2001 년도 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

# KALIMER 원자로건물에 대한 3 차원 면진적용 지진응답시간이력해석

# Seismic Response Time History Analyses for KALIMER Building with a Horizontal and Vertical Seismic Isolation

이재한, 유 봉, 구경회
대전광역시 유성구 덕진동 150
한국원자력연구소

요 약 문

수평과 수직방향으로 면진된 KALIMER 원자로건물의 집중질량-보 모델에 대해 인공지진과 1995 고베지진에 대하여 지진응답시간이력해석을 수행하였다. 3 차원 면진을 채택한 경우 2 차원 면진에 의해 증폭된 수직방향 지진응답을 감소시키는 것으로 나타났다. 인공지진의 경우 1.5Hz 로 수직면진하는 경우 점성감쇠가 3% 이상이면 원자로지지점에서의 응답이 비면진 경우 보다 낮아졌고, 고베지진의 경우는 수직방향 점성감쇠가 9% 일 때 비면진 경우보다 수직응답가속도 크기를 줄일 수 있었다.

Abstract

The seismic response time history analyses for the lumped mass models of KALIMER reactor building with a horizontal and vertical seismic isolation are performed for Artificial Time History and Kobe earthquakes. The vertical amplification by the horizontal isolation is reduced by a vertical isolation for both earthquakes. The 3% viscous damping and the vertical isolation frequency of 1.5Hz gives a reduced vertical response compared to the fixed base condition at reactor support, and the 9% viscous damping to Kobe earthquake is required to get an equivalent vertical response with a fixed base condition.

## I. 서 론

KALIMER 원자로건물은 그림 1 에 나타난 바와 같이 가로와 세로의 길이가 56m x 39m 이고 높이는 51m 이다[1]. 지진해석을 위한 단순 집중질량-보 모델은 건물 전체를 원자로구조물 지지벽과 원자로건물로 구분하는 2 축 모델(2-stick model)로 구성되며, 면진조건에 따라 고유진동수를 계산하고 계산결과를 이용하여 입력지진에 대한 지진응답가속도 시간이력해석을 ABAQUS 프로그램[2]으로 수행하였다.

건물의 수평 면진주파수는 0.5Hz 로 하고, 등가감쇠계수는 12%로 하였다. 수직방향 면진주파수는 1.5Hz 로 하고, 점성감쇠는 2 차원 면진에 의해서 증폭된 가속도응답 크기를 비면진 경우의 수직응답수준으로 줄여주는 값을 조사하기 위하여 감쇠계수를 3%, 6%, 9%로 변화시키면서 지진응답

해석을 수행하였다.

입력지진은 US NRC RG 1.60 에서 규정한 SSE 설계기준 지진스펙트럼에서 만든 인공 지진시간이력(Artificial Time History, 0.3g 수평, 0.2g 수직)과 1995 년 Kobe 실측지진(수평 NS 0.837g, 수직 0.338g)을 사용하였다. 해석결과로부터 수평 및 수직방향에 대해 비면진된 경우와 면진된 경우에 대한 응답가속도와 면진베어링의 변형을 평가했다.

