

# 깊은보-내부기둥 접합부의 비선형해석을 위한 전산플랫폼

## A Computational Platform for Nonlinear Analysis of Deep Beam-and-Interior Column Joints

김 태 훈†      고 동 우\*      이 한 선\*\*      신 현 목\*\*\*  
Kim, Tae-Hoon      Ko, Dong-Woo      Lee, Han-Seon      Shin, Hyun-Mock

### 요 지

이 연구에서는 깊은보-내부기둥 접합부의 내진성능평가를 위한 비선형 유한요소해석 기법을 제시하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 깊은보-내부기둥 접합부의 강도, 연성도 등 거동특성을 파악하기 위한 반복횡하중 실험을 수행하였다. 실험의 변수로는 축력과 횡방향 철근량을 정하였다. 이 연구에서는 깊은보-내부기둥 접합부의 내진성능평가를 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**핵심용어** : 깊은보-내부기둥 접합부, 내진성능평가, 거동특성, 반복횡하중, 해석기법

### Abstract

This paper presents a nonlinear finite element analysis procedure for the seismic performance assessment of deep beam-and-interior column joints. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Horizontal cyclic load tests were conducted to estimate the strength, ductility, and behavioral characteristics of deep beam-and-interior column joints. Experimental parameters are axial forces and amount of transverse reinforcement. The proposed numerical method for the seismic performance assessment of deep beam-and-interior column joints is verified by comparison of its results with reliable experimental results.

**Keywords** : deep beam-and-interior column joints, seismic performance assessment, behavior characteristics, horizontal cyclic load, numerical method

### 1. 서 론

최근 들어 그리스, 터키, 대만 등에서는 큰 지진으로 인하여 수많은 인명피해 뿐만 아니라 건축물, 사회기간시설물 등에도 심각한 피해를 입었다. 이로부터 주요 구조물의 내진성능의 확보가 인명 및 재산을 지진으로부터 보호하기 위하여 얼마나 중요한지를 다시 한번 확인할 수 있었다.

우리나라에서는 지진에 대한 계기관측을 시작한 이래, 홍성지진, 영월지진 등 중소규모의 지진이 빈번히 관측되고 있으며, 이에 따라 한반도도 지진에 대해 안전한 곳이 아니라 는 각성과 함께 지진에 대한 피해를 줄일 수 있는 방안을 논

의하게 되었으며 신축 또는 기존 구조물의 지진거동 파악 및 내진설계 등에 많은 노력과 비용이 투입되고 있다.

최근 우리나라에서 많이 건설되고 있는 상부 벽식-하부 골조로 이루어진 형태의 건물은 대형 지진이 발생할 경우, 모멘트 저항골조나 벽식 구조와 달리 하부골조에 손상이 집중되어 하부 연약층에서 파괴가 발생하고 이는 건물전체의 붕괴로 이어질 수 있기 때문에, 지진 발생 시 대형 피해가 우려되는 대표적인 예라 할 수 있다(김현수 등, 2003; 고동우 등, 2006; 고현 등, 2009).

이 연구는 비선형 유한요소해석을 이용하여 이러한 상부 벽식-하부 골조로 이루어진 건물의 중요한 내진특성을 나타내는

† 책임저자, 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기반기술연구소 수석연구원  
Tel: 02-2145-6485 ; Fax: 02-2145-6500  
E-mail: th1970.kim@samsung.com

\* 제주대학교 건축학부 조교수

\*\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

깊은보-내부기둥 접합부의 지진거동을 파악하고 그 내진성능을 평가하는데 목적이 있다. 또한 횡방향 철근량만을 고려한 기존의 ACI 중진지역내진상세(ACI, 1995)에 의한 방법과 축하중과 연성의 영향 등을 고려하여 횡방향 철근을 산정하는 Sheikh가 제시한 식(1997)에 따라 설계된 내부기둥의 거동 특성 차이를 규명하여 중약진 지진지역에서의 합리적이면서 경제적인 내진설계법의 개발을 위한 자료를 제공하고자 한다.

철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달 효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램(Kim 등, 2003; 2005; 2007; 2009)을 이용하여 깊은보-내부기둥 접합부의 거동특성을 파악하고자 한다.

이 연구에서는 다자유도계 구조물의 적용에 한계를 보일 수 있는 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM) (ATC, 1996; 송종걸 등, 2008)의 단점을 보완한 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법(Kim 등, 2005; 2007)을 확장하여 깊은보-내부기둥 접합부의 내진성능을 해석적으로 평가하고자 한다.

