

# 지진하중을 받는 RC 격납건물의 열화에 따른 신뢰성 해석

## Time Dependent Reliability Analysis of the Degrading RC Containment Structures Subjected to Earthquake Load

오 병 환<sup>\*</sup>      최 성 철<sup>\*\*</sup>      현 창 현<sup>\*\*\*</sup>  
Oh, Byung Hwan    Choi, Seong Cheol    Hyun, Chang Hun

### 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 final goal of this study is to develop the reliability analysis of RC containment structures. The cause of the degrading is first clarified and the reliability assessment has been conducted. By introducing stochastic analysis based on random vibration theory, the reliability analysis which can determine the failure probabilities has been established.

### 1 서 론

원자력발전소는 구조물의 수명동안 끊임없이 외부로부터의 열화기구에 노출되어 있으며 시간이 경과함에 따라 구조물 자체의 저항력은 이러한 열화기구에 의해 감소하게 된다. 저항력의 감소로 인하여 원자력 발전소는 외·내부로부터의 하중에 대하여 점차 낮은 신뢰성을 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 RC 격납건물과 관련된 여러 열화기구를 규명하였고 지진하중 작용 시 열화도에 따른 구조물의 파괴확률을 구하였다. 이를 위하여 스펙트럼 밀도함수(Power Spectral Density)로써 지반운동을 묘사하였고 주파수영역에서의 스펙트럼 해석을 통해 구조물의 추계학적 응답을 구함으로써 RC 격납건물의 파괴확률을 추정하였다.

### 2. RC 격납건물의 모델링

- \* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수
- \*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 대학원
- \*\*\* 한국원자력안전기술원 연구원

본 연구에서는 그림 1에서와 같이 원자력발전소 RC격납건물을 7개의 집중질량을 갖는 집중질량체 요소로 모델링하였고 고정지반 경계조건을 사용하여 각 집중질량에서의 지진하중에 대한 동력학적 해석과 이로부터의 신뢰성 해석을 수행하였다.

RC격납건물은 원형실린더형 벽체와 반구형 돔으로 구성되어 있으며 해석과 관련된 구조물의 재료 특성으로 콘크리트는 재령28일 설계압축강도 250 kg/cm<sup>2</sup>, 단위중량은 2,400 kg/m<sup>3</sup>을 사용하였으며 철근의 경우 항복강도 4,200 kg/cm<sup>2</sup>, 단위중량 7,850 kg/m<sup>3</sup>을 사용하였으며 철근배근 특성은 아래 표 1과 같다.

표 1 RC 격납건물의 배근상세

위 치(m)	Hoop		Meridional	
	내 측	외 측	내 측	외 측
0 ~4.57	D20@30.5	D20@30.5	D20@22.9	D25@22.9
4.57~15.24	D20@30.5	D20@30.5	D20@22.9	D20@22.9
15.24~38.10	D20@30.5	D20@30.5	D16@22.9	D16@22.9
38.10~45.72	D20@22.9	D25@22.9	D16@22.9	D16@22.9
45.72~54.86	D20@22.9	D25@22.9	D20@22.9	D20@22.9

※ D20@30.5 : 철근 직경 20mm, 배근간격 30.5cm

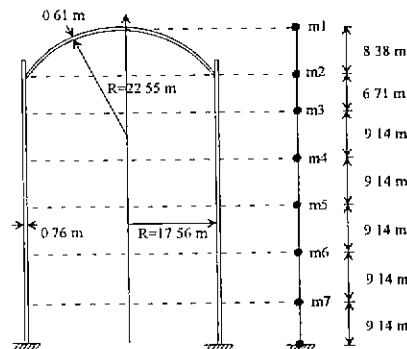


그림 1. 격납건물 단면도

### 3. 입력지반운동 모델링

지진하중과 응답에 대한 확률적 특성은 구하기 위해 아래와 같은 두가지 가정을 사용하였다. 첫째로, 각각의 입력지반운동은 정상성(Stationary)과 평균이 '0'인 정규(Gaussian)분포를 따르는 Random Process로 가정하였고 스펙트럼 밀도함수로 식(1)의 Kanai-Tajimi 스펙트럼(K.Kanai, 1957)을 사용하였다. 따라서, 입력지반운동에 대한 응답도 선형탄성해석의 범위에서는 평균이 '0'인 정규분포이며 임의진동(Random Vibration)이론으로부터 확률적 특성을 도출할 수 있다

$$S_{gk}(\omega) = S_0 \frac{1 + 4 \zeta_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4 \zeta_g^2 (\omega/\omega_g)^2} \quad (1)$$

여기서  $S_0$ 는 지진의 강도를 나타내는 계수이며  $\omega_g$ 와  $\zeta_g$ 는 지배적인 지반진동수와 임계감쇠값으로 각각  $9\pi$  rad/sec와 0.6의 값을 사용하였다.

