

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* 최 성 철** 현 창 현*** 최 강 룡***
Oh, Byung Hwan Choi, Seong Cheol Hyun, Chang Hun Choi, Kang Ryong

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 RC 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 earthquake loading uncertainties into account.

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

고도의 신뢰성을 요하는 원자력발전소가 그 수명동안 겪게되는 지진하중은 불확정적인 개념을 포함하고 있는 확률론적 변수이다. 이러한 변수의 특성으로 인하여 원자력 발전소의 안전성에 관련되는 여러 해석과 설계 시 확률론적 개념에 기초한 해석의 필요성을 느끼게 된다.

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 원자력발전소가 시간의 경과에 따라 적절한 신뢰성을 유지하기 위해서는 시간에 따른 신뢰성해석을 통해 미래상태의 구조물의 신뢰성을 예측하여 목표하고자 하는 신뢰성을 유지하기 위한 적절한 대책이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 RC격납건물과 관련된 여러 열화기구를 규명하였고 지진하중 작용 시

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

열화도에 따른 구조물의 파괴확률을 구하였다. 이를 위하여 스펙트럼 밀도함수(Power Spectral Density)로써 지반운동을 모사하였고 주파수영역에서의 스펙트럼 해석을 통해 구조물의 추계학적 응답을 구함으로써 RC 격납건물의 파괴확률을 추정하였다.

2. RC 격납건물의 모델링

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 재료특성으로 콘크리트는 재령28일 설계압축강도 3,500 psi, 단위중량은 150 lb/ft³을 사용하였으며 철근의 경우 항복강도 60 ksi, 단위중량 490 lb/ft³를 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@12	D20@12	D20@9	D25@9
4.57 ~ 15.24	D20@12	D20@12	D20@9	D20@9
15.24 ~ 38.10	D20@12	D20@12	D16@9	D16@9
38.10 ~ 45.72	D20@9	D25@9	D16@9	D16@9
45.72 ~ 54.86	D20@9	D25@9	D20@9	D20@9

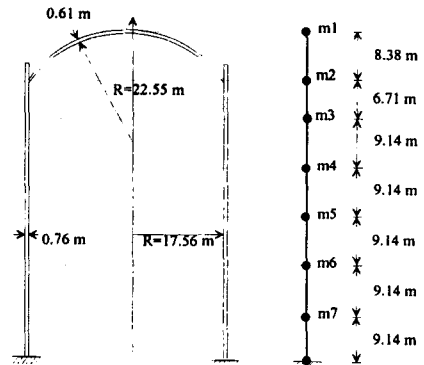


그림 1. 격납건물 단면도

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.

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

여기서 S_0 는 지진의 강도를 나타내는 계수이며 ω_g 와 ζ_g 는 지배적인 지반진동수와 임계감쇠값으로 각각 9π rad/sec와 0.6의 값을 사용하였다.

둘째로, 각각의 지진강도에 대한 통계적 변화를 모사하기 위해 식 (2)와 같은 TypeII의 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

n 개의 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.

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

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬이며 $\{u\}$ 는 지반에 대한 구조물의 상대변위, $\{\ddot{u}_g\}$ 는 지반가속도를 나타낸다.

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.

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

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 n 차 모우드에 대한 일반화된 질량, 강성, 감쇠값이다.

4.2 임의진동(Random Vibration)해석

임의진동(Random Vibration)해석은 지반가속도 \ddot{u}_g 가 정상성(Stationariness)과 평균이 '0'인 정규분포를 따른다는 가정하에 수행되었다. 이러한 가정으로부터 일반화된 모우드 좌표 $\{q\}$ 가 정상적이며 평균이 '0'인 정규분포라는 사실 또한 알 수 있다. 지반가속도가 평균이 '0'인 정규분포라는 사실은 실험적으로 관측되었으며 일반적으로 받아들이려지고 있다. 실제 지반가속도는 비정상적(Nonstationary)이나 일반적으로 10~30 sec 정도의 지속시간을 가지므로 지진지속시간을 곱하여 파괴확률을 추정하는 경우에는 정상적이라고 볼 수 있다.(Shinozuka 1972)

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.

