

원자로용 핵연료 피복재의 인장특성에 관한 연구

배봉국* · 송춘호** · 석창성***

A Study on Mechanical Properties of Fuel Cladding Materials

Bong-Kook Bae, Chun-Ho Song and Chang-Sung Seok

Key Words: Zircaloy(지르칼로이), Zirlo(지를로), Fuel Cladding(연료 피복관), Tensile Test(인장시험), Mini-Specimen(미소시험편)

Abstract

The fuel of light water reactor used for several years at high temperature and pressure, so it needs to clad with high corrosion resistance material. The cladding materials need low absorption of a neutron and high corrosion resistance. Cladding materials used Zircaloy-2 in Boiling Water Reactor, Zircaloy-4 in Pressurized Water Reactor and Zirlo has good for long term corrosion. If fracture of cladding tube occurred during operation, it caused disaster. So it is needed to estimate of integrity for cladding materials. In this paper, tension characteristics of cladding materials are investigate which is basic research for fracture characteristic. Also analysis of residual stress effect between tube type(original type) specimen and flattened type specimen.

1. 서론

현재 국내에서 가동되고 있는 발전소 중 대부분은 가압경수로형 원자로이며 경수로에 사용되는 연료는 고온고압의 원자로 수증에서 수년간 파손되지 않고 성능이 발휘되어야 하므로 부식저항성이 좋은 재료로 피복시켜 사용하게 된다. 피복재로는 중성자 흡수가 적고 내식성이 좋은 지르코늄합금이 사용되는데 현재 비등경수로(Boiling Water Reactor: BWR) 연료의 피복에는 Zircaloy-2가, 가압경수로(Pressurized Water Reactor: PWR) 연료의 피복에는 Zircaloy-4가 각각 사용되고 있으며, Zirlo와 같은 장기간 부식에 강한 합금재료도 개발되어 사용되고 있다.

최근 핵발전으로부터 보다 큰 출력을 얻을 수 있는 고연소도화에 대한 필요성이 증대됨에 따라 연소가 진행된 핵연료를 사용하여 연소의 영향을 조사하는 실험이 일본의 NSRR, 프랑스의 CABRI 계획 등으로 진행 중에 있다. 이들 연구에 의하면 고연소도 핵연료에서 취화가 진행된 피복관의 반응도 사고(Reactivity Initiated Accident: RIA) 조건 하에서 펠릿-피복관 상호작용(Pellet Clad Mechanical Interaction: PCMI)에 의해 파손 저항한계가 낮아짐이 확인되었다. 만일 가동중 위의 파손이 발생하게 되면 국내의 경우에는 있을 수 없지만 체르노빌 사고와 같은 최악의 경우 이 과정에서 핵연료가 용융 분산하여 압력파가 발생, 큰 재앙을 초래할 가능성도 있다. 따라서 원자력 발전소에 있어서 정상가동상태나 반응도 사고와 같은 이상동작시에 핵연료 피복관의 건전성 확보와 연관하여 피복재의 항복거동은 매우 중요한 문제이다.⁽¹⁻⁸⁾

본 연구에서는 핵연료 피복관의 파괴특성을 조사하기 위한 기초연구로써 피복관으로 사용되는

* 성균관대학교 기계공학부
 ** 성균관대학교 기계공학부 Post-doc.
 *** 성균관대학교 기계공학부

Table 1 Chemical compositions (wt. %).

Element	Sn	Fe	Cr	Ni	O	Nb	Zr
Zircaloy-2	1.5	0.12	0.10	0.05	0.01	-	bal
Zircaloy-4	1.5	0.21	0.10	-	0.01	-	bal
Zirlo	1.5	0.12	0.10	0.05	0.01	0.5	bal

재료의 굽힘 가공과 방향에 따른 인장특성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 튜브형의 재료를 그대로 가공하여 제작한 시험편과 판형이 되도록 펴서 제작한 시험편의 두 종류를 준비하여 가공에 의한 영향을 살펴보고, 길이방향과 원주방향으로의 인장시험을 수행하여 방향에 따른 영향을 함께 검토하였다.⁽⁹⁾

