

강종에 따른 고력볼트 보 이음부 인장거동 평가

김희동
인하공업전문대학 건축과

Evaluation of Tensile Behaviors of Beam Splice with High Strength Bolts According to Steel Grades

Hee-Dong Kim
Department of Architecture, Inha Technical College

요약 건축구조용 강종을 사용한 고력볼트 보 이음부 설계시 연결판 강종을 어떻게 결정할 것인가에 대해 적절한 강종 선택 기준 제시가 필요한 상황이다. 본 연구는 이를 위한 기초 연구 단계로 보 부재 고력볼트 이음부 플랜지를 모사한 인장시험체에 대한 정적가력시험을 통해 건축구조용 강종 적용 유무에 따른 인장거동 차이를 평가하고, 그 결과를 후속 연구에 활용하는데 목적이 있다. 이를 위해 이음부 내력 및 거동에 영향을 미칠 것으로 예상되는 플랜지 및 연결판의 두께와 강종 및 강도를 주요 변수로 시험체를 설계 및 제작하였다. 총 48개 시험체에 대한 인장시험결과 모든 시험체에서 공칭강도를 적용한 설계인장강도를 충분히 상회하는 인장하중 저항능력을 나타냈으며 연결판 설계강도가 플랜지 판 설계강도의 1.25배를 상회할 경우 플랜지 판의 파단에 따른 종국 상태 도달 가능성이 지배적인 것으로 나타났다. 그리고 플랜지 강종의 변화에 따른 최대인장하중의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났으나 변형에서는 차이가 나타났다. 그리고 시험 결과 보 부재의 강종과 연결판 두께가 이음부 거동에 영향을 미치는 주요 인자로 확인 되었다.

Abstract In designing a high strength bolted beam splice using steel for building structures, it is necessary to present the appropriate steel grade selection criteria for how to determine the cover plate steel grade. This study examined the difference in tensile behavior according to the steel grades through static tensile tests simulating the beam member high strength bolt joints flange. For this purpose, the specimens were designed and fabricated with the main variables, such as the thickness, steel grade and the strength of flange and cover plate, which are expected to affect the splice strength and behavior. The tensile test results for a total of 48 specimens showed that the tensile-load capacity exceeded the design tensile strength applied with a nominal strength of steel in all specimens. When the design strength of the cover plate exceeded 1.25 times that of the flange plate, the flange plate governed the behavior of splice. The change in maximum tensile load due to the change in flange steel grade is not very large, but there is a difference in deformation. The test results confirmed that the steel grade and thickness of the cover plate were the main factors affecting the beam splice behavior.

Keywords : Steel Grades, Beam Splice, High Strength Bolt, Tensile Test, Cover Plate

본 논문은 한국연구재단 연구과제(NRF-2016R1D1A1B03931956)로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hee-Dong Kim(Inha Technical College)

email: drkimhd@inhac.ac.kr

Received September 5, 2019

Accepted January 3, 2020

Revised October 10, 2019

Published January 31, 2020

1. 서론

1.1 연구배경

최근 국내에서도 내진설계에 대한 관심이 증가하면서 강구조 건축물의 내진설계시 일정 수준 이상의 소성변형 능력이 요구되는 수평하중 저항 시스템의 경우 내진 관련 성능이 우수한 SHN, SN 및 TMC와 같은 건축구조용 강종의 적용을 적극 권장하고 있으며[1], 실무에서도 이들 건축구조용 강종의 적용이 빠른 속도로 확대되고 있다[2].

이러한 건축구조용 강종의 사용시 고력볼트를 이용한 보 이음(beam splice) 방식을 적용할 경우 필연적으로 요구되는 연결판(cover plate)의 강종을 어떻게 결정할 것인가에 대해서 실무적으로 지속적인 문제들이 발생하고 있다.

현재 강구조 건축물의 보 이음부 설계시 연결판 강종 선정에 대해서는 별도의 명문화된 규정은 제시된 것이 없으나 실무에서는 통상적으로 보 부재와 동등 이상 강종을 적용하고 있으며, 기존에 SS 및 SM과 같은 강종이 적용된 H형강 보의 경우에는 연결판의 강종도 보 부재 강종과 동등한 SS 또는 SM강종의 판재류를 적용하는데 있어 강재 수급 등에 현실적인 문제를 유발하지 않았다.

하지만 H형강 보 부재에 건축구조용 강종을 적용할 경우 연결판도 동등한 건축구조용 강종의 판재(SN 또는 TMC)를 적용할 수 있다면 통상적인 방식의 적용에 큰 무리가 없으리라 판단되나, 현실적으로 연결판의 제작을 위해 건축구조용 판재류를 확보한다는 것이 강재 수급 현실을 고려할 때 거의 불가능한 경우가 대부분이다.

따라서 강종별 수급 현황과 같은 현실적인 문제를 고려하여 건축구조용 강종을 적용한 보의 우수한 내진 성능 발현을 기대할 수 있는 적절한 보 이음부 연결판 강종 선택 및 관련 설계방법에 대한 명확한 기준 제시가 필요한 상황이다.

