

# 제철용 고로 구조물의 열응력 유한요소 해석

## Thermal Stress Finite Element Analysis of Iron-manufacturing Furnace Structures

한 대 석\*    백 점 기\*\*    이 제 명\*\*\*    김 원 범\*\*\*\*    이 만 승\*\*\*\*\*    최 우 철\*  
Han, Dae Suk   Paik, Jeom Kee   Lee, Jae-Myung   Kim, Won Beom   Lee, Man Seung   Choi, Woo Cheol

### 요 약

제철용 고로구조물의 안전성 위협 요인으로는, 고로자중이나 철판석 낙하 등과 같은 기계하중 외에도 구조물 내부 온도가 최대 1700℃에 이르는 고온 환경을 들 수 있다. 이러한 고온의 작업 환경은 고로 구성부재들의 크립손상, 열피로 문제 등을 야기시키기 때문에 이들 고열에 의한 영향평가는 고로의 안전성 평가에 있어 필수요소로 거론되고 있다. 일반적으로 고로의 단면을 구성하고 있는 내화재, 냉각판, 철판 등의 냉각시스템을 거치면서 내부의 고온 환경은 고로 외피에 이르는 동안 온도강하가 이루어진다. 급격한 온도강하는 나타나지 않지만 장기간 고로 가동에 있어 상시하중으로 작용하는 이 열원에 의해 고로 각 구부위에는 열응력이 발생하고 이 열응력과 나머지 기계적 하중의 조합에 의해 크립이나 열피로 등과 같이 고로 구조물 안전성 위해요인들이 발생한다고 분석되어 진다. 따라서 본 연구에서는, 고로 안전성 평가를 위한 첫 번째 단계로서 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용한 열응력 해석을 수행하여 잠재적인 안전성 위해요인으로 알려진 열응력 발생 특성을 분석하고, 고로 건전설계 및 보수 유지 관리지침으로 활용할 수 있는 기반기술을 개발한다.

### 1. 서 론

산업용 구조물 안전성 평가에 있어서의 주요 검토대상에는 피로, 파괴, 충격, Creep, 진동 등 여러 가지 하중 특성에 따른 구조응답 분석이 필요하다. 그 중에서 고온 환경이 예상되는 구조물, 특히 제철용 고로 구조물의 안전성평가를 수행하기 위해서는 크립이나 열피로손상과 같은 온도유기 손상거동 파악이 필수적이다. 일반적인 범위에서의 안전성 평가 방법을 응력기반 평가, 변형률기반 평가로 나눈다면, 고온 환경하의 안전성 평가 문제는 응력기반 방법이 손쉬운 것으로 알려져 있다. 물론 크립현상 예측용 구성방정식 개발이나 열피로 문제 적용형 이론 개발등은 변형률 기반 방법으로 분류될 수 있지만, 이들 방법을 사용할 경우에는 특정 목적용 유한요소 알고리즘의 개발이나 상용해석코드라 하더라도 User subroutine 활용 등과 같이 부가적

