

시간에 따른 F13T 고장력 볼트의 체결력 감소

Time Dependent Reduction of Clamping Forces of High Strength Bolt F13T

조재병* · 성택룡**

Jo, Jae Byung · Seong, Taek-Ryong

Abstract

Relaxation of high strength bolts was investigated. Block type and splice type specimens were fabricated with different types of bolts and different clamping lengths. Bolts were tightened to the specified torque. Clamping forces were measured through strain gauges installed on the shafts of bolts, while specimens were kept in a constant temperature and humidity. In all cases, ratio of clamping force reduction is less than 10%. Test results of different types of specimens and bolts and different clamping lengths were compared each other by using a simple model, which is suggested in this study for the estimation of bolt relaxation. The suggested model shows reasonably good agreements with test results for all cases. No difference is found between F13T and F10T bolts, but Dacro coated bolts shows higher relaxation than black bolts by approx. 30%. And also the comparison of test results shows that ratios of bolt relaxation become larger as clamping lengths of bolt shorter and the number of faying surfaces greater.

Keywords : F13T bolt, dacro bolt, relaxation

요 지

실험을 통해 고장력 볼트의 릴렉세이션을 측정하였다. 종류와 표면 처리가 다른 볼트를 사용하여 체결길이가 서로 다른 블록형태와 겹침이음형태의 시험체를 조립하였다. 항온항습실에서 시간 경과에 따라 볼트에 도입된 축력을 변형률 게이지를 통하여 측정하였다. 볼트축력의 감소율은 모든 시험체에서 10% 미만으로 나타났다. 결합 형태, 볼트종류, 체결길이 그리고 볼트의 표면 처리가 서로 다른 여러 경우에 대해 실험결과를 이 연구에서 제안한 릴렉세이션 추정 모델을 이용하여 비교, 검토하였다. 제안한 모델은 여러 경우에 대한 실험 결과와 모두 합리적으로 잘 합치하고 있다. F13T와 F10T 볼트사이의 차이점을 발견할 수 없으나 다크로 볼트의 최종 체결력 감소율은 일반 볼트보다 30% 정도 높으며, 또한 전체적으로 볼트 체결길이가 짧아짐에 따라, 전단면의 수가 증가함에 따라 높아지는 경향을 보여주고 있다.

핵심용어 : F13T 볼트, 다크로 볼트, 체결력 감소율, 릴렉세이션

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목표

국내의 경우 일부의 소수거더교 등 특별한 경우를 제외한 대부분의 강교량 현장 연결은 일반적으로 고장력 볼트 F10T- M22를 사용한 마찰접합으로 시공하고 있다. 최근에는 교량용 극후판 고강도 강재의 현장 연결부에 더 효율적으로 적용할 수 있도록 F10T보다 강도가 30% 증가된 F13T가 개발되었고(포항산업과학연구원 2001), 한국산업규격(KS B 1010, 2004)에도 등록되었다.

F13T 볼트를 강교량에 적용할 수 있기 위해서는 우선 생산, 공급 가능한 볼트가 KS 규격에서 요구하고 있는 F13T 볼트의 항복강도, 인장강도, 신율 등 일반적인 물성치를 만족하여야 한다. 또한 기존의 F10T 볼트가 지연파괴 현상이 발생하여 현재 사용이 금지된 점에서도 알 수 있듯이 고강도 볼트의

경우 강도가 증가할수록 지연파괴에 대한 안전성이 요구되고 있다. 이외에도 피로에 대한 성능도 보장되어야 할 것이며, 시간 경과에 따른 볼트 축력의 감소율도 평가되어야 한다.

고장력 볼트를 사용한 마찰접합의 성능은 이음부 전단면의 표면 상태에 따른 마찰계수뿐만 아니라 볼트의 체결력에 의해 결정된다. 볼트의 체결력은 볼트 체결 후 시간이 흐름에 따라 감소하는데, 그 원인으로는 볼트의 풀림, 각 요소 접촉면 사이 요철의 평탄화를 통한 밀착도 증가, 모재와 이음판 사이의 접촉면에 있는 도막의 크리프 변형, 기타 연결부의 릴렉세이션, 외력에 의한 부재의 단면 수축 등이 있다(Sedlacek 등 2001). 볼트 머리 또는 너트 밑의 접촉부와 볼트와 너트의 나사산 접촉부에는 볼트 축력으로 인해 마찰 저항이 유발된다. 한편 볼트 나사부는 볼트 축에 직각인 방향에 대해 일정한 경사각을 이루므로 볼트의 축력과 나사 경사각에 의한 나사 풀림 모멘트가 발생한다. 그러나 일반적

*정회원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : jbj@kyonggi.ac.kr)

**정회원 · 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : trseong@rist.re.kr)

으로 나사 경사각의 크기가 작으므로 이 풀림모멘트는 충분히 작아서 마찰 저항력을 극복할 수 없다. 외력에 의해 볼트의 접합부에 일정 크기 이상의 미끄러짐이 발생하여 볼트 풀림을 방지하고 있는 마찰 저항력이 거의 사라지게 되면 볼트가 풀릴 가능성도 있으나 정상적으로 설계, 시공된 강교량의 마찰접합부는 이러한 미끄러짐이 반복하여 발생 할 가능성이 없으므로 볼트풀림으로 인한 체결력 감소는 없는 것으로 알려져 있다(Hasselmann 등 2005).

