

과대 볼트구멍에 따른 고장력볼트 마찰이음의 사용성에 관한 연구

박정웅¹, 양승현^{2*}, 조강균¹

¹조선대학교 토목공학과, ²조선이공대학 토목건설과

A Study on the Serviceability of High-Tension Bolt Friction Joints according to Oversize Bolt Holes

Jeong-Ung Park¹, Seung-Hyun Yang^{2*} and Kang-Kyun Cho¹

¹Chosun University, Department of Civil Engineering

²Dept. of Civil Construction Engineering, Chosun College University of Science & Technology

요 약 고장력볼트 마찰이음에서 모재 및 덮개판을 과대공 제작하였을 경우 연결부의 내하력에 다소의 변화가 발생될 수 있다. 본 논문에서는 고장력볼트 마찰이음에서 표준공과 과대공에 따라 미끄럼하중과 미끄럼계수의 변화를 파악하기 위하여 정적인장시험을 실시하였다. 정적인장시험결과 모재 및 덮개판의 과대공 제작에 따라 미끄럼계수의 변화가 다소 발생하였으나 이를 정형화시키기에는 다소 무리가 따랐으며, 미끄럼강도는 표준공 제작시의 값과 과대공 제작시의 값이 최대 26%의 차이를 나타내었다. 그러나 이는 설계미끄럼강도를 초과하기 때문에 사용하중하에서 연결부의 사용성에 미치는 영향이 미약하므로 강부재 제작시 부득이하게 발생할 수 있는 과대공에 따른 규정을 보다 유연하게 적용시킨다면 구조물의 설계 및 시공시 효율성과 경제성 증대의 효과가 기대된다고 판단되었다.

Abstract There can be some variation in the load carrying capacity of high-tension bolt friction joints when oversize bolt holes are made on the base plate and the cover plate. This study performed a static tensile test in order to examine the variation of slip load and slip coefficient according to standard bolt hole and oversize bolt hole in high-tension bolt friction joints. According to the results of the static tensile test, the slip coefficient changed to some degree according to oversize bolt holes on the base plate and the cover plate, but it was somewhat unreasonable to find a pattern in the change. Sliding strength showed a difference of up to 26% between the use of standard bolt holes and the use of oversize bolt holes. Because this exceeds the design sliding strength, however, its effect on the serviceability of joints under service load is insignificant. Thus, if the regulation on oversize bolt holes, which may be inevitable in making steel members, is applied flexibly, we may improve efficiency and economy in the design and construction of structures.

Key Words : Standard Bolt Hole, Oversize Bolt Hole, Slip Load, Slip Coefficient, Design Slip Strength

1. 서론

오늘날 강재료는 기간산업의 전 분야에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있으며 특히 교통하중의 대형화 및 교통량의 증가에 따라 요구되어지는 대형 교량구조물에서 강재의 사용빈도는 다른 재료에 비해 매우 높다고 할 수 있다. 강교량은 부득이하게 부재간 이음이 요구되며 용접이

음은 대부분 공장에서 실시하는 것에 반해 고장력볼트를 이용한 이음은 현장에서 주로 이루어진다. 고장력볼트는 담금질과 뜨임 등의 열처리를 통해 80~120kgf/mm²의 인장강도를 가지는 고장력강으로 제작되어지며 보통볼트나 리벳에 비해 하중에 대한 엇갈림이 적고 리벳이음에 비교하여 응력집중현상이 나타나지 않아 역학적 성능이 우수하고 응력이 원활하게 전달되어 반복적으로 작용하

본 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 건설핵심기술연구개발사업으로 수행된 연구결과입니다.

