

원자로용 핵연료 피복재의 인장특성에 관한 연구

배봉국[†] · 송춘호^{*} · 석창성^{**}

(2002년 1월 5일 접수, 2003년 1월 6일 심사완료)

A Study on the Mechanical Properties of Nuclear Fuel Cladding Materials

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

Key Words: Zircaloy(지르칼로이), Zirlo(지르로), Nuclear Fuel Cladding(핵연료 피복관), Tensile Test(인장시험), Mini-Specimen(소형시험편)

Abstract

The fuel of light water reactor is used for several years under high temperature and pressure, so it needs to be clad with high corrosion resistance material. The cladding materials must have the characteristics of low absorption of a neutron and high corrosion resistance. Zircaloy-2 in Boiling Water Reactor, Zircaloy-4 in Pressurized Water Reactor have been used as cladding materials and Zirlo has been developed as the material for preventing the corrosion. If the fracture of the cladding tube occurs during operation, it will cause the economic loss to shut down and replace the system. So it is needed to evaluate the integrity of the cladding materials. In this paper, the tensile characteristics of the cladding materials were investigated for the basic research of fracture characteristics. Also the residual stress was analyzed to compare the tube type(original type) specimen and the flattened type specimen.

1. 서 론

현재 국내에서 가동되고 있는 발전소 중 대부분은 가압경수로형 원자로이며 경수로에 사용되는 연료는 고온고압의 원자로 수증에서 수년간 파손되지 않고 성능을 발휘하여야 하므로, 여기에 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 사용

되고 있으며, Zirlo와 같은 장기간 부식에 강한 합금재료도 새로 개발되어 사용되고 있다.⁽¹⁾

최근 원자력 발전으로부터 보다 큰 출력을 얻을 수 있는 고연소도화에 대한 필요성이 증대됨에 따라 연소가 진행된 핵연료를 사용하여 연소의 영향을 조사하는 실험이 일본의 NSRR, 프랑스의 CABRI계획 등으로 진행 중에 있다. 이들 연구에 의하면 고연소도 핵연료에서 취화가 진행된 피복관의 경우 반응도 사고(Reactivity Initiated Accident: RIA) 조건 하에서 펠릿-피복관 상호작용(Pellet Clad Mechanical Interaction: PCMI)에 의해 파손 저항한계가 낮아짐이 확인되었다.⁽²⁾ 만일 가동중에 피복관의 파손이 발생하게 되면 냉각수에 방사능이 누출될 위험이 있을 뿐만 아니라 이를 교체하기 위해 가동을 중단해야하므로 경제적인 손실을 초래하게된다. 따라서 원자력 발전소에 있어서 정상가동상태나 반응도 사고와 같은 이상동작시에 핵연료 피복관의 건전성 확보와 연관하여 피복재의 파괴거동은 매우 중요한 문제이

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학부

E-mail : bbkook@empal.com

TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7486

^{*} 회원, 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터

^{**} 회원, 성균관대학교 기계공학부

다.⁽³⁾

본 연구에서는 핵연료 피복관의 파괴특성을 조사하기 위한 기초연구로써 피복관으로 사용되는 재료의 펼침가공과 인장방향에 따른 강도특성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 튜브형 재료를 그대로 가공하여 제작한 시험편, 판형이 되도록 펴서 제작한 시험편, 이렇게 두 종류를 준비하여 가공에 의한 영향을 살펴보고, 길이방향과 원주방향으로의 인장시험을 수행하여 방향에 따른 영향을 함께 검토하였다.^(4,5)

specimen)에 해당하고, Zircaloy-2 시험편에 (1)을, Zircaloy-4와 Zirlo 시험편에 (2)를 붙여 표현하였다. Zircaloy-4와 Zirlo 시험편의 크기가 Zircaloy-2 시험편보다 상대적으로 작다.

