

유한요소법을 이용한 VOD Ladle 내화물의 열응력 해석

이순욱 · 조문규* · 임종인* · 함경춘** · 배성인 · 송정일

창원대학교 기계공학과

*포항산업과학연구원 재료공정연구센터

**인하공업전문대학 기계설계과

(2001년 1월 9일 접수)

Thermal Stress Analysis of Refractory of VOD Ladle Using Finite Element Method

Soon-Uk Lee, Mun-Kyu Cho*, Jong-In Lim*, Kyoung-Chun Ham**, Sung-In Bae and Jung-Il Song

Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon, 641-773, Korea

*Center of Materials Process Research, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang, 790-660, Korea

**Department of Machine Design, Inha Technical Junior College, Incheon, 402-752, Korea

(Received January 9, 2001)

초 록

유한요소법을 이용하여 STS VOD 래들에서 내장 내화물의 재질 및 back filler의 시공 위치에 따른 열응력을 수행하였다. 불소성 내화물의 경우 높은 열전도율에 의해 가동면과 배면(back face)간의 온도구배가 소성품에 비해 감소하였으며 탄성계수도 낮아 발생하는 열응력이 2~4배 낮았다. Back filler는 dolomite 내화물의 열간 팽창을 흡수하기 위해 시공하는 것으로, 상대적으로 낮은 열전도율을 가지고 있기 때문에 back filler의 내부와 외부에 급격한 온도구배가 발생된다. 결과적으로 래들의 내부는 고온을 유지하여 내화물이 팽창이 되고, 외부는 온도가 낮아지므로 수축되어 열응력이 증가하였다.

ABSTRACT

Thermal stress of the STS(stainless)VOD(vacuum oxygen decarburization) ladle with the variation of material property of refractory and the location of back filler was analyzed by finite element method(FEM). In the case of unplastic refractory, thermal distribution between hot face and back face was decreased by high thermal conductivity, and thermal stress was decreased about 1/2~1/4 of original value with low young's modulus coefficients. Back filler, which was constructed to absorb the thermal expansion of refractory of dolomite, has relatively low thermal conductivity compared with others refractory. Thermal distribution of back filler between hot face and back face was changed rapidly. Consequently, thermal stress of refractory using back filler was increased with different temperature between inner and outer surface of the ladle.

Key words : Ladle, Dolomite, Back filler, FEM, Thermal Stress

1. 서 론

스테인레스(이하 STS로 약기함)강은 전기로에서 받은 용강을 AOD(Argon-Oxygen Decarburization)로에서 조탈산하고, VOD(Vacuum Oxygen Decarburization), VD(Vacuum Decarburization), LT(Ladle Treatment)등의 정련 처리를 거친 후 주조과정으로 들어간다. SUS 400계열의 STS강을 정련하는 VOD 조업은 1750°C 이상의 진공 및 고온조건하에서 최소 600 Nm³/hr 이상의 산소를 상하로 취입하고, 저점도의 슬래그가 조성되는 가혹한 조건에서 진행되는 조업이다. 특히 ULCN 강과 같은 고급강 생산을 위해서는 VD처리시 Ti, Al, Si, CaO, CaF₂ 등의 탈산제를 사용하는데, 이때 용강온도의 상승, 슬래그의 염기도 및 점도의 급변 등으로 극히 가혹한 조건을 초래한다. 이와 같은 조건에서 내

화물에 발생할 수 있는 손상으로는 화학적인 용손과 역학적인 파괴로 구분할 수 있다. 용용 금속이나 슬래그와의 화학적인 반응에 의한 용손은 내화물의 재질 및 사용조건에 따라 달라지므로 어느 정도 예측이 가능하다. 예를 들어, 박재원등¹⁾은 1550°C~1600°C의 온도 범위에서 stamp 재의 원료로서 사용되는 돌로마이트 클링커에 대해서 Fe₂O₃의 포함 유무에 따른 용강에 의한 침식거동을 연구하였다. 열충격에 의한 spalling, 외력에 의한 역학적인 파괴에 관해서는 발생위치나 시간, 파괴형상 등에 대한 사전예측이 어려워 이로 인한 조업중단 등의 사고가 발생하기도 한다. Alsica 내화물의 경우 슬래그에 대한 강한 내침식성과 열충격 저항성이 우수한 흑연의 특성을 이용하여 알루미늄계 내화물의 단점인 낮은 열충격 저항성 및 연기성 슬래그에 대한 낮은 내침식성을 보완한 내화물로, 이 경우 고온에서 산화하기 쉬