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

시험에 사용된 재료는 원자로의 핵연료 피복관으로 사용되는 Zircaloy-2, Zircaloy-4, 그리고 Zirlo로서 화학적 성분은 Table 1과 같다. Fig. 1의 사진과 같이 피복관의 크기가 작으므로 ASTM E8과 기존의 연구를 참조하여 표준시험편보다 작은 소형시험편을 제작하였다.⁽⁹⁻¹¹⁾

시험편은 튜브형(tube) 피복관을 그대로 사용하거나(original type) 굽힘가공을 통해 피복관을 판형(plate)으로 펼친(flattened type) 2종류의 시험재료를 준비하고 이들로부터 각각 길이방향 시험편(longitudinal specimen)과 원주방향 시험편(transverse specimen)을 제작하여 총 4가지 형태의 인장시험편을 준비하였다. Fig. 2는 제작된 시험편 중 Zircaloy-2 시험편의 형상을 나타내며, (a)가 길이방향 시험편(original longitudinal specimen), (b)가 원주방향 시험편(original transverse specimen), (c)가 판형 길이방향 시험편(flattened longitudinal specimen), 그리고 (d)가 판형 원주방향 시험편(flattened transverse specimen)에 해당한다. Zircaloy-4와 Zirlo 시험편은 Zircaloy-2 시험편 보다 다소 작고, 두 시험편의 크기는 동일하다.



Fig. 1 Size of clad and coin.

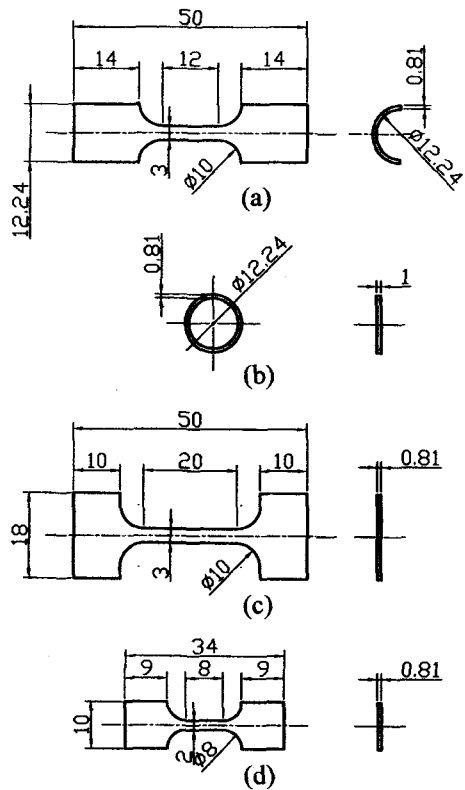


Fig. 2 The geometry of specimens about zry-2: (a)original longitudinal specimen (b)original transverse specimen (c)flattened longitudinal specimen (d)flattened transverse specimen.

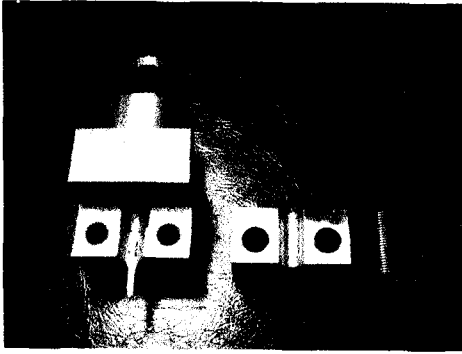


Fig. 3 Grip device for original longitudinal specimen.

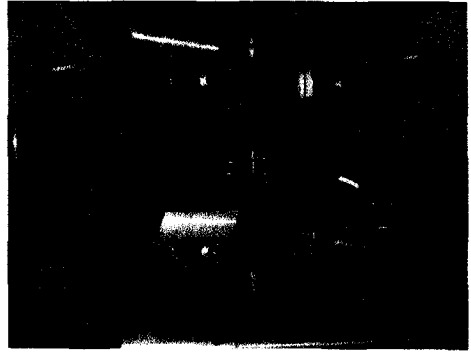


Fig. 4 Extensometer and grip for flattened specimen.

