

## 연속 주조의 응고와 벌징에 관한 3차원 해석

김영대\* · 조종래\*\* · 이부윤\*\*\* · 하만영\*\*\*\*

### Three-dimensional Analysis for Solidification and Bulging of Continuously Cast

Y. D. Kim, J. R. Cho , B. Y. Lee and M. Y. Ha

#### Abstract

In this paper, The bulging behavior of the solidified shell in continuously cast slabs have been numerically analyzed using three-dimensional elasto-plastic and creep finite element method. Three-dimensional model has been applied in order to investigate the effect of the narrow face shell on restraining the bulging deflection. Solidification analysis are carried out by two-dimensional finite difference method. In this way, strains occurring at the solidification front near the narrow face of the slab, as well as those occurring in the board face have been computed. The adequacy of the model has been checked against the experimental results. In addition, the effect of the slab width and casting speed on the bulging are discussed.

**Key Words** : Continuously Cast slabs, Bulging, Finite element method, Three-dimensional model, Elasto-plastic, Creep

#### 1. 서 론

연속주조 공정은 기존의 잉곳주조공정에 비하여 높은 생산성과 에너지 절약 효과에 큰 잇점이 있기 때문에 비약적으로 발전해 왔다. 연속주조과정에서 강이 품질과 생산성 향상을 저하시키는 내부크랙은 주조 속도, 물 배치, 냉각조건 등의 영향을 많이 받는다. 내부 크랙은 응고면에서의 인장변형률이 임계값을 초과하였을 때 발생할 수 있다. 내부 크랙의 원인이 되는 인장변형률의

주된 역할을 하는 것이 주편의 벌징현상이다. 주조속도가 빠를 때, 응고층의 두께 감소와 주편의 표면온도 증가로 벌징에 의한 변형률은 커지고 롤피치가 클 때 급격히 증가한다. 이러한 배경하에서 본 논문은 벌징해석과 내부크랙 발생을 정확하게 해석하기 위해 2차원 응고해석을 이용하여 주조 속도와 슬래브폭에 따른 주편의 온도 분포를 비교하였고 이 응고해석에서 얻은 데이터를 이용하여 ANSYS에 탄소성과 크리프를 적용시켜 3차원 유한요소모델을 이용하여 벌징해석을 수행하였다.

\* 한국해양대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부  
\*\*\* 계명대학교 자동차공학부  
\*\*\*\* 부산대학교 기계공학부

## 2. 응고해석

### 2.1 지배방정식 및 재료의 물성치

주편에 발생하는 결함을 이해하고 제어하기 위해서는 연속주편의 응고상황과 온도 분포를 해석해야 한다. 주편은 식(1)과 같이 2차원 비정상상태에 열전달방정식을 유한차분법을 이용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

응고 및 벌징해석은 두께는 동일하게 하고 폭은 여러 경우를 적용하여 수행하였다. 이들 해석 조건은 Table.1에 나타내었다.

Table1 Solidification simulation conditions

Chemical composition of steel (wt%)	C:0.08, Si:0.25, Mn:1.55
Half slab thickness(mm)	125
Slab width(mm)	1650, 1000, 770, 500
Casting speed(m/min)	1.4, 2.0
Emissivity of slab surface	0.9
Cooling water temperature(°C)	30
Specific cooling water( l/kg )	0.45, 0.73

### 2.2 각 냉각구간에서의 열전달 경계조건

1차냉각인 물드내 냉각은 용탕 표면으로부터 멀어질수록 주편의 수축에 의해 열전달이 현저히 줄어들어 가는 경향이 있다. 이러한 특성을 고려하여 다음과 같은 열전달식을 사용하였다.<sup>(1)</sup>

$$h_m(t) = ae^{-t} + be^{-t/n} + c \quad (2)$$

2차 냉각부분은 Fig.1과 같이 세 영역으로 구분하여 각각의 영역에 따라 다음의 열전달계수 관계식을 적용하였다. 이때의 열전달계수는 냉각수량, 표면온도 및 응고 속도의 함수 형태로 표시되며 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

$$h_m = 10^{1.48} T_s^{-0.1358} \dot{W}^{0.6293} V_a^{0.2734} \quad (3)$$

를 접촉 냉각구간에서는 다음과 같이 적용하였다.<sup>(3)</sup>

$$h_{I,V} = 2500 \text{ (J/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{K)} \quad (4)$$