둘째로, 각각의 지진강도에 대한 통계적 변화를 모사하기 위해 식 (2)와 같은 Type II의 극치분포를 사용하였으며 지진발생빈도는 포아송(Poisson)분포를 가정하였다. 또한 지진재해도곡선(Seismic Hazard Curve)을 통해 우리나라 지진발생빈도와 특성을 반영하였다.

$$f_Z(z) = \alpha (\alpha_g/a_0) (\alpha_g z/a_0)^{-(\alpha+1)} \quad (2)$$

여기서  $Z$ 는  $S_0^{1/2}$ 에 해당한다.

### 4. 동력학적 해석

#### 4.1 모우드(Mode) 해석

n개의 자유도를 갖는 시스템에 지진하중이 작용할 때 운동방정식은 선형탄성의 범위 내에서 식(3)과 같이 표현할 수 있으며 회전관성을 무시하고 수평방향의 자유도만으로 표현되는 응축(Condensation)된 방정식이다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M][\hat{I}]\{\ddot{u}_g\} \quad (3)$$

일반적인 모우드가 존재한다고 가정하고 절점변위벡터  $\{u\}$ 를 모우드 좌표로 전개하면

$$\{u\} = [\Phi]\{q\} \quad (4)$$

여기서  $\{q\}$ 는 일반적인 모우드 좌표(모우드 진폭)이며  $[\Phi]$ 는 모우드 행렬이다.

식 (4)를 식 (3)에 대입하고 모우드 직교성을 이용하여 모우드 방정식으로 정리하면 아래와 같다.

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\frac{\phi_n^T [M] \{\hat{I}\}}{\phi_n^T [M] \phi_n} \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

식 (5)의 각각의 모우드에 대한 전달함수를 구해보면

$$H_{q_n}(\omega) = \frac{1}{K_n + i\omega C_n - \omega^2 M_n} \quad (6)$$

여기서  $M_n, K_n, C_n$ 은 각각 n차 모우드에 대한 일반화된 질량, 강성, 감쇠값이다.

#### 4.2 임의진동(Random Vibration)해석

정상적이라는 가정하에  $\{q\}$ 의 Cross-Correlation 행렬  $[R_{qq}(t_0)]$ 는 아래와 같다.

$$[R_{qq}(t_0)] = E[\{q(t)\}\{q(t+t_0)\}^T] \quad (7)$$

위에서 전개한 식들은 Wiener-Khintchine(W-K)변환을 이용하여 시간영역에서 주파수영역으로 변환할 수 있으며 W-K변환을 Cross-Correlation 행렬에 적용하면 아래와 같은 Cross-Spectral 밀도함수를 얻을 수 있다.

$$[S_{qq}(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [R_{qq}(t_0)] e^{-i\omega t_0} dt_0 \quad (8a)$$

$$[R_{qq}(t_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} [S_{qq}(\omega)] e^{i\omega t_0} d\omega \quad (8b)$$

식(8)을 이용하고 추계학적(Stochastic) 이론(Lin 1967)으로부터  $\{q\}$ 와  $\{\dot{q}\}$ 의 공분산(Covariance)행렬  $[V_{qq}]$ 과  $[V_{q\dot{q}}]$ 은 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$[V_{qq}] = [R_{qq}(0)] = \int_{-\infty}^{\infty} [S_{qq}(\omega)] d\omega \quad (9a)$$

$$[V_{q\dot{q}}] = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 [S_{qq}(\omega)] d\omega \quad (9b)$$

여기서  $\dot{q}(t) = dq(t)/dt$ 이다.

#### 5. RC 격납건물의 시간에 따른 신뢰성 해석

### 5.1 구조물의 열화

원자력발전소가 주변 환경에 의해 시간이 지남에 따라 열화가 진행된다면 구조물의 열화도는 아래와 같은 식 (10)에 의해 나타낼 수 있다. (Ellingwood, 1993)

$$r(t) = r_0 g(t) \quad (10)$$

여기서,  $r_0$ 는 구조물 혹은 구성요소의 초기강도,  $g(t)$ 는 열화함수,  $r(t)$ 는 시간 T에서의 강도를 나타낸다. 구조물의 열화가 진행될수록 구조물의 저항력은 감소할 것이며 따라서 파괴확률은 증가할 것이다.

