

# BIM을 이용한 프리캐스트 콘크리트 전단벽의 배근 오류 검증 및 휨 연성 모델 제시

문주현<sup>1\*</sup>

## Verification of Reinforcing Arrangement Error in Precast Concrete Shear Walls Using BIM and Presentation of Flexural Ductility Model

Ju-Hyun Mun<sup>1\*</sup>

**Abstract:** This study established a BIM procedure considering manufacturing errors in the production process, and evaluated the flexural ductility of precast all-lightweight aggregate concrete special shear walls (PLASWs) with spliced sleeve technique. In the production process, the concrete cover thickness of PALSW was on average 1.28 times greater than the cross-sectional details of the specimen modeled with Revit BIM program. In particular, the bending inner radius of the hoop and inner-cross tie were greater than the designed details. Consequently, the confinement effect of core concrete reduced from 64% to 54% due to the manufacturing errors in the transverse reinforcing bars, resulting in a decrease in the ductility of PALSW by approximately 4.91%. Considering these findings, the BIM of PLASW with spliced sleeve technique should compliment the bending inner radius of the transverse reinforcing bars, and the defined brittleness increase coefficient reflecting the decreased core concrete confining pressure in the stress-strain relationship of confined concrete should be evaluated as 1.8.

**Keywords:** BIM, Precast concrete shear wall, Manufacturing error, Flexural ductility

### 1. 서 론

특수 전단벽은 특수 모멘트 골조에서 일반적으로 사용하는 내진성능이 충분히 확보된 고연성형 구조부재이다(Yoon et al., 2013). 특수 전단벽의 연성은 전단철근인 후프 철근과 내부 보조 띠철근에 의해 코어 콘크리트가 효율적으로 구속된 경계요소로부터 발휘된다(Yang et al., 2021a). 그렇기 때문에 KDS 14 20 80(2021) 및 ACI 318-19(2019)에서는 고연성 발휘를 위한 경계요소내의 최소 전단철근량을 규정하고 있으며, 특히 프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC) 전단벽에서는 기초 접합부의 하중전달력이 휨 설계 내력의 80% 이상 확보하도록 제시하고 있다. 또한, ACI ITG 5.1-07(2008)은 PC 전단벽에서 현장타설 전단벽과 비슷한 수준의 휨 연성을 확보하기 위해 각각 절대적 동등성 개념으로 도입하고 있다. 특히, 이 기준에서는 고연성 확보를 위한 최대내력 이후의 한계 변형각을 정의하였으며, 이 시점에서의 내력, 강성 및 상대에너지소산 면적의 최소값을 제시하고 있다. 이와 같이 PC 특수

전단벽의 접합부에서의 전단전달력은 연성 확보를 위한 중요 한 설계 요소이다(Yang et al., 2021a; Zhi et al., 2024).

Yang et al.(2023)은 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PC 특수 전단벽이 접합부에서의 응력집중 현상으로 인해 일체타설 특수 전단벽보다 변위연성비 및 일손상지수가 각각 15.4% 및 33.1% 이상 낮음을 보였다. Zhi et al.(2024)는 스플라이스 슬리브 내부에 설치되는 주철근은 그라우팅재와의 부착응력의 저하로 소성힌지구간이 감소함을 검증하였다. 이와 같이 PC 특수 전단벽에 대한 기존 연구는 대부분 기초와의 접합에서 스플라이스 슬리브에 의해 저하되는 연성을 정량적으로 평가하는데에 중점을 두고 있다(Xue et al., 2022; Lu et al., 2023; Xu et al., 2017). 하지만, PC 특수 전단벽의 연성은 스플라이스 슬리브의 접합공법 뿐만 아니라 경계요소내의 코어 콘크리트의 구속비율에 의해서도 현저한 영향을 받는다(Yang et al., 2021b). 특히 절곡공정이 많은 외부의 후프철근과 내부 보조띠철근을 포함하고 있는 경계요소를 고려하여 볼 때, PC 특수 전단벽은 생산과정에서 발생하는 경계요소내 철근들의 제작오차로 인한 코어 콘크리트의 구속비율의 감소로 그 연성능력이 현저히 저하될 수 있다(Liang et al., 2023; Xiao et al., 2021). 이러한 단점에도 제작오차를 고려한 PC 특수 전단벽의 연성평가에 대한 연구는 매우 미미한 수준에 있으며, 특히 PC 특수 전단벽에서 제작오차(사용된 재료들의 물량산

<sup>1</sup>정회원, 경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공 조교수, 교신저자

\*Corresponding author: mjh@kgu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Gyeonggi-do, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

출)를 감소하기 위한 연구(Dalia et al., 2022; Yang et al., 2022)는 스케치업 프로그램(2024)과 BIM(Building Information Modeling) 프로그램을 연동하는 수준에 그치고 있다. 따라서 PC 특수 전단벽은 정확한 연성능력과 실질적인 배근상세를 반영할 수 있는 BIM을 구축하기 위해 생산과정에서 발생할 수 있는 제작오차를 고려할 필요가 있다.

이 연구의 목적은 프리캐스트 경량골재 콘크리트 특수 전단벽A\_{sh})으로 설정하였다. PALSW는 스케치업 프로그램(2024)과 레빗 프로그램(2024)의 컴포넌트 기능을 연동(Mun et al., 2022)하는 절차를 이용하여 주요변수에 따른 실험체 상세를 BIM으로 구현하였다. 스케치업(2024)과 레빗(2024)으로 모델링된 PALSW는 실제 투입된 재료들의 물량과 공장 현장에서 제작된 상세와의 비교를 통해 BIM의 제작오차를 검증하고 모델링을 보완하였다. 한편, PALSW의 휨연성은 변위연성비와 일손상지수로부터 평가하였다. 특히 PALSW에서 경계요소내의 구속효과는 Yang et al.(2021a)에 의해 제시된 일체형 전단벽의 횡하중-변위관계와 실험결과를 피팅시키는 절차에서 경계요소내 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 역으로 추산하는 절차를 이용하였다. 최종적으로 PALSW의 휨 연성은 띠철근의 제작오차에 의한 경계요소내 구속력의 저하를 고려할 수 있는 횡하중-변위 관계를 이용하여 변위연성비의 평가모델로 일반화하였다.

