

# HSA800 강재를 적용한 보-기둥 중간모멘트 접합부 논스칼립 공법 소개

(Introduction of Intermediate Beam to Column Connection with  
Nonscallop using HSA800)



김진원 책임연구원  
(주)포스코 철강솔루션센터



이승은 책임연구원  
(주)포스코 철강솔루션센터



김도환 책임연구원  
(주)포스코 철강솔루션센터



김진호 수석연구원  
(주)포스코 철강솔루션센터

## 1. 서론

일반적으로 강구조에서의 휨재는 우수한 재료적 인성을 바탕으로 탄성이후의 충분한 소성영역과 변형능력을 확보하기를 요구받는다. 여기서 재료적 인성은 재료의 기본적인 강도와 항복이후에 인장강도에 다다르기까지의 내력상승폭 및 소성변형량으로 판단되는 요소이다. 따라서 재료의 인장강도에 대한 항복강도의 비로 정의되는 항복비는 그 재료를 적용한 부재의 변형능력에 지대한 영향을 미친다. 즉, 대체적으로 재료의 항복비가 낮을수록 부재의 변형능력이 향상되는 관계를 가지게 된다. 하지만 고강도강 HSA800의 경우 항복강도 650-770 MPa, 인장강도 800-950 MPa급의 고성능을 가진 재료이기는 하나 아직까지 종래에 사용되고 있는 일반연강에 비하여 높은 항복비와 낮은 연신율을 가짐에 따라 휨재 적용에 있어서 불리한 요건을 가지게 된다. 현재까지는 고강도강을 적용한 휨재에 관한 연구가 충분히 이루어지지 않은 실정이며 실험 및 해석연구를 병행하여 연강접합부와와의 비교검토 및 적용 가능한 접합상세에 대한 연구개발이 필요하다.

지난 노스리지지진(1994)과 고베지진(1995)을 통하여 비록 강재의 연성능력이 탁월하다 하더라도 접합상세에 따라 골조전체의 거동이 취성적으로 변화될 수 있음을 확인하였다. 이에 FEMA350에서는 WUF-W, FF, RBS등의 연성접합상세를 제시하였다. 하지만 이들 접합상세는 연강을 대상으로 한 검증만이 이루어졌으며 고강도강을 적용할 경우 기대만큼의 변형능력이 확보되지 않을 가능성이 크다. 이미 HSA800강을 적용한 선행실험결과를 통하여 WUF-W접합상세의 경우 KBC2009기준의 특수모멘트골조의 요구성능을 만족시킬 수 없음을 확인하였다. 당시 이들 접합상세의 문제점은 고강도강을 사용함에 따라 스칼립(Scallop) 부위에 응력집중이 심화되기 때문이다. 이와 같은 문제점을 보완하고 HSA800 고강도강 접합부의 변형능력을 향상시키기 위하여 논스칼립(Non-Scallop)상세를 적용하였다.

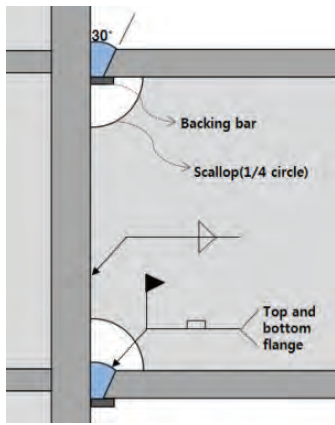
논스칼립 공법은 보 부재 단부의 변형도 완화를 목적으로 보 부재와 기둥의 접합시 스칼립을 두지 않고 플랜지 부분은 백업바를 사용한 개선용접 실시 후 백업바를 제거하고 반대편에 모살용접으로 보강하며 웨브는 양면 모살용접으로 접합하는 방식이다. 논스칼립 접합형태를 종래 접합형태와 비

교하여 그림 1에 나타내었다. 논스칼럽 공법은 단부의 웨브 단면결손이 없어 기존상세에서 취성파단의 주요위치가 되는 플랜지의 응력분배에 유리하다.

