

PVRC 감쇠를 고려한 밀립관의 시간이력해석

Time History Analysis of Surge Line Considering PVRC Damping

김 태 형* · 전 장 환** · 김 종 민** · 윤 기 석*** · 김 인 용***

Kim, Tae-Hyung · Jheon, Jang-Hwan · Kim, Jong-Min · Yoon, Ki-Seuk · Kim, In-Yong

ABSTRACT

The PVRC(Pressure Vessel Research Council) damping is for the response spectrum analysis of the piping system. In this study, the possibility to apply it to the time history analysis is evaluated to reduce the higher conservatism for the structural integrity. The evaluation was performed for the surge line connecting the pressurizer to the hot-leg, and the whole mode includes the RCS and the building structures with the surge line. The analyses were performed using ANSYS code.

The first modal analysis shows the modes of the surge line are isolated from those of the other structures. The composite modal damping was calculated with PVRC damping for the surge line and RG 1.60 damping for the other structures by using ANSYS routines. Of the calculated composite modal damping values, the composite modal damping values related to the modes of the surge line were replaced with the PVRC damping values with respect to its frequencies. With this replacement, the composite modal damping values of the other structures were not changed.

Based on this decouple characteristics, the time history analyses for the seismic events with PVRC damping for the surge line were performed. And the results show the resultant loads can be reduced by up to 50%.

1. 서 론

RG 1.60⁽¹⁾에 따르면 구조물에 대한 감쇠는 지진하중의 종류, 구조물의 특성 및 배관 크기에 따라 다른 값으로 주어진다. 그리고 PVRC(Pressure Vessel Research Council)에서는 RG 1.60에서 배관에 대하여 규정하고 있는 감쇠를 대체하는 PVRC 감쇠⁽²⁾에 대하여 언급하고 있다. PVRC 감쇠는 배관의 고유진동수에 따라 감쇠 값이 결정되며 배관의 크기에 관계없이 운전정지지진(OBE)이나 안전정지지진(SSE)에 대하여 적용할 수 있는 감쇠로써 응답스펙트럼해석에 사용되는 감쇠이다. 따라서 지진하중에 의한 배관의 응답을 구하기 위해 해선 PVRC 감쇠를 이용한 응답스펙트럼해석을 수행하는 방법과 배관이 포함되어 있는 구조물에 대하여 RG 1.60에서 제시된 감쇠를 각 요소에 적용한 후, 모드해석을 통하여 전체 구조물의 모드별 감쇠를 구하고 이렇게 구해진 모드별 감쇠를 이용해서 지진하중에 대한 시간이력해석을 수행하는 방법이 있을 수 있다.

* 한국전력기술(주) 원자로설계개발단 차장 E-mail: kimth@kopec.co.kr

** 한국전력기술(주) 원자로설계개발단 차장

*** 한국전력기술(주) 원자로설계개발단 처장

본 연구에서는 고유진동수에 따라 감쇠 값을 달리 적용해야 하는 요소가 포함된 구조물에 대하여 시간이력해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 밀림관, 원자로냉각재계통, 가압기, 1·2차측 차폐건물 등이 포함된 해석모델을 작성하였으며, 밀림관에 대해서는 PVRC 감쇠를 적용하였고 다른 요소들은 RG 1.60에 따른 감쇠 값을 사용하였다. 해석모델에 대하여 모드해석을 수행한 후 전체 구조물에 대한 밀림관의 모드기여도를 파악하였다. 또한, 밀림관의 고유진동수에 해당하는 각각의 PVRC 감쇠를 밀림관에 적용하여 구조물의 복합모드감쇠를 구한 후 밀림관의 감쇠 값에 따른 구조물의 복합모드감쇠 변화를 살펴보았다. 해석 결과를 평가함으로써 PVRC 감쇠를 시간이력해석에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다.

또한 밀림관에 대하여 PVRC 감쇠를 고려한 시간이력해석 결과와 밀림관에 대한 응답스펙트럼해석 결과를 비교하였다. 본 해석 결과를 이용하면 기존의 응답스펙트럼해석 결과를 사용한 밀림관의 LBB 평가에 대한 보수성을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

2. 해석 모델

그림 1은 밀림관 및 밀림관 지지대의 배치를 보여주고 있다. 밀림관은 3개의 수직방향의 Constant Effort Hanger(H1Y, H2Y & H3Y), 2개의 유압스너버(S1X & S2Y) 그리고 1개의 수평방향의 Rigid Sway Strut(R1X)로 구성되어 있다.

