

판 두께와 볼트 크기를 고려한 고장력 볼트 이음부의 극한 거동

Ultimate Behavior of High-Tension Bolted Joints Considering Plate Thickness and Bolt Size

김 성 보* 최 종 경* 허 인 성*

Kim, Sung-Bo Choi, Jong-Kyoung Heo, In-Sung

(논문접수일 : 2008년 7월 9일 ; 심사종료일 : 2008년 10월 13일)

요 지

본 연구에서는 판 두께와 볼트 크기에 따른 고장력 볼트 마찰이음부의 극한 거동을 비선형 유한 요소 해석 및 실험을 통하여 분석하였다. 볼트의 크기 및 모재의 두께가 고장력 볼트 마찰이음부에 끼치는 영향을 미끄러짐 하중, 볼트의 변형 및 파괴하중과의 관계와 함께 파악하였다. M20, M22, M24의 세가지 볼트와 모재의 두께가 12mm, 16mm, 20mm, 30mm, 40mm인 경우에 대하여 압축력을 받는 고장력 볼트 이음부의 극한 거동을 고찰하였다. 이음부의 힘-변위 관계 및 외력-변형도 관계를 실험적으로 도출하였으며 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용한 수치해석 결과와 비교, 분석하였다.

핵심용어 : 고장력 볼트, 미끄러짐, 극한 거동, 강제 마찰, 모재두께, 볼트 크기

Abstract

The ultimate behavior of high-tension bolted joints with various plate thickness and bolt size is investigated using nonlinear F.E. analysis and experimental study. The relation with sliding load, bolt deformation, and failure modes are presented based on plate thickness and bolt size. Three kinds of the bolt diameter(M20, M22, M24) and five types of the steel plates(12mm, 16mm, 20mm, 30mm, 40mm) are considered for the ultimate behavior of the bolted joints. The numerical model, constructed by commercial F.E. program, ABAQUS, of ultimate behavior of bolted joints is introduced and verified by experimental results. The force-displacement and force-axial strain relations are measured and compared with the results by 3D finite element analysis.

Keywords : high-tension bolt, slip, ultimate behavior, steel friction, plate thickness, bolt size

1. 서 론

강구조물은 재료의 특성상 많은 이음부위가 발생되며, 그 연결방법으로는 고장력 볼트와 용접에 의한 방법이 주로 사용되고 있다. 용접이음은 용접기능공의 숙련도 및 작업조건에 따라 이음부의 신뢰성이 좌우되어 현장에서의 품질관리가 어렵다. 이러한 이유로 공사현장에서는 신뢰성, 시공성 및 경제성을 종합적으로 고려하여 고장력 볼트의 사용이 점차 늘어나고 있다. 고장력 볼트는 구조적 성능의 우수성으로 인하여 건설 분야의 주요 재료로써 지배적인 위치와 위상을 누리고 있고, 그 사용성이 증가함에 따라 이에 대한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다. 과대공 및 시공 자체의 관리에

다른 마찰계수의 변화 등 현장에서 나타날 수 있는 여러 가지 상황들에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있으며, 나아가 강구조물의 대형화와 장대화에 따른 고장력 볼트의 대형화에 대해서도 연구가 활발히 진행되고 있다.

최일윤 등은(1996) 축력 및 표면조도를 감소시킨 고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로거동에 대한 연구를 수행하여 도입축력과 표면조도에 따른 볼트 이음부의 피로강도를 조사하였다. 조선규는(1997) 볼트 구멍의크기, 표면처리 및 체결력이 미끄러짐 하중에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 발표하였다. 김성훈 등은(1997) 고장력 볼트 이음부의 유한요소 해석을 실시하여 마찰면의 형상과 내부 압축응력의 분포 영역 및 유효단면적의 산정 방법을 연구하였다. 박용명 등은

† 책임저자, 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수
Tel: 043-261-3241 ; Fax: 043-275-2377
E-mail: sbkim@chungbuk.ac.kr

* 충북대학교 토목공학과 석사

· 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

(2000) 내후성강재가 사용된 고장력볼트 이음부의 미끄러짐 계수 평가실험을 수행하였으며, 최성모 등은(2004) 각국의 설계기준에 나타난 마찰접합부의 표면처리 상태와 볼트 구멍의 유격 등과 같은 다양한 설계조건을 만족할 수 있는 현실적인 기준을 설정하였고 파대구멍 또는 슬롯구멍을 갖는 고장력볼트 마찰이음부의 거동에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 심재수 등은(2004) 결함이 있는 고장력 볼트 이음부의 3차원 유한요소 해석을 제시하였고 결함에 따른 보수·보강의 기준을 해석적 방법으로 접근하였다. 이승용 등은(2006) 볼트의 크기 및 판두께의 차이에 따른 고장력볼트 이음부의 역학적 거동에 관한 연구를 통해 M30 고장력볼트의 릴랙세이션 및 미끄러짐 계수에 관한 연구를 발표하였다. 한진희 등은(2008) 압축력을 받는 고장력 볼트 마찰이음부의 미끄러짐 거동에 관한 연구를 통해 M20 볼트가 사용된 마찰이음부의 미끄러짐 특성을 분석하였다.

본 논문에서는 판 두께 및 볼트 크기에 따른 고장력 볼트 마찰이음부의 극한 거동을 3차원 유한 요소 해석과 실험을 통하여 규명하였다. M20, M22, M24의 볼트 및 모재의 두께가 고장력 볼트 마찰이음부에 끼치는 영향을 미끄러짐 하중, 볼트의 변형 및 파괴하중과의 관계와 함께 파악하였다. 마찰 이음부의 극한 거동에 대한 유한요소해석에서, 재료실험을 통하여 실제 사용된 응력-변형도 곡선을 적용하여 초기 미끄러짐 하중 이후의 볼트 접합부의 극한 거동을 분석하였다.

2. 압축력을 받는 고장력볼트 이음

본 논문에서 연구대상으로 사용된 고장력 볼트 이음부의 형상은 그림 1과 같으며 구체적인 제원은 표 1에 나타나 있다. 볼트의 종류는 M20, M22, M24의 세 종류이고 모재의 두께는 12mm, 16mm, 20mm, 30mm, 40mm이다. 볼트 구멍은 도로교시방서 규정에 따라 볼트지름의 3mm 여유 공간을 두고 천공하였고, 최소 중심간 거리는 볼트 지름의 3배를 기준으로 설정하였다.

