

< 논문 >

평행부를 갖는 링 시험편의 인장특성 고찰

배봉국* · 구재민* · 석창성†
(2004년 8월 31일 접수, 2005년 2월 18일 심사완료)

A Study on the Tensile Property of Ring Specimen Having Gauge Length

Bong-Kook Bae, Jae-Mean Koo and Chang-Sung Seok

Key Words : Ring Test(링 시험), Ring Specimen(링 시험편), Load-Displacement Conversion Relationship of Ring(LCRR: 링 변환관계)

Abstract

In this study, we tried to establish the method of evaluating the tensile properties of the ring specimen of Arsene which have gauge length. In this result, we verified the availability of central piece. We made ring specimens and devices such as central piece, pins, and clevises. A proper tensile speed was determined by pre-test. The result of main test was calibrated and compared with the result of FEM. To obtain the tensile properties from the ring test result, we observed two relationships: one is strain-displacement and the other is load ratio-displacement. The tensile properties could be evaluated by using these relationships.

1. 서론

원자력 발전소의 운영 중 발생하는 사고에서 많은 비율을 차지하고 있는 것은 핵연료 피복관의 파괴와 관련된 것이다. 핵연료 피복관은 일종의 압력관으로, 내압을 받는 압력관의 파괴는 주로 원주방향 응력에 기인하므로 원주방향 인장특성을 파악하는 것이 중요하다. 핵연료 피복관과 같은 소형 압력관의 원주방향 인장특성을 평가하기 위한 방법의 하나로 링 시험법(ring test)이 있다. 링 시험에는 판을 축방향에 수직으로 절삭하여 제작한 링 시험편(ring specimen)이 사용된다. 최초로 링 시험을 규정한 ISO 8496⁽¹⁾에서는 단순한 형태의 링 시험편에 원통형 실린더 두 개를 삽입하고 평행을 유지하면서 실린더 사이의 간격을 넓혀 링이 파괴되기까지의 연신량을 측정하는 시험법에 대하여 규정하고 있다. 링 시험편은 표

준인장시험편과 달리 시험편과 핀이 곡면으로 접촉하고 있으므로 인장하중이 가해지면 시험편의 일부는 펼쳐지고 일부는 굽혀지면서 초기에 연신이 급격히 증가하는 특유의 링 인장곡선이 나타난다.

이와 같은 곡면부에서의 굽힘은 링 시험에 있어서 피할 수 없는 것으로서 정확한 물성치를 얻는데 방해가 되어왔다. 기존의 연구들은 링 시험편의 형상이나 실린더의 형상을 변화시켜 굽힘모멘트를 최소화하는데 중점을 두어왔다.^(2,3) 특히 Arsene은 기존의 링 시험의 문제점을 해결하기 위하여 최대의 평행부를 갖도록 링 시험편을 설계하고 링 시험편 내부에 중앙조각을 삽입하여 평행부에서의 굽힘을 억제하였다. 하지만 마스터선도 형태로 얻어진 결과를 적용하기가 쉽지않고 고온에서의 적용이 어려운 문제가 있었다.^(4,5)

본 연구에서는 Arsene이 제안한 평행부를 갖는 링 시험편을 이용하여 인장특성을 평가하는 기초를 마련하고, 이후 고온인장특성 평가에 활용하기 위한 링 변환관계(LCRR)를 제안하고자 하였다. 이를 위하여 수치해석으로 중앙조각의 유무

* 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

에 따른 응력분포의 차이를 확인하고 링 시험편과 중앙조각, 핀, 크래비스를 제작하였다. 예비실험을 수행하여 인장속도를 검증한 후, 본 실험을 수행하였다. 시험장치의 변형을 보정한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였으며, 하중-변위 선도에서 응력-변형을 선도를 산출할 수 있는 링 변환관계를 제시하였을 뿐만 아니라, 이를 고찰하여 링 인장특성을 구하였다.

2. 링 인장실험과 보정

2.1 시험편과 시험장치

본 연구에서 실험과 해석에 사용한 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 시험편을 인장하는 방식들을 나타낸 것이다. 그림에서 점영역은 노치부를 나타낸다. 기존에는 Fig. 2(a)와 같이 단순하게 인장 하였으나 이 경우 평행부가 펼쳐지고 핀의 모서리와 접촉하는 부분에서 응력 집중이 발생하여 균일한 응력이 형성되지 않는 문제가 있었다. 이를 개선하기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 시험편을 90도 돌려 인장하면 평행부가 곡면을 유지할 수 있지만 핀으로부터 직접 힘을 받으므로 균일한 응력이 형성되기 어렵고 마찰력이 크게 작용하며 평행부가 아닌 지점에서 파단이 발생할 수 있는 문제가 있었다. Fig. 2(c)는 이러한 문제를 해결하기 위하여 Arsene⁽⁴⁾이 제안한 모델로서, 평행부의 곡면을 유지하면서 핀의 모서리의 영향을 받지 않도록 중앙조각을 삽입한 형태이다.

Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)에 대하여 평행부에서의 원주방향의 응력분포를 살펴보기 위하여 ABAQUS 5.8을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석모델에는 Fig. 3과 같이 총 1,340개의 요소를 갖는 링의 1/8 모델이 사용되었고, 경계조건은 Fig. 2(c)의 경우 Fig. 4와 같이 링이 대칭 절단면에 대하여 미끄럼 운동만 가능하다고 보고 핀과 중앙조각을 강체로 가정하여 핀을 수직 이동시켜 하중을 가하며 해석을 수행하였다. Fig. 2(b)의 경우도 Fig. 4와 유사하지만 중앙조각이 없고 핀을 수평 이동시켜 가중한다는 점이 다르다. 수치해석 결과는 Fig. 5와 같다. 화살표가 가리키는 부분이 평행부에 해당한다. Fig. 2(c)와 같이 중앙조각을 삽입한 경우 Fig. 5(b)와 같이 평행부 전체에서 응력분포가 균일하게 나타남을 확인할 수 있다.

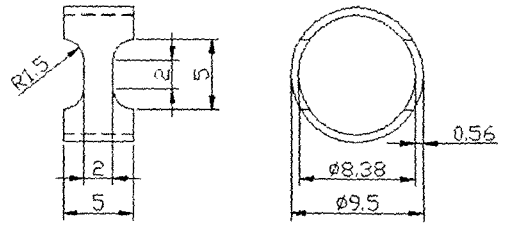


Fig. 1 Arsen's ring specimen having gauge length (unit: mm)

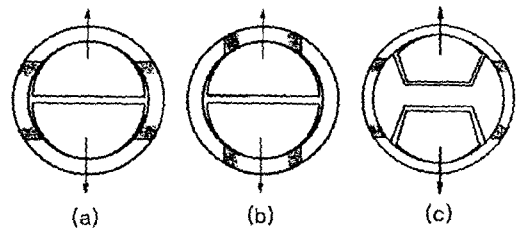


Fig. 2 Tensile methods

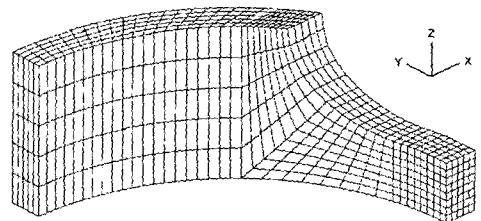


Fig. 3 FEM model of ring specimen

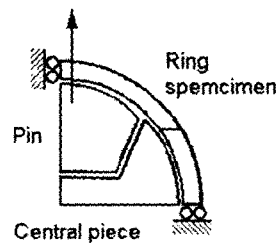


Fig. 4 Boundary condition

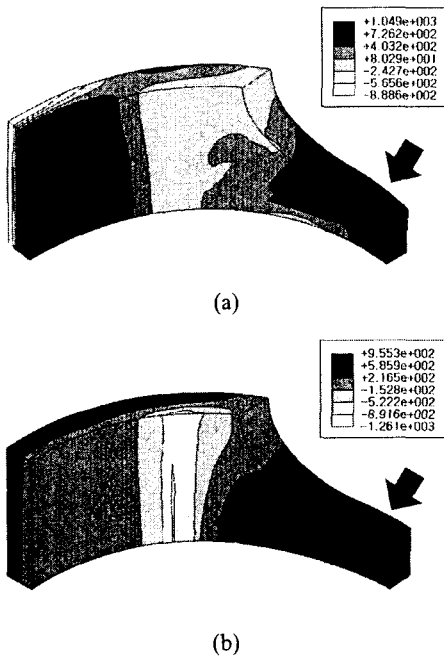


Fig. 5 Hoop stress distribution (a) model of Fig. 2(b), (b) model of Fig. 2(c)

Fig. 6은 Fig. 2(c)를 참조하여 제작한 중앙조각과 핀, 그리고 핀을 고정하는 크래비스이다. 시험편의 재료는 지르코늄 합금인 Zircaloy-4와 Zirloy이며, 시험장치의 재료로는 시험편이 작아서 시험장치의 단면적이 한정되는 것을 감안하여 지르코늄 합금에 비해 충분히 높은 강도를 유지할 수 있는 인코넬 합금을 사용하였다. Fig. 7은 시험장치와 시험편을 설치한 모습을 나타낸다.

