

## 고온에서 핵연료 피복관의 변형 및 급냉 취화

### Deformation and Quench Embrittlement of Fuel Claddings at High Temperature

충남대학교 \*이종혁, 홍순익,  
한국원자력연구소 백종혁, 이명호, 정용환

#### 요약

원자로 내 LOCA 조건에서의 Zircaloy-4 및 국산 신형 피복관에 대한 고온변형 및 열충격 시험을 수행하였다. 고온변형 시험을 위해 650-950°C 온도에서 20-80MPa의 원주응력을 가하여 등온-등압시험을 수행하고 파단시간 및 파단 연신율을 측정하였다. 열충격 시험은 5가지 온도 조건에서 500-15,000초 동안 등온 산화시킨 후 700°C까지 서냉하여 급냉 시킴으로써 열충격에 의한 피복관의 파괴 거동을 관찰하였다. 고온변형 시험결과, 800°C 근처에서 최대 변형량을 나타냈고, 850-950°C 영역, 즉 ( $\alpha+\beta$ )의 2상 영역에서 최소의 파단 연신율을 나타내었다. 고온산화 후 미세조직은 일반적으로  $ZrO_2$ ,  $\alpha-Zr(O)$  그리고 prior- $\beta$  층과 같이 3개의 다른 층을 형성하였다. 산화 시간과 온도 증가에 따라 산화막과  $\alpha-Zr(O)$ 상의 두께가 성장하고 prior- $\beta$ 상은 감소하였다. 국산 신형 피복관의 예비시험결과 전체적인 LOCA 저항성은 KAERI 피복관이 Zircaloy-4와 유사할 것으로 추정된다.

#### Abstract

The high temperature deformation and thermal shock tests were performed to estimate the integrity of Zircaloy-4 and KAERI cladding under LOCA condition. The high temperature deformation test was carried out under the temperature range of 650~950°C and hoop stress range of 20~80MPa. The thermal shock test was carried out under a individual isothermal oxidation temperature for 500~15000s. A maximum of burst strain occurred at around 800°C, and it decreased to 850~950°C which is known as temperature range of ( $\alpha+\beta$ ) phase in Zircaloy-4. Quench microstructure generally consisted of three distinct layers such as  $ZrO_2$ ,  $\alpha-Zr(O)$  and prior- $\beta$  layer. The thickness of  $ZrO_2$  and  $\alpha-Zr(O)$  layer increased while prior- $\beta$  layer decreased as oxidation increased. The preliminary results on KAERI claddings indicated that LOCA resistance of these claddings seem to be superior or comparable to Zircaloy-4 cladding.

## 1. 서론

현재 가압경수로(PWR) 원자로의 핵연료 피복관용 재료로는 Low Tin Zircaloy-4 재료를 널리 사용하고 있다. 1990년대 이전에는 Tin 함량이 약 1.5wt% 수준인 표준(standard) Zircaloy-4 피복관을 널리 사용하였으나 최근의 고연소도 운전에 따른 부식 저항성 향상을 위하여 그 함량을 약 1.3wt%로 줄인 Low Tin Zircaloy-4 재료를 채택하고 있는 경향이다. 또한 최근에는 약 70 GWD/tU 이상의 고연소도까지 사용 가능한, Low Tin Zircaloy-4 재료를 대체할 수 있는 신합금 피복관을 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 한국을 중심으로 활발히 개발하고 있다. 국내의 한국원자력연구소에서도 이러한 고연소도용 국산 신형 피복관 6종의 시제품을 제조하여 그 성능을 시험하고 있다. 이러한 신형 피복관이 개발되어 상용화하려면 노내외 조건에서 정상상태 성능뿐만 아니라 사고상태 조건에서의 안전성 또한 검증되어야 한다. 이러한 사고조건 중의 하나로써 1차측 냉각 LOOP가 파단되어 냉각 능력을 상실하는 원자로 내 사고인 냉각재상실사고 (LOCA : loss of coolant accident) 조건에서의 피복관 성능입증은 중요한 인허가 평가요소이다.

냉각재상실사고가 발생하면 수증기 분위기가 형성되고 피복관 온도 및 내압 증가에 따른 고온변형 및 고온에서의 산화, 비상 냉각수 주입에 따른 피복관의 열충격 등 일련의 과정을 겪게 된다. 이러한 LOCA 발생시 피복관의 온도 및 압력에 대한 일반적인 진행과정은 blowdown, refill, reflood의 세단계로 진행되는데, 사고 진행 과정은 연료봉 출력, 잠열 (decay heat), 연료심과 피복관 사이의 간격, 피복관 외부로의 열전달 등, 여러 가지 요인에 따라서 다양한 사고추이를 보이며 진행된다.<sup>1)</sup>

Blowdown 구간은 냉각재 누출 과정을, refill 구간은 압력 용기 하단으로부터의 비상 냉각수 주입 시점을, reflood는 비상 냉각수가 주입되는 과정을 나타낸다. Blowdown 구간에서는 온도가 상승하고 압력용기의 압력이 저하되므로 피복관 내부 압력의 증가에 의해서 피복관이 부풀어 오르는 Ballooning 현상이 발생하게 되고, 비상노심냉각계통 (ECCS : emergency core cooling system)이 작동하기 전까지 노심은 수증기 또는 물과 수증기의 2상 분위기하에 처하게 된다. 이때 피복관 외부로의 열전달 능력이 현저히 저하되므로 온도가 급상승하여 피복관 산화가 급격히 진행된다. 이러한 고온 상태의 피복관이 Reflood 구간의 비상냉각수 주입에 의해 차가운 냉각수에 잠기게 되며 이는 급냉 효과와 같은 영향을 받게 된다. 이때 고온산화 현상에 의해 피복관의 연성이 저하된 상태에서 피복관에 열충격 (thermal-shock)이 가해지면 결국 피복관의 취성파단을 야기할 수 있다.<sup>1)</sup> 이러한 사고에 의해 피복관이 파단 되면 핵연료 펠렛 및 핵물질들이 노심으로 누출되며 이는 또한 냉각재 유로를 막음으로써 추가적인 열전달 능력을 저하시키고 연료봉 용융 등 사고추이를 더욱 악화시킬 수 있다. 따라서 이러한 LOCA 조건에서도 피복관은 ballooning에 대한 저항성이 커야 하며 열충격이 가해지더라도 그 파단 저항성이 커야 한다.

