

<연구논문>

수치해석 및 진동대 실험을 통한 충전기의 캐비닛내부응답스펙트럼(ICRS) 결과 비교

이상진* · 최인길* · 박동욱** · 임승현**

In-Cabinet Response Spectrum Comparison of Battery Charger by Numerical Analysis and Shaking Table Test

Sangjin Lee*, In-Kil Choi*, Dong-Uk Park** and Seung-Hyun Eem**†

(Received 30 April 2019, Revised 13 June 2019, Accepted 18 June 2019)

ABSTRACT

The seismic capacity of electric cabinets in Nuclear Power Plants (NPPs) should be qualified before installation and be maintained during operation. However it can happen that identical devices cannot be produced for replacement of devices mounted in electric cabinets. In case of when no In-Cabinet Response Spectrum (ICRS) is available for new devices, ICRS can be generated by using Finite Element Analysis (FEA). In this study we investigate structural response and ICRSs of battery charger which is supplied to NPPs. Test results on the battery charger are utilized in this study. The response is measured by accelerometers installed on the housing of the battery charger and local panels in the battery charger. Numerical analysis model is established based on resonant frequency search test results and validated by comparison with 2 types of earthquake testing results. ICRSs produced from the numerical model are compared with measured ICRSs in the seismic tests. Developed analysis model is a simple reduced model and anticipates ICRSs quite well as measured response in the tests overall despite of its structural limitation.

Key Words : Electric cabinet (전기 캐비닛), Nuclear power plant (원자력발전소), ICRS (캐비닛내부응답스펙트럼), Numerical analysis (수치 해석), Battery charger (충전기)

1. 서 론

원자력발전소에 설치되는 안전관련 기기의 경우 내진검증을 수행하여 지진 시 기기의 구조적 안전성과 기능이 유지됨을 입증해야 한다. 원자력발전소의 안전과 관련된 캐비닛형 전기기기 역시 설치 전 내진검증이 요구된다. 캐비닛의 내진검증을 위해 캐비닛이 위치하는 층의 층응답스펙트럼에 상응하는 지진시간

이력을 지진입력값으로 사용하며, 이를 캐비닛에 가하여 기기 전체의 구조적 안전성과 기능이 유지됨을 보인다. 검증을 마친 캐비닛은 설치된 이후에도 유지 관리 되어야 하는데, 수십 년에 달하는 운영기간 동안 캐비닛을 구성하는 부속장치의 교체는 불가피하다.

그러나 부속장치의 재고가 없고 동일한 부품의 생산이 중지되어 더 이상 확보가 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 캐비닛내부응답스펙트럼(ICRS: In-cabinet response spectrum)이 존재하지 않는 경우에는 해당 캐비닛에 새로운 부속장치를 교체한 후 집합체 시험을 하는 방법이 가장 신뢰도가 높겠지만, 운영 중에 있는 원자력발전소의 캐비닛을 제거했다가 다시 설치하는 것은 현실적인 방법이 아니다.

† 책임저자, 한국원자력연구원

E-mail : eemsh@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2183 FAX : (042)868-8256

* 한국원자력연구원

** 국토교통인프라운영원

이와 같은 문제를 해결하는 방법 중 하나로써, ICRS를 예측하는 방법이 있다. EPRI 보고서⁽¹⁾에서는 전기 캐비닛의 ICRS를 예측하기 위해 전기 캐비닛을 3가지로 분류하고 해당 분류 내에서 다양한 크기의 캐비닛에 대한 실험을 수행한 결과를 바탕으로 증폭계수를 계산하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 상당한 보수성을 지니는데, 좀더 정확한 증폭계수 산정을 위한 연구⁽²⁾도 수행되어 왔으며 이외에도 Ritz벡터를 이용한 접근방법도 제시되었다⁽³⁾.

본 연구에서는 수치 해석적 기법을 통해 ICRS를 생성하는 방식으로 예측해보았다. 이를 위해 원자력발전소에 실제 사용되는 캐비닛형 전기기기 중 충전기(battery charger)에 진동대 실험을 수행한 결과⁽⁴⁾를 활용하였으며, 수치 해석 결과로 예측된 ICRS를 실험결과와 비교하였다. 수치 해석을 위해 ANSYS Workbench를 사용하였으며, 실험 결과의 분석과 수치 해석 결과와의 비교를 위해 MATLAB(The Mathworks, Inc.)을 사용하였다.

2. 충전기의 진동대 실험

2.1 실험 조건

원자력발전소에 설치되는 충전기를 진동대에 설치하여 공진탐색시험과 서로 다른 주파수 성분을 가지는 2종의 지진하중에 대해 진동대 실험을 수행하였다.⁽⁴⁾ 진동대 실험에 사용된 충전기의 모습과 계측을 위해 설치된 가속도계의 위치는 Fig. 1과 같다. 충전기를 최대한 사용 중 상태와 유사하게 모사하기 위해, 충전기 하부를 강재 지그에 용접으로 접합한 후 12개의 M24 볼트를 이용하여 지그와 진동대를 고정하였다. 가속도계 중 A1은 진동대에 설치되어 충전기에 입력되는 가속도를 계측하였다. A2~A6은 충전기 외부에 높이를 다르게 설치하였으며, A7~A9는 충전기 내부에 설치하였다. 원자력발전소에 설치되는 캐비닛의 경우 일반적으로 내진검증 결과에 캐비닛 구조물의 응답결과도 포함된다. 본 연구에서도 캐비닛 구조물(충전기 외함)의 응답을 얻기 위해 가속도계 A2-6를 설치하였다. 가속도계 A7-9는 본 연구에서 수치해석적 방법으로 예측한 ICRS를 실제 응답과 비교하기 위해 충전기 내부 패널에 설치하였다.

