

손상된 파이프의 구조 안전성 평가



박재학

충북대학교 안전공학과

1. 서론

화학설비나 산업설비 또는 국가 기간 설비에서 파이프(pipe)는 중요한 위치를 차지하고 있으며 파이프의 파열은 그대로 대형 사고나 설비 가동의 중단으로 연결되는 경우가 많다. 따라서 파이프의 구조 건전성을 유지하는 것은 안전의 확보와 생산 설비의 효율적 운용을 위하여 중요하다.

파이프 재료 내부에는 재료 제작 시, 또는 파이프 제작 시 발생된 결함이나 사용 중 부식이나 피로 등의 영향으로 생성된 결함이 존재한다. 이러한 결함은 파이프의 강도를 낮추게 되고, 파이프의 잔류강도가 사용압력보다 낮아지게 되면 파이프가 파열하게 된다. 따라서 본 글에서는 파이프에 균열이 존재하거나 손상된 경우의 구조안전성 평가를 위하여 필요한 해석방법에 대하여 살펴본다.

내용에는 건전한 파이프의 파열압력식, 축방향 및 원주방향 단일 관통균열이 존재하는 경우의 파열압력식, 표면 균열이 존재하는 경우의 해석 방법 및 마모에 의한 손상이 존재하는 경우의 해석 방법 등이 포함된다. 소개된 해석 방법은 파이프 뿐만 아니라 일반적인 구조물의 해석에도 응용할 수 있다.

2. 파이프 재료의 특성 시험

2.1. 단순 인장시험

파이프의 구조 안전성 평가를 위해서는 파이프 재료의 기계적 특성을 알아야 한다. 우선 단순인장 시험을 통하여 기본적인 기계적 성질을 알 수 있다.

단순 인장시험에서의 응력-변형률 관계식이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\sigma = C\epsilon^n \tag{1}$$

여기서 n 은 변형률경화지수이다. 또한 단순 인장 시험을 통하여 파이프 재료의 극한강도 σ_u 및 항복강도 σ_y 를 얻는다.

2.2. 파괴인성의 측정

파이프 내에 균열이 존재하는 경우는 균열의 위험성을 평가하여야 하고 이를 위해서는 재료의 파괴 특성을 알아야 한다. 파이프 재료가 연성이 큰 재료인 경우는 과도한 소성변형에 의하여 파이프가 파열되므로 극한강도와 항복강도만으로 파열압력을 구할 수 있다. 그러나 연성이 크지 않은 재료의 경우 구조 안전성 해석을 위해서 재료의 파괴인성(fracture toughness)을 측정할 필요가 있다. 파괴인성이라 함은 재료의 균열성장에 대한 저항의 정도이다.

재료의 파괴인성을 알기 위하여 K_{Ic} 측정 시험을 행한다. ASTM(American Society for Testing and

Materials)의 E399에 규정된 K_{Ic} 의 표준측정방법은 다음과 같다.

1) 사용 시험편

ASTM에서 규정하고 있는 시험편들은 컴팩트 시험편(compact specimen), 굽힘 시험편(single edge notched bend specimen, SENB), 아크형 시험편(arc-shaped specimen) 및 디스크형 시험편(disk-shaped specimen)이다. 이중 많이 사용되는 컴팩트 시험편과 굽힘 시험편의 형상은 Fig. 1과 2와 같다.

또한 시험편의 크기 및 형상은 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{YS}} \right)^2, \tag{2}$$

$$0.45 \leq a/W \leq 0.55$$

여기서 B는 시험편의 두께이다. 첫 번째 식에서 시험편의 두께에 관한 조건은 평면변형(plane strain) 상태가 되기 위한 조건이다. 식 (2)의 계산을 위해서는 K_{Ic} 값이 필요하지만 아직 K_{Ic} 값을 알지 못하므로 대략적인 K_{Ic} 값을 추정하여 시험편의 크기를 결정하여야 한다. 시험 후 K_{Ic} 가 예상보다 크게 되어 식 (2)의 조건을 만족하지 못하였다면 보다 큰 시험편을 사용하여 다시 시험을 행하여야 한다.