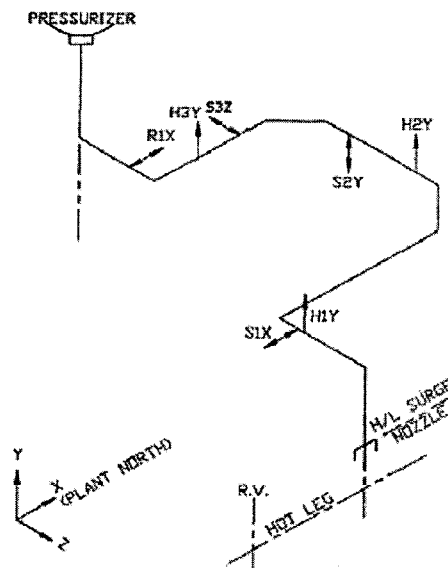


그림 1. 밀림관 및 밀림관 지지대

범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS⁽³⁾를 사용하여 밀립관, 원자로냉각재계통, 가압기 그리고 1·2차측 차폐건물을 모델링하였다(그림 2). 그림 2에서 Y축은 수직방향, X축과 Z축은 수평방향을 각각 나타낸다.

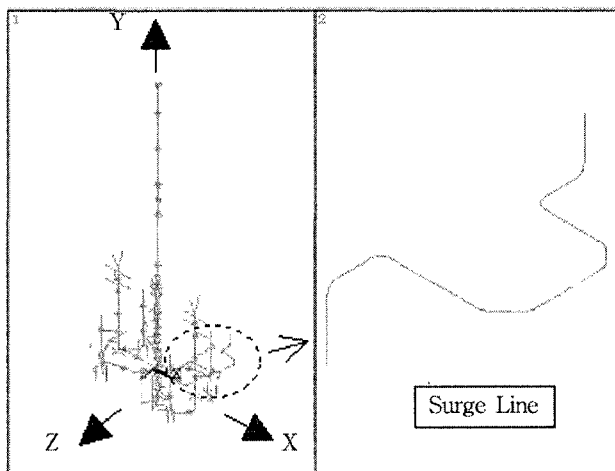


그림 2. 유한요소모델

3. 모드해석

Householder(reduced) 방법을 사용하여 누적 질량비가 1.0인 200개의 모드에 대하여 해석을 수행하였고 각 구조물의 고유진동수 및 모드형상을 구하였다. 이 때, 1·2차측 차폐건물, 원자로용기, 증기발생기, 원자로 냉각재펌프 지지대의 하단을 경계조건으로 구속하였다. 구조물의 모드와 모드기여도로부터 밀립관의 고유진동수(표 1) 및 모드형상(그림 3)을 구하였고, 모드해석 결과로부터 밀립관의 거동은 다른 구조물과 동적으로 비연성(decoupling)되고 있음을 확인하였다.

표 1. 밀립관의 고유진동수

No. of Mode	Frequency	No. of Mode	Frequency
7	5.7163	44	21.062
8	6.4756	45	21.138
11	10.558	56	24.640
14	12.278	59	25.694
34	15.938	67	29.517
42	19.206	74	31.926

