

## 연속주조 몰드의 구조해석

원종진\*, 이종선\*\*, 홍석주\*\*\*

### Structural Analysis of Continuous Casting Mold

Chong-Jin Won\*, Jong-Sun Lee\*\*, Suck-Ju Hong\*\*\*

#### Abstract

The objective of this study is structural analysis of continuous casting mold. A two-dimensional finite element model was developed to compute the temperature distribution, thermal stress and thermal strain behavior for continuous casting mold. Structural analysis was made using thermal analysis result, utilizing transient analysis of ANSYS. This structural analysis results, many variables such as casting speed, cooling condition, film coefficient, convection and load condition are considered.

**Key Words :** Continuous Casting Mold(연속주조 몰드), Broad Face(장편), Narrow Face(단편), Structural Analysis(구조해석), Load Step(하중단계), Stress Distribution(응력분포)

### 1. 서 론

고온에서 용해된 금속을 준비된 형틀에 주입하여 형상을 만드는 주조는 활용범위가 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. 주물은 결함이 없고 설계된 기능을 충분히 발휘해야 하며 강도 및 경도 등

과 같은 기계적인 성질이 요구범위에 있어야 한다.

본 논문에서 고려한 연속주조(continuous casting)<sup>(1)</sup>에 대한 연구로는 연속주조시 발생하는 열영향에 대한 많은 연구<sup>(2-4)</sup>들이 수행되었으며, Cui Xiaochao 등<sup>(5)</sup>은 냉각수 압력과 온도의 영향을 받는 구리몰드에 대하여 응력과 변형률을 해석하였고, Selaries 등<sup>(6)</sup>은 연속주조시 공정의 최적화에 대하여 연구하였다. 연속주조는 특수주조에 속하며 연속적으로 위에서 공급되는 용탕이 장편(broad face)과 단편(narrow face)으로 조립된 몰드(mold)에서 동일한 조건으로 생각되는 균질한 잉곳(ingot)을 제품의 크기에 구

\* 국민대학교 기계·자동차공학부  
\*\* 대전대학교 기계설계공학과(jongsun@road.daejin.ac.kr)  
\*\*\* 조선대학교 기계공학과

애받지 않고 생산할 수 있으며 가공비용이 저렴하다. 또한 몰드에 용탕을 주입하는 도관이 항상 로보다 낮은 위치에 있어서 산화물이 생기지 않으므로 잉곳 중에 편석이 적고 수축공이 없는 미세조직을 얻을 수 있는 생산성 높은 제조방식이다. 연속주조는 높은 온도의 용탕에 직접 접촉되어 고온으로 가열되는 몰드를 내부에서 순환하는 냉각수에 의해 냉각시킬 때 몰드 내부의 열변형 및 열응력 계산을 위하여 접촉면의 온도분포, 시간에 따른 잉곳의 이동량과 온도분포, 또한 몰드의 온도분포에 대해서 발생하는 응력과 변형률을 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS<sup>(7-8)</sup>로 해석하고 각 임계점들의 온도분포를 구해 이를 구조해석<sup>(9-10)</sup>의 입력자료로 활용하여 연속주조 몰드의 기초설계에 응용한다.

## 2. 열해석과 구조해석의 이론

### 2.1 열해석 이론

본 해석을 위해서는 먼저 각 요소의 행렬을 구하여 평행방정식을 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 1/2값<sup>(8)</sup>을 취한다.

식 (1)은 시간  $t_{n+1}$ 에서 다음과 같다.

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

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. 이 때의 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.

### 2.2 응력해석 이론

주응력  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 다음의 연산을 통해서 구할 수 있다.

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_o & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_o & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_o \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

여기서  $\sigma_o$ 는 세 가지 값을 갖는 응력원소이다.

주응력  $\sigma_1$ 은 양의 값을 가지며  $\sigma_3$ 는 음의 값을 갖는다.

$\sigma_1$ 의 응력값은  $\sigma_1 - \sigma_2, \sigma_2 - \sigma_3, \sigma_3 - \sigma_1$ 의 절대치중 최대값을 갖는다. 즉,

$$\sigma_t = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (7)$$

von Mises의 항복응력 또는 등가응력으로 표시된  $\sigma_e$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_e = \left( \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{1/2} \quad (8)$$

## 3. 몰드설계 및 해석

본 논문에서 사용된 몰드는 해석의 간소화를 위하여 몰드 윗부분에서 100mm 떨어진 곳의 1/2 단면을 취하였다.