*교신저자 : 양승현(ttury@daum.net)

접수일 09년 07월 31일

수정일 09년 08월 17일

게재확정일 09년 08월 19일

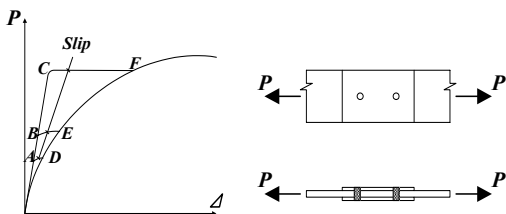
는 하중에 대하여 높은 피로강도를 나타낸다. 고장력볼트의 하중전달방법 중 일반적으로 사용되는 마찰이음은 항복강도의 80%의 힘이 작용할 때 까지 너트를 조여 볼트에 축력을 작용시켜 판과 판사이의 마찰력에 의해 하중을 전달하는 방식으로 시공이 용이하고 신뢰성이 높다. 고장력볼트를 이용한 이음부의 강성확보를 위해서는 볼트 체결시 정확한 축력의 도입, 접촉면의 상태, 모재의 구멍내에서 볼트의 위치에 따른 미끄럼량 등에 대한 관리가 요구되어진다.

본 연구에서는 마찰이음 고장력볼트의 강성확보와 관련된 요인 중 모재 및 덮개판의 구멍크기를 구조설계기준에 제시된 값과 볼트구멍의 크기를 변화시킨 과대공에 대하여 시험체를 제작하고 정적 인장시험을 실시하여 허용응력설계법에 의거하여 사용하중에 의한 표준공 및 과대공에서 미끄럼강도와 미끄럼계수의 변화에 대하여 비교분석하였다.

2. 고장력볼트 이음부의 설계

2.1 고장력볼트 마찰이음의 메카니즘

고장력볼트의 마찰이음은 설정된 토크값에 의해 도입된 축력에 의하여 모재와 모재사이 또는 이음판과 모재사이에 접촉이 이루어져 접촉면에서 압력이 발생하게 되며 설계하중이 작용하는 시점에서 접촉면의 마찰력에 의하여 설계하중을 각 부재가 부담하게 된다.



[그림 1] 연결부의 역학적 거동특성

설계하중이 증가하여 마찰력을 초과하면 접촉면에서는 그림 1의 P-Δ 선도에서와 같이 미끄럼(A, B, C)이 발생하는데 이 때 하중의 크기는 볼트의 장력과 접촉면의 마찰계수에 의해 좌우된다. 또한 모재의 구멍내에서 볼트의 위치에 따라 미끄럼량이 결정되어 질 수 있으며 이에 따라 미끄럼 과정에서 다소의 하중 증가가 발생할 수 있다. 결국 모재의 볼트구멍의 크기에 따라 미끄럼량 및 미끄럼하중이 결정되어 진다. 이 때 설계하중과 미끄럼은 선형거동을 하게 된다. 더욱 설계하중을 증가하여 그림 1

의 P-Δ 선도에서 D, E 및 F와 같이 미끄럼이 완료된 후에는 볼트의 나사부와 모재 및 덮개판이 직접 부착하게 되고 볼트의 전단강도 및 지압강도가 발휘되며, 모재 및 덮개판에서도 인장강도 및 지압강도가 발휘되어 설계하중에 대하여 저항하게 되는데 이 때에 비선형거동을 하게 되며 종국에는 모재 또는 볼트에서 파괴에 이르게 된다[5].

2.2 고장력볼트 이음부의 설계기준

2.2.1 접촉면의 상태에 따른 미끄럼계수

미끄럼계수는 마찰이음 고장력볼트의 미끄럼강도를 결정짓는 주요 요인이다. 미끄럼계수에 대한 국내외의 설계기준은 접촉면의 처리상태에 따라 0.2~0.5로 규정되고 있으며 2005년 개정된 도로교설계기준에 의해 우리나라에서는 표면처리에 관계없이 미끄럼계수를 0.4로 규정하고 있다. 또한 시공성을 고려하여 볼트 연결부의 표면처리는 블라스트 등에 의해 녹, 흑피 등을 제거하여 마찰계수가 0.4이상 얻어지도록 규정하고 있다.

