

무중단 유지보수 기능확보를 위한 데이터센터의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation for Concurrently Maintainable Data Center



홍종국*



강순필**



오정근***



나운****



이유주*****

* 삼성물산 상품기술연구소 과장
 ** 삼성물산 상품기술연구소 대리
 *** 삼성물산 상품기술연구소 부장
 **** 삼성물산 건축구조팀 부장
 ***** 삼성물산 건축구조팀 과장

1. 서론

건축 내진설계에서 일반적으로 사용되는 강도설계법(Capacity Based Design)은 지진발생시 구조물에 발생하는 하중을 인위적으로 낮추어 부재를 설계하고 설계된 부재가 연성을 갖도록 상세를 하는 것이다. 이러한 설계방법은 구조엔지니어들에게 이미 익숙하고 체계적이지만 실제 구조물의 거동 및 피해 정도를 파악하기는 어려운 단점이 있다. 반면 성능기반 설계법(Performance Based Design)은 발주처에서 대상 구조물에 대하여 허용할 수 있는 피해수준을 정하게 되면 설계 지진하중 하에서 구조물의 실제 거동을 바탕으로 요구되는 성능을 발휘할 수 있도록 설계하는 방식이다. 이는 강도설계법에 비하여 합리적이며 보다 구체적이라고 할 수 있고, 이러한 장점으로 인하여 성능기반 설계법은 현재 내진설계 뿐만 아니라 방폭 및 내화설계 등에 보편화되어 널리 쓰이고 있다.

최근의 경향을 보면 데이터센터 건물은 그 기능을 안정적으로 발휘할 수 있도록 무중단 유지보수 기능확보를 기본으로 하고 있으며, 이를 만족하기 위해서는 에너지공급 뿐만 아니라 큰 지진 발생시에도 피해수준을 최소화할 수

있는 횡하중 저항시스템의 구축이 필수적이다. 이러한 경우 성능기반 설계법을 통해서 구조물의 요구사항을 충족시킬 수 있는데, 이를 위해서 기존의 강도설계법을 이용해 기본설계를 실시하고 그 후 성능기반 내진설계법을 이용해 구조부재들의 요구성능이 확보될 수 있도록 하고 있다.

2. 비선형 정적해석을 통한 성능기반 내진평가

2.1 건물개요

대상건물은 지하2층/지상11층 규모이며, KBC2009¹⁾ 기준 내진 특등급으로 설계된 데이터센터로 횡하중에 대하여 철근콘크리트 특수전단벽 구조가 적용되었고, 중력하중에 대하여 철근콘크리트 라멘조가 적용되었다(표 1 참조). 콘크리트의 설계강도는 저층부에서 40MPa이며, 상부층에서는 30MPa이다. 철근의 강도는 HD13이하의 경우 400MPa를 사용하고 HD16이상의 경우에는 500MPa를 적용하였다.

그림 1은 대상 데이터센터의 구조시스템을 나타내고 있다. 설계 적재하중은 1,000kg/m²이상으로 하였고 층고는 1

표 1 대상 건축물 개요

위치	서울특별시
용도	데이터센터
규모	지하2층, 지상 11층
구조형식	중력저항: 철근콘크리트 라멘조
	횡력저항: 철근콘크리트 특수전단벽
콘크리트강도	$f_{ck} = 40\text{MPa}$ (B2~4F), 30MPa (5F~11F)
철근강도	$f_y = 400\text{MPa}$ (HD13이하), 500MPa (HD16이상)
내진설계	기준: KBC2009 (국토해양부, 2009) 지역계수: 0.22 (상세지진재해도: 0.176) 지반종류: S_c 중요도: 특등급 반응수정계수(R): 6

층에서는 7m, 그 외에서는 5.4m로 하였다. 9m×13.2m를 기본 모듈로 하는 철근콘크리트 라멘조에 두께 150~200mm 일방향 슬래브를 구성하여 중력하중에 대하여 저항하도록 설계하였다. 횡하중을 지지하는 철근콘크리트 특수전단벽은 건물의 양 단부에 배치하였고, 벽체의 두께는 200~400mm로 설계되었다. 장변방향(x)의 하중은 길이가 짧은 여러개의 벽체(두께 200mm)를 이용하여 지지하도록 하였고 기본 진동주기는 1.9초로 나타났다. 반면 단변방향(y)으로는 건물의 양 끝단에 두께 400mm 벽체를 이용하였고 기본 진동주기는 0.7초로 나타났다.

