2003 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

고온 불연속구조물의 탄성추종 평가해석에 대한 고찰

On the evaluation of elastic follow-up of a high temperature discontinuous structure

이종민, 김종범, 이형연, 이재한

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로의 구조물은 고온 환경에서 소성 및 크립과 같은 재료의 비탄성 변형을 겪게 되는데 실제 구조물에서는 강하고 약한 부분이 존재하는 불연속 구조물에서의 상호작용으로 인해 약한 부분에 변형이 집중되는 탄성추종 거동이 발생하게 되고 설계해석에서 이를 적절히 고려해야 할 필요성이 대두된다.

본 연구에서는 불연속구조물의 탄성추종 거동을 살펴보고 미국, 일본, 프랑스, 영국의 고온구조 설계코드에서 탄성추종 효과를 반영하고 있는 현황을 비교분석하였다. 또한 두개의 막대모델과 L-형 불연속구조물에 대한 상세 비탄성해석을 수행하여 불연속구조물의 형상과 하중종류에 따른 탄성추종 거동을 평가한 결과 이들 영향이 상당히 큰 것을 확인하였다.

Abstract

While high temperature structures of LMR experience inelastic deformation such as plasticity and creep due to high temperature operating temperature of 530~550°C, geometric nonlinear structures may undergo elastic follow-up behavior due to the interaction between stiff region and weak region. Thus, careful consideration should be given to the design and analysis of high temperature geometric nonlinear structure.

In this study, the elastic follow-up behavior of geometric nonlinear structure has been investigated and the current status of design method implemented in the ASME-NH, Japanese BDS, French RCC-MR, and UK R-5 codes to consider elastic follow-up behavior has been reviewed. It has been shown that the ratio of the stiff region and the weak region and the type of loading affect the elastic follow-up behavior greatly from the detailed inelastic analyses of two bar model and L-shaped structure subjected to various loading situation. The applicability and the conservatism of simplified analysis methods implemented among various design codes need to be studied further.

1. 서론

액체금속로의 고온배관, Y-형태 구조, 노즐, 튜브와 튜브시트 연결부 등의 기하학적 불연속 구조물에 대한 크립-피로 손상 평가는 구조건전성의 확보를위해 상당히 중요하기 때문에 프랑스, 영국, 일본과 같은 원자력 선진국들에서는 신뢰성 있고 사용하기 간편한 평가방법의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 고온 불연속 구조물에서 발생하는 특징적인 거동 중의 하나인 탄성추종은 구조적으로 취약한 부위와 강한 부위가 연결되어 있을 때 강한 부위로 인해 취약부위의 비탄성 변형이 더욱 증가하고 응력은 완화되는 현상을 일컫는다.

탄성추종의 개념은 Robinson[1]에 의해서 처음 제안되었는데, 배관계통에 응력이 크게 작용하는 부위에서 발생한 크립변형률 집중현상을 탄성추종으로 설명하였다. 이후 많은 연구자들이 연구노력을 기울여 여러나라에서 고온 설계 지침에 적용되었다. 미국의 고온구조 설계 지침서인 ASME B&PV Code, Section III, Subsection NH[2]에서는 탄성추종현상을 규정하고 가능한 한 설계시에 탄성추종이 발생하는 것을 배제하도록 권고하고 있다. Roche[3]는 탄성추종응력이 일차응력과 이차응력의 특성을 모두 지니고 있다는 특성을 고려하여 이를 일차응력과 이차응력으로 분할하는 방법론을 개발하였고 Kobayashi[4]는 단순비탄성해석을 이용한 탄성추종평가법을 제안하였으며 Kasahara[5]는 일반화된 탄성추종모델을 고속증식로의 크립-피로 평가에 적용하는 방법을 제안하였고, Dhalla[6]는 배관계에서의 열팽창으로 인한 탄성추종 크기를 계산하는 단순화된 탄성평가방법을 개발한 바 있고 김종범[7]은 Y-구조물에 대한 탄성추종을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 탄성추종 현상을 분석하고 탄성해석을 이용한 탄성추종 비탄성 변형률 평가기술을 정립하고 고온구조물의 설계에서 탄성추종 영향을 고려하는 방법들을 고찰하였다. 그리고 Two Bar Model 과 L-형 불연속구조물을 사례로 탄성추종 상세 비탄성해석을 수행하여 단순평가 방법과 비교분석 하였다.

2. 탄성추종 현상에 대한 고찰

구조물의 대부분의 영역이 탄성적으로 거동하며 단지 일부 영역만이 비탄성변형을 받을 때 하중, 응력 및 변형률을 계산하려면 전체 구조물의 거동을 살펴야한다. 이러한 경우 탄성추종 때문에 국부 영역은 변형률 집중현상을 겪을 수 있다. 이때의 국부 영역은 구조적 불연속부나 약한 재질을 사용한 부분, 또는 고도의 응력 집중부가 될 수 있다. 이를 도식적으로 설명하면 다음과 같다.

