

## 알루미늄 용탕 보온로의 열해석 및 하부 구조물의 강도해석

박상수\*, 김병민#, 강충길\*\*

### Analysis of Temperature of Molten Aluminium Holding Furnace and Stress of Substructure Frame

Sang Soo Park\*, Byung Min Kim# and Chung Gil Kang\*\*

#### ABSTRACT

The demand on thermos furnace of Al molten metal has recently been getting higher and higher according to the increase in use of Al and Al alloys. This study considers the estimation of the thermal and mechanical stability in the thermos furnace for Al casting. It is executed through the analysis of heat transfer on the refractory material and heat stress on each steel shell. Also, the estimation of structural stability was appraised through the strength analysis of the lower structure. In result, the temperature of steel shell rose to 320.15K and its elastic deformation was about 1.5mm. The elastic deformation of the lower structure was about 0.66mm. As a result of it, the data obtain from the analysis in this study are regarded as stable value on considering that the size of the furnace is 2500mm.

**Key Words** : Heat transfer, Holding furnace, Refractory material, Thermal analysis, Molten Al alloy

#### 1. 서론

최근 부품 산업에 있어서 가장 중요한 과제 중의 하나는 부품 경량화와 함께 고기능성을 갖춘 부품의 생산과 개발이라 할 수 있다. 이러한 요구에 따라 최근 알루미늄 및 마그네슘 합금과 같은 경량화 재료 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 적용범위가 점차 확대되고 있다. 또한 기존의 철강 재료의 대안이 아니라 제품 개발 초기단계에서부터 경량화 소재 채택을 고려하는 제품 설계 및 생산라인을 구성하고 있는 추세이다.<sup>1-5</sup> 이에 따라 알

루미늄 및 알루미늄 합금의 수요증가로 인해 관련 기술인 알루미늄 주조를 위한 로의 설계 및 제작 기술에 관한 연구의 중요성이 또한 한층 더 높아지고 있는 실정이다.<sup>6,7</sup>

현재 국내 공업로 산업은 기반산업으로서 모든 산업분야에 대한 파급효과가 막대하고 제품의 변화에 따라 다양한 로의 개발이 가속화 될 뿐만 아니라 특수로에 대한 수요도 꾸준히 증가하고 있는 상황이다. 그러나 국내에 공급되는 공업로의 대부분은 외국에서 도입하는 실정으로, 국내 공업로 개발의 필요성을 절실히 보여주고 있다.

접수일: 2004년 12월 31일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

E-mail [bmkim@pusan.ac.kr](mailto:bmkim@pusan.ac.kr) Tel. (051) 510-3074

\*\* 부산대학교 기계공학부

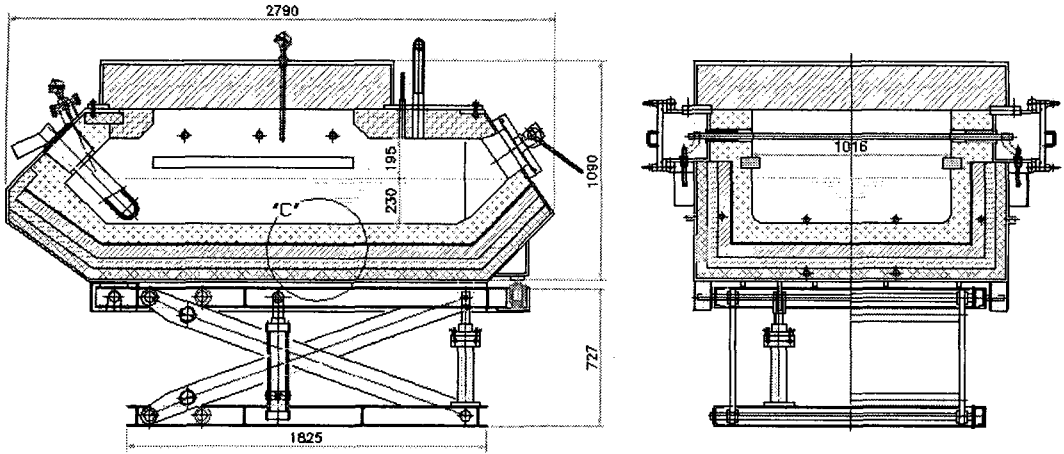


Fig. 1 Drawing of holding furnace for molten aluminium alloy (unit : mm)