원자력발전소 RC 격납건물과 관련된 열화모델은 아래 표 2에 나타나 있으며 이러한 열화모델을 이용하여 시간에 따라 변하는 신뢰도의 모델에 따른 민감도를 조사할 수 있다. 선형모델과 포물선형모델은 각각 철근의 부식과 황산염해로 인한 구조물의 강도감소를 나타낸다. 제곱근형모델은 시간에 따라 감소하는 확산이 지배적인 열화과정을 나타낸다. 이러한 열화모델도 열화도는 변동성을 포함하는 확률적 변수이나 실제로 실험자료의 부족으로 결정론적 변수로 취급하였으며 이에 대하여는 추후 연구가 필요한 실정이다.

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 : $g(t) = 1 - a\sqrt{t}$	0.7, 0.8, 0.9	Diffusion-controlled degradation

5.2 한계상태의 설정

RC 격납건물의 파괴와 안전의 경계상태인 한계상태는 강도한계상태에 대하여 설정하였다. 수평 지반운동으로 인한 격납건물의 파손은 전단력으로 인한 파손과 휨모멘트로 인한 파손으로 나눌 수 있으며 원형실린더형 형상을 갖는 RC단면의 휨강도와 전단강도를 구하기 위해서 아래의 그림 2와 같이 단면을 n개의 층으로 나누어 각 층에 대하여 철근과 콘크리트의 응력-변형도 관계 및 평형방정식을 고려하여 휨강도를 구하였다.(Park 1993)

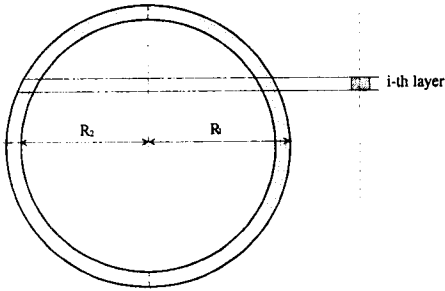


그림 2. 원형 단면도

$$P_{int} = \sum_{i=1}^n f_{ci} A_{ci} + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si} \quad (11)$$

$$M_n = \sum_{i=1}^n f_{ci} A_{ci} d_i + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si} d_i - P \frac{h}{2} \quad (12)$$

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 전단강

도를 구함에 있어 구조물의 자중을 고려하여 계산한 경우와 무시하고 계산한 경우로 나누어 한계상태를 각각에 대하여 설정하였다.(Priestley 1996)

$$V_c = 0.166\sqrt{f'_c} A_c \quad (13a)$$

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sh} f_{yh} D'}{s} \cot 30^\circ \quad (13b)$$

$$V_p = \frac{D-c}{h} P \quad (13c)$$

여기서 f'_c 는 콘크리트의 압축강도, A_c 는 콘크리트 총단면적의 0.8배, A_{sh} 는 띠철근의 단면적, f_{yh} 는 띠철근의 항복강도, s 는 띠철근의 간격, D' 은 띠철근의 중심간의 간격, P 는 상재수직하중, D 는 단면의 직경, h 는 건물의 높이를 나타낸다.

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 (14)로 설정하였다.

$$M_b \geq M_n \quad (14)$$

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

5.3 파괴확률

위의 식 (14)와 같이 설정된 한계상태에 대하여 파괴확률을 판단하기 위해서는 응답에 관한 추계학적 추정이 필요하다. 본 연구에서는 스펙트럼 해석을 통해 RC 격납건물 벽체의 모멘트의 표준편차를 추정하고 이 값에 근거하여 이미 설정된 한계상태를 넘어가는 확률을 추정하였다.

밀바닥면에서의 모멘트는 각 절점의 수평탄성력에 각 절점의 높이를 곱합 값의 합이므로 이에

대한 전달함수는 아래와 같다.

$$H_{M_b}(\omega) = \{h\}^T [K] \{H_u(\omega)\} \quad (15)$$

여기서 $\{h\}$ 는 각 절점의 높이를 나타내는 벡터이다.

