

Lined Pipe 해석을 위한 등가 탄성계수 계산

정진한*, 최재승(한국중공업 기술연구원), 하대홍(한서대학교)

Equivalent Elastic Modulus for Lined Pipe Analysis

Jin-Han Jung, Jae-Seung Choi(R&D Center, HANJUNG), Dae-Hong Ha(Hanseu University)

ABSTRACT

The steel pipe for fluid catalytic cracking(FCC) unit, petroleum refinery, is lined with refractory to protect the system from high-temperature of the internal flow. The property of the refractory has an effect upon the stress analysis of FCC unit. Because 1-D pipe element or 3-D shell element are usually used in commercial codes of stress analysis to evaluate the structural soundness, the equivalent elastic modulus considering steel and refractory should be applied. In the research, the theoretical method to obtain the value of the equivalent property is introduced and then the stress analysis is carried out with the part of FCC unit.

Key Words : Fluid catalytic cracking(FCC) unit(유동성 촉매 분해 장치), Chemical pressure vessel(화학 압력 용기), Equivalent elastic modulus(등가 탄성 계수), Refractory lining(내화벽돌)

1. 서론

석유 정제용 FCC Unit 는 유동성 촉매 분해 장치(Fluid Catalytic Cracking Unit)의 약어로 중질유인 Bunker-C 유 및 잔사유를 고온에서 촉매(Catalyst)와 반응시켜 Bunker-C 유 및 잔사유의 탄소 입자를 촉매가 흡수함으로써 가솔린과 같은 정제된 상태의 경질유를 생산하고, 탄소 입자의 흡수로 손상된 촉매는 700 ~ 800 °C 의 더운 공기와 혼합되어 촉매에 흡수된 탄소 입자를 분리함으로써 정제된 양질의 촉매를 재사용하는 장치이며, 일반적으로 반응로와 재생기로 구성되어 있다.

FCC Unit 는 일반 화학 압력용기와는 달리 고온의 내부 유체로부터 시스템을 보호하기 위해 내벽에 내화벽돌(Refractory)이 설치 되어 있어 FCC Unit 응력 해석을 위해서는 내화물의 영향을 반드시 고려해야만 한다. 그러나 건전성 평가를 위한 배관 해석, 응력해석 프로그램들은 1 차원 Pipe 요소나 3 차원 Shell 요소를 주로 사용하고 있어 Steel 과 내화벽돌을 동시에 고려할 수 없다. 그래서 내화벽돌이 설치된 시스템의 응력해석을 위해서는 등가 물성치의 개념이 도입되어야 한다. 즉 내화벽돌이 고려된 등가 물성치를 계산하여 이를 Steel 의 물성치

대신에 사용하게 된다.

본 연구에서는 내화벽돌이 설치된 FCC Unit 의 응력해석을 위한 등가 탄성 계수를 계산하는 방법을 제시하고 이를 이용하여 FCC Unit 의 응력해석을 수행하였다.

2. 이론

등가 탄성계수를 계산하기 위해서는 Steel 과 내화 벽돌 사이에 미끄럼(Slip)이 일어나지 않고 두 재질이 하나의 재질처럼 굽힘이 일어난다고 가정한다. 따라서 총 굽힘 모멘트는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$M = M_S + M_L \tag{1}$$

Case I) 인장에서의 내화벽돌의 탄성계수가 압축일 때의 탄성계수와 같은 경우에 중립축은 관의 중심에 위치하고 Simple Beam Theory 를 이용하면 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{eq1} = E_S + E_L \frac{I_L}{I_S} = E_S + E_L \frac{r_2^4 - r_1^4}{r_3^4 - r_2^4} \tag{2}$$

Case II) 내화벽들이 인장을 받지 않고 압축만을 받고 또한 내화벽들의 평균 반경(r_L) $\gg t_s, t_L$ 이고 중립축 Offset 'p'는 작다고 가정한다.

내화벽들이 인장을 받지 않으면, Fig. 1 에서 보는 것처럼 중립축은 단면의 압축축으로 'p'만큼 이동한다.

