

# 원자력 압력용기의 설계기준과

## 응력 해석방법



김 천 옥

(연세대학교 이공대 교수)

(a) 평판경판의 변위

그림 9와 같이 셸의 끝에 연결된 평판경판의 변위는 점a에서 압력에 의한 회전각이

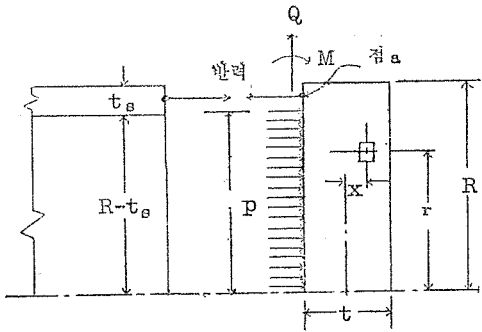


그림 9. Flat head

$$\theta_p = + \frac{F_1}{E(t/R)^3} P \dots\dots\dots (25a)$$

그리고 반경방향 변위는

$$\omega_p = - \frac{t}{2} \theta_p \dots\dots\dots (25b)$$

로 주어진다.

반경방향력 Q와 모우멘트M에 의한 회전각과 반경방향변위는 점a에서

$$\theta = \frac{-F_3}{ER(t/R)^2} Q + \frac{-2 F_3}{ER^2 (t/R)^3} M \dots\dots (25c)$$

$$\omega = \frac{-F_3}{3 E (t/R)} Q + \frac{F_3}{ER (t/R)^2} M \dots\dots (25d)$$

로 주어진다.

윗 식에서 Q와 M은 셸의 부정정해석에 의하여 구하여 진다.

(b) 평판경판에서의 응력

내압p에 의한 응력들은 다음 식들로 주어진다.

반경방향응력 :

$$\sigma_r = \frac{(x)p}{t(t/R)^2} \left[ (F_2) - \frac{3(3+v)r^2}{4R^2} \right] \dots (26a)$$

접선방향력 :

$$\sigma_t = \frac{(x)p}{t(t/R)^2} \left[ (F_2) - \frac{3(1+3v)r^2}{4R^2} \right] \dots (26b)$$

축 방향응력 :

$$\sigma_l = x - \frac{t}{2} \frac{p}{t} \dots\dots\dots (26c)$$

그리고 반경방향력 Q와 모우멘트 M에 의한 반경방향 및 접선방향응력은 다음식으로 주어진다.

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{F_4}{t} \left[ 1 - \frac{6(x)}{t} \right] Q - \frac{12F_4(x)}{t_3} M \dots (26d)$$

윗 식들에서 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>, 및 F<sub>4</sub>는 경판의 선상정수로서 포아송비 v와 t<sub>s</sub>/R의 값에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$F_1 = \frac{3(1-v)(2-f^2)(1-f)^2[8-f(4-f(1-v))]}{1b(2-f)} \dots\dots\dots (27a)$$

$$F_2 = \frac{3}{8} (1-f)^2 \{ (1-v)(2-f^2) + 4(1-v)[1+2ln \frac{2f}{2-2f}] \} \dots\dots\dots (27b)$$

$$F_3 = \frac{3}{8} (1-v)(2-f)[8-f(4-f)(1-v)] \dots (27c)$$

$$F_4 = \frac{1}{8} [(8-f(4-f)(1-v))] \dots\dots\dots (27d)$$

여기서

$$f=ts/R \dots \dots \dots (27e)$$

이다.

3-1.4. 다공판(多孔板)

열교환기에서 사용되는 전열관을 지기(支技)하는 원판은 구멍이 많이 뚫린 판으로서 셀에 직접 연결되어 있으므로 이 판의 변위는 셀의 응력에 영향을 미친다. 다공원판의 변위는 구멍을 뚫음으로 인하여 탄성계수와 포아송비가 달라졌다고 생각하는 상당원판해석법에 의하여 관계식은 다음과 같다. 다공판은 그림 10과 같이 정삼각형 분포인 경우<sup>1)</sup> 말한다.