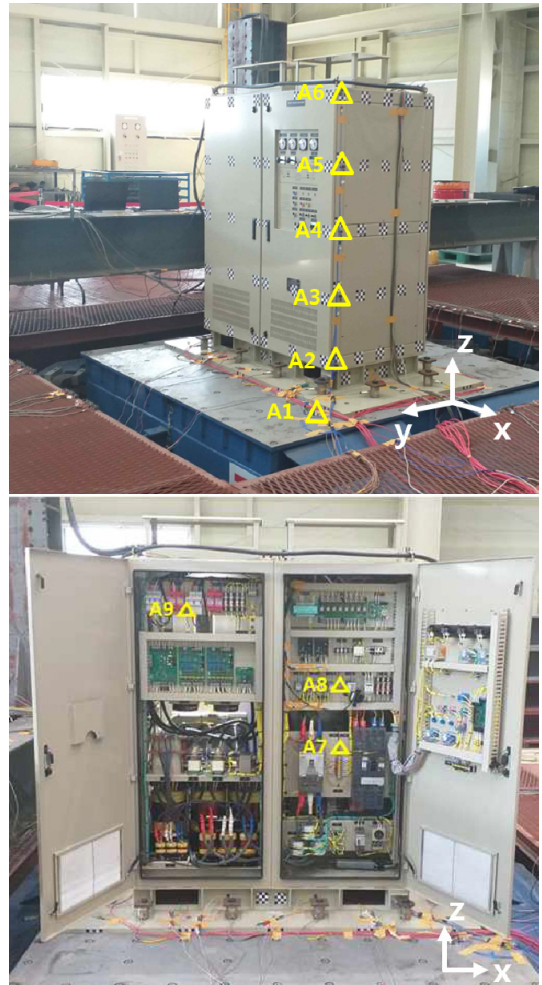


Fig. 1 Battery charger and locations of accelerometers⁽⁴⁾

진동대 입력운동의 주파수 범위는 0.5~60 Hz이다. 공진탐색시험의 입력은 랜덤파로 충전기의 구조적 손상을 일으키지 않을 정도의 크기로 하였으며, 진동지속시간은 60초 이상으로 하였다. 지진하중으로는 NRC의 Regulatory Guide 1.60의 설계 응답스펙트럼⁽⁵⁾과 울진 지역의 등재해도 응답스펙트럼⁽⁶⁾에 대해 진동대 시험을 수행하였다. 지진가속도 시간 이력곡선 한 세트는 수평(2방향), 수직(1방향)에 대해 생성하였으며 최대지반가속도(0.2 g)를 가진다.

2.2 공진탐색시험 결과

충전기의 공진주파수를 결정하기 위하여 전달함수를 산정하는 방법을 적용하였으며, 전달함수는 진동대에 입력된 가속도(A1)에 대한 응답가속도

(A6~A9)의 비를 이용하여 결정되었다. 가속도계 A6의 응답가속도를 통해 계산된 전달함수는 Fig. 2와 같으며, 이를 통해 산정된 충전기 구조물의 공진주파수는 X 방향 12.5 Hz Y 방향 29.25 Hz이다.

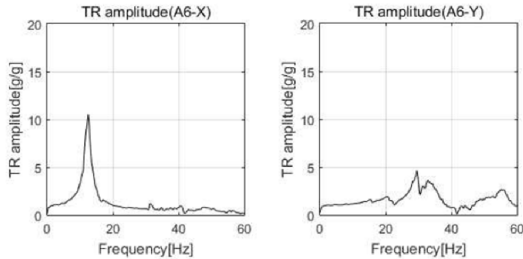


Fig. 2 Amplitude of transfer function at accelerometer A6 in resonant frequency search test #1 and #2(4)

3. 충전기의 수치해석 모델

3.1 충전기 모델링

충전기의 형상은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 매우 복잡하다. 이를 수치해석에 사용하기 위해 상세 모델링하는 것은 지극히 어려운 일이다. 또한 부속장치의 생산이 중단된 캐비닛의 경우 공진탐색시험 외에는 활용할 수 있는 실험 자료가 제한적이기 때문에, 수치해석 모델을 검증할 수 있는 방법이 한정적이다. 그러므로 상세 모델링을 수행했다라도 이 모델이 실제를 얼마나 재현하고 있는지 확인하기 어렵다. 본 연구에서는 이와 같은 현실적인 어려움을 고려하여 충전기의 구조물은 1차원 보 요소를 사용하여 단순화하여 모델링 하였다. Fig. 1의 A7-9 가속도계가 설치된 충전기 내부 패널에는 relay와 같은 부속장치가 설치된다. 패널에 대한 수치해석 모델링(스프링-질량 시스템)을 위해 필요한 부착물의 질량 및 무게 중심, 강성 등의 정보를 알 수 없었기 때문에 3차원 유한요소 해석 모델(Fig. 4)을 구성하여 별도의 수치해석을 수행하였다. 별도로 수치해석을 수행하여 얻은 결과를 바탕으로 1차원 스프링-질량 시스템을 별도로 모델링하였으며, 이를 통해 충전기 내부 패널 응답의 재현성을 높임으로써 수치해석 모델로 산출되는 ICRS의 정확도를 높이려고 하였다. 충전기와 같은 Relay Panel type의 경우 외함(housing)에 캐비닛 대부분의 질량이 분포한다는 연구결과(1)가 제시되어 있으므로 패널을 제외한 충전기의 질량을 수치해석 모델에 균등하게 분포시켰다.

