

Torque Shear형 고장력 볼트 이음부의 피로거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fatigue Behavior of Torque Shear Type High Tension Bolted Joints

장 동 일¹⁾ · 이 성 욱²⁾
By CHANG, Dong Il and Lee, Sung Uk

ABSTRACT : The fatigue test under the constant amplitude repeated loading is performed to investigate the fatigue behavior of the Torque Shear type high tension bolted joint which is able to manage the axial force uniformly. From the test results, it's known that the reduction of the axial force of T/S bolt followed by the elapsed time is similar to that of the high tension bolts. The difference of relaxation is not occurred according to the position of bolts, the size of the introduced axial force but the effect of the variation of temperature is large. In the reduction of the axial force followed by the cumulation of the fatigue load, the outer bolt is larger than the inner bolt. This result depends on the difference in the distribution of the non-slip zone. The variation of the surface roughness affects the slip and the reduction of the axial force.

1. 서 론

최근 강구조물의 현장 이음방식으로 널리 사용되고 있는 고장력 볼트 마찰이음은 높은 축력을 도입하여 체결하고 또한 체결력을 장기간 유지하는 것을 기본 조건으로 하고 있다¹⁾. 따라서 볼트 체결시 정확한 축력의 도입과 체결 후 축력의 관

리가 중요한 문제로 된다. 그러나 실제로 현장에서 정확한 토크계수를 도입하고 관리하는 것에는 많은 어려움이 따르고 있어, 이러한 문제점을 보완하여 일정 토크로 체결이 가능한 Torque Shear형 고장력 볼트(이하 T/S 볼트)가 개발되어 사용되어 오고 있다.

T/S 볼트는 소정의 도입 축력에 이르면 볼트

1) 정희원 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

2) 정희원 : 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

표 1. 화학성분 및 물리적 성질

강재 종류	화학성분(%)					물리적 성질			
	C	Si	Mn	P	S	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	신장율 (%)
SWS 490B	0.16	0.38	1.23	0.012	0.009	368.3	529.2	205274.5	23.0

끝부분의 핀테일(Pintail)이 파단되어 일정한 체결 토크가 도입되므로 고장력 볼트보다 축력의 관리가 용이하고, 체결시간을 절약하여 공기 단축이 가능하며, 토크 렌치에 의한 체결 검사의 생략이 가능한 장점을 갖고 있다.²⁾ 그러나 T/S 볼트에 도입되는 실제 축력, 시간경과에 따른 릴렉세이션 문제, 미끄러짐 내력 등에 관한 연구가 미흡하고, 동적하중을 받는 교량 구조물에서의 사용성을 검토하기 위한 반복하중에 의한 피로시험을 통하여 피로거동 및 이에 따른 축력의 감소, 피로균열 발생 등의 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 정적시험, 릴렉세이션 시험과 동적하중에 의한 피로시험을 실시하여 T/S 볼트 마찰 이음부의 미끄러짐 하중과 도입축력의 감소 문제, 그리고 피로거동을 전반적으로 분석하여 향후 T/S 볼트 이음에 대한 시방기준 작성의 기초자료를 제시함을 목적으로 하였다.

2. 시험편 및 시험방법

T/S 볼트 이음 시험편의 모재와 이음판은 포항제철에서 생산하고 있는 용접 구조용 강재인 SWS 490B로서, 그 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

T/S 볼트는 현재 강교량의 현장 조립시 주로 사용되는 M22(F10T)를 사용하였으며, 볼트의 기계적 성질 및 화학성분, 너트 및 와셔의 화학성분은 각각 표 2 및 표 3과 같다.

표 2. T/S 볼트의 물리적 성질

볼트 종류	물리적 성질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	단면 수축율 (%)	신장률 (%)
M22(F10T)	1010	1069	66.0	20.0

표 3. T/S 볼트, 너트 및 와셔의 화학성분 및 경도

종류	화학성분(%)						경도 (HRC)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	
볼트	0.19	0.24	0.74	0.013	0.004	0.72	33.5
너트	0.46	0.24	0.71	0.013	0.016	-	25.5
와셔	0.44	0.19	0.72	0.016	0.004	-	41.5

T/S 볼트 시험편은 그림 1과 같이 폭 80mm, 두께 9mm로 하여, 양측면에 두께 9mm의 이음판을 붙여 제작하였으며, 볼트 구멍은 직경 22mm에 1.5mm의 여유를 두어 23.5mm로 하였다.

