about 30%.

The comparison of the experiment with the simulation was conducted for the glass house system of Chunnam University. Energy simulation was conducted for calculation of heat losses in the side wall, the roof and the underground. The total amount of heat losses were evaluated by summing up the heat losses of above three zones. In nighttime, the glass house was heating by the boiler using kerosene. Hence the amount of energy consumption were evaluated by the amount used of kerosene in nighttime. The simulation results of the overall thermal conductance were good agreement with the experimental results within the maximum error of 15%. As results, the heat losses through the side wall and the roof were about 85% to the total amount of heat losses for no screen glass house. On the other hand, they were 70% for the single layer

thermal screen system and 60% for the double layer thermal screen system respectively. This means the effectiveness of the reflective thermal screen system resulting in higher heat loss of the underground.

Until now, multiple thermal screen was applied to the roof side of the glass house. The double layer thermal screen system of the side wall which was developed in combination of reflective screen and fabric was designed to apply the object glass house. And the problem of the operation was solved to good economy.

The overall thermal conductance of the double layer plastic panel system was about 30% lower than that of no screen glass house system. And the insulation performance of the double layer plastic panel system was much the same as that of the single layer reflective thermal screen system of the glass house.

The economic analysis of the reflective thermal screen system was conducted for Seoul, Daejon, Kwangju and Cheju area. As a result, the life cycle of the single layer reflective screen system is the same as that of the double layer reflective screen system. The reason for this is that the additional charge of the double layer reflective thermal screen is equal to the cost of the yearly energy saving. For kerosene, the life cycle is about 2 years in Seoul, Daejon and Kwangju area and is about 3 years in Cheju area. For tax free kerosene, the life cycle is about 2.7 years in Seoul, Daejon area. On the other hand, the life cycle is about 3 years in Kwangju area and is about 4.5 years in Cheju area respectively.

The life cycle of the reflective thermal screen is in general 5~7 years. Under such a condition, it is expected that the effect of energy saving in kerosene will keep up for 4~5 years and that in tax free kerosene will continue for 2.5~4.3 years.

As a result, the installation of light reflection screen in the glass

house during winter season could improve to result in growth promotion, quality fruit production and yield increase of hydroponically grown cucumber plants and it also might be lead to reduce the heating cost.

# 여 백

# CONTENTS

<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	1
Section 1. Background .....	1
Section 2. Goal and Objectives .....	4
<b>Chapter 2. Thermal Screen System of the Glass House</b> .....	7
Section 1. Thermal Characteristics of the Glass House .....	7
Section 2. Thermal Screen .....	9
1. Surface Emissivity .....	9
2. Reflective Thermal Screen .....	10
3. Comparison of Specimen of Domestic and Oversea Thermal Screen .....	14
Section 3. Thermal Conductance of Reflective Thermal Screen System .....	24
1. Thermal Conductance .....	24
2. Results of Measurement .....	28
Section 4. Remarks .....	34
<b>Chapter 3. Pre-experiment of the Glass House(50 pyung)</b> .....	37
Section 1. Pre-experiment .....	37
1. Purpose and Experimental Method .....	37
2. Experimental Glass House and Test Scope .....	47
Section 2. Experimental Results .....	53
1. Heat Load of Infiltration .....	53

2. Building Load Coefficient(BLC) .....	54
3. Energy Performance of the Glass House .....	57
Section 3. Simulation Model of Pre-experiment .....	63
1. Building Energy Analysis Program, ESP-r .....	63
2. Basic Model and Weather Data .....	64
3. Calibration of Simulation Model .....	71
Section 4. Evaluation of Performance of Reflective Thermal Screen System .....	75
Section 5. Remarks .....	87

## **Chapter 4. Computational Analysis of Performance of**

<b>Thermal Screen System</b> .....	91
Section 1. Overviews of the Glass House .....	91
Section 2. Analysis of Thermal Screen System for the Side Wall .	92
1. Single Layer Reflective Thermal Screen .....	92
2. Double Layer Reflective Thermal Screen .....	101
Section 3. Analysis of Thermal Screen System for the Roof .....	102
1. Single Layer Reflective Thermal Screen .....	102
2. Double Layer Reflective Thermal Screen .....	107
Section 4. Analytical Results .....	109
1. Thermal Screen of the Side Wall .....	109
2. Thermal Screen of the Roof .....	114
Section 5. Remarks .....	118

## **Chapter 5. Development of High Efficient Thermal Screen**

<b>System</b> .....	119
---------------------	-----

Section 1. Thermal Performance of TEST-CELL .....	119
1. Construction and Experiment of TEST-CELL .....	119
2. Experimental Results .....	124
3. TEST CELL of Double Layer Plastic Panel .....	127
Section 2. Comparison of Thermal Performance of Large Scale Glass House .....	130
1. Experiment .....	130
2. Experimental Results .....	135
Section 3. Comparison of results of the experiment and analysis .....	151
Section 4. Control Equipment of Multiple Thermal Screen .....	159
1. Supporting Device to Screen Rotating Shaft .....	159
2. Isolation Device of Multiple Screen .....	161
Section 5. Economic Analysis of the Glass House .....	163
1. Weather Data .....	163
2. Evaluation of the Yearly Energy Performance .....	165
3. Economic Analysis of Reflective Thermal Screen System .....	176
Section 6. Remarks .....	179

**Chapter 6. Crops Physiology and Ecological Reaction under  
    Supply Lighting Condition .....** 181

Section 1. Crops Ecology for Light Environment Characteristics .....	181
1. Effect of Light on Crops .....	181
2. Light Environment Improvement .....	183
Section 2. Effect of Reflection Light on Crop Growth .....	186
1. Materials and Experimental Method .....	186
2. Experimental Results and Considerations .....	186

Section 3. Estimation of Crop Ecology in Instal	
Reflective Thermal Screen .....	191
1. Experimental method and crops selection .....	191
2. Experimental Results and Considerations .....	193
Section 4. Light Transmittance of the Reflective Screen, Crops	
Physiology and Optimum Environment Condition .....	204
1. Materials and Experimental Method .....	204
2. Experimental Results and Considerations .....	205
Section 5. Remarks .....	207
<b>Chapter 7. Conclusions .....</b>	<b>211</b>
<b>References .....</b>	<b>215</b>
<b>Appendix</b>	



# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제1절 연구의 배경 및 필요성 .....	1
제2절 연구의 목적 .....	4
제 2 장 유리온실 열반사 단열시스템 .....	7
제1절 유리온실의 열적 특성 .....	7
제2절 유리온실용 단열스크린 .....	9
2.2.1 표면방사율 .....	9
2.2.2 열반사 단열스크린 시료조사 .....	10
2.2.3 국내외 온실용 단열스크린 열성능 비교 .....	14
제3절 열반사 단열시스템의 열관류율 .....	24
2.3.1 열관류율 .....	24
2.3.2 측정결과 .....	28
제4절 소 결 .....	34
제 3 장 실규모(50평형) 유리온실 대상 예비실험 .....	37
제1절 예비실험 .....	37
3.1.1 실험목적 및 방법 .....	37
3.1.2 대상온실 및 측정범위 .....	47
제2절 실험결과 및 분석 .....	53
3.2.1 침기부하 .....	53
3.2.2 건물 열손실계수(BLC) .....	54
3.2.3 온실의 에너지성능 .....	57

<b>제3절 예비실험 해석모델</b>	63
3.3.1 건물에너지해석 프로그램 ESP-r	63
3.3.2 기본모델 및 기상자료	64
3.3.3 시뮬레이션 모델 보정	71
<b>제4절 유리온실 열반사 단열시스템 성능예측</b>	75
<b>제5절 소결</b>	87

## 제 4 장 유리온실의 열성능 평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션

.....	91
<b>제1절 유리온실 열성능 해석 개요</b>	91
<b>제2절 측벽용 반사 단열스크린의 열성능 해석</b>	92
4.2.1 1중 반사 단열스크린	92
4.2.2 2중 반사 단열스크린	101
<b>제3절 천정용 반사 단열스크린의 열성능 해석</b>	102
4.3.1 1중 반사 단열스크린	102
4.3.2 2중 반사 단열스크린	107
<b>제4절 시뮬레이션 결과 및 고찰</b>	109
4.4.1 측벽용 반사 단열스크린	109
4.4.2 천정용 반사 단열스크린	114
<b>제5절 소결</b>	118

## 제 5 장 고효율 유리온실 단열 시스템 개발

<b>제1절 소규모 TEST-CELL온실의 열성능</b>	119
5.1.1 TEST-CELL구성 및 실험	119
5.1.2 실험결과 및 고찰	124
5.1.3 2중 플라스틱 외피 TEST-CELL 실험	127

<b>제2절 실규모 유리온실 대상 성능비교</b>	130
5.2.1 실험	130
5.2.2 실험결과 및 고찰	135
<b>제3절 실험 및 시뮬레이션 결과의 비교 검증</b>	151
<b>제4절 다중 반사단열스크린 구동장치</b>	159
5.4.1 스크린회전축 지지장치	159
5.4.2 다중 단열스크린 분리장치	161
<b>제5절 유리온실 경제성 분석</b>	163
5.5.1 기상데이터	163
5.5.2 지역별 연간 에너지성능 평가	165
5.4.3 단열스크린 경제성 분석	176
<b>제6절 소결</b>	179
<b>제 6 장 수광조건과 작물생리 생태적 반응</b>	181
<b>제1절 광환경 특성에 따른 작물생태</b>	181
6.1.1 태양광이 작물에 미치는 영향	181
6.1.2 시설 내 광환경 개선	183
<b>제2절 반사광 이용이 작물의 생장 및 생육에 미치는 영향</b>	186
6.1.1 재료 및 방법	186
6.1.2 실험결과 및 고찰	186
<b>제3절 광반사 단열스크린 설치에 따른 작물생태 평가</b>	191
6.3.1 실험방법 및 작물선정	191
6.3.2 실험결과 및 고찰	193
<b>제4절 피복재 광투과율, 작물생리 규명 및 최적 환경조건 기준</b>	204
6.4.1 재료 및 방법	204
6.4.2 실험결과 및 고찰	205
<b>제5절 소결</b>	208

제 7 장 결 론 ..... 211

참고문헌 ..... 215

부록

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경 및 필요성

우리나라의 에너지 소비량은 세계 10위 수준, 특히 석유소비량은 세계 6위 수준으로 이는 IMF 기간인 '97년을 제외하고는 최근 경제규모 확대로 매년 큰 폭의 증가율을 보여왔다. 우리나라는 국내사용 총에너지의 약 97%를 수입에 의존하고 있으며 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 따라서 국내 산업 전반이 유가변동에 매우 민감한 현실에서 농업분야의 시설하우스도 예외가 될 수 없어 에너지 소비량에 매우 의존적이다.

이러한 상황에서 지난 '91년부터 41조원의 예산을 들여 벌이고 있는 정부의 농어촌 구조개선 사업의 일환으로 국내에도 유리온실 등 첨단 시설하우스가 급속히 보급되어 현재는 전국적으로 350 ha의 유리온실이 보급되어 있으며, 비닐하우스의 보급면적은 45,000 ha에 이르고 있다. 이중 난방을 공급해 작물재배를 하는 시설하우스의 가온면적은 약 10,000 ha로 추산되고 있으며, 여기에 투입되는 에너지비용은 연간 평균 20,000원/평으로 평가되고 있다. 이는 단순계산에 의해서도 연간 6000억원을 넘는 에너지 비용이 시설하우스의 난방에 투입되고 있는 것이 된다. 더욱이 기존 시설에 난방시스템을 추가하는 온실이 증가함에 따라 가온면적이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 시설하우스에 투입되는 에너지비용은 더욱 증가할 것으로 예측되고 있다.

이미 '97년의 유류값 상승과 IMF, 그리고 국제사회의 끊임없는 분쟁에 따른 국제유가의 불안과 폭등으로 많은 시설하우스 운영자가 도산 또는 극심한 경영난을 겪고 있는데, 이는 전체 운영비의 30~40% 이상을 차지하는 에너지 비용 부담이 가장 큰 이유로 손꼽힌다. 따라서 향후 몇 년내에도 국내 시설하우스의 운영 성패는 에너지 비용의 부담율이 가장 큰 영향요인이 될 것이 자명하다.

이상과 같은 실정에서 우리나라 농업분야의 선진화 및 구조개선을 위해 추진

된 시설하우스 사업의 성공을 위해서는 에너지 문제에 대한 근본적 해결방안이 시급히 수립되어야 한다. 최근 유류비용의 추가상승은 시설하우스 운영의 존립자체를 위협할 정도이며, 이와 관련한 에너지 문제는 시급히 해결해야 할 당면과제로 남아있다.

이와 같은 측면에서 현재 운영되고 있는 국내 시설하우스의 야간단열 구조는 에너지적인 측면, 즉 열적인 측면에서 접근된 최적의 시스템이라 볼 수 없으며, 일부의 경우는 이해의 부족 및 잘못된 적용으로 인하여 에너지 절감의 큰 가능성에도 불구하고 막대한 에너지의 손실을 야기하고 있는 경우가 많이 발생되고 있다. 기존연구 및 선행경험 등을 통해 예측해 볼 때 야간단열시스템의 개선을 통해 30%이상의 에너지 절감효과가 기대되며, 이러한 시스템은 실제로 온실 난방비의 최소 10%만을 절감하더라도 연간 600억원의 에너지 비용이 절감 가능한 큰 잠재성을 갖고 있다.

'90년대 초부터 활성화된 국내 유리온실 보급으로 인해 나타나는 최근의 또다른 문제점은 수많은 온실관련 업체의 연이은 운영난을 들 수 있다. 당시 국내에는 전국적으로 유리온실 사업과 관련하여 시설하우스 운영자, 투자자, 설치 시공업자 등 172개의 회원사가 활동하고 있었다. 이들과 관련된 설치공사업은 농업, 임업, 원예용 등의 각종 온실 설치 공사와 관련하여 토목공사, 건축공사, 내부설비(스크린, 천측창 개폐), 첨단 전자시스템 공사, 양액 재배 시스템 공사 등이며, 이에 따른 부대 공사까지 포함하여 광범위한 사업분야를 형성하였다. 그러나 이들업체는 최근의 온실 에너지문제로 인한 운영난 및 IMF를 경험하는 가운데 대부분의 업체가 도산 또는 영업을 중단한 상태이며, 현재는 약 20여개 업체만이 활동을 하고 있는 실정이다. 결과적으로 유리온실 산업의 활성화를 통한 관련 기술의 노하우 및 기술축적이 정립되기도 전에 위기를 맞이하고 있다.

작물재배를 위한 유리온실은 열적인 측면에서 외벽이 모두 유리로 된 건축물로 간주될 수 있다. 일반적인 건물의 불투명 외벽 부분의 열관류율은 관련법규에 의해  $0.4 \sim 0.5 \text{ kcal/m}^2\text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 이며, 이는 통상 50 mm 단열재 전후로 벽돌 1장 쌓기를 하면 나올 수 있는 성능이다. 반면에 온실 외피와 같이 유리 한장의 열관류율은  $5.0 \text{ kcal/m}^2\text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$  이상으로 일반 건축 외벽에 비해 약 10배 이상의 열손실이 이루

어진다. 따라서 유리온실 등 시설하우스는 일반 건축물과 달리 실내의 일정 환경 조성을 위해 막대한 양의 에너지가 투입되어야 하는 근본적 문제를 안고 있다. 그러나 시설하우스는 재배작물을 위해 근본적으로 주간에 최대한의 일사량을 확보하여야 하며, 이를 위해 투과율이 높은 단창의 유리나 경질필름의 외피가 설치되어야 하는 상반성을 갖게 된다. 겨울철 평균일조시간을 8시간으로 가정할 때 유리온실의 하루 사용에너지의 1/3만 태양에너지로 부터 공급받으며, 나머지 2/3는 유리 외피를 통해 외기로 손실되는 에너지량을 난방을 통해 공급받아야 한다. 최근 신문 지상을 통해 시설하우스 1년 순이익이 유통비용에 못 미치거나 온실 전체 운영비의 50% 이상을 에너지 비용이 차지했다는 보도가 입증하듯이 국내 기후조건에서 시설하우스의 외피구조는 근본적으로 유가의 변동에 민감할 수밖에 없는 취약한 열적 구조를 갖고 있다.

국내 유리온실은 본격적으로 보급되기 시작한 '90년대 초부터 주로 유럽을 중심으로 한 외국기술이 적극 도입되었으며, 이때부터 알미늄 계통의 열반사 단열재를 이용한 단열스크린이 국내에도 보급되기 시작하였다. 그동안 국내 여러 업체의 노력을 통해 열반사 단열스크린의 국산화가 이루어져 제품이 상용화되어 있다. 그러나 현재 국내 단열스크린 모델의 대부분은 외국산 모델을 단순 모방한 수준이며, 에너지적인 측면에서도 열반사 단열의 원리를 충분히 이해하지 못한 상태로 응용되기 때문에 단열성능을 제대로 발휘할 수 없는 구조로 설계되어 복사 차단에 의한 단열효과를 극대화하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 여름철 일사 차단을 위한 차광재의 기능과 겨울철 단열재의 기능을 동시에 충족시킬 수 있는 설계 및 설치 운영을 함으로써 두 개 기능 모두 최대의 성능을 발휘할 수 있도록 할 필요가 있다.

시설하우스는 고부가가치 산업으로서 현안인 에너지문제를 해결하면 농가의 큰 수익을 기대할 수 있는 잠재성이 큰 분야이다. 현재 사회문제화 되고 있는 유리온실의 해결방안으로는 이미 투자된 막대한 자본 및 시설을 활성화시킨다는 측면을 넘어서, 21세기 첨단농산을 위한 유망분야, 즉 국내 농가의 구조를 개선할 수 있는 분야로 인식하고 근본적 문제점을 해결하는 방향으로 추진되어야 한다. 이러한 관점에서 시설하우스 구조의 단열 성능개선은 근본적으로 시급히 해

결되어야 할 문제라고 평가된다.

시설하우스 사업은 생활수준이 높아지고 경제력이 발달할수록 큰 성장 가능성을 가지게 되며, 이미 이 분야는 세계적으로 큰 시장을 형성하고 있다. 특히 에너지관련 문제는 각국이 공통으로 가지고 있는 중요 해결사안의 하나이다. 따라서 외국제품의 모방수준에서 벗어나 온실의 에너지를 대폭 절감할 수 있는 야간 단열(재)시스템의 개발은 국내는 물론 해외시장까지 개척할 수 있는 매우 중요한 기술 분야라 할 수 있다. 아울러 국내시장은 물론 해외시장까지 진출하기 위해서는 시설하우스 관련 기술 및 산업의 발전을 통해 경쟁력 있는 기술축적이 확보되어야 하며, 이를 위하여 근본적으로 시설하우스의 에너지 문제를 해결함으로써 온실관련 시장의 산업체를 재활성화 시키는 것이 매우 중요한 의미를 갖는다 할 수 있다.

## 제 2 절 연구의 목적

본 연구에서는 유리온실 운영에 따르는 난방에너지의 효과적 활용 및 에너지 비용의 절감과 외피복재의 광 투과 및 열반사 성능에 따른 작물성장의 영향 등을 규명코자 하였으며, 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 온실의 야간단열을 위한 에너지 성능평가를 위해 유럽의 건물용 표준동적 해석 프로그램인 ESP-r을 기준으로 일사 및 가동단열 효과를 평가할 수 있는 시간별 온실 모델을 수립하고 개선함으로써 유리온실 해석모델을 개발한다.

- 수립된 해석모델을 통해 온실의 실온 변동 및 가동 단열(재) 시스템의 에너지 성능 평가 모델링을 수행하며, 이를 시스템 개발의 기초 자료로 활용한다. 또한 각 지역별 기후조건에 따른 유리온실의 에너지 밸런스 및 에너지 소비성능을 시뮬레이션 평가함으로써 지역별 유리온실 성능자료로 활용한다.

- 열관류율 측정 챔버(Calibrated Hot Box Chamber)를 응용하여 온실용 단열 스크린의 열관류율 측정실험을 수행하며, 단열스크린의 성능자료를 도출한다. 최



종적으로 현재 뚜렷한 기준없이 의복재 보온율을 기준하고 있는 단열(재) 시스템의 성능지수를 개선하기 위해 온실 단열재의 성능지수 및 측정방법 표준화에 대한 기초 자료를 수립한다.

- 온실 측벽의 경우 단열재의 보관방식에 따라 열반사 단열재로 관류 단열성능도 증가시킬 수 있는 다공성재료 또는 공기층 유도 복합시스템을 개발 목표로 한다.

- 반면 천장의 경우 단열재 보관에 따른 차광성, 단열재의 가동성 및 보관성 그리고 표면의 결로 및 낙수 문제 등 측벽과 달리 제약사항이 많으므로 내측에 하절기 차광 및 동절기 상향 대류억제 및 습기 함습을 할 수 있는 구조의 1차 피복재를, 외측에 내외부 열반사 단열 코팅이 된 2차 피복재를 설치함으로써 기능을 분리하여 최대의 성능을 도모할 수 있는 형태로 개발한다.

- 고효율 야간단열 시스템의 개발단계에서 개발된 단열시스템은 열관류율 및 방사율 측정 등의 반복실험과 유리온실에서의 운영 실험 등을 통해 단열재료의 표면방사율이 유리온실의 에너지성능에 주는 영향을 정량적으로 규명한다.

- 기존 온실 단열스크린 시스템의 성능확인을 위해 현재 농가에 보급 적용 운영중에 있는 제품을 대상으로 열관류율 측정을 수행해 성능을 검증한다.

- 전장 1m \* 1m인 건물 부자재 열관류율 측정기(Calibrated Hot-Box)를 통한 열저항 성능 확인작업을 통해 열반사 단열시스템을 개발한다. 이때 KS F 2299방식에 근거한 기존의 열관류율 측정방식은 전도성 단열을 기준으로 하기 때문에 복사단열 성능에 대한 고려를 위해서는 상응하는 측정방법을 개발 적용한다.

- 유리온실에 적용되는 단열스크린의 광투과율 차이에 따른 유리온실 내부에서의 작물의 생태학적 영향을 규명한다.

- 또한 외피복재로부터의 거리에 따르는 광환경 변화를 추적하여 외피복재 및 열반사 단열시스템의 도입에 따른 온실내부의 환경조건 기준을 정립한다.

여 백

## 제 2 장 유리온실 열반사 단열시스템

### 제 1 절 유리온실의 열적 특성

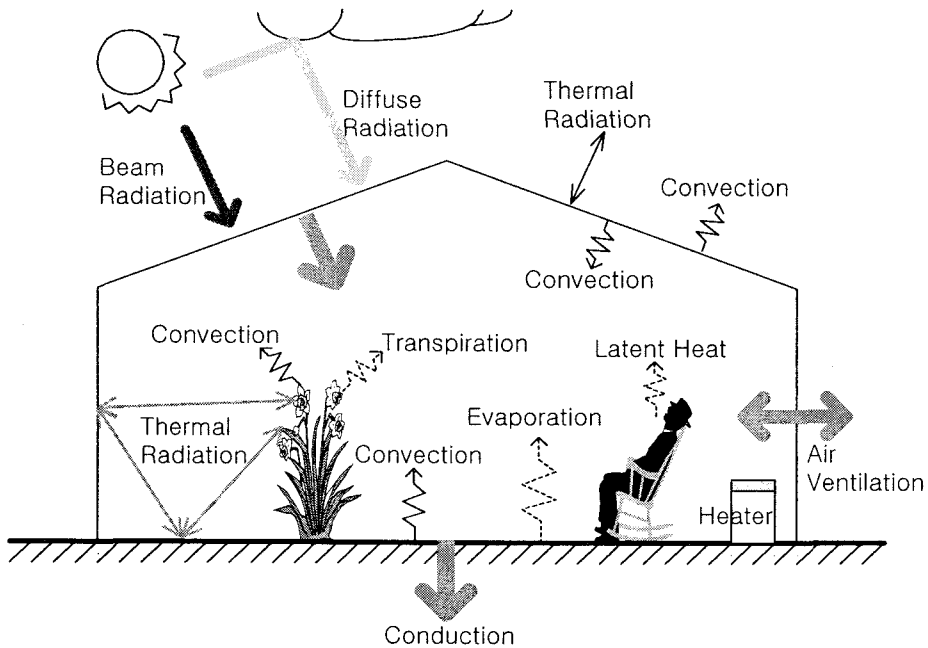
주간에 온실내로 투과되는 일사량은 온실내부의 열적 환경변화에 가장 큰 영향을 주는 요인으로서 복사에너지의 형태로 온실내부로 전달되어 바닥과 벽면에 수열됨으로써 온도를 상승시키고 온실 내부의 공기 온도를 높이게 된다. 주간에 온실 온도를 상승시키는 주요 요인으로서 일사량은 일시, 위도, 일사량 도달표면의 방향 및 기울기 등에 따라 변하므로 온실의 위치 및 형태, 설치위치 등이 온실 내부온도 결정의 주요 변수로 작용한다.

온실표면이 여러 개의 경사면으로 되어 있다고 가정하고 각 면을 통해 투과되는 일사량을 구하여 이를 종합하면 온실내의 일사량 분석은 용이하게 된다. 그러나 온실의 피복재 표면에는 온실 내외부의 온도차로 인하여 겨울철에는 거의 매일 수분이 응축되어 생기는 결로가 발생하고 있으며, 피복재의 외부 표면도 장기간 사용하면 오염되어 일사량 투과율을 저하시키는 요인으로 작용하고 있다.

온실의 일사 투과율은 온실 상면의 중앙부분이 높고, 주변이 낮으며 그 차이는 약 10%이내이다. 일반적으로 동서형으로 장방형인 온실이 남북형으로 장방형인 온실보다 일사량 투과율이 높으며, 이러한 현상은 온실 피복재가 오염되었거나 내부에 응축현상이 생길 때 더욱 크게 나타난다. 동서형 온실의 경우 온실 전 일사량의 60~80%가 온실 남쪽 벽면과 지붕면을 통과하며, 북쪽의 벽면과 지붕은 6~18% 내외가 통과하는 것으로 조사되었다[1].

온실 피복면에 도달하는 일사량은 직달 및 산란 일사량으로 나누어지며, 일부는 온실 피복재에 흡수되거나 반사되고, 그 나머지는 온실 내로 투과된다. 온실 내로 투과되는 일사량은 전체 일사량의 69%이며, 그중에서 14%가 바닥이나 벽면에서의 증발현상에 사용된다. 현열의 일부는 바닥에 전달되며, 그 나머지는 온실 내부 공기에 흡수되어 온실의 온도를 상승시킨다. 온실 내에서 현열 또는 잠

열화된 태양에너지의 일부는 바닥과 벽면에 전달되거나 피복면을 통하여 외부로 전달된다. 피복면을 통한 열전달은 피복재의 내외부 표면에서의 대류 열전달, 피복면과 온실내 각 면과의 장파 복사 열교환, 환기에 의한 현열 및 잠열 교환 등으로 나타난다.



[그림 2-1] 온실의 주요 열환경 요소

[그림 2-1]은 온실의 주요 열환경 요소를 나타낸 것으로 유리온실에서 진행되는 열취득 및 열손실에 관한 전체적인 내용을 도식한 그림이다. 일반적으로 온실 내부의 온도는 온실 외부의 열손실을 억제한 만큼 상승하게 된다. 피복재를 유리로 사용하면 장파 복사에 의한 외부 열전달을 억제하며 온실내의 일사량 투과율은 향상된다. 이러한 효과를 온실효과라고 하는데, 이는 주간에는 온실내부 온도가 상승하는 원인이 된다. 야간에는 주간에는 바닥과 벽면에 축열된 열이 각 면의 표면에서 온실 내로 방열된다. 가온(加溫) 온실의 경우 난방기의 열원이 사용되며 피복면에서의 열전달은 내부에서 장파 복사 교환 및 대류 열전달에 의한 열흡수,

외부와외 장파 복사 교환 및 대류 열전달에 의한 방열 등으로 이루어진다. 그러나 무가온(無加溫) 온실에서는 피복면의 온도가 외기 온도보다 낮기 때문에 일반적으로 대류현상에 의해 외기에서 열을 흡수한다.

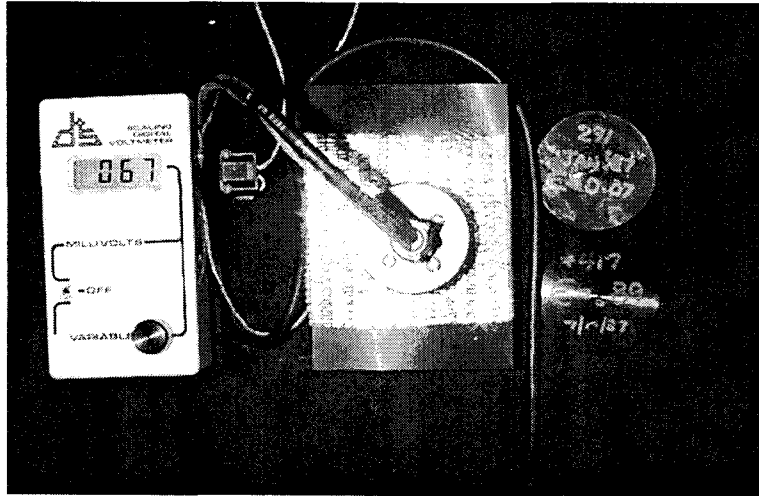
온실의 난방 유무(有無)와 상관없이 야간에 온실의 열손실은 장파복사에 의해 수열된 피복면에서 외기로 복사와 대류 열전달에 의해 손실되는 것이 대부분이므로 피복면에 전달되는 복사열을 차단하거나 반사하여 다시 방열면으로 되돌려 보내는 방법이 온실의 야간 열손실을 최소화할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

## 제 2 절 유리온실용 단열스크린

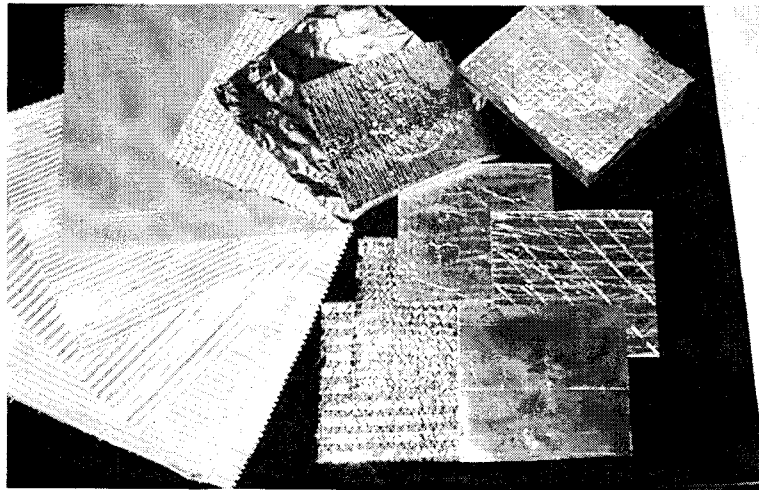
### 2.2.1 표면방사율

본 연구에서는 방사율 측정을 위해 미국의 Devices & Services사의 Scaling Digital Voltmeter를 이용하였다. 이 기기는 제공되는 몇 개의 표준시편에 의해 기기를 보정할 수 있으며, 측정하고자 하는 재료를 방열판 위에 올려놓고 측정기를 수직으로 설치하여 방열 에너지량을 측정함으로써 방사율을 Digital Meter에 표시하도록 되어 있다[2],[3],[4]. [그림 2-2]는 계측기를 통한 열반사 재료의 방사율 측정장치를 보여준다.

방사율 측정을 위해 선택된 시편은 주로 건축용 단열재로 개발된 재료로 각종 설비의 배관보온용으로 사용되는 제품, 유리솜 등의 표면마감용으로 사용되어지는 제품 등이며, 농업용 시설하우스 보온용으로 개발된 제품이 다수 포함되어 있다. 즉 태양열 집열기와 같은 설비기기의 단열용으로 사용되어지는 재료를 포함하여 국내외에서 열반사 복사단열재로 활용되고 있는 총 14종의 시편을 선정하여 방사율을 측정하였다. [그림 2-3]은 방사율 측정을 위해 선별된 각종 시편을 보여준다.



[그림 2-2] 표준 방사율 측정장치



[그림 2-3] 열반사 성능을 가지는 방사율 측정재료

### 2.2.2 열반사 단열스크린 시료조사

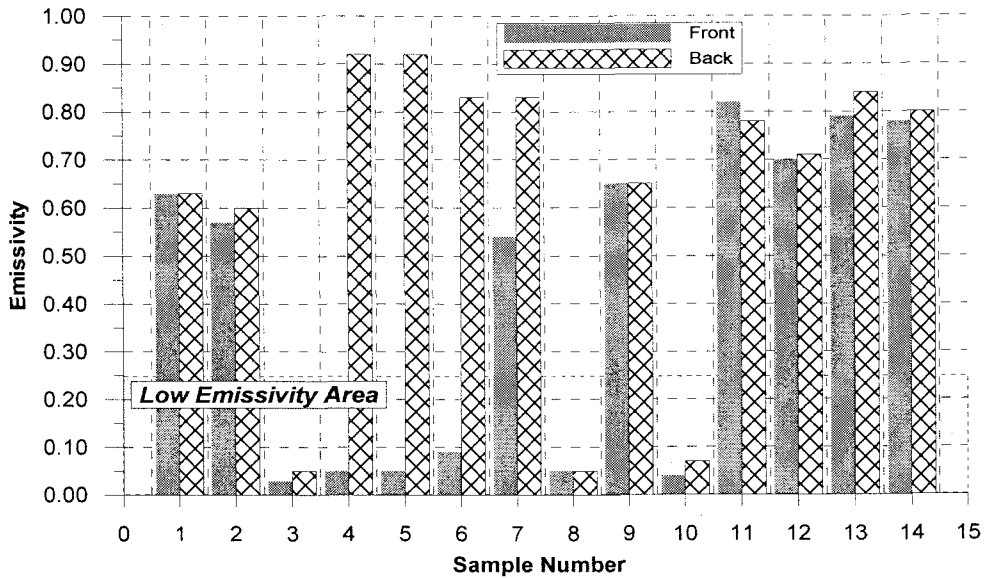
방사율 측정시험 결과 측정에 사용된 대다수의 시편은 알루미늄 증착 또는 박판 형태로 노출되어 있는 것보다 증착이나 박판 위에 PE계의 얇은 필름이 코팅되어 있는 것으로 조사되었다. 이는 알루미늄 재료의 특성상 알루미늄 상태 그대

로 공기 중에 노출될 경우 산화되어 내구성이 약해지거나 부식되고, 또한 알루미늄의 산화과정에서 표면에 얇은 피막이 형성되어 표면에 얼룩이 생기는 것을 방지하기 위해 필름을 입히는 것으로 알려졌다. 그러나 재료의 부식방지 및 내구성 향상을 위해 덧씌워지는 이질재료에 의해 알루미늄 자체가 가지는 방사성능은 급격히 저하되어 평균 0.60이상의 방사성능을 갖게 된다. 이는 복사차단 효과 측면에서 본다면 일반적으로 사용되는 건축재료, 즉 유리, 목재, 벽지 등과 큰 차이가 없는 방사특성을 갖게 되어 알루미늄이 가지는 저방사 성능을 현저히 저하시키는 결과를 나타낸다.

<표 2-1>은 측정에 사용된 시편의 표면 마감형태와 구성을 나타내고 있으며, [그림 2-4]는 시편의 양 표면에서 측정된 표면방사율 값을 도식한 그림이다. 또한 재료의 표면방사성능 측정실험을 통해 도출된 측정결과를 요약하면 <표 2-2>와 같다. 따라서 도출된 데이터를 근거로 하여 4가지의 시편을 선택하고, 이 재료를 유리와 조합된 단열시스템을 구성하여 열관류 성능 평가에 활용하였다.

<표 2-1> 시편의 표면마감 유형 구분

구 분	시편 1	시편 2	시편 3	시편 4	시편 5	시편 6	시편 7
알루미늄증착형			●	●	●		
알루미늄박판형			●			●	
PE 코팅	●	●					●
구 분	시편 8	시편 9	시편 10	시편 11	시편 12	시편 13	시편 14
알루미늄증착형	●						
알루미늄박판형	●		●				
PE 코팅		●		●	●	●	●



[그림 2-4] 각 시편의 표면 방사특성 측정결과

<표 2-2> 시편의 표면 방사율 측정 결과

	표면방사율		특 기 사 항
	전면	후면	
시편1	0.71	0.71	국내 제품으로 약 5mm정도의 폭을 가진 알루미늄소재와 PE계 필름을 번갈아 놓고 합사로 한면 노출 직조된 형태이며 일반적으로 농업용 시설온실의 보온, 차광용으로 사용
시편2*	0.65	0.65	국내 제품으로 약 5mm정도의 폭을 가진 알루미늄소재를 연달아 위치시킨 후 합사로 한면노출 직조된 형태이며 일반적으로 농업용 시설온실의 보온, 차광용으로 사용
시편3	0.03	0.05	관형의 국외 제품으로 태양열 집열기의 바닥부분 반사단열소재로 사용하며 양쪽 표면사이에 아스팔트 펠트 보강된 형태이다.알루미늄증착, 또는 박막의 형태로 마감
시편4*	0.05	0.92	국내 제품으로 크라프트지 위에 알루미늄을 증착 시킨 형태로 유리솜, 압면 등의 표면마무리용으로 활용되며 일반적으로 덕트의 배관보온용, 설비배관 보온용으로 사용
시편5*	0.05	0.92	국내 S사의 제품으로 크라프트지 위에 합사로 보강하여 알루미늄을 증착시킨 형태로 유리솜, 압면 등의 표면마무리용으로 활용되며 일반적으로 덕트의 배관보온용, 설비배관 보온용으로 사용
시편6	0.09	0.83	국내 제품으로 5mm정도 두께의 플라스틱계 스폰지 위에 알루미늄을 증착시킨 형태로 설비배관의 보온용으로 사용

※ 표시된 시편을 대상으로 상당 열관류율 실험을 위한 열반사 단열시스템 구성



<표 계속>

	표면방사율		특 기 사 항
	전면	후면	
시편7	0.54	0.83	국내 제품으로 20mm정도 두께의 플라스틱계 스폰지 위에 알미늄을 증착하고 다시 그위에 PE필름을 입혀 제작된 것으로 덕트의 배관이나 설비 배관용으로 사용
시편8*	0.05	0.05	국내 제품으로 크라프트지의 양측면에 모두 알미늄을 증착하여 양면모두 저방사특성을 갖도록 제작, 유일하게 건축용 단열재로 사용
시편9	0.65	0.65	국내 제품으로 약 5mm정도의 폭을 가진 알미늄 소재를 연달아 위치시킨 후 합사가 양측면으로 모두 노출 직조된 형태이며 농업용 시설온실의 보온, 차광용으로 사용
시편10	0.04	0.07	국내 제품으로 알루미늄을 박판형태로 얇게 가공하여 만든제품으로 일반적인 알루미늄 호일
시편11	0.82	0.78	국내 제품으로 양면이 코팅되어진 알루미늄 실로 천을 짜듯이 직조한 형태로 농업용 온실의 차광용으로 사용
시편12	0.70	0.71	국내 제품으로 코팅되어진 알루미늄 실과 합사의 7:3 비율로 천을 짜듯이 직조되었으며 재료자체에 통기성능이 있어 농업용 온실의 차광용으로 사용
시편13	0.79	0.84	국내 제품으로 코팅되어진 알루미늄 실과 합사의 5:5비율로 천을 짜듯이 직조한 형태로 재료자체에 통기성능을 가지고 있으며 농업용 온실의 차광용으로 사용
시편14	0.78	0.80	국내 제품으로 코팅되어진 알루미늄 실과 합사의 3:7비율로 천을 짜듯이 직조한 형태로 거의 일반 천에 가까우며 농업용 온실의 차광용으로 사용

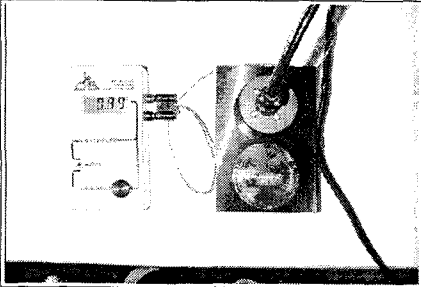
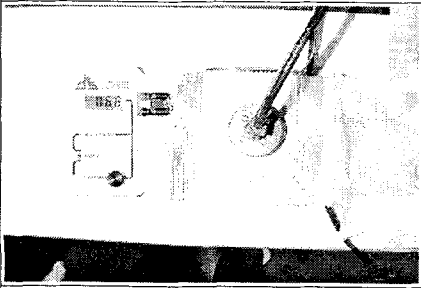
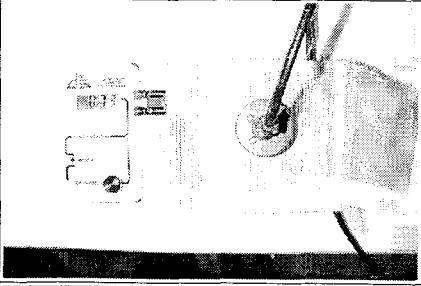
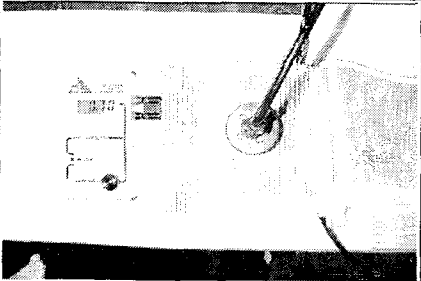
※ 표시된 시편을 대상으로 상당 열관류율 실험을 위한 열반사 단열시스템 구성

### 2.2.3 국내외 온실용 단열스크린 열성능 비교

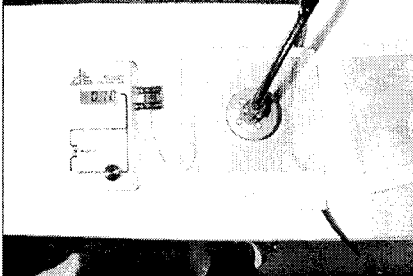
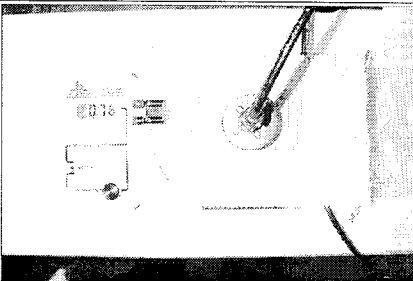
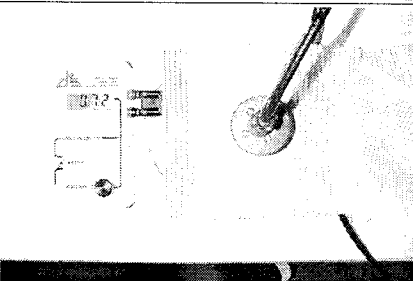
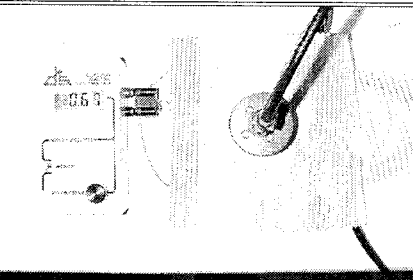
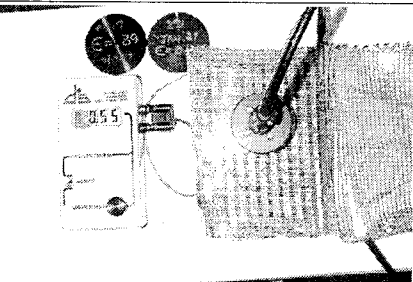
본 연구에서는 국내외 온실용 단열스크린의 열성능을 비교하기 위해 총 36개의 제품에 대한 방사율 측정을 하였다. <표 2-3>은 유리온실 단열스크린으로 개발되어 설치되고 있는 스크린에 대한 방사율 측정결과를 정리한 것이다. 국내제품은 표면방사율이 0.25로부터 0.76까지 광범위하게 분포하였으며, 외국제품은 방사율이 0.28에서 0.64 정도인 것으로 나타나, 전체적으로 볼 때 국산제품의 질도 최근 향상되어 외국산도 거의 동등한 방사율 특성을 보였다. 한편 <표 2-4>는 외산 반사단열 스크린 제품들과 최근 구미와 유럽에서 사용되고 있는 플라스틱 외피(1중 및 2중, 3중 포함)들에 대한 사진이다. 대체로 플라스틱 패널 형태의 외

피는 폴리카보네이트(Polycarbonate; PC)로 만들어졌으며, 투과율도 최대 90% 이상의 좋은 투과특성을 나타내었다. 따라서 플라스틱 외피의 단점을 보완한다면 유리보다 단열성능이 뛰어난 플라스틱 제품의 사용이 향후 고려될 수 있다.

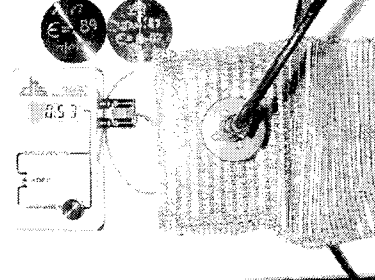
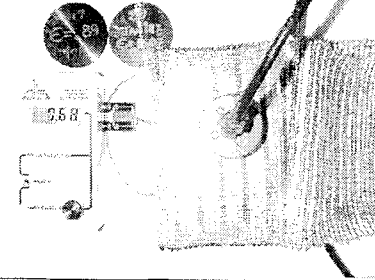
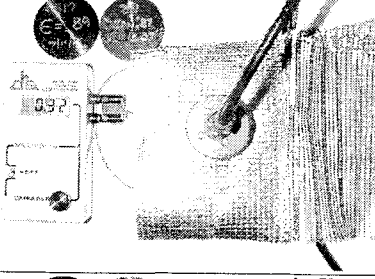
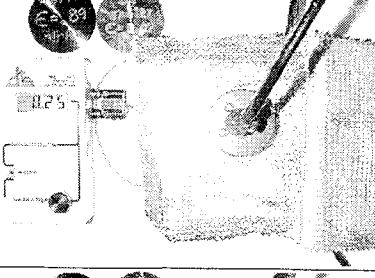
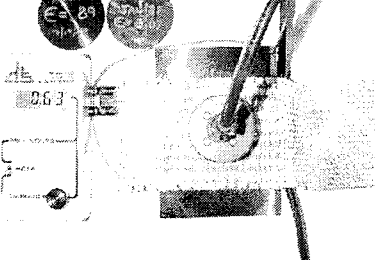
<표 2-3> 국내의 단열스크린 제품에 대한 방사율 측정결과

방사율 측정 실험	방사율	비 고
		※ 방사율 측정기기 Calibration 과정 - 2개의 보정판에 의해 보정 - 0.89, 0.07 보정 그림은 0.89로 보정하고 있는 과정
	0.66	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 100 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 홍보전단 : 보온율 80%, 반사율 95%
	0.73	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 4-2E 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 3번, 공간 2번 반복형태 홍보전단 : 보온율 70%, 반사율 80%
	0.70	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 4-4E 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 3번, 공간 3번 반복형태 홍보전단 : 보온율 65%, 반사율 70%

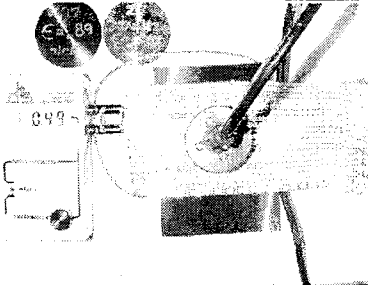
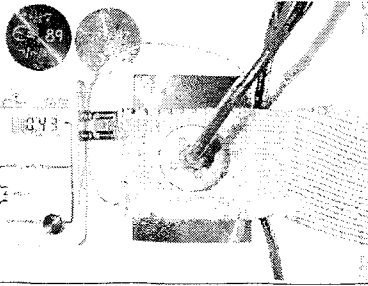
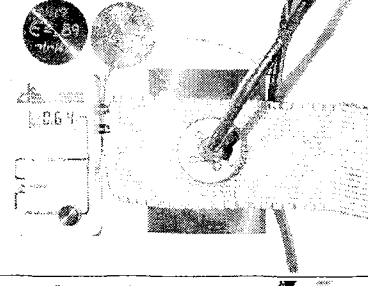
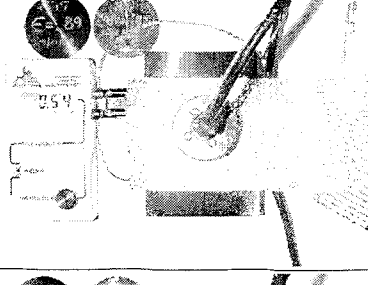
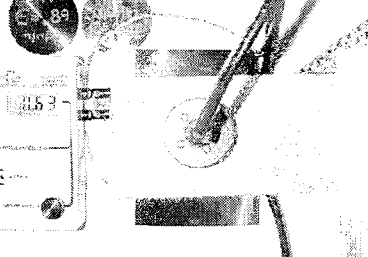
<표 계속>

방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.70	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 2-4E 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알미늄 2번, 공간 3번 반복형태 홍보전단 : 보온율 55%, 반사율 55%
	0.76	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 2-4S 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알미늄 2번, 천 3번 반복형태 홍보전단 : 보온율 20%, 반사율 55%
	0.72	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 4-4S 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알미늄 3번, 천 3번 반복형태 홍보전단 : 보온율 35%, 반사율 75%
	0.67	제조회사 : 대진알멕스 제품명 : AL 4-2S 특징 : 알루미늄으로 약 1mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알미늄 3번, 천 2번 반복형태 홍보전단 : 보온율 50%, 반사율 85%
	0.55	제조회사 : 서울농자재 제품명 : SAS 50 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알미늄 1번, PE필름 1번 반복형태 홍보전단 : 보온율 55%, 반사율 55%

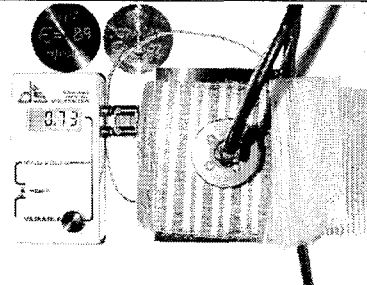
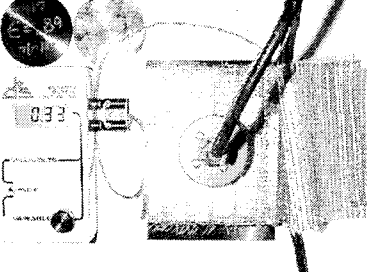
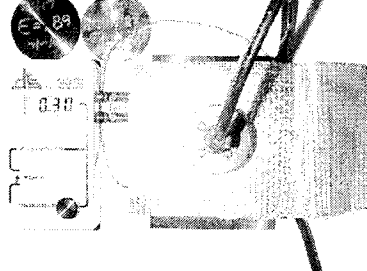
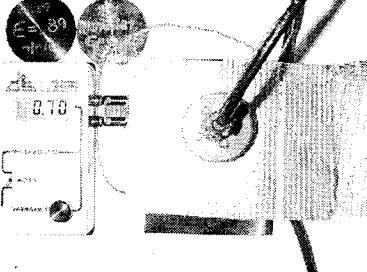
<표 계속>

방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.53	제조회사 : 서울농자재 제품명 : SAS 50S 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 1번, 공간 1번 반복형태 홍보전단 : 보온율 20%, 반사율 55%
	0.68	제조회사 : 서울농자재 제품명 : SAS 70 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 3번, PE필름 1번 반복형태 홍보전단 : 보온율 65%, 반사율 75%
	0.32	제조회사 : 서울농자재 제품명 : SAS 100(PE계 실) 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 계속 겹쳐서 직조 홍보전단 : 보온율 75%, 반사율 95%
	0.25	제조회사 : 서울농자재 제품명 : SAS 100(검은실) 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 계속 겹쳐서 직조 홍보전단 : 보온율 75%, 반사율 95%
	063	제조회사 : 이노테크 제품명 : IT 55 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 1번, PE필름 1번 형태 홍보전단 : 보온율 55%, 차광율 55%

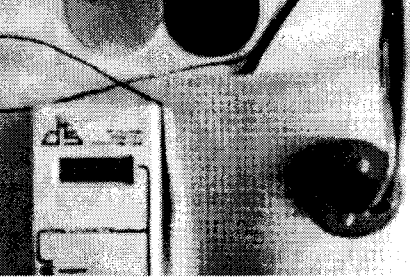
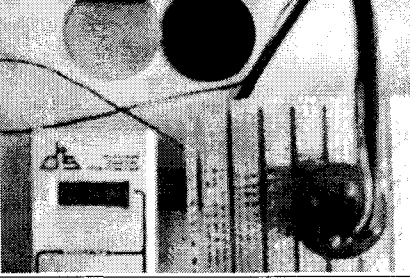
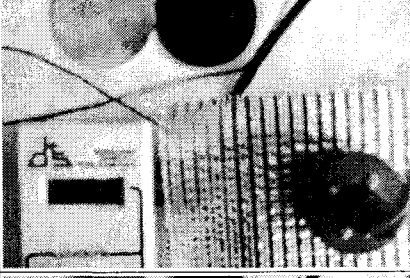
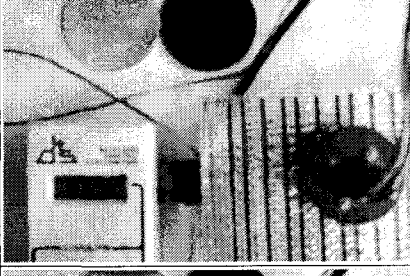
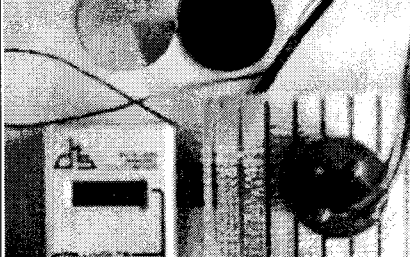
<표 계속>

방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.49	제조회사 : 이노테크 제품명 : IT 75 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 3번, PE필름 1번 형태 홍보전단 : 보온율 65%, 차광율 75%
	0.43	제조회사 : 이노테크 제품명 : IT 85 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐진 형태 홍보전단 : 보온율 70%, 차광율 85%
	0.64	제조회사 : 이노테크 제품명 : IT 100 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐진 형태 홍보전단 : 보온율 80%, 차광율 99%
	0.54	제조회사 : 이노테크 제품명 : IT 100 ULTRA(PE계 실 직조) 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐진 형태 홍보전단 : 보온율 80%, 차광율 99%
	0.63 (뒷면)	제조회사 : 이노테크 제품명 : IT 100 ULTRA(PE계 실 직조) 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐진 형태 홍보전단 : 보온율 80%, 차광율 99%

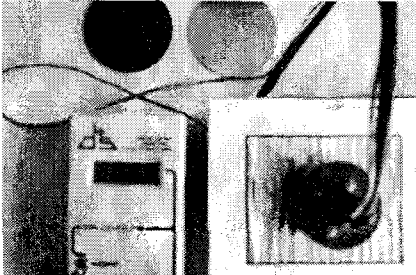




<표 계속>

방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.73	제조회사 : LS(엘에스) 제품명 : SLS 10 Ultra 특징 : PE계 필름을 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 PE계 필름 계속 겹쳐서 직조
	0.33	제조회사 : LS(엘에스) 제품명 : ULS 15F 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 1번, 공간 2번 형태
	0.30	제조회사 : LS(엘에스) 제품명 : ULS 18 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 3번, 공간 1번 형태
	0.70	제조회사 : LS(엘에스) 제품명 : ILS ALU 특징 : 알루미늄으로 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 계속 겹쳐서 직조 PE계 실로 직조

<표 계속>

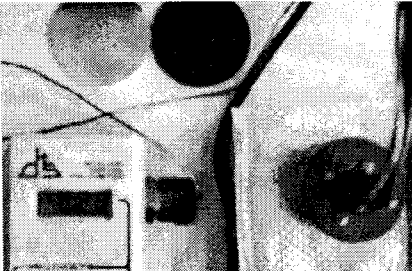
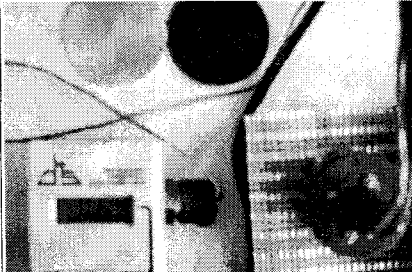
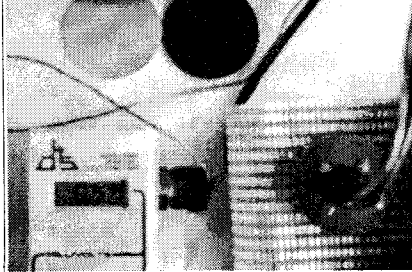
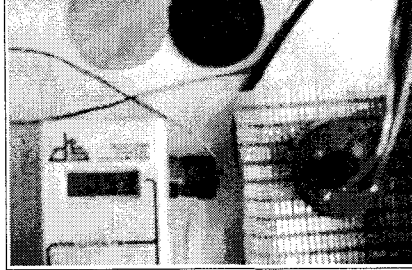
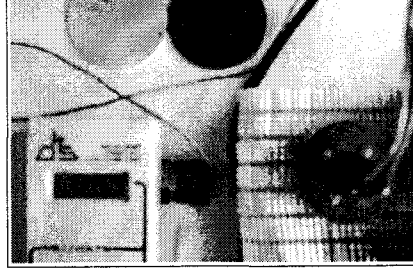
방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.41	제조회사 : LS 제품명 : HORTIROLL A/W 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐 제작하였으며, 뒷면에는 PE코팅을 입힌 형태 홍보전단 : 보온율 70%, 차광율 100%
	0.47	제조회사 : LS 제품명 : ULTRA 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐진 형태 홍보전단 : 보온율 45%
	0.58	제조회사 : LS 제품명 : XLS 15 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 1번, PE필름 1번 홍보전단 : 보온율 57%
	0.52	제조회사 : LS 제품명 : XLS 16 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 2번, PE필름 1번 홍보전단 : 보온율 62%
	0.39	제조회사 : LS 제품명 : XLS 17 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄 3번, PE필름 1번 홍보전단 : 보온율 67%

<표 계속>

방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.36	제조회사 : HS(HEESCHER) 제품명 : HS 887 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들고 방사형태의 천위에 직접 불린 형태, 알루미늄 3번, 공간 1번, 홍보전단 : 보온율 61%, 차광율 80%
	0.32	제조회사 : HS(HEESCHER) 제품명 : HS 888 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들고 방사형태의 천위에 직접 불린 형태, 알루미늄 4번, 공간 1번, 홍보전단 : 보온율 65%, 차광율 85%
	0.52	제조회사 : HS(HEESCHER) 제품명 : HS 880 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들고 방사형태의 천위에 직접 불린 형태, 알루미늄 1번, 공간 1번, 홍보전단 : 보온율 52%, 차광율 60%
	0.45	제조회사 : HS(HEESCHER) 제품명 : HS 885 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들고 방사형태의 천위에 직접 불린 형태, 알루미늄 2번, 공간 1번, 홍보전단 : 보온율 56%, 차광율 70%
	0.49	제조회사 : HS(HEESCHER) 제품명 : HS 895 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들고 느슨한 방사형태의 천위에 직접 불린 형태, 알루미늄 3번, 공간 1번, 홍보전단 : 보온율 30%, 차광율 45%



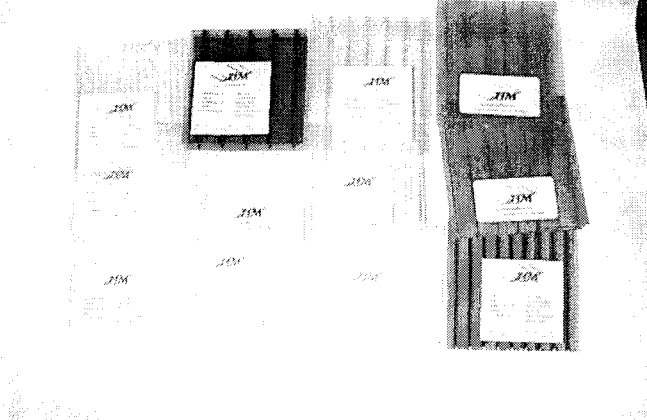
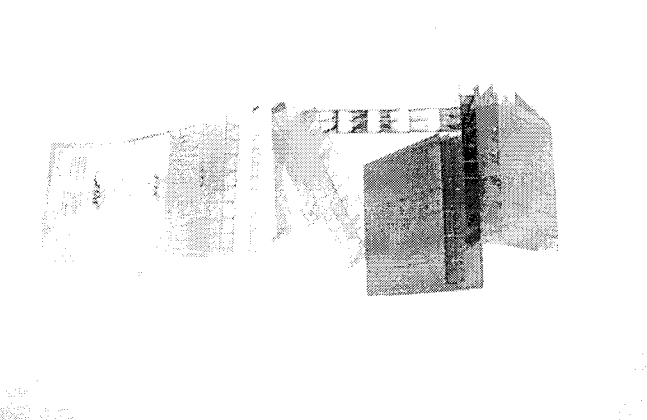

<표 계속>

방사율 측정 실험	방사율	비 고
	0.28	제조회사 : PH(PHORMIUM I) 제품명 : GEV-AL WIT 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄을 연속하여 겹쳐 제작하였으며, 뒷면에는 PE코팅을 입힌 형태, 홍보전단 : 보온율 78%, 차광율 99%
	0.64	제조회사 : PH(PHORMIUM I) 제품명 : PH 44 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄과 PE필름을 번갈아 위치, 알루미늄 1번, PE필름 2번 홍보전단 : 보온율 52%, 차광율 45%
	0.54	제조회사 : PH(PHORMIUM I) 제품명 : PH 55 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄과 PE필름을 번갈아 위치, 알루미늄 1번, PE필름 1번 홍보전단 : 보온율 58%, 차광율 55%
	0.51	제조회사 : PH(PHORMIUM I) 제품명 : PH 66 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄과 PE필름을 번갈아 위치, 알루미늄 2번, PE필름 1번 홍보전단 : 보온율 63%, 차광율 65%
	0.49	제조회사 : PH(PHORMIUM I) 제품명 : PH 77 특징 : 알루미늄 약 5mm정도의 실을 만들어 천을 직조하듯이 제작한 제품 알루미늄과 PE필름을 번갈아 위치, 알루미늄 3번, PE필름 1번 홍보전단 : 보온율 68%, 차광율 75%

<표 2-4> 국내외 단일스크린 및 플라스틱 외피 제품 종합



<표 계속>

유리온실 외피 대응 자료	비 고
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해외로부터 수집된 자료</li> <li>• 시설하우스의 외피재료 대체 재료로써, 이중으로 구성된 플라스틱 제품들</li> <li>• TIM : Transparent Insulation Material</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 내부 간격과 크기, 강도를 보완한 다중 플라스틱 외피</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TIM 이외의 다양한 형태로 구성된 플라스틱 외피 대응제품</li> </ul>

## 제 3 절 열반사 단열시스템의 열관류율

### 2.3.1 열관류율

#### 가) 열관류율 측정실험

하나의 단열시스템으로 열반사 복사시스템에 대한 열성능 평가를 위해 저방사 재료와 유리로 조합된 단열시스템에 대하여 열관류성능 측정실험을 실시하였다. 열반사 복사시스템에 대한 열관류 성능의 성능평가방법은 국내외를 막론하고 아직까지 정확한 측정방법이나 평가방법에 대한 기준이 마련되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 특성상 유리조합 구조임을 감안하여 창호에 대한 성능평가방법인 KS F 2278 창호의 단열성 시험방법과 건물에 적용되는 단열재의 성능평가 시험방법, 즉 ASTM C 1224, JIS A 1420, KS F 2299 등에 근거하여 실험을 진행하였다.

실험방법은 우선 5 mm 판형유리와 100 mm의 공기층, 그리고 방사율 측정에 의해 선정되어진 재료로 조합된 단열시스템을 측정시편으로 설치한다. 그리고 양측면의 온도조건을 설정하여야 하는데, ASTM, JIS, KS규격에 의하면 건축물 부재에 대한 실험을 위해 양측면의 공기설정 온도에 대한 규정은 없으면 단지 구조물의 사용조건에 가깝게 시험조건을 설치하도록 권장하고 있다. 그러나 KS F 2278 “창호의 단열성 시험방법”에 의하면 항온실과, 과일상자측은  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 저온실의 경우  $0\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 실험하는 것을 원칙으로 하고 있으므로 본 실험에서는 후자의 기준에 맞추어 실험을 진행하였다[5],[6],[7],[8].

또한, 창호의 단열성 시험방법에 의하면 정상상태에 도달했다고 판단되는 시점을 기준으로 30분간 3회 측정하여 평균을 구하는 방법을 권장하고 있으며, 건축부재의 시험방법에서는 8시간 측정 또는 4시간 측정을 2회 하여 오차범위가 1% 이내인 것을 권장하고 있다. 그러나 본 실험에서 적용한 단열시스템의 경우 측정시편의 열용량이 작고, 예비실험을 통한 분석결과 2시간, 4시간, 8시간의 측정결과 오차범위가 3%이내에 포함되는 것으로 분석되어 2시간씩 2회 측정하여 평균

하는 방법을 택하였다. 따라서 본 실험에서는 양측면의 공간상태가 정상상태에 도달되었다고 판단되는 시점을 기준으로 정확히 2시간 동안 투입되는 열량을 계측하여 재료의 두께와 면적의 함수로 열관류율을 도출하는 방식으로 하였다.

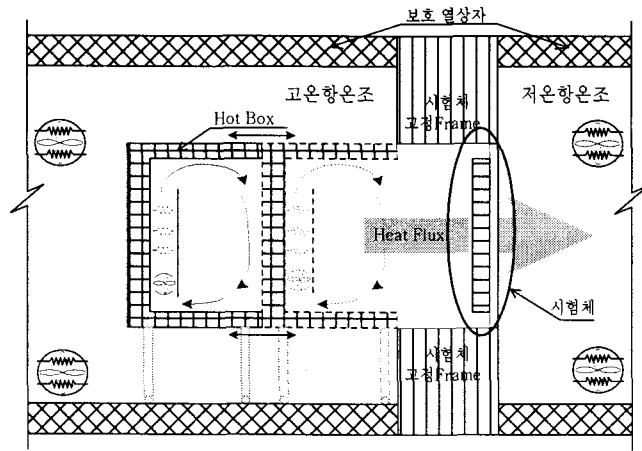
열관류성능 평가를 위해 구성된 사례는 방사율 측정실험으로부터 얻어진 데이터에 근거하여 조합하였으며, 5mm 투명단창을 기준으로 각기 다른 방사성능을 가지는 표면에 대하여 복사차단 단열성능의 정량적인 평가가 가능하도록 하였다. <표 2-5>는 서로 다른 방사성능을 가지도록 조합한 각 사례의 구성을 보여준다.

<표 2-5> 열관류 성능평가를 위한 구성 사례

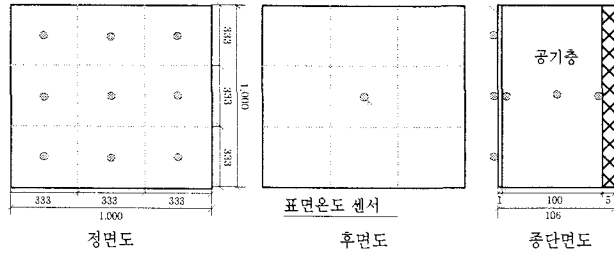
Case	구 성(고온측부터)	표면방사율(고온측부터)			
Case 1	5mm 투명 단창			0.83	0.83
Case 2	Kraft지 + 5mm 투명 단창	0.92	0.92	0.83	0.83
Case 3	양면코팅열반사지 + 5mm 투명 단창	0.65	0.65	0.83	0.83
Case 4	고온측 단면 열반사지 + 5mm 투명 단창	0.05	0.92	0.83	0.83
Case 5	저온측 단면 열반사지 + 5mm 투명 단창	0.92	0.05	0.83	0.83
Case 6	양면열반사지 + 5mm 투명 단창	0.05	0.05	0.83	0.83

정량적인 열관류 성능을 도출하기 위해 단열시스템 전체에 대한 전도성능, 각 재료 표면에서의 대류열전달 계수 등이 정확히 산정되어야 하므로 고온측과 저온측의 표면온도 측정을 위해 측정면적을 9등분하여 표면온도를 측정하였다.

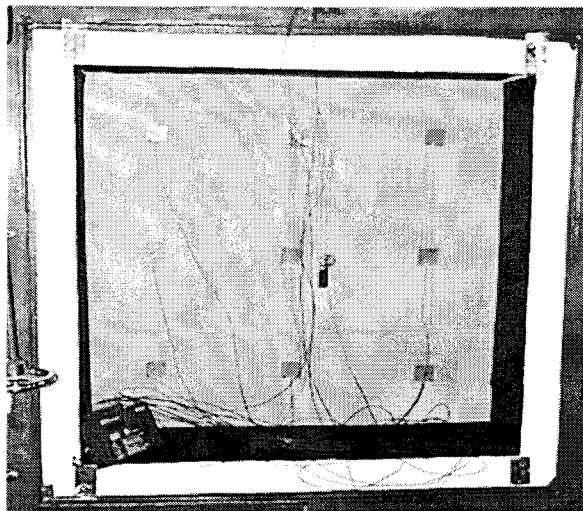
측정기기의 특성상 가열상자, 저온항온조 등은 설정온도 조건을 만족하기 위해 공간내의 일정속도 이상의 기류분포를 가지고 있으므로 전열기를 통해 직접 공급되는 공기에 의해 특정부위에서 온도조건이 달라지는 편차를 최소화하기 위해 9등분된 면적에 의한 면적가중온도로 계산하여 분석하는 방법을 택하였다. 표면 온도 측정을 위해 사용된 센서는 미국의 OMEGA사의 T-Type 열전대로 표면온도를 측정할 수 있도록 특별히 제작되어진 정밀도  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 제품을 이용하였다. [그림 2-6]은 열관류율 측정장치의 구성 및 형상을 나타내고 있으며, [그림 2-7]은 재료 표면에서의 온도 측정을 위한 센서측정위치를 보여주고 있다.



복사 단열재 5mm 투명유리



[그림 2-6] 실험장치 개요 및 측정센서 위치

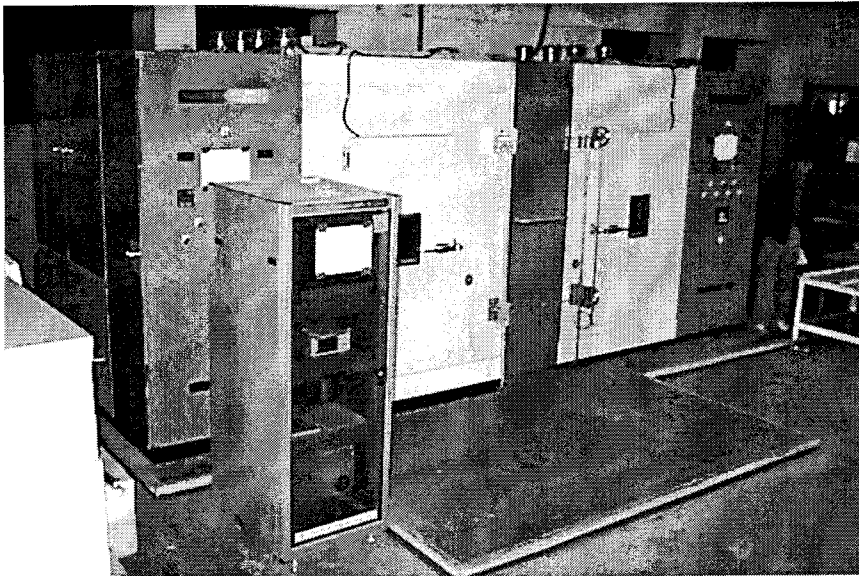


[그림 2-7] 실험재료의 센서부착 모습

## 나) 열관류율 측정장치

시스템의 열관류 성능을 평가하기 위해 한국에너지기술연구소에 설치된 “건축물 부재의 정상상태 단열성능 측정장치”를 이용하였다. 이 시스템은 열관류 성능 측정방법 중 보호열상자(Guarded Hot Box)에 의한 측정방식을 채용한 시스템이다[9]. 시스템의 구성은 중앙에 1000(W)×1000(H)×500(D)mm 규격으로 시험재료를 끼워 넣을 수 있도록 제작된 단열 충전된 고정프레임이 위치하고 있으며, 양쪽으로는 동일한 크기의 내부면적을 가진 고온 항온조와 저온 항온조가 각각 위치하고 있다. 각 항온조는 컴퓨터의 제어에 따라 자동 조절되며 설정온도, 예비 동작시간, 측정시간 등의 설정조건을 입력하여 동작하도록 구성되어졌다. 시험장치의 자세한 기기사양 및 제원은 <표 2-6>과 같다.

시험체의 표면온도 및 중간 공기층에서의 온도측정은 역시 T-Type 열전대를 사용하였으며, 계측을 위한 데이터로거로 Grant사의 1250 series를 이용하여 5초 단위로 측정된 데이터를 30초단위로 저장, 분석하였다.