표 2 열화모델과 해당 메카니즘

Shape of degradation function	Degrading rate g(30)	Corresponding degradation mechanism
Linear : $g(t) = 1 - at$	0.7, 0.8, 0.9	Corrosion
Parabolic : $g(t) = 1 - at^2$	0.7, 0.8, 0.9	Sulfate attack
Square root : $g(t) = 1 - at^{1/2}$	0.7, 0.8, 0.9	Diffusion-controlled degradation

### 5.2 한계상태의 설정

RC 격납건물의 파괴와 안전의 경계상태인 한계상태는 강도한계상태에 대하여 설정하였다. 수평지반 운동으로 인한 격납건물의 파손은 전단력으로 인한 파손과 휨모멘트로 인한 파손으로 나눌 수 있으며 원형실린더형 형상을 갖는 RC단면의 휨강도와 전단강도를 구하기 위해서 단면을 n개의 층으로 나누어 각 층에 대하여 철근과 콘크리트의 응력-변형도 관계 및 평형방정식을 고려하여 휨강도를 구하였다. (Park 1993)

전단강도에 대해서도 각 층의 콘크리트의 단면적과 철근량을 고려하여 콘크리트가 갖는 전단강도 성분  $V_c$ 와 보강철근이 갖는 전단강도 성분  $V_s$ , 그리고 수직상재하중의 전단강도 성분  $V_p$ 로 나누어 계산하였다. 휨강도와 전단강도를 구함에 있어 구조물의 자중을 고려하여 계산한 경우와 무시하고 계산한 경우로 나누어 한계상태를 각각에 대하여 설정하였다. (Pricstley 1996)

RC 격납건물의 전단파괴를 일으키는 수평력이 작용할 때 발생하는 모멘트는 구조물의 휨모멘트강도보다 훨씬 큰 값을 가지므로 따라서, 동일한 크기의 수평력이 작용할 때 휨파괴가 먼저 일어나게 되므로 파괴의 한계상태를 휨모멘트에 대하여서만 아래와 같이 식 (11)로 설정하였다.

$$M_b \geq M_n \quad (11)$$

여기서  $M_b$ 는 지진하중이 작용할 때 해석을 통해 구한 모멘트이며  $M_n$ 은 단면에서의 계산을 통해 구한 휨모멘트강도이다.

### 5.3 파괴확률

관심있는 응답의 스펙트럼 밀도함수는 지반의 스펙트럼 밀도함수와 응답의 전달함수를 통해 구할 수 있으므로, 밑바닥면에서의 모멘트의 스펙트럼 밀도함수는

$$S_{M_s} = H_{M_s}(\omega) S_{gg}(\omega) H_{M_s}(\omega)^T \quad (12)$$

응답이 미리 정해진 한계상태를 단위시간동안 넘어서는 빈도수(Barnes Upcrossing Rate)  $\nu_M$ 는 다음과 같이 구할 수 있다. (Newland 1993)

$$\nu_{M_b} = \int_0^{\infty} p(M_b, \dot{M}_b) \dot{M}_b d\dot{M}_b \quad (13)$$

여기서  $p(x, \dot{x})$ 는 응답과 응답의 시간변화율의 결합확률밀도함수이다.

식 (2)에서 정의된 바와 같이 각각의 지진강도  $Z$ 의 확률적 특성을 고려하게 되면 아래와 같다.

$$\nu(t) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \nu_{M_b}(t) f_Z(z) dz \quad (14)$$

응답이 지진지속시간동안 그 한계상태를 넘어서는 사건의 회수가 포아송분포를 따른다고 가정하면, 지진지속시간동안  $x$ 회의 파괴확률이 일어날 확률은 아래와 같다

$$P(X_{\mu_{dE}} = x) = \frac{(\nu(t) \mu_{dE})^x}{x!} \exp(-\nu(t) \mu_{dE}) \quad (15)$$

따라서 지진지속시간동안 파괴가 일어날 확률은 한번도 일어나지 않을 확률의 여확률이므로 위의 식 (15)에 '0'을 대입하여, 지진이 일어났을 때 파괴가 일어날 조건부확률을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_{f_{s|eq}}(t) = 1 - \exp(-\nu(t) \mu_{dE}) \quad (16)$$

지진하중을 받는 RC 적남건물은 5.1절에서와 같이 여러가지 열화기구에 노출되어 있으므로 구조물의 응답과 저항도 시간에 따라 변화할 것이다. 따라서 지진발생빈도가 포아송분포를 따른다면 이와 관련된 파괴사건도 시간이 지남에 따라 변화하는 Non-Homogeneous 포하송분포를 따르게 된다. 그러므로 지진이 발생했을 때 파괴사건강도(Failure Event Intensity)  $m(t)$ 는

$$m(t) = \int_0^t \lambda P_{f_{s|eq}}(t) dt \quad (17)$$

여기서  $\lambda$ 는 평균발생빈도수이다.