2.2 내진성능목표 및 지진하중

데이터센터는 설계지진하중 발생 후에도 지속적이며 안정적인 서비스를 공급하기 위하여 무중단 유지보수 기능 수행을 목표로 하기 때문에 성능기반 내진평가 기법을 통해 주요 구조물의 횡력 저항능력을 검토하였다. 국토해양

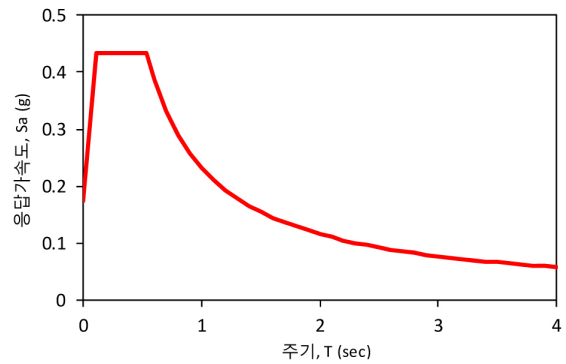
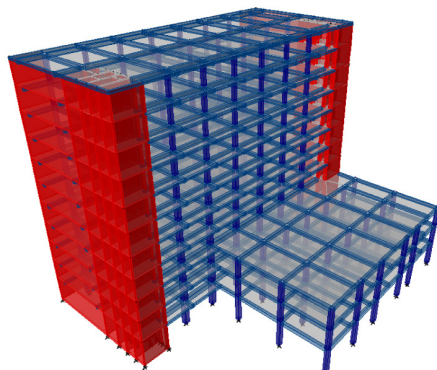


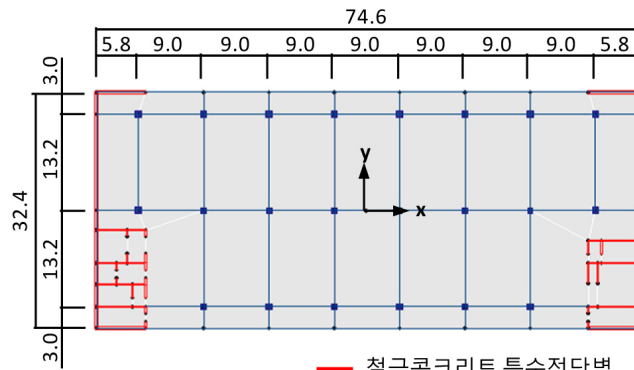
그림 2 설계 스펙트럼 가속도

부의 2011년 기준 시설물(건축물) 내진성능 평가요령²⁾ (이하 내진성능 평가기준)에 따르면 내진 특등급에 해당하는 구조물은 2400년 지진의 2/3 수준의 지진(=2/3MCE) 작용 시 거주가능(Immediate Occupancy Performance Level, IO) 수준의 성능을 발휘해야 한다고 규정하고 있다. 거주가능 성능수준은 지진발생 후 피해가 경미하고 비구조재에 손상은 있으나 거주에 안전하며 간단한 보수와 청소를 통해 기능을 수행할 수 있는 수준이라고 정의되어 있다. 거주가능(IO) 수준보다 더 상위 개념인 기능유지(Operational Performance Level, OP) 수준의 기준은 국내뿐만 아니라 해외에서도 정립된 바가 없기 때문에 대상구조물에 대하여 거주가능(IO) 수준을 목표성능으로 정하고 구조물의 기능수행(OP) 수준은 정성적으로 평가하기로 하였다.

