

탄성추종계수를 이용한 고온 배관계의 크리프 응력 예측

서준민*·윤교근*·이현재*·오영진**·김윤재**

Prediction of Creep Stress in High Temperature Piping System Using Elastic Follow-up Factor

Jun-Min Seo, Gyo-Geun Youn, Hyun-Jae Lee*, Young-Jin Oh** and Yun-Jae Kim**†

(Received 23 April 2018, Revised 17 June 2018, Accepted 18 June 2018)

ABSTRACT

When designing high temperature piping system, creep phenomena must be considered. Since ASME code does not provide detailed methods of design by rule (DBR) for high temperature piping, Finite element analysis should be performed. However, In the case of piping system with frequent design changes, creep analysis of the entire piping system for every change is ineffective and practically impossible. Therefore, based on elastic and elastic-plastic analysis, which takes a relatively short time, the creep stress is predicted by using elastic follow-up factor method provided in R5 code and plastic-creep analogy presented by Hoff. The predicted creep stress for a virtual piping system was compared with the creep analysis result and the two results showed similar stress relaxation tendency in time.

Key Words : PGSFR, Elastic follow-up factor (탄성추종계수), Plastic-creep analogy (소성-크리프 유사성), Creep stress (크리프 응력), Stress relaxation (응력 완화)

기호설명

A : Creep constant
 B : Strength coefficient
 X_0 : Plastic strain parameter
 m : Plastic hardening exponent
 n : Creep exponent
 n_0 : Plastic strain parameter
 Z : Elastic follow-up factor
 σ_y : Yield strength
 ε_p : Creep strain

ε_p : Plastic strain
 \bar{E} : Effective elastic modulus
 $\bar{\sigma}$: Equivalent stress
 $\bar{\varepsilon}$: Equivalent strain
 $\dot{\varepsilon}$: Creep strain rate

1. 서론

국내에서 개발중인 PGSFR (Prototype Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor)의 경우 가동 압력은 기존 가압경수로 (약 10MPa)에 비해 매우 낮지만 (약 0.1MPa) 가동 온도는 500°C 이상으로 높다. 이에 따라 고온에서의 비선형 거동 및 크리프 현상에 대한 추가적인 고려가 필요하다. SFR과 같은 고온 원자로의 설계를 위한 코드로는 미국의 ASME B&PV Code, Section III, Division 5⁽¹⁾와 프랑스의 RCC-MRx,

† 책임저자, 회원, 고려대학교 (기계공학과)

E-mail: kimy0308@korea.ac.kr

TEL: (02)3290-3372 FAX: (02)929-1718

* 고려대학교 (기계공학과)

** 한국전력기술 (미래전력기술연구소)

section III⁽²⁾, 영국의 R5코드⁽³⁾ 등이 있으며, 국내의 경우 ASME 코드를 기준으로 원자로를 설계하고 있다. 현재 고온 배관계에 대한 응력 평가 기준인 ASME 코드 Div. 5 HBB-3600에서는 수식에 의한 설계(Design by Rule, DBR)를 적용할 수 있는 상세 방법을 제시하고 있지 않으므로, 유한요소 해석에 의한 설계(Design by Analysis, DBA)를 적용해야 한다. 3-D 요소에 대한 유한요소해석 시 크리프 해석의 경우 해석 시간이 오래 소요되기 때문에 잦은 설계 변동이 있는 배관계의 경우 매번 전체 배관계에 대하여 크리프 해석을 하는 것은 비효율적이다.

이차 하중이 작용하는 구조물에서는 구조적 불연속부에 의해 탄성추종 (Elastic follow-up)현상이 발생할 수 있다⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾. 일차 하중이 작용하는 구조물에 비해 이차 하중이 작용하는 구조물에서 탄성추종 현상이 두드러지게 발생할 수 있으며, 이로 인해 국부적으로 큰 크리프 변형률이 발생할 수 있다. SFR과 같은 고온 원자로의 경우 가동 압력이 낮지만 가동 온도는 높아 이차 하중이 지배적이므로 이에 대한 크리프 거동 예측이 중요하다. R5코드에서는 고온 구조물의 열응력 하에서 탄성추종계수를 계산하는 법과 이를 이용하여 시간에 따른 크리프 응력을 예측하는 방법을 제시하고 있다⁽³⁾.