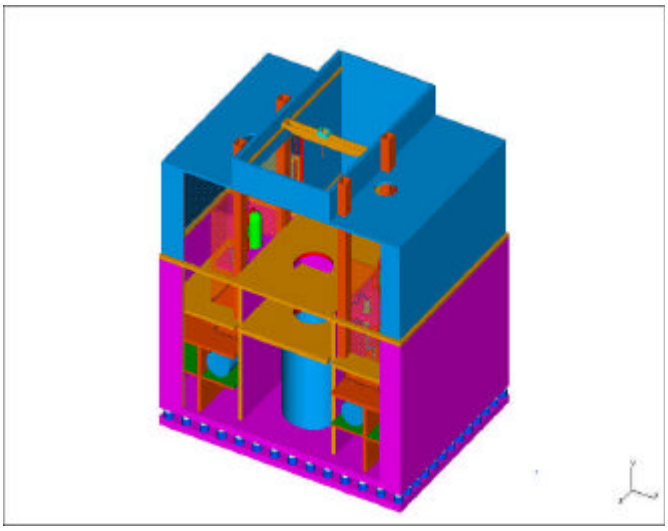


그림 1. 칼리머 원자로건물 구조도

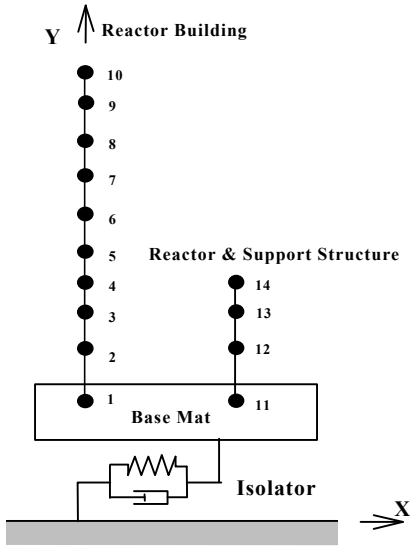



그림 2. Lumped Mass-Beam Models

## 2. 원자로건물의 집중질량-보 모델 동특성

전단벽과 콘크리트 슬라브로 이루어진 KALIMER 원자로건물의 지진응답시간이력해석을 수행하기 위한 모델은 그림 2 와 같다[3,4]. 원자로건물에 대하여는 수직방향으로 9 개 구역으로 나누어 10 개의 집중질량과 9 개의 보요소로 구성되고, 원자로구조물 지지벽은 원자로지지위치까지 4 개의 절점과 3 개의 보요소로 구성되었다. 보의 관성모멘트는 건물의 전단벽 강성만을 고려하여 계산하였으며, 수평면 상에 존재하는 슬라브는 집중질량으로 처리되었다.

원자로건물은 모든 내부기기를 포함하여 58,000 톤이며, 0.5 Hz 로 수평 면진하는 경우 면진강성은 $5.77 \times 10^8$ N/m, 등가감쇠계수를 12%로 하면 감쇠값은 $4.356 \times 10^7$ N.sec/m 가 된다[3]. 원자로건물을 1.5 Hz 로 수직 면진하는 경우 면진장치의 수직강성은 $5.2 \times 10^9$ N/m 이 되고, 등가감쇠계수를 3%로 하면 감쇠값은 $3.267 \times 10^7$ N.sec/m 가 된다. 질량중심의 편심과 질량의 회전관성모멘트를 고려하여 고유진동수 해석을 수행한 결과 비면진된 경우는 표 1 에, 수평 면진된 경우는 표 2 에, 수평 및 수직방향으로 3 차원 면진된 경우는 표 3 에 각각 제시하였다.

해석결과에서 수평 면진된 원자로건물의 고유진동수와 비면진된 원자로건물의 고유진동수를 비교한 결과 수평 면진에 의해 구조물의 고유진동수가 전체적으로 증가되고, 면진주파수에 유효질량이 집중되어 있다. 또한 수평 면진베어링의 수직방향 강성에 의해서 비면진 원자로건물의 1 차 수직방향 고유진동수가 15.1Hz 에서 12.8Hz 로 낮아진 것을 알 수 있다.

수평 면진된 원자로건물의 고유진동수와 3 차원 면진된 원자로건물의 고유진동수를 비교한 결과 수직면진에 의해서 수직방향 유효질량이 수직 면진주파수 1.5Hz 에 집중되며, 구조물의 수직방향 1 차 고유진동수도 12.8Hz 에서 24.7Hz 로 변화된 것을 알 수 있다.

표 1. Natural Frequencies of KALIMER Building

| Frequency No. | Major Direction | Frequency (Hz) | Participation Factor | Effective Mass(kg) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Z-rot | 6.21 | -6.07 | |
| 2 | Y | 6.35 | 1.26 | 2.82E+07 |
| 3 | X | 7.33 | 1.26 | 2.97E+07 |
| 4 | Z | 15.1 | 1.30 | 3.77E+07 |
| 5 | X | 17.0 | 0.422 | 1.05E+07 |
| 6 | Y | 17.6 | 0.507 | 1.13E+07 |
| 8 | X | 29.0 | -0.198 | 1.48E+06 |
| 9 | X | 29.1 | 0.067 | 5.00E+05 |
| 10 | Y | 31.7 | 0.167 | 1.17E+06 |
| 11 | Y,Z | 38.8 | 0.168 | 1.44E+06 |
| Total Mass =5.8E7 kg, Basemat Mass =1.16E7kg | | | | |

