

RC 벽식 아파트의 손상 제어를 위한 PC 비내력벽 시스템의 실험적 평가

Experimental Evaluation of PC Non-Bearing Wall System for the Damage Control of RC Wall Type Apartments

문 교 영*
Moon, Kyo Young

김 시 윤**
Kim, Siyun

김 승 직***
Kim, Sung Jig

이 기 학****
Lee, Kihak

Abstract

This study introduces a newly developed PC non-bearing wall system to prevent the damage of RC wall-type apartments that have been heavily damaged by the 2017 Pohang Earthquake. In order to evaluate the performance of the developed PC non-bearing wall system, a static cyclic test is conducted. The prototype of test specimen is from the RC wall-type apartment which has been severely damaged by the 2017 Pohang Earthquake. The specimen with the conventional non-bearing wall system showed the similar damage of RC wall type apartment suffered from the Pohang Earthquake. In case of the specimen with the developed PC non-bearing wall system, cracks and damages were not transmitted between the walls due to the seismic slit and there were almost no cracks in the non-bearing walls. Therefore, the proposed non-bearing wall system, separated from the structural walls, could prevent spreading cracks to bearing walls and make it possible to effectively control damage due to earthquake loads.

Keywords : Damage control, RC wall type apartment, Non-bearing wall, Precast concrete wall

1. 서론

2017년 발생한 포항 지진으로 인하여 많은 구조물이 피해를 입었으며 그 중 벽식 아파트의 벽체에 심한 균열과 손상이 발생하였다. 벽식 아파트는 대다수의 사람들이 거주하고 있는 구조물로서 균열 및 손상 발생 시 보수·보강이 어렵고 막대한 경제적 손실이 초래된다. <Fig. 1>에서 볼 수 있듯이 포항 지진(2017)으로 피해를 입은 벽식 아파트는 비내력벽의 개구부 사이로 심한 전단 균열이 발생하였고, 비내력벽의 균열 및 손상이 내력벽으로 전달되어 피해를 증폭시켰다. 이러한 피해는 구조 설계 시 비

내력벽을 횡력 저항 부재로서 고려하지 않고 구조 해석을 수행하였으나 시공 시 공사 기간 단축 및 경제적인 이유로 전단벽과 함께 최소 철근을 배근하여 공동으로 콘크리트를 타설하여 발생한 것이다. 하지만 비내력벽 자체의 강도 및 강성을 무시할 수 없으며 비내력벽을 고려하지 않는다면 구조물의 지진 거동에 불리하게 작용될 수 있다^{1),2)}. 또한 비내력벽은 RC 골조와 상호 작용을 일으켜 구조물의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다^{3),4)}. 비내력벽의 일부인



<Fig. 1> Damage of RC wall type apartment

* 학생회원, 계명대학교 건축공학전공, 석사과정
Dept. of Architectural Engineering, Keimyung Univ.
** 학생회원, 계명대학교 건축공학전공, 박사과정
Dept. of Architectural Engineering, Keimyung Univ.
*** 교신저자, 정회원, 계명대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Keimyung Univ.
Tel: 053-580-5273 Fax: 02-2036-1133
E-mail: sjkim4@kmu.ac.kr
**** 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ.

날개벽을 적용하여 내진성을 향상시킬 수 있다는 기존 연구⁵⁻⁷⁾는 다수 있으나 포항 지진(2017)에서 나타난 비내력벽 및 내력벽 손상의 제어에 대한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 벽식 아파트 비내력벽의 기존 설계 및 시공의 문제점을 해결하여 안전성을 확보하고 지진 피해를 저감할 수 있는 시스템을 제안하고, 정적 반복 가력 실험을 통해 제안한 시스템의 내진성을 평가하고자 한다.