Hoff⁽⁷⁾의 소성-크리프 유사성에 의하면 재료의 소성 변형률 관계식과 크리프 변형률 관계식이 유사할 때, 소성 해석을 통해 크리프 거동을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 가장 정확하지만 시간이 오래 걸리는 탄-소성-크리프 해석 결과 응력을 예측하기 위해, 비교적 시간이 덜 소모되는 탄성, 탄-소성 해석과 Hoff의 소성-크리프 유사성을 이용하여 탄성추종계수를 계산하였다. 계산된 탄성추종계수와 R5코드에서 제공하는 크리프 응력 계산식을 이용하여 시간에 따른 크리프 응력을 예측해 보았으며 이를 탄-소성-크리프 해석 결과와 비교하였다.

2. 간략 탄성추종계수 결정법

2.1 탄성추종계수

탄성추종 현상이란 Robinson이 최초로 발견한 것으로 크리프 현상이 발생할 때 이차 하중이 작용함에도 불구하고 구조적 불연속으로 인하여 연속부가 상대적인 탄성 거동을 하고, 탄성 스프링처럼 작용을 하여 이차 하중의 일부가 일차 하중처럼 작용하는

것을 말한다⁽⁴⁾. 탄성추종계수(Elastic follow-up factor, Z)는 응력 완화 (Stress relaxation)와 응력 완화-변형률관계에서 탄성추종이 미치는 영향을 정량화 한 것이다⁽⁸⁾. 다축 응력 상태에서 탄성추종계수는 다음과 같이 크리프 현상에 의한 탄성 변형률 증분과 크리프 변형률 증분의 비로 정의되며 이를 도식화 하면 그림 1과 같다⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾.

$$Z = \frac{\Delta \bar{\epsilon}^c}{\Lambda \bar{\epsilon}^e} = \frac{\Delta \bar{\epsilon}^c}{\Delta \bar{\sigma} / \bar{E}} = \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\Delta \bar{\sigma} / \bar{E}} + 1 \quad (1)$$

이 때, \bar{E} 는 유효 탄성계수, $\bar{\sigma}$ 는 등가 응력, $\bar{\epsilon}$ 는 등가 변형률로 다음과 같다. 여기서 E 와 ν 는 각각 탄성 계수와 프아송 비 이다

$$\bar{E} = \frac{3E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12} + \sigma_{23} + \sigma_{31})^2 \right] \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2 + 6(\epsilon_{12} + \epsilon_{23} + \epsilon_{31})^2 \right] \quad (4)$$

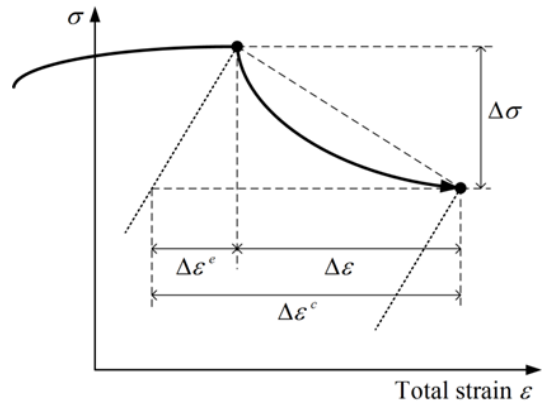


Fig. 1 Elastic follow-up factor for multi-axial stress

2.2 Z를 이용한 크리프 응력 계산법

크리프 현상이 발생하면 구조물의 응력은 재분배되며, 높았던 응력은 시간에 따라 완화된다. R5 코드에서는 이러한 크리프 응력 완화를 탄성추종

계수 Z 를 이용하여 계산하며, 다음 식 (5)와 같이 주어진다⁽³⁾.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{dt} = -\frac{\bar{E}}{Z} \dot{\bar{\epsilon}}_c(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}_c) \quad (5)$$

