

하부설치 제어봉구동장치의 내진시험 지그 설계

Design of Seismic Test Jig for Bottom Mounted Control Rod Drive Mechanism

선종오[†] · 이지훈* · 김경호* · 조영갑*
Jong-Oh Sun[†], Jihoon Lee*, Gyeong Ho Kim* and Yeong-Garp Cho*

(Received September 4, 2020 ; Revised October 7, 2020 ; Accepted October 28, 2020)

Key Words : Seismic Test Jig(내진 시험 지그), Bottom Mounted Control Rod Drive Mechanism(하부설치 제어봉구동장치), Kijang Research Reactor(기장연구소)

ABSTRACT

A bottom mounted control rod drive mechanism (BMC RDM) for Kijang Research Reactor has been developed and its safety functions during safe shutdown earthquake events should be verified by conducting tests according to KEPIC END 2000. Furthermore, the test object should be supported such that it simulates the intended service supporting. BMC RDM is supported by its reactor which has two natural frequencies in the horizontal direction under the cutoff frequency of the earthquake. Therefore, a seismic test jig with those two same natural frequencies and mode shapes should be designed and manufactured for the test. This paper explains how the test jig is designed, modelled, tested, and manufactured. FE models are generally modified based on test results. However, this is quite challenging because the jig should be designed and manufactured based on the analysis results.

1. 서론

현재 건설 중인 기장연구소(KJRR; Kijang research reactor)에 적용될 하부설치 제어봉구동장치(BMC RDM)가 개발되었으며, KEPIC END 2000 (IEEE-344)의 요건에 따라서 내진시험이 수행되었다⁽¹⁻³⁾. KEPIC END 2000의 요건에 따르면, BMC RDM(bottom mounted control rod drive mechanism)은 건설 부지에 발생할 수 있는 예상 가능한 최대 지진(안전정지지진, safe shutdown earthquake)⁽⁴⁾ 중 그 안전기능의 정상작동 여부를 시험으로 입증하여야 하며, 시험에서는 실제 설치 환경이 충실히 모사되어야 한다. 이 논문은 이

러한 설치 환경 모사를 위한 지지구조물(이하 지그)의 설계 요건, 설계, 제작, 시험 및 FE 모델링 방법 등에 대한 전반적인 내용을 기술한다.

내진시험에서 검증되어야 하는 안전기능은 안전정지지진 중 ①제어봉(CAR; control absorber rod)이 요구되는 시간 내에 정상적으로 낙하해야 하며, ②구조건전성이 유지되어야 한다.

2. 초기 설계 및 시험 계획

2.1 BMC RDM의 소개

시험대상체인 BMC RDM은 Fig. 1에 나타난 바와 같은 형상을 가지며, 원자로의 아래층에 설치된 구동

[†] Corresponding Author; Korea Atomic Energy Research Institute, Senior Researcher
E-mail: josun@kaeri.re.kr

* Korea Atomic Energy Research Institute, Senior Researcher

‡ Recommended by Editor Young Cheol Huh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

장치가 비접촉 방식으로 extension shaft를 구동한다. Extension shaft는 층간을 지나 원자로 내부로 연결된 긴 봉이며, 이에 연결된 CAR의 위치에 따라 원자로의 출력이 제어된다.

BMC RDM의 하부는 구동부로서 두꺼운 콘크리트로 이루어진 하부격실의 바닥과 천장에 고정된다. Extension shaft를 통해 구동부와 연결되는 CAR은 원자로내부에서 안내관에 의해 수평방향으로 지지되며, CAR은 안내관과 마찰을 줄이기 위한 roller를 내재하고 있다. 따라서, BMC RDM의 지지부는 총 세 곳으로 하부격실의 바닥, 천장 및 원자로 내부에 위치한 안내관이 이에 해당한다.

2.2 지그의 설계 요건

내진시험 지그의 필요한 기능은 ①시험대상체의 실제 설치 환경을 충실히 모사해야 하며, ②가진대에 설치되어 가진 될 수 있어야 한다.