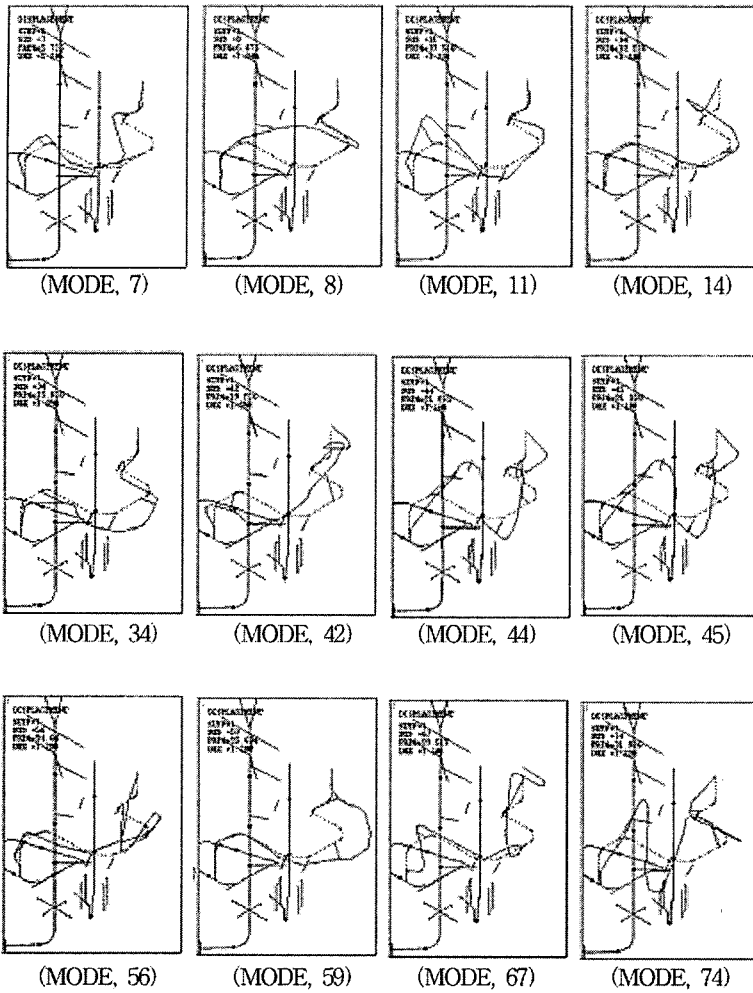


그림 3. 밀리핀관의 모드형상

4. 복합모드감쇠

전체 구조물을 구성하는 각각의 요소들에 대하여 재질특성에 따라 RG 1.60⁽³⁾에서 제시된 서로 다른 감쇠 값을 적용한 후 구조물의 고유진동수 및 모드에 따라 복합모드감쇠를 구하였다. ANSYS에선 MDAMP 명령어를 사용하여 구조물의 진동모드에 따른 모드감쇠를 정의하고 있다.

그림 4는 밀리핀관의 응답스펙트럼해석에서 사용되고 있는 PVRC 감쇠를 나타내며 밀리핀관의 고유진동수에 따라 5% 영역(10Hz 이하), 2% 영역(20Hz 이상) 그리고 2%에서 5% 영역(10Hz - 20Hz)으로 나뉘어 진다. 시간이력해석 시 밀리핀관에 PVRC 감쇠를 적용하기 위하여 밀리핀관의 감쇠 변화에 따른 전체 구조물의 복합모

드감쇠 변화를 살펴보았다. 밀립관에 대하여 2% 감쇠와 5% 감쇠를 각각 사용하여 전체 구조물의 복합모드 감쇠를 구한 후, 밀립관의 감쇠 변화가 전체 구조물의 복합모드감쇠에 미치는 영향을 살펴보았다.

표 2는 밀립관의 감쇠 변화에 따른 전체 구조물의 복합모드감쇠 변화를 보여주고 있다. 여기서, 2% 감쇠와 5% 감쇠의 해석결과는 밀립관에 대하여 각각 2% 감쇠와 5% 감쇠를 적용하였을 경우에 대한 전체 구조물의 복합모드감쇠를 나타낸다. 여기서, 굵게 표시된 값은 밀립관의 고유진동수에 해당하며 ratio는 2% 감쇠와 5% 감쇠의 해석결과 비이다. 표 2의 해석결과로부터 밀립관의 고유진동수를 제외한 다른 구조물의 고유진동수에 해당하는 복합모드감쇠는 밀립관의 감쇠 변화에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 이처럼 밀립관과 다른 구조물의 동적거동이 서로 비연성되는 특성을 이용하면 밀립관에 PVRC 감쇠를 적용할 수 있고 전체 구조물에 대한 복합모드감쇠를 구할 수 있다. 즉, 표 2의 해석결과를 모드해석으로부터 밀립관의 고유진동수를 구한 후 그 주파수에 해당하는 PVRC 감쇠 값을 전체 구조물의 모드감쇠로 사용할 수 있음을 보여준다.

