

# RNN 모델을 이용한 스마트 중간층 면진시스템의 제어성능 평가

김현수

선문대학교 건축사회환경공학부

## Control Performance Evaluation of Smart Mid-story Isolation System with RNN Model

Hyun-Su Kim

Division of Architecture, Architectural and Civil Engineering, Sunmoon University

**요약** 본 논문에서는 RNN 순환 신경망 (Recurrent Neural Network) 모델을 사용하여 스마트 중간층 면진 시스템의 지진 응답 제어 성능을 수치 해석을 통하여 검토하였다. 이를 위해서 지진 하중을 받는 건물의 동적 지진 응답 예측을 위한 RNN 모델을 개발하였다. 보다 실제적인 연구를 위하여 중간층 면진 시스템이 설치된 실존하는 건물인 시오도메스미토모 건물을 예제 구조물로 선택하였다. 스마트 중간층 면진 시스템은 기존의 납 댐퍼를 대신하여 MR (Magnetorheological) 댐퍼를 사용하여 구성하였다. 그 외 고무 베어링이나 강재 댐퍼는 그대로 사용 하였다. 수치 해석을 통하여 개발된 RNN 모델이 기존의 FEM (Finite Element Method) 모델과 비교해서 매우 정확한 응답을 예측하는 것을 확인할 수 있었다. RNN 모델을 사용하면 자유도가 많은 FEM 모델을 사용한 경우에 비하여 해석 시간을 대폭 줄일 수 있다. 개발된 RNN 모델을 사용한 수치 해석 결과 스마트 중간층 면진 시스템이 기존의 수동 중간층 면진 시스템에 비하여 구조물의 지진 응답을 대폭 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

**Abstract** The seismic response reduction capacity of a smart mid-story isolation system was investigated using the RNN model in this study. For this purpose, an RNN model was developed to make a dynamic response prediction of building structures subjected to seismic loads. An existing tall building with a mid-story isolation system was selected as an example structure for realistic research. A smart mid-story isolation system was comprised of an MR damper instead of existing lead dampers. The RNN model predicted the seismic responses accurately compared to those of the FEM model. The simulation time of the RNN model can be reduced significantly compared to the FEM model. After the numerical simulations, the smart mid-story isolation system could effectively reduce the seismic responses of the existing building compared to the conventional mid-story isolation system.

**Keywords** : Smart Mid-Story Isolation System, Recurrent Neural Network Model, Fuzzy Logic Controller, Seismic Response Reduction, Soft-Computing

### 1. 서론

최근 구조공학 분야에서도 인공지능 및 첨단 제어공학을 적용한 연구가 다양하게 수행되고 있다[1-3]. 인공지능분야에서 각광을 받고 있는 기계학습 (Machine

Learning)이 구조공학분야에 구조해석 및 설계, 설계자 동화와 최적화, 구조제어, 구조시스템 식별, 구조 상태평가 및 모니터링 등 매우 다양한 형태로 적용되고 있다. 본 연구에서는 스마트 구조제어시스템 개발 과정에서 반드시 필요한 수치해석 및 시뮬레이션 작업의 효율성을

본 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호: NRF-2019R1A2C1002385)

\*Corresponding Author : Hyun-Su Kim(Sunmoon Univ.)

email: hskim72@sunmoon.ac.kr

Received September 30, 2019

Accepted January 3, 2020

Revised November 11, 2019

Published January 31, 2020

개선하기 위해서 구조 시스템 식별 및 구조제어 분야에 중점을 두고 연구를 수행하였다. 고층건물의 동적응답을 저감시키기 위한 스마트 구조시스템 설계 및 제어알고리즘 개발과정에서 일반적으로 유한요소해석모델을 사용하여 시간이력해석을 수행하게 된다. 이때 많은 자유도로 구성된 유한요소해석모델을 사용하면 해석시간이 많이 소요되어 시스템 및 제어알고리즘 설계의 최적화 과정에서 미처 탐색하지 못한 영역이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 인공신경망기법 중 시간이력 응답예측에 우수한 성능을 보이는 순환신경망(Recurrent Neural Network, 이하 RNN)을 이용해 구조물의 지진응답 예측모델을 개발하여 정확성을 검증하였다.