운 흑연의 단점이 나타난다.^{2,3)} 이외에도 제강 래들의 제작 시 내화제에 미치는 열응력에 관한 연구가 몇몇 연구자^{4,9)}에 의하여 이루어졌으며, 이러한 내화물에 작용하는 응력 및 손상원인을 미리 조사 분석한 후에 이에 대한 대책을 수립하는 것이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 STS ladle의 내장 내화물로서 MgO-CaO계 dolomite 내화물을 적용하는데 있어 dolomite 내화물의 재질에 따른 노체의 온도 및 열응력 분포를 해석함으로써 적합한 재질을 선정하고자 하였다. 또한 dolomite 내화물의 배면에 시공하여 dolomite 내화물의 열간팽창을 흡수하는 stamp재의 일종인 back filler(이하 B/F로 약기함)의 시공 여부에 따른 노체의 온도 및 열응력 분포를 해석함으로써 B/F의 적용 효과를 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1. 해석대상

본 연구에서 해석대상인 STS ladle의 개략도를 Fig. 1에

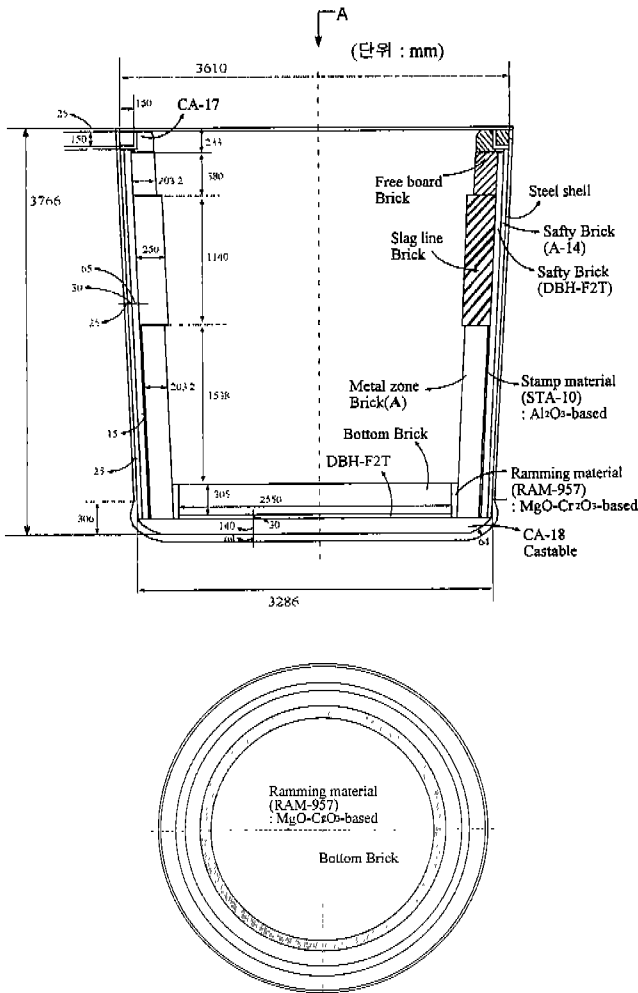


Fig. 1. Schematic diagram of STS ladle.