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

$$S_{M_b} = H_{M_b}(\omega) S_{gg}(\omega) H_{M_b}(\omega)^T \quad (16)$$

응답이 미리 정해진 한계상태를 단위시간동안 넘어서는 빈도수(Barrier Upcrossing Rate) ν_{M_b} 는 다음과 같이 구할 수 있다.(Newland 1993)

$$\nu_{M_b} = \int_0^\infty p(M_b, \dot{M}_b) \dot{M}_b d\dot{M}_b \quad (17)$$

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

4.2절에서의 가정과 같이 입력지반운동이 정규분포를 따른다면 응답 또한 정규분포를 따르게 되며 따라서 정규분포의 확률 밀도함수를 이용하게 되면 위의 식 (17)은 아래와 같이 된다.

$$\nu_{M_b} = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{\text{Var}[\dot{M}_b]}}{\sqrt{\text{Var}[M_b]}} \exp\left(-\frac{M_b^2}{2\text{Var}[M_b]}\right) \quad (18)$$

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

$$\nu(t) = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \nu_{M_b}(t) f_Z(z) dz \quad (19)$$

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

$$P(X_{\mu_{DE}} = x) = \frac{(\nu(t) \mu_{DE})^x}{x!} \exp(-\nu(t) \mu_{DE}) \quad (20)$$

따라서 지진지속시간동안 파괴가 일어날 확률은 한번도 일어나지 않을 확률의 역확률이므로 위의 식 (20)에 '0'을 대입하여, 지진이 일어났을 때 파괴가 일어날 조건부확률을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_{f_s|eq}(t) = 1 - \exp(-\nu(t) \mu_{DE}) \quad (21)$$

지진하중을 받는 RC 격납건물은 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 포아송분포를 따르게 된다. 그러므로 지진이 발생했을 때 파괴사건강도(Failure Event Intensity) $m(t)$ 는

$$m(t) = \int_0^t \lambda P_{f_s|eq}(t) dt \quad (22)$$

여기서 λ 는 평균발생빈도수이다.

포하승분포에서 n번째 발생까지 대기시간 W_n 의 분포는 아래와 같다.

$$f_{W_n}(t) = \frac{\lambda P_{f_s|eq}(t) [m(t)]^{n-1} \exp[-m(t)]}{(n-1)!} \quad (23)$$

관심있는 시간 $t=t^*$ 에서의 파괴확률은

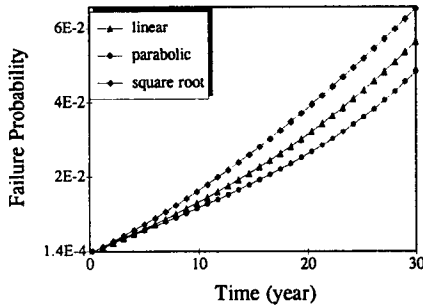
$$P(W_1 < t^*) = F_{W_1}(t^*) = \int_0^{t^*} f_{W_1}(t) dt \quad (24)$$

5.4 시간에 따른 파괴확률의 변화

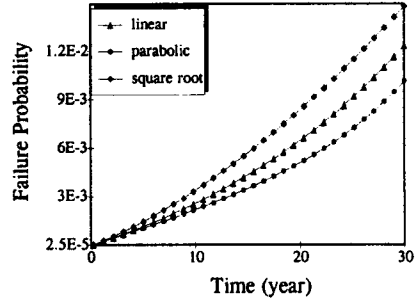
지진하중이 작용할 경우 RC 격납건물의 시간에 따른 파괴확률의 변화를 식 (24)를 이용하여 추정하였다. 열화모델과 열화도 및 건물의 저항력을 자중고려 유·무에 따라 파괴확률의 민감도를 분석하였다.

