

## 연속주조 몰드의 열해석

이종선, 이현곤\*(대전대학교)

# Thermal Analysis of Continuous Casting Mold

Jong-Sun Lee, Hyun-Gon Lee\*

### Abstract

This study is object to thermal analysis of continuous casting mold. A two-dimensional transient finite element model was developed to compute the temperature distribution and stress behavior for continuous casting mold. For thermal analysis using analysis result from FEM code. In other to thermal analysis of continuous casting mold, many variables such as casting speed, cooling condition, film coefficient, convection and load condition are considered.

Keywords : Continuous Casting Mold(연속주조 몰드), Thermal Analysis(열해석), Convection(대류열복사), Film Coefficient(막 열전도계수), Broad Face(장편), Narrow Face(단편)

### 1. 서 론

금속의 용해성을 이용하여 고온에서 용해된 금속을 준비된 형틀에 주입하여 형상을 만드는 주조는 역사적으로도 오랜동안 이용된 광범위한 제조공정이다. 주물에 사용되는 재료들은 주조가 쉽고 충분한 강도와 경제적인 재질로서 주철, 주강, 구리합금, 알루미늄합금, 아연합금 등이 있다. 특히 주철은 가장 경제적이고 주조성이 우수하며 강도면에서 자동차, 각종 기계의 몸체, 공작기계, 농업용 기계 등에 널리 사용되고 있다. 주조된 주물은 결함이 없고 설계된 기능을 충분히 발휘해야 하며 또한 기계부품으로 설계된 제품에는 강도 및 경도 등과 같은 기계적인 성질이 요구범위에 있어야 한다.

최근 주조공정의 합리화, 기계화 등으로 품질의 향상과 가격의 절감으로 주물공업은 발전을 거듭하고 있다. 특히 최근 높은 정밀도와 강도를 고려한 특수주조법이 개발되면서 원심력을 사용하는 원심주조법

(centrifugal casting), 용융금속을 가압하는 다이캐스팅(die casting), 정밀주조법에서 주형을 제작하는 방법에 따라 셸주형법(shell molding process), 인베스트먼트 주조법(investment casting), 주조중 공기에 의해 기계적 성질의 저하를 방지하기 위해 용해할 때 가스를 제거하고 결함을 방지하기 위한 진공주조법(vacuum casting) 등이 실제 많은 공정에서 사용되고 있다.

연속주조(continuous casting)시 반드시 필요한 몰드(mold)는 국내 제철 제강업체에서 활발히 사용되고 있으나 국내의 기술여건의 미숙함 때문에 아직 설계와 제작을 외국기술에 의존하고 있는 실정이다.

본 논문에서 고려한 연속주조는 특수주조에 속하며 연속적으로 위에서 공급되는 용탕이 장편(broad face)과 단편(narrow face)으로 조립된 몰드에서 동일한 조건으로 냉각되는 균질한 잉곳(ingot)을 제품의 크기에 구애받지 않고 생산할 수 있으며 가공비용이 저렴하다. 또한 잉곳 중에 편석이 적고 수축공이 없는 미세조직을 얻을 수 있는 생산성 높은 제조방식이

다. 이 방식은 주물의 용융점에 직접 접촉되어 고온으로 가열되는 몰드를 내부에서 순환하는 냉각수에 의해 일정한 온도로 유지시켰을 때 내부의 열변형 및 열응력 계산을 위하여 접촉면의 온도분포, 시간에 따른 잉곳의 이동량과 온도분포를 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS로 해석하고 각 임계점들의 이상 온도분포를 구해 이를 몰드 파손 및 제품결함을 검증하여 연속주조 몰드의 설계에 응용하고자 한다.

## 2. 유한요소 해석과 관련이론

### 2.1 유한요소 해석에서 ANSYS의 특징과 기능

구조해석용 범용 유한요소 해석 프로그램으로는 ADINA, ANSYS, NASTRAN, SUPER-SAP 등이 널리 사용되고 있다. 이중 범용 유한요소 해석 프로그램으로 공학적 문제를 해석하고 사용자가 직접 해석 과정을 대화식 인터페이스를 제공하는 ANSYS가 널리 사용되고 있다.

ANSYS는 structure, thermal, electronic, magnetic 및 선형, 비선형 등의 문제를 수행하는데, preprocess, solver, postprocess의 모듈로 구성되어 있다. 또한 최적화의 일괄처리가 가능하며 해석결과를 정적, 동적으로 출력할 수 있으므로 여러 형태의 특성이 동시에 작용된 경우 즉, Thermal-Stress Analysis, Electro-Magnetic, Acoustics, Piezo-electric 등의 문제도 해석할 수 있다. 이러한 특성은 다양한 산업분야에 적용될 수 있는 유연성을 지니며 항공우주, 자동차공학, 가전제품, 전자, 원자력, 기계, 조선분야 등 응용범위가 매우 넓다.

본 논문에 사용된 ANSYS 프로그램의 과도해석(transient analysis)은 구조 또는 소음해석에서 온도 자기장과 같은 시간에 관련된 자유도를 고려한 해석방법으로서 이를 위해서는 초기조건이 가장 중요한 요소로서 주어져야만 한다.

### 2.2 열해석 이론

본 해석을 위해서는 먼저 각 요소의 행렬을 구하여 평형방정식을 구성한 후 연립방정식의 해를 구한다. 이에 사용된 기본식은 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q_a\} \quad (1)$$

여기서 [C]는 비열 matrix, [K]는 계수 matrix, {T}는 절점에서의 온도, {\dot{T}}는 자유도 값의 시간율, {Q<sub>a</sub>}는 작용하는 열의 흐름을 나타낸다.

이 관계식을 해석에 적용하기 위해서 시간의 증감을 고려하여 일반화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\{T_{n+1}\} \\ &= \{T_n\} + (1 - \theta) \Delta t \{\dot{T}_n\} + \theta \Delta t \{\dot{T}_{n+1}\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 과도적분 변수  $\theta$ 는 Crank-Nicolson의 방법에 따라 보통 1/2값을 취한다.

그리고 식 (1)은 시간  $t_{n+1}$ 에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q_a\} \quad (3)$$

식 (3)의 {\dot{T}\_{n+1}}를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{\theta \Delta t} [C] + [K]\right)\{T_{n+1}\} \\ &= \{Q_a\} + [C]\left(\frac{1}{\theta \Delta t}\{T_n\} + \frac{1-\theta}{\theta}\{\dot{T}_n\}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

온도에 의존하는 물성치는 요소별로 상승한다. 이때의 온도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$T_c = \{N_o\}^T \{T\} \quad (5)$$

여기서 T<sub>c</sub>는 물성치 값의 증감이 끝난 상태의 온도, {N<sub>o</sub>}는 요소의 좌표에서 증가된 형상계수, {T}는 절점의 온도이다.