여기서 중립축의 위치는 중립축 위의 면적 모멘트와 아래의 면적 모멘트 합이 같다는 원리를 이용해서 구할 수 있다. Fig. 1 에서 중립축(N-A)에 관한 면적 모멘트를 취하면,

$$(\text{Steel의 면적}) \times p = \frac{1}{n} \times (\text{빗금 친 면적}) \times (g-p)$$

즉 다시 말해서,

$$\pi(r_3^2 - r_2^2)p = \frac{1}{n} \left[\frac{\pi}{2}(r_2^2 - r_1^2) - 2t_L p \right] (g-p) \quad (3)$$

$$\text{여기서 탄성계수비 } n = \frac{E_S}{E_L}$$

X-X 축에서 g(무게중심)까지의 거리를 얻기 위해서 Lining 영역을 3 부분(N-A 축위, X-X 와 N-A 축사이, X-X 축 아래)로 나눈 후 X-X 축에 대한 3 부분의 모멘트 합은 0 이어야 한다.

$$\left[\frac{\pi}{2}(r_2^2 - r_1^2) - 2pt_L \right] g + 2(pt_L) \frac{p}{2} - \frac{\pi}{2}(r_2^2 - r_1^2) \times \frac{2r_L}{\pi} = 0$$

요약하면, 다음과 같이 표현된다.

$$\left[\frac{\pi}{2}(r_2^2 - r_1^2) - 2pt_L \right] g = (r_2^2 - r_1^2)r_L - p^2 t_L \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용해서,

$$p^2 - \frac{\pi}{2t_L} \left[2n(r_3^2 - r_2^2) + (r_2^2 - r_1^2) \right] p + \frac{r_L}{t_L} (r_2^2 - r_1^2) = 0 \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 Offset 'p'를 구할 수 있다.

Fig. 1 의 중립축에 관한 등가 탄성계수는 다음과 같다.

$$E_{eq2} = E_S + E_L \frac{I_L}{I_S} \quad (6)$$

여기서 I_S 는와 I_L 은 평행축 이론(Parallel-Axis

Theorem)을 적용해서 쉽게 구해진다.

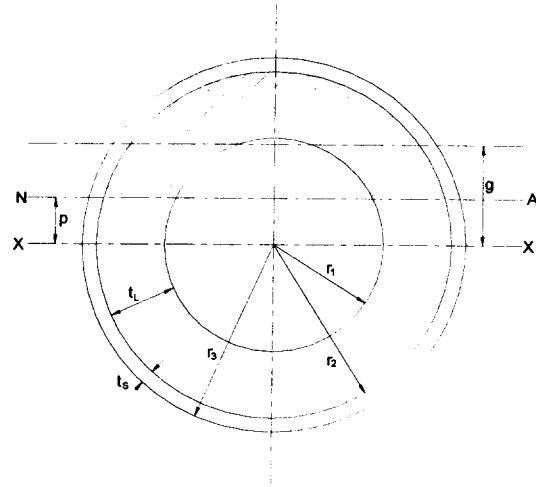


Fig. 1. Cross section of lined pipe of Case II

$$I_S = \frac{\pi}{4}(r_3^4 - r_2^4) + p^2 \pi(r_3^2 - r_2^2)$$

$$I_L = \frac{\pi}{8}(r_2^4 - r_1^4) - \frac{2}{3}p^3 t_L - \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2} [4r_L p - p^2 \pi]$$

Case III) Case II의 가정과는 달리 t_L 과 p 의 치수를 고려하고 나머지 가정은 Case II와 같다.

Fig. 2 에서 힘의 평형(Static Equilibrium) 을 고려하면

$$F_S + F_L = 0 \quad (7)$$

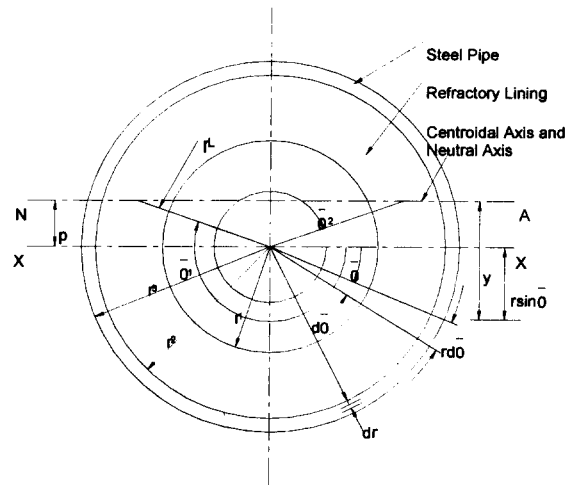


Fig. 2 Cross section of lined pipe of Case III

3. 유한요소 해석

$$F_s = \frac{E_s}{\rho} \int_{r_1}^{r_3} \int_0^{2\pi} (r \sin \theta + p) r d\theta dr = \frac{E_s}{\rho} p \pi (r_3^2 - r_2^2)$$

$$F_L = \frac{E_L}{\rho} \int_{r_1}^{r_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (r \sin \theta + p) r d\theta dr$$

$$= \frac{E_L}{\rho} \left[-\frac{1}{3} (r_2^3 - r_1^3) (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \frac{1}{2} (r_2^2 - r_1^2) p (\theta_2 - \theta_1) \right]$$