## 2. 전산플랫폼 RCAHEST

### 2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근으로 구성되는 복합재료이며, 비선형 재료모델은 이들 각 구성 재료가 중첩된 것으로 표현할 수 있는데 각각의 해석모델은 콘크리트와의 부착특성을 고려하여 개발된 것이라야 한다. 이러한 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델(Kim 등, 2003; 2005; 2007; 2009)을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제1균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력상태에 대한 탄소성과괴모델의 기본개념에 의해서 표현된다. 균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다(그림 1).

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최

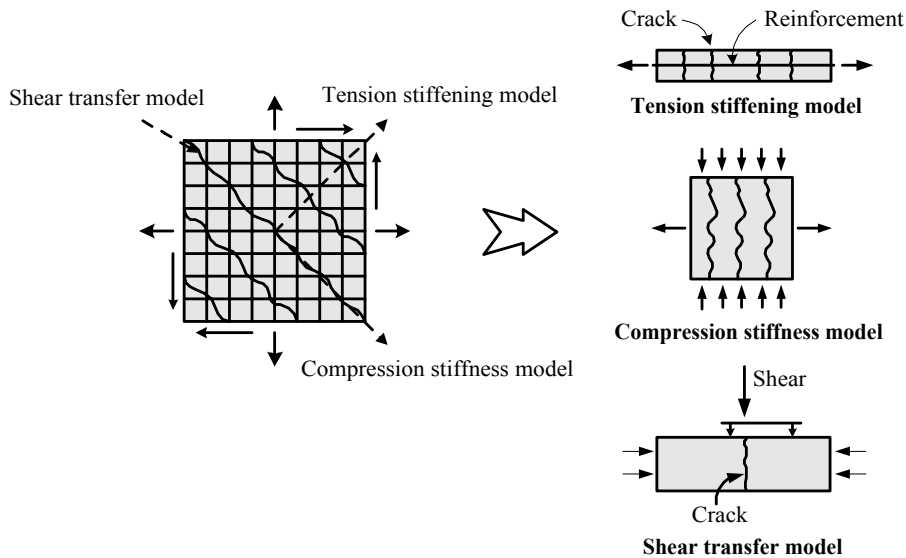


그림 1 균열발생후 콘크리트의 구성모델

초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다(그림 2).

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다준다. 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 이 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등(1988)의 제안모델을 채택하였다(Kim 등, 2003).

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등(1971)에 의해 제안된 해석모델을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다(Kim 등, 2005).

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한

고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식(Mander 등, 1994)을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등(1982)의 제안식을 수정하여 사용하였다.

### 2.2 전산플랫폼의 작성

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등(Kim 등, 2003; 2005; 2007; 2009)을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2(Taylor, 2000)에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)을 수정하여 사용하였다(그림 3).

### 2.3 비선형해석에 의한 내진성능평가

최근 철근콘크리트 구조물의 설계는 한계상태설계(Limit State Design) 이론을 도입하여 사용하고 있으며, 이를 기본으로 성능기반설계(Performance Based Design) 이론으로 전환하여 한층 선진화되는 과정에 있다. 또한 요구되는 성능기준에 적합한 구조물을 설계하기 위한 기반기술의 개발이 필요시 되고 있다.

성능기반 내진설계는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 차세대 개념의 내진설계 방법이다. 즉 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하

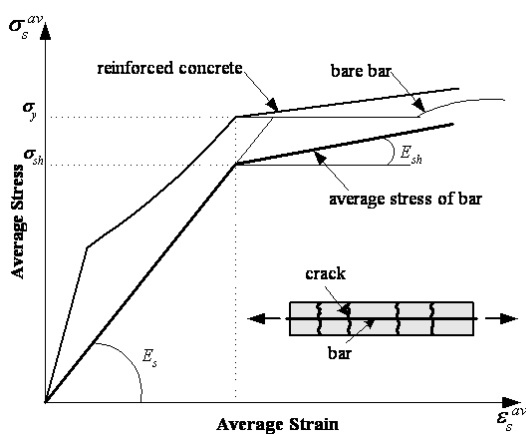


그림 2 철근모델

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Joint element	<b>FEAP</b>		4 nodes RC shell element
Reinforcing or Prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

그림 3 전산플랫폼 RCAHEST

Seismic Hazard Level (지진위험수준)	Structural Performance Level (구조성능수준)			
	Ordinary (일반)	Fully Operational (완전기능)	Delayed Operational (기능수행)	Stability (붕괴방지)
	Minimum Hazard Level (최소위험수준)			
	Intermediate Hazard Level (중간위험수준)			
	Maximum Hazard Level (최대위험수준)			

그림 4 성능기반 내진설계 체계

고, 이를 달성하도록 하는 설계법이다(ATC, 1996).

그림 4는 기존의 연구자들이 제안한 성능기반 내진설계 체계를 나타내고 있으며 성능목표는 지역의 중요도 및 교량의 중요성 등에 따른 위험수준에 의해 결정된다(Lehman 등, 2004). 이러한 내진설계 체계는 교량과 건물의 여러 성능기반 설계규정과 거의 유사하다(ATC, 1996; FEMA, 1997).

