

상세구조해석을 이용한 제철설비구조물 안전성 평가 기술개발

Development of a Safety Assessment Method using Detailed Structural Analysis for Iron-Manufacturing Plant Structures

백 점 기† 이 만 승* 이 제 명**
Paik, Jeom-Kee Lee, Man-Seung Lee, Jae-Myung
(논문접수일 : 2004년 10월 18일 ; 심사종료일 : 2005년 3월 4일)

요 지

최근, 제철소, 원자력 및 수·화력 발전소 등 주요 기간설비에 있어서 해당 구조물, 관련 장비들의 노후화에 따른 고장진단, 수리보수, 안전성 평가와 잔여 수명 예측을 통한 수명연장에 관련된 요구가 높아지고 있다. 손상발생 시나리오의 구축, 정밀해석기법의 확립, 위험성 혹은 신뢰성 평가기술 개발 등에 관한 연구가 이러한 요구를 반영하여 활발하게 수행되고 있다. 본 연구에서는 구조물의 안전성 평가분야에서 가장 활발하게 사용되는 유한요소해석기술을 이용하여 제철설비 구조물의 안전성을 평가하는 절차를 개발하고 실제 가동 중인 고로를 대상으로 적용하여 유용성을 검토하였다.

핵심용어 : 안전성, 수명연장, 유한요소해석, 제철설비, 고로

Abstract

Up to date, the life extension of industrial plant structures has been strongly required in the field of iron-manufacturing company, atomic or power generation company and so on. Fault monitoring, maintenance of aging structural components, safety assessment and residual life prediction may be recognized as typical and/or practical methods in terms of life extension methods. Based on the construction of damage scenario, precise analysis method and development of the risk or reliability assessment, a number of studies have been carried out in this viewpoint. In conjunction with the finite element analysis technique, a practical procedure for the safety assessment of iron-manufacturing plant structures was developed in this paper with a particular interest in furnace. By virtue of the detailed finite element analyses for blust furnace under an operational condition, the validity of the proposed procedure for safety assessment was presented.

keywords : safety, life extension, finite element analysis, iron-manufacturing plant structures, blust furnace

1. 서 론

대표적인 국가 기간설비이자 대규모 산업설비인 제철구조물에는 매우 다양한 종류가 있으며 설계 및 보수유지를 위한 기술개발에 상당한 노력이 투입되고 있다. 하지만, 적용기술개발상의 체계적인 절차를 마련하려는 시도는 대상설비의 복잡함, 기술분야의 다양성이 원인이 되어 많은 제약을 받고 있다. 단적인 예로 구조물의 강도평가, 안전성 분석 등에 폭넓게 활용되고 있으며, 활용경험 및 관련기술

이 상당한 수준에 이르러 있는 유한요소해석기술의 적용조차도 아직 제철설비분야에서는 체계적으로 이루어져 있지 못하는 현실을 들 수 있다. 그 이유는 제철설비 구조물 대상 유한요소해석에서는 기계적 하중 뿐만 아니라, 가동 중에 필연적으로 발생하는 열관련 문제 및 상세 가동조건 고려의 어려움 등의 제한요소가 많기 때문이다.

특히, 유한요소해석을 이용하여 열관련 문제를 다룰 경우에는 과도 열전도해석과 연계되는 비선형 해석이 이루어져야 하며, 이 단계에서 대상 구조물의 기하학적 특성과

† 책임저자, 정회원 · 부산대학교 조선해양공학과 교수
전화: 051-510-2429 ; Fax: 051-512-8836
E-mail: jeompaik@pusan.ac.kr

* (주)포스코건설

** 부산대학교 조선해양공학과 조교수

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

열이력 등에 따라 계산량의 방대함이나 구조이산화의 난점 등이 해석상의 장애로 거론되고 있다. 또한 실제 가동조건을 고려한 해석수행을 위해서는 정밀한 자료구축이 필수적이기 때문에 설비 운용기관을 제외하고는 접근이 쉽지 않은 것도 장애요인의 하나로 거론되고 있다.¹⁾

본 연구에서는 제철설비 구조물 중에서 사고발생이 가장 심각한 문제가 발생하는 고로를 대상으로 설계 및 보수유지용 구조안전성 평가기술 확립을 위한 유한요소해석을 수행하였다.

