

단일노치 링시험편을 이용한 인장 특성 평가방법 개발

배봉국[†]·구재민*·석창성*

The Development of Evaluating Tensile Property Method used the Single Notched Ring Test

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

Key Words : Ring Test(링 시험), Single Notched Specimen(단일노치 시험편)

Abstract

In this study, the single notched specimen which was proposed the previous study was used to evaluate of the transverse tensile property of zircaloy cladding. The single notched specimen has notches which give stress intensity effect, so both FEM and experiment are needed for the same time. Take a coincidence of tensile behavior about both FEM and experiment, then obtain stress and strain from FEM only. The influence of notch was estimated by comparing the result of experimental, FEM. Then the relationship between stress-strain and displacement was evaluated.

1. 서 론

내압을 받는 튜브의 파괴특성을 평가하기 위해서는 원주방향의 기계적인 성질을 파악하는 것이 필요하다. 원주방향의 성질을 조사하기 위하여 파열 시험(burst test), 맨드릴 시험(mandrel test), 링 시험(ring test)의 세 가지 시험 방법이 주로 사용된다. 파열 시험은 내압을 이용한 시험으로써 가장 실제 가동상황에 유사한 조건에서 실험이 가능하지만 특별한 가압 장치와 많은 재료가 소모되는 밀봉 압력관이 필요하다. 맨드릴 시험은 4조각 이상의 맨드릴을 관 내부에 넣고 외경방향으로 가압하여 실험하며, 일정한 응력장을 형성할 수 있지만 관 내부에 가해지는 힘을 측정하기

는 어렵다. 링 시험은 링 내부에 두 개의 실린더를 삽입하고 이를 통해 원주방향으로 인장을 가하여 시험하게 된다. 링 시험의 가장 큰 문제점은 두 중간영역 사이에서 굽힘모멘트가 발생한다는 것이다.

최초로 링 시험법을 정의한 ISO 8496⁽¹⁾에서는 외경 150mm 이상, 내경 100mm 이상인 금속 시험편의 내부에 두 개의 원통형 실린더를 평행하게 삽입하고 서로 수직으로 당겨 링이 파괴되기까지의 연신율을 조사하였다. 이 방법은 상대적인 재료의 연성과 내부 결함 여부를 정성적으로 조사하는데 사용되어왔으며 적용에 많은 한계를 가지고 있었다. 그 이후 Krashchenko, V. P.와 Gurarii, A. I.⁽²⁾가 두 개의 반원형의 실린더를 이용한 링 시험 방법을 제안하였지만 여전히 굽힘모멘트와 불균일한 변형율이 존재하는 문제점이 있었다. 최근 Sylvie Arsene와 Jinbo Bai^(3,4)는 기존의 링 시험의 문제점을 해결하기 위하여 두 개의 반원형의 실린더 사이에 중앙조각을 삽입하여 굽힘모멘트를 최소로 하였고, 중앙조각과 접촉하는 부분에서 평행부의 길이를 최대로 하여 변형율의

[†] 성균관대학교 기계공학부 대학원

E-mail : bbkook@empal.com

TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482

* 성균관대학교 기계공학부

불균일을 최소화 하였으며, 전체 변위로부터 변형률과 응력을 구하는 수치해석적인 방법을 제시하였다. T.M. Link 등⁽⁵⁾은 링 시험편에 좁은 평행부 없이 노치부 만을 두어 원주방향으로의 근사 평면변형을 조건을 만족하는 링형 시험편을 제작하였으며, 노치부가 실린더의 곡면과 미끄럼 접촉을 하면서 인장되도록 하여 굽힘모멘트의 영향을 배제하였다.

앞선 연구자들의 연구에서는 노치가 시험편의 상부와 하부의 양쪽에 존재하는 이중노치 시험편이 사용되었다. 이중노치 시험편은 실험과 해석을 수행할 때 대칭성이 유지되는 장점이 있지만, 제작하기 어렵고, 항복이 일어나면 대칭성을 상실하며, 무엇보다도 어느 쪽에서 파단이 일어날지 알 수 없는 단점이 있다. 노치부가 한쪽에만 존재하는 단일노치 시험편은 인장방향에 따라 노치부와 마주보는 부분이 비대칭이 되는 문제가 있어 사용되지 않고 있지만, 노치부의 면에 수직하게 인장 함으로써 좌우의 대칭성을 확보한다면 사용이 가능할 것이다. 더우기 단일노치 시험편은 파단 지점이 결정되어 있으므로 실험의 관찰이 용이하고, 이중노치 시험편에 비해 제작이 쉬우므로 제작오차를 줄일 수 있다.

