'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

불균일 피로크랙의 CCT 파괴인성실험의 유효성에 관한 고찰

Validation of CCT Fracture Toughness Test with Non-uniform Prefatigue Crack

오 동준, 안 상복, 김 도식, 김 성수, 김 영석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구의 목적은 조사재 시험편의 피로크랙의 상태가 표준 실험방법의 기준에 벗어난다는 이유로 귀중한 실험치를 잃는 경우를 막기 위하여, 불균일 피로크랙의 파괴인성거동을 규명하는 것이다. 따라서 CCT 시험편의 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성 실험을 Cold Worked Zr-2.5Nb 압력관을 사용하여, 상온과 250°C 와 300°C 에서 각각 행하였다. 사용된 재료는 공정이 다른 비조사재인 Double-melted 와 Quad-Melted 압력관과 조사된 Quad-Melted 압력관이었다. 그 결과 고온에서는 불균일 피로에 의한 파괴인성치의 영향이 적은 것을 알 수 있었다. 하지만 상온에서는 여러 연성에 영향을 주는 요소에 의해 불균일 피로크랙의 파괴인성치를 신뢰하는데 문제가 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 연성이 낮은 Double-Melted 와 조사재의 경우에는 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성치가 보수성을 띤다는 것을 밝혔다.

Abstract

The aim of this study is to investigate the fracture behaviour of CCT specimen with non-uniformed prefatigue crack to save the invaluable data obtained from the irradiated material due to the lack of the standard limitation. These tests were carried out at RT, 250°C and 300°C and three different materials such as unirradiated double-melted, quad-melted and irradiated Zr-2.5Nb pressure tubes, were used. In conclusion, at 250°C and 300°C *J-R* curves of non-uniformed prefatigue crack shows a good agreement with those of the uniformed prefatigue crack. At room temperature, it shows some difficulties to validate the fracture toughness data obtained from the non-uniform prefatigue crack. However, in the case of low-ductile double-melted and irradiated material at room temperature the fracture toughness from non-uniformed prefatigue crack shows the conservatism.

1. 서론

월성원자력발전로와 같은 가압 중수로형 발전로의 압력관 재료로 cold worked Zr-2.5Nb 합금이 사용되고 있다. 이 중수로 압력관은 핵연료 집합체 및 냉각재인 중수를 지지하는 부품으로, 1 차 계통의 압력경계 부품 중 가장 핵심이 되는 부품이다. 10 년이상 된 월성원자력 발전로의 조사된 압력관의 임계크랙길이에 의한 안전 수명을 좀더 정확히 예측하기 위해서는 조사재 압력관의 파괴인성실험은 필수적인 것이다.

압력관의 파괴인성 실험은 압력관의 제한된 제원 때문에, 일반적으로 표준이 되는 ASTM 표준시험방법에 제시된 시험편 규격을 따르는데 어려움이 있다. 따라서 캐나다의 AECL 에서는 압력관의 곡면을 살린 Curved Compact Tension (CCT) 시험편을 이용하여 ASTM 에서 규정한 파괴인성 실험에 준한 파괴인성실험법을 개발하였다. 이 실험법의 CCT 시험편은 ASTM 의 평면응력조건하에서의 파괴인성시험편의 제약조건을 완전히 만족하지는 않을지라도 일반적인 파괴인성치의 경향을 잘 나타내므로, 압력관의 Burst Test 에 의한 파괴인성 실험과 병행하여 실험실에서의 작은 시험편을 이용한 파괴인성치를 얻기 위해서 주로 이용되고 있다.

한편 안전수명예측 시에 더욱 중요한 의미를 갖는 조사재 실험은 조사재 시험편의 제한성과 희귀성으로 인해 충분한 실험 결과 획득에 많은 어려움이 있다. 또한 조사재의 방사능 문제로 사람이 직접 접촉할 수 없기 때문에 특수한 시설하에서 간접적인 접촉에 의한 실험으로 인해 실험상 많은 애로점을 갖고있다. 이런 이유로 CCT 시험편을 이용한 조사재 파괴인성실험의 전제조건인 피로균열 형상이 균일하지 않을 경우가 빈번히 생기는 사례가 있다. 그러나 이런 귀하고 단가가 비싼 시험편의 실험결과를 단지 크랙선단의 균일성 조건에 적합하지 않다는 이유 하나로 포기하기에는 너무나 비경제적인 것이다.

따라서 본 실험은 불균일 피로크랙을 갖는 CCT 시험편의 파괴인성실험이 균일 피로크랙의 파괴인성실험 결과와 비교 검토하여 어떤 경향을 나타내며, 이런 실험치가 어느 정도의 신뢰성을 갖는가를 판단하는데 그 목적이 있다. 그러기 위해서 상온과 250°C 300 도°C 에서의 Zr-2.5Nb 압력관의 불균일 피로 크랙과 균일 피로크랙을 갖는 CCT 시험편을 이용하여 파괴인성치의 비교와 파단면 검사를 행하여 유효성 여부를 검토하였다.

