

직사각형 웹 개구부를 가진 합성보의 강도와 초기강성도

Strength and Initial Stiffness of Composite Beams with a Rectangular Web-Opening

김 원 기* 박 노 웅** 이 승 준***
Kim, Won ki Park, Noh Woong Lee, Seung Joon

국문요약

철골조 및 합성구조의 건축물이 강한 지진 하에서 효율적으로 거동하도록 유도하는 연구중의 하나로서 개구부를 가진 합성보의 이력거동을 조사하고 있다. 실험적 연구와 비선형 FEM 해석 연구 모두가 그러한 합성보의 연성도를 입증하였다. 합성보 단부 즉, 기둥 면에서 발생할 수 있는 취성과파괴 이전에 직사각형 개구부의 모서리 주변에 있는 4개의 T형 단면에서 소성힌지를 형성하며 합성보 전체의 연성도를 유지하고 있다. 본 연구는 직사각형 웹 개구부를 가진 합성보의 강도와 초기강성도를 산정하는 약산식을 제시하였고, 그 결과를 실험 및 비선형 FEM 해석의 결과와 비교 분석하였다.

주요어 : 합성보, 웹 개구부, 강도, 초기강성도, 이력거동

ABSTRACT

For the efficient performance of steel and composite building structures subjected to strong earthquake, one of current research investigates the cyclic behavior of open-web composite beams. Both experimental test and nonlinear FEM analysis demonstrate their behavior so ductile that four T-sections around the corners of rectangular web-opening develop plastic hinges prior to potential brittle failure at the beam end, i.e. at the column face. This research proposes simplified equations for determining strength and initial stiffness of composite beams with a rectangular web-opening, and compares its results with those of experimental test and nonlinear FEM analysis.

Key words : composite beam, web opening, strength, initial stiffness, cyclic behavior

1. 서 론

외국에서 기존건물에 발생한 지진피해 중에서, 보 단부의 최대 모멘트 부위에 발생하는 손상은 취성과파괴를 초래하였다. 기둥-보 접합부에서 나타나는 파괴에 의한 피해를 극소화하기 위한 연구로서 보의 단부 가까이에 있는 부재 단면을 감소하여, 이 감소된 단면에 소성힌지를 유도하여 인성파괴의 결과를 초래하는 연구^{(1),(2)}가 계속되었다. 그 중에서 강재보

의 플랜지 부분을 곡선으로 감소시킨 그림 1의 dogbone beam은 미국에서 실용화되어 있는 상태이며, slotted beam 형태는 현재 미국에서 연구중이다.

현재 대부분의 철골건물이 철근콘크리트 슬래브와 강재보가 합성으로 거동하는 합성보로 설계된다. 그러므로 합성보와 같이 복잡한 거동을 하는 부재에서 dogbone과 같은 형태는 적합하지 못하며, 또한 데크플레이트나 콘크리트 슬래브가 위치하는 부분에 설치되므로 기존의 합성보를 보강하는 방법에도 적합하지 못하다.

개구부를 가진 유공 합성보의 단조하중에 대한 거동에 관한 연구 역시 그 동안 많이 수행

* 정희원 · 호서대학교 제5공학부 건축공학전공 교수

** 호서대학교 건축학과 대학원

*** 정희원 · 아주대학교 환경도시공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

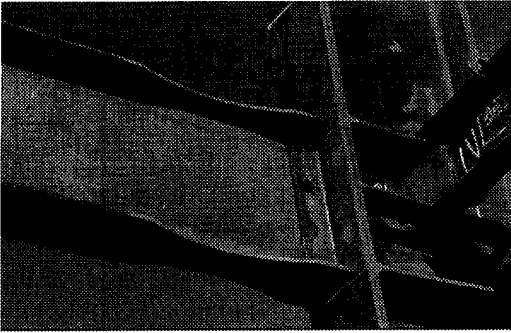


그림 1 Dogbone beam

되었으며 부재의 공칭강도 산정 설계식^{(3),(4)}이 이미 제시되었다. 국내에서는 웹 개구부가 상단에 설치된 경우인 그림 2와 같이 상부 유공 합성보의 극한 내력에 관한 연구⁽⁵⁾가 이미 시행되어 단조하중에 대한 성능은 우수함이 확인되었다. 또한 반복하중을 받는 합성보에서 합성보의 웹 단면에 개구부를 설치하여 개구부 주변의 소성힌지를 유도하여 인성과파괴를 유도하는 실험⁽⁶⁾을 수행하였다. 이 연구는 보 단부의 전단력에 의한 2차모멘트의 영향으로 생기는 4개 부위의 소성모멘트를 이용하여 에너지소산과 연성에 대하여 확인하였다.