2.2.2 인장부재의 설계

인장부재의 고장력볼트 연결부에서는 작용외력에 의해 인장응력이 항복응력에 가까워짐에 따라 볼트구멍을 통한 단면에 있어서 포아손 효과에 의해 판두께가 감소하며, 이에 따라 볼트축력이 감소한다. 그 결과 마찰전단력이 감소하여 미끄럼 강도가 저하할 가능성이 있다. 그리고 미끄럼 발생 후에는 고장력볼트와 모재 또는 이음판의 볼트구멍 등이 지압상태로 된다. 따라서 모재 및 이음판이 항복에 대해서 여유가 있는 경우에는 이음판의 최대내력은 고장력볼트의 전단강도나 지압강도 또는 모재와 이음판의 지압강도나 인장강도에 의해 결정된다. 연결부의 최대내력이 모재나 이음판의 인장강도에 의해 결정되는 경우 부재의 유효단면에 대해서는 볼트 구멍에 의한 단면결손을 고려할 필요가 있다.

도로교설계기준(2005)에서는 인장부재의 볼트구멍위치의 단면설계에 있어 순폭(총 폭에서 볼트 구멍에 의해 잃은 폭을 뺀 값)과 판 두께의 곱으로 구한 순단면적을 유효단면적으로 하여 단면설계를 하고 있다[3].

$$\begin{aligned} & \text{순단면에 대한 인장응력} \\ & \leq \text{허용인장응력} = \frac{\text{항복응력}}{S} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 S : 안전율 = 1.7

2.2.3 과대공에 대한 규정

고장력볼트 마찰이음에 있어서 볼트구멍의 직경에 대한 제한은 현장이음시 구조부재사이에 거의 완벽한 장력을 요구하게 된다. 그러나 실제조건에서는 때때로 구조물의 한쪽이 외기에 노출되어 부재의 수축 및 팽창이 일어나게 되어 강부재의 조립시 볼트구멍간의 정확도를 떨어뜨려 볼트구멍이 일치하지 않은 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 허용직경을 초과하여 볼트구멍을 확장함으로써 볼트삽입을 용이하게 하여 부재의 조립에 따른 효율을 증가시켜서 공기 단축, 비용절감과 같은 효과를 얻을 수 있다. 이러한 요구에 의해 최근 선진외국에서는 고장력볼트 이음부에서 과대공을 허용하는 것을 시방기준에 규정하고 있으나, 국내에서는 과대공에 대한 규정이 마련되어 있지 않은 실정이다[1,11].

【표 1】 볼트구멍의 지름 (mm)

볼트호칭	표 준 공		과 대 공	
	마찰이음	지압이음	마찰이음	지압이음
M20	22.5	21.5	규 정 없 음	규 정 없 음
M22	24.5	23.5		
M24	26.5	25.5		

2.2.4 마찰이음 고장력볼트의 허용력 및 미끄럼강도

마찰이음 고장력볼트에서 연결부재간의 마찰저항은 볼트의 체결력에 비례하므로 큰 축력을 도입할수록 유리하지만 체결력증가에 따른 비틀림응력, 볼트나사부에서의 응력집중 및 지연파괴 등을 고려하여 항복응력보다 낮게 설계볼트축력 N을 결정하게 된다. 일반적으로 시공시 볼트체결력이 일정치 못할 경우를 대비하여 볼트축력은 설계축력보다 약간 크게 한다.

$$N = \alpha \cdot f_y^b \cdot A_e^b \quad (2)$$

여기서, N : 설계볼트축력
 α : 항복응력의 감소계수
 (F8T : 0.85, F10T : 0.75)
 f_y^b : 볼트의 항복응력
 A_e^b : 볼트의 응력단면적

볼트의 축력을 도입하는 방법에는 토크 제어법과 너트 회전법 등이 있다. 토크제어법에서 체결토크 T와 축력 N의 관계는 다음과 같다.

