

과대공을 갖는 고장력 볼트 이음부의 역학적 거동에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and Analytical Studies on the Mechanical Behavior of High Tension Bolted Joints with Oversize Hole

이 승 용¹⁾ · 박 영 훈²⁾ · 조 선 규³⁾ · 장 동 일⁴⁾
Lee, Seung Yong Park, Young Hoon Cho, Sun Kyu Chang, Dong Il

요 약 : 볼트 구멍의 크기가 고장력 볼트 이음부의 역학적 거동 및 내부 압축응력 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 과대공 및 표준공을 갖는 고장력 볼트 이음부에 대한 실험 및 해석적 연구를 실시하였다. 실험적 연구에서는 정적 인장시험과 피로시험을 실시하여 미끄러짐 특성, 피로강도 및 피로파단 양상을 평가하였으며, 해석적 연구에서는 유한요소해석을 통하여 내부 압축응력의 분포영역을 밝히고, 내부 압축응력의 분포가 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 실험결과, 과대공을 갖는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 계수와 피로강도는 표준공을 갖는 이음부와 비교하여 큰 차이는 없으나 다소 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 과대공 시험편의 경우 볼트 구멍의 크기가 표준공 시험편과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 축력의 작용폭이 좁아져 마찰영역으로 작용하는 내부 압축응력의 분포영역이 작아지기 때문으로 판단되며, 이는 유한요소해석 결과로도 확인할 수 있었다. 또한, 피로시험 결과 과대공 시험편의 피로균열의 발생점이 표준공 시험편 보다 볼트 구멍 내벽에 가까운 것을 알 수 있어, 피로균열의 발생위치는 고장력 볼트의 도입축력에 의해 모재와 이음판에 형성되는 내부 압축응력의 분포영역과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT : To evaluate the mechanical behavior and the compressive stress distribution in high tension bolted joints according to the size of bolt hole, the experimental and analytical studies are performed with enlarging bolt hole size. In experimental study, the static test is performed to measure the slip coefficient, and the fatigue test is also performed to evaluate the fatigue strength and failure pattern of fatigue crack. In analytical study, the compressive stress distribution is investigated by using the finite element analysis. From the result of experimental study, the slip coefficient and fatigue strength of the high tension bolted joints with oversize hole are not much different but somewhat it has decreased. These are because the size of bolt hole is larger than the holes of nominal size, therefore the width of clamping force is

1) 정회원, 한양대학교 산업과학연구소 연구원
2) 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정
3) 정회원, (주)서영기술단 전문이사
4) 정회원, 한양대학교 지구환경건설공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 1999년 3월 31일까지 학회로 보내
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

decreased and the compressive stress distribution area is smaller, this is certificated in the finite element analysis. In addition, the origin of fatigue crack in the oversize holes is closer to the hole than in the holes of nominal size, consequently it is investigated that the origin of fatigue crack is intimately associated with the compressive stress distribution which is formulated by the clamping force in both base metal and splice plate.

핵심용어 : 고장력 볼트 이음, 과대공, 압축응력 분포, 마찰영역, 축력의 작용폭
 KEYWORDS : high tension bolted joint, oversize hole, compressive stress distribution, friction area, width of clamping force

1. 서론

고장력 볼트 마찰이음은 분리되어 있는 부재에 이음판을 대고 고장력 볼트에 높은 축력을 작용시켜 체결하므로써 이음부 사이에 발생한 압축력으로 외력을 전달한다^(10,11). 또한, 이음부에서의 힘의 전달은 부재간의 압축력 및 볼트 축력에 의하여 외력과 균형을 이룸으로서 형성되어지며, 부재간의 압축력, 도입된 축력의 변화 및 미끄러짐 하중 등은 볼트 체결부 및 볼트의 유효강성에 지배된다. 이때 유효강성은 일반적으로 이음부의 유효단면적과 탄성계수의 곱으로 나타내어지지만 이음부재의 유효 단면적, 즉 내부 압축응력의 분포영역이 어느 정도가 되는지를 판단하기는 쉽지가 않다. 종래에는 이음부의 탄성변형에 관계하는 유효 단면적을 등가 중공 원통형으로 가정하여 이에 대한 여러 가지 검토가 이루어졌다.

Rötscher는 내부 압축응력 분포형상에 있어서 각도 γ (이음부의 표면과 원추의 모선이 이루는 각)를 45° 로 분포하는 것으로 가정하였으며, Wallner는 γ 를 80° 로, Frisher는 γ 를 포물선으로 분포하는 것으로 가정하여 이음부의 유효 단면적과 스프링 상수를 산출하였다. 또한, 국내에서도 내부 압축응력 분포에 대한 일부 기초적인 연구가 수행되었다^(1,12,13). 그러나, 일반적으로 내부 압축응력의 분포는 고장력 볼트의 도입축력, 과대공의 도입시 볼트 구멍의 크기, 볼트 머리부

에 와셔를 사용하지 않는 T/S 볼트의 사용시 와셔의 사용 유무, 마찰이음의 경우 볼트 구멍의 틈이 있으므로 볼트 및 와셔의 위치 그리고 모재 및 이음판의 판두께의 차이 등 여러 인자들에 영향을 받게 되나, 이러한 인자들이 미치는 영향에 대한 정량적인 평가는 이루어지지 못한 실정이다.

특히, 고장력 볼트의 현장조립시 볼트 구멍간의 불일치로 인하여 볼트 구멍을 확장해야할 필요성이 자주 발생하고 있으며, 이를 위해서 외국의 시방기준^(6,7,8,9)에서는 어느 정도의 범위까지 과대공을 허용하는 규정을 두고 있다. 그러나, 우리나라의 경우 과대공에 대한 시방규정이나 이에 대한 역학적 특성의 규명, 내부 압축응력의 분포에 미치는 영향 등에 관한 연구는 미흡한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 볼트 구멍의 크기가 고장력 볼트 이음부의 역학적 거동 및 내부 압축응력 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실험 및 해석적 연구를 실시하였다. 실험적 연구에서는 M22 고장력 볼트에 대한 표준공인 볼트 구멍 직경 24mm와 외국의 시방기준에서 적용하고 있는 과대공의 허용범위인 26mm를 갖는 고장력 볼트 이음부에 대한 정적 인장시험과 피로시험을 실시하여 미끄러짐 특성, 피로강도 및 피로파단 양상을 평가하였다. 한편, 해석적 연구에서는 볼트 구멍의 직경을 24mm 및 26mm로 변화시킨 경우에 대해 유한요소해석을 실시하여 내부 압축응력의 분포영역을 밝히고, 내부 압축응력의 분포

가 고장력 볼트 이음부의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험 개요

시험편은 모재와 이음판 모두 SWS 490B 강재를 사용하였으며, 화학성분 및 기계적 성질은 표 1과 같다. 고장력 볼트는 M22×65(F10T) 고장력 육각 볼트를 사용하였다. 정적 인장시험 및 피로시험에 사용된 시험편의 형상은 그림 1과 같으며, 각 시험편별 시험편의 치수, 시험 종류 및 도입축력은 표 2와 같다. 그림 1에서 두 모재 사이의 간격은 5mm로 하였다.

