한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집 pp.200~205

연속주조 몰드의 열해석 비교

원종진(국민대학교), 이종선*(대진대학교),
윤희중(인천기능대학), 이현곤(국민대학교 대학원)

Thermal Analysis Comparison of Continuous Casting Mold

Chong-Jin Won(Kookmin Univ.), Jong-Sun Lee*(Daejin Univ.),
Hee-Jung Youn(Inchon Polytechnic College), Hyun-Gon Lee(Kookmin Univ.)

Abstract

This study is object to thermal analysis comparison of continuous casting mold. A two-dimensional transient finite element model was developed to compute the temperature distribution for continuous casting mold. For thermal analysis using analysis result from ANSYS. 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), Nickel Coating(니켈도금), Weld Coating(용접코팅), Thermal Analysis(열해석), Convection(대류열복사), Film Coefficient(막 열전도계수)

1. 서 론

금속의 용해성을 이용하여 고온에서 용해된 금속을 준비된 형틀에 주입하여 형상을 만드는 주조는 역사적으로 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. 주물은 결함이 없고 설계된 기능을 충분히 발휘해야 하며 강도 및 경도 등과 같은 기계적인 성질이 요구범위에 있어야 한다.

본 논문에서 고려한 연속주조(continuous casting)[1]에 대한 연구로는 연속주조시 발생되는 열영향에 대한 많은 연구[2~4]들이 수행되었으며, Cui Xiaochao 등[5]은 냉각수 압력과 온도의 영향을 받는 구리몰드에 대하여 응력과 변형률을 해석하였고, Selaries 등[6]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 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 냉각시킨다.

본 논문에서는 연속주조 몰드의 열해석을 비교하기 위하여 코팅하지 않은 연속주조 몰드, 니켈도금된 연속주조 몰드와 용접코팅된 연속주조 몰드에 대하여 열해석을 수행하였다. 이와 같은 3가지 형태의 연속주조 몰드의 열해석시 몰드 내부의 열변형 및 열응력 계산을 위하여 접촉면의 온도분포, 시간에 따른 잉곳의 이동량과 온도분포를 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS[7~8]로 해석하고 각 임계점들의 온도분포를 구해 연속주조 몰드의 기초설계에 응용하고자 하였다.

2. 열해석 이론

2.1 열해석 이론

본 해석을 위해서는 먼저 각 요소의 행렬을 구하여 평형방적식을 구성한 후 연립방적식의 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.

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

여기서 과도적분 변수 θ는 Crank-Nicolson의 방법에 따라 보통 ½값을 취한다.

그리고 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.

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

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

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

여기서 T_c는 물성치 값의 증감이 끝난 상태의 온도, {N_o}는 요소의 좌표에서 증가된 형상계수, {T}는 절점의 온도이다.

3. 몰드설계 및 해석

해석시 사용되는 몰드는 해석의 간소화를 위하여 몰드 윗부분에서 100㎜ 떨어진 곳의 ½ 단면을 취하였으며 연속주조시 응고된 용탕과 몰드표면의 마찰을 고려하여 니켈도금된 연속주조 몰드는 접촉부에 두께 0.5㎜의 니켈도금층을 고려하여 모델링하였으며, 용접코팅된 연속주조 몰드는 니켈도금층 상부에 두께 1㎜의 용접코팅층을 고려하여 모델링하였다.

몰드 내부에는 40℃(313K)의 냉각수가 총 44개의 냉각수관에 흐르고 있으며 현장에서 이용되고 있는 작업환경을 고려하여 주조속도는 0.8m/min, 용탕의 온도는 1,555℃(1,828K)를 택하였다.

3.1 몰드의 모델링

Fig. 1은 유한요소 해석을 위한 모델의 실제 치수를 나타내고 해석을 위하여 Thermal Solid Quad 8Node (Plane55), 4,557개의 요소와 4,816개의 절점을 사용하였다. 그리고 이 절점들 가운데 해석결과로 사용될 몰드 표면의 절점을 1~28까지 표시하였다.