$$T = k \cdot d \cdot N \quad (3)$$

여기서, k : 토크계수(0.1~0.2)
 d : 볼트 직경

마찰연결은 볼트에 높은 인장력을 가하여 볼트로 접합되는 부재의 접촉면에 마찰저항을 일으킴으로써 부재 간에 작용하는 전단력을 마찰력으로 지지하는 것이다. 이와 같은 마찰연결의 내하력은 부재 간에 작용하는 전단력이 마찰저항에 의한 지지능력을 넘게 되어 부재 접촉면에서 미끄러짐(Slip)이 생길 때의 한계하중값으로 정의되며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_s = m \cdot \mu \cdot N \quad (4)$$

마찰연결에서 1마찰면당 허용되는 볼트 한 개의 허용력은 다음과 같다.

$$\rho_a = \frac{R_s}{S.F} = \frac{\mu \cdot (\alpha \cdot f_y^b \cdot A_e^b)}{1.7} \quad (5)$$

여기서, R_s : 마찰연결의 내하력
 m : 마찰면의 수
 μ : 마찰계수
 N : 설계볼트축력

도로교설계기준에서는 식(5)로 구한 허용력으로부터 볼트의 재질 및 치수에 따라 표 2와 같이 정하고 있다.

【표 2】 마찰이음용 고장력볼트의 허용력

볼트 등급	호칭	SF	μ	α	F_y^b (N/mm ²)	A_e^b (mm ²)	N (kN)	ρ_a (kN)	허용력 (kN)
F8T	M20					244.8	133.2	31.3	31
	M22	1.7	0.4	0.85	640	303.4	165.1	38.8	39
	M24					352.5	191.8	45.2	45
F10T	M20					244.8	165.2	38.8	39
	M22	1.7	0.4	0.75	900	303.4	204.8	48.2	48
	M24					352.5	237.9	56.0	56

마찰이음 시험편의 설계 미끄럼강도 및 미끄럼계수는 다음과 같다[3,4,12].

$$P_s = \frac{1}{S} \times \mu \times N \times m \quad (6)$$

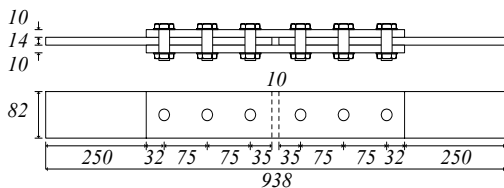
$$\mu = \frac{P_s}{N \times m} \quad (7)$$

여기서, P_s : 미끄럼강도
 S : 안전율
 m : 마찰면의 수

3. 고장력볼트 인장실험

3.1 시험편 제작 및 조립

시험편은 M22의 F10T 고장력볼트와 SM490B의 강부재를 2면전단방식으로 연결하고 모재 및 덮개판에 대하여 표준구멍과 과대구멍으로 가공하여 각각 2조씩 제작하였다.



[그림 2] M22 고장력볼트 시험편

[표 3] 시험편의 규격 및 치수

구분	구멍 형태	시험편 명칭	모재 구멍	덮개판 구멍	수량	
M22	1	표준	M22-ST2	∅24	∅24	2
	2	과대	M22-OB4	∅26	∅24	2
	3	과대	M22-OB6	∅28	∅24	2
	4	과대	M22-OC4	∅24	∅26	2
	5	과대	M22-OC6	∅24	∅28	2
	6	과대	M22-OD4	∅26	∅26	2
	7	과대	M22-OD6	∅28	∅28	2
합계					14	

ST : 모재 및 덮개판의 표준공 제작
 OB : 모재의 과대공 제작
 OC : 덮개판의 과대공 제작
 OD : 모재 및 덮개판의 과대공 제작
 2,4,6 : 과대공 치수(볼트직경 + 2,4,6mm)

본 연구에서는 다음과 같이 시험편을 제작 및 조립하여 정적인장실험을 실시하였다.

- (1) 마찰면에 블라스트에 의해 표면처리를 한 후 모재를 서로 10mm이격시키고 부재의 직진성을 확인하

면서 예비조임을 실시하였다.