2. PC 비내력벽 시스템

본 연구에서는 비내력벽과 내력벽의 균열 및 손상 전달을 방지하여 안전성을 확보하고 기존 설계 및 시공의 문제점을 해결할 수 있는 시스템을 제안한다. 제안한 PC 비내력벽 시스템의 형상은 <Fig. 2>에 나타나 있다. 공사 기간을 단축하고 지진으로 인해 손상이 발생하였을 때 비내력벽만 교체할 수 있도록 비내력벽을 프리캐스트로 제작한다. 제작한 비내력벽을 조립형 힌지(Hinge)를 이용하여 벽체 상·하부에 있는 슬래브에 끼워 넣을 수 있도록 개발하였다. 힌지의 일부분을 슬래브(Slab)에 매립하여 고정시킨 후 윗부분을 고장력 와셔 및 볼트를 이용하여 조립한다. 조립한 힌지의 윗부분에 PC 비내력벽을 끼워 넣은 후 볼트를 이용하여 연결시키는 형태이다. 비내력벽 양단부에 20mm 내진 슬릿(Seismic slit) 및 상·하부에 30mm 내진 슬릿을 두어 지진이 발생하였을 때 비내력벽과 내력벽 사이의 균열 전

달을 방지할 수 있고, 손상이 발생하더라도 PC 비내력벽을 교체하여 재조립이 가능한 시스템이다.

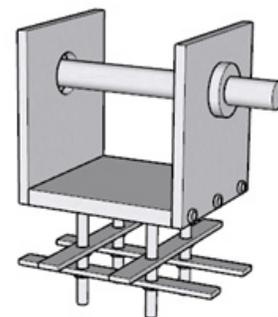
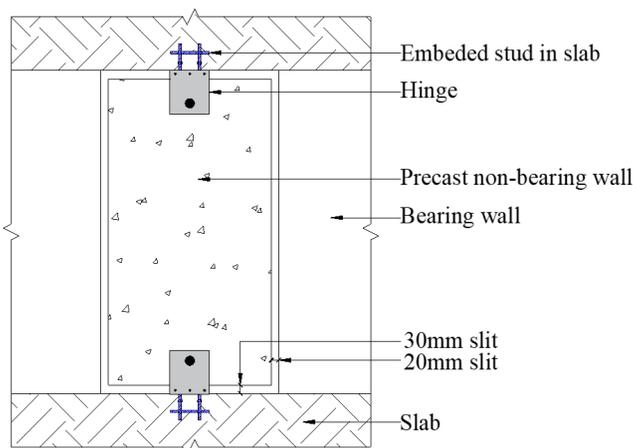
3. PC 비내력벽의 내진성능평가

3.1 실험체 개요

본 연구에서는 개발한 PC 비내력벽 시스템의 성능 평가를 위해 실험체를 설계하고 정적 반복 가력 실험을 수행하였다. 실험체는 총 2개로 기존 실험체(NBW)와 제안된 PC 비내력벽 시스템을 적용한 실험체(PCW)이다. 두 실험체는 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 포항 지진(2017)으로 인해 심각한 손상을 입은 벽식 아파트를 기반으로 설계 및 제작하였다. 실험체는 액츄에이터 용량 및 실험실 여건을 고려하여 2/3 Scale로 축소하여 제작하였으며 이에 따른 실험체의 상세 및 배근 등의 일람은 <Table 1>과 <Fig. 4>에 나타나 있다. 실험체는 중앙에 비내력벽이 있고, 비내력벽 양단에 내력벽이 있으며, NBW 실험체 비내력벽의 중앙에 개구부가 있다.

앞서 언급한 바와 같이 제안한 PC 비내력벽 시스템에서 4면에 슬릿을 두므로 실험체 NBW는 1,000 X 1,800 X 135mm이고, 실험체 PCW는 960 X 1,740 X 135mm이다. 두 실험체 모두 콘크리트 강도 24MPa로 설계하였으며, KBC2016의 최소 철근비 규정⁸⁾에 맞게 철근을 배근하였다.

