

가력방향이 다른 L형 벽체의 내력특성 평가를 위한 비선형 FEM 해석

Nonlinear FEM Analysis for Strength Characteristics of L-shaped Walls with Different Load-directions

조 남 선* 하 상 수** 최 창 식*** 오 영 훈**** 이 리 형*****
Cho, Nam-Sun Ha, Sang-Su Choi, Chang-Sik Oh, Young-Hun Lee, Li-Hyung

Abstract

The cross sections of structural walls have various shapes such as T, L, and H-shaped. The L-shaped walls frequently appear in the corner of the structural plans. There are a little researches on the structural performance of L-shaped walls subjected to bi-directional loads. L-shaped wall subjected to bi-directional loads might be failed due to high compressive stress in the corner of the wall. L-shaped wall subjected to bi-directional(45° direction) loads was failed by the compressive failure more possible than that of one-directional(0° direction) loads. Therefore, in this paper, Two L-shaped wall specimens are chosen and presented. One is LCU specimen subjected to the bi-directional loads, the other is LCX specimen subjected to the one-directional loads. Also, the experimental results compared with the analytical results from nonlinear FEM analysis.

1. 서론

건축 구조물은 사회적인 요구 및 설계기술의 발달과 고강도 콘크리트 재료나 합성 강관등 철골재의 사용 및 합성구조 시공기술의 향상으로 대형화, 고층화, 경량화 및 세장화 되는 추세에 있다. 이러한 초고층 건물의 등장과 함께 건물에 작용하는 지진이나 풍하중과 같은 수평하중에 경제적이고 효율적으로 저항하는 구조시스템의 연구가 지속적으로 수행되면서 주요 횡력저항 요소인 전단벽의 내진성능 확보의 중요성이 대두되고 있다. 현재 고층벽식구조의 평면내의 벽체는 직사각형 단일벽체보다는 T형, L형, H형 등의 다양한 형태로 계획되는 이형벽체가 대부분을 차지하고 있음에도 불구하고, 이형벽체 설계에 대한 규준이 마련되어 있지 않아 단면의 특성을 고려하지 못하고 있는 실정이어서 이에 대한 대책이 마련되어야 한다. 이러한 연구배경과 국내 및 국외의 연구현황을 바탕으로 하여 본 연구에서는 L형 벽체를 선정하였다. L형 벽체는 이형벽체 중 가장 기본이 되는 형태라 할 수 있으며, 수평하중에 따라 비대칭형상을 갖는 L형 벽체는 그 역학적 특성이 다르게 나타나므로 L형 벽체의 구조실험 및 해석적 연구를 통해 역학적 특성을 파악하여 가장 취약한 방향을 고려한 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 ACI 318-99 규준에 준하여 설계된 실험체를 일방향(0° 방향)과 이방향(45° 방향)으로 수평하중을 가한 실험적 연구와 이를 근거로 한 유한요소 해석을 통하여 L

* 정희원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

**** 정희원, 한양대학교 STRESS 연구조교수, 공학박사

** 정희원, 한양대학교 건축공학과 박사과정

***** 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

*** 정희원, 대전대학교 건축공학과 교수, 공학박사

형 벽체의 가력방향에 따른 내력특성을 평가하고자 한다.

2. L형 벽체의 구조실험

2.1. 실험체 계획

본 실험체는 벽식구조 아파트 또는 교아 벽체를 횡력저항 요소로 사용하는 사무소 건물 등에서 흔히 볼 수 있는 L형 벽체를 선정하였다. L형 벽체의 역학적 특성에 가장 큰 영향을 주는 요소는 수평하중의 방향이며, 수평하중의 방향에 따라 L형 벽체에 작용하는 응력분포가 다르게 나타난다. 따라서 본 연구의 변수는 이와 같은 특성을 고려하여 수평하중의 방향을 변수로 하였으며 각각 일방향(0°) 및 이방향(45°)으로 수평하중을 받는 L형 벽체를 제작하였다. 실험체 일람을 표 1에 나타내었으며, 실험체 형상 및 배근상황은 그림 3과 같다. 두 실험체는 하중방향만 서로 다르고, 나머지는 모두 동일하다.

