볼트 구멍 크기에 따른 TS 고력볼트 접합부 거동 평가

Evaluation on the Behavior of Slip Critical Joints with TS High Strength Bolts Subjected to a Size of Bolt Holes

이 현 주[1] 김 강 석[2] 나 환 선[3] 이 강 민[4]* 김 현 철[5]
Lee, Hyeon Ju Kim, Kang Seok Nah, Hwan Seon Lee, Kang Min Kim, Hyun Chul

Abstract

The oversized and slotted holes are frequently required for the built-up in construction sites. The foreign provisions specify the reduction of the slip load subjected to the size of bolt holes and the direction of load. There are no domestic building codes and researches on the bolt holes. Therefore, it is necessary to evaluate a change of joint strength quantitatively according to the bolt-hole size and surface condition by means of experiment. This study was conducted to evaluate the slip load subjected to the size of bolt holes ,and measured on a change of clamping force of high strength bolts during 168 and 800 hours to analyze the trend of relaxation after fastening bolts. Torque shear bolts defined on KS B 2819 was used for the specimen. Test results exhibit that the variation on the slip load of the others was below 10% by contrast with the standard hole and the highest rate of relaxation was 2.66% of the initial clamping force at the case of the long-slotted hole of 2.5D.

Keywords : High strength bolts, Hole size of bolts, Slip load, Slip coefficient, Relaxation

1. 서 론

철골조 건설공사 현장에서 철저한 품질관리를 통해 제작된 강재를 반입하여 조립하더라도, 온도변화 및 선행 공정상의 시공오차로 인하여 볼트 구멍 간의 불일치가 발생하여 고력볼트 체결작업에서 볼트 구멍을 확대하는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 현장에서의 임의적인 볼트 구멍의 가심은 마찰면적 감소 및 응력집중으로 인하여 접합부의 강성 및 내력을 초래하여 철골구조물의 구조적 안전성을 저해할 수 있다.

과대구멍은 모든 방향에 대하여 동일한 여유를 갖을 수 있어서 대부분의 접합부에서 용이하게 사용할 수 있고, 슬롯구멍은 외력의 작용에 대하여 수직 혹은 수평방향으로 보다 큰 여유가 필요한 접합부에서 유용하게 쓰이고 있다. 따라서, 미국의 AISC LRFD에서는 철골 현장 조립시 확공의 필요성 및 그로 인한 고력볼트 접합부의 내력 감소를 반영하기 위해 과대구멍 및 슬롯구멍에 대하여 각각의 저감계수를 설정하여 구조계산시 사용하도록 정해두고 있다. 일본도로교시방서 기준에서는 직경 20, 22, 24mm 볼트구멍에 대하여 '직경+4.5mm'까지는 별도의 저감계수 없이 허용하고 있다. 또한, 일본 강구조접합부 설계지침 및 Eurocode 3에서는 볼트직경 별로 구분하여 '직경+4mm'~'직경+8mm'까지 과대구멍을 허용하고 있고, 저감계수 0.85를 적용하고 있다. 국외 기준에서는 고력볼트 미끄럼접합부에서 과대구멍에 대한 허용기준을 제정하여 품질관리 및 시공 효율성을 동시에 고려하고 있다. 그러나, 국내 건축공사 표준시방서에서는 고력볼트 구멍지름 Φ가 27mm 이하인 경우는 Φ+2mm, 27mm를 초과하는 경우에는 Φ+3mm로 표준 볼트구멍 지름에 대한 한계허용치만을 규정하고 있다.

또한, 그동안 선행 연구는 장기축력이완을 고려하지 않은 상태에서 미끄럼내력을 평가한 것으로서 실제 고력볼

1) 정회원, 한전 전력연구원, 선임연구원
2) 정회원, 한전 전력연구원, 선임연구원
3) 정회원, 한전 전력연구원, 책임연구원
4) 정회원, 교신저자, 충남대학교 건축공학과, 부교수
5) 정회원, 충남대학교 건축공학과, 석사과정

* Corresponding author : leekm@cnu.ac.kr 042-821-5625
• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Specimen list

Specimen	Bolt Type	Steel Type	Faying Surface	Bolt holes (mm)	Effective Sectional Area (cm2)	Test Quantity
*(R)ST	S10T M20 ℓ= 85mm	SM490A	Shot Blast	22 (d+2mm)	14.82	3 *((1)
(R)OV4				24 (d+4mm)	14.44	3 (1)
(R)OV6				26 (d+6mm)	14.06	3 (1)
(R)SL1.3				22*26((d+2) *1.33d))	14.82	3 (1)
(R)SL2.5				22*50 ((d+2)*2.5d))	14.82	3 (1)

*( ) is for relaxation test

트의 거동을 반영한 것이라고 볼 수는 없다. 따라서, 본 논문에서는 고력볼트의 볼트구멍 크기에 따른 미끄럼접합부의 거동을 보다 객관적으로 장기축력이완을 고려하여 미끄럼내력을 평가하였다.