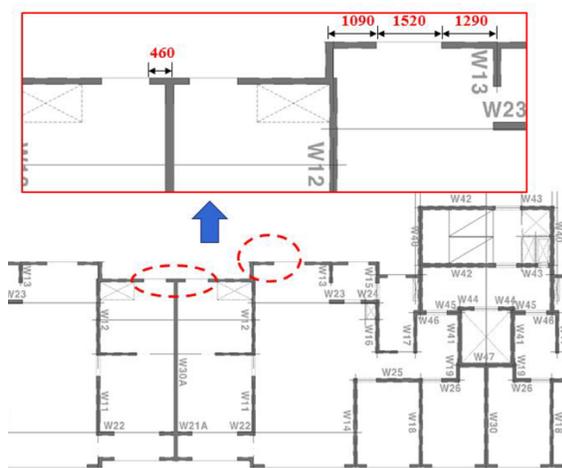
실험체 NBW의 개구부 및 PCW의 슬릿 부분에 쿠션재 및 간격재를 설치하여 타설하고, 양생 후 쿠



<Fig. 2> PC non-bearing wall system details

<Table 1> Properties of test specimens

Specimen		Dimension (mm)		Design strength (MPa)	Rebar ratio (%)			
		(Width, Clear height, Thickness)			Longitudinal		Transverse	
		Bearing wall	Non-bearing wall		Bearing wall	Non-bearing wall	Bearing wall	Non-bearing wall
NBW	Conventional system	670 X 1,800 X 135	1,000 X 1,800 X 135	24	0.47	0.21	0.29	0.29
PCW	Precast wall with hinge	670 X 1,800 X 135	960 X 1,740 X 135		0.47	0.21	0.29	0.29



<Fig. 3> Floor plan of prototype structure

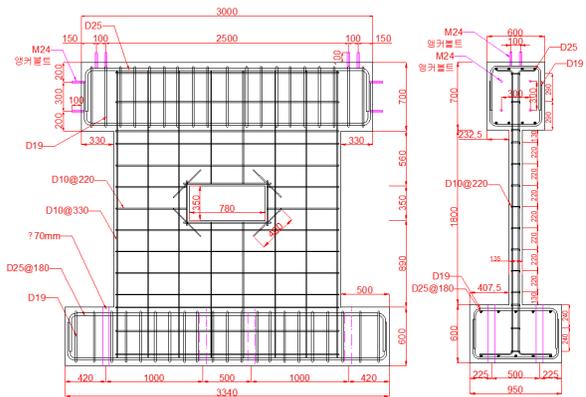
선재 및 간격재를 제거하였다. 실험체 PCW의 경우 힌지의 일부분을 슬래브 상·하부에 볼트를 이용하여 고정시킨 후 매립하여 실험체와 함께 타설하였고, 동일한 조건 하에서 비내력벽을 프리캐스트로 제작하여 볼트를 이용하여 힌지에 조립하였다.

3.2 재료 시험

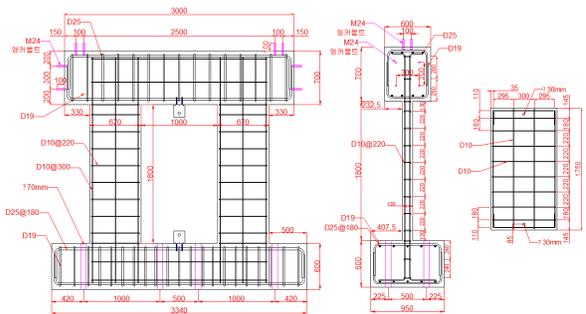
본 실험에서 사용된 콘크리트의 압축 강도는 실험체와 동일 조건으로 타설 및 양생 후 강도를 시험하였으며, 각 공시체 3개의 평균값으로 산정하였다. 실험 결과, NBW 실험체 및 PCW 실험체의 콘크리트 압축 강도는 각각 24.7MPa 및 23.6MPa이다. 벽체 제작 시 사용한 D10 철근의 인장 실험 결과, 항복 강도는 452.85MPa, 인장 강도는 594.74MPa이다.

3.3 실험 방법

실험체의 실제 설치는 <Fig. 5>에 나타나 있다.