## 2. BIM 절차 및 실험

### 2.1 실험체 상세

Fig. 1과 Table 1에는 Yang et al.(2024)에 의해 수행된 PALSW 실험체의 상세를 나타내었다. 일반적으로 PC 전단벽의 생산과정에서 제작오차가 많이 발생하는 부분은 절곡공정

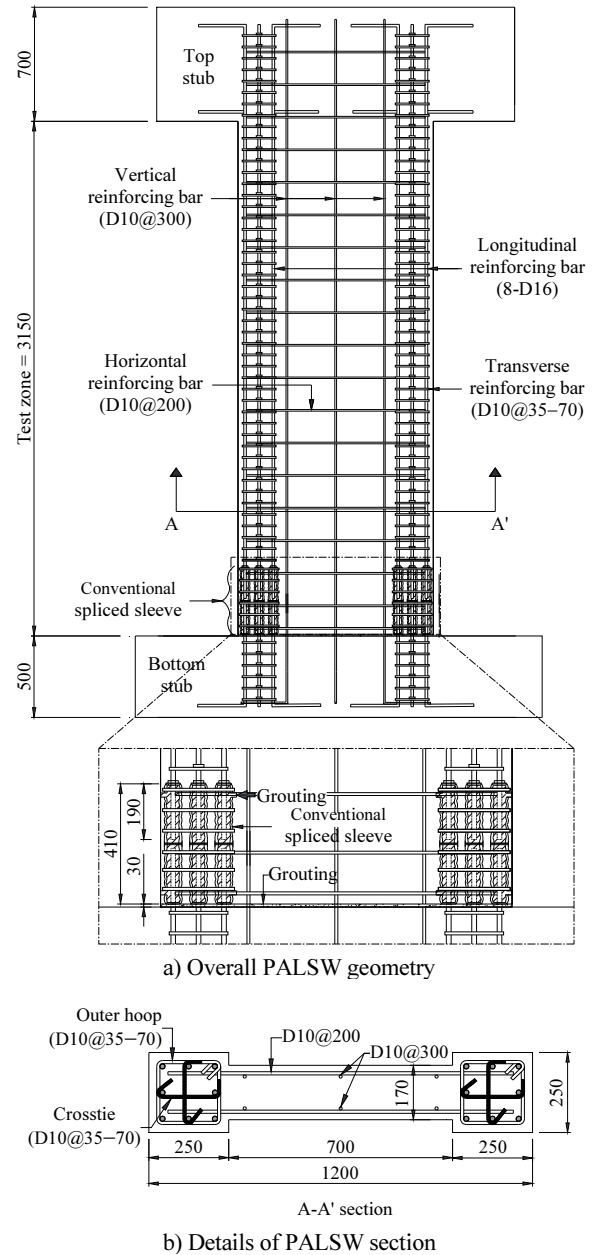


Fig. 1 Details of the PALSW specimens

Table 1 Details of shear wall specimens

Specimens	Transverse reinforcing bar				Longitudinal reinforcing bar	Reinforcing bar in web			Concrete type	Connection method
	$\frac{A_{sh}}{A_{sh,m}}$	$s$ (mm)	$\rho_{sh}$	$\omega_{sh}$	Arrangement	$\rho_s$	$\rho_v$	$\rho_h$		
1.0A	1.0	70	0.019	0.211					All-lightweight aggregate concrete	Spliced sleeve technique
1.5A	1.5	50	0.026	0.289	8-D16	0.025	0.003	0.004		
2.0A	2.0	35	0.037	0.411						

Note]  $A_{sh}$  = amounts of transverse reinforcing bar at the boundary element,  $A_{sh,m}$  = minimum required amounts of transverse reinforcing bar at the boundary element,  $s$  = spacing of transverse reinforcing bar at the boundary element,  $\rho_{sh}$  and  $\omega_{sh}$  = volumetric transverse reinforcing bar ratio and indices at the boundary element, respectively,  $\rho_s$  = longitudinal reinforcing bar ratio at the boundary element, and  $\rho_v$  and  $\rho_h$  = vertical and horizontal reinforcing bar ratios in web, respectively.

이 많은 외부의 후프철근과 내부 보조띠철근이다(Bacharz et al., 2019; Tworzewski, 2015) 또한, 이러한 띠철근들은 현장에서 제작오차에 의해 경계요소내 코어 콘크리트의 구속비율을 변화시킨다(Kim et al., 2021). 이에 따라 주요변수로서 후프 철근과 내부 보조띠철근의 영향을 고려하기 위해  $A_{sh}$  인 실험체들을 선정하였다.  $A_{sh}$ 는 KDS 14 20 80(2021)에서 제시하고 있는 최소양( $A_{sh(min)}$ )을 기준으로  $1.0A_{sh(min)}$ ,  $1.5A_{sh(min)}$  및  $2.0A_{sh(min)}$ 으로 변화하였다. 이로서 띠철근의 간격은 각 주요변수에서 70 mm, 50 mm 및 35 mm으로 산정되었다.

모든 PALSW 실험체는 250 mm × 250 mm의 단면 크기의 경계요소를 가지고 있으며, 전체 길이와 웨브 두께는 각각 1,200 mm 및 170 mm이다. 또한, 실험체의 전체높이와 실험구간의 높이는 각각 4,350 mm 및 3,150 mm이다. 콘크리트의 피복두께는 20 mm이다. 경계요소내의 주철근은 직경 16 mm의 이형철근 이용하여 8개 배근하였으며, 띠철근은 직경 10 mm의 이형철근을 이용하여 주요변수에 따라 배근하였다. 또한, 웨브의 수직 및 수평철근은 직경 10 mm의 이형철근을 이용하여 각각 300 mm 및 200 mm로 배근하였다. 한편, PALSW 실험체에서 벽체와 기초는 스플라이스 슬리브 공법을 이용하여 결합하였다. 결합시 벽체와 기초의 주철근들의 스플라이스 슬리브 내의 삽입길이와 상호간격은 ICC-ES ESR-3433(2023)에서 제시한 요구사항에 준하였다. ICC-ES ESR-3433(2023)의 기준에 따른 스플라이스 슬리브 내의 삽입길이 및 주철근의 상호 간격은 각각 105 mm와 35 mm이었다. 스플라이스 슬리브는 외부 및 내부 직경이 각각 48 mm 및 32 mm의 D사의 제품을 이용하였다.

## 2.2 재료특성

Table 2에는 사용된 전 경량골재 콘크리트(all-lightweight aggregate concrete, ALWAC)의 배합표 및 측정된 압축강도를

를 나타내었다. 경량골재는 바텀애시 기반의 인공팽창골재인 독일의 L사의 제품을 이용하였다. 사용된 경량골재는 단위용적중량이 1,400 ~ 1,500 kg/m<sup>3</sup>이며, 흡수율이 10.3 ~ 14.1%으로서 일반골재 보다 단위용적중량이 약 37.9% 낮고 흡수율이 약 14배 높았다. 배합표에서 ALWAC의 물-결합재비 및 잔골재율은 각각 30% 및 45%이었으며, 구조실험시점에서 측정된 ALWAC의 압축강도는 평균 39.6 MPa이었다.

Table 3에는 사용된 보강재들의 역학적 특성을 나타내었다. 주철근으로 사용된 직경 16 mm의 이형철근의 항복강도와 인장강도는 각각 431 MPa와 577 MPa이었다. 또한 띠철근과 수직 및 수평철근으로 사용된 직경 10 mm의 이형철근의 항복강도와 인장강도는 각각 440 MPa와 572 MPa이었다. 이들 철근들의 탄성계수들은 평균 198,838 MPa이었다. 기초와 벽체간의 접합을 위해 사용된 스플라이스 슬리브의 항복강도와 인장강도는 각각 564 MPa와 706 MPa이었으며, 이때의 탄성계수는 165,882 MPa이었다.