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 소형시험편(mini-specimen)을 제작하였다.⁽⁶⁾

튜브형(tube) 피복관을 그대로 사용하거나 (original type) 펼침가공을 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. 판형 시험편의 제작을 위하여 튜브의 한쪽을 잘라서 C형을 만든 후 조금씩 곡률 반경을 넓히고 최종적으로 바이스에 물려서 완전히 펼쳐지도록 하였다. Fig. 2는 제작된 시험편들의 형상을 나타낸다. (a)가 길이방향 시험편(original longitudinal specimen), (b)가 원주방향 시험편(original transverse specimen), (c)가 판형 길이방향 시험편(flattened longitudinal specimen), (d)가 판형 원주방향 시험편(flattened transverse



Fig. 1 Size of cladding and coin

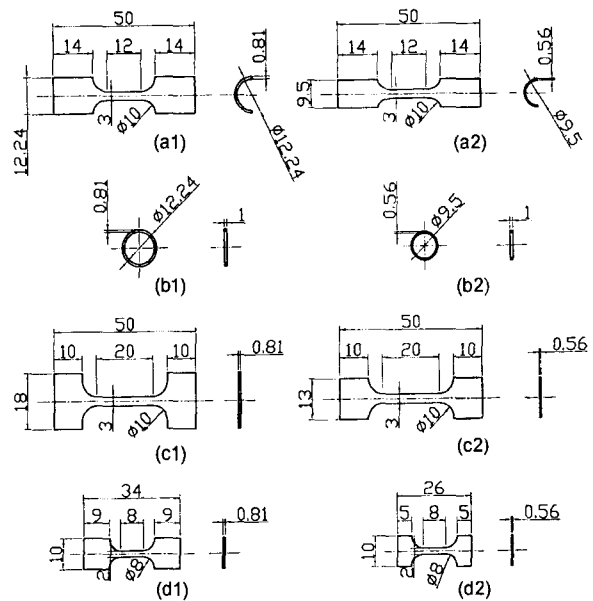


Fig. 2 The geometry of specimens: Zircaloy-2 with suffix (1), Zircaloy-4 and Zirlo with suffix (2); (a)Original Longitudinal specimen (b)Original Transverse specimen (c)Flattened Longitudinal specimen (d)Flattened Transverse specimen (unit : mm)

Table 1 Chemical compositions (wt. %)

	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	1.0	0.01	0.008	-	0.01	1.0	bal

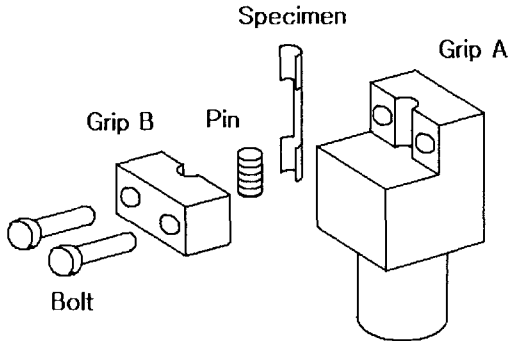


Fig. 3 Grip device for original longitudinal specimen

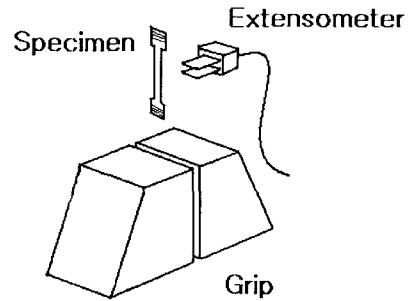


Fig. 4 Extensometer and grip for flattened specimen

2.2 장치 및 실험방법

Fig. 2에서 보인 시험편 중에서 판형 시험편 ((c), (d))의 경우 일반 판형 그림을 사용하여 고정시켰으나 그렇지 않은 시험편((a), (b))의 경우에는 시험편을 고정시키기 위한 적절한 형태의 그림을 제작하여 사용하였다. 또한 연신을 측정 장치(extensometer)와 시험편 설치조건을 맞추기 위해 5 ton 인장시험기(Hightech, Instron)에서 길이방향 인장시험을, 25 ton 인장시험기(Shimazu, AutoGraph)에서 원주방향 인장시험을 각각 수행하였다.

하중속도 0.3mm/min으로 상온에서 길이방향 인장시험을 하였으며, 게이지 간격 10mm의 연신을 측정장치를 시험편의 평행부에 부착하여 변형량을 측정하였다.

