

기존 철근콘크리트 골조의 반복거동 예측을 위한 이력모델

Hysteresis Model for the Cyclic Response of Existing Reinforced Concrete Frames

손 주 기*
Son, Joo-Ki

이 창 환**
Lee, Chang-Hwan

Abstract

As the damage caused by earthquakes gradually increases, seismic retrofitting for existing public facilities has been implemented in Korea. Several types of structural analysis methods can be used to evaluate the seismic performance of structures. Among them, for nonlinear dynamic analysis, the hysteresis model must be carefully applied because it can significantly affect the behavior. In order to find a hysteresis model that predicts rational behavior, this study compared the experimental results and analysis results of the existing non-seismic reinforced concrete frames. For energy dissipation, the results were close to the experimental values in the order of Pivot, Concrete, Degrading, and Takeda models. The Concrete model underestimated the energy dissipation due to excessive pinching. In contrast, the other ones except the Pivot model showed the opposite results with relatively little pinching. In the load-displacement curves, the experimental and analysis results tended to be more similar when the column axial force was applied to columns.

Keywords : Hysteresis model, Dynamic analysis, Reinforced concrete, Energy dissipation, Pinching

1. 서론

2016년의 경주 지진과 2018년 포항 지진을 포함하여 최근 한반도에 지진 발생이 잦아지고 있다¹⁾. 과거에 비하여 지진의 빈도뿐만 아니라 인명피해와 건물의 손상도 늘어가고 있어²⁾ 이를 예방하는 대책이 필요하다. 이러한 상황에 대응하기 위해서 국내 내진설계기준이 최근에 개정되었고^{3,4)}, 동시에 기존 공공시설물을 대상으로 한 내진보강사업도 지속적으로 추진되고 있다.

내진보강은 건물이 지진력에 충분한 성능을 유지할 수 있게 하는 역할을 한다. 건물의 내진안전을 확보하고자 특정한 보강방법을 시행하기 전에는 기존 구조체의 내진성능을 정확히 파악한 후 적절한 보강안을 선정해야 한다. 이 때 기존 구조물의 성능을 파악하기 위해서

구조해석이 선행되어야 한다.

구조물에 대한 내진해석에는 지진에 대한 이해를 바탕으로 지진이 발생된 상황에 맞는 모델링이 반영되어야 하며, 구조요소에 대한 이력모델은 지진과 같은 동적 하중에 의한 부재의 거동 특성(에너지 소산, 강도 및 강성 저하 등)에 큰 영향을 끼치므로 신뢰할 수 있는 모델이 사용되어야 한다. 따라서 구조물의 내진해석 시 거동을 합리적으로 모사할 수 있는 적정 이력모델의 선정을 위한 자료가 중요하다.

반복 하중 및 동적 하중 하에서의 부재 거동을 예측하기 위한 목적으로 이력모델 간 비교 연구를 수행한 사례는 기존부터 있어왔다. Yu(2008)⁵⁾는 CANNY 프로그램을 사용하여 휨변형 기반으로 제안된 이력모델들을 비교하는 해석적 연구를 수행하였고, Kim et al.(2009)⁶⁾은 동일 프로그램에서 Yu(2008)⁵⁾와 다른 이력모델들을 비교하였다. Shin, Lee & Jeong(2009)⁷⁾은 Drain-2DX 프로그램을 이용하여 접합부에 다양한 이력모델을 적용한 후 각각의 내진성능을 비교한 연구 결과를 보고하였으며, Je, Kim & Yoon(2009)⁸⁾은 이력모델에 따른 표준 학교건물의 비탄성거동을 비교 및 분석하였다. 또한 Son & Lee(2020a and 2020b)^{9,10)}는 비내진 철근콘크리트

* 학생회원, 부경대학교 건축·소방공학부, 석사과정
Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University
** 교신저자, 정회원, 부경대학교 건축·소방공학부 조교수, 공학박사
Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University
Tel: 051-629-6087 Fax: 051-629-7084
E-mail: chlee@pknu.ac.kr

(RC) 평면골조를 대상으로 실험결과와 이력모델을 달리 한 해석결과를 비교하기도 하였다.

이상과 같이 RC 부재의 이력모델과 관련된 선행 연구들이 존재하지만, 해석 프로그램에서 지원되는 이력모델들이 다른 경우에는 기존 연구 결과를 적용하는데 제한이 생길 수 있다. 또한 최근 개발된 새로운 이력모델에 대한 평가가 지속적으로 필요하며, 동일한 이력모델에 대한 평가에서도 추가적인 검증을 수행함으로써 연구 결과의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 기존 비내진 RC 골조에 대한 실험사례를 토대로 해석모델을 작성하였다. 다음으로 모델을 작성하는 과정에서 입력된 이력모델을 변경하면서 해석을 반복하였고, 해석결과들을 선행 실험결과와 비교하였다. 또한 적용된 이력모델에 따른 구조체의 거동을 하중-변위 관계, 에너지 소산, 최대강도 및 초기강성의 측면에서 분석하여 실제와 유사한 거동을 나타내는 이력모델을 확인하였다. 이를 바탕으로 본 연구는 RC 골조 구조물의 내진해석을 위한 해석모델 작성 시 합리적인 이력모델 선정에 도움이 되는 기초자료를 제공하고자 하였다.