BMC RDM 구동부의 지지위치는 콘크리트 하부격실 바닥과 천장이며, 하부격실은 지진하중의 최대 가진주파수(= 40 Hz) 이내에서 충분한 강성을 가진 강체로 가정한다. BMC RDM 상부에 위치한 CAR은 원자로 내부의 안내관에 의해 수평방향으로 지지되고, 안내관은 40 Hz 이하에서 x-방향으로 23.8 Hz 및 28.3 Hz의 두 고유진동수를 가지며, y-방향으로는 21.8 Hz 및 28.7 Hz에서 고유진동수를 갖는다⁽⁵⁾. 첫 번째 고유진동수에서

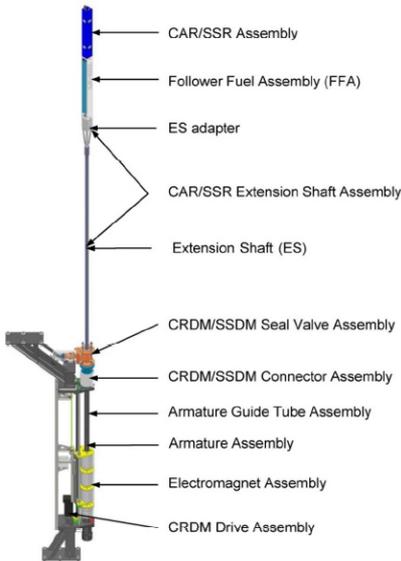


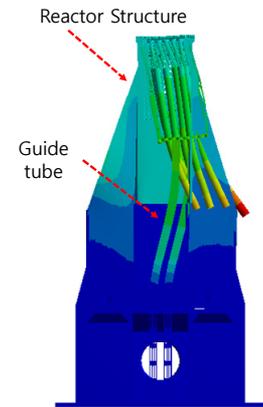
Fig. 1 Constitution of BMC RDM

안내관은 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 원자로구조물과 in-phase로 거동하는 굽힘 모드 형상을 갖는다. 두 번째 고유진동수에서는 Fig. 2(b)와 같이 원자로구조물과 안내관이 out-of-phase로 거동하는 굽힘 모드 형상을 보인다. 각 모드의 유효질량은 전체질량의 약 25%와 15%에 해당하는 원자로의 주요모드이며, CAR 지지부의 주요 특성에 해당된다. 따라서, 내진시험 지그의 설계요건을 아래와 같이 정하였다.

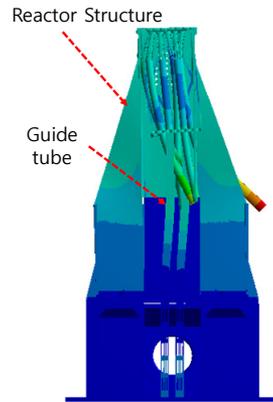
- (1) 구동부가 설치되는 하부는 40 Hz 이하에서 강체 거동할 것
- (2) CAR을 수평 지지하는 안내관은 오차 ±10% 범위 내에서 유한요소 해석으로부터 도출된 2개의 고유진동수와 모드형상을 가질 것

2.3 지그 초기 설계 및 시험 계획

시험 결과에 맞추어 해석 모델을 개선하는 것은 많



(a) In-phase mode



(b) Out-of-phase mode

Fig. 2 1st & 2nd mode shape of reactor in y-direction

은 연구가 있어왔다. 그러나, 이 연구에서는 목표 고유진동수를 갖도록 지그를 설계 및 제작해야 하는 굉장히 도전적인 문제이다. 또한, 내진시험 지그에는 BMCRD의 설치/해체/계측/관측/방수 등을 위해 많은 수의 볼트 및 방수재가 사용될 뿐만 아니라 원자로 내부 형상을 모사함으로써 인한 끼움 조립, 물의 영향 등의 모델링에 많은 불확실 요소가 존재한다. 따라서, 이 연구에서는 실제 내진시험 이전에 지그의 고유진동수 측정 시험을 3회 계획하였으며, 매 시험의 결과에 따라 해석 모델을 개선하고 지그의 설계 변경을 계획하여 최종 목표를 달성하고자 하였다.

2.4 지그의 초기 설계

시험대상체인 BMCRD는 그 길이가 7 m 이상이다. 2.2절에서 기술한 요건을 만족하도록 설계하면 내진시험 지그는 그 중량이 너무 커져서 국내에서 가용한 가진대에서는 시험이 불가능하였다. 따라서, 이 내진시험에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 extension shaft의 길이를 약 3 m에서 1 m 정도로 축소하고 다른 부품은 본품과 동일하게 유지하는 것으로 내진시험을 계획하였다. Extension shaft는 하부격실의 구동부와 CAR을 연결해주는 역할만을 하며, 다른 구조물과의

간섭은 없기 때문에 이와 같은 변경에 의한 시험은 타당하다고 판단된다.

