

# 가스 재열기 로터 부위의 응력 해석

이후광\*, 황석환, 최재승(두산중공업 기술연구원)

## Stress Analysis of Rotor Part in Gas-Gas Heater

Hoo-Gwang Lee, Suk-Hwan Hwang and Jae-Seung Choi (Doosan Heavy Industries & Construction)

### ABSTRACT

The possibility of weight reduction of rotor part in gas-gas heater(GGH) is studied from the viewpoint of allowable stress. In this work, finite element analysis(FEA) is performed with original model and three weight-reduced models with different diaphragm thickness, respectively. Stress concentrations at rotor diaphragm happen due to the dead weight, pressure difference between treated gas and untreated gas and thermal distribution in the rotor. As the thickness of diaphragm is decreased, the stress level is increased. The direction of treated gas and untreated gas flow may affect the stress level. Fatigue life assessment is not considered because pressure difference, the only cyclic load, can be ignored. The possible weight-reduced model is presented.

**Key Words** · GGH(가스재열기), Rotor Diaphragm (로터 다이어프램), Weight reduction (경량화), FEA (유한요소해석)

### 1. 서론

환경 문제가 중요하게 거론됨에 따라 근래의 화력발전소 및 각종 플랜트에는 배출 가스에서 SOx를 저감하기 위한 탈황설비(flue gas desulfurization, FGD) 시스템을 갖추고 있다. 그러나, 일반적으로 FGD를 통과한 처리 후 가스는 그 온도가 수분 포화 온도인 40~50℃로 낮아져 연도(stack)와 송풍관(duct) 내면의 부식을 유발할 수 있으며 대기중에서 쉽게 분산되지 않아 주변의 환경을 오염시킬 수 있어 처리 후 가스의 재열 필요성이 제기된다. 가스 재열기(gas-gas heater, GGH)는 고온의 처리 전 가스(untreated gas)로부터 열을 회수하여 저온의 처리 후 가스(treated gas)를 재열하는 장치로, 열소자(heating element)를 부착한 로터(rotor)가 처리 전 가스 영역과 처리 후 가스 영역을 회전 이동하면서 열전달을 유도한다<sup>(1)</sup>. 가스재열기의 구조는 크게 열소자가 설치되어 열전달을 수행하는 로터와 처리 전후 가스의 분리를 담당하는 섹터 플레이트(sector plate), 그리고 전체 구조를 지지하는 하우징(housing)으로 구성되어 형태상으로는 화력발전소 보일러에서 고온의 배출 가스를 이용하여 저온의 연소 공기의 가열과 석탄 연료의 건조에 사용되는 공기예열기(air

pre-heater, AH)와 동일하다. 한편, 가스재열기가 받는 하중은 자중, 열과 압력으로 정리되나 현재까지 이와 같은 하중을 상세하게 분석하여 설계에 적용하고 있지 않다. 따라서, 과도 설계된 부분을 검토하여 구조 경량화를 통하여 경제성을 확보하려는 것이 세계적인 추세이다<sup>(2)</sup>.

본 논문에서는 현재 당사가 건설중인 발전소에 설치 예정인 가스재열기의 로터를 대상으로 가동 조건을 고려한 응력해석과 적용 자재의 치수 변경을 통하여 경량화 모델을 제시하였다.

### 2. 가스재열기 로터의 구조 및 FEA 모델

가스재열기의 로터는 중심에 지축(trunnion)과 헤더(header)가 위치하고 여기에 스텝 다이어프램(stub diaphragm), 메인 다이어프램(main diaphragm) 등이 부착되어 원주 방향으로 대칭(축대칭, 24개의 반복구조)을 이루고 있다. 유한요소해석의 효율성을 위하여 1/24 부분 모델링(15°)을 하였고(Fig 1), 로터의 반경은 6,472mm, 메인 다이어프램의 높이는 872mm이다. 경계조건은 원주방향으로 반복 구조임을 고려하여 축대칭 구속조건을 적용하였고, 하부 지축의 바닥면을 지지점으로 설정하였다.