볼트 이음부에는 그림 2와 같은 F10T의 마찰이음용 고장력볼트가 사용되었고, 그 제원은 표 2와 같다. 고장력 볼트의 조임에는 토크법과 회전법이 있으며, 본 논문에서는 토크법을 사용 도입축력을 확보하였다. 토크법은 조임 토크와 조임력의 선형관계를 이용한 조임 관리방법이다. 표 3은 볼트에 따른 도입축력을 나타낸 것으로 볼트 조임 축력은 설계볼트축력을 10% 증가시킨 값을 적용하였다.

볼트 체결에 도입되는 축력을 확인하기 위하여, 그림 3과 같이 볼트의 머리부분과 와셔에 직경 3mm의 구멍을 천공하여 변형도게이지를 부착하고 볼트 체결에 도입되는 축력을

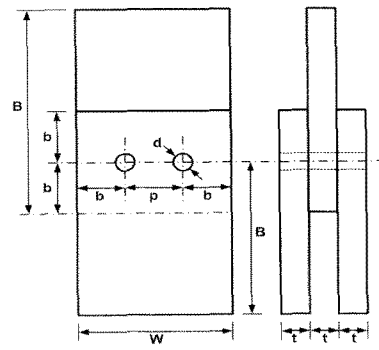


그림 1 Type of bolted connection

표 1 Property of bolted connection

Bolt	Plate property(mm)					
	Thickness (t)	Hole diameter (d)	Width (W)	Length (B)	Edge distance (b)	Pitch (p)
M20	12, 16, 20, 30, 40	23	250	300	75	100
M22	12, 16, 20, 30, 40	25	250	300	75	100
M24	12, 16, 20, 30, 40	27	250	300	75	100

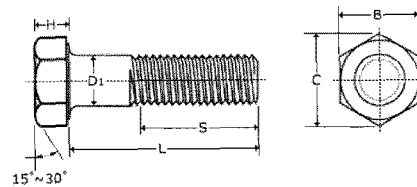


그림 2 High tension bolt

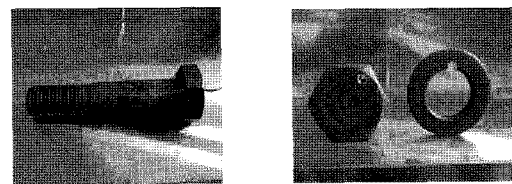


그림 3 Bonded strain-gage and drilled high-tension bolt

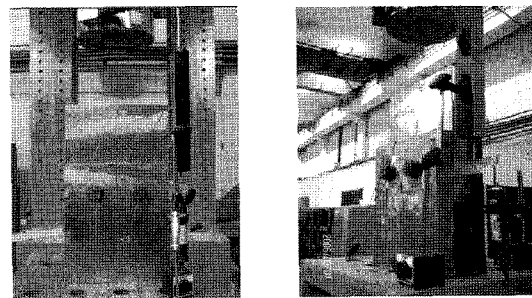


그림 4 Set-up of test specimen and equipments

확인하였다. 그림 4는 상기와 같이 제작된 실험 시편의 모습이고 이음의 극한 거동을 측정하기 위하여 그림 5(a)와 같이

표 2 Dimensions of high-tension bolts (unit : mm)

Size	Thickness (T)	Length (L)	Effective length(S)	Width (B)	Height (C)
M20	12	70	35	18	35
	16	80	35		
	20	110	35		
	30	140	40		
	40	170	45		
M22	12	80	40	35	40
	16	90	40		
	20	100	40		
	30	140	40		
	40	160	40		
M24	12	80	40	40	45
	16	90	40		
	20	100	50		
	30	140	50		
	40	160	50		

표 3 Axial force of bolt

Division	Size	Bolt axial force of design (kN)	Bolt axial force of torque (kN)	Average axial force (kN)	
				Min.	Max.
F10T	M20	160	180	170	185
	M22	200	220	210	230
	M24	235	260	245	270

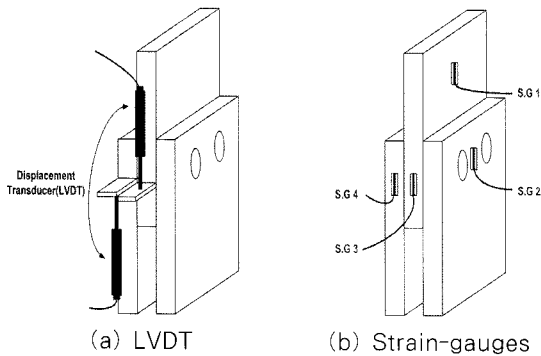


그림 5 Location of LVDT and strain-gauge

중앙판과 측면판에 LVDT를 설치하였고 변형도계이치를 그림 5(b)와 같이 부착하여 압축력의 증가로 인한 이음부의 변형을 측정하였다.

3. 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 및 파괴 모드

그림 6(a)와 같이 이음부의 압축력이 미끄러짐 하중보다 작은 경우, 하중이 재하 되어도 미끄러짐은 발생하지 않는다. 따라서 시편의 처짐은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