포하송분포에서  $n$ 번째 발생까지 대기시간  $W_n$ 의 분포는 아래와 같다.

$$f_{W_n}(t) = \frac{\lambda P_{f_{s|eq}}(t) [m(t)]^{n-1} \exp[-m(t)]}{(n-1)!} \quad (18)$$

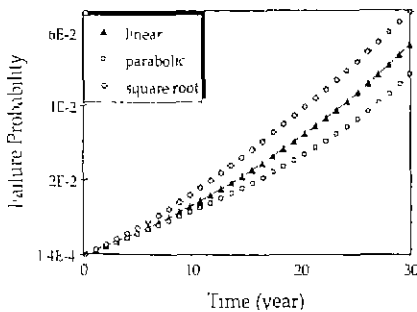
관심있는 시간  $t = t^*$ 에서의 파괴확률은

$$P(W_1 < t^*) = F_{W_1}(t^*) = \int_0^{t^*} f_{W_1}(t) dt \quad (19)$$

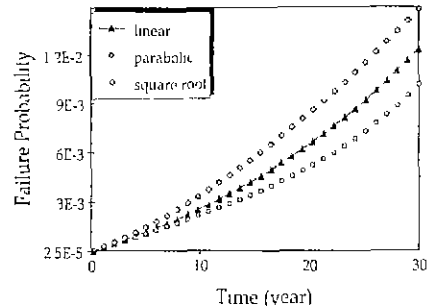
#### 5.4 시간에 따른 파괴확률의 변화

##### 5.4.1 모델에 따른 파괴확률의 변화

· 열화도  $g(30)=0.7$ , 자중 무시

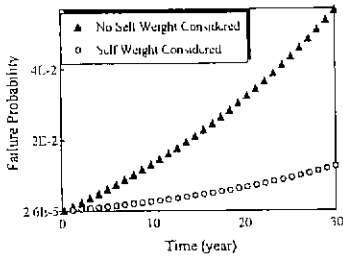


· 열화도  $g(30)=0.7$ , 자중 고려

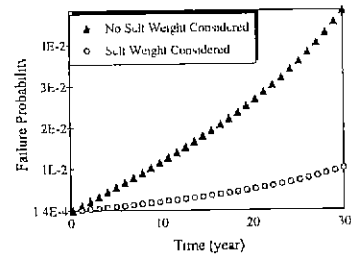


#### 5.4.2 저항력의 자중고려 유·무에 따른 파괴확률의 변화

· 열화도  $g(30)=0.7$ , Linear Model

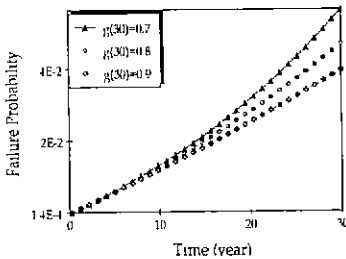


· 열화도  $g(30)=0.7$ , Parabolic Model

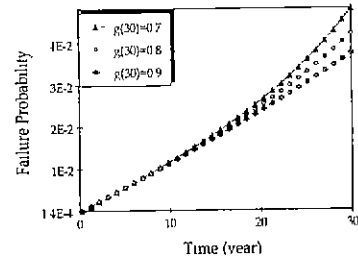


#### 5.4.3 열화도에 따른 파괴확률의 변화

· Linear Model, 자중 무시



· Parabolic Model, 자중 무시



## 6. 결 론

본 연구에서는 지진하중이 작용할 때 열화기구에 노출되어 있는 RC 격납건물의 시간에 따른 파괴확률을 추정하였다. 이를 위해 입력지반운동, 열화기구, 구조물의 저항력을 모델링하였고, 이를 근거로 하여 파괴확률을 산출하는 방법을 제시하였으며 해석예제를 적용하여 파괴확률을 추정하였다. 파괴확률의 추정 시 열화모델 및 열화도 그리고 자중고려 유·무에 따라 민감도를 분석하였다.

민감도 분석 결과, 파괴확률에 가장 큰 영향을 미치는 변수(parameter)로는 구조물의 저항력이라 볼 수 있으며 동일한 열화도에서 Square-root이 가장 큰 파괴확률을 보이고 있다. 열화도에 따른 파괴확률은 다른 변수에 비하여 그 영향이 다소 적으며 파괴확률은 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며 그 크기는  $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 의 범위에서 나타나고 있다.

## 참 고 문 헌

- 1 K. Kanai(June 1957), "Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground", bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 35, pp.309-325
- 2 Lin, Y. K (1967), "Probabilistic theory of structural dynamics", Robert E. Krieger Publishing Co., New York
- 3 Ellingwood, B. R and Yasuhiro Mori (1993), "Reliability-Based Service Life Assessment of Aging Concrete Structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No.5, pp.1600-1621
- 4 Park, R. and Paulay, T.(1993), "Reinforced Concrete Structures", Johns Wiley and Sons
- 5 Priestley, M J.N, Seible, F, and Calvi, G. M (1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges", Johns Wiley and Sons, Inc, N.Y.