[그림 2-7] 열관류율 측정장치

<표 2-6> 건축부재 정상상태 단열성능 측정장치 사양

구 분	고 온 항 온 조	저 온 항 온 조	가 열 상 자
외관 크기	W1400×H2400×D2200	W1400×H2400×D2200	W1100×H1600×D550
내부 크기	W1300×H2000×D2000	W1300×H2000×D2000	W1000×H1000×D500
단열 처리	내외부단열강판 0.5t 경질우레탄 100mm	내외부단열강판 0.5t 경질우레탄 100mm	내외부단열강판 0.5t 경질우레탄 100mm
사용온도범위	-30℃ ~ +100℃	-45℃ ~ +60℃	0℃ ~ +100℃
온도조절범위	±0.1℃	±0.1℃	±0.2℃
온도오차범위	±0.25℃	±0.25℃	±0.5℃
송풍 Input	AL W400×H500 1개소	AL W400×H500 1개소	AL W400×H500 1개소
송풍 Output	AL W400×H150 1개소	AL W400×H150 1개소	AL W400×H150 1개소
Chiller	380V, 5HP, 이원냉동, 공냉식	380V, 5HP, 이원냉동, 공냉식, 반폐형압축기	-
Heater	SUS 304, SCREW PLUG type, 6kW/3단	SUS 304, SCREW PLUG type, 6kW/3단	SUS 304, SCREW PLUG type, 500W×2
전 원	AC 380V, 3상, 60HZ	AC 380V, 3상, 60HZ	AC 220V 단상
안전장치	누전차단기, 냉동기, 히타 과부하 보호기, 비상정지스위치, 고,저 압력스위치, 온도과상승방지장치		

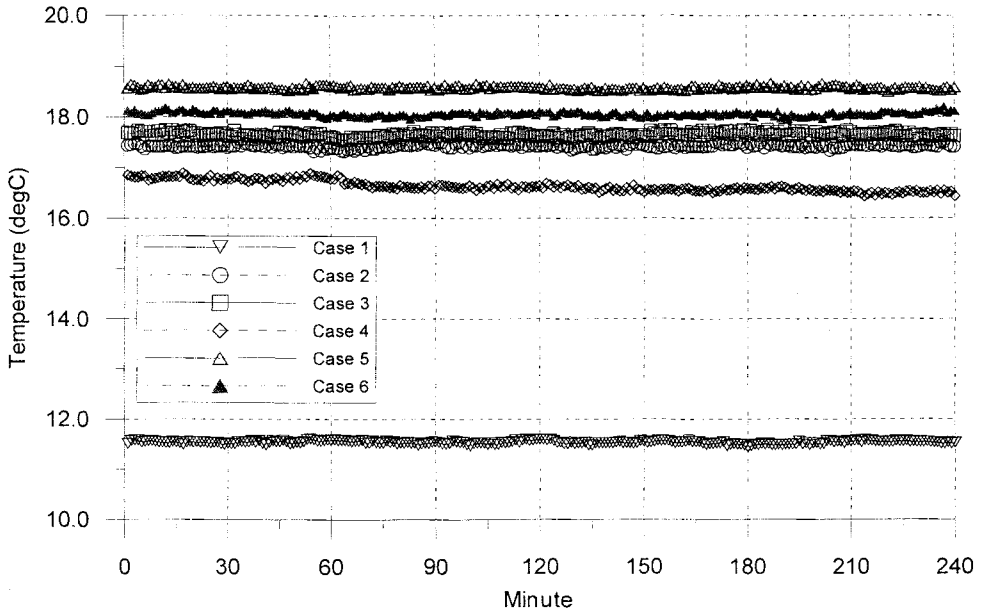
### 2.3.2 측정결과

1단계 방사율 측정을 통해 도출된 결과에 의하면 다수의 사례에서 저방사 특성영역으로 인정되는 0.25이상의 방사율이 측정되었다. 저방사 영역이라함은, 창호의 물리적 특성 분석 프로그램으로 공인된 LBL의 Window 4.1에 의하면 방사특성이 0.25이하의 영역에서 저방사 특성으로 인정하고 있으므로 본 연구에서도 방사율 0.25이하의 영역을 저방사 영역으로 규정하였다[10]. 따라서 낮은 방사특성을 보이고 있는 시편들과, 방사율이 높은 하나의 사례를 선별하여 열반사 복사 시스템을 구성하고 열관류성능에 대한 측정을 수행하였다.

본 연구에서는 유리조합 구성 시스템에 대한 연구에 주목적이므로 5mm 투명



단창 유리를 기준으로 복사단열 효과를 분석하였으며, 모든 사례에 대하여 동일한 실험조건을 구성한 후 설정한 온도조건이 정상상태에 도달되었다고 판단되는 시점을 기준으로 2시간씩 2회에 걸쳐 측정된 평균값으로 분석하였다.



[그림 2-8] 정상상태에서의 사례별 고온측 표면온도 분포

[그림 2-8]은 각 사례별로 측정을 시작한 이후의 고온측에 면한 표면에서 측정된 데이터를 근거로 한 평균값에 대한 온도분포를 나타낸 것이다. 모든 사례에서 정상상태에 도달한 후 표면에서의 온도를  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  이내로 일정한 온도상태를 유지하는 것으로 분석되었다.

각 사례에서 고온측에 면한 표면온도의 차이가 크개는  $8^{\circ}\text{C}$ 까지 차이를 보였는데, 이러한 이유는 각 사례의 고온측에 면한 표면과 유리측 공기층에 면한 표면의 방사성능에 의해 크게 영향을 받는 것으로 판단되었다. 즉 고온측 표면에서 가장 높은 온도를 보이고 있는 사례는 알루미늄 표면이 직접 중공층으로 노출된 사례였는데 이는 고온측에서 수열된 열량에 대해 알루미늄 표면이 열 방출되는 것을 최대한 억제함으로써 재료 자체의 온도가 고온을 유지하고 있는 것으로 판

단된다.

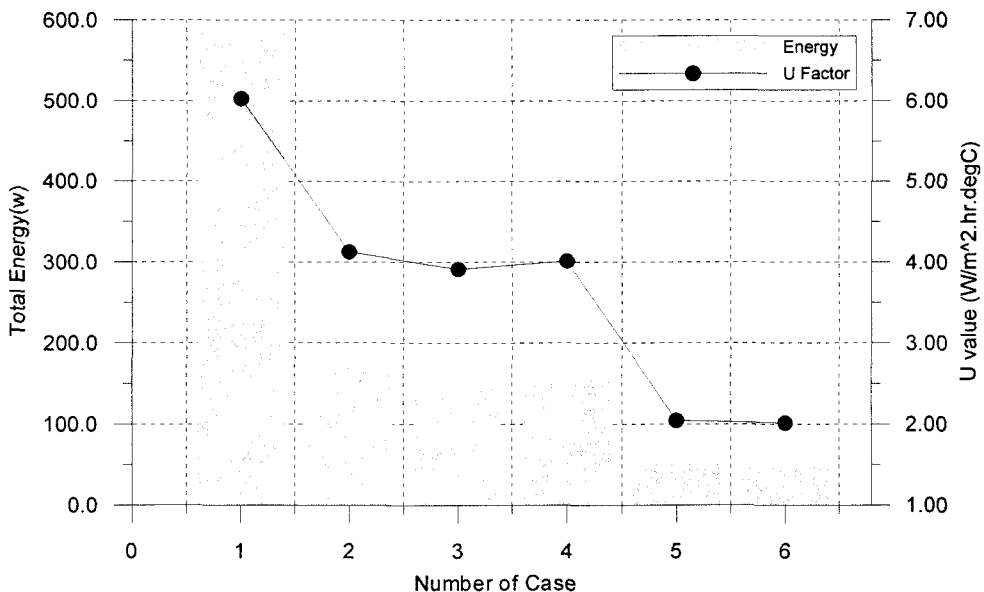
두 번째로 높은 온도를 유지하고 있는 시스템은 양면이 저방사 특성을 가지는 사례이다. 이는 고온측에 면한 표면에서 수열되는 열량의 대부분이 반사특성에 의해 차단되므로 재료자체의 온도상승을 최전단 표면에서부터 방지하고 있는 특성 때문인 것으로 분석되었다.

건축부재의 열관류성능 측정을 위한 재료 표면에서의 기류에 대해서는 저온측 표면에 대해 ASTM, ISO 등에서 규정되어 있으나, 본 연구에서 구성된 열반사 복사시스템의 경우에는 저온측 표면이 유리로 구성되어진 시스템임을 감안하여 창호의 단열성능 측정기준에 의해 진행하였다[11],[12]. 창호의 단열성능 평가를 위한 기준에 의하면 시험체 표면에서의 기류에 대한 기준이 아닌 표준시료에 의한 재료 표면에서의 열저항을 구해 동일한 조건으로 각 사례에 대한 실험을 실시함으로써 시험체의 표면 열저항을 보정해 주는 방식이 택하여 진다. 따라서 본 연구도 유리와 조합된 단열시스템이므로 창호의 평가기준에 준하여 측정, 평가하였다.

<표 2-7> 사례별 온도분포 및 열관류성능 측정결과

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
고온측 공기온도(℃)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
고온측 재료 표면온도(℃)		17.5	18.4	16.9	17.5	17.6
고온측 재료뒷면 표면온도(℃)		16.10	16.61	15.34	15.98	15.67
공기층 온도(℃)		10.50	10.22	11.77	9.25	8.90
저온측 유리뒷면 표면온도(℃)	11.2	4.60	3.97	4.20	2.44	2.40
저온측 유리 표면온도(℃)	8.35	3.32	3.20	2.72	1.49	1.70
저온측 공기온도(℃)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
열관류율(W/m <sup>2</sup> Ch)	6.028	4.126	3.912	4.013	2.045	2.013
시간당 소요열량(W/h)	588.5	171.9	152.7	154.8	51.8	48.8
관류율대비 비율(%)	100	68.4	64.9	66.6	33.9	33.4
열량대비 비율(%)	100	29.2	25.9	26.3	8.8	8.3

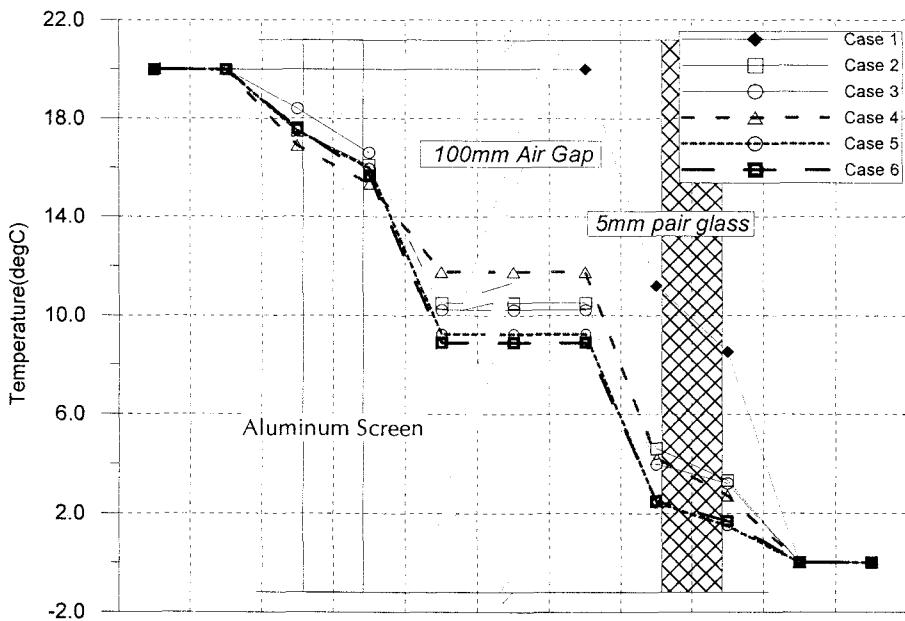
<표 2-7>은 각 사례의 표면 온도분포와 보정된 표면열저항 수치 및 투입열량에 의해 산출된 열관류율 결과를 나타낸다. 5mm 투명단창에 대한 측정결과를 기준으로 각 사례의 열관류율 수치는 사용재료의 방사특성에 따라 30%에서 최대 약 67%까지 복사차단에 의한 관류저항의 증가를 보이고 있으며, 동일 공간 내에서 설정온도 유지를 위한 관류부하는 크라프트지로 조합되어진 Case 2의 70%부터 양측면이 모두 방사율 0.05를 유지하고 있는 Case 6의 경우는 최대 90%이상의 단열성능 증가 효과를 나타내고 있다. 분석된 결과에 의하면 방사율이 높은 재료로 구성된 Case 3과 고온측 표면이 저방사로 처리된 Case 4에서 열관류율 수치나 투입열량에서 거의 차이를 보이지 않고 있는 것으로 나타났는데, 이러한 이유로는 측정을 위해 사용된 시스템 자체의 특성 때문인 것으로 판단된다. 즉 시스템의 운영특성상 고온측 공간에서 정상온도 유지를 위해 내부에 설치된 송풍장치로 부터 형성된 기류가 재료의 표면에 직접 도달하여 고온측 표면의 대류 열전달 수치를 상승시키게 되고, 이로 인해 자연대류 상태보다 훨씬 큰 효과를 나타냄으로써 상대적으로 열반사 효과에 의한 복사열 차단성능이 감소되는 결과로 나타난다.



[그림 2-9] 사례별 열관류 성능 및 시간당 투입열량 비교

한편 표면방사율이 동일한 경우에 열관류율은 저온측 방사율이 좋을 때(Case 5)와 양면이 모두 좋을 때(Case 6) 상호 거의 비슷한 값을 보였다. 따라서 복사 차단재료로의 표면 방사특성에 의한 단열효과는 저온측 표면의 방사율이 낮을수록 수열되는 에너지를 복사열전달에 의한 저온측으로의 에너지 이동을 차단하는 것으로 나타난다.

[그림 2-9]는 측정된 각 사례별로 투입된 에너지량과, 투입된 에너지량을 근거로 산출된 열관류율 값을 나타내고 있다. 그림에서 나타나는 바와 같이 양면이 모두 저방사 특성을 가진 재료를 사용한 단열시스템이 가장 우수한 단열성능을 보이고 있었다. 다음으로 우수한 관류저항 성능을 나타낸 것은 중공층에 저방사 특성을 가진 표면의 경우인 Case 5였다. 그러나 저방사 특성을 갖는 표면이 고온측에 노출된 경우에 방사율이 0.65인 사례보다 관류저항이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 가능한 최소의 기류만 형성되도록 재구성하여 실험한 결과 고온측으로 저방사 특성을 가진 표면이 면했을 때 열관류율이  $2.33 \text{ W/m}^2\text{K}$ 인 것으로 나



[그림 2-10] 사례별 온도분포 Profile

타났다. 이는 저방사표면이 중공층으로 위치한 사례 5보다 낮은 관류저항을 보이고 있지만 사례 3과 비교하여 40%이상 관류저항이 증가한 것이다.

[그림 2-10]은 각 사례에 대해 고온측 공기로부터 저온측 공기에 이르는 각 절점에서의 표면온도 변화를 도식화 한 것이다. 그림에서 나타난바와 같이 표면의 방사특성에 따라 각 절점에서 온도 변화폭이  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  정도의 차이를 보이고 있다. 고온측 표면에서의 각 사례를 비교해 보면 고온측 표면에서의 방사율이 0.65인 사례에서 가장 높은 온도를 나타내고 있다. 이는 Case 3의 경우에 5mm 정도의 폭을 가진 알루미늄 재료를 합사로 직조하여 제작하였기 때문에 표면에 무수한 구멍이 형성되어 효과적으로 열을 차단하지 못하고 중공층과 열교환이 이루어졌기 때문으로 분석된다. 고온측 표면에서 가장 낮은 온도분포를 보인 사례는 사례 4로  $16.9^{\circ}\text{C}$ 인 것으로 나타났다. 표면온도가 가장 낮게 나타난 이유는 고온측 공기로부터 전달되는 열량이 재료의 내부로 흡수되지 않고 재료의 반사성능에 의해 최대한 차단되는 반면, 뒷면의 방사성능은 0.92로 높기 때문에 저온측으로 많은 양의 열을 방출하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 고온측 표면이 동일한 방사특성을 갖는 Case 6의 경우는 표면대류에 의해 전달되어 재료 내부로 흡수된 열에너지가 중공층 표면에서도 저방사 특성을 갖는 조건 때문에 방출되지 않고 자체온도를 상승시키기 때문에 Case 4와 비교하여 높은 온도를 나타내고 있는 것으로 분석된다. 이러한 현상은 중공층과 면해있는 표면에서도 뚜렷이 나타난다. 중공층과 접해있는 표면이 저방사 특성을 가진 Case 5의 경우 재료의 두께가 0.007mm 정도 밖에 되지 않지만 양쪽표면에서의 온도 차이는 거의  $2^{\circ}\text{C}$  가까이 차이를 보이고 있다. 이는 재료에 도달한 열에너지가 재료의 반대쪽 표면의 저방사 특성에 의해 공기층으로 전달되지 못하고 내부로 흡수, 또는 고온측으로 재방사되기 때문인 것으로 판단된다.

중공층 내부에서의 온도분포는 중공층으로 면한 표면이 저방사 특성인 Case 5와 Case 6이 가장 낮은 온도를 나타내는데, 이는 표면에서 방출되는 열량이 상대적으로 작기 때문인 것으로 분석된다. 이런 표면특성에 의한 온도분포 차이는 중공층으로 면한 유리의 표면온도에 직접적으로 영향을 미치며, 상당부분 복사 차단된 열은 유리의 저온측 표면에서 그 효과가 나타나 동일한 소재임에도 표면온

도의 차이에 따라 대류 열저항 수치를 상승시키는 요인으로 작용하는 것으로 분석되었다.

## 제 4 절 소 결

본 장에서는 적용시설 및 방법은 다르지만 용도 면에서 열반사 단열재료로 사용되는 시편을 대상으로 내외부 표면방사율에 대한 정밀한 측정을 실시하였다. 또한 측정된 방사율 데이터로부터 5가지 시편을 선택하여 동일한 조합으로 구성된 복사단열시스템에 대하여 열관류 성능을 도출하였으며, 그 결과로 얻은 결론은 다음과 같다.

열반사 복사차단방식을 이용하는 단열재의 대다수 재료에서 재료표면의 손상이나 내구성 증대, 부식방지를 위해 알루미늄 표면 위에 PE계 필름을 코팅하여 본래 알루미늄이 가지는 저방사 특성을 효과적으로 활용하지 못하고 있는 것으로 분석되었다. 이는 알루미늄 자체의 방사율이 0.03~0.09사이를 유지하고 있는 반면 표면에 얇은 박막의 PE 필름이 코팅된 경우에는 방사성능이 최소 0.60이상으로 일반적인 건축재료의 표면방사성능과 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

유리와 조합으로 구성된 복사단열시스템의 관류성능 측정에서는 유리만으로 구성된 사례와 비교하여 사용재료의 방사특성에 따라 최소 30%에서 최대 67%까지 열관류 저항이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 적용조건 하에서는 최대 90%이상 단열성능이 향상되는 것으로 분석되었다. 실험에 의해 가장 우수한 단열성능을 나타낸 사례로는 양측 표면의 방사성능이 0.05인 알루미늄 박막으로 형성된 재료로 복사단열시스템을 구성한 경우인 것으로 나타났다. 특히 표면방사율이 동일한 경우에 열관류율은 저온측 방사율이 좋을 때와 양면이 모두 좋을 때 상호 거의 비슷한 값을 보였다. 따라서 복사 차단재료로서의 표면 방사특성에 의한 단열효과는 저온측 표면의 방사율이 낮을수록 수열되는 에너지를 복사열전달에 의한 저온측으로의 에너지 이동을 차단하는 것으로 나타난다. 즉 중공층으로 면한 표면에서 저방사 특성을 가진 단열시스템은 스크린으로 전달된 에너지

가 고온측에서 어떻게 열교환하는지와는 상관없이 저온측으로 면한 표면의 저항사 특성으로 인해 최소한의 에너지만을 저온측으로 방출함으로써 에너지 이동을 최소화 하는 것으로 판단된다.

현행 국내의 건축부재에 관한 표준 단열성능측정 방법은 KS F 2299에서 규정하고 있으나 유리화 조합된 복사단열시스템의 평가방법으로는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 이는 열반사 복사단열시스템이 열전도성능이 우수한 유리화 조합되는 구성상 특수성으로 KS F 2299에 의한 측정을 할 경우에 표면 열전달 계수가 필요 이상 과도하게 되어 정확한 측정을 할 수 없기 때문이다. 즉 열전도저항이 낮은 재료화 조합으로 구성된 단열시스템 또는 건축부재의 경우 열관류율 산출은 새로운 측정 평가방법의 개발이 요구되며, 기존 단열성능 측정방법에 의한 측정이 진행 될 경우에는 표준판 등에 의한 보정계수를 선정한 후 상당 열관류성능 측정하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 즉 측정된 실험데이터는 상당히 큰 폭으로 열관류 저항이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 관류저항의 증가에 따라 이와 비례하여 적용된 시설의 에너지 소비가 선형적으로 적용되지는 않았다. 따라서 측정된 상당 열관류율의 값을 근거로 현장실험과 시뮬레이션을 통해 에너지 평가를 수행함으로써 연간 에너지 소비량을 정량적으로 분석하였다.

여 백



## 제 3 장 실규모(50평형) 유리온실 대상 예비실험

열반사 단열시스템과 전도차단형 단열시스템, 또는 무단열 시스템의 경우에 단열성능을 효과적으로 비교 분석하기 위해서는 동일한 조건의 건물을 대상으로 단열유형을 달리 적용하여 분석하는 것이 가장 좋은 방법이다. 그러나 실제규모의 동일한 규모나 운영조건을 가진 건물을 선택하여 단열시스템을 설치하고 측정 분석하기란 사실상 불가능하다. 또한 열반사 단열시스템의 단열성능 해석을 위해서는, 가능한 단순한 벽체 구조를 가진 공간, 예를 들면 유리온실이나 건물의 한켠에 부착된 부착온실을 대상으로 실험을 하는 것이 가장 효과적으로 복사차단 성능을 검증하기에 유리하다. 따라서 본 연구에서는 유리로만 구성된 실험용 온실을 대상으로 온실자체의 열성능 및 반사특성을 갖는 단열시스템의 설치에 따라 달라지는 온실의 열성능을 측정하여 비교, 분석하는 것으로 실험을 진행하였다.

실험을 통해 평가하고자 하는 주요 목표로는 1) 복사단열시스템의 구성으로 벽체의 열관류 성능이 달라질 때 건물의 열성능 평가, 2) 복사단열시스템 설치에 따른 건물의 난방에너지 절감효과 분석, 3) 다양한 방사특성을 가진 복사단열시스템의 시뮬레이션 해석을 위한 기초데이터 확보, 4) 열반사 복사단열시스템의 시뮬레이션 해석모델 수립과 검증이다.

### 제 1 절 예비실험

#### 3.1.1 실험목적 및 방법

본 연구에서는 유리온실을 대상으로 침기량(infiltration) 측정실험, 건물 열손실 계수(BLC : Building Load Coefficient) 측정시험 및 복사단열시스템의 성능평가

실험으로 구분하여 실험을 진행하였다. 침기량 측정실험은 유리온실의 특성상 일반적인 유형의 건물에 비해 연결부의 기밀화 시공이 불가능하여 건물의 난방부하 증가에 중요한 요인으로 작용하기 때문이다. 측정된 유리온실의 침기율은 시뮬레이션을 위한 온실의 해석모델에 입력자료로 활용하였다.

건물 열손실계수 측정실험은 유리온실이 설정조건을 만족하기 위해 요구되는 자체 열성능을 평가하는 것이다. 건물 열손실계수는 건물의 에너지 성능을 나타내는 주요 지수이므로 난방기간 중 발생하는 외부부하에 대한 유리온실의 열성능 조절능력 평가를 위해 수행되었다. 측정은 실험대상으로 열반사 단열시스템이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우에 대해 각각 진행하였으며, 각 사례에 대한 열손실계수는 시뮬레이션을 통한 결과의 검증에 활용하였다.

또한 전 장에서 수행된 복사단열시스템 설치에 따른 부하절감 효과가 실제 건물 적용 시에도 유효한지에 대한 평가를 위해 유리온실에서의 열성능 평가를 수행하였다. 평가를 위한 방법으로 각 사례의 동일 온도조건 설정 시 소요되는 총 에너지 투입량으로 분석하였으며, 열관류율 차이에 따른 난방에너지 절감량을 정량적으로 평가하였다.

### 가) 침기량 측정실험

유리온실에서 환기 및 기밀성능에 영향을 미치는 주요 공기유동 경로는 출입구, 천장에 설치된 환기구 등이며 이외에도 외벽의 유리 및 창틀의 간극 등이 내외부 공간의 공기유동 요인으로 들 수 있다.

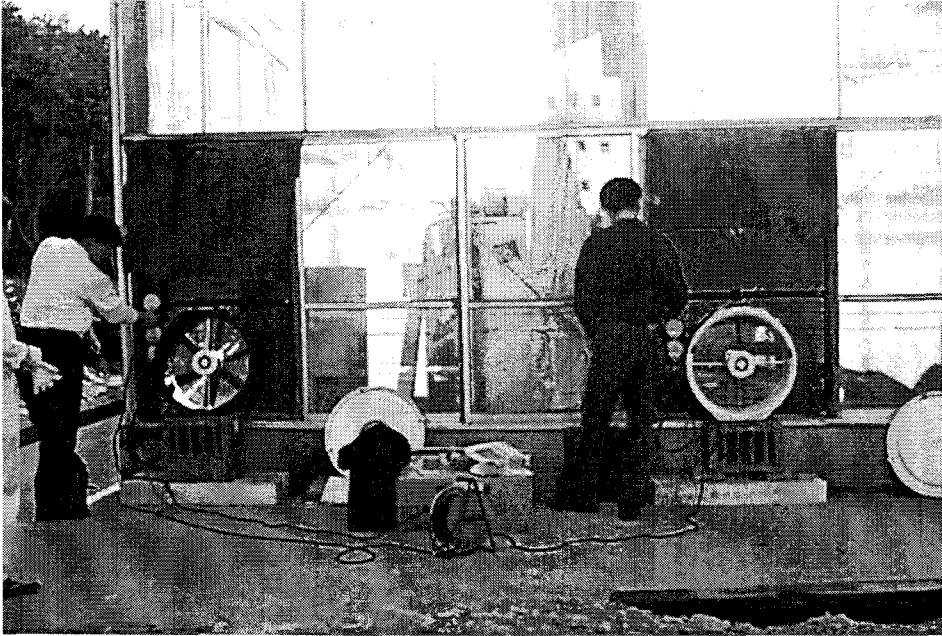
건물 내외부로의 공기유동은 온실의 환기량을 증가시켜 냉 난방부하의 증가요인으로 작용하고, 의도하지 않은 침기(infiltration) 현상을 일으켜 실내 열환경을 저하시키기도 하며, 또 우리나라와 같이 한랭한 동계조건을 갖는 지역에서는 결로 발생의 문제를 야기 시키기도 한다. 그리고 외부소음의 전달과 외부로부터 내부로 공기오염원을 운반하여 실내공기의 오염과 냄새 등을 유발하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 유리온실의 기밀성능에 대한 실측데이터의 확보를 위해 현장측정을 수행하여 유리온실의 에너지성능 평가를 위한 기초자료로 활용하였다.

실내로 유입되는 공기는 의도된 환기(intentional ventilation source)와 의도되

지 않은 침기에 의해 좌우된다. 건물 설계 시 계획된 특정 개구부를 통해 유입되는 공기유동량은 개구부의 크기와 풍속 등에 대한 직접적인 측정으로 평가가 가능하지만, 드러나지 않은 틈새(gap 또는 crack)를 통한 공기유동은 측정 및 평가하기가 다소 어렵다.

기밀성능의 측정을 위한 대표적인 실험방법에는 가스추적법(tracer gas method)과 블로어 도어(blower door)를 이용한 압력차 측정법(fan pressurization method)이 있는데, 가스추적법은 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub> 등의 불활성 가스를 임의로 실내에 분출한 후, 시간의 경과에 따른 가스농도의 변화량을 가스측정기 등으로 측정하여 건물의 기밀 및 환기성능을 평가하는 방법이다. 압력차 측정법은 실내외의 압력차를 임의상태로 유지시킨 후, 그에 따른 공기유동량 변화를 측정하여 건물의 기밀성능을 평가하는 방법으로 지나친 공기유동이 계획환기 시스템의 작용을 어렵게 한다는 점에서 매우 중요하며, 건물의 총 공기유동량(overall air leakage of building)을 측정하는 가장 일반적인 방법이다. 이 측정법은 블로어도어(blower door)등을 이용하여 단위실 또는 건물 전체를 대상으로 기밀성능을 측정하며, 실험조건을 임의로 변화시킬 수 있고 계절 등 주변기후의 영향을 크게 받지 않고 측정할 수 있다는 장점이 있다[13].

본 연구에서는 블로어 도어에 의한 압력차 측정법을 사용하였으며 ASTM E 779-87(Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization)의 원리와 개념을 채용하여 구성하였다. 주요 측정기기로는 미국 Energy Conservatory사의 Blow Door System Model 3을 사용하였다. 블로어도어 시스템의 구성요소는 실내외 압력차를 일정하게 유지할 수 있도록 유입공기량을 조절하는 팬 및 속도조절기, 실내외 압력차를 측정하는 압력차계와 출입문 그리고 창호에 설치 가능하도록 되어있는 프레임부분으로 크게 구분되어져 있다. [그림 3-1]은 Blower Door를 설치하고 유리온실의 기밀성능을 측정하는 모습을 보여주고 있다.



[그림 3-1] Blower Door 설치 및 측정

본 연구에서 채택한 측정기기의 유효 압력차 측정범위는 10 Pa~100 Pa로 실제 정상상태에서의 실내외 압력차인 약 1~4 Pa에서의 실제 외피를 통한 환기량 측정은 다소 어렵다. 따라서 본 연구에서는 5.5~26 Pa 까지의 압력 조건에서 압력차를 증가시키면서 진행하였다. 이 측정결과를 바탕으로 정상상태(4 Pa)의 환기량을 간접적으로 추정하는 방법을 채택하였다. 또한 침기율 측정을 위한 예비실험 결과 온실의 자체 부피가 워낙 크고 기밀성이 떨어지며, 외기에 직접 노출되어있는 특성상 하나의 측정시스템으로는 필요 압력을 나타낼 수 없는 것으로 분석되어 부득이 동일한 측정기기를 2개 설치하여 실험하는 것으로 하였다.

실내외 압력차와 환기량 사이에는 대수관계(對數關係 ; log-log관계)가 있으므로 이를 근거로 측정결과를 통계 처리하여 상호관계를 규명함으로써 온실의 고유한 기밀성능을 평가할 수 있다. 따라서 이를 근거로 정상상태에서의 환기량 추정이 가능하다.

미국의 ASTM 기준에서는 기상조건이 풍속 0~2 m/s, 외기온 5~35℃인 상황에서 측정과 환기구 및 배기구 등을 밀폐하고 측정할 것을 요구하고 있다[14].

본 측정방법에서 실내외 압력차  $\Delta P$ 와 공기유동량  $Q$ 와의 관계는 일반적으로 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$Q = Q_0(\Delta P)^{1/n} \quad (3.1)$$

여기서  $Q$  : 공기유동량 ( $m^3/h$ )

$Q_0$  :  $\Delta P = 1mmAq$  일때의 수치 ( $m^3/h$ )

$\Delta P$  : 실내외 압력차 (Pa)

$n$  : 공기 유동 지수

위 식에서 기밀성능은  $Q_0$ 와  $n$ 에 의해 표현할 수 있다. 그러나 직감적으로 기밀성능을 이해하기 어렵기 때문에 이에 대응하는 공기유동량에 주목하고, 이를 단순화하여 유효누기면적으로 치환함으로써 상호간의 관계를 표시할 수 있다. 따라서 공기유동량이 개구면적에 비례한다고 가정할 때  $\Delta P$ 와  $Q$ 의 관계는 다음식과 같다.

$$\Delta P = r/2g(10,000/3,600 \cdot Q/aA)^2 \quad (3.2)$$

여기서  $aA$  : 유효누기면적 ( $cm^2$ )

$a$  : 유량계수

$A$  : 누기 면적 ( $cm^2$ )

$r$  : 공기의 비중량 ( $kg/m^3$ )

$g$  : 속도( $m/s^2$ )

식(3.1)의  $\Delta P$ 와  $Q$ 와의 관계를 식(3.2)에 대입하면  $aA$ 는 다음식과 같이 표시된다.

$$\alpha A = 2.78 \times \sqrt{r/2g} Q_o (\Delta P)^{1/N-0.5} \quad (3.3)$$

식(3.3)에서 나타난 바와 같이  $\Delta P$ 와  $n$ 의 수치에 따라 유효누기면적이 변화하기 때문에 압력차에 따른  $\Delta P$ 와  $n$ 의 적정수치가 기준으로 제시되어야 한다. ASHRAE에서는 4 Pa을, 일본의 경우는 10 Pa를, 스웨덴, 노르웨이, 캐나다 R-2000에서는 50 Pa(약 5 mmAq)일 때의 공기 유동량을 환기회수로 표시한다. 본 연구에서는 ASHRAE의 기준에 따라 4 Pa일 때의 침기량을 계산하여 뒤에 수행될 시뮬레이션의 침기부하 데이터로 활용하였다[15],[16],[17].

#### 나) 건물 열손실계수 측정실험

유리온실 자체가 지니는 열성능을 정량적으로 분석하기 위해서는 우선적으로 난방기간 동안에 해당 온실에 투입되는 모든 에너지원에 대한 누적치와 실내외 온도차의 누적치를 기본으로 하여 구할 수 있다.

일반적으로 건물의 BLC를 구하기 위해 측정되는 항목과 모든 에너지원의 누적치에 대한 데이터는 다음과 같은 식으로 구해진다[18].

$$E_{net} = Q_h + Q_{sol} + Q_{el} + Q_m \quad (3.4)$$

여기서  $E_{net}$  : 건물에 소요된 에너지원의 합

$Q_h$  : 보조난방기기에 의한 에너지 output

$Q_{sol}$  : 태양 획득 열

$Q_{el}$  : 조명 및 전기기기에 의한 획득 열

$Q_m$  : 재실자에 의한 획득 열

또한 투입된 에너지량의 측정과 동일기간동안 실내온도와 실외온도차( $\Delta T$ )의 누적치를 구하고, 상기의 투입에너지와 온도차에 대한 누적치를  $x$ ,  $y$  좌표축에 표현하여 얻어지는 그래프에서 가장 적합한 선형보간식을 구하면 해당건물의

BLC를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 측정대상인 유리온실에 대해 3가지 조건, 무단열 조건, 차광스크린 설치 조건, 복사단열시스템 설치조건에 대해 데이터를 습득하는 것으로 하였으며, 각각의 조건에서 얻어지는 데이터를 근거로 적용 시스템의 물리적 특성에 따른 유리온실의 BLC를 측정하였다.

일반적으로는 BLC를 측정하기 위한 데이터 측정기간은 5일에서 10일 정도로 추천되고 있는데, 본 연구에서는 약 7일간의 데이터를 기준으로 분석하였다. 온실에서 획득되는 에너지량을 정확하게 측정하고 분석하기 위해 측정기간 동안의 모든 데이터는 1분 간격으로 24시간 측정되었지만, 보다 정량적인 평가를 위하여 BLC평가에 사용된 데이터는 난방시간대인 야간시간대를 대상으로 데이터분석을 수행하였다.

#### 다) 열관사 단열시스템의 성능평가 실험

유리온실을 대상으로 무단열 사례, 차광스크린 설치 사례, 단열스크린 설치 사례 등 3가지 사례로 구분하여 실험을 하였다. 사례의 가장 큰 특징으로 Case 1은 5mm 단창유리로만 구성된 온실이며, Case 2는 방사율이 0.71인 단열재료를 사용할 경우, Case 3은 방사율이 0.65인 유지하는 복사단열 스크린을 사용한 경우로 각각 대표될 수 있다.

실험방법은 Case 2와 Case 3의 경우 모두 실험기간 동안 주야간을 통해 지속해서 스크린을 설치하여 실험기간 동안 일정한 열관류 성능을 갖도록 하였다. 방사능이 다른 각 사례에서 실험기간 동안 투입된 총 열량을 정량적으로 측정하였으며, 측정된 열량을 바탕으로 에너지 절감성능을 평가하였다. 또한 온실내부에 32곳의 공기온도를 측정하여 사례별 실내조건을 비교 분석하였다.

외벽 및 천장을 통해 유입되는 일사에너지는 바닥이외에 축열체가 없도록 고려하였으며, 실험의 일관성 유지를 위해 실험이 끝나는 기간동안 동일한 조건을 유지하도록 하였다. <표 3-1>은 각 사례별 실험조건을 나타내고 있으며, <표 3-2>, <표 3-3>, <표 3-4>는 각 사례의 실험기간 중 대전지역의 일별 기상자료를 각각의 기상요소별로 측정하여 정리한 것이다.

<표 3-1> 실험 사례별 설정조건

	실험조건	실험일시	사용재료 방사율	실험기간중온도(℃)		
				평균	최고	최저
Case1	무단열	2월14일 12:00~2월20일 12:00	-	-1.06	9.7	-9.0
Case2	차광스크린	2월21일 12:00~2월28일 12:00	0.71	-0.59	8.6	-8.7
Case3	단열스크린	3월1일 12:00~3월7일 12:00	0.65	4.33	18.3	-6.8

<표 3-2> Case 1(무단열조건) 실험기간 중 대전지역 기상자료

일시	온도조건(℃)			평균풍속 (m/sec)	평균습도 (%)	평균운량 (할)	일조시간 (시간)	비고
	평균	최고	최저					
2월14일	0.4	4.6	-2.9	5.0	62.0	5.9	4.3	비/진눈개비
15일	-3.9	-0.8	-7.1	5.4	51.0	4.6	5.7	비
16일	-3.6	2.0	-7.9	3.6	56.0	1.9	7.0	비
17일	-2.9	3.0	-9.0	3.6	49.0	0.6	8.8	맑음
18일*	-0.4	5.4	-6.0	2.5	42.0	6.0	8.8	구름많음
19일	2.4	9.7	-2.7	2.1	37.0	7.1	4.4	구름많음
20일	0.6	6.8	-3.0	3.6	54.0	2.4	9.3	맑음/안개

\* 표시된 부분은 해당 실험기간중의 대표일을 나타낸다.

<표 3-3> Case 2(단열스크린설치) 실험기간 중 대전지역 기상자료

일시	온도조건(℃)			평균풍속 (m/sec)	평균습도 (%)	평균운량 (할)	일조시간 (시간)	비고
	평균	최고	최저					
2월21일	-1.3	4.4	-6.5	4.0	46.0	0.0	9.4	맑음
22일*	-1.1	5.7	-6.3	2.0	47.0	3.4	6.6	구름조금
23일	1.3	8.6	-4.4	2.2	55.0	6.9	5.9	구름많음
24일	-2.5	1.9	-5.8	4.8	39.0	0.0	9.5	맑음
25일	-2.4	3.0	-8.7	2.1	42.0	3.4	7.3	구름조금
26일	0.5	6.1	-4.2	2.4	53.0	7.4	3.9	비
27일	2.3	7.8	-3.4	3.3	55.0	2.6	9.0	비
28일	-1.5	2.4	-4.9	4.5	39.0	0.3	9.6	맑음

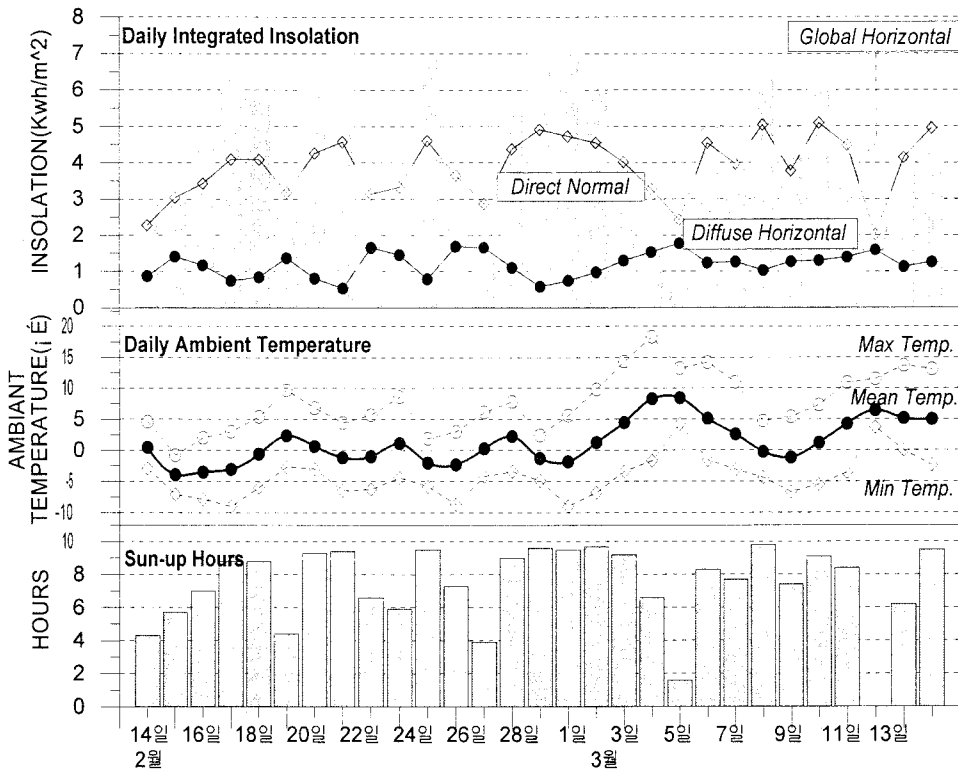
\* 표시된 부분은 해당 실험기간중의 대표일을 나타낸다



<표 3-4> Case 3(단열스크린설치) 실험기간 중 대전지역 기상자료

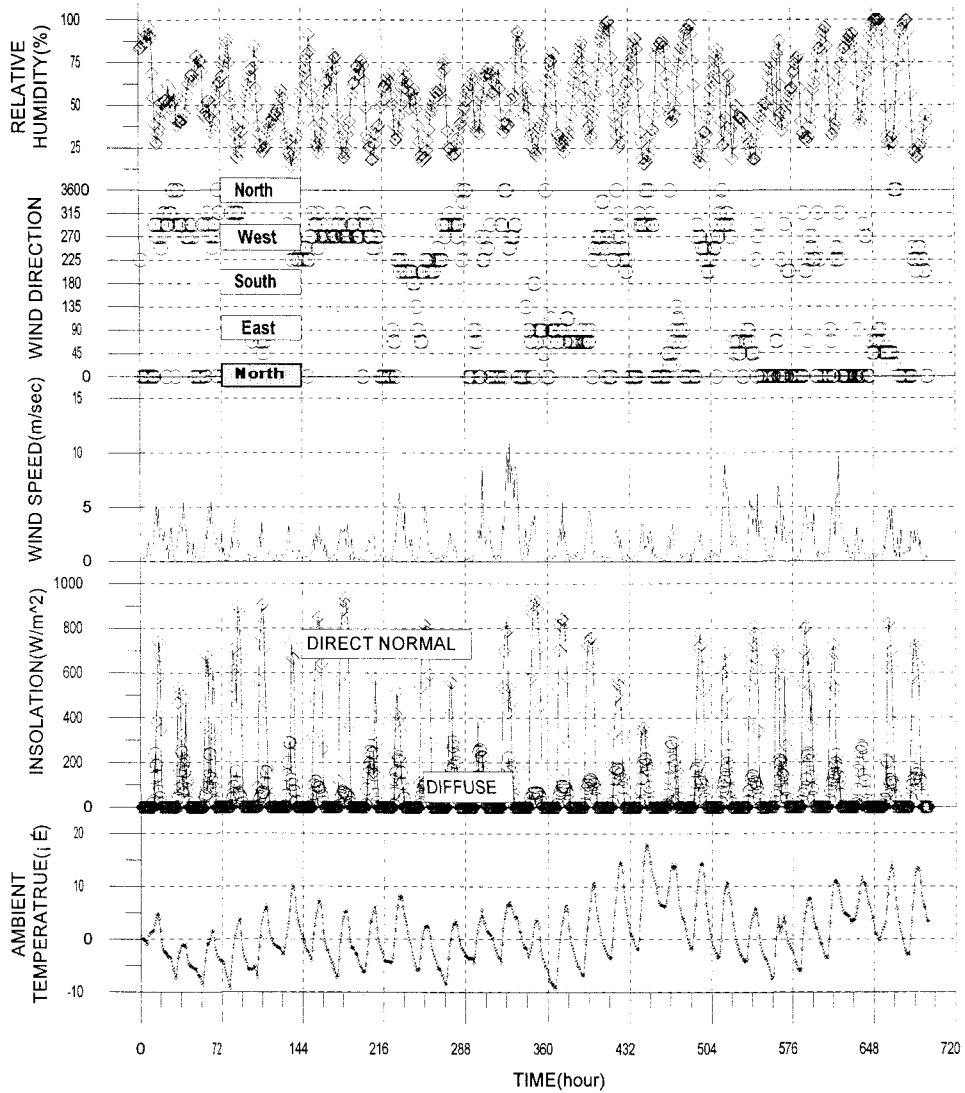
일시	온도조건(°C)			평균풍속 (m/sec)	평균습도 (%)	평균운량 (할)	일조시간 (시간)	비고
	평균	최고	최저					
3월1일	1.3	9.8	-6.8	1.7	60.0	0.0	9.7	맑음
2일	4.6	14.3	-3.4	1.5	59.0	0.0	9.2	맑음/안개
3일	8.4	18.3	-1.7	1.3	46.0	6.5	6.6	비/안개
4일	8.4	13.2	4.2	2.2	64.0	6.1	1.6	비/안개
5일	5.3	14.2	-1.6	1.9	52.0	1.6	8.3	맑음/안개
6일	2.9	11.0	-3.1	3.2	50.0	1.8	7.7	비/소나기
7일	-0.6	4.7	-4.4	4.4	34.0	0.0	9.8	맑음

※ 표시된 부분은 해당 실험기간중의 대표일을 나타낸다



[그림 3-2] 실험기간 중 대전지역 일사량자료 변환 및 분석

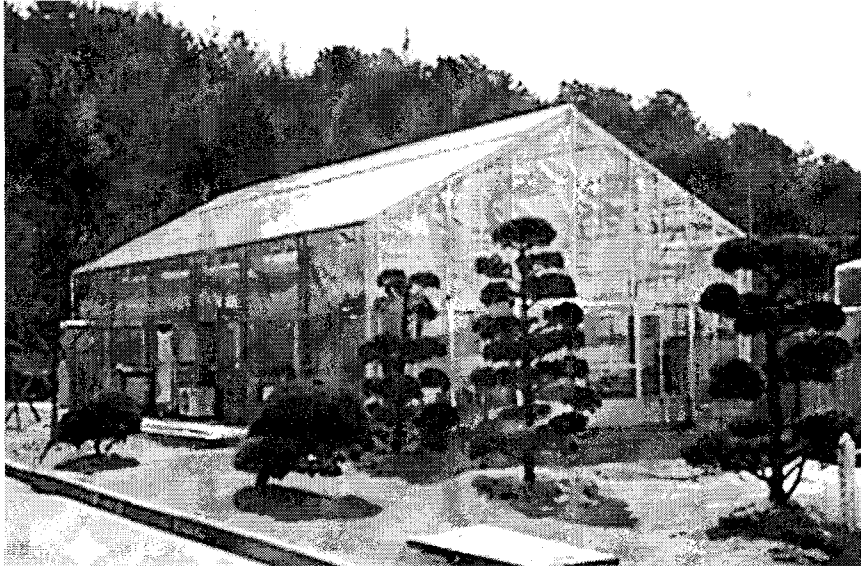
[그림 3-2]와 [그림3-3]은 실험이 진행된 기간동안 측정된 기상데이터를 근거로 기상요소에 따라 분석한 그래프이다.



[그림 3-3] 실험기간 중 대전지역 일별 기상자료 변환결과

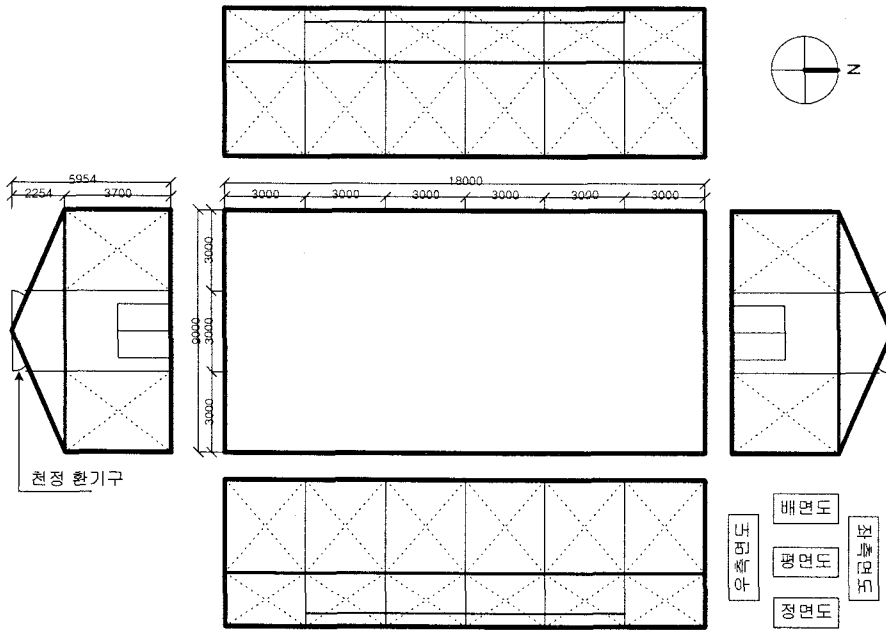
### 3.1.2 대상온실 및 측정범위

복사단열시스템의 현장 성능검증 실험은 대덕연구단지 한국에너지기술연구원 내에 위치한 유리온실을 대상으로 하여 실시되었다. 해당 유리온실은 1995년도에 건설된 시설로서, 전체 형상은 H형강으로 주 구조체를 세운 후 사면과 지붕 모두를 KS L 2001 A급 5mm 투명단창으로 마감한 전형적인 온실 형태이다. 규모는 폭 9m, 길이 18m, 높이 5.954m의 장방형 형태이며 박공지붕으로 마감하였고, 길이방향이 남북방향을 향하여 설치되어 있다. [그림 3-4]는 실험대상 온실의 사진이며, [그림 3-5]는 규모 및 형상을 도면화 한 것이다.

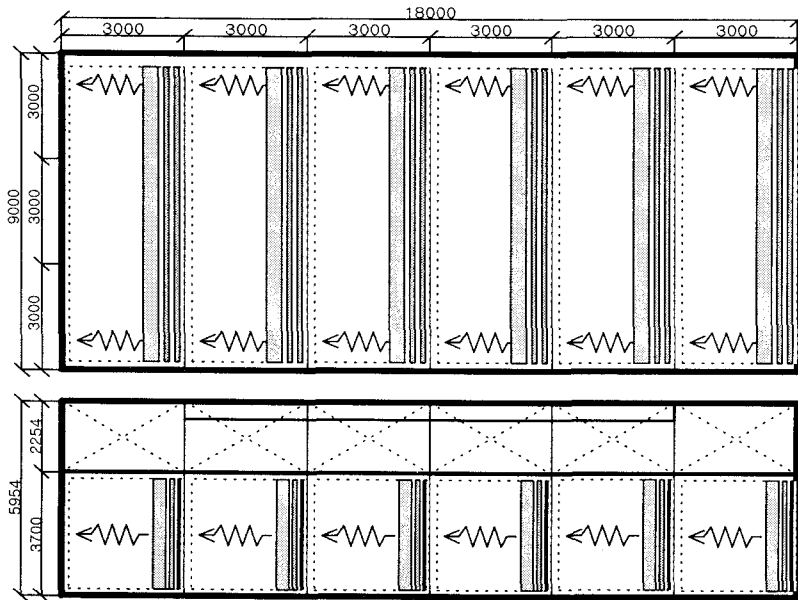


[그림 3-4] KIER 유리온실 전경

주 사용재료로서 H형강(LH-Beam 150\*75\*7\*7t)은 3m간격으로 설치되었고, 중도리 철골형강은 C형강(C-75\*45\*15\*2t, C-60\*30\*10\*2t)으로 설치되었다. 벽체를 구성하고 있는 유리를 지지하기 위한 창틀은 여러 형태의 알루미늄 바로 구성되었으며, 천장의 가장 높은 곳에는 환기를 위한 환기구가 설치되어 자동개폐기에 의해 작동되도록 설치되었다. [그림 3-6]은 단열스크린의 구동형태를 나타낸다.



[그림 3-5] KIER 유리온실 기본 도면



[그림 3-6] 스크린 자동개폐장치 개념도(위:천정부, 아래:측면부)  
 점선 : 단열스크린 설치시, 실선 : 단열스크린 제거시

한편 온실 내 난방조건 충족을 위해서는 70,000 kcal/hr 용량의 유류 보일러와 4350 kcal/hr 용량의 Fan-Coil Unit(FCU)을 10대 설치하였다. 그러나 예비실험을 통해 시험한 결과 외기온의 급격한 하강시 충분한 열량공급을 하지 못하는 것으로 조사되었으며, 따라서 동용량의 Fan-Coil Unit 5대를 추가로 설치하였다. 이와 함께 보조 난방기로서 용량 50,000kcal/hr인 공기식 난방시스템도 같이 설치하였으나, 이 대형 Fan-Coil Unit의 경우에 실내 온도분포를 일정하게 하는데 문제가 있고, 또한 기 설치된 Fan-Coil Unit으로도 외기 변동에 대한 충분한 열량공급이 가능한 것으로 파악되어 사용되지는 않았다.

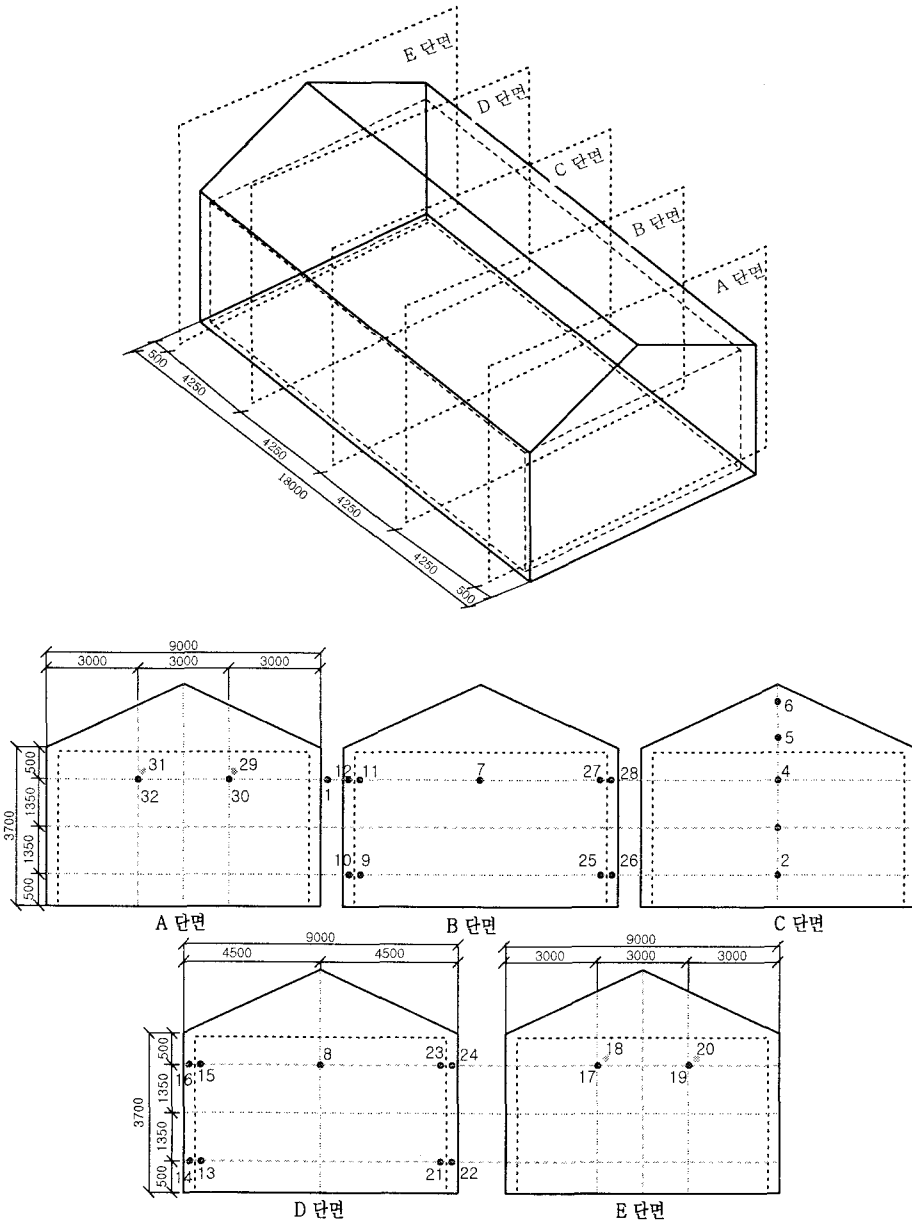
실험 목적인 복사단열시스템의 단열성능 평가를 위해 온실의 측벽면과 상부 천장부에 스크린형 단열재를 설치했는데, 이 스크린은 구동 모터에 의해 구동축이 회전하여 스크린을 견인하도록 구성된 전동식 개폐장치를 사용하였다. 스크린의 개폐장치는 0.5마력의 내습형 감속장치가 부착되었으며, 스크린의 처짐을 방지하기 위하여 지지로프를 설치하였다. 또한 전면부의 스크린 견인장치는 권취형 모터를 설치하여 상하 정지구간을 자유롭게 조절할 수 있도록 하였으며, 개폐모터와 연결된 제어장치는 예폭시로 물딩하고 방수커넥터로 연결하여 고온다습한 온실 환경에서도 원활히 작동되도록 하였다.

온실내의 실내온도와 외기온도를 측정 하기 위해 T-type 열전대를, 그리고 일사량 측정을 위하여 일사량계를, 난방부하 측정을 위한 유량계를 각각 온실의 난방시스템에 설치하였다. 각 위치에 설치된 측정센서에서 측정된 데이터는 HP Datascan 7320, 7020, 7100 Acquisition System을 통해 컴퓨터로 입력되도록 하였다. 측정센서는 각 위치에서 10초마다 데이터를 측정하고 6회, 즉 1분 동안 측정값의 평균을 컴퓨터에 기록하도록 프로그램 하였다.

#### 가) 온도측정

온실공간의 성능평가를 위해 주요 변수인 온도를 실내온도, 단열스크린 설치 후 천장부 온도, 스크린 설치에 따른 유리외 스크린사이의 중공층 공기온도, 스크린 안쪽 공기온도 등으로 나누어 측정하였으며, 온실을 길이방향으로 5등분하여 각 단면을 기준으로 측정위치를 선정하였다. 자세한 측정위치 및 측정내용은

[그림 3-7]과 <표 3-5>에 각각 나타나있다.



[그림 3-7] 실내 온도분포 측정을 위한 센서 위치도

<표 3-5> 온실 내 측정센서 번호 및 위치

센서 번호	센서 위치	센서 번호	센서 위치
1	외기온	24	단면 D 서측면 스크린바깥 상부
2	실 중앙 하부	25	단면 B 서측면 스크린안쪽 하부
3	실 중앙 중간	26	단면 B 서측면 스크린바깥 하부
4	실 중앙 상부	27	단면 B 서측면 스크린안쪽 상부
5	실 중앙 스크린 위	28	단면 B 서측면 스크린바깥 상부
6	실 중앙 지붕 밑	29	단면 A 서측면 스크린안쪽 상부
7	단면 B 중앙 상부	30	단면 A 서측면 스크린바깥 상부
8	단면 D 중앙 상부	31	단면 A 동측면 스크린안쪽 상부
9	단면 B 동측면 스크린안쪽 하부	32	단면 A 동측면 스크린바깥 상부
10	단면 B 동측면 스크린바깥 하부	33	유량계 A
11	단면 B 동측면 스크린안쪽 상부	34	유량계 B
12	단면 B 동측면 스크린바깥 상부	35	일사량
13	단면 D 동측면 스크린안쪽 하부	36	풍속
14	단면 D 동측면 스크린바깥 하부	37	FCU Group A Supply 수온
15	단면 D 동측면 스크린안쪽 상부	38	FCU Group A Return 수온
16	단면 D 동측면 스크린바깥 상부	39	FCU Group B Supply 수온
17	단면 E 동측면 스크린안쪽 상부	40	FCU Group B Return 수온
18	단면 E 동측면 스크린바깥 상부		
19	단면 E 서측면 스크린안쪽 상부	41	실내온도 평균
20	단면 E 서측면 스크린바깥 상부	42	천장부분 온도 평균
21	단면 D 서측면 스크린안쪽 하부	43	스크린바깥 공기층 평균온도
22	단면 D 서측면 스크린바깥 하부	44	스크린안쪽 평균온도
23	단면 D 서측면 스크린안쪽 상부	45	보일러 유입열량

총 측정점은 공기온도 측정(1~32번) 32포인트와 Fan-Coil Unit에 공급되는 온수와 회수되는 물의 온도를 측정하는 RTD 센서 4개로 구성되었으며, 41~44번은 각 방위별로 동일한 위치에 설치된 센서의 평균값을 기록하였다.

주요 측정원칙으로 실내 공기온도를 온실의 정중앙에서 수직높이에 따라 0.5 m, 1.85 m, 3.20 m 위치의 3곳에서 측정하고, B단면과 D단면에서 한 포인트씩을 더해 5곳을 측정하는 것으로 하였다. 또한 단열스크린의 설치에 따른 스크린 외

부의 온도변화를 측정하기 위해 온실의 박공 부분, 즉 단열스크린 위쪽에 온실의 정중앙 위치로부터 2곳을 선정하여 측정하였다. 단열시스템의 설치에 따른 외부-유리안쪽-스크린안쪽 단면에 대한 온도의 정밀 측정을 위해 동측면과 서측면에 각각 4쌍, 즉 총 8포인트의 온도측정을 실시하였고, 남측면과 북측면에는 각각 2쌍인 4포인트의 위치를 선정하여 측정을 실시하였다.

#### 나) 일사량

유리온실의 외부에 APPLY사의 PSP 일사량계를 설치하여 대전지역의 수평면 전 일사량을 측정하였다. 측정방식은 온도의 측정과 마찬가지로 10초에 한번씩 데이터를 측정하고, 데이터를 6번 측정한 값, 즉, 1분단위로 평균치를 모니터링 하도록 구성하였다. 이때 측정 단위는  $W/m^2$ 이다.

#### 다) 외기풍속

유리온실의 외부에 풍배형 풍향풍속계를 설치하여 옥외의 평균풍속 및 평균풍향을 측정하여 모니터링 하도록 구성하였다.

#### 라) 유량

보일러로부터 공급되는 온수의 양을 측정하기 위해 각 팬코일유닛으로 분배되기 이전의 주 배관으로부터 유량을 측정하였다. 초기에 설치한 팬코일유닛의 난방용량 부족으로 팬코일유닛을 추가 설치하였기 때문에 유량은 주요배관 두 곳으로 나누어 측정되었다. 유량계로는 OVAL KOREA사의 LS 5577-23모델이 사용되었다.

#### 마) 공급열량

난방이 필요한 시간에 투입된 열량의 정확한 산정을 위하여 난방이 시작되는 시점을 기점으로 팬코일유닛에 공급된 공급수와 열교환을 끝내고 돌아오는 회수수의 온도를 RTD센서를 통해 측정하고, 공급된 유량을 측정하여 컴퓨터 내부에서 계산에 의하여 계속 저장되도록 프로그램 하였다.



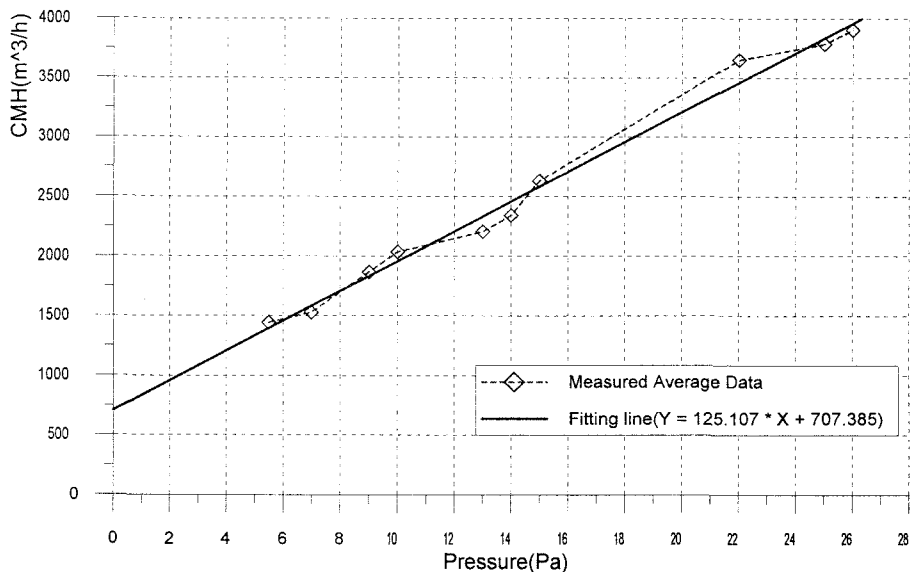
## 제 2 절 실험결과 및 분석

### 3.2.1 침기부하

실험 대상 온실이 외기에 직접 노출되어 있기 때문에, ASTM의 규정에 따라 외기온이 5℃이상이고 평균 풍속이 2m/sec를 넘지 않는 날을 택해 침기량 측정 실험을 하였다. <표 3.6>은 2일간 2회에 걸쳐 측정된 데이터를 평균하여 얻은 침기량을 나타낸 것이다. [그림 3-8]은 측정된 데이터를 기초하여 압력변화에 따른 침기량 변화를 나타낸 것으로, 압력이 변화함에 따라 소요풍량이 거의 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

<표 3.6> Blower Door법에 의한 침기량 측정 결과

Pressure(Pa)	5.5	7	9	10	13	14	15	22	25	26
CMH(m <sup>3</sup> /h)	1443.	1528.	1867.	2037.	2207.	2343.	2631.	3650.	3786.	3905.
	3	2	8	6	4	2	9	7	5	4



[그림 3-8] 유리온실에 대한 현장 기밀성능 측정결과

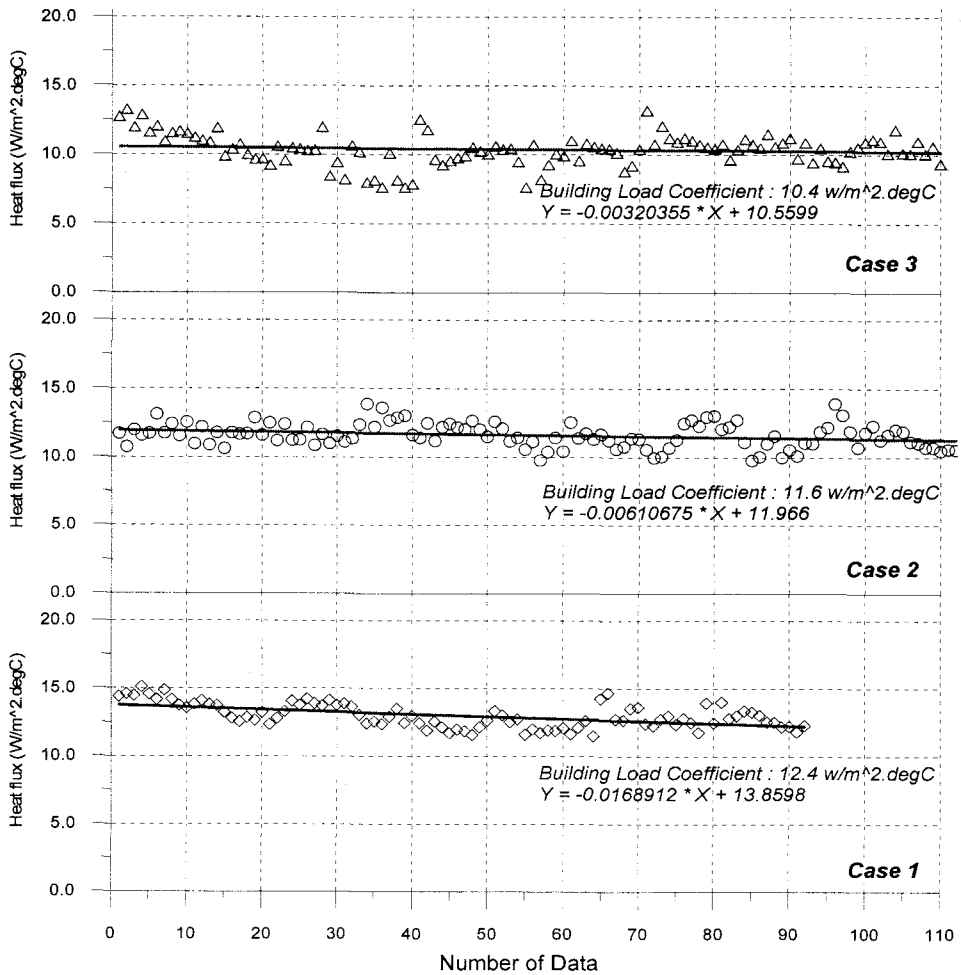
측정된 결과를 근거로 데이터 분석을 실시한 결과 실내 압력에 대한 내부 소요 풍량과의 관계는 대략  $Y=125.107 \times X + 707.385$ 의 보정식을 갖는 것으로 나타났다. 즉 ASHRAE 기준에 의하면 4 Pa일 때 실험대상 유리온실의 침기량은 투입되는 풍량이 약 1540 m<sup>3</sup>/h가 되는 것으로 나타난다. 따라서 4 Pa인 경우를 기준으로 할 때 유리온실이 가지는 침기부하 계산을 위한 시간당 환기회수는 1.84회인 것으로 계산된다.

### 3.2.2 건물 열손실계수(BLC)

자연조건하에 노출되어 있는 건물의 경우에 난방부하에 영향을 줄 수 있는 요소로 가장 민감하게 영향을 미치는 요인은 외기온을 꼽을 수 있으며, 이와 함께 풍속, 운량 등 여러 가지 기상요소에 의해 복합적으로 영향을 받고 있다. 그러나 실험사례인 유리온실의 경우에는 난방이 이루어지는 야간시간대에는 천공과의 복사 열교환이 건물의 난방부하에 커다란 영향을 미치게 되므로 천공의 운량에 따라 달라지는 천공온도(sky temperature)는 난방부하 평가에 주요한 기상변수로 작용되어 진다

이런 조건들을 감안해 보면 동일한 기간에 동일한 조건을 갖고 있는 대상에 대해 내부 변수를 달리 한 실험으로 보다 정확한 측정이 이루어 질 수 있으나, 본 연구에서는 대상건물의 제약된 조건하에서 실험을 진행하였으므로 외부 기상 조건이 비슷한 특정기간을 대상으로 분석을 행하여 상대비교가 될 수 있도록 하였다.

온실에서 단열시스템의 유무에 따른 건물 열손실계수를 구하기 위해 각 사례별로 약 7일간의 측정을 수행하였으며, 야간시간대를 대상으로 분석하였다. 실험 기간 중의 외기온과 실내설정온도와의 차이( $\Delta T$ )에 따른 에너지 투입량으로 부터 BLC를 구할 수 있었으며, 이를 각 사례별로 나누어 분석하였다.



[그림 3-9] 사례별 BLC Test 결과

[그림 3-9]는 각각의 사례에 대해 실험기간동안 측정된 에너지소비량을 근거로 BLC를 구하여 도식화한 그래프이다. Case 1의 경우에 평균 12.4 W/m<sup>2</sup>°C의 건물 열손실계수를 갖는 것으로 나타났으며, Case 2의 경우 11.6 W/m<sup>2</sup>°C, Case 3의 경우에는 10.4 W/m<sup>2</sup>°C의 열손실계수를 각각 갖는 것으로 나타났다. 이는 실험 대상 건물인 유리온실의 단열시스템 유형에 따른 결과로서, 무단열 경우인 Case 1과 비교하여 Case 2의 경우는 약 93%, Case 3의 경우는 약 83%에 해당한다. 이러한 수치로부터 Case 2와 Case 3 무단열의 경우와 비교하여 약 7% 및 17%정도

열성능이 우수한 사례로 평가될 수 있다. 따라서 [그림 3-9]의 결과로 단열시스템의 유형별 온실의 에너지 성능을 단적으로 판단할 수 있다. <표 3-7>은 외기온과 실내온도차에 의한 시간당 에너지 투입량과 그 비율을 보여준다.

<표 3-7> 외기온과의 온도차( $\Delta t$ )에 대한 에너지투입량 비교

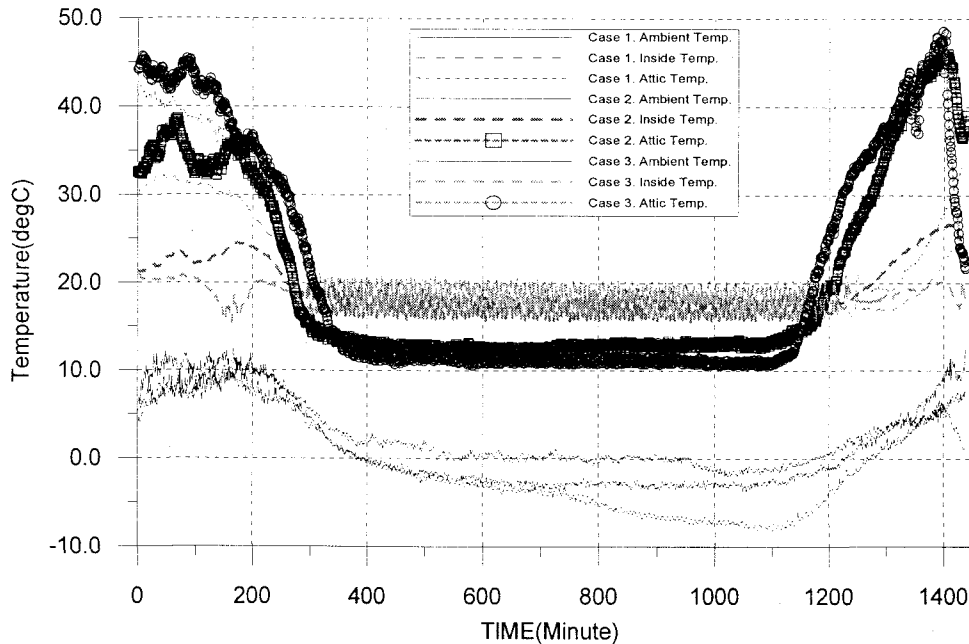
Case \ $\Delta t(^{\circ}\text{C})$		18	19	20	21	22	23	24	25	누적치
		18	19	20	21	22	23	24	25	
Case 1	열량(kW/h)	2,223	2,498	2,660	2,698	2,842	2,970	2,980	2,993	21,864
	비율(%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00
Case 2	열량(kW/h)	1,940	2,130	2,139	2,200	2,306	2,411	2,480	2,492	18,100
	비율(%)	87	85	80	81	80	81	83	83	82.50
Case 3	열량(kW/h)	1,408	1,729	1,813	1,980	2,241	2,293	2,393	2,410	16,270
	비율(%)	63	69	68	73	78	77	78	80	73.3

단열시스템의 설치에 따른 실험기간 중 야간시간대의 평균 투입열량을 살펴보면 건물 열손실계수의 비율과 비례하여 투입열량이 감소하지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 까닭은 건물 열손실계수는 실내외 온도차이에 의한 총 투입열량의 함수로 결정되는 반면, 실제 건물에서의 난방부하는 기온, 풍속, 풍향, 천공온도 등 상당히 다양한 변수에 의해 종합적으로 결정되기 때문인 것으로 판단된다. 즉 실내외의 온도차가 크지 않아도 풍속이 강하거나 풍향이 건물을 빗겨나가는 쪽으로 진행된다면 건물의 표면 열전달 계수를 증대시켜 열손실을 가중시키는 요인으로 작용하게 된다.