성능평가를 위한 지진의 위험도는 내진성능 평가기준²⁾에서 규정한 방법으로 지진의 스펙트럼 가속도를 구하였다. 기준에서 제시한 방법은 KBC2009와 동일하지만 지진구역에 따른 유효지반 가속도(S)를 산정함에 있어서 상세 지진재해도를 이용하지 않고 지진구역 별로 주어진 지역계수(=0.22)를 이용하여 보수적으로 산정하도록 하고 있다. 그림 2



(a) 데이터센터



(b) 기준층 평면

그림 1 대상 구조물: 데이터센터

는 이와 같은 방법으로 구해진 2400년 지진의 2/3 수준의 지진에 대한 설계 스펙트럼 가속도를 나타낸다.

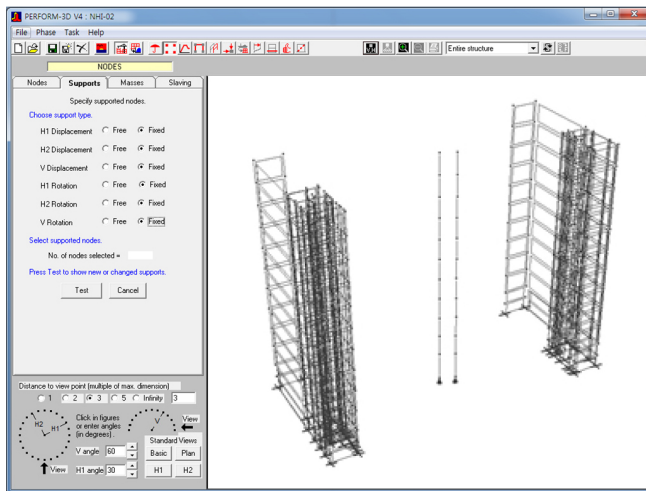
2.3 해석모델

구조물의 설계 시 모든 지진하중은 전단벽이 저항하고 중력하중은 골조가 부담하도록 하였다. 따라서 내진성능 평가기준에 의해 전단벽은 1차부재(primary component)로 분류되어 그 성능이 평가되어야 하며, 골조는 2차부재(secondary element)로 분류되어 횡하중 작용 시 부재에 발생하는 변형조건을 만족시켜야 한다. 하지만 본 프로젝트에서는 설계 초기단계에서 주요 구조부재의 성능을 평가하는 것을 목표로 하였기 때문에 전단벽만을 고려하고 추후 골조의 성능은 변형조건을 만족할 수 있도록 설계하는 것으로 하였다.

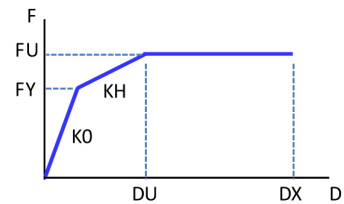
대상 구조물의 모델링 및 해석은 구조해석 상용 프로그램인 Perform 3D³⁾를 이용하여 수행하였다(그림 3참조). 해석 모델은 지하층을 제외하고 지상층 구조물을 대상으로 하였고 지상1층 바닥판 레벨에서 각 수직부재는 변위나 회전에 대하여 고정되는 것으로 하였다. 철근콘크리트 특수 전단벽이 횡하중 지지요소로서 모델링되었고, 횡 변위 시 골조에 발생하는 중력하중의 영향은 건물 질량중심(또는 질량중심에서 건물길이의 5%에 해당하는 길이만큼 떨어진 위치)의 P-delta기동을 이용하여 반영되도록 하였다.

