

온도에 따른 T/S고장력볼트의 체결축력 변동성에 관한 실험적 연구

김미선¹ · 최성모² · 안우찬³ · 이승우⁴ · 양일승^{5*}

¹조교수, 동신대학교, 건축공학과, ²교수, 서울시립대학교, 건축학부, ³과장, (주)동아,

⁴학사과정, 동신대학교, 건축공학과, ⁵부교수, 동신대학교, 건축공학과

Experimental Study on the Clamping Force of Torque Shear Type High Strength Bolts According to the Temperature

Kim, Misun¹, Choi, Sungmo², Ahn, Woochan³, Lee, Seungwoo⁴, Yang, Ilseung^{5*}

¹Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Dongshin University, Naju, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

³Bolt DIV Quality Control Team Manager, Dongah Co., Ltd., Changwon Korea

⁴Undergraduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Dongshin University, Naju, Korea

⁵Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Dongshin University, Naju, Korea

Abstract - High tension bolts are generally used when joining parts of a steel structure. However, there are some difficulties when managing a clamping force, which is an instrument used for fastening. Recently a T/S (torque shear type) bolt has been developed for easier quality control. Like H/S bolts, T/S bolts are similar and used widely across the country. Despite their similarity, very little research has been conducted on the clamping force of T/S bolts by temperature. The main parameter of the study is T/S bolt sizes (M16, M20, M22, M24), experience temperatures (0°C, 20°C, 60°C) and seasons (winter, spring, summer, fall). Also, T/S bolts lengths ranging from 40 mm to 180 mm were selected for the study. The experimental result displayed that the mechanical properties on the sets of T/S bolts KS B 2819 code. Furthermore, it has shown how the clamping force and standard deviation of T/S bolts by temperature satisfy KS specifications. However, The clamping force of T/S bolt decreased when the temperature was low.

Keywords - Torque shear bolt, Tension, Clamping force, Clamping force of season, Temperature dependence

1. 서론

최근 구조물의 거대화화 장대화에 따라 콘크리트 구조물에 비해 자중이 작고 강성이 큰 강구조물이 많이 건설되고 있다. 강구조물은 근본적으로 조립식 구조이기 때문에 부재간의 접합방법이 가장 중요한 문제이다. 강구조물에서 일반적으로 사용되어지고 있는 접합방법 중 마찰접합용 토크전단형 고장력볼트(이하, T/S고장력볼트)를 사용하는 방

법이 있다. T/S고장력볼트의 KS기준은 2003년 제정되었으며, KS F10T, S10T에 해당하는 ASTM F 2280^[1]이 제정되는 등 국내외를 비롯한 각국에서 관련 기술의 기준이 수립되고 있다. 미국의 경우 미국강구조학회 RCSC시방서^[2]에서 규정한 고장력볼트 체결방법은 토크관리법에서 발생하는 축력과 토크의 변수에 영향을 받지 않고 적절한 축력도입이 가능하다. 또한 Dahl *et al.*^[3] 등과 같이 상온에서의 고장력볼트 도입축력의 신뢰도를 향상시키기 위한 연구를 진행하였다.

T/S고장력볼트는 현재, 건축 및 토목의 강구조물에서 가장 넓게 이용되고 있는 접합방법으로서 고강도 볼트를 사용하여 큰 축력을 도입하고, 그 결과 생기는 접합재간의 압축력에 의해 작용외력을 전달하는 것이 큰 특징이다.

따라서 현장온도 및 시공환경에 따른 체결축력에 대한 연구는 Nah *et al.*^[4], Nah and Choi^[5], Lee *et al.*^[6] 등과 같이 활

Note.-Discussion open until August 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 10, 2019; revised December 14, 2019; approved on December 19, 2019.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-61-330-3129 Fax. +82-61-330-3103

E-mail. yang1698@dsu.ac.kr

발히 진행되어 왔다. T/S고장력볼트는 일반 육각머리 고장력볼트로 핀테일이 파단되면 적정축력이 도입되는 것으로 알려져 있지만, 실제로는 외부환경조건에 따라 볼트 나사산, 와셔에 도포된 윤활유의 점도변화는 물론 이물질의 부착여부 등 다양한 현장조건에 따라서 토크계수가 변한다. 따라서 T/S고장력볼트 도입축력도 설계기준을 만족하지 못하거나 과도하게 체결될 경우가 발생한다. 따라서 T/S고장력볼트의 체결은 상온(10°C - 30°C)에서 체결하도록 하고 있다. 본 연구에서는 T/S고장력볼트의 직경(M16, M20, M22, M24) 별로 온도(0°C, 20°C, 60°C)와 계절(봄, 여름, 가을, 겨울)을 변수로 체결축력 시험을 수행하여 체결축력의 변동성을 파악하고자 한다. 또한, T/S고장력볼트의 상온 시 너트 회전각과 체결축력에 대한 관계를 규명하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 세트 체결축력의 온도 의존성 실험

KS B 1010세트 체결축력의 온도 의존성 실험에 대한 KS 기준은 Table 1에 나타내고 있다. 상온에서 세트의 체결축력 실험은 10°C - 30°C에서 사용하도록 규정되어 있기 때문에 20°C(상온)에서 수행하고, 0°C(저온) 및 60°C(고온)의 극한온도에서도 수행하려 한다. 세트의 실험은 강구조설계^[7]에 나타난 축력계(TMC-400)와 전동식 토크렌치(MTS-80L)를 사용한다.