나타내었다. 영구장에는 Al₂O₃-SiO₂계 내화물(A-14), 준영구장에는 MgO-Cr₂O₃계 내화물(DBH-F2T)을 사용하고 있으며, blanket 부위와 바닥 영구장으로는 Al₂O₃계 부정형 내화물인 CA-17, CA-18을 적용하고 있다. 바닥용 내화물과 벽체용 내화물이 접하는 경계부위에는 바닥용 내화물의 열간 팽창을 흡수하기 위해 MgO-Cr₂O₃계 stamp재(RAM957)를, 벽체용 내화물과 준영구장이 접하는 경계부위에는 벽체용 내화물의 열간 팽창을 흡수하기 위해 Al₂O₃계 stamp재(STA-10)를 사용하고 있다. 가동면에는 dolomite 내화물을 적용하는데, 1차 lining의 경우는 metal zone(이하 M/Z으로 약기함)과 bottom(이하 B/T으로 약기함) 부위에는 탄소가 함유된 불소성품을, free board(이하 F/B로 약기함)와 slag line(이하 S/L으로 약기함) 부위에는 소성품 dolomite 내화물을 사용하였다. 한편 2차 lining의 경우는 모든 부위에 탄소함유 불소성품을 적용하였으며, back filler는 ①시공하지 않거나, ②M/Z까지 시공, 그리고 ③M/Z 및 S/L까지 시공하였다. Dolomite 내화물의 재질 및 back filler의 적용부위에 따른 분석항목을 Table 1에 정리하여 나타낸다.

각 물질층의 측정방법으로는, 시편표면에 초음파를 조사한 다음 반대편에서 초음파를 감지하여 온도에 따른 시편의 탄성율을 측정하였으며, dilatometer를 이용하여 Ar 분위기 하에서 승온속도 10°C/min으로 시편의 열간선변화율을 측정하였다. 한편, 시편의 열전도율은 hot wire법과 laser splash

Table 1. Conditions of Thermomechanical Analysis by FEM

| | No construction of back filler(B/F) | Construction to metal zone(M/Z) | Construction to metal zone(M/Z) and slag line(S/L) |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|
| 1st lining | case11 | case12 | case13 |
| 2nd lining | case21 | case22 | case23 |

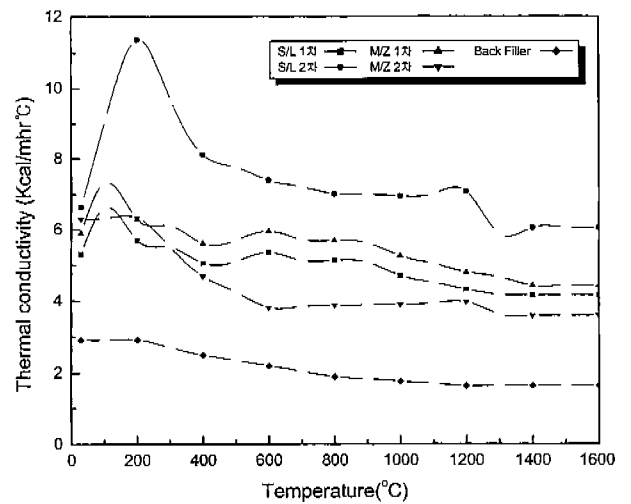


Fig. 2. Thermal conductivities of each material with varying temperature.

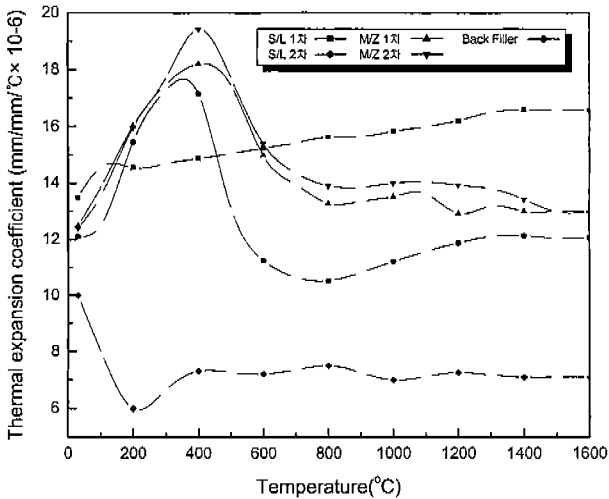


Fig. 3. Thermal expansion coefficient of each material according to the variation of temperature.