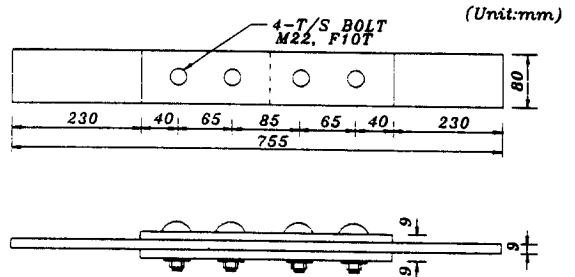


그림 1. 시험편의 형상 및 치수

T/S 볼트 마찰이음 시험편의 수는 총 9개로, 이 중에서 정적시험은 1개, 피로시험은 8개에 대해 실시하였으며, 피로시험편 중에서 2개에 대해서 릴렉세이션을 측정하였다. 각 시험편의 단면적 및 시험종류는 표 4와 같다.

한편, 각 시험편의 모든 볼트 축에 사진 1과 같이 변형률게이지를 부착하여 릴렉세이션 및 반복하중에 따른 축력의 감소를 측정하였으며, 미끄러짐 하중은 그림 2와 같이 시험편 양측에 변위 변환기를 설치하여 모재와 이음판의 상대 변위를 측정하였다.

표 4. 시험편의 종류, 단면적 및 시험종류

시험편 번호	총단면적 (mm ²)	순단면적 (mm ²)	시험종류		
			정적시험	릴렉세이션 시험	피로시험
TS1	720.0	508.5	×	○	○
TS2	720.0	508.5	×	○	○
TS3	720.0	508.5	×	×	○
TS4	720.0	508.5	×	×	○
TS5	720.0	508.5	×	×	○
TS6	720.0	508.5	×	×	○
TS7	720.0	508.5	×	×	○
TS8	720.0	508.5	×	×	○
TS9	720.0	508.5	○	×	×

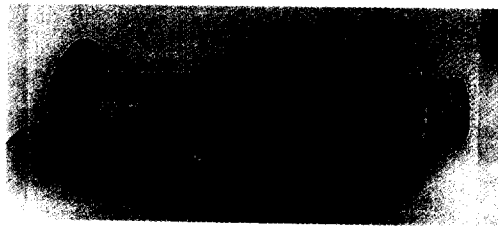


사진 1. 볼트 축에 부착한 변형률 게이지

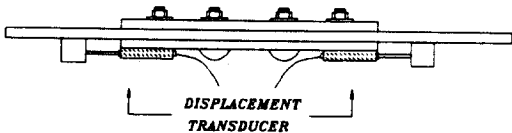


그림 2. 변위 변환기 부착위치

정적 인장시험은 45tonf 용량의 유압식 시험기에 의해 실시하였으며, 이로부터 하중-변형을 및 하중-변위 관계를 구하여 미끄러짐 하중을 계산하였다.

피로시험은 30tonf 용량의 전기 유압식 피로시험기를 사용하여 일정진폭 반복하중으로 실시하였으며, 파형은 sine파, 재하속도는 10Hz, 응력비는 0.1로 일정하게 하였다. 또한 피로시험 중 반복회수에 따른 도입축력의 감소율을 일정회수 마다 측정하였으며, 실험 후 파단된 시험편에 대하여 균열 발생점 및 파단형상을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간의 경과에 따른 축력의 변화

각 시험편의 볼트 축에 부착한 변형률게이지로부터 체결 직후부터 시간의 경과에 따라 일정 시간대별로 변형률을 측정하여, 이로부터 축력의 변화를 조사한 결과는 그림 3 및 표 5와 같다. 그림 3에서 중축은 축력도입 직후부터의 경과시간(분)이며, 횡축은 도입축력에 대한 축력의 변화비를 나타낸다.