그림 4로부터 밀립관의 고유진동수에 해당하는 PVRC 감쇠를 밀립관에 적용하고 다른 구조물의 감쇠를 고려하여 전체 구조물의 복합모드감쇠를 구하였다. 밀립관 모드에 대하여 전체 구조물의 복합모드감쇠를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 PVRC Damping은 그림 4로부터 구한 밀립관의 고유진동수에 해당하는 PVRC 감쇠 값을 나타내며 2% Damping과 5% Damping은 밀립관에 대하여 각각 2% 감쇠와 5% 감쇠를 적용하여 구한 전체 구조물의 복합모드감쇠를 나타낸다. 그리고 Case1의 결과는 밀립관의 고유진동수가 10Hz에서 20Hz 사이인 경우로써 밀립관의 고유진동수에 해당하는 PVRC 감쇠 값을 밀립관의 감쇠로 사용했을 때의 전체 구조물의 복합모드감쇠를 나타낸다. Ratio는 2%, 5% 그리고 Case1의 감쇠에 대한 PVRC 감쇠 비를 나타낸다. 표 3의 결과로부터 밀립관에 대하여 PVRC 감쇠를 적용해서 구한 전체 구조물의 복합모드감쇠와 PVRC 감쇠는 20Hz 이내에선 2% 이내에서 잘 일치하고 있다. 따라서 20Hz 이내에선 밀립관의 고유진동수에 해당하는 PVRC 감쇠를 그 진동수에 해당하는 구조물의 복합모드감쇠로 사용할 수 있다. 또한 20Hz 이상인 경우에는 밀립관에 대하여 2% 감쇠를 적용하여 구한 복합모드감쇠를 전체 구조물의 복합모드감쇠로 사용해야 함을 알 수 있다.

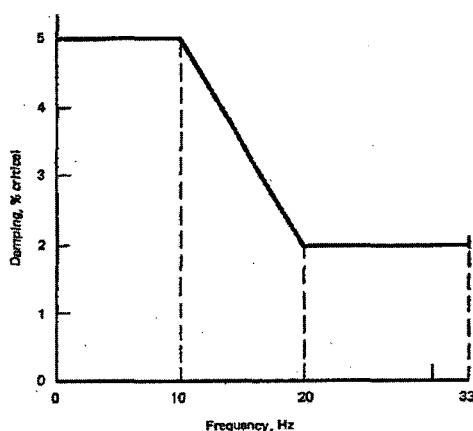


그림 4. 배관의 응답스펙트럼해석에 사용되는 감쇠 값 (PVRC 감쇠)

표 2. 밀림관의 감쇠 값에 따른 전체 구조물의 복합모드감쇠

No. of Mode	Freq.	2% Damping	5% Damping	Ratio
1	0.87985	7.446E-02	7.446E-02	1.00
2	0.87991	7.445E-02	7.445E-02	1.00
3	4.5781	3.001E-02	3.001E-02	1.00
4	4.5843	5.000E-02	5.000E-02	1.00
5	4.5855	5.001E-02	5.001E-02	1.00
6	5.0274	3.002E-02	3.002E-02	1.00
7	5.7163	2.020E-02	4.961E-02	2.46
8	6.4756	2.003E-02	4.994E-02	2.49
9	10.401	3.065E-02	3.085E-02	1.01
10	10.503	4.414E-02	4.443E-02	1.01
11	10.558	2.040E-02	4.967E-02	2.43
12	11.761	3.000E-02	3.001E-02	1.00
13	11.785	3.116E-02	3.117E-02	1.00
14	12.278	2.015E-02	4.974E-02	2.47
15	12.385	3.083E-02	3.083E-02	1.00
16	12.422	3.086E-02	3.093E-02	1.00
17	12.452	5.010E-02	5.010E-02	1.00
18	12.492	3.000E-02	3.000E-02	1.00
19	12.495	3.000E-02	3.000E-02	1.00
20	12.749	3.001E-02	3.001E-02	1.00
21	12.902	3.027E-02	3.027E-02	1.00
22	13.234	5.000E-02	5.000E-02	1.00
23	13.245	4.998E-02	4.998E-02	1.00
24	13.270	3.780E-02	3.782E-02	1.00
25	13.952	4.152E-02	4.153E-02	1.00
26	14.239	3.968E-02	3.970E-02	1.00
27	14.388	3.028E-02	3.028E-02	1.00
28	14.455	3.000E-02	3.000E-02	1.00
29	14.734	4.397E-02	4.403E-02	1.00
30	14.865	3.938E-02	3.938E-02	1.00
31	15.299	3.002E-02	3.002E-02	1.00
32	15.450	3.539E-02	3.539E-02	1.00
33	15.523	3.366E-02	3.367E-02	1.00
34	15.938	2.011E-02	4.997E-02	2.48
35	17.060	3.025E-02	3.025E-02	1.00
36	17.376	3.135E-02	3.141E-02	1.00
37	18.138	3.030E-02	3.031E-02	1.00
38	18.166	3.001E-02	3.001E-02	1.00
39	18.169	3.000E-02	3.000E-02	1.00
40	18.175	3.002E-02	3.003E-02	1.00