Table 1. Clamping force for the T/S bolts set according to the temperature dependence

T/S bolt size	Clamping force (kN)		Standard deviation clamping force (kN)
	0°C, 60°C AVE.	20°C AVE.	20°C SD.
M16	106-139	110-133	8.5 or less
M20	165-217	172-207	13.0 or less
M22	205-268	212-256	16.0 or less
M24	238-312	247-298	19.0 or less

체결축력 시험은 KS B 2819(2013)^[8], JSS II 09(2015)^[9]에 따른다. 체결은 흠이 파단될 때까지 연속 시행하며, 파단 흠의 파단 후 체결축력을 측정한다. 축력계의 눈금량은 측

정하려고 하는 축력 1% 이하로, 그 오차는 측정하려고 하는 축력값의 범위 내에서 각 눈금이 표시하는 값의 2% 이하로 한다. 표면 온도계의 눈금량은 2°C 이하로 하고, 온도는 -5°C - 65°C 범위 내에서 2°C 이하로 한다. 저온 및 고온의 체결축력 실험은 실험 종료 시까지 볼트 세트 제품의 실험 온도인 0°C, 60°C를 유지하기 위해서 0°C 시험체는 6시간 이상 냉동하고, 60°C 시험체는 시험로를 이용하여 해동온도에서 6시간 이상 보관하고, 볼트 심부와 표면 온도가 요구하는 온도를 유지할 수 있도록 하였다.

2.2 세트 체결축력의 계절별 온도 의존성 실험

세트 체결축력의 계절별 온도 의존성 실험은 각각 2월, 5월, 8월, 11월에 대해서 수행하고자 한다. 계절별 세트의 체결축력의 변동성을 평가하기 위하여 D사에서 생산한 T/S 고장력볼트의 사이즈별 목길이(3 types)에 따라 체결축력 실험을 수행하였다. 실험은 1로트에서 무작위로 5개의 볼트를 선정하여 실험에 의한 축력값의 평균을 산출하여 요구되는 축력값에 만족여부를 평가하였다. Fig. 1에서는 계절별 T/S고장력볼트 체결축력의 온도 의존성 평가를 위한 실험과정을 보여주고 있다.

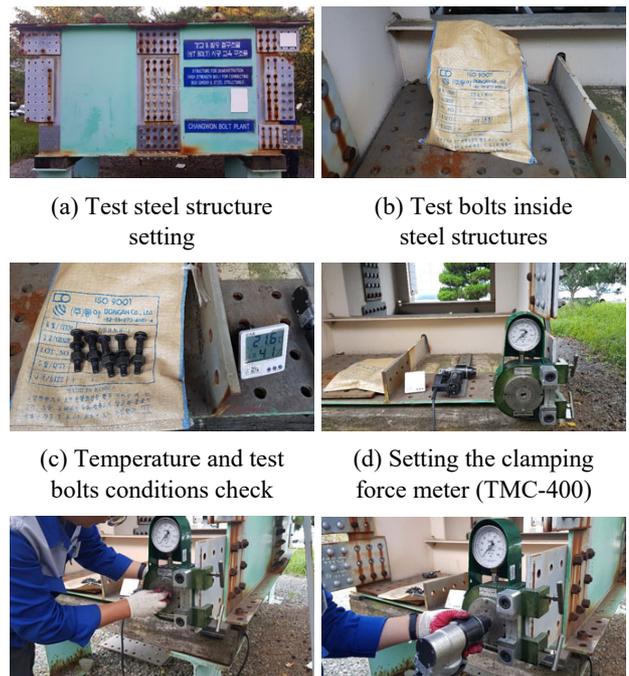


Fig. 1. Procedures of clamping force of T/S bolt set according to the season

2.3 축력과 너트 회전각 실험

T/S고장력볼트의 도입 축력과 너트의 회전각 관계를 볼트의 호칭별로 측정하였다. 세트 체결성능실험은 토크실험기에서 각도를 확인하면서 15°씩 연신율과 변형도 게이지의 데이터를 수집하였다. 축력은 볼트의 축부에 부착한 스트레인게이지에서 산출하였다. 즉, 축력은 스트레인게이지에서 측정한 변형도에 볼트단면적과 영계수(인장 실험에서 산출)를 곱해서 산출한다. 또한, Fig. 2에서는 축력-너트 회전각 실험 순서를 나타내고 있다. 축력과 회전각 실험 전에 볼트길이를 측정한 후 Table 2에서 나타낸 것과 같이 1차 체결하고, 여장길이를 측정한 후 90°까지 가력하여 볼트의 파단 유무를 확인한다. 마지막으로, 실험 후에 볼트길이를 측정한다.