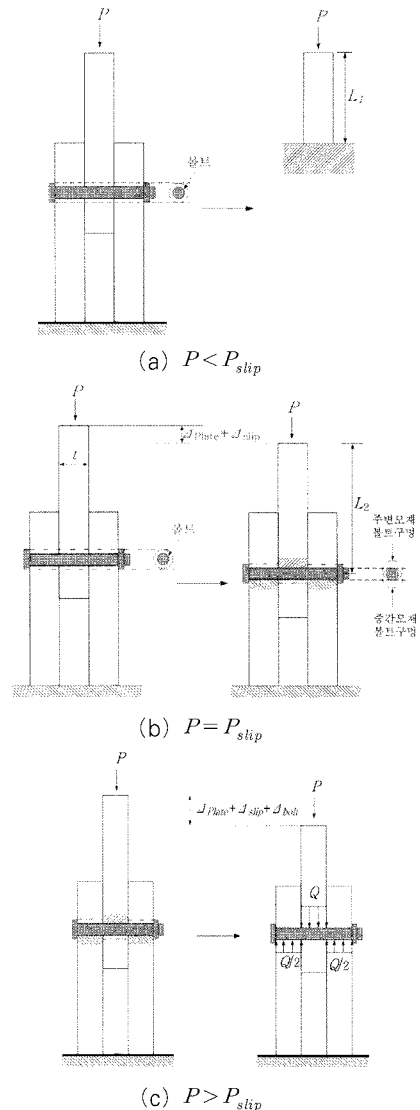


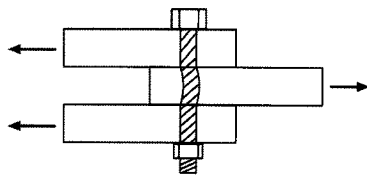
그림 6 Slip behavior of bolted joint

$$\Delta = \Delta_{plate} \approx \frac{PL_1}{EA} \quad (1)$$

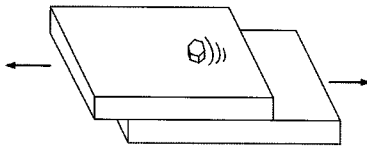
그림 6(b)는 이음부의 압축력과 미끄러짐 하중이 같아지는 경우로 볼트와 볼트구멍사이의 여유공간(3mm)인 Δ_{slip} 만큼 이음부재 사이에서 미끄러짐이 발생하며 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\Delta = \Delta_{plate} + \Delta_{slip} \approx \frac{PL_2}{EA} + \text{여유공간}(3mm) \quad (2)$$

그림 6(c)는 이음부의 압축력이 미끄러짐 하중보다 큰 경우, 볼트와 이음부재가 하중이 재하되는 방향으로 접촉하게 된다. 이때 볼트에도 하중이 가해짐으로서 볼트의 변형이 발생하게 되며, 볼트의 직경이 모재의 두께보다 상대적으로 큰



(a) Shear failure of bolt



(b) Bearing failure of plate

그림 7 Failure mode of bolted joint

경우 모재의 지압변형에 따른 처짐이 발생하기 시작한다. 즉 발생하는 총변위를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta = \Delta_{plate} + \Delta_{slip} + \Delta_{bolt} + \Delta_{bearing} \quad (3)$$

외력의 지속적인 증가로 인해 극한하중에 도달하면서 이음부는 파괴된다. 극한하중에서 이음부의 파괴 양상은 볼트의 크기 및 모재의 두께에 따라 그림 7과 같은 형태로 구분된다. 즉 모재의 두께가 볼트의 직경보다 상대적으로 두꺼운 경우 볼트의 전단파괴가 발생하고, 볼트의 직경이 모재의 두께보다 큰 경우 주로 모재의 지압파괴가 이음부의 파괴모드로 나타난다.

4. 유한요소 해석

본 논문에서는 고장력 볼트 이음부의 해석을 위하여 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 이음부재 및 볼트를 8절점 고체요소(C3D8)를 이용하여 모델링하였다. 해석 모델의 기본 형상은 실제 시험체와 동일하게 모델링하였으며, 기하학적 대칭성을 고려하여 그림 8과 같이 전체 해석모델의 1/4 모델을 작성하였다.

강재의 비탄성 유한요소해석에서는 강재의 응력-변형도 곡선식을 도입해서 탄성 및 소성거동에 대한 정확한 거동을 얻을 수 있다. 이때 강재의 응력-변형도 관계는 그림 9와 같이 실제 시험 실험에서 산출된 이음부재의 응력-변형도 곡선을 평균적으로 단순화하여 유한요소해석에 적용하였다. 즉, 변형 경화가 발생하는 변형도를 항복변형도의 10배로 정의하고 경화구간의 기울기를 탄성구간의 2.4%로 적용하였다. 단순화된 응력-변형도 곡선식의 좌표값을 표 4에 나타내었으며 볼트의 재료 특성은 탄성-완전소성으로 가정하였다.

볼트의 직경 및 모재의 두께별 마찰계수는 볼트의 도입축

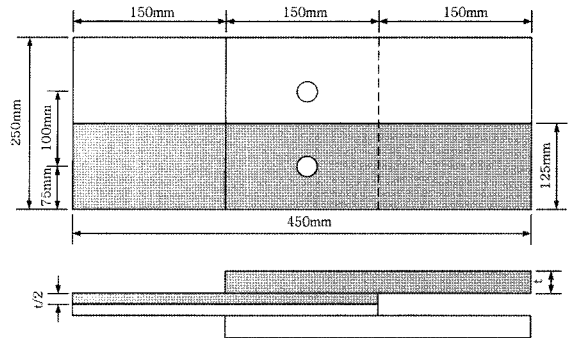


그림 8 Symmetrical modeling for F.E.M

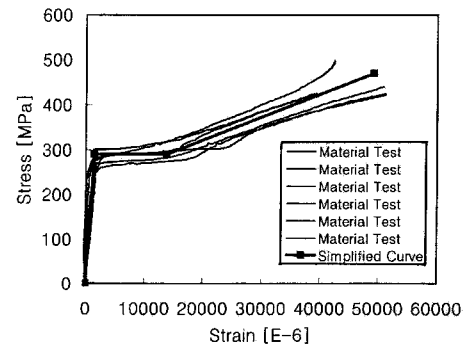


그림 9 Stress-strain relation

표 4 Material property of analysis model

	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio	Yield stress (MPa)	Simplified Stress-strain curve	
				Stress (MPa)	Strain (E-6)
Plate	2.1×E5	0.3	290	290	1380
				290	13800
				470	49185
Bolt	2.1×E5	0.3	900	900	4286
				900	42860

력과 실험 결과 얻어진 미끄러짐 하중을 고려하여 계산된 값을 표 5와 같이 사용하였다.