그림 1 에 보인 것과 같이 고온 상태에서 두께가 얇은 A 부분과 두꺼운 B 부분으로 이루어진 두개의 막대 모델을 살펴보기로 한다. 막대에 변형을 가하면 이 변형은 초기에 힘의 평형에 의해 A 와 B 부분에 각기 다른 양의 변형이 발생한다. 만일 B 는 탄성영역에 머물고 A 는 소성변형이 발생하는 정도의 초기변형 하중이 가해졌다고 보면 B 에 발생하는 실제 응력과 변형은 탄성해석으로 구한 값보다 응력은 작고 변형은 크게 발생할 것이다. 이 현상은 초기 힘의 평형 상태와 관련되는 탄성추종이라 볼 수 있다. 이제 초기 변형이 가해진 상태가 오래 지속되면 A 와 B 는 각기 다른 크립거동을 보이게 된다. 두 막대 모두 응력은 완화되면서 A 막대는 크립에 의한 변형이 증가되고 B 막대의 변형은 감소하여 총변형은 일정하게 유지된다. 즉, 강한 부분인 B 의 영향으로 약한 부분인 A 에 변형이 집중되는 현상이 발

생하는 것으로 전형적인 탄성추종 현상이다.

일반적으로 가해진 하중이 힘일 경우 이는 구조물의 평형을 유지하도록 하기 때문에 일차응력으로 구분하고, 열하중이나 변위하중은 힘의 평형을 유지하는데 기여하지 않고 자율성이 없기 때문에 이차응력으로 구분하고 있다. 하지만 그림 1 의 경우와 같이 불연속구조물에 변위하중이 가하고 있을 때 유발되는 응력은 일차응력과 이차응력의 성질을 모두 나타내기 때문에 응력을 간단히 구분하기 어렵다. 따라서 탄성추종을 평가하여 응력구분에 이용할 수 있는데 과도한 탄성추종이 발생할 경우 변위하중에 의해 발생된 응력은 일차응력의 성질에 가깝다고 할 수 있다. ASME-NH 에서는 열하중이나 변위하중으로 유발된 응력이 탄성추종을 동반할 경우 일차응력으로 간주하여 보수성을 갖도록 하였는데 이는 경우에 따라 과도한 보수성을 나타낼 수 있어서 면밀한 검토가 필요한 실정이다.

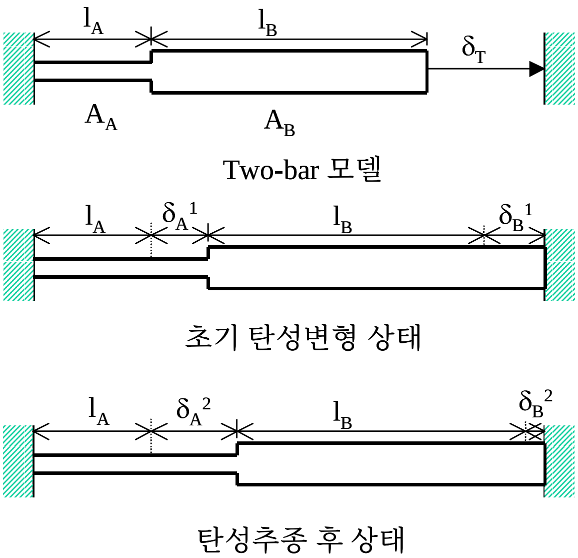

그림 1. 탄성추종 현상 설명도

앞에서 살펴본 것처럼 탄성추종 현상은 구조물 재료 자체의 비선형 거동 특성이라기 보다는 구조물을 형성하고 있는 약한부분과 강한부분의 상호작용으로 인하여 발생된 불연속구조물의 효과라고 볼 수 있으며 이를 이해하고 설계해석에 적절히 반영하기 위해서는 반드시 구조물 전체의 거동을 고려해야 한다. 그림 1 에서 살펴본 두개의 막대 모델에 대한 실제 해석을 수행하였는데 이는 다음 장에서 설명하기로 한다.

3. 설계코드에 반영된 탄성추종 평가방법

미국의 고온구조설계코드인 ASME-NH[2]와 일본의 BDS[8] 및 DDS 코드와 프랑스의 RCC-MR 코드[9]에서 탄성추종을 다루고 있는 방법을 비교분석하면 다음과 같다.

