

# 연속주조 몰드의 구조해석

원종진(국민대학교), 이종선(대진대학교),  
홍석주(조선대학교), 이현곤\*(국민대학교 대학원)

## Structural Analysis of Continuous Casting Mold

Chong-Jin Won(Kookmin Univ.), Jong-Sun Lee(Daejin Univ.),  
Suck-Ju Hong(Chosun Univ.), Hyun-Gon Lee\*(Kookmin Univ.)

### Abstract

This study is object to structural analysis of continuous casting mold. A two-dimensional finite element model was developed to compute the temperature distribution, stress and strain behavior for continuous casting mold. For structural analysis using thermal analysis result from FEM code. In other to structural 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), Structural Analysis(구조해석), Convection(대류열복사), Film Coefficient(막 열전도계수), Broad Face(장편), Narrow Face(단편)

### 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 등과 같은 기계적인 성질이 요구범위에 있어야 한다.

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 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 내부의 열변형 및 열응력 계산을 위하여 접촉면의 온도분포, 시간에 따른 잉곳의 이동량과 온도분포, 또한 몰드의 온도분포에 대해서 발생하는 응력과 변형률을 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS로 해석하고 각 임계점들의 온도분포를 구해 이를 구조해석의 입력자료로 활용하여 연속주조 몰드의 기초설계에 응용하고자 한다.

### 2. 열해석과 구조해석의 이론

#### 2.1 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,  $\{Q_a\}$ 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 방



나타내고 해석을 위하여 4528개의 요소와 4271개의 절점을 사용하였으며, 과도해석은 2D Thermal solid (PLANE55)를 사용하고 구조해석은 2D Structure solid(PLANE42)를 사용하였다. 그리고 이 절점들 가운데 몰드 표면의 절점을 1~28까지 표시하였다.