2.2 장치 및 실험방법

Fig. 2에서 보인 시험편 중에서 판형 시험편 ((c), (d))은 일반 판형 그립을 사용하여 고정시켰으나 그렇지 않은 시험편((a), (b))은 시험편을 고정시키기 위한 적절한 형태의 그립을 제작하여 사용하였다. 또한 연신을 측정장치(extensometer)와 시험편 설치조건을 맞추기 위해 길이방향 인장시험은 5 ton 인장시험기에서(Hightech, Instron), 원주방향 인장시험은 25 ton 인장시험기(Shimazu, AutoGraph)에서 각각 수행하였다.

길이방향 인장시험은 하중속도 0.3mm/min으로 상온에서 행해졌으며 게이지 간격 10mm의 연신을 측정장치를 시험편의 평행부에 부착하여 변형량을 측정하였다. Fig. 3은 길이방향 시험편을 고정시키기 위한 그립으로써 시험편이 원래의 형상을 유지하면서 인장력을 받을 수 있도록 설계되어 있다. 그립에서 왼쪽 그립에 파단된 시험편의 일부가 놓여있는 모습이 보인다. 왼쪽의 시험편 위에 오른쪽의 핀을 놓고 중앙의 덮개를 덮어 볼트로 조여서 고정시키도록 구성되어 있다.

Fig. 4는 판형 길이방향 시험편 고정용 그립과 연신을 측정장치의 설치 모습을 나타낸다. 판형 길이방향 시험편의 경우 재료의 길이를 한정하여 그립이 맞물리는 부분의 면적이 작아서 시험편-그립 사이의 미끄러짐이 발생할 수 있으므로 그립이 닿는 부위에 홈을 내어 이를 방지하였다.

원주방향 인장시험은 하중속도 0.3mm/min으로 상온에서 행해졌으며 시험편의 길이가 미소하여 연신을 측정을 하지 못하고 인장강도만을 측정하였다.

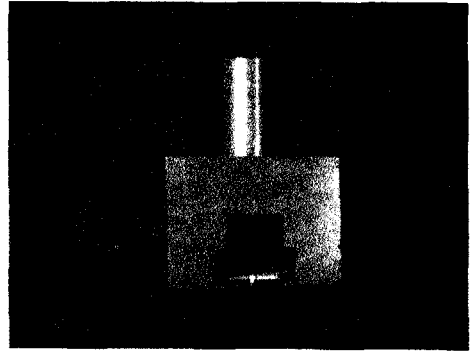


Fig. 5 Grip device for original transverse specimen.

Fig. 5는 원주방향 시험편 고정용 그립으로써 링형의 시험편을 핀에 걸고 핀을 그립 안쪽으로 미끄러뜨려 중간에 고정시키도록 되어 있다. 그립에서 핀에 시험편이 걸려있는 모습이 보인다. 그립과 핀의 허용하중이 시험편의 파단하중 보다 충분히 크도록 설계되어 있다. 시험편 안쪽에 두 개의 핀을 넣고 아래 위 그립에 동시에 밀어 넣은 후 인장을 가하여 시험하게 된다.

판형 원주방향 시험편은 판형 길이방향 시험편과 유사하므로 그립도 Fig. 4의 판형 길이방향 시험편용 그립과 유사하다. 판형 길이방향 시험편과 마찬가지로 시험편이 그립에 고정되는 부위의 면적이 작으므로 홈을 내어 시험중의 시험편-그립 사이의 미끄러짐을 방지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2 Mechanical properties of nuclear fuel claddings. (L: longitudinal, T: transverse)

Material	Type	Direction	T.S (MPa)	0.2%Y.S (MPa)
Zircaloy-2	Original	L	898	882
		T	854	-
	Flattened	L	854	822
		T	875	-
Zircaloy-4	Original	L	786	646
		T	760	-
	Flattened	L	757	666
		T	772	-
Zirlo	Original	L	827	696
		T	813	-
	Flattened	L	778	682
		T	798	-

3종류의 핵연료 피복관을 대상으로 각각 4가지 썩의 시험편을 제작하여 인장시험을 수행한 결과를 Table 2에 정리하였다.

