

## 연주 설비용 몰드 오실레이터의 강건 설계

박용태\*(포항공과대학교 대학원 기계공학과), 이창수(LG 전자), 황운봉(포항공과대학교 기계공학과),  
강기판(포항산업과학연구원), 신건(포항산업과학연구원)

### Robust Design of the Mold Oscillator of Continuous Casting Machine

Y. T. Park(Mech. Eng. Dept. POSTECH), C. S. Lee(LG Electronics), W. Hwang(Mech. Eng. Dept. POSTECH),  
G. P. Kang(RIST), G. Shin(RIST)

#### ABSTRACT

The goal of this research is to deduce the robust design of mold oscillator of the continuous casting machine. In the case of the system operated in the high temperature condition, the structural problems caused by the heat are dominant. Therefore, the thermal stress is considered with the connection of the thermal and structural analyses. The cooling ability of the water jacket was estimated and the robustness of mold oscillator was judged with the displacement and stress distributions obtained by the finite element method. The analytic results were compared with the real values of the iron mill.

**Key Words :** Mold Oscillator (몰드 오실레이터), Water Jacket (워터 자켓), Thermal Stress (열응력)

#### 1. 서론

설비설계는 철강재를 성형하기 위한 설비에 소요되는 비용 중 많은 부분을 차지하고 있는 만큼, 철강생산설비의 설비 설계기술은 고부가가치 국가 전략산업의 하나이다. 유럽 및 일본의 철강 설비사에서는 오랜 기간동안 연주설비에 대해 연구, 개발에 투자하여 생산 기술을 축적하였으며, 또한 자체 기술에 의해 설비를 설계할 수 있는 능력을 갖추고 있다. 그러나 국내에서는 설비의 설계에 관한 연구, 개발이 부족하며, 국내의 기술은 선진사의 설계도면에 따른 설비의 일부를 도면에 따라 제작할 수 있는 정도의 기술 밖에는 확보하지 못하고 있는 실정이다.

연주기는 일반적인 구조설비와 비교하였을 때, 외부 하중에 의한 효과와 함께 열에 의한 변형과 열응력의 크기가 상대적으로 매우 크게 발생된다. 연주기의 설계는 열에 대한 고려가 수반되어야 하므로 일반적인 구조설비와 상이한 점이 있다. 고온 환경에서 운전되는 시스템의 경우는 자중이나 외부 하중의 영향보다 열에 의한 구조적 문제가 지배적이므로 전열해석과 구조해석의 연계해석을 통한 열

응력 해석이 요구된다. 즉, 용탕에 의해 가해지는 열유속(heat flux)과 동판부와 water jacket 부의 대류 열전달(convection)을 고려한 전열해석으로부터 몰드 전체의 온도분포를 구하고, 이를 구조해석의 입력 데이터로 사용하여 구조해석을 수행함으로써 열팽창에 의한 열응력을 고려하였다.

#### 2. 모델링

##### 2.1 해석모델

열전달 해석과 구조해석을 위하여 Fig. 1 과 같은 해석모델을 사용하였다. 슬래브의 폭은 최대생산폭을 고려하여 1600 mm 로 하였으며, 매니스커스의 높이는 800 mm 로 하였다. 재질과 형상 및 경계 조건이 대칭이므로 전체 몰드부의 1/2 을 해석모델로 하여, 16,733 개의 8 절점 육면체요소를 사용하였다. 해석의 효율성을 위하여 복잡한 형상은 단순화 하되, 동판과 water jacket 의 주요부는 설계도면과 동일한 외형 치수를 사용하였으며, 대류열전달이 일어나는 동판과 water jacket 사이에 존재하는 water slot 은 도면과 동일하게 모델링 하였다. 해석의 정도를 높이기 위해 동판의 두께방향으로 조밀하게

요소를 생성함으로써 작은 두께를 사이에 두고 발생하는 전열과 대류 현상을 해석할 수 있게 했으나, water slot 근처의 온도분포 자체가 주관심이 될 경우에는 요소망을 더 세밀히 하여 국지 해석을 수행할 필요가 있다. 금번 연구에서 동판과 water jacket 사이에 체결된 볼트는 생략하고 동판과 water jacket이 일체한 것으로 해석하였고, 몰드와 진동프레임을 연결하는 부위는 부재의 두께는 일치시키되 형상을 간략화하였으며, 핀을 해석모델에서 제외하고 핀이 위치하는 지점에 경계조건을 두어 해석이 가능하도록 하였다. 단면 몰드부는 해석모델에서 제외하는 대신 적절한 경계조건을 주어 해석하였다.

