

온도변수에 따른 고력볼트 체결력 평가

Evaluation on Clamping force of High Strength Bolts By Temperature Parameter

나 환 선¹⁾ · 이 현 주²⁾ · 김 강 석³⁾ · 김 진 호⁴⁾ · 김 우 범⁵⁾
Nah, Hwan Seon Lee, Hyeon Ju Kim, Kang Seok Kim, Jin Ho Kim, Woo Bum

요 약 : 건축공사 표준시방서에서 규정하는 TS고력볼트는 KS B 2819에 따라 토크관리법에 의한 체결한다. TS고력볼트는 핀 테일이 파단 되면 적정축력이 도입되는 것으로 알려져 있지만, 실제로는 온도조건에 따라 토크계수가 변하고 도입축력도 설계기준에 미치지 못하는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 현장 온도조건이 볼트의 토크계수 및 도입축력의 영향을 평가하기 위해 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 범위에서 3 종류의 고력 볼트에 대해 도입축력, 토크계수, 너트회전각을 실험적으로 비교 분석하였다. 실험결과 TS고력볼트의 경우 핀 테일이 파단될 때 모든 온도조건에서 설계볼트장력과 표준볼트장력을 상회하는 도입축력을 나타냈으며 -10°C 에서 50°C 까지 온도 상승함에 따라 핀 테일 파단시점의 볼트에 도입되는 평균축력은 20kN 증가되었다. 아연피막 처리한 일반육각형 고력볼트의 경우, 0°C , 20°C , 50°C 조건, 토크계수 0.13과 토크 $462\text{N}\cdot\text{m}$ 에서 표준볼트축력을 상회하였지만, 도입축력의 일정한 경향을 찾을 수 없었으며 온도변수 별 평균 도입축력 차는 최대 50kN이었다. 일반 육각고력볼트의 경우, 온도 상승에 따라 평균 도입축력도 상승되는 추세였으며 토크 $462\text{N}\cdot\text{m}$ 일때 온도변수별 볼트의 도입축력은 최대 33kN 차이를 보였다. 또한, TS볼트를 제외한 육각볼트 종류 군에 대해서는 너트회전각 90° 경우의 도입축력은 설계볼트장력에 미치지 못했다. 따라서, 기존 너트회전각 $120^{\circ}\pm 30^{\circ}$ 의 하한치 -30° 에 대한 재평가를 고려해 볼 필요가 있다.

ABSTRACT : The clamping of torque shear bolt is based on KS B 2819. It was misunderstood that the tension force of the TS bolt was induced generally at the break of pin-tail specified. However, the clamping forces on slip critical connections do not often meet the intended tension, as it considerably varies due to torque coefficient dependent on temperature variables despite the break of the pin tail. In this study, the tension of torque shear bolts were compared with two types of high-strength hexagon bolts by temperature parameters from -10°C to 50°C . Torque shear bolts showed that the average clamping force increased to 20kN as the temperature increased. In case of galvanized high-strength hexagon bolts, the average clamping forces at 0°C , 20°C , 50°C were recorded over standard bolt tension, 178kN, and the worst standard deviation was 50kN. In case of high-strength hexagon bolts, average clamping forces increased as the temperature went up, and the worst standard deviation was 33kN lower than that of galvanized high-strength hexagon bolts. As for the turn-of-the-nut method, at nut rotation of 90° , two types of high-strength hexagon bolts did not meet the intended design bolt in tension, 162kN. It is necessary to re-evaluate the range of turn of nut, $120^{\circ}\pm 30^{\circ}$.

핵심어 : 토크 전단형 볼트, 온도, 토크계수, 인장력, 토크

KEYWORDS : torque-shear bolt, temperature, torque coefficient, tension, torque

1. 서론

전력산업을 위한 154kV 변전소 구조물의 설계가 2002년 철골구조로 표준화 되면서 볼트 접합부에 사용되는 볼트종류는

기존의 일반육각형 고력볼트 대신 토크전단형 고력볼트(이하, TS고력볼트)로 설계 시공되고 있다.(서용표 등, 2007) TS 고력볼트의 KS기준은 2003년 제정되었으며, KS F10T, S10T에 해당하는 ASTM F 2280이 2006년에 제정되는 등, 국내

- 1) 교신저자, 정회원, 한전 전력연구원 책임연구원
(Tel. 042-865-5711, Fax. 042-865-5729, E-mail : hsnah@kepri.re.kr)
- 2) 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원(hyeon@kepri.re.kr)
- 3) 정회원, 한전 전력연구원 일반연구원(kangseok@kepri.re.kr)
- 4) 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 수석연구원(jinho@rist.re.kr)
- 5) 정회원, 공주대학교 건축공학부 교수(wbk@kongju.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회담을 게재하겠습니다.