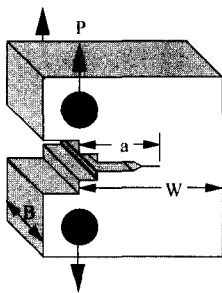


Fig. 1. Compact specimen

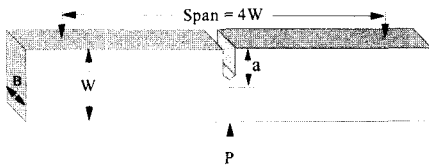


Fig. 2. SENB specimen

2) 피로균열

기계가공으로는 균열을 낼 수가 없기 때문에 기계 가공으로 노치를 만든 후 반복하중을 가하여 원하는 길이만큼 피로균열을 내어야 한다. 이때 피로균열을 내기 위하여 가한 하중이 파괴인성 시험에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 피로균열을 낼 때의 최대 하중에서의 K_I 인 K_{max} 에 대하여 다음과 같은 제한규정을 둔다. 피로균열을 내는 초기에는 $K_{max} \leq 0.8K_{Ic}$ 가 되도록 하고 나중에는 $K_{max} \leq 0.6K_{Ic}$ 가 되어야 한다.

3) 하중-하중선 변위 곡선

하중을 가하면서 하중-하중선 변위 곡선을 구한다. 하중선 변위는 하중이 가해지는 점에서의 변위를 뜻하는 것으로 클립 게이지(clip gage) 등을 이용하여 측정할 수 있다.

4) P_Q 점의 결정

하중-하중선 변위 곡선은 Fig. 3과 같은 3가지 유형이 있다. 각각의 곡선에 대하여 5% 시컨트 라인(secant line)을 그린다. 5% 시컨트 라인은 곡선의 초기 기울기보다 5% 작은 기울기를 가진 선을 의미한다. 이 직선과 하중-하중선 변위 곡선이 만나는 점을 찾는다. 이점은 그림에서 P_3 점에 해당한다. 각 유형의 곡선에 대하여 P_Q 점을 구한다. P_Q 점은 균열 성장을 시작될 때의 하중을 뜻한다. 그러나 Fig. 3의 곡선에서 유형I의 경우는 균열 성장이 시작되는 점을 찾기가 쉽지 않다. 따라서 많은 실험을 통하여 P_3 점을 P_Q 점으로 하기로 하였다. 유형 I에서 P_3 점은 엄밀히 볼 때 균열성장이 시작된 점이 아닌 균열성장이 시작되어 균열길이의 2% 정도의 균열진전이 이루어진 점에 해당된다.

5) K_Q 의 결정

P_Q 로부터 다음 식에 의하여 시험편에서의 응력강도 계수 K_Q 를 구한다.

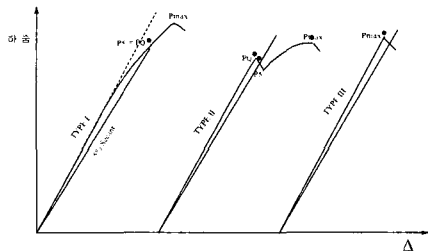


Fig. 3. Load vs. load-line-displacement curve

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

여기서 컴팩트 시험편의 경우,

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (4)$$

으로 표시되고, SENB 시험편의 경우 다음과 같이 주어진다.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2.15 - 3.93\left(\frac{a}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right] \quad (5)$$

6) K_{IC} 의 결정

K_Q 는 다음 조건을 만족하는 경우 K_{IC} 가 된다.

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (6)$$

두께에 관한 위의 조건은 평면변형 상태가 되기 위한 조건이다.

3. 파이프의 피열압력

3.1. 건전한 파이프

결합이 포함되지 않은 건전한 관에서의 파열압력 계산식을 살펴본다. 이때 파이프의 재료가 연성이 큰 재료라면 파이프의 파열은 과도한 소성변형에 의하여 발생된다.

균열이 없고 내압만이 작용될 경우 파열압력(P_h)을 구하는 식은 Svensson¹⁾에 의하여 다음과 같이 제시되었다.

$$P_h = K(n)\sigma_w \ln\left(1 + \frac{t}{R_i}\right) \quad (7)$$

$$K(n) = \left[\frac{0.25}{n + 0.227} \left[\frac{e}{n} \right]^n \right] \quad (8)$$

e 는 2.71828로 로그 지수이고, t 는 파이프의 두께 그리고 R_i 는 파이프의 중심에서 내벽까지의 거리이다.