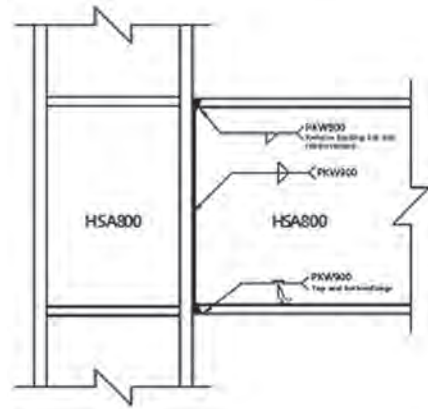
## 2. 논스칼럽 접합상세 제작과정

일반적인 논스칼럽 제작과정은 다음과 같으며, 그림 2~그림 3에 백업바 설치 유무에 따른 제작과정을 나타내었다.

- ① 보 부재 개선 컷팅 및 백업바 설치  
: 컷팅시 웨브의 일부까지 컷팅을 하며 루트의 간격은 5 mm 이상으로 한다.
- ② 플랜지, 웨브 용접  
: 플랜지의 경우 맞댐용접을 실시하며 웨브는 전길이에 걸쳐 모살용접을 한다.
- ③ 백업바 제거 및 가우징  
: 백업바 제거 후 보 플랜지 루트부분의 전길이에 걸쳐 가우징 작업을 한다.

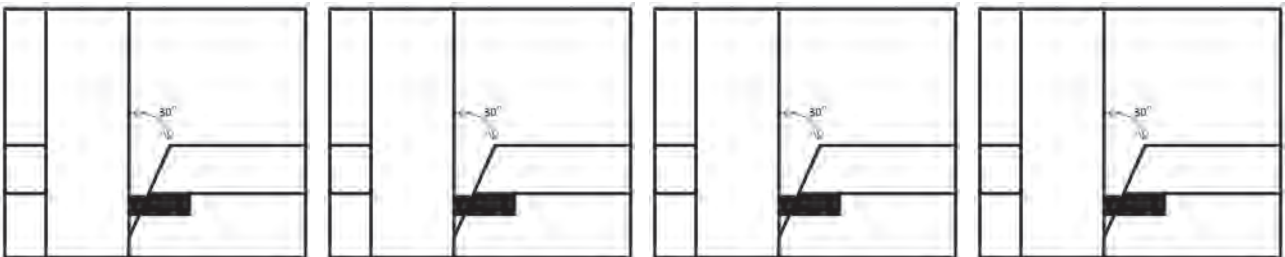


(a) Scallop 공법



(b) Non-Scallop 공법

[그림 1] 스칼럽 공법과 논스칼럽 공법 상세



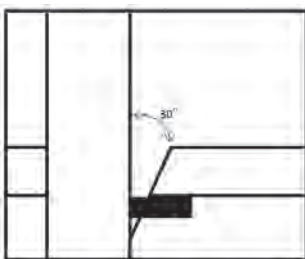
(a) 보 부재 개선컷팅 및 백업바 설치

(b) 플랜지, 웨브 용접

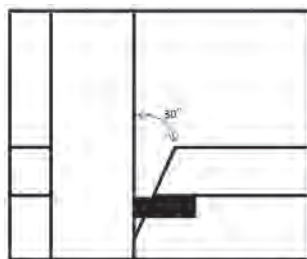
(c) 백업바 제거 및 가우징

(d) 보강 모살용접

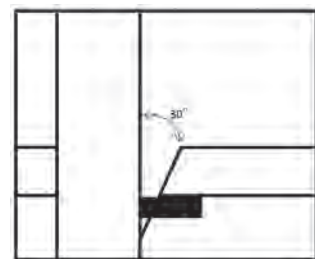
[그림 2] 논스칼럽 상세 제작의 일반적인 순서



(a) 보 부재 개선컷팅



(b) 플랜지, 웨브 용접



(c) 보강 모살용접

[그림 3] 백업바를 생략한 논스칼럽 접합상세 제작순서



④ 보강 모살용접

: 플랜지 맞댐 용접부의 반대편(루트 부분)을 모살용접으로 보강한다.

또한 작업자의 숙련도에 따라 루트간격을 보다 줄여 백업바를 설치하지 않은 상태에서 보 플랜지를 개선용접한 후 반대편 루트부분을 보강 모살용접하는 방법이 있다.