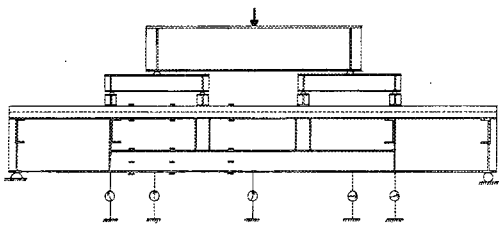


그림 2 상부 유공 합성보의 실험

2. 연구 목적

이번 연구에서는 직사각형 형태의 웹 개구부를 가진 합성보의 강도와 초기강성도를 산정하고자 한다. 합성보의 강도와 강성도는 개구부 유, 무에 따라 차이가 있다. 직사각형 형태의 개구부를 설치되었을 경우의 강도와 초기강성도의 산정방법을 제안한다.

강도는 전산해석과 미국 AISC기준에 의한 설계식의 공칭강도와 비교하며, 또한 앞서 실행한 실험에서의 강도와 비교한다.

강성도는 전산해석 결과와 여기서 유도한 수식의 계산결과를 비교한다.

이번 연구에서는 개구부 형태를 직사각형 형태로 제한하였으며, 개구부 위치는 웹 중앙에 고정하여 배치하였다.

3. 실험

웹 개구부를 가진 합성보의 실험⁽⁶⁾으로 그림 3과 같은 형상의 시험체를 제작하여 그림 4와 같이 실험하였다.

시험체는 기둥과 보로 구성되었으며, 시험체의 기둥 면에서 30cm 떨어진 강재보 웹 중앙에 개구부를 설치하였다. 가력점은 기둥에서 180cm 떨어져있고, 개구부 중앙에서 150cm 떨어져 있다. 실험은 하중-변위의 거동을 조사하기 위해 반복하중을 가하였다. 실험과 관련된 자세한 사항은 참고문헌 6에 상세히 수록되어 있다.

