

전동렌치 전기에너지를 이용한 토크쉬어볼트의 체결축력 검사기법 개발

Development of the Method for Inspecting the Clamping Force of Torque Shear Bolts Using the Electricity energy of Electric torque wrench

이 현 주^{1)*}

나 환 선²⁾

김 강 식³⁾

김 강 석⁴⁾

Lee, Hyeon Ju

Nah, Hwan Seon

Kim, Kang Sik

Kim, Kang Seok

Abstract

The torque-coefficient of torque-shear type high-strength bolts is affected by the environmental factors, such as 'wet', 'rust', 'exposure to air' and workability during tightening high strength bolts. It is difficult to assume the direct tension induced into the bolt due to variation of torque-coefficient for torque-shear type high-strength bolts. Therefore, it is essential to measure tension loads of bolts and to verify the clamping force under construction. In this study, the manufacture of trial product was planned to identify the induced force into the bolts. The algorithm for a trial product was composed of the relation between electricity energy taken from torque shear wrench and tension force from hydraulic tension meter. The regression analysis equation to measure the direct tension was derived by statistical analysis using Minitab program. It is considered that the trial product is reliable tool to evaluate the tension force comparable to a commercial torque wrench.

Keywords : torque shear bolt, clamping force, torque, algorithm, energy

1. 서론

철골구조물 고력볼트 접합부에 사용되는 토크쉬어볼트는 체결 토크가 항상 핀테일의 파단 토크와 같아지도록 제작되었기 때문에 체결 토크의 정밀도는 매우 좋으나, 공장제작 시 토크계수가 일정하도록 유회처리를 하여 제조, 관리되어 지더라도 공장 출하 후 시공과정에서 건축공사표준시방서⁴⁾에 정한 절차를 따르지 않을 경우 수분 침투, 녹 발생, 외기노출 등으로 유회유가 변질되면 토크계수가 변동되어 접합부 내력확보를 위한 체결축력 도입에 문제가 발생할 수 있다.

고력볼트 접합부에 대한 기존의 축력도입 및 검사방법은 토크관리법을 적용하기 때문에 현장에서 축력계에 의한 샘플실험에서 공장에서 납품된 포장상태의 고력볼트를 대상으로 핀테일 파단 시 도입된 체결축력을 검사하고 있다. 그러나 이현주 등(2008)의 실제 고력볼트 시공환경에 따른 토크계수와 체결축력에 관한 실험적 연구에서

현장에서 체결되는 토크쉬어볼트는 볼트의 보관 상태와 가볼트 미사용 및 당일 미체결에 따른 외기노출과 이에 따른 수분침투 및 녹 발생으로 인하여 토크계수가 변동되어 적정축력을 도입할 수 없게 되며, 나환선 등(2008)의 현장 시공온도에 따른 고력볼트 체결력 평가에서도 시공 온도에 따라 토크계수가 변동되어 도입되는 체결축력의 변동이 발생되고 있음이 알려져 있다.

체결된 토크쉬어볼트의 육안검사방법으로 핀테일의 파단여부와 1차 체결 후 금매김에 의한 너트회전량 검사를 실시하도록 되어 있지만, 현장의 시공자는 물론 관리감독자까지도 시방서의 검사절차를 생략하고 핀테일만 파단되면 적정축력이 도입된 것으로 잘못 이해하고 있다.

또한, 현재까지 개발된 고력볼트 축력검사법의 기본 원리는 볼트 변형률을 측정하여 길이변화량에 대한 축력을 산정하는 것으로, 스트레인게이지 및 로드셀을 이용하는 방법과 초음파법 등이 있다. 그러나, 스트레인게이지 및 로드셀법의 경우, 개별 볼트마다 센서를 부착해야 하므로 연

1) 정회원, 한전전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
2) 정회원, 한전전력연구원 녹색성장연구소 책임연구원
3) 정회원, 한전전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
4) 정회원, 한전전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원

* Corresponding author : hyeon@kepri.re.kr 042-865-5223

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구실험과 같은 특정 용도로만 사용되고 있고, 상용 초음파 측정계의 경우에도 대상 고력볼트의 먼처리가 불가피하고 측정 오차가 크기 때문에 현장에서는 사용되고 있지 않다.

따라서 이러한 문제를 보완할 수 있는 대체기술에 대한 연구개발과 검증실험이 필요한 실정으로, 본 연구에서 제안하고자 하는 방법은 현장에서 토크쉬어볼트 핀테일 파단 시 축력을 측정할 수 있는 검사기 개발을 위하여 고력볼트 접합에 사용되는 토크쉬어볼트 전용체결기와 결합하여 전동렌치 전류량 및 누적에너지와 축력과의 상관관계를 분석하고, 축력을 측정하는 회귀식과 검사기를 개발하여 통계적으로 검증함으로써 측정데이터의 신뢰도를 높이고자 한다.