스마트 구조시스템이 적용된 고층 예제구조물을 작성하기 위하여 실제 구조물에서 중간층 면진시스템이 사용된 시모도메 스피도모 건물[4]을 선택하였다. 기존에 중간층 면진시스템을 구성하는 납댐퍼를 대신하여 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 구조시스템을 구성하였다. 개발한 RNN 예측모델을 고층건물의 스마트 중간층 면진시스템 개발에 적용하여 그 효용성을 검토하였다.

## 2. RNN 지진응답 예측모델 개발

### 2.1 LSTM 네트워크 RNN 모델

스마트 중간층 면진시스템을 구성하기 위해서 본 연구는 MR (magnetorheological) 감쇠기를 사용하였다. MR 감쇠기와 같은 스마트 준능동 제어장치의 동적거동을 모사하기 위한 소프트웨어 컴퓨팅 기법은 지속적으로 개발되어 왔다. 그러나 스마트 구조제어시스템이 설치된 전체 고층건물의 동적거동을 예측할 수 있는 인공지능 기반 모델의 개발에 대한 연구는 아직까지 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 인공지능 기반의 스마트 구조제어시스템이 설치된 고층건물 지진응답 시간이력 예측모델을 개발하였다. 다양한 딥러닝 (Deep Learning) 기법 중에서 RNN은 시계열 데이터 (Time-Series Data)를 다루는데 매우 효과적이라고 알려져 있다. RNN은 입력층, 은닉층, 출력층으로 연결되어 있고 이전 스텝의 출력값이 다시 입력값으로 연결되는 순환 구조를 가지고 있어서 순환신경망이라고 한다. RNN 모델의 정확성을 높이기 위해서는 매 시점에 심층 신경망 (Deep Neural Network)을 사용하는 것이 필요하다. 그러나 이러한 경우 오래 전의 데이터에 의한 기울기 값이 소실되는 문제

(Vanishing Gradient Problem)로 학습이 어려워진다. 이를 해결하는 대표적인 모델로 Fig. 1에 나타난 장단기 메모리 (Long-Short Term Memory, 이하 LSTM) 방식의 순환신경망[5]이 제안되었고 본 연구에서는 LSTM 방식의 RNN을 사용하였다. LSTM 신경망은 상대적으로 긴 시계열 데이터를 관리하는데 효과적이라고 알려져 있다.

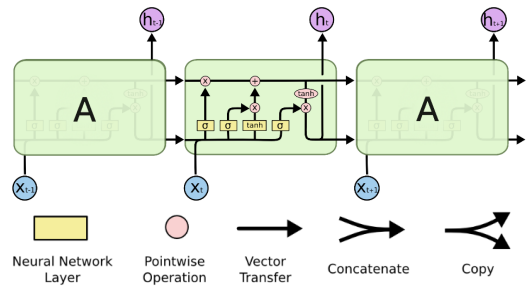


Fig. 1. The repeating module in an LSTM[5]

본 연구에서 개발하는 순환신경망 예측모델은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 4개의 입력과 2개의 출력변수를 가진다. 지반가속도, 지반속도, 지반변위 및 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 입력변수로 선택하였다. RNN 모델 입력의 수가 증가하면 정확도가 증가하므로 지진하중을 세 가지 타입으로 사용하였다. 구조물의 안전성을 대표하는 면진층 변위와 건물의 최대 층간변위를 두 개의 출력변수로 선택하였다. 특정한 지진하중을 선택하면 선택한 지진하중에만 과적합된 (Over Fitting) 순환신경망 모델이 생성될 수 있으므로 백색파를 지진하중의 특성을 갖도록 필터링한 3,000초의 인공지반가속도를 작성하였다. 작성된 인공 지반가속도를 사용하여 순환신경망 모델을 학습하고 학습에 사용되지 않은 지반가속도를 사용하여 정확도를 검증하였다.