실험 결과로서, 그림 5와 같이 개구부의 네 모서리에 소성힌지가 발생하였으며, 강재보 T

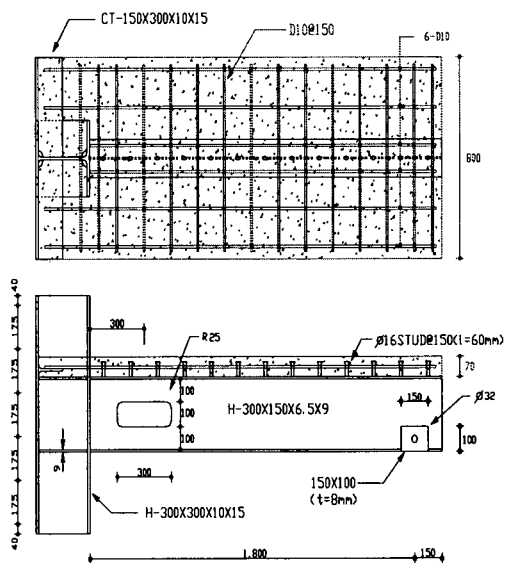


그림 3 시험체 형상

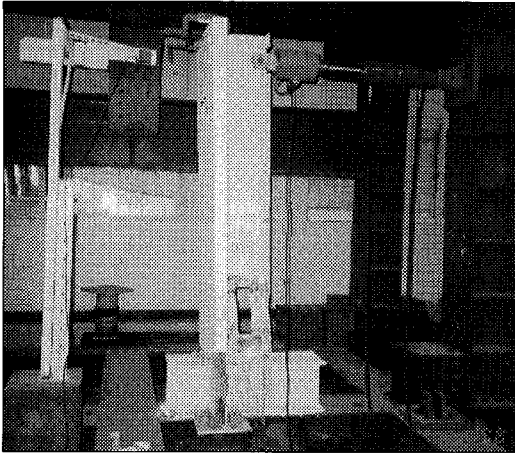


그림 4 실험 현장

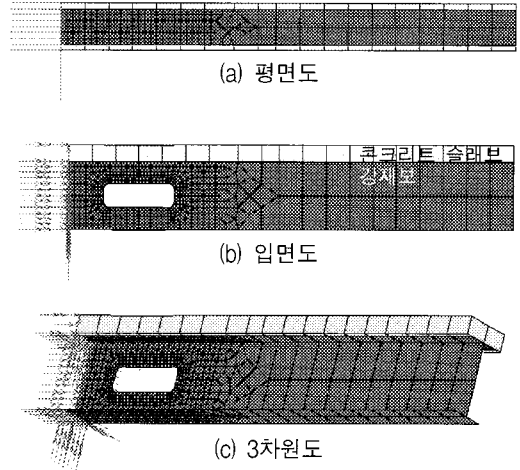


그림 6 전산 해석 모델

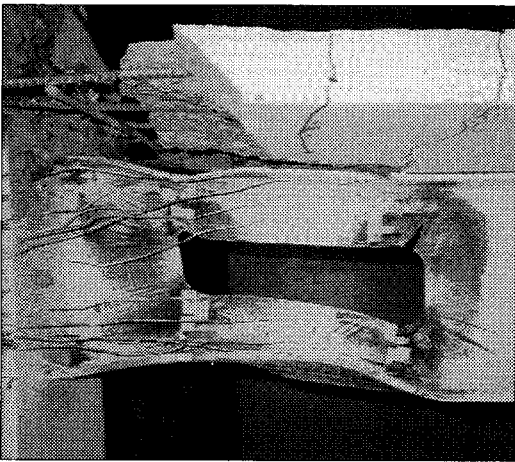


그림 5 시험체 파괴 형태

단면 상·하에 국부좌굴이 생기면서 균열 발생 후 파단되었다. 이 실험에서의 최대 강도는 정모멘트 구간에서는 15.3tonf, 부모멘트 구간에서는 12.3tonf으로서 그림 8과 표 7에 정리하였다.

4. 전산해석

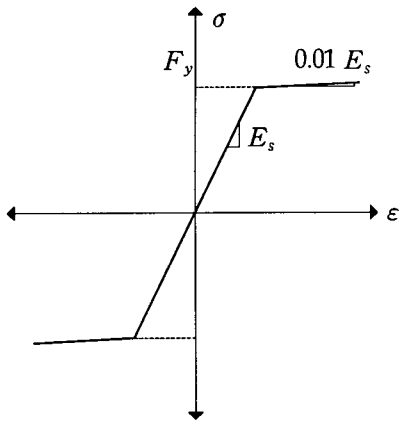
전산해석에서 앞선 실험의 시험체를 그림 6과 같이 모델링하였다. 전산해석은 비탄성해석 프로그램인 MARC⁽⁷⁾를 사용하여 수행하였다. 전산해석에서 웹 개구부를 가진 합성보의 강성과 강도를 평가하기 위한 모델의 평면도와 입면도 및 3차원도는 그림 6(a),(b),(c)와 같다.

시험체는 콘크리트 슬래브의 폭이 80cm이었으나 전산해석 시간의 단축을 위하여 20cm로 축소하였다. 즉, 콘크리트 슬래브의 시어래그 (shear lag)효과는 무시하였다. 또한, 강재보의 요소(element)는 개구부 주변의 응력도-변형도 관계와 전산해석 시간을 고려하여 개구부 주변만 작게 분할하였다.

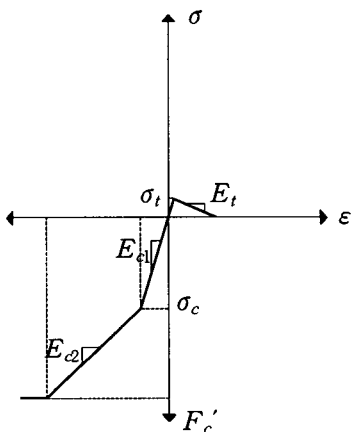
전산해석에서 경계조건은 그림 6과 같으며 하중은 단부에서 180cm 떨어진 위치에서 변위 제어(displacement control)로 가력하였다. 강성도를 산정할 때의 해석은 탄성해석으로, 강도를 산정할 때 해석은 비탄성해석으로 수행하였다. 재료의 성질은 그림 7 및 표 1과 같다.

