

## 고력볼트 접합부표면의 방식도장변수에 따른 체결력 평가

나 환 선<sup>†</sup> · 이 현 주

한국전력공사 전력연구원, 대전시 유성구 문지로 65  
(2012년 3월 26일 접수, 2012년 4월 25일 수정, 2012년 4월 26일 채택)

### Evaluation on Clamping Force of High Strength Bolts By Coating Parameters of Faying Surfaces

Hwan Seon Nah<sup>†</sup> and Hyeon Ju Lee

Korea Electric Power Corporation Research Institute, 65 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-380, Korea  
(Received March, 26, 2012; Revised April 25, 2012; Accepted April 26, 2012)

Clamping force of a high strength bolt is reduced by a certain period of time after the initial set-up. In case of special treatments on faying surfaces such as protective coating, clamping force is relaxed more severely. Tests for slip critical joints subject to various faying surface parameters were conducted. Five different surface treatments were tested including mill scale surface, blast surface, rust surface and coated surfaces. Each specimen was composed of F10T M20 of high strength bolts and steel plates. Based on the result of slip coefficient test, blast treatment surface showed 0.59, rust treatment surface showed 0.54 and inorganic zinc treatment surface exhibited 0.44. Clean mill treatment surface and red lead paint treatment surface were 0.23, 0.21 respectively. It is identified that the slip coefficient in Korean structural design guide should be determined for various surface conditions. Subsequently from long term relaxation test of ASTM A 490 high strength bolts, relaxation of no-coated surfaces such as blast, clean mill, rust treatment, the loss of initial clamping load was 10.5%, 13.6% and 7.9% for 1,000 hours, while the loss of initial clamping force was reached as 15.0%, 18.7% more than the required redundancy 10% in case of inorganic zinc and red lead painted treatment. It is required that the limit of relaxation on coated faying surface should be established separately for various surfaces.

**Keywords** : high strength bolt, coating, slip coefficient, relaxation, creep

#### 1. 서 론

강구조물의 접합부, 특히 볼트접합부의 경우는 보통 도장을 하지 않는 상태로 현장반입되어, 고력볼트 체결후, 현장에서 마감 도장을 수행하고 있다. 그러나, 경우에 따라서는 원 철골부재 반입시 도장이 된 상태로 반입되기도 한다. 미국강구조협회, 유럽의 EURO code3, 일본건축학회에서는 강구조물의 볼트 접합부의 표면처리조건에 따라 고력볼트 접합부의 미끄럼계수를 다르게 설정하고 있는데, 특히, 도장 표면과 비 도장표면에 따라 그 차이가 발생하고 있다. 그러나 한국 강구조설계기준은 표면조건에 상관없이 0.45로 규정되어있다. 또한 현장 체결된 고력볼트는 체결과정에서 고력볼트에 도입된 축력은 체결작업이 완료된 직후, 무도장 미끄럼접합부 표면의 경우 평균 3~5% 정도, 도장된 접합부 표면은 도장종류와 도막두께에 따라 축력저하가 더 심하게 발생되며, 접합부에 외력이 작용하지 않아도 체결작업

직후부터 3~7일까지 약간 감소하는 경향을 나타낸다 (Kim, 2001). 500시간 정도 경과 후에는 축력저하 현상이 멈추어 일정축력을 유지하고, 도장표면의 경우에는 1,000 시간까지 축력저하 현상이 멈춘다(Frank,1981; Yang, 2000; Kulak, 2001). 볼트 접합표면에 도장이 도포되었을 경우 강재의 탄성계수와 비교할 때 상대적으로 도장재료의 탄성계수가 결정적인 요인이기 때문에, 다른 외적 요인보다 훨씬 빠르게 도막 크리프가 진행되며 볼트 축력저하의 지배적인 요인이 된다(Frank,1981; Kulak, 2001; AIJ 2003). 또한 도막 두께가 두꺼워질수록 크리프의 현상은 더욱 크며 크리프 현상이 클수록 체결된 고력볼트의 축력은 손실량이 비례적으로 크다 (Yang, 2000; Kulak, 2001). 고력볼트 미끄럼접합부의 도장표면조건에 대한 규정이 미국강구조협회(AISC), 유럽의 EURO code3, 일본건축학회(AIJ)에서는 존재하고 있지만 한국강구조 설계기준은 없다. 고력볼트의 체결력에 영향을 미치는 외부환경요인으로 외기온도에 의존성에 관한 논문도 국내 1편 뿐이다(Nah, 2009). 국내의 몇몇 연구자에 의해 무도장표면조건에서 미끄럼계수 산

<sup>†</sup> Corresponding author: hsnah@kepri.re.kr

정에 관한 연구가 몇 편 있다(Park, 2000; Kim, 2001). 그러나 광명단페인트, 무기질아연도장과 같이 도장표면조건에서의 미끄럼계수가 없으며 따라서 장기축력이완에 대한 실험연구도 국내에서는 거의 찾기 힘들다(Nah, 2010).