시험편의 표면처리는 샷블라스트(Shot Blast) 처리와 샷블라스트 후 무기 징크리치 프라이머(Zincrich Primer, 이하 징크리치 프라이머라 함)를 실시한 2종류로 하였다. 샷블라스트 처리는 직경 3.2mm의 철구를 사용하여 분사 공기압 6kg/cm², 분사거리 1m, 분사각도 45°로 하였으며, 징크리치 프라이머는 샷블라스트 공정을 거친 후 공기 스프레이(공기압 4kg/cm²)로 2회 도

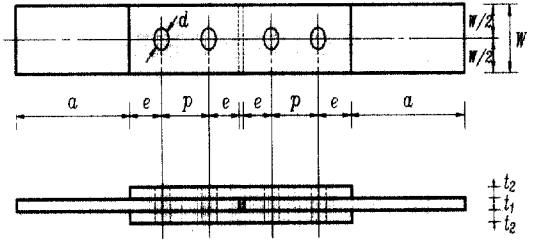


그림 1. 시험편의 형상

장(목표 도막두께 약 25 μ)를 실시하였다. 한편, 볼트 구멍의 직경은 표준공(ST 시험편)의 경우 2mm의 빈틈을 두어 24mm, 과대공(OV 시험편)의 경우 4mm의 빈틈을 두어 26mm로 하였다.

볼트의 체결은 토크렌치를 사용하여 토크 제어법에 의해 실시하였으며, 예비체결과 본체결로 나누어 예비체결에서는 도입축력의 60%를 체결하고, 본체결에서 도입축력까지 체결하였다. 도입축력은 도로교 표준시방서⁽¹⁾의 규정을 만족하는 범위내에서 21.5tonf(토크 85kgf·m)로 하였으며, 일부 시험편에 대해서는 도입축력을 20% 감소시킨 17.7tonf(토크 70kgf·m)로 체결하였다.

정적 인장시험은 유압식 시험기(일본 Shimadzu 사, 정적시험 용량 ± 45 tonf)를 사용하여 미끄러

표 1. 모재 및 이음판의 화학성분 및 기계적 성질

강재종류	화 학 성 분 (%)					물 리 적 성 질			
	C	Si	Mn	P	S	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)	신장률(%)
SWS 490B	0.16	0.38	1.23	0.012	0.009	368.3	529.2	205274.5	23.0

표 2. 시험편의 종류 및 치수

시험편 기호	도입축력 (tonf)	표면처리	시험종류 및 시험편 개수	단면적		시험편 제원 (mm)						
				총단면적 (mm ²)	순단면적 (mm ²)	구멍 직경 d	모재 두께 t ₁	이음판 두께 t ₂	폭 W	연단 거리 e	피치 p	a
ST-B	21.5	샷블라스트	정적(2) 피로(3)	800	560	24.0	10	10	80	40	75	200
	17.7											
ST-Z	21.5	징크리치 프라이머	정적(2) 피로(7)	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	17.7											
OV-B	21.5	샷블라스트	정적(2) 피로(4)	800	540	26.0	10	10	80	40	75	200
	17.7											
OV-Z	21.5	징크리치 프라이머	정적(2) 피로(6)	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	17.7											

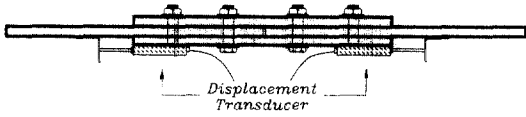


그림 2. 변위 변환기 부착 위치

짐이 발생한 후 파단에 이를 때까지 실험을 실시하여 정적 데이터를 획득하였다. 또한, 그림 2와 같이 부착한 변위 변환기를 이용하여 하중-변위 관계를 도출하였으며, 이로부터 미끄러짐 하중 및 미끄러짐 계수를 산정하였다.

피로시험은 정적시험과 동일한 유압식 시험기(일본 Shimadzu사, 동적시험 용량 $\pm 30\text{tonf}$)를 사용하여 일정진폭 반복하중하에서 실시하였으며, 파형은 sine파, 재하속도는 5~10Hz, 응력비는 0.1로 일정하게 하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 미끄러짐 계수

표준공 및 과대공 시험편에 대한 정적시험 결과 얻어진 하중-변위 선도의 일례를 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에 나타난 하중-변위 선도

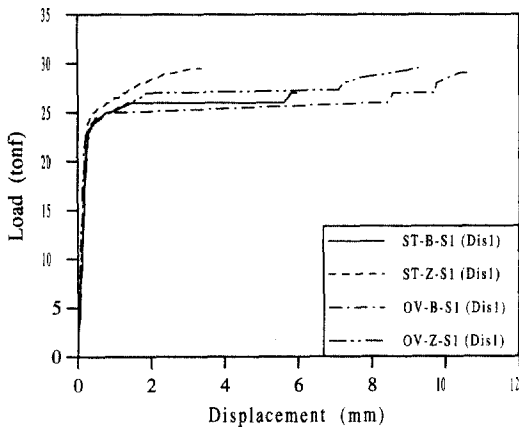


그림 3. 하중-변위 선도

표 3. 미끄러짐 하중 및 미끄러짐 계수

시험편 번호		계결토크 (kgf·m)	도입축력 (tonf)	미끄러짐 하중 (tonf)	미끄러짐 계수
표준공	ST-B-S1	70	17.7	24.0	0.339
	ST-B-S2	85	21.5	25.0	0.291
	ST-Z-S1	70	17.7	25.5	0.346
	ST-Z-S2	85	21.5	25.0	0.291
과대공	OV-B-S1	70	17.7	24.0	0.339
	OV-B-S2	85	21.5	24.5	0.285
	OV-Z-S1	70	17.7	24.0	0.339
	OV-Z-S2	85	21.5	24.0	0.279

로부터 미끄러짐 하중을 결정하고, 이로부터 미끄러짐 계수를 계산한 결과는 표 3과 같다.