체결력의 감소량에 영향을 주는 주요 요인으로 이음부에서 서로 접촉하게 되는 판과 판 사이의 접촉면 또는 외서와 판 사이의 접촉면의 상태를 들 수 있다. 후판을 볼트 접합한 일반적인 경우에는 접촉면의 도막 종류와 두께가 중요 변수가 된다. 접촉면에 도막층이 있는 경우에는 체결력에 의해 도막층의 크리프 변형이 상당기간에 걸쳐 발생하게 된다. 도장의 종류와 도막두께, 건조기간, 볼트의 직경과 개수, 그리고 접촉면의 수를 달리한 볼트축력 이완 측정시험에서는 (Katzung 등 1996) 최종 크리프가 10%인 폴리머 도막의 경우 약 3일, 30%인 경우 최소 14일 소요되었고, 예폭시 계열의 징크말 도장보다는 알키드수지 또는 아크릴수지 계열의 도막이 더 많은 크리프 변형이 발생하였으며, PVC계열은 한층 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 세계 각국의 기준에서는 고장력볼트를 이용한 마찰접합부의 접촉면에 허용하는 도장의 종류와 도막 두께에 대해 일정한 조건을 만족하도록 규정하고 있다. 국내에서도 도장을 하지 않거나 도장을 할 경우에는 일정한 조건을 만족하는 무기징크리치 도장을 하도록 규정하고(도로교시방서, 2005) 있다.

그 동안 발표된 시간 경과에 따른 고장력 볼트의 축력 변화에 대한 연구 결과로는 도막의 종류 및 두께, 조임 순서, 체결력의 변화, 볼트구멍의 크기, 볼트의 방청 처리 등 다양한 조건으로 접합한 마찰이음의 볼트를 대상으로 시험을 통해 볼트의 변형률을 측정하고 분석한 것이 있다. 지금까지의 연구는 F10T급, 또는 F8T급 고장력 볼트를 사용한 것이어서 새로 개발된 F13T 고장력 볼트에 대한 축력의 이완에 대한 평가가 요구된다. 또한 아직까지 볼트의 체결길이와 이음의 전단면 개수가 체결력 감소율에 미치는 영향에 대해 연구된 결과가 없다. 따라서 본 연구에서는 F13T 볼트를 대상으로 체결길이와 전단면의 개수를 달리한 경우에 대해 볼트축력의 감소율에 대한 연구를 수행하였다.

1.2 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 F13T 볼트의 시간 경과에 따른 체결력의 변화를 시험을 통하여 측정하고, 그 결과를 분석하였다. 볼트의 종류에 따른 비교를 위해 F10T 볼트를 사용한 경우,

표 1. F13T 볼트의 인장 시험결과

호칭	볼트길이 (mm)	인장하중(kN)		인장강도(MPa)		시험체 개수
		평균값	표준편차	평균값	표준편차	
M20	70~120	332.3	1.7	1356	7.0	9
M22	60~140	418.8	4.1	1382	13.5	18

그리고 볼트 이음면의 수와 체결길이 등이 체결력 감소율에 미치는 영향을 검토하기 위해 2면 전단이음 형태로 겹쳐 놓은 판을 관통하여 볼트를 체결한 시험체(이하 이음판시험체), 하나의 블록을 관통하여 볼트를 체결한 시험체(이하 블록시험체), 체결 길이가 서로 다른 경우 등에 대해 시험을 수행하였다. 시험 결과를 분석하기 위해 체결력 감소율을 추정하는 모델을 제시하였고, 시험 결과를 이용하여 추정모델의 미지수 값을 추정하였다. 측정된 감소율과 추정모델을 이용하여 계산한 값의 비교를 통하여 추정 모델의 유효성을 검토하였다. 또한 추정 모델을 이용하여 체결력 감소에 영향이 미치는 주요 요소와 볼트 이음부의 설계 및 시공시 주의가 필요한 경우를 제시하였다.

2. 실험 계획 및 시험체 제작

2.1 재료

본 실험에 사용하기 위해 생산한 F13T 볼트에 대한 인장 시험결과는 다음 표 1과 같다. KS B1010에서 요구하고 있는 인장강도는 1300~1500 MPa이며, M20과 M22에 대해 인장하중은 각각 318.2 kN, 394.4 kN이다. 인장시험결과 각각 평균 332.2 kN, 418.8 kN 표준편차 1.7과 4.7로써 모두 KS B1010의 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

2.2 시험체 형상 및 치수

볼트 축력이완 실험에 사용한 시험체 형상은 다음 그림 1과 같으며, 시험체의 판 두께 및 볼트의 규격과 시험체의 개수는 표 2와 같다.

