

## 큐폴라 용해로 철판의 열응력 및 피로수명 해석

양영수\*, 배강열\*\*,#

\*전남대학교 기계공학과, \*\*경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

### Analysis of Thermal Stress and Fatigue Life in the Steel Shell of a Cupola Furnace

Young-Soo Yang\*, Kang-Yul Bae\*\*,#

\*Department of Mechanical Engineering, CNU, \*\*Department of Mechatronics Engineering, GNUST

(Received 15 October 2019; received in revised form 1 December 2019; accepted 6 December 2019)

#### ABSTRACT

Thermo-mechanical analysis was carried out using the finite element method for the steel shell of a cupola furnace. When the outer surface of the shell was cooled with water to within the temperature range of 35–80 °C during operation of the cupola, the inner surface of the shell was expected to exhibit a temperature of 65–248 °C based on heat transfer analysis. The shell was also expected to have an equivalent stress range of 100–280 MPa in the outer surface over the temperature range examined. Upon cooling the shell to obtain an outer surface temperature <80 °C, the maximum equivalent stress of the shell did not exceed the yield strength. Although the temperature of the outer surface varied between 35 and 80 °C periodically due to the cooling control problem, the fatigue stress at the outer surface of the shell was calculated to be within the fatigue strength. During a non-operational period to examine the system between furnace operations, the thermal stress presented in the shell was sufficiently low to reach the desired yield strength and fatigue limit.

**Key Words** : Cupola Furnace(큐폴라 용해로), Steel Shell(철판), Thermal Stress(열응력), Fatigue Life(피로수명), Finite Element Method(유한요소법)

#### 1. 서론

제철 산업에서는 다양한 종류의 설비가 활용되고 있으며, 각 설비의 효율적 기능을 위한 설계 및 안정적 운영을 위한 유지와 보수 기술의 개발이 지속되고 있다. 특히, 설비의 강도 평가 등 안전성을 체계적으로 규명하기 위한 연구는 제철 산

업에서 중요한 선결 과제가 되고 있어, 제철 설비에서 중요한 비중을 차지하고 있는 용해로 등에 대한 안정성 연구가 다수 수행된 바 있다<sup>[1-3]</sup>. 용해로의 벽 구조는 주철재(stave)와 내화물(castable)로 구성된 내화부가 단열 작용을 하고, 외곽의 철판(steel shell)이 구조재로서 벽을 지지하는 형태이다. 용해로 철판에 대한 강도 건전성을 연구하여, 용해로 내벽의 손상이 없고 철판의 냉각 효과가 정상인 경우에 대한 철판 강도해석 결과를 보고한 사례가 있고, 내화부의 기능이 비정상인 경우에 대비한 철판의 안정성에 대한 대책을 제안하고 있

# Corresponding Author : kybae@gntech.ac.kr

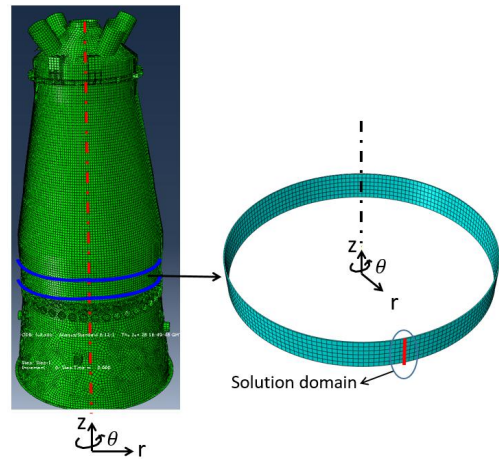
Tel: +82-55-751-3384, Fax: +82-55-751-3389

다<sup>[1]</sup>. 한편, 큐폴라 용해로의 지속 사용으로 노후화가 진행되면서 철판이 가열되는 현상이 발생하고 있다. 이는 내화물 등 내부 단열부가 국부적인 마모 등으로 인해 열화되어 단열 기능을 제대로 하지 못하는 결과로 판단된다. 철판의 열전도가 용이해 지면, 철판에는 고온과 열하중 등에 의한 안전성의 문제가 야기될 수 있다. 이에 대한 대책으로, 철판 내로 냉각수를 흘려 보내는 냉각반을 설치하거나 철판의 외면에 냉각수를 분사하는 방식이 효과적으로 적용되고 있다<sup>[4]</sup>.

