

전기가열식 필름 천공기의 열전달률 개선

김종일 · 김재홍*[†]

조선대학교 공과대학 기계공학부 · *서강정보대학 열냉동관리과
(1999. 11. 10. 접수 / 2000. 3. 4. 채택)

An Improvement of Heat Transfer of Electric Hole Cutter for Polyethylen Film

Jong-II Kim · Jae-Hong Kim*[†]

Department of Mechanical Engineering, Chosun University · *Department of Heating & Air Conditioning, Seo Kang College
(Received November 10, 1999 / Accepted March 4, 2000)

Abstract : This paper presents a development of an electric hole cutter for agricultural polyethylen film. Mechanical hole cutter with blades and electrical hole cutters are being tried in products now. But Mechanical hole cutter systems have a few faults. So the hole cutter systems using electrical heater have mainly been developed and optimized. Computer aided engineering was introduced for the purpose of electric heated hole cutter being developed, because it helped reduce the unnecessary tests. Three types of heated cups were surveyed with MSC/Nastran, and the type of model C was most effective in heat transfer.

1. 서 론

농업용 온실에 들어가면 밖의 온도보다 온실 내의 온도가 훨씬 높은 것은 유리가 태양에너지의 87%를 실내로 통과시키는 반면 그 반대로 이동하는 에너지는 실질적으로 거의 통과시키지 못하는 온실효과 때문이다.

이러한 온실효과는 추운 겨울날에도 태양에너지를 포집할 수 있기 때문에 일찍이 온실 재배 등 농업분야에서 많이 이용하고 있으며 온실에 사용되는 주요재질은 최근 현대적인 대규모 시설인 유리온실이 늘어가는 추세지만 아직도 대부분 농가에서는 값이 저렴하고 좁은 면적에서도 쉽게 이용할 수 있는 농업용 폴리에틸렌 필름을 많이 사용하고 있다. 농업용 폴리에틸렌 필름은 이식, 파종 등의 목적에 따라 적정크기의 구멍과 간격이 필요한데 폴리에틸렌 필름 특성상 천공면을 깨끗하게 천공하여 제품을 생산하기가 어려움에 따라 생산성을 저하시키는 주요한 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 현재 비교적 신뢰성이 있는 농업

용 폴리에틸렌 천공기계가 국내외에서는 개발되어 있지 않기 때문에 제조업체 요구에 따라 기계식 천공법 대신 신뢰성이 있는 전기가열식 천공기계 개발을 설계 목적으로 하고, 전기소모가 적은 가열부 형상 및 가열부 부착방법을 최적화하기 위해 설계단계에서 CAE(Computer Aided Engineering) 해석을 적용함으로써 가열부의 온도분포를 예측하고 실험에 따른 반복회수 및 소요시간을 줄이는 효과적인 설계방법을 제시하고자 한다.

2. 천공법에 따른 문제제기

기계식 천공법은 Fig. 1과 같은 직류서보 전동

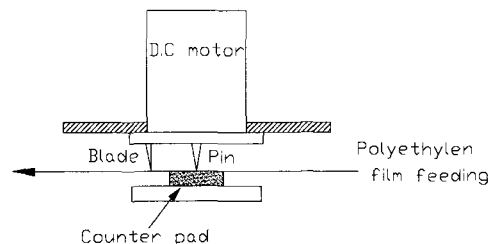


Fig. 1. Mechanical drilling system

[†] To whom Correspondence should be addressed
jikim@mail.chosun.ac.kr

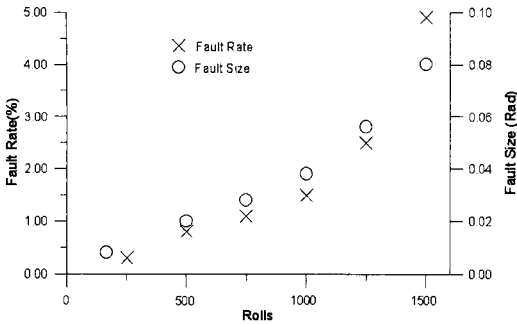


Fig. 2. Faults rate and size in Mechanical System

기에 칼날(Blade)를 연결시켜 칼날이 고속으로 회전하면서 필름을 천공하는 방법이다.

