

핵연료 집합 구조체의 가이드튜브에 대한 좌굴응력 해석

Buckling Analysis of Guide Tube in the Spent Fuel Skeleton

김영환, 윤지섭, 정재후, 홍동희, 송상호*
 한국원자력연구소(충남대학원)

Young-Hwan Kim, Ji-Sup Yoon, Jae-Hoo Jung, Dong-Hee Hong(Korea Atomic Energy Research Insitute)
 Sang-Ho Song*(Graduate School, Univ. of ChungNam)

Abstract

The spent fuel skeleton is processed in the cutting processing after compacting. If The cutting length is processed in the same interval length. The spent fuel skeleton is stayed on the connection of bottom nozzle and guide tube. In the case, because the compressive stress is loaded along the length, the guide tube is generated the buckling stress and the deforming. But the deformed guide tube interrupted the guide tube inserted through compressive room. therefore, it is experimented for the optimum buckling stress and the preventing of guide deformed. This paper is predicted the all over buckling stress of the spent fuel skeleton by using experiment. The guide of Spent fuel skeleton have buckling characteristics of the medium column. The experiment and analysis is conducted by the comparing among the equation of Euler , Johnson and Engresser. The fittest one of methods is Engresser equation

Key Words : The spent fuel skeleton, Buckling stress, Engresser equatio, Guide tube

1. 서론

사용후핵연료 집합체 구조폐기물 압축장치는 저장처분 공간의 절감과 효율적 관리를 위해서 사용후핵연료 집합체의 핵연료봉을 인출하고 남은 구조 폐기물을 감용시키는 압축 절단장치이다. 사용후핵연료 집합체 구조폐기물 압축장치가 구조체를 압축할 때 구조체의 구성요소인 지지격자와 가이드 튜브의 경계면에 좌굴응력이 발생된다. 본 연구는 구조체의 구성품인 가이드 튜브의 변형 좌굴 응력 즉, Euler Eq. , Johnson Eq. 그리고 , Engresser Eq를 비교하고, 실험결과와 비교 분석하였다. 그러나 실험재료인 지르칼로이 튜브를 제작할 경우 고가이며, 구조체 전체를 대상으로 실험하기에는 측정 실험장비가 없다. 따라서 일부 확보된 소량의 지르칼로이 튜브의 실험으로 전체 구조체의 변형응력을 예측하는 실험이 수행되었다. 가이드튜브와 연결된 지지격자로부터 압축/절단공정이 진행될 때 구조체의 길

이 방향의 어느 선상의 시점에서는 압축램이 지지격자와 가이드튜브의 연결접점 위에 머물게 된다. 이런 경우에는 압축력의 방향이 구조체의 길이방향으로 작용되기 때문에 가이드 튜브의 좌굴 Sress변형이 발생되며, 이러한 변형은 압축을 위한 구조체의 진입을 방해하게 된다. 따라서 가이드튜브의 변형 좌굴응력을 도출하여, 진입시 구조체의 변형방지를 위한 가장 적절한 지르칼로이튜브의 좌굴 특성을 알고, 압축램으로 인한 구조체 좌굴 방지의 연구가 수행되었다.

2. 본론

2-1 실험 방법

본 실험에서는 KOFA형인 집합체의 구조체가 사용되었으며, 가이드 튜브의 재질은 지르칼로이(Zry-4)로서 외경이 1.201cm, 내경이 1.118cm의 크기를 갖는다. 구조체의 형태를 보면 전체길이 406.0cm에서 지지격자사이에 있는 40cm에서 50cm 길이의 가이드 튜브가 가장

쉽게 변형이 발생되었다. 따라서 최종적인 가이드 튜브의 변형응력을 알기 위해서 각 길이별로 6cm에서 30cm까지 1단계의 변형 스트레스를 실험하여, 2단계로 가이드 튜브의 개수를 5개로 증가시켜 길이별로 변형정도를 조사하였다. 3단계 실험으로는 가이드 튜브의 길이를 8cm로 고정하고 튜브 개수를 25개까지 증가했을 때 변형 스트레스를 조사하였다. 실험 결과를 토대로 가이드 튜브에 변형이 생기는 최종 응력을 알아봄으로써 지지격자와 가이드 튜브 사이에 변형이 생기지 않는 적정 응력과 구조체의 가이드 튜브에 대한 최적의 기둥공식을 도출하였다.