2.3 시험체 제작

볼트의 체결력 이완은 강종과는 관계가 없을 것으로 예상되므로 본 실험에서는 쉽게 구할 수 있는 SM490 강재를 시험체 제작에 사용하였다. F13T와 상대적인 비교를 하기 위한 시험용 볼트로 F10T는 M22 육각볼트를 선정하였고, F13T 볼트는 M22, TS(torque-shear)볼트를 사용하였다. TS 볼트의 기계적 성능은 육각볼트에 대한 규격과 동일한 기준을 적용하고 있고, 설계기준(도로교설계기준, 2005)에서도 TS볼트와 육각볼트를 동일하게 취급하고 있으므로 TS볼트에

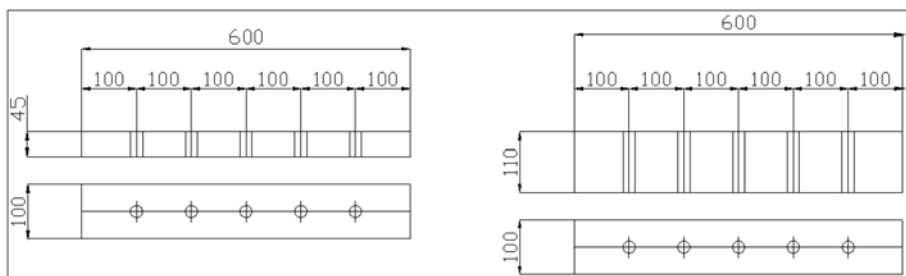


그림 1. 시험체 형상 및 크기

표 2. 시험체 규격 및 개수

시험체 기호	시험체 종류	시험체 두께 (mm)	볼트종류	볼트표면	볼트길이	측정 개소
F10T-SP44-DC	이음판	12+20+12 = 44	F10T	다크로	L85	3
F13T-SP44-NC	이음판	12+20+12 = 44	F13T	일반	L85	2
F13T-SP44-DC	이음판	12+20+12 = 44	F13T	다크로	L85	3
F10T-SP110-DC	이음판	30+50+30 = 110	F10T	다크로	L150	3
F13T-SP110-NC	이음판	30+50+30 = 110	F13T	일반	L150	3
F13T-SP110-DC	이음판	30+50+30 = 110	F13T	다크로	L150	3
F10T-BL45-DC	블록	45	F10T	다크로	L85	2
F13T-BL45-DC	블록	45	F13T	다크로	L85	3
F13T-BL110-DC	블록	110	F13T	다크로	L150	3

표 3. 도장

구분	내용
도장 시스템 명	내후성 중방식 하도
도료제품명	슈퍼징크 190BG
건조도막 중 아연함유량	90% 이상 (기준 : 80% 이상)
목표 도막두께	모재 75 μm ; 이음판 50 μm

표 4. 도막두께 측정 결과

항목	기준	평균의 95% 신뢰구간
모재 건조도막 두께	75 μm 이상	82.28~85.28 μm
이음판 건조도막 두께	50 μm 이상	55.86~57.37 μm
접촉면 1면당 최소 건조도막 두께	30 μm 이상	55.86~57.37 μm
접촉면의합계 건조도막두께	90~200 μm	138.14~142.65 μm

대한 실험결과는 육각볼트의 경우에도 동일하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 실험에 사용된 볼트는 표면처리를 하지 않은 흑볼트와 현재 거의 모든 교량용 볼트에 적용하고 있는 다크로 볼트를 사용하였다. 실험에 사용된 볼트의 토크 계수 값은 F10T의 경우 0.125, F13T의 경우 0.129로 도로 교표준시방에 규정된 값, 0.11~0.15를 만족하고 있다.

접촉면의 표면처리는 도로교표준시방서 규정에 따라 교량의 방식처리에 일반적으로 사용되는 블라스팅 처리(SSPC SP-10)와 표 3과 같은 무기질 아연말 프라이머를 도포하였다. 시험체 표면의 도막두께를 총 928개소에서 측정하여 통계 처리한 결과는 다음 표 4와 같다.

2.4 체결력 검증

체결력 검증을 위해 F10T-M22 다크로 볼트 4개, F13T-M22 일반볼트 4개, F13T-M22 다크로 볼트 4개에 대해 볼트 축력 측정시험을 수행하였다. 볼트 축력의 도입은 토크 제어법으로 실시하였으며, 표준볼트도입축력은 F10T는 220 kN, F13T는 286 kN으로 설정하였다. 볼트 몸체부에는 대칭이 되도록 2개의 변형률 게이지를 부착하였고, 하중계에 볼트의 축력이 걸리도록 볼트를 설치하고 너트에 토크를 가하여 볼트를 조였다(그림 2. 참조).