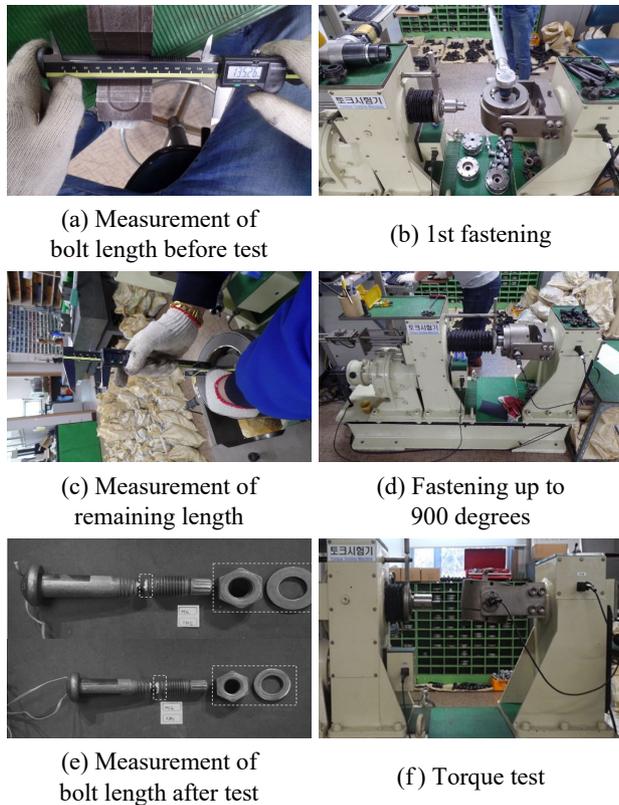


Fig. 2. Procedures of clamping force to nut rotation relation test

Table 2. Torque in T/S bolt 1st fastening

T/S bolt size	M16	M20, M22	M24
1st fastening torque	100 kN·mm	150 kN·mm	200 kN·mm

2.4 T/S고장력볼트 세트의 인장 실험 결과

제품의 기계적 성질은 KS규준에 따라 실험하였을 경우, 아래의 인장 하중(최소) 미만에서 파단되는 일이 없고, 인장 하중을 증가시켰을 때 볼트 머리가 떨어져 나가서는 안 된다. 제품의 인장실험 결과는 Table 3과 Fig. 3에서 나타내고 있으며, 모든 시험편에서 KS규준을 충족하고 있는 것으로 나타났다. M16시험체와 M20시험체의 인장하중은 166 kN - 175 kN, 262 kN - 274 kN으로 KS규준치인 157 kN 이상, 245 kN 이상 조건을 모두 충족하는 것으로 나타났다. 또한 M22시험체와 M24시험체의 인장 하중은 325 kN - 336 kN, 381 kN - 392 kN으로 KS규준치인 303 kN 이상, 353 kN 이상으로 조건을 충족하고 있었다.

Table 3. Tensile test results of T/S bolt set

Specimen		Tensile load (kN)			KS standard
M16	×40	167	166	172	157 or more
	×80	174	173	174	
	×120	174	175	174	
M20	×45	263	262	265	245 or more
	×90	265	262	263	
	×140	272	273	274	
M22	×50	327	325	325	303 or more
	×105	333	333	333	
	×160	335	335	336	
M24	×55	383	381	385	353 or more
	×120	386	388	389	
	×180	392	392	390	

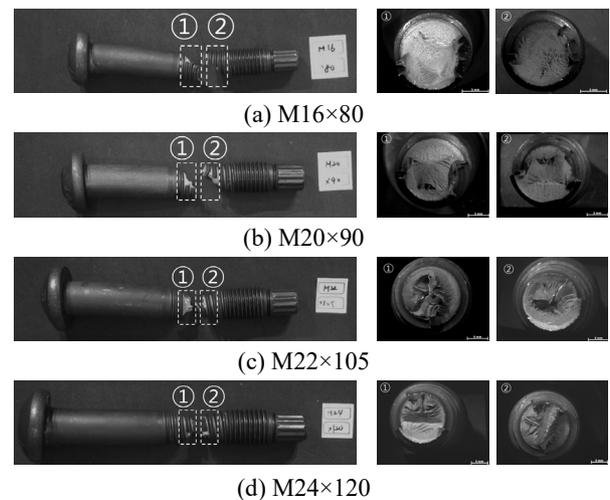


Fig. 3. Fracture condition of T/S bolt set specimens

3. 실험결과 및 분석

3.1 세트 체결축력의 온도 의존성 실험

온도별 T/S고장력볼트 체결축력의 평균치와 표준편차는 Table 4, Fig. 5, Fig. 6에 나타내고 있다. 또한, 체결축력 실험 후 사이즈별 파단면 사진은 Fig. 4에 나타내고 있다. 실험 결과, 모든 시험체는 실험온도와 관계없이 각 제품의 체결축력 관련 KS 규준을 모두 만족시키는 것으로 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 실험온도별 각 시험체의 체결축력의 평균치와 표준편차는 실험온도가 낮을수록 하한치에 가까운 값을 나타내고 있었다.