표 3에 나타난 볼트 구멍의 크기에 따른 미끄러짐 계수의 영향을 살펴보면, 마찰면을 슛볼라스트 및 징크리치 프라이머한 경우 모두 볼트 구멍의 크기가 증가할수록 미끄러짐 계수가 동일하거나 다소 감소하는 경향이 나타났으며, 감소량은 최대 약 4%로 나타났다. 이러한 원인은 볼트 구멍의 크기가 증가하게 되면 상대적으로 마찰영역, 즉 내부 압축응력의 분포영역이 작아짐에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2 피로강도

볼트 구멍 직경 24mm의 표준공과 직경 26mm의 과대공을 갖는 고장력 볼트 마찰이음부에 대한 피로시험을 실시하여 얻어진 결과를 표 4에 나타내었다. 또한, 피로시험 결과를 S-N 선도로 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 응력범위는 총단면적으로 구한 값이며, 응력비는 0.1로 동일하다. 한편, 표 4에서 피로파단이 일체화 영역과 비일체화 영역의 경계부에서 발생하지 않고, 모재의 측면에서 발생한 경우에는 고장력 볼트 마찰이음에서 이상적인 피로파단이 발생한 경우가 아니므로 S-N 선도상에 표시하지 않았다.

표 4. 피로시험 결과

시험편 번호	최대하중 P_{max} (tonf)	최소하중 P_{min} (tonf)	응력범위 $\Delta\sigma_g$ (MPa)	파단회수 N_f	파단위치
ST-B-F1	20.0	2.0	220.5	2,645,812	일체화영역 경계
ST-B-F2	21.0	2.1	231.5	1,365,563	일체화영역 경계
ST-B-F3	21.0	2.1	231.5	1,404,106	일체화영역 경계
ST-Z-F1	20.0	2.0	220.5	1,130,298	모재 측면의 결함부
ST-Z-F2	20.0	2.0	220.5	3,963,010	일체화영역 경계
ST-Z-F3	20.0	2.0	220.5	1,290,024	모재 측면의 결함부
ST-Z-F4	20.0	2.0	220.5	1,022,000	모재 측면의 결함부
ST-Z-F5	20.0	2.0	220.5	1,566,322	모재 측면의 결함부
ST-Z-F6	21.0	2.1	231.5	931,982	모재 측면의 결함부
ST-Z-F7	21.0	2.1	231.5	759,192	모재 측면의 결함부
OV-B-F1	21.0	2.1	231.5	987,662	일체화영역 경계
OV-B-F2	20.0	2.0	220.5	2,538,374	일체화영역 경계
OV-B-F3	21.0	2.1	231.5	1,577,785	일체화영역 경계
OV-B-F4	21.0	2.1	231.5	1,001,636	모재 측면의 결함부
OV-Z-F1	21.0	2.1	231.5	1,360,702	모재 측면의 결함부
OV-Z-F2	22.0	2.2	242.6	1,160,746	일체화영역 경계
OV-Z-F3	22.0	2.2	242.6	1,293,943	일체화영역 경계
OV-Z-F4	21.0	2.1	231.5	1,556,104	모재 측면의 결함부
OV-Z-F5	21.0	2.1	231.5	2,310,775	일체화영역 경계
OV-Z-F6	21.0	2.1	231.5	2,100,703	일체화영역 경계

그림 4를 살펴보면, 마찰면을 슛블라스트 처리한 경우 200만회 피로강도를 표준공 시험편의 경우 226MPa, 과대공 시험편의 경우 224MPa로 표준공과 과대공 시험편의 피로강도의 차이는 크지 않으나, 과대공 시험편에서 피로강도가 약 1% 감소함을 알 수 있다. 또한, 마찰면을 징크리치 프라이머한 경우에는 과대공 시험편의 200만회 피로강도는 235MPa로 나타나며, 표준공 시험편의 경우 이상적인 피로파단이 발생한 시험편이 1개 밖에 되지 않아 정확한 비교는 어려우나 과대공 시험편의 결과를 회귀분석한 회귀선과 표준공 시험편의 결과가 동일선상에 놓임으로 미루어

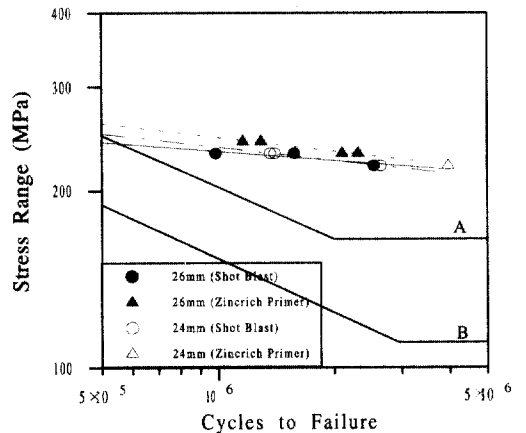


그림 4. S-N 선도

마찰면을 징크리치 프라이머한 경우에도 표준공과 과대공 시험편의 피로강도의 차이는 거의 없는 것을 알 수 있다.

3.3 피로균열의 발생 및 파단 위치

피로시험이 완료된 후 시험편을 해체하여 피로균열의 발생점 및 피로파단 양상을 관찰하였으며, 피로균열의 발생 위치의 일례를 나타내면 그림 5와 같다.