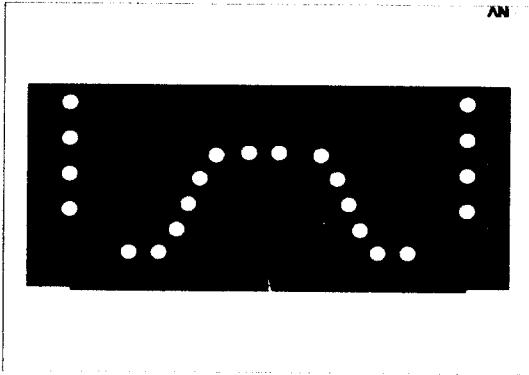


Fig. 2 Section area of molten steel and mold

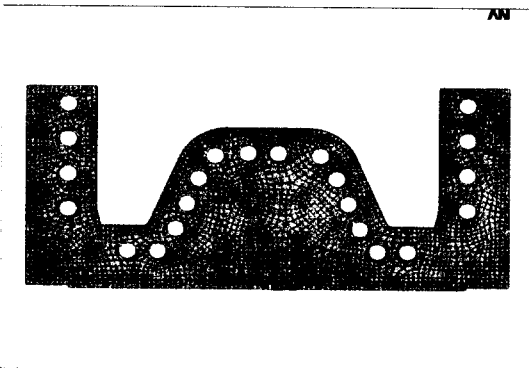


Fig. 3 Element of mold by mesh generation

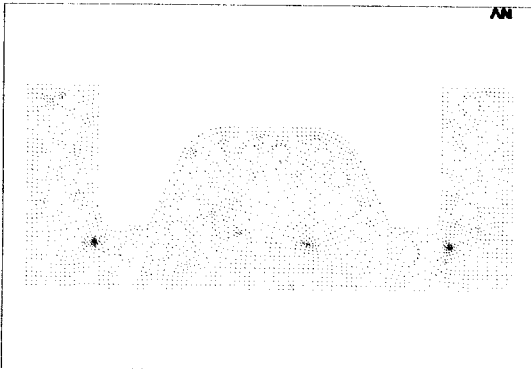


Fig. 4 Node point of mold section

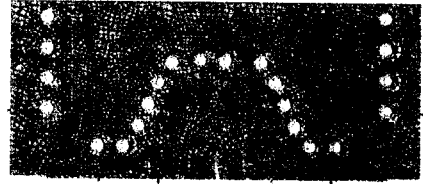


Fig. 5 Load condition of structural analysis

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) 0.014를 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 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 물성치로는 밀도, 비열, 열전도계수 그리고 구조해석을 수행하기 위한 포아송비, 탄성계수, 열팽창계수가 고려되었다.

또한 열전도 계수는 Table 2와 같으며 Fig. 6과 같이 온도에 따른 편차가 심하여 온도변화에 따른 정확한 값을 입력하였다.

Table 1 Material properties of Cu & Fe

구 분		단위	물성치
Cu	밀 도 $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	8933
	비 열 $C_p$	J/kg·K	385
	포아송비 $\nu$		0.34
	탄성계수 $E$	N/m <sup>2</sup>	122.583125×e6
	팽창계수 $\alpha$	1/K	16.5×e-6
Fe	밀 도 $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7870
	비 열 $C_p$	J/kg·K	447
	포아송비 $\nu$		0.28
	탄성계수 $E$	N/m <sup>2</sup>	212.804305×e6
	팽창계수 $\alpha$	1/K	10×e-6

Table 2 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

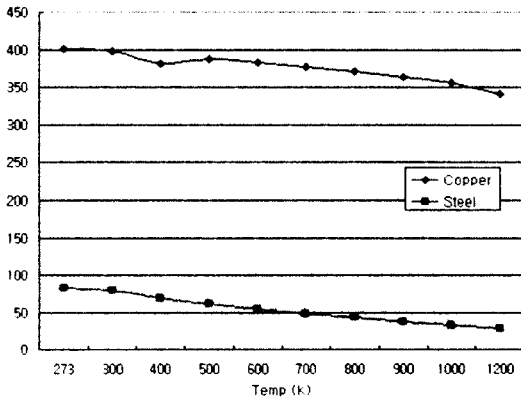


Fig. 6 Thermal coefficient change by temperature

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 과도해석 결과

본 논문에서 과도해석에 의한 몰드와 용탕의 접촉 표면에서 구조해석의 처음 하중단계로 작용될 7.5초일 때 온도분포는 Table 3과 같으며 몰드에서의 시간에 따른 온도분포는 Fig. 7과 같다. 과도해석을 수행하는 동안 52.5초까지 7단계의 온도를 구하였으며 각각의 하중단계에 하중조건과 구조해석에 필요한 물성치와 적당한 요소로 바꾸어 입력된다.

Table 3 Temperature distribution of mold surface

1	2	3	4	5	6	7
659.537	654.077	659.430	659.745	611.476	532.429	615.626
8	9	10	11	12	13	14
526.838	624.348	651.801	689.747	710.605	702.954	654.808
15	16	17	18	19	20	21
658.506	702.987	706.894	681.680	643.556	625.572	534.477
22	23	24	25	26	27	28
618.939	636.610	610.967	653.245	657.687	652.380	658.770

##### 4.2 구조해석 결과

과도해석의 결과인 몰드와 용탕에서의 온도를 하중 조건으로 적용시켜 구조해석을 수행하였다.

Fig. 8~Fig. 14는 온도영향으로 몰드에 발생하는 응력을 Von Mises 항복조건식에 의해 나타낸 결과이다.