이런 상황에서 건물의 난방부하에 가장 큰 영향을 미치는 온도차에 의한 에너지 투입량을 살펴보면 Case 1에 대한 Case 2의 총 투입열량 비율은 약 83%, Case 3의 경우에는 약 73%인 것으로 각각 나타났다. 총 투입열량을 온도만의 함수로 하여 비율로 나타내면 무단열 시스템 사례에 대하여 표면 방사성능이 0.65인 복사단열시스템을 설치할 경우에 약 26%이상의 에너지 절감효과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

### 3.2.3 온실의 에너지성능

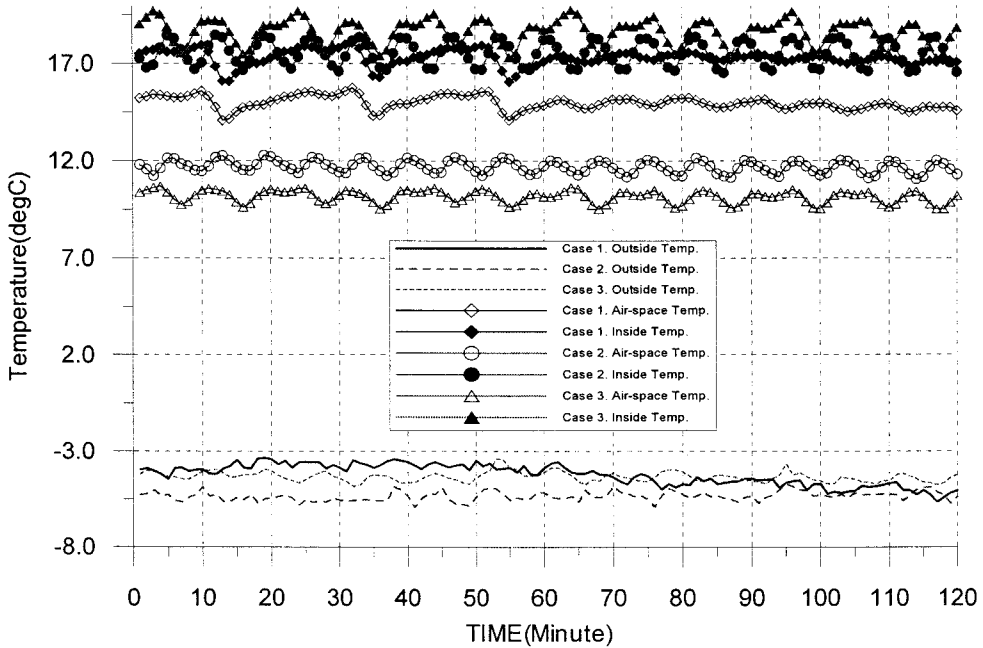
온실의 측정실험에서 각 성분별로 자세히 분석하기 위해 사례별로 외기 기상 조건이 비슷한 대표일을 택하여 해석하였다. 우선 온실 내부에서 단열시스템으로 구분된 내측과 단열시스템의 외측에서의 온도편차를 확인하기 위해 각 측벽과 실내평균온도, 천장부의 평균온도에 대한 분석을 수행하였다. [그림 3-10]은 사례별 대표일의 온도분포를 나타낸 것으로 단열스크린으로 구성된 실내와 온실의 내부이기는 하나 단열스크린의 영역이 아닌 천장부에 대한 온도분포를 보여주고 있다.



[그림 3-10] 사례별 대표일의 실내온도와 천장부 온도 비교

Case 1의 경우는 단열스크린이 설치되지 않은 관계로 실내부와 천장부의 야간 시간대의 온도분포는 동일하게 나타났으나, Case 2와 Case 3은 야간시간대에 천장부분의 온도가 12℃~14℃의 온도분포를 보이는 것으로 나타났다. 이는 단열시스템의 설치로 온실의 천장부분은 난방열량을 공급받지 못하고 자연상태에 그대

로 노출되어 있기 때문이다. Case 3이 Case 2보다 천장부근의 온도가 더 낮게 유지되는 것으로 나타났는데, 이는 실험기간의 외기상태가 비슷하다는 점을 고려하면 표면 방사율이 더 낮은 Case 3의 경우가 내부의 열을 더 적게 방출하기 때문인 것으로 판단된다. 즉 천장 공간의 바닥이 되는 단열스크린 윗면의 방사율에 따라 내부열량의 열전달 차이에 의한 결과라 할 수 있다.

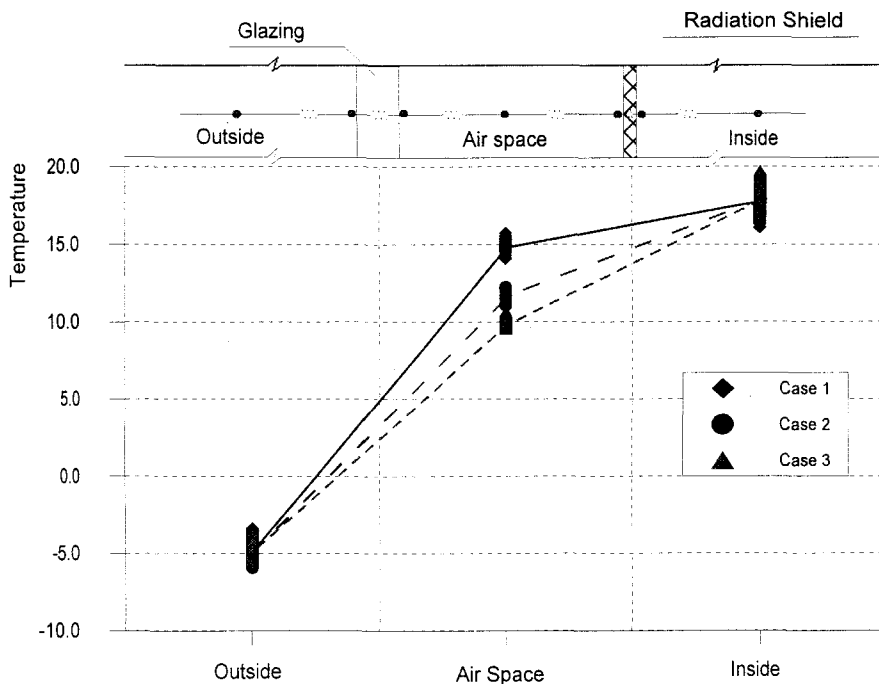


[그림 3-11] 사례별 외기온-공기층-실내온도 비교

[그림 3-11]은 각 사례의 대표일에서 난방이 소요되는 야간시간대 2시간을 선택해 외기온과 유리와 단열시스템 사이의 중공층, 단열시스템의 내부 100 mm 지점의 온도분포를 4면의 평균치로 도시한 그래프이다. 천장부분의 온도비교에서와 마찬가지로 실 내부의 온도는 설정온도인 18℃ 근처에서 주기적인 일정한 온도 분포를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 측벽의 중공층에서는 Case 1의 경우 평균 15℃로 실 내부와 약 3℃ 정도 차이를 보이고 있는데, 이는 온실 내측 유리 표면에서 전도와 대류에 의한 열교환으로 측벽 주위의 온도가 낮아진 것으로 해

석된다.

유리와 단열시스템 사이 중공층에서 Case 2는 약  $11.7^{\circ}\text{C}$ , Case 3은 약  $10.2^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 나타냈는데, 이는 천장의 경우와 마찬가지로 거의 동일한 온도조건임에도 불구하고 단열시스템의 표면 방사성능에 의해 중공층의 온도가 결정되기 때문이다. 이것은 상대적으로 고온을 유지하는 실내부 온도가 복사단열시스템으로 전달은 되나, 수열된 열량을 적게 방출하는 표면의 방사특성으로 중공층으로 열량이 적게 전달된 때문인 것으로 분석할 수 있다.



[그림 3-12] 사례별 내외부의 온도 프로파일

이와 같이 표면의 방사율에 따라 결정되는 중공층의 온도차이는 고온의 열에너지가 저온측으로 어떤 경로를 통해 전달되는지를 밝히는 중요한 단서가 된다. 즉 중공층의 온도가 낮으면 낮을수록 유리면과 교환되는 열량은 작아지며 따라서 유리의 외측 표면온도가 낮게 유지되므로 복사에 의한 열 교환량이 상대적으로 작게 나타나는 것이다. [그림 3-12]는 2시간 동안의 각 사례별 외기온, 중공

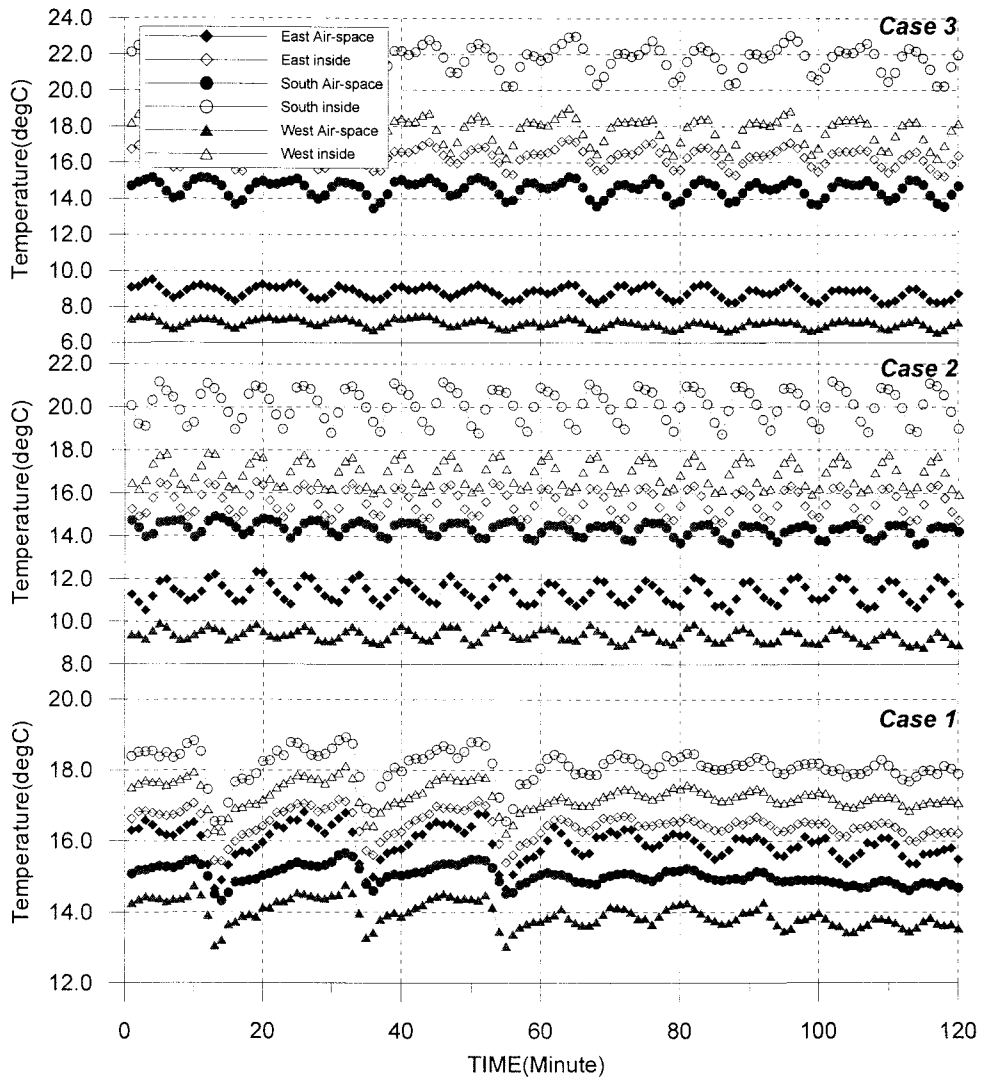
층, 단열시스템 내측의 온도를 나타낸 것으로, 각 절점을 선형으로 표시한 것이다.

실내온도 및 외기온이 거의 동일한 각 사례에서 표면 방사율이 낮은 단열시스템일수록 중공층 온도보다 낮게 나타나게 되는 것을 분명하게 알 수 있다. 중공층에서의 평균온도는 Case 2와 Case 3에서 약 1.5℃가량의 온도차를 나타내고 있는데, 이런 온도형태는 실험이 진행되는 전 기간에 대하여 동일한 경향을 보였다. 이와 같은 결과로 표면 방사율이 Case 3보다 더 낮은 경우에 중공층에서의 온도는 보다 더 낮게 유지되고, 유리 외표면에서의 복사 열 전달량은 더욱 작아질 것으로 유추할 수 있다.

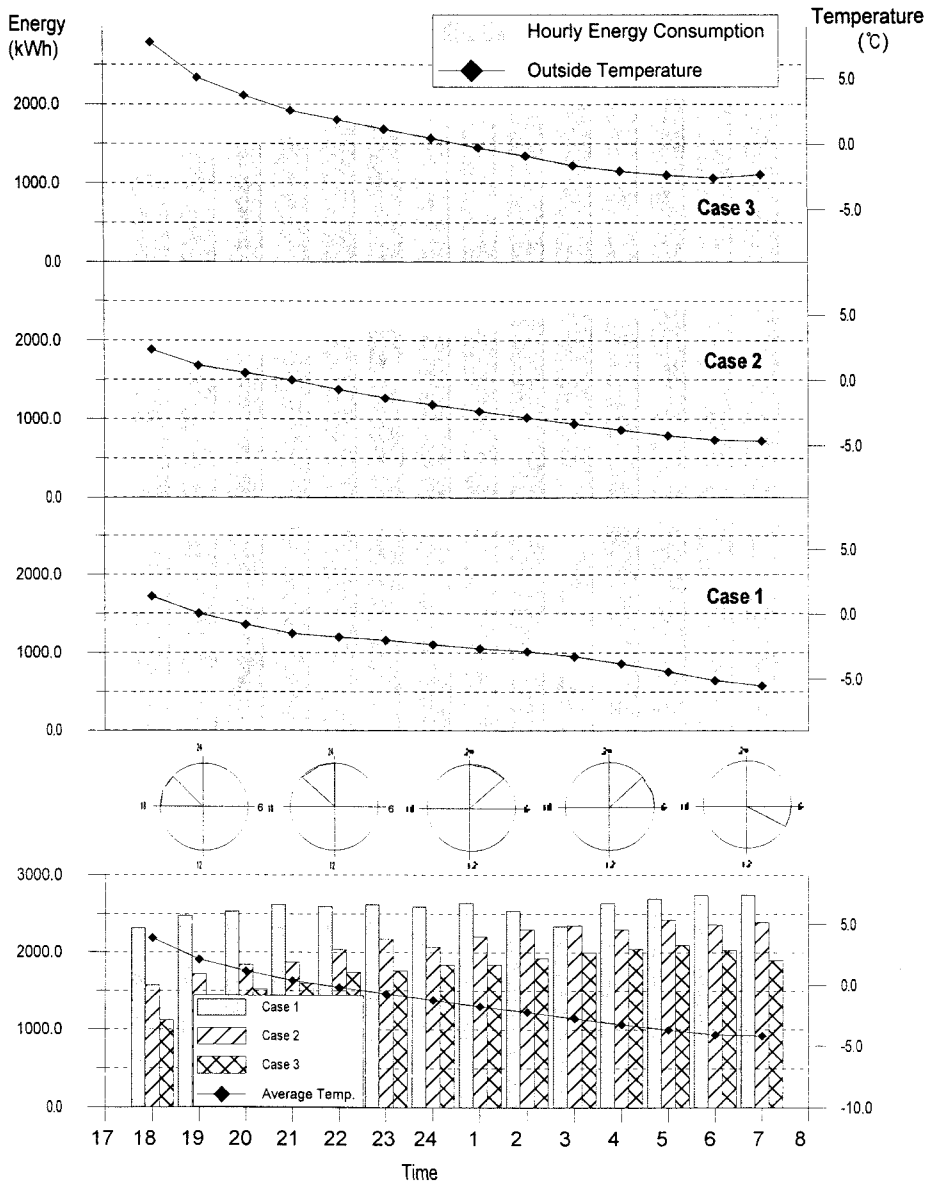
[그림 3-13]은 사례별 방위에 따른 온도분포, 즉 외기온, 중공층 및 단열시스템 내부의 온도분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것처럼 모든 사례에서 서측 벽면에서 가장 낮은 온도분포를 보이고 있으며 그 다음으로 동측벽에서 낮은 온도분포를 보이고 있는데, 이는 동측과 서측이 남측과 북측에 비해 면적이 2배정도 크기 때문에 자체의 기밀성능이 남측과 북측면에 비해 다소 떨어지기 때문으로 판단된다. 이런 현상은 모든 사례에서 동일한 양상을 보이고 있으므로 특별히 방위에 의한 영향은 아닌 것으로 분석되었다.

[그림 3-14]는 각 사례의 대표일을 기준으로 야간 시간대별 외기온과 투입열량을 비교 도식한 그림이다. 여기서도 Case 2는 Case 1에 비해 17% 정도 투입열량이 감소되는 것으로 나타났으며, Case 3에서도 마찬가지로 Case 1에 비해 약 26% 정도로 투입열량이 감소되는 효과가 있는 것으로 조사되었다.





[그림 3-13] 사례별 방위에 따른 온도분포 특성



[그림 3-14] 사례별 대표일의 시간대별 에너지 소비 비교

## 제 3 절 예비실험 해석모델

### 3.3.1 건물에너지해석 프로그램 ESP-r

건물의 연간 열부하량에 대한 각종 공조시스템별로의 연간에너지 소비량을 과학적으로 산정하기 위하여 간이 에너지 해석방법으로서 알려진 수정 BIN법에 의한 간이 에너지 방법등이 이용되고 있지만, 보다 정확한 예측을 위해서는 정밀해석 프로그램인 TRNSYS, DOE-2, 및 ESP-r과 같은 프로그램이 이용되고 있다.

이 중에서 ESP-r(Environmental Systems Performance : r은 research를 의미)는 영국의 스트리스 클라이드 대학의 ESRU(Energy Systems Research Unit)에서 유럽 건물 시뮬레이션 프로그램(European Reference Building Simulation Program)으로 개발한 것으로 국제적으로 공인된 프로그램이다. 이는 현재 세계적으로 60여개 이상의 대학, 연구소, 컨설팅회사에서 사용되고 있으며, 유리온실과 같이 복사에 의한 열손실이 큰 건물의 해석에 탁월한 해석능력을 가지고 있으므로 본 예비실험에서는 ESP-r 프로그램을 이용하여 유리온실을 해석하고자 한다.

ESP-r은 실제의 상황을 정밀하게 시뮬레이션하고, 그 정확도는 현행 국제적인 건물에너지 시뮬레이션 분야의 최고수준을 유지하고 있다. 건물 열에너지에 영향을 미치는 모든 요소를 동시에 고려할 수 있도록 되어있어, ESP-r은 설계자에게 건물의 형상, 외피, 설비와 제어방법 등의 결합에 의해 발생하는 복잡한 관계를 사전에 파악하게 해준다. 이 프로그램은 해석하고자 하는 건물의 기하학적 데이터, 건물의 구성재료, 내부환경 조건 및 운전관련 설정자료, 침기(infiltration)와 실간<sup>2</sup>의 공기이동 등 자료를 프로젝트 매니저라는 틀을 통해 입력한다. 또한 이렇게 입력된 자료는 기상조건 변화, 실내환경조건, 프랜트의 종류 및 제어의 방법 등과 연결되어 설정된 시간단위로 유한체적 및 에너지 보존의 법칙에 의거한 각종 에너지 방정식에 의해 해석된다.

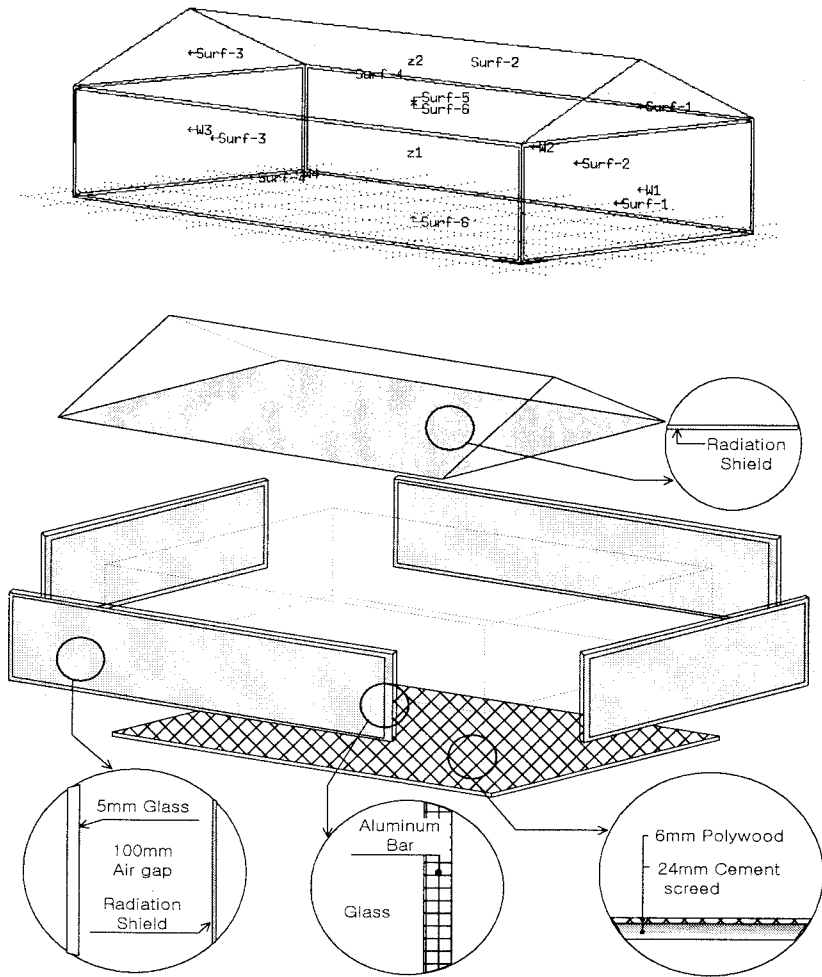
### 3.3.2 기본모델 및 기상자료

#### <기본모델>

복사단열시스템의 설치에 따른 정량적인 평가를 위해서는 해석모델의 형상 및 제반 영향요소를 가능한 단순화시키는 것이 바람직하다. 따라서 컴퓨터를 통한 시뮬레이션에서는 가능한 한 실제조건과 동일한 환경조건 및 열성능을 갖도록 제반 변수를 단순화하였다.

또한 해석을 위해 대상 온실 내부에는 인체나 조명 등 내부발열 에너지원이 전혀 없는 것으로 가정하였고, 실내로 투입된 에너지원은 태양에 의한 일사에너지와 설정조건을 만족하기 위해 소요되는 난방에너지만 고려되었다.

[그림 3-15]는 예비실험이 수행된 온실을 컴퓨터로 모델링한 것으로, 실내 공조는 단열시스템으로 적용된 공간에만 적용되며 해석의 편의를 위해 단열시스템이 적용되는 실내공간부분과 지붕공간, 즉 2개의 존으로 나누어 구성하였다. 평가모델은 실제시설을 근거로 9m×18m×3.7m 규모의 장방형으로 높이 2.25m의 박공지붕 형태로 되어있으며, 남북방향이 길이방향으로 위치해 있다. 현장실험에서 복사단열 시스템의 적용 시 난방공간으로 적용되는 부분은 아래쪽, 즉 Zone 1 이므로 시뮬레이션에서도 Zone 1에만 난방이 행해지는 것으로 고려하며, 천장부분, 즉 Zone 2의 하단에 위치한 단열면에 의해 복사 및 자연대류에 의한 에너지 공급이 이루어지는 것으로 고려된다.



[그림 3-15] 평가대상 기본모델의 존 구성과 부위별 상세

대상 온실은 외벽부분이 100 mm 알루미늄 프레임으로 골조를 형성하고 그 안 쪽으로 복층으로 구성된 열반사 단열시스템이 끼워져 있는 형태로 이루어졌으며, 지붕부분은 5 mm 유리로 구성되었으며 바닥은 24 mm의 시멘트 위에 6 mm의 Plywood로 마감되었다. <표 3-8>은 시뮬레이션에 적용된 평가대상 모델의 구성 재료별 열적 특성데이터를 보여주고 있다.

<표 3-8> 시뮬레이션에 적용된 대상 모델의 구성재료별 열적특성 데이터

	두께 (m)	열전도율 (W/m <sup>2</sup> ℃)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	비열 (J/kg℃)	표면 방사율	표면태양 흡수율	열관류율 (W/m <sup>2</sup> h℃)
Glass	0.005	1.05	2500	750	0.83	0.05	5.47
AL flame	0.01	210	2700	880	0.22	0.20	5.62
AL shield 1	0.001	210	2700	880	0.65	0.60	5.62
AL shield 2	0.001	210	2700	880	0.05	0.05	5.62
Kraft	0.001	0.56	350	1000	0.90	0.65	
Cement	0.024	1.40	2100	650	0.91	0.65	
plywood	0.006	0.15	560	2500	0.90	0.65	

각 방사특성을 가진 단열시스템에 대한 정량적인 평가를 위해 건물의 구성시스템의 외벽 및 천장부분을 변화시켰으며 실내의 환경조건은 실험과 동일한 조건으로 난방제어온도를 18℃로 설정하였다. 단열시스템 적용공간에 에너지의 공급방식은 실내 설정온도에 따라 해석공간의 평균 공기온도를 감지하여 필요시에 즉시 공기절점(ar point node)으로 열량을 투입하는 이상제어(ideal control) 방식을 적용하였다.

<기상자료>

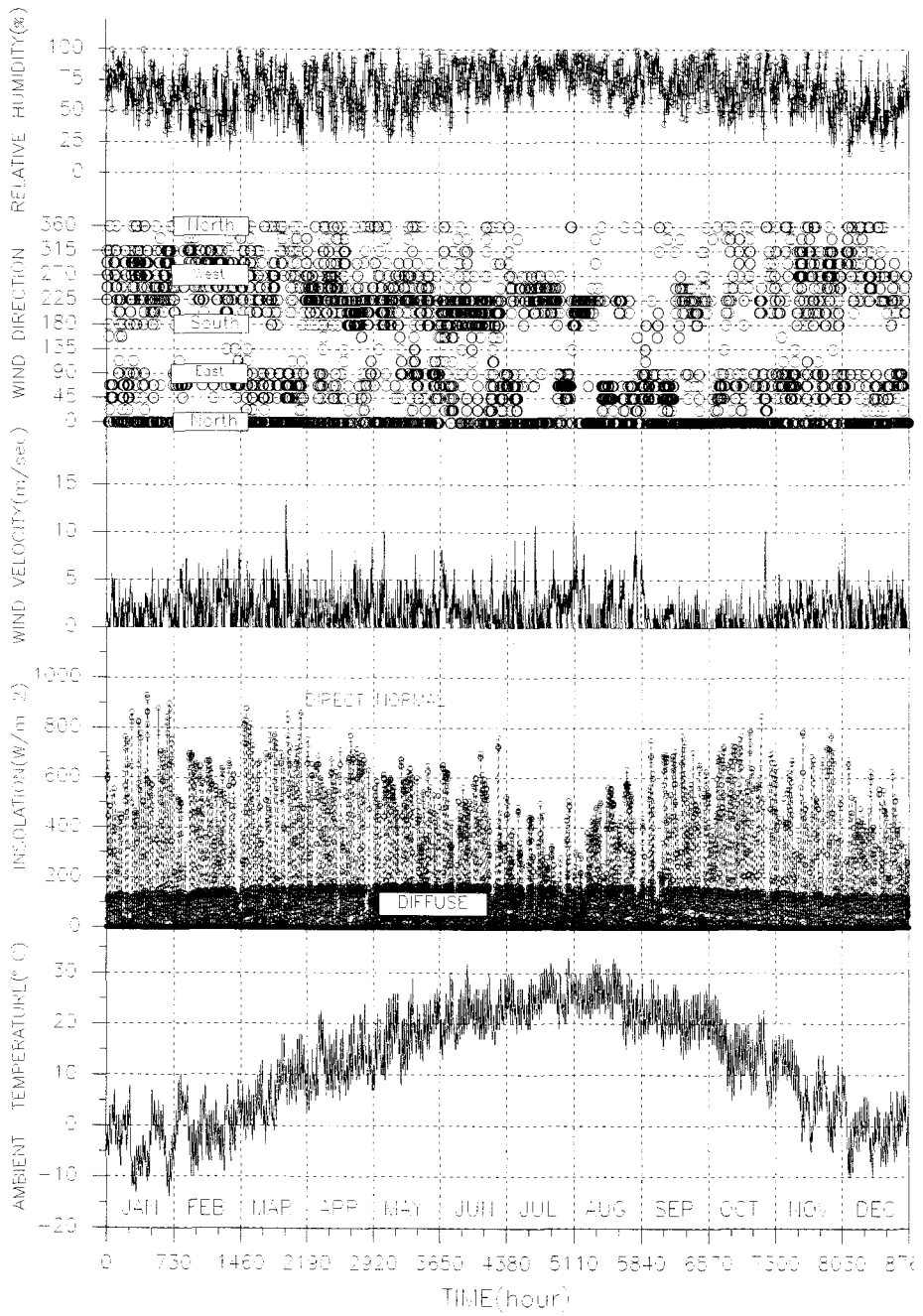
정밀계산을 위한 동적 상세 시뮬레이션 방식을 위해서는 일반적으로 ①외기 건구온도(dry bulb temperature), ②수평면 산란(천공)일사(diffuse horizontal insolation), ③법선면 직달일사(direct normal insolation) 또는 수평면 전일사량(global horizontal insolation), ④절대습도(absolute humidity) 또는 상대습도(relative humidity) 또는 습구온도(wet bulb temperature), ⑤풍향(wind direction), ⑥풍속(wind speed), ⑦운량(cloud cover) 등에 대한 1년간 데이터가 필요하다[19].

현재 국내에서 이용되고 있는 기상데이터들은 크게 공조장치의 용량을 결정하기 위한 최대 열부하 계산용 자료와 연간 에너지의 소비량 산정을 위한 기간 열

부하 계산용 자료로 구분되어 통계기간 및 표준화 방식에 따라 여러 가지 자료가 혼용되어 사용되고 있다[20]. 그러나 대부분의 자료가 통계기간이 짧고 표준화 작업이 제대로 이루어지지 못한 상태로 외국과 같이 지역별 기후를 대표할 수 있는 TMY나 TRY와 같은 자료가 구축되지 못하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 국내에 발표되고 일부 활용되고 있는 기상자료에 대한 평가 선행연구에 의하면 컴퓨터 시뮬레이션의 다양한 변수를 적용하기 위해서는 공조학회에서 발표된 표준기상데이터를 활용하는 것이 유효한 방법인 것으로 제안되었다. 따라서 본 연구에서는 온실의 에너지성능 및 열반사 단열시스템의 에너지성능 평가를 위해 1990년 공기조화 냉동공학회에서 발표한 서울지역의 시간별 기상데이터를 활용하였다. 공기조화 냉동공학회 데이터의 통계기간은 1974년에서 1983년까지 10년간이며, 일본의 공기조화 위생공학회가 제안한 방식으로 작성되어 HASP/ACLD 양식으로 만들어졌다.

본 연구에서는 ESP-r의 기상데이터 양식으로 변환하기 위해 공기조화 냉동공학회의 데이터를 기본자료로 구성양식을 수정하였으며, 이 과정에서 풍향을 360도 단위로, 절대습도를 상대습도로 전환하였다. [그림 3-16]은 공기조화 냉동공학회의 서울지역 시간별 기상데이터를 ESP-r의 기상데이터 양식으로 변환한 결과를 항목별로 도식한 것이다. 본 연구에서 수행된 온실 실험데이터와 시뮬레이션을 위한 모델링의 타당성을 평가하기 위해서는 실험이 수행된 2월 14일부터 3월 14일까지 한달간의 기상자료로 실측한 대전지역의 기상데이터를 수정 삽입하였다.

<표 3-9> 및 [그림 3-17]은 시간별 데이터를 이용하여 서울지역의 각 항목별 월별 대표값 데이터를 도출한 것이다. 서울지역의 연간 일사량 자연 분포를 살펴보면 월평균 수평면 전일사의 경우 5월에 4.24 kWh/m<sup>2</sup>day로 최고치를, 동절기인 12월에 1.66 kWh/m<sup>2</sup>day로 최저치를 나타내며, 7월에는 장마철의 영향으로 인해 일사량이 감소된 형태를 나타낸다.

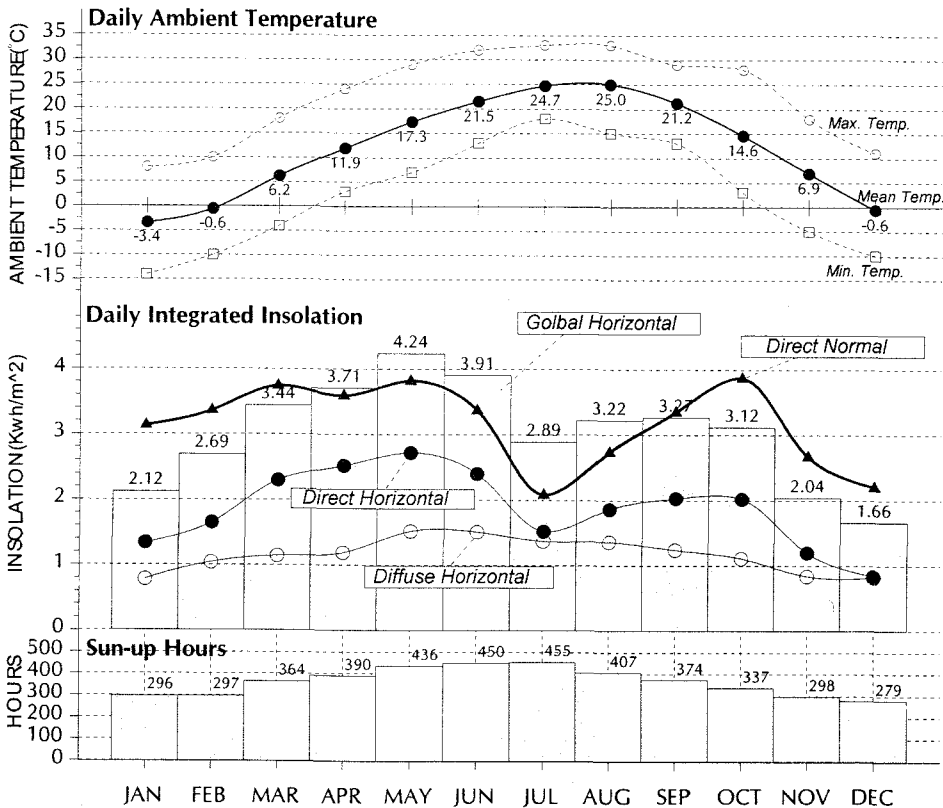


[그림 3-16] 시간별 기상자료 변환 결과(원자료 : 공조학회, 1990)



<표 3-9> 월별 기상자료 변환 결과 (원자료 : 공조학회, 1990)

	일사강도(KWh/m <sup>2</sup> )				외기온도(°C)		
	수평면산란	수평면직달	수평면 전	법선면 직달	월최저	월최고	월평균
1월	0.78	1.34	2.12	3.13	-14.0	8.0	-3.4
2월	1.04	1.65	2.69	3.36	-10.0	10.0	-0.6
3월	1.14	2.30	3.44	3.74	-4.0	18.0	6.2
4월	1.19	2.52	3.71	3.59	3.0	24.0	11.9
5월	1.52	2.72	4.24	3.82	7.0	29.0	17.3
6월	1.51	2.40	3.91	3.37	13.0	32.0	21.5
7월	1.37	1.52	2.89	2.08	18.0	33.0	24.7
8월	1.36	1.86	3.22	2.73	15.0	33.0	25.0
9월	1.24	2.03	3.27	3.35	13.0	29.0	21.2
10월	1.11	2.02	3.12	3.87	3.0	28.0	14.6
11월	0.84	1.20	2.04	2.67	-5.0	18.0	6.9
12월	0.82	0.84	1.66	2.20	-10.0	11.0	-0.6
연평균	1.16	1.87	3.03	3.16	2.42	22.75	12.06



[그림 3-17] 월별 일사량자료 변환결과 (원자료 : 공조학회, 1990)

법선면 직달일사량의 경우는 10월과 5월에 최고치를 나타내며, 동절기인 1월~3월에도 상대적으로 높은 일사강도를 나타낸다. 반면에 7월의 경우는 12월 보다 낮은 값을 나타내고 있다. [그림 3-16]에서 법선면 직달일사의 연중 시간별 분포를 살펴보면 최대치는 1월달에 나타나며, 3월과 10월에도 높은 일사강도를 보이거나 반면에 하절기인 7월과 8월의 일사강도는 매우 낮게 나타나고 있다. 수평면 산란일사 강도는 5월에 1.52 kWh/m<sup>2</sup>day를 정점으로 동절기로 갈수록 감소되어 1월에 0.78 kWh/m<sup>2</sup>day를 나타내나, 변화폭은 다른 일사성분에 비해 심하지 않으며 연중 거의 일정한 분포를 보이고 있다.

계산된 연평균 수평면 전 일사량은 3.03 kWh/m<sup>2</sup>day로 1982년부터 9년간 한국 에너지기술연구소와 중앙기상청이 실시한 최근 측정결과인 3.6 kWh/m<sup>2</sup>day와 비교할 때 약 0.6 kWh/m<sup>2</sup>day정도 낮게 나타났다. 이는 최근의 측정이 표준일사계의 교정작업으로 인해 측정 정밀도가 높아진 때문인데, 결과적으로 본 연구에서 활용한 일사데이터는 실제강도보다 다소 낮게 적용되었다고 볼 수 있다.

외기온의 경우 1월에 최저온도 -14℃를 기록하였으며, 최고온도는 33℃로 7월 및 8월에 기록되었다. 1월의 월평균 온도는 -3.4℃ 그리고 8월의 월평균 온도는 25℃로 나타났으며, 연평균 외기온은 12.1℃로 4월 및 10월의 월평균 기온과 비슷하였다. 연평균 외기온의 경우 중앙기상청에서 발표한 1961년~1990년까지 30년간 통계기간에 대한 서울지역의 연평균 외기온 값인 11.8℃와 비교할 때 0.3℃의 오차를 보이고 있지만 월평균값의 변화를 비교해 보면 거의 유사하게 일치하였다.

풍속의 경우 최대풍속은 3월달에 기록된 13.4 m/sec이며, 주로 2월에서 8월까지의 기간에 5 m/sec를 넘는 강풍의 빈도가 높았으며, 9월 및 10월은 상대적으로 풍속이 가장 낮게 나타났다. 연평균 풍속값은 1.72 m/sec로 나타났다. 상대습도의 경우는 동절기에 비해 하절기의 습도분포가 높게 나타났으며, 연평균 상대습도는 68%, 연중 최저습도는 15%로 각각 나타났다.

### 3.3.2 시뮬레이션 모델 보정

시뮬레이션을 통해 다양한 변수의 성능평가를 위해서는 기준이 되는 실제건물에 대한 해석모델의 물리적 타당성과 에너지 밸런스가 정확히 묘사되었을 때 비로소 신뢰할 수 있는 데이터를 얻을 수 있다. 따라서 해석모델이 자연조건하에서 생길 수 있는 다양한 변수에 대해 실제시설과 동일한 물리적 반응을 나타낼 수 있도록 상세한 묘사가 요구된다. 실제로 실험에 의해 실측된 데이터와 동일한 현상을 나타내는 모델을 구성하기란 불가능하며 실측데이터와 해석모델과의 오차를 최대한 줄이는 작업이 필요하다. 또한 외부 부하에 대해 해석모델이 적절하게 변화하는 모델을 구현하기 위해서는 실측된 실험데이터를 근거로 하여 해석모델이 가지는 구성변수들을 조정하고 수정하는 모델의 보정 과정이 필요하다. 즉 건물에너지 성능을 평가하기 위한 도구로 사용되는 거의 모든 프로그램은 열량공급을 위한 기기의 효율을 100%로 산정하여 계산되어지기 때문에 실제와 동일하게 해석모델을 입력하여도 총 소요열량에 있어서 오차는 생기게 된다. 따라서 해석모델에서는 열량공급을 위한 기기의 효율을 84%로 고려하여 계산하였다.

온실의 실측실험이 진행된 무단열 조건의 사례와 방사율이 0.65를 가지는 복사단열시스템을 설치하였을 경우에 2가지의 사례에 대하여 각각 약 4일간 및 8일간의 데이터를 근거로 하여 모델을 보정하였다.

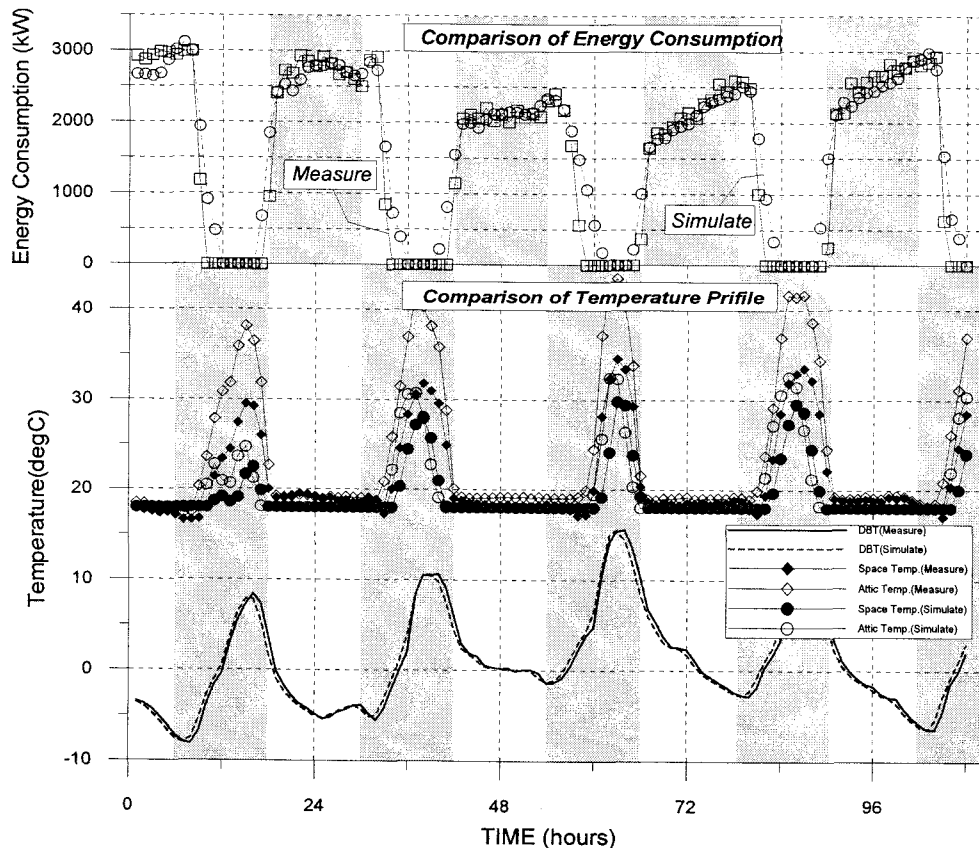
해석모델의 타당성 검증을 위해 4가지 성능변수를 기준으로 하여 비교하였는데, <표 3-10>은 단열조건에 따른 보정 기간 중 실내와 천장부의 평균온도, 그리고 시간당 투입열량, BLC등을 보여준다.

<표 3-10> 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터의 환경변수 비교

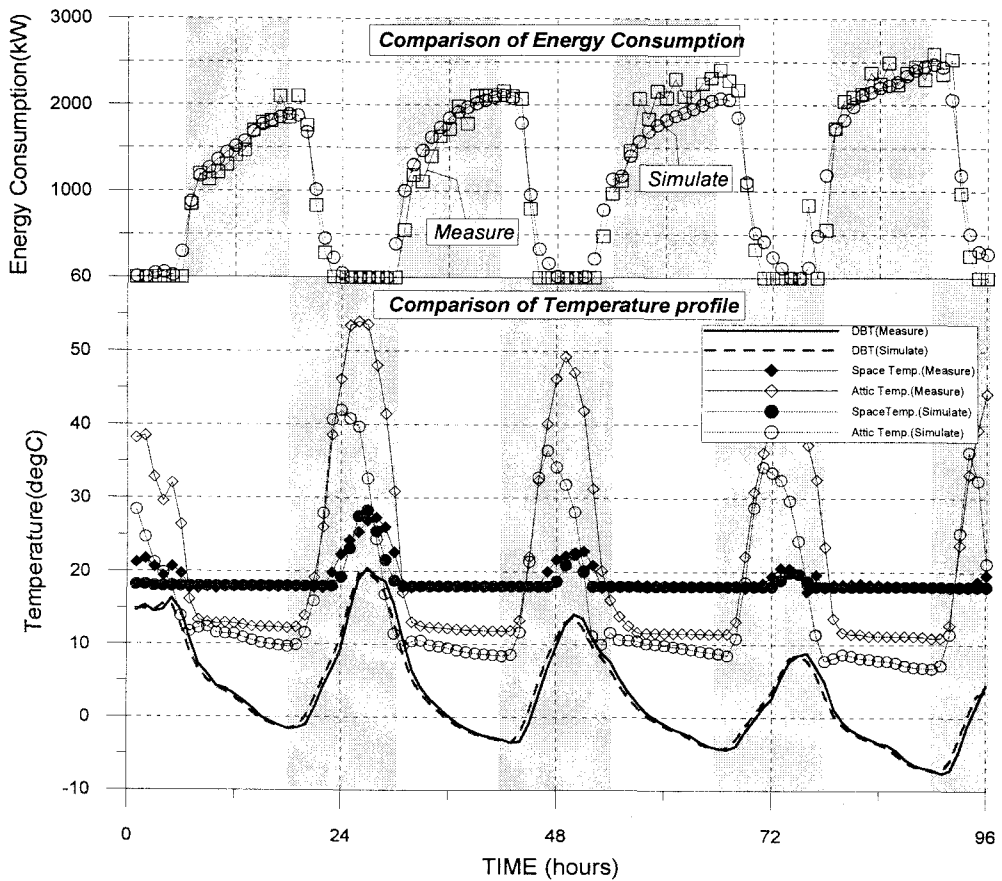
구 분		실내온도(℃)		천장부 온도(℃)		BLC (W/m <sup>2</sup> ℃)	시간당 투입열량 (kWh)
		주간	야간	주간	야간		
무단열조 건	실험치	20.5	18.6	23.2	19.1	12.4	2,410.7
	모델링	19.0	18.2	19.6	18.0	12.4	2,386.2
단열스크 린조건	실험치	19.1	18.1	22.8	13.4	10.4	1,638.6
	모델링	18.7	18.0	16.7	10.3	10.2	1,629.8

무단열 조건의 실내 평균온도를 비교해 보면 일사에 의한 온도변화의 폭이 커지는 주간에 실험데이터에서는 20.5°C로 해석모델의 경우보다 약 1.5°C정도 높게 나타났으며, 야간의 경우에는 18.6°C로 해석모델과 비교하여 0.4°C의 편차로 상당히 근사한 온도조건을 보이고 있었다. 온실의 건물 열손실계수는 실험데이터와 해석모델 모두 12.4 W/m<sup>2</sup>°C로 나타나 부하에 대한 열성능이 동일하게 묘사된 것으로 나타났다.

· 외기 부하에 대한 시간당 평균 소요에너지는 실험 및 해석결과 2,410 kWh, 2,386 kWh로 각각 나타났는데, 이는 약 1%의 오차를 보이고 있어 물리적으로 해석모델이 실제시설과 상당히 흡사하게 모델링 되었음을 알 수 있었다.



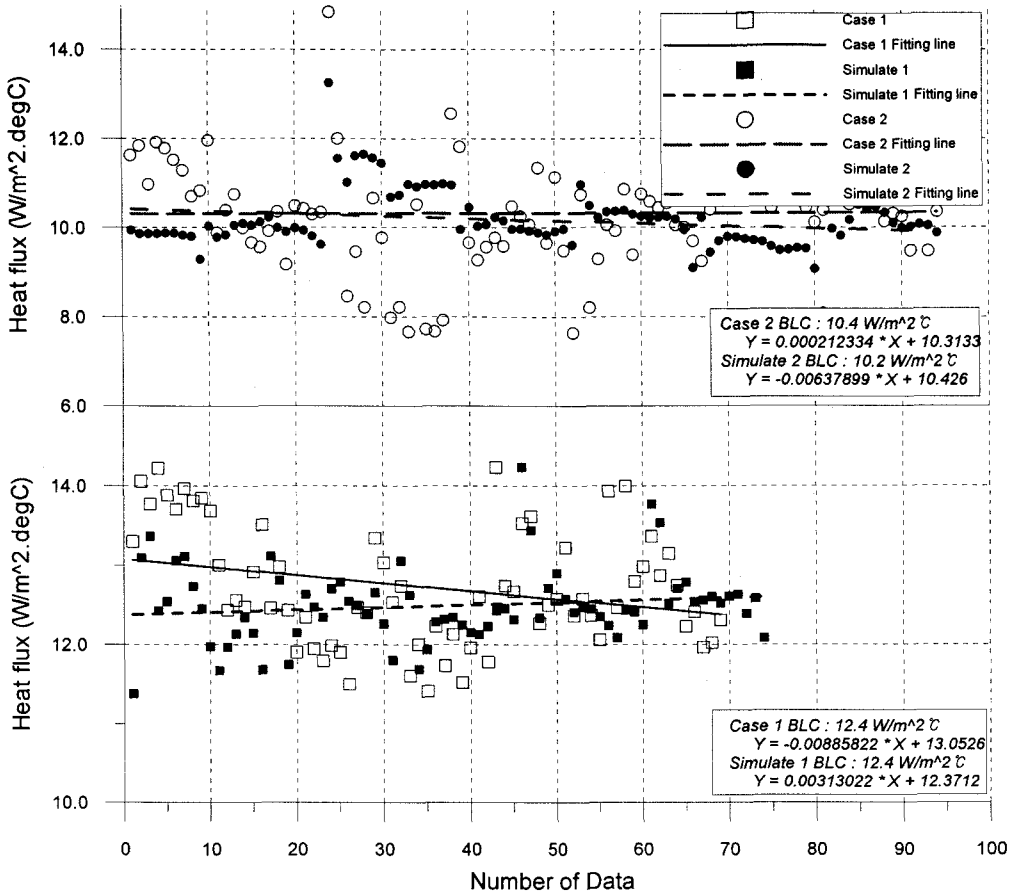
[그림 3-18] 모델보정을 위한 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 환경조건 비교 (무단열 조건)



[그림 3-19] 모델 보정을 위한 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 환경조건 비교  
(단열스크린 설치)

[그림 3-18]과 [그림 3-19]는 무단열 조건과 단열스크린 설치조건 하에서의 실험 및 해석결과와 시간에 따른 환경변수의 변이를 나타낸 것이다.

방사율이 0.65인 복사단열시스템을 설치한 사례 비교에서 실내 평균온도는 각각 주간에 0.4℃, 야간에 0.1℃의 오차를 보이고 있어 무단열 조건의 경우보다 더욱 근접하여 반응하고 있는 것으로 나타났다. 또한 실험 및 해석결과 BLC는 각각 10.4 W/m<sup>2</sup>℃와 10.2 W/m<sup>2</sup>℃로 거의 동일한 열성능을 갖는 것으로 나타났으며, 시간당 평균 에너지 투입량은 각각 1,639 kWh와 1,630 kWh로 약 0.5%의 오차를 갖는 것으로 나타났다.



[그림 3-20] 모델 보정을 위한 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 BLC 비교

[그림 3-20]은 무단열 시스템과 복사단열시스템의 경우에 측정된 실측데이터와 해석결과 얻어진 BLC 값을 비교를 보여준다. 두가지 경우 모두 건물이 가지는 열성능 평균치는 동일하게 나타났으나, 실측데이터의 경우에 선형 보정 라인의 기울기가 더 가파르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 해석모델의 경우 부하 발생 시 발생부하에 해당하는 필요열량이 곧바로 공기로 전달되는 이상제어 방식을 취하고 있는데 반하여, 실제시설의 경우는 부하발생 시 필요한 부하만큼의 열량이 즉시 공급되지 않고 기기가 가동될 때 발생하는 초기 가동부하 등의 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 선형 보정라인의 경우 직선으로 표현되는 특성 때문에 나타나는 차이이므로 순간치에 대한 비교가 아닌 전체에 대한 평균 열성

능을 취할 경우 실험값과 해석모델 결과는 거의 동일한 열성능을 갖는 것으로 나타났다.

## 제 4 절 유리온실 열반사 단열시스템 성능예측

내부 방사성능이 다른 각각의 복사단열시스템에 대한 개별적 성능 및 방사율이 열전달에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 5가지의 사례를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. Case 1과 Case 3은 예비실험이 수행된 온실의 성능평가 실험에서 수행된 사례를 근거로 하여 기본모델을 구성하였으며, Case 2는 열반사 성능이 거의 없는 크라프트지를 이용한 단열시스템을 구현하여 공기층에 의한 영향을 분석하였다. 또한 Case 4와 Case 5는 각각 저방사 특성을 가진 표면이 각각 저온측을 면하고 있는 시스템 및 양면이 모두 저방사 특성을 가진 시스템에 대한 평가를 위해 구성하였다.

<표 3-11> 에너지성능 평가를 위한 시뮬레이션 사례 구성

Case	측벽 및 천장구성	지붕 구성	측벽 표면 방사율 (고온측부터)			
Case 1		5mm Single Glass			0.83	0.83
Case 2			0.92	0.92	0.83	0.83
Case 3			0.65	0.65	0.83	0.83
Case 4			0.92	0.05	0.83	0.83
Case 5			0.05	0.05	0.83	0.83

<표 3-11>은 시뮬레이션을 위한 해석모델의 외벽 구성 체계와 유형별 표면 방사율을 각각 보여주고 있다. 또한 각각의 사례에 대하여 기상조건과 환경 설정 조건을 동일하게 입력하여 순수한 복사단열 유형에 대한 열성능 영향을 분석하고자 하였으며, 온실이 가지는 침기량 및 각 벽체의 열관류 성능은 예비실험에서 각각 수행된 침기성능 측정실험 및 열관류 성능 측정실험으로부터 조사된 실측

데이터에 근거하여 입력변수로 활용하였으며 <표 3-12>는 냉난방 설정온도, 침기량, 열관류율, 보일러 용량 등 시뮬레이션에 적용된 설정 조건을 보여주고 있다.

<표 3-12> 시뮬레이션을 위한 주요 설정조건

변 수	설정조건	변 수	설정조건	
난방온도(℃)	18.0	열관류율 (W/m <sup>2</sup> h℃)	Case 1	5.44
냉방온도(℃)	-		Case 2	3.84
침기량(ACH)	1.84		Case 3	3.65
보일러용량(kW)	80.0		Case 4	1.97
Control	Ideal control		Case 5	1.94

연중 난방을 필요로 하는 난방기간은 정확하게 날짜로 구분할 수 없지만 본 연구에서는 1월~4월, 10월~12월까지 7개월간을 난방기간으로 설정하여 분석을 수행하였다. 설정된 난방기간은 총 5,088시간이며, 해당기간동안 실내 온도조건이 설정온도 이하로 내려가 난방부하가 발생하는 시간을 난방이 필요한 시간으로 판단하였다. <표 3-13>은 총 시뮬레이션 기간동안 투입된 총열량과 난방소요시간, 난방소요 기간 중 평균투입열량으로 구분하여 보여주고 있다.

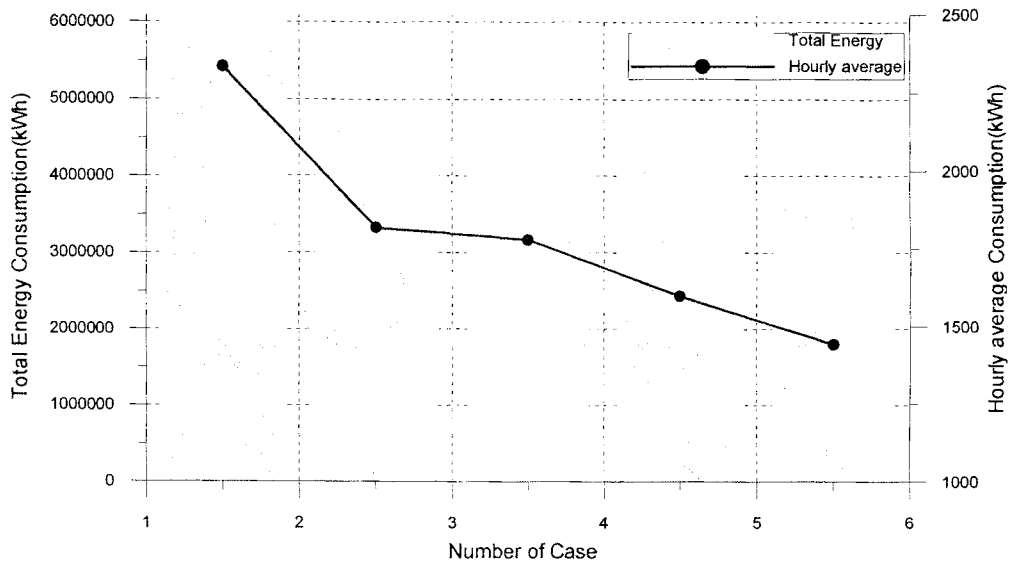
<표 3-13> 사례별 난방기간 중 투입열량 비교

	시뮬레이션시간	총 투입 열량(kWh)	전체평균 (kWh)	난방소요 시간	난방필요시간 평균 투입열량 (kWh/hr)	비율 (%)
Case 1	5,088	6,014,613	2,333.9	4,415	2689.4	100
Case 2	5,088	4,684,252	1,817.3	4,566	2025.9	75
Case 3	5,088	4,587,224	1,779.6	4,557	1987.7	74
Case 4	5,088	4,122,194	1,599.7	4,417	1842.5	69
Case 5	5,088	3,719,517	1,443.4	4,383	1675.6	62

표에서 보면 Case 1의 경우에 난방을 필요로 하는 난방소요시간은 Case 5 다음으로 적은 것으로 나타났는데, 이는 Case 1의 경우 상대적으로 다른 사례에 비



해 열용량이 작기 때문에 주간의 일사에너지 수열에 의해 실내의 온도조건이 급변하기 때문인 것으로 분석되었다. 난방소요시간이 상대적으로 작기는 하나 야간의 기상변화에 대한 열손실이 커져 난방기간 중 총 투입에너지는 6,014,600 kWh로 가장 많은 것으로 나타났다. [그림 3-22]는 난방기간중 투입된 총 에너지량과 이를 시간별 평균 소모 에너지량으로 구분하여 표현한 그래프이다.



[그림 3-21] 난방기간 중 사례별 총 투입열량 및 평균열량 비교

Case 1을 제외한 다른 사례에서는 벽체가 가지는 열관류 성능이 작아짐에 따라 점차 난방소요시간도 작아지는 것으로 나타났다. 난방을 위한 열량의 투입은 외기온과 실내온도의 차이에 의해 결정되는 요인이기는 하나 이를 정량적으로 분석하기 위해서 각 사례에 대해 난방기간 중 총 투입된 열량을 난방소요시간에 대한 평균값으로 분석할 필요가 있다. 따라서 시뮬레이션된 결과를 근거로 사례별 난방소요시간에 대한 평균 투입열량을 비교해 보면 Case 1을 기준으로 할 때 Case 2는 25%, Case 3은 26%의 에너지 절감효과가 있는 것으로 분석되는데, 이는 예측실험 데이터와도 일치한다. 또한 Case 4는 31%, Case 5는 38%까지 절감이 가능한 것으로 분석되었는데, 이를 총 투입열량으로 나타내면 각각 1,892,400 kWh, 2,295,100 kWh의 에너지 절감효과를 보인다. 이는 해석모델의 단위면적당

11,68 kWh/m<sup>2</sup>, 14,17 kWh/m<sup>2</sup>의 에너지 절감이 가능한 것을 의미하는 것이다.

따라서 단열시스템이 설치되지 않은 Case 1을 기준으로 각각의 사례에서 보여지는 에너지 절감량은 공기층을 포함한 복사단열시스템의 설치에 따른 열전달 차단에 의한 영향에 기인한 것으로 복사단열시스템의 설치로 25%~38%까지의 에너지 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

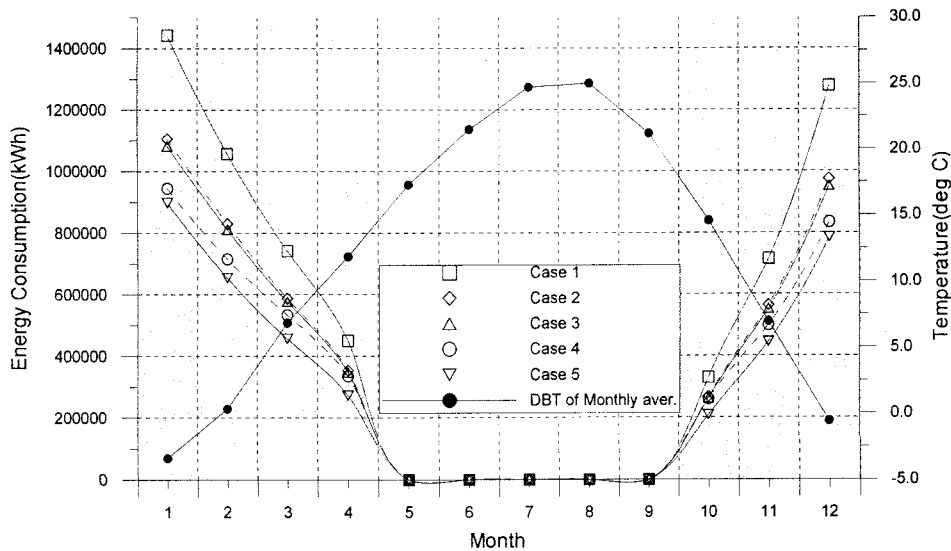
Case 2와 Case 3에서 보면 방사율이 27%이상 차이가 있음에도 불구하고 거의 동일한 난방소요시간 및 투입열량을 보이고 있는데, 이러한 결과는 본 보고서 2장의 방사능 측정 및 분석에서 언급한 바와 같이 저방사 특성에 대한 열성능의 효과는 방사율이 0.25이하의 특성을 유지할 때 보다 큰 효과를 나타낼 수 있음을 보여준 결과라 할 수 있다. 즉 표면 방사율이 0.92인 크라프트지를 사용한 시스템과 표면 방사율이 0.65인 재료를 사용한 단열시스템에 대한 단열성능은 순수한 방사율에 따른 열전달 감소효과라고 하기보다는 복사단열시스템을 구현하기 위해 필연적으로 요구되는 공기층의 설치로 인한 열전도성능의 차단에 의한 효과가 더 큰 요인이라 할 수 있다. 따라서 기존의 농업용 온실 등에 열반사 단열재로 적용되고 있는 재료의 방사성능을 기준으로 구성한 Case 3의 경우에 단열 공기층의 형성으로 나타난 열전달 저감 현상으로 생각되며, 복사 차단에 의한 단열효과를 구현을 위해서는 표면방사성능이 0.25 이하인 재료로 시스템을 구성해야 효율적인 것으로 판단된다.

<표 3-14>와 [그림 3-23]은 난방기간 중 월별 총 열량투입 및 난방필요 시간당 평균열량을 외기온 변화에 대해 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있지만 Case 2와 Case 3은 Case 1과 비교할 때 하나의 그룹을 형성하며 상당히 절감된 에너지 성능을 보이거나, Case 4와 Case 5 보다는 낮은 에너지성능을 보인다.

이는 난방기간 전체에 대한 분석에서도 나타난 결과이지만 복사단열시스템을 구성하는 재료 표면의 저방사 특성에 의한 효과로 분석된다. 또한 월별 소요열량 분석에서 추론할 수 있는 내용으로는 외기온과 실내온도와의 차이가 크면 클수록 복사차단에 의한 단열효과가 상당히 향상되는 것으로 나타났다.

<표 3-14> 난방기간 중 사례별 월별소요열량 및 월평균 소요열량 비교

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
외기온(°C)		-3.37	0.34	6.84	11.88	17.3	21.5	24.7	25	21.2	14.59	6.94	-0.59
case 1	총열량	1,442,229	1,056,640	741,744	450,354	0	0	0	0	0	330,544	715,877	1,277,223
	월평균	1,938.5	1,572.4	996.9	625.5	0	0	0	0	0	444.3	994.3	1,716.7
case 2	총열량	1,105,672	830,152	587,757	354,102	0	0	0	0	0	268,492	564,019	974,056
	월평균	1,486.1	1,235.3	789.9	491.8	0	0	0	0	0	360.8	783.4	1,309.2
case 3	총열량	1,082,221	811,431	577,171	348,577	0	0	0	0	0	263,607	552,693	951,521
	월평균	1,454.6	1,207.5	775.8	484.1	0	0	0	0	0	354.3	767.7	1,278.9
case 4	총열량	944,157	715,630	533,147	335,901	0	0	0	0	0	260,207	499,485	833,664
	월평균	1,269	1,064.9	716.6	466.5	0	0	0	0	0	349.7	692.8	1,122
case 5	총열량	897,516	654,358	456,506	273,382	0	0	0	0	0	208,212	444,913	784,627
	월평균	1,206.3	973.7	613.6	379.7	0	0	0	0	0	279.9	617.9	1,054.6



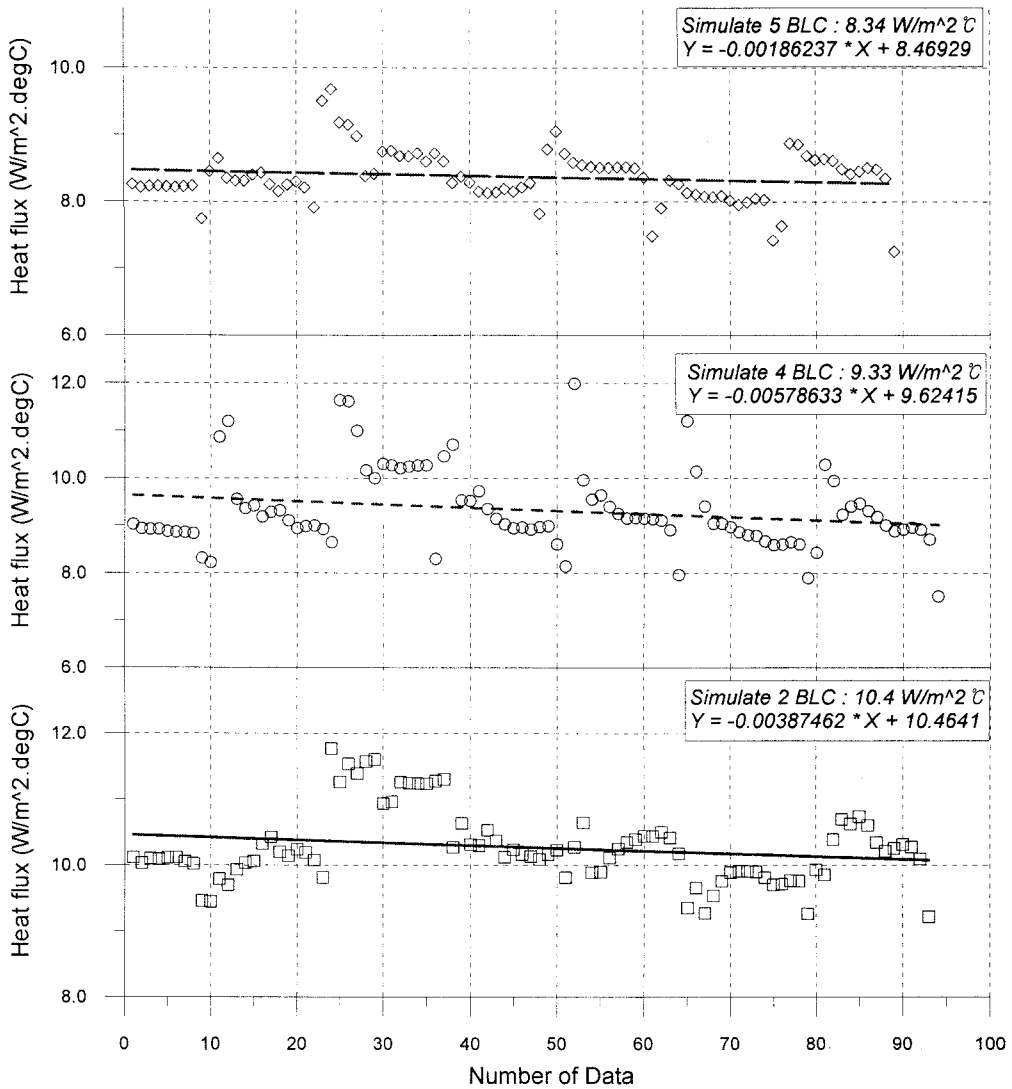
[그림 3-22] 난방기간 중 월평균 소요열량 및 월평균 건구온도

즉, 열전달 모드에서 복사에 의한 부분은 서로 마주보고 있는 표면 또는 지면, 천공 등과의 온도차에 의해 열교환이 진행되므로 마주 면하고 있는 공간의 온도가 일정하다면 복사를 행하는 표면의 온도에 의해 열전달량이 결정된다. 따라서 실내 측으로부터 복사단열재에 전달되는 열에너지를 많이 흡수하는 재료가 상대적으로 많은 복사열전달이 이루어진다고 할 수 있다. 그러므로 표면의 방사율이 낮은 재료일수록 전달되는 열을 대부분 반사하고 최소한의 열에너지만 재료로 흡수하게 되기 때문에 저방사 특성을 가진 재료일수록 표면에서 낮은 온도분포를 나타내게 되고 결과적으로 반대 면으로의 복사 열전달량도 작아지게 된다. 이러한 현상은 본 보고서 2장의 열관류 성능 측정실험에서 얻은 표면온도 측정값으로부터도 동일한 결과를 확인할 수 있다.

IEA(International Energy Agency)에 의하면 건물의 열성능을 판단하기 위한 데이터로 5일~10일 정도의 실측데이터를 이용하여 해석할 수 있는 것으로 제시되었기 때문에 본 연구에서는 온실의 실험기간과 동일한 7일간의 데이터를 사례에 대하여 도출 분석하였다.

해석모델의 열성능을 정량적으로 평가할 수 있는 지표로서 각 사례에 대한 건물 열손실계수를 도출하여 분석한 결과는 [그림 3-24]에 나타났다. Case 1과 Case 3에 대한 건물 열손실계수는 [그림 3-20]에 자세히 나타냈으므로 Case 2, Case 4, Case 5에 대한 분석치만 표시하였다. 즉 그림에서 Case 2가 BLC는  $10.4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , Case 4는  $9.33 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , Case 5가  $8.34 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 인 것으로 각각 나타났다. 이는 무단열 사례인 Case 1과 비교하여 볼 때 Case 4은 약 25%, Case 5는 약 33% 정도 더 우수한 성능을 나타냈다.

BLC의 평가에서 그래프에서 선형보정을 하기 위한 Fitting line의 오차율은 10% 이내였다. 데이터는 실측 데이터와의 일관성을 유지하기 위해 난방부하가 발생하는 기간을 기준으로 분석하였으며 주야간을 모두 포함한 건물 열손실계수를 구하면 좀 더 낮아질 것으로 판단된다.



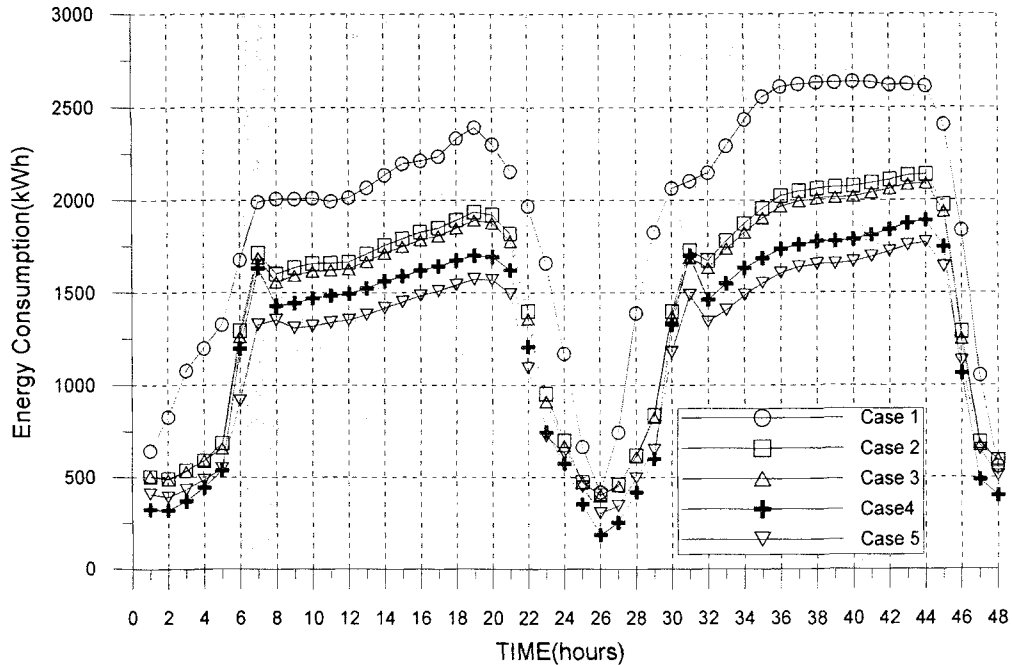
[그림 3-23] 사례별 BLC 평가

시뮬레이션 된 각각의 사례에 대하여 보다 세밀한 분석을 수행하기 위해 대표 일의 개념을 도입하였다. 각 사례에서 사용된 기상자료는 동일하므로 동절기를 대표할 수 있는 48시간(1월5일 12:00~1월7일 12:00)을 선정하였으며, 해당기간 중 투입된 열량과 실내 환경조건, 그리고 난방부하 등을 요인별로 분석하였다.

선정된 대표기간동안 기상자료에 의하면 외기 기상조건은 약 70% 담천공의 상

태로 건구온도는 평균  $-2.40^{\circ}\text{C}$ , 평균 풍속은  $1.05\text{ m/sec}$ 로 주로 6일 오후부터 야간에 걸쳐 많은 빈도를 나타냈다. 주간에는 실내온도에 영향을 줄 수 있는 직달일사량 및 확산일사량은 각각  $92.4\text{ W/m}^2$ ,  $35.2\text{ W/m}^2$ 였으며 평균 습도는 78%였다.

[그림 3-25]는 대표기간 중 사례별 투입된 열량을 시간별로 나타낸 그래프이다.