2. 재료 및 실험 방법

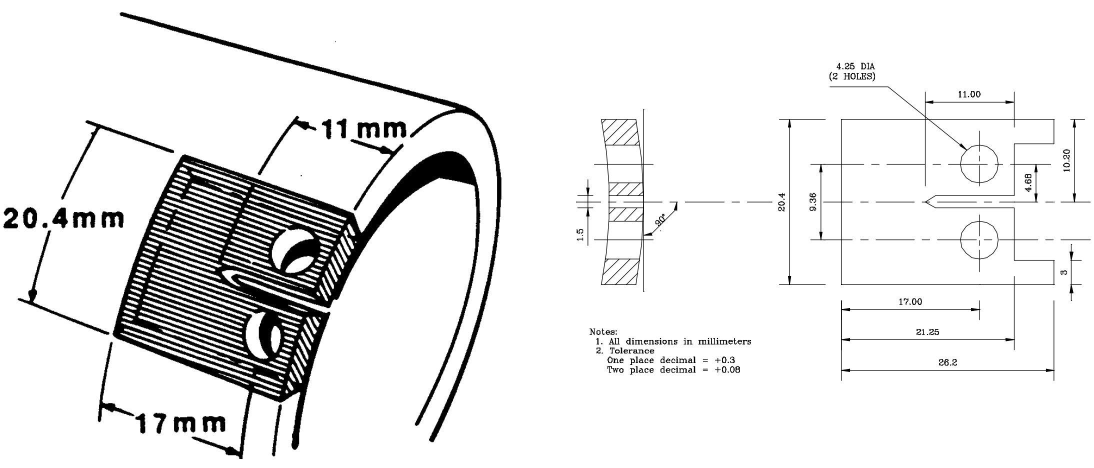
2-1 재료 및 시험편

본 실험은 상온, 250°C 와 300°C 에서의 균일한 피로크랙과 불균일한 피로크랙의 파괴인성치를 비교하기 위해서 준비되었다. 먼저 상온에서는 Double-melted 와 Quad-melted 된 비조사재의 실험과 Quad-melted 의 조사재 실험이 각각 시행되었다. 250°C 와 300°C 에서의 실험

은 Quad-melted 비조사재에 대해서만 행하여졌다. 압력관의 내직경은 103 mm 이며, 두께는 4.2~4.4 mm 이다. Fig. 1(a)는 압력관으로부터 CCT 시험편을 채취하는 방향과 위치를 나타내고 있으며, (b)는 시험편의 치수를 보여주고 있다. CCT 시험편의 크랙 진전방향은 Axial 방향이며, W는 17 mm, 크랙비(a_i/W)는 0.4 이다. Table. 1 은 파괴인성치 계산에 사용될 횡방향의 인장실험 결과를 보여주고 있다.

Table. 1 Zr-2.5Nb 합금의 횡방향 인장실험 결과

조사여부	공정	온도(°C)	Young's Modulus (GPa)	Poisson;s Ratio	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)
비조사재 (Unirradiated)	Double	25	102	0.4	735	811
	Quad	25	94.5	0.4	726.9	799.5
		250	81.6	0.4	544.5	588.7
		300	78.7	0.4	526.7	561.6
조사재 (Irradiated)	Quad	25	102.0	0.4	941.4	985.3



(a) The Collection of CCT Specimen (b) The Geometry of CCT Specimen

Fig. 1 CCT Specimen from Pressure Tube and the Geometry

2-2 실험 장치 및 방법

장치 및 크랙측정방법

사용된 실험장치는 Instron 8501 이며, 조사재 실험은 본 연구소에 있는 IMEF 시설 내에서

행해졌다. 실험시 사용된 Grip 은 Zr-2.5Nb 합금을 사용하여 가공하였으며, DCPD 측정시에 전류의 절연을 위하여 800°C 에서 3 시간 열처리 후에 공랭하여 산화막 처리를 하였다. 피로크랙의 측정은 비조사재의 경우 Visual Method 에 의해 양방향에서 행해졌으며, 조사재의 경우에는 Highscope 를 이용하여 한 방향에서 측정하였다. 파괴인성실험시, 실험동안의 크랙의 측정은 DCPD 방식에 의하여 추정하였으며, 실험이 끝난 후에는 Nine point average method 에 의하여 실제크랙 길이를 측정한 후에 DCPD 의 보정이 이루어졌다.

Fatigue Cracking

파괴인성실험을 위한 균일한 피로크랙을 얻는 것은 신뢰할만한 실험결과를 얻기 위해서 꼭 필요한 전제조건으로 여겨진다. 그러나 폭 17 mm 의 CCT(Curved Compact Tension)시험편을 사용하여 균일한 피로크랙을 얻는 것은 CCT 시험편의 곡면에 의한 Bending 으로 인한 응력분포의 불균일 때문에 보통 사용하는 피로크랙생성 방법으로는 얻기가 어렵다. 일반적인 평활핀을 사용한다면 CCT 시험편의 내벽쪽에 더 많은 응력이 작용하여 안쪽의 피로크랙이 바깥쪽의 크랙보다 더 많이 나가게 된다. 그러나 적당히 테이퍼진 핀을 사용하여 작용하는 응력의 분포를 균일하게 맞출 수 있다면, 만족할 만한 균일한 피로크랙을 얻을 수가 있다. 본 실험에서는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 0.5° 경사의 테이퍼 핀을 사용하여 균일한 피로크랙을 얻었으며, 불균일 피로크랙은 2.0° 경사의 테이퍼 핀을 반대로 착용하여 얻을 수 있었다. 균일한 피로크랙을 얻기 위한 조건은 여러 번의 시행착오에 의해서 그 조건을 찾을 수 있었다. 피로크랙의 길이는 크랙비(a_i/W)가 약 0.5 정도가 되게끔 하였으며, 하중비 (R) 는 0.1 로 하였다. 피로크랙은 ΔK 감소법을 사용하였으며, 초기의 ΔK 는 약 12 MPa√m 였으며, 최종 크랙길이의 약 25%가 남았을때는 약 10MPa√m 가 되게끔 조절하였으며, Frequency 는 3Hz 로 고정하였다.