소성변형의 불안정에 기초하여 구해진 파열압력에 대한 식들도 제시되어 있지만 제시된 식에 의하여 계산된 파열압력은 일반적으로 식 (7)에서 제시하고 있는 압력보다 커진다.

3.2. 단일 관통 균열이 존재하는 파이프

다음으로 파이프에 축방향 또는 원주방향 관통 균열이 한 개 존재하는 경우의 파이프의 파열압력에 대하여 살펴본다.

우선 축방향 단일균열이 존재하고, 내부 압력이 작용되는 경우의 파열압력을 구하는 식들을 살펴본다. 이 경우 파열압력은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$M\sigma_H = \sigma_F \quad (9)$$

여기서 M 은 벌징계수 (bulging factor)이고, σ_H 는 원주방향응력 (hoop stress)으로 $\sigma_H = rp/t$ 로 주어진다. r 은 파이프의 평균반경, p 는 작용내압, t 는 파이프 두께이다. σ_F 는 유동응력으로 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma_F = k(\sigma_{ys} + \sigma_w) \quad (10)$$

따라서 M 이 알려질 경우 파열압력은 다음과 같이 구해진다.

$$P = \frac{t\sigma_F}{rM} \quad (11)$$

벌징계수 M 에 대해서는 몇 가지 식들이 제안되어 있다. Folias²⁾는 다음과 같이 주고 있다 :

$$M = \sqrt{1 + \frac{0.40L^2}{rt}} \quad (12)$$

여기서 L 은 균열길이이다. 벨기에의 Belgatom에서 제안된 식은 다음과 같다³⁾.

$$k = 0.513, \quad M = 0.614 + 0.386 \exp\left(\frac{-1.125L}{\sqrt{rt}}\right)$$

$$+ \frac{0.433L}{\sqrt{rt}} \quad (13)$$

프랑스에서는 Folias의 별징계수를 이용하여^{4,5)},

$$k = 0.58, \\ M = \sqrt{1 + \frac{0.40L^2}{rt}} \quad (14)$$

으로 주고 있다.

EPRI는 파열압력에 대한 실험결과를 보수적으로 평가한 다음 식을 제안하였다⁴⁾.

$$P_N = 0.44628 - 0.41881 \log_{10} \lambda. \quad (15)$$

여기서

$$P_N = \frac{Pr}{(\sigma_{ys} + \sigma_w)t}, \\ \lambda = \frac{L}{\sqrt{rt}} \quad (16)$$

이다. EPRI에서 제안된 위 식이 너무나 보수적이기 때문에 1997년 EPRI는 새로운 식을 다음과 같이 제안하였다⁶⁾.

$$P_N = 0.0613 + 0.536 \exp(-0.278 \lambda) \quad (17)$$

원주방향 관통 단일균열이 존재하는 경우의 파열 압력은 다음과 같이 주어진다⁵⁾.

$$k = 0.58, \\ P = \frac{4rt\sigma_F}{\pi R_i^2} \left\{ \frac{\pi - \alpha}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{2}\right) \right\} \quad (18)$$

여기서 R_i 는 파이프의 내부 반경, 균열의 길이는 원주각으로 2α 이다.

위에 제시된 식들에 의하여 계산된 파열압력이 현재 가해지고 있는 작용압력보다 충분히 크다면 파이프의 파열 위험성은 없다고 하겠다.

소개된 식들을 이용하여 균열이 존재하는 파이프에서의 파열압력을 계산해 본 예가 Fig. 4에 도시되었다. Fig. 4는 도시가스용 KS D3631 강관에 대하여 축방향 균열길이에 따른 계산된 파열 압력 결과를 나타낸 그림이다. 이때 강관의 내경은 304.5mm, 외

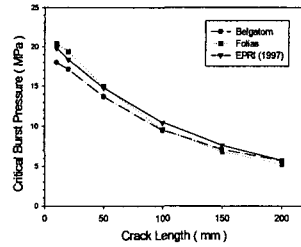


Fig. 4. Critical burst pressure from three equations

경은 318.5mm이고 두께는 7mm이다. 또한 재료의 항복강도는 362.3MPa, 극한강도는 432.5MPa이다.