2-2 실험

실험 조건으로는 상온의 상태에서, 실시하였으며, 지르카로이(Zry-4)의 특성은 인장강도 4587kg/cm^2 , 항복강도 3260kg/cm^2 , 밀도 6.5g/cm^3 , 탄성계수 $0.98 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ 이다. 압축실험을 위한 실험장비는 만능재료 시험기(용량 10톤, Model : PSM-100)를 사용하였다. 그림2 - 그림6은 가이드 튜브의 길이가 6cm, 12cm, 18cm, 24cm, 30cm의 길이 변화에 따라서 변형실험의 결과를 나타낸 것이다.

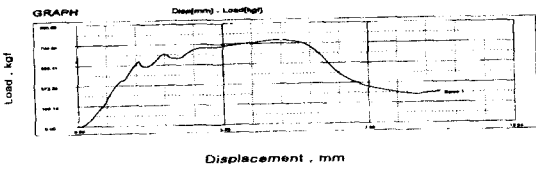


그림 1. 6cm인 Zr-4 튜브의 좌굴하중과 변위량

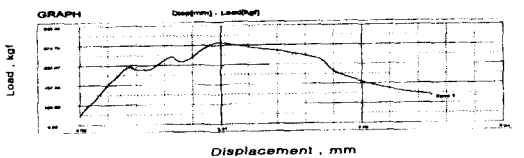


그림 2 12cm인 Zr-4 튜브의 좌굴하중과 변위량

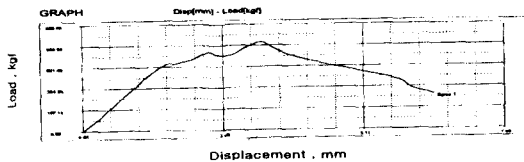


그림 3. 18cm인 Zr-4 튜브의 좌굴하중과 변위량

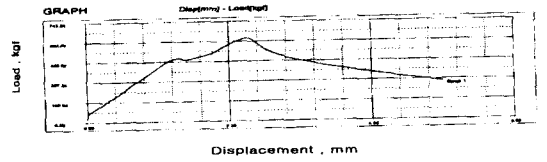


그림 4. 24cm인 Zr-4 튜브의 좌굴하중과 변위량

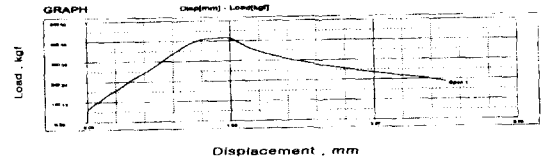


그림 5. 30cm인 Zr-4 튜브의 좌굴하중과 변위량

그림 6은 세장비에 따라 좌굴 변형 응력 범주를 보여주고 있다. 본 실험재료는 Sn 1.45%, Fe 0.15%, ni, Cr 0.1%, 나머지 Zr로 구성된 Zry-4 성분으로 좌굴 Stress에 대한 세장비 특성을 달리하고 있다. 따라서 그림7에서와 같이 실험을 통하여 분석하였다. 실험 결과 Zry-4 튜브는 중간주로 결정하였다. 중간주의 적용 공식은 보통 오일러 공식을 쓰지 않고, 테트마이어(Tetmyer)의 직선식과 랭킨식을 사용하여야 하나 두 식을 적용할 때 실험계수의 미지수 값을 도출하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 존슨 식, 비탄성 좌굴에서의 Engress 방정식, 그리고 오일러 공식을 적용하여 구조체의 구성요소인 Zry-4 튜브의 변형좌굴 Stress를 도출하였고, 여기서 제시된 각각의 적용식 과 실험결과를 비교하였다.