하중계에 전달된 볼트축력과 볼트 몸체부에 부착한 변형률 게이지의 값을 회귀분석하면 다음 표 5와 같다. 볼트의 체결력은 몸체부에서 측정된 변형률을 이용하여 높은 신뢰도

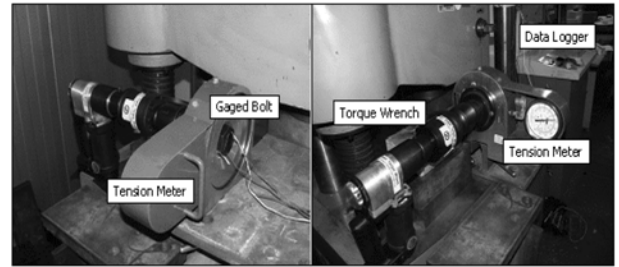


그림 2. 볼트 축력 실험

표 5. 볼트 축력 추정식

시험체	회귀분석식(°)	R ²
F10T 일반 볼트	$Y = 0.079 \times x$	0.971
F13T 일반 볼트	$y = 0.078 \times x$	0.971
F13T 다크로처리 볼트	$y = 0.078 \times x$	0.974

(주) : y = 축력(kN); x = 변형률(10⁻⁶)

로 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 시험체의 볼트 체결력 값으로 볼트의 몸체부에서 측정된 변형률과 위의 관계식을 이용하여 산출한 값을 사용하였다.

3. 실험 결과

볼트 체결 직후부터 1개월 이상 시간의 경과에 따른 볼트의 축력을 측정하였다. 시험체는 온도와 습도의 영향을 받지 않도록 시험시작 1일 전부터 전 시험기간 동안 항온항습실에 보관하였다. 변형률 측정 결과로부터 축력의 감소량을 산출하여 초기 볼트 축력에 대한 비율로 환산하고, 매 경과일(day)마다 표시한 점을 그래프로 나타내면 다음 그림 3과 같다.

위의 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 3개의 판을 겹쳐놓은 형태로 제작한 이음판시험체에 비하여 하나의 블록에 볼트를 체결한 블록시험체의 경우에 축력감소가 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 이음판시험체의 경우 접촉면의 불균일한 높이와 도막의 크리프 등으로 시간 경과에 따른 축력 감소가 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 체결길이가 짧은 경우에 축력 감소가 더 큰 것은 접촉면에서 발생한 변형률이 동일하더라도 볼트 축력의 감소에 미치는 영향이 더 크기 때문일 것으로 유추된다. 각 경우의 손실률-경과기간 곡선으로부터 추세선을 이용하여 경과기간 1년에 대한 손실률을 구하면 표 6과 같다. 여러 문헌에 나타난 실험 자료에

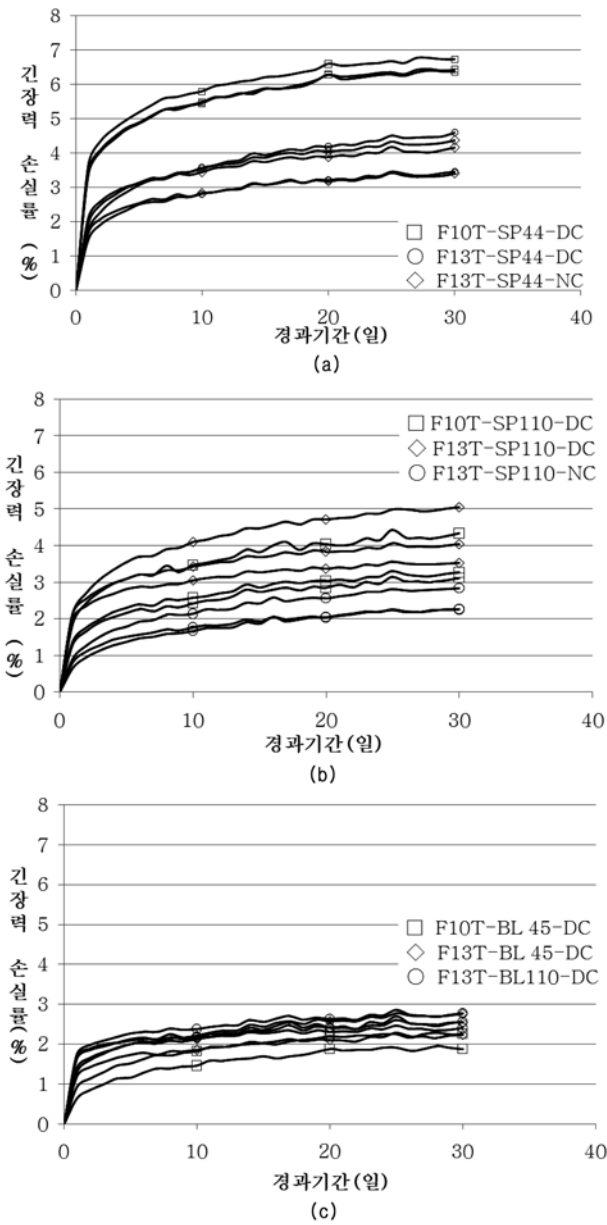


그림 3. 볼트 축력 이완 : (a) 이음판시험체 $t=12+20+12=44$ mm, (b) 이음판시험체 $t=30+50+30=110$ mm, (c) 블록시험체 $t=45$ mm, 110 mm