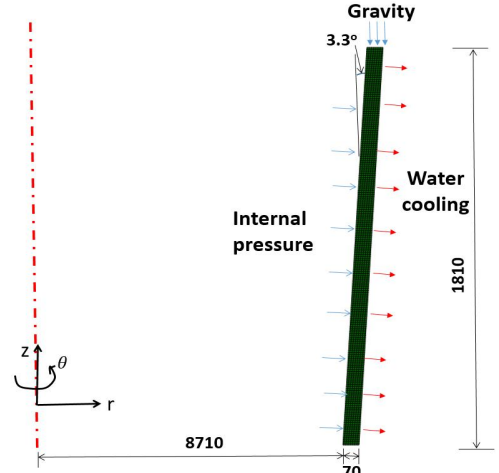
용해로 철판에서 균열이 생성되는 현상은 실제 산업현장에서 중요한 문제가 되고 있다. 철판의 안전성 확보를 위해 외면의 온도 측정이나 음파를 이용한 균열 발생의 조기 탐지 기술이 연구되고 있다<sup>[5]</sup>. 큐폴라 용해로 철판에서 균열이 발생하면 열하중에 의한 피로나 고온에 의한 크립에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 주기적인 반복하중이 작용되면 피로에 의한 균열의 가능성이 높고<sup>[6]</sup>, 재질 용융점의 0.4배 이상인 고온에서 하중이 지속적으로 작용되면 크립에 의한 균열의 발생 가능성이 높다<sup>[7]</sup>. 용해로 내부는 연료의 연소에 의해 발열하기 때문에, 고온의 상태가 유지되고, 연소 상황에 따라 불규칙한 온도 분포를 하게 된다. 그럼에도 용해로 내벽의 내화물이 전열을 차단하고 외부에서는 수냉을 시행하기 때문에, 철판이 크립이 우려되는 고온에 지속적으로 노출되는 상황은 아닌 것으로 판단할 수 있다.

냉각수 분사로써 철판 외면 온도를 일정 온도 이하로 관리하는 상황에서도 철판 내외면의 온도 차이가 발생하고 상하 및 원주 방향 위치에 따라 온도분포가 불균일한 상태에 있어, 열응력의 발생과 열응력의 주기적 변동이 발생될 것이고, 이로 인한 피로 하중이 작용하게 될 것으로 예측된다.

본 연구에서는 용해로 작동 중에 철판 외면 온도의 유지 수준에 따라 철판의 내면 온도, 응력 분포, 그리고 열하중으로 인한 피로 하중의 크기를 예측하고자 하였고, 이와 같은 크기를 철판의 항복 및 피로강도 수준과 비교하여 안전성을 검토하고자 하였다. 또한 주기적 점검을 위한 휴풍 및 살수 중단 시, 철판의 온도 및 열응력 분포를 계산하여 안전성을 함께 검토하고자 하였다.



(a) Axisymmetric shape



(b) Dimension and boundary condition

Fig. 1 Solution domain for finite element analysis of cupola furnace shell

## 2. 온도분포 및 열응력 해석

### 2.1 용해로 구조와 2차원 해석 모델

용해로 형상은 Fig. 1(a)와 같이 원통의 외형을 가지며, 연소와 용해가 이루어 지는 내부 공간을 둘러 싸는 외벽의 구성은 내부의 단열부와 외부의 철판으로 구성되고, 철판의 재질은 SM490 탄소강이다. 용해로의 노후화가 진행되면, 단열부가 국부적으로 탈락되는 문제가 발생한다. 외부 철판에서의