외를 막론하고 관련 기술기준의 수립이 된 건 최근 10년 이내이다. 미국의 경우 미국강구조학회 RCSC시방서(2004)에서 규정한 고력볼트 체결방법 중 직접인장측정기구(DTI)에 의한 체결방법을 따르기 때문에 한국처럼 토크관리법에서 발생하는 축력과 토크의 변수에 영향을 받지 않고 적절한 축력도입이 가능하다. 또한, 직접적으로 축력도입에 관한 여러 연구(Struik 등, 1973; Ghobara, 1992; Dahl 등, 1996)를 통해 도입축력의 신뢰도를 높이는 연구결과를 발표해왔다. 그러나 한국의 경우 이미 90년대 중반부터 철골구조물 일반건설현장에서 많이 사용되어온 TS 고력볼트에 대해 시공자는 물론 관리감독자까지도 핀 테일만 파단되면 적정축력이 도입되는 것으로 잘못 이해하고 있다. 철골 구조물 고력볼트접합부의 내력 확보를 위해서는 변동 폭이 작고 안정적인 축력이 볼트에 도입되어야 한다. 적정축력도입을 위해서는 나사산의 토크계수가 일정하게 유지되어야 하나, 토크계수는 볼트의 보관상태, 기온변화에 따른 볼트 표면의 방청유 상태, 이물질 부착 혹은 제품의 손상 등에 의해 영향을 받기 때문에 볼트의 운반, 보관, 조립작업 등 제품 취급 시 세심한 주의가 필요하다. 일반육각 고력볼트와 달리 TS고력볼트의 토크계수 국내규정은 따로 정해진 바 없으며, 일본의 경우는 고력볼트 접합 설계 및 시공가이드북에서는 0.10 ~ 0.17 정도의 값을 권장하고 있으며 온도 범위를 0℃ ~ 60℃로 제한하고 있다.(일본건축학회, 2003) 본 연구에서는 철골 공사현장에서의 온도조건이 볼트 제품의 토크계수 및 도입축력에 미치는 영향을 살펴보기 위해 -10℃~50℃의 범위에서 각 10℃ 간격으로 7가지 온도변수로 축력시험을 실시하였으며 볼트종류는 TS 고력볼트와 일반육각 고력볼트, 아연피

막 일반육각고력볼트를 그 대상으로 하였다.

2. 시험계획 및 시험

동절기, 하절기에 따라 현장 온도편차는 크게 다르며 이때 볼트의 축력과 토크는 어떻게 변화하는지를 확인하기 위해 -10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃, 50℃ 조건 속에서 볼트 체결력 시험을 수행하였다.(김진호 등, 2007) 체결 후의 특성을 평가하기 위해 사용된 TS고력볼트는 S10T M20, 길이 140mm로 설정하였고, 일반육각고력볼트와 아연피막 처리한 일반육각형 고력볼트는 F10T M20, 길이 135mm로 설정하였다. 3 종류의 볼트길이를 동일한 조건으로 시험하고자 하였으나, 기성 제품시장 조건이 허락되지 않았고, 사전연구(나환선 등, 2007)에서 길이변수에 대한 체결력의 변화가 크지 않았기 때문에 본 연구에서는 볼트길이 5mm에 대한 축력차이를 인정하지 않는다는 전제로 본 시험을 수행하였다.

표 1. 시험체 일람표

볼트 등급	볼트 종류	규격	온도 (℃)	시험체 개수 (EA)
S10T	TS고력볼트 (KS B2819)	M20×140	-10	10
			0	10
			10	10
F10T	일반 육각볼트 (KS B1010)	M20×135	20	10
			30	10
			40	10
F10T	아연피막처리 육각볼트 (KS B1010)	M20×135	50	10

표 2. TS고력볼트 온도변수에 따른 축력변화

Temp.	Measurement	Shearing off at the spined end				Maximum Point			Break Point	
		N (kN)	T (N·m)	θ (°)	k	N (kN)	T (N·m)	θ (°)	N (kN)	θ (°)
-10℃	Average	179.2	542	153	0.15	267.6	743	376	185.9	921
	Standard Deviation	6.91	18.24	5.82	0.01	4.16	44.49	34.95	7.02	35.85
0℃	Average	180.7	537	154	0.15	267.0	718	375	187.7	899
	Standard Deviation	9.72	2.45	10.6	0.01	5.08	53.51	55.83	10.57	48.08
10℃	Average	181.0	536	151	0.15	263.1	723	350	184.9	919
	Standard Deviation	6.53	2.93	7.12	0.01	2.13	12.26	37.41	8.30	82.14
20℃	Average	182.5	533	158	0.15	267.1	691	354	189.3	898
	Standard Deviation	4.42	2.08	10.16	0.01	1.70	17.54	26.21	5.45	53.32
30℃	Average	182.7	528	154	0.15	262.8	701	366	186.0	897
	Standard Deviation	5.37	2.58	5.23	0.01	4.77	32.15	62.70	7.30	62.70
40℃	Average	187.8	526	156	0.14	260.8	691	347	183.1	889
	Standard Deviation	11.68	3.46	9.12	0.01	6.86	43.27	26.19	6.01	38.45
50℃	Average	192.5	525	160	0.14	263.4	666	357	182.1	913
	Standard Deviation	7.91	4.31	5.37	0.01	3.25	37.96	27.66	8.70	81.3

TS고력볼트의 시험방법은 1차적으로 인력으로 로드 셀 부분에 시험체 볼트를 조립한 후에 시험기로 너트를 회전시켜 핀 테일이 파단될 때까지 체결하고 그 후 지그를 교체하여 볼트가 파단될 때까지 진행하며 이 과정에서 토크, 너트회전각, 볼트축력을 측정하였다. 아연피막처리 볼트의 경우, 유사한 절차에 따라 시험자 1인의 힘으로 1차 체결 후, 볼트가 파단될 때까지 시험을 수행하였다. 볼트 표면온도 조건을 충족시키기 위해 대상 볼트 시험체를 온도세팅 인큐베이터에 넣고 온도조건을 맞추었으며 실험 시작 전에는 온도측정기로 볼트 표면온도를 검사한 후에 시험을 실시하였다. 본 시험에 사용된 시험체 목록은 표 1과 같다.