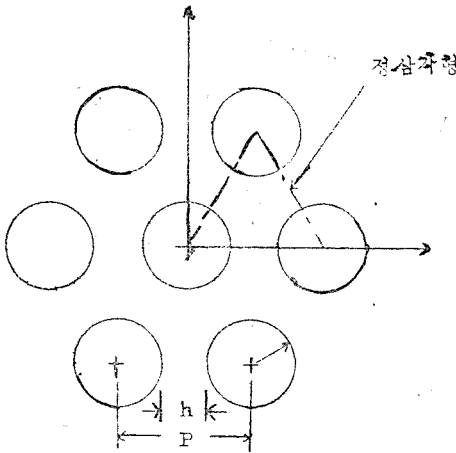


그림 10. Perforated Plate

(a) 압력에 의한 응력과 변위

그림 11과 같이 1차 및 2차압력  $P_1, P_2$ 를 받는 다공판의 응력은

$$\sigma_r = \mp \frac{3}{8} \left( \frac{R^*}{t} \right)^2 (3+v^*) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R^*} \right)^2 (\Delta P) \right] \dots \dots \dots (28a)$$

$$\sigma_\theta = \mp \frac{3}{8} \left( \frac{R^*}{t} \right)^2 [(3+v^*) - (1+3v^*) \left( \frac{r}{R^*} \right)^2] (\Delta p) \dots \dots \dots (28b)$$

로 주어진다. 그리고  $r=R^*$ 에서 중심면의 변위는

$$\omega = \frac{vR^*}{E} \frac{(p_1+P_2)}{2} \dots \dots \dots (28c)$$

$$\theta = \frac{3}{2} \frac{(R^*)^3}{E^* t_3} (1-v^*) (\Delta p)$$

로 부터 결정된다.

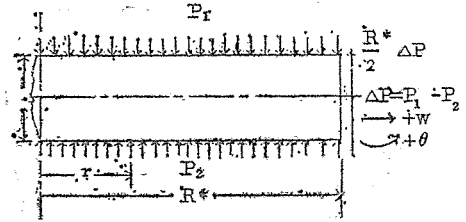


그림 11. Uniformly Distributed Pressure Loads

(b) 관내압에 의한 응력과 변위

그림 12와 같이 다공판에 연결된 전열관의 내압에 의한 응력은

$$\sigma_r = \sigma_c = \frac{h}{p} \frac{(p-h-2t)}{h+2 \frac{E_t}{E} t} p_i \dots \dots \dots (29a)$$

로 주어지고  $r=R^*$ 에서의 중위면이 변위는

$$\theta = 0$$

$$\omega = \frac{R^*}{E} \left[ \frac{E}{E^*} (1-v^*) - (1-v) \right] p_i \dots \dots \dots (29b)$$

인데 이 식에서  $\bar{E}^*$ 와  $v^*$ 는 관의 영향을 고려한 다공계수인데

$$\frac{\bar{h}}{\bar{p}} = \frac{h + \frac{2E_t}{E} t}{p}$$

로 부터 얻는 상당탄성계수 및 포아송비이다.

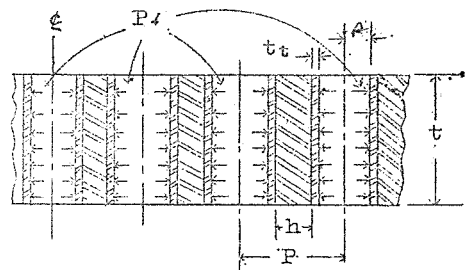


그림 12. Tubes or Perforations

그림 12. Tubes or Perforations

3-2. 컴퓨터프로그램의 구성

대부분의 압력용기는 원통셀을 기간(基幹)으로 하여 경셀으로 반구셀·타구(橢球) 또는 평판을 채용하고 있다. 지름이 다른 두개의 원통셀을 연결할 때에는 원추셀의 일부를 사용한 다. 그러므로 압력용기의 해석에서 먼저 원통셀