본 연구는 2가지 목적을 위해 진행되었다. 첫 번째 실험목적은 국내환경에 적합한 고력볼트 접합부의 내력을 결정할 미끄럼표면 조건에 따른 미끄럼계수 산정의 기틀을 마련하기 위하여, 도막표면에 대한 미끄럼계수 수준을 어떻게 설정하는 것이 타당한지에 관한 기초데이터를 제공하는 것이다. 두 번째 실험목적은 고력볼트 미끄럼접합부 표면처리 변수에 따라 고력볼트에 체결된 최초 축력이 1,000시간경과에 따라 감소되었는지를 확인하기 위한 것이다. 두 실험을 통해, 한국 건축구조설계기준의 고력볼트 접합부의 미끄럼계수를 제안하고, 최초 체결된 고력볼트의 장기축력 이완 수준을 확인하고자 하였다.

## 2. 실험계획

첫 번째 실험에서는 모재 접촉면의 표면종류를 변수로 2면 전단 이음부에서 고력볼트 축력을 측정하고, 미끄럼계수 산정방법에 따라 표면조건에 따른 미끄럼계수를 도출한다. 시험체 목록은 Table 1에, 시험체 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 두 번째 실험에서는 좀 더 다양한 변수로 최초 체결된 고력볼트로부터 1,000시간 경과후의 장기축력 변화를 측정한다. 실험변수는 모재와 덧판 접촉면의 표면처리 조건에 따라 밀 스케일, 광명단 페인트, 무기질 아연도장, 블라스트 처리, 녹 발생 조건 5종류이다.

사용 구조용 강재는 한국산업규격 SM490A, 모재두께 19 mm, 덧판두께 12 mm이며, 고력볼트는 KS B 2819에 적합한 토크쉬어링 고력볼트 S10T M20으로, 미국 ASTM F 2280(2006)과 동일한 재료기준이다. 시험체 설계는 접촉면에서 미끄럼발생 이전에 모재가 먼저 항복하여 포아송비의 영향으로 미끄럼하중이 저하되지 않도록 하였다. 볼트

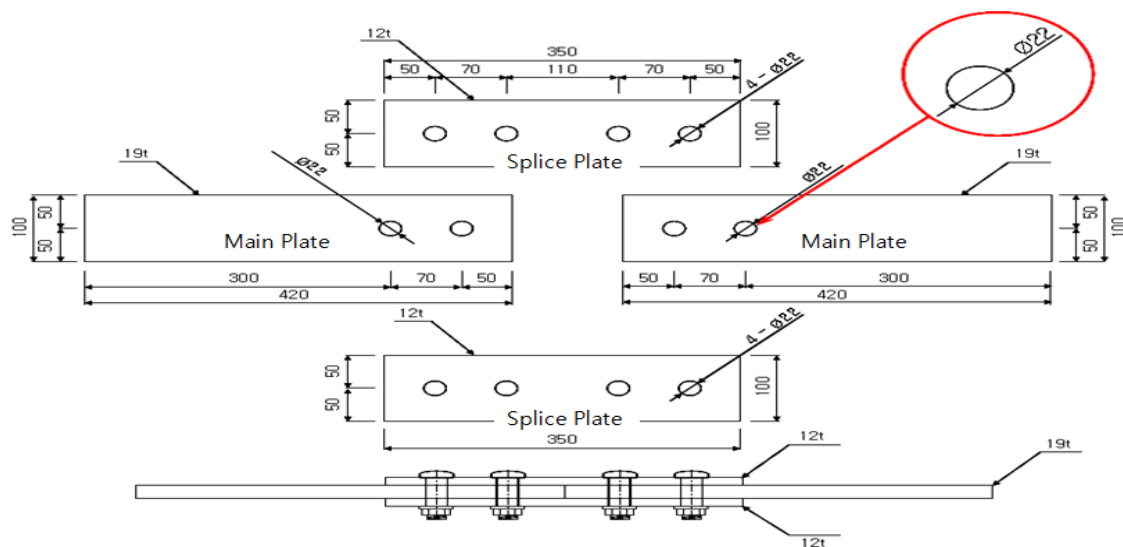


Fig. 1. Description of specimen.

Table 1. Specimens for slip coefficient test

Specimen	Bolt	Faying Surface Treatment	Quantity of Specimen	Number of Bolts	Number of Tests
2KFM-1,2,3	Torque-shear type high strength bolt (S10T) M20 $\ell=85\text{mm}$	Mill scale	3	12	6
2KFP-1,2,3		Red lead paint (Coating thickness : $65\mu\text{m}$ )	3	12	6
2KFZ-1,2,3		Inorganic zinc (Coating thickness : $128\mu\text{m}$ )	3	12	6
2KFR-1,2,3		Rust	3	12	6
2KFB-1,2,3		Blast	3	12	6

피치는 시방서 표준치수인 70 mm, 연단거리 50 mm로 일  
본건축학회 기준에 따라 Fig. 1 과 같이 설계하였다.