## 3. 몰드설계 및 해석

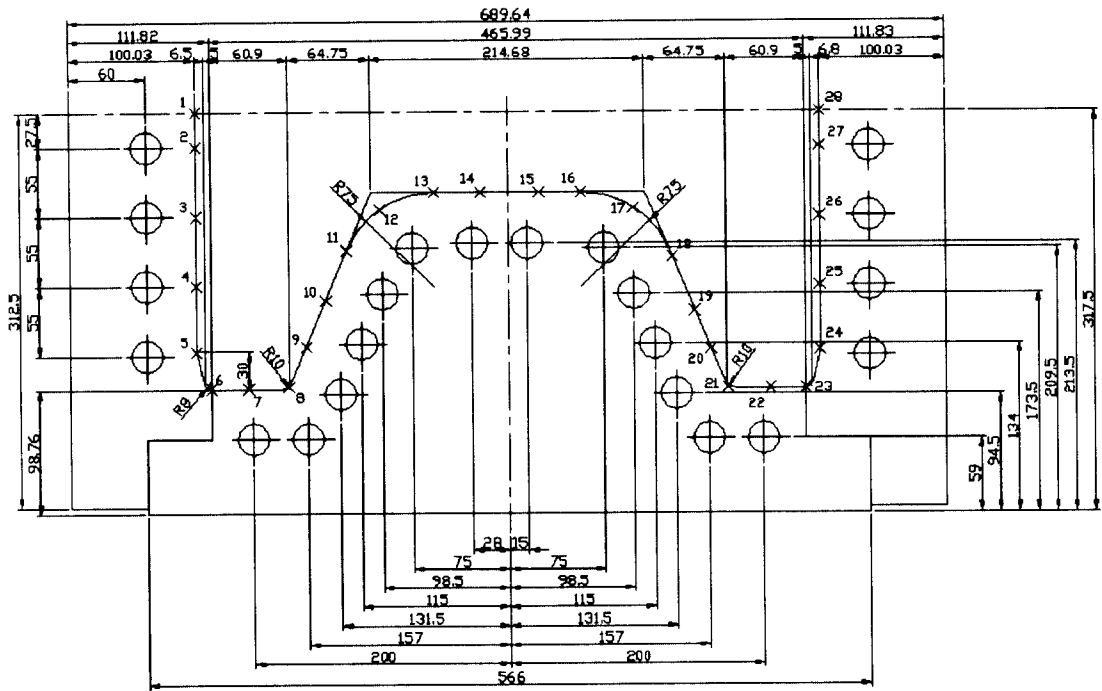


Fig. 1 Simple model for thermal analysis of continuous casting mold

유한요소법 해석 프로그램을 사용하기 위해서는 기하학적 형상의 모델과 모델의 물성치가 입력되어야 한다. 그리고 구조물은 실제 조건에 부합되는 경계조건, 하중조건, 절점, 요소와 같은 기본자료를 토대로 해석이 수행된다. 본 연속주조 몰드는 사용되는 몰드의 결합도에서 해석의 간소화를 위하여 몰드 윗부분에서 100mm 떨어진 곳의 1/2 이상화된 단면을 취하였다.

높은 주조온도를 고려하여 내부에는 40°C(313K)의 냉각수가 총 44개의 냉각수관에 흐르고 있으며 실제 현장에서 이용되고 있는 작업환경을 고려하여 주조속도는 0.8m/min, 용탕의 온도는 1555°C(1828K)를 택하였다.

### 3.1 몰드의 모델링

Fig. 1에서 유한요소 해석을 위한 단순화된 모델의 실제 치수를 나타내고 있다. 여기서 냉각수 관과 용탕의 냉각을 위한 조립된 몰드의 윗부분에서 100mm 떨어진 곳에서의 단면이다. 사용된 모델에는 해석을 위하여 Thermal Solid Quad 8Node (Plane77), 4253

개의 요소와 13198개의 절점을 사용하였다. 그리고 이 절점들 가운데 해석결과로 사용될 몰드 표면의 절점을 Fig. 1에서 1~28까지 표시하였다.

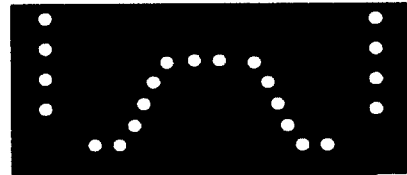


Fig. 2 Section area of molten steel and mold

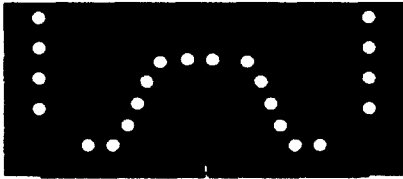


Fig. 3 Element of molten steel and mold by mesh generation

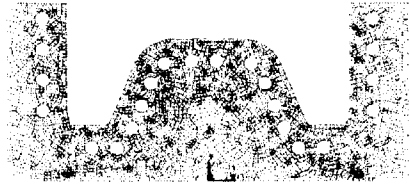


Fig. 6 Node point of mold section



Fig. 4 Mold section by mesh generation



Fig. 7 Load condition of thermal analysis

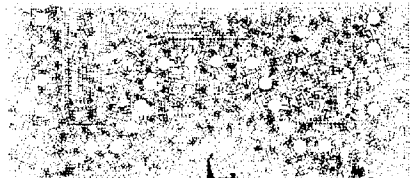


Fig. 5 Node point of molten steel and mold

Fig. 2 ~ Fig. 6까지는 해석의 기본이 되는 면적, 요소, 절점의 생성을 나타낸 것이고 Fig. 7과 같은 실제와 유사한 하중조건을 입력한다. 냉각수 관에는 40℃의 냉각수가 항상 일정한 온도를 유지하면서 순환한다고 생각하여 일반 온도하중조건을 적용시켜 주황색의 하중조건이 표시된 것이고 그림에서 왼쪽과 오른쪽 그리고 밑 면에는 대류 열복사(convection)하중조건으로 일반 대기온도인 25℃와 막 열전도계수(film coefficient) 0.014를 적용시킨다.

