

## 유한요소법을 이용한 LD - 전로의 노저부 형상에 따른 응력분포의 해석

김성순 · 한봉석 · 허완욱\* · 하창수\* · 이형직\*\* · 이홍림†

연세대학교 세라믹공학과

\*POSCO 기술연구소 광양선광그룹

\*\*강릉대학교 세라믹공학과

(2001년 6월 4일 접수; 2001년 8월 3일 승인)

### The Stress Distribution Analysis of LD - converters with Different Edge Shapes by FEM

Sung-Soon Kim, Bong-Suk Han, Wan-Uk Hue\*, Chang-Su Ha\*,  
Hyung Jik Lee\*\* and Hong-Lim Lee†

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*POSCO Technology Research Center, Kwangyang 545-010, Korea

\*\*Department of Ceramic Engineering, Kangnung National University, Kangnung 210-702, Korea

(Received June 4, 2001; Accepted August 3, 2001)

#### 초 록

전로 내화물의 화학적인 부식에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 전로 내화물의 자체 무게와 구조적인 형상으로 발생하는 응력집중에 의한 내화물의 부식에 대해서는 그 연구가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 각이진 노저부 형상을 가지는 전로(모델 1)와 완만한 곡선 형상을 가지는 전로(모델 2)에 대하여 FEM을 이용하여 자중응력분포 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 비교 분석하였다. 시뮬레이션결과 슬래그 라인 근방에서 모델 2가 모델 1 보다 높은 응력값을 나타내었다. 따라서 열적·화학적 요인을 모두 고려한다면 조업 중기에 모델 2의 슬래그 라인 근방에서의 부식이 모델 1에 비해 심각할 것이라 결론 내릴 수 있다.

#### ABSTRACTS

There have been many studies about the chemical corrosion of converter's refractories. However, few studies have been reported for the stress corrosion induced by the weight of the refractories and by the two bottom shape models designed for the converter. In this study, the stress distributions of the two converter models were analyzed by FEM. Model 1 has the step edge shape and model 2 has the round edge shape. Simulation results show that model 2 of round bottom edge has higher gravitational stress just below the slag line than the model 1. Model 2 is considered to suffer more serious corrosion than model 1 during the middle working stage by the thermal and chemical factors.

**Key words :** Converter, Stress corrosion, FEM

#### 1. 서 론

전로의 내화물은 다른 제강로용 내화물에 비해 산소취입에 의한 용강의 교반, 노체의 경동 또는 회전, 더스트의 다량 발생, 취련에서 출강까지의 급격한 온도변화, 고온조업, 장입물의 충격 등의 요인에 의해 상당한 악조건 하에서 사용되고 있다. 따라서 지속적인 관찰과 시기 적절한 보수가 병행되어야 한다. 그러나 작업환경 특성상 노저부에 대한 지속적인 관찰이 힘들기 때문에 즉각적인 보수가 어렵다. 또한 생산성 향상을 지향하는 조업 여건으로 인하여 전로의

가동률이 증가하여 노체보수 시간이 부족한 실정이다.<sup>1)</sup> 현재는 컴퓨터와 로봇을 이용한 감시 보수 체제가 가동 중이긴 하지만 이 방법 역시 조업 중에 발생하는 전로의 문제에 대해서는 적절히 대처하지 못하고 있다. 따라서 전로조업 중에 발생하는 문제를 미연에 방지하기 위해서는 근본적인 전로에 대한 데이터를 이용하여 응력분포를 분석하고 사용수명을 예측하는 일이 필요하다.

전로 내화물의 수명을 저하시키는 원인은 크게 3가지로 구분할 수 있다.<sup>2)</sup>

첫째, 기계적 침식으로 원료 장입시의 충돌에 의한 침식이 있다. 충격완화를 위해 충돌 부위에 충격 완충재를 사용하거나 내화물 축조 시에 내충격성이 강한 내화재료를 선택

†Corresponding author : htm@yonsei.ac.kr

하여 두껍게 축조함으로써 다른 부위와의 침식 균형을 유지하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다.