많은 연구자들에 의해서 LOCA 조건에서 피복관의 기계적 특성 평가가 수행되었는데, Hardy<sup>2)</sup>는 Zircaloy-4 피복관의 ballooning 현상에 대한 내부압력과 가열속도 및 온도의 영향에 대해서 실험하였다. 그리고 Chapman<sup>3)</sup>은 냉각시 열전달계수를 고려하여 원주방향의 변형량을 추가로 분석하였다. Sell과 Ortlieb는 Zircaloy-4 피복관의 고온변형시 상변태의 영향을 분석하였으며<sup>4)</sup>, Uetsuka는 내부 표면 산화에 의한 Zircaloy-4의 취성을 링 압축시험을 통해서 분석하였다.<sup>5)</sup>

위와 같은 LOCA 조건에서의 피복관의 기계적인 특성을 평가하기 위해서 Zircaloy-4 피

복관에 대한 다양한 조건에서의 ballooning, 고온산화 및 열충격 시험을 수행하였다. 또한 국산 신형 피복관에 대한 예비 LOCA 시험을 수행하고 Zircaloy-4 피복관의 특성과 비교, 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용된 Zircaloy-4 피복관의 제원은 외경이 약 9.5mm, 두께가 약 0.57mm로서 시편의 길이는 330mm를 사용하였다. 한국원자력연구소에서 개발한 KAERI 피복관도 Zircaloy-4와 동일한 제원이다. Zircaloy-4와 KAERI 피복관은 Zr 합금으로서 Zircaloy-4는 Sn이 1.3% 첨가된 반면에 KAERI 피복관은 Nb이 첨가된 합금으로서 KC, D는 low Nb 합금이고, KF, H는 high Nb 합금이다. LOCA 특성평가 시험은 고온변형 시험과 열충격 시험으로 나누어 수행하였다.

고온 변형시험은 목표 온도까지 20℃/sec로 가열한 후 피복관이 파열 될 때까지 유지하였고, 10-80MPa의 내부 압력을 가하여 650-950℃의 온도에서 등온-등압 시험을 수행하였다. 열충격 시험은 목표 온도까지 10℃/sec로 가열하고 일정 시간동안 등온 산화 시킨 후 약700℃까지 서냉 시킨 다음 상온의 냉각수를 사용하여 급냉 처리 하였다. Zircaloy-4의 경우 1,000-1,250℃에서 500-15,000초 동안 등온산화 시켰고 KAERI 피복관의 경우 1000, 1100, 1200℃의 온도에서 등온 산화 시켰다.

LOCA 실험장비는 단일봉 시험 장비로써 고온변형, 수증기 산화 및 열충격 시험 등 LOCA의 전 과정을 모사 할 수 있는 종합(integral) LOCA 시험 장비로써 자체 제작하였으며, 그림 2에 본 시험 장비의 모식도를 나타내었다. 시험 시편인 피복관은 양 끝단에 멘드렐을 장착하고 약 200mm의 가열 부분, 즉 active length를 지정하여 전극을 연결한다. 피복관을 가열하는 방식은 전기저항 가열법을 이용하였으며 이때 최대 500A의 D.C power supply를 사용하였다. 이러한 경우, 최대온도 1500℃, 최대 가열속도 200℃/s, 최대 압력 120bar 까지 온도 및 압력 제어가 가능하다. 그리고 압력 제어기를 사용하여 압력을 조절하였으며 이때, 주입되는 개스는 아르곤을 사용하였다. ECCS가 작동하기 전까지 원자로내의 수증기 분위기를 모사하기 위해서 증기 발생기(steam generator)를 부착, 사용하였고 ECCS 작동에 따른 차가운 냉각수 주입 효과를 얻기 위해 시험장비 하단부에 유량 조절이 가능한 급수라인을 연결하였다. 고온 변형시 피복관의 원주 변형량을 측정하기 위해서 레이저 변위측정기를 장착하였고, 피복관의 온도를 측정하기 위해서 파이로메타와 열전대를 설치하였다. 그리고 피복관 가열시 축방향의 변형량을 측정하기 위해서 20mm LVDT를 사용하였다. 이 모든 데이터와 변수 제어는 컴퓨터를 통해 자동적으로 제어할 수 있도록 프로그래밍하였다.

### (1) 고온 변형 시험

고온 변형 시험의 경우에는 피복관 내부에 불활성 기체인 아르곤 개스를 압력 제어기를 사용하여 일정하게 주입하였으며, 이때 내부 압력은 아래의 식에 의해 초기 압력을 원주 응력(hoop stress)으로 계산하여 가압하였다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i D_m}{2t} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{\theta}$ 는 원주방향으로 작용하는 응력(hoop stress)이고,  $P_i$ 는 초기 압력,  $t$ 는 피복관

의 두께,  $D_m$ 은 중간 직경을 나타낸다. 여기서 중간 직경(mid-wall diameter)이라 함은 피복관의 두께 중간을 기준으로 해서 측정한 직경이다.