그림에서 보면 Belgatom 식으로부터 계산된 파열 압력이 가장 낮게 나타났고, Folias 식에 의한 파열 압력이 가장 높게 나타났다. 도시가스 배관의 평균 내압이 1.47MPa 이므로 계산된 파열압력은 이보다 충분히 크고, 가정된 균열길이에 대해서는 강관이 충분한 강도를 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 파손평가선도의 이용

다음으로 파손평가선도(failure assessment diagram, FAD)를 이용하여 파이프의 파괴특성을 해석하는 방법을 살펴본다. 파손평가선도를 이용하여 균열이 존재하는 구조물을 해석하는 방법은 파이프만이 아닌 일반구조물에도 적용할 수 있는 방법이다.

구조물에 균열이 존재하는 경우

$$K_I = K_{Ic} \quad (19)$$

의 조건이 만족되면 그 균열은 성장이 시작된다. 여기서 K_I 은 균열에서 계산된 응력강도계수(stress intensity factor)이고, K_{Ic} 는 주어진 재료의 주어진 두께에 대한 파괴인성이다. K_{Ic} 는 재료 두께의 함수가 되는데 재료 두께가 얇아지면 그 값이 커지고 두꺼워지면 감소하여 어떤 최소 값으로 수렴하게 되는데 이 최소 값을 K_{Ic} 로 표시하고 평면변형 파괴인성(plane strain fracture toughness)이라 한다. 만약 평면 변형의 조건이 만족되는 경우는

$$K_I = K_{Ic} \quad (20)$$

의 조건에서 균열성장이 시작된다. 일반적으로 표면 균열의 경우는 판의 두께에 관계없이 평면변형의 조

건을 적용하고 있다.

연성재료의 경우 K_I 값이 K_{IC} 가 되기 전에 균열이 존재하는 부분에 전면적인 항복이 발생되어 구조물이 파괴가 될 수 있다. 따라서 구조물의 파괴안전성을 따질 때에는 K_I 에 대한 검토뿐만 아니라 전면적인 항복이 발생될 지의 여부도 살펴보아야 한다. 이와 같이 두 가지 파괴변수를 검토하여 구조물의 파괴여부를 판단할 수 있도록 그린 도표를 파손평가선도라 한다.

그 한 예로 다음과 같이 표현는 식을 이용할 수 있다.

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-1/2} \quad (21)$$

식 (21)을 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 즉 어떤 경우의 K_r 및 S_r 을 나타낸 점이 그림의 곡선의 안쪽에 놓이면 파괴가 되지 않는 안전한 상태임을 표시한다. 그러나 곡선 상이나 그 바깥쪽에 놓이면 파괴가 되는 상태가 된다. 여기서 $S_r = \sigma / \sigma_c$ 이고 $K_r = K_I / K_{IC}$ 이다. σ_c 는 구조물이 붕괴가 되는 붕괴 응력이고, σ 는 구조물에 작용되는 현재의 응력이다.

파손평가선도를 이용하여 파괴 가능성을 해석하기 위해서는 발견된 균열에 대한 응력강도계수를 구하여야 한다. 가장 많이 발견되는 균열인 Fig. 6과 같은 평판에서의 반타원형 표면 균열에 대한 응력강도계수 식은 다음과 같다.

$$K_I = \lambda_s \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} f(\phi) \quad (22)$$

여기서

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}$$

$$\lambda_s = \left[1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right) \right] [1 + 0.1(1 - \sin^2 \phi)^2]$$

$$f(\phi) = \left[\left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{1/4}$$

이다. 만약 파이프의 직경이 균열에 비하여 아주 큰 경우에는 식 (22)를 사용하여 응력강도계수를 계산할 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우는 참고문헌 7 등에서 제시된 보다 적합한 식으로부터 응력강도계수를 계산한다.

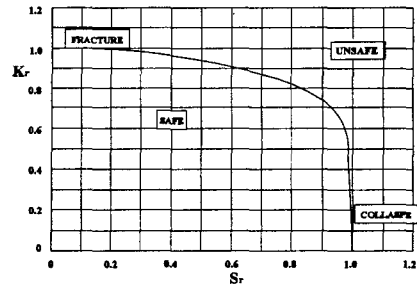


Fig. 5. Failure assessment diagram

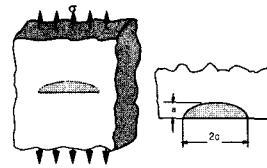


Fig. 6. A semi-elliptical surface crack

파손평가선도를 이용하여 파이프 내에 존재하는 표면균열을 해석한 예를 Fig. 7에 보였다. 파이프의 형상은 내경 20.06mm, 외경 22.60mm, 파이프 두께 1.27mm이고 $a = 0.508\text{mm}$, $c = 4.27\text{mm}$ 인 반타원형 표면균열이 파이프의 내벽에 축방향으로 존재하는 경우 내압에 대하여 각 작용압력에 대한 (K_r , S_r) 점들을 표시하면 Fig. 7과 같다. 여기서 K_r 과 S_r 은 다음과 같이 정의된다.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}}, S_r = \frac{P}{P_o} \quad (23)$$

