

단면결손에 따른 고장력볼트 체결부의 내하력 변화에 관한 연구

박정웅¹, 양승현^{2*}, 장석인¹

¹조선대학교 토목공학과, ²조선이공대학 토목건설과

A Study on the Change of Load Carrying Capacity of High-tension Bolt Joints by Critical Sections

Jeong-Ung Park¹, Seung-Hyun Yang^{2*} and Seok-In Jang¹

¹Chosun University, Department of Civil Engineering

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

요 약 고장력볼트를 이용한 강부재의 체결에서 모재 및 덮개판의 과대공으로 인한 단면결손이 체결부에서 내하력의 저하가 우려되어 정적 인장시험을 실시하였다. 인장시험을 통하여 구해진 체결부의 파단시 최대하중을 단면결손율 및 설계강도와 비교하여 체결부의 내하력 변화를 파악하였다. 이에 따르면 단면결손율이 클수록 강도저하율이 컸으며 특히, 모재의 단면결손이 덮개판의 단면결손보다 강도저하에 대한 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 모재 및 덮개판을 과대공으로 제작한 고장력볼트 체결부는 표준공의 경우보다 내하성능이 다소 저하되었지만 파단시의 최대인장강도는 설계파단강도보다 15%이상 크게 나타났다. 본 연구에서는 과대공으로 제작된 고장력볼트 체결부에서 내하력저하에 미치는 영향이 미미하므로 강부재의 체결시공에 있어 과대공의 허용은 경제성과 효율성의 고취에 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

Abstract This study conducted a static tensile test in order to prevent the lowering of load carrying capacity caused by critical sections made by over bolt holes in the base plate and the cover plate of steel member joints using high-tension bolts. The change of the load carrying capacity of joints was examined by comparison of the maximum load on joint fracture obtained from the tensile test with critical section rate and design strength. According to the results, the rate of decrease in strength was higher when the critical section rate was high, and in particular, decrease in strength was affected much more by critical sections in the base plate than by those in the cover plate. In high-tension bolt joints using over bolt holes for the base plate and the cover plate, load carrying performance was somewhat lower than that in joints using standard bolt holes, but the maximum tensile strength on fracture was over 15% higher than design fracture strength. According to the results of this study, the use of over bolt holes in high-tension bolt joints had an insignificant effect on the lowering of load carrying capacity, so the allowance of over bolt holes in the joints of steel members is expected to enhance to the economy and efficiency of the works.

Key Words : Critical section, Load carrying capacity, Standard bolt hole, Over bolt hole

1. 서론

강부재의 연결은 용접이나 리벳, 볼트와 같은 체결재(fastener)를 이용하여 견고한 접합이 이루어 지도록 하여야 한다. 리벳은 가열된 상태에서 강부재의 체결 후 냉각

과정에서 몸통부의 인장강도가 충분치 못하고 엇갈림, 응력집중현상 등이 발생하기 쉽고 특히 피로강도가 적어 오늘날의 강부재의 체결재로 사용빈도가 적으며 이에 대한 대책으로 고장력볼트가 체결재로 주로 이용되어지고 있다. 고장력볼트 마찰이음은 볼트의 축에 큰 인장력을

본 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 건설핵심기술연구개발사업으로 수행된 연구결과임.

*교신저자 : 양승현(ttury@daum.net)

