

지진 해석시 선형탄성과괴역학 측면에서의 관통 균열 배관에 대한 가진 방법론 검토[§]

김 종 성^{*†} · 김 용 우^{*}

* 순천대학교 기계공학전공

Review of Acceleration Methods for Seismic Analysis of Through-Wall Cracked Piping from the Viewpoint of Linear Elastic Fracture Mechanics

Jong Sung Kim^{*†} and Yong Woo Kim^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Suncheon Nat'l Univ.

(Received March 16, 2014 ; Revised May 11, 2014 ; Accepted June 3, 2014)

Key Words: Seismic Analysis(지진 해석), Cracked Piping(균열 배관), Acceleration Method(가진 방법론), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

초록: 시간 이력 지진해석시 두 가지 가진 방법론[유효하중법(또는 관성법), 거대질량법]이 적용되고 있는데 균열 없는 구조물에 대해서만 두 가지 가진 방법론의 타당성을 확인한 바 있으나, 균열로 인해 강성이 변화하는 균열 배관에 대해서는 가진 방법론의 타당성에 대한 연구가 수행된 바 없다. 본 연구에서는 시간이력 Implicit 동적 탄성 지진해석을 통해 탄성 파괴역학 측면에서 관통 균열 배관에 대한 두 가지 가진 방법론의 타당성을 평가하였다. 평가 결과, 거대질량의 크기와 최대 시간 증분이 적절히 선정된다면 균열 배관에 대해서도 두 가지 가진 방법론이 모두 동일한 결과를 도출함을 확인하였다.

Abstract: Two acceleration methods, an effective force method (or inertia method) and a large mass method, have been applied for performing time history seismic analysis. The acceleration methods for uncracked structures have been verified via previous studies. However, no study has identified the validity of these acceleration methods for cracked piping. In this study, the validity of the acceleration methods for through-wall cracked piping is assessed via time history implicit dynamic elastic seismic analysis from the viewpoint of linear elastic fracture mechanics. As a result, it is identified that both acceleration methods show the same results for cracked piping if a large mass magnitude and maximum time increment are adequately selected.

1. 서 론

가동중 검사를 통해 원전 안전 1등급 배관에서 균열을 발견하면 사용중 적합성 평가 코드인 ASME B&PV Code, Sec. XI에 따라 다음 핵연료 교체 주기까지 구조 건전성이 유지되는지를 평가하여야 한다.⁽¹⁾ 이때 고려되는 설계 기준 사고는 설계수명 동안 1회 발생한다고 가정하는 Level D 사고를 포함하여야 한다.⁽¹⁾ 후쿠시마 원전 사고 이후 설계기준을 초과하는 지진이 반복적으로 올 수 있

음을 확인하였다.⁽²⁾ 이러한 반복적인 설계기준 초과 지진 하에서 원전 안전 1등급 균열 배관의 건전성이 유지됨을 확인할 필요성이 대두되었다. 반복적인 설계기준 초과 지진하중은 균열 배관에 무시할 수 없는 소성 변형과 누적 손상을 야기시킬 수 있으므로 소성변형을 고려한 시간 이력 동적 지진해석을 수행하여야 한다. 시간 이력 지진해석시 두 가지 가진 방법론이 적용되고 있다. 그 중 하나는 유효하중법이고 다른 하나는 거대질량법이다.⁽³⁾ 유효하중법은 가진 절점에 가속도를 바로 작용시키는 방법으로 이론적 근거가 명확하나 유한요소 프로그램화하는 것이 어렵고 구조물의 절대 변위/속도/가속도를 구하기 위해서는 추가적인 작업이 필요하다. 이에 반하여 거대질량법은 가진

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2014. 2. 26.-28., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, kimjsbat@suchon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

절점에 거대질량을 부가하고 가속도에 상응하는 하중을 작용시키는 방법으로 유한요소 해석 공식화가 용이하고 구조물의 절대 변위/속도/가속도를 구하기 위해 추가적인 작업이 필요하지 않으나 거대질량의 크기 설정과 관련된 이론적 근거가 명확하지 않다.⁽³⁾ 기존 연구들⁽³⁻⁵⁾을 통해 균열 없는 구조물에 대해서는 유효하중법과 거대질량법의 타당성을 확인한 바 있으나, 균열로 인해 강성이 변화하는 균열 배관에 대해서는 가진 방법론의 타당성에 대한 연구가 수행된 바 없다.

