



토크전단형 고력볼트의 토크계수 변동에 따른 체결축력 확보방안에 관한 연구

이현주¹ · 나환선² · 최성모³

한국전력공사 전력연구원 선임연구원¹, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원²
 서울시립대학교 건축학부 교수³

A Study on the Secure Plan of Clamping Force according to the Variation of Torque-Coefficient in Torque-Shear High Strength Bolts

Lee, Hyeon-Ju¹ · Nah, Hwan-Seon² · Choi, Sung-Mo³

¹Senior Researcher, Korea Electric Power Research Institute

²Principal Researcher, Korea Electric Power Research Institute

³Professor, Division Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul

Abstract: Torque control method and turn of nut method are specified as clamping method of high strength bolts in the steel construction specifications. Quality control of torque coefficient is essential activity because torque control method, which is presently adopted as clamping method in domestic construction sites, is affected by variation of torque coefficient. 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 the environmental factors and temperature variables despite the break of the pin tail. This study was focused to evaluate the effect of environmental factors and errors of installing bolts during tightening high strength bolts. The environmental parameters were composed of 'wet' condition, 'rust' condition, 'only exposure to air' condition. And 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.

Key Words: Torque Shear Bolt, Clamping Force, Torque, Torque-coefficient

1. 서 론

국내 철골조립현장에 주로 사용되고 있는 구조물용 토크-전단형 고력볼트(이하, TS 고력볼트)는 토크관리법으로 체결을 실시하는 볼트이기 때문에 마찰접합용 고력육각볼트(이하, 육각 고력볼트)를 조일 경우와 동일하게 1차체결 → 금매김 → 본체결 순서로 실시하여야 하며, 토크계수 관리를 철저히 하여야 한다. 그러나 현장에서는 이러한 문제점을 인식하지 못하고 핀테일이 파단 되면 체결이 완료되는 것으로 오인하는 경우가 있다. 고력볼트

접합부의 구조성능은 볼트에 도입되는 축력과 접합면의 표면처리 상태에 좌우된다. 특히 볼트에 도입되는 축력은 모든 볼트에 대해 일정한 크기로 도입되기 어려우며 작업환경 및 기기 여건 등에 따라 약간의 편차가 존재한다. 또한, 이미 도입된 축력에 대해서도 시간의 경과와 함께 축력이 저하하는 경우가 있기 때문에 볼트의 축력검사는 접합부의 내력확보 및 구조물의 안전성을 확보하는데 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 고력볼트 체결공법의 장단점을 분석하고, 국내현장에서 주로 사용되고 있는 토크관리

주요어: 토크전단형 고력볼트, 체결축력, 토크, 토크계수

Corresponding author: Lee, Hyeon-Ju

Power Distribution Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, 105 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Deajeon 305-760, Korea
 Tel: +82-42-865-5223, Fax: +82-42-865-5944, E-mail: hyeon@kepri.re.kr

투고일: 2014년 9월 1일 / 수정일: 2014년 9월 17일 / 게재확정일: 2014년 9월 19일

법을 적용한 TS 고력볼트에 대해 보관에서 체결, 검사에 이르는 전체 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 실험요인으로 도출 및 반영하여, 이로 인한 TS 고력볼트의 축력저하 현상을 실험적으로 규명하고 현실적으로 가능한 체결방법 및 과학적인 축력 검사방법 개발의 필요성을 검토하고 기술개발 기반을 마련 하고자 하였다.

2. 고력볼트 체결공법

고력볼트의 체결공법은 토크관리법, 너트회전법, 직접인장법이 적용되고 있다. 우리나라와 일본은 토크관리법을 많이 이용하고 있고, 볼트규격인 KS B1010 및 JIS B1186에서도 토크계수에 대해 상세히 규정하고 있으며, 특히 토크관리법을 적용한 TS 고력볼트를 주로 사용하고 있다.

미국 및 영국에서는 너트회전법에 의한 체결이 일반적이다. 특히 미국에서는 1974년부터 너트회전법에 관한 규정축력의 도입, 작업성, 검사 방법 등을 제정하였으며, 너트회전각을 너트길이, 접합부의 상태에 관해서도 자세하게 정하고 있다. 물론 토크계수법에 의한 체결규정도 있으며, 토크계수법으로 체결할 때는 시공 시 축력검사를 엄격히 실시하여 너트회전법을 초과하지 않도록 하고 있다.

2.1 토크관리법

토크관리법은 너트를 회전시키는데 소요되는 토크와 볼트에 도입되는 축력이 식 (1)과 같이 일정한 관계가 있음을 이용한 고력볼트 체결공법이다. 이 체결방법은 토크계수를 근거로 간접적으로 체결축력을 제어하는 방법이며, 접합부의 내력확보를 위한 1차적인 출발점으로 체결축력 안정을 위해서는 시공단계에서 토크계수 관리가 상당히 중요한 의미를 가진다.

$$T = k \cdot d \cdot N \quad (1)$$

(T: 토크, k: 토크계수, d: 볼트직경, N: 축력)

육각 고력볼트의 토크관리법 체결방법은 Fig 1 고력볼트를 Fig 2의 토크제어형 전동렌치를 이용하여 체결한다. 체결토크를 결정하기 위해서는 체결당일 축력계에 볼트 5개에 대한 토크검사를 실시한 후 체결토크를 결정하고 전동렌치의 토크를 설정하여 체결을 실시한다.