표 2. Natural Frequencies of 2D-Isolated KALIMER Building (0.5Hz)

| Frequency No. | Major Direction | Frequency (Hz) | Participation Factor | Effective Mass(kg) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Y | 0.5 | 1.00 | 5.72E+07 |
| 2 | X | 0.5 | 1.00 | 5.74E+07 |
| 3 | Z-rot | 6.21 | -2.82 | |
| 4 | Y | 8.73 | -.0049 | 491 |
| 5 | X | 10.1 | -.0032 | 257 |
| 6 | Z | 12.8 | 1.343 | 4.79E+07 |
| 8 | X,Z | 21.7 | .00059(-0.01) | 17.3(6672) |
| 9 | Y,Z | 22.9 | .00057(-0.027) | 15.3(36057) |
| 11 | X | 31.3 | .0067 | 2.13 |
| 13 | Z | 34.1 | -0.475 | 6.53E+06 |

표 3 Natural Frequencies of 3D-Isolated KALIMER Building (0.5Hz(H) + 1.5Hz(V))

| Frequency No. | Major Direction | Frequency (Hz) | Participation Factor | Effective Mass(kg) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Y | 0.5 | 1.00 | 5.72E+07 |
| 2 | X | 0.5 | 1.00 | 5.74E+07 |
| 3 | Z | 1.52 | 1.00 | 5.70E+07 |
| 4 | Z-rot | 6.21 | -2.82 | |
| 5 | Y | 8.73 | -.0049 | 491 |
| 6 | X | 10.1 | -.0032 | 257 |
| 8 | X | 21.7 | .00056 | 17.3 |
| 9 | Y,Z | 22.9 | .00055(0.0011) | 15.3(62.3) |
| 10 | Z | 24.7 | .0067 | 1115.6 |
| 12 | X | 31.3 | .00027 | 2.12 |

### 3. 원자로건물 지진응답시간이력해석

지진해석에 적용된 입력 지진은 인공지진 시간이력과 1995 년 Kobe 지진으로 하였다. 이력해석에서 시간증분은 0.005 초로 25 초간 수행했으며, 구조물의 구조감쇠는 5%을 적용하였다.

### 가. 인공지진 시간이력해석

인공지진의 최대 수평 및 수직방향 최대 입력가속도는 각각 0.30g 와 0.208g 이다. 면진 및 비면진 원자로건물의 하부기초판, 원자로용기 지지 위치 및 건물상단에 발생하는 최대 응답가속도를 표 4 에 나타냈다.

X 방향 수평 가진 시 건물상단과 원자로용기 지지점의 가속도응답스펙트럼 및 각 위치에서의 가속도이력을 그림 3 에 나타냈다. 수평 면진 경우 건물상단에 발생하는 X 방향 최대가속도가 면진베어링이 12% 등가감쇠를 갖는 경우 고정기초의 1.461g 에서 0.177g 로 줄었으며, 이 값은 입력지진가속도 0.30g 보다 작다. 이 때 면진베어링의 최대 수평 변형은 약 20cm 이며, 고무전단변형률은 72%로 계산되었다.

0.208g 의 수직방향 가진 시 건물상단과 원자로용기 지지점의 가속도응답스펙트럼 및 각 위치에서의 가속도이력을 그림 4 에 나타냈다. 수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 원자로용기 지지점의 가속도는 0.557g 로 비면진 일 때의 0.355g 보다 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 알려진 수평면진에 의해서 수직방향 응답가속도가 증가한다는 사실과 일치하고 있다[4]. 또한 3% 점성감쇠계수를 갖는 1.5Hz 수직방향 3 차원 면진을 채택한 경우 2 차원 면진에 의해서 증폭된 원자로용기 지지점의 수직방향가속도 응답인 0.557g 에서 비면진 경우의 수준인 0.352g 로 줄일 수 있었다. 면진장치의 점성감쇠를 6%와 9%로 하면 가속도응답이 0.284g 와 0.255g 로 커지지만 입력 수준 0.208g 보다 낮추지는 못하였다. 원자로건물 상단에서는 3 차원 면진효과가 원자로용기 지지점에서 보다 더 큰 것으로 나타났다. 면진장치의 최대 수직 변형량은 3% 점성감쇠 인 경우 최대 3.74cm 로 나타났다.