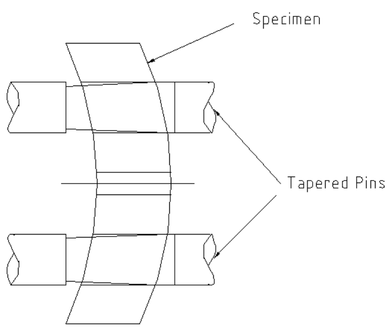


Fig. 2 Tapered Loading Pins for Fatigue Precracking

파괴인성실험

본 실험은 ASTM E 1737-96 에 준하여 Single-specimen method 에 의해 행하여졌다. 고온실

험의 경우에, 하중제어방식에 의해 초기 하중을 0.2KN 을 가한 후에 바라는 실험온도가 되기를 기다린다. 실험온도에 달하면, 평형상태를 얻기 위해서 1 시간이상의 soaking time 을 주었으며, 실험온도의 오차는 ±3°C 이었다. 실험이 이루어지는 동안에 하중치, 하중변위값, potential drop,과 온도 등은 Instron 의 Fast Track JIC 프로그램에 의하여 측정되었다. 실험이 끝난 후에는 약 300°C 에서 10 분간 heat-tinting 작업을 하였으며, 시편의 추가적인 변형을 방지하기 위하여 하중비, 0.7 에서 피로크랙 작업을 하여 시험편을 파단시켰다. 파단된 시험편의 최종크랙길이를 9-point average method 에 의해 측정하였다.

J-Resistance Curve

J-R curve 를 그리기 위해서 ASTM E-1152 에 의하여 J 값을 구할 수 있다. J 값은 식(1)을 이용하여 하중, 하중변위값, 그리고 그 시점에서의 크랙길이에 의해 구할 수 있다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \tag{1}$$

여기서 J_{el}과 J_{pl}은 각각 J의 탄성 및 소성에 의한 해당되는 값이다. J_{el}값은 작용하중, P_i,와 크랙 길이, a_i,의 함수이며, 식(2)에 의해 구해진다.

$$J_{el} = \frac{P_i(1-n)}{EB\sqrt{W}} f(\frac{a_i}{W}) \tag{2}$$

B 는 시편의 두께이며, n는 Poisson' s ratio, W는 시편의 폭, 그리고 E 는 Young' s Modulus 이다. 그리고

$$f(\frac{a_i}{W}) = \frac{2 + a_i/W}{(1-a_i/W)^{3/2}}(0.866 + 4.64\frac{a_i}{W} - 13.32(\frac{a_i}{W})^2 + 14.72(\frac{a_i}{W})^3 - 5.6(\frac{a_i}{W})^4) \tag{3}$$

J_{pl}은 하중점 변위에 의해 구해진다.

$$J_{pl} = [J_{pl(i-1)} + (\frac{h}{b})\frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B}][1 - g_i\frac{(a_i - a_{i-1})}{b}] \tag{4}$$

여기서

$$h_i = 2.0 + 0.522\frac{b}{W}, \ g_{\mathrm{i}} = 1.0 + 0.76\frac{b}{W} \tag{5}$$

이때, $A_{pl(i)}$ - $A_{pl(i-1)}$은 하중과 하중점 변위 곡선상의 소성역 부분의 면적 증가분으로 식(6)에 의해 구할 수 있다.

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + [P_i + P_{i-1}][d_{pl(i)} - d_{pl(i-1)}]/2 \tag{6}$$

$d_{pl(i)}$는 전체 하중점 변위, d,의 소성영역에 해당되는 부분이며, 현재 크랙에 대한 탄성 컴플라이언스로부터 구할 수 있다.

$$d_{pl(i)} = d_i - P_iC_i \tag{7}$$

또한, C_i는 시편의 컴플라이언스로 식(8)에 의해 계산된다.

$$C_i = \frac{1}{E^*B}(\frac{w+a_i}{w-a_i})^2[2.1630 + 12.219\frac{a_i}{w} - 20.065(\frac{a_i}{w})^2 - 0.9925(\frac{a_i}{w})^3 + 20.609(\frac{a_i}{w})^4 - 9.9314(\frac{a_i}{w})^5] \quad (8)$$

식(8)의 E^*은 시험방법의 불확실성을 고려한 Effective Young's Modulus 이다. 이 값은 초기 시험편의 컴플라이언스의 값, C_0,와 원래 크랙길이 a_0에 의해 구해진다.

$$E^* = \frac{1}{C_0 B}(\frac{w+a_0}{w-a_0})^2[2.1630 + 12.219\frac{a_0}{w} - 20.065(\frac{a_0}{w})^2 - 0.9925(\frac{a_0}{w})^3 + 20.609(\frac{a_0}{w})^4 - 9.9314(\frac{a_0}{w})^5] \quad (9)$$

3. 실험 결과

Fig. 3 은 균일 피로크랙과 불균일 크랙에 의한 *J-R Curve* 이다. Fig.3(a)에서는 상온에서의 비조사재와 조사재의 *J-R Curve* 를 비교하였다. 비조사재 중에 Double melted 압력관의 불균일 피로크랙의 *J-R Curve* 는 균일 피로크랙에 의한 *J-R Curve* 보다 낮은 인성치의 경향을 초기부터 파단시까지 일관되게 보이고 있다. 그런 경향은 조사재의 경우에도 같았다. 하지만 비조사재의 Quad-Melted 의 압력관은 초기에는 불균일 피로크랙의 인성치가 균일 피로크랙의 인성치와 비슷한 경향을 보였으나, 크랙이 점점 전파함에 따라 불균일 피로크랙의 파괴인성치가 더 높은 경향을 보여주고 있다. Fig.3(b)는 250°C 와 300°C 에서의 *J-R Curve* 를 보여주고 있다. 여기서는 온도와 피로크랙의 균일여부와 무관하게 초기부터 파단시까지 거의 비슷한 경향의 *J-R Curve* 를 얻을 수 있었다.

