

시설하우스 에너지 절감을 위한 열유동 수치 해석 실증 연구

신미수 · 김혜숙 · 최준호 · 장동순[†]

충남대학교 환경공학과

(2006년 12월 14일 접수, 2007년 4월 17일 채택)

Indepth Study of Numerical Heat Transfer and Fluid Flow for Energy Saving of Greenhouse

Mi-Soo Shin · Hey-Suk Kim · Jun-Ho Choi · Dong-soon Jang[†]

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT : The purpose of study is to obtain basic but important information for the operation of the greenhouse facility located in the suburb of town. Special emphasis is given on the aspect of energy saving method, which can be easily applicable in a practical sense. For this end numerical calculation has been made systematically in order to increase the energy efficiency by the evaluation of the temperature distribution in greenhouse. Major parameters considered are primarily the overall shape of greenhouse together with the various conditions of baffle installation inside greenhouse. Further, the performance of heating system is also carefully compared each other for a number of typical arrangements of heating duct. The performance of the computer program developed in this study is evaluated by the observation of the famous fluid trapping phenomenon occurred in staggered baffle condition in the enclosure of greenhouse. Based on the this study, a number of useful conclusions can be drawn, that is, the installation of baffles are quite effective in energy saving method with a minor modification of facility. Also, it is found that the change of the heating duct system can contribute significantly to the uniform temperature distribution in greenhouse. Further other findings obtained by numerical calculation were not only physically consistent and meaningful but also useful for the determination of optimum condition of practical operation of greenhouse.

Key Words : Greenhouse, Baffle Installation, Energy Saving, Numerical Study

요약 : 본 연구의 목적은 시설하우스에 대한 기본적인 면에서도 중요한 운전 자료를 얻기 위한 것이다. 특히 시설하우스 에너지 절감을 위해 실용적으로 쉽게 적용할 수 있는 방법에 중점을 두었다. 이러한 목적에 의해 하우스내의 온도분포를 평가하기 위한 방법으로 조직적인 수치해석연구를 수행하였다. 이러한 연구에서 고려한 중요한 변수는 시설하우스의 일반적인 형상과 함께 시설하우스내의 열유동을 조절하는 다양한 배플 조건을 가정하였다. 아울러 난방가열시스템의 배관배치에 따른 열유동 특성과 효율을 상호 비교하였다. 이러한 연구의 결과로 얻어진 몇 가지의 유용한 결론을 정리하였다. 특히 시설하우스 천장에서 내린 배플은 최소한의 시설로서 에너지 효율에 실질적인 기여를 할 수 있었으며 또한 난방배관의 구조는 시설하우스내의 균일한 온도 분포를 얻기 위하여 크게 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 기타 본연구의 여러 수치해석 결과들은 물리적인 면에서 의미가 있었으며 실용적인 면에서 시설하우스의 최적 운전조건 설정에 도움이 된다고 판단하였다.

주제어 : 시설하우스, 배플 설치, 에너지 절감, 전산 수치해석

1. 서론

본 연구의 목적은 도심근교 시설하우스의 특성 조사를 통해 기본적인 자료를 확보하고, 시설하우스의 형상변화, 시설하우스 내부 배플 설치에 따른 열전달 및 실내 오염물질 확산 특성, 온풍 덕트의 다양한 배치 등 주요 설계변수에 따른 열 유동 해석을 통해서 에너지를 절감 할 수 있는 설계 조건을 제시하는 것이다. 시설하우스의 설계는 안전한 구조, 적정 환경 조절, 소요에너지의 절감, 용이한 시공 등을 고려해야 한다. 현재 국내에 보급되고 있는 온실은 환경조절의 효율성이나 에너지 절약측면에서 개선의 여지가 많은 실정이라 판

단된다. 또한 이러한 시설하우스의 설계나 운전조건 설정에 있어서 조직적인 연구가 이루어지고 있지 않아 시설하우스에서 실제 적용을 위한 자료로 활용하기에는 부족한 점이 있다.^{1,2)}

