

FOSM 방법을 이용한 내진성능 중요부재 판별법

Identifying Significant Components of Structures for Seismic Performance Using FOSM Method

이태형¹⁾ · 칼리드 모살람²⁾

Lee, Tae-Hyung · Mosalam, Khalid

국문 요약 >> 구조 시스템을 구성하는 구조부재들의 상대적인 중요도를 판별하는 것은 성능기반 지진공학에서 매우 중요한 과정이다. 확률기법의 하나인 First-Order Second Moment 방법을 이용하여, 각 구조부재들의 불확실한 성능 때문에 발생하는 구조 시스템의 요구 성능의 불확실성을 예측할 수 있고, 이런 과정을 통해서 구조부재의 중요도를 판별할 수 있다. 특정한 구조부재의 불확실한 성능에 대한 구조 시스템의 요구성능이 민감할수록 그 구조부재의 중요도는 높아진다는 점을 이용하여 중요부재를 판별한다. 따라서 요구성능의 민감도가 상대적으로 큰 구조부재는 그렇지 않은 부재보다 더 중요하다고 할 수 있다. 개발된 중요부재 판별법은 연성 철근콘크리트 프레임의 중요부재를 판별하는 과정에 적용함으로써 방법을 검증하였고, 적용 가능성을 보여주었다.

주요어 FOSM, 철근콘크리트, 성능기반 지진공학, 내진성능, 불확실성, 확률변수

ABSTRACT >> The identification of significant structural components under seismic loading through a probabilistic approach is of interest to many structural engineers. The First-Order Second Moment method can be used to achieve this goal by estimating uncertainty in the seismic demand of a structural system induced by the capacity uncertainties of each structural component. Significant structural components are those to which the seismic demand of the structure is more sensitive than it is to other ones. The developed procedure demonstrated by a ductile reinforced concrete frame shows that it is computationally effective and robust in terms of identifying significant structural components.

Key words FOSM, Reinforced concrete, Performance-based earthquake engineering, Seismic performance, Uncertainty, Random variable

1. 서론

성능기반 지진공학의 중요한 한 요소는, 구조물을 구성하고 있는 여러 가지 부재중에서 구조물의 특정한 성능에 관련된 소위 “중요부재”를 판별하는 것이다. 예를 들어, “20개의 교각으로 구성되어 있는 교량이 지진하중을 받아 흔들릴 때, 교량의 상부구조물의 횡방향 가속도에 가장 큰 영향을 미치는 교각은 A교각과 B교각이다”라고 말할 수 있는 방법이다. 구조물의 내진성능에 대한 구조부재의 중요도를 평가하기 위해서는 부재의 위치와 구조물의 강성에 대한 부

재의 기여도뿐 만 아니라 확률분포로 표시되는 부재의 강도와 변형 능력 등을 동시에 고려하여야 한다. 구조물의 각 부재가 각각 어느 정도의 중요성을 갖는지를 알게 되면, 이는 구조물의 설계단계에 영향을 주는 중요한 정보가 될 뿐만 아니라, 기존 구조물의 보강을 계획하고 설계할 때 특히 중요한 지표가 된다. 즉, 중요도가 높은 부재에 보강의 우선순위를 주는 방법을 이용하여 보다 효율적이고 경제적인 보강을 할 수 있다.

지금까지 유럽과 미국을 중심으로 구조물의 확률적 거동 평가에 관한 연구가 진행되어 왔다. 1972년 Shinozuka⁽¹⁾는 콘크리트구조물의 재료적 불확실성이 강도에 미치는 영향을 연구했고, 그 뒤에도 Grant, et al.⁽²⁾, Mirza and MacGregor⁽³⁾, Frangopol, et al.⁽⁴⁾, Lee and Mosalam⁽⁵⁾ 등에 의해서 재료적 불확실성이 구조부재의 강도에 미치는 영향은 계속 연구되어 왔다. 구조물의 전체적인 거동이 불확실성에 받는 영향도 많이 연구가 되었는데, Chryssanthopoulos, et al.⁽⁶⁾,

¹⁾ 정회원·건국대학교 토목공학과, 조교수
(교신저자: thlee@konkuk.ac.kr)

²⁾ 버클리 캘리포니아대 토목환경공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 6. 18 / 수정일 : 2009. 7. 1. / 게재확정일 : 2009. 7. 2)

Ghobarah and Aly⁽⁷⁾, Shinghal and Kiremidjian⁽⁸⁾ 등은 지진의 특성과 구조물의 재료적인 특성의 불확실성을 고려하여 구조물의 거동을 확률적으로 평가하는 방법론을 각각 제시하였다.

1995년 이후 성능기반 지진공학이 미국을 중심으로 발전하기 시작하면서⁽⁹⁾, 성능기반 지진공학의 방법론에 맞춘 연구결과가 발표되었는데, 2000년 Porter 외⁽¹⁰⁾는 철근콘크리트(이하 RC) 건물을 대상으로 지진 발생 시 주요 확률변수에 대한 경제적 손실의 민감도를 연구하였고, 2003년 Baker and Cornell⁽¹¹⁾은 First-Order Second-Moment (FOSM) 방법⁽¹²⁾을 이용하여 지진하중으로 손상된 건물의 복구비용에 내재된 불확실성을 추정하는 방법을 제안하였다. 한편, 2005년 Lee and Mosalam⁽¹³⁾은 FOSM 방법을 이용하여 지진하중의 불확실성과 구조물의 재료적 특성에 내재된 불확실성에 대한 RC 구조물 거동의 민감도를 연구하였다.