고온변형 시험은 650~950°C의 온도 범위에서 초기 압력 10~80MPa 구간에서 시험을 수행하였다. 시험 장비에 장착된 시편은 목표 온도까지 가열한 후에 일정한 압력을 유지하면서 피복관이 파열될 때까지 계속 유지하였다. 시험이 끝난 피복관은 파열이 발생할 때까지의 파열 시간( $t_r$ )과 파열이 일어난 부분의 변형량인 총 변형량(total elongation)을 측정하고 파열부위를 중심으로 상하로 각각 약 20mm 위치의 변형량인 균일 변형량(uniform elongation)을 측정한다. 이러한 변형은 대체적으로 불균일하게 발생하므로 그 변형량은 실을 이용하여 원주 둘레를 측정하였다. 시험이 끝난 피복관은 각 시험 조건별로 총변형량과 파열 시간을 비교 평가하였다.

## (2) 열충격 시험

피복관의 열충격에 대한 파괴 저항성을 평가하기 위해 고온에서 등은 산화시킨 후, 약 10mm/s의 속도로 냉각수를 주입하였다. 시험 피복관의 온도는 10°C/s의 속도로 목표 온도 1000, 1100, 1150, 1200, 1250°C의 5가지 온도까지 가열한 후, 수증기 분위기에서 등은 산화를 수행하였다. 이때 유지시간은 시험온도에 따라 500~15,000초의 범위에서 수행되었다. 목표 산화시간이 되면 피복관 온도는 비상냉각계통(ECCS) 작동시 원자로내의 분위기를 모사하기 위해서 자동적으로 ~10°C/s의 속도로 냉각되어 700°C까지 떨어뜨린 후, 냉각수를 피복관 하단 부분에서부터 채움으로써 급냉 효과를 가하였다.

산화 후 급냉시킨 시편의 단면 관찰을 위해서 피복관을 절단하였고, sand paper를 600, 1200 순으로 polishing 한 후 화학적으로 에칭하였다. 광학 현미경을 사용하여 산화막( $ZrO_2$ )과  $\alpha$ -Zr(O) 층과 prior- $\beta$ 상을 관찰하였다. 또한 기계적 연성을 평가하기 위해 산화 후 급냉한 시편을 약 15mm의 길이로 절단하여 인장 시험기를 사용해서 상온에서 링 압축시험(ring compression test)을 수행하였으며, 시험 후 파단면은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### (1) 고온변형(Ballooning) 시험

그림 2는 고온변형 시험 결과로써 Zircaloy-4와 국산 피복관들의 온도-압력에 대한 변형량을 비교 도시하였다. Zircaloy-4 피복관의 파열 변형량은 시험온도에 따라 넓은 분포를 보이고 있다. 그러나 시험온도에 따라 뚜렷한 변형량 차이를 나타내고 있는데, 즉 약 800°C에서 위쪽 경계선과 아래쪽 경계선 모두 최대 변형량을 나타내고 있고 약 950°C에서 가장 낮은 변형량을 나타내고 있음을 관찰 할 수 있다. 이는 일반적인 Zircaloy-4의 전형적인 고온 변형특성이다.<sup>1,2)</sup> Zircaloy-4의 파열 변형량은 온도가 증가 할수록 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 Zircaloy-4 재료의 상변태와 밀접한 연관이 있는 것으로 추정된다. 즉, hexagonal 구조의  $\alpha$  상에서 2상구역인 ( $\alpha+\beta$ ) 혼합상으로 변태하는 약 820°C에서 최대 변형량이 발생하고 ( $\alpha+\beta$ ) 중간 구역인 약 920°C에서 최소 변형량이 발생했다.<sup>1,8)</sup> 이는  $\beta$  상에서  $\alpha$  상으로의 변태는 무확산 변태로서 전단변형을 하기 때문에 단상인  $\alpha$  상 구역에서는 온도가 증가 할수록 변형량이 증가하는 반면에 2상 지역인 ( $\alpha+\beta$ ) 혼합상에서는 변형량이 감소하게 되고 ( $\alpha+\beta$ ) 중간 구역에서 최소 가공경화가 발생<sup>9)</sup>하기 때문에 이 구간에서 최

소의 변형량을 나타내는 것으로 추정된다.

그림 3은 고온 변형시 Zircaloy-4 피복관의 온도에 따른 미세조직의 변화를 나타내는 것으로서 파열이 발생한 부분(burst region)과 파열이 일어난 부분에서 약 20mm 떨어진 균일 변형 부분(uniform region)에서 관찰한 조직을 나타내고 있다. 그리고 파열된 부분의 조직이 균일변형 부분에 비해 좀 더 연신된 것을 볼 수 있는데 이는 파열된 부분의 변형량이 좀 더 크기 때문이다. 조직의 변화를 보면 700°C의 온도에서는 완전 재결정된  $\alpha$  조직을 나타내고, 온도의 증가에 따라 결정립 성장을 나타낸다. 800-850°C의 온도에서는 막 형성되기 시작한  $\beta$ 상들이  $\alpha$  결정립계에 존재하게 되지만 900°C보다 높은 온도에서는  $\alpha$  결정립이 크게 성장했음을 알 수 있고, 형성된  $\beta$ 상들이  $\alpha$  결정립계 뿐만 아니라 결정립내에서도 다량으로 존재함을 알 수 있다. 시험온도 925°C와 950°C사이에서는  $\beta$ 상의 분율이 증가하나 이론적인 구조로는 정상상태의  $\alpha$  결정립이다. 그리고 975°C 이상의 온도에서는 순수  $\beta$  구역으로서 존재하게 된다.<sup>4)</sup> 그림 2에서 파열된 피복관의 접사 사진을 비교해 봐도 피복관의 최대 변형량의 변화를 쉽게 비교할 수 있다. 이러한 피복관의 변형거동은 피복관 표면의 불균일한 온도 분포에 의해서도 영향을 받을 것으로 예상된다.<sup>10)</sup>