또한, 국내 및 국외의 연구 결과, 과대구멍 및 슬롯구멍에 대한 미끄럼하중 및 미끄럼계수의 저하는 미비하다는 결론이 우세하다. 그러나, 기존의 연구가 정적 인장시험 및 피로시험에 대한 평가에만 국한되어 실시되어 왔기 때문에, 체결 후 특성 평가는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 TS 고력볼트 접합부의 구멍 크기의 따른 미끄럼하중 및 미끄럼계수, 최대하중 등의 구조 특성을 파악하기 위한 정적 인장시험과 800시간 장기 축력이완 시험을 실시했다.

2. 실험체 및 실험방법

실험체의 종류는 모두 5종류로 ST 실험체는 표준볼트 구멍(22mm, Φ=d+2mm) 실험체이며 OV4, OV6, SL1.3, SL2.5 실험체는 과대구멍 및 슬롯구멍의 영향을 평가하기 위해 볼트구멍을 Table 1과 같이 가공하여 제작하였다.

실험체의 모재와 첨판 접촉면의 표면은 입도 0.5 mm~1.4 mm로 숏 블라스트 처리를 하였으며, 사용강재는 SM490A, 두께는 모재가 19mm, 첨판이 12mm이며, 사용 고력볼트는 토크전단형으로서 직경 20mm, 길이 95mm 이다.

실험체 설계는 접촉면에서의 미끄럼발생 이전에 모재가 먼저 항복하여 미끄럼하중이 저하되지 않도록 하였다. 즉 모재의 항복하중이 접합부의 미끄럼내력 이상이 확보되도록 하고, 볼트피치는 시방서 표준치수인 70mm, 연

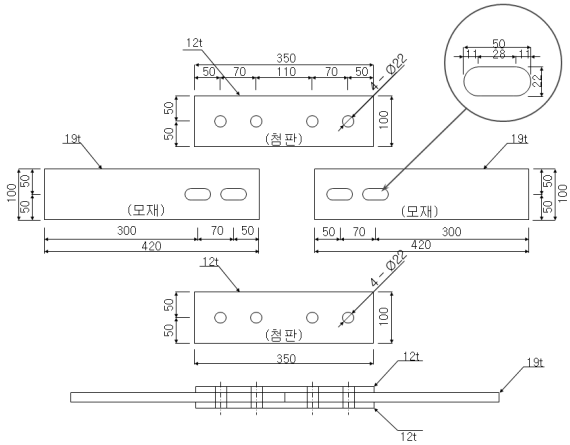

Fig. 1 2SL2.5 specimen(standard radious + 4mm)

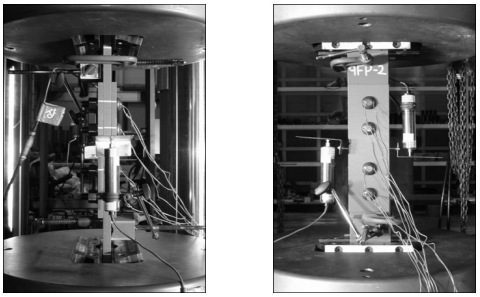

Fig. 2 The view of slip load test

단거리50mm로 설계되었다. 실험체 제작은 판재의 길이 방향으로 제작하였다. Fig. 1에서는 조립된 슬롯구멍 실험체(SL2.5)를 나타냈다.

실험체 조립을 위한 고력볼트의 체결작업은 1차 체결(T = 150 N·m, T : Torque)과 본체결(목표축력 178 kN까지, 핀테일 파단시점)로 구분하고 체결순서도 내측 → 외측볼트 순으로 체결하였다. 또한, 하중 증가에 따른 접합부의 고력볼트 축력 변화를 파악하기 위해 고력볼트 축부에 변형률 게이지를 부착하였다. 미끄럼내력 평가를 위한 정적 인장시험시 가력방법은 미끄럼 발생 이전까지는 하중제어, 이후는 변위제어 방법으로 하였으며 접합부 상태가 미끄럼발생 후 지압상태를 거쳐 모재 혹은 첨판이 파단 될 때까지 진행하였다. 미끄럼거동을 분석하기 위한 정적 인장 가력시험 전경은 Fig. 2와 같다.

미끄럼내력 평가를 위한 동일한 형상의 실험체를 제작하여 장기축력이완 실험을 병행하여 수행하였다. 기온변화에 따른 축력의 변화가 있음을 우려하여 Fig. 2와 같이 항온, 항습실에서 실험을 진행하였다. 축력의 변화는 고력볼트의 축부에 부착된 스트레인 게이지를 통해 체결이 완료된 이후부터 800시간 동안 측정하였다. 볼트 구멍에