ASME-NH 에서는 설계시 탄성추종 현상을 고려할 것을 요구하고 있지만 이에 대한 평가방법을 명시적으로 별도로 제시하지는 않았다. 과도한 탄성추종으로 인한 국부적인 변형률 집중이 발생하지 않도록 해야한다고 규정하고 있고 탄성해석의 결과로부터 구한 변형률범위를 갖고 비탄성변형률 범위를 산정하는 과정에서 탄성추종으로 인하여 발생하는 변형률의 증가는 노이버룰을 이용하여 계산되며 응력의 완화는 Isochronous Curve 를 이용하여 계산된

다. 또한 크립손상을 평가할 때 다축응력계수 G 로써 탄성추종 영향을 일부 고려할 수 있다.

$$S_r = S_j - 0.8G(S_j - \bar{S}_r)$$
$$G = \frac{\sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)}{\sigma_1 - 0.3(\sigma_2 + \sigma_3)}$$

그리고, 구조물에 국부적으로 발생할 수 있는 과도한 탄성추종으로 인한 변형률집중을 방지하기 위하여 탄성추종을 동반하는 이차응력(압력유발 국부 막응력과 굽힘응력, 온도유발 막응력)을 일차응력으로 분류하도록 하였다. ASME NH 에서 수명동안의 비탄성변형률을 구하기 위하여 일차응력지수 X 와 이차응력지수 Y 를 오도넬-포로스키 선도에 적용하여 유효크립계수 Z 을 구한 뒤 유효크립응력 σ_c 를 구하여 $1.25\sigma_c$ 에 대한 변형률을 Isochronous Curve 에서 찾으면 이것이 비탄성변형률이 되는데 탄성추종을 동반하는 이차응력을 일차응력으로 구분하면 보수적인 변형률 평가를 할 수 있다. 사실 과도한 탄성추종을 동반하는 이차응력을 일차응력으로 구분할 때 어느정도의 탄성추종을 과도한 것으로 볼 수 있는가에 대해서는 논란의 여지가 많을 수 있다. 다만 설계코드의 목적상 보수성을 유지해야 한다는 관점에서 현재의 응력구분 규정을 만든 것으로 이해할 수 있다.

일본의 고온구조설계지침인 BDS[8]에서는 변형률 범위를 구할 때 다음 식과 같이 탄성추종계수 q 를 사용하도록 하였다.

$$\varepsilon_t = K_\varepsilon \varepsilon_n$$
$$K_\varepsilon = \max\{\left(s^* / \bar{s}\right) K^2,\ K \cdot K_e^{'}\}$$
$$K_e^{'} = 1 + (q-1)(1 - 3\bar{s}_m / s_n),\ q = 3$$

여기서 탄성추종계수 q 는 그림 2 에 보인 것과 같이 주어진 응력상태에서 탄성변형률 성분과 총변형률의 비로써 정의된다.

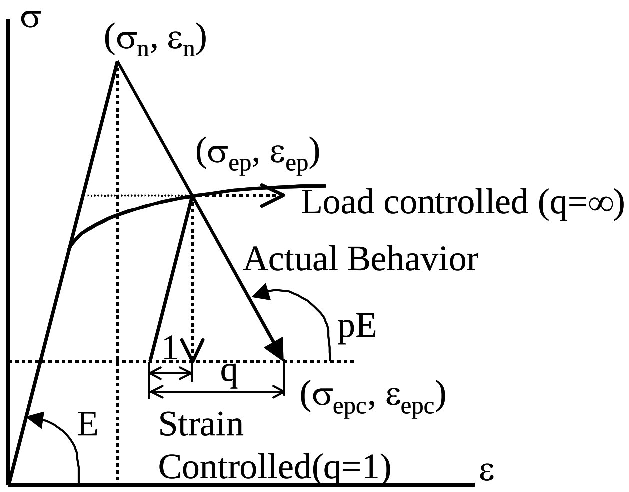

그림 2. 탄성추종 계수 q 의 설명도

이를 이용하여 앞 장에서 살펴본 두개의 막대모델에 대해서 탄성추종계수를 구하면 다음과 같다.

$$q = \frac{1 + \frac{l_B}{l_A}\frac{A_A}{A_B}}{1 + \frac{l_B}{l_A}\left[\frac{A_A}{A_B}\right]^n},\ where\ n\ is\ creep\,const$$

그리고 Cantilever 모델에 대해 탄성추종계수를 구하면 다음과 같다.

$$q = \frac{n+2}{3}, where\ n\ is\ creep\ const$$

위에서 구한 탄성추종계수에 Norton's Power Law 크립식 $\dot{\varepsilon}^{cr} = B\sigma^n \quad (n \le 7)$ 을 적용하고 크립계수 n 을 7 로 하면 q 값은 2~3 사이값이 된다. BDS 에서는 보수적으로 탄성추종계수 q 를 3 으로 정하였다.

일본은 2000 년 무렵에 BDS 를 개정한 DDS 를 발간되었는데 여기에서는 첨두응력에 대한 탄성추종계수 q_p 와 크립에 관한 탄성추종계수 q_c 를 구분하여 적용하도록 하였고 적용절차를 BDS 보다 세분하여 복잡해졌는데 이에 대해서는 현재 분석중이다.