이 연구에서는 기존의 지진손상 평가법(Kim 등, 2005; 2007)을 확장하여 표 1과 같이 성능수준과 함께 비교하여 나타냄으로써 철근콘크리트 구조물의 내진성능 평가가 가능하도록 하였다. 완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않으며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

위와 같이 성능기반 내진설계 체계는 손상상태의 정량화가 필수적이며 이는 그림 5와 같이 확장된 지진손상 평가법을

통해서 얻을 수 있다. 손상상태의 정량화는 기존의 연구자들이 제시한 손상지수에 관한 연구결과(Kim 등, 2005; 2007)를 근거로 하고 있으며, 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다.

### 3. 해석 예 및 고찰

#### 3.1 선정된 실험체의 제원

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 6에 나타난 것과 같은 깊은보-내부기둥 접합부(고동우 등, 2006)를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 깊은보-내부기둥 접합부의 비탄성 거동특성을 정량화시킨 실험이기 때문이다.

실험체는 1/2.5 축소모델로 제작되었으며 콘크리트 공시체의 28일 평균압축강도는 33.6MPa이다. 주철근은 SD 40의 D10철근, 횡철근은  $\phi$ 4일반철선과 D5철선을 사용하였으며 평균항복강도는 각각 440MPa, 351MPa, 475MPa이다.

그림 7은 ACI 기준(1995)과 Sheikh 제안식(1997)에 따라 각각 설계된 기둥의 소성힌지 부분의 단면이며 이를 1/2.5로 축소하였다. 설계된 기둥에 대해 상부축력과 횡철근량을 달리한 깊은보-내부기둥으로 이루어진 부분 구조체를 제작한 후 반복횡하중 실험을 수행하여 기둥의 강도, 연성, 그리고 이력특성을 분석하였다. ACI의 방법에 따라 설계한 실험체는 INT A-1과 INT A-2이고, Sheikh가 제안한 방법에 따라 설계한 실험체는 INT S-1과 INT S-2이다. 이때 축력이  $0.3P_0$ 인 실험체는 “-1”, 축력이  $0.2P_0$ 인 실험체는

표 1 성능수준 상세와 지진손상 평가

Performance level	Service	Repair	Damage	
			State	Index
Fully operational	Full service	Limited epoxy injection	Hairline cracks	0.1
Delayed operational	Limited service	Epoxy injection Concrete patching	Open cracks Concrete spalling	0.4
Stability	Not useable	Replacement of damage section	Bar buckling/Fracture Core crushing	0.75



