

사물인터넷 구현을 위한 고강도 콘크리트 박막벽체의 극한 편심하중 강도에 관한 연구

오 순 택* · 이 동 준** · 김 연 식***

A Study of Axial Eccentricity Strength of High Strength Concrete Thin Walls for Internet of Things

Oh Soontaek · Lee Dongjun · Kim Yeonsik

〈Abstract〉

Recently, a high strength concrete(HSC) in excess of 80 MPa is popular to use in the domestic construction field. But there is no design standard of high strength concrete. It is reason why a study about structural behaviors of thin walls is required. In this paper, the accurate Finite Element Method as a virtual test is suggested considering material properties, which are concrete and steel, and the experimental fractural model suggested by Kupfer. It is conducted the comparison evaluation of the ultimate failure loads, lateral-displacements and crack propagation patterns between the results of experimental approach, which were carried on Saheb's test for normal strength concrete and Lee's test for high strength concrete. Therefore it is suggested to use the accurate virtual simulation test method and Ubiquitous Sensor Network(USN) by Finite Element Method for Internet of Things(IoT).

Key Words : Finite Element Method, Virtual Simulation Test, Axial Eccentricity Strength of HSC, Ubiquitous Sensor Network, Internet of Things

I. 서론

IoT 구현을 위한 사물전자태그(RFID)나 센서를 활용한 정보를 네트워크에 연결하여 실시간 정보관리 시스템의 구축은 USN 기반 감지체계와 정보분석 및

평가를 위한 기준 정립이 요구된다[1]. 이러한 USN을 기반으로 한 콘크리트 관련 연구와 기술은 국내에서 삼성과 현대가 각각 10여 가지 보유기술을 활용하고 있으나 고강도 콘크리트 박막벽체에 관련된 평가기술은 관련 기준과 함께 상용화 되고 있는 고강도 콘크리트의 적용범위에 미치지 못하여 시급히 보완되어야 할 수준이다.

최근 국내에서 타워펠리스, 롯데123 타워의 건설에

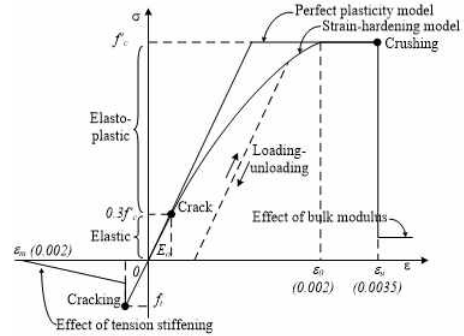
* 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수(제1저자)

** 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 강사(교신저자)

*** 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정

적용된 압축강도 80 MPa 이상 고강도 콘크리트의 적용범위가 확대되어 이에 따른 고강도 콘크리트의 설계기준의 개정 및 박막내력 벽체의 구조적 거동에 대한 심도깊은 연구가 시급히 요구되고 있다. 국내외 설계기준 및 관련 연구결과를 바탕으로 편심 축압축력에 의한 좌굴현상을 고려한 박막벽체의 극한하중, 경계조건에서의 사변지지 경우를 고려한 설계기준, 그리고 개구부의 영향을 고려한 실험적 연구결과들이 제안되고 있다. 기존의 실험결과를 고려한 적절한 유한요소법 수치모델을 구축하여 극한하중 및 구조적 거동을 가상시뮬레이션 수치해석방법을 제안하고자 한다. 콘크리트와 철근의 재료특성과 실험적 파괴모델을 적용한 수치해석 방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 관련 연구결과인 Saheb[2]가 수행한 보통콘크리트 실험결과와 Lee[3]의 고강도 콘크리트를 적용한 실험결과를 수치해석하고 극한 파괴하중, 형변위, 균열진전에 관하여 가상시뮬레이션을 이용한 해석결과와 상관계수를 이용하여 비교 평가하였다.

적용하였다. 인장력이 작용한 경우 인장 항복응력 f_t 까지 선형거동 후 균열이 발생한 후 변형률 ϵ_m 0.002 까지 선형감소하는 tension stiffening을 적용하였다.