(a) NBW



(b) PCW

<Fig. 4> Specimen details

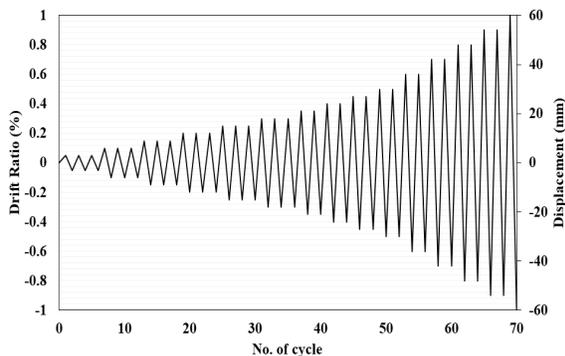
실험체의 축 하중은 2,000kN 용량의 오일잭을 사용하여 758kN의 하중을 실험 종료 시까지 일정하게 가력하였다. 축 하중 가력 시 등분포로 축 하중이 전달될 수 있도록 실험체 상부에 프레임을 설치하였다. 횡 하중을 가력하기 위하여 설치한 압축 2,000kN 및 인장 1,300kN 용량의 유압서보 액츄에이터로 계획한 층간 변위비에 따라 점증되는 변위 제어 방식으로 가력하였다. 변위 이력은 <Fig. 6>에 나타난 바와 같이 층간 변위비 0.3%까지는 3회, 그 이후에는 2회 반복하여 점증 가력하였다. 또한 횡

하중 가력 시 실험체가 면의 방향으로 비틀어지는 것을 방지하기 위하여 상부 양단에 프레임을 두고 M24 앵커볼트와 강봉을 프레임에 설치하였다.

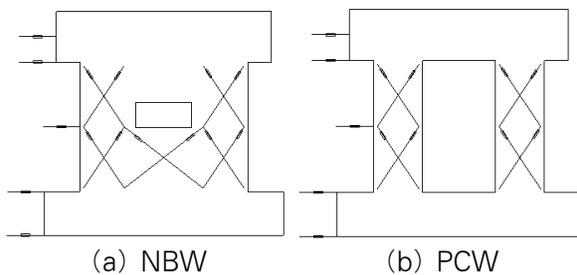
실험체의 LVDT 위치는 <Fig. 7>에 나타나 있다. 실험체 하부의 회전(Rotation)을 측정하기 위하여 하부 슬래브에 2개의 LVDT를 설치하였으며, 벽체 및 가력 부분의 변형을 측정하기 위하여 3개의 LVDT를 설치하였다. 또한 전단 변형을 측정하기 위하여 벽체면에 'X'형으로 LVDT를 설치하였다.



<Fig. 5> Test setup



<Fig. 6> Loading history



<Fig. 7> LVDT locations

4. 실험 결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴 양상

<Fig. 8>은 각 실험체의 최종 파괴 양상을 나타낸 것이다. 현재 시공되고 있는 방식으로 제작한 NBW 실험체는 층간 변위비 0.05%에서 벽체의 측면과 하단부에 초기 균열이 나타나기 시작하였고, 이러한 균열은 층간 변위비가 증가함에 따라 점차 상부로 전달되었다. 층간 변위비 0.2%에서 개구부 주위에 다수의 균열이 발생하였으며, 개구부 끝에서부터 대각으로 전단 균열이 발생하였다. 층간 변위비 0.25%에서는 개구부 끝에서 발생한 대각 균열들이 추가로 발생하면서 'X'형태의 전단 균열이 발생하였고, 층간 변위비가 증가함에 따라 균열들이 이어져 내려갔다. 0.4% 이후의 층간 변위비에서는 벽체 전면에서 다수의 균열이 발생하였으며, 벽체 하단부 및 측면에서 콘크리트 박리가 발생하였다. 층간 변위비 0.4%에 이르러 콘크리트 박리 현상이 더욱 심하게 나타나 벽체 하단부의 철근이 표면에 드러나기 시작하였으며, 개구부 안쪽에서부터 박리 현상이 추가적으로 발생하였다. 층간 변위비 0.6% 정가력 시 <Fig. 8 (a)>에서 보이는 바와 같이 벽체 전면에서 발생한 대각 균열을 따라 벽체가 파괴되면서 실험을 종료하였다.