- (2) 설계축력은 200kN, 시공축력은 220kN으로 결정하여 설계축력의 10%에 해당하는 축력이 나올때의 토크값을 설정하고 1차조임 토크값은 510kN · mm으로 하여 소요 토크값의 60%정도로 1차조임을 실시하였다.
- (3) 본조임 토크값은 850kN · mm으로 하여 최종 축력에 도달할 때까지 본 조임을 실시하였다.



[그림 3] 시험편의 제작 및 조립

3.2 정적인장실험

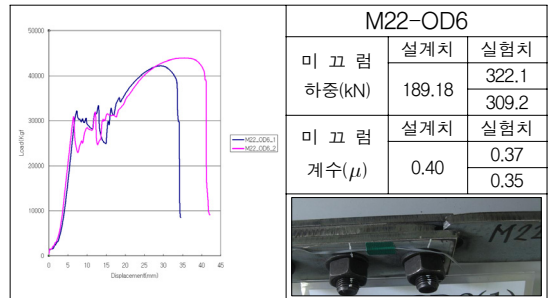
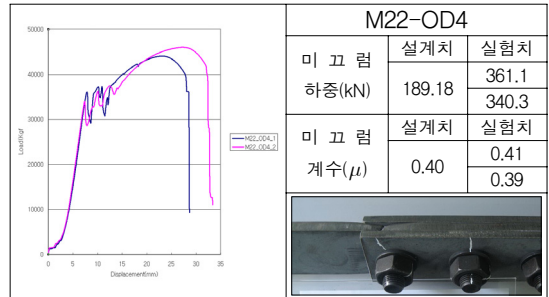
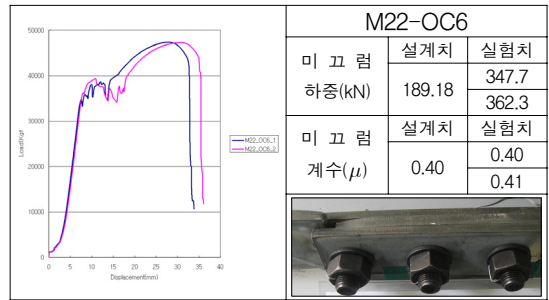
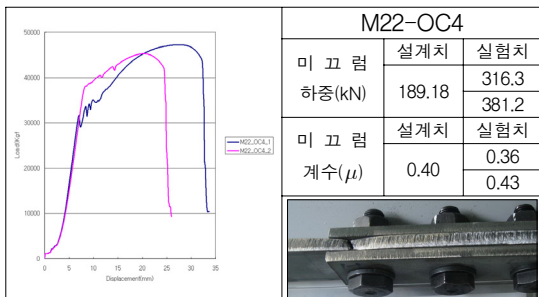
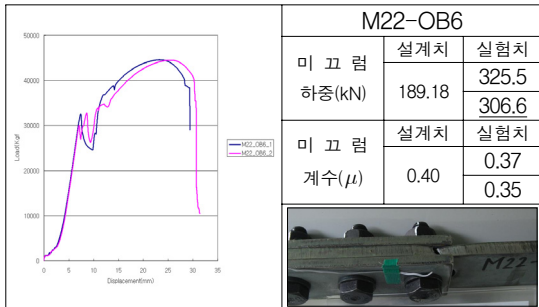
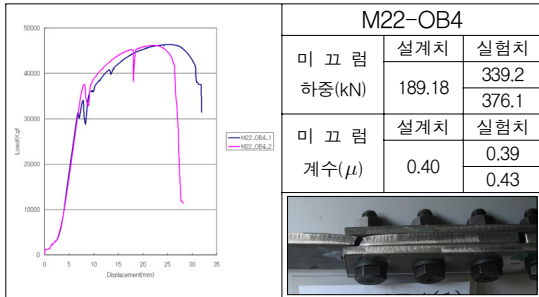
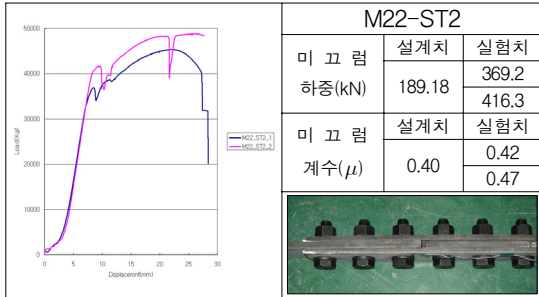
실험체는 하중재하시 편심이 발생하지 않도록 볼트선과 그림선의 중앙선이 일치하도록 하고, 실험체의 미끄러짐 현상이 일어나지 않도록 접합 플레이트를 그림의 전체가 밀착되도록 설치한 후 변위계를 모재의 편측에 각각 설치하였다. 5mm/min의 가력속도로 하중을 가하여 작용하중 및 변형량을 측정하였다.