시험체 제작은 판재의 길이 방향으로 제작하였고, 모재와  
덧판 접촉면의 표면처리상태는 흑피는 강제 반입시의 표면  
조건이며, 녹 발생 조건은 블라스트처리 후 30일동안 대기  
노출하여 녹을 발생시켰다. 광명단페인트는 한국산업기준  
KSM-6030 1종 2류 적갈색이며 도막두께가 평균 65  $\mu\text{m}$ ,  
무기질 아연도막 두께는 평균 128  $\mu\text{m}$ 이다. 블라스트 표면  
거칠기는 50  $\mu\text{m}$ 를 유지하기 위해 그릿 직경은 0.5 mm~  
1.4 mm다. 대상볼트의 물성은 인장강도가 1,000~1,200  
 $\text{N/mm}^2$  항복강도는 900  $\text{N/mm}^2$  이다.

시험체 조립을 위한 고력볼트의 체결작업은 1차 체결토크  
(15 kg · m) 후, 목표축력 178 kN으로 2차 체결하였다. 시  
험체에 대한 가력방법은 미끄럼 발생될 때까지는 하중제어,  
이후는 변위제어 방법으로 하였으며 접합부 상태가 미끄럼  
발생 후 지압상태를 거쳐 모재 혹은 덧판이 파단 될 때까지  
진행하였다.

한편, 고력볼트 체결력의 변화를 측정할 목적으로 각각의  
고력볼트 체결시 와셔와 함께 로드셀을 동시에 부착했다.  
사용된 로드셀의 민감도는 1.345 mV/V, 저항치는 350  $\Omega$   
 $\pm 1\%$ 이었다. 스트레인 데이터취득은 일본 도쿄소기사에서  
제작된 데이터로거 모델 TDS 601을 이용했다. 미끄럼계수  
에 사용된 고력볼트는 토크쉬어 고력볼트를 사용했으며, 장  
기축력시험에 사용된 고력볼트의 종류는 다크로 피막 토크  
쉬어 고력볼트, ASTM A490 고력볼트 총 2종을 적용했다.  
장기축력시험에 적용된 실험변수에 따른 시험체는 Table  
2와 같다. 최초 도막두께 계획과 달리 무기질 아연도장의  
경우 96  $\mu\text{m}$ , 광명단페인트 실제 측정 도장두께는 평균  
125  $\mu\text{m}$ 이었다.

### 3. 미끄럼계수 산정 시험결과 분석

하중-변위관계, 미끄럼 발생까지의 볼트 축력 저하율, 미  
끄럼하중, 미끄럼계수 최대하중 등을 통하여 각 표면처리  
조건별로 2면 전단 이음부 시험체의 구조특성을 분석했다.  
축력 저하율은 4개의 고력볼트에 부착된 스트레인게이지를  
통해 미끄럼 발생까지의 축력변화를 계측한 결과이다. 미끄  
럼하중은 미국강구조협회 한계상태설계법(AISC LRFD)를  
기준으로 하여, 급격한 하중저하 지점 혹은 하중변화가 완만  
한 경우, 변형량 0.02"(0.5 mm)를 기준으로 하였으며 미끄  
럼계수는 (식 1)에 의해 산정된다(Kulak, 2001; AIJ,  
2003).

$$u = P_{slip} / m \cdot n \cdot N \tag{식 1}$$

여기서,  $u$  : 미끄럼계수,  $P_{slip}$  : 미끄럼하중(kN) (실험측정  
값),  $m$  : 전단면(미끄럼 표면) 수( $m=2$ ),  $n$  : 볼트수량(2),  
 $N$  : 체결축력(표준볼트축력 178 kN) 이다.

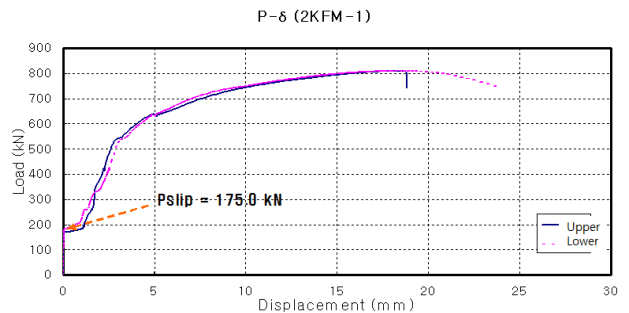


Fig. 2. Load-displacement curve of axial force for high strength bolt on mill scale surface.