균열 발생은 주로 하단부의 코우크스 연소에 의한 가열영역에서 예견되며, 균열의 방지를 위한 대책 등을 고려하기 위해서는 열응력 및 피로수명 해석이 필요하다. 전체를 해석영역으로 설정하면 계산의 효율이 떨어지기 때문에 안전성이 우려되는, 연소에 의한 가열부를 둘러 싸고 있는 영역만을 해석영역으로 설정하였고, 철판의 원통형 구조를 고려하여, 2차원 축대칭 면으로 모델링하였다. 단열부의 열화 및 탈락 상태를 명확히 파악하여 적용할 수 없고 접촉부의 열적 저항 등을 가늠하기 어렵기 때문에, 외면 온도의 측정이 가능한 철판 자체만을 해석 대상으로 고려하였다. Fig. 1(a)에서는 용해로 내의 가열 영역과 해당 영역을 싸고 있는 철판의 확대된 형상을 보여 주고 있다. Fig. 1(b)는 해석영역의 축대칭 단면 모델 및 경계조건을 보여 주고 있다. 온도분포 및 열응력 해석은 상용 소프트웨어를 사용하여 수행하였다<sup>[8]</sup>.

## 2.2 온도분포 해석

철판의 온도분포 해석에서는 SM490 탄소강의 열적 물성인 열전도도와 비열이 온도변화에 따라 변화하는 크기를 고려하였다. 철판 외면에는 냉각수가 분사되고, 동시에 온도의 측정이 가능하다. 철판의 내부 표면온도가 주어지면, 열전달과 외부 표면에서 수냉에 의한 대류현상을 고려하여 철판의 외부 표면온도를 계산할 수 있다. 철판 내부온도를 단계적으로 변화시켜 외부 표면에서의 온도를 반복적으로 계산하고, 측정된 외부 표면 온도와 일치하면 내부 표면 온도를 결정할 수 있다. 철판 외부 표면에서는 위치 또는 냉각 상황에 따라 온도가 35 ~ 80°C의 분포로 측정되고 있다. 온도계산에서 필요한 입력조건으로 철판 외면에서 수냉이 발생할 때의 대류열전달계수  $h$  값이 주어져야 한다. 대류열전달계수는 Prandtl number를 활용하여  $2114 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{°C}$  값을 추정하여 도출하였다<sup>[9]</sup>.

용해로 철판의 주기적 점검을 위하여 코우크스 연소를 위한 송풍을 중단하고 철판 외면에 살수를 중단하면, 철판의 온도가 상승하여, 열하중 상황이 변화될 수 있다. 이를 위한 온도 해석을 수행하였다. 송풍 및 살수 중단 상태에서 철판 내부 표면

온도는 최대 600°C로 측정되므로, 온도분포 해석에서는 내부 표면온도를 100°C에서 600°C까지 상승시켰으며, 외부 표면에서는 공기에 의한 자연대류조건으로 설정하고, 대류계수는  $10 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{°C}$ 를 적용하였다. 해석영역은 축대칭 4각형 요소 2954개로 분할하였고, 요소 크기는 5 mm이었다.

## 2.3 열응력 해석

용해로 철판에는 온도 변화와 함께 자체의 중력과 내부의 압력이 작용하게 된다. 철판 전체의 무게는 1063 ton이며, 내부에 3139 ton의 내화부가 부착되어 있기 때문에, 철판 하단부에서는 4202 ton의 하중을 받고 있다. 한편, 해석하고자 하는 영역에는 상부로부터 2365.2 ton의 하중이 작용하는 것으로 계산되고, 이를 단면적으로 나누면 약 6.18 MPa의 응력값에 해당한다. 이 값은 상온에서의 철판 항복응력(295 MPa)의 2%정도 수준이다.

$$\sigma_z = \frac{W}{2\pi r t} = \frac{2,365,200 \text{ kg}_f}{2\pi(8,710)(70) \text{ mm}^2} = 6.18 \text{ MPa} \quad (1)$$

이 값을 해석영역 상단부에서 수직으로 작용하는 하중으로 고려하고, 하중 조건으로 입력하였다.

용해로 내의 송풍 압력은 4.5 기압으로 일정하게 작용한다고 가정하였으며, 내부 지금(raw metal)과 연료에 의한 압력은 Rankine이 제시한 토압 이론을 이용하여 0.18 기압으로 산정하였다<sup>[10]</sup>. 용해로 내부에서 작용하는 압력을 중첩하여, 해석영역에서의 압력 경계 조건으로 적용하였다. 내부 압력에 의해 철판 내부 표면에 작용되는 축방향 및 원주방향 응력은 각각 0.468 MPa와 58.2 MPa (소재 항복응력의 20% 수준)로 예측된다.

$$\sigma_z = 4.5 \text{ 기압} + 0.18 \text{ 기압} = 4.68 \frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2} = 0.468 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P r}{t} = \frac{0.468 \times 8,710}{70} = 58.2 \text{ MPa} \quad (3)$$

Fig. 1(b)에서 경계조건으로, 모델의 상단에서는 수직 방향으로 중력이 작용하고 수평방향으로는 자유단으로 설정하였고, 하단에서는 좌측점을 고

정점으로 두고, 수직 방향으로 변위를 구속하고 수평 방향으로 자유단으로 설정하였다.