이와 같은 경우 일반적인 논스캘럽 제작과정에 비하여 열처리 횟수가 1회 줄어들기 때문에 용접부의 성능확보에 유리한 측면이 있다.

기둥중심까지의 거리는 3.5m로 설정하였으며 보와 기둥은 HSA800으로 제작하였다. 부재단면치수는 각각 보춤이 600mm, 700mm일 경우로 분류하여 보 춤이 600mm인 경우는 보 단면 H-600×200×15×25, 기둥단면은 H-440×440×25×35, 보 춤이 700mm인 경우는 보단면은 H-700×300×15×25, 기둥단면은 H-520×520×35×35로 제작하였다. 각 부재는 PKW-900(AWS 5.29, E121-T1-G)을 사용하여 완전용입 용접에 의한 빌트업(Built-up)으로 제작하였다.

실험변수는 보의 춤 및 접합상세의 차이로서 총 3개의 실험체로 구성하였다. 즉 보춤 600 mm의 경우 종래의 1/4원형(R=33) 스텔럽을 가지는 접합상세와 논스캘럽 접합상세로 구성하였으며 보춤 700 mm의 경우 논스캘럽 상세를 적용한 실험체로 구성하였다. 실험변수에 따른 실험체일람을 표 1에 나타내었다. 실험체상세 및 제원을 그림 4에 나타내었다.

3. 구조성능 검증

3.1 실험계획

접합부 반복재하실험을 위하여 실험체의 형태는 T자형의 기둥-보 접합부로 제작하였다. 보의 경간(가력중심지점에서

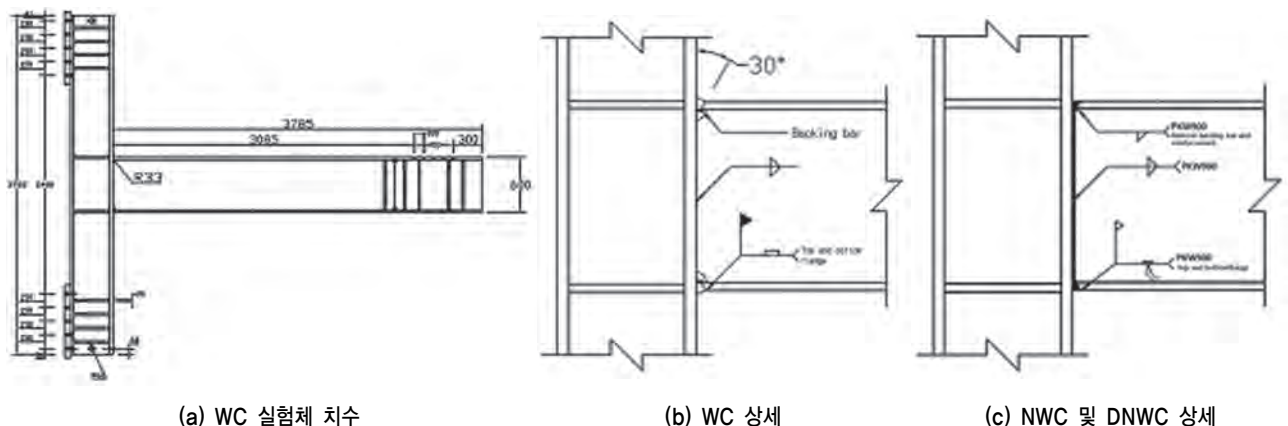
[표 1] 실험체 일람

Specimen	Beam member	Column member	Connection type (Beam edge)	Strength ratio		
				Beam	Column	Panel
WC	H-600×200×15×25 (HSA800)	H-440×440×25×35 (HSA800)	Scallop connection	1	1.76	1.84
NWC			Non-Scallop connection	1	1.76	1.84
DNWC	H-700×300×15×25 (HSA800)	H-520×520×35×25 (HSA800)	Non-Scallop connection	1	1.59	1.52

