

## 제철용 고로의 유한요소해석

### Finite Element Analysis for Iron-Making Furnace

이 만 승\*      백 점 기\*\*      이 제 명\*\*  
Lee, Man-Seung      Paik, Jeom-Kee      Lee, Jae-Myung

---

#### Abstract

There has been recent demand for extending the life of age-degraded structures and equipment by such techniques as diagnosis, maintenance, safety assessment, and estimating residual life on iron-making plants and hydraulic, thermal, and nuclear power plants. These techniques take into account comprehensive scenarios that may cause malfunction and structural damage and allow an assessment of risk based on the likely scenarios. In particular, the safety assessment and residual life estimation of age-degraded ships and equipment facilities require consideration of various factors such as mechanical and thermal stresses, corrosion, hardness, load variation due to changes of operating condition, crack generation, and strength reduction of material by fatigue.

In this study, a detail thermal stress analysis, one of useful techniques of safety assessment and maintenance, is performed on a blast furnace by using general FEM code (MSC/NASTRAN).

---

#### 1. 서    론

본 연구는 기계 장치 설비의 수명평가 기술 개발을 위한 타당성을 분석하는 것으로서, 각 대상 설비에 있어서의 중요 부속들에 있어서의 설계 및 운전 이력에 의한 손상이 일어나기 쉬운 취약 부분 파악 및 손상 기구 판명 등을 통한 관련 기초 요소 기술을 조사 분석함으로써 향후 기계장비의 수명 평가기술 개발을 위한 타당성을 분석하고, 구체적인 기술개발 전략을 구축하고자 한다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서는 다양한 기법중에서 기계설비의 열응력 해석을 이용한 고로의 상세구조해석을 수행하여 실제 선박 및 제철소 등의 설비에 적용할 수 있는 체계적인 기술 개발을 하고자 한다.

고로(Blast Furnace)의 장기사용에 의한 노후화와 관련된 손상은 고로자체가 원인이 되어 발생하고 있는 것으로, 고로 철판 하단과 콘크리트 지지부 사이의 열화현상이 있다<sup>(2)</sup>. 열화현상의 작용이 원인이 되어 고온의 장입가스에 의한 내부 상승력이 결국에는 고로 전체를 상부로 부상시키는 작용을 하며, 이 과정에서 열에 의한 구조물의 열화도 전체적인 손상발생 평가에 영향을 미치리라는 예측이 이루어지고 있다.

---

\* (주)포스코건설

\*\* 부산대학교 조선해양공학과 교수

고로의 열화현상을 열응력 해석을 통하여 평가한 대부분의 기존의 연구 결과는 고로의 하단부만을 해석대상으로 삼는 경우가 일반적이거나, 본 연구와 같이 고로 전체를 해석대상으로 하여 고로의 자중 및 상세 온도분포를 바탕으로 구조해석을 수행한 예는 거의 없다. 따라서, 본 연구에서는 고로내부의 고온 환경이 고로에 발생시키는 열응력 특징을 분석하기 위해 실측된 온도데이터를 바탕으로 유한요소해석(상세 열응력 해석)을 수행한다. 본 해석의 목적은 일상적인 하중하의 고로에 대한 상세 유한요소 해석결과를 통하여 가동환경에 의한 고로의 손상발생 가능성 여부를 파악하고, 고로에 미치는 영향에 대한 구체적인 자료를 제공함으로써 종합적인 고로 안전성 평가를 수행하는데 있다.

## 2. 해석 범위 및 해석 방법

본 연구에서 수행한 해석 범위 및 해석 방법은 크게 아래와 같다.

- 고로 철판 단면구조 2차원 열전달 해석
- 모든 가동환경(초기환경하중)을 고려한 고로 전체구조 3차원 상세 구조해석.

유한요소해석은 범용해석코드 MSC/ NASTRAN을 사용하여 수행되었다. 그림 1과 2는 해석대상인 고로의 설계도와 실측된 고로 내부 온도분포를 나타내고 있다.