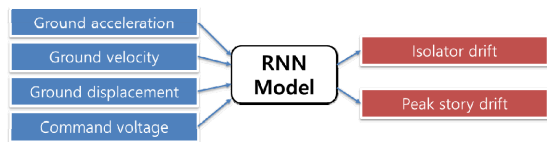


Fig. 2. Input and output of RNN model

### 2.2 RNN 예측모델의 지진응답 예측 성능

개발된 RNN 지진응답 예측모델의 정확성을 검증하기 위하여 유한요소해석 (Finite Element Method, 이하 FEM) 모델과 비교하였다. 예제구조물을 나타내기 위한 FEM 모델의 강성, 감쇠 및 질량 값은 선행연구[4]에서

제시된 값을 사용하였다. LSTM 기반 RNN 모델을 개발하기 위해서 학습데이터 시퀀스 길이를 200으로 하였고 히든 레이어를 40개로 두었다. 학습 속도 (Learning Rate)를 0.01로 하였고 학습 반복횟수는 3,000으로 하였다. 인공지반가속도로써 작성한 3,000초의 백색파 중 80%인 2,400초는 RNN 모델의 학습을 위해서 사용하였고 학습에 사용하지 않은 나머지 600초는 RNN 모델의 정확성 검증을 위해 사용하였다. 학습에 사용하지 않은 데이터를 RNN 모델의 검증에 사용함으로써 정확성 평가의 신뢰도를 높였다.

두 모델의 최대 층간변위 (11층) 및 면진층변위 시간이력을 그림 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 RNN 모델이 FEM모델과 비교하여 매우 정확한 응답을 나타내었다. 두 모델간의 RMS (Root Mean Square) 에러는 0.024952로써 매우 작은 값으로 나타났다.

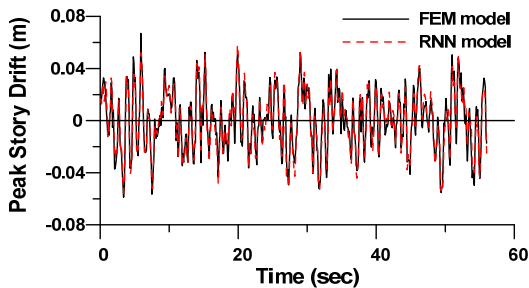


Fig. 3. Inter-story drift time histories

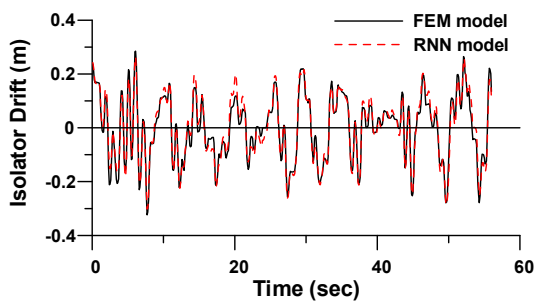


Fig. 4. Isolator drift time histories

이와 같이 개발된 RNN 지진응답 예측모델을 사용하면 FEM 해석모델을 사용하는 수치해석시간을 대폭 줄일 수 있기 때문에 스마트 구조제어시스템 및 제어알고리즘의 설계를 매우 효율적으로 수행할 수 있다.

### 3. RNN 모델을 이용한 중간층 면진 스마트 제어시스템 개발

#### 3.1 스마트 중간층 면진시스템의 최적설계

본 연구에서 예제구조물로 선택한 시오도메 스미토모 건물의 높이는 126.1m이고 일반 층의 층고는 4.2m이다 [4]. 건물은 25층의 철골조 구조물이고 지하층은 3층으로 구성되어 있다. 지진격리층은 11층과 12층 사이에 위치하고 있다. 실제 건물의 지진격리층은 41개의 적층 고무면진장치와 100개의 납 댐퍼 및 14개의 강재 댐퍼로 구성되어 있다. 본 연구에서는 납댐퍼를 대신하여 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 중간층 면진시스템을 구성하였다.