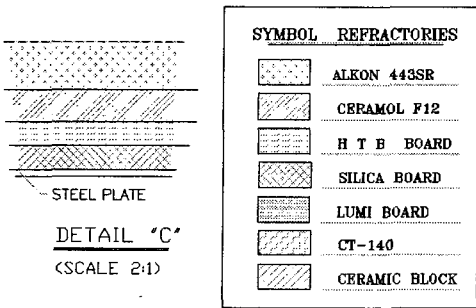


Fig. 2 Layers of refractory materials

현재 공업로 산업은 설계 및 제작시 현장 경험에 의존하여 인력 부족과 표준화 및 규격화가 되어 있지 않아 설계상 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 설계기법의 부재로 공업로 개발시 시간과 비용의 낭비를 초래하게 된다.

따라서 본 논문에서는 공업로의 개발과 안정적인 공업로의 설계를 위한 유한요소해석 기법을 마련하고자 하였다. 본 연구에 사용된 공업로는 Fig. 1 과 같이 알루미늄 용탕 보온로(holding furnace)이다. 보온로는 여러 내화재 층과 이를 둘러싼 강재 셸(steel shell)로 구성되어 있다. 그리고 높이 조절이 가능한 하부 구조물이 상부의 보온로 무게를 지지하고 있다.

본 연구의 목적은 먼저 알루미늄 용탕 보온로

의 특징을 이해하고, 보온로를 구성하는 내화재의 온도해석과 하부구조물의 강도해석을 통해 설계된 보온로의 안정성을 평가하고, 공업로 해석기법을 확립하는 것이다. 연구 내용은 내부 고온 공기 및 알루미늄 용탕과 각종 내화재의 열전달 해석과 이를 통해 얻어진 외부 강재 셸의 온도 분포를 이용한 열응력 해석으로 나누어진다. 또한 보온로와 용탕의 무게를 지지하는 하부 구조물의 안전성을 평가하기 위해 강도해석을 수행하였다.

## 2. 알루미늄 용탕 보온로의 특성

일반적으로 알루미늄 용탕 보온로는 고온/고압에서 운전되는 특성 때문에 여러 겹의 내화재에 둘러 쌓여 있으며 용탕과 바로 접촉하는 내벽 부분에는 고온 및 침식에 견딜 수 있는 강도가 높은 내화재가 설치되어 있다. 그러나 만약 강도가 높은 내화재 만으로 전 영역을 시공하게 되면 높은 밀도로 인하여 중량이 무거워지고 또한 열전도계수가 크기 때문에 대기로의 열손실량이 많아지게 된다. 따라서 일부 영역을 제외한 대부분의 영역에는 강도가 낮고 열전달계수도 낮은 내화재를 설치하여 열손실 및 중량을 최소로 제작해야 한다. 따라서 보온로 설계에 있어 적절한 내화재의 선정 및 두께의 결정은 가장 중요한 부분 중의 하나이다.<sup>8-11</sup>

이러한 특성을 참고로 Fig. 1 과 같은 알루미늄

Table 1 Thermal properties of used refractories

Properties	Silica Board	Alkon 443SR	Ceramol F12	HTB	CT-140	Ceramic Block
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1050	3000	900	240	1600	2200
Thermal conductivity (W/m/K)	0.9	2.54	0.23	0.9	0.73	0.17
Specific heat (J/kg/K)	880	920	1000	710	1170	835
Max. service temp.(K)	923.15	1273.15	1773.15	1273.15	1673.15	1773.15

용탕 보온로를 설계하였고 로 내부의 내화재 층의 상세도는 Fig. 2 에 나타내었다. 보온로에 사용된 각종 내화재의 열적 특성은 내화재 재료 공급사측 자료를 기초로 하였으며 각각에 대해서는 Table 1 에 정리하였다.