Fig. 1 High-strength hexagon bolt



Fig. 2 Torque-Control type electric wrench

체결토크는 고력볼트의 윤회상태에 따라 달라지기 때문에 매일 체결 전 결정해야 하지만, 체결 당일 축력검사를 통해 적정 토크로 체결한다고 하더라도 토크계수의 변동의 가능성은 있기 때문에 최소 요구 축력 미만으로 체결될 경우가 발생할 수 있다. 따라서 토크계수는 현장온도, 볼트의 보관상태, 시공조건에 따라 달라지기 때문에 토크계수 관리를 철저히 해야 목표축력에 도달할 수 있다. 체결 후 검사방법은 Fig 3과 같이 1차체결 이후 금매김을 실시 한 후 본체결 종료 후에 너트회전량을 확인하여 합격 여부를 검사하도록 되어 있어, 현장 관리가 어렵고 정확한 1차체결 토크와 금매김 및 너트회전량 검사가 전제 되어야 한다.

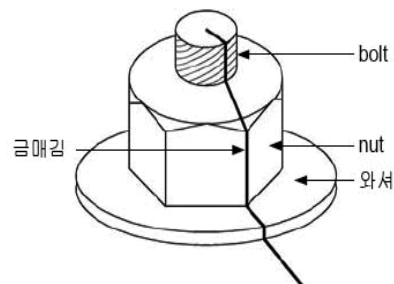


Fig. 3 Marking

TS 고력볼트는 KS B2819 「구조물용 토크-전단형 고력볼트·6각너트·평와셔의 세트」에 규정된 볼트로서 체결토크가 핀테일의 파단토크와 같아지면 핀테일이 파단되도록 만들어진 볼트로서, 비교적 체결토크의 정밀도가 양호한 편이나 토크계수의 변동이 생기면 체결토크의 정밀도가 양호하다고 해도 도입되는 축력에는 변동이 생긴다. 이러한 이유로 체결 전에 축력계에 볼트 5세트에 대한 축력검사를 실시한 후 규정된 범위 내에서 핀테일이 파단될 때 현장체결을 실시한다. 체결방법은 Fig 4의 TS 고력볼트를 Fig 5의 토크전단형 전동렌치를 이용하여 고력볼트의 핀테일이 파단될 때까지 체결한다.



Fig. 4 Torque Shear Bolt



Fig. 5 Torque-Shear type electric wrench



Fig. 6 Nut rotation angle control type electric wrench

TS 고력볼트도 토크관리법을 적용하기 때문에 토크계수의 변동에 따라 축력이 달라질 수 있다. 현장 시공온도의 변화에 따라 동절기에는 도입축력이 부족할 수 있으며, 하절기에는 도입축력이 증가하여 과체결의 우려가 있다. 또한, 볼트의 보관방법과 현장 품질관리 절차를 준수하지 않을 경우 외기노출, 수분침투, 녹 발생으로 인하여 축력저하의 원인이 된다.

TS 고력볼트는 식 (1)에서 항상 토크(T)가 일정하기 때문에 토크계수(k)가 증가되면 볼트축력(N)이 감소한다. 이 때 육각 고력볼트의 경우, 토크계수가 증가하면 토크를 증가시켜 소정의 볼트 축력을 확보할 수 있지만, TS 고력볼트는 토크를 제어할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이러한 특징 때문에 축력검사 시 토크계수가 변화되어 축력이 감소하게 되면 볼트를 현장 반출하고 신품으로 교체하여야 한다.

2.2 너트회전법

고력볼트가 철골구조물에 도입된 초기에는 주로 현장 체결공법으로 토크관리법이 적용되었지만 당시만 해도 볼트의 품질 안정도가 열악하여 토크계수를 일정하게 유지하기 위한 기술이 낙후된 상황이었다. 이 때문에 토크계수를 일정하게 유지하기 위한 기술적 노력이 볼트 제조, 취급, 현장시공 및 체결 후 검사 등의 측면에서 신뢰도의 편차가 컸다. 특히 토크계수 변동에 의한 볼트 축력의 커다란 편차는 가장 큰 문제점이었으며, 이를 해결하기 위한 수단으로 볼트변형과 축력의 관계에 착안한 체결방법이 너트회전법이다. 너트회전법은 볼트에 일정량의 변형을 가해 그 변형량을 너트회전량으로 판정함으로써 볼트축력을 추정하는 방법이다. 즉 너트회전법은 너트를 일정량 회전시켜서 얻어지는 볼트의 축력과 변형량의 관계를 이용해 축력을 도입하는 방법이다.

육각 고력볼트의 체결은 1차체결 완료 후에 금매김을 실시하고 1차체결을 기점으로 120°(M12는 60°) 회전하여 체결을 실시한다. 본체결은 Fig 6의 너트회전각 제어형 전동렌치를 이용하여 너트회전법에 의한 너트회전량을 도입한다.