\* 부산대학교 조선해양공학과 석사과정

\*\* 부산대학교 조선해양공학과 교수

\*\*\* 부산대학교 조선해양공학과 조교수

\*\*\*\* 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원

\*\*\*\*\* (주) 포스코건설

\*\*\*\*\* 부산대학교 조선해양공학과 석사과정

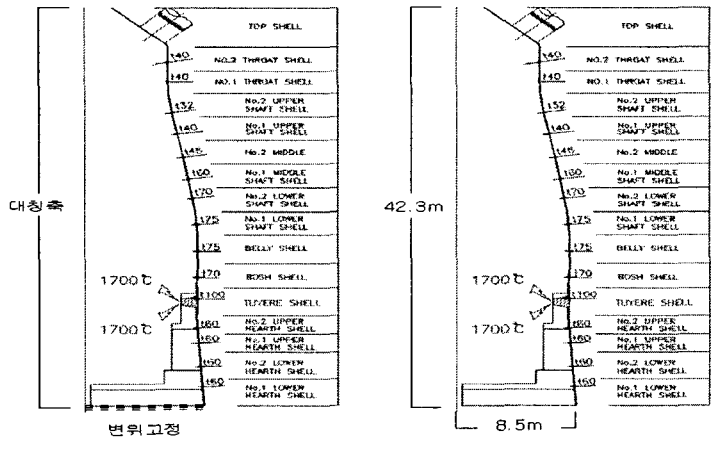
인 접근법이 요구된다. 반면, 응력기반 방법을 이용한다면 상용 유한요소해석코드를 이용하여 응력해석을 수행한 후 얻어진 응력장을 바탕으로 크립이나 열피로 문제를 비교적 손쉽게 다룰 수 있다. 다만, 이 경우에는 응력해석 결과를 얻기 위한 해석과정의 타당성과 결과의 정량적인 수준이 요구된다고 볼 수 있다. 본 연구에서는, 전술한 바와 같이 고로의 안전성을 평가하기 위해서 상기의 응력기반 안전성평가기법을 활용하기 위하여 고로의 열전도해석을 수행하고<sup>(1)-(4)</sup> 그 결과에 바탕으로 둔 열응력 해석을 수행한다. 구조이산화 과정 및 각 구성 재료의 기계적 특성치 고려 방법에 따라 나타나는 열응력 해석결과의 편차를 분석하고, 이 결과를 토대로 고로 안전성 평가를 위한 정량적 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 해석 범위

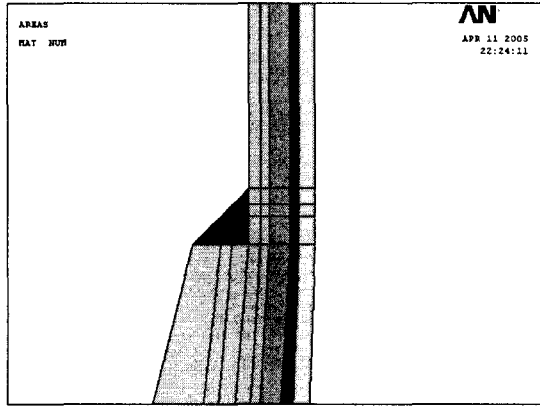
본 연구에서 수행한 해석 범위는 고로구조물 전체를 모델링하여 열응력을 해석하는 것이며, 해석방법은 범용유한요소 프로그램인 ANSYS 8.0을 사용하였다. 열전도 해석을 수행한 후의 온도하중과 송풍에 의한 내압, 내용물에 의한 축압, 철피, 내화물, 냉각판, 내용물 등의 자중을 고려하여 열응력뿐만 아니라 기계적 하중을 고려하여 실제에 가까운 내부응력을 찾아내고자 하였다. 또한 열응력해석에서 가장 중요한 변수인 열팽창 계수를 내화물이라도 종류에 따라서 해당하는 값을 사용하였다. 이는 외부 철피의 응력발생에 가장 지배적인 영향을 미칠 것으로 추정되기 때문이다. 재질의 비선형성은 고려하지 않았으며 가동 중인 고로의 일정한 온도에서의 정상상태 열전달해석에서 열응력해석으로의 연성해석을 수행하였다.

