

실내환경과 건설현장 온도변수를 고려한 고력볼트 체결력 예측

나환선¹ · 이현주²

한국전력공사 전력연구원 책임연구원¹, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원²

Estimation on Clamping Force of High Strength Bolts Considering Temperature Variable of Both Site conditions and Indoor Environments

Nah, Hwan-Seon¹ · Lee, Hyeon-Ju²

¹Principal Researcher, Korea Electric Power Corporation Research Institute

²Senior Researcher, Korea Electric Power Corporation Research Institute

Abstract: The torque shear high strength bolt is clamped normally at the break of pin-tail specified. However, the clamping forces on slip critical connections do not often meet the required tension, as it considerably fluctuates due to torque coefficient dependent on lubricant affected temperature. In this study, the clamping tests of torque shear bolts were conducted independently at indoor conditions and at construction site conditions. During last six years, temperature of candidated site conditions was recorded from -11°C to 34°C . The indoor temperature condition was ranged from -10°C to 50°C at each 10°C interval. As for site conditions, the clamping force was reached in the range from 159 to 210 kN and the torque value was from 405 to 556 N·m. The range of torque coefficient at indoor conditions was analyzed from 0.126 to 0.158 while tensions were indicated from 179 to 192 kN. The torque coefficient at site conditions was ranged from 0.118 to 0.152. Based on this test, the variable trends of torque coefficient, tension subjected temperature can be taken by statistic regressive analysis. The variable of torque coefficient under the indoor conditions is $0.13\%/^{\circ}\text{C}$ while it reaches $2.73\%/^{\circ}\text{C}$ at actual site conditions. When the indoor trends and site conditions is combined, the modified variable of torque coefficient can be expected as $0.2\%/^{\circ}\text{C}$. and the modified variable of tension can be determined as $0.18\%/^{\circ}\text{C}$.

Key Words: high strength bolt, torque, tension, torque-coefficient, estimation

1. 서 론

강구조물의 마찰접합용 고력볼트는 해외 건설분야에서는 축력검사용 특수와셔를 통해 축력도입의 적정성을 확인하고 있으며 토크에 의한 체결방법은 거의 사용하지 않았다. 한국과 일본의 경우에는 2000년대 이후 육각머리 고력볼트보다 핀테일이 파단되는 외형적 특성때문에 토크전단형 고력볼트(이하, TS고력

볼트)를 주로 사용하고 있다. TS고력볼트의 경우, 건설현장의 작업자는 물론 관리감독자조차 TS고력볼트의 핀 테일이 파단되면 적정축력이 도입될 것으로 오해하고 있지만 실제로는 외부환경조건에 따라 볼트 나사산, 와셔에 도포된 윤활유의 점도변화는 물론 이 물질의 부착여부 등 다양한 현장조건에 따라서 토크 계수가 변하고 설계조건에 필요한 축력이 도입되지 못하거나 과도하게 체결될 경우가 종종 발생한다. 위와 같은 문제점이 실제 건설현장에서 얼마나 대두되

주요어: 고력볼트, 토크, 인장력, 토크계수, 예측

Corresponding author: Nah, Hwan-Seon

Korea Electric Power Corporation Research Institute, 105 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-760, Korea
Tel: +82-42-865-5221, Fax: +82-42-865-5944, E-mail: hsnah@kepc.co.kr

Received August 28, 2015 / Revised September 11, 2015 / Accepted September 15, 2015

는지를 사실 확인하거나 검증한 사례는 거의 없다. 본 연구에서는 실내 실험실에서 수행된 결과와 다양한 건설현장에서 품질검사로 수행되었던 고력볼트의 축력에 대한 데이터를 취득하여 각각의 결과를 분석하고 또 비교함으로써 다양한 경우에 발생된 고력볼트의 온도변수에 대한 누적데이터를 통해 축력의 최적 예측을 수행하고자 하였다. 또한 국내 건설현장에서 사용되었던 TS고력볼트에 대한 현장 축력을 측정하고 현장 온도조건, 강수량의 영향에 따른 축력 변화의 수준을 분석하고자 하였다.

일본의 경우, 표면처리를 실시한 고력볼트의 토크계수 변동은 주로 온도에 의존한다는 실험결과가 있었다. 그러나 각 연구자에 따라 그 결과의 편차가 상당히 컸다. 또한, 이 문헌들에 따르면 토크계수 변동은 온도변수에 대해 선형적인 회귀분석이 가능했으며, -20℃~40℃ 온도 범위내에서 온도가 상승함에 따라 토크계수는 감소하였다. 北岡의 연구결과는 토크계수의 변동율이 1℃당 0.6~0.7%정도이며, 學田 明의 연구는 0.48%, 山本の 연구에서는 0.31%로 연구결과가 상당한 차이를 보였다. 미국의 경우, 제조회사에 따라 윤활유의 특성 및 종류에 따라 고력볼트의 체결력이 달라진다고 보고하였다.(Kulak et al., 2001; Bickford, 1998; Tambori, 1999) Vand는 고력볼트의 나사산에 윤활유가 있는 경우와 없는 경우의 토크계수를 비교한 실험결과를 발표하였다.(Vand et al., 2008)이 실험결과에 따르면 윤활유 도포된 고력볼트의 토크계수는 0.205였으며, 윤활유 도포가 되지 않은 건조된 고력볼트의 토크계수와 0.04 차이가 발생하였다. 또한 Abdalla의 연구에서는 윤활유의 다양한 조건과 볼트 길이에 따른 토크계수 변동을 분석했다. 이 연구에서는 실험결과와 해석결과를 비교하였는데 대략 23%의 차이가 발생한다고 발표하였다.(Abdalla et al., 2011) 위와 같이 실험조건에 따라서도 체결력이 상이한 결과를 보였고, 해석결과도 각각 상이한 결과를 보였다. 국내에서 고력볼트의 체결력 관련하여 실험실에서 수행했던 연구결과는 더러 있었지만 실제 현장조건에 따른 결과에 대한 보고 사례는 없었다(Nah et al., 2009, 2014).

