

## 철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 보-기둥 접합부의 해석모델링 기법

### Analytical Modeling Method of Beam-Column Joints for the Inelastic Analysis of R/C Structures

장극관\*                      황정현\*\*                      양승호\*\*\*  
Chang, Kug Kwan              Hwang, Jung Hyun              Yang, Sung Ho

---

#### ABSTRACT

The purpose of this paper to describe an analytical model that is capable of reproducing the hysteretic behavior of beam-column joints under cyclic loading and to suggest the variable of hysteretic model for the inelastic analysis of R/C frame structures To do this quasi-static analysis using IDARC program was performed for the beam-column joints. The effort to obtain the result of analysis similar to those of experiment was made by determining the value for hysteretic parameters representing stiffness degradation, strength deterioration and pinching effect. The accuracy and reliability of the proposed analytical model was demonstrated by comparison of load-displacement relation, maximum strength, stiffness degradation and energy dissipation.

---

#### 1. 서론

구조물에 지진과 같은 강한 횡하중이 작용할 때 구조물의 일부 부재는 항복상태에 도달하고 부재의 설계상태에 따라서는 붕괴되는 경우도 발생한다. 따라서 구조물이 강진 상태에서도 안정적인 비탄성 거동을 보이도록 구조물은 적절한 강도와 연성을 확보하는 것이 내진설계에 필수적이다. 특히 철근콘크리트 구조물은 지반운동으로 인해 구조물에 입력된 에너지에 대하여 집중 취성파괴가 일어나지 않게 하고 점진적으로 구조물 전체로 분산시키며 균등한 에너지소산을 유도하는 것이 바람직하다. 설계 개념의 변화에 따라 구조물의 비탄성 영역에서의 거동특성 및 손상정도 파악의 중요성은 증대되고 있으며 구조물의 설계시 내진에 관련된 시방서들이 비선형 동적해석에 의한 내진 성능평가를 요구하는 방향으로 개정되어 가고 있다.

---

\* 정희원, 서울산업대학교 건축공학과 부교수  
\*\* 서울산업대학교 건축공학과 연구원  
\*\*\* 서울산업대학교 건축공학과 석사과정

구조물의 전체 거동은 각 부분 부재의 기여도의 합으로 표현되기 때문에 정확한 구조물의 응답을 얻기 위해서는 부재차원의 신뢰성 있는 이력모델을 사용하는 것이 매우 중요하다. 부재 차원에서 이력 모델의 특성을 검토하기 위한 해석적인 방법은 미시적 해석방법인 유한요소 해석보다는 부재단위의 거동을 바탕으로 한 거시적 모델을 사용하는 해석법이 바람직하며 현재 구조물의 고층화에 의한 고강도 콘크리트의 사용은 일반화되고 있는 실정인데 반하여 이력모델의 개발은 일반강도 콘크리트를 사용한 부재에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 현재 보-기둥 접합부의 거동을 해석적으로 구하기 위해서는 기존의 보 부재의 이력모델이 고려되어 있는 비선형 해석프로그램, 즉 DRAIN 또는 IDARC 프로그램이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 기존의 프로그램으로 골조구조물의 비선형해석을 수행할 때 보-기둥 접합부의 전단변형을 고려하기가 쉽지 않고 또한 보-기둥 접합부를 해석하기 위하여 부분 구조체를 모델링하는데도 상당한 제약이 있다. 예를 들면 입력하중은 기둥의 절점에서 수평방향으로만 작용할 수 있기 때문에 보에 가력하중을 작용시키는 보편적인 보-기둥 접합부 실험상태를 해석하기가 어렵고 보와 기둥을 회전시켜 적용할 때에는 기둥으로 치환된 보의 비대칭 철근배근을 고려할 수 없기 때문에 신뢰성 있는 해석결과를 기대하기 어렵다. 따라서 기존의 비탄성 해석프로그램으로 보-기둥 접합부 부재의 이력거동을 재현하는 데 실제적으로 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 철근 콘크리트 건물의 거시적 비선형거동을 해석할 수 있는 IDARC 프로그램을 사용하여 보-기둥 접합부 부재의 비선형 이력거동을 효과적으로 얻을 수 있는 해석모델링 방법을 제시하고 또한 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 이력모델에서의 물리적인 변수값을 기존의 실험값<sup>(1)(2)</sup>을 바탕으로 하여 고강도 철근콘크리트 골조의 비선형해석에 적용 가능한 신뢰성 있는 이력모델을 제안하고자 한다.

