

부재 및 고장력볼트 구멍치수에 따른 미끄러짐계수의 실험적 연구

양승현^{1*}
¹대신건설이엔씨

Experimental Study on the Slip Coefficient with Member Type and Dimensions of High Tension Bolt Hole

Seung-Hyun Yang^{1*}

¹Dae Shin Construction ENC.

요 약 고장력볼트 마찰이음에서 접촉면의 표면상태에 따라 다양한 값을 갖는 미끄러짐계수는 볼트의 축력과 미끄러짐하중에 의해 결정되어진다. 또한 접촉면적은 미끄러짐하중에 영향을 미치게 되므로 볼트구멍에 따라 변하는 접촉면적은 미끄러짐계수와 상관관계를 갖게 된다. 본 연구에서는 부재의 종류, 볼트의 직경 및 볼트구멍의 크기에 따른 미끄러짐계수와 미끄러짐하중의 변화를 파악하기 위하여 32개의 시험편을 제작하여 휨시험 및 인장시험을 실시하였다. 과대볼트구멍으로 제작된 시험편의 미끄러짐하중은 표준볼트구멍으로 제작된 미끄러짐하중의 80%이상의 강도를 발휘하였으며 설계 미끄러짐강도를 상회하였다. 또한 과대볼트구멍으로 제작된 시험편과 표준볼트구멍으로 제작된 시험편의 순단면적비와 미끄러짐비간에는 상당한 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 시험결과가 각 시험체에 따라 다소의 차이를 보이는 것은 미끄러짐계수의 중요한 파라메타인 고장력볼트의 도입축력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 볼트구멍 크기의 증가는 미끄러짐 계수 뿐 아니라 볼트 축력의 감소를 야기시키므로 설계강도의 감소를 초래하는 것은 자명한 사실이지만 외국의 경우와 같이 구조적 안정을 위협하지 않는 범위 내에서 볼트구멍에 대한 규정에 유연성을 갖는 것도 시공성과 효율성에 긍정적인 요소가 될 것으로 기대된다.

Abstract Slip coefficient, whose value is dependent on the condition of contact surface at the friction joint of high tension bolt, is determined by slip load. Because contact area affects slip load, contact area that varies with bolt hole size is also related to the slip coefficient. In this study, we manufactured 32 specimens and performed bending and tension tests in order to examine changes in slip coefficient and load with material type, bolt diameter, and size of bolt hole. Slip load of specimens with oversize bolt hole had strength that was more than 80% higher than the slip load of specimens with standard bolt hole, and it also exceeded the design slip strength. In addition, we observed significant correlation between net-section ratio and slip ratio of specimens with oversize and standard bolt hole. However, some differences between the specimens are thought to have been caused by reduction in initial axial force of high tension bolt, which is an important parameter of slip coefficient. It is self-evident that increased bolt hole size would lead to decrease in design strength as it reduces both slip coefficient and bolt axial force. Nevertheless, we suggest that some flexibility in regulation of bolt hole, as long as it does not threaten the structural stability, may be a positive factor in terms of workability and efficiency.

Key Words : High tension bolt, Slip coefficient, Oversize bolt hole, Standard bolt hole, Bending Test, Tensile Test