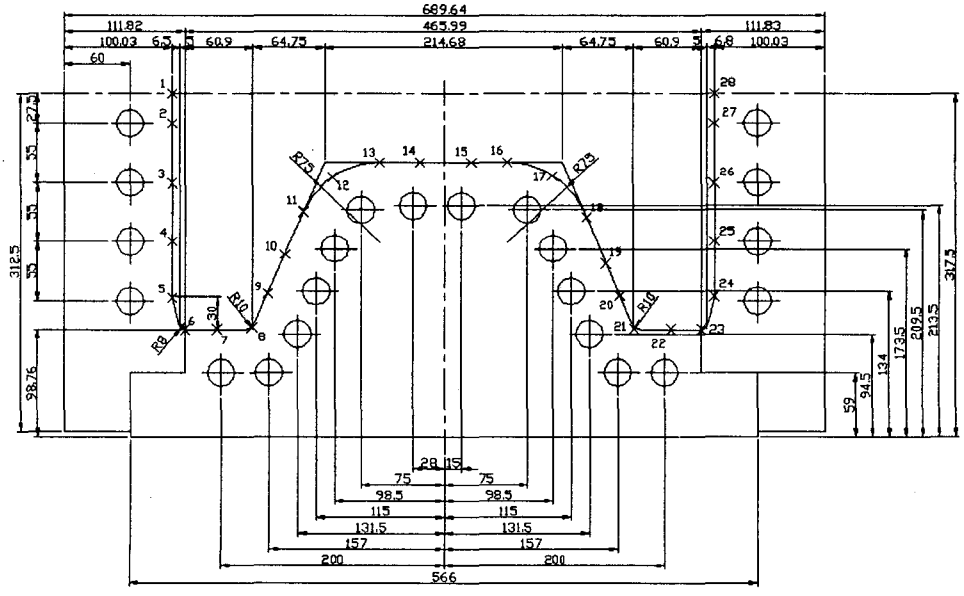

Fig. 1 Simple model for thermal analysis of continuous casting mold

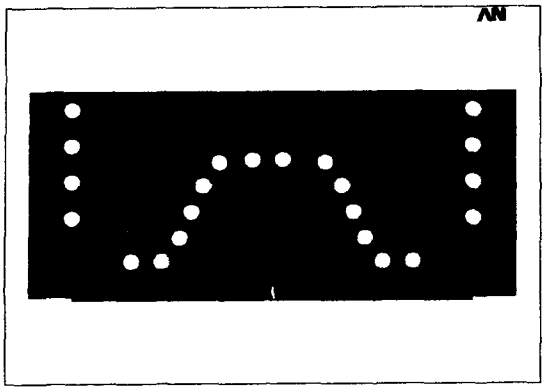

Fig. 2 Section area of molten steel and mold

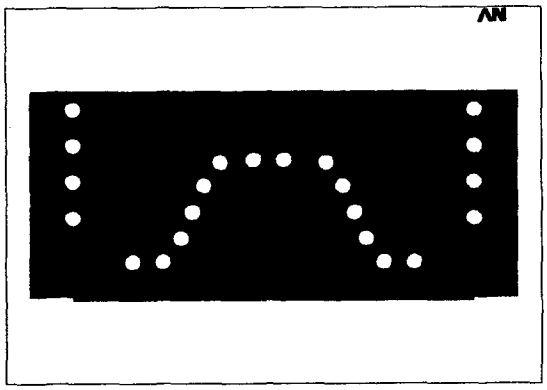

Fig. 3 Element of molten steel and mold by mesh generation

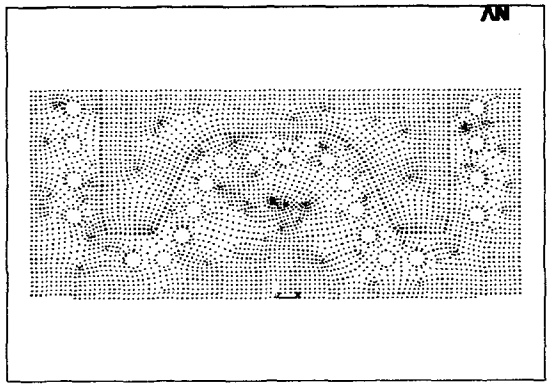

Fig. 4 Node point of molten steel and mold

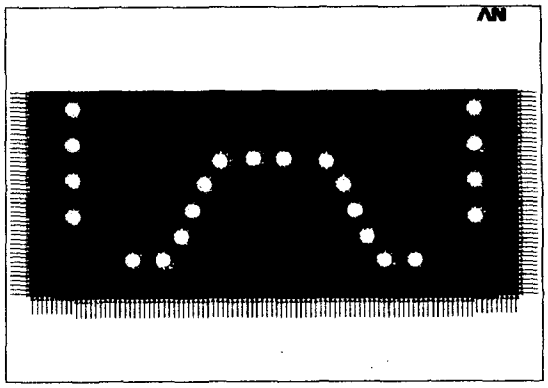

Fig. 5 Load condition of thermal analysis

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 적용시킨다.

그리고 몰드부분과 초기 용탕의 온도를 절점에 각각 25℃와 1,555℃를 작용시켜 용탕이 주입되어 초기 냉각되는 해석을 위해 주조속도인 0.8m/min을 시간으로 분석하는 몰드 윗부분을 0초로 하고 최종 몰드 밑부분까지 도달하는 52.5초까지를 각각 7.5초로 나누어 해석하였다.

3.2 재료의 물성치

과도해석을 수행하기 위한 기본적인 물성치[9]로는 Table 1과 같이 밀도, 비열이 고려되었으며 열전도 계수는 온도에 따른 편차가 심하여 Table 2의 값을 입력하였다. 용접코팅층의 해석을 위해서 물성치는 주성분인 니켈의 물성치를 활용하였으며 플라즈마아크용접시 용가제의 역할을 하는 금속 Powder의 성분은 Table 3과 같다.