그림 5 성능수준과 손상상태를 평가하는 지진손상 평가법

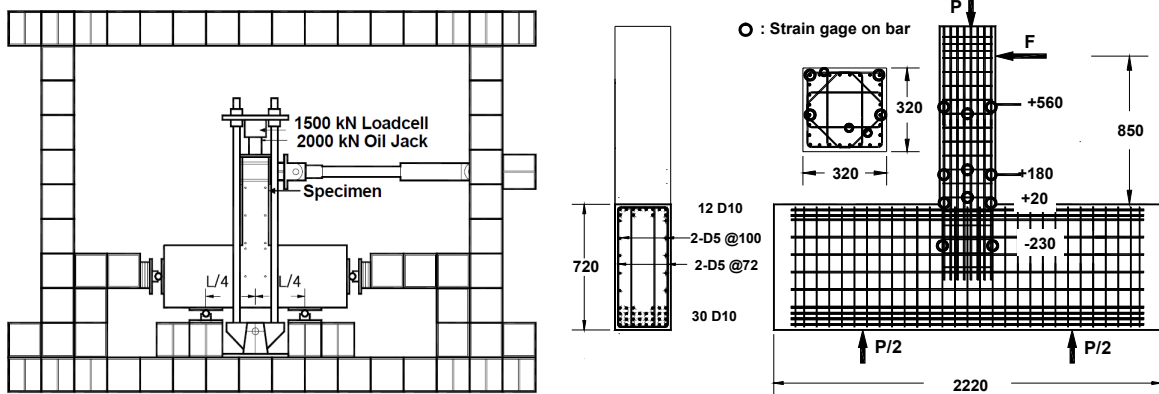


그림 6 깊은보-내부기둥 접합부 실험체

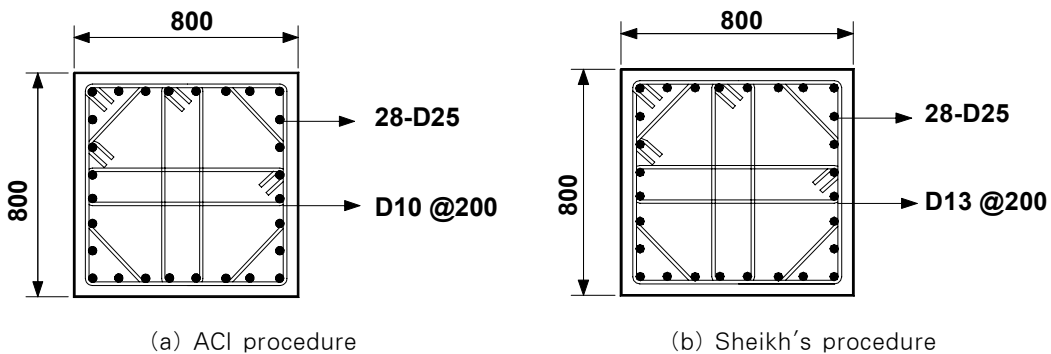


그림 7 기둥의 단면

“-2”로 표시된다.

재하를 축하중을 가력한 후  $\pm 1\text{mm}$ ,  $\pm 2\text{mm}$ ,  $\pm 4\text{mm}$ ,  $\pm 8\text{mm}$  ~  $\pm 32\text{mm}$  까지 각 단계에서 2회씩 반복하는 변위제어 방식으로 가력한 후 최종단계에서는 기둥의 주철근이 완전히 좌굴되어 피복이 박리될 때까지 가력하였다.

### 3.2 유한요소해석을 위한 요소분할

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 그림 8과 같이 철근 콘크리트요소 50개, 탄성요소 2개, 그리고 경계면요소 4개로 총 56개의 요소로 분할하였다. 철근콘크리트요소의 경우에는 8절점을 갖는 등매개요소로서 3점 가우스 적분을 적용하였고, 가력점과 지지점에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한 깊은 보와 내부기둥의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속 변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다.

이산균열개념에 근거한 경계면 요소는 기본적으로 요소의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 전술한 철근과 콘크리트의 재료모델을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 요소의 응력-변형률

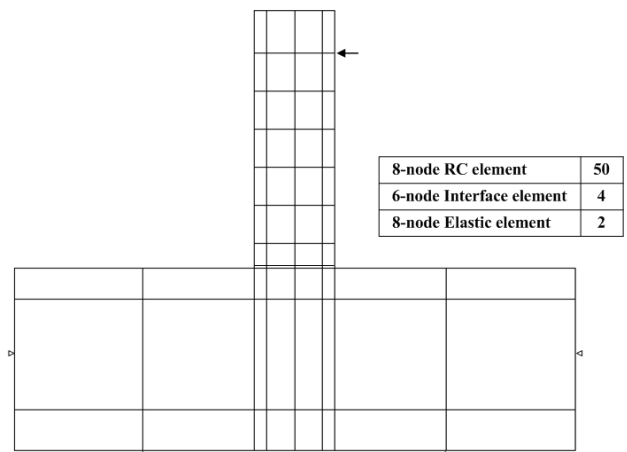


그림 8 유한요소모델

관계는 압축응력-압축변위 및 전단응력-전단미끄러짐의 관계로 정의된다. 이때 경계면 요소의 총 전단변위는 접합면에서의 미끄러짐과 국소적인 응력집중의 영향으로 인한 변위의 합으로 표현하였다(Kim 등, 2003; 2005). 그리고 사용된 유한요소망은 일반 탄성해석과의 수렴성 시험(convergence test)결과 형상비(aspect ratio)에 의한 영향은 1.0%미만이었으며, 이는 콘크리트구조의 비선형해석에서 예상되는 오차에 비하여 매우 작은 것으로 나타나 그 타당성이 검증되었다.

### 3.3 해석결과

그림 9~그림 12는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소 해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

일반적인 실험체의 파괴형상은 실험과 해석결과 모두 먼저 수평균열이 발생하고 다음으로 수평균열 주위로 미세한 수직 균열이 발생하였다. 상부 변위가 더욱 커지면서 최초로 발생한 수평균열이 사방향으로 발전하게 되며, 이 단계에서부터 수직균열이 발생하였다. 이후 하중이 반복되면서 소성힌지부에서 콘크리트 피복의 탈락이 시작되었다. 콘크리트 피복이 탈락이 된 이후에도 상당한 변형능력을 보이다가 노출된 철근의 좌굴과 인장이 반복되면서 주철근이 파단에 이르렀다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과