2. 토크쉬어볼트의 체결특성

고력볼트의 토크계수 변동은 온도상승에 대해서는 과도한 체결의 경향을 나타내며, 온도저하에 대해서는 토크계수 상승에 따른 체결력 부족으로 접합부 내력 확보에 문제가 생길 수 있다. 특히, 체결토크를 미리 설정하는 토크쉬어볼트에 대해서는 온도에 의한 토크계수 변동은 중요한 문제이며 온도변화에 둔감한 표면처리나 체결작업이 가능한 온도범위 규제, 체결력의 허용 변동 폭에 여유를 두는 등의 조치가 필요하다.

또한, 현장의 볼트 보관상태나 당일 체결 여부에 따라 습기, 녹 등의 원인으로 윤활유의 상태가 변하게 되어 Table 1과 같이 상온의 정상조건 토크계수와 비교하여 조건에 따라 12%~38% 증가되어 일본건축학회 발행 고력볼트 접합설계시공 가이드북¹⁰⁾에서 권장하고 있는 토크계수의 범위 0.110~0.170을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있으며, 핀테일 파단 시 체결축력은 표준볼트장력(178kN)과 비교하여 10%~27% 감소함으로써 KS B2819⁶⁾에서 정한 M20의 체결축력 측정값의 평균값 범위인 172kN~207kN를 벗어난 것을 알 수 있다.

Table 1 Experimental results for various variables reflecting on construction site condition

실험변수	토크계수		토크[N·m]		축력[kN]		너트 회전각 [°]
	평균값	표준 편차	평균값	표준 편차	평균값	표준 편차	
상온, 정상조건	0.146	0.004	533	2.078	182.5	4.423	114
침수 1초	0.191	0.016	522	4.544	137.8	11.809	93
침수 30분	0.189	0.016	528	3.451	140.2	11.664	102
외기노출 30일	0.164	0.013	521	3.396	159.7	12.200	111
녹발생 30일	0.201	0.019	522	5.610	130.8	12.440	91

토크쉬어볼트의 핀테일 파단 시 토크는 토크계수가 심하게 변화된 것과 달리 1~2%의 토크 변화가 나타났으며, 이것은 토크쉬어볼트는 체결 토크가 항상 핀테일 파단 토크와 같아지도록 제작되었기 때문에 토크계수와 관계없이 일정 토크에서 핀테일이 파단 되기 때문이다.

3. 체결축력 및 전류량 측정실험

3.1 실험계획 및 방법

본 실험에서는 2장에서 기술한 토크쉬어볼트의 체결특성에 따른 문제점인 토크계수가 온도변화와 현장관리에 따라 민감하게 반응하여 체결축력이 저하되기 때문에 현장조사에서 도출된 시공품질관리의 문제점을 실험조건에 반영하여 토크계수 변동에 따른 도입축력에 대한 전류량의 변화를 측정하기 위해 상온정상조건, 수분침수 1초, 수분침수 30분 조건으로 실험변수를 계획하여 핀테일 파단 시 체결축력과 전류량을 측정하였다. 평가대상 고력볼트는 KS B 2819에 규정된 토크쉬어볼트 M20, 길이 85 mm이며, 실험변수별 실험체 수량은 Table 2와 같다.

축력실험은 유압식 축력계(SKIDMORE MS-102, U.S.A)에 토크쉬어볼트를 설치하고 전동렌치(TONE GH-242HRZ/9rpm, 일본)로 핀테일이 파단 될 때까지 체결하였다. 이 실험방법의 기본 원리는 볼트 체결 시 전동렌치의 전력량 변화와 축력의 상관관계를 통해 축력을 산정하는 것으로서, 전력량은 전압과 전류량의 곱으로 이루어지며 이때 교류 전압을 사용하는 전동렌치의 전력량의 시간별 변화량은 전류 값에 의존하기 때문에 Fig. 1과 같은 전동렌치 작동과정에서 소모되는 전류량을 분석하면 축력을 예측할 수 있다. 실험에서 측정된 데이터는 축력계 측정값과 전류값이며, 전류값은 전동렌치의 기동 전류값부터 볼트 체결이 완료된 시점까지의 전류값과 전류센서를 이용하여 전동렌치의 구동 시에 사용된 실 전류값을 측정하였다. 데이터는 초당 10,000회의 샘플링으로 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 실험장비 구성도는

Table 2 Specimen List

볼트등급	볼트종류	볼트규격	실험변수	수량 [EA]
F10T	토크쉬어볼트	M20×85	정상조건	30
			수분침수 1초	30
			수분침수 30분	30
			소 계	90