3.1 파단 형상

Fig. 6 ~ 9에 파단된 시험편을 나타내었다. 그림 위쪽의 큰 시험편이 Zircaloy-2 시험편이고 아래쪽의 작은 시험편이 Zircaloy-4 혹은 Zirlo 시험편이다.

Fig. 6와 Fig. 7의 길이방향 시험편을 살펴보면 Zircaloy-2 시험편은 국부수축이 발생하여 요철형(cup&corn)으로 파단되었고 Zircaloy-4 시험편은 45도 슬립면을 따라 전단 파단이 일어난 것으로 보아 모두 연성파괴 되었음을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9의 원주방향 시험편을 살펴보면 판형 시험편의 경우 Zircaloy-2, Zircaloy-4 모두 45도 슬립면을 따라 전단 파단이 일어났으며 링형 시험편의 경우도 국부수축이 발생한 파단면을 관찰할 수 있으므로, 모두 연성파괴 되었음을 확인할 수 있다. 링형 시험편은 두께가 얇아서 평면응력 상태가 유지되었을 것으로 생각된다.

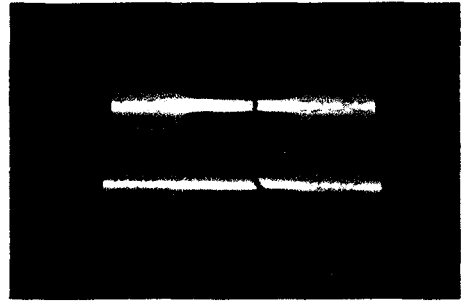


Fig. 6 Longitudinal specimen.

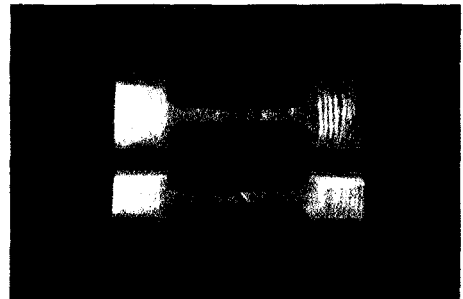


Fig. 7 Flattened longitudinal specimen.

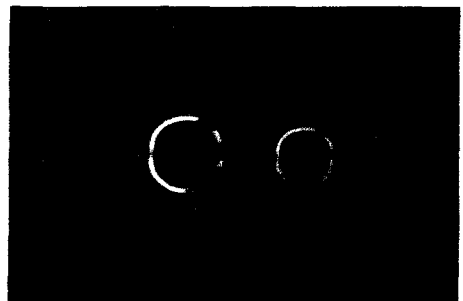


Fig. 8 Transverse specimen.

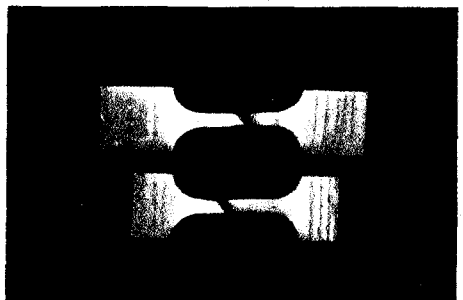


Fig. 9 Flattened transverse specimen.

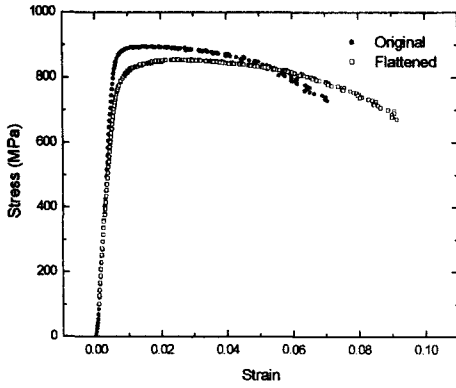


Fig. 10 Stress-strain curve of Zircaloy-2.