지진응답 평가를 위한 인공지진하중을 작성하기 위하여 강진지역의 특성을 나타내는 LA지역을 기반으로 IBC2012 설계기준에 근거한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. 이를 기반으로 한 인공지반가속도를 생성하기 위해서 선행연구[6]에서 사용한 역사지진의 지진동 파형과 동일한 위상특성을 가지면서 설계용 가속도 응답스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진을 작성하는 방법을 사용하였다. 인공지진 작성을 위해서 구조물의 지진응답 거동을 분석할 때 널리 사용되고 있는 El Centro (1940, NS) 지진하중을 사용하였다. 이러한 방법으로 작성한 인공지진동의 가속도 시간이력을 Fig. 5에 나타내었다.

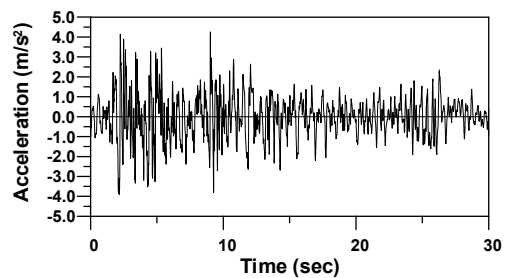


Fig. 5. Artificial ground acceleration

스마트 중간층 면진시스템의 제어성능을 효과적으로 발휘하기 위해서는 최적의 제어 알고리즘을 개발하는 것이 필요하다. 일반적인 스마트 기초 면진시스템은 지반에 대하여 상부구조물의 응답을 저감시키는 것이 가장 큰 목적이므로 준능동 제어알고리즘 중에서 비교적 간단하고 좋은 제어성능을 나타내는 스카이훅 (Sky-Hook) 제

어알고리즘이 사용될 수 있다. 그러나 이 알고리즘은 감쇠기의 비선형성을 고려하지 못하여 감쇠기에 입력되는 전압을 최대값 또는 최소값으로만 결정한다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 본 연구에서는 복잡하고 불확실하며 애매한 조건아래서 적용되어 좋은 성능을 나타내는 퍼지논리제어 (Fuzzy Logic Control, 이하 FLC)를 사용하였다. 퍼지논리제어는 고유의 견실성과 비선형 및 불확실성을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 스마트 제어시스템을 제어하는데 용이하다. 퍼지논리 제어알고리즘의 개발 과정에서 입력 및 출력 변수를 어떤 값으로 선택하느냐에 따라서 제어성능이 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 구조물의 안전성에 큰 영향을 미치는 면진층 변위와 최대 층간변위가 발생하는 11층의 층간변위를 입력변수로 선택하였고 명령전압을 출력변수로 선택하였다. 퍼지논리제어기에서 입력과 출력을 표현하기 위하여 가우스 소속함수(membership function)를 사용하였다. 가우스 소속함수의 형태는 2개의 파라미터( $c$ 와  $\sigma$ )를 정의함으로써 결정된다. 여기서  $c$ 는 중앙부의 위치,  $\sigma$ 는 표준편차를 나타낸다. 이 두 가지의 파라미터를 이용하여 퍼지규칙을 표현하는 방법을 Fig. 6에 나타내었다.