수년간에 걸쳐 축적된 고로의 가동환경 분석과 사고사례 분석, 각 부위별 하중 상세 등을 모두 고려하여 현재까지 간 이해석만을 이용하여 안전성 평가를 수행해 오던 고로에 대해 체계적이고 현실적인 안전성 평가용 기초를 제공하였다.²⁾

2. 해석 범위 및 해석 방법

제철설비 구조물 중에서 가장 중요한 구조물인 고로는 철광석을 용융시키는 구조물이다. 상부로부터 유입된 철광석에 연소재인 석탄가루를 첨가한 후 고온의 가스열(1700℃)을 이용하여 용융철을 만들어내는 구조물이다. 구조물 특성상, 열차폐용 내부벽돌구조, 냉각시스템, 구조형성용 외부 철판구조 등으로 복잡하게 구성되어 있다. 이러한 고로 구조물에서 가동 중 발생 가능한 대표적인 손상형태로 고로 철판 하부와 콘크리트 지지 부 사이의 열화현상이 알려져 있다.

따라서 고로의 열화현상에 대한 열응력 해석이 일부 수행된 바 있으나, 기존의 연구 결과 대부분은 고로 하부만을 해석대상으로 삼고 근사적인 열하중만을 고려하는 경우가 대부분이며,³⁾ 본 연구와 같이 고로 전체를 해석대상으로 하여 고로의 자중 및 상세 온도분포를 바탕으로 구조안전성 평가를 수행한 예는 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 고로내부의 고온 환경이 고로에 발생시키는 열응력 특징을 분석하기 위해 각 부위별로 실측된 온도 데이터와 고로에 미치는 모든 종류의 하중성분을 바탕으로 상세유한요소해석을 수행한다.

따라서 일상적인 하중 하의 고로에 대한 상세 유한요소 해석결과를 통하여 가동 환경에 의한 고로의 손상발생 가능성 여부를 파악하고, 고로에 미치는 영향에 대한 구체적인 자료를 제공함으로써 종합적인 고로 안전성 평가가 가능하게 된다.^{4)~6)}

유한요소해석은 범용해석코드 MSC/NASTRAN을 사용하여 수행되었다. 고로 전체를 대상으로 3차원 입체요소를 사용하였으며, 요소크기의 결정에 관해서는 기존의 유사연구결과에서 수렴성 평가를 거쳐 채용한 크기를 기준으로

이산화를 수행하였다.

고로의 외피는 상대적으로 두께가 얇기 때문에 판 혹은 셸요소의 사용도 가능하지만, 고로 단면의 구성이 열차폐용 벽돌 등과 연결되어 있는 이유로 계산시간상의 약점에도 불구하고 3차원 입체요소를 활용하였다. 총 요소(HEXA8) 수는 약1200만개이며 각 부위별로 해당 재료에 대한 재료 특성치가 고려되었다. 전체 고로 형상의 대칭성을 고려하여 1/2대칭조건으로 경계조건을 설정하였으며, 고로 최하부에 해당되는 절점은 고정조건으로 설정하였다.

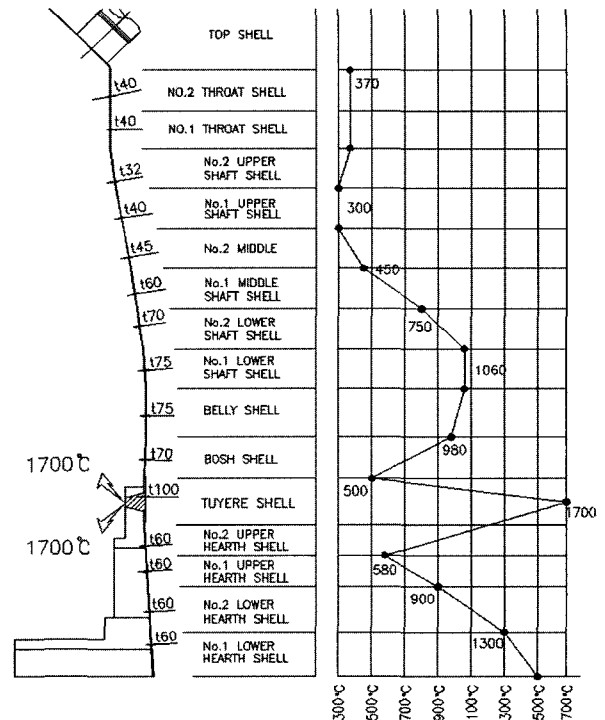


그림 1 Design detail of furnace structure & inner surface temperature distribution

그림 1은 실제 설계도에 근거한 고로의 단면도 및 부위별 명칭 및 각 부위별 측정온도를 나타낸다. 고로 단면의 기하학적 특성을 살펴보면, 내화벽돌을 사용한 1차 열차폐 및 냉각수가 흐르는 냉각관을 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. 그림 2는 유한요소해석 순서개요를 도식화 하였다.