철피의 응력 해석에 있어서, 소재의 탄성계수와 항복강도 등은 온도변화에 따라 변화하는 물성값을 사용하였고, 포아송비 및 열팽창계수는 온도변화와 관계없이 일정한 값을 사용하였다. 해석영역은 온도분포해석과 동일하게 축대칭 4각형 요소 2954개로 분할하였고, 요소 크기는 5 mm이었다.

용해로 철피의 주기적 점검을 위하여 코우크스 연소를 위한 바람을 휴풍하고 외부표피에 살수를 중단하는 경우에 대하여 응력해석을 수행하였다. 이때는 수평하중에서 송풍압력에 의한 경계조건을 0의 크기로 두고 해석하였다.

### 3. 피로수명 해석

철피에 작용하는 열응력은 항복점 이하로, 고주기(high cycle) 피로가 가해진다고 가정하여, S-N 곡선을 이용하여 피로수명을 해석하고자 하였다. 고주기 피로파괴는 반복하중에 의해 파단이 일어나는 현상으로, 피로하중은 최대응력( $S_{max}$ )과 최소응력( $S_{min}$ )의 차이를 2로 나눈 값 ( $S_a = (S_{max} - S_{min})/2$ )으로 나타낸다.

한편, 평균응력( $S_m = (S_{max} + S_{min})/2$ )의 수준이 피로수명에 미치는 효과가 있어, 평균응력이 인장(+)이면 수명이 감소하고 압축(-)이면 수명이 증가한다<sup>[7]</sup>. 다축으로 응력이 작용하는 경우, S-N곡선에 적용하기 위한 피로하중은 Sines 방법을 적용할 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$S_N = \frac{[(S_{a1} - S_{a2})^2 + (S_{a2} - S_{a3})^2 + (S_{a3} - S_{a1})^2]^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2}} + \frac{0.5(S_{m1} + S_{m2} + S_{m3})}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

여기서,  $S_N$ 은 피로하중,  $S_{ai}$ 는  $i$ 축 방향 최대 및 최소 주응력 차이의 1/2,  $S_{mi}$ 는  $i$ 축 방향 최대 및 최소 주응력의 평균이다. 철피는 다축응력상태이고 평균응력 수준이 존재하게 된다. 응력해석에서

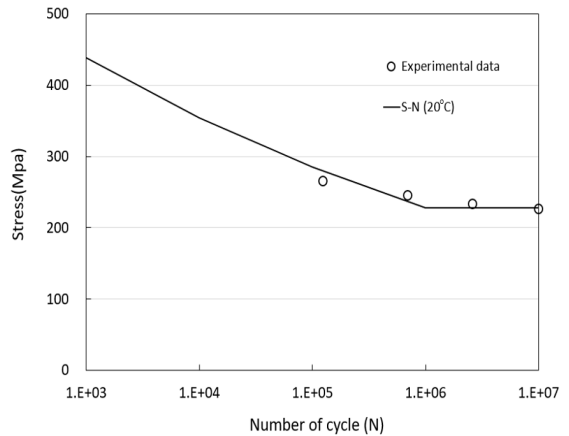


Fig. 2 S-N curve of SM490 steel

산출되는 응력을 활용하여 방정식 (4)에 필요한 응력을 구하고, 이를 식에 대입하여 피로하중  $S_N$  값을 구하였다. 철피 내부가 외부보다 높은 온도 상태에 있기 때문에, 내부는 압축 그리고 외부는 인장 응력이 작용할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 피로에 의한 파괴는 외부에서 발생 가능하므로, 피로하중 계산에서는 철피 외부의 표면부 응력을 사용되게 된다.