WC : welded connection

NWC : Non-Scallop welded connection

DNWC : Deep beam with Non-Scallop welded connection method



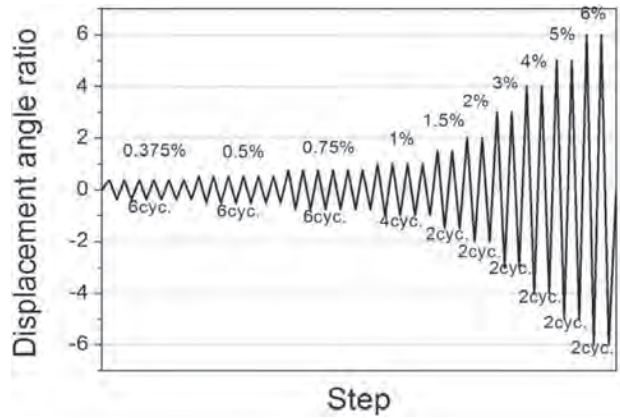
[그림 4] 실험체 상세 및 제원

### 3.2 실험체 제작

실험체 제작에 사용된 용접재료를 HSA800 전용 용접재료인 PKW900 (1.4 mm)이다. PKW900은 전자세 용접이 가능한 용접재료로서 용접재료의 기계적 성질과 화학성분 및 용접조건은 표 3.2~표 3.4에 나타내었다. PKW900의 예열 조건은 80°C 이상, 층간온도는 200°C 이하로 규정하고 있으며, 본 실험체 제작시는 예열을 100°C로 가열하고 용접을 수행하였다. 용접시 가장 중요한 것은 입열량을 준수하는 것으로, 입열량은 전류, 전압, 용접속도에 영향을 받는다. HSA800 강재를 FCAW(Flux Cored Arc Welding)으로 용접하여 접합 할 경우, 20 kJ/mm 이하의 입열을 가할 것을 권장하고 있다. 본 실험체 제작시 표 3에서 제시한 용접조건을 준수하였다.

### 3.3 실험방법

실험체 경계조건은 기둥의 상하부를 회전지그와 볼트체결하여 핀접합을 구현하였으며 보 부재의 자유단에 3,000kN 용량의 Actuator를 설치하여 반복이력가력을 계획하였다. 가력패턴은 FEMA 350에 제시되어 있는 접합부 반복재하절차를 사용하였다(그림 5 참조). 또한 보 부재의 횡좌굴을 방지하기 위하여 가력지점에서 700mm 떨어진 지점에 구속지그를 설치하였다. 실험체 셋업 및 실험전경을 그림6에 나타내었다.



[그림 5] 가력패턴(FEMA350)



[그림 6] 테스트 셋업

[표 2] 용접재료 기계적 성질

용접재료	규격	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	Elongation (%)	Charpy V-notch (j)		차폐가스
					-5°C	-20°C	
PKW900	AWS A5.29	Min 760	870 ~ 1,050	14	47	-	CO <sub>2</sub>
	Example	802	910	18.5	65	47	

[표 3] 용접조건

용접재료	용접방법	인장강도 (MPa)	용접조건						
			차폐가스	전류 (A)	전압 (V)	용접속도 (cm/min)	입열량 (kJ/cm)	층간온도 (°C)	예열온도 (°C)
PKW900	FCAW	900~1050	CO <sub>2</sub> 100%	270	28	23	20	200	100



### 3.4 실험결과

#### 3.4.1 재료실험결과

본 연구에서 사용된 강재의 재료특성을 그림4에 나타내었다. 고강도 강재의 특성상 항복점이 불분명하다는 점을 고려하여 항복강도는 0.2% off-set method로 측정하였다. 탄성계수의 경우 강재의 일반적인 영계수와 유사한 수치를 나타내었으며 항복비의 경우 0.83정도로 나타남에 따라 일반적으로 사용되는 연강에 비하여 항복이후의 내력상승 폭이 작은 특성을 보임을 확인할 수 있다.

[표 4] HSA800강재의 재료특성

No	Yield Strength $\sigma_y$ (MPa)	Tensile Strength $\sigma_u$ (MPa)	Elongation (%)	Yield Ratio $\sigma_y/\sigma_u$
1	740.6	887.1	22	0.835
2	739.0	888.9	20	0.831
3	739.1	884.5	21	0.836

#### 3.4.2 모멘트-회전각 관계 및 파단형상

실험결과에 따른 모멘트-회전각 관계 및 파단형상을 그림 6에 나타내었다. 그래프상의 수평파선은 각 보의 전소성모멘트와 전소성모멘트의 80%지점을 표시한 것이다. 모든 실험체들은 전소성모멘트 이상의 내력을 만족하였으며 중국거동의 경우 용접부위에서 파단이 발생하지 않고 모두 보 플랜지 취성파단으로 나타났다. 변형능력의 경우 접합상세에 따라 큰 차이를 나타내었다. 실험체별 주요실험경과는 다음과 같다.