높은 주조온도를 고려하여 몰드 내부에는 40℃(313K)의 냉각수가 총 44개의 냉각수관에 흐르고 있으며 실제 현장에서 이용되고 있는 작업환경을 고려하여 주조속도는 0.8m/min, 용탕의 온도는 1,555℃(1,828K)를 택하였으며, 하중조건과 경계조건을 적용시켜 과도해석결과 얻어진 몰드의 온도분포를 토대로 구조해석을 실시하여 각 하중단계(load step)에서의 응력과 변형률을 구하였다.

### 3.1 몰드의 모델링

Fig. 1은 유한요소 해석을 위한 모델의 실제 치수를 나타내고 해석을 위하여 4,528개의 요소와 4,271개의 절점을 사용하였으며, 과도해석은 2D thermal solid (PLANE 55)를 사용하고 구조해석은 2D structure solid(PLANE42)를 사용하였다. 그리고 이 절점들 가운데 몰드 표면의 절점을 Fig. 1에 1~28까지 표시하였다.

Fig. 2~Fig. 4는 해석의 기본이 되는 면적, 요소, 절점의 생성을 나타낸 것이고 Fig. 5와 같은 실제와 유사한 하중조건을 입력한다. 냉각수 관에는 40℃의 냉각수가 항상 일정한 온도를 유지하면서 순환한다고 생각하여 일반 온도하중조건을 적용시켜 하중조건이 표시된 것이고, 대류

열복사(convection)하중조건으로 일반 대기온도인 25℃와 막 열전도계수(film coefficient) 0.014<sup>(6)</sup>를 적용시켰으며, 몰드 상부와 대칭인 특성을 고려하여 Fig. 5의 몰드 윗부분에는 구조해석시 대칭구속조건을 부여하였다.