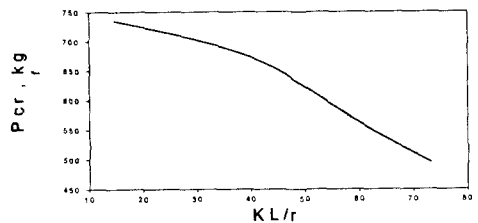


그림 6. Zry-4 튜브의 세장비 변화에 따른 좌굴하중

그림 8는 튜브의 각 길이 별로 실험한 결과 형상이다. 그 형상을 보면 튜브는 파단되지 않고 좌굴이 되는 것으로 알 수 있고, 튜브의 지지형태는 한쪽이 고정되고 다른 쪽은 회전되는 실험 구조체의 특성상 세장비 값을 결정해 주는 k값은 0.7로 하였다. 튜브의 좌굴에 적용되는 오일러 방정식은 다음과 같다.

$$P_{cr} \propto \frac{EI}{l^2} \quad (1)$$

$$\therefore P_{cr} = n \pi^2 \frac{EI}{l^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{cr} = n \pi^2 \frac{E}{l^2} \times \frac{I}{A} = n \pi^2 E \left(\frac{k}{l} \right)^2 = n \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} \quad (3)$$

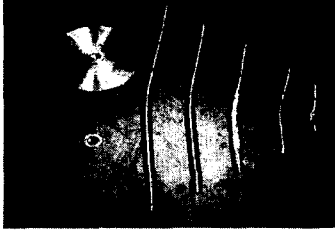


그림 7. 가이드 튜브의 길이에 따른 좌굴형상

단, 여기서, σ_{cr} 은 좌굴응력, E : 탄성계수[kg/cm²], I : 절단면의 단면2차 모우멘트[cm²], L : 튜브의 길이[cm], A : 튜브의 단면적[cm²], λ : 세장비, n : 고정계수 오일러 방정식에 의한 좌굴해석은 그림 8에서와 같이 실험 결과와 일치되지 않는다. 그림 7에서 보면 Zry-4 튜브는 좌굴로 판단되나, 그림 6의 세장비 $\left(\frac{kl}{r}\right)$ 에 따른 임계좌굴하중 (P_{cr})의 변화율이 중간주에 해당한다. 따라서 Zry-4 튜브에 대한 세장비 $\left(\frac{kl}{r}\right)$ 값이 80이하의 범위에서는 오일러 방정식이 적용되지 못한다. 존슨(Johnson)은 이론식이 아니고 실험식으로써 다음과 같다.

$$\sigma_{cr} = \sigma_c - \frac{\sigma_c^2}{4n\pi^2 \times E} \times \left(\frac{kl}{r}\right)^2 \quad (4)$$

위의 식에서 σ_c 는 Zry-4의 항복응력을(3260kg/cm²) 표시한다. 존슨식을 보면 $\frac{\sigma_c^2}{4n\pi^2 \times E}$ 의 정수 값은 0.067로 결정됐다. 그러나 세장비 $\left(\frac{kl}{r}\right)$ 의 변화에 따라 그림 8과 같이 실험값과 일치하지 않는다. 따라서 존슨 식은 Zry-4 튜브의 좌굴변형응력 적용에 부적합하다. 다음은 Engresser식으로 E 대신에 재료의 접선계수 Et를 대입하여 비탄성좌굴의 경우를 포함하여 Euler 방정식을 수정한식으로 식7과 같다.