[그림 3-24] 사례별 대표일의 투입열량 비교

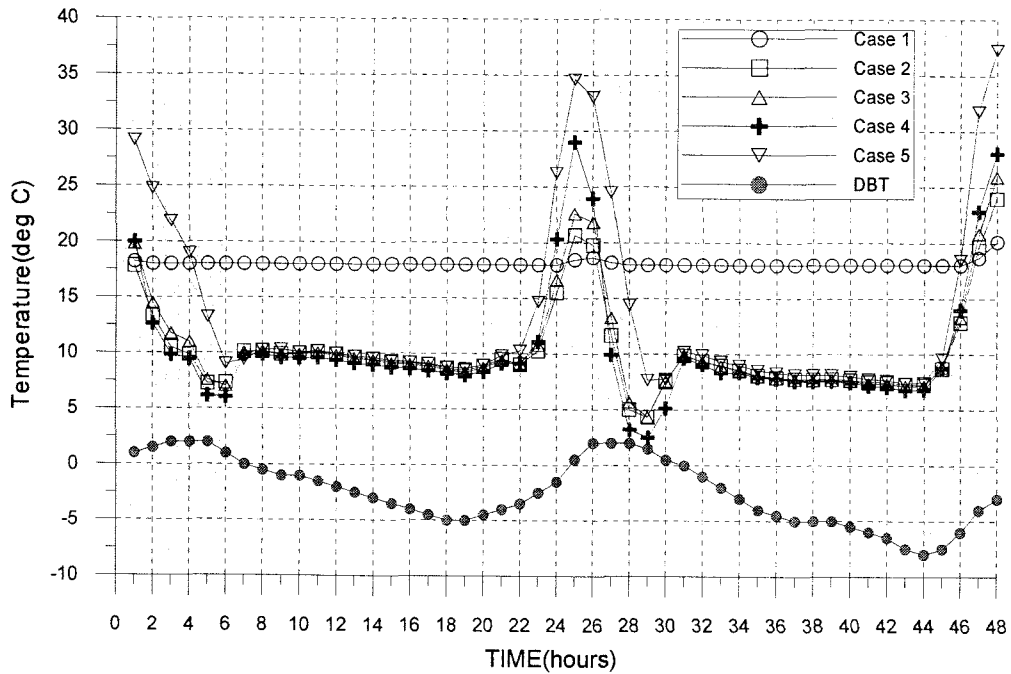
해석된 모델이 유리로 구성된 경량구조임을 감안할 때 외기 풍속조건에 의한 열손실계수는 상당히 커지게 된다. 선정된 대표일의 풍속조건 비교결과 첫째날보다 두 번째 날의 평균 풍속이 더 강했던 것으로 나타났는데, 이에 따라 두 번째 날의 야간시간대 부하가 첫 번째 날보다 더 많이 부하가 발생되어 투입열량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 이틀간의 대표기간동안 건구온도의 변화 폭이 크지 않았던 점을 감안하면, 침기에 의한 열손실은 복사단열시스템에 영향을 받지 않으므로 모든 사례에서 일률적으로 투입 열량이 상승하고 있는 것으로 나

타났다. 또한 대표기간동안 주간의 일사에 의한 열량획득이 저조하여 주간에도 꾸준히 부하발생에 따른 열량이 투입되고 있는 것으로 나타났으며, 특히 Case 1의 경우에서 외기온 변화에 따른 열량투입 곡선이 급격하게 변동하고 있는 것으로 보아 상대적으로 열용량이 작은 모델임을 판단할 수 있었다.

또한 총 난방기간 동안의 월별 에너지 투입에 대한 비교에서도 나타났던 바와 같이 Case 2와 Case 3이 거의 동일한 형태의 열량투입 현상을 보이고 있는데, Case 4, 5와는 투입 열량면에서 상당한 차이를 보였다. 야간시간대에는 Case 1로부터 Case 5까지 복사단열시스템의 방사성능이 낮아짐에 따라 열량투입곡선이 순차적으로 낮게 나타나고 있다.

그러나 주간시간대에 있어서는 Case 4와 Case 5에서 열량투입량이 역전되어지는 현상을 보이고 있는데, 이는 Case 5에서 사용된 열반사 재료가 양면이 모두 저방사 특성을 가지고 있기 때문에 태양으로부터 획득되는 일사에너지를 효과적으로 실내에 전달하지 못한 반면, Case 4에서는 실내쪽으로 면한 재료의 표면에서 0.92의 방사특성을 가지고 있어 일사에 의해 수열된 열에너지를 충분히 실내로 전달하여 적은 양이나마 실내 온도상승의 한 요인으로 작용했기 때문으로 판단된다.

[그림 3-26]은 해석모델에서 Zone 1과 Zone 2 부분으로 구획되어진 천장부분의 대표기간 중 온도변화 곡선을 나타내고 있다. 해석모델에서 Zone 1과 Zone 2로 구획한 가장 큰 이유는 복사단열시스템이 설치 조건을 실내부분으로 국한하여 설치함으로써 공간의 분할이 필요했으며, 에너지가 투입되는 환경조절공간을 복사단열시스템의 내부으로 한정하였기 때문이다. 따라서 부하변동에 의해 자동 조절 되도록 설정된 Zone 1은 일사량이 강하게 사입되는 주간에 잠시 동안 설정 온도인 18℃를 넘는 온도분포를 보이고 있으나, 평균적으로 꾸준히 18℃를 유지하고 있기 때문에 분석을 위한 여지가 거의 없다. 그러나 Zone 2는 유리로 마감된 하나의 공간으로 형성되어 있기는 하지만 부하변동에 대한 투입 열량이 전혀 없기 때문에 단지 복사단열시스템의 천장 바깥면 아랫부분으로부터 자연대류에 의해 전달되는 에너지만이 Zone 2의 온도조건에 변화를 줄 수 있는 요인이다. 따라서 Zone 2의 온도변화를 분석하는 것이 바람직하다.



[그림 3-25] 사례별 대표일의 천정부분 온도 비교

[그림 3-26]는 사례별 대표일의 천정부분 온도를 나타낸 것으로 음영부분으로 표시된 부분은 태양에 의한 일사에너지가 실내로 유입되어 실내온도의 상승요인으로 작용하는 부분을 나타낸다. 그래프에서 나타난 것처럼 Case 1은 단열시스템이 설치되지 않았기 때문에 실내 설정온도의 영향을 받아 18°C로 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 Case 1을 제외한 모든 사례에서는 일사에너지가 유입되기 시작하면서 급격히 온도가 상승되는 것으로 나타났는데, 이는 단지 유리 and 단열스크린 사이의 좁은 공간이기 때문에 열용량이 작아 외기온 및 일사에 의해 큰폭으로 변화하기 때문이다. 이 같은 현상은 거의 유사한 형태를 보이며 온도상승이 일어나고 있지만 특히 Case 4와 Case 5에서는 주간예 Zone 2부분의 온도가 상당히 높게 상승하고 있는데, 이런 현상을 보이는 가장 큰 이유는 Zone 2를 이루는 공간에서 바닥면이라 할 수 있는 복사단열시스템의 표면이 낮은 방사성능을 유지하며 태양으로부터 획득되는 일사에너지를 복사단열시스템의 표면으로부터 장파 복사에너지로 변환하여 공간 내부로 열전달 함으로써



실내온도의 상승요인으로 작용하기 때문이다.

일사량이 가장 크게 나타나는 오후 1시부터 2시 사이를 지나게 되면 일사량은 점차 감소하여 실내로 사입되는 에너지의 양보다 외기와의 열교환으로 인한 손실량이 더욱 커지게 되어 실내의 급격한 온도저하 요인으로 작용한다. 이러한 현상은 Case 1을 제외한 모든 사례에서 동일하게 나타나는데, 실내온도가 급격하게 떨어져 약 5℃정도까지 낮아졌다가 그 이후부터는 Zone 1로부터 자연대류에 의해 에너지를 꾸준히 공급받아 야간시간동안에는 평균적으로 약 8℃에서 10℃사이의 온도를 유지하는 것으로 나타났다. 야간의 온도분포를 수치상으로 확인하면 Case 4와 Case 5에서 약간 낮은 온도분포를 보이고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 야간시간대에 Zone 2의 바닥으로부터 실내쪽으로 전달되는 열량이 Case 4와 Case 5의 경우에 바닥이 저방사 특성을 가진 재료로 구성되어 있기 때문에 Case 2와 Case 3보다 상대적으로 적은 양이 전달되기 때문인 것으로 판단된다.

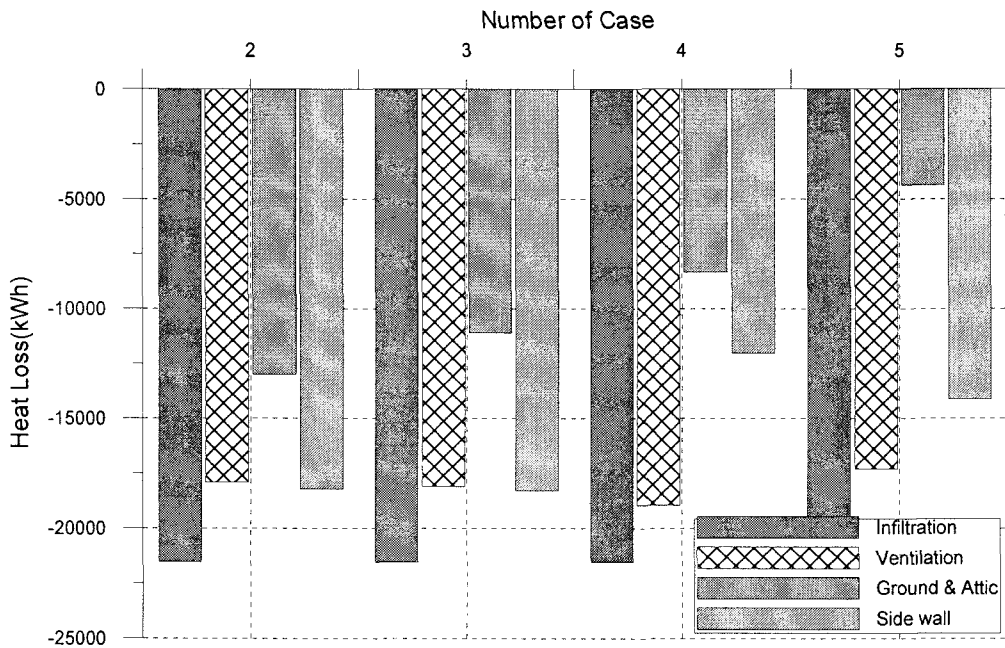
<표 3-15> 사례별 부하요인에 대한 손실열량 비교

	침기손실	환기손실	천장 및 지면을 통한 손실	외벽을 통한 손실	합 계
Case 2	-21,535.2	-17,918.7	-12,996.1	-18,213.8	-70,663.8
Case 3	-21,535.2	-18,101.4	-11,109.3	-18,290.3	-69,036.2
Case 4	-21,535.2	-18,952.0	-8,330.3	-12,016.9	-60,834.4
Case 5	-21,535.2	-17,290.4	-4,357.8	-14,142.6	-57,326.0

대표기간동안 사례별 열손실량을 정량적으로 표시하면 <표 3-15>와 같다. 표에 정리된 수치는 공조공간, 즉 Zone 1에 대하여 해석한 것이며 Zone 1과 Zone 2에 걸쳐 모두 공조를 행하고 있는 Case 1은 해석에서 제외시켰다. 각 사례에서 먼저 침기량은 1.84 ACH로 고정시켰기 때문에 모두 동일한 양의 손실이 있는 것으로 판단되며, 표에 나타난 환기손실은 복사단열시스템의 적용시 벽체의 내부에 고정된 시스템이 아니고 스크린형태로 고려하였기 때문에 유리와 복사단열재 사이에 자연대류에 의한 환기가 발생하게 되었다. 이를 고려하여 본 시뮬레이션에

서는 환기손실로 고려하였다. 또한 Zone 1의 천장부분에 면한 Zone 2의 바닥에서 일정부분 환기가 발생하는데 이를 천정을 통한 손실로 간주하였다.

Case 2의 경우 전체 손실열량에 대한 침기손실이 30.4%로 가장 많은 부하발생요인으로 분석되었으며 환기에 의한 손실은 25.4%로 외벽을 통한 손실량인 25.8%와 거의 비슷한 수준을 나타내었다. 또한 천장 및 지면을 통한 손실은 전체의 18.4%로 가장 낮게 나타났는데, 이를 종합하면 천장 및 지면을 포함한 벽체 손실은 44.2%로 전체 열손실 부분에 대해 상당한 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 총 투입열량 면에서 큰 차이를 보이고 있지 않는 Case 3에서도 Case 2와 거의 유사한 비율로 부하요인별 손실열량을 나타내었다. [그림 3-26]은 각 사례별로 나타난 부하요인별 손실열량을 표현한 그래프이다.



[그림 3-26] 사례별 부하요인에 대한 손실열량 비교

저방사 특성을 가지는 Case 4와 Case 5에서는 천장 및 지붕을 포함한 벽체에서의 손실이 각각 33.3%, 32.3%로 Case 2와 Case 3에 비해 총 손실열량 대비

10%이상의 낮은 손실율을 보이고 있는데, 이는 저방사 특성을 가진 복사단열시스템에 의한 복사차단 효과로 천장 및 벽체에서의 표면손실을 상당히 감소시킨 결과로 분석된다. 이는 침기량과 환기량, 그리고 지면의 조건이 동일한 상황에서 침기부하와 환기부하 및 지중손실이 모든 사례에서 동일한 손실분을 차지하게 되므로 총 투입 열량의 감소효과를 벽체 및 천장에서 모두 절감시키고 있는 것으로 사료된다.

## 제 5 절 소결

본 장에서는 유리로 구성된 실제온실을 대상으로 침기량 측정실험, 건물 열손실계수 측정실험, 복사단열시스템의 에너지 성능 측정실험에 대해 다루었다. 또한 실험을 통해 얻어진 결과를 기본데이터로 ESP-r 프로그램을 활용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이러한 과정을 통해 얻어진 주요결과는 다음과 같다.

침기량 측정실험은 ASTM E 779 방식에 따라 Blower Door에 의한 압력차 측정방법으로 온실의 침기량을 도출하였는데 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers : 미국 공기조화냉동공학회)의 기준에 따라 분석해보면, 외기압이 4Pa일 때 온실 내부로 유입되는 공기량은 약 1540 m<sup>3</sup>/h 인 것으로 나타났으며, 이를 온실의 부피에 따라 환산하면 시간당 약 1.84회의 침기부하를 갖는 것으로 나타났다.

건물의 열성능을 나타내는 지수인 건물 열손실계수 평가에서는 무단열 시스템인 경우에 그 값이 12.4 W/m<sup>2</sup>°C 인 것으로 나타났으며, 표면 방사율이 0.71인 경우에는 11.6 W/m<sup>2</sup>°C, 표면 방사율이 0.65인 경우에는 10.4 W/m<sup>2</sup>°C 인 것으로 각각 나타났다. 이는 무단열 사례에 비해 표면 방사율이 0.71인 사례에서 7% 정도의 열성능 향상을 기대할 수 있는 것으로 해석되며, 표면 방사율이 0.65인 사례에서는 약 17%까지 열성능 향상을 기대할 수 있는 것으로 사료된다.

또한 실험기간 중 각 사례의 평균투입열량을 기준으로 분석한 결과 무단열 시

시스템의 경우와 비교하여 단열스크린의 방사율이 0.71인 단열조건에서 83%, 방사율이 0.65인 단열조건에서 73% 인 것으로 나타나 각각 17%와 27%의 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 즉 건물의 열손실계수의 감소에 따라 에너지 절감능력이 선형적으로 증가하지는 않는 것으로 나타났다.

측정된 실험자료를 근거로 ESP-r 프로그램에 의한 시뮬레이션 결과로는 열반사 복사단열시스템의 설치에 따른 연간 난방에너지 절감효과는 약 25%~38% 정도인 것으로 분석되었다. 또한 복사단열시스템의 효과는 외기온이 낮을수록, 즉 외기의 온도와 실내 설정온도와의 차이가 크면 클수록 그 효과가 극대화되는 것으로 나타났으며, 국내의 경우 연중 외기온이 가장 낮게 유지되는 1월에 복사단열효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

또한 복사차단 효과가 거의 없는 재료를 사용하여 단지 공기층 구성에 의한 효과를 분석해본 결과 약 25%까지의 부하절감 성능을 나타내었다. 이는 복사단열시스템의 구성에 있어서 공기층이 가지는 열차단 성능이 상당히 큰 부분을 차지하기 때문에 복사단열시스템의 설치시 기대되는 38%의 부하절감 효과는 저방사 재료에 의한 복사차단효과 및 공기층 형성에 따른 표면저항의 증가 등 복합적인 요인에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

각 사례에 대한 건물 열손실계수의 분석결과로서 단지 유리로만 구성된 해석 모델에서 나타나는 열성능은  $12.4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 인 반면, 표면방사율이 0.05인 복사단열시스템을 설치하였을 경우의 열성능은  $8.34 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 로 약 35%가량 더 우수한 열성능을 갖는 것으로 나타났다. 또한 부하요인별 손실열량을 비교해 보면, 적용된 모든 사례에 있어서 거의 유사한 침기손실과 환기손실 그리고 지중을 통한 손실이 나타남에도 불구하고 총 손실열량에서 약 20%정도 차이가 나타난다. 이런 결과는 벽체의 열관류율에 따라 달라지는 열전달 손실에 의한 차이로 판단된다. 즉 저방사 특성을 가진 복사단열시스템을 설치할 경우에 열관류저항이 증가하고 벽면 및 천장에서의 복사차단 성능에 의해 부하의 약 20%가량을 절감할 수 있으며, 이러한 부하의 감소는 곧바로 에너지 절감의 효과로 나타나는 것으로 해석된다.

본 예비실험이 수행된 유리온실은 약 50평 정도의 면적으로 측벽의 높이가

3.7m, 천정의 높이가 6m에 이르며 측벽에는 장변측의 길이방향을 따라 전동으로 개폐되는 약 2m 높이의 측창이 설치되어 있기 때문에 측정온실은 침기량 측정시험에서 일반적인 유리온실에 비해 침기 및 환기에 의한 영향을 많이 받아 단열의 측면에서는 불리한 조건을 가지고 있었다. 따라서 측정 및 시뮬레이션된 결과는 일반적인 유리온실에 비해 보다 높은 열손실 수치를 갖는 것으로 조사되었다. 그러나 침기 및 환기로 인한 열손실을 제외한 나머지 외피에 의한 열손실의 산출이 가능하며, 그 결과 단열스크린의 방사율에 의한 복사차단 및 스크린 설치로 인한 공기층 형성이 단열성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 반사단열 스크린의 방사율이 유리온실 단열시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석은 본 보고서의 5장에서 상세하게 다루기로 한다.

여 백

## 제 4 장 유리온실의 열성능 평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션

### 제 1 절 유리온실의 열성능 해석 개요

복사단열시스템의 설치에 따른 열전달특성을 정량적으로 평가하기 위해서는 재료의 표면방사성능에 대한 복사차단 효과가 필수적으로 고려되어야 한다. 복사에 의한 열전달은 고온측과 저온측으로 구분되는 모든 표면에서 진행되며, 전열되는 면적 비율, 각도, 형상계수 등 상당히 복잡한 변수에 의해 다차원 함수로 표현된다. 즉 3차원 공간에서의 복사열전달을 해석하기 위해서는 방열면으로부터 전면부에 위치하는 모든 면에 대해 표면온도 특성을 고려하여 해석해야 하기 때문에 동적 상태에서의 정량적인 분석은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 해석모델을 최대한 단순화하여 마주보고 있는 면이 한 면이고 일정한 방향으로만 열이 전달되는 것으로 가정한 1차원 해석모델을 개발하여 분석을 수행하였다.

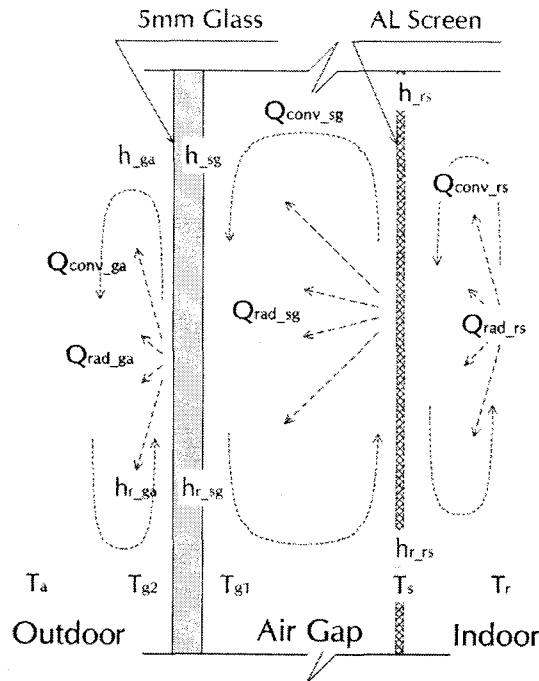
이러한 복사열전달의 1차원 해석을 통해 중공층을 포함하는 복사단열시스템의 표면방사성능에 따른 열관류 성능을 정량적으로 도출하여 제시하였다. 또한 유리로 구성된 공간에서의 열손실을 이론적으로 대류와 전도에 의한 열전달량과 복사에 의한 열전달량으로 구분하여 정량적으로 도출하였다.

해석모델의 전개에 의한 각 절점에서의 에너지 전열특성 분석을 위해 실험계수를 포함한 실험식을 제시하였으며, 다차원 방정식의 해석을 위해 EES (Engineering Equation Solver version 5.008) 프로그램을 활용하였다. EES 프로그램은 다차원 함수를 가지는 방정식을 해석하기 위해 개발된 프로그램으로 연립 방정식의 계산을 위해 Newton방법을 사용한 프로그램이다. 본 보고서에서는 Jacobian행렬을 미지수에 대한 추측값의 반복계산에 의해 도출하는 방식으로 계산하였다.

## 제 2 절 측벽용 반사 단열스크린의 열성능 해석

### 4.2.1 1중 반사 단열스크린

반사단열시스템의 구성에 의한 열손실을 이론적으로 해석하기 위해 [그림 4-1]과 같은 해석모델을 설정하였다. 본 연구에서는 해석의 복잡함을 줄이고, 단지 방사성능에 의해 결정되는 반사단열시스템의 상대적인 평가를 위해 1차원 해석으로 국한하여 진행하였다. 또한 본 보고서의 3장에서 진행된 실험의 조건과 동일하게 구성하여 검증할 수 있도록 5mm의 유리와 적절한 너비의 중공층으로 구성되는 복사단열시스템으로 해석하였으며, 동일조건에서의 평가를 위해 다음과 같은 3가지 가정을 하였다.



[그림 4-1] 측벽용 1중 반사단열 스크린 시스템의 열손실 해석모델



가정 1) 방사를 하는 각 표면들은 일정온도로 유지되고, 균일한 방사 및 반사를 하는 복사 특성을 갖는다.

가정 2) 방사를 하는 각 표면들은 투과를 하지 않는 비투명 매질이고, 파장에 대해 무관하며 방사율과 흡수율이 동일한 표면 특성을 가진다.

가정 3) 표면들 사이에 존재하는 매질(공기)에서 흡수 및 방사가 일어나지 않는다.

[그림 4-1]과 같은 조건의 열전달 해석을 위해 해석모델은 4부분으로 분할, 진행하였다. 즉 ① 고온측 공간에서 반사단열 스크린까지의 열전달, ② 반사단열 스크린과 유리 사이의 공간에서의 열전달, ③ 유리에서의 전도 열전달, ④ 유리 표면에서 외기로의 열전달 등으로 구분하였다. 이 조건에서 만일 유리와 매질에서 열흡수가 일어나지 않는다면 열평형 방정식에 따라 열전달은 동등한 크기를 가져야 하며, 모든 열전달은 대류 및 복사 그리고 유리에서 전도열전달로 표시된다. 따라서 다음과 같이 분할된 각각의 공간에서 열흐름 모델을 수립하였다.

### 1. 고온측 공간에서 반사단열 스크린으로의 열전달량( $Q_{rs}$ )

고온측 공간 내부에서 반사단열 스크린 사이의 열전달은 각 표면의 온도차에 의해 결정된다. 따라서 고온측 내부온도를  $T_r$ , 복사차단재의 온도를  $T_s$ , 대류열전달 계수를  $h_{rs}$ 라 할 때 대류에 의한 열전달량( $Q_{conv-rs}$ )은 다음 식과 같다.

$$Q_{conv-rs} = h_{rs}A(T_r - T_s) \quad (4.1)$$

식(4.1)에서 온실내부의 대류열전달 계수는 자연대류 열전달이 지배적이며, 강제대류의 영향을 고려한 다음과 같은 식을 사용한다[21].

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4} \quad (Ra_L \leq 10^9)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4} (1 + 1.6 \times 10^{-8} Ra_L \Psi)^{1/12} \quad (10^9 \leq Ra_L \leq 10^{12})$$

여기서  $Nu_L$  : 평균 Nusselt number

$Ra_L$  : Rayleigh number

Pr : Prandtl number

$$\psi = \left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$

또한 유리의 높이를  $L$ , 고온측 공기의 열전도 계수를  $k_{air}$ 라 하면, 대류열전달 계수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$h_{rs} = \overline{Nu}_L \frac{k_{air}}{L}$$

그러나 고온측에서의 환경조건이 자연대류 상황이 아닌 강제송풍에 의한 조건이라면 열전달 계수는 자연대류에 의한 열전달계수 값보다 상당히 크게 된다. 그러므로 자연대류 및 강제대류를 모두 고려한 다음과 같은 실험식을 사용하였다.

$$h_{rs} = \overline{Nu}_L \frac{k_{air}}{L} + 3.043 V_{wind}^{0.170} \quad (4.2)$$

고온측인 실내와 반사단열 스크린 사이의 복사열전달이 열손실에 기여하는 정도는 고온측 내부온도와 반사단열 스크린의 온도 그리고 각 표면의 방사율에 의존한다. 일반적인 복사난방 해석을 위한 관계식은 고온측에 면해있는 고온측 내부의 방사율이 1일 경우 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{rad-rs} = \sigma \epsilon_s (T_r^4 - T_s^4) \quad (4.3)$$

여기서  $Q_{rad-rs}$  : 고온측 내부에서 반사단열 스크린으로의 복사 열전달량[W]

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수 [ $5.6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ ]

$\epsilon_s$  : 반사단열 스크린의 표면 방사율

그러나 해석하고자 하는 모델에서는 방사성능에 따른 복사 열전달에 대한 해석을 목표로 하고 있으므로 고온측 내부의 방사율을 고려하여 계산되어야 한다. 따라서 고온측 내부의 표면방사율을 고려하면 복사열전달량은 식(4.4)와 같이 표시되고, 이때 복사열전달 계수는 식(4.5)로 정의될 수 있다.

$$Q_{rad-rs} = \sigma \frac{(T_r^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1} \quad (4.4)$$

$$h_{r-rs} = \sigma \frac{(T_r^2 + T_s^2)(T_r + T_s)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1} \quad (4.5)$$

여기서  $\epsilon_r$ 는 고온측 내부의 방사율이다. 따라서 고온측 실내로부터 반사단열 스크린으로의 총 열전달량은 식(4.6)과 같이 표시될 수 있다.

$$Q_{rs} = Q_{conv-rs} + Q_{rad-rs} \quad (4.6)$$

## 2. 반사단열 스크린과 유리사이 공기층에서의 열전달량( $Q_{sg}$ )

반사단열 스크린과 유리 사이의 중공층 열전달량은 공간 사이의 거리와 두 표면 사이의 온도차의 함수로 계산될 수 있다. 그러므로 반사단열 스크린과 유리사이 공기층(air gap)의 대류열전달량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{conv-sg} = Ah_{sg}(T_s - T_{gl}) \quad (4.7)$$

여기서 A : 열전달 면적 [ $m^2$ ]

$h_{sg}$  : 복사차단재와 유리사이 공기층의 대류 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$T_s$  : 복사 차단재 온도[°C]

$T_{gl}$  : 유리 내부 온도[°C]

식(4.7)에서  $h_{sg}$ 에 대한 실험식은 Elsherbiny 등이[22] 두 평판 사이에서의 대류 열전달은 두 평판 사이의 간격  $L$ 과 두 평판 사이의 온도차, 그리고 기울기 등에 의존하는 실험식을 제시하였다. 이 실험식에서 반사단열 스크린과 유리는 수직으로 세워져 있으므로 다음 식의 사용이 가능하다. 즉

$$h_{sg} = \overline{Nu}_L \frac{k_{air}}{L}$$
$$\overline{Nu}_L = \max(Nu_1, Nu_2, Nu_3) \quad (4.8)$$

여기서  $Nu_1 = 0.0605Ra_L^{1/3}$

$$Nu_2 = \left[ 1 + \left[ \frac{0.104Ra_L^{0.293}}{1 + (6310/Ra_L)^{1.36}} \right]^3 \right]^{1/3} \quad (4.9)$$

$$Nu_3 = 0.243 \left( \frac{Ra_L}{H/L} \right)^{0.272}$$

이러한 실험식, 즉 식(4.9)는 마주보는 두 평판 사이의 온도차가 어느 시점 이하로 줄어들게 되면 순수 전도에 의한 열전달을 나타내고 있다.

반사단열 스크린과 유리 공간 사이의 복사열전달은 단열스크린의 방사율( $\epsilon_s$ ), 유리의 방사율( $\epsilon_g$ ), 그리고 스크린과 유리온도에 의존한다. 따라서 두 표면 사이의 복사열전달량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{rad-sg} = Ah_{r-sg}(T_s - T_{gl}) \quad (4.10)$$

여기서  $Q_{rad-sg}$  : 반사단열 스크린과 유리공간 사이에서의 복사 열전달량[W]

$h_{r-sg}$  : 반사단열 스크린과 유리사이 공기층의 복사열전달계수[W/m<sup>2</sup>°C]

반사단열 스크린과 유리의 방사율에 영향을 받는 두 면사이의 복사열전달계수  $h_{r-sg}$ 는 다음 식과 같다.

$$h_{r-sg} = \sigma \frac{(T_s^2 + T_{g1}^2)(T_s + T_{g1})}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \quad (4.11)$$

여기서  $\epsilon_s$  : 반사단열 스크린의 유리측 방사율

$\epsilon_g$  : 유리의 방사율

따라서 반사단열 스크린과 유리사이 중공층에서의 총 열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{sw} = Q_{conv-sg} + Q_{rad-sg} \quad (4.12)$$

### 3. 유리를 통한 열전달량( $Q_{cond-g}$ )

유리내부에서는 열전도 현상에 의해 고온측에 면한 유리의 표면으로부터 저온측, 즉 외기와 면한 표면으로 열전달된다. 유리의 열전도율을  $k_{glass}$  라고 하고 두께를  $t$  라 하면 전도에 의한 열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{cond-g} = A \frac{k_{glass}}{t} (T_{g1} - T_{g2}) \quad (4.13)$$

### 4. 유리표면에서 저온측으로의 열전달량( $Q_{ga}$ )

유리외부에서 저온측으로 복사열전달은 풍속과 풍향에 의해 의존한다. 즉 유리의 저온측 표면에 바람이 직접 부딪치는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 유리 표면에서의 대류열전달 계수는 상당한 차이를 보인다.

유리의 저온측 표면에 기류가 직접 닿는 경우라면, 유리의 열전달 계수  $h_{ga}$ 는

$$h_{ga} = 8.07 V_{wind}^{0.605} \quad \text{for } V_{wind} > 2$$

$$h_{ga} = 12.27 \quad \text{for } V_{wind} < 2$$

과 같은 상수값을 입력하여 해석이 가능하지만, 유리의 표면에 전달되는 기류의 조건이 위와 같지 않다면 아래와 같은 식으로 해석이 가능하다.

$$h_{ga} = 18.64(0.3 + 0.05 V_{wind})^{0.170}$$

그러나 기류의 풍속이 0m/s일 경우 대류 열전달계수 값은 위에 제시한 값보다 상당히 작다고 보고하고 있다[23]. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 자연대류와 강제대류가 존재하는 모든 경우 모두를 고려한 실험식을 사용하였다[24].

$$h_{ga} = 2.8 + 3.0 V_{wind} \quad (4.14)$$

따라서 저온측 유리표면에서의 대류 열전달량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{conv-ga} = Ah_{ga}(T_{g2} - T_a) \quad (4.15)$$

유리 외부에서 저온측으로의 복사열전달은 자연조건의 상황이라면 천공온도 (sky temperature)에 의해서 평가되어야 한다. 천공온도에 대한 관계식은 여러 연구자들에 의해 보고되고 있는데, 대표적인 식들은 다음 식과 같다. 즉

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5}$$

$$T_s = T_a - 6$$

그러나 Dunkle[25]에 의하면 하루 중 창공온도의 변화폭은 1.5~22℃ 정도로

측정되어 명확한 관계식을 정의하기가 어려운 것으로 보고된 바 있다. 따라서 본 연구의 해석에서는 창공온도 대신 외기온도를 사용하였다.

따라서 유리외피에서 외기로의 복사열전달량( $Q_{rad-ga}$ )은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{rad-ga} = Ah_{r-ga}(T_{g2} - T_s) \quad (4.16)$$

여기서  $h_{r-ga}$  : 유리 외부에서 저온측으로의 복사열전달계수 [ $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ]

$T_{g2}$  : 유리 외부 온도 [ $^\circ\text{C}$ ]

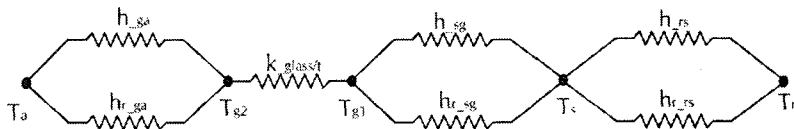
식(4.16)에서 복사열전달계수  $h_{r-ga}$ 는 다음 식과 표시된다.

$$h_{r-ga} = \sigma\epsilon_g(T_{g2}^2 + T_a^2)(T_{g2} + T_a) \quad (4.17)$$

따라서 총 열전달량( $Q_{wa}$ )는 다음 식과 같다.

$$Q_{ga} = Q_{conv-ga} + Q_{rad-ga} \quad (4.18)$$

이상과 같이 도출된 식들로부터 축벽용 1중 반사단열 스크린 모델의 각 부분에 대한 열전달 해석이 가능하며, 이는 궁극적으로 해석하고자 하는 저방사 재료에 의한 복사단열시스템의 전체 열관류율  $U$ 를 구하기 위한 것이다. [그림 4-2]는 1중 반사단열 스크린 모델에 대한 각 노드(node)를 포함한 열저항 회로망을 나



[그림 4-2] 1중 반사단열 스크린 시스템의 열저항 회로망

타내며, 이와 같은 열저항 회로도로부터 열관류율 U를 나타내면 다음 식과 같다.

$$U = \left( \frac{1}{(h_{rs} + h_{r-rs})} + \frac{1}{(h_{sg} + h_{r-sg})} + \frac{t}{k_{glass}} + \frac{1}{(h_{ga} + h_{r-ga})} \right)^{-1} \quad (4.19)$$

식(4.19)에서 U값은 해석모델의 고온측 내부에 반사단열 스크린이 존재하는 경우이므로 단열스크린에 의한 대류열손실과 방사율에 따른 복사열손실을 상당히 줄일 수 있다. 반면에 반사단열 스크린이 없는 경우를 가정하면 열관류율 U는 다음식과 같이 간단히 표시된다.

$$U = \left( \frac{1}{(h_{rs} + h_{r-rs})} + \frac{t}{k_{glass}} + \frac{1}{(h_{ga} + h_{r-ga})} \right)^{-1} \quad (4.20)$$

따라서 해석모델의 고온측 내부에서 외기로의 총 열전달량 Q는 다음 식과 같다.

$$Q = UA(T_r - T_a) \quad (4.21)$$

한편 해석의 단순화를 위해 분할된 각 해석 공간내에서의 열전달량은 열평형 방정식을 만족해야 하므로 다음과 같은 식이 성립한다. 즉

$$Q_{rs} = Q_{sg} = Q_{cond-g} = Q_{ga} \quad (4.22)$$

반사단열 스크린 시스템에 대한 총괄 열관류율을 구하기 위해서는 각 부분에서의 정확한 열전달계수 값과 온도 등을 산출해내어야 한다. 즉 자연대류에 의한 열전달계수 값은 해당영역에서의 온도에 의존하므로 각 부위에 대한 온도를 알아야 열전달계수의 값들을 얻을 수 있다. 그러나 일반적으로 실험이나 실제상황에서 측정에 의해 명확히 얻어질 수 있는 조건은 고온측 공기온도  $T_r$ 과 외기 온



도  $T_a$ 가 대부분인 경우가 많으므로 이럴 경우 반사단열 스크린의 표면온도, 유리 벽 내부 및 외부온도 등을 구해야만 이론식에 의해 총 열관류율을 계산해 낼 수 있게 된다. 따라서 이와 같은 온도를 구하기 위해서는 다음의 방정식들을 풀어야 하는데, 이는 앞에서 표시된 식을 이용하면 구할 수 있다. 즉 식(4.6), 식(4.12), 식(4.13) 및 식(4.18)를 식(4.22)에 적용하면 다음과 같은 방정식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (h_{rs} + h_{r-rs})(T_r - T_s) &= (h_{gw} + h_{r-gw})(T_s - T_{g1}) \\
 (h_{sg} + h_{r-sg})(T_s - T_{g1}) &= \frac{k_{glass}}{t}(T_{g1} - T_{g2}) \\
 \frac{k_{glass}}{t}(T_{g1} - T_{g2}) &= (h_{ga} + h_{r-ga})(T_{g2} - T_a)
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

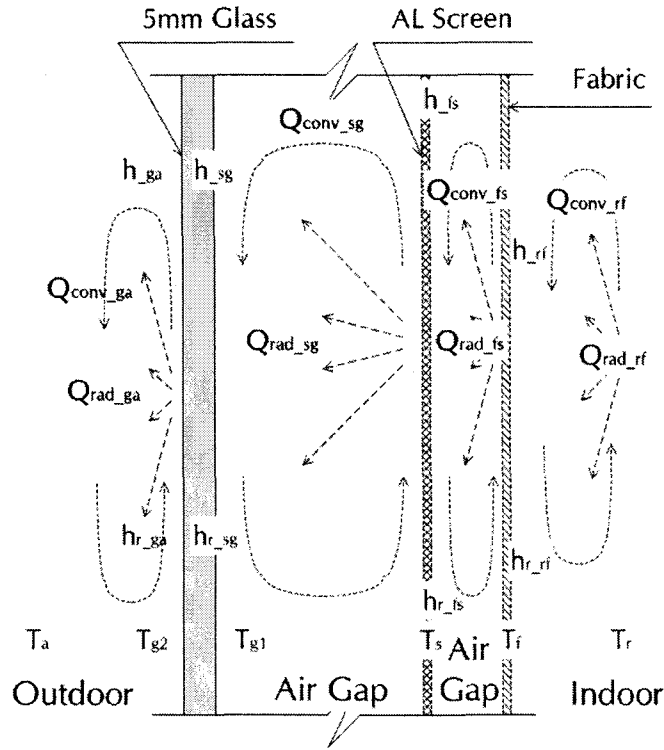
이상과 같은 식으로부터 해석모델의 유형별 열전달량을 계산하였으며, 이는 열 반사 단열시스템의 열관류율 측정실험의 결과와 비교, 검증되었다.

#### 4.2.2 2중 반사 단열스크린

2중 반사단열 스크린 시스템은 유리온실의 외기로의 열손실을 보다 줄이기 위해 사용될 수 있으며, 이는 1중 반사단열 시스템과 비교하여 실내측에 부직포 (fabric)를 한 겹 더 설치하여 반사단열 스크린과 부직포 사이에 추가로 공기층 (air gap)을 더 형성한 형태를 보이고 있다.

[그림 4-3]은 축벽용 2중 반사단열 스크린 시스템의 열해석 모델을 나타낸다. 부직포의 추가 설치로 인한 모델해석에서의 차이점은 실내로부터 유리면 사이에 2개의 분할된 공기층이 존재한다는 것이다. 따라서 온실내부로부터 첫 번째 공기층에 대한 고려가 추가될 뿐 나머지는 사실상 1중 반사단열 스크린 시스템과 동일한 열전달 방정식을 사용하는 것이 된다. 즉 2개의 공기층에서는 동일한 열전달 방정식이 적용되며, 다음과 같은 열평형 방정식이 성립된다.

$$Q_{rf} = Q_{fs} = Q_{sg} = Q_{cond-g} = Q_{ga} \quad (4.24)$$



[그림 4-3] 축벽용 2중 반사단열 스크린 시스템의 열해석 모델

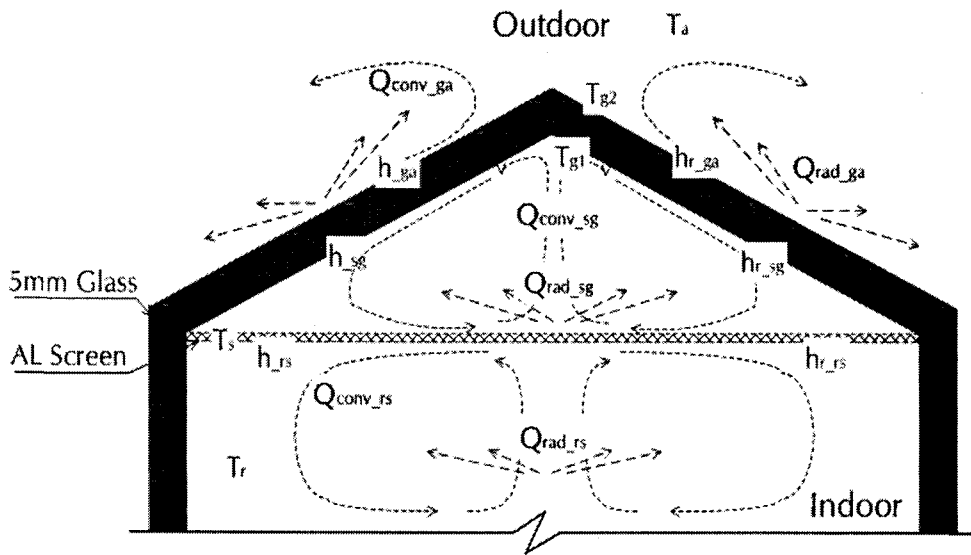
### 제 3 절 천정용 반사 단열스크린의 열성능 해석

#### 4.3.1 1중 반사 단열스크린

[그림 4-4]는 천장용 1중 반사단열 스크린 시스템의 열해석 모델을 나타낸다. 그림에서 보면 실내에서 주로 자연대류 및 복사에 의한 열전달이 이루어지는데, 특히 천장부는 2등변 삼각형 형태를 이루고 있다. 따라서 이 형상에 대한 자연대

류 열전달계수 값을 알아야 하며, 또한 삼각형 형태의 설비에 대한 복사열전달계수 값을 도출해 낼 수 있는 방정식을 필요로 한다.

천정용 반사단열 스크린 시스템에 대한 시뮬레이션은 전술한 측벽용 단열스크린 시스템의 경우와 대체로 유사하나 형상이 다른 관계로 열전달계수에 대한 식들이 달라진다.



[그림 4-4] 천장용 1중 반사단열 스크린 시스템의 열해석 모델

### 1. 고온측 공간에서 반사단열 스크린으로의 열전달량( $Q_{rs}$ )

고온측 공간에서 반사단열스크린으로의 대류에 의한 열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{conv-rs} = \frac{\overline{Nu}_L k_{air}}{L} (T_r - T_s) \quad (4.25)$$

여기서 대류 열전달은 Lloyd, Morgan 등[26]의 실험식을 이용한다. 즉

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (4.26)$$

한편 복사에 의한 열전달량은 다음식과 같다.

$$Q_{rad-rs} = \sigma \epsilon_s A (T_r^4 - T_s^4) \quad (4.27)$$

여기서  $\sigma$  : Stefan-Boltzman 상수

$\epsilon_s$  : 반사단열 스크린의 고온측 표면 방사율

따라서 고온측 실내로부터 반사단열 스크린으로의 총 열전달량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{rs} = Q_{conv-rs} + Q_{rad-rs} \quad (4.28)$$

## 2. 반사단열 스크린과 유리사이 공기층에서의 열전달량( $Q_{sg}$ )

반사단열 스크린과 유리 사이의 공기층에서의 대류열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{conv-sg} = \frac{\overline{Nu}_L k_{air}}{H} (T_s - T_{gl}) \quad (4.29)$$

여기서 H : 반사단열 스크린으로부터 천장면 최대 높이

식(4.29)에서  $\overline{Nu}_L$ 는 삼각형 형상 내부에 자연대류가 일어나는 경우에 대한 Nusselt수로서 Poulidakos, Bejan 등[27]의 실험식을 이용한다. 즉

$$\overline{Nu}_L = 0.225 Ra_L^{0.3} \quad \left( \frac{H}{L} = 0.577, 7.5 \times 10^4 < Ra_L < 2 \times 10^5 \right) \quad (4.30a)$$

$$\overline{Nu_L} = 0.345 Ra_L^{0.3} \quad \left( \frac{H}{L} = 0.207, 10^6 < Ra_L < 10^7 \right) \quad (4.30b)$$

반사단열 스크린과 유리공간 사이의 삼각형 공간 내에서의 복사열전달량은 Kirchhoff의 전류법칙을 이용하여 다음 식과 같이 유도된다.

$$Q_{rad-sg} = \sigma \frac{(T_s^4 - T_{gl}^4)}{\frac{A_2(1-\epsilon_s)}{A_1\epsilon_s} + \frac{A_2}{2A_1F_{12}} - \frac{1-\epsilon_g}{2\epsilon_g}} \quad (4.31)$$

여기서  $\epsilon_s$  : 반사단열 스크린의 표면 방사율

$\epsilon_g$  : 유리의 표면 방사율

$A_1$  : 반사단열 스크린의 면적

$A_2$  : 지붕에서 공기와 면하고 있는 유리의 면적

$$F_{12} = \frac{L_1 + L_2 - L_3}{2L_1} \quad (\text{view factor})$$

$L_1$  : 반사단열 스크린의 너비

$L_2$  : 한쪽면 천정면의 유리 길이

$L_3$  : 다른 한쪽 천정면의 유리 길이

따라서 반사단열 스크린과 유리 사이 중공층에서의 총 열전달량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q_{sg} = Q_{conv-sg} + Q_{rad-sg} \quad (4.32)$$

### 3. 유리를 통한 열전달량( $Q_{cond-g}$ )

유리 내부에서는 열전도에 의해 고온측 유리표면에서 저온측 유리표면으로 열이 전달된다. 유리의 열전도계수를  $k_{glass}$ 라 하고 유리의 두께를  $t$ 라 하면 열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{cond-g} = A \frac{k_{glass}}{t} (T_{g1} - T_{g2}) \quad (4.33)$$

#### 4. 유리표면에서 저온측으로의 열전달량( $Q_{ga}$ )

유리 외부에서 저온측으로의 대류 열전달은 주로 외기풍속에 의존한다[4]. 따라서 대류열전달량은 다음과 같다.

$$Q_{conv-ga} = Ah_{ga}(T_{g2} - T_a) \quad (4.34)$$

여기서  $h_{ga} = 2.8 + 3.0V_{wind}$

한편 유리 표면에서 저온측으로의 복사열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{rad-ga} = \sigma \epsilon_g A (T_{g2}^4 - T_a^4) \quad (4.35)$$

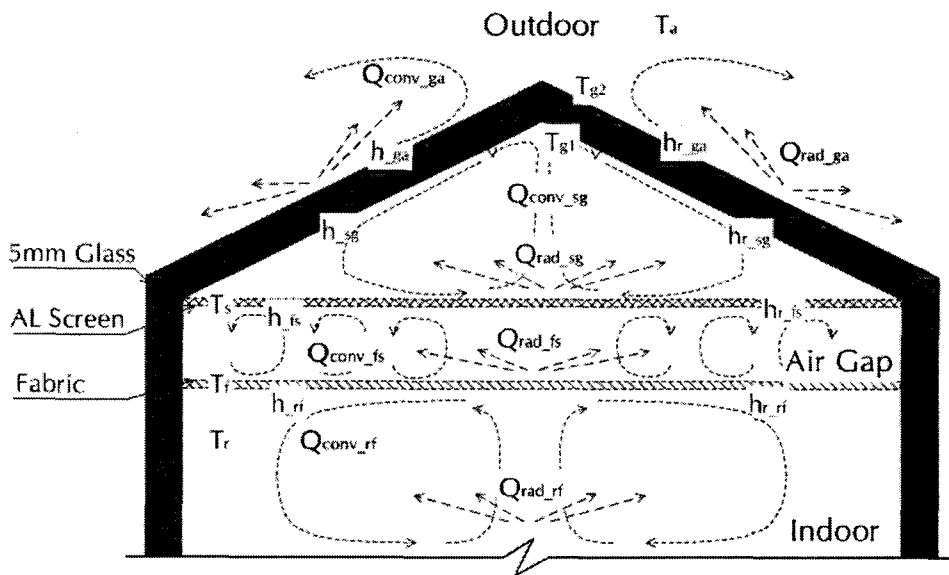
따라서 총 열전달량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{ga} = Q_{conv-ga} + Q_{rad-ga} \quad (4.36)$$

이상과 같이 정의된 식들로부터 천장용 1중 반사단열 스크린 시스템의 열전달 방정식에 대한 해는 축벽용 반사단열 스크린 시스템에서 행한 방법을 사용하여 구해질 수 있다.

#### 4.3.2 2중 반사 단열스크린

[그림 4-5]는 천장용 2중 반사단열 스크린 시스템의 열해석 모델을 나타낸다. 이 시스템은 기본적으로 열저항 회로망 구성이 축벽용 2중 반사단열 스크린 시스템과 동일하다. 그리고 이 경우도 실내온실의 상단 스크린 하단부에 역시 부직포를 설치함으로써 실내와 외피 사이에 2개의 공기층을 형성하고 있다. 그러나 실내로부터 첫 번째 공기층, 즉 부직포와 스크린 사이의 공간에서는 열전달 메커니즘이 특별한 자연대류 현상이 나타날 것으로 예상되는데, 이 영역에 대한 열전달 방정식은 다음과 같다.



[그림 4-5] 천장용 2중 반사단열 스크린 시스템의 열해석 모델

### 1. 반사단열 스크린과 부직포 사이의 열전달량( $Q_{fs}$ )

반사단열 스크린과 부직포 사이에서 자연대류에 의한 열전달량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$Q_{conv-fs} = \frac{\overline{Nu}_L k_{air}}{L} (T_s - T_f) \quad (4.37)$$

여기서 평행한 두 평판사이에서의 대류 열전달은 Hollands[28]의 실험식을 이용한다.

$$\overline{Nu}_L = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_L \cos \tau} \right]^* \left[ 1 - \frac{1708 (\sin 1.8\tau)^{1.6}}{Ra_L \cos \tau} \right] + \left[ \left( \frac{Ra_L \cos \tau}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^*$$

여기서 기울기, 즉  $\tau=0$ 이면 위 식은 다음과 같이 간단한 형태로 변환된다.

$$\overline{Nu}_L = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_L} \right]^* + \left[ \left( \frac{Ra_L}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^* \quad (4.38)$$

식(4.38)에서 [ ]\*안의 값이 음수이면 0의 값을 취한다.

$$\text{여기서 } Ra_L = \frac{2g(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2(T_s + T_\infty)} Pr$$

한편 이 영역에서의 복사열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{rad-fs} = \sigma A \frac{(T_s^4 - T_f^4)}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_f} - 1} \quad (4.39)$$

여기서  $\epsilon_f$  : 복사차단재(부직포)의 표면 방사율

$\epsilon_s$  : 반사단열 스크린 표면 방사율

따라서 부직포와 반사단열 스크린 사이 중공층에서의 총 열전달량은 다음 식



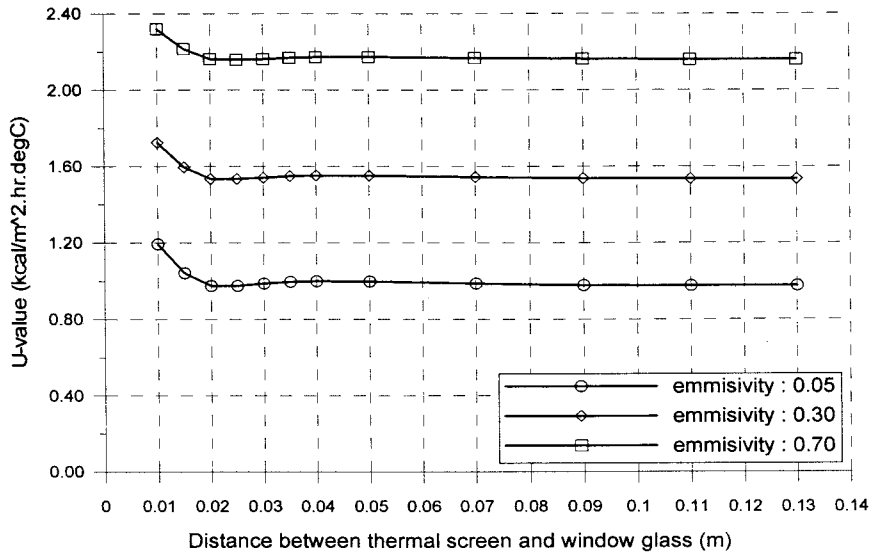
과 같이 표시된다.

$$Q_{fs} = Q_{conv-fs} + Q_{rad-fs} \quad (4.40)$$

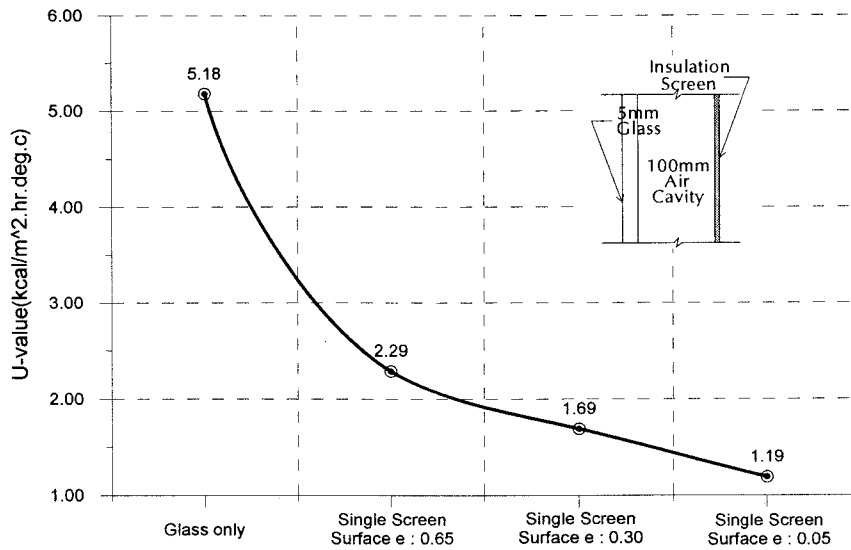
## 제 4 절 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.4.1 측벽용 반사 단열스크린

[그림 4-6]은 측벽용 2중 반사단열 스크린 시스템의 경우에 표면방사율 변화에 대한 스크린-유리 간격에 따른 총괄 열관류율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 방사율이 큰 0.7의 경우가 열관류율(U-value)이 1.35 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup> 정도로 크게 나타나며, 방사율이 0.05인 경우는 약 0.6 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>로 낮게 나타난다. 이와 같은 결과는 방사율이 외기 열손실에 큰 영향을 미치는 것을 나타낸 것으로 반사스크린의 효율성을 보여주는 것이다. 즉 표면방사율이 낮은 0.05의 경우가 0.7인 경우보다 2배 이상 열손실을 줄여줄 수 있음을 의미한다. 또한 본 연구에서 스크린-유리 사이의 간격을 시뮬레이션 한 결과 간격이 커지면 열관류율이 점차 감소하여 열손실이 작게 나타나나, 약 2 cm 이상이 되면 일정한 값을 나타낸다. 그리고 열관류율의 변화는 2 cm 이하의 영역에서 표면방사율이 작을수록 보다 현저하게 나타난다. 따라서 온실 측벽에서 스크린-유리 사이의 간격이 2 cm 이상 유지되도록 유의할 필요가 있다.



[그림 4-6] 방사율 변화에 대한 스크린-유리 간격에 따른 열관류율  
(측벽용 1중 반사단열 스크린)

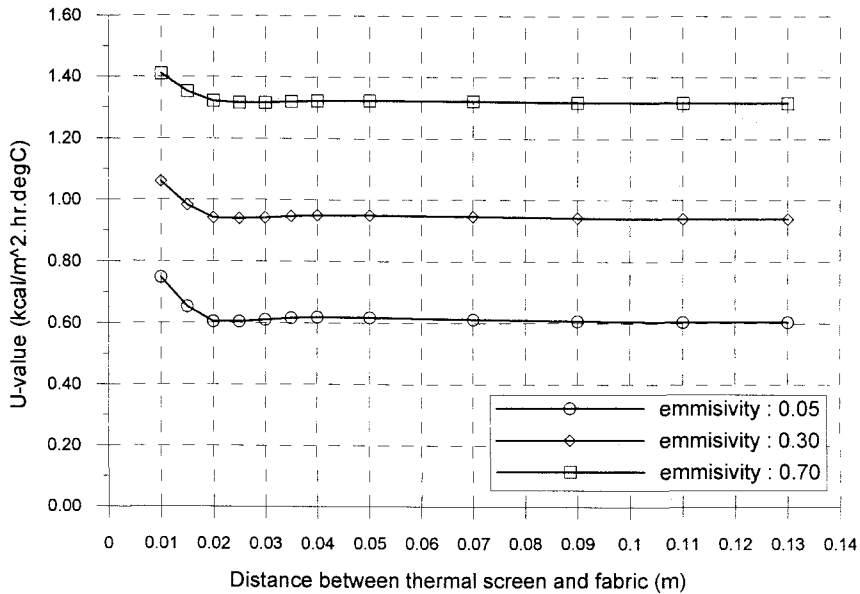


[그림 4-7] 1중 반사단열 스크린 시스템의 표면방사율 변화에 따른  
측벽의 열관류율

[그림 4-7]은 1중 반사단열 스크린의 표면방사율 변화에 따른 측벽의 총괄 열관류율을 나타낸 것이다. 그림에서 단열스크린이 채택되지 않고 유리온실로만 있는 경우에 총괄 열관류율은  $5.18 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$  정도로 크게 나타나지만, 1중 반사단열 스크린이 설치된 유리온실의 총괄 열관류율은  $1.19\sim 2.29 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$  정도로 낮게 나타난다. 즉 이는 유리온실의 열손실량을 약 60~80% 정도 크게 낮출 수 있음을 의미하는 것이다. 따라서 반사단열 스크린 시스템은 매우 유용한 설비로서 유리온실을 가진 시설농가에서는 반드시 갖춰야 할 것으로 평가된다.

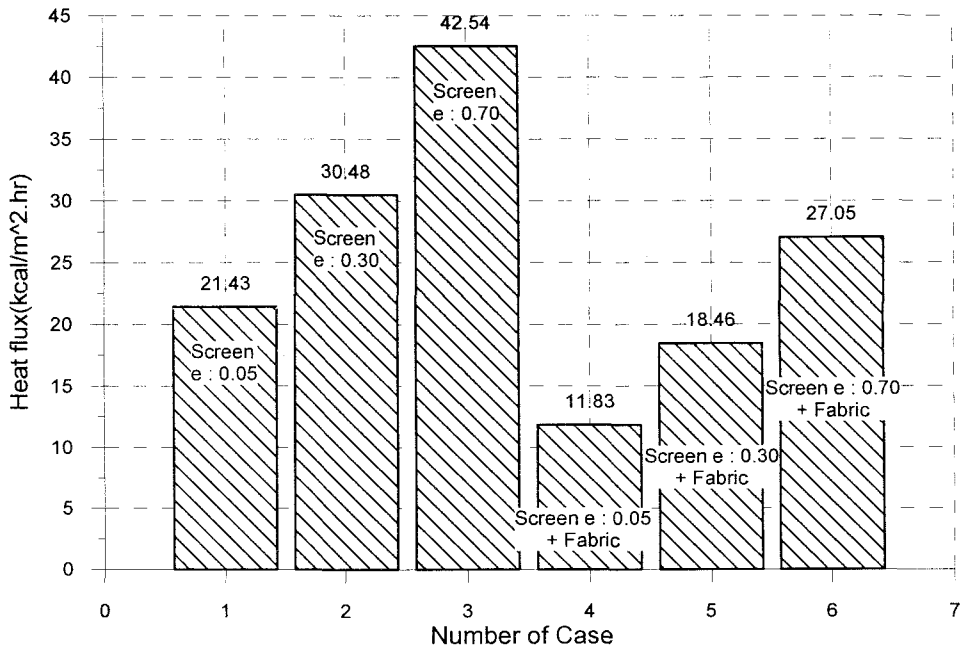
또한 1중 반사단열 스크린 시스템에 대한 총괄 열관류율은 표면방사율의 변화 ( $\varepsilon=1.05, 0.3, 0.65$ )에 따라 유리온실만 있는 경우의 열손실을 기준으로 할 때 약 20% 정도의 범위 안에서 변화한다. 따라서 어떤 표면방사율을 가진 반사단열 스크린을 사용하는가에 따라 유리온실의 열성능에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다. 한편 표면방사율이 0.3인 측벽용 1중 반사단열 스크린 시스템의 열손실을 기준으로 할 때 방사율이 0.65인 시스템의 경우는 약 35% 정도의 열손실을 더 가져오며, 방사율이 0.05인 시스템의 경우는 약 30% 정도의 열손실을 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

[그림 4-8]은 측벽용 2중 반사단열 스크린 시스템의 경우에 방사율 변화에 대한 스크린-부직포(fabric) 간격에 따른 열관류율을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 먼저 [그림 4-6]에서 살펴본 바와 같이 스크린 유리 사이의 간격이 2cm 이상 유지되는 경우 단열성능에 큰 영향을 미치지 않는다는 가정 하에서 스크린-유리 사이의 간격을 현실적인 값인 10cm로 두고 시뮬레이션을 행하였다. 따라서 측벽용 2중 반사단열 스크린 시스템의 스크린-부직포 사이의 적정 간격을 살펴보고자 하였으며, 그 결과 스크린-부직포 사이의 2cm 이상이 유지되도록 하는 것이 단열성능을 약 6~7% 정도 향상시키는 결과를 가져올 것으로 예상된다.



[그림 4-8] 방사율 변화에 대한 스크린-부직포 간격에 따른 열관류율(측벽용 2중 반사단열 스크린)

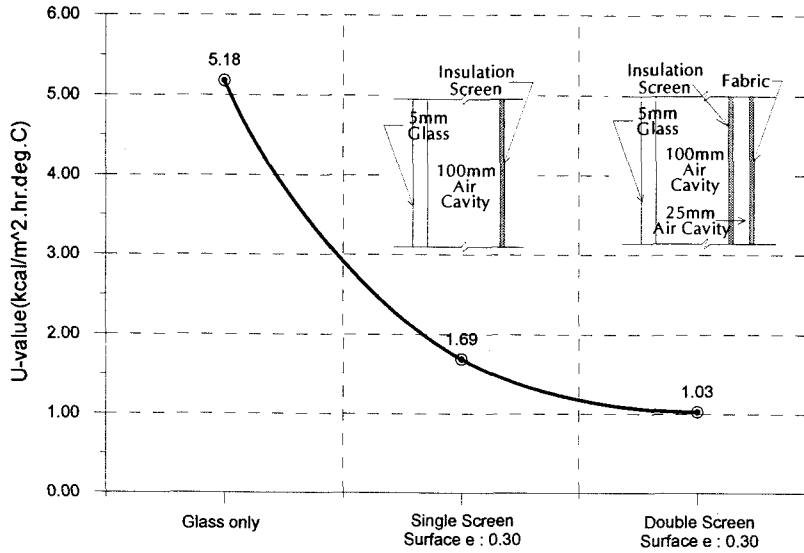
[그림 4-9]는 전남대 온실(50평)을 대상으로 시뮬레이션에 적용하였을 때 측벽용 1중 및 2중 반사단열 스크린 시스템에 대한 사례별 에너지 소비량을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 먼저 1중 스크린에 대한 계산결과 표면방사율의 변화에 따라 그 값이 작을수록 열손실이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 그리고 마찬가지로 2중 스크린의 계산결과에서도 동일한 경향을 보이고 있다. 그러나 방사율이 0.05인 제품은 현실적으로 상용화되기 어려운 점이 있다. 이러한 이유는 알루미늄 포일이 0.05 정도의 값을 갖는데, 얇은 막 등으로 표면처리가 되지 않은 제품은 공기중에서 산화되어 퇴화되는 현상을 가져오기 때문이다. 이러한 점을 고려할 때 현재 세계적으로 성능이 좋은 반사스크린의 방사율은 약 0.3 정도라 할 수 있다. 따라서 본 시뮬레이션 결과 표면방사율이 0.3인 1중 반사단열 스크린 시스템을 기준으로 할 때 표면방사율이 동일한 2중 반사스크린 시스템은 약 40% 정도의 에너지절감효과를 가져올 것으로 예측된다.



[그림 4-9] 측벽용 1중 및 2중 반사단열 스크린 시스템의 사례별 에너지 소비량(50평 대상; 전남대 온실)

[그림 4-10]은 개발된 해석모델로부터 얻은 사례별 측벽에 대한 총괄 열관류율을 나타낸 것이다. 해석모델에 적용된 유리온실의 구성재료 및 단열 스크린 등의 물성치는 실제 실험이 진행된 전남대학교에 설치된 재료에 기초하여 입력되었으며, 또한 실험이 진행된 기간동안 측정된 외기온 및 실내온도 등의 평균값을 사용하였다. 수치계산은 표면방사율이 0.3인 동일한 알루미늄 스크린을 사용한 1중 반사스크린과 부직포를 조합한 2중 반사스크린을 설치한 경우에 대해 수행되었다. 그 결과 1중 반사단열 스크린의 경우는 총괄 열관류율이  $1.69 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ , 그리고 2중 반사단열 스크린의 경우는 총괄 열관류율이  $1.03 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 인 것으로 각각 나타났다. 그림에서 보면 단열스크린이 없는 유리온실의 열관류율이  $5.18 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 로부터 1중 단열스크린 설치온실로 바뀌어지면  $1.69 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 로 급격히 떨어진다. 그러나 1중 단열스크린 온실에서 2중 단열스크린 온실로 바뀌어지면 열관류율의 감소폭이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 2중 단열스크린 이상의 다중 스크린 시스템이 되더라도 열관류율이 비례적으로 작아지지

않아 다중 스크린 시스템의 설치로 인한 에너지 절감효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

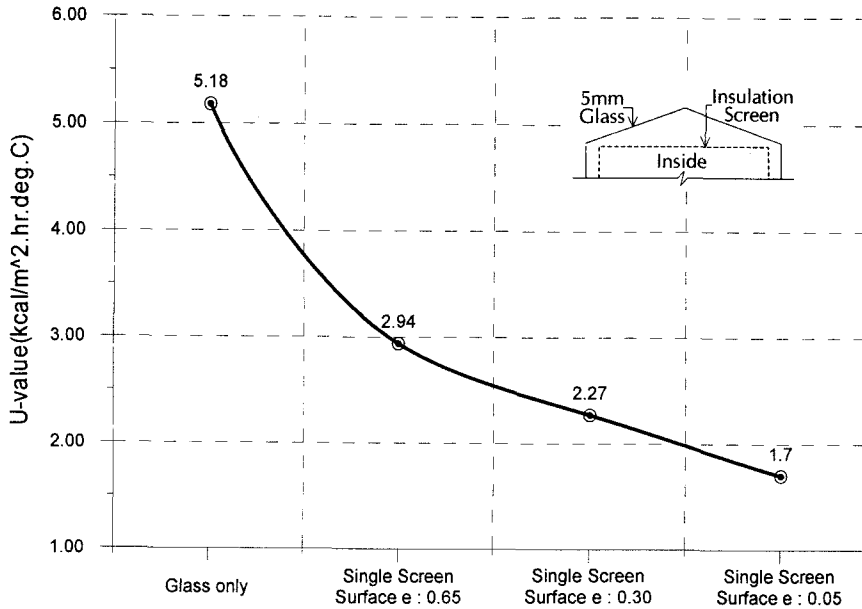


[그림 4-10] 단열스크린 구성형태에 따른 축벽의 열관류율

#### 4.4.2 천정용 반사 단열스크린

[그림 4-11]은 1중 반사단열 스크린 시스템의 표면방사율 변화에 따른 유리온실의 천정면에서의 사례별 총괄 열관류율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 천정에서 계산되는 열관류율 값은 표면방사율이 0.65인 경우에 2.94 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>°C, 0.3인 경우에 2.27 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>°C 그리고 방사율이 0.05인 경우에는 1.70 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>°C의 총괄 열관류율 값을 갖는 것으로 각각 나타났다. 표면방사율이 0.3인 1중 스크린의 경우에 천장용 반사단열 스크린 시스템은 축벽용 반사단열 스크린 시스템과 비교할 때 총괄 열관류율이 약 30~70% 정도 크게 나타나는데, 이는 천장부의 열손실이 축벽부보다 더 크게 나타남으로 인하여 천장부 단열의 중요성이 부각되는 이유이기도 하다. 축벽용 유리온실의 경우에는 단열스크린과 유리 사이의 간

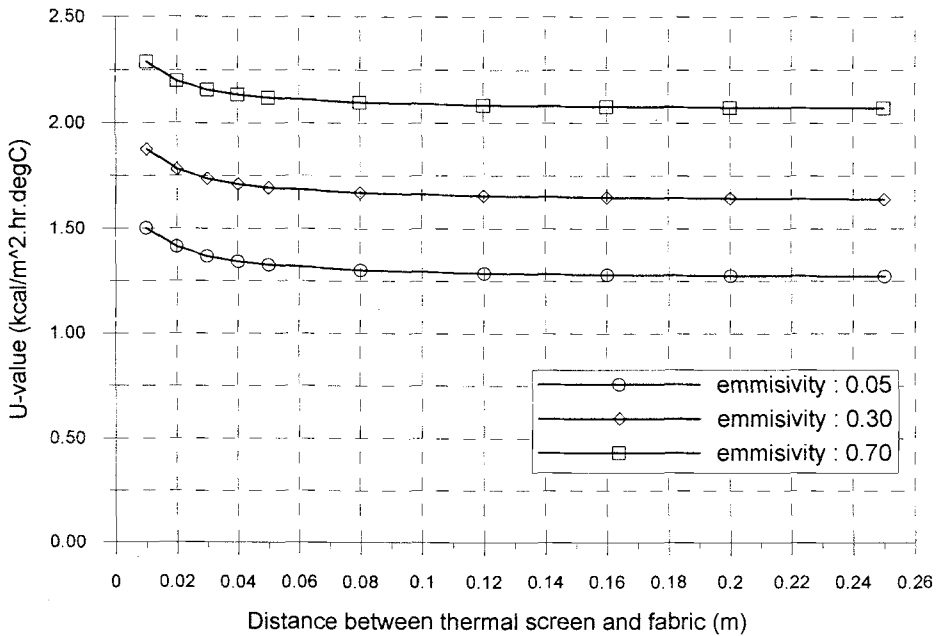
격이 약 10 cm 정도로 일정하게 유지되어 있는 반면에 천장부분에서는 온실의 구조상 삼각트러스 형태를 가지고 있기 때문이다. 즉 측벽의 경우는 높이 방향으로 내부측면 가역조건의 일반적인 자연대류가 일어나는 것으로 예측되나, 천정의 경우는 아랫면 가열조건에서 육방체세포(Hexagonal Cell)형태의 Benard Cell에 의해 발생하는 자연대류 열전달 메카니즘이 상호 다르기 때문이다.



[그림 4-11] 1중 반사단열 스크린 시스템의 표면방사율 변화에 따른 천정면 열관류율

[그림 4-12]는 천정용 2중 반사단열 스크린 시스템의 경우에 방사율 변화에 대한 스크린-부직포(Fabric) 간격에 따른 열관류율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 스크린-부직포 간격이 약 8 cm 정도 이상이 유지되면 시스템의 단열성능에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 스크린-부직포 간격이 8 cm 이하에서 표면방사율에 관계없이 유사한 형태의 열관류율 특성을 나타내었다. 그리고 이 경우에도 스크린-부직포 간격이 10 cm 정도 충분히 떨어져 있는 것이 효과적이며, 그렇지 않은 경우에 비해 약 10% 정도 단열성능이 향상되는

결과를 가져올 것으로 예상된다. 그러나 실제 유리온실에서는 천장용 2중 반사단열 스크린 시설을 할 때 2개의 스크린을 동시에 구동하는 것이 편리하며, 이와 같은 자동구동 제어장치에서는 약 20 cm 이상의 간격이 필요하기 때문에 이에 대한 문제는 크게 중요하지 않을 것으로 판단된다.



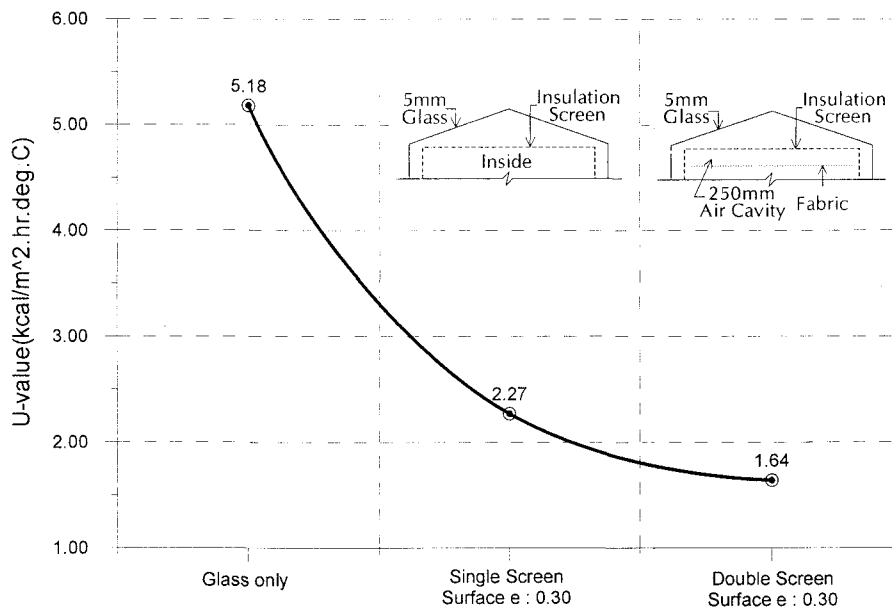
[그림 4-12] 방사율 변화에 대한 스크린-부직포 간격에 따른 열관류율(천정용 2중 반사단열 스크린)

한편 천장용 2중 반사단열 스크린의 표면방사율 변화에 따른 영향을 살펴보면 표면방사율이 0.3인 천정용 1중 반사단열 스크린 시스템의 열손실을 기준으로 할 때 방사율이 0.65인 시스템의 경우는 약 30% 정도의 열손실을 더 가져오며, 방사율이 0.05인 시스템의 경우는 약 25% 정도의 열손실을 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

[그림 4-13]은 사례별 천정부에 대한 총괄 열관류율을 나타낸 것으로 이는 전술한 바와 같이 실험이 진행된 전남대학교의 온실사양 및 기후조건에 근거하여 계산되었다. 수치계산은 역시 표면방사율이 0.3인 동일한 알루미늄 스크린을 사



용한 1중 반사스크린과 부직포를 조합한 2중 반사스크린을 설치한 경우에 대해 수행되었다. 그 결과 1중 반사단열 스크린의 경우는 총괄 열관류율이 2.27 kcal/m<sup>2</sup>hr°C, 그리고 2중 반사단열 스크린의 경우는 총괄 열관류율이 1.64 kcal/m<sup>2</sup>hr°C 인 것으로 각각 나타났다. 일반적으로 천장용 반사단열 스크린 시스템의 경우 도 시스템의 열관류 성능이 측벽용 시스템의 경우와 유사하다. 따라서 천정용의 경우 1중 단열스크린 온실에서 2중 단열스크린 온실로 바뀌어지면 유리온실의 열손실이 약 28% 정도 감소되는 것으로 나타난다. 그리고 그림에서 볼 때 천정용 역시 2중 단열스크린 이상의 다중 스크린 시스템이 되더라도 열관류율이 비례적으로 작아지지 않아 다중 스크린 시스템의 설치로 인한 에너지 절감효과는 크지 않은 것으로 판단된다. 이 문제는 본 보고서의 5장 경제성 분석에서 보다 세밀하게 다루어 질 예정이다.