표 4. Acceleration and Displacement Values of Reactor Building under ATH Earthquake

| | X-Direction (g) | | Z-Vertical (g) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fixed Base | 2D-Isolation | Fixed Base | 2D-Isolation | 3D-Isolation | | |
| Node / Damping | - | 12% | - | 12% | 3% | 6% | 9% |
| 01 (Base) | 0.3 | 0.175 | 0.206 | 0.321 | 0.350 | 0.282 | 0.254 |
| 10 (Top) | 1.461 | 0.178 | 0.581 | 0.848 | 0.354 | 0.287 | 0.257 |
| 14 (RV Support) | 0.597 | 0.174 | 0.355 | 0.557 | 0.352 | 0.284 | 0.255 |
| Input Acceleration (11 or 301) | 0.3 | 0.3 | 0.206 | 0.208 | 0.208 | 0.208 | 0.208 |
| Max. Relative Displacement (cm) | | 19.8/ -8.8 | - | - | 3.66/ -3.74 | 3.03/ -2.97 | 2.69/ -2.51 |

### 나. Kobe 지진 응답시간이력해석

Kobe 실측지진을 입력하중으로 사용하였다. 지진의 최대 수평(NS) 및 수직방향 입력가속도는 각각 0.839g 와 0.338g 이다. 수평 및 수직 방향 가진에 의해 면진 및 비면진 원자로건물의 하부기초판, 원자로용기 지지 위치 및 건물상단에 발생하는 최대 응답가속도를 표 5 에 나타냈다.

X 방향 수평 가진시 건물상단과 원자로용기 지지점의 가속도응답스펙트럼 및 각 위치에서의 가속도이력을 그림 5 에 나타냈다. 수평 면진 경우 건물 상단에 발생하는 X 방향 최대가속도가 면진베어링이 12% 등가감쇠를 갖는 경우 고정기초의 1.486g 에서 0.181g 로 입력지진가속도 0.839g 보다 크게 줄었으며, 이 때 면진베어링의 최대 수평변형은 17.2cm, 전단변형률 62%로 계산되었다.

수직방향 가진 시 건물상단과 원자로용기 지지점의 가속도응답스펙트럼 및 각 위치에서의 가속도이력을 그림 6 에 나타냈다. 수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 원자로용기 지지점의 가속도는 0.708g 로 비면진 일 때의 0.558g 보다 증가되는 것을 확인할 수 있다. 또한 3 차원 면진을 채택한 경우 2 차원 면진에 의해서 증폭된 원자로용기 지지점의 수직방향가속도 응답은 면진장치의 점성감쇠가 3%,6%, 9%인 경우 0.723g, 0.626g 및 0.555g 로 나타났다. 면진장치의 최대 수직 변형은 점성감쇠가 3%, 6%, 9% 인 경우 최대값이 각각 7.6cm, 6.5cm, 4.5cm 로 나타났다.

표 5. Acceleration and Displacement Values of Reactor Building under Kobe Earthquake

| | X-Direction (g) | | Z-Vertical (g) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fixed Base | 2D-Isolation | Fixed Base | 2D-Isolation | 3D-Isolation | | |
| Node / Damping | - | 12% | - | 12% | 3% | 6% | 9% |
| 01 (Base) | 0.839 | 0.181 | 0.339 | 0.421 | 0.715 | 0.619 | 0.551 |
| 10 (Top) | 1.486 | 0.188 | 0.922 | 1.171 | 0.728 | 0.631 | 0.558 |
| 14 (RV Support) | 1.018 | 0.181 | 0.558 | 0.708 | 0.723 | 0.626 | 0.555 |
| Input Acceleration (11 or 301) | 0.839 | 0.837 | 0.339 | 0.338 | 0.338 | 0.338 | 0.338 |
| Max. Relative Displacement (cm) | | 17.2/ -10.43 | - | - | 7.0/ -7.6 | 6.4/ -6.5 | 4.14/ -4.5 |

## 4. 결 론

지진응답해석 결과로부터 수평 면진하는 경우 구조물에서 발생하는 수평 응답가속도가 크게 줄고, 상대변위가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다.

수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 원자로지지점의 가속도는 인공지진과 Kobe 지진하중에 대하여 0.557g 와 0.708g 로 비면진일 때의 0.355g 와 0.558g 보다 증가되었다.