*Corresponding Author : Seung-Hyun Yang

Tel: +82-10-2049-6345 email: ttury@hanmail.net

접수일 12년 08월 17일

수정일 12년 09월 05일

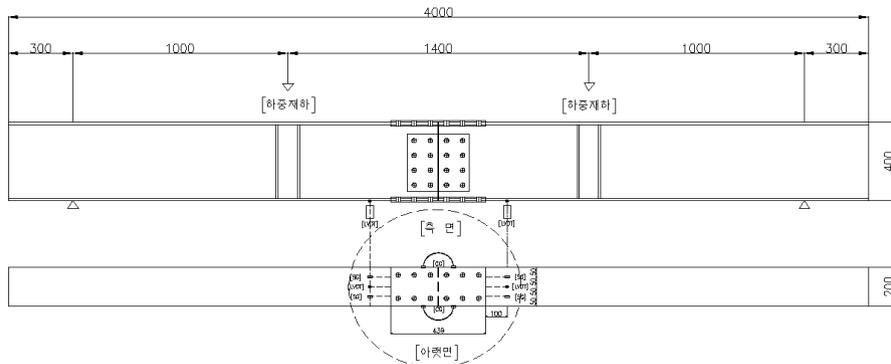
게재확정일 12년 09월 06일

1. 서론

해상교량을 비롯한 구조물의 거대화 및 장대화에 따라 강성이 크고 자중이 작은 강구조물의 사용빈도가 증가되고 있다. 강재를 연결할 때 품질관리가 쉽고 기존 구조물의 보수방법으로 널리 사용되고 있는 고장력볼트 마찰이음의 미끄러짐 계수에 대해서 외국의 설계기준에서는 접촉면의 처리상태에 따라 0.33~0.50으로 규정하고 있고, 우리나라의 도로교설계기준에서는 미끄러짐계수를 표면 처리에 관계없이 0.4로 규정하고 있다. 또한 볼트구멍을 확장함으로써 볼트 삽입을 용이하게 하여 조립능률의 향상과 건설시간, 비용 및 노력 등의 절감을 도모하기 위하여 외국의 시방기준에서는 고장력볼트 이음부에서 어느 정도의 범위까지 과대볼트구멍을 허용하는 규정을 두고 있고, 국내의 경우는 최근 개정된 KBC-09에서는 내력계수를 저감시키는 계수를 규정하고 과대구멍과 슬롯구멍을 허용하고 있으나 도로교 표준시방서에서는 아직 과대볼트구멍에 대한 규정이 없다. 고장력볼트 마찰이음에서 접촉면의 표면상태에 따라 다양한 값을 갖는 미끄러짐계수는 볼트의 축력과 미끄러짐하중에 의해 결정되며 접촉면적은 미끄러짐하중에 영향을 미치게 되므로 볼트구멍에 따라 변하는 접촉면적은 미끄러짐계수와 상관성을 갖게 된다. [1,3,4,6]

본 연구에서는 부재의 종류, 볼트의 직경 및 볼트구멍의 크기에 따른 미끄러짐계수와 미끄러짐하중의 변화를 파악하기 위하여 32개의 시험편을 제작하여 휨시험 및 인장시험을 실시하였다.

2. 휨시험



[그림 1] 휨시험편
[Fig. 1] Bending Specimen

2.1 시험편 제작

SM490, H-400×200×8×13인 강재를 F10T M22의 고장력볼트에 의한 2면 전단방식으로 마찰접합을 실시하였고, 볼트의 간격 및 연단거리는 도로교 설계기준(2010)에 따라 결정하였다. 시험체는 수동토크렌치를 이용하여 토크값을 145kN·mm으로 일정하게 1차 조임을 실시하고 금매김 후 설계볼트축력 200kN에 도달하도록 토크값 850kN·mm로 2차 조임을 하였다. 하중재하시 횡좌굴을 방지하기 위하여 시험체를 내민보로 제작하고 내민구간에 횡좌굴방지를 위한 강봉을 고정시켰으며, 하중재하위치에 수직보강재를 설치하여 국부변형을 방지하도록 하였다. 휨에 의한 거동특성을 파악하기 위하여 플랜지하면의 모재 경계부에는 크랙계이저를 좌우에 1개씩 부착하였고, 수직변위를 측정하기 위하여 중앙부 하면에 변위계를 설치하였다. 표준볼트구멍 및 과대볼트구멍으로 제작된 휨부재의 미끄러짐계수 및 미끄러짐하중을 측정하기 위하여 표 1과 같이 모재 및 덮개판을 표준볼트구멍 및 과대볼트구멍으로 제작한 4개의 시험편을 대상으로 휨시험을 실시하였다. [2,8]