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

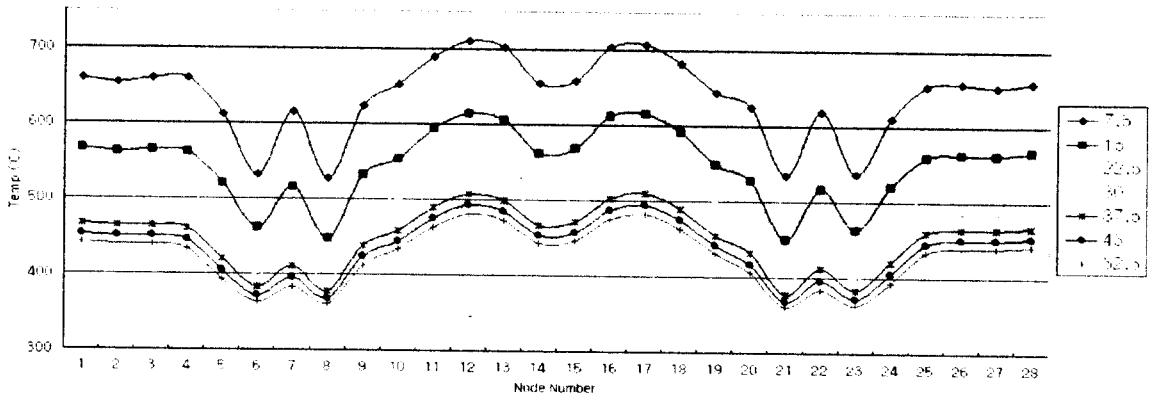


Fig. 7 Temperature distribution of mold surface

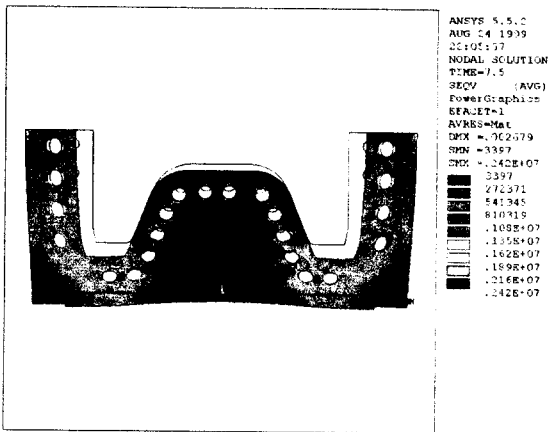


Fig. 8 Stress distribution at 7.5 sec.

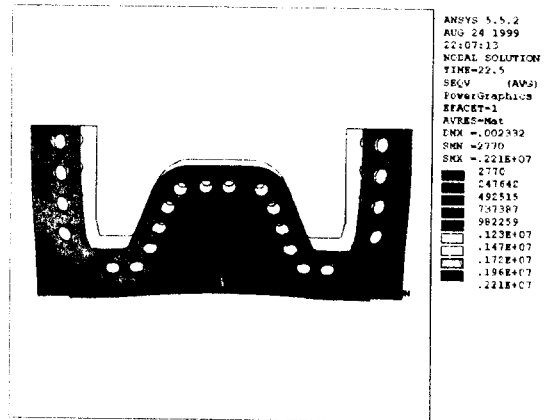


Fig. 10 Stress distribution at 22.5 sec.

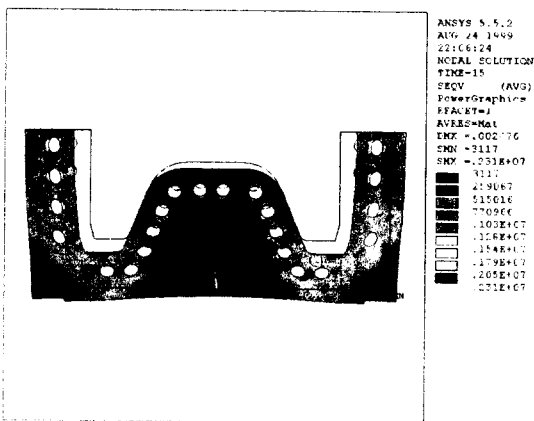


Fig. 9 Stress distribution at 15 sec.