너트회전법은 소성영역에서 체결되기 때문에 과체결의 우려가 있으며, 정해진 회전각으로 체결하기 때문에 볼트 제품의 로트에 따라 축력이 달라질 수 있다. 또한 1차체결 이후 금매김을 한 후 너트회전량으로 적정 체결 여부를 검사하도록 되어 있으나 현장 관리가 어렵고, 금매김 및 너트회전량 검사의 불편함으로 인해 생략되는 경우가 있다.

2.3 직접인장 확인법

직접인장 확인법은 기존 볼트에 특수 형태의 와셔를 추가하여 적정 축력이 도입됨을 확인할 수 있는 방법으로, 미국에서는 1950년대부터 사용해왔으며 현재는 1994년 ASTM F959에 인증된 특수 와셔를 주로 사용하고 있으며, 이 와셔는 표면에 돌기를 형성하고 특정 하중에서 눌릴 수 있도록 정밀하게 열처리되어 생산되는 제품이다. 열처리된 돌기의 압축강도는 부식, 도장, 도금, 오염, 온-습도 등에는 영향을 받지 않고 오직, 너트의 조임으로 증가되는 수직 압축력에만 직접 반응하는 구조이다.

직접인장 확인법은 육각 고력볼트나 TS 고력볼트에 Fig 7과 같은 종류의 특수형태의 와셔를 추가로 삽입하여 돌기부분이 일정량 눌리거나 돌기가 눌러 실리콘이 일정량 배출될 때까지 체결한다. 체결작업을 통해 압축력이 일정 수준을 넘으면 돌기들은 함몰되며, 이때의 압축력 만큼 볼트에 인장력이 발생하게 된다.

단순 돌기형 와셔의 경우, 와셔 돌기의 눌림상태에 대하여 체결 전에 전동공구의 검증 체결이 필요하고, 체결 후에는 필러게이지를 이용하여 체결이 완료된 볼트에 대한 별도의 계측이 필요하다. 실리콘 배출 돌기형 와셔는 돌기가 눌린 후 실리콘의 배출상태를 확인하여 체결을 완료하는 방법으로 육안으로 체결상태를 할 수 있도록 개선된 제품이지만 실리콘의 방출상태에 따라 축력의 도입상태가 달라지기 때문에 방출상태에 대한 체결 전의 작업자의 검증이 필요하다. 이러한 돌기형 와셔는 기존

와서의 마찰력 유지를 위해 기존 와서에 추가로 돌기와서를 시공함에 따라 고력볼트 재료비가 2배 정도 증가되며 체결작업자의 체결 숙련도가 필요하지만 토크관리법이나 너트회전법에 비해 축력 도입에 대한 신뢰도가 높은 편이다.



Fig. 7 Direct Tension Indicators

3. 시공현장 문제점 분석

고력볼트의 현장반입에서 시공, 체결 후 검사단계인 너트회전량 확인까지 시공현장의 각 단계별 작업에서 발생할 수 있는 현장 환경조건 및 시공관리 절차상의 문제점을 조사하여 고력볼트가 노출되는 환경과 기간을 조사하여 고력볼트 체결성능평가의 실험조건으로 반영하고자 하였다.

3.1 현장반입 및 보관 단계

고력볼트의 현장반입 단계에서 문제점은 거의 없으나, 보관단계에서 문제점이 발생할 여지가 있다. 볼트 보관 장소는 내부 보관이 원칙이며, 온도변화가 적은 전용 보관창고를 설치하는 것이 가장 좋다. 대형 건설현장의 경우 볼트 보관 창고를 설치하고 있지만 소규모 현장에서는 현장사무소의 일부에 보관하거나, 팔레트나 목재를 설치하고 방수 시트를 덮는 등의 보양이 필요하지만 최소한의 비를 맞지 않는 정도의 보관을 하고 있다. 이럴 경우 계절에 따라 외부 습기나 우수의 유입으로 토크계수 변동의 원인이 된다. 또한 시공을 위해 보관 장소에서 반출할 경우 옥외에 마대상태로 방치되는 경우가 있어 습기 유입으로 고력볼트 세트의 토크계수를 변동시켜 적정한 체결축력을 도입할 수 없는 상태가 발생하기도 한다.

3.2 체결전 검사, 가볼트 체결

토크관리법을 사용하는 TS 고력볼트의 경우 매일 시공전에 고력볼트 체결 전 검사를 실시하는 것이 원칙이다. 그 이유는 볼트의 보관단계 및 시공단계와 현장 시공온도에 따라 토크계수가 변동되어 축

력저하 문제점이 발생할 가능성이 있기 때문이다.

그러나 국내의 경우 검사를 할 수 있는 축력계를 건설회사 또는 철골 시공회사가 가지고 있는 경우는 거의 없고, 볼트제조사의 품질관리부서에서 가지고 있기 때문에 매번 현장검사를 실시하기에는 현실적으로 어려운 형편이기 때문에 가장 중요한 제품 확인은 초기 현장반입으로 대체되고 있는 실정이다.