외력의 증가와 함께 마찰이음부의 미끄러짐 해석에서는 마찰면에 접촉요소를 추가하여 해석에 사용한다. 접촉요소를 구성하는 절점들의 상대적인 위치에 따라 요소의 강성을 비선형적으로 보정하면서 다양한 접촉 거동을 모델링을 할 수 있다. 접촉요소는 그림 10에 나타난 두 영역 A와 B가 겹치는 것을 방지하는 역할을 제외하고는 영역들의 거동에 아무런 저항을 하지 않는다는 점에서 일종의 가상적인 요소로 정의될 수 있다. 접촉요소는 두 영역 A 및 B의 상대적인 거동에 따라 길이가 증가하거나 감소하는 상태가 될 것이다. 이는 접촉요소의 길이는 두 영역 사이의 간격으로 정의되며, 이 값은 상수가 아니라 접촉문제의 수렴해를 구하는 반복과정에서 계속 변하는 변수가 된다.

표 5 Coefficient of friction

Bolt Size	Bolt axial force (kN)	Thickness (mm)	Coefficient of friction
M20	180	12	0.167
		16	0.167
		20	0.167
		30	0.208
		40	0.208
M22	220	12	0.182
		16	0.182
		20	0.182
		30	0.216
		40	0.216
M24	260	12	0.202
		16	0.202
		20	0.202
		30	0.231
		40	0.231

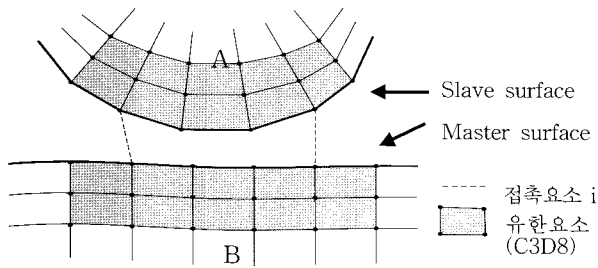


그림 10 Mechanical surface interaction with friction

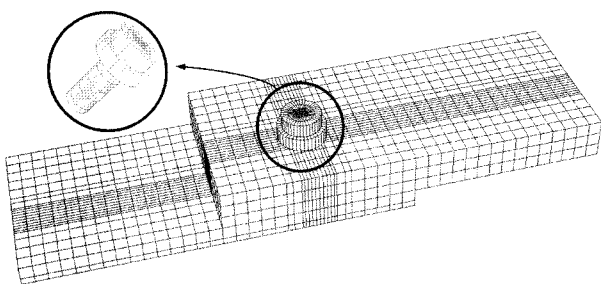


그림 11 F.E.M model of bolt connection

접촉요소의 축방향 변형도가 인장축(+)이면 요소의 길이가 증가된 상태를 의미하며, 이때는 접촉요소가 두 영역의 변형을 구속해서는 안 된다. 즉, 접촉요소의 탄성계수를 무시할 정도의 작은 값으로 설정한다. 변형도가 압축이면 요소의 길이가 감소되어 수축된 상태를 나타내고, 변형도의 값이 -1에 이르게 되면 요소의 길이가 0이 되어 두 영역 사이의 간격이 완전히 사라지게 되므로 접촉된 상태를 나타낸다. 결국 변형도가 -1 보다 작게 되면 한 영역이 다른 영역의 내

부로 침범한 형태가 되어 물리적으로 정의될 수 없는 상태가 되므로, 겹쳐지는 것을 방지하기 위하여 요소의 탄성계수를 무한히 큰 값으로 지정해야 한다.

그림 11은 상기에 기술된 조건들을 적용하여 완성된 유한요소해석모델을 나타낸다. 특히, 볼트 주변 요소의 변장비는 1에 근접하도록 분할하였으며, 요소의 평균적 크기는 2mm×6mm×10mm이다.

5. 유한요소해석 및 실험 결과 고찰

5.1 미끄러짐 하중과 극한하중-변위

표 6 및 그림 12(a)~(c)에서 M20, M22, M24볼트가 사용된 시편의 모재 두께별 미끄러짐 하중, 극한하중, 극한변위를 나타내었다. 표 6에서 Failure Displacement 는 시편이 파괴되었을 때 예측된 변위이다. 볼트의 크기가 동일한 경우 M24-16T의 경우만 제외하고 모재의 두께가 12T, 16T의 미끄러짐 하중은 크게 변화하지 않게 예측되었으나 30T 이상으로 모재의 두께가 두꺼워질수록 미끄러짐 하중이 증가하여 40T인 경우 12T에 비하여 평균 약 27% 정도 증가함을 확인하였다. 또한, 동일한 볼트를 사용하였을 때에 12T, 16T, 20T로 두께가 증가할수록 극한하중의 증가율은 최대 69%로 예측되었으나 30T에서 40T로 증가하였을 때에 극한하중의 증가율은 크지 않음을 확인하였다. 즉, 30T, 40T의 경우 파괴모드가 판의 지압보다는 볼트의 전단파괴가 지배적으로 나타났기 때문이라고 판단된다. 극한변위는 볼트의 크기 및 판 두께에 따라 발생하는 뚜렷한 특징은 예측되지 않았으나 볼트의 크기가 클수록 볼트의 휨변위가 작게 발생하여 전반적으로 극한변위가 감소하는 경향이 나타났다.

그림 13은 모재의 두께 변화에 따른 볼트직경별 힘-변위 관계이다. 모재 두께가 12T인 경우 볼트의 직경에 상관없이 극한하중이 유사하지만, 모재의 두께가 증가할수록 M20과 M24 사용에 따른 극한하중의 증가효과가 커짐을 알 수 있다. 즉, 12T인 경우 M22, M24의 극한 하중은 M20에 대하여 각각 106%, 107%로 거의 동일하지만, 30T의 경우 각각 121%, 134%로 증가함을 알 수 있다. 이는 M20을 기준으로 M22, M24 볼트의 면적비인 121%, 144%와 유사하다. 즉, 모재가 얇은 박판의 경우 판의 지압 및 휨좌굴이 파괴모드로 나타나지만 후판인 경우 볼트의 전단파괴가 파괴모드를 결정하기 때문이라고 판단된다.