이러한 보 이음부의 거동과 관련하여 이철호 등(1998)이 반복재하 실험에 대한 내진 거동에 대한 연구[3]를 수행하였으며, 최성모 등(2003)은 고력볼트 접합 이음 보의 탄소성 거동에 대한 실험적 연구[4]를 수행하였다. 또한 이훈년 등(2006)은 F13T 볼트를 적용한 경우에 대한 실험적 연구[5]를 수행하였으며, 김필중 등(2011)은 시공성 향상을 위한 새로운 이음부 개발과 관련된 연구[6]를 수행하였다. 하지만 선행된 연구들 중 보 부재 및 연결판의 강종 변화에 따른 영향에 대해서는 진행된 연구가 없어 이에 대한 검증 및 연구가 필요한 상황이다.

1.2 연구목적 및 방법

1.1에서 기술한 문제 해결을 위한 연구의 기초 단계로 고력볼트 보 이음부의 플랜지 부위를 모사한 인장실험체에 대한 정적가력실험을 통해 보 부재에 건축구조용 강종 적용 유무에 따른 고력볼트 이음부 인장거동의 구조적 차이를 인장하중 및 변위, 그리고 연결판의 변형률 변화를 기준으로 평가하여 주요 영향인자를 선별하고, 이를 추후 연결판 강종 변화의 영향을 평가하는데 기초 자료로 활용하는데 본 연구의 목적이 있다.

이를 위하여 실무현장에서 가장 일반적으로 사용되는 열간압연H형강(RH)을 적용한 고력볼트 보 이음부의 플랜지 판을 대상으로 한 인장실험체를 제작하고, 이에 대한 정적 인장가력실험을 실시하였다. 가력실험은 U.T.M을 이용 이음부에 파단이 발생할 때까지 시행하였으며, 시험편의 인장하중, 인장변형 및 연결판의 변형률, 그리고 파단 성상 등을 확인하였다.

실험을 통하여 확인된 결과들은 강종, 연결판 두께 등의 주요 변수들의 변화를 기반으로 검토하여 최종적으로 보 부재의 강종변화에 따른 영향 및 주요 영향인자를 평가하였다. 연구의 주요 흐름은 Fig. 1에 간단히 정리하였으며, 각 단계별 세부적인 사항은 해당 장에서 상세하게 기술하였다.

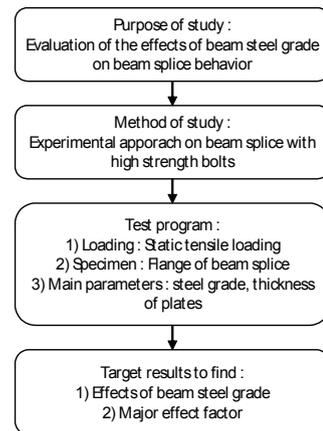


Fig. 1. Flow of study

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획

고력볼트 보 이음부를 모사한 인장실험체 계획을 위해 통상적인 강구조 건축물의 H형강 고력볼트 보 이음부 중

거동에 미치는 영향이 큰 플랜지 부분을 대상으로 하였다.

고력볼트 이음 형식은 실무에서 보 이음부 설계시 가장 많이 사용되는 2면 전단형태의 연결부를 가정하였다. 연결판의 설계항복강도(F_y)는 플랜지 판의 설계항복강도와 동일하게 설정하였으며, 연결판의 두께는 플랜지판의 인장내력을 전달 가능하도록 연결판 두께의 합이 플랜지판 이상이 되도록 하였다. 고력볼트는 이음부의 설계강도가 연결판 또는 플랜지판의 항복 또는 파단에 의해 결정될 수 있도록 토크쉬어볼트 (S10T, M22)를 적용하여 설계하였으며 연단거리, 볼트 중심간 거리 등은 실무 적용 기준을 준하여 설계하였다.

실험체 제작은 보 이음부 가정 열간압연 H형강 플랜지를 직접 절단, 가공하여 실험체 제작에 사용하였으며, 연결판은 판재를 절단, 가공하여 최대한 실제 보 이음부의 강재 상황에 근접할 수 있도록 하였다.

실험체 설계에 적용된 주요 변수는 보 강종 변화에 따른 거동에 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요 인자인 플랜지 및 연결판의 두께와 강종 및 강도를 선정하였다.

플랜지 두께는 열간압연 H형강 중 보 부재로 주로 사용되는 H600 ~ H900 series 중 정치수 3가지 단면 (H600, H700, H900)을 기준으로 17, 24, 28mm를 선정하였다. 연결판 두께는 생산 및 수급 가능 강판 규격을 고려하여 플랜지 두께와 연결판 두께의 합이 유사하도록 하여 설계 내력이 동등한 수준이 되도록 한 경우와 연결판 두께의 합이 플랜지 두께보다 1.14(H900), 1.25(H700) 및 1.40(H600)배 더 크도록 설정한 경우를 변수로 하였다. 이를 통하여 소성변형을 플랜지 판에 집중시켰을 때(플랜지 두께 < 연결판 두께 합)와 연결판에도 소성변형을 고려한 경우(플랜지 두께 ≃ 연결판 두께 합)의 거동 차이를 고찰 할 수 있도록 하였다. 실험체의 폭(B)은 H형강 치수를 고려하여 H600 series는 80mm, 나머지는 90mm로 하였다.

플랜지 강종은 열간압연 H형강에 주로 사용되어온 일반강종인 SS, SM 강종과 건축구조용 강종인 SHN 강종을 적용하여 강종별 영향을 평가할 수 있도록 하였으며 강도는 인장강도 기준 400MPa, 490MPa 두가지로 하였다. 연결판의 강종 및 강도는 플랜지 판의 강도와 동일한 강도의 SS, SM 강종을 적용하였다.