슬래브 폭면에서의 분사냉각구간과 물 접촉냉각구간을 제외한 모든 영역과 두께면에서의 물드부분을 제외한 모든 영역은 복사냉각을 적용한다.

$$-k \frac{dT}{dx} = h_{II,IV} (T_s - T_a) \quad (5)$$

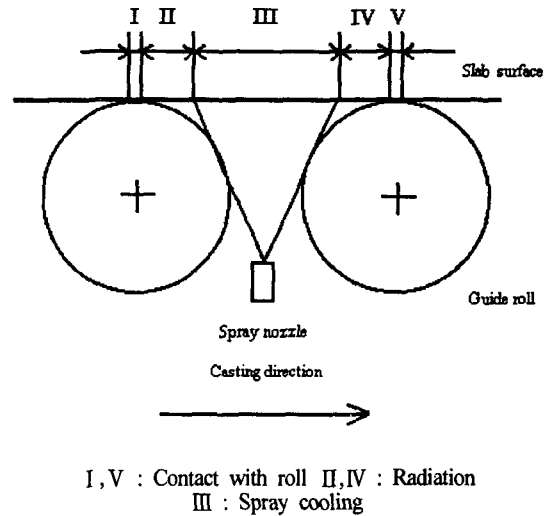


Fig. 1 Classification of secondary cooling zones

### 2.3 열전달해석 결과

Fig.2과 Fig.3은 주속이 1.4, 2.0 m/min일때의 온도분포를 비교하여 보았다. 주속이 빠를수록 응고층의 형성이 늦어지고 슬래브 폭이 좁아질수록 응고 층의 형성이 빨라짐을 슬래브 폭과 두께면의 온도분포에서 알수가 있다.

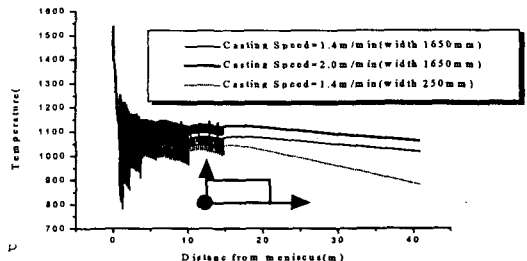


Fig. 2 Temperature distributions of width face of slab

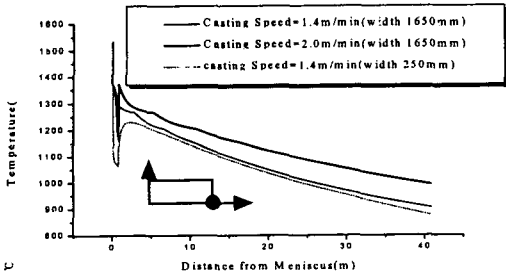


Fig. 3 Temperature distributions of narrow face of slab

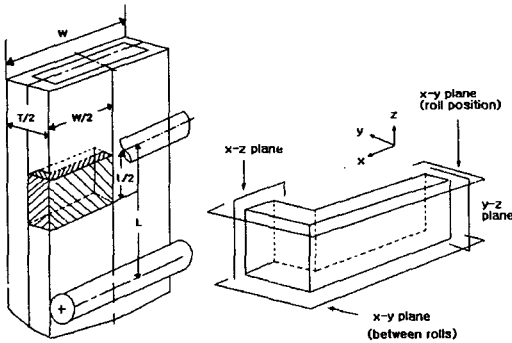


Fig. 4 Three-dimensional model in bulging analysis.