WC 실험체의 경우 정부방향 최대내력은 각각 3503.9 kN·m, -3410.8 kN·m으로 나타났으며, 최대변형각은 0.03rad으로 나타났다. 이후 0.04rad 첫 사이클 가력시 보 단부 하부플랜지에서 취성파단이 발생하였다. NWC 실험체의 경우 실험체의 경우 WC실험체와 비교하여 단부의 용접방식을 논스캐럽 공법으로 바꾼 접합상세로서 최대변형각이 0.04rad으로 나타났다.

이와 같은 결과는 단부의 스캐럽 유무에 따라 접합부의 변형도 완화효과에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 하지만 최종형태는 마찬가지로 보 하부 플랜지 취성파단으로 나타났다.

DNWC의 경우 최대내력은 6846.9 k·m, -6554.9 k·m으로 나타났으며 회전각 0.04rad 이후 보 부재 하부 플랜지 취성파단에 의해 실험이 종료되었다. 보 춤의 증가로 인한 내력상승을 제외하면 NWC실험체와 유사한 변형능력을 나타내었다.

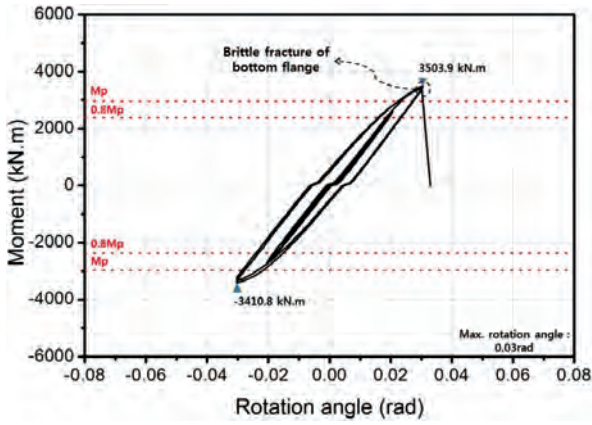
#### 3.4.3 접합부 변형능력 분석

휨재의 변형능력을 비교하기 위해서는 각 실험체별 항복점을 명확하게 측정할 필요성이 있다. 선행연구들을 통하여 반복하중에 의한 이력곡선은 골격곡선부와 바우싱거부, 탄성제하부로 이루어져 있으며 이중 골격곡선부의 경우 일방향 가력에 의한 하중-변형의 이력곡선과 그 궤도가 거의 일치함이 증명된 바 있다(秋山 宏, 1990).

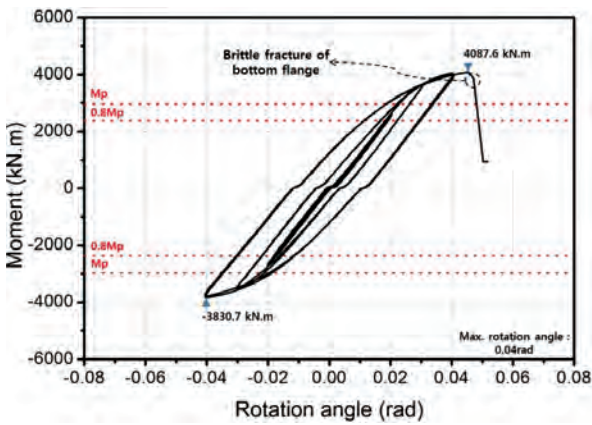
본 연구에서는 이와 같은 이론에 입각하여 각 실험체별 골격곡선을 추출한 후 General Yield Point Method를 사용하여 항복점을 측정하였다. 각 실험체별로 항복점과 함께 주요구성능을 표 5에 정리하였다. 표 5에서 괄목할만한 부분은 고강도강 실험체들의 항복변형각이 0.02rad내외에서 나타나고 있다는 점이다. 이는 일반 연강접합부의 탄성변형각이 0.01rad 내외인 것을 감안할 때 고강도강 접합부의 탄성 변형량이 2배가량 크게 나타남을 보여준다.