Table 1 Material properties of Cu, Fe & Ni

구 분		단위	물성치
Cu	density ρ	kg/m³	8,933
	specific heat C_p	J/kg·K	385
Fe	density ρ	kg/m³	7,870
	specific heat C_p	J/kg·K	447
Ni	density ρ	kg/m³	8,900
	specific heat C_p	J/kg·K	439.6

Table 2 Thermal coefficient of Cu, Fe & Ni

Material	Temp (K)	W/m·K	Temp (K)	W/m·K
Cu	273 K	401.0	300 K	398.0
	400 K	392.0	500 K	388.0
	600 K	383.0	700 K	377.0
	800 K	371.0	900 K	364.0
	1,000 K	357.0	1,200 K	342.0
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
	1,000 K	32.6	1,200 K	28.2
Ni	273 K	94.0	300 K	65.3
	400 K	90.5	500 K	67.4
	600 K	80.1	700 K	69.6
	800 K	72.1	900 K	71.8
	1,000 K	65.5	1,200 K	76.1

Table 3 Material properties of metal powder

(wt%)

Ni	C	Cr	Si	B	Mo	Fe
Bal	0.25~0.75	7.5~15	3.5~4.4	1.7~3.2	0~5	0~1

4. 결과 및 고찰

본 논문에서 시간에 의한 몰드와 용탕의 접촉부분의 온도분포를 보면 Fig. 6~Fig. 14와 같다.