[표 1] 시험편의 종류 및 치수

[Table 1] Type of Bending Specimens

시험편	구멍형태	모재 구멍직경	재 덮개판 구멍직경	수량	
M22	FM-ST	표준	24	24	1
	FM-OB6	과대	28	24	1
	FM-OD4	과대	26	26	1
	FM-OD6	과대	26	28	1
계					4

ST : 모재 및 덮개판의 표준볼트구멍 제작
OB : 모재의 과대볼트구멍 제작
OD : 모재 및 덮개판의 과대볼트구멍 제작
4,6 : 과대볼트구멍 치수(볼트직경 + 4,6mm)



[그림 2] 휨시험편의 제작
[Fig. 2] Making of Bending Specimens

2.2 시험방법 및 시험결과

고장력볼트 접합부에 동일한 휨을 적용하기 위하여 중앙부로부터 좌우로 700mm 떨어진 위치에 대하여 2점 재하방식으로 시험하였다. 하중재하는 200ton 유압실린더를 이용하여 5ton/min의 속도로 하중을 가하면서 수직변위와 미끄러짐 변위를 측정하였다.

강축에 대한 휨실험은 미끄러짐계수와 미끄러짐하중의 측정목적으로 실시하였는데 하중의 크기에 따라 발생한 횡좌굴은 미끄러짐이 발생한 이후에 발생하였고 횡좌굴에 따라 미끄러짐 거동에 일관성이 저하되므로 시험체에 미끄러짐이 발생하면 시험체에 대한 가력을 중지하였다.



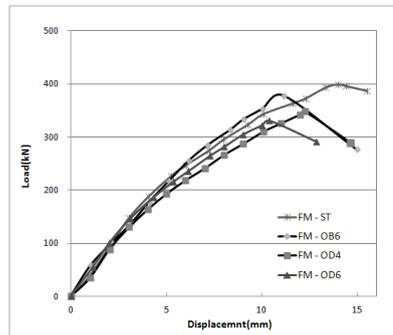
[그림 3] 휨시험 및 시험편의 좌굴
[Fig. 3] Bending Test and Buckling

그림 4와 같이 시험편에 따라 10~14mm의 수직변위가 발생한 시점에서 수직하중이 급격히 감소하며 미끄러짐이 발생하였다. 이 때 수직하중으로부터 얻어진 휨모멘트와 단면상수로부터 고장력 볼트 접합부의 미끄러짐하중을 계산하여 하중시험에 의하여 얻어진 수평변위와의 관계를 그림 5에 나타내었다. 표준볼트구멍으로 제작된 시험편의 미끄러짐하중이 가장 크게 나타났으며 특히, 모재와 덮개판을 볼트 공칭치름보다 6mm 크게 제작한 시험편(FM-OD6)의 값보다 21% 크게 측정되었다. 볼트구멍의 치수가 클수록 미끄러짐하중과 수평변위간의 기울기가 다소 급하게 나타났다. 표준볼트구멍으로 제작된 시험편은 완전한 미끄러짐 발생 후 하중 증가에 따라 2차 미끄러짐이 발생하였고 과대볼트구멍의 경우에는 일정한

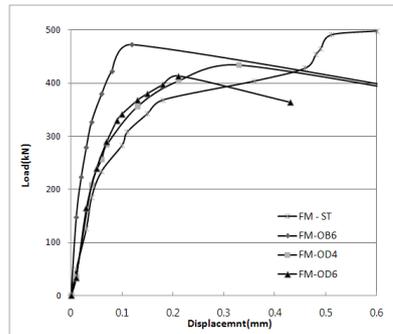
패턴으로 미끄러짐이 발생하는 것으로 나타났다.

