

Zircaloy-4 핵연료 피복관의 신파괴인성 시험법

오동준* · 안상복* · 홍권표*
(2002년 11월 27일 접수, 2003년 3월 10일 심사완료)

New Fracture Toughness Test Method of Zircaloy-4 Nuclear Fuel Cladding

Dong Joon Oh, Sang Bok Ahn, and Kwon Pyo Hong

Key Words: Nuclear Fuel Cladding(핵연료 피복관), KAERI Embedded Charpy(KEC) Specimen (KAERI 삽입 샤르피형 시편), Zircaloy-4 Alloy(지르카로이-4 합금), IMEF(Irradiated Material Examination Facility, 조사재시험시설)

Abstract

To define the causes of cladding degradation which can take place during the operation of nuclear power plants, it is required to develop the new fracture toughness test of spent fuel cladding. The fracture toughness of Zircaloy-4 cladding was estimated using the recently developed KAERI embedded Charpy (KEC) specimen. Axially notched KEC specimens cut directly from unirradiated fuel claddings, were tested in a way similar to the standard toughness test method of a Single Edge Bending (SEB) specimen. The results of KEC fracture toughness test at room temperatures were discussed and compared with those of the previous other studies. In conclusions, even though the KEC fracture toughness test of nuclear fuel claddings was easier and more reliable than those developed earlier, the results from the cladding fracture tests were not the material characteristics but the specific fracture parameters which were deeply related to the specification of claddings. In addition, the phenomenon of a thickness yielding was not observed from the fracture surface. It was closely related to the fact that the plane strain condition of the KEC specimen was changed to the plane stress condition during crack advancing. It was also supported by the fractographic evidence that the formation of ductile dimples at the crack initiation became the similar appearance such as a quasi-cleavage after the sufficient crack advancing.

1. 서론

1990년대 초반부터 원자력발전소의 경제성 향상을 위하여 핵연료 연소도를 증가시키기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그 일환으로 핵연료의 연소량을 증가시키기 위한 장주기/고연소 운전, 열효율을 향상시키기 위한 고온 가동운전과

발전소 1차 계통의 방사선 준위를 감소시키기 위한 고산도(PH)운전 등으로 인하여 핵연료를 감싸고 지탱하며 보호해주는 피복관(cladding)의 운전 조건은 더욱 가혹해지고 있다.

핵연료 피복관은 예전에 사용되던 스테인레스강 대신에 현재는 중성자 흡수 면적이 작고 탁월한 내식성 및 우수한 기계적 성질로 인하여 Zr합금을 주로 사용하고 있다. 하지만 이런 Zr합금으로 된 핵연료 피복관에 대한 기계적 성질에 대한 연구는 동종의 Zr합금 압력관이나 칼란드리아관과 같이 아직까지 충분히 이루어지지 않은 실정이다. 또한 현재까지는 핵연료 피복관 재료를 평판화시킨 후에 가공한 소형 시험편을 이용한 기

* 책임저자, 회원, 안동대학교

E-mail : djoh@andong.ac.kr

TEL : (054)820-6016 FAX : (054)823-1766

* 한국원자력연구소 조사재시험시설(IMEF)

계적 시험만이 주로 행해져왔다. 하지만, 핵연료 피복관은 매우 얇은 두께와 작은 직경의 실린더형 구조적 형상으로 인해 핵연료 피복관 재료의 평판화 과정에 따른 미시조직의 집합도나 잔류응력의 변화를 받게 된다. 이로 인하여 지금까지 사용 되어왔던 평판화된 핵연료 피복관 재료를 이용하여 예측되어진 재료의 기계적 특성이 원래 얇은 관형의 핵연료 피복관 재료의 물성치로 간주하기에는 많은 문제점을 내포하게 될 수 밖에 없다. 따라서, 이런 핵연료 피복관의 설계 및 안전성 수명평가 등을 위해서는 피복관 본래의 형상을 유지한 Zr합금 시험편을 사용하는 새로운 재료 파괴시험 개발의 필요성이 점차 증가하고 있는 실정이다.⁽¹⁾

본 연구에서는 원자력 발전소의 안전성 및 수명 평가에 필수적인 핵연료 피복관의 기계적 및 구조적 파괴 특성을 정확히 규명하기 위하여 고안된 소형시험편을 이용하여 한국원자력연구소 조사재 시험시설(Irradiated Material Examination Facility, IMEF) 안에서 파괴인성 시험을 쉽게 수행할 수 있게 새로이 파괴인성 시험법을 개발하게 되었다. 새로이 개발된 시험법에 의한 파괴인성 시험결과를 기존 다른 Zr합금 재료의 파괴인성 결과와 비교 검토하여 시험의 타당성을 확인하였으며, 또한 Zircaloy-4 핵연료피복관의 정확한 파괴거동을 규명하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구를 위하여 WH(Westinghouse) 16×16 핵연료집합체에 사용되는 외경이 9.5 mm, 두께 0.57 mm인 Zircaloy-4 비조사재 핵연료 피복관 재료를 사용하였다. Zircaloy-4의 조성과 횡방향 인장 특성은 Table 1과 2와 같다.⁽²⁾