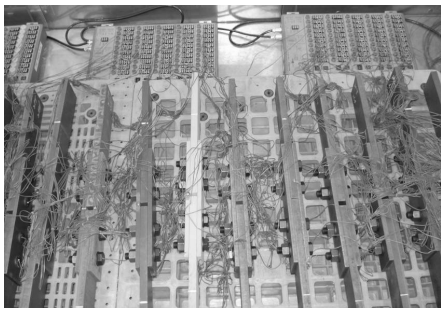

Fig. 3 The view of relaxation test

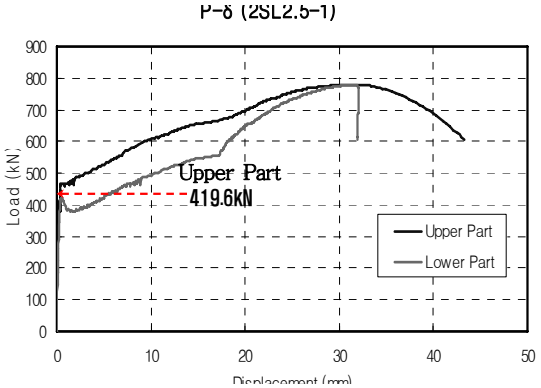

Fig. 4 Load-Displacement curve of specimen 2SL2.5-1

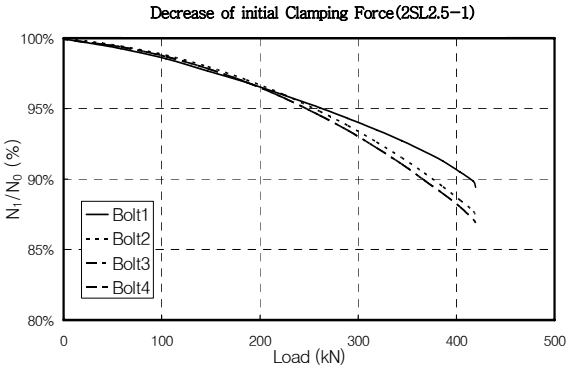

Fig. 5 Time-Relaxation curve of specimen 2SL2.5-1

따른 고력볼트 미끄럼이음부 실험체는 각 볼트구멍 별 1개씩으로 총 4개의 볼트를 대상으로 축력을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 볼트 구멍 크기에 따른 접합부 미끄럼거동 특성

볼트 구멍 크기에 따른 접합부의 구조특성을 평가하기 위해 정적 인장시험을 통해 미끄럼하중, 미끄럼계수, 최대하중 그리고 축력저하율을 분석했다. 미끄럼하중과 미끄럼계수는 접합부의 형태가 상부와 하부로 나누어져 있기 때문에 별도의 미끄럼하중 값으로 표시했다. Table 2는 실

Table 2 Test result

Specimen	Bolt Holes Ø(mm)	Initial Clamping Force (kN)	Decrease of Initial Clamping Force (%)	Slip Load (kN) (Upper/Lower)	Ultimate Load (kN)	Slip Coefficient (Top/Bottom)
ST2-1	22 (d+2mm)	178	8	421.1 / 432.6	810.9	0.591 / 0.607
ST2-2		178	10	402.1 / 404.1	808.7	0.565 / 0.568
ST2-3		178	-	289.7 / 414.1	808.3	0.547 / 0.582
Mean				410.6	809.3	0.576
OV4-1	24 (d+4mm)	178	10	430.8 / 466.5	810.2	0.605 / 0.655
OV4-2		178	13	429.5 / 417.3	786.8	0.603 / 0.586
OV4-3		178	-	338.5 / 385.1	798.9	0.475 / 0.541
Mean				411.3	798.6	0.578
OV6-1	26 (d+6mm)	178	12	460.5 / 470.1	787.4	0.647 / 0.660
OV6-2		178	12	438.9 / 460.1	785.4	0.616 / 0.646
OV6-3		178	-	362.3 / 401.7	780.5	0.508 / 0.564
Mean				432.2	784.4	0.607
SL1.3-1	22*26 ((d+2)*1.33d))	178	11	481.6 / 483.4	819.8	0.676 / 0.679
SL1.3-2		178	13	451.2 / 506.1	818.3	0.634 / 0.711
SL1.3-3		178	-	344 / 422.1	806.6	0.483 / 0.593
Mean				448.1	814.9	0.629
SL2.5-1	22*50 ((d+2)*2.5d))	178	11	419.6 / 368.4	778.8	0.589 / 0.517
SL2.5-2		178	9	407.5 / 406.4	774.6	0.572 / 0.571
SL2.5-3		178	-	405.6 / 309.5	789.2	0.570 / 0.435
Mean				386.2	780.9	0.542

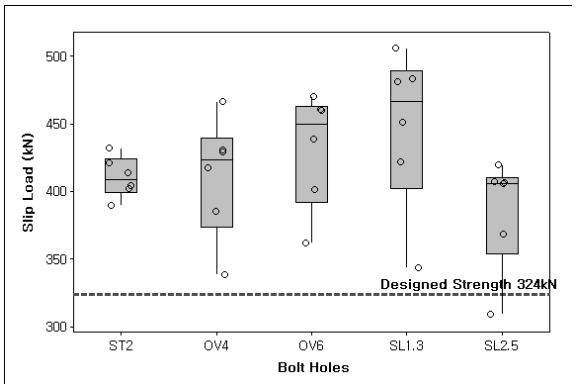

Fig. 6 Box plot of slip load

험체 별로 실험결과를 Fig. 4는 슬롯구멍 실험체 SL2.5의 하중-변위 곡선을, Fig. 5는 하중 증가에 따른 접합부 고력볼트의 축력저하율을 대표적으로 나타낸 것이다.