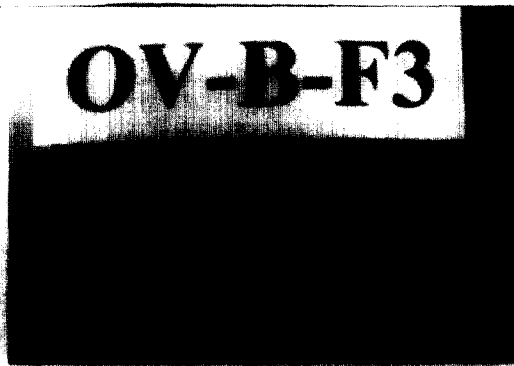


그림 5. 피로균열의 발생위치

그림 5는 전형적인 마찰이음 상태에서의 피로균열의 발생 및 파단양상을 나타내는 것으로, 피로균열은 볼트의 도입축력으로 인한 마찰력으로 모재와 이음판이 일체화되는 영역과 일체화되지 않는 영역과의 경계부에서의 응력집중에 의해 발생, 진전되어 파단에 이르는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 표준공과 과대공 시험편의 피로파단 양상은 큰 차이없이 유사한 경향을 나타내었다.

그러나, 표 4에서와 같이 일부 시험편은 모재 측면의 결합부에서 피로균열이 발생하여 파단된 경우도 발생하였으며, 마찰면을 슛블라스트한 경우 보다 징크리치 프라이머를 실시한 시험편에서 이러한 현상이 많이 나타났다.

이 원인은 마찰면을 징크리치 프라이머한 경우에는 일체화 영역과 비일체화 영역의 경계부에서의 응력집중이 상대적으로 완화되는 것에 기인하

표 5. 피로균열의 발생 위치

시험편 조건	시험편 번호	피로균열의 발생위치 (mm)	평균 (mm)	비고	
표준공 (스블라스트)	ST-B-F1	11	11		
	ST-B-F2	10			
	ST-B-F3	13			
표준공(프라이머)	ST-Z-F2	11	11		
과대공 (스블라스트)	OV-B-F1	16	9	결합부에서 발생하여 제의	
	OV-B-F2	8			
	OV-B-F3	10			
과대공 (프라이머)	OV-Z-F2	8	8		
	OV-Z-F3	9			
	OV-Z-F5	8			
	OV-Z-F6	8			

는 것으로 판단되며, 모재 측면의 결합을 제거한 시험편에서는 전형적인 피로파단이 발생함을 확인할 수 있었다.

한편, 일체화 영역과 비일체화 영역의 경계부에서 피로균열이 발생한 시험편에 대해서 피로균열의 발생 위치를 볼트 구멍 내벽으로부터 측정된 결과는 표 5와 같다.

표 5를 살펴보면, 볼트 구멍 내벽으로부터 피로균열의 발생점까지의 거리는 표면처리 조건에 따라서는 큰 차이가 없으나, 볼트 구멍의 크기에 따라서는 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 원인은 과대공 시험편은 볼트 구멍이 크기 때문에 축력의 작용폭이 상대적으로 좁아 축력의 분포영역이 작아짐에 따라 피로균열의 발생점이 볼트 구멍 내벽에 가까워지는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 피로균열의 발생위치는 고장력 볼트의 도입축력에 의해 모재와 이음판에 형성되는 내부 압축응력의 분포영역과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 표준공 및 과대공 시험편의 피로균열의 발생위치의 평균은 각각 11mm와 9mm로 이는 와서를 통한 축력의 작용폭 10mm(표준공 시험편) 및 9mm(과대공 시험편)과 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 내부 압축응력분포의 유한요소해석

4.1 해석 모델

볼트의 도입축력으로 인해 모재와 이음판의 경계에서 발생하는 내부 압축응력을 구하기 위하여 그림 6과 같은 모델링으로 유한요소해석을 실시하였다. 이때 축력의 분포는 이음부에 인장하중이 작용하지 않았을 때 볼트축을 중심으로 대칭으로 분포하므로, 해석에서는 이를 고려하여 8절점 사각형 요소를 이용하여 수치해석을 실시하였으며, 해석 패키지는 LUSAS를 사용하였다.

한편, 본 연구에서는 외력, 즉 인장하중이 작용하지 않는 때의 볼트 축력에 의한 이음부재 내부의 응력분포를 구하는 것이 목적이므로 해석 영역을 시험편의 길이 방향으로서는 이음판의 1/2 영역, 즉 이음부 방향으로의 모재 단부에서 이음판이 위치하는 영역까지로 하였다. 또한, 시험편의 대칭성을 고려하여 시험편 두께 방향으로도 전체 두께의 1/2만을 고려하였다. 경계조건은 볼트 구멍 내벽의 경우, 볼트 구멍 내벽과 볼트 사이에는 gap이 있는 상태이므로 절점을 자유단으로 구성하고, 모재와 이음판의 분할면은 각 절점을 힌지로 구성하였다.

한편, 볼트 머리부에 도입된 축력을 각 요소에 반영하기 위해서는 축력의 분포를 산정할 필요가 있으나 볼트의 축력도입시 볼트의 회전과 볼트 우각부의 응력집중 등으로 인하여 그 분포를 산정하기가 쉽지 않다. 따라서, 본 연구에서는 일반적으로 볼트의 체결시에 볼트 축력이 원활히 전달되도록 하기 위하여 볼트 보다 경도가 높은 와셔를 사용하고, 또한 원형의 와셔를 사용하고 있음⁽⁶⁾을 고려하여 볼트에 도입된 축력은 H/T 볼트의 경우 와셔의 저면, 볼트 머리부에 와셔를 사용하지 않는 T/S 볼트의 경우 볼트 머리 저면에 등분포로 작용하는 것으로 가정하였다.

특 하기 위하여 볼트 보다 경도가 높은 와셔를 사용하고, 또한 원형의 와셔를 사용하고 있음⁽⁶⁾을 고려하여 볼트에 도입된 축력은 H/T 볼트의 경우 와셔의 저면, 볼트 머리부에 와셔를 사용하지 않는 T/S 볼트의 경우 볼트 머리 저면에 등분포로 작용하는 것으로 가정하였다.

4.2 해석 결과

볼트 구멍 직경 24mm의 표준공과 26mm의 과대공 시험편에 대한 유한요소해석 결과로부터 볼트의 도입축력으로 인한 이음부 내부의 수직응력, 즉 압축응력의 분포를 나타내면 그림 7과 같다.