[그림 4-13] 단열스크린 구성형태에 따른 온실천정의 열관류율

## 제 5 절 소결

먼저 본 장에서는 스크린-유리, 스크린-부직포 사이의 간격이 유리온실의 열관류 성능에 미치는 영향을 조사하기 위한 시뮬레이션 결과, 그 적정간격이 측벽부의 경우는 약 2cm(스크린-유리 및 스크린-부직포 간격 동일한 경향을 나타냄), 천장부의 경우는 약 8cm 정도가 되는 것으로 나타난다. 또한 계산 결과 측벽부의 경우는 스크린-부직포 사이의 간격이 2cm 이상이 유지되면 단열성능이 약 6~7% 정도 향상되고, 천장부의 경우는 스크린-부직포 간격이 10cm 정도 충분히 떨어져 있는 것이 효과적이며, 그렇지 않은 경우에 비해 약 10% 정도 단열성능이 향상되는 결과를 가져온다.

단열스크린이 채택되지 않고 유리온실로만 있는 경우에 총괄 열관류율은 일반적으로 5.18 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup> 정도로 크게 나타나지만 표면방사율에 따라 1중 반사단열 스크린이 설치된 유리온실의 측벽부 총괄 열관류율은 1.19~2.29 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 그리고 천정부 총괄 열관류율은 2.94~1.70 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup> 정도로 각각 낮게 나타난다. 즉 이는 유리온실의 열손실량을 약 40~80% 정도까지 크게 낮출 수 있는 수치를 나타낸다.

1중 단열스크린 온실과 2중 단열스크린 온실을 비교해 보면 단열스크린이 없는 유리온실의 열관류율이 5.18 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>이라 할 때 1중 단열스크린 설치온실로 바뀌어지면 측벽부는 1.69 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 천장부는 2.27 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>로 급격히 떨어진다. 그러나 1중 단열스크린 온실에서 2중 단열스크린 온실로 바뀌어지면 측벽부는 1.03 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 천장부는 1.64 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>로 총괄 열관류율의 감소폭이 현저하게 줄어든다. 따라서 이러한 경향으로부터 유추해 볼 때 2중 단열스크린 이상의 다중 스크린 시스템이 되더라도 열관류율이 비례적으로 작아지지 않아 다중 스크린 시스템의 설치로 인한 에너지 절감효과는 크지 않은 것으로 판단된다. 한편 1중 반사스크린 시스템과 2중 반사스크린 시스템을 상호 비교해 보면 본 시뮬레이션 결과 표면방사율이 0.3으로 동일한 1중 반사단열 스크린 시스템을 기준할 때 2중 시스템은 1중 시스템보다 측벽부의 경우 약 40%, 천장부의 경우에 약 30% 정도의 에너지 절감 효과가 각각 나타날 것으로 예측된다.

## 제 5 장 고효율 유리온실 단열시스템 개발

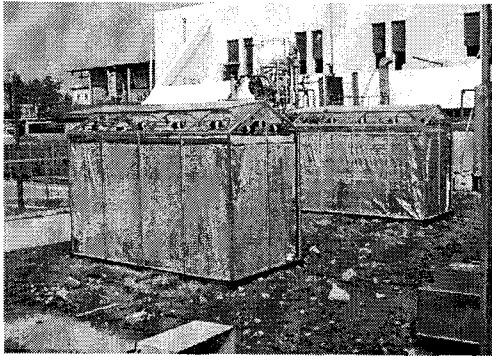
### 제 1 절 소규모 TEST-CELL 온실의 열성능

#### 5.1.1 TEST-CELL구성 및 실험

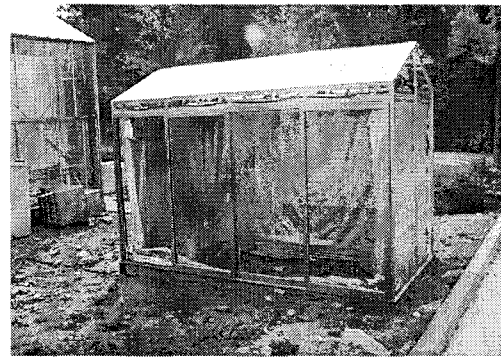
유리온실에서 단열스크린의 설치시 단열스크린의 종류 및 재질에 의한 에너지 절감성능을 정량적으로 평가하고 분석하기 위해서는 실제로 작물을 재배, 운영하고 있는 온실을 대상으로 평가하는 것이 가장 정확하고 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있는 방법이다. 그러나 실제 작물이 재배되고 있는 온실을 대상으로 실험을 진행할 경우에 재배되고 있는 작물의 특성과 적정 온도를 유지하며 운영되어야 하는 제한조건 등으로 인하여 다양한 온도에 따른 변수 실험을 진행하기가 수월하지 않다 또한 재배되는 작물의 종류와 유형에 따라 각각 서로 다른 재배상의 유효온도 범위를 가지고 있어서 수많은 작물에 대하여 각각의 조건에 적합한 단열스크린의 성능을 규명하기란 여간 어렵지 않다.

따라서 유리온실에 단열스크린의 설치에 따른 에너지 성능을 규명하기 위해서는 가장 일반적이며 동일한 조건을 가진 두개의 시설을 대상으로 서로 다른 단열시스템을 구성하고 일정기간 지속적인 실험을 진행하는 것이 좋다. 따라서 이와 같은 방법으로 두 시스템 간에 나타나는 에너지 성능에 대해 비교하는 것이 가장 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 한국에너지기술연구원에 소규모의 일반 유리온실 TEST-CELL을 제작하여 단열스크린 성능평가 실험을 실시하였다.

[그림 5-1]은 동일한 재료와 규모로 설계된 2개 동의 TEST-CELL을 보여주는 사진이다. 두 동의 TEST-CELL은 모두 동일한 대지에 남향으로 배치하여 제작되었으며, 다른 온실에 의한 그늘이나 환경적 영향을 받지 않도록 충분히 이격하여 설치되었다.



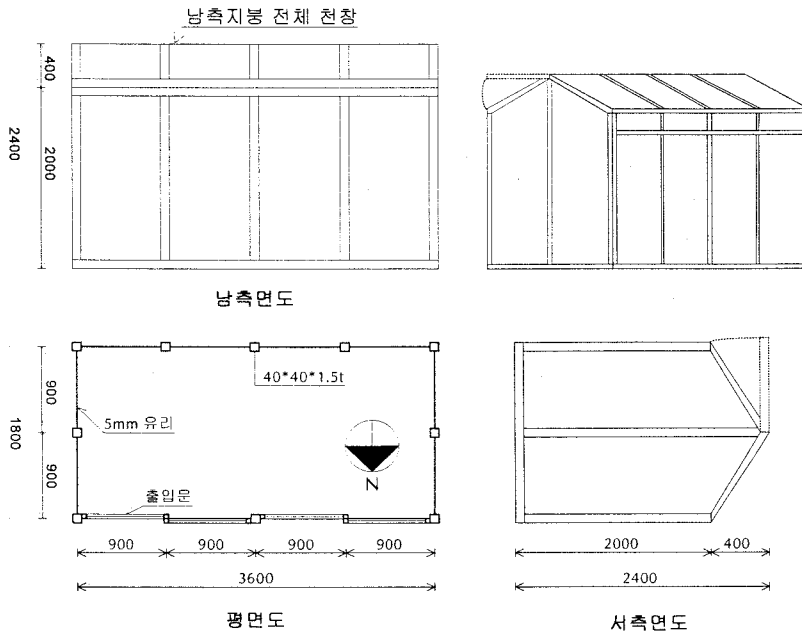
[그림 5-1] 소형유리온실 전경



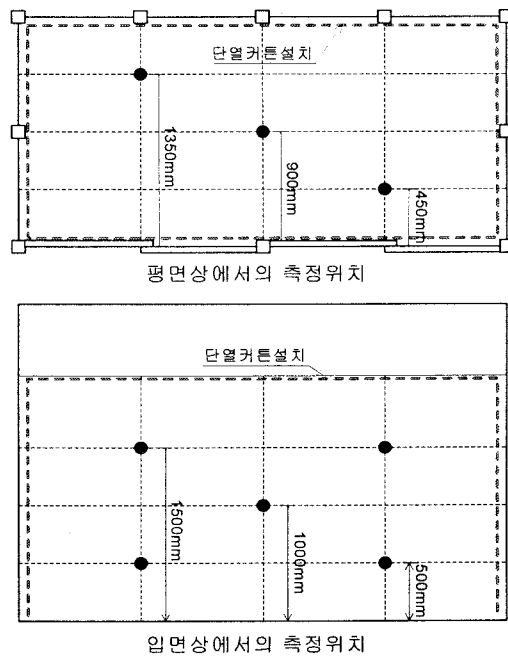
[그림 5-2] 내부구조 및 스크린설치

[그림 5-2]는 TEST-CELL의 내부구조와 내부에 설치된 단열스크린이 각 방위별로 각각 동작하는 모습을 보여주는 사진이다.

Test-Cell은 [그림 5-3]에서 보는 바와 같이 동서방향으로 측면 길이가 길도록 장방형으로 설계되었으며, 동서측은 1.8m, 남북측은 3.8m로 2평의 규모로 제작되었다. 주요 구조물은 각형 철재로 40\*40\*15t의 재료를 사용하였고, 전면과 천정을 모두 5mm 유리로 마감하여 가장 일반적인 유리온실 형태로 구성하였다. 벽면의 높이는 2m로 이며, 박공형 천정으로 만들어졌다. 천정부분부터 지붕 끝단까지의 높이는 0.4m이며 남측으로 설치된 지붕부분은 전체가 전동식으로 여닫을 수 있도록 구성된 천창으로 설계하였다. 내부에는 측벽용 수직단열스크린과 천정용 수평단열스크린이 설치될 수 있도록 내부에 전동식 모터와 예인장치를 준비하여 스크린의 재료를 바꿔가며 실험할 수 있도록 하였다. [그림 5-4]는 난방기간중 내부 환경 측정을 위한 온습도센서의 측정위치를 나타낸다.

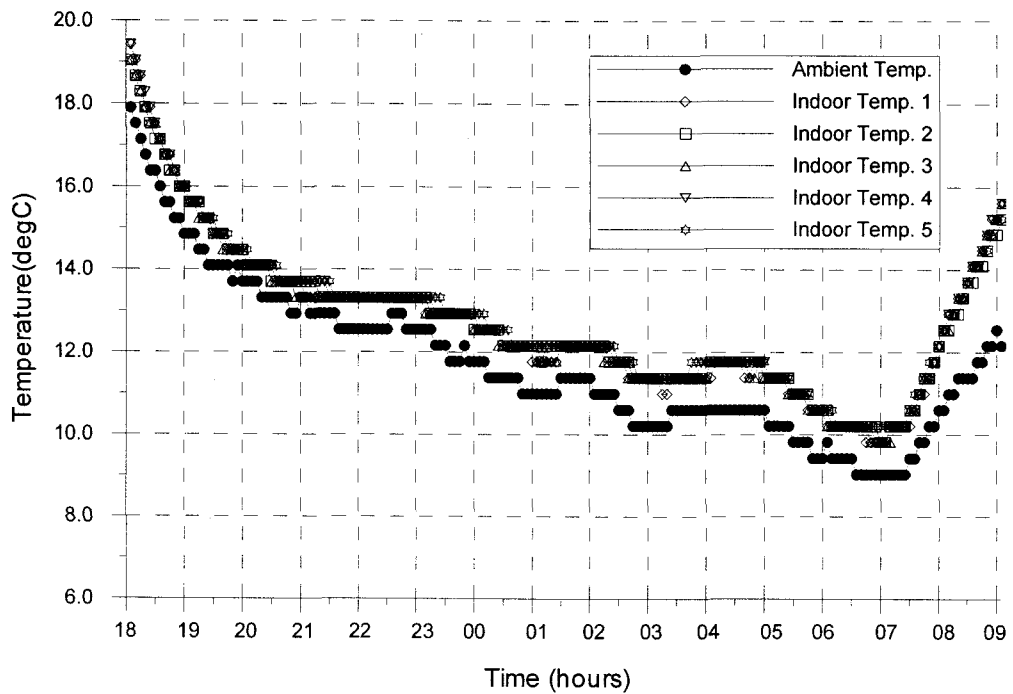


[그림 5-3] KIER 소형온실 형상 및 규격



[그림 5-4] 소형온실의 측정센서 위치도

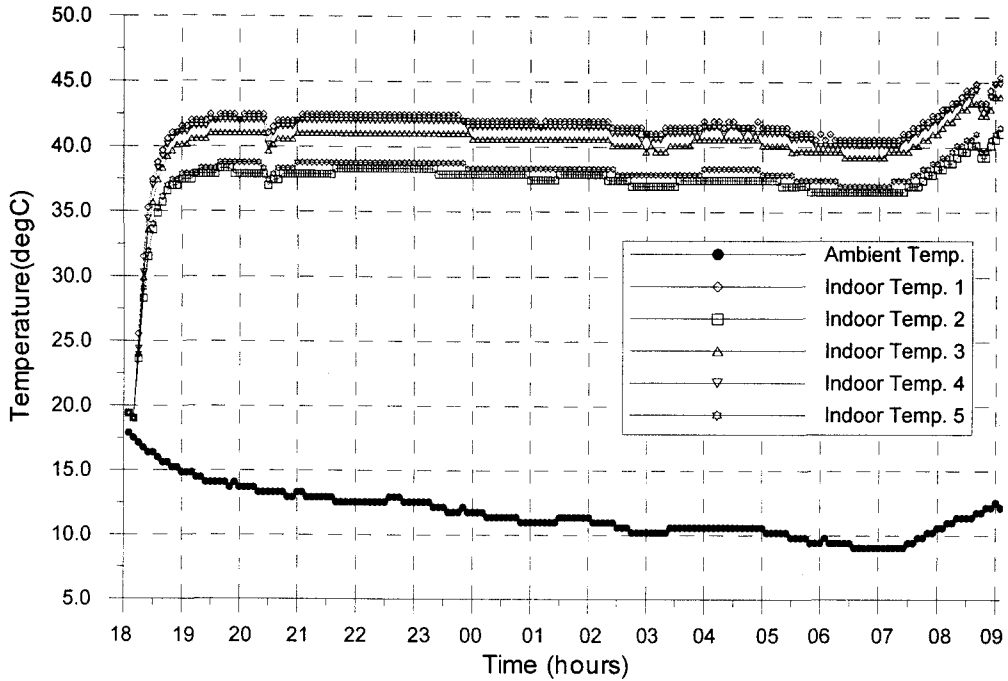
이러한 Test-Cell을 동일한 재료와 규모로 2개의 동을 설치하고 서로 다른 단열시스템의 구성하고 상대비교가 가능하도록 하였다. 내부에 설치된 난방시스템은 각각의 온실에 1.5 kW급 온풍식 전기 히터를 2대씩 설치하였으며 전기히터를 통해 공급되는 전력량을 누적 적산전력계를 사용하여 난방가동시간 동안 투입되는 전기에너지량을 측정, 비교하였다. 또한 온실내부에 보정된 열전대를 설치하고, 컨트롤러를 통해 난방설정온도에 따라 전기히터의 전원이 자동적으로 On-Off 될 수 있도록 하였다.



[그림 5-5] 무가온 조건에서 TEST-CELL 내부의 온도변화

실험은 우선 설계 제작된 TEST-CELL의 자체 열성능과 설치된 난방시스템의 적정 용량에 대한 판단을 위해 예비실험을 진행하였는데, [그림 5-5]는 무가온 조건에서의 난방필요시간(오후 6:00 ~ 익일 오전 09:00)동안 측정된 유리온실 내부의 온도분포를 보여준다. 그림에서 보면 온실내부의 온도는 외기온의 변화에 따라 약 0.5°C~1°C정도 높게 일정한 형태로 변화하고 있는 것으로 나타난다. 이

는 설치된 TEST-CELL 내부에서 어떠한 발열요인이 없이 일사에 의해 축열된 바닥면이 지중열원과 함께 열을 방출함으로써 야간시간동안 약간의 온도상승요건으로 작용한 것으로 사료된다.



[그림 5-6] 난방적용 TEST-CELL 내부의 온도변화(설정온도 40℃)

[그림 5-6]은 난방이 적용된 TEST-CELL 내부의 온도변화를 나타낸 것으로 TEST-CELL내부에 설치된 난방기가 외부기상조건의 변화에 대해 설정된 온도 조건 하에서 내부 온도변화에 따라 잘 컨트롤될 수 있는지를 보여준다. 내부 설정온도를 극한조건으로 가정하기 위해 설정온도를 40℃로 하여 실험한 결과 측정센서의 설치 높이에 따라 약 2℃정도의 온도차를 보이고는 있으나 실내외 평균온도는 대체로 설정온도 조건을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 측정센서의 높이에 따라 2℃정도의 온도차를 보이고 있는 것은 제작된 TEST-CELL의 경우, 일반적인 온실에 비해 상당히 규모가 작고 하단에 있는 난방기에 의해 열이 공급되는 과정에서 자연대류가 발생하며, 난방기가 On-Off 작동되는 과정에서 나

타난 결과로 사료된다. 또한 난방기를 제어하는 온도센서의 위치에 따라 온실내부의 평균온도 조건이 달라질 수 있다. 따라서 본 TEST-CELL 실험에서는 높이에 따른 온도분포의 분석보다는 각 측정지점으로부터 측정된 온도를 평균하여 설정된 온도조건을 만족하는지 여부에 대한 판단을 하고, 이를 만족하면 각 TEST-CELL로 투입된 총 전기 에너지량으로부터 소형온실의 에너지성능을 판단하였다.

#### [1중 단일스크린 비교실험]

실험일시 : 2001년 3월 - 10월 중

실험조건 :

- 실험1) Case 1 : 이노테크 Ultra 100제품 설치,  
Case 2 : 공기버블 단열재 설치
- 실험2) Case 1 : 이노테크 Ultra 100제품 설치,  
Case 2 : 호주산 단열스크린 설치(방사율 0.05)

#### [2중 단열스크린 비교실험]

실험일시 : 2002년 2월 - 4월 중

- 실험1) Case 1 : 이노테크 Ultra 100제품 설치,  
Case 2 : 이노테크 Ultra 100 + Air Cavity + 부직포 88g 설치.
- 실험2) Case 1 : 이노테크 Ultra 100제품 설치,  
Case 2 : 이노테크 Ultra 100 + Air Cavity + 부직포 88g 설치  
(천정부분만 부직포 제거)

### 5.1.2 실험결과 및 고찰

실험은 크게 3가지 경우에 대하여 나누어 진행하였으며 2001년 3월부터 2002년 4월까지 실시하였다. 세부적으로는 각각의 시스템을 구성하여 2개 동의



TEST-CELL에 설치하고 이들 2개의 단열시스템에 대하여 상호비교, 평가하였다. 또한 각 조건에 대해 평균 4일 가량 실험을 행하고 진행된 기간동안의 평균치를 분석하였으며, 동시에 실험이 진행된 동안 투입된 총 전력소비량을 조사하였다.

<표 5-1>은 1중 단열스크린 설치에 따른 상대 비교한 결과를 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 표면 방사율이 유리의 방사율과 거의 동일한 공기버블 단열스크린을 설치하였을 경우에는 방사율이 0.65인 이노테크 제품을 사용한 경우보다 약 25% 이상 전기소모량이 많은 것으로 나타났다. 그러나 두 번째 실험, 즉 표면방사율이 0.05인 호주산 단열스크린을 설치하였을 경우에는 단열성능이 약 41% 이상 향상되는 효과를 가져오는 것으로 나타났다.

<표 5-1> 1중 단열스크린 설치에 따른 평균 투입 에너지량

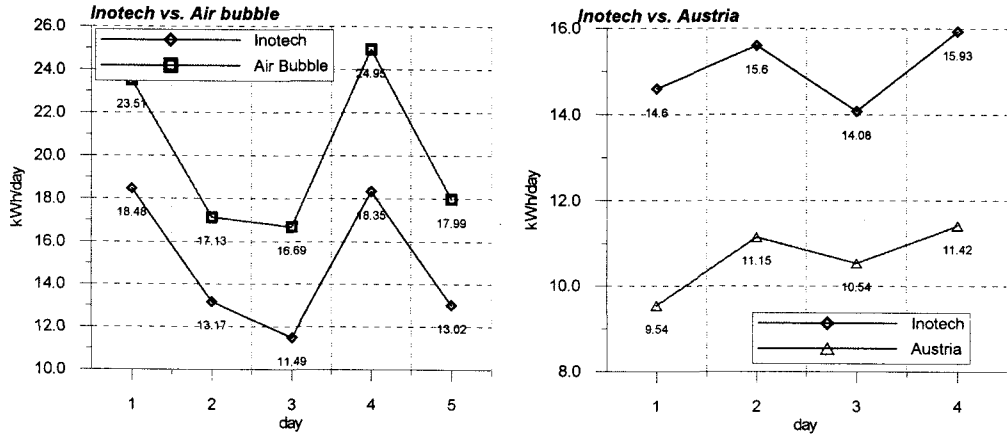
실험 일자	평균 기온	전기사용량	전기사용량	전기소비량	대비비율 ((A/B)*100)	이노테크방사율		공기버블방사율		이노테크 열관류율	공기버블 열관류율
		(이노테크(A))	(공기버블(B))	차이 (A-B)		전면	후면	전면	후면		
3/13	5.4	18.48	23.51	-5.03	<b>78.6</b>	0.65	0.65	0.90	0.90	3.912 (W/m <sup>2</sup> . degC.hr)	(W/m <sup>2</sup> . degC.hr)
3/14	9.6	13.17	17.13	-3.96	<b>76.9</b>						
3/15	5.5	11.49	16.69	-5.20	<b>68.8</b>						
3/16	5.3	18.35	24.95	-6.60	<b>73.5</b>						
3/16	7.9	13.02	17.99	-4.97	<b>72.4</b>						
<b>평균</b>		<b>14.90</b>	<b>20.05</b>	<b>-5.15</b>	<b>74.3</b>						

실험 일자	평균 기온	전기사용량	전기사용량	전기소비량	대비비율 ((A/B)*100)	이노테크방사율		호주산 방사율		이노테크 열관류율	호주산 열관류율
		(이노테크(A))	(호주산(B))	차이 (A-B)		전면	후면	전면	후면		
3/31	4.9	14.60	9.54	5.06	<b>153.0</b>	0.65	0.65	0.05	0.05	3.912 (W/m <sup>2</sup> . degC.hr)	2.013 (W/m <sup>2</sup> . degC.hr)
4/1	6.7	15.60	11.15	4.45	<b>139.9</b>						
4/2	9.5	14.08	10.54	3.54	<b>133.6</b>						
4/3	9.2	15.93	11.42	4.51	<b>139.5</b>						
<b>평균</b>		<b>15.05</b>	<b>10.66</b>	<b>4.39</b>	<b>141.2</b>						

이는 유리온실 내부에 설치되는 단열스크린의 표면 방사율에 따라 온실 자체의 열성능에 매우 민감하게 작용하는 것으로 분석될 수 있다. 즉 단열스크린 설치에 따른 유리와 단열스크린 사이의 정체된 공기층도 단열에 영향을 미치지만 그 보다는 단열스크린 자체의 표면 방사율에 대한 영향이 더 크게 영향을 미치

는 것으로 판단된다.

[그림 5-7]은 1중 단열스크린 비교실험에서 측정되어진 각각의 사례에 대한 에너지 소비량을 각 실험별로 분류하여 비교한 그래프이다.



[그림 5-7] 사례별 1중 단열스크린 비교실험 결과 나타난 에너지소비량

<표 5-2>는 표면방사율이 0.34로 개선된 단열스크린에 부직포를 덧 붙여서 2중 단열스크린으로 구성하여 진행한 실험과, 온실 외피를 유리 와 이중 프라스틱으로 구성했을 경우에 가지는 온실을 열성능을 비교한 실험 결과를 정리한 표이다. 표에서 실험 1은 표면 방사율이 0.34로 개선된 제품만으로 스크린을 구성한 사례와 개선된 스크린에 부직포를 덧 붙혀 2중 단열스크린이 되도록 구성하여 설치한 사례에 대한 비교실험으로 단일스크린으로 구성된 사례에 비교하여 2중

<표 5-2> 2중 단열스크린 설치 및 외피조건 변화에 대한 비교

실험구분		사례구분	평균전력사용량 (kWh)	환산열량 (Mcal)	상대비율 (%)	절감량 (%)
2중단열스크린 비교실험	실험 1	Case 1	21.36	18.37	100%	
		Case 2	18.38	15.80	<b>86.05%</b>	<b>13.95%</b>
	실험 2	Case 1	23.45	20.16	100%	
		Case 2	21.51	18.50	<b>91.73%</b>	<b>8.27%</b>

으로 구성된 사례에서 약 14%의 에너지성능이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 표면방사율 성능에 대한 영향이 거의 없는 부직포를 설치하여 기존의 시스템에 인위적으로 정체된 공기층을 하나 더 형성하도록 하여진 시스템으로 단일 스크린만으로 설치된 시스템에 비해 실내측으로 추가적인 정체된 공기층의 형성에 따른 에너지 성능 향상 효과로 판단된다.

또한 실험 2에서는 실험 1과 동일한 조건에서 천정부분에 설치된 부직포를 제거, 즉 천정부분은 1중 단열시스템으로 형성되고 벽체부분만 2중 단열시스템으로 구성하였을 경우에 대한 실험이다. 이 실험에서는 1중 단열스크린 설치 조건에 비해 약 8.2%의 에너지 절감성능을 나타내었는데, 실험 1의 결과를 근거로 유추하면 천정부분에 설치된 2중 단열스크린의 효과는 약 6%의 단열성능을 가지는 것으로 분석할 수 있다.

동일한 조건에서 실험 1과 실험 2를 진행했던 이유는 본 실험이 진행된 소형 TEST-CELL의 경우 측벽에 비해 천정부분의 스크린 설치 면적이 1/3 정도에 불과하지만, 실제 농가에 보급된 온실의 경우는 대개 천정부분의 스크린 설치 면적이 측벽 면적에 비해 평균적으로 1.5~2배 이상의 면적으로 온실에서 발생하는 열손실 비율이 천정부분에서 상대적으로 크게 나타나기 때문에 이에 대한 예측을 하고자 수행하였다.

### 5.1.3 2중 플라스틱 외피 TEST-CELL 실험

유리온실이 다른 건축물에 비해 열손실이 많은 이유는 온실을 이루는 주요 외피구성 재료가 열전도성이 우수한 유리라는 재료로 이루어졌기 때문이다. 온실은 구조물의 특성상 외부온도가 작물의 생장점 이하로 떨어지는 동절기에 일사를 가능한 많이 수열하여 온실 내부의 온도를 높게 유지함으로써 사계절 내내 작물의 재배가 가능한 공간으로 구성하기 위한 것이다. 이런 이유로 온실을 이루는 외피 재료로 투광성능이 좋은 재료인 유리를 선택하여 사용하나, 다른 측면에서 보면 동절기에 일조시간이 짧으므로 온실의 적정 온도를 유지하기 위한 가온시간이 증가하기 때문에 유리온실은 에너지 과소비형 구조물이라 아니할 수 없다.

실제로 유리온실을 운영하는 농가의 가장 큰 어려움은 난방이 필요한 기간동안 투입되는 에너지비용이라는 보도가 이를 뒷받침한다.

따라서 유리와 비교하여 일사 투과율은 약간 떨어지나 열전도 저항측면에서 뛰어난 성능을 나타내는 투명한 2중 플라스틱을 온실의 외피로 사용하면 에너지 측면에서 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 2중 플라스틱 온실에 대한 에너지 성능을 정량적으로 파악하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

### [외피 조건(유리 vs. 2중 플라스틱) 변화 비교실험]

실험일시 : 2002년 2월 - 4월 중

실험1) Case 1 : 유리온실 (단열스크린 미설치)

Case 2 : 2중 플라스틱 온실 (단열스크린 미설치)

실험2) Case 1 : 유리온실, 이노테크 Ultra 100제품 설치,

Case 2 : 2중 플라스틱 온실 (단열스크린 미설치)

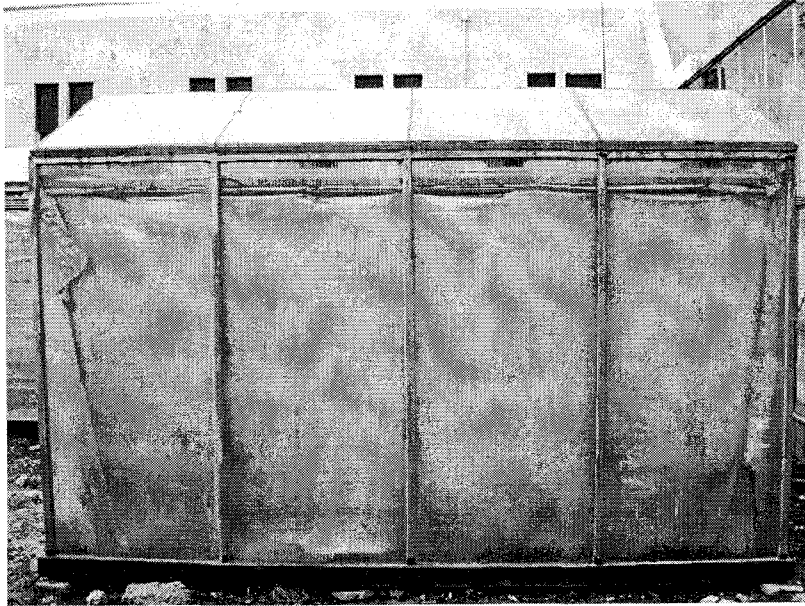
실험3) Case 1 : 유리온실, 이노테크 Ultra 100제품 설치,

Case 2 : 2중 플라스틱 온실, 이노테크 Ultra 100제품 설치,

[그림 5-8]은 2중 플라스틱으로 제작된 TEST-CELL 사진이며, <표 5-3>은 기 실험한 유리온실과 동일한 규모를 갖는 2중 플라스틱 외피 온실에 대한 실험 결과를 나타낸다.

<표 5-3> 유리온실과 2중 프라스틱 온실 비교실험 결과

실험구분		사례구분	평균전력사용량 (kWh)	환산열량 (Mcal)	상대비율 (%)	절감량 (%)
외피조건 변화 비교실험	실험 1	Case 1	23.35	20.08	100%	
		Case 2	15.72	13.52	<b>67.32%</b>	<b>32.68%</b>
	실험 2	Case 1	21.34	18.35	100%	
		Case 2	22.78	19.59	<b>106.75%</b>	<b>-6.75%</b>
	실험 3	Case 1	12.47	10.72	100%	
		Case 2	8.40	7.22	<b>67.36%</b>	<b>32.64%</b>



[그림 5-8] 플라스틱 유리온실 TEST-CELL

실험 1은 단열스크린이 설치되지 않은 유리온실과 2중 플라스틱으로 구성된 온실이 가지는 자체 열성능 비교를 위해 행해졌다. 그 결과 2중 플라스틱으로 구성된 사례에서 유리온실에 비해 약 32.6%의 에너지 절감 성능을 가지는 것으로 나타났으며, 단열스크린이 설치된 유리온실과 단열스크린이 설치되지 않은 플라스틱 온실에 대한 비교 실험에서는 플라스틱 온실이 1중 단열스크린 유리온실에 비해 약 6.7%의 에너지가 더 요구되는 것으로 나타났다. 이는 1중의 단열스크린이 설치된 유리온실과 이중 플라스틱으로 구성된 온실이 약간의 차이는 있지만 거의 유사한 에너지 성능을 나타내고 있는 것으로 고려할 수 있다.

또한 유리온실과 플라스틱 온실에 동일한 1중 단열스크린을 설치하여 진행한 실험 3에서는 유리온실에 비해 플라스틱 온실에서 약 32.6%의 에너지 절감성능을 나타냈는데, 이는 단열스크린이 설치되지 않은 실험 1에서의 결과와 동일한 에너지 성능으로 실험 1이나 실험 3에서 얻어진 데이터가 상호 신뢰할 수 있는 결과임을 입증한다고 하겠다.

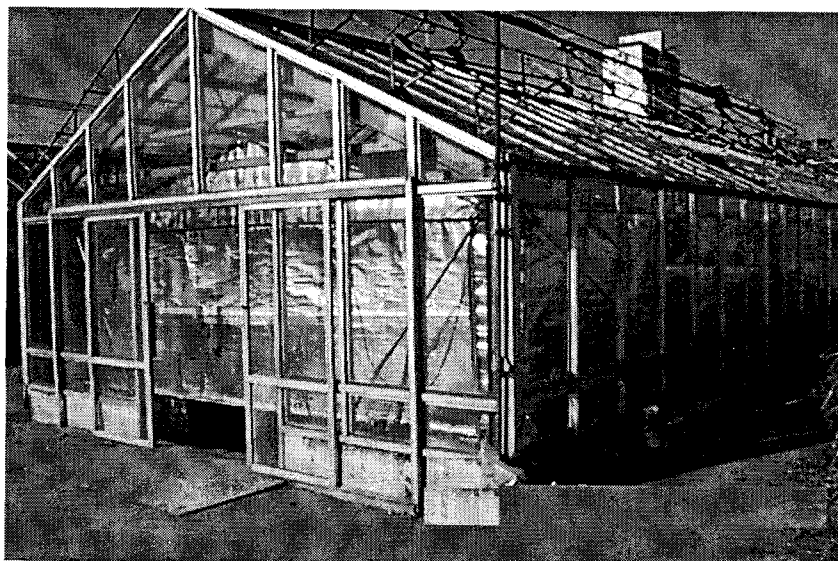
## 제 2 절 실규모 온실대상 성능비교

### 5.2.1. 실험

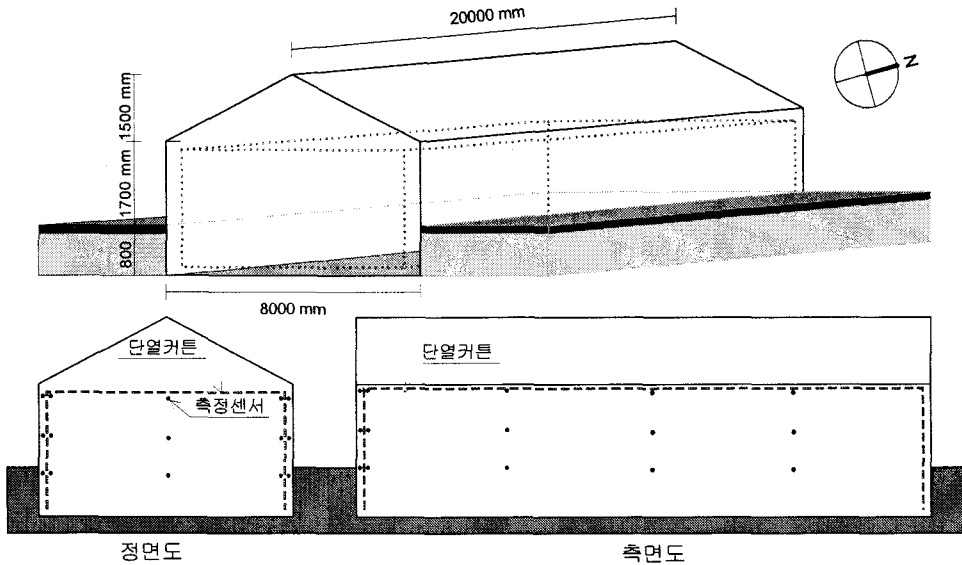
#### 1. 대상온실

열반사 단열시스템의 현장 성능검증을 위해 전남대학교내에 위치한 유리온실을 대상으로 실험을 수행하였다. 해당 유리온실의 전체 형상은 H형강으로 주 구조체를 세운 후 북측을 제외한 3면은 모두 투명단창으로 마감한 전형적인 온실이다. 북측은 해당온실 여러 동이 독립되어 연결된 형태의 작업전실 및 복도 개념을 가진 불투명 구조체로 이루어져 있다.

온실의 규모는 폭 6m, 길이 18m, 높이 4m의 장방형이고, 박공지붕 형태이며 남북으로 길이방향을 이루며 설치되어있다. 기존의 여타 온실과 비교하여 특이한 점은 유리온실의 일부, 약 1m가량이 지면 아래로 위치하고 있는 점이다. [그림 5-9]는 실험대상온실의 전경을 나타낸 사진이며, [그림 5-10]은 유리온실의 규모 및 형상을 도면화 한 것이다.



[그림 5-9] 전남대학교 유리온실 전경



[그림 5-10] 측정용 실험온실 형상 및 규모

주 사용재료로써 H형강(LH-Beam 150\*75\*1.8\*7t)은 3m간격으로 설치되었으며, 벽체를 구성하고 있는 유리를 지지하기 위한 창틀은 알루미늄 프레임으로 구성 되어있다.

실험목적인 열반사 단열시스템의 단열성능평가를 위해 온실의 측벽면과 상부 천정부에 단열스크린을 설치하였는데, 이 스크린은 구동모터에 의해 구동축이 회전하여 견인하도록 구성된 전동식 개폐장치에 의해 구동된다.

온실내부의 온도변화는 상세하게 분석하기 위해 HOBO 온습도 센서를 이용하여 측정되었다. 온도측정 위치는 온실을 횡단면 및 종단면으로 나누어 횡단면 측에는 동쪽과 서쪽스크린을 중심으로 스크린의 내부와 외부로 나누어 각각 3개 포인트 설치하고, 실내부에서는 실의 중앙에 높이별로 3곳을 선정하였다. 온실의 종단면에서는 서측의 스크린을 중심으로 스크린의 외부 3곳과 내부 3곳, 그리고, 온실을 크게 4등분하여 각각의 분절위치의 높이에 따라 3곳씩 선정하여 측정하였다. 또한 높이에 따른 온도편차를 분석하고 온실 각 지점에서의 평균온도를 분석하기 위해 측정을 위한 지점의 지상 1m, 1.8m, 2.5m 3곳으로 나누어 측정하였다. 이렇게 온실에 27개의 측정센서를 설치하여 2곳의 온실을 동일하게 구성하였

으며, 각각 온실의 환경조건 및 스크린의 구동조건을 동일하게 조절하여 측정하였다.

## 2. 사례구성

실험 1의 경우는 동일한 조건에서 1중 단열스크린을 설치하는 사례로 비교되는 두 시설에 적용된 단열스크린의 표면방사율 차이에 따른 에너지 절감성능 평가를 위해 수행되었다.

실험 2의 경우는 동일한 표면방사율을 가지는 알루미늄 스크린을 활용하여 하나의 시설은 1중 단열스크린이 설치된 사례고, 또 다른 시설은 부직포를 활용하여 2중 단열스크린을 적용한 사례에 대한 비교 실험을 행하였다. 실험 2는 인위적으로 단열시스템에 하나의 공기층을 형성하여 얻을 수 있는 에너지 절감성능에 대한 평가를 위해 수행되었다.

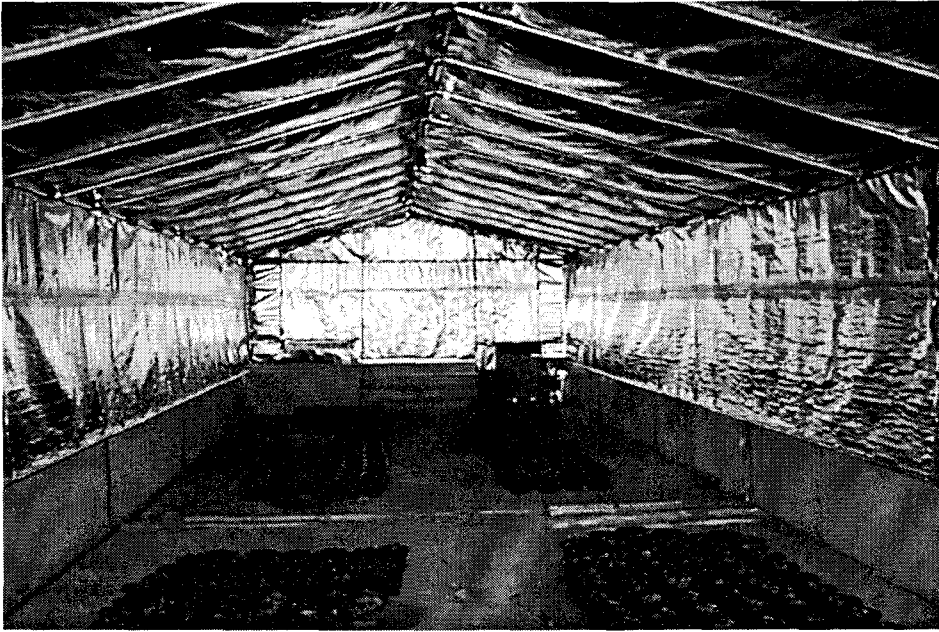
실험 3의 경우는 동일한 알루미늄 스크린 및 부직포로 2중의 단열시스템을 형성하고, 하나의 시설에는 알루미늄 스크린과 부직포와의 공기층 간격이 5mm ~ 10mm 정도를 유지하도록 설치하였으며, 다른 하나의 시설에는 인위적으로 일정하게 약 25mm 정도의 공기층을 형성하도록 설치하였다. 실험 3은 알루미늄 스크린과 부직포와의 사이에 형성된 공기층의 간격이 온실의 단열성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다.

### [실험 1]

<표 5-4> 시스템 사양 (실험 1)

항목	단열시스템 구성	Case 1	Case 2
온실규모(m)		8*20*4	8*20*4
난방면적(m <sup>2</sup> )		460	460
설치제품		국내 I사 단열스크린	호주산 단열스크린
표면방사율		0.65	0.05





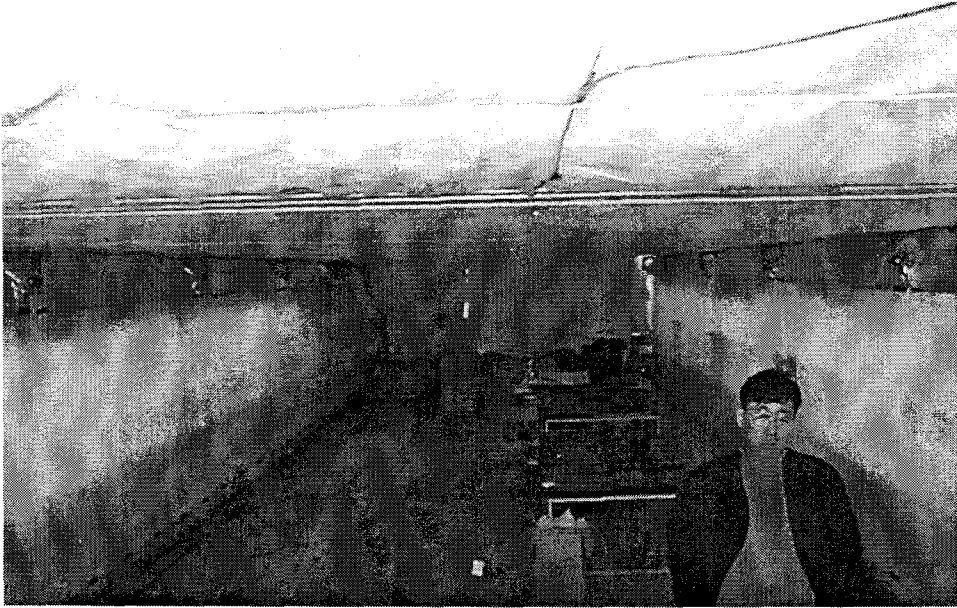
[그림 5-11] 호주산 단열스크린 적용사례 (1차년도 시작품)

<표 5-4>는 상대비교가 가능하도록 조합된 실험 1의 사례구성을 나타낸 표로서 실험에 사용된 스크린은 국내산 스크린(방사율 0.65)과 호주산(방사율 0.05)이었다. [그림 5-11]은 표면방사율이 0.05인 호주산 단열스크린을 설치한 Case 2에 대한 사진이다.

[실험 2]

<표 5-5> 시스템 사양 (실험 2)

항목	단열시스템 구성	Case 1	Case 2
온실규모(m)		8*20*4	8*20*4
난방면적(m <sup>2</sup> )		400	400
설치제품		국내 I사 단열스크린	국내 I사 단열스크린 + 부직포
표면방사율		0.30	0.30



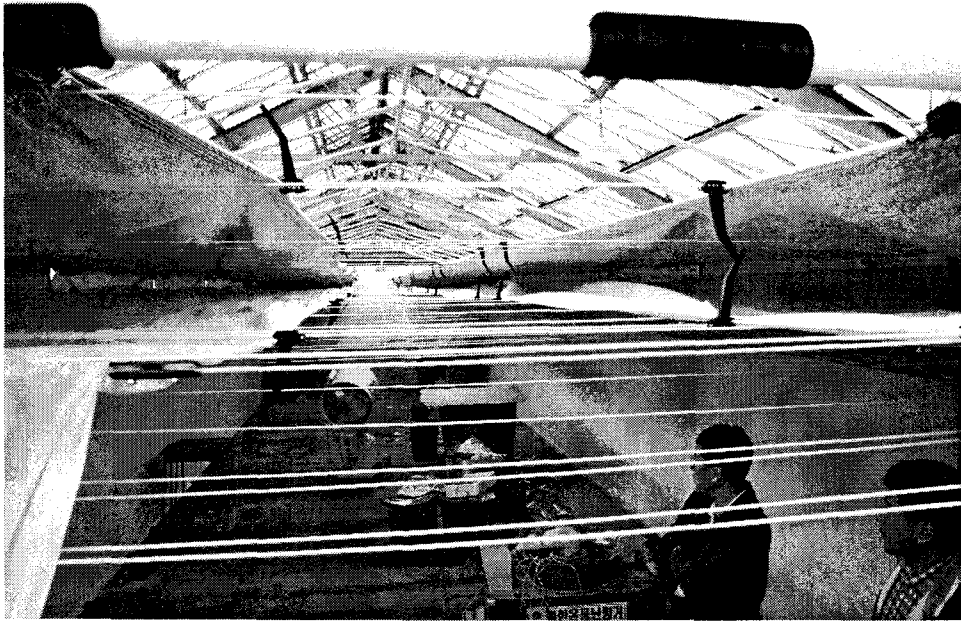
[그림 5-12] 2중 단열스크린 설치 사례 (2차년도 시작품)

<표 5-5>는 실험 2를 진행하기 위한 사례구성을 나타낸 표로써 실험에 사용된 스크린은 국내산(방사율 0.30) 1중 스크린과 동일한 스크린에 부직포가 추가 설치된 것이다. [그림 5-12]는 부직포를 이용하여 2중 단열스크린을 제작하고 인위적인 공기층이 형성되도록 2중 단열스크린을 설치한 사례를 나타낸 사진이다.

[실험 3]

<표 5-6> 시스템 사양 (실험 3)

항목	단열시스템 구성	Case 1	Case 2
온실규모(m)		8*20*4	8*20*4
난방면적(m <sup>2</sup> )		351	351
설치제품		국내 I사 단열스크린 + 부직포	국내 I사 단열스크린 + 부직포
표면방사율		0.30	0.30
스크린사이 간격(mm)		5-10	25



[그림 5-13] 일정한 간격을 가진 2중 단열스크린 설치 사례(3차년 시작품)

<표 5-6>은 실험 3을 진행하기 위한 사례 구성을 나타낸 표로서 실험에 사용된 스크린은 국내산과 부직포를 2중으로 혼합 구성 되었는데 스크린의 간격을 달리 하였다. [그림 5-13]은 일정한 간격을 유지하는 공기층이 설치되도록 제작된 2중 단열스크린의 설치 사례를 보여준다.

자연조건하에 노출되어 있는 유리온실의 경우 난방부하에 영향을 줄 수 있는 가장 민감한 요호로서 외기온을 꼽을 수 있는데, 이는 풍속, 운량 등 여러 가지 기상요소에 의해 복합적으로 영향을 받고 있다. 이런 조건들을 감안하면 동일한 조건을 갖고 있는 대상에 대해 내부 변수를 달리한 실험을 행함으로써 단열스크린의 형태와 구조에 따라 두 시설이 상호비교 될 수 있도록 하였다.

## 5.2.2 실험결과 및 고찰

### [실험 1]

- 비난방 조건시 각 사례의 실내온도 환경 비교분석

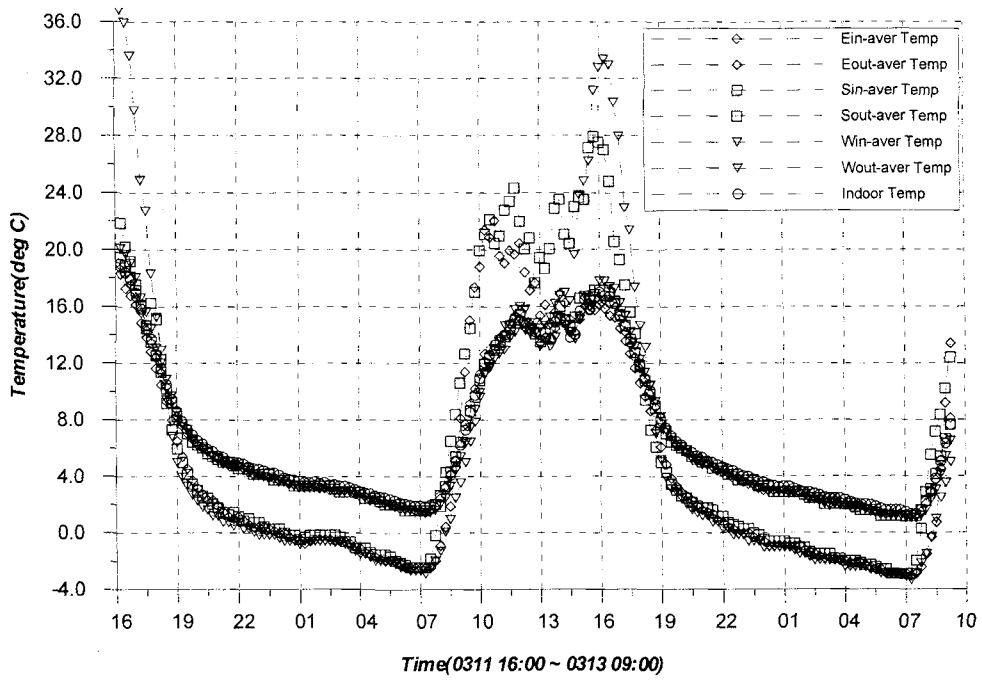
이 실험은 온실내부의 가온을 하지 않은 상태에서 주간에는 단열스크린을 개방하고 야간에는 단열스크린을 설치하여 나타나는 스크린 자체의 단열성능을 비교하기 위해 행해졌다.. 실험은 약 2주간에 걸쳐 수행하였으나, 실험기간을 대표할 수 있는 2일을 택하여 대표기간을 분석하였다. <표 5-7>은 각 사례의 실험조건을 보여준다.

<표 5-7> 비난방 실험 조건 비교

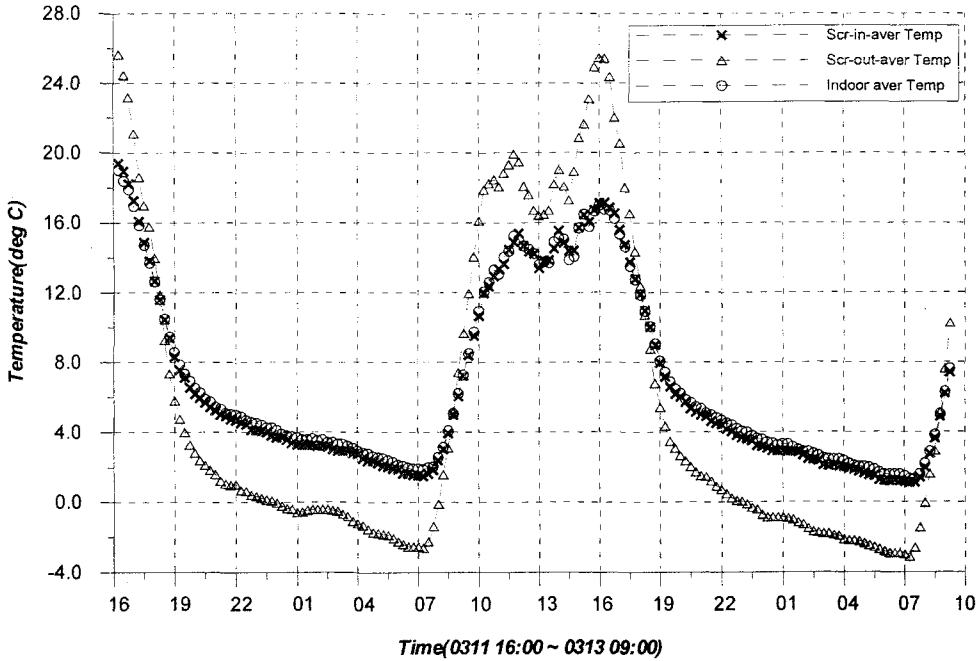
구분		Case 1	Case 2
설치제품		국내 I사 제품	호주산 단열스크린
제품 표면방사율		0.65	0.05
단열스크린 구동조건	개	오전 09:00	
	폐	오후 17:30	
내부환경		작물 생육	
실험분석기간		3월11일 16:00 ~ 3월13일 09:00	

분석의 편의를 위해 실내공간 테이터는 실내측에 설치한 9개의 측정데이터를 평균하여 입력하였으며, 각 벽면의 스크린 내외부로 설치된 세 개의 측정센서로부터 평균값을 취하였다. [그림 5-14]는 Case 1의 대표기간 중 각 위치에서의 온도분포를 보여주고 있으며, [그림 5-15]는 실내평균온도와 스크린의 내부평균온도 그리고 스크린외부의 평균온도 등을 각각 나타낸 것이다.

그림에서 보면 주간시간대의 실내평균온도는 외기온에 비해 약 10℃이상 상승된 온도분포를 나타내어 온실효과의 현상을 그대로 보여주고 있으며, 가온이 되지 않는 야간시간대에는 외기온의 변동과 유사한 패턴으로 온도가 변화되는 것을 알 수 있다. 스크린을 중심으로 내외측에 약 10cm 이격된 거리에서 측정된 온도분포에서 특이한 온도특성을 볼 수 있는데, 야간시간에 스크린 내부에서 측정된 데이터는 동측, 남측, 서측 모두 외기온과 유사한 패턴으로 약 0.5~1℃정도 높은 온도를 나타내고 있다.

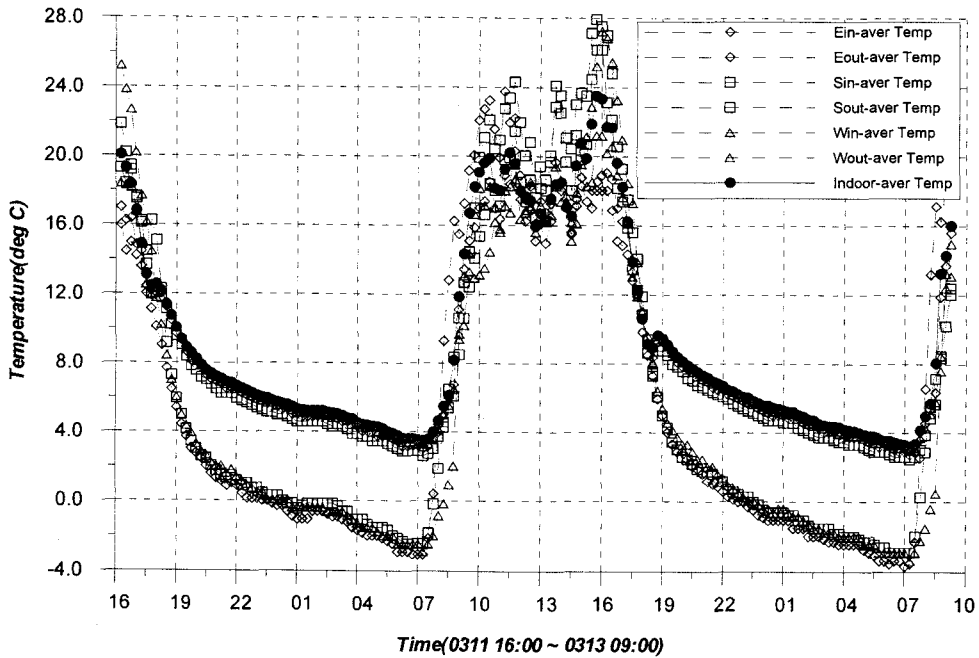


[그림 5-14] 비난방 조건시 단열스크린 설치에 따른 실내온도 분포(Case 1)

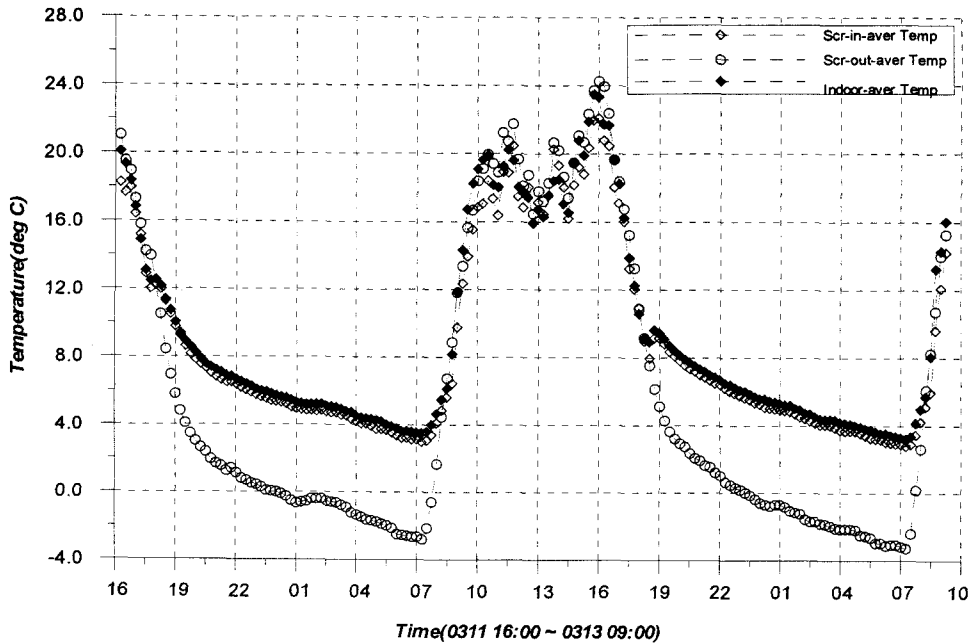


[그림 5-15] 비난방 조건시 각 부위에서의 평균온도 비교(Case 1)

[그림 5-16]은 Case 2의 대표기간 중 각 위치에서의 온도분포를 보여주고 있으며, [그림 5-17]은 실내평균온도와 스크린의 내부평균온도, 그리고 스크린외부의 평균온도 등을 나타냈다. Case 2의 경우에서도 마찬가지로 주간에는 온실내부의 온도가 외기온에 비해 평균 10℃이상 상승되는 것으로 나타났으며, 각 방위에 따른 평균온도분포도 거의 비슷한 경향을 보였다. 그러나 야간의 경우에는 Case1과는 다른 분포를 나타냈는데, 스크린의 내측에서 측정된 데이터는 외기온보다 약 3℃정도 높은 온도분포를 나타냈다. 이는 측정기간의 기상조건이 주간에 일사가 거의 없는 상황임을 고려하면 약간의 축열된 에너지, 내부에 생육중인 식물의 호흡으로 발생한 에너지 및 지중열 등으로 인한 에너지가 야간에 외부로 손실되는 과정에서 단열스크린의 설치로 인해 열손실을 상당부분 줄여줌으로써 나타난 현상으로 사료된다.



[그림 5-16] 비난방 조건시 단열스크린 설치에 따른 실내온도 분포(Case 2)



[그림 5-17] 비난방 조건시 각 부위에서의 평균온도 (Case 2)

난방을 행하지 않고 있는 상황에서도 Case 1은 스크린의 내측과 외측의 온도 차이가 약 4°C인 것에 반해, Case 2에 설치된 단열스크린의 경우 그 자체만으로 스크린의 내측과 외측의 온도차가 약 7°C정도로 유지되는 것을 보면 상대적으로 Case 2의 단열스크린의 경우가 Case 1의 경우보다 단열성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

#### - 난방조건 대표기간 분석(0318 00:00 ~ 0318 07:00)

본 실험에서는 단열성능이 다른 스크린이 설치된 유리온실에 대해 야간시간대에 난방을 수행하면서 나타나는 실내 환경조건을 분석하였다. 온실의 난방을 위해 설치된 난방기구는 농업용으로 사용되는 온풍기를 사용하였고, 실내에 온도의 성층화를 방지하고 각 부위에의 균등한 온도조건을 유지할 수 있도록 송풍기에 비닐덕트를 연결하였다. 비닐덕트는 약 1m 간격으로 X자 형태의 구멍을 내어 온실의 동, 남, 서측의 벽 아래쪽으로부터 위쪽으로 온풍이 전달될 수 있도록 하였다.

2개의 온실 모두 동일용량의 온풍기와 동일한 형태의 송풍시설을 설치하여 난방기구에 의한 이상조건은 없는 것으로 하였으며, 실내의 제어온도는 17℃로 설정하여 실험하였다. 난방기를 제어하는 온도센서는 난방장치에 설치된 센서를 그대로 이용하였으며, 설치위치에 따른 온도제어를 가능한 한 일정하게 하기 위해 온실의 정 중앙부 지상 1m지점에 설치하여 제어하였다. 난방기의 제어방식은 On/Off 조절이 되는 시스템으로 제어온도를 17℃로 하였을 경우 측정센서로부터 16℃가 측정되면 난방기가 가동되고, 18℃가 되면 난방기가 정지되도록 설정하였다.

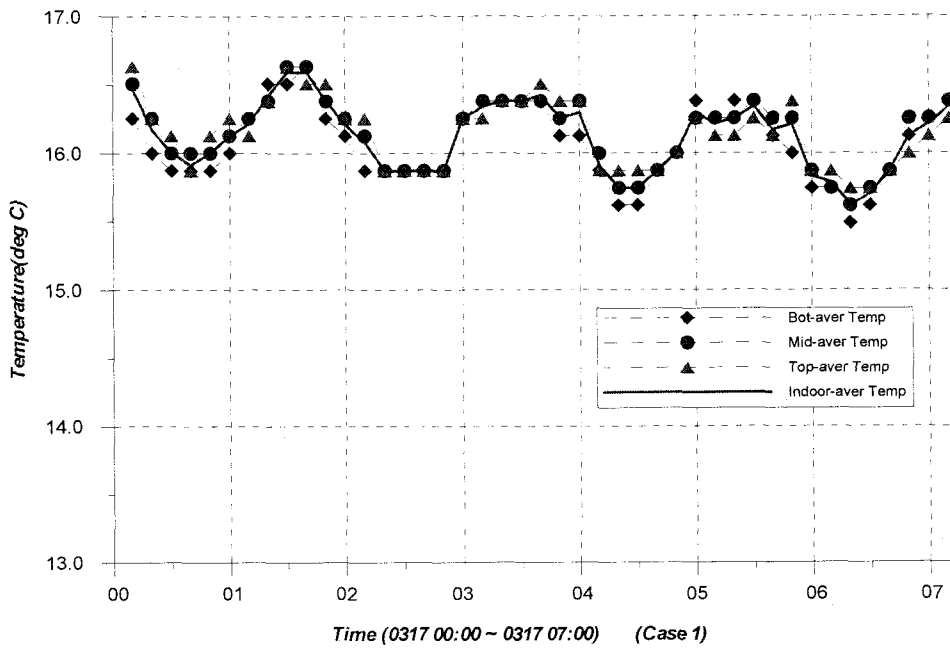
난방기의 에너지원은 경유를 사용하였으며, 일일 에너지사용량을 정확하게 계량하기 위해 급유 배관의 중간에 눈금계가 설치된 탱크를 설치하여 난방가동 시간 전의 초기눈금과, 다음날 오전 난방이 끝나는 시간에 내려간 지점의 눈금을 기록하여 일일 기름사용량을 모니터하였다. 실험조건으로는 Case 1, 2 모두 오후 17:30분에 단열스크린을 설치하고, 다음날 오전 09:00에 스크린을 제거하는 방식으로 운영하였으며, 스크린의 설치와 제거시간과 동일한 조건으로 난방기의 가동 시간을 조절하여 주간시간대에 난방기가 가동되는 경우가 없도록 하였다.

실험은 2001년 3월 15일부터 약 10일간 진행하였으며, 외부 기상의 변동이 적고 데이터의 수집이 온전한 3월 16일 오후부터 3월 18일 오전까지의 실험데이터를 기준으로 분석하였다. 측정센서의 설치위치 및 높이는 비난방조건 실험과 동일하게 하였으며 데이터는 10분 간격으로 측정하도록 하였다.

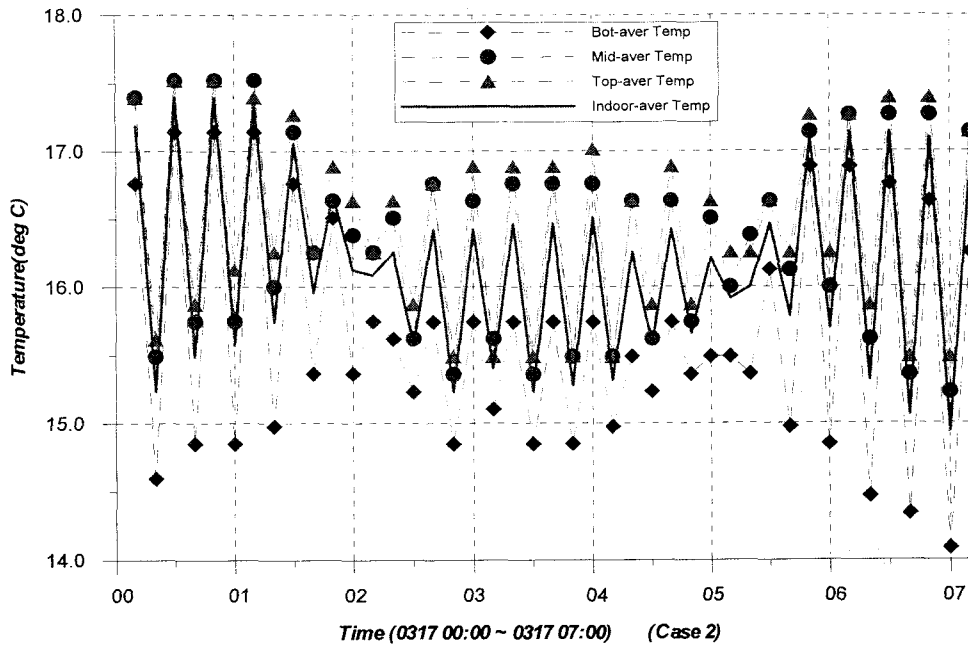
다음은 실험진행 기간 중에 나타난 각 사례별 특징을 상세하게 분석하기 위해 대표기간 분석을 행하였다.

[그림 5-18]과 [그림 5-19]는 각 사례에서 측정센서의 높이에 따라 분석한 온도분포 그래프이다. Case 1에서 난방되는 실내 공간온도는 측정높이에 따라 아주 근소한 차이를 보이고 있으나, 거의 동일한 온도분포를 나타내며 실내온도가 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 덕트를 통해 전달되는 가온된 공기가 실내에 유입되면서 급격하게 실내온도에 영향을 주는 것이 아니라, 단열스크린의 직조형태에 기인하여 일부는 바깥쪽으로 빠져나감으로 열손실되고, 일부는 실내에 영향을 주어 실내온도가 완만하게 상승하는 것으로 사료된다.





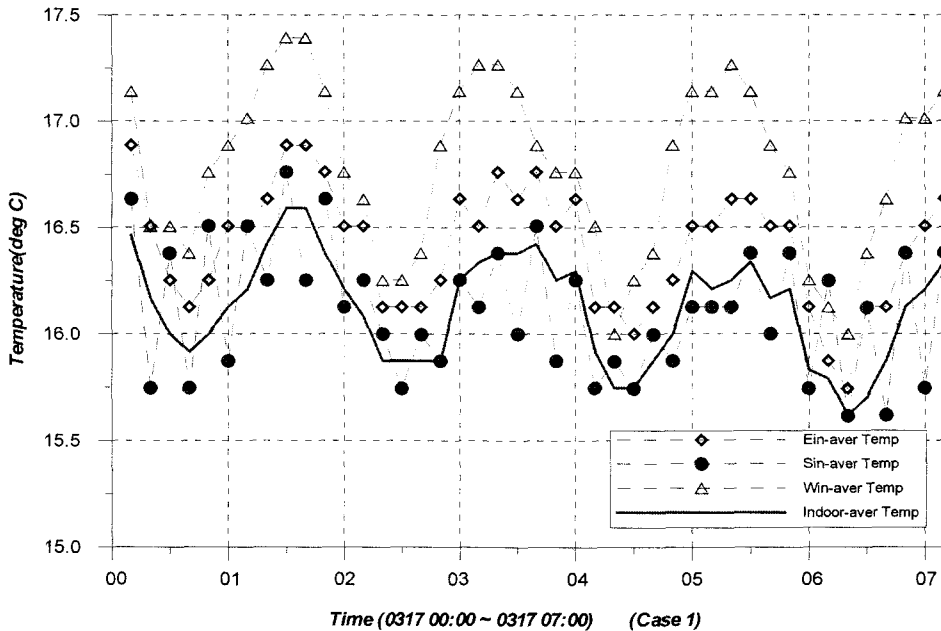
[그림 5-18] 난방조건시 실내 높이에 따른 대표기간 온도분포(Case 1)



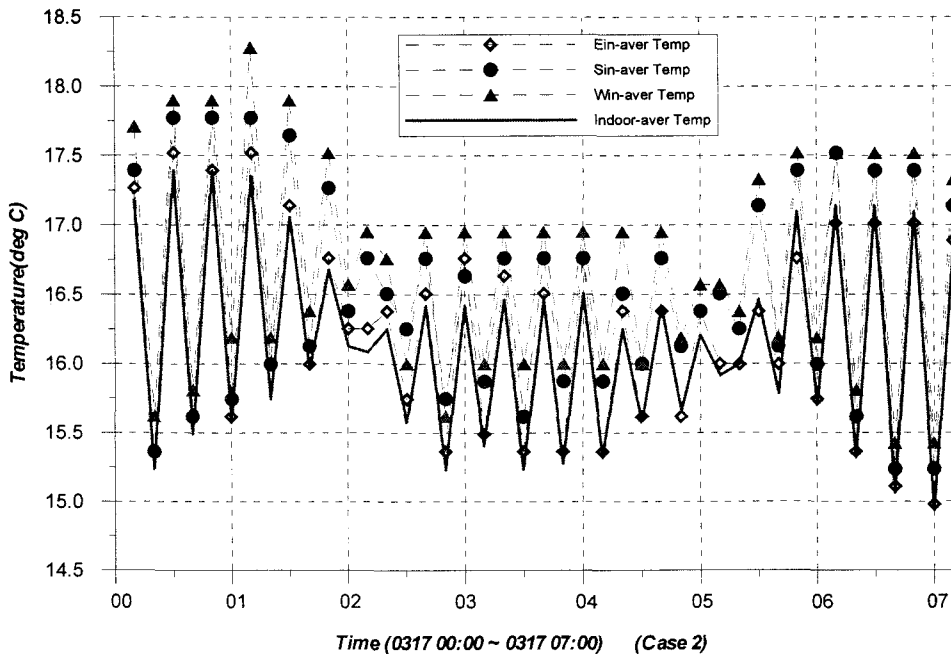
[그림 5-19] 난방조건시 실내 높이에 따른 대표기간 온도분포(Case 2)

그러나 Case 2는 설치된 단열스크린의 재질이 공기의 유동을 완전히 차단할 수 있는 밀폐형태로 이루어져 있기 때문에 난방기가 작동하여 가온된 공기가 실내에 투입될 때 덕트를 통해 전달되는 가온 공기의 영향으로 실내의 온도가 급격하게 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 실내 환경유지를 위해 설정된 온도까지 가온되고 나면, 외부와 거의 단절된 실내 공간의 특성에 따라 실내에서는 온도차에 따른 공기의 성층화가 점차 형성되는 것으로 분석된다.

따라서 Case 2는 Case 1과 비교하여 실내환경을 설정된 온도까지 유지하기 위한 난방기의 가동시간이 현저히 줄어드는 것으로 나타났는데, 이는 온실 내부의 상하부 온도차가 크게 되어 전체 온실의 평균온도가 저하됨에 따라 Case 1보다 난방기가 가동된 후 다음 가동되는 시간까지의 차가 훨씬 짧아지게 되는 현상이 나타났다. 그러나 전체적인 측면에서의 실내 유지를 위한 난방에너지 투입량은 난방이 필요한 야간시간동안 난방기의 총 가동시간이 Case 1과 비교하여 현저하게 작아져서 결과적으로 Case 1에 비해 보다 에너지 절약적인 시스템이라 할 수 있다.