## 2.3 모델링 및 절차

BIM 구현을 위한 PALSW 실험체의 모델링은 스케치업 프로그램(2024)과 레빗 프로그램(2024)의 로더블 라이브러리를 이용하여 Mun et al.(2022)에 의해 제시된 절차(Fig. 2)를 이용하였다. 모델링 절차를 요약하면 다음과 같다; 1) 스케치 프로그램을 이용하여 실험체의 전체 상세를 모델링한다; 2) 3D 이미지로 모델링된 파일은 레빗 프로그램의 컴포넌트 기능을 이용하여 IFC 파일로 변환한다; 3) 레빗 프로그램의 로더블 라이브러리에서 변환된 파일을 로딩한다; 4) 레빗 프로그램에서 사용된 재료들의 간섭을 확인하여 수정한다; 5) 각 재료들의 물량을 산출한다. 특히 절차 4)에서 모델링된 PALSW는 공장 현장에서 제작된 상세와의 비교를 통해 상세를 보완한다. 스케치업 프로그램(2024)과 레빗 프로그램(2024)을 이용

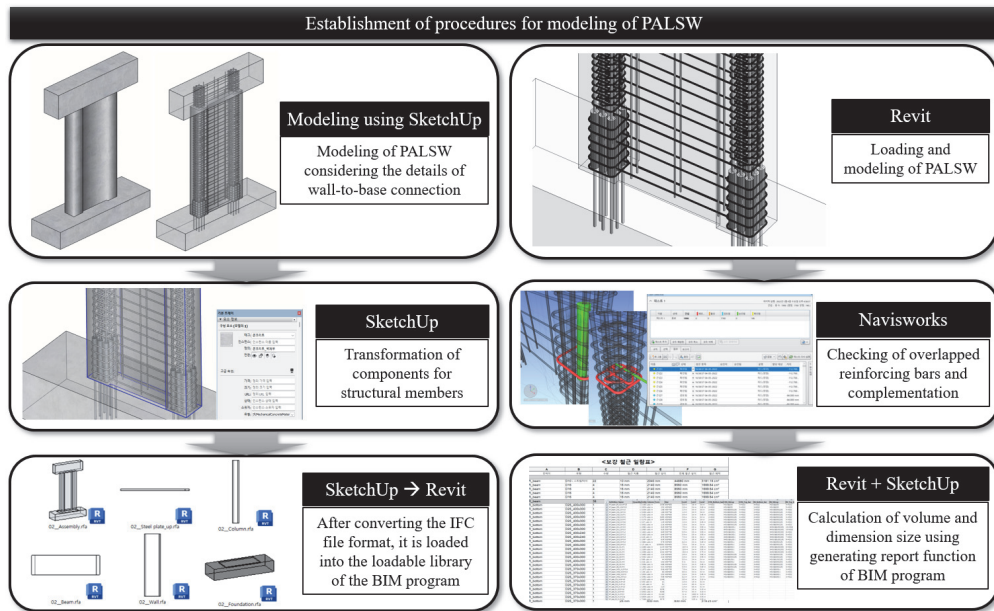
**Table 2** Mixture proportions of ALWAC

Concrete type	$f_{cd}$ (MPa)	$\rho_{cd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$W/C$	$S/a$	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				$f_{ck}$ (MPa)	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )
					$W$	$C$	$C_L$	$F_L$		
ALWAC	35	1,500	0.30	0.45	195	355	566	503	39.6	1,755

Note] ALWAC = all-lightweight aggregate concrete,  $f_{cd}$  and  $\rho_{cd}$  = designed compressive strength and unit weight of concrete, respectively,  $W/C$  = water-to-cement ratio by weight,  $S/a$  = fine aggregate-to-total aggregate ratio by volume,  $W$  = water,  $C$  = ordinary Portland cement,  $C_L$  and  $F_L$  = coarse and fine lightweight aggregates, respectively, and  $f_{ck}$  and  $\rho_c$  = compressive strength and unit weight of concrete, respectively.

**Table 3** Mechanical properties of reinforcing bars

Steel type	Diameter (mm)	Yield strength (MPa)	Yield strain	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
Deformed bars	10	440	0.0023	572	194,115
	16	431	0.0022	577	203,561
Spliced sleeve	60	564	0.0034	706	165,882



**Fig. 2** Modeling process and research method for PC shear walls using SketchUp and Revit

한 BIM에서는 Fig. 1에서 제시된 상세와 동일하게 모델링하였다. 특히, 경계요소내의 후프철근과 내부 보조띠철근의 배근 상세는 KDS 14 20 50(2021)에서 제시하고 있는 구부림 각도(90° 및 135° 갈고리)와 구부림 내면 반지름( $2d_b$ ) 규정에 부합하도록 모델링하였다.

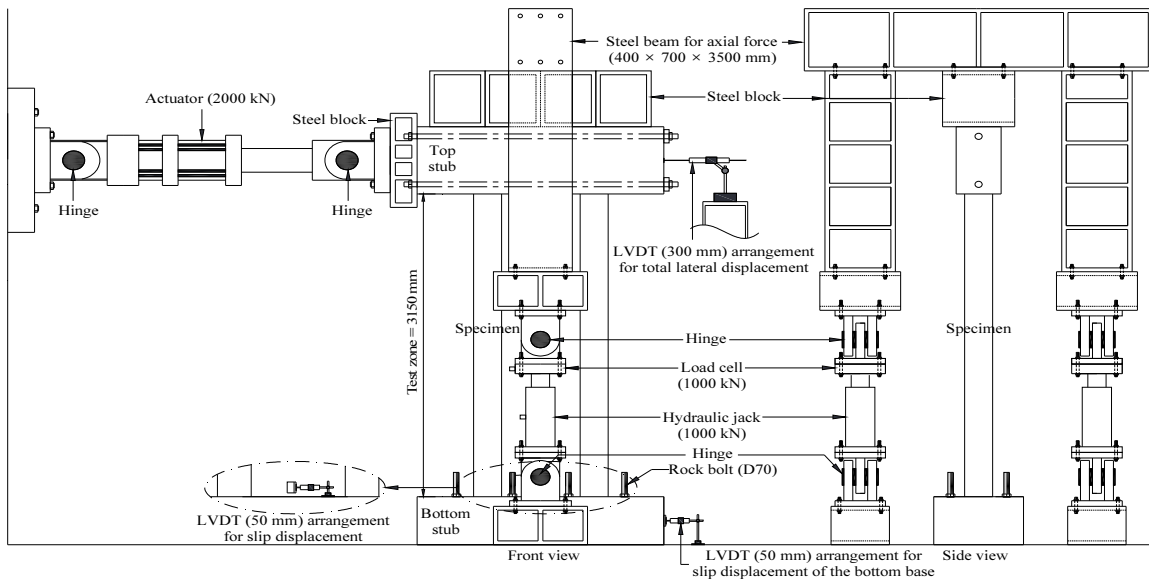
#### 2.4 BIM의 비교항목

공장 현장에서 제작된 상세와의 비교를 통해 보완된 PALSU의 BIM 모델링은 Navisworks 기능을 이용하여 배근된 경계

요소내의 주철근 및 띠철근, 웨브의 수평철근 및 수직철근 그리고 스플라이스 슬리브들의 상호 간섭의 정도를 평가하였다. 또한, 산출된 재료들의 물량들은 실제 투입된 재료들의 물량과 비교하여 PALSU의 BIM 모델링에서 물량산출 측면의 한계성을 검토하였다. 콘크리트는  $m^3$ 의 체적단위로, 철근과 스플라이스 슬리브는  $ton$ 의 중량단위로 산출하였다.