여기서 식 (6)과 같이 Norton-law에 의한 멱함수(power-law)를 따르는 크리프 변형률 관계식을 이용하여 양변을 정리하고 적분하면 식 (7)과 같다. 여기서 C 는 적분 상수인데, 크리프에 의해 응력이 완화되기 전인 탄-소성 응력을 $t=0$ 일 때의 응력으로 대입하면 구할 수 있다. 따라서 최종적인 시간에 따른 응력 식은 식 (8)과 같다.

$$\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n \quad (6)$$

$$\frac{\sigma^{1-n}}{1-n} + C = -\frac{E}{Z} At \quad (7)$$

$$\sigma = \left\{ (n-1) \frac{\bar{E}}{Z} At + \sigma_0^{1-n} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (8)$$

2.3 Hoff의 유사성

Hoff가 제시한 소성-크리프 유사성에 따르면 비선형 탄성체(Nonlinear Elastic Body)의 관계식과 점성체(Viscous Body)의 관계식이 각각 식 (9), 식 (6)과 같다면, 소성 거동과 크리프 거동이 유사하다⁽⁷⁾. 즉, 소성에 의해 발생하는 응력 완화 및 변형률 증가와 크리프에 의해 발생하는 응력 완화 및 변형률 증가가 비슷하다는 것이다. 이를 이용하면 탄-소성 해석 결과를 이용하여 크리프 거동 예측이 가능하다.

$$\epsilon_p = A\sigma^m \quad (9)$$

Roche⁽¹¹⁾, 이국희⁽¹²⁾ 등은 이러한 Hoff의 유사성과 참조 응력법을 이용하여 탄-소성 거동을 하는 균열을 가진 구조물에 이차 하중이 가해지는 경우에 대하여 탄성 추종 계수를 탄-소성 해석으로 결정하는 방법을 제시하였다. 이 방법에 따르면 소성 경화 지수 m 과 크리프 지수 n 이 동일하다면, 특정 형상의 균열 구조물에서 탄성추종계수가 동일하다.

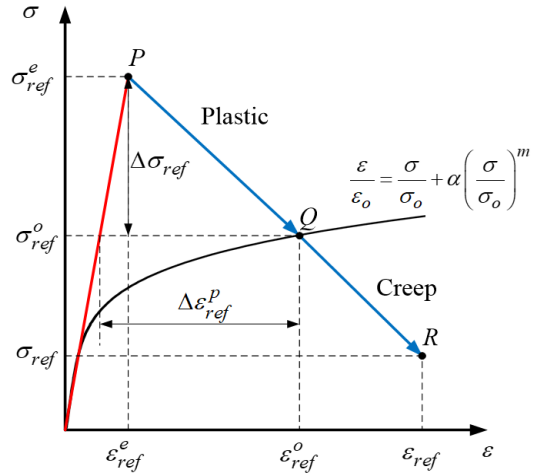


Fig. 2 Elastic follow-up factor based on reference stress

또한 탄성추종계수는 멱함수 법칙을 따르는 두 변형률 관계식의 지수 A 와 B 에 영향을 받지 않는다. 그림 2는 참조 응력, 참조 변형률과 탄성추종계수의 관계를 나타낸다.

본 연구에서는 구조물의 특정 지점을 대상으로 Z 를 계산하였기 때문에 참조 응력과 참조 변형률은 대상 지점의 등가 응력과 등가 변형률로 대체하였으며, 다음과 같은 관계식을 이용하여 탄성추종계수를 계산하였다.

$$Z = \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\Lambda \bar{\epsilon}^e} = \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\Delta \bar{\sigma} / \bar{E}} \quad (10)$$

3. 유한요소해석

3.1 배관계 형상

유한요소해석을 위한 가상 배관계의 대략적인 형상과 치수는 그림과 같다. 배관계는 직경이 다른 두 배관들로 이루어져 있는데, 큰 직경은 552 mm, 작은 직경은 405mm 이며 두께는 모두 15mm로 동일하다. 큰 직경으로 이루어진 배관의 r/t 는 약 18, R/r 는 약 2.9이며, 작은 직경으로 이루어진 배관의 r/t 는 약 14, R/r 는 약 2.8이다. 요소 타입은 이차 저감적분요소인 C3D20R을 사용하였으며, 요소 개수는 55,400 개, 절점 개수는 259,227 개 이다. 벽 두께 방향으로 4개의 요소를 사용하였다. 유한요소

해석은 상용 소프트웨어인 ABAQUS ver. 2016을 이용하여 수행하였다⁽¹³⁾.