프랑스의 고온구조 설계코드인 RCC-MR[9]에서도 ASME-NH 와 마찬가지로 탄성추종을 RB3225 에서 규정하고 있고 탄성추종의 악영향을 설명하였다. 크립이 발생하지 않는 경우 불연속구조물의 응력집중부에서 RB3223.3 에서 설명한 셰이크다운을 만족하면 탄성추종의 위험은 배제될 수 있다고 하였다. 크립이 발생할 경우 탄성추종 영향을 고려해야 하는데 이는 1993 년 개정판에서 다음 식으로 반영되어 응력완화와 크립변형률을 구하도록 하였다.

$$\dot{\sigma}_r = -E\dot{\varepsilon}_{cr} / C_r \quad (\dot{\varepsilon}_{cr}\ is\ creep\ strain\ rate)$$

$$\varepsilon^{cr}(t) = \frac{C_r}{E}\{K_s\overline{\Delta\sigma^*} - \sigma(t)\}$$

여기서 Cr 은 탄성추종계수로 일본의 BDS 와 마찬가지로 3 을 사용한다. 그리고 소성변형으로 인한 변형률의 증가는 ASME-NH 와 유사하게 노이버 방법을 사용하여 구한다. 응력의 분류는 RB 3224.3.5 에서 설명한 것과 같이 탄성추종의 위험이 없는 경우 열응력과 변형률제어 응력은 이차응력으로 규정하지만 탄성추종의 위험이 있는 경우에는 일차응력으로 규정하여 변형률범위를 구할 때 보수적인 평가가 가능하도록 하였다.

영국의 경우 고온구조 건전성 평가지침 R5[10]에서도 국부영역에서 크립으로 인한 변형률 증가량을 구할 때 탄성추종계수 Z 를 사용하고 있다.

지금까지 미국, 일본, 프랑스의 고온구조 설계코드에서 탄성추종 영향을 고려하고 있는 방법에 대하여 간략히 살펴보았는데 중요한 점은 다음과 같다. 설계코드에서 해석에 의한 설계를 수행할 때 기본적으로 탄성해석 방법에 의존하고 있고 탄성해석 결과 구한 변형률범위로부터 비탄성변형률 범위를 결정하는 방법론들을 제시하고 있다. 이때 불연속구조물이나 배관계통에서 탄성추종으로 인하여 발생하는 변형률의 증가를 평가해야 한다는 점인데 이는 크립의 영향이 없는 경우와 크립의 영향이 있는 경우에 대해 달리 평가되어야 한다.

크립의 영향이 없는 경우 소성변형 발생과 첨두응력의 영향에 의한 변형률의 증가는 미국과 프랑스의 경우처럼 노이버 룰을 사용하여 평가할 수도 있고 일본의 경우처럼 탄성추종계수를 사용하여 평가할 수 있다. 크립의 영향이 있는 경우 미국과 프랑스의 경우처럼 탄성추종으로 인해 발생한 변형률 증가는 이로 인한 응력을 일차응력으로 재분류하여 보수적으로 변형률범위를 평가할 수도 있고 일본의 경우처럼 크립에 의한 탄성추종계수를 사용하여 평가할 수 있다. 각 방법의 장단점은 보다 광범위한 비교분석을 수행한 뒤 논할 수 있겠다.

4. 불연속구조물 형상에 따른 탄성추종거동 분석

지금까지 살펴본 탄성추종 현상을 316 스테인레스강으로 만든 막대모양의 불연속구조물에 적용한 해석예제를 통하여 분석해 보았다. 그림 3 에 보인 것과 같이 두께가 40cm 인 A 막대와 두께가 30cm 인 B 막대의 총길이는 4350cm 이고 B 막대의 끝단에 변위하중을 가하였는데 3mm, 10mm, 20mm 의 3 가지 경우에 대해 살펴보았다. 막대는 550°C 의 균일온도 상태라고 가정하였다. 변위하중은 1000 초동안 가한 후 100 만초동안 유지하였다.

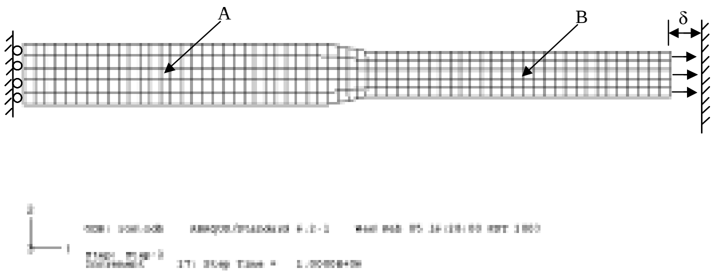

그림 3. 불연속 막대 모델

비탄성변형이 발생할 경우 탄성해석으로는 실제 구조물에 발생하는 변형률을 알 수 없기 때문에 비탄성해석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 탄소성 크립해석을 이동경화모델과 Norton's 크립식을 사용하여 수행하였다. 이동경화에 사용된 물성치로 영률과 포와송비는 550°C 일 때 각각 155.3GPa, 0.305 이고 소성경화를 모사하는 응력, 변형률은 124MPa, 0 과 179MPa, 0.00885 와 191MPa, 0.021 이다. 크립상수 B 와 n 은 각각 $6.37x10^{-75}Pa^{-n}/s$, 7.9[11]이다.