단조이력곡선에 나타난 바와 같이 논스캐럽공법으로 제작된 NWC, DNWC 실험체의 경우 정, 부방향으로 모두 0.04rad 이상의 변형능력을 나타내고 있으며 스캐럽공법을 적용한 WC 실험체에 비하여 소성변형능력이 2배 가량 크게 나타났다.

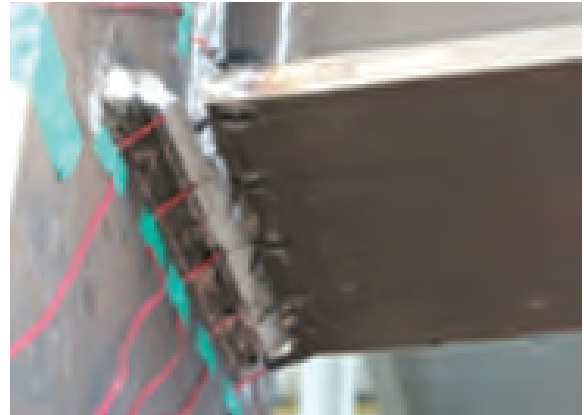
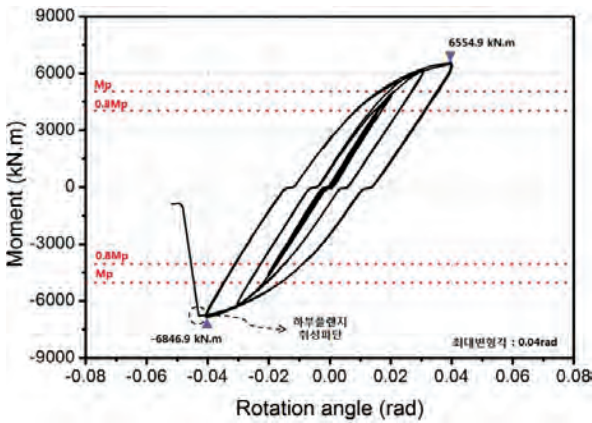
또한 앞서 모멘트-회전각 반복이력곡선의 결과와 더불어 판단하였을 때, 논스캐럽 공법으로 제작된 HSA800강 보-기둥 접합부는 보 춤 700mm수준까지 KBC2009에서 제시한 중간모멘트골조(IMF)의 요구성능을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) WC 모멘트-회전각 및 파단형상



(b) NWC 모멘트-회전각 및 파단형상



(c) DNWC 모멘트-회전각 및 파단형상

[그림 6] 실험체별 모멘트-회전각 관계 및 파단형상

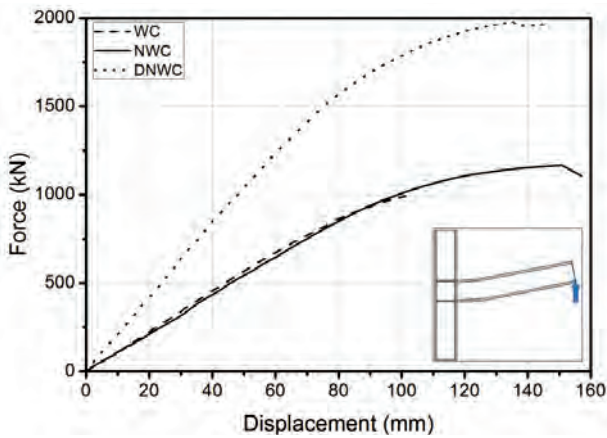
### 3.4.4 보단부 변형도 분석

그림 8은 동일한 부재단면이 사용되었으며 접합상세만 상이한 WC와 NWC실험체의 접합부 회전각에 따른 최대변형도를 비교한 것이다. WC실험체의 최대변형각인 0.03rad에