Table 2. Specimens for long term relaxation test

I.D of Specimen	Faying surface treatment	Coating Thickness	Species of Bolts	Quantity		Ambient Condition
				Specimen	Bolt	
R2KDFM	Mill scale	-	Dacro- coated torque-shear type high strength bolt M20 ( $\ell$ : 85 mm)	1	4	Indoor exposure
R2KDFP	Red lead paint	125 $\mu\text{m}$ (4.9mils)		1	4	
R2KDFZ	Inorganic zinc	96 $\mu\text{m}$ (3.7mils)		1	4	
R2KDFR	Rust	-		1	4	
R2KDFB	Blast	-		1	4	
R2AFM	Mill scale	-	ASTM A490 heavy hex high strength bolt M20 ( $\ell$ : 85 mm)	1	4	Indoor exposure
R2AFP	Red lead paint	125 $\mu\text{m}$ (4.9mils)		1	4	
R2AFZ	Inorganic zinc	96 $\mu\text{m}$ (3.7mils)		1	4	
R2AFR	Rust	-		1	4	
R2AFB	Blast	-		1	4	

밀스케일 표면 시험체(2 KFM Series)에 대한 미끄럼계수 산정시험 결과는 Fig. 2와 같이 미끄럼하중이 167~175 kN이었으며 (식1)로부터, 미끄럼계수는 0.23~0.24를 얻었다. 이 결과는 일본건축학회 기준, 0.20~0.35의 범위에 존재하였지만, 미국강구조협회 볼트위원회(RCSC)기준인 0.33보다 시험결과가 낮았다(Kulak, 2001). 각 볼트의 축력 저하율은 최소 1%에서 최대 3%에 이르렀다.

광명단 페인트 표면 시험체 (2KFP Series)에 대한 결과는 미끄럼하중은 139.9~168.2 kN, 미끄럼계수는 0.19~0.23 으로 일본건축학회 기준, 0.15~0.25의 범위에 존재하였지만, 미국강구조협회 볼트위원회기준인 0.06과는 큰 차이를 보였다(Kulak, 2001). 각 볼트의 축력저하율은 최소 2%에서 최대 18%에 이르는 것으로 나타났다.

무기질아연 표면 시험체(2KFZ Series)에 대한 결과는 미끄럼하중이 313.2~326.2 kN, 미끄럼계수는 0.44~0.45로 일본건축학회 기준 0.10~0.30, 미국강구조협회 볼트위원회에서 제시된 유사한 조건인 용융아연도금 0.18, 상온아연도금 0.30과 큰 차이를 보였다(AIJ, 2003 ; Kulak, 2001). 위 결과는 무기질아연표면의 경우에도 표면처리 조건, 도포조건, 도막 상태, 도막두께 차이에 따라 접합부의

미끄럼거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이때 각 볼트의 축력 저하율은 최소 7%에서 최대 12%에 이르렀다. 표면 녹 시험체(2KFR Series)에 대한 결과는 미끄럼하중이 389.2~394.6 kN, 미끄럼계수는 0.54~0.55로 산정되었다. 녹 발생의 경우는 일본건축학회에서 제시하고 있는 미끄럼계수의 범위를 0.45~0.70으로 광범위하게 설정해 두고 있다(AIJ, 2003). 미국강구조협회 볼트위원회 제시 기준 Grit blasted, exposed (short period)조건인 미끄럼계수 평균치 0.54와 유사한 결과를 보였다(Kulak, 2001). 녹 발생 표면의 경우는 광명단페인트, 무기질아연도장 표면의 도막두께에 따라 평가가 결정되는 것과 달리, 표면상태를 정량적으로 판단하기가 어려웠다.

표면 블라스트 시험체의 경우는 강판의 흑피를 제거하기 위한 방법으로 사용되고 있으나 고력볼트 접합부에서는 비교적 안정되고 높은 미끄럼계수 확보가 가능한 표면처리 방법이다. ‘고력볼트 접합 설계 시공 가이드북’(AIJ, 2003)에서는 블라스트 표면에서 미끄럼계수를 0.40~0.75정도를 제시하고 있고, ‘Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints’, (Kulak, 2001)에 의하면 Grit Blasted조건에서 미끄럼계수의 평균치를 0.49, 동일한 표면처리 후

**Table 3. Slip coefficient test result subjected to faying surface condition**

Specimen	Faying Surface	Clamping Load (kN)	Slip Load (kN)	Max. Load (kN)	Slip Coefficient	Description of Fracture
2KFM-1	Mill scale	178	175.0	810.4	0.246	Fracture at Main Plate
2KFM-2		178	168.0	803.2	0.236	
2KFM-3		178	167.0	817.3	0.235	
Average			170.0	810.3	0.239	
2KFP-1	Red lead paint	178	139.9	811.5	0.197	Fracture at Main Plate
2KFP-2		178	145.8	801.7	0.205	
2KFP-3		178	168.2	809.9	0.236	
Average			151.3	807.7	0.213	
2KFZ-1	Inorganic zinc	178	313.2	800.7	0.440	Fracture at Main Plate
2KFZ-2		178	326.2	805.9	0.458	
2KFZ-3		178	319.8	800.9	0.449	
Average			319.7	802.5	0.449	
2KFR-1	Rust	178	389.2	783.9	0.547	Fracture at Main Plate
2KFR-2		178	394.6	794.5	0.554	
2KFR-3		178	388.9	778.4	0.546	
Average			390.9	785.6	0.549	
2KFB-1	Blast	178	433.5	810.9	0.609	Fracture at Main Plate
2KFB-2		178	408.8	808.7	0.574	
2KFB-3		178	418.5	808.3	0.588	
Average			420.3	809.3	0.590	