전산해석은 표 2와 같이 4가지 경우로 해석하였다. 전산해석에서의 부모멘트 구간은 합성보의 콘크리트가 인장을 받는 경우이다. 이 경우 콘크리트의 인장력을 무시하고 해석하였다. 즉, 부모멘트 구간의 전산해석 모델링은 콘크리트 슬래브가 없는 강재보의 강성도와 같다. 전산해석에서 정모멘트 구간은 콘크리트가 압축을 받는 경우이다. 즉, 전산해석 모델링을 합성보로 설계하였다. 강성도 전산해석 결과는 그림 8과 표 2에 정리하였다.

여기서, 그림 8에서 보는 바와 같이 실험에 의한 강성도가 적게 나타난 주된 이유는 고정단의 회전에 의한 변형 때문이다. 따라서 이후 강성도의 비교에서는 실험결과를 생략하기로 한다.



(a) 강재



(b) 콘크리트

그림 7 재료의 응력-변형도 곡선

표 1 재료의 역학적 성질 (tonf/cm²)

강재	F_y	3.06
	E_s	2,100
콘크리트	F_c'	0.265
	σ_c	0.133
	σ_t	0.027
	E_{c1}	244
	E_{c2}	91
	E_t	41

표 2 초기강성도의 전산해석 결과 (tonf/cm)

구분	개구부 없는 경우	개구부 있는 경우
부모멘트 구간	7.00	6.56
정모멘트 구간	15.2	14.1

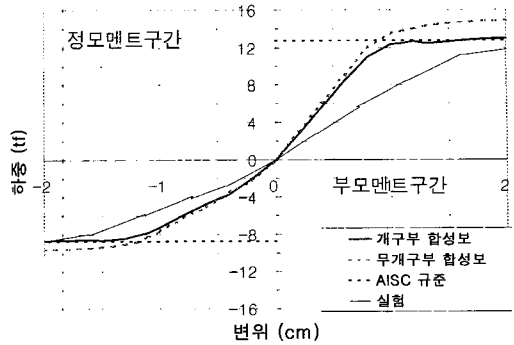


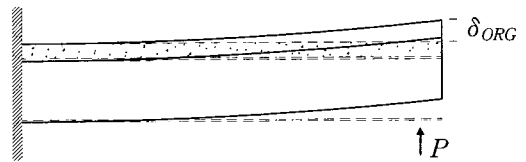
그림 8 전산해석과 실험의 하중-변위 곡선

전산해석에서의 최대 강도는 개구부가 있는 경우의 정모멘트 구간에서는 12.5tonf, 부모멘트 구간에서는 7.81tonf이다. 개구부가 없는 경우의 정모멘트 구간에서는 13.8tonf, 부모멘트 구간에서는 8.81tonf로 그림 8과 표 7에 정리하였다.

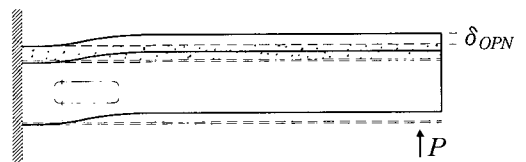
5. 초기강성도와 강도의 약산식

5.1 초기강성도 약산식 산정

초기강성도, 즉 탄성이론에 의한 약산식은 그림 9와 같이 개구부가 없는 경우의 변위를 우선 계산하고 개구부 효과 즉, 전단력에 대한 2차 모멘트의 효과인 전단변형에 의한 변위를 계산하여 추가하는 방법으로 산정한다. 다만 여기서 전단응력도에 의한 변형은 무시하였다.



(a) 개구부가 없는 경우의 변위 (δ_{ORG})



(b) 개구부로 인한 추가 변위 (δ_{OPN})

그림 9 구조체의 변형 형태

합성보의 강성도 산정에 적용한 변위는 다음 (1)식으로 산정하였다.

$$\delta_{TOT} = \delta_{ORG} + \delta_{OPN} \quad (1)$$

여기서 δ_{TOT} : 전체 변위

δ_{ORG} : 개구부 없는 경우의 변위

δ_{OPN} : 개구부로 인한 추가 변위

합성보의 부모멘트 구간의 δ_{ORG} 의 계산은 콘크리트 인장강성을 무시하고 강재보로 변위를 계산하였다.