현재 국내의 농가에 보급되고 있는 첨단유리온실의 종류는 외곡산 벤로(venlo)형과 와이드스팬(wide-span)형 및 국내에서 개발된 소수의 모델이 있다. 그 동안 외곡산 온실은 우리나라의 기후조건에 적합하지 않아 여러 가지 문제점이 노출되고 있으며 국내에서 시설원예의 기술축적이 부족한 상황에서 개발된 온실도 개선의 여지가 많은 것으로 지적되고 있다. 따라서 우리나라의 기후조건에 적합한 한국형 시설하우스의 개발이 시급한 실정이다. 본 연구는 우리나라에 널리 보급되어 있는 시설하우스의 형상에 대한 기본적인 수치 해석적 연구를 수행하고, 기존의 시설하우스에 열유동의 조절용 차단 배플 등의 설치로 열효율 향상을 기도 하였다. 열유동 조절용 배플의 기본적인 개념은 시설하우스의 구조를

[†] Corresponding author
E-mail: p_dsjang@cun.ac.kr
Tel: 042-821-6677

Fax: 042-823-8362

태양열 집광판과 같은 경사진 구조를 취하게 하는 것이다. 이는 경사진 시설하우스내의 구조가 가열공기의 대류를 자연스럽게 지면으로 유도함으로써 상층 천장부에서의 열효율을 최소화하고 효율적인 지면 가열을 목적으로 한다.

또한 도시근교 소규모 시설하우스에서 많이 활용하는 온풍난방의 경우 온실 내부 온도를 균일하게 유지하는 것이 중요하다. 따라서 온풍 덕트의 다양한 배치를 조직적으로 평가함으로써 균일한 온도를 유지하기 위한 변수 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 이차원 2-D 직교좌표계에서 개발된 프로그램을 가지고 기본적인 예비연구와 함께 시설 하우스 내에서 일어나는 물리적인 특성들을 검증하는 변수연구를 수행하였다. 그리고 시설하우스의 복잡한 3차원 열유동 현상에 대한 수치해석과 정량적인 연구를 위해서는 상용코드인 STAR-CD (Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions - Computational Dynamics)를 활용하였다.

2. 수학적 모델 및 방법

2.1. 일반지배방정식

질량, 운동량, 에너지 등에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현되며 단위체적당 시간에 따른 물리량의 변화는 유동 및 확산항 그리고 단위체적당 생성항의 합으로 나타난다.³⁾

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (1)$$

unsteady convection diffusion source

여기서 ϕ 는 단위질량당 일반속속변수로서 x, y, z방향의 속도를 나타내며 Γ 는 확산계수, S_ϕ 는 생성항을 나타낸다.

열전달은 전도, 복사, 대류 등에 의해 이루어지는데 대류에 의한 열전달은 보다 복잡한 양상을 띠게 된다. 이는 대류 열전달이 Ra와 종횡비 등 여러 가지 함수로 나타나기 때문이다. Rayleigh수는 보통 부력에 의한 유동과 점성 저항력의 비를 나타냄으로서 유동의 세기를 나타내는 무차원 변수인데 같은 종횡비에 대해 Ra가 커지면 유동이 증가함으로써 유동열전달은 증가하게 된다.

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T H^3}{\nu \alpha} = \text{부력/저항력} \quad (2)$$

윗 식에서 g, β , ν , α 는 각각 중력가속도, 열팽창계수(thermal expansion coefficient), 동점도 계수(kinematic viscosity), 그리고 열확산 계수(thermal diffusivity)를 나타낸다.

Ra수와 종횡비에 따른 열유동 특성은 Bejan의 이론적 분석에 의하면 전도영역과 대류영역 등으로 정리될 수 있는데, 종횡비가 큰 직사각형 공간에서는 $Ra^{\frac{1}{4}}$ 의 값이 $\frac{H}{L}$ 보다 작아지면 열전달 특성은 전도에 의해 주도되며 그 반대의 경우에는 대류에 의한 영향을 받게 된다. Table 1에 대류 열전달에서의 주요 무차원 변수에 대하여 나타내었다.

단한 공간 내에서 층류에 가까운 공기의 자연대류 문제를 해석하는 경우 무차원화된 변수를 이용하여 지배방정식을 단순화 시키는 방법이 종종 이용되어 왔다. 본 연구에서도 적절한 가정 하에 해석 대상이 되는 속도 성분 u, v 와 온도(T) 등의 변수를 무차원화 하여 지배방정식을 유도하였다.