[그림 4] 정적인장실험 전경

3.3 실험결과 및 고찰

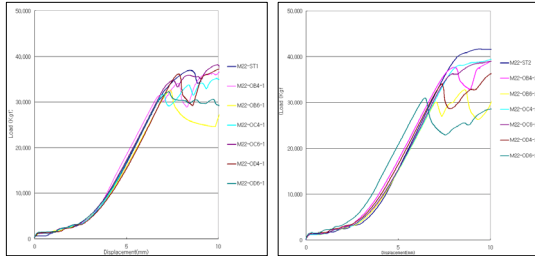
본 연구에서는 인장파괴시까지의 정적 인장실험을 통하여 인장하중과 축변형량을 그림 5와 같이 얻을 수 있었다. 이에 따르면 미끄럼하중은 306.6~416.3kN, 최대하중은 421.7~488.1kN이고, 미끄럼발생시의 미끄럼계수는 0.38~0.51로 나타났다. 여기서 미끄럼계수는 정적인장실험에 의한 미끄럼하중과 식6 및 7에 의하여 산정하였다.



[그림 5] 각 시험편의 변위-하중 선도

미끄럼하중은 표준시험에서 416kN으로 가장 크게 나타났으며 모재를 6mm 과대공으로 제작한 시험편에서의 미끄럼강도는 306kN으로 가장 적게 나타났다. 미끄럼 강도가 발휘될 때의 미끄럼량은 과대공의 상관성을 발견할 수 없었다. 전체적으로 시험편의 미끄럼강도는 설계강도의 1.63~2.21배 크게 나타났다. 이는 설계 미끄럼강도 산정시 안전율인 1.7을 전반적으로 상회하는 값으로 설계 미끄럼강도의 산정에 적용되는 안전율은 볼트구멍의 크기와 상관성이 있음을 알 수 있었다. 또한 미끄럼계수는 표준공에서 가장 크게 나타났으며 과대공의 경우에는 미끄럼계수가 다소 감소하였다. 그러나 미끄럼계수를 과대공의 크기나 형식에 대하여 정형화시키기에는 다소 상관관계가 적은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 시험체의 접촉면에 대하여 블라스트에 의하여 표면처리를 하였는데 미끄럼계수는 볼트구멍의 크기보다 접촉면의 표면상태와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 그림 6는 각 시

험체에 미끄럼이 발생할 때까지의 하중-변위선도를 나타낸 것으로 각 시험체의 미끄럼량은 7~8mm정도인 것을 알수 있었다.