3. 시험결과

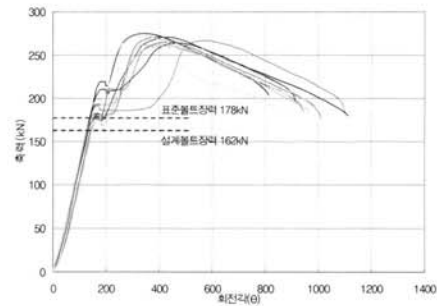
3.1 TS고력볼트

온도변수에 따른 시험결과는 표 2와 같다. 표 2에는 시험체 볼트의 핀 테일 파단시점, 최대축력, 볼트파단 지점에서의 볼트축력, 토크, 너트회전각의 측정결과와 핀 테일 파단시의 볼트축력과 토크를 근거로 토크계수를 계산하였다. 그림 1~3은 각 볼트 종류에 따른 축력-너트회전각, 축력-토크 관계를 나타낸다. 시험결과를 도시한 그림에 설계기준과 시방사에서 규정된 설계볼트장력과 표준볼트장력을 각각 표시하였다.

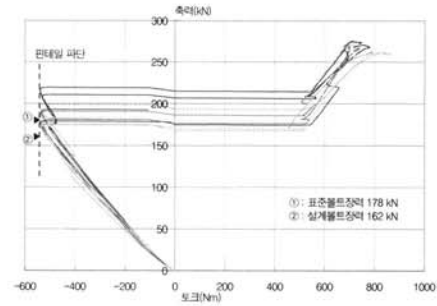
그림 1과 같이 TS볼트의 경우, 볼트축력-토크관계 곡선에서 볼트축력이 표준볼트장력 수준에서 변곡점이 생기며, 볼트축력-토크관계에서 토크의 방향이 바뀐다. 그 이유는 축력 시험기의 기기 특성에서 보이는 물리적 현상이다. 핀 테일이 파단되기 전까지는 핀 테일을 붙잡는 1차 지그를 사용하고, 핀 테일이 파단된 이후부터는 2차 지그를 사용하는데, 지그 교체 과정에서, 2차 지그의 회전방향이 반대로 설정되었기 때문이다. 본 시험 중 볼트 체결과정에서 시험과정 중에 축력-너트회전각 관계에서 축력의 증가 없이 너트회전각이 수평으로 증가하는 부분에서 너트와 볼트가 동시에 회전하는 공회전 현상이 발생하였는데 시험결과를 분석할 때 공회전 현상에 의한 너트회전각을 제외한 순수 회전각으로 산출하였다. 이 현상은 볼트와 너트 나사산 간의 마찰저항이 볼트 머리부에서의 마찰저항보다 증가하기 때문으로 철골공사현장에서도 현장조건과 볼트의 상태에 따라 자주 발생할 수 있는 현상이다.

온도변수를 고려한 시험결과 핀 테일 파단시점에서의 평균 토크계수는 0.136~0.151, 토크는 525 N·m ~ 542 N·m로 온도저하에 따라 토크계수, 토크가 증가하는 경향을 보였다. 이 시점의 볼트축력은 179.2 kN ~ 192.5 kN 범위로 나타났으며 설계볼트장력 이상을 충분히 확보하였으며, 이 시점의 너

트회전각은 151°~160°정도로 나타났다.



(a) 축력-너트회전각



(b) 축력-토크

그림1. 20℃에서 TS볼트 축력시험

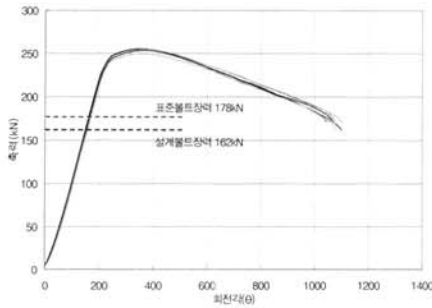
20℃에서의 최대축력은 260.8 kN ~ 267.6 kN ($1,064.5 \text{ N/mm}^2 \sim 1,092.2 \text{ N/mm}^2$) 정도로 제품인장강도 287.4 kN ($1,173.1 \text{ N/mm}^2$) 보다 6%~7% 정도 저하되었는데, 이 원인은 체결과정에서의 너트회전에 따른 비틀림에 의해 전단력이 부가적으로 작용하여 인장강도를 저하시켰기 때문이다. 최대축력 지점에서의 너트회전각은 347°~376°, 볼트 파단시점에서의 너트회전각은 889°~921°를 보였다.

시험했던 볼트의 파단은 체결된 너트에 인접된 나사부에서 발생하였는데, 체결축력과 토크 관계로부터 볼트가 최대축력에 도달한 후, 동일단면이 가장 취약한 부위에서 네킹 (Necking) 현상에 의한 것으로 판단된다.

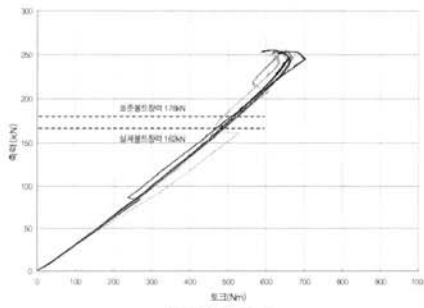
3.2 일반육각볼트

도입된 볼트축력이 표준볼트장력 178kN 일때 토크의 변동 폭은 480 N·m ~ 576 N·m로 크게 나타난 반면 너트회전각은 155°~171°로 작게 나타났다. 탄성한계 지점의 축력은 그림 2와 같이 223 kN ~ 227 kN 정도이며 이때의 너트회전각은 198°

~ 227°이었다. 또한, 최대축력은 251 kN ~ 254 kN, 너트회전각은 333° ~ 381°정도의 범위를 나타냈는데 온도변수와 무관하게 일정범위의 결과를 보였다. 파단지점에서의 너트회전각은 994° ~ 1,100°의 너트회전각을 나타냈다. 시험결과 토크계수 평균값은 다음과 같다. -10 °C와 0 °C 조건에서는 0.154 ~ 0.161 로 토크계수 A종 규격 0.15를 초과했으며, 10 °C 조건에서는 0.147 ~ 0.154 로 A종 규격 범위 안쪽의 값이 혼재하였지만, 그 편차인 0.1의 범주내 존재하였다. 한편 20 °C ~ 50 °C 의 조건에서는 0.134 ~ 0.144 로 규격 범위를 만족하는 것으로 나타났다.



