한국압력기기공학회 논문집
제13권 제2호 2017년 12월 pp. 38-43

ISSN 1738-8333
http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2017.13.2.038

동적 시간이력 탄소성 지진 해석을 위한 레일레이 감쇠계수 결정방법 고찰

김종성†·이석현*·권형도**·오창영***

Investigation on the Determination Method of Rayleigh Damping Coefficients for Dynamic Time History Elastic-Plastic Seismic Analysis

Jong Sung Kim†, Seok Hyun Lee* and Hyeong Do Kweon** and Chang-Young Oh***

(Received 27 October 2017, Revised 27 November 2017, Accepted 14 December 2017)

ABSTRACT

This paper investigates how to determine the Rayleigh damping coefficients for dynamic time history seismic analysis of piping systems. Three methods are applied. The first one is a conventional method to use the natural frequencies of the mode 1 and 2, derived from dynamic analysis. The second method is to determine the Rayleigh damping coefficients based on frequency range of the acceleration histories. The last one is a iterative transient response analysis method using the transient analysis results without and with damping. It is found that the conventional method and the iterative transient response method yield the same results whereas the acceleration frequency-basis method provides more conservative result than the other methods. In addition, it is concluded that the iterative transient response method is recommended.

Key Words : Dynamic Time History Elastic-Plastic Seismic Analysis (동적 시간이력 탄소성 지진해석), Finite Element Analysis (유한요소 해석), Rayleigh Damping (레일레이 감쇠), Nuclear Piping (원자력 배관)

1. 서 론

2011년 동일본 대지진을 비롯하여 2016년 경주지진이 발생함에 따라 우리나라에도 원전의 건전성과 관련하여 지진에 대한 관심이 증대되고 있다. JNES (Japanese Nuclear Energy Safety Organization)와 NUPEC (Nuclear Power Engineering Center)에서는 실 원전 배관계와 동등한 수준의 배관계에 대한 지진 실험을 수행한 바 있으며[1], US NRC (United States, Nuclear Regulatory Commission)의 지원 하에 미국 BNL (Brookhaven National Laboratory)에서 JNES/ NUPEC 배관계 지진실험을 해석적으로 평가한 바 있다[2]. 일본 NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)와 도쿄대는 곡관 배관계 지진시험을 수행하고 유한요소 해석을 위한 반복 물성 거동을 고찰한 바 있다[3]. 인도의 BARC (Bhabha Atomic Research Center)에서는 대형 지진하중 조건에 해당하는 큰 반복하중에 대해 원전 배관의 손상 가능성을 파악하기 위해 배관계 실험을 수행하였다[4]. 상기 서술한 연구들은 실험에 집중되어 있는 연구이며 레일레이 감쇠계수 (Rayleigh damping coefficient)를 이용한 유한요소 해석을 수행 시 일반적 관습적 방법에 따라 동특성 해석 결과로부터 도출된 모드 1과 2에 해당하는 고유진동수를 이용하여 레일레이 감쇠계수를 설정하고 있다. 가진

† 회원, 세종대학교
kimjsbat@sejong.ac.kr
TEL: (010)2792-7980 FAX: (02)3408-4413
* 세종대학교
** 한국수력 중앙연구원
*** 한국기계연구원 재료연구소

주파수의 영역이 고유진동수 해석을 통해 얻은 모드 1과 2의 고유진동수들과 크게 벗어나 있다면 일반적인 방법이 타당한가에 대한 의문점이 존재한다. 그러나 이를 고찰한 연구를 국내외적으로 확인하기 어렵다.

본 연구에서는 가진주파수와 모드 1, 2의 고유진동수와 큰 차이를 가지는 원전 배관계를 대상으로 레일레이 감쇠계수를 결정하는 방법을 고찰하였다.

2. 해석 대상

2.1 형상 정보 및 가진 이력

Fig. 1은 해석대상의 형상정보이다. 해석대상은 가동원전의 안전 1등급 정지냉각계통 배관을 대상으로 선정하였다. 약 3000kg의 밸브가 양 앵커 포인트 부근에 달려 있으며 4개의 지지대가 있다. 지지대 1은 X방향으로 지지를 하고있으며 지지대 2,3,4는 Y방향으로 지지를 하고 있다. Fig. 2는 해석에 사용된 가속도 시간이력이다. El Centro Earthquake 시간 가진이력을 근거로 BDBE (Beyond Design Basis Earthquake)[5]에 해당하는 최대 1.18g 수준의 가진이력을 각 지지대별로 도출한 결과[6]를 가지고 가진하였다. 이때 NS는 북남 방향 VT는 수직 방향, EW는 동서 방향을 의미한다 S1, S2, S3, S4는 Fig. 1에 제시되어 있는 지지대를 의미한다.