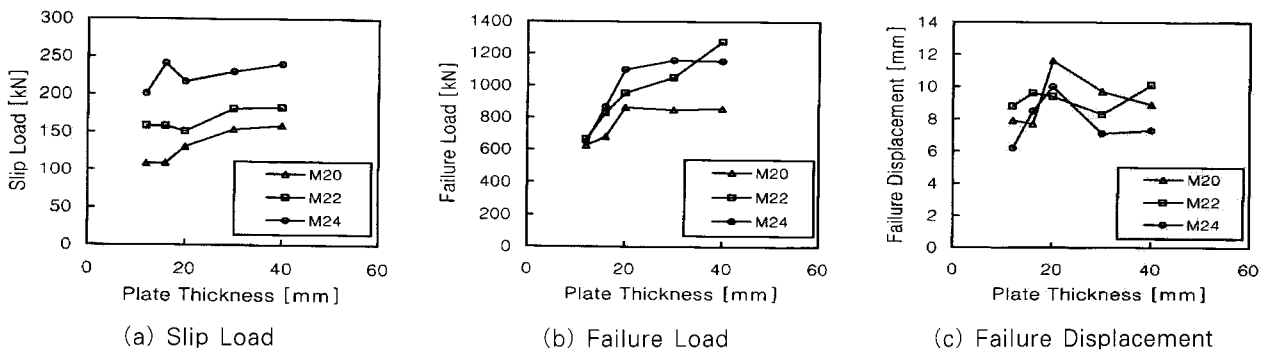


그림 12 Load-displacement curve with bolt types

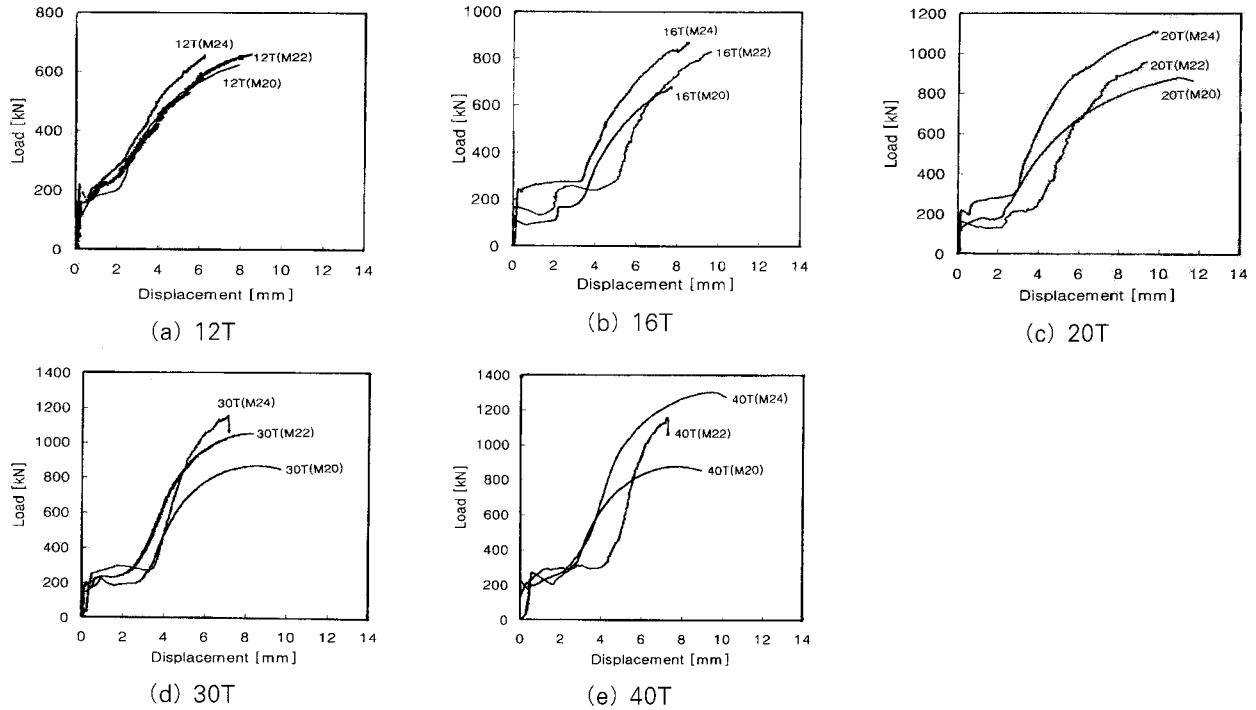


그림 13 Load-displacement curve with plate thickness

표 6 Slip and failure Load

BoltSize	Thick-ness (T)	Slip Load (kN)	Failure Load (kN)	Failure Displacement (mm)
M20	12	108.3	624.9	7.9
	16	109.4	680.9	7.7
	20	130.8	862.4	11.6
	30	153.9	848.1	9.7
	40	158.7	856.4	8.9
M22	12	158.3	665.4	8.8
	16	158.3	829.6	9.6
	20	151.4	953.1	9.4
	30	181.3	1052.3	8.3
	40	182.9	1276.6	10.1
M24	12	200.9	649.2	6.2
	16	241.3	868.5	8.5
	20	216.8	1100.0	10.0
	30	230.3	1158.8	7.1
	40	240.1	1152.7	7.3

5.2 하중-변형도 곡선

그림 14에 이음부재의 두께별 하중-변형도를 게이지의 부착위치에 따라 도시하였다. SG1 위치의 경우 중앙판의 중앙 지점 변형도로서 지속적인 압축력에 의해 압축변형이 거의 선형적으로 증가하게 나타났다. 특히 미끄러짐이 발생하는 하중에 도달하면 변형도의 증가가 급격히 변화함을 알 수 있다. SG2는 측면판의 볼트 사이에서의 변형도를 나타낸다. 미끄러짐 이후 파괴하중에 도달함에 따라 볼트 주변의 국부적인 지압 거동 때문에 변형도의 부호가 압축에서 인장으로 바뀌는 현상이 발생하였다. 판 두께가 클수록 변형도의 변동 폭도 크게 예측되었다. SG3와 SG4의 경우 동일선상에서 각각 중앙판과 주변판 옆면에서의 변형도이다. SG3에서의 변형도는 미끄러짐이 발생하기 전까지는 압축변형을 나타내고 있지만 미끄러짐이 발생한 후에는 인장의 부호를 나타내고