짧은 기간 대기에 노출된 Grit Blasted exposed short period 조건에서는 0.53 으로 공장 가공 직후 보다 높은 값을 제시하고 있다. 슛 블라스트 시험체 (2KFB Series)에 대한 결과는 미끄럼하중이 408.8~433.5 kN, 미끄럼계수는 0.57~0.61로 녹발생의 표면에 비해 동등 이상의 결과를 보였다.

표면조건에 따른 미끄럼계수 산정시험 종합결과는 Table 3과 같다. 실험결과에 따르면, 밀 스케일 표면과 광명단페인트 표면과 같이 표면이 말끔한 조건에서는 현재의 국내 기준인 0.45보다 훨씬 못 미치는 결과를 보였으며, 녹 발생과 블라스트 처리한 표면과 같이 표면이 거친 조건에서는 국내 기준보다 훨씬 높은 미끄럼계수를 보였다. 실험결과와 일본 건축학회 기준, 미국강구조협회 볼트위원회 기준을 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 따라서, 국내에서도 표면처리 조건에 따른 볼트접합부에 적합한 설계기준을 제시할 필요가 있다.

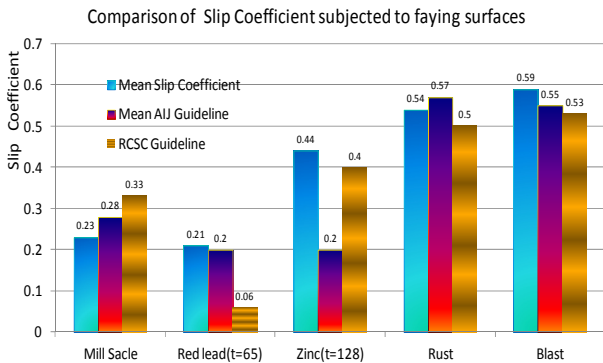


Fig. 3. Comparison of slip coefficient test results with other criteria.

#### 4. 장기축력 산정 실험결과

##### 4.1 다크로 피막 TS 고력볼트 이음부

다크로 피막 TS 고력볼트 이음부의 미끄럼 표면의 종류에 따른 장기축력이완율의 특성을 파악한다. 미끄럼표면 종류에 따른 다크로 피막 TS 고력볼트 2면 전단 이음부의 시험결과는 Table 4와 같다. 이 다크로 피막 TS 고력볼트 이음부는 체결이후 실내노출조건에 따라 수행되었기 때문에, 일일 편차가 발생하면서 축력이완이 진행되는 모습을 확인할 수 있다. 또한, 다크로 피막 TS 고력볼트 이음부의 광명단 페인트 표면 시험체 (R2KDFP)가 미끄럼 표면 도장 두께가 125 μm로 도막의 크리프현상이 발생했고, 따라서 축력변동이 컸다. 더불어, 체결된 고력볼트 자체도 다크로 피막처리 되어 체결력의 이완율이 더 큰 변수로 작용했기 때문이라고 판단된다.

밀 스케일 표면 이음부 (R2KDFM)의 168시간 장기축력 이완율은 평균 5.2%, 744시간은 평균 7.3%, 1,000시간 장기축력이완율은 평균 8.9% 으로 측정되었다. 일반적으로 다크로 피막 볼트 군에서는 온도변수, 현장변수에 일정한 경향을 보이지 않고, 불특정하게 축력변동이 발생했다. 이러한 요인이 표준볼트 축력 178 kN을 토크로 환산하여 체결할 때 생기는 토크계수와 온도 등의 변수에 의해 체결력이 달라졌기 때문이다.

광명단 페인트 시험체 (R2KDFP)의 168시간 장기축력 이완율은 평균 28.4 %, 744시간 이완율은 32.5%, 1,000시간 장기축력이완율은 평균 34.9 %로 미끄럼계수 산정시험과 마찬가지로 축력변화가 상당히 컸다. 광명단 페인트 시험체 (R2KDFP)의 시간-축력변화를 관계는 Fig. 4과 같다. 이 시험체는 항온, 항습조건이 아닌 일반 시험실 조건에