2.2. 경계조건

Fig. 1은 시설하우스의 도식도 및 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 1의 (b)에 나타난 바와 같이 외부공기의 유입이나 환기 없이 시설하우스 가운데 난방장치가 있다고 가정하고 시설하우스 형상변화에 따른 수치해석을 수행하였으며 또한 길이 방향으로 배플 유무에 따른 열유동 및 실내공기의 오염물질의 확산거동을 동시에 고려하였다. 아래 그림에서 앞쪽 벽에 열원과 그에 따른 오염물질 발생원이 존재한다고 가정하였다.

3. 연구결과 및 토론

Fig. 2는 Fig. 1의 (b)에 나타난 바와 같이 시설하우스 길이 방향의 2차원 수직평면에서 다양한 배플을 설치한 경우 유동분포를 나타낸 것이다. 전체적인 유동양상은 열적 부력 현상에 의하여 자연스럽게 천장에서는 hot wall에서 cold wall

Table 1. Variable dimensionless parameters of convection heat transfer

Dimensionless parameter	definition	natural convection	forced convection	Physical meaning
Pr	$\frac{\nu}{\alpha}$	important factor	important factor	the ratio of thermal diffusion & momentum diffusion
Re_L	$\frac{u_\infty L}{\nu}$	-	important factor	the ratio of viscous force & inertial force
Pe_L	$Re_L \cdot Pr$	-	important factor	-
Nu_L	$\frac{hL}{k_f}$	important factor	important factor	the ratio of conduction heat transfer & convection heat transfer
Gr_L	$\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$	important factor	-	the ratio of viscous force & buoyancy
Ra_L	$Gr_L \cdot Pr$	important factor	-	the ratio of ratio of viscous force & resistance

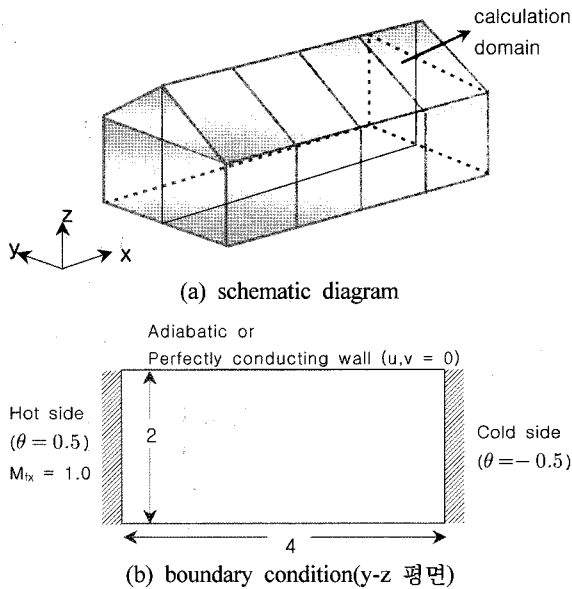


Fig. 1. Schematic diagram and boundary condition of greenhouse.

방향으로, 바닥에서는 cold wall에서 hot wall 방향으로 이어지는 순환 구조를 보이고 있다. 그러나 열적부력에 의해 유도되는 유동의 특징과 같이 배플의 위치 및 배치에 따라 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 배플이 있는 경우의 자연대류 유동은 open enclosure(배플이 없는 용기나 실내공간) 보다 전반적으로 약해진 결과를 보였다. 배플이 설치된 경우 유동이 배플에 의해 분리되는 형태를 나타냈으며,

특히 Fig. 2의 (c)는 배플에 의해 유동이 2개의 순환영역을 만들고 있으며, 배플과 배플 사이에 유속이 급격히 줄어들면서 trapping zone(유동정체 영역)을 형성하는 것을 볼 수 있다. 폐쇄된 공간에서 자연대류가 발생할 때 배플 설치에 따른 ‘fluid trap’ 현상은 이전의 연구에서도 밝혀진 바 있다.⁴⁾ 도시근교의 시설하우스의 경우 소규모로 영세하게 운영되어 유동이나 온도에 대한 실험 데이터를 얻기 어려운 실정므로 프로그램 검증에 위해 문헌에 나와 있는 자료와 정성적인 비교를 통해 프로그램을 검증하였다.