## 2.2 재료물성 및 입력데이터

Water jacket 은 투자율이 낮은 재질이 요구되고, 자속밀도를 높이기 위해 근접거리를 유지해야 하며, 용접이 어려운 구조로 되어 있으므로 주물로 제작된다. 본 해석에서는 water jacket 의 이러한 특수성을 고려하여 316C12 를 기준으로 해석하였다. 이를 동판의 기계적 성질과 함께 Table 1 에 나타냈다.

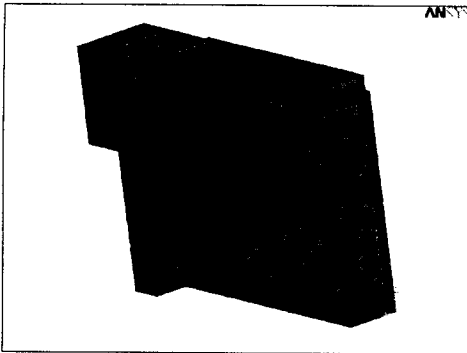


Fig. 1 Finite Element Model

Table 1 Mechanical Properties of Materials

구분	Water Jacket	동판
인장강도 (MPa)	520	410
항복강도 (MPa)	230	300
밀도 (Kg/m <sup>3</sup> )	7.85 x 10 <sup>3</sup>	8.94 x 10 <sup>3</sup>
영률 (GPa)	206	128
포아송 비	0.3	0.343
열팽창계수 (°C)	12 x 10 <sup>-6</sup>	18 x 10 <sup>-6</sup>
열전도율 (W/m°C)	14	315

Table 2 Operating Conditions

구분	단위	값
대류열전달계수	W/m <sup>2</sup> °C	35 x 10 <sup>3</sup>
냉각수 온도	°C	15
기초 온도	°C	20

해석을 위해서는 시스템을 구성하는 부품의 물성뿐만 아니라 운전환경을 정확하게 적용하여야 한다 (Table 2). 동판의 water slot 과 냉각수 사이의 열전달 계수는 문헌을 참조하였고, 기초 온도는 몰드 조립 시점에 몰드의 초기 온도를 나타내는 것으로 연간 평균 온도와 제철소 내 분위기 온도를 고려하여 산정하였다. 열유속 프로파일은 현장에서 측정된 것으로, 최대 열유속 조건에 대해 해석을 수행하였다.

## 2.3 경계조건

### 2.3.1 열전달해석

열전달해석의 경계조건으로는 동판 뒷면의 water slot 과 water jacket 에서 일어나는 대류열전달을 지정하고 동판 표면에 열유속을 지정하였다. 열유속은 몰드의 중앙으로부터 단면의 위치까지 열유속 프로파일에 의거하여 주어졌다. 본 연구에서 분위기에 의한 대류냉각 효과는 고려하지 않았다.

### 2.3.2 구조해석

구조해석의 구속조건으로 몰드의 중앙부에 대칭조건을 부여하고 우상단의 핀구속부에는 장변의 폭방향(x 좌표)과 높이 방향(z 좌표)의 변위를 구속하였다. 동판의 표면에 단면 몰드가 접촉하는 위치의 중앙 부분에 면의 두께방향 변위(y 좌표)를 구속하였다. 몰드의 자중을 고려하였으며, mold clamping force 와 철타력은 힘평형을 이루고 있고, 크기가 상대적으로 작으므로 해석에 고려하지 않았다. 열전달해석에서 계산된 절점의 온도 분포를 입력하였다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 열전달해석

Fig. 2 는 최대 열유속 조건에 대한 온도분포를 보인 것으로 동판과 water jacket 을 분리하여 나타냈다. 최고 온도는 동판의 열유속 최대 지점에서 266 °C 로 계산되었으며, water jacket 에서는 동판의 체결 부위가 상대적으로 높은 온도 분포를 보이지만 냉각수와 기초온도 사이의 값이다.

