

열화를 고려한 원자력발전소 철근콘크리트 보의 지진 취약도 해석

Seismic Fragility Analysis of Deteriorated Reinforced Concrete Beams in Nuclear Power Plants

이 명 규* 김 문 수** 정 언 석*** 김 인 수**** 고 성 기*****
Lee, Myung Kue* Kim, Moon Soo** Chung, Yun Suk*** Kim, In Soo**** Koh, Sung Ki*****

Abstract

The seismic fragility analyses of reinforced concrete propelled beam are performed to evaluate safety margin. The models were simulated by Latin Hyper-Cube (LHC) method considering various aging-related deterioration of RC beam. Fragility curves under various condition subjected to static load are compared. It is found that the 20% loss of top and bottom steel 15% lower than the undegraded beam in the ultimate strength. Seismic fragility analyses were performed to find out the effect of aging-related deterioration on the dynamic behaviour of RC beam.

1. 서론

원자력발전소에서 콘크리트 구조물은 원자로 차폐구조물 및 원자로 안전의 최후 보루인 격납구조물을 구성하고 있으며, 보조건물, 연료건물, 터빈건물, 취수구조물 등의 주요 건설재료로 사용되고 있다. 이러한 콘크리트 구조물이 적절하게 설계되고 시공된 건설 초기에는 상당한 안전 여유(safety margin)를 가지고 있으나 경년열화(age-related degradation)에 의하여 동특성(dynamic properties), 구조응답(structural response), 구조저항 또는 성능(structural resistance or capacity), 파괴양상(failure mode), 파괴 시발 부위(location of failure initiation) 등에 영향을 받게 된다.

신규원자력 발전소 건설이 어려워짐에 따라 기존의 가동 원전의 운전 연장요구가 있는 경우에는 모든 하중조건하에서 현재의 면허취득기준(current licensing basis : CLB)을 만족하는 가를 판단하기 위해서는 구조물의 경년열화 영향을 잘 이해하고 평가해야한다. 이러한 필요성에 의해 본 논문에서는 원자력 발전소의 철근 콘크리트 보 구조물의 열화에 따른 하중 저항 특성의 변화를 정적하중과 지진하중에 대한 취약도 분석을 통하여 살펴보았다.

* 정회원, 전주대학교 토목환경도시공학과 교수
** 한국원자력 안전기술원
*** 정회원, 한국원자력 안전기술원
**** 고려개발주식회사
***** 전주대학교 토목환경도시공학과 대학원

2. 취약도모델의 개념

취약도 분석은 설계값을 초과하는 검토수준의 사건이라는 특정한 사고에 저항하는 공학적으로 설계된 부재나 계통의 성능을 확률론적으로 나타내고 평가하기 위한 기법이다. 취약도 모델링은 대개 전체적인 시스템의 거동과 특히 시스템이 잘못될 수 있는 거동에 초점을 맞춘다. 취약도 모델링 과정에서는 거동에서의 불확실성 거동 추정치와 연관된, 시스템 거동의 중앙값 추정치를 구한다. 이것은 구조 매개변수들에 대해 보수적으로 평가하고, 가정한 보수성이 안전도 해석에 예측 불가능한 방식으로 전파되는 전형적인 결정론적 해석방식과 구별된다.

구조물의 취약도는 대개 대수정규(lognormal) 누적분포함수(CDF : cumulative distribution function)에 의해 나타낸다. 만일 구조 성능을 통계적으로 독립인 여러 가지 확률변수의 곱으로 나타내지는 경우에는 중앙극한정리(central limit theorem)에 의해 이러한 CDF의 선택은 타당하다고 볼 수 있다. 대수정규 누적확률분포는 다음과 같이 나타내진다.

$$F_R(x) = \Phi[\ln(x/m_R)/\beta_R] \quad (1)$$

여기서, $F_R(x)$ 는 작용하중이 x 인 경우 파괴확률, $\Phi[\]$ 는 표준 정규확률의 적분(표준정규분포의 CDF), m_R 은 성능의 중앙값 능력, β_R 은 대수정규분포의 표준편차로 $V_R < 0.3$ 인 경우 확률변수의 변동계수(COV : coefficient of variance, V_R , when)와 거의 같다.

알고있는 정보가 본질적으로 완벽하다면, 식(1)와 같이 정의된 성능에 대한 5% 배제한계가 안전율을 검토하기 위한 기반으로 선택될 수 있다(정해진 값 이하가 될 확률이 5%미만인 값). 만약 선택된 검토수준의 부재성능이 $R_{0.05}$ 보다 작은 경우에는 그 수준에서 구조부재의 허용거동에 대한 확률(하중이 $R_{0.05}$ 보다 작은 경우 부재가 안전한 상태일 확률)이 최소 95%이다.

$$R_{0.05} = m_R \exp(-1.645\beta_R) \quad (2)$$

시스템분석 및 기본자료의 한계 때문에 생긴 가정에 의해 성능에 있어서 부가적인 불확실성이 발생한다. 우연한 불확실성과 반대로, 이러한 지식기반(인식론적) 불확실성은 분석의 수준과 기초한 자료에 의존하며, 일반적으로 좀더 상세한(비용이 추가되는) 분석에 의해 감소될 수 있다. 철근콘크리트 구조물의 인식론적 불확실성의 원인은 삼차원 구조물을 2차원으로 모델링하는 것, 완전한 고정단이나 회전단이 아닌 지지조건, 구조해석시 전단변형을 무시하는 것, 분포(smear)모델에 의해 균열을 다루는 것, 기초자료의 한계 등이다.

3. 취약도평가를 위한 자료

3.1 단면 모델을 위한 통계자료

정적하중을 받는 철근콘크리트 휨 부재(보와 슬래브)와 낮은 전단벽체 구조물의 강도를 나타내기 위한 통계자료 요약은 표1. 에 나타나있다. 이것은 출판물(Ellingwood and Hwang, 1983; MacGregor et al., 1983)에 대한 상세한 분석과 원자력 발전소로부터 추가된 자료에 기초하였다.

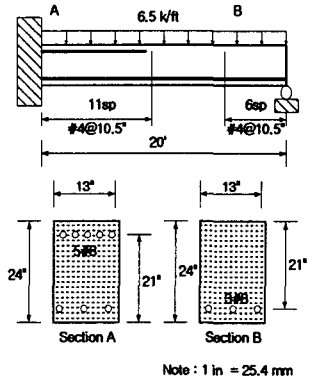
3.2 단면의 기하학적 특성 및 LHC 샘플링

부정정보의 조건부 한계상태 확률을 해석적 식(closed form)으로 표현하기 위해서는 극한능력의 이상화된 모델이외에 다른 방법을 사용하는 것은 어렵다. 그러므로, 구조적 능력의 불확실성은 해석적인 식보다는 반복적인 유한요소해석을 포함한 몬테카를로 과정에 의해 평가된다. 비선형 유한요소해석 비용 때문에 불확정성 모델과 취약도를 평가하기 위해 요구되는 시뮬레이션 수 N 은 최소로 유지해야만 한다. 수치실험을 효과적으로 수행하기 위한 무작위 표본추출 계획(변동감소 기술)을 적용할 수 있다(Rubenstein, 1981). 1980년 Imam과 Conover는 Latin Hypercube(LHC) 표본추출법이 복잡한 시스템을

포함한 시스템 신뢰성 문제에 매우 유용하다고 발표했다. LHC sampling에 의해 얻어진 추정치들은 편향되어 있지 않으며, 추정치들의 표준오차는 동일한 수의 표본에 대한 대부분 다른 방법에 비하여 가장 작다. LHC 표본추출법은 본 연구에서 각각 추출된 구조물의 하중-변형 곡선 및 취약도를 결정하기 위해 유한요소 프로그램과 결합되었다. 각 취약도 곡선은 19개 구조물의 해석에 기초하였으며, 이 경우 재료강도, 치수, 모델링 오차 등은 표1. 및 위에서 언급한 사항들과 동일하도록 생성하였다. 19개의 샘플수는 계산과 해석을 위해 주어진 시간과 노력을 고려한 실용적인 상한 값이다. 이들 계산과 유한요소해석 결과들을 비초과확률 5%와 95% 사이에 순서대로 정렬하여 평균 위치에 도시하였다. 계산 및 해석결과로부터 대수정규분포를 이용하여 취약도 변수 m_R 과 β_c 를 결정하였다.

표 1. 철근콘크리트 보의 구조저항 특성의 통계자료

Property	Mean	COV	CDF
Concrete(4000-psi)			
Compression strength	3,552 psi	0.16	N
Tensile (splitting) strength	358 psi	0.18	N
Initial tangent modulus	3,800 ksi	0.18	N
Limiting compression strain	0.004	0.20	N
Grade 60 reinforcement			
Yield strength	66 ksi	0.10	LN
Modulus of Elasticity	29,000ksi	N/A	N/A
Placement of reinforcement			
Effective depth, d	d in	0.5/d	N
Bar cover	c+1/4 in	0.625/c	N



Note : 1in = 25.4mm; 1psi = 6.895kPa; 1ksi = 6.895MPa;

그림 1. Cantilever Beam의 배근도

N = Normal Distributio , LN = Lognormal Distribution

4. 등분포하중에 대한 취약도 해석

등분포하중이 작용하는 경우에 소성해석을 통한 해석적인 식을 이용하여 19개의 샘플에 대한 극한 하중을 구하여 취약도 곡선을 구하였다.

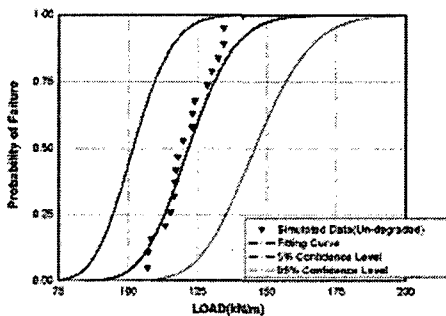


그림 2. Fragility Curve of Undegraded Structure

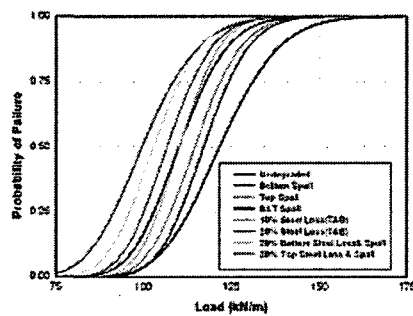


그림 3. Fragility Curve of Degraded Structure

5. 지진하중에 대한 취약도 곡선

구조물에 작용하는 지진하중을 모델링하기 위해서 설계지반가속도 0.2g로 알려진 울진3,4호기의 수직방향의 지진이력(그림 4 참조)을 입력값으로 사용하여 지진하중에 대한 취약도를 수치적으로 검토

하였다. 해석은 정적하중에 대한 취약도를 산정하기 위하여 LHC 샘플링에 의해 구해진 19개의 다른 단면 및 재료 특성을 갖는 가상 구조물에 대하여 비선형 동적해석을 수행하였다. 해석모델에서는 건전한 경우와 상하덮개가 열화되고 철근 단면적이 20% 손상된 경우에 대하여 동적해석을 수행하여 취약도 곡선을 구하여 비교하였다. 다음 그림 5는 건전한 구조물에 대한 취약도 곡선으로 가로축은 구조물 지점에서의 지진 가속도(단위 $g=9.8m/sec^2$)를 나타내고, 세로축은 주어진 지진가속도에서의 조건부 파괴확률을 나타내고 있다. 그림 6은 열화된 경우의 지진하중에 대한 취약도 곡선을 나타내고 있다. 취약도 해석에 의하면 조건부 파괴확률 0.5에서 건전한 구조물의 경우 파괴가속도가 약 3.9g 정도인데 비하여, 열화된 구조물의 경우 2.6g로 나타나고 있다.

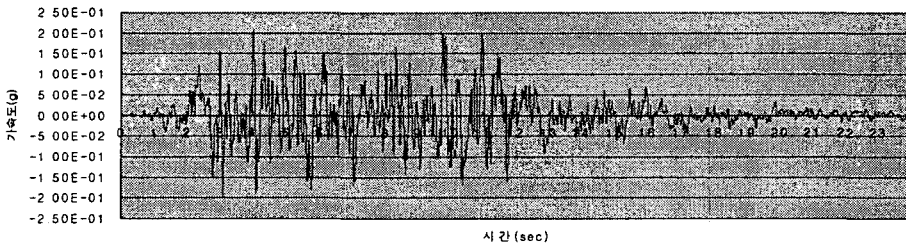


그림 4. 해석에서 사용한 수직 방향의 지진 가속도(0.2g)

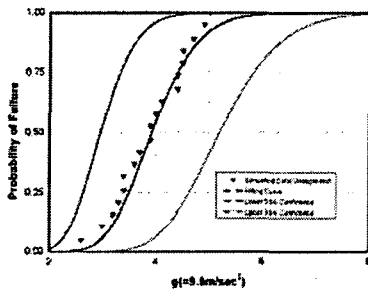


그림 5. 건전한 구조물의 지진취약도 곡선

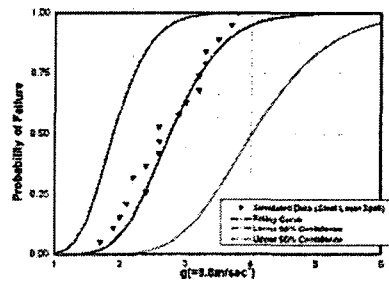


그림 6. 열화된 구조물의 지진취약도 곡선

5. 결론

구조물의 단면재료 특성값과 철근의 유효깊이, 피복 손실 등의 구조적 특성에 대하여 각각 19개의 모델을 생성하고, 정적 파괴하중을 해석적인 식을 이용하여 구하고, 취약도곡선을 계산하였다. 보 구조물에 대한 계산결과 열화가 발생하는 경우 취약도 곡선이 좌측으로 이동하여 파괴하중이 감소하는 결과를 보였다. 수직방향의 지진하중에 대한 취약도 곡선에서 열화된 경우가 건전한 경우의 72%수준(3.9g→2.8g)으로 저항능력이 감소하는 결과를 보였다.

참고문헌

- 1) NUREG/CR-6715, "Probaility-Based Evaluation of Degraded Reinforced Components in Nuclear Power Plants," by J. I. Braverman, B.R. Ellingwood, D. J. Naus, C.H. Hofmayer, S. Shteyngart, and P. Bezler, Brookhaven National Laboratory, April, 2001.
- 2) ABAQUS User's Manual Ver. 6.4, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc, 2003,
- 3) ABAQUS Example Manual Ver. 6.4, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc 2003