[그림 5-20] 난방조건시 스크린안쪽의 방위별 대표기간 분석(Case 1)



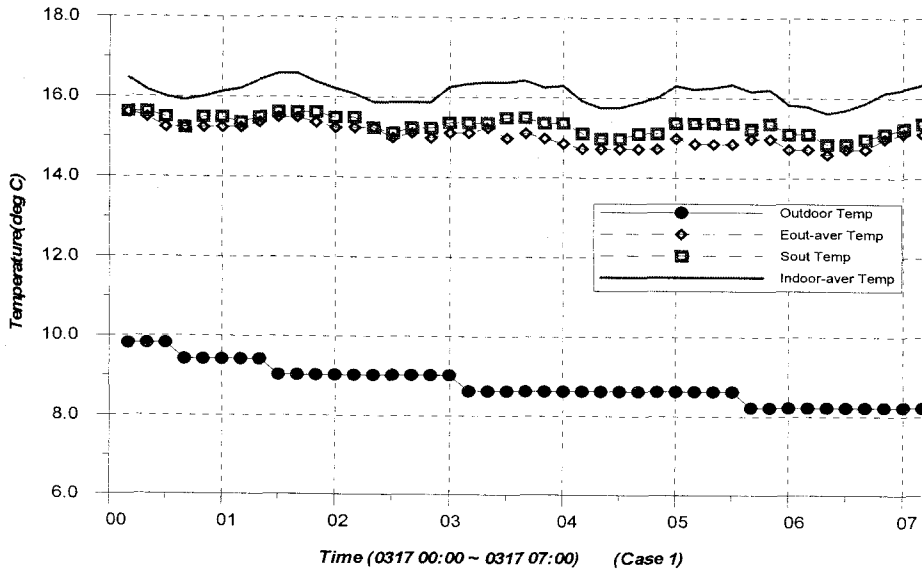
[그림 5-21] 난방조건시 스크린안쪽의 방위별 대표기간 분석(Case 2)

[그림 5-20]과 [그림 5-21]은 단열스크린이 설치된 실내측에서의 각 방위별로 측정된 온도분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보면 각 방위에 따라 그다지 큰 온도 차이는 보이고 있지 않지만, 남쪽에서 측정된 온도보다 동쪽과 서쪽에서 측정된 온도에서 크기는 1°C 정도의 온도차를 보이고 있다.

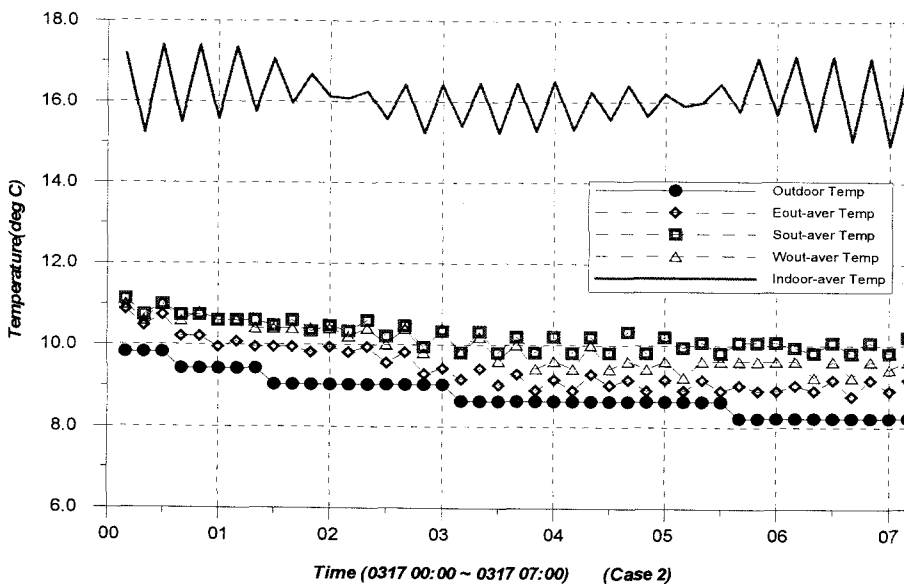
이는 앞서 설명한 바와 같이 실내에 가온공기를 투입하기 위해 설치된 공기 덕트가 동측과 서측벽쪽으로 붙어서 길게 설치되어 있기 때문에 상대적으로 가온공기의 영향을 덜 받은 남쪽에서 약간 낮은 온도를 보이는 것으로 분석된다. 이러한 현상은 Case 1과 Case 2에서 공통적으로 나타나고 있으나, 각 방위에 따른 온도차이는 설치된 단열스크린의 재질과 형태 때문에 Case 2에서 보다 적은 온도분포를 보이는 것으로 사료된다.

[그림 5-22]와 [그림 5-23]은 단열스크린과 온실외피 유리 사이에서 각 방위별로 구분하여 측정된 온도분포를 도시한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 Case 1과 Case 2 모두에서 스크린 바깥쪽에서 측정되는 온도는 방위에 따

라 커다란 차이를 보이고 있지는 않았다. 즉 단열스크린의 설치에 따른 열손실 현상은 방위에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.



[그림 5-22] 난방 조건시 스크린 바깥쪽의 대표기간 분석(Case 1)



[그림 5-23] 난방 조건시 스크린 바깥쪽 대표기간 분석(Case 2)

<표 5-8>은 실험이 진행된 기간동안 각 방위별, 측정위치별 온도분포 및 사용된 에너지투입량의 평균값을 비교한 것이다. 표에서 나타난 것처럼 실내 평균온도는 16.12℃와 16.15℃로 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 스크린 안쪽에서 측정된 평균온도도 16.44℃와 16.47℃로 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 단열스크린과 유리사이에서 측정된 온도는 단열스크린의 재질과 재료에 따라 15.2℃와 9.9℃로 약 5.3℃의 온도차를 보였다. 또한 실험기간 중 투입된 평균 사용유량은 22.5ℓ와 10.2ℓ로 분석되었는데, 이를 에너지로 환산하면 207 Mcal 와 93.8 Mcal로 나타나, Case 2에 적용된 단열스크린의 경우는 Case 1과 비교하여 상대적으로 약 55%의 에너지 절감성능을 나타내었다.

<표 5-8> 사례별, 위치별 실내 평균온도 및 에너지사용량

			Average (DgreeC)	실내평균 기준오차 (DgreeC)	사례동일 위치별오차 (DgreeC)	사용 유량 (Litter)	환산열량 (Mcal/litter)	절감비율 (%)
Ambient Temperature			<b>8.80</b>					
Inotech Ultra 100	East	Inside	16.41	-0.29	0.19	<b>22.50</b>	<b>207.0</b>	<b>100</b>
		Outside	15.04	1.08	5.08			
	West	Inside	16.78	-0.66	0.10			
		Outside	15.12	1.00	5.68			
	South	Inside	16.11	0.01	-0.39			
		Outside	15.30	0.82	5.07			
	Inside average		<b>16.44</b>	-0.31	-0.03			
	Outside average		<b>15.17</b>	0.95	5.29			
	Center average		<b>16.12</b>	0.00	-0.03			
Austria Insulation	East	Inside	16.22	-0.07	-0.19	<b>10.20</b>	<b>93.8</b>	<b>45.3</b>
		Outside	9.96	6.19	-5.08			
	West	Inside	16.68	-0.53	-0.10			
		Outside	9.44	6.71	-5.68			
	South	Inside	16.51	-0.36	0.39			
		Outside	10.24	5.91	-5.07			
	Inside average		<b>16.47</b>	-0.32	0.03			
	Outside average		<b>9.88</b>	6.27	-5.29			
	Center average		<b>16.15</b>	0.00	0.03			

## [실험 2]

실험조건 : Case 1 : 이노테크 Ultra 100제품 설치,

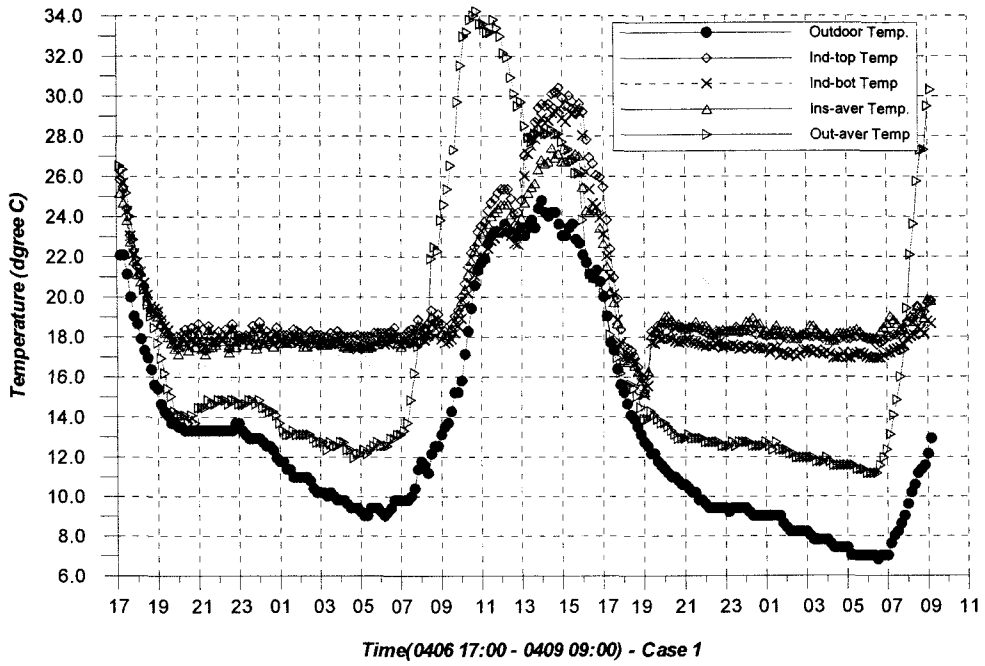
Case 2 : 이노테크 Ultra 100 + Air Cavity + 부직포 88g 설치.

실험일시 : 2002년 4월 중

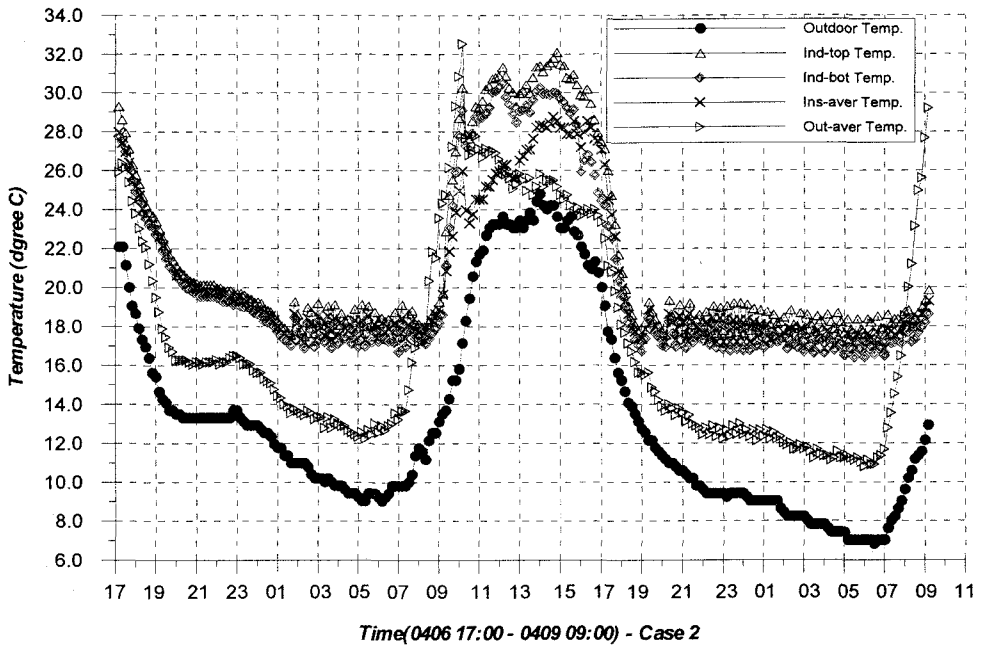
두 번째로 진행된 실험은 기존의 유리온실에서 일반적으로 사용되는 알루미늄 단열스크린을 설치한 사례와 알루미늄 스크린에 부직포를 연결하여 알루미늄 스크린과 부직포 사이에 하나의 공기층이 추가로 형성되도록 구성한 단열스크린과의 에너지 성능 비교를 위해 행해졌다.

[그림 5-24]와 [그림 5-25]는 실험이 진행된 기간동안 실내의 높이별 온도분포 및 단열스크린과 유리사이의 온도분포 등을 비교한 그래프이다.

[그림 5-24]는 기존의 1중 단열스크린을 사용하여 측정된 실내온도 분포를 나타낸 것으로, 실내의 높이에 따라 1m, 1.5m, 2m 지점에서 측정된 온도는 커다란 차이 없이 거의 균일한 온도분포를 나타내고 있다. 그러나 2중으로 설치된 Case 2는 [그림 5-25]에서 보는 바와 같이 실내공간의 높이에 따라 1.5℃~2℃가량의 온도 성층화 현상을 보이고 있다. 또한 보다 단열이 보장되어진 Case 2는 Case 1과 비교하여 난방기기가 더 빈번히 작동하는 것으로 나타났다. 그러나 Case 2는 실제로 야간시간동안 보일러가 가동된 시간을 합하면 Case 1과 비교하여 더 짧게 가동되어 투입에너지양이 보다 적은 것으로 나타났다. 즉 실내에 설정된 온도 조건에 도달하는 시간은 짧은 반면 난방기가 재가동되기 까지 걸리는 시간은 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 이는 Case 2가 Case 1보다 단열성능이 더 우수하다는 것을 반증하는 것이라 하겠다. 단열스크린과 유리 사이에서 측정된 온도는 실내 평균온도와 비교하면 3℃~6℃ 정도 낮은 분포를 보이고 있는데, 이러한 현상은 Case 2에서도 동일하게 나타났다.

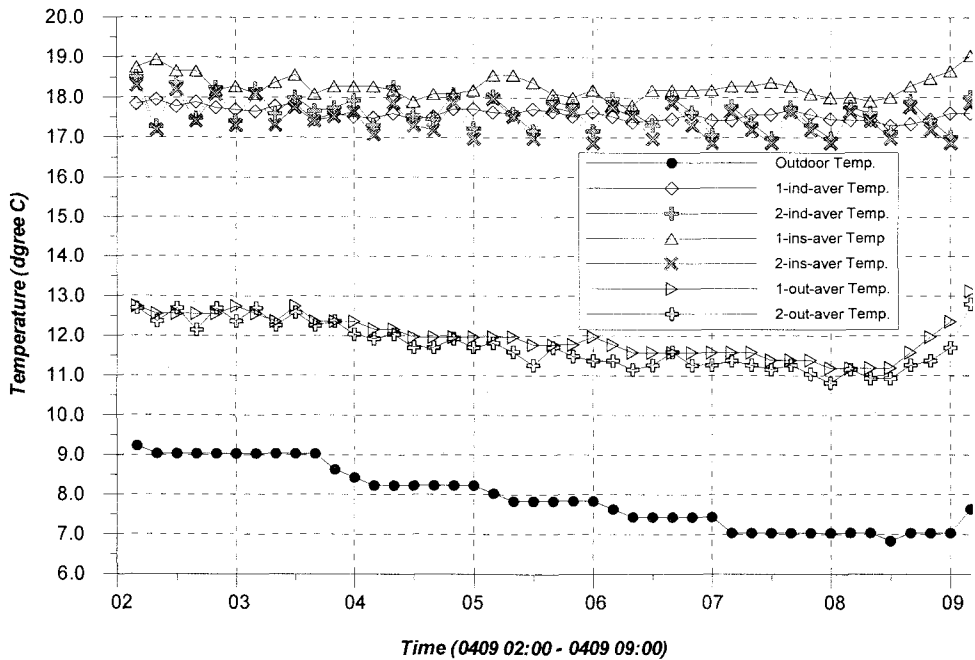


[그림 5-24] 각 위치별 평균온도 분포 (Case 1)



[그림 5-25] 각 위치별 평균온도 분포 (Case 2)

[그림 5-26]은 실험이 진행된 기간동안 측정된 데이터 중에서 대표기간을 선정하여 두 사례에서 측정된 각 부분의 온도분포를 나타낸 그래프이다. 두 사례 모두에서 실내 평균온도, 단열스크린의 안쪽 및 바깥쪽에서 측정된 데이터를 비교하면 거의 동일한 온도분포를 나타내며 운영되고 있는 것을 알 수 있다. 실내평균온도와 스크린 안쪽에서 측정된 데이터를 보면 Case 1에서 측정된 데이터는 완만한 온도상승과 하강곡선을 그리며 분포하는 반면, Case 2는 Case 1에 비해 급격한 온도변화 곡선을 보여주고 있는데, 이는 앞에서 설명된 바와 같이 Case 2에 설치된 단열스크린이 가지는 성능이 보다 우수하여 난방설정온도까지 도달하는 시간이 Case 1에 비교하여 짧게 나타나기 때문에 나타나는 현상이다.



[그림 5-26] 대표기간 중 실내 위치별 온도분포

<표 5-9>는 실험 2가 진행된 사례에 대해 각 위치에 따른 온도분포와 사용된 에너지량에 대해 비교한 것이다. 표에서 INSIDE로 표시된 부분은 설치된 단열스크린의 바로 앞쪽에서 측정된 데이터, OUTSIDE로 표시된 부분은 단열스크린과



유리사이에서 측정된 데이터, 그리고 CENTER로 표시된 부분은 실내 공간의 평균온도를 각각 나타낸 것이다.

<표 5-9> 사례별 위치별 평균온도 분포 및 에너지사용량

		Average (DgreeC)	실내평균 기준오차 (DgreeC)	사례동일 위치별오차 (DgreeC)	사용 유량 (Litter)	환산열량 (Mcal/litter)	절감비율 (%)
Ambient Temperature		<b>7.92</b>					
Single Screen	Inside average	<b>18.27</b>	0.69	0.82	<b>12.45</b>	<b>114.5</b>	<b>100</b>
	Outside average	<b>11.96</b>	-5.62	0.24			
	Center average	<b>17.58</b>	0.00	-0.06			
Double Screen	Inside average	<b>17.45</b>	-0.19	-0.82	<b>9.75</b>	<b>89.7</b>	<b>78.3</b>
	Outside average	<b>11.72</b>	-5.92	-0.24			
	Center average	<b>17.64</b>	0.00	0.06			

각 사례에서 측정된 평균 사용 에너지량은 Case 1에서 12.45ℓ, Case 2에서는 9.75ℓ로 약 2.7ℓ의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 즉 이는 Case 1의 단열스크린보다 Case 2에 설치된 단열스크린이 약 22%정도 우수한 에너지성능을 나타내는 것이다.

한편 Case 2에 설치된 단열스크린은 알루미늄 스크린과 부직포의 조합으로 형성된 2중 스크린인데, 설치되는 면적이 커지면서 2중으로 제작된 단열스크린에서 일정한 너비를 가진 공기층이 형성되지 않고, 일부에서는 5mm이하로 일부에서는 10mm이상으로 균일하지 않은 공기층이 형성되어 공기층의 너비에 따른 에너지 성능을 정량적으로 파악할 수 없었다. 따라서 일정한 공기층을 가지는 단열스크린을 제작하여 실험 3을 진행하도록 하였다.

### [실험 3]

실험조건 : Case 1 : 5mm-10mm공기층을 가지는 2중 단열스크린,

Case 2 : 25mm 공기층을 가지는 2중 단열스크린

실험일시 : 2002년 11-12월 중

동일한 재료인 알루미늄 스크린과 부직포를 사용하여 2중 스크린을 제작하고 2개의 스크린 사이에 형성된 공기층의 간격에 따라 달라지는 단열스크린의 에너지 성능을 정량적으로 분석하기 위해 실험을 행하였다.

<표 5-10>은 실험이 진행된 사례에 대해 각 위치에서 측정된 평균온도와 평균 에너지사용량을 나타낸 것이다. 표에서 나타난 것처럼 스크린 안쪽과 스크린 바깥쪽온도 그리고 실내 평균온도 등은 커다란 차이를 보이지 않고 거의 동일한 온도분포를 갖는 것으로 조사되었다. 그러나 실험이 진행된 기간 중 난방이 필요한 야간시간동안 측정된 평균 유류 소비량은 Case 1에서 18ℓ와 Case 2에서 16.8ℓ로 약 1.2ℓ의 차이를 보였다. 이는 열량으로 환산, 비교하면 Case 2가 약 6.7%의 에너지 절감효과를 가져오는 것으로 분석되었다.

<표 5-10> 사례별 평균 온도분포 및 에너지사용량 비교

		Average (DgreeC)	실내평균 기준오차 (DgreeC)	사례동일 위 치별오차 (DgreeC)	사용 유량 (Litter)	환산열량 (Mcal/litter)	절감비율 (%)
Ambient Temperature		<b>0.88</b>					
Double Screen(A)	Inside average	<b>14.35</b>	0.12	0.59	<b>18.00</b>	<b>165.6</b>	<b>100</b>
	Outside average	<b>8.88</b>	-5.35	-0.52			
	Center average	<b>14.23</b>	0.00	0.26			
Double Screen(B)	Inside average	<b>13.76</b>	-0.21	-0.59	<b>16.80</b>	<b>154.6</b>	<b>93.3</b>
	Outside average	<b>9.40</b>	-4.57	0.52			
	Center average	<b>13.97</b>	0.00	-0.26			

즉 동일한 재료로 구성된 2중 단열스크린이라 하더라도 알루미늄 스크린과 부직포 사이에 형성된 공기층의 두께에 따라 에너지 성능이 달라지고 있다. 즉 이는 본 보고서의 4장에서 유리온실 단열스크린의 에너지성능 해석모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과와 거의 동일한 결과를 나타내는 것으로, 유리온실의 다양한 변수 시뮬레이션을 위한 해석모델의 타당성 및 신뢰성을 입증하는 것이다.

### 제 3 절 실험 및 시뮬레이션 결과의 비교 검증

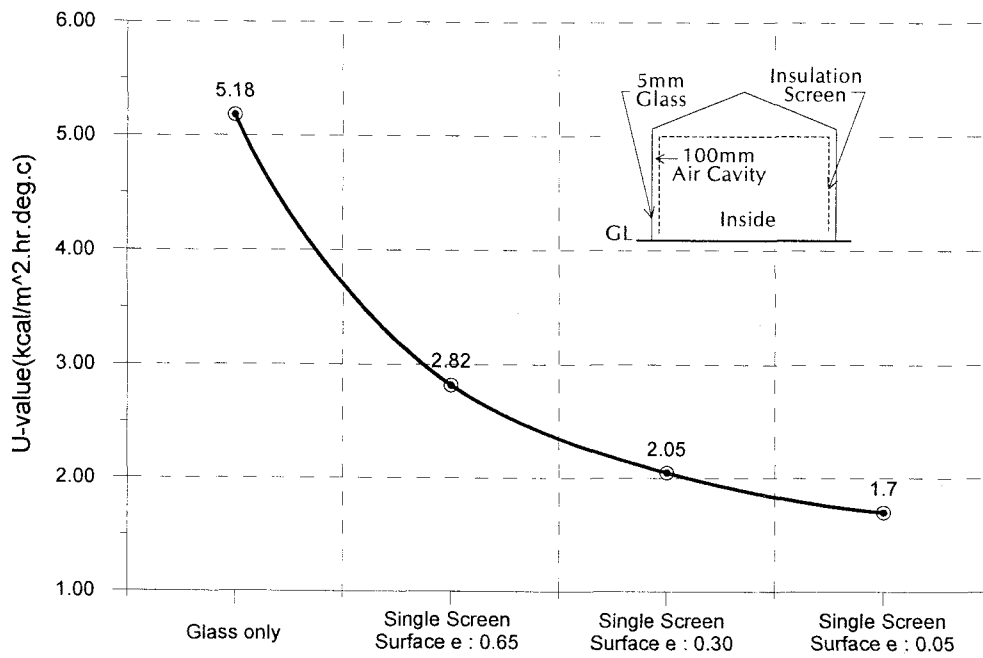
본 절에서는 본 연구의 타당성 및 신뢰성 확보를 위해 사례별 유리온실의 단열스크린에 대한 실험 및 해석결과를 상호 비교 검증하였다.

해석모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션은 유리온실의 규모와 형상, 그리고 사용된 단열스크린의 표면방사율 등 다양한 조건에 따라 에너지 성능이 달라지므로 각각의 상황에 따라 적절히 적용되었다. 4장에서 나타났듯이 해석모델은 단열스크린의 적용위치에 따라 측벽용 해석모델, 천정용 해석 모델로 구분되고, 단열스크린의 구성형태 즉, 1중 및 2중 단열스크린으로 나누어 분석이 가능하다.

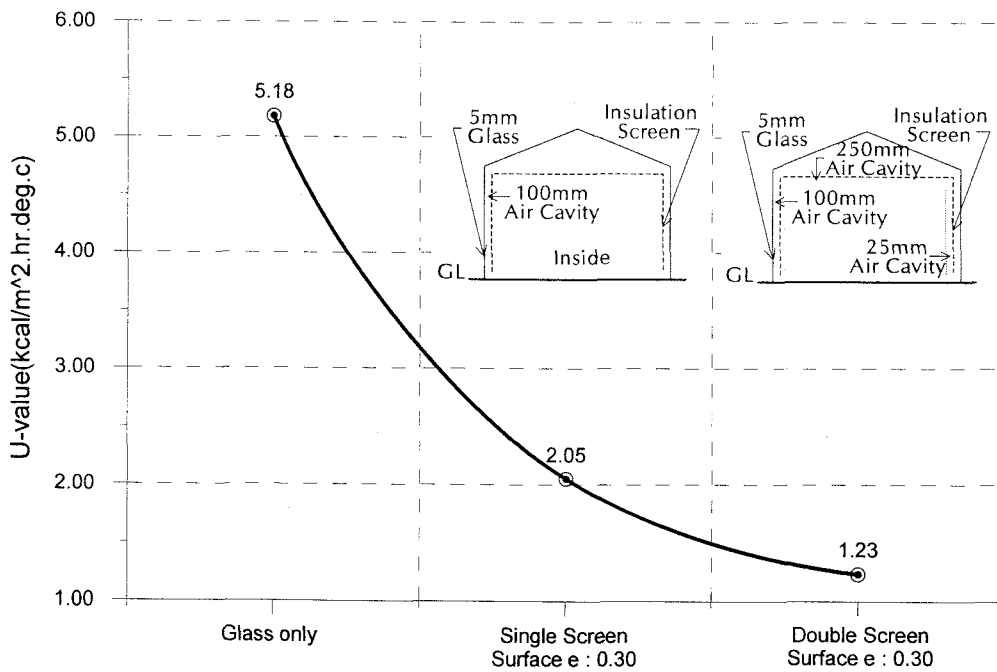
개발된 해석모델은 다양한 조건에 적합한 결과를 도출할 수 있도록 여러조건 의 실험이 진행되었다. 즉 한국에너지기술연구원에 설치된 소규모 실험용 유리온 실과 전남대에 설치된 실규모 온실에 적용한 결과 얻은 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교 검증하였다.

따라서 본 연구에서는 유리온실의 각 부위, 즉 천정, 측벽, 바닥, 그리고 단열 스크린이 적용되지 않는 측벽 상부부분 등으로 나누어 계산하도록 되었으며, 각 각의 조건에서 계산된 결과를 종합하여 유리온실 전체에 대한 에너지 성능을 판 단할 수 있도록 하였다.

[그림 5-27]과 [그림 5-28]은 전남대학교에 설치된 실규모 유리온실에서 측정 된 데이터를 근거로 사례별 온실 전체에 대한 총괄 열관류율 값을 나타낸 것이 다. 그림에 나타난 바와 같이 유리온실에 설치된 단열스크린의 표면방사율에 따 라 각기 다른 에너지 성능을 나타내는 것으로 조사되었는데, 표면 방사율이 0.65 를 나타내는 단열 스크린의 경우 총괄 열관류율이 2.82 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>-1</sup>°C 정도로 나타 났으며, 표면방사율이 0.3인 단열스크린의 경우에는 총괄 열관류율이 2.05 kcal/ m<sup>2</sup>hr<sup>-1</sup>°C 정도로 나타났다. 이는 표면 방사율이 0.65인 인 사례에 비교하여 표면 방사율이 0.3인 사례에서 약 27%의 에너지 절감성능을 기대할 수 있음을 의미한 다. 또한 표면 방사율이 0.05인 사례에서는 열관류율이 1.70 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>-1</sup>°C로 0.65인 사례에 비교하여 약 40%정도의 에너지 절감성능을 갖는 다고 말할 수 있다.



[그림 5-27] 단열스크린 표면방사율에 따른 총괄 열관류율 (실험치)



[그림 5-28] 단열스크린 구성형태에 따른 총괄 열관류율 (실험치)

한편 표면 방사율이 0.3인 알루미늄 스크린을 1중으로 설치한 단열시스템과 동일한 표면 방사율을 가진 알루미늄 스크린에 부직포를 조합하여 2중으로 제작하여 단열시스템을 설치한 사례와의 비교는, 2중으로 설치한 사례에서 총괄 열관류율이 1.23 kcal/m<sup>2</sup>hr°C인 것으로 나타났다. 즉 이는 표면 방사율이 0.3인 1중 알루미늄 단열스크린보다 부직포를 조합하여 2중 단열스크린 시스템을 설치할 경우에 약 40% 가량의 에너지 절감 성능을 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 근거로 기존에 농가에서 가장 일반적으로 사용하는 표면 방사율이 0.65인 단열스크린 설치 사례와 비교하면 표면 방사율이 0.3인 알루미늄 스크린에 부직포를 조합한 시스템의 경우 약 56% 이상의 에너지 절감성능을 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 단열스크린의 표면 방사율이 저방사 영역을 유지하는 재료를 사용하면 할수록 더 많은 에너지 절감성능을 기대할 수 있으며, 특별히 저방사 영역을 갖지 않아도 중간에 하나의 정체된 완충 공기층을 형성할 수 있다면 약 40% 가량의 에너지 절감성능을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 계산된 측벽 및 천정부분에서의 결과는 바닥면으로의 열손실을 포함하면 전체 유리온실의 총괄 열관류율의 산출이 가능하며, 이는 실제 대상온실에 적용한 실험결과와 비교함으로써 시뮬레이션의 타당성을 검증할 수 있다. 따라서 토양으로의 열전달량을 계산해 낼 필요가 있으며, 이에 대한 계산식은 다음과 같다.

#### [토양(soil)으로의 열전달량]

고온측 공간에서 바닥, 즉 토양표면으로의 열전달량은 역시 대류 및 복사에 의한 열전달량으로 나누어진다.

먼저 실내로부터 토양표면으로 대류에 의한 열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{conv-rs} = \frac{\overline{Nu}_L k_{air}}{L} (T_r - T_{soil}) \quad (5.1)$$

$$\text{여기서 } \overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (5.2a)$$

$$\overline{Nu_L} = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (5.2b)$$

한편 실내로부터 토양표면으로의 복사 열전달량은 다음 식으로 구해진다.

$$Q_{rad-rs} = \sigma A \frac{(T_r^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_s}} \quad (5.3)$$

여기서  $\sigma$  : Stefan-Boltzman 상수

$\epsilon_s$  : 바닥 흙 표면 방사율

따라서 고온측 실내로부터 토양표면으로의 총 열전달량은 다음과 같다.

$$Q_{rs} = Q_{conv-rs} + Q_{rad-rs}$$

한편 토양속으로의 열전달은 토양 속에서 전도에 의해 이루어지며, 이는 토양의 유효 열전도율을  $k_{soil}^*$ , 토양의 유효 지중깊이를  $t_{eff}$ 라 하면 지중을 통한 열전달량은 다음 식과 같다.

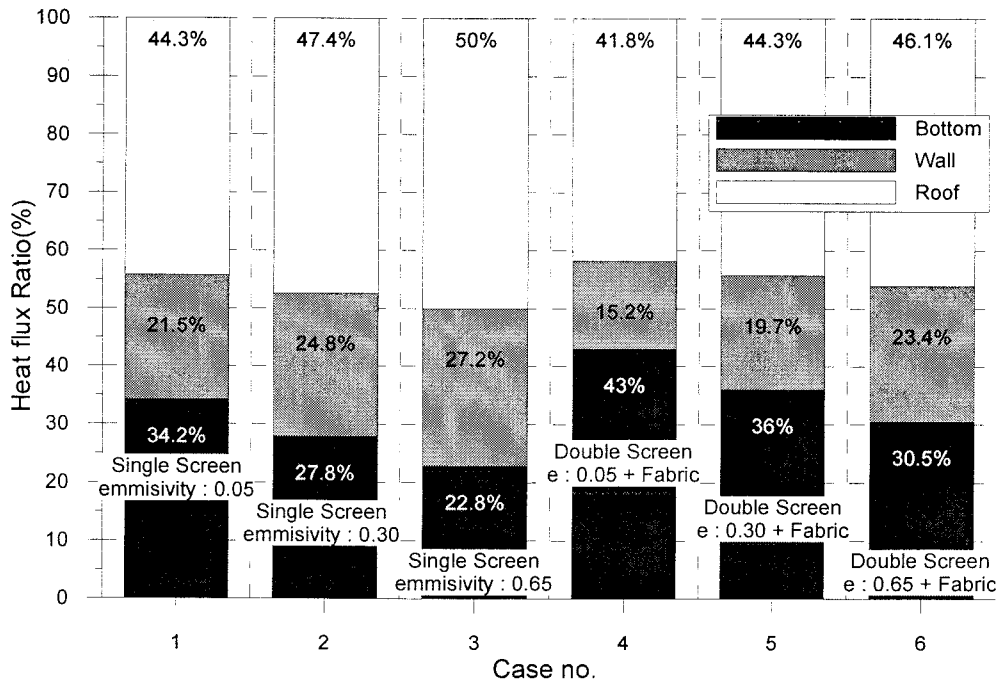
$$Q_{cond-s} = A \frac{k_{soil}^*}{t} (T_s - T_{ref}) \quad (5.5)$$

여기서  $T_{soil}$  : 토양의 표면온도

$T_{ref}$  : 기준온도(reference temperature)

식(5.5)에서 기준온도는 지면 또는 벽면에서 1m 떨어진 지중온도에 의거하여 유리온실 내부의 지중온도가 주야간을 통해 가열되고 가온되는 조건을 고려하여 실내온도와 1m 떨어진 지중온도의 중간값으로 하였다.

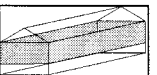
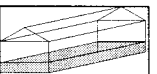
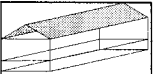
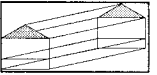

[그림 5-29]는 해석모델을 이용하여 사례별 유리온실의 부위별 손실 에너지량을 백분율로 나타낸 것이다. 각 사례에서 보면 총에너지 손실량은 각각 다르지만, 해석모델의 경우 유리온실에서 각 부위별로 손실되는 양을 나누어서 계산하여 총합을 구하는 방식이므로 각 사례에서 측정되는 부위별 비율을 확인 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그 결과 모든 사례에서 가장 열손실비율이 높은 부분은 천정부분인 것으로 나타났다. 실제로 천정부분이 차지하는 면적비율이 가장 크며, 천정을 통한 열손실 메커니즘이 측벽이나 지중면 보다 열손실이 크게 나타나기 때문이다. 또한 천정면의 경우는 창공과 마주하고 있는데, 천공온도(Sky Temperature)는 다른 주변 건물이나 공간에서 나타나는 온도보다 매우 낮기 때문에 천정면에서 일어나는 복사 열교환이 크게 나타난 결과로 영향을 미친 것으로 예측된다.



[그림 5-29] 각 위치별 에너지 사용량 비율  
( $\Delta T: 18^{\circ}\text{C}$ , 광주지역 1월 평균 지중온도 적용)

<표 5-11>은 해석모델에 의해 시뮬레이션 된 사례별 유리온실의 구성 부위별 손실 에너지량을 나타내었다.

<표 5-11> 단열스크린 적용에 따른 유리온실 각 부위별 열손실 비율

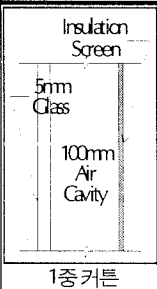
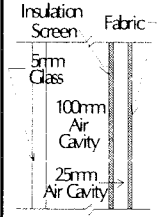
			Single Screen (Glass+ e.0.05)	Single Screen (Glass+ e.0.30)	Single Screen (Glass+ e.0.65)	Double Screen (Glass+e.0.05 +Fabric)	Double Screen (Glass+e.0.30 +Fabric)	Double Screen (Glass+e.0.65 +Fabric)
Wall (적용면적: 140m <sup>2</sup> )	 (적용면적: 95.2m <sup>2</sup> )	단위면적당 Heat flux(kcal/m <sup>2</sup> .hr)	21.43	30.48	41.15	11.83	18.46	25.87
		투입열량(kcal/hr)	2040.35	2901.68	3917.76	1126.61	1757.05	2462.82
	 (적용면적: 44.8m <sup>2</sup> )	단위면적당 Heat flux(kcal/m <sup>2</sup> .hr)	14.65	20.42	26.52	8.55	13.24	18.13
		투입열량(kcal/hr)	656.16	914.70	1188.26	383.02	593.36	812.21
	총 투입열량(W)		2696.51	3816.38	5106.02	1509.64	2350.41	3275.03
	성분비율 (%)		21.51	24.77	27.18	15.18	19.73	23.36
Roof (적용면적: 182m <sup>2</sup> )	 170.8m <sup>2</sup> )	단위면적당 Heat flux(kcal/m <sup>2</sup> .hr)	30.65	40.79	52.88	22.89	29.53	36.45
		투입열량(kcal/hr)	5237.78	6970.49	9036.79	3910.70	5046.73	6228.32
	 (적용면적: 12m <sup>2</sup> )	단위면적당 Heat flux(kcal/m <sup>2</sup> .hr)	26.86	28.04	30.02	20.36	19.39	19.53
		투입열량(kcal/hr)	322.31	336.45	360.29	244.29	232.73	234.38
	총 투입열량(W)		5560.09	7306.93	9397.08	4154.99	5279.46	6462.70
	성분비율 (%)		44.35	47.43	50.03	41.78	44.32	46.10
Bottom (적용면적: 160m <sup>2</sup> )	 (적용면적: 160m <sup>2</sup> )	단위면적당 Heat flux(kcal/m <sup>2</sup> .hr)	26.76	26.76	26.76	26.76	26.76	26.76
		총 투입열량 (kcal/hr)	4280.94	4280.94	4280.94	4280.94	4280.94	4280.94
		성분비율 (%)	34.14	27.79	22.79	43.04	35.94	30.54
Total (적용면적: 482.88m <sup>2</sup> )	총 투입열량(kcal/hr)		12537.54	15404.24	18784.03	9945.56	11910.81	14018.66
	성분비율 (%)		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

<표 5-12>는 약 2년여에 걸쳐 진행된 전남대학교의 실규모 온실에서 얻어진 실측데이터와 시뮬레이션된 결과를 근거로 비교한 것이다. 분석은 1중 단열 스크



린이 적용된 사례와 2중 단열스크린이 적용된 사례로 나누어 진행되었으며, 1중 단열스크린이 적용된 사례는 다시 단열스크린의 표면방사율 변화에 따른 총괄 열관류율을 산출하였다. 실제 실험조건과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 행하기 위해 각각의 실험이 진행된 기간동안 측정된 데이터를 근거로 평균값을 취하여 총에너지 사용량 및 외기온과 실내와의 온도차 등을 입력조건으로 사용하였다. 또한 단열스크린이 적용된 측벽과 천정뿐만 아니라 바닥면으로 손실되는 에너지량도 포함하여 계산하였으며, 이로 부터 표면방사율이 다른 단열스크린이 적용되었을 경우에 나타나는 유리온실의 총괄 열관류율을 구하였다.

<표 5-12> 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

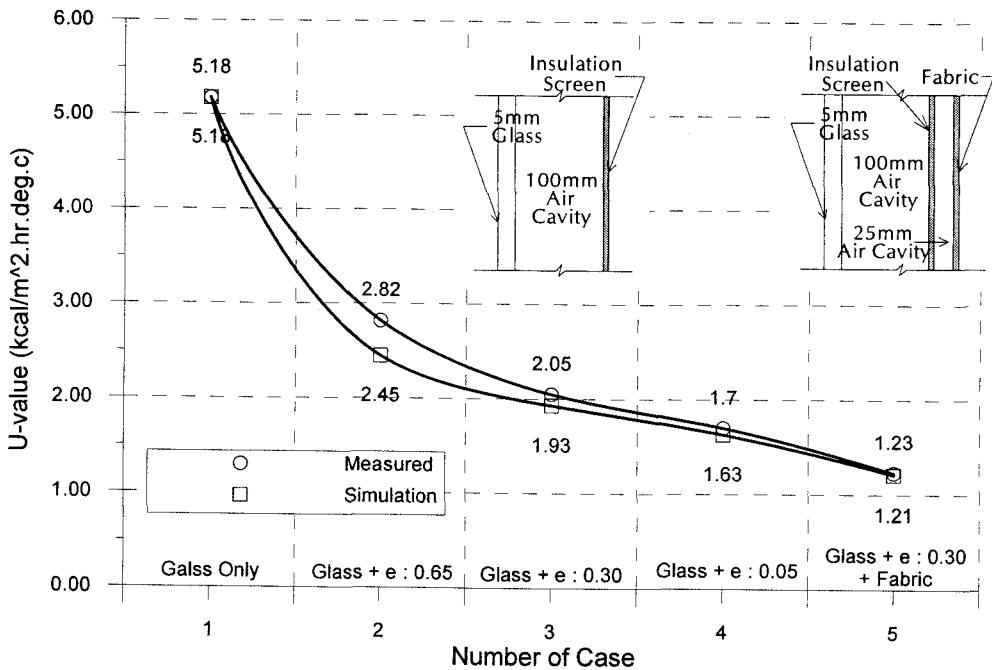
	단열스크린 표면방사율	구분	총에너지 투입량 (kcal)	온도차 (degC)	적용면적 (m <sup>2</sup> )	기온시간 (hr)	열관류율 (kcal/m <sup>2</sup> .hr.degC)	상대비율 (%)
 1중 커튼	0.05	Simulation	80839.36	7.35	482.88	16	1.424	57.6
		Measured	84420.00	7.35			1.487	60.2
	0.3	Simulation	125752.54	9.66			1.685	68.2
		Measured	133964.98	9.66			1.795	72.7
	0.65	Simulation	121411.36	7.32			2.147	86.9
		Measured	139724.93	7.32			2.471	100.0
 2중 커튼 (5mm Glass + e.0.30 + Fabric)	0.3	Simulation	79178.96	9.72	1.054	42.7		
		Measured	80729.96	9.72	1.075	43.5		

먼저 일반적으로 유리온실 단열스크린으로 가장 많이 보급된 표면방사율이 0.65인 사례인 경우 이때의 총괄 열관류율을 100%로 기준하였을 때 실측데이터와 비교하면, 시뮬레이션 결과는 약 13%정도 낮은 것으로 나타났다. 표면 방사율

이 0.3인 사례의 경우는 약 4%, 표면방사율이 0.05인 사례의 경우는 약 3% 정도 열관류율이 각각 낮게 나타났다.

또한 표면방사율이 0.3인 알루미늄 스크린과 부직포와 조합으로 된 2중 단열스 크린의 적용사례에서는 약 1%의 오차를 보여, 전체적으로 측정된 실측데이터와 시뮬레이션 데이터의 오차는 약 15%이내의 범위를 가지고 있어 개발된 해석모델 이 실제조건과 상당히 유사하게 묘사된 것으로 판단된다.

[그림 5-30]은 실측된 데이터를 근거로 얻어진 온실의 총괄열관류율과 해석모 델에 의해 시뮬레이션 되어진 총괄 열관류율을 전체적으로 비교한 그래프이다. 전체적으로 시뮬레이션 된 데이터에서 약간씩 낮은 수치로 나타내고는 있지만 실측된 측정데이터와 비교하여 거의 유사한 결과를 보이고 있으며, 두 데이터간 에 오차율은 15% 이내로 나타나 개발된 해석모델이 실제조건을 상당히 정확하게 묘사하고 있음을 알 수 있다.



[그림 5-29] 각 시스템별 측정 및 해석결과 열관류율 비교

## 제 4 절 다중 반사단열스크린 구동장치

실험 및 시뮬레이션 결과 기존의 1중 스크린 시스템에 비해 2중 스크린 시스템이 단열성능 면에서 우수한 것으로 조사되었다. 그러나 2중 단열시스템은 종종 천정면에 적용된 사례는 찾아볼 수 있으나, 측벽용 2중 시스템은 국내에서 새롭게 개발 및 제안코자 하는 시스템이므로 적용방식이나 스크린 구동시스템에서 기존의 방식으로는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 2중 스크린시스템의 최적화를 위해 스크린 회전축 지지장치 및 다중 단열스크린 분리장치 등에 대한 고려가 필요하다.

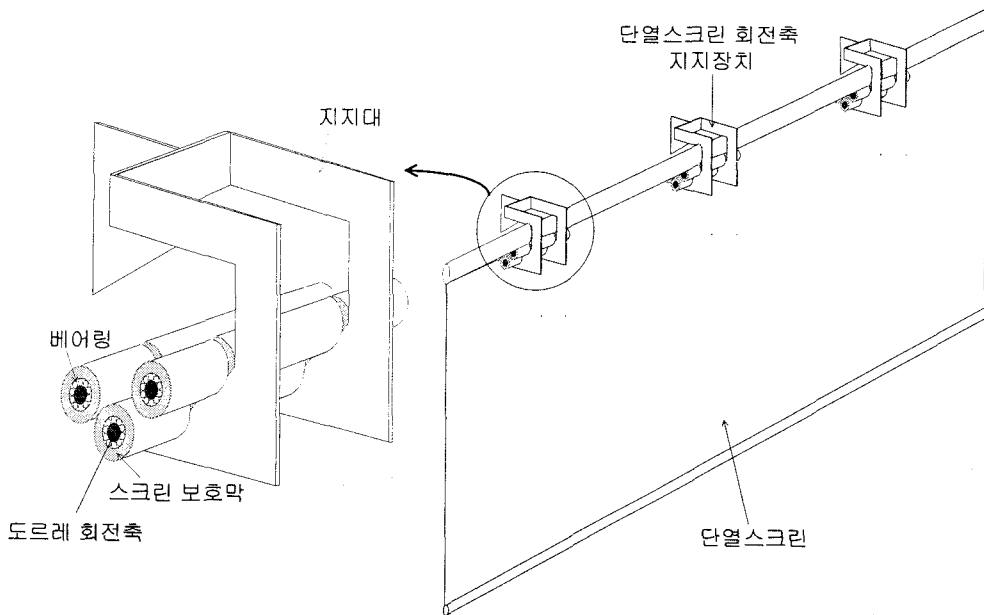
### 5.4.1 스크린 회전축 지지장치

유리온실에 적용되는 측벽용 단열시스템의 경우, 권취형 모터에 직렬로 회전축을 연결하여 회전축이 온실의 측벽을 따라 두루마리 식으로 올라가고 내려오면서 개폐되거나, 또는 측벽의 천정부근과 만나는 지점에 회전축을 고정하고 구동모터를 연결하여 회전축에 설치된 견인줄에 의해 스크린을 개폐하는 방식이 가장 널리 적용되고 있다. 그러나 회전축이 오르내리면서 스크린이 개폐될 경우에는 스크린 자체에 지나치게 과도한 인장력이 발생하여 스크린의 수명에 치명적인 영향을 주거나 권취형 모터가 움직일 수 있도록 레인을 설치해야 하는 등 많은 문제점을 안고 있다. 또한 견인줄을 이용하여 스크린을 개폐하는 경우에는 주간에 일사수열을 유도하기 위해 스크린이 열릴 때 온실의 바닥쪽에 스크린이 위치하게 되므로 스크린을 적재할 수 있는 별도의 장치를 설치하여야 하며, 온실 바닥의 이물질 등이 스크린 표면에 달라붙게 되어 열반사 효과를 저하시키는 결과를 가져오게 된다.

따라서 본 연구에서는 측벽의 천정부근에 권취형 모터를 설치하고 모터에 직렬로 스크린 회전축을 연결하여 단열스크린이 오르내리며 개폐동작을 하는 단열스크린 구동장치를 개발하였다. 스크린 회전축이 측벽의 상부에 위치함에 따라 축 자체가 가지는 자중을 지탱하기 위한 지지장치와 회전축이 지지장치 내측에

올려져서 위치하므로 회전축에 감겨진 스크린이 손상되지 않게 고려하여 설계하였다.

[그림 5-31]은 유리온실 측벽 상부에 위치하는 회전축 지지장치의 작동 원리와 회전축 지지장치의 상세를 보여주는 그림이다. 측벽에 고정되는 지지장치는 구동 모터에 직접 연결된 스크린 회전축이 개폐 동작을 함에 있어서 항상 안정된 동작을 하도록 지지하면서 스크린의 손상을 가져오지 않고 일정하게 유지되어야 한다. 따라서 스크린 회전축의 지지대를 온실 구조체의 일부에 2중 고정형으로 설치하고 그 지지대 사이에 베어링과 스크린 보호대로 구성된 도르레, 그리고 스크린 회전축의 두께에 따라 일정한 힘으로 회전축을 지지할 수 있도록 구성된 커튼보호대를 사용함으로써 문제를 해결하였다. 즉 온실의 구조체에 설치된 지지대의 안쪽으로 3개의 도르레 위에 스크린회전축이 놓이게 되는데, 스크린 회전축의 원활한 회전을 위해 설치된 도르레는 2중의 지지대에 자체 축을 올려놓고, 그 축에 설치된 베어링에 의해 양방향 회전이 용이하도록 설계되었다.



[그림 5-31] 단열스크린 회전축 지지장치

또한 설치된 도르레의 베어링이 스크린 구동축에 두루마리형태로 감긴 스크린이 직접 접촉하면서 생기는 스크린 손상을 방지하기 위해 베어링을 스크린 보호대로 피복하였다. 스크린 회전축에 스크린이 감기거나 풀리면서 회전축의 두께가 달라지게 된다. 따라서 스크린이 직접 닿는 부분인 스크린 보호대는 그 달라지는 회전축의 두께를 효과적으로 지지하기 하기 위해 자체적으로 탄성을 갖는 소재로 제작되어 항상 일정한 힘으로 스크린 회전축을 지지할 수 있도록 만들어졌다.

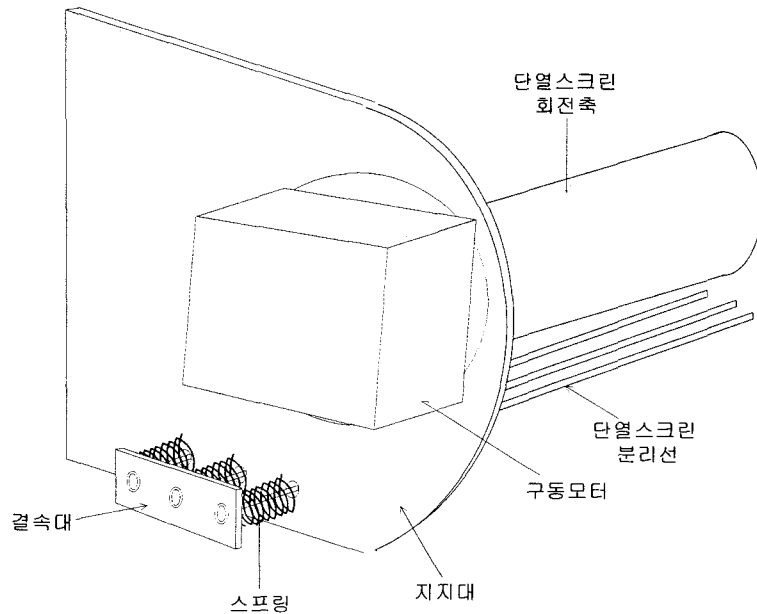
#### 5.4.2 다중 단열스크린 분리장치

일반적으로 1중 스크린으로 구성된 측벽용 단열시스템은 권취형 모터를 이용하여 끈을 매달아 커튼을 여닫는 방식과, 회전축을 이용하여 두루마리 식으로 커튼을 여닫는 방법 등이 가장 널리 적용되고 있다. 또한 2중이상의 다중으로 단열스크린을 구성할 때는 특별한 장치 없이 각기 따로 작동되는 구동시스템을 이용하고 스크린 견인장치에 의존하여 스크린 사이의 공간을 만들어주는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 이런 구동방식은 구동시스템이 각각 운영되어야 하기 때문에 설치비용의 증가와 구동장치 자체가 가지는 부피 때문에 온실 내부공간의 활용도에 있어 효율적이지 못한 단점이 있다.

또한 하나의 구동장치를 이용하여 2중 이상의 다중 스크린으로 단열시스템을 설치할 때에는 섬유질로 구성된 단열스크린이 각각의 자중에 의해 늘어지는 원리로 인해 자연스럽게 형성되는 스크린간의 간격 외에 일정한 간격을 인위적으로 구성할 수 없는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 2중 이상 다중으로 단열시스템을 설치할 때, 스크린 사이의 간격을 일정하게 유지하여 스크린 사이에 정채된 공기층을 형성하고, 그 정채된 공기층에 의해 단열시스템이 가지는 성능을 향상시킬 수 있는 부속 가설물이 개발되었다.

[그림 5-32]는 다중 스크린으로 구성되는 단열시스템에서 스크린 사이의 간격을 일정하게 유지하도록 고안된 스크린 분리장치를 보여주는 그림이다. 기존의 단열스크린 개폐장치와는 별도로 스크린이 개폐되는 바깥쪽 가장자리 양쪽에 지지대를 설치한다. 지지대는 구동모터를 지지하거나 스크린 분리장치를 고정하기

위해 설치한 것으로 지지대의 아래쪽에 일정한 간격으로 타공을 만들고, 그 사이에 스크린이 부딪쳐도 손상되지 않도록 피복을 입힌 스크린 분리선이 관통한다. 관통된 스크린 분리선은 지지대 바깥쪽에 설치된 스프링을 통과하여 결속대에서 잡아주게 되는데, 이때 스프링은 결속대를 밀어내는 인장력이 작용하게 되어 스크린 분리선이 길어지면서 생길 수 있는 처짐 현상을 완화시키게 된다. 이처럼 양 끝단에 인장력이 작용되어 탄성이 유지되도록 설치된 스크린 분리선 바깥쪽으로 다중 단열스크린을 각각 늘어뜨리면 스크린이 펼쳐질 때 자동으로 일정간격이 유지된 다중막 스크린을 형성하게 된다.



[그림 5-32] 다중 단열시스템에서의 스크린 분리장치

## 제 5 절 유리온실 경제성 분석

### 5.5.1 기상데이터

국내의 경우 1987년된 개정된 건축법에 따르면 전국을 3개의 기후대로 구분하여 단열기준 등을 규제하고 있다. 3개의 기후대라 함은 중부지역(서울특별시, 경기도, 인천광역시, 충청북도, 강원도), 남부지역(충청남도, 대전광역시, 전라북도, 광주광역시, 전라남도, 경상북도, 경상남도, 대구광역시, 부산광역시), 그리고 제주도 이렇게 구분하는 것을 말한다. 이는 연간 평균 외기온 분포에 따라 구분한 것으로 동일한 유리온실이라 하더라도 위치하는 장소 및 그 지역의 기후조건에 따라 각기 다른 에너지 성능을 나타내기 때문이다.

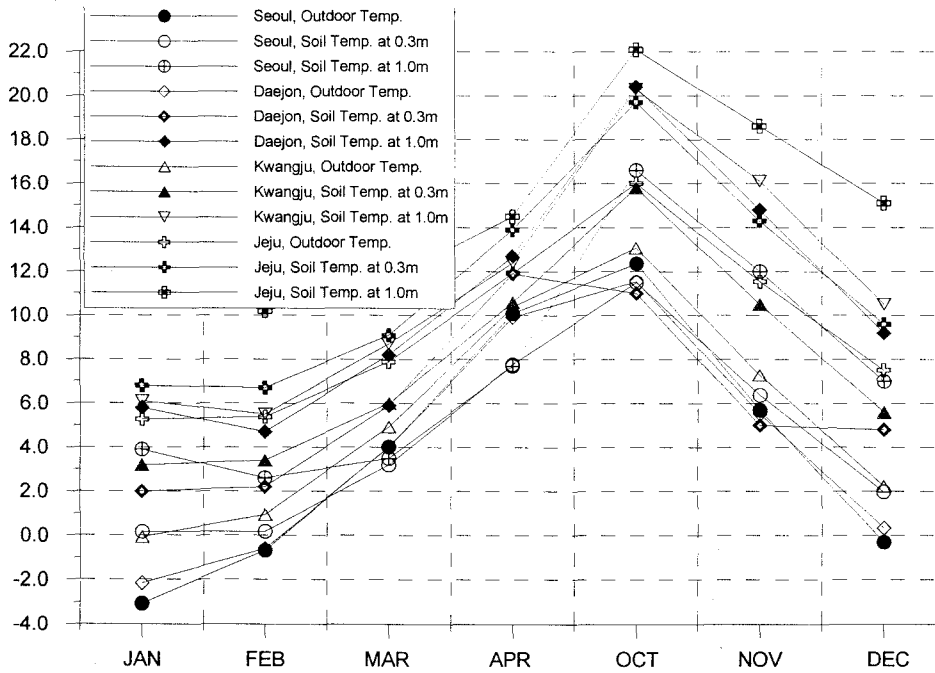
유리온실에 서로 다른 단열 시스템을 설치하고 그에 따른 에너지 성능을 정량적으로 분석하기 위해서는 건축법에서처럼 최소한 3개의 기후대로 나누어 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 서울, 대전, 광주, 제주 등 네곳을 선택하여 각 지역에 따라 단열시스템의 에너지 성능을 정량적으로 분석하였다.

<표 5-13>은 1985년부터 1995년까지 약 10년간 각 지방 기상청에서 측정된 데이터를 근거로 작성한 기상자료이다. 유리온실의 단열시스템 특성에 따른 연간 에너지 성능을 평가하기 위해서 필요한 자료들만 모아서 정리한 것이다. 즉 유리온실의 경우 난방이 필요한 시기는 그 해당 월에 상관없이 외기온이 일정한도 이하로 내려가면 가온을 하게 되는데, 일반적으로는 그 기간이 10월부터 12월 그리고 다음해 1월부터 4월 정도까지가 그 기간에 해당된다. 따라서 본 연구에서는 1월부터 4월 그리고 10월부터 12월 등 7개월간의 기상데이터를 주로 정리하였다.

또한 그 기간 중에도 일사로 인한 온실내부의 수열이 가능한 시간에는 거의 난방이 행해지지 않으므로 난방가동시간을 오후 5시부터 다음날 오전 9시까지 16시간동안 난방이 진행되는 가온시간대로 정하였다. 즉 <표 5-13>에 나타낸 데이터는 가온시간대인 1월부터 4월, 그리고 10월부터 12월까지, 오후 5시부터 다음날 오전 9시까지 측정된 데이터만 수집하여 10년간 평균으로 나타낸 것이다.

<표 5-13> 야간시간(17:00-09:00)대 위치별 평균온도(1985년부터 1995년 평균)

		JAN	FEB	MAR	APR	OCT	NOV	DEC
서울	외기온	-3.06	-0.69	4.02	10.09	12.36	5.69	-0.31
	지중 0.3m	0.16	0.17	3.20	7.77	11.50	6.37	1.98
	지중 1m	3.90	2.60	3.50	7.70	16.60	12.00	7.00
대전	외기온	-2.16	-0.61	4.00	9.92	11.54	5.51	0.33
	지중 0.3m	2.00	2.20	5.90	11.90	11.00	5.00	4.80
	지중 1m	5.80	4.70	8.20	12.70	20.40	14.80	9.20
광주	외기온	-0.08	0.93	4.93	10.39	13.07	7.28	2.24
	지중 0.3m	3.20	3.40	6.00	10.60	15.80	10.50	5.60
	지중 1m	6.10	5.50	8.70	12.40	20.30	16.10	10.50
제주	외기온	5.27	5.37	7.88	11.93	16.00	11.53	7.51
	지중 0.3m	6.80	6.70	9.10	13.90	19.70	14.30	9.60
	지중 1m	11.70	10.20	11.60	14.50	22.10	18.60	15.10



[그림 5-33] 각 지역별 평균 기상데이터



[그림 5-33]은 각 지역에서 측정된 데이터를 근거로 난방이 필요한 시간대만 취합하여 월별로 나타낸 그래프이다. 이렇게 정리된 기상자료를 활용하여 각 시스템별 경제성 분석을 하였다. 또한 난방이 필요한 7개월 동안 야간시간대인 오후 5시부터 다음날 오전 9시까지 16시간 중 외기온이 실내설정온도인 18℃ 이상을 나타내는 시간을 제외하고 월별로 총 난방에너지 투입시간을 구하여 이를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

### 5.5.2 지역별 연간 에너지 성능 평가

본 연구에서는 개발된 해석모델에 가공, 정리된 기상데이터를 활용하여 각 지역별로 단열시스템의 형태에 따른 정량적인 에너지성능 분석을 수행하고 얻어진 결과를 근거로 해당 시스템별 경제성을 판단하였다.

우선 실규모 온실의 에너지성능을 실측하였던 50평형 온실을 대상으로 각 지역별로 분석하고 연간 에너지 성능을 도출하였으며, 또한 국내에 가장 많은 분포를 가진 200평형 온실을 대상으로 각각의 단열시스템을 적용한 연간 에너지 성능 분석을 수행하였다.

비교를 위한 조건으로 3가지 사례를 구성하였는데, 첫 번째는 어떠한 단열시스템도 설치되지 않은 유리온실을 대상으로 하였으며, 두 번째는 이미 개발되어 국내 유리온실에 널리 적용된 표면방사율이 0.3인 알루미늄 스크린이 적용된 단열시스템, 그리고 세 번째는 본 연구에서 얻어진 주요 결과물인, 표면방사율이 0.3인 알루미늄 스크린과 부직포로 구성되어 두 스크린 사이에 공기층이 약 25mm 정도 유지되는 2중 단열스크린 시스템을 각각 선정하여 분석하였다.

단열시스템의 적용지역으로는 기상데이터가 정리된 서울, 대전, 광주, 제주 지역으로 구분하여 수행하였으며, 전남대학교에 설치하여 실측실험이 진행된 데이터와 광주지역에서 시뮬레이션된 데이터를 근거로 타당성 및 신뢰성을 검증하였다.

<표 5-14>는 각 지역별, 사례별로 구분하여 50평형 유리온실을 대상으로 시뮬레이션된 결과를 보여준다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 각 지역별로 연간 총

사용에너지 측면에서 서울지역과 제주지역과는 거의 두배 가까운 차이를 나타내고 있다. 이는 동일한 면적과 동일한 단열시스템을 구현해도 단열시스템이 설치되는 지역의 기후조건에 따라 그 사용 에너지량은 커다란 차이가 있음을 보여주는 예라 하겠다.

<표 5-14> 단열스크린 형태에 따른 각 지역별 연간에너지 절감량 (50평형)

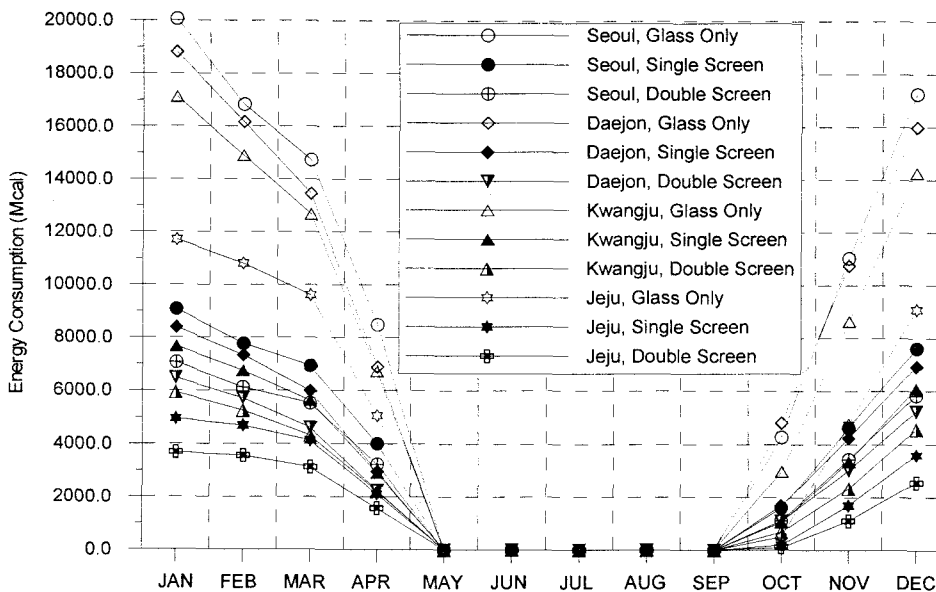
(단위 : Mcal)

	서울			대전		
	Glass Only	Single Screen	Double Screen	Glass Only	Single Screen	Double Screen
JAN	20,052.29	9,066.01	7,061.45	18,800.78	8,382.43	6,467.96
FEB	16,824.85	7,762.15	6,116.91	16,166.61	7,328.10	5,709.40
MAR	14,723.16	6,926.34	5,520.86	13,446.77	5,979.79	4,603.14
APR	8,474.13	4,004.50	3,225.33	6,881.32	2,951.53	2,234.41
MAY	0	0	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0	0	0
JUL	0	0	0	0	0	0
AUG	0	0	0	0	0	0
SEP	0	0	0	0	0	0
OCT	4,265.22	1,593.95	1,108.58	4,805.57	1,684.49	1,103.12
NOV	11,024.70	4,623.09	3,438.49	10,737.17	4,237.74	3,020.24
DEC	17,250.91	7,608.61	5,837.47	15,989.16	6,923.02	5,234.96
TOTAL	92,615.26	41,584.65	32,309.10	86,827.38	37,487.10	28,373.23
RATIO(%)	100.00	44.90	34.89	100.00	43.17	32.68
	광주			제주		
	Glass Only	Single Screen	Double Screen	Glass Only	Single Screen	Double Screen
JAN	17,112.78	7,664.21	5,925.51	11,705.49	4,943.64	3,685.07
FEB	14,896.58	6,743.56	5,248.16	10,800.93	4,685.93	3,556.42
MAR	12,666.07	5,612.04	4,315.87	9,595.20	4,129.37	3,120.55
APR	6,723.89	2,901.76	2,208.68	5,050.35	2,104.94	1,567.09
MAY	0	0	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0	0	0
JUL	0	0	0	0	0	0
AUG	0	0	0	0	0	0
SEP	0	0	0	0	0	0
OCT	2,974.24	1,050.55	683.72	509.32	193.81	111.06
NOV	8,637.06	3,348.84	2,336.88	4,740.51	1,693.20	1,110.50
DEC	14,260.35	6,092.27	4,566.30	9,072.62	3,596.93	2,561.35
TOTAL	77,270.97	33,413.24	25,285.11	51,474.42	21,347.80	15,712.04
RATIO(%)	100.00	43.24	32.72	100.00	41.47	30.52

또한 단열시스템의 형태에 따라 각 지역별로도 그 차이를 나타내고 있는데, 단열시스템이 설치되지 않은 사례에 비하여 표면 방사율이 0.3인 단열스크린을 1중으로 설치하여도 각 지역에서 평균 약 55% 정도의 에너지 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 타 지역에 비해 연평균 외기온이 높게 나타나는 제주도의 경우는 그 차이가 가장 커서 1중 단열스크린의 설치로 약 60% 정도의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

2중 단열스크린을 설치할 경우에는 그 절감폭이 더욱 증가되어 평균 65%~70%까지 에너지 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났으며, 1중 단열스크린 설치와 비교하여 2중 단열스크린의 설치 효과는 약 20%~25% 정도 에너지 절감 효과가 있는 것으로 시뮬레이션 되었다.

[그림 5-34]는 지역에 따라 단열시스템 사례별로 각 월별 에너지 소비량을 정량적으로 시뮬레이션한 결과를 도시한 것이다. 또한 <표 5-15>는 각 지역별로 단열시스템 종류에 따라 200평형 온실에서 예측되는 총에너지 소비량을 정리한 것이다. 표에 나타난 것처럼 온실의 규모가 200평형이나 50평형이나 총에너지소



[그림 5-34] 단열스크린 구성에 따른 지역별 연간 에너지 소비량 (50평형)

<표 5-15> 단열스크린 형태에 따른 각 지역별 연간에너지 절감량 (200평형)

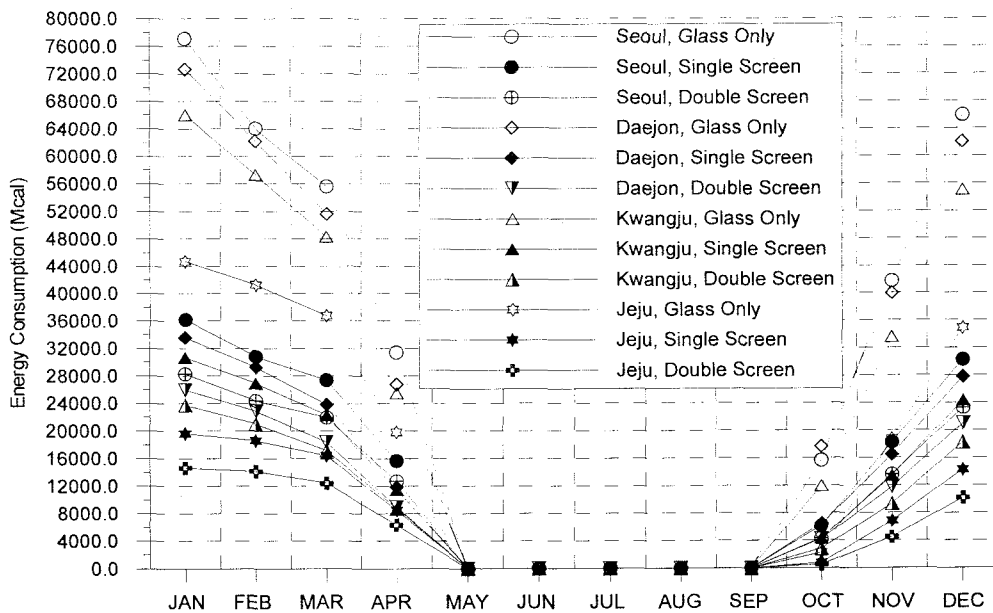
(단위 : Mcal)

	서울			대전		
	Glass Only	Single Screen	Double Screen	Glass Only	Single Screen	Double Screen
JAN	77,092.95	36,155.35	28,238.48	72,682.83	33,538.58	25,927.30
FEB	64,038.08	30,777.05	24,358.37	62,184.30	29,236.02	22,841.44
MAR	55,595.24	27,354.17	21,930.65	51,615.82	23,816.37	18,382.67
APR	31,380.74	15,660.95	12,722.59	26,749.24	11,855.84	8,972.97
MAY	0	0	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0	0	0
JUL	0	0	0	0	0	0
AUG	0	0	0	0	0	0
SEP	0	0	0	0	0	0
OCT	15,640.03	6,120.34	4,264.54	17,653.95	6,447.41	4,208.70
NOV	41,743.48	18,230.73	13,588.82	39,951.05	16,463.42	11,753.55
DEC	65,943.85	30,239.01	23,264.49	62,077.88	27,760.01	21,009.29
TOTAL	351,434.37	164,537.60	128,367.94	332,915.07	149,117.66	113,095.92
RATIO(%)	100.00	46.82	36.53	100.00	44.79	33.97
	광주			제주		
	Glass Only	Single Screen	Double Screen	Glass Only	Single Screen	Double Screen
JAN	66,008.13	30,622.40	23,729.58	44,688.56	19,595.38	14,635.64
FEB	57,271.92	26,894.96	20,991.30	41,250.13	18,592.49	14,149.62
MAR	48,316.89	22,263.16	17,178.70	36,722.76	16,403.04	12,432.77
APR	25,496.68	11,467.67	8,761.72	19,807.03	8,481.71	6,314.32
MAY	0	0	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0	0	0
JUL	0	0	0	0	0	0
AUG	0	0	0	0	0	0
SEP	0	0	0	0	0	0
OCT	11,972.16	4,299.09	2,784.31	2,195.44	746.75	474.20
NOV	33,585.09	13,406.79	9,344.83	18,728.43	6,841.61	4,465.74
DEC	55,067.82	24,335.61	18,259.20	34,854.86	14,289.51	10,179.97
TOTAL	297,718.69	133,289.68	101,049.64	198,247.21	84,950.51	62,652.27
RATIO(%)	100.00	44.77	33.94	100.00	42.85	31.60

비량 자체는 차이가 있지만 단열시스템의 종류에 따라 거의 유사한 에너지 소비 패턴을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 온실이 설치되는 지역에 따라 에너지 소

비량은 달라지지만, 단열시스템의 종류에 따라 온실의 규모가 달라져도 거의 유사한 에너지 소비패턴을 보인다. 또한 200평형 온실의 경우는 50평형 온실에 비해 온실의 규모는 정확하게 4배로 커졌지만 에너지 소비량이 4배에 미치지 않는 것으로 나타났는데, 이는 온실의 규모가 커짐에 따라, 즉 천정면적의 증가에 따라 측벽면적이 비례적으로 증가하지 않고, 완만하게 증가한 때문으로 사료된다. 따라서 단위면적당 에너지소비량은 온실면적이 큰 경우가 작은 경우보다 작게 나타난다. 또한 1중 단열스크린의 설치로 인한 에너지 절감효과는 지역에 관계없이 약 50% 정도인 것으로 기대되며, 제주지역에서는 2중 단열스크린의 설치로 인해 약 70%까지 에너지 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

[그림 5-35]는 200평형 유리온실에서 예상되는 지역별 각 사례에 대한 에너지 소비량을 시물레이션 한 결과를 나타낸 것이며, <표 5-16>은 200평형 유리온실에서 소비되는 열손실 비율을 온실 각 부분의 열손실 패턴별로 나누어 분석한 것이다.