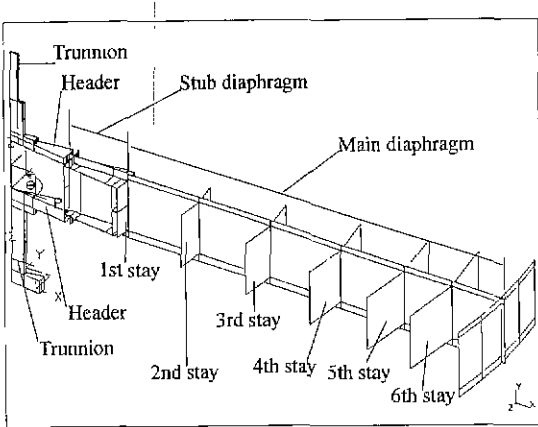


Fig. 1 Rotor structure and part's names

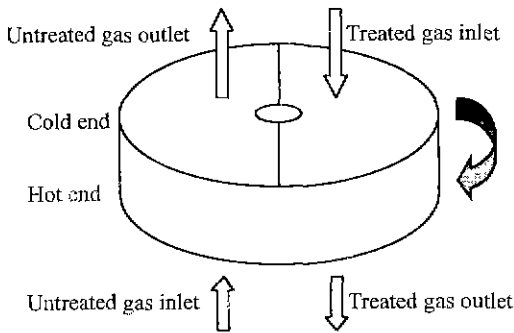


Fig. 2 Gas flow of GGH

하중조건은 열하중과 기계적 하중을 적용하였고 Fig.2는 처리 전후 가스의 정계면을 기준으로 열하중의 분포를 나타낸다. 기계적하중은 로터 전체의 자중에 의한 하중, 각 스테이(stay)에 장착되는 열소자 구조물(heating element & basket)의 중량에 의한 하중과 원주 방향으로 작용하는 처리 후 가스 영역과 처리 전 가스 영역간의 압력차에서 기인하는 하중 등 3가지이다. 자중에 의한 하중은 중력가속도를 이용하였고, 열소자 구조물에 의한 하중은 열소자 구조물의 중량을 분석하여 설치 위치(basket support bar)에 중량에 해당하는 하중을 부과하였으며, 압력차에 의하여 발생하는 하중은 다이어프램의 하중 작용면에 압력으로 적용하였다. 열하중의 적용은 로터가 1~4 rpm으로 지속적으로 회전을 하므로 각 영역에서의 분명한 온도 구분이 형성되지 않기 때문에 영역별 평균값을 이용하였다. 그러나, 상하 방향으로의 온도 분포는 회전되는 무관하며 지속적으로 유지되므로 열응력 유발의 주요 인자이다. 본 가스제열기에서 처리 전 가스는 하부로 입력되어 상부로 출력되며, 처리 후 가스는 상부로

입력되어 하부로 출력되는 구조로 상단이 저온부(cold end), 하단이 고온부(hot end)이다 따라서, 각 가스 영역의 고온부와 저온부의 온도를 각각 산술 평균 내었고, 각 평균 온도를 로터의 상하 방향으로 선형 변화를 가정하여 가스의 온도를 결정하였다 또한 열응력 해석을 위한 열전달 계수의 결정은 실험식(1)에 따라 결정하였고<sup>(9)</sup>, 전체적인 하중 조건은 Table 1에 제시하였다

$$h = a + b \omega^n \text{ (Kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C)} \dots \dots \dots (1)$$

$a, b$  : Coefficient,  
 $\omega$  : Fluid velocity

Table 1 Thermal and mechanical loading conditions

Thermal load			Mechanical load	
Thermal conductivity	41 l kcal/mh°C	Density	7.85×10 <sup>-6</sup> kg/mm <sup>3</sup>	
Thermal expansion	12×10 <sup>-6</sup> /°C	Gravitational acc.	9,800 mm/sec <sup>2</sup>	
Loc. #	Temp. (°C)	h (kcal/m <sup>2</sup> h°C)	1st basket support bar	0.44293 kgf/mm
1	25	10	2nd basket support bar	0.84725 kgf/mm
2	51	10	3rd basket support bar	0.88011 kgf/mm
3	75.8	25	4th basket support bar	0.84313 kgf/mm
4	76.6	10	5th basket support bar	0.69745 kgf/mm
5	116.3	25	6th basket support bar	0.62393 kgf/mm
6	25	10	7th basket support bar	0.24736 kgf/mm
7	116.3	10	Pressure difference on diaphragm	201.5×10 <sup>-6</sup> kgf/mm <sup>2</sup>
8	92	5		

\* Location # : See Fig.3

유한요소해석 모델은 Fig.3에 제시하였다. 지축과 헤더에는 3차원 solid 요소를, 스테이의 하단에 위치한 basket support bar에서는 beam 요소를 이용하였고, 그 이외의 부분은 3차원 shell 요소를 이용하여 전체 모델은 8,434 개의 절점과 7,825 개의 요소로 구성하였다 유한요소해석은 다이어프램의 두께를 변경하며 열전달 해석과 선형 구조 해석을 수행하였다. 다이어프램의 치수 선정은 가스제열기 제작에 활용되고 있는 상용 자재에서 4가지를 선택하였다(Table 2).