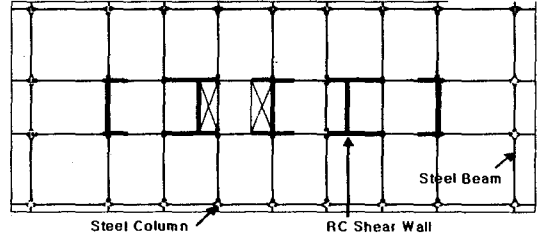
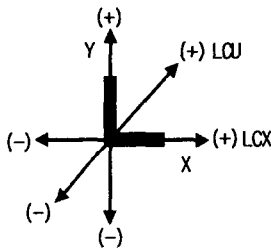


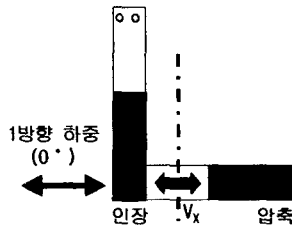
그림 1 대상건물 평면도

2.2. 실험변수

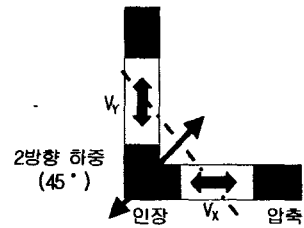
수평하중을 받는 L형 벽체는 복부와 플랜지의 성능이 다르기 때문에 정·부가력에 따라 상이한 이력거동을 보이게 된다. 플랜지가 인장력을 받을 때는 압축력을 받을 때보다 비교적 많은 인장철근이 분포하고 있어 플랜지가 압축력을 받을 때가 상대적으로 취약하게 된다. 또한 L형 벽체에 수평하중이 작용할 경우, 코너부 및 벽체 양단부는 주축방향(0°)으로 수평하중이 작용할 때보다 경사방향(45°)으로 수평하중이 작용할 때 더 큰 압축응력을 부담하게 된다. 이는 그림 2에 나타난 것처럼 경사방향의 하중(V)은 V_x 와 V_y 의 분력으로 작용하여 L형 벽체의 코너로 집중될 경우 가장 취약한 압축응력 상태가 되므로, 경사방향의 수평하중 작용에 대한 검토가 필요하다.



(a) 가력방향



(b) LCX 실험체 응력분포

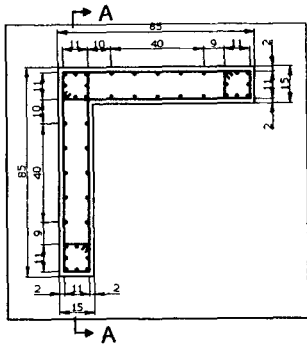


(c) LCU 실험체 응력분포

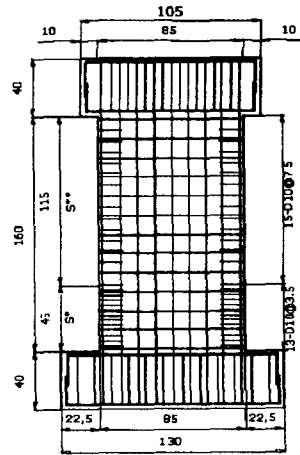
그림 2 실험변수

표 1 실험체 일람표

No	가력방향	실험체명	형상비 (h_w/l_w)	축력 ($N/f_{ck}A_g$)	ρ_h	ρ_v	접합부 및 단부의 배근				
							코너부 구속범위	코너부 수직철근	구간	접합부의 횡보강근	단부 횡보강근
1	일방향	LCX	1.88	0.1	0.014	0.26	13cm(0.15 l_w)	8-D13	s*	D10@35	D10@35
2	이방향	LCU					접합부		s**	D10@75	D10@75



(a) 실험체 단면



(b) 실험체 입면(A-A단면)

그림 3 실험체 배근상세

2.2. 재료 시험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 굵은 골재의 최대치수 13mm, 슬럼프값 15cm인 설계기준강도 350kgf/cm²로 하였으며, 철근은 D10과 D13의 철근을 사용하였다. 콘크리트의 탄성계수(Ec)는 응력-변형도 곡선에서 최대응력의 1/4에 해당하는 응력에 대한 할선강성으로 산정하였다. 재료시험 결과를 표 2와 표 3에 나타내었다.