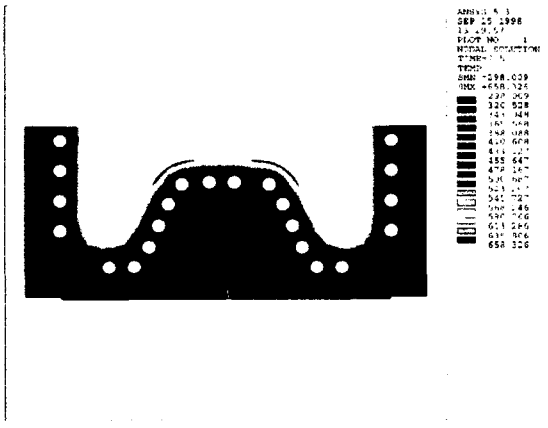

Fig. 6 Temperature distribution for continuous casting mold at 7.5 sec.

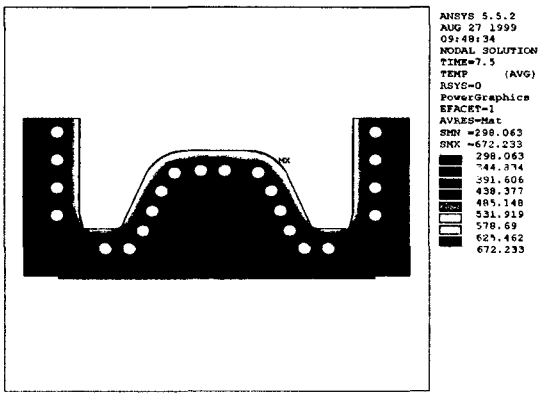

Fig. 7 Temperature distribution for continuous casting nickel-coated mold at 7.5 sec.

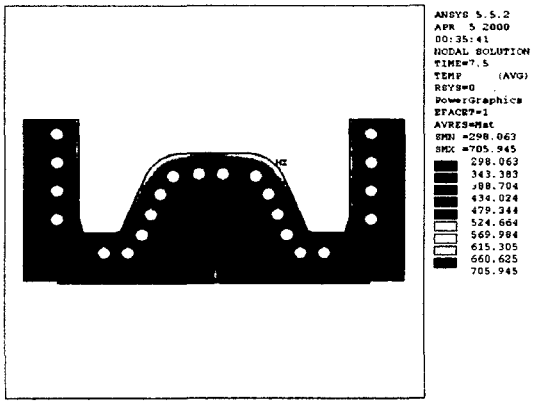

Fig. 8 Temperature distribution for continuous casting welding-coated mold at 7.5 sec.

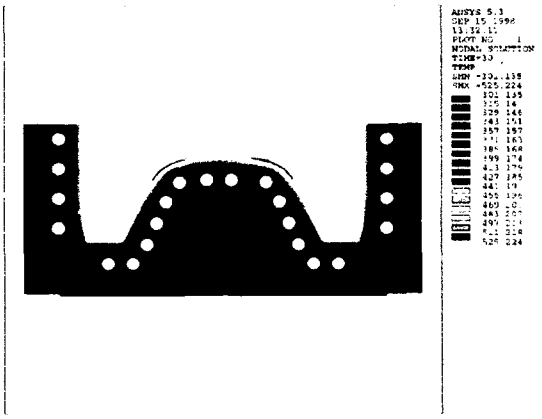

Fig. 9 Temperature distribution for continuous casting mold at 30 sec.

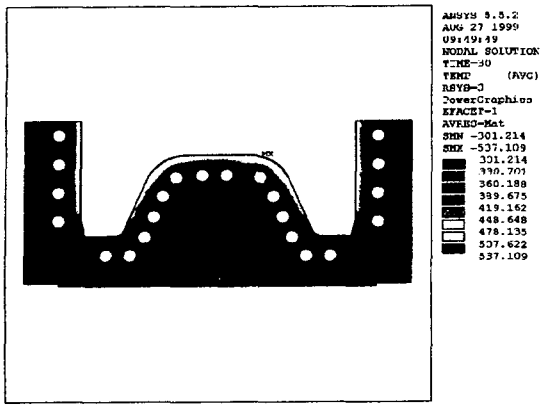

Fig. 10 Temperature distribution for continuous casting nickel-coated mold at 30 sec.