(a) 축력-너트회전각



(b) 축력-토크

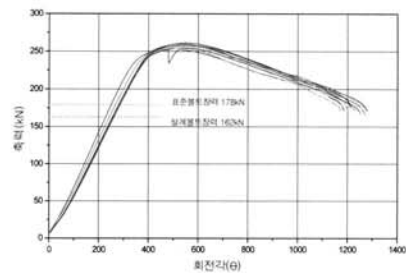
그림 2. 20°C에서 일반육각볼트의 축력시험

20°C에서 일반육각볼트에 도입된 최대응력은 909 N/mm² ~ 936 N/mm²로써 볼트항복응력 900 N/mm² 를 상회하는 값이며 최대축력은 제품인장시험의 평균값 1,135 N/mm² 보다 8% ~ 10% 정도 낮은 값을 보였다.

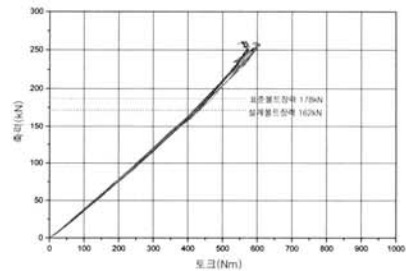
3.3 아연피막처리 일반육각볼트

표준볼트장력에서의 토크변동 폭은 393 N·m ~ 535 N·m 이며, 너트회전각 범위는 138° ~ 285°로 나타났다. 일반육각

볼트와 비교할 때, 아연피막처리 육각볼트의 최저토크는 -87 N·m, 최고토크는 -41 N·m만큼 각각 낮았고, 너트회전각의 변동 폭은 -17° ~ +114°로 상대적으로 컸다. 탄성한계 지점의 축력은 그림 3과 같이 평균적으로 223 kN ~ 235 kN 정도이며 최대축력은 250 kN ~ 260 kN 로써, 일반육각볼트의 경우와 유사하였는데, 이는 온도변화가 볼트제품의 기계적 성질에 영향을 미치지 않았음을 의미한다. 파단지점에서의 너트회전각은 919° ~ 1,225°로 편차가 컸다. 각 시험체 분석결과, 평균 토크계수는 -10 °C와 0 °C 조건에서 0.125 ~ 0.148, 10 °C 조건에서도 0.122 ~ 0.144 로 KS B 1010 볼트와 달리 토크계수 A종 규격을 만족하고 있었다. 또한, 20 °C 의 조건에서는 0.120 ~ 0.126으로 다른 온도조건에 비하여 토크계수의 편차가 작았다.



(a) 축력-너트회전각



(b) 축력-토크

그림 3. 20°C에서 아연피막처리 육각볼트의 축력시험

20°C에서의 아연피막처리 육각볼트의 최대응력은 943N/mm² ~ 975 N/mm²로써 볼트항복응력 900 N/mm² 를 상회하였으며 최대축력은 제품인장시험의 평균값 1,132 N/mm²보다 7% ~ 10% 정도 낮게 분석되었다.

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 TS고력볼트

4.1.1 핀 테일 파단시 체결축력 분석

TS 볼트의 핀 테일이 파단될 때 볼트 온도별 체결축력 평균 값의 범위는 그림 4와 같이 179.2kN ~ 192.5kN이다. 이 결과는 건축구조설계기준에서 요구하는 설계볼트장력 162kN과 표준볼트장력 178kN을 모두 만족하고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 -10℃, 0℃에서 일부축력이 표준볼트장력 이하의 값을 나타냈다. 이 결과에 따르면 볼트의 온도가 상승할수록 체결 축력도 점차 증가되었다.

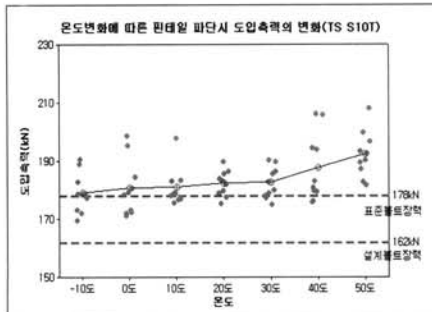


그림 4. TS볼트 핀 테일 파단시 체결축력

4.1.2 핀 테일 파단시 토크계수 분석

시험결과, 핀 테일 파단시점의 토크계수는 0.126 ~ 0.158의 범위를 나타냈는데, 그림 5와 같이 토크계수는 체결축력과 반비례하므로 온도가 상승할수록 토크계수는 거의 일정하게 낮아졌다. 또한, 표준편차의 범위는 0.004 ~ 0.008로 TS볼트의 표준편차는 규정에 없으나, 일반육각 고력볼트 토크계수의 표준편차 0.01 기준을 만족한 신뢰도가 높은 값이었다.