가볼트는 철골 설치작업에 있어서 부재 조립에 사용되고 본체결 또는 현장 용접 시까지 예상된 외력에 대하여 설치된 철골의 변형 및 도괴를 방지하기 위하여 사용한 볼트를 말하며, 부재 조립 및 철골세우기 후 변형 방지, 본체결 시 정확한 시공 유지, 본체결이 완료 될 때까지 예상되는 외력에 저항하는 것을 목적으로 하고 있다. 가볼트는 가볼트를 제외한 나머지 볼트구멍에 본볼트로 1차체결을 실시하여 부재의 밀착이 완료되면 제거하는 것으로서, 고력볼트 접합에서 부재 접합면의 밀착정도는 중요하며 TS 고력볼트는 1차체결 시 부재가 완전히 밀착된 상태로 체결하는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 현장에서는 본볼트 재료인 TS 고력볼트로 가볼트를 대신하는 경우가 있으며, 이 경우 장기간 옥외 노출에 따른 녹 발생 등으로 토크계수가 변동되며, 조립 시 무리한 작업으로 인해 나사산의 변형 및 파손에 따른 축력저하의 원인이 되고 있다.

3.3 1차체결, 금매김

1차체결은 볼트 접합부의 볼트군마다 가볼트를 제외한 모든 위치에 본체결 볼트를 삽입 후 조임순서에 따라 작업을 실시한다. 체결은 프리세트형 토크렌치, 전동 임팩트렌치 등을 사용하여 볼트 규격별로 시방서에 명시된 토크로 너트를 회전시켜 조여야 한다. 그 후 가볼트를 제거하고 본볼트로 교체하여 동일하게 조인 후 1차체결을 실시한다. 이때 접합 부재는 본볼트에 의해 충분히 밀착되어야 하며 어느 일정한 토크로 체결작업을 반복하여 실시하기 위해서는 프리세트형 토크렌치를 이용하는 것이 좋으며, 최근에는 정확하고 신속한 체결을 위해 1차체결 전용렌치가 사용되고 있다. 그러나 현장에서는 가볼트 사용이 생략되는 경우와 1차체결 역시 정해진 토크로 체결하지 않는 경우가 있다. 그 이유는 첫째로 가볼트를 사용하지 않고 가볼트 용도로 사용한 본볼트를 제거하지 않기 때문에 본 볼트에 많은 토크를 도입하지 않거나, 손 조임만을 실시하는 것이며, 둘째는 금매김 및 본체결 시 회전량 검사를 실시하지 않기 때문이다.

고력볼트 체결 품질관리 절차에 따라 1차체결을 마친 볼트에는 1차체결 종료를 나타내는 금매김을

표시하여야 한다. 이 표시는 본체결의 종료를 나타냄과 동시에 체결 후의 검사에 이용하며, 본체결 시 너트의 회전으로 인해 생기는 금매김의 어긋남에 의해 체결작업의 완료 확인이 가능하며 너트 회전량, 공회전의 유무 확인도 쉽게 할 수 있다. 그러나 현장에서는 전술한 바와 같이 1차체결 및 금매김이 생략되는 경우가 있기 때문에 토크계수 변동으로 인해 축력이 적게 도입된 불량볼트를 선별할 수 없게 된다.

3.4 본체결, 검사

본체결은 TS 고력볼트 전용 체결기를 이용하여 핀테일이 파단 될 때까지 조인다. 핀테일의 파단만으로 고력볼트가 제대로 체결되었다고 판단할 수 없는 경우는 볼트 세트의 토크계수가 변동된 고력볼트의 체결축력은 규정 값보다 미달되는 현상이 발생하게 되며, 이런 오류를 검사할 수 있는 금매김 및 너트회전량 검사 역시 생략되고 있는 실정이다.

3.5 체결 시 기상조건

고력볼트는 수분에 의해 토크계수가 변화할 수 있기 때문에 시공 및 관리에 있어서 볼트가 젖지 않도록 충분히 주의해야 한다. 볼트 체결 시공 중에 강우 등의 상황이 발생한 경우에는 체결 도중 볼트 군은 체결을 마무리를 한다. 부득이한 경우에는 물에 젖는 것을 방지하기 위해 시트 등으로 보양을 실시하여야 한다.

또한 동절기 시공의 경우, TS 고력볼트는 KS B 2819에서 온도 의존성에 대한 규정(0℃~60℃)이 정해져 있기 때문에 0℃ 이상에서 사용해야 한다. 0℃ 이하의 조건에서는 눈이나 저온조건으로 인하여 문제의 발생이 우려되기 때문에 체결의 시공계획에 있어서 특히 신중한 주의가 필요하다. 일반적으로 동절기 시공에 있어서 체결 시공 장소를 양생하지 않으면 체결 부재나 볼트에 부착하는 얼음이나 눈의 영향으로 축력을 확보할 수 없으며, 임시 가열 등에 의해 얼음이나 눈을 녹여도 접합부 모든 부분의 완전한 수분 제거가 곤란하여 남은 수분이나 가조립 시 체결 부재 사이에 침투한 수분이 결빙될 가능성이 있기 때문에 볼트 체결을 실시하면 체결축력이 저하된다. 가열 보온 후 체결을 실시하는 경우에도 결빙 후 녹은 물에 의한 영향이 있기 때문에 안정적인 체결성능 확보를 위해서는 이런 환경하에서의 볼트 체결은 가능한 피해야 한다. 하지만 우리나라 공사현장의 여건은 현실적으로 그렇지 못한 편으로 겨울철 철골 조립 공사를 실시하는 경우를 자주 볼 수 있으며, 물을 사용하는 습식공사가 아니기 때문에 온도에 의한 영향을 고려하지 않는