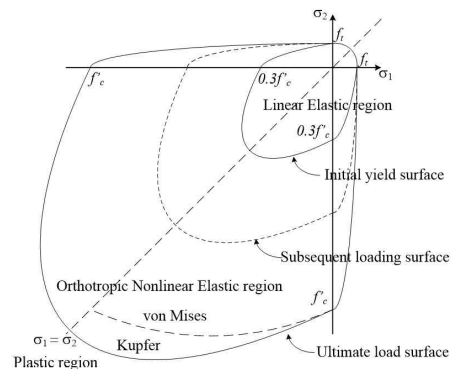
<그림 1> 콘크리트 일축 거동

콘크리트면에 대하여 2축 하중이 동시에 작용하는 경우 일반적으로 적용되는 von Mises 파괴모델보다 현실적인 실험결과를 반영한 Kupfer 모델을 적용하였다. <그림 2>에서 두 모델을 비교하였다.

II. 재료특성 모델링

2.1 콘크리트 물성 모델링

콘크리트 물성의 구조적 거동은 <그림 1>의 $\delta-\epsilon$ 선도를 적용하였다. 압축력이 작용할 때 $0.3f'_c$ 까지 탄성 선형거동을 형성하고 $0.3f'_c$ 이후 균열이 발생하여 항복하중 f'_c 까지 비선형 거동을 나타내는 Strain-hardening model을 적용하였다. 비선형 거동은 변형률 ϵ_0 0.002까지 진행 후 크러싱이 발생하는 극한 변형률 ϵ_u 0.0035 까지 소성거동을 나타낸다. 반면 균열이 발생하지 않으면 f'_c 까지 선형변형 후 완전소성모델이 된다. 그리고 압축파괴가 발생한 크러싱 이후 저항하중이 급격히 감소된 bulk modulus를



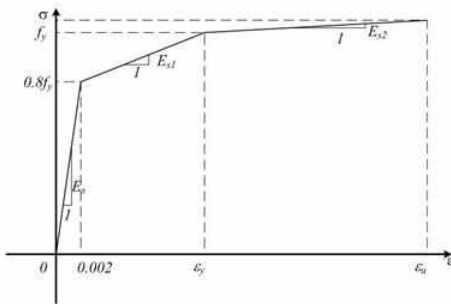
<그림 2> 콘크리트 이축 거동

Strain-hardening model을 적용할 경우 초기 항복면은 30%의 f'_c 에 작용응력이 도달할 경우 초기 탄성계수 E_0 에 의하여 형성되고 이후 작용응력이 증가되면 Hardening rule을 적용하여 소성변형률에 의하여

형성된다. 소성범위에서 작용하중을 제거하면 초기 탄성계수 기울기도 감소하여 영구변형이 발생한다[4].

2.2 철근 물성 모델링

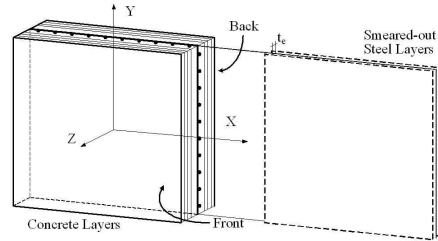
철근의 구조적 거동은 3 가지 탄성계수를 적용하여 모델링하였다. 인장항복응력 f_y 의 80% 까지 초기 탄성계수 E_s 에 의하여 변형률 0.002에 도달하며 선형거동 후 변형 탄성계수 E_{s1} 으로 항복응력에 다다른다. 항복 이후 소성거동 구간에서 소성 탄성계수 E_{s2} 로 극한 변형률에 도달하는 3단계의 선형거동으로 모델링하였다. 이때 적용된 각각의 탄성계수 E_s, E_{s1}, E_{s2} 는 $2.1E+5, 2.3E+4, 2.5E+2$ 을 적용하였다[4].



<그림 3> 철근 3 탄성계수 거동

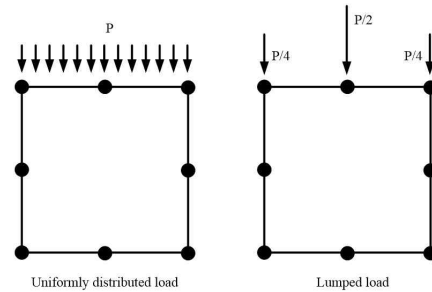
2.3 유한요소 모델링

Layered Finite Element Method (LFEM) 모델을 적용하여 벽체 요소를 분할하였다. <그림 4>와 같이 철근을 판요소로 변형하고 콘크리트를 두께로 분할한 층으로 세분화 하여 각각 8-nodes Plate를 적용하였다. 콘크리트의 분할은 외측에서 상대 두께 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 비율로 중심축까지 양측에 적용하고 철근은 직경 8mm를 물성값을 수직, 수평 2 층에 각각 적용하였다[5].