내진시험 지그의 설계 형상은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 그 크기는 약 3.1 m × 3.6 m × 5.8 m이며 질량은 시험체 포함 약 4 톤이다.

주로 I형강으로 제작된 bottom structure는 강체 요건을 만족할 수 있도록 충분히 보강되었다. Room top은 콘크리트로 이루어진 하부격실의 천장과 원자로 바다의 역할을 할 수 있도록 내부를 grid 형상으로 설계하여 충분한 강성을 가짐과 동시에 경량을 유지할 수 있도록 하였다. Bottom structure와 room top으로 둘러싸인 공간에는 시험 대상체인 BMCRD이 설치되어야 하기 때문에 분해/조립이 가능하도록 볼

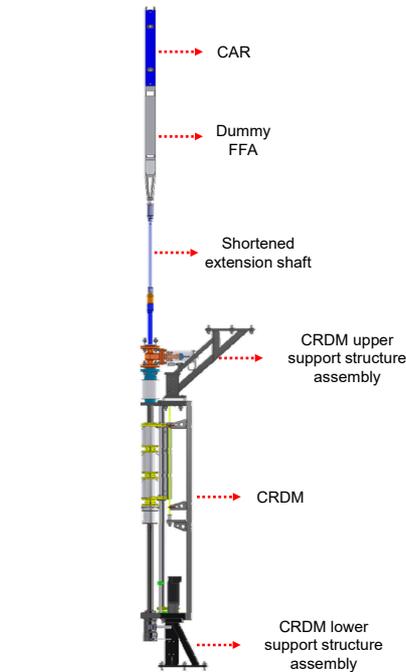
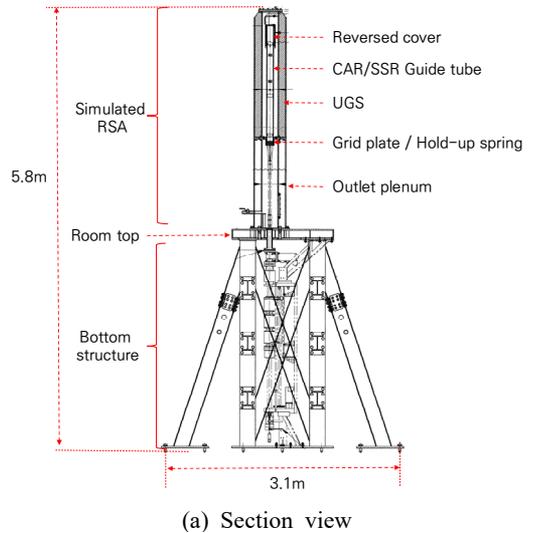