접수일 09년 08월 03일

수정일 09년 08월 16일

재제정일 09년 09월 16일

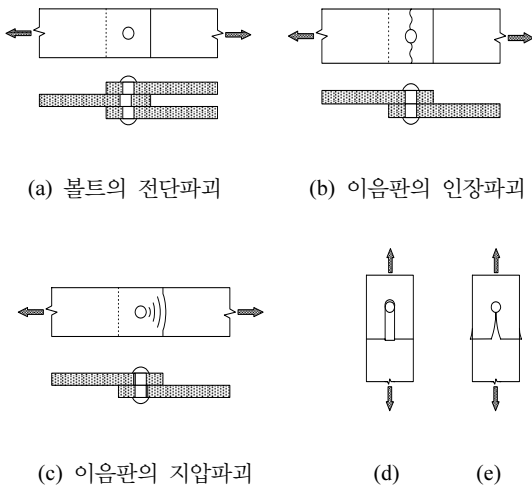
발생시켜 그 반력으로 이음강판에 발생하는 압축력에 의해 마찰력을 발생시켜 응력을 전달하는 방법이다. 고장력볼트에 의해 이음부의 내력을 확보하기 위해서는 볼트의 체결시 정확한 축력의 도입, 접촉면의 상태, 모재의 구멍내에서 볼트의 치수 및 위치에 따른 활동(slippage)에 대한 관리가 요구되어진다[6].

본 연구에서는 모재 및 덮개판을 표준공 및 과대공으로 제작한 고장력볼트 마찰이음에서 단면결손율과 발휘되는 최대인장강도의 관계를 분석하기 위하여 정적인장시험을 실시하였다. 아울러 정적인장시험 결과를 토대로 구조설계기준에서 제시하고 있는 연단거리 및 볼트간 중심간격에 대한 기준에 대하여 고찰하였다.

2. 고장력볼트 이음의 이론적 고찰

2.1 고장력볼트 이음부의 파괴

강부재의 이음부에서의 연결강도를 결정하기 위해서는 파괴형태에 대한 고려가 매우 중요한 요소이다. 연결부의 파괴형태는 그림 1과 같이 볼트의 파괴와 이음판의 파괴로 대별되어 질 수 있다. 그림 1의 (d)는 이음판의 전단파괴를 나타낸 것이고 (e)는 이음판의 할렬파괴를 나타낸 것이다. 그러나 실제 강부재의 연결부에서는 이음판의 연단거리를 구조설계기준에 의하여 충분히 설정하므로 (d)와 (e)와 같은 파괴는 매우 드물게 발생하는 것이 일반적이다. [5,6]



[그림 1] 이음부의 파괴형태

설계파단강도 P_p 는 단면결손을 고려하여 다음과 같이

결정하였다.

$$P_p = A_e \times f_u \quad (1)$$

여기서, P_p : 설계파단강도(kN)

A_e : 볼트구멍을 공제한 유효단면적(mm²)

f_u : 최소인장강도(=490 MPa)

2.2 최소 연단거리 및 볼트의 중심간격

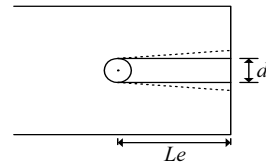
최소 연단거리는 그림 1의 (d), (e)와 같이 강부재가 하중전달방향으로부터 분리되는 것을 방지하기 위하여 필요하다. 최소 연단거리의 추정은 단부 볼트에 의해 전달되는 힘과 체결장치 후면의 강부재의 전단파괴를 야기시키는 힘을 등치시켜 얻어질 수 있다[5,6].

$$P = f_p \times d \times t \quad (2)$$

여기서, f_p : 지압응력(bearing stress)

d : 체결장치의 공칭지름

t : 이음판의 두께



[그림 2] 체결부의 연단거리

$$P = 2\left(L_e - \frac{d}{2}\right) \times t \times \nu_u \quad (3)$$

여기서, L_e : 체결장치의 중심으로부터 단부까지의 거리

ν_u : 이음판의 전단강도

f_u : 이음판의 인장강도

이 때, 이음판의 전단강도는 실험적으로 인장강도의 62%정도이므로 $\nu_u = 0.62 \times f_u$ 를 적용하였으며 식 1과 2를 등치시켜 $\frac{L_e}{d} \approx \frac{f_p}{f_u}$ 라 하고, 연단거리에 대한 안전계수 2.0을 적용시키면 하중전달방향의 최소연단거리는 다음과 같다.

$$L_e = \frac{2P}{f_u \times t} \quad (4)$$

또한 체결장치 사이 부재의 인장파괴를 방지하기 위하여 규정되는 최소 중심거리를 상기의 식 3으로부터 다음과 같이 얻어질 수 있다[4].

$$L = \frac{2P}{f_u \times t} + \frac{d}{2} \quad (5)$$

그러므로 연단거리와 볼트의 중심간격을 고려한 최대하중은 다음과 같이 구할 수 있다.