## 3. 고로 구조물의 치수와 모델링

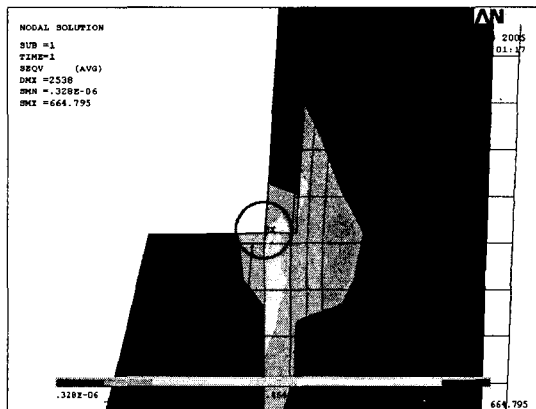
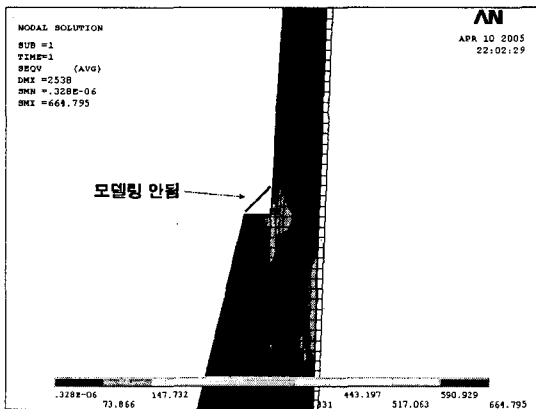
고로의 높이는 42.3m 노저부의 지름이 17m 이고 노저부에서 위로 갈수록 지름이 줄어드는 원주형이다. 고로 전체를 모델링에 있어서는 작업량을 줄이기 위하여 열전달해석과 열응력해석의 연성해석이 가능한 축대칭요소(Plane55 ⇒ Plane42)를 사용하여 그림 1 과 같이 회전체의 단면만을 모델링 하였다. 고로상부의 면적이 적고 노저부로 갈수록 면적이 넓어지는 구조물의 특징 때문에 절점의 공유문제와 요소의 크기 조절문제 용이하지 않았지만, 국부적으로 mesh size를 직접 조절하고 삼각형 요소를 병용함으로써 고로 설계도면에 최대한 근사한 모델링을 하였다. 최대한 설계도면에 가까운 모델링을 해야 하는 점은 고온의 열전달, 열응력 해석을 수행할 시 더욱 강조되어야 할 점이다. 왜냐하면 최대한 근사한 모델링을 하지 않으면, 그림 2,3에서 나온 결과와 같이 작은 부분이 모델링 되지 않았을 뿐인데, 도출된 결과가 실제와는 전혀 다른 양상의 해석이 나올 수 있기 때문이며, 그렇기에 이번 연구에서는 고로의 모델링의 정확성에 신중을 기하였다. 고로 모델링의 mesh size 에 있어서는 고로 자체의 특성상 내화벽돌이 가장 많은 부분을 차지하기 때문에 구조물의 mesh size 결정은 전체 element 수를 계산 가능한 범위 내로 줄이기 위해서 동일한 mesh size를 사용하지 않고 상대적으로 작은 부분인 냉각 stove와 back filling material (IMCS-F), 그리고 외부 철피에 대하여는 그것의 상대적 크기를 고려하여 mesh size를 작게 설정하였다. 노저바닥은 지면에 완전히 고정되어 있다고 가정하였으며, 축대칭요소를 사용하였기 때문에 경계조건은 모델링 되어진 고로 밑바닥 부분의 절점들의 변위를 고정시킴으로 모델링을 완성하였다.



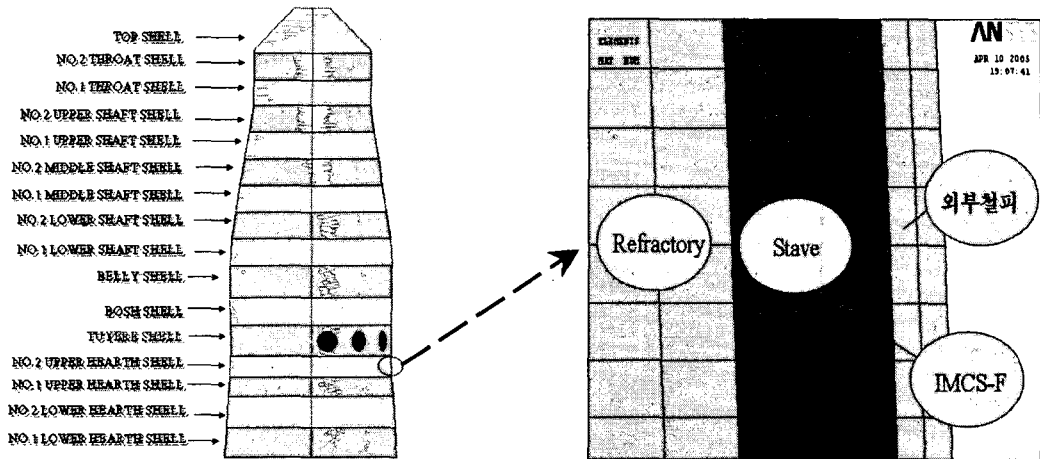
( 그림 1. 고로의 경계조건과 치수 및 각부 철판의 두께 )



( 그림 2. 실제 고로 구조물의 FEA Model )



( 그림 3. 모델링의 단순화에 의한 영역 누락과 발생하는 문제 )



( 그림 4. 재질별 영역의 상대적 크기에 따른 Mesh size 의 결정 )

( 표 1 요소특성과 Mesh size )

요 소	요소 개수	절점 개수
2-D Axisymmetric Quadrilateral 4-Node Element (plane-42)	14,307	15,306
부 위	Mesh Size (mm)	
외 부 철 피	30 × 30 ~ 30 × 60	
냉 각 판	60 × 60	
내 화 물	120 × 60 ~ 120 × 120	

#### 4. 열응력해석의 기계적 재질 특성

열응력 유한요소 해석에서 가장 지배적인 변수는 열팽창계수 (Thermal Expansion)이다. 고로 설계 도면에 서는 수십 종의 재질이 사용되었으나, 모델의 단순화를 위해 미소한 부분의 상이한 재료에 대해서는 열팽창 계수를 따로 적용하지 않았다. 이를 위해 주요한 13개의 material이 간추려 졌으며, 각각의 재질별에 따른 열 팽창계수는 아래와 같다.

( 표 2 재질에 따른 열팽창계수 )

Material No.	Name	Value(mm/mm °C)	Material No.	Name	Value(mm/mm °C)
1	철 피	11 E -006	8	FN-1	4.4 E -006
2	IMCS-F	4 E -006	9	FH	5.9 E -006
3	Iron stave	11 E -006	10	UF-WBA	4.5 E -006
4	Copper stave	17 E -006	11	BC-8SR	3.5 E -006
5	CAB-HVSC	4 E -006	12	BC-5	3.3 E -006
6	SSB-2	4.3 E -006	13	Throat armour	21.7 E -006
7	SBAN-1	4.3 E -006			

다음으로 안전성 평가의 기준이 되는 외부 철판의 기계적 특성을 정리하였다. 본 해석에 적용된 철판 재질은 용접구조용 압연강재(SM 490C)로 KS D 3515 또는 JIS G 3160 규격에 해당한다.

( 표 3 외부 철판의 재료물성치 )

외부 철판(SM 490C) 기계적 특성	
탄성계수 (MPa)	205800
Poisson's ratio	0.3
비중량 (kgf/mm <sup>3</sup> )	7.85 × 10 <sup>-6</sup>
항복강도 (MPa)	290 ~ 324
인장강도 (MPa)	490 ~ 607.6

### 5. 온도하중과 기계적 하중의 적용

고로의 응력해석에 있어서 온도하중과 기계적 하중을 동시에 적용함으로, 실제에 근접한 해를 찾도록 하였다. 열전달해석을 수행함으로써 나오는 결과 (RTH 파일) 를 열응력해석에서 온도하중으로 사용하게 되는데, 선행되어진 열전도해석이 정상상태의 해석이기 때문에 고정된 온도하중으로써 열응력을 해석하였다. 본 해석에는 적용된 제철용 고로에서 발생하는 기계적 하중은 다음과 같이 분류된다.

내 압	철판 중량	내화물 중량	stave 중량	부착물 중량	송풍압상력	내용물 중량	내용물 하향력	내용물 측압
-----	----------	-----------	-------------	-----------	-------	-----------	------------	-----------

이러한 기계적 하중을 적용시키는데 몇 가지 가정을 하였다. 첫째, 내용물 하향력은 모두 노저부 바닥에 작용한다. 둘째, 내용물 측압은 내용물에 의해 발생하는 측압으로 계산은 Rankine의 토압이론을 이용한 ACI Method를 사용하여 산출된 값을 사용하였다. 셋째, 노내 압력은 송풍구로부터의 송풍압력에 의해 생기는 노내 압력으로서 노정부 설계압력으로부터 송풍구부 송풍압력까지 선형적으로 변하는 것으로 가정하였다. 넷째, 부착물 중량은 해당부위에 하향력으로 작용시켰다.

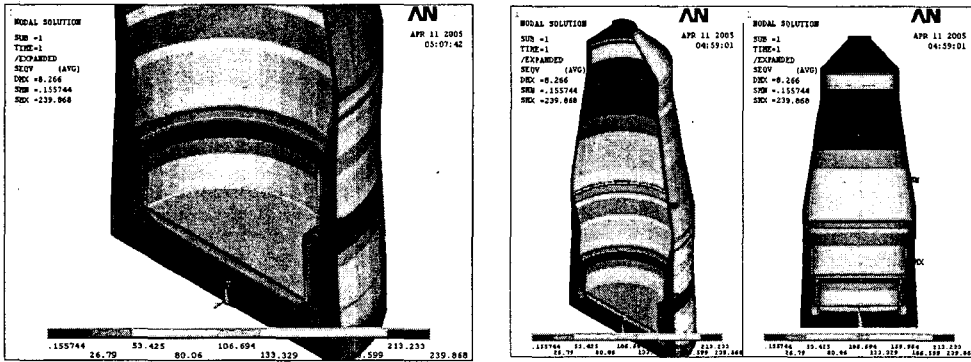
( 표 4 고로의 기계적 하중 )

부 위	내용물측압	내압	측압+ 내압	부착물중량	송풍상향력	내용물중량
단 위	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[N]	[N]	[N]
Top	0	0.2744	0.2744	0	-2.5E+07	0
No2. Throat	0	0.2744	0.2744	474516	0	3040842
No1. Throat	0.0051254	0.303114	0.308239	0	0	2770460
No2. Upper shaft	0.0009604	0.302007	0.302967	92120	-4454198	3185392
No1. Upper shaft	0.014406	0.321244	0.33565	0	-5039258	3621982
No2. Middle shaft	0.0190512	0.340432	0.359484	0	-5685078	4099830
No1. Middle shaft	0.0236376	0.35965	0.383288	0	-6377644	4615506
No2. Lower shaft	0.0281652	0.378858	0.407023	0	-7087654	5145392
No1. Lower shaft	0.032634	0.398056	0.43069	0	-7846174	5712224
Belly	0.0370734	0.419224	0.456298	0	0	7241220
Bosh	0.0421498	0.440794	0.482944	0	-7633220	5991524
Tuyere	0.0464226	0.4508	0.497223	0	0	6300126
No2. Upper hearth	0.0507542	0.4508	0.501554	0	-2582594	8696030
No1. Upper hearth	0.0507542	0.4508	0.501554	0	-2621794	17922926
No2. Lower hearth	0.0507542	0.4508	0.501554	0	-3919706	0
No21 Lower hearth	0.0507542	0.4508	0.501554	0	-4001634	0

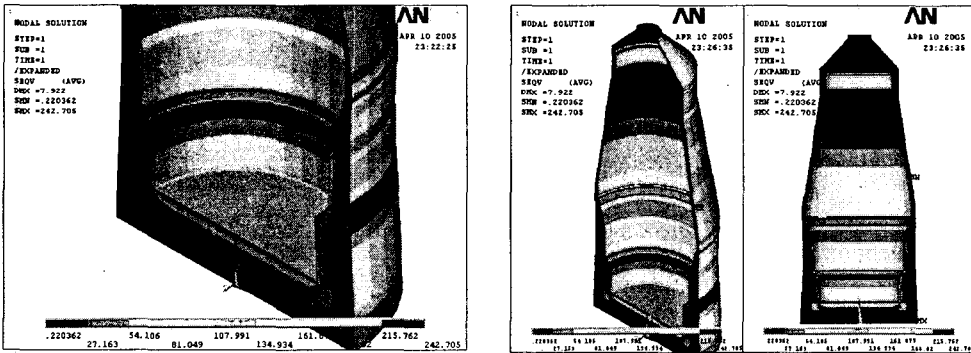
외부철피, 냉각 Stave, 내화벽돌의 자중에 관해서는 재질별의 밀도를 구하고 중력가속도를 입력하여 ANSYS에서 열응력 해석시 모델링 된 부분의 자중이 자동적으로 고려되어 해석되도록 하였다.

## 6. FEM 해석 결과

FEM 해석에서 열응력만을 고려한 해석과 기계적하중이 같이 고려된 해석을 비교하여 보았으며 결과로 도출된 응력은 Von - Mises 등가응력이다.

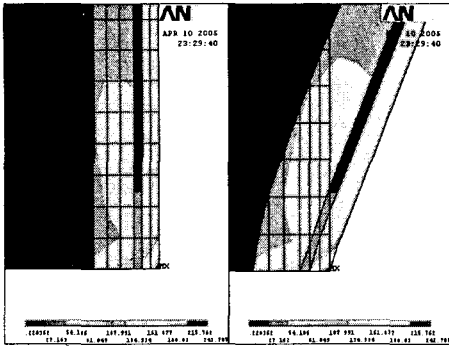


( 그림 5. 기계적 하중이 적용되지 않은 열응력 해석결과 )

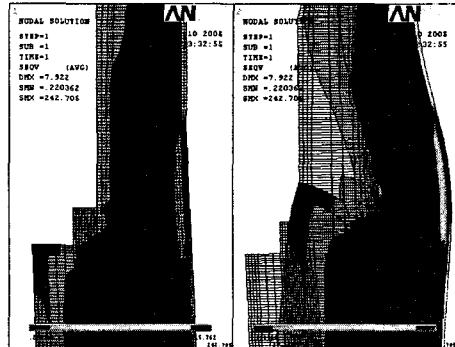


( 그림 6. 기계적 하중이 적용된 열응력 해석결과 )

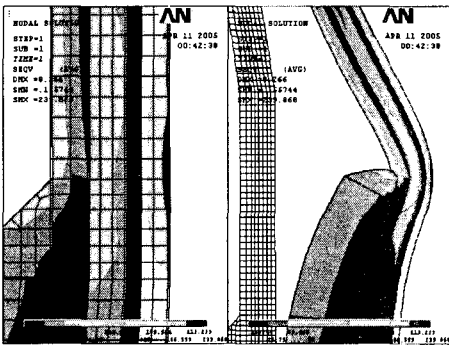
두개의 해석결과에서 나타나는 최대응력은 기계적 하중이 적용되지 않은 해석에서 239.868 MPa의 응력이 송풍구하부 철피부에서 나타났고, 기계적 하중이 고려된 해석결과에서는 242.708 MPa 응력이 노저부 최하단 철피부에서 발생하였다. 그림 1 에서 노저부 최하단 응력은 239.191 MPa 로 나타났으므로 두개의 결과는 기계적 하중은 고로의 열응력해석에서 차지하는 비중이 아주 적다는 것을 의미한다. 두개의 해석결과에서 상대적으로 응력이 높게 나와서 손상가능성이 있다고 판단되는 부분은 세부부분으로 압축되며 각각의 부위는 그림 노저부 최하단 철피부, 송풍구 하부 철피부, Belly Shell 하단부이다. 각 부분에 대해서 상세 응력 분포는 다음과 같다.



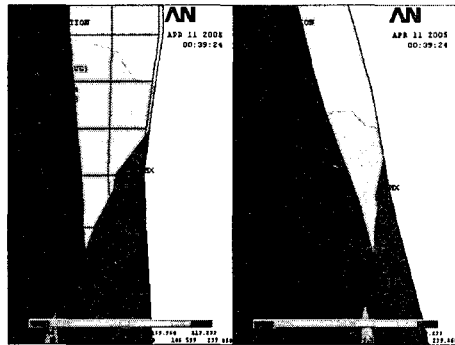
(그림 7. 노저부 최하단 철판부 응력분포)



(그림 8. 송풍구 하단 철판부 응력분포)

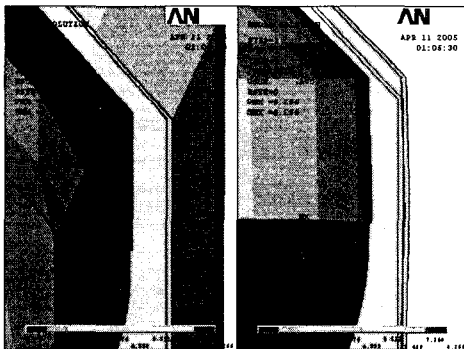


(그림 9. Belly Shell 하단부 응력분포)

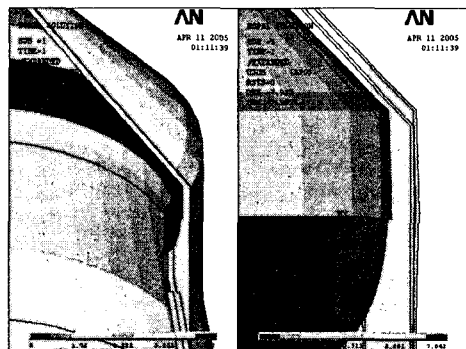


(그림 10. 송풍구 하단 철판부 상세 응력분포)

응력이 높게 나온 세 부분의 Multi-Plot 응력분포도를 살펴보면, 왼쪽의 Displacement Scale Factor 는 True Size( $\times 1$ ) 이고 오른쪽은 Displacement Scale factor 가 267.3 이다. 해석결과의 일반적인 경향은 내화물의 팽창에 외부 철판이 안쪽 혹은 바깥쪽으로 휘어지면서 응력이 발생하게 되고, 특히 기하학적으로 단면의 면적이 갑자기 좁아지는 부분에서는 바깥쪽으로 철판이 굽으면서, 상대적으로 높은 인장응력이 발생한다.



(그림 11. 최대변위부-기계적 하중 적용안됨)



(그림 12. 최대변위부-기계적 하중 적용됨)

그림 11와 12에서 나타난 해석결과는 최대변위를 가리키는데 변위의 거동 특성이 바깥으로 약간 확장되면서 상방향으로 높게 발생하고 있으며, 이것은 기계적 하중이 적용되었을 시에 최대변위의 발생량이 8.266mm에서 7.922mm로 약간 줄어드는데, 그것은 외부 철판과 내화재 등의 자중의 영향이라고 분석된다.

## 7. 결 론

고로의 열응력 유한요소 해석을 수행한 결과, 외부 철판의 최대응력이 약 240 MPa 에 도달하였고, 이것은 재질의 Minimum Yield Stress 인 290 MPa을 넘지 않으므로 최소 안전율은 1.2가 되며, 고로의 정상적인 가동 중에 안정하다고 판단되어 진다. 본 열응력 유한요소해석에서 나온 최대응력은 서로 다른 재질간의 접촉면은 완전하게 접촉하고 있다고 가정하였기 때문에 이는 좀더 보수적인 평가이며, 실제 고로에서는 접촉면에서의 열전달저항 그리고, 불안정한 접촉과 마찰 때문에 외부 철판에서의 응력 레벨은 해석결과보다 더 낮을 것이라 예측된다. 하지만 고로의 가동특성상, 언제든지 연와의 국부적인 소실로 인하여 높은 열이 직접 냉각판이나 철판에 닿든지, 순간적으로 고온의 장입가스가 내화 벽돌의 두께가 적은 상부에 빠른 속도로 도달할 수 있기 때문에 갑자기 높은 열응력이 발생하거나, 이것이 기계적 하중과의 상호 작용에 의해 계속하여 반복되면 열피로나 크립에 의하여 외부 철판의 손상이 생길 수 있다.<sup>(5)</sup> 그러므로 고로의 성능과 안전성을 보장하기 위해서 열전대에 의한 상시온도점검을 행하고 변화가 있을시 변화된 온도분포를 온도하중으로 삼아 열응력해석을 수행한 다음 응력의 전체적인 변화 추이를 판단하여 점검과 보수를 행한다면 효율적인 고로 가동과 고로 수명연장을 기대할 수 있으리라 생각되며 또한, 전체적인 고로의 안전성평가를 위해 열응력의 해석뿐만 아닌, 다른 안전성 평가의 Cross Check가 필요하다.

## 참고 문헌

1. 백점기, 이만승, 이제명, "상세구조해석을 이용한 제철설비구조물 안정성평가 기술에 관한 연구", 한국전산구조공학회 2004 추계학술발표회 논문집 제 18권, 제1호 pp.93~99
2. 최우철, 백점기, 이제명, 김원범, 이만승, 한대석, "제철용 고로 구조물의 열전도 유한요소 해석", 한국전산구조공학회 2005 춘계학술발표회 논문집
3. Frank P. Incropera, David P. De-Witt, "Introduction to Heat Transfer" John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002, p. 892
4. Minkowycz, W. J., "Handbook of numerical heat transfer" John Wiley & Sons, Inc., New York, 1988, p. 1024
5. Manson, S. S., "Thermal stress and low-cycle fatigue" R.E. Krieger Pub. Co., 1981, p. 404