최종적인 Zry-4의 임계하중 P_{cr} 을 구하기 위해서 회전 반지름은 다음과 같다.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5)$$

따라서 세장비는 다음과 같다.

$$\frac{KL i}{r} \quad (\text{여기서 } i=6,12,18,24,30) \quad (6)$$

식 (4)를 적용하면 다음과 같다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_i}{\left(\frac{KL i}{r}\right)^2} \quad (\text{여기서 } i=6,12,18,24,30) \quad (7)$$

$$E = \frac{\sigma_c}{\epsilon} \quad (8)$$

여기서 압축 항복응력 $\sigma = 3260 \text{ kg/cm}^2$, ϵ (변형율) $E = 1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 를 얻는다. 이 값들을 식 (7)에 대입하면 튜브의 각 길이에 따라서 $\sigma_{cr6}, \sigma_{cr12}, \sigma_{cr18}, \sigma_{cr24}, \sigma_{cr30}$ 의 값을 얻는다. 그 결과 튜브 길이 6cm에서 24cm까지는 $\sigma_{cr} > \sigma_y = 3260 \text{ kg/cm}^2$ 이므로 비탄성좌굴이 발생된다. 여기서 튜브 길이 30cm는 압축항복응력 $\sigma = 3260 \text{ kg/cm}^2$ 이하에서 변형이 발생되기 때문에 비탄성좌굴에서 배제하였다. $\sigma - \epsilon$ 선도의 두 번째 영역은 다음과 같다.

$$E_t = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{\sigma_s - \sigma_y}{\epsilon_t - \epsilon} \quad (9)$$

여기서 σ_s 는 최대 변형하중, ϵ_t 는 접선계수의 접점에 대한 변형율이다. 식 (7)을 적용하면 $\sigma_{cr6,12,18,24}$ 은 그림 8과 같이 실험식의 최대변형하중과 탄성하중 사이에서 임계변형하중이 발생되며, 변형의 변화율이 식 (7)의 실험 결과식과 같다. 여기서 튜브길이 30cm의 좌굴은 압축/절단 장치에 1차 압축램과 2차 압축램의 거리가 30cm 이하이기 때문에 고려하지 않았다. 따라서 Zry-4 튜브의 임계 변형하중은 Engresser 방정식이 가장 적합함을 알 수 있었다

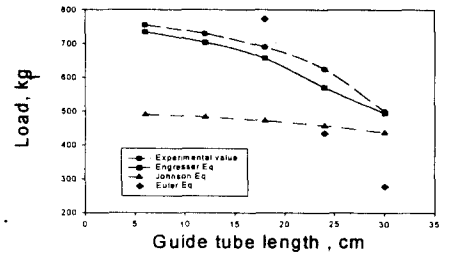


그림 8. 절단길이에 따른 Zry-4 튜브의 변형 임계 하중

구조체는 25개의 튜브로 되어 있으며 지지격자간의 사이는 40에서 50cm의 거리를 갖고 있다. 그러나 직접 Zry-4 튜브를 실험하기에는 고가이기 때문에 먼저 각각 5개씩 6, 12, 18, 24, 튜브길이(cm)를 변화시켜가며 압

축실험을 하였다. 그리고 Engresser 방정식을 적용한 Zry-4 튜브의 임계 변형하중이 그림 8의 범위내에 있는지 검증하였다. 그 결과 지르칼로이 튜브의 임계하중은 탄성항복하중과 최대 변형하중 사이에 있기 때문에 본 식에 적용한 Engresser 방정식이 지르칼로이 변형 임계하중에 가장 적합함을 알 수 있다.

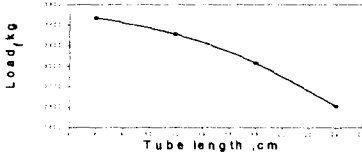


그림 9. 길이에 따른 5개인 튜브의 최대 변형하중

길이가 8cm일 때의 튜브 수량을 증가시키고, 25개 까지 증가시켜가며 최종 변형 응력을 결정하였다. 실험 결과 적용 가능한 Engresser 방정식을 도출하였고, 최종 변형 Stress 결정과 1차 압축램의 힘을 결정하였다