$\delta_{OPN,N}$ 의 계산은 그림 10과 같은 라멘골조 모델로 개구부에 의한 변위를 계산하였다. 개구부 효과의 계산은 2가지 방법으로 계산되었다. 그림 11과 같이 첫 번째 방법은 실제 개구부 크기 h_o 로 계산하고, 두 번째 방법은 개구부 크기를 h_1 으로 확대하였다. 개구부 크기를

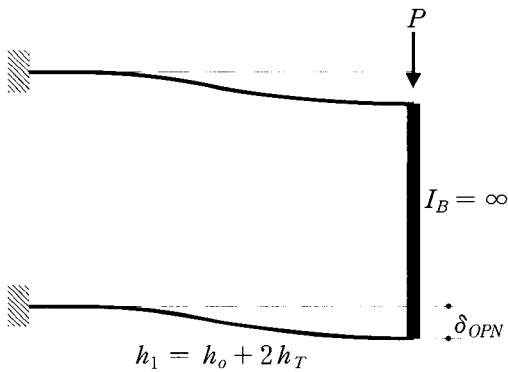


그림 10 부모멘트 구간 개구부 해석 모델

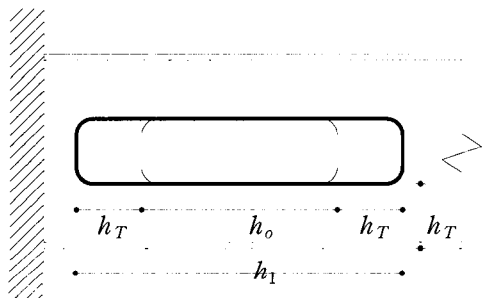


그림 11 부모멘트 구간 개구부 확대 모델

확대한 이유는 그림 5와 같이 개구부 주변에 응력집중이 발생하기 때문에 그 효과를 고려하여 개구부 크기를 확대하였다.

개구부 효과의 계산은 다음 (2)식과 같으며, 여기서는 두 번째 방법으로서 h_1 을 대입한다. 합성보의 부모멘트 구간의 전체 변위의 계산 결과는 표 3에 정리하였다.

$$\delta_{OPN,N} = P h_1^3 / 12 E (2 I_T) \quad (2)$$

여기서, h_1 : $h_o + 2 h_T$

확대된 개구부 폭 (cm)

h_o : 실제 개구부 폭 (cm)

h_T : T형 단면 스템의 춤 (cm)

I_T : T형 단면의 단면2차모멘트 (cm⁴)

표 3 부모멘트 구간의 단위하중에 의한 변위 (cm/tonf)

변위	δ_{ORG}	$\delta_{OPN,N}$	δ_{TOT}
방법1	0.134	0.0037	0.138
방법2		0.017	0.151

결과적으로 부모멘트 구간의 강성도는 단위하중에 의한 변위의 역수로서 방법2의 값을 적용하면 개구부가 없는 경우 7.49, 개구부가 있는 경우 6.62가 된다.

합성보의 정모멘트 구간의 δ_{ORG} 의 계산은 콘크리트 압축강성을 고려하여 변위를 계산하였다.

$\delta_{OPN,P}$ 의 계산은 그림 12와 같은 라멘골조 모델로 개구부에 의한 변위를 계산하였다. 개구부 효과의 계산은 그림 13과 같이 2가지 방법으로 첫 번째 방법은 실제 개구부 크기 h_o 로, 두 번째 방법은 개구부 크기를 h_1 으로 확대하였다. 개구부 효과의 계산은 다음 (3)식과 같으며 두 번째 방법으로서 h_1 과 h_2 를 대입한다. 합성보의 정모멘트 구간의 전체 변위의 계산 결과는 표 4에 정리하였다.