식 4로부터 볼트 1개당 연단거리에 따른 최대강도 P_1 은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{L_e \times f_u \times t}{2} \quad (6)$$

식 5로부터 볼트 1개당 중심간격에 따른 최대강도 P_2 는 다음과 같다.

$$P_2 = (L - \frac{d}{2}) \left(\frac{f_u \times t}{2} \right) \quad (7)$$

그러므로 모재 및 덮개판에 대하여 각각 적용시킨 볼트의 연단거리와 볼트의 중심간격을 고려한 최대강도는 다음과 같다.

$$P_t = (P_1 \times n_e) + (P_2 \times n_s) \quad (8)$$

여기서, P_t : 연단거리와 볼트 중심간격을 고려한 최대하중
 n_e : 하중방향 연단거리의 수
 n_s : 하중방향 볼트간격의 수

고장력볼트의 이음에서 구조물의 한쪽이 외기에 노출되거나 기존 구조물에 새로운 부재를 연결시키는 경우, 용접 등에 의한 변형량을 정확하게 예측할 수 없는 경우 볼트의 구멍이 서로 일치하지 않는 경우가 발생할 수 있으며 이 경우 볼트의 허용직경을 초과하여 볼트구멍을 확장함으로써 볼트삽입을 용이하게 하여 조립 능력의 향상과 건설시간, 비용 및 노력 등의 절감을 도모할 수 있다. 이러한 요구에 대하여 외국의 시방기준에서는 고장력볼트 이음부에서 과대공을 허용하는 규정을 두고 있으나,

국내의 경우에는 과대공에 대한 규정이 없다[1,12].

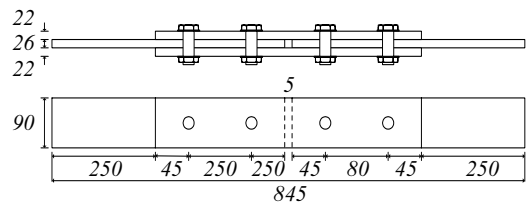
[표 1] 볼트구멍의 지름 (mm)

볼트호칭	표준공		과대공	
	마찰이음	지압이음	마찰이음	지압이음
M20	22.5	21.5	규정없음	규정없음
M22	24.5	23.5	규정없음	규정없음
M24	26.5	25.5	규정없음	규정없음

3. 고장력볼트 인장실험

3.1 시험편 제작

시험편은 M24의 F10T 고장력볼트와 SM490B의 강부재를 2면전단방식으로 연결하고 모재 및 덮개판에 대하여 표준구멍과 과대구멍으로 가공하여 각각 2조씩 제작하여 정적인장실험을 실시하였다.



[그림 3] 고장력볼트 시험편

[표 2] 시험편의 규격 및 치수

구분	구멍 형태	시험편 명칭	모재 구멍	덮개판 구멍	수량
1	표준	M24-ST2	∅26	∅26	2
2	과대	M24-OB4	∅28	∅26	2
3	과대	M24-OB6	∅30	∅26	2
4	과대	M24-OC4	∅26	∅28	2
5	과대	M24-OC6	∅26	∅30	2
6	과대	M24-OD4	∅28	∅28	2
7	과대	M24-OD6	∅30	∅30	2
계					14