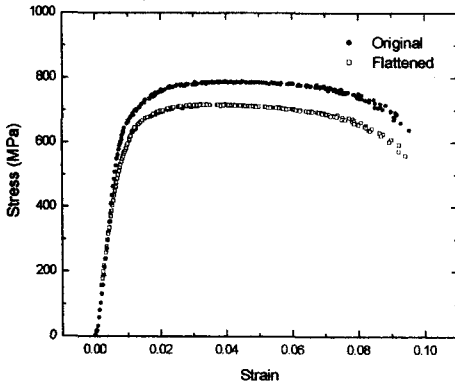


Fig. 11 Stress-strain curve of Zircaloy-4.

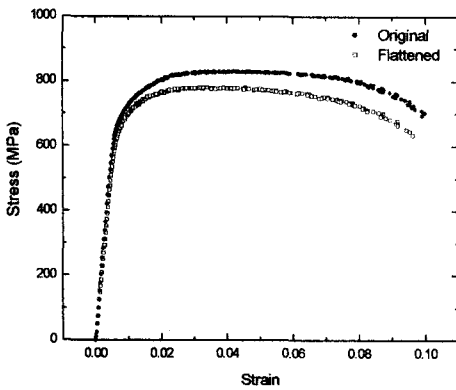


Fig. 12 Stress-strain curve of Zirlo.

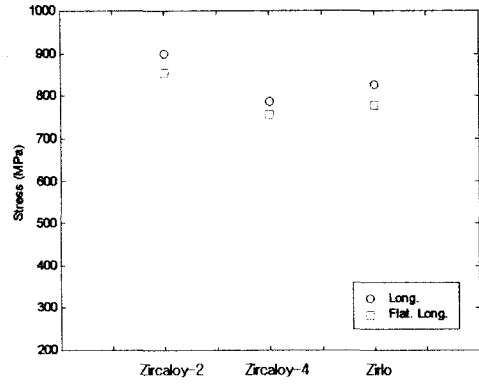


Fig. 13 Tensile strengths of longitudinal specimens.

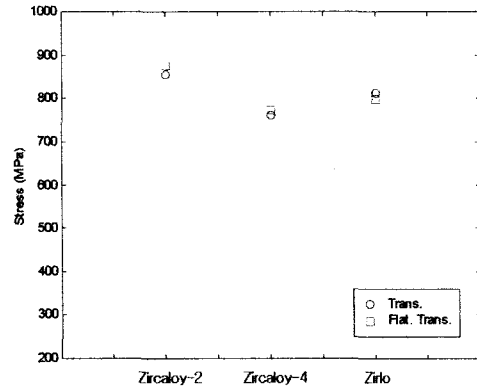


Fig. 14 Tensile strengths of transverse specimens.

3.2 굽힘 가공의 영향

Fig. 10 ~ 12는 각 피복판에서의 길이방향 인장 시험 결과를 응력-변형률 선도로 나타낸 것이다. 전반적으로 판형 길이방향 시험편이 길이방향 시험편보다 인장강도 값이 저하되지만 연신율은 특정한 경향을 보이지 않음을 알 수 있다.

Fig. 13은 Table 2를 바탕으로 길이방향에서의 판형과 원형 시험편의 인장강도를 비교한 것이다. Zircaloy-2의 인장강도가 가장 높고, 다음으로 Zirlo, Zircaloy-4의 순서로 나타났다. 그리고 응력-변형률 선도에서 살펴본 바와같이 전 재료에 대하여 판형 시험편의 인장강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 시험편을 판형으로 굽힘

가공하는 과정에서 발생된 잔류응력이 해소되지 못하고 길이방향 인장강도에 영향을 주기 때문에로 생각된다.