각 실험체는 2개씩 제작하였으며 실험체 별 주요 변수는 Table 1에 요약 정리하였고 실험체 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Specimens list

Specimen	Flange plate		Cover plate		No. of T.S. bolts
	Thickness (mm)	Steel grade	Thickness (mm)	Steel grade	
H600A	17	SS400	9	SS400	2
H600B	17	SHN400	9	SS400	2
H600C	17	SM490A	9	SM490A	2
H600D	17	SHN490	9	SM490A	2
H700A	24	SS400	12	SS400	3
H700B	24	SHN400	12	SS400	3
H700C	24	SM490A	12	SM490A	3
H700D	24	SHN490	12	SM490A	3
H900A	28	SS400	14	SS400	3
H900B	28	SHN400	14	SS400	3
H900C	28	SM490A	14	SM490A	3
H900D	28	SHN490	14	SM490A	3
H600E	17	SS400	12	SS400	2
H600F	17	SHN400	12	SS400	2
H600G	17	SM490A	12	SM490A	2
H600K	17	SHN490	12	SM490A	2
H700E	24	SS400	15	SS400	3
H700F	24	SHN400	15	SS400	3
H700G	24	SM490A	15	SM490A	3
H700K	24	SHN490	15	SM490A	3
H900E	28	SS400	16	SS400	3
H900F	28	SHN400	16	SS400	3
H900G	28	SM490A	16	SM490A	3
H900K	28	SHN490	16	SM490A	3

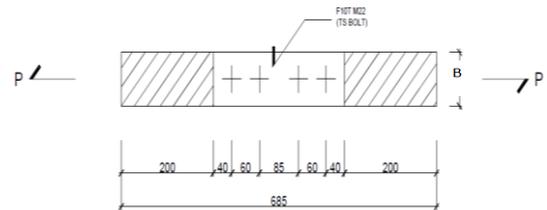


Fig. 2. Specimen shape

2.2 가력 및 계측 계획

가력은 5,000kN급 U.T.M을 사용하여 정적 인장가력을 실시하였다. 가력 속도는 통상적으로 인장시험편에 적용되는 속도(변형을 변화율 50%/min)를 적용하였으며, 가력 종료 시점은 실험체의 인장 파단이 발생할 때로 하였다.

계측은 인장하중 및 인장변위(실험체 전체 변위)와 연결판 중앙부의 변형률을 소성 변형률계기지를 통하여 측정하였다. 그리고 가력 종료 이후 각 실험체 별 파괴 성상 및 변형 형상을 관측하였다.

3. 실험결과

각 실험체 제작에 사용된 H형강 및 판재의 기계적 특성을 파악하기 위해 KS에 규정된 바에 따라 소재인장시험(coupon test)을 실시하였다. 실험 결과 실험체 제작에 사용된 모든 강재는 관련 KS에 규정된 사항을 모두 만족하고 있는 것으로 파악되었으며, 그 주요 결과를 Table 2에 정리하였다. 단, 금번 실험체 제작은 KS 개정 이전에 진행되어 제작 당시 KS를 기준으로 강재 성능을 평가하였다.

Table 2. Material properties of steels

Type	Steel grade	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E.L. (%)	Y.R.
H600	SS400	323	457	29.8	0.71
H600	SHN400	353	477	28.3	0.74
H600	SM490A	462	579	23.0	0.80
H600	SHN490	376	510	25.5	0.74
H700	SS400	296	462	28.3	0.64
H700	SHN400	310	455	29.0	0.68
H700	SM490A	356	500	29.2	0.71
H700	SHN490	393	539	28.0	0.73
H900	SS400	320	477	32.0	0.67
H900	SHN400	351	484	26.0	0.73
H900	SM490A	383	553	24.0	0.69
H900	SHN490	386	527	28.5	0.73
PL-9	SS400	305	461	29.0	0.66
PL-9	SM490A	412	573	23.0	0.72
PL-12	SS400	300	453	29.0	0.66
PL-12	SM490A	404	572	25.0	0.71
PL-14	SS400	290	440	31.0	0.66
PL-14	SM490A	401	544	26.0	0.74
PL-15	SS400	295	453	29.0	0.65
PL-15	SM490A	375	532	25.0	0.70
PL-16	SS400	286	442	30.0	0.65
PL-16	SM490A	408	546	27.0	0.75

인장실험체에 대한 가력 실험 결과 중 최대인장하중(Max. load), 최대인장하중 시 인장변형량(Disp. at Max load), 최초 미끄럼발생 하중(Load at first slip), 최초 미끄럼 발생시 인장변형량(Disp. at first slip)을 Table 3에 정리하였다. 그리고 최대인장하중 도달시 연결판 양측 중앙부 변형을 평균값을 Table 4에 정리하였다.

그리고 실험체의 최종 파단 성상을 검토한 결과 실험체 별 파단 위치의 차이가 있음이 확인되었다(Fig. 3 참조).

이에 각 실험체의 파단 부위를 Table 5에 정리하였다.