수직면진을 채택한 원자로건물에 있어서는 인공지진의 경우 수직방향 1.5Hz 로 면진하는 경우 점성감쇠가 3% 이상이면 원자로용기 지지점에서의 응답이 비면진 경우 보다 낮아졌고, Kobe 지진의 경우는 수직방향 점성감쇠가 9%는 되어야 비면진 경우보다 가속도 크기를 낮출 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

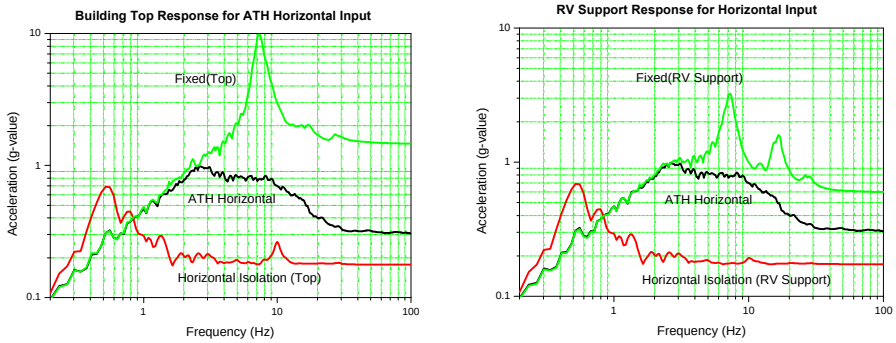
참고문헌

[1] 한도희 등, KALIMER 예비개념설계보고서, KAERI/TR-1636/2000, 한국원자력연구소, 2000.

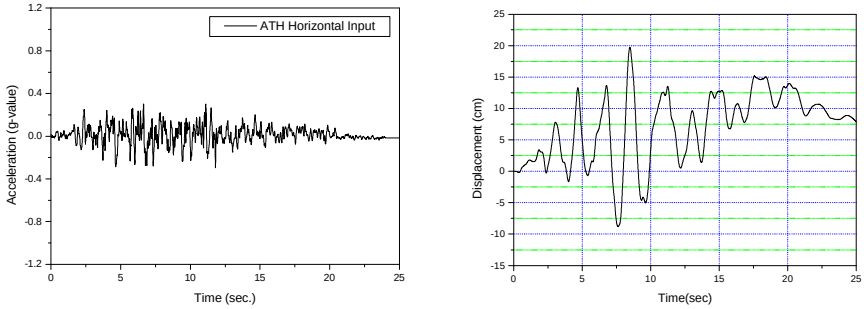
[2] ABAQUS Computer Program, Version 5.7.

[3] 유 봉,이재한,구경회, 이형연, 최인길, KALIMER 원자로건물 지진해석모델링 및 지진응답해석, 한국원자력학회 '98 춘계학술발표회 논문집, pp.903-908,1998.5.

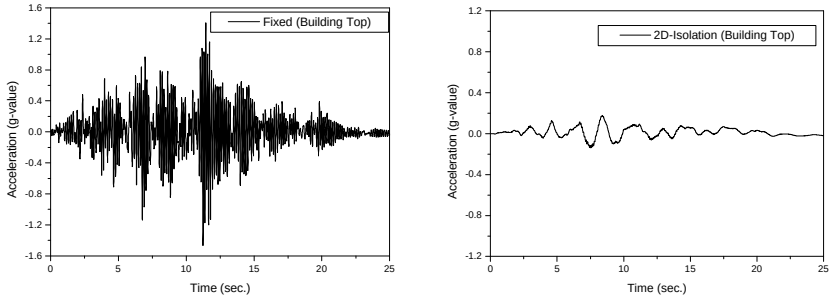
[4] 유 봉,이재한,구경회, 지반특성에 따른 면진 및 비면진구조물의 가속도 응답 영향평가, KAERI/TR-607/96, 한국원자력연구소, 1996.



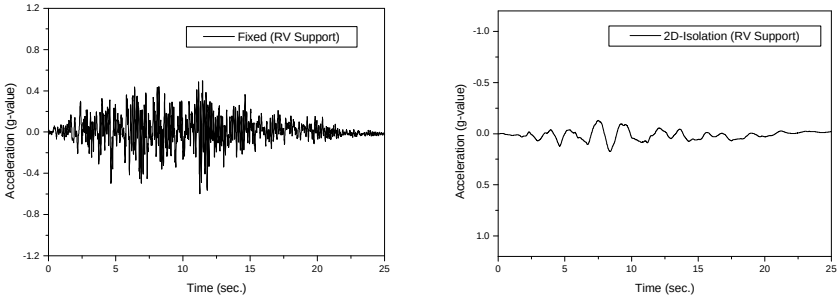

Response Spectrum at Building Top & RV Support (5%)