서는(나환선 등 2008, 이현주 등 2008, Shi 등 2005, 이승용 등 1999, Katzung 등 1996) 30일 이내에 거의 모든 손실이 완료되는 것으로 나타나 있다. 본 실험에서는 이음판 시험체의 경우 50일 이후에도 손실률이 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나 실험실의 사정으로 인하여 볼트 축력 이완 실험을 계속할 수 없었다. 본 연구에서는 편의상 추세를 1년까지 연장시켜서 표 6과 같은 볼트축력 손실률의 실험값을 구했으며, 이 값들을 사용하여 볼트 축력의 이완에 대한 비교, 분석을 수행하였다.

4. 실험결과 분석

4.1 볼트축력 손실률 추정 모델

볼트 체결 후 시간 경과에 따라 체결력 감소와 직결되는 변형량은 볼트의 종류와 품질이 동일하고, 모재와 이음판의 재질 및 표면처리 조건이 동일하다면 다음과 같이 3요소에

서 발생하는 변형량을 합한 값으로 추정할 수 있다. 볼트의 체결길이에 따른 영향에 볼트 직경의 영향을 같이 고려할 수 있는 방안도 있겠으나 변수가 증가하면 이를 입증하기 위한 시험체의 개수가 증가(볼트의 직경이 다른 시험체 추가)하게 되는 어려움이 있으므로 본 연구에서는 제외시켰다.

$$\Delta L_c = \Delta L_w + n_s \cdot \Delta L_s + \varepsilon_B \cdot L \quad (1)$$

여기서,

ΔL_c : 시간경과에 따른 볼트 체결길이 총 변화량

L : 초기의 볼트 체결길이

ΔL_w : 와셔의 접촉부분, 볼트와 너트의 나사산 부분에서 시간 경과에 따라 발생하는 변형량(이음부의 전단면 수와 체결길이에 무관함)

ΔL_s : 이음부의 1개 전단면(이음판 사이의 접촉면)에서 시간 경과에 따라 발생하는 변형량

n_s : 전단면의 개수

ε_B : 체결길이 구간에서 시간 경과에 따라 발생하는 볼트 몸체부분의 변형률 평균값(ΔL_w 와 ΔL_s 를 제외한 기타 효과)

따라서 볼트축력의 손실률은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$R_{cal} = \frac{\Delta L_c}{\varepsilon_p \cdot L} = \frac{1}{L} \left(\frac{\Delta L_w}{\varepsilon_p} + n_s \cdot \frac{\Delta L_s}{\varepsilon_p} \right) + \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_p} = \frac{1}{L} (x + n_s \cdot y) + z \quad (2)$$

여기서 R_{cal} : 볼트축력의 손실률 계산값 (%)

ε_p : 체결로 인한 볼트 축의 초기 변형률

미지수 x, y, z 는 실험결과를 이용하여 최소자승법으로 구할 수 있다. 즉 각각의 계산값, R_{cal} 과 실험값, R_{exp} 의 차이를 제공하여 모두 합한 값이 최소가 되기 위해서는 다음의 연립방정식을 만족해야한다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k \frac{1}{L_i^2} & \sum_{i=1}^k \frac{n_{S,i}}{L_i^2} & \sum_{i=1}^k \frac{1}{L_i} \\ \sum_{i=1}^k \frac{n_{S,i}}{L_i^2} & \sum_{i=1}^k \frac{n_{S,i}^2}{L_i^2} & \sum_{i=1}^k \frac{n_{S,i}}{L_i} \\ \sum_{i=1}^k \frac{1}{L_i} & \sum_{i=1}^k \frac{n_{S,i}}{L_i} & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k \frac{R_{exp,i}}{L_i} \\ \sum_{i=1}^k \frac{R_{exp,i} \cdot n_{S,i}}{L_i} \\ \sum_{i=1}^k R_{exp,i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

표 6의 실험값을 식 (3) 대입하여 얻은 다음의 연립방정식을 풀면 식 (4)와 같은 볼트 체결력 손실률 계산식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0.00759 & 0.00975 & 0.40202 \\ 0.00975 & 0.19504 & 0.52727 \\ 0.40202 & 0.52727 & 25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.27611 \\ 3.64454 \\ 131.6 \end{bmatrix}$$

$$R_{cal} = \frac{29.86 + 99.12 \cdot n_s}{L} + 2.69(\%) \quad (4)$$

이 식을 사용하여 각 시험체에 대한 손실률 계산값을 구하면 다음 표 7과 같다.

