

엔지니어기반 전산시스템을 적용한 철근콘크리트 기존 건축물의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Existing Buildings with Engineer-oriented Computerized System

황선우¹⁾ · 김동연¹⁾ · 김태진^{1)*} · 김경태¹⁾

Hwang, Sunwoo¹⁾ · Kim, Dong-Yeon¹⁾ · Kim, Taejin^{1)*} · Kim, Kyungtae¹⁾

¹⁾(주)창민우구조컨설턴트

¹⁾Chang Minwoo Structural Consultants

/ A B S T R A C T /

Nonlinear analysis for seismic performance evaluation of existing building usually takes 4~5 times more than linear analysis based on KBC code. To obtain accurate results from the nonlinear analysis, there are a lot of things to be considered for nonlinear analysis modeling. For example, reinforcing layout, applied load and seismic details affect behavior of structural members for the existing building. Engineer-oriented computerized system was developed for engineers to evaluate effective seismic performance of existing buildings with abiding by seismic design principles. Using the engineer-oriented program, seismic performance evaluation of reinforced concrete building was performed. Nonlinear hinge properties were applied with real time multiple consideration such as section layout, section analysis result, applied load and performance levels. As a result, the building was evaluated to satisfy LS(Life Safety) performance level. A comparison between engineer-oriented and program-oriented results is presented to show how important the role of structural engineer is for seismic performance evaluation of existing buildings.

Key words: Engineer-oriented Computerized System, Seismic Performance Evaluation, Nonlinear Hinge Property, Pushover Analysis

1. 서론

최근 한반도에 지진발생에 의한 피해가 늘어나고, 국내에서도 주기적으로 지진이 발생하면서 안전에 대한 관심 및 건축구조물의 지진 안정성에 대한 기준이 강화되고 있다. 내진설계 의무화 건물은 2층까지 확대되었고, 내진설계가 도입된 1988년 이전에 지어진 공공 건축물에 대한 내진성능평가 및 보강이 활발하게 진행되고 있다.

한국시설안전공단 지침[1] 및 ASCE41-13[2]에서는 기존건축물에 대한 내진성능평가에 대한 절차를 제시하고 있고, 비선형해석을 기반으로 한 2차 상세평가의 경우 주요구조부재의 주요 영향인자들을 고려하여 비선형 속성 값을 제시하고 있다.

일반적으로 건물의 구조설계를 수행 할 때에는 당시의 건축구조기준에

따라 선형해석을 기반으로 설계를 수행하나, 내진설계가 도입되기 이전 2~30년 전의 기존건축물의 경우 비내진상세가 적용된 건물이 현재 기준에서 제시하는 지진하중에 대해 탄성상태를 유지하기 어렵고, 시간경과 및 손상 등에 따라 건물이 노후화되기 때문에 성능 역시 떨어지게 된다. 따라서 기존건축물에 대한 내진성능평가를 수행할 시 건물의 정확한 성능평가를 위해 비선형해석을 수행하는 경우가 종종 있다.

비선형 해석은 선형해석에 비해 약 4배 이상의 시간과 노력이 소요되는 것으로 FEMA 451b[3]에서는 나타내고 있으며, 그만큼 고려해야 할 사항이 많고 엔지니어는 여러 가지 변수들을 고려하여 신중하게 비선형 모델링 작업을 수행하여야 한다. 실무에서는 비선형해석에 소요되는 작업량 및 시간을 단축시키기 위하여 전산시스템을 개발하여 사용하고 하고 있다. 그러나 일부에서는 비선형 해석에 대한 명확한 이해와 모델링의 적정성에 대한 검토 없이 프로그램에 의존하여 내진성능평가를 수행하여 적절하지 않는 결과를 도출하는 경우가 종종 있다. 실제로 단계별 모델링에 대한 상세검토 없이 단시간 안에 비선형해석 모델링을 구축할 경우 결과에 대한 타당성을 검증하는데 오히려 더 많은 시간이 걸리게 된다.

*Corresponding author: Kim, Taejin

E-mail: taejin@minwoo21.com

(Received November 10, 2016; Revised December 29, 2016; Accepted January 13, 2017)

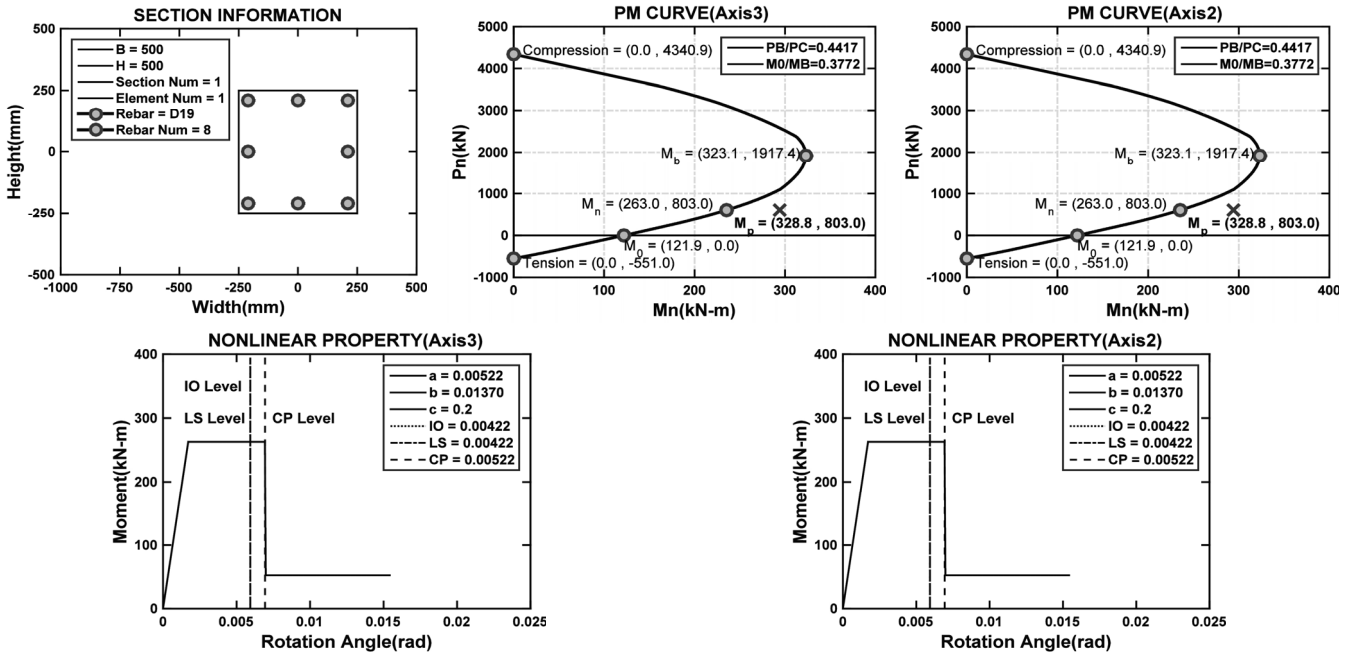


Fig. 1. Vertical Element Nonlinear Property Producing Algorithm

따라서 이 연구에서는 비내진상세가 적용된 저층 기존건축물에 대해 시설안전공단 지침 및 내진설계 기본개념을 바탕으로 여러 가지 영향인자를 고려하여 엔지니어기반 전산시스템을 통한 다각도의 검토와 함께 비선형 해석을 통한 내진성능평가를 수행한 후 이를 프로그램 의존적인 결과 값과 비교해 봄으로써, 내진성능평가 시 엔지니어의 비선형해석에 대한 명확한 이해 및 신중한 검토 후에 이를 모델링에 반영하여야 함을 전달하는데 목적이 있다.