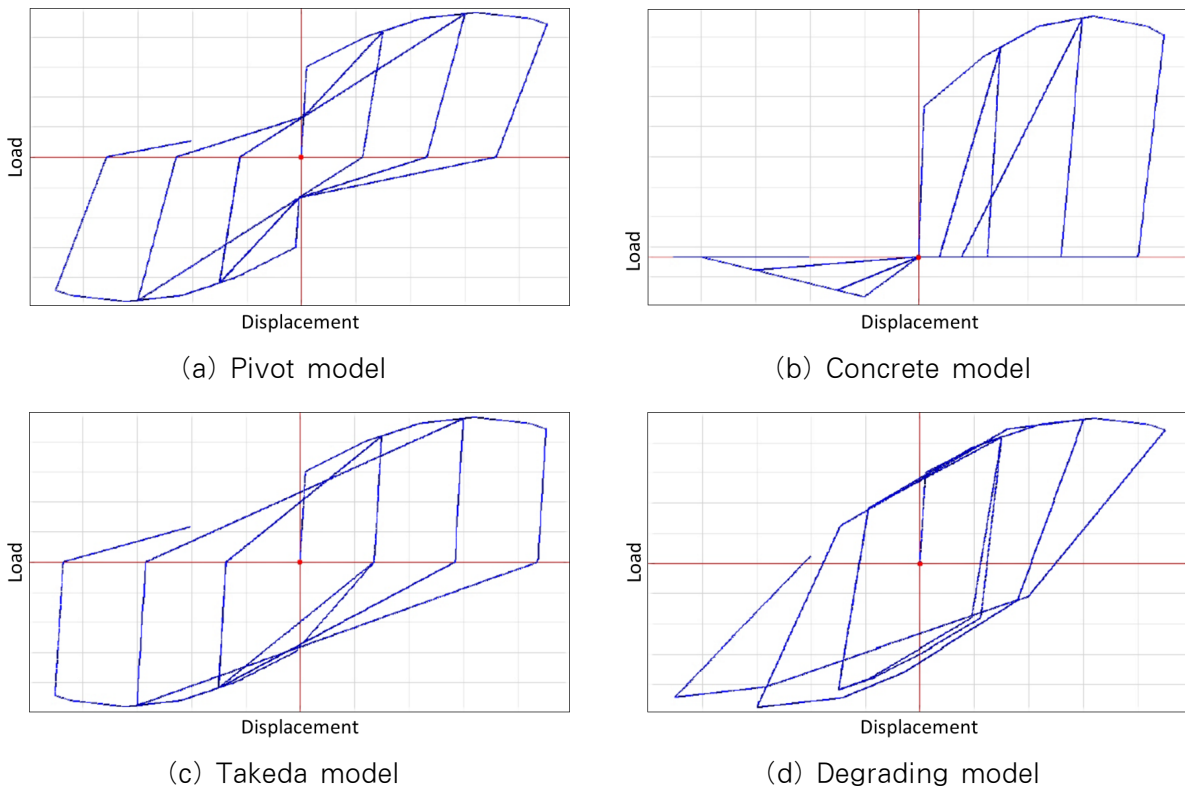
2. 연구 방법

본 연구는 RC 골조의 실험결과와 이력모델에 따른 해석결과를 비교 및 분석하였으며, 연구 대상으로 선정된 실험에 대한 상세내용은 3절에서 제시된다.

해석에는 상용 구조해석 프로그램인 ETABS¹¹⁾를 사용하였다. 이력모델의 경우 해당 프로그램에 내장된 것들 중 Degrading, Takeda, Pivot 및 Concrete 모델을 적용대상으로 선정하였다(Fig. 1). 적용 시 추가적인 변수를 입력해야 하는 이력모델은 Concrete, Degrading 및 Pivot 모델이다.

프로그램 매뉴얼¹¹⁾에 따르면, Degrading 모델은 f_0 , f_1 , f_2 , x_1 , x_2 및 s 를 변수로 가진다. 여기서 f_0 , f_1 및 f_2 는 각각 성능저하를 고려한 부재의 항복 시, 항복 이후와 최대변형에 도달하기까지, 그리고 최대 변형 시의 에너지 소산량과 성능 저하가 반영되지 않았을 때 에너지 소산량의 비율이다. 또한 x_1 과 x_2 는 각각 항복 이후와 최대변형 사이, 그리고 최대 변형 시의 변형 단계를 의미하며, s 는 강성 저감 계수이다.

Degrading 모델은 기본적으로 임의 방향의 제하



〈Fig. 1〉 Hysteresis property¹¹⁾

(Unloading)와 재재하(Reloading) 시까지 형성된 주곡선의 길이만큼 반대 방향 가력에서도 동일하게 곡선을 정의하는데, 추가적으로 에너지 소산의 저감을 구현할 수 있다. 가력이 진행될 동안 최대 변형에 해당하는 시점의 변위(d_{max})를 매 시점의 변위와 x_1 및 x_2 를 곱한 d_1 , d_2 와 비교하여 f 를 결정한다. 만약 $d_{max} > d_2$ 인 경우 $f = f_2$ 이다. 이러한 f 가 반영되면 이전 가력에서 제하와 재재하 시까지 형성된 주곡선보다 짧게 생성하여 에너지 소산 면적을 감소시킨다. 동시에 s 는 제하 시의 강성을 조절하는 역할을 하고, 최댓값인 1에 가까울수록 제하 강성은 줄어든다. 본 연구에서는 x_1 및 x_2 에 대해서 각각 5와 10의 기본값을, $f_0 = 0.5$, $f_1 = 0.4$, $f_2 = 0.1$, $s = 1$ 을 적용하여 구조물의 점진적인 변형 증가에 따른 에너지 소산 저감이 구현되도록 하였다.

Concrete 모델에서 변수 e 는 압축으로부터 제하 시 균열 확대에 따른 에너지 소산량 저감을 반영하는 계수이다. 해당 모델은 인장 방향 가력의 경우 제하 때마다 활선강성을 유지하고, 압축의 경우 제하 시점마다 활선강성에 e 를 곱한 강성으로 주곡선을 정의한다. 본 해석에서는 에너지 소산 능력의 저하를 적절하게 나타내기 위해 e 값으로 0.7을 적용하였다.