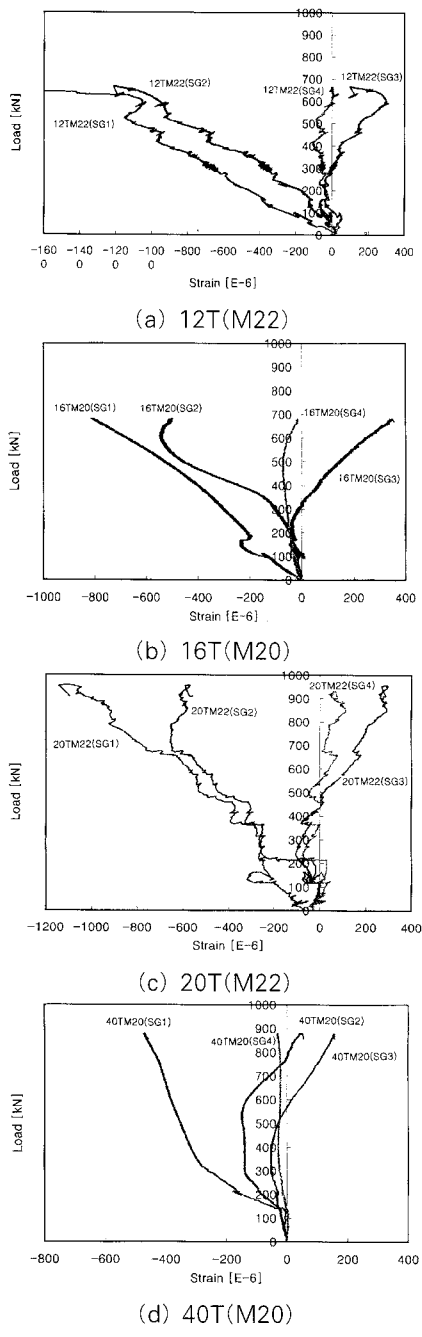


그림 14 Experimental results of load-strain curve

있다. 이는 미끄러짐 발생후 중앙모재의 볼트 주변에서 집중하중에 의해 발생하는 국부적인 지압 거동의 영향을 받기 때문이라고 판단된다. SG4는 볼트에 의해 전달된 하중이 좌, 우측 주변판으로 분산되면서 발생하는 지압응력의 분포정도가 중앙판보다 좁기 때문에 변형도 변화는 크게 발생되지 않았다.

5.3 유한 요소해석과 실험결과와의 비교

그림 15(a)~(c)는 각각 극한하중에서의 변형형상과 볼트 주변의 응력집중현상을 나타낸다. 그림 15(a)에서 외력의 증

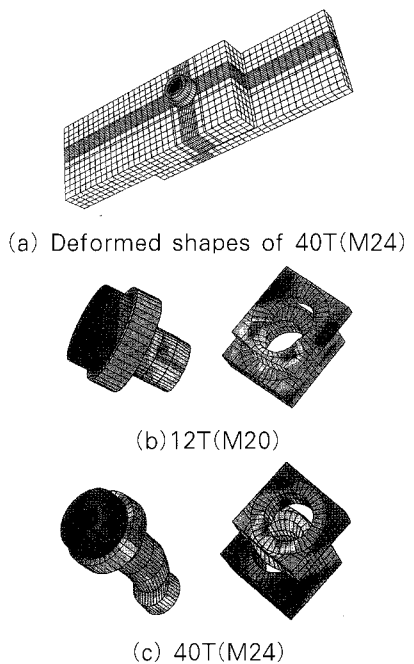


그림 15 Deformed shape and stress contour at failure

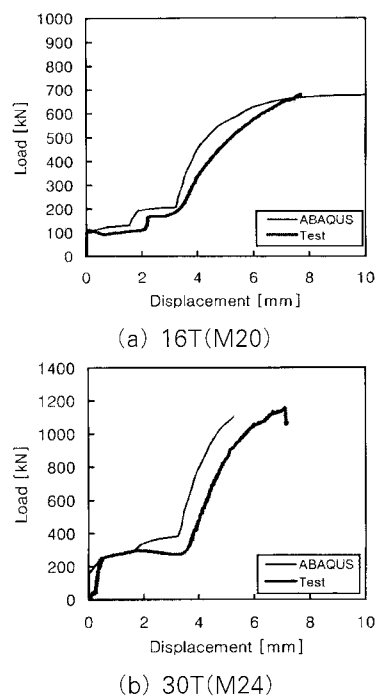
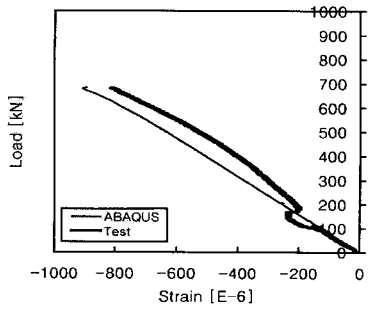


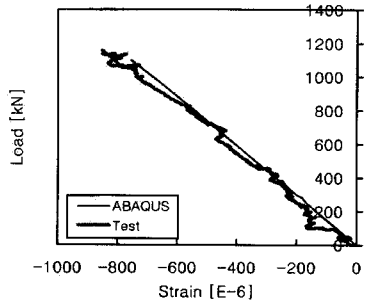
그림 16 Experimental and FEM results of load-displacement

가와 함께 발생한 미끄러짐 변위를 확인할 수 있다. 또한, 12T와 같은 박판인 경우 극한하중에 도달했을 때 볼트의 휨 변형보다 판의 지압 변형이 크게 발생되지만, 40T와 같은 후판의 경우 판의 변형보다 볼트의 전단이 파괴를 유발함을 확인할 수 있다.