제안한 PC 비내력벽 시스템을 적용한 PCW 실험체는 층간 변위비 0.05%에서 내력 벽체의 측면과 하단부에 초기 균열이 발생하였고, 층간 변위비 0.35%까지 내력 벽체의 균열이 점차 상부로 전달되었다. 층간 변위비 0.4%에서부터 내력 벽체 하단부에 다수의 균열이 발생하기 시작하였으며, 0.6%에 이르러 내력 벽체 상단부에 균열이 발생하였다. 층간 변위비 0.7%에서 내력 벽체 하단부에 콘크리트 박리 현상이 발생하였고, 내력 벽체의 상·하단부에서 다수의 균열이 발생하였다. 층간 변위비 0.8%에 이르러 박리 현상이 더욱 심하게 나타나면서 내력 벽체의 하단부에서 파괴가 발생하였다. 층간 변위비 0.9% 정가력 시 <Fig. 8 (b)>에서 보이는 바와 같이 내력 벽체의 하부가 파괴되면서 실험을 종료하였다.

NBW 실험체의 경우 전형적인 전단 파괴 거동을 나타냈으며, PCW 실험체는 비교적 휨 거동을 나타내었다. 또한 NBW 실험체의 파괴 양상을 보았을 때 실험체 제작에 기반이 된 포항 지진(2017) 발생 시 나타난 벽식 아파트의 피해 양상과 유사하였다. PCW 실험체의 경우 양단 내력벽 상·하부에는 균열이 발생하였으나 힌지로 연결되어 있는 비내력벽에는 균열 및 손상이 전혀 발생하지 않았다. NBW 및 PCW 실험체 모두 내력벽 부분에서 콘크리트 박리 현상 및 파괴가 일어났으나 PCW 실험체는 NBW 실험체에 비해 비교적 심하지 않은 파괴 양상을 보였다. 이는 PCW 실험체의 내력벽이 비내력벽과 이격되어 설치되어 있어 양단의 내력벽이 세장한 벽체로 작용하여 비교적 급격한 파괴가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

층간 변위비 0.35%일 때 NBW 실험체에서 포항 지진(2017) 발생 시 나타난 벽식 아파트의 피해와 가장 유사한 균열이 발생하였다. 제안한 PC 비내력벽 시스템의 성능을 비교하기 위하여 층간 변위비 0.35%를 기준으로 NBW 및 PCW 실험체의 균열 양상을 비교하였다. 균열 양상은 <Fig. 9>에 보이는 바와 같이 NBW 실험체와 비교하였을 때 PCW 실험체의 내력벽에는 하단부에 미세한 휨 균열이 일부 발생하였고, 비내력벽에는 균열 및 손상이 전혀 발생하지 않았다.



(a) NBW



(b) PCW

<Fig. 8> Crack pattern of specimens at failure

4.2 하중-변위 관계

<Fig. 10>은 두 실험체의 하중(Force)-층간 변위비(Drift ratio) 관계를 나타낸 것이다.