## 2. 해석모델

### 2.1 해석대상 구조물

해석대상 구조물인 보-기둥 접합부의 실험체는 실제 구조물에서 변곡점이 재현되는 부분인 기둥 및 보 단부에 힌지를 설치하고 기둥에 가해지는 외력을 보의 변곡점에 치환하여 반복의 수직력으로 가력하는 방식으로 실험이 수행되었다. 실험체의 형상 및 배근상황은 그림 1. 및 표 1.과 같다.

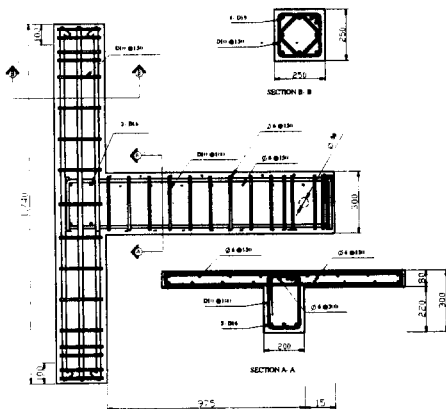


표 1. 실험체 형상 및 배근상황

실험체명	보 (200X300mm)		기둥 (250X250mm)		슬래브 (80mm)
	주근	전단 보강근	주근	휨 보강근	
HBC	4-D16 (TOP)	D10	8-D19	D10	Ø6
HBCBS	3-D16 (BOT)	Ø100		Ø150	Ø150

그림 1. 실험체 단면형상 및 배근상세 (unit : mm)

## 2.2 재료모델

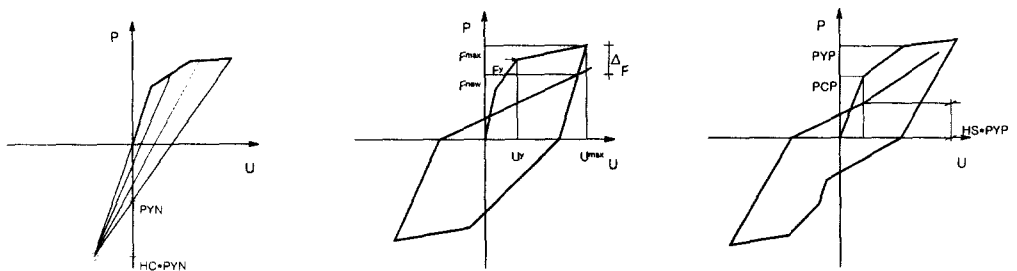
콘크리트 및 철근의 재료 모델은 재료실험을 통하여 얻은 값을 해석값에 적용하였다. 콘크리트 모델은 횡구속에 의한 압축강도 증진 및 압축변형율의 증가를 고려하는 Park, Priestley and Gill Model의 횡구속 콘크리트 응력-변형도 곡선을 사용하였고 철근은 변형경화에 따른 철근응력의 상승을 고려할 수 있는 삼선형(Trilinear)모델을 사용하였다. 표 2.는 해석에 사용된 재료의 특성값을 나타낸다.

표 2. 해석에 적용된 재료 특성값

콘크리트		철근	
최대압축강도(FC)	640 kg/cm <sup>2</sup>	항복강도(FS)	4550 kg/cm <sup>2</sup>
탄성계수(EC)	2.98×10 <sup>9</sup> kg/cm <sup>2</sup>	극한강도(FSU)	1.4×FS
최대압축변형율(EPSO)	0.2 %	탄성계수(ES)	2.0×10 <sup>9</sup> kg/cm <sup>2</sup>
인장균열강도(FT)	0.12×(FC)	변형경화계수(ESH)	0.01×ES
		변형경화시의 변형율(EPSH)	3.0 %

## 2.3 이력모델

이력모델은 부재에 작용하는 하중가력(loading), 하중제거(unloading) 및 하중재하(reloading)의 반복적인 상태를 모멘트-곡률 곡선에서 수치적인 방법으로 각 구간을 정의한 것으로서 부재는 구간별로 규정된 일정한 경로를 따라 거동을 한다. 따라서 이력모델은 부재의 기계적인 특성을 반영하면서 반복적인 하중에 대한 강성저하, 강도감소 및 핀칭현상 등의 물리적인 값이 고려된다. 본 연구에서 사용된 부재의 이력모델은 Park et. al 모델로서 하중-변위 관계, 모멘트-곡률 곡선에서 콘크리트의 균열상태가 고려된 삼선형으로 이루어져 있으며 부재는 재료특성과 단면형상으로 계산되는 각 하중점과 변위점들이 이력곡선의 경로를 따르도록 되어있다. 이력변수는 강성저하, 강도감소, 핀칭 및 슬립 등의 거동 특성을 조절하며 그림 2.는 각 이력변수를 나타내고 있다.



(a) 강성저하(Stiffness Degradation) (b) 강도감소(Stiffness Deterioration) (c) 슬립 및 핀칭(Slip or Pinching)

그림 2. Park et. al 이력모델의 이력변수

## 3. 구조체 해석 모델링

보-기둥 접합부의 실험은 실험조건상 기둥에 작용하는 외력을 보에 작용하는 수직의 반복하중으로 대체하여 적용하는 것이 일반적이다. 비탄성해석 프로그램 IDARC를 사용하여 보-기둥 접합부 실험체를 해석하는데 있어 프로그램 사용상의 제약을 피하면서 실험값과 비교 가능한 해석모델을 개발하고

각 해석모델의 한계를 규명하기 위해서 HBC 구조체의 실험값과 각 해석모델링을 사용한 해석값을 비교 분석하였다.

### 3.1 치환모델

IDARC 프로그램으로는 수평부재인 보에 반복 수직하중을 적용할 수 없기 때문에 그림 3.과 같이 기둥은 보로, 보는 기둥으로 치환하여 모델링하여 치환된 보에 사이클하중을 가할 수 있다. 보로 치환된 기둥의 양 끝단은 실험조건과 같은 지지상태가 되도록 힌지로 모델링 한다.

### 3.2 라멘모델

그림 4.와 같이 최상단 보는 수평하중을 전달해 주는 강체로서 설계하고 보에 작용한 수평하중에 의해 기둥에 모멘트가 발생하지 않도록 최상단 보에 연결되는 기둥상부에 힌지상태로 모델링 한다. 점선 내부 부분이 실험체로서 이 모델은 같은 조건의 실험체가 마주보고 있는 형상으로 모델링 된다. 실험체의 하부 기둥의 끝단이 모멘트가 영(zero)값을 이룰 때 Beam NO.1 중앙부에서 변곡점을 이루는 복곡율이 발생하여 실험조건을 만족하게 된다. Column NO.1과 Column NO.2의 길이를 조절하면서 반복 해석하여 실험체 기둥 끝단의 모멘트 값이 영(zero)에 가까운 근사값을 찾는다.

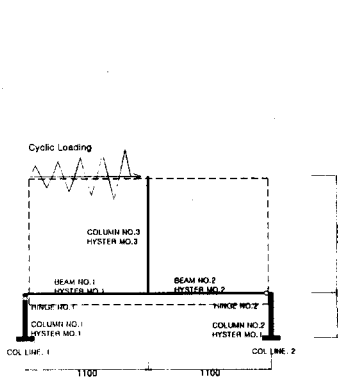


그림 3. 치환모델

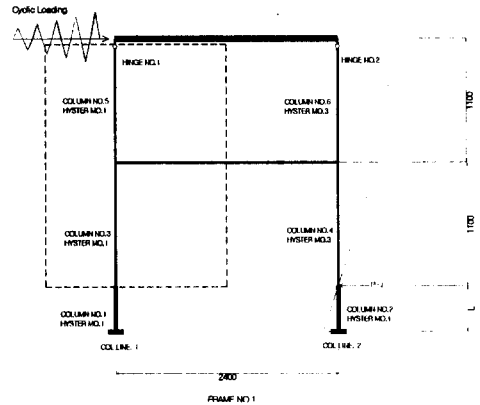


그림 4. 라멘모델

### 3.3 수정모델

앞선 모델들의 결점을 보완하고 보-기둥 접합부 실험체를 해석할 수 있는 모델로서 이 모델의 형상은 실험체의 형태에 따라 그림 5., 그림 6.과 같이 모델링 할 수 있다. 점선안에 있는 실험체를 제외한 나머지 구조부재의 연결을 전체 강성매트릭스에서 오류를 일으키지 않도록 계획적으로 힌지를 배치한다. 즉 그림 5.에서와 같이 실험체 부분을 제외한 나머지 부재들의 한쪽 끝단은 힌지로 고려되어 반대편 단에서만 휨 모멘트를 받게된다. 이 모델은 기둥 상단에 가해지는 반복하중의 효과가 보-기둥 접합부에 휨모멘트로 집중되도록 계획적으로 힌지를 배치한 것이다. 또한 실제 건물에서 보-기둥 접합부는 슬래브 및 횡방향 보가 연결되어 있는 것이 일반적이며 이 모델은 슬래브 및 횡방향 보를 고려하는 접합부 모델링도 가능하다. 그림 6.은 횡방향 보가 있는 실험체를 해석하기 위한 모델링으로서 그림 5.의 골조를 가운데 프레임으로 모델링하고 횡방향 보가 연결되는 프레임을 병렬로 모델링하여 접합부의 절점에서 좌우수직방향의 프레임에 횡방향 보를 연결한다. 이때 좌우측에 병렬로 접합되는 프레임의 기둥은 단면을 최소화하고 상부에 힌지를 배치하여 해석시 힘을 받지 못하는 부재로

계획한다.

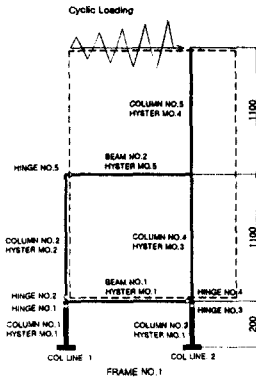


그림 5. 수정모델 (HBC)

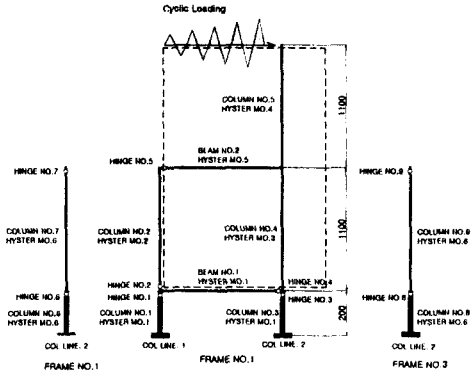


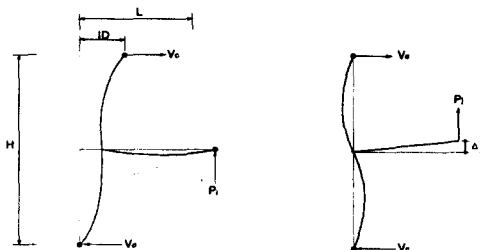
그림 6. 수정모델 (HBCBS)

#### 4. 유사 정적해석(Quasi-Static Analysis)

실험값은 보 끝단에 동적가진기(actuator)로 반복하중을 가력하고 가력점 하부에 변위계를 설치하여 가력하중과 보 끝단의 변위량을 계측한 값을 사용하였다. 치환모델의 경우 보가 기둥으로 치환되었기 때문에 해석시 적용된 수평하중에 대한 기둥의 변위 및 층간변위값을 사용하여 간단히 실험값과 비교할 수 있다. 라멘모델 및 수정모델의 경우 해석시 기둥에 수평하중을 가력하고 보 끝단의 수직변위가 제한된 힌지 조건이므로 실험값과 비교 가능한 값은 수평하중을 가한 층의 층간변위값과 층전단력 값이다. 내부 보-기둥 접합부에 관한 실험체와 이상화된 구조체의 역학적인 관계에 대해서는 수식으로 이미 발표되었으며<sup>(3)</sup> 그림 7.과 같은 본 연구에서 수행한 외부 보-기둥 접합부에 대한 실험체와 이상화된 구조체의 역학적인 관계는 다음과 같이 정리할 수 있다.

층간변형각 ( $R$ ) :  $R = \frac{(d_j)}{2L}$ , 층간변위 ( $ID$ ) :  $ID = R \times H$ , 층전단력 ( $V$ ) :  $V = P_i \times (\frac{L}{H})$

유사 정적해석(Quasi-Static Analysis)은 실험체에 가해진 하중 과 변위 이력에 대한 측정값을 통해 실험체의 가력 조건과 동일하게 모델링할 수 있다. 그림 8.는 실험체에 적용된 변위연성의 이력을 나타내고 있으며 본 연구에서 치환모델은 실험체와 같은 변위이력 값을 적용하였으며 라멘모델 및 수정모델은 실험체의 변위이력 값에  $\frac{H}{2L}$ 의 비율을 곱한 값을 적용하였다.



(a) 접합부의 실제거동 (b) 실험체의 거동  
그림 7. 외부 보-기둥 접합부의 거동

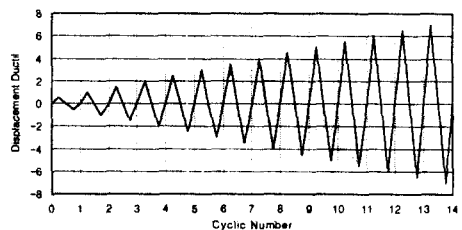
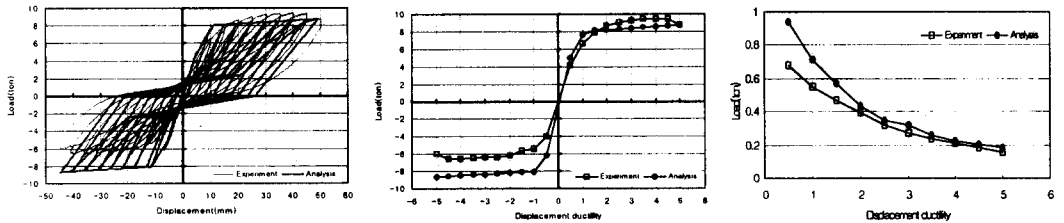


그림 8. 변위연성의 이력

## 5. 해석결과의 분석

### 5.1 치환모델

IDARC에서 기둥의 단면 특성값 입력시 주근은 총 단면적 값으로 입력되고, 보의 특성값은 상하단을 구분하여 각각의 주근의 단면적으로 입력하게 된다. 이 모델은 보를 기둥으로 치환하였기 때문에 보의 상하단 주근의 차이를 고려하지 못한다. 그림 9.(a)의 하중-변위 곡선 및 그림 9.(b)의 강도변화의 비교에서 알 수 있듯이 상하단 주근의 양이 다를 경우 보 부재가 기둥 부재로 입력되기 때문에 정(Positive), 부(Negative)의 최대강도가 대칭으로 재현된다. 따라서 치환 모델은 상하단 주근의 양이 다를 경우에는 그 특성을 정확히 나타낼수 없는 단점이 있다. 그림 9.(c)는 각 변위연성에 대한 강성저하 추이를 나타낸 것으로서 정방향과 부방향의 최대변위점을 연결한 직선의 기울기 값으로 실험값과 해석값을 비교하였다.