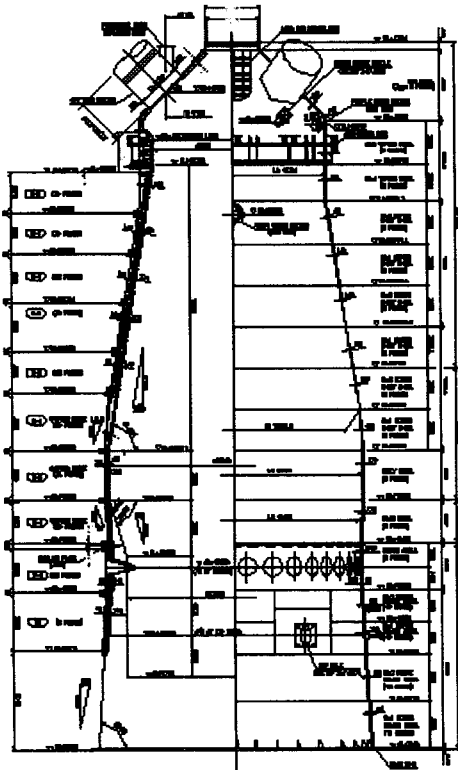


Fig. 1 Design detail of furnace structure

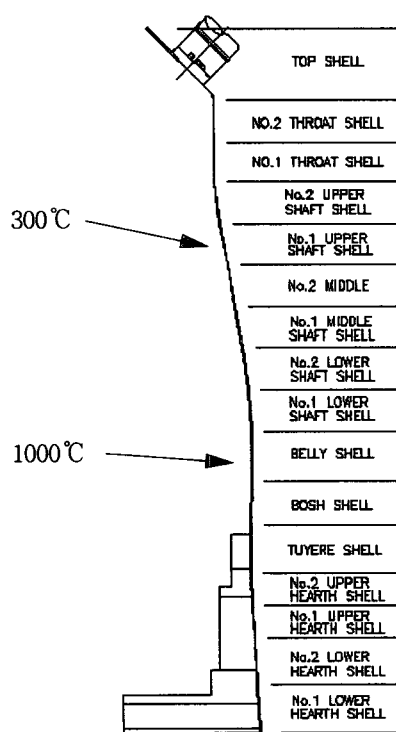


Fig. 2 Inner surface temperature distribution

고로 단면의 기하학적 특성을 살펴보면, 내화벽돌을 사용한 1차 열차폐 및 냉각수가 흐르는 냉각판을 채용한 2차 열차폐 구조를 가지고 있으며, 고로의 높이에 따라 각각 상이한 기하학적 특징을 갖는다. 본 해석에서는 이러한 형상을 모두 고려한 열전도 해석을 수행한 후, 이 결과를 바탕으로 상세 구조해석을 수행하였다. 본 유한요소 해석시 사용요소는 3차원 8절점 솔리드요소이며, 고로 전체구조를 해석대상으로 취하였다. 작용하중 성분으로는 고로내부의 온도와 고로자체의 자중, 그리고 고로 내부로의 장입가스에 의한 발생하는 외압을 사용하였고, 높이별 각 위치에서의 고로 상하방향 하중을 실제 입력자료로 사용하였다. 고로 내부의 고온에 의한 응력 파악을 위하여 고로 내부에서 측정된 높이별 온도를 열하중 자료로 사용하였다. 그림 3은 전체 유한요소 해석순서개요를 도식화 하였다.