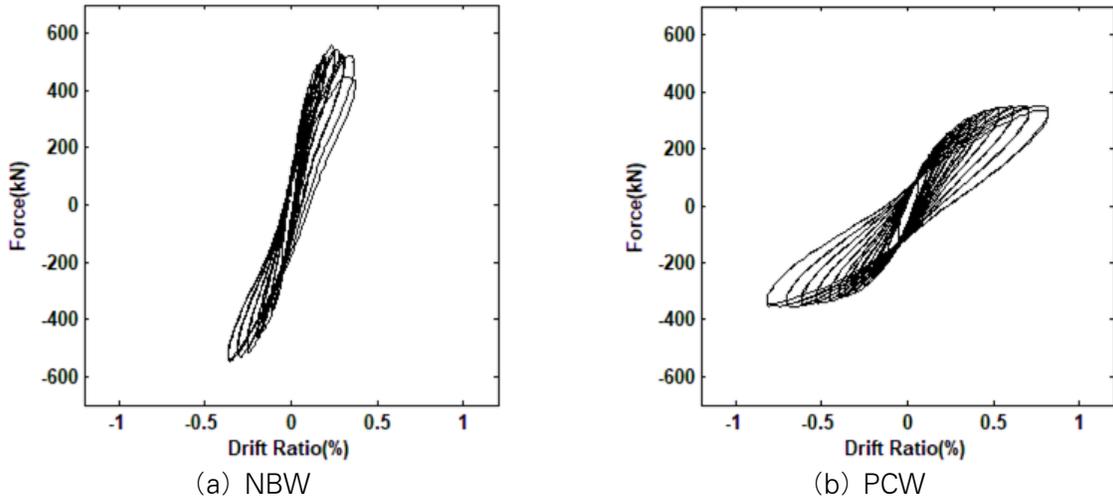


(a) NBW



(b) PCW

<Fig. 9> Crack pattern of specimens at drift ratio of 0.35%



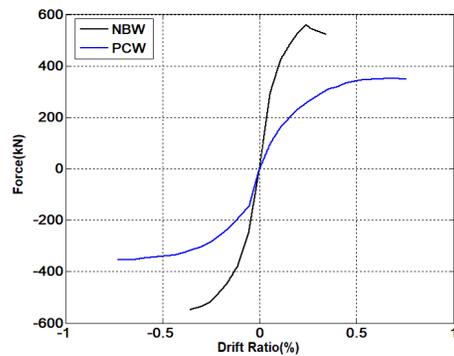
<Fig. 10> Force-Drift ratio relationship

기준 실험체인 NBW 실험체의 경우 정가력 시 층간 변위비 0.24%에서 최대 하중 559.59kN, 부가력 시 층간 변위비 0.36%에서 최대 하중 548.49kN으로 나타났으며 최대 하중 이후 급격한 하중 저감을 보였다. PCW 실험체의 경우 정가력 시 층간 변위비 0.67%에서 최대 하중 350.63kN, 부가력 시 층간 변위비 0.65%에서 최대 하중 354.38kN으로 나타났으며 최대 하중 이후 매우 완만한 하중 저감을 보였다. PCW 실험체는 NBW 실험체에 비해 최대 하중이 약 37% 낮게 나타났다. PCW 실험체의 비내력벽을 내력벽과 이격시켜 내력벽과 함께 거동하지 않도록 설치하였기 때문에 NBW 실험체에 비해 강성 및 강도가 떨어지는 것으로 판단된다. 또한 <Fig. 10>에 보이는 바와 같이 NBW 실험체에 비해 PCW 실험체의 하중-층간 변위 곡선이 매우 완만하게 나타났다. 이 또한 앞서 언급했듯이 비내력벽이 내력벽과 함께 거동하지 않도록 이격시켜 설치하여 양단의 내력벽이 세장한 벽으로 거동하기 때문인 것으로 판단된다.

<Table 2>는 실험에서 측정된 최대 하중, 이에 상응하는 변위 및 층간 변위, 연성비 등의 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

4.3 연성 능력

기준 실험체와 제안한 PC 비내력벽 시스템을 적용한 실험체의 연성을 비교하기 위하여 <Fig. 11>에 포락 곡선(Envelope curve)을 나타내고 <Table 2>에 결과값을 나타내었다.