2. 시험 및 측정계획

2.1 기술기준

TS고력볼트의 KS기준은 2003년 제정되었으며, KS F10T, S10T에 해당하는 ASTM F2280이 2006년에 제정되었고, KS F10T에 대한 기술시방서를 비롯하여 관련 기술기준이 정립된 건 국내·외를 살펴봐도 최근

10년 내외에 불과하다. TS고력볼트는 일정한 토크에서 핀테일이 파단되도록 유도된 제품이지만 토크관리법에 근거하고 있다. 그러나 북미지역에서는 주로 고력볼트의 체결력을 인장력으로 기술기준을 제정하고 있었다. 이와 반대로 한국은 일본의 영향을 받아 시방서와 표준규격에서는 고력볼트의 인장력을 기준으로 기술기준을 제시하고 있지만 실제 시공방법은 토크관리법을 따르고 있다.

2.2 시험대상 및 방법

실내실험 대상 고력볼트는 S10T, 직경 20mm(M20)이었으며 길이는 70mm로 선정하였다. 체결력을 확인하는 방법으로 로드셀, DTI (Direct Tension Indicator), 축력계를 이용하여 도입된 축력을 추정하였다. DTI는 ASTM F959에서 명시하고 있는 축력확인방법으로 특수한 와셔를 이용하지만 국내 상용제품이 없어서 국외제품을 적용하였다. 실내실험은 -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50℃의 온도조건에서 각각 10개씩의 고력볼트를 선정하였다.

또한 현장계측의 경우, 2008년~2014년까지 24개 건설현장에서 계측된 고력볼트의 축력, 토크, 토크계수가 그 대상이었다. 고력볼트 종류는 S10T, 직경 20mm(M20)이었으며 길이는 현장특성에 따라 70, 75, 85, 90, 95mm로 다양하였다. 시험대상 고력볼트의 수량은 품질검사 목적으로 최소 5개로 선정하고 길이변수는 고려하지 않았으며 현장 온도조건을 검사보고서에 기록하였다. 축력확인방법은 축력계와 DTI를 병행하여 적용하였다.

대상 건설현장연도는 Table 1과 같이 2008년부터 2014년까지 총 24개소였으며 2012년에는 계측기회가 없었다. 현장은 제주도를 제외한 전국에 골고루 분포되어 있었다.

Table 1. Onsite inspection outline

Year	'08	'09	'10	'11	'12	'13	'14	Sum
Frequency	2	4	5	4	0	5	4	24

현장의 외기온도는 실제 측정일 기준으로 기상청 30년 평균온도 통계자료를 이용하였으나, 실제 현장과 해당 기상청과의 거리가 있어서 현장 온도와 많은 차이를 보이는 경우가 많았다. 따라서 본 연구에서는 실제 측정일자와 시간의 현장온도를 적용하였는데 Table 2와 같이 -11~34℃의 온도분포를 보였다.

현장검사 월별 현황은 Fig. 1과 같이 1월, 5월에 각각 4회로 가장 많았으며 4월과 6월은 계측기회가 전혀 없었다.

현장의 외기온도는 실제 측정일 기준으로 기상청 30년 평균온도 통계자료를 이용하였으나, 실제 현장과 해당 기상청과의 거리가 있어서 현장 온도와 많은 차이를 보이는 경우가 많았다. 따라서 본 연구에서는 실제 측정일자와 시간의 현장온도를 적용하였는데 Table 2와 같이 -11~34℃의 온도분포를 보였다.

Table 2. Canded onsite

Site	Temp. (℃)	Date	Site	Temp. (℃)	Date
No.1	-11	2013. 1	No.3	15	2010. 3
No.24	3	2013. 1	No.13	20	2010.10
No.2	3	2011. 1	No.17	21	2011. 5
No.6	4	2008.11	No.14	23	2009. 3
No.4	5	2010. 2	No.18	25	2013. 5
No.5	5	2010. 3	No.16	25	2009. 9
No.7	5	2014.12	No.21	26	2014. 5
No.8	8	2009. 1	No.15	27	2011. 9
No.12	11	2010. 5	No.20	30	2011. 8
No.10	12	2014.11	No.19	32	2009. 7
No.9	13	2008.12	No.22	34	2013. 8
No.11	14	2014.11	No.23	34	2013. 8

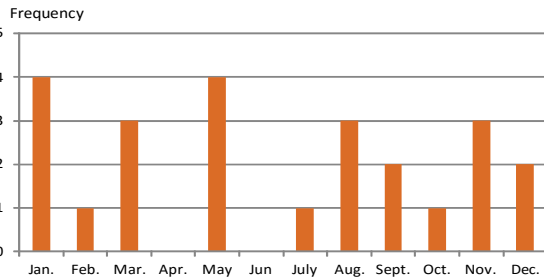


Fig. 1 Onsite inspection frequency

3. 체결력 결과분석

3.1 실내실험 축력변동

-10℃일 때 평균축력은 179.2 kN, 50℃일 때의 평균 축력은 192.5 kN으로 점증적으로 상승되는 경향을 보였으며 이때의 표준편차는 최소 4.4~최대 11.6 kN으로 분석되었다. 핀테일 파단시점의 축력변화 추이는 Fig. 2와 같고, 온도변수별 평균축력을 분석한 데이터는 Table 3과 같다.