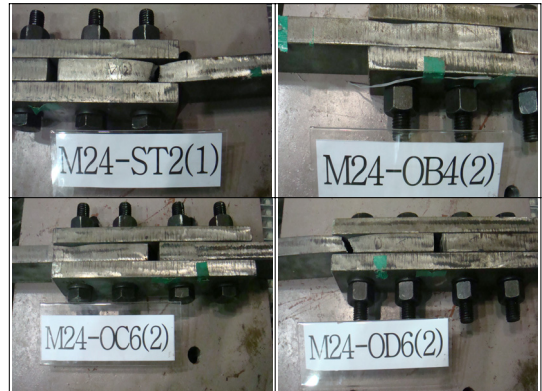
ST : 모재 및 덮개판의 표준공 제작
 OB : 모재의 과대공 제작
 OC : 덮개판의 과대공 제작
 OD : 모재 및 덮개판의 과대공 제작
 2,4,6 : 과대공 치수(볼트직경 + 2,4,6mm)

3.2 시험편 조립

본 연구에서는 다음과 같은 절차를 통하여 시험편을

조립하였다.

- (1) 마찰면에 블라스트에 의해 표면처리를 한 후 모재를 서로 5mm이격시키고 부재의 직진성을 확인하면서 예비조임을 실시하였다.
- (2) 축력의 감소를 고려하여 설계축력 235kN에 대하여 시공축력을 260kN으로 결정하고 설계축력의 10%에 해당하는 축력이 나올때의 토크 값을 설정하고 1차조임 토크값은 소요 토크값의 60%정도인 750kN·mm으로 하여 1차조임을 실시하였다. [12]
- (3) 본조임시의 토크값은 1,100kN·mm으로 하여 최종축력에 도달할 때까지 본 조임을 실시하였다.



[그림 5] 시험편의 파단



[그림 4] 시험편의 제작 및 조립

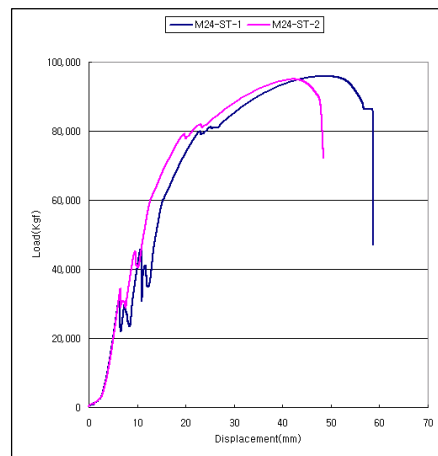
3.2 정적인장실험

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.

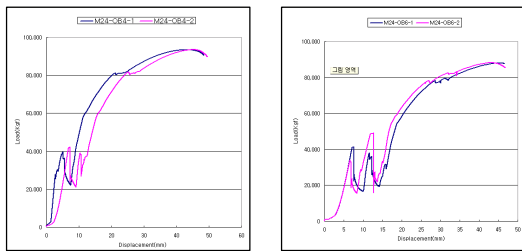
3.3 실험결과 및 고찰

인장시험에 의한 최대 인장하중은 M24-ST에서 972~973kN, M24-OD6에서 867~891kN으로 나타났다. 또한, M24-OB6에서는 878~881kN, M24-OC6에서 906~951kN으로 나타났다. 이를 토대로 표준공으로 제작된 시험체의 인장강도가 가장 크고 모재의 과대공 치수가 클수록 인장강도가 작았으며 덮개판의 과대공 시험체는 모재의 과대공 시험체보다 인장강도가 다소 크게 나타나서 덮개판의 과대공이 모재의 과대공보다 강도저하의 영향이 더 적은 것을 알 수 있었다.

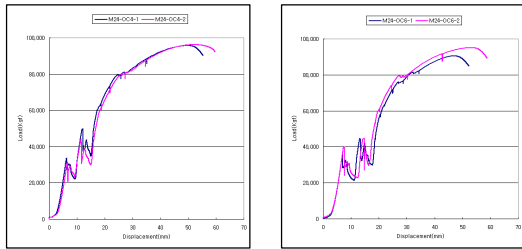
인장시험결과를 토대로 하여 단면결손에 따른 강도저하율을 검토한 결과 M24-OD6에서 단면결손율이 6.25%인데 대하여 강도저하율은 최대 10.9%에 이르는데 반해 M24-OB6에서는 단면결손율 2.32%, 강도저하율 9.7%로서 모재의 단면결손이 덮개판의 단면결손보다 강도저하에 대한 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다.