본 연구자들은 최근 연구에서 특정 형태의 이중노치 시험편과 단일노치 시험편에 대하여 해석을 통해 인장특성을 비교하고, 단일노치 시험편의 적용가능성을 보인바 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 단일노치 시험편에서의 실험과 해석의 비교, 인장특성평가에 대해 좀더 다루고자 한다. 이를 위해 시험편과 지그의 설계와 실험, 수치해석을 수행하고 노치의 영향과 응력집중 계수를 고려하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험편과 그립

단일노치 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 인장시험용 반원형 실린더로써 SM45C를 재료로 사용하였다. 단일노치 시험편과 실린더는 재료의 강도를 고려하여 실린더의 항복이 일어나기 전까지 지지할 수 있는 최대하중과 시험편의 파단하중 사이에 2이상의 안전율을 두고 설계 및 제작하였다.

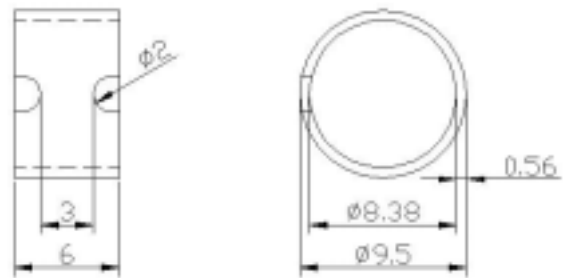


Fig. 1 Single notched specimen

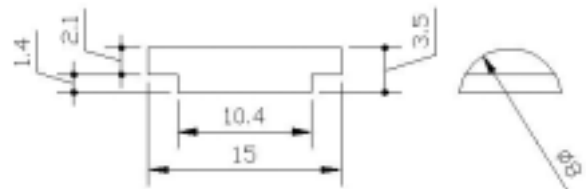


Fig. 2 Cylinder

2.2 시험방법

지그 두개가 한 세트로써 Fig. 3과 같이 서로 마주보는 두개의 실린더에 시험편을 걸고 두 지그의 홈 사이에 끼워 넣어서 Fig. 4와 같이 고정시켜 실험한다.⁽⁶⁾ Fig. 3과 같이 시험편의 노치부를 인장방향에 수직하게 놓은 이유는 굽힘모멘트를 배제하고 곡면을 유지하기 위해서이다. 또한 실린더와 시험편 사이의 마찰을 줄이기 위해 윤활제를 삽입하였다. 준비된 지그와 시험편을 25ton 인장시험기(Shimazu, AutoGraph)에 장착하고 하중속도 0.3mm/min으로 실험을 수행하였다.



Fig. 3 Specimen on cylinders



Fig. 4 Test diagram

2.3 시험결과

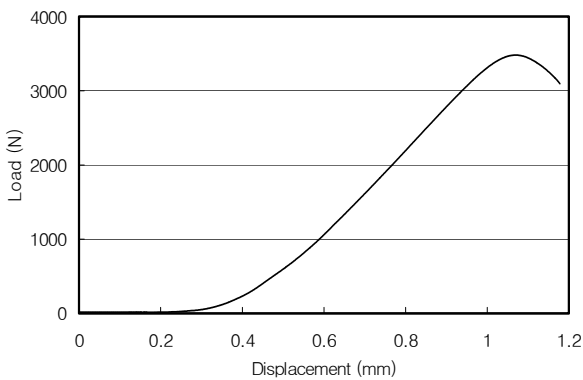


Fig. 5 The relation of the load and the stroke of uncalibrated test data

시험결과는 Fig. 5과 같이 나타났다. 초기에 J 형태로 늘어나는 것은 전형적인 링의 시험결과이지만⁽³⁾ 여기서는 변위가 과도하게 나타났다. 과도한 변위의 원인은 Fig. 6의 실린더의 하중상태에서 찾아볼 수 있다. 시험시 실린더는 분포하중을 받는 양단지지보와 같이 거동하여 하중에 따라 추가 변위가 발생하므로 다음의 식(1)과 같은 보정이 필요하다.