2. 엔지니어기반 전산시스템

비선형해석 모델링의 경우 벽체의 거동을 적절하게 평가하기 위해서는 fiber요소[4]를 사용하도록 권장되고 있고 기둥 및 보의 경우는 fiber요소로 모델링할 수 있지만, 과도한 해석소요시간과 결과신뢰도의 영향이 크지 않아 FEMA hinge[5]로 모델링하여 평가할 수 있도록 규정하고 있다. fiber요소의 경우 콘크리트 및 철근에 대한 재료비선형을 입력하면 지진하중 하에서 벽체의 강도 및 강성저감 등을 자동으로 수치해석적으로 반영할 수 있으나, FEMA hinge모델의 경우 강도 및 강성변화 등에 대한 기준값들을 각 부재별 단면해석 및 하중조건 등을 고려하여 엔지니어가 직접 설정해 주어야 한다.

실무에서는 많은 경우 비선형 해석 모델링의 효율성을 높이기 위하여 MIDAS SET 등의 단면해석 프로그램과 엑셀시트 등의 나름대로의 자체 기술을 활용하여 비선형 해석을 수행하고 있다. 그러나 일반적으로 비선형 속성을 산출해주는 엑셀시트 등은 부재명과 최종 결과값이 텍스트 위주로만 되어있어 해당부재가 어떠한 배근상세를 가지고 설계되었고 얼마만큼의 하중이 작용되어 있고, 그래서 결과적으로 어느 정도의 비선형 속성을 가지는지에 대한 다각도의 검토가 어려워 그 적절성을 판단하기가 쉽지 않다. 따라서 합리적인 내진성능평가 결과를 얻기 위해서는 주요 구조부재의 영

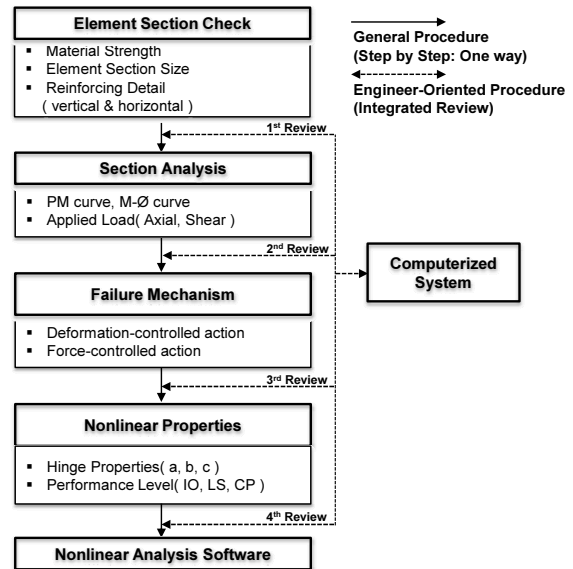


Fig. 2. Engineer-oriented Computerized System

향인자를 복합적으로 검토하여 비선형 속성을 보다 명확하게 산출하는 것이 요구된다. (Fig. 2) 이 연구에서는 시설안전공단에서 제시하는 지침과 철근콘크리트 구조물에 대한 내진설계 기본원리[6] 및 KBC2009[7] 내진설계기준을 기반으로 통합검토를 통해 합리적인 비선형 속성을 정의할 수 있는 엔지니어기반의 전산프로그램을 개발하여 적용하였다.

2.1 비선형속성 영향인자

주요 구조부재의 비선형속성은 작용하는 하중 및 설계된 단면상세 등에 의해 영향 받는다. 시설안전공단 지침 및 ASCE41-13에서는 주요 구조부

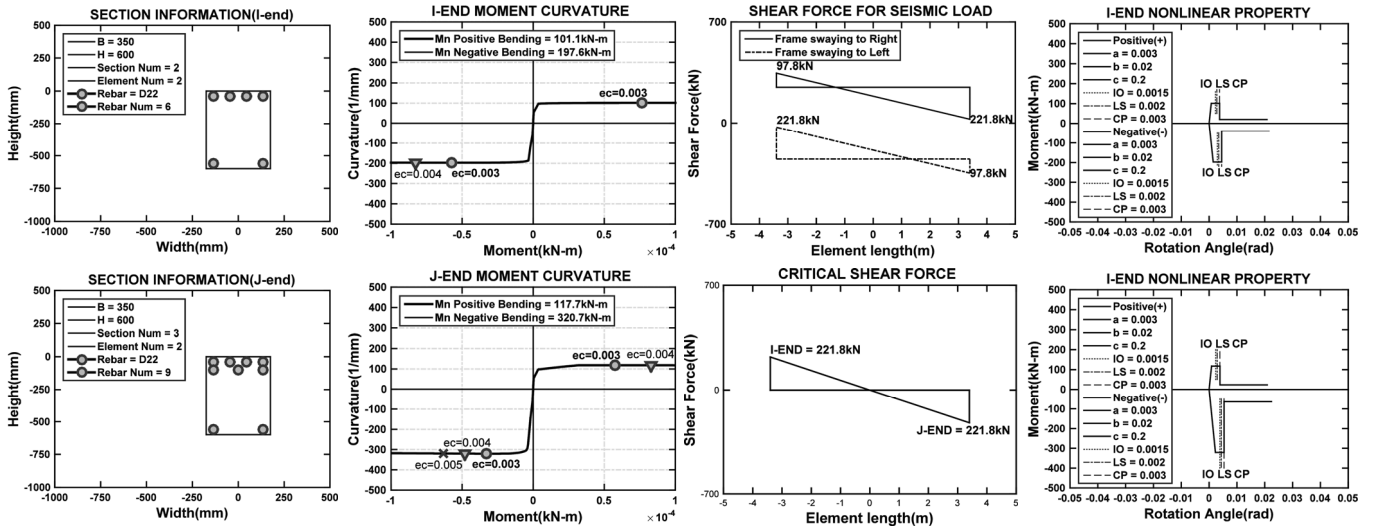


Fig. 3. Horizontal Element Nonlinear Property Producing Algorithm

재인 수직부재(기둥)와 수평부재(보) 등에 대한 배근상세에 의해 내진/비내진상세로 구분하고 작용하중 등을 고려하여 몇 가지 기준 값에 따라 지배거동 및 비선형 속성을 정의하고 있다. 아울러 FEMA hinge 모델의 경우는 fiber 요소처럼 강성저감을 실시간으로 반영할 수 없기 때문에 유효강성을 적용하도록 규정하고, 수직부재의 경우 축력비에 의해 부재의 비선형속성 및 유효강성 값이 영향을 받는다.