3mm 의 작은 변위하중에 대해서는 두개의 막대 모두에서 소성변형이 발생하지 않지만 10mm 의 하중에서는 A 막대는 탄성응답을 하지만 B 막대는 항복이 발생하여 소성변형이 발생한다. 20mm 의 하중을 가하면 A 와 B 모두에서 소성변형이 발생한다. 10mm 의 변위하중에 대한 탄성해석 수행결과 A 막대와 B 막개의 응력과 변형률은 각각 (345MPa, 0.0020156), (460MPa, 0.0026875)였다. 비탄성 해석결과 A 막대와 B 막대의 응력과 변형률은 각각 (125MPa, 0.000735), (167MPa, 0.00413)으로 약한 부분인 B 막대의 변형은 탄성해석 결과는 0.269%였지만 탄소성해석 결과는 0.413%로 54%나 증가한 값이다. 이때 강한 부분인 A 막대의 변형은 탄성해석시 0.202%였지만 탄소성해석 결과는 0.074%로 오히려 감소하게 된다. 이것이 탄성추종으로써 약한 부분인 B 의 변형률 증가를 가져오게 된다. 이 결과를 갖고 앞에서 설명한 탄성추종계수를 구하면 q=1.744 가 된다. 탄성추종현상은 변위하중을 3mm 또는 20mm 를 가한 경우에도 10mm 의 경우와 거의 유사하게 발생하고 탄성추종계수도 거의 같은 결과를 얻어서 하중의 크기에는 별 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

한편, 100 만초의 유지시간 동안 두개의 막대에 발생하는 현상을 탄소성 및 크립해석을 수행하여 살펴보면 A 막대는 탄소성해석결과인 (125MPa, 0.000735)에서 (117MPa, 0.000699)로 응력이 완화되며 변형이 감소하였고 B 막대는 탄소성해석결과인 (167MPa, 0.00413)에서 (156MPa, 0.00417)로 응력은 완화되며 변형률은 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과로 크립 탄성추종계수를 구하면 q=1.54 가 되며 그림 4 에 A 막대와 B 막대의 응력-변형률 변화를 표시하였다.

탄성추종계수의 유용함은 복잡한 비탄성해석을 수행하지 않고서도 탄성해석을 수행하여 얻은 응력과 변형률을 Isochronous Curve 에 적용하고 탄성추종계수에 해당하는 선을 그어서 하중시간에 해당하는 곡선과 만나는 점을 찾아 실제 구조물에 발생하는 비탄성 응력 및 변형률 값을 구할 수 있다는 것이다. 다만 구조물의 형상과 하중의 종류에 따라 다양한 탄성

추종이 발생할 것이기 때문에 기존 설계코드에서 적용하는 방법의 타당성과 보수성 여부를 판단할 필요성이 있다. 그림 3 에 보인 두개의 막대 모델에서 가는 부분인 B 의 길이가 2m 였는데 이를 다양하게 바꾸어서 불연속구조 형상 효과를 살펴보았는데 이를 그림 5 에 나타내었다.

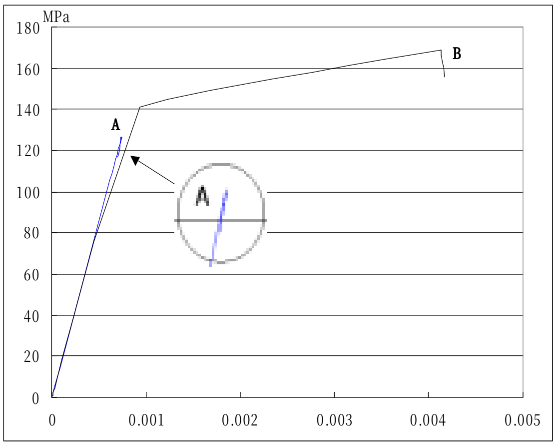

그림 4. 두개의 막대모델에 대한 탄소성 크립해석 결과(10mm 변위하중)