### 3. 벌징해석

슬래브의 벌징현상은 주변 파단의 위험과 균열발생의 원인이 되어 주변품질을 저하시킨다. 본 연구에서는 2차원 모델을 이용하여서는 슬래브폭면과 두께면의 영향으로 인한 변형률을 알 수가 없으므로 보다 정확한 해석을 위해 3차원 모델을 이용하였다. Fig.4와 같이 롤과 롤사이의 주변 1/8을 이용하였고 롤의 지지부분은 단순구속으로 대체하였으며, 주변의 양 끝단은 주조방향으로 변위를 구속하고 롤과 롤사이의 주변방향의 응고층 형성은 일정하게 적용하였다. 본 연구에서의 해석 모델은 탄소성과 크리프를 적용한 유한요소법을 이용하였다. 8절점 요소로 이루어진 응고층의 요소망은 Fig.5와 같다.

#### 3.1 주조 속도의 영향

주속을 1.4, 2.0m/min을 적용했을 때 주속이 2.0m/min 일 때의 벌징량은 주속이 1.4m/min일 때의 벌징량보다 4.5배 더 증가하였다. 주속에 따른 변형률은 용탕표면으로부터 15.4m 지점에 롤이 위치하는 지점에는 인장변형률이 최대가 되고, 중심부로 갈수록 감소하여 롤과 롤사이의 중심부에서 압축변형률이 최대로 작용을 하는데,

주속이 2.0m/min일 때의 인장변형률과 압축변형률은 주속이 1.4m/min일 때보다 4배정도 증가함을 알 수가 있다.

#### 3.2 크리프의 영향

Fig.6은 크리프시간에 따른 각 방향의 변형률과의 관계를 나타내고 있는데 크리프 시간이 영일 때 탄소성해석에서 얻을 수 있는 변형률 값을 의미를 하고, 크리프 시간이 증가할수록 주조방향의 변형률  $\epsilon_z$  값이 가장 큰 영향을 받음을 알 수가 있다.

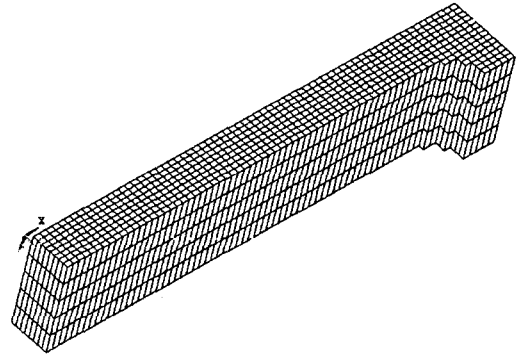


Fig. 5 Finite element mesh for bulging analysis

#### 3.3 슬래브 폭의 영향

Fig.7은 2차원과 3차원 해석의 벌징량을 비교해 보았다. 슬래브폭이 770mm이하일 때는 2차원모델과 3차원 모델의 벌징량의 차이가 현저하게 나타났다. 슬래브 두께가 250mm로 일정하고 슬래브 폭 대 두께비가 3 : 1이하일 때는 2차원 해석을 적용할 수가 없다는 것을 알 수가 있었다. Fig.8는  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  그리고  $\epsilon_z$ 의 값은 응고면에서 각 방향의 최대 변형률을 표시하고 있는데, 주조방향의 변형률  $\epsilon_z$ 가 슬래브 폭 변화에 따라 가장 큰 변화가 있으며, 슬래브 폭이 작아 질수록  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ 의 변형률을 무시할 수가 없음을 알 수가 있다.

#### 3.4 실험적 결과와 비교

Fig.9는 Wunnenberg에 의한 측정값<sup>(4)</sup>과 계산되어진 벌징량을 비교하였다. 롤 피치에 따른 최대 벌징량을 나타내는데 계산된 값이 정적모델임에도 불구하고 잘 일치함을 알 수가 있다.