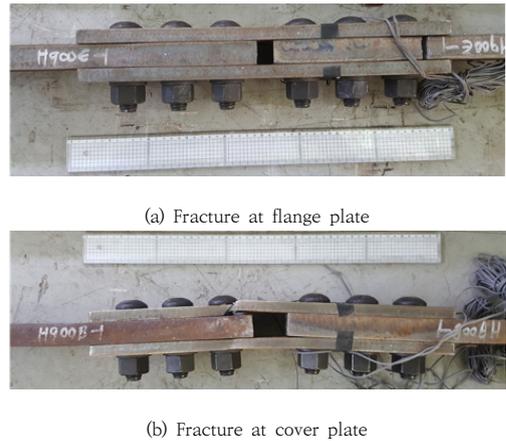


Fig. 3. Fracture of specimens

3.1 인장하중

보 이음부에 가장 기본적으로 요구되는 하중 전달 능력을 확인하기 위해 각 실험체 별 최대인장하중 및 최초 미끄럼 발생시 하중을 강재의 설계강도(F_y , F_u)를 이용하여 산정한 이음부 설계인장강도($\phi \cdot P_t$)로 무차원화 한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

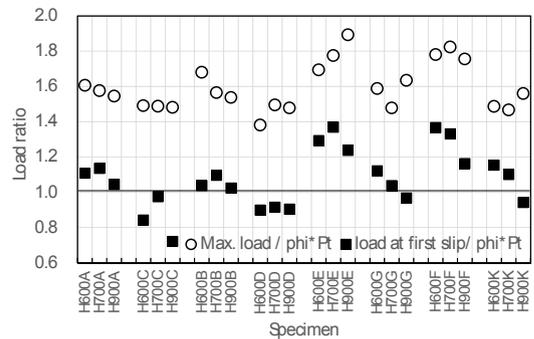


Fig. 4. Load ratio between test loads and design strengths

Fig. 4을 보면 H600D를 제외한 모든 실험체에서 최대인장하중이 설계인장강도의 1.4배 이상을 상회하는 것으로 나타났다. 그러나 최초 미끄럼 발생은 인장강도 490MPa급 강종을 적용한 일부 경우(C, D, G, K 실험체)에서 비교적 낮은 하중에서 미끄럼이 발생한 것이 확인되었다. 이는 강재 강도 상승에 따른 설계기준강도의

Table 3. Tensile tests results

Specimen	Max. load (kN)	Disp. at Max. load (mm)	Load at first slip (kN)	Disp. at first slip (mm)	Specimen	Max. load (kN)	Disp. at Max. load (mm)	Load at first slip (kN)	Disp. at first slip (mm)	Specimen	Max. load (kN)	Disp. at Max. load (mm)	Load at first slip (kN)	Disp. at first slip (mm)
H600A_1	456.5	44.1	319.1	1.0	H700A_1	719.1	31.3	525.9	1.3	H900A_1	825.5	33.1	564.6	1.2
H600A_2	460.9	45.1	313.5	0.9	H700A_2	720.8	36.3	511.8	1.3	H900A_2	821.4	34.7	548.4	1.1
H600B_1	494.6	36.7	277.0	0.7	H700B_1	715.4	40.0	497.4	1.2	H900B_1	820.9	36.4	539.7	1.2
H600B_2	465.1	37.8	316.2	0.9	H700B_2	714.5	42.3	504.9	1.3	H900B_2	818.2	34.2	552.8	1.8
H600C_1	525.1	32.9	300.4	0.7	H700C_1	859.0	41.7	547.2	1.1	H900C_1	1004.1	35.1	321.7	1.0
H600C_2	518.5	29.8	289.0	0.7	H700C_2	873.5	33.1	588.0	1.2	H900C_2	1008.7	34.1	657.3	1.2
H600D_1	484.0	30.4	311.4	0.8	H700D_1	870.4	34.6	540.0	1.0	H900D_1	1000.2	36.9	620.3	1.1
H600D_2	482.6	30.2	317.5	0.8	H700D_2	870.4	37.2	526.1	1.0	H900D_2	1007.5	35.9	608.2	1.1
H600E_1	486.9	31.9	366.1	1.0	H700E_1	849.1	38.5	649.8	1.4	H900E_1	1009.5	35.2	619.3	1.0
H600E_2	480.5	31.5	373.0	1.3	H700E_2	773.4	29.5	601.2	2.2	H900E_2	1008.4	33.7	699.7	1.2
H600F_1	508.4	33.3	406.4	1.2	H700F_1	893.1	38.4	606.3	1.2	H900F_1	943.4	32.6	623.7	1.0
H600F_2	508.9	33.9	374.9	1.0	H700F_2	772.9	27.2	610.3	2.3	H900F_2	928.4	28.9	615.7	3.2
H600G_1	553.2	22.2	394.6	1.0	H700G_1	874.0	25.6	606.3	1.3	H900G_1	1112.8	41.8	652.6	1.1
H600G_2	558.3	20.7	390.2	1.1	H700G_2	846.6	24.7	601.5	1.6	H900G_2	1107.1	40.0	661.8	1.2
H600K_1	523.4	26.2	411.3	1.2	H700K_1	844.8	24.4	620.0	1.4	H900K_1	1061.8	35.6	619.1	1.0
H600K_2	516.8	31.1	395.8	1.3	H700K_2	863.3	24.3	662.0	2.1	H900K_2	1056.9	38.3	660.3	1.1