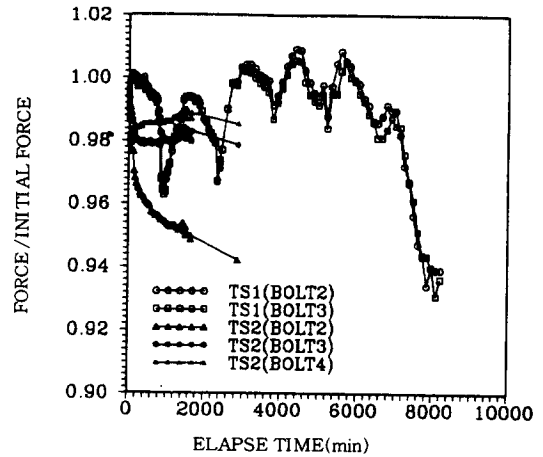


그림 3. 시간의 경과에 따른 축력의 감소

표 5. 시간의 경과에 따른 축력의 감소율

시험편 번호	볼트위치 (상단에서부터)	도입축력 (tonf)	1시간 후 (%)	3시간 후 (%)	1일 후 (%)	2일 후 (%)
TS1	2	19.09	-	1.00	1.14	1.15
	3	17.46	-	1.23	1.24	1.23
TS2	2	14.10	2.82	3.61	4.79	5.73
	3	15.26	1.73	1.95	2.03	2.19
	4	17.93	1.36	1.41	1.51	1.65

그림 3 및 표 5로부터 체결 후 3시간 동안 볼트의 축력은 급격히 감소하고, 그 이후에는 감소가 완만해짐을 알 수 있으며, 1일 경과 후에는 전체 감소량의 약 84~91% 정도가 진행되는 것으로 나

타났다. 이와 같이 고장력 볼트 이음의 체결은 짧은 시간에 상당히 큰 인장력이 볼트에 작용하게 되고, 이러한 도입축력은 이음부에 외력이 작용하지 않고도 시간이 경과함에 따라 조금씩 감소하는 경향이 나타나는데, 이러한 현상을 릴렉세이션(Relaxation)이라 한다. 이러한 축력의 감소는 체결 직후에 급격히 나타나며, 연결계가 안정화될 때까지 조금씩 감소해 간다.

이러한 경향은 고장력 볼트의 경우와 유사한 것으로 고장력 볼트의 경우에는 실제 볼트 설계축력 계산시 릴렉세이션을 고려하여 약 10% 정도 축력을 증가시키도록 시방서에 규정되어 있다.^{1,3)}

한편, 축력의 감소율은 볼트에 따라 다소 차이가 있으나, 고장력 볼트에 대한 외국의 연구사례를 보면 1분에서 3주 정도까지 추가로 발생하는 감소율은 4% 정도이고, 11.4년이 지난 후에도 약 6% 정도 감소한다고 보고되고 있다.^{4,5,6)} 따라서 본 시험결과는 고장력 볼트에 대한 기존의 연구결과와 큰 차이가 없이 유사한 경향이 나타나고 있음을 알 수 있다.

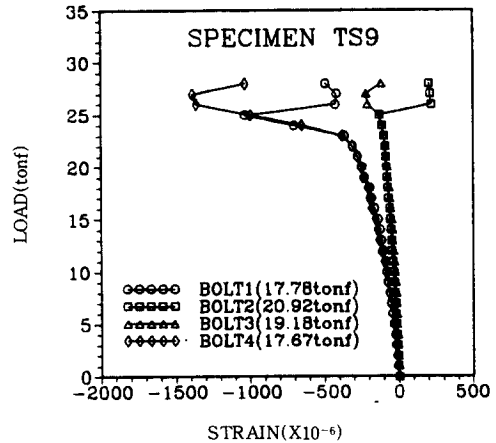
또한, 볼트의 위치에 따른 축력 감소량의 차이나 도입 축력의 차이에 따른 축력의 감소량의 차이는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며, 오히려 일일 기온 변화에 따른 축력의 변화가 주기적으로 나타나 온도변화의 영향이 큼을 알 수 있다.⁶⁾

3.2 미끄러짐 하중

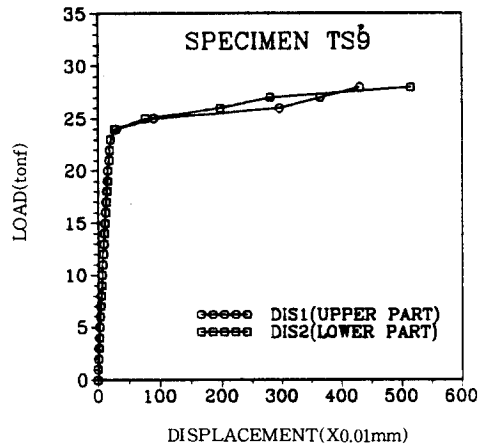
T/S 볼트 시험편에 대한 정적시험으로부터 얻어진 결과는 표 6과 같고, 볼트의 하중-변형률 선도와 모재와 이음판의 하중-변위 선도는 그림 4와 같다.