여기서,

ρ : Composite Cylinder 의 곡률 반경

$$\theta_1 : \pi + \sin^{-1} \left(\frac{p}{r_L} \right)$$

$$\theta_2 : 2\pi - \sin^{-1} \left(\frac{p}{r_L} \right)$$

식(7)에 대입하면,

$$p \pi (r_3^2 - r_2^2) = -\frac{1}{n} \left[\frac{1}{3} (r_2^3 - r_1^3) (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) + \frac{p}{2} (r_2^2 - r_1^2) (\theta_2 - \theta_1) \right] \quad (8)$$

Case II에서 구한 p 값을 식 (8)의 초기치로 가정 해서 수치해석에 의해 p 값을 구한다. Case III에서 등가 탄성계수는 다음과 같다.

$$E_{eq3} = E_s + E_L \frac{I_L}{I_S} \quad (9)$$

여기서

$$I_s = \int_{r_2}^{r_3} \int_0^{2\pi} (r \sin \theta + p)^2 r d\theta dr = \frac{1}{4} \pi (r_3^4 - r_2^4) + \pi p^2 (r_3^2 - r_2^2)$$

$$I_L = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (r \sin \theta + p)^2 r d\theta dr = \frac{1}{4} (r_2^4 - r_1^4) \left[\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} - \frac{\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1}{4} \right]$$

$$- \frac{2}{3} p (r_2^3 - r_1^3) (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \frac{1}{2} p^2 (r_2^2 - r_1^2) (\theta_2 - \theta_1)$$

실제의 경우에는 아래 식이 평균 탄성계수를 계산하는데 사용되어 질 수 있다.

$$E_{eq4} = 0.6 \cdot E_{eq1} + 0.4 \left[\frac{E_{eq2} + E_{eq3}}{2} \right] \quad (10)$$

앞 Section 에서 얻은 등가 탄성계수를 이용한 응력해석을 수행하기 위한 모델은 Fig. 3 에 나타난 FCC Unit 반응로의 Stripper 와 Riser 의 Junction 부를 선택하였다. Riser 는 재생기에서 재생된 촉매가 증질유와 접촉, 증질유를 분해하는 곳이고, Stripper 는 접촉 반응이 끝난 촉매를 고온의 Steam 으로 촉매의 불순물을 제거하여 재생기로 순환시키는 장치이다. Stripper 와 Riser 의 내부에는 서로 다른 재질의 Refractory 가 설치되어 고온의 유체로부터 장치들을 보호하고 있다. Fig. 4 는 Stripper 와 Riser Junction 부의 유한요소 모델과 경계조건을 보여주고 있다. Fig. 4 에 나타난 것과 같이 내압과 열하중 만을 작용시켰다. 이 모델은 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.5 를 사용하여 3,648 개의 ANSYS SHELL 63 요소로 구성되어 있다. 해석 모델의 주요 치수, 물성치와 하중 조건은 Table 1 에 나타내었다.

Stripper 와 Riser 의 등가 탄성 계수는 Table 2 에 나타내었다. Stripper 와 Riser 모두 Case I 일 때 등가 탄성계수가 가장 크게 나타났다. 대부분의 실제 해석에서는 Case I 의 물성치를 사용하여 가장 보수적인 설계를 하고 있다. 그러나 4 가지의 등가 탄성계수의 값은 큰 차이를 보이지 않고 경험적으로 사용하는 Case IV의 값이 Case I 과 가장 근사한 값을 가진다. 4 가지 등가 탄성 계수를 이용하여 해석한 결과는 Table 3 에 나타내었다. 등가 탄성계수의 값이 차이가 크지않기 때문에 해석결과 Stress 도 유사한 값을 가진다. 결론적으로 가장 보수적인 해석을 위해서는 Case I 의 등가 탄성계수가 적합하다. Fig. 5 는 Case I 의 Primary + Secondary Stress Intensity 의 분포를 보여 주고 있다. 시스템의 건전성 평가는 다음의 ASME Criteria 를 따른다.