#### 2.5 실험 셋팅 상세

Fig. 3에는 일정 축하중을 받는 PALSU 실험체의 반복 휨



**Fig. 3** Test set-up

거동 평가를 위한 구조실험 셋팅상세를 나타내었다. PALSW 실험체는 강제력 볼트와 너트를 이용하여 반력바닥에 완전히 고정하였다. 축력은 힌지 시스템이 부착된 유압잭을 이용하여 구조실험동안 편심을 방지하면서 실험체에 일정한 축력이 도입되도록 하였다. 이때의 축력은  $0.1A_g f_{ck}$  로 설정하였는데,  $A_g$ 는 축력이 도입되는 단면적을,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도를

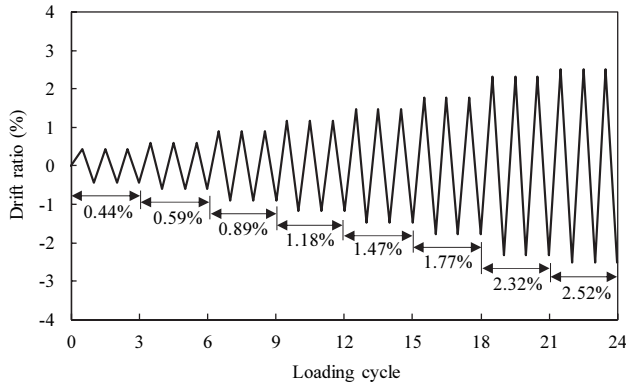


Fig. 4 Cyclic history of lateral load

를 의미한다. 횡하중은 실험체 상부 스티브에 연결된 액츄에이터를 이용하여 도입하였다. 가력이력 곡선은 Fig. 4에 나타내었다. 각 사이클의 증분변위는 FEMA 356(2000)에서 제시된 절차를 이용하여 결정하였다. 구조실험동안의 횡변위는 300 mm 용량의 변위계(linear variable differential transducer, LVDT)를 이용하여 액츄에이터의 중심선과 동일선상 위치의 하중 작용점에서 측정하였다. 미끄러짐 변위는 기초와 벽체와의 접합부 사이에서 50 mm용량의 LVDT를 이용하여 측정하였다.

### 3. BIM 결과 및 분석

#### 3.1 각 재료들의 간섭과 물량산출

Table 4에는 PALSW 실험체에서 사용된 재료들의 간섭경향과 간섭건수를 나타내었다. Mun et al.(2022)에 의해 지적된 바와 같이 스플라이스 슬리브는 경계요소내의 띠철근 또는 웨브의 수평철근과의 간섭이 주로 발생하였다. 이에 따라  $A_{sh}$ 가  $1.0A_{sh(min)}$ 으로 설계된 PALSW 실험체에서 경계요소내의

Table 4 Overlapped reinforcing bars

Specimens	Details of overlapped reinforcing bars			The number of overlapped reinforcing bars		
	Spliced sleeve-Transverse reinforcing bar	Spliced sleeve-Horizontal reinforcing bars of web	Transverse reinforcing bar-Horizontal reinforcing bars of web	Spliced sleeve-Transverse reinforcing bar	Spliced sleeve-Horizontal reinforcing bars of web	Transverse reinforcing bar-Horizontal reinforcing bars of web
1.0A				77	24	10
1.5A				136	24	14
2.0A				183	24	22

Table 5 Total volume weight of used materials

Specimens	Volume at each materials(m <sup>3</sup> )							Weight at each reinforcing bar(ton)					
	Concrete		Boundary element				Mortar	Web		Boundary element			Web
	Cement	Fine aggregate	Outer transverse reinforcing bar	Inner transverse reinforcing bar	Longitudinal reinforcing bar	Spliced sleeve and vertical reinforcing bars		Horizontal reinforcing bars	Outer transverse reinforcing bar	Inner transverse reinforcing bar	Longitudinal reinforcing bar	Horizontal and vertical reinforcing bars	
1.0A	0.082	0.276	0.223	0.0051	0.0041	0.0133	0.0065	0.0039	0.0050	0.040	0.032	0.104	0.039
1.5A	0.082	0.275	0.222	0.0065	0.0051	0.0133	0.0065	0.0039	0.0050	0.050	0.040	0.104	0.039
2.0A	0.081	0.273	0.220	0.0094	0.0078	0.0133	0.0065	0.0039	0.0050	0.073	0.061	0.104	0.039

띠철근과 스플라이스슬리브와의 간섭은 77건이었으며, 웨브와의 간섭은 10건으로 간섭에 대부분을 차지하였다. 특히 이러한 간섭의 빈도는  $A_{sh}$  이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 스플라이스슬리브의 비교적 큰 기하학적 상세(2022)에 기인한 것으로 사료된다. 따라서, 경계요소내의 후프철근은 콘크리트 피복두께를 일정하게 유지하면서 스플라이스슬리브를 둘러싸는 형상이므로 공장현장에서 각 꼭지점에서의 절곡각도에 대한 주의가 요구된다.

Table 5에는 레빗 프로그램을 이용하여 산출된 구성 재료들의 물량을 나타내었다. PALSW 실험체에서  $A_{sh}$ 가  $1.0 A_{sh(min)}$ 에서  $2.0 A_{sh(min)}$ 으로 증가할 때에 콘크리트 물량은 약 1% 다소 감소하였으나, 띠철근은 약 1.78배 증가로 현저하였다. 이는  $A_{sh}$ 가 증가할수록 띠철근이 차지하는 체적이 증가하여 상대적으로 콘크리트 물량이 감소하기 때문이다.

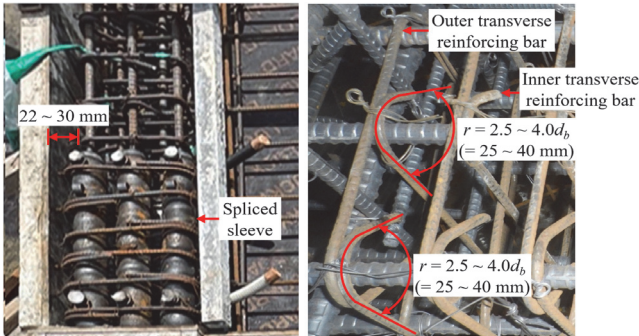


Fig. 5 Manufacturing error in construction site

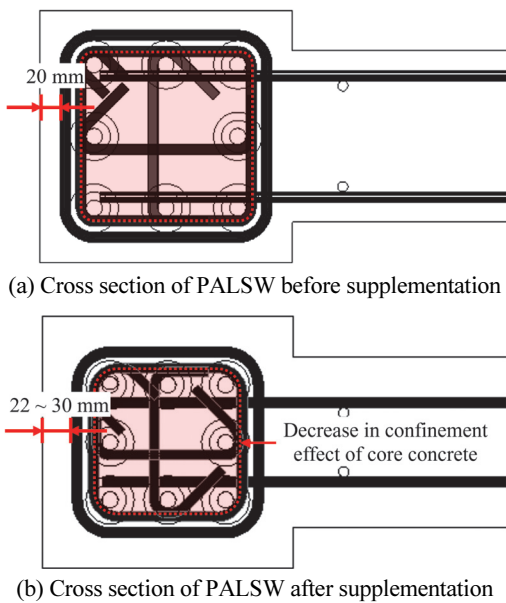


Fig. 6 Modeling of shear walls considering manufacturing errors using BIM program