표준 실험체의 미끄럼하중은 평균 410.6kN, 미끄럼계수는 평균 0.576으로 현행 구조설계기준의 미끄럼계수 0.45를 만족했다. 미끄럼발생까지의 축력저하율은 평균 8% ~10% 정도 이르는 것으로 나타났다.

과대구멍 실험체에 대한 결과는 OV4 실험체의 경우, 미끄럼하중은 평균 411.3kN, 미끄럼계수는 평균 0.578, OV6 실험체의 경우, 미끄럼하중은 평균 432.2kN, 미끄럼계수는 평균 0.607로 표준 실험체와 차이는 미미하게 나타났다.

슬롯구멍 실험체에 대한 결과는 SL1.3 실험체의 경우, 미끄럼하중은 평균 448.1kN, 미끄럼계수는 평균 0.629, SL2.5 실험체의 경우, 미끄럼하중은 평균 386.2kN, 미끄럼계수는 평균 0.542로 과대구멍 실험체와 같이 표준 실험체와의 차이는 10 % 미만으로 미비했다.

미끄럼 발생까지의 축력저하율은 과대구멍 실험체 OV4의 경우 평균 10% ~ 13%, OV6의 경우 평균 12%로 나타났다. 또한, 슬롯구멍 실험체 2SL1.3의 경우 평균 11% ~ 13%, 2SL2.5의 경우 평균 9% ~ 11%로 표준 실험체 대비(평균 8% ~9%) 대비 30% 이상 증가한 것으로 나타났다.

구멍크기에 따른 미끄럼하중의 분포를 파악하기 위하여 공학 통계 분석 프로그램 Minitab V15를 이용하여 구멍 변수 별 미끄럼하중 값을 Fig. 6과 같이 상자그림으로 나타냈다. 원 모양 점은 개별 값을 각 구멍 변수 별 박스는 전체 개별 값의 범위의 25%에서 75%의 구간을, 가운데 선은 중위값을, 위 아래 꼬리는 박스 이외의 구간을 나타낸다. 볼트 구멍 별 미끄럼하중은 Fig. 6과 같이 특정한

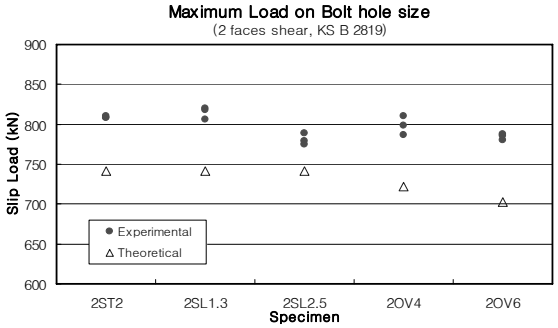

Fig. 7 Comparison between test and calculated results per specimen

Table 3 Results of 2 sample t test(Comparison of standard bolt-hole specimen)

Comparison with standard specimens	P-value	Estimate For difference	95% CI for difference
OV4	0.973	-0.7	(-47.4, 46.1)
OV6	0.281	-21.6	(-66.4,, 23.1)
SL1.3	0.191	-37.4	(-101.1, 26.2)
SL2.5	0.223	24.4	(-19.6, 68.5)

양상을 관찰할 수 없었고, 표준 구멍 실험체보다 구멍면적이 큰 경우, 산포가 크게 나타났고, 일부 슬롯구멍 실험체에서 미끄럼접합부 실험체의 설계 미끄럼내력을 하회하는 것으로 나타났다. 참고로 Fig. 6에 나타난 설계 미끄럼내력 324kN은 KBC2008에 규정된 미끄럼접합부 미끄럼계수 0.5와 F10T 고력볼트 직경 20mm에 해당되는 설계볼트축력 162kN을 적용하여 본 실험체를 대상으로 계산된 값이다.

Fig. 6의 실험결과를 보다 정량적으로 비교 분석하기 위해 표준 볼트구멍 실험체와 각 볼트 구멍 실험체 별로 2표본 t검정을 수행하여 얻은 결과는 Table 3과 같다. p값은 0.05를 기준으로 0.05보다 크면 95% 신뢰구간에서 '두 표본의 차이가 있다'라는 대립가설이 기각될 수 있다. 이와 동시에 차이의 95% 신뢰구간에서 0을 포함하고 있으면 두 표본의 차이가 없음을 의미한다.

과대구멍과 슬롯구멍 실험체의 미끄럼하중의 표준편차가 크게 나타났고, 일부 슬롯 구멍 실험체에서는 설계 미끄럼내력을 하회하는 것으로 나타났지만, 결국 95% 신뢰구간에서 통계적으로 검정해본 결과, 표준 볼트구멍과 크게 다르지 않음을 알 수 있었다. 다만, 볼트 구멍이 커질수록 차이 추정치의 절대값이 커지는 동시에 p값이 작아지는 것으로 나타났다. 따라서, 볼트 구멍 크기에 따른 장기축력이완율을 고려한 미끄럼하중의 별도 분석이 필요하다.