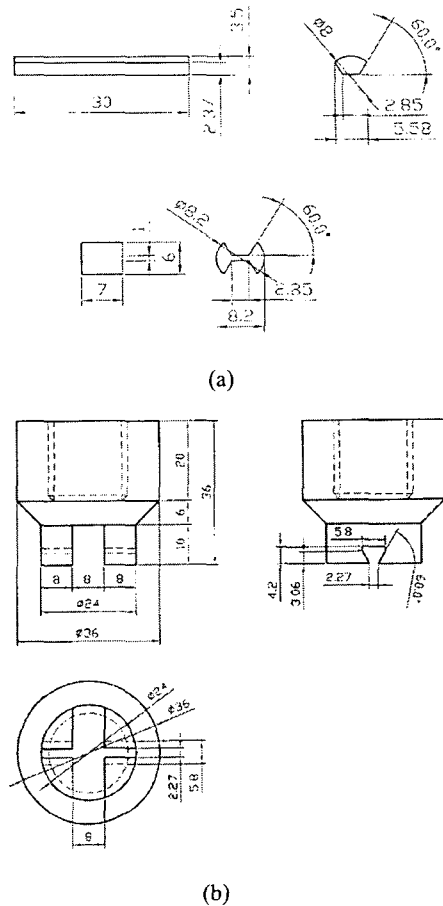


Fig. 6 Testing Devices (a) pin and central piece (b) jig (unit: mm)

2.2 예비실험을 통한 인장속도의 검증

ASTM⁽⁶⁾에서 권장하는 인장 변형률 속도(strain rate)는 항복 전에 0.005 /min, 항복 후에 0.05~0.5 /min이다. 하지만 소형 인장시험편을 사용하는 경우 평행부의 길이가 작으므로 대부분 항복 후의 인장속도 구간인 0.05~0.5 /min에서 실험을 수행한다.^(3,5,7-11) 본 연구에서도 기존의 논문⁽⁵⁾을 참고하여 0.1 mm/min, 즉 평행부 길이를 2 mm로 환산했을 때 약 0.05 /min의 인장속도로 실험을 수행하고자 하였다. 이에 앞서 본 논문에서 사용되는 지르코늄 합금재료가 0.1 mm/min 부근에서 인장속도의 영향에 민감한지 확인하기 위하여 인장속도별 예비실험을 수행하였다.

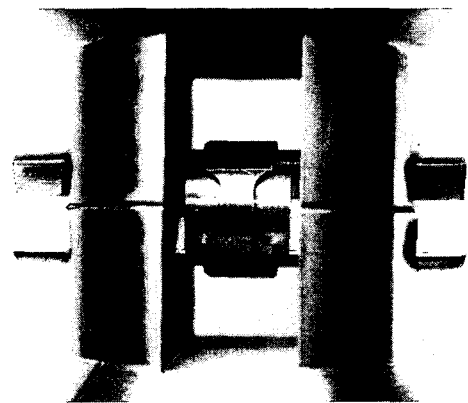


Fig. 7 Testing Assembly

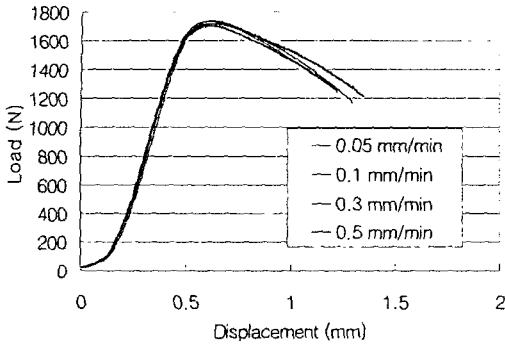


Fig. 8 Effect of tensile speed

예비시험에서의 인장속도는 0.05~0.5 mm/min으로 변형률 속도로 환산하면 0.025~0.25 /min에 해당한다. 시험편의 재료는 Zircaloy-4로, 초기 하중으로 약 50 N를 가하였으며, 인장시험기 25 ton Shimadzu (AutoGraph)를 사용하여 최대 250 kg 구간에서 분해능 0.0625 kg으로 하중을 측정하였다. Fig. 8은 인장속도에 따른 하중-변위 선도로서, 인장속도에 따른 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