본 논문에서 사용된 알루미늄 용탕 보온로는 각각의 내화재 특성을 고려하여 설계되었고, 최외각에는 내화재 형상유지 및 보호를 위해 구조용 합금강(SS41(S400))으로 14 mm의 강재 셸을 형성시켰다. 강재 셸의 기계적 특성은 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Mechanical and thermal properties of SS41

Properties	Value
Yield strength (MPa)	240
Tensile strength (MPa)	490
Young's modules (Gpa)	210
Elongation (%)	20.3
Thermal conductivity (W/m/K)	43
Specific heat (J/kg/K)	330
Thermal expansion coefficient (μm/m/K)	15.8

일반적으로 보온로 운전시 용탕의 온도를 적정 온도로 유지시키는 것은 제품 생산성에 큰 영향을 미친다. 따라서 알루미늄 용탕의 온도를 일정 온도로 유지하는 것 뿐만 아니라 용탕 온도 유지를 위한 보온로 상부의 분위기 온도를 제어하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 알루미늄 용탕의 적정온도는 993.15K 로, 내부 공기 온도는 용탕의 온도보다 80K 높은 1073K 로 설정하였고,<sup>12-14</sup> 이를 보온로의 해석시 온도조건으로 설정하였다.

### 3. 보온로 해석 방법

#### 3.1 보온로의 온도해석방법

알루미늄 용탕 보온로의 온도 및 강재 셸의 강도해석은 전체 로의 1/2 단면을 모델링 하였다. 또한 로 내·외부의 온도센서와 용탕 주입구 등의 기타장치는 내화재의 온도분포 및 강재 셸의 강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 간주하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하였고, 모델은 Fig. 3 과 같다.

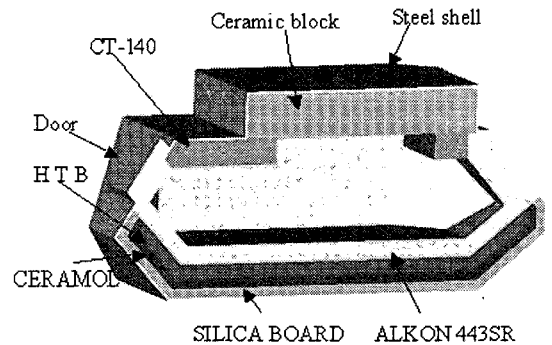


Fig. 3 3D-Model for thermal analysis of molten aluminium furnace

보온로의 내부 온도해석 방법은 용탕의 상부 내화재 부분에 Fig. 4 와 같이 내부 고온공기에 의한 대류 열전달과 복사 열전달을 고려해주었다. 대류와 복사에 의한 열전달은 보온로 내부의 가스 종류에 따라 달라진다. 본 연구에서는 보온로 내부의 분위기 가스를 일반 대기중의 공기를 사용하고, 보온로 분위기 온도인 1073.15K 에서의 공기 물성치를 부여하였다.<sup>15</sup> 보온로 내부의 고온 공기 물성치는 Table 3<sup>15</sup> 에 나타내었다. 또한 외부 공기

와 강제 쉘의 열손실을 계산하기 위해 외부 공기의 열전달 계수(h)는 15 W/m<sup>2</sup>/K 로 하였고 공기 온도(T<sub>∞</sub>)는 300K 로 하였다.

알루미늄 용탕과 직접 접하는 하부 내화재는 용탕에 의해 직접적으로 열전도 되도록 Fig. 5 와 같이 내화재 끝단(ALKON 443SR)에 알루미늄 용탕의 온도인 993.15K 가 발열하는 것으로 가정하여 해석하였다.

Table 3 Thermal properties of air at high temperature

Temp. (K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg · K)	Thermal conductivity (W/m · K)
273	1.252	1011	0.0237
293	1.164	1012	0.0251
313	1.092	1014	0.0265
333	1.025	1017	0.0279
353	0.968	1019	0.0293
373	0.916	1022	0.0307
473	0.723	1035	0.0370
573	0.596	1047	0.0429
673	0.508	1059	0.0485
773	0.442	1076	0.0540
1273	0.268	1139	0.0762

### 3.2 보온로 하부 구조물의 강도해석방법

알루미늄 용탕 보온로는 여러 내화재 층과 이를 둘러싼 강제 쉘로 구성되어 약 5000 kg 정도의 무게가 나간다. 그리고 작업의 편의성 및 유지 보수를 위해 높이 조절을 할 수 있도록 보온로 하부를 받쳐주는 구조물이 설치되어 있다. 따라서 보온로를 받쳐주는 하부 구조물은 상부 보온로의 무게를 지지할 수 있도록 안전성이 보장되어야 한다.