경우도 종종 있다. 특히 당일 체결이 지켜지지 않는 현장의 경우에는 더 심각한 상황에 노출되는 경우가 많다.

4. 고력볼트 체결성능평가

고력볼트의 각 시공 단계별로 발생할 수 있는 품질관리 절차의 문제점을 실험에 반영하여 고력볼트 축력에 영향을 미치는지 실험을 통해 규명하였다. 실험에 반영된 요인은 현장에서 절차 생략으로 발생할 수 있는 대기 중 노출상태와 대기노출에 따라 비를 맞는 경우, 볼트보관 불량으로 인한 볼트의 침적상태, 침적에 따른 녹 발생 상태를 가정하여 실험 조건을 계획하였다.

4.1 실험체 구성 및 방법

실험은 축력시험기를 사용하였으며, 고력볼트에 대한 체결과정에서 나타나는 특성을 평가하기 위하여 볼트에 도입되는 축력, 너트회전각, 토크, 토크계수를 측정하였다. 실험에 사용된 볼트는 F10T M20×140 TS 고력볼트이며, 실험계획은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental Design

실험 변수		실험체 개수
종류	내용	
상온(20℃), 정상조건	상온 개봉후 즉시 체결	10EA
수분 침적 1초	빗물이 닿은 상태	10EA
수분 침적 30분	빗물에 흠뻑 젖은 상태	10EA
외기노출 30일	보관상태 불량	10EA
녹 발생 30일	얇은 녹 발생	10EA

4.2 실험결과

현장조건에 따른 핀테일 파단 시의 체결축력, 토크, 토크계수, 너트회전각 실험결과를 Table 2에 나타내었다.

핀테일 파단 시 토크계수는 Fig 8과 같이 상온의 정상조건 토크계수(평균 0.146)와 비교하여 1초 침적 조건에서 31%, 30분 침적 조건에서 30%, 녹 발생 30일 조건에서 38% 증가하여 일본강구조협회규격 JSS II09에서 권장하고 있는 토크계수의 범위 0.110~0.170을 만족하지 못하였다. 토크계수가 증가한 이유는 KS B1010에서 토크계수의 범위(0.11~0.15)와 표준편차(0.010이하)를 규정하고 있으며, 이를 유지하기 위해 아연계 인산염처리와 석연계 윤활처리 조합을 사용하고 있고, 이 윤활처리는 습기에 약하고 대기에 노출될 경우 산화되어 토크계수가 증가

되었기 때문이다. 또한 물의 침적상태에 따라 표준편차도 규정범위 (0.010 이하)를 초과하였다.

Table 2. Results of the Experiment

현장변수	축력(kN)		토크(N·m)		토크계수		너트회전각(°)	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
상온정상조건	182.5	4.423	533	2.078	0.146	0.004	114	10.159
수분침적 1초	137.8	11.809	522	4.544	0.191	0.016	93	13.598
수분침적 30분	140.2	11.664	528	3.451	0.189	0.016	102	7.938
외기노출 30일	159.7	12.200	521	3.396	0.164	0.013	111	12.631
녹 발생 30일	130.8	12.440	522	5.610	0.201	0.019	91	9.797

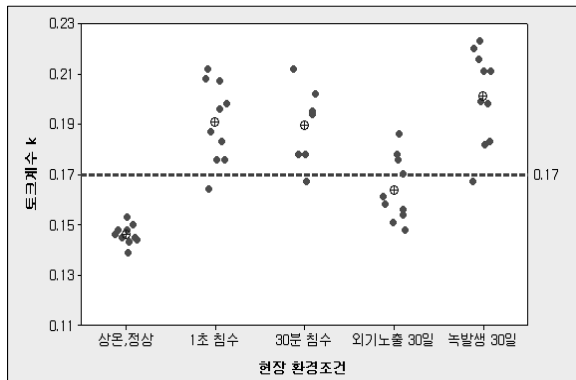


Fig. 8 Torque-coefficient of Environmental Factors

핀테일 파단 시 축력은 Fig 9와 같이 정상조건 축력(평균 182.5kN)과 비교하여 1초 침적 조건 24%, 30분 침적 조건 23%, 외기노출 30일 조건 12%, 녹 발생 30일 조건에서 28%의 축력이 감소되었으며 표준편차도 크게 나타났다. 축력이 감소한 이유는 식 (1)에서 수분 침적 등으로 토크계수가 증가되어 축력은 감소되었기 때문이다.

