

DTI 와셔를 이용한 고력볼트 체결공법

Method of Clamping a High Strength Bolt using Direct Tension Indicating Washer



나환선 (Hwan-Seon Nah) | 한국전력공사 전력연구원 | hsnah@kepco.co.kr

1. 서론

고력볼트 접합부의 마찰저항은 볼트 인장력에 의존하므로 고력볼트의 마찰 접합부에 필요한 가장 주요한 요인은 최소 인장력의 확보라고 할 수 있다.

현재 국외의 경우, 시방서의 관련 기준을 살펴보면 다음과 같다.

Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, Table 4 'Fastener Tension Required for Slip-critical Connections and Connexions Subject to Direct Tension'에서 언급한 것 처럼 기술된 최소 인장 강도의 70% 이상까지 체결하도록 규정되어 있다. DTI(Direct Tension Indicator, 미국 특허번호 5370483)는 ASTM F959 (Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators

for Use with Structural Fasteners)에 규정되어, 고력볼트의 인장력을 직접 확인하는 것으로서, 국내 건설현장에서는 사용된 적이 없다. 그러나, 체결축력의 도입을 육안으로 확인할 수 있고, 토크계수의 변동에 영향을 받지 않는다는 장점으로 인하여 북미대륙에서는 활발하게 사용되고 있다.

2. 고력볼트의 체결공법

고력볼트의 체결공법은 국내에서는 토크관리법과 너트회전법을 주로 이용하고 있으나, 관련 국외문헌에는 다음과 같이 크게 4가지 공법으로 분류하고 있다.

표 1. 너트회전법에 의한 고력볼트 체결방법

볼트머리아래의 볼트몸체 길이	각 부재가 볼트축에 대해서 수직일 경우	*부재1면이 볼트축에 대해서 경사졌을 경우	*부재2면이 볼트축에 대해서 경사졌을 경우
볼트직경의 4배이하	1/3 회전(120°)	1/2 회전(180°)	2/3 회전(240°)
볼트직경의 4배이상 8배미만	1/2 회전(180°)	2/3 회전(240°)	5/6 회전(300°)
볼트직경의 8배이상 12배미만	2/3 회전(240°)	5/6 회전(300°)	1 회전(360°)

* 단, 경사 각도는 1:20을 넘지 않으며, 경사와셔 사용하지 않는 경우

** 1)너트회전이 1/2 이하인 경우, 허용오차 ± 30°

2)너트회전이 2/3 이하인 경우, 허용오차 ± 45°

1) 너트회전법(Turn-of-nut Tightening)

변형을 제어 방법(strain control method)으로 알려져 있으며 이 방법은 너트 회전의 시작점과 회전 각도 계측의 정확성이 요구되고 있다.

$$T = k \times d_1 \times N$$

(T : 조임력(토크, kg · cm), k : 토크계수치(0.11~0.19),
d₁ : 볼트나사의외경지름, N : 볼트인장력(kg))

2) 토크관리법(Calibrated Wrench Tightening)

토크 제어방법(Torque control method)은 탄성 범위 내에서 주어진 인장력을 계측 가능한 기구를 사용하여 각 직경당 3개의 고력 볼트를 현장 체결함으로써, 일정한 볼트 체결력을 확인한 다음, 이 체결력을 미리 계측된 정밀한 토크렌치를 사용하여 기준 토크치를 설정하고, 이 설정된 토크치로 현장시공체결한다.

3) 대체볼트 설치공법(Installation of Alternate Design Bolts)

볼트의 인장력을 간접적으로 나타내거나 혹은 자동적으로 기준 인장력을 제공하도록 의도된 설계특징을 지닌 fastener가 설치되는 방법이다. 이 경우 최소한 세 개 이상의 시편이 현장 체결 조건에서 실제 고력볼트의 요구되는 인장력을 나타내는지를 관련 장치를 이용하여 조사해야한다.