이 기계식 천공법은 천공후 면이 깨끗할 뿐 아니라 고속작업이 가능하다. 그러나 개별 직류서보 전동기에 개수가 너무 많아 복잡하며, 작업 중 전기회선의 단선으로 인한 생산성이 저하되는 경우가 빈번히 발생되며 장시간 사용시 칼날의 조기 마모 및 절단으로 인하여 Fig. 2와 같이 끝마무리가 시간이 경과할 수록 악화되므로 칼날을 조기에 교체하여야 한다. 따라서 설비 가동을 저하 및 유지비가 많이 소요되는 단점이 있다. 이 외에 폴리에틸렌 필름의 저융점 특성에 따라 가열식 천공법이 있다.

가열식 천공법은 고주파 가열식과 전기 가열식으로 구분되는데 고주파 가열식은 예열 시간이 짧아 전력을 절약할 수 있으나 고주파 발생장치 및 증폭장치 제작비용이 고가이므로 대중화가 곤란하다. 또한 작업장에서 발생하는 고주파는 인체에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 방지 대책이 어려우며, 설계자료 부족으로 인한 신뢰성이 있는 제품이 되기까지는 보다 많은 시간과 투자비가 필요하다. 그러나 전기가열식은 제작이 쉽고 장시간 사용에 따른 마모부분 및 교체부품 발생이 적어 신뢰성이 크고 제작비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 따라서 가열단면을 비효율적으로 설계하였을 때는 천공에 어려움 및 전기소모가 크기 때문에 가열부의 최적설계가 수반되어야 한다.

3. 전기가열식 천공장치 구성 및 기구

전기가열식의 천공장치 구성은 Fig. 3과 같다. 전기가열식 천공방법은 Fig. 3처럼 제품이 감기

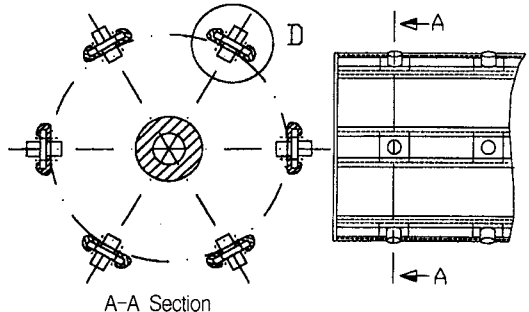
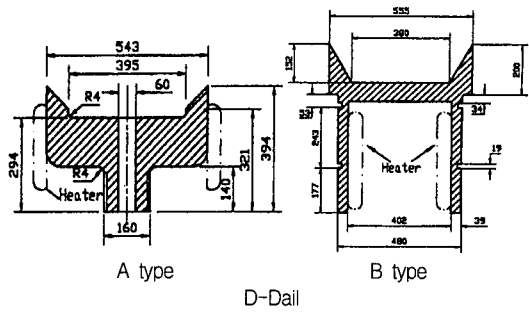


Fig. 3. Electrical heating hole cutter system

는 과정 중에 가열된 컵으로 순간 천공하는 장치인데 필요한 구멍의 크기와 개수에 맞는 가열 컵을 제작하여 컵내부 또는 외부에 가열기를 부착하여 20분 정도의 예열로 평균 110°C가 되면 0.03mm 정도의 필름(film)을 순간적으로 녹여 원하는 형상의 구멍을 뚫는 정상작업을 할 수 있다.

따라서 효과적인 컵의 단면을 얻기 위해서는 가열부의 형상 및 가열기장착 방법에 대한 연구가 필요하기 때문에 Fig. 3과 같이 가열기를 내장 또는 외장할 수 있는 여러 단면을 설계하였으나 컵의 기계가공성 및 생산설비와의 장착성을 감안하여 Fig. 4와 같은 각각의 모델로 한정하여 열적 최적화를 수행하였다.

모델 A는 가열컵의 높이가 21mm로 가열부는 하부에 부착하였으며, 모델 B는 모델 A와 높이 및 가열기부착 위치가 동일하나 중량 및 원가를 고려하여 선단부의 단면두께가 얇은 슬림(slim)형을 고안하였다. 모델 C는 모델 A와 컵의 직경은 동일하나 가열기가 컵 중간부에 내장되어 있는 형태이다. 이상의 3 가지 모델의 선단부의 온도 분포를 각각 확인한 후 열전달 측면에서 우수한 모델을 적용하기 위해서는 온도분포와 천공에 대한 천공관련 신뢰성 실험이 수반되어야 하므로 반복실험에 따른 비용 및 시간을 절감하기