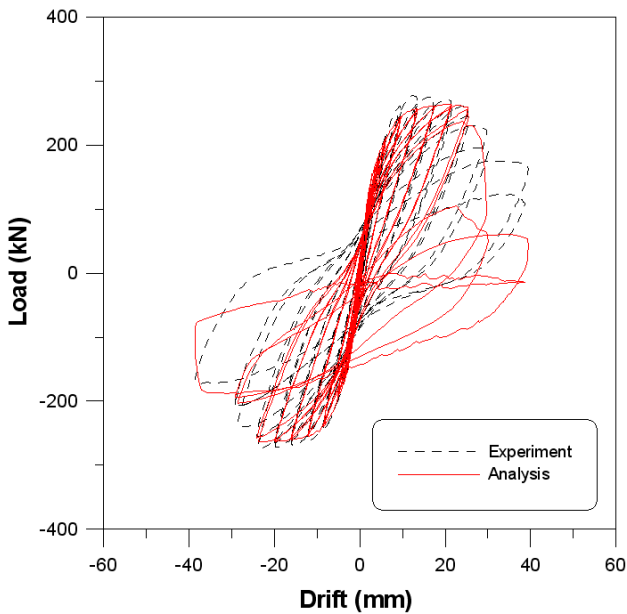


그림 9 실험체 INT A-1의 하중-변위 곡선

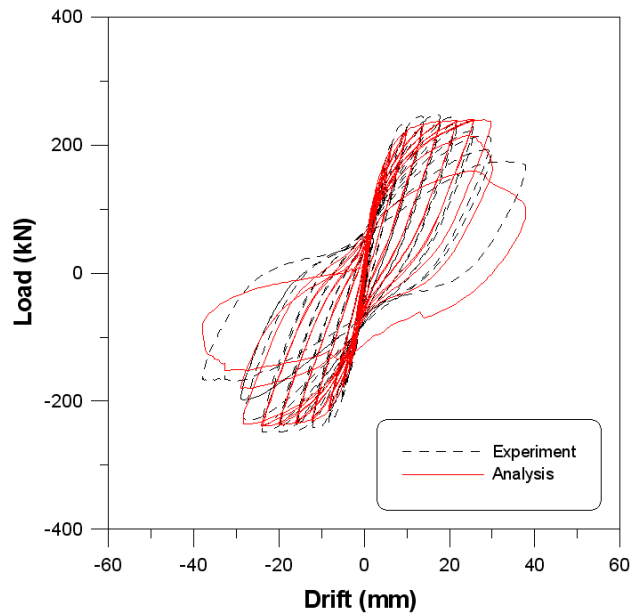


그림 10 실험체 INT A-2의 하중-변위 곡선

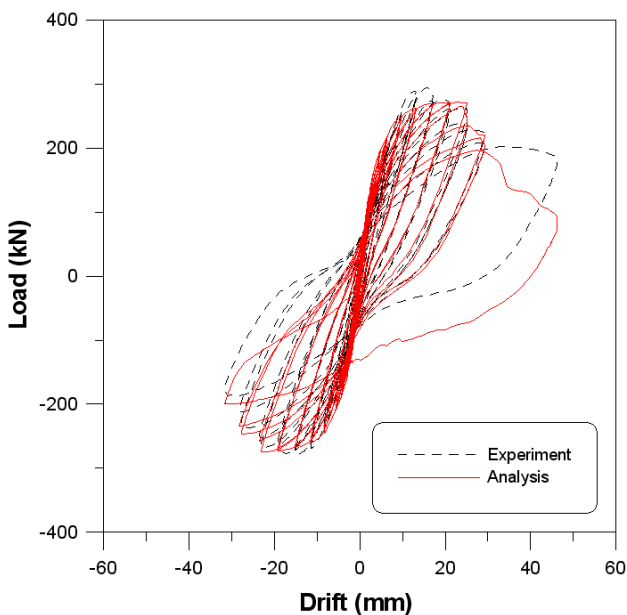


그림 11 실험체 INT S-1의 하중-변위 곡선

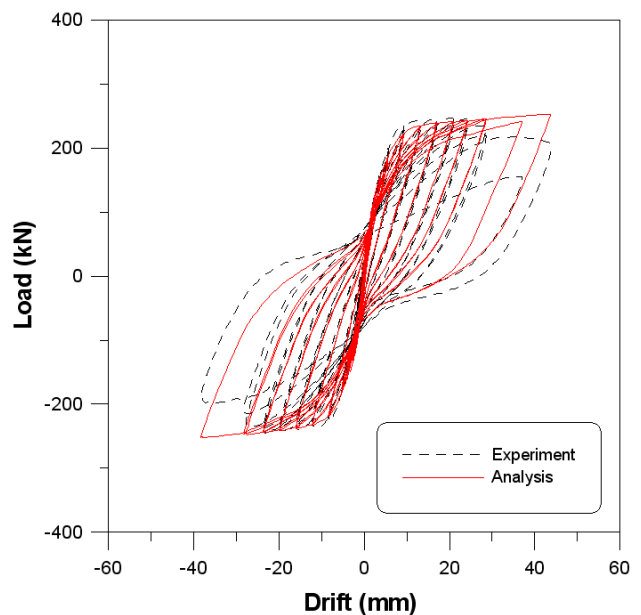


그림 12 실험체 INT S-2의 하중-변위 곡선

함께 비교하여 표 2에 정리하였다. 이 표에서 변위연성도는 그림 13에서 보듯이 Sheikh(1997)가 적용한 방법을 사용하였다. 즉, 최대하중이 0.8배일 때 변위와 초기하중이 유지되어 최대하중에 도달하였을 때 변위의 비를 변위연성도로 정의하였다.