일반적인 저탄소강의 경우에 S-N곡선은 인장강도 값을 이용한 전형적인 선도에서 추정하여 사용하기 때문에<sup>[11]</sup>, 이를 근거로 철피 소재인 SM490의 S-N곡선을 Fig. 2와 같이 도출하였다. 실험데이터는 상온 상태에서 측정된 결과로, 제안된 식과 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 4. 해석 결과 및 고찰

중력 및 송풍에 의한 내부 압력이 작용된 상태에서, 철피의 외부표면 온도가 35°C일 때 철피 단면의 온도분포가 Fig. 3에 나타나 있다.

철피 외부에서 수냉의 제어 정도에 따라 용해로 철피 외부 표면온도가 35°C에서 80°C까지 변화할 때, 철피 내부 표면온도가 Fig. 4에 나타난 바와 같이 예측되었다. 이로써, 정상 조업 중에는 철피 내부 표면온도가 약 250°C 이하로 유지됨을 알 수 있다.

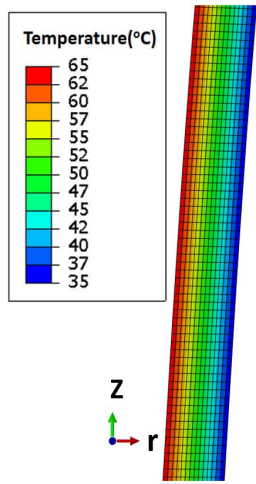
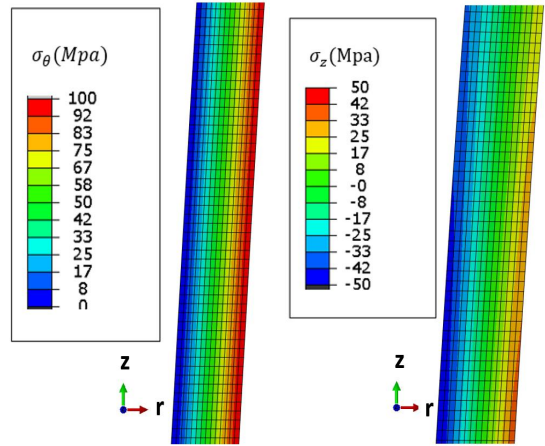


Fig. 3 Temperature distribution with 35°C at outside surface of shell



(a) Circular direction (b) Axial direction  
Fig. 5 Stress distribution of steel shell with 35°C at outside surface