2.3 본 실험과 하중-변위 선도의 보정

Zirlo 시험편을 사용하여 인장속도 0.1 mm/min으로 본 실험을 수행하였다. 실험결과는 Fig. 9와 같이 나타났다. 링 시험에 사용되는 시험장치는 그 크기의 제한으로 인하여 충분한 강성을 가지지 못하므로 하중이 가해질 때 Fig. 10과 같이 탄성변형을 일으킬 수 있다. 따라서 Fig. 9에는 시험편의 변위뿐만 아니라 시험장치의 굽힘 변형에 의한 변위도 포함되어 있으므로, 시험편의 변위를 얻기 위해서는 식 (1)과 같이 전체 변위에서 시험장치의 변위를 빼주어야 한다.

$$\delta_{Specimen} = \delta_{Total} - \delta_{Device} \quad (1)$$

시험장치의 변위 δ_{Device} 는 하중의 함수로서, 강성이 큰 링을 시험편 대신 설치함으로써 측정이 가능하다. Fig. 11은 시험장치의 하중에 따른 변위를 측정한 결과로써, 이를 보간하면 시험장치의 변위 δ_{Device} 를 식 (2)와 같이 하중 P 의 식으로 표현할 수 있다.

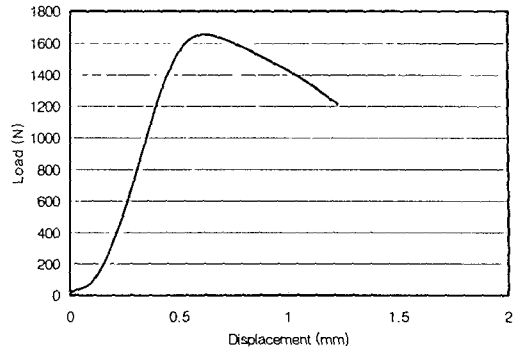


Fig. 9 Raw test result of load versus displacement

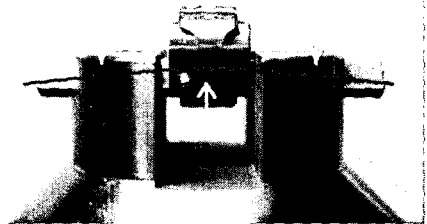


Fig. 10 Displacement of device by bending

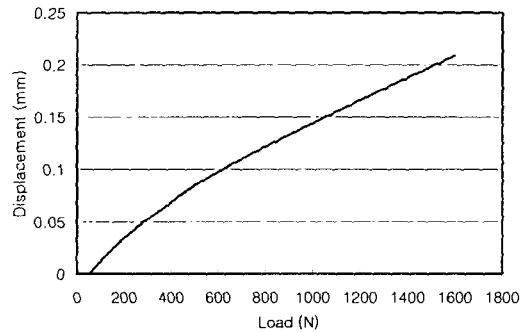


Fig. 11 Displacement versus load for device

$$\delta_{Device} = 0.00157 (P - 50)^{0.6592} \quad (2)$$

윗 식에서 변위는 mm, 하중은 N이고 50은 초기하중 50 N을 의미한다. 보정을 통해 실험의 하중-변위 선도의 변위는 전체적으로 감소한다.

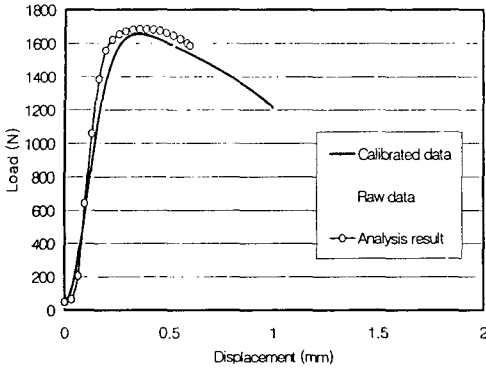


Fig. 12 Load versus displacement curves of calibrated test result and analysis result

Fig. 12는 보정을 통해 얻어진 하중-변위 선도와 해석을 통해 구한 하중-변위 선도를 비교한 것이다. 크기와 기울기가 매우 유사함을 확인할 수 있다.