#### 3.5 크랙 형성의 기준

주변의 벌징에 의한 내부크랙 발생 가능성을 예측할 수 있는 여러 가지 기준 중에서 일반적으로 주조방향의

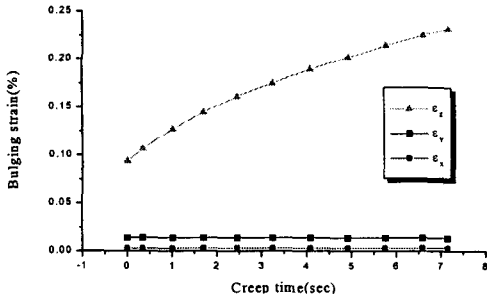


Fig. 6 Effect-of creep on bulging strains

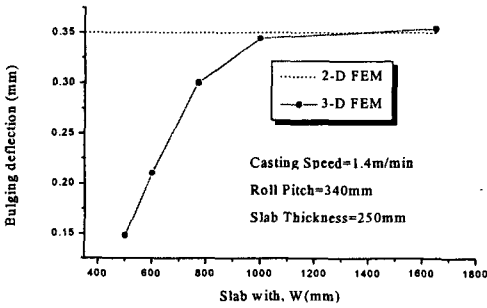


Fig. 7 Effect of slab width on bulging deflection

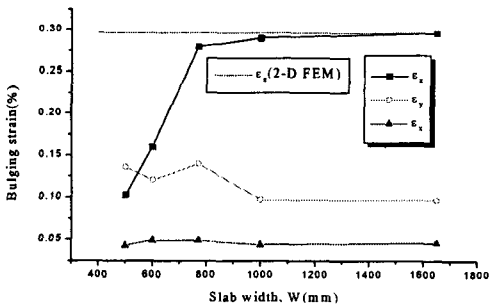


Fig. 8 Effect of slab width on bulging strains

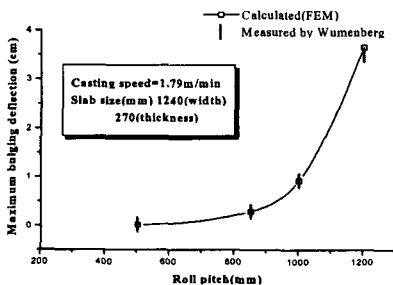


Fig. 9 Comparison between measured and calculated maximum bulging

최대 인장변형률을 많이 사용한다. 1320°C 이상인 강의 변형률이 0.2~0.3%일 때 크랙발생이 가장 높다.<sup>[5]</sup> Fig.8의 경우에 슬래브 폭이 증가하면 할수록 주조방향의 변형률이 0.3%에 가까워진다. 따라서 크랙 발생의 가능성이 증가한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 연속주조에 있어서 내부결함의 주원인이 되는 벌징현상을 탄소성과 크리프를 동시에 적용한 3차원모델을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 2차원 비정상상태에 열전달방정식을 유한차분법을 이용하여 옹고해석을 실시하여 주조속도와 슬래브폭에 따른 옹고현상을 확인하였다.

(2) 벌징해석에 있어 크리프변형의 영향을 확인하였으며, 특히 주조방향의 변형률에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

(3) 슬래브폭 변화의 영향을 확인하기 위해 2차원해석과 3차원해석의 벌징량과 변형률의 차이를 비교한 결과, 슬래브 폭이 두께의 3배보다 작을 때에는 반드시 3차원해석이 필요하다는 것을 확인하였다.

(4) 측정값과 비교한 결과를 보면, 정적모델 적용의 타당성을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- (1) G. Alvarez de Toledo, J. Lainez and J. C. Cirion, 1993, Model optimization of continuous casting steel secondary cooling, Elsevier Sequoia, pp.287~291.
- (2) R. M. Fand, 1965, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, p.995.
- (3) B. Barber, B. A. Lewis and B. M. Leckenby, 1985, Finite-element analysis of strand deformation and strain distribution in solidifying shell during continuous slab casting, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 12, No.4 *Duisburg-Huckingen*, pp.171~175.
- (4) K. Wünnenberg and, 1978, Strand bulging between supporting rollers during continuous slab casting, *Stahl u. Eisen*, Vol. 98, No. 6, pp.254~259.
- (5) A. Grill, J. K. Brimacombe and F. Weinberg, 1976, Mathematical analysis of stresses in continuous casting of steel, Ironmaking and Steelmaking, No. 1, pp.38~47.