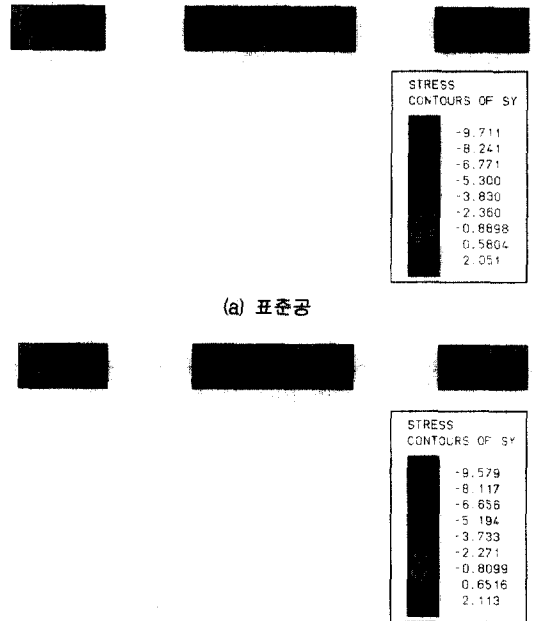


그림 7. 유한요소해석 결과

그림 7에서 고장력 볼트와 와셔의 위치는 볼트 구멍 중심을 축으로 정중상에 위치하는 것으로 하였다. 해석 결과를 살펴보면, 압축응력은 약 45°의 각도로 분포 형상을 이루나 하중점으로부터 멀어질수록 각도가 커짐을 알 수 있으며, 그 크기는

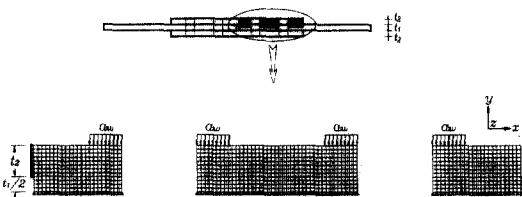


그림 6. 내부 압축응력분포의 유한요소해석 모델링

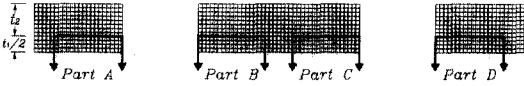


그림 8. 내부 압축응력의 분포영역 구분

와서의 저면에 가까워질수록, 볼트 구멍의 내벽에 가까워질수록 증가함을 알 수 있다.

한편, 모재와 이음판 사이의 마찰면에서의 압축응력 분포영역을 구하기 위하여 유한요소해석으

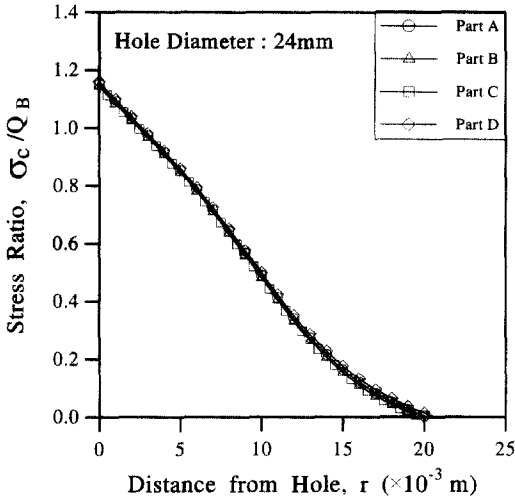
로부터 얻어진 압축응력을 등분포 하중으로 나누어 무차원화시킨 응력비(σ_c/Q_B)를 볼트 구멍의 내벽으로부터의 거리(r)에 대해 나타내면 그림 9와 같다. 그림에서 분포영역의 구분은 그림 8과 같이 두개의 볼트 구멍에 대해 내측 볼트의 좌측 구멍 내벽을 중심으로 좌측으로는 Part A, 우측 구멍 내벽을 중심으로 우측으로는 Part B로 하였으며, 외측 볼트에 대해서도 마찬가지로 각각 Part C 및 Part D로 구분하여 분석을 실시하였다.

그림 9를 살펴보면, 마찰면에서의 내부 압축응력 분포는 볼트 구멍 내벽으로부터 멀어질수록 감소하며, 분포양상은 대체로 종모양과 선형의 중간 형태로 나타나고, 그 영역은 와서의 폭의 약 2배 정도까지 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 볼트 축을 중심으로 좌우대칭의 분포양상이 나타나며, 내측 볼트 및 외측 볼트의 분포양상의 차이는 나타나지 않았다.

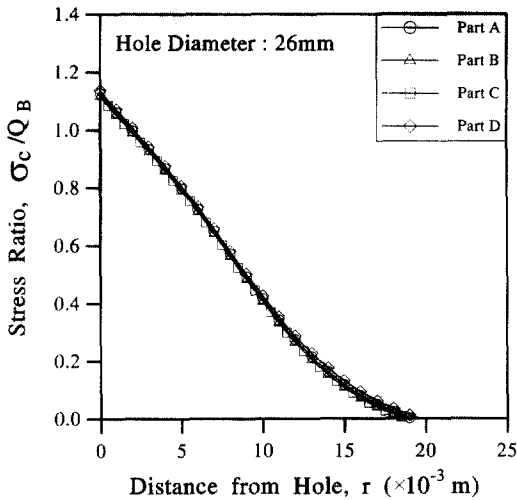
4.3 볼트 구멍 크기의 영향

볼트 구멍의 크기가 내부 압축응력의 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 직경 24mm의 표준공과 직경 26mm의 과대공 시험편에 대한 압축응력의 분포양상을 비교하였다. 그 일례로 Part A에서의 표준공과 과대공 시험편의 압축응력 분포를 그림 10에 나타내었다.

그림 10으로부터 과대공 시험편의 내부 압축응력의 분포 거리가 표준공 시험편에 비해 약 1mm 정도 작아지는 것을 알 수 있으며, 이러한 양상은 나머지 위치에서도 동일하게 나타났다. 이러한 원인은 과대공의 경우 표준공과 비교하여 볼트 구멍의 직경이 커지게 되므로 상대적으로 볼트 축력의 분포면적이 작아짐에 기인하는 것으로 판단된다. 이는 과대공의 정도, 즉 볼트 구멍의 크기가 증가할수록 내부 압축응력의 분포 면적이 감소함을 의미한다. 따라서, 실험결과로부터 과대공 시험편의 미끄러짐 계수 및 피로강도가 표준공 시험편과 비교하여 다소 저하하는 원인으로 작용하는 것으로 판단된다.