하부 구조물의 구조는 높이 조절을 위해 중심부와 우측 끝단에 피스톤이 장착되어 있고, 구조물의 바닥부와 보온로를 받치는 상부는 H 빔으로, 바닥부와 상부의 연결은 X 형의 레버로 설계되어 있다. 하부 구조물의 재질은 구조용 탄소강인

SS41 이다. 강도 해석은 로 내부에 알루미늄 용탕이 채워져 있다고 가정하여 보온로의 총 무게를 5776 kg로 설정하여 수행하였다. 해석 조건은 Fig. 6 과 같이 로의 높이가 가장 낮을 경우를 Case 1, 로의 높이가 가장 높을 경우를 Case 2 로, 로의 유지 보수를 위해 기울였을 경우를 Case 3 으로 설정하였다.

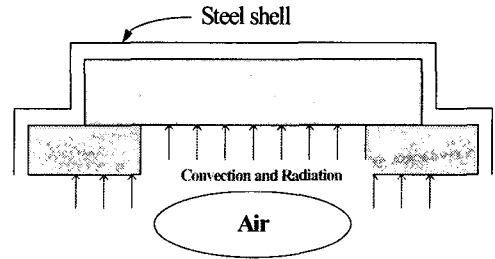


Fig. 4 Heat transfer to overhead

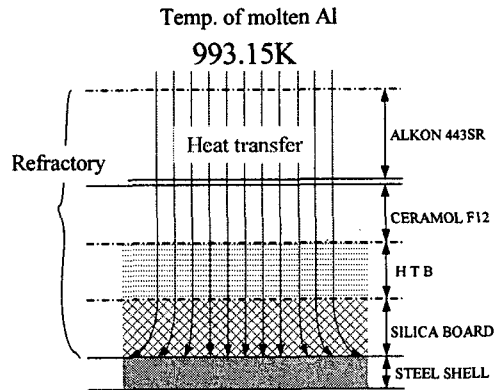
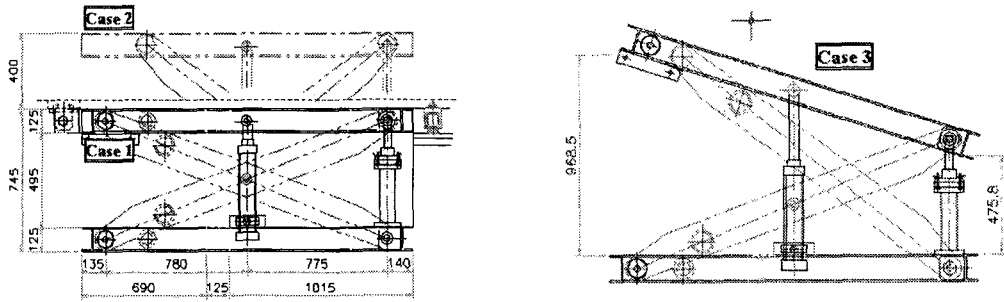


Fig. 5 Heat transfer to bottom

해석을 위한 모델링은 구조물의 바닥부와 보온로를 받쳐주는 2 개의 H 빔과, H 빔을 연결하는 X 레버만을 모델링 하였고 피스톤은 보온로의 높이를 조절할 뿐 보온로의 무게를 지지하지는 않기 때문에 해석상 고려하지 않았다. 해석시 보온로의 무게 적용은 보온로를 받쳐주는 상부 H 빔에 균일하게 작용하는 것으로 가정하여 로의 무게 5776kg 을 분포하중으로 적용시켰고, 전체 무게에 대한 자중을 고려하였다.