그리고 몰드부분과 초기 용탕의 온도를 절점에 각각 25℃와 1555℃를 작용시켜 용탕이 주입되어 초기 냉각되는 해석을 위해 용탕의 주조속도인 0.8m/min을 시간으로 분석하는 몰드 윗부분을 0초로 하고 최종

몰드 밑부분까지 도달하는 52.5초까지를 각각 7.5초로 나누어 해석하였다.

본 논문에서 사용된 온도는 모두 단위환산을 위하여 절대온도를 해석에 적용시켰다.

### 3.2 재료의 물성치

과도해석을 수행하기 위한 기본적인 물성치로는 밀도, 비열, 열전도계수가 있으며 이중 열전도 계수는 온도에 따른 편차가 심하여 온도분포에 따른 정확한 값을 입력하였다.

구리의 밀도 (25℃) :  $\rho = 8933 \text{ kg/m}^3$ ,

구리의 비열 (25℃) :  $C_p = 385 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,

철의 밀도 (25℃) :  $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$ ,

철의 비열 (25℃) :  $C_p = 447 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,

Table 1 Thermal coefficient of Cu & Fe

| Material | Temp (K) | W/m·K | Temp (K) | W/m·K |
|----------|----------|-------|----------|-------|
| Cu       | 273 K    | 401   | 300 K    | 398   |
|          | 400 K    | 392   | 500 K    | 388   |
|          | 600 K    | 383   | 700 K    | 377   |
|          | 800 K    | 371   | 900 K    | 364   |
|          | 1000 K   | 357   | 1200 K   | 342   |
| Fe       | 273 K    | 83.5  | 300 K    | 80.3  |
|          | 400 K    | 69.4  | 500 K    | 61.3  |
|          | 600 K    | 54.7  | 700 K    | 48.7  |
|          | 800 K    | 43.3  | 900 K    | 38.0  |
|          | 1000 K   | 32.6  | 1200 K   | 28.2  |

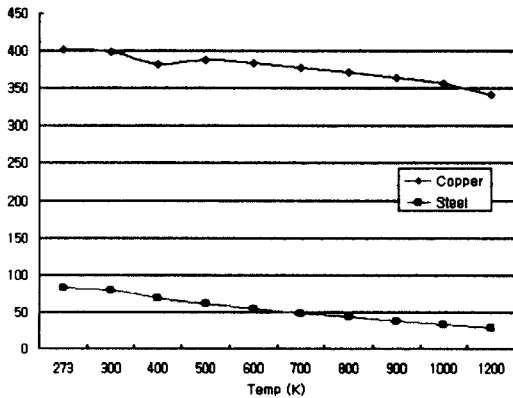


Fig. 8 Thermal coefficient change by temperature change

### 4. 결과 및 고찰

본 논문에서 시간에 의한 몰드와 용탕의 접촉부분의 온도분포를 보면 Fig. 9 ~ Fig. 15 와 같다.

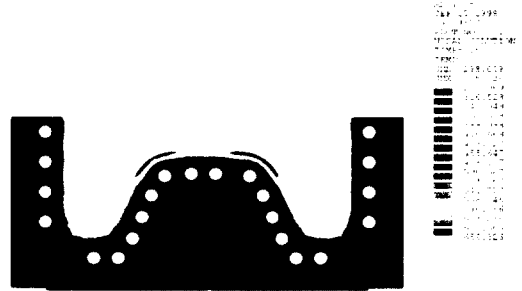


Fig. 9 Temperature distribution at 7.5 sec.