표 6. 정적 인장시험 결과

시험편 번호	도입축력 (tonf)	순단면적 (mm ²)	총단면적 (mm ²)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
TS9	17.78(볼트1)	508.5	720.0	443.7	540.2
	20.92(볼트2)				
	19.18(볼트3)				
	17.67(볼트4)				



(a) 하중-변형률 선도



(b) 하중-변위 선도

그림 4. 하중-변형률 및 하중-변위 선도

위의 그림 4(a)와 (b)에서 항복하중 부근에서 변형률과 변위가 급격히 변화하는 점이 나타나는데, 이때의 하중이 미끄러짐 하중이다. 미끄러짐 하중보다 작은 하중이 작용하는 영역에서는 마찰력으로 응력이 전달되므로 변형률도 하중에 따라 일정하게 선형으로 증가함을 알 수 있다. 그러나, 하중이 증가함에 따라 부재의 접촉면 사이에서 미끄러짐이 발생하면, 이 미끄러짐으로 인해 하중이 증가하면서 볼트의 응력이 크게 변화하는 현상이

나타난다. 이러한 현상은 모재와 이음판 사이에 미끄러짐이 발생하면서 모재와 볼트축이 지압상태로 되어 응력전달기구가 달라지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

또한 그림 4(a)에서 외측 볼트(1, 4번)가 내측 볼트(2, 3번) 보다 먼저 미끄러짐이 발생함을 알 수 있는데, 이는 각 볼트의 압축력이 내측에서는 중첩되어 작용하여 일체화 영역이 커짐에 따라서 외측 볼트에서 먼저 마찰에서 지압상태로 이르게 되어 미끄러짐이 발생하고 그 후 내측에서 미끄러짐이 발생하는 것으로 사료된다.

한편, 위의 그림 4로부터 미끄러짐 하중을 구하고, 다음 식(1)로부터 미끄러짐 계수를 계산한 결과는 표 7과 같다. 이때, 도입축력은 각 볼트의 평균값을 이용하였다.

$$F = \mu mN \quad (1)$$

여기서, F는 미끄러짐 하중, μ 는 미끄러짐 계수, m은 마찰면 수, N은 도입 축력을 나타낸다.

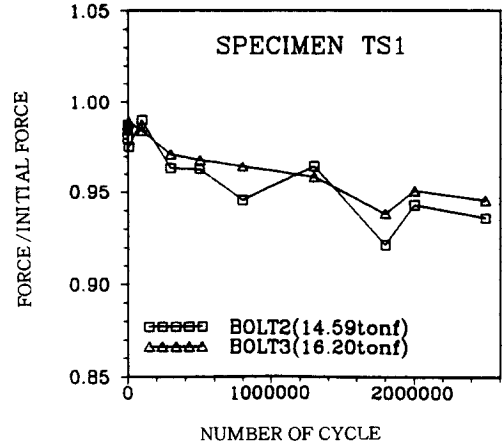
표 7. 미끄러짐 하중 및 미끄러짐 계수

시험편 번호	도입축력의 평균 (tonf)	미끄러짐 하중 (tonf)	미끄러짐 계수
TS9	18.89	23.0	0.304

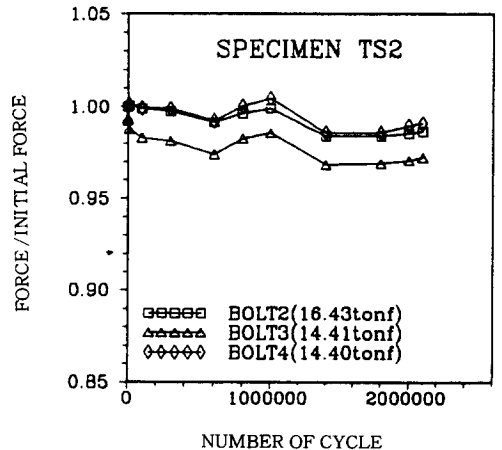
표 7에서 미끄러짐 계수는 0.304로 시방서⁷⁾에서 규정하고 있는 0.4 보다 작게 나타났는데, 이는 모재와 이음판의 표면에 발생한 녹을 브러쉬로 제거 함으로서 표면조도가 작아진 것에 기인하는 것으로 사료된다.