2.2 수직부재(기둥)

Fig. 1은 수직부재에 대한 비선형속성 정의 프로그램을 제시하고 있다. 입력정보는 설계된 부재의 배근상세와 축력이며, 이를 기반으로 배근상세는 내진상세 및 비내진상세를 결정하고, 단면해석 알고리즘을 통해 단면에 해당하는 PM상관도를 통해 축력을 고려한 Mn값을 산출한다. 그리고 재료의 초과강도를 고려하여 Mp값을 산출하고 부재길이를 고려하여 Vp값을 산정한다. 산정된 Vp값은 Vn값과의 비교를 통해 변형지배/하중지배를 판별하고 계산된 결과들을 바탕으로 한국시설안전공단에서 제시하는 지침에 근거하여 해당 부재의 조건에 맞는 비선형속성 값을 결정한다. 최종적으로 결과 값을 바탕으로 대상건물의 내진성능평가를 위한 비선형해석 프로그램인 Perform3D에 적용할 입력데이터 값을 산출하고, 산출된 값이 비선형해석 모델링에 적용된다. 엔지니어는 산출된 비선형 속성 값이 합리적인지에 대해 해당부재의 축력비 및 단면해석결과(PM상관도)를 통한 결과 값을 기반으로 반드시 확인 작업을 거쳐야 한다. 제시된 기둥부재의 경우는 양방향에 대해 대칭인 부재이기 때문에 각 방향에 대한 비선형 속성 값이 동일하지만, 건물에 따라 부재의 크기 및 배근상태가 비대칭인 경우가 존재할 수 있으며 이러한 경우 위에서 제시한 절차에 의해 각 방향의 비선형 속성을 다르게 각각 산출하여 해석모델에 반영하여야 한다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 개발된 엔지니어기반의 수직부재 비선형속성 정의 프로그램은 해당 수직부재의 단면형상 및 배근상태와 축력을 고려한 각 방향 단면해석 (PM 상관도) 그리고 그에 따른 FEMA hinge의 비선형 속성 값 및 비선형 구조해석 소프트웨어 입력데이터 값을 통합하여 시각적으로 제시한다. 이

에 따라 엔지니어가 정의된 비선형 속성 값의 적절성에 대해 판단할 수 있고 프로그램에 맞는 입력데이터를 제시함으로써 비선형 모델링에 걸리는 시간 또한 단축시킬 수 있다.

2.3 수평부재(거더)

수평부재에 대한 비선형속성 정의 프로그램을 수평부재의 경우 I단과 J에 해당하는 단면의 배근상태 등에 따라 각각 검토를 수행한다. 단면해석의 경우 모멘트-곡률 곡선을 통해 정모멘트/부모멘트에 대한 단면성능을 예측하고, 내진설계의 시 적용되는 중력하중과 양방향 Sway 모드를 고려하여 작용전단력을 산출하게 된다. 이렇게 산출된 양쪽단부기준 최대 작용전단력을 기준으로 Vp값을 산정하고 Vn과의 비교를 통해 변형지배/하중지배를 판단한다. 그 다음 결과 값을 기반으로 한국시설안전공단에서 제시하는 비선형 속성 값과 비선형해석 모델링에 적용할 입력데이터 값들을 산출하도록 한다. 복합적인 일련의 절차를 개발 전산프로그램을 통해 엔지니어는 수평부재에 대해 I단 J단에 대한 각각의 배근상세 및 모멘트 곡률곡선, 작용전단력 및 비선형 속성을 한눈에 파악할 수 있어 주요 구조부재의 적절한 모델링과 더불어 건물의 내진성능평가 결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있도록 하였다(Fig. 3).

3. 예제건물 일반사항

3.1 대상건물 개요

국내 기존건축물에 대한 내진성능평가를 위해 4층 규모의 건물을 대상 건물로 선정하였다. 대상건물은 지하 1층 지상 4층으로 구성된 연면적 3470 m²에 총 높이 14.9 m의 철근콘크리트 보통모멘트골조 시스템 구조로써 1981년에 준공되었다(Table 1). 대상건물의 대표 평면이 Fig. 4에 제시하였고 1~2층의 구조는 거의 동일하고, 3~4층으로 올라가면서 평면의 우측 일부가 증축되는 형태를 가지고 있다.

Table 1. Building Outline

Target Building	'D' library
Use	Education/Research Facility
Gross Floor Area	3470 m ²
Building Area	1163 m ²
Story	B1F ~ 4F
Height	14.9 m
Structure	Reinforced Concrete Structure
Year of Completion	1981

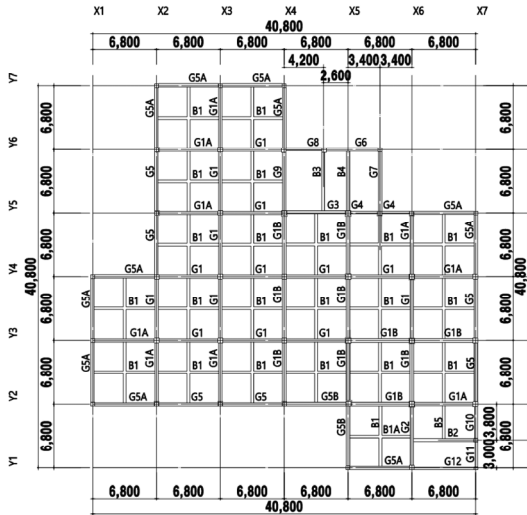


Fig. 4. Typical Plan(1st Floor)

3.2 구조부재 평가

내진성능평가를 위한 시설안전공단지침에서는 KBC2009에서 제시하고 있는 내진설계 특별고려사항의 규정에 따른 횡보강근 만족여부에 따라 내진상세단면과 비내진상세단면을 구분하고 있는데, 소성힌지구간에서 전단보강근의 간격이 d/3이하이고 전단보강근에 의한 전단강도가 설계전 단력의 3/4이상일 경우 내진상세를 만족하는 것으로 규정하고 있다.

내진설계가 도입된 1988년 이전에 건설된 이 건물은 300~500 mm의 기둥 크기로 설계되어 있으며, 약 0.9~2.4%의 철근비를 가지고 횡보강근은 300 mm간격으로, 대부분의 수직부재는 내진상세가 적용되지 않도록 설계되었다. 또한 상대적으로 중력하중의 크기가 작은 상층부의 기둥이 하층부에 비해 작게 설계되었다. 주요 수평부재인 거더도 기둥과 마찬가지로 몇몇 부재가 내진상세를 만족하는 단면도 존재하지만, 그렇지 않은 단면이 다수인 것으로 검토 되었다. 단면크기, 정모멘트 및 부모멘트 철근, 그리고 I단J단에 대해서 매우 다양한 상세를 가지는 부재로 설계가 되었고, 다양한 상세는 비선형 해석 모델링 시 그만큼 많은 상세검토 후에 비선형 속성 등이 모델링에 반영되어야 함을 의미한다.

3.3 하중 및 강도 산정

시설안전공단지침에서는 기존 건축물의 내진성능평가를 위해 설계기

준강도로부터 평균강도를 구하기 위한 재료별 보정계수와 경과년수 및 재료상태에 따른 감소계수를 제시하고 있다. 이 연구에서는 콘크리트의 경우 재료별 보정계수(1.2), 경과년수 30년이상(0.8), 재료상태 보통(0.9)상태로 가정하여 내진성능평가 시 강도를 결정하였고, 철근의 경우는 건설연도별 재료의 기본값에 대해 1981년에 해당하는 값 중, 하한값으로 강도를 결정하였다(Table 4).