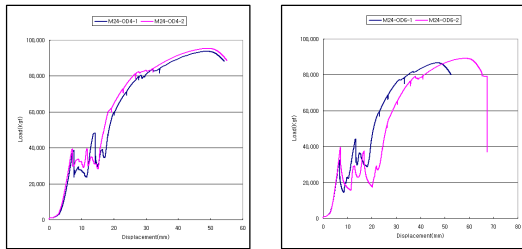
[그림 6] 표준공 시험편의 변위-하중 선도



(a) M24-OB4 및 M24-OB6



(b) M24-OC4 및 M24-OC6



(c) M24-OD4 및 M24-OD6

[그림 7] 과대공 시험편의 변위-하중 선도

[표 3] 시험편의 설계강도 및 최대하중(kN)

시험체명	설계강도	실험 P_t	P_{sb} (모재)
			P_{sc} (뿔개판)
M24-ST2(1)	815.6	973.0	713.4
M24-ST2(2)	815.6	972.4	603.7
M24-OB4(1)	789.8	934.4	707.1
M24-OB4(2)	789.8	934.1	603.7
M24-OB6(1)	764.4	878.2	700.7
M24-OB6(2)	764.4	880.9	603.7
M24-OC4(1)	789.8	957.5	713.4
M24-OC4(2)	789.8	962.0	598.3
M24-OC6(1)	764.4	905.6	713.4
M24-OC6(2)	764.4	950.9	592.9
M24-OD4(1)	789.8	937.1	707.1
M24-OD4(2)	789.8	953.1	598.3
M24-OD6(1)	764.4	867.0	700.7
M24-OD6(2)	764.4	891.1	592.9

최대하중과 단면결손을 고려하여 산정한 설계파단강도와의 비는 M24-OC6에서 1.244로 가장 크게 나타났으며 M24-OD6에서 1.136으로 가장 적은 것으로 나타났다. 최대하중과 모재의 연단거리 및 볼트 중심간격을 고려한 설계강도와의 비는 M24-ST에서 1.364 및 1.612로 가장 크게 나타났으며 M24-OD6에서 1.237로 가장 적은 것으로 나타났다. 최대하중과 뿔개판의 연단거리 등을 고려한 설계강도의 비는 M24-ST에서 가장 컸으며 M24-OB6에서 가장 적게 나타났다. 이는 표준공으로 제작되었거나 뿔개판을 과대공으로 제작된 시험체의 내하성능이 우수하며 모재를 과대공으로 제작한 경우에는 내하성능이 다소 적음을 나타내는 것으로 판단되었다.

[표 4] 단면결손율에 따른 강도비

시험체명	단면결손율	강도저하율	P_t / P_p	P_t / P_{sb}	P_t / P_{sc}
M24-ST2(1)	0.00	0.00	1.193	1.364	1.612
M24-ST2(2)		0.00	1.192	1.363	1.611
M24-OB4(1)	1.16	3.97	1.183	1.321	1.548
M24-OB4(2)		3.94	1.183	1.321	1.547
M24-OB6(1)	2.32	9.74	1.149	1.253	1.455
M24-OB6(2)		9.40	1.152	1.257	1.459
M24-OC4(1)	1.96	1.59	1.212	1.342	1.600
M24-OC4(2)		1.07	1.218	1.348	1.608
M24-OC6(1)	3.93	6.93	1.185	1.269	1.527
M24-OC6(2)		2.24	1.244	1.333	1.604
M24-OD4(1)	3.13	3.69	1.187	1.325	1.566
M24-OD4(2)		1.98	1.207	1.348	1.593
M24-OD6(1)	6.25	10.89	1.134	1.237	1.462
M24-OD6(2)		8.36	1.166	1.272	1.503