Fig. 3 BMCRD with shortened extension shaft

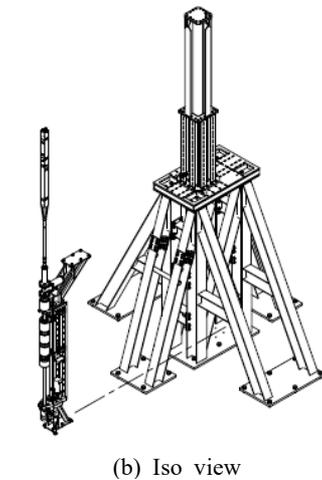


Fig. 4 Design of seismic test jig

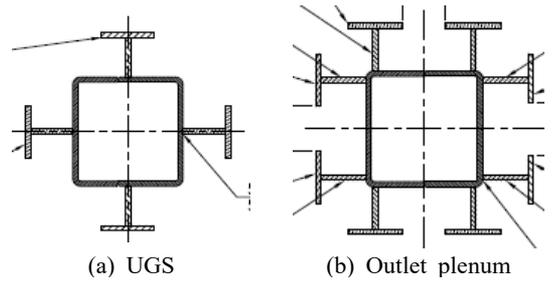
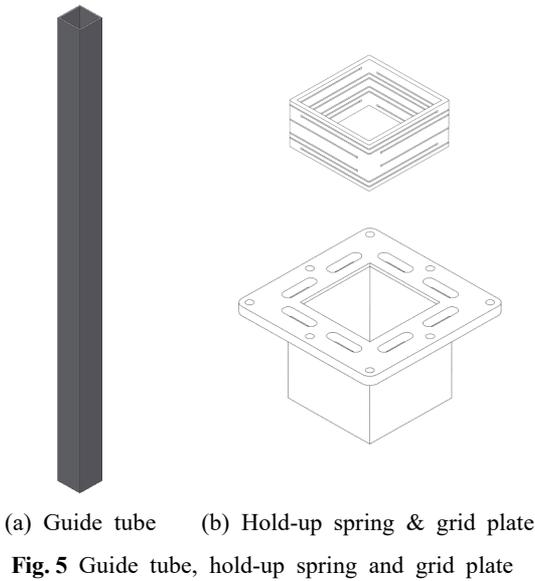


Fig. 6 Section view of UGS & outlet plenum

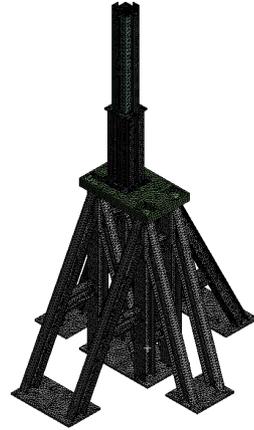


Fig. 7 FE model for seismic test jig

트 조립식으로 설계되었다.

Room top 상부에는 원자로구조물 및 CAR 안내관을 모사하는 simulated RSA가 위치한다. Simulated RSA 내부에는 Fig. 5에 나타난 사각 형상의 CAR 안내관이 Grid Plate의 사각홈에 아주 작은 간극을 갖고 삽입되는데, 둘 사이에는 안내관의 열팽창 및 조사성장을 흡수할 수 있는 hold-up spring이 삽입된다. 안내관의 최상단에는 reversed cover가 설치되어 안내관 최상단을 simulated RSA의 상단과 연결시킨다. Reversed cover가 둘 사이를 연결하는 스프링 역할을 하도록 설계되었으며 그 형상을 조정함으로써 안내관과 simulated RSA의 out-of-phase 모드 고유진동수를 조정할 수 있도록 계획하였다. simulated RSA의 구성품인 UGS와 Outlet plenum은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 사각단면의 외부에 I형강 형태의 보강재를 설계하였다. 그 목적은 simulated RSA 굽힘모드의 고유진동수 변경이 필요할 때, 해당 부분을 제거하거나 추가 보강하여 고유진동수를 조절하고자 함이다.

2.5 지그의 FE 모델

상용 유한요소 프로그램인 Ansys를 사용하여 지그의 유한요소 모델을 Fig. 7과 같이 구성하였다. 2차 요소인 Solid186와 Solid187요소로 구조를 구성하였으며, 같은 2차 요소인 Fluid220과 Fluid221로 내부의 물을 모델링하였다.

구성품 간의 볼트 조립부들은 볼트 및 플랜지의 크

기 정보로부터 Fig. 8에 나타난 바와 같은⁶⁾ 볼트 인장력에 의해 예압력이 가해지는 플랜지부의 면적을 계산하고 Fig. 9에서 보는 바와 같이 bolt-frusta에 해당하는 면적에만 bonded 접촉 조건 또는 경계조건을 부여하였다.

사각형 단면을 갖는 Fig. 5의 CAR 안내관 하부의 측면은 grid plate 내부 측면과 no separation 접촉 조건을 부여하였고, 안내관 하부의 hold-up 스프링은 정적 해석을 통해 스프링 상수를 구한 후 스프링 요소로 반영하였다.