Table 3. Indoor test results (Unit: kN)

Temp. (℃)	-10	0	10	20	30	40	50
Tension	179.2	180.8	180.9	182.5	182.7	187.8	192.5
Std. deviation	6.9	9.7	6.5	4.4	5.3	11.6	7.9

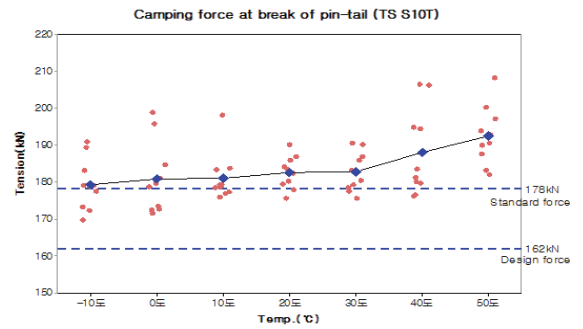
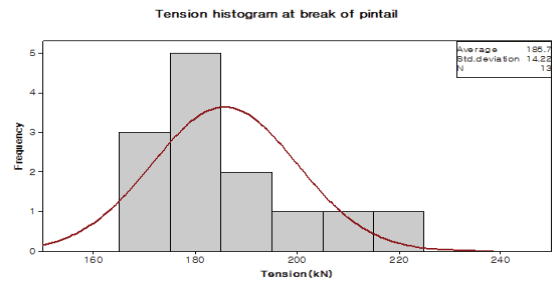
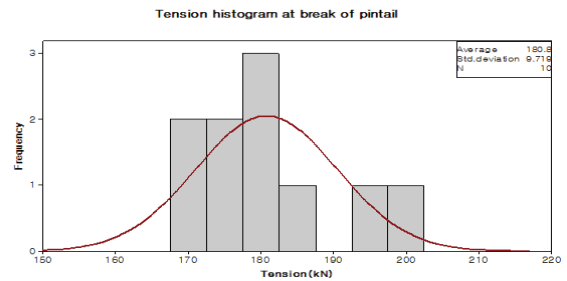


Fig.2 Tension trends of indoor test

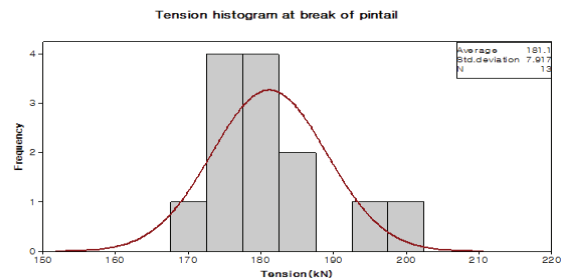
온도분포별 대상 고력볼트 축력에 대한 정규분포를 살펴보면 다음 Fig. 3(a)~(g)와 같다.



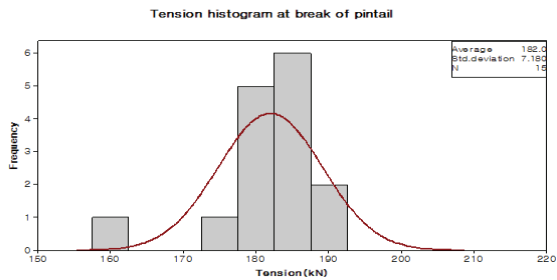
(a) -10℃



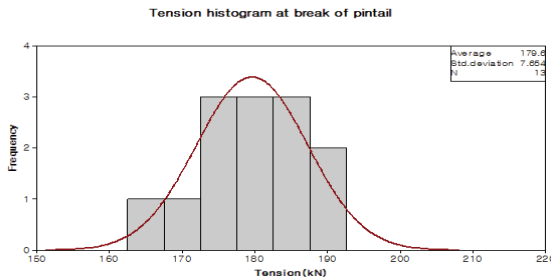
(b) 0℃



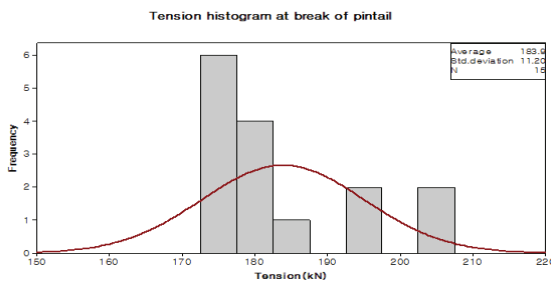
(c) 10℃



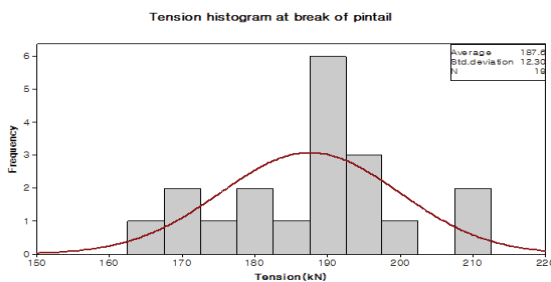
(d) 20°C



(e) 30°C



(f) 40°C



(g) 50°C

Fig. 3 Histogram of tension at indoor test

실내실험의 경우 일정한 온도, 습도조건에서 체결 축력을 분석하였기 때문에 실내실험의 결과는 건설현장의 측정데이터보다 신뢰도가 높았다. 실내실험결과를 바탕으로 온도변수를 고려한 축력의 선형 회귀분석한 결과는 다음 식(1)과 같다.

