

고력볼트 길이에 따른 체결 특성 평가

An Evaluation of Clamping Characteristics for High Strength Bolts with Variable Bolt Lengths

이강민¹⁾ 김강석²⁾ 나환선³⁾ 이현주⁴⁾ 오경환^{5)*}
Lee, Kang Min Kim, Kang Seok Nah, Hwan Seon Lee, Hyeon Ju Oh, Kyung Hwan

Abstract

It has been reported that the length parameter of high strength bolts results in the variance in tensile loads. The required turn of nut for each length is specified in AISC RCSC specification. There is no specific regulation datum about the bolt length in the two national codes and specifications in Korea. Therefore this study focused on evaluating influence of the clamping torque subjected to length parameter of high strength bolts. Two types of high strength bolt specimens were manufactured and tested; High Strength Hexagon bolt specified in ASTM A490 and Torque Shear Bolt in KS B 2819. The length parameter ranged from 60mm(3d) to 140mm(7d). The torque, turn of nut, and the clamping force were analyzed to review whether length parameter affects on the required tensile strength. To evaluate the effects of the length parameter on the torque and turn of nut for the required strength and clamping force, statistical analysis was also carried out.

Keywords : High strength bolt, Length parameter, Tension, Torque, Turn of nut

1. 서론

고력볼트 마찰접합에서는 볼트의 축력으로 도입된 접합부재 간의 마찰력이 외력에 대하여 작용하기 때문에 적정 축력의 확보가 중요하지만 일반적으로 온도와 볼트 길이에 따라 체결축력이 영향을 많이 받는 것으로 보고되고 있다. 국내에서는 고력볼트 체결법으로 너트회전법이 아닌 토크관리법이 적용되고 있고 최근에는 KS B 2819의 ‘구조물용 토크-전단형 고장력 볼트’(이하, TS 고력볼트)가 주로 사용되고 있으나, TS 고력볼트의 KS 기준은 2003년에 제정되었다. 미국에서 사용되는 TS 고력볼트에 해당되는 ‘Twist off’, ‘Type Tension Control Bolt’ 관련 미국 기준 중 기계적 성질이 F8T에 해당하는 ASTM F1852는 1998년에 제정되었고, F10T에 해당하는 ASTM F2280은 2006년에 제정되어 국내외를 막론하고 TS 고력볼트의 길이에 따른 체결특성에 대한 연구

자료는 드물다.

또한, 현장에서는 접합부재의 두께에 따라서 고력볼트의 길이를 달리 사용하게 되어 KS B 2819에는 국내에서 생산되는 고력볼트의 길이를 직경별로 40~200 mm까지 정하고 있다. 그러나, 볼트 길이에 따른 적정 축력 도입을 위한 소요 토크와 너트회전각에 대한 국내 기준은 없다. 다만, 건축공사표준시방서에 직경-길이비가 5이상인 경우, 너트회전각이 120°이상 필요하기 때문에 소요 회전각을 실험 등의 방법으로 적정 축력을 도입하도록 권고하고 있을 뿐이다.

따라서, 본 논문에서는 TS 고력볼트의 길이에 따른 적정 축력 도입을 위한 너트회전각 및 토크를 분석하여 길이변수에 따른 토크와 너트회전각 등 체결특성을 평가하고자 한다. 길이변수에 따른 TS 고력볼트의 체결특성과 비교를 위해 동일 조건에서 너트회전법을 채용하고 있는 미국의 ASTM A490 육각 고력볼트를 병행하여 평가하

1) 정회원, 충남대학교 건축공학과 부교수
2) 정회원, 한전 대전충남본부 차장
3) 정회원, 한전 전력연구원 책임연구원
4) 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원
5) 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 부장

* Corresponding author : ohkh@samsung.com 02-2145-6586

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

였다. 또한, 길이변수에 대한 유효성을 정량적으로 분석하기 위하여 통계분석 프로그램 Minitab을 활용하였다.

2. 실험계획 및 방법

길이변화에 따른 고력볼트의 체결과정 및 체결 후의 특성을 평가하기 위해 60, 80, 100, 120, 140 mm를 사용하여 직경-길이비를 3, 4, 5, 6, 7로 구성하였고 실험에 사용된 고력볼트는 TS 고력볼트, 육각 고력볼트 총 2종류로서 국내 H사에서 주문, 생산된 동일 로트 제품이다. 각 길이별 실험체 개수는 10개, 총 동일 종류 볼트 실험체 개수는 총 50개로서 통계 분석을 하기 위한 표본수를 충분히 만족할 수 있을 정도로 계획하였다. 볼트 종류에 따른 길이별 실험체 개수를 Table 1에, 볼트길이 별 실험체 형상을 Fig. 1에 나타냈다.