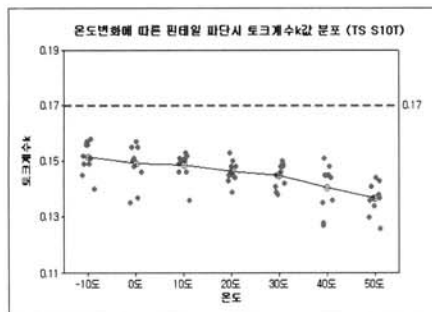


그림 5. TS볼트 온도에 따른 핀 테일 파단시 토크계수 변화

4.1.3 핀 테일 파단시 너트회전각 분석

온도변화에 따른 너트회전각의 정규분포도에 따르면 TS볼트 핀 테일이 파단되는 시점의 너트회전각은 그림 6과 같이 143° ~ 177°의 범위였으며 최대표준편차가 10.1°였다. 평균 너트회전각은 151° ~ 160°으로, 일반 고력볼트의 너트회전각 120°±30°와 비교할 때, 평균 너트회전각은 31° ~ 40°로 상회했으나, 편차는 ±4.5°에 불과했다. 이 결과에 따르면, 핀 테일 파단은 온도변수에 상관없이 일정한 회전각에서 발생되었다.

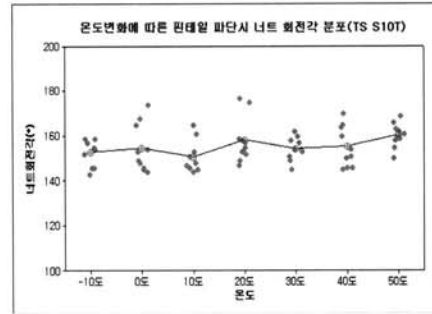


그림 6. TS볼트 핀 테일 파단시 너트회전각

4.2 일반육각볼트

4.2.1 도입축력 분석

현장에서 축력시험을 수행하지 않고 규격범위의 값을 임의로 가정해서 체결할 경우 도입축력 변화를 알아보기 위해 토크계수를 A종 볼트규격의 중간치인 0.13를 기준으로 설정하고 토크 462.8N·m으로 체결했을 때의 도입축력을 추적하였다. 그림 7과 같이 온도상승에 따라 볼트축력이 증가하였지만 50℃ 온도조건을 제외한 대부분의 온도변수 시험체에서 표준설계볼트장력(178kN)은 물론 설계볼트장력(162kN)에도 미치지 못했다. 표 3에서 가장 도입축력이 낮았던 -10℃온도조건에서 설계볼트장력의 15%, 표준설계볼트장력대비 23% 낮은 축력이 각각 도입되었다.

표 3. 토크계수 k=0.13, 토크치 T=462.8 N·m의 도입축력 (단위:kN)

온도변수	-10℃	0℃	10℃	20℃	30℃	40℃	50℃
평균	138.6	145.8	149.8	155.7	161.8	159.2	171.1
표준편차	3.7	5.1	2.8	6.8	5.2	5.4	3.6

표 3의 결과와 같이, 토크계수가 일정하도록 생산 관리된 볼트제품이라 하더라도, 철골현장의 환경온도조건을 고려하지 않으면 목표축력보다 현저하게 낮은 축력이 도입될 수 있다.표면

처리를 실시한 볼트에서도 토크계수치의 변동이 온도변화에 의존하며, 대체로 1℃의 온도변화에 0.5%이다(김진호, 1996)라고 되어있다. 이는 축력변동은 1차적으로 토크계수 변동에 의한 것이지만, 2차적으로 온도변수가 추가되면 토크계수변동 편차가 증가 된다는 점이다. 표3 결과와 같이 변동요인으로 토크계수와 온도는 유기적인 관계를 갖고 있다. 본 실험결과에 따르면, 토크계수 (0.13 → 0.11) 변동 영향으로 축력변동 17%, 온도(20℃ → -10℃) 변동 영향으로 축력변동 15%에 각각 이른다. 즉, 이론적으로는 토크계수와 온도 변동 폭이 동시에 영향 받을 때, 최대 축력 변동 폭은 32%까지 증가될 수 있다.

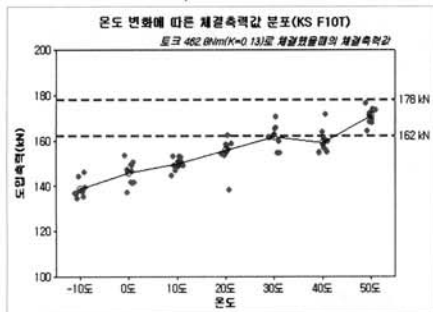


그림 7. 일반육각볼트의 온도에 따른 도입축력 변화 (k=0.13)

4.2.2 토크계수 분석

일반육각볼트의 온도변수별 토크계수의 분포도는 그림 8과 같다. 시험에 사용된 고력볼트는 등급 A종으로 토크계수 값이 0.11 ~ 0.15 사이의 값을 갖는다. 이 결과는 한국강구조학회 기술기사(김진호, 1996; 김상섭, 1997)과 유사한 값이다. 그러나 -10℃ ~ 0℃ 온도조건에서 시험된 볼트의 토크계수는 B종 규격 (0.15 ~ 0.19)에 해당되는 결과를 나타냈다.

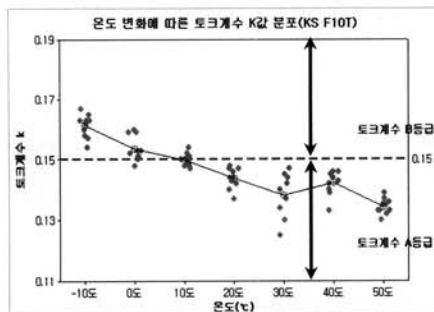


그림 8. 일반육각볼트의 온도에 따른 토크계수 변화

이는 온도가 낮아지면서 볼트의 표면에 윤활 처리된 방청유의 점성 변화로 나사산에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 10℃ 조건에서 A종과 B종 범위의 값이 혼재된 결과를 보였고, 20℃ 이상 조건에서 A종 제품의 토크계수를 만족했다. 이는 볼트와 너트에 도포된 방청유의 윤활상태가 온도상승에 따라 마찰계수가 감소한 것으로 보인다. 즉, 그림 8과 같이, 온도가 높아질수록 토크계수는 점차 감소하는 경향을 보였다.