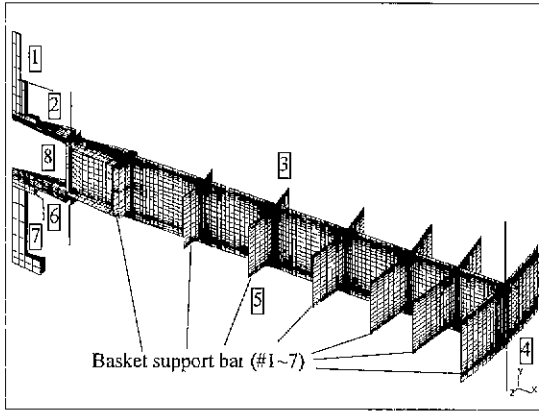


Fig 3 FEA model and loading locations

Table 2 Difference between original model and modified model

(Unit . mm)	Original model	Modified model I	Modified model II	Modified model III
Stub diaphragm thickness	22	19	15	10
Main diaphragm thickness	19	12	10	8

### 3. FEA 해석 결과 및 분석

유한요소해석 결과는 응력 측면에서 검토하였고, 각 하중 성분별 영향을 고려하기 위하여 하중 성분별 해석 결과를 Table 3에 제시하였다. 응력은 등가 응력을 검토하였으며 허용응력은 항복응력<sup>(4)</sup>의 2/3로 제한하여 14.3 kgf/mm<sup>2</sup>(150°C)이다.<sup>(5,6)</sup>

응력해석 결과 최대 응력의 크기는 다이아프램의 두께 감소에 따라 증가하였다. 최대 응력 발생 위치는 다이아프램 두께 변경에 크게 영향을 받지 않고 일정하며 헤더와 스텝 다이아프램의 상단 접촉부, 1번 스테이와 메인 다이아프램의 연결 부위에서 최대 응력이 발생하였다(Fig.4~7). 이는 자중에 의한 처짐 발생과 두께가 변화하는 위치에서의 응력 집중에서 기인하는 것이다. 그리고, 각 하중 성분의 역할 구분을 위하여 기존 모델에 대하여 각 하중 성분별 해석 결과를 분석하였다. 차압하중에 의한 응력은 자중과 온도분포에 의한 하중에 비하여 미미하였다. 자중에 의한 응력은 상하 구속 변적이 다른 외팔보 형태 때문에 스텝 다이아프램과 상단 헤더와의 경계부에서 최대 응력이 발생하며, 온도 분포에 의한 응력은 고온부에서 열팽창이 크고 헤더측 온도와의 차이가 크기 때문에 스텝 다이아프램과 하단 헤더와의 경계부에서 최대 응력이

발생하였다. 이 결과는 처리 전 가스와 처리 후 가스의 유입 방향이 현재의 경우와 반대인 경우 하중 성분별 최대 응력 발생 위치가 겹치게 되어 로터의 구조적 안정성 확보에 어려움이 있을 수 있고 그만큼 경량화가 어려움을 알려준다.