부를 검토한다. 만일 원통셀의 길이가 감쇠 길이  $L_c(=\pi/\beta)$  보다 길 경우에는 일단에 작용하는 전단력과 모우멘트가 타단에 영향을 주지 않으므로 원통셀을 둘로 나누어 상하 2부분을 따로 따로 해석하면 된다. 만일 원통셀이 감쇠 길이 보다 짧으면 압력용기 전체를 필요한 셀요소로 분해하고 부정정해석을 진행한다. 부정정해석은 각 셀요소 마다 미지의 부정정력을 미지수로 한 채 계수들 계산하여 컴퓨터에 기억시켰다가 계수가 모두 결정되면 영향계수 매트릭스들 만든다. 이 매트릭스들 Gauss-Seidel의 소거법을 이용하여 연립방정식을 풀면 부정정력을 구하게 된다. Gauss-Seidel의 Elimination Method는 15원연립방정식(15元聯立方程式)까지는 양호한 해를 구할 수 있으므로 원자로 압력용기의 해석에는 적합하다.

부정정력이 모두 결정되면, 이들 값을 각 셀요소의 공식에 대입하여 응력, 변위 등 요구되는 값을 구한다. 응력은 압력에 의한 것과 부정정력에 의한 것을 합하고 주응력들로 부터 응력강도를 구하여 설계기준의 값과 비교 한다.

일반적으로 최대응력은 셀요소의 연결부에 생기므로 셀요소의 전반에 걸친 응력계산은 필요하지 않으나 응력분포의 모양을 설명하기 위하여 그림 13에서는 Kraus (6)의 계산결과를 보여 준다.

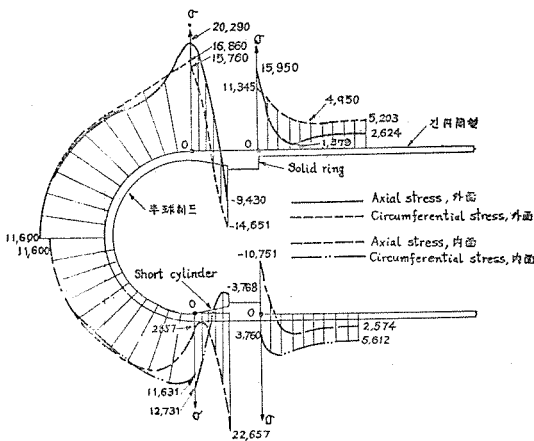


그림 13. 蒸氣發生器下半部の 應力分布

#### 4. 결 론

이상으로 원자로압력용기의 설계기준과 응력 해석방법을 설명하였다. 참고문헌(1)에서 주고 있는 설계의 기본개념은 일반압력용기에 사용하는 기준을 일층 강화하고 일반압력용기에서는 요구하지 않는 응력해석을 구조해석, 피로해석, 및 열응력해석으로 나누어 엄격하게 실시 하고있다. 앞으로 우리나라 원자력발전기술의 제1단계는 도입되는 원자력발전설비의 안전성을 분석하고 운전에 필요한 기술을 습득하는 것이므로 안전성분석에 필요한 과제중 특히 응력해석프로그램의 자체개발이 시급하다. 또한 배합해석, 지진해석 등 안전성분석에 필요한 과제가 산적되어 있으므로 이 분야에 관심있는 기술자들의 조직적 연구가 필요하다.

원자로압력용기는 일반압력용기의 설계와 사용경험에 기초를 두고 설계·제작되고 있으므로 상당히 높은 신뢰성을 주고 있으나, 핵반응에서 방사되는 중성자의 효과와 열 사이클의 변동 등에 예측하기 어려운 사용조건을 가지고 있으므로 앞으로도 많은 연구들 요하고 있다. <完>

#### 참고문헌

1. ASME. ASME Boiler and Pressure Vessel Code-Section III: Nuclear Power Plant Component, 1971. ASME. New York
2. 발전용 원자력기술기준, 화력발전기술협회 1972. 동경
3. Timoshenko. S. and Woinowsky-Krieger, s., Theory of Plates and Shells, and Edition, 1959, Mc Graw-Hill Book Co., New York, N. Y., p. 468.
4. Kraus. H., Thin Elastic Shells, John Wiley & Sons, Inc., New York. 1967, pp. 132-142.
5. Geckeler, J. W., "Über die Festigkeit achsensymmetrischen Schalen". Forschungsarb Ingwes., Vol. 276, 1-52 (1926)