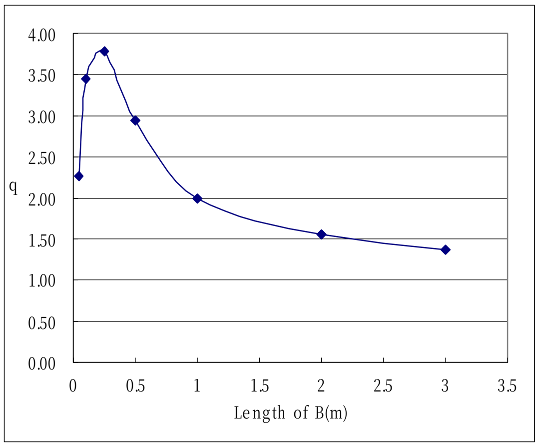

그림 5. 막대 B 의 길이에 따른 탄성추종 계수의 변화

그림 5 에서 보듯이 두꺼운 부분인 A 의 길이가 2m 로 일정할 때 가는 부분 B 의 길이를 0.05m, 0.1m, 0.25m, 0.5m, 1m, 2m, 3m 로 변경하여 탄성추종 분석을 수행한 결과 탄성추종계수 q 는 0.25m 인 경우 최대값인 3.79 가 되고 길이가 이보다 길어지거나 작아질수록 작아짐을 알 수 있다. q 값이 1 이 되면 변형률 제어 거동을 하게 되는데 B 의 길이가 3m 이상이 되면 q 가 1.38 보다 작아져서 변형률 제어 양상을 띠게 되는데 이는 B 부분의 길이가 늘어남으로써 A 와 전체적인 탄성에너지가 균형을 이루게 되어 대등한 거동을 하게 되기 때문이다. 변형률 제어거동의 경우에는 발생한 응력이 이차응력의 성질을 갖는다.

B 의 길이가 0.05m 인 경우에 q 는 2.27 이 되었는데 여기서 알 수 있는 것은 취약 부위 B 가 강한 부분 A 에 비해 무척 작을 경우에는 B 의 거동이 A 와 상호작용을 하지 못하고 국부적인 거동만을 하게 된다는 것이다. 이는 대형판에 국부적으로 열을 가했을 경우 국부지역은 전체 거동에 영향을 미치지 않고 나머지 영역에 의해 구속되는 것과 같은 현상이다.

따라서 앞에서의 분석결과로부터 불연속구조물에 발생하는 탄성추종거동은 불연속구조물의 강한 부위와 약한 부위의 형상의 비가 중요한 역할을 하게 되고 약한 부분이 너무 약하면 강한 부위와 상호작용을 할 수 없고 단지 국부 효과만 나타남을 알 수 있었다. 그리고 그림 5 에서 본 것과 같이 탄성추종계수는 형상에 따라 1~3.8 까지의 분포를 가짐을 알 수 있어서 이를 한가지 값으로 고정하여 사용하는 것은 여러가지 문제를 가질 수 있음을 확인하였다. 즉, 너무 보수적인 값을 설정하면 설계가 과도하게 되고 보수적이지 못한 값을 설정하면 설계가 타당하지 못하기 때문이다. 불연속구조물의 형상으로 인한 탄성추종거동은 앞으로 좀 더 많은 사례를 검토하여 효과적으로 설계에서 고려할 수 있는 방법을 도출할 필요성이 있다.

5. 하중의 종류에 따른 탄성추종거동 분석

불연속구조물의 탄성추종거동은 형상과 하중형태에 의존하게 되는데 앞 절에서 형상에 의한 영향을 살펴보았고 여기서는 하중형태의 영향을 살펴보기로 한다. 그림 6 에 보인 것과 같은 L-형 불연속구조물에 고온 상태에서 유지시간을 갖는 반복 힘하중, 반복 변위하중, 및 열과도하중의 세가지 종류의 하중이 작용할 경우에 대한 탄성추종 거동을 상세 비탄성해석을 수행하여 분석하고 탄성추종계수를 산정하여 단순평가방법과 비교해 보았다. 범용 유한요소해석코드인 ABAQUS 를 사용하여 8 절점 CPE8 요소 239 개와 818 개의 절점을 사용하여 모델링하였고 상단에 수평방향 힘하중을 100 초 동안 20000N 가하고 40 만초동안 유지하였다가 다시 200 초동안 반대방향으로 20000N 을 가한뒤 같은 속도로 제하하는 경우와 변위하중은 +/-5mm 를 같은 방식으로 가하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 열과도하중에 대한 영향도 분석하기 위해 모델의 좌측면에 20 시간동안 350°C 에서 550°C 로 열을 가하여서 400 시간 동안 유지하였다가 다시 20 시간동안 350°C 로 낮추는 하중을 열전달계수 5833W/m^2 °C 를 사용한 대류열전달로 적용하였다. 오른쪽과 바닥면은 대칭경계조건을 사용하고 350°C 의 온도가 일정하게 작용하는 것으로 하였다.