이와 같이 구조물의 확률적 거동해석에 관한 많은 논문이 발표되었음에도 불구하고, 구조물의 성능에 대한 각 부재들의 중요도를 평가하는 연구는 매우 드물다. 2002년 Gharaibeh, et al.⁽¹⁴⁾는 신뢰성이론(Reliability Method)을 이용하여 구조물 전체의 거동에 대한 구조부재들의 상대적인 중요도를 연구하였다. 그들이 사용한 방법은 구조물을 직렬 시스템과 병렬 시스템의 조합으로 간주하는 일반적인 신뢰성이론으로, 각 구조부재의 상태를 “파괴” 혹은 “안전” 두 가지로 분류하는 한계함수(Limit-State Function)로 정의하고, 그에 따른 각 부재들의 신뢰성의 조합으로 전체 구조 시스템의 신뢰성을 계산하는 방법이다. 이 방법은 부재의 상태를 “파괴”나 “안전” 두 가지로 밖에 나타낼 수 없기 때문에, 적용성에 한계가 있고, 단순 트러스와 같이 특수한 경우를 제외한 일반적인 토목구조물에 적용하기에는 무리가 있다.

본 연구의 목적은 구조물의 확률적 해석방법 중 간단하면서도 효율적인 FOSM 방법을 이용하여 구조부재가 갖는 강도 및 변형 능력의 불확실성에 의한 구조물 거동의 불확실성을

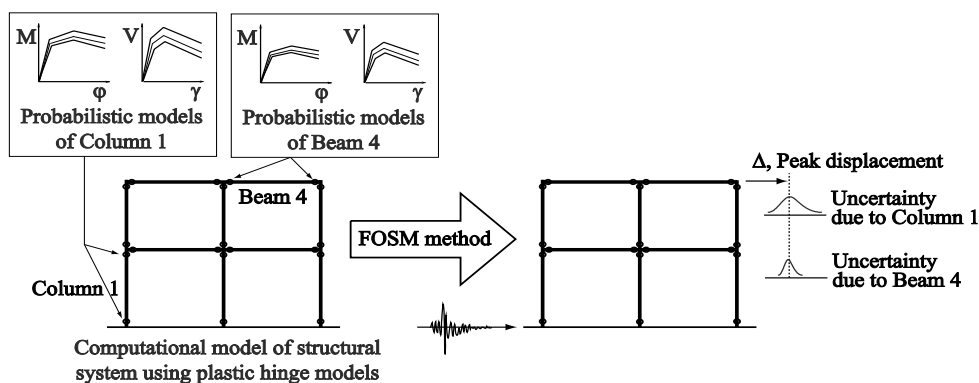
이해하고, 구조물 거동의 민감도를 이용하여 각 구조부재의 중요도를 산정하는 데 있다.

2. 중요부재 판별 원리

구조물의 부재성능이 불확실한 이유는 부재를 구성하고 있는 구조재료의 물성값과 부재의 치수가 설계시의 값과 다르기 때문이다. 부재의 성능이 명확하지 않기 때문에 지진하중에 의한 구조물의 거동을 나타내는 Engineering Demand Parameter (이하 EDP)가 명확하지 않고 불확실하다. 이 연구에서는 부재의 성능을 강도성능과 변형성능으로 구분하고, 이를 부재의 위험단면(Critical Section)에서의 모멘트-곡률관계로 나타내었다. 보와 기둥으로 이루어진 뼈대구조가 지진하중을 받을 때, 부재의 위험단면은 일반적으로 부재의 양 끝단에 위치한다.

부재의 모멘트-곡률관계를 확률적으로 나타내기 위해서는 추계적 파이버모델(Stochastic Fiber Element Model)을 이용하는 것이 적합하다. 실험이나 실제 지진의 피해를 입은 구조물로부터 통계자료를 축적하는 것이 이상적이거나, 이는 실제로 매우 어렵기 때문이다. Lee and Mosalam⁽⁵⁾은 뼈대구조물의 비선형거동을 가장 정확하게 계산할 수 있는 파이버모델과 확률론적 해석방법의 하나인 몬테카를로 시뮬레이션기법을 결합하여 추계적 파이버모델을 개발하였다. 본 연구에서는 이 모델을 구조해석용 프로그램인 OpenSees⁽¹⁵⁾에 적용하여 보와 기둥의 위험단면에서의 확률적 모멘트-곡률관계를 유도하는데 사용하였다.

구조물 전체의 해석모델에서 각 부재는 소성힌지모델(Plastic Hinge Model)을 이용하여 모델링하였다. 소성힌지모델을 이용한 보-기둥 요소는 소성힌지부분의 모멘트-곡률관계 혹은 모멘트-회전각 관계를 정의해 주어야 하는데, 본 연구에서는 추계적 파이버모델을 이용하여 도출된 확률적 모멘트-곡률관계로 소성힌지의 거동을 정의하였다. 구조 시



〈그림 1〉 부재의 확률모델과 FOSM 방법을 이용한 구조물의 평가방법

시스템 차원에서 부재성능의 불확실한 성능을 고려하려면 구조 시스템 해석과정에서 확률론적 기법이 사용되어야 하는데, 본 연구에서는 FOSM 방법을 사용하여 EDP의 확률을 계산하도록 하였다. 그림 1은 부재의 확률모델과 FOSM 방법을 이용한 구조물의 평가방법을 도식적으로 보여준다. 이 방법에서, 구조 시스템을 구성하고 있는 여러 개의 부재들 중 한 개의 부재가 가지고 있는 불확실한 성능에 의해서 EDP가 불확실해지는 정도를 정량화할 수 있고, 이 값으로부터 해당 부재에 대한 EDP의 민감도를 계산할 수 있다. 이런 과정을 모든 부재들에 대해서 반복하면, 각 부재에 대한 EDP의 민감도를 모두 계산할 수 있고, 민감도가 큰 순서대로 부재의 중요도가 크다고 할 수 있다. 왜냐하면, 이 민감도는 부재의 강성과 연성, 구조물 내에서의 위치와 강성기여도, 그리고 부재성능의 확률분포 특성이 모두 반영되었기 때문이다.