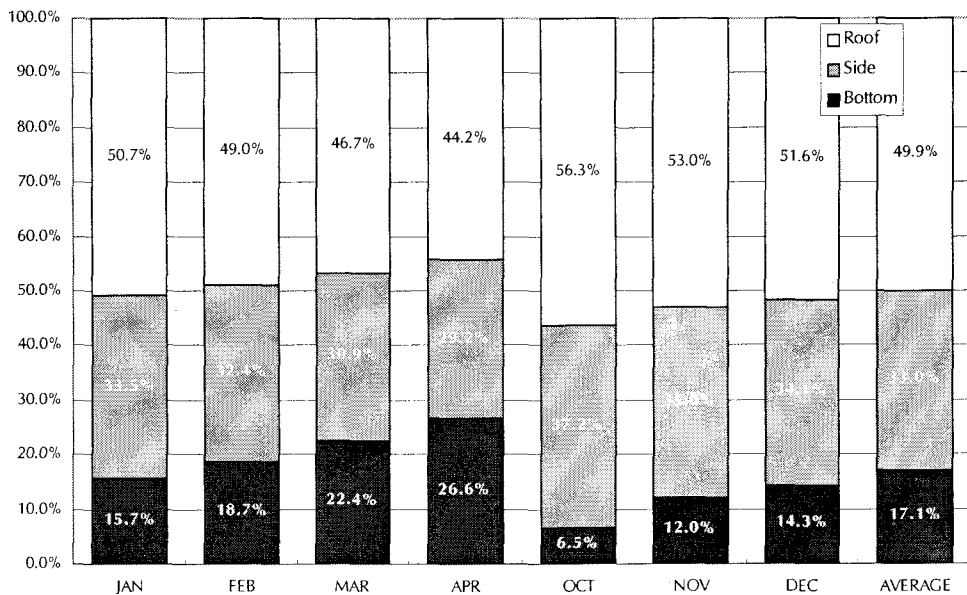
[그림 5-35] 단열스크린 구성에 따른 지역별 연간 에너지 소비량 (200평형)

<표 5-16> 단열스크린 구성에 따른 각 부위별 열손실 비율(200평형)

			JAN	FEB	MAR	APR	OCT	NOV	DEC	AVERAGE
Glass Only	Seoul	Side	33.5%	32.4%	30.9%	29.2%	37.2%	35.0%	34.1%	33.0%
		Roof	50.7%	49.0%	46.7%	44.2%	56.3%	53.0%	51.6%	49.9%
		Bottom	15.7%	18.7%	22.4%	26.6%	6.5%	12.0%	14.3%	17.1%
	Daejeon	Side	24.4%	23.1%	23.0%	23.0%	32.1%	28.4%	25.5%	24.8%
		Roof	48.8%	46.5%	46.9%	47.8%	67.8%	58.2%	51.4%	50.3%
		Bottom	26.8%	30.3%	30.1%	29.2%	0.1%	13.4%	23.1%	24.9%
	Kwangju	Side	23.7%	22.9%	22.8%	22.1%	32.0%	29.5%	25.6%	24.5%
		Roof	47.7%	46.2%	46.7%	46.1%	67.9%	60.9%	52.0%	49.9%
		Bottom	28.6%	30.9%	30.5%	31.7%	0.1%	9.6%	22.4%	25.6%
	Jeju	Side	25.2%	23.8%	23.4%	23.5%	31.6%	32.1%	27.9%	25.5%
		Roof	51.6%	48.7%	48.4%	49.7%	68.1%	67.8%	57.7%	52.8%
		Bottom	23.2%	27.6%	28.2%	26.8%	0.3%	0.1%	14.4%	21.7%
Single Screen	Seoul	Side	23.7%	22.1%	20.0%	17.7%	27.8%	25.2%	24.3%	22.7%
		Roof	47.4%	44.4%	40.8%	36.8%	58.8%	51.8%	49.0%	46.0%
		Bottom	28.8%	33.5%	39.2%	45.5%	13.5%	23.0%	26.7%	31.4%
	Daejeon	Side	24.4%	23.1%	23.0%	23.0%	32.1%	28.4%	25.5%	24.8%
		Roof	48.8%	46.5%	46.9%	47.8%	67.8%	58.2%	51.4%	50.3%
		Bottom	26.8%	30.3%	30.1%	29.2%	0.1%	13.4%	23.1%	24.9%
	Kwangju	Side	23.7%	22.9%	22.8%	22.1%	32.0%	29.5%	25.6%	24.5%
		Roof	47.7%	46.2%	46.7%	46.1%	67.9%	60.9%	52.0%	49.9%
		Bottom	28.6%	30.9%	30.5%	31.7%	0.1%	9.6%	22.4%	25.6%
	Jeju	Side	25.2%	23.8%	23.4%	23.5%	31.6%	32.1%	27.9%	25.5%
		Roof	51.6%	48.7%	48.4%	49.7%	68.1%	67.8%	57.7%	52.8%
		Bottom	23.2%	27.6%	28.2%	26.8%	0.3%	0.1%	14.4%	21.7%
Double Screen	Seoul	Side	18.4%	16.9%	15.1%	13.2%	24.5%	20.5%	19.1%	17.6%
		Roof	44.6%	40.7%	36.0%	30.9%	56.2%	48.7%	46.1%	42.2%
		Bottom	36.9%	42.4%	49.0%	56.0%	19.3%	30.9%	34.7%	40.2%
	Daejeon	Side	19.1%	17.9%	18.0%	18.4%	30.1%	24.0%	20.4%	19.8%
		Roof	46.2%	43.2%	43.0%	43.1%	69.8%	57.2%	49.0%	47.4%
		Bottom	34.7%	38.8%	39.0%	38.6%	0.1%	18.7%	30.6%	32.8%
	Kwangju	Side	18.5%	17.7%	17.9%	17.5%	30.4%	25.6%	20.6%	19.6%
		Roof	44.6%	42.6%	42.6%	41.0%	69.4%	60.6%	49.5%	46.6%
		Bottom	36.9%	39.6%	39.6%	41.5%	0.2%	13.8%	29.8%	33.8%
	Jeju	Side	20.4%	18.9%	18.7%	19.3%	31.6%	30.1%	23.7%	21.0%
		Roof	48.5%	44.9%	44.1%	44.7%	67.9%	69.8%	56.1%	49.5%
		Bottom	31.1%	36.2%	37.3%	36.0%	0.5%	0.1%	20.2%	29.5%

[그림 5-36]은 단열스크린이 설치되지 않은 유리온실을 대상으로 서울지역의 기상데이터를 입력하여 얻어진 시뮬레이션 결과를 각 부위별 열손실 비율로 표시한 그래프이다. 그림에서 가장 큰 열손실 비율을 나타내는 부위는 천정면인 것으로 조사되었는데, 3월과 4월을 제외하고는 전체적으로 50%가량의 열손실이 지붕부를 통해 일어나는 것으로 나타났다. 그 다음으로 열손실 비율이 크게 나타나는 부위는 벽면으로 평균 33%의 열손실 비율을 나타냈으며 유리온실 내부의 바닥면으로 손실되는 비율은 약 17%인 것으로 조사되었다.

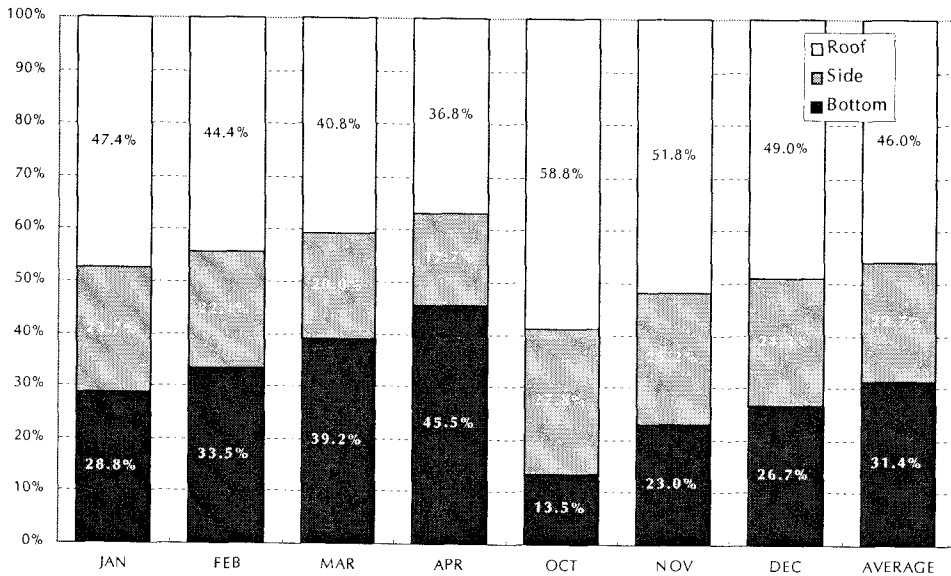
천정면으로의 열손실이 가장 크게 나타나는 것은 10월로 조사되었는데, 이는 다른 달에 비해 10월에 측정된 외기온과 지중온도가 가장 높은 것에 그 원인을 찾을 수가 있다.



[그림 5-36] 단열스크린이 없는 경우의 각 부위별 열손실비율(서울지역)

[그림 5-37]은 표면방사율이 0.3인 1중 단열 스크린을 설치한 유리온실을 대상으로 서울지역의 기상데이터를 입력하여 얻어진 시뮬레이션 결과를 각 부위별 열손실 비율로 표시한 그래프이다. 얻어진 결과를 보면 평균적으로 천정면에서의

열손실 비율은 전체의 46%, 벽면에서의 열손실은 22.7%, 바닥면으로의 열손실은 31.4%로 각각 나타났다. 이는 단열스크린이 설치되지 않은 사례와 비교할 때 천정면과 벽면에 의한 열손실은 상당부분 줄어든 반면 바닥면으로의 열손실이 상당히 늘어난 것을 알 수 있다. 그러나 실제적으로 총 에너지량으로 비교하면 바닥면으로의 열손실은 동일하나 유리온실 전체에서 손실되는 열손실량이 줄어들었기 때문에 상대적으로 바닥면으로의 열손실이 비율이 증가한 것으로 나타나기 때문이다.



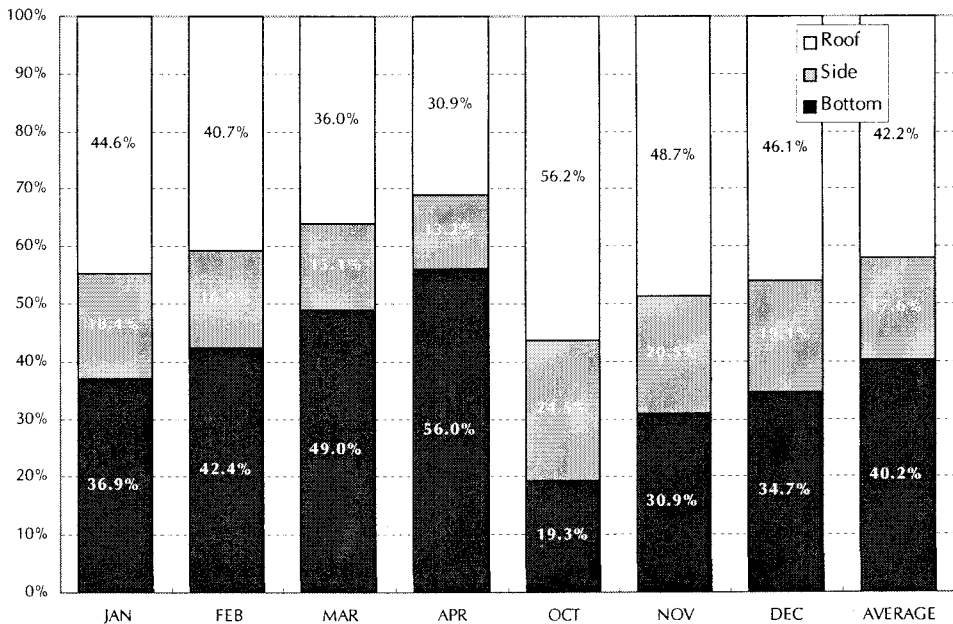
[그림 5-37] 1중 단열스크린 설치 시 각 부위별 열손실 비율 비교(서울지역)

평균적으로 천정면에서의 열손실이 가장 크게 나타난 반면 유독 4월달의 경우에는 유난히 바닥면으로의 열손실이 크고, 천정 및 벽면으로의 열손실 비율이 작은 것으로 나타났다. 이는 4월달에 외기온의 상승 비율에 비해 지중온도는 그다지 크게 변화하지 않는 관계로, 천정과 벽면을 통한 열손실보다 바닥면으로의 열손실 비율이 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

[그림 5-38]은 표면방사율이 0.3인 알루미늄 스크린과 부직포를 연결하여 2중

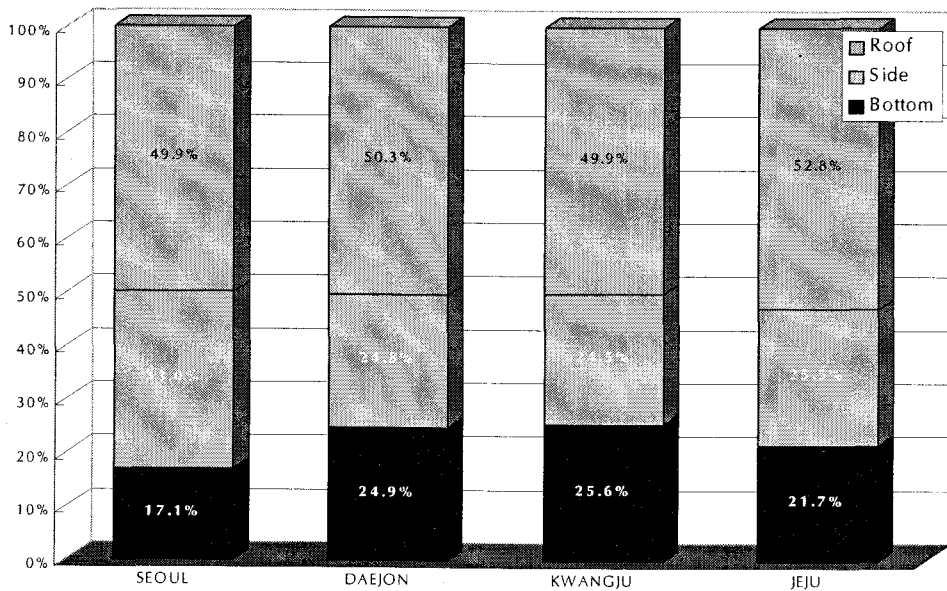


단열스크린을 제작하고 이를 설치한 유리온실을 대상으로 서울지역의 기상데이터를 입력하여 얻어진 시뮬레이션 결과를 각 부위별 열손실 비율로 표시한 그래프이다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과에 의하면 이 경우 평균적으로 지붕면으로의 열손실이 42%, 벽면으로의 열손실이 18%, 바닥으로의 열손실이 40%로 각각 나타났다. 상기의 두 사례에 비교하여 가장 큰 차이를 보이는 것은 바닥면을 통한 열손실 비율이 상당히 증가했다는 것이다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 상기의 사례들과 비교할 때 바닥면으로의 열손실이 특별히 증가했기 때문이 아니라, 바닥면으로의 열손실량은 거의 동일하나 유리온실 전체의 총 에너지손실량이 줄어들었기 때문에 상대적으로 바닥면을 통한 열손실 비율이 증가하였기 때문이다. 즉 이는 단열시스템이 없는 온실의 경우 열손실의 대부분을 차지하던 벽면 및 천정면에서의 열손실이 단열시스템의 설치로 인해 상대적으로 바닥면을 통한 열손실 비율이 증가하였기 때문이다.



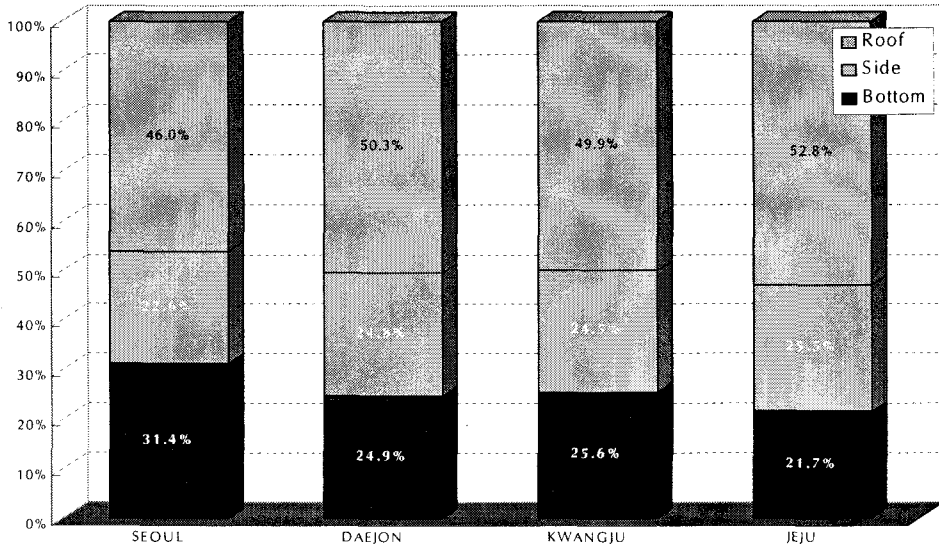
[그림 5-38] 2중 단열스크린 설치 시 각 부위별 열손실 비율(서울지역)

[그림 5-39]는 기후조건이 다른 각 지역에서 단열스크린이 설치되지 않은 유리 온실을 대상으로 연간 총 에너지량을 구하고 이를 근거로 유리온실의 각 부위별 열손실 비율을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보면 동일한 남부지방의 기후대로 묶여진 대전지역과 광주지역에서는 온실의 각 부위별로 거의 동일한 에너지손실 비율을 나타내었으며, 전체적으로는 천정을 통한 열손실이 약 50%, 벽면을 통한 열손실이 25%, 그리고 바닥면을 통한 열손실이 약 25% 정도의 비율을 차지하는 것으로 각각 나타났다. 그러나 서울지역에서는 조금 다른 특성을 나타내고 있는데, 즉 천정을 통한 열손실 비율은 다른 지역과 비교하여 거의 동일하나 벽면을 통한 열손실이 타 지역에 비해 약 8% 높은 반면 바닥면으로의 열손실 비율은 8%정도 낮은 것으로 나타났다. 이는 타 지역에 비해 서울지역이 상대적으로 외기온 분포가 낮은 반면 지중온도는 큰 차이를 보이고 있지 않아서 천정면보다는 벽면을 통한 열손실 비율이 증가했기 때문이다. 즉 바닥면을 통한 열손실은 양적인 측면에서는 대전 및 광주지역과 비슷하나 외기온에 대해 직접적으로 영향을

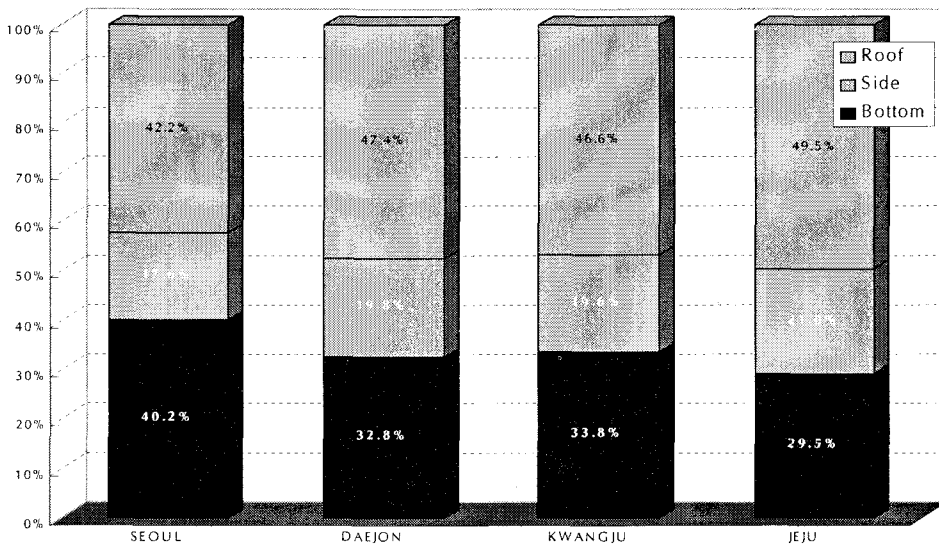


[그림 5-39] 단열스크린이 없는 경우 각 지역별 연평균 부위별 열손실 비율

받는 천정 및 벽면을 통한 열손실 양이 증가함에 따라, 전체 열손실 비율에 대한 지중면의 열손실 비율이 상대적으로 낮게 나타났기 때문이다.



[그림 5-40] 1층 단열스크린 설치 시 각 지역별 연평균 부위별 열손실 비율



[그림 5-41] 2층 단열스크린 설치 시 각 지역별 연평균 부위별 열손실 비율

[그림 5-40]과 [그림 5-41]은 1중 단열스크린과 2중 단열스크린이 설치된 사례에 대해 각 지역에 따라 유리온실 부위별 열손실 비율을 그래프로 나타낸 것이다.

### 5.4.3 단열스크린 경제성 분석

유리온실에 단열스크린의 설치에 따른 경제성을 판단하기 위해서는 단열스크린의 초기 설치비용과 연간 총에너지 절감비율에 의해 결정될 수 있다. 또한 지역별 연간 에너지 성능평가에서 나타났듯이 유리온실이 적용되는 해당지역의 기후조건에 따라 단열스크린의 에너지 성능이 다르게 나타나기 때문에 본 연구에서는 해석모델에 의해 시뮬레이션 된 지역별, 사례별로 연간 에너지 소비량을 근거로 경제성 분석을 수행하였다.

경제성 판단을 위한 상대 비교 대상으로는 단열스크린이 설치되지 않은 유리온실을 기준으로 하였으며, 표면 방사율이 0.3인 단열스크린 시스템과, 표면방사율이 0.3인 알루미늄 스크린과 부직포로 조합된 2중 단열스크린을 상호 비교하는 것으로 하였다. 또한 유리온실은 면적에 따라 각기 다른 경제성을 나타내게 되므로 국내 농가에 가장 많이 보급되어진 200평형 온실을 대상온실로 선택하였다. 우선 단열스크린 설치에 따른 총 추가설치비용에 대한 판단을 위해 현재 국내의 단열스크린 설치 전문업체에서 일반적으로 설치되고 있는 단열스크린 및 부속자재, 인건비 등을 근거로 실제 농가에 납품할 경우를 고려하여 1중 단열스크린 설치비용과 2중 단열스크린 설치비용을 근거로 하여 단열시스템 설치 초기비용을 각각 산정하였다.

<표 5-17>은 제공받은 1중 및 2중 단열 스크린 설치에 따른 추가 설치비용을 단순 계산하여 정리한 표이다. 표에서 나타난 것처럼 200평형 유리온실을 대상으로 1중 단열스크린을 설치하는데 소요되는 총 비용은 약 23,000,000원 정도가 소요되는 것으로 조사되었으며, 측벽 및 천정부분을 모두 2중 단열스크린으로 설치할 경우 소요되는 비용이 약 27,800,000원 정도인 것으로 조사 되었다. 이는 2002년 10월 중 공식 물가 자료를 근거로 조사된 자료이다.

<표 5-17> 200평 유리온실기준 1중, 2중 단열스크린 설치비용

구분	공정및 자재 내역	금액(원)	소계(원)	합계 (원)	부가가치세	총합 (원)	
Single Screen	측벽용	사면개폐기	620,000	12,257,600	20,909,800	2,090,980	23,000,780
		롤러베어링	4,500,000				
		파이프류	1,257,800				
		부속자재류	179,800				
		알루미늄스크린	1,500,000				
		콘트롤박스	400,000				
		인건비	3,800,000				
	천정용	수평커튼 모터	44,000	8,652,200			
		에인및 받침용 낙하산줄	375,000				
		롤러베어링	585,000				
		부속자재류	728,200				
		사우드 및 지지파이프	1,170,000				
		알루미늄스크린	2,350,000				
콘트롤박스	400,000						
인건비	3,000,000						
Double Screen	측벽용	사면개폐기	620,000	12,617,600	25,292,000	2,529,200	27,821,200
		롤러베어링	4,500,000				
		파이프류	1,257,800				
		부속자재류	179,800				
		알루미늄스크린	1,500,000				
		부직포(200g)	360,000				
		콘트롤박스	400,000				
		인건비	3,800,000				
	천정용	수평커튼 모터	88,000	12,674,400			
		에인및 받침용 낙하산줄	750,000				
		롤러베어링	1,170,000				
		부속자재류	1,456,400				
		사우드 및 지지파이프	2,340,000				
		알루미늄스크린	2,350,000				
		부직포(200g)	720,000				
콘트롤박스	800,000						
인건비	3,000,000						

<표 5-18>은 지역별, 단열스크린 설치 사례별로 시뮬레이션 된 결과와 조사된 단열시스템 설치 추가비용, 그리고 2002년 10월 기준 유가 등을 근거로 하여 분석된 단열시스템별 경제성 자료이다.

표에서 보면 단열시스템이 설치되지 않은 유리온실과 비교하여 1중 단열스크린 설치 시 예상되는 연간 에너지절감량(A)와, 2중 단열 스크린 설치 시 예상되는 연간 에너지절감량(B)는 200평형 유리온실을 대상으로 시뮬레이션 된 결과로

<표 5-18> 단열스크린 설치 시 경제성분석

		서울	대전	광주	제주
Glass Only vs. Single Screen 에너지절감량 (Mcal)	1	40,937.598	39,144.246	35,385.726	25,093.175
	2	33,261.031	32,948.280	30,376.963	22,657.641
	3	28,241.074	27,799.446	26,053.731	20,319.718
	4	15,719.786	14,893.397	14,029.007	11,325.322
	10	9,519.688	11,206.537	7,673.066	1,448.688
	11	23,512.745	23,487.632	20,178.304	11,886.815
	12	35,704.844	34,317.875	30,732.213	20,565.345
	합계 (A)	186,896.765	183,797.411	164,429.009	113,296.704
Glass Only vs. Double Screen 에너지 절감량 (Mcal)	1	48,854.475	46,755.532	42,278.549	30,052.915
	2	39,679.707	39,342.859	36,280.624	27,100.510
	3	33,664.587	33,233.147	31,138.194	24,289.986
	4	18,658.150	17,776.273	16,734.961	13,492.706
	10	11,375.488	13,445.253	9,187.847	1,721.245
	11	28,154.662	28,197.498	24,240.257	14,262.688
	12	42,679.360	41,068.587	36,808.618	24,674.889
	합계 (B)	223,066.429	219,819.150	196,669.050	135,594.940
등유환산 열량 (kcal/Litter) (C)		9200			
보일러등유 과세유가격 (원/Litter) (D)		599.70			
보일러등유 면세유가격 (원/Litter) (E)		420.00			
Single Screen 설치시 에너지절감량에 대한 등유 환산량 (Litter) (F) = ((A) * 1000) / (C)		20,314.87	19,977.98	17,872.72	12,314.86
Double Screen 설치시 에너지절감량에 대한 등유 환산량 (Litter) (G) = ((B) * 1000) / (C)		24,246.35	23,893.39	21,377.07	14,738.58
Single Screen 설치시 에너지절감비용(원) (H) = (F) * (D)	과세유	12,182,825	11,980,794	10,718,269	7,385,221
	면세유	8,532,244	8,390,751	7,506,542	5,172,241
Double Screen 설치시 에너지절감비용(원) (I) = (G) * (D)	과세유	14,540,537	14,328,864	12,819,829	8,838,727
	면세유	10,183,467	10,035,222	8,978,370	6,190,204
Single Screen 설치 추가비용(원) (J)		23,000,780			
Double Screen 설치 추가비용(원) (K)		27,821,200			
Single Screen 설치시 추가비용 회수기간(년) (L) = (J) / (H)	과세유	1.9	1.9	2.1	3.1
	면세유	2.7	2.7	3.1	4.4
Double Screen 설치시 추가비용 회수기간(년) (M) = (K) / (I)	과세유	1.9	1.9	2.2	3.1
	면세유	2.7	2.8	3.1	4.5

과세유가격은 한국석유공사 석유공보처 제공 2002.10.15일 기준가격적용  
(<http://www.petronet.org/korea/general/intro/dome.xls>)  
면세유가격은 농업기계화연구소제공 2002.10.15일 기준가격적용  
([http://www.namri.go.kr/upload/2002\\_...](http://www.namri.go.kr/upload/2002_...).xls)

부터 얻어진 데이터이다. 또한 유리온실에서 사용되는 난방기기의 연료를 보일러 등유로 하고 등유 1리터로부터 얻어지는 환산열량을 (C)라 하면 각 단열시스템에서 얻어지는 사례별 연간 보일러 등유의 절감 가능량 (F 및 G)를 구할 수 있다. 여기서 이를 보일러 등유의 과세유 가격(D)과 면세유 가격(E)로 각각 나누어 주면 연간 총 에너지 절감비용을 구할 수 있다. 따라서 이를 근거로 <표 5-17>에 나타난 단열시스템의 설치비용(J 및 K)로 나누면 초기 설치비용에 대한 경제성(회수년한)을 구할 수 있으며, 이렇게 얻어진 결과가 초기투자비용에 대한 경제성으로 판단할 수 있다.

이상과 같은 계산과정을 통해 얻어진 결과로 1중 단열스크린을 설치했을 경우에 과세유 기준으로 서울, 대전, 광주 지역에서는 약 2년 정도의 운영으로 초기 투자비용을 에너지 절감량으로 부터 회수가 가능한 것으로 나타났으며, 기후조건이 우수한 제주도의 경우에는 약 3.1년이면 초기투자비용을 회수할 수 있는 것으로 나타났다.

면세유를 기준으로 회수년한을 산출하면 서울, 대전지역에서 약 2.7년, 광주지역에서 약 3.1년, 그리고 제주지역에서는 약 4.4년이 소요되는 것으로 나타났다. 그리고 2중 단열스크린을 설치했을 경우에는 과세유 기준으로 서울, 대전, 광주 지역에서는 약 2년, 제주지역에서는 약 3년의 회수기간이 요구 되는 것으로 나타났으며, 면세유 기준으로는 서울, 대전, 광주지역에서 약 3년, 제주지역에서는 약 4.5년이 소요되는 것으로 각각 나타났다.

일반적으로 알루미늄 스크린으로 제작된 단열스크린의 사용연한이 5년에서 7년 정도인 것으로 조사되고 있는데, 위에서 얻어진 결과와 비교할 때 초기 투자비를 모두 회수 하고도 과세유 기준으로는 3년에서 5년, 면세유 기준으로는 약 2년에서 4년 동안은 에너지를 절감효과를 기대할 수 있다.

## 제 6 절 소결

본 장에서는 시뮬레이션 결과와 실제 적용대상 유리온실에 대한 실험결과를

비교, 분석함으로써 고효율의 반사단열 스크린 시스템을 제시코자 하였다.

먼저 시뮬레이션과 실험 간의 비교는 전남대의 실제온실에 대하여 실시하였는데, 여기서 시뮬레이션은 측벽 및 천정부와 지중면에 대한 계산을 실시한 후 이를 합산하는 방법에 의해 유리온실의 총 열손실량을 산출하였으며, 실험은 난방이 필요한 야간시간대(저녁 5시~익일 아침 9시)에 등유 보일러를 이용하여 난방한후 그 사용량으로부터 총 열손실량을 도출하였다. 그 결과 시뮬레이션과 실험 간의 오차는 최대 15% 정도로 잘 일치함을 보였다.

측벽 및 천정을 통한 열손실은 단열이 안된 일반 유리온실 전체 열손실량의 약 85% 정도였으며, 1중 스크린 시스템의 경우는 70%, 그리고 2중 스크린 시스템의 경우는 약 60%로 점차 감소하였다. 따라서 이는 반사단열 스크린 시스템의 효율성을 나타내는 것으로 지중으로의 열손실 비율이 증가하게 되는 결과를 가져온다.

기존 유리온실의 천장부분 평면스크린에 적용되던 다중스크린 시스템을 측벽부에도 적용할 수 있도록 설계하였으며, 이를 대상온실에 적용하였다. 따라서 본 연구에서는 운용상의 문제점을 해결하고 경제성이 좋은 알루미늄 스크린-부직포 조합의 2중 반사단열 스크린 시스템을 개발하여 제시하였다.

본 연구에서는 서울, 대전, 광주 및 제주 지역을 대상으로 과세유 및 면세유에 대한 경제성 검토를 실시한 결과 1중 단열스크린 2중 단열스크린 시스템은 경제성이 거의 유사한 것으로 나타났다. 즉 과세유를 기준으로 하였을 때 경제성이 서울, 대전, 광주 지역에서 약 2년 정도였으며, 기후조건이 우수한 제주 지역에서는 약 3년으로 나타났다. 그리고 이는 면세유를 기준하였을 때 서울, 대전지역에서 약 2.7년, 광주지역에서 약 3년, 그리고 제주지역에서는 약 4.5년인 것으로 각각 나타났다. 이러한 결과는 2중 반사스크린에서 부직포로 인한 추가비용이 연간 에너지 절감비용과 거의 같기 때문에 나타났기 때문으로 사료된다.



## 제 6 장 수광조건과 작물생리 생태적 반응

### 제 1 절 광환경 특성에 따른 작물생태

#### 6.1.1 태양광이 작물에 미치는 영향

작물은 빛으로부터 에너지를 공급받아 동화산물을 합성하고 이로부터 각종 대사작용에 필요한 물질을 생산한다. 일반적으로 식물은 주위의 광 환경에 잘 적응하면서 성장한다. 즉, 식물은 광을 잘 감지하는 식물의 눈이라 할 수 있는 Phytochrome(적색광 및 원적색광 수광체) 또는 Cryptochrome(청색광 및 자외선 수광체)이라는 색소를 갖고 있어[29] 광의 량, 광의 방향, 광의 질에 대한 정보를 얻으면서 성장한다. 그러므로 자연의 태양광은 자외선, 가시광선, 적외선으로 구성되어 있으며, 각 광파장에 따라 작물의 생육 반응도 다양하게 나타난다. 광합성은 광 강도에 의하여 가장 크게 영향을 받는데, 일반적으로 작물은 암흑 하에서는 광합성에 의한 탄산가스의 흡수가 전혀 없고, 호흡에 의한 탄산가스의 방출만이 이루어지고 있다. 광 강도가 암흑으로부터 서서히 증가하면, 이내 광합성에 의한 탄산가스의 흡수량과 호흡에 의한 방출량이 같아져서 외관상 탄산가스의 수치가 0이 되는 점에 도달하게 된다. 이점이 광보상점으로, 강광을 좋아하는 많은 과채류에서는 1,000~2,000 lux이고, 또 약광을 좋아하는 채소류에서는 200~1,000lux이다. 여기서 계속하여 광이 강하게 공급되면 광합성속도는 직선적으로 증가하지만, 이내 그 증가는 완만하게 되어 일정 수준을 유지하게 되는데, 이때의 광강도를 광포화점이라고 부르며, 대개 그 값은 작물의 종류에 따라서 다르다.

식물의 수광체인 Phytochrome은 Pr 및 Pfr의 두 형태로 존재하며, 적색광(R) 또는 원적색광(FR)의 조사에 의해 서로 다른 형태로 변환하면서 식물의 생육에 직접적으로 관계한다. 즉 광환경은 식물의 생체중, 건물중, 초장, 엽면적 등과 같

은 양적인 성장 증가와 화아형성, 발근, 줄기형성, 잎의 전개 등과 같은 형태형성에 크게 영향을 미친다[30]. 특수한 파장대의 광이 식물체의 생육에 큰 영향을 미친다는 점에 착안하여 담배, 콩, 밀, 고추, 수박과 같은 식물에 대한 광 조사 효과가 이미 연구된 바 있고, 광 형태 형성 제어용 인공광원으로 적색의 단색 파장을 갖는 소형의 LED를 사용한 연구가 수행된 바 있다. 따라서 빛은 작물이 생육하는데 있어 중요한 환경요인이지만 작물생육에 영향을 끼치는 광량, 광질, 일장 등은 장소, 시간 또는 시설물의 피복재료에 따라 변하기 때문에 이러한 요인들을 고려한 광의 이용은 작물의 생육에 중요한 의미를 갖는다.

과채류는 일반적으로 광의 요구도가 높기 때문에 광량이 부족하면 생리장해 등이 쉽게 발생하며, 특히 축성 및 반축성 재배 작형 시기인 가을부터 초봄까지에 문제가 되는데 이때에 주로 시설재배가 이루어지기 때문에 더욱 중요한 문제라고 생각된다. 광량부족에 따른 생리장해 발생 주요 원인은 광합성량 저하에 따른 동화생성물의 부족에 기인한다. 동화 산물이 부족하게 되면 각 기관의 발육이 빈약하게 되고, 특히 성장점 부위에 형성되는 꽃눈의 발육이 불량하여 낙뢰, 낙화의 원인이 되며, 개화 이후에도 낙과되기 쉽다. 잎과 줄기부위에 광합성산물의 분배가 증가되어 도장하게 되고 뿌리는 세력이 저하하게 된다. 과실 비대기 이후의 약광은 오이에서 곡과, 어깨홀쪽과, 세장과, 흐름과가 발생하고 토마토에서는 공동과, 줄썩음과가 많아지고 가지는 석과나 곡과의 발생이 증가하며 수박에서 황대, 피수박, 당도저하 등이 발생된다. 그리고 이 시기에는 동화양분의 분배가 과실에 많아지므로 뿌리가 쇠약하게 되어 양·수분의 흡수가 저하하고 지상부와 균형을 잃어 착과의 주기가 심하게 발생한다. 흐린 날씨가 계속된 후에는 뿌리가 쇠약해져서 양·수분의 흡수가 감소할 뿐만 아니라 잎도 연약한 상태인데 이후의 날씨가 맑아지면 성장점에 석회 부족증이 심하게 되고 잎은 일소현상을 나타낸다.

하우스 내에 광량이 부족할 때에는 물론이지만 때로는 광량이 지나치게 높을 때에도 광합성작용을 증대시키기보다는 시설내의 온도를 높여 오히려 광합성을 감소시키는 쪽으로 작용하는 경우도 있다. 작물에 따라 광 포화점이 다른데 강광성 작물인 멜론, 토마토, 수박, 참외, 호박, 장미, 국화 등의 광포화점은 60~

70klux로 높고 중광성 작물로는 딸기, 완두, 고추, 시크라멘, 프리지아 등으로 40~45klux 정도이며, 약광성 작물인 상추, 시금치, 생강, 관엽식물, 양란 등은 20~25klux 정도로 낮기 때문에 적절한 차광 등을 통하여 광량을 조절할 필요가 있다. 우리나라 여름철의 일사강도는  $850\sim 950\text{W}\cdot\text{m}^2$ ( $1\text{klux}\approx 10\text{W}\cdot\text{m}^2$ )정도이기 때문에 여름철 시설 내 투광량이 60~75% 수준이 되므로 작물에 따라 일사가 강할 때에는 수시 차광으로 광량을 조절하여 줄 필요가 있다.

일반적으로 늦은 봄부터 여름(5~8월)에 광량이  $700\text{W}\cdot\text{m}^2$  이상 되면 강광성 작물은 30% 정도의 차광을 하여주고 중광성 작물은 50% 내외, 약광성 작물은 70%내외의 차광재를 사용하여 차광을 한다. 광량이 지나치게 높아지면 과실표면에 온도가 상승하여 일소피해가 많이 나타나는데 이는 하우스 내가 건조하거나, 날씨가 흐린 후 맑은 날씨에서 뿌리로부터 수분흡수가 적을 때 많아진다. 토마토에서는 일소과 이외에도 햇벌이 강해지면 과피 표면의 노화가 진행되어 열과가 되기 쉽고, 딸론 등에서는 네트형성이 불균일하게 되고 착색이 불량해 진다.

### 6.1.2 시설 내 광환경 개선

시설 내 광환경은 구조재의 광선차단, 피복재의 광선 반사 또는 흡수, 피복재의 오염과 수분에 의한 광선의 반사 또는 흡수 등으로 노지에 비해 광량이 크게 감소하며, 또한 위치에 따라서 많은 차이가 나서 작물의 생육이 균일하지 못한 경우가 많은데, 이와 같이 광분포가 균일하지 않은 원인은 시설골재의 차광과 시설물에 대한 태양광의 입사각이 위치에 따라 다르기 때문이다. 따라서 경제적이고 작물생육에 효과적인 시설의 설치 및 이용이 필요하다.

시설재배의 대부분은 저온 약광기에 이루어지고 시설 내에는 피복물, 물방울, 먼지 등의 광차단요소로 인하여 광량의 부족상태가 가중된다. 따라서 시설재배에서는 작물의 생육에 보다 적절한 광 환경조절, 피복물의 세척, 보광, 경종방법의 개선 등 광도를 높이기 위한 대책들이 요구되어 지는데, 시설내부로의 투과광량의 증대방안으로서는 첫째, 온실골격자재의 선택에 있어 차광율이 적고, 강도가 높으며, 용적이 적은 철재나 지붕의 차광면적이 적은 온실구조를 선택해야 한다.

둘째, 피복자재의 선택에 있어 광투과율이 높고, 색소가 첨가되지 않으며, 물방울이 맺히지 않는 무적자재, 오염도가 낮고 쉽게 세척될 수 있는 자재를 선택해야 한다. 셋째, 피복재의 광흡수와 반사를 고려한 선택이 따라야 한다. 지붕의 입사각에 따라 광투과율은 큰 차이를 보인다. 따라서 지붕의 경사는 광투과율 뿐 만 아니라 결로현상, 적설하중 등을 고려하여 적절한 각도가 되도록 해야 한다. 유리나 투명필름의 투과율은 입사각이 작을 때 상당히 높을 뿐 만 아니라 서로 비슷한 모양을 보이고 있는데 착색필름의 투과율은 현저하게 낮다. 어느 피복재에서나 입사각이 60°를 넘게 되면 투과율이 급격하게 낮아지고 75°에서는 반감된다. 피복자재를 이용하여 시설 내 광환경을 조절할 수 있는 것은 광의 양적인 측면에서는 외피복자재의 경우 투과율이 높을수록 우수한 자재이므로 광량의 조절보다는 광질의 조절기술이 필요하다. 현재 개발 보급되고 있는 피복자재 가운데 이러한 광질의 차이를 보이는 것으로는 자외선 차단 피복자재와 광과장 전환 피복자재와 산광피복자재 그리고 각종 유색도료를 이용한 선택성 광과장 투과 피복자재 등이 있다. 시설내의 지면이나 벽면에 도달한 빛은 대부분 작물이 이용하지 못하는데, 이러한 빛을 반사물체를 설치하여 산광시키면 광부족상태의 시설재배에서는 작물의 수광성이 향상되어 수량이 증가한다. 반사물체로서 유리도 이용되지만, 설치비용이 많이 들고 깨지기 쉽기 때문에 최근에는 가격이 저렴하고 설치하기도 용이한 아크릴판이나 실버 폴리에틸렌필름(silver polyethylene film)과 같은 알루미늄을 주체로 한 반사필름을 많이 이용한다. 넷째, 시설의 설치방향에 따라 광 투과는 달라지는데 연동과 단동 및 동서동과 남북동에 따라 광입사는 달라지게되므로 재배작물에 따른 방향의 선택이 중요하다. 다섯째, 전 광투과량은 감소하지만 골격자재에 의한 그늘이 없어지고 실내의 광분포를 고르게 하는 산광자재를 이용하는 것이다. 여섯째, 재식간격과 이랑의 방향조절 및 엽면적 지수의 확대를 통한 경종적인 방법이다. 시설재배에서 겨울철 광부족 현상에 대한 대책으로 피복자재의 광투과율, 방직성, 시설방향 및 작물 재배법 개선 등에 관한 여러 방법이 이용되고 있으나, 최근 들어 반사필름을 도입하여 보다 간편하게 작물군락 하부를 직접적으로 보광 시켜주는 방법이 시도되고 있다.

원예작물 재배에 있어 반사필름은 단열, 보광 및 반사 특성을 이용하여 고온기

에 지온을 조절하고, 과실류의 착색을 촉진하며, 저온기에 있어서의 단열효과, 그리고 진딧물 발생 억제 등에 의한 수량 및 품질 향상을 위해 사용되어 왔다. 이 반사필름 멀칭에 의해 기온, 조도, 토양수분, 지온, 습도 등 환경조절이 가능하고 이에 따른 식물생육의 변화 즉, 수량의 증가, 과실의 착색 및 당도 증진, 숙기촉진 및 잡초방제 등 많은 효과를 나타내었다.

절화의 경우, 반사필름 멀칭에 따른 개화촉진 및 품질향상, 증수효과는 이미 여러 작물에서 보고 되고 있으며, 반사광에 의한 균락 내 광 환경 개선이 무엇보다도 작물의 광합성, 즉 동화 산물 생산에 크게 영향 미치는 것으로 알려져 있다.

카네이션의 경우 동일한 광 조건에서 잎의 이면의 광합성 속도가 표면과 큰 차이가 없었고, 지상부 광의 30%를 잎 이면에 보광 처리한 결과, 보광처리하지 않은 것보다 광합성효율이 향상된 보고도 있다. 이러한 초기생육 촉진효과는, 반사필름멀칭 보광처리에 의해서 잎의 광합성효율이 향상되고, 결국 생육단계도 앞당겨져 조기에 개화하는 것으로 판단된다. 또한, 생육중기에도 반사멀칭은 무성해진 초관으로 균락내 중·하층부의 광합성 효율이 매우 낮아진 성숙엽을 동화작용에 참여 시키므로써 초관의 중·하층 부위가 확대되면서 수량을 증대시키는 것으로 보고 되고 있다. 또한, 반사필름의 이용으로 화훼류 중 카네이션, 스프레이국화, 글라디올러스, 유스토마의 생육, 수량 및 품질이 향상되었으며, 과수류 중에서는 복숭아, 사과, 포도, 배, 밀감, 감에서 과실착색촉진, 숙기촉진, 당도향상, 산도감소, 지온저하 등의 효과가 보고 되었다. 또한 반사필름 멀칭에 의해 진딧물 등 해충의 기피효과로 바이러스 방제효과도 보고 되었다. 그러나 이들 반사필름의 사용에 따른 수관 내 환경변화 및 작물생육에 미치는 영향에 관한 검토는 거의 이루어지지 않고 있으며, 이러한 자재의 설치에 따른 시설 내 작물생육환경에 대한 검토가 미진한 상태이다.

## 제 2 절 반사광 이용이 작물의 생장 및 생육에 미치는 영향

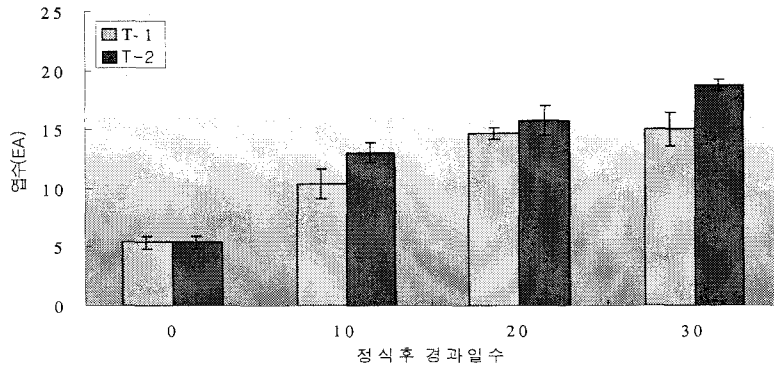
### 6.2.1 재료 및 방법

시설 내 알루미늄 반사광 도입에 따른 작물의 수관(canopy)내 광환경 변화와 이에 따른 오이의 생육 및 생리·생태적 반응을 구명하기 위한 본 연구는 2001년 1월부터 전남대학교 농과대학 부속농장에서 수행하였으며, 공시품종은 “겨울나기 청장오이(홍농종묘)”를 사용하였으며, 2001년 1월 종자를 최아후 육묘 트레이에 파종하고, 정식은 본엽이 5~6매 전개되었을 때 펠라이트와 코코피트를 1:1로 혼합한 배지에 하였다. 재배에 사용된 양액은 네델란드 PBG 배양액을 사용하여 관리하였다. 재배시스템은 플라스틱 성형베드(W30×H20×L100cm)에 혼합배지를 채우고 그 위에 타이폰(Typon, 2.8 l/hr, Netafim, Israel)을 2줄로 설치하여 흑백필름으로 멀칭 하였다. 실험군의 처리는 무처리(T-1), 시설의 북쪽에 반사필름을 설치하여 주간에 반사광을 이용(T-2)의 두 가지 처리로 하였으며, 기초조사 후 10일 간격으로 3회에 걸쳐 초장, 엽수, 경경, 엽면적, 생체중, 건물중 및 과실수량조사 등을 조사하여 각 처리구간의 생장특성을 비교·검토하였다.

### 6.2.2 실험결과 및 고찰

#### ① 엽수의 변화

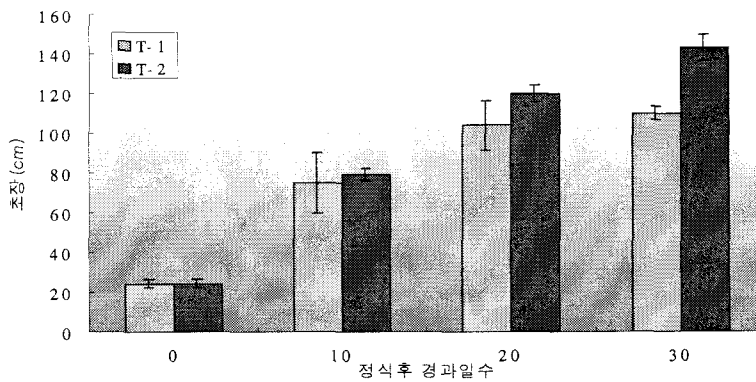
생장기간 동안의 처리구별 엽수의 변화를 3차에 걸쳐 경과시간별로 조사한 결과는 최종 T-2(18.6개)가 T-1(15개)과 비교하였을 때 약 24%의 생장촉진효과를 보였으며 정식 후 10일, 20일의 결과에서도 알루미늄증착자재를 설치한 T-2 처리구에서 엽수가 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 6-1] 반사광 이용에 따른 엽수의 변화

② 초장의 변화

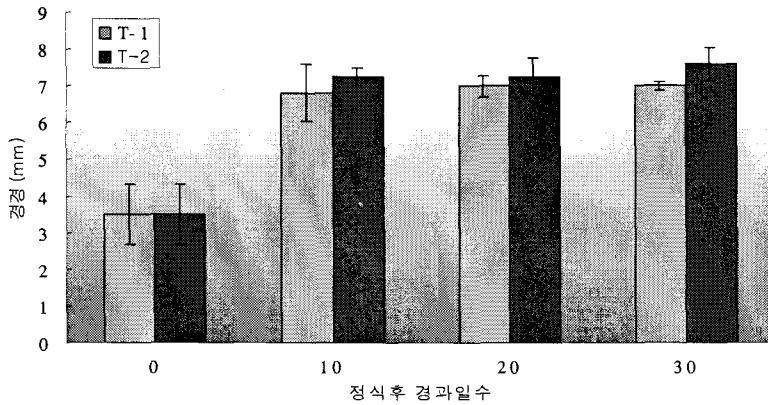
초장의 변화를 3차에 걸쳐 경과시간별로 조사한 결과 T-2(143cm)가 T-1(110cm)과 비교시 30%의 성장 촉진효과가 나타났다. 이와 같은 결과는 주간에 작물에 대한 광환경이 알루미늄 증착자재를 설치한 처리구에서 적산된 광량이 더 높은 것으로 생각되며 광량의 증가로 인한 작물의 엽온 증가로 작물 생육에 적합한 환경조건이 이루어진 것으로 판단된다.



[그림 6-2] 반사광 이용에 따른 초장의 변화

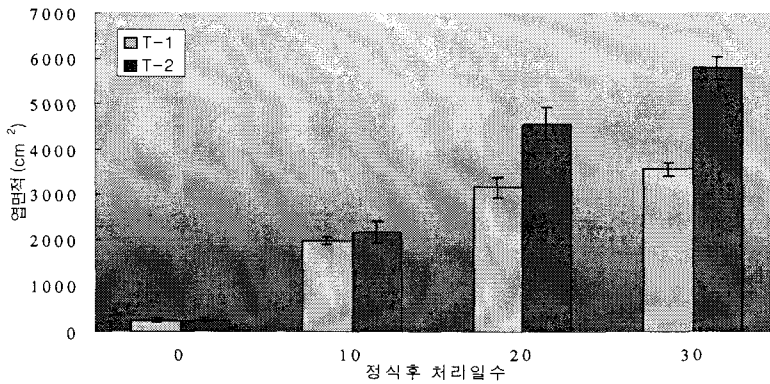
### ③ 경경의 변화

경경의 변화를 3차에 걸쳐 경과시간별로 조사한 결과 T-2(7.6mm)가 T-1(7mm)과 비교시 8.6%의 생장 촉진효과가 나타났으며, T-1의 경우 1차 조사와 3차 조사까지의 경경의 증가량은 유의차를 나타내지 않았으나 T-2 처리구의 경우는 0.5mm의 경경의 증가를 나타내었다.



[그림 6-3] 반사광 이용에 따른 경경의 변화

### ④ 엽면적의 변화



[그림 6-4] 반사광 이용에 따른 엽면적 변화

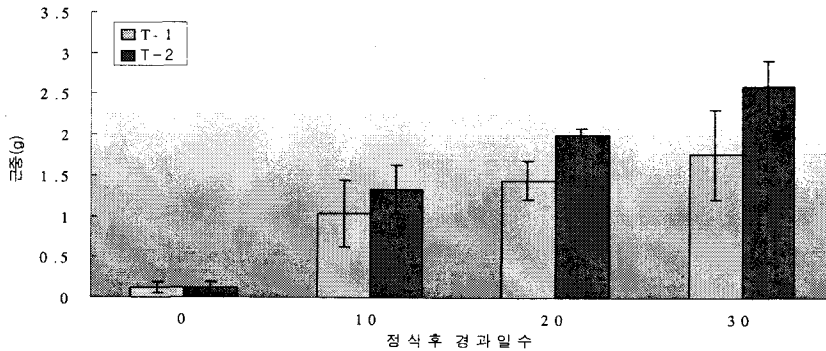
엽면적의 변화를 3차에 걸쳐 경과시간별로 조사한 결과 T-2(5771.923cm<sup>2</sup>)가



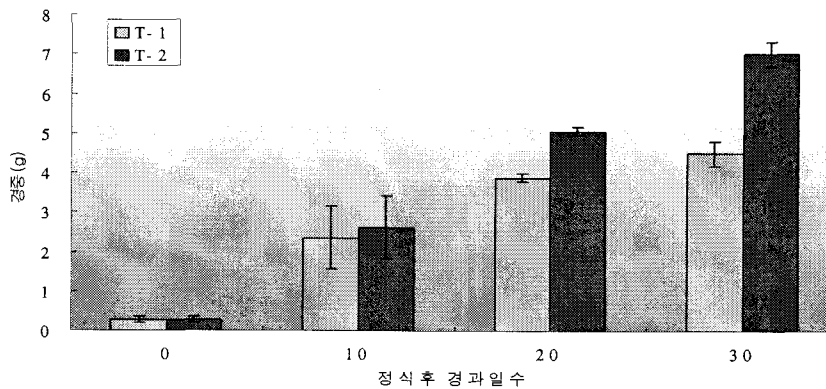
T-1(3553.723cm<sup>2</sup>)과 비교시 62%의 성장촉진효과가 나타났으며, 특히 그 증가폭이 다른 조사항목보다 월등히 높게 나타났다. 이러한 결과도 역시 반사광에 의한 작물체의 적산광량이 높아짐으로서 나타나는 결과로 판단되었다.

⑤ 근중, 경중, 엽병중, 엽중의 변화(건물중)

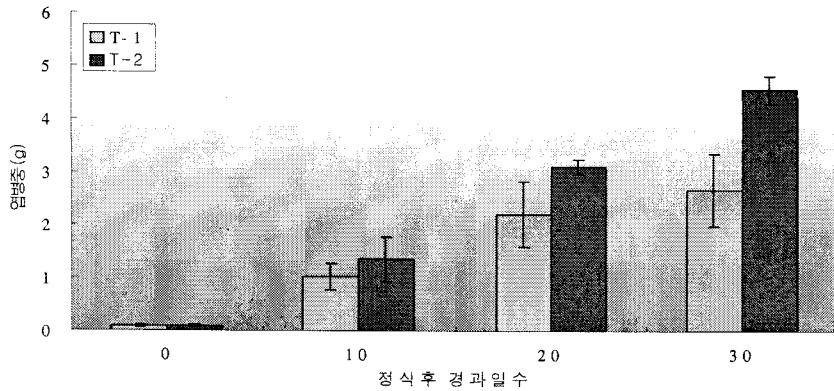
근중의 변화를 3차에 걸쳐 경과시간별로 조사한 결과 T-2(2.59g)가 T-1(1.76g)과 비교시 47%의 성장촉진효과가 나타났으며, 경중, 엽병중, 엽중의 경우도 각각 56%, 71%, 90%의 성장촉진효과를 나타내었다.



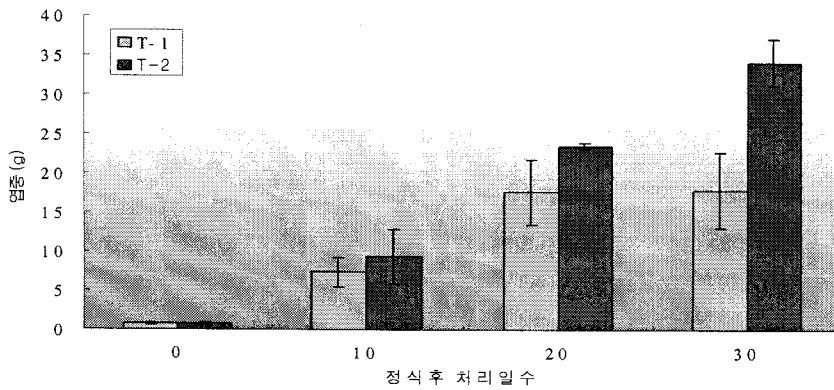
[그림 6-5] 반사광 이용에 따른 근중 변화



[그림 6-6] 반사광 이용에 따른 경중 변화



[그림 6-7] 반사광 이용에 따른 엽병중 변화



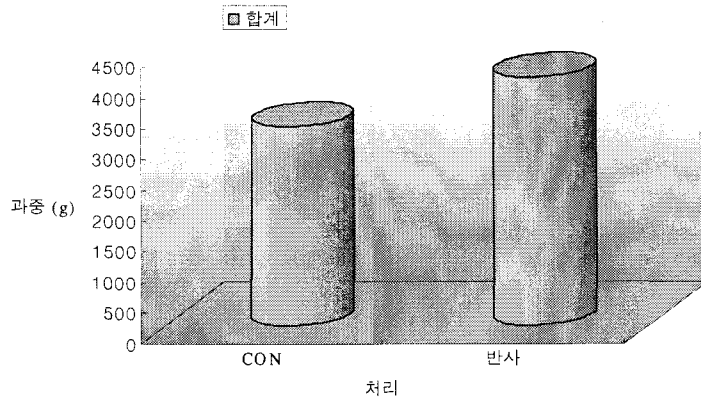
[그림 6-8] 반사광 이용에 따른 엽중 변화

#### ⑥ 과실 수확량

본 시험 기간중 반사광 이용에 따른 오이의 기초조사와 더불어 과실수량의 변화를 조사하였다. 조사결과 T-2(4030.5g)가 T-1(3230.4g)과 비교시 24%의 과실 수량증가 효과가 나타났다.

반사필름의 농업적 이용은 주로 과수류의 품질향상과 화훼류의 개화촉진 및 품질향상에도 효과가 있는 것으로 보고 되고 있으며[31],[32],[33], 본 실험에서는 시설 내 반사단열필름을 설치하여 주간에 반사광을 이용한 처리구에서 오이의

생장이 매우 양호하게 나타났으며, 특히 각 기관별 생체중 및 건물중 또한 다른 처리구 보다 높은 것을 관찰 할 수 있었다.



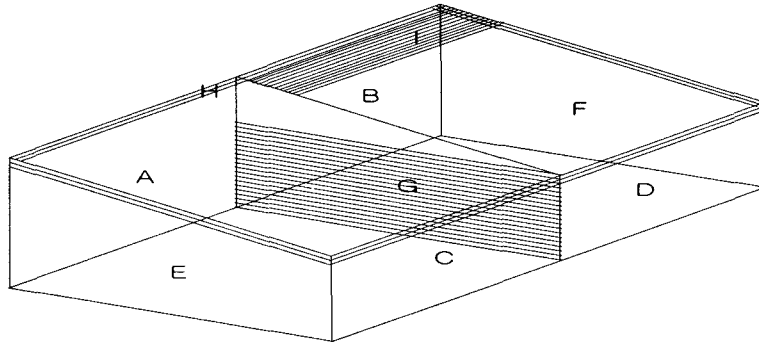
[그림 6-9] 반사광 이용에 따른 과중 변화

### 제 3 절 광반사 단열스크린 설치에 따른 작물생태 평가

#### 6.3.1 실험방법 및 작물선정

본 연구는 2001년 2월부터 5월까지 전남대학교 농과대학 부속농장에서 수행하였다. 공시품종은 “겨울나기 청장오이(홍농종묘)”를 사용하였으며, 2001년 2월 13일 최아 후 육묘트레이(50공)에 파종하고, 본엽이 1~2엽 전개한 3월 3일에 비닐 포트(지름 9cm)에 이식하여 네델란드PBG배양액 1/2농도(1.1S/m)로 관리하였다. 정식은 본엽이 5~6매 전개되었을 때 필라이트와 코코비타를 1:1로 혼합한 배지로 하여 동월 25일에 하였다. 정식 후 2주간은 네델란드PBG배양액 1/2배액으로 관수하였으며, 그 이후부터는 표준농도로 높여 관리하였다. 재배시스템은 플라스틱 성형베드(W30×H20×L100cm)에 혼합배지를 채우고 그 위에 타이푼(Typon, 2.8ℓ/hr, Netafim, Israel)을 2줄로 설치하여 흑백필름으로 멀칭 하였다. 처리는

무처리구(CON), 시설의 북쪽에 반사단열필름을 설치하여 주간에 반사광을 이용하고 야간에는 전면을 반사단열필름으로 피복(T1), 야간에 반사단열필름으로 전면피복(T2), 주간 개방된 반사단열필름으로 형성될 수 있는 음영대 설치와 야간 단열(T3)로 하였다. 재식은 25cm간격으로 처리구당 15주씩 완전임의 배치하였다 [그림 6-10].



- |   |  |
|---|--|
| A(back) : LRIF fixation                 | B(back) : LRIF opening and closing       |
| C(front) : LRIF opening and closing     | D(front) : LRIF opening and closing      |
| E(left side) : LRIF opening and closing | F(right side) : LRIF opening and closing |
| G(partition) : White-Black Film         | H(roof) : LRIF opening and closing       |
| I(shade) : form shading area            |  |
- \* LRIF : Light reflection and insulation film

[그림 6-10] 온실내 광반사 단열필름설치 모식도

급액은 오전 7시부터 오후 7시까지 맑은 날엔 30분 간격으로 주당 2,800ml/일을, 흐린 날에는 주당 1,500ml/일을 관주하였다. 생육조사는 3월 25일부터 실시하여 10일 간격으로 3회에 걸쳐 초장, 엽수, 경경, 엽면적, 근활력, 클로로필, 생체중 및 건물중 등을 조사하였으며, 또한 수량, 엽온, 광합성량 및 처리구에 따른 광환경, 온도를 조사하였다. 근활력은 TTC(Triphenyl tetrazolium chloride) 방법에 의하여 뿌리를 절취하여 증류수에 세척한 후 뿌리 시료는 약 2cm 길이로 절단하여 균일하게 혼합한 후 그 중에서 500mg을 취하여 유리 test tube에 넣고 1%의 TTC용액, 0.1M인산나트륨 buffer, 증류수가 각각 1:4:5의 비율로 혼합된 액 10ml를 첨가하였다. 뿌리는 용액 중에 완전히 잠기게 하고 흡입펌프를 이용하여 시료중의 기포를 제거하고 암 상태로 30℃ 항온수조에서 2시간동안 반응시켰다. 반응

시간 종료 후 2N 황산 2ml을 가해서 반응을 정지시키고, 시료를 거른 후 이 추출액을 비색계 (UV/VIS spectrophotometer)를 이용 470nm에서 측정하였다.

광합성율의 측정은 맑은 날 오전 10시부터 오후 4시까지 실시하였다. 광합성 측정에 사용된 휴대용 고속반응 광합성측정기(Portable Photosynthesis System, LI-6400, LI-COR, USA)로 본 실험에서는 1,000 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>에서만 측정하였다. 온도와 CO<sub>2</sub>농도는 각각 26℃와 400ppm으로 고정하였다.

엽온은 맑은 날 엽온측정기(신영전자, SYE-420)를 이용하여 20분마다 측정하였으며, 처리구내 광환경, 온도는 Hobo(ANSET Computer Corporation)를 이용하여 추적하였다. 수량조사는 과장이 25cm 내외일 때 수확하여 각 처리구간에 비교·검토하였다. 엽면적은 자동엽면적계(Hayashi DenKo CO. LID, Japan)로 측정하였고, 각 기관별 건물중은 80℃의 Dry oven에서 2일간 건조시킨 후 칭량하였다. 일정간격으로 조사된 기관별 건물중, 생체중 및 엽면적을 기초로 하여 다음의 성장 해석을 실시하였으며, 성장 해석된 자료를 바탕으로 각 처리에 따른 영향을 분석하였다.

### 6.3.2 실험결과 및 고찰

본 실험은 광반사단열필름의 설치가 오이의 성장과 발육 및 수량에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행하였다.

<표 6-1> 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 성장특성

Treatment	Plant height (cm)	no. of leaves (ea/plant)	Leaf area (dm <sup>2</sup> /plant)	Stem diameter (cm/pl.)	Chlorophyll content (mg/g)
CON	110.0b	15.0b	35.5c	7.00b	46.33b
T1	143.0a	18.6a	57.7a	7.60a	52.93a
T2	115.3b	16.0b	40.9b	7.09ab	48.10b
T3	98.3c	14.3b	28.4d	6.59b	45.27b

<표 6-1>은 처리에 따른 정식후 30일째의 오이의 성장특성을 나타낸 것이다.

CON, T1, T2, T3의 처리에 따른 양액재배 오이의 생육반응 중 초장의 경우 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1(주간 반사광 + 야간단열)의 경우는 1.3배, T2의 경우에는 1.04배의 생육촉진 효과를 나타내었으나, 광부족 조건을 처리한 T3처리구는 오히려 0.89배로 생육이 억제되는 결과를 나타내었다. 엽의 형성에 미치는 영향을 조사하여 본 결과에서도 무처리구(1 기준)대비 T1의 경우 1.24배, T2의 경우 1.06배로 생육촉진 효과를 나타내었으나, T3의 경우 0.95배로 억제되는 것으로 나타나 초장의 경우와 거의 일치한 결과를 나타내었다. 그리고, 엽면적, 경경, 엽록소 함량의 변화를 조사한 경우 T1은 1.62, 1.08, 1.14, T2처리구는 1.15, 1.01, 0.94, T3의 경우에는 0.8, 0.94 및 0.97배로 조사되었다. 이러한 결과는 Huh 등(1988)의 보고에서도 작물의 생육에 미치는 요인을 조사한 결과 광조건이 광합성 즉, 동화산물생산에 주로 영향을 나타낸다고 보고 한 바 있다. 본 연구결과와 유사한 조건으로 검정한 결과 중 Huh등(1995)은 카네이션을 대상으로 반사필름 멀칭으로 광조건을 보강하여 수량과 품질에 미치는 영향을 발표한 사례에서 카네이션의 시설 내 절화재배에 있어서 반사필름 멀칭이 광환경, 광합성 및 생육, 수량 및 품질향상에 미치는 효과를 구명한 결과, 반사필름종류를 달리한 경우에서 Neopolyshine, Taiyo 및 Tyvek는 광합성 유효복사에서 반사율이 공히 85% 이상으로 모두 높게 나타났고, 노지 일사량의 92%가 투과되는 유리온실 내 지상 10cm에서의 무멀칭구의 반사광율은  $13.8\text{Wm}^{-2}$  로 유리온실 내 투과광량의 약 3%로 나타났는데, 반사필름 멀칭구의 반사광량은  $340\text{Wm}^{-2}$ 로 약 73%로 나타나 반사필름 멀칭에 의한 시설내 광량증가 효과가 매우 높은 결과를 나타내었다고 보고하였다. 즉, 이러한 결과는 반사필름이 시설 내 카네이션 군락의 지상부 근처의 수광 비율을 증가시켜 광환경개선과 함께 식물체의 광합성 및 생장을 촉진시키고 나아가 화아발육의 촉진, 개화 피크의 이동, 재화수량의 증가, 그리고 약할율의 감소로 나타났다고 발표한 경우와 비교시 본 연구에서도 광환경이 보강된 T1처리구와 무처리구(1 기준)를 비교시 초장의 경우 1.3배 엽수의 경우 1.24배 그리고 엽면적, 경경, 엽록소 함량의 변화를 조사한 경우 T1은 1.62, 1.08, 1.14배로 나타나 오이의 경우도 광환경의 개선이 주 생육에 미치는 영향을

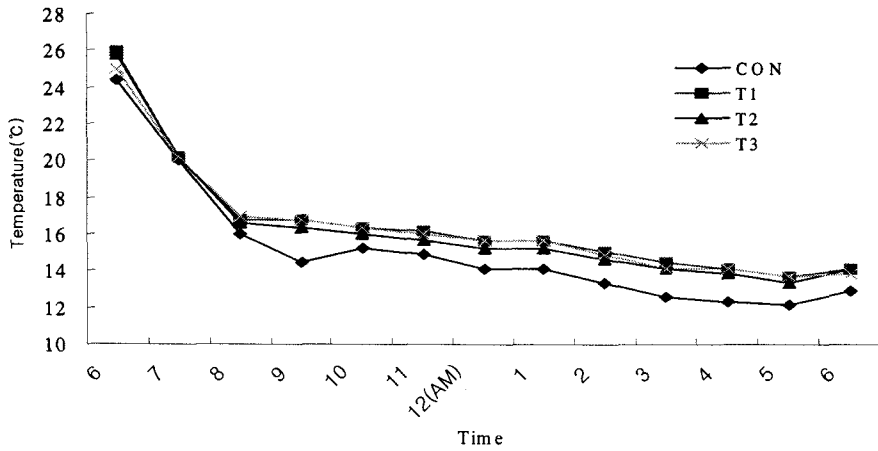
차지하는 것으로 나타났다.

<표 6-2> 30일후 광반사단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 성장분석

Treatment	RGR (g/day)	NAR (g/dm <sup>2</sup> /day)	LAR (cm <sup>2</sup> /g)	LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	CGR (g/m <sup>2</sup> /day)	T/R ratio
CON	0.10c	6.83b	0.015a	0.277c	0.851c	14.2c
T1	0.12a	8.90a	0.014a	0.391a	1.568a	17.6b
T2	0.11b	8.28a	0.013a	0.306b	1.139b	18.9a
T3	0.09c	6.69b	0.014a	0.237d	0.715c	14.0d

relative growth rate(RGR), net assimilation rate(NAR), leaf area ratio(LAR), leaf area index(LAI), relative leaf growth rate(RLGR), crop growth rate(CGR), top/root(T/R ratio), and dry matter partitioning ratio(DMPR)

<표 6-2>는 처리구별 30일간의 성장해석을 나타낸 것이다. 상대생장율(RGR)은 무처리구(1 기준)를 기준으로 주간의 광반사 단열필름의 반사광 이용과 야간의 단열로 처리한 T1처리구의 경우 1.2배, T2의 경우에는 1.1배로 높게 나타났고, 광반사 단열필름에 의해 형성되는 음영 처리구는 0.9배로 가장 열등한 결과를 나타내었다. 순동화율(NAR)도 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1의 경우 1.3배, T2의 경우 1.2배로 높게 나타났으나, T3의 경우 0.97배로 가장 낮은 결과를 나타내었다. 엽면적지수(LAI), 개체생장율(CGR) 또한 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1처리구에서 각각 1.4, 1.8배로 가장 우수하게 나타났다. 이러한 결과는李(1997)의 멜론의 멀칭재배시 반사필름 멀칭에 의한 생육특성에서와 유사한 결과를 보였으며, 한 등(2000)의 토양 피복재료에 따른 장미의 절화수량 및 품질에 미치는 영향을 규명한 실험에서 무멀칭구보다 반사필름멀칭구의 반사광에 의한 광합성 증가로 인해 정식 6개월 후에는 초장이 9.3cm 더크고, 총 shoot수도 0.2개 더 많았다고 보고하였다. T/R율은 T2처리구에서 높게 나타났는데 이는 정식 후 30일째의 뿌리의 건물중을 비교했을 때 T1처리구의 뿌리발달이 T2처리구의 뿌리발달보다 훨씬 우수했기 때문으로 판단된다.



<그림 6-11> 광반사 단일필름 설치에 따른 수경재배오이의 주간온도변화

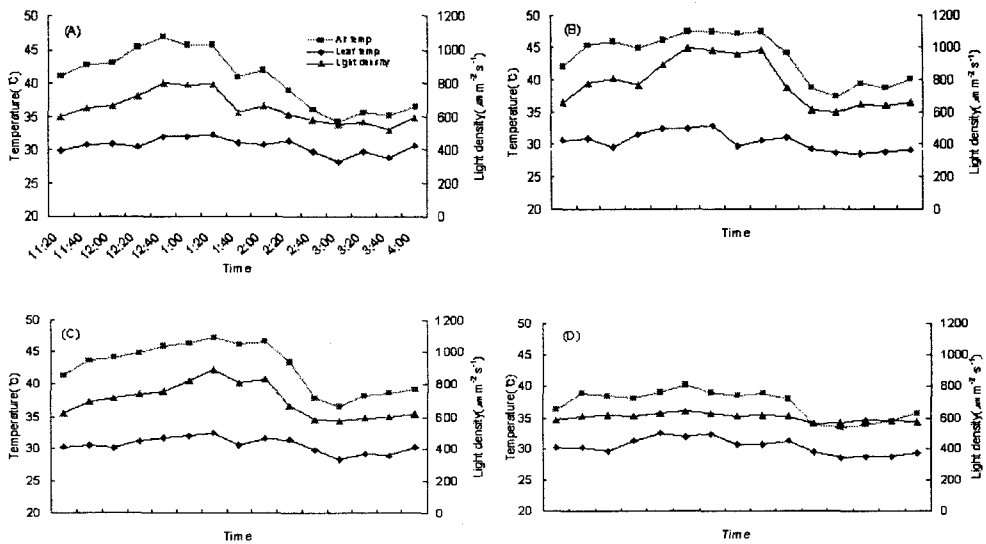
[그림 6-11]은 각 처리구별 야간온도의 변화를 경시적으로 나타낸 것으로 T1, T2, T3 처리구는 모두 야간 단열효과로 인해 무처리구보다 2°C정도 높은 경향을 보였다. 李 等(1997)은 반사필름 멀칭시 무멀칭에 비해 지온이 오전 8시부터 오후 8시까지 낮았으나 오후 10시부터 오전 6시까지 반대로 높았다고 보고하였으며, 허(1994)의 보고와 같이 온도가 상승하는 주간에는 반사필름 멀칭이 단파를 흡수하는 투과율이 낮기 때문에 지온이 무멀칭보다 낮게 유지되나 저온기에는 단열효과가 있어 야간에는 무멀칭보다 온도가 높게 유지된다는 점과 일치하였다.