Table 4. Average strain of cover plates at maximum load

Specimen	Strain ($\times 10^{-6}$)	Specimen	Strain ($\times 10^{-6}$)	Specimen	Strain ($\times 10^{-6}$)
H600A_1	4926	H700A_1	10590	H900A_1	14450
H600A_2	3618	H700A_2	10108	H900A_2	10339
H600B_1	4046	H700B_1	4363	H900B_1	11924
H600B_2	4245	H700B_2	9379	H900B_2	12384
H600C_1	2604	H700C_1	699	H900C_1	2925
H600C_2	2212	H700C_2	1537	H900C_2	3321
H600D_1	1481	H700D_1	925	H900D_1	1220
H600D_2	1160	H700D_2	937	H900D_2	376
H600E_1	915	H700E_1	2054	H900E_1	998
H600E_2	1743	H700E_2	1225	H900E_2	988
H600F_1	1063	H700F_1	930	H900F_1	1331
H600F_2	1056	H700F_2	1269	H900F_2	928
H600G_1	1067	H700G_1	1717	H900G_1	4697
H600G_2	372	H700G_2	1408	H900G_2	5140
H600K_1	969	H700K_1	1471	H900K_1	2387
H600K_2	682	H700K_2	1908	H900K_2	2117

향상은 있으나 설계미끄럼강도는 강재의 강도와는 무관한 조건에 의해 결정되어 나타난 현상으로 판단되며, 금번 실험체는 플랜지 및 연결판의 거동에 의해서 최대내력이 결정되도록 계획되었으므로 초기 미끄럼 발생이 연구 결과 달성에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다. 다만, 초기 미끄럼 발생 현상에 대해서는 추후 추가적인 검토가 필요할 수 있다고 판단된다.

금번 실험결과 모든 실험체에서 공칭강도를 적용한 설계인장강도를 충분히 상회하는 인장하중 저항능력(하중 전달능력)을 나타냈다. 따라서 기존 설계법에 따라 지압 강도를 고려하여 이음부 한 경우에는 강종 변화가 하중 전달 능력에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 5. Fracture part

Specimen	Fracture part	Specimen	Fracture part	Specimen	Fracture part
H600A_1	F	H700A_1	C	H900A_1	C
H600A_2	F	H700A_2	C	H900A_2	C
H600B_1	C	H700B_1	C	H900B_1	C
H600B_2	C	H700B_2	C	H900B_2	C
H600C_1	C	H700C_1	F	H900C_1	C
H600C_2	C	H700C_2	C	H900C_2	C
H600D_1	F	H700D_1	C	H900D_1	C
H600D_2	F	H700D_2	C	H900D_2	C
H600E_1	F	H700E_1	F	H900E_1	F
H600E_2	F	H700E_2	F	H900E_2	F
H600F_1	F	H700F_1	F	H900F_1	F
H600F_2	F	H700F_2	F	H900F_2	F
H600G_1	F	H700G_1	F	H900G_1	C
H600G_2	F	H700G_2	F	H900G_2	F
H600K_1	F	H700K_1	F	H900K_1	F
H600K_2	F	H700K_2	F	H900K_2	F

note) F : flange plate / C : cover plate

3.2 연결판의 변형

보 이음부 연결판의 변형 성능을 평가하기 위해 최대 인장하중 도달시 연결판 중앙부에 부착된 소성계이지의 평균값(Table 4 참조)을 이용하여 각 변수별 최대하중시 연결판의 변형률을 강재 설계항복강도를 이용하여 산정한 항복변형률(F_y / E_s)로 무차원화한 결과의 평균값을 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Average strain ratio between tests and nominal yield strain

Variables		Steel grade	
		400MPa	490MPa
Thin cover plate	Normal	7.86	1.40
	Architectural	6.74	0.64
Thick cover plate	Normal	1.15	1.51
	Architectural	0.96	1.00

무차원화한 결과에서는 인장장도 400MPa급 실험체에서는 판의 두께가 얇은 경우가 월등하게 연결판의 변형률이 높은 것으로 나타났으며, 전반적으로 플랜지에 건축구조용 강종이 적용된 경우가 일반 강종이 적용된 경우에 비해 연결판의 변형률이 86~83% 정도로 낮게 나타났다.

하지만 인장장도 490MPa급 실험체의 경우에는 판두께가 두꺼운 경우에서 변형률이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 건축구조용 강종을 적용하였을 경우에 연결판 변형률이 46~66% 정도로 낮게 나타났다.

따라서 연결판의 변형률 변화는 400MPa급 강재에서는 두께 차이에 따른 영향이 매우 크게 나타났으나 490MPa급 강재에서는 그 영향이 감소하였으며, 건축구조용 강종을 플랜지판에 적용할 경우 연결판의 변형률이 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 건축구조용 강재가 가진 우수한 변형성능으로 인하여 플랜지 판이 전체 변형에 기여하는 바가 증가하여 나타난 현상으로 판단된다. 또한 이러한 현상은 강재의 강도가 증가할수록 크게 나타나는 것으로 확인 되었다.

3.3 파괴 성상

금번 실험에서 최종 파괴 모드는 연결판에서 파단이 발생한 경우와 플랜지 판에서 파단이 발생한 경우로 크게 나누어 볼 수 있다(Fig. 3 참조).

각 실험체의 인장파단 성상을 정리한 Table 5를 보면 연결판의 두께가 플랜지 내력에 맞추어 설계가 된 경우(A~D series)에는 플랜지 판에서 파단이 발생한 경우가 총 24개 실험체 중 5개로 20.8%를 차지하였다. 연결판 두께가 플랜지 내력을 상회하도록 설계된 경우(E~K series)에는 플랜지 판에서 파단이 발생한 경우가 총 24개 실험체 중 23개로 95.8%를 차지하였다. 플랜지에서 파단이 발생한 1개의 실험체(H900G_1)도 연결판 대 플랜지 판의 내력비가 1.14로 두께 증감비율이 가장 낮은 실험체였다.