Fig. 3은 배플의 위치 및 배치에 따른 온도분포 결과이다. 배플이 설치되지 않은 (a)의 경우 hot wall 쪽의 상부 쪽으로 치우쳐 고온영역이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 배플이 설치된 경우는 고온영역이 배플에 의해 갇히면서 hot wall 쪽에 널리 분포되는 것을 볼 수 있다. 만일 영세한 농촌 사정을 감안할 때, 따로 보관창고 없이 하나의 시설하우스에서 농산물 재배와 보관을 일정기간 병행해야 한다면 이와 같은 형태의 배플 설치가 앞쪽은 고온을 유지하므로 농작물의 재배지로 활용하고 바닥에 설치된 배플 뒤쪽은 다른 경우보다 저온을 유지하므로 일시적인 농산물 보관 장소로의 활용도가 가능하리라 생각된다.

Fig. 4는 오염물질의 확산특성을 나타낸 결과이다. 결과에 나타나 있듯이 배플에 의해서 오염물질의 확산특성이 달라지면서 hot wall에서 발생하는 열과 물질이 배플에 의해 갇히게 되면서 뜨거운 벽 쪽 영역에 국부정체가 나타나면서 고농도가 유지되었고 배플 뒤쪽으로는 물질 확산이 거의 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다.

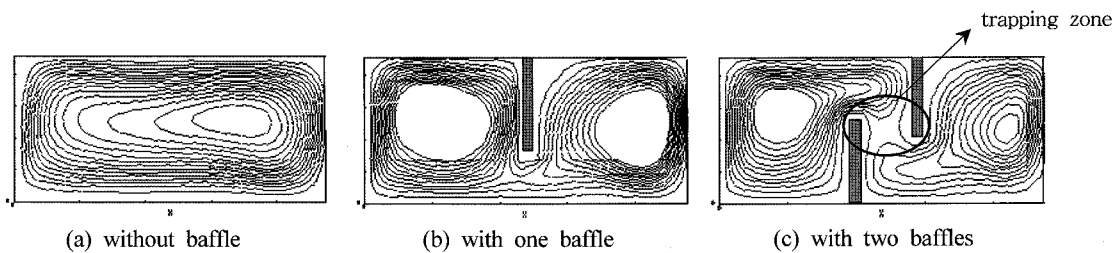


Fig. 2. Streamline contour plots.

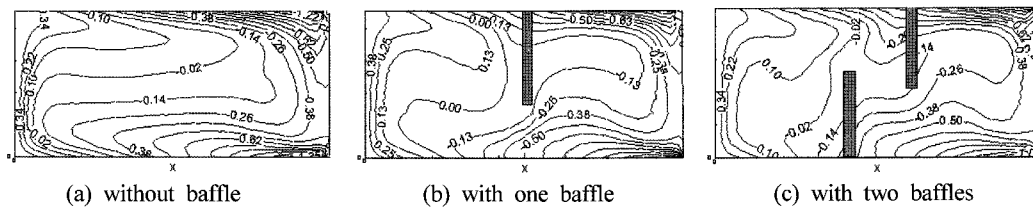


Fig. 3. Temperature distributions.

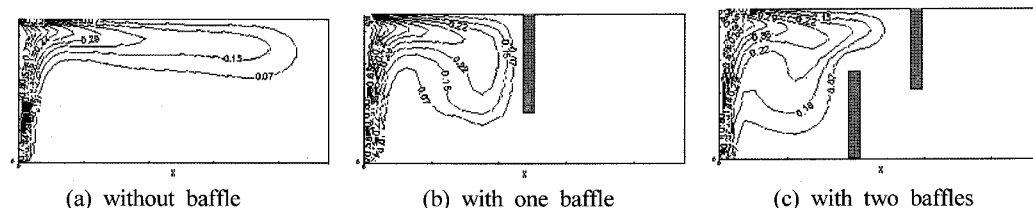


Fig. 4. Pollutant mixture fraction.

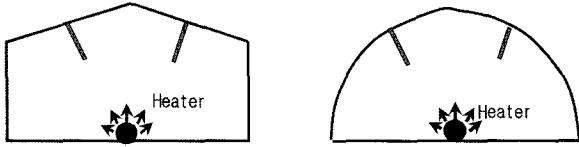


Fig. 5. Schematic diagram of various greenhouse.