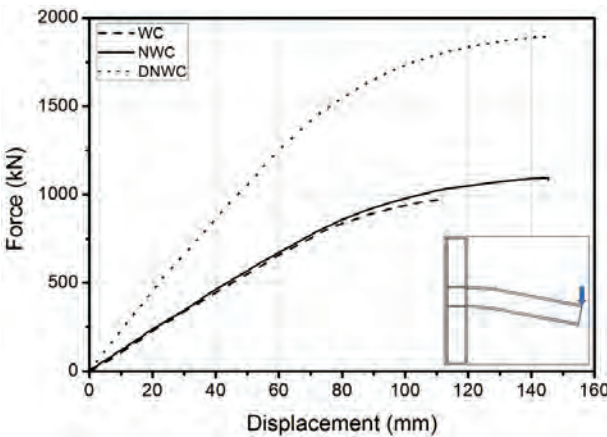
서의 변형도는 논스캘럽공법을 사용함에 따라 대략 60%까지 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

[표 5] 실험결과에 따른 주요 구조성능

Specimen	Loading direction	Initial stiffness (kN/mm)	Yield rotation angle (rad)	Yield moment (kN · m)	Mmax rotation angle (rad)	Maximum moment (kN · m)	Maximum rotation angle (rad)	Plastic rotation angle (rad)	Failure mode
WC	Positive(+)	11.25	0.0233	3213	0.0296	3504	0.0296	0.0063	Brittle Failure
	Negative(-)	11.24	0.0218	3003	0.0320	3411	0.0320	0.0102	
NWC	Positive(+)	10.84	0.0262	3476	0.0430	4088	0.0448	0.0186	Brittle Failure
	Negative(-)	11.52	0.0225	3176	0.0415	3831	0.0415	0.0190	
DNWC	Positive(+)	21.33	0.0214	5580	0.0391	6847	0.0420	0.0206	Brittle Failure
	Negative(-)	22.94	0.018	5059	0.0419	6554	0.0419	0.0239	

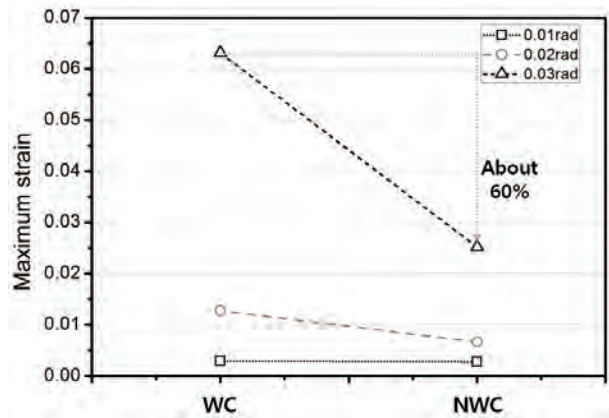


(a) 정방향 가력시



(b) 부방향 가력시

[그림 7] 단조이력곡선

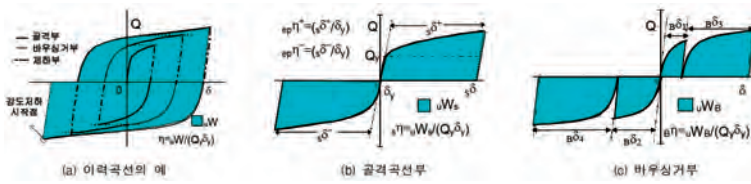


[그림 8] 접합상세에 따른 접합부 회전각에 대한 최대변형도 비교

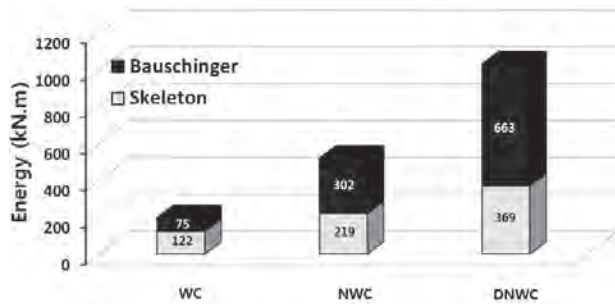
### 3.4.5 에너지 흡수능력

각 실험체별 에너지 흡수능력을 그림 9에 나타낸 방법을 사용하여 스킴레톤부와 바우싱거부로 나누어 그림 10에 나타내었다.