모드해석을 수행하여 고유진동수를 계산하고 Fig. 10에서 보는 바와 같이 수평방향으로 simulated RSA와 그 내부의 CAR 안내관이 in-phase 모드와 out-of-phase 모드를 갖을 수 있도록 설계 변수들을 조정하였다. 여기서, in-phase 모드의 고유진동수는 simulated RSA 외부 보강재의 형상 변경을 통해 조정할 수 있고, out-of-phase 모드의 고유진동수는 reversed cover의 형상 변경을 통해 각 시험의 중간에 변경할 수 있도록 계획하였다. Fig. 10에 표현된 x방향 모드 형상과 동

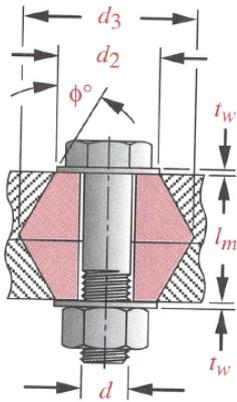
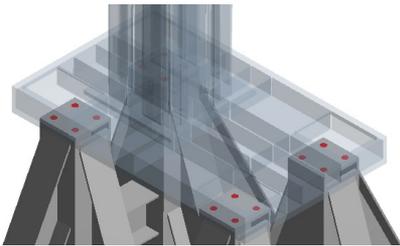
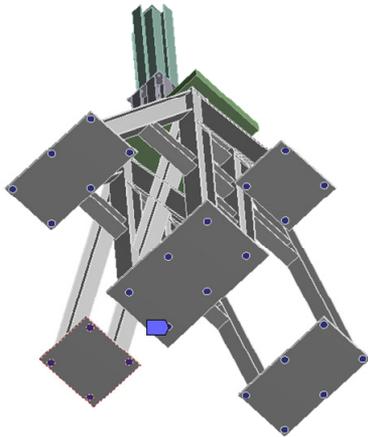


Fig. 8 Bolt-frusta model



(a) Bolt-frusta between bottom structure & room top



(b) Bolt-frusta between bottom structure & shaking table

Fig. 9 Example of bolt-frusta application

일하게 y방향 또한 동일한 두 가지 모드를 가진다. 이와 관련된 설명은 3.1절에서 추가 기술한다.

3. 모드 시험 및 FE 모델 수정

최종적으로 내진시험 지그가 원하는 고유진동수를

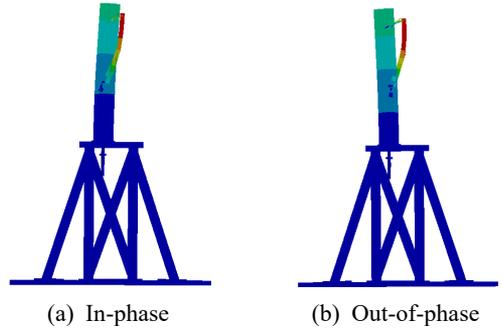


Fig. 10 1st & 2nd mode shape of seismic test jig (section view, in x-direction)

갖도록 설계하기 위해서는 지그의 FE모델을 정확하게 수립하고 이를 바탕으로 설계를 수정해 나가야 한다. 따라서 이 시험에 앞선 3번의 예비 모드시험 목적은 시험 결과를 바탕으로 신뢰도 높은 내진시험 지그의 유한요소 모델을 수립하는 것이다.

3.1 1차 시험 및 모델/설계 수정

BMC-RDM의 내진성능시험은 내진성능평가기관으로 등록된 부산대학교 지진방재연구센터에서 수행되었고, 이 내진시험에서는 KEPIC END 2000의 요건에 따라 6자유도 가진대에서 수평-수직 동시 가진을 해야 한다. 그러나, 1차 모드시험은 수평 방향으로만 가진이 가능한 3자유도 가진대와 수평-수직 가진이 모두 가능한 6자유도 가진대에서 두 번 수행되었다. 그 이유는 본 연구원에서 선행했던 다른 시험의 경험에 기반한다.

지진방재연구센터의 3자유도 가진대는 튼튼한 철골 구조물 위에 4개의 음압 베어링이 위치하며 가진 테이블을 아래로 강하게 끌어당긴다. 동시에 수평으로 4개의 유압 피스톤이 설치되어 구동하여 수평 3자유도를 제어하는 구조이기 때문에 수직방향으로 충분히 강한 강성을 가진다. 반면에 6자유도 가진대는 오직 유압 피스톤 4개가 가진 테이블을 수직방향으로 지지하는 동시에 가진하며, 수평 방향으로 또 다른 4개의 유압 피스톤이 가진 테이블과 연결되어 수평방향으로 가진하는 방식이다. 6자유도 가진대의 특성은 시스템을 구성하는 테이블, 유압 피스톤 및 제어기 등의 다양한 요소에 의해 결정이 되는데, 본 연구팀은 선행 시험의 경험을 통해 6자유도 가진대가 시험체에 충분한 고정경계 조건을 제공하지 못한다고 예상하였다. 따라서, 이를 확인하기 위해 두 가진대에서 1차 시험을 동일하게 진행하였다.