Fig. 3은 길이방향 시험편을 고정시키기 위한 그림으로서 시험편이 원래의 형상을 유지하면서 인장력을 받을 수 있도록 설계한 것을 보여준다. 그림에서 그림A의 홈에 파단된 시험편이 놓이고 시험편 위에 핀이 포개어지며 그 위에 그림B가 덮여 볼트로 조여져서 고정되도록 구성하였다. 핀에 가로방향으로 홈을 내어 시험편과 그림 사이의 미끄러짐을 방지하였다.

Fig. 4는 판형 길이방향 시험편 고정용 그림과 연신을 측정장치의 설치 모습을 나타낸 것이다. 시험편의 그림이 닿는 부위에 홈을 내어 미끄러짐을 방지하였다.

하중속도 0.3mm/min으로 상온에서 원주방향 인장시험을 하였으며, 시험편의 길이와 폭이 연신

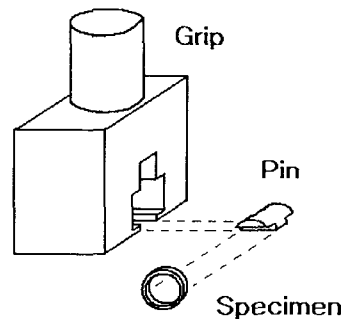


Fig. 5 Grip device for original transverse specimen

을 측정장치를 설치하기에 충분하지 못하여 연신을 측정하지 못하고 인장강도만을 측정하였다.

Fig. 5는 원주방향 시험편 고정용 그림으로서 링(ring)형의 시험편을 핀에 걸고 핀을 그림 안쪽에 밀어 넣어 중앙에 고정시키도록 설계하였다. 그림과 핀의 재질로 S45C를 사용하였으며 허용하중이 시험편의 파단하중 보다 충분히 큰 값을 가지도록 설계하였다. 시험편 안쪽에 두 개의 핀을 넣고 아래 위 그림에 동시에 밀어 넣은 후 인장을 가하여 시험하게 된다.^(6,7)

판형 원주방향 시험편의 경우 판형 길이방향 시험편과 유사하므로 그림도 Fig. 4의 판형 길이방향 시험편용 그림과 유사하다. 판형 길이방향 시험편과 마찬가지로 시험편이 그림에 고정되는 부위의 면적이 작으므로 홈을 내어 시험중의 시험편-그림 사이의 미끄러짐을 방지하였다.

2.3 실험결과

2.3.1 인장특성

3종류의 핵연료 피복관을 대상으로 각각 4가지 씩의 시험편을 제작하여 인장시험을 수행한 결과를 Table 2에 정리하였다. 강도에서 ASTM B811에서 제시하고있는 기준을 충분히 만족하고 있으며 기준보다 1.8 ~ 3.6배 높은 값을 보였다. Zircaloy-2의 인장강도가 가장 높고, 다음으로 Zirlo, Zircaloy-4의 순서로 나타났다.

Table 2 Mechanical properties of nuclear fuel claddings

Material	Direction	Type	T.S. (MPa)	Y.S. (MPa)	R.A. (%)
Criteria (ASTM B811)			413	241	20(EL)
Zircaloy 2	L	O	898	882	-
		F	854	822	26.3
	T	O	854	(735)	48.5
		F	875	-	24.6
Zircaloy 4	L	O	786	646	-
		F	757	666	17.5
	T	O	760	(637)	43.1
		F	772	-	18.1
Zirlo	L	O	827	696	-
		F	778	682	22.7
	T	O	813	(709)	41.8
		F	798	-	15.7

(L: Longitudinal, T: Transverse, O: Original, F: Flattened)