Fig 10은 녹 발생 30일 시험체의 너트회전각에 따른 축력분포 그래프이며, 핀테일 파단 시 체결축력은 118.0~157.2kN(평균 130.8kN)으로 표준볼트장력 178kN에 미달하였으며, 최대축력은 상온의 정상조건 최대축력(평균 267.1kN)과 비교하여 14.4% 저하된 228.6kN으로 분석되었다.

Fig 11은 녹 발생 시험체의 핀테일 파단 후 볼트가 파단 될 때까지 시험한 사진으로 볼트의 파단위치는 모든 조건의 시험체에서 동일하게 너트 앞 나사산 부분에서 파단이 발생하였다.

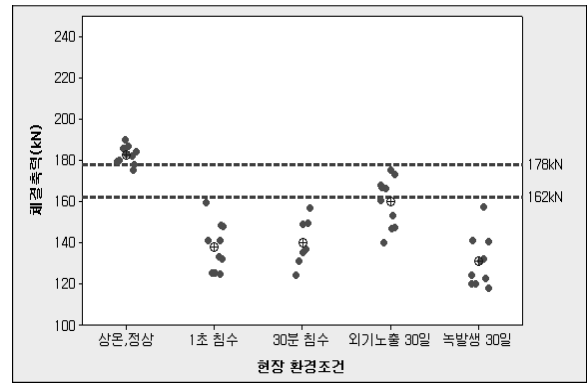


Fig. 9 Clamping Force of Environmental Factors

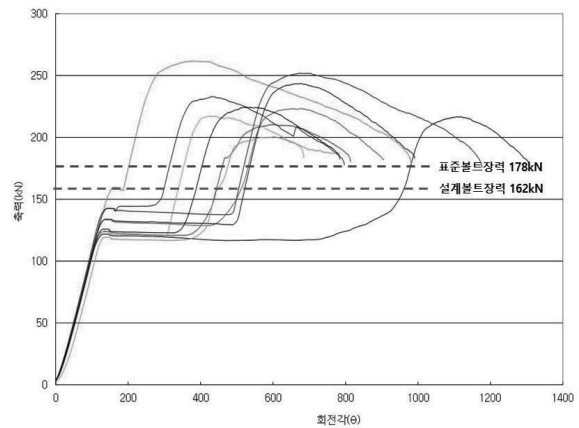


Fig. 10 Clamping Force-Turn of Nut(rust condition)



Fig. 11 Specimen after Broken(rust condition)

핀테일 파단 시 토크는 토크계수가 12~38%로 심하게 변화된 것과 달리, Fig 12와 같이 상온의 정상조건 토크(평균 533N·m)와 비교하여 1~2%의 토크변화를 나타냈다. 이것은 볼트 특성상 체결토크가 항상 핀테일 파단토크와 같아지도록 제작되었기 때문에 토크계수와 관계없이 일정 토크에서 핀테일이 파단 되었기 때문이며, 이런 이유로 핀테일 파단만으로 볼트 체결 완료 여부를 검사하는 것은 토크계수의 관리가 잘되었을 때 가능한 방법이다.

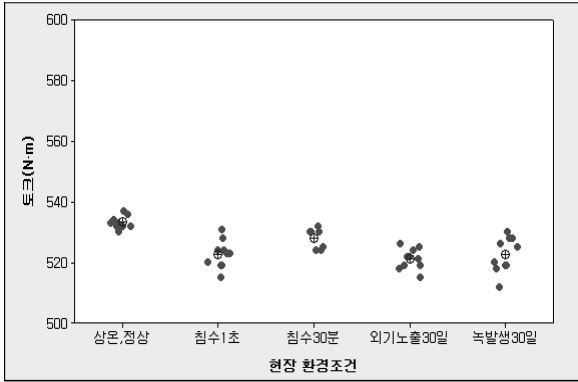


Fig. 12 Torque of Environmental Factors

4.3 상관관계 분석

고력볼트 축력변동에 영향을 미치는 중요인자를 분석하기 위해 시공현장 조건을 반영한 고력볼트 체결특성 실험결과를 분석하여 각 요인별 상관관계를 공학통계 전용 Minitab 프로그램 (Ver. 17.1.0)을 이용하여 분석하였다.

상관관계 분석결과는 Table 3과 같이 상관관계가 있는 요인은(유의수준 0.05이하) 축력-토크계수(상관계수 -0.994, P값 0.001), 축력-너트회전각(상관계수 0.920, P값 0.027), 토크계수-너트회전각(상관계수 -0.944, P값 0.016)으로 분석되었다. 특히 그 중에 축력-토크계수가 강한 상관관계를 보였으며, 상관계수가 (-)로 나타난 것은 식 (1)과 같이 토크계수가 축력 및 너트회전각과 반비례 관계이기 때문이다.

토크는 축력과 토크계수, 너트회전각과 관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 핀테일의 파단토크는 축력과 관계없이 일정하게 파단 되는 볼트의 특성으로 분석된다.