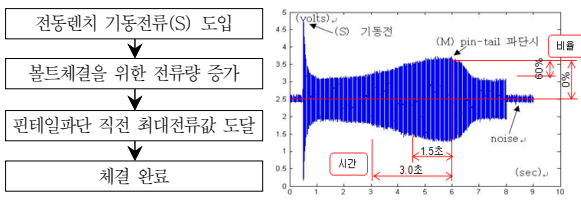


Fig. 1 Current trend of electric wrench

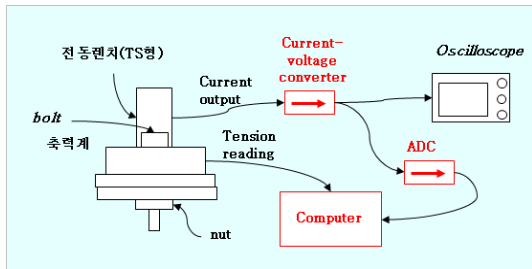


Fig. 2 Experimental equipment



(a) Experiment view



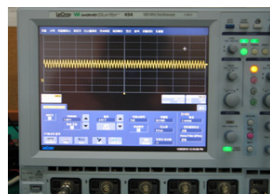
(a) Clamping a bolt



(c) Sampling current



(c) Measuring a clamping force



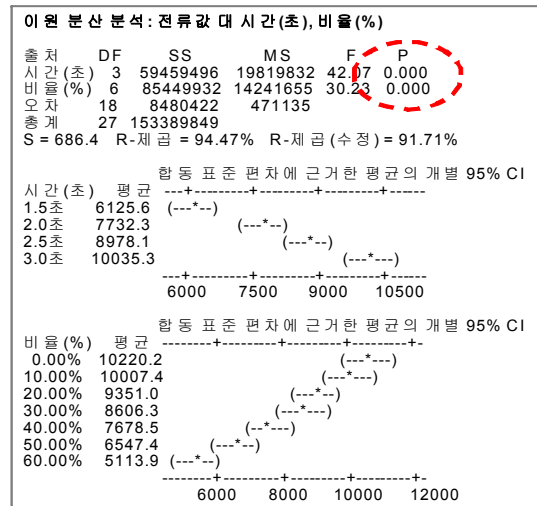
(d) Processing current trend

Fig. 3 Experimental Process

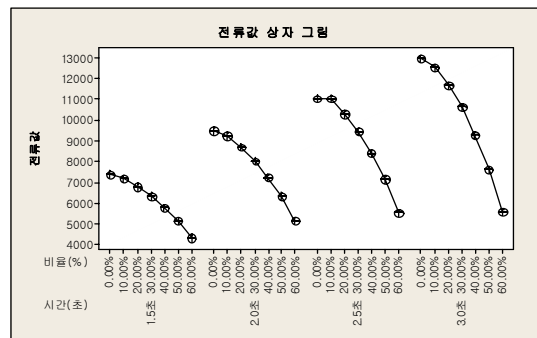
Fig. 2와 같으며, 실험전경 및 실험과정은 Fig. 3과 같다.

3.2 축력과 전류값 상관관계 분석

전류센서에서 측정된 볼트 체결 시 실 사용된 전류값이



(a) Two-way ANOVA results (time vs. ratio)



(b) Box plot of relation between time and ratio

Fig. 4 Analysis of main factors

축력으로 변환될 때 영향을 미치는 주요인자는 이원분산 결과 Fig. 4(a)와 같이 p값이 0.05이하로 핀테일 파단 시점 이전의 시간과 최대전류값 대비 비율이 잠재인자로 유의한 것으로 나타났으며, 이를 기준으로 데이터 처리를 하기 위해 기동 전류값을 제외한 최대 전류값으로부터 Fig. 1과 같이 역으로 1.5초, 2.0초, 2.5초 3.0초 동안의 값을 16진법으로 초당 10,000개의 비율로 디지털화한 후, 계산된 15,000개의 데이터 중 최대값 대비 10%~90%까지 10% 단위의 비율 이상 값을 합산하여 회귀식 도출을 위한 전류값으로 사용하였다.

3.2.1 축력계값-전류값 회귀분석

실험에 사용된 총 90개의 볼트에 대한 축력계값을 기준으로 측정된 전류값과의 관계에서 회귀분석을 실시한 결과 Table 3과 같이 핀테일 파단직전 이전 적산 시간 3.0초와 전류값의 적산 비율 0% ~ 60%까지를 분석한 결과 95% 신뢰구간에서 도출된 회귀식의 R-제곱값은

Table 3 Regression analysis results

전류값 적산조건 (시간/비율)	S	R-제공	R-제공 (수정)
3초 / 0%	13.0473	42.6	41.9
3초 / 10%	13.0742	42.3	41.7
3초 / 20%	13.0107	42.9	42.2
3초 / 30%	12.9386	43.5	42.9
3초 / 40%	13.4328	39.1	38.4
3초 / 50%	13.3906	39.5	38.8
3초 / 60%	13.7046	36.6	35.9

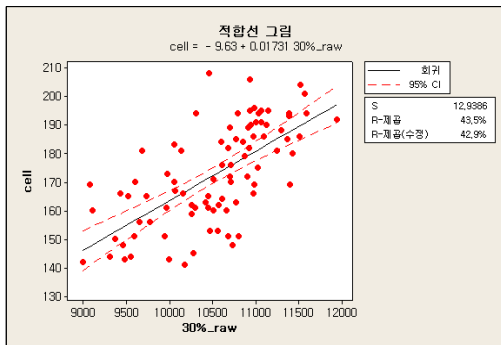


Fig. 5 Fitted line plot of 3.0 seconds 30% current

36.6% ~ 43.5%로 신뢰도가 다소 낮게 나타났다. 그중에 30% 전류값 합산이 43.5%로 가장 높게 나타났으며, 회귀분석에 대한 적합선 그림은 Fig. 5와 같다.