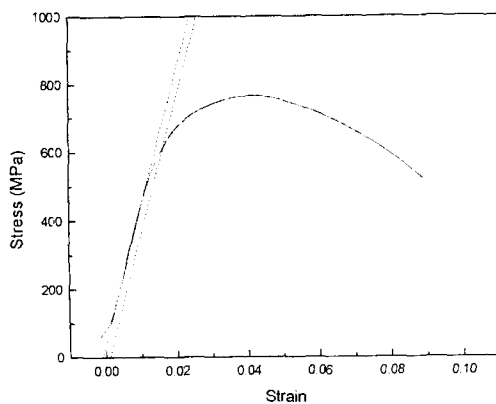


Fig. 6 Stress-strain curve of the Z4-TO specimen

원주방향 시험에서 링형 시험편의 경우 Fig. 6과 같이 초기에 J의 형태를 나타내지만⁽⁶⁾ 직선구간이 잘 나타나므로 오프셋을 통해 대략적인 항복강도를 구할 수 있었다. 하지만 판형 시험편의 경우 직선구간이 나타나지 않아 항복강도를 구하기 어려웠다. 또한 파단면 확대사진 측정을 통하여 단면수축율을 구하였으나 원형 길이방향 시험편에 대해서는 단면형상의 제약으로 인하여 구하기가 어려웠다. 단면수축율을 보면 Zircaloy-2 시험편이 가장 큰 연성을 가진다.

Fig. 7은 각 피복관에서의 길이방향 인장시험 결과를 응력-변형률 선도로 나타낸 것이다. 전반적으로 판형 시험편이 원형을 유지한 시험편 보다 인장강도 값이 저하되지만 연신율은 거의 같음을 알 수 있다.

2.3.2 파단면

Fig. 8은 길이방향 시험편의 파단모습을 나타낸 것이다. (a)는 판형시험편, (b)는 원형시험편이며, 윗쪽이 Zircaloy-2 시험편, 아랫쪽이 Zircaloy-4 또는 Zirlo 시험편이다. 두께가 두꺼운(0.81mm) Zircaloy-2 시험편은 국부수축이 발생하여 요철형으로 파단되었고 두께가 얇은(0.56mm) Zircaloy-4 시험편은 45도 슬립면을 따라 전단 파단이 일어나 모두 연성파괴 되었다.