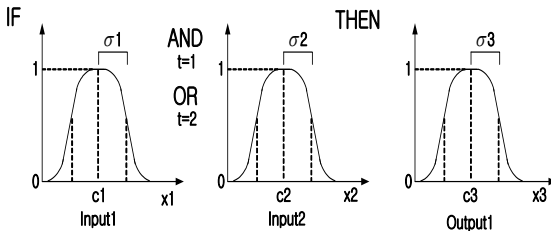


Fig. 6. Fuzzy rule with gaussian membership function

그림에 나타난 바와 같이 하나의 규칙은 6개의 변수로 표현되고 퍼지논리 제어알고리즘을 개발하기 위해 20개의 규칙을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기 모델은 0 volt에서 5 volt까지 조절할 수 있으므로 퍼지 제어기의 출력도 0-5 volt 사이의 명령전압으로 하였다. 예제구조물인 시오도메 스키토모 건물을 대상으로 설계한 스마트 중간층 면진시스템의 MR 감쇠기 최적 용량을 파라미터 연구를 통해 검토하였고 1,000 kN 용량의 감쇠기를 27개 사용하여 27,000 kN으로 결정하였다. 일반적으로 면진시스템의 설계목적은 면진된 상부구조물의 지진응답을 효율적으로 저감시키는데 있다. 그런데 Northridge 지진 (1994) 이후에 면진층의 과도한 변위에 의한 구조물의 파괴가 다수 보고되어서 면진구조물

뿐만 아니라 면진층의 변위도 중요한 설계변수로 고려되고 있다. 따라서 스마트 중간층 면진시스템의 설계목적도 면진층의 최대변위응답을 줄이는 것과 지진하중에 의한 건물의 최대 층간변위비를 허용치 (1.5%) 이하로 줄이는 것으로 나눌 수 있다. 그런데 면진층 변위와 층간변위비 사이에는 서로 상치관계가 존재하므로 스마트 중간층 면진시스템의 설계는 다목적 최적화 문제로 귀결된다. 본 연구에서는 공학분야에 널리 사용되고 있는 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) 다목적 유전자알고리즘[7]을 이용하여 퍼지제어기를 최적화하였다. 목적함수는 최대 면진층변위(J1) 및 최대 층간변위(J2)를 줄이는 것으로 하였고 각 응답은 실제 구조물의 값에 대하여 정규화하여 나타내었다.

### 3.2 스마트 중간 면진시스템의 제어성능 평가

본 연구에서 사용한 유전자알고리즘인 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. Fig. 5에 나타난 인공지진하중을 사용하여 수치해석을 수행하였으며 수치해석 시간간격은 0.005초를 사용하여 퍼지논리 제어기의 진동제어성능을 평가하였다. 다목적 최적화 작업을 수행한 결과인 파레토 최적해집합을 Fig. 7에 나타내었다. 또한 파레토 최적해 집합 중 최대 면진층변위와 최대 층간변위를 가장 효율적으로 제어하는 알고리즘을 각각 선택하여 FLC1과 FLC2로 나타내었고 두 응답을 모두 적절하게 제어하는 알고리즘을 FLC3로 표현하였다.