3.2.2 전류값 가중치(compensation value) 산정

1차 회귀식 분석결과 축력측정 신뢰도가 43.5%로 낮아 신뢰도가 높은 회귀식을 도출하기 위해 전류값과 축력의 상관도가 높아지도록 전류값의 보정을 실시하였다. 각 조건별로 구해진 축력의 평균값을 실험조건에 따라 3개의 그룹으로 나누어 보면 평균 축력이 191kN, 170kN, 156kN으로 나누어진다. 전류값과 축력이 일차 함수관계가 되도록 하기위해 평균축력이 170kN(전류값 5108 A·s)에서 191kN(전류값 5210 A·s)으로 증가시 축력은 11% 증가되었지만 전류값의 변화는 2%만 증가되었기 때문에 축력 상승분을 고려하여 가중치 1.1을 곱하여 축력 예측에 사용한 전류값은 5730 A·s 이다. 같은 방법으로 가중치를 구하여 측정한 모든 전류값에 적용하였으며 전류값 구간별 가중치는 Table 4와 같다.

3.2.3 최적조건 회귀식 도출

1차 회귀식에 사용된 전류값(핀테일 파단직전 이전 적산 시간 3.0초와 전류값의 적산 비율 0%~60%)에

Table 4 Weight of each current range

전류값(A·s)	가중치	전류값(A·s)	가중치
4600	0.79250	5100	1.00
4650	0.81325	5150	1.05
4700	0.83400	5200	1.10
4750	0.85475	5250	1.15
4800	0.87550	5300	1.20
4850	0.89625	5350	1.25
4900	0.91700	5400	1.30
4950	0.93775	5450	1.35
5000	0.95850	5500	1.40
5050	0.97925	-	-

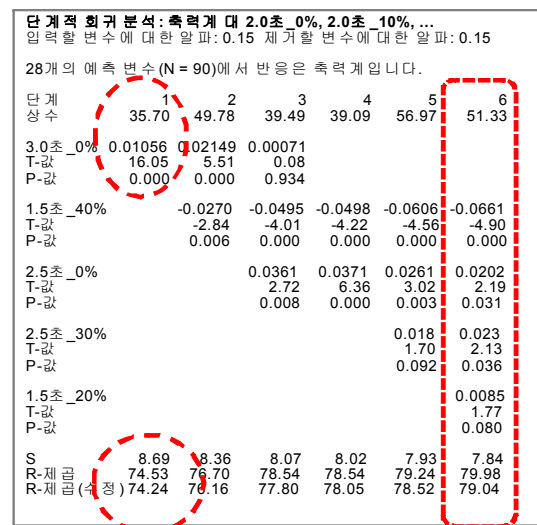


Fig. 6 Stepwise regression analysis

Table 4의 가중치를 적용하여 회귀식을 분석한 결과 R-제공값이 61.6%~74.5%로, 보정전 전류값과 비교하여 신뢰도가 171% 향상되었다.

전류값에 대한 적산 시간 및 비율에 대한 최적조건의 회귀식을 도출하기 위해 Fig. 6과 같이 단계적 회귀분석 결과 적산 시간 3.0초와 적산 비율 0%(최대값이 1.2일 때 0% 이상인 0 이상의 값들을 적분한 값)의 R-제공값이 74.5%로 회귀모형에 대한 설명정도가 높은 편이며, F값은 257.56으로 높고 P값은 95% 신뢰수준에서 0.05 이하로서 회귀곡선이 매우 유의한 것으로 분석되었다. 통계분석프로그램에서 도출된 회귀식은 아래와 같다.

$$y = 35.70 + (0.01056x) \quad (1)$$

여기서, y는 축력값(kN), x는 보정후의 전류값(A·s)을 의미한다.