지금까지 다른 연구자에 의해 제안된 핵연료 피복관의 파괴인성 시험편은 Grigoriev⁽³⁾에 의한 편하중(PL) 형과 Edsinger⁽⁴⁾의 Vallecitos Embedded Charpy(VEC) 형으로 구분할 수 있다. 그러나 Grigoriev의 시험편은 조사재 시험을 하는 핫셀(hot cell) 내에서 시험편의 지그 고정, 시험편 양면에서 진전되는 두 개의 균열의 차이, 그리고 피로 예비균열의 부재로 인한 파괴인성치의 증가 등의 제반 문제점을 포함하고 있다. 반면에 VEC 시험

편은 Grigoriev시험편의 단점을 보완하고 형상이 비교적 간단하여 핫셀에서 쉽게 제작하여 시험을 행할 수 있으나, 시험편을 고정시키기 위한 자켓(jacket)의 사용으로 인한 하중선과 지그(jig)의 기준선의 일치가 어렵다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이런 단점을 보완하기 위하여 시험편을 고정시키는 자켓 대신에 지그의 양단에 나사부위를 가공하여 시험편을 고정하도록 개선한 KAERI Embedded Charpy(KEC) 시험편을 사용하였다.

KEC 시험편은 한 개의 균열진전면을 얻기 위해 피복관의 한 쪽 부분을 제거한 VEC시험편과 유사한 형태로써, 본래의 핵연료 피복관을 축방향으로 10 mm 길이로 절단한 후에 초기 균열비(a/W)가 0.4가 되게끔 V-노치(30°)를 와이어 커팅으로 가공하였다. Fig. 1은 KEC시험편의 외관과 V-노치 형상을 보여주고 있다.

KEC 시험편의 지그는 ASTM E1820-99 규격의 SEB(single edge bend) 시험편에서 제시한 기준에 의해 폭(W)은 10 mm, 스패(S)은 40 mm, 그리고 전체 길이는 55 mm로 결정하였다. 지그의 재질은 인코넬을 사용하였으며, 시험편이 삽입되는 부분은 와이어커팅에 의해 가공되었다. Fig. 2는 마치 한 개의 SEB 시험편을 2등분한 형태의 지그 정중앙에 KEC시험편을 삽입한 후에 나사로 고정시킨 것을 보여주고 있다. 핵연료 피복관의 소형 시험편의 두께는 0.57 mm 밖에 되지 않으므로, 작은 외력에도 쉽게 소성변형의 가능성이 있으므로, 미세한 외력에 의한 변형이 생기지 않도록 세심한 주의를 해야 한다.

Table 1 Compositions of Zircaloy-4 (wt. %)

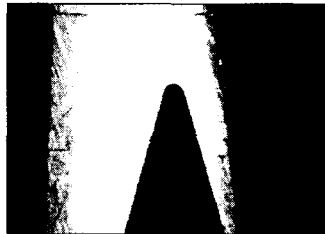
Sn	Fe	Cr	N	O	Zr
1.3	0.22	0.10	0.01	0.13	balance

Table 2 Transverse Tensile Properties of Zircaloy-4

YS (MPa)	UTS (MPa)	ϵ_{total} (%)	Poisson's ratio, ν
705.5	785.5	16.8	0.33



(a) Appearance of KEC cladding specimen



(b) V-notch shape of KEC specimen

Fig. 1 KEC cladding specimen

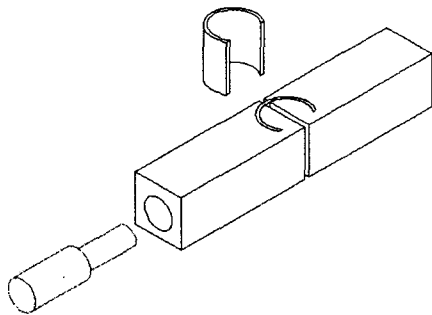


Fig. 2 Jig assembly of KEC specimen

2.2 파괴인성 시험 방법

2.2.1 예비 피로 균열

KEC 파괴인성 시험의 재현성을 보장하기 위해서는 초기 균열발생 시의 균열선단의 균일한 응

력분포가 중요한 변수로 작용한다. 따라서 이런 실험 부정확성을 줄이기 위해서는 기계적 가공에 의한 노치 선단의 잔류응력이나 소성역의 영향을 제거할 수 있는 예비 피로균열(pre-fatigue crack)을 준비해야 한다. 이런 균일한 예비피로균열을 얻기 위하여 KEC시험편에 대칭인 4점굽힘 응력 상태의 반복하중을 가하였다.

피로균열 선단의 균일화 정도가 10% 이내 일 때에 시험이 유효하다는 기존의 연구 결과에 따라서 파괴인성 시험 후에 육안 파단면 검사에 의해 10% 이상의 예비 피로균열의 불균일성을 보이는 시험결과는 배제하였다.⁽⁵⁾

초기 균열비 0.4에서 예비피로균열을 만들어 균열비 0.5가 되게끔 하였으며, ΔK 감소법에 의해 하중을 제어하였다.