그림 16(a), (b)는 유한요소 해석결과와 실험결과에 따른

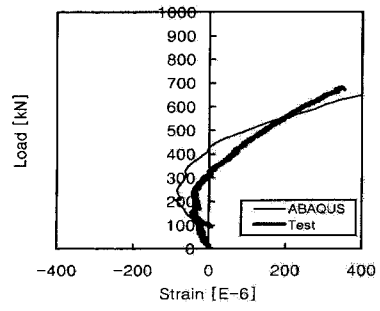


(a) 16T(M20)

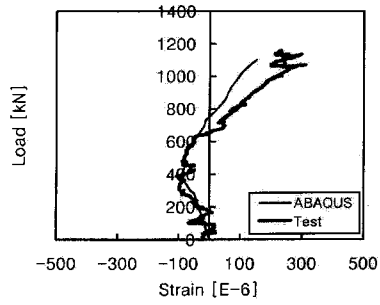


(b) 30T(M24)

그림 17 Experimental and FEM results of load-strain at SG1

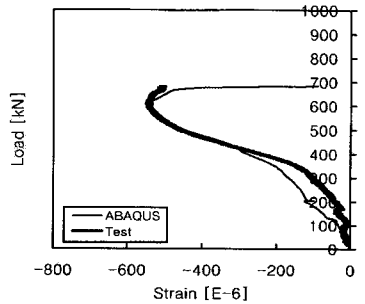


(a) 16T(M20)

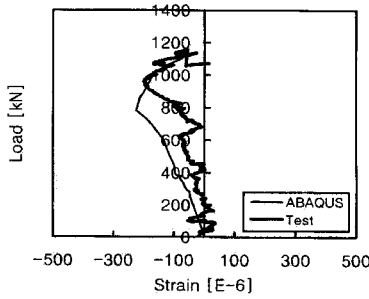


(b) 30T(M24)

그림 19 Experimental and FEM results of load-strain at SG3

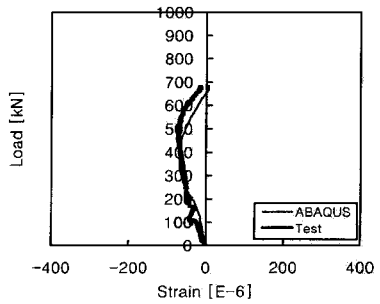


(a) 16T(M20)

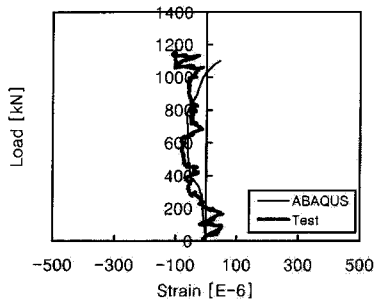


(b) 30T(M24)

그림 18 Experimental and FEM results of load-strain at SG2



(a) 16T(M20)



(b) 30T(M24)

그림 20 Experimental and FEM results of load-strain at SG4

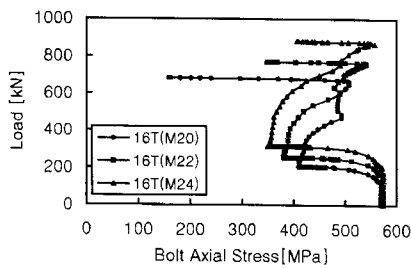
이음부의 힘-변위 결과이다. 16T에서는 외력이 미끄러짐 하중에 도달하면 모재가 볼트 상, 하단의 여유 공간에 단계적으로 접촉하여 단계적 미끄러짐이 발생하지만 30T에서는 이러한 단계적 미끄러짐보다는 지속적인 변위의 증가가 계속되고 해석결과도 동일하게 계산되었다. 또한, 미끄러짐 이후의

극한 하중에 도달할 때까지의 거동은 해석결과와 계측결과가 거의 동일하게 얻어지며 각각의 극한하중은 해석치와 실험치가 3%이내의 차이를 보임을 확인하였다.

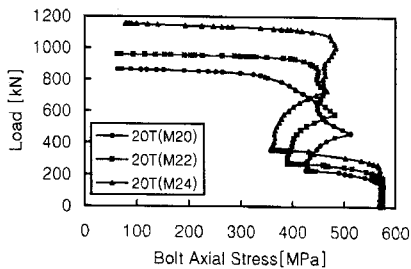
그림 17~20에서 각각 변형도 측정 위치 SG1-SG4에서 16T(M20)과 30T(M24) 시편에 대한 유한요소 해석결과와

표 7 Comparison of Experimental and FEM results

Bolt Size	Thick-ness (T)	Failure Load (kN)		Yield State Displacement (mm)		Ultimate State Displacement (mm)	
		FEM	Test	Bolt	Plate	Bolt	Plate
M20	12	577.5	624.9	0.008	0.159	0.215	0.454
	16	683.2	680.9	0.011	0.163	0.318	0.664
	20	865.8	862.4	0.018	0.170	0.465	0.814
	30	1270.9	848.1	0.161	0.312	0.499	0.653
	40	1328.0	856.4	0.185	0.336	1.224	1.367
M22	12	668.6	665.4	0.007	0.159	0.210	0.444
	16	770.0	829.6	0.010	0.162	0.265	0.533
	20	960.7	953.1	0.015	0.167	0.424	0.799
	40	1581.0	1276.6	0.178	0.329	1.318	1.460
M24	12	757.4	649.2	0.006	0.158	0.240	0.431
	16	881.1	868.5	0.009	0.161	0.255	0.528
	20	1155.4	1100.0	0.009	0.161	0.395	0.791
	30	1099.8	1158.8	0.027	0.188	0.284	0.439
	40	1718.1	1152.7	0.170	0.321	1.410	1.554



(a) 16T



(b) 20T

그림 21 Bolt axial stress

계측결과 나타난 변형도를 도시하였다. 모든 위치에서 외력의 증가와 함께 변화되는 변형도가 계측결과와 해석치가 거의 동일하게 계산되어 본 논문에서 작성한 유한요소해석 모델의 신뢰성을 확인할 수 있다.