그림 4는 피복관이 파열될 때까지의 파단 시간 (time to rupture)과 초기 원주응력과외의 관계를 비교한 그림이다. 이 그림에서 Zircaloy-4의 파단 저항성은 표준 Zircaloy-4의 고온 변형거동<sup>4)</sup>과 유사한 것으로 평가되었다. 국산 피복관들에 대한 시험은 750°C, 50MPa 조건에서만 수행되었으며, 그 결과 파단 시간은 Zircaloy-4에 비해 약간 더 길게 나타났으나 시험의 오차를 고려할 때 유사한 경향이라고 판단된다. 그림 2에서 국산 피복관의 파단 변형량은 Zircaloy-4의 변형량 범위 내에 존재하며 그림 4에서와 같이 약간 긴 파단시간을 가지는 것으로 평가할 때, 국산 피복관의 ballooning 저항성은 기존의 Zircaloy-4 재료보다 좀 더 우수하거나 유사할 것으로 평가된다.

## (2) 열충격(Thermal Shock) 시험

그림 5는 Zircaloy-4 피복관을 산화 온도와 시간에 변화를 준 후에 급냉 시험한 피복관의 단면을 촬영한 광학 사진으로서 (a)는 1000°C에서 2000, 15000초, (b)는 1100°C에서 2000, 10000초, (c)는 1200°C에서 2000, 5000초 산화시킨 시험편이다. 지르코늄 합금이 수증기 분위기에서의 산화 반응은  $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2$  이다. 이때 수증기 중에 존재하던 물분자가 Zr과 반응하여 표면에 산화층( $ZrO_2$ )을 형성하고 수소가 발생한다. 또한 공기 중에 존재하던 산소는 산화층을 침투하여 산소 안정화된  $\alpha$ -Zr(O) 층을 형성하고 더 깊은 내면에는 prior- $\beta$  층을 형성하게 된다. 그림 5는 이러한 3개의 층이 온도 및 시간에 따라 뚜렷이 변화함을 보여준다. 즉, 산화 온도와 시간이 증가함에 따라서 산화층과  $\alpha$ -Zr(O) 층이 증가하고 prior- $\beta$ ( $\alpha'$ 상) 층이 감소함을 관찰 할 수 있었다. 이는 산소와 Zr의 반응에 의해서 온도가 높고 산화시간이 증가함에 따라서 산소의 확산에 의해 산화층( $ZrO_2$ )과  $\alpha$ 상 구역은 확장되는 반면에 prior- $\beta$ ( $\alpha'$ 상) 상 구역은 점점 감소하게 되기 때문이다.

그림 6은 산화 후 급냉(quenching)시킨 각종 피복관 재료의 미세조직 사진이다. 이때 시험조건은 1100°C에서 3000s 동안 산화시킨 후 급냉 시켰으며, Zircaloy-4와 KAERI 피복관 C, D, F, H의 조직사진에서와 같이 일반적으로 산화층( $ZrO_2$ ),  $\alpha$ -Zr(O)층 및 prior- $\beta$ ( $\alpha'$ 상) 상 구역을 관찰할 수 있다. Zircaloy-4의 경우에는 세 층의 구조가 뚜렷이 구별되지만 Nb이 첨가된 KAERI C, D, F, H 피복관의 단면은 Zircaloy-4와 같이 명확하게 구별되지 않고 비교

적 얇은 산화층을 나타내고 침상형의  $\alpha$ 층이 관찰되었다. 이는 Zr-Nb 합금에 대한 다른 연구자의 급냉시험 결과<sup>11)</sup>와도 일치한다. 그리고 prior- $\beta$ 상을 보면 그물형의 조직을 관찰할 수 있는데, 975°C 이상의 온도 즉, 순수  $\beta$  구역에서 급냉시킨 조직은 급냉시 일반적으로 그물형의 basketwave 구조로 변하게 된다.<sup>4)</sup> 그리고 Nb의 함량이 적은 K-C, D 피복관의 경우에는 Nb 함량이 많은 Zirlo, 외국신형 피복관 B 나 K-F, H 피복관에 비해서 매우 얇은 산화막과  $\alpha$ 층을 보여 주고 있다.

그림 7는 고온산화 후 급냉시킨 Zircaloy-4와 KAERI D, F 피복관의 각 층별 경도분포를 측정함으로써 산화막의 경도값은 포함되지 않았다. 깊이가 깊을수록  $\alpha$ 층에서는 경도값이 점진적으로 감소하며 prior- $\beta$  층에서는 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 경도값은 급속내 산소 고용도에 의존하는 것으로 알려져 있으며  $\alpha$ 층의 경도값이 prior- $\beta$ 층에 비해서 높은 경도값을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. Nb이 첨가된 피복관의 prior- $\beta$ 층은 Zircaloy-4에 비해서 높은 경도값을 나타내는데, 이는 Zircaloy-4에 비해서 지지금속내의 산소농도가 높음을 의미한다. Nb은 bcc 구조의 원소로서  $\beta$ 상을 안정화시키는 경향이 있다. 따라서 Nb이 첨가된 피복관의 경우 Zircaloy-4 보다  $\beta$ 상이 높은 평형산소농도를 보유하게 되며 이에 따라 합금 내에 Nb 함량이 높을수록  $\beta$ 상은 좀더 많은 산소를 포함하게 된다.<sup>11)</sup> 여기서  $\alpha$ -층의 경도값이 prior  $\beta$ -층 보다 경도값이 높다는 것은 재료의 연성이 낮음을 의미한다. 그러므로 Nb이 다량 첨가된 경우 prior- $\beta$ 층의 연성이 저하되는 것으로 추정된다.