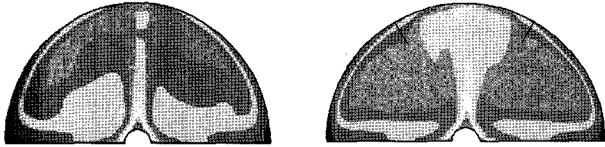


Fig. 6. Temperature distribution of a semicircle type greenhouse.

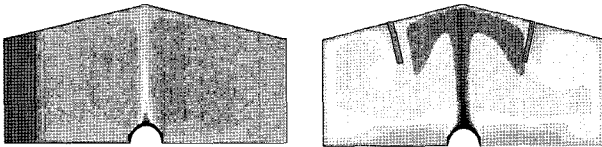


Fig. 7. Temperature distribution of a veno type greenhouse.

Fig. 5는 현재 시설하우스로 널리 사용되는 대표적인 형상에 대한 정면 도식도이다. 위의 결과에서 이미 배플 설치에 의해 시설하우스 내부의 열전달과 물질전달 양상이 달라지는 것을 확인했으나, 배플의 설치 효과를 좀더 가시적으로 확인하고자 각각의 시설하우스 형상에 대하여 정면에서 높이방향으로의 온도 분포를 나타내었다. Fig. 6은 반원형 시설하우스 내부의 온도분포 결과인데 고온의 상승기류가 단열재질의 배플에 의해 차단되어 하강기류를 형성하면서 고온의 영역이 시설하우스의 하부 쪽으로 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 고온의 영역을 작물이 실제로 자라는 시설하우스의 하부 쪽으로 이동시키면서 에너지 절약측면에서도 효과가 있을 것으로 생각된다. Fig. 7은 벤로형 시설하우스에 대한 온도분포 결과인데 Fig. 6과 마찬가지로 결과를 얻을 수 있었다.

다음은 우리나라의 온실난방시스템으로 대부분을 차지하는 온풍난방시스템에 대한 변수연구 결과이다. 특히 소규모의 시설하우스 난방에 많이 사용되는 온풍난방 시스템은 공기를 직접 가열하기 때문에 온수 또는 증기난방시스템과는 달리 파이프와 같은 열 수송매체가 필요 없고, 장치가 간단하고, 시설비가 저렴하며, 보수관리가 용이한 장점이 있다. 또한 내용연수를 제외하고 단순히 연료비만 비교하면 온풍난방은 온수난방에 비해 약 1/5에 불과하고, 온실 규모가 작을수록 그 차는 더욱 심하다. 그리고 다른 방식에 비하여 열 이용효율이 높고, 경량이어서 이동에 편리하고 배관이 필요하지 않아 작업 면에서도 유리한 장점을 가지고 있다. 단, 열 수송매체인 공기의 열용량이 작기 때문에 온풍기가 정지하면 열의 공급이 차단되므로 보온성이 낮은 단점이 있다.^{4,5)}

시설하우스 내부 온도 분포를 균일하도록 하기 위해서는 덕트를 이용한 공기분산이 필요하다. 온풍 덕트의 배치는 온실의 크기 및 방향, 난방기의 위치 등에 따라 달라진다. 덕트를 배치할 때 처음부터 온도분포를 균일하게 하는 것은 어렵기 때문에 분기 덕트의 길이조절이나 다양한 배치를 통하여 이런 점을 보완하고자 한다. 덕트의 직경은 온풍 난방기의 송풍량을 기준으로 결정하며, 주관 및 지관의 방식을 도입할 경우에는 주관에 대한 지관의 수를 적절하게 결정해야 한다. 그 수가 많을 경우 지나친 압력손실 발생에 따라 온풍이 돌아 나오지 않는 곳이 생기고 온도가 균일해지지 않으며, 적을 때는 온풍기가 과열되기 쉽다.^{6,7)}