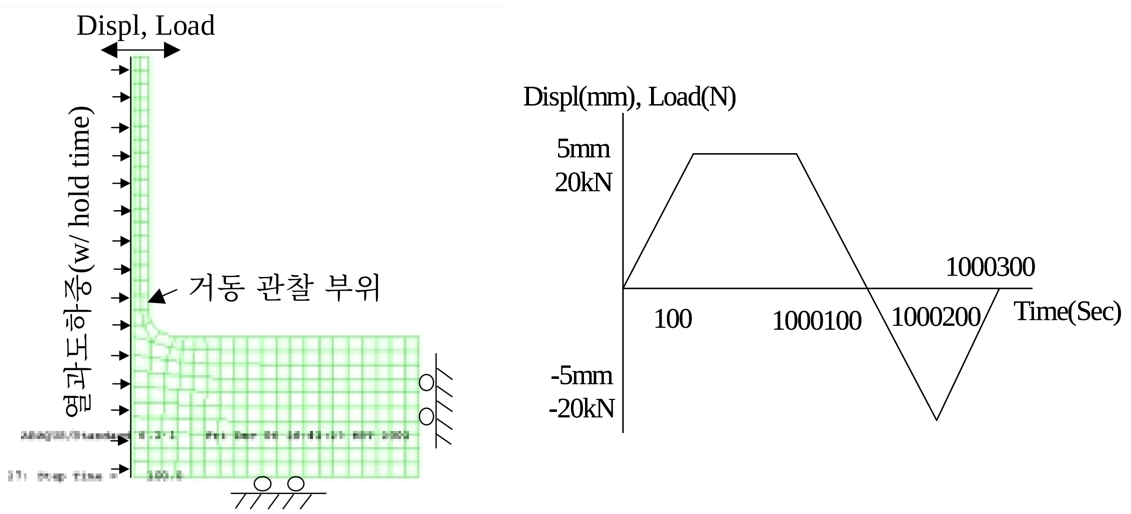

그림 6. 탄성추종 해석 L-형 불연속구조물 모델 및 하중

각 경우에 대한 비탄성해석은 결합경화모델과 Norton's Power Law Creep 을 연계하여 수행하였다. 결합경화모델에 사용한 재료상수들인 C, γ, b, Q 는 각각 40600MPa, 139.4, 50.4, 95.6MPa 이고 Norton 의 크립상수 B 와 n 은 각각 $6.37 \times 10^{-75} Pa^{-n}/s$, 7.9[11]이다.

해석결과 그림 6 에 표시한 탄성추종 관심 부위에서 탄성추종계수는 변위하중의 경우 그림 7 에 보인 것과 같이 q=2.16 으로 전형적인 탄성추종거동 양상을 보였고 하중을 5 회 반복하였을 경우 그림 8 과 같이 탄성추종 거동은 유지되고 있음을 알 수 있다. 힘하중을 적용하였을 경우 그림 9 에 보인 것과 같이 q=8.14 로써 예측한대로 하중의 성격상 탄성추종 거동 양상과는 거리가 있고 일차응력의 전형적인 결과를 얻었다. 그리고 열과도 하중에 대해서는 그림 10 에 보인 것과 같이 q=1.1 로써 탄성추종 거동이라기 보다는 거의 변형률제어 거동양상을 보였는데 이는 본 연구에서 사용한 해석모델과 열과도하중의 형태에 대한 결과일 뿐이며 다른 구조형상과 열과도하중에 대해서는 탄성추종 거동이 발생할 수 있다고 예상된다. 탄성추종계수는 다음 관계식으로 구하였다.

$$q = 1 - 1/p \quad (Graphical \quad Method)$$
$$q = \Delta\varepsilon_p / \{(\Delta\sigma_{EL} - \Delta\sigma)/E\} \quad for \quad elastoplastic$$
$$q = \Delta\varepsilon_c / \{(\Delta\sigma)/E\} \quad for \quad creep$$

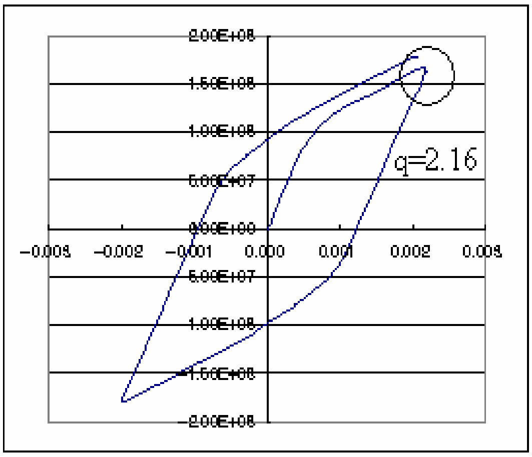

그림 7. 변위하중에 대한 탄성추종 평가

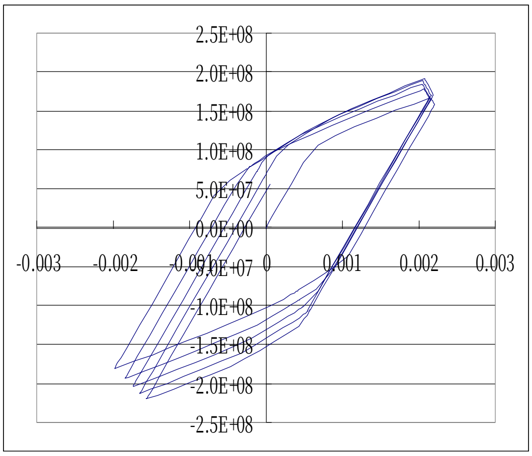

그림 8. 변위하중에 대한 탄성추종 평가(5회)