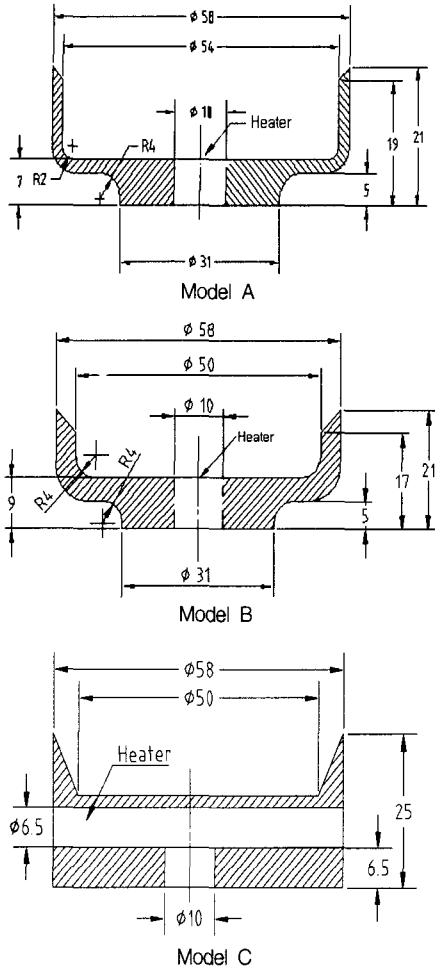


Fig. 4. Geometry of heating cup

위해서 CAE를 이용한 유한요소해석을 수행한 후 실험으로 천공의 신뢰성 평가를 수행하였다.

4. 열적 최적화를 위한 유한 요소 해석

4.1. 모델링 이론 (MSC/Nastran 해석 방법)

본 논문에서는 실험에 소요되는 시간 및 반복 회수를 줄이기 위해 가열부의 열적 해석 기법으로는 CAE(Computer Aided Engineering)를 이용하였다. CAE해석에 사용된 소프트웨어(SoftWare)는 MSC/Nastran이며, 해석 목적은 가열부의 열전달 기구를 규명하는 것보다 최적화를 위한 실험 샘플을 선정하는 것을 목적으로 하였기 때문에 해석을 단순화하였고 자연대류로 가정하여 해석하였다.

MSC/Nastran의 자연대류 열전달 접근 방법은 해석 대상인 가열부의 막계수(film coefficient)는 온도함수와 주위 온도함수 뿐만 아니라 시간의 함수로도 정의 할 수 있게 되어 있지만 해석의 단순화를 위해 다음과 같은 시간에 따라 열유동 상태가 변하지 않는 정상상태의 열평형방정식을 이용한다⁸⁾.

$$[K](U) + (R)(U + T_{abs})^4 = (P) + (N) \quad (1)$$

여기서 $[K]$ = 열전도도매트릭스
 (U) = 알고 싶은 곳의 온도벡터
 (R) = 방사온도 매트릭스
 (T_{abs}) = 주위온도
 (P) = 열유동상수벡터
 (N) = 열 유동에 영향을 받는 온도벡터

정상상태의 열평형 방정식은 방사항에 4제곱을 하였기 때문에 해석 결과는 온도뿐만 아니라 경계조건, 재료특성에 따라 달라지는 비선형 상태로 계산되어지며 해는 Newton-Raphson 반복법을 이용하였다. 이러한 계산 과정에서 정상상태의 열평형 방정식은 다음 식으로 유도된다.

$$[K_T]^i \{\Delta U\}^i = (R)^i \quad (2)$$

여기서

$$[K_T]^i \equiv [K]^i + 4[R]^i \{U^i + T_{abs}\}^3 - \{\delta N / \delta U\}^i \quad (3)$$

$$(R)^i \equiv (P)^i + (N)^i - [K]^i \{U^i\} - [R]^i \{U^i + T_{abs}\}^4 \quad (4)$$

여기서 $[K_T]^i$ = 접선전도도매트릭스

$[R]^i$ = 잉여벡터

각각 반복법에서 좌측 매트릭스와 우측벡터는 알고자 하는 온도 벡터에 의해 계산되어지므로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\{\Delta U\}^i = \{U^{i+1} - U^i\} \quad (5)$$

MSC/Nastran에서는 각각 반복적으로 해를 푸는데 일반적으로 잉여 벡터를 재 계산 하지만 반복법의 효과를 향상시키기 위해서는 접선 매트릭스도 재 계산할 수 있으므로 최적의 해를 얻을 수 있다. 따라서 정상상태에서의 해석일지

라도 데이터 입력 값에 따라서 비선형 상태의 해석도 가능하다.

4.2. 가열부의 모델링

전기가열식 천공장치는 가열부의 형상 및 온도분포 조건에 따라 폴리에틸렌 필름 천공에 직접적인 영향을 미치므로 실험에 따른 소요시간 및 반복회수를 줄이기 위해 실험과 동일한 유한요소 모델을 만들었다.

절점에 모델 A와 모델 B의 가열부 하단 온도는 전기 가열기용량을 감안 A와 B 모두 절점에 균일하게 가해지도록 하였고, 모델 C는 가열기가 중심부에 내장되어 있기 때문에 내부에 가열기를 모델링하여 절점에 균일하게 가해지도록 하였다. 가열부 재질은 모두 구조용강(SAPH45)을 절삭하여 사용되므로 동일한 재질의 물성값으로 3차원 Solid 모델을 이용하여 각각 모델링을 하였다. 따라서 해석의 단순화와 주변온도에 따른 냉각성능 비교를 쉽게 하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다³⁾.

- 1) 가열부의 모든 벽면에서의 방사율은 동일하다.
- 2) 모든 재질은 온도에 따라 밀도가 변하지 않는다.

4.3. 격자 생성 및 경계조건

가열부의 열전달 해석 모델은 원통좌표계를 기본으로 MSC/Nastran의 Post processing 기능을 이용하였다.

유한요소 해석을 위한 격자 생성은 4각 격자를 기본으로 채택하였으나 가열부 상면의 기하학적 형상 및 해의 정밀도를 감안 삼각 격자를 혼합하여 모델링하여 사각격자와 삼각격자는 모두 일치시켰다. 그 결과 모델 A는 1280개의 절점과 926개의 요소를 생성하였으며, 모델B는 1156개의 절점과 926개의 요소를 생성하였다. 모델C는 가열기가 중앙에 내장되어 있기 때문에 보다는 많은 2856개의 절점과 2816개의 요소를 생성하였다. 각 모델의 전열선 부분은 열전달 계수 값이 적기 때문에 평면으로 단순화하였으나 모델C의 경우는 가열기장착위치 및 방법을 실험과 동일하게 하였다. 경계조건으로는 모델A와 모델B는 하부의 가열부분에 200℃의 온도를 입력하였으며, 모델C는 중앙부에 가열기를 경계조건으

로 하여 200℃를 각각 절점에 입력하였다. 또한 각각의 요소에는 자연대류 열전달 계수 $5.1 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{℃}$ 값을 입력하였다⁴⁾.

주위공기의 온도는 24℃를 기준으로 하여 모델A, 모델B, 모델C의 요소에 동일하게 입력하였으며, 유동조건은 시간에 따라 열전달계수가 변하지 않는 정상상태로 가정하여 해석하였다.

5. 실험장치 및 방법

전기가열식 천공기의 신뢰성 확인 실험은 첫째 전기가열식을 사용했을 때 최적으로 정확하고 안정되게 천공 작업이 가능한가 또한 향후 천공크기와 간격의 조절이 용이하고 작업이 편리한가에 대해 전기가열식 천공기를 시제작하여 농업용 폴리에틸렌 필름을 양산하는 방법과 동일하게 작업을 하면서 신뢰성을 평가하였다.

또한 전기 가열식 천공부의 가열부 및 주위온도분포를 확인하기 위해 Fig. 5와 같은 실험 장

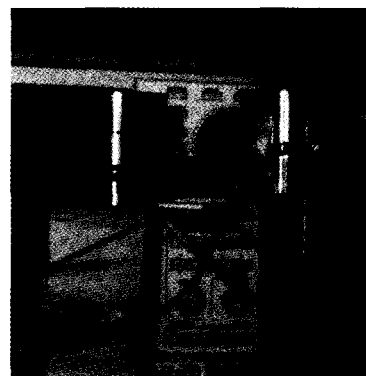
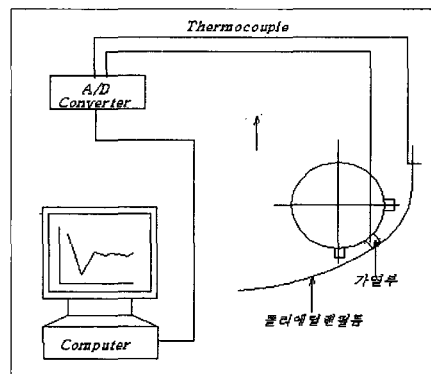


Fig. 5. Schematic diagram & photograph of temperature measurement

치에 의해 온도분포를 확인하였다.