3. 열전도 해석

임의의 열원에 의한 구조물 내부 온도구배가 원인이 되어

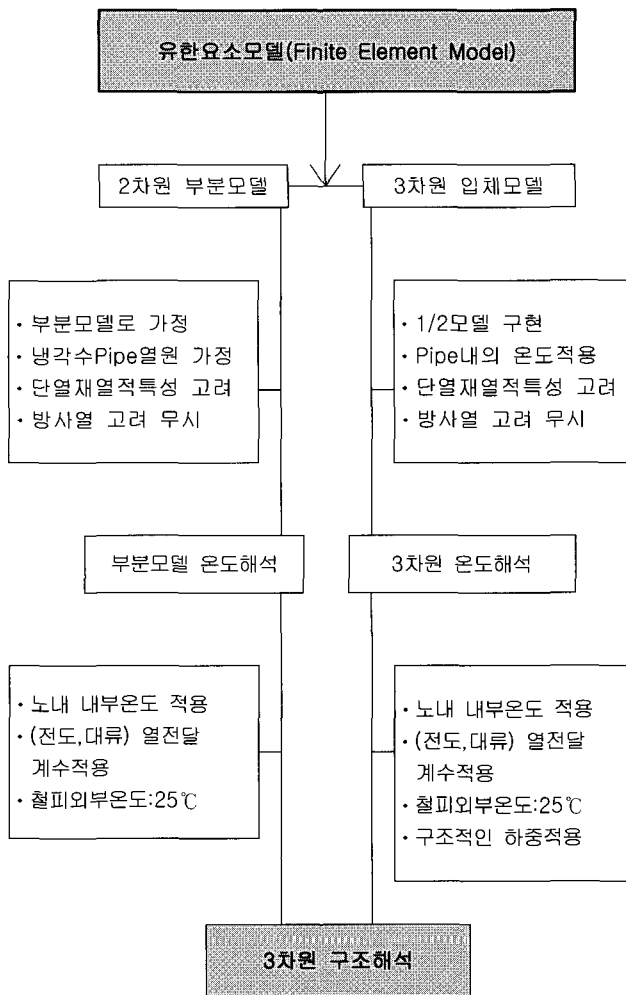


그림 2 Finite element analysis procedure

열 변형이 생기며, 이러한 온도구배를 파악하기 위한 열전도해석이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 고로 내부에 조성된 고온의 환경이 고로외벽을 구성하는 내화벽돌, 냉각관을 거치면서 온도가 어떻게 변화하여 외부 철폴피에 도달하는지를 조사하였다.

그림 3은 열전도해석 대상인 내화벽돌 및 냉각 판으로 이루어진 열 차폐 기구를 포함한 고로 단면의 예를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 상당히 복잡한 구조를 가진 냉각시스템을 이루고 있다. 고로 높이별로 냉각판 형태 혹은 냉각수 온도 등이 다소 상이하지만 모두 내화벽돌, 냉각 판, 그리고 고로 철폴피로 구성되는 점은 동일하다. 이러한 냉각시스템 구조는 그림 1에서 나타내고 있는 각 부위에서 개별적으로 사용된다.

본 연구에서는 그림 3과 같은 냉각시스템을 거쳐 온도가 어떻게 변화하는가를 조사하기 위해, 내부에서 발생한 고온과 냉각시스템에 의한 효과가 방사대칭형이라는 가정 하에 단면에 대한 2차원 열전도 해석을 수행하였다.⁷⁾