<그림 4> 철근 콘크리트 대표요소

벽체상변 nodes점에는 실험에서 적용된 등분포 하중을 등가하중분할 방식으로 <그림 5>와 같이 절점에 집중하중으로 전환하였다. 하중 재하위치는 벽체 전단면에 압축지배가 이루어지도록 벽체중양으로부터 단면핵 범위인 편심거리 벽체두께 $t_w/6$ 을 적용하였다.



<그림 5> 절점 재하하중

III. 기존 실험 해석

3.1 Saheb 실험

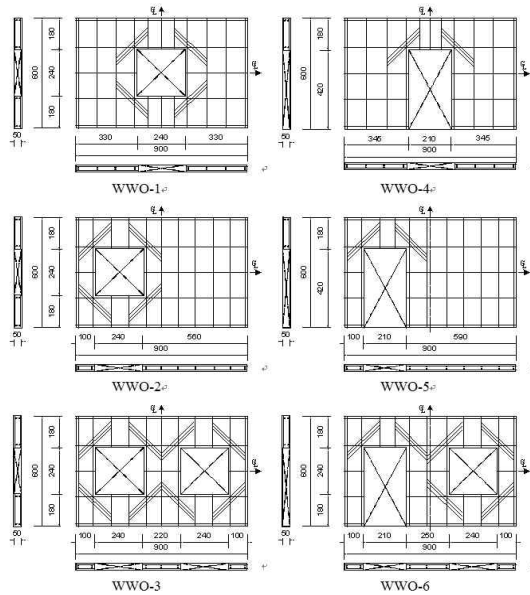
Saheb는 보통압축강도의 콘크리트벽체를 <그림 6>과 같이 창문과 창호를 조합하여 6개의 개구부 조건으로 실험을 수행했다. 실험 벽체의 사양은 높이 (H)는 600mm, 길이(L)는 900mm, 두께(t_w)는 50mm 으로 동일하다. window openings의 크기는 240mm x 240mm, door openings의 크기는 240mm x 420mm

이다. 콘크리트 강도(f_c')는 28.2 MPa이고 수평균 2.12mm와 수직근 3mm의 철근이 사용되었고 이때의 철근의 항복강도(f_y)는 각각 297 MPa, 985 MPa이다. 그리고 이들의 탄성계수는 2.05×10^5 MPa와 2.1×10^5 MPa이다. 1/6 폭두께에서 편심축하중이 등분포로 재하되었고 구속조건은 상하단면만 단순지지하였다. 실험에 적용된 벽체의 종횡비(H/L), thickness ratio(L/t_w), 세장비(H/t_w)는 각각 0.67, 18, 12이다[2].

을 증명하였다.

<표 1> Saheb 실험 극한하중 비교

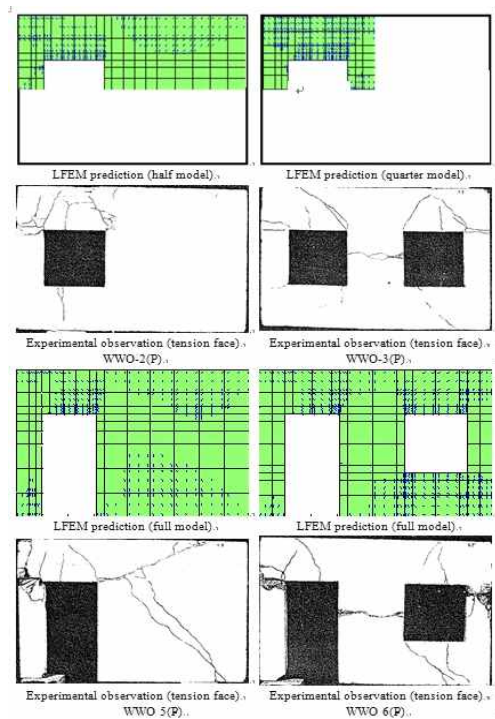
시편명	실험결과(kN)	해석결과(kN)	비교
WWO-1	692.5	700.7	1.012
WWO-2	592.8	588.0	0.991
WWO-3	448.4	539.0	1.202
WWO-4	697.5	686.0	0.984
WWO-5	587.8	568.4	0.967
WWO-6	448.4	509.6	1.136
		평균	1.049
		CV (%)	8.8