2.2.2 복수 시험편을 이용한 파괴인성시험

핵연료 피복관의 파괴인성 시험을 위해서는 우선적으로 복수 시험편을 이용한 순간 중단 3점굽힘 파괴인성 시험(interrupted 3-point bending fracture toughness test)을 ASTM E1820-99에 준하여 시행하였다. Fig. 3은 3점굽힘 하중에 의해 시험편에 하중이 작용하도록 지그와 시험편을 정렬시킨 것을 보여주고 있다. KEC 시험편의 제한된 제원으로 인하여 하중점 위치의 정확도는 일반적인 SEB시험편보다도 더욱 중요하다. 하중작용점의 정렬이 본 시험의 유효성을 좌우하는 중요한 인자 중에 하나이다. 따라서 하중작용점의 정렬을 위해 이동현미경(travelling microscope)이 사용되었다. 시험이 끝난 후에는 시험편과 지그, 그리고 시험기에 의한 컴플라이언스를 보정하기 위하여 모의시험편에 의한 하중-하중선변위 곡선의 초기 기울기에 대한 컴플라이언스 보정을 수행하였다.⁽⁶⁾

시험이 끝난 후에는 300℃에서 약30분간 파단면에 가열 착색(heat tinting)을 행하였으며, 다시 액화질소에서 -196℃로 냉각한 후에 취성파단시켰다. 파단면으로부터 피로균열의 길이와 파괴인성시험에 의해 진전된 균열 길이를 금속현미경을 통해 9점 평균법에 의해 직접 측정하였다. 파단면의 외형은 저배율 현미경(stereoscope)을 이용하여 촬영하였으며, 또한 고배율의 전자현미경(SEM)에 의해 국부적인 파괴기구의 특징을 관찰하였다.

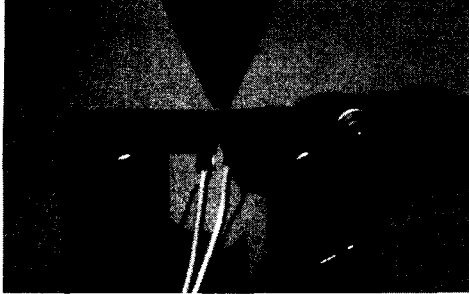


Fig. 3 Alignment of KEC Specimen

복수 시험편을 이용한 파괴인성 시험 결과는 유럽파괴연구단(EGF: European Group on Fracture)이 제안한 해석을 이용하였다.⁽⁷⁾ 이 방식은 하중-하중선변위 곡선의 아래면적에 해당하는 일 에너지(U)를 탄성 부분과 소성 부분으로 구분할 필요가 없으며, 단지 균열 진전량에 따라 다음과 같이 구분하여 구한다.

우선, 균열길이가 $0.06(W-a_0)$ 이하일 경우에는 식 (1)에 의해 J_0 를 구한다.

$$J_0 = \eta U / B(W - a_0) \quad (1)$$

여기서 SEB 시험편의 경우에는 $n=2$ 이고, U 는 하중-하중선 변위 선도가 끝난 점까지의 하단부 면적이다. B 는 KEC 시험편 두께이며, W 는 폭을 그리고 a_0 는 초기의 균열길이를 의미한다. 따라서 본 연구의 B 는 0.57 mm 이고 W 는 10 mm 이다. 본 시험에 사용한 시험편은 두께 방향의 구속조건이 표준시험편보다 많이 완화된 상태이므로 SEB 시험편에 적용한 $n=2$ 를 사용하는 대신에 KEC 시험편의 형상과 같은 GE의 VEC 시험편에 의해 구한 n 값인 1.55를 적용한다.

균열이 진전하여 길이가 $a_i > 0.06(W-a_0)$ 일 경우에는 식 (1) 대신에 식 (2)를 적용한다.

$$J = J_0 (1 - (0.75\eta - 1)\Delta a / (W - a_0)) \quad (2)$$

여기서, J_0 는 식 (1)에 의해 얻어지며 Δa 는 진전한 균열성장량으로서, 시험이 끝났을 때 측정된 각각의 실제 파단 균열길이를 의미한다. 균열성장량에 따른 균열 성장 한계의 계산은 본 시험편의 제한적 제원으로 인해 가능하지 않으므로, 균열의 길이가 0.15 mm일 때와 1.5 mm인 점

에서 둔화직선(blunting line)과 기울기가 같은 직선으로 배제직선(exclusive line)을 대체한다. 이 배제직선 사이에는 최소한 4개 이상의 시험 결과가 등간격으로 존재해야 한다.

2.2.3 DCPD 이용한 단수 시험편 파괴인성시험

원자력 발전소에서만 얻을 수 있는 귀한 조사재로 복수시험편 파괴인성 시험을 한다는 것은 비효율적이다. 이런 이유로 인해 DCPD(DC potential drop)를 응용하여 균열의 길이를 연속적으로 추정할 수 있는 단수시험편 파괴인성 시험법의 개발이 궁극적인 목적이라 할 수 있다. 단수시험편을 이용한 파괴인성 시험을 위해서 예비 파괴균열이 있는 KEC 시험편에 전압차를 측정하기 위한 DCPD 단자를 스폿용접 (spot welding)에 의해 부착시킨다.