$$N = 0.1985 \cdot t + 179.8 \quad (N : \text{축력}, t : \text{온도}) \quad (1)$$

회귀분석에 사용된 공학통계분석방법에 따른 결정 계수(R^2)은 83%으로 상당히 신뢰할만한 결과로 판단된다. 온도 1°C당 축력 변동폭은 0.11%이었다.

3.2 건설현장 축력변동

구조물의 마찰접합에 적용되는 TS고력볼트의 경우는 KS규격에서 토크계수가 명시되지 않은 상태이다. 다만, 육각머리 고력볼트 A종 0.110~0.150에 해당하는 것으로 추정할 뿐이다. 이 연구는 시험대상 현장의 고력볼트에 대한 축력과 토크를 결정한 다음 토크계수를 추정하였다. 24개 건설현장의 측정일 기준 평균온도 범위는 -11°C의 경우를 제외하면 0°C이상 조건이었고 최소온도가 3°C이었다. 축력 분포를 종합한 결과는 Fig. 4와 같다.

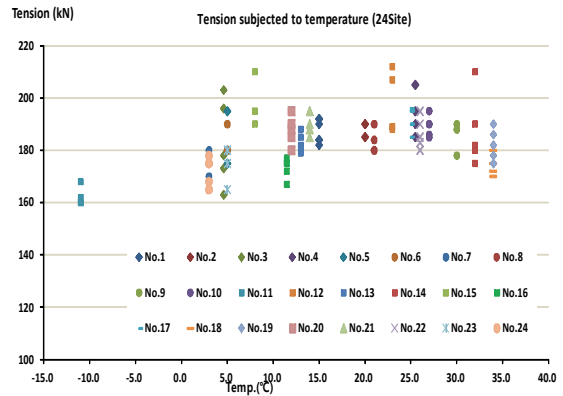


Fig. 4 Tension at onsite condition

Fig. 4에서 정상 온도조건(10~30°C)과 비정상 온도조건일때 각각 유사한 현장온도에서 고력볼트 축력을 각각 비교하였다. 첫번째, 현저(No.16)현장은 온도 11.5°C였으며, 평균축력은 173kN이었으며 노포(No.13)현장의 경우는 온도 13°C일 때 평균축력이 183kN 이었다. 이 결과는 현저현장에서 측정일에 0.5 mm의 강수량 때문에 고력볼트 몸체의 윤활유가 희석이 되었을 뿐더러 습기로 인해 볼트 셋트에 녹이 발생되었고 이러한 이유 때문에 축력이 다소 저하되었을 것으로 추측된다. 이처럼 동일한 온도조건에서도 별도의 외형변수 때문에 각각 다른 축력이 나타날 가능성이 있다. 두 번째, 명지(No.5)현장과 신김포(No.6)현장은 온도는 5°C, 신파주(No.3)현장은 온도는 4.6°C로 거의 동일하거나 유사한 경우의 축력을 비교했을 때, 이 현장에서 측정된 고력볼트의 평균축력은 184, 184, 183kN 이었다.

토크전단형 고력볼트의 온도범위는 한국표준규격

KS B 2819에 정상온도조건과 비정상온도조건으로 구분되어 있다. 따라서 현장 측정결과도 위 2가지 종류로 구분하여 분석하였다. 정상온도조건 10~30℃의 경우는 12개소이며, 온도와 축력이 상관관계는 Fig. 5와 같다. 다만 건설현장의 특성상 실내실험과 같은 항온항습과 같은 균일한 환경조건도 아니고, 실제 현장온도를 기준으로 분석하였을 뿐더러, 과거 5년간 현장에서 측정한 데이터를 기반하였기 때문에 실내실험결과와 단순 비교는 어려웠다. 이때의 평균 축력은 187kN, 축력의 표준편차는 5.2 kN, 평균 토크는 504 N·m 토크의 표준편차는 31.1 N·m, 토크계수는 0.13, 토크계수의 표준편차는 0.009였다. 현장에서 측정된 평균축력은 한국건축공사표준시방서에 제시된 설계볼트 축력, 178kN의 ±10% 범위내에 존재하였다. 정상온도조건에서의 온도변화에 따른 축력 실험결과의 회귀분석결과는 아래 식(2)와 같다.

$$N=0.5213 \cdot t + 176.9 \quad (N : \text{축력}, t : \text{온도}) \quad (2)$$

공학통계분석방법에 따른 회귀식의 결정계수(R²)은 35%이었으며 온도 1℃당 축력 변동폭은 0.29% 로써 실내실험결과보다 축력 변동폭이 작았다.