4.2 실험 결과와 추정모델의 비교

체결력 손실률에 대한 실험값과 계산값의 비(R_{exp}/R_{cal})를 볼트의 체결길이에 시험체의 형태(이음판시험체 또는 블록시

표 6. 볼트축력 손실을 실험값

시험체 번호	시험체 종류	볼트종류	볼트 표면	체결길이 L (mm)	전단면 수 n_S	손실율 R_{exp} (%)
F10T-SP44-DC-1	이음판	F10T	다크로	44	2	8.5
F10T-SP44-DC-2	이음판	F10T	다크로	44	2	9.0
F10T-SP44-DC-3	이음판	F10T	다크로	44	2	8.5
F13T-SP44-DC-1	이음판	F13T	다크로	44	2	8.4
F13T-SP44-DC-2	이음판	F13T	다크로	44	2	8.9
F13T-SP44-DC-3	이음판	F13T	다크로	44	2	8.4
F13T-SP44-NC-1	이음판	F13T	일반	44	2	4.9
F13T-SP44-NC-2	이음판	F13T	일반	44	2	6.5
F10T-SP110-DC-1	이음판	F10T	다크로	110	2	6.0
F10T-SP110-DC-2	이음판	F10T	다크로	110	2	4.8
F10T-SP110-DC-3	이음판	F10T	다크로	110	2	4.4
F13T-SP110-DC-1	이음판	F13T	다크로	110	2	7.1
F13T-SP110-DC-2	이음판	F13T	다크로	110	2	5.3
F13T-SP110-DC-3	이음판	F13T	다크로	110	2	4.4
F13T-SP110-NC-1	이음판	F13T	일반	110	2	4.1
F13T-SP110-NC-2	이음판	F13T	일반	110	2	3.2
F13T-SP110-NC-3	이음판	F13T	일반	110	2	3.4
F10T-BL45-DC-1	블록	F10T	다크로	45	0	3.4
F10T-BL45-DC-2	블록	F10T	다크로	45	0	3.0
F13T-BL45-DC-1	블록	F13T	다크로	45	0	3.4
F13T-BL45-DC-2	블록	F13T	다크로	45	0	4.0
F13T-BL45-DC-3	블록	F13T	다크로	45	0	2.9
F13T-BL110-DC-1	블록	F13T	다크로	110	0	2.4
F13T-BL110-DC-2	블록	F13T	다크로	110	0	3.2
F13T-BL110-DC-3	블록	F13T	다크로	110	0	3.5

표 7. 볼트 체결력 손실을 계산값

체결길이 L (mm)	전단면수 n_S (ea)	손실율(계산) R_{exp} (%)
44	2	7.88
110	2	4.77
45	0	3.36
110	0	2.96

험체)에 따라 구분하여 나타내면 그림 4(a)와 같다. 전체적으로 R_{exp}/R_{cal} 값은 체결길이와 시험체의 형태에 관계없이 평균 1.0을 중심으로 일정한 범위에 분포되어 있어 제 4.1절에서 제안한 체결력 손실을 추정모델의 적용 타당성이 있는 것으로 평가된다. 볼트의 종류에 따른 손실률의 차이를 검토하기 위해 R_{exp}/R_{cal} 값을 F10T와 F13T의 경우로 각각 구분하여 나타내면 그림 4(b)와 같다. F10T 볼트를 사용한 시험체가 많지 않으나 F13T 볼트의 경우와 거의 같은 분포 범위를 보이고 있어 볼트의 종류에 따른 볼트 체결력 손실률의 차이는 거의 없을 것으로 판단된다. 그림 4(c)는 볼트 표면을 다크로 처리한 경우와 별도의 표면처리를 하지 않은 일반 볼트의 경우를 구분하여 나타낸 것이다. 손실률의 평균값을 비교하면 일반볼트는 다크로 처리한 볼트의 경우보다 약 30% 작은 것으로 나타났다.

4.3 체결력 감소를 예측

일반 볼트는 제 4.2절에서 기술한 바와 같이 손실률이 작게 나타나므로 제외시키고, 다크로 처리한 볼트의 경우에 대해서 제 4.1절에서 제시한 방법으로 다시 손실률 계산식을 구하면 다음 식 (5)와 같다.

$$R_{cal} = \frac{12.45 + 117.07 \cdot n_S}{L} + 3.04 \quad (\%) \quad (5)$$

볼트 체결길이에 따른 R_{cal} 과 R_{cal} 값을 시험체 종류별로 구분하여 그래프로 나타내면 그림 5와 같다. 실험에서 측정된 손실률 값과 추정모델에 의한 계산값이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 블록시험체의 체결력 손실률은 이음판시험체의 경우보다 작으며 볼트의 체결길이에 따른 손실률의 차이도 매우 작은 것으로 나타났다. 그러나 전단면의 수가 2개인 이음판시험체의 경우에는 볼트의 체결 길이가 작아질수록 손실률이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 추정 모델을 사용하여 2면 전단이음의 경우와 채움판 1개를 사용한 2면 전단이음의 경우에 대해 각각 체결력 손실률을 계산하면 볼트의 체결길이가 각각 35 mm 이하, 52 mm 이하인 경우에는 손실률이 10%를 초과하는 것으로 나타났다. 이음판 접촉면의 표면처리 상태에 따라 손실률이 달라지지만, 특히 채움판 등을 사용하여 전단면의 수가 많고 볼트의 체결길이가 짧은 경우에는 설계와 시공 단계에서 볼트 체결