또한, T1처리구의 야간온도가 T2, T3처리구에 비해 다소 높게 나타났는데, 이것은 주간 반사광으로 인한 약간의 지온상승에 의한 효과로 생각된다[34].

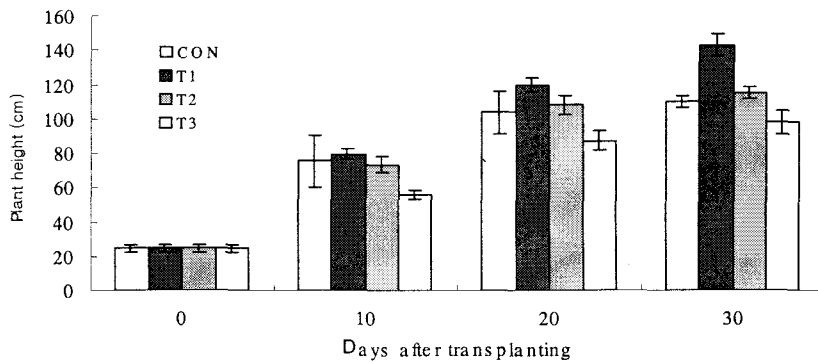
[그림 6-12]는 맑은날 오전 11시 20분부터 오후 4시까지의 각 처리구별 기상환경과 엽온의 변화를 경시적으로 나타낸 것이다. 광도와 기온은 무처리구와 T2처리구 사이에서는 거의 비슷한 양상을 보였으며, 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1처리구에서 온도와 광도가 각각 1.07, 1.2배로 가장 높게 나타났으며, T3처리구에서는 0.91, 0.92배로 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 Nam 등(1997)과 Huh 등(1994)의 반사필름 멀칭구에서 반사광량이 현저히 높았다는 보고와 유사하였다. 엽온을 살펴보면 모든 처리구에서 대체적으로 30°C 전후



를 나타냈으며, 광도와 비교했을 때 많은 광량을 받은 T1처리구가 다른 처리구와 비슷한 엽온의 변화를 보인 것으로 보아 반사필름의 설치에 의한 광반사가 오이 엽의 기공밀도를 증가시켜 이로 인한 순조로운 증산이 엽온을 저하시킨 것으로 사료되었다(Cho 等, 1997).



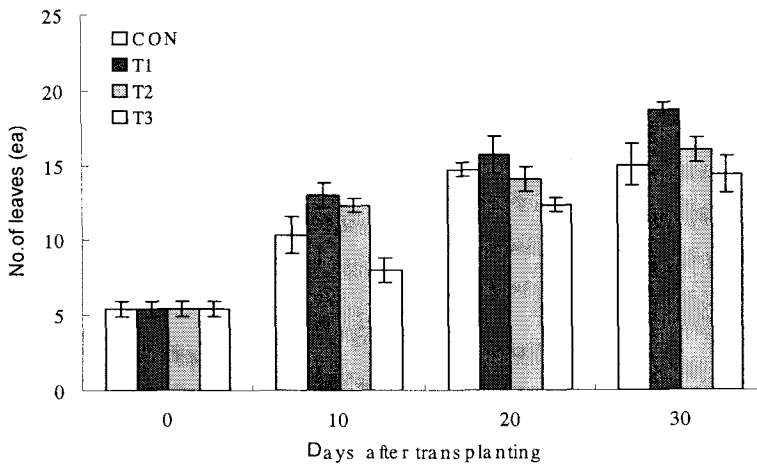
[그림 6-12] 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 광량, 온도 및 엽온 비교 (A-CON, B-T1, C-T2, C-T3)



[그림 6-13] 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 초장 및 엽면적 비교

[그림 6-13]은 처리에 따른 초장의 변화를 경시적으로 나타낸 것이다.

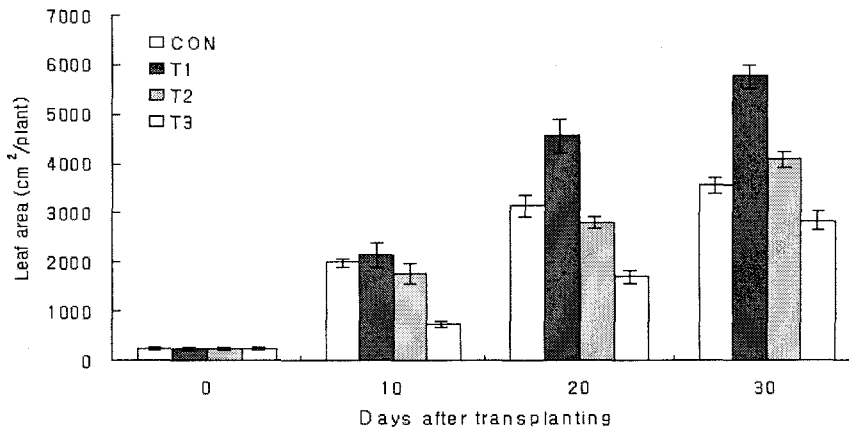
초장의 경우 정식후 10일째까지는 T3(단열필름의 개폐에 의해 생길 수 있는 음영대)처리구를 제외한 모든 처리구에서 별다른 차이를 보이지 않았지만 20일째부터 T1(주간 반사광 + 야간단열)처리구와 무처리구의 차이가 12cm로 현저히 나타났으며, 무처리구와 T2처리구의 성장차이도 조금씩 보이기 시작했다. 정식 후 30일째에는 T1처리구(143cm)가 무처리구(110cm)에 비해 1.3배에 가까운 성장 촉진효과를 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 주간 반사광을 이용한 경우에 작물군락 내부의 광환경이 개선될 수 있고 약간의 지온상승에 의한 효과로 사료되었다(李 등, 1997). 또한 정식 후 기간이 길어질수록 처리구간의 차이가 현저히 드러나는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 초장의 증가에 따른 엽수의 증가가 더욱 이런 성장촉진효과를 나타내는 것으로 생각된다.



[그림 6-14] 정식 후 경과일수에 따른 수정재배오이의 엽수변화량

[그림 6-14]와 [그림 6-15]는 각각 엽수와 엽면적을 나타낸 것이다. 엽면적은 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1처리구가 1.6배의 높은 증가율을 보인 반면, T3 처리구에서는 0.8배의 가장 낮은 증가율을 보였다. 초장과는 달리 정식 후 20일까지는 무처리구(3160cm<sup>2</sup>/plant)가 T2처리구(2814cm<sup>2</sup>/plant)에 비해 엽면적이 높

게 나타났지만, 30일째에는 초장에서와 같은 차이를 관찰할 수 있었다. 엽수의 경우도 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1처리구의 증가율이 1.2배로 가장 높았으며, 정식후 30일째의 엽수는 엽면적의 증가율과 일치하고 있음을 알 수 있었다. 생육초기에 엽면적의 경우 T2처리구가 무처리구에 비해 성장율이 다소 떨어지는 이유는 잎의 상호 차폐로 인해 잎이 받는 광도가 줄어들었기 때문으로 생각되었다.



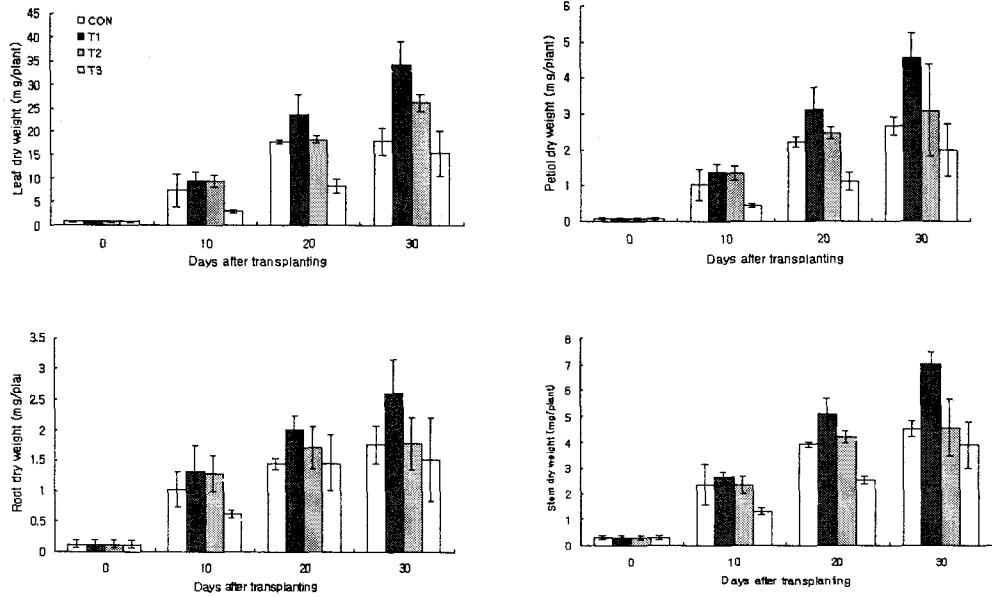
[그림 6-15] 정식 후 경과일수에 따른 수경재배오이의 엽면적 변화량

<표 6-3> 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 생체중 및 건물중 함량

Treat- ment	Fresh weight (g · plant <sup>-1</sup> )					Dry weight (g · plant <sup>-1</sup> )				
	Root	Stems	Petioles	Leaves	Total	Roots	Steam	Petioles	Leaves	Total
CON	29.08b	50.36b	38.50b	110.6b	228.54c	1.77b	4.50b	2.66b	17.87c	26.8c
T1	41.7a	73.91a	63.37a	200.6a	379.58a	2.60a	7.02a	4.55a	34.13a	48.3a
T2	29.13b	50.44b	42.15b	150.6b	243.19b	1.78b	4.57b	3.09ab	25.99b	35.4b
T3	24.1b	41.91b	27.11c	91.1c	184.22c	1.52b	3.88b	1.99b	15.34c	22.7c

<표 6-3>은 정식 후 30일째 조사한 신선중과 건물중을 나타낸 것이다. 처리구 별 신선중이 T1>T2>CON>T3의 순서로 높았으며, 건물중 또한 신선중과 같은 순서를 보였다. 건물중의 경우 T1처리구가 무처리구에 비해서 약 1.8배의 높은

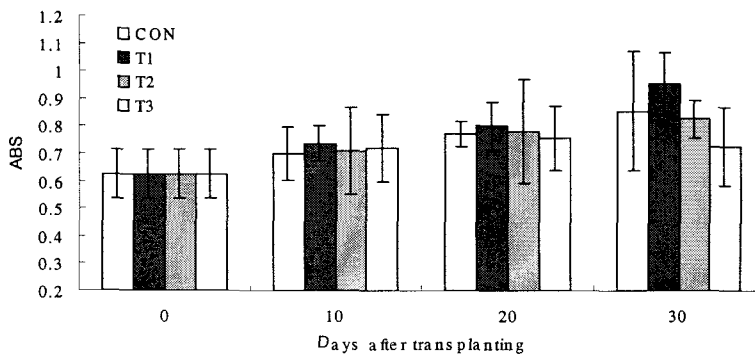
수치를 나타냈으며, T3처리구와 비교했을 때 2배 이상의 높은 수준을 나타내었다. 이러한 결과는 광반사단열필름에 의한 보광에 의해 잎의 광합성 효율이 향상되고, 성숙엽들을 동화작용에 참여시킴으로써 초관의 중, 하층부위가 확대되었기 때문으로 사료되었다.



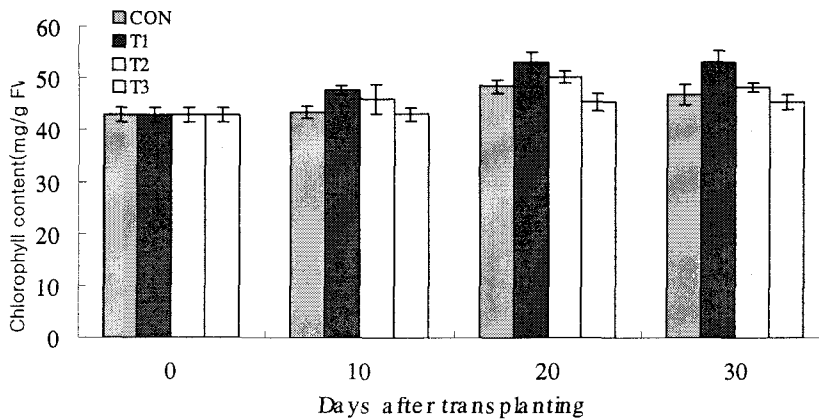
[그림 6-16] 정식후 경과일수에 따른 수경재배오이의 건물중 비교

[그림 6-16]은 각 처리구의 경경, 엽병, 엽, 뿌리의 건물중을 정식후 10일 간격으로 조사하여 비교한 것이다. 경경의 경우 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1처리구에서 1.6배로 가장 높은 증가율을 보였으며, 엽병, 엽 및 뿌리의 건물중 또한 T1처리구가 1.7, 2, 1.5배의 증가율을 나타내었다. 이러한 결과는 광반사필름에 의한 균락내 광환경 개선이 초기 영양생장의 촉진효과를 보인 것으로 사료되었다. 또한, 균락내 광환경 개선에 의한 엽의 기공밀도 증가로 활발한 증산 및 광합성 작용으로 체내의 물질대사나 성장에 영향을 주고 그 결과 간접적으로 무기성분의 흡수나 분배에 영향을 주어 생육이 양호했다고 생각되었다. 무처리구와 T2처리구간의 차이는 정식 후 30일째에도 명확하게 나타나지 않았으며, 뿌리의

건물중 또한 시간이 경과함에 따라 무처리구와 T2처리구간의 차이가 경감하는 것을 관찰할 수 있었다. 무처리구와 T2처리구간의 차이가 명확하게 나타나지 않은 이유는 야간 난방으로 인한 단열처리구의 야간온도 상승으로 인해 주간에 만들어진 동화산물의 전류가 원활히 이루어지지 않았기 때문으로 사료되며, 이로 인하여 호흡율의 증가도 이런 경향을 보이는 요인중의 하나로 판단된다.



[그림 6-17] 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 근활력 비교

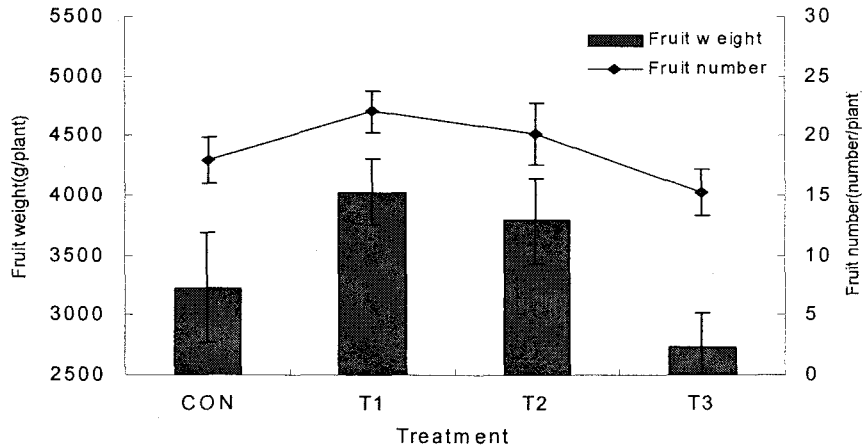


[그림 6-18] 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 엽록소함량 비교

[그림 6-17]은 처리에 따른 오이의 근활력을 나타낸 것으로 지상부 성장과 비

슷한 경향이었으며, T1처리구의 경우 정식후 기간이 경과함에 따라 다른 처리구에 비해서 그 증가가 월등히 높았으며, T3처리구는 음영을 받는 엽면적의 증가로 인해 근활력이 다소 감소하는 경향을 보였다. CON과 T2처리구간의 차이는 크게 나타나지 않았지만 야간의 고온으로 인해 정식후 30일째의 근활력은 CON에 비해 다소 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다.

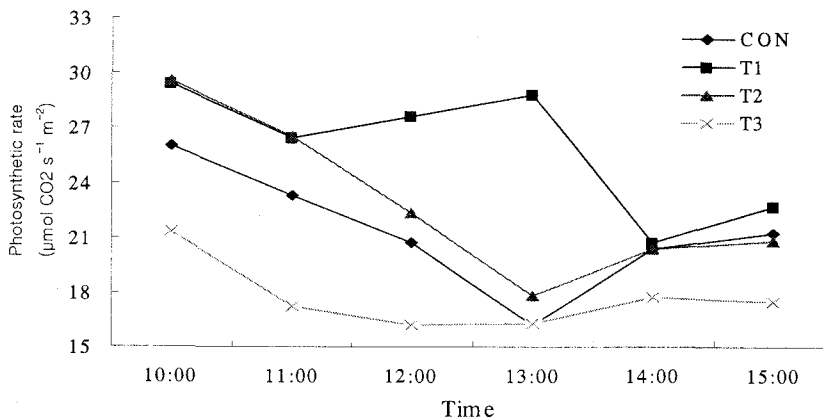
[그림 6-18]은 처리구별로 chlorophyll content를 정식후 30일째 까지 10일 간격으로 조사한 것으로 정식후 20일째까지는 모든 처리구에서 chlorophyll content가 증가하였으나 30일째에는 T1처리구를 제외한 모든 처리구에서 다소 감소하는 경향을 보였으며, 음영처리구인 T3처리구의 감소율은 T2처리구나 CON에 월등히 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이런 현상은 생육초기와는 달리 음영을 받는 엽면적이 증가했기 때문으로 사료되었다. 작물체엽의 엽록소 함량과 광합성 속도와는 밀접한 관계가 있어 엽록소 형성 및 파괴에 영향을 주는 요인은 작물 생육과 밀접한 관련이 있다고 보고하였다[35].



[그림 6-19] 광반사 단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 과실수 및 과실중량 비교

[그림 6-19]은 처리에 따른 오이의 누적과실수 및 누적 과실중을 나타낸 것이다. 각 처리구당 10주를 선택하여 생육초기부터 과실조사를 하였으며, 누적과실

수의 경우 T1처리구가 가장 높게 나타났으며 T2, CON, T3처리구 순으로 차이를 보였다. T1처리구가 무처리구에 비해 25%의 증수효과가 있었으며, 누적과실중도 비슷한 양상을 나타내었다. 이러한 결과는 山口 등의 카네이션 동계재배에 있어서 반사시트멀칭에 의해 수량이 30~40%증가되고 채화시기도 상당히 빨라졌다는 보고와 일치하였으며, 북측면의 반사필름 반사광에 의한 하부까지의 수광량이 늘어서 결과적으로 수량이 높아지는 것으로 사료되었다.



[그림 6-20] 광반사단열필름 설치에 따른 수경재배오이의 광합성량 변화

[그림 6-20]은 1시간 간격으로 상위 5엽을 기준으로 각 처리구 별로 측정된 광합성량을 나타낸 것으로 전체적으로 오전중 높은 반면 오후에 오전보다 낮은 범위에서 생체리듬을 보이는 경향이였다. 광합성량은 무처리구(1 기준)를 기준으로 T1처리구가 1.2배로 가장 높게 나타났으며, 상대적으로 광 차광율이 높은 T3처리구에선 0.8배로 가장 낮게 나타났다. T2처리구는 무처리구에 비해 오전까지는 높게 나타났지만, 오후에는 다소 떨어지는 경향도 관찰할 수 있었다. 박과식물은 C3식물의 전형적인 순광합성을 나타내는데, 광도에 따른 엽의 최대광합성율이 11~30mgCO<sub>2</sub> · h<sup>-1</sup> · dm<sup>2</sup>의 범위에 나타난다고 한다[36],[37],[38],[39]. 광도는 광주기보다 광합성활동을 결정하는데 더 중요한 역할을 하지만 광합성 동화 산물의 분배에 있어서도 광도는 영향을 미치지 못하고, 광주기가 영향을 미치게 된

다. 본 실험에서는 광합성율은 광도의 증감에 따라 비례적으로 증가하였으며, 최대광합성율은 T2처리구에서  $29.6\text{mgCO}_2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{dm}^2$  정도로 나타났다.

## 제 4 절 피복재 광투과율, 작물생리 규명 및 최적 환경 조건기준

### 6.4.1 재료 및 방법

본 실험은 2002년 10월부터 12월까지 전남대학교 농과대학 부속농장에서 수행하였다. 실험에 사용한 공시품종으로는 오이는“겨울나기 청장오이(홍농종묘)”를 사용하였고 토마토는 “슈퍼 도태랑(코레콘)”을 사용하여 실험을 수행하였다. 2002년 10월에 작물의 종자를 최아한 후 50공 트레이에 파종하였고, 본엽이 1~2매 전개된 묘를 비닐포트(지름 9cm)에 이식하였고 정식은 본엽이 5~6매 전개되었을 때 필라이트와 코코비타를 1 : 1로 혼합한 배지를 사용하여 11월에 정식을 하였다. 실험에 사용한 배양액은 네델란드 PBG배양액을 사용하였으며 정식 후 2주간은 1/2배액을 관주하였으며, 이후에는 표준농도로 적정하여 관리하였다. 재배시스템은 플라스틱 성형베드(W30×H20×L100cm)에 혼합배지를 채우고 그 위에 타이푼(Typon, 2.8ℓ/hr, Netafim, Israel)을 2줄로 설치하여 흑백필름으로 멀칭하였다. 실험군의 처리는 기존 폴리에틸렌 필름(T1)을 대조구로 하였고, 유리온실(T2), 폴리에틸렌 2중피복(T3)으로 하여 실험을 수행하였다. 재식은 25cm간격으로 처리구당 15주씩 완전임의 배치하였다.

조사내용으로는 피복자재로부터의 거리에 따른 광환경 및 온도환경 변화를 측정하였고, 작물체의 엽은 광합성량, 호흡량의 변화를 측정하였다. 광합성율의 측정은 3회에 걸쳐 실시하였으며 측정시간은 매일 정오에 실시하였다. 광합성 측정에 사용된 휴대용 고속반응 광합성측정기(Portable Photosynthesis System, LI-6400, LI-COR, USA)로 본 실험에서는  $1,000\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}^2$ 에서만 측정하였다. 온도와  $\text{CO}_2$ 농도는 각각 26℃와 400ppm으로 고정하였다.



## 6.4.2 실험결과 및 고찰

<표 6-5>, <표 6-6>은 피복자재에 따른 오이와 토마토의 성장특성을 나타낸 표이다.

<표 6-4> 피복자재에 따른 수경재배 오이의 성장특성 비교

Treatment	Plant height (cm)	no. of leaves (ea/plant)	Leaf area (dm <sup>2</sup> /plant)	Stem diameter (cm/pl.)
T1	108.2a	16.4a	52.3a	7.20a
T2	98.4b	14.4b	44.2b	6.75ab
T3	83.2c	11.2b	34.2d	6.02b

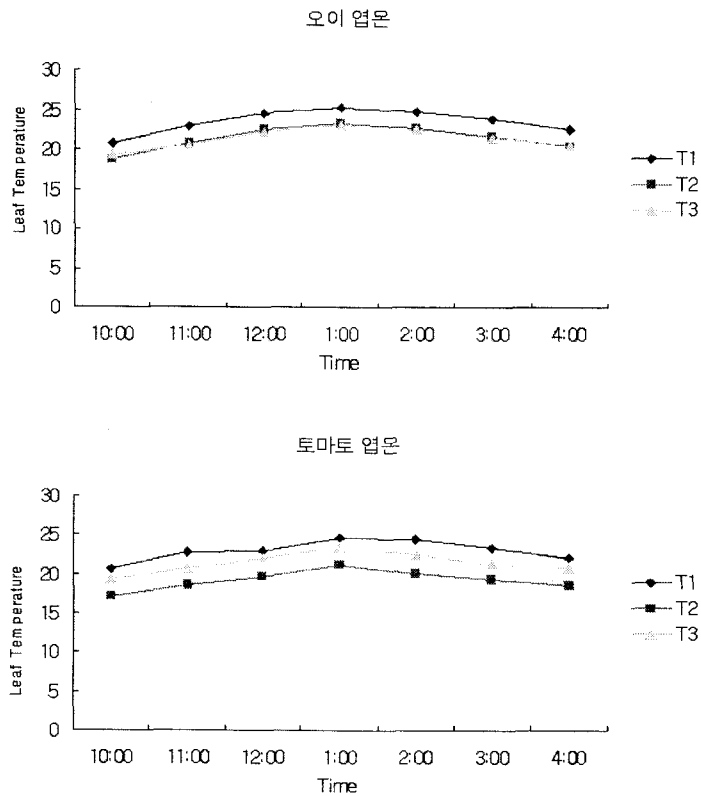
<표 6-5> 피복자재에 따른 수경재배 토마토의 성장특성 비교

Treatment	Plant height (cm)	Leaf area (dm <sup>2</sup> /plant)	Stem diameter (cm/pl.)
T1	121.4a	79.4a	4.32a
T2	101.6b	52.1b	4.12ab
T3	94.1c	45.3d	3.84b

오이의 성장특성을 비교한 경우 T1 처리구에서 108.2cm로 T2, T3에 대비하여 각각 10%와 30% 이상의 초장의 신장효과를 나타내었으며, 엽수는 16.4개로 T2, T3에 대비하여 각각 12%와 46%의 엽수의 증수효과를 나타내었다. 엽수의 차이에 의해 엽면적도 또한 T1처리구가 52.3(dm<sup>2</sup>/plant)을 나타내었으며 다른 처리구에 대비하여 43.2, 34.2로 21%와 52% 이상의 엽면적을 확보하는 것으로 나타났다. 오이의 경경에서도 7.2로 T2, T3처리구에 대비하여 6%와 19%로 T2처리구와는 차이점이 미미하였으나 T3와 대비하였을 때는 10%이상의 경경의 증대를 나

타내었다. 이와 같은 결과는 토마토의 경우에서도 유사한 성장특성의 경향을 나타내었다.

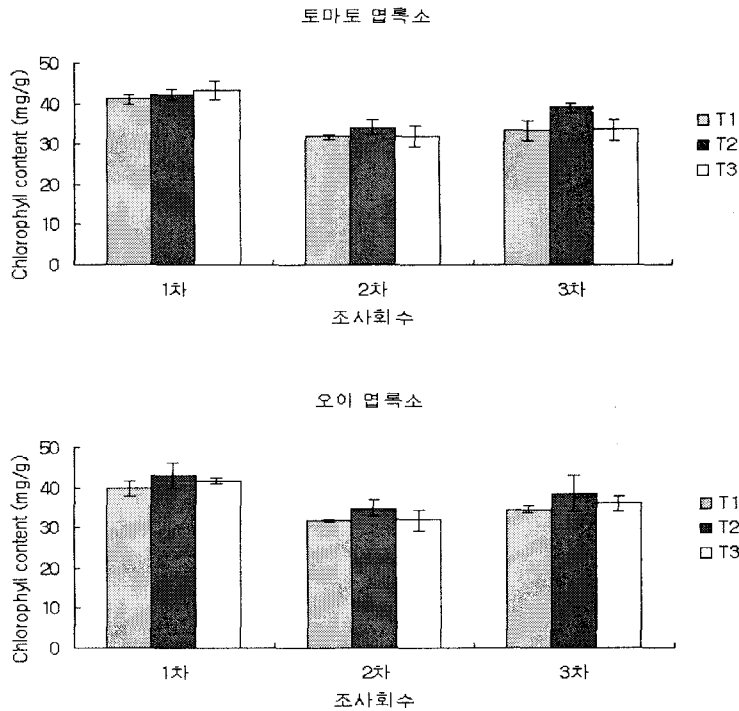
이와 같은 생장의 특성을 나타내는 이유로는 피복자재의 두께에 따른 생장의 특성이 나타난 것으로 사료되었다. 피복자재가 두꺼울수록 광투과율이 떨어져서 생장에 필요한 동화산물을 효과적으로 이용하지 못해서 나타난 결과로 사료되었다.



[그림 6-21] 피복자재에 따른 오이와 토마토의 엽온 비교

[그림 6-21]은 오이와 토마토의 엽온을 오전 10시부터 오후 4시까지 시간대별로 조사한 것을 나타낸 그림이다. 엽온은 오이와 토마토에서 유사한 경향을 나타내었다. T1 처리구가 T2, T3처리구에 대비하였을 때 엽온이 평균 3°C 및 1°C 정도의 차이를 나타내었다. 오이의 경우 T2처리구와 T3 처리구에서 엽온을 비교하

였을 때 유의차가 나지 않는 경향을 나타내었으나, 토마토의 경우는 약 2℃ 이상의 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이는 시설내부에서 작물체의 엽에 적산되어지는 광량에 의한 온도의 편차로 사료되었으며, 오이와 토마토의 엽의 위치에 따른 광적산량에 의한 차이로 판단된다.

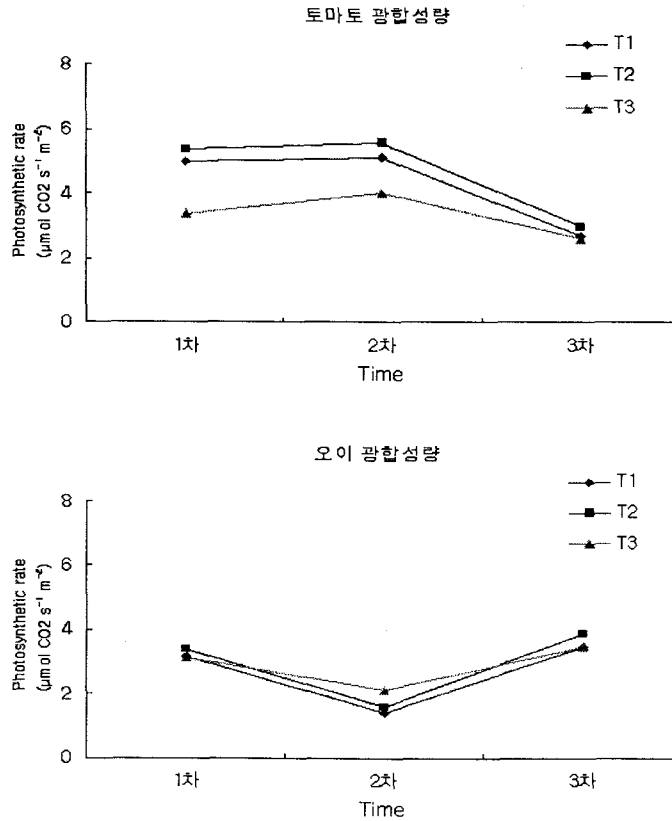


[그림 6-22] 피복자재에 따른 오이와 토마토의 엽록소 함량 비교

[그림 6-22]는 피복자재에 따른 오이와 토마토의 엽록소 함량을 3회에 걸쳐 조사한 데이터를 나타낸 그림이다. 엽록의 함량은 생장특성과는 달리 T2 처리구에서 42.4, 34.2, 39.1로 다른 처리구인 T1, T3에 대비하여 약 10%정도 높은 경향을 나타내었다.

[그림 6-23]은 피복자재에 따른 오이와 토마토의 광합성량을 비교하여 나타낸 그래프이다. 조사시기는 매 측정마다 정오에 측정을 하였으며, 오이와 토마토에서 각각 T2처리구가 다른 처리구에 대비하여 광합성이 높은 것으로 측정되었다.

측정일의 외부시간별 일사량을 비교하였을 경우 1차조사시의 외부일사량은 1.86 이었고, 2차조사시는 2.00, 그리고 마지막 조사시의 외부일사량은 1.96으로 나타났다. 외부시간별 일사량을 대비하였을 때 작물체가 나타내는 광합성량은 오이의 경우 T1은 평균 3.1, T2는 3.6 T3는 3.2의 수치를 나타내었고 토마토의 경우 4.4, 5.2, 3.5를 나타내었다.



[그림 6-23] 피복자재에 따른 오이와 토마토의 광합성량 비교

## 제 5 절 소 결

유리온실 내부로 수광되는 광량과 반사광 및 반사단열재에 의한 실내 광량증

가 작물의 생리에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위해 진행된 여러 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

광반사 단열필름의 상용에 따른 양액재배 작물을 대상으로 군락내 환경변화 및 영향평가를 위해 수행한 실험을 통해 반사필름이 적용된 실험에서 그렇지 않은 조건에 비해 약 1.5배 정도의 초장생장증가를 나타냈으며, 야간단열에 의한 시설내 환경변화에서는 열반사 단열스크린 설치 시설에서 야간에 약 1~2℃ 정도의 높은 온도를 유지하는 것으로 분석되었다.

또한 단열스크린 설치에 따른 작물의 생육비교에 대해서는 단열스크린 설치 시설에 재배중인 작물에서 엽수와 엽면적에서 우수하게 분석되었고, 근활력과 엽록소 함량은 단열스크린이 설치되지 않은 시설의 작물에 비해 월등히 높게 나타났다.

과실수와 누적 과실중은 단열스크린 설치 시설에서 무처리 시설에 비해 25%의 증수효과가 나타났다. 광합성량 면에서도 단열스크린 처리에 따른 반사효과에 의해 단열스크린이 설치된 시설에서 가장높게 나타났으며, 엽온의 차이는 크게 나타나지 않았지만 광도와 비교했을 때 높은 광도에서 반사에 의한 영향으로 커튼 설치 시설에서 증산작용이 활발히 이루어진 것을 관찰할 수 있었다.

광반사 단열필름의 설치에 주간재배작물내의 광환경을 개선시켜 주고, 야간에 단열을 통한 보온으로 시설내 온도를 높여 양액재배시 작물의 성장과 과실 품질향상 및 수량을 증가시킬 수 있으며, 난방비 절감에도 기여하는 것으로 분석되었다.

여 백

## 제 7 장 결 론

본 연구에서는 반사 단열스크린을 이용하여 유리온실의 외피 단열성능을 향상시키기 위하여 온실의 측벽 및 천장용으로 구분되는 고효율 열반사 단열(재) 시스템을 개발하고자 하였다. 본 열반사 단열스크린 시스템은 기존 시스템과 비교하여 개선된 시스템으로 경제성이 있고 시설하우스 농가 소득 증대에 이바지할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

유리온실의 열반사 단열재로 사용되는 대부분의 반사단열 스크린은 0.6 이상의 표면방사율을 갖는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 알루미늄이 공기중에 직접 노출될 경우에 발생하는 부식이나 스크린 자체의 내구성 증대를 위해 알루미늄 표면위에 또 다른 PE계 필름을 코팅하기 때문인 것으로 나타났다. 그러나 열반사 단열스크린이 가지는 복사차단 성능을 보다 효과적으로 이용하기 위해서는 표면방사율이 약 0.25 이하의 저방사 영역을 유지하는 것이 효율적인 것으로 사료된다. 열반사 단열스크린과 조합된 단열시스템의 열관류율 측정실험 결과 총괄 열관류율은 표면방사율이 작아짐에 따라 약 30~70% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

유리온실 예비실험 결과 유리온실과 같은 기밀화 시공이 어려운 경량외피 건물일수록 침기 및 환기 등이 난방부하에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었으며, 온실 내부의 과열방지 및 원활한 공기순환 등을 위해 설치한 측창 및 천장 그리고 개구부 등이 침기 및 환기부하 측면에서는 불리하게 작용하는 것으로 나타났다. 또한 열반사 단열시스템의 성능은 스크린의 표면방사율과 온실외피와 스크린 사이에 형성된 정체 공기층의 적절한 조합에 의해 복합적으로 작용하는 것으로 분석되었다.

스크린-유리, 스크린-부직포 사이의 간격이 유리온실의 열관류 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 시뮬레이션을 행한 결과 간격이 커질수록 열관류율이 점차 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 그 값이 특정한 값 이상이 되면 총괄 열관류율은 변화가 없이 거의 일정한 값을 나타낸다. 그리고 그 값은 측벽부의 경우

약 2cm(스크린-유리 및 스크린-부직포 간격 동일한 경향을 나타냄), 천장부의 경우는 약 8cm 정도가 되는 것으로 각각 나타난다. 또한 계산 결과 측벽부의 경우는 스크린-부직포 사이의 간격이 2cm 이상이 유지되면 단열성능이 약 6~7% 정도 향상된다. 한편 천장부의 경우는 스크린-부직포 간격이 10cm 정도 충분히 떨어져 있는 것이 효과적이며, 그렇지 않은 경우에 비해 약 10% 정도 단열성능이 향상된다.

단열스크린이 미설치된 유리온실로만 있는 경우에 총괄 열관류율은 일반적으로 5.2 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup> 정도로 크게 나타난다. 그러나 표면방사율에 따라 1중 반사단열 스크린이 설치된 유리온실의 측벽부 총괄 열관류율은 2.3~1.2 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 그리고 천정부 총괄 열관류율은 2.9~1.7 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup> 정도로 각각 낮게 나타난다. 이는 유리온실의 열손실량을 약 40~80% 정도까지 크게 낮출 수 있는 수치를 나타내는 것이다. 따라서 반사단열 스크린 시스템은 매우 유용한 설비로서 유리온실을 가진 시설농가에서는 반드시 갖춰야 할 것으로 평가된다.

1중 단열스크린 온실과 2중 단열스크린 온실을 비교해 보면 단열스크린이 없는 유리온실의 총괄 열관류율을 5.2 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>이라 할 때, 1중 단열스크린 설치 온실로 바뀔 경우 측벽부의 총괄 열관류율은 1.7 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 천장부는 2.3 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>로 각각 저하된다. 그러나 1중 단열스크린 온실에서 2중 단열스크린 온실로 바뀔 경우에 측벽부는 1.0 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 천장부는 1.6 kcal/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup> 정도로 총괄 열관류율의 감소폭이 현저하게 줄어든다. 따라서 이러한 경향으로부터 유추해 볼 때 총괄 열관류율은 2중 단열스크린 이상의 다중 스크린 시스템이 되더라도 열관류율이 비례적으로 감소하지 않을 것으로 예상되며, 따라서 다중 스크린 시스템의 설치로 인한 에너지 절감효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

한편 1중 반사스크린 시스템과 2중 반사스크린 시스템을 상호 비교해 보면 분시물레이션 결과 표면방사율이 0.3으로 동일한 1중 반사단열 스크린 시스템을 기준으로 할 때 2중 시스템은 1중 시스템보다 측벽부의 경우 약 40%, 천장부의 경우에는 약 30% 정도의 에너지절감 효과가 각각 나타날 것으로 예측된다.

시물레이션과 실험 간의 비교는 전남대의 실제온실을 대상으로 행해졌다. 여기서 시물레이션은 대상온실의 측벽 및 천정부와 지중면에 대한 계산을 실시한 후



이를 합산하는 방법에 의해 유리온실의 총 열손실량을 산출하였으며, 실험은 난방이 필요한 야간시간대(저녁 5시~익일 아침 9시)에 등유 보일러를 이용하여 난방한후 그 사용량으로부터 총 열손실량을 산출하였다. 그 결과 시뮬레이션과 실험은 상호 잘 일치함을 보였으며, 이때 최대 오차는 15% 정도였다.

측벽 및 천정을 통한 열손실은 단열이 안된 일반 유리온실의 경우에 전체 열손실량의 약 85% 정도였으며, 1중 스크린 시스템의 경우는 70%, 그리고 2중 스크린 시스템의 경우는 약 60%로 점차 감소하였다. 따라서 이는 반사단열 스크린 시스템의 효율성을 나타내는 것으로 지중으로의 열손실 비율이 점차 높아지는 결과를 가져온다.

본 연구에서는 기존 유리온실의 천장부분 평면스크린에 적용되던 다중스크린 시스템을 측벽부에도 적용할 수 있도록 설계하였으며, 이를 대상온실에 적용하였다. 또한 시스템의 운용상 문제점을 해결하고 경제성이 좋은 알루미늄 스크린-부직포 조합의 2중 반사단열 스크린 시스템을 개발, 제시하였다.

2중 플라스틱 패널 온실은 총괄 열관류율이 반사단열 스크린이 미설치된 일반 유리온실에 비해 약 30% 정도 낮게 나타났으며, 이는 1중 반사단열 스크린이 설치된 유리온실의 단열성능과 거의 유사한 것으로 나타났다. 플라스틱 패널 온실은 최근 유럽을 비롯한 많은 나라에서 설치사용을 상용화하는 중에 있기 때문에 향후 국내에서도 플라스틱을 온실외피로 사용하려는 시도와 실증실험을 통한 문제점 해결에 적극 나설 필요가 있다 하겠다.

본 연구에서는 서울, 대전, 광주 및 제주 지역을 대상으로 과세유 및 면세유에 대한 경제성 검토를 실시하였다. 그 결과 1중 단열스크린은 2중 단열스크린 시스템과 경제성이 거의 유사한 것으로 나타났다. 즉 과세유를 기준으로 하였을 때 경제성이 서울, 대전, 광주 지역에서는 약 2년, 기후조건이 우수한 제주 지역에서는 약 3년 정도인 것으로 나타났다. 그리고 이는 면세유를 기준하였을 때 서울, 대전지역은 약 2.7년, 광주지역은 약 3년, 그리고 제주지역은 약 4.5년인 것으로 각각 나타났다. 이러한 결과는 2중 반사스크린에서 부직포로 인한 추가비용이 연간 에너지 절감비용과 거의 동일하게 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

일반적으로 알루미늄 스크린으로 제작된 단열스크린의 사용연한이 5년에서 7

년 정도인 것으로 조사되고 있다. 따라서 사용년한을 7년으로 할 때 초기투자비를 모두 회수하고도 과세유 기준으로는 4~5년, 면세유 기준으로는 약 2.5~4.3년 동안 에너지를 절감효과를 기대할 수 있다.

광반사 단열스크린의 설치는 주간에 재배작물내의 광환경을 개선시켜주고, 야간에 단열을 통한 보온으로 시설내 온도를 높여 양액재배시 작물의 성장과 과실의 품질 향상 및 수량을 증가시킬 수 있으며, 난방비의 절감에도 기여하는 것으로 분석되었다.

## 참 고 문 헌

1. 한국에너지기술연구소, 시설그린하우스 기후조절시스템 개발 연구, 농림수산부, 1995.
2. ASTM, ASTM C 727 Standard Recommended Practice for Use of Reflective Insulation in Building Constructions.
3. ASTM, ASTM C 1158-97 Standard Practice for Installation and Use of Radiant Barrier Systems(RBS) in Building Construction.
4. ASTM, ASTM E 408-71 Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques.
5. ASTM, ASTM C 1224-99 Standard Specification for Reflective Insulation for Building Applications.
6. Japanese Industrial Standard, JIS 1420-1992, 住宅用斷熱材の 斷熱性能試驗方法, 1992.
7. 韓國工業規格 KS F 2299-1985, 建築物부재의 正常狀態에서의 斷熱性能 試驗方法, 1985.
8. 韓國工業規格 KS F 2278-1998, 窓戶의 斷熱性 試驗方法, 1998.
9. 한국동력자원연구소, 건물외피의 단열기술개발 연구(Ⅱ), KE-88-15, p.78.
10. Lawrence Berkeley Laboratory, WINDOW 4.0 : Documentation of Calculation Procedures, Energy & Environment Division, 1993, pp35-37.
11. Lechner, N., Heating, Cooling, Lighting : Design Methods for Architects, John Wiley & Sons, 1991.
12. ISO, ISO 7730, Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal

- Comfort, ISO, 1984.
13. 이윤규, 空氣流動 解釋에 의한 共同住宅 換氣性能 豫測모델에 관한 研究, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1997.
  14. ASTM E 779-87 Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization.
  15. ASHRAE, ASHRAE Fundamentals 1993, ASHRAE, 1993.
  16. ASHRAE, ASHRAE Standard, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE 55-1992, ASHRAE, 1992.
  17. ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, 1997.
  18. IEA Energy Conservation, Source Book for Energy Auditors, pp.341-342.
  19. 윤종호, 可變 日射調節窓의 環境性能 平價 研究, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1994.
  20. 김기세 외, 건물에너지 성능평가를 위한 효과적 기상자료 선정에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, Vol 18. No. 3. 1998.
  21. Mills, Anthoony. F., Heat and Mass Transfer, IRWIN, Chicago, 1995.
  22. Elsherbiny S.M., Raithby G. D., and Hollands K. G. T., "Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers" J. Heat Transfer, 104, 1982.
  23. Lawrence Berkeley Laboratory, WINDOW 4.0 : Documentation of Calculation Procedures, Energy & Environment Division, 1993.
  24. McAdams, William H., Heat Transmission, McGraw-Hill, Inc., 1954.
  25. Dunkle, R. V., Vhristie, E. A. and Cooper, P. I., "A Method of Measuring Sky Radiation", Proc. Int. Solar Energy Society Silver Jubilee Int. Congress, Atlanta. Georgia, May 28-June 1, 1979.

26. Lloyd, J. R. and Morgan, W. R., "Natural Convection Adjacent to Horizontal Surfaces of Various Planforms", ASTM paper 74-WA/HT-66, 1974.
27. Poulidakos D. and Bejan A., "Natural Convection Experiments in a Triangular Enclosure", J. Heat Transfer, Vol. 105, 652, 1983.
28. Hollands, K.G.T., S.E. Unny, G.D. Raithby, and L. Konicek, "Free Convective Heat Transfer across Inclined Air Layers", J. Heat Transfer, Vol. 98, P.189, 1976.
29. Kendrick R. E. and G. H. M. Kronenberg, 1994. Phytochrome. In : Photomorphogenesis in plants. 2nd ed. Kluwer Academic publishers, Dordrecht, Netherlands. pp.3~69.
30. Sage, L. C., 1992. Shade avoidance, In : Pigment of the imagination. Academic Press, London, UK. pp.33~100.
31. Cho I. H., W.S. Kim, N.Y. Heo, and Y.S. Kwon, 1997. Effect of reflective film mulching on the stomatal features, transpiration rate and photosynthetic rate of plant in greenhouse cultivation. J. Bio. Fac. Env. 6(4):235~429.
32. 허건완, 조해룡, 방창석, 송정섭, 구대회, 김영진, 김입현, 1996. 반사필름 멀칭 과 재식밀도가 클러디올러스의 개화 및 구근생산에 미치는 영향. 농진청 농업 과학논문집(원예편) 38(2):503~507.
33. Huh, K.Y., K.S. Kim, and Y. Takashi, 1994. Effect of reflective film mulching on the growth, productivity and quality of cut spray chrysanthemum flowers in glasshouse cultivation. RDA. J, Agri. Sci. 36(1)422~429.
34. 이종남, 이진태, 장석우, 김완배, 엄영현, 1997. 멜론의 고랭지 비가림 재배시 멀칭재료에 따른 생육 및 수량. 원예논문집 39(2)49~55.
35. 조일환, 김완순, 허노열, 권영삼, 1997. 반사필름 멀칭이 토마토의 기공특성,

- 증산속도, 광합성속도에 미치는 영향. 생물생산시설환경 6(4):292~298.
36. Thregeon, R. and J. A. Webb, 1975. Leaf development and phloem transport in *Cucurbita pepo* : carbon economy. Plant 123:53~62.
37. Gaastra, P., 1962. Photosynthesis of leaves and field crop. Neth. J. Agric. Sci. 10:311~324.
38. Klueter, H. H., W. A. Bailey, P. N. Bolton, and D. T. Krizek, 1973. Light and temperature for maximum photosynthesis in a cucumber leaf. Trans. ASAE 16:142~144.
39. Pharr, D. M., S. D. Huber, and H. N. Sox, 1985. Leaf carbohydrate status and enzymes of translocate synthesis in fruiting and vegetative plants of *Cucumis Sativus* L. Plant Physiol. 77:104~108.

# 부 록

(유리온실 EES 해석 프로그램)

여 백



## A : 측벽부 2중 단열스크린 시스템의 열손실계산

```

Function h_rs(T1, T2, L, V_fan)
{h_rs : heat transfer coefficient from room to shield or window
 beta : thermal expansion coefficient = 1/T
 Pr : Prandlt number = c_p mu/k
 Ra_L : Rayleigh number = g beta (T1-T2) L^3/(alpha nu) }

P_atm=101.325          "[kPa]"
T_av=(T1+T2)/2
T_avk=T_av+273.15     "[K]"
beta=1/T_avk
g=9.8
c_p=SPECHEAT(Air, T=T_av)*1000          "[J/kg K]"
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av)              "[ ]"
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av)        "[W/m K]"
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm)   "[kg/m^3]"

Pr=c_p*mu/k_air
alpha=k_air/(rho_air*c_p)
nu=mu/rho_air

PI_AIR=(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(16/9)

Ra_L=g*beta*(T1-T2)*L^3/(alpha*nu)

IF (Ra_L < 1.e9) THEN
    Nu_ave=0.68+0.670*(Ra_L*PI_AIR)^0.25
    h_rs:=Nu_ave*k_air/L+3.043*V_fan^0.170
ELSE
    Nu_ave=0.68+0.670*(Ra_L*PI_AIR)^0.25*(1+1.6E-8*Ra_L*PI_AIR)^(1/12)
    h_rs:=Nu_ave*k_air/L+3.043*V_fan^0.170
ENDIF

END

Function h_sw(T1, T2, H, L)
{h_sw : heat transfer coefficient from shield to shield or window
 H_s : height of building
 L : spacing between shield and window }

P_atm =101.325
T_av=(T1+T2)/2
T_avk=T_av+273.15
beta=1/T_avk
g=9.8
c_p=SPECHEAT(Air, T=T_av)*1000          "[J/kg K]"
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av)              "[ ]"
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av)        "[W/m K]"
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm)   "[kg/m^3]"

Pr=c_p*mu/k_air
alpha=k_air/(rho_air*c_p)
nu=mu/rho_air

Ra_L=g*beta*(T1-T2)*L^3/(alpha*nu)

Nu1=0.0605*Ra_L^(1/3)
Nu2=(1+(0.104*Ra_L^0.293/(1+(6310/Ra_L)^1.36))^3)^(1/3)
Nu3=0.242*(Ra_L/(H/L))^0.272

```

```

Nu_ave=max(Nu1, Nu2, Nu3)
h_sw:=Nu_ave*k_air/L
END
Function h_wa(V_wind)
{h_wa : heat transfer coefficient from window to ambient}
h_wa:=2.8+3.0*V_wind
END
Function hr_rs(Tr, Ts, eps_s1)
{hr_rs : radiative heat transfer coefficient }
sigma:=5.67e-8
RR :=1/eps_s1
Tr_k:=Tr+273.15
Ts_k:=Ts+273.15
hr_rs:=sigma*(Tr_k^2+Ts_k^2)*(Tr_k+Ts_k)/RR
END
Function hr_sw(Ts, Tw, eps_s2, eps_w)
{hr_sw : radiative heat transfer coefficient }
sigma:=5.67e-8
RR:=(1-eps_s2)/eps_s2+(1-eps_w)/eps_w+1
Ts_k:=Ts+273.15
Tw_k:=Tw+273.15
hr_sw:=sigma*(Ts_k^2+Tw_k^2)*(Ts_k+Tw_k)/RR
END
Function hr_wa(Tw, Ta, eps_w)
{hr_wa : radiative heat transfer coefficient}
sigma:=5.67e-8
RR:=1/eps_w
Tw_k:=Tw+273.15
Ta_k:=Ta+273.15
hr_wa:=sigma*(Tw_k^2+Ta_k^2)*(Tw_k+Ta_k)/RR
END
MODULE energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21,
eps_s22, eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, width_sw, H, Ts1_in, Ts2_in
Tw1_in, Tw2_in :Ts1, Ts2, Tw1, Tw2)
{initial temperature}
Ts1[1]=Ts1_in
Ts2[1]=Ts2_in
Tw1[1]=Tw1_in
Tw2[1]=Tw2_in
"1. heat flux from room to shield 1"
h_rs=h_rs(Tr, Ts1[1], H, V_fan)
hr_rs=hr_rs(Tr, Ts1[1], eps_s11)
Q_rs1=(h_rs+hr_rs)*(Tr-Ts1)
"2. heat flux from shield 1 to shield 2"

```

```

h_ss=h_sw(Ts1[1], Ts2[1], H, width_ss)
hr_ss=hr_sw(Ts1[1], Ts2[1], eps_s12, eps_s21)
Q_ssl=(h_ss+hr_ss)*(Ts1-Ts2)

"3. heat flux from shield 2 to window"
h_sw=h_sw(Ts2[1], Tw1[1], H, width_sw)
hr_sw=hr_sw(Ts2[1], Tw1[1], eps_s22, eps_w)
Q_sw1=(h_sw+hr_sw)*(Ts2-Tw1)

"4. heat conduction in window"
hc_w=k_glass/thick_glass
Q_wcl=hc_w*(Tw1-Tw2)

"5. heat flux from window to ambient"
h_wa=h_wa(V_wind)
hr_wa=hr_wa(Tw2[1], Ta, eps_w)
Q_wal=h_wa*(Tw2-Ta)+hr_wa*(Tw2-Ta)

"energy balance"
Q_rsl=Q_ssl
Q_ssl=Q_sw1
Q_sw1=Q_wcl
Q_wcl=Q_wal

END

MODULE energy_balancel(V_fan, V_wind, Trw, Taw, eps_w, k_glass, thick_glass
H, Tw1_inw, Tw2_inw : Tw1w, Tw2w)

{initial temperature}
Tw1w[1]=Tw1_inw
Tw2w[1]=Tw2_inw

"1. heat flux from room to window"
h_rsw=h_rs(Trw, Tw1w[1], H, V_fan)
hr_rsw=hr_rs(Trw, Tw1w[1], eps_w)
Q_rwlw=(h_rsw+hr_rsw)*(Trw-Tw1w)

"2. heat conduction in window"
hc_ww=k_glass/thick_glass
Q_wclw=hc_ww*(Tw1w-Tw2w)

"3. heat flux from window to ambient"
h_waw=h_wa(V_wind)
hr_waw=hr_wa(Tw2w[1], Taw, eps_w)
Q_walw=h_waw*(Tw2w-Taw)+hr_waw*(Tw2w-Taw)

"energy balance"
Q_rwlw=Q_wclw
Q_wclw=Q_walw

END

"Main Program"
{Property definition}
eps_s11=0.90 {emisivity of inner shield 1}
eps_s12=0.90 {emisivity of outer shield 1}
eps_s21=0.30 {emisivity of inner shield 2}
eps_s22=0.30 {emisivity of outer shield 2}
eps_w=0.94 {emisivity of window}
k_glass=1.4 {thermal conductivity of window: [W/m K]}

```

```

{geometry of room and window}
thick_glass=0.005      {thickness of window glass}
width_ss=0.025         {width between shield 1 and shield 2}
width_sw=0.1           {width between shield 2 and window}
H=1.7                  {height of building}

V_fan=6.0              {fan speed in greenhouse [m/s]}
V_wind=3.0             {wind speed [m/s]}
Tr=13.97               {room temperature : [C]}
Ta=0.88                {ambient temperature : [C]}

"Calculate heat transfer rate with radiation shield"
{initial guess value}
Ts1_in=Tr-2
Ts2_in=Ts1_in-2
Tw1_in=Ts2_in-2
Tw2_in=Tw1_in-2

call energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21, eps_s22
eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, width_sw, H, Ts1_in, Ts2_in, Tw1_in,
Tw2_in : Ts1, Ts2, Tw1, Tw2)

Ts11=Ts1
Ts21=Ts2
Tw11=Tw1
Tw21=Tw2

call energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21, eps_s22
eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, width_sw, H, Ts11, Ts21, Tw11, Tw21 :
Ts1_2, Ts2_2, Tw1_2, Tw2_2)

Ts11_in=Ts1_2
Ts21_in=Ts2_2
Tw11_in=Tw1_2
Tw21_in=Tw2_2

call energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21, eps_s22
eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, width_sw, H, Ts11_in, Ts21_in, Tw11_in
Tw21_in : Ts13, Ts23, Tw1_3, Tw2_3)

Ts12_in=Ts13
Ts22_in=Ts23
Tw1_2in=Tw1_3
Tw2_2in=Tw2_3

call energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21, eps_s22
eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, width_sw, H, Ts12_in, Ts22_in, Tw1_2in
Tw2_2in : Ts1_f, Ts2_f, Tw1_f, Tw2_f)

"1. heat flux from room to shield 1"
h_rs=h_rs(Tr, Ts1_f, H, V_fan)
hr_rs=hr_rs(Tr, Ts1_f, eps_s11)
{Qc_rs=h_rs*(Tr-Ts1_f)}
Qr_rs=hr_rs*(Tr-Ts1_f)}
Q_rs=(h_rs+hr_rs)*(Tr-Ts1_f)

"2. heat flux from shield 1 to shield 2"
h_ss=h_sw(Ts1_f, Ts2_f, H, width_ss)
hr_ss=hr_sw(Ts1_f, Ts2_f, eps_s12, eps_s21)
{Qc_ss=h_ss*(Ts1_f-Ts2_f)}
Qr_ss=hr_ss*(Ts1_f-Ts2_f)}

```

```

Q_ss=(h_ss+hr_ss)*(Ts1_f-Ts2_f)

"heat flux by radiation"
{eta=Qr_ss/Q_ss*100}

"3. heat flux from shield 2 to window"
h_sw=h_sw(Ts2_f, Tw1_f, H, width_sw)
hr_sw=hr_sw(Ts2_f, Tw1_f, eps_s22, eps_w)
{Qc_sw=h_sw*(Ts2_f-Tw1_f)}
Qr_sw=hr_sw*(Ts2_f-Tw1_f)}
Q_sw=(h_sw+hr_sw)*(Ts2_f-Tw1_f)

"4. heat conduction in window"
hc_w=k_glass/thick_glass
Q_wc=hc_w*(Tw1_f-Tw2_f)

"5. heat flux from window to ambient"
h_wa=h_wa(V_wind)
hr_wa=hr_wa(Tw2_f, Ta, eps_w)
{Qc_wa=h_wa*(Tw2_f-Ta)}
Qr_wa=hr_wa*(Tw2_f-Ta)}
Q_wa=h_wa*(Tw2_f-Ta)+hr_wa*(Tw2_f-Ta)

"열관류율 :U"
U=1/(1/(h_rs+hr_rs)+1/(h_ss+hr_ss)+1/(h_sw+hr_sw)+1/hc_w+1/(h_wa+hr_wa))
"[W/m^2]"
Q=U*(Tr-Ta)

{"Let's calculate Ra, Nu etc"}

P_atm =101.325
T_av=(Ts1_f+Ts2_f)/2
T_avk=T_av+273.15
beta=1/T_avk
g=9.8
c_p=SPECHEAT(Air, T=T_av)*1000 "[J/kg K]"
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av) "[ ]"
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av) "[W/m K]"
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm) "[kg/m^3]"

Pr=c_p*mu/k_air
alpha=k_air/(rho_air*c_p)
nu=mu/rho_air

Ra_ss=g*beta*(Ts1_f-Ts2_f)*(width_ss)^3/(alpha*nu)

Nu1_ss=0.0605*Ra_ss^(1/3)
Nu2_ss=(1+(0.104*Ra_ss^0.293/(1+(6310/Ra_ss)^1.36))^3)^(1/3)
Nu3_ss=0.243*(Ra_ss/(H/width_ss))^0.272

Nu_max=max(Nu1_ss, Nu2_ss, Nu3_ss)}

Call energy_balancel(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_w, k_glass, thick_glass, H
Tw1_in, Tw2_in : Tw1_w, Tw2_w)

Tw11_w=Tw1_w
Tw21_w=Tw2_w

Call energy_balancel(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_w, k_glass, thick_glass, H
Tw11_w, Tw21_w : Tw1_ww, Tw2_ww)

```

```

Tw1_2w=Tw1_ww
Tw2_2w=Tw2_ww

Call energy_balance1(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_w, k_glass, thick_glass, H
Tw1_2w, Tw2_2w : Tw11_ww, Tw21_ww)

Tw1_2inw=Tw11_ww
Tw2_2inw=Tw21_ww

Call energy_balance1(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_w, k_glass, thick_glass, H
Tw1_2inw, Tw2_2inw : Tw1_finw, Tw2_finw)

"1. heat flux from room to window"
h_rsw=h_rs(Tr, Tw1_finw, H, V_fan)
hr_rsw=hr_rs(Tr, Tw1_finw, eps_w)
{Qc_rww=h_rsw*(Tr-Tw1_finw)
Qr_rww=hr_rsw*(Tr-Tw1_finw)}
Q_rww=(h_rsw+hr_rsw)*(Tr-Tw1_finw)

"2. heat conduction in window"
hc_ww=k_glass/thick_glass
Q_wcw=hc_ww*(Tw1_finw-Tw2_finw)

"3. heat flux from window to ambient"
h_waw=h_wa(V_wind)
hr_waw=hr_wa(Tw2_finw, Ta, eps_w)
{Qc_waw=h_waw*(Tw2_finw-Ta)
Qr_waw=hr_waw*(Tw2_finw-Ta)}
Q_waw=h_waw*(Tw2_finw-Ta)+hr_waw*(Tw2_finw-Ta)

"열관류율 :U"
U_w=1/(1/(h_rsw+hr_rsw)+1/hc_ww+1/(h_waw+hr_waw))    "[W/m^2]"
Qw=U_w*(Tr-Ta)

```

## B : 천정부 2중 단열스크린 시스템의 열손실계산]

```

Function h_rs(T1, T2, L1, V_fan)
{h_rs : heat transfer coefficient from room to shield 1
  L1 : bottom length of triangular roof
  beta : thermal expansion coefficient = 1/T
  Ra_L : Rayleigh number = g beta (T1-T2) L^3/(alpha nu) }

P_atm=101.325      "[kPa]"
T_av=(T1+T2)/2
T_avk=T_av+273.15  "[K]"
beta=1/T_avk
g=9.8
c_p=SPECHHEAT(Air, T=T_av)*1000      "[J/kg K]"
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av)            "[ ]"
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av)     "[W/m K]"
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm) "[kg/m^3]"

alpha=k_air/(rho_air*c_p)
nu=mu/rho_air
L=L1/2      "characteristic length

Ra_L=g*beta*(T1-T2)*L^3/(alpha*nu)
Nu_ave=0.27*Ra_L^0.25

h_rs:=Nu_ave*k_air/L+3.043*V_fan^0.170

END

Function h_ss(T1, T2, L)
{h_ss : heat transfer coefficient from shield 1 to shield 2
  L : spacing between shield and window }

P_atm =101.325
T_av=(T1+T2)/2
g=9.8
c_p=SPECHHEAT(Air, T=T_av)*1000      "[J/kg K]"
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av)            "[ ]"
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av)     "[W/m K]"
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm) "[kg/m^3]"

Pr=c_p*mu/k_air
nu=mu/rho_air

Ra_L=2*g*(T1-T2)*L^3*Pr/(nu^2*(T1+T2))

Nu_1=1-1708/Ra_L

IF(Nu_1 < 0) THEN
  Nu_1=0
ENDIF

Nu_2=(Ra_L/5830)^(1/3)-1

IF(Nu_2 < 0) THEN
  Nu_2=0
ENDIF

Nu_ave=1+1.44*Nu_1+Nu_2

```

```
h_ss:=Nu_ave*k_air/L
```

```
END
```

```
Function h_sw(T1, T2, H, L1)
```

```
{h_sw : heat transfer coefficient from shield to window  
H : maximum height of roof  
L1 : bottom length of triangular roof}
```

```
P_atm =101.325
```

```
T_av=(T1+T2)/2
```

```
T_avk=T_av+273.15
```

```
beta=1/T_avk
```

```
g=9.8
```

```
c_p=SPECHEAT(Air, T=T_av)*1000
```

```
"[J/kg K]"
```

```
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av)
```

```
"[ ]"
```

```
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av)
```

```
"[W/m K]"
```

```
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm)
```

```
"[kg/m^3]"
```

```
alpha=k_air/(rho_air*c_p)
```

```
nu=mu/rho_air
```

```
Ra_L=g*beta*(T1-T2)*H^3/(nu*alpha)
```

```
L=L1/2
```

```
C=-0.3243*(H/L)+0.4121
```

```
"regression expression for aspect
```

```
ratio, H/L"
```

```
Nu_ave=C*Ra_L^0.3
```

```
h_sw:=Nu_ave*k_air/H
```

```
END
```

```
Function h_wa(V_wind)
```

```
{h_wa : heat transfer coefficient from window to ambient}
```

```
h_wa:=2.8+3.0*V_wind
```

```
END
```

```
Function hr_rs(Tr, Ts1, eps_s1)
```

```
{hr_rs : radiative heat transfer coefficient }
```

```
sigma:=5.67e-8
```

```
RR :=1/eps_s1
```

```
Tr_k:=Tr+273.15
```

```
Ts1_k:=Ts1+273.15
```

```
hr_rs:=sigma*(Tr_k^2+Ts1_k^2)*(Tr_k+Ts1_k)/RR
```

```
END
```

```
Function hr_ss(Ts1, Ts2, eps_s1, eps_s2)
```

```
{hr_ss : radiative heat transfer coefficient }
```

```
sigma:=5.67e-8
```

```
RR:=(1-eps_s1)/eps_s1+(1-eps_s2)/eps_s2+1
```

```
Ts1_k:=Ts1+273.15
```

```
Ts2_k:=Ts2+273.15
```



```
hr_ss:=sigma*(Ts1_k^2+Ts2_k^2)*(Ts1_k+Ts2_k)/RR
```

```
END
```

```
Function hr_sw(Ts2, Tw1, eps_s2, eps_w, L1, L2, L3, length)
```

```
{hr_sp : radiative heat transfer coefficient
```

```
  A1 : area of the bottom of roof
```

```
  A2 : area of the roof surface faced with ambient air}
```

```
sigma:=5.67e-8
```

```
A1=L1*length
```

```
A2=L2*length
```

```
F12=(L1+L2-L3)/(2*L1)
```

```
RR:=A2*(1-eps_s2)/(A1*eps_s2)+A2/(2*A1*F12)+(1-eps_w)/(2*eps_w)
```

```
Ts2_k:=Ts2+273.15
```

```
Tw1_k:=Tw1+273.15
```

```
hr_sw:=sigma*(Ts2_k^2+Tw1_k^2)*(Ts2_k+Tw1_k)/RR
```

```
END
```

```
Function hr_wa(Tw, Ta, eps_w)
```

```
{hr_wa : radiative heat transfer coefficient
```

```
  Tsky : sky temperature = Ta-6}
```

```
sigma:=5.67e-8
```

```
RR:=1/eps_w
```

```
Tw_k:=Tw+273.15
```

```
Ta_k:=Ta+273.15
```

```
hr_wa:=sigma*(Tw_k^2+Ta_k^2)*(Tw_k+Ta_k)/RR
```

```
{Tsky=Ta-6
```

```
Tsky_k=Tsky+273.15
```

```
hr_wa:=sigma*(Tw_k^2+Tsky_k^2)*(Tw_k+Tsky_k)/RR}
```

```
END
```

```
MODULE energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21,  
eps_s22, eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, H, L1, L2, L3, length, Ts1_in  
Ts2_in, Tw1_in, Tw2_in :Ts1, Ts2, Tw1, Tw2)
```

```
{initial temperature}
```

```
Ts1[1]=Ts1_in
```

```
Ts2[1]=Ts2_in
```

```
Tw1[1]=Tw1_in
```

```
Tw2[1]=Tw2_in
```

```
"1. heat flux from room to shield 1"
```

```
h_rs=h_rs(Tr, Ts1[1], L1, V_fan)
```

```
hr_rs=hr_rs(Tr, Ts1[1], eps_s11)
```

```
Q_rsl=(h_rs+hr_rs)*(Tr-Ts1)
```

```
"2. heat flux from shield 1 to shield 2"
```

```
h_ss=h_ss(Ts1[1], Ts2[1], width_ss)
```

```
hr_ss=hr_ss(Ts1[1], Ts2[1], eps_s12, eps_s21)
```

```
Q_ssl=(h_ss+hr_ss)*(Ts1-Ts2)
```

```
"3. heat flux from shield 2 to window"
```

```

h_sw=h_sw(Ts2[1], Tw1[1], H, L1)
hr_sw=hr_sw(Ts2[1], Tw1[1], eps_s22, eps_w, L1, L2, L3, length)
Q_sw1=(h_sw+hr_sw)*(Ts2-Tw1)

"4. heat conduction in window"
hc_w=k_glass/thick_glass
Q_wcl=hc_w*(Tw1-Tw2)

"5. heat flux from window to ambient"
h_wa=h_wa(V_wind)
hr_wa=hr_wa(Tw2[1], Ta, eps_w)
Q_wal=h_wa*(Tw2-Ta)+hr_wa*(Tw2-Ta)

{Tsky=Ta-6
Q_wal=h_wa*(Tw2-Ta)+hr_wa*(Tw2-Tsky)}

"energy balance"
Q_rsl=Q_ssl
Q_ssl=Q_sw1
Q_sw1=Q_wcl
Q_wcl=Q_wal

END

"Main Program"
{Property definition}
eps_s11=0.90           {emisivity of inner shield 1}
eps_s12=0.90           {emisivity of outer shield 1}
eps_s21=0.30           {emisivity of inner shield 2}
eps_s22=0.30           {emisivity of outer shield 2}
eps_w=0.94             {emisivity of window}
k_glass=1.4            {thermal conductivity of window: [W/m K]}

{geometry of room and window}
thick_glass=0.005      {thickness of window glass}
width_ss=0.25          {width between shield 1 and shield 2}
length=20              {length of greenhouse}
H=1.5                  {maximum height of roof}
L1=8                   {bottom length of triangular roof}
L2=SQRT(H^2+(L1/2)^2)  {length of roof surface faced with ambient air}
L3=L2

V_fan=6.0              {fan speed in greenhouse [m/s]}
V_wind=3.0             {wind speed [m/s]}
Tr=13.97               {room temperature : [C]}
Ta=0.88                {ambient temperature : [C]}

"Calculate heat transfer rate with radiation shield"
{initial guess value}
Ts1_in=Tr-2
Ts2_in=Ts1_in-2
Tw1_in=Ts2_in-2
Tw2_in=Tw1_in-2

call energy_balance(V_fan, V_wind, Tr, Ta, eps_s11, eps_s12, eps_s21, eps_s22,
eps_w, k_glass, thick_glass, width_ss, H, L1, L2, L3, length, Ts1_in, Ts2_in,
Tw1_in, Tw2_in : Ts1, Ts2, Tw1, Tw2)

Ts11=Ts1
Ts21=Ts2
Tw11=Tw1

```

Tw21=Tw2

call energy\_balance(V\_fan, V\_wind, Tr, Ta, eps\_s11, eps\_s12, eps\_s21, eps\_s22  
eps\_w, k\_glass, thick\_glass, width\_ss, H, L1, L2, L3, length, Ts11, Ts21, Tw1  
1, Tw21 : Ts1\_2, Ts2\_2, Tw1\_2, Tw2\_2)

Ts11\_in=Ts1\_2  
Ts21\_in=Ts2\_2  
Tw11\_in=Tw1\_2  
Tw21\_in=Tw2\_2

call energy\_balance(V\_fan, V\_wind, Tr, Ta, eps\_s11, eps\_s12, eps\_s21, eps\_s22  
eps\_w, k\_glass, thick\_glass, width\_ss, H, L1, L2, L3, length, Ts11\_in, Ts21\_i  
n, Tw11\_in, Tw21\_in : Ts13, Ts23, Tw1\_3, Tw2\_3)

Ts12\_in=Ts13  
Ts22\_in=Ts23  
Tw1\_2in=Tw1\_3  
Tw2\_2in=Tw2\_3

call energy\_balance(V\_fan, V\_wind, Tr, Ta, eps\_s11, eps\_s12, eps\_s21, eps\_s22  
eps\_w, k\_glass, thick\_glass, width\_ss, H, L1, L2, L3, length, Ts12\_in, Ts22\_i  
n, Tw1\_2in, Tw2\_2in : Ts1\_f, Ts2\_f, Tw1\_f, Tw2\_f)

"1. heat flux from room to shield 1"

h\_rs=h\_rs(Tr, Ts1\_f, L1, V\_fan)  
hr\_rs=hr\_rs(Tr, Ts1\_f, eps\_s11)  
{Qc\_rs=h\_rs\*(Tr-Ts1\_f)  
Qr\_rs=hr\_rs\*(Tr-Ts1\_f)}  
Q\_rs=(h\_rs+hr\_rs)\*(Tr-Ts1\_f)

"2. heat flux from shield 1 to shield 2"

h\_ss=h\_ss(Ts1\_f, Ts2\_f, width\_ss)  
hr\_ss=hr\_ss(Ts1\_f, Ts2\_f, eps\_s12, eps\_s21)  
{Qc\_ss=h\_ss\*(Ts1\_f-Ts2\_f)  
Qr\_ss=hr\_ss\*(Ts1\_f-Ts2\_f)}  
Q\_ss=(h\_ss+hr\_ss)\*(Ts1\_f-Ts2\_f)

"heat flux by radiation"

{eta=Qr\_ss/Q\_ss\*100}

"3. heat flux from shield 2 to window"

h\_sw=h\_sw(Ts2\_f, Tw1\_f, H, L1)  
hr\_sw=hr\_sw(Ts2\_f, Tw1\_f, eps\_s22, eps\_w, L1, L2, L3, length)  
{Qc\_sw=h\_sw\*(Ts2\_f-Tw1\_f)  
Qr\_sw=hr\_sw\*(Ts2\_f-Tw1\_f)}  
Q\_sw=(h\_sw+hr\_sw)\*(Ts2\_f-Tw1\_f)

"4. heat conduction in window"

hc\_w=k\_glass/thick\_glass  
Q\_wc=hc\_w\*(Tw1\_f-Tw2\_f)

"5. heat flux from window to ambient"

h\_wa=h\_wa(V\_wind)  
hr\_wa=hr\_wa(Tw2\_f, Ta, eps\_w)  
{Qc\_wa=h\_wa\*(Tw2\_f-Ta)  
Qr\_wa=hr\_wa\*(Tw2\_f-Ta)}  
Q\_wa=h\_wa\*(Tw2\_f-Ta)+hr\_wa\*(Tw2\_f-Ta)

{Tsky=Ta-6  
Qr\_wa=hr\_wa\*(Tw2\_f-Tsky)

```

Q_wa=h_wa*(Tw2_f-Ta)+hr_wa*(Tw2_f-Tsky)}
"열관류율 :U"
U=1/(1/(h_rs+hr_rs)+1/(h_ss+hr_ss)+1/(h_sw+hr_sw)+1/hc_w+1/(h_wa+hr_wa))
"[W/m^2]"
Q=U*(Tr-Ta)

"Let's calculate Ra, Nu etc"

{P_atm =101.325
T_av=(Ts1_f+Ts2_f)/2
g=9.8
c_p=SPECHEAT(Air, T=T_av)*1000 "[J/kg K]"
mu=VISCOSITY(Air, T=T_av) "[ ]"
k_air=CONDUCTIVITY(Air, T=T_av) "[W/m K]"
rho_air=DENSITY(Air, T=T_av, P=P_atm) "[kg/m^3]"

Pr=c_p*mu/k_air
nu=mu/rho_air

Ra_L=2*g*(Ts1_f-Ts2_f)*(width_ss)^3*Pr/(nu^2*(Ts1_f+Ts2_f))}

```