3. 링 변환관계

링 시험으로 구한 하중-변위 선도로부터 응력-변형률 선도를 구하기 위해서는 각각 변형률과 변위의 관계와, 응력과 하중의 관계를 정립하는 것이 필요하다. 일반적인 표준 인장시험에서는 이들 관계가 선형적으로 나타나지만, 링 실험에서는 링 시험편의 평행부에 작용하는 굽힘으로 인하여 이들 관계가 비선형적으로 나타나므로 직접적인 변환이 불가능하다. 이때의 관계를 링 변환관계(LCRR: Load-displacement Conversion Relationship of Ring)라 부르기로 한다. 본 장에서는 앞서의 해석과 실험데이터를 이용하여 링 변환관계를 정립하고, 이를 적용하여 링 실험결과로부터 인장특성을 산출하고자 한다.

3.1 변형률-변위 관계

Fig. 7에서 링 시험편의 앞뒤 평행부에 각각 1.0 mm×0.7 mm 크기의 소형 스트레인 게이지(TML, UFLK-1-11)를 부착하고 인장시험을 수행하여 변형률을 측정하였다. Fig. 13은 스트레인 게이지에서 측정된 변형률과 수치해석에서의 변형률을 함께 나타낸 것이다. 이처럼 실험과 동일한 해석결과를 얻기 위해서 수치해석의 마찰계수

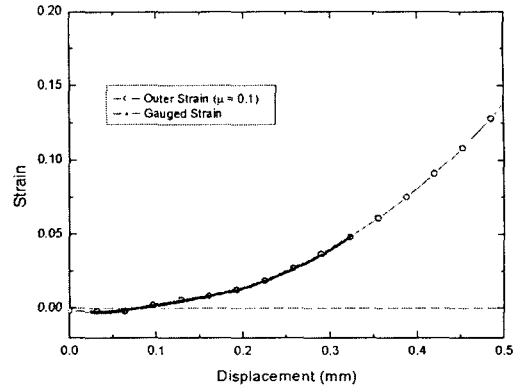


Fig. 13 Outer hoop strain versus displacement

가 0.1이어야하므로 이후의 해석조건으로 마찰계수 0.1을 계속 적용하였다. 만일 표준 인장시험편으로 실험을 한다면 기울기가 일정한 직선이 얻어지겠지만, 링 인장실험 동안에 얻어지는 선도는 링의 굽힘으로 인하여 Fig. 13에서 보이는 것과 같은 곡선이 얻어진다. 이때의 변형률은 평행부의 바깥면, 즉 스트레인 게이지를 붙이는 영역에서의 변형률의 평균값이다. 실제로 실험을 통하여 변형률을 측정하면 초기에 변형률이 마이너스 값을 가지다가 서서히 증가하여 계속 선형적으로 증가하는 양상을 보인다. 변형률이 마이너스가 나오는 이유는 초기에 평행부의 바깥쪽에 압축이 가해지기 때문이다.

Fig. 14는 이를 좀더 자세히 설명하기 위하여 링 시험 동안의 원주방향 응력의 분포를 나타낸 것으로서, 짙은 색이 인장응력, 옅은 색이 압축응력 상태에 해당한다. Fig. 14(a)를 통해 알 수 있듯이 초기에는 평행부의 바깥쪽(A)에 압축응력이, 안쪽(B)에는 인장응력이 작용한다. 그 이유는 평행부가 아직 중앙조각과 맞닿지 않은 상태에서 굽힘응력이 주로 작용하기 때문이다. 또한 핀의 외경($\phi 8$ mm)이 시험편의 내경($\phi 8.38$ mm)보다 작으므로 시험편 내부의 상단부 중앙(C)에 압축응력이 가해진다. Fig. 14(b)에서는 인장응력이 점차 크게 작용하여 바깥면에서 압축응력이 조금씩 사라지고 있다. 또한 핀이 시험편의 내부에 조금씩 맞닿아가면서 상단부의 중앙에 작용하던 압축응력이 평행부 근처(D)로 이동한 것을 알 수 있다. Fig. 14(c)는 항복을 지난 시점으로써 평행부