재료 특성은 모든 경우에 있어서 tri-linear 관계를 적용하였다. 철근은 비좌굴 비탄성 철근(inelastic steel material, non-buckling) 타입을 이용하여 압축과 인장이 같은 값을 갖도록 하였고 반복하중에 의한 강도저감(cyclic strength degradation)은 고려하지 않았다. 반면, 콘크리트의 경우는 비탄성 콘크리트(inelastic concrete material) 타입을 이용하여 압축에 대하여 성능을 발휘하지만 인장에 대하여 전혀 저항하지 않도록 하였고 강도저감을 고려하였다. 또한 특

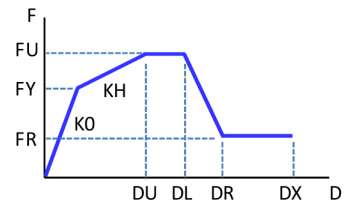
재료 특성은 모든 경우에 있어서 tri-linear 관계를 적용하였다. 철근은 비좌굴 비탄성 철근(inelastic steel material, non-buckling) 타입을 이용하여 압축과 인장이 같은 값을 갖도록 하였고 반복하중에 의한 강도저감(cyclic strength degradation)은 고려하지 않았다. 반면, 콘크리트의 경우는 비탄성 콘크리트(inelastic concrete material) 타입을 이용하여 압축에 대하여 성능을 발휘하지만 인장에 대하여 전혀 저항하지 않도록 하였고 강도저감을 고려하였다. 또한 특



(a) Perform 3D 해석모델



(b) 철근 재료특성



(c) 콘크리트 재료특성

그림 3 구조해석 모델링

표 2 재료특성을 고려한 해석 입력값 (그림 3 참조)

		FY (MPa)	FU (MPa)	FR/FU	DU (m/m)	DL (m/m)	DR (m/m)	DX (m/m)	K0 (GPa)	KH/K0
철근 ($f_y = 400$ MPa)		500	625	-	0.1	-	-	0.2	200	0.006
콘크리트	Confined ($f_{ck} = 40$ MPa)	28.8	48	0.75	0.004	0.0065	0.015	0.02	30.9	0.203
	Unconfined ($f_{ck} = 40$ MPa)	28.8	48	0.01	0.0019	0.0021	0.004	0.02	30.9	0.642
	Confined ($f_{ck} = 30$ MPa)	21.6	36	0.75	0.004	0.0065	0.015	0.02	28.6	0.159
	Unconfined ($f_{ck} = 30$ MPa)	21.6	36	0.01	0.0019	0.0021	0.004	0.02	28.6	0.440

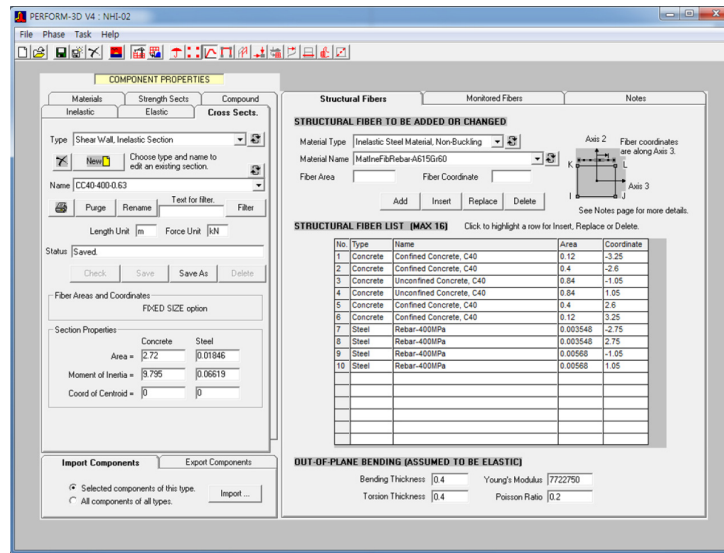


그림 4 Fiber모형을 이용한 철근콘크리트 전단벽

표 3 철근콘크리트 전단벽의 허용기준 (국토해양부, 2011)

 θ = plastic hinge rotation l_v = plastic hinge length	조건			허용기준 (θ , rad)		
	특수경계 요소유무	배근상태와 축력비	작용 전단력크기	거주가능 (IO)	인명안전 (LS)	붕괴방지 (CP)
있음	0.1이하	0.25 이하	0.005	0.010	0.015	
		0.5 이상	0.004	0.008	0.010	
없음	0.1 이하	0.25 이하	0.002	0.004	0.008	
		0.5 이상	0.002	0.004	0.006	

수전단벽의 경계요소 유무에 따라 콘크리트 구속효과를 나타낼 수 있는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하였다. 각각의 재료적 특성을 고려한 해석 입력값은 표 2에 정리된 바와 같다. 해석에서 사용된 재료의 평균강도는 설계강도에 내진성능 평가기준에서 제시한 보정계수를 곱하여 산정하였다.