P_t : 인장시험에 의한 최대하중
 P_p : 설계파단강도
 P_{sb} : 모재의 연단거리 및 볼트간격을 고려한 최대강도
 P_{sc} : 뿔개판의 연단거리 및 볼트간격을 고려한 최대강도

4. 결론

본 연구에서는 모재 및 뿔개판을 과대공으로 제작한 고장력볼트를 이용한 강부재의 체결에서 단면결손에 따른 최대하중의 변화를 파악하기 위하여 정적 인장시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 표준공으로 제작된 시험체의 최대인장강도가 가장 크고 모재의 과대공의 치수가 클수록 인장강도가

- 작았으며 덮개판에 대한 과대공이 모재의 과대공보다 강도저하의 영향이 더 적은 것으로 나타났다.
- 2) 단면결손에 따른 설계강도의 변화를 고려하여 단면결손율과 강도저하율의 관계를 검토한 결과 단면결손율이 클수록 강도저하율이 컸으며 특히, 모재의 단면결손이 덮개판의 단면결손보다 강도저하에 대한 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다.
 - 3) 모재 및 덮개판의 단면결손에 따른 최대하중/설계강도의 관계를 고찰한 결과 표준공으로 제작되었거나 덮개판을 과대공으로 제작한 시험체의 내하성능이 우수하며 모재를 과대 공으로 제작한 경우에는 내하성능이 다소 적은 것으로 나타났다.
 - 4) 모재 및 덮개판을 과대공으로 제작한 고장력 볼트 체결부는 표준공의 경우보다 내하성능 측면에서 다소 불리하지만 파단시 최대하중이 설계파단강도보다 15%이상 크고 고장력볼트 체결부의 내하력저하에 미치는 영향이 미미하므로 과대공의 허용이 강부재의 체결 시공에 있어 경제성과 효율성의 고취에 기여 할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, “도로교표준시방서”, pp.93~99, 2005.
- [2] 건설교통부, “도로교설계기준”, pp.66~68, 101~108, 2005.
- [3] 한국강구조학회, “강구조공학,” pp.191~202, 468~470 2002.
- [4] 한국강구조학회, “강구조의 설계,” pp.56~61, 2000.
- [5] Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer “Steel Structures Third Edition,” McGraw-Hill, pp.66~78, 1992.
- [6] Jack C. McCormac, (장동일 역), “Structural Steel Design,” 구미서관, pp.237~239, 1988.
- [7] 한중욱, 박영석, “F13T급 고장력볼트를 이용한 마찰연결부 피로강도에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집 제28권 5A호, pp. 623~629, 2008.
- [8] 경갑수, 이승용, 김기현 “도장처리한 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집 제28권 5A호, pp. 691~697, 2008.
- [9] 한진희, 최종경, 허인성, 김성보, “압축력을 받는 고장력볼트 이음부의 미끄러짐 거동”, 한국강구조학회 논문집 제20권 2호, pp. 279~288, 2008.
- [10] 조선규, 홍성욱 “표면상태에 따른 고장력볼트 마찰 이음부의 거동특성에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집 제9권 3호, pp. 421~430, 1997.

- [11] 성택룡, 황민오, 이종관, 윤태양 “고장력볼트 마찰 이음에 있어서 미끄럼계수와 마찰계수에 대한 고찰”, 한국강구조학회 제19권 제3호, pp. 63~69, 2007.
- [12] 이승용, 경갑수 “고장력볼트 마찰이음의 합리적 설계 및 시공에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집 제26권 제3A호, pp. 513~521, 2006.
- [13] 이통우 “과대구멍을 갖는 고장력볼트 이음부의 거동에 관한 실험적 연구”, 중앙대학교 석사학위논문, pp.60~83, 2005.
- [14] 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,

장 석 인(Seok-In Jang)

[준회원]



- 2008년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 석사과정

<관심분야>

토목구조, 강구조공학