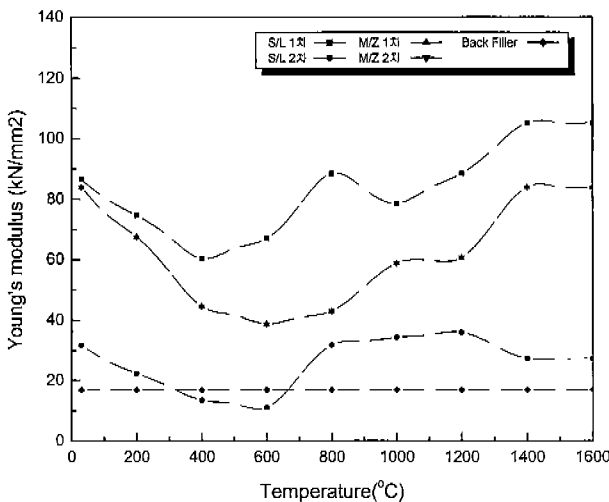


Fig. 4. Young's modulus of each materials according to the variation of temperature.

법을 이용하여 측정하였다. 600°C로 예열되어 있는 고온취임강도 시험기에 시편을 장입한 후, 30분간 유지하여 시편 내의 온도분포를 균일하게 하였다. 그리고 10°C/min의 속도로 목표온도까지 승온하고 30분간 유지한 후, 고온취임강도를 측정하였다. Fig. 2~4는 FEM 해석시 주요 관심부분인 M/Z, S/L 및 B/F (STA-10)의 온도 변화에 따른 물성치를 열전도도, 열간선변화율 및 탄성계수의 순으로 정리하여 나타내었다.

2.2. 열전도 및 열응력

열전도는 높은 에너지 입자에서 근접해 있는 낮은 에너지 입자로의 입자사이의 상호작용의 결과로서 나타나는 에너지 전달이다. 열전도는 고체, 액체 및 기체 상태에서 일어날 수

있다. 전도는 입자들의 불규칙한 운동중에 나타나는 충돌과 확산에 의해서 이루어진다. 고체상태에서는 격자 단위에서 입자들의 진동에 의한 전도도도 고려해야 한다. 이러한 열전도는 접촉 면적과 온도차이에 비례하며, 두께에 반비례하며, 수식으로 나타내면 아래식처럼 나타낼 수 있다. 여기서 k는 열전도도(Thermal conductivity)이다.

$$\begin{aligned} \text{Rate of heat conduction} &\propto \frac{(\text{Area})(\text{Temperature difference})}{\text{Thickness}} \\ &= -kA \frac{dT}{dx} \end{aligned}$$

만일 어떤 물체가 단성 변형을 하고 이 물체에 외력과 열이 작용될 경우, 주어진 물체가 받는 전체 응력은 외력에 의한 응력과 열에 의해 작용되는 열응력으로 나타낼 수 있다. 여기서 열응력은 어떤 물체의 온도가 상승하면 물체 내부의 격자에너지가 증가되고 원자의 진폭은 점점 증대되어 결과적으로 물체의 자유팽창을 가져온다. 이때 단단한 지지물로 물체의 자유팽창을 억제한다면 물체내부에서는 커다란 응력이 발생하게 된다. 이것은 물체를 특정온도에서 자유로이 팽창시킨 뒤 처음의 크기로 압축할 때 필요로 하는 응력과 같은데 이때 발생하는 응력을 열응력이라고 정의한다. 열응력의 발생사유는 일반적으로 다음의 3가지로 분류한다.

- 1) 자유팽창의 억제 - 물체의 구속된 상태에서 온도변화에 의해 발생하는 열응력.
- 2) 급열, 급냉에 의한 온도구배 - 각 체적소편(element)의 자유팽창이 불가능한 경우에 시료내부의 온도구배에 의한 열응력.
- 3) 일정속도로 온도변화 - 일정속도로 표면의 온도변화에 의해 표면과 중심에서의 온도구배로 발생하는 열응력.