$$\begin{aligned} \delta_{Specimen} &= \delta_{Total} - \delta_{Cylinder} \\ &= \delta_{Total} - P \times r \end{aligned} \quad (1)$$

where $r = \left(\frac{\delta}{P}\right)_{Cylinder}$

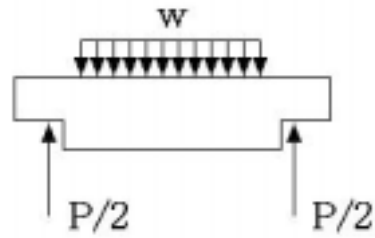


Fig. 6 Load state of cylinder

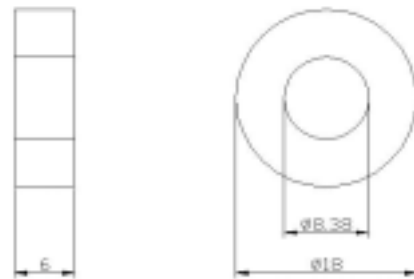


Fig. 7 Rigid ring

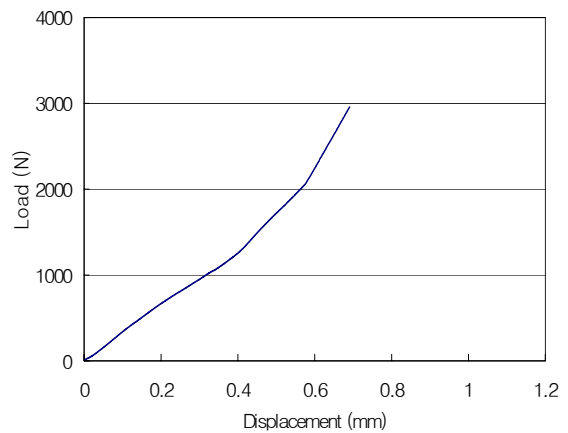


Fig. 8 Calibration curve of cylinder

실린더 변위의 보정을 위하여 Fig. 7과 같이 두께를 가지고 변형을 제한한 강체링을 제작하여 기울기 r을 측정하였다. 실린더의 변화를 살펴보면 Fig. 8에서 링 시험과 같은 기울기의 변화가 관찰된다. 그 원인은 강체링이 충분한 강성을 갖지 못하여 약간의 변형이 일어났기 때문이며 만일 완전한 강체링이었다면 변위의 변화가 더 작고 일정한 기울기를 가진 직선이 얻어졌을 것이다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 하중 변위의 변화가 가장 작은 2000N 이상의 구간에서의 기울기 8kN/mm를 보정에 사용하였다.

3. 해 석

3.1 해석모델

단일노치 시험편의 인장특성을 수치해석적으로 분석하기 위하여 ABAQUS 5.8을 이용하였다. 해석 모델은 실험에서 사용된 시험편과 동일하다. 해석에 사용된 재료는 핵연료 피복관으로 사용되는 지르코늄 합금인 지르로(Zirlo)로써, 물성치로 탄성계수 99.3GPa, 프와송비 0.37를 가진다. 원주 방향 소형인장시험을 통해 구한⁽⁶⁾ 값을 사용하여 탄소성 해석을 수행하였다.

시험편 내부에 반원형의 실린더 두개를 삽입하고 상하로 0.5mm씩 변위를 주어 링의 변형을 해석한다. 실린더의 반경이 4mm로써 시험편의 내부 반경 4.19mm보다 0.19mm 작으므로 초기의 0.19mm까지는 실린더와 시험편 사이에 접촉응력이 나타나지 않는다. 노치부는 실린더의 곡면에 접촉된 상태로 미끄러지며 원주방향으로 하중을 전달받아 파단에 이르게된다.

3.2 해석결과

3.2.1 하중-변위

Fig. 9에 해석을 통해 구한 하중-변위 선도와 앞장에서 실험으로 구한 하중-변위 선도를 함께 나타내었다. 실린더와 시험편 사이의 간격과 굽힘으로 인해 초기의 하중 변화가 완만한 전형적인 링 시험편의 인장거동을 보인다.⁽³⁾ 시험편, 지그, 실린더의 형상, 마찰조건에서의 오차로 인하여 다소 차이가 발생하였으나, 실험과 해석의 경향과 크기가 흡사함을 확인할 수 있다.