(a) Conditions for analysis of Case 1 and Case 2

(b) Conditions for analysis of Case 3

Fig. 6 Conditions for analysis of substructure frame

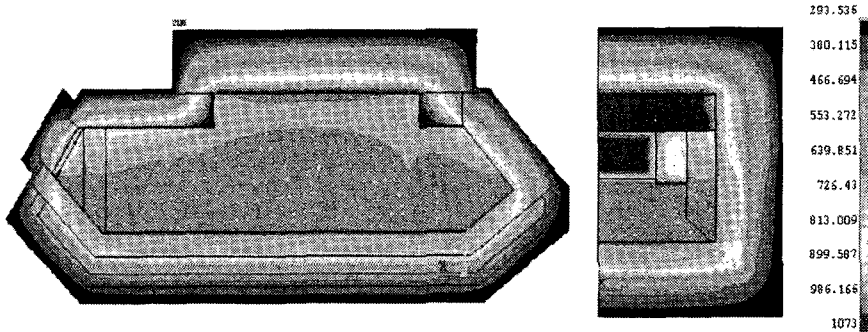


Fig. 7 Temperature distribution of molten aluminium holding furnace (unit : K)

Table 4 Comparison of analyses and maximum allowable temperature

Refractory	Silica Board	Alkon 443SR	Ceramol F12	H T B	CT-140	Ceramic Block
Max. temp.	466.15	993.15	949.15	639.15	1073.15	1073.15
Max. service temp.(K)	923.15	1273.15	1773.15	1273.15	1673.15	1773.15

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 보온로의 온도 해석결과

Fig. 7 은 보온로의 온도해석 결과를 나타내었고, 각 내화재별 온도와 최고사용온도를 Table 4 에 비교하였다. 내화재의 최고 온도는 상부의 Ceramic Block 에서 1073K(800℃)의 온도를 보였고, 사용온도가 가장 낮은 내화재는 하부의 Silica Board 에서 466K(193℃)의 온도분포를 보였다. 따라서 내화재의 온도분포는 각 내화재의 최고 사용 온도에 못 미쳐 사용상 열적으로 안전함을 알 수 있다. 강제 셀의 온도 분포는 Fig. 8 에 보였듯 유지보수를 위한 개폐구의 내측 부분에서 최고 온도인 400K(127℃)로 나타났고, 강제 셀의 외부 벽면 일

부분에서 320K(47℃)의 온도 분포를 보였으나 50℃이하 이므로 안전함을 알 수 있다.

##### 4.2 강제 셀의 열변형 및 응력 해석결과

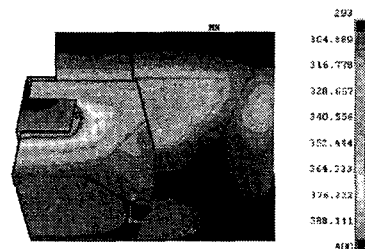


Fig. 8 Temperature distribution of steel shell(unit : K)

알루미늄 용탕 보온로의 내화재에서 강제 셸로 열전달 해석을 통해 보온로 외부 강제 셸의 온도를 계산하였고, 이 결과를 이용하여 강제 셸의 열변형 및 열응력 해석을 하였다.

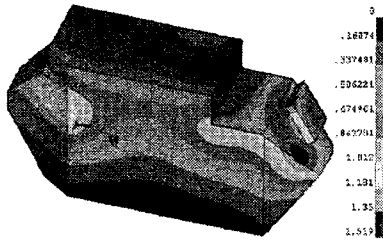
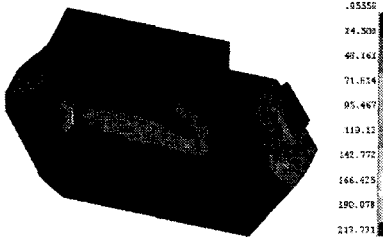
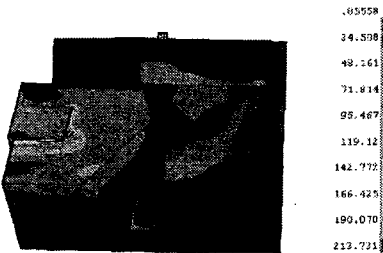