둘째, 온도구배로 발생하는 열응력에 의한 침식이 있다. 전로내부의 온도는 조업 과정 중에서 주기적으로 변화한다. 이로 인해 내화물의 가동면과 내부에는 온도구배가 생기고, 열팽창 정도 차에 따라 열응력이 발생한다. 노내 온도 변동에 따른 내화물 표층 부의 균열 발생에 의한 침식현상을 열적 스프링이라 한다. 열적 스프링을 저감시키기 위해서는 내화벽돌 축조직후의 노체에열 및 조업중의 온도관리가 중요하다. 최근에는 열전도도가 우수한 흑연 분말을 혼합, 제조합으로써 표면과 내부의 온도 구배를 완만하게 유지하여 스프링에 강한 MgO-C 내화물이 개발되어 널리 활용되고 있다.

셋째, 화학적인 원인으로 슬래그와 내화물의 반응에 의한 부식을 들 수 있으며, 이는 노체의 수명을 결정적으로 좌우한다.<sup>3)</sup> 슬래그 중의 FeO는 MgO에 고용하여 MgO를 저융점화하여 용손을 촉진 한다. 슬래그에 의한 내화물 침식을 저감시키기 위한 기술로는 소량 슬래그 조업에 의한 슬래그 중의 MgO 용해량 및 슬래그내화물 간의 접촉면적 감소, Dolomite 첨가 또는 취련 종점 슬래그 잔류 활용에 의한 MgO 용출 저감 방법등이 사용되고 있다.

이와 같은 부식원인들 중에서 화학적인 원인에 의한 전로 내화물의 침식에 대해서는 많은 연구가 되어 있으나 구조적 형상으로 기인되는 응력부식에 대해서는 그 연구가 미비한 실정이다. 이것은 전로가 거대 기물이란 점과 조업 중에 발생하는 균열의 발생과 성장 관찰의 어려움으로부터 기인한 것이다. 따라서 본 연구에서는 전로에서 발생하는 응력부식에 대한 연구를 위해 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 기계 부품의 개발단계에서 성능과 형상의 최적화를 위한 도구로 널리 사용되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 제품의 개발 과정에서 범할 수 있는 시행 착오를 줄여줌으로써 개발 기간을 단축하고 비용을 절약하는 유용한 도구가 될 수 있으며, 부품의 형상과 특성을 최적화하고 개발품의 성능 향상을 기할 수 있다. 또한 시뮬레이션 과정에서 얻어진 데이터를 이용하면 여러 가지 조업 조건에서의 수명을 예측하여 실제 부품의 운용 효율을 높일 수 있다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션에서는 해석 결과를 얻기 위한 기초 데이터와 해석결과 및 오차의 분석이 매우 중요하므로, 여러 차례의 시뮬레이션 결과를 분석하여 해석 오류를 줄여야한다. 현재 시뮬레이션을 이용한 많은 연구가 진행중이다.<sup>4,6)</sup>

본 연구에서는 슬래그 라인에서의 부식 양상이 서로 다른 2가지 형상의 전로에 대하여 자중응력에 관한 시뮬레이션을 행하였다. 이 2가지 모델은 서로 다른 노저부 형상을 가지고 있다. 모델 1은 각이진 노저부 형상을 가지고 있고, 모델 2는 완만한 곡선으로 이루어진 노저부 형상을 가지고 있다. 시뮬레이션을 통해 이 두 모델간의 슬래그 라인 근방에서의 응력분포를 비교 분석하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 실험방법

응력해석 시뮬레이션에는 상용 프로그램인 ABAQUS 5.7-1.8을 사용하였다.

전로의 온도분포 해석을 위해 두 가지 모델을 구축하였다. 전로의 온도분포 해석을 위해 작성한 3차원 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 모델 1은 노저부가 각진 형상을 가지고 있고, 모델 2는 완만한 곡선으로 이루어진 노저부 형상을 가지고 있다.