대상건물은 주 용도가 도서관으로써 상대적으로 큰 활하중(7.5 kN/m²)이 작용하고 있고, 이는 비슷한 규모의 다른 건축물에 비해 더 큰 중력을 견디도록 설계되었음을 예측할 수 있다(Table 3). 중력하중은 비선형 해석에 적용되는 각 부재의 비선형 속성 및 강성에 영향을 미치므로 현재 사용되고 있는 건물의 용도에 맞게 건축구조기준에서 제시하는 하중을 고려하여 평

Table 2. Seismic Design Criteria

Category	Application
Seismic Zone Factor	S=0.22
Site Class	S _b
Building Importance	Importance(1)_(School)
Risk Category	I
Importance Factor(I _E)	1.2
Respond Modification Coefficient(R)	3
Lateral Resisting System	Reinforced Concrete Moment Frame

Table 3. Gravity Load

Use	Dead Load(kN/m ²)	Live Load(kN/m ²)
Library	-3.99	-7.5
1F Lobby	-3.99	-4.0
1F Toilet	-4.38	-3.0
1F Information Room, Night Duty Room, Lounge	-7.88	-2.5
2F Hall	-3.99	-4.0
2F Toilet	-4.38	-3.0
2F Gallery	-3.99	-5.0
2F Office A	-3.99	-2.5
2F Office B	-6.19	-2.5
2F Lecture Room	-3.99	-3.0
2F Digital Reference Room	-3.99	-4.0
3F Lecture Room	-3.99	-3.0
3F Reading Room	-3.99	-3.0
3F Hall	-3.99	-4.0
Roof Top(Lounge)	-6.14	-3.0
Roof Top(Holding No Access)	-6.14	-1.0
Water Tank	-6.14	-7.0
Stairs	-6.44	-3.0

Table 4. Material Strength

Material	Design Strength	Applied Strength
Concrete	21 MPa	18 MPa
Reinforcement	240 MPa	240 MPa

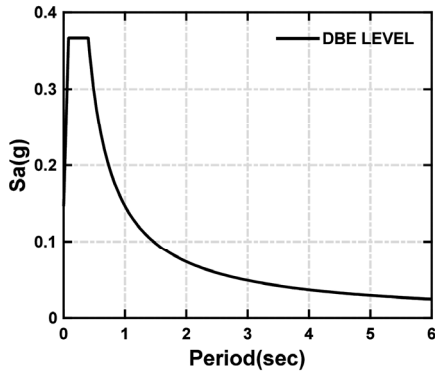


Fig. 5. Response Spectrum

가에 반영하는 것이 매우 중요하다. 또한 지반조건, 구조시스템 및 용도 등을 고려하여 지진하중을 산정하였다(Table 2). 지반조건은 해당부근의 지반조사를 실시하여 검토하였고, 이를 기반으로 KBC2009의 기준에 따라 해당 응답스펙트럼을 작성하였다(Fig. 5). 또한 이 건물은 도서관으로써 교육시설(학교)과 동일한 중요도로 고려하였다.

3.4 구조해석 및 평가 S/W

이 연구를 위한 대상건물의 해석 및 평가는 선형해석의 경우 실무에서 많이 활용되고 있는 Midas Gen(2015)을 사용하였고, 내진성능평가를 위한 해석은 비선형해석프로그램으로 검증된 Perform3D(version 5)를 사용하였다. 부재단면해석 및 비선형속성정의의 경우 내진설계절차를 기반으로 한 부재단면해석과 시설안전공단지침에서 제시하는 비선형속성 값을 참조하여 개발된 엔지니어기반 전산프로그램을 활용하였다. 개발된 프로그램의 경우 각 조건 별 수계산과 단면해석 등은 상용프로그램과의 비교를 통한 검증작업을 거쳐 신뢰도를 확보하였다.

4. 비선형 해석 모델링

4.1 내진성능평가 목표

내진성능평가를 위한 요구성능수준을 “기존 시설물(건축물) 내진성능평가요령(2013)”에 근거하여 결정하였다. Table 5에 KBC2009에서 규정하는 내진등급에 따른 성능목표와 각 대상건물의 요구성능수준을 나타내었다. 이 건물의 경우 교육시설로 중요도(I)로 설정하여 내진 1등급으로 분류되므로 2400년 지진의 2/3수준의 지진에 대해 성능목표를 인명안전으로 설정하였다.

4.2 부재력 산출 및 유효강성

구조부재의 유효강성 및 비선형 속성은 작용하중에 영향을 받는다. 작용 부재력을 산정함에 있어서, 푸쉬오버해석을 성능점이 수렴할 때까지 반복하여 그때의 부재력을 비선형 속성을 위한 하중값으로 적용하는 경우도 있지만, 이 연구에서는 대상건물의 내진성능평가를 위해서 실무에서 주로 활

Table 5. Seismic Performance Objectives

Risk Category of KBC2009	DB level(2/3 of the MCE level)
Special	Immediately Occupancy
I	Life Safety
II	Collapse Prevention

Table 6. Effective Stiffness

Component	Bending Stiffness	Shear Stiffness	Axial Stiffness
Beam	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	-
Column (Axial force ratio more than 0.5)	$0.7E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Column (Axial force ratio less than 0.3)	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$

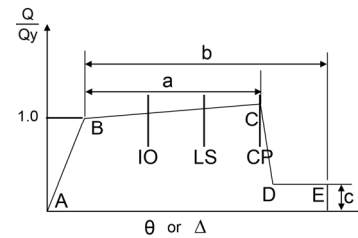


Fig. 6. Plastic Hinge Property Definition

용되는 KBC2009에서 제시하는 하중조합에 의한 부재력을 이용하여 비선형속성 산출값으로 적용하고 그에 따라 유효강성을 적용하였다. 내진성능평가 시 적용되는 유효강성 값을 Table 6에 제시하였다.

4.3 비선형속성 정의

기존건축물의 내진성능평가를 위해 시설안전공단 지침에서는 주요 구조부재의 배근상태 및 작용하중 등을 기반으로 기준값을 설정하여 내진상세 적용여부, 주요지배거동에 따라 각 부재의 비선형 속성에 대한 기준값 및 성능수준을 제시하고 있고 엔지니어는 제시된 조건에 대응되는 값들을 비선형 해석 모델링에 반영할 수 있다(Fig. 6).

4.4 대상건물 비선형속성 평가 결과

주요 구조부재별로 비선형속성을 산출한 후 수평 및 수직부재에 대한 영향인자에 따른 대표적 비선형 속성을 정리하였다. 수직부재의 경우 크게 2가지 유형으로 비선형 속성이 정의되었고, 수평부재는 총 3가지의 대표유형이 정의되었다.