Fig. 9 Elastic deformation of steel shell (unit : mm)



(a) Outside view



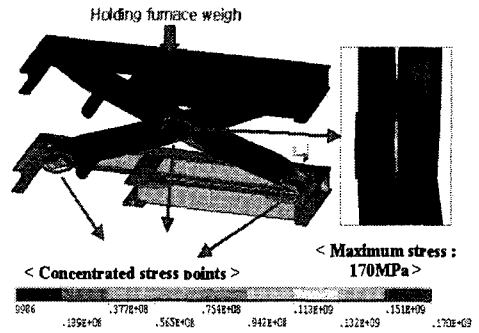
(b) Inside view

Fig. 10 Effective stress distribution of steel shell (unit :MPa)

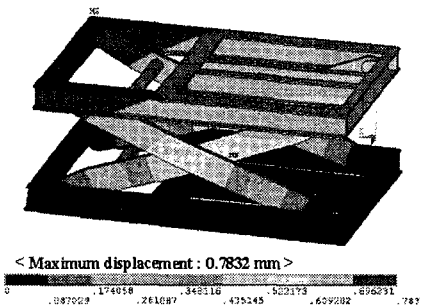
강제 셸의 열변형 및 열응력 해석 결과는 Fig. 9 와 10 에 나타내었다. 강제 셸의 최대 변위는 온도가 가장 높은 부분인 개폐구 부분에서 1.5 mm의 변형이 나타났다. 하지만 전체 알루미늄 용탕 보온로의 길이가 약 2800 mm인 것과 비교해 볼 때 미미함을 알 수 있다. Fig. 11 의 응력분포는 개폐구 내측부에서 최대응력이 213 MPa로 SS41 의 허용 항복강도보다 적게 나타났지만 상당히 높은 수치를 나타내었다. 실제 최대응력 발생부는 국부적으로 코

너부의 2~3 개 노드에서 발생된다. 이것은 유한요소격자 형상에 의한 것으로 코너부의 격자 국부적으로 과하게 변형되었기 때문이다. 만약 코너부의 격자를 좀더 세분화 할 경우 앞선 응력값보다 훨씬 낮아진다. 그러므로 강도해석 결과를 통해 강제 셸은 안전한 것으로 판단한다.

### 4.3 하부구조물의 강도해석 결과



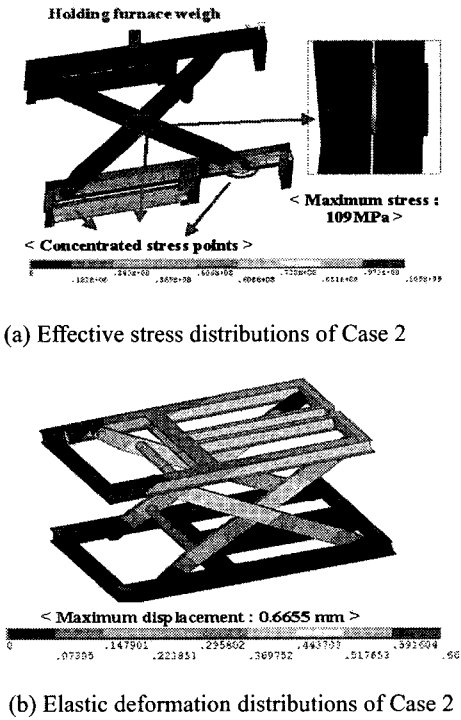
(a) Effective stress distributions of Case 1



(b) Elastic deformation distributions of Case 1

Fig. 11 Result of analysis for Case 1

Fig. 11 은 보온로의 높이가 가장 낮은 경우인 Case 1 에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. Fig. 11 의 (a)는 하부 구조물의 유효응력분포로 H 빔과 X 레버의 체결부위와 X 레버가 교차되는 체결핀에서 응력이 다소 높게 나타났다. 최대응력 집중부위는 측면 상세도에 보였듯 X 레버를 연결시켜주는 체결 핀에서 최대응력 170 MPa로 나타났다. 상부 보온로의 무게에 의한 탄성변형은 Fig. 11 의 (b)에 나타내었듯, 최대변위는 상부 H 빔에서 0.78 mm의 변위를 보였다.