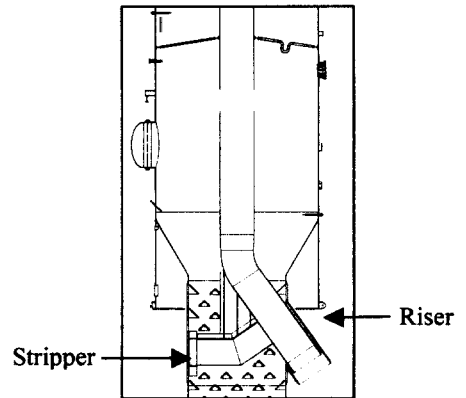


Fig. 3 Reactor of FCC Unit

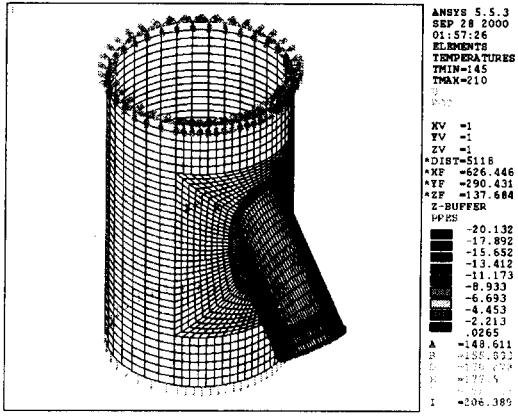


Fig. 4 FE model and boundary condition

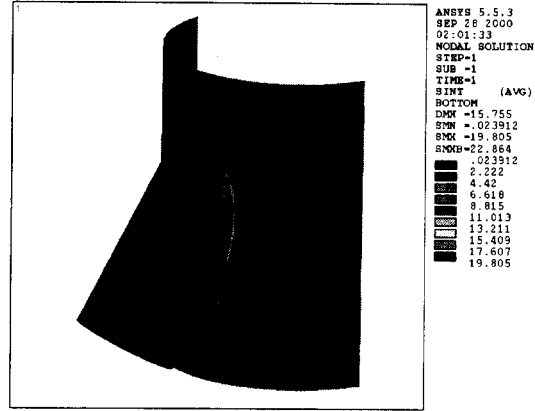


Fig. 5 Stress Intensity distribution

- Primary Local Membrane Stress Intensity $\leq 1.5S_m$
- Primary + Secondary Stress intensity $\leq 3S_m$

Stripper 와 Riser 의 소재인 SA516-70 의 Stress Intensity 가 $14.06\text{kg}/\text{mm}^2$ 이므로 4 가지 경우 모두 ASME Criteria 를 만족함을 알 수 있다.

Table 1. Dimension and loading condition of Model

	Stripper	Riser
I.D.	4524 mm	1753 mm
t_s	76 mm	51 mm
t_r	127 mm	152 mm
E_s	$20560 \text{ kg}/\text{mm}^2$	$20560 \text{ kg}/\text{mm}^2$
E_L	$496.33 \text{ kg}/\text{mm}^2$	$1125 \text{ kg}/\text{mm}^2$
압력	$0.0178 \text{ kg}/\text{mm}^2$	$0.0265 \text{ kg}/\text{mm}^2$
온도	145°C	210°C

Table 2. Equivalent elastic modulus

	Stripper	Riser
E_{eq1}	21284	22993
E_{eq2}	21261	21760
E_{eq3}	20911	21614
E_{eq4}	21204	22429

(Unit : kg/mm^2)

Table 3. Analytical result

	P_L	$P_L + P_b + Q$
Case I	17.737	19.805
Case II	17.239	19.669
Case III	17.105	19.515
Case IV	17.272	19.721

(Unit : kg/mm^2)

4. 결론

석유 정제용 FCC Unit 와 같이 고온의 내부 유체로부터 시스템을 보호하기 위하여 내벽에 내화벽돌을 설치한 압력 용기의 응력해석 수행을 위한 등가 탄성 탄성계수를 구하는 방법을 제시하였고 유한요소 해석에 이를 적용하였다.

참고문헌

1. "Project Book for Stress Analysis in FCCU-Reactor/Regenerator", RTI, 1998
2. Truong K. T., "Improve FCCU Refractory Lined Piping Design", Hydrocarbon Processing, pp. 69 ~ 74, July 1998
3. 김 태완, 최 재승, 정 진한, "석유 정제용 FCC Unit 의 Pipe Stress 해석을 위한 등가 물성치 계산", 기술보고서, 한국중공업, 1999.2
4. Chadda, T. S., "Effect of Refractory Lining on the Stiffness of Steel Pipe", ASME, pp 79 ~ 87, 1981
5. Manuel Aguirre G. "Bending of Composite Cylinders", Master Thesis, Rice University, 1969
6. Mogbo Nathan C., Jirsa James O., and Wilhoit, Jr. J.C., "Effective Stiffness of Concrete Coated Line Pipe", ASME, 1972