그리고 몰드부분과 초기 용탕의 온도를 절점에 각각 25℃와 1555℃를 작용시켜 주입되어 초기 냉각되는 해석을

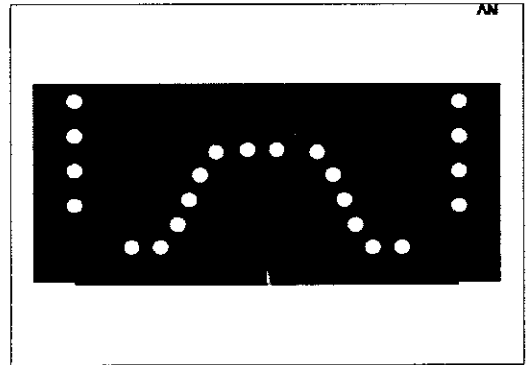


Fig. 2 Section area of molten steel and mold

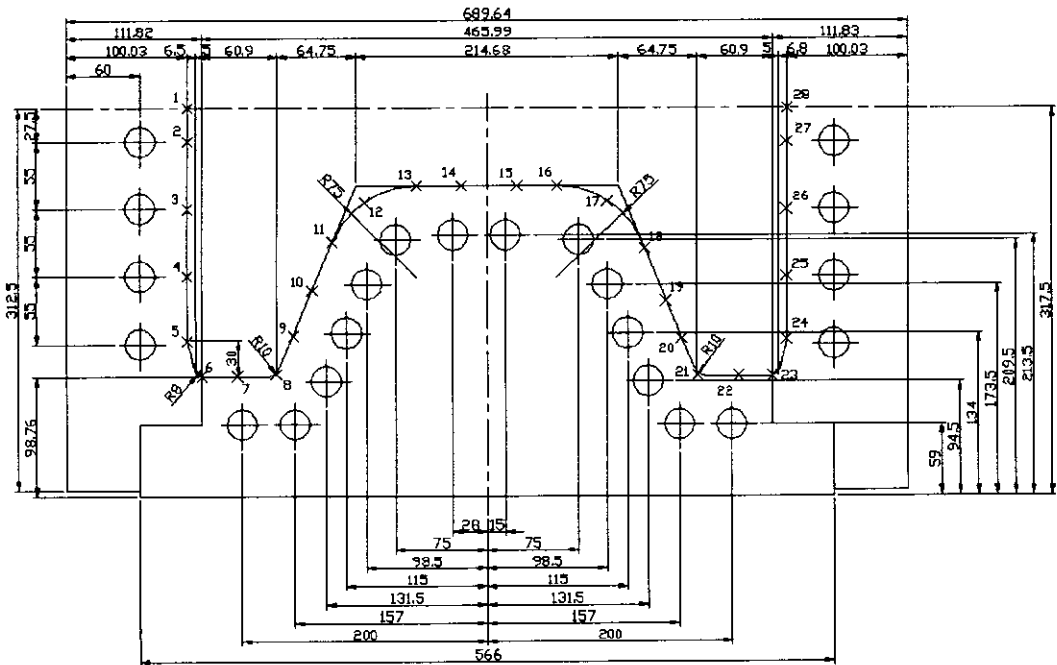


Fig. 1 Simple model of continuous casting mold

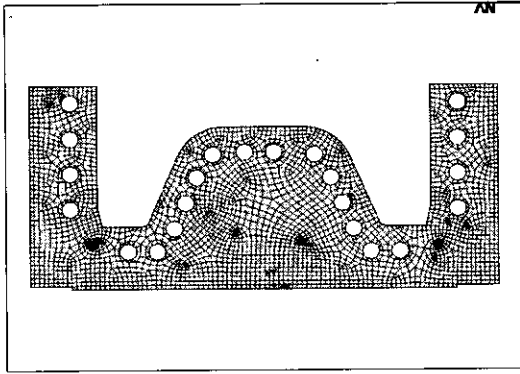


Fig. 3 Elements of mold by mesh generation

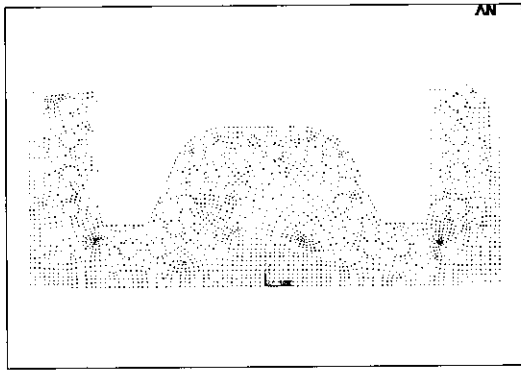


Fig. 4 Node points of mold section

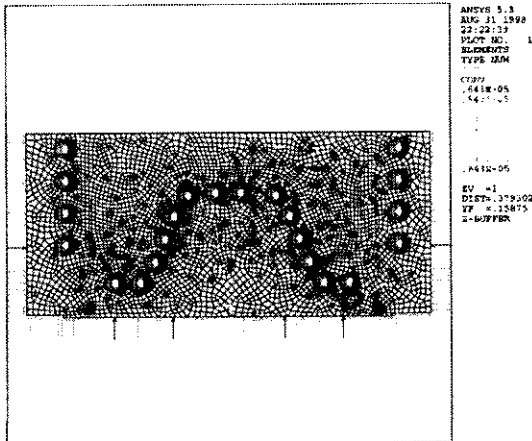


Fig. 5 Load conditions of structural analysis

위해 용탕의 주조속도인 0.8m/min을 시간으로 고려하여 몰드 윗부분을 0초로 하고 최종 몰드 밑부분까지 도달하는 52.5초까지를 각각 7.5초로 나누어 해석하여 각 절점에서의 온도를 구한 후 결과를 구조해석의 각 하중단계에 적용시켜 구조해석을 수행하였다.

### 3.2 재료의 물성치

과도해석을 수행하기 위한 기본적인 물성치<sup>(11)</sup>로는 밀도, 비열, 열전도계수 그리고 구조해석을 수행하기 위한 포아송비, 탄성계수, 열팽창계수가 고려되었다.

열전도 계수는 Table 2와 같으며 Fig. 6과 같이 온도에 따른 편차가 심하여 온도변화에 따른 정확한 값<sup>(11)</sup>을 입력하였다.