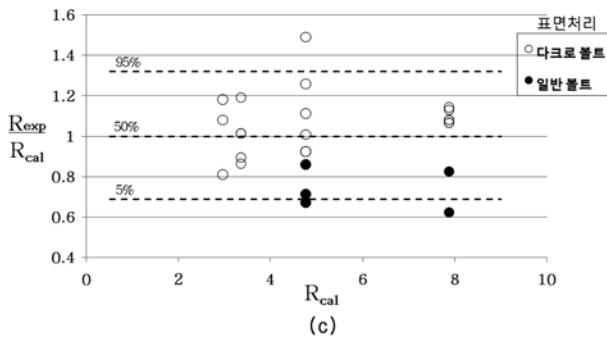
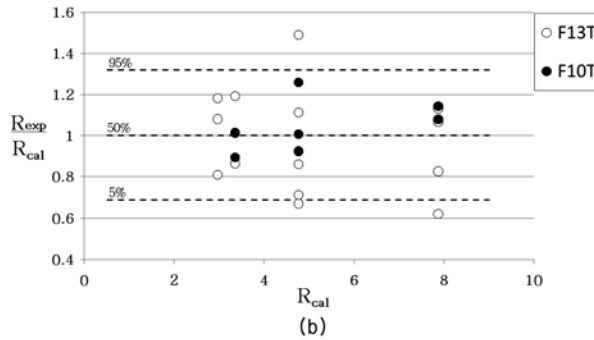
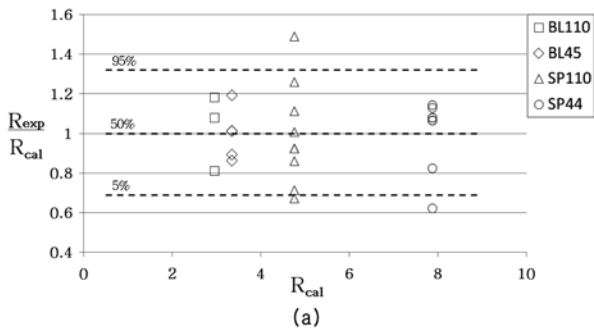


그림 4. 볼트 표면 처리별 손실률 실험값과 계산값의 비: (a) 시험체 종류; (b) 볼트 등급; (c) 표면처리

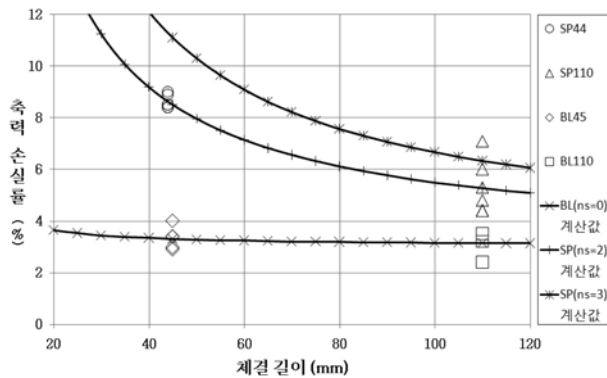


그림 5. 체결길이에 따른 볼트 축력의 손실률

력의 손실에 대해 사전에 검토하고 주의할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4.4 유효성 고찰

볼트 축력손실률 추정모델은 본 논문에서 독창적으로 제안하고, 유효성을 검증하기 위해 실험결과와 비교하였다. 아직까지 국내외에서 볼트 축력의 손실률 계산식이 제시된 것이 없는데, 그 이유는 다음과 같을 것으로 추정된다.

(1) 지금까지 볼트이음은 주로 체결길이가 30 mm~60 mm 이고, 2면 전단이음에 사용되었으므로 모든 경우에 공통적으

로 체결력 10%를 고려하여 사용하는데 큰 문제점이 없었다.

(2) 최근에 극후판(판두께 100 mm까지)이 사용되기 시작하면서 볼트 체결길이가 더 큰 경우도 있으며, 제작 후 수정작업이 어려워 채움재를 사용하거나, 이음판이 두꺼운(24 mm초과) 경우에는 얇은 판 2개를 겹쳐서 사용해야 함에 따라 전단면의 개수가 증가하게 되는 등 다양한 경우가 발생하게 되었다.

(3) 접합면의 표면처리가 손실률에 큰 영향을 미치는데, 동일한 표면처리 조건으로 체결길이와 전단면의 수를 달리한 시험을 수행하려면 동시에 시험을 수행하여야 할 시험체 개수가 많아지고, 시험기간이 오래 걸리며, 항온항습 공간이 필요하므로 어려움이 있다.