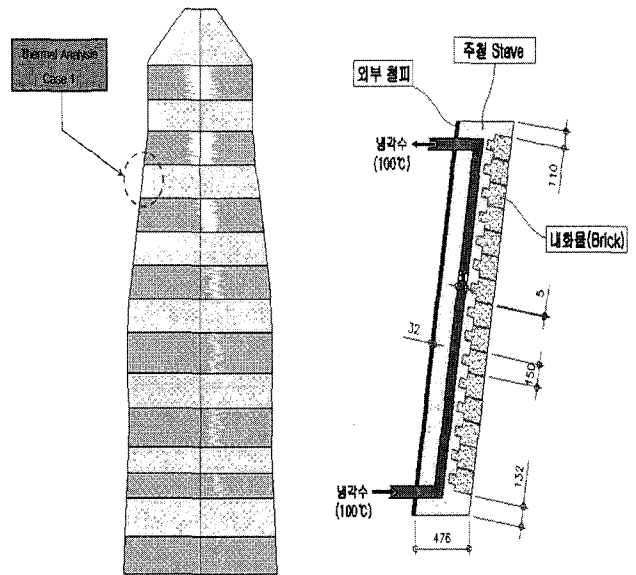


그림 3 A schematic of the furnace wall cross-section

해석에서는 각 재료 물성치는 정밀하게 고려하였으나, 그림 3과 같은 상세구조의 유한요소모델링은 생략하였다. 철폴피, 냉각판, 내화벽돌에 대하여 각각의 재료물성치를 고려한 2차원 축대칭요소(QUD4) 5130개를 이용한 유한요소모델링을 수행하였다.⁸⁾ 고로 내부로부터 전해지는 열원의 대칭성과 고로형상의 대칭성을 고려하여 2차원 축대칭 모델을 적용하였고, 냉각수파이프에 의한 원주방향 열전도는 무시하였다. 해석상의 경계조건을 그림 4에 나타내듯이 상하방향 대칭조건 및 고로 내·외부 자유팽창/수축 그리고 강체운동모드 발생 방지를 위해 냉각수 파이프상의 한 개 절점을 고정조건으로 설정하였다.

전술한 바와 같이 각 부위별 냉각시스템의 냉각수온도와 그림 1의 내부온도를 열하중으로 가정한 후, 정상상태를 기준으로 하는 열전도 해석을 수행하였다.

그림 4는 해석대상 개략도를 나타내며, 표 1은 열전도 해석에 사용한 재료물성치이다.

다양한 조건하의 열전도해석의 결과를 그림 5에 정리하여 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 고로 내부로부터 상당한 크기의 고온이 열원으로 작용하여도 내화벽돌과 냉각판을 거치면서 대부분 온도강하가 이루어져서 최종적으로 고로 철폴피에 전해지는 온도는 냉각수 온도라는 것을 알 수 있다.

표 1에서 알 수 있듯이 냉각판 재료의 열전달율(선팽창계수)이 내화벽돌이나 철폴피에 비하여 매우 큰 이유로 냉각 판 내부를 흐르는 냉각수 흐름 자체가 고로내부로부터 철폴피까지 이르는 열전달 경로 상에서 상당한 크기의 완충 역할을 하고 있는 것으로 사료된다.

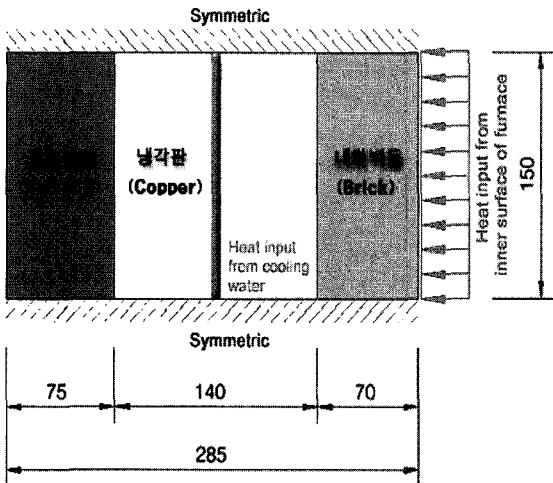


그림 4 Analysis model of 2D thermal transition analysis for furnace cross-section (unit: mm)