고유진동수 측정 방법은 수평 방향으로 sine sweep 신호로 가진대를 가진하고 Fig. 11에 나타난 위치에서 3축 가속도계를 이용하여 가속도를 측정하였다. 그 후, 1번 측정 위치의 신호를 reference로 하여 주파수 응답 함수를 계산한 후, 고유진동수를 찾아내었고 그 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다. 자세한 고유진동수 탐색 방법은 3.4절에서 기술한다. 지그의 해석 결과가 목표치(원자로의 해석 결과)보다 낮도록 설정한 이유는 해석보다 시험의 고유진동수가 더 낮게 나올 것이라는 경험적 예측하에 목표치보다 의도적으로 높은 고유진동수를 갖도록 지그를 초기 설계하였기 때문이다.

3자유도 가진대에서의 시험 결과를 살펴보면 simulated RSA가 전체적으로 변형하는 in-phase 모드 (Fig. 10(a))의 고유진동수는 해석과 굉장히 유사한 결과를 보이나, 6자유도 가진대에서 측정된 고유진동수는 10% 이상 작은 결과를 보인다. 이는 6-자유도 가진대가 충분한 고정 경계 조건을 제공해 주지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 이 결과를 바탕으로 지그의 FE모델에 시험이 수행될 6-자유도 가진 테이블의 질량과 질량관성모멘트 및 이를 수직 지지하는 유압피스톤의 강성을 모델에 추가하였고, 유압피스톤의 강성값을 조정하여 in-phase 모드의 고유진동수를 조정하였다. 가진 테이블 자체는 충분한 강성을 가질 것으로 예상하였기 때문에 질량과 관성모멘트 특성만 반영하였고, 앞서 설명한 유압 피스톤 및 제어기 등의 영향을 강성값으로 해석에 반영한 것이다.

Out-of-phase 모드를 살펴보면 해석 결과에 비하여 시험에서 현저히 낮은 고유진동수를 보였으며, 그 원인

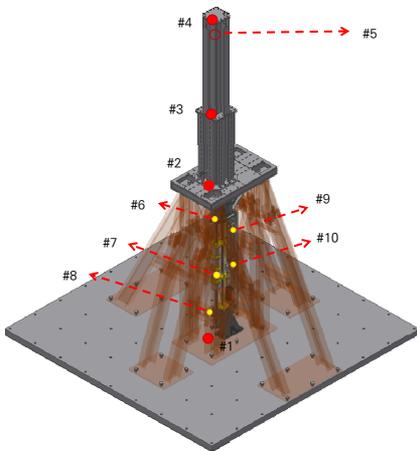


Fig. 11 Location of 3-axis accelerometers

으로 안내관의 하부 모델에 문제가 있었던 것으로 분석이 되었다. 초기 FE 모델에는 안내관과 grid plate의 측면에 수직방향으로 미끄러짐이 가능한 no separation 접촉 조건을 부여하였으나, 해당 접촉을 제거하고 holdup spring의 특성만을 스프링 요소로 반영하였을 때, 시험 결과와 동일한 결과를 보였다. 해당 특성은 원자로의 유한요소 모델에도 동일하게 수정하였으며, 이로 인해 2번째 모드시험에서는 목표치(원자로의 고유진동수)가 수정이 되었다.

앞서 기술한 바와 같이 유한요소 모델을 수정하였으며, out-of-phase 모드의 고유진동수를 높이고자 reversed cover의 설계를 Fig. 12에서 보는 바와 같이 변경하였다.

3.2 2차 시험 및 모델/설계 수정

2차 시험은 6자유도 가진대에서만 수행되었다.