3.2 충전기 내부 패널 모델링

가속도계가 설치된 충전기 내부의 패널에 대한 수치해석 모델링을 작성하기에 앞서, 실험을 통해 얻은 응답을 분석하였다. 실험 과정을 보면 충전기에 가진을 한 후에 매 번 공진주파수 탐색시험을 수행하였기 때문에 공진주파수 탐색시험은 방향별로 총 9 번 수행되었다. 실험에는 오차와 편차가 존재하므로 각 실험 결과를 비교하기 보다는 9번의 공진주파수 탐색시험 결과를 평균하여 비교해보았다. 공진주파수 탐색시험 결과 분석에는 실험보고서(4)와 동일하게 전달함수를 통해 분석하는 방법을 적용하였다.

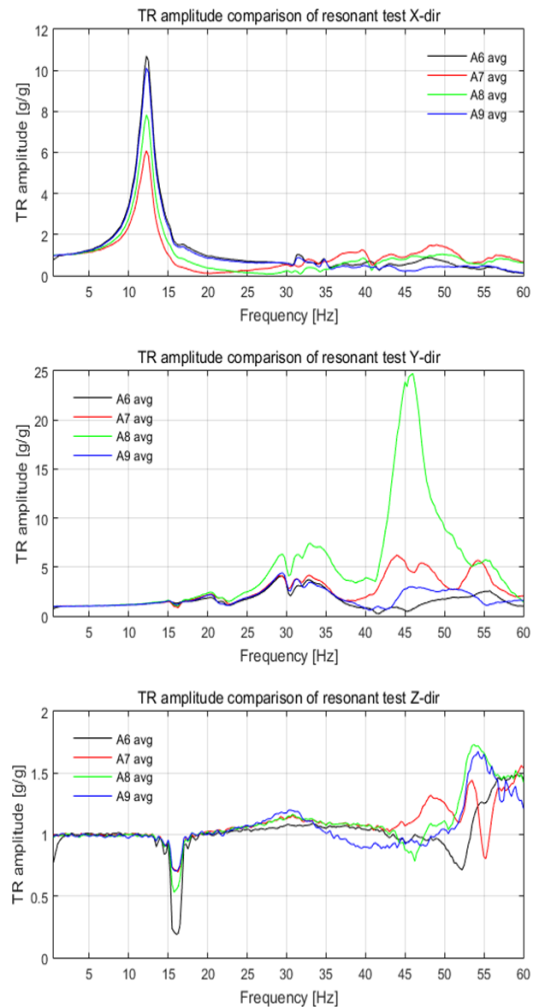


Fig. 3 Averaged transmissibility of transfer function at the accelerometer A6,7,8,9

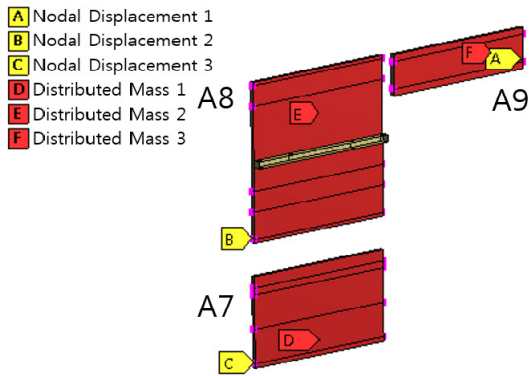


Fig. 4 3-dimensional analytic model of local panels, at which accelerometers place, for modal analysis

결과 분석을 위해 실험보고서에 사용한 방법과 동일한 방법으로 전달함수를 계산하였다. 그 결과는 Fig. 3과 같다. 가속도계 A7-9은 충전기의 구조물 내부에 위치한 패널에 부착되어 있기 때문에, A7-9에서 측정되는 응답은 충전기 구조물의 전역 모드(global mode)에 의해 영향을 받는다. 그러므로 A7-9에서 측정된 응답을 분석할 때는 구조물의 모드 즉 A6에서 측정된 응답과 함께 분석해야 한다. 이와 같은 분석을 위해 Fig. 3에는 A6의 응답을 포함하여 A7-9에서의 응답과 겹쳐서 그래프를 작성하였다.

Fig. 3의 X 방향 결과를 보면 알 수 있듯이, 12.5 Hz 주파수 부근에서 나타나는 A7-9의 전달률(transmissibility)의 크기는 서로 차이가 있지만 A6의 전달률 보다는 작은 것으로 나타난다. 해당 주파수에서의 A7-9 응답이 1보다 큰 전달률을 나타내는 것은 해당 위치(패널)의 공진에 의한 것이 아니라 충전기 구조물(A6)에 의한 결과로 볼 수 있으며, 이는 A7-9에서의 전달률 크기 순서가 각 가속도계의 설치된 높이 순서와 같다는 사실에서 더욱 분명해진다. 그러므로 가속도계 A7-9가 설치된 각 패널은 X방향으로는 상당한 수준의 구조적 강성을 가지는 것으로 판단되며, 이로 인해 60 Hz까지의 주파수 범위에서는 공진이 발생하지 않는다. Fig. 3의 Y 방향 결과를 보면 A8의 경우 46 Hz의 주파수에서 뚜렷하게 공진 모드가 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 A7의 경우 해당 그래프는 1개 이상의 공진 주파수가 존재하는 것으로 보이며 그 중 전달률 값이 최대인 44 Hz를 모델링을 위한 공진 주파수로 선택하였다. A9의 경우 약 44 Hz부터 53 Hz 대역에서 A6 대비

증가한 전달률을 보이고, 정확한 공진 주파수를 판단하기 어려우므로 약 49 Hz의 공진 주파수를 가지는 것으로 가정하였다. Fig. 3의 Z 방향 그래프는 A7-9에서 뚜렷한 공진 모드를 선정하기 어렵다.