Table 3. Results of Correlation Analysis

구분	축력	토크	토크계수
토크	0.659 0.227	-	-
토크계수	-0.994 0.001	-0.590 0.295	-
너트회전각	0.920 0.027	0.561 0.325	-0.944 0.016
셀 내용	Pearson 상관계수 P-값		

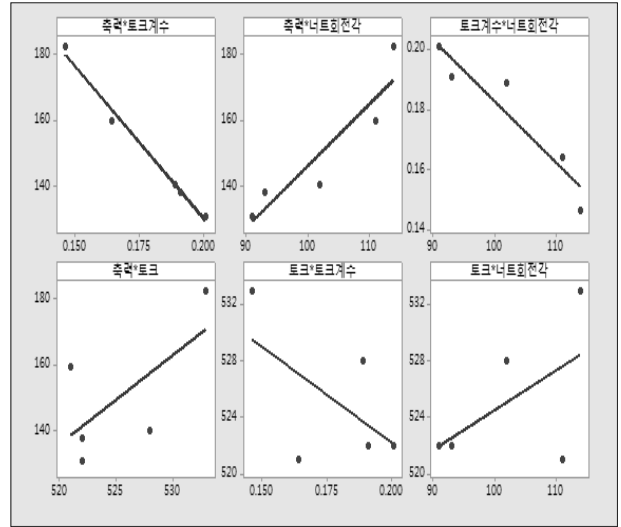


Fig. 13 Scatter Diagram of Environmental Factors

5. 전동렌치 누적전류량 측정 예비실험

고력볼트 체결특성 실험결과에 대한 상관관계 분석결과 축력과 너트회전각이 상관계수가 높게 나타났다. 따라서 고력볼트를 체결하는 전동렌치에 사용되는 전류의 누적량과 너트회전량, 즉 축력과 상관관계를 실험적으로 규명하기 위해 전동렌치에서 사용되었던 누적전류량을 측정하기 위한 예비실험을 실시하였다.

5.1 실험체 구성 및 방법

축력과 누적전류량 측정실험은 유압식 축력계(SKIDMORE MS-102, U.S.A)에 TS 고력볼트를 설치하고 전동렌치(TONE GH-242HRZ / 9rpm, 일본)로 핀테일이 파단 될 때까지 체결하였다. 이 과정에서 축력계로 기준이 되는 축력값을 측정하였고, 전력품질분석기로 초당 10회의 전압과 전류의 RMS값을 계측하였다. 실험에 사용된 볼트는 F10T M20×85 TS 고력볼트이며, 실험계획은 Table 4와 같다.

Table 4. Experimental Design

볼트 등급	볼트 종류	볼트 규격	실험변수	수량 (EA)
F10T	토크 전단형	M20×85	정상조건	3
			수분침적 1초	3
			수분침적 30분	3
			윤활처리	3
			소 계	12

5.2 실험결과

축력과 누적전류량 측정 실험결과에 대한 분석에서 누적전류량은 전동렌치가 초기 기동된 후 너트가 회전하기 시작하는 시점(최소 전류값)에서 핀테일이 파단 되는 시점(최대 전류값)까지의 누적전류량으로 계산하였다. Table 5에는 기준이 되는 축력계 축력값은 측정 축력으로, 누적전류량을 Fig. 15에서 산출된 식 (2)의 회귀식에 대입하여 회귀분석 반영 축력으로 환산하였으며, 측정 축력과 회귀분석 반영 축력에 대한 표준편차를 산출한 결과 0.354~11.314로 분석되었다.

$$T = -36.28 * 15.81I \quad (2)$$

(T: 토크, I: 누적전류량, N: 축력)

Table 5. Results of the Experiment

현장조건	측정 축력 (kN)	누적 전류량 (A)	회귀분석 반영 축력 (kN)	표준 편차
정상-1	178	13.612	178.8	0.566
정상-2	180	13.116	171.0	6.364
정상-3	190	13.306	174.0	11.314
침적1초-1	150	10.871	135.5	10.253
침적1초-2	132	11.117	139.4	5.233
침적1초-3	150	12.575	162.5	8.839
침적30분-1	155	12.195	156.5	1.061
침적30분-2	175	13.800	181.8	4.808
침적30분-3	162	12.844	166.7	3.323
운환-1	145	12.318	158.4	9.475
운환-2	178	13.052	170.0	5.657
운환-3	166	12.829	166.5	0.354
평균	163.4	12.637	163.4	0.006

Fig. 14의 각 현장조건별 시간에 따른 전류량 변화 그래프 분석에서 축력이 저하된 실험체(침적1초-1, 150kN, 4.09초)는 정상조건 실험체(정상-1, 178kN, 5.09초) 보다 체결시간이 1초 정도 빨리 종료되었다. 이것은 1초 정도 너트 회전이 덜 체결된 상태를 의미하며 정상조건 볼트보다 너트회전량이 작았다.

Fig. 15는 축력과 누적전류량의 회귀분석결과 및 적합선 그림이며, 회귀분석결과 95% 신뢰구간에서 R-제곱값은 67.5%로 분석되었으며, 예비실험 결과로서 의미가 있는 것으로 판단되며, 본실험을 통해 좀 더 정량적인 많은 실험데이터를 확보함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이라고 판단된다.