(a) Effective stress distributions of Case 2

(b) Elastic deformation distributions of Case 2

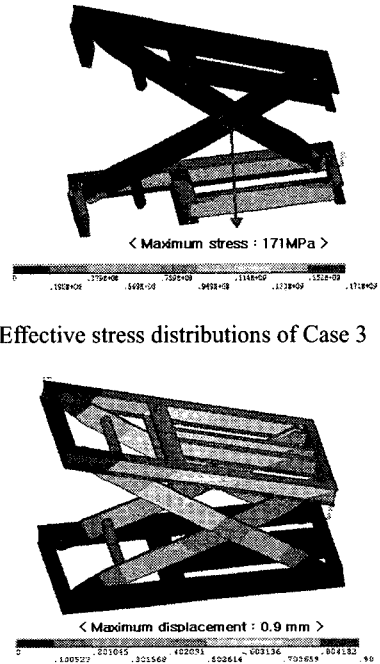
Fig. 12 Result of analysis for Case 2

보온로의 높이가 가장 높을 경우인 Case 2 에 대한 해석 결과는 Fig. 12 에 유효응력과 탄성변형 분포를 나타내었다. 최대응력분포는 Fig. 12 의 (a) 에 보였듯 X 레버 교차부분에서 109 MPa로 나타났다. Case 1 의 해석 결과와 비교하면, Case 1 과 Case 2 모두 같은 위치에서 최대응력을 보였고, Case 2 의 경우 최대응력은 Case 1 에서 최대응력인 170 MPa보다 작게 나타났다. 이는 보온로의 높이가 높을 때는 X 레버의 교차각이 크므로 X 레버에 부여되는 힘이 적어 X 레버 교차부분인 핀에 응력이 적게 나타나고, 보온로의 높이가 낮을 경우는 X 레버의 교차각이 작으므로 레버 자체에서 보온로를 지탱하기 보다는 레버 교차지점의 핀에 의지하게 된다. 따라서 보온로의 높이가 낮을 때가 높을 때보다 최대 응력이 크게 나타난다.

보온로 무게에 의한 탄성변형 역시 Case 1 과 같은 부위인 상부 H 빔에서 크게 나타났고, 값은 Case 1 보다 작은 0.66 mm를 보였다.

Case 3 의 경우는 보온로의 유지 및 보수를 위해 보온로의 개폐구(door)를 열어 작업하기 쉽게 기울였을 경우이다. 따라서 이때에는 보온로 내부

의 알루미늄 용탕은 없다. 하지만 본 해석에서는 유지 및 보수시 작업자가 하부 구조물에 오르게 되므로 보온로의 무게와 작업자 및 기타 보수장비의 무게가 가해진 것으로 간주하여 앞서 수행한 보온로의 무게를 적용하였다.



(a) Effective stress distributions of Case 3

(b) Elastic deformation distributions of Case 3

Fig. 13 Result of analysis for Case 3

보온로의 유지 및 보수를 위해 기울였을 경우 (Case 3)에 대한 해석결과는 Fig. 13 에 보였다. Fig. 13 의 (a)는 Case 3 의 유효응력분포로 최대응력은 앞서 수행한 경우와 같이 X 레버의 교차축 핀에서 171 MPa로 가장 크게 나타났다. 최대변위 역시 0.9 mm로 보온로를 직접 받쳐주는 상부 H 빔에서 발생하였다.

알루미늄 용탕 보온로 하부 구조물의 안전성 평가를 위해 앞서 수행한 해석 결과를 Table 5 에 정리하였다. 하부 구조물의 최대 응력 집중부위는 X 레버의 교차축 핀에서 나타났으나 그 값이 SS41 의 항복 강도인 250 MPa이하이고, 변위 역시 전체 크기에 비해 최대 0.9 mm로 아주 작게 나타났다. 결과적으로 세 가지 경우에 대해 모두 안전함을 알 수 있다.