Table 1 Material properties of Cu & Fe

properties		units	values
Cu	density ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>	8,933
	specific heat (Cp)	J/kg.K	385
	Poisson's ratio ( $\nu$ )		0.34
	elastic modulus (E)	MPa	122.58
	coefficient of expansion ( $\alpha$ )	1/K	16.5E-6
Fe	density ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>	7,870
	specific heat (Cp)	J/kg.K	447
	Poisson's ratio ( $\nu$ )		0.28
	elastic modulus (E)	MPa	212.80
	coefficient of expansion ( $\alpha$ )	1/K	10E-6

Table 2 Thermal coefficient of Cu & Fe

Material	Temp (K)	W/m.K	Temp (K)	W/m.K
Cu	273K	401.0	300K	398.0
	400K	392.0	500K	388.0
	600K	383.0	700K	377.0
	800K	371.0	900K	364.0
	1000K	357.0	1,200K	342.0
	Fe	273K	83.5	300K
400K		69.4	500K	61.3
600K		54.7	700K	48.7
800K		43.3	900K	38.0
1000K		32.6	1,200K	28.2

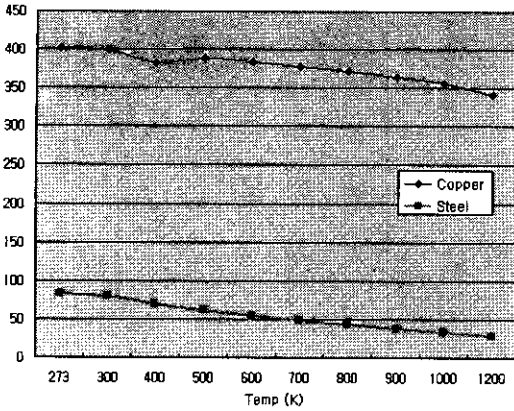


Fig. 6 Thermal coefficient change by temperature change

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 과도해석 결과

본 논문에서 과도해석에 의한 몰드와 용탕의 접촉표면에서 구조해석의 처음 하중단계로 작용될 7.5초일 때 온도분포는 Table 3과 같으며 몰드에서의 시간에 따른 온도분포는 Fig. 7과 같다. 과도해석<sup>(17)</sup>을 수행하는 동안 52.5초까지 7단계의 온도를 구하였으며 각각의 하중단계에 하중조건과 구조해석에 필요한 물성치와 적당한 요소로 바꾸어 입력된다.

### 4.2 구조해석 결과

과도해석의 결과인 몰드와 용탕에서의 온도를 하중조건으로 적용시켜 구조해석을 수행하였다.

Table 3 Temperature distribution of mold surface at 7.5sec (unit:K)

1	2	3	4	5	6	7
659.5	654.1	659.4	659.7	611.5	532.4	615.6
8	9	10	11	12	13	14
526.8	624.3	651.8	689.7	710.6	703.0	654.8
15	16	17	18	19	20	21
658.5	703.0	706.9	681.7	643.6	625.6	534.5
22	23	24	25	26	27	28
619.0	636.6	611.0	653.2	657.7	652.4	658.8

Table 4 Maximum thermal stress at each time step (unit: Pa)

time(sec)	values	time(sec)	values
7.5	23.716	37.5	19.992
15	22.638	45	19.208
22.5	21.658	52.5	18.522
30	20.776		

Fig. 8~Fig. 14는 온도영향으로 몰드에 발생하는 응력을 von Mises 항복조건식에 의해 나타낸 결과이며 Table 4와 같다.

최대응력은 내부 용탕의 팽창으로 인하여 몰드 외부에서 발생하며 이때 발생하는 최대, 최소응력은 시간이 지나면서 점차적으로 감소한다.