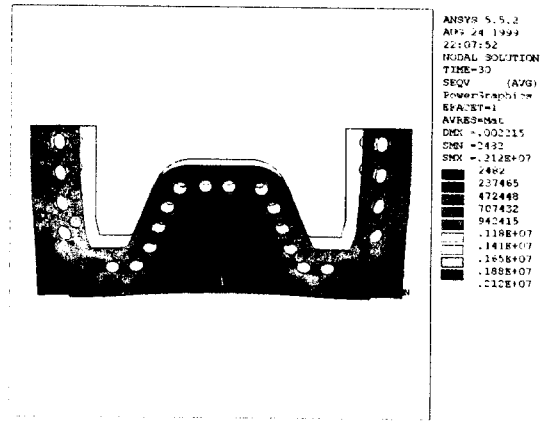


Fig. 11 Stress distribution at 30 sec.

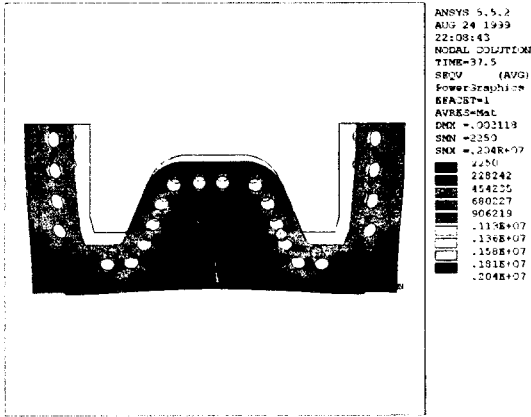


Fig. 12 Stress distribution at 37.5 sec.

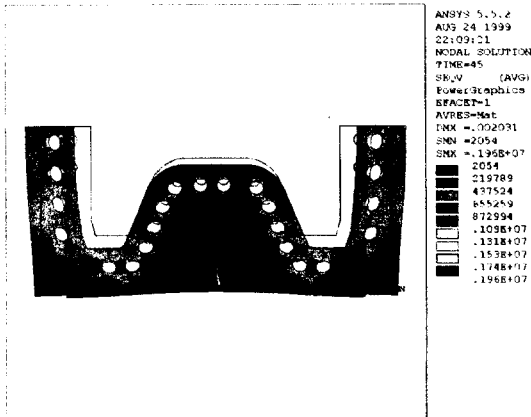


Fig. 13 Stress distribution at 45 sec.

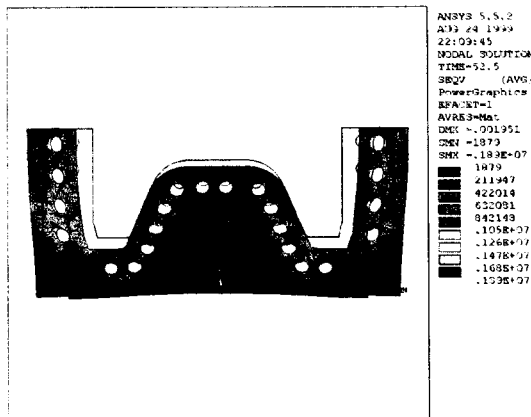


Fig. 14 Stress distribution at 52.5 sec.

## 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 1/2단면에서 온도분포는 구리의 용융온도 보다 낮은 것을 알 수 있으며 좌우 대칭의 온도가 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) 최대응력이 발생하는 부분에서의 응력을 고려해보면 몰드 재질인 구리의 인장강도를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있다.
- 4) 고온에서 작업이 수행되기 때문에 열에 의한 변형량을 고려하여 몰드를 설계한다면 정밀한 치수의 제품을 생산할 수 있다.

## 참고문헌

- 1) 김동원, 기계공학작법, 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.
- 7) William Weaver, Jr. and R. Johnston, Finite Elements for Structural Analysis, PRENTICE HALL, INC., 1993.