Fig. 14는 Table 2를 바탕으로 원주방향에서의 판형과 원형 시험편의 인장강도를 비교한 것이다. 마찬가지로 Zircaloy-2의 인장강도가 가장 높고, 다음으로 Zirlo, Zircaloy-4의 순서로 나타났다. 그리고 판형 시험편과 원형 시험편 사이의 인장강도의 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 원주방향 인장시험에서 굽힘가공을 하지 않은 링형 시험편의 연신부가 곡률이 있는 상태에서 수직으로 퍼지는데 이 과정에서 굽힘가공을 통해 발생하는 잔류응력과 동일한 형태의 잔류응력이 발생하기 때문으로 생각된다.

따라서 길이방향 시험 시에는 굽힘가공을 하지 않은 시험편을 사용하는 것이 피복관의 파괴특성을 잘 나타낼 수 있고, 원주방향 파괴시험 시에는 어느 시험편이나 무방함을 알 수 있다. 만일 길이방향 파괴시험에 판형 시험편을 사용한다면 잔류응력에 대한 해석을 통해 그 차이를 보정해 줄 필요가 있다.

4. 결론

핵연료 피복관인 Zircaloy-2, Zircaloy-4, Zirlo를 대상으로 굽힘가공 여부와 시험편 방향에 따라서 4 종류의 미소 인장 시험편을 제작하고 인장시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피복재의 인장강도는 Zircaloy-2가 가장 높았고 다음으로 Zirlo, Zircaloy-4의 순이었다.

(2) 길이방향 인장시험에서는 잔류응력의 영향으로 판형 시험편의 인장강도와 항복강도가 감소하였다.

(3) 원주방향 인장시험에서는 판형 시험편과 원형 시험편의 인장강도 사이에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

(4) 길이방향 시험에는 원형 시험편을 사용하는 것이 바람직하며, 판형 시험편을 사용하는 경우 해석을 통한 보정이 필요하다.

참고문헌

(1) M. Kiroda, etc., 2001, "Analysis of the fracture

behavior of hydrided fuel cladding by fracture mechanics," Nuclear Eng. and Design, vol. 203, pp. 183~194.

(2) F. Lemoine, 1997, "High burnup fuel behavior related to fission gas effects under reactivity initiated accidents (RIA) conditions," J. of Nuclear Materials, vol. 248, pp. 238~248.

(3) V. Grigoriev, B. Josefsson and B. Rosborg, 1996, "Fracture toughness of zircaloy cladding," ASTM STP 1295, pp. 431~447.

(4) 이재경, 이병휘, 1987, "'Out-of-pile test for yielding behavior of PWR fuel cladding material," J. of the Korea Nuclear Society, vol. 19, no. 1, pp. 22~33.

(5) K. Y. Shiao, J. J. Kai and C. H. Tsai, 1990, "The effects of proton irradiation on the microstructure and corrosion resistance of Zircaloy-4 tube," Nucl. sci. j., vol. 27, no. 1, pp. 45~56.

(6) 박기성, 이병휘, 1989, "Dynamic strain aging of zircaloy-4 PWR fuel cladding in biaxial stress state," J. of the Korea Nuclear Society, vol. 21, no. 2, pp. 89~98.

(7) K. L. Murty, 1986, "Biaxial creep of zircaloy cladding," Tran. of the Indian Inst. of Metals, vol. 39, no. 4, pp. 357~368.

(8) K. L. Murty and B. L. Adams, 1985, "Biaxial creep of textured zircaloy I: experimental and phenomenological descriptions," Materials Sci. and Eng., vol. 70, pp. 169~180.

(9) T.M. Link, D.A. Koss and A.T. Motta, 1998, "Failure of Zircaloy under transverse plane-strain deformation," Nuclear Eng. and Design, vol. 186, pp. 379~394.

(10) 최용, 강영환, 류우석, 임창생, 1985, "The Slow Strain Rate Dependence of Zircaloy-4 Cladding Tube in Iodine Atmosphere (I)," J. of the Korea Nuclear Society, vol. 17, no. 3, pp. 211~215.

(11) ASTM E8, 1995, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," pp. 56~136.