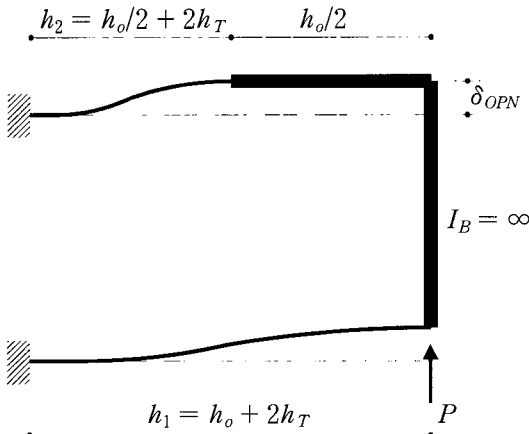


그림 12 정모멘트 구간 개구부 해석 모델

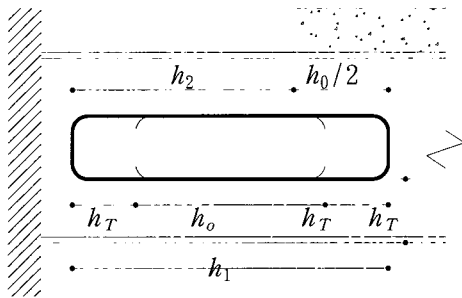


그림 13 정모멘트 구간 개구부 확대 모델

표 4 정모멘트 구간의 단위하중에 의한 변위 (cm/tonf)

변위	δ_{ORG}	$\delta_{OPN,P}$	δ_{TOT}
방법1	0.057	0.00065	0.058
방법2		0.0087	0.066

$$\delta_{OPN,P} = P \left(\frac{h_1^3}{1 + (h_1/h_2)^3} \right) / 12EI_T \quad (3)$$

여기서, $h_2 : h_o/2 + 2h_T$

압축 플랜지 부분의 개구부 폭 (cm)

$I_T : T$ 형단면의 단면2차모멘트 (cm⁴)

결과적으로 부모멘트 구간의 강성도는 단위 하중에 의한 변위의 역수로서 방법2의 값을 적용하면 개구부가 없는 경우 17.69, 개구부가 있는 경우 15.2가 된다.

참고적으로, δ_{ORG} 은 부재 길이에 따른 영향이 크며 δ_{OPN} 은 부재 길이와 무관하고 개구부 크기에 따라 영향이 크다.

5.2 강도의 산정

강도는 미국 AISC규준에 따라 공칭강도를 산정한다.

미국 강구조학회인 AISC(3)에서 제공한 설계식을 적용하여 웹 개구부를 가진 강재보와 합성보의 공칭강도를 산정하였다. 계산 과정은 참고문헌 4와 6에 자세히 수록되어 여기서 생략하며, 휨강도와 전단강도의 상관식은 참고문헌 3에 따라 다음 (4)식과 같다.

$$\left(\frac{M_n}{M_m} \right)^3 + \left(\frac{V_n}{V_m} \right)^3 = 1 \quad (4)$$

여기서,

M_n : 전단력을 고려한 공칭휨강도

M_m : 전단력이 없다고 가정한 경우의 공칭 순수휨강도

V_n : 휨모멘트를 고려한 공칭전단강도

V_m : 휨모멘트가 없다고 가정한 경우의 공칭 순수전단강도

6. 결과 분석

6.1 해석 결과 정리

전산해석의 강성도 결과와 수식해석의 강성도 결과는 표 5, 6과 같이 나타난다. 수식해석의 강성도는 2가지 방법 중 두 번째 방법만을 표시하였다. 첫 번째 방법은 수식/전산해석의 비율이 두 번째 방법과 비교하여 작기 때문이다.

표 5 부모멘트 구간 강성도의 결과 비교 (tonf/cm)

	개구부 없는 경우	개구부 있는 경우
전산해석	7.00	6.56
약산식	7.49	6.62
약산식/전산해석(%)	107%	101%

표 6 정모멘트 구간 강성도의 결과 비교 (tonf/cm)

	개구부 없는 경우	개구부 있는 경우
전산해석	15.2	14.1
약산식	17.7	15.2
약산식/전산해석(%)	117%	108%

표 7 강도 산정의 결과 비교

구 분	최대 하중 (tonf)		
	정모멘트	부모멘트	
AISC 기준 공칭강도	12.8	8.70	
전산 해석	개구부 있는 경우	12.5	7.81
	개구부 없는 경우	13.8	8.81
실험 최대 하중	15.3	12.3	

표 7은 1) 미국 AISC규준의 공칭강도 2) 전산해석, 그리고 3) 반복하중 실험으로부터의 결과의 최대 하중값이다. 표 7에서 1)은 개구부에서의 전소성 하중을 계산한 값이고, 2)는 전산해석에서 4부터 4cm의 변위 제어인 경우의 최대하중이며, 3)은 실험값 중에서 4부터 4cm까지의 변위 제어인 경우의 최대하중 값이다.