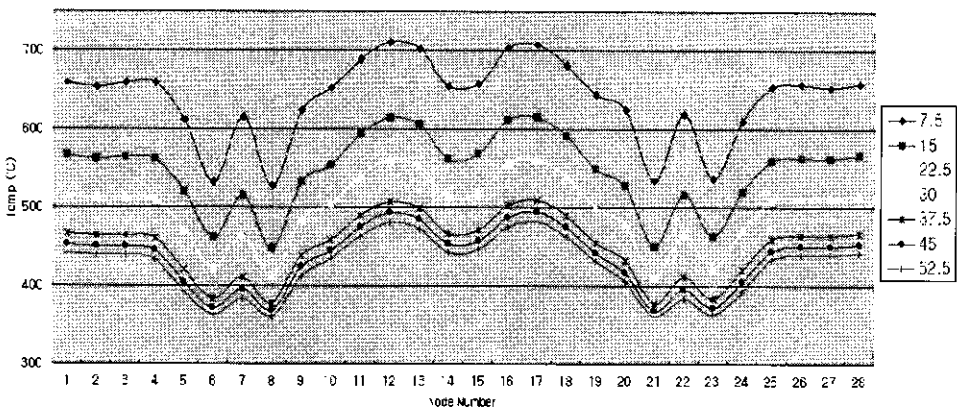


Fig. 7 Temperature distribution of mold surface

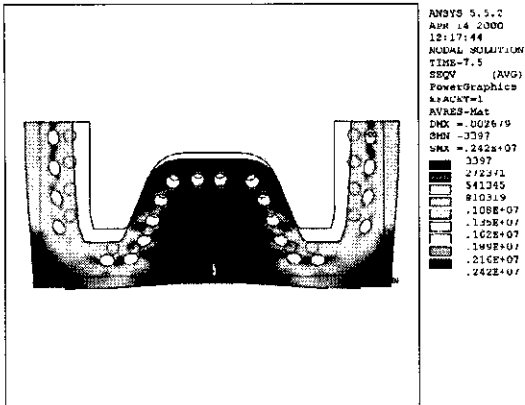


Fig. 8 Thermal stress distribution at 7.5 sec.

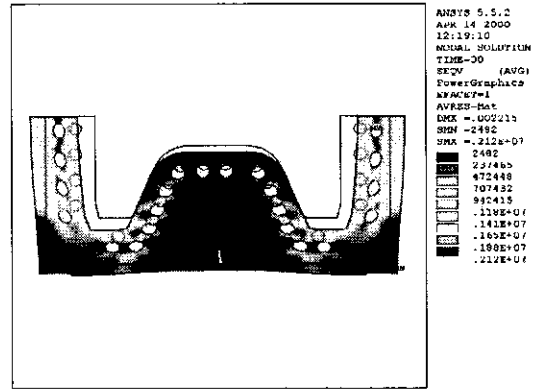


Fig. 11 Thermal stress distribution at 30 sec.

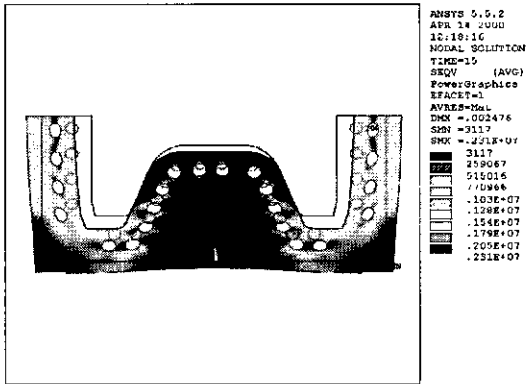


Fig. 9 Thermal stress distribution at 15 sec.

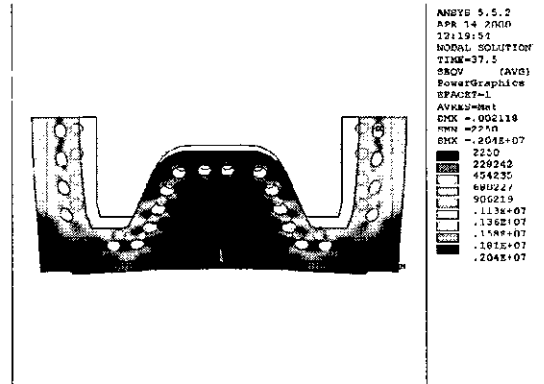


Fig. 12 Thermal stress distribution at 37.5 sec.

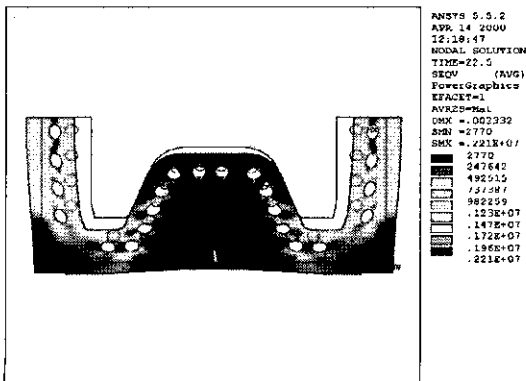


Fig. 10 Thermal stress distribution at 22.5 sec.