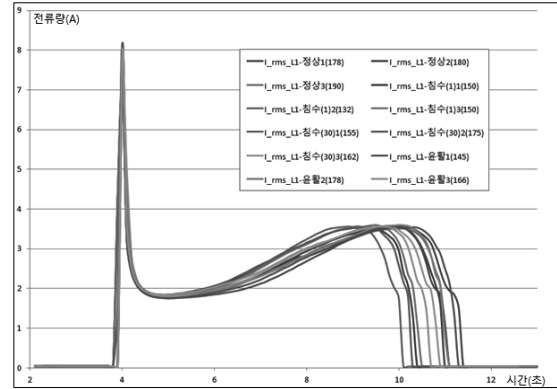


Fig. 14 Electric Current-Time

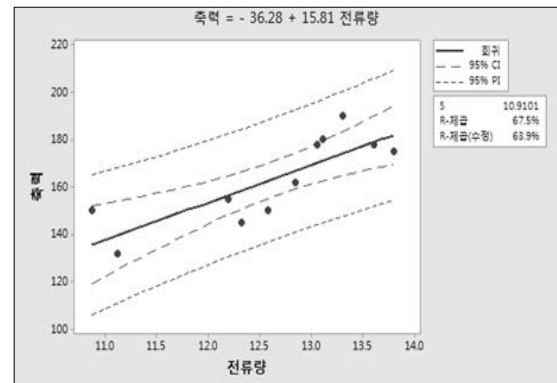


Fig. 15 Electric Current-Clamping Force Correlation

6. 결론

철골구조물의 고력볼트 접합부에 사용되는 고력볼트의 체결공법에 따른 장단점을 분석함으로써 품질관리 주요 인자를 도출하고, 국내 시공현장의 시공실태를 조사하여 품질관리에 따른 문제점을 도출, 반영하여 체결특성실험을 실시하였으며 실험결과에 대한 각 요인별 상관관계를 분석하여 전동렌치 전류량 측정 예비실험을 실시하였다.

- (1) 현장 환경조건을 반영한 핀테일 파단 시 축력 실험결과 상온 정상조건 축력(평균 182.5)과 비교하여 1초 침적조건 24%, 30분 침적조건 23%, 외기노출 30일 조건 12%, 녹 발생 30일 조건에서 28%의 축력이 감소되었으며 표준편차도 크게 나타났다.
- (2) 고력볼트 체결특성 실험결과에 대한 상관관계 분석결과, 축력-토크계수(상관계수 -0.994, P값 0.001), 축력-너트회전각(상관계수 0.920, P값 0.027), 토크계수-너트회전각(상관계수 -0.944, P값 0.016)으로 분석되었다.
- (3) TS 고력볼트(M20×85)를 전동렌치로 체결할 때 사용되는 전류량(누적에너지)과 축력의 상관관계 예비실험에서 측정 축력과 회귀분석반영 축력에 대

한 표준편차를 산출한 결과 0.354~11.314로 분석되었으며, 회귀분석 결과 95% 신뢰구간에서 R-제곱값은 67.5%로 분석되었다.

TS 고력볼트는 현장 환경에 따라 토크계수가 변동되어 편차율이 과다 되어도 적정축력을 도입되지 못하는 경우를 실험결과를 통해 규명됨에 따라 개발된 체결공법과 과학화된 검사방법에 대한 개발 필요성이 도출되었다. 향후 직접인장 확인법이 적용된 스마트와셔 및 자동화된 축력 검사방법에 대한 개발이 지속적으로 필요할 것으로 판단되며, 전류량 분석 예비실험결과를 바탕으로 본실험에서 더 발전된 결과가 도출될 것으로 기대하고 있다.

References

- 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.
- Kim, J. H. (2001). An Experimental Study on the Structural Behavior in Friction Type Bolted Joints Clamping by F13T Grade High Strength Bolt, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 53-61.
- 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 Steel Structure, KSSC*, Vol. 20, No. 1, pp. 43-53.
- 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., Ryoo, J. Y., and Choi, S. M. (2012), "Estimation of Long Term Clamping Force of High Strength Bolts By Coating Thickness Parameters of Slip Faying Surfaces", *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.* Vol. 3, No. 1, pp.8-15.
- Nah, H. S., and Lee, H. J. (2012), "Evaluation on Clamping Force of High Strength Bolts by Coating Parameters of Faying Surfaces", *Corrosion science and technology*. Vol. 11, No. 2, pp.48-56.
- Nah, H. S., Lee, H. J., Kim, K. S., Kim, J. H., and Kim, W. B. (2010), "Evaluating Relaxation of High-strength Bolts by Parameters on Slip Faying Surfaces of Bolted Connections", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 295-303.
- 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., et al. (2007), "Development a Technology of Improving Performance on Bolted Connection of Steel Structure", *Research Report, Korea Electric Power Research Institute*
- RCSC Committee (2004), *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*, AISC Inc., Chicago, Illinois, USA.