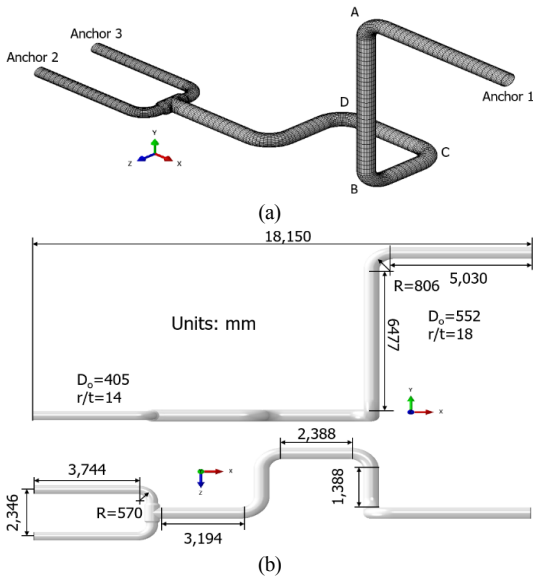


Fig. 3 (a) Schematic geometry of virtual piping system, (b) Dimensions of virtual piping system (Units: mm)

Table 1 Material properties at elevated temperature

Temperature [°C]	Thermal Conductivity [W/(mK)]	Elastic Modulus [GPa]	Yield Strength [MPa]
20	23.1	215	400
50	23.4	213	390
100	23.8	211	375
150	24.2	208	367
200	24.5	204	362
250	24.9	201	359
300	25.2	197	355
350	25.4	193	349
400	25.7	188	338
450	25.9	184	320
500	26.1	179	292
550	26.3	173	254

3.2 재료 물성

해석 대상 재료는 고온 배관재로 많이 사용되는 Alloy steel grade 91 (P91)로 가정하였으며, 재료 물성은 2010 AFCEN RCC-MRx Code Sec. III Tome1 Subsection Z을 참고하였다⁽²⁾. 프야송 비 ν 는 온도에 따른 값이 아닌 단일 값 0.3을 사용하였으며, 온

도에 따른 재료 물성들은 표 1에 나타내었다.

소성 변형률과 크리프 변형률에 대한 식은 각각 식 (11), 식 (6)과 같으며 550°C에서의 재료 물성인 $C_0=1.0605$, $n_0=0.0367$, $B=1.0745E-22$, $n=7.9307$ 을 이용하였다.

$$\varepsilon_p = \left[\frac{\sigma}{C_0 \sigma_y} \right]^{1/n_0} \quad (11)$$

3.3 해석 조건

해석 조건은 Anchor1부터 3까지를 모두 고정하고 배관계 전체에 PGSFR의 가동 온도인 545°C를 가하여 열팽창에 의한 이차 하중을 가하였다. 크리프 해석을 위한 크리프 시간은 PGSFR의 가동 주기인 7,200 시간(=10개월)로 하였다. 크리프에 의한 응력 완화는 응력-변형률 관계가 비선형적으로 나타나므로 응력이 완화에 따라 탄성추종계수가 다른 값을 나타낸다. 따라서 다양한 크리프 시간 및 크리프 응력에 대한 탄성추종계수를 구하기 위해 탄-소성 해석 시 임의로 항복 강도를 사용하여 해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 상용프로그램인 ABAQUS 2016 ver. 을 사용하였다.