표 7에서 유한요소해석 결과 얻어진 파괴하중을 전체 실험시편에 대하여 비교하였다. Yield State Displacement와 Ultimate State Displacement는 각각 중앙판의 볼트 구멍 상단부와 볼트와의 접촉부분에서 최초 항복이 발생했을 때의 변위 및 유한요소해석이 종료되었을 때의 변위를 나타

낸다. 볼트의 파단이 발생하는 30T이상의 경우를 제외하고 12T, 16T, 20T에서는 모든 경우에서 해석치와 실험치가 최대 8%의 오차 이내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만, 40T와 같이 후판이 사용된 시편에서는 해석치가 시험치에 비하여 최대 35% 크게 계산되었다. 이는 볼트의 재료특성을 탄성-완전 소성으로 가정하여 유한요소 해석 수행에 있어서 실험에서 관찰된 볼트의 파단을 모사하지 못한 결과라고 판단된다. 같은 판 두께에 대하여 볼트의 크기를 증가시켜 극한 하중을 예측한 결과, M20을 기준으로 M24를 사용한 경우 극한 하중의 증가량은 12T, 16T, 20T, 30T, 40T에서 각각 4%, 28%, 28%, 37%, 35%로 예측되었다. 즉, 12T와 같은 박판에서는 볼트의 크기 증가에 따른 이음부의 극한 하중 증가효과가 크지 않음을 확인하였다.

또한, 중앙판의 볼트구멍 상단부와 볼트와의 접촉부분에서 최초 항복이 발생하여 파괴하중에 도달한 경우 볼트의 휨변위 및 판의 지압변위를 각각 비교하였다. 최초 항복상태에서 12T, 16T, 20T에서 볼트의 휨변위는 0.01mm~0.02mm 정도로 작게 발생하지만 40T와 같은 후판의 경우 약 0.2mm 정도의 큰 값을 가지는 것으로 계산되었다. 한편, 극한상태에서 볼트와 중앙판의 접촉부에서의 볼트의 휨변위 및 판의 지압변위성분을 비교하였다. 12T, 16T, 20T의 경우 극한 상태에서 볼트의 휨변위에 대한 판의 지압변위 비가 약 1.8~2.1의 범위에 있지만, 30T 및 40T에서는 1.1~1.3으로 나타났다. 즉, 12T와 같은 박판인 경우 극한하중에 도달했을 때 볼트의 휨보다 판의 지압변형이 파괴모드를 지배하고, 40T와 같은 후판의 경우 파괴시 볼트의 휨강도가 이음부의 파괴를 유발함을 알 수 있다.

그림 21은 외력의 증가에 따른 볼트의 축방향 응력에 대한 이력곡선이다. 외력이 미끄러짐 하중에 도달하기 전에는 볼트의 축응력은 초기 도입축력에 대응하는 일정한 값을 유지하지만, 미끄러짐 하중 이후에는 초기응력의 약 30%정도 감소하다가 극한하중에 도달하면 급격히 축응력이 감소하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 모재 두께 및 볼트 크기에 따른 고장력 볼트 이음부의 3차원 유한요소해석을 실시하여 실시편의 실험결과와 비교, 분석을 수행하였다. 실험과 동일한 위치의 변위 및 변형도를 계산하여 하중-변위 관계와 하중-변형도 관계를 산출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 볼트의 크기가 같은 경우 미끄러짐 하중은 모재 두께가 12T, 16T, 20T인 경우 거의 동일하게 예측되었으

나, 모재의 두께가 30T, 40T로 두꺼워질수록 미끄러짐 하중이 증가하여 40T인 경우 12T에 비하여 약 27% 증가하였다.

- 2) 동일한 두께를 갖는 시편에 대하여, 볼트의 크기를 증가시켜 극한 하중을 예측한 결과, M20을 기준으로 M24를 사용한 경우 극한 하중의 증가량은 12T 및 40T에서 각각 4%, 35%로 예측되어, 볼트의 크기 증가에 따른 이음부의 극한하중 증가효과는 박판보다 후판에서 크게 발생하였다.
- 3) 12T와 같은 박판인 경우 극한하중에 도달했을 때 볼트의 휨변형보다 판의 지압 변형이 크게 발생되지만, 40T와 같은 후판의 경우 파괴 시 판의 변형보다 볼트의 전단이 이음부의 파괴를 유발함을 확인하였다.
- 4) 본 논문에서 수행된 고장력 볼트 이음부의 극한 거동에 대한 유한요소 해석결과를 실험결과와 비교한 결과, 외력의 증가와 함께 변화되는 힘-변위 및 힘-변형도가 잘 일치하게 얻어져서 본 논문에서 작성한 유한요소해석 모델의 타당성을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업 및 교량핵심기술연구단을 통한 건설핵심기술연구개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김성훈, 이승용, 최준혁, 장동일 (1997) 고장력볼트 이음부의 내부 압축응력 분포, 한국강구조학회논문집, 9, pp.171~179.
- 박용명, 성택룡 (2000) 내후성장재 고장력볼트 이음부 미끄러짐계수 평가실험(I), 한국강구조학회논문집, 12, pp.167~175.
- 심재수, 김춘호, 김동조 (2004) 고장력 볼트 이음부의 3차원 유한요소 해석, 한국강구조학회논문집, 16, pp.407~414.
- 이승용, 경갑수, 성기태 (2000) 채움판을 갖는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 거동, 대한토목학회논문집, 20, pp.1005~1015.
- 이승용, 최준혁, 김성훈, 박철우 (2006) 볼트의 크기 및 판두께의 차이에 따른 고장력볼트 이음부의 역학적 거동에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 26, pp.67~74.
- 조신규 (1997) 과대공을 갖는 고장력 볼트 마찰이음부의 미끄러짐 거동, 한국강구조학회논문집, 9, pp.301~307.
- 최성모, 노원경, 김진호 (2004) 과대구멍 또는 슬롯구멍을 갖는 고장력볼트 마찰이음부의 거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회발표대회논문집, pp.138~144.
- 최일윤, 이승용, 경갑수, 장동일 (1996) 축력 및 표면조도를 감소시킨 고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로거동, 대한토목학회논문집, 16, pp.607~619.
- 한진희, 최종경, 허인성, 김성보 (2008) 압축력을 받는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 거동, 한국강구조학회논문집, 20, pp.279~288.
- ABAQUS, ABAQUS User's Manual, Version 5.8, Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc, 1998.