모델의 모든 영역은 8개의 절점을 갖는 6면체 형태의 요소로 구성하였다. 해석의 오차를 최소한으로 줄이기 위해서 각 요소의 종횡비, 최소 및 최대 내각, 비틀림, 비대칭 왜곡도 등을 모두 고려하여 각 요소들이 최적의 기하학적 성질을 갖도록 하였다. 또한 정확한 해석 결과를 위해 외장 철판 부분을 제외하고 순수 내화물만을 모델링 하였다.

모델은 전체의 1/4에 대해서만 구축하고 양쪽의 전단면에 대해서는 대칭조건을 주었다. 중력조건을 주기 위해 모델의

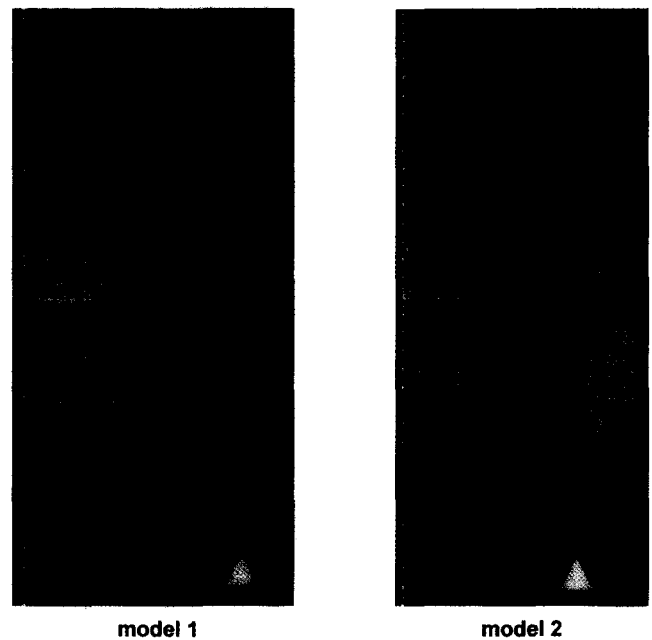


Fig. 1. 3D model of converters and boundary condition.

Table 1. Properties and Composition of MgO-C Refractory

Properties	Mean value
Density	2800 Kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus <sup>10)</sup>	7 G Pa
Poisson's ratio	0.2
Composition	Mean value
MgO	89.8 (wt%)
Carbon	6.5 (wt%)

아래 부분에 Fig. 1과 같이 y축 방향으로 고정시켰다.

시뮬레이션에 사용한 내화물의 물성을 Table 1에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 용강을 고려하지 않았을 경우

전로와 같은 거대 기물의 경우 응력 분포를 확인하기가 어렵고, 또한 내화물의 자체 무게에 의한 응력부식은 느린 균열 성장 파괴에 속하므로 상당히 시간이 지난 후에야 파괴가 일어나게 된다. 따라서 전로 내화물의 파괴는 화학적인 부식이나 혹은 열충격 파괴 등으로 분석될 수 있다. 그러나 전로의 슬래그 라인 부근은 슬래그와 용강 그리고 내화물간의 삼상계면이 존재하는 곳이다. 이 곳은 에너지적으로 매우 불안정한 곳이기 때문에 화학적, 기계적인 부식이 전로내에서 가장 활발한 곳이다. 따라서 이 부근에 높은 응력이 걸리게 되면 그 만큼 더 부식에 취약해 질 수밖에 없다. 이러한 관점에서 전로 내화물 노저부 형상의 변화는 자중에 의한 응력분포를 변화시킬 수 있고 이것은 노저부의 부식 양상을 변화시킬 수 있다.

전로의 노저부 형상이 서로 다른 2가지의 전로에 대한 3차원 모델을 이용한 전로의 응력분포를 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다. 이 두 가지 모델간의 슬래그 라인 부근에서의 응력값을 비교해 보면 모델 2의 경우 0.43 MPa 모델 1의 경우는 0.30 MPa로 최대 응력값이 모델 2가 더 큼을 알 수 있다.