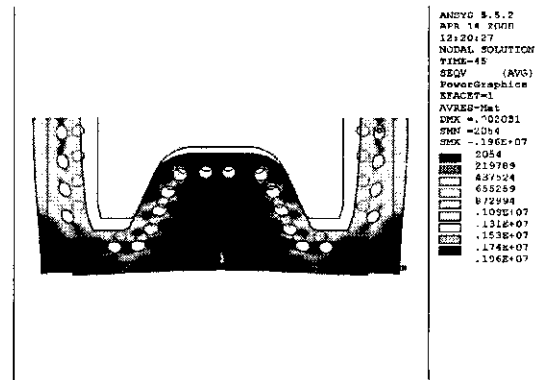


Fig. 13 Thermal stress distribution at 45 sec.

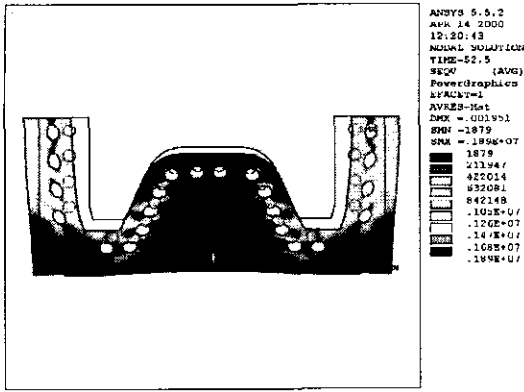


Fig. 14 Thermal stress distribution at 52.5 sec.

### 5. 결 론

연속주조 몰드에 대하여 유한요소해석 방법을 이용한 열해석의 결과를 입력자료로 활용하여 구조해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 몰드 윗부분으로부터 100mm 부분의 단면에서 온도분포는 좌우 대칭의 온도가 몰드 표면에 분포함을 알 수 있다.
- (2) 몰드 표면에서의 온도는 용탕이 몰드의 윗부분에 접촉을 시작하여 몰드로부터 이탈하는 52.5초 동안 비선형적 온도감소가 일어나는 것을 알 수 있다.
- (3) 최대응력이 발생하는 부분에서의 응력을 고려해보면 몰드 재질인 구리의 인장강도를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있다.
- (4) 고온에서 작업이 수행되기 때문에 구조해석에 의해 얻어진 열에 의한 변형량을 고려하여 몰드를 설계한다면 몰드의 수명연장과 정밀한 치수의 제품을 생산할 수 있다.

### 후 기

이 논문은 1999년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) 김동원, 기계공학법, 청문각, 1997.
- (2) B. Lally et al., "Finite Difference Heat Transfer Modeling for Continuous Casting", Metal. Trans., Vol.21, pp. 761~770, 1990.
- (3) S. K. Choudhary, D. Mazumdar and A. Ghosh, "Mathematical Modeling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel", ISIJ, Vol.33, No.7, pp. 764~774, 1993.
- (4) Chen Dongliang et al., "A Method of Modeling the Heat Transfer in Mushy Zone during Solidification of Steel", Steel and Iron, Vol.36, No.6, p. 22, 1996.
- (5) Cui Xiaochao, Wang Youhong and Suo Jingyun, "The Stress and Strain Analysis of Copper Mold in Coupling", The 2nd International Conference on Continuous Casting of Steel, Wuhan, China, pp. 451~453, 1997.
- (6) J. Selaries et al., "Continuous Casting Process Optimization through an Improved Thermal Modeling of the Cast Steel Products", 80th Steelmaking Conference, Chicago, pp. 272~273, 1997.
- (7) ANSYS User's Manual Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1996.
- (8) ANSYS Thermal Analysis Guide Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1994.
- (9) T. R. Chandrupatla and A. D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice Hall, 1991.
- (10) William Weaver, Jr. and R. Johnston, Finite Elements for Structural Analysis, PRENTICE HALL, INC., 1993.
- (11) James Shackelford and William Alexander, Material Science & Engineering Hand Book, CRC Press, 1994.
- (12) 이종선, 조동현, "연속주조 몰드의 열해석", 한국 공작기계학회지, Vol.8, No.6, pp. 43~49, 1999.