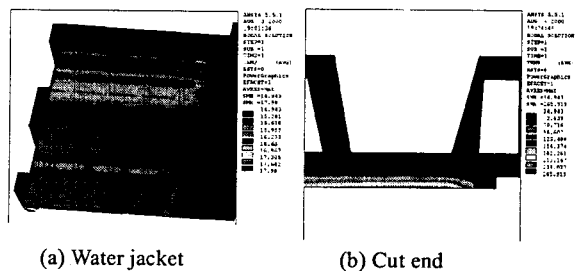


Fig. 2 Temperature Distributions

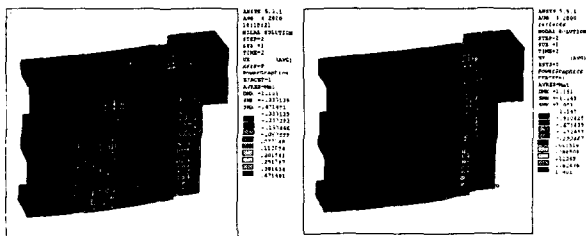
Fig. 2 (b)는 동판과 water jacket 의 경계면의 온도분포를 보여준다. Water slot 을 지나면서 온도는 격감함을 알 수 있다. 해석결과에 의하면 현재의 water slot 의 열전달 효과는 우수하며, 필요에 따라 water slot 의 축소와 그에 따른 water slot 의 형상 변경과 동판 두께의 조절이 가능한 것으로 판단된다.

### 3.2 구조해석

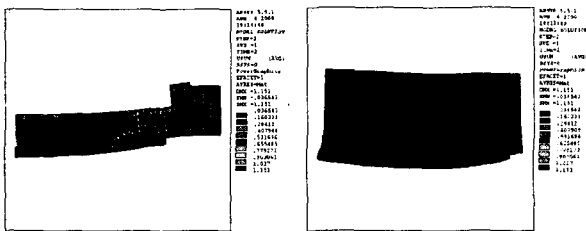
하중과 동판의 전면에 분포되는 열하중을 고려한 주조 중 몰드의 유한요소해석의 결과를 Fig. 3 부터 6 까지 나타내었다.

Fig. 3 에 몰드의 폭 방향(x 방향) 변위와 두께 방향(y 방향) 변위를 나타냈다. 폭 방향으로서는 몰드의 중앙부의 대칭 구속조건과 우측 편에 의해 구속되어 있으므로, 동판 우측 끝단에서 최대 0.47 mm 의 변위가 발생하였다. 두께 방향으로서는 몰드의 중앙부에서 높이에 따라 편 위치를 기준으로 1.0~1.8 mm 의 변위가 발생하였다. 최대변형은 최대 열유량이 가해진 위치보다 아래에서 나타났다.

Fig. 4 에 다른 위치에서 관찰한 변위를 나타내었으며, 몰드의 변형양상을 관찰할 수 있다. 동판의 열팽창은 폭 방향 및 높이 방향의 길이 변화를 일으키게 되어 몰드 중앙부의 가운데 지점에서 최대 변형이 일어나며, 경계조건의 존재에 의해 동판의 끝단과 편 부위의 목에서 변형곡률이 영이 되는 점이 존재한다. 몰드의 우측 하단부는 두께방향으로 뒤틀리는 변형 양상을 보인다.