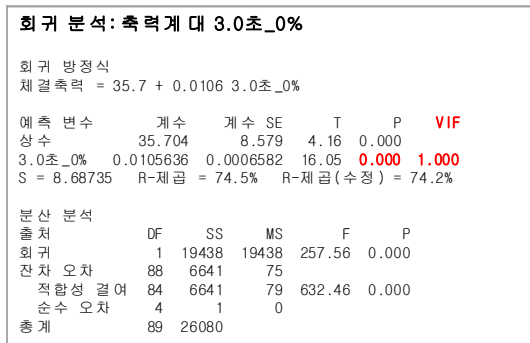


Fig. 7 Collinearity Analysis of the proposed regression equation

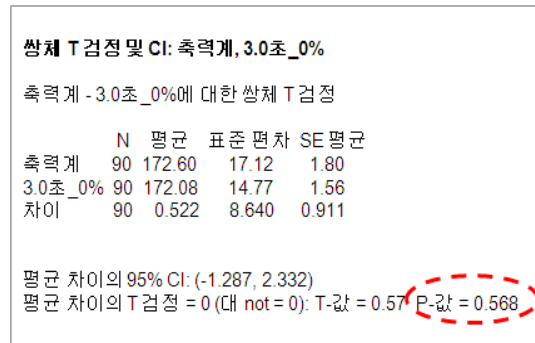


Fig. 10 Paired t-test

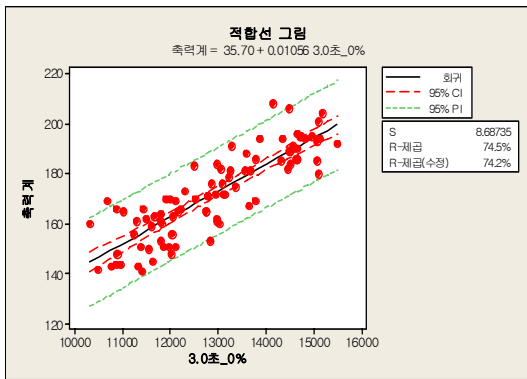


Fig. 8 Fitted line plot of the regression equation

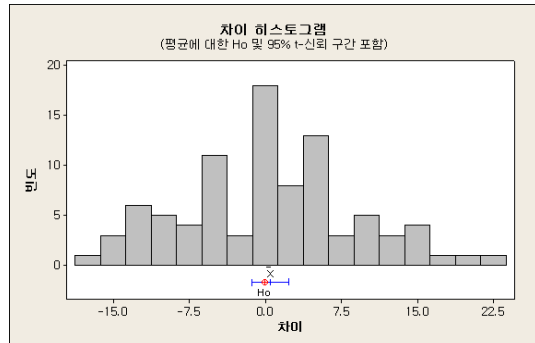


Fig. 11 Difference Histogram

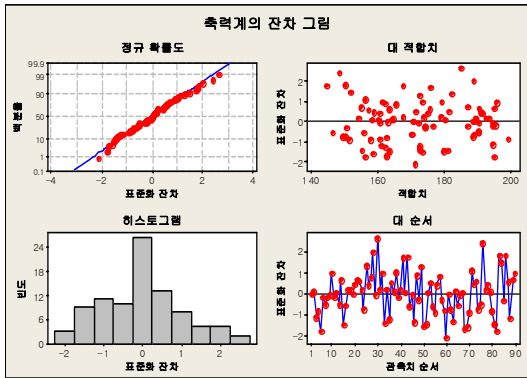


Fig. 9 Residual Plot of the regression equation

회귀식의 선정은 R-제곱값이 79.98로 가장 높은 회귀식을 배제하고 계산의 편리성과 프로그램 속도를 고려하여 선정하였으며, 선정된 회귀식에 대한 공선성 분석결과 Fig. 7과 같이 VIF=1.0으로 회귀계수는 의미가 있는 것으로 확인되었으며, 적합선 그림 및 잔차 그림은 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다.

3.2.4 축력검사기 통계적 검정

단계적 회귀분석에서 도출된 최적조건의 회귀식을 반

영하여 제작될 축력검사기에서 측정된 축력값과 축력계에서 측정된 각각의 값들의 신뢰도를 평가하였다.

기존 축력검사 기기인 유압식 축력계에서 측정된 축력값(kN)과 선정된 회귀식에 보정전류값을 적용한 축력값(kN)을 비교하여 실제 측정값과 어느 정도 오차를 보이는지, 또한 신뢰할 만한 값인지를 확인하기 위한 통계적 검증 방법이다. 본 통계학적 접근을 위한 소프트웨어는 Minitab(ver.15)¹⁵⁾를 이용하였으며, 통계학적 검정은 모집단이 2개 있는 모평균을 비교하는 검정 문제이며, 유압식 축력계에서 얻은 데이터와 선정된 회귀식에서 얻은 데이터가 1:1 대응관계를 형성하기 때문에, 쌍체 t검정을 실시하였다.

선정된 회귀식을 적용하여 추출된 데이터는 핀테일이 파단되기 3.0초전부터 파단점까지의 누적 전류량을 기준으로 하였으며, 최대 전류값 대비 0% 이상의 전류값 적산 결과를 회귀 분석한 축력값 데이터 표본은 90개였으며, 쌍체 t검정 결과는 Fig. 10과 같이 P 값이 0.568로 0.05보다 크므로 귀무가설(H₀)을 채택한다. 즉, 유압식 축력계에서 얻은 데이터와 시제품에서 얻은 데이터는 95%의 신뢰도 수준에서 두 축력의 차이가 없는 것으로 판단된다. 쌍체 t검정에 따른 차이 히스토그램, 개별값 및