가열부에서의 온도분포 목적은 농업용 폴리에틸렌 필름의 용점값을 측정하여 가열에 따른 필요 이상의 전력을 낭비하지 않기 위해서이고 가열부 주변의 온도분포 측정은 농업용 폴리에틸렌 필름이 가열부의 온도에 따라 변형이 될 수 있으므로 변형되지 않는 온도 기준을 확보하기 위해서다.

온도측정 방법은 $\phi 0.25\text{mm}$ 의 Alumel-chromel 형 열전대를 A/D변환기의 Terminal panel table을 통해 데이터를 취득하여 Data Acquisition System을 이용하여 컴퓨터에 저장한 후 온도값을 처리하였다.

6. 결과 및 고찰

6.1. 유한요소해석 및 실험결과

가열부의 최적형상 및 가열온도를 산출하는데 실험에 따른 소요시간 및 반복회수를 줄이기 위해 Fig. 6과 같은 유한요소 해석을 이용하였다.

해석결과 모델 A와 B는 하부에서 200°C 로 가열하였을 때 모델 A의 가열부 상부 온도는 130°C 로 나타났고 모델 B의 상부 온도는 140°C 로 나타났다.

또한 모델C는 가열기가 중앙에 내장되어 있어 상부 최고온도가 156°C 로 되었다. 이러한 이유는 모델A가 모델B 대비 두께가 4mm 정도 더 두껍기 때문이라고 판단되며, 모델C는 가열기가 중앙부에 내장되어 있기 때문에 열전달이 효과적인 것으로 판단된다. Fig. 7의 실험결과에서도 상부의 온도가 모델 A의 경우는 128°C , 모델B의 경우는 134°C , 그리고 모델C는 154°C 로 나타났으며 온도분포도 유한요소 해석의 값과 동일한 경향을 나타내었다.

따라서 동일 가열량 이면 모델B의 경우 모델 A대비 상부온도가 6°C 정도 높고, 모델 C의 경우 모델 A 대비 무려 26°C 가 높게되므로 가열부 형상의 시제작 사양으로는 모델 C를 적용하여 평가하였다.