위의 3가지 경우 중, ladle에서는 형상에 의한 자유팽창의 억제로부터 열응력이 발생된다.

2.3. Modeling 및 경계조건

노체 열응력 해석에는 FEM을 기본으로 한 구조해석 program인 ANSYS 5.3을 이용하였다. ANSYS에서 모델 생성시 가장 기본 단위가 되는 것은 절점이며 각 절점을 연결하여 선을 생성하고 다시 선에 의해서 면을 생성하는데, 면의 생성시 단면이 사각인 경우에 해석 결과가 우수하므로 AutoCAD를 이용하여 ladle의 단면을 사각단면으로 분할함으로써 기본적인 모델을 생성하였다. 모델 생성후 각 면의 절점들을 출력하여 ANSYS 5.3에서의 절점좌표로써 이용하였다. Katsunori Takahasi³⁾에 따르면 brick lining으로 이루어진 ladle에 있어서 스폴링 현상과 관계가 있는 인장응력을 확인하기 위해서는 FEM 모델시 brick과 brick의 연결을 gap element와 dummy element를 사용해야한다고 보고한바 있다. 하지만 본 연구에서는 스폴링 현상보다는 M/Z 및 S/L에서 반경방향으로의 온도구배 및 열응력에 관심이

있으므로 gap element와 dummy element를 사용하지 않고 단순화 시켰다. 온도조건으로는, 내부를 조업온도인 1600°C로, 외부는 대류열전달(대류열전달계수 = 0.03)이 일어나게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 내화물의 재질에 변화에 따른 열응력 해석

Fig. 5에 ladle의 높이방향으로 dolomite 내화물의 배면(outer)에서의 온도 계산결과를 나타내었다. Back filler는 시공하지 않았으며, 사용초기의 ladle에서 1600°C의 용강을 수강한 상태를 기준으로 분석하였다. S/L 및 F/B 부위를 소성품으로 적용한 1차 lining에 비해서 불소성품을 사용한 2차 lining의 경우 S/L에서의 평균온도가 약 270°C 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 소성품에 비해 높은 열전도율을 가지는 불소성 dolomite 내화물을 적용하였기 때문이며, 그 결과 가동면과 dolomite 내화물 배면간의 온도구배가 감소하였다.

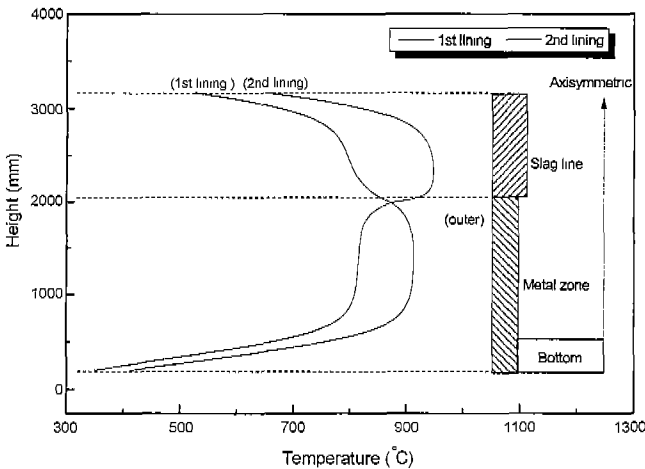


Fig. 5. Temperature distribution of dolomite brick at outer face of the ladle.