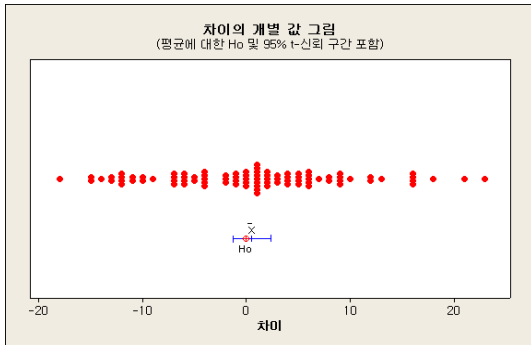


Fig. 12 Individual Plot of difference from Paired t-test

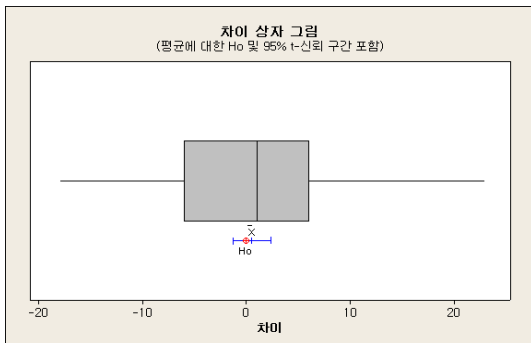


Fig. 13 Box Plot of difference from Paired t-test

Table 5 Experimental Condition for evaluating the measuring device

볼트 등급	볼트 종류	볼트 규격	실험변수	수량 (EA)
F10T	토크쉬어 볼트	M20×85	정상조건	10
			수분 침수 1초	5
			수분 침수 30분	5
			계	20

상자 그림은 Fig. 11 ~ Fig. 13과 같다.

4. 현장 적용성 평가

4.1 실험실 검증 실험

통계적으로 회귀모형에 대한 설명력이 높은 회귀식을 적용하여 시작품으로 제작한 축력검사기에 대하여 실제 현장조건을 적용하여 축력을 측정 시 신뢰성이 있는지 검증하기 위해 현장 적용성 평가를 실시하였다. 실험에 사용된 고력볼트 및 실험조건은 Table 5와 같으며, 각 조건 별로 고력볼트 체결과 동시에 축력계값과 시작품인 축력검사기에서 구해진 계산 알고리즘에 의한 고력볼트의 축력값을 비교하여 검증하였다.

축력 검증실험은 Fig. 14와 같이 개발된 축력검사기에 전원을 연결하고 전동렌치를 축력검사기에 연결한 후에

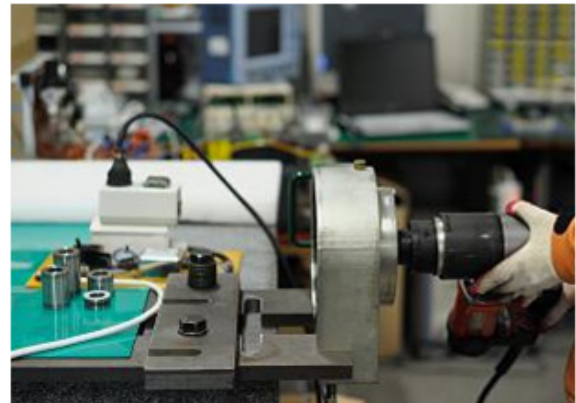


Fig. 14 A view of verification test for the measuring device

Table 6 Verification test results

실험 조건	볼트 no.	축력계 (KN)	축력검사기 (KN)	실험 조건	볼트 no.	축력계 (KN)	축력검사기 (KN)
정상 조건	1	186	184	1초 침수	1	165	164
	2	182	183		2	161	159
	3	178	177		3	166	167
	4	172	174		4	158	160
	5	180	182		5	155	152
	6	186	185	30분 침수	6	143	145
	7	175	177		7	148	149
	8	177	176		8	146	144
	9	183	184		9	140	138
	10	180	181		10	149	145

유압식 축력계에 토크쉬어볼트를 가체결하고 축력검사기의 전류값 샘플링 시작스위치를 누른 후 전동렌치로 핀테일을 파단 시킨다. 핀테일 파단이 완료되면 종료 버튼을 누르면 2초정도 후에 축력검사기에 축력값이 표시된다.

실험 조건별로 유압식 축력계에 표시된 축력값과 축력검사기에 표시된 축력값은 Table 6과 같으며, Minitab을 이용하여 쌍체 t검정을 실시하였다.

정상볼트 10개에 대한 쌍체 t검정 결과 P값이 0.05이상(0.423)으로 측정된 축력계와 축력검사기에 대한 축력의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 검정결과 및 차분 상자그림은 Fig. 15 및 Fig. 16과 같다.

1초 및 30분 침수볼트 각 5개에 대한 쌍체 t검정결과 P값이 0.553과 0.413으로 분석되어, P값이 0.05이상으로 귀무가설(H_0)을 채택하여 측정된 축력계와 축력검사기에 대한 축력의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 검정결과는 Fig. 17 및 Fig. 18과 같다.

쌍체 T검정 및 CI: 축력계_1, 축력검사기_1

축력계_1 - 축력검사기_1에 대한 쌍체 T

	N	평균	표준 편차	SE평균
축력계_1	10	179.900	4.557	1.441
축력검사기_1	10	180.300	3.945	1.248
차분	10	-0.4000	1.50554	0.476095

평균 차분의 95% CI: (-1.477002, 0.677002)
 평균 차분의 T검정 = 0 (대 not = 0): T-값 = -0.84
 P-값 = 0.423