철근콘크리트 전단벽의 단면특성은 비탄성 전단벽(shear wall, inelastic section) 타입의 fiber model을 적용하여 비탄성 거동을 예측할 수 있도록 하였다(그림 4 참조).

건물에 가해지는 하중은 두 단계로 나누어서 먼저 중력하중을 가하고 건물의 장변(x-direction) 또는 단변(y-direction) 방향으로 변위하중이 가해지도록 하였다. 변위의 형태는 건물의 1차 모드만을 고려하여 1층부터 지붕층까지 선형으로 증가하도록 가정하였다.

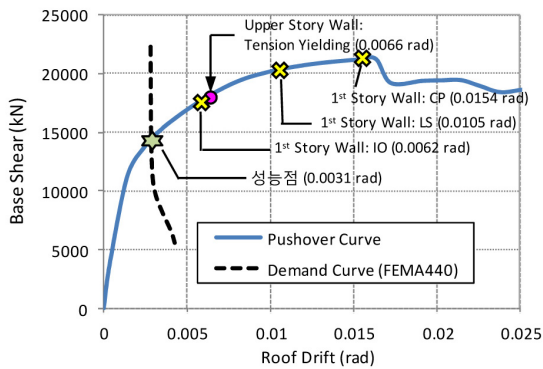
2.4 성능점의 산정

ATC-40⁴⁾에서 제시된 역량 스펙트럼법(capacity spectrum method)은 능력 스펙트럼 곡선과 요구 스펙트럼 곡선을 하나의 좌표계에 표현하고, 두 곡선의 교차점을 주어진 지진

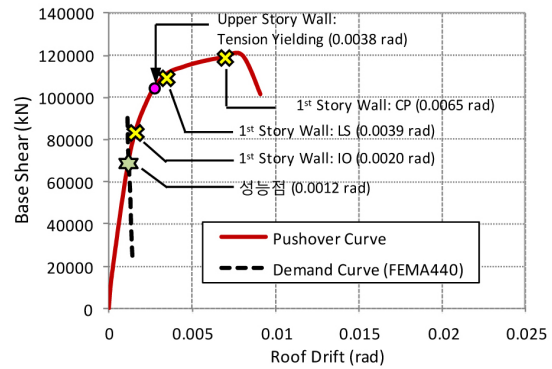
에 대한 구조물의 응답, 즉 성능점으로 보는 방법이다. 능력 스펙트럼 곡선은 비선형 정적해석을 통해 얻은 Pushover 곡선을 가속도와 변위 좌표계로 변환하여 구조물의 저항능력을 나타낸 것이고, 요구 스펙트럼 곡선은 주어진 지진에 대한 응답 스펙트럼을 가속도와 변위 좌표계로 변환하여 건물의 요구내력을 나타낸 것이다. 이 방법에서는 성능점을 구하기 위하여 초기 5% 감쇠비에 대한 요구 스펙트럼을 반복계산을 통해 유효주기(T_{eff})와 유효감쇠비(β_{eff})에 대한 요구 스펙트럼으로 수정함으로써 실제 구조물의 비선형 효과를 고려한다. 본 프로젝트에서는 반복계산의 문제점을 개선한 FEMA440⁵⁾의 Improved Procedures for Equivalent Linearization 중 Locus of Possible Performance Points 방법을 이용하여 성능점을 산정하였다.