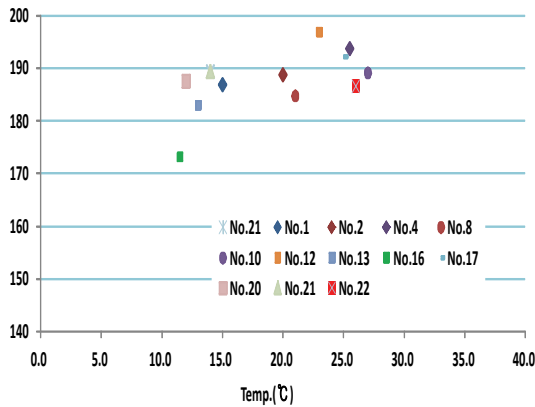


Fig. 5 Tension under normal temp.(10~30℃)

비정상온도조건의 경우는 Fig. 6과 같이 12개 현장이며, 평균 축력은 179kN, 축력의 표준편차는 9.1 kN, 평균 토크는 513 N·m 토크의 표준편차는 30.1 N·m, 토크계수는 0.14, 토크계수의 표준편차는 0.01로 정상온도조건 범위보다 약 9.6% 낮은 값을 보였다.

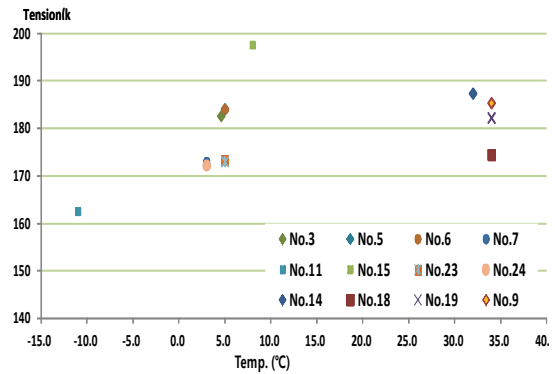


Fig. 6 Tension under abnormal temp.

비정상온도조건에서의 온도변화에 따른 축력을 회귀분석한 결과는 다음 식(3)과 같다.

$$N=1.4308 \cdot t + 174.5 \quad (N : \text{축력}, t : \text{온도}) \quad (3)$$

이때의 결정계수(R²)은 71%이었으며 온도 1℃당 축력 변동폭은 0.82%/℃ 로써 정상온도조건에 비해 축력변동의 편차가 0.53%/℃ 더 크게 나타났다.

저온에서 고온으로 변화되는 과정에서 축력도 상승되는 경향을 보였지만 온도가 상승함에 따라 축력의 상승수준이 선형적으로 비례하지 않았다. 그러나 저온 환경조건보다 고온 환경조건에서 축력이 전반적으로 상승하는 경향을 보였다.

정상온도조건과 비정상온도조건을 포함한 모든 현장계측데이터로부터 온도변수에 따른 축력의 변동과 관련된 회귀분석 결과는 다음 식(4)로 정리할 수 있다.

$$N=0.5558 \cdot t + 175.06 \quad (N : \text{축력}, t : \text{온도}) \quad (4)$$

이때의 결정계수(R²)은 61%이었으며 온도 1℃당 축력 변동폭은 0.31%/℃ 였다. 실내실험결과에 비해 2.8배 축력의 편차가 큰 것으로 분석되었다.

3.3 실내실험과 건설현장결과의 보정

실험결과 얻어진 회귀분석식(1)~(4)로부터 환경조건과 온도범위조건에 따라 온도변화에 따른 축력 변동폭이 조금씩 달라졌다. 그 원인은 실내실험의 환경조건보다 현장조건이 상대적으로 복합적인 요인이 많이 발생할 개연성이 컸기 때문이라고 판단된다. 따라서 TS고력볼트의 체결축력을 예측 신뢰도를 향상할 목적으로 현장조건의 결과와 실내실험조건의 결과를 병행하여 재편성하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있다.

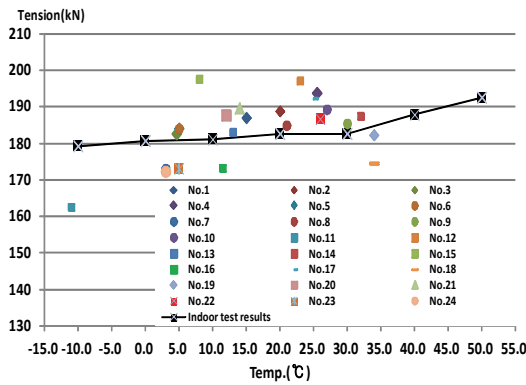


Fig. 7 Comparison of two test results

Fig. 7으로부터 현장계측데이터와 실내실험결과를 포함한 전체 데이터에 대한 회귀분석 결과는 다음 식(5)으로 정리할 수 있다.

$$N = 0.3373 \cdot t + 177.72 \quad (5)$$

(N : 축력, t : 온도)

이때 온도변화에 따른 축력변동폭은 0.18%/°C 로써 실내실험결과의 축력 변동폭보다는 0.07% 크고, 현장계측 결과에서 얻은 축력 변동폭보다는 0.13%/°C 작게 나타났다.