그림 8과 9는 시편의 변위에 따른 시편의 길이당 하중을 나타내는 하중-변위 곡선으로써 고온산화 후 급냉시킨 피복관의 기계적 특성을 평가하기 위해서 피복관을 약 15mm 길이로 절단하여 만능재료시험기를 사용하여 변위속도 1mm/sec로 압축 시험한 결과들이다. 이러한 링 압축시험에서 하중이 순간적으로 낮아지는 구간이 있는데 이는 압축시 발생하는 균열에 의해서 재료의 파괴가 발생하는 구간이다. 일반적으로 2-3개의 조각들로 파괴가 발생하였으며 완전한 파괴가 발생할 때까지는 수차례의 하중감소를 겪는다. 보통 첫 번째로 발생한 급격한 하중감소까지의 변형량을 기준으로 그 재료의 연성 정도를 가늠할 수 있다.<sup>12)</sup> 그림 8은 1100°C의 일정온도에서 3000, 5000, 10000초의 산화 시간에 변화를 주어 산화시킨 후 급냉시킨 Zircaloy-4 피복관의 링 압축시험 결과로써 산화시간이 증가함에 따라 피복관의 기계적 특성이 저하됨을 관찰할 수 있다. 이도 역시 산화시간이 길어질수록 지지금속내의 산소농도가 증가하고 그에 따라서 기계적 특성이 저하되었음을 알 수 있다. 그림 9는 1100°C에서 3000s 동안 산화시킨 Zircaloy-4와 국산 신형 피복관들의 링 압축시험시의 하중-변형량 곡선이다. 그 결과, 국산 신형 피복관들은 Zircaloy-4와 유사한 특성을 나타내었다.

그림 10은 1100°C에서 3000s 동안 산화시킨 Zircaloy-4와 KAERI C, H 피복관의 링 압축시험한 시편의 파면을 SEM을 통해서 관찰한 그림으로서  $\alpha$ -층은 전형적인 취성파괴의 형태를 나타내고 있고 prior- $\beta$ 층은 다수의 딴플(dimple)이 존재하는 연성파괴를 나타내고 있다. 따라서 파괴 저항성을 나타내는 주요 층은 prior- $\beta$ 층으로 간주된다. 산화시킨 후 급냉시킨 피복관의 경도값 분포와 SEM 관찰을 통해서 LOCA 사고시 연성을 갖는 prior- $\beta$ 층이 피복관의 LOCA 저항성에 매우 중요한 요소임을 관찰할 수 있다.

#### 4. 결론

1. Zircaloy-4 피복관은  $\alpha$ 상 영역인 약 800°C까지는 온도 증가에 따라 과열 변형량이 증가하고 ( $\alpha+\beta$ )상의 850~950°C 영역에서는 최소의 변형량을 나타내었다. 국산 신형 피복관의 고온변형 저항성은 Zircaloy-4 피복관 보다 우수하거나 유사한 것으로 나타났다.
2. 수증기 분위기에서 산화시킨 피복관은 온도가 높고 산화시간이 길수록 산화막과  $\alpha$ -Zr(O)층은 확장되는 반면 prior- $\beta$ 층은 감소하였다. 그리고 Nb이 첨가된 신형 피복관들의 경우 산화막 성장은 Zircaloy-4 보다 얇았으며 침상형의  $\alpha$ -Zr(O)층을 나타내었다.
3. 국산 피복관들의 열충격에 대한 파단 저항성은 Zircaloy-4 및 외국 피복관들에 비해 우수하거나 유사한 것으로 나타났다.
4. 링 압축시험을 통해서 국산 신형 피복관의 취성과파괴 저항성을 평가한 결과 Zircaloy-4와 유사한 특성을 나타내었다. 파단면 분석 결과  $\alpha$ -Zr(O)층은 취성과파괴를, prior- $\beta$ 층은 연성 파괴를 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부의 원자력연구 개발 사업 중 지르코늄합금핵연료피복관 과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) F. J. Erbacher and S. Leistikow: Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP, 939 (1987) 451.
- 2) D. G. Hardy: Topical meeting on water-reactor safety held at Salt Lake City, Utah, March 25-28, CONF-730304, (1973) 254.
- 3) H. Chapman, J. L. Crowley, A. W. Longest and G. Hofmann: Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP, 681 (1979) 393.
- 4) Hans-Jürgen Sell and Erhard Ortlieb: Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 1423 (2002) 658.
- 5) H. Uetsuka, T. Furuta and S. Kawasaki: Division of Reactor Safety, JAERI, (1980) 53
- 6) Louis Baker, Jr. and Louis C. Just: ANL-6548, (1962).
- 7) Yu. K. Bibilashvili, N.B. Sokolov, L. N. Andreeva-Andrevskaya, V. Yu. Tonkov, A.V. Salatov, A. M. Morosov, V. P. Smirnov: IAEA Tech. Ctte., Halden, Sept 10-14, (2001).
- 8) F. J. Erbacher, H. J. Neitzel, H. Rosinger, H. Schmidt, and K. Wiehr: Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP, 754 (1982) 271.
- 9) D. O. Hobson, M. F. Osborne and G. W. Parker: Nuclear Tech., Vol. 11, (1971) 479.
- 10) F. Erbacher, H. J. Neitzel, and K. Wiehr: Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 681, (1979) 429.
- 11) Kwang Heon Park, Tae Geun Yoo, Sung Kwon Kim, "High Temperature Oxidation of a Zirconium Base Alloy in Steam", Canadian Nuclear Society, (2001).
- 12) Z. Hózer, Á. Griger, L. Matus, L. Vasáros, M. Horváth: IAEA Tech. Ctte., Halden, Sept 10-14, (2001).