3.3 반복회수에 따른 축력의 변화

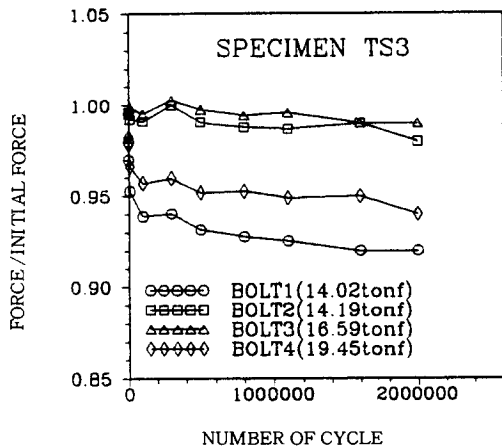
T/S 볼트 마찰이음부에 대한 피로시험시 반복 회수에 따른 축력의 변화를 볼트 축에 부착한 변형률게이지로부터 측정하였으며, 그 결과는 표 8 및 그림 5(a)~(g)와 같다. 한편 각 볼트의 체결시 실제 도입된 축력을 측정하여 이를 표 8에 함께 수록하였다.



(a) TS1



(b) TS2



(c) TS3

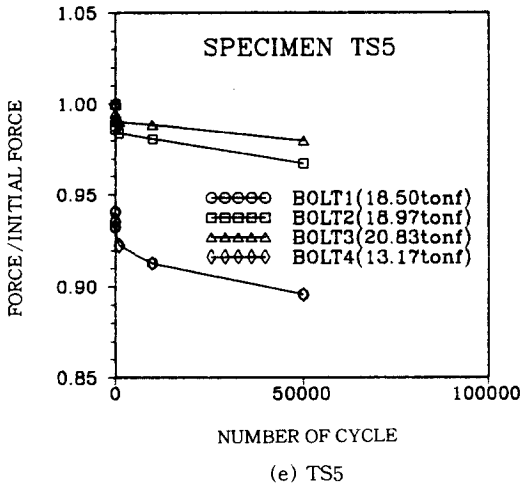
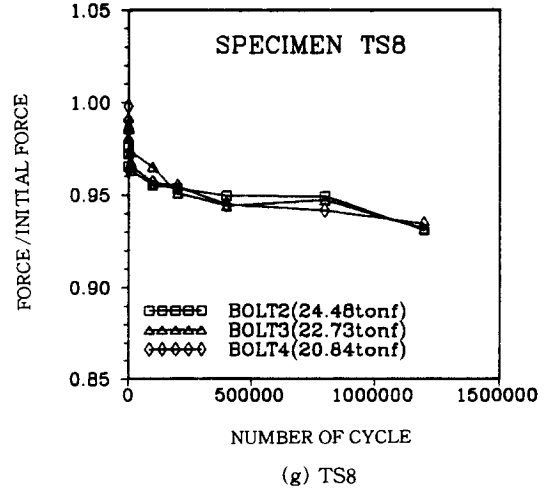
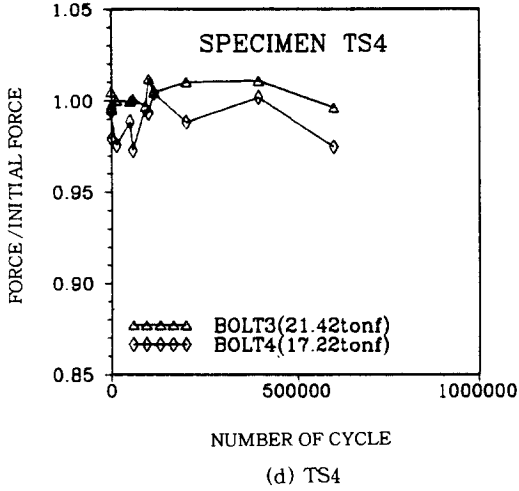
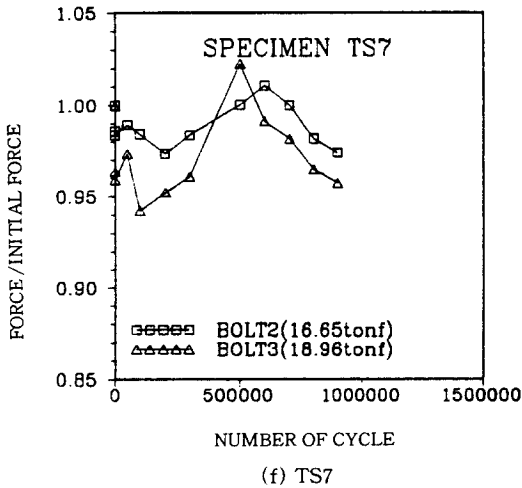


그림 5. 반복회수에 따른 축력의 감소

표 8과 그림 5(a)~(g)를 살펴보면, 반복하중의 누적에 따른 축력의 변화는 반복회수 1~2회에서 급격히 축력이 감소하고, 그 이후에는 큰 변동이 없는 것으로 나타났다. 반복회수 200만회에서 축력감소의 범위는 외측볼트(1, 4번)에서 약 5~10% 정도로 나타났고, 내측(2, 3번)에서는 이보다 작은 경향이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 정적시험에서 미끄러짐이 발생하는 경향과 유사한 것으로 하중이 대칭으로 작용하고, 각 볼트의 압축력이 내측에 중첩되어 작용하므로 일체화 영역이 커지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.