[표 2] 휨시험 결과
[Table 2] Bending Test Results

시험체	재하하중 (kN)	휨모멘트 (kN·m)	미끄러짐 하중 (kN)	미끄러짐 계수
FM-ST	399.00	199.50	498.75	0.208
FM-OB6	377.99	189.00	472.50	0.197
FM-OD4	347.70	173.85	434.63	0.181
FM-OD6	330.95	165.48	413.70	0.172



[그림 4] 수직하중과 수직변위 선도
[Fig. 4] Test Load-Deflection Relationship



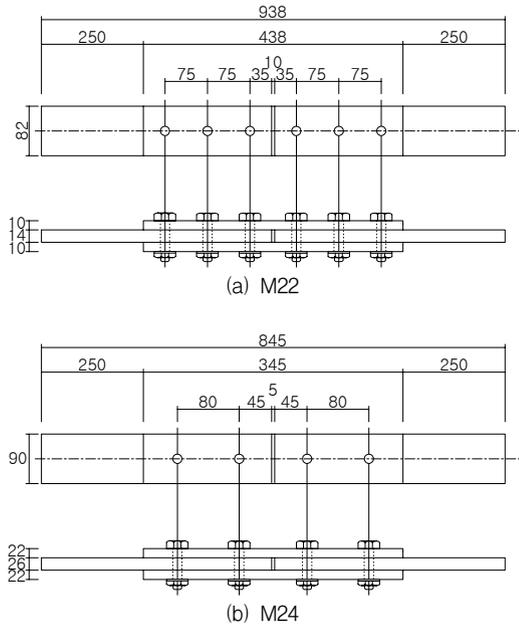
[그림 5] 미끄러짐하중과 미끄러짐량 선도
[Fig. 5] Slip Load-Sliding Relationship

3. 인장시험

3.1 시험편제작 및 인장시험

인장시험에 사용된 SM490B의 시험편을 M22 및 M24의 F10T 고장력볼트로 2면 전단형식으로 연결하고 모재 및 덮개판에 대하여 표준구멍과 과대볼트구멍으로 가공하여 제작하였다. 시험결과와 신뢰성을 높이고자 각각의 시험편을 2조씩 제작하여 총 28개의 시험편을 대상으로 인장시험을 실시하였다. 시험편의 마찰면에 블라스트에 의해 표면처리를 한 후 모재를 1차 조임하고, 설계축력

200kN 및 235kN에 도달하도록 토크값 850kN·mm 및 1,100kN·mm로 하여 본 조임을 실시하였다. 이 때 미끄러짐이 발생하기 전에 볼트 축부에 전단력이 작용하지 않도록 하기 위하여 볼트가 구멍의 중앙부에 위치하도록 조립하였다. 작용하중에 따른 변형량을 측정하기 위하여 변위계를 모재의 편측에 각각 설치한 후 5mm/min의 가력속도로 하중을 가하여 파단시까지 인장시험을 실시하였다.

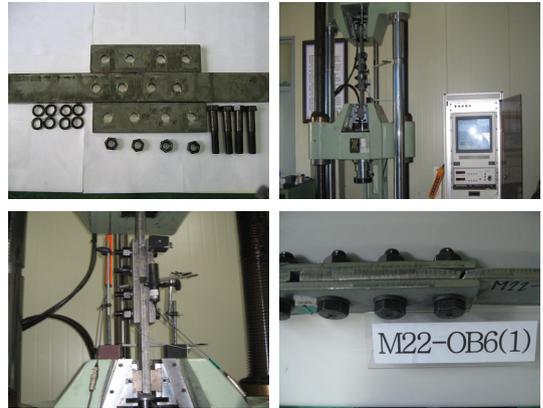


[그림 6] 인장시험편
[Fig. 6] Tensile Specimens

[표 3] 인장시험편의 종류(mm)

[Table 3] Type of Tensile Specimens(mm)