실험 및 해석결과 모두 Sheikh의 제안식에 따라 설계한 경우 최대강도와 변위연성도는 ACI 방법에 따라 설계한 기둥보다 증가하였으며, 두 가지 설계법 모두 축하중이 증가할 경우 최대강도 이후 강도감소현상이 커지면서 연성도 감소하였다. 이러한 결과로부터 기둥에 작용하는 축력이 기둥의 연성과 강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 1.04와 0.04로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 안전측으로 평가하고 있으며 변동계수가 0.04에 불과하여 깊은보-내부기둥 접합부의 비탄성 거동특성을 정확히 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.87과 0.08로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과 보다 다소 크게 평가하고 있으나 변동계수가 0.08에 불과하여 깊은보-내부기둥 접합부의 지진거동을 비교적 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

표 2 실험 및 해석결과의 비교

Specimen	Experiment		Analysis		(1)/(3)	(2)/(4)
	$V_{max}$ kN (1)	$\mu$ (2)	$V_{max}$ kN (3)	$\mu$ (4)		
INT A-1	277.0	5.5	263.8	6.6	1.05	0.83
INT A-2	247.6	5.7	240.1	6.8	1.03	0.84
INT S-1	294.4	5.6	271.6	6.8	1.08	0.82
INT S-2	247.2	9.7	252.9	10.0	0.98	0.97
Mean					1.04	0.87
COV					0.04	0.08

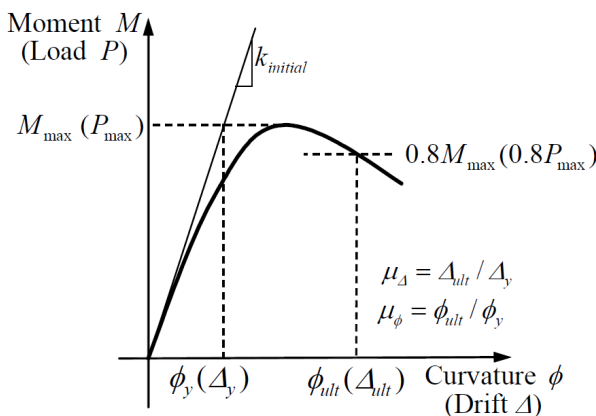


그림 13 연성도 산출

### 3.4 내진성능평가

표 3과 4는 하중재하에 따른 손상지수의 변화를 성능수준과 함께 비교·검토하여 깊은보-내부기둥 접합부 실험체의 내진성능평가를 나타내고 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 지진하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 대체적으로 잘 일치하고 있다(그림 9~그림 12).

하중재하에 따른 손상지수의 변화를 나타내는 그림 14는 이 해석의 매개변수로 사용한 축력에 따른 거동특성을 비교한 것으로서 축력의 감소에 따라 손상이 지연되고 있음을 잘 나타내고 있다. 해석결과의 단계별 손상지수 값을 확인해보면 Drift 4mm에서 INT A-1은 0.09, INT A-2는 0.08이고 Drift 16mm에서 INT A-1은 0.22, INT A-2는 0.24이고 Drift 28mm에서 INT A-1은 0.91, INT A-2는 0.50이다. 그리고 Drift 40mm에서는 INT A-1은 0.99,

표 3 실험체 A series의 내진성능평가

Drift (mm)	실험체 INT A-1		실험체 INT A-2	
	Damage Index	Performance Level	Damage Index	Performance Level
1.0	0.00	Fully operational	0.01	Fully operational
2.0	0.06	Fully operational	0.06	Fully operational
4.0	0.09	Fully operational	0.08	Fully operational
8.0	0.09	Fully operational	0.09	Fully operational
12.0	0.18	Delayed operational	0.20	Delayed operational
16.0	0.22	Delayed operational	0.24	Delayed operational
20.0	0.30	Delayed operational	0.33	Delayed operational
24.0	0.32	Delayed operational	0.38	Delayed operational
28.0	0.91	-	0.50	Stability
32.0	0.99	-	0.99	-
40.0	0.99	-	0.99	-