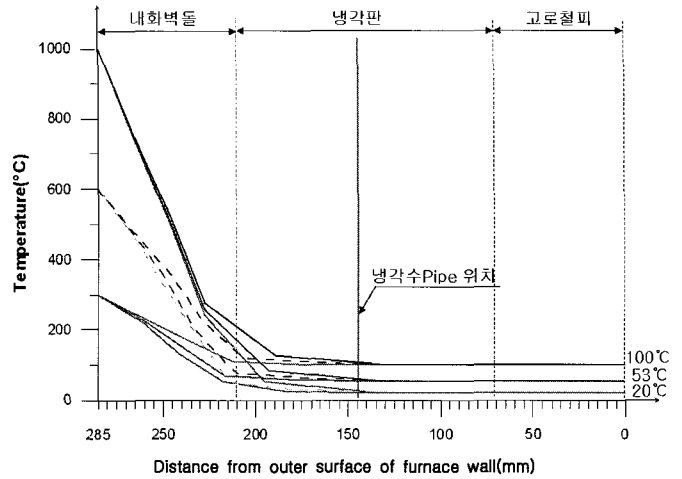


그림 5 Temperature distribution along the furnace wall for several heat input conditions

표 1 Mechanical properties of each material of furnace

	Thermal Conductivity (k) [W/m°C]	Specific Heat (Cp) [J/kg°C]	Density (ρ) [kg/m ³]
철피	60.7	1169	7854
냉각판	339	480	8933
내화벽돌	14.42	200	2600

즉, “고로내부 → 내화벽돌 → 냉각판 → 철피”로 이루어지는 단면 구조에서, 냉각수 온도를 중심으로 이루어지는 열전도효과가 “냉각판 - 철피”의 구조에서 거의 지배적인 것으로 파악된다.

이는 고로의 관리에서 냉각수 온도 조절 및 상시 예측할

동이 세밀하게 이루어지고 있는 사실로부터도 자연스럽게 이해될 수 있다. 즉, 내부의 고온이 외피에 전달되지 않도록 하는 온도강하 기구 중에서 가장 중요한 역할을 하는 기구는 냉각판구조라는 것을 확인할 수 있다.

4. 상세구조 해석

4.1 안전성평가 절차

일반적으로 구조물의 안전성 평가를 위한 기법에는 파손 모드해석, 사고계통도 해석 및 고장계통도 해석 기법 등이 있다.⁹⁾ 이러한 기법들을 통해 시스템의 안전성, 잠재적 위험을 포함한 구조물의 연약 부위 파악 및 유지보수 활동을

표 3 Loading condition details

부 위	내압 [kgf/mm ²]	철피중량 [tonf]	내화물 중량 [tonf]	Stave 중량 [tonf]	부착물 중량 [tonf]	송풍 압상력 [tonf]	기타 [tonf]	내용물 중량 [tonf]	내용물 부력 [tonf]	내용물 하향력 [kgf]	연직하중 소계 [kgf]
Top	0.015	61.62	93.42	0	0	-960	334.2	0	0	0	-625800
No2. Throat	0.015418	8.695	33.77	11.98	57.71	0	3	21.25	0	21.25	72690
No1. Throat	0.015418	8.695	33.77	11.98	57.71	0	3	21.25	0	21.25	72690
No2. Upper shaft	0.016568	18.39	84.33	101.4	0	-170	0	40.16	-26.2	13.96	-68600
No1. Upper shaft	0.018832	45.43	112.8	169.5	3.68	-200	0	58.51	-30.4	28.11	-26820
No2. Middle shaft	0.021056	25.07	87.45	195.6	14.56	-193	0	53.91	-30.2	23.71	17160
No1. Middle shaft	0.023014	27.58	90.95	186.1	18.24	-205	0	55.42	-34.1	21.32	-660
No2. Lower shaft	0.025034	58.5	133.2	331.5	25.52	-256	0	105.2	-39.6	65.6	101020
No1. Lower shaft	0.027164	58.5	133.2	373.2	25.52	-256	0	123	-44.7	78.3	142720
Belly	0.031679	57.38	97.62	285.9	36.4	0	0	99.67	-57.6	42.07	32230
Bosh	0.033963	48.27	189.5	214.9	21.84	506.7	0	83.91	-27.2	56.71	743440
Tuyere	0.035249	84.16	251.2	163.5	19.52	0	84.2	91.61	0	91.61	267220
No2. Upper hearth	0.035249	56.82	232.4	17.5	1.68	-175	0	156.1	0	156.1	-155820
No1. Upper hearth	0.035249	57.99	263.7	0	0	-179	0	325.4	0	325.4	-179000
No2. Lower hearth	0.035249	37.94	528.5	0	0	-117	0	0	0	0	-117000
No21 Lower hearth	0.035249	38.42	588.9	0	0	-119	0	0	0	0	-119000

체계적으로 동정·관리 할 수 있다. 그러나 상기의 기법들을 활용하기 위해서는 보통 해당 구조물의 수리보수 이력 및 모니터링 결과 등에 대한 데이터가 필수적이다.