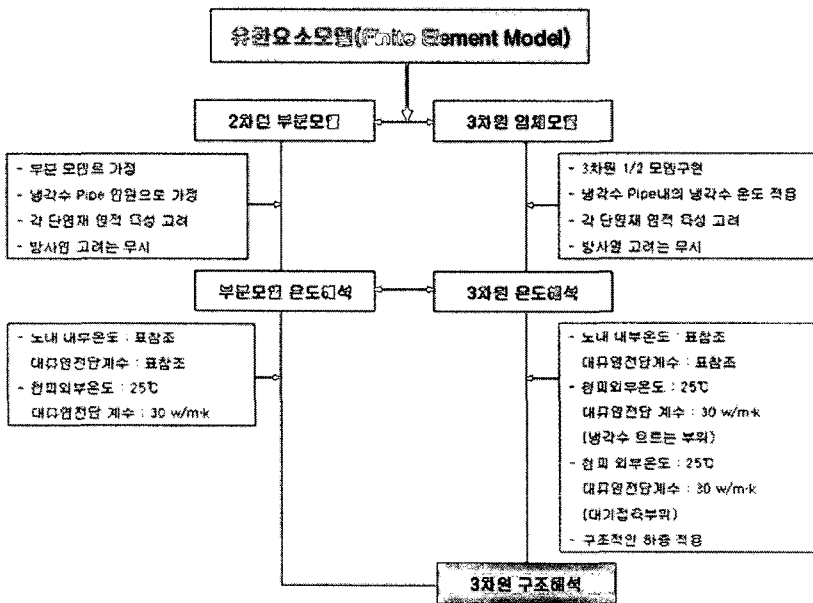


Fig. 3 Finite element model

### 3. 열전도 해석

고로의 열응력 해석을 위한 가장 기초단계인 열전도해석을 수행한다. 임의의 열원(Heat source)에 의한 구조물 내부 온도구배가 원인이 되어 열 변형이 생기며, 이를 정량적으로 규명하기 위하여 열전도해석을 수행한다. 이러한 온도구배를 파악하기 위한 해석을 수행해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 고로 내부에 조성된 고온이 고로외벽을 구성하는 내화벽돌, 냉각판을 거치면서 온도가 어떻게 변화하여 외부 철판에 도달하는지를 조사하였다<sup>(3)</sup>.

그림 3은 열전도해석 대상인 내화벽돌 및 냉각판으로 이루어진 열차폐기구를 포함한 고로 단면의 예를 나타내고 있다.

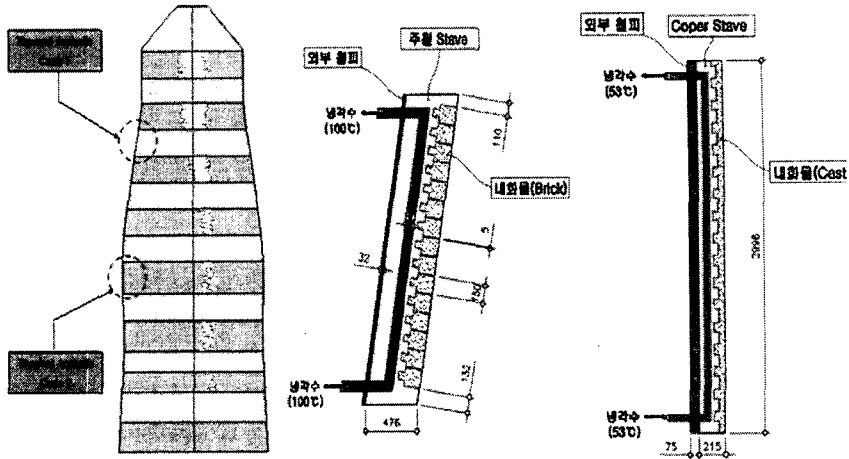


Fig. 4 Thermal analysis model case 1, 2 for selected furnace wall

그림으로부터 알 수 있듯이 상당히 복잡한 구조를 가진 냉각시스템을 이루고 있다. 고로 높이 별로 냉각판 형태 혹은 냉각수 온도 등이 다소 상이하지만 모두 내화벽돌, 냉각판, 그리고 고로 철판으로 이어지는 구조라는 점은 동일하다.