표 2. 콘크리트 압축강도 시험결과

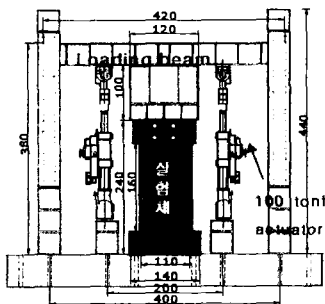
설계강도 (kgf/cm ²)	압축강도시험(kgf/cm ²)			탄성계수 (kgf/cm ²)	슬럼프 (cm)
	3일	7일	28일		
350	212	266	384	2.94x10 ⁵	15.5

표 3. 철근 인장강도 시험결과

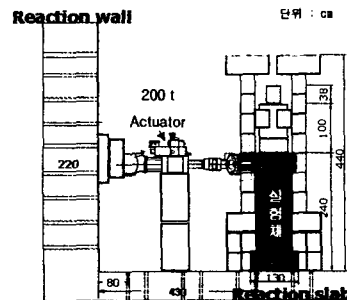
구분 종류	항복강도 (kgf/cm ²)	항복변형도 (x10 ⁻⁶)	탄성계수 (tonf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	연신률 (%)
D10	3650	2252	1.831x10 ⁶	4820	20.3
D13	3620	1924	1.825x10 ⁶	4920	17.8

2.3. 실험체 제작 및 실험방법

실험체 제작은 실제 시공상황에 맞게 철근배근과 콘크리트 타설이 이루어졌다. 실험체의 하부기초판과 상부가력판에 사용된 철근은 D19이며, 시험시 전단력 및 모멘트에 대하여 충분한 강도 및 강성을 갖도록 설계하였다. 실험체의 수직철근과 수평철근은 모두 D13이며, 실험체의 휨강도시에 작용하는 전단력을 상회하는 전단강도를 보유하도록 전단 설계함으로써 전단파괴의 가능성을 배제하였다. 그리고 횡보강 철근은 D10을 사용하여 폐쇄형 직사각형 형태로 수직철근내의 콘크리트를 구속하였다. 그림 4



(a) 정면



(b) 측면

그림 4 실험체 설치상황

의 실험체 설치상황에 나타난 바와 같이 실험체는 하부기초판이 완전고정 상태가 되도록 $\phi 70$ 인 강봉으로 반력슬래브에 설치하였으며, 횡력이 가해지는 동안 일정 축하중($0.10A_g \cdot f_{ck}$)을 가력하기 위해 상부가력판에 설치된 강성골조 양 끝에 설치된 100 tonf actuator를 이용하였다. 횡력은 반력벽에 설치된 200tonf actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다.

횡력의 가력방식은 실험체의 횡변위를 가력점의 높이로 나누어 준 부재각(1/600, 1/400, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/35, 1/25)으로 제어하였으며, 각 단계에 적용된 변위 이력은 강도와 강성의 저하에 대한 자료를 얻을 수 있도록 각 싸이클별 3회씩 점증가력 하였다.

3. 실험결과 및 분석

실험체에 적용된 하중과 변위 관계는 그림5에 나타내었으며, 실험결과는 표 4와 같다. LCX 실험체의 항복강도는 정가력시 부재각 1/145, 부가력시에는 1/113 LCU 실험체는 정부가력시 각각 부재각 1/155, 1/134에서 나타났다. 기준실험체인 LCX 실험체의 최대내력이 56.1 tonf, LCU 실험체는 36.4 tonf으로 LCX 실험체가 LCU 실험체보다 약 46%의 내력증가를 보였으며, 부가력시는 각각 46.3 tonf, 46.6 tonf로 나타나 단조화 곡선에서 볼 수 있듯이 비슷한 양상을 나타냈다. 이로써 이방향으로 수평하중을 받을때의 내력은 일방향에 비해 상당히 작은 내력을 보유하고 있는 것을 알 수 있으며 양단부에 적절한 횡보강근이 배근되어야 할 것으로 판단된다. 또한 변위연성비에서 나타난 바와 같이 LCX 실험체가 LCU 실험체에 비해 정부가력시 상대적으로 작은 값을 보이고 있는데 이는 일방향시 벽체단부의 압괴로 강도의 급격한 감소를 초래하기 때문에 역시 콘크리트 구축을 위한 횡보강근 배근이 이루어져야 한다고 판단된다. 최상부 변위각은 정가력시 4.28%와 부가력시 3.27%인 LCU 실험체가 2.77%와 2.52%인 LCX 실험체보다 크지만 두 실험체 모두 UBC-97에서 제시하고 있는 2.0~2.5%를 모두 만족하는 변형능력을 보여주고 있다.