3. FOSM 방법

본 절에서는 중요부재 판별법의 이론적인 근간이 되는 FOSM 방법을 간략하게 설명하였다. 평균이 μ_X 이고 표준편차가 σ_X 인 확률변수 X 의 함수인 $Y=g(X)$ 를 생각해 보자. 함수 $g(X)$ 가 변수 X 에 대해서 미분가능하다면, 1차 테일러급수를 이용하여 Y 를 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Y \approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx} \right)_0 (X - x_0) \quad (1)$$

이 때, $()_0$ 는 x_0 에서 계산한 함수 값이다. 평균을 나타내는 Y 의 일차 모멘트와 분산을 나타내는 이차 모멘트는 각각

$$\mu_Y \approx g(\mu_X) \quad (2)$$

$$\sigma_Y^2 \approx \left(\frac{dg}{dx} \right)_0^2 \sigma_X^2 \quad (3)$$

이다. 이 근사값들을 First-Order Second-Moment(FOSM)라고 부른다. 확률변수의 차원을 확장하여, 확률벡터(Random Vector) $\vec{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ 의 함수인 $Y = g(\vec{X})$ 를 생각해 보면 \vec{X} 의 평균벡터(Mean Vector) $\vec{\mu}_X = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T$ 와 Variance-Covariance 행렬 $VC[\vec{X}]$ 을 이용하여 Y 의 일차 및 이차 모멘트를 다음 식 (4), (5)와 같이 표시할 수 있다.

$$\mu_Y \approx g(\vec{\mu}_X) \quad (4)$$

$$\sigma_Y^2 \approx \nabla^T g(\vec{X}) VC(\vec{X}) \nabla g(\vec{X}) \quad (5)$$

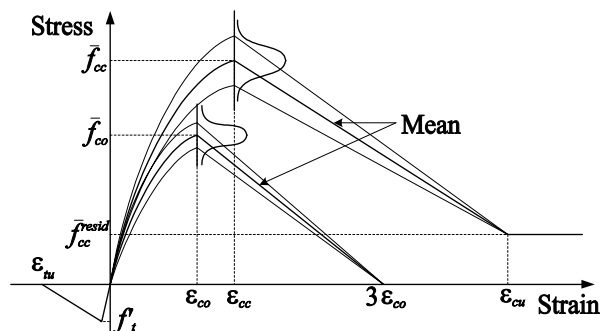
이 때, $\nabla g(\vec{X}) = [\partial g / \partial x_1, \partial g / \partial x_2, \dots, \partial g / \partial x_n]^T$ 으로, $g(\vec{X})$ 의 X 에 대한 Gradient를 나타낸다. 본 연구에서는 식 (5)의 σ_Y^2 를 Y 의 \vec{X} 에 대한 민감도(Sensitivity Measure)로 삼는다. 수식에서 볼 수 있듯이, 이 방법을 이용하면, 확률변수에 대한 함수의 Gradient뿐만이 아니라, 각 확률변수들 간의 확률적 상호관계(Correlation)도 동시에 고려된다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 컴퓨터 구조모델이 위에서 설명한 함수 g 에 해당하게 된다. 독립변수인 \vec{X} 는 확률분포로 표시되는 각 구조부재의 성능을 나타내고, 종속변수인 Y 는 구조물의 거동을 나타내는 EDP로, 역시 확률분포로 표시된다. 이 EDP가 각 부재의 능력에 민감한 정도를 기준으로 부재의 상대적인 중요도를 판단하게 된다.