(a) 표준공



(b) 과대공

그림 9. 마찰면에서의 내부 압축응력 분포

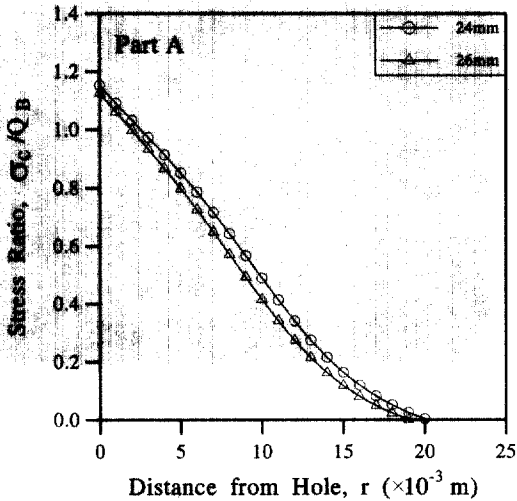


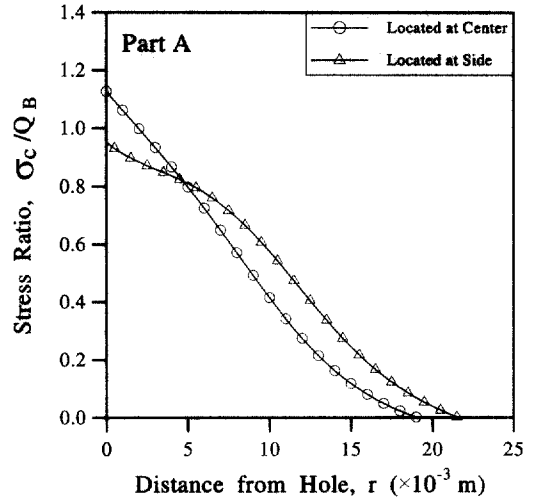
그림 10. 볼트 구멍의 크기에 따른 내부 압축응력 분포의 비교

한편, 3.3절에서 언급한 표준공 및 과대공 시험편의 피로균열의 발생위치의 평균인 11mm와 9mm를 그림 10에 나타난 압축응력의 해석결과와 비교하면 표준공 및 과대공 시험편의 피로균열은 모두 압축응력비(σ_c/Q_B) 약 0.5 부근에서 발생함을 알 수 있으며, 이 위치는 와셔를 통한 축력의 작용폭과 대체로 잘 일치하는 것이다.

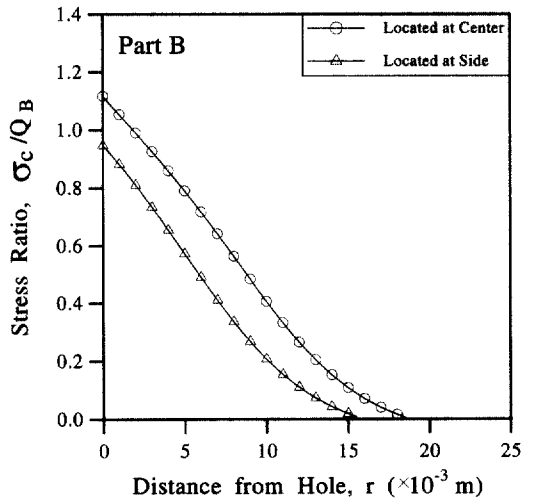
4.4 와셔의 위치에 따른 영향

고장력 볼트의 도입축력은 와셔를 통하여 이음판 및 모재로 전달되므로 와셔의 위치가 달라지면 축력의 작용 범위가 변화된다. 따라서, 와셔의 위치의 변화에 따른 내부 압축응력 분포를 비교하기 위하여 표준공 및 과대공 시험편에 대해 고장력 볼트와 와셔 모두가 볼트 구멍 중심축을 중심으로 정중앙에 위치하는 경우와 이들 모두가 볼트 구멍의 한쪽으로 치우친 경우에 대해 유한요소해석을 실시하였으며, 그 결과의 일례를 그림 11에 나타내었다.

그림 11을 살펴보면, Part A의 위치에서, 즉 볼트와 와셔 모두가 치우친 쪽에서의 내부 압축응력 분포 영역을 비교하면, 볼트와 와셔 모두가 치



(a) 과대공(Part A)



(b) 과대공(Part B)

그림 11. 와셔의 위치에 따른 내부 압축응력 분포의 비교

우친 위치에서는 축력의 작용폭이 볼트 구멍 내벽에서 1mm 떨어진 지점에서부터 분포하기 때문에 볼트와 와셔 모두가 정중앙에 위치한 경우 보다 내부 압축응력의 최대값은 작으나 분포 영역은 넓어지는 것을 알 수 있다. 반대로 볼트와 와셔가 치우친 방향의 반대쪽인 Part B의 위치에서는 볼트와 와셔가 정중앙에 있는 경우 보다 축력의 작용폭이 좁아지므로 내부 압축응력의 최대값과 분

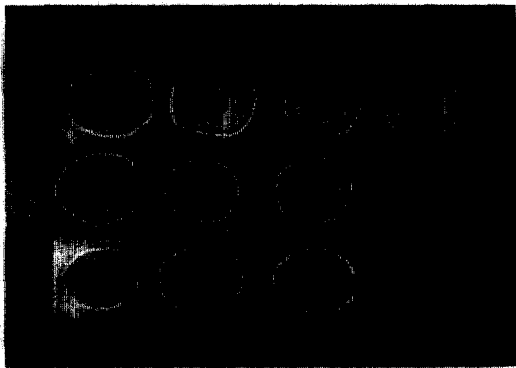
포 영역 모두가 작아지는 것을 알 수 있다.

위의 결과로부터 볼트와 와셔의 위치에 따라 내부 압축응력의 분포 영역은 변화되며, 이러한 변화는 볼트 구멍의 크기가 커질수록, 즉 과대공의 경우에는 더욱 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 고장력 볼트 이음부에서 균일한 내부 압축응력 분포를 얻기 위해서는 고장력 볼트의 체결시 볼트와 와셔의 위치를 정확하게 할 필요성이 있다. 특히, 과대공을 갖는 이음부에서는 볼트 구멍의 빈틈이 크기 때문에 고장력 볼트의 체결시 더욱 세심한 주의가 요망된다.

