

내압을 받는 원전 강제격납건물의 신뢰성 해석

A Study on the Reliability Analysis of Nuclear Steel Containment Structures Subject to Internal Pressure

오 병 환*
Oh, Byung Hwan

최성철**
Choi, Seong Cheol

ABSTRACT

Nuclear power plant structures may be exposed to aggressive environmental effects that may cause their strength and stiffness to decrease over their service lives. Although the physics of these damage mechanisms are reasonably well understood and quantitative evaluation of their effects on time-dependent structural behavior is possible in some instances, such evaluations are generally very difficult and remain novel. The assessment of existing steel containment in nuclear power plants for continued service must provide quantitative evidence that they are able to withstand future extreme loads during a service period with an acceptable level of reliability. Rational methodologies to perform the reliability assessment can be developed from mechanistic models of structural deterioration, using time-dependent structural reliability analysis to take loading and strength uncertainties into account.

The final goal of this study is to develop the analysis method for the reliability of containment structures. The cause and mechanism of corrosion is first clarified and the reliability assessment method has been established. By introducing the equivalent normal distribution, the procedure of reliability analysis which can determine the failure probabilities has been established.

1. 서론

원자력발전소는 고도의 신뢰성을 요하는 구조물로서 구조물의 수명동안 겪게되는 하중과 저항력은 불확정적인 개념을 포함하고 있는 확률론적 변수로 보는 것이 타당하다. 따라서 원자력 발전소의 안전성에 관련된 해석 및 설계 시 확률론적 개념에 기초한 해석이 필요하게 된다. 원자력 발전소는 끊임없이 성능저하(deterioration)과정을 겪게 되며 이로 인하여 구조물 자체의 저항력이 감소되어 시간의 경과에 따라 낮은 신뢰성을 갖게 된다.

원자력 발전소 내 강제격납건물은 다양한 열화기구에 노출되어 있으며 이 중 부식이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 부식은 부재의 유효두께를 감소시키며 나아가 구조물의 안전도를 떨어

*정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

**정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원

어뜨리게 된다. 따라서 본 연구에서는 부식두께를 나타낼 수 있는 모델을 결정하고 LOCA(Loss Of Coolant Accident)시에 발생하는 내압을 받는 강재격납건물의 신뢰성 해석을 통해 구조물의 신뢰성 지수와 파괴확률을 예측하고자 하였다.

2. 강재격납건물의 열화손상기구

부식은 강재격납건물과 라이너에 손상을 주는 메카니즘 중 가장 주요한 메카니즘으로 볼 수 있다. 균일한 부식은 부재의 단면감소를 초래하며 구조물의 전체적인 비탄성 변형 혹은 강재 셸의 불안정성을 초래하며 부분적인 부식은 누출과 압력경계의 손실을 초래할 수 있다. 균일한 부식 혹은 부분적인 부식으로 인한 침투깊이는 아래와 같이 모델링 할 수 있다.¹⁾

$$Z(t) = C(t - T_I)^M \quad : \quad t > T_I \quad (1)$$

여기서 C는 부식환경에 관련된 비율변수로서 추계학적 절차를 걸쳐 결정되어야 할 변수이다. M은 시간에 관련된 변수로 탄소강재의 경우에 2/3의 값을 갖으며 T_I 는 부식을 초기화시키는데 필요한 임의의 시간이다.

3. 강재격납건물의 구조적 특성 및 설계규정

강재격납건물은 반지름 r과 두께 h_0 를 갖는 원통형 셸로 이상화할 수 있다. 이러한 셸은 위쪽에 반구를 갖고 있으며 일반적으로 간격 s_1 으로 원주에 설치된 단면적 A_1 의 ring stiffener와 간격 s_2 로 수직으로 설치된 단면적 A_2 의 stringer를 갖고 있다. 부식환경에 노출된 셸은 위치에 따라 다른 침투깊이를 갖으며 정확한 셸의 해석을 위해서는 stiffener와 불연속(discontinuity)를 고려한 상세한 유한요소 해석이 필요하다. 그러나, 셸의 극한 해석은 일반적으로 셸의 거동을 합리적이며 보수적으로 평가한다고 한다.²⁾

ring stiffened 원통형 셸의 설계식은

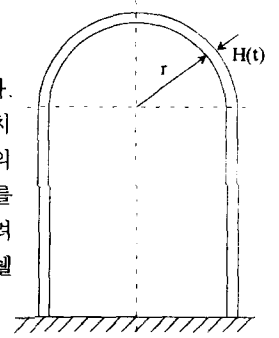


그림 1 이상화된 셸의 형상

$$\frac{F_{yn}}{S_F} \geq D_n + L_n + P_n \quad (2)$$

여기서 F_{yn} 은 항복용력이며 $S_F(=1.97)$ 는 안전계수, D_n 은 사하중, L_n 은 활하중, P_n 은 LOCA시의 압력이다.