Table 4. Clamping force of T/S bolt set according to the temperature dependence

Specimen	Clamping force (kN)						
	0°C AVE.	0°C SD.	20°C AVE.	20°C SD.	60°C AVE.	60°C SD.	
M16	×40	114	6.5	124	4.1	123	1.6
	×80	111	3.7	123	4.2	127	5.8
	×120	109	1.8	122	4.5	136	2.6
M20	×45	173	1.8	190	6.4	198	9.7
	×90	174	8.3	187	5.0	205	7.1
	×140	173	4.0	189	6.2	200	11.4
M22	×50	216	4.3	237	6.3	242	14.4
	×105	219	8.5	237	5.6	246	11.4
	×160	215	7.9	235	6.3	249	11.1
M24	×55	245	5.0	272	10.9	289	13.9
	×120	248	5.3	275	7.8	287	9.6
	×180	246	2.9	273	6.4	280	12.3

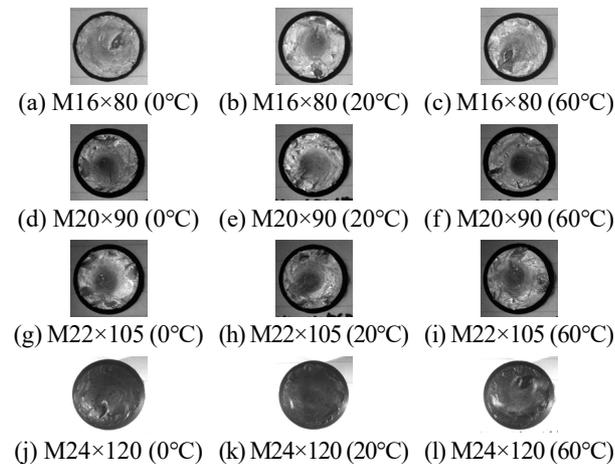
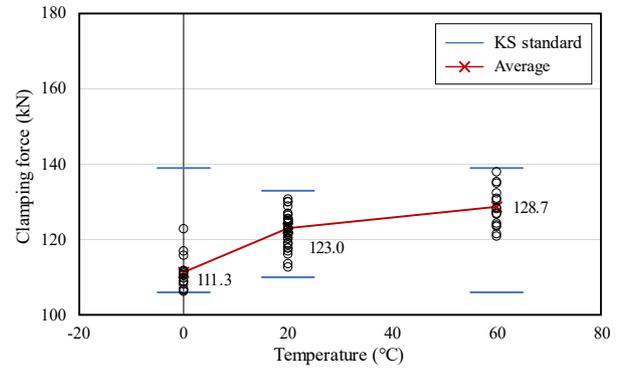
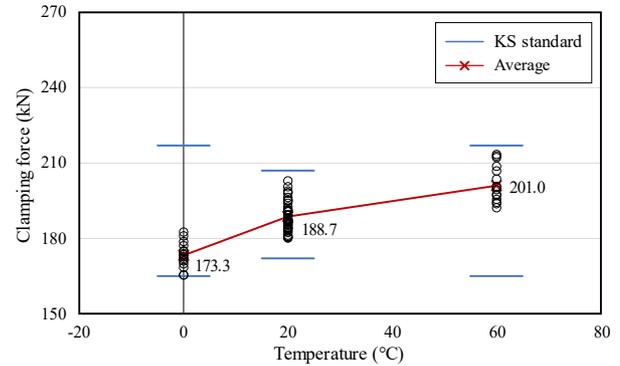


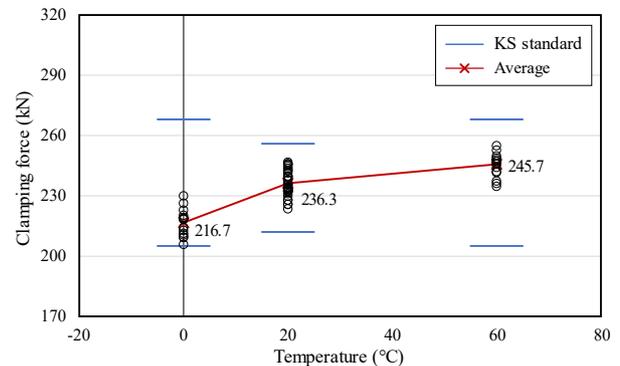
Fig. 4. Fracture condition after clamping force test according to the temperature dependence



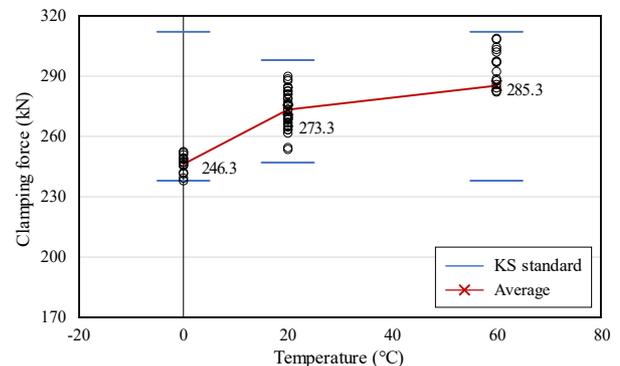
(a) M16×40 (60, 80)