4.4.1 수직부재(기둥) 평가

수직부재는 크게 두 가지 유형의 부재로 설계 되었으며, 대부분의 부재

Table 7. Typical Nonlinear Property Type(Vertical Element)

	Type 1	Type 2
Section Shape		
Section Size	400 x 400 , 500 x 500	
Seismic Detail	Non-seismic Detail (Hoop lap = 300 mm)	
Axial Force Ratio	Low(0.1~0.3)	High(0.5)
Effective Stiffness	0.5I	0.7I
Failure Mode	Flexural	Shear
Nonlinear Property		

는 비내진상세가 적용된 것으로 평가되었다. 기둥의 비선형 속성은 축력비에 크게 영향을 받는데, 대상건물의 경우 10~50%의 축력비에 따라 유효강성을 다르게 적용하였다(Table 6). 또한 축력비는 기둥부재의 모멘트강도에도 영향을 미치며 그에 따라 V_p 값에 영향을 주기 때문에 동일 전단강도 대비 하중지배/변형지배 거동 또한 달라진다. 특히 비내진상세의 경우 V_n 값이 크지 않기 때문에 축력에 의한 부재의 강도변화가 주요변수가 된다. 결과적으로 기둥부재의 경우 휨지배 거동에 따라 상대적으로 큰 연성능력을 보이는 유형과 전단지배거동으로 인해 항복 후 연성능력이 거의 없는 유형으로 평가되었다(Table 7).

4.4.2 수평부재(거더) 평가

대상건물의 수평부재는 매우 다양한 배근상세 및 크기로 설계되었다. 따라서 비선형 속성 또한 다양하게 존재한다. 또한 정모멘트 및 부모멘트에 대한 비선형 속성을 달리 적용하고 I단과 J단에 따라서도 달라지기 때문에 비선형 해석 시 고려해야 할 요소가 많다. 이 연구에서는 설계된 기존건축물의 모든 수평부재에 대한 비선형 속성을 산출하였고, 서로 다른 경향성을 보이는 3가지 대표유형의 비선형 속성을 정리하였다. 수직부재와 마찬가지로 이 대상건물은 1988년도 이전에 설계된 건물로써 많은 부재가 내진상세가 적용되지 않았다. 첫 번째 유형으로는 I단과 J단의 상세가 동일하고, 상대적으로 작용전단력이 작용하는 부재의 경우 안정적인 휨지배거동을 보였고, 두 번째 유형으로 I단과 J단의 상세가 다름과 동시에 높은 작용전단력에 의해 전단지배거동을 보이는 부재가 존재하였다. 마지막으로 I단과 J단이 다른 상세에 대해 휨지배거동과 전단지배거동의 경계선상에 있어 한쪽은 전단지배거동 다른 한쪽은 휨지배거동을 보이는 유형으로 검토되었다(Table 8).

4.5 구조해석 모델링

4.5.1 모델링 적용기준

대상건물의 주요 구조부재는 기둥과 거더로 이루어진 모멘트 골조 시스템이다.

Table 8. Typical Nonlinear Property Type(Horizontal Element)

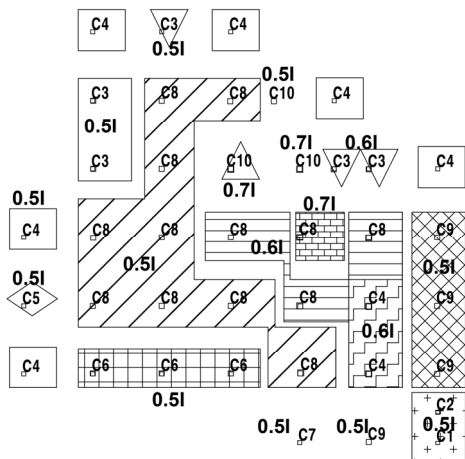
	Type 1	Type 2	Type 3
Section Shape			
Section Size	350x600	350x600	250x600
Seismic Detail	Non-seismic Detail (Hoop lap = 100~300 mm)		
Rebar (I & J-end)	Equal	Different	Different
Applied Force	Low	High	-
Failure Mode	Flexural	Shear	Flexural&Shear
Nonlinear Property			

각 요소에 대한 비선형 해석시 FEMA hinge타입의 요소를 모델링으로 많이 활용하고 있다. 따라서 예제건물에 대한 비선형 모델링은 앞에서 산출된 비선형 속성을 기반으로 기둥부재는 Perform3D에서 제공하는 FEMA COLUMN Concrete Type을 사용하였고, 거더는 FEMA BEAM Concrete Type을 사용하였다.

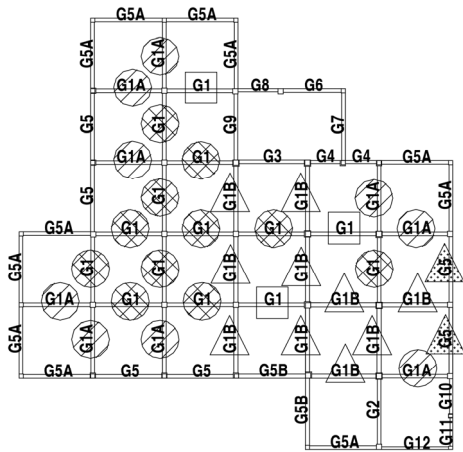
4.5.2 그룹화

대상건물의 구조부재는 각각의 부재크기, 배근상세 및 작용하중 등 비선형 속성에 영향을 미치는 변수가 모두 다르기 때문에 산출되는 비선형 속성이 조금씩 차이가 있다. 그러나 비선형속성 모델링을 위해서 모든 부재를 각각 다르게 속성을 정의하는 것은 합리적이지 못하며 실제로 차이가 미미한 비선형 속성을 모두 다르게 모델링하는 것은 공학적으로도 비효율적이다. 대상건물의 규모가 커지고 복잡해질수록 효율적으로 비선형모델링을 구축하는 것이 더욱 중요해진다. 이에 대상건물의 내진성능평가를 위한 경제적인 비선형 모델링을 위해서 비선형 속성과, 유효강성, 단면상세 등을 기준으로 유사속성(오차 10% 이내)을 가진 부재들을 그룹화하여 올바른 평가 결과를 도출해내는데 영향을 끼치지 않으면서 효과적으로 모델링이 가능하도록 하였다.

기둥의 비선형속성 설정 시 주의해야 할 점으로는 4.4.1절에서 제시한 바와 같이 같은 단면상세를 가지더라도 축력비에 의해 변형지배/하중지배가 달라지기도 하고, 유효강성 또한 달라진다는 점이다. 이러한 점을 고려하여 기둥의 비선형속성을 그룹화하여 모델링 하였다. (Fig. 7(a)) 거더의 경우, 다양한 단면상세로 인해 상대적으로 많은 수의 비선형속성 그룹으로



(a) Vertical Element(Column)



(b) Horizontal Element(Girder)

Fig. 7. Grouping

분류되었다. 4.4.2절에서 나타난 바와 같이 영향인자들을 모두 고려하여 다양한 유형의 비선형 속성으로 모델링 하였고, 유사한 속성을 가지는 부재별로 그룹화하여 모델링 하였다. 또한 작용전단력에 의해 주요 지배거동이 바뀌는 부재는 같은 상세를 가지더라도 다른 그룹으로 정의하였다(Fig. 7(b)). 동일한 원리를 적용하여 전층에 걸쳐서 수직 및 수평부재에 대한 그룹화 과정을 거쳐 비선형 모델링을 구축하였다.