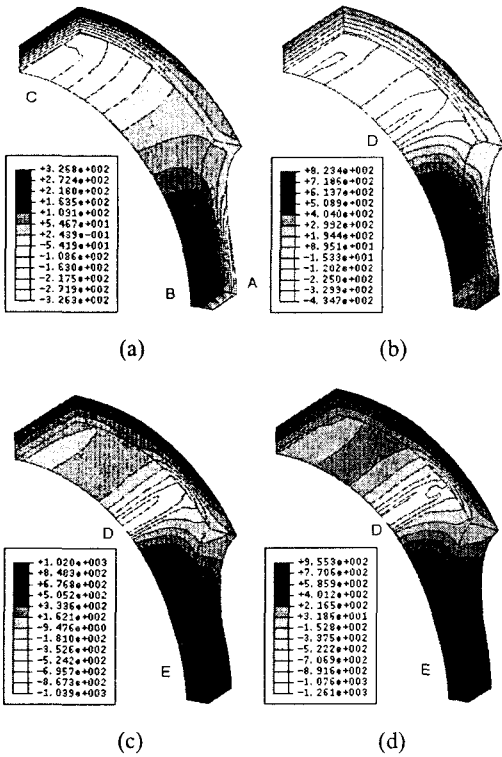


Fig. 14 Distribution of hoop stress at displacement
(a) 0.032 (b) 0.128 (c) 0.290 (d) 0.452 (mm)

전체(E)에 인장응력이 주로 작용하고 있으며 핀의 모서리가 맞닿는 부분(D)에 압축응력이 작용하고 있다. Fig. 14(d)에서도 마찬가지로 평행부(E)에 인장응력이 작용하고 있으며 핀의 모서리가 맞닿는 부분(D)에는 강한 압축응력이 작용하고 있다.

실제로 변형률을 적용하기 위해서는 평행부의 중립축 혹은 전체 두께를 가로질러 작용하는 평균 변형률 값을 이용해야 한다. Fig. 15는 마찰계수가 0.1일 때의 하중선도, 중립축의 변형률과 바깥쪽 영역의 변형률, 그리고 게이지 변형률을 함께 나타낸 것이다. 삼각형 곡선은 마찰계수가 0.1일 때의 해석으로 구한 하중선도를 나타내는데, 실험결과에 비하여 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 중립축의 변형률은 실선으로서 초기 값이 0 이상이고, 원형 곡선으로 표시된 바깥쪽 영역의 변형률에 비하여 조금 낮은 값을 보이고 있다. 또한 수치해석에서는 항복이 발생한 후 실제로 발생하는 네킹 등의 현상이 고려되지 않음

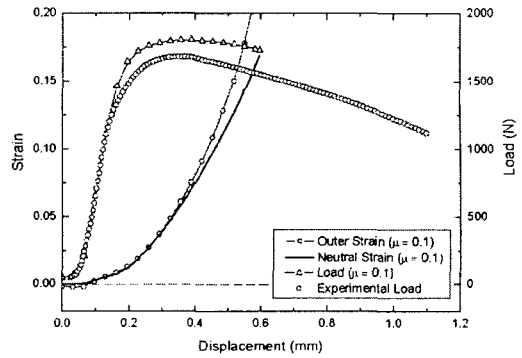


Fig. 15 Outer and neutral strain at 0.1 friction coefficient versus displacement

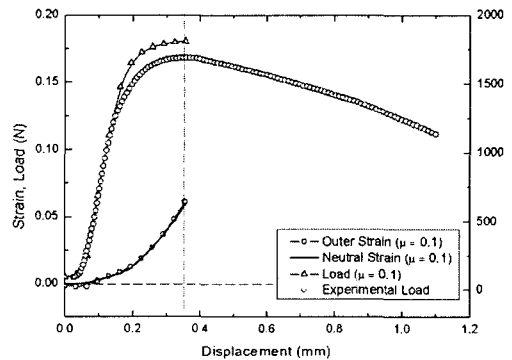


Fig. 16 Remove analysis lines after maximum load point

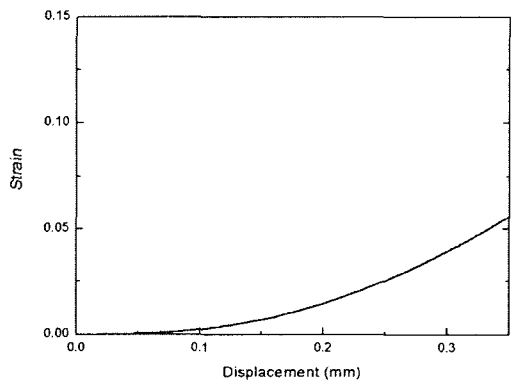


Fig. 17 Conversion relationship between hoop strain and displacement

므로 최대 하중점 이후의 해석값은 부정확하며, 무의미하므로 무시하면 Fig. 16과 같다. Fig. 17은 최종적으로 얻어진 변형률-변위 관계이다.

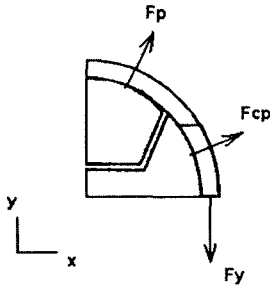


Fig. 18 Free-body diagram

3.2 응력-하중 관계

Fig. 18에서 \$F_p\$와 \$F_{cp}\$는 각각 핀과 중앙조각으로부터 링에 가해지는 힘에 해당한다. 원주방향 응력은 평행부에 작용하는 y방향 하중인 \$-F_y\$를 평행부의 단면적으로 나누어 구할 수 있다. 일반적인 인장시험에서는 \$F_{cp}\$가 존재하지 않으므로 \$F_p = -F_y\$이 되어 실험에서 측정된 \$F_p\$로부터 바로 응력을 환산할 수 있으나, 링 인장시험에서는 \$F_{cp}\$를 고려해 주어야 한다. \$F_{cp}\$는 실험적으로 측정이 불가능하므로, 수치해석으로부터 구해야한다. 여기에 사용되는 것이 식 (3)에 나타난 하중비 \$f_c\$이다.

$$\begin{aligned} \sigma_H &= \frac{-F_y}{A} \\ &= \frac{(F_p)_y + (F_{cp})_y}{A} \quad (3) \\ &= \frac{(1 + f_c)(F_p)_y}{A} \end{aligned}$$

이때 $f_c = \frac{(F_{cp})_y}{(F_p)_y}$

식 (3)에서 하중비 \$f_c\$는 핀과 중앙조각으로부터 링에 가해지는 y방향 하중들의 비로서 수치해석으로부터 구할 수 있는 값이고, \$(F_p)_y\$는 실험에서 측정되는 하중이다. 하중비와 \$(F_p)_y\$를 알면 식 (3)으로부터 응력과 하중 사이의 변환이 가능하다. Fig. 19는 수치해석을 통해 구한 하중비-변위 관계를 나타낸다. 하중비가 변위에 따라 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

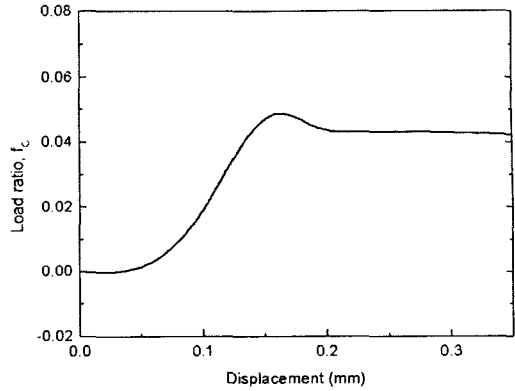


Fig. 19 Conversion relationship between load ratio and displacement

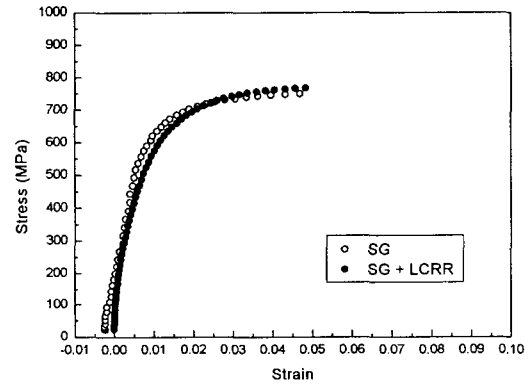


Fig. 20 Stress-strain curves of Zirloy

3.3 응력-변형률 선도

Fig. 20에 앞서의 실험결과로부터 얻어진 원주방향 응력-변형률 선도를 나타내었다. '●'는 Fig. 12의 하중-변위 선도에 Fig. 17과 Fig. 19의 링 변환관계(LCRR)를 적용하여 구한 것이고, '○'는 스트레인 게이지(SG)만 사용하여 링 변환관계를 적용하지 않은 것이다. 스트레인 게이지만 사용한 '○'의 경우 스트레인 게이지에서 측정되는 초기 변형률이 마이너스 영역에 머물러 있고, 스트레인 게이지 측정범위를 넘어서는 구간에 대해서는 선도를 그릴 수 없으며, 고온 인장시험을 해야하는 경우 스트레인 게이지를 이용하기 어려운 문제점이 있다. 또한 중앙조각에 의한 하중의 영향이 무시되므로 정확한 응력을 구하기 어렵다. 이에 반해 링 변환관계를 적용한 '●'의 경우 스트레인 게이지를 사용할 때 발생하는 굽힘의 영향