4. 토크와 토크계수 분석

4.1 실내실험 토크계수분석

TS 고력볼트의 핀 테일이 파단될 때 주변 온도별 체결축력 평균값의 범위는 179~192 kN이었다. 이 결과는 건축구조설계기준에서 요구하는 설계볼트장력 162kN과 표준볼트축력 178kN을 모두 만족하는 값이다. 실험결과 중 -10°C, 0°C에서 일부축력이 표준볼트축력 이하의 값을 보였다. 실내실험 결과에 따르면 볼트의 온도가 상승할수록 체결 축력도 점차 증가되는 현상을 보였다. 핀 테일 파단시점의 토크계수는 0.126 ~ 0.158의 범위를 나타냈는데, Fig. 14와 같이 토크계수는 체결축력과 반비례하므로 온도가 상승할수록 토크계수는 거의 일정하게 낮아졌다. 또한, 각 온도조건별 표준편차의 범위는 0.004~0.008로 TS볼트의 표준편차는 규정에 없으나, 일반 육각 고력볼트 토크계수의 표준편차 0.01 기준을 만족하고 있었다.

이 때의 토크계수는 다음 식(6)과 같은 회귀분석 결과를 얻었다. 이때의 결정계수(R²)은 92%이었으며

토크계수의 변동 폭은 1°C당 0.13%로 분석되었다.

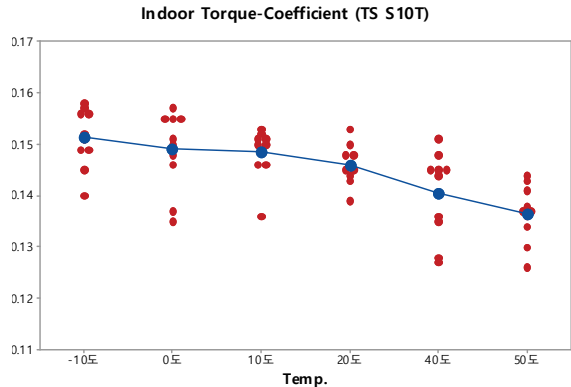


Fig. 8 Torque coefficient(indoor)

$$k_{in} = -0.0002 \cdot t + 0.1497 \quad (6)$$

(k : 토크계수, t : 온도(°C))

Fig. 9는 전체 범위의 토크계수 잔차그림을 나타냈다.

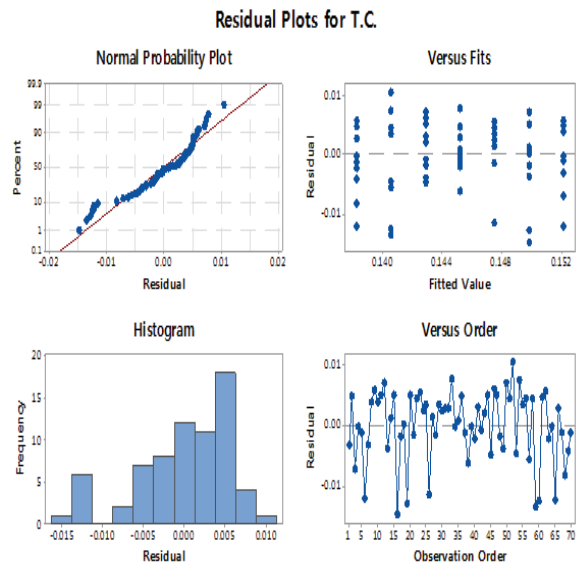


Fig. 9. torque coefficient at Indoor

4.2 현장측정 토크계수 분석

24개 건설현장의 측정일 기준 평균온도분포는 -11~34°C였으며, 이때의 온도와 토크계수의 관계를 살펴보기위해 토크의 분포를 확인하였다. 현장의 체결토크 결과는 Fig. 10과 같고 현장계측 토크값으로부터 토크계수를 얻었다.

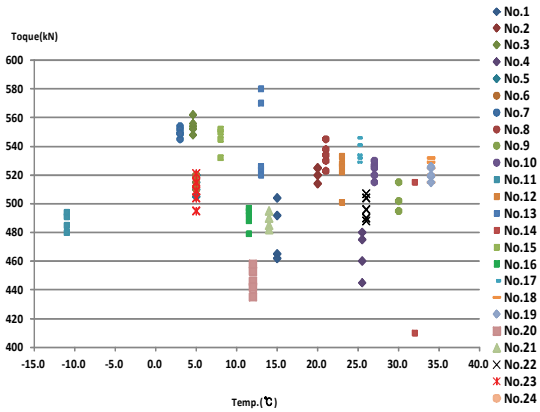


Fig. 10. Torque at onsite

각각 현장의 평균토크범위는 447~554 N·m을 나타냈으며 24개 현장 토크 평균은 509 N·m, 24개 현장의 평균 토크계수는 0.13으로 분석되었다.

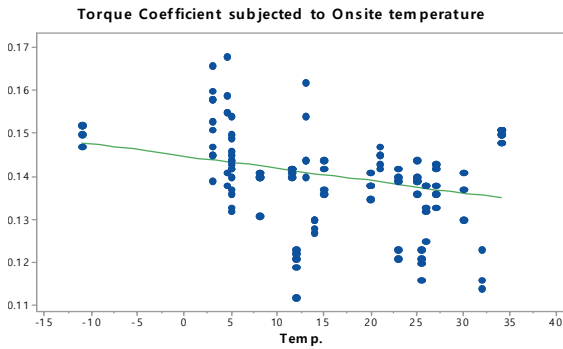


Fig. 11 Torque coefficient at onsite

Fig. 11은 5년간 건설현장에서 측정된 데이터에 대한 토크계수에 대한 결과를 종합한 것이다. 이때의 토크계수 표준편차는 0.01로써 나타났다. 핀테일이 파단되었을 때의 축력기준 토크계수는 0.118~0.152 범위에 존재하였다. 현장조건에서 수행되었던 데이터는 실내실험조건과 달리, 온도변수이외 볼트 길이변수, 습도, 우수량과 같은 외형요인을 포함한 복합 변수들에 양상에 따라 상대적으로 일정한 실내실험조건 결과와는 상당히 변동폭이 컸다.