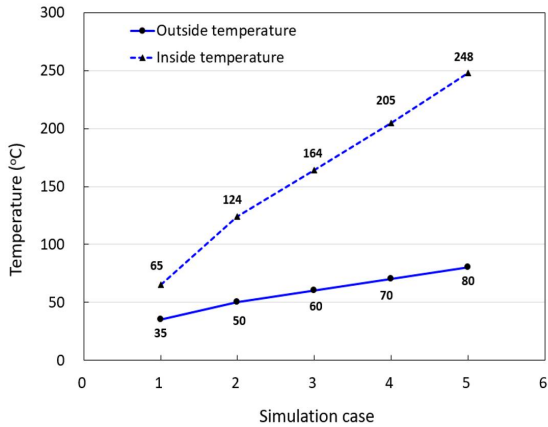


Fig. 4 Inside temperatures of steel shell for outside temperatures

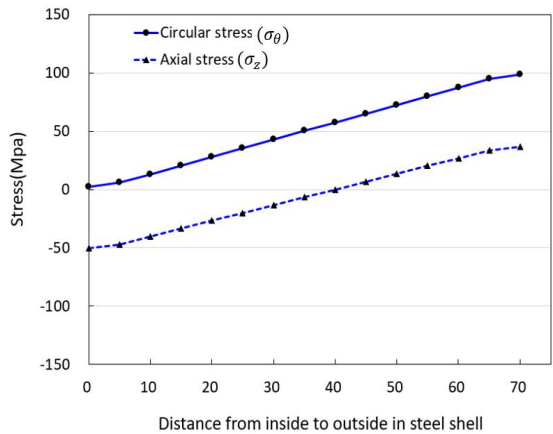


Fig. 6 Thermal stress distribution in steel shell with 35°C at outside surface

온도분포 해석의 결과를 기반할 때, Fig. 5(a)에 나타난 원주방향 응력( $\sigma_\theta$ )과 Fig. 5(b)에 나타난 길이방향 응력( $\sigma_z$ )은 철판 내부에서 압축응력, 철판 외부에서는 인장응력으로 작용될 것으로 예상되었다. 철판 내부는 온도가 증가하여 팽창량이 크게 되나, 철판 외부의 온도가 적게 증가하기 때문에 철판내부가 구속되어 압축응력이 나타나고, 반대의 현상 때문에 철판 외부에서는 인장응력이 나타나기 때문이다. 따라서 철판의 균열이 예상된다면,

인장응력이 작용되는 철판의 외부 표면에서 발생이 가능할 수 있다.

Fig. 6은 외부 표면온도 35°C(내부 표면온도 65°C)일 때, 해석 영역 중간 높이에 보인 응력 분포 상태이며, 축방향 응력은 철판 내부에서 압축으로 나타나고, 외부는 인장으로 나타나고 있다.

한편, 원주방향응력은 외부에서 뿐만 아니라, 내부에서도 인장으로 나타나고 있다. 이는 온도분포에 의해서는 압축 응력이 생성되었으나, 내부 송

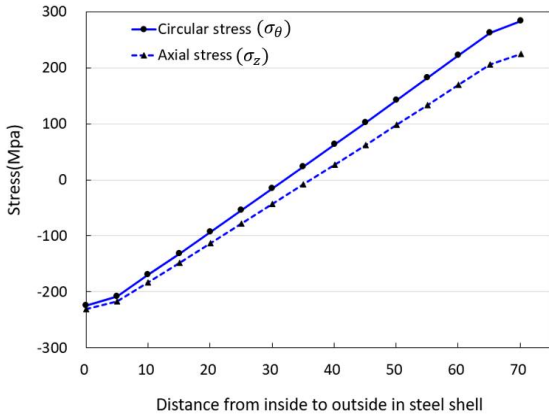


Fig. 7 Thermal stress distribution in steel shell with 80°C at outside surface

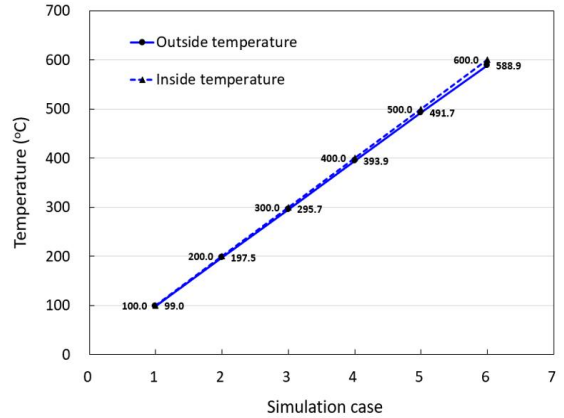


Fig. 9 Temperature distribution of steel shell during non-wind and non-water-cooling period

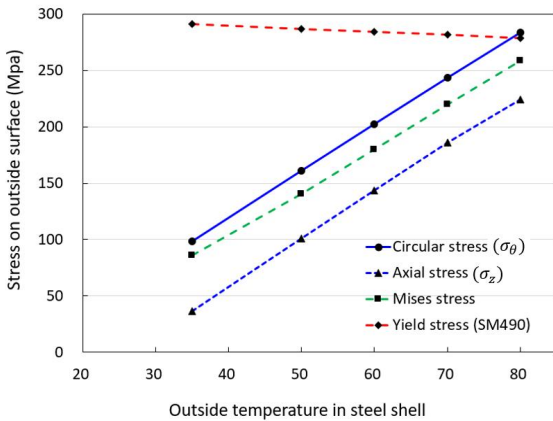


Fig. 8 Stress components on outside surface of shell with temperature at outside surface