### 3.2 현장 제작된 상세와의 비교를 통한 제작 및 물량오차

Fig. 5에는 현장에서 제작된 PALSW 실험체와 레빗프로그램을 이용하여 모델링된 실험체 상세를 비교하여 제작오차를 확인하였다. 현장에서 제작된 PALSW 실험체는 전체 크기에 대한 오차는 미미하였다. 반면, 현장에서 제작된 PALSW 실험체에서 콘크리트의 피복두께는 22 ~ 30 mm로서 레빗으로 모델링된 단면상세에 비해 평균 1.28배 크게 있었다. 특히, 후프철근의 꼭지점과 내부보조 띠철근의 구부림의 내면 반지름에 관여하는 영역이 모델링된 상세( $r = 2d_b$ ) 보다 평균적으로 1.20배 크게 있었다. 이를 경계요소내 구속비율로 개념으로 환산하면 기존 64%에서 54%로 감소되었음을 확인하였다. 이는 경계요소에서 배근되는 후프철근 및 내부보조 띠철근의 내면 반지름이 작업노무자의 숙련도에 따라 부정확하게 제작될 수 있어 경계요소내 코어 콘크리트의 구속비율이 계획된 값보다 감소될 수 있음을 의미한다. 또한, 부정확한 후프철근 및 내부보조 띠철근의 제작은 레빗 프로그램에 의해 산출된 물량과 실제 투입된 물량의 차이가 발생함을 확인하였다.  $A_{sh}$ 가  $1.0 A_{sh(min)}$ 으로 설계된 PALSW 실험체에서 실제 투입된 후프철근과 띠철근의 물량은 각각 0.040 톤 및 0.032 톤으로 레빗 프로그램에 의해 산출된 물량보다 각각 6.05% 및 3.44% 감소하였다. 실제 투입된 물량과 레빗 프로그램에서 산출된 물량들의 차이는  $A_{sh}$ 가 증가함에 따라 다소 증가한 경향을 보였다. 이에 반해 실제 투입된 스플라이스슬리브, 수평철근 및 수직철근의 물량은 레빗 프로그램에서 산출된 물량과 거의 비슷한 수준에 있었다. 따라서, Fig. 5에 나타난 바와 같이 제작 및 물량오차를 최소화하기 위해서 레빗 프로그램에 의해 모델링된 상세는 현장에서 제작 가능한 후프철근 및 내부보조 띠철근의 구부림 내면 반지름을 반영할 필요가 있다. Fig. 6에는 후프철근 및 내부 보조 띠철근의 현장에서의 제작오차를 고려한 PALSW 실험체의 보완된 모델링 상세를 나타내었다. 위의 실제 제작된 PALSW 실험체의 배근상세를 기반으로 경계요소내에서 54%로 감소된 구속비율을 반영할 수 있도록 후프철근 및 내부보조 띠철근의 구부림 내면 반지름에 관여하는 영역을 평균 1.20배 이상 크도록 수정하였다. 하지만, 이 결과는 제한된 변수범위를 갖는 PALSW 실험체에 한정된 것이므로, 다양한 변수를 갖는 실험체에서의 제작오차에 대한 사례분석을 통해 향후 제작오차를 고려한 BIM 구축절차의 기준을 마련하는 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 4. 휨 연성 거동의 결과요약

### 4.1 횡하중-변위관계

Fig. 7에는 PALSW 실험체의 횡하중-변위관계를 나타내었다.

횡하중-변위관계에서 초기강성에 대한  $A_{sh}$ 의 영향은 미미하였다. 경계요소내의 주철근의 항복 이후 강성은 급격히 저하되었는데, 그 기울기의 저하 정도는  $A_{sh}$ 가 증가함에 따라 작았다. 특히 최대내력 이후 하중 저하는  $A_{sh}$ 가 가장 작게 배근된 PALSW 실험체( $1.0A_{sh(min)}$ )에서 현저하였다. 이에 반해  $A_{sh}$ 가 가장 많이 배근된 PALSW 실험체( $2.0A_{sh(min)}$ )에서 최대내력 이후의 하중저하는 가장 완만하였다. 이로부터 경계요소내에 배근되는 띠철근의  $A_{sh}$ 는 PALSW 실험체의 휨 연성에 중요한 영향을 미치는 변수임을 확인하였다.

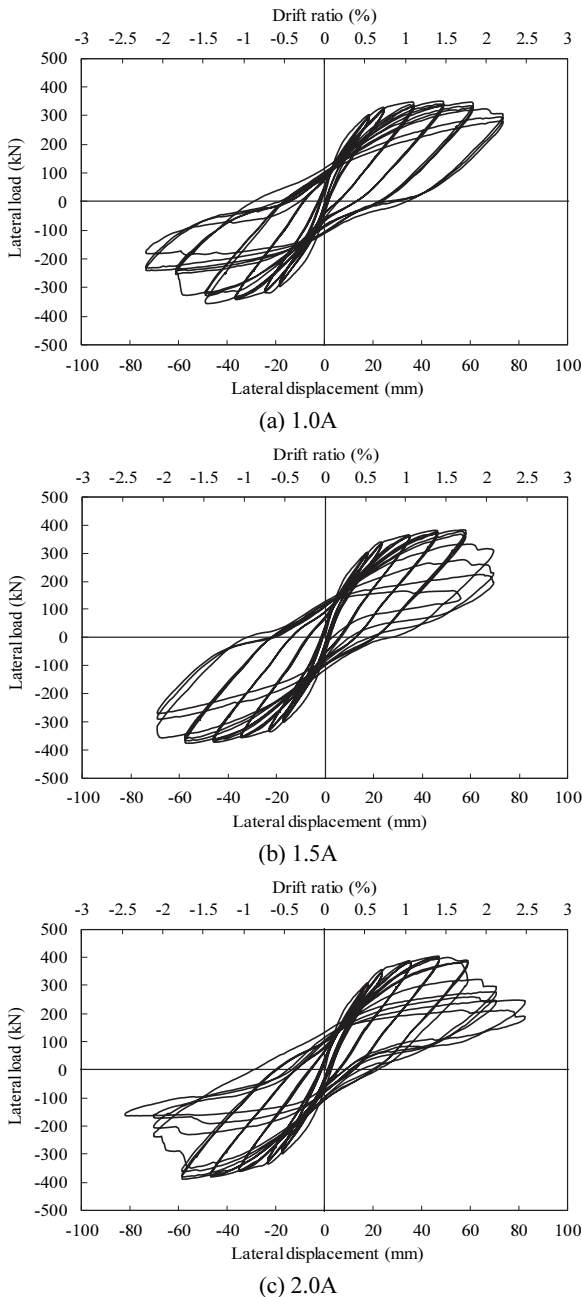


Fig. 7 Lateral load-displacement relationships

## 4.2 변위연성비

Table 6에는 PALSW 실험체에서 얻어진 실험결과를 요약하여 나타내었다. PALSW 실험체의 변위연성비( $\mu_{\Delta}$ )는 최대내력 이후 80%로 저하되는 시점에서의 변위( $\Delta_{s0}$ )에 대한 항복변위( $\Delta_y$ )의 비로 나타내었다(Watson and Park, 1994).  $\mu_{\Delta}$ 는  $A_{sh}$ 가  $1.0A_{sh(min)}$ 로 배근된 PALSW 실험체에서 2.71이었으며, 이 값은  $A_{sh}$ 가 증가함에 따라 증가하였다.  $A_{sh}$ 가  $1.0A_{sh(min)}$ 로 배근된 PALSW 실험체의  $\mu_{\Delta}$ 는 3.30으로  $1.0A_{sh(min)}$ 로 배근된 PALSW 실험체 보다 약 1.2배 높았다. 결과적으로 경계요소내의 구속압을 증가시킴에 따라 PALSW 실험체의 연성능력이 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