2.2 유한요소 모델

Fig. 3은 해석대상의 유한요소 모델이다. 그림에서 보이는 바와 같이 빔 요소와 연속체 요소를 사용한 복합모델을 사용하였다. 이때 연속체의 모델의 두께방향 요소는 8개 원주방향 요소개수는 24개 길이방향(곡관의 요소 개수)의 요소개수는 16개를 사용하였으며[7]요소형태는 C3D8I를 사용하였으며, 해석은 상용 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.[8]

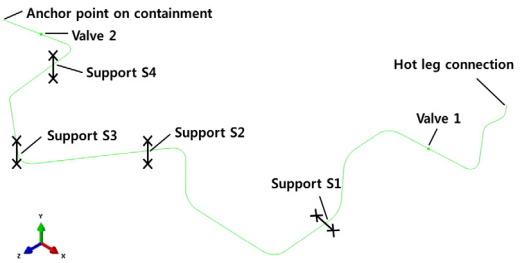


Fig. 1 Geometry of Safety Class 1 Piping System in Shut-down Cooling System of OPR 1000

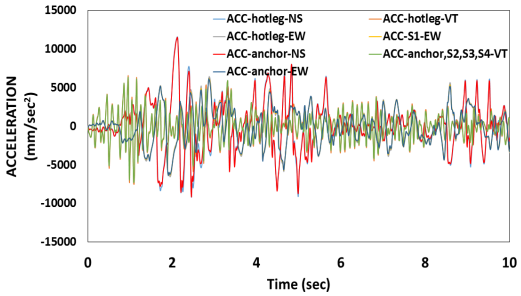


Fig. 2 Acceleration-Time History for Each Support

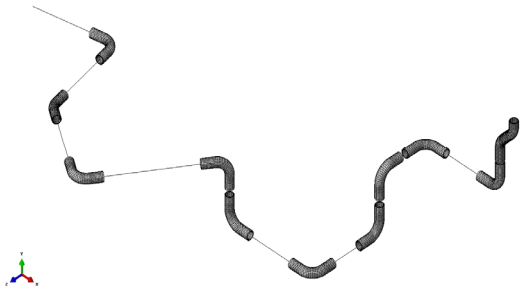


Fig. 3 FE Model of OPR1000 Shut-down Cooling System

2.3 재료물성

해석대상의 재료는 오스테나이트 스테인리스 강 TP316이며 해석에 사용된 물성 정보는 Table 1[9]과 같다. 지진의 반복효과를 고려하기 위하여 복합경화 모델들중 하나인 Chaboche 모델을 사용하였다. Chaboche 이동경화 모델 식은 식 (1)과 같다.

Table. 1 Values of the Chaboche Model Parameters for Austenitic Stainless Steel TP316 at Room Temperature

σ_0	C_1	γ_1	C_2	γ_2	C_3	γ_3
150	60000	1200	19600	140	1800	4

$$da = \sum_{i=1}^{3} da_i \,,\; da_i = \frac{2}{3} C_i d\epsilon^p - \gamma_i a_i dp \qquad (1)$$

여기서 a는 배응력 p는 소변형률 dp는 소성변형률 증가량 γ, C는 배응력계수이다.

3. 레일레이 감쇠계수 설정 방법

3.1 동특성 해석 및 감쇠값

동특성 해석을 위하여 앵커 지점과 각 지지대에 경계

조건을 주어 해석을 진행하였다. 그 결과는 Table 2에 정리하였다.

Table. 2 Result of Natural Frequency Analysis

MODE	RAD/TIME	CYCLES/TIME (Hz)
1	14.131	2.2490
2	25.909	4.1235
3	31.287	4.9794
4	35.736	5.6875
5	54.647	8.6973
6	58.921	9.3776
7	67.068	10.674
8	85.096	13.544
9	91.088	14.497
10	100.64	16.017
11	117.85	18.757
12	128.57	20.462
13	160.39	25.527
14	179.24	28.527
15	192.78	30.681

본 연구에서는 Draft Regulatory Guide DG-1157[10]에 따라 SSE (safety shutdown earthquake)의 감쇠값인 4%를 적용시켰다.

3.2 일반적인 방법

일반적인 방법은 모드 1과 2의 고유진동수들을 사용하여 레일레이 감쇠계수 값을 결정하는 것을 의미한다. Table 2에서 보이는 바와 같이 모드 1의 고유진동수는 2.249 Hz 이며 모드 2는 4.123 Hz이다. 두 고유진동수를 이용하여 식 (2)에 대입하여 레일레이 감쇠계수인 α, β를 구하였다. α=0.7315, β=0.001998의 레일레이 감쇠계수 값을 도출하였다. 여기서 α는 질량 관련 감쇠계수이며 β는 강성 관련 감쇠계수 w_i는 모드해석 결과 주파수이다.