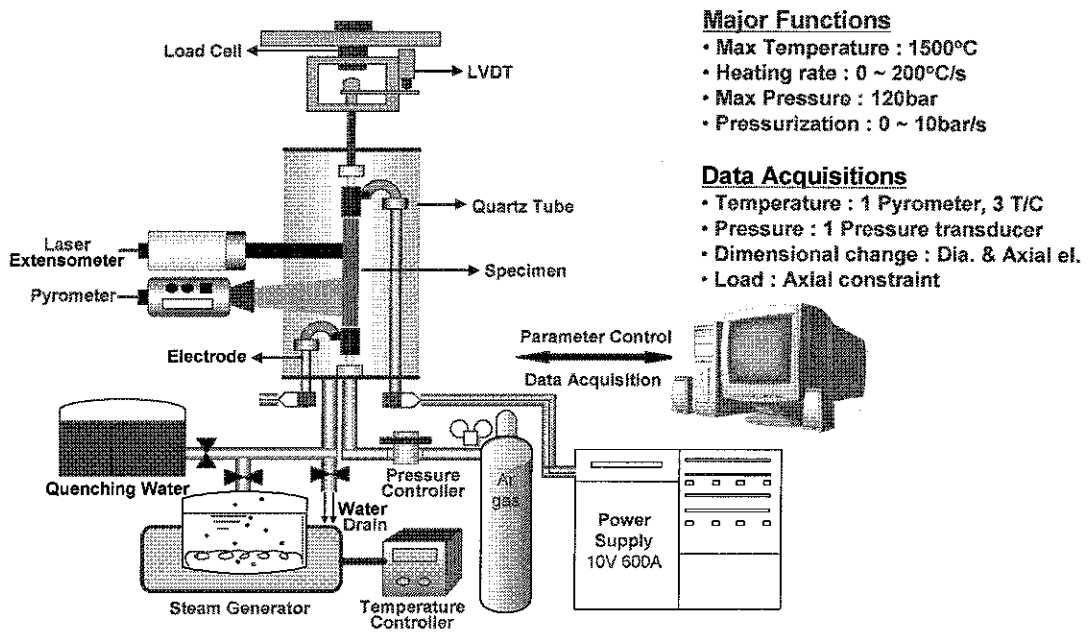


Fig. 1. Schematic diagram of integral LOCA equipment

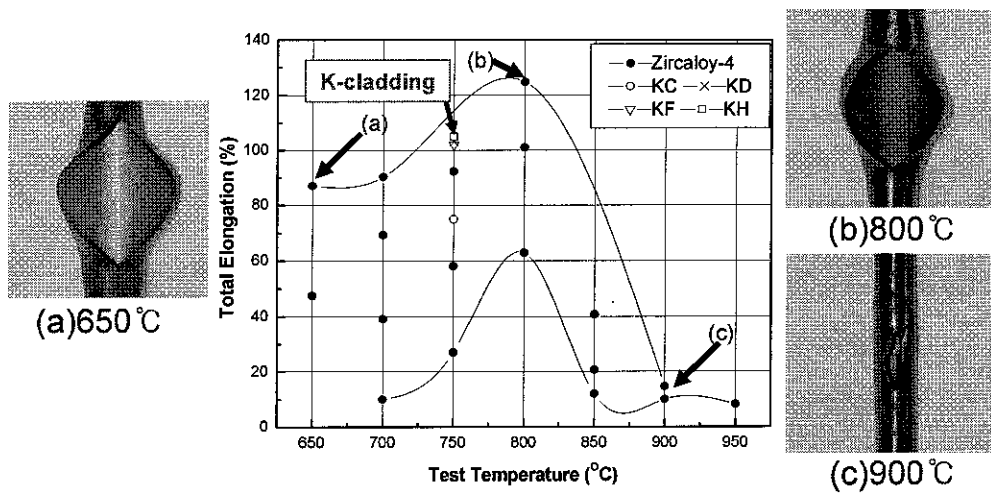


Fig. 2. Burst strain versus burst temperature of Zircaloy-4 and KAERI claddings



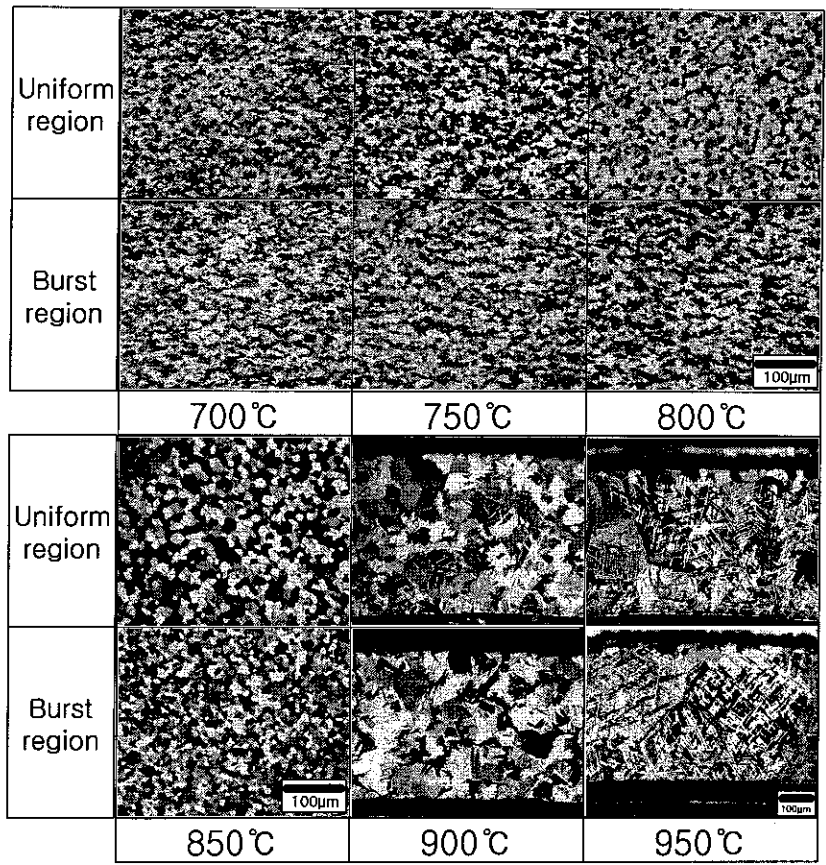


Fig. 3. Microstructural changes with test temperature at uniform and burst region of Zircaloy-4 claddings