4.6 대상건물 취약부 예측

정의된 비선형 속성들을 기반으로 취약부를 미리 예측해 봄으로써 내진 성능평가의 결과에 대한 신뢰성의 잣대로써 활용될 수 있도록 하였다. 실제 비선형 해석을 통한 결과는 비선형 속성 뿐만 아니라 여러 가지 복합적인 요인에 의해 영향을 받지만, 미리 주요 구조부재의 배근상태, 하중 등의 검토에 따른 비선형 속성 결과에 따른 엔지니어의 결과 예측을 통해 해석 후 잘못된 모델링으로 인한 터무니없는 결과에 대해 한번 더 검토해 볼 수 있는 절차로서 의미를 가진다. 수직부재의 경우 높은 축력비에 의한 높은 강성 및 비내진상세로 인한 전단지배거동을 보이는 부재가 취약할 것으로 판단되며, 수평부재는 비내진상세와 높은 작용전단력으로 전단지배거동을 보

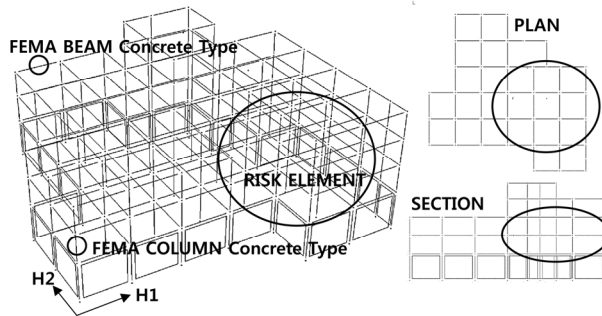


Fig. 8. Risk Region Prediction

Table 9. Eigenvalue Analysis of Elastic/Nonlinear Model

	Mode No.	H1 dir.		H2 dir.	
		Mass(%)	Sum(%)	Mass(%)	Sum(%)
Elastic Model	1	0.11	0.11	65.59	65.59
	2	78.85	78.96	0.59	66.18
Nonlinear Model	1	0.65	0.65	75.44	75.44
	2	78.23	78.88	0.66	76.10

이는 부재가 취약할 것으로 예상된다. 결과적으로 대상건물에 대한 구조부재 평가결과 3층부 및 지붕층에 대한 중력하중의 영향으로 높은 축력비를 가지고 높은 강성과 전단지배거동이 우려되는 우측 저층부 기둥이 취약할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 8).

5. 비선형 정적해석

5.1 해석결과의 적정성

선형 정적해석[8]의 허용범위는 대상건물의 비정형성이 크지 않고 1차 모드의 모드참여비율이 75% 이상이어야 한다. 고유치해석을 통한 주요 모드는 유사한 결과를 보여야 하며, 유효강성을 적용한 결과(강성저감효과)로 비선형정적해석의 초기강성은 탄성해석결과보다 조금 작은 값을 가져야 할 것이다. 게다가 철근콘크리트 보통모멘트골조의 시스템 초과강도 값은 3으로 기준에서 제시하고 있기 때문에 유효강성 및 감소계수 등이 적용된 적용강도를 고려하면 설계미면전단력에 대한 비선형해석에 의한 시스템강도가 3보다 조금 작은 값이 도출되는 것이 바람직하다. 반대로 너무 작은 수치의 초과강도가 도출되는 것도 건물을 보수적으로 평가할 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다.

5.1.1 푸쉬오버해석(비선형정적해석)의 적정성

Table 9에서는 주요모드의 질량참여율을 제시하고 있다. 표에서 보여주듯이 내진성능평가를 위한 비선형해석모델의 경우 H1, H2방향에 대한 1차 모드의 경우 질량참여율이 75%가 넘는 결과를 보여주고 있고, 이는 시설안전공단지침에서도 제시하고 있듯이 건물의 내진성능을 비선형 정적해석으로 평가할 수 있음을 보여준다고 할 수 있다.

Table 10. Effective Stiffness

	Design	Apparent	Over Strength Ratio
H1	2105kN	3660kN	1.74
H2	2105kN	3570kN	1.70

5.1.2 시스템 초과강도 검토

비선형 정적해석 결과의 시스템초과강도를 검토한 결과 H1 방향에 대해서는 1.74, H2 방향에 대해서는 1.70 값을 가진다. 따라서 철근콘크리트 보 통모멘트골조 시스템의 초과강도계수 3을 기준으로 유효강성 및 설계밀면 전단력산정에 설계기준강도(21 Mpa)를 쓴 반면 비선형정적해석의 경우 감소계수 등을 적용해 18 Mpa를 사용한 점을 고려하면 대상건물에 대한 비선형 정적해석 결과는 합리적인 내진성능평가 모델링으로 적절함을 확인할 수 있다(Table 10).

5.2 내진성능평가

대상건물에 대한 내진성능평가는 H1, H2 방향에 대한 성능점에 대해, 시설안전공단 지침에서 제시하는 DE(Design Earthquake)수준에서 LS(Life Safety)를 만족하는지를 검토하였다. 평가를 위해서 비선형 정적해석이 수행되었고, 성능점의 산정을 위해서는 FEMA440[9]에서 제안하는 절차를 적용하였다.

5.2.1 성능점 검토

Fig. 9는 DE수준에서의 H1, H2 방향에 대한 성능점을 나타내었다. H1 방향에 대한 성능점은 Base Shear가 3241 kN이고 Reference Drift가 0.003947일 때로 나타났다. 성능점에서의 각 부재별 구조성능검토 결과, 주요 구조부재인 기둥과 보(거더)가 모두 시설안전공단 지침에서 제시하는 인명안전수준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 대상건물의 비선형속성 산출 결과 전단지배거동을 보이는 부재가 다수 존재하였음을 고려할 때 많은 부재가 탄성상태에 머물렀음을 알 수 있다. H2 방향에 대한 성능점은 Base Shear가 3183 kN이고 Reference Drift가 0.004074일 때로 나타났다. 성능점에서의 각 부재별 구조성능검토 결과, H2 방향에 대해서도 주요 구조부재인 기둥과 보(거더)가 모두 인명안전수준을 만족하는 것으로 나타났다. 대상건물의 경우 부재의 비내진상세로 인해 내진성능이 취약한 부재가 다수 존재하나, 지반조건이 Sb지반으로 상대적으로 건물의 전체성능이 우수하다고 평가되기보다 지진발생시 작용하는 하중이 다른 지반조건에 비해 안전하여 평가결과 목표 내진성능을 만족하도록 평가되었을 것으로 판단된다.

