

핵연료 피복관의 후우프 거동시험을 위한 시편의 최적형상 평가

홍대훈* · 서기석** · 안상복** · 홍성인*

Evaluation of Optimized Ring Specimen Shape for the Hoop Behavior Test of Nuclear Fuel Clad Tube

D.H. Hong, K.S. Seo, S.B. Ahn and S.I. Hong

Abstract

In order to evaluate the tensile behaviors of hoop direction for the nuclear fuel cladding tubes, the shapes of specimen and jig fixtures for the ring test are decided with various conditions under the elastic-large plastic deformations. The axial displacement of the jig cylinders is converted to the circumferential direction elongations of specimen. The stress distributions on specimen are depended on the radii and locations of specimen and jig size and central angle. Therefore we calculated the stress distributions and decided the optimum shapes to get the uniform stress in the area of specimen gage length. From the analysis the stress distributions in gage area are reviewed with the radii and location of specimen notch and the central angle of jig cylinder. The optimum shapes of specimen and jig are proposed to the clad tube having 10.62 mm in diameter and 0.63 mm in thickness for 16x16 PWR nuclear fuel assembly.

Key Words : Ring test, Hoop behavior, Nuclear fuel clad tube, notch, gauge length

1. 서론

원자력 발전소에서 연소되는 핵연료는 펠렛 형태의 산화 우라늄(UO₂)과 지르코늄 합금의 피복관으로 쌓여 있다. 국내에 가동중인 원자로의 형태는 가압 경수로가 일반적이다. 가압 경수로의 핵연료의 형태는 핵연료 요소(fuel element)가 약 직경 10.62 mm 및 길이 3.75 m 크

기인 튜브형태의 피복관과 그 내부에 있는 UO₂로 이루어져 있다. 핵연료 요소는 다시 14x14, 16x16 혹은 17x17개의 배열로 구성된 하나의 집합체로 되어 있고, 이러한 집합체가 약 150 다발 가량 원자로에 장전되어 가동되고 있다. 가압 경수로에서 핵연료의 운전조건은 일반적으로 압력과 온도가 15.5 MPa 및 320°C이며, 원자로에서 핵연료가 장전 후 1년 이상 운영되고 있다. 이

* 충남대학교 기계공학과

** 원자력 연구소

러한 고온 및 고압의 조건에서 장기간 운영되기 때문에 기계적 특성이 우수한 피복관을 가진 핵연료가 요구된다. 핵연료는 연소되면서 핵분열성 기체를 발생시키며, UO₂ 펠렛 내부의 결정 입계의 변화에 따른 직경방향의 팽창 등은 피복관의 내압 하중을 가하게 된다. 원자로 내부에서 만약 피복관의 손상이 발생한다면, 방사성 물질의 유출 등과 같이 심각한 사고를 초래할 수 있다. 따라서 방사선 조사 전후에 피복관의 횡방향 혹은 원주방향의 기계적 건전성의 평가가 중요하다.

피복관과 같이 튜브형태에서 내압에 따른 원주방향의 기계적 거동시험은 일반적으로 파열 시험, mandrel 시험 및 ring 시험 등 여러 방식으로 제시되어 왔다. 파열 시험에서는 가압용 유체에 의해 내압을 작용시키는 방법으로 정확한 원주방향의 파열 하중을 구할 수 있으나, 고온의 시험조건일 때 가압용 유체의 온도 변화가 용이하지 않는 단점을 갖고 있다. 한편 mandrel 시험은 피복관 튜브 내에 4개 이상의 mandrel를 삽입하고을 반경 방향의 팽창력을 이용하는 방식으로, 이 경우는 링 내의 힘을 정확하게 측정하기 어렵다. Ring 시험은 피복관 튜브 내부에 고정된 실린더와 축방향으로 거동하는 실린더로 구성되며, 시편 ring에 일정한 노치를 주고 인장을 하는 방식으로, 시편의 온도 변화 조건과 인장시 가하는 하중을 크기를 정확히 측정할 수 있으나, 시험편의 중앙부에 굽힘모멘트가 발생할 수 있다. 조사후핵연료의 피복관의 횡방향 인장시험은 시험편이 방사성 물질이고 사람이 손쉽게 접근할 수 없는 방사성 차폐 시설 내에서 수행되므로 시험 장치의 구조가 단순하고, 조작이 용이하여야 한다. 그러므로 ring 시험 방식이 채택되었다. 앞서 언급한 것과 마찬가지로 ring 시험에서 굽힘모멘트를 최소화하기 위해 조사후 피복관의 최적 시험편의 형상을 결정하는 내용을 본 논문에서 기술하였다.