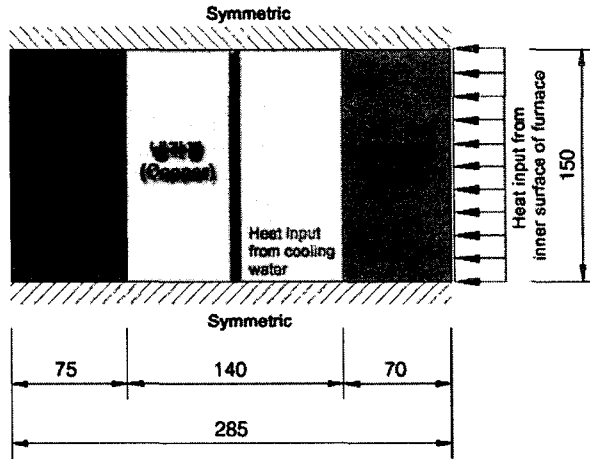


Fig. 5 Two dimensional thermal analysis model for furnace wall(unit: mm)

Table 1 Furnace wall material properties

	Thermal Conductivity (k) (W/m°C)	Specific Heat (Cp) (J/kg°C)	Density (ρ) (kg/m <sup>3</sup> )
철판	60.7	1169	7854
Copper	339	480	8933
내화벽돌	14.42	200	2600

본 연구에서 채용된 고로 단면 열전도 해석용 2차원 해석모델을 그림4에 보이고 있다. 전술한 바와 같이 고로 단면은 매우 복잡한 형상을 지니고 있으나, 본 해석에서는 그림4 와 같이 이상화시켜 열전도 해석을 수행하였다. 즉, 냉각판 내부의 냉각수 파이프의 상세 구조 모델링은 생략하였다.

표 1은 실제 사용한 내화벽돌, 철판 및 냉각판의 재료 특성치를 보인다. 실제 해석에서는 고로 내면에 존재하는 최고온도와 냉각수 파이프 위치에서의 냉각수 온도를 고정 열원으로 사용하였으며 구조물 전체의 초기온도는 상온(25℃)으로 하였다.

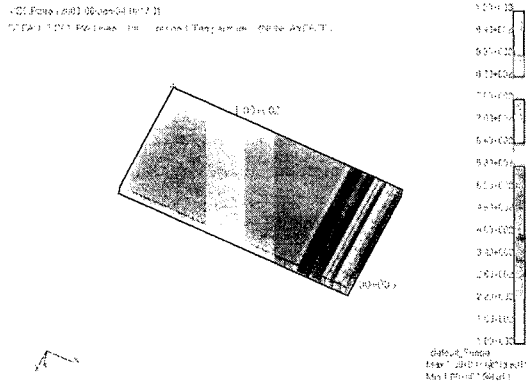


Fig. 6 Temperature distribution of thermal analysis case 1(cooling water temperature 100℃ and 1000℃ inner surface heat source)

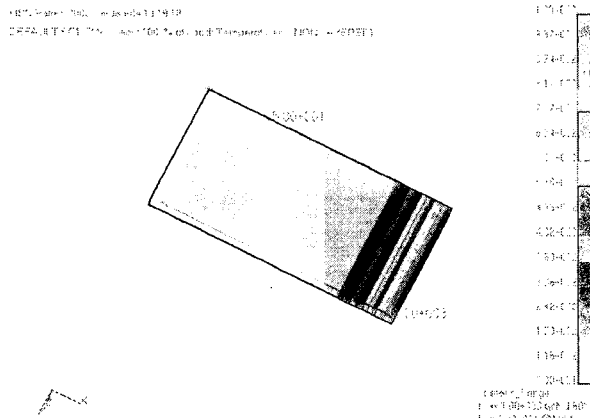


Fig. 7 Temperature distribution of thermal analysis case 2(cooling water temperature 53℃ and 1000℃ inner surface heat source)

그림 6~7은 열전도해석 결과를 보이고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 고로 내부로부터 상당한 크기의 고온이 열원으로 작용하여도 내화벽돌과 냉각판을 거치면서 대부분 온도강하가 이루어져서 최종적으로는 냉각수 온도가 고로 철판에 전해지는 것을 알 수 있다.