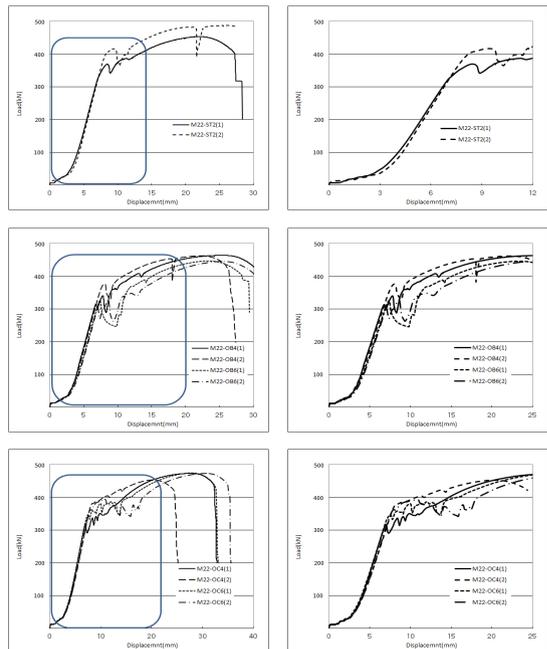
시험편	구멍형태	모구멍직경	재구멍직경	뿔개 판구멍직경	수량
M22	M22-ST2(1,2)	표준	24	24	2
	M22-OB4(1,2)	과대	26	24	2
	M22-OB6(1,2)	과대	28	24	2
	M22-OC4(1,2)	과대	24	26	2
	M22-OC6(1,2)	과대	24	28	2
	M22-OD4(1,2)	과대	26	26	2
	M22-OD6(1,2)	과대	28	28	2
M24	M24-ST2(1,2)	표준	26	26	2
	M22-OB4(1,2)	과대	28	26	2
	M22-OB6(1,2)	과대	30	26	2
	M22-OC4(1,2)	과대	26	28	2
	M22-OC6(1,2)	과대	26	30	2
M22-OD4(1,2)	과대	28	28	2	
M22-OD6(1,2)	과대	30	30	2	
계					28