길이 변화만을 변수로 분석하기 위해 실험실 온도는 20°C를 유지하였고 볼트제품의 포장 개봉 즉시 Fig. 2의 볼트 축력시험기를 사용하여 축력, 너트회전각, 토크, 토크계수를 측정하였다. 사용된 축력 시험기의 측정 오차는 축력 ± 2.5 kN, 토크 ± 0.5 N·m, 너트회전각 $\pm 0.5^\circ$ 이고 측정자는 고력볼트를 소켓에 설치만 하는 것으로 충분하기 때문에 길이 인자에 따른 변동을 충분히 반영할 수 있다고 판단된다.

한편, 실험은 Fig. 2와 같은 볼트 실험기의 오른쪽 로드셀 부분에 대상 실험체 볼트를 설치하고 왼쪽 돌출부분의 소켓을 통해 너트를 회전시킴으로서 끝나는 수준으로 간

Table 1 Experimental Design

Bolt Type	Diameter (mm)	Length (mm)	Quantity (EA)
1. Torque Shear Bolt - KS B 2819	20	60	10
		80	10
		100	10
2. Hexagon Bolt - ASTM A490	20	120	10
		140	10



Fig. 1 Specimen

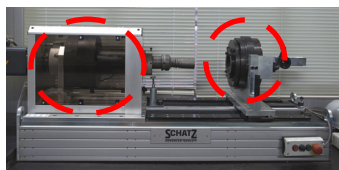


Fig. 2 Test Machine

단하기 때문에 측정자에 따른 편차는 무시하여 통계분석을 수행하였다. 또한, 체결 후의 특성을 평가하기 위해서 볼트가 파단될 때까지 토크, 너트회전각 그리고 축력을 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 재료물성시험

각 볼트 종류 별로 재료물성시험을 위한 시험체를 3개씩 채취하여 인장 시험을 수행하였고 그 결과 및 각 볼트 규격별 제시된 기계적 물성은 Table 2와 같다. 대표적으로 TS 고력볼트의 하중-변형도 관계는 Fig. 3과 같다.

TS 고력볼트 시험체의 경우, 항복강도는 1134.1~1147.7 N/mm², 인장강도는 1156.0~1165.8N/mm²으로 규정값인 900N/mm², 1000N/mm² 이상으로 모두 규격을 만족하는 것으로 나타났으며 연신율도 평균 24.8%로 규준을 충분히 만족하고 있다. 단면수축률의 경우 2, 3번 시험체의 경우 각각 43.8%, 40.9%의 값으로 규격치 40%를 만

Table 2 Mechanical Property Test results

Bolt Type		Yield Strength N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Elongation %	Rate of reduction in area %
TS Bolt	Ave.	1142	1142	24.8	41.5
	Dve.	7.279	7.279	4.464	2.108
	Spec.	940~	1000~1200	14~	40~
Hexagon Bolt	Ave.	1110	1154	18.8	30.7
	Dve.	12.124	9.493	0.482	1.127
	Spec.	940~	1040~1210	14~	40~

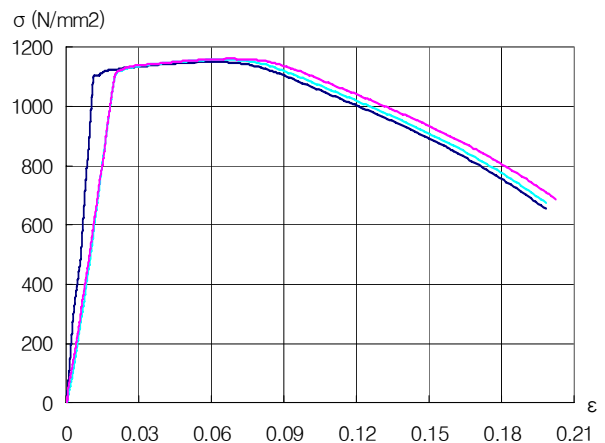


Fig. 3 Mechanical Property Test results(TS Bolt)

족하였으나 1번 시험체는 39.7%로 규격에 약간 못 미치는 값을 가지는 것으로 나타났다.

육각 고력볼트의 경우, 항복강도 1103~1154N/mm², 인장강도 1146.2~1199.2N/mm²으로 규정값인 940N/mm², 1040N/mm² 이상으로 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 연신율도 평균 17.98%로 기준을 충분히 만족하고 있다. 그러나, 단면수축률의 경우 모든 시험체의 값이 30% 정도로서 기준치 40%에 못 미치는 것으로 나타났다.

3.2 TS 고력볼트 축력실험 결과

TS 고력볼트의 도입축력-너트회전각, 도입축력-토크의 관계에서 대표적으로 길이 140 mm변수에 대한 결과를 Fig. 4, 5에 나타냈다.

축력-너트회전각 관계에서 180 kN 지점에서 변곡점이 발생하였는데 이것은 핀 테일 파단시 순간적으로 유압이 떨어져 시험을 재개하는 과정에서 나타난 것이다. 핀 테일 파단지점에서의 볼트 축력은 평균 182.3 kN, 표준편차 4.467로 구조설계기준인 설계볼트축력 168 kN 이상을 충분히 확보하고 있는 것으로 나타났다.