2. Ring Tensile Testing Device

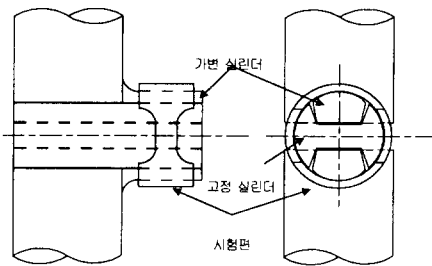


Fig. 1 Ring Tensile Testing System

링 인장시험 시스템의 구조는 Fig. 1과 같다. 링 형태의 시험편 내부에 상하로 움직이는 가변 실린더와, 시험편 중앙부위는 아령형태의 고정 실린더를 삽입하여 링의 원주방향 변형을 유도한다.

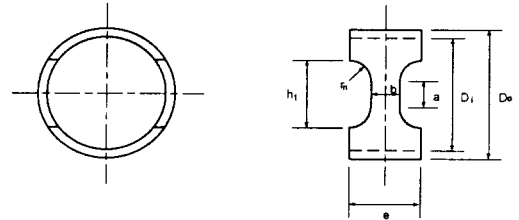


Fig. 2 Ring Specimen for Tensile Testing

링 형상의 시험편의 형상은 Fig. 2와 같으며 가운데 부분에는 가변 실린더에 의하여 발생하는 응력이 표점길이(gauge length)내에 일정하게 작용하도록 하기 위하여 임의의 반경을 가진 노치부분이 있다.

3. 유한요소 해석

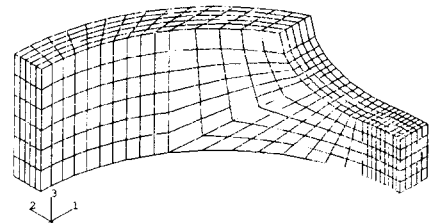


Fig. 3 Modeling of Ring Specimen

해석에 사용된 모델은 링 형상이 대칭이라는 점을 이용하여 1/8의 부분만 모델링을 하였고 경계지점에 적절한 경계조건을 적용하였다. 요소는 3차원 8절점요소를 사용하였으며 내부실린더는 강체표면으로 처리하였다. 노치 반경과 표점길이 변화에 따른 다수의 기하학적 모델이 필요하다는 점을 감안하여 모델링을 Fortran Program을 작성하여 활용하였다. 해석에 사용된 재료는 핵연료 피복관인 Zircaloy-4이며 판재의 종방향 물성치는 다음 표 1과 같이 적용하였다. 핵연료 후프 거동에 대한 전산해석 평가는 ABAQUS ver. 5.8로 수행하였다.

Table. 1 Material Property of Zircaloy-4

Yield stress	482 MPa
Ultimate stress	694.1 MPa
Fracture stress	1005.4 MPa
Young's Modulus	103421 MPa
Possion's ratio	0.289

해석시에 링 시험편의 형상을 이루는 설계치수 중에서 적절한 형상을 얻는데 영향을 미치는 것을 변수를 선택하고 나머지 치수는 고정시키는 방법으로 25 가지 이상의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

Table. 2 Dimension of Model for Case

고정치수	D_o	링의 바깥지름	10.62mm
	D_i	링의 안지름	9.36mm
변수	r	노치 반경	0.5,0.8,1.1,1.4,1.7
	$l(a/2)$	표점길이	0.5,0.8,1.1,1.4,1.7
	c	가변실린더 각도	20,30,40,50,60

4. 결과 및 고찰

링 인장시험편의 전체 거동은 3차원적인 응력분포를 가지고 있으나, 설계에 따라 표점길이 내에서는 후프 방향에 대하여 1차원의 결과를 얻을 수 있다. 따라서 시험편의 후프 방향 물성치를 정확하게 얻기 위해 표점길이 내에서 후프 방향의 응력은 최대가 되고 나머지 부분의 응력은 최소화되도록 적절하게 시험의 치수를 선정하여야 한다. 이런 응력의 분포는 상당응력(effective stress)과 후프응력을 비교함으로써 예측될 수 있다.