여기서 나타낸 응력은 Von mise 응력으로 구조물의 설계

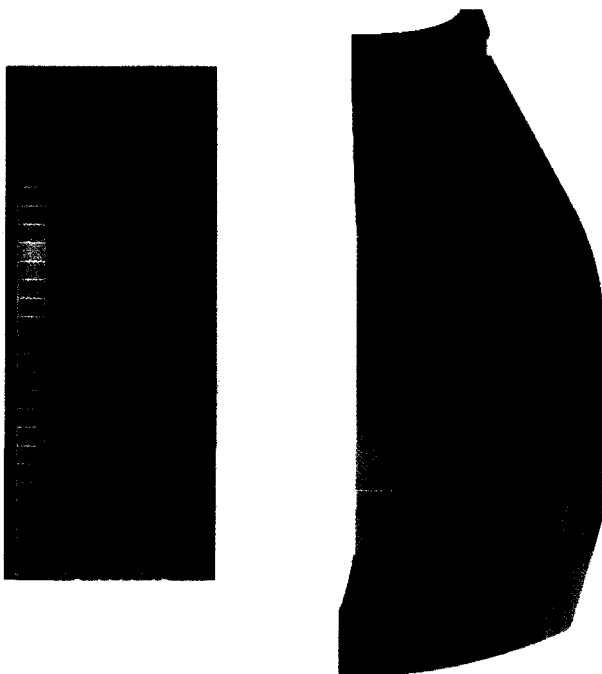


Fig. 2. Gravitational stress distribution of model 1.

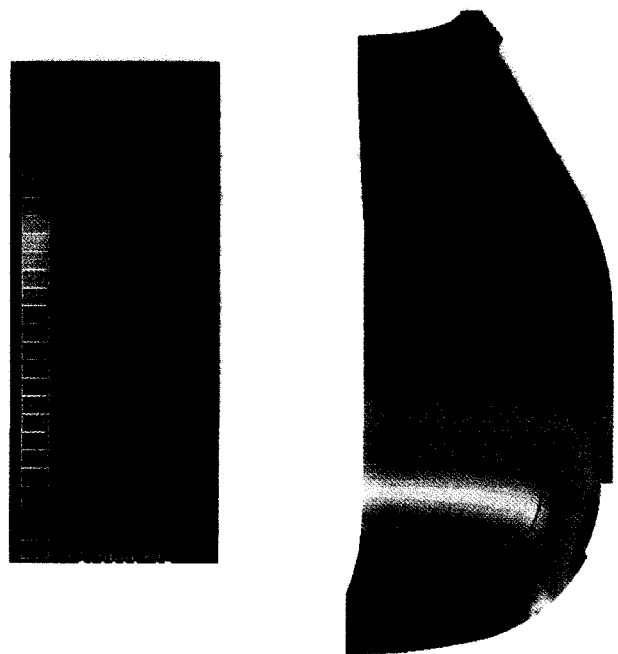


Fig. 3. Gravitational stress distribution of model 2.

에서 파괴 기준으로 사용되는 응력 기준 값이며 주응력  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 을 이용하여 아래의 식(1)로 나타낼 수 있다.<sup>7)</sup>

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$

이 응력 값은 각 지점에서 발생하는 주응력 성분의 응력의 최대값 분포를 응력의 방향에 관계없이 나타낼 수 있으므로, FEM 해석 결과에서 가장 응력이 많이 발생하는 부분을 확인하는데 주로 사용된다.