Fig. 4(a)~(c)는 각각의 *J-R Curve* 의 특정 파괴인성치인 *dJ/da*, Tearing Modulus 와 *J(1.5 mm)*의 값을 비교한 그림이다. 여기서 *dJ/da* 는 0.15 mm 와 1.5 mm 선 사이의 *J-R Curve* 의 기울기를 나타내며, 찌어짐 계수 (Tearing Modulus)는 $T = \frac{E}{s_f^2}\frac{dJ}{da}$ 의 관계로부터 구하였으며, *J(1.5)*는 1.5 mm 의 크랙길이에서 blunting line 과 평행한 직선과 *J-R Curve* 와 만나는 점에서의 인성치이다. Fig. 4(a)~(c)에서 나타나듯이 250°C 와 300°C 에서의 파괴인성치들은 피로크랙의 영향이 적은 것을 알 수있다. 그러나 상온에서의 파괴인성치들은 피로크랙의 상태와 공정에 따라 특성이 다른 것을 알 수 있었다. 불균일 피로크랙 Quad-Melted 비조사재의 파괴인성치들은 균일 피로크랙의 파괴인성치보다 높은 값을 나타낸 반면에 연성이 작은 Double-Melted 비조사재나 Quad-Melted 조사재의 경향은 반대로 나타났다. Double-melted 비조사재의 경우에 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성치가 균일 피로크랙에 의한 파괴 인성치 보다 약 25% 정도 적었으며, 조사재의 경우에는 더욱 차이가 심하여 50%정도 적게 나타났다. 이런 경향

은 Fig. 3과 일치함을 알 수 있다.

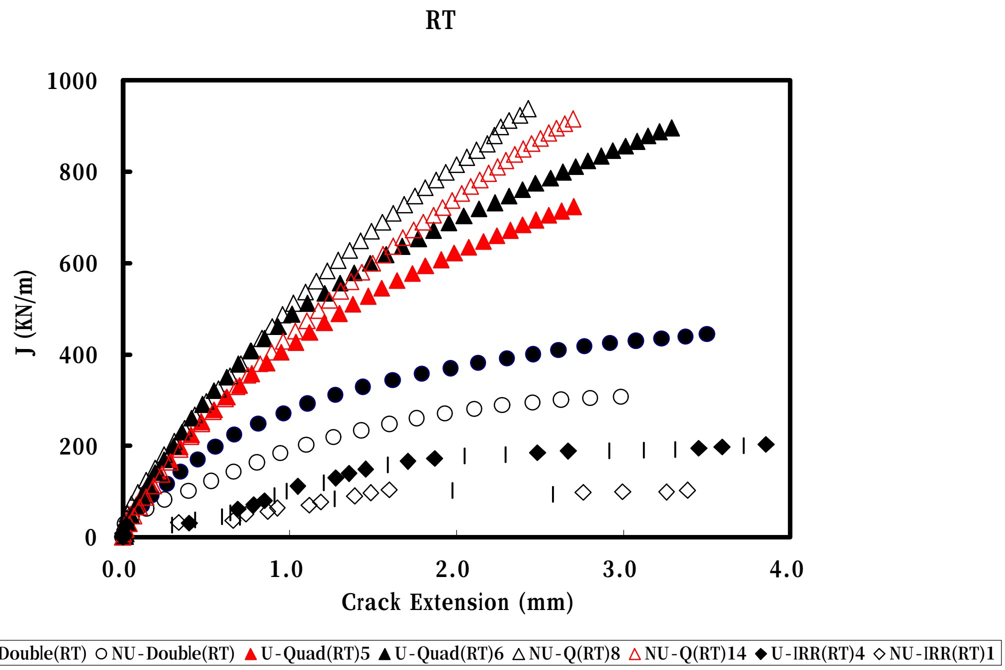
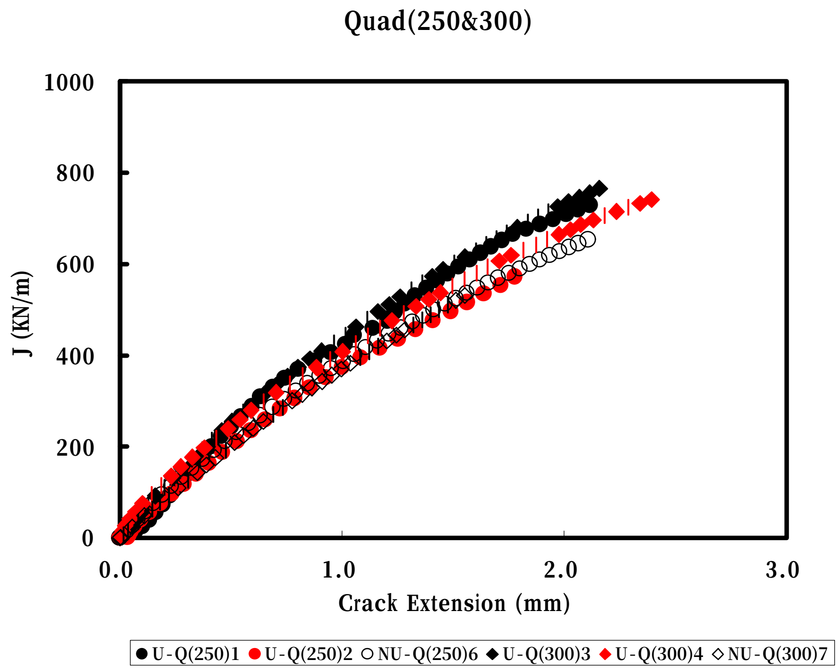


Fig. 3(a) *J-R* Curve of the Uniformed and the Non-Uniformed Prefatigue Crack at Room Temperature



Fig, 3(b) *J-R Curve* of the Uniformed and the Non-Uniformed Prefatigue Crack at 250°C and 300 °C