탄성해석에서 셸막(shell membrane)에서 내압에 의한 셸 내부의 circumferential stress는

$$P_n = P_{des} \frac{r}{H(t)} \quad (3)$$

여기서 P_{des} 는 설계에서 사용된 최대압의 공칭값이며 r과 $H(t)$ 는 셸의 반지름과 두께이다. 셸이 내압을 받을 경우 사하중과 활하중은 내압에 비해 무시할 수 있다는 가정하에 셸의 설계두께는

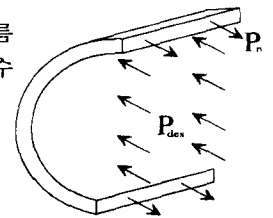


그림 2 셸막에서의 응력

$$h_0 = S_F \frac{P_{des}}{F_{yn}} r = \frac{P_{des}}{S_{mc}} r \quad (4)$$

4. 강제격납건물의 한계상태 방정식

내압의 발생하면 셸은 변형하게 되며 전체적인 셸의 파괴 이전에 강제격납건물의 부가물이 파괴된다. 유한요소 모델링 및 해석²⁾에 따르면 셸의 지배적인 한계상태는 과도한 비탄성변형의 한계상태라고 볼 수 있다. 임계 변형의 발생에 대응하는 압력을 한계압력 p_0 라 하며 축대칭의 ring-stiffened 셸에서는

$$p_0 = F_y \frac{H(t)}{\gamma} \chi(t) \quad (5)$$

여기서 F_y 는 임의의 항복응력이며 시간 t 에서의 셸의 임의 두께 $H(t)=h_0-Z(t)$ 이다. γ 는 파괴시 셸의 소성변형을 고려하는 항으로 stiffener의 효과를 고려하면

$$\chi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{A_1}{s_1 H(t)} \quad (6)$$

한계상태는 한계압력 p_0 와 임의의 LOCA시에 발생하는 최대압력 P_a 와 같다는 상태에서 정의되며 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$F_y \frac{H(t)}{\gamma} \chi(t) - P_a = 0 \quad (8)$$

5. 신뢰성해석

5.1 신뢰성 해석변수³⁾

표 1 신뢰성 해석변수

변 수	Nominal(design) value	Statistical Properties
반 지름, r	16.8 m	deterministic
초기 두께, h_0	34.9 mm	deterministic
Stringer area, A_1	155 cm ²	deterministic
Stringer spacing, s_1	3.0 m	deterministic
Peak accidental pressure, P_a	0.28 MPa	Type I max (0.8 P_{des} , 20%)
Yield strength, F_y	262 MPa	Lognormal (1.10 F_{yn} , 7%)

5.2 부식변수⁴⁾

$C = 600 \mu\text{m}/\text{year}^M$ for severe corrosion

$C = 300 \mu\text{m}/\text{year}^M$ for moderate corrosion

$T_I = 10 \text{ year}$

$M = 0.7$

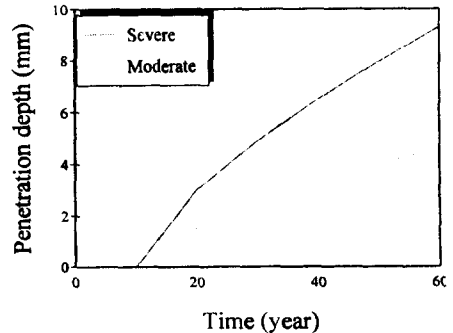


그림 3 시간에 따른 부식두께의 변화

5.3 시간에 따른 신뢰성 지수 및 파괴확률의 변화

표 2 시간에 따른 신뢰성지수 변화

시간 (year)	Reliability Index	
	Severe	Moderate
10	5.116	5.116
20	4.810	4.952
30	4.611	4.864
40	4.432	4.787
50	4.266	4.717
60	4.104	4.639

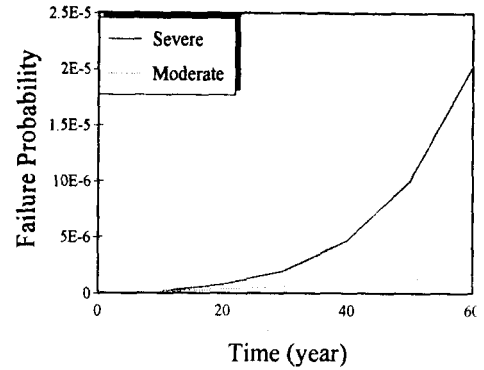


그림 4 시간에 따른 파괴확률의 변화

6. 결론

신뢰성해석 결과를 살펴보면 시간이 지남에 따라 부식이 진전되어 부재의 두께가 감소하게 되며 따라서 구조물에 존재하는 하중은 증가하고 저항은 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 구조물의 신뢰성은 시간의 경과에 따라 감소하게 되며 파괴확률은 증가하게 된다. 파괴확률의 크기를 살펴보면 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 의 단위를 갖으며 부식에 노출된 환경이 심한 경우와 보통인 경우를 비교하여보면 부식이 심한 경우에서 파괴확률이 더욱 크게 나타나고 있고 시간이 지남에 따라 파괴확률 크기의 차이가 더욱더 심해지는 경향을 보이고 있다.

참고문헌

1. Ellingwood, B.R. and Bhattacharya, B., "Reliability-based Condition Assessment and Service Life Prediction of Steel Containment and Liners", SMIRT 14, 1997, pp.39-46
2. Greimann, L.G. et al., "Reliability Analysis of Steel Containment Strength", Report NUREG/CR-2442, June 1982
3. Hwang, L.G., et al., "Probability Based Design Criteria for Nuclear Plant Structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, 113(5), pp. 925-942
4. Bhattacharya, B., "A Damage Mechanics Based Approach to Structural Deterioration and Reliability", PhD thesis, Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA