

# 쌍원형 개구부를 가진 합성보의 이력거동

## Cyclic Behavior of Composite Beams with Double-Circular Web Openings

김 원 기\*  
Kim, Wonki\*

박 노 응\*\*  
Park, Noh Woong\*\*

---

### ABSTRACT

Intentionally weakened girders near the beam-to-column connection lead ductile failures at the weakened points prior to potential brittle failure at the connection points subjected to strong earthquake. Recent research investigated cyclic behavior of composite beams with a rectangular web opening, and find out ductile failure of such beams due to plastic hinge formation of T-section at the four corners of the rectangular opening. But, eventual failures of T-sections are resulted from local buckling of T-section having a narrow stem and a narrow bound of plastic hinge formation. This continuing research proposes double-circular opening instead of rectangular one in order to improve energy dissipation capacity as well as composite beam strength. Experimental test of two specimens was carried out, and its results are compared with those of nonlinear finite element analyses.

---

핵심용어: 합성보, 웨브 개구부, 개구부 형태, 연성도, 에너지소산, 강도, 실험, 비선형해석  
KEY WORDS: composite beam, web opening, opening type, ductility, energy dissipation, strength, experiment, nonlinear analysis

### 1. 서 론

외국에서 기존건물에 발생한 지진피해중에서 보 단부의 최대 모멘트 부위에 발생하는 손상은 취성 파괴를 초래하였다. 이러한 피해를 극소화하기 위한 연구로서 보의 단부 가까이에 있는 부재 단면을 감소하여, 이 감소된 단면에서의 소성힌지를 유도하여 인성파괴의 결과를 초래하는 연구<sup>(1,2)</sup>가 계속되었다. 그 중에서 강재보의 플랜지 부분을 곡선으로 감소시킨 그림 1의 도그본 보(Dogbone Beam)와 플랜지 하단의 웨브에 수평 슬롯을 설치한 그림 2의 슬롯 보(Slotted Beam)는 미국에서 실용화되어 있는 상태이다.

현재 대부분의 강구조건물이 철근콘크리트 슬래브와 강재보의 합성으로 거동하는 합성보로 설계된다. 그러므로 합성보와 같이 복잡한 거동을 하는 부재는 도그본 보와 같은 형태는 적합하지 못하며,

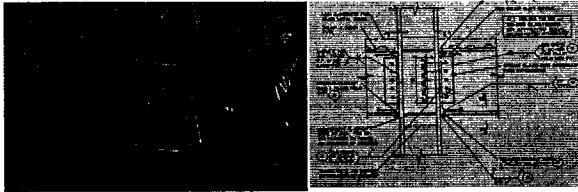
---

\* 호서대학교 제5공학부 건축공학전공, 교수

\*\* 호서대학교 건축학과 석사과정

또한 테크플레이트나 콘크리트 슬래브가 위치하는 부분에 설치되므로 기존의 합성보를 보강하는 방법에도 적합하지 못하다.

개구부를 가진 유공 합성보의 단조하중에 대한 거동에 관한 연구 역시 그 동안 많이 수행되었으며 부재의 공칭강도 산정 설계식<sup>(3,4)</sup>이 이미 제시되었다. 국내에서는 웹 개구부가 상단에 설치된 경우인 상부 유공 합성보의 극한 내력에 관한 연구<sup>(5)</sup>가 이미 시행되어 단조하중에 대한 성능은 우수함이 확인되었다. 또한 반복하중을 받는 합성보에서 합성보의 웹 단면에 개구부를 설치하여 개구부 주변의 소성힌지를 유도하여 인성파괴를 유도하는 실험<sup>(6)</sup>을 하였다.



(a) Dogbone beam (b) Slotted beam

그림 1 외국 연구 사례



그림 2 직사각형 개구부

최근 연구는 그림 2와 같이 웹 중앙에 직사각형 개구부를 가진 합성보의 거동을 조사하였다. 이 연구는 보 단부의 전단력에 의한 2차모멘트의 영향으로 생기는 4개의 부위의 소성모멘트를 이용하여 에너지소산을 확인하였다.

이번 연구는 개구부의 형태를 향상시켜 연성도와 에너지 소산능력을 향상시키며 결국 합성보의 내진성능을 향상시키는데 목적이 있다. 즉 직사각형 개구부 대신에 쌍원형 개구부를 두어 원형 개구부 주변의 소성모멘트를 증가시키고, 원형 개구부 주변의 소성모멘트 영역을 증가시키는데 있다.

## 2. 실험계획 및 실험

웹에 두 개 원형 개구부를 가진 합성보에 대한 반복하중시의 거동을 조사하기 위하여 개구부 간격을 변수로 고려하며, 총 2개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 웹에 두 개 원형 개구부를 설치하여 비렌디일 거동을 이용한 소성힌지를 유도하는 방법이다.

### 2.1 시험체 선정

앞선 실험<sup>(6)</sup> 및 유한요소해석<sup>(9)</sup>에서 얻은 결과를 분석하여 개선된 웹 개구부를 제안하였다. 웹 개구부의 형태를 선정하는데 응용된 아이디어는 다음과 같다. 1) 상부티와 하부티 단면의 비틀림좌굴을 방지 또는 지연시킨다. 2) 개구부 구석의 응력집중현상을 극소화한다. 3) 소성영역을 넓게 분포시켜 에너지 소산능력을 증가시킨다.

그림 5에 보이는 'CDC3'와 'CDC5'는 쌍원형 형태의 개구부를 가지고 있다. 웹에 직사각형 개구부를 가진 합성보에 대한 앞선 연구에서 확인된 것처럼 강재보에서 상부티와 하부티가 초기에 비틀림좌굴 현상을 나타냈으며, 개구부 모서리에서 응력집중현상이 발생하였기 때문에 쌍원형 개구부 형태를 선정하였다.

### 2.2 시험체 설계 및 제작

시험체의 형상은 보 단부에서 15cm 떨어진 위치에 개구부를 설치하여 개구부 주변에서 인성파괴가 유도되도록 계획하였다. 시험체의 형상과 치수는 그림 3과 같다. 시험체의 주요변수는 개구부의 간격이며, 개구부의 상세는 그림 5와 같다. 시험체 'CDC3'와 'CDC5'은 보단부에서 15cm 떨어진 위치가 개

구부의 끝단이다. 개구부의 크기는 'CDC3'는 개구부가 원형으로 직경 15cm, 간격 3cm이며, 'CDC5'는 개구부가 원형으로 직경 15cm, 간격 5cm이다.

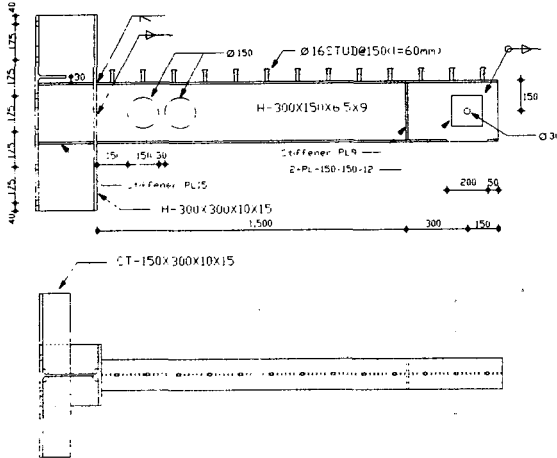


그림 3 시험체 형상

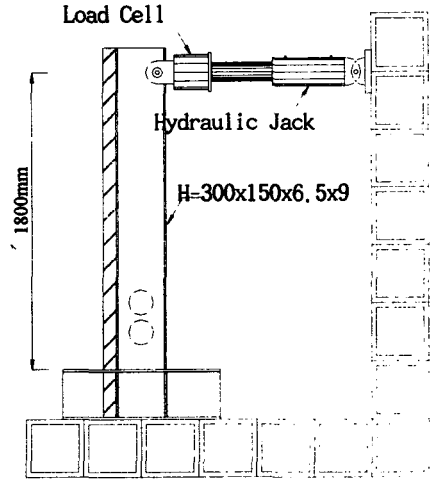
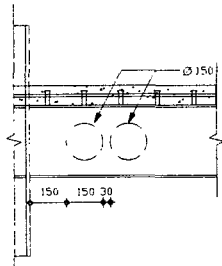
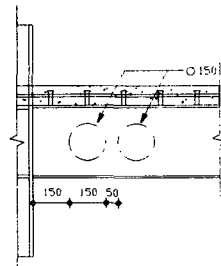


그림 4 시험체 설치



(a) 시험체 'CDC3'



(b) 시험체 'CDC5'

그림 5 개구부 상세

기둥과의 접합부 위치와 개구부 위치에서의 상대적인 강도와 인성도를 비교·분석하기 위해서 두 개의 시험체 모두 기둥재와 접합부 패널을 포함시켜 제작하였다. 두 개의 시험체 구성에서 기둥재는 H-300x300x10x15, 강재보는 H-300x150x6.5x9 이며, 평판 철근콘크리트 슬래브의 폭은 80cm, 두께는 7cm이다. 슬래브 두께의 중앙에 배근된 주근은 6-D10이며, 합성보 역할로 사용된 스티드코넥터는 13- $\phi$ 16이다.

합성보 자유단의 가력점은 기둥과의 접합부에서 180cm 떨어진 위치이며, 결과적으로 웨브 개구부의 중심에서 150cm 떨어진 위치이다.

### 2.3 재료의 강도

시험체를 구성하는 강재의 재료 인장시험을 하였다. 강재의 인장시편은 플랜지와 웨브로부터 각각 1개의 인장시편을 제작하여 실험하였다. 시편의 형상 치수는 길이 200mm, 폭 40mm이다. 항복강도  $F_y$ 는 플랜지가 3.67tf/cm<sup>2</sup>이며, 웨브가 3.77tf/cm<sup>2</sup>이다. 항복비  $F_y/F_u$ 는 플랜지가 0.70, 웨브가 0.73로 나타났다. 콘크리트의 재료강도 시험 결과는 4주 압축강도의 평균값은 239tf/cm<sup>2</sup>이다.

## 2.4 실험방법 및 측정

실험은 그림 4와 같이 시험체를 수직으로 세워 기둥부를 바다 골조에 고력볼트로 접합하였으며, 보의 기둥의 접합부로부터 180cm 떨어진 가력점 위치에 변위측정장치를 설치하여, 가력점에서의 하중-변위 관계를 조사하였다. 시험체의 개구부 주변의 응력도를 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 부착하였다.

시험체에 가해지는 재하하중은 반복하중으로 재하하였으며, 타 대학에서 수행하고 있는 철골보-기둥의 실험 결과와 비교하기 위하여 탄성영역과 비탄성영역을 철골보-기둥의 실험과 동일한 변위제어로 재하하였다.

## 2.5 실험 결과

두 개의 시험체 모두가 그림 6와 같이 콘크리트 부분이 완전히 파괴되고, 개구부 주변에 소성힌지가 발생한 후에, 플랜지의 국부좌굴과 개구부 부분의 파단으로 내력이 저하되어 실험을 중단하였다.

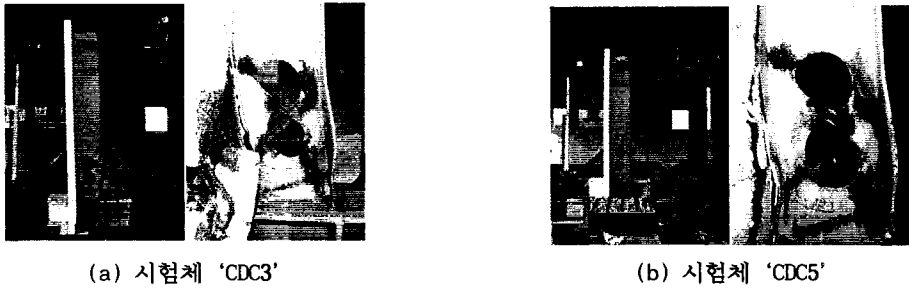


그림 6 시험체 실험 전경과 파괴형태

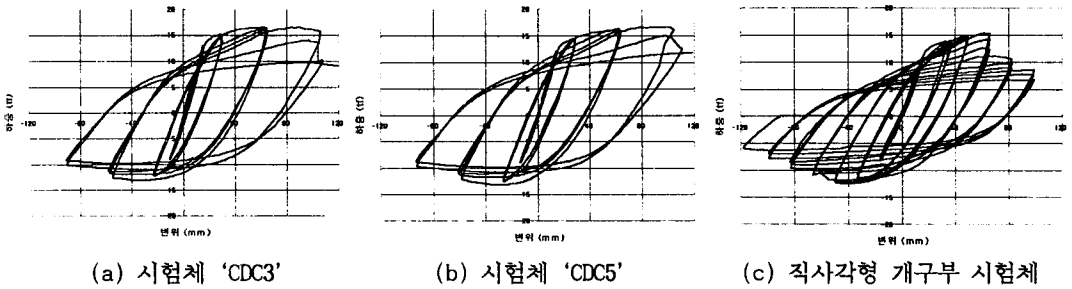


그림 7 시험체 하중-변위 이력곡선

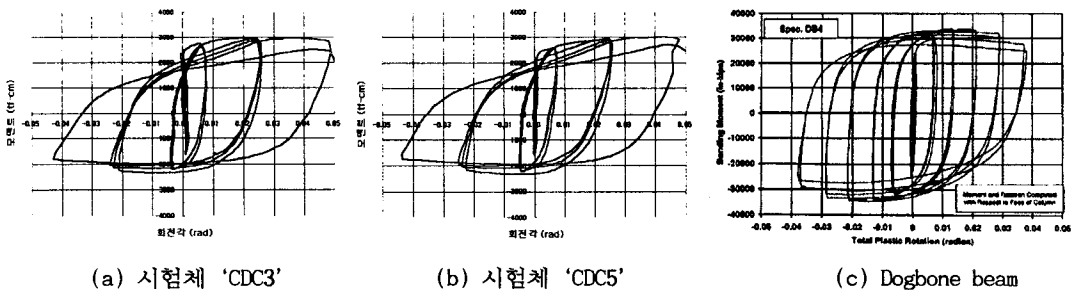


그림 8 시험체 소성 회전각-모멘트 이력곡선

그림 7(a), (b)는 실험이 완료되기까지의 하중-변위 이력곡선을 보여주고 있다. 시험체 'CDC3'의 경우에 정모멘트 구간의 최대하중은 약 16.5tf(변위 88mm)에 도달하였고, 부모멘트 구간의 최대하중은 약 13.1tf(변위 33mm)에 도달하였다. 정모멘트구간에서의 초기 강성은 약 9.3tf/cm이며 부모멘트구간의 초기 강성은 약 8.1tf/cm이다. 정모멘트구간과 부모멘트구간의 최대변위는 147mm이다.

시험체 'CDC5'의 경우에 정모멘트 구간의 최대하중은 약 16.7tf(변위 95mm)에 도달하였고, 부모멘트 구간의 최대하중은 약 13.1tf(변위 32mm)에 도달하였다. 정모멘트구간에서의 초기 강성은 약 8.8tf/cm이며 부모멘트구간의 초기 강성은 약 7.4tf/cm이다. 정모멘트구간과 부모멘트구간의 최대변위는 154mm이다. 그림 7(c)는 앞서 수행한 직사각형 개구부의 하중-변위 곡선이다.

그림 8(a), (b)는 실험의 소성 회전각-모멘트의 이력곡선을 나타낸 그림이며, 그림 8(c)는 미국에서 연구<sup>(2)</sup>한 도그본 보의 소성 회전각-모멘트의 이력곡선이다. 도그본 보의 크기는 W36X194였다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소해석 모델

유한요소 해석은 앞서 실험의 시험체를 참고하여 모델링하였다. 유한요소 해석에서 두 개 원형 개구부를 가진 합성보의 이력거동을 평가하기 위한 모델의 평면과 입면 및 개구부 상세는 그림 9(a), (b), (c)와 같다. 시험체의 콘크리트 슬래브의 폭이 80cm이었으나 유한요소 해석 시간의 단축을 위하여 20cm로 축소하였다. 이는 콘크리트 슬래브의 시어 래그(shear lag)효과를 무시하였다. 또한, 강재보의 요소(element)는 개구부 주변의 응력도-변형을 관계와 유한요소해석 시간을 고려하여 개구부 주변만 작게 분할하였다.

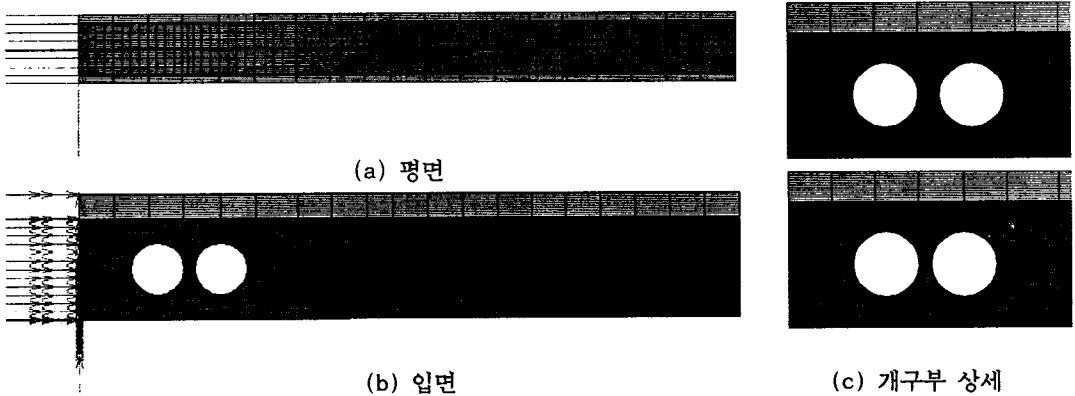


그림 9 유한요소 해석 모델

#### 3.2 유한요소해석 방법

유한요소해석은 실험에서 얻은 결과와 비교하기 위해서 다음 두가지 사항을 주요 변수로 입력하였다.

첫째, 재료적 비선형(material nonlinear)이다. 콘크리트와 강재의 두가지 재료의 항복강도는 시험체에서 측정된 28일 압축강도  $F_c'$ 와 인장실험을 통해 얻은  $F_t$ 를 입력하고 항복이후의 거동은 표(table)로 입력하였다. 그림 10(a), (b)과 표 1은 유한요소해석에 적용한 강재와 콘크리트의 재료적 성능과 그 성능에 따른 변형도-응력도 상관도를 보여주고 있다. 비탄성해석에 적용하는 상관도로서, 강재의 경우 최대항복점 이후의 하강곡선이 포함되었으며, 콘크리트의 경우 파괴점(crushing) 이후의 강도상실이 포함되었다. 결국, 구조체의 연성도와 에너지소산능력을 분석하도록 하였다.

둘째, 기하학적 비선형(geometric nonlinear)이다. 실험에서 국부좌굴로 인한 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 초기 변위를 강제 제작시 발생하는 오차허용 범위를 기준으로 입력하였다. 또한 컴퓨터 프로그램 MARC (MARC, 1994)에서 기하학적 비선형해석 옵션(option)을 적용하여 해석하였다.

유한요소해석에서 경계조건 (boundary condition)은 그림 9(a),(b)와 같으며 하중은 단부에서 180cm 떨어진 위치에서 변위제어(displacement control)하였다. 실험시에서의 실제 실험과 마찬가지로 변위제어를 하여야만 하강 P- $\Delta$ 곡선이 얻어질 수 있다. 해석은 반복하중으로 실행했으며, 재료의 변형도 경하 규칙(hardening rule)은 Kinematic을 적용하여 해석하였다. 개구부 주변의 응력도의 분포와 가력점에서의 하중-변위 관계를 측정하였다.

표 1 재료의 역학적 성질(tf/cm<sup>2</sup>)

강재	$F_y$	3.06
	$E_s$	2,100
콘크리트	$F_c'$	0.265
	$\sigma_c$	0.133
	$\sigma_t$	0.027
	$E_{c1}$	244
	$E_{c2}$	91
	$E_t$	41

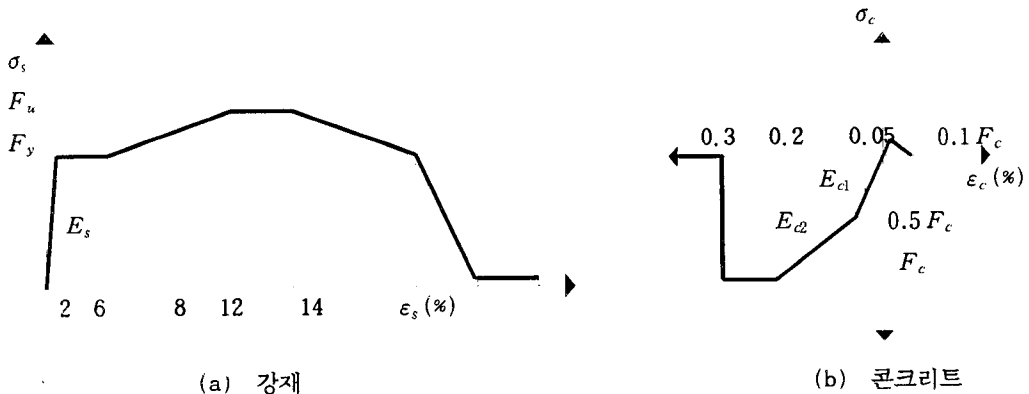


그림 10 재료의 응력-변형 곡선

### 3.3 유한요소해석 결과

그림 11은 유한요소해석에서 얻은 하중-변위 이력 곡선을 보여 주고 있다. 시험체 각각의 변위중분 해석 결과로 보이는 곡선은 강재요소중의 어느 하나가 등가소성변위(equivalent plastic strain)가 0.0776인 점, 즉 그림 10에서 보이는 총변위(total strain)가 0.08인 점에 도달하였을 때 마감하여 표현하였다. 왜냐하면 이 마감점 이후의 출력데이터는 수렴상의 문제 때문에 해석결과가 불확실하기 때문이다. 그러나, 모든 시험체에 이 마감점을 적용하였기에, 보 부재의 연성도에 관한 한 공정하게 비교될 수 있다.

시험체 'CDC3'의 경우에 정모멘트 구간의 최대하중은 약 13.28tf에 도달하였고, 부모멘트 구간의 최대하중은 약 11.68tf에 도달하였다. 정모멘트구간에서의 초기 강성은 약 11.5tf/cm이며 부모멘트구간의 초기 강성은 약 7.0tf/cm이다.

시험체 'CDC5'의 경우에 정모멘트 구간의 최대하중은 약 13.36tf에 도달하였고, 부모멘트 구간의 최대하중은 약 11.991tf에 도달하였다. 정모멘트구간에서의 초기 강성은 약 11.7tf/cm이며 부모멘트 구간의 초기 강성은 약 6.3tf/cm이다.

유한요소해석의 비교 및 해석결과의 분석은 다음과 같이 요약된다.

1) 두 개의 합성보 시험체 모두가 보 단부보다는 개구부 주변에서 현저한 비탄성 거동을 보여주고 있다. 따라서, 해석상의 마감점에 대한 비교분석을 통하여, 'CDC5'(5cm 개구부 간격)이 시험체 'CDC3'(3cm 개구부 간격)보다 연성도가 큰 것이 입증되었다. 사실, 시험체 'CDC5'에서 개구부를 포함하는 감소단면이 그렇게 약하지 않았다면, 보 단부에서 먼저 현저한 비탄성 거동이 발생하였을 것이다.

2) 연성도가 큰 시험체 'CDC5'에서 콘크리트 슬래브의 변형도가 파괴점인 0.003에 도달하지 않았다. 왜냐하면 정모멘트 구간에서 강도저하가 발생하지 않았기 때문이다. 그러나, 콘크리트 재료의 비탄성 사이클 거동에 따른 핀칭(pinching)현상은 정모멘트 구간에서 나타나고 있다.

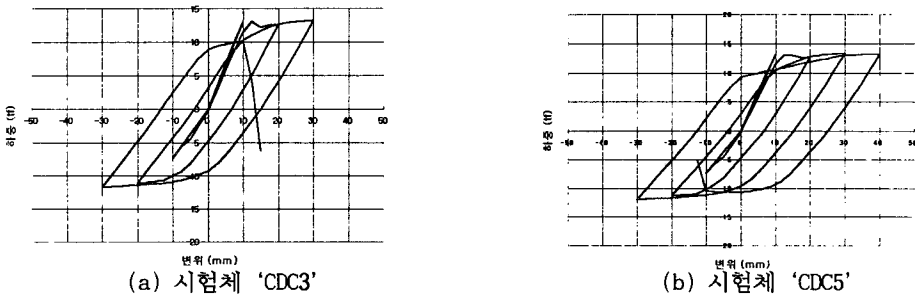


그림 11 유한요소해석 하중-변위 이력곡선

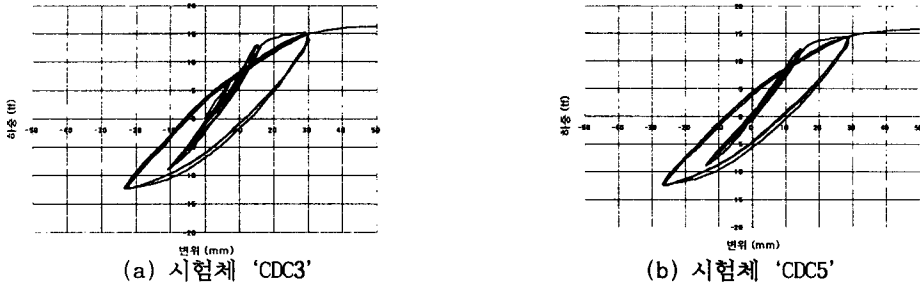


그림 12 실험에 의한 하중-변위 이력곡선

### 3.4 비교 분석

실험과 유한요소해석의 결과는 표 2의 최대 강도와 표 3의 초기 강성으로 비교하였다. 초기강성의 결과는 그림 11, 12으로 비교할 수 있다. 두 가지 해석을 분석하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실험에서 최대강도는 정모멘트구간에서는 시험체 'CDC5'가 'CDC3'보다 높고, 부모멘트구간에서는 시험체 'CDC5'가 'CDC3'와 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 유한요소해석에서 최대강도는 정모멘트구간에서는 시험체 'CDC5'가 'CDC3'보다 높고, 부모멘트구간에서는 시험체 'CDC5'가 'CDC3'보다 높은 것으로 나타났다.
- (3) 실험과 유한요소해석에서 초기 강성을 비교하면 시험체 'CDC3'에서 유한요소해석의 정모멘트 구간을 제외하고는 시험체 'CDC5'보다 초기 강성이 높게 나타났다.

표 2 최대 강도 비교 (tf/cm<sup>2</sup>)

시험체명	해석방법	정모멘트 구간	부모멘트 구간
시험체	실 험	16.51	13.08
'CDC3'	유한요소 해석	13.28	11.68
시험체	실 험	16.65	13.09
'CDC5'	유한요소 해석	13.36	11.99

표 3 초기 강성 비교 (tf/cm)

시험체명	해석방법	정모멘트 구간	부모멘트 구간
시험체	실 험	9.3	8.1
'CDC3'	유한요소 해석	11.5	7.0
시험체	실 험	8.8	7.4
'CDC5'	유한요소 해석	11.7	6.3

#### 4. 결론

웹에 쌍원형 개구부를 가진 합성보의 내진성능 향상을 위한 실험과 유한요소해석의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 반복하중을 받는 합성보에서 합성보의 단부(기둥과 접합부 위치)에서 발생할 수 있는 파단 이전에 웹 개구부 주변에서 발생하는 소성변형과 에너지 흡수를 확인하였다.
- (2) 실험과 유한요소해석 결과 시험체 'CDC5'가 'CDC3'보다 연성도가 높다.
- (3) 실험과 유한요소해석 결과 시험체 'CDC5'가 'CDC3'보다 내진성능이 우수하다.

앞으로 수행할 연구는 유한요소해석을 통해 내진성능이 우수한 합성보 모델을 제안하고 실험을 통해 확인한다. 또한 수식적해석을 수행하여 개구부 형태에 따른 강성과 강도의 산정식을 제안하고자 한다.

#### 감사의 글

이번 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 연구비 지원하에 지진공학연구센터에서 집행하고 있는 과제중의 한 세부과제로 수행되었다.

#### 참고문헌

- 1) Iwankiw, Nestor R., "Ultimate Strength Considerations for Seismic Design of the Reduced Beam Section (Internal Plastic Hinge)", AISC Engineering Journal, 1997 Volume 34, No.1, PP.3-16
- 2) Plumier Andre, "The Dogbone: Back to the Future" AISC Engineering Journal, 1997 Volume 34, No.2, PP.61-67
- 3) David Darwin, "Steel and Composite Beams with Web Openings / Steel Design Guide Series 2", American Institute of Steel Construction, Inc., 1990
- 4) 김원기, 이승준, 신영창, 이강훈, "춤이 큰열연 H형강 보의 효율성", 강원산업주식회사, 1995.8
- 5) 이승준, 김원기, 정이근, "상부 유공 합성보의 극한 내력", 대한건축학회논문집 11권 6호 PP.137-144, 1995.6, 대한건축학회
- 6) 박노웅, 김원기, 이승준. (1998), "웹개구부를 가진 합성보의 이력거동", *Proceedings of EEEK Conference*, 2(1), 173-179
- 7) MARC Analysis Research Corporation (1994), *Computer Program MARC*, California, U.S.A.
- 8) Wonki Kim, Nohwoong Park, "Geometric Nonlinear and Inelastic Analyses of Open-Web Composite Beam", *Strutural Steel PSSC'98*, Volume 1, 1998
- 9) 박노웅, 김원기, "개구부를 가진 합성보의 비선형 해석", *MARC User's Forum 98*, 1998.10