6.2 결과 비교분석

초기강성도에 있어서 개구부가 있는 부모멘트 구간의 경우 전산해석과 약산식을 비교하면 표 5와 같다. 약산식/전산해석의 비율은 101%로 나타났다.

초기강성도에 있어서 개구부가 있는 정모멘트 구간의 경우 전산해석과 약산식을 비교하면 표 6과 같다. 약산식/전산해석의 비율은 108%로 나타났다.

약산식에서 부모멘트 구간과 정모멘트 구간의 개구부 없는 경우의 초기강성도에 대한 약산식/전산해석의 비율을 각각 비교하면 107%, 117%로 나타났다. 약산식에서는 전단응력도의 영향이 포함되지 않았기 때문이다. 전산해석과 약산식에서 개구부가 없는 경우의 강성도 차이를 전단응력도의 영향으로 볼 수 있다.

강도는 미국 AISC규준과 전산해석을 비교하면 정모멘트 구간에서는 2%의 차이가 있으며, 부모멘트 구간에서는 10%의 차이가 있다.

강도해석 결과에서 실험과 전산해석이 차이가 있는 것은 전산해석은 단조하중이고 실험은 변형도경화가 포함된 반복하중이기 때문으로 판단된다. 참고적으로 시험체의 재료실험 결과로서 $F_y = 3.06 \text{ tonf/cm}^2$ 이며 $F_u = 4.62 \text{ tonf/cm}^2$ 로서, 항복비 $F_y/F_u = 0.66$ 이다.

7. 결 론

본 연구에서는 웹에 직사각형 개구부를 가지는 합성보의 전산해석과 수식해석 및 실험을 수행하였다. 세 가지 방법에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 부모멘트 구간과 정모멘트 구간의 강성도 산정에서 모서리의 응력집중을 고려하여 개구부 크기를 확대하며 제시한 약산식이 적합하며, 전산해석과 유사한 결과를 보이고 있다.
2. 강도의 산정은 전산해석과 미국 AISC규준이 제시한 약산식간에 차이가 별로 없는 것으로 나타났다.
3. 전산해석과 AISC규준의 강도산정 방법은 변형도경화가 포함이 안되어 최대 강도가 모두 실험값보다 작다.
4. 미국 AISC규준이 제시한 강도 산정용 약산식은 부재의 내력 평가에 적용될 수 있으며, 여기서 제시한 초기강성도 산정용 약산식은 변위 또는 고유진동수 평가에 적용될 수 있다.

다음 연구로서, 개구부의 형태와 위치를 변수로 하는 여러 가지 형태에 대해서도 강도와 초기강성도 산정용 약산식의 정확성을 확인하여야 한다. 또한 연성도(ductility) 산정방법에 관한 연구로 확대하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 연구비 지원 하에 지진공학연구센터에서 집행하고 있는 과제중의 한 세부과제로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Iwankiw, N. R., "Ultimate strength considerations for seismic design of the reduced beam section (internal plastic hinge)," *AISC Engineering Journal*, Vol. 34, No. 1, 1997, pp. 3-16.
2. Plumier, A., "The dogbone: back to the future," *AISC Engineering Journal*, Vol. 34, No. 2, 1997, pp. 61-67.
3. David, D., "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 큰 열연 H형강 보의 효율성", 강원산업주식회사, 1995. 8.
5. 이승준, 김원기, 정이근, "상부 유공 합성보의 극한 내력", 대한건축학회논문집, 11권 6호, 1995. 6, pp. 137-144.
6. 박노웅, 김원기, 이승준, "웹 개구부를 가진 합성보의 이력거동", *Proceedings of EEEK Conference*, 2(1), 1998, pp. 173-179.
7. *Computer Program MARC*, Analysis Research Corporation, 1994, California, U.S.A.
8. Kim, W. K. and Park, N. W., "Geometric nonlinear and inelastic analyses of open-web composite beam," *Structural Steel PSSC '98*, Vol. 1, 1998.
9. 박노웅, 김원기, "개구부를 가진 합성보의 비선형 해석", *MARC User's Forum 98*, 1998. 10.
10. 김원기, "1997년도 연차보고서", 서울대학교 지진공학센터, 1998. 3.