시험에서 얻은 DCPD 값으로부터 Johnson⁽⁸⁾의 식을 이용하여 직접 균열길이를 계산할 수 있으나, 실제의 시험편 경우에는 균열이 진전함에 따라 오차가 증가하는 경향이 있다. 따라서 본 실험에서는 DCPD와 균열비(a/W) 선도를 사용하여 균열진전량을 예측하였으며, 시험이 끝난 시험편의 파단면에서 9점 평균길이 측정방법에 의해 실측한 최초의 균열길이 a_0 와 총 균열 길이, Δa 를 이용하여 시험 동안의 균열 길이를 보정하였다. DCPD시험법의 다른 과정은 기존에 사용하였던 방법과 유사한 방법을 사용하였다.⁽⁹⁾ 시험이 끝난 시험편은 복수시험편과 동일한 방법으로 파단면 검사를 행하였다.

J 값은 시험 데이터로부터 하중, 하중선 변위, 그리고 그때의 DCPD값을 이용하여 ASTM E1820-99의 식 (3)에 의해 계산한다.

$$J_{(i)} = (K_{(i)})^2 (1 - \nu^2) / E + J_{pl(i)} \quad (3)$$

여기서 $K_{(i)}$ 는 ASTM E399에 의하여 다음 식 (4)에서 구할 수 있다.

$$K_{(i)} = [P_i S / (BW^3)] f(a_i/W) \quad (4)$$

이때, $f(a_i/W)$ 는 다음 식 (5)에 의해 주어진다.

$$f(a_i/W) = 3(a_i/W)^{1.2} [1.99 - (a_i/W)(1 - a_i/W)(2.15 - 3.93(a_i/W) + 2.7(a_i/W)^2) / [2(1 + 2a_i/W)(1 - a_i/W)^{3.2}]] \quad (5)$$

또한 $J_{pl(i)} = [J_{pl(i-1)} + (n_i/b_i)(A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)})/B] \times [1 - \gamma_i(a_i - a_{(i-1)})/b_i] \quad (6)$

이다. 여기서 본 시험의 경우에는 $n_i=1.55$ 이고 $\gamma_i=1.0$ 이다.

상기 식에서 $A_{pl(i)}-A_{pl(i-1)}$ 은 하중-하중선 변위 곡선의 아래 면적의 증가분에 해당한다. 이것은 하중-하중선 변위곡선에서 직접 구할 수 있을 뿐 아니라, 다음 식 (7)에 의해 구할 수 있다.

$$A_{pl(i)}=A_{pl(i-1)}+[P_i+P_{i-1}][\delta_{pl(i)}-\delta_{pl(i-1)}]/2 \quad (7)$$

여기서

$$\delta_{pl(i)}=\text{하중선 변위의 소성 부분}=\delta_{i-1}(P_i C_{iLL}) \quad (8)$$

이때, C_{iLL} 은 $\delta_{pl(i)}$ 에 해당하는 컴플라이언스로서,

$$C_{iLL}=(1/EB)[S/(W-a_i)]^2 \times [1.193-1.98(a_i/W)+4.478(a_i/W)^2-4.443(a_i/W)^3+1.739(a_i/W)^4] \quad (9)$$

로 구할 수 있다.

3. 시험 결과 및 논의

3.1 복수시험편 파괴인성 시험 결과와 논의

복수시험편을 이용한 파괴인성시험은 정확한 균열 길이에 따른 객관적인 파괴인성거동을 파악할 수 있다는 장점이 있는 반면에 여러 개의 시험편의 사용에 따라 시험편의 재료특성이 균일하지 않을 경우나 시험기의 컴플라이언스 등이 변동될 경우에는 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 하지만 현재까지의 피복관 파괴인성에 관한 연구는 단수 시험편에 의한 파괴인성 시험법의 난제들을 모두 해결하지 못했기 때문에 아직까지 복수시험편을 이용한 최대하중에서의 파괴인성값의 비교에 의해 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 본 실험의 타당성을 확인하기 위하여 본 시험결과와 다른 기존의 연구결과와 비교 작업을 행하였다. 우선적으로 최대하중에서의 파괴인성값의 비교와 연성파괴의 양상을 보이는 Zircaloy-4 피복관의 J-R 곡선 특성을 고찰하였다.

Fig. 4는 복수 KEC 시험편에 의한 3점굽힘 파괴인성 시험을 하여 얻은 하중-하중변위 데이터 중에서 최대 하중점에 상응하는 파괴인성치 (K_{ML})의 분포를 보여주고 있다. 이 값들은 시험을 끝내는 시점에 따라 얻어지는 균열길이와는 무관하고 또한 균열이 시작되는 점으로 간주할 수 있

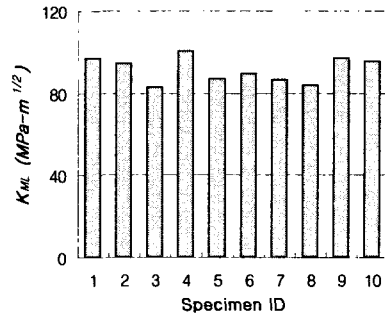


Fig. 4 K_{ML} of Zircaloy-4 Cladding

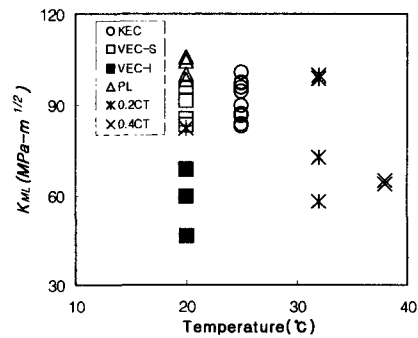


Fig. 5 K_{ML} Comparison of Different Test Methods at Room Temperature

음에 따라 다른 연구결과와의 비교가 가능하다는 장점이 있다. 본 시험에 의하면 Zircaloy-4 핵연료 피복관의 K_{ML} 값은 주로 82~100 MPa√m 사이로 평균값은 약 91.5 MPa√m 이었다.