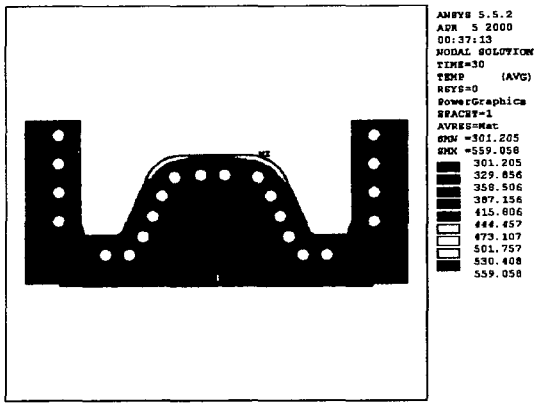

Fig. 11 Temperature distribution for continuous casting welding-coated mold at 30 sec.

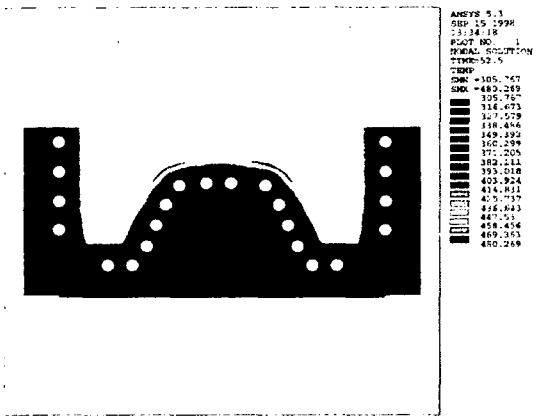

Fig. 12 Temperature distribution continuous casting mold at 52.5 sec.

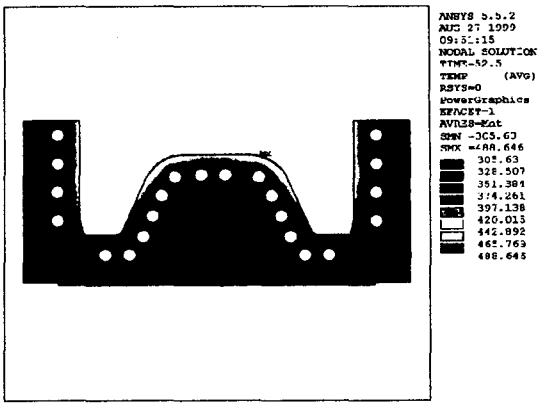

Fig. 13 Temperature distribution for continuous casting nickel-coated mold at 52.5 sec.

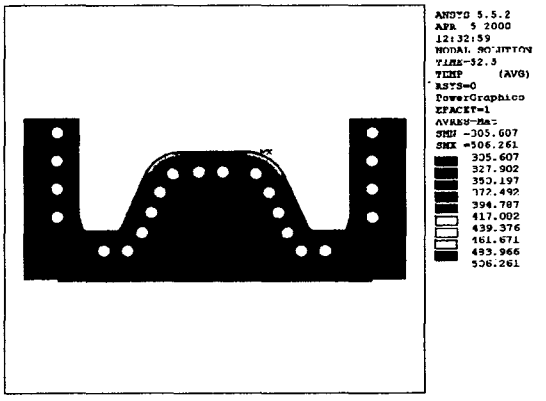

Fig. 14 Temperature distribution for continuous casting welding-coated mold at 52.5 sec.

Fig. 6~Fig. 14까지 그림 왼쪽의 가장 높은 온도분포가 시간에 따라 점차적으로 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 선택된 해석절점 1~6까지는 왼쪽 단편, 7~22까지는 장편 그리고 23~28까지는 오른쪽 단편으로서 온도변화를 나타내면 Table 4와 같다.

또한 해석대상인 3가지 형태의 몰드 윗부분에서 100㎜ 떨어진 부분, 즉 7.5초 표면온도는 Fig. 15와 같은 온도분포를 나타난다.