이와 같이 실험 결과를 분석하여 가속도계 A7-9가 위치한 패널의 공진주파수를 다시 선정하였다. 선정된 공진주파수를 만족시키는 1차원 스프링-질량 시스템을 구성하기 위한 방법으로는 여러 가지가 존재한다. 본 연구에서는 패널 및 패널에 부착된 부속장치의 질량 정보를 알 수 없었기 때문에, 패널의 크기를 실측한 후 이를 바탕으로 실제와 형상과 경계조건이 유사한 3차원 수치해석 모델링을 한 후 패널에 분포 질량을 추가하는 방법으로 질량을 예측하였다. 분포 질량이 추가된 3차원 해석모델을 사용하여 모드 해석을 수행하였으며, 모드 해석 결과가 실험 결과를 분석하여 얻은 패널의 공진주파수와 일치시켰다. 산출된 질량은 7~15 kg 정도로 충전기의 전체 무게인 1.5 톤에 비해 1 % 미만의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 외함에 캐비닛 대부분의 질량이 분포할 것이라는 가정과 일치한다.

산출된 질량정보를 바탕으로 각 패널 별로 스프링-질량 시스템을 구성하였으며, 각 스프링-질량 시스템은 실제 패널이 설치된 높이에 맞추어 충전기의 구조물에 연결하는 방식으로 모델을 구성하였다. 실험 결과를 분석한 내용에 근거하여, 각 스프링-질량 시스템이 Y 방향으로만 거동하도록 1자유도계 모델을 구성하였다. 구성된 모델은 Fig. 5와 같다. 충전기의 바닥의 모든 회전방향은 구속된 상태이며 각 병진방향으로는 입력 가속도(A1)가 가해진다. Fig. 1의 A7-9 위치에서 알 수 있듯이 패널과

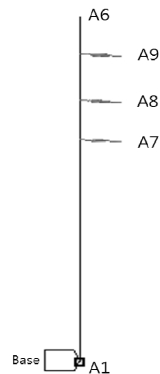


Fig. 5 Analytic model of the battery charger

부착물의 실제 형상은 복잡하지만 이를 1자유도계의 진동으로 가정하고 수치해석 모델을 구성하여, 보요소의 거동과 스프링-질량 시스템의 거동만으로 표현하였다. 그 결과 수치해석 모델에서 얻어진 응답과 진동대 시험을 통해 얻은 응답에 차이를 보일 것으로 예상된다.

3.3 충전기 수치해석 모델 검증

충전기 수치해석 모델의 검증을 위해, 실험에서 공진탐색시험을 위해 사용된 입력 가속도(A1)를 수치해석 모델에 입력하중으로 적용한 후 충전기 상단(A6)에서의 응답을 실험 결과와 비교하였다. 방향별로 총 9 회의 공진주파수 탐색시험을 수행했는데, 이 중 X와 Y 방향으로 가진한 공진주파수 탐색 시험 4 회를 임의로 선택하여 해석을 수행하였다.

수치해석의 방법론으로 ANSYS(7)에서 제공하는 모드 중첩법을 적용하였으며, X와 Y 각 방향에서 누적 모드 질량 참여율이 90% 이상이 되도록 하였다. 본 연구의 목적은 ICRS를 주어진 조건하에서 예측해내는 것이므로, 1차원 보 요소로 구성된 해석 모델이 충전기 구조물의 거동을 최대한 유사하게 묘사할 수 있어야 한다. 이를 위해 1차원 보 요소의 단면특성과 재료물성, 감쇠비를 구성하였다.

Fig. 6은 X 방향으로 가진 한 경우에 대해 실험과 해석 결과를 비교한 그래프이며, 4 가지 경우에 대한 결과를 평균한 것이 Fig. 7의 그래프이다. 실험 결과와 비교하여 공진 주파수 및 최대 전달률 값이 상당히 유사하며 그래프의 전체적인 형상 또한 유사함을 알 수 있다. 60 Hz 부근에서 해석 결과의 전달률이 증가하는 모습을 보이는데, 이는 수치해석 모델의

X 방향 두 번째 공진 주파수가 75 Hz 부근에 있기 때문으로 판단된다. 실험에서는 60 Hz 주파수 영역까지만 가진 하였기 때문에 이상의 고주파수 영역에서 충전기 구조물의 응답을 알 수 없다. 그러나 본 연구에서는 최대 60 Hz의 주파수까지만 관심이 있고, 수치해석 모델이 보이는 응답은 모델의 단순화된 구조에 비해 충전기 구조물의 거동을 상당히 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 Y 방향으로 가진 한 경우에 대해 실험과 해석 결과를 비교한 그래프이며, 4 가지 경우에 대한 결과를 평균한 것이 Fig. 9의 그래프이다. 실험 결과와 비교하였을 때 공진 주파수를 잘 묘사하고 있다. 최대 전달률 값은 실험 결과보다 해석 결과가 조금 더 큰 값을 가지지만, 실험 결과 33 Hz 부근에서 발생하는 응답까지 포괄하는 모습을 보인다. 실험 결과에서 Y 방향의 충전기 구조물의 거동은 X 방향보다 복잡한 거동을 보이지만, 수치해석 모델은 상당한 가정을 바탕으로 1차원 보로 단순화되었기 때문에 그 한계가 분명하여 실제 거동을 모두 묘사하지 못한다. 그럼에도 수치해석 모델은 그것의