Fig. 5에서는 상온의 기존 다른 시험결과와 본 시험결과인 K_{ML} 값을 비교하였다. KEC시험편에 의한 결과는 ○에 의해 표시되었으며, 미국의 GE에 의한 VEC시험편의 결과는 □과 ■으로 표시되었다.⁽⁴⁾ 여기서 □은 본시험과 같이 하중속도가 느린 경우(0.1mm/min)이고 ■은 충격시험에 의해 얻은 K_{ML} 값이다. 또한 △는 Grigoriev의 핀하중(pin-loading, PL) 시험편의 결과⁽³⁾를 의미하며, *⁽⁴⁾과 x⁽⁴⁾는 각각 평판화 시켜 만든 CT 시험편의 결과이다. 여기서 사용된 재료는 0.4CT 시험편의 경우는 Zircaloy-4이지만 PL시험편, VEC 시험편과 0.2CT 시험편의 결과는 Zircaloy-2의 결과이다. 물론 재료의 특성면에서는 약간의 차이

를 보이거나 상온에서의 파괴 거동은 매우 흡사하므로 Fig. 5에서 같이 비교하여 표시할 수 있었다.

KEC시험편의 결과가 PL시험편의 결과보다는 약간 작으나 대체적으로 PL시험편과 VEC시험편의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. PL 시험편의 결과가 VEC시험편의 결과보다 약간 높은 것은 PL시험편의 예비피로균열의 부재로 인한 균열 발생 초기의 노치둔화 효과와 시험형상에 의한 영향으로 인한 파괴인성치의 증가가 주원인으로 여겨진다. 또한 VEC시험의 결과에 의하면 시험 속도에 따라 파괴인성결과가 달라지는 것을 알 수 있다. 충격에 의한 동적 파괴인성치가 약 60 MPa√m 전후였던 것에 비해 정적 파괴인성치는 약 90MPa√m 전후였다. 이것은 본 시험의 평균치인 91.5 MPa√m의 근사치였다. 본 시험 결과는 기존의 다른 여러 시험 결과가 서로 매우 분산되어 있는 것에 비해 좋은 정밀도를 보여주고 있으며, 이때 발생한 약간의 분산은 시험 중 시험편이 받는 하중속도의 예민성, 또는 기계 장치에서 오는 컴플라이언스의 차이로 인한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 복수 시험편에 의한 파괴인성 시험의 J - R 곡선으로 10개의 시험결과 중에 유효영역인 0.15mm와 1.5mm 오프셋 직선사이에서 8개의 유효한 결과를 얻었다. 이 J - R 곡선 결과와 비교할 수 있는 기존의 Zr합금 피복관에 대한 연구 보고서나 시험결과가 없으므로 본 결과는 피복관과 다른 형상의 구조물인 압력관의 Zr-합금 재료와의 파괴인성 거동과 비교하였다.

Fig. 6에서 Zircaloy-4 피복관의 결과는 ●으로 표시하였으며, Zr-2.5Nb 압력관의 파괴인성 결과는 ○으로 표기하였다.⁽¹⁾ J - R 곡선의 비교에서 쉽게 알 수 있듯이 Zircaloy-4 피복관의 파괴인성은 Zr-2.5Nb 압력관의 파괴인성에 비해 매우 작은 것을 쉽게 알 수 있다. 압력관에서 사용되는 Zr-2.5Nb 재료는 기존의 Zircaloy-4 재료가 수소의 흡수율이 크다는 단점을 보완하기 위하여 대체된 재료로써, 상온에서 수소를 흡수하지 않은 경우의 파괴인성은 거의 비슷하다. 그러나 Fig. 6의 결과비교에서 쉽게 알 수 있듯이, Zircaloy-4와 Zr-2.5Nb의 J - R 곡선의 큰 차이가 의미하는 것은 이 때 얻어지는 파괴인성은 그 재료 자체의 물성

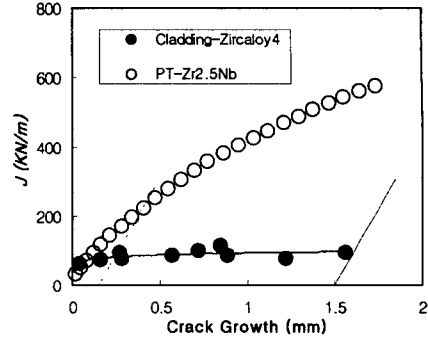


Fig. 6 J - R Curves Comparison of Zr-alloy

치가 아니며, 시험편의 형상에 의존적이라는 사실을 암시한다. 즉, KEC나 VEC 또는 PL과 같은 피복관 형상을 유지한 시험편의 파괴인성 시험결과는 자체 재료의 고유 물성치가 아닌 피복관 형상에 의해 영향을 받을 수 있는 피복관의 파괴인성 특성치라는 것을 알 수 있다. 이와같은 이유로 본 연구에서는 K_{IC} 나 J_{IC} 와 같은 재료의 물성 파괴인성치를 따로 구하지 않고, 피복관의 파괴 거동 특성만을 파악하기 위한 J - R 곡선 비교를 행하였다.