Pivot 모델의 변수로는 α , β 및 η 가 있으며¹²⁾, 주곡선이 정의되는 1, 3사분면의 경우 재하 및 제하 시 특정한 지점(피벗 지점. 이하 P)을 향하도록 곡선이 생성된다. α 는 P 의 위치와 연관되고, P 는 제하 강성에 영향을 준다. 2, 4사분면의 경우 각각 1, 3사분면의 곡선 위에 지정되는 핀칭 지점(이하 PP)을 향하도록 곡선이 형성된다. PP 를 정의하는 데는 β 가 관련되는데, 이는 0에서 1 사이의 값을 가진다. η 는 P 를 후퇴시키는 것으로 제하 시 강성의 저하를 나타내며($0 < \eta \leq 1$), 값이 1에 가까울수록 강성의 저하가 크게 반영된다. 본 해석의 경우 균열에 의한 저하거동을 나타내기 위하여 1로 적용하였다. α 및 β 에 대해서는 회귀분석을 바탕으로 Sharma, Eligehausen & Reddy(2013)이 식 (1)~(4)와 같은 산정식을 제시한 바 있다¹³⁾.

$$\alpha = 0.170k_a + 0.415 \quad (1)$$

$$\beta = 0.485k_b + 0.115 \quad (2)$$

$$\text{where, } k_a = p_t / \text{ALR}$$

$$k_b = (\text{ALR})^{0.25} \times (p_{sh})^{0.2}$$

$$\alpha = \begin{cases} 4.4 - 25.38 \times \text{ALR} & (0 \leq \text{ALR} \leq 0.13) \\ 1.0 & (0.13 < \text{ALR}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = 0.125 + 0.44 \times (\text{ALR}) \quad (4)$$

여기서, p_t 는 주철근비(%), p_{sh} 는 전단철근비(%), ALR은 요소에 작용하는 축력비이다. 산정식에서 확인되는 것처럼 설정 변수는 부재의 축력비와 배근 상세에 따라 달라진다. 식 (1)과 (2)는 기둥과 보를 대상으로 제안된 것인데, 축력이 없거나 상대적으로 작은 경우에는 α 의 산정이 불가능하거나 비정상적으로 크게 산정되는 한계가 있다. 이러한 경우에 대해서는 해당 식의 적용성이 제한되어 본 해석에서는 Dowell, Seible & Wilson(1998)¹²⁾의 도표를 참고하여 α 를 산정하였다. 해석모델에 적용된 구체적인 수치는 후속 절에서 언급된다.

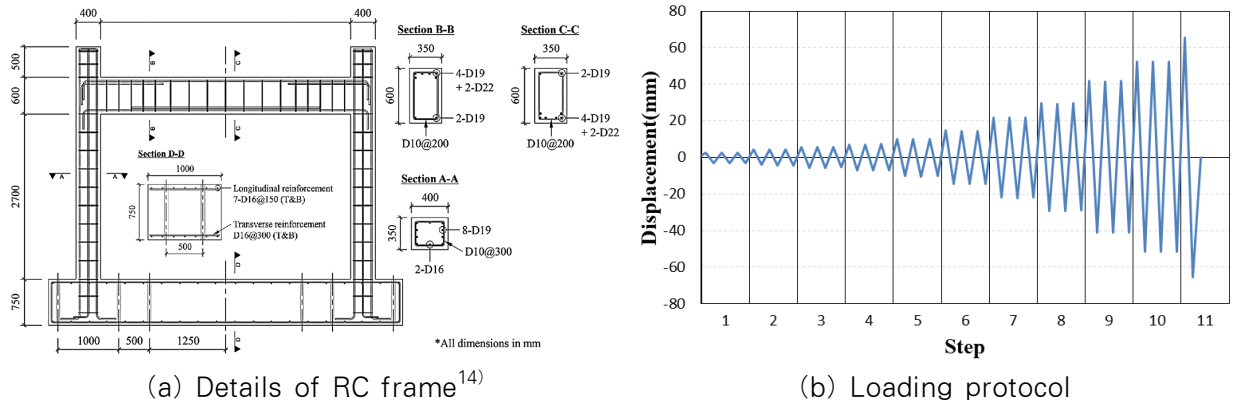
3. 결과 및 분석

연구대상으로 선정된 골조의 실험결과와 이력모델에 따른 해석결과를 하중-변위 관계, 에너지 소산, 최대강도 및 초기강성의 측면에서 비교하였다. 각 이력모델에 따른 거동은 에너지 소산에서 뚜렷한 차이를 보였고, Pivot, Concrete, Degrading 및 Takeda 모델 순으로 실험결과와 작은 차이를 나타냈다.

3.1 기둥 축력이 없는 골조 (Frame 1)

기둥 축력이 재하되지 않은 경우로서 Lee et al.(2018)의 비내진 상세를 가진 기존 RC 골조 실험체¹⁴⁾를 대상으로 하였다. 골조의 기둥 사이 간격은 4.5m, 높이는 3.3m이고, 접합부 내에는 띠철근이 존재하지 않았다. 골조 상단에는 점증하는 반복 수평하중이 재하되었고, 자중 외 추가적인 하중은 없었다. <Fig. 2>는 골조의 배근을 비롯한 상세 사항과 적용된 가력프로그램을 나타낸 것이다.