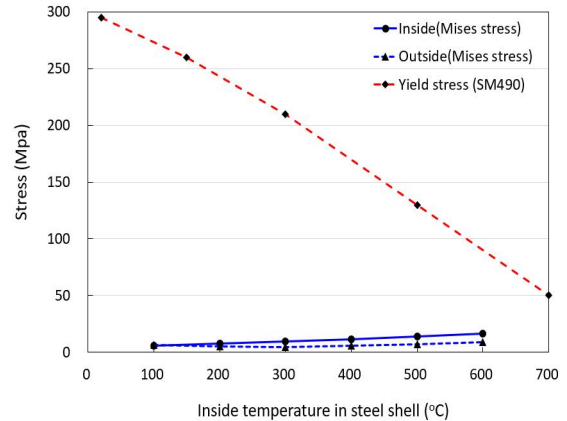


Fig. 10 Mises stress of steel shell during non-wind and non-water-cooling period

풍압력에 의한 인장 효과가 더 크게 나타난 결과로 해석할 수 있다. 철판 내부에서, 송풍 압력에 의한 축방향 응력 변화는 크지 않다.

Fig. 7은 외부 표면온도 80°C(내부 표면온도 248°C)일 때의 응력분포 상태이며, 열응력 효과가 지배적으로 나타나, 축 방향 및 원주 방향에서, 철판 내부에서는 압축응력, 철판 외부에서는 인장응력이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 철판 외부 표면온도를 35°C에서 80°C까지 변화할 때 철판 외부 표면에서의 응력크기를 나타낸 결과로, 표면온도가 80°C에 근접하면 철판

외부에서의 상당응력(Mises 응력)이 해당 온도에서의 항복응력(275 MPa)에 도달함을 알 수 있다. 따라서, 탄성 범위 내에서 동작하기 위해서는 철판 외부 표면온도를 70°C이하로 유지하도록 해야 하고, 이로써 철판의 내부 표면 온도는 205°C 이하가 되도록 해야 한다.

용해로 내부로의 송풍을 중단하고 동시에 외부 표면에 살수를 중단하는 공정에 대한 해석을 수행하였다. 철판 내부 표면온도를 100°C에서 600°C까지 각각 변화하여 수행한 온도 해석결과, Fig. 9와 같이 철판 내부와 외부 사이의 온도 차이가 거의

발생하지 않아, 내외부 온도 차이에 의한 열응력은 미미할 것으로 예측할 수 있다.

용해로 중력과 철판 내부의 지금과 연료에 의한 압력이 동시에 작용할 때, 철판 내부 온도 변화에 따른 상당응력이 Fig. 10에 나타나 있다. 온도 증가에 따라, 내외부 온도차로 인하여, 응력이 비례적으로 다소 크게 발생하고 있다. 100°C에서 600°C까지 온도 증가에 따라 재료의 항복응력이 감소하지만, 발생한 응력은 항복응력보다 작은 크기로 나타나고 있다. 특히 600°C에서, 항복응력인 90 MPa의 크기에 비해 상당응력은 20 MPa 이내로, 약 22%의 크기로 나타나고 있다. 따라서 휴풍 및 살수 중단에 의한 철판의 안정성 문제는 크지 않을 것으로 판단된다.

철판 외부 표면온도 35°C와 내부 표면온도 65°C를 기준으로, 외부 표면온도를 반복적으로 증가 및 감소한다고 가정하고 피로수명을 계산하였다. 즉 외부 표면온도 50°C의 피로하중은 외부 표면온도가 35°C에서 50°C까지 반복적으로 변화한다고 가정하여, 35°C일 때 열응력과 50°C일 때의 열응력을 계산하여 각 응력상태의 차이를 활용하고 이를 식 (4)에 적용하여 피로하중 값을 계산하였다. 철판의 내부는 압축응력이 분포하고 외부는 인장응력이 작용한다. 따라서 피로 문제는 외부에서 발생한다고 판단할 수 있고, 철판 외부 표면의 응력을 적용하였다. 철판 외부 표면온도가 80°C까지 변화된다고 설정하여 피로하중을 계산하였고, 계산결과가 Table 1에 나타나 있다. 모든 경우에 각

온도에서의 피로한도 이하의 피로하중으로 계산되고 있어, 철판에서는 열응력에 의하여 피로 파괴가 일어나지 않을 것으로 예측할 수 있다. 한편, 주기적 점검 기간인 송풍 및 냉각 중단 상태에서도 철판 내 응력의 크기가 매우 낮으므로 피로한도보다 충분히 낮은 피로하중이 인가될 것으로 예측할 수 있다.