Fig. 15 Paired t-test results for normal condition

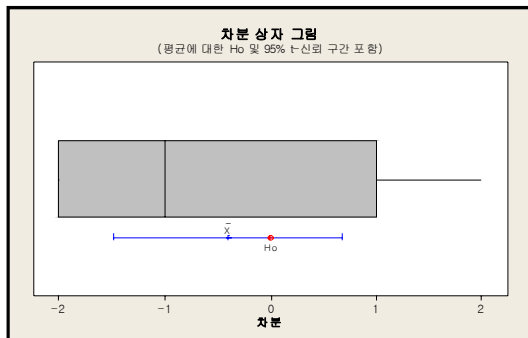


Fig. 16 Box plot of difference for normal condition

쌍체 T검정 및 CI: 축력계_2, 축력검사기_2

축력계_2 - 축력검사기_2에 대한 쌍체 T

	N	평균	표준 편차	SE 평균
축력계_2	5	161.000	4.637	2.074
축력검사기_2	5	160.400	5.683	2.542
차분	5	0.60000	2.073644	0.927362

평균 차분의 95% CI: (-1.974769, 3.174769)
 평균 차분의 T검정 = 0 (대 not = 0): T-값 = 0.65
 P-값 = 0.553

Fig. 17 Paired t-test results of submersion condition for 1 second

쌍체 T검정 및 CI: 축력계_3, 축력검사기_3

축력계_3 - 축력검사기_3에 대한 쌍체 T

	N	평균	표준 편차	SE 평균
축력계_3	5	145.200	3.701	1.655
축력검사기_3	5	144.200	3.962	1.772
차분	5	1.00000	2.44949	1.09545

평균 차분의 95% CI: (-2.04144, 4.04144)
 평균 차분의 T검정 = 0 (대 not = 0): T-값 = 0.91
 P-값 = 0.413

Fig. 18 Paired t-test results of submersion condition for 30 minutes

4.2 철골현장 적용성 평가

철골 조립현장에 대한 축력검사기의 적용성 평가를 2



(a) measuring a clamping force (b) Trial product



(c) Measuring a damping force (d) Displaying the measured value

Fig. 19 Field test for the measuring device

Table 7 Verification test results on construction site condition

볼트 NO	현장 A		현장 B	
	축력계 [kN]	축력검사기 [kN]	축력계 [kN]	축력검사기 [kN]
1	185	182	182	178
2	192	176	184	176
3	186	184	210	194
4	180	175	190	203
5	178	177	192	180
평균	184.2	178.8	191.6	186.2
표준편차	5.50	3.96	11.082	11.756

개 현장을 대상으로 축력계에 의한 실험과 병행하여 Fig. 19와 같이 실시하였다. 실험에 사용된 토크쉬어볼트는 현장에서 실제 사용되는 포장 보관상태의 M20×85mm 이며, A 현장은 축력검사기 개발 실험에 사용된 전동렌치 사용하고, B 현장은 현장에서 체결에 사용되는 전동렌치를 사용하였으며, 실험결과는 Table 7과 같다.

축력검사 결과 A 현장의 경우 축력검사기 축력의 평균 값은 178.82kN으로 축력계에 의한 평균값 184.2kN 보다 3.0% 적게 나타났고, B 현장의 경우도 2.81% 적게 나타났다. 측정된 축력값의 개별값 비교를 위한 쌍체 t검정결과 P값이 0.05이상(A 현장 : 0.119, B 현장 : 0.342)으로 95% 신뢰구간에서 축력계값과 축력검사기 값의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 쌍체 t검정 결과는 Fig. 20~Fig. 21과 같다.

쌍체 T 검정 및 CI: 축력계, 검사기				
축력계 - 검사기에 대한 쌍체 T 검정				
	N	평균	표준 편차	SE 평균
축력계	5	184.20	5.50	2.46
검사기	5	178.80	3.96	1.77
차이	5	5.40	6.11	2.73

평균 차이의 95% CI: (-2.18, 12.98)
 평균 차이의 T 검정 = 0 (대 not = 0): T-값 = 1.98 P-값 = 0.119

Fig. 20 Paired t-test results of the construction site A

쌍체 T 검정 및 CI: 축력계, 검사기				
축력계 - 검사기에 대한 쌍체 T 검정				
	N	평균	표준 편차	SE 평균
축력계	5	191.60	11.08	4.96
검사기	5	186.20	11.76	5.26
차이	5	5.40	11.22	5.02

평균 차이의 95% CI: (-8.53, 19.33)
 평균 차이의 T 검정 = 0 (대 not = 0): T-값 = 1.08 P-값 = 0.342

Fig. 21 Paired t-test results of the construction site B

5. 결론

토크쉬어볼트에 대한 체결 후 축력검사방법은 현재 핀테일 파단 및 너트회전량을 육안으로 검사하는 방법이 사용되고 있지만, 실제 현장에서는 토크계수 변동에 따른 축력저하의 문제점을 인식하지 못하고 핀테일 파단만을 검사하고 있다. 본 연구에서 이러한 문제점을 해결하고자 토크쉬어볼트 전용체결기와 결합하고 전동렌치 전류량 및 누적에너지와 축력과의 상관관계를 분석하여 축력을 측정하는 회귀식을 도출하고 통계적인 검증을 통하여 현장에서 토크쉬어볼트 핀테일 파단 즉시 축력을 측정할 수 있는 검사기를 개발하였다.