## 5. 제작오차를 고려한 경계요소내의 구속효과

### 5.1 경계요소내 구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계

3.2절에서 분석된 바와 같이 실제 경계요소내 코어 콘크리트의 구속비율은 후프철근과 내부보조 띠철근의 제작오차에 의해 설계된 값 보다 감소할 수 있음을 확인하였다. 특히, 4장에서 분석된 바와 같이 경계요소내 코어 콘크리트의 구속비율은 취성적인 재료(경량골재 콘크리트)와 하중전달이 다소 불리한 접합구조(스플라이스 슬리브)를 갖는 전단벽의 연성에 미치는 영향이 현저하다(Yang et al., 2023; Yang et al., 2024). 따라서, PALSW 실험체의 연성은 제작오차에 의해 발생할 수 있는 감소된 경계요소내 코어 콘크리트의 구속비율의 영향을 반영할 필요가 있다. 이를 반영한 구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계를 도출하기 위해 Yang et al.(2021a)에 의해 제시된 일체형 특수 전단벽의 횡하중-횡변위관계를 이용하였다. 일체형 특수 전단벽의 횡하중-횡변위관계에서 적용된 Yang et al.(2021b)의 구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계는 다음과 같다.

Table 6 Summary of test results

Speci	$P_y$ (kN)		$P_n$ (kN)		Ave.	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_{s0}$ (mm)	$\mu_{\Delta}$
	+	-	+	-				
1.0A	317	316	355	347	351	21.7	58.8	2.71
1.5A	320	314	361	353	357	21.0	64.7	3.08
2.0A	346	325	393	371	382	20.9	69.0	3.30

Note]  $P_y$  = lateral load at longitudinal reinforcing bar yielded,  $P_n$  = peak load,  $\Delta_y$  and  $\Delta_{s0}$  = displacement at  $P_y$  and  $0.8P_n$  after  $P_n$ , respectively, and  $\mu_{\Delta}$  = displacement ductility ratio.

$$f_c = \left[ \frac{(\beta_1 + 1)(\epsilon_c / \epsilon_{cc})}{(\epsilon_c / \epsilon_{cc})^{\beta_1 + 1} + \beta_1} \right] f_{cc} \quad (1)$$

$$f_{cc} = 0.85 K_s f_{ck} \quad (2)$$

$$K_s = 1 + 1.1 \frac{k_1 \rho_{sh} f_{hc}^{1.15}}{f_{ck}} \quad (3)$$

$$k_1 = 0.15 \sqrt{\left( \frac{b_c}{s} \right) \left( \frac{b_c}{C} \right)} \quad (4)$$

$$f_{hc} = E_s \left[ 9 \left( \frac{\rho_{sh} k_1^{0.3} \xi_b^{0.1}}{(f_{ck} / f_0)^{0.1}} \right)^{-0.93} \times 10^{-5} \right] \leq f_{yh} \quad (5)$$

$$E_{cc} = 4210 \left( \frac{f_{cc}^{0.5} \rho_{sh}^{0.01}}{\xi_b^{0.1}} \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_{cc} = 0.37 \left( \frac{f_{cc}}{\xi_b^{0.1} E_{cc}^{0.6}} \right)^{0.87} \quad (7)$$

$$\epsilon_{c85} = 1.26 \left[ \frac{(f_0 / f_{cc}) \rho_{sh}^{0.5}}{\xi_b^3} + \epsilon_{cc} \right]^{0.99} \quad (8)$$

$$\beta_1 = 0.136 \left( \frac{f_{cc} / f_0}{\xi_b^{0.1}} \right)^{1.46} \quad \text{for } \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \quad (9)$$

$$\beta_1 = 0.0022 \left[ \frac{(f_{cc} / f_0)^{0.5} \xi_b^2}{\rho_{sh}^{0.5}} \right] \quad \text{for } \epsilon_c > \epsilon_{cc} \quad (10)$$

$$\xi_b = \left( \frac{d}{d_a} \right)^{0.1} \left( \frac{\rho_0}{\rho_c} \right)^2 \left( \frac{h}{d} \right)^{0.3} \quad (11)$$

여기서,  $f_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 최대응력을,  $\epsilon_{cc}$ 는  $f_{cc}$ 에서의 변형률을,  $\beta_1$ 는 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계에서 상승구간 및 하강구간의 기울기를,  $K_s$ 는 띠철근의 구속효과에 대한 강도증가계수를,  $C$ 는 주철근의 중심간 거리를,  $f_{hc}$  및  $E_{cc}$ 는 각각  $f_{cc}$ 에서의 띠철근의 인장응력 및 탄성계수를,  $\xi_b$ 는

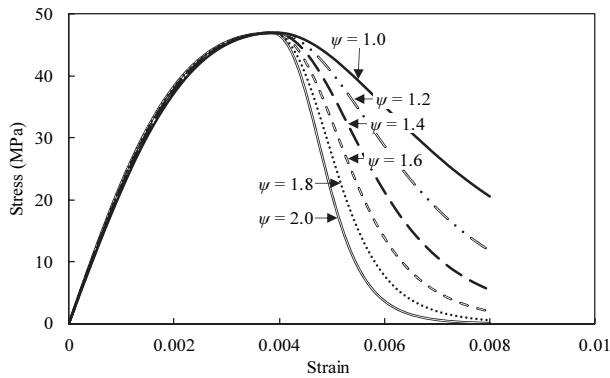


Fig. 8 Determination of  $\psi$  using try-and-error procedure

취성도를,  $h$  및  $d$ 는 각각 전단벽의 높이 및 유효깊이를,  $d_a$ 는 골재의 최대 직경을,  $f_0$  및  $\rho_0$ 는 각각 콘크리트의 압축강도 (= 10 MPa) 및 단위용적중량(= 2,300 kg/m<sup>3</sup>)의 참고값을 의미한다. 식 (1) ~ (11)에서 나타낸 바와 같이 구속압에 관련된 함수는  $\xi_b$ 이다. 따라서 식 (1) ~ (11)에서  $\xi_b$ 의 함수는  $\psi$ 의 취성도 증가계수를 적용함으로써 프리캐스트 콘크리트 전단벽에서 제작오차에 의해 감소된 구속비율의 영향을 고려할 수 있는 취성도( $\xi_{ER}$ )를 다음과 같이 반영할 수 있다.

$$\xi_{ER} = \psi \xi_b \quad (12)$$

식 (12)에서  $\psi$ 는 4.1절에서 얻어진 횡하중-변위관계 실험결과와 유사한 횡하중-변위관계가 산출될 때까지 임의로 조정하여 결정하였다(Fig. 8). 결정된 PALSW 실험체의  $\psi$ 는 1.7 ~ 1.9의 범위에 있었다. 결론적으로 PALSW 실험체는 기초부와의 접합과 제작오차에 의해 평균 16%의 경계요소내의 구속압이 저하되었음을 확인할 수 있다. 다만, 이 제안된 값은 제한된 변수를 갖는 PALSW 실험체에서 검증되었으므로 향후 다양한 변수범위를 갖는 실험체에서 도출된 실험값을 기반으로 범용성 있는 보정값의 제시가 필요하다.