4.2.3 너트회전각 에 의한 축력분석

너트회전법에서 체결작업 후 검사기준으로 규정하고 있는 1차 체결 후 120°±30° 범위에서의 일반육각볼트의 도입축력은 그림 9 ~ 그림 11과 같다.

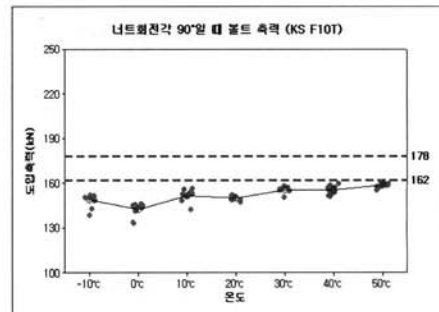


그림 9. 너트회전각 90°의 볼트 축력

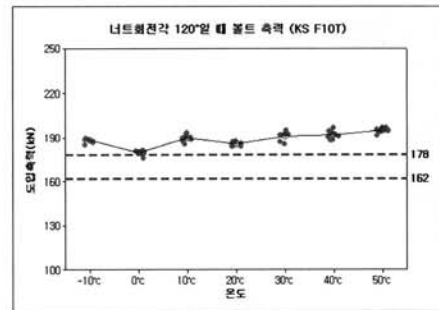


그림 10. 너트회전각 120°의 볼트 축력

회전각 120°이상의 경우에는 표준볼트축력을 충분히 확보하고 있지만 90°지점에서는 전체 결과값이 설계기준축력 미만으로 나타났다. 이 시험결과에 따르면 너트회전법에서 규정하고 있는 회전각 하한치(-30°)에 대한 기준개선을 검토해 볼 필요가 있다고 판단된다.

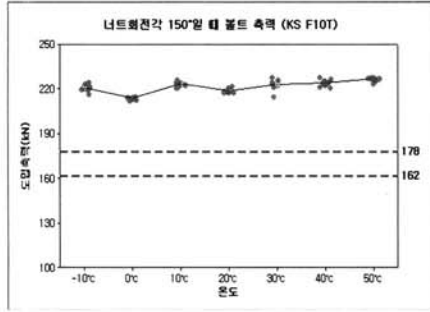


그림 11. 너트회전각 150°의 볼트 축력

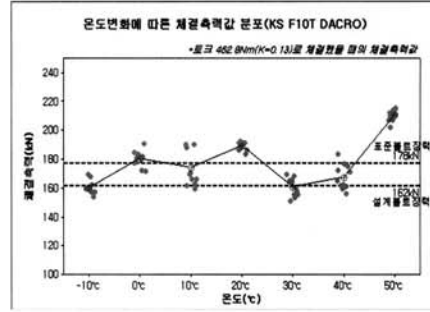


그림 12. $k=0.13$, $T=462.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 일때의 도입속력

4.3 아연피막처리 일반육각볼트

4.3.1 도입속력 분석

육각고력볼트의 경우와 동일조건에서 비교를 위해, 아연피막처리 육각볼트의 경우에도 토크계수 0.13, 표준볼트 장력 178 kN 일때의 토크치 462.8 kN를 기준으로 시험된 볼트의 도입속력이 온도변수에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하였고 그 결과는 아래 표 4와 같다.

표 4. 토크계수 $k=0.13$, 토크치 $T=462.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 의 도입속력 (단위:kN)

온도변수	-10℃	0℃	10℃	20℃	30℃	40℃	50℃
평균속력	160.3	180.5	172.8	189.1	160.1	169.4	210.9
표준편차	4.4	5.7	12.1	2.8	5.9	8.1	4.2

그림 12에서 아연피막처리 육각볼트에서는 일반육각볼트보다 전반적으로 도입속력이 21kN ~ 39kN 높았다. 또한, 0℃, 20℃, 50℃ 조건에서는 표준볼트장력 178kN을 상회하였으나, 10℃, 40℃조건에서는 설계볼트장력 162kN만을 상회한 것으로 분석되었고, 나머지 -10℃, 30℃조건에서는 설계볼트장력에조차 미치지 못했다. 또한 10℃온도조건에서는 다른 온도변수와 달리 표준편차가 최소 2배 이상 크게 나타났는데, 이는 2개의 시험데이터 이상치에 의한 것이다. 볼트자체 또는 환경조건 또는 어떤 요인에 의해 축력의 변동 폭이 증가하였을 뿐, 그림 14와 같이 온도변수에 따른 일정한 경향을 찾을 수 없었다. 아연피막처리 육각볼트의 경우, 일정한 시점에서의 축력으로만 온도변수에 대한 평가를 할 수 없어서, 추가적으로 탄성한계점에서의 도입속력, 최대속력일 때를 각각 비교하여 어떤 경향이 나타나는지를 확인하였다. 그림 13에서 탄성한계점에서의 도입속력은 0℃를 제외하고, 대체적으로 225kN내외 일정한 값을 나타냈다.