금번 실험에서 연결판에서 파단이 발생한 실험체의 최대하중시 연결판 평균 변형률은 5.629×10^{-6} 이었으며, 플랜지에서 파단이 발생한 실험체의 최대하중시 연결판 평균 변형률은 1.629×10^{-6} 으로 약 3.46배 차이가 있었다. 하지만 최대하중시 평균 인장변형량은 각각 35.7mm와 32.1mm로 그 차이는 1.11배로 나타났다. 따라서 플랜지 파단이 발생한 경우에는 플랜지에 변형이 집중되었다는 것을 확인할 수 있으며 파단 부위 변경에 따른 전체 변형량의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 전체 변형 성능에는 큰 변화를 주지 않으면서 플랜지 판에 변형을 집중시키는 것도 가능성이 충분히 있다고 보여진다.

일반적으로 설계단계에 사용하는 강재의 설계강도(F_y, F_u)와 실제 강도(σ_y, σ_u) 차이와 보 이음부 실무 설계시에는 플랜지의 내력을 충분히 상회 하도록 연결판의 두께를 산정하게 된다는 점 등을 고려하고 본 실험의 결과를 기반으로 판단할 때 실무에서 적용되는 보 이음부에서는 연결판 설계내력이 플랜지 판 내력의 1.25배를 상회할 경우 플랜지 판의 변형 및 파단에 따른 종국 상태 도달 가능성이 지배적인 것으로 판단된다.

4. 변수별 영향 고찰

4.1 판두께의 영향

4.1.1 플랜지 판 두께 영향

고력볼트 이음부 인장저동에 보 플랜지 판 두께가 미치는 영향을 평가하기 위해 플랜지 판 두께가 가장 얇은 H600 series와 각 변수별 최대인장하중의 비율을 Fig. 5에 나타내었다.

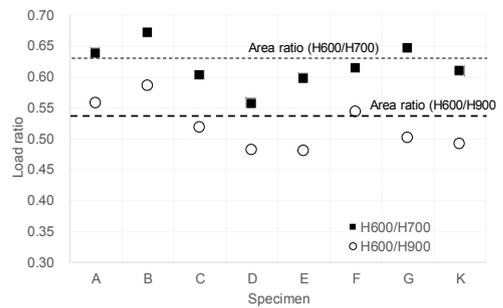


Fig. 5. Max. tensile load ratio between H600 and others

최대인장하중 비율은 H700의 경우 평균 0.62(판 단면적 비율 : 0.629), H900의 경우 평균 0.52(판 단면적 비율 : 0.539)로 나타났다.

Fig. 5에서 보면 H700, H900 실험체의 최대인장하중 증가 비율은 표준편차 0.035(H600/H700), 0.039(H600/H900)의 수준으로 플랜지 판 단면증가 비율과 유사하게 나타났다. 따라서 일반적으로 설계되는 보 이음부와 유사한 조건에서 파단의 대부분이 플랜지판에서 발생한 본 실험은 플랜지 판의 증가가 최대인장하중 증가에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 현상은 각 변수별 연결판의 영향을 살펴보면 명확히 알 수 있다. 연결판 두께의 합이 플랜지판과 유사한 A~D 실험체의 경우 표준편차 0.05~0.045 수준이며, 연결판의 두께 합이 플랜지 판보다 두꺼운 E~K 실험체의 경우에는 표준편차 0.021~0.028로 나타나 연결판 두께가 증가할 경우 내려 결정이 플랜지 판에 의해서 명확하게 좌우됨을 확인할 수 있다.

최초 이음부 미끄럼 발생 하중의 비율은 0.578(H700), 0.629(H900)의 평균값을 나타냈으며, 최초 미끄럼 발생 시 변위의 비율도 0.658(H700), 0.703(H900)으로 나타났다. 따라서 최초 미끄럼 발생 하중 및 변위는 최대인장하중과 그 경향이 달리 나타났으며, 이는 미끄럼 발생하중은 판 두께에 의하여 좌우되는 결과가 아니라 판 사이의 마찰력과 도입된 장력에 의해 결정되므로 나타난 현상이라 판단된다.

이에 비해 최대하중시 변위값의 비율은 평균값으로 0.980(H700), 1.009(H900)로 플랜지 판 두께의 변화에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 전체 변위는 플랜지 판의 변형과 연결판의 변위의 합으로 표현되기 때문에 나타난 현상이라 판단된다. 따라서 플랜지 판의 변형을 유도할 경우에도 전체 변위값에 큰 차이 없이 목표한 거동을 확보할 수 있다고 판단된다.

4.1.2 연결판 두께 영향

연결판 두께 변화에 따른 영향을 평가하기 위해 각 실험체 별로 연결판 두께가 얇은 경우와 두꺼운 경우 최대인장하중 및 최대인장하중시 변위 비율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 연결판 두께 변화에 따른 최대인장하중(L)의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났다(표준편차 0.01 ~ 0.08). 이는 앞서 플랜지 판두께의 변화 영향과 동일한 경향으로 최대인장하중은 플랜지판에 의해서 결정되고 있는 것을 뒷받침하고 있다고 판단된다.