또한, 볼트의 도입축력의 차이에 따른 축력 감소의 변화는 나타나지 않았는데, 이는 도입축력이 체결상태에 따라 다소 달라진다 할지라도 각각의 볼트가 하나의 연결계를 구성하여 거동하기 때문인 것으로 판단된다. 문헌에 의하면 반복하중이 가해짐에 따라 너트의 회전이 발생하고 그 영향은 약 5~10% 정도되는 것으로 보고되고 있으나⁸⁾, 본 실험에서는 이를 검증하지 못하였다.

한편, 반복하중이 가해진 이후에 모재와 이음판의 표면을 관찰한 결과 상호마찰로 인하여 표면상태가 변하는 것을 알 수 있었으며, 이를 사진 2에 나타내었다.

표 8. 반복회수에 따른 축력의 변화

시편번호	재하하중 (P_{max}/P_{min})	볼트번호	도입축력 (tonf)	축력의 변화율				
				1회	2회	50만회	100만회	200만회
TS1	16.5 / 1.65	1	-	-	-	-	-	-
		2	14.59	0.986	0.986	0.963	0.946	0.943
		3	16.20	0.985	0.985	0.968	0.964	0.951
		4	-	-	-	-	-	-
TS2	10.0 / 1.00	1	-	-	-	-	-	-
		2	16.43	1.000	1.000	0.991	0.999	0.985
		3	14.41	0.994	0.993	0.974	0.985	0.970
		4	14.40	0.999	1.000	0.992	1.004	0.989
TS3	13.0 / 1.30	1	14.02	0.975	0.970	0.931	0.925	0.962
		2	14.19	0.995	0.996	0.990	0.986	1.000
		3	16.59	0.997	0.998	0.997	0.995	1.002
		4	19.45	0.982	0.978	0.959	0.949	0.975
TS4	20.0 / 2.00	1	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-
		3	21.42	1.000	0.996	0.995	-	-
		4	17.22	0.974	0.996	0.974	-	-
TS5	20.0 / 2.00	1	18.50	0.941	0.935	-	-	-
		2	18.97	0.991	0.988	-	-	-
		3	20.83	0.995	0.992	-	-	-
		4	13.17	0.947	0.942	-	-	-
TS7	21.5 / 2.15	1	-	-	-	-	-	-
		2	16.65	0.986	0.984	1.000	0.974	-
		3	18.96	0.963	0.959	1.002	0.957	-
		4	-	-	-	-	-	-
TS8	19.0 / 1.90	1	-	-	-	-	-	-
		2	24.48	0.977	0.965	0.949	0.930	-
		3	22.73	0.987	0.992	0.944	0.931	-
		4	20.84	0.998	0.986	0.945	0.934	-

사진 2를 살펴보면, 볼트에 도입된 축력에 의하여 표면이 상당히 깎이어나감을 알 수 있었으며, 이러한 표면조도의 변화가 미끄러짐이나 축력의 감소에 미치는 하나의 요인이 될 수 있었다. 또한, 볼트 머리 위치에서의 표면상태를 나타낸 사진 3을 보면 볼트 머리와 와셔의 형상이 그대로 나타나 있는 것으로 보아 반복하중에 의하여 모재가 심하게 깎인 것을 관찰할 수 있다. 이는 마찰로 인하여 한계면압을 초과한 것으로 판단되며, 볼트의 축력감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.