ATH Horizontal Input　　LRB Displacement Time History

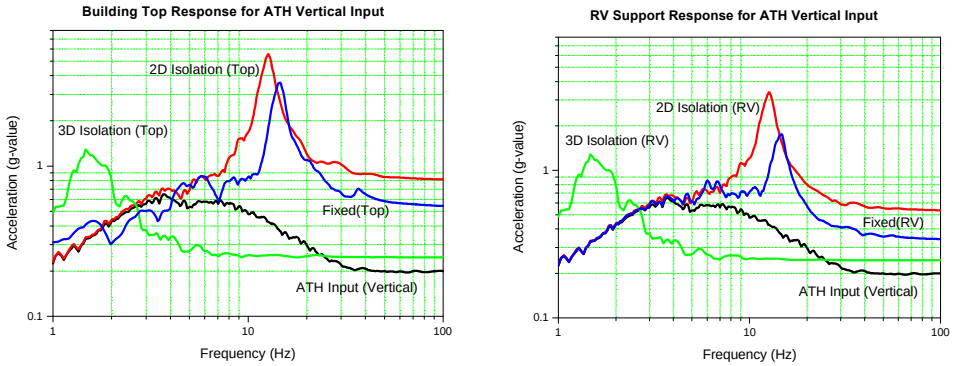



Building Top Acceleration Time History for ATH Horizontal Input

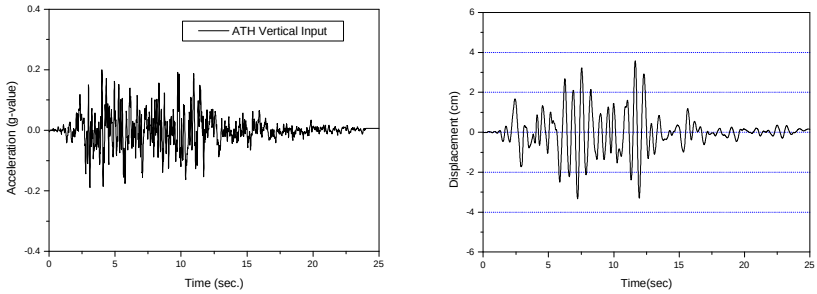



RV Support Acceleration Time History for ATH Horizontal Input

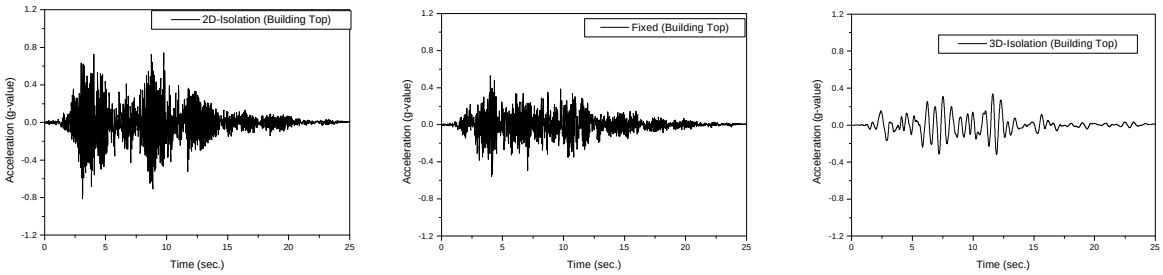
그림 3.　Acceleration Responses for KALIMER Building under Horizontal Artificial Time History (ATH)



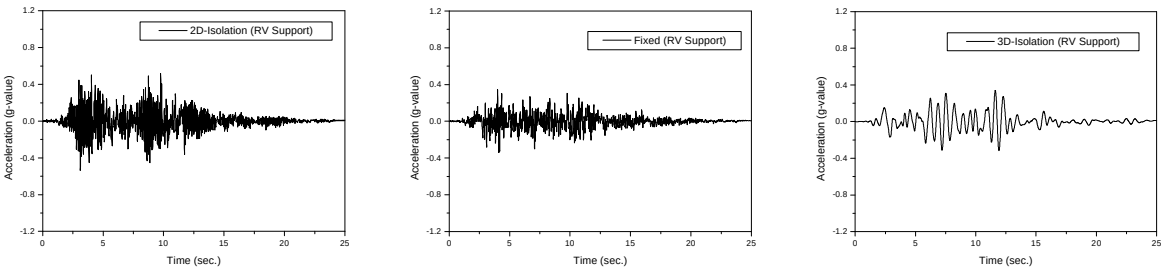

Response Spectrum at Building Top & RV Support (5%)