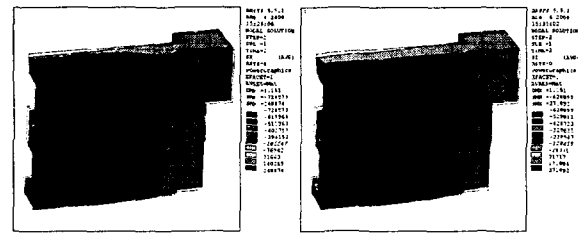
(a) x-direction (b) y-direction  
Fig. 3 Displacement Distributions



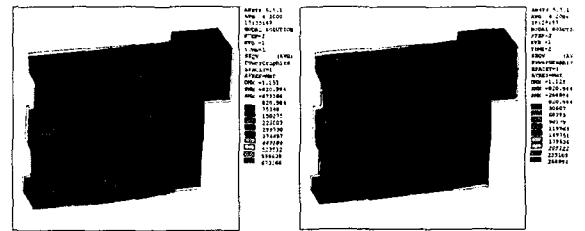
(a) z-direction view (b) x-direction view  
Fig. 4 Total Deformation Shapes

Fig. 5 에 폭 방향(x 방향)과 높이 방향(z 방향) 응력 분포를 나타내었다. 폭 방향으로서는 온도증가에 따른 열팽창량이 가장 큰 최대 열유속 부여 지점에서 729 MPa 의 최대 압축응력이 발생했다. 동판의 전역에는 최소 300 MPa 의 압축응력이 발생하였으며, water jacket 에는 편체결 경계부를 제외한 전역에서 최대 249 MPa 의 인장응력이 발생하였다. 이는 동판의 열팽창에 의해 water jacket 은 인장응력을 받고, water jacket 은 동판의 열팽창을 저지하게 되어 동판에는 압축응력이 걸리기 때문이다. 열팽창에 의한 압축응력은 자유 경계조건에 대한 열팽창량과 구조적으로나 경계조건에 의해 저지되는 열팽창량의 차이에 비례하여 발생하게 된다. 높이 방향(z 방향)의 응력은 최대 열유속 부여 지점에서 629 MPa 의 최대 압축응력이 발생했다. 폭 방향의 경우와 달리 동판의 왼쪽 부분에 최대 압축응력이 걸리는 것은 동판의 열팽창은 동일하지만, 끝단으로 갈수록 몰드의 높이 방향 강성이 증가하여 변형이 줄어들기 때문이다. 동판의 전역에는 최소 120 MPa 의 압축응력이 발생하였으며, water jacket 에는 전역에서 최대 272 MPa 의 인장응력이 발생하였다.

Fig. 6 에 Von-Mises 응력분포를 나타내었다. 동판에는 200 MPa 전후에서 673 MPa 까지의 응력이 걸리고, water jacket 의 전면에는 국부적으로 최대 269 MPa 의 응력이 발생하나, 대부분의 영역은 180 MPa 이하의 값이 발생하였다. 동판의 경우 대부분의 영역에는 항복강도(300 MPa) 이상의 응력이 발



(a) x-direction (b) z-direction  
Fig. 5 Stress Distributions



(a) Mold plate (b) Water jacket  
Fig. 6 Von-Mises Stress Distributions

생하며, 거의 전역에 허용강도(200 MPa)보다 큰 응력이 발생하였다. 이는 열변형의 특성상 동판의 두께의 크기에 상관없이 일어나는 현상으로, 상온과 조업 온도간의 차가 일정한 경우 본 몰드에서 피할 수 없는 상황이다. Water jacket의 최대 응력은 배면의 세로방향 보강부에서 발생하였으며, 동판과의 접촉부분에서 큰 응력이 발생한 것은 동판의 열팽창에 따른 인장응력이 컸기 때문이다. Water jacket에는 거의 전역이 항복강도(230 MPa) 이하의 응력 분포를 보이므로 강도 측면에서 현재 큰 문제는 없으나, 설계자의 입장에서는 전역을 허용강도(150 MPa) 이하로 낮출 필요성에 대해 검토해 보아야 한다. 특히, 배면의 세로방향 보강의 증대가 필요할 것으로 사료된다.

몰드의 온도 강하에 따른 회복 현상의 결과를 Fig. 7 과 8 에 나타내었다. Fig. 7 은 냉각 후 몰드의 변위 분포로, 중앙의 최대 열유속 지점에 두께방향 안쪽으로 0.3mm 의 최대 변위가 발생하였다. 조업 중에 압축응력을 받던 동판은 조업 후 냉각에 따른 동판의 수축과 구속 조건에 의해 인장 상태에서 작업을 마치게 되어, 몰드를 오실레이팅 프레임에서 분리해 내었을 때 잔류응력의 작용으로 mold 의 내부방향으로 오목한 최종변형이 유발된다.