Table 1 1st modal test results

Mode shape	X-direc. [Hz]		Y-direc. [Hz]	
	In-phase	Out-of-phase	In-phase	Out-of-phase
Reactor FE model	23.8	28.3	21.8	28.7
Jig FE model	26.1	29.6	24	30.4
3-DOF shaker	25.25	17.25	24	16.5
6-DOF shaker	22.25	16.75	22	16.5

Table 2 2nd modal test results

Mode shape	X-direc. [Hz]		Y-direc. [Hz]	
	In-phase	Out-of-phase	In-phase	Out-of-phase
Reactor FE model	22.0	25.3	19.2	28.8
Jig FE model	24.5	32.4	22.9	39.8
6-DOF shaker	22.0	28.75	21.5	39

Table 3 Final modal test results

Mode shape	X-direc. [Hz]		Y-direc. [Hz]	
	In-phase	Out-of-phase	In-phase	Out-of-phase
Reactor FE model	22.6	25.4	20.1	28.6
6-DOF Shaker	21.0	24.0	20.8	30.3

1차 시험 결과로부터 수정된 원자로 FE 모델의 해석 결과값과 내진시험 지그의 해석 결과 및 2차 모드 시험 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 지그와 원자로의 해석 결과가 서로 다르게 설계된 이유는 CAR의 질량 유무 때문이다. 최종 내진시험에서는 시험대상체가 설치되지만, 예비 모드시험에서는 시험대상체를 설치할 수 없었다. 따라서, BMCARDM의 CAR을 질량으로 반영한 지그의 FE 모델을 원자로의 고유진동수와 일치시킨 후, 실제 시험 결과는 CAR의 질량이 없는 해석 결과와 비교하였다.

지그의 해석 결과와 시험 결과를 비교하였을 때, 10% 오차를 약간 벗어나지만 약간의 설계 수정으로 목표를 달성할 수 있을 것으로 판단하였다.

3.3 3차 시험 및 모델/설계 수정

3차 시험에서는 2차 시험 때 CAR을 단순 질량으로 모델링한 것이 적절한지 검증하고자 하였다. 시험대상체인 BMCARDM은 내진시험에 선행되어야 하는 성능, 피로 및 수명 시험이 진행 중이었기 때문에 모드시험에서는 설치가 불가능하였다. 따라서, 이를 적절히 모사하는 dummy 시험체를 제작하여 지그에 설치하고 3차 모드시험을 수행하였다.

Dummy 시험체를 포함한 지그의 모드해석 결과는 CAR을 단순 질량으로 가정한 경우와 차이가 있었다. Dummy 시험체를 포함한 3차 모드시험 결과를 바탕으로 dummy 시험체의 구동부 축과 extension shaft의 접촉 모델링 방법을 결정하였고, 최종 시험에 사용될 내진시험 지그의 설계를 최종확정하였다.

3.4 최종 모드시험

최종 내진시험에서 BMCARDM이 설치된 내진시험기의 모드시험이 Fig. 13에서 보는 바와 같이 수행되

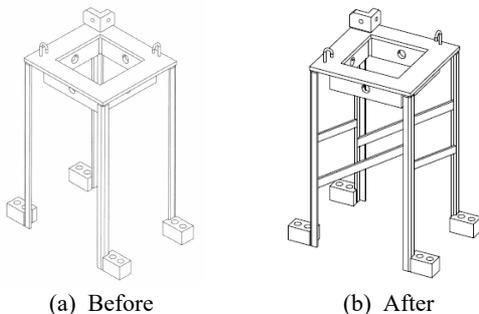


Fig. 12 Design change of reversed cover

었다. 해당 시험의 자세한 과정 및 결과는 부산대 지진방재연구센터의 내진성능검증 시험 보고서(7)에 자세히 수록되어 있다.

내진성능검증 시험 이전 최종 모드시험이 수행되었으며, Fig. 11에 나타난 위치에 3축 가속도계를 설치하였다. Fig. 11에서 점선으로 표시된 5번 위치는 내진시험 지그 내부에 위치한 안내관에 설치된 3축 가속도계이다.

6자유도 가진대에 각각 x방향 및 y방향으로 sine sweep 신호로 가진 후 공진주파수를 관측하였다. x방향에 대한 시험을 예시로 설명하면, 1번 가속도계의 계측 신호를 reference로 하여 계산한 주파수 응답함수의 크기 및 위상을 Fig. 14에 나타내었고, 지진방재센터에서 도출한 모드형상을 Fig. 15에 도시하였다(7).