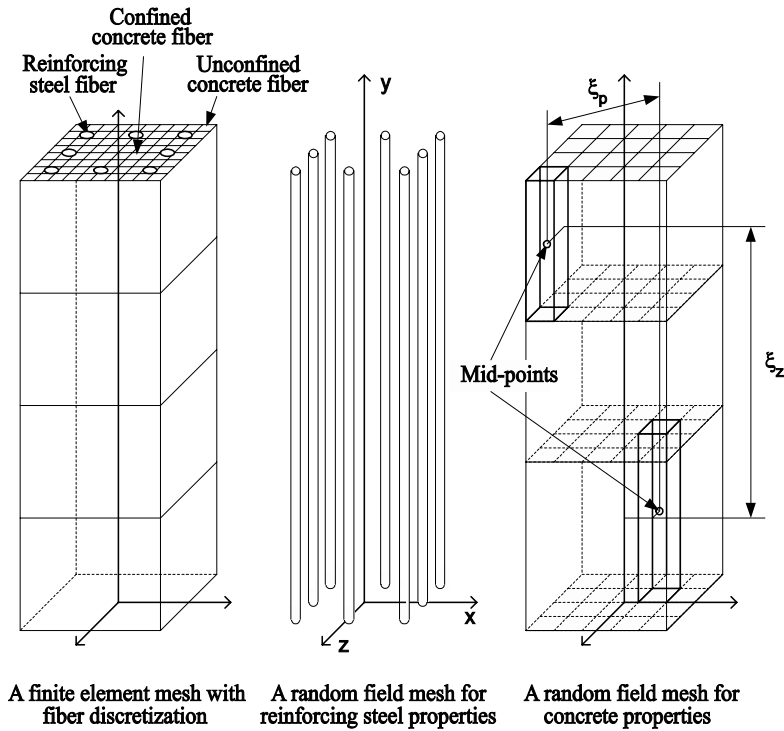
4. 추계적 파이버모델

재료적 성질이나 부재 치수의 불확실성 때문에 구조물을 구성하고 있는 부재들의 강도 및 변형 능력이 불확실하게 되고, 이런 불확실한 구조부재로 이루어진 구조시스템의 거동도 따라서 불확실하게 된다. 확률론적 구조해석에서는 부재 치수의 불확실성보다는 구조물의 거동에 대한 영향이 상대적으로 큰 재료적 성질에 대한 불확실성을 주로 고려한다. RC 구조의 경우 철근과 콘크리트의 기계적 재료성질이 이에 해당한다. 그림 2는 RC 구조물의 대표적인 재료모델인 콘크리트의 확률모델을 보여준다.

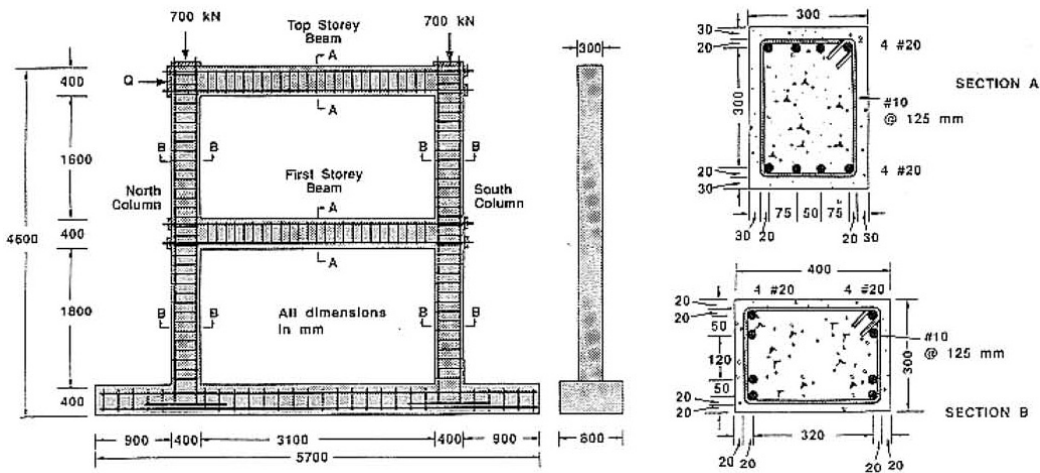
그림 3은 추계적 파이버 모델을 이용한 RC 부재의 모델링을 보여준다. 파이버 모델은 보나 기둥의 비선형해석에 가장 적합한 모델링 기법으로, 이를 몬테카를로 시뮬레이션과 결합하여 구조부재의 재료나 치수의 불확실성을 고려하도록 한 것이 추계적 파이버모델이다. RC 부재의 경우 그림 3과 같이 철근의 확률장(Random Field)과 콘크리트의 확률



〈그림 2〉 콘크리트의 확률모델



〈그림 3〉 추계적 파이버모델을 이용한 철근콘크리트 부재의 모델링



〈그림 4〉 VE 프레임의 설계상세와 부재의 단면 (Vecchio와 Emara, 1992)

장을 따로 모델링한 후 파이버요소의 각 파이버에 콘크리트 혹은 철근의 재료 값을 지정하는 방법으로 재료의 불확실성을 고려한다.

5. 연성 RC 프레임 해석

5.1 연성 RC 프레임

본 연구에서 개발한 구조물의 중요부재 판별법을 검증하고, 적용성을 검토하기 위하여 연성 RC 프레임을 선택하여 중요부재를 판별하였다. 본 연구에서 고려된 구조물(이하

VE)은 1992년 Vecchio and Emara⁽¹⁶⁾가 실험에 사용했던 2층 연성 RC 프레임으로, 보와 기둥의 단면은 그림 4와 같이 직사각형 단면으로 이루어져 있다. 실험에서 VE에는 700kN의 고정 축하중이 두 개의 기둥에 각각 작용했고 2층 보에는 단조중가 횡하중이 가해졌다. 실험은 구조 시스템이 극한성능에 도달할 때까지 진행되었고, 이 시스템의 파괴모드는 보의 양단과 기둥의 밑면에 발생한 소성힌지발생으로 관찰되었다. 이 실험에 사용된 구조재료의 공칭 및 확률적 성질은 표 1에 나타나 있다. 단, 재료들의 확률적 성질인 평균, 표준편차 및 분포의 형태는 기존의 연구결과들⁽¹⁷⁾을 참조하여 결정하였다.

〈표 1〉 재료의 공칭 자원과 확률분포

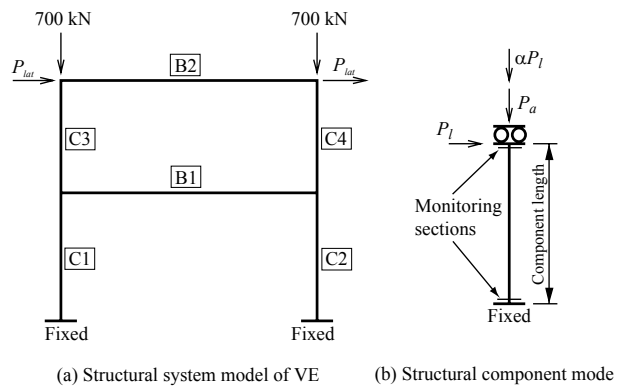
재료특성	공칭값	평균	COV ^g (%)	확률분포
(a) 콘크리트				
압축강도 ^a	30.0 MPa	27.8 MPa	15	정규분포
초기 탄성계수 ^b	27.5 GPa	27.5 GPa	8	정규분포
(b) 종방향 철근				
항복강도 ^c	420 MPa	418 MPa	9	대수정규분포
극한강도 ^d	600 MPa	596 MPa	9	대수정규분포
탄성계수	192 GPa	192 GPa	3.3	정규분포
극한변형률	0.07	0.07	20	정규분포
(c) 횡방향 철근				
항복강도 ^e	455 MPa	454 MPa	9	대수정규분포
극한강도 ^f	640 MPa	647 MPa	9	대수정규분포
탄성계수	192 GPa	192 GPa	3.3	정규분포
극한변형률	0.07	0.07	20	정규분포