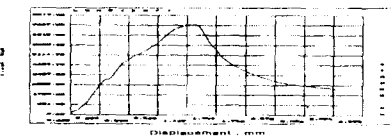


그림 10. 8cm이고, 튜브개수가 12개 일때의 좌굴 하중

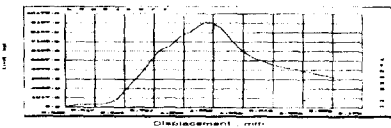


그림 11. 8cm이고, 튜브개수가 16개 일때의 좌굴 하중

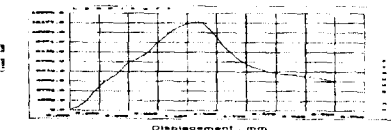


그림 12. 8cm이고, 튜브개수가 20개 일때의 좌굴 하중

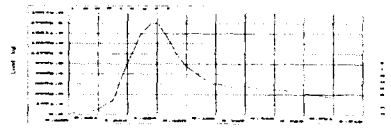


그림 13. 8cm이고, 튜브개수가 25개 일때의 좌굴 하중

실험결과 Zry-4 개수의 증가에 따라 정비례하여 변형 좌굴 하중이 증가함을 알 수 있다. 개수가 20개일 때의 변화율은 실험 편심 오차로 고려된다. 따라서 Zry-4 길이가 8cm이고, 개수가 25개일 때의 변형 좌굴하중이

17740kgf 이다. 이 값을 식10에 대입한 결과 값과 비교 하였다.

$$P_{cr} = A_{cr} \frac{\pi^2 E_i n}{\left(\frac{KL_i}{r}\right)^2} \quad (i=6,12,18,24,30) \quad (10)$$

여기서 P_{cr} 은 변형 좌굴하중, n 은 튜브의 개수, 실험 값은 17740kgf이다. 식 (10)의 값은 1720kgf으로 0.01의 오차의 정확도를 보여준다 그러나 구조체의 지지격자 간의 거리가 48cm임을 감안할 때 굽힘반경은 24cm 이다. 따라서 튜브길이 24cm의 압축램의 최대 변형 좌굴 하중은 14275kgf로 결정된다.

4. 결론

사용후핵연료 집합체 구조폐기물 압축장치가 구조체를 압축할 때 구조체의 구성요소인 지지격자와 가이드 튜브의 경계면에 좌굴응력이 발생된다. 본 연구는 구조체의 구성품인 가이드 튜브의 변형 좌굴 응력 즉, Euler Eq., Johnson Eq. 그리고, Engresser Eq를 비교하고, 실험결과와 비교 분석하였다. 그결과 세장비가 80이하의 구조체의 Zry-4 튜브의 Engresser Eq이 가장 적합함을 알 수 있었다. 사용후 핵연료구조체의 지르칼로이 가이드 튜브의 좌굴되지 않는 좌굴하중은 1427kg으로 확인 되었다 따라서 가이드 튜브의 변형 좌굴응력을 도출하여, 진입시 구조체의 변형방지를 위한 가장 적절한 지르칼로이 튜브의 좌굴 특성을 알고, 압축램으로 인한 구조체 좌굴 방지의 연구가 수행되었다.

참고 문헌

1. D.S. Zhu and Y.K. Cheung "Postbuckling analysis of circular cylindrical shell under combined loads" computer and structure Vol. 58. No. 1. pp 21-26, 1996
2. Y. Jianqio "Buckling Analysis of Angle Multi Aminated Long Hollow Cylinders" Journal of Engeering Mechanics, Vol 125, No.8, August, 1999
3. Jun-Sik Kim, Maenghyo Cho "Postbuckling of Delaminated Composites Under Compressive Loads Using Global-Llocal Approach" 1997.
4. Y.Nakamura, T Kimura "Buckling Characteristics of Rigidly Jointed Single-Layer Latticed Domes Subjected to a Concentrated Load and External Pressure" 1996