이는 대표적인 내열재료인 내화벽돌에 의해 1차적인 냉각이 효과적으로 이루어 진다고 판단된

다. 또한, 표 1에서 알 수 있듯이 냉각판 재질의 열전달율(선팽창계수)이 내화벽돌이나 철판에 비하여 매우 큰 이유로 냉각판 내부를 흐르는 냉각수 흐름 자체가 고로내부로부터 철판까지 이르는 열전달 경로상에서 상당한 크기의 완충역할을 하고 있는 것으로 사료된다. 즉 “고로내부 → 내화벽돌 → 냉각판 → 철판”로 이루어지지 않는 단면 구조에서 냉각수 온도를 중심으로 이루어지는 열전도효과가 “냉각판 - 철판”의 구조에서 거의 지배적인 것으로 파악된다. 이는 고로의 관리에서 냉각수 온도 조절 및 상시 예측활동이 세밀하게 이루어지고 있는 사실로부터도 자연스럽게 이해될 수 있다. 즉, 내부의 고온이 외피에 전달되지 않도록 하는 온도강하 기구 중에서 가장 중요한 역할을 하는 기구는 냉각판 구조라는 것을 확인 할 수 있다<sup>(4)</sup>.

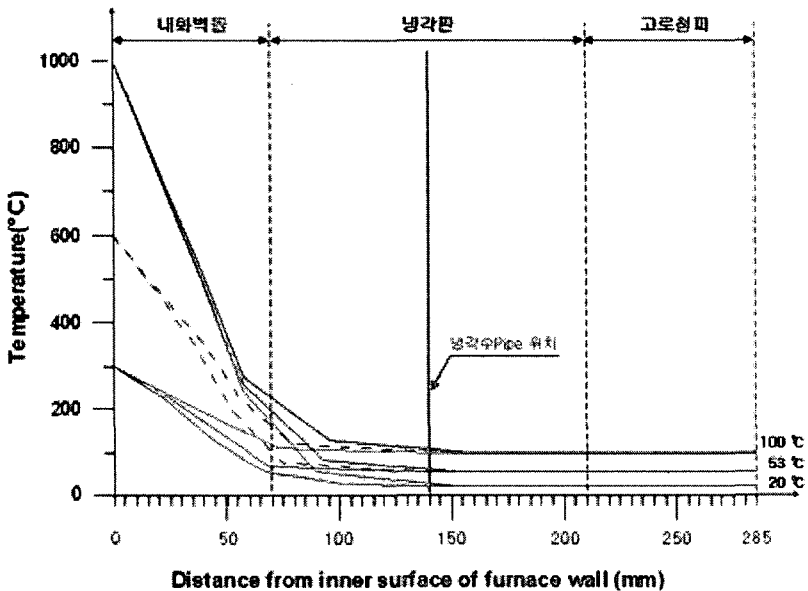


Fig. 8 Temperature distribution along the furnace wall for several heat input conditions

그림 8은 고로내부에서 실측된 다양한 온도범위와 냉각수 온도를 변화시키며 수행한 “고로내부 → 내화벽돌 → 냉각판 → 철판” 단면에서의 온도구배를 도시하고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 내부온도의 변화에도 불구하고 외피에 전달되는 온도는 대부분 냉각수 온도임을 확인할 수 있다. 따라서, 상세 구조해석에 사용하는 온도하중으로는 지금의 얻어진 결과에 따라 냉각수 온도를 채용하였다.

#### 4. 3차원 상세 구조해석

Chapter 2에서 설명한 각 하중성분 및 Chapter 3에서 수행된 열전도 해석 결과 즉 온도분포를 바탕으로 고로의 구조해석을 수행하였다. 표 2 및 3은 해석 시 사용한 고로 철판 및 내화벽돌의 기계적 특성치를 나타내고 있다.

Table 2 Furnace wall (outer surface steel) material properties

	SM41CN		SM50C	
	t≤40mm	t≥40mm	t≤40mm	t≥40mm
탄성계수 (kgf/mm <sup>2</sup> )	2100			
프와승비	0.3			
비중량 (kgf/mm <sup>3</sup> )	7.85 × 10 <sup>-6</sup>			
연장률계수	11.9 × 10 <sup>-6</sup>			
인장강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	41 ~ 52		50 ~ 62	
항복강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	24	22	33	30

Table 3 Furnace wall(thermal barrier brick) material properties

	Thermal barrier brick
탄성계수 (kgf/mm <sup>2</sup> )	2000
프와승비	0.2
비중량 (kgf/mm <sup>3</sup> )	2.60 × 10 <sup>-6</sup>
연장률계수	7.14 × 10 <sup>-7</sup>