한편, Fig. 7은 구멍 변수 별 최대하중의 실험 결과값과

Table 4 The result of relaxation test

Specimen	Mesured Bolt	Initial Calmping Force	Hole Area (㎟)	Relaxation Ratio (%)			
				168 hr.		800 hr.	
				Value	Mean (standard deviation)	Value	Mean (standard deviation)
R2ST	Bolt 1	178kN	379.9	1.21	1.39 (0.135)	1.54	1.70 (0.129)
	Bolt 2			1.37		1.81	
	Bolt 3			1.53		1.80	
	Bolt 4			1.44		1.65	
R2OV4	Bolt 1		452.2	1.20	1.29 (0.116)	2.10	1.82 (0.190)
	Bolt 2			1.21		1.73	
	Bolt 3			1.29		1.68	
	Bolt 4			1.45		1.77	
R2OV6	Bolt 1		530.7	1.49	1.63 (0.221)	2.46	2.07 (0.302)
	Bolt 2			1.42		2.15	
	Bolt 3			1.70		1.76	
	Bolt 4			1.91		1.93	
R2SL1.3	Bolt 1		423.9	1.66	1.70 (0.319)	2.20	2.23 (0.238)
	Bolt 2			2.15		2.05	
	Bolt 3			1.41		2.58	
	Bolt 4			1.57		2.11	
R2SL2.5	Bolt 1		687.9	1.72	2.10 (0.782)	2.08	2.71 (0.877)
	Bolt 2			3.25		4.00	
	Bolt 3			1.54		2.24	
	Bolt 4			1.87		2.55	

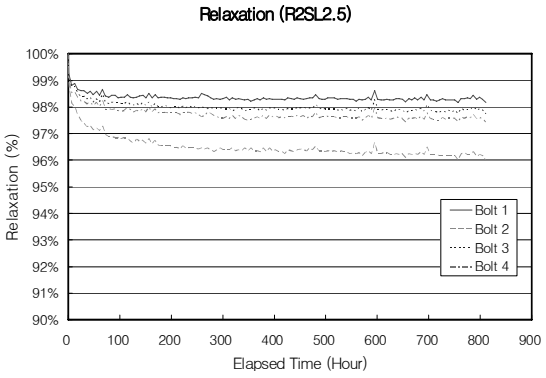

Fig. 8 Relaxation test results of specimen SL2,5 slotted hole

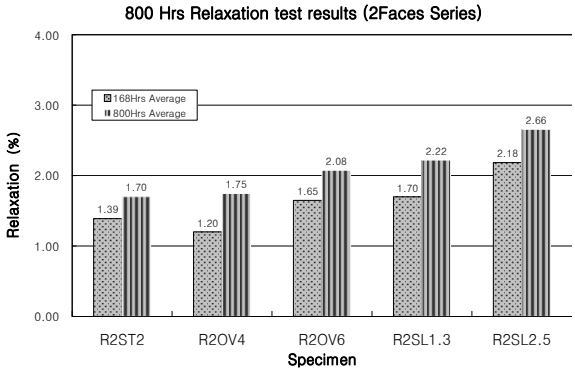

Fig. 9 Comparison of relaxation between 168 and 800 hr.

이론값을 비교하기 위해 나타냈다. 최대하중의 크기는 유효 순단면적의 크기 순(ST2 = SL1.3 = SL2.5 > OV4 > OV6) 으로 나타날 것으로 예상했지만, 슬롯구멍 실험체 2SL2.5의 최대하중이 평균 780.9kN으로 가장 작게 나타났다. 대체적으로 표준구멍과 과대구멍 실험체(2OV4, 2OV6)의 최대하중을 비교해보면, 유효 순단면적의 크기 순으로 나타났다.

3.2 볼트 구멍 크기에 따른 장기축력이완 특성 변화 분석

고력볼트 접합부에 도입된 축력은 나사면, 좌면, 접합부재 등에서 접촉면의 표면처리상태, 표면 불균등에 의해 체결 직후부터 이완이 생기게 된다. 볼트 구멍 크기에 따른 장기축력이완 (Relaxation)특성 변화를 분석하기 위해 체결 직후부터 800시간 동안 축력의 변화를 측정하였다.

G. Kulak과 J. W. Fisher의 연구결과가 반영된 AISC RCSC의 Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints(2004)를 통해 장기축력이완은 고력볼트 체결 직후 초기에 대부분의 축력 저감을 나타낸다는 것을 참고하여 본 연구에서는 체결완료 후 168시간과 최종 800시간 경과후의 축력변화 결과 를 나누어서 분석하였다. 실험체에 체결된 4개의 볼트로부터 계측된 결과의 평균과 표준편차로 나타냈다. 측정시간은 체결후 초기 3일은 2시간 간격, 이후부터 6시간 간격으로 계측하였고, 각 실험체 별 800시간 장기축력이완 결과를 평균값으로 Table 4에 나타냈다.