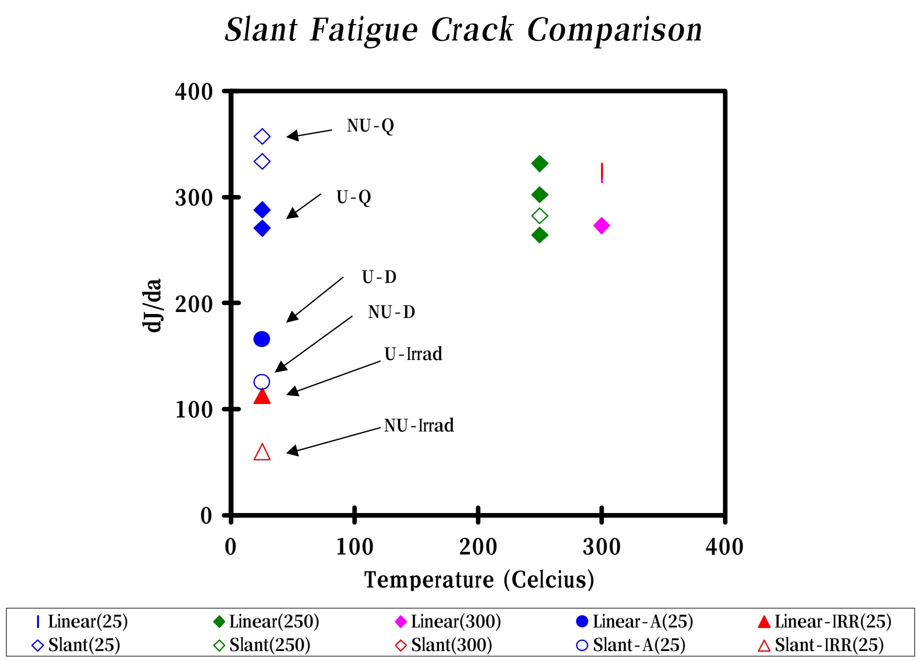


Fig. 4(a) The Comparison of dJ/da between the Uniformed and Non-uniformed Prefatigue Crack

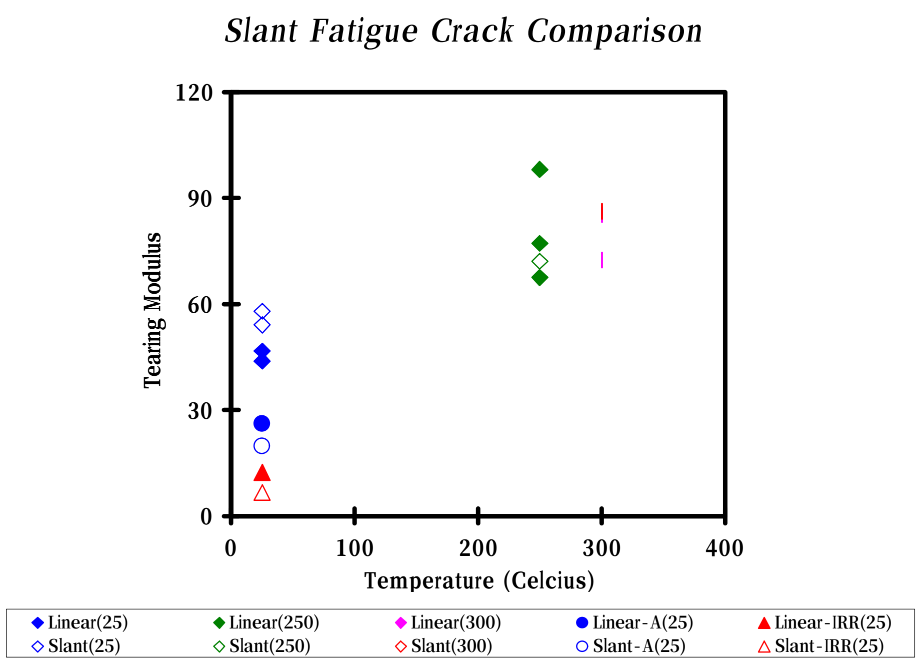


Fig. 4(b) Tearing Modulus Comparison between the Uniformed and Non-uniformed Prefatigue Crack