사진 2. 반복하중 재하이후의 표면 상태

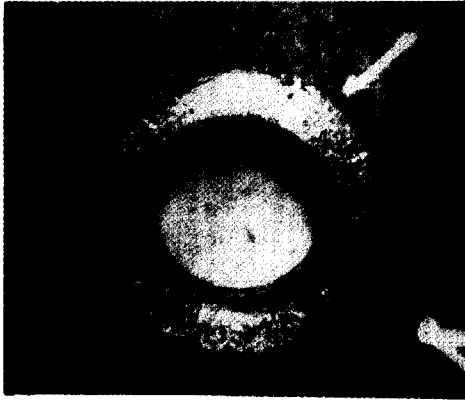


사진 3. 볼트 위치에서의 표면상태

3.4 피로강도

T/S 볼트 마찰이음 시험편에 대하여 일정진폭 하중하에서 피로시험을 실시한 결과를 표 9에 나타내었으며, 이를 S-N 선도로 나타내면 그림 6과 같다.

표 9 및 그림 6으로부터 T/S 볼트 이음부의 200만회 피로강도는 모재의 총단면을 기준으로 235MPa로 나타났으며, 이를 AASHTO⁹⁾ 및 JSSC¹⁰⁾ 설계기준과 비교해 볼 때 시방서 기준인 B등급을 초과하는 충분한 피로강도를 갖고 있음을 알 수 있다.

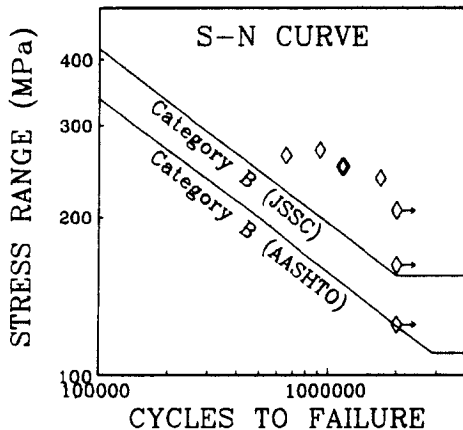


그림 6. S-N 선도

표 9. 피로시험 결과

시험편 번호	재하하중 (P_{max}/P_{min})	총단면적 (mm^2)	응력범위 (MPa)	파단회수	비고
TS1	16.5/1.65	720	206.3	>2,000,000	파단안됨
TS2	10.0/1.00	720	125.0	>2,000,000	파단안됨
TS3	13.0/1.30	720	162.5	>2,000,000	파단안됨
TS4	20.0/2.00	720	250.0	1,144,220	
TS5	20.0/2.00	720	250.0	1,167,530	
TS6	21.0/2.10	720	262.5	656,360	
TS7	21.5/2.15	720	268.7	920,200	
TS8	19.0/1.90	720	237.5	1,687,400	

3.5 피로파단 위치

T/S 볼트 이음 시험편의 피로시험 결과, 각 시험편의 피로균열 발생 및 파단위치를 그림 7에 나타내었다.

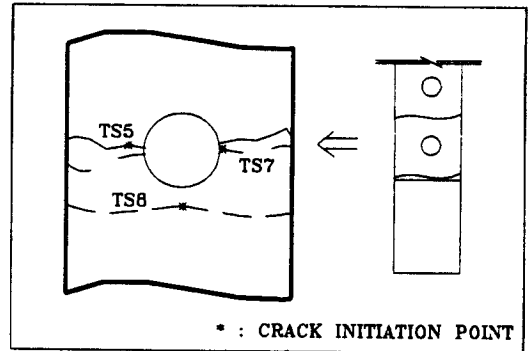


그림 7. 피로균열 발생 및 파단위치

그림 7을 살펴보면, 피로균열의 발생은 응력집중이 가장 큰 볼트 구멍에서 시작되는 경우도 있지만 볼트 주변부에서 균열이 시작되어 파단되는 경우도 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 본 연구와 기존 연구^{11,12)}에서의 시험결과를 살펴보면, 충분히 체결된 이음에 있어서는 볼트 주변부는 모재와 덮개판이 완전히 일체화되어 있기 때문에 최대응력이 발생할 가능성이 높아 피로균열의 발생점이 된다. 즉, 일체화 영역의 경계와 일체화 영역 내부의 볼트 구멍 끝부분을 고려할 수 있는데 대부분이 일체화 영역 경계에서 피

로균열이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 고장력 볼트를 충분히 체결하므로써 볼트 구멍의 존재에 의한 볼트 구멍 주변부의 응력집중이 상당히 완화되고, 비일체화 영역이 나타나므로 인하여 응력전달에 있어 새로운 영역이 구멍의 주변부에 응력집중을 일으키는 결과가 된 것을 의미하며, 그 크기가 볼트 구멍의 끝에서보다 더 크게 되었기 때문인 것으로 사료된다.