3.2 DCPD 파괴인성 시험 결과와 논의

본 연구에서는 복수시험편에 의한 파괴인성 시험편의 단점을 극복할 수 있는 단수 시험편에 의한 파괴인성 시험을 DCPD 균열 측정법을 이용하여 수행하였다. Fig. 7은 균열비(a/W)와 전압강하비(V/V_0)의 비례관계를 보여주고 있다. 균열비가 약 0.65이하에서는 좋은 선형관계를 보여주는 것을 알 수 있다. 따라서 피복관의 단수시험편에 의한 파괴인성 시험에서는 균열길이가 약 1.5 mm까지 전파할 때까지는 DCPD에 의한 균열 진전량의 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 하중과 하중점변위와 전압변화량과의 관계를 나타내는 곡선이다. 하중점 변위가 증가함에 따라 어느 점까지 일정하게 증가하다가 최대점을 지난 후에는 감소하는 기계적 특성을 잘 나타내고 있다. 반면에 전압변화량은 최대하중점까지는 변화가 극히 적었으나 최대점을 통과함에 따라 전압변화량이 급히 변화하는 것을 알 수 있다. 이 곡선 역시 DCPD에 의한 균열진전량의 추정이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

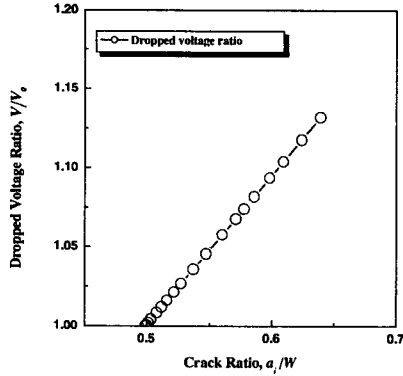


Fig. 7 Crack Ratio(a/W) and Dropped Voltage Ratio(V/V_0) of DCPD Method

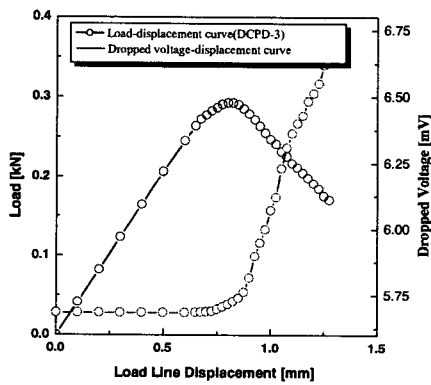


Fig. 8 Load-Displacement and Dropped Voltage Curve of DCPD Method

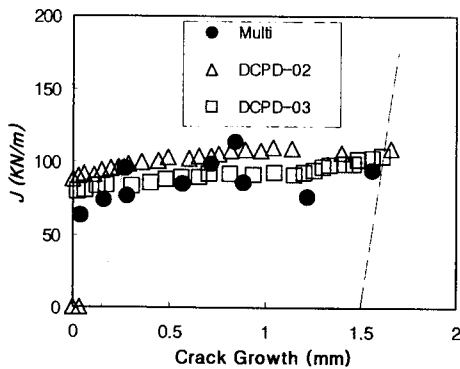


Fig. 9 J - R Curves Comparison between Multiple Specimen Method and Single Specimen Method Using DCPD

Fig. 9는 복수시험편법에 의해 얻은 J - R 곡선과 DCPD를 응용한 단수 시험편법의 J - R 곡선을 비교한 것이다. DCPD를 이용한 단수시험편법에 의한 파괴인성저항곡선은 초기에는 균열면의 접촉에 의해서 균열진전의 관측이 쉽지 않으므로 복수시험편에 의한 파괴인성저항곡선보다 다소 높은 저항의 경향을 나타낸다. 하지만 일정길이만큼 균열이 전파함에 따라 두 시험법에 의한 결과는 좋은 일치를 보여주었다. 각기 다른 두 시험법에 의해 구한 결과가 잘 일치한다는 사실은 두 시험법의 객관적 타당성을 보여주는 좋은 증거라 할 수 있다.

3.3 파단면 검사

Fig. 6과 9에서 알 수 있듯이 상대적으로 매우 작은 Zircaloy-4 피복관의 파괴인성으로 인하여 Zircaloy-4 피복관의 파괴기구가 연성파괴 거동이 아닌 취성파괴가 아닌가 하는 의심이 생기게 된다. 따라서 본 절에서는 이런 파괴기구를 규명하기 위하여 저배율 현미경(stereoscope)과 고배율 SEM (scanning electronic microscope)을 이용하여 파단면 검사를 행하였다.