5.2.2 허용충간변위 검토

대상건물에 대한 충간 변형각 검토는 시설안전공단 지침(“기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령. 2013.12.”)에서 제시하는 구조시스템 및 성능수준별 허용충간 변형각에 준하여 충간 변형각을 검토하였다. 이 대상건

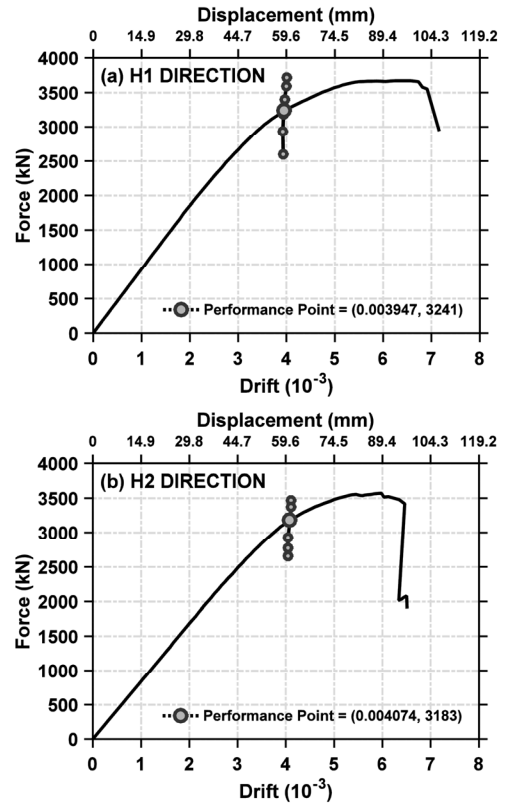


Fig. 9. Performance Point

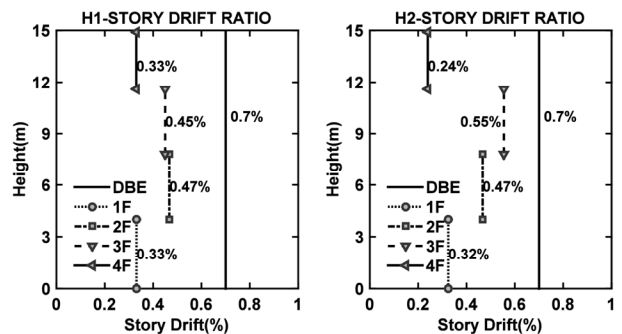


Fig. 10. Allowable Story Drift

Table 11. Result of Seismic Performance Evaluation

Category	Performance Objectives at DE Level	H1 dir.	H2 dir.
Structural Member	Life Safety	OK	OK
Allowable Story Drift	0.7% (Life Safety)	0.4671% (OK)	0.5544% (OK)

물은 RC모멘트 골조로써 비내진상세에 대하여 LS(Life Safety)수준에서 1.0를 넘지 않도록 제시하고 있다. 그러나 조적채움벽이 있을 경우 보다 보수적인 기준으로 0.7값을 넘지 않도록 규정하고 있어 대상건물에 대한 허용충간변위는 보수적으로 0.7에 대해 만족여부를 검토하였다. 검토결과

Table 12. Typical Nonlinear Property Comparison

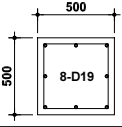
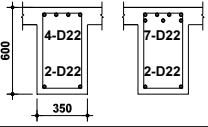
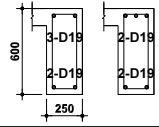
	Column			Girder 1			Girder 2								
Section Shape															
Section Size	500x500			350x600			250x600								
Acceptance Criteria		Engineer	Program	I&J-end	Engineer	Program	I-end	Engineer	Program	J-end	Engineer	Program			
	Failure Mode	Shear	Flexural	Failure Mode	Shear	Flexural	Failure Mode	Flexural& Shear	Flexural	Failure Mode	Flexural& Shear	Flexural			
	Seismic Detail	Non Seismic	Seismic	Seismic Detail	Non Seismic	Seismic	Seismic Detail	Non Seismic	Seismic	Seismic Detail	Non Seismic	Seismic			
	IO	0.0005	0.0025	IO	+	0.0015	0.005	IO	+	0.0015	0.005	IO	+	0.005	0.005
					-	0.0015	0.005			-	0.0015		0.005		-
	LS	0.0005	0.0075	LS	+	0.002	0.01	LS	+	0.002	0.01	LS	+	0.005	0.01
					-	0.002	0.01			-	0.002		0.01		-
	CP	0.0005	0.015	CP	+	0.003	0.02	CP	+	0.003	0.02	CP	+	0.015	0.02
-					0.003	0.02			-	0.003	0.02			-	0.0135

Fig.10에서 제시하는 바와 같이 H1, H2방향에 대해 지침에서 제시하는 기준을 만족하는 결과를 보여준다. 결과적으로 대상건물에 대한 내진성능평가 결과 지침에서 요구하는 성능목표를 모두 만족하는 것으로 평가되었다 (Table 11).

6. 비선형 해석 시 엔지니어의 중요성

비선형해석에 의한 내진성능평가는 앞 절에서 제시한 바와 같이 많은 시간과 노력 및 엔지니어의 적절한 판단이 요구된다. 그러나 실제로 많은 시간이 주어지지 않는 실무조건 등으로 인해 단계별 상세검토에 의한 비선형 해석이 아닌 프로그램에 의존하여 결과 값을 의심 없이 받아들이거나 다각도의 검토 없이 건물의 내진성능을 평가하는 경우가 종종 있다. 그러나 이는 건물의 단순한 내진성능평가 뿐만 아니라, 안전성과도 직접적으로 연결될 수 있는 매우 중요한 부분임을 간과해서는 안 된다. 따라서 본 절에서는 엔지니어의 판단 없이 자동 산출된 비선형 속성 입력 값에 따른 비선형 해석결과가 실제 건물의 성능을 과도하게 평가할 수 있음을 간접적으로 제시하고, 비선형 해석에 의한 건물의 내진성능을 평가함에 있어서 엔지니어의 역할이 매우 중요함을 제시하고자 한다.

6.1 비선형 정적해석 결과 비교

엔지니어 기반의 비선형 정적해석 결과와 프로그램 기반의 결과를 비교하였다. 엔지니어 기반의 결과는 앞 절에서 엔지니어기반 전산프로그램 및 상세검토에 의해 수행한 결과 값을 의미하며, 프로그램 기반의 결과 값은 기본적인 배근 및 하중 적용을 기반으로 자체적으로 생성해 낸 비선형 속성 값들을 의미한다. 초기 강성 값의 경우 엔지니어 기반의 결과 값은 주요 구조부재의 하중 등에 따라 유효강성이 적용되었으나, 프로그램 기반의 경우 이를 고려하지 못해 강성이 조금 더 크게 평가되었다. 비선형 정적해석 평가 결과 건물은 내진성능에서 큰 차이를 보였고, 프로그램 기반의 평가 결과가

실제 엔지니어 기반의 평가결과에 비해 훨씬 건물의 성능을 좋게 평가하고 있음을 확인하였다. 제시된 프로그램 기반 결과는 엔지니어의 판단을 배제한 결과로서 보다 극명한 결과 값의 차이를 보여줄 수 있으나 엔지니어의 적절한 검토 없이 비선형 해석을 통한 내진성능 평가시에 프로그램에 의존하여 내진성능을 평가하게 되면 때때로 건물의 성능을 실제보다 과도하게 평가할 수 있고 이는 지진발생시 건물의 안전성에 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 각별한 주의가 필요함을 제시하는 점에 있어 큰 의미가 있다.