<Fig. 11> Envelope curve

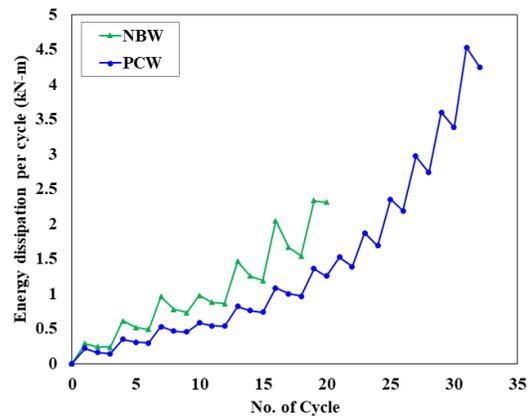
<Table 2> Measured results and ductility ratio

Specimen		P_{max} (kN)	P_u (kN)	δ_{max} (%)	δ_u (%)	δ_y (%)	μ	Stiffness (kN/mm)
NBW	+	559.59	522.03	0.24	0.35	0.29	1.20	273.08
	-	548.49	548.49	0.36	0.36		1.25	
PCW	+	350.63	349.3	0.67	0.76	0.29	2.58	125.45
	-	354.38	353.01	0.65	0.73		2.50	

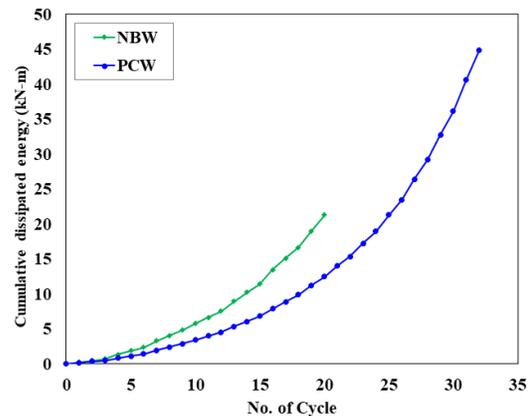
연성비(μ)는 항복 변위에 대한 극한 변위의 비로 정의한다. 본 연구에서는 실험체의 소성 힌지 구간에서 변형률을 측정하여 가장 먼저 항복하는 시점의 변위를 항복 변위(δ_y)로 정의하였으며, 정가력 및 부가력 시 항복하는 변위의 평균값을 계산하여 사용하였다. 또한 극한 변위(δ_u)는 극한 하중(P_{max}) 이후 실험체 파괴가 시작되는 변위로 정의하였다. <Table 2>에서 보이는 바와 같이 NBW 실험체의 연성비는 정가력 시 1.20, 부가력 시 1.25, 평균 1.23으로 나타났다. PCW 실험체의 연성비는 정가력 시 2.58, 부가력 시 2.50, 평균 2.54로 나타났다. PCW 실험체의 연성비는 NBW 실험체에 비하여 평균 약 107% 증가하였다.

4.4 에너지 소산 능력

실험체의 각 사이클 단계별 에너지와 이를 합산한 누적 에너지 소산을 <Fig. 12>에 나타내었다. <Fig. 12 (a)>의 사이클 단계별 에너지를 살펴보면 3사이클(충간 변위비 0.05%)까지는 두 실험체의 변동성이 비슷하나 그 이후에는 NBW 실험체가 PCW 실험체에 비하여 변동성이 큰 것으로 나타났다. <Fig. 12 (b)>의 누적 에너지 소산을 비교하였을 때 3사이클(충간 변위비 0.05%)까지는 두 실험체의 에너지 소산 능력이 비슷하나 이후 20사이클(충간 변위비 0.3%)까지는 NBW 실험체가 PCW 실험체에 비하여 더 높게 나타났다. 이 구간에서 기존 실험체가 제안한 시스템을 적용한 실험체보다 더 높게 나온 것은 비내력벽과 내력벽이 이격되어 함께 거동하지 않는 PCW 실험체에 비하여 NBW 실험체의 강도 및 강성이 높기 때문이라 판단된다. 하지만 전체 에너지 소산 능력을 비교해 보았을 때 PCW 실험체가 NBW 실험체에 비해 110.8% 높게 나타났다. 따라서 극한 상태까지 비교할 경우 제안한 PC 비내력벽 시스템을 적용한 PCW 실험체가 NBW 실험체에 비하여 대체적으로 우수한 에너지 소산 능력을 가진 것으로 판단된다.