표 2. 각 공법별 비교

구 분		Torque Wrench	T/S Bolt (=Twist Off)	DTI Washer
Bolt Tension 검출원리		회전력(간접) [마찰계수 영향 큼]	회전력(간접)+전단력 [마찰계수 영향 큼]	압축력(직접) [마찰계수와 무관]
설계	Tension 확보정도	부정확	부정확	정확
	Tension 이완방지	방지효과 없음	방지효과 없음	이완 방지 탁월
	Safety Factor	높게 적용	높게 적용	최적값 적용
제작	철골 제작	Hole가공 많음	Hole가공 많음	최적 Hole 수
	방청 도장	부분도장 + 현장완료	부분도장 + 현장완료	제작처 완전도장
시공	시공 절차	가 체결 + 정밀체결	연속체결	연속체결
	시공 인력	2인 1조 필수	1인 시공 가능	1인 시공 가능
	시공 장비	전동+Torque Wrench	전용 전동Wrench	일반 전동 Wrench
	작업자 의존도	매우 높음	낮음	매우 낮음
	도장/도금 영향	매우 큼	매우 큼	영향 없음
	접지시공	면취+Jumper용접	면취+Jumper용접	DTI자체
검사	검사 방법	Torque Wrench	육안/Torque Wrench	육안/Feeler Gage
	검사 장소	현장검사 필수	육안검사 가능	원격지 육안검사
	검사 비용	매우 높음	매우 높음	매우 저렴
현장 관리	안전 관리	--	추가 위험 요소 유발	--
	자재 관리	제작사별 관리 필요	제작사별 관리 필요	불 필요
		Lot별 관리 필요	Lot별 관리 필요	불 필요
		부식방지 필수	부식방지 필수	불 필요
보관기간별 관리 필요		보관기간별 관리 필요	불 필요	
유지 보수	안전예방점검	Torque Wrench, 곤란	Torque Wrench, 곤란	Feeler Gage, 가능

4) 직접 인장력 측정 공법(Direct tension Indicator Tightening)

볼트의 인장력을 직접적으로 확인할 수 있도록 설계된 장치를 이용하여 볼트를 체결하는 방법이다. 이 방법으로 대표되는 것이 하중인식용 와셔(Load Indicating Washer)이다. 이 와서는 일반 평 와셔에 비해 한 면에 돌기가 나와있는 형태로 되어 있고, 이 돌기가 일정하중을 받으면 소성변형을 하면서 볼트머리와 이 와셔사이 간격이 감소되면서 해당 볼트에 도입된 인장력을 확인하는 방법이다.

기존의 토크 렌치 방법의 이용에 따른 토크계수 또는 현장 작업 환경 조건에 따른 고력볼트 와셔면의 표면 변화등에 관계없이 일정한 인장력을 도입할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면, 와셔단가가 비싸다는 단점이 고려되어야 한다.

위의 4가지 공법중 한국에서 자주 사용되는 토크관 리법, 토크쉬어볼트에 의한 설치공법, 그리고 DTI 와셔 적용공법을 각각 비교한 내용은 [표-2]와 같다.

3. 시험방법

본 시험에서는 국내에서 생산되는 고력볼트에 대하여 DTI의 사용성 평가 및 현장변수에 의한 토크계수 변동되는 상황에서 적정 축력이 도입되는지를 확인하고자 하였다. 시험에 사용된 미국 Applied Bolting Tech.사의 DTI로서, ASTM A490용 Classes 10.9 규격(F10T급)을 사용하였으며 계획된 시험변수는 다음과 같으며, 시험체 일람은 [표 3]과 같고 시험체 형상은 [그림 1]~[그림 3]과 같다.

- 아연피막 고력볼트에 DTI를 적용
- ASTM 고력볼트에 DTI를 적용
- TS 고력볼트에 DTI를 적용
- TS 고력볼트 30분 수분침적 후 DTI를 적용



그림 1. TS 고력볼트+DTI



그림 2. ASTM A490 고력볼트+DTI



그림 3. 아연피막 육각 고력볼트+DTI

표 3. 시험체 일람 (DTI의 적용성 평가)

시험변수	고력볼트 종류 별 시험체 수량		
	TS 고력볼트 (KS B 2819, S10T M20)	아연피막 육각 고력볼트(F10T M20)	ASTM A490 고력볼트(M20)
상온, 정상조건	15	15	15
수분침적 30분	15	-	-