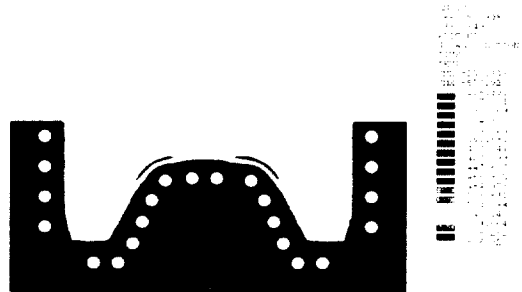


Fig. 10 Temperature distribution at 15 sec.

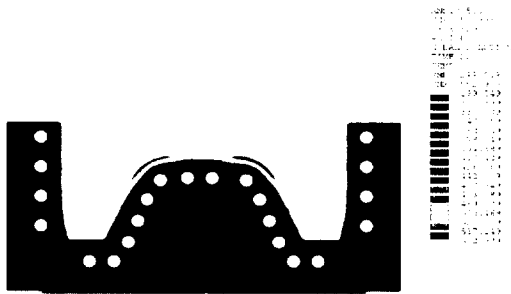


Fig. 11 Temperature distribution at 22.5 sec.

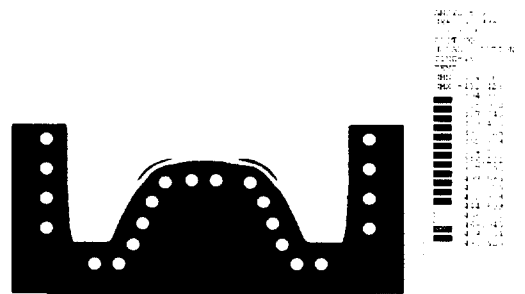


Fig. 14 Temperature distribution at 45 sec.

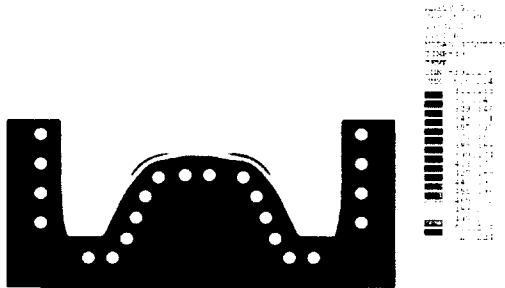


Fig. 12 Temperature distribution at 30 sec.

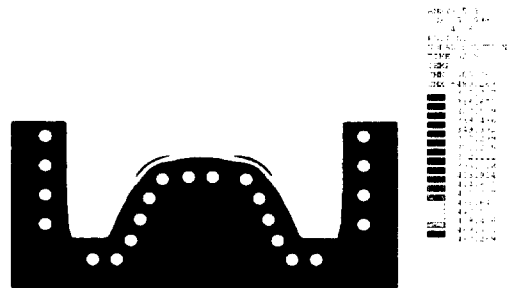


Fig. 15 Temperature distribution at 52.5 sec.

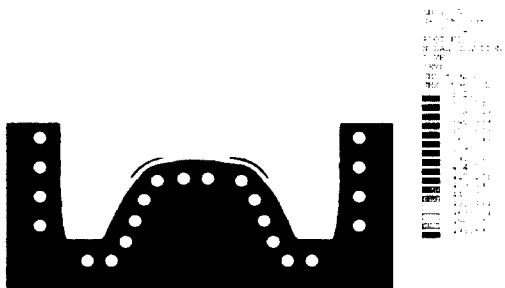


Fig. 13 Temperature distribution at 37.5 sec.

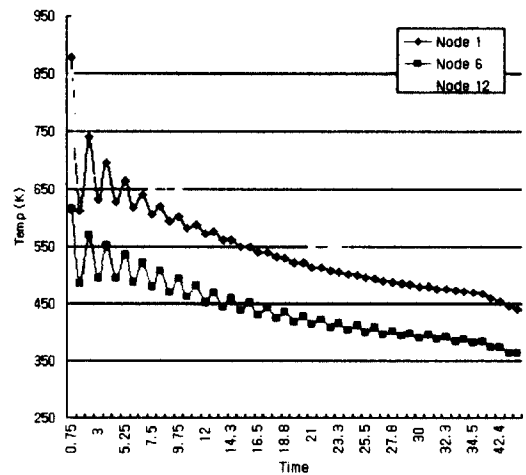


Fig. 16 Temperature change at node 1, 6, 12

Fig. 9~Fig. 15까지 그림 왼쪽의 가장 높은 온도 분포가 시간에 따라 점차적으로 줄어드는 것을 볼 수 있으며 해석절점 중 1, 6, 12번 절점의 시간에 따른 온도변화를 그래프로 나타내면 Fig. 16과 같이 비선형적 온도 감소를 볼 수 있다. 또한 몰드 윗부분에서 100mm 떨어진 부분, 즉 7.5초에서 표면의 온도를 보면 Table 2과 같이 온도가 분포하며 이를 그래프로 나타내면 Fig. 17과 같다.