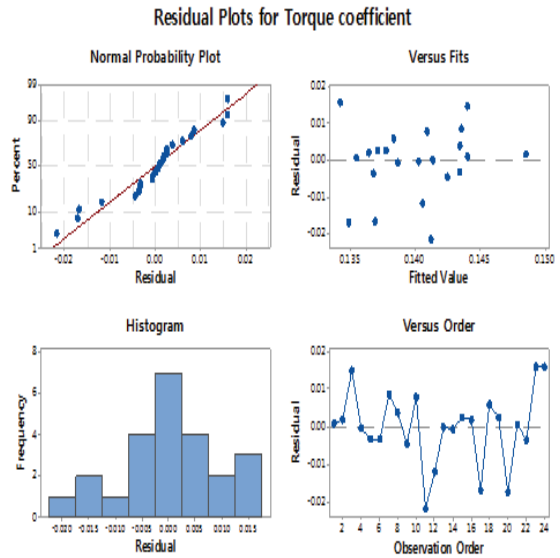


Fig. 12 torque coefficient at onsite

Fig. 12는 현장측정 토크로부터 얻은 데이터로부터 취득한 토크계수의 공학통계를 통해 얻은 잔차를 나타냈다. 실내실험의 온도변수에 해당되는 현장 온도조건과 비교하고, 동일한 온도범위에 따라 회귀분석한 결과 토크계수에 대한 다음과 같은 식 (7)을 얻었다.

$$k_{out} = -0.0042 \cdot t + 0.1539 \quad (7)$$

(k :토크계수, t : 온도(°C))

현장측정결과인 토크에 근거한 토크계수 변동폭은 축력과 마찬가지로 실내실험결과와 비교할 때 1°C 당 2.73%로 상당한 차이를 보였다.

4.3 실내실험과 현장측정결과 통합

앞서 축력의 변동폭에 대해서도 분석하였듯이 실내실험결과와 현장측정결과는 주변 환경적인 복합요인이외에도 고력볼트의 현장저장 조건과 입고 일자 그리고 현장의 품질관리수준에 따라 달라지고 있음을 확인하였다. 따라서 Fig. 13과 같이 실내실험결과와 현장계측 데이터를 통합하여 토크계수에 대한 현장 신뢰도를 반영한 산술평균과 추세를 분석하였다. 회귀분석 결과, 토크전단형 고력볼트의 토크계수는 1°C당 0.2%으로 변동하는 것으로 확인되었으며 그 결과는 식(8)과 같이 정리할 수 있다.

$$k_{inc} = -0.0000258 \cdot t + 0.1454 \quad (8)$$

(k :토크계수, t : 온도(°C))

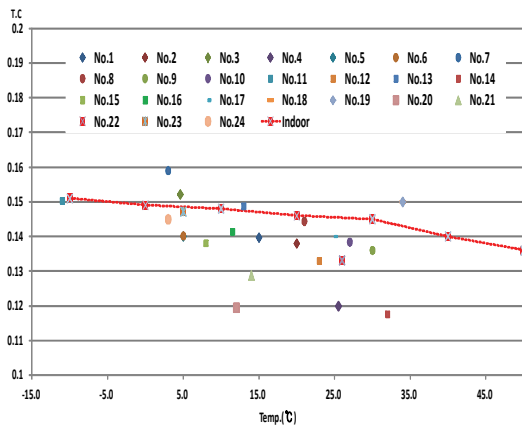


Fig. 13 Incorporation of torque coefficient

이 연구결과에서 얻은 온도변화에 따른 토크계수의 변동폭과 국외연구자들의 결과를 Fig. 14와 같이 비교하였다. 이번 연구결과는 토크전단형 고력볼트의 핀테일이 파단되는 시점을 기준으로 축력, 토크, 토크계수를 판별하였다. 국외의 결과는 일반육각머리 고력볼트를 그 연구대상으로 하였고 연구시점도 상당한 차이가 있어서 단순비교는 쉽지 않지만 이번 연구결과, 0.2%/°C은 일본의 야마모토(山本)의 연구결과인 0.31%/°C와 가장 근접한 결과이다. 또한 토크전단형 고력볼트의 품질관리가 우수하여 온도변수에 대한 변동폭이 가장 작은 것으로 추측된다.

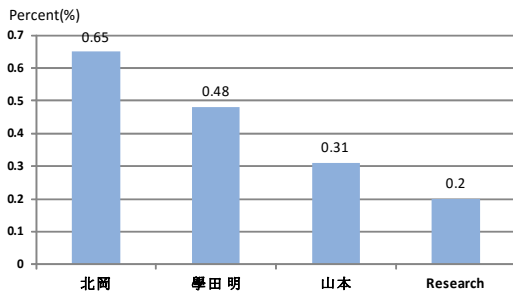


Fig. 14 Comparison of torque coefficient

5. 결론

본 연구는 24개 건설현장에서 체결된 품질검사를 목적으로 토크전단형 고력볼트에 대한 핀테일 파단 시점의 축력에 대해 지난 5년간 측정데이터와 실내 실험결과를 비교분석하고 현장조건을 고려한 실제 고력볼트의 축력을 예측하기 위한 목적으로 수행되었다. 실험대상은 S10T, M20 TS고력볼트였다. 현장계측결과와 실내실험결과를 통합하여 도입축력, 토크

크계수의 상관관계를 고찰하였고 그 결과를 회귀분석하고 온도변화에 따른 체결축력을 수식으로 도출하였다. 실내실험의 경우, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50°C조건에서 각각 10개씩 그 대상으로 선정하였다. 반면 현장계측 데이터의 경우, 현장특성상 5개의 고력볼트를 선정하여 그 결과를 분석하였다.