(b) M20×45 (90, 140)

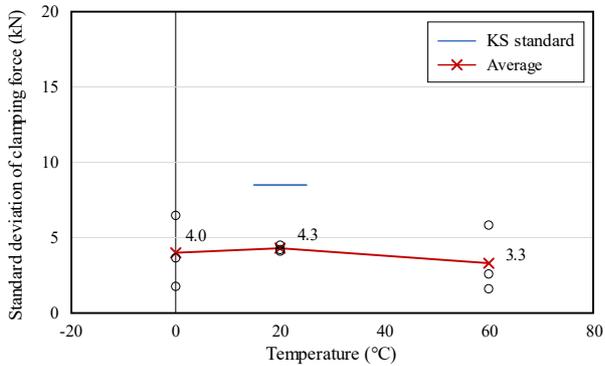


(c) M22×50 (105, 160)

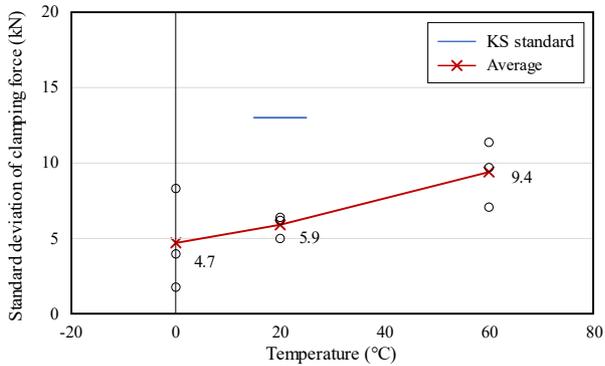


(d) M24×55 (120, 180)

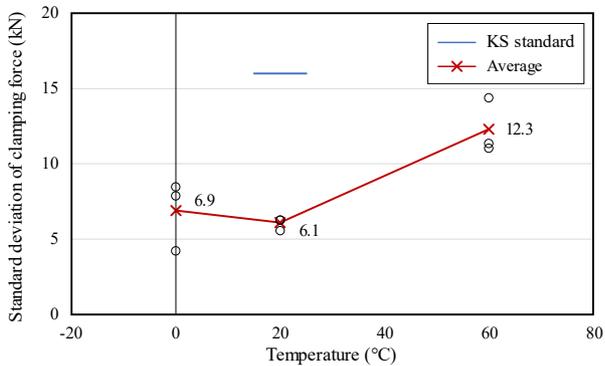
Fig. 5. Clamping force of T/S bolts according to the temperature dependence



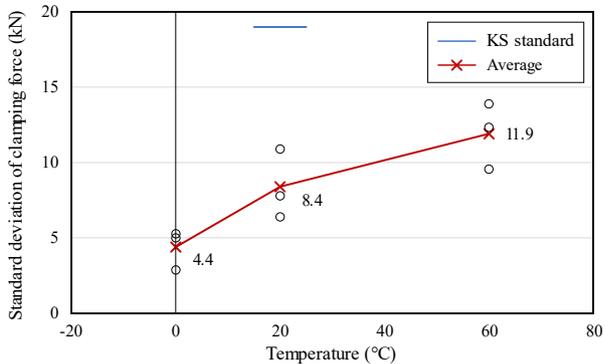
(a) M16×40 (60, 80)



(b) M20×45 (90, 140)



(c) M22×50 (105, 160)



(d) M24×55 (120, 180)

Fig. 6. Clamping force standard deviation of T/S bolts according to the temperature dependence

3.2 T/S고장력볼트 세트의 계절별 체결축력실험

계절별 세트 체결축력의 변동성을 파악하기 위한 체결축력 실험을 수행하였으며, 그 실험결과는 Table 5와 Fig. 7에 나타내고 있다. 또한, 체결축력 실험 시 외기온도는 Table 5에 나타내고 있다.

계절별 체결축력 실험결과, M16시험체와 M20시험체의 체결축력 평균치(체결축력 표준편차)는 각각 117.9 kN - 129.9(3.32 - 5.57) kN, 185.4 kN - 200.4(3.51 - 6.43) kN으로 나타났다. 또한, M22 시험체와 M24 시험체의 체결축력의 평균치(표준편차)는 222.9 kN - 249.9(3.12 - 7.09) kN, 270.6 kN - 287.8(4.65 - 9.0) kN으로 나타났다.

이상에서 나타난 것과 같이 T/S고장력볼트의 체결축력의 평균치와 표준편차는 계절 및 T/S고장력볼트 사이즈와 관계없이 모든 제품에서 KS 규준을 만족시키는 것으로 나타났다. 그러나, 그림에 나타난 것과 같이 2월(겨울)에 수행한 체결축력 평균치가 다른 계절에 수행한 체결축력 평균치보다 낮은 값을 나타냈으며, 이는 온도의 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 5. Clamping force of T/S bolt set according to the season

Specimen	Clamping force (kN)								
	Feb. AVE.	Feb. SD.	May. AVE.	May. SD.	Aug. AVE.	Aug. SD.	Nov. AVE.	Nov. SD.	
M16	×40	121.0	4.13	121.5	3.38	128.2	3.90	121.2	3.67
	×80	117.9	3.91	123.8	5.57	126.9	4.18	123.1	5.10
	×120	118.7	4.08	124.7	4.87	129.9	3.32	120.0	4.69
M20	×45	185.4	3.82	194.1	4.04	200.4	5.72	193.7	4.77
	×90	189.7	6.43	194.1	3.51	196.1	5.10	192.1	3.72
	×140	189.6	5.87	196.1	5.67	196.3	4.60	195.3	4.80
M22	×50	232.7	3.92	241.1	6.05	249.9	5.97	239.0	3.95
	×105	234.6	6.64	239.6	4.66	246.2	5.89	239.0	3.62
	×160	222.9	4.52	246.2	3.12	247.9	7.09	237.1	6.37
M24	×55	277.0	5.04	284.5	4.65	281.3	6.56	274.0	7.04
	×120	272.5	6.77	278.4	6.29	287.8	9.00	275.9	5.98
	×180	270.6	8.06	281.8	6.83	286.4	8.00	279.5	8.05
Outside air temperature	-2°C		19°C		33°C		6°C		

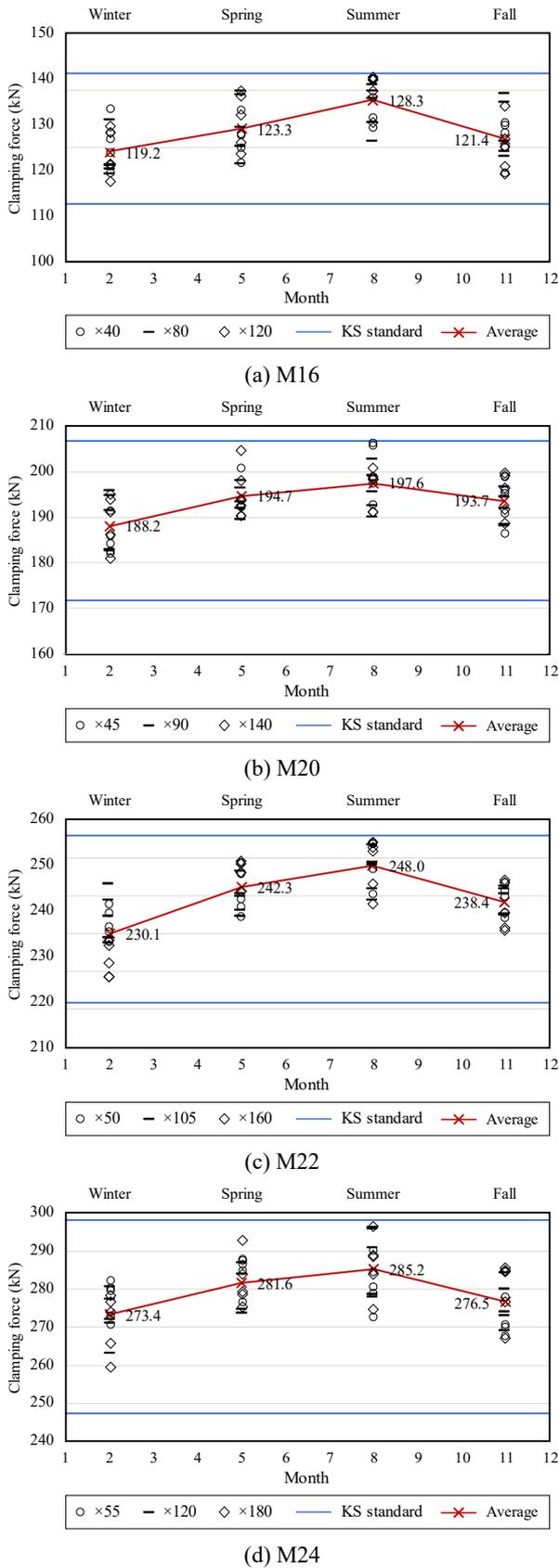


Fig. 7. Clamping force according to the season

3.3 축력과 너트 회전각 실험

T/S고장력볼트의 호칭별 도입축력과 너트의 회전각 실험결과는 Table 6과 같다. 여기서, 연신율은 변위계의 파단을 방지하기 위해서 800°까지만 측정하였다. 900° 이상까지 회전시킨 세트의 축력과 연신율은 T/S고장력볼트의 크기에 의해 영향을 받지만 길이에 의한 영향은 작은 것으로 판단된다. Table 6에서 CASE1과 CASE2로 각각 실험한 결과 M16과 M20의 평균 축력은 각각 165 kN, 249 kN이다. 또한 M22와 M24의 평균축력은 321 kN, 370 kN이다. 세트 체결성능 실험에서 측정된 결과는 볼트 실험편의 인장 실험시 축력의 95% 이내이다. 성장은 볼트 크기가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한 세트 체결성능 실험 후 파괴상황은 Fig. 8에 나타내고, 체결축력과 너트 회전각과의 관계는 Fig. 9에 나타낸다. 볼트 나사부에서 늘어난 후 국부적인 수축 파단이 관찰되었으며, 볼트의 머리부 파단 및 표면에 균열은 관찰되지 않았다.

Table 6. Clamping force–rotation angle test results

Specimen	Clamping force (kN)			Elongation (mm)		
	CASE1	CASE2	Ave.	CASE1	CASE2	Ave.
M16×80	162	167	165	5.29	5.18	5.24
M20×90	246	252	249	6.09	6.09	6.09
M22×105	316	326	321	7.30	7.59	7.45
M24×120	377	363	370	7.81	7.76	7.79

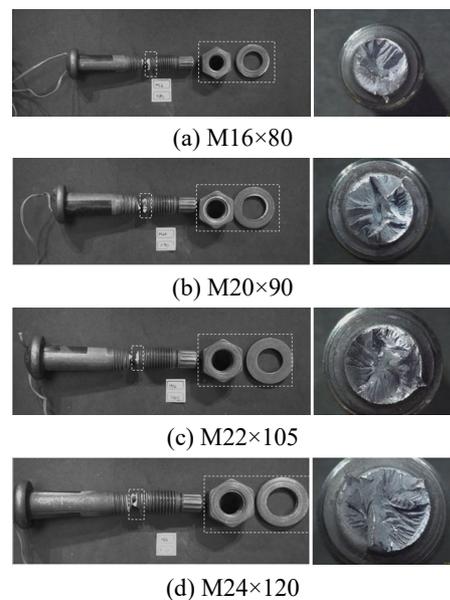


Fig. 8. Fracture condition after clamping force–nut rotation test

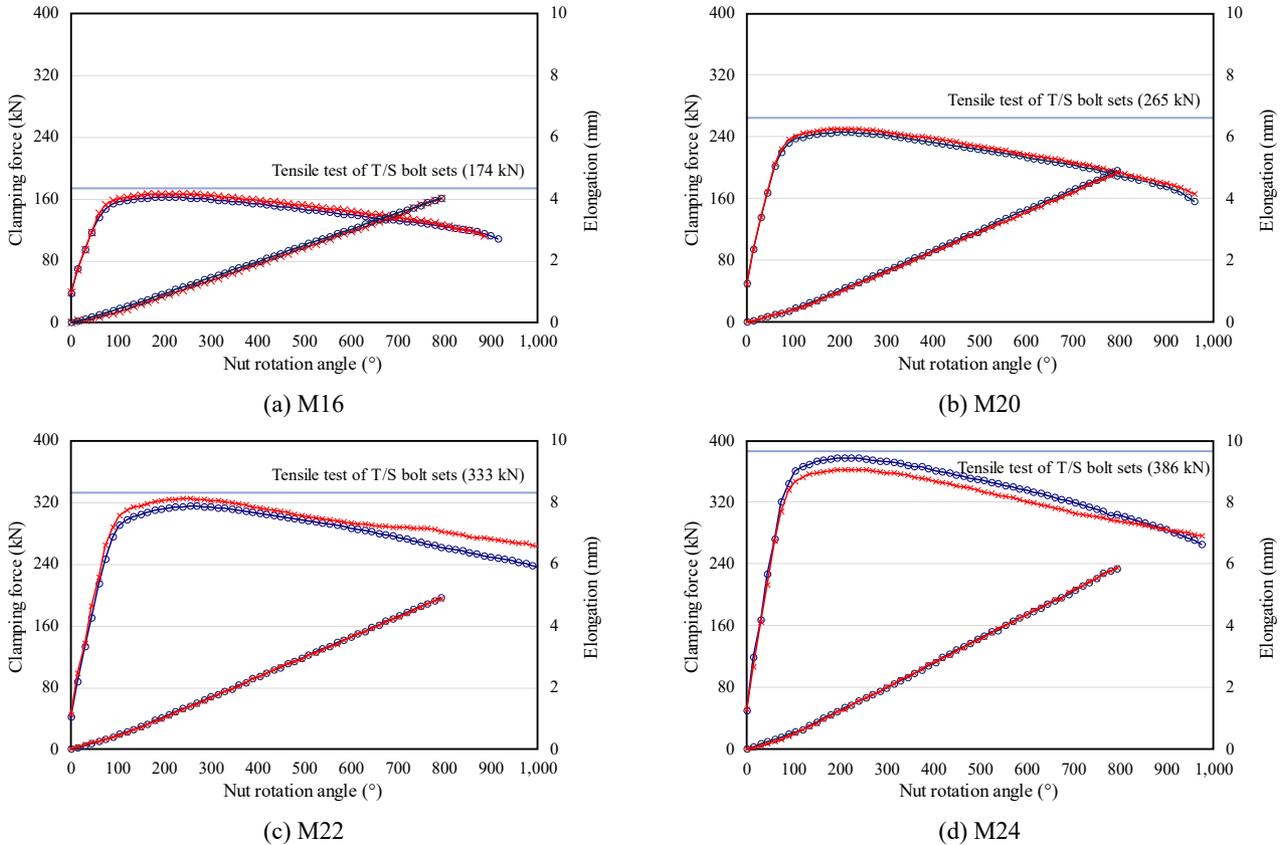


Fig. 9. Clamping force–nut rotation angle test results

4. 결론

본 연구에서는 S10T급 T/S고장력볼트의 온도 의존성과 회전각을 파악하기 위해 제품의 인장 실험, 상온에서 세트의 체결축력, 세트의 온도 의존성 실험 및 축력-너트회전각 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 제품의 인장 실험결과, 최소 인장하중은 KS 기준치의 1.06배 - 1.12배 높은 값을 나타내었으며, 목길이에 따른 영향은 미비한 것으로 나타났다.
- (2) 세트 체결축력의 온도 의존성 실험결과, 모든 시험체에서 축력 평균치와 표준편차가 KS 규준을 만족하는 것으로 나타났으며, 체결축력은 온도가 높은 고온(60°C)이 온도가 낮은 저온(0°C)보다 1.13배 - 1.16배 높은 값을 나타내었다.
- (3) 세트의 계절별 체결축력의 온도 의존성 실험 결과, 모든 시험체에서 체결축력 평균치와 표준편차가 KS 규준을 만족하는 것으로 나타났으며, 체결축력은 온

도가 높은 여름(8월)이 온도가 낮은 겨울(2월)보다 1.04배 - 1.08배 높은 값을 나타내었다.

- (4) 너트회전법에 의한 최대 체결축력은 제품 인장실험에 의한 최대하중의 94.0% - 96.4%로 안정된 값을 나타내었으며, 볼트 파단 시점은 900° 이상이였다. 신율은 5.24 mm - 7.79 mm로 볼트의 크기가 클수록 높은 연신율을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 (주)동아의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] American Society for Testing and Materials (2014) *Standard Specification for "Twist off" Type Tension*

- Control Structural Bolt/Nut/Washer Assemblies, Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength* (ASTM F2280-14), USA.
- [2] Research Council on Structural Connections (2004) *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [3] Dahl, J.S., Lu, L.-W., Fisher, J.W., and Abruzzo, J. (1996) Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A490 1 1/4- in. Diameter Bolts, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.33, No.1, pp.7-17.
- [4] Nah, H.S., Lee, H.J., Kim, K.S., Kim, J.H., and Kim, W.B. (2008) Evaluation on Clamping force of High Strength Bolts by Temperature Parameter, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.3, pp.399-407 (in Korean).
- [5] Nah, H.S., and Choi, S.M. (2014) Evaluation on Clamping Force Subjected to Onsite Temperature Parameter of Torque Shear High Strength Bolts, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.11-12 (in Korean).
- [6] Lee, H.J., Nah, H.S., Kim, K.S., Kim, J.H., and Kim, J.M. (2008) Experimental Study on the Torque Coefficient and Clamping Force of High Strength Bolts Subjected to Environmental Parameters, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.1, pp.43-53 (in Korean).
- [7] KSSC (2016) *KBC2016 Design of Steel Structural*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [8] Korean Agency for Technology and Standards (2013) *Sets of Torque-Shear Type High Tension Bolt, Hexagon Nut and Plain Washer for Structural Joints* (KS B 2819: 2013), Korea (in Korean).
- [9] Japanese Society of Steel Construction (2015) *Sets of Torshear Type High Strength Bolt, Hexagon Nut and Plain Washer for Structural Joints* (JSS II 09-2015), Japan (in Japanese).

요 약: 고장력볼트는 일반적으로 강구조물의 접합부에 사용된다. 하지만 적절한 체결축력을 도입하는데 어려움이 있다. 최근 T/S (토크전단형)볼트가 보다 쉬운 품질관리를 위해 개발되었다. T/S볼트는 H/S볼트와 유사하며 전국적으로 많이 사용된다. 그럼에도 불구하고 T/S볼트의 클램핑력에 대한 온도별 연구는 거의 수행되지 않았다. 연구는 T/S볼트 크기(M16, M20, M22, M24), 온도(0°C, 20°C, 60°C), 계절(겨울, 봄, 여름, 가을)에 대해 수행되었다. 또한 목길이에 따라 40 mm - 180 mm로 분류하였다. 실험결과 T/S고장력볼트 KS B 2819의 기계적 성질을 보여 주었다. 또한 온도별 T/S고장력볼트의 체결축력 및 표준편차가 KS규준을 만족하는지 나타내었다. 하지만 T/S고장력볼트의 온도가 낮을수록 체결축력이 낮아졌다.

핵심용어: 토크-전단형 볼트, 인장력, 체결축력, 계절별 체결축력, 온도 의존성