위의 손실률 계산식 (5)의 범용적 유효성에는 한계가 있다. 손실률은 접합면의 표면처리상태와 볼트의 품질, 그리고 볼트의 표면처리 상태 등에 따라 많은 영향을 받을 것으로 추정된다. 기존 문헌의 시험결과는 시험체의 표면처리가 다르고, 그 다른 정도를 정량적으로 다룰 수 없기 때문에 본 논문에서 자료로 사용하거나 비교할 수 없었다. 본 논문에서 유도한 손실률 계산식은 본 논문 2.3에 기술된 경우와 유사한 볼트 이음부에 대해서는 적용 가능하지만 범용으로 사용하기는 어려울 것으로 판단된다. 그러나 다양한 경우에 대한 시험자료가 쌓인다면 통계적으로 분석하여, 규정된 품질관리요건을 만족한 경우에 범용으로 사용할 수 있는 손실률 계산식을 만드는 것도 가능할 것으로 예상된다.

5. 결 론

볼트의 종류, 볼트 표면처리, 시험체의 종류, 볼트 체결길이 등이 서로 다른 시험체에 대하여 시간 경과에 따른 볼트 체결력의 변화를 시험을 통하여 측정하고, 그 결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험에서 측정된 손실률은 모든 경우에 10% 미만인 것으로 나타났다.
2. 제시한 손실률 추정모델에 의한 계산값은 실험에서 측정된 손실률 값과 잘 일치하고 있어 적용 타당성이 있는 것으로 평가된다.
3. 볼트 종류(F13T, F10T)에 따른 체결력 손실률의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.
4. 일반볼트는 다크로 처리한 볼트의 경우보다 손실률의 평균값이 약 30% 작은 것으로 나타났다.
5. 블록시험체의 체결력 손실률은 이음판시험체의 경우보다 작으며 볼트의 체결길이에 따른 손실률의 변화도 매우 작은 것으로 나타났다.
6. 이음판시험체는 볼트의 체결 길이가 작아질수록 손실률이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.
7. 손실률 추정 모델로 검토한 결과 2면 전단이음의 경우와 2면 전단이음에 채움판 1개를 삽입한 경우에 볼트의 체결 길이가 각각 35 mm 이하, 52 mm 이하이면 손실률이 10%를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 채움판 등을 사용하여 이음부에서 판의 개수가 많고 볼트의 체결길이가 짧은 경우에는 설계와 시공 단계에서 볼트 체결력의 손실에 대해 사전에 검토하고 품질관리에 주의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김강석, 나환석, 이현주, 김진호(2008) TS고력볼트 마찰접합부의 구멍크기에 따른 장기 축력이완 평가, **한국강구조학회 학술대회 발표집**, 한국강구조학회, pp. 160-163.
- 이현주, 나환선, 김강석, 김진호(2008) ASTM A490 고력볼트의 체결하중 변화에 따른 장기축력이완 평가. 2008년 **한국강구조학회 학술대회 발표집**, 한국강구조학회, pp. 164-167.
- 이승용, 경갑수, 장동일(1999) 방청처리한 고장력 볼트이음부의 릴렉сей션 및 미끄러짐 거동에 관한 실험적 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제1-5호, pp. 697-705.
- 포항산업과학연구원(2001) F13T급 고력볼트 제품의 기계적 성능 및 체결성능 평가 (I).
- 한국도로교통협회(2005) 도로교설계기준.
- 한국도로교통협회(2005) 도로교표준시방서.
- KS B 1010(2004) 마찰접합용 고장력 6각볼트·6각너트·평와서의 세트.
- Azuma, K., Kanno, R., Uno, N., and Hirai, K. (2005) Performance of Super High-Strength Bolts with an Ultimate Strength of 1400 N/mm² Class, 3rd International Symposium on Steel Structures, Seoul, Korea.
- Hasselmann, U. and Valtinat, G. (2005) Geschraubte Verbindungen, *Stahlbau*, Ernst & Sohn, pp. 378-380.
- Katzung, W., Pfeiffer, H., and Schneider, A. (1996) Zum Vorspannkraftabfall in planmäßig vorgespannten Schraubenverbindungen mit beschichteten Kontaktflächen. *Stahlbau*, Ernst & Sohn, Vol. 65, Heft 9, pp. 307-311.
- Sedlacek, G. and Kammel, C. (2001) Zum Dauerverhalten von GV-Verbindungen in verzinkten Konstruktionen - Erfahrungen mit Vorspannkraftverlusten. *Stahlbau*, Ernst & Sohn, Vol. 70, Heft 12, pp. 917-926.
- Shi, G., Shi, Y., Wang, Y., and Li, S. (2005) Monitoring on tightening sequences and strain relaxation of high strength bolts. 3rd International Symposium on Steel Structures, Seoul, Korea, pp. 458-464.

(접수일: 2008.11.7/심사일: 2009.2.10/심사완료일: 2009.2.10)