4.1 노치반경의 변화에 따른 평가

상당응력과 후프응력의 차이는 링 시험편의 시험부위를 기하학적으로 결정하는 노치 반경과 표점길이에 의하여 영향을 받는다. 먼저 표점길이가 1.1 mm이고 실린더 중심각이 40 °일 때, 노치 반경의 변화에 따른 표점길이 내 중앙부의 상당응력과 후프응력의 변화는 Fig. 4와 같다. 상당응력과 후프응력은 노치반경이 클수록 차이가 작아지며 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 노치

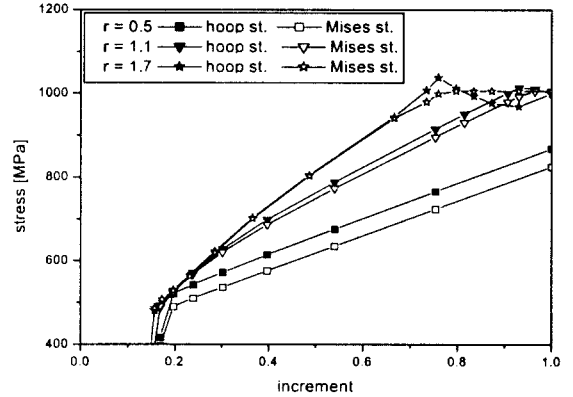


Fig. 4 Hoop and Effective stress for radius variation

반경이 클수록 후프 방향의 인장 응력으로 집중되는 현상이 발생하는 것이라고 할 수 있다. 그러나 그래프 끝단의 파단점 부위의 변화 가운데, 노치 반경이 큰 1.7 mm 경우에 끝단에서는 후프 방향 이외의 응력 성분이 과도하게 나타나므로 적절하지 못하다. 이것은 시험편의 표점길이 내에서 불균등한 응력 집중이 발생하였으며, 가장 적절한 노치반경의 크기는 중간 크기의 약 1.1 mm이 적절하다.

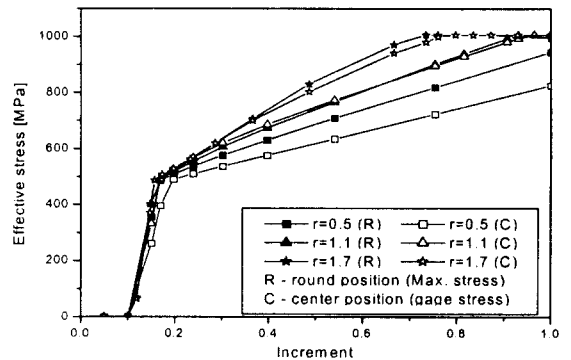


Fig. 5 Effective stress for radius variation at round and center position

만약 시험편에서 최대 상당응력이 표점길이 이외에서 발생한다면, 표점길이 바깥에서 우선 파단이 발생하여 시험부위의 정확한 응력변화 측정을 어렵게 한다. Fig. 5는 표점길이가 1.1 mm이고 실린더 중심각이 40 °일 때, 최대응력이 발생하는 노치반경의 끝단 부분과 표점길이 중앙부에서 노치 반경에 따른 응력변화를 나타낸다. 반경이 0.5 mm와 1.7 mm인 경우는 노치반경의 끝단 부

본에서 파단이 먼저 일어나게 된다. 반경이 1.1 mm인 경우에는 두 응력이 거의 일치하게 되며 폭방향으로 비교적 균일한 응력분포를 가짐을 예측할 수 있다. 상기 두가지 경우의 노치 반경에 대한 응력 평가의 결과, 노치 반경은 1.1 mm 이상 혹은 1.7 mm 이하 범위이내인 것을 알 수 있다.

4.2 표점길이의 변화에 따른 평가

노치 반경이 1.1 mm이고 실린더 중심각이 40 °일 때, 표점길이가 변화에 따라 표점길이내 중앙부에서 상당응력과 후프응력은 Fig. 6과 같다. 표점길이가 길수록 약 1.1mm 이상 길이에서 상당응력과 후프응력의 차이도 작아짐을 알 수 있다. 그 차이가 최소화되는 표점길이는 1.7 mm이지만 그 경우의 상당응력분포인 Fig. 7(b)에서

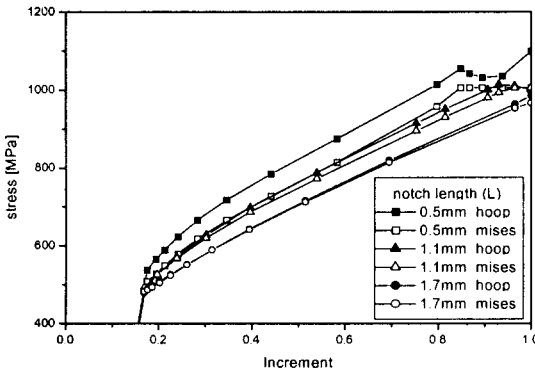
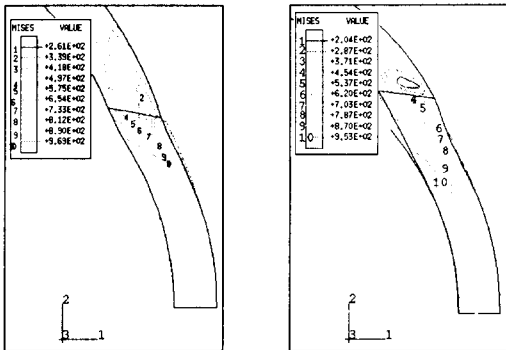


Fig. 6 Hoop and Effective stress for notch length

보는바와 같이 표점길이 내의 중심부위가 아니라, 시험편의 안 쪽에서 최대 응력이 발생하고 있다. 따라서 이상적인 표점길이는 Fig. 7(a)의 경우인 1.1 mm 근방에 존재한다고 판단된다.



(a) (b)
Fig. 7 Mises Contour for Notch Length
(a)1.1 mm (b)1.7 mm

4.3 노치반경 및 표점길이변화의 비교평가

노치 반경과 표점길이를 변화시킨 경우에 시험편의 임의의 지점에서 파단 순간에 표점길이가 중앙부위에서 응력 값은 Fig. 8과 같이 나타나고 있다. 따라서 임의점에서 파단이 시작되는 경우 표점길이가 중앙부의 응력값이 작다면 시험편의 다른 위치에서 응력집중이 발생하는 것을 의미한다. 이 응력이 파단응력에 가까울수록 시험편의 표점길이가 이내 부분에서 응력집중이 발생하는 것이다. 노치 반경이 작은 경우는 길이가 증가할수록, 반대로 반경이 큰 경우는 길이가 감소할수록 표점길이내에서 파단 응력에 근사하게 된다. 그러므로 최적형상은 노치 반경이 1.4 mm, 표점길이는 0.8 mm인 경우이다.

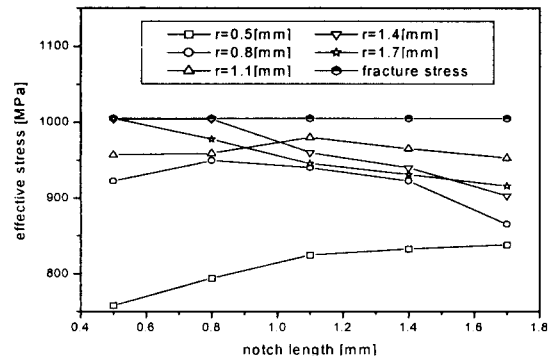


Fig. 8 Comparison between center effective stress and fracture stress due to the variation of radius and notch length

4.4 가변실린더의 각도변화에 따른 평가

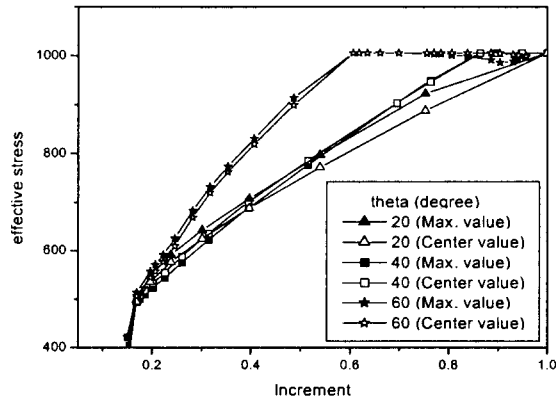


Fig. 9 Effective stress for cylinder theta at round and center position

Fig. 9는 노치반경이 1.4 mm이고 표점길이가 0.8 mm인 시험편을 3종류의 실린더 중심각도에 대하여 응력변화를 측정하는 것이다. 각도가 20도인 경우에는 시험부위가 아닌 다른 지점에서 응력집중이 발생하는 것을 확인할 수 있고 60도인 경우는 급격한 응력의 변화와 함께 초기부분에서 불균일한 응력의 경향이 나타남을 알 수 있다. 실린더 제작시 중심각도가 너무 크거나 작은 경우는 가변실린더나 고정실린더에서 과도한 굽힘력이 작용함으로써 시험의 정확성의 극히 저하시킬 우려가 있는 것 또한 고려하면 최적의 실린더의 중심각도는 40도라고 할 수가 있다.

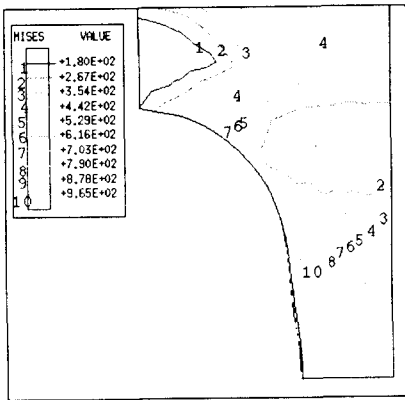


Fig. 10 Contour of optimized ring shape

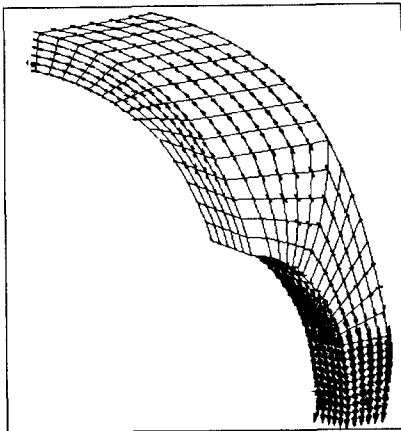


Fig. 11 Hoop stress of optimized ring shape

Fig. 10은 최적형상으로 평가된 노치반경 1.4 mm, 표점길이 0.8 mm 및 가변실린더의 각도 40일때의 상당응력분포를 나타내는 것으로 측정부위에서 일정한 응력을 나타냄을 알 수 있으며, 또한 Fig. 11에서 보는 바와같이

노치부위에서 hoop응력 또한 균일하게 작용하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

인장시험편의 설계에서 노치 반경, 표점길이 및 가변 실린더의 변화에 따른 해석평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노치 반경의 크기 변화에 따른 평가에서, 표점길이 내에서 후프응력이 상당응력과 유사한 경우 즉 3축 응력상태에서 후프응력 성분이 지배적인 경우는 노치 반경을 증가시킬수록 유리하지만 아주 큰 경우는 표점길이 바깥쪽에서 최대 응력이 먼저 도달한다. 따라서 노치 반경이 1.4 mm일 때가 적당하다.

(2) 표점길이의 길이 변화에 따른 평가에서, 표점길이 내에서 후프응력 성분이 지배적인 경우는 표점길이의 길이가 증가할수록 유리하지만 아주 큰 경우는 표점길이 중앙부가 아닌 다른 부분에서 최대 응력이 먼저 도달한다. 따라서 표점길이가 0.8 mm일 때가 적당하다.

(3) 실린더각도 변화에 따른 해석결과에 따르면, 중심각이 40°인 경우가 최적인 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 원자력연구소에서 수행하는 핵연료 피복관의 횡방향 인장시험 과제에서 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- (1) Arsene, S. and Bai, J., 1996, "A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test.", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 24, pp. 386~391.
- (2) Arsene, S. and Bai, J., 1998, "A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test. - Experimental Investigation", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 26, pp. 26~30.
- (3) Johnson, W., 1983, "Engineering Plasticity", Ellis Horwood Limited.
- (4) Krashchenko, V. P. and Gurarii, A. I., 1993, "Methods of Tensile Testing Ring Specimen", translated from Zavodskaya Laboratoriya, Vol. 51, No. 11, pp. 66~69.