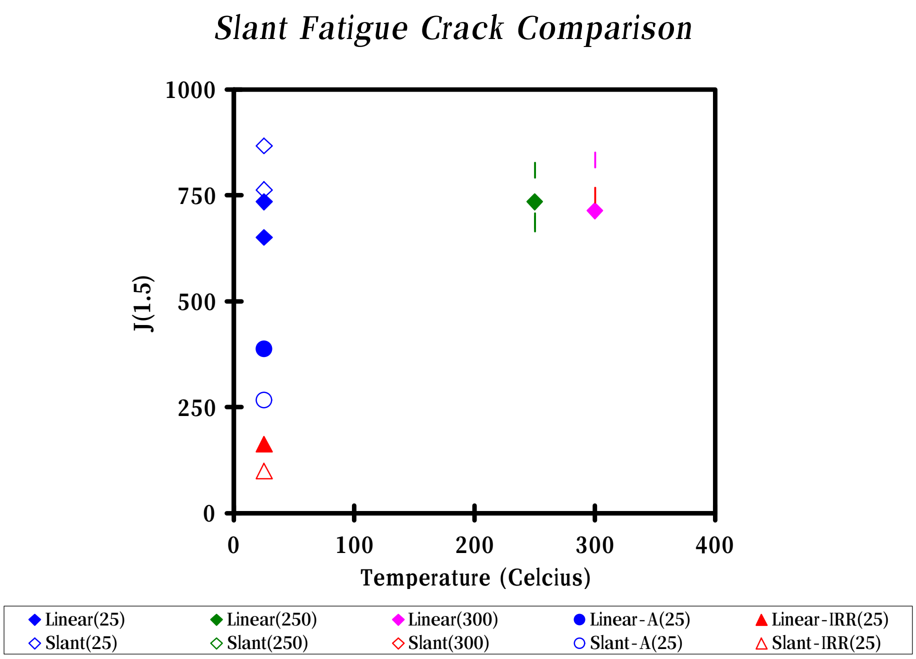
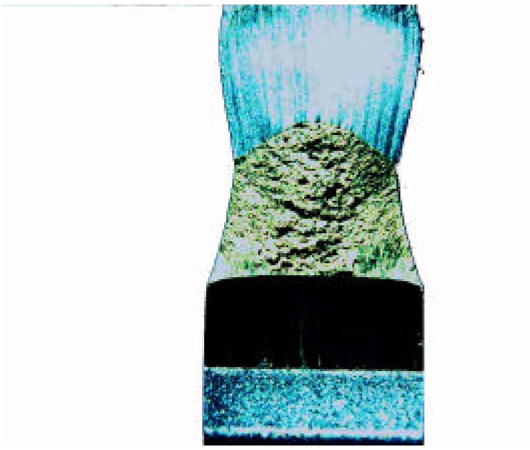
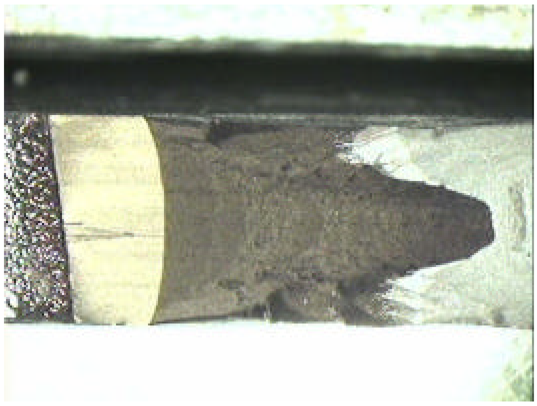


Fig. 4(c) J(1.5) Comparison between the Uniformed and Non-uniformed Prefatigue Crack

4. Fractography

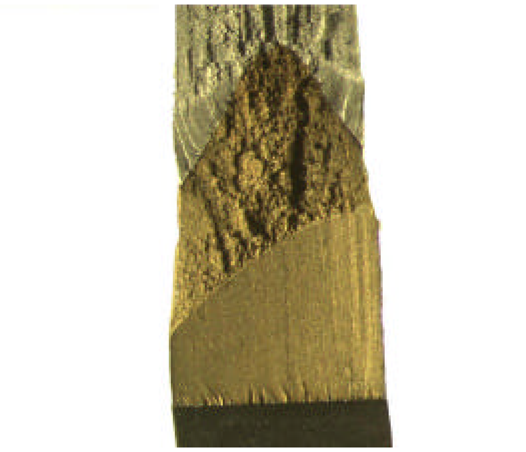
Fig. 5(a)는 균일 피로크랙에 의한 비조사재의 파괴인성 실험 후의 파단면을 보여주고 있다. Fig.(b)는 조사재의 파단면이며, (c)는 Double-melted 비조사재의 불균일 피로크랙에 의한 파단면을 나타내고 있다. (d)~(f)는 비조사재인 Quad-melted 불균일 피로크랙에 의한 파단면을 온도의 변화에 따라 보여주고 있다. (g)는 조사재의 불균일 피로크랙에 의한 파단면이다. Quad-Melted 의 비조사재의 파단면은 온도나 피로크랙의 상태와 무관하게 Thickness Yielding 을 보여주고 있으며, 반면에 상온에서의 조사재의 파단면은 비조사재와 같은 Thickness Yielding 을 관찰할 수는 없었으나 크랙이 전파함에 따라 파단면의 Tunnelling 형상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 비조사재의 경우에 Quad-Melted 보다 인성치가 낮은 Double-Melted 압력관의 불균일 피로크랙에 의한 파단면은 Thick ness Yielding 의 양이 상대적으로 적었으며, 조사재와 같은 Tunnelling 을 관찰 할 수 있었다.