본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽⁶⁾을 이용한 시간이력 Implicit 동적 탄성 지진해석을 통해 선형탄성파괴역학 측면에서 관통 균열 배관에 대한 두 가지 가진 방법론의 타당성을 평가하였다. 아울러 균열 크기에 따른 강성 변화가 동적 특성을 변화시킬 수 있으므로 동특성 해석을 통해 균열 크기가 고유진동수에 미치는 영향을 고찰하였으며 가진 방법별 해석 변수(예: 거대질량법의 부가 질량의 크기, 최대 시간 증분 등)가 최대 응력확대계수에 미치는 영향도 고찰하였다.

2. 유한요소 지진해석

2.1 해석 모델

한국표준형 원전(KSNP: Korean standard nuclear power) 밀림관을 단순화시킨 1/4 해석 모델을 Fig. 1에 제시하고 있다. 밀림관의 재질은 오스테나이트 스테인리스 강 TP347으로 해석시 사용한 물성치는 300°C에 해당하는 물성을 사용하였다. 탄성계수는 173.6GPa, 푸아송 비는 0.31, 밀도는 8,030 kg/m³으로 설정하였다.⁽⁷⁾ 배관 중심에 원주방향 관통 균열이 위치하고 있으며 고려된 균열의 원주방향 길이는 30도, 90도, 150도이다. 구조 댐핑으로 4%를 사용하였다.⁽⁸⁾ Fig. 2는 구속조건을 제시하고 있다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 kinematic coupling 기법⁽⁶⁾을 이용하여 양단 지지 점에 해당하는 참조 절점에 단순 지지 조건을 부가하였으며 균열 단합을 제한하기 위해 균열 면 상에 강제 면을 설정하고 접촉 조건을 부가하였다. 하중 조건이나 기하학적 형상이 대칭이므로 해석의 용이성을 위해 1/4만 모델링하였고 이에 따라 대칭면에 대칭 조건을 부가하였다. El Centro 지진 시간이력 데이터⁽⁹⁾를 활용하여 참조 절점에 Fig. 3과 같은 최대 가속도 0.3g에 해당하는 단순화된 지진하중을 부가하였다.

Fig. 4는 원주방향 관통균열의 크기별 유한요소

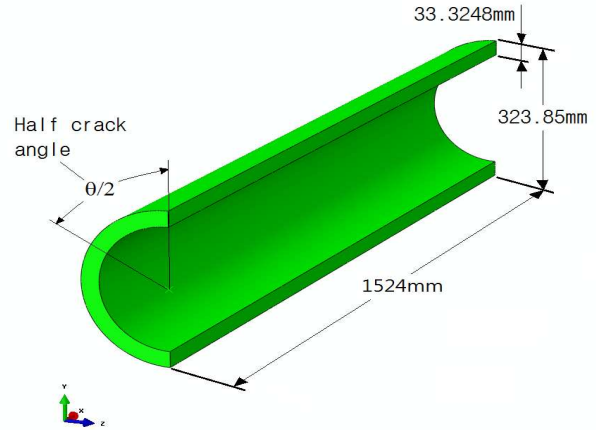


Fig. 1 Schematic configuration of a simplified surge line with the through-wall crack in KSNP power plants

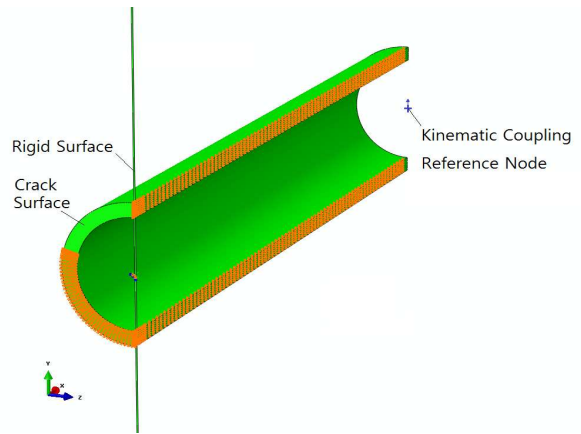


Fig. 2 Constraint conditions of the simplified surge line

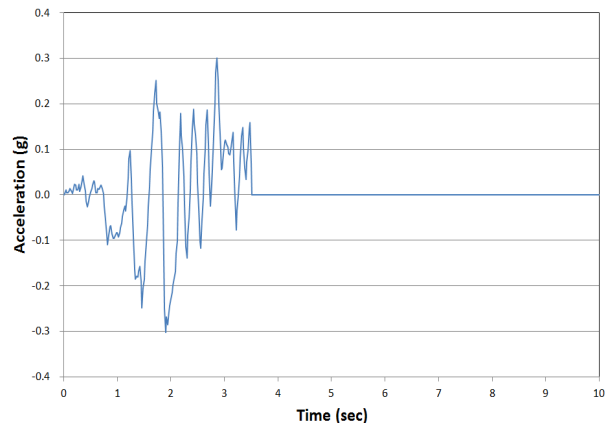


Fig. 3 Time history for simplified seismic acceleration

모델을 보여주고 있다. 사용한 유한요소는 8절점 감차 적분 유한요소로서 균열 선단의 요소는 특이요소를 사용하였다. 유체는 본 연구의 유한요소 모델링에 고려하지 않았고 향후 연구에서 다룰 예정이다.

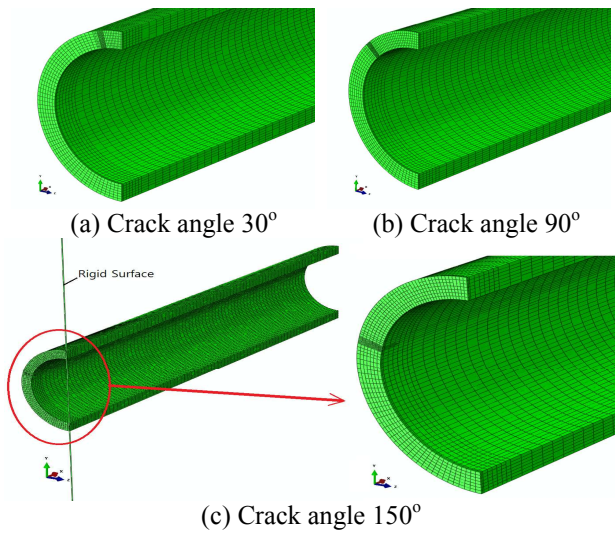


Fig. 4 Finite element models of the simplified surge line

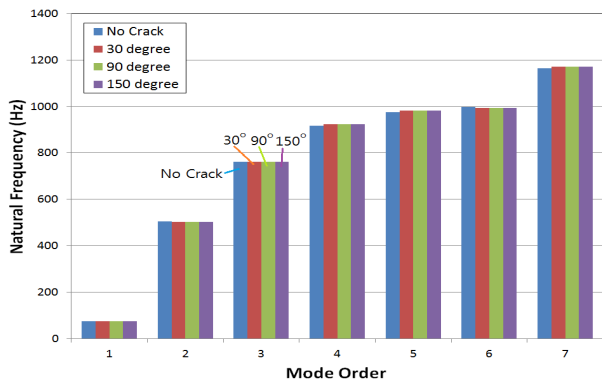


Fig. 5 Variation of natural frequencies at symmetric modes according to crack circumferential length

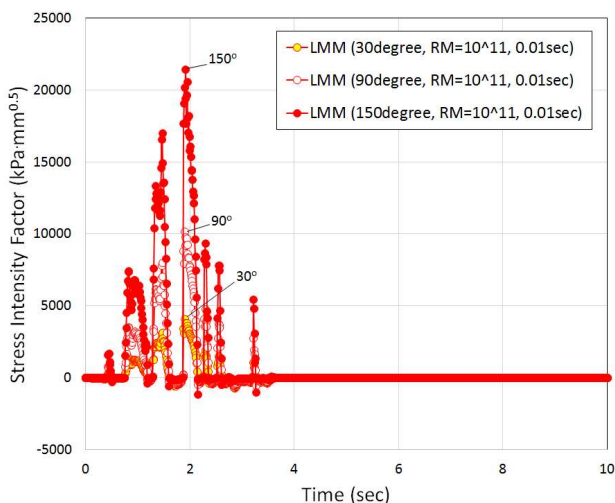
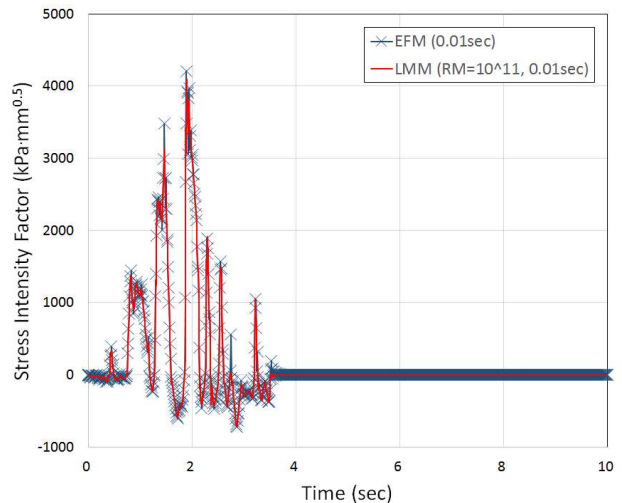


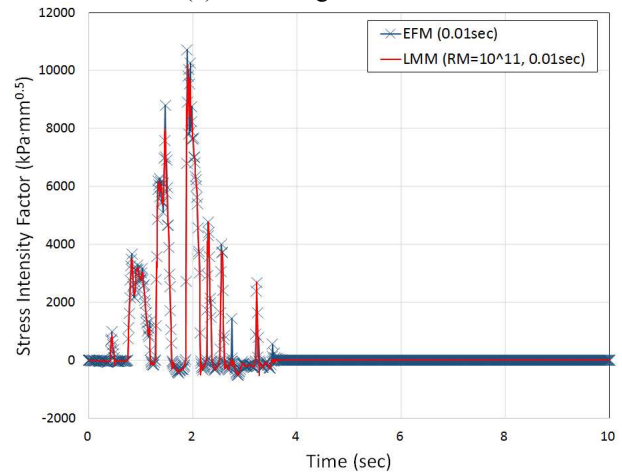
Fig. 6 Variation of stress intensity factor history according to crack circumferential length

2.2 동특성 해석

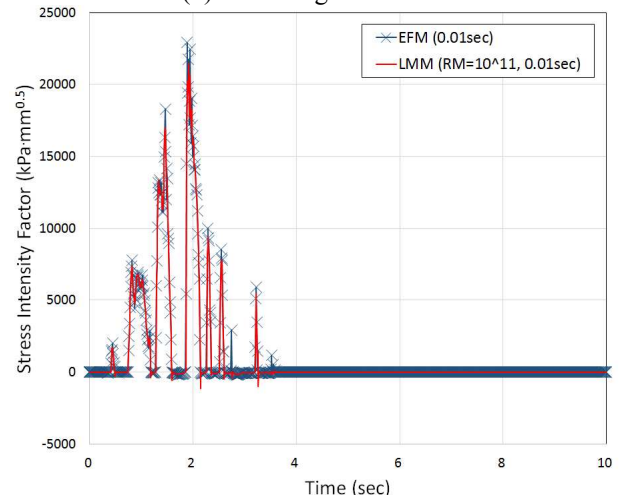
ABAQUS 내 Block Lanczos 기법⁽⁶⁾을 이용하여 3 가지 관통균열 배관에 대한 유한요소 동특성 해



(a) Crack angle 30°



(b) Crack angle 90°



(c) Crack angle 150°

Fig. 7 Comparison of stress intensity factor histories between the effective force method and the large mass method

석을 수행하였다. Fig. 5는 관통균열 크기 증가에 따른 대칭 모드의 고유진동수 변화를 보여주고 있

다. 균열 크기 증가에 따라 고유진동수는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 이유는 배관 직경 대비 길이가 짧아 균열이 커져도 강성 저하가 미미하기 때문으로 판단된다.

2.3 지진 균열 해석

ABAQUS를 이용하여 시간이력 implicit 동적 탄성 균열 해석을 수행하였다. 응력확대계수는 균열 선단 근처의 적분 경로를 4개 선정하고 선정된 적분경로에서 평가된 값들의 평균으로 계산하였다. Fig. 6은 거대질량법(부가 질량비 $R_M=M/m=10^{11}$, 최대 시간 증분 $\Delta t_{max}=0.01sec$)을 적용하여 도출된 균열 크기 증가에 따른 응력확대계수 이력의 변화를 보여주고 있다. 여기서 M은 부가 거대질량, m은 해석 모델의 질량을 의미한다. 그림에서 보이는 바와 같이 균열 크기가 증가할수록 최대 응력확대계수의 값은 증가함을 알 수 있다.

3. 가진 방법론 검토

거대질량법과 유효하중법을 각각 적용한 결과를 상호 비교하여 해석 변수가 응력확대계수에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 7은 두 가지 가진 방법론을 적용하여 도출된 각 균열 크기별 응력확대계수 이력을 비교하고 있다. 유효하중법($\Delta t_{max}=0.01sec$)을 적용한 결과와 거대질량법($R_M=10^{11}$, $\Delta t_{max}=0.01sec$)을 적용한 결과에 큰 차이는 없으나, 유효하중법에 의한 응력확대계수 값이 거대질량법에 의한 응력확대계수 값보다 약간 크게 평가되었다. Fig. 8은 Fig. 7의 결과를 이용하여 도출된 균열 크기 증가에 따른 최대 응력확대계수의 상대적 차이 변화를 제시하고 있다. 여기서 상대적 차이는 유효하중법에 의한 최대 응력확대계수 대비 거대질량법에 의한 최대 응력확대계수의 비(%)를 의미한다. 그림으로부터 균열 크기가 증가할수록 두 방법론 사이의 상대 차이가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 균열 원주방향 길이 150°인 경우 최대 시간 증분 변화에 따른 각 가진 방법론 별 응력확대계수의 이력 변화를 보여주고 있다. 유효하중법, 거대질량법 모두 최대 시간 증분이 증가시 최대 응력확대계수는 증가함을 알 수 있다. 최대 시간 증분이 작을수록 보다 정확한 해석치를 도출하는 유한요소해석의 특성상 최대 응력확대계수 값이 더 이상 변화가 없는 최대 시간 증분의 상한치를 설정하여야 한다. Fig. 10은 균열 원주방향 길이 150°인 경우 최대 시간 증분 변화에 따른 각 가진

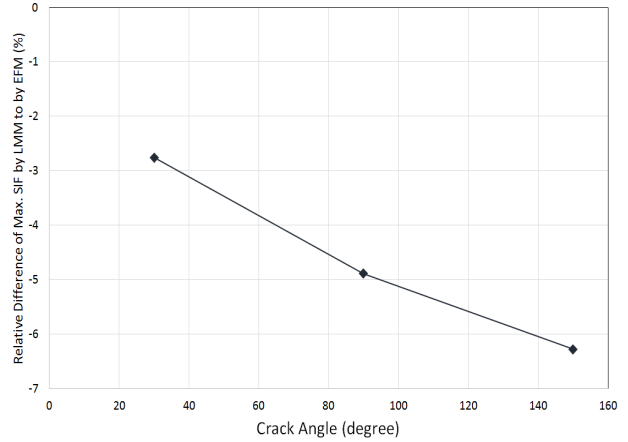
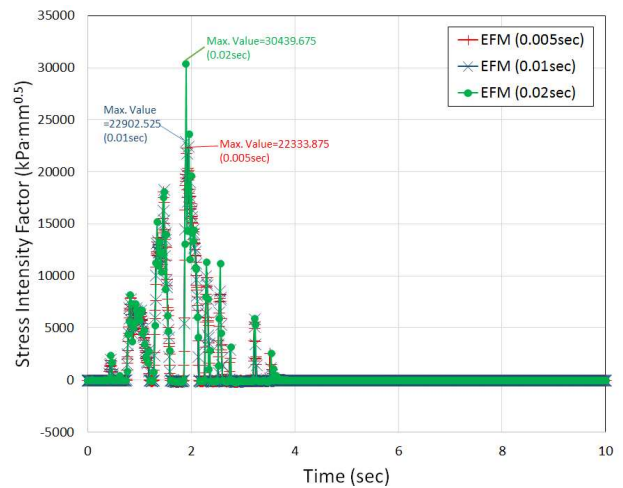
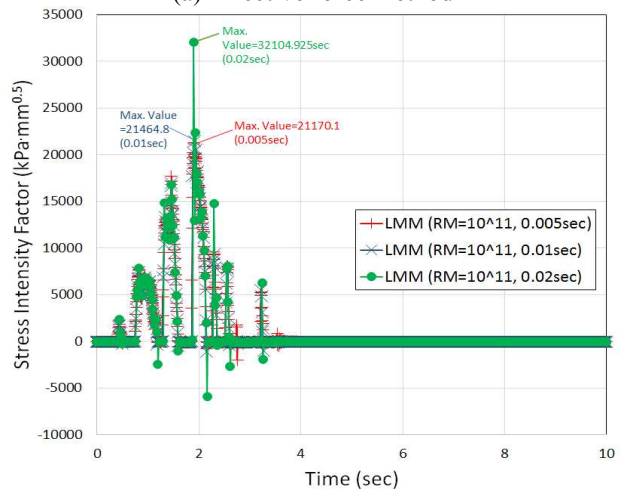


Fig. 8 Variation of relative difference of the maximum stress intensity factors by the large mass method to those by the effective force method according to crack circumferential length



(a) Effective force method



(b) Large mass method

Fig. 9 Variation of stress intensity factor history for each acceleration method with maximum time increment (crack circumferential length=150°)

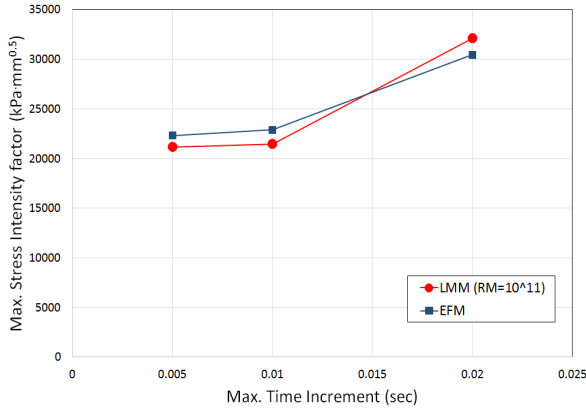


Fig. 10 Variation of maximum stress intensity factor for each acceleration method with maximum time increment (crack circumferential length=150°)

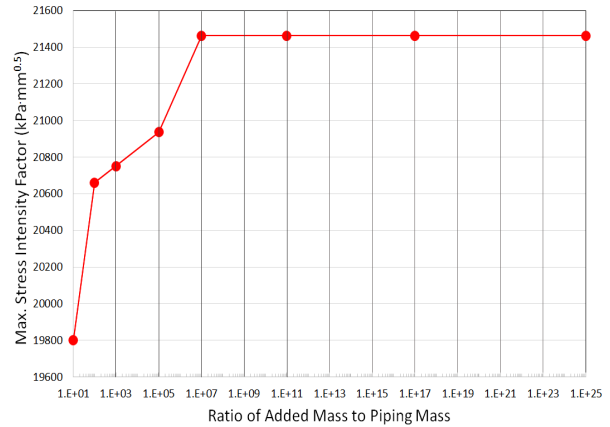
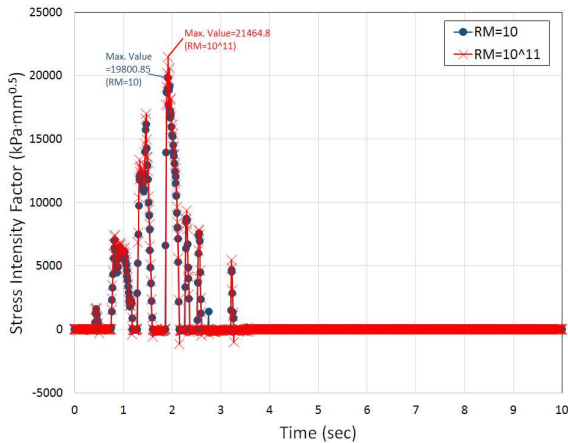
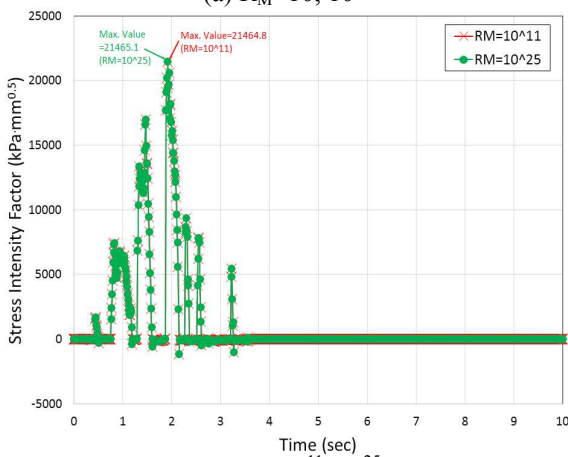