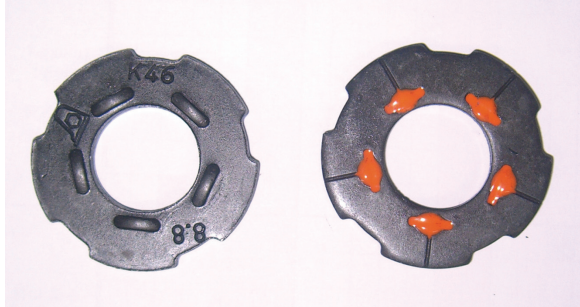


그림 4. 체결 전 DTI 형상



그림 5. 체결 후 DTI 형상

시험은 축력시험기에 볼트를 끼우고 DTI, 와셔, 너트 순으로 체결하여 앞서의 시험과 동일한 요령으로 1차 적으로 시험자의 손으로 로드셀 부분에 시험체 볼트를 세팅한 후에 시험기로 너트를 회전시켜 아연피막 육각 고력볼트는 DTI의 실리콘이 방출 될 때까지 진행하고, TS 고력볼트는 핀테일 파단을 기준으로 시험을 진행하여 체결축력을 측정하였다.

[표 4]는 ASTM F959 규격에서 정한 DTI의 볼트 직경별 압축하중의 범위를 나타냈고, [그림 4]과 [그림 5]

표 4. DTI 압축응력 허용범위

Direct Tension Indicator Size (Nominal Diameter)	Compression Load Range, kN	
	Type 8.8	Type 10.9
M 16	91~109	114~131
M 20	142~170	179~206
M 22	176~211	221~254
M 24	205~246	257~296
M 27	267~320	334~384
M 30	326~391	408~469
M 36	475~570	595~684

는 DTI의 체결 전 형상과 체결 후 실리콘이 방출된 사진을 보여주고 있다.

4. 시험결과

DTI의 사용성을 평가하기 위하여 아연피막 및 ASTM 고력볼트에 DTI를 적용한 시험에서는 실리콘이 방출되기 시작할 때와 실리콘이 방출된 후의 체결축력을 측정한 결과는 [표 5]와 같다.

아연피막 육각 고력볼트의 시험결과 평균 체결축력은 131.8kN에서 1차 방출이 시작되어 197.3 kN에서 실리콘 방출이 완료되었으며 표준볼트축력인 178kN을 만족하였다.

ASTM A490 고력볼트는 101.3kN에서 1차 방출이 시작되어 182.4kN에서 실리콘 방출이 완료되어 최소요구축력 155.58kN을 만족하였다. 그러나, 일부 시험체에서 체결축력이 200kN을 초과하는 것으로 나타났는데, 위와 같은 과체결의 발생은 와셔 테두리에서의 실리콘 방출 완료시점을 시험자의 육안판단으로 확인하기 때문이다.

표 5. DTI의 사용성 평가 시험결과

볼트 종류	시험조건	체결축력		
		TS 고력볼트 핀테일파단시	DTI	
			실리콘 방출시작	실리콘 방출끝
TS 고력볼트	상온, 정상조건	180.7	127.9	199.7
	수분침적 30분	149.4	127.1	186.1
아연피막 육각 고력볼트	상온, 정상조건	-	131.8	197.3
ASTM A490 고력볼트	상온, 정상조건	-	111.9	197.6

상온, 정상조건에서 TS 고력볼트에 DTI를 적용한 시험은 실리콘이 방출되기 시작할 때와 실리콘이 방출된 후, 그리고 핀테일 지점에서의 체결축력은 [그림 6]에

나타났다. 시험결과, 체결축력 평균 127.8kN에서 1차 방출이 시작되어 186.1kN에서 실리콘 방출이 완료되었으며, TS 고력볼트의 핀테일은 실리콘 방출이 완료되기 바로 직전인 180.6kN에서 파단되어 실리콘의 방출 시점이 핀테일의 파단 시점과 비슷하게 나타났다.