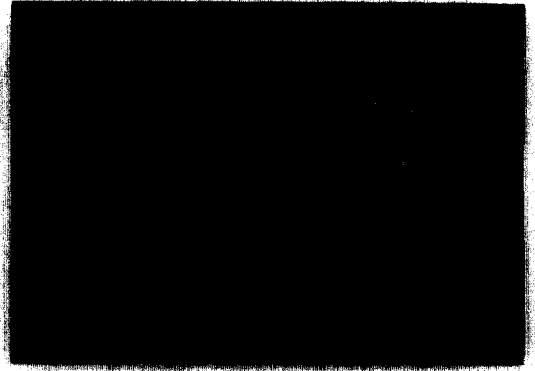
4.5 마찰면의 영역과 내부 압축응력 분포의 관계

고장력 볼트 마찰이음 시험편에 대한 기존의 연구결과^(3,4)에서 피로시험 후 시험편을 해체하여 모재와 이음판의 표면 상태를 관찰하였으며, 그 일례를 그림 12에 나타내었다.

그림 12를 살펴보면, 모재와 이음판의 마찰작용으로 인하여 볼트 구멍 둘레로 마찰면의 흔적이 환형상을 이루고 있음을 알 수 있으며, 그 형상은 볼트 구멍에 가까울수록 뚜렷한 양상이 나타나고 있다. 이러한 마찰면의 분포 상태는 주미끄러짐의 발생에 의한 마찰면의 변화를 의미하는 것은 아니고, 볼트 축력으로 인한 마찰면적을 나타내는 것이다. 또한, 볼트 구멍을 중심으로 한정된 범위까



(a) 슛볼라스트



(b) 징크리치 프리아머

그림 12. 피로시험 후 마찰면의 형상

지만 마찰영역이 나타남으로 미루어 모재와 이음판의 전체가 마찰거동에 관여하는 것이 아니라 일부 영역에 국한됨을 알 수 있다⁽⁵⁾.

즉, 마찰면의 상태가 변하는 영역은 볼트의 체결로 인하여 형성되는 압축응력의 분포영역을 의미한다. 따라서, 이를 정량적으로 평가하기 위해서는 볼트 구멍을 중심으로 마찰면의 영역을 측정함으로써 실제 압축응력의 분포영역을 간접적으로 파악할 수 있다.

한편, 피로시험이 완료된 시험편에 대해 시험편을 해체한 후 모재와 이음판의 표면에 나타난 접지면의 거리, 즉 마찰영역을 각 볼트에 대해서 4방향(그림 13 참조)으로 볼트 구멍의 내벽으로부터 측정된 결과를 빈도분포로 나타내고, 유효요소해석을 통하여 얻어진 내부 압축응력 분포영역의 해석결과를 원형좌표로 나타내어 비교하면 그림 14와 같다.

한편, 그림 14에 나타낸 마찰영역의 측정결과와 평균을 볼트 구멍내벽으로부터의 거리로 나타내고, 이 위치에서의 해석 압축응력을 비교하여

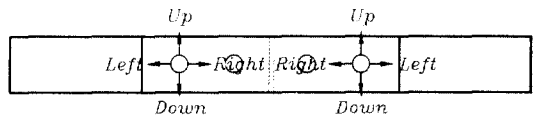
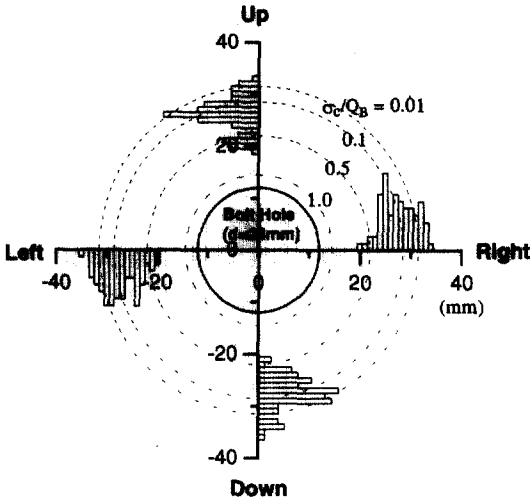
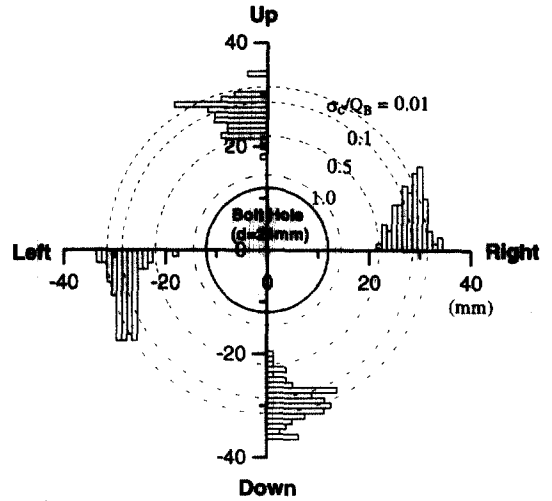


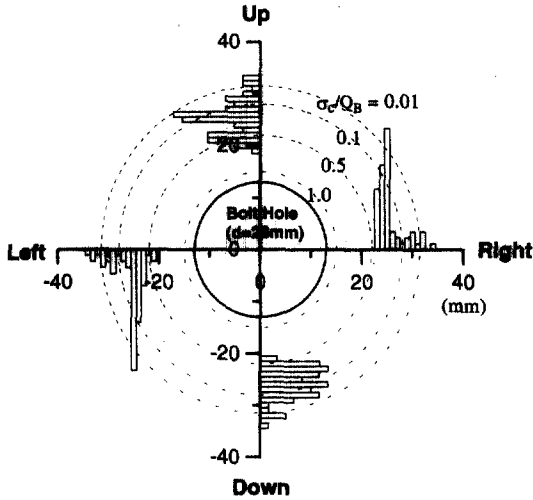
그림 13. 마찰면 영역의 측정위치 구분



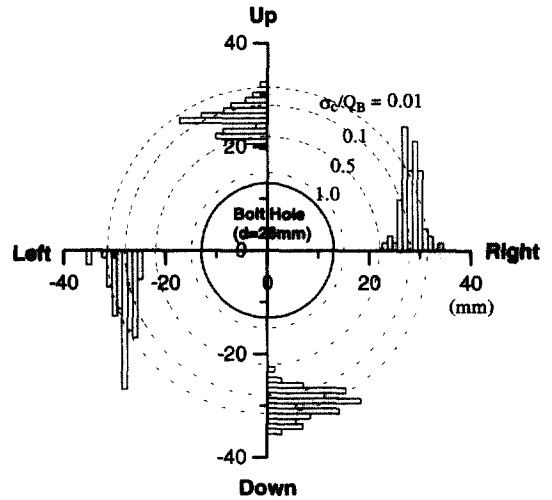
(a) H/T 볼트 (표준공, 표면처리: 샷블라스트)