현재 대부분의 농가에서 채택하고 있는 덕트의 배치방식은 Fig. 8의 (a)와 같이 온풍기와 덕트의 주관을 한쪽 또는 양쪽측면에 배치하고 지관은 하우스 길이에 따라 일정한 길이로 동일하게 설치하는 방식이 사용된다. 이러한 경우 하우스 내의 온도편차가 커질 뿐만 아니라 지관의 길이가 길어짐에 따라 덕트의 처음과 끝 부분에 온도차가 생겨 시설의 전후면 온도편차가 13~15℃까지 생겨 온도분포가 불균일해지는 단점이 있다. 시설내 전 후면의 온도편차가 생길 경우 작물의

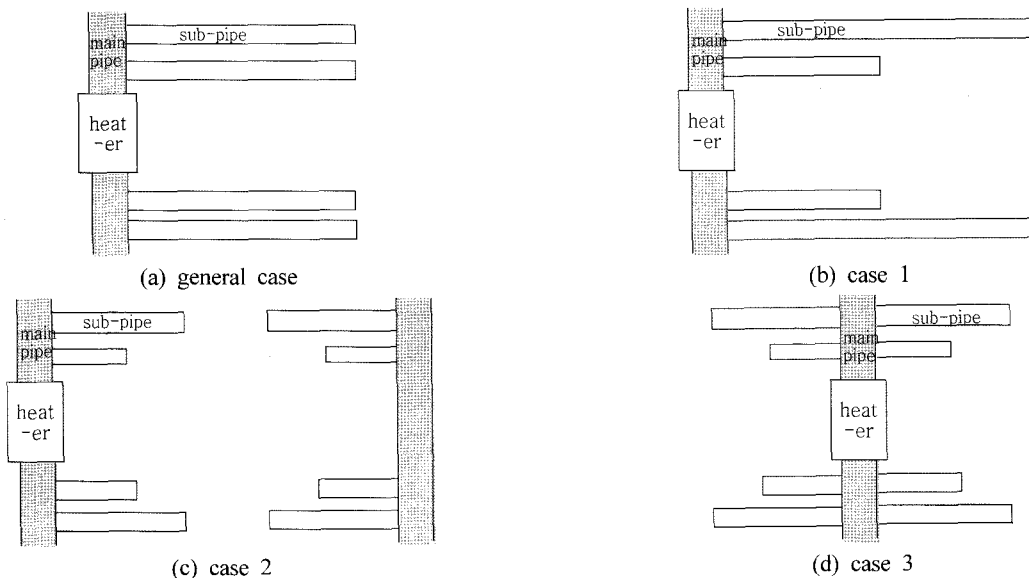


Fig. 8. A various type of duct arrangement.

생육에도 차이가 생겨 수량과 품질이 떨어지는 문제점이 생긴다. 이에 Fig. 8의 (b), (c), (d)와 같이 다양한 덕트의 배치를 통하여 내부 온도분포의 균일 정도를 살펴보았다.

수치해석에 사용된 온실의 구조는 전면부에 온풍기가 위치하고 주관을 이어 온실 내부에 일정한 간격으로 배치되어 있는 지관이 설치되어 있는 구조이다. 계산조건은 4개 또는 8개의 지관을 통해 동일한 열량(14,250 kcal/hr)으로 온풍을 주입하였으며, 각 벽면은 겨울철을 고려하여 -5°C의 일정한 외기 온도를 가정하였으며 상층부에는 자연 통풍을 위한 세 곳의 환기구를 배치하였다.

Fig. 9에서 Fig. 13은 Fig. 9에 제시한 다양한 덕트 배치에 따른 유동 및 온도분포 계산 결과이다. Fig. 9에 일반적인 덕트 배치에 대한 유동 및 온도분포를 나타내었는데 덕트를 통해 배출된 고온의 공기가 부력에 의해 상승하여 하우스의 상층부에서 체류하며 천정의 환기구로 배출되는 양상을 나타냈다.

Fig. 10의 경우 덕트의 배치를 개선시킴으로써 온풍의 체류시간이 길어져 Fig. 9에 비해 시설하우스 끝부분의 온도가 다소 상승하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 기존의 덕트 배치와는 달리 주관을 온풍기의 반대편 벽면으로 유도하여 지관을 내어 온풍을 배출한 결과이고, Fig. 12는 중앙에 난방기를 배치하여 양 벽면으로 온풍을 배출한 결과이다. 두 경우 모두 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 한 방향으로의 온풍배출에 비해 온풍의 체류시간이 길고 좀 더 원활한 난류 혼합이 발생하여 시설하우스 전체에 걸쳐 고온지점과 저온지점의 온도편차가 줄어드는 효과를 나타내었다.