Pivot 모델이 적용된 해석에서 변수 α 와 β 는 Dowell, Seible & Wilson(1998)¹²⁾과 Sharma, Eligehausen & Reddy(2013)¹³⁾에 따라 산정하였고, 기둥의 경우 $\alpha = 7.150$, $\beta = 0.117$ 이 적용되었다. 기둥에는 축력이 없었던 반면, 실험 세팅 상 보에는 강봉을

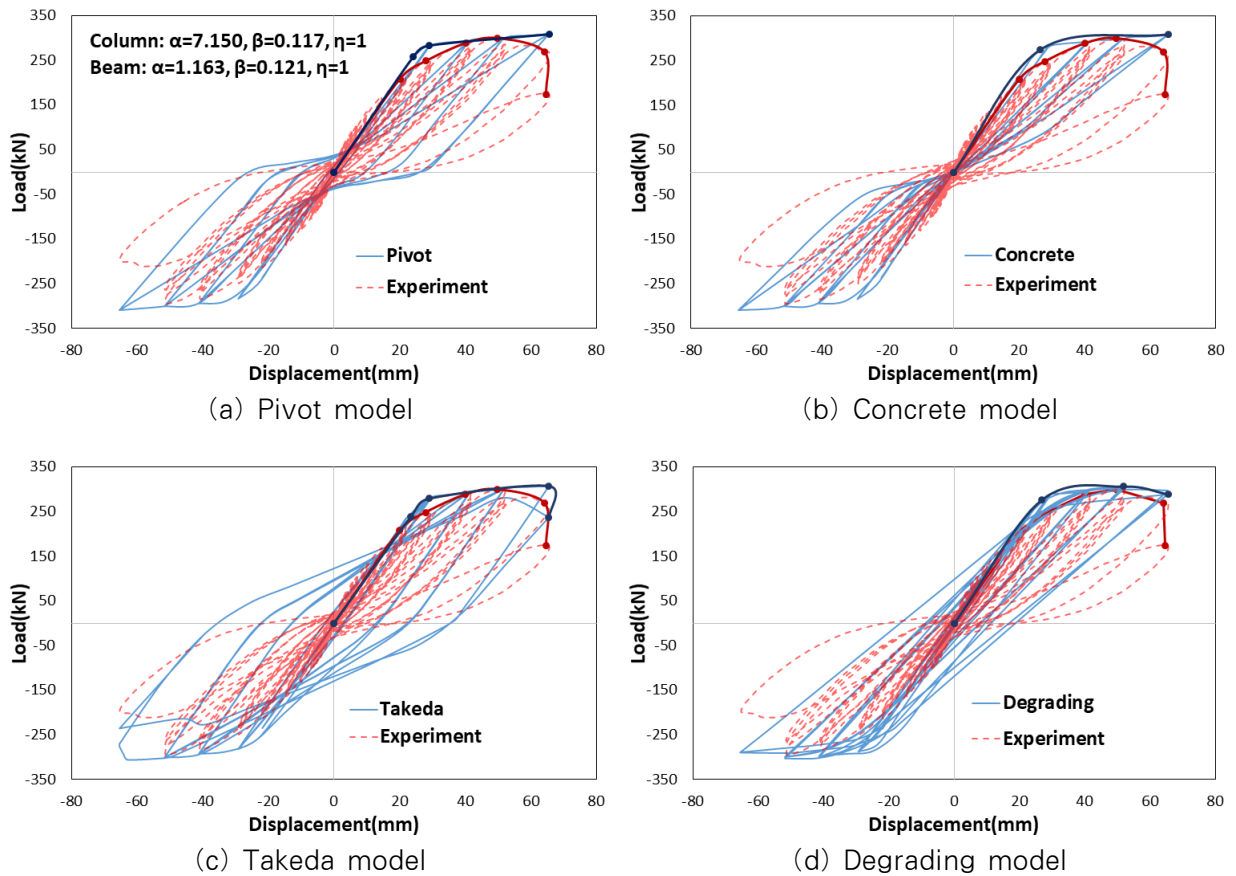


〈Fig. 2〉 Details of experiment (Frame 1)

통한 초기긴장력이 도입되었고 이를 반영하여 $\alpha = 1.163$, $\beta = 0.121$ 이 보에 입력되었다.

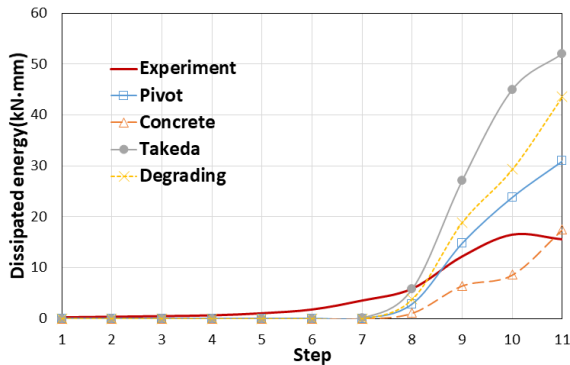
〈Fig. 3〉은 각 이력모델을 적용한 해석 및 실험에 따른 하중-변위 관계를 나타낸 것이며, 포락선이 함께 표현되어 있다. 실험과 해석결과의 포락선은 전반적으로 유사하게 나타났으나, 해석결과는 가력 후반부의 강도저하 특성을 정교하게 나타내지 못하는 결과를 보였다.

〈Fig. 4〉는 가력 단계별 에너지 소산량을 보여준다. Takeda 및 Degrading 모델을 적용한 경우 진폭이 큰 가력 후반부에 실험결과보다 과도하게 큰 에너지 소산량을 나타냈다. 반면, Concrete 모델의 경우 전반적으로 보수적인 경향을 보였고, Pivot 모델을 적용한 경우가 실험결과에 가장 근사한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 〈Fig. 5〉의 누적 소산에너지(E_t)에서도 확인되는데,

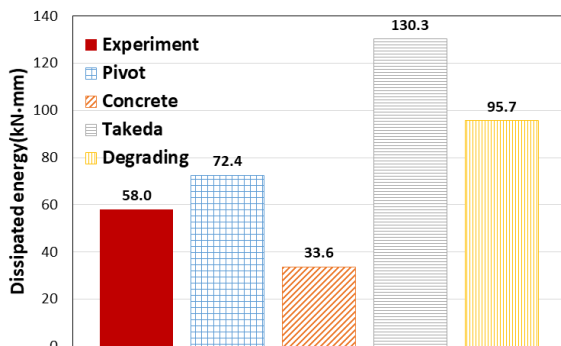


〈Fig. 3〉 Load-Displacement curves (Frame 1)