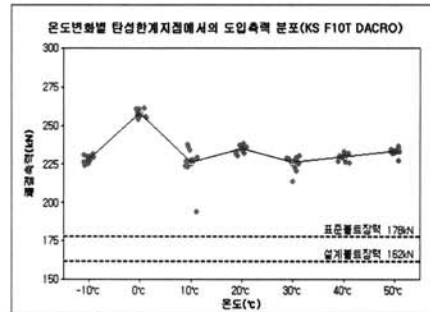


그림 13. 온도변수에 따른 탄성한계점의 도입속력

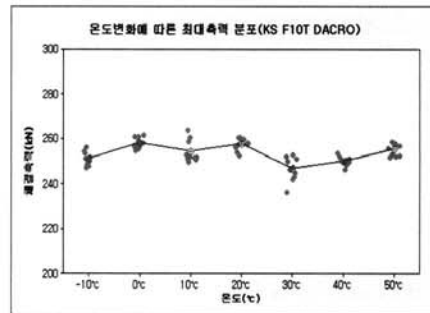


그림 14. 온도변수에 따른 최대속력

또한 그림 14에서 시험된 볼트의 최대속력을 비교한 값에서도 250kN 내외로 일정한 값을 보였다. 본 실험결과에 따르면, 탄성한계점의 축력, 최대속력으로 판단할 때 기계적 물성은 온도변수에 영향을 받지 않았으며, 볼트에 도포된 아연피막이 일반육각볼트의 경우보다 온도변수에 영향을 덜 받지만, 어떠한 경향도 보이지 않았기 때문에 온도변수에 대해 도입속력 평가는 추가적인 많은 실험이 필요하다고 사료된다.

4.3.2 토크계수 분석

일반육각볼트, TS고력볼트의 경우와 달리, 아연피막처리 육

각볼트의 온도변수별 토크계수는 그림 15에서와 같이 일정한 경향을 찾을 수 없었다. 이 경우, 저온에서의 토크계수는 20℃와 50℃의 경우보다 더 큰 값을 보였다. 또한, 10℃에서 변동 폭은 28%로 가장 컸으며, 50℃에서는 0.11에 못 미치는 토크계수를 나타내 과 체결이 우려되었다. 이러한 무작위적인 경향은 볼트와 너트에 도포된 윤활상태에 따른 온도변수의 영향보다는 아연피막처리의 도막 층의 특성과 도막두께라는 인자에 기인한 것으로 판단된다.

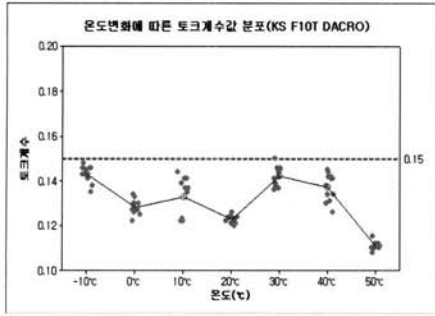


그림 15. 온도변수별 토크계수

각 온도조건 모두 토크계수 A종 규격 0.11 ~ 0.15를 만족하고 있으므로 안정적이나, 토크계수 히스토그램을 분석한 결과에 따르면 온도변수별 토크계수의 표준편차는 0.001 ~ 0.006까지 일정치 않았다. 이 시험결과에 따르면, 온도변수별 토크계수의 관리가 쉽지 않음을 알 수 있다.

4.3.3 너트회전각에 의한 볼트 축력분석

너트회전법에 의한 볼트 체결법을 수행한 결과는 다음과 같다. 건축공사 표준시방서에서 규정하고 있는 1차 체결, 150kN을 도입한 후 너트회전각 120°±30°범위에서 온도변수에 따른 볼트축력은 그림16 ~ 그림18 과 같다.

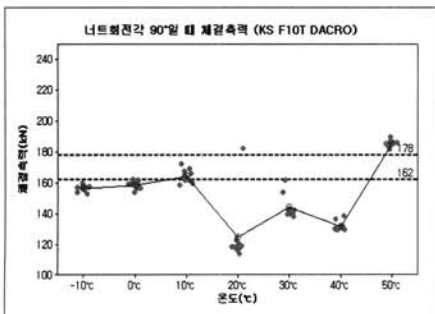


그림 16. 너트회전각 90°의 도입축력

너트회전각 90° 지점에서는 온도변수 50℃에서만 시험된 볼트군의 평균축력이 표준볼트장력 178 kN을 상회하였을 뿐, 온도변수 10℃조건 평균축력은 설계볼트장력을 겨우 상회하는 164 kN을 기록하였고 나머지 온도변수 -10℃에서 155 kN, 0℃에서 158 kN, 20℃에서 124 kN, 30℃에서 143 kN, 40℃에서 131 kN으로 각각 설계볼트장력조차 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 너트회전각 120°에서 볼트에 도입된 축력의 경우, 온도변수 20℃, 30℃, 40℃조건에서 각각, 표준볼트 축력에 미치지 못하였다. 너트회전각 90° 일 때 볼트에 도입된 축력은 전반적으로 온도변수에 관계없이 목표축력 이하로 분석되었다.

이 시험결과는 4.2.3 일반육각볼트의 너트회전각에 의한 분석과 마찬가지로, 보다 구체적이고 광범위한 실험계획법에 의해 검증을 수행하여, 현재 건축공사표준시방서에서 규정하고 있는 너트회전법에 의한 체결 시, 회전각 하한치 -30°에 대한 개선을 고려해야할 것으로 판단된다.

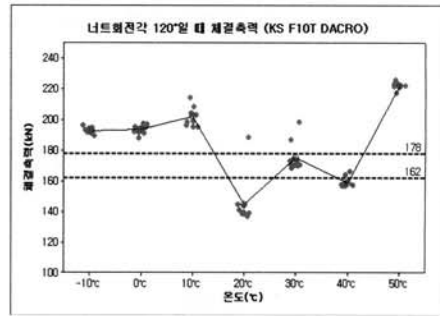


그림 17. 너트회전각 120°의 도입축력

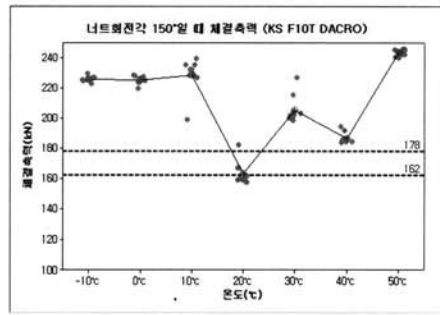


그림 18. 너트회전각 150°의 도입축력

5. 결론

본 논문에서는 철골 공사현장에서의 온도조건이 볼트 제품

의 토크계수 및 도입축력에 미치는 영향을 분석하기 위해 -10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃, 50℃의 7가지 온도변수와 TS볼트, 일반육각볼트, 아연피막처리 육각볼트 3종류에 대한 축력, 토크, 토크계수를 비교 시험하였다. TS볼트는 핀 테일 파단시점의 축력을, 일반육각볼트와 아연피막처리 육각볼트의 도입축력은 특정토크계수와 특정토크를 기준으로 하여 각각 결과를 분석하였다. 그 시험결과와 분석내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) TS볼트의 핀 테일이 파단될 때 볼트온도별 체결축력 평균값의 범위는 179.2 kN ~ 192.5 kN였다. 이 결과는 건축구조설계기준에서 요구하는 설계볼트장력 162 kN 과 표준볼트장력 178kN을 모두 만족한 값이며, 시험했던 볼트종류 중에서 가장 신뢰도가 높은 볼트종류였다. 또한, 온도가 상승할수록 도입축력도 높아지는 경향을 가장 뚜렷하게 보였다.
- (2) 일반 육각볼트의 온도변수에 따른 도입축력 확인을 위해 토크계수 0.13, 토크 462.8N·m으로 체결했을 때의 도입축력을 분석하였다. 50℃ 온도조건을 제외한 시험체에서 설계볼트장력 162 kN에도 미치지 못했으며 가장 체결축력이 낮았던 -10℃ 온도조건에서 설계볼트장력의 15% 저하, 표준설계볼트장력의 23% 낮은 축력인 138kN이 도입되었다. 또한 너트 회전법에 의한 축력평가를 수행한 결과, 너트회전각 90°에서 설계볼트장력보다 4kN ~ 20kN 낮은 값을 보였고, 너트회전각 120°에서 설계볼트장력을 겨우 만족하는 경향을 보였다.
- (3) 아연피막처리 육각볼트도 일반육각볼트와 동일한 방법으로 축력을 비교 평가하였다. 아연피막처리 육각볼트의 경우 일반육각볼트 도입축력보다 21kN ~ 39kN 높게 분석되었다. 그러나, 온도상승에 따른 일정한 경향을 찾아볼 수 없이, 온도변수별로 혼재된 양상을 띄고 있다. 0℃, 20℃, 50℃ 조건에서는 표준볼트장력 178kN을 상회하였고, 10℃, 40℃ 조건에서는 설계볼트장력 162kN만을 상회하였고, 나머지 -10℃, 30℃ 조건에서는 설계볼트장력에조차 미치지 못했다. 너트 회전법에 의한 축력의 경우도 체결축력이 온도변수와 무관하게 도입되었음을 확인하였다. 너트회전각 90°에서 설계볼트장력을 상회한 경우는 온도변수 10℃, 50℃였다. 너트회전각이 커질수록 전반적으로 도입축력이 증가했지만, 너트회전각 120°에 도달할 때까지 온도변수 20℃의 경우에는 설계볼트장력에 미치지 못했다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 지원 하에 이루어진 연구과제 '철골구조물 고력볼트 접합부 성능향상기술 개발'의 일환으로 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김진호(1996), 고력볼트 체결방법의 기본원리 및 시공관리, 한국강구조학회지 제8권 3호, p.53
- 김상섭(1997), 고력볼트의 설계 및 시공기술, 한국강구조학회지 제9권 2호, p.123
- 서용표 등(2007), 철골구조물 고력볼트 접합부의 성능향상 기술개발 1차년도 보고서, 연구보고서, 한전전력연구원
- 나환선, 이현주, 김강석, 김주연, 김진호(2007), 길이변수에 따른 TS고력볼트 체결력의 영향에 관한 실험적 연구, 2007년도 학술발표회논문집, 한국강구조학회, pp.323 ~326
- 김진호, 김주연, 한기명, 나환선, 이현주, 김강석(2007), 현장 온도특성을 고려한 고력볼트 체결성능에 대한 실험적 연구, 2007년도 학술발표회논문집, 한국강구조학회, pp. 337~342
- 日本建築學會(2003), 高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 日本建築學會, pp.75
- John H.A.Struik, A.O Oyeledun, John W Fisher(1973), Bolt Tension Control with a Direct Tension Indicator, *AISC Engineering Journal*, 1st Quarter
- A. Ghobara (1992), Installation of Large Diameter High Strength Bolts With and Without Direct Tension Indicators, Civil Engineering Department, McMaster University, Hamilton, Ontario
- Joans Dahl, Le Wu Lu, John W Fisher, John Abruzzo (1996), Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A 490 1-1/4 in., *AISC Engineering Journal*, 1st Quarter
- Geoffrey L. Kulak, John W. Fisher, John H.A. Struik (2001), Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, 2nd Ed., *AISC Inc.*
- RCSC (2004), *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*, AISC
- ASTM F 2280-06 (2006), Twist Off Type tension Control Structural Bolt/Nut/Washer Assemblies, Steel, Heat Treated, 150ksi Minimum Tensile Strength, *ASTM International*
- (접수일자 : 2008. 1. 17 / 심사일 2008. 3. 10 / 게재확정일 2008. 5. 24)