^a와 ^b, ^c와 ^d, ^e와 ^f의 상관계수는 각각 0.8, -0.5, -0.55이다.
^g 변동계수.

5.2 구조부재의 확률적 단면모델

VE는 두 개의 보와 네 개의 기둥으로 구성되어 있다. 각 구조부재에 대한 위험단면의 강도성능과 변형성능을 결정하기 위해서는 부재의 하중경계조건을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 구조 시스템의 선형탄성해석 시 계산되는 반력과 부재력을 부재의 하중경계조건으로 하였다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 중력하중과 횡하중이 구조 시스템에 작용하는 경우를 고려하여 각 부재의 부재력을 계산하였고, 하중경계조건으로 결정하였다. 그림 5(b)와 같이 각 부재마다 상수 축하중 P_w , 단조증가 횡하중 P_l , 단조증가 축하중 αP_l 의 세 가지 하중을 받도록 부재를 정의하였다. VE를 구성하는 6개의 부재들 중 자원과 하중조건이 비슷한 부재들을 한데 묶어 3개의 대표부재로 나타내었다. 각 대표부재를 설정하는데 필요한 자원과 하중은 표 2에 정리하였다.

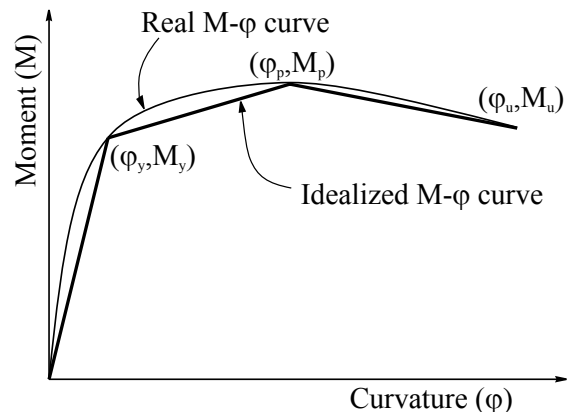
대표부재의 위험단면에 대해 확률적 모멘트-곡률 관계를 도출하기 위해서 각 대표부재에 대해서 정적비선형해석 (Pushover Analysis)을 수행하였다. 표 1에 제시된 재료의 확률변수를 고려하기 위하여 추계적 파이버 모델을 이용하여 OpenSees의 입력자료를 생성하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하기 위해 각 부재 당 1500번의 구조해석을 실시하였고, 그 결과를 통계적으로 처리하여 확률적 모멘트-곡률 관계를 도출하였다. 각 부재 위험단면의 모멘트-곡률 관계는 비선형 곡선으로 얻어지는데, 그림 6과 같이 이를 이상화하여 삼선형(Trilinear)모델로 나타내었다. 이 모델은 세 개의 점으로 정의되는데, 각각 항복점, 최대하중점, 그리고 극한점이 그것이다. 따라서, 하나의 모멘트-곡률 관



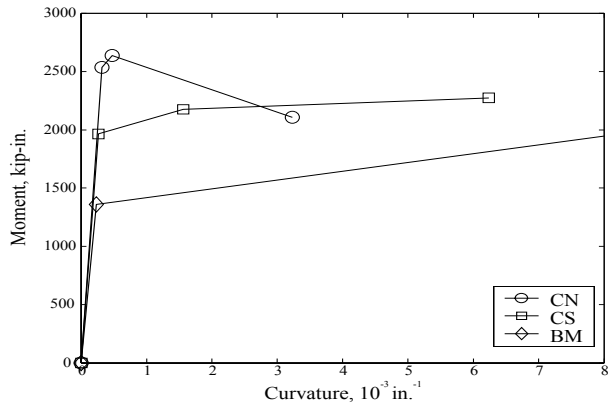
〈그림 5〉 선형탄성해석에 의한 대표부재 설정

〈표 2〉 VE의 대표부재 설정을 위한 자원과 하중

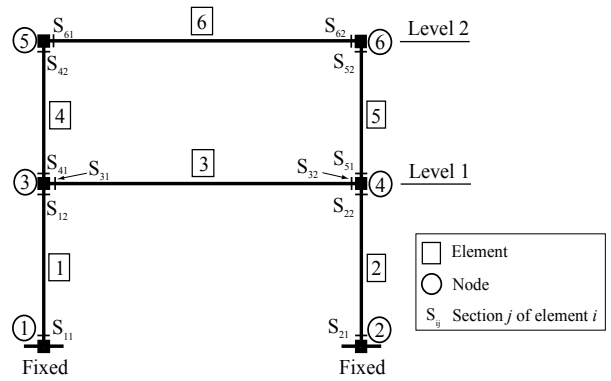
대표부재	P_w (kN)	a	길이 (cm)	비고
CN	700	1.0 (압축)	200	C2와 C4를 나타냄
CS	700	-1.0 (인장)	200	C1와 C3를 나타냄
BM	0.0	0.0	350	B1와 B2를 나타냄