3.4 해석 결과

탄성추종계수 계산 및 크리프 응력 예측은 그림 1에서 곡관 A, B, C, D의 최대 응력 지점에 대하여 수행하였다. 그림4에서 왼쪽에는 각 곡관별로 계산한 탄성추종계수를 나타내었고 오른쪽에는 탄성추종계수 이용하여 예측한 크리프 응력 완화 결과를 나타내었다. 왼쪽 그림에서 검은색 직선은 탄성 해석 결과 곡관부의 최대 응력을 나타낸 것이며, 비선형 선도들은 항복 강도를 바꾸어가며 탄-소성 해석을 했을 때 탄성 응력이 최대였던 지점과 동일한 지점의 탄-소성 응력을 나타내었다. 항복 강도를 낮춤에 따라 선도는 점점 내려가며 이에 따라 탄성 추종계수가 달라지게 된다. 탄성추종계수는 식 (10)을 이용하여 계산하였다. 계산된 탄성추종계수는 임의로 가정한 항복 강도에 따라 약 2에서 4까지의 값을 나타내었다. 크리프 응력 예측 시에는 사용한 탄성추종계수는 R5코드에서 제공하는 Z=3을 이용하였다. 이는 해석을 통해 구한 Z값을 사용하여 예측된 크리프 응력과는 큰 차이를 나타내지 않음을 확인하였다.