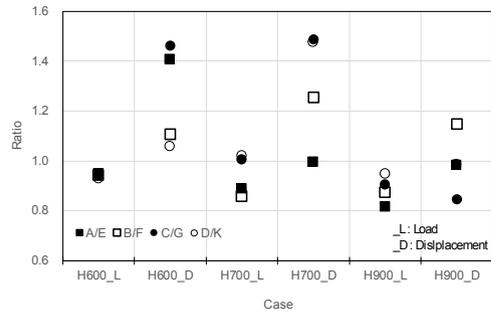


Fig. 6. Max. tensile load and displacement ratio between thin and thick cover plate

최대하중시 변위값(D)의 경우 실험체 변수에 따라서 편차가 나타나고 있다. 연결판 두께 변화에 따른 변형량의 차이가 증가하는 것은 H600에서는 건축구조용 강종(SHN)을 적용한 경우(B, D, F, K)보다 일반강종(SS, SM)을 보 부재에 적용한 경우(A, C, E, G)에 더 크게 나타났으나, H700 및 H900에서는 건축구조용 강종을 적용한 경우가 더 크게 나타났다.

최대하중시 변위는 최초 미끄럼 발생 시점에 의해 영향을 받으므로 변형에 연결판의 기여도를 좀 더 명확하게 평가하기 위해 각 실험체별로 연결판의 두께가 얇은 경우(A, B, C, D)와 연결판 두께가 두꺼운 경우(E, F, G, K)의 연결판 변형률 비율을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 N은 일반강종의 경우를 나타내며, A는 건축구조용강종을 의미한다.

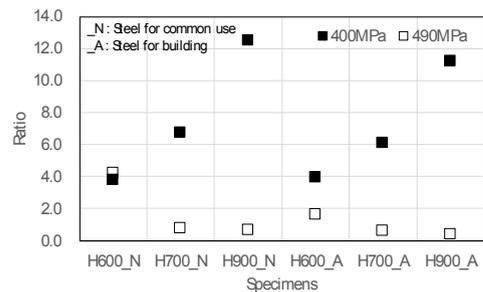


Fig. 7. Strain ratio of cover plate between thin and thick cover plate

비교 결과를 살펴보면 전체적인 경향은 항복강도에 따라서 일반강종의 경우와 건축구조용 강종의 경우가 유사하며, 400MPa급 강종에서 연결판 두께에 따른 변형률 변화가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 기반으로 볼 때 연결판의 두께 증가에

따른 내력 변화는 크지 않으나 최대하중시 변형에는 영향을 미치며, 저강도 강재의 경우 연결판 두께 증가에 따른 연결판 변형 기여도 변화가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4.2 강종의 영향

플랜지 판의 건축구조용 강재 여부에 따른 영향을 확인하기 위해 각 동일 변수별 일반강종(SS, SM)과 건축구조용강종의 연결판 변형률 비율을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 S는 연결판 두께가 플랜지판과 유사한 경우, T는 연결판 두께가 플랜지판보다 두꺼운 경우를 나타낸다. 비교 결과를 보면 H600, H700의 경우에는 변수 변화에 따른 변형률 비율에 진폭이 그리 크지 않으나 H900의 경우에는 인장강도 490급에서 그 차이가 2.2 ~ 5.6배 정도로 매우 크게 나타났다. 이는 타 강종 대비 H900 형강에서 일반강종과 건축구조용 강종간의 소재 연신율 차이가 비교적 크게 나타나 발생한 현상이라 판단된다.

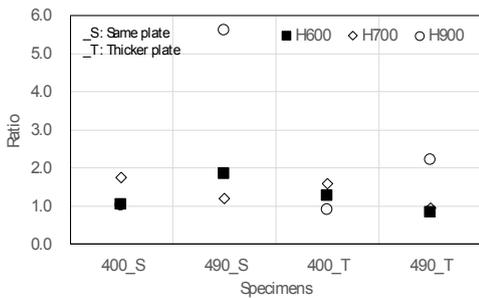


Fig. 8. Strain ratio between normal and architectural steel

이상의 결과를 보면 연결판의 두께가 얇고 강도가 낮은 경우에는 연결판에 항복 현상이 상대적으로 크게 유도되나 강도가 증가하거나 판의 두께가 증가하면 연결판과 플랜지 판 사이의 변형률 분배가 증가되는 것으로 판단되며, 이러한 현상은 플랜지 판에 건축구조용 강종을 적용한 경우에 더 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

또한 강종 변화에 따른 최대인장하중 및 최대인장하중시 변위의 변화를 확인하기 위해 일반강종(SS, SM)과 건축구조용 강종의 최대하중 및 최대하중시 변위 비를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 _S는 연결판 두께가 얇은 경우이며, _T는 연결판 두께가 두꺼운 경우를 나타낸다. 그리고 연결판에 부착된 양측의 소성계이지 평균값을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 _N은 일반강종을 나타내며, _A는 건축구조용 강종의 결과를 나타낸다.