〈그림 6〉 이상화된 삼선형 모멘트-곡률 곡선



〈그림 7〉 평균 모멘트-곡률 곡선



〈그림 8〉 VE의 구조해석 모델

〈표 3〉 대표부재의 확률적 모멘트-곡률 관계를 정의하는 요소

부재	인자	평균	표준편차	COV (%)	상관계수						
					M_y	M_p	M_u	ϕ_y	ϕ_p	ϕ_u	
CN	M_y	269.81	13.56	5.0	1.00						
	M_p	287.32	15.03	5.2	0.92	1.00					
	M_u	245.18	20.22	8.2	0.75	0.89	1.00				
	ϕ_y	11.73	1.18	10.1	0.65	0.45	0.30	1.00			
	ϕ_p	23.66	3.43	14.4	0.51	0.63	0.61	0.25	1.00		
	ϕ_u	144.13	20.91	14.5	-0.29	-0.24	-0.33	-0.37	-0.07	1.00	
CS	M_y	237.04	12.32	5.2	1.00						
	M_p	260.43	14.35	5.5	0.93	1.00					
	M_u	258.85	22.03	8.5	0.80	0.88	1.00				
	ϕ_y	10.67	0.94	9.0	0.74	0.72	0.59	1.00			
	ϕ_p	43.31	8.15	18.8	0.26	0.41	0.40	0.12	1.00		
	ϕ_u	197.44	25.87	13.1	-0.14	-0.31	-0.22	-0.29	-0.17	1.00	
BM	M_y	153.66	12.65	8.2	1.00	-				-	
	M_u	262.12	21.47	8.2	0.73	-	1.00			-	
	ϕ_y	9.21	0.91	9.7	0.91	-	0.63	1.00		-	
	ϕ_u	510.39	93.66	18.3	-0.43	-	-0.45	-0.37		-	1.00

비고: 모멘트의 단위는 kN-m, 곡률의 단위는 10^{-3} m^{-1} 임.

계를 정의하기 위해서는 6개의 인자, 즉, 항복모멘트와 곡률, 최대모멘트와 곡률, 극한모멘트와 곡률이 정의되어야 한다. 그림 7은 대표부재 CN, CS, BM의 위험단면에 대한 모멘트-곡률 관계의 평균곡선을 나타낸다. 각 대표부재의 위험단면에 대한 확률적 모멘트-곡률 관계를 정의하는데 필요한 요소들의 평균과 표준편차, 그리고 각 요소들 간의 상관 계수(Correlation Coefficient)는 표 3에 나타나 있다.

5.3 구조부재에 대한 EDP의 민감도

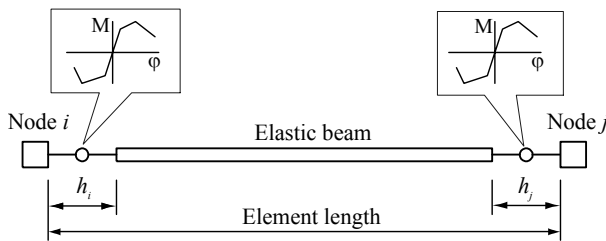
구조 시스템을 구성하는 부재의 성능이 불확실하기 때문에 발생하는 EDP의 불확실성을 FOSM 방법을 이용하여

예측하였다. EDP의 불확실성은 구조해석을 통해서 얻어진 EDP의 평균과 표준편차를 이용하여 계산하였고, EDP의 변동계수(Coefficient of Variation)를 계산하여 각 구조부재에 대한 EDP의 민감도로 사용하였다. EDP의 변동계수가 크게 계산되는 구조부재는 그렇지 못한 부재보다 더 중요하다고 해석하였다. VE 프레임이 지진하중을 받을 때의 최대층가속도 (Peak Absolute Floor Acceleration, 이하 PFA), 최대층변위 (Peak Absolute Floor Displacement, 이하 PFD), 최대층간변위 (Peak Interstory Drift Ratio, 이하 IDR)를 EDP로 설정하여 관찰하였다. 이 EDP들은 프레임 구조물의 지진해석 시 일반적으로 관찰하는 요구성능이다.

5.3.1 구조해석 모델

구조 시스템 해석은 앞서 언급한 OpenSees를 이용하여 수행하였고, 이 때 사용된 구조 모델은 그림 8과 같다. 이 구조해석 모델을 구성하는 요소는 beamWithHinge 모델로, 요소의 중간은 탄성요소로 되어 있고, 양 끝단은 소성힌지 모델이 고려된 요소이다. 요소 양 끝단의 소성힌지모델은 모멘트-곡률 관계로 정의되었다. (그림 9)

정적비선형해석 시 고려하였던 수직하중으로부터 구조 시스템의 질량을 계산하였고, 이를 각 노드에 고르게 분배하였다. 구조 시스템의 감쇠 특성은 임계감쇠비를 5%로 하였을 때 질량과 강성에 비례하는 감쇠비로 가정하였다. 이로부터 계산된 VE의 고유주기는 0.55초로 계산되었다.