Fig. 13은 덕트의 배치변화에 따른 온도분포를 좀 더 가시적으로 확인하고자 작물의 생육에 직접적으로 영향을 미치는 높이인 50 cm 지점에서의 온도 분포를 비교한 것이다. 공통적으로 모든 Case에서 덕트가 위치한 지점에서는 온풍

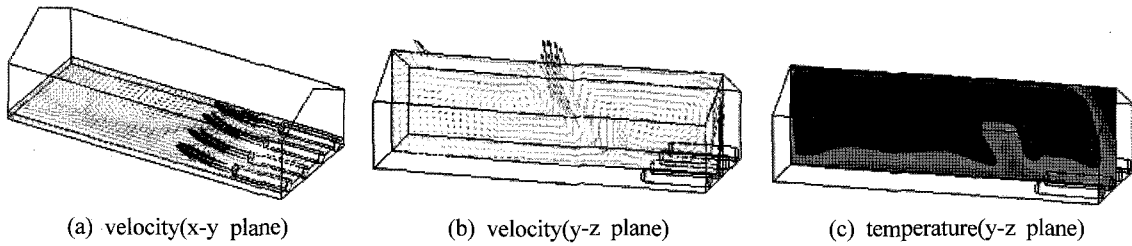


Fig. 9. Calculation results of general case.

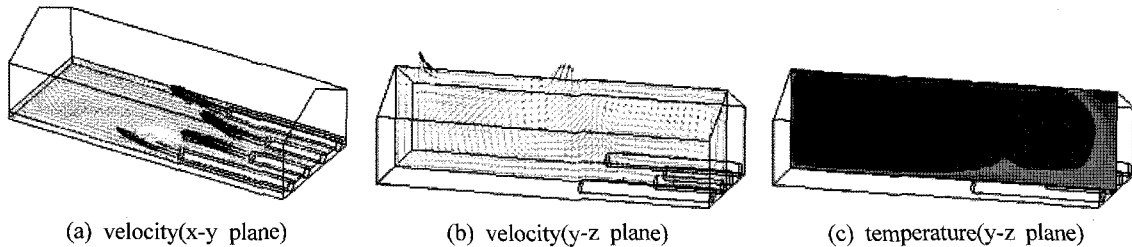


Fig. 10. Calculation results of case 1.

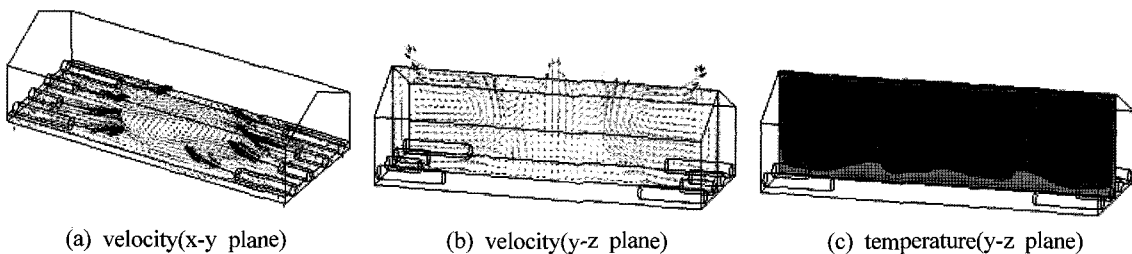


Fig. 11. Calculation results of case 2.

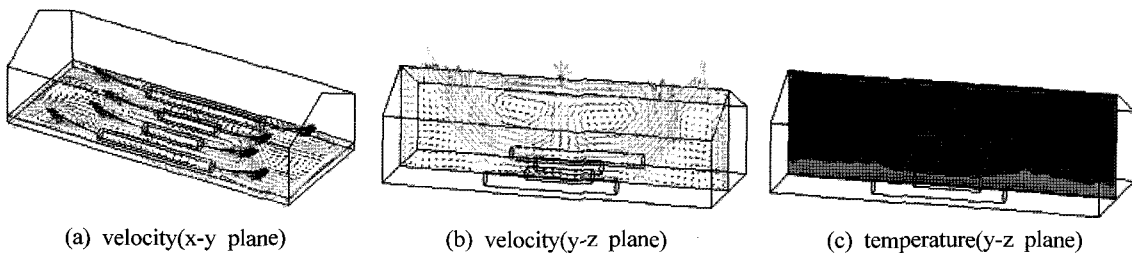


Fig. 12. Calculation results of case 3.