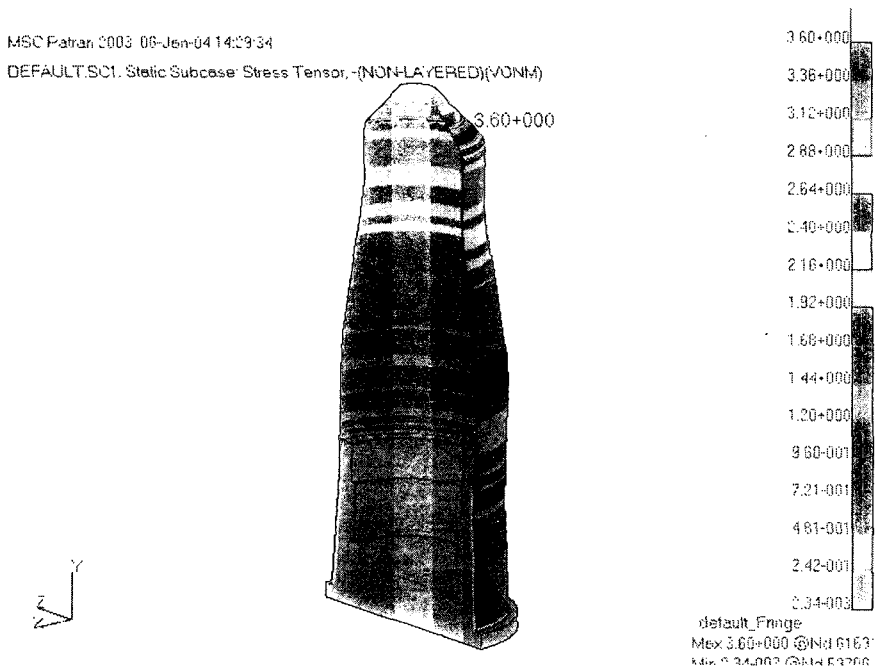


Fig. 9 von-Mises equivalent stress distribution of furnace overall structure

MSC Patran 2003 05-Jan-04 15:26:55  
 DEFAULT SOL, Slab, Subcase: Stress Tensor, (NONLAYERED)(VONM)

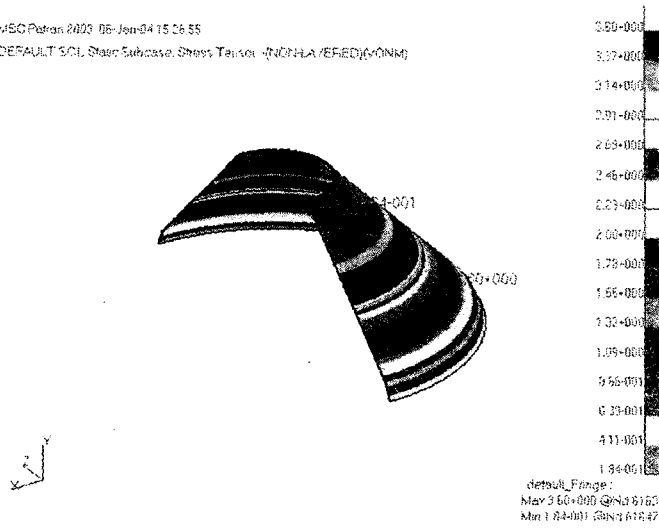


Fig. 10 von-Mises equivalent stress distribution of furnace top structure

MSC Patran 2003 06-Jan-04 15:57:36  
 DEFAULT SOL, Slab, Subcase: Stress Tensor, (NONLAYERED)(VONM)