## 5.2 제작오차를 고려한 변위 연성비 모델 제시

Fig. 9에는 5.1절에서 결정된  $\xi_{ER}$ 를 이용하여 예측된 횡하중-변위관계와 PALSW 실험체의 횡하중-변위 관계를 비교하였다.  $\xi_{ER}$ 를 고려하여 예측된 횡하중-변위 관계는 PALSW 실험체의 횡하중-변위 관계를 전반적으로 잘 예측하였다. 이렇게 제시된 횡하중-변위관계의 예측모델은 PALSW 실험체의 변위연성비를 평가할 수 있는 모델을 일반화하기 위해서 변수 연구를 수행하였다. 변수연구에서 적용된 변수는  $\mu_{\Delta}$ 에 현저한 영향을 주는  $f_{ck}$ ,  $\rho_{sh}$ ,  $\rho_c$  및  $N_u / A_g f_{ck}$ 로 선정하였으며, 이들

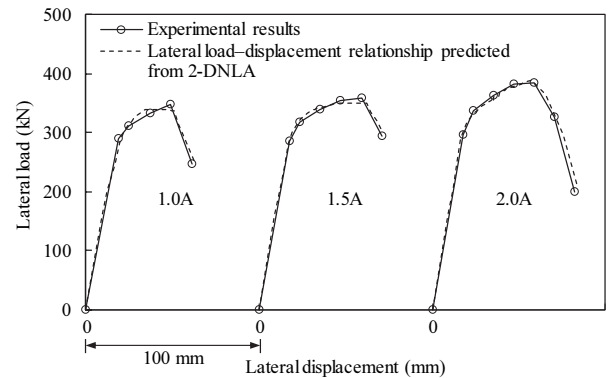


Fig. 9 Comparisons of predicted and measured lateral load-displacement relationships



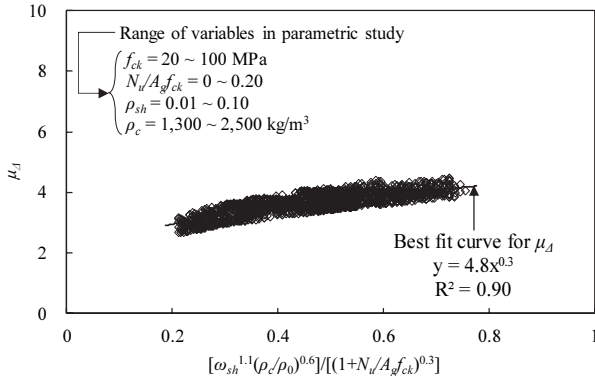


Fig. 10 Regression analysis to simplify  $\mu_{\Delta}$

함수들의 범위를 각각 20 ~ 100 MPa, 0.01 ~ 0.10, 1,300 ~ 2,500 kg/m<sup>3</sup> 및 0 ~ 0.2로 결정하였다. 이들 변수연구로부터 도출된  $\mu_{\Delta}$ 는 try-and-error 절차를 수행하여 다음의 식으로 일반화 하였다(Fig. 10).

$$\mu_{\Delta} = 4.8 \left[ \frac{\omega_{sh}^{1.1} (\rho_c / \rho_0)^{0.6}}{(1 + N_u / A_g f_{ck})^{0.3}} \right]^{0.3} \quad (13)$$

여기서,  $\omega_{sh} (= \rho_{sh} f_{ysh} / f_{ck})$  및  $f_{ysh}$ 는 각각 띠철근의 체적지수 및 항복강도를,  $N_u$ 는 전단벽에 작용하는 축하중을 의미한다. 결과적으로 식 (12)와 식 (13)으로부터 기초부와의 접합과 제작오차에 의해 감소된 구속비율의 영향을 합리적으로 반영한 PALSW의  $\mu_{\Delta}$ 의 모델을 제시할 수 있다.

## 6. 결론

이 연구에서는 프리캐스트 경량골재 콘크리트 특수 전단벽 (precast all-lightweight aggregate concrete special shear walls, PALSW)의 생산공정에서 발생할 수 있는 제작오차를 고려할 수 있는 BIM 절차와 휨 연성 평가모델을 제시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레빳으로 모델링된 PALSW에서 경계요소내에 설치된 띠철근과 스플라이스 슬리브와의 간섭은 77 ~ 183건이었으며, 웨브의 수평철근과의 간섭은 10 ~ 22건으로 간섭경향이 높았다. 이 간섭건수는 띠철근의 보강량 ( $A_{sh}$ )이 증가함에 따라 증가하였다.
- (2) 현장에서 제작된 PALSW에서 콘크리트 피복두께는 22 ~ 30 mm로서 레빳으로 모델링된 실험체의 단면상세에 비해 평균 1.28배 크게 있었다. 특히, 후프철근의 꼭지점과 내부보조 띠철근의 양단의 구부림 내면 반지름은 평균적으로 모델링된 실험체의 상세 보다 크게 제작되었다.
- (3) 레빳으로 모델링된 PALSW 실험체에서 산출된 후프철근과 띠철근의 물량은 실제 투입된 물량 보다 각각

6.05% 및 3.44% 적었다. 이는 경계요소에서 배근되는 후프철근 및 내부보조 띠철근의 구부림 내면 반지름이 현장에서 부정확하게 제작되었기 때문인 것으로 사료된다.

- (4) 레빳을 이용한 PALSW 실험체의 모델링은 스플라이스 슬리브의 사용 및 띠철근의 제작오차에 의해 경계요소내에서 64%에서 54%로 감소된 구속비율을 반영할 수 있도록 후프철근의 꼭지점과 내부보조 띠철근의 구부림 내면 반지름에 관여하는 영역을 평균 1.20배 이상 크게 수정하였다.
- (5) 횡하중-변위관계에서 PALSW 실험체는  $A_{sh}$ 가 증가함에 따라 최대내력 이후의 하중이 완만히 저하되었고 연성적으로 거동하였다. 이로부터 후프철근 및 띠철근을 이용한 경계요소내의 구속압의 증가가 PALSW의 연성을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.
- (6) 횡하중-휨변위관계의 예측모델과 PALSW 실험체의 실험결과와의 비교를 통하여 스플라이스 슬리브의 비교적 큰 기하학적 상세와 띠철근의 난해한 가공과정에서 발생하는 제작오차를 고려할 수 있는 코어 콘크리트 구속압의 취성도 증가계수 ( $\psi$ )는 평균 1.8로 평가될 수 있었다.
- (7) PALSW의  $\mu_{\Delta}$ 는  $\psi$ 를 고려하여 예측된 특수 전단벽의 횡하중 변위관계를 이용한 변수연구로부터  $\mu_{\Delta} = 4.8 \left[ \frac{\omega_{sh}^{1.1} (\rho_c / \rho_0)^{0.6}}{(1 + N_u / A_g f_{ck})^{0.3}} \right]^{0.3}$ 으로 일반화할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022R1A2B5B03002476)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. ACI Committee 318 (2019), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary, American Concrete Institute(ACI), USA.
2. ACI ITG-5.1-07 (2008), Acceptance Criteria for Special Unbonded Post-Tensioned Precast Structural Walls Based on Validation Testing, American Concrete Institute (ACI), USA.
3. AIJ (2002), Guidelines for the Design of Structural Precast Concrete Emulating Cast-in-Place Reinforced Concrete, Architectural Institute of Japan, Japan.
4. Bacharz, K., Raczkiwicz, W., Bacharz, M., and Grzmil, W. (2019), Manufacturing Errors of Concrete Cover as a Reason of Reinforcement Corrosion in a Precast Element-Case Study, *Coatings*, 9(11), 1-12.