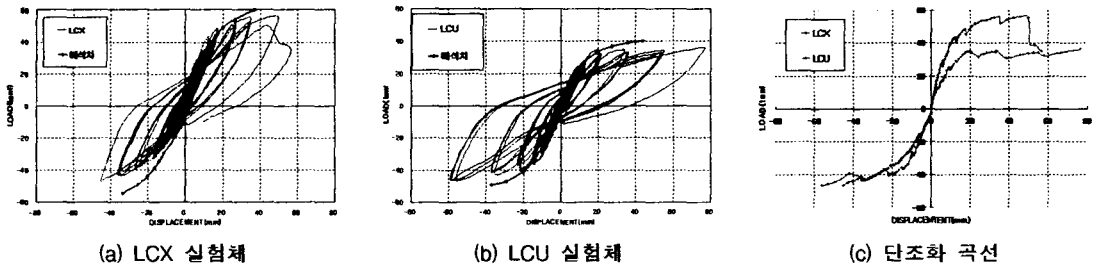


그림 5 하중-변위 곡선

표 4 실험 결과

실험체명		V_{cr}	V_y	V_{max}	Δ_y	Δ_u	μ	θ_u	부재각
		(tonf)	(tonf)	(tonf)	(mm)	(mm)	(연성비)	(%)	항복
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)/(4)	-	
LCX	+	20.3	43.8	56.1	12.4	49.9	4.02	2.77	1/145
	-	9.1	31.7	46.3	16.0	45.4	2.84	2.52	1/113
LCU	+	14.3	26.6	36.4	11.6	77.1	6.64	4.28	1/155
	-	8.8	35.6	46.6	13.4	58.9	4.49	3.27	1/134

V_{cr} : 균열하중, V_y : 항복하중, V_{max} : 최대하중, Δ_y : 항복변위, Δ_u : 최대변위, μ : 변위연성비, θ_u : 최대 부재각

4. 비선형 유한요소해석

4.1. 재료모델

본 실험체의 유한요소해석에서는 비선형 거동을 평가하기 위하여 기하 및 재료 비선형을 고려한 3차원 탄소성 해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 탄소성 해석을 위해서 해석용 모델에 사용된 콘크리트는 3차원 솔리드구조체의 SOLID65를 사용하였고, 철근은 SPAR 요소인 LINK요소를 사용하였다. 콘크리트 요소는 8개의 절점으로 구성되며, 각 절점에 x, y, z방향의 자유도를 3개씩 가진다. 또한 요소의 적분점에서 균열 및 압괴장도를 부여하고 소성 및 크리이프 변형 등을 고려할 수 있다. 콘크리트의 재료모델은 모든 방향에 대하여 재료적인 성질이 동일한 등방성요소를 사용하였다. 철근 요소는 축방향의 거동을 표현하기 위한 것으로서 각 절점에서는 3방향의 자유도를 가지며 그림 6와 같이 콘크리트 요소에서 철근의 방향을 지정해주게 된다. 철근의 재료 비선형성을 고려하기 위한 BKIN(Bilinear Kinematic Hardening)모델은 그림 7과 같고 콘크리트 및 철근의 재료물성치는 재료실험결과를 사용하였다.

4.2. 해석모델링

본 연구의 해석모델링은 실험체의 형상 및 배근 그리고 하중단계에 따른 가력방법을 실험과 동일하게 적용하였으며, 실험체 밑면은 완전고정 상태로 모델링하였다. 변위 측정 역시 실험과 동일한 위치의 절점을 취하였으며, 해석은 비선형영역까지 수행하여 이 과정에서의 변위, 강도, 균열양상을 평가하였다. 또한 해석과정에서는 콘크리트와 철근의 부착파괴는 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 또한 실험체의 비대칭으로 인

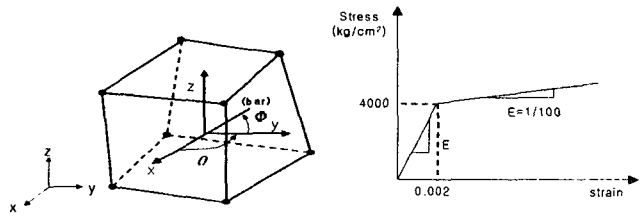


그림 6 콘크리트 요소와 요소내 철근방향 그림 7 철근요소 모델

한 비틀림이 일어나지 않도록 1방향의 자유도를 구속하였다. 가력보는 해석모델링에 적합한 형태로 재구현하여 축력 및 횡력에 의한 영향이 나타나지 않도록 충분한 강성체로 모델링하였다.

4.3. 해석모델변수

해석모델링은 실험결과와 비교된 일방향과 이방향을 기준으로하여 L형 실험체의 도심을 중심으로 표 5와 같은 각으로 모두 13개의 수평하중을 받는 실험체를 모델링하여 정부가력 해석을 실행하였으며 LCX와 LCU 실험체를 기준으로 횡력을 받는 실험체의 결과를 참조하여 부재각 1/100일때의 하중을 비교 검토하여 나타내었다.