각각의 모델의 노저부에서의 응력분포를 자세히 관찰하기 위하여 응력집중 부분을 확대하여 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 모델 2의 경우 높은 응력이 슬래그 라인 조금 아래

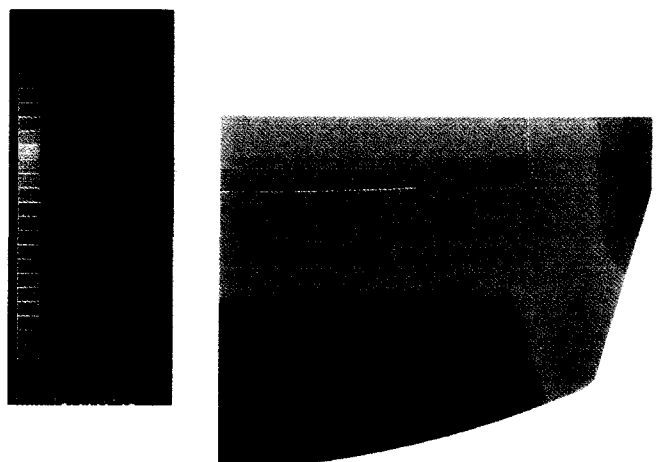


Fig. 4. Magnification view of model 1.

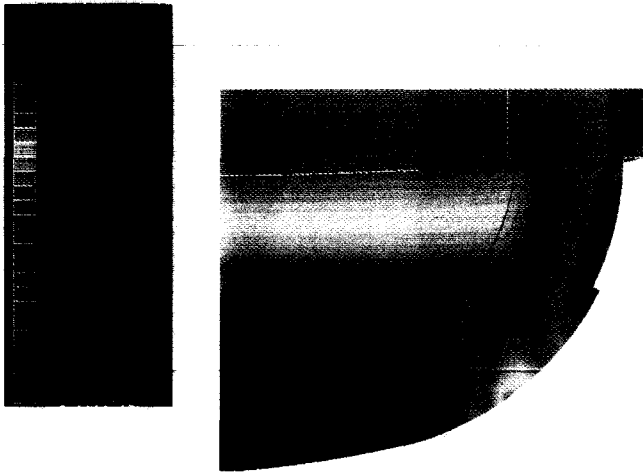


Fig. 5. Magnification view of model 2.

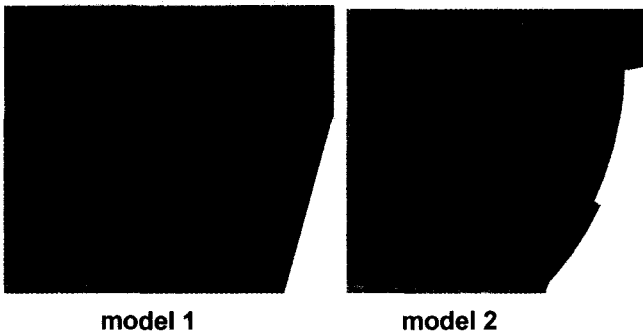


Fig. 6. Gravitational vector of model 1 and model 2.

에 넓게 분포하고 있고 이에 비해 모델 1의 경우는 상대적으로 높은 응력이 좁게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 높은 응력이 걸리는 부위의 면적이 클수록 작업 중에 응력부식에 의해 손상이 가해지는 면적이 커지게 되므로, 모델 2의 경우 슬래그 라인 근방에서의 부식은 모델 1에 비해 더 큰 면적에 걸쳐 발생되게 된다. 또한 모델 2의 경우가 모델 1에 비해 슬래그 라인 근방에서 발생하는 응력이 더 높으므로, 응력 부식의 속도가 모델 2가 더 빠르게 된다. 따라서 동일 조업 시점에서 모델 2의 슬래그 라인 근방에서의 부식이 모델 1에 비해 심각하게 될 것을 예측할 수 있다.

이 두 모델의 응력벡터 성분을 Fig. 6에 나타내었다. 모델 2의 경우 내화물의 무게에 의해 발생하는 y축 방향의 수직 응력성분이 별다른 방향의 전환 없이 전로 바닥의 수평성분과 만나게 되는 반면, 노저부 형상이 완만한 곡선 처리가 된 모델 2의 경우에는 수직으로 내려오던 응력이 곡선 부분을 따라 이동되게 되면서, 벡터들이 곡선이 시작되는 부분 부근(슬래그 라인 바로 아랫부분)에 집중되게 된다.