Table 4. Relaxation of dacro coated torque shear bolts

Specimen	Long term relaxation rate(%)					Surface Treatment	
	-	168 Hours (a)	744 Hours (b)	1,000 Hours (C)	(a)/(c)		(a)/(b)
R2KDFM	Average	5.20	7.3	8.90	58	71	Mill scale
	Standard Deviation	0.216	0.364	0.545			
R2KDFP	Average	28.38	32.59	34.93	81	87	Red lead paint
	Standard Deviation	2.767	2.839	2.880			
R2KDFZ	Average	10.2	10.8	12.85	85	95	Inorganic zinc
	Standard Deviation	1.833	2.056	1.823			
R2KDFR	Average	12.60	13.3	15.40	84	95	Rust
	Standard Deviation	0.775	0.760	0.300			
R2KDFB	Average	4.58	7.4	8.70	53	62	Blast
	Standard Deviation	0.525	0.534	0.560			

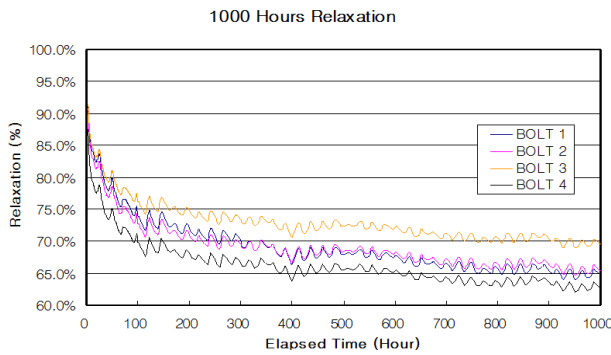


Fig. 4. relaxation of dacro coated torque shear bolts on inorganic zinc surface(R2KDFP).

서 축력변화를 측정했기 때문에, 일 기온 차에 의한 축력변화로 일일측정시간대 별로 축력의 오차를 관찰할 수 있었다. 168시간 경과 후의 장기축력이완율이 744시간의 87% 1,000시간의 81%를 초과하는 것으로 나타났다. 이 시험결과와는 축력이완율 자체는 다른 시험체보다 극도로 컸지만, 시간에 따른 축력저하 경향은 체결초기 1주일 이내 85%에 이른다는 국외문헌기록과 크게 다르지 않았다(Kulak, 2001).

무기질 아연도장 표면 시험체 (R2KDFZ, 도장두께 96 μm)의 168시간 장기축력이완율은 평균 10.2%이며, 744시간 경과후 평균 10.8% 1,000시간 경과후 평균 11.3%로 저하되었다. 또한, 초기축력이완율이 744시간 경과후의 95%, 1000시간경과 후의 85%로 분석되었다.

녹 표면 시험체 (R2KDFR)의 168시간 장기축력이완율은 평균 12.6%, 744시간 경과후 평균 13.3% 1,000시간 장기축력이완율은 평균 15.0%로 분석되었다. 또한, 초기축력이완율이 744시간 경과후의 95%, 1000시간경과 후의 84%로 무기질 아연도장표면의 시간경과 축력저하율과 동일한 경향을 보였다.

블라스트 표면 시험체 (R2KDFB)의 168시간 장기축력이완율은 평균 4.9%, 744시간 경과후 평균 7.4% 1,000시간 경과후의 장기축력이완율은 평균 9.2%로 분석되었다 또한, 초기축력이완율이 차지하는 비율은 744시간대비 62%, 1,000시간 대비 53%로 다른 실험결과와 많은 차이를 보였으며, 밀 스케일 표면 시험체와 오히려 유사한 경향을 보였다. 이런 이유는 접합부 표면상태가 실내노출조건이 아닌, 외부노출 환경조건이며 시험된 계절이 12월, 1월의 겨울철에 눈, 비, 외기노출여부에 따라 접합부의 블라스트 표면상태가 초기시험조건에 비해 녹 발생이 되는 등 많이 변경되었기 때문이다.

다크로 피막 TS 고력볼트 이음부의 장기축력이완 결과는 Fig. 5와 같다. 1,000시간 장기축력이완율은 미끄럼 표면

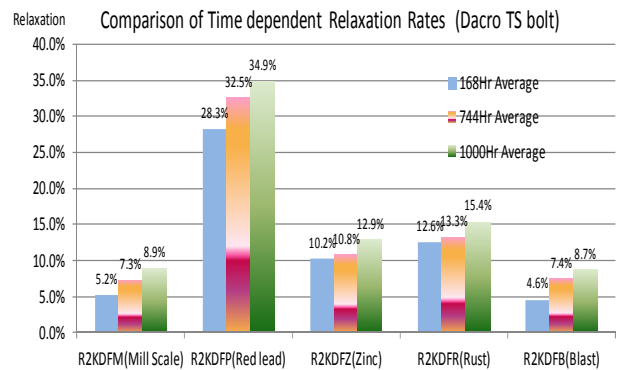


Fig. 5. Time dependent relaxation of dacro coated torque shear bolts.