토크쉬어볼트(M20×85)를 이용하여 전동렌치가 고력볼트 체결에 사용되는 전류량(누적에너지)과 축력과의 상관관계를 분석한 결과, 전동렌치의 전류량 값 중 기동 전류를 제외한 최대값은 핀테일 파단 직전에 나타나며, 최대값으로부터 역으로 전류량 값을 합산하여 특정 수위 이상의 전류값 합산과 축력과의 관계를 통계 프로그램(Minitab)과 계산 프로그램(Matlab¹⁴), C++)을 사용하여 핀테일 파단직전 3초까지의 데이터중 전류 최대값 대비 0% 이상의 값들의 합산이 축력계에 의한 축력값과 가장 회귀모형에 대한 설명도가 높은 회귀식(R-제곱값 74.5%)을 도출하였다.

도출된 회귀식을 적용하여 축력검사의 시제품을 제작하여 측정된 축력에 대한 검증실험 및 철골 조립현장에

서 실제 사용되는 토크쉬어볼트에 대한 축력실험 결과를 쌍체 t검정으로 분석한 결과 P값이 0.05이상으로 95% 신뢰구간에서 측정된 축력계(정밀도 ±3%)와 축력검사에 대한 축력의 차이가 없는 것으로 나타났다.

개발된 축력검사는 시제품으로, 특정규격인 M20×85mm의 토크쉬어볼트에 국한하여 실험된 자료를 바탕으로 회귀식을 도출하였기 때문에 실용화를 위해서는 토크쉬어볼트의 직경별, 길이별로 전류량 측정실험을 실시하여 회귀식을 도출하기 위한 추가실험이 필요하다.

축력검사가 실용화가 되면 철골구조물의 토크쉬어볼트에 대한 축력검사에 활용하여 고력볼트에 도입된 축력을 확인하고 불합격된 볼트는 교환이나 추가체결을 실시하여 한국건축구조 설계기준에서 요구하는 체결축력에 대한 시공품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사에서 수행한 변전소철골구조물 유지관리 기술개발 연구과제의 결과물임

참고문헌

1. 김진호, 우해성, 최성모, "고력볼트 마찰접합부의 설계기준 및 내력에 관한 연구", 대한건축학회논문집 제19권 4호, 2003, pp.27-35.
2. 김진호, 김주연, 한기명, 나환선, 이현주, 김강석, "현장 온도 특성을 고려한 고력볼트 체결성능에 대한 실험적 연구", 한국강구조학회 학술발표논문집, 2007, pp.337-342.
3. 나환선, 이현주, 김강석, 김진호, 김우범, "온도변수에 따른 고력볼트 체결력 평가", 한국강구조학회 논문집 제 20권 3호, 2008, pp.399-407.
4. 대한건축학회, 건축공사 표준시방서, 2006.
5. 이현주, 나환선, 김강석, 김진호, 김진만, "고력볼트 시공환경에 따른 축력과 토크의 영향에 관한 실험적 연구", 한국강구조학회 논문집 제 20권 1호, 2008, pp.43-53.
6. 한국표준협회, KS B 2819 구조물용 토크-전단형 고장력볼트·6각 너트·평와서의 세트, 2005.
7. 한전전력연구원, 철골구조물 고력볼트접합부 성능향상 기술개발 최종보고서, 2008.
8. 한전전력연구원, 변전소 철골구조물 유지관리기술개발 최종보고서, 2009.
9. 日本建築學會, 鐵骨工事 技術指針/工事現場 施工, 1996.
10. 日本建築學會, 高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 2003.
11. JASS 6, 建築工事標準仕様書 鐵骨工事, 2007.
12. JSS II09, 構造用 トルシア形 高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, 日本鋼構造協會, 1981.
13. Geoffrey L. Kulak, John W. Fisher, John H. A. Struik, "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints", AISC Inc, 2001.

-
14. Matlab (ver.7)
 15. Minitab (ver.15)
 16. RCSC, Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, AISC, 2004.

(접수일자 : 2010년 6월 8일)
(심사완료일자 : 2010년 8월 9일)

요 지

토크쉬어볼트의 토크계수는 환경요인에 의해 영향을 받는다. 습기, 녹, 시공중의 작업성 등. 토크쉬어볼트의 토크계수의 변동에 기인하여 볼트에 도입된 축력을 예측하는 매우 어렵다. 이런 이유로 시공중인 볼트 축력을 측정하고, 체결력을 검증하는 것은 필수적이다. 이 연구에서, 볼트에 도입된 하중을 확인하기 위해 시작품 제작이 계획되었다. 시작품의 알고리즘은 토크쉬어 전동렌치에서 얻은 전기에너지와 유압축력기에서 얻은 축력과의 상관관계를 구성한 것이다. 직접축력을 계측하는 회귀분석식은 미니탭 프로그램을 이용한 통계학적인 분석방법에서 구한 것이다. 이 시작품은 상용 토크렌치에 견줄만한 인장력을 평가하는 신뢰성이 있는 도구라고 판단된다.

핵심 용어 : 토크쉬어볼트, 체결축력, 토크, 알고리즘, 에너지