ATH Vertical Input LRB Displacement Time History

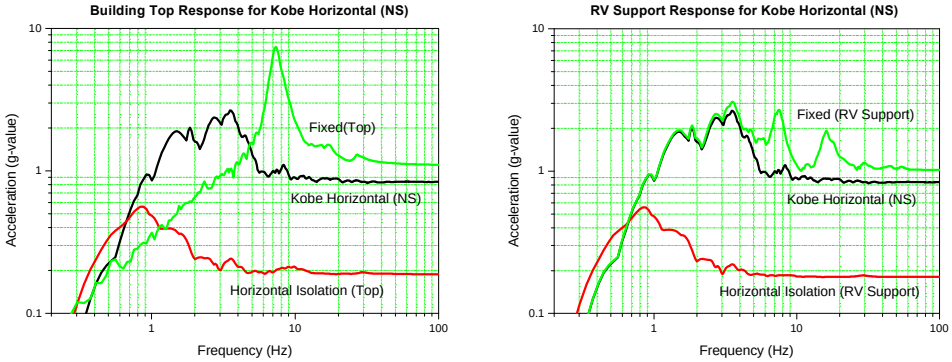



Building Top Acc. Time History for ATH Vertical Input

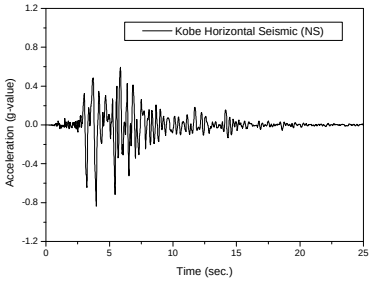



RV Support Acc. Time History for ATH Vertical Input

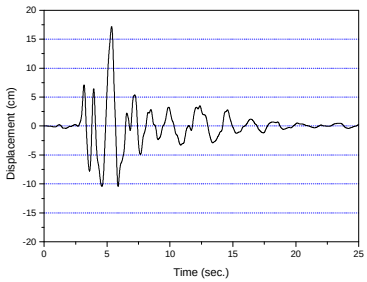
**그림** 4. Acceleration Responses for KALIMER Building under Vertical Artificial Time History (ATH)



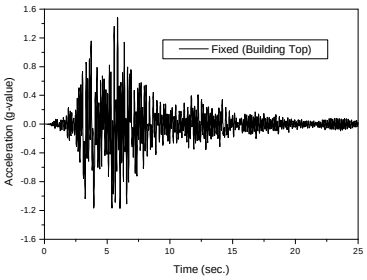

Response Spectrum at Building Top & RV Support (5%)