## 5. 결론

조업 중인 용해로에서 자중과 조업 압력을 고려한 상태로 철판의 온도 및 응력 분포 해석을 수행하고 열응력과 피로하중을 산출하여 안전성을 검토하고자 하였다. 이와 같은 과정에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 철판 외부의 냉각으로 표면온도가 35 ~ 80°C 범위로 예측되면, 내부 표면의 온도는 65 ~ 248°C의 범위인 것으로 예측할 수 있었다.
2. 외부 표면 온도가 높아질 수록 철판 내부의 압축응력과 철판 외부의 인장응력이 증가하였고, 인장응력이 가장 크게 나타나는 철판 외부 표면이 피로하중의 영향을 가장 크게 받게 될 것으로 판단하였다.
3. 철판 외부 표면온도가 80°C까지 상승하면 철판 외부 표면에서의 상당응력이 280 MPa에 이르게 되고, 이는 해당 온도에서의 항복점을 다소 상회하는 크기이다. 따라서 영구변형의 발생을 방지하기 위해서는 외부 표면 온도를 80°C 이하로 관리하여야 한다.
4. 외부 표면 온도가 35°C에서 80°C까지의 범위에서 유지되는 경우에, 표면에 나타나는 피로하중은 피로한도보다 작게 계산되어, 조업 중 철판은 피로파괴에 대하여 안전한 상태로 예측된다.
5. 주기적 점검을 위한 휴풍 및 살수 중단 시, 철판에는 최대 600°C까지 온도가 상승하나, 내부와 외부 표면 온도의 차이가 거의 없고, 이로 인한 열응력의 크기는 항복응력의 22% 수준으로 계산되었다.

## 후 기

**Table 1 Fatigue stress and fatigue limit of the shell for outside and inside surface temperatures to which those temperatures change periodically from 35°C and 65°C respectively**

Outside surface temperature (°C)	Inside surface temperature (°C)	Fatigue stress (Mpa)	Fatigue limit (Mpa)
50	124	102	221
60	164	138	219
70	205	174	217
80	248	207	215

“이 논문은 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2018-3304) 지원에 의하여 연구되었음”

## REFERENCES

1. Paik, J. K., Lee, M. S., Lee, J. M., "Development of a Safety Assessment Method using Detailed Structural Analysis for Iron-Manufacturing Structures", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 93-99, 2005. ISSN: 1229-3059.
2. Han, D. S., Paik, J. K., Lee, J. M., Kim, W. B., Lee, M. S., Choi, W. C., "Thermal Stress Finite Element Analysis of Iron-manufacturing Furnace Structures", Proc. of Annual Conference of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, pp. 283-290, 2005.
3. Ahn, K. H., "The Mechanism of Stress Corrosion Cracking and Preventive Measures in Hot Stoves, A Thesis for a Master, Gyungsang National University, Republic of Korea, 2002.
4. Char, J. Y., "Engineering Study on Cooling Plate Design of Blast Furnace", A Thesis for a Master, POSTECH, Republic of Korea, 2017.
5. Kim, D. H., Lee, S. B., Bae, D. M., Yang, B. S., "Early Shell Crack Detection Technique Using Acoustic Emission Energy Parameter Blast Furnaces", Journal of Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 36, No. 1, pp. 45-52, 2016.
6. Kim, D. Y., Lee, G. H., Hur, J. W., "Life Fatigue Prediction of an Accumulator Composed of Bladder and Housing", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 5, pp. 58-63, 2018.
7. Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., Metal Fatigue in Engineering, John Willey & Sons, pp. 75-176 and p. 249, 2013.
8. ABAQUS, ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.10, Dassault Systemes, Ch. 14, 2010.
9. Kwon, O. M. et al., Foundations of Heat Transfer 5th Ed., Textbooks Pub., p. 434, 2008.
10. Troitsky, M. S., Tubular Steel Structures: Theory and Design, Concordia University Pub., Montreal, pp. 10.1-10.26, 1990.
11. Sakai, T. and Shiozawa, K., Databook on Fatigue Strength of Metallic Materials, Elsevier, Vol. 1, p. 69, 1996.