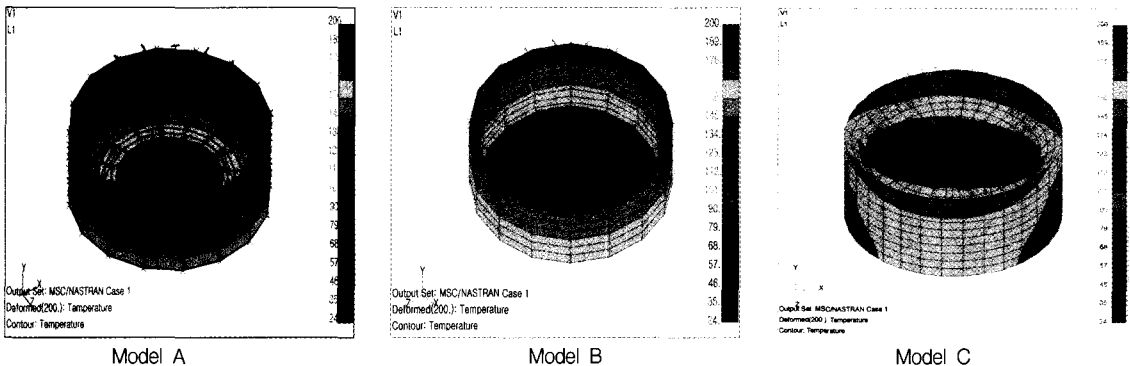


Fig. 6. Temperature contours of MSC/Nastran

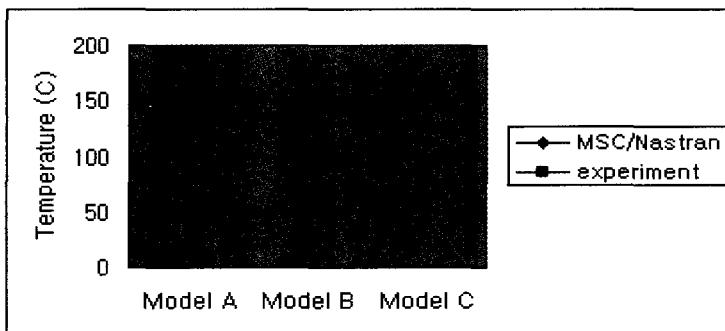


Fig. 7. Comparison of temperature of top edge of each model

6.2. 전기 가열식 천공기의 신뢰성

전기가열식의 천공기의 신뢰성을 평가하기 위해 가열컵을 모델 C를 장착하여 시제작한 전기가열식 천공기를 농업용 폴리에틸렌 필름의 양산 작업 방법과 동일하게 가동시켜 작업한 결과 사용시간이 경과하여도 불량률 발생이 기계식 천공법 보다 낮게 나타났으며, 기계식 천공법의 경우 칼날이 사용 시간이 경과할 수록 무디어져 천공면이 깨끗하지 못하였으나 전기가열식 천공기의 경우는 사용 시간과 관계없이 천공면이 일정하고 기계식의 경우처럼 칼날을 교환해야 할 필요성이 없어 관리에 소요되는 비용 및 시간을 절감할 수가 있을 것으로 생각된다.

가열부 최적온도는 가열기 용량을 10W-20W 까지 변화시키면서 가열부를 단품 실험한 결과 가열부 온도가 110℃ 정도면 순간 천공이 가능하였으나 폴리에틸렌 필름이 이중구조일 때에도 천공은 순간적으로 가능하여야 하므로 최적온도는 130℃ 정도가 적합하다고 판단된다.

또한 가열부 온도 상승에 따른 천공부 주변의 농업용 폴리에틸렌 필름의 열변형은 폴리에틸렌의 이송 속도가 2m/sec 이상 되며 공기의 비열값이 낮으므로 육안상 변형이 나타나지 않아 전체적으로 기계식 천공기보다도 신뢰성이 우수하였다.

7. 결 론

신뢰성이 있고 설비 유지비용이 저렴한 농업용 폴리에틸렌 필름 천공장치 개발을 위하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 농업용 폴리에틸렌 필름 천공기는 칼날에 의한 절단방식보다 전기가열식의 천공기를 개발하여 사용할 경우 사용 시간이 경과하여도 깨끗한 천공면을 얻을 수 있었고 부품 교환에 따른 비용 및 시간을 절감할 수 있어 생산성을 향상할 수 있었다.

2) 가열부 형상에 따른 열전달 효과는 모델 A 보다는 슬림(slim)형으로 개발한 모델 B의 형상도 우수하였으나, 가열기를 중앙부에 내장시키는 모델 C의 방법이 가장 효과적이었다.

3) 전기가열식 천공기 개발을 위해 가열부를 CAE를 이용하여 온도분포를 예측한 결과 실험값과 동일한 경향을 나타내었으며,

4) 실험에 소요되는 시간 및 반복 회수를 줄일 수 있어 전기 가열식 천공장치의 효율 개선에 효과적이었다.

감사의 글 : 이 논문은 1998년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) J. P. Holman, Heat transfer. McGraw-Hill, 6th Edition, 1997.
- 2) J. I. Kim, J. B. Park and J. H. Kim, Development of Hole cutter system of Agricultural Polyethylene film, The International journal of chosun university, Vol. 1, No. 2, 1998.
- 3) R. A. Wirtz and W. M. Cauliffe, Experimental modeling of convection downstream from an electronic package row, Journal of electronic packaging, Vol. 111, September 1989.
- 4) D.e. Arvizu and R.j. Moffat, Experimental heat transfer from an array of heated cubical element on an adiabatic channel wall, Thermo science. Div. report—MT-33, department of mech. Eng., stanford university, stanford, california, 1981.
- 5) E. M. Sparrow, J. E. Neithammer and A. Chaboki, Heat transfer and pressure drop characteristics of arrays of rectangular modules encountered in electronic equipment, Int. J. Mass transfer, Vol. 25, No. 7, pp. 961~973, 1982.
- 6) Aung, W., Fletcher, L. S. and Semas, V., Developing laminar free Convection between Vertical flat plate with symmetric Heating, Int. J. heat mass transfer, Vol. 104, pp. 501~507, 1972.
- 7) Kang, B. H. and Jaluria, Y. Natural convection heat transfer characteristics of a protruding thermal source located on horizontal and vertical surface, Int. J. Heat mass transfer, Vol. 33, No. 6, pp. 1347~1357, 1990.
- 8) MSC/Nastran User's manual, V2.1, The MacNeal Shwendler Corp. USA, 1995.