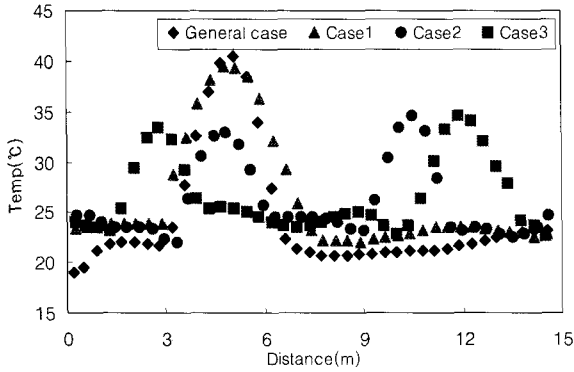


Fig. 13. Comparison of temperature distributions with various duct arrangements.

난방기의 직접적인 영향으로 인해 고온을 나타내며 그 이후 온도 저하가 발생된다. 그러나 case 2와 case 3의 경우 기존의 덕트 배치와 비교하여 고온과 저온의 온도편차가 현저히 줄어드는 경향을 나타내었다.

4. 결론

본 연구는 시설하우스의 기본적이면서 중요한 운전 자료를 얻기 위한 수치 해석적 연구로서 시설하우스의 열효율 향상을 위해서 시설하우스의 형상변화 및 내부에 배플(보조 차폐장치)의 설치 등 중요 변수에 따른 열 유동 해석을 시도하였다. 개발된 2-D 프로그램으로 기본적인 예비연구와 물리적인 특성 검증을 수행하였으며, 문헌에 나타난 자료와의 비교를 통해 정성적으로 검증하였다. 시설하우스의 형상변화 및 내부에 배플(보조 차폐장치)의 설치에 따른 수치해석을 수행하여 유용한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 천장에서 내린 배플은 최소한의 시설로 에너지 절감 차원에서 효과가 있는 것으로 나타났다.

시설하우스 난방에 온풍을 이용하는 경우 온풍 이송 덕트의 배치는 내부 공간의 균일한 온도분포에 크게 영향을 미치는 것을 확인 하였다. 연구 결과 덕트의 길이 변화는 난방

기에서 멀리 떨어진 곳은 좀 더 길게 배치하고 가까운 영역의 덕트는 좀 더 짧게 배치하는 것이 유리하였다. 또한 덕트의 위치는 시설하우스의 중앙에서 양쪽으로 온풍을 분사하는 경우와 양쪽에서 길이변화를 주어 온풍을 분사한 경우 시설하우스 내부에 좀 더 고른 온도분포 양상을 나타내었다. 이와 같이 온풍 이송 덕트의 배치를 변경함으로써 온실 내부 온도편차를 줄이고 전체적인 열효율 상승효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 향후 지역 농촌과 연계하여 실용적 측면의 변수 연구를 지속적으로 수행한다면 경제기반이 상대적으로 취약한 농촌지역에 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 대전·충남지역 대전환경기술개발 센터에서 시행한 환경기술 연구개발사업의 연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 시설원에 에너지 절감기술, 농림부(2000).
2. 김홍제 외 9인, 시설하우스 에너지 절감을 위한 고효율 단열(재)R 시스템 개발, 한국에너지기술연구소(2002).
3. Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill Company(1980).
4. Adrian Bejan, Convection heat transfer, John Wiley & Sons(1984).
5. Lechner, N., Heating, Cooling, Lighting : Design methods for Architects, John Wiley & Sons(1991).
6. Nansteel, M.W. and Greif, R., "Natural convection in undivided and partially divided rectangular enclosures," *J. of Heat Transfer*, **103**, 623~629(1981).
7. Elsherbiny, S. M., Raithby, G. D., and Hollands, K. G. T., "Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers," *J. of Heat Transfer*, **104**(1982).