5. 결 론

코팅하지 않은 연속주조 몰드, 니켈도금된 연속주조 몰드, 용접코팅된 연속주조 몰드에 대하여 유한요소 해석 방법을 이용하여 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 몰드 표면의 온도분포는 좌우 대칭의 온도가 분포함

Table 4 Temperature distribution of mold surface

Continuous Csting Mold	Node No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Temp	605.8	606.0	606.2	607.4	565.1	479.7	568.4	487.2	581.4	591.5	633.9	652.1	638.7	603.5
	Node No.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	Temp	608.5	650.1	653.2	637.6	600.0	579.6	488.7	569.3	481.1	561.8	600.9	603.6	603.4	603.5
Nickel-Coated Mold	Node No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Temp	623.2	618.7	619.4	618.1	575.6	485.3	589.0	502.5	602.4	614.8	649.5	664.9	658.8	622.9
	Node No.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	Temp	625.3	662.2	668.7	624.6	612.4	573.3	487.6	586.3	485.5	576.7	618.1	618.8	619.0	622.6
Welding-Coated Mold	Node No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Temp	656.5	652.4	652.7	652.8	605.4	493.8	626.6	521.8	628.1	645.3	682.0	700.2	684.0	656.2
	Node No.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	Temp	658.3	703.0	703.7	682.6	647.1	634.2	522.3	628.9	493.7	607.0	652.0	652.7	652.7	656.0

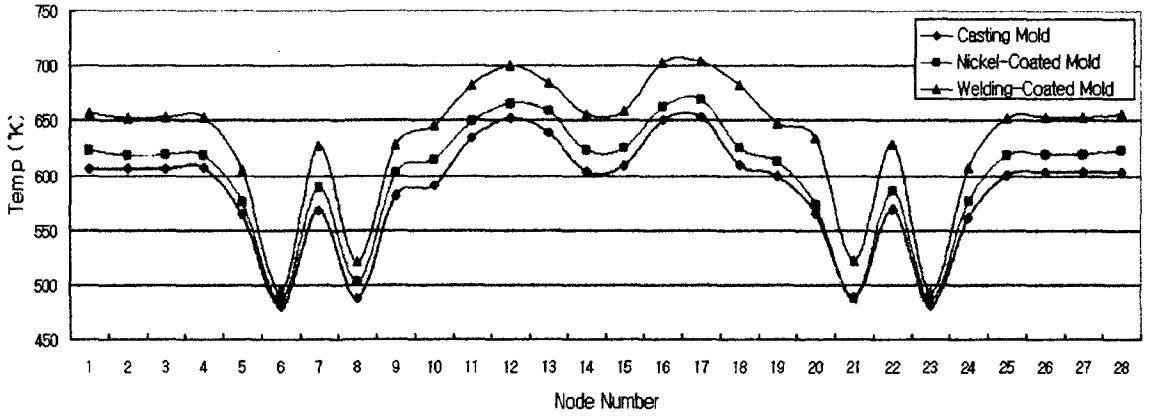

Fig. 15 Temperature distribution of mold surface

을 알 수 있다.

2) 용탕의 초기 최대온도가 작용하는 몰드의 윗부분에 접촉을 시작하여 밑부분까지 이동, 몰드로부터 이탈하는 52.5초 동안 비선형적 온도감소가 일어나는 것을 알 수 있다.
3) 몰드표면의 최대온도분포를 코팅하지 않은 연속주조 몰드와 비교하면 니켈도금층을 고려한 해석결과 약 15° 정도, 용접코팅층을 고려한 해석결과 약 50° 정도 높으며 이는 니켈도금층과 용접코팅층의 두께에 의한 영향으로 판단된다.
4) 상기 결과를 온도분포하중으로 작용시켜 몰드 각 부분에 작용하는 응력과 변형률을 구하는 구조해석의 기본 자료로 활용된다.

참고문헌

1) 김동원, 기계공작법, 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, pp.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) James Shackelford and William Alexander, Material Science & Engineering Hand Book, CRC Press, 1994.