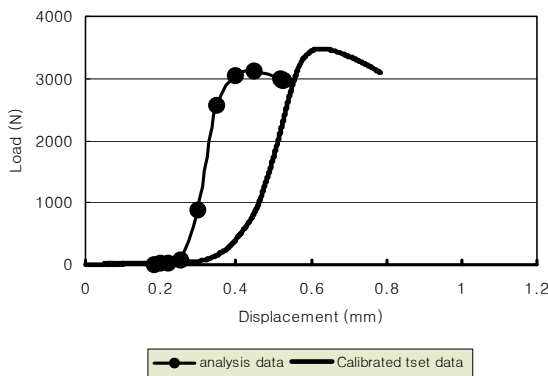


Fig. 9 The relation of the load and the stroke of calibrated test data and analysis data

3.2.2 노치의 영향

압력관의 주된 파괴요인은 원주방향 응력이며 원주방향 응력은 대부분의 경우 평면변형을 상태에서 작용하여 압력관을 파손시킨다. 단순노치를 가지는 시험편을 사용하는 이유는 노치부에서 실제 압력관에 가까운 평면변형을 상태를 구현할 수 있기 때문이다.

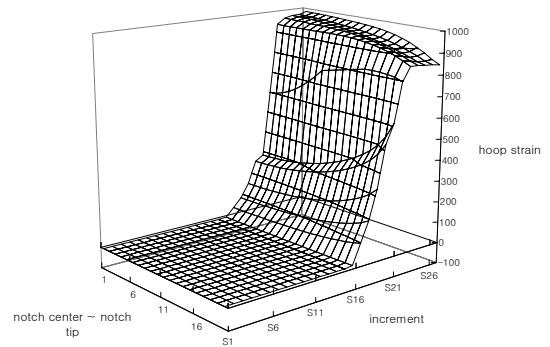


Fig. 10 Hoop stress distribution near the notch

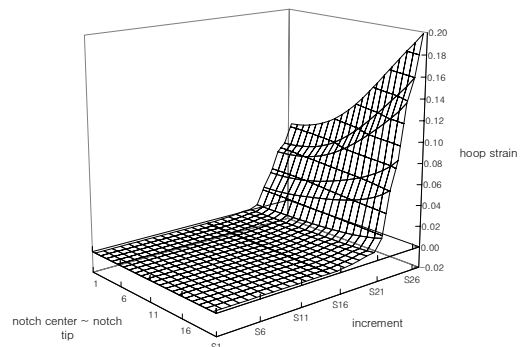


Fig. 11 Hoop strain distribution near the notch

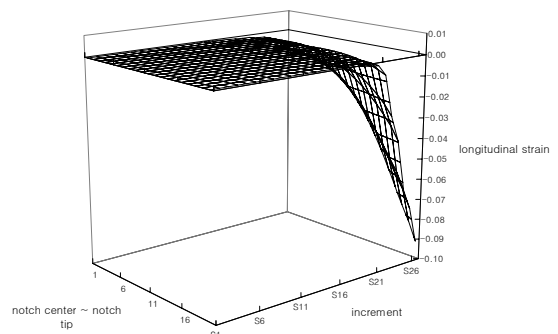


Fig. 12 Width strain distribution near the notch

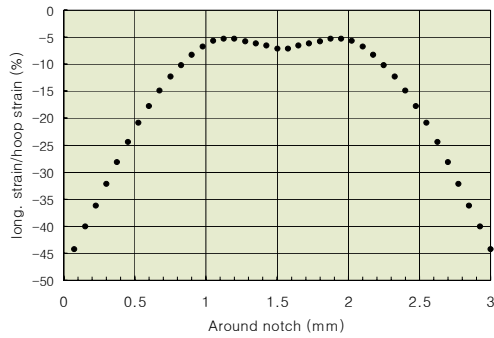


Fig. 13 Strain ratio near the notch

Fig. 10은 노치중앙에서 노치선단에 이르기까지 해석 증분에 따른 원주방향 응력의 분포를 나타낸 것이다. 그림에 표시한 항복이 일어나는 시점을 기준으로 항복이 일어나기 전의 탄성범위 내에서는 노치선단의 응력이 최대가 되지만, 전단면이 항복한 후에는 소성변형을 구속하는 힘이 노치선단보다 내부에서 강하게 작용하므로 노치중앙의 응력이 최대가 된다.