Fig. 8에는 대표적으로 슬롯구멍 실험체 RSL2.5의 장기 축력이완 실험 결과를 나타냈다. 체결 직후부터 24시간까지는 축력이 급격히 저하하여, 각 볼트 별 장기 축력이완율은 1.39%, 2.50%, 1.60%, 1.76%로 평균 1.81% 감소하였고, 최종적으로 800시간 장기 축력이완율은 각각 2.08%, 4.00%, 2.24%, 2.55%로 평균 2.71%, 표준편차 0.877로 나타났다.

따라서, 장기축력이완은 초기 일주일까지 급격히 진행되고, 그 이후부터는 축력감소율이 급격히 떨어지면서 특정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 한편, 168시간까지의 장기 축력이완율은 1.72%, 3.25%, 1.54%, 1.87%로 평균 2.1%를 나타내어 최종 장기 축력이완율 평균 2.66%의 80%에 해당되는 값으로 나타났다.

한편, 168시간 장기축력이완율과 800시간 장기 축력이완율의 볼트구멍 별 비교는 Fig. 9와 같다. 볼트구멍 종

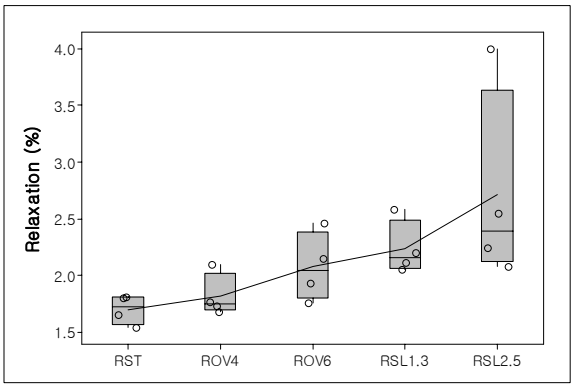

Fig. 10 Box plots of relaxation

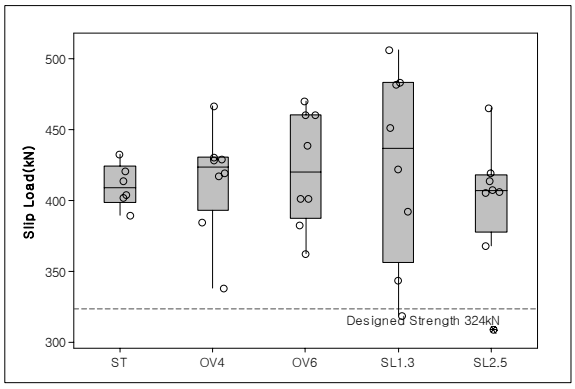

Fig. 11 Box plots of slip loads

류와 상관없이 실험체에서의 고력볼트 축력의 변화는 초기 168시간까지 저하가 급격하게 나타난 다음, 그 이후부터 축력변화가 매우 미미하게 나타나서 800시간 장기축력이완율은 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.

각 실험체 별 800시간 장기 축력이완율은 Fig. 10과 같다. 표준 구멍 R2ST 실험체의 경우 평균 1.70%로 가장 작게 나타났고, 슬롯구멍 R2SL2.5 실험체의 경우, 표준 실험체 대비 56% 증가한 2.71%로 가장 크게 나타났다.

과대구멍 실험체의 경우, R2OV4 실험체가 평균 1.82%, R2OV6 실험체가 2.07%로 2OV4 실험체 대비 21% 정도 크게 나타났다. 볼트 구멍 면적의 크기는 2SL2.5>2OV6>2SL1.3>2OV4>2ST 순이며, 장기 축력이완율의 크기는 2SL2.5>2SL1.3>2OV6>2OV4>2ST 순으로 나타나서, 대체적으로 구멍의 크기가 커짐에 따라서, 장기 축력이완율 또한 커지는 경향을 관찰할 수 있었다.

볼트 구멍 면적과 장기축력이완율과의 상관관계를 명확히 분석하기 위해 일원 분산분석을 수행하였다. 분산분석 결과는 Table 5와 같다. Table 5의 분산분석 결과에서 자유도는 '요인개수-1'로서 볼트 구멍의 종류가 총 5개이므로 4가 되고, 각 요인에 따른 측정값의 개수는 4개이고 각 자유도는 3이 되므로 오차의 자유도는 15가 된다. 개별 관측치와 오차에 대한 제곱합과 평균 제곱합은 Table 5와 같고, 그 차이에 의해서 볼트 구멍면적에 대한 개별 관측치의 변동폭을 설명할 수가 있다. 따라서, 볼트 구멍 면적에 따른 장기축력이완율의 경우, 유의확률이 0.05보다 작으므로 대립가설을 채택하여 볼트 구멍면적에 대한 장기축력이완율의 의존성은 있다라는 결론을 내릴 수가 있다. 한편, 분산분석 결과의 신뢰도 지수에 해당되는 R2가 46.7%로 다소 낮게 나타났는데, 이는 장변 길이가 볼트 직경 2.5배에 해당되는 슬롯구멍 실험체

Table 5 ANOVA table from the slip load results

Analysis Object	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean of Sum of Squares	F	P-value
Bolt-hole	4	2.552	0.638	3.29	0.04
Error	15	2.910	0.194		
Total	19	5.463			
S = 0.441 R-square = 46.72%					

RSL2.5에서 일부 특이치가 발생되어 편차가 커졌기 때문이다. 그러나, 볼트구멍 크기에 따른 장기축력이완율이 증가되는 경향이 명확히 관찰되었다.

3.3 장기축력이완율을 고려한 미끄럼내력 재산정 결과

실제 강 구조물 접합부에 적용되는 고력볼트의 축력은 장기축력이완이 발생되어 특정 축력값에 수렴된 값으로서 해당 장기축력이완율 만큼 미끄럼내력이 감소된다.

따라서, 800시간 장기축력이완 실험을 통해 얻은 볼트구멍에 따른 장기축력이완율을 적용하여 미끄럼내력을 재산정하여 평가하였고, 결과는 Fig. 11과 같다. 슬롯구멍 실험체 RSL2.5에서 일부 실험체를 제외하고 대부분 설계 미끄럼내력은 324kN을 상회하였고 볼트구멍이 커짐에 따라 편차가 커지는 경향이 나타났다. 그러나, 실제 현장에서 볼트구멍 확공 사례에 대한 허용 및 그에 따른 저감계수를 설정하기 위해서는 보다 정량적인 분석방법이 필요하다.

따라서, 규격하한을 설계 미끄럼내력 324kN로 설정하여 볼트 구멍종류 별 공정능력 분석을 수행하였고 결과는 Fig. 12와 같다. 표준 볼트구멍에서 Z bench가 5.324로 우수한 품질이 예상되었고, 과대구멍의 경우, '표준구멍+2mm'에서 Z bench가 2.23, '표준구멍+4mm'에서는 2.25로 어느 정도 과대구멍에 대한 허용할 수 있는 수준

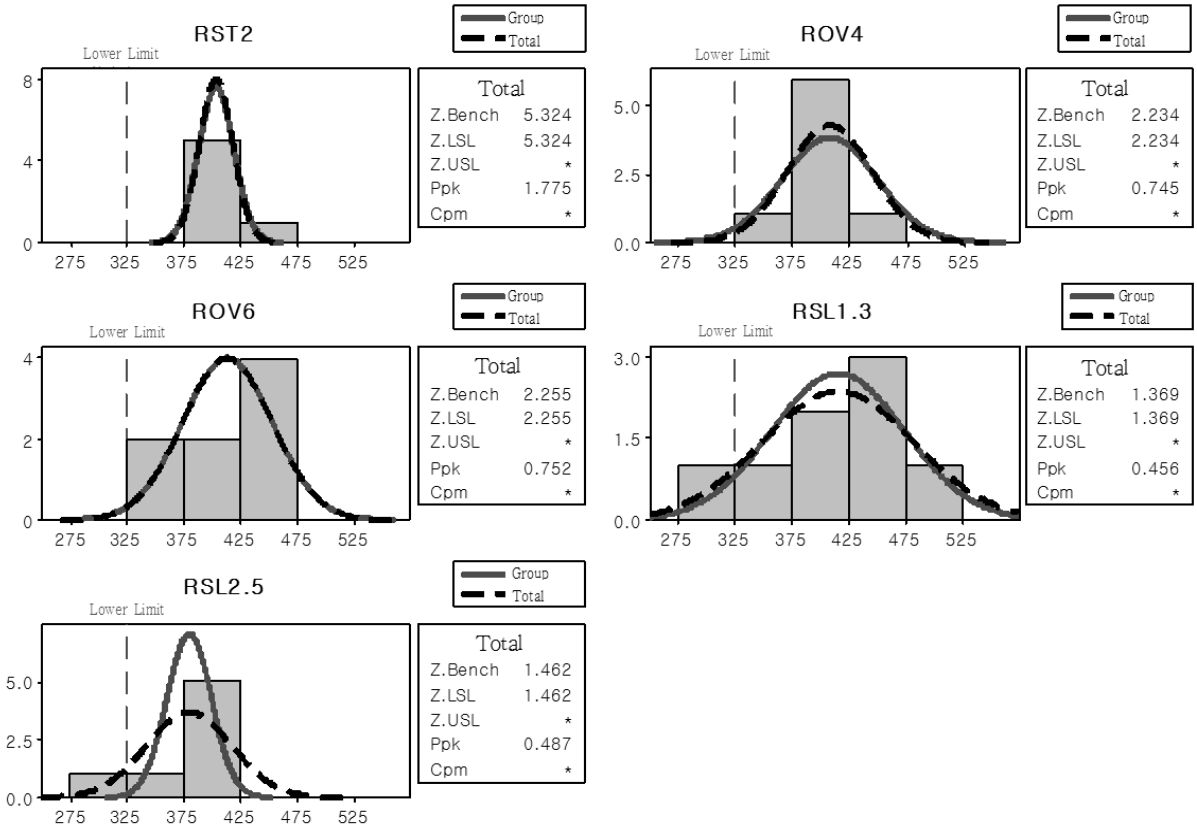

Fig. 12 The results of quality analysis of slip load subjected to bolt-hole

으로 나타났다.

한편, 슬롯구멍 실험체 RSL1.3에서는 1.98, RSL2.5 실험체에서는 1.5 미만으로 나타나서 실제 현장에서 도입 시 시공 품질이 현저하게 저하되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 볼트구멍에 따른 장기축력이완을 고려한 고력볼트 미끄럼접합부 내력을 일원 분산분석, 공정능력 분석 등의 통계 분석기법을 이용하여 평가하였고 그 결과는 아래와 같다.

1) 과대구멍(d+4mm, d+6mm), 슬롯구멍(1.33d, 2.5d)을 갖는 TS 고력볼트 접합부의 미끄럼계수 및 미끄럼하중은 표준 실험체 대비 ±5% 미만으로 변화량이 미비했고, 현행 구조설계기준 0.5를 초과하여, 설계내력을 모두 만족하는 것으로 나타났다.
2) 과대구멍 실험체 2OV4 및 2OV6의 최대내력은 유효단면적의 감소로 인하여 표준실험체 대비 1%~4% 정도 감소하였고, 슬롯구멍 실험체의 경우, 표준실험체와 동일한 유효단면적을 갖지만, 최대내력이 다소 감소하는 것으로 나타났다.
3) 볼트구멍에 크기에 따른 미끄럼내력은 특정한 경향을 관찰할 수 없었으나, 볼트구멍 크기가 증가됨에 따라 미끄럼내력의 편차가 커지는 것으로 나타났다.
4) 장기 축력이완율은 체결 직후 초기 일주일 동안의 축력감소량이 전체 축력감소량의 80% 이상을 차지하였으며, 일주일 이후부터는 완만한 축력감소율을 나타냈고, 구멍의 크기가 커짐에 따라서, 장기 축력이완율이 커지는 경향을 관찰할 수 있었다.
5) 볼트구멍 크기에 따른 장기축력이완율을 일원 분산분석을 통해 분석한 결과, 유의확률이 0.04로 95% 신뢰수준에서 장기축력이완율의 볼트구멍 크기에 대한 의존성이 있는 것으로 판단된다.
6) 볼트구멍 별, 장기축력이완율을 고려하여 미끄럼내력을 재산정한 결과, 슬롯구멍의 일부 실험체가 설계미끄럼내력을 화회하는 것으로 나타났고, 공정능력 분석결과, 슬롯구멍의 경우, Z bench가 1.5 미만으로 실제 현장 적용시 품질이 현저하게 저하되는 것으로 예상되었다.

참고문헌

1. 김강석, 나환선, 이현주, 김진호, “TS 고력볼트 마찰접합부의 구멍 크기에 따른 장기축력이완 평가”, 한국강구조학회 학술논문집, , 2008,
2. 김진호, 우해성, 최성모, “고력볼트 마찰접합부의 설계기준 및 내력에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, Vol.19, No.4, 2008, pp. 27-35.
3. 이승용, 조선규, 장동일, “고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로거동에 관한 연구(Ⅱ)”, 대한토목학회 논문집, 1998, Vol.18, I-5, pp 725-736
4. 이승용, 박용훈 외 2, “과대공을 갖는 고장력 볼트 이음부의 역학적 거동에 관한 시험 및 해석적 연구”, 한국강구조학회 논문집, Vol.10, 1998, pp 355-367
5. 日本建築學會, 高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 2003
6. Geoffrey L. Kulak, “Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints”, 2nd Edition, AISC, Inc., 2001
7. MINITAB R15 Program Manual , 2008
8. RCSC, Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, Research Council on Structural Connections, 2004

(접수일자 : 2010년 10월 28일)
(수정일자 : 2010년 12월 3일)
(심사완료일자 : 2010년 12월 10일)

요 지

고력볼트의 현장 조립시 볼트 구멍 간의 불일치로 인하여 볼트 구멍을 확장하는 경우가 빈번하게 발생하고 있으며, 이를 위해서 외국 기준에서는 볼트 구멍 크기, 형태, 하중 방향에 따라 미끄럼하중에 대한 규정을 따로 두고 있다. 그러나 우리나라의 경우 과대구멍에 대한 시방규정이나 이에 대한 접합부 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 접합부재 표면처리와 볼트 구멍 크기의 변화가 접합부 내력에 어떠한 영향을 미치는 지를 실험을 통해 정량적으로 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 볼트 구멍 크기 및 형태에 따른 접합부의 미끄럼하중의 변화와 체결 후, 장기축력이완의 경향을 분석하기 위하여 160시간 및 800시간 동안 고력볼트의 축력의 변화를 측정하였다. 본 실험대상 고력볼트로 KS B 2819에 규정된 TS(Torque Shear)형 고력볼트를 사용하였다. 표준 볼트구멍 대비 그 외 볼트구멍의 미끄럼하중의 변화는 10% 미만으로 나타났으며, 장기축력이완은 직경 2.5배의 슬롯구멍에서, 2.66%로 가장 높게 나타났다.

핵심 용어 : 고력볼트, 볼트 구멍, 미끄럼하중, 미끄럼계수, 장기축력이완