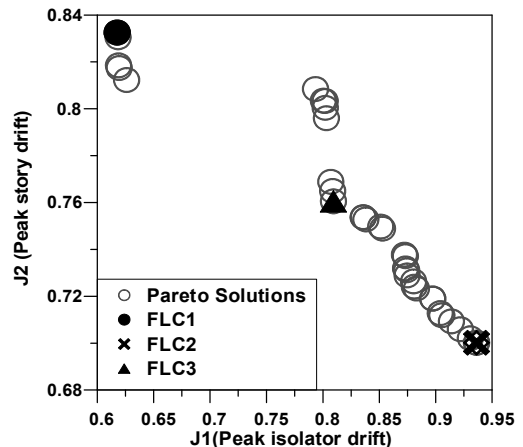


Fig. 7. Pareto optimal solutions

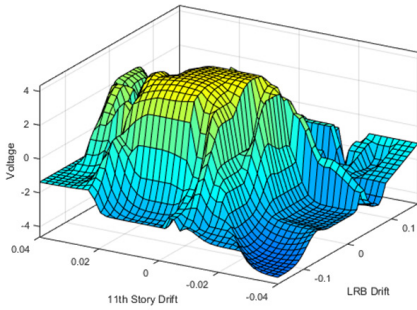


Fig. 8. Rule surface of FLC1

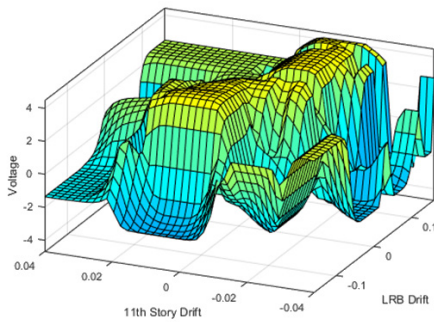


Fig. 9. Rule surface of FLC2

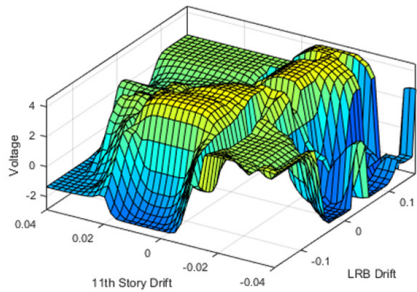


Fig. 10. Rule surface of FLC3

동일한 스마트 중간층 면진시스템에 대하여 제어알고리즘만 변경해도 제어성능이 크게 달라진다. 선택한 제어기 3개의 규칙평면 (Rule Surface)를 Figs. 8-10에 나타내었다. 각 제어기마다 형태가 다르고 면진층변위 입력의 범위는  $\pm 0.2$  m, 11층 층간변위 입력범위는  $\pm 0.04$  m로 결정하였다. 선택한 제어알고리즘의 스마트 중간층 면진시스템에 대한 제어성능을 비교검토하기 위하여 Table 1에 나타난 3가지 해석모델을 사용하였다. Model1은 중간층 면진시스템이 없는 일반 고층건물이고 Model2는 수동 중간층 면진시스템이 적용된 시오도메 스미모토 건물이다. Model3는 스마트 중간층 면진시

스템이 적용된 모델로서 3개의 제어알고리즘이 적용된다. 3개의 해석모델 및 3개의 제어알고리즘을 적용한 모델을 사용하여 수치해석을 수행한 결과 최대 층간변위 및 면진층변위를 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Description of comparative models

Name	Description
Model1	without mid-story isolation system
Model2	existing Shiodome Sumitomo model
Model3	with smart mid-story isolation system

Table 2. Comparison of seismic responses

Name	Peak story drift	Peak isolator drift
Model1	9.00 cm	-
Model2	4.35 cm	18.17 cm
Model3(FLC1)	3.62 cm	11.22 cm
Model3(FLC2)	3.05 cm	17.01 cm
Model3(FLC3)	3.31 cm	14.70 cm

예제구조물의 최대 층간변위는 층고가 4.8 m로 가장 큰 11층에서 발생하고 허용층간변위는 7.2 cm이다. Table 2에서 볼 수 있듯이 중간층 면진시스템이 적용되지 않은 구조물의 최대 층간변위 9.00 cm에서 수동 중간층 면진시스템을 적용하면 4.35 cm로 약 50% 정도의 응답을 저감시킬 수 있다. 중간층 면진시스템을 사용함으로써 허용 층간변위비 기준을 만족시킬 수 있었다. 스마트 중간층 면진시스템을 이용하면 최대 층간변위를 약 17% ~ 30% 정도 더 저감시킬 수 있는 것을 알 수 있다. Model2의 경우에는 최대 층간변위를 4.35 cm로 저감시키면서 상치되는 면진층변위가 18.17 cm 발생하였다. 이 값을 Model3(FLC1)에서는 최대 층간변위를 17% 저감시키면서 최대 면진층변위를 39%까지 대폭 줄일 수 있었다. Model3의 세 가지 제어알고리즘을 적용한 경우의 층간변위 및 면진층변위 시간이력을 Model2와 함께 Figs.11과 12에 나타내었다. 가장 큰 응답이 발생하는 6초 및 10초 근처에서 각 제어시스템 별 응답의 차이가 많이 발생하였다. 즉 구조물의 피해가 가장 클 것으로 예상되는 최대 응답구간에서 스마트 제어시스템이 상충되는 두 응답을 동시에 효과적으로 제어할 수 있는 것을 확인하였다.