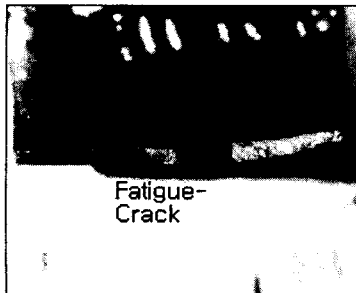
Fig. 10은 저배율의 스테레오스코프에 의해 Zircaloy-4 피복관의 KEC시험편 파단면을 촬영한 사진들이다. 시험이 완료된 후에 300°C에서 30분간 가열착색을 하였기 때문에 균열이 진전한 부분이 더욱 어두운 색으로 보이고 있다. 사진의 왼쪽으로부터 초기에는 균열비(a/W) 0.4까지 기계적노치 가공을 한 가장 진한 면이 보이며, 그 후에는 균열비 0.5까지 균일한 예비피로균열이 보인다. 그 후에 파괴인성 시험에 의한 균열이 진전된 것을 확인할 수 있으며, 나머지 밝은 부분은 액화질소 속에서 -196°C에서 취성파단시킨 면이다.

파괴인성 시험에 의해 진전된 정상적인 균열부위는 일반적인 Zr 합금의 연성 파괴 시에 관찰되는 특징 중의 하나인 두께항복(thickness yielding) 현상에 의한 시험편 두께의 국부적인 변화가 거의 일어나지 않은 것을 알 수 있다. 두께항복 현상이 발생하지 않은 것은 Fig. 11(a)의 SEM사진에서 다시 확인할 수 있다. 처음 균열이 발생한 점에서의 시험편의 두께와 최종 시험이 정지된 점에서의 두께 변화가 거의 발생하지 않은 것을 쉽게 알 수 있다. 단지 이런 두께항복 현상이 발

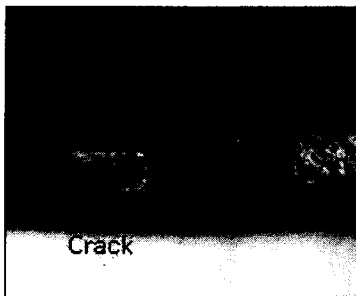
생하지 않았다 하여 취성파괴로 간주할 수는 없기 때문에 다시 고배율로 각각 다른 부위에 대한 SEM관찰을 하였다.

Fig. 11(b)와 (c)는 각각 피로균열선단과 파괴균열이 충분히 진전한 중앙부위에서 촬영한 사진이다. 여기서 알 수 있듯이 피로균열 선단에서는 처음에 스트래치존(stretch zone, SZ)이 형성되었다가 연성 파괴의 파단면의 특징인 덤플(dimple)이 잘 형성된 것을 알 수 있다. 그러다가 균열이 충분히 진전된 부위에서는 덤플의 형상과 함께 마치 의사벽개(quasi-cleavage)와 같은 형상이 공존하는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 Fig. 6과 9에서 균열 초기에는 강한 파괴 저항을 의미하는 급격한 J - R 곡선의 상승을 보이지만, 균열이 어느 일정한 양만큼 진전한 후에는 작은 에너지에 의해 균열이 진전할 수 있는 완만한 기울기의 J - R 파괴 거동을 보이는 것과 연관성이 있다.

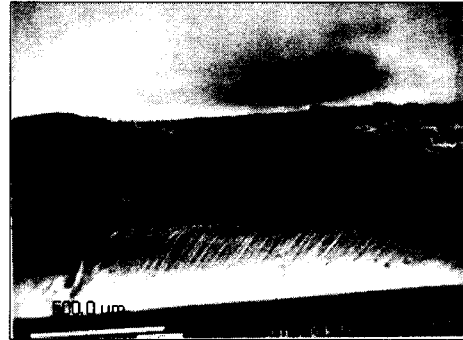


(a) Fracture Surface of KEC Specimen by Stereoscope ($\times 5$)

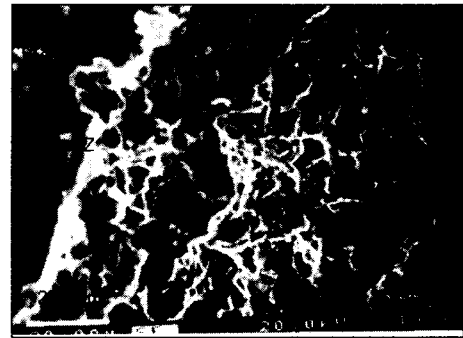


(b) Uniform Pre-Fatigue Crack and Stable Crack Growth ($\times 12.5$)

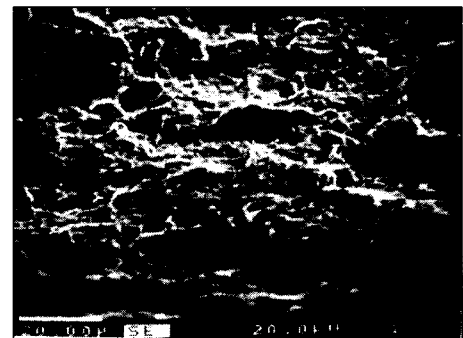
Fig. 10 Fracture Surface at Low Magnification



(a) No-Thickness Yielding at Fracture Surface of KEC Specimen



(b) Dimple Formation at the Close Area of Pre-Fatigue Crack



(c) Similar Quasi-Cleavage at the Middle Part of Stable Crack Growth

Fig. 11 Fracture Surfaces of KEC Specimen by SEM

즉, 초기에는 피로균열 선단의 둔화(blunting)와 완전한 덩플이 형성되기 위하여 많은 에너지를 필요로 한다. 하지만 점차적으로 균열이 진전하면서 완전한 덩플 형상의 감소와 더불어 의사벽개와 같은 파괴기구 거동이 관찰된다는 것은, 일단 균열이 시작된 후에는 균열 발생 초기보다 작은 에너지의 증가에 의해서도 균열이 급격히 진전하게 된다는 것을 의미한다.