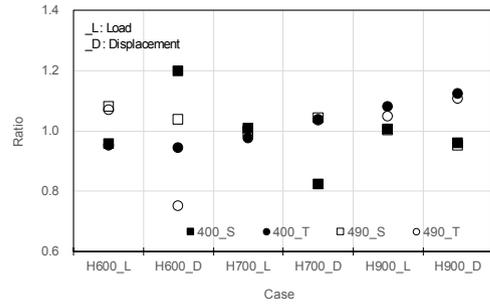


Fig. 9. Ratio between normal and architectural steel grade

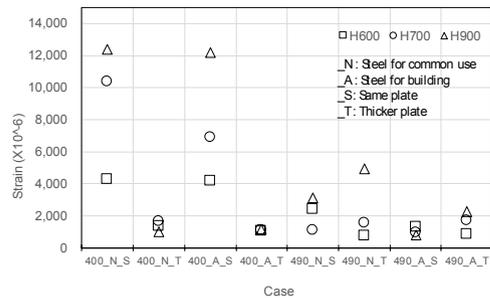


Fig. 10. Average strain value of cover plates

결과를 살펴보면 플랜지 강종의 변화에 따른 최대인장하중의 변화는 그리 크지 않은 것으로 보이나 변형성상에서는 차이가 나타나고 있다. 이는 앞선 판 두께의 변화 고찰시에도 확인된 사항과 일치한다.

특히 이러한 보 부재 강종 변화에 따른 변형률 변화 경향은 변형률의 차이가 발생한 H900 실험체를 제외하더라도 인장강도 400MPa급 강재에서 보다 490MPa급 강재에서 다소 명확하게 확인되고 있다.

4.3 주요 영향인자

상기의 연구 결과를 통하여 고려볼트 보 이음부 보 부재의 강종 변화는 인장하중 전달능력에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 하지만 보 부재에 건축구조용 강종을 적용한 경우 플랜지의 변형 기여도가 증가하는 것으로 나타났으며, 강도 차이도 변형성능에 영향을 미치고 있는 것으로 확인되었다. 그러므로 변형성능적인 측면에서는 강종 변화의 영향이 있다고 판단된다.

판두께 변화와 관련해서는 연결판의 두께를 일정 수준 이상 확보할 경우 인장하중 전달성능은 플랜지판의 두께에 의해서 제어 할 수 있을 것으로 예상되며, 전체 변형성능에 큰 영향을 주지 않으면서 플랜지 판에 변형이 집중되도록 유도할 수 있는 것으로 확인되었다.

따라서 금번 실험에 근거하여 보 부재의 강종과 연결판의 두께가 보 이음부의 거동을 제어하는데 중요한 역할을 하는 인자로 판단된다.

5. 결론

금번 연구 결과를 간략하게 정리하면 다음과 같다.

- 1) 모든 실험체에서 설계인장강도를 충분히 상회하는 인장하중 전달능력을 나타냈으며, 플랜지 판 강종 변화에 따른 하중 전달능력 차이는 없는 것으로 나타나 하중 전달성능 측면에서는 강종 변화 영향은 미미하다고 판단된다.
- 2) 연결판 두께 증가로 연결판 설계강도가 플랜지 판 설계강도의 1.25배를 상회할 경우 플랜지 판의 파단에 따른 종국 상태 도달 가능성이 지배적인 것으로 나타나 설계시 변형 지배 요소를 고려할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 건축구조용 강종을 플랜지판에 적용할 경우 변형이 플랜지 판으로 유도되는 효과가 나타났으며, 이 경우에도 전체 실험체 변형량에는 큰 차이가 확인되지 않았다. 따라서 변형을 특정 요소로 유도하여도 이음부의 소성변형 성능을 유지할 수 있는 가능성이 확인 되었다.
- 4) 고력볼트 보 이음부의 거동을 제어하기 위한 주요 인자는 보 부재의 강종과 연결판의 두께 인 것으로 판단된다.
- 5) 후속 연구를 통하여 보 부재에 건축구조용 강종이 적용되고 연결판에 특정 조건이 부여될 경우 전체 변형 성능에 큰 변화 없이 연결판의 소성거동을 억제하면서 건축구조용 강종이 적용된 보 부재에 소성변형을 유도 할 수 있는 방안의 제시 검토가 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] AIK, Korean Building Code and commentary, p.1221, AIK, 2019, p.886

[2] S.H.Lee, Hyundai steel seismic steel sales are expended, CEO score daily, 2019.08.
<http://www.ceoscoredaily.com/news/article.html?no=58703>, 2019.08.01

[3] C.H.Lee, J.W.Park, "Cyclic Seismic Performance of High-Strength Bolted-Steel Beam Splice", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.2, No.4, pp.115-122, Dec., 1998

[4] S.M.Choi, J.H.Kim, W.K.Rho, "Elasto-Plastic Behavior of Steel Beams with High Strength Bolted Splices", *Journal of KSSC*, Vol.15, No.5, pp. 531-539, Oct., 2003

[5] H.W.Lee, S.K.Kim, J.S.Lee, J.H.Kim, W.K.Kim, "Experimental Study of H-beam Splices Using F13T High-Tension Bolts", *KSSC-CONFERENCE 2006*, KSSC, Busan, Korea, Vol.17, pp. 87-90, Jun., 2006

[6] P.J.Kim, Y.S.Boo, J.G.Yang, E.T.Lee, S.S.Kim, "Development and Performance Evaluation of the Fourth Generation H-section Beam-to-Column Weak Axis Connection for Improving Workability", *Journal of KSSC*, Vol.23, No.3, pp. 295-304, Jun., 2011

김 희 동(Hee-Dong Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 중앙대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 중앙대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2006년 8월 ~ 2012년 2월 : 현대제철주식회사 차장
- 2012년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 건축과 부교수

<관심분야>

건축구조, 강구조, 구조용 강재