2.5 내진성능 평가

대상 구조물에 대하여 내진성능 평가기준에서 제시한 내진 성능 상세평가를 실시하였다. 각 전단벽의 성능을 판정하기 위하여 최하층부분(소성힌지 구역)에 rotation gage, wall type



(a) 장변(x) 방향



(b) 단변(y) 방향

그림 5 Pushover 곡선과 성능평가

(4-node) component를 배치하여 회전각을 측정할 수 있도록 하였다. 성능수준별 허용기준은 내진성능 평가기준에 의하여 표 3과 같이 정의되어 있다. 소성힌지 이외의 지역에서는 각 전단벽의 양 단부에 axial strain gage(2-node) component를 배치하여 철근과 콘크리트의 응력상태를 확인하였다.

그림 5는 각 방향에 대한 구조물의 해석 결과인 Pushover 곡선을 나타내고 있다. 단변방향으로 긴 전단벽이 위치하고 있어 강성이 크므로 밀면전단력이 크고 변위가 적게 발생하고 있다. 반면 장변방향으로는 상대적으로 강성이 작기 때문에 밀면전단력이 작고 변위가 크게 발생함을 알 수 있다. 장변방향의 경우, FEMA440에 의하여 산정된 성능점은 지붕층 변위로 0.0031rad이고, 전단벽의 소성힌지 발생 지역에서 거주가능(IO) 허용수준에 해당하는 지붕층 변위는 0.0062rad으로 허용기준을 두 배 정도 만족시키고 있다. 단변방향은 성능점이 0.0012rad인 반면, 거주가능 허용수준은 0.0020rad으로 허용기준을 1.67배 만족시키고 있음을 알 수 있다. 어느 경우라도 상부층 전단벽에서 인장철근의 항복은 1층 전단벽의 거주가능 허용수준을 초과한 후에 발생하고 있다. 따라서 본 구조물이 목표로 한 설계 지진하중 하에서 거주가능(IO) 성능수준은 확보된 것으로 평가하였다.


3. 결 론

안정적이고 지속적인 서비스를 제공하기 위해 최근 데이터센터 신축의 경우 무중단 유지보수가 가능한 구조를 기본적으로 필요로 하고 있다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위해서는 전력과 냉방뿐만 아니라, 설계지진 규모의 큰 지진이 발생하더라도 그 본연의 기능을 수행할 수 있는 횡하중 저항시스템을 구축해야만 가능하다고 할 수 있다. 본 프로젝트에서는 설계 초기단계에서 성능기반 내진설계(performance based seismic design) 기법을 이용해 대상 구조

물의 횡하중 저항시스템인 철근콘크리트 특수전단벽의 내진 성능을 평가하였다. 내진성능 평가기준에 의하면 내진 특등급의 경우 설계지진하중 발생시 거주가능(Immediate Occupancy, IO) 성능수준을 요구하고 있지만 무중단 유지보수를 위해 요구되는 수준은 그보다 상위개념인 기능유지(Operational Performance, OP) 성능수준이라고 판단된다. 그러나 기능유지 성능수준은 아직까지 기준으로 정립된 바가 없어서 정량적 판단이 어렵기 때문에 대안으로 거주가능 성능수준을 목표로 평가한 후 정성적으로 접근하였다.

내진성능 평가기준으로 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령(국토해양부, 2011)을 적용하였다. 비선형 Pushover 해석을 이용해 구조물의 거동을 파악하였고, FEMA440에서 제시한 개선된 방법으로 설계 지진하중 시의 구조물의 응답을 산정하였다. 그 결과 구조체의 저항능력이 거주가능(IO) 성능수준에서 요구하는 허용기준 대비 67~100%초과 만족하고 있는 것으로 나타났다. 이를 근거로 구조체는 거주가능(IO) 성능수준에 대하여 상당한 여력이 있기 때문에, 기능유지(OP) 성능수준을 확보하는데 문제가 없을 것으로 판단하였다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2009), 건축구조설계 기준, 대한건축학회
2. 국토해양부 (2011), 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령
3. Computers and Structures Inc., Perform 3D Version 4.0.4
4. ATC (1996), ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings
5. FEMA (2005), FEMA440: Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures 

[담당 : 이유주, 편집위원]