6.2 비선형 속성값 비교

Fig. 11에서 제시하고 있는 두 가지 결과의 차이가 어디에서 발생하는지 판단하기 위해 주요 구조부재에 대한 대표적인 비선형 속성값을 비교해 보았다. 엔지니어 기반의 비선형 속성 결과는 4.4절(4.4.1 및 4.4.2)에 수직 및 수평부재에 대한 대표적인 비선형 속성값을 비교대상으로 선별하였고, 해당 대표 부재에 대한 프로그램 기반의 비선형 속성값을 비교하였다.

수직부재의 압축력이 큰 기둥 유형에 대한 비교 결과, 비내진상세가 적용된 부재로서 엔지니어 기반의 전산프로그램을 활용한 평가결과 전단지배거동을 보이는 부재로 평가되었으나, 프로그램 기반의 결과 값은 내진상세를 가진 휨 거동을 기둥으로 비선형 속성이 평가되었다. 이러한 내진상세 적용여부 및 지배거동 차이는 비선형해석 결과 값의 차이를 발생시키는 요인 중에 하나인 것으로 판단된다.

수평부재에서 엔지니어 기반의 비선형 속성의 경우, I단과 J단의 상세가 다름과 동시에 높은 작용전단력에 의해 전단지배거동을 보이는 부재와 I단과 J단이 다른 상세에 대해 휨 지배 거동과 전단지배거동의 경계선상에 있어 한쪽은 전단지배거동 다른 한쪽은 휨 지배 거동을 보이는 유형에 대해 모델링에 반영하였다. 그러나 프로그램 기반의 비선형 속성 결과, 수직부재와 마찬가지로 비내진상세 및 전단지배거동을 보이는 부재에 대해 내진상세와 휨 지배 거동을 보이면서 높은 연성능력을 보이는 부재로 평가되었다. 이에 따라 건물의 성능을 실제보다 높게 평가하는 것으로 검토되었다. 또한 수

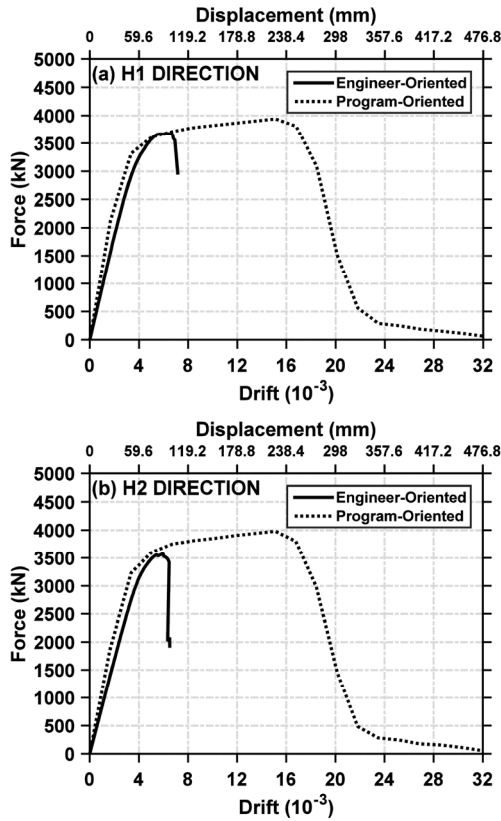


Fig. 11. Nonlinear Pushover Curve Comparison

평부재에서 I단과 J단이 배근 상세 및 지배거동이 다른 부재에 대해서도 각 단에 대한 비선형 속성을 복합적으로 고려하지 못하고 단일 속성으로 반영 되는 경향을 보였다.

7. 결론

시설안전공단 지침에서 규정하는 비선형 해석에 의한 기존건물의 내진 성능 평가를 수행하였다. 비선형 해석은 선형해석에 비해 많은 시간과 노력이 필요하며, 엔지니어의 비선형해석에 대한 이해 및 충분한 경험, 아울러 해석결과에 대한 단계별 상세검토 등을 통한 건물의 올바른 내진성능평가가 요구된다. 이 연구에서는 엔지니어 기반의 전산프로그램을 사용하여 기존건축물에 대한 비선형 해석 및 내진성능평가를 수행하였으며, 프로그램 기반의 결과 값과의 비교를 통해 비선형해석에 있어서 엔지니어의 중요성에 대해서 언급하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주요 구조부재의 비선형 속성을 산출함에 있어서 부재의 배근상태, 적용하중을 기반으로 내진설계 기본원리에 의해 내진상세적용 여부 및 지배거동 등을 적절하게 판단하여 비선형 모델링에 반영하는 것이 중요하며, 엔지니어 기반의 전산 프로그램은, 배근상세, 적용하중, 단면해석결과 및 비선형속성 값을 통합하여 제시함으로써 모델링의 적절성을 판단 후 PERFORM 3D 비선형해석프로그램에 적용이 가능하도록 하였다.
- 2) 수직부재는 배근상세 및 축력에 의해 유효강성 및 지배거동 등의 비선형 속성이 영향 받으며, 비대칭 배근에 대해서는 각 방향에 대한 비선형

속성이 달라진다. 또한 수평부재는 배근상세, 작용전단력, 정모멘트 부 모멘트 차이 그리고 I단 J단의 다른 지배거동을 보이는 비선형 속성 등이 비선형 모델링에 고려되어야 한다.

- 3) 비선형 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 엔지니어는 비선형속성 정의부터 건물의 취약부를 미리 예측할 수 있어야 하며, 시스템 초과강도 및 모드해석 결과 등을 통해 해석결과의 적절성을 판단할 수 있어야 한다. 아울러 주요 구조부재에 대해 모델링 단계부터 부재의 배근상태, 하중, 비선형속성, 유효강성 등에 대해 종합적으로 검토하여 건물의 내진성능을 평가할 수 있어야 한다.
- 4) 해석 프로그램에 의존한 비선형 해석 결과 값은 단계별 상세검토에 의한 엔지니어 기반의 결과 값에 비해 건물의 내진성능을 훨씬 좋게 평가하는 결과를 보였으며, 이렇게 실제보다 높은 내진성능을 가지는 것으로 평가된 건물은 지진 발생 시 안전성에 큰 문제를 야기할 수 있다. 따라서 비선형 해석을 기반으로 내진성능을 평가할 시에는 엔지니어의 신중한 이해, 지식, 경험이 필수적이며 비선형 해석 시 충분한 시간과 노력이 수반될 수 있도록 실무여건 등이 마련되어야 할 것이다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부 도시건축연구 사업의 연구비지원(과제번호 16AUDP-B066083-04)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. KISTEC, Seismic Performance Evaluation Method for Existing Buildings, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, c2013.
2. ASCE/SEI 41-13, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, c2014.
3. NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Materials FEMA 451B, c2007.
4. PEER/ATC-72-1, Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings, Applied Technology Council, c2010.
5. ASCE, FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, ASCE for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. c2000.
6. MacGregor JG, Wright JK, Reinforced Concrete: Mechanics and Design, Fifth Edition, Prentice Hall, c2009.
7. AIK, Korean Building Code, KBC 2009, Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, c2009.
8. Chopra AK, Goel R, A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation, Report No. PEER 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, c2001.
9. FEMA440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency; c2005.