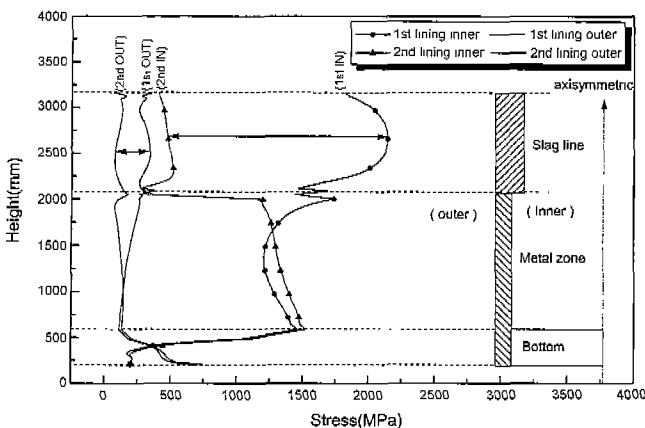


Fig. 6. Thermal Stress of dolomite brick of the ladle at hot face(inner) and back face(outer).

Fig. 6은 ladle의 높이방향으로 dolomite 내화물의 가동면(inner)과 배면(outer)에서의 열응력 계산결과를 나타낸 것이다. M/Z의 경우는 lining에 따른 열응력 차이가 크지 않다. 반면에 S/L의 경우는 뚜렷한 차이를 보여주고 있다. Dolomite 내화물의 배면에서는 1차 lining의 경우 300 MPa 정도의 열응력 값을 나타낸 반면에 2차 lining은 1/2수준인 150 MPa 정도의 열응력이 발생되었다. 또한 dolomite 내화물의 가동면에서는 1차 lining의 경우 2000 MPa 정도의 높은 열응력 값을 나타내었지만, 2차 lining은 1/5수준인 400 MPa 정도의 열응력 값을 나타내었다. 이상의 결과로부터 전 부위에 불소성품을 적용한 2차 lining이 열응력에 대해서는 낮은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 특히 S/L의 경우 높은 열전도율과 낮은 선팽창계수 및 탄성계수를 가지는 내화물의 적용으로 1차 lining에 비해 매우 낮은 열응력을 나타내었다.

3.2. Back Filler의 시공여부에 따른 열응력 해석

Fig. 7은 2차 lining시 S/L에서의 반경방향으로의 열분포를 나타낸다. 그림에서 보는것처럼 S/L의 배면에 B/F가 시공된 경우가 높은 온도구배를 나타내고 있다. Fig. 8은 2차 lining에서 B/F의 시공위치에 따라 온도분포를 해석한 결과이다. B/F의 시공조건에 따른 온도분포를 비교하면 B/F 자체의 열전도도가 다른 재질에 비해 낮기 때문에 B/F가 시공된 부위에서 온도가 낮게 유지될을 알 수 있다. 즉, B/F가 시공 안된 경우에 비하여 시공된 경우에 M/Z에서는 평균온도가 30°C 정도 낮았으며, S/L의 경우에는 약 55°C 낮게 나타났다.

Fig. 9는 ladle의 높이방향으로 dolomite 내화물의 가동면(inner)과 배면(outer)에서의 열응력 계산결과를 나타낸 것이다. Dolomite 내화물의 가동면(inner)에서는 B/F의 시공조건에 상관없이 유사한 값을 나타내었지만, dolomite 내화물의 배면(outer)에서는 B/F를 시공함에 따라 열응력이 50~110

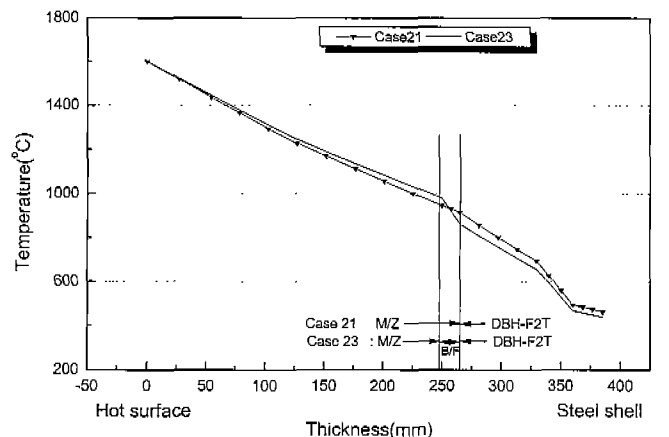


Fig. 7. Thermal distribution of the ladle at the slag line of the 2nd lining according to construction of back filler.