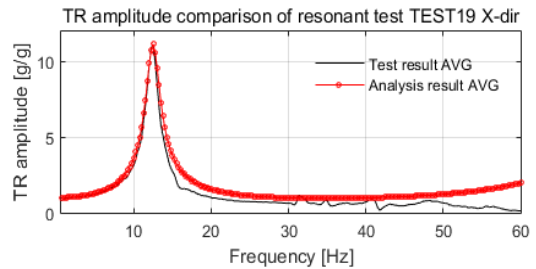


Fig. 7 Averaged transmissibility of transfer function at the accelerometer A6 in X-dir.

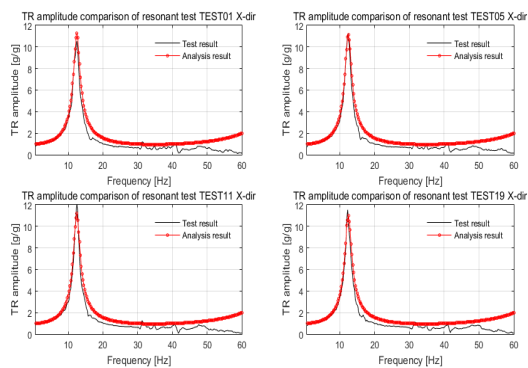


Fig. 6 Transmissibility of transfer function at the accelerometer A6 in X-dir.

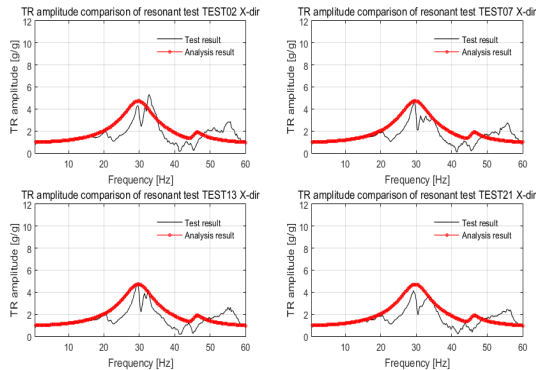


Fig. 8 Transmissibility of transfer function at the accelerometer A6 in Y-dir. (Test #2, 7, 13, 21)

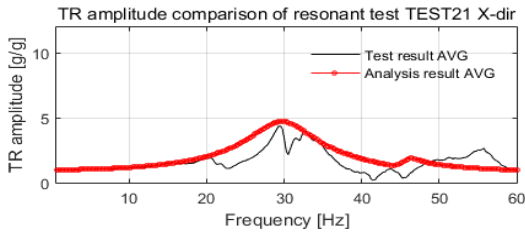


Fig. 9 Averaged transmissibility of transfer function at the accelerometer A6 in Y-dir.

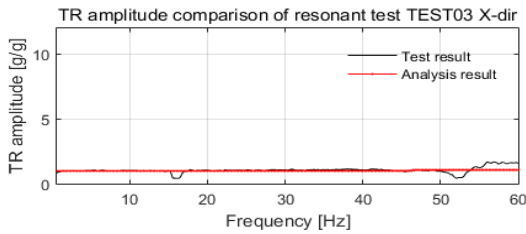


Fig. 10 Transmissibility of transfer function at the accelerometer A6 in Z-dir.

단순화된 구조에 비해 충전기 구조물의 거동을 전반적으로 상당히 잘 포괄하여 모사하는 것으로 판단된다. 그러나 55 Hz 부근의 응답은 수치해석 모델의 한계로 인해 실제 거동을 모사하지 못하고 있으며, 해당 주파수에서 실험 결과의 전달률 값은 2.7인 반면 해석 결과는 1.1의 전달률을 보인다.

Fig. 10은 Z 방향으로 가진 한 경우에 대해 1개의 공진주파수 탐색시험 결과와 이에 대응되는 해석 결과를 비교한 그래프이다. 실험보고서에 기술되어 있듯이 Z 방향에서는 충전기 구조물의 공진 주파수가 나타나지 않으며, 수치해석 모델 역시 Z 방향 구조적 강성이 크기 때문에 관심 주파수 대역 전반에서 전달률이 1에 가까운 값을 보인다. 수치해석 모델은 충전기 구조물의 거동과 전반적으로 유사한 응답을 보이는 것으로 판단된다.

4. 결과 비교

공진주파수 탐색시험 결과와 비교하여 검증한 수치해석 모델을 사용하여, 충전기의 응답스펙트럼을 수치 해석적 방법으로 산출하였다. 해석을 위한 입력 하중으로는 실험과 동일하게, Regulatory Guide 1.60 응답스펙트럼으로 생성한 지진하중(이하 REG 1.60 지진하중)과 울진 지역의 등재해도 응답스펙트

럼으로 생성한 지진하중(이하 Uljin 지진하중)을 적용하였다. 지진 하중의 경우 X, Y, Z방향에서 동시에 하중을 가하였다.