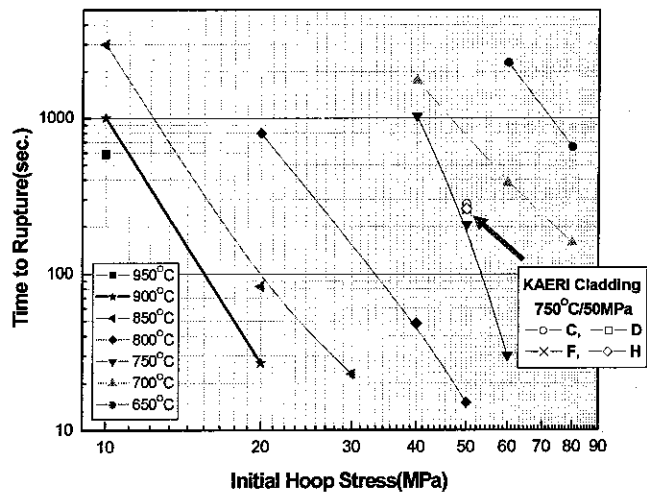


Fig. 4. Time to rupture versus initial hoop stress of Zircaloy-4 and KAERI claddings

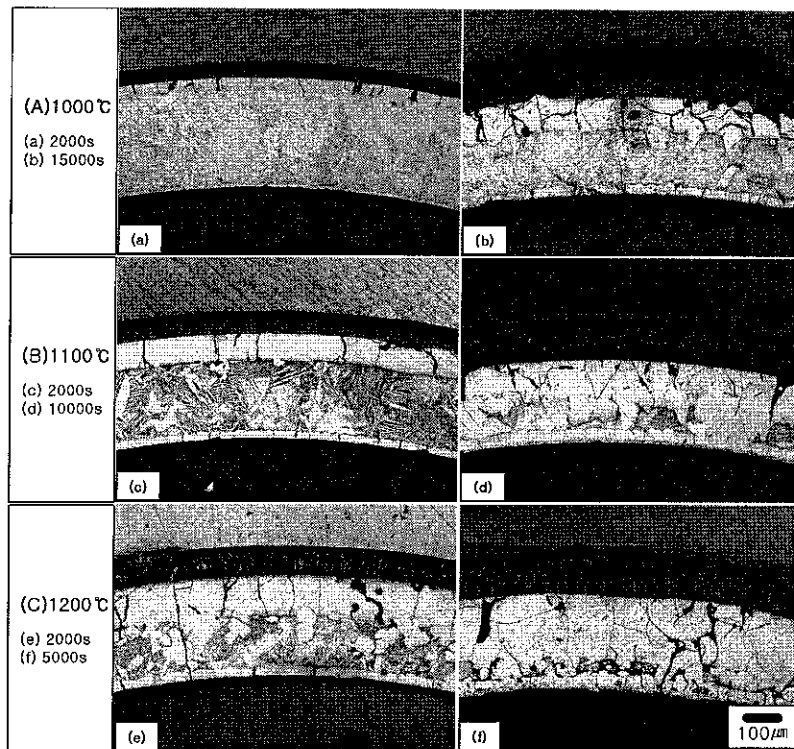


Fig. 5. Optical microstructure of Zircaloy-4 after steam oxidation and quenching; (A) 1000°C, (B) 1100°C, (C) 1200°C

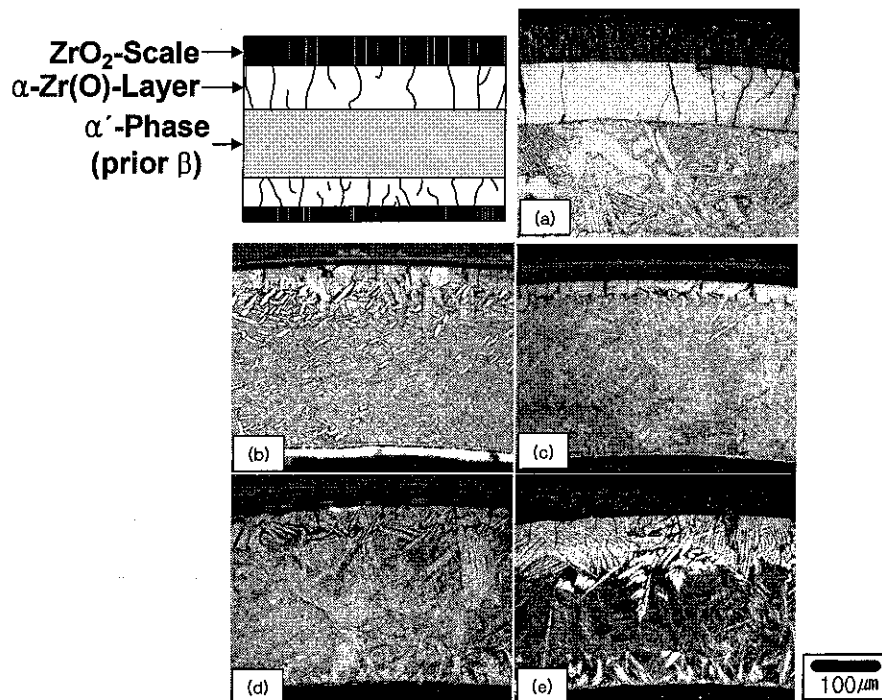


Fig. 6. Optical microstructure of Zircaloy-4, Zirlo, B and KAERI claddings after steam oxidation and quenching (Oxidation at 1100°C for 3000s); (a) Zircaloy-4, (b) KC, (c) KD, (d) KF, (e) KH