Takeda 및 Degrading 모델의 E_i 는 각각 실험값 대비 124.6%, 65.0% 높았고, Concrete 모델의 경우 42.1% 낮게 나타났다. Pivot 모델의 경우 실험값과 24.8%의 오차를 보였지만, 평가된 모델 중 E_i 를 가장 근사하게 예측하였다. 이는 다른 이력모델과 다르게 변수 β 의 영향으로 핀칭을 반영한 손상 거동이 나타났기 때문으로 판단된다. 한편, Degrading 모델과 Concrete 모델은 에너지 소산과 관련된 변수에 대하여 기본값 대비 각각 상대적으로 낮게, 그리고 높게 입력하였음에도 E_i 에서 큰 차이가 발생하였다. 두 이력모델에서는 부재 상황을 반영한 변수를 직접적으로 산정하지 않고 계수를 이용하여 에너지 소산특성을 조정하게 된다. 이러한 간접적인 방식은 본 해석에서 부재의 저하거동을 근사하게 예측하지 못하는 결과를 보였고, 다양한 조건을 가진 RC 부재의 거동을 미리 예측하는 데에도 제한사항이 될 수 있을 것으로 판단된다.



〈Fig. 4〉 Energy dissipation at each step



〈Fig. 5〉 Total dissipated energy

〈Table 1〉 Maximum strength and initial stiffness (Frame 1)

Category	Maximum strength (kN)	Initial stiffness (kN/mm)
Experiment	300.6	17.7
Pivot	308.7	10.8
Concrete	309.0	10.8
Takeda	307.8	10.8
Degrading	305.9	10.8

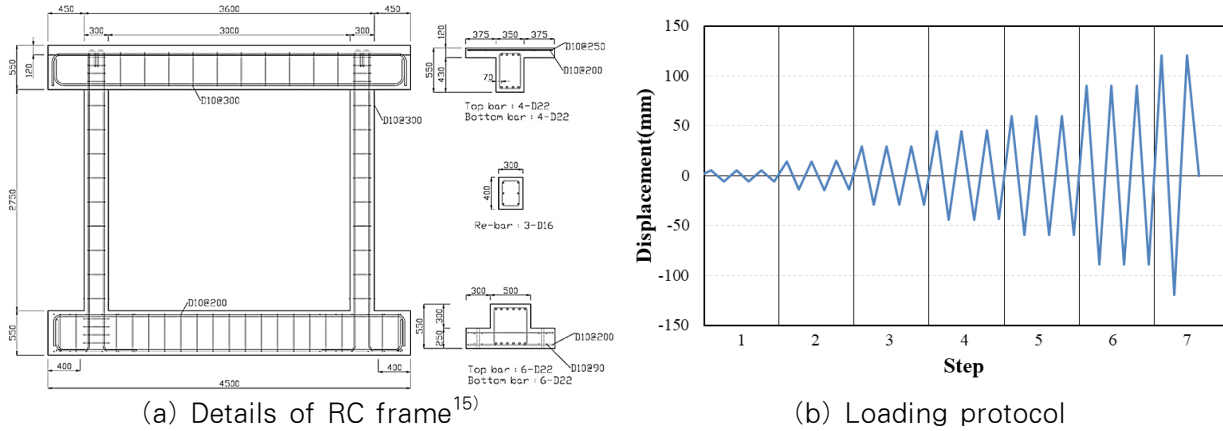
〈Table 1〉은 Frame 1에 대한 최대강도(P_{max})와 초기강성(K_i)을 보여준다. 각 이력모델을 적용했을 때의 P_{max} 는 1.0% 이내의 매우 근소한 차이만을 나타냈고, 실험값과의 오차도 최대 2.8% 이내로 해석결과는 골조의 P_{max} 를 매우 정확하게 예측하는 결과를 보였다. K_i 의 경우 부재의 항복 전 탄성거동에 대한 결과로서 모든 해석모델에서 동일한 값을 보였다. 그러나 실험값에 대비해서는 40% 가량 과소평가되는 결과를 보였는데, 이는 기준에 따라 적용된 유효강성이 본 실험체의 실제 상황에 비해 지나치게 낮은 강성을 반영한 결과로 판단된다.

이상 기동 축력이 없는 Frame 1에 대한 거동특성 비교로부터, 적용 이력모델 사이에 확연한 차이를 나타내는 에너지 소산의 측면에서 실험결과가 차이가 작게 나타난 Pivot, Concrete, Degrading 및 Takeda 모델의 순으로 실제 거동과 유사한 것으로 평가된다.

3.2 기동 축력이 재하된 골조 (Frame 2)

Frame 2는 기동 축력이 재하된 경우로 Oh et al.(2019)의 비내진 상제로 설계된 기존 RC 골조 실험체¹⁵⁾를 대상으로 하였다. 골조의 기둥과 보의 순길이는 각각 2.75m, 3.3m이다. 기둥의 피철근은 300mm 간격으로 배근되었고, 90도 갈고리의 비내진 상세를 가진다. 골조 상단에는 변위제어에 의한 점증 반복 수평하중이 재하되었고, 추가적으로 각 기둥에 내력의 약 5%에 해당하는 축하중이 가력되었다. 〈Fig. 6〉은 골조의 형상 및 배근 상세와 수평방향의 가력프로그램을 나타낸 것이다.

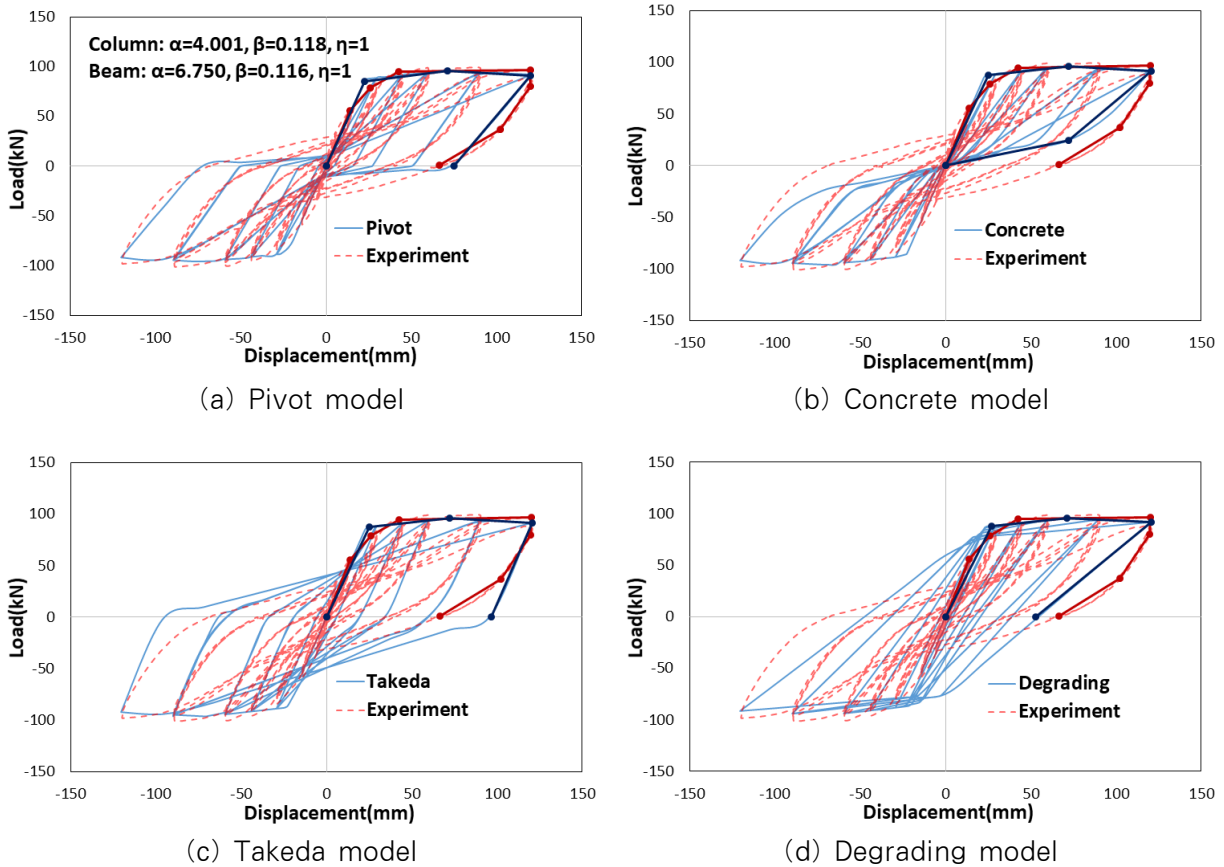
Pivot 모델에서 변수 α 와 β 는 Frame 1에서와 동일한 방식으로 산정하였고, 기둥의 경우 $\alpha = 4.001$, $\beta = 0.118$, 보의 경우 $\alpha = 6.750$, $\beta = 0.116$ 으로 각 부재에 입력되었다.



〈Fig. 6〉 Details of experiment (Frame 2)

〈Fig. 7〉은 Frame 2에 대하여 각 이력모델을 사용한 해석 및 실험에 따른 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. Frame 1에서와 다르게 전반적으로 실험과 해석결과의 포락선이 가력 후반부까지 유사하게 나타났다. 〈Fig. 8〉은 각 이력모델에 대한 가력 단계별 에너지 소산량을 보여주는데, 대부분 Frame 1과 유사한 양상을 보였다.

Takeda 및 Degrading 모델을 적용한 경우 가력 중반부에 들어서면서 에너지 소산량을 실험결과보다 크게 평가한 반면, Concrete 모델의 경우 가력 초기부터 종료 시점까지 실험결과보다 낮은 보수적 경향을 나타냈다. Pivot 모델이 적용된 경우 에너지 소산량이 실험결과에 가장 가까웠지만, Frame 1에서와 다르게 가력 중반 단



〈Fig. 7〉 Load-Displacement curves (Frame 2)

계에서의 소산량이 실험값보다 높게 나타났다.

〈Fig. 9〉는 E_t 를 막대그래프로 표현한 것이다. Takeda 및 Degrading 모델의 경우 각각 실험값 대비 69.5%와 56.2%로 높은 수치를 보이며 여전히 매우 비보수적인 경향을 나타냈다. Concrete 모델의 E_t 는 실험값의 50%에 불과했으며, Frame 1에서처럼 에너지 소산이 지나치게 낮은 것으로 확인되었다. Pivot 모델의 경우 실험값 대비 4.0% 작은 E_t 를 보이며 적용된 이력모델 중 실제 거동에 가장 가까운 것으로 평가되었다.

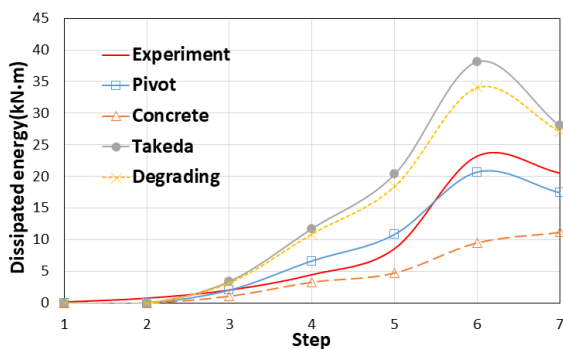
Frame 2에 대한 P_{max} 및 K_i 는 〈Table 2〉에 요약되어 있다. P_{max} 는 Concrete 모델에서 0.1kN 높게 나타났을 뿐 모든 이력모델에서 거의 동일한 값을 나타냈다. 실험결과와의 오차도 5.4% 이내로 해석결과는 골조의 최대강도를 보수적인 측면에서 근사하게 예측하였다. K_i 의 경우 Frame 1에서와 동일하게 부재의 항복 전 탄성 상태에서 산정된 결과로서 모든 해석모델에서 일치하였지만, 실험값에 대비해서는 25.7%에 해당하는 낮은 값을 나타냈다. 부재의 유효강성을 고려하기 위해 Frame 2에 적용된 강성저감 비율은 Frame 1에서와 차

〈Table 2〉 Maximum strength and initial stiffness (Frame 2)

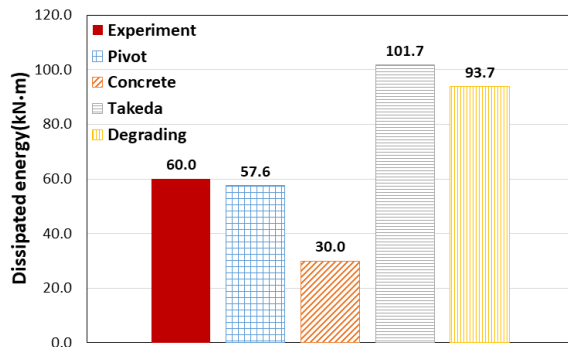
Category	Maximum strength (kN)	Initial stiffness (kN/mm)
Experiment	101.2	14.8
Pivot	95.9	3.8
Concrete	95.9	3.8
Takeda	96.0	3.8
Degrading	95.9	3.8

이가 없었다. 그러나 Frame 2에는 내력의 약 5%에 해당하는 축하중이 기동에 재하되어 실험 골조의 강성을 증가시켰을 것으로 예상되며, 이로써 해석결과와 실험값의 차이가 Frame 1에 비해서 크게 나타난 것으로 분석된다.

기동 축력이 재하된 Frame 2에 대한 거동특성 비교로부터, 적용된 이력모델 사이에서 뚜렷한 차이를 보이는 에너지 소산 측면에서 실험결과와의 차이가 작게 나타난 Pivot, Concrete, Degrading 및 Takeda 모델의 순으로 실제 거동에 근접한 것으로 평가된다. 이러한 순서는 3.1절의 Frame 1에 대한 결과와 동일했다.



〈Fig. 8〉 Energy dissipation at each step



〈Fig. 9〉 Total dissipated energy

3.3 논의

앞선 3.1 및 3.2절에서 비내진 상세를 갖는 기존 RC 골조인 Frame 1과 Frame 2의 실험결과를 각각의 이력모델이 적용된 해석결과와 비교 및 분석하였다. 하중-변위 관계, 에너지 소산, 최대강도(P_{max}) 및 초기강성(K_i)에 대한 거동특성을 비교한 결과, 각 이력모델들 사이에서 가장 뚜렷하게 차이 나는 것은 에너지 소산이었다.

2가지 경우 모두 Pivot 모델을 적용했을 때의 가력 단계별 에너지 소산량과 누적 소산에너지(E_t)가 실험결과에 가장 근사한 수치로 나타났다. 이로부터 Pivot 모델이 보-기동으로 구성된 기존 골조 구조물의 에너지 소산특성을 잘 표현할 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히 기동에 축하중이 재하되었던 Frame 2의 경우 축하중이 없었던 Frame 1과 비교할 때 하중-변위 관계에서 가력 후반부의 강도저하 특성을 적절히 나타내었다. 이러한 차이가 발생한 것은 Pivot 모델의 적용에서 설정이 필요한 변수에 대하여 축력이 없는 기동 부재에 대한 검증이 부족하기 때문으로 판단되었다. 따라서 해당 부분에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

한편 Pivot 모델을 적용하기 위해서는 부재의 배근 상세와 작용하는 축력을 고려하여 관련 변수를 미리 산정해야 하므로 구성 부재의 수가 많은 구조물에서는 해석모델의 작성 시간 및 난이도가 증가할 수 있다. 따라서 규모가 크거나 복잡한 구조물을 대상으로도 Concrete 및 Takeda 모델과 같이 추가 변수 설정이 단순하거나 필요하지 않은 이력모델과 대비한 Pivot 모델의 결과 신뢰성 및 적용성이 추가적으로 검토될 필요가 있을 것이다.

Pivot 모델 다음으로는 Concrete 모델의 경우가 에너지 소산의 관점에서 실험값에 근접했다. 그러나 핀칭이 과도하게 나타나 하중-변위 곡선으로 둘러싸인 면적이 실험결과에 비해 작았고, E_s 를 실험값보다 40~50% 가량 낮게 평가하였다. 반면 Degrading 및 Takeda 모델을 적용한 경우 핀칭 효과가 실제보다 낮은 수준으로 구현되어 실험결과 대비 E_s 를 최소 50%에서 최대 125% 까지 높게 평가하는 비보수적 경향을 보였다.

Frame 1과 Frame 2의 결과를 비교해 보면 골조 기둥에 축하중이 재하된 경우(Frame 2)의 하중-변위 관계에서 가력 후반부까지 강도저하 특성이 보다 잘 나타나 이력모델이 적용된 해석결과와 실험결과의 차이가 작게 발생하였다. 이러한 양상은 각 이력모델이 대부분 축력이 존재하였던 부재들에 대한 검증을 바탕으로 제안되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 비내진 RC 골조를 대상으로 수행된 기동 축력 유무에 따른 2가지 실험사례를 바탕으로 해석적인 연구를 수행하였다. 보와 기동 부재에 대한 이력모델을 달리한 해석을 반복 수행하였고, 이를 통해서 얻어진 하중-변위 관계, 에너지 소산, 최대강도 및 초기강성을 실험결과와 비교 및 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 각 이력모델이 적용된 해석결과와 실험결과와의 비교에서 가장 뚜렷한 차이를 보인 것은 에너지 소산이었다. 이러한 에너지 소산 측면에서 실험결과에 근사한 거동을 나타낸 이력모델은 Pivot, Concrete, Degrading 및 Takeda 모델의 순이었다.

2) Pivot 모델이 적용된 경우 보-기둥 형식인 기존

골조의 에너지 소산특성을 적절히 나타내는 것이 확인되었다. 그러나 Frame 1과 Frame 2의 결과를 비교하였을 때 하중-변위 관계에서 강도저하 특성의 반영이 다르게 나타났다. 후자의 경우 실험결과에 더 근사했던 것으로부터, 기동 축력이 없거나 상대적으로 작은 경우에 대한 변수 산정에 제한사항이 있는 것으로 평가되며, 이에 대한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

3) Pivot 모델 다음으로는 에너지 소산 측면에서 Concrete 모델이 실험결과에 근접한 거동을 보였다. 그러나 과도한 핀칭 때문에 하중-변위 곡선으로 구성되는 면적이 실험결과에 비해 작게 나타나 해석모델의 에너지 소산 능력을 낮게 평가하는 경향이 확인되었다. 이와 반대로 Degrading 및 Takeda 모델의 경우 핀칭이 다소 적게 구현되어 비보수적으로 높게 에너지가 소산되었음을 확인할 수 있었다.

4) 각 이력모델이 적용된 해석결과와 실험결과의 비교에서 골조 기둥에 축하중이 재하된 여부에 따라 거동 특성 중 하중-변위 관계에서 다른 양상이 확인되었다. 특히 기동 축하중이 존재한 Frame 2의 경우 가력 후반부까지 강도저하 특성이 잘 반영되었다. 이러한 양상이 나타난 것은 이력모델 개발과정에서 축력이 존재하는 부재에 대하여 주로 검증이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019R1C1C1005372). 또한 이 논문은 2018학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(C-D-2018-0567).

References

1. Jee, H. W., & Han, S. W., "Prediction of Peak Ground Acceleration Generated from the 2017 Pohang Earthquake", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.22, No.3, pp.211~217, 2018, doi: 10.5000/EESK.2018.22.3.211

2. Korea Meteorological Administration, "9.12 Earthquake Damage Viewed from the Site", Earthquake Focus, Vol.7, No.3, pp.12~15, 2016
 3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "KDS 41 17 00", MOLIT, 2019.
 4. Yu, E., Park, H. G., & Park, J. H., "Main Contents of Building Seismic Design Code (KDS 41 17 00)", Magazine of the Korean Society of Steel Construction, Vol.31, No.3, pp.11~16, 2019
 5. Yu, M. H. (2008). Nonlinear Behavior of Structures including Hysteretic Characteristic (Master's dissertation). Dong-a University, Republic of Korea
 6. Kim, J. U., Kang, P. D., Jun, D. H., & Lim, Y. K., "Comparison of Hysteretic Models for Nonlinear Seismic Analysis of Reinforced Concrete Structures", Journal of the regional association of architectural institute of korea, Vol.11, No.2, pp.203~210, 2009
 7. Shin, J. W., Lee, K. H., & Jeong, S. H., "Seismic Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame with Various Hysteresis Connection Models", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.25, No.11, pp.19~27, 2009
 8. Je, J. H., Kim, J. S., & Yoon, T. H., "Inelastic Behavior of Standard School Building according to Hysteresis Models", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.10, No.4, pp.838~845, 2009, doi: 10.5762/KAIS.2009.10.4.838
 9. Son, J. K. & Lee, C. H. (2020). Cyclic Behavior of Non-seismic Reinforced Concrete Plane Frames According to Hysteresis Model (in press). Proceedings of the Korean Association for Spatial Structures 2020 Conference, Republic of Korea, Vol.16, No.1, pp.70~71
 10. Son, J. K., & Lee, C. H. (2020). Effect of Hysteresis Models on Cyclic Behavior of Non-seismically Designed RC Frames. Program Book of 2020 Conference of the Korean Society for Advanced Composite Structures, pp.69
 11. CSI (Computers & Structures, Inc.), "CSI Analysis Reference Manual", ETABS version 17, CSI, 2017.
 12. Dowell, R. K., Seible, F., & Wilson, E. L., "Pivot Hysteresis Model for Reinforced Concrete Members", ACI Structural Journal, Vol.95, No.5, pp.607~617, 1998
 13. Sharma, A., Eligehausen, R., & Reddy, G. R., "Pivot Hysteresis Model Parameters for Reinforced Concrete Columns, Joints, and Structures", ACI Structural Journal, Vol.110, No.2, pp.217~227, 2013
 14. Lee, C. H., Ryu, J., Kim, D. H., & Ju, Y. K., "Improving seismic performance of non-ductile reinforced concrete frames through the combined behavior of friction and metallic dampers", Engineering Structures, Vol.172, pp.304~320, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.045
 15. Oh, S. H., Choi, S. M., Ryu, H. S., Kim, Y. J., & Choi, K. Y., "Static Loading Test for Performance Evaluation of Dual-Frame Type Seismic Retrofit System", Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol.10, No.4, pp.38~47, 2019, doi: 10.11004/kosacs.2019.10.4.038
- Received : July 22, 2020
 - Revised : August 25, 2020
 - Accepted : August 28, 2020