4.1 충전기 상부의 응답스펙트럼 비교

ICRS 결과를 분석하기에 앞서, 해석을 통해 추출한 충전기 구조물(A6)의 응답스펙트럼을 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 11 - 12는 각각 Uljin 지진하중, REG 1.60 지진하중을 가한 실험 결과에 대응되는 수치 해석 결과를 비교한 그래프이다. 각 그림의 1행은 가속도계 A6에서의 가속도-시간이력 곡선이며, 2행은 A6에서의 응답스펙트럼 곡선이다. 응답스펙트럼 곡선 중 A6에서의 실험 결과는 검은색 실선으로, A6에서의 해석 결과는 붉은색 점선과 마커로 표기하였으며, 파란색 점선은 A1에서의 응답스펙트럼으로 입력 하중과 응답을 비교하기 위해 함께 도시하였다. 3개의 열은 각각 X, Y, Z방향의 응답이다. 각 그래프에서

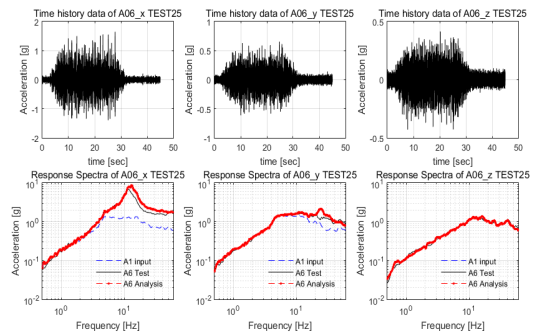


Fig. 11 Estimated time history data and response Spectra at the accelerometer A6 under Uljin seismic loading

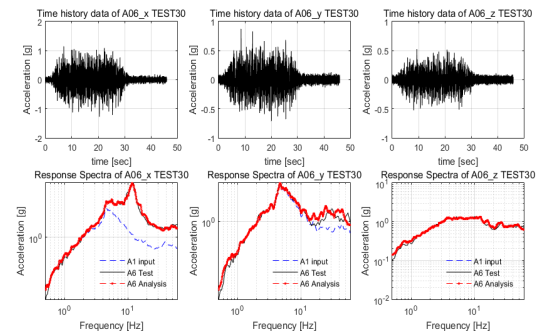


Fig. 12 Estimated time history data and response Spectra at the accelerometer A6 under REG 1.60 seismic load

A6의 실험과 해석에서 측정된 최대 가속도를 비교했을 때, Fig. 12의 X와 Z방향을 제외한 모든 경우에서 해석의 최대 가속도가 크게 나왔다. 해석결과가 실험의 최대 가속도보다 작은 값을 가지는 Fig. 12 X 방향의 경우 -1%, Z방향의 경우 -2%의 차이를 보인다. 그러나 이 정도의 차이는 Z 방향의 누적 모드 질량 참여율과 수치해석 모델의 한계성을 고려하였을 때 큰 오차라 볼 수 없다고 판단된다. 각 그래프의 주파수 대역별 응답을 보면, X 방향의 응답은 두 경우 모두에서 최대 가속도가 발생하는 주파수에서 차이가 발생하지만 전체적으로 해석 결과가 실험 결과를 매우 잘 모사하고 있다. Y 방향의 응답은 10 Hz이하의 대역에서는 해석 결과가 실험 결과를 매우 잘 모사하며, 그 이상의 대역에서도 3.3절에서 확인된 수치해석 모델의 한계성에도 불구하고 상당히 재현성이 높은 편이라 판단된다. 두 경우 모두에서 55 Hz 부근의 주파수 영역에서는 해석 결과가 상대적으로 응답가속도가 작게 나오는데, 이는 Fig.8과 9에서 확인했었던 수치해석 모델의 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 공진주파수 탐색시험에서 55 Hz 부근의 응답을 모사하지 못하는 것을 확인하였고 이는 본 연구에서 구성한 수치해석 모델이 가지는 한계로 인한 것이므로 응답스펙트럼에서도 55 Hz 부근의 응답이 과소평가 되는 것이다. 그렇더라도 국부적인 주파수 영역을 제외한 전반에서 실험 결과의 응답을 잘 모사하거나 포괄하고 있으므로 해당 수치해석 모델은 단순함에 비해 상당히 강력한 재현성을 보이고 있다고 생각된다. Z 방향의 응답은 두 가지 지진하중 하에서 수치해석 모델이 실험 결과를 매우 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

4.2 충전기의 ICRS 비교

수치 해석 결과로 예측된 ICRS(A7,8,9)을 실험 결과와 비교하였다. 3.2절에서 A7의 경우 1개 이상의 공진 주파수가 존재하지만 44 Hz를 공진 주파수로 선택하였는데, 이 경우 응답스펙트럼이 실험 결과와 상당한 차이를 보였다. A7의 공진 주파수가 잘못 설정되었다고 판단되어 44 Hz 다음 선택되었던 47 Hz를 공진 주파수로 간주하여 스프링-질량 시스템을 재구성한 후 해석을 수행하였다. 스프링-질량 시스템은 공진 주파수의 정확도에 의존적이므로 이와 같은 현상이 발생한 것으로 판단되며, ICRS 예측

을 위한 수치해석 모델을 구성할 때 패널의 공진 주파수를 정확히 판단하는 것이 중요함을 알 수 있다. 실제 상황에서는 교체가 필요한 부속 장치를 패널에 부착하여 시험을 할 수 있으므로 공진 주파수를 찾는 것에 큰 문제가 없을 것으로 예상된다.