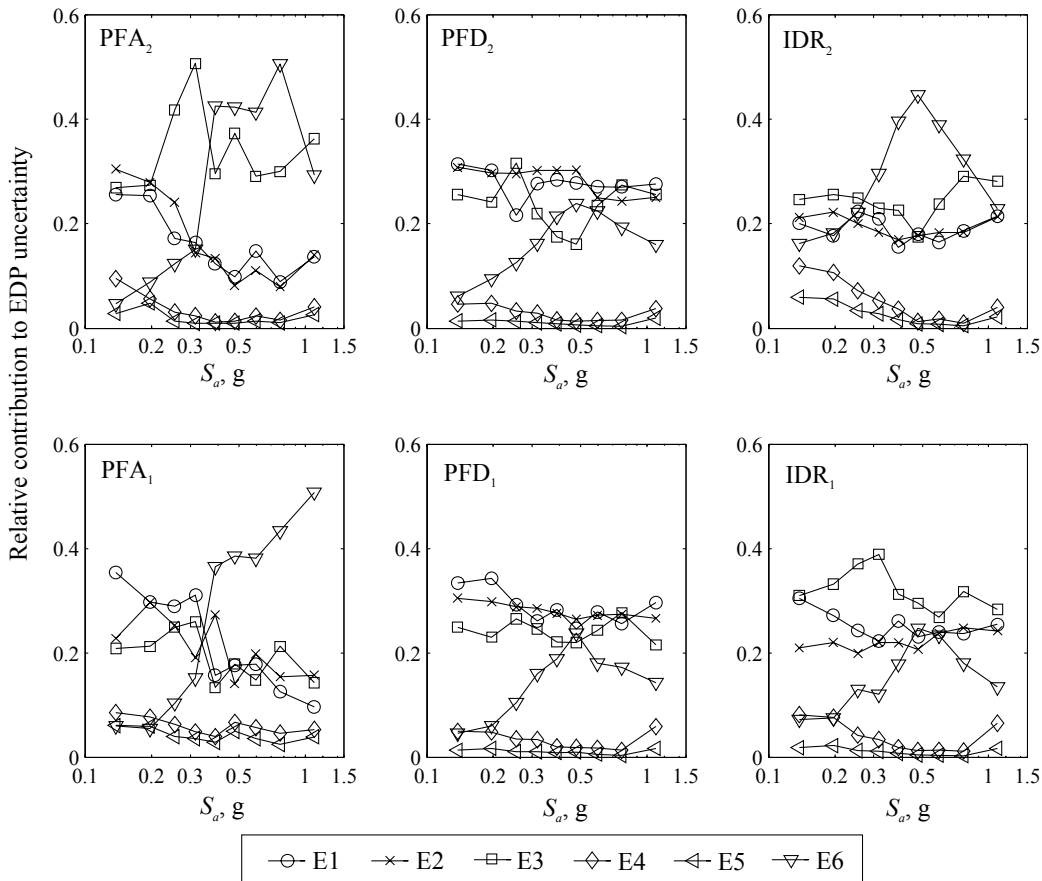


〈그림 9〉 소성힌지모델로 구성된 보-기둥요소

뉴마크 베타 방법에 $\gamma=0.05$ 와 $\beta=0.25$ 를 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 입력 지반가속도 간격의 반을 구조해석의 시간간격으로 설정하였다. 비선형 평형방정식은 수정된 뉴튼-랩슨 (Modified Newton-Raphson) 알고리즘으로 풀이하였다.

5.3.2 지진하중

주어진 지진하중의 크기(IM, Intensity Measure)에 대한 EDP의 조건부 민감도 (Conditional Sensitivity)를 계산하였다. 이는 지진하중의 크기가 주어졌을 때 확률변수에 대한 EDP의 민감도를 나타낸다. 이 계산에서 각 구조부재의 거동특성을 확률변수로 고려하였고, 각 확률변수에 대한 EDP의 변동계수를 각각 구한 후 서로 비교하여 변동계수가 큰 확률변수가 그렇지 않은 확률변수보다 상대적으로 중요한 것으로 판단하였다. 특정한 구조부재의 상대적인 중요도는 전체 부재에 의한 EDP의 불확실성에 대한 그 부재 만에 의한 EDP의 불확실성의 비율로 표시하였다. 지진하중의 크기는 스펙트럼 가속도가 0.14g부터 1.10g까지 9단계로 나누어 각각 고려하였다. 같은 지진하중의 크기에 대해서도 지반가속도의 시간이력에 따라 그 특성이 달라지는데, 이를



〈그림 10〉 구조부재들의 상대적인 중요도

고려하기 위해서 20개의 각각 다른 지반가속도 시간이력을 고려하였다. 지반가속도 시간이력은 Lee and Mosalam⁽¹³⁾이 사용했던 20개의 실제 지진기록을 사용하였고, 이들의 응답 스펙트럼은 Lee and Mosalam⁽¹³⁾의 논문에 자세하게 설명되어 있다.

5.3.3 중요 부재

그림 10은 각각 다른 구조부재들의 상대적인 중요도를 나타낸다. 이 그림에서 가로축은 지진하중의 크기를, 세로축은 부재의 중요도를 나타내고, 6개의 그래프는 각각 다른 EDP에 대한 계산결과를 보여준다. EDP에 대한 각 구조부재들의 중요도는 지진하중의 크기가 변함에 따라 달라지는 것으로 관찰되었다. 단, 4번과 5번 부재(2층의 기둥)는 지진하중의 크기에 거의 관계없이 모든 EDP에 가장 작은 영향을 주는 것으로, 즉 가장 ‘덜 중요한’ 부재로 판명되었다. 6번 부재(2층 보)의 PFA에 대한 중요도는 지진하중이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 관찰되었다. 반면에 PFD와 IDR에 대한 6번 부재의 중요도는 지진의 스펙트럼 가속도 0.5g까지는 증가하다가 그 이후로는 감소하는 경향을 보여주었다.

앞의 계산과 결과에 대한 분석을 통해서 각 구조부재의 EDP에 대한 조건부 민감도와 관련된 결론을 다음과 같이 도출하였다.