K_I 은 표면균열에서 가장 깊은 균열선단에서의 응력강도계수, P 는 작용압력이다. 또한 K_{IC} 는 평면 변형파괴인성으로 $295\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 값이 사용되었다. P_o 는 축방향 표면균열에 대하여 과도한 소성변형에 의하여 파손이 발생하는 압력으로 다음 식으로 주어진다 :

$$P_o = \frac{\sigma_f t}{R} \left[\frac{1 - a/t}{1 - a/Mt} \right] \quad (24)$$

여기서 R 은 파이프의 반경, t 는 파이프 두께, a 는 균열깊이, M 은 관통균열에 대한 벌정계수이고 σ_f 는 유동응력으로 항복강도와 인장강도의 평균값이다.

Fig. 7에서 (K_r , S_r) 점이 실선으로 표시된 파손평

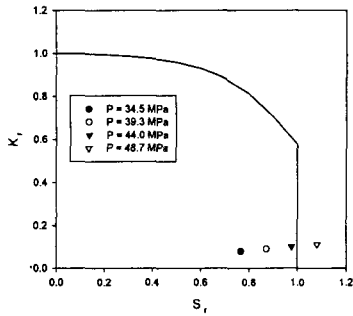


Fig. 7. Failure assessment diagram

가선도와 만나게 되면 파손이 발생되었다고 평가된다. 이때 세로축에 가까운 영역에서 만나게 되면 취성파괴에 의하여 파손이 발생된 것으로, K_I 을 파괴변수로 사용할 수 있다. 또는 가로축에 가까운 영역에서 만나면 이는 과도한 소성변형에 의하여 파손이 발생된 것을 뜻하고, 그 중간영역에서는 두 파손 모드가 모두 영향을 끼치고 있음을 뜻한다. Fig. 7에서 (K_I, S_r) 점들이 가로축에 아주 가까운 영역에서 만나고 있으므로 파열은 취성파괴에 의해서가 아닌 과도한 소성변형으로 인하여 발생함을 알 수 있다. 따라서 이 예에서는 파열압력을 구하기 위해서 균열성장조건이 아닌 소성변형 해석을 이용할 필요가 있다.

5. 마모 손상된 파이프의 파열압력

일반적으로 파이프는 유체의 흐름에 의한 마모(감육) 또는 부식이나 전기 화학적인 반응에 의한 국부적인 마모 등이 발생하여 구조적인 불안정을 야기시키며 그 현상은 환경, 작용하중, 사용년도 등 여러 가지 조건에 따라 달라진다.

일반적으로 파이프의 부식을 방지하기 위하여 파이프에 코팅처리를 하고 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 외부 또는 내부의 환경요인들에 의하여 코팅부에 손상이 생기고 손상된 코팅부에서는 부식이 발생하여 국부적으로 응력집중을 받게 되므로 파이프의 구조적 안전에 큰 문제가 되고 있다.

마멸부의 두께 감소의 영향을 고려한 파이프의 파열압력 계산을 위하여 제안된 식 중의 하나는 식 (7)에서 두께 t 대신 마멸 손상부의 남아있는 두께 e 를 대입하여 얻을 수 있다.

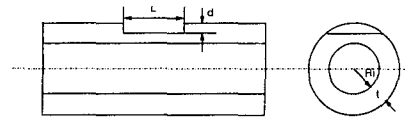


Fig. 8. Configuration of F-type wear in a pipe

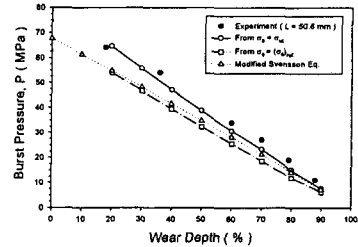


Fig. 9. Burst pressure of F-type with wear length, $L = 50.8 \text{ mm}$

$$P_r = K(n)\sigma_w \ln\left(1 + \frac{t}{R_i} \cdot \frac{e}{t}\right) \quad (25)$$

이를 수정된 Svensson 식이라 부르기로 하자.