본 연구에서와 같은 조건 하에서는 스프링-질량 시스템의 경우 시스템의 공진 주파수에서의 응답의 크기는 시스템을 구성할 때 사실상 결정되어 버린다. 그러므로 실제 응답을 모사하는 데 한계가 있다. 이를 염두에 두고 A7부터 ICRS 해석 결과를 시험 결과를 비교 검토 하였다.

Fig 13 - 14는 각각 Uljin 지진하중, REG 1.60 지진하중을 가한 실험 결과에 대응되는 A7 위치에서의 ICRS 해석 결과를 비교한 그래프이다. 각 그림의 1행은 가속도계 A7에서의 가속도-시간이력 곡선이며, 2행은 A7에서의 ICRS 곡선이다. 실험 결과는 검은색 실선으로, 해석 결과는 붉은색 점선과 마커로 표기하였으며, 파란색 점선은 A1에서의 응답스펙트럼으로 입력 하중과 응답을 비교하기 위해 함께

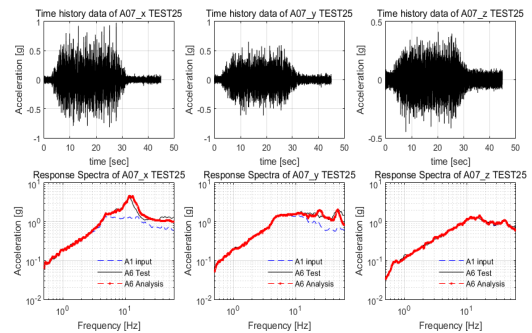


Fig. 13 Estimated time history data and ICRS at the accelerometer A7 under Uljin seismic loading

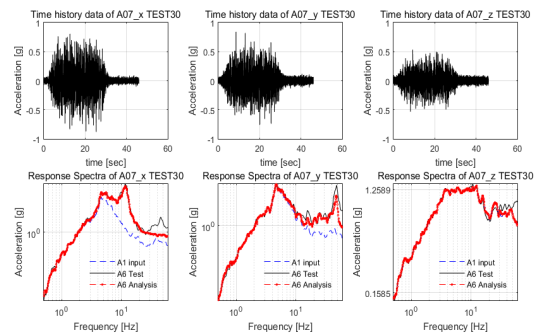


Fig. 14 Estimated time history data and ICRS at the accelerometer A7 under REG 1.60 seismic load

도시하였다. 3개의 열은 각각 X, Y, Z방향의 응답이다. X와 Z 방향의 경우 스프링-질량 시스템의 자유도가 제약되어 있음에도 불구하고 실험과 유사한 응답을 보이며 최대 가속도가 발생하는 주파수를 잘 예측하고 있다. Y 방향의 경우 두 가지 지진하중의 경우 모두에서 최대 가속도가 발생하는 주파수를 매우 잘 예측함을 알 수 있다. Fig 13의 경우 일부 주파수 대역에서 응답이 과소평가 되기도 하지만, 최대가 발생하는 가속도를 매우 잘 모사됨을 알 수 있다. Fig 14의 경우에도 일부 주파수 대역에서 응답이 과소평가 되지만 전반적으로는 실제 거동을 잘 모사하는 것으로 보인다. 49 Hz 근처에서의 예측한 응답의 경우 주파수는 잘 예측하였지만 가속도 값이 낮게 나오는데, 이는 스프링-질량 시스템이 가지는 한계를 잘 보여준다.

Fig 15 - 16는 각각 Ujjin 지진하중, REG 1.60 지진하중을 가한 실험 결과에 대응되는 A8 위치에서의 ICRS 해석 결과를 비교한 그래프이다. X와 Z 방향의 경우 스프링-질량 시스템의 자유도가 제약되어 있음에도

불구하고 실험과 유사한 응답을 보이며 최대 가속도가 발생하는 주파수를 잘 예측하고 있다. Y 방향에서는 모든 지진하중 경우에서 최대 가속도가 발생하는 주파수를 매우 잘 예측하지만 최대 가속도의 크기를 과소평가함을 보인다. 나머지 주파수 영역에서는 가속도의 크기를 잘 예측하고 있다. 최대 가속도 값이 과소평가 하는 것은 앞에서 기술한 스프링-질량 시스템이 가지는 한계를 보여준다.

Fig 17 - 18는 각각 Ujjin 지진하중, REG 1.60 지진하중을 가한 실험 결과에 대응되는 A9 위치에서의 ICRS 해석 결과를 비교한 그래프이다. X와 Z 방향의 경우 스프링-질량 시스템의 자유도가 제약되어 있음에도 불구하고 실험과 유사한 응답을 보이며 최대 가속도가 발생하는 주파수를 잘 예측하고 있다. Y 방향에서는 모든 경우에서 실험의 응답을 포괄하는 응답스펙트럼을 보인다. 실험 결과에서의 최대 가속도가 발생하는 주파수 및 그 이하의 주파수 대역에서는 응답을 매우 잘 예측한다. 20 Hz부터

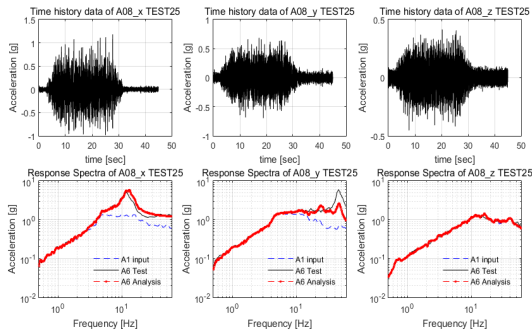


Fig. 15 Estimated time history data and ICSR at the accelerometer A8 under Ujjin seismic loading