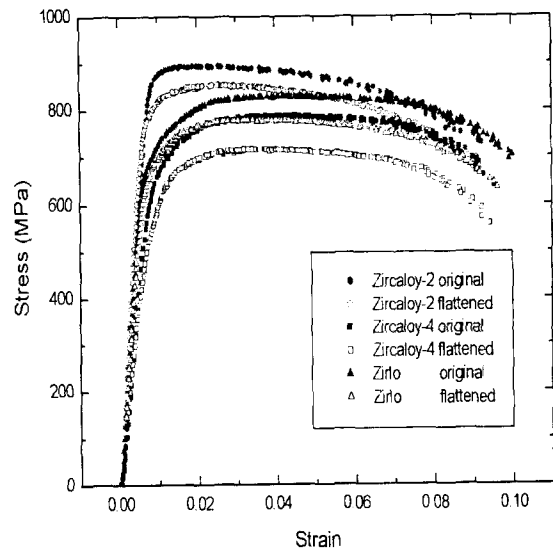


Fig. 7 Stress-strain curves of longitudinal direction specimen

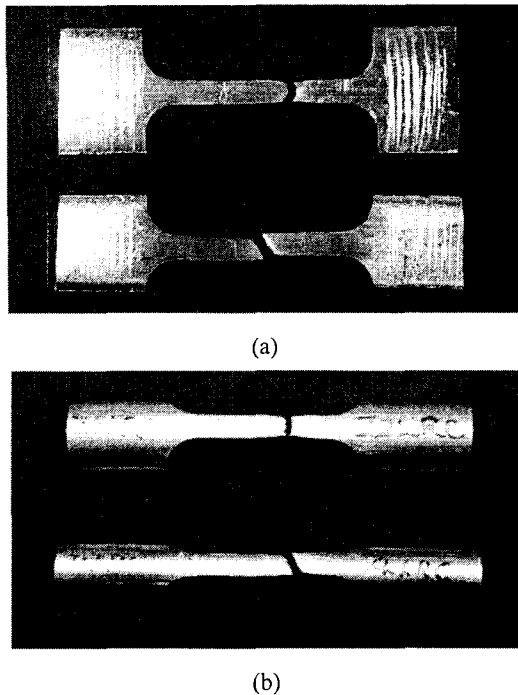


Fig. 8 Fractured longitudinal specimens: (a) flattened (b) original

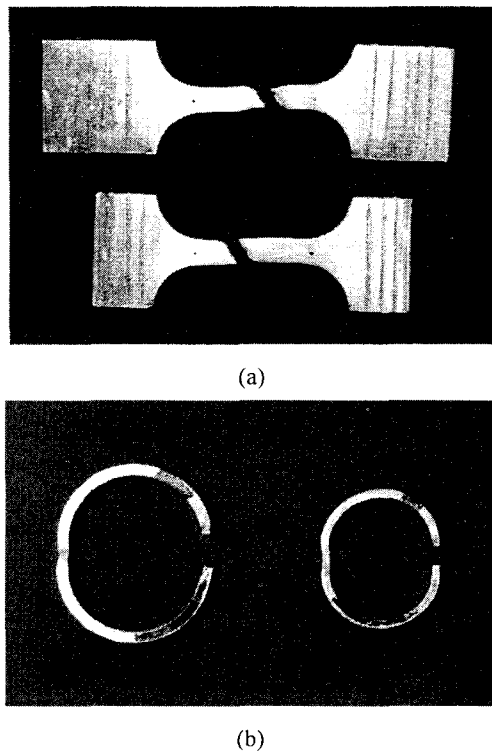


Fig. 9 Fractured transverse specimens: (a) flattened (b) original (ring)

Fig. 9는 원주방향 시험편의 파단모습이다. (a)는 편형 시험편의 경우로써 모두 45도 슬립면을 따라 전단 파단이 일어났고, (b)의 링형 시험편의 경우도 국부수축이 발생한 파단면을 관찰해보면 모두 연성파괴되었음을 확인할 수 있다. 폭이 얇아서 평면응력상태가 유지되었을 것으로 생각된다.

3. 해석

펼침가공에 따른 잔류응력의 영향을 분석하기 위해 ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석모델은 Zircaloy-2를 대상으로 대칭성을 고려하여 1/2 모델을 사용하였으며 Fig. 10에 그 형상을 나타내었다. 재료상수값으로는 영률 99GPa, 항복응력 880MPa을 입력하였다. 그림에서 강제 판 위에 왼쪽 하단을 구속시킨 1/2 모델을 두고 강제 슬라이더로 1/2 모델을 밀어서 펼친 다음 강제 슬라이더를 제거한 후의 잔류응력을 구하였다.

Fig. 11은 해석결과로써, (a)는 원주방향으로의 잔류응력 분포를, (b)는 길이방향으로의 잔류응력 분포를 나타낸다. 오른쪽 끝이 약간 휘어진 이유는 강제 슬라이더 제거 후 모델의 일부분이 탄성 복원 되었기 때문이다. 1/2 모델을 사용하였으므로 양 끝단의 응력분포는 큰 의미가 없고 모델의 중간 지점에 해당하는 A-A'단면에서의 잔류응력 상태가 시험편의 잔류응력을 잘 나타낼 수 있을 것이다.