논스캘럽공법이 적용된 NWC실험체는 종래의 스킴레톤공법으로 이루어진 WC실험체에 비하여 스킴레톤부와 바우싱거부에 대한 에너지 흡수량에서 상대적으로 높은 수치를 나타내었다. 또한 보 춤에 영향에 따라 DNWC실험체의 경우 NWC에 비하여 큰 에너지 흡수량을 나타내었다. 논스캘럽공법이 적용된 실험체들은 스킴레톤공법이 적용된 WC실험체에 대하여 스킴레톤부에 대한 바우싱거부의 에너지 비가 더욱 크게 나타남에 따라 탄성이후 소성역에서 보다 많은 에너지를 축적할 수 있음을 확인할 수 있다.



[그림 9] 이력곡선의 분해



[그림 10] 에너지 흡수능력 비교

#### 4. 결론

본 고에서는 HSA800강 보-기둥 중간모멘트골조 이상의 구조성능을 확보할 수 있는 내진접합상세에 대하여 기술하였다. 보 단부의 변형도를 줄여 접합부 변형능력을 향상시키기 위한 대안으로서 논스캘럽 공법을 적용하였으며 실물대 접합부 반복재하실험을 실시하여 구조성능을 검증하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실험결과를 통하여 스텝공법이 적용된 보 춤 600 mm를 가지는 실험체(WC)의 경우 최대변형각은 0.03rad 내외로 나타났으며 탄성거동 이후 취약한 소성거동을 나타내었다.
- (2) 논스캘럽공법이 적용된 보 춤 600 mm, 700 mm를 가지는 실험체(NWC, DNWC)들의 경우 보 춤에 따라 최대내력의 차이가 발생하나 최대변형각의 경우 보 춤에 관계없이 0.04rad 내외, 내력상승률은 1.2이상으로 나타났다.
- (3) 논스캘럽공법의 경우 스텝공법에 비하여 스텝공법에 의한 단면결손부가 없기 때문에 최대응력지점이 되는 보 단부에서의 변형도를 효과적으로 줄일 수 있으며 이는 전체 접합부의 변형능력 향상으로 나타나는 것으로 판단된다.
- (4) 논스캘럽공법을 적용할 경우 보 춤 700 mm이하에서 층

분히 HSA800강용 중간모멘트접합상세로 활용 가능성을 검증하였다. 논스캘럽공법을 적용할 경우 4%의 층간변형능력을 발현하여 특수모멘트골조에 상당하는 상세로 평가가 되었다. 하지만 고강도강 실험체들의 항복변형각이 0.02rad내외에서 형성되고 있어서 소성변형능력을 고려할 경우 안정적으로 중간모멘트접합부로 활용 가능한 것으로 구조기술사회의 인정을 받았다.

본 기사에서는 지면관계상 HSA800 강재를 적용한 보-기둥 중간모멘트 접합부 논스캘럽 공법에 대해서 축약하여 기술하였다. 본 연구의 결과는 고강도강의 기둥-보 접합부 적용을 위한 설계기준 마련에 기초적인 데이터를 제공할 수 있을 것으로 판단되며 향후 추가적인 실험연구와 해석적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. SAC Joint Venture (2000) Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA-350.
2. 日本建築學會 (2001) 鋼構造接合設計指針.
3. 대한건축학회 (2009) 건축구조설계기준 및 해석(KBC 2009), 기문당
4. S.J. Chen (2001) Design of Ductile Seismic Moment Connections, Increased Beam Section Method and Reduced Beam Section Method, Steel Structure, pp.44-52
5. Engelhardt, M.D., Fry, G.T., Jones, S., Venti, M., and Holiday, S. (2000) Behavior and design of radius-cut, reduced beam section connections, SAC Background Document SAC/BD-00/17, SAC Joint Venture, Richmod, CA.
6. 한상환, 정진, 문기훈, 김진원(2012), “개선된 엑세스 홀 형상을 갖는 WUF-W접합부의 실험을 통한 내진성능평가”, 한국지진공학지 16권 6호(통권 제88호), 한국지진공학회
7. 오상훈, 최영재, 윤성기, 이동규(2010), “SN 강재가 사용된 강구조 용접모멘트접합부의 내진성능 평가”, 한국강구조학회 논문집 제22권 3호, pp.271-280, 한국강구조학회