(a) 하중-변위 곡선의 비교

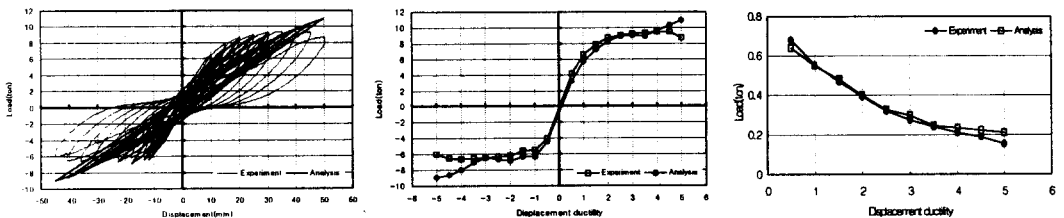
(b) 최대강도의 비교

(c) 강성저하의 비교

그림 9. 치환모델의 실험값과 해석값의 비교 (HBC)

### 5.2 라멘모델

해석 모델의 하부 기둥의 길이를 조절하면서 반복 해석하여 실험체 기둥 끝단의 모멘트 값이 영(zero)에 가까운 근사값을 찾아 실험조건과 같은 조건하에서 해석을 수행하였다. 그림 10.에서 알 수 있듯이 이 모델은 실험체와 비교시 변위연성값  $\mu=3$  이내에서 초기강성 및 강성저하의 추이, 각 변위 단계에서의 최대강도 값의 비교에서 우수한 결과를 보여준다. 그러나  $\mu=3$  이상에서 그림 10.(b)와 같이 정 부방향에서 하중의 급격한 증가를 나타낸다. 해석결과 중 손상정도 및 소성힌지의 발생 위치를 검토한 결과 보가 항복한 이후에는 하부 기둥의 접합부에 파괴가 진행된 것을 알 수 있었다. 이 모델은 제한된 변위연성 이내에서 실험결과와 가장 우수한 결과를 보였으나 파괴의 형상이 실험체 부분외의 구조부재로 전달되는 결과가 발생하며 따라서 최대내력을 나타낸 후부터는 실험결과치와 일치하지 않는 현상이 발생되고 있다.



(a) 하중-변위 곡선의 비교

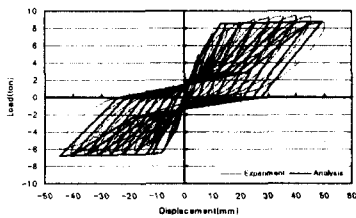
(b) 최대강도의 비교

(c) 강성저하의 비교

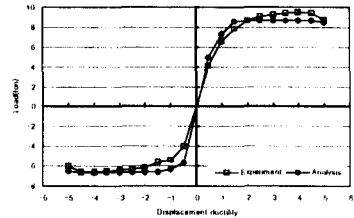
그림 10. 라멘모델의 실험값과 해석값의 비교 (HBC)

### 5.3 수정모델

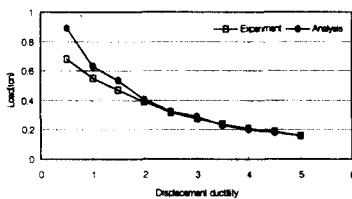
치환모델 및 라멘모델이 가지고 있는 단점을 보완하고 보-기둥 접합부 실험체의 비탄성해석이 가능한 최종적인 모델로서 기둥에 작용되는 반복의 수명하중이 해석 종료시까지 보-기둥 접합부에 휨모멘트로 집중되어 해석모델 계획시 실험체를 제외한 나머지 구조부재로 파괴가 전이되지 않는다. 그림 11. (a)는 HBC 실험체의 결과치와 수정모델의 해석치와의 하중-변위 곡선의 비교를 통한 차이를 볼수 있다. 그림 11. (b) 강도변화의 추이에서 부(-)측 실험값의 초기강도가 해석값에 비해 현저히 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 해석시 정(+)측 초기 1cycle에서 해석결과는 완전탄성 거동을 나타낸 반면 실험체는 이미 균열에 의한 영구변형이 있었기 때문에 초기 1cycle 부(-)측의 최대강도 및 강성에 영향을 준것으로 보인다. 그림 11. (c)는 변위연성( $\mu$ )에 따른 강성값을 나타내는데 해석치의 초기강성이 실험값에 비해 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. 그림 11. (d)는 누적된 에너지소산 양의 비교를 나타내며 만족할 만한 근사값을 보여주고 있다.