또한, 이러한 현상은 초기에는 두께가 얇더라도 예리한 피로 균열선단에서는 3축응력에 의한 평면변형률(plane strain) 조건하에서 연성파괴에 의한 덩플의 형성이 활발하다가, 균열이 점차적으로 진전함에 따라 두께 방향의 변형률 상태가 소멸된 평면응력(plane stress) 조건으로 천이되는 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 여겨진다. 이러한 균열선단의 응력 상태 변화가 연성파괴임에도 불구하고 두께 항복현상이 발생하지 않은 사실과 깊은 관련성이 있다.

4. 결 론

Zircaloy-4 피복관 형상을 유지한 KEC 시험편을 사용하는 두 가지 파괴인성시험법을 개발하였으며, 이 방법에 의해 상온에서 파괴인성 시험을 행하여 다음과 같은 사실을 규명하였다.

(1) 복수 KEC 시험편을 이용한 핵연료 피복관 파괴인성 시험은 기존의 어떤 피복관 파괴인성 시험보다 쉽고 시험 결과를 신뢰할 수 있으며, 그 때 얻어지는 결과는 재료의 물성치가 아닌 핵연료 피복관의 시험편 형상에 의한 파괴인성 특성치이다.

(2) 단수 KEC 시험편을 이용한 DCPD 파괴인성 시험의 $J-R$ 곡선결과는 복수 시험편을 이용한 파괴인성 시험의 $J-R$ 곡선 결과와 좋은 일치를 보였으며, 이 결과로부터 두 시험의 객관적 유효성을 확인하였다.

(3) 핵연료 피복관의 KEC 시험편 파단면검사를 통하여 균열 발생 시에는 평면변형률인 균열 선단에서의 3축 응력상태로 인한 덩플이 주된 파괴기구이었으나, 균열이 성장함에 따라 평면응력에 의한 의사벽개(quasi cleavage)의 파괴기구도 공존함을 확인하였다. 이러한 특징은 핵연료 피복관의 두께항복(thickness yielding) 현상이 발생하지 않은 것과 깊은 연관성이 있다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소 자체연구개발사업의 “사용후 핵연료 피복관의 횡방향 인장 및 파괴인성 시험기술 개발” 과제의 일환으로 수행된 것입니다. KAERI 관련자 및 IMEF 종사자 여러분의 도움에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, Y.S., Ahn, S.B., and Kim, J.K., 2001, "The Strength and Fracture Behavior Characteristics of Irradiated Zr-2.5Nb CANDU Pressure Tube Materials," *Transaction(A) of Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 510~519.
- (2) Ahn, S.B., 2001, "Development of the Transverse Tensile and Fracture Toughness Test Techniques for Spent Fuel Cladding," *KAERI Research Report KAERI/RR-2156/2000*, KAERI, pp. 91~109.
- (3) Grigoriev, V. and Josefsson, B., 1996, "Fracture Toughness of Zircaloy Cladding Tubes," *Zirconium in the Nuclear Industry: 11th International Symposium*, ASTM STP 1295, pp. 431~447.
- (4) Edsinger, K., Davies, J.H. and Adamson, R.B., 2000, "Degraded Fuel Cladding Fractography and Fracture Behavior," *Zirconium in the Nuclear Industry: 12th International Symposium*, ASTM STP 1354, pp. 316~339.
- (5) Oh, D.J., Ahn, S.B. and Kim, Y.S., 2001, "Validation of CCT Fracture Toughness Test with Non-uniformed Pre-fatigue Crack," *Journal of Korean Institute of Metal and Materials*, Vol. 39, No. 1, pp. 27~33.
- (6) Buzzard, R.J. Gross, B. and Srawley, J.E., 1978, "Load-Displacement Measurement and Work Determination in Three-Point Bend Tests of Notched or Precracked Specimens," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 6, No. 1, pp. 35~39.
- (7) European Group on Fracture, 1990, "EGF Recommendations for Determining the Fracture Resistance of Ductile Materials," *EGF P1-90*, pp.

- 9~28.
- (8) Johnson H.H., 1965, "Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth," *Materials Research and Standards*, pp. 442~445.
- (9) Oh, D.J., Ahn, S.B. and Kim, Y.S., 2000, "Fracture Toughness Embrittlement by Hydride in Zr-2.5Nb Pressure Tube," *Proceeding(A) of Korean Society of Mechanical Engineering of 2002 Annual Fall Meeting*, Korea University, pp. 93~98.