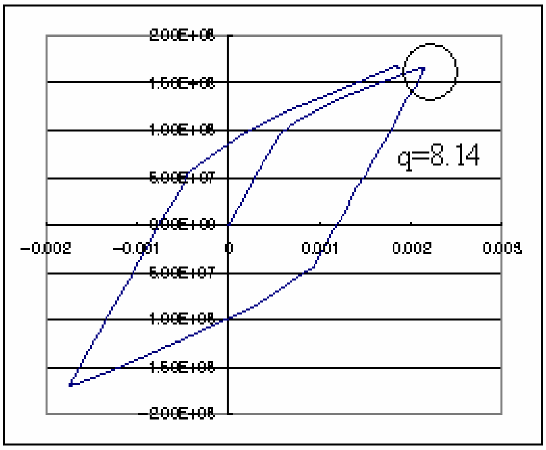

그림 9. 힘하중에 대한 탄성추종 평가

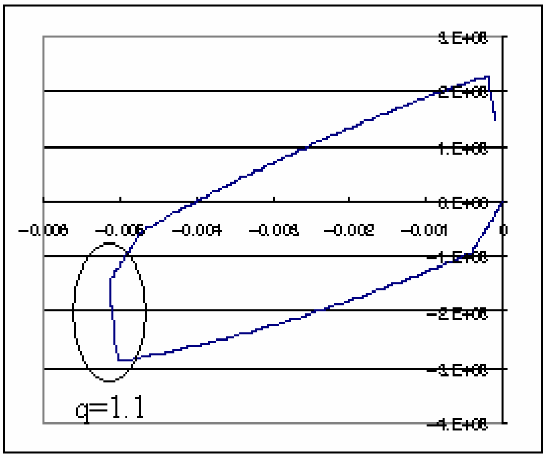

그림 10. 열과도하중에 대한 탄성추종 평가

6. 결론

본 연구에서는 고온 불연속구조물에 발생하는 탄성추종 현상을 분석하고 여러나라의 고온구조 설계코드에서 이를 고려하고 있는 기술현황을 비교분석하였다. 또한 불연속구조물에 대한 비탄성해석을 수행하여 실제의 탄성추종거동 평가를 수행해 보았다. 그 결과 불연속구조물의 탄성추종거동은 구조물의 형상과 하중종류에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었고 현재의 설계코드에서 탄성추종계수를 한가지 값으로 설정하여 탄성추종 영향을 간단히 평가할 수 있도록 한 경우에 발생할 수 있는 문제점을 파악하였다. 액체금속로 구조물의 설계해석 단계에서는 고온 불연속구조물에 대한 상세 비탄성해석을 수행하는 것보다 탄성해석을 수행한 뒤 이로부터 비탄성거동을 평가할 수 있는 보수적인 단순평가방법을 주로 사용하고 있기 때문에 이들 평가방법들이 갖고 있는 보수성의 정도와 평가범위에 대한 면밀한 검토가

요구되기 때문에 향후 다양한 구조 형태와 하중에 대한 탄성추종 거동 평가를 수행하고 관련된 해석 및 평가기술 분야에 많은 노력을 기울일 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] E.L.Robinson, "Steam Piping Design to Minimize Creep Concentrations," p.1147, Trans. ASME. 1955

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, ASME, (2001).

[3] R.L.Roche, "Estimation of Piping Elastic Follow-up by Using Conventional Computations," Int.J. of Pressure Vessel and Piping, Vol.26, p.53, 1986

[4] K.I.Kobayashi, Y.Saito and T.Udoguchi, "Estimation of Elastic Follow-up Behavior on 18Cr-8Ni Steel Using Simplified Inelastic Analysis," Trans. Of the ASME, Vol.116, p.136, 1994

[5] N.Kasahara, et.al., "Advanced Creep-Fatigue Evaluation Rule for Fast Breeder Reactor Components: Generalization of Elastic Follow-up Model," Nuclear Engr. And Design, Vol. 155, p.499, 1995

[6] A.K.Dhalla, "Verification of an Elastic Procedure to Estimate Elastic Follow-Up," J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 108, p.461, 1986

[7] 김종범, 이형연, 유봉, “크립하중을 받는 Y-구조물의 탄성추종 거동분석”, 1997 추계학술발표대회 논문집, 한국원자력학회, 1997

[8] BDS, Structural Design Guide for Class 1 Components of Prototype Fast Breeder Reactor for Elevated Temperature Service, PNC N241 84-08(1,2)TR, PNC, 1984

[9] RCC-MR, Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, Section I, Subsection B: Class 1 Components, AFCEN, France, 1993

[10] R.A..Ainsworth, et.al., An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures (R5), Nuclear Electric Ltd, UK, 1998

[11] H. Riedel, Fracture at High Temperatures, Springer-Verlag, 1987