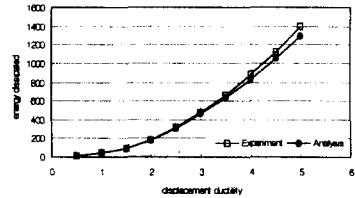
(a) 하중-변위 곡선의 비교



(b) 최대강도의 비교



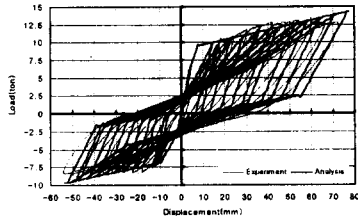
(c) 강성저하의 비교



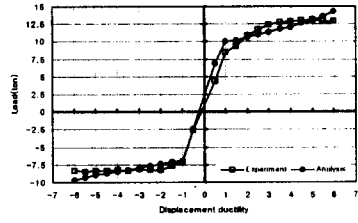
(d) 에너지소산 양의 비교

그림 11. 수정모델의 해석값과 실험값의 비교 (HBC)

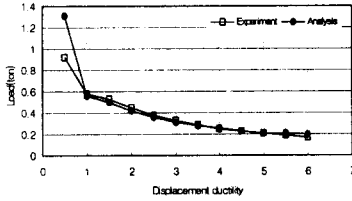
이를 토대로 수정모델을 사용하여 실제 골조에서 보-기둥-슬래브-횡방향 보가 조합된 일반적인 접합부를 나타내는 HBCBS 구조실험체를 수정모델로 모델링 하여 해석을 수행하였으며 해석시 슬래브의 효과는 보를 T형보로 모델링하였다. 횡방향 보는 접합부의 절점에서 좌우 수직방향의 프레임에 횡방향으로 연결된다. 해석시 횡방향 보의 저항성능은 수직강성과 비틀림강성으로 정의되는데 횡방향 보는 해석골조에 수직한 부재로서 병렬로 배열된 골조에 접합되는 특성상 해석 종료시까지 선형으로 거동한다. 즉 수직강성값과 비틀림강성값은 상수로 입력된다. 보의 항복 이후의 구간에서의 접합부의 내력은 횡방향 보의 비틀림강성값의 크기에 따라 달라지며 비틀림강성값은 단면형상에 대한 IDARC의 권장값을 사용하였다. IDARC는 횡방향 보의 해석결과값을 알 수 없기 때문에 해석 후 접합부에 연결된 각 부재의 단부 모멘트의 총합에서 횡방향 보가 분담한 부분을 추출하여 사용하였다. 그림 12.은 하중-변위 곡선, 강도변화, 강성저하, 및 에너지소산 양을 비교하였으며 비교적 정확한 결과를 보이고 있다.



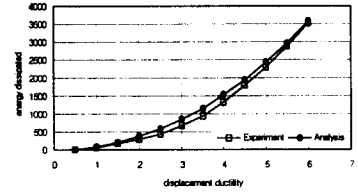
(a) 하중-변위 곡선의 비교



(b) 최대강도의 비교



(c) 강성저하의 비교



(d) 에너지소산 양의 비교

그림 12. 수정모델의 해석값과 실험값의 비교 (HBCBS)