(a) Energy dissipation per cycle



(b) Cumulative dissipated energy
<Fig. 12> Energy dissipation

5. 결론

본 연구에서는 벽식 아파트의 비내력벽에 발생하는 지진 피해를 저감시키기 위하여 PC 비내력벽 시스템을 제안하였다. 제안된 PC 비내력벽 시스템의 내진성능을 평가하기 위하여 정적 반복 가력 실험을 수행하고 구조 성능을 평가하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 현재 시공되는 방식으로 제작한 NBW 실험체의 균열 및 파괴 양상은 실제 포항 지진(2017)으로 인해 발생한 벽식 아파트 피해와 유사하게 나타났다. 제안한 PC 비내력벽 시스템을 적용한 PCW 실험체는 내력벽에 일부 휨 균열이 발생하고 비내력벽에는 균열 및 손상이 전혀 발생하지 않았다. 따라서 제안한 PC 비내력벽 시스템은 균열 및 손상 제어에 효과가 있는 것으로 판단된다.

2) NBW 실험체의 하중이 PCW 실험체에 비하여

약 37% 높게 나타났다. 이는 PCW 실험체의 비내력 벽을 내력벽과 이격시켜 내력벽과 함께 거동하지 않도록 설치하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 NBW 실험체의 경우 낮은 층간 변위비에서 최대 하중에 도달한 후 급격히 파괴되었으나 PCW 실험체는 최대 하중에 도달한 후 휨 거동을 보이며 완만한 하중 저감을 나타내었다.

3) 제안한 시스템을 적용한 PCW 실험체의 변위 연성비가 NBW 실험체에 비하여 약 107% 높게 나타났다. 따라서 제안한 PC 비내력벽 시스템 적용 시 기존 벽식 시스템보다 연성 능력이 우수할 것으로 판단된다.

4) 실험체의 파괴 시점까지의 누적 에너지 소산을 비교하였을 때 제안한 시스템을 적용한 PCW 실험체가 NBW 실험체에 비하여 110.8% 높게 나타났다. 따라서 제안한 PC 비내력벽 시스템 적용 시 기존 벽체 시스템보다 에너지 소산 능력이 우수한 것으로 나타났다.

이와 같은 실험 결과를 고려할 때 제안된 PC 비내력벽 시스템은 균열 및 손상 제어에 큰 효과가 있으며 기존 벽체 시스템의 내진성능을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 국토교통기술촉진연구사업(19CTAP-C143093-02)의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ko, H., Kim, H. S., Park, Y. K., & Lee, D. G., "Evaluation of Seismic Behavior for RC Moment Resisting Frame with Masonry Infill Walls", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.14, No.5, pp.13~22, 2010
2. Dolsek, M., & Fajfar, P. (2000). On seismic behavior and mathematical modelling of infilled RC frame structures. Proceedings of

- the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand
3. Shing, P. B., & Mehrabi, A. B., "Behaviour and analysis of masonry-infilled frames", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.4, No.3, pp.320~331, 2002
4. Moon, K. H., Jeon, Y. R., Lee, C. S., & Han, S. W., "Evaluation of Performance of Korean Existing School Buildings with Masonry Infilled Walls Against Earthquakes", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.16, No.6, pp.37~46, 2012
5. Inoue, K., Kobayashi, K., & Araishi, M. (2012). Structural characteristics of column with precast wing walls as energy absorption elements. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Portugal
6. Liu, K. C., Liu, Y. W., Huang, W. C., & Chen, C. Y., "The structure behavior of reinforced concrete wing-wall under earthquake", International Journal of Physical Sciences, Vol.5, No.7, pp.1164~1174, 2010
7. Kabeyasawa, T., Kabeyasawa, T., Kim, Y., Kabeyasawa, T., & Bae, K. (2009). Tests on reinforced concrete columns with wing walls for hyper-earthquake resistant system. Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, USA, pp.1~12
8. AIK. Korean Building Code, KBC 2016, Architectural Institute of Korea, 2016.

■ Received : October 09, 2019

■ Accepted : October 23, 2019