Table 5 Results of analysis for substructure frame

	Case 1	Case 2	Case 3
Max. elastic deformation (mm)	0.78	0.66	0.90
Max. effective stress (MPa)	170	109	171
Yield stress of SS41 (MPa)	240		

### 5. 결론

본 논문의 목적은 알루미늄 용탕 보온로의 설계 및 제작시 유한요소해석을 통해 열·구조적 안정성을 확보하고자 하였다. 설계된 알루미늄 용탕 보온로의 유한요소해석을 통해 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 알루미늄 용탕 보온로의 열응력 및 강제 셀의 강도해석을 위한 유한요소기법을 정립하였으며 향후 각종 알루미늄 보온로의 해석 및 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.
- (2) 내화재의 온도분포가 허용사용온도 이하로 나타났고, 강제 셀의 온도분포는 개폐부 부분을 제외한 외부 벽면에서 323.15K 이하인 320.15K의 온도 분포를 보여 온도에 대해 안전하게 나타났다.
- (3) 강제 셀의 열변형 해석은 최대 1.5 mm로 전체 크기와 비교해 아주 작게 나타났고, 열응력 역시 허용 항복강도 240 MPa에 못 미치는 213 MPa로 나타나 외부 강제 셀은 열에 안전함은 알 수 있었다.
- (4) 설계된 보온로 하부 구조물의 구조 안정성평가를 위해 해석은 최저 및 최고 높이 그리고 기울였을 경우에 대해 수행하였고, 해석 결과는 유지 보수를 위해 기울였을 경우 상부 H 빔에서 최대 변위 0.9 mm로 전체 크기에 비해 미소하게 나타났고, 최대 응력은 레버의 교차축 편에서 171 MPa의 응력을 보여 하부 구조물의 재료 SS41의 항복강도인 240 MPa를 넘지 않으므로 구조적으로 안전하게 나타났다.

### 참고문헌

1. Kang, C. G., Choi, J. C. and Bae, W. B., "Semi-solid forming, casting and forging technologies of

- lightweight materials, " J. of KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 7-21, 2000.
2. Khoei, A.R., Gethin, D.T. and Masters, I., "Design optimization of aluminium recycling process using Taquchi approach, " Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (IPMM'99), pp. 513-518, 1999.
3. Tlustý, J., Smith, S. and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
4. Hong, C. P., Umeda, T. and Kimura, Y., "Modeling of Casting and Welding Process-II," The Metallurgical Society of AIME, pp. 221-230, 1984.
5. Wu, Y., Bui, R., Bourgeois, T. and Chapdelaine, A., "Modeling the cylindrical scrap aluminium remelter, " Metals and Minerals Society, pp. 96-106, 1994.
6. Arthur, C. S., "The Diecasting Book," Vol. 2, pp. 422, 1996.
7. Daniel, E. G., "Modern Casting," pp. 47, 1997.
8. Park, H. S., Lee, Y. K., Kim, K. H., Cho, K. W., Min, B. H. and Kim, M. H., "Numerical simulation of slab reheating furnace by the zone method, " J. of KSME, Vol. 15, No. 3, pp. 970-981, 1991.
9. Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., "Radiative transfer," McGraw-Hill, pp. 85, 1967.
10. Kim, G. H. and Kim, G. T., "A mathematical model of the fuel flow rate for optimal combustion in the reheating furnace, " RIST Tech. Research Report, Vol. 2, No. 4, pp. 93-103, 1988.
11. Rao, T. R., Barth, G. J. and Miller, J. R., "Computer model prediction of heating soaking and cooling times in batch coil annealing, " Iron and Steel Engineer, Semp., pp. 22-31, 1983.
12. Reed, R. J., "Light metal age, " pp. 10, 1985.
13. Neff, D. V., "Aluminium cast house technology," TMS, pp. 197, 1993.
14. Shinichiro, Fujikawa, Yuki-yoshi, Kitamura and Saburo, Shimamura., "Application of numerical methods for the aluminium casting/forging process, " J. Mat. Proc., Vol. 27, pp. 93-110, 1991.
15. Whiteley, P. R., "Aluminium cast house technology," TMS, pp. 255, 1993.