- 폭 넓은 지진하중의 크기의 대역에 걸쳐 2층의 기둥들은 무시할 만큼 중요도가 작았다.
- 구조부재들의 모든 EDP에 대한 중요도는 지진하중의 크기에 따라 달라졌다. 특히 2층 보의 중요도는 그 변화의 폭이 가장 넓었다.
- 스펙트럼 가속도가 0.2g보다 작은 지진하중의 크기에 대해서, 1층 기둥과 1층 보가 모든 EDP에 대해 중요한 것으로 나타났는데, 이는 첫 번째 항복이 이들 부재에서 일어났기 때문으로 분석된다.

6. 결론

FOSM 방법을 이용하여 구조 시스템의 중요부재를 판별하는 기법을 개발하였고, 이를 연성 RC 프레임에 적용함으로써 방법의 검증 및 적용 가능성을 보여주었다. 추계적 파이버모델로 구조부재 위험단면의 확률적 모멘트-곡률관계를 도출하고, 이를 소성힌지모델에 적용하여 구조 시스템을 확률적으로 해석하는 방법을 이용하였다. 각 구조부재들에

대한 EDP(최대층가속도, 최대층변위, 최대층간변위 등)의 민감도를 FOSM 방법을 통하여 계산하였고, 각 부재에 의해서 발생하는 EDP의 불확실성을 이용하여 어떤 부재가 그 EDP에 대해 가장 중요한가는 판단하였다. 지진가속도의 시간이력에 대한 불확실성을 고려하기 위해 20개의 각각 다른 지진가속도 시간이력을 고려하였고, 여러 단계의 지진하중 크기를 고려하였다.

VE 프레임의 경우, 지진하중의 크기에 관계없이 1, 2층 보와 두 개의 1층 기둥들이 모든 EDP에 대해 중요한 부재로 판별되었다. 특히 1층 보와 1층의 기둥들은 낮은 지진하중 레벨에서 다른 모든 부재들보다 더 중요하게 나타났다. 이는 이들 부재들이 다른 부재들보다 먼저 항복할 가능성이 높음을 나타낸다.

구조물의 각 부재가 각각 어느 정도의 중요성을 갖는지를 알게 되면, 이는 구조물의 설계단계에 영향을 주는 중요한 정보가 될 뿐만 아니라, 기존 구조물의 보강을 계획하고 설계할 때 특히 중요한 지표가 된다. 즉, 중요도가 높은 부재에 보강의 우선순위를 주는 방법을 이용하여 보다 효율적이고 경제적인 보강을 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-331-D00571).

참고 문헌

1. Shinozuka, M., "Probabilistic modeling of concrete structures," *Journal of engineering mechanics division, ASCE*, Vol. 98, No. 6, 1433-1451, 1972.
2. Grant, L.H., Mirza, S.A., and MacGregor, J.G., "Monte Carlo study of strength of concrete columns," *ACI Journal*, Vol. 75, No.8, 348-58, 1978.
3. Mirza, S.A., and MacGregor, J.G., "Slenderness and strength reliability of reinforced concrete columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 4, 428-438 1989.
4. Frangopol, D.M., Spacone, E., and Iwaki, I., "A new look at reliability of reinforced concrete columns," *Structural Safety*, Vol. 18, No. 2, 123-150, 1996.
5. Lee, T.-H., and Mosalam, K.M., "Probabilistic fiber element modeling of reinforced concrete structures," *Computers and Structures*, Vol. 82, No. 27, 2285-2299, 2004.
6. Chryssanthopoulos, M.K., Dymiotis, C., and Kappos, A.J., "Probabilistic evaluation of behavior factors in EC8-designed R/C frames," *Engineering Structures*, Vol. 22, 1028-1041, 2000.

7. Ghobarah, A., and Aly, N.M., "Seismic reliability assessment of existing reinforced concrete buildings," *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 4, 569-592, 1998.
8. Shinghal, A. and Kiremidjian, A., "Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage," *Journal of Structure Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 12, 1459-1467, 1996.
9. Structural Engineers Association of California (SEAOC), *Vision 2000, Performance-based seismic engineering*, SEAOC, Sacramento, CA., 1995.
10. Porter, K.A., Beck, J.L., and Shaikhutdinov, R.V., "Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables," *Earthquake Spectra*, Vol. 18, No. 4, 719-743, 2002.
11. Baker, J.W., and Cornell, C.A., "Uncertainty specification and propagation for loss estimation using FOSM methods," In Der Kiureghian, Madanat, and Pestana, editors, *Proc. of ninth Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Civil Eng., ICASP9, San Francisco, California, USA, July 6-9, 2003*, Roteerdam, Millpress, 973-980 2003.
12. Melchers, R.E., *Structural reliability analysis and prediction*, Wiley, Chichester, 1999.
13. Lee, T.-H., and Mosalam, K.M., "Seismic demand sensitivity of reinforced concrete shear-wall building using FOSM method," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 14, 1719-1736, 2005.
14. Gharaibeh, E.S., Frangopol, D.M., and Onoufriou, T., "Reliability-based importance assessment of structural members with applications to complex structures," *Computers and Structures*, Vol. 80, No. 12, 1113-1131, 2002.
15. McKenna, F., and Fenves, G.L., "*OpenSees Manual*," Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, <http://opensees.berkeley.edu>, 2001.
16. Vecchio, F.J., and Emara, E.B., "Shear deformations in reinforced concrete frames," *Structural Journal, ACI*, Vol. 89, No. 1, 46-56, 1992.
17. Mirza, S.A., Hatzinikolas, M., and MacGregor, J.G., "Statistical descriptions of strength of concrete," *Journal of Structural Division, ASCE*, 105 (ST6), 1021-1037, 1979.