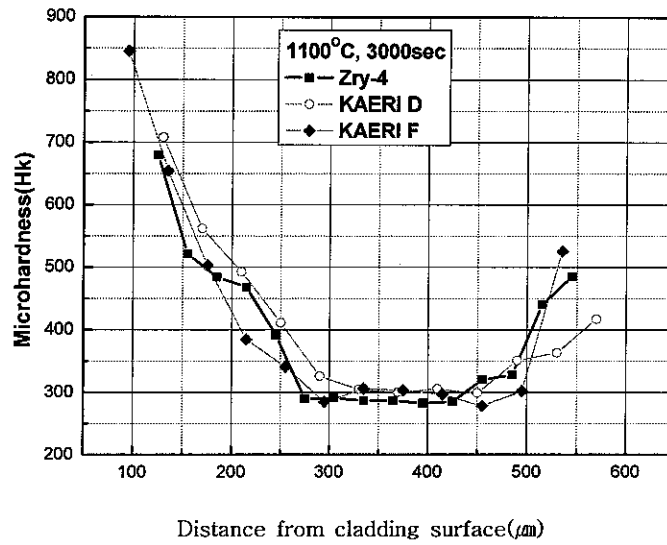


Fig. 7. Hardness of Zircaloy-4 and KAERI claddings after steam oxidation and quenching (Oxidation at 1100°C for 3000s)

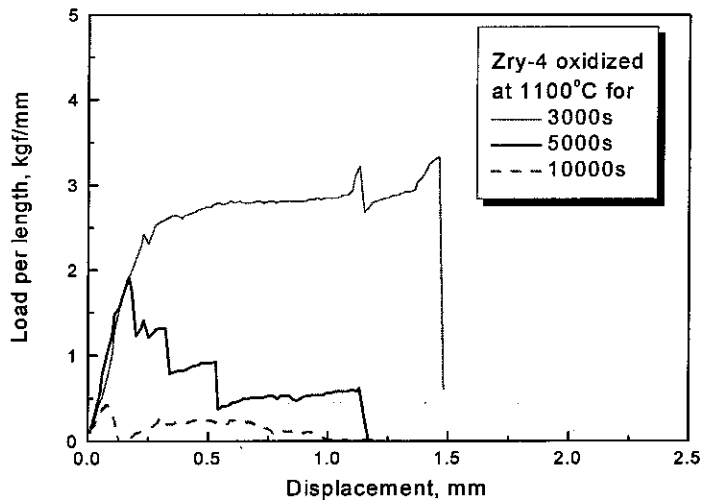


Fig. 8. Ring compression test of Zircaloy-4 after steam oxidation and quenching

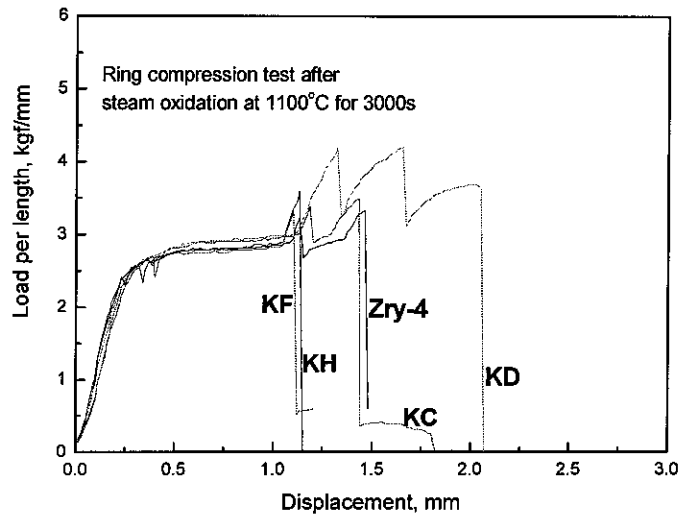


Fig. 9. Ring compression test of Zircaloy-4, KAERI claddings after steam oxidation and quenching (Oxidation at 1100°C for 3000s)

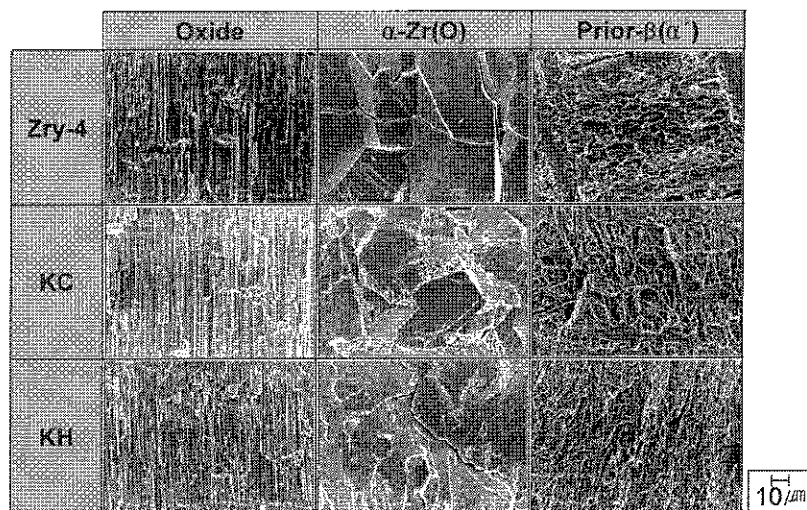


Fig. 10. Fractographs after ring compression test of Zircaloy-4 and KAERI claddings (Oxidation at 1100°C for 3000s)