(c) H/T 볼트 (표준공, 표면처리: 징크리치 프라이머)



(b) H/T 볼트 (과대공, 표면처리: 샷블라스트)



(d) H/T 볼트 (과대공, 표면처리: 징크리치 프라이머)

그림 14. 마찰면 영역과 내부 압축응력의 분포영역 비교

표 6. 마찰면의 평균과 해석결과와의 비교

볼트구멍의 크기	마찰면의 조건	볼트 종류	마찰면의 평균 (mm)	평균거리에서의 해석 압축응력 (σ_c/Q_B)
표준(24mm)	샷블라스트	H/T 볼트	15.15	0.16
과대(26mm)	샷블라스트	H/T 볼트	12.63	0.24
표준(24mm)	징크리치 프라이머	H/T 볼트	15.86	0.12
과대(26mm)	징크리치 프라이머	H/T 볼트	14.74	0.14

표 6에 나타내었다.

그림 14와 표 6를 살펴보면, 마찰영역의 측정 결과는 각 측정 방향에 대해서 뚜렷한 차이가 없고, 마찰면의 표면처리 조건에 따라서도 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러나, 과대공의 경우에는 축력의 작용폭이 상대적으로 작아져 마찰영역이 줄어들음을 알 수 있다. 한편, 측정치의 평균은 슛블라스트를 실시한 과대공의 경우를 제외하면 유한요소해석에 의한 압축응력의 크기(σ_c/Q_B)의 약 0.07~0.16 정도의 범위에 분포하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 마찰면 영역의 측정이 마찰면을 슛블라스트한 경우와 같이 시험편의 표면상태에 따라 다소 차이가 있고, 측정이 육안에 의한 것임을 감안하면 해석 결과는 측정 결과에 매우 근접하는 것으로 판단되므로, 마찰면의 표면상태를 측정하는 간접적인 방법은 이음부의 내부 압축응력 분포영역을 파악하는데 있어 좋은 방법인 것으로 판단된다.

5. 결 론

과대공을 갖는 고장력 볼트 이음부의 역학적 특성을 살펴보기 위하여 실험적 연구로부터 미끄러짐 계수와 피로강도 등의 역학적 성질을 평가하였으며, 유한요소해석을 실시하여 내부 압축응력의 분포영역을 비교, 분석하였다.

실험결과 과대공을 갖는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 계수와 피로강도는 표준공을 갖는 이음부와 비교하여 큰 차이는 없으나 다소 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 과대공 시험편의 경우 볼트 구멍의 크기가 표준공 시험편과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 축력의 작용폭이 좁아져 마찰영역으로 작용하는 내부 압축응력의 분포영역이 작아지기 때문으로 판단되며, 이는 유한요소해석 결과로도 확인할 수 있었다.

또한, 피로시험 결과 과대공 시험편의 피로균열의 발생점이 표준공 시험편 보다 볼트 구멍 내

벽에 가까운 것을 알 수 있어, 피로균열의 발생위치는 고장력 볼트의 도입축력에 의해 모재와 이음판에 형성되는 내부 압축응력의 분포영역과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

한편, 고장력 볼트의 체결에 의하여 모재와 이음판의 접촉면에 형성된 마찰영역을 측정한 결과, 이는 유한요소해석에 의한 내부 압축응력의 분포영역과 잘 일치하는 것으로 나타나 이음부 내부에 전달되는 압축응력의 분포영역은 마찰면의 표면상태를 관찰함으로써 간접적인 측정이 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 건설교통부, "도로교 표준시방서 - 설계·시공 및 유지관리편", 1996, pp.175~184.
- (2) 김성훈, 이승용, 최준혁, 장동일, "고장력 볼트 이음부의 내부 압축응력 분포", 한국강구조학회 논문집, 제9권 제2호, 1997, pp.171~179.
- (3) 최일윤, 이승용, 경갑수, 장동일, "축력 및 표면조도를 감소시킨 고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로거동", 대한토목학회논문집, 제16권 제 I-5호, 1996, pp.607~619.
- (4) 최준혁, "고장력 볼트 마찰이음부의 정적 및 피로거동에 관한 실험 및 해석적 연구", 한양대학교 공학석사학위논문, 1996, 12.
- (5) Tanihira, T., Toshimori, N., Fujisawa, M. and Taito, Y., "Experiment and Analysis of Cross Ribed Split Tee Connection Subject to Tension", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.36A, 1990.
- (6) AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", 1986, pp.109~113.
- (7) British Standards Institution, "Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 3. Code of Practice for Design of Steel Bridges", 1982.
- (8) ECCS, "European Recommendations for Bolted Connections in Structural Steelwork", 1985.
- (9) 日本道路協會, "道路橋示方書·同解説", 1994,

pp.174~193.

- (10) 日本建築學會, "高力ボルト接合設計施工指針", 1993, pp.11~22.
- (11) 三木千壽, 西村俊夫, "高力ボルト摩擦接合のボルト締付力が継手の疲勞強度に及ぼす影響", Technical Report, No.12, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, 1972.
- (12) 日本鋼構造協會, "引張り接合", JSSC, Vol.2, No.12, 1996, pp.56~73.
- (13) 長嶋文雄, "摩擦接合継手のすべり問題および設計への適用", 博士學位論文, 1996.
- (14) 日本橋梁建設協會, "高力ボルト施工マニュアル", 1990, pp.2.

(접수일자 : 1998년 4월 30일)