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta w_i}{2} \quad (2)$$

3.3 가진주파수 기준 방법

가진주파수 기준 방법은 가진이력의 주된 주파수를 기준으로 레일레이 감쇠계수를 결정하는 방법을 의미한다. Fig. 4는 시간 가진이력을 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 주파수 영역으로 변환한 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 w_1,w_2,w_3이 주요 주파수로 도출되었다. 이때의 주파수는 w_1=6.6Hz w_2=13.37Hz w_3=33.5Hz이다. 도출된 세 주파수를 가지고 레일레이 감쇠계수를 도출하였다. 첫 번째로 가속도가 가장 높은 주파수(w_1)와 주파수가 가장 높은 주파수(w_2)를 선택하여 α, β를 식(2)에 대입하여 구한 결과, α=2.771, β=0.000318의 레일레이 감쇠계수 값을 도출하였다. 두 번째로는 가장 넓은 범위의 주파수 범위(w_1,w_3)를 선택하여 α, β를 구한 결과, α=2.222, β=0.0003676의 레일레이 감쇠계수를 도출하였다.

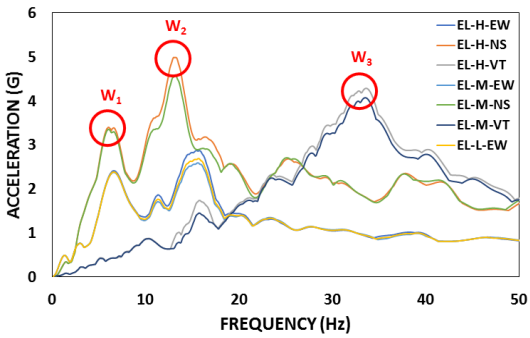


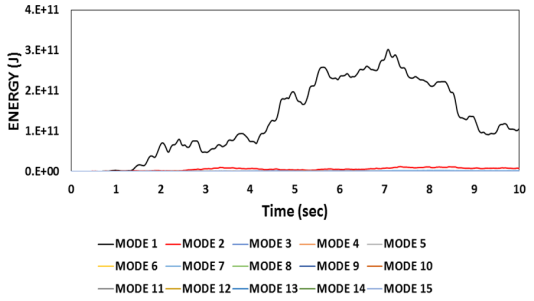
Fig. 4 Excitation Frequency for Each Support

3.4 반복 과도응답 해석방법

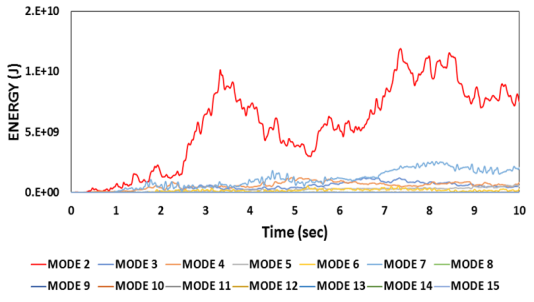
반복 과도응답 해석방법은 과도응답 해석을 통하여 각 모드 별 주요 모드가 무엇인지 도출한 후에 그 도출된 주파수를 이용하여 α, β를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 에너지와 가속도를 기준으로 주요 모드를 선별하였다.

첫번째 해석은 감쇠를 주지 않은 상태에서 과도응답 해석을 수행하며 두번째 해석은 첫번째 해석에서 얻은 주요 모드의 고유진동수들을 이용하여 레일레이 감쇠계수를 구한다. 세번째 해석은 두번째 해석에서 얻은 주요 모드의 고유진동수들을 이용하여 주요 모드의 변화 여부를 고찰한다. 즉, 주요 모드의 수렴 여부를 확인한다.

Fig. 5는 감쇠를 고려하지 않은 첫번째 해석 결과로써 에너지 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 모드 1, 2가 주요모드 임을 확인 할 수 있다. Fig. 6은 감쇠를 고려하지 않은 첫번째 해석 결과로써 가속도 결과이다. 에너지 결과와는 달리 모드 1과 7이 주요 모드인 것을 확인 할 수 있다.