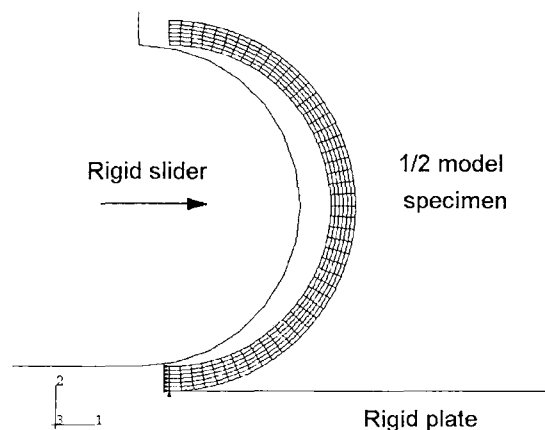


Fig. 10 Stress analysis model by ABAQUS

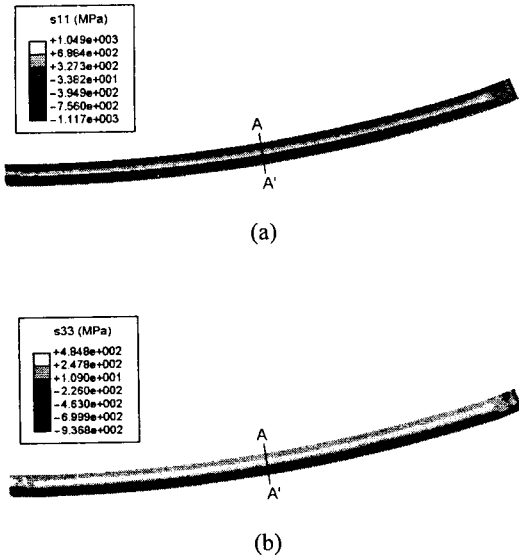


Fig. 11 Residual stress analysis result. (a) Transverse residual stress. (b) Longitudinal residual stress

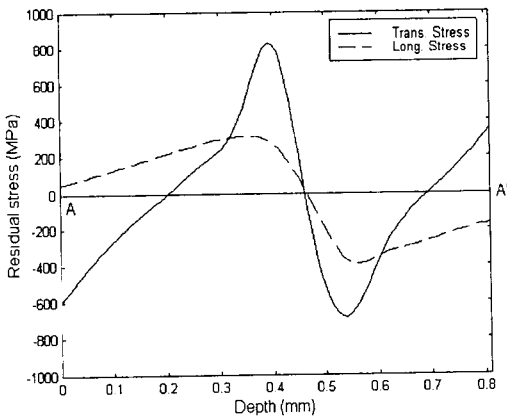


Fig. 12 Residual stress distribution along A-A' line

Fig. 12는 Fig. 11의 A-A'단면에서의 두께방향에 따른 잔류응력의 크기를 나타낸 것이다. 바깥쪽에 치우쳐서 대칭되게 압축과 인장 잔류응력을 형성하고 있으며 원주방향으로 길이방향 보다 더 큰 잔류응력이 분포되어있다.

4. 고찰

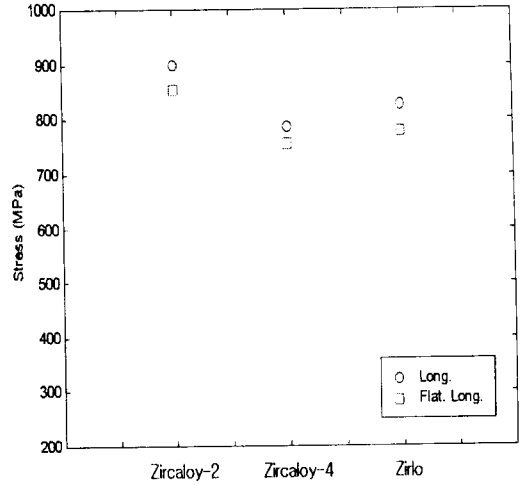


Fig. 13 Tensile strengths of longitudinal specimens

4.1 방향성의 영향

Table 2에서 인장방향에 따른 인장강도의 차이를 비교해보면 펄침가공을 하지않은 경우 길이방향의 인장강도가 조금 큰 값을 가진다. 그 이유는 튜브제작 과정에서 인발로 인해 결정립들이 길이방향으로 늘어나 이방성을 지니게 되어 원주방향이 길이방향보다 더 취약해지기 때문인 것으로 생각된다. 반면에 펄침가공을 한 경우 원주방향으로의 소성변형이 발생하고 가공경화로 인해 원주방향으로의 강도가 높아지므로 원주방향의 인장강도가 길이방향의 인장강도 보다 높게 나타나는 것으로 생각된다. 펄침가공 전후의 단면수축율의 변화를 통해 펄침가공으로 인해 가공경화가 발생함을 확인할 수 있다.

4.2 펄침가공의 영향

Fig. 13은 Table 2를 바탕으로 길이방향에서의 판형과 원형 시험편의 인장강도를 비교한 것이다. 응력-변형률 선도에서 살펴본 바와같이 전 재료에 대하여 판형 시험편의 인장강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 12의 길이방향 잔류응력이 길이방향 인장강도에 영향을 주었기 때문이라고 생각된다.

Fig. 14는 원주방향에서의 판형과 원형 시험편의 인장강도를 비교한 것이다. 판형 시험편과 원형 시험편 사이의 인장강도는 차이가 크지 않았다.