따라서, 피로균열이 볼트 구멍에서 떨어져 발생하는 것은 구멍의 마무리 정도와 오차 등이 피로강도에 미치는 영향을 상당히 감소시킬 수 있으므로 가공상 큰 잇점이 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

T/S 볼트 마찰 이음부에 대한 정적시험, 릴렉세이션 시험 및 피로시험을 실시한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) T/S 볼트는 체결직후 3시간 정도 경과 후 볼트의 축력은 급격히 감소하고, 그 이후는 그 감소가 완만해지며, 1일 경과 후에는 전체 감소량의 약 84~91% 정도가 감소하는 것으로 나타났다. 축력의 감소량은 볼트에 따라 다소 차이가 있으나, 이는 고장력 볼트에 대한 기존의 시험결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

(2) 볼트의 위치나 도입축력의 크기에 따른 축력 감소량의 차는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며, 오히려 일일 기온 변화에 따른 축력의 변화가 주기적으로 나타나 온도변화의 영향이 매우 큼을 알 수 있었다.

(3) 외측 볼트가 내측 볼트보다 먼저 미끄러짐이 발생함을 알 수 있는데, 이는 각 볼트의 압축력이 내측에서는 중첩되어 작용하여 일체화 영역이 커짐에 따라서 외측 볼트에서 먼저 마찰에서 지압상태로 이르게 되어 미끄러짐이 발생하고 그 후 내측에서 미끄러짐이 발생하는 것으로 사료된다.

(4) 반복회수에 따른 축력의 감소는 반복회수 1~2회에서 급격히 축력이 감소하며, 그 이후는

큰 변동이 없는 것으로 나타났다. 그 범위는 외측 볼트가 내측보다 큰 경향을 나타내고 있는데, 이는 하중이 대칭으로 작용하는 것과 각 볼트의 압축력이 내측에 중첩되어 작용하므로 일체화 영역이 커지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

(5) 반복하중이 가해진 이후에 모재와 덮개판의 표면을 관찰한 결과, 볼트에 도입된 축력에 의하여 표면이 상당히 깎여 나감을 알 수 있었으며, 이러한 표면상태의 변화가 미끄러짐이나 축력의 감소에 미치는 하나의 요인이 됨을 알 수 있었다.

(6) T/S 볼트 이음부의 200만회 피로강도는 235MPa로 나타났으며, 이를 AASHTO 및 JSSC 설계기준과 비교해 볼 때 시방서 기준인 B등급을 초과하는 충분한 피로강도를 갖고 있음을 알 수 있었다.

(7) 피로균열의 발생은 응력집중이 가장 큰 볼트 구멍에서 시작되는 경우도 있지만, 일체화 영역과 비일체화 영역의 경계에서 균열이 시작되어 파단되는 경우도 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 일체화 영역의 존재는 볼트 구멍의 마무리 정도, 구멍의 오차 등이 피로강도에 미치는 영향을 상당히 감소시킬 수 있으므로 가공상 큰 잇점이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 日本建築學會, “高力ボルト接合設計施工指針”, 1993, pp. 1~68.
2. 김상섭, “고장력 볼트 및 T/S 볼트의 품질관리”, 대건사, 1994.
3. 건설부, “도로교 표준시방서”, 1992.
4. E. Chesson, Jr. and W. H. Munse, “Studies of the Behavior of High Strength Bolts and Bolted Joints”, Engineering Experiment Bulletin 469, University of Illinois, Urbana, 1965.
5. J. Tajima, “Effect of Relaxation and Creep on the Slip Load of High Strength Bolted Joints”, Structural Design Office, Japanese National Railways, Tokyo, June, 1964.
6. 石原靖弘 外 2人, “高力ボルト軸力の經年變化に關

- する一考察”, 土木學第49回次學術講演會, I-102, 1994. 9.
7. 社團法人 日本橋梁建設協會, “高力ボルト施工マニュアル”, 1990, pp. 2.
 8. 橋本篤秀, “ナット回轉法に関する實驗的研究”, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1977. 10.
 9. AASHTO, “Standard Specification for Highway Bridges”, 13 Edition, American Association of Steel Highway and Transportation Officials, 1988.
 10. 日本鋼構造協會, “鋼構造物の疲勞設計指針 同解説”, 1993
 11. 三木千壽, 西村俊夫, “高力ボルト摩擦接合のボルト締結力が連結の疲勞強度に及ぼす影響”, Technical Report, No. 12, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, 1972. 7.
 12. 長文山鳥雄, “摩擦接合連手のすべり問題および設計への適用, 1991.