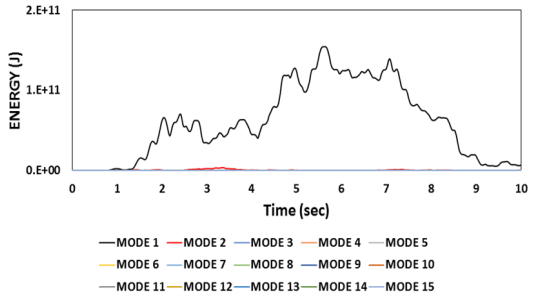


(a) All Mode

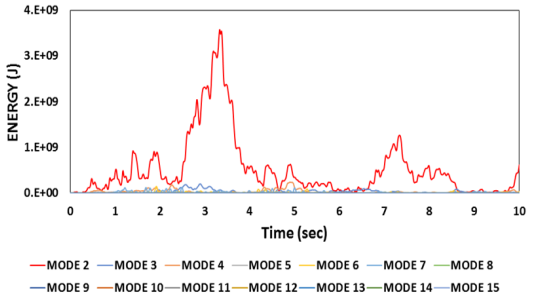


(b) Except Mode 1

Fig. 5 Transient Analysis Results without Damping (Energy)



(a) All Mode



(b) Except Mode 1

Fig. 6 Transient Analysis Results with Damping (Energy)

Fig. 7은 첫번째 해석 결과인 에너지 기준 주요 모드를 이용하여 감쇠계수 값을 설정 후 재해석한 에너지 결과이다. Fig. 8은 첫번째 해석 결과인 가속도

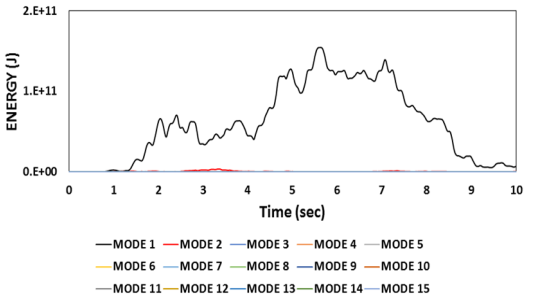


Fig. 7 Transient Analysis Results of Readjustment Damping (Energy)

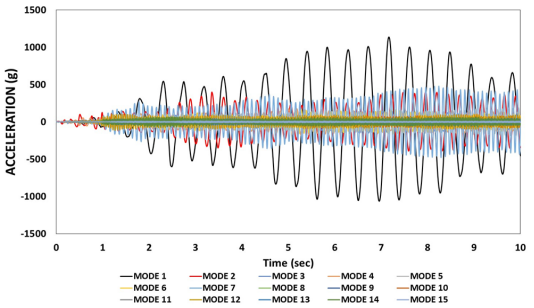


Fig. 8 Transient Analysis Results without Damping (Acceleration)

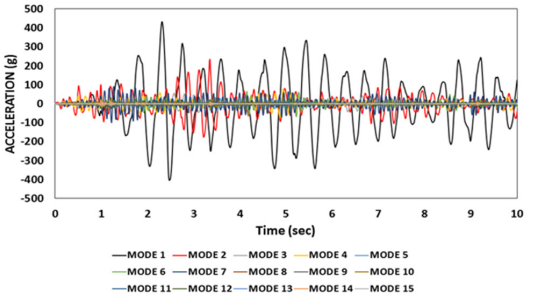


Fig. 9 Transient Analysis Results with Damping (Acceleration)

기준 주요 모드를 이용하여 감쇠계수 값을 설정후 재해석한 가속도 결과이다. Fig. 7과 8에서 보이는 바와 같이 에너지나 가속도 모두 주요 모드가 모드 1과 2임을 알 수 있다. 특히, 가속도 기준 경우, 첫번째 해석에서는 주요 모드가 모드 1과 7이었으나 두번째 해석에서는 모드 1과 2로 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 두번째 해석 결과인 에너지 기준 주요 모드를 이용하여 감쇠계수 값을 설정 후 재해석한 에너지 결과이다. Fig. 10은 두번째 해석 결과인 가속도 기준 주요 모드를 이용하여 감쇠계수 값을 설정 후 재해석한 가속도 결과이다. Fig. 9와 10에서 보이는

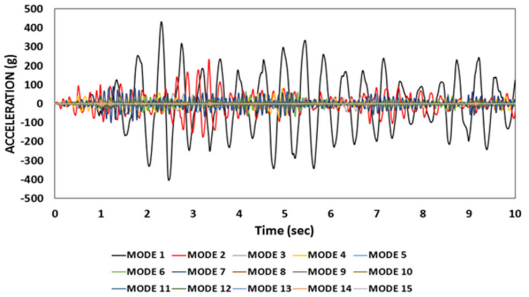


Fig. 10 Transient Analysis Results of Readjustment Damping (Acceleration)

바와 같이 두번째 해석 결과의 주요 모드와 동일하게 에너지나 가속도 모두 주요 모드가 모드 1과 2임을 알 수 있다. 즉, 최종적으로 주요 모드는 모드 1과 2로 수렴됨을 알 수 있다.