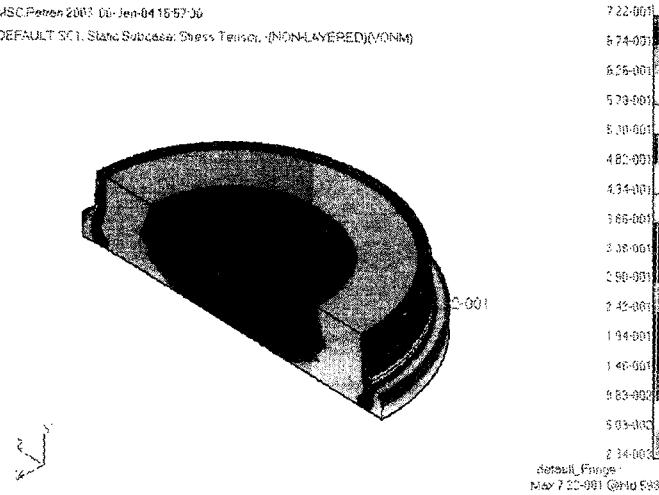


Fig. 11 von-Mises equivalent stress distribution of furnace lower structure including thermal barrier brick structure

그림 10는 고로 상부의 응력분포를 확대하여 보이고 있다. 최대응력이 발생한 위치는 수직의 벽으로부터 급격하게 형상이 바뀌는 부분이며, 이와 같은 해석결과를 토대로 필요에 따라 기하학적 형상 변화부에 보강등과 같은 조치를 취할수도 있을 것으로 판단된다. 그림 11은 노저부를 중심으로 응력분포를 확대하여 보이고 있다. 내부벽돌보다는 외부철피에 더 큰 응력이 발생하고 있으며, 내부벽돌로 보강/열차폐가 이루어지지 못한 부분에서 상대적으로 큰 응력이 발생하고 있음을 확인할 수 있다<sup>(4)</sup>.

또한 한 가지 주지할 만한 사실은, 고로 철판의 연직하부에서 상대적으로 큰 응력값이 얻어졌다는 것이다. 장입가스에 의한 상향력으로 고로철판 전체가 위로 부상하는 효과가 있으나, 전체적



으로는 내화벽돌 구조부를 포함한 노저부와의 연결이 철판 구조물의 부상을 저지하게 되며, 1차적으로 고로철판 연결하부, 2차적으로는 내화벽돌과의 접합부에서 벽돌 내부에 비하여 상대적으로 큰 응력이 나타나고 있는 것으로 이해할 수 있다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서 수행된 자중, 온도 및 내압 등 모든 종류의 하중성분을 고려한 해석결과를 종합해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 냉각판 및 내화벽돌에 의한 온도 저하량은 상당히 크며 대부분의 경우 냉각판을 거치면서 냉각수 온도까지 온도저하가 이루어짐을 확인하였다. 따라서 내부온도에 의해 발생한 철판의 열응력 역시 미소한 크기이며 이것은 로로 철판에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

일부 유사 연구결과에서도 확인된 바와 같이, 고로자중에 의한 효과는 장입가스의 상향성분 하중에 의해 대부분 상쇄되며 그 결과 응력이 가장 크게 발생하는 부분은 고로 최상부임을 확인하였다. 하지만 이 때 발생한 최대 응력의 크기도 철판 고조물의 재료 항복응력에 크게 미치지 못하므로 구조물의 성능저하 요인으로 볼 수 없다.

고로의 성능저하 혹은 손상영역은 본 해석에서와 같은 일상적인 환경 하에서는 발생 가능성이 희박하다는 것을 알 수 있다. 다만, 냉각판의 불량이나 부식 등에 의한 철판두께 감소 혹은 내화벽돌의 열화 등으로 인해 열차폐 기구의 손상이 발생한다면, 그러한 개소에 국부적인 응력집중 등이 발생할 개연성이 있으며 따라서 상시 감시체제를 확립하여 이들 열 차폐 기구의 노후화 혹은 경년 손상여부를 면밀하게 파악하는 것이 가장 중요하다고 볼 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 포스코건설(주)의 연구비지원에 의해 수행된 것이며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. S.S. Rao, "Reliability based design", McGraw-Hill Inc., 1992.
2. D. Casselman and K. Eastman, "Major rehabilitation program R.H. Saunders GS", Proc. of waterpower XIII, Buffalo, NY, 2003.
3. Development of a condition monitoring system - Hydrox, New York Power authority internal report, 2002.
4. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1998 Edition.