표 4 실험체 S series의 내진성능평가

Drift (mm)	실험체 INT S-1		실험체 INT S-2	
	Damage Index	Performance Level	Damage Index	Performance Level
1.0	0.00	Fully operational	0.01	Fully operational
2.0	0.05	Fully operational	0.04	Fully operational
4.0	0.07	Fully operational	0.05	Fully operational
8.0	0.08	Fully operational	0.07	Fully operational
12.0	0.13	Delayed operational	0.13	Delayed operational
16.0	0.18	Delayed operational	0.17	Delayed operational
20.0	0.29	Delayed operational	0.21	Delayed operational
24.0	0.47	Stability	0.26	Delayed operational
28.0	0.97	-	0.32	Delayed operational
32.0	0.99	-	0.37	Delayed operational
40.0	0.99	-	0.51	Stability

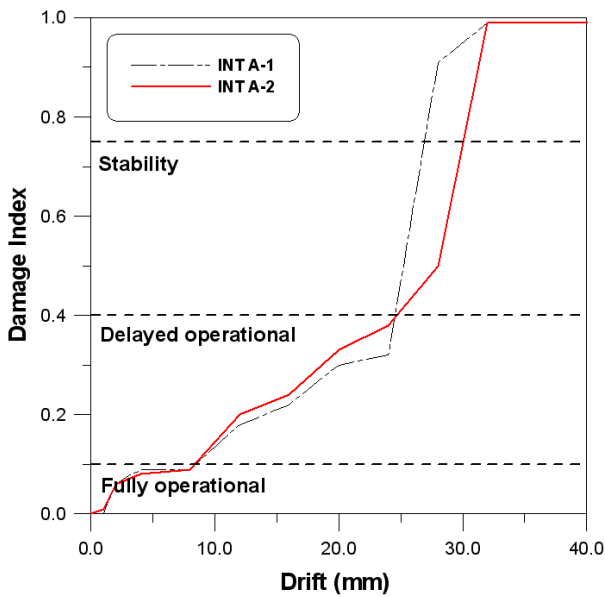


그림 14 실험체 A series의 내진성능평가

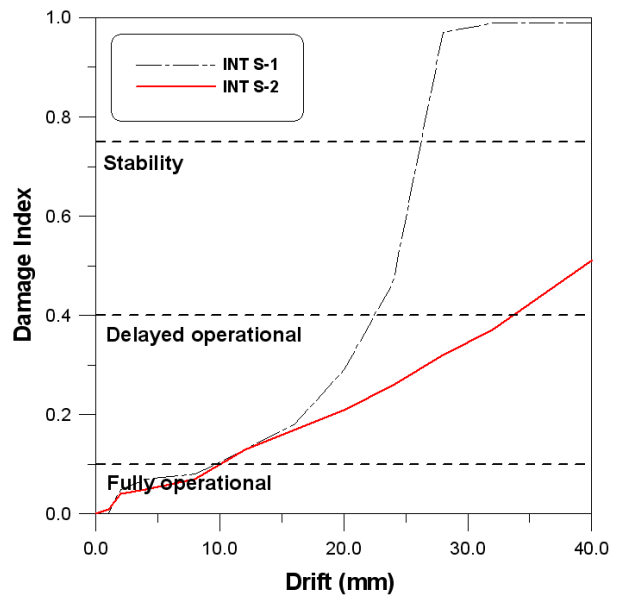
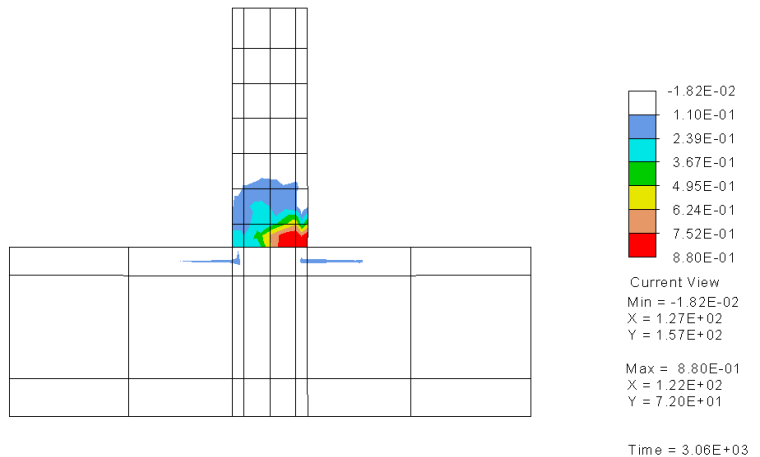