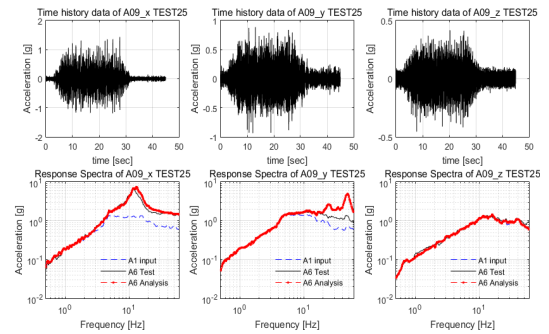


Fig. 17 Estimated time history data and ICSR at the accelerometer A9 under Ujjin seismic loading

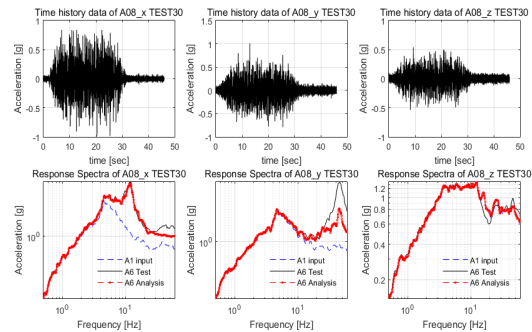


Fig. 16 Estimated time history data and ICSR at the accelerometer A8 under REG 1.60 seismic load

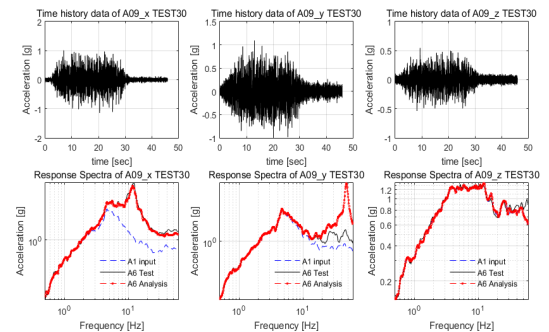


Fig. 18 Estimated time history data and ICSR at the accelerometer A9 under REG 1.60 seismic load

점점 응답 가속도를 과대평가하는 경향을 보이며, 3.2절에서 공진 주파수로 선정된 49 Hz에서 실험 결과보다 상당히 큰 응답 가속도를 보인다. 그러나 실험 결과의 응답스펙트럼에서도 49 Hz에서 국부적인 응답의 증가가 발생하므로, 공진 주파수는 잘 예측하였지만 스프링-질량 시스템이 응답 가속도를 과대평가하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소에 설치된 충전기를 수치해석 및 진동대 실험을 통해 ICRS를 비교하였다. 충전기는 진동대에 설치 되었으며, ICRS를 생성하기 위하여 충전기 내부에 가속도계를 설치하였다. 충전기의 특성을 파악하기 위하여 공진탐색시험으로부터 충전기의 고유진동수를 파악하였다. 충전기의 ICRS는 NRC의 Regulatory Guide 1.60의 설계응답스펙트럼과 울진지역의 등재해도응답스펙트럼에 대해 작성이 되었다. 수치해석을 통해 충전기의 ICRS를 생성하기 위하여 공진탐색시험으로부터 얻은 결과를 활용하여 충전기를 수치모델을 작성하였다. 충전기의 외부 구조물과 내부 패널들을 단순화 하여 모델링 하였으며, 수치 해석을 통해 충전기 구조물의 상단과 내부 패널들에서의 응답스펙트럼을 계산하였다. 수치해석과 진동대 실험으로부터 도출된 충전기의 ICRS를 비교한 결과, 스프링-질량 시스템으로 구성된 해석 모델의 한계로 인해 일부 영역에서 응답가속도에 차이가 발생하지만 전체적인 경향은 유사한 것을 확인 할 수 있다. 본 연구를 통해 비교적 간단한 수치해석적인 방법으로 캐비닛 ICRS의 경향을 파악 가능함을 확인 하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (20171510101960 & 20171510101910)

참고문헌

- (1) EPRI, 1995, "Guidelines for Development of In-Cabinet Seismic Demand for Devices Mounted in Electrical Cabinets," Woburn, NP-7146-SL R1.
- (2) Cho, S. G, So, G., Han, M., and Kim, D., 2016, "Comparative Evaluation of In-cabinet Amplification Factor for Devices Mounted in Electrical Cabinets," *Proc. of KNS 2016 Autumn Meeting*, Gyeongju, October 27-28.
- (3) Gupta, A., Yang, S. K., and Gupta, A. K., 1999, "Ritz Vector Approach for Evaluating Incabinet Response Spectra," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 217, pp. 49-62.
- (4) KOCED, 2018, "Seismic test of limit state for the charger", Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, Yongin -si.
- (5) Reg. Guide 1.60 Rev.2, 2014, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- (6) Eem, S. H., and Choi, I. K., 2017, "Response Amplification of MCC Cabinets Induced by High Frequency Earthquakes," *Proc. of KNS 2017 Autumn Meeting*, Gyeongju, October 26-27.
- (7) ANSYS, Inc., 2019, *ANSYS Manual*