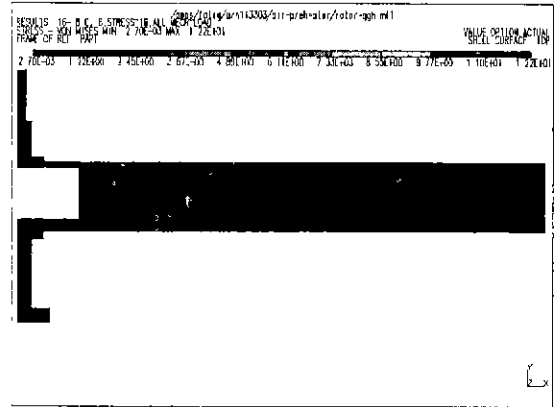


Fig 4 Equivalent stress distribution for original model

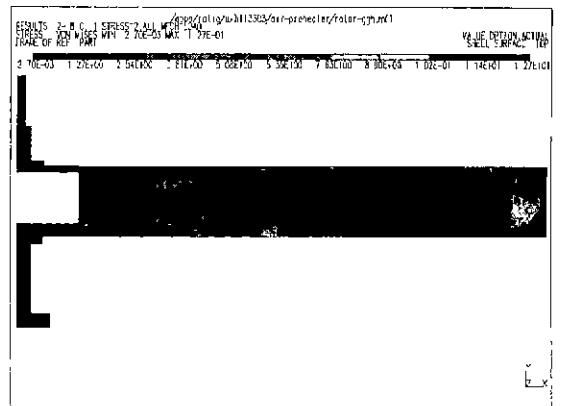


Fig 5 Equivalent stress distribution for modified model I

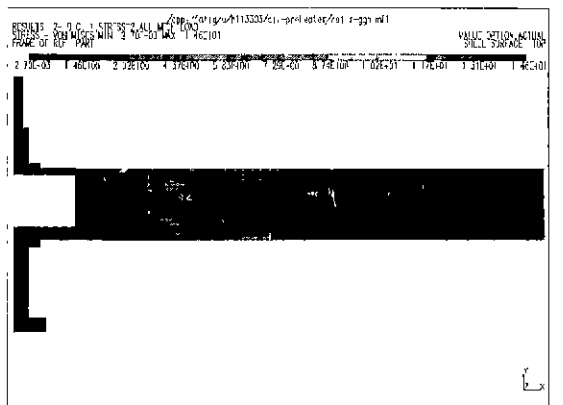


Fig 6 Equivalent stress distribution for modified model II

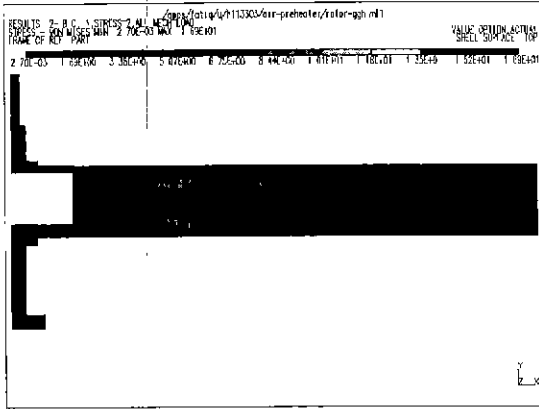


Fig. 7 Equivalent stress distribution for modified model III

#### 4. 결론

가스재열기의 로터에 대하여 유한요소해석을 통한 응력해석을 수행하고 다이어그램 두께 변경을 적용하여 경량형 모델의 가능성을 검토한 결론은 다음과 같다.

- 1) 제시된 경량형 모델 중 modified model I 으로의 경량화가 가능하다.
- 2) 처리 전 gas와 처리 후 gas의 유입 방향은 로터의 구조적 안정성에 큰 영향을 미친다
- 3) 차압하중은 로터의 피로 수명에 영향을 줄 만큼 큰 응력을 발생시키지 않으나, 보일러 기동 및 정지시의 과도 하중의 피로 수명에 대한 연구가 추후 필요하다.

Table 3 Summary of analysis results

Properties		Model #	Original	I	II	III
All loading	Max stress (kgf/mm <sup>2</sup> )		12.2	12.7	14.6	16.9
	Max. +Y deform (mm)		0.979	0.967	0.948	0.932
	Max. -Y deform (mm)		1.38	3.14	4.09	5.34
G loading only	Max stress (kgf/mm <sup>2</sup> )		10.4	11.1	13.4	16.7
Thermal loading only	Max. stress (kgf/mm <sup>2</sup> )		4.32	4.6	5.09	5.52
P diff loading only	Max. stress (kgf/mm <sup>2</sup> )		0.235	0.641	0.950	1.53
Weight (kgf)			18,111	11,928	9,860	7,696

#### 참고문헌

- 1 "Ljungström Gas Gas Heater(GGH) for Flue Gas Desulfurization System (FGD)," Technical Note, HANJUNG
2. 정재현, 함병훈, 이후광, 김중삼, "화력발전소 공기예열기의 피로손상 해석," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집, pp.955~959, 1998.
3. 日本機械學會編, "傳熱工學資料," 改訂 第3版, 1975.
4. HANJUNG R&D Center Material Database, 1998.
5. "Strength Calculation Methods and Formulas for Major Structural Components of GGH", Technical Note. ABB-KK, 1997.
6. Shigley, Joseph Edward. and Mischke, Charles R., "Mechanical Engineering Design" 5th ed. McGraw-Hill Inc, 1989

또한, 회전하는 로터의 다이어그램은 주기적으로 하중을 받게 되므로 피로하중을 받을 수 있다. 그러나, 자중과 열하중 조건은 로터의 회전과는 무관하므로 피로수명에 영향을 줄 수 있는 하중 조건은 차압하중 뿐이다. 그러나, 차압하중에 의한 응력 (Table 3)은 그 크기가 상당히 작아 피로수명에 영향을 주지 않을 것이다. 다만, 발전소의 기동 및 정지와 같은 짧은 시간의 천이 상태에서 발생하는 온도의 변화 주기는 피로 수명에 영향을 줄 것으로 판단되므로 추가적인 연구가 필요하다.

이상의 종합적인 하중의 영향을 고려한 응력해석결과에서는 modified model I 으로의 로터 경량화가 가능한 것으로 판단되었다.