<그림 6> Saheb 실험벽체

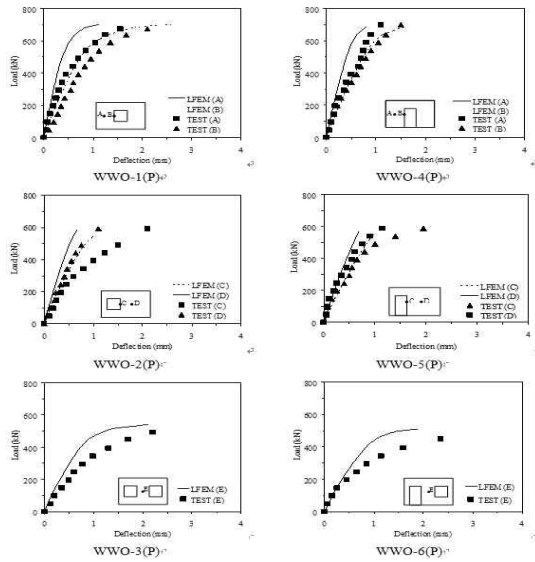
가상시뮬레이션 LFEM 해석결과와 Saheb의 실험 극한하중을 비교해 보았을 때 <표 1> 과 같이 6 가지 벽체의 극한하중값을 비교하였다. LFEM 해석결과와 실험결과와의 비는 0.967에서 1.136으로 분포하고 평균은 1.049, 상관계수는 8.8%로 나타났다. 가상실험 LFEM 해석결과와의 분석을 통하여 정확성과 효율성에서 개구부를 포함한 박막벽체에 편심축하중이 작용한 경우 극한하중을 예측할 수 있는 효과적인 도구임

Saheb의 실험의 균열형상을 가상시뮬레이션한 결과와 비교한 결과 압축, 인장면 모두 일치하였다. <그림 7>에서 1/2, 1/4, full 모델의 경우를 대표적으로 비교하였다.



<그림 7> Saheb 실험벽체 균열형상 비교

Saheb의 실험의 하중-변위선도를 계측위치별로 <그림 8>에 비교하였다. 실험결과는 표식으로 해석결과는 선으로 표현하였다.



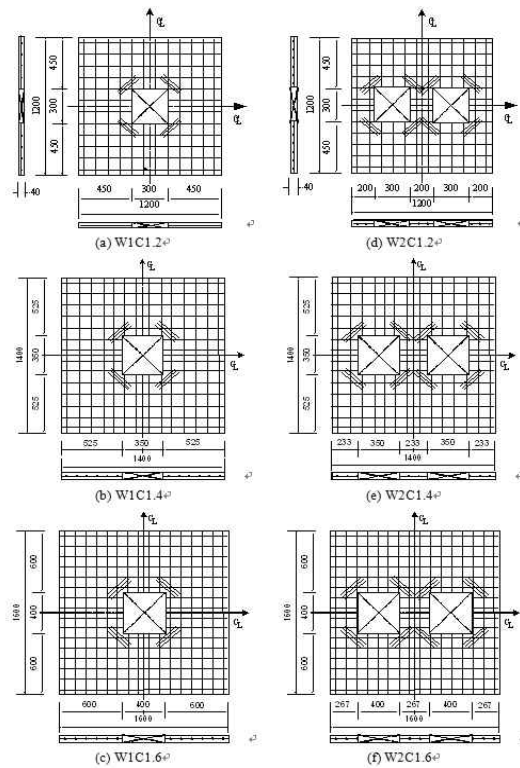
<그림 8> Saheb 실험벽체 하중-변위선도비교

실험 계측결과 벽체 중앙부에 개구부가 위치한 경우인 WWO-1와 WWO-4에서 벽체 중앙높이 개구부 근처 point B에서 최대변위가 발생하였고, 반면에, 개구부가 좌측에 위치한 WWO-2와 WWO-5에서는 개구부 근처 계측점 point C에서 최대값이 발생하여 벽체 중앙높이에서 일정하게 변위가 발생하는 상하단 지지조건인 경우 부분적인 횡좌굴과 개구부의 영향을 알 수 있었다. 그리고 두 개의 개구부를 포함한 WWO-3과 WWO-6에서는 파괴가 발생하기 전까지 상당한 소성변형을 나타내었다.

해석 결과의 비교한 경우 이러한 현상은 모두 일치하였고 항복하중과 횡변위 값은 측정 오차범위 내로 일치하였다. 따라서 보통 압축 콘크리트 강도의 세장비 12인 벽체의 극한하중, 횡변위, 균열형상을 LFEM 수치모델로 가상시뮬레이션을 통하여 정확히 예측할 수 있다.