종류에 따라 값이 달랐다. 또한, 대부분의 표면조건에서 체결 직후 초기에 축력변화가 크고, 일일 기온 차에 의해 축력 변화는 있었지만, 1,000시간 장기축력이완율은 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 ASTM A490 고력볼트 이음부

ASTM A490에 규정된 고력볼트의 기계적 물성은 국내의 육각 고력볼트와 강도 면에서 약간의 차이가 있을 뿐, 거의 유사한 값을 요구하고 있다. 그러나 재료시험을 통해 확인된 ASTM A490 고력볼트의 기계적 물성은 KS규격 육각 고력볼트와 비교하여, 연신율과 단면수축률에서 차이가 있었다. 미끄럼 표면종류에 따른 ASTM A490 고력볼트 2면 전단 이음부의 시험결과는 Table 5와 같다.

밀 스케일 표면 시험체 (R2AFM)의 168시간 장기축력이완율은 평균 8.4%, 744시간의 경우 평균 12.2% 1,000시간 장기축력이완율은 평균 13.6%로 나타났다. 이때 초기축력이완율의 점유율은 744시간에 69%, 1,000시간에 62%로 시간경과에 따른 축력이완의 경향이 다른 시험체와 많이 차이가 났다. 그러나, Table 4의 밀 스케일 시험체 (R2KDFM)와는 유사한 경향을 보였다.

광명단 페인트 시험체 (R2AFP)의 168시간 장기축력이완율은 평균 13.0%, 744시간은 평균 16.7% 1,000시간 장기축력이완율은 평균 18.7%로 분석되었고, 축력이완과정은 Fig. 6과 같다. 그러나, 이 결과는 Table 4의 다크로 고력볼트 이음부 시험체 R2KDFP(도장두께 125 μm) 평균 34.9% 대비 2배 이상 작았지만 10%이상 볼트 초기체결력 이상 감소되어서 설계기준을 만족하지 못하였다. 위와 같이 각각의 체결볼트의 종류, 표면에 도포된 광명단의 두께, 외기노출시기가 각각 변수로 작용하여 축력이완율에도 그 차이가 컸다.

무기질 아연도장 표면 시험체 (R2AFZ, 도장두께 96 μm)의 168시간 장기축력이완율은 평균 12.1%, 1,000시간

Table 5. Time dependent relaxation of ASTM A490 bolts

Specimen	Long term relaxation (%)					Surface Treatment	
	-	168 Hours (a)	744 Hours (C)	1,000 Hours (b)	(a)/(b)		(a)/(c)
R2AFM	Average	8.4	12.2	13.6	62	69	Mill scale
	Standard Deviation	2.120	2.210	1.168			
R2AFP	Average	13.0	16.7	18.7	70	78	Red lead paint
	Standard Deviation	0.497	1.602	0.586			
R2AFZ	Average	12.1	15.0	15.0	81	81	Inorganic zinc
	Standard Deviation	2.329	2.446	1.311			
R2AFR	Average	5.4	7.9	7.9	68	68	Rust
	Standard Deviation	0.263	0.278	0.283			
R2AFB	Average	7.0	9.7	10.5	66	72	Blast
	Standard Deviation	0.818	0.832	0.718			

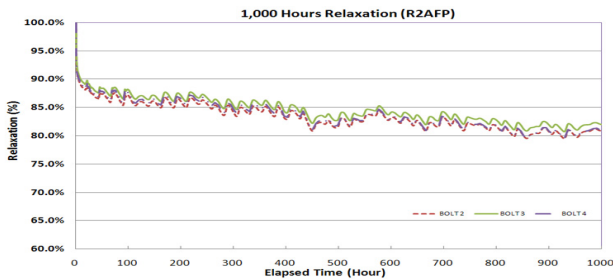


Fig. 6. relaxation of dacro coated torque shear bolts on red lead painted surface(R2AFP).

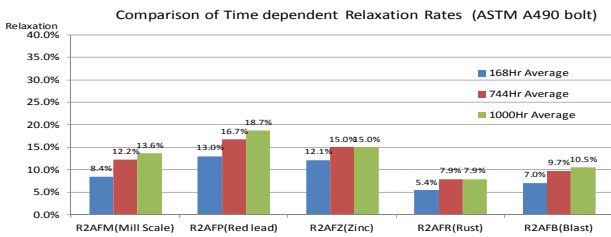


Fig. 7. Time dependent relaxation of ASTM A490 bolts.

경과후 장기축력이완율은 평균 15.0 %로 나타났다. 이때 초기 축력이완율의 점유율은 744시간과 1,000시간이 81%로 동일하게 측정되었다.

녹 표면 시험체 (R2AFZ)의 168시간 장기축력이완율은 평균 5.4 %, 744시간과 1,000시간 장기축력이완율은 평균 7.9 %로 동일하였다.

블라스트 표면 시험체 (R2AFB)의 168시간 장기축력이완율은 평균 7.0 %, 744시간 경과 후 9.7% 1,000시간 경과 후의 장기축력이완율은 평균 10.5 %으로 나타났는데, 대체적으로 무기질아연도장 표면시험체를 제외하고는 최초 축력이완율 대비 일정시간경과후의 저하율이 70% 내외로 작았다.

ASTM A490 고력볼트 이음부의 장기축력이완 결과를 종합해보면 Fig. 7 과 같다.