5. Federal Emergency Management Agency (2000), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356), FEMA, USA.
6. ICC-ES ESR-3433 (2023), ICC-ES evaluation report ESR-3433, ICC Evaluation Service, USA.
7. KDS 14 20 50 (2021), Concrete Structure Rebar Detailed Design Standards (KDS 14 20 50), Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Korea.
8. KDS 14 20 80 (2021), Earthquake Resistant Design for Concrete Structures (KDS 14 20 80), Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Korea.
9. Kim, E. Y., Kim, Y. J., Choi, S. M., Kim, D. J., and Park, K. Y. (2021), Bond and Anchorage Composite Behavior of RCC Device for Substitution Seismic Hook through Pull-out Experiment, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 12(2), 21-32.
10. Liang, Z., Gong, C., Liang, W., Zhang, S., and Li, X. (2023), Behavior of Confined Headed Bar Connection for Precast Reinforced Concrete Member Assembly, *Applied Sciences*, 13(2), 1-32.
11. Lu, Y., Jiang, L., and Lin, F. (2023), Seismic Performance of Precast Concrete Shear Wall using Grouted Sleeve Connections for Section Steels Reinforced at Wall Ends, *Structures*, 57, 1-14.
12. Morsi, D. M. A., Ismaeel, W. S. E., Ehab, A., and Othman, A. A. E. (2022), BIM-Based Life Cycle Assessment for Different Structural System Scenarios of a Residential Building, *Ain Shams Engineering Journal*, 13(6), 1-15.
13. Mun, J. H., Yoon, H. S., Kim, J. W., and Eom, B. H. (2022), Modeling of Precast Concrete Shear Walls BIM Program, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 22(5), 451-462 (in Korean).
14. Revit (2024), Autodesk Revit for Windows. Ver. 2024. USA: Autodesk, Inc.
15. Sketchup (2024), Sketchup Pro. Ver. 2024. USA: Trimble, Inc.
16. Sheikh, S. A., and Houry, S. S. (1997), A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns, *ACI Structural Journal*, 94(4), 421-432.
17. Tworzewski, T. (2015), Errors during Manufacturing of Reinforced Concrete Beams at the Example of Concrete Cover Deviations, *TRANSCOM Proceedings, 11th European Conference of Young Researchers and Scientists, University of Zilina, Slovakia*, 310-314.
18. Watson, S., and Park, R. (1994), Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns, *Journal of Structure Engineering*, 120(6), 1825-1849.
19. Xiao, S., Wang, Z., Li, X., Harries, K. A., Xu, Q., and Gao, R. (2021), Study of Effects of Sleeve Grouting Defects on the Seismic Performance of Precast Concrete Shear Walls, *Engineering Structures*, 236, 1-12.
20. Xu, G., Wang, Z., Wu, B., Bursi, O., Tan, X., Yang, Q., and Wen, L. (2017), Seismic Performance of Precast Shear Wall with Sleeves Connection Based on Experimental and Numerical Studies, *Engineering Structures*, 150, 346-358.
21. Xue, W., Huang, Q., and Li, Y. (2022), Experimental Study of Precast Concrete Shear Walls with Spiral-Confined Lap Connections under Cyclic Loads, *Journal of Building Engineering*, 52, 1-15.
22. Yang, F., Hussain, S., Fadhel, M., and Ghafoor, K. (2022), Research on the Design Method of Prefabricated Concrete Structure Based on BIM, *Computer-Aided Design and Applications*, 20(S3), 148-164.
23. Yang, K. H., Mun, J. H., and Oh, N. K. (2021a), Flexural Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Shear Walls, *Journal of Structural Engineering*, 148(1), 1-14.
24. Yang, K. H., Mun, J. H., and Hwang, S. H. (2021b), Compressive Stress-Strain Model for Confined Lightweight Concrete Based on Brittleness Number, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, 25(8), 3041-3053.
25. Yang, K. H., Mun, J. H., and Oh, N. K. (2023), Flexural Behavior of Precast Lightweight Concrete Shear Walls, *ACI Structural Journal*, 120(2), 217-231.
26. Yang, K. H., Im, C. R., Mun, J. H., and Jung, Y. B. (2024), Seismic Connection Performance of Precast All-Lightweight Aggregate Concrete Shear Walls, *Journal of Building Engineering*, 85, 1-23.
27. Yoon, S. J., Lee, K., Chun, Y. S., and Kim, T. W. (2013), Analysis of Nonlinear Seismic Behavior of Reinforced Concrete Shear Wall Systems Designed with Special and Semi-Special Seismic Details, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 17(1), 43-51 (in Korean).
28. Zhi, Q., Yuan, Z., Zheng, Y., Jia, L., and Guo, Z. (2024), Experimental Research on Seismic Performance of Precast Concrete Shear Walls with a Novel Grouted Sleeve Used in the Connection, *Journal of Earthquake Engineering*, 28(5), 1379-1403.

Received : 04/29/2024  
 Revised : 05/09/2024  
 Accepted : 05/10/2024

**요 지** : 이 연구의 목적은 생산공정에서 발생할 수 있는 제작오차를 고려한 BIM 절차를 구축하고, 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 프리캐스트 전경량 골재콘크리트 특수전단벽(precast all-lightweight aggregate concrete special shear walls, PLASW)의 휨 연성 모델을 제시하는 데에 있다. 생산현장에서 제작된 PALSW의 콘크리트 피복 두께는 Revit BIM 프로그램으로 모델링된 단면상세보다 평균 1.28배 컸으며, 특히, 후프철근과 내부 크로스타이의 구부림 내면 반지름은 설계 단면상세보다 더 크게 있었다. 결과적으로 띠철근의 제작오차로 인해 코어 콘크리트의 구속비율이 64%에서 54%로 감소하였으며, PALSW의 휨 연성은 약 4.91% 감소하였다. 이 실험결과를 고려하여, 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PLASW의 BIM 모델링은 띠철근의 구부림 내면 반지름을 보완해야 하며, 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계에서 구속압의 감소를 반영하여 취성도 증가계수는 1.8로 평가될 수 있다.

**핵심용어** : BIM, 프리캐스트 콘크리트 전단벽, 제작오차, 휨 연성