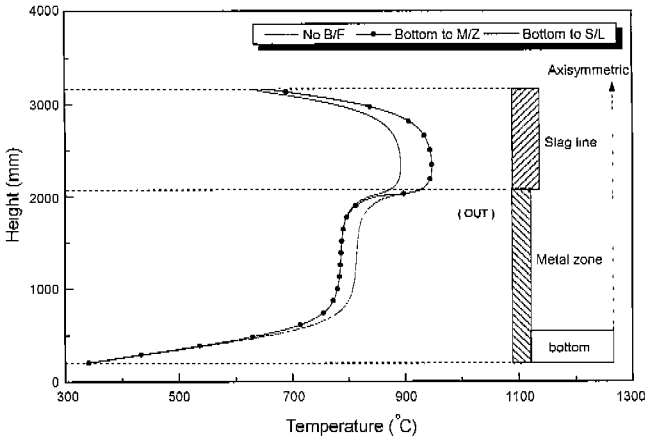


Fig. 8. Temperature distribution of the dolomite brick of the ladle at back face(outer).

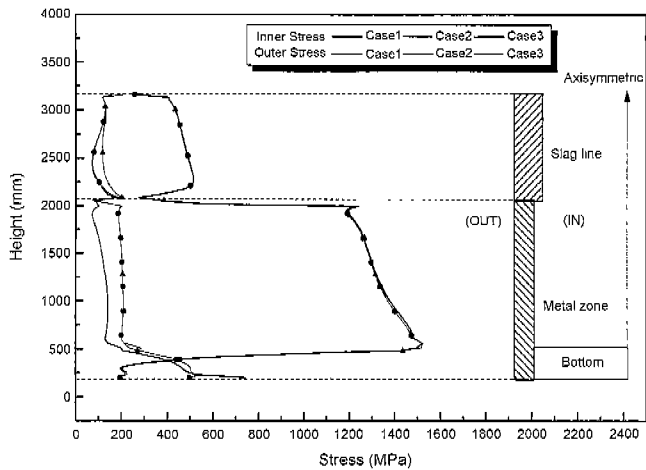


Fig. 9. Thermal stress of the dolomite brick of the ladle at hot face(inner) and back face(outer).

MPa 정도 높아졌다. 즉, B/F를 시공하지 않은 case1에 비해 B/F를 M/Z에 시공한 case 2, 3의 경우 110 MPa 정도 높은 열응력을 나타내었다. 또한 S/L에 B/F를 시공하지 않은 case 1, 2에 비해 시공한 case 3의 경우 평균 열응력이 50 MPa 정도 높게 나타남을 알 수 있다. B/F는 시공시 dolomite 내화물의 열팽창을 흡수하는 반면에 B/F가 시공되는 만큼 내장 내화물의 부피가 줄어들며, 또한 낮은 열전도율로 인하여 Fig. 9의 결과에서 알 수 있듯이 온도구배가 증가하게 된다. 이러한 B/F의 낮은 열전도율에 의한 dolomite 내화물내의 평균 온도 감소 및 부피감소로 인하여 B/F를 시공할 경우 dolomite 내화물에서 열응력이 증가하는 결과를 초래하게 된다.

본 연구에서는 B/F를 설치하지 않은 경우가 Fig. 10에서 처럼 전체적으로 가장 작은 응력을 나타냈다. 따라서 B/F를 사용하는데 있어서 dolomite 내화물의 열팽창을 흡수할 수 있는 최소한의 두께로 시공하는 것이 바람직하다