No. of Mode	Freq.	2% Damping	5% Damping	Ratio
41	18.738	3.647E-02	3.703E-02	1.02
42	19.206	2.069E-02	4.897E-02	2.37
43	19.992	3.026E-02	3.030E-02	1.00
44	21.062	2.409E-02	4.205E-02	1.75
45	21.138	2.630E-02	3.762E-02	1.43
46	21.432	3.021E-02	3.039E-02	1.01
47	21.501	3.054E-02	3.056E-02	1.00
48	21.572	3.021E-02	3.021E-02	1.00
49	21.595	3.000E-02	3.000E-02	1.00
50	22.934	3.005E-02	3.005E-02	1.00
51	23.325	3.013E-02	3.014E-02	1.00
52	23.778	3.023E-02	3.025E-02	1.00
53	24.378	2.999E-02	3.003E-02	1.00
54	24.495	5.000E-02	5.000E-02	1.00
55	24.517	5.000E-02	5.000E-02	1.00
56	24.640	2.050E-02	4.903E-02	2.39
57	24.824	2.993E-02	3.016E-02	1.01
58	24.881	2.997E-02	3.008E-02	1.00
59	25.694	2.041E-02	4.926E-02	2.41
60	25.848	5.000E-02	5.000E-02	1.00
61	25.849	5.000E-02	5.000E-02	1.00
62	27.569	5.006E-02	5.006E-02	1.00
63	28.502	3.955E-02	3.959E-02	1.00
64	28.531	3.003E-02	3.003E-02	1.00
65	29.003	3.000E-02	3.002E-02	1.00
66	29.315	3.106E-02	3.106E-02	1.00
67	29.517	2.170E-02	4.694E-02	2.16
68	30.010	4.864E-02	4.895E-02	1.01
69	30.184	3.018E-02	3.018E-02	1.00
70	30.466	2.959E-02	3.216E-02	1.09
71	30.729	3.398E-02	3.427E-02	1.01
72	30.906	4.096E-02	4.098E-02	1.00
73	31.211	2.956E-02	3.137E-02	1.06
74	31.926	2.032E-02	4.953E-02	2.44
75	32.896	3.625E-02	3.646E-02	1.01
76	33.641	3.097E-02	3.097E-02	1.00
77	34.007	3.105E-02	3.106E-02	1.00
78	36.565	3.119E-02	3.154E-02	1.01
79	36.891	6.856E-02	6.857E-02	1.00
80	37.047	6.395E-02	6.399E-02	1.00

표 3. 밀림판의 PVRC 감쇠 값에 따른 전체 구조물의 복합모드감쇠

No. of Mode	Frequency	2% Damping	5% Damping	PVRC Damping	Case 1	Ratio
7	5.7163	2.020	4.961	5.000	-	1.01
8	6.4756	2.003	4.994	5.000	-	1.00
11	10.558	2.040	4.967	4.833	4.804	1.01
14	12.278	2.015	4.974	4.317	4.300	1.00
34	15.938	2.011	4.997	3.218	3.223	1.00
42	19.206	2.069	4.897	2.238	2.293	0.98
44	21.062	2.409	4.205	2.000	-	0.83
45	21.138	2.630	3.762	2.000	-	0.76
56	24.640	2.050	4.903	2.000	-	0.98
59	25.694	2.041	4.926	2.000	-	0.98
67	29.517	2.170	4.694	2.000	-	0.92
74	31.926	2.032	4.953	2.000	-	0.98

Note : Damping Value = %

5. 시간이력해석

밀림판에 대하여 PVRC 감쇠가 고려된 전체 구조물에 대하여 지진하중에 대한 시간이력해석을 수행하였다. 그림 5는 지진하중에 대한 가속도 시간이력을 나타낸다.