Fig. 8에 도시된 바와 같은 F-형(flat 형)의 손상이 존재하는 파이프에 대하여 유한요소법에 의하여 얻어진 파열압력과 식 (25)에서 얻어진 파열압력 및 실험에서 구해진 파열압력을 도시한 그림이 Fig. 9이다. 이때 결함부 길이 L 은 50.8 mm 이다. 해석 결과와 식에서 얻어진 파열압력 결과가 비교적 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

해석에서 고려된 파이프의 치수는 내경= 20.06 mm , 외경= 22.60 mm , 두께= 1.27 mm , 길이= 100.0 mm 이다. 재료 특성은 식 (1)에서 $n=0.36$, $C=3190 \text{ MPa}$ 이고, $\sigma_{35}=340.5 \text{ MPa}$, $\sigma_w=735.5 \text{ MPa}$ 이다. 그리고 식 (1)에서 얻어지는 응력이 인장강도 σ_w 보다 커지는 경우는 $\sigma = \sigma_w$ 로 가정하였다.

Fig. 9의 유한요소 해석에서 사용된 파열 조건은 다음과 같다.

(1) 손상 파이프의 평균 원주응력 σ_θ 가 인장강도 (σ_w)에 도달하면 파열이 된다.

(2) 손상 파이프의 평균 원주응력 σ_θ 가 $(\sigma_\theta)_{ref}$ 에 도달하면 파열이 된다.

여기서 평균 원주응력은 마모에 의해 두께가 감소된 임의의 지점에서 두께 방향으로 구한 원주응력의 평균값이다. 이때 평균 원주응력은 감소된 두께에서 각 절점에서의 응력을 이용하여 두께를 따라

적분한 후 두께로 나눈 값으로 하였다.

두 번째 조건에서 $(\sigma_{\theta})_{ref}$ 는 다음과 같이 구해진 응력이다. 우선 식 (7)의 Svensson식으로부터 파열압력 P_{th} 를 구한다. 손상이 되지 않은 완전한 파이프에 대하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모델을 구성하고 내압으로 P_{th} 를 가한 후 탄소성 해석을 행한다. 이때 최대 하중에서의 두께 방향으로 평균 원주응력을 구하고 이를 $(\sigma_{\theta})_{ref}$ 로 취한다. 두께가 파이프의 직경에 비하여 아주 작은 경우는 다음 식으로부터 $(\sigma_{\theta})_{ref}$ 를 계산할 수 있다.

$$(\sigma_{\theta})_{ref} = \frac{P_{th}R_i}{t}$$

5. 결 언

손상된 파이프의 구조 신뢰성을 확보하기 위하여 필요한 해석 방법에 대하여 살펴보았다. 여기에는 축방향 또는 원주방향 단일 관통균열이 존재하는 경우의 파열압력식, 표면 균열이 존재하는 경우의 해석 방법 및 마모에 의한 결함부가 존재하는 경우의 해석 방법 등이 포함되어 있다.

참고문헌

- 1) EPRI NP-6865-L Vol. 1, "Steam Generator Tube Integrity Volume 1; Burst Test Results and Validation of Rupture Criteria (Framatome Data)", 1991.
- 2) E.S. Folias, "A finite line crack in a pressured cylindrical shell", Int. J. Fracture, Vol. 1, pp. 104-113, 1965.
- 3) EPRI NP-6626SD, "Belgian approach to steam generator tube plugging for primary water stress corrosion cracking", 1990.
- 4) EPRI NP-6865-L, "Steam generator tube integrity, Volume 1 : Bust test results and validation of rupture criteria", 1991.
- 5) EPRI NP-6865-L, "Steam generator tube integrity, Volume 2 : Leak-Before-Break analysis for primary water stress corrosion cracking near the tubesheet", 1991.
- 6) EPRI TR-107618 Volume 2, "Circumferential Flaws Burst Data-Evaluation of Foil Reinforcement Effect", 1997.
- 7) T.L. Anderson, Fracture Mechanics, 2nd ed., CRC, 1995.