을 고려하므로 원래 구하고자 했던 중립축의 변형률을 이용할 수 있고, 스트레인 게이지의 측정 한계를 벗어나거나 스트레인 게이지를 사용하기 어려운 경우에도 변위와의 관계로부터 변형률의 추정이 가능하며, 중앙조각에 의한 하중의 영향을 고려하여 정확한 응력을 파악할 수 있다. 따라서 링 인장시험으로 인장특성을 평가할 때 링 변환관계를 적용함으로써 더 나은 결과를 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Arsene이 제안한 평행부를 갖는 링 시험편을 이용하여 수치해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석을 통하여 중앙조각을 사용한 경우 시험편의 굽힘이 방지되어 평행부에 균일한 응력 분포가 형성됨을 확인하였다.

(2) 지르코늄 합금에 대하여 0.05 ~ 0.5 /min 구간에서 인장속도에 따른 영향이 없음을 실험적으로 확인하고, 기존의 문헌을 참고하여 인장속도를 0.05 /min으로 결정하여 실험하였다.

(3) 지르코늄 합금 피복관을 대상으로 링 인장 실험에서 구한 하중-변위 선도에서 응력-변형률 선도를 구하기 위한 변형률-변위 관계와 하중비-변위 관계, 즉 링 변환관계(LCRR)를 고찰하고 제시하였다.

(4) 링 인장시험에서 정확한 원주방향 인장특성을 얻기 위해서는 수치해석을 병행한 링 변환관계의 산출과 적용이 중요하며, 링 변환관계를 확장시키면 고온의 링 인장시험에도 적용이 가능할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) ISO 8496:1988(E), 1998, Metallic materials - Tube - Ring tensile test, *International Standard*.
- (2) Krashchenko, V. P. and Gurarii, A. I., 1993, "Method of Tensile Testing Ring Specimen

(Review)," *Trans. from Zavodskaya Laboratoriya*, Vol. 51, No. 11, pp. 66~69.

- (3) Link, T. M., Koss, Don and Motta, Thompson, 1998, "Failure of Zircaloy under transverse plane-strain deformation," *Nuclear Eng. and Design*, Vol. 186, pp. 379~394.
- (4) Arsene, Sylvie and Bai, Jinbo, 1996, "New approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test," *J. of Testing & Evaluation*, Vol. 24, No. 6, pp. 386~391.
- (5) Arsene, Sylvie and Bai, Jinbo, 1998, "New approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test - experimental investigation," *J. of Testing & Evaluation*, Vol. 26, No. 1, pp. 26~30.
- (6) ASTM, 1992, "Standard Specification for Seamless and Welded Zirconium and Zirconium Alloy Tubes," *ASTM B523-92*, pp. 375~378.
- (7) K.W. Lee, S.K. Kim, K.T. Kim and S.I. Hong, 2001, "Ductility and Strain Rate Sensitivity of Zircaloy-4 Nuclear Fuel Claddings," *J. of Nuclear Materials*, Vol. 295, pp. 21~26.
- (8) Pierron, O. N., Koss, D. A. and Motta, A. T., 2003, "Tensile Specimen Geometry and the Constitutive Behavior of Zircaloy-4," *J. of Nuclear Materials*, Vol. 312, pp. 257~261.
- (9) Kohyama, A., Sato, S. and Hamada, K., 1993, "An Automated Tensile Machine for Small Specimen Heavily Neutron Irradiated in FFTF/MOTA," *ASTM STP 1204*, pp. 356~367.
- (10) Kasiviswanathan, K. V., Hotta, S. K., Mukhopadhyay, C. K. and Raj Baldev, 1998, "Miniature Shear Punch Test with On-line Acoustic Emission Monitoring for Assessment of Mechanical Properties," *ASTM STP 1329*, pp. 523~538.
- (11) Thak Sang Byun, Joo Hark Kim, Se Hwan Chi and Jun Hwa Hong, 1998, "Effect of Specimen Thickness on the Tensile Deformation Properties of SA508 C1.3 Reactor Pressure Vessel Steel," *ASTM STP 1329*, pp. 575~587.
- (12) Bong-Kook Bae, Chun-Ho Song and Chang-Sung Seok, 2003, "A Study on Mechanical Properties of Fuel Cladding Materials," *KSME (A)*, Vol. 27, No. 2, pp. 231~238.