최종적으로 모드 1과 2로 수렴하기 때문에 α, β 값은 일반적인 방법과 같은 α=0.7315, β=0.001998이 도출되었다.

3.5 방법론별 비교

Fig. 11은 상기 서술한 감쇠계수 도출 방법을 통해 얻은 감쇠계수를 가지고 동적 시간이력 해석을 수행하여 도출된 최대 등가 소성변형률 값들이다. 그림에서 보이는 바와 같이 일반적 방법과 반복 과도응답 해석방법은 같은 최대 등가소성변형률을 나타내며 가진주파수 방법은 다른 방법들 보다 비보수적인 결과 값을 도출하였다. 그 중에서 넓은 범위의 주파수 범위를 선택하여 레일레이 감쇠계수를 구한 결과가 더 비보수적임을 알 수 있다.

본 해석 대상에 대해서는 일반적 방법과 반복 과도응답 해석방법이 동일한 결과를 도출하나 해석 대상에 따라서는 다른 결과도 도출할 수 있으므로 반복 과도응답 해석방법을 바람직한 방법으로 제안하고자 한다.

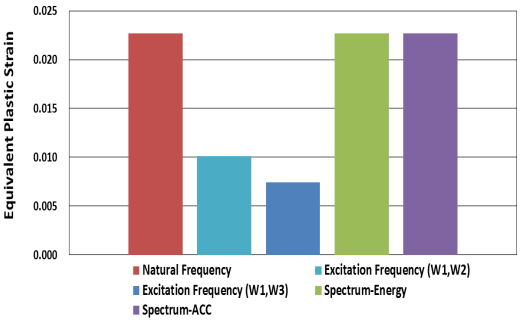


Fig. 11 Results Based on Various Rayleigh damping coefficients

4. 결 론

다양한 레일레이 감쇠계수 도출방법을 이용하여 동적 시간이력 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

- ○ 일반적 방법과 반복 과도응답 해석방법이 동일한 결과를 도출한 반면 가진주파수 방법은 다른 방법들 보다 비보수적인 결과를 도출함
- ○ 해석 대상에 따라서는 다른 결과도 도출할 수 있으므로 반복 과도응답 해석 방법을 권장함

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20171520101650)와 (No. 20161510200340)의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

(1) DeGrassi, G., Nie, J. and Hofmayer, C., 1999, "Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program," *NUREG/CR-6983*.

(2) USNRC, 2011, Near-Term Report and Recommendations for Agency Actions Following the Events in Japan.

(3) Iwata, K., Karakida, Y., Jin, C., Nakamura, H. and Kasahara, N., 2015, "Multilayer kinematic hardening model for carbon steel and its application to inelastic analyses of an elbow subjected to cyclic in-plane bending," *Proc. of ASME PVP2015 Conference, PVP2015-45853.*

(4) Ravikiran, A., Dubey, P. N., Agrawal, M. K., Reddy, G. R., Singh, R. K. and Vaze, K. K., 2015, "Experimental and Numerical studies of Ratcheting in a Pressurized Piping System under Seismic Load", *J. of Pres. Ves. Tech.*, Vol. 137, No.2, pp. 031011-1-7.

(5) Hough, S.E. 2004, *Finding fault in California: an earthquake tourist's guide*, Mountain Press Publishing, ISBN 978-0-87842-495-5, p. 185.

(6) Kim, Y. J., 2014, Seismic Integrity Characteristics of Uncracked and Through Wall Circumferential Cracked Pipes under Beyond Basis Earthquake, *MS Thesis of Seoul National University*.
(7) Kim, J. S., Lee, S. H., and Kweon, H. D., 2017, "Optimal Finite Element Modeling Technique for Efficient Time History Seismic Dynamic Elastic-Plastic Analysis," *Proc. of KSME Reliability Div.*, Jeju, Korea, pp 96-96
(8) Dassault Systemes Simulia Corp, 2013, "Abaqus 6.13 Analysis User's Manual,"
(9) Chaboche, Dang-Vang, K. and Cordier, G., 1979, "Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel," *Proc. of 5th International Conference on SMiRT, Div. L*, Berlin Germnay.
(10) USNRC, 1973, "Damping values for seismic design of nuclear power plants," Draft regulatory guide DG-1157 (Proposed Revision 1 of Regulatory Guide 1.61)