Fig. 13 Photo of seismic test jig with BMCARDM

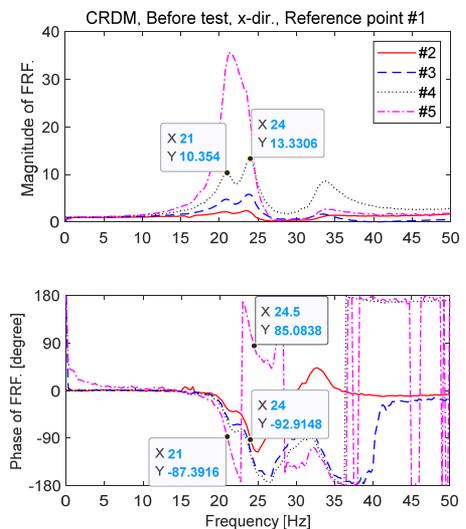


Fig. 14 Frequency response function (ref. acc#1)

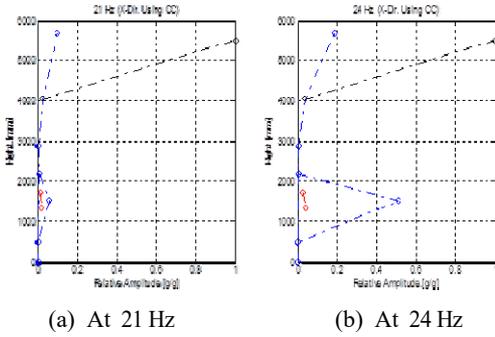


Fig. 15 Measured mode shape

내진시험 지그 최상단(4번)과 지그 내부 안내관(5번)에서 계측된 주파수 응답함수에서 21 Hz와 24 Hz에 공진주파수가 존재하는 것을 알 수 있다. 단, 21 Hz에서는 4번과 5번 위치의 위상차가 없으나, 24 Hz는 두 위치의 위상차가 180° 발생하는 out-of-phase 모드라는 것을 알 수 있다. 지진방재센터에서 도출한 Fig. 15의 모드형상에서 위상차는 확인할 수 없지만, 콘크리트 하부 격실을 모사하는 bottom structure가 충분히 강하게 설계되었고, simulated RSA는 Fig. 10에서 도시된 바와 같은 모드형상을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

x 및 y방향의 모드시험 결과와 목표치인 원자로 FE 모델의 고유진동수는 Table 3에 정리한 바와 같으며, 목표치의 10% 오차 이내의 고유진동수를 갖도록 내진시험 지그가 설계되었음을 최종 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 기장연구로에 적용 예정인 하부설치 제어봉구동장치의 내진시험을 위한 내진시험 지그의 설계, 모델링, 제작 및 시험에 관한 전반적인 내용을 기술하였다. 내진시험기는 원자로의 실제 설치 환경인 원자로의 동적 특성을 모사하기 위해 설계 및 제작되었으며, 시험을 통해 목표한 고유진동수 및 모드형상이 구현되었음을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2012M2C1A1026910).

References

- (1) Lee, J. H., Cho, Y. G., Yoo, Y. S. and Huh, H., 2015, Experiment Verification of Stepping and Drop Performance of Bottom-mounted CRDM for KIJANG Research Reactor, Proceedings of the KNS 2015 Spring Meeting, pp. 193~194.
- (2) Kim, S. Kim, G.-H., Sun, J., Cho, Y. G., Kim, J.-H., Jung, T. -H. and Lee, K.-H., 2016, Seismic Drop Performance for Second Shutdown Drive Mechanism Installed in Research Reactor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 697~704.
- (3) Sun, J. O., Lee, J. H., Kim, K. H., Kim, S. H. and Choo, Y. S., 2018, Seismic Test of Bottom-mounted Control Rod Drive Mechanism, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 320.
- (4) Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013, IEEE 344: Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations.
- (5) Sun, J. O., Kim, G., Choo, Y. S. and Yoo, Y. S., 2016, Calculation of Added Mass for Submerged Reactor with Complex Shape, Proceedings of the KNS 2016 Autumn Meeting, ICD-ROM.
- (6) Norton, R. L., 2000, Machine Design: An Integrated Approach, 2nd Edition, Upper Saddle River, Prentice-Hall Inc.
- (7) Seismic Simulation Test Center, 2018, Seismic Performance Test Report of CRDM and SSDM, SESTEC-2017-N-001-0, Rev.1.



Jong-Oh Sun received the Ph.D. degree from KAIST, Korea in 2012. He is a senior researcher in KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute).