

<연구논문>

탄소성 유한요소해석시 2차원 유한요소 밀도에 대한 반복하중이 작용하는 노치부의 변형률의 민감도 분석

김종성[†]·장현수^{*}

Sensitivity Analysis of Strain on Notches under Cyclic Loading to 2-D Finite Element Density in Elasto-Plastic Finite Element Analysis

Jong-Sung Kim[†] and Hyun-Su Jang^{*}

(Received 30 December 2020, Revised 04 February 2021, Accepted 17 February 2021)

ABSTRACT

This paper presents sensitivity analysis results of strain on notches under cycling loading to 2-D finite element density considering plasticity. Cylindrical notched specimens having some stress concentrations were modeled with 2-D axisymmetrical finite element having various finite element densities. Elasto-plastic finite element analysis was performed for the various finite element models subjected to cycling loading considering plasticity. The finite element analysis results were compared to investigate sensitivity of the finite element analysis variables such as von-Mises effective stress, accumulated equivalent plastic strain, and equivalent plastic strain to 2-D finite element density. As a result of the comparison, it was found that the accumulated equivalent plastic strain is more sensitive than the others whereas the von-Mises effective stress is much less sensitive.

Key Words : Sensitivity analysis (민감도 분석), Finite element density (유한요소 밀도), Cyclic loading (반복하중), Elasto-plastic finite element analysis (탄소성 유한요소 해석), Accumulated equivalent plastic strain (누적 등가소성변형률), Equivalent plastic strain (등가소성변형률)

기호설명

K_t = Stress concentration factor
 YS = Yielding strength
 UTS = Ultimate tensile strength

1. 서 론

최근 국내·외에서 지진이 빈번하게 발생하면서 지진에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며^(1,2), 원자

력 발전소 구조물의 설계에 설계기준초과지진과 같은 큰 하중이 반복하는 대형 지진에 대한 비선형 응력-변형률 관계를 고려한 유한요소 해석 기법과 변형률 기반 내진평가가 활발히 연구되고 있다⁽³⁻⁵⁾.

유한요소해석에서 유한요소 밀도는 해석 결과의 정확성에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 유한요소 밀도 증가시 결과 값은 이론 해에 수렴하지만, 그에 반하여 계산 시간이 오래 걸린다. 탄소성 유한요소해석의 사전 작업으로써 해석결과에 대한 유한요소 밀도의 민감도 분석을 수행하여 정확한 결과 값을 경제적인 계산 시간 내에 도출할 수 있는 최적의 유한요소 밀도를 결정해야 한다. 신뢰성 있는 결과를 효율적으로 얻을 수 있는 최적의 유한요소 밀도를 선정하는 과정은 중요하며, 대형 지진 하중시

[†] 책임저자, 회원, 세종대학교 양자 원자력공학과
E-mail : kimjsbat@sejong.ac.kr
TEL : (02)3408-4055 FAX : (02)3408-3182
^{*} 세종대학교 대학원 양자 원자력공학과

중요하게 고려되는 변형률에 대한 유한요소 밀도의 민감도 분석이 필요 하다. 응력에 미치는 유한요소 밀도와 형식의 영향 분석 연구는 많이 수행 되었지만⁽⁶⁻⁸⁾, 변형률에 대한 유한요소 밀도의 민감도 분석에 대한 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 소성을 고려한 2차원 유한요소 밀도에 대한 반복 하중이 작용하는 노치 (notch) 변형률의 민감도 분석을 수행하였다. 일부 응력 집중을 갖는 원통형 노치 시편들이 도입되었고 다양한 유한요소 밀도를 갖는 2차원 축대칭 유한요소로 모델링되었다. 소성을 고려하여 반복 하중을 받는 다양한 유한요소 모델들에 대해 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과를 비교하여 von-Mises 유효 응력, 누적 등가 소성 변형률, 등가 소성 변형률과 같은 유한 요소 해석 변수들의 2차원 유한요소 밀도에 대한 민감도를 조사하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 유한요소 모델

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁹⁾를 사용하여 유한요소 모델링과 반복하중에 대한 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 해석 대상은 노치를 가진 환봉 시편이다. 해석 대상의 유한요소 모델은 CAX8R(2차 축대칭 4차 저감 적분 요소)로 구성되어 있으며, 해석 시간 단축을 위해 1/4 축대칭 모델을 사용하였다.

시편 중심부의 노치 반경 R은 응력집중계수 K_t 에 따라 결정하였으며, 응력집중계수와 시편 중심부의 반경은 표 1에 제시되고 있다.

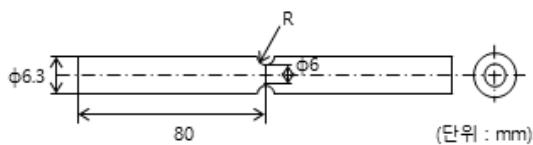


Fig. 1 Dimensions of cylindrical notched specimen.

Table 1 Stress concentration factors and notch radii of cylindrical notched specimens.

Case Variable	1	2	3	4
K_t	1.2653	1.3243	1.5229	1.7134
R (mm)	2.73	2.03	0.97	0.59

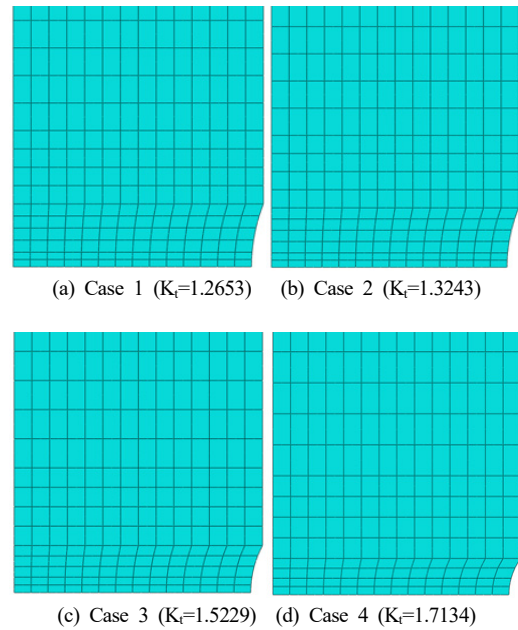


Fig. 2 Finite element models of cylindrical specimens having some stress concentrations (no. of finite elements along half notch centerline : 14)

표 1에 제시된 응력집중계수 값들은 반경방향 유한요소 개수가 22개인 매우 치밀한 유한요소 밀도를 가지는 유한요소 모델에 단순 인장 응력이 작용하는 경우에 대해 탄성 유한요소해석을 수행하고 응력집중계수의 정의에 따라 도출된 것이다. 변형률에 대한 유한요소 밀도 민감도 분석을 위해 각 경우 별로 반경방향 요소밀도는 노치 중심선의 반을 따라 반경방향으로 6, 10, 14, 18, 22개로 설정하였다. 그림 2는 그림 1을 토대로 ABAQUS를 통해 구축한 유한요소 모델이며, 반경방향 요소밀도 14개 (노치 중심선의 반을 따라 유한요소 개수가 14개)일 때의 노치 중심부 형상을 보여준다. 노치 선단에서의 변형률 이력을 신뢰성 있게 계산하기 위해 노치 중심부 근처에 존재하는 유한요소의 길이방향 크기는 0.1 mm로 세밀하게 모델링하였다.

2.2 재료물성

해석 대상은 원전 1차측 배관재로 널리 사용되고 있는 SA182 TP316 스테인리스강으로 제작된다고 가정하였다. 반복 하중은 재료경화를 발생시키기 때문에 단순 하중과는 다른 재료거동을 보인다. 따

라서 반복 응력-변형률 실험 결과⁽¹⁰⁾를 토대로 보수적인 결과를 도출한다고 알려져 있는 Bi-Linear 이동경화 모델을 사용하였다. ASME B&PV Code, Sec.II, Part D⁽¹¹⁾에 제시된 데이터를 토대로 원전 운전 온도인 316 °C에서의 탄성계수와 프와송비는 각각 175.4 GPa과 0.31로 결정하였다. Bi-Linear 이동경화 모델 정의시 사용된 원전 운전 온도인 316 °C에서의 항복강도 (YS : yield strength)와 인장강도 (UTS : ultimate tensile strength)는 각각 185.8 MPa과 447 MPa이다.

2.3 하중

반복하중은 인장응력과 압축응력이 반복적으로 가해진다고 가정하였다. 그림 3은 유한요소 해석시 시편의 끝단에 적용된 반복하중 이력을 도식화한 것이다. 그림 상의 P는 작용 하중의 최대 절대값을 의미한다. 반복하중의 최대 절대값은 해석대상의 재료인 SA182 TP316 스테인리스강의 항복강도 값을 기준으로 결정하였으며, 항복강도의 1.12배, 1.49배, 1.85배로 각각 209.12 MPa, 277.09 MPa, 345.08 MPa로 설정하였다.

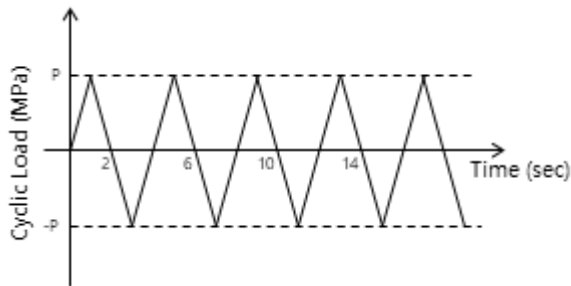


Fig. 3 Cyclic loading applied to analysis.

2.4 탄소성 유한요소 해석 결과

다양한 반경방향 요소 밀도(6, 10, 14, 18, 22)와 다양한 반복하중(209.12 MPa, 277.09 MPa, 345.08 MPa)을 조합한 경우들에 대하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 4(a)~(c)는 반경방향 요소 밀도가 14개, 반복하중이 209.12 MPa인 경우, 응력 집중계수 변화에 따른 노치 중심선 선단부의 누적 등가 소성 변형률, 등가 소성 변형률과 von-Mises 유효응력 이력의 변화들을 나타내고 있다. 그림 상의 PEEQ와 PEMAG은 각각 누적 등가 소성 변형률과 등가 소성 변형률을 의미한다.

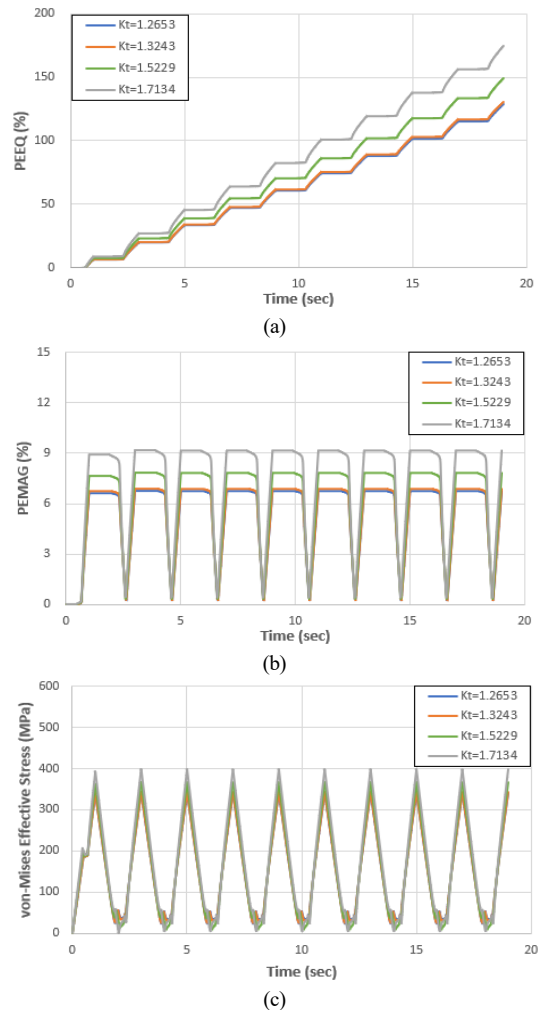


Fig. 4 Variations of finite element analysis results vs. stress concentration factors (no. of finite elements along half notch centerline : 14, Cyclic load size : 277.09 MPa): (a) accumulated equivalent plastic strain time histories, (b) equivalent plastic strain time histories, (c) von-Mises effective stress time histories

그림 4(a)~(c)를 통해 응력집중계수가 클수록, 즉 노치반경이 작을수록 누적 등가 소성 변형률과 등가 소성 변형률, von-Mises 유효응력이 증가함을 확인하였다. 응력집중계수가 1.7134일 때와 1.2653일 때의 최대 누적 등가 소성 변형률은 각각 174 %와 128 %로 도출되었는데, 응력집중계수 1.2653의 값을 기준으로 볼 때, 약 35.9 %의 상대 증가가 발생했고, 최대 등가 소성 변형률은 각 경우에 대해 각각 9.2 %와 6.7 %로 계산되었는데 응력집중계수

1.2653의 값을 기준으로 볼 때, 약 41.5 %의 상대 증가가 발생했다. 또한 응력집중계수가 1.2653, 1.3243, 1.5229, 1.7134인 경우 모두 3초에서 최대 von-Mises 유효응력(340 MPa, 344 MPa, 369 MPa, 398 MPa)이 발생하였으며, 응력집중계수 1.2653의 값을 기준으로 약 17.1 %의 상대 증가가 발생하였다. 노치 선단에서의 누적 등가 소성 변형률과 등가 소성 변형률은 노치 반경에 따라 값이 민감하게 변하는 것을 확인하였으며, von-Mises 유효응력은 상대적으로 덜 민감한 것을 확인하였다.

3. 민감도 분석

요소밀도에 따른 민감도 분석은 최대 누적 등가 소성 변형률, 최대 등가 소성 변형률, 최대 von-Mises 유효응력의 상대차이 경향을 분석하여 진행하였다. 반경방향 요소밀도가 22개일 때의 최대 값을 기준치로 설정하고, 상대차이를 계산하였다. 표 2는 반복하중 크기별 응력집중계수에 따른 각 유한요소 해석 결과의 기준치들을 제시하고 있다. 그림 5~7은 반경방향 요소밀도에 따른 최대 누적

등가 소성 변형률의 상대차이, 최대 등가 소성 변형률의 상대차이, 최대 von-Mises 유효응력의 상대차이를 각각 보여준다.

Table 2 Reference value of each finite element analysis result according to the stress concentration factor for each cyclic load size

P (MPa)	K_t	Max. PEEQ (%)	Max. PEMAG (%)	Max. von-Mises effective stress (MPa)
209.1	1.2653	41.79	2.23	236.707
	1.3243	42.67	2.28	237.822
	1.5229	50.82	2.72	248.226
	1.7134	63.56	3.41	265.103
277.09	1.2653	128.9	6.8	340.99
	1.3243	131.2	6.92	343.701
	1.5229	150.7	7.95	367.682
	1.7134	178.8	9.44	403.263
345.08	1.2653	208.7	10.99	436.419
	1.3243	211.9	11.15	440.256
	1.5229	239.4	12.6	473.857
	1.7134	278.3	14.64	522.519

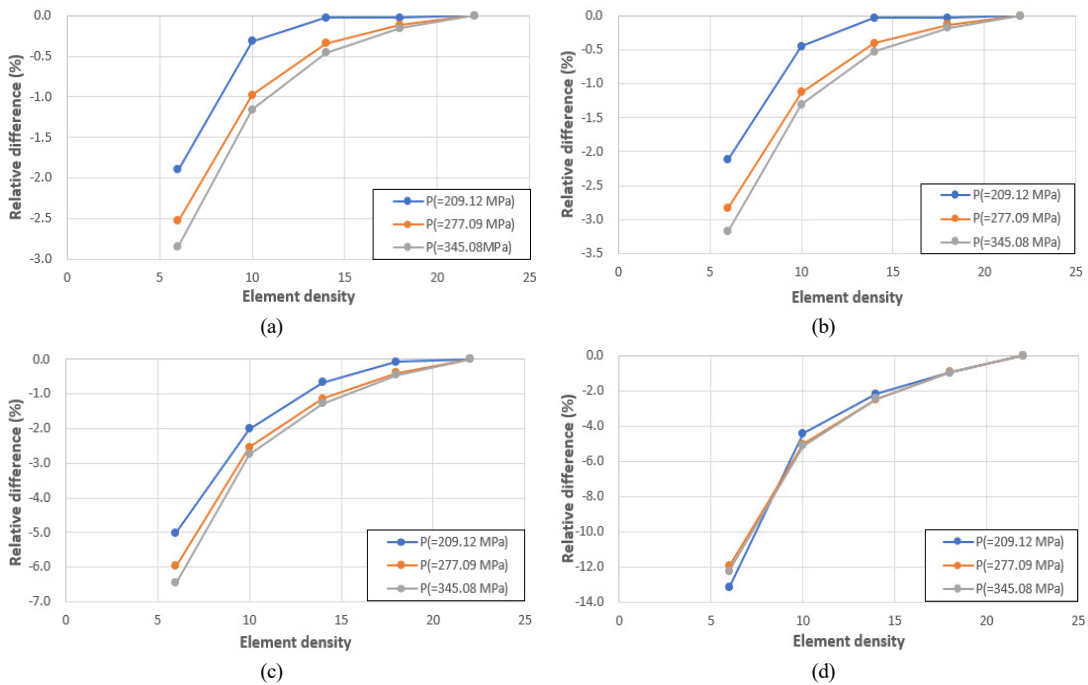


Fig. 5 Variations of relative differences for accumulated equivalent plastic strain vs. finite element density: (a) $K_t=1.2653$, (b) $K_t=1.3243$, (c) $K_t=1.5229$, (d) $K_t=1.7134$

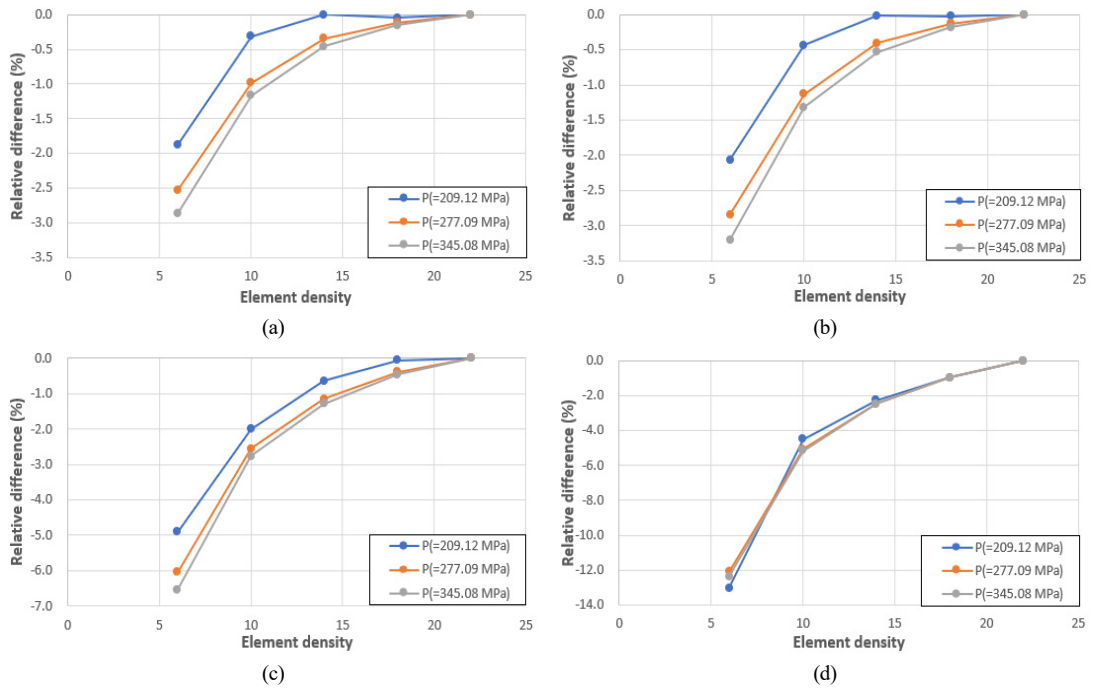


Fig. 6 Variations of relative differences for equivalent plastic strain vs. finite element density: (a) $K_t=1.2653$. (b) $K_t=1.3243$, (c) $K_t=1.5229$, (d) $K_t=1.7134$

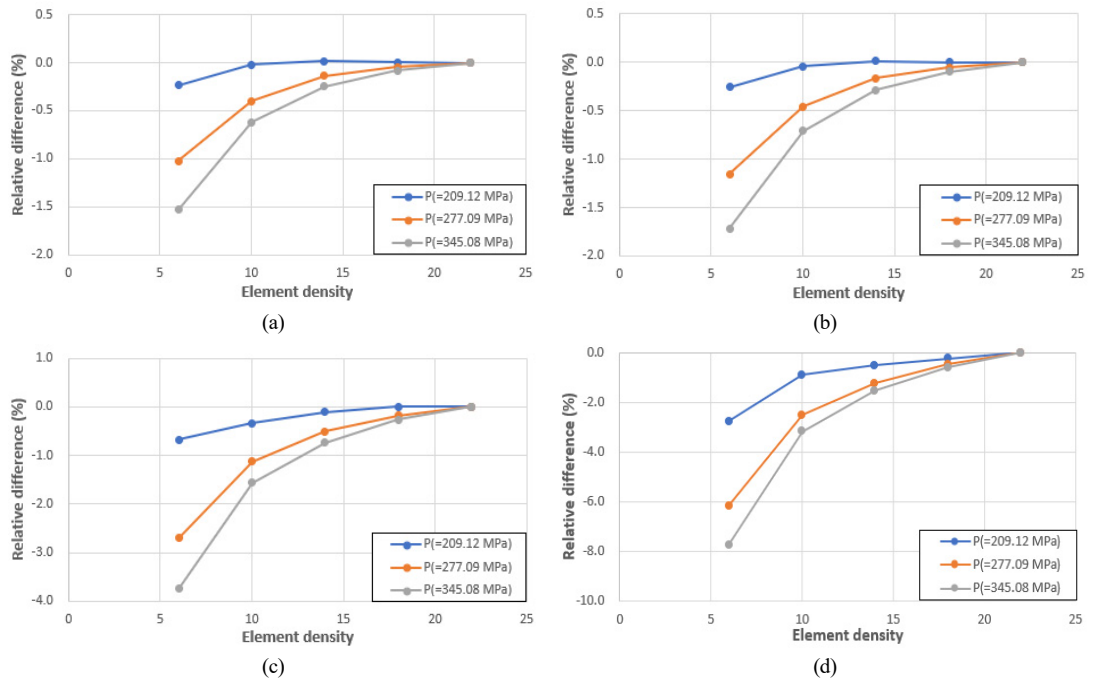


Fig. 7 Variations of relative differences for von-Mises effective stress vs. finite element density: (a) $K_t=1.2653$. (b) $K_t=1.3243$, (c) $K_t=1.5229$, (d) $K_t=1.7134$

그림에서 보이는 바와 같이 누적 등가 소성 변형률, 등가 소성 변형률 및 최대 von-Mises 유효응력 모두 상대차이의 절대값은 응력집중계수가 증가할수록 증가할 뿐만 아니라 작용 하중의 최대 절대값이 증가할수록 유한요소 밀도에 민감함을 알 수 있다.

가장 큰 상대차이의 절대값을 보이는 $K_t=1.7134$ 인 경우에 대해 상대차이의 최대 절대값은 누적 등가 소성 변형률 경우 최대 12.23~13.18 %, 등가 소성 변형률 경우 최대 12.35~13.02 %, von-Mises 유효응력 경우 최대 2.75~7.72 %의 범위를 보인다. 누적 등가 소성 변형률은 다른 결과들에 비하여 유한요소 밀도에 더 민감한 반면 von-Mises 유효응력은 다른 결과들에 비하여 훨씬 덜 민감함을 알 수 있다. 내진평가 등 구조 건전성 평가를 위해 소성 변형률을 입력변수로 사용시에는 응력을 입력변수로 이용하는 경우 보다 유한요소 밀도에 대한 민감도 분석에 훨씬 세심한 주의를 기울여야 함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 반복하중 하의 탄소성 유한요소 해석시 변형률에 대한 2차원 유한요소 밀도의 민감도 분석을 수행하였으며, 연구를 통해 얻은 결론은 아래와 같다.

- 누적 등가 소성 변형률, 등가 소성 변형률, von-Mises 유효응력은 응력집중계수가 클수록 반경방향 요소밀도에 보다 민감함.
- 누적 등가 소성 변형률, 등가 소성 변형률, von-Mises 유효응력은 응력집중계수가 크지 않은 경우 (K_t 가 1.5229 이하) 작용 하중의 최대 절대값이 클수록 반경방향 요소밀도에 보다 민감함.
- 누적 등가 소성 변형률은 다른 유한요소 해석 결과들에 비하여 유한요소 밀도에 더 민감한 반면 von-Mises 유효응력은 두 소성 변형률들 보다 훨씬 덜 민감함.

후 기

본 연구는 2018년도 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2018M2A8A4084016)의 결과입니다.

참고문헌

- (1) 2016, weather center, <http://www.weather.go.kr>
- (2) Masashi Hirano, Taisuke Yonomoto, Masahiro Ishigaki, Norio Watanabe, Yu Maruyama, Yasuteru Sibamoto, Tadashi Watanabe, Kiyofumi Moriyama, 2012, "Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accidents", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 49, No. 1, pp. 1-17, doi:10.1080/18811248.2011. 636538
- (3) Masaki Morishita, Akihito Otani, Izumi Nakamura, Tomoyoshi Watakabe, 2019, "A JSME Code Case on Piping Seismic Design Based on Inelastic Response Analysis and Strain-Based Fatigue Criteria", *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*, Vol. 142, No. 2, doi:10.1115/ 1.4045674
- (4) Gyeong-Hoi Koo, Jong-Sung Kim, Yun-Jae Kim, 2020, "Feasibility Study on Strain-Based Seismic Design Criteria for Nuclear Components", *Energies*, MDPI, Open Access Journal, Vol. 13, No. 17, pp. 1-20, doi:10.3390/ en13174435
- (5) Jong-Sung Kim, Jun-Young Kim, 2020, "Simplified elastic-plastic analysis procedure for strain-based fatigue assessment of nuclear safety class 1 components under severe seismic loads", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 52, Iss. 12, pp. 2918-2927, doi:10.1016 /j.net.2020.05.008
- (6) Tae-Kwang Song, Hong-yeol Bae, Yun-Jae Kim, Kyoung-Soo Lee and Chi-Yong Park, 2008, "Sensitivity Analysis of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weldment in Nuclear Power Plant", *KSME*, Vol. A-32, No. 9, pp. 770-781, doi:10.3795/KSME-A.2008.32.9.770
- (7) Hong-yeol Bae, Ju-Hee Kim, Yun-Jae Kim, Chang-Young Oh, Ji-Soo Kim, Sung-Ho Lee and Kyoung-Soo Lee, 2012, "Sensitivity Analysis of Finite Element Parameters for Estimating Residual Stress of J-Groove Weld in RPV CRDM Penetration Nozzle", *KSME*, Vol. A-36, No. 10, pp. 1115-1130, doi:10.3795/KSME-A.2012. 36.10.1115
- (8) Pawel Kaldunski, Leon Kukielka, 2008, "The sensitivity analysis of the drawpiece response on the finite element shape parameter", *PAMM*, Vol. 8, No. 1, pp. 10725- 10726, doi:10.1002/pamm.200 810725
- (9) Dassault Systems, ABAQUS Version 6.16, User's

Manuals, 2016
(10) Jin-Weon Kim, 2021, “Experiment and Evaluation of Repetitive Properties of Representative Equipment Materials for Elevated Seismic

Performance”, Sejong University, Seoul
(11) ASME B&PV Code, Sec.II, Part D, 2019, “Properties Material”, American Society of Mechanical Engineers, NY