그림 15 실험체 S series의 내진성능평가



(a) Experiment



(b) Analysis

그림 16 실험체 INT S-1의 하중-변위 곡선

INT A-2는 0.99이다. 즉 축력이  $0.3P_0$ 인 INT A-1보다 축력이  $0.2P_0$ 인 INT A-2가 동일한 하중단계에서 손상이 지연되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 15는 Sheikh가 제안한 방법에 따라 설계한 실험체의 축력에 따른 거동특성을 비교한 것으로서 축력의 감소에 따라 손상이 지연되고 있음을 잘 나타내고 있다. 해석결과의 단계별 손상지수 값을 확인해 보면 Drift 4mm에서 INT S-1은 0.07, INT S-2는 0.05이고 Drift 16mm에서 INT S-1은 0.18, INT S-2는 0.17이고 Drift 28mm에서 INT S-1은 0.97, INT S-2는 0.32이다. 그리고 Drift 40mm에서는 INT S-1은 0.99, INT S-2는 0.51이다. 즉 축력이  $0.3P_0$ 인 INT S-1보다 축력이  $0.2P_0$ 인 INT S-2가 동일한 하중단계에서 손상이 지연되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 16은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도와 실험결과를 비교한 예로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성힌지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 깊은보-내부기둥 접합부의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중과 같은 반복하중에 의한 깊은보-내부기둥 접합부의 내진성능을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 신설 또는 기존 깊은보-내부기둥 접합부의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.



#### 4. 결 론

이 연구에서는 깊은보-내부기둥 접합부의 비선형 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 깊은보-내부기둥 접합부 실험체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 이 연구에서 제안한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 1.04와 0.04이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.87와 0.08로서, 실험결과를 비교적 잘 평가하고 있음이 확인되었다.
- 2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 깊은보-내부기둥 접합부의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으며, 실험결과에 나타난 균열 및 변형결과와 전반적으로 일치하는 손상지수도를 보여주고 있다.
- 3) 지진하중을 받는 깊은보-내부기둥 접합부의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 상부 벽식-하부 골조로 이루어진 건물의 중요한 내진특성을 나타내는 깊은보-내부기둥 접합부의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
- 4) 현행 내진설계 규정에 만족하지 않는 기존의 깊은보-내부기둥 접합부에 대한 보수·보강의 판단 등에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 성능기반 내진설계 개념에 접목하여 비선형 유한요소 해석을 이용한 합리적이고 경제성있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

고동우, 이한선 (2006) 깊은보-내부기둥 접합부의 반복횡하중 실험, 대한건축학회 논문집, 22(11), pp.43~50.

고현, 박용구, 이동근 (2009) 비내력벽을 가진 RC모멘트저항 골조의 취약도 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 22(4), pp.355~362.

김현수, 이동근 (2003) 필로티가 있는 전단벽의 효율적인 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 16(4), pp.387~400.

송종걸, 장동휘, 김학수, 정영화 (2008) 철근콘크리트 벽체구조물에 대한 등가단자유도 방법 및 등가 감쇠비 산정방법에 따른 역량스펙트럼해석, 한국전산구조공학회 논문집, 21(2), pp.169~188.

ACI 318-95 (1995) Building Code Requirement for Structural Concrete.

Applied Technology Council (1996) Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *ATC-40 Report*, Redwood City, California.

Federal Emergency Management Agency (1997) NEHRP Guidelines of the Seismic Rehabilitation of Buildings, *FEMA 273*, Washington, D. C.

Kakuta, Y., Okamura, H., Kohno, M. (1982) New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan, *IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures*, Lausanne, pp.51~58.

Kent, D.C., Park, R. (1971) Flexural Members with Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 97(7), pp.1969~1990.

Kim, T.H., Hong, H.K., Chung, Y.S., Shin, H.M. (2009) Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns with Lap Splices using Shaking Table Tests, *Magazine of Concrete Research*, 61(9), pp.705~719.

Kim, T.H., Kim, Y.J., Kang, H.T., Shin, H.M. (2007) Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns using a Damage Index, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(7), pp.843~855.

Kim, T.H., Lee, K.M., Chung, Y.S., Shin, H.M. (2005) Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns, *Engineering Structures*, 27(4), pp.576~592.

Kim, T.H., Lee, K.M., Yoon, C.Y., Shin, H.M. (2003) Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(9), pp.1199~1207.

Lehman, D., Moehle, J., Mahin, S., Calderone, A., Henry, L. (2004) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 130(6), pp.869~879.

Mander, J.B., Panthaki, F.D., Kasalanati, K. (1994) Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 6(4), pp.453~468.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(8), pp.1804~1826.

Sheikh, S.A., Khoury, S.S. (1997) A Performance-

Based Approach for the Design of Confining in tie Columns, *ACI Structural Journal*, 94(4), pp.421~431.

**Taylor, R.L.** (2000) FEAP-A Finite Element Analysis Program, Version 7.2 Users Manual, Volume 1 and Volume 2.

- 논문접수일 2010년 11월 19일
- 논문심사일 2010년 11월 22일
- 게재확정일 2011년 1월 24일