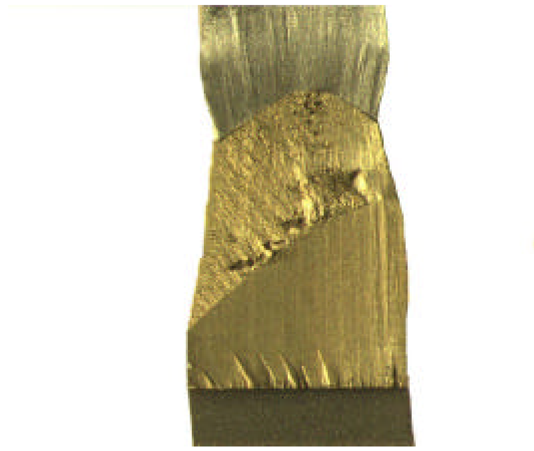




(a) U-Quad Melted (RT): D=2.0%

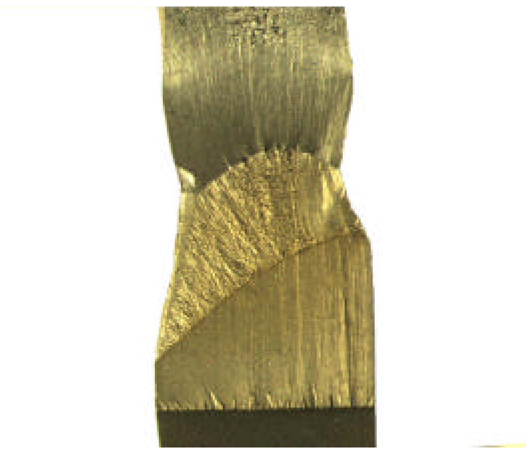
(b) U-Irrad.(RT): D=3.8%





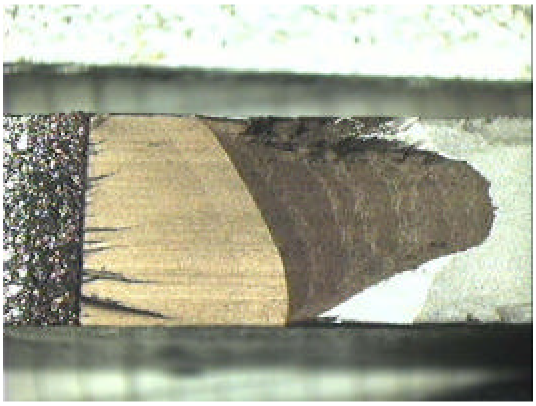
(C) NU-Double Melted(RT): D=18.3%

(d) NU-Quad Melted (RT): D=19.0%



(e) NU-Quad-Melted(250°C): D=14.3%

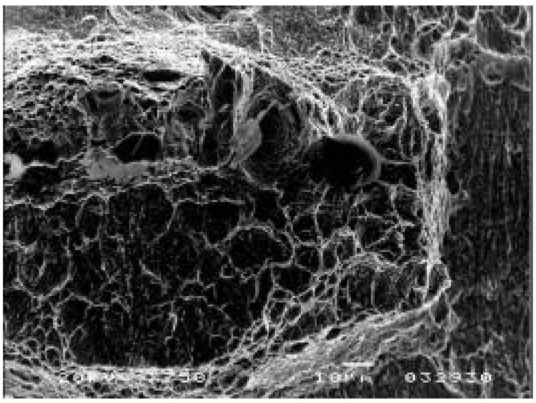
(f) NU-Quad-Melted (300°C): D=17.6%



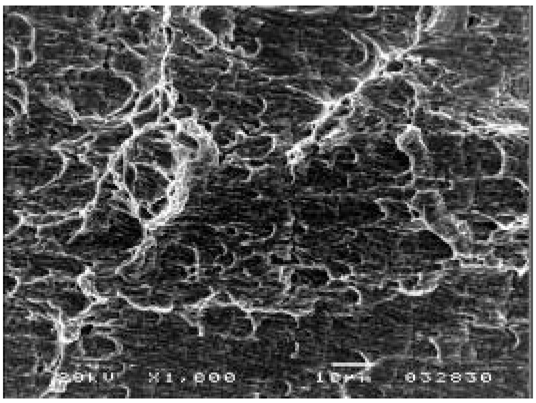
(g) NU-Irrd. (RT): 20.9%

Fig. 5 Fracture Surface of Uniformed and No-Uniforned Prefatigue Crack

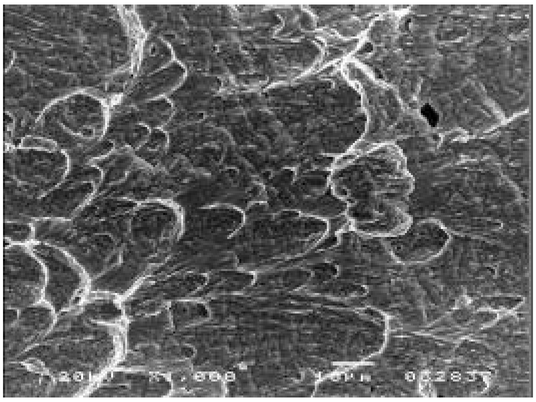
Fig. 6 는 비조사재의 각 시험편의 파단면을 SEM 촬영한 것이다. Fig. 6(a)는 상온에서의 Quad-Melted 압력관에서 균일피로크랙의 파단면 사진이다. 물론 연성파괴의 특징인 수많은 딤플이 관찰되면서도 딤플을 둘러싼 주변에는 응력의 특이성으로 커다란 림을 형성한 것을 알 수 있다. Fig. (b)는 상온에서의 불균일 피로크랙 Quad-Melted 압력관의 사진이다. 이것은 (a)사진과는 달리 림(Rim)의 형상을 찾을 수는 없다. (c)와 (d)는 250°C 와 300°C 에서의 파단면 사진인데, 이때는 딤플이 주변의 응력상태의 변화로 인해 어떤 방향성을 띠면서 늘어나는 형상인 것을 알 수 있다. (e)사진은 Double-Melted 압력관의 상온에서의 딤플형태로 (a)와는 달리 어떤 Layer 를 형성하는 딤플 형태를 볼 수 있다. 이런 모든 딤플은 연성파괴의 특징인 것을 잘 나타내고는 있지만 형태의 상이함은 각각의 온도와 공정에 따른 연성의 차이와 피로크랙의 형상에 따른 작용응력의 상이함에 의한 복합적인 작용에 의하여 이루어진 것으로 추정된다.



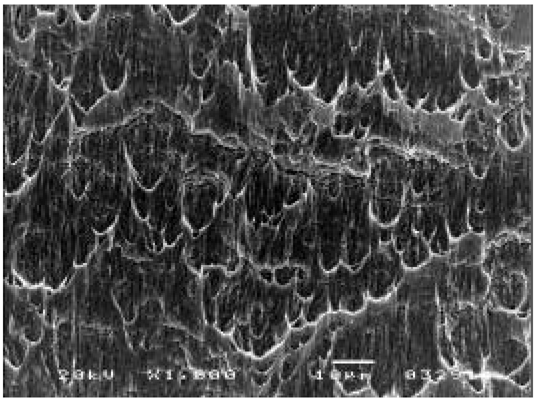
(a) U-Quad-Melted (RT)