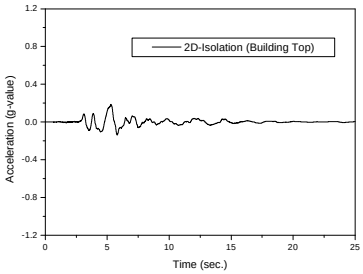



Kobe Horizontal Input

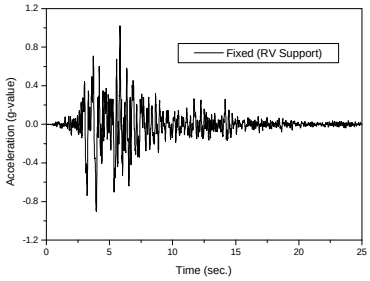


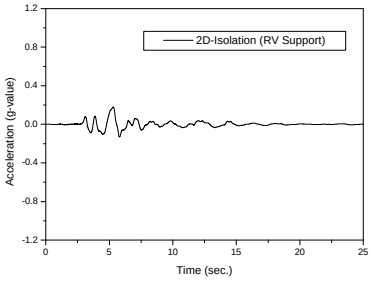

LRB Displacement Time History



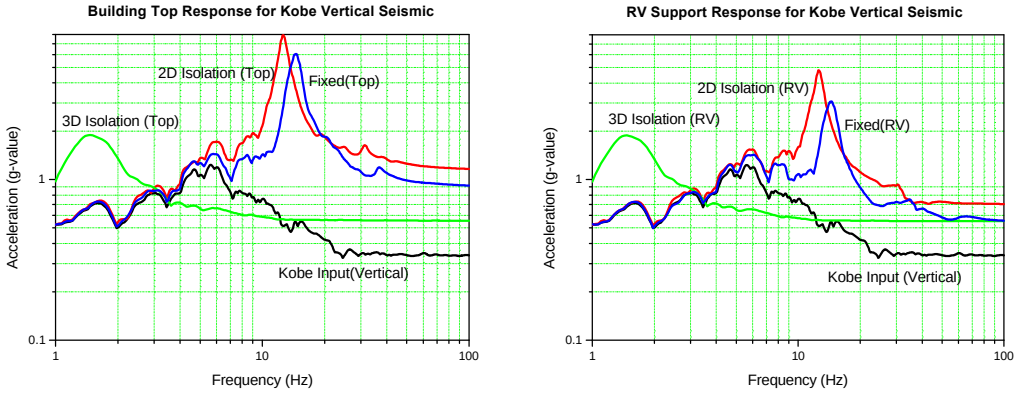

Building Top Acc. Time History for Kobe Horizontal Seismic



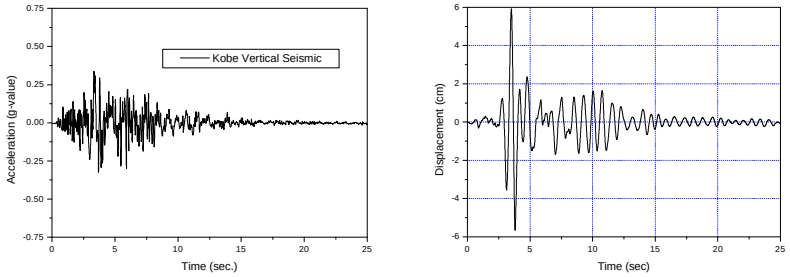




RV Support Acc. Time History for Kobe Horizontal Seismic

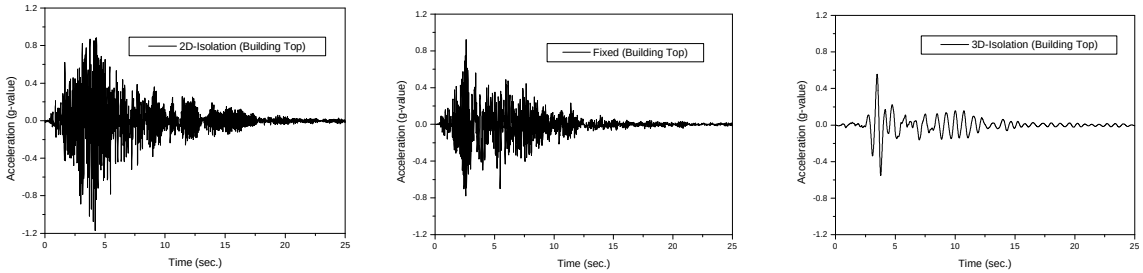
**그림** 5. Acceleration Responses for KALIMER Building under Kobe Horizontal Earthquake



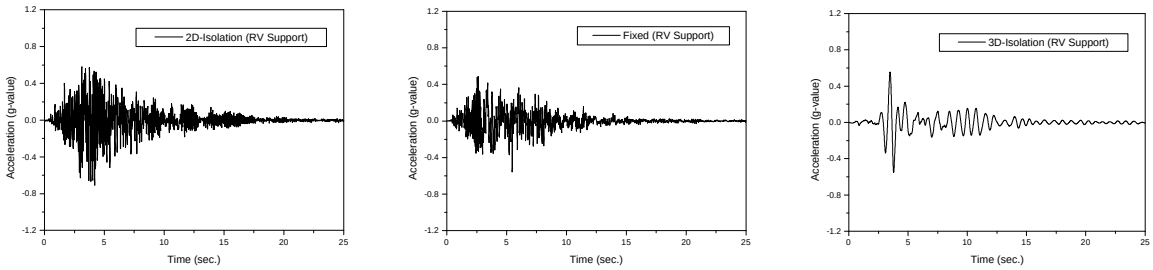

Response Spectrum at Building Top & RV Support (5%)




Kobe Vertical Input LRB Displacement Time History




Building Top Acc. Time History for Kobe Vertical Seismic




RV Support Acc. Time History for Kobe Vertical Seismic

그림 6. Acceleration Responses for KALIMER Building under Kobe Vertical Earthquake