최대축력은 평균 266.5 kN, 표준편차 2.406으로 이때의 너트회전각은 평균 351°, 표준편차 27.487로 나타났다. 파단지점에서의 너트회전각은 평균 917°, 표준편차 70.810으로 비교적 여유 있는 너트회전각을 보였으며 볼트가 파단될 때까지는 너트가 거의 3회전에 가까운 회전량을 보였다. 시험 종료 시의 볼트파단은 너트가 체결된 바로 위쪽의 나사부에서 발생했다. 너트회전각에 따른 볼트축력의 증가율은 핀테일 파단지점까지는 1.2kN/1°

(=182.3kN/155°), 핀테일 파단 이후 최대축력 지점까지는 0.4kN/1°(=84.2kN/196°)로 나타났다.

Fig. 5의 도입축력-토크 관계에서 그래프의 방향이 다르게 나타난 것은 TS 고력볼트의 경우 핀테일과 너트를 고정하고 있는 지그의 회전방향이 다르기 때문이다. 즉, 초기 토크-축력의 관계는 핀테일이 파단될 때까지의 소요토크를 나타내며 핀테일 파단 후에는 너트부분 회전에 따른 소요토크를 나타낸다.

TS 고력볼트의 체결은 핀-테일 파단을 기준으로 완료되므로 그 시점을 기준으로 토크와 축력, 너트회전각을 측정하였다. 또한, 체결 후 검사기준으로 사용되고 있는 너트회전각 범위인 120±30°를 고려하여 너트회전각 90°, 120°, 150°일 때의 축력을 측정하였다. 길이별 TS 고력볼트 시험체의 핀테일 파단지점, 최대축력, 볼트파단지점에서의 볼트 축력, 토크, 너트회전각의 측정결과와 핀테일 파단시의 볼트축력과 토크값을 근거로 계산된 토크계수는 Table 3과 같다.

핀 테일 파단시 체결축력의 경우, 길이 60, 80, 100 mm에서는 각각의 평균이 176.3 kN, 178.1 kN, 177.4 kN로 서로 비슷하게 나타났고, 120 mm와 140 mm에서는 평균 187 kN, 182.3 kN으로 비슷하게 나타나서 길이 100 mm를 전후로 값의 차이를 관찰할 수 있었다.

핀테일 파단시의 소요토크는 530N·m~537N·m로 비교적 일정한 값을 보였으며 축력은 175.5kN~190.1kN으로 구조설계기준에서 요구되는 설계볼트축력(162kN)을 충분히 확보하는 것으로 나타났으나 토크계수가 커질수록 도입되는 축력의 크기는 작아지는 것으로 나타났다.

토크계수는 평균 0.146, 표준편차 0.004로 TS 고력볼트의 토크계수 규격 범위에 해당되는 0.110~0.170을 만

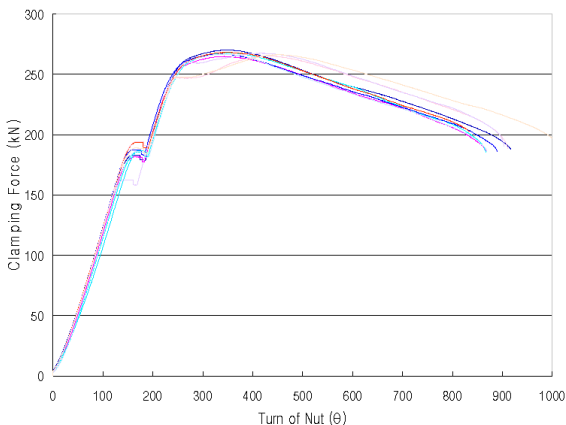


Fig. 4 Nut Rotation-Clamping Force(TS bolts,140mm)

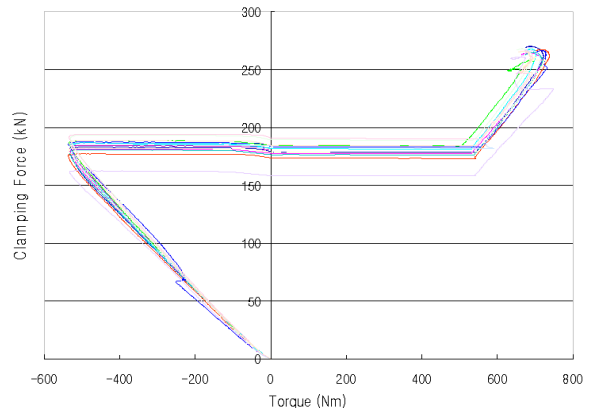


Fig. 5 Torque-Clamping Force(TS bolts, 140mm)

Table 3 Test Results(Torque Shear Bolt)

Bolt Length (mm)		At the sheared-off of splined end				Turn of Nut			Ultimate Strength		
						90°	120°	150°			
		N(kN)	T(Nm)	θ (°)	k	N(kN)	N(kN)	N(kN)	N(kN)	T(Nm)	θ (°)
60	Ave.	176.3	516	151	0.146	162.4	178.2	184.2	251.0	641	347
	Dev.	4.641	4.484	4.646	0.004	4.737	5.378	7.264	2.257	11.496	8.319
80	Ave.	178.1	509	143	0.143	169.9	183.8	188.1	247.5	676	307
	Dev.	4.590	3.532	4.073	0.004	4.972	9.755	9.093	4.096	32.585	30.306
100	Ave.	177.4	499	141	0.142	172.7	183.6	193.9	248.7	623	344
	Dev.	15.718	2.227	7.595	0.013	10.390	19.110	8.580	2.559	25.162	13.371
120	Ave.	187.0	509	168	0.136	161.5	184.6	190.3	244.8	639	363
	Dev.	10.497	3.876	7.879	0.008	3.959	11.674	14.257	3.581	36.108	18.593
140	Ave.	182.3	533	155	0.146	162.9	183.9	194.0	266.5	692	351
	Dev.	4.467	2.121	8.228	0.004	4.626	7.506	6.801	2.406	16.737	27.487

족하는 것으로 나타났다. TS 고력볼트 제품의 기계적 물성 및 형상으로 결정되는 핀 테일 파단시 토크 값은 평균 533 N·m, 표준편차 2.121로 나타나서 거의 일정한 값으로 나타났다.

핀 테일 파단시 너트회전각은 직경 20 mm의 F10T 고력볼트의 1차 체결에 해당되는 150 N·m를 0°로 재산정하면 60mm에서 평균 106°, 80mm에서 평균 103°, 100mm에서 평균 98°, 120mm에서 평균 125°, 140mm에서 평균 111°로 너트회전각 검사기준인 120±30°범위를 만족하는 것으로 나타났지만, 볼트 길이 120 mm를 전후로 너트회전각 결과 값의 차이가 관찰되었다.

최대축력은 볼트 길이 60, 80, 100, 120 mm에서는 각각 평균 251kN, 247.5 kN, 248.7 kN, 244.8 kN으로 서로 비슷하게 나타났지만, 140 mm에서는 266.5 kN으로 다소 높게 나타났다. 볼트 축부에 인장력만 작용하는 단순 인장시험과는 달리 축력시험에서는 너트 체결과정에서 나타나는 비틀림에 의한 영향으로 전단응력이 볼트

축부에 부가적으로 작용하기 때문에 물성시험에서의 인장하중의 평균값 1142 N/mm² 대비 11~13% 정도 낮게 나타났다.

3.3 육각 고력볼트 축력시험 결과

육각 고력볼트의 도입축력-너트회전각, 도입축력-토크의 관계에서 대표적으로 길이 140 mm변수에 대한 결과를 Fig. 6, 7에 나타내었다.

육각 고력볼트의 표준볼트축력 도입시 소요 너트회전각은 평균 121°, 표준편차 4.337로 TS 고력볼트 너트회전각 120°에서 축력결과와 비슷하게 나타났다. 또한, 탄성한계 지점에서의 너트회전각은 평균 225°, 축력은 평균 231kN로 나타났다. 최대축력 지점에서 너트회전각은 평균 390°, 축력은 평균 256kN로 나타났다. 탄성한계지점과 최대축력 지점에서의 너트회전각 차이는 165°, 축력의 차이는 35 kN으로 너트회전각의 차이에 비해 도입축력의

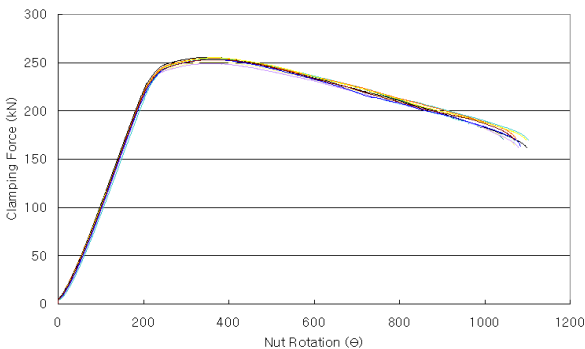


Fig. 6 Nut Rotation-Clamping Force(Hexagon bolts,140mm)

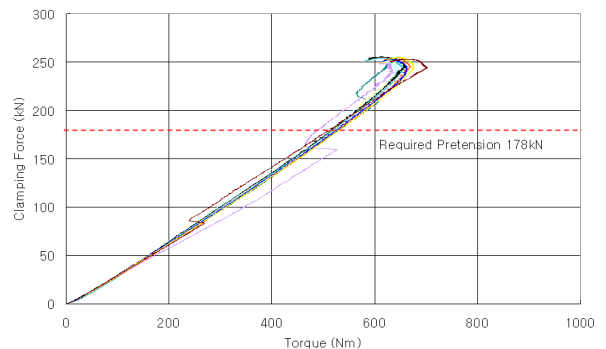


Fig. 7 Torque-Clamping Force(Hexagon bolts, 140mm)

Table 4 Test Results(Hexagon Bolt)

Bolt Length (mm)		Required Tension (178kN)		Torque Coefficient	Turn of nut (180°)		Yield Strength			Ultimate Strength		
		T(Nm)	θ (°)*		N (kN)	T(Nm)	N(kN)	T(Nm)	θ (°)	N (kN)	T(Nm)	θ (°)
60	Ave.	564	97	0.158	198	620	237	713	215	263	733	351
	Dev.	19.898	4.978	0.005	31.944	80.595	3.474	19.499	26.290	2.326	17.495	22.059
80	Ave.	554	104	0.156	214	651	232	693	199	260	703	350
	Dev.	20.096	3.288	0.006	6.122	23.271	3.459	18.307	5.343	3.336	19.046	11.052
100	Ave.	564	113	0.158	199	618	230	695	211	259	707	387
	Dev.	19.664	4.847	0.005	9.986	32.902	4.129	20.080	8.879	3.703	23.164	16.207
120	Ave.	571	112	0.160	195	615	227	693	212	256	688	393
	Dev.	24.246	1.960	0.007	12.752	48.571	2.385	32.273	10.477	3.035	24.350	13.141
140	Ave.	570	121	0.160	189	599	231	711	225	256	716	390
	Dev.	20.177	4.337	0.005	9.347	29.327	3.329	18.501	4.980	2.387	15.457	14.543

크기는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 너트회전 각에 따른 축력 증가율은 탄성한계점까지는 231kN/225° (=1.02kN/1°)이지만 그 후 최대축력까지의 축력증가율은 25kN/165° (=0.15kN/1°)로 소성 범위에서의 축력증가율이 작게 나타났다. 이러한 결과를 근거로 탄성범위에서의 축력을 목표로 하는 경우 너트회전법을 적용하는 경우 도입축력의 편차가 커져서 볼트체결에 대한 품질관리 차원에서 오히려 불리하다. 따라서, 가급적 목표 축력범위를 상향 조정하여 규정하는 것이 유리하다고 판단된다. 또한, 최대축력 이후 시험체 파단지점까지의 너트회전각은 350° (=740°-390°)로 충분히 여유 있는 변형능력을 보여 목표 축력을 기준(표준볼트축력 178 kN)보다 상향 조정하여도 충분히 안정적인 것으로 나타났다.

길이별 육각 고력볼트 시험체의 표준볼트축력, 최대축력, 볼트파단 지점에서의 볼트 축력, 토크, 너트회전각 결과와 볼트축력과 토크값을 근거로 계산된 토크계수는 Table 4와 같다.

미국의 AISC의 RCSC규격에 의하면 본 시험체(ASTM A490, 4D~8D)의 경우 Snug-Tight 상태에서부터 적정 체결을 위한 너트회전각을 180°, 허용오차 ±30°로 규정하고 있다. 따라서, TS 고력볼트 시험체와 달리 육각 고력볼트는 너트회전각 180°일 때의 축력과 토크를 추가로 분석했다.

목표축력(표준볼트장력)을 확보하기 위한 토크 평균값은 60mm에서 564N·m, 80mm에서 554N·m, 100mm에서 564N·m, 120mm에서 571N·m, 140mm에서 570N·m로 비교적 안정된 값을 보였으며 길이변화에 대한 영향은 나타나지 않았다.

토크계수 평균값은 60mm에서 0.158, 80mm에서 0.156, 100mm에서 0.158, 120mm에서 0.160, 140mm에서 0.160으로 비교적 안정된 값을 보였으며 KS B 1010에서 규정하고 있는 토크계수 B종(0.150~0.190, 표준편차 0.030이하)범위를 만족하고 있으며 길이변화에 대한 영향은 나타나지 않았다.

철골구조시방서에서 규정하고 있는 1차 체결 이후 볼트축력이 표준볼트장력(178kN)에 도달할 때까지의 너트회전각은 60mm에서 106°, 80mm에서 105°, 100mm에서 113°, 120mm에서 112°, 140mm에서 123°로 비교적 변동폭이 크게 나타났다.

회전각 180°일 때의 체결축력을 나타냈다. 회전각 180°일 때의 축력은 최소 축력을 만족했고 길이조건에 따른 축력 변화는 일정한 경향을 찾을 수가 없었다.

한편 탄성한계점 이후 최대축력까지의 너트회전각은 60mm에서 136°, 80mm에서 151°, 100mm에서 176°, 120mm에서 181°, 140mm에서 175°로 볼트 길이별 최대 축력 도입 시 소요 너트회전각이 상이한 것으로 나타났다.

4. 길이에 따른 고력볼트 체결특성 분석

본 실험결과를 보다 정량적으로 분석하기 위해 통계분석 프로그램인 Minitab V15를 이용하였다. TS 고력볼트의 핀 테일 파단 시 토크와 같이 단순 수치를 통해서도 충분히 그 경향을 파악할 수 있는 것은 제외하고, 고력볼트 종류 별 축력, 소요 너트회전각을 중심으로 길이 인자간의 변동과 동일 길이군 내에서의 편차를 비교하여 길이

변수의 유의성을 판별하기 위해 분산분석을 사용하여 분석하였다.

4.1 TS 고력볼트

길이에 따른 TS 고력볼트의 체결축력과 소요 너트회전각에 대하여 일원 분산분석을 통해 신뢰도 95%로 분석한 결과는 Table 5, 6과 같다.

분산분석 결과에서 자유도는 '요인개수-1'로서 길이변수의 종류가 총 5개이므로 4가 되고, 각 요인에 따른 시험체의 개수는 10개이고 각 자유도는 9가 되므로 오차의 자유도는 45가 된다. 각 개별 관측치와 오차에 대한 제곱합과 평균 제곱합은 표와 같고, 그 차이에 의해서 길이변수에 대한 개별 관측치의 변동폭을 설명할 수가 있는 원리이다.

따라서, 체결축력의 경우, 유의확률이 0.05보다 크므로 귀무가설이 기각되어 신뢰도 95% 수준에서 길이변수에 대한 의존성은 없다라는 결론을 내릴 수가 있고, 너트회전각의 경우, 유의확률이 0.05보다 작으므로 길이변수에 대한 의존성을 인정할 신뢰도 95% 수준으로 인정할 수 있다.

한편, 분산분석의 전제는 반응 변수 값의 측정치 즉, 개별 데이터가 무작위로 측정되어야 한다는 것과 각 요인별 측정치의 분산은 서로 동일하고, 모든 측정치는 정규 분포를 나타내야 한다는 것이다. 길이변수에 대한 TS 고력볼트의 핀-테일 파단시 체결축력과 소요 너트회전각의 경우, 위 세 가지의 분산분석의 전제를 만족하고 있었음을 확인하였다.

길이에 따른 TS 고력볼트의 체결축력과 너트회전각의 분포는 Fig. 8, 9와 같다. 볼트 길이 100 mm에서 편차가

Table 5 ANOVA table from the Clamping force(TS bolts)

Source	DF	SS	MS	F	P
Length(mm)	4	784.2	196.1	2.33	0.07
Error	45	3781.7	84.0	-	-
Total	49	4566.0	-	-	-

Table 6 ANOVA table from the turn of nut(TS bolts)

Source	DF	SS	MS	F	P
Length(mm)	4	4953.6	1238.4	25	0.00
Error	45	2228.8	49.5	-	-
Total	49	7182.4	-	-	-

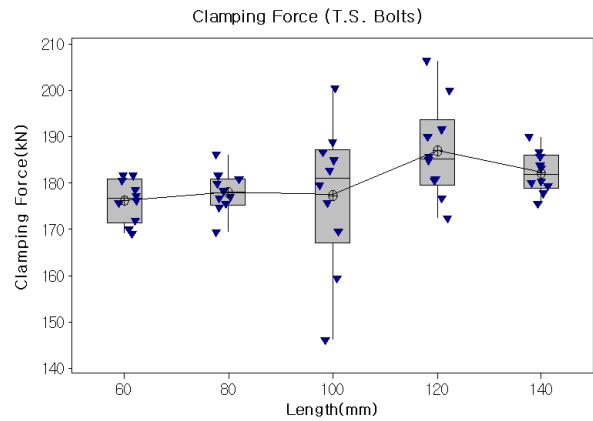


Fig. 8 Torque-Clamping Force(TS bolts)

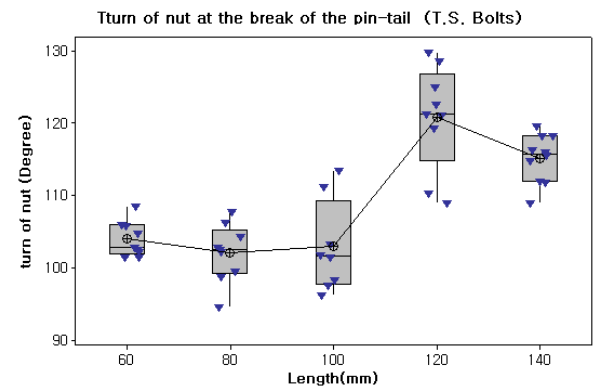


Fig. 9 Turn of nut-Clamping Force(TS bolts)

크고, 120 mm에서는 평균값이 다른 길이변수 보다 조금 크게 나타났지만 실제로 볼트 길이에 따른 핀 테일 파단시 체결축력은 특정한 경향 없이 비슷한 값으로 나타났고 대부분 표준볼트축력을 상회하였다. 반면, 핀 테일 파단시 너트회전각(1차체결에 소요된 너트회전각을 제외한 값)은 볼트 길이 100 mm를 전후로 60, 80, 100 mm에서는 각각 평균 104°, 102°, 103°로 나타났고, 120, 140 mm에서는 평균 121°, 116°로 보다 큰 값으로 나타났다. TS 고력볼트의 경우, 체결이 종료되는 시점이 핀 테일이 파단지점에서의 축력은 길이에 관계없이 대부분 표준볼트축력을 상회하는 것으로 나타났고 길이 별로 약간의 소요 너트회전각이 약간의 차이가 나타났지만, 너트회전각 검사기준인 120±30°범위를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4.2 육각 고력볼트

길이에 따른 육각 고력볼트의 표준볼트축력 도입시 소

Table 7 ANOVA table from the turn of nut(Hexagon Bolt)

Source	DF	SS	MS	F	P
Length(mm)	4	2983	746	46.1	0.000
Error	41	664	16.2	-	-
Total	45	3646.2	-	-	-

Table 8 ANOVA table from the needed torque(Hexagon Bolt)

Source	DF	SS	MS	F	P
Length(mm)	4	1815	454	1.04	0.397
Error	41	19633	436	-	-
Total	45	21448	-	-	-

요 너트회전각 및 토크에 대하여 일원 분산분석을 통해 신뢰도 95%로 분석한 결과는 Table 7, 8과 같다.

Table 7에서의 귀무가설은 ‘볼트 길이에 대한 소요 너트회전각의 의존성이 없다’로서 소요 너트회전각의 경우, 유의확률 0.05 미만으로 나타나 귀무가설이 기각되어 길이변수에 대한 의존성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서, 육각 고력볼트의 경우, 길이에 따라 소요 너트회전각이 상이하며 Fig. 10의 길이별 소요 너트회전각의 분포를 통해서도 볼트 길이 100, 120mm의 결과값은 비슷하게 나타났지만, 대체적으로 길이가 증가할수록 소요 너트회전각이 큰 것으로 나타났다.

이를 보다 정량적으로 분석하기 위해 길이에 따른 소요 너트회전각에 대해 회귀분석을 수행한 결과는 아래 Eq. (1)과 같다. 모형의 설명력 지수인 R^2 가 75% 정도로 도출된 회귀모형의 설명력은 인정할 수 있는 수준으로 판단된다.

$$\theta = 81.6 + 0.280 \cdot \ell \quad (1)$$

소요 토크의 경우, 유의확률이 0.397로 나타나서 귀무가설이 채택되어 볼트 길이에 대한 소요 토크의 의존성을 인정할 수가 없는 것으로 나타났다. Fig. 11의 분포에서도 거의 볼트 길이 별로 토크의 평균값이 수평하게 연결되어 서로 값이 비슷하게 나타났고, 길이 별 토크 값의 편차도 비슷하게 나타났다.

육각 고력볼트의 개별 관측치가 Fig. 12와 같이 정규분포를 따르고 있고, 개별 관측치의 분산이 대부분 비슷하게 나타났고, 무작위 추출되어 관측된 값의 경향은 찾을 수가 없었다. 따라서, TS 고력볼트의 편 테일 파단시 체결축력과 소요 너트회전각의 분석과 마찬가지로 분산분석의 전제를 만족하고 있었음을 확인하였다.

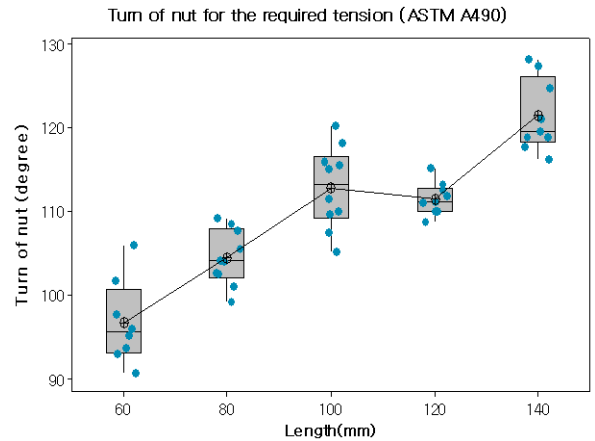


Fig. 10 Turn of nut—Clamping Force(Hexagon bolts)

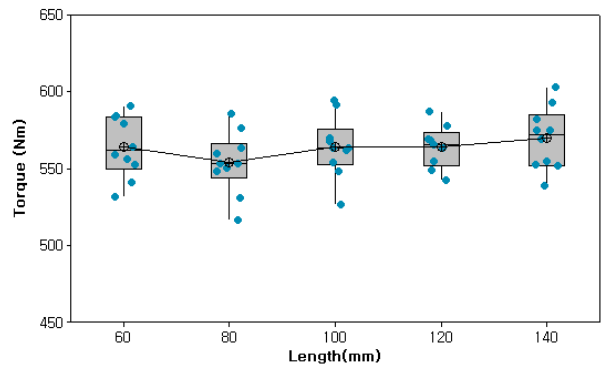


Fig. 11 Torque—Clamping Force(Hexagon bolts)

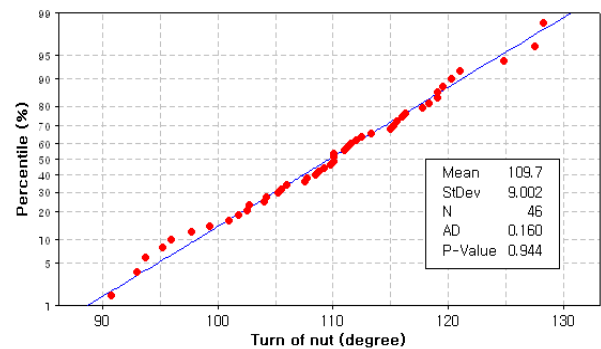


Fig. 12 Probability Plot of the needed turn of nut(Hexagon bolts)

5. 결론

TS 고력볼트와 육각 고력볼트의 길이변화에 따른 체결 특성을 평가하기 위하여 실험결과를 근거로 통계분석을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 유추할 수 있었다.

- (1) TS 고력볼트와 육각 고력볼트 모두 길이변화에 따른 소요 토크 및 토크계수의 변화에 있어서 일정한 경향이 없었고 그 변화량은 2~6% 나타났다. 즉, 토크 및 토크계수는 길이변화에 따라 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.
- (2) TS 고력볼트의 경우, 길이변수에 따른 체결축력에 대해 일원 분산분석을 수행한 결과 유의확률이 0.07로 0.05보다 크므로 귀무가설이 기각되어 길이변수에 대한 의존성을 인정할 수가 없다. 신뢰도 95% 수준에서 길이에 대한 영향력을 없는 것으로 판단된다. 핀 테일 파단시 소요 토크는 볼트 몸체와 핀 테일이 연결되는 잘못된 부분의 전단강도에 직결되는 제품의 고유한 특성으로 길이변수에 대한 특정한 변화를 관찰할 수가 없었다. 소요 너트 회전각의 경우, 유의확률이 0.05 미만으로 귀무가설을 기각하여 길이 의존성을 인정할 수 있었고 육각 고력볼트와 달리 길이에 따른 선형 비례관계는 관찰되지 않았으나 길이-직경비 5d 전후로 큰 차이가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 육각 고력볼트는 그 변화량은 작았지만, 길이가 증가할수록 축력이 작아지는 경향을 나타냈고, 소요 너트회전각에 대해서는 유의확률이 0.05 미만으로 길이 의존성이 있는 것으로 나타났고, 회귀분석 수행 결과에서도 길이가 증가할수록 소요 너트회전각이 커지는 선형 비례관계를 나타냈다. 회귀분석의 설명력이 전체 관측값 중 75% 이상을 설명할

수 있을 정도로 설명력은 충분히 인정할 수 있는 수준으로 나타났다. 또한, 토크의 경우, 유의확률이 0.397로서 길이의존성을 관찰할 수가 없었다.

- (4) 너트회전각 90°지점에서는 대부분의 실험체가 표준볼트축력에 미달했기 때문에 실제로 현장 검사 기준 범위에 해당되더라도 축력에 미달되는 경우가 발생할 수 있으므로 너트회전각에 대한 철저한 관리가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 나환선, 이현주, 김강석, 고력볼트 접합부 기술지침 및 현장 시공지침, 한국전력공사 전력연구원 전력연-단200., 2006.
2. 나환선, 이현주, 김강석, 서용표, 권기주, 김진호, 김주연, 철골구조물 고력볼트 접합부 성능향상 기술개발, 한국전력공사 전력연구원 1차년도 연구보고서, 2007.
3. 日本建築學會, Japanese Architectural Standard Specification 5, 鐵筋コンクリート工事., 2003.
4. Geoffrey L. Kulak, John W. Fisher, John H. A. Struik, Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, 2nd Edition, AISC, Inc. pp.61-65., 2001.
5. MINITAB R15 Program Manual., 2008.
6. RCSC committee A. 1, American Institute of Steel Construction, Inc., Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, pp.35-69, 2004.

(접수일자 : 2011년 5월 7일)

(수정일자 : 2011년 7월 5일)

(심사완료일자 : 2011년 7월 12일)

요 지

고력볼트 길이-직경비가 5d 이상인 경우, 시험을 통한 결과를 활용하여 현장에서 볼트 체결을 하도록 권고하고 있을뿐 길이-직경비에 따른 별도의 규정 및 지침은 없다. 국내에서는 고력볼트 체결법으로 너트회전법이 아닌 토크관리법이 적용하고 있고 최근에는 KS B 2819의 '구조물용 토크-전단형 고장력 볼트'(이하, TS 고력볼트)가 주로 사용되고 있기 때문에 길이 인자에 따른 규정이 국외 기준에 비해 미비한 것이 현실이다. 따라서, 본 논문에서는 TS 고력볼트의 길이인자에 따른 적정 축력 도입을 위한 소요 너트회전각 및 토크를 분석하여 길이변수에 따른 특성을 평가하고자 한다. 실험결과와 분석에서는 통계분석 프로그램 Minitab을 활용하여 길이변수에 대한 유효성을 정량적으로 분석했다.

핵심 용어 : 고력볼트, 길이, 축력, 토크, 너트회전각