3.2 Lee 실험

Lee는 50 MPa 이상의 고강도의 콘크리트벽체를 <그림 9>와 같이 벽체 중앙부에 1~2개의 창문의 경우 3 가지 세장비를 적용하여 6개의 조건으로 실험을 수행했다. 이 6 가지의 벽체에 대하여 3 가지 콘크리트의 강도를 적용하여 총 18번의 실험을 수행했다. 정사각형 높이(H)와 길이(L)로 각각 1200mm, 1400mm, 1600mm 크기의 실험체를 구성하였고 두께(t_w)는 모두 40mm이다. 개구부의 크기는 개당 벽체 면적 25%로서 각각 300mm x 300mm, 350mm x 350mm, 400mm x 400mm이다.



<그림 9> Lee 실험벽체

콘크리트 강도(f'_c)는 50.3 MPa ~ 99.3 MPa이고

철근의 항복강도(f_y)는 수평근과 수직근 모두 450 MPa 이다. 벽체의 1/6 폭두께 위치에 편심축하중이 등분포로 재하되었고 종횡비(H/L)는 1, thinness ratio(L/t_w)와 세장비(H/t_w)는 각각 30, 35, 40이다[6].

가상시뮬레이션 LFEM 해석결과와 Lee의 실험 극한하중을 비교해 보았을 때 <표 2> 와 같이 18 개 벽체의 극한하중값을 비교하였다. LFEM 해석결과와 실험결과의 비는 O90W2C1.6 시편에서 0.898로 실험결과보다 해석결과가 낮게 나타났으며, O45W2C1.4 시편에서는 1.435로 실험결과보다 해석결과가 높게 나타났다. 평균은 1.118, 변동계수는 16%로 나타났다.

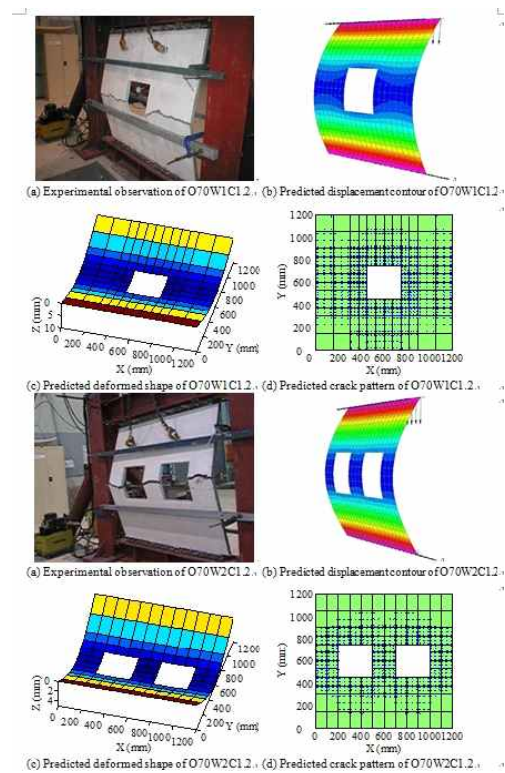
O45W2C1.4 시편에서 0.61로 실험결과보다 해석결과가 낮게 나타났으며, O90W1C1.4 시편에서 1.43로 실험결과보다 해석결과가 높게 나타났다. 평균은 1.01, 변동계수는 23%로 나타났다. 극한하중비와 비교하여 평균값은 근접하였으나 상관관계는 상대적으로 크게 나타났다. 이는 현실 실험의 불확실성으로 발생하는 데이터의 분산현상으로 25% 상관계수 데이터 관리의 경우 허용된다.

<그림 10>에서 두 가지 개구부 실험과 횡변위 그리고 균열형상 가상 실험 결과를 비교하여 나타내었다.