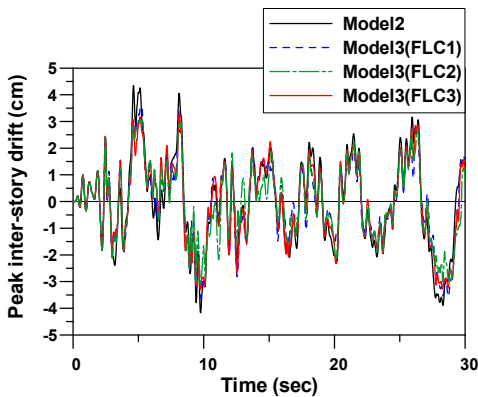


Fig. 11. Peak inter-story drift time histories

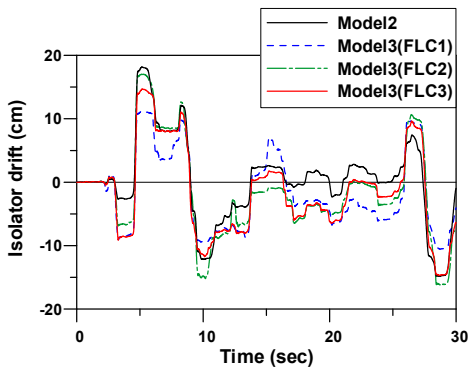


Fig. 12. Peak isolator drift time histories

#### 4. 결론

본 논문에서는 딥러닝 기법 중 시계열 데이터의 예측에 우수한 성능을 보이는 RNN 모델을 사용하여 스마트 중간층 면진시스템이 설치된 고층건물의 지진응답 제어 성능을 평가하였다. 개발한 RNN 모델은 정확해로 가정한 FEM 모델과 비교하여 매우 우수한 정확성을 나타내는 것을 확인하였다. 개발한 RNN 모델을 사용하면 매 시간 스텝마다 동적평형방정식을 계산해야하는 FEM 모델에 비하여 대폭 줄어든 시간으로 비교적 정확한 지진 응답을 예측할 수 있었다. 개발한 RNN 모델을 이용하여 스마트 중간층 면진시스템의 지진응답 제어성능을 검토하였고 기존의 수동 중간층 면진시스템에 비하여 최대 층간변위 및 면진층변위를 동시에 효과적으로 저감시키는 것을 확인하였다.

#### References

- [1] H. Salehi, R. Burgueño, "Emerging artificial intelligence methods in structural engineering", *Engineering Structures*, Vol. 171, pp.170-189, May 2018.
- [2] Q. Wang, J. Wang, X. Huang, L. Zhang, "Semiactive nonsmooth control for building structure with deep learning", *Complexity*, Vol. 2017, Article ID 6406179, Nov. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6406179>
- [3] H. S. Kim, "Multi-objective optimal design using genetic algorithm for semi-active fuzzy control of adjacent buildings", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 1 pp.219-224, 2016.
- [4] T. Sueoka, S. Torii, Y. Tsuneki, "The Application of Response Control Design using Middle-Story Isolation System to High-Rise Building", *Proceeding of The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.
- [5] C. Olah, Understanding LSTM Networks, Available From: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs> (accessed Sep. 20, 2019)
- [6] H. S. Kim, J. W. Kang, "Vibration control performance evaluation of hybrid mid-story isolation system for a tall building", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 18, No. 3 pp.37-44, 2018.
- [7] K. Deb, A. Pratap, S. Agrawal, T. Meyarivan, "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", Technical Report No. 200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2000.

김 현 수(Hyun-Su Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2004년 12월 : Texas A&M University, Department of Civil Engineering (박사후 연구원)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수

<관심분야>

구조해석, 진동제어, 최적설계, 내진설계