4.4. 해석결과

표 5와 그림 8과 같이 구조실험체인 LCX, LCU 실험체의 부재각 1/100시 내력비교는 정가력시 각각 45.45 tonf와 27.86 tonf, 부가력시는 33.18 tonf과 35.6 tonf로 실험결과와 비교 최대 7.5%의 오차로 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 그 외 모델링의 실험결과를 그림 8에 나타내었는데 정가력시는 이방향(45°)일때의 내력으로써 벽체 양단부가 압축을 받을 경우와 부가력시는 일방향(0°)일때의 접합부가 압축을 받을 때 가장 취약한 내력을 보유하고 있는 것으로 나타나 접합부 및 양단부의 콘크리트의 구속을 위한 적절한 횡보강근이 필요할 것으로 판단된다.

표 5 해석결과

가력방향	부재각 1/100시 내력비교				비고
	정가력(tonf)		부가력(tonf)		
	해석치	실험치	해석치	실험치	
0°	46.45	45.46	35.67	33.18	LCX
22.5°	32.76	-	35.87	-	-
30°	29.77	-	35.3	-	-
45°	27.86	26.6	36.72	35.6	LCU
60°	29.77	-	35.3	-	-
67.5°	32.76	-	35.87	-	-
90°	46.45	45.46	35.67	33.18	LCX
112.5°	52.06	-	49.75	-	-
120°	54.11	-	51.91	-	-
135°	56.62	-	56.62	-	-
150°	51.91	-	54.11	-	-
157.5°	49.75	-	52.06	-	-
180°	35.67	-	46.45	-	-

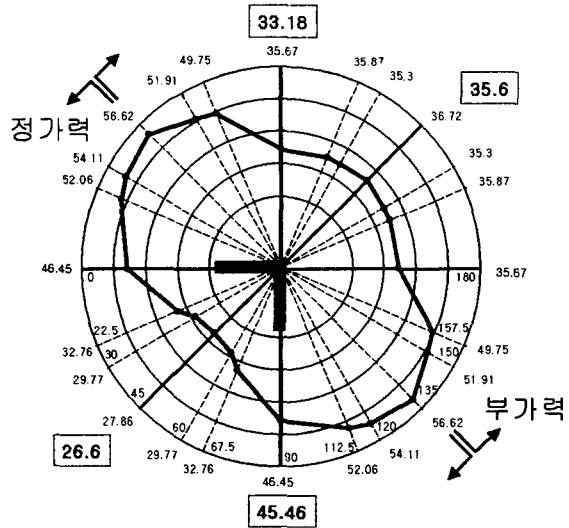


그림 8 가력방향에 따른 내력(부재각 1/100)

5. 결론

1. 구조실험시 LCX 실험체(일방향)는 LCU 실험체(이방향)에 비하여 정가력시 약 54%의 내력증가를 보였으며 부가력시는 비슷한 내력을 보유하고 있는 것으로 나타났다.
2. 구조실험된 LCX, LCU 실험체의 해석결과는 실험결과와 부재각 1/100시 내력비교는 최대 오차7.5%로 정부가력시 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있었다.
3. 해석모델링된 13개의 실험체의 정부가력 해석결과 정가력시는 이방향(45°)일 때, 부가력시는 일방향(0°)일 때 가장 작은 내력을 보유하고 있는 것을 알 수 있다.
4. 실험 및 해석결과 L형 벽체는 접합부 및 양단부에 응력이 집중되며 이 부분에 콘크리트 구속을 위한 적절한 횡보강근이 배근되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 연구비 지원과 (주) SK 건설의 실험체 제작 지원으로 이루어진 연구의 일부로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. American Concrete Institute (1999), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-99, Farmington, Michigan.
2. ANSYS Swanson Analysis System, Inc., ANSYS User's Manual for Release 5.5.
3. 溝口光南, 荒井康辛 (1993), “二方向水平力を受ける鉄筋コンクリートL型開断面耐震壁の弾塑性性状に関する實驗的研究”, 日本建築學會構造系論文報告集 第450號 1993年8月. pp71~80.
4. 한상환, 오영훈, 이리형 (1999), “벽체단부의 횡보강근 양에 따른 변형능력의 평가”, 한국콘크리트학회논문집, 제11권 6호, pp. 101~112.
5. 이리형, 최창식, 오영훈 (1990), “비탄성 반복하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 이력거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제6권 6호 통권32호, pp. 239~248.