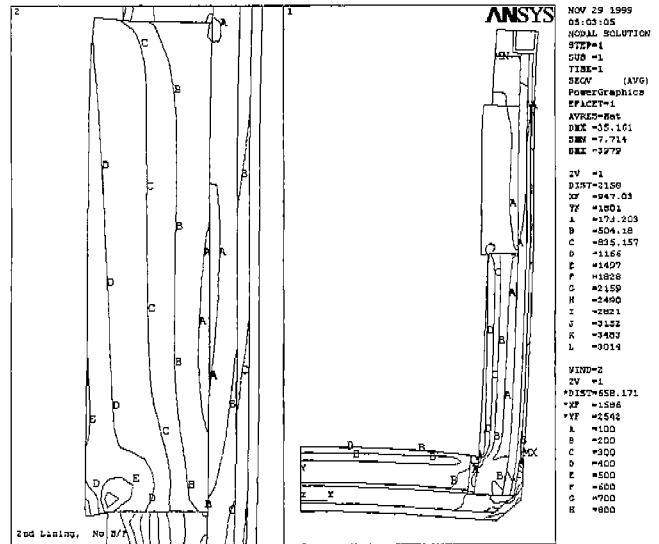


Fig. 10. Thermal stress of the fire brick of the ladle without back filler in the 2nd lining.

고 판단되며, 이러한 결과는 향후 STS ladle에 대한 B/F의 최적 시공두께를 도출하기 위한 분석자료로 활용될 것이다.

4. 결 론

유한요소법을 이용하여 STS 정련용 레이블에서 내장 내화물의 재질 및 back filler의 시공 위치에 따른 열응력 해석을 행하였다. 불소성 내화물의 경우 높은 열전도율에 의해 가동면과 배면간의 온도구배가 소성품에 비해 감소하였고 탄성계수도 낮아, 발생하는 열응력이 2~4배 낮았다. Back filler는 dolomite 내화물의 열간 팽창을 흡수하기 위해 시공하는 것으로, 상대적으로 낮은 열전도율을 가지고 있기 때문에 back filler의 내부와 외부에 급격한 온도구배가 발생된다. 즉 내부는 고온을 유지하고 외부는 온도가 낮아 지므로 내부의 팽창과 외부의 상대적인 수축이 발생됨으로써 노체의 열응력이 증가하게 된다. 따라서 back filler를 사용할 경우 반경방향으로의 온도분포는 낮출 수 있지만 열응력 증가의 요인이 되므로 가능한 최소의 두께로 시공하는 것이 바람직하다.

REFERENCES

1. 박재원, 홍기곤, "용강에 의한 들로마이트 클링커의 침식 거동," 한국요업학회지, **35**(12), 1301-07 (1998).
2. 조문규, 정두화, 이석근, "Al₂O₃-SiC-C 내화물의 특성에 미치는 MgO의 첨가효과," 한국요업학회지, **35**(2), 129-36 (1998).
3. 조문규, 홍기곤, "제강용 레이블 슬래그에 의한 스피넬 클링커의 침식 거동," 한국요업학회지, **36**(10), 1035-39 (1998).

- (1999).
4. K. Takahasi, Y. Miyamoto and M. Kumagai, "Thermomechanical Stress Analysis in Brick Linings by FEM using Non-linear Boundary Condition," Technical research laboratories, Kawasaki Steel Corporation.
 5. B. Nagai, O. Matsumoto, T. Isobe and Y. Nishiumi, "Wear Mechanism of Castable for Steel Ladle by Slag," *Taikabutsu*, **42**(8), 15-20 (1990).
 6. M. Kobayashi, K. Kataoka, Y. Sakamoto and I. Kifune, "Improvement of Alumina-magnesia Castable for Steel Ladle Wall," *Taikabutsu*, **49**(2), 74-80 (1997).
 7. I. Takano, H. Shikano, I. Furusato, I. Takita and K. Furuta, "Effect of Spinel Raw Material on Corrosion Resistance for Steel Ladle Castable," *Taikabutsu*, **43**(4), 187-192 (1991).
 8. A. Nagasoe, S. Tsurumoto and A. Kitamura, "Refractory Characteristics of Spinels with Various MgO Contents," *Taikabutsu*, **43**(1), 2-10 (1991).
 9. E. S. Chen, "Selection of Ladle Lining Materials for Thermomechanical Performance," Thermomechanical Design, Inc.