3.2. 용강을 고려한 경우

용강의 무게는 270 ton 이상인 것으로 알려져 있다. 조업

중에 용강은 랜스로부터 마하 2~3의 압력을 중심부에 받아 전로 내에서는 유체의 흐름이 발생된다.<sup>8)</sup> 이때 노저부는 위에서부터 내려오는 용강에 의해 교반압력을 받게 된다. 따라서 용강을 고려한 시뮬레이션에서는 이러한 용강의 움직임을 고려하는 것이 타당하다. 그러나 본 연구에서는 아직 이들에 대한 정확한 데이터를 확보하지 못한 상태이기 때문

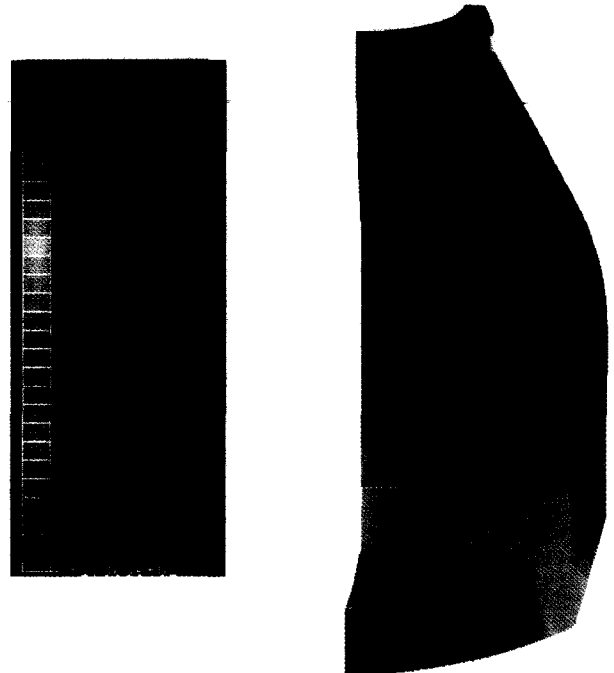


Fig. 7. Gravitational stress distribution of model 1 with melt.

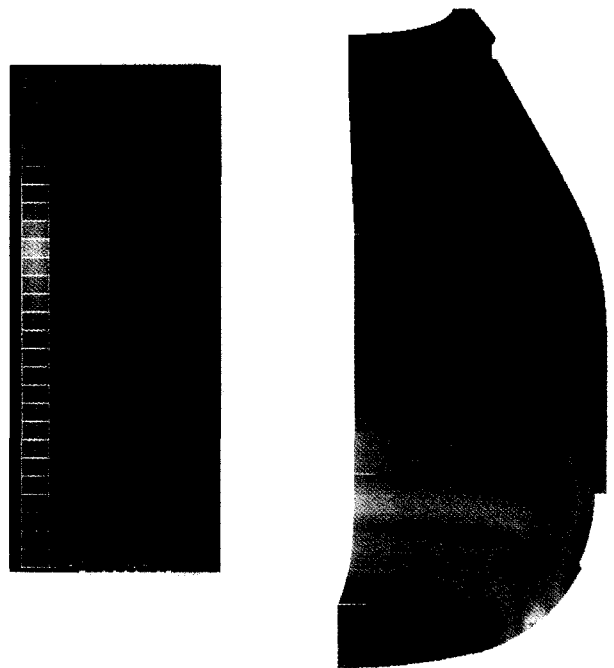


Fig. 8. Gravitational stress distribution of model 2 with melt.

에 용강의 이러한 움직임은 고려하지 않고, 단순히 무게만을 고려하여 시뮬레이션을 행하였다. 용강의 흐름을 고려한 시뮬레이션은 추후에 행할 예정이다.