### 4.3 소 결

실내노출환경조건에서 수행된 다크로 피막 TS고력볼트 이음부는 1주일 초기 이완율이 전체이완율의 53~85%로, ASTM A490 고력볼트는 1주일 초기 장기축력이완율이 전체이완율의 62~81%로 나타났다.

고력볼트 접합부 표면처리 조건에 따른 장기축력이완에 대한 종합결과는 다음과 같다. 도막처리를 하지 않은 표면 (블라스트, 밀스케일, 녹)시험체의 결과는 168시간에 5.2~12.6%, 1,000시간에 7.9~15.4%의 이완율을 기록하였다.

도막처리를 한 표면(무기질아연도장, 광명단)의 이완율은 비도막 처리 표면보다 도장의 크리프현상 때문에 더 크게 나타났다. 무기질아연도장, 광명단페인트의 표면은 1주일 경과후인 168시간에 이미 고력볼트의 축력설계기준인 10%를 상회했고, 최대34.93%를 기록했다.

이 실험결과로부터 비도막 표면조건에서는 볼트종류나 표면처리조건에 상관없이 10%이내의 축력이완율을 기록

하였으나, 접합부 표면에 도장을 하는 경우에는 도장종류별, 도막두께별로 장기축력이완의 기준을 만들어 설계볼트축력 대비 10%를 상회하지 않는 범위 결정이 필요하다.

## 5. 결 론

1) 고력볼트 접합부 표면처리 조건에 따른 미끄럼계수 산정실험에 대한 종합결과는 아래와 같다.

미끄럼계수산정 시험에서 아연도금 표면 한국건축구조설계기준 0.45와 동등하며, 표면 녹과 슛 블라스트 표면은 기준을 상회하는 값을 보였지만, 밀 스케일 상태와 광명단 페인트와 같이 표면 거칠기가 없는 경우에는 미끄럼저항이 작아 미끄럼계수 0.23, 0.21 로 분석되었다. 따라서, 한국건축설계기준에서도 위와 같은 표면조건을 고려하여 미끄럼계수 추가 산정기준이 조속하게 필요하다.

2) 고력볼트 접합부 표면처리 조건에 따른 장기축력이완에 대한 종합결과는 아래와 같다.

가) 블라스트 표면, 밀스케일 표면, 녹 발생 표면과 같은 비도막 접합부에서 고력볼트의 장기축력이완 결과는 168시간에 5.2~12.6%, 1,000시간에 7.9~15.4%의 이완율을 기록하였다. 위 결과중에서 녹발생 표면조건과 밀 스케일 표면조건은 표면처리 정도에 따라 축력이완의 편차가 발생했고, 블라스트 표면처리조건이 가장 안정된 결과를 보였다.

나) 도막처리를 한 표면조건의 이완율은 비도막 처리 표면조건보다 도장의 크리프현상 때문에 더 크게 나타났다. 무기질아연도장(도막두께 96  $\mu\text{m}$ 인 경우) 표면과 광명단

페인트(도막두께 125  $\mu\text{m}$ 인 경우)는 이미 초기 1주일 이내 고력볼트 F10T M20에 적합한 설계볼트축력의 10%를 더한 표준볼트 축력의 여유범위를 넘어섰기 때문에, 접합부 내력에 문제가 발생할 수 있다.

위 실험결과로부터, 장기축력이완은 다양한 변수에 의해 장기축력이완이 발생되고 또한 축력이완율도 다르게 변화되고 있음을 확인하였다. 따라서 고력볼트 접합부의 장기축력이완현상을 고려할 때, 접합부 표면에 도장종류별, 도막두께별 10%이내의 허용 장기축력이완을 고려한 설계기준의 수립이 절대적으로 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Arch. Inst. of Japan, Guidebook on Design and Fabrication of High Strength Bolted Connections, p. 111, Arch. Inst. of Japan (2003).
2. ASTM F 2280-06, p. 150, ASTM International (2006).
3. K. Frank and J. Yura, FHWA/ RD-81/148, p. 29, US Department of Transportation, Federal Highway Association (1981).
4. G. L. Kulak, J. W. Fisher, and J. H. A. Struik, Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, p. 61, 2<sup>nd</sup> Ed., AISC Inc. (2001).
5. J. Yang and J. DeWolf, *J. Bridge Eng.*, **5**, 99 (2000).
6. J. H. Kim, *J. Arch. Inst. Korea*, **19**, 27 (2003).
7. H. S. Nah, H. J. Lee, K. S. Kim, J. H. Kim, and W. B. Kim, *Inter. J. Steel Struc.*, **9**, 123 (2009).
8. H. S. Nah, H. J. Lee, K. S. Kim, J. H. Kim, and W. B. Kim, *Inter. J. Steel Struc.*, **10**, 295 (2010).
9. Y. M. Park and T. R. Song, *J. Korean Steel Struc.*, **12**, 167 (2000).