밀림판 지지대에 작용하는 모멘트에 대하여 응답스펙트럼해석 결과에 대한 시간이력해석 결과의 비(ratio)를 표 4에 나타내었다. 여기서, 시간이력해석을 통하여 밀림판 지지대에 작용하는 하중의 크기는 응답스펙트럼해석 결과에 비하여 50%까지 감소함을 알 수 있다.

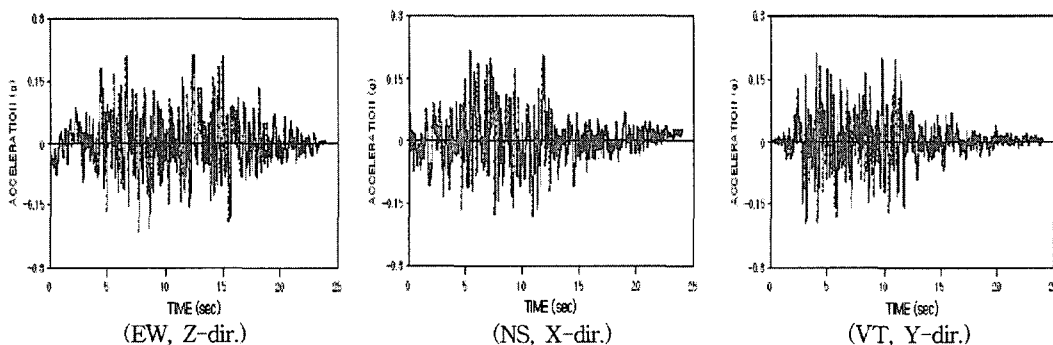


그림 5. 지진하중

표 4. 해석결과

Loc.	Ratio				
	Ma	Mb	Mc	BM	RM
H1Y	0.47	0.44	0.50	0.45	0.46
S1X	0.47	0.44	0.50	0.45	0.46
H2Y	0.40	0.33	0.50	0.39	0.39
S2Y	0.40	0.47	0.40	0.45	0.44
H3Y	0.26	0.45	0.36	0.43	0.42
R1X	0.49	0.46	0.33	0.44	0.45

Note : 1) Ma = Torsion, Mb & Mc = Bending Moments
 2) BM = SRSS of (Mb & Mc), RM = SRSS of (Ma, Mb & Mc)
 3) Ratio = Results of time history analysis to response spectrum analysis

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 고유진동수에 따라 감쇠 값을 달리 적용해야 하는 요소가 포함된 구조물에 대하여 시간이력해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 밀립관, 원자로냉각재계통, 가압기, 1:2차측 차폐건물 등이 포함된 해석모델을 작성하였으며, 밀립관에 대해서는 PVRC 감쇠를 적용하였고 다른 요소들은 RG 1.60에 따른 감쇠 값을 사용하여 밀립관의 감쇠 값에 따른 구조물의 복합모드감쇠 변화를 평가하였다.

해석결과로부터 밀립관의 고유진동수에 해당하는 구조물의 복합모드감쇠에 대하여 20Hz 이내에선 밀립관의 고유진동수에 해당하는 PVRC 감쇠를 그 진동수에 해당하는 구조물의 복합모드감쇠로 사용하고, 20Hz 이상에선 2% 감쇠를 밀립관에 적용하여 구한 복합모드감쇠를 그 진동수에 해당하는 구조물의 복합모드감쇠로 사용해야 하며, 밀립관의 고유진동수에 해당하지 않는 구조물의 고유진동수에 대한 복합모드감쇠는 밀립관의 감쇠 값에 영향 받지 않음을 확인하였다. 또한 PVRC 감쇠가 고려된 시간이력해석을 수행하여 밀립관 지지대에 작용하는 하중은 응답스펙트럼해석 결과에 비해 50%까지 감소함을 확인하였다. 따라서 본 해석 결과를 이용하면 기존의 응답스펙트럼해석 결과를 사용한 밀립관의 LBB 평가에 대한 보수성을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. RG 1.60 Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants
2. ASME Code Case N-411-1, Alternative Damping Values for Response Spectra Analysis of Class 1, 2 and 3 Piping Section III, Division 1.
3. ANSYS 7.1 User's Manual, ANSYS, Inc.