1) 축력에 대한 실내실험과 현장계측에 대한 종합분석결과는 다음과 같다. 현장측정 대상 TS고력볼트는 체결온도조건은 -11~34°C범위였다. 축력범위는 159~210kN이며, 이 때 토크치 범위는 405~556 N·m로 나타났다. 현장에서 계측된 축력에 대해 정상온도조건과 비정상온도조건을 포함한 축력변동의 경향은 다음과 같다. 온도 1°C당 축력 변동폭은 0.31%/°C였다. 실내실험의 축력변화 추이는 다음과 같다. -10°C일 때 평균축력은 179.2 kN, 50°C일 때의 평균 축력은 192.5 kN까지 상승되었다. 이때의 표준편차는 4.4~11.6 kN였다. 온도1°C 당 축력 변동폭은 0.11%/°C이었다. 실내실험과 현장계측결과를 통합한 온도변수에 대한 축력의 수정회귀식은 다음과 같다.

$$N = 0.3373 \cdot t + 177.72$$

이때 온도변화에 따른 축력 변동 폭은 0.18%/°C로써 실내실험결과의 축력변동 폭보다 0.07%/°C 컸다.

2) 토크전단형 고력볼트에 대한 온도의존성을 검증하기 위해 수행된 실내실험과 현장측정결과를 비교분석하고 통합한 토크계수의 결과는 다음과 같다. 실내실험은 각 온도별로 10개의 시험체로 구성하고 온도구간별 평균 토크계수에 대한 온도구간별 변화 추이는 1°C당 0.13%/°C이었다.

지난 5년간 현장에서 계측한 결과, 각각 현장의 평균토크범위는 447~554 N·m을 나타냈으며 24개 현장 토크 평균은 509 N·m, 24개 현장의 평균 토크계수는 0.13으로 분석되었다. 현장계측의 경우 1°C당 2.73%/°C의 변동을 보였다.

실내실험결과와 현장실험결과를 통합한 토크계수 변동폭은 회귀분석결과는 다음과 같다.

$$k_inc = -0.0000258 \cdot t + 0.1454$$

이때 토크계수는 1°C당 0.2%/°C으로 변동되었다.

References

- Architectural Institute of Japan (2003), Guidebook on Design and Fabrication of High Strength Bolted Connections, AIJ.
- ASTM F 2280-06 (2006), Twist Off Type Tension Control Structural Bolt/Nut/Washer Assemblies, Steel, Heat Treated, 150ksi Minimum Tensile Strength, ASTM International, Philadelphia, PA, USA.
- ASTM F959M, Standard Specification for Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators for use with Structural Fasteners, ASTM International, Philadelphia, PA, USA.
- Bickford, John H.(1990), An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints, Marcel Dekker Inc., Madison Avenue, New York, NJ.
- Khairidin Abdalla, Dimitrios N. Kaziolas, Charalambos C.Baniotopoulos (2011), "Tightening and Loosening Torque of M253 Bolts : Experimental and Analytical Investigation", International Journal of Engineering and Information Sciences, 6(2), pp. 69-83.
- Kulak, Geoffrey L.,Fisher, John W., Struik, John H.A.(2001), Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, 2nd Ed., AISC Inc.
- Nah, H. S., Lee, H. J., and Choi, S. M. (2014), "Evaluating long-term relaxation of high strength bolts considering coating on slip faying surface", Steel and Composite Structures, Vol. 16, No. 6, pp. 703-718.
- Nah, H. S., Lee, H. J., Kim, K. S., Kim, J. H. and Kim, W. B. (2009a), "Method for Estimating the Clamping Force of High Strength Bolts Subjected to Temperature Variation", International Journal of Steel Structures, Vol. 9, No. 2, pp. 123-130.
- Nah, H. S., Lee, H. J., Kim, K. S., Kim, J. H. and Kim, W. B. (2009b), "Evaluation of Slip Coefficient of Slip Critical Joints with High Strength Bolts", Structural Engineers & Mechanics, Vol. 32, No. 4, pp. 477-488.
- Nah, H. S., Lee, H. J., Choi, S. M. and Kim, W. B.(2015), "Analysis on Variation of Torque Co-efficient by Ambient Temperature of High Strength Bolt", Proc. 5th KOSACS Conference, Jeju, Korea, pp.95-96 (in Korean).
- RCSC Committee(2004), Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, AISC Inc., Chicago, Illinois, USA.
- Tambori, Akbar R.(1999), Handbook of structural steel connection design and detail Design, McGraw-Hill, USA.
- Vand, E. Hemmati, Oskouei R.H., Chakherlou T.N., (2008) "Experimental Method for Measuring Clamping Force in Bolted Connections and Effect of Bolt Threads Lubrication on its Value", World Academy of Science, Engineering and Technology 22, pp. 457-460.