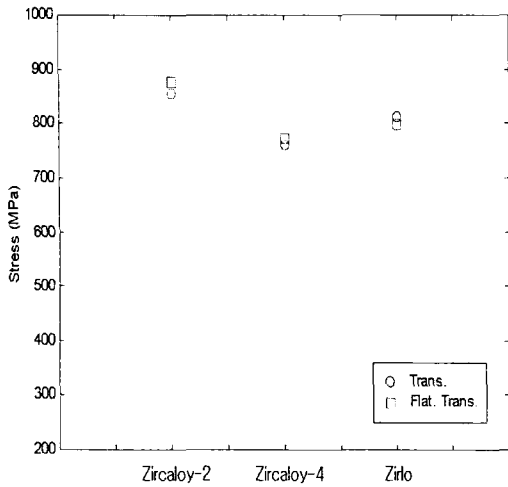


Fig. 14 Tensile strengths of transverse specimens

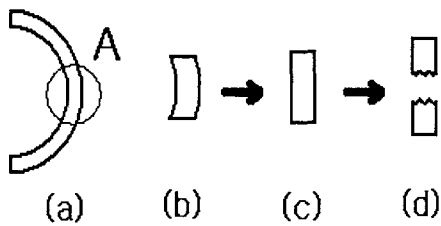


Fig. 15 Process of deformation at elongated section of transverse specimen

Fig. 12의 원주방향 잔류응력이 인장강도에 영향을 주었어야 하는데 그렇지 못한 이유는 실험 과정에서 인장응력 이외에 다른 응력이 작용되었기 때문이라 생각된다. Fig. 15에서 (a)는 원주방향 시험편을 나타내는 것으로써 이 중 연신부에 해당하는 A부분이 시험과정동안 변화하는 모습을 오른쪽에 나타내었다. 우선 펼침가공을 한 시험편은 펼침에 의해 (c)까지 변형된 상태에서 인장시험에 사용되며 펼침가공을 하지 않은 링형 시험편은 (b)상태에서 인장시험에 사용되게 된다. 하지만 링형 시험편은 인장시험시 굽힘응력이 작용하여 (c)의 과정을 거쳐서 파단에 이르게 되므로 펼침가공을 통해 발생하는 잔류응력과 동일한 형태의 응력이 시험 중 가해지게 된다. 따라서 펼침가공에 의한 굽힘응력과 시험중의 굽힘응력이 같으므로 펼침가공의 영향을 알아볼 수 없게 되는 것이다. 따라서 굽힘응력의 영향을 받지않

도록 고려한 인장 시험을 통해 펼침가공의 영향에 대한 검증이 필요하다.

5. 결론

핵연료 피복관인 Zircaloy-2, Zircaloy-4, Zirlo를 대상으로 굽힘 잔류응력과 시험편 방향에 따라서 각각 4종류의 미소 인장시험편을 제작하고 인장 시험 및 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피복재의 인장강도는 Zircaloy-2가 가장 높았고 Zirlo, Zircaloy-4의 순이었으며, 모두 강도 기준을 만족하였다.

(2) 수치해석결과 펼침가공을 통해 발생하는 잔류응력의 원주방향 성분이 길이방향 성분보다 컸다. 하지만 실험에서는 펼침가공을 하지 않은 경우도 원주방향 성분이 발생하므로 길이방향 성분에 의한 영향만을 확인할 수 있었다.

(3) 펼침가공의 원주방향시험편에 대한 영향을 알아보기 위해서는 굽힘응력을 받지 않는 형태의 인장시험을 추가로 수행해야 한다.

참고문헌

- (1) Yi, Jae-Kyung and Lee, Byong-Whi, 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.
- (2) Kuroda, Masatoshi and etc., 2001, "Analysis of the Fracture Behavior of Hydrided Fuel Cladding by Fracture Mechanics," *Nuclear Eng. and Design*, Vol. 203, pp. 183~194.
- (3) Lemoine, Francette, 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.
- (4) 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.
- (5) ASTM E8, 1995, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," pp. 56~136.
- (6) 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.

(7) 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.