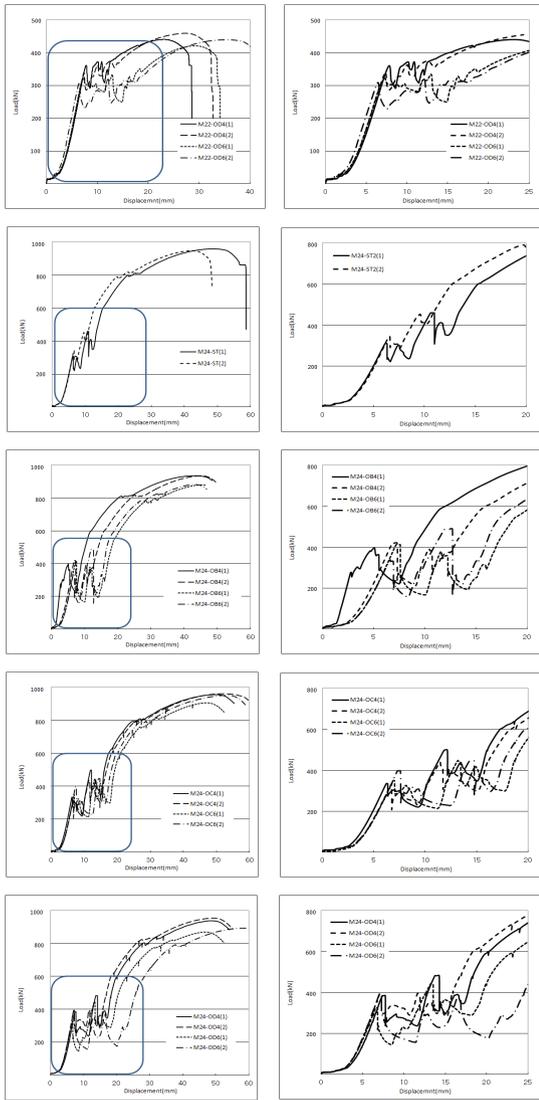


[그림 7] 시험편의 조립 및 인장시험
[Fig. 7] Making and Tensile Test

3.2 시험결과

인장시험은 휨시험과 달리 시험편의 파단시까지 인장시험을 실시하였다. 그림 7과 같이 인장력과 변위를 얻었으며 미끄러짐하중을 구하는 측정의 위치를 확인하기 위하여 탄성구간에서의 하중-변위선도를 시험편의 전체 하중-변위선도의 우측에 나타내었다. 인장시험편의 평균 미끄러짐하중은 표준볼트구멍으로 제작된 시험편이 과대볼트구멍으로 제작된 시험편보다 크게 측정되었다.





[그림 7] 인장시험편의 하중-변위선도
[Fig. 7] Test Load-Elongation Relationship

M22시험편의 미끄러짐하중은 파단하중의 80%, M24 시험편은 40% 수준이었는데 이는 고장력볼트의 수량에 기인한 것으로 판단되며, 각 시험편의 미끄러짐하중은 설계강도를 상회하였다. M22의 표준볼트구멍 시험편의 미끄러짐계수는 0.328인 반면 과대볼트구멍 시험편의 미끄러짐계수는 0.263~0.298로 나타났으며 M24의 표준볼트구멍 시험편의 미끄러짐계수는 0.425인 반면 과대볼트구멍 시험편의 미끄러짐계수는 0.336~0.414로 나타났다.

[표 4] M22시험편의 인장실험 결과
[Table 4] Tensile Test Results(M22)

시험체명	파단하중 (kN)	미끄러짐 강도(kN)	미끄러짐계수	
			실험값	평균
M22-ST2(1)	453.1	369.2	0.308	0.328
M22-ST2(2)	488.1	416.3	0.347	
M22-OB4(1)	463.6	339.2	0.283	0.298
M22-OB4(2)	461.8	376.1	0.313	
M22-OB6(1)	446.0	325.5	0.271	0.264
M22-OB6(2)	445.2	306.6	0.256	
M22-OC4(1)	472.8	316.3	0.264	0.291
M22-OC4(2)	453.1	381.2	0.318	
M22-OC6(1)	474.2	347.7	0.290	0.296
M22-OC6(2)	473.3	362.3	0.302	
M22-OD4(1)	440.8	361.1	0.301	0.293
M22-OD4(2)	460.4	340.3	0.284	
M22-OD6(1)	421.7	322.1	0.268	0.263
M22-OD6(2)	439.5	309.2	0.258	

[표 5] M24 시험편의 인장실험 결과
[Table 5] Tensile Test Results(M24)

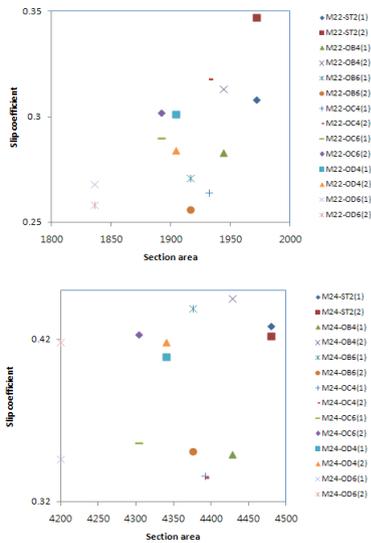
시험체명	파단하중 (kN)	미끄러짐 강도(kN)	미끄러짐계수	
			실험값	평균
M24-ST2(1)	973.0	402.5	0.428	0.425
M24-ST2(2)	972.4	396.3	0.422	
M24-OB4(1)	934.4	327.6	0.349	0.397
M24-OB4(2)	934.1	418.2	0.445	
M24-OB6(1)	878.2	412.8	0.439	0.395
M24-OB6(2)	880.9	329.5	0.351	
M24-OC4(1)	957.5	315.4	0.336	0.336
M24-OC4(2)	962.0	314.5	0.335	
M24-OC6(1)	905.6	334.5	0.356	0.390
M24-OC6(2)	950.9	397.8	0.423	
M24-OD4(1)	937.1	384.5	0.409	0.414
M24-OD4(2)	953.1	392.6	0.418	
M24-OD6(1)	867.0	324.9	0.346	0.382
M24-OD6(2)	891.1	392.8	0.418	

4. 시험결과 분석

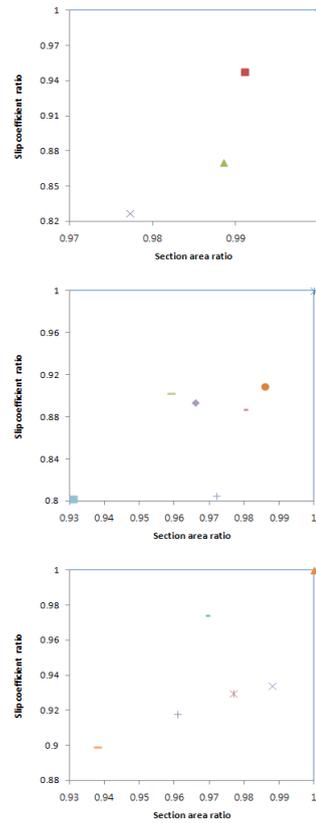
휨부재의 미끄러짐계수가 0.172~0.208로 인장부재의 미끄러짐계수 0.263~0.425보다 매우 적게 계산되었는데 미끄러짐계수는 볼트의 도입장력, 미끄러짐 하중 및 마찰면의 수에 따라 계산하므로 마찰면의 수가 상대적으로 많은 휨부재의 미끄러짐 계수가 작게 평가되었다. 그러므로 미끄러짐 계수만을 단순히 비교하는 것은 적절하지 못하다고 판단되어 각 시험체별로 유효단면적과 미끄러짐계수를 비교분석하였다.

M22 고장력볼트로 체결된 인장부재의 미끄러짐계수는 볼트구멍을 공제한 모재의 유효단면적과 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 M24 고장력볼트로 체결된 인장부재의 미끄러짐계수와 순단면적과의 관계는 상관성이 적게 평가되었는데 이는 동일한 조건으로 제작된 각 2조의 시험체간의 편차에 의한 것으로 판단된다. 이러한 편차를 줄이고자 미끄러짐계수와 단면적의 평균값을 표준볼트구멍으로 제작된 시험체의 평균값과의 비로써 비교한 결과 순단면적비와 미끄러짐비간에는 상당한 상관성을 가지는 것으로 분석되었다. 또한, 힘부재에서도 인장시험편의 순단면적비와 미끄러짐비간의 상관성과 유사한 현상을 나타내었다.

일반적으로 미끄러짐계수는 접촉면의 성질에 따라 결정되며 수직반력과 미끄러짐하중과의 비에 의해 계산되므로 접촉면적과 직접적으로 관계없는 것으로 알려져 있다. 그러나 고장력볼트 체결부의 볼트구멍에 따른 접촉면적은 미끄러짐하중과 관계가 있으므로 본 연구결과와 같이 순단면적과 미끄러짐계수간에는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 미끄러짐계수의 중요한 파라메타가 되는 고장력볼트의 축력은 체결시 도입축력의 부족, 크리프나 릴렉세이션, 체결시 이음판의 어긋남 등으로 인한 규정 볼트축력의 도입미비 등과 공용중의 여러 가지 원인에 의한 볼트의 풀림현상에 의해 도입축력이 감소할 가능성이 크다. 도입축력이 감소한 경우에는 미끄러짐 하중이 현저히 감소하여 미끄러짐 계수가 감소하는 경향을 나타내게 된다.



[그림 8] 유효단면적과 미끄러짐계수의 관계
[Fig. 8] Section Area-Slip Coefficient Relationship



[그림 9] 단면적비-미끄러짐계수비
[Fig 9] Section Area Ratio-Slip Coefficient Ratio Relationship

5. 결론

본 연구에서는 부재의 종류, 볼트의 직경 및 볼트구멍의 크기에 따른 미끄러짐계수와 미끄러짐하중의 변화를 파악하기 위하여 힘시험 및 인장시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 과대볼트구멍으로 제작된 시험편의 미끄러짐하중은 표준볼트구멍으로 제작된 시험편에서 발휘된 미끄러짐하중의 80%이상의 강도를 발휘하였으며 설계미끄러짐강도를 상회하였다.
- 2) 과대볼트구멍으로 제작된 시험편과 표준볼트구멍으로 제작된 시험편의 순단면적비와 미끄러짐비간에는 상관성이 높게 나타났다.
- 3) 각 시험편에 따라 미끄러짐계수비가 다소의 차이를 보이는 것은 미끄러짐계수는 마찰면의 상태 뿐 아니라 고장력볼트의 조임시 도입된 축력이 여러가지

원인에 의하여 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

- 4) 볼트구멍 크기의 증가는 미끄러짐 계수 뿐 아니라 볼트 축력의 감소를 야기시키므로 설계강도의 감소를 초래하는 것은 자명한 사실이지만 외국의 경우와 같이 구조적 안정을 위협하지 않는 범위 내에서 볼트구멍에 대한 규정에 유연성을 갖는 것도 시공성과 효율성에 긍정적인 요소가 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Kim, C.H. "Slip Coefficients between Steel Plates Fixed with High Tension Bolts", Journal of the Korean Society Tribologist and Lubrication Engineers, Vol. 24, No. 6, pp.338-342, 2008.
- [2] Kim, C.H., Kim, S.H. "Analysis on the Sliding Load for High-tension Bolt Joint of the H-Beam in Pure Bending", Journal of the Korea Contents Association, Vol. 4, No. 1, pp. 541-544, 2006.
- [3] Korean Society of Steel Construction "Fabrication Guide for Structural Joints Using High-Strength Bolts", Korean Society of Steel Construction, 2009.
- [4] Korean Society of Steel Construction, "Design Manual for Standard Connections Using High-Strength Bolts", 238, Korean Society of Steel Construction, 2009.
- [5] Lee, C.W., Shin, J.C., Bang, M.S. "The Study on High-tension Bolted Splice by Elasto-Plastic Analysis with Sliding and Experimental Testing", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 3A, pp.439-444, 2004.
- [6] Lee, S.Y., Kyung, K.S. "A Study on Rational Design and Construction of High-Tension-Bolt Friction Joints", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 3A, pp. 513-521, 2006.
- [7] Lee, S.Y., Choi, J.H., Kim, S.H., Park, C.W. "Mechanical Behavior of High tension Bolted Joints with Varying Bolt Size and Plate Thickness", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.26, No. 1A, pp. 67-74, 2006.
- [8] Park, J.U., Yang, S.H., Jang, S.I. "A Study on Serviceability of Oversized Bolt Hole in High-tension Bolt Joint Subjected to Bending", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 10, No. 10, pp. 2831-2836, 2009.
- [9] Seong, T.R., Yoon, T.Y., Lee, J.K., Koh, H.M. "An Analytical Study on the Behavior of Slip-Critical Connections", Journal of the Korean Society of Civil

Engineers, Vol.2006, No. 10, pp. 29-32, 2006.

- [10] Seong, T.R., Hwang, M.O., Lee, J.K., Yoon, T.Y. "A Comparative Study on the Slip Coefficient and the Coefficient of Friction", Journal of the Korean Society of Steel Construction, Vol. 19, No. 3, pp. 63-69, 2007.

양 승 현(Seung-Hun Yang)

[정회원]



- 1994년 2월 : 조선대학교 조선대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 조선대학교 조선대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 대신건설 이엔씨 기술이사

<관심분야>

토목구조설계, 교량유지관리