Fig. 12 Variation of maximum stress intensity factor with additional mass ratio of the large mass method (crack circumferential length=150°)



(a) $R_M=10, 10^{11}$



(b) $R_M=10^{11}, 10^{25}$

Fig. 11 Variation of stress intensity factor history with additional mass ratio of the large mass method (crack circumferential length=150°)

방법론 별 최대 응력확대계수의 변화를 제시하고 있다. Fig. 10으로부터 두 가지 가진 방법론 모두 최대 시간 증분 0.01sec에서 최대 응력확대계수 값이 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 11은 균열 원주방향 길이 150°인 경우 거대질량법의 부가 질량비 R_M 변화에 따른 응력확대계수의 이력 변화를 보여주고 있다. 부가질량비가 변화함에 따라 최대 응력확대계수가 일부 변화함을 확인할 수 있다. Fig. 12는 균열 원주방향 길이 150°인 경우 거대질량법의 부가 질량비 변화에 따른 최대 응력확대계수의 변화를 제시하고 있다. Fig. 12에서 보이는 바와 같이 부가 질량비 10^7 이상에서 일정한 최대 응력확대계수가 도출됨을 알 수 있다.

4. 결론

시간이력 Implicit 동적 탄성 지진해석을 통해 선형탄성과괴역학 측면에서 관통 균열 배관에 대한 두 가지 가진 방법론의 타당성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동일 최대 시간 증분 조건에서 유효하중법이 거대질량법보다 높은 응력확대계수를 도출 하나 큰 차이(유효하중법 기준 최대 6.3%)는 아님.
- (2) 균열 크기 증가에 따라 응력확대계수가 증가하며 유효하중법과 거대질량법 사이의 최대 응력확대계수 상대차이의 절대값은 증가(유효 하중법 기준 2.8%에서 6.3%로 증가)함.
- (3) 최대 시간 증분 증가시 유효하중법과 거대질량법 모두 최대 응력확대계수 값이 증가함.
- (4) 거대질량법의 부가 질량비는 10^7 이상으로 설정하는 것이 타당함.

후 기

This research was supported by National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning. (NRF-2013M2A8A 1040924)

참고문헌
(References)

- (1) 2011, ASME B&PV Code Committee, ASME B&PV Code, Sec. XI.
- (2) 2011, USNRC, *Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century: The Near Term Task Force Review of Insights from the Fukushima Dai-Ichi Accident*.
- (3) Kim, Y. W. and Jhung, M.J., 2011, "Mathematical Analysis Using Two Modeling Techniques for Dynamic Responses of a Structure Subjected to a Ground Acceleration," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.43, No.4, pp.361~374.
- (4) Kim, Y. W. and Jhung, M. J., 2014, "A Study on Large Mass Method for Dynamic Problem of Multiple Degree-of-Freedom System Excited by Ground Acceleration Time History," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.28, pp.25~41.
- (5) Zhang, J., Mu, Z. and Gan, M., 2011, "Study of the Analysis Methods of Wave-Passage Effect Based on ABAQUS," *Advanced Materials Research*, Vol. 163-167, pp.4316~4319.
- (6) 2012, Dassault Systems, *Simulia, User's Manuals for ABAQUS*, Ver.6.12.
- (7) 2011, ASME B&PV Code Committee, ASME B&PV Code, Sec.III, Appendices.
- (8) 2007, USNRC, RG 1.61, *Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, Rev.1.
- (9) <http://www.vibrationdata.com/elcetro.htm>.