<표 2> Lee 실험 극한하중 비교

시편명	f_c (MPa)	실험결과 (kN)	해석결과 (kN)	극한 하중비	횡 변위비
O50W1C1.2	53.0	309.0	351.7	1.138	0.96
O70W1C1.2	67.7	426.7	400.2	0.938	0.87
O90W1C1.2	95.1	470.9	473.8	1.006	1.18
O95W1C1.2	96.2	488.5	476.8	0.976	0.82
O45W1C1.4	32.0	191.3	247.2	1.292	0.79
O90W1C1.4	80.0	300.2	417.9	1.392	1.43
O95W1C1.4	99.3	426.1	488.5	1.146	1.01
O50W1C1.6	47.0	294.3	278.1	0.945	1.13
O90W1C1.6	97.1	503.3	503.3	1.000	0.90
O50W2C1.2	50.3	191.3	253.1	1.323	1.14
O70W2C1.2	67.7	242.8	294.3	1.212	1.24
O95W2C1.2	96.2	308.1	350.2	1.137	1.13
O45W2C1.4	44.5	150.7	216.3	1.435	0.61
O90W2C1.4	80.0	244.3	310.5	1.271	1.12
O95W2C1.4	99.3	350.8	323.7	0.923	0.68
O50W2C1.6	51.1	195.7	228.1	1.166	1.13
O70W2C1.6	74.1	279.0	260.5	0.934	1.29
O90W2C1.6	97.1	347.3	312.0	0.898	0.69
평균				1.118	1.01
CV (%)				16%	23%

동일한 방법으로 벽체 파괴 시 최대 횡변위를 측정하여 비교한 결과 18 개 벽체의 횡변위비는



<그림 10> Lee 실험벽체 가상실험

IV. 결론

IoT 구현을 위한 USN 기반을 구축하기 위한 계측 위치와 허용변위와 한계응력을 규정하기 위한 고강도 박막벽체의 주요변수별 가상시뮬레이션 실험 방법과 유한요소수치해석법을 연계하여 제안하였다.

한계성이 큰 실험실험을 대신할 수 있는 가상시뮬레이션을 개발하기 위하여 유한요소법을 적용하여 고강도 콘크리트 박막벽의 재료 특성과 구조시스템을 모델링하고 기존의 실험결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 비교한 주요 항목은 극한하중, 최대 횡변위, 균열형상으로서 변동계수를 활용하여 분석하였다.

분석 결과 보통강도 콘크리트를 적용한 Saheb 실험의 경우 극한하중비가 평균 1.049 변동계수 8.8%를 나타내었고 고강도 콘크리트와 박막벽체를 적용한 Lee 실험의 경우 평균 1.118 변동계수 16%를 나타내었다.

따라서 고강도 콘크리트 압축강도 100 MPa 까지 세장비 40까지 개구부를 포함한 박막벽체의 구조성능 실험을 계측 관리하고 구조안정성을 지능적으로 평가할 수 있는 IoT 체계를 제안한다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 노영, 변정우, "RFID를 활용한 유비쿼터스 컨벤션에 관한 연구," 디지털산업정보학회 논문지, 제5권, 제3호, 2009, pp. 176-184.

[2] Saheb S. M., Desayi P., "Ultimate Strength of R. C. Wall Panels with Openings," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 6, 1990, pp. 1565-1578.

[3] Lee D. J., "Experimental and Theoretical Studies of Normal and High Strength Concrete Wall Panels with Openings," Phd thesis of Griffith University, 2008.

[4] Hong G., "Cracking and Punching Shear Failure Analysis of Reinforced Concrete Flat Plates by Layered Finite Element Method," Phd thesis of Griffith University, 1996.

[5] Guan H., Cooper C., Lee D. J., "Ultimate Strength Analysis of Normal and High Strength Concrete Wall Panels with Varying Opening Configurations," Engineering Structures, Vol. 32, 2010, pp. 1341~1355.

[6] Fragomeni S., Doh J. H, Lee D. J., "Behavior of Axially Loaded Concrete Wall Panels with Openings: An Experimental Study," Advances in Structural Engineering, Vol. 15, No. 8, 2012, pp. 1345~1358.

■ 저자소개 ■



오 순 택
Oh Soontaek

1993년 3월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 교수

1992년 2월 State University of New York at Buffalo 지진공학 (공학박사)

1989년 2월 State University of New York at Buffalo 토목공학 (석사)

1983년 2월 연세대학교 토목공학 (학사)

관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : alicia@seoultech.ac.kr



이 동 준
Lee Dongjun

2009년 3월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 강사
2009년 3월 Griffith University 구조공학
(공학박사)
2000년 2월 서울과학기술대학교 구조공학
(석사)
1981년 2월 연세대학교 건축학 (학사)

관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : djlee@snut.ac.kr



김 연 식
Kim Yeonsik

2014년 9월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템공학과 석사과정
2014년 8월 서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 (학사)

관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : kysgood89@naver.com

논문접수일: 2014년 12월 26일
수 정 일: 2015년 1월 21일
계재확정일: 2015년 1월 26일