(a) 계열 1 (b) 계열 2

【그림 6】 미끄럼발생시 하중-변위 선도

4. 결론

본 연구에서는 고장력볼트 마찰이음에 대하여 모재 및 덮개판의 과대공에 따른 사용하중하에서의 미끄럼계수 및 미끄럼강도를 측정하고자 정적 인장실험을 실시하였으며 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미끄럼강도는 표준공 시험체에서 가장 크게 나타났으며 모재 및 덮개판의 과대공 시험체에서는 최대 26%가량 작게 나타났다.
- 2) 실험에 의한 미끄럼강도는 설계 미끄럼강도의 1.63~2.21배 크게 나타났는데 이는 설계 강도를 산정할 때 고려되는 안전율인 1.7을 상회하는 값으로 설계 미끄럼강도의 산정시 적용되는 안전율은 과대공과 상관성이 있음을 알 수 있었다.
- 3) 미끄럼계수는 표준공 시험편에서 가장 크게 나타났으며 과대공 시험편에서는 미끄럼계수가 다소 감소하였으나 미끄럼계수를 과대공의 크기나 형식에 대하여 정형화시키기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단되었다.
- 4) 과대공을 가지는 부재는 표준공을 가지는 부재에 비하여 미끄럼하중이나 미끄럼계수의 측면에서 다소 불리하지만 실험결과에 의하면 미끄럼강도는 설계 미끄럼강도의 140% 이상의 강도확보가 이루어지므로 우리나라의 구조설계기준에서 제시되는 규정보다 유연한과대공의 적용이 이루어진다면 강구조물의 설계 및 시공이 보다 효율적이고 경제적이 수 있다고 사료되었다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, “도로교표준시방서”, pp.38~39, 93~99, 2005.
- [2] 건설교통부, “도로교설계기준”, pp.101~108, 2005.
- [3] 한국강구조학회, “강구조공학”, pp.191~202, 2002.
- [4] 한국강구조학회, “강구조의 설계”, pp.56~61, 2000.
- [5] Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer “Steel Structures Third McGraw-Hill, pp.66~78, 1992.
- [6] 한중옥, 박영석, “F13T급 고장력볼트를 이용한 마찰연결부 피로강도에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집 제28권 5A호, pp. 623~629, 2008.
- [7] 경갑수, 이승용, 김기현 “도장처리한 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집 제28권 5A호, pp. 691~697, 2008.
- [8] 한진희, 최종경, 허인성, 김성보, “압축력을 받는 고장력볼트 이음부의 미끄러짐 거동”, 한국강구조학회 논문집 제20권 2호, pp. 279~288, 2008.
- [9] 조선규, 홍성욱 “표면상태에 따른 고장력볼트 마찰이음부의 거동특성에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집 제9권 3호, pp. 421~430, 1997.
- [10] 성택룡, 황민오, 이종관, 윤태양 “고장력볼트 마찰이음에 있어서 미끄럼계수와 마찰계수에 대한 고찰”, 한국강구조학회 제19권 제3호, pp. 63~69, 2007.
- [11] 이승용, 경갑수 “고장력볼트 마찰이음의 합리적 설계 및 시공에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집 제26권 제3A호, pp. 513~521, 2006.
- [12] 이통우 “과대구멍을 갖는 고장력볼트 이음부의 거동에 관한 실험적 연구”, 중앙대학교 석사학위논문, pp.60~83, 2005.
- [13] 우해성, 김진호, 최성모 “고장력볼트 마찰접합부 각국 설계기준의 비교연구”, 한국강구조학회 학술발표 논문집 6월, pp. 423~430, 2002.

박 정 응(Jeong-Ung Park)

[정회원]



- 1992년 2월 : 조선대학교 조선공학과 (공학사)
- 1995년 4월 : 오사카대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 11월 : 오사카대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 1월 : 삼성중공업 책임연구원

- 2001년 9월-현재: 조선대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>

토목구조, 용접강도, 피로, 용접잔류응력, 용접변형

양 승 현(Seung-Hun Yang)

[정회원]



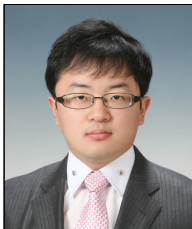
- 1992년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 조선이공대학 겸임교수

<관심분야>

토목구조, 교량유지관리,

조 강 균(Kang-Kyun Cho)

[정회원]



- 2008년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2009년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)

<관심분야>

토목구조, 강구조공학