Fig. 11은 노치중앙에서 노치선단에 이르기까지 해석 증분에 따른 원주방향 변형율의 분포를, Fig. 12는 폭방향 변형율의 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 Fig. 11과 Fig. 12를 토대로 최대하중 전의 항복이 발생하는 시점에서 노치부의 폭방향 변형율과 원주방향 변형율의 비를 노치 폭 방향으로 도시한 것이다. 노치중앙부에서 변형율의 비가 0에 근접하므로 평면변형율 상태에 가깝다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 응력-변형율

Fig. 14는 근사 평면변형율 상태 영역에서의 원주방향 변형율-변위 선도를 나타낸 것이다. 변형율이 변위 증가에 따라 점차 커지는 경향을 보이며, 이 선도는 시험편의 형상과 재료에 의해 결정되어진다. 한 예로써 노치부의 길이가 더 긴 시험편과 비교해 보면 본 시험편이 변위의 증가에 따른 변형율의 증가가 더 심하게 나타난다.

Fig. 15는 근사 평면변형율 상태 영역에서의 원주방향 응력-변형율 선도이다. 앞서의 Fig. 9의 하중-변위 선도에서 공칭인장강도를 계산하면 약 595MPa이 얻어지며, 여기에 노치의 형상에 따른 응력집중계수 1.76을 적용하면 약 1050MPa의 인장강도가 얻어지는데, 이것은 Fig. 15에서 나타난 값과 거의 일치한다.

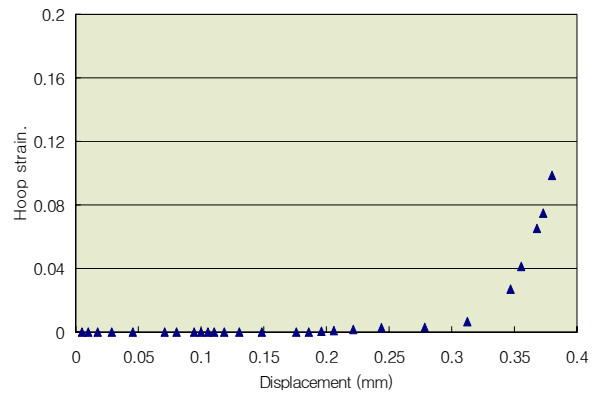


Fig. 14 The relation of the hoop strain and stroke of analysis data

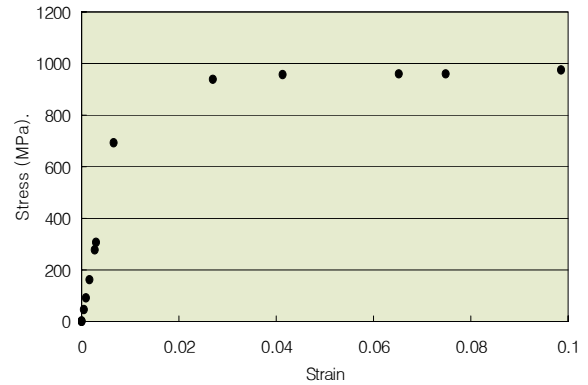


Fig. 15 The relation of the hoop stress and hoop strain of analysis data

4. 결 론

본 연구에서는 단일노치 시험편으로 인장특성을 평가할 수 있는 방법을 구하기 위한 기초연구로써 단일노치 시험편의 제작과 실험, 모델링과 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단일노치 시험편을 설계, 제작하고 실험과 해석을 통해 하중-변위 선도를 구하고 비교하였다.
- (2) 노치부근에서의 최대 응력과 변형율의 분포가 항복을 전후로 바뀌며, 노치중앙부에 평면변형율 조건이 형성됨을 확인하고, 응력집중계수를 적용하여 인장강도를 산출하였다.
- (3) 변형율-변위 선도는 시험편의 형상과 재료에 따라 다르게 나타나므로 다양한 시험편 형상에 대한 연구가 더 필요하다.

참고문헌

- (1) ISO 8496:1998(E) Metallic materials, Tube, Ring tensile test.
- (2) Krashchenko, V. P. and Gurarii, A. I., 1993, "Method of Tensile Testing Ring Specemin (Review)," translated from Zavodskaya Laboratoriya, Vol. 51, No. 11, pp. 66 ~ 69.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Bong-Kook Bae, Chun-Ho Song and Chang-Sung Seok, 2001, "A Study on Mechanical Properties of Fuel Cladding Materials," Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting A, pp. 489 ~ 494.
- (7) Bong-Kook Bae, Chang-Sung Seok and Cheol Kim, 2002, "The Development of Evaluating Tensile Property Method," Proceedings of the KSME 2002 Joint Symposium A, pp. 287 ~ 291.