그림 13. 은 HBC 및 HBCBS 구조실험체의 변위연성값에 따른 누적된 에너지소산 양의 실험값에 대한 해석값의 오차율을 나타내고 있다. 하중-변위 관계 곡선에서 폐곡선으로 표현되는 에너지소산 양은 변위연성값이 증가할수록 크게 발생하며 해석결과는 변위연성값  $\mu=0.5$ 인 초기 1cycle에서 탄성상태를 유지하는 관계로 실험결과와 비교시 많은 오차를 나타내고 있으나 초기 변위연성 부근의 에너지소산 면적의 양은 전체 에너지소산 면적에는 미소한 영향을 미친다. HBC의 경우 각 변위연성값에서 10% 내의 오차율을 나타내었으며 누적된 전체 에너지소산 양의 오차는 7.12 %의 값을 나타내었다. HBCBS의 경우 초기 변위연성값에서 상당한 오차를 나타내었으나 누적된 전체 에너지소산 양의 오차는 1.99 %값을 나타내었다. 그림 13.의 오차율은 (해석값/실험값)\*100의 값으로 나타내었다. 실험체 해석을 위한 수정모델의 사용시, 고강도 콘크리트 실험체의 이력거동을 재현하기 위해 실험결과치를 바탕으로 해석결과와 근사한 값을 얻을 수 있도록 이력변수를 조절 하였으며 표 3. 은 IDARC를 사용하여 수정모델을 해석할 때 적용된 이력변수를 나타내고 있다.

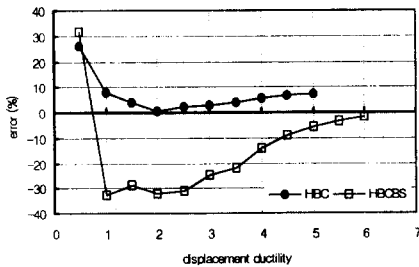


그림 13. 누적 에너지소산 양의 오차율

표 3. 수정모델의 이력변수

실험체	변수	강도감소		핀칭
	$\alpha$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\gamma$
HBC	2	0.1	0.4	0.4
HBCBS	6	0.001	0.001	0.55



## 6. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부를 기존의 비탄성 해석프로그램인 IDARC를 사용하여 보-기둥 접합부의 신뢰성 있는 이력거동을 얻을 수 있는 해석 모델링 기법과 고강도 콘크리트를 사용한 골조의 비탄성해석시에 적용할 수 있는 수정된 Park 이력모델을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 통상적인 보-기둥 접합부 실험방법(기둥에 작용하는 수평의 반복하중을 보단부의 수직하중으로 대체하여 적용)에서의 부재의 거동을 예측하기 위한 예비해석시에 보-기둥 접합부 모델링 방법으로 수정모델을 제안하였다.
- 2) 실험값은 가력하중에 대한 보 단부의 처짐량으로 해석값은 충전단력 또는 보 단부에 작용된 모멘트에 대한 중간변위값으로 비교할 수 있다.
- 3) 변위연성에 의해 누적된 전체 에너지소산 양의 실험결과와 본 연구에서 제안한 수정모델의 해석결과는 HBC는 7.12 %, HBCBS는 1.99 %의 오차율을 보였다.
- 4) 표 3에 나타난 각 실험체별 이력변수는 IDARC에서 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 비탄성해석시 보 및 기둥의 이력변수로 사용하였으며 실험값에 근접하는 신뢰성 있는 이력모델의 변수값을 제안하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초(과제번호:97060201013) 및 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 장극관, 서대원, "일반강도 및 고강도 재료를 사용한 보-기둥 접합부의 지진응답", 한국지진공학회 논문집, 제 3권, 제 4호, 1999. 12, pp 83-94
- 2) 장극관, 서대원, "고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 전단강도", 콘크리트학회지 제 12권 2호, 2000. 4, pp 53-61
- 3) Gilson N. Guimaraes, Michael E. Kreger James O. Jirsa, "Reinforced Concrete Frame Connections Constructed Using High- Strength Materials", University of Texas at Austine, 1989. 8, pp 16-25
- 4) David Key, "Earthquake desing Practice for Buildings", Thomas Telford, 1988, pp 91-131
- 5) Roufaiel, M.S.L. and C. Meyer, "Analytical Modelling of Hysteretic Behaviour of R/C Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 3, 1987.5)
- 6) S.R. UMA and A. MEHER PRASAD, "Analytical Modelling of R/C Beam Coullumn Connections Under Cyclic Loads", 11 WECC, Paper NO.1869, 1996.
- 7) 전상우, "철근콘크리트 골조의 비탄성 해석과 이력거동", 서울대학교 건축학과 대학원, 1998.4, pp 1-89