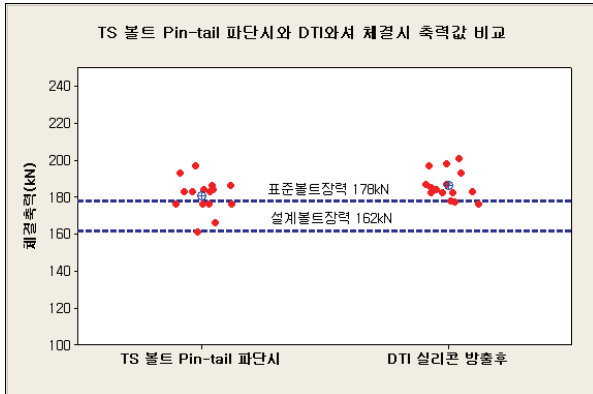


그림 6. 상온, 정상조건에서의 체결축력 분포

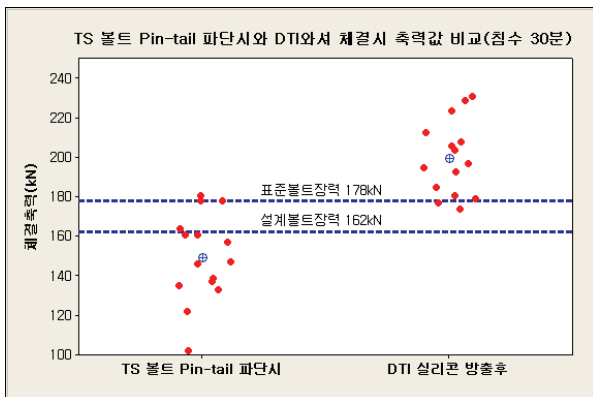


그림 7. 수분침적 30분 조건에서의 체결축력 분포

수분침적 30분 후, TS 고력볼트에 DTI를 적용할 경우에는 [그림 7]와 같이 체결축력 평균 127.1kN에서 1차 방출이 시작되어 TS 고력볼트의 핀테일 파단은 실리콘 방출이 완료되기 전인 149.4kN에서 파단되었다. 그 이후, DTI의 실리콘이 방출될 때까지 추가 체결한 결과 199.7kN에서 실리콘 방출이 완료되었다. 따라서, 수분침적으로 인한 토크계수의 변동으로 TS 고력볼트의 핀테일은 적정 축력이 도입되기 전에 파단되었으나,

DTI의 실리콘 방출은 토크계수의 변동과 무관하게 적정축력을 도입할 수 있었다.

5. 결론

한국과 일본의 경우에는 2000년대 이후 육각머리 고력볼트보다 핀테일이 파단되는 외형적 특성 때문에 토크전단형 고력볼트를 주로 사용하고 있다. TS고력볼트의 경우, 건설현장의 작업자는 물론 관리감독자조차 TS 고력볼트의 핀 테일이 파단되면 적정축력이 도입될 것으로 오해하고 있지만 실제로는 외부환경조건에 따라 볼트 나사산, 와서에 도포된 윤활유의 점도변화는 물론 이물질의 부착여부 등 다양한 현장조건에 따라서 토크계수가 변하고 설계조건에 필요한 축력이 도입되지 못하거나 과도하게 체결될 경우가 종종 발생한다.

이에 반하여, DTI 와서를 이용한 고력볼트의 축력체결은 기존의 토크관리법과 너트회전법과 달리 와서의 소성변형 특성을 시각적으로 확인하고 필러게이지를 통해 검사를 확인할 수 있는 공법이라는 사실을 확인할 수 있었다. 본 시험에서는 다양한 종류의 고력볼트와 환경조건이 다른 조건에서 DTI와서를 이용한 공법의 체결력이 어떻게 달라지는지를 평가하였다.

아연피막 육각 고력볼트, ASTM A490 고력볼트를 사용하여 DTI의 체결특성을 평가한 결과, 각각 197.3kN, 182.4kN에서 실리콘 방출이 완료되었으며 표준볼트축력인 178kN을 만족하였다.

수분침적 30분 조건에서 TS 고력볼트의 핀테일은 149.4kN에서 파단되어 표준볼트축력(178kN)을 미달하는 것으로 나타났으나, DTI의 실리콘이 방출될 때까지 추가 체결한 결과 199.7kN에서 실리콘 방출이 완료되었다. 따라서, DTI를 사용할 경우 TS고력볼트의 핀테일이 어떤 환경조건에서 파단되더라도 적정한 축력을 도입할 수 있다는 사실을 확인하였다.