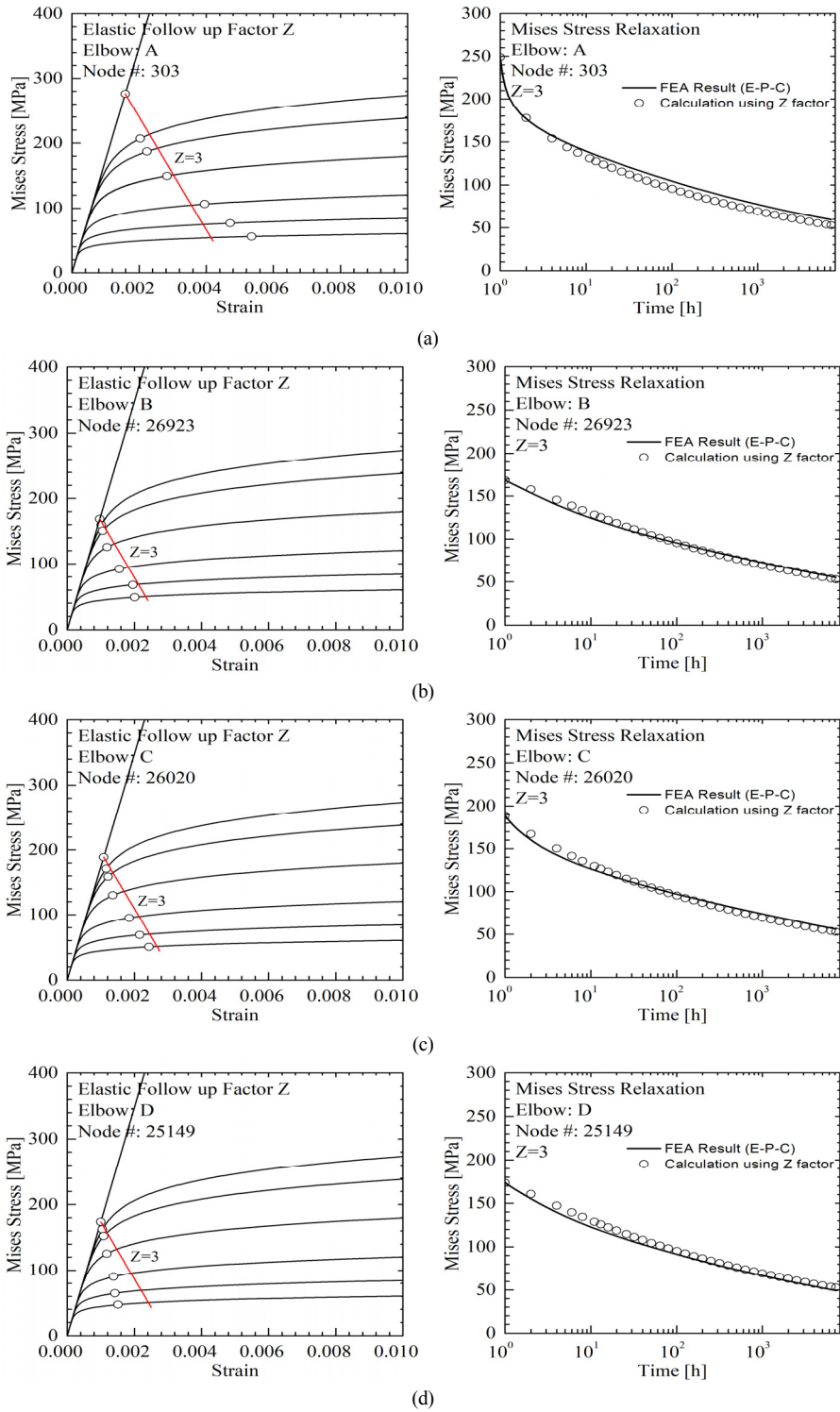


Fig. 4 Elastic follow-up factor with various yield strength and predicted creep stress using $Z=3$ for (a) elbow A, (b) elbow B, (c) elbow C and (d) elbow D

4. 결 론

고온 배관계 설계 시 크리프 현상에 의한 응력 완화에 대한 고려가 필요한데, 크리프 해석은 많은 시간이 소요되며 특히 설계 변동이 잦은 배관계의 경우, 매번 전체 배관계의 크리프 해석을 수행하는 것에는 시간과 효율성에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 시간이 덜 소모되는 탄성 해석과 탄-소성 해석을 통해 탄성추종계수를 계산하였고 이를 통해 크리프 응력 완화를 예측하였다. 해석을 통해 구한 탄성추종계수 Z 는 약 2에서 4정도이며 이를 이용해 예측한 크리프 응력과 R5코드에서 제안하는 탄성추종계수 $Z=3$ 을 이용해 예측한 크리프 응력은 큰 차이가 없었다. 따라서 고온 배관계 설계 시 간략 탄성추종계수 결정법을 이용할 수 있으며, 탄성추종계수 $Z=3$ 을 이용하면 배관계의 크리프 응력을 예측할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013, 2017년도 미래창조과학부의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2013M2B2B1075733, NRF-2017R1A2B2009759, No. 2014M2A8A6028600).

참고문헌

- (1) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 5, ASME, 2015, New York, USA.
- (2) RCC-MRx, Section III, "Rules for nuclear installation mechanical components," AFCEN, 2010, Paris, France.
- (3) R5: An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Resision 3, British Energy Generation Limited, 2003, Gloucester, UK.
- (4) Robinson, E. L., 1955, "Strain Piping Design to Minimize Creep Concentration," *Transactions of ASME*, Vol. 77, pp. 1147-1162.
- (5) Boyle, J. T. and Nakamura, K., 1987, "The Assessment of Elastic follow-up in High Temperature Piping Systems - Overall Survey and Theoretical Aspects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 26, pp. 167-194.
- (6) Kasahara, N., Nagata, T., Iwata, K. and Negishi, H., 1995, "Advanced Creep-Fatigue Evaluation Rule for Fast Breeder Reactor Components: Generalization of Elastic Follow-up Model," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 155, pp. 499-518.
- (7) Hoff, N. J., 1954, "Approximate Analysis of Structures in the Presence of Moderately Large Creep Deformations," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 12, pp. 49-55.
- (8) Lida, K., Asada Y., Okabayashi K. and Nagata T., 1987, "Simplified analysis and Design for Elevated Temperature Components of MONJU," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 98, pp. 305-317.
- (9) Seshadri, R., 1990, "The Effect of Multiaxiality and Follow-up on Creep Damage," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 112, pp. 378-385.
- (10) Kizhatil, RK. and Seshadri, R., 1995, "Multiaxial Stress Relaxation using the Local Region Constraint Parameter," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 63, pp. 99-110.
- (11) Roche, R. L., 1988, "Modes of Failure - Primary and Secondary Stresses," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 110, pp. 234-239.
- (12) Lee, K. H. and Kim, Y. J., 2012, "A Method to Determine Elastic Follow-up Factors to Predict C(t) for Elevated Temperature Structures," *Trans. Korean Society of Mechanical Engineering. A*, Vol. 36, No. 7, pp. 759-768.
- (13) ABAQUS Version 2016. User's Manual, 2016, Dassault Systems Simulia Corporation, USA