표 2 고로의 손상사례 조사내용

설비 및 장치명	손상사례 조사결과	개수
본체 철판	· 적열, 부식이 없이 전반적으로 양호한 상태 이나, 내용적확대로 전면교체가 불가피함.	전면 교체
Tower Structure	· 기울기측정, 부식상태 조사결과 대체로 양호 냉각설비, 노정설비 변경에 따라 개조, 보강이 필요.	전면 교체
노체 냉각설비	· 배관부식상태, Valve작동상태는 양호하나, 냉각설비 변경으로 전면교체 필요	전면 교체
환상관	· 적열 및 균열실적이 없이 양호, 내용적 확대로 풍구수가 변경예정으므로 전면교체 필요	전면 교체
송풍지관	· 열화로 인한 냉각수 누수개소 있음	전면 교체
Troat Armour	· 돌출된 부분이 있음, 철판교체로 전면교체 필요	전면 교체
내화물	· Shaft부 연와는 양호하나 BOSH부 연와 잔존이 낮은 상태이며, 노저연와도 상태는 양호하나 향후 1대기 조업 및 내용적확대에 따른 전면교체 필요	전면 교체
노정점화 장치	· 배관부식 외에는 양호함.	전면 교체
Profile Meter	· 철판상태	전면 교체
A/B probe	· 마모 및 부식이 심함	전면 교체
Shaft Gas probe	· 노후화로 Gas Leak 심하여 사용치 않고 있음	전면 교체

표 2는 1988년 7월부터 2000년 7월에 걸쳐 가동된 고로 본체에 대한 각종 고장현상 및 문제점들에 대한 자료를 보이고 있다.

분석결과에 의하면 부식이나 피로 등에 의한 노후화현상은 염려할 수준이 아니며, 결론적으로 볼 때 고로의 가스 누출 사고 등은 고로자체의 가동조건에 의한 것임을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 모든 가동조건 하에서 발생 가능한 각종 하중성분들을 대상으로 표 3과 같은 부위별 하중산정 결과와 열전도 해석에 의한 온도분포 결과를 이용하여 고로 전체를 대상으로 하는 상세 구조해석을 수행하였다.

4.2 실가동 조건을 고려한 하중산정

표 3에서 나타내는 각 하중성분들은 실제 가동중인 고로를 대상으로 고로자중이나 내용물 중량 분석결과 및 일상가동 조건 하의 기계적 하중을 계산하여 산정하였다.

먼저, 고온 고압의 가스에 의한 내용물 부력은 송풍압에 의해 발생하는 내용물의 부력으로서 총 부력의 20%만이 철판에 전달된다고 가정하였다. 즉,

$$부력 F = F_u - F_r - F_d \tag{1}$$

F_u : 고로 풍구부의 송풍압력에 의해 내용물에 작용하는 상향 하중

F_r : Shaft 각 부위에서의 송풍압력에 의한 철판 압상력의 반력

F_d : 노정압에 의해 내용물에 작용하는 하향 하중

내용물 측압은 내용물에 의해 발생하는 측압으로 측압의 계산은 Rankine의 토압이론을 이용한 ACI Method를 사용하여 다음과 같이 산출하였다.¹⁰⁾

$$P = \frac{\gamma R}{\mu'} \left(1 - e^{-\frac{\mu' - k}{R} h} \right) \tag{2}$$

D : 직경 (m)

h : 내용물의 깊이 (m)

k : 압력계수 $(1 - \sin\phi)/(1 + \sin\phi)$

P : 내용물에 의한 수평압 (t/m^2)

R : Hydraulic Radius ($D/4$ m)

γ : 내용물의 평균 비중량 ($W/V = 1.19 t/m^3$)

μ' : 벽면과 물체와의 마찰계수

ϕ : 내용물의 안식각

송풍압상력은 노내압력에 의하여 철판 경사부위에 부가되는 상·하향력을 의미하며 해당부위의 경사각과 면적에 의해 계산된다. 즉,

$$W = P \sin\theta \cdot A \tag{3}$$

A : 작용면적 (m^2)

P : 노내압력 (kg/m^2)

θ : 철판 경사각도 (degree)

여기서 P 는 식 (2)에 의해 주어지는 압력이다.

표 4, 5는 해석에 사용된 고로 구성재료의 기계적 특성치를 나타낸다.

표 4 Furnace wall (outer surface steel) material properties

	SM41CN		SM50C	
	t≤40mm	t≥40mm	t≤40mm	t≥40mm
탄성계수 [kgf/mm ²]	2100			
프와송비	0.3			
비중량 [kgf/mm ³]	7.85 × 10 ⁻⁶			
열팽창계수	11.9 × 10 ⁻⁶			
인장강도 [kgf/mm ²]	41 ~ 52		50 ~ 62	
항복강도 [kgf/mm ²]	24	22	33	30

4.3 해석결과 및 고찰

그림 6은 전체 해석모델상의 응력분포(von Mises stress)를 나타낸다. 상대적으로 고로상부구조물에서 높은 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 1 및 표 3에서 확인할 수 있듯이 치수에 비해 비교적 큰 하중이 작용하고 있기 때문에 분석된다.

그림 7은 고로 상부의 응력분포를 확대하여 보이고 있다. 최대응력이 발생한 위치는 수직 외벽으로부터 급격하게 형상이 바뀌는 부분이며, 이와 같은 해석결과를 토대로 필요에 따라 기하학적 형상 변화부에 보강 등과 같은 조치를 취할 수도 있을 것으로 판단된다.

그림 8은 노저부를 중심으로 응력분포를 확대하여 보이고 있다. 내부벽돌보다는 외부 철판에 더 큰 응력이 발생하고 있으며, 내부벽돌로 보강/열차폐가 이루어지지 못한 부분에서 상대적으로 큰 응력이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

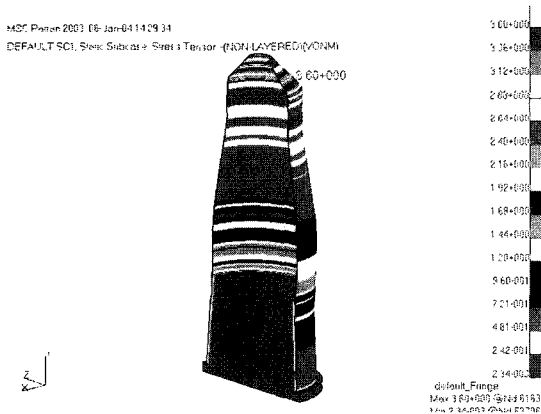


그림 6 von-Mises equivalent stress distribution of furnace overall structure

표 5 Furnace wall(thermal barrier brick) material properties

	Thermal barrier brick
탄성계수 [kgf/mm ²]	2000
프와송비	0.2
비중량 [kgf/mm ³]	2.60 × 10 ⁻⁶
열팽창계수	7.14 × 10 ⁻⁷

또한, 한 가지 주목할 만한 사실은 고로 철판의 연직하부에서 상대적으로 큰 응력 값이 얻어졌다는 것이다. 장입 가스에 의한 상향력으로 고로 철판 전체가 위로 부상하는 효과가 있으나, 전체적으로는 내화벽돌 구조부를 포함한 노저부와의 연결이 철판 구조물의 부상을 저지하게 되며, 1차적으로 고로 철판 연직하부, 2차적으로는 내화벽돌과의 접합부에서 벽돌 내부에 비하여 상대적으로 큰 응력이 나타나고 있는 것으로 이해할 수 있다.

전술한 바와 같이 각 부위별 발생응력의 분석결과에 의하면 전체적으로는 고로상부에서의 응력값이 가장 크게 나타나고 있으나, 각 위치에서의 해당재료의 항복응력의 크기와 비교한 결과 상대적으로 가장 취약한 부위는 고로하부임을 확인할 수 있다.

기존의 고로 관련사고, 특히 가스누출 등은 항상 고로하부에서 발생하였다는 사실로부터 상기 해석결과와 타당성을 유추할 수 있다. 즉, 실제 가동 조건 및 온도환경을 모두 고려한 상세해석 결과, 고로 전체적으로는 고로를 상부로 부양시키고자 하는 힘이 지배적이며, 그 결과 하부와 지지부사이의 연결부에서 비교적 큰 응력이 발생하는 것으로 판명되었다.

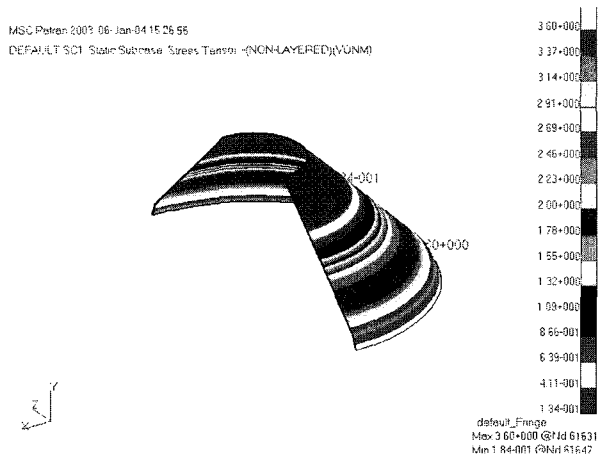


그림 7 von-Mises equivalent stress distribution of furnace top structure

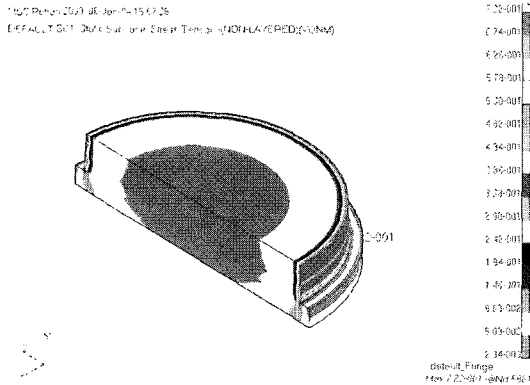


그림 8 von-Mises equivalent stress distribution of furnace lower structure including thermal barrier brick structure

4. 결 론

본 연구에서는 제철용 설비구조물 중에서 가동환경이나 구조형상 등이 가장 까다롭다고 알려진 고로를 대상으로 실제 가동 시 발생가능한 모든 하중성분을 고려한 상세구조해석을 수행하였다.

자중, 온도 및 내압 등 모든 종류의 하중성분을 고려한 해석결과에 대한 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 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 고로 철판에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.
- (2) 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 구조물의 재료 항복응력에 크게 미치지 못하므로 구조물의 성능저하 요인으로 볼 수 없다.
- (3) 고로의 성능저하 혹은 손상영역은 본 해석에서와 같은 일상적인 환경 하에서는 발생 가능성이 희박하다는 것을 알 수 있다. 다만, 냉각 판의 불량이나 부식 등에 의한 철판 두께 감소 혹은 내화벽돌의 열화 등으로 인

해 열 차폐 기구에 손상이 발생한다면, 그러한 감소에 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.

본 연구에서는 제철용 고로설비에 대한 상세구조해석을 바탕으로 고로의 안전성 평가를 수행하였다. 하중조건 판정을 위한 방대한 자료조사가 이루어졌으며 유한요소해석을 통한 정밀한 평가가 수행되었다. 본 연구와 같은 정보를 이용한다면, 손상발생 가능성이 높은 위치의 파악이 가능하리라 판단되며 따라서 적절한 구조 보강 절차를 수립하는데 매우 유용하게 활용될 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Rao, S.S., *Reliability based design*, McGraw-Hill Inc., 1992
2. Casselman D., Eastman, K., "Major rehabilitation program R.H. Saunders GS", *Proc. of waterpower XIII*, Buffalo, NY, 2003
3. "Gas Leak 방지를 위한 노저 철판 설계기술 개발", 포항산업과학연구원, 2002
4. Moses, F., Kinser, D.E., "Analysis of structural reliability", *Journal of Structural Div.*, Vol.93, No. ST5, 1967
5. Christensen, P. T., Baker, M.J., *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, Berlin, 1982
6. Development of a condition monitoring system - Hydrox, New York Power authority internal report, 2002
7. ASME Boiler and Pressure Vessel Code 1998 Edition.
8. 정철섭, 김기석, "복합 재료로 구성된 축대칭 원판에서의 열응력", 한국전산구조공학회학회지, Vol.8, No.1, 1995, pp.173~186
9. Barlow, R.E., Lambert, H.E., *Introduction to Fault Tree Analysis, in Reliability and Fault Tree Analysis*, SIAM, Philadelphia, 1975, pp. 7~37
10. Troitsky, M.S., *Tubular steel structures-theory and design*, Concordia University Montreal, 1990.