Fig. 8 에 냉각 후 몰드의 응력 분포를 나타내었다. 주조 중 최대 응력이 발생하였던 동판 부분에서, 냉각 후 역시 294 MPa 의 최대 잔류응력이 발생하였다. 동판의 그 외 부분에서는 150MPa 이하의 응력 분포를 보였으며, water jacket 의 경우 전역

이 50MPa 이하의 응력 분포를 보였다. 몰드의 잔류응력 분포 양상은 주조 중 응력분포와 비례적인 관계를 보였다.

#### 4. 결론

동판의 표면을 통해 전달된 열유속은 동판에서 최대 266 °C 의 온도를 발생시켰으며, water slot 을 통한 수냉에 의해 water jacket 은 상온을 유지하므로 몰드의 냉각계통은 적절하다고 판단된다.

동판의 열팽창에 기인한 water jacket 의 변형은 크게 x-y 단면 과 y-z 단면의 굽힘 변형으로 나눌 수 있다. 이 두 변형 양상의 조합으로 몰드의 중앙부에 최대 변형이 나타나며, 자유경계면을 가진 몰드의 우하변에도 종속 변위가 크게 유발되었다.

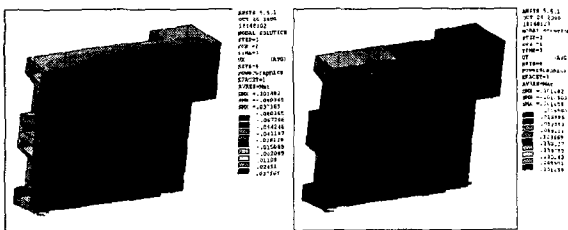
동판의 경우 대부분의 영역에는 항복강도 이상의 응력 분포를 보이며, 이는 열변형의 특성상 피할 수 없는 현상으로 생각된다. Water jacket 에는 거의 전역이 항복강도 이하의 응력이 발생하므로 강도 측면에서 현재 큰 문제는 없으나, 설계 단계에서는 전역을 허용강도 이하로 낮출 필요가 있다. 기존 몰드의 전체 구조해석 결과는 강도 측면에서 대체로 안정하나 강성 측면에서 water jacket 의 보강 또는 설계 개선이 필요한 것으로 판단된다.

#### 후 기

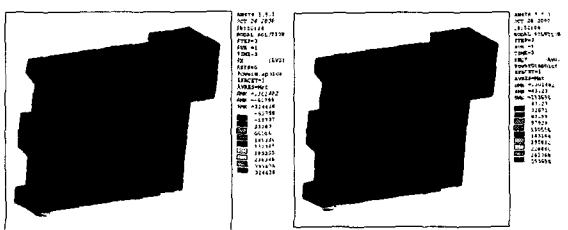
본 연구는 포항제철과 포항산업과학연구원의 연구비 지원으로 진행되었으며, 이에 담당자 여러분들에게 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Wolf, M. M., "Mold Oscillation Guidelines", *Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Vol. 74, pp. 51-71, 1991.*
2. Wolf, M. M., "On Optimised Mold Oscillation in High-speed Slab Casting", *Report on Continuous Casting Technology, 1995.*
3. Hideaki Mizukami, Kiminari Kawakami, etc, "Lubrication Phenomena in a Mold and Optimum Mold Oscillation Mode in High-speed Casting", *철과강, pp1862-1869, 1986.*
4. Mollers, Ch., Andre, B., Bodenstein, F., Rzepczyk, H., Sowka, E., "Results of Operational Use of a Resonance Mould", *2nd European Conference on Continuous Casting, Dusseldorf, 1994.*



(a) x-direction (b) y-direction  
Fig. 7 Displacement Distributions (Cooling)



(a) x-direction (b) Von-Mises  
Fig. 8 Stress Distributions (Cooling)