용강과 접하고 있는 면에 용강의 무게로 인해 발생하는 압력조건을 주었으며 그 밖의 조건은 앞과 동일하다. 해석 결과 모델 1에는 0.33 MPa의 응력이 모델 2에는 0.48 MPa의 응력이 슬래그 라인 부근에 발생하는 것을 알 수 있다. 응력분포는 3.1절의 것과 비교하여 크게 차이가 나지 않았으나 용강의 무게에 의해 노저부에는 더 높은 응력이 걸리는 것을 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

만약 용강의 온도와 외벽의 온도차이로 인해 발생하는 열응력과 용강의 교반응력을 고려한다면 슬래그 라인 부근에 발생하는 응력은 본 연구에서 얻은 것 보다 훨씬 커질 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

각이진 노저부 형상을 가지는 모델 1과 완만한 곡선 형상을 가지는 모델 2에 대하여 각각 3차원 모델을 작성하였다. 이 모델을 이용하여 실제용융조건과 동일한 경계조건을 3차원 모델에 대입하였으며 이를 바탕으로 자체 중량만 고려한 경우, 자체 중량과 용강의 무게를 고려한 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 비교 분석하였다.

자중만을 고려하였을 경우 슬래그 라인 부근에서 모델 1에는 0.30 MPa이 모델 2에는 0.43 MPa의 응력이 발생하였다. 자중과 용강의 무게를 동시에 고려한 경우 자중만을 고려하였을 때와 응력분포는 비슷하나, 두 모델간의 슬래그 라인에서의 응력 값은 차이가 더 커졌다. 이 경우 모델 1의 최대응력 0.33 MPa이 모델 2에는 0.48 MPa의 응력이 발생하였다.

현재 복합취련전로에서는 용강의 교반이 심하여 노벽과 노상의 이음부를 구면 구조로 하여 이 부위의 마모를 억제하고 있다.<sup>9)</sup> 종래 구조에서는 노저내화벽들의 평행이동이

하부 노벽연화에 맞부딪쳐서 큰 응력이 발생한다. 이것에 대하여 구면구조에서는 노저의 이동을 비교적 부드럽게 노벽에 전달하여 바닥 부분의 응력이 크게 집중하는 것을 피하도록 하고 있다. 그러나 구면 구조의 경우 바닥 부분의 응력은 완화되나 대신 응력집중부위가 슬래그 라인 근방으로 이동하는 것을 시뮬레이션 결과 관찰할 수 있었다. 따라서 모델 2의 경우 전로 조업 중기에 모델 1에 비하여 노저부 슬래그 라인 근방의 부식이 심각해 질 것으로 예상할 수 있다.

#### REFERENCES

1. D. H. Baik, "Present Status of LD Steelmaking at Kwang-Yang Works," *Bull. Kor. Inst. of Met. and Mater.*, **6**(2), 129-137 (1993).
2. B. D. You, "Operational Practice of BOF for the Prologation of Lining Life," 2nd Metal Refinement Symposim, 133-160, *Kor. Inst. Met. & Mater.*, (1989)
3. G. Shin and S. M. Kim, "The Mechanism of Slag Attack on Pitch-Bearing Dolomite BOF Refractories," *J. Kor. Ins. Met. & Mater.*, **19**, 724-1447 (1981).
4. S. E. Park, J. H. Lee and H. L. Lee, "Determination of the Biaxial Strength by Ball-on-3-Ball Test," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36**(3), 225-230 (1999).
5. S. M. Jeong, S. E. Park and H. L. Lee, "Biaxial Fracture Behavior of Alumina Ceramics : Indentation Effect on Ball-on-3-ball Test," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(7), 713-720 (2000).
6. T. W. Kim and S. H. Park., "Micromechanical Analysis for Transverse Properties of Ceramic/Metal Composite," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38**(6), 575-581 (2001).
7. 조철호, 유한요소법과 파괴역학, pp. 46-47, 정림출판, 1984.
8. 김용식, 전로제강법, pp. 56-61. 기전연구사, 1995.
9. 김용식, 전로제강법, pp. 22-26, 기전연구사, 1995.
10. H. Baudson, F. Debucquoy, M. Huger, C. Gault and M. Riquad "Ultrasonic Measurement of Young's Modulus MgO/C Refractories at High Temperature," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **19**, 1895-1901 (1999).