Table 2 Temperature distribution of mold surface

|         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |
| 605.819 | 606.008 | 606.168 | 607.354 | 565.058 | 479.681 | 568.392 |
| 8       | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      |
| 487.169 | 581.406 | 591.535 | 633.891 | 652.102 | 638.645 | 603.469 |
| 15      | 16      | 17      | 18      | 19      | 20      | 21      |
| 608.498 | 650.092 | 653.204 | 637.644 | 600.039 | 579.547 | 488.730 |
| 22      | 23      | 24      | 25      | 26      | 27      | 28      |
| 569.302 | 481.087 | 561.746 | 600.873 | 603.554 | 603.351 | 603.520 |

Fig. 17은 Fig. 1에서 나타난 절점 1~6까지는 왼쪽 단편, 7~22까지는 장편, 그리고 23~28까지는 오른쪽 단편의 해석위치에서 온도분포를 나타낸 값이다.

## 5. 결 론

연속주조 몰드에 대하여 유한요소해석 방법을 이용하여 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 몰드 윗부분으로부터 100mm 부분의 1/2단면에서 온

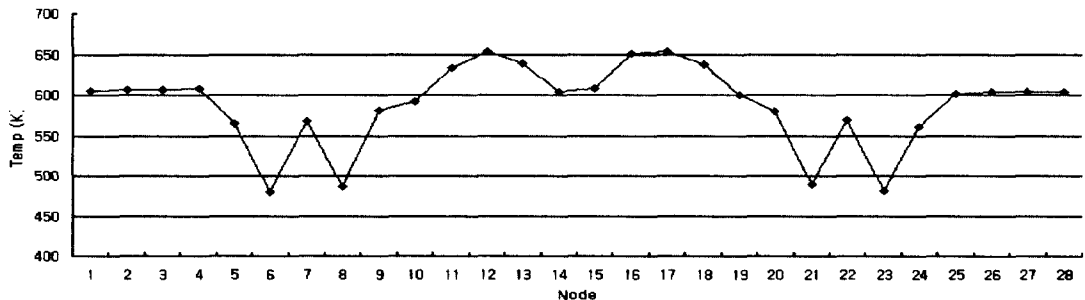


Fig. 17 Temperature distribution of mold surface

도분포는 구리의 용융온도인 1083.4℃ 보다 낮은 것을 알 수 있으며 비교적 좌우 대칭의 온도가 연속주조 몰드의 표면에 분포함을 알 수 있다.

- 2) 몰드 표면에서의 온도는 용탕의 초기 최대온도가 작용하는 연속주조 몰드의 윗부분에 접촉을 시작하여 밑부분까지 이동, 몰드로부터 이탈하는 52.5초 동안 비선형적 온도감소가 일어나는 것을 알 수 있다.
- 3) 상기 결과는 열해석시 온도분포하중으로 작용시켜 표면 각 부분에 작용하는 응력해석의 기본 자료로 활용된다.
- 4) 온도분포에서 6번 절점과 12번 절점의 최대 온도차이를 고려할 때 균일한 온도분포를 위해서 냉각수관의 위치를 재검토하여 설계를 한다면 몰드의 수명연장과 원활한 작업을 수행할 수 있다.

## 참고문헌

- 1) 김동원, 기계공학잡, 청문각, 1997.
- 2) J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, 1990.
- 3) T. R. Chandrupatla and A. D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice Hall, 1991.
- 4) ANSYS User's Manual Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1996.
- 5) ANSYS Thermal Analysis Guide Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1994.
- 6) James Shackelford and William Alexander, Material Science & Engineering Hand Book, CRC Press, 1994.