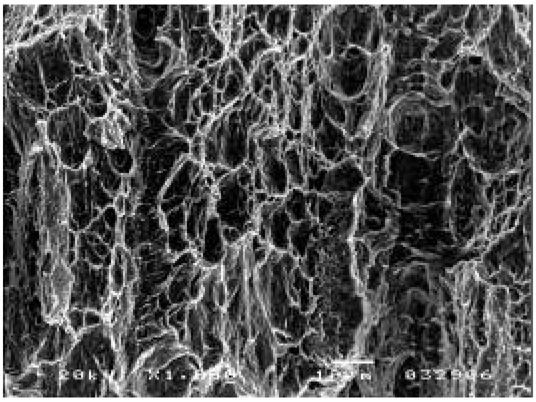
(b) Non-U Quad-Melted (RT)



(c) Non-U Quad-Melted (250°C)



(d) Non-U Quad-Melted (300°C)



(e) Non-U Double Melted (RT)

Fig. 6 the Comparison of Fracture Surface Using SEM

5. 토의

ASTM 표준 파괴인성실험(ASTM E 1737-96)은 초기 크랙 길이에 대하여 5%이내의 균일한 크랙일 경우에만 실험의 적합성을 인정하는 것으로 제시하고 있다. 하지만 AECL 은 여러 번의 실험과 경험을 빌려서, BS4447(1977)표준 시험법에서 제시한 10%이내의 균일 크랙을 CCT 실험에서 채택하고 있다.

AECL 의 Leitch 와 Shewfelt 는 8.5%까지의 불균일 피로크랙의 CCT 시험편에 대하여 3 차원 탄소성해석을 통하여, 이범위내에서의 미세한 크랙선단의 불균일은 전체적인 파괴인성치에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 밝혔다. 그리고 크랙의 불균일성은 단지 크랙선단의 시편표면에서 짧은 거리에 한해서 응력분포에만 영향을 준다는 것을 밝혔다. Kan 과 Blackburn 도 위의 결과와 비슷한 결과를 탄성해석에 의하여 구하였으며, 또한 크랙길이의

16% 범위내에서는 K_I 값이 유효값과 약 2%의 오차만을 보인다는 것을 밝혔다.

본실험에서는 10%에서 20%사이의 불균일 피로크랙에 대하여 실험적으로 파괴인성치를 비교하였다. 그 결과 고온(250°C 와 300°C)에서의 파괴인성 실험치는 불균일 피로크랙과 균일 피로크랙에 의한 파괴인성 실험결과는 매우 좋은 일치를 보여주었다. 하지만 상온에서는 공정의 종류와 조사와 비조사된 상태에 따른 연성의 차이로 인해 불균일 피로크랙의 파괴인성치의 유효성에 대햐여 좀더 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다. 하지만 상온의 경우에서도 알 수 있듯이 연성이 낮은 재료의 경우에는 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성치도 균일피로크랙에 의한 파괴인성치보다 낮으므로 보수성을 유지하는 것을 알 수 있다. Himbeault 등도 이런 피로크랙의 균일화 정도와 실험온도와의 연관성에 대해 지적한 바 있다. 그리고 이런 미소원공에 의한 연성파괴인 Zr 합금의 경우에는 연취성 변환점 이하에서의 취성파괴를 일으키는 강보다는 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성에 영향이 적을 것이라고 추정한 바 있다. 또한 이런 특성은 조사재나 수소의 함량과도 연관이 있을 것으로 추정되며, 따라서, 이런 연취성의 차이에 의해 파괴인성치의 보수성을 보장할 수 있는 변환점이나 변환 온도를 규명하는 연구는 앞으로도 더욱 관심을 가지고 지속적으로 연구할 필요가 있다.

6. 결론

CCT 시험편의 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성 실험을 Cold Worked Zr-2.5Nb 압력관을 사용하여, 상온과 250°C 와 300°C 에서 각각 행하였다. 사용된 재료는 공정이 다른 Double-melted 와 Quad-Melted 압력관과 조사된 Quad-Melted 압력관이었다. 그 결과 고온에서는 불균일 피로에 의한 파괴인성치의 영향이 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 고온에서의 파괴인성실험치는 피로크랙의 상태와 무관하게 신뢰할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만 상온에서는 각 재료의 수소 함량, 공정방법과 조사 여부 등과 같이 연성에 영향을 주는 요소에 의해 불균일 피로크랙의 파괴인성치를 신뢰하는데 문제가 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 연성이 낮은 Double-Melted 와 조사재의 경우에는 불균일 피로크랙에 의한 파괴인성치가 보수성을 띤다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

American Society for Testing and Materials, ASTM E 1737-96, “Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness”.

American Society for Testing and Materials, ASTM E 1152-87, “Standard Test Method for Determining J-R Curves”.

British Standaes Institute BS5447: 1977, “Plain Strain Fracture Toughness (K_{IC}) of Metallic Materials”.
B.W. Leitch and R.S.W. Shewfelt, Unpublished research, AECL

D.D. Himbeault and P.H. Davies, “Second International Round Robin on Fracture Toughness Testing of Pressure Tube Materials Using 17 mm Curved Compact (Toughness) Specimens,” RC-2069, COG-98-161-I, Jan. 1999, AECL

L.A. Simpson, C.K. Chow, and P.H. Davies, “Standard Test Method for Fracture Toughness of CANDU Pressure Tubes”, AECL Report COG-89-110-I, September 1989

R. Kan and W.S. blackburn, “Effect of Crack Front Non-Linearity on Results from Compact Tension Tests,” International Journal of Fracture, Vol. 55, pp. 285-292, 1992

안 상복, 김 도식, 오 동준, 김 성수, 김영석,”Zr-2.5Nb 중수로 압력관 재료의 조사후 파괴인성 거동 연구”, 대한기계학회 2000 년도 제 1 회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp.118-123, 2000 년 2 월 25 일 한국표준연구원