5.4.1 모델에 따른 파괴확률의 변화

· 열화도 $g(30)=0.7$, 자중 무시

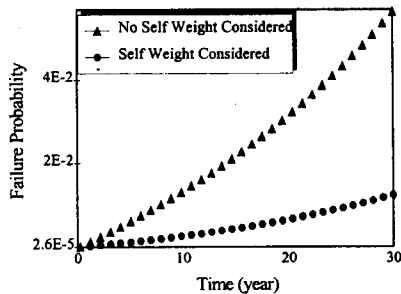


· 열화도 $g(30)=0.7$, 자중 고려

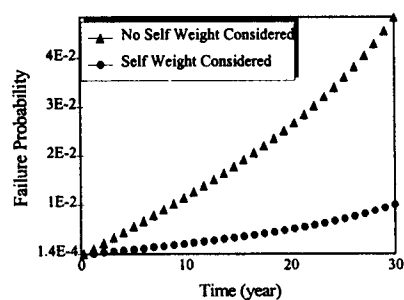


5.4.2 저항력의 자중고려 유·무에 따른 파괴확률의 변화

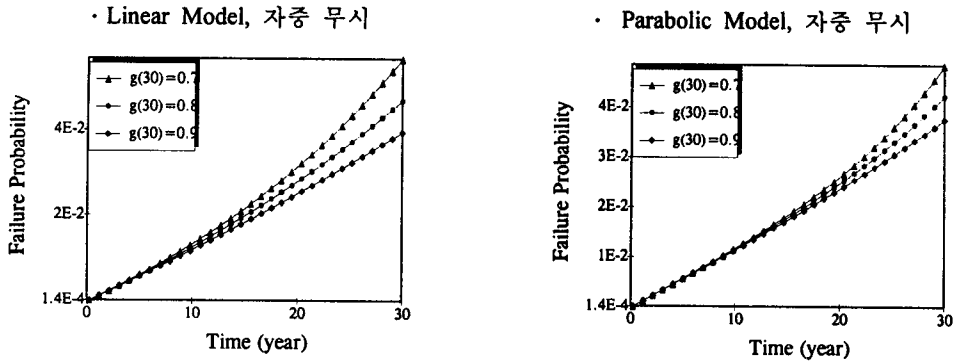
· 열화도 $g(30)=0.7$, Linear Model



· 열화도 $g(30)=0.7$, Parabolic Model



5.4.3 열화도에 따른 파괴확률의 변화



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 분석하였으며 그 결과를 요약하며 아래와 같다.

1. 열화기구에 노출되어 있는 RC 격납건물의 시간에 따른 파괴확률산출을 위한 방법을 제시하였다.
2. 원자력 발전소 내 RC 격납건물의 열화기구를 나타낼 수 있는 모델을 결정하였으며 열화모델 및 열화도에 따른 파괴확률의 변화를 추정하였다.
3. 건물의 저항력 산출 시 자중고려 유·무에 따라 파괴확률의 변화는 민감한 결과를 보이고 있다. 따라서 보다 정확한 파괴확률의 추정을 위해서는 관심있는 응답의 저항력의 정확한 산출과 이에 관련된 한계상태 방정식 설정에 많은 자료를 필요로 한다.

본 연구에서는 열화기구의 설정에 있어 다양한 열화기구의 복합작용, 부재별 열화작용 및 열화도의 확률분포에 따른 영향 등 보다 현실적인 열화에 의한 영향과 우리나라 특성을 반영할 수 있는 입력지반 운동에 대한 모델링 등을 고려하지 못하고 있다. 따라서 이들은 좀 더 보완함으로써 보다 정확한 파괴확률의 산출 및 RC 격납건물의 평가를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 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
- Shinozuka, M. (1972), "Methods of safety and reliability analysis", Structural Safety and reliability, Pergamon Press, New York, pp. 11-45
- Lin, Y. K. (1967), "Probabilistic theory of structural dynamics", Robert E. Krieger Publishing Co., New York
- 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
- Park, R. and Paulay, T.(1993), "Reinforced Concrete Structures", Johns Wiley and Sons
- Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G. M. (1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges", Johns Wiley and Sons, Inc, N.Y.
- Newland, D. E.(1993), "An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis", John Wiley and Sons, Inc, N.Y