'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Low Tin Zry-4 핵연료피복관의 파열강도에 미치는 열처리와 시험온도의 영향

Effect of Heat Treatment and Testing Temperature on Burst Strength of Low Tin Zry-4 Fuel Cladding

김경호, 남철, 최병권, 이명호, 정용환

한국원자력연구소

요 약

Low tin Zircaloy-4 핵연료피복관을 가지고 열처리와 시험온도 변화 따른 파열강도특성과 고온변형거동을 알아보기 위하여 온도범위 상온에서부터 500℃까지에서 파열시험을 수행하였다. 응력이완 열처리한 시편이 완전재결정열처리한 시편보다 전 시험온도에서 최대원주응력은 높았으나, 반면에 균일파열연신율(UBE)과 총 원주연신율(TCE)은 낮았다. 응력이완열처리한 시편의 연신율이 증가하는 변곡점은 300℃이며, 완전재결정열처리한 시편의 연신율 극대점은 400℃을 나타내었다. 시편의 파열 메카니즘은 최대원주응력까지는 튜브의 모든 방향으로 균일하게 원주방향으로 변형되다가 시편의 어느 한 부분에 pinhole과 같은 소수의 균열이 생기면 응력이 집중되어 국부적인 두께감소가 일어나서 결과적으로 파열되는 이른바 핀홀파괴라 생각된다.

Abstract

The tube burst tests were conducted on low tin Zircaloy-4 claddings in order to obtain preliminary perspectives on the deformation behavior and burst characteristics by changing final annealing conditions (i.e., stress-relieved and recrystallized) and test temperatures (i.e., room temperature to 500℃). The ultimate hoop stress of stress-relieved tube was exhibited higher than that of the recrystallized at all test temperatures, and the uniform burst elongation and total circumferential elongation were exhibited vice versa. The inflection point was observed on the elongation of the stress-relieved tubes at around 300℃, while the recrystallized sample showed the maximum elongation at around 400℃. The burst mechanism was believed to be occured by pinhole fracture that caused by the local stress concentration at a small crack after uniform deformation behavior until ultimate strength.

1. 서론

가압형경수로(pressurized water reactor)의 냉각재상실사고(loss-of -coolant accident)는 핵연료집합체를 구성하는 연료봉으로 사용되고 있는 지르칼로이 피복관이 가동 중 고온으로 가열되고 또한 내외압력의 차에 의해서 부풀어올라 변형 파열되어 일어나는 중대사고다. 이러한 팽창변형은 핵분열생성물을 밀봉하는 제 1의 벽으로서의 피복관의 성능에 대해서 뿐만 아니라 노심 전체의 열 수력거동에 대해서도 중대한 영향을 미친다. 그러므로 ASTM B 811-97과 외국피복관 제조회사들은 피복관에 대해서 제조시 성능요건을 명시한다. 한 예로 ASTM B 811-97에서는 최대원주응력(ultimate hoop stress, UHS)은 500MPa 이상, 그리고 총 원주연신율(total circumferential elongation, TCE)는 초기 표점거리 50mm에서 최소 20%를 요구하고 있다. 일반적으로 연료봉의 파괴는 위에서 언급한 사항 외에 펠렛과 피복관의 상호작용(pellet/cladding interaction, PCI), 내부 수화물화(internal hydriding), 피복관 붕괴(cladding collapse), 침식(fretting), 연료펠렛 과열(overheating of fuel pellets), 과도한 연료 엔탈피(excessive fuel enthalpy), 파열(bursting) 그리고 기계적인 파괴(mechanical fracturing) 등으로 야기된다. 따라서 이러한 변형거동을 조사하기 위하여 단일의 관 또는 모의 연료집합체를 이용하여 여러 연구자들에 의해서 다수의 실험이 행하여져 왔다 [1,2,3,4,5]. 이들 실험은 피복관내에 일정한 어느 값의 초기 내압을 가한 후, 초기 내부의 가스 용적에 대하여 여러 종류의 가열속도로 가열하거나 또는 여러 종류의 시험 온도, 가압속도, 시험환경분위기, 심봉(mandrel)의 유무 그리고 파열시험기를 변화시키며 수행하였다. 그러나 파열시험에 있어서는 압력유체를 유압으로 시험하는 규격 외에 기체로 시험하는 경우와 특히, 고온에서의 파열시험 규격은 아직 정립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 자체적으로 제작한 아르곤 가스를 압력유체로 하는 최대 가압능력 20,000 psi까지 가압할 수 있는 파열시험기를 이용하여 low tin Zircaloy-4 단일 피복관을 가지고 시험온도 변화에 따른 파열강도특성과 고온변형거동 실험과 아울러 광학편광현미경과 주사전자현미경(SEM)으로 미세조직 및 파단면 관찰를 수행하였다.

2. 실험방법

2-1. 시편준비(Specimen preparation)

본 연구에 사용된 재료는 현재 경수로 가압 경수로(PWR)에서 사용되고 있는 Sandvik Special Metals Corp.에서 공급된 핵연료피복관으로서 화학적 조성은 표 1과 같다. 피복관의 외경과 내경은 각각 9.7mm, 8.433mm이고, 최소 벽두께(wall thickness)는 0.58mm이다. 진원도(ovality)는 최대 0.076mm이며, 편심도(eccentricity)와 진직도(straightness)는 각각 최대 0.1mm와 0.2mm/25mm이다. 주괴(ingot)제조는 3번의 용해를 실시하였고, 또한 최종 열처리 변화에 따른 피복관의 기계적 특성을 조사하기 위하여 응력이완(496℃, 4시간)과 완전재결정 열처리(580℃, 4시간)를 진공 열처리로에서 수행하였다. 여기서부터 응력이완이완 열처리한 시편을 편의상 T1, 완전재결정열처리한 시편을 T2라 명명하기로 한다. 끝단 밀봉파열시험(the closed-end burst test)을 위한 파열시편(burst test Zircaloy-4 cladding specimen)은 열처리와 시험온도 변화에 따른 파열강도 특성을 조사하기 위하여 ASTM B 811-97과 KWU 규격으로 제작하였다. 시편의 크기는 길이는 평균 외경의 최소 10배 이상인 150mm로 절단하였으며, 원주방향과 축 방향 응력비가 2 : 1이 되도록 끝단 밀봉(end fitting)을 하였다. 또한 튜브인장시편은 ASTM E 8M 규격으로 길이는 150mm, 표점거리는 50mm가 되도록 절단하였으며, 튜브시편의 인장시험을 위한 metal plug을 제작하였다.

2-2. 시편내부 심봉(Internal mandrel) 제작

심봉은 시편의 내부공간의 가스체적을 감소시켜 시편 파열 시에 용출가스의 총 운동량을 감소시키는 목적 이외에 파열시험 시에 시편의 굽힘(bending)을 방지하기 때문에 TCE(total circumferential elongation)를 증가시킨다고 Kallstrom[6,7]은 제안하였다. 따라서 본 시험을 위한 심봉의 제작은 ASTM B 811-97에 명시 되어있는 규격으로 심봉(mandrel) 외경은 튜브의 평균 내경 보다 작게 하여 간극은 0.25 mm ± 0.05mm가 되도록 하였고, 이 간극은 시편 내에 압력유체가 유체의 이동이 용이하도록 양끝을 axial relief groove 처리한 부분을 제외한 값이다. 길이는 시편의 길이보다 약 1~2 %의 틈새를 주었다. 또한 시편 내부에 들어가는 심봉은 시험하는 동안 시편의 축 방향 변형에 방해를 주지 않도록 하여야 하기 때문에 양끝을 테이퍼(taper) 가공을 하였다.

2-3. 파열시험 장치(Burst test apparatus for the closed-end burst test)

파열시험 장치를 사진 1 (a)와 (b)에 나타내었다. 최대 가스 가압 용량은 최대 20,000 PSI까지 이며, 압력유체는 아르곤 가스를 사용한다. 장치에 부착된 전기로는 최대 600℃까지 승온 시킬 수 있는 3-zone type으로서 균일온도 구간(uniform zone)은 10cm 이며, 목적온도에서 온도편차는 ± 2℃ 이다. 사진 1 (a)는 파열시험장치의 앞면을 나타내며, 가압속도와 온도를 조절할 수 있는 조절기와 압력과 온도를 표시해주는 지시계, 그리고 파열시험 동안 압력을 기록하는 기록계가 설치되어 있다. 사진 1 (b)는 파열시편을 장착할 수 있는 상.하 운동이 가능한 전기로 밑면으로서 고압가스라인을 연결할 수 있도록 되어있다.

2-4. 끝단 밀봉 파열시험(Closed-end burst test)

응력이완과 완전재결정 열처리 된 low Sn Zircaloy-4 cladding 시편을 사진 1 (b)에서와 같이 수직으로 장착하고 시편중앙 표면에 열전대를 부착한 후, 시편을 전기로 내로 올리고 나서 상온, 300℃, 350℃, 350℃, 400℃, 450℃ 그리고 500℃ 까지 시험온도를 변화시키면서 파열시험을 실시하였다. 시편상단은 캡(cap)으로 밀봉되어 있고, 시편이 일단 목적온도까지 도달하면 10분 이상 유지한 후 가압기를 작동시켜 가압기의 각 행정마다 압력의 급격한 변동(surge)이 발생하지 않도록 약 50 bar/min의 일정한 가압속도로 아르곤가스를 가압한다. 시편 내부의 가압속도는 가압기와 시편내 공간의 사이를 연결하는 가스파이프의 중간에 설치된 유량미세 조절가능한 제어밸브에 의하여 조절된다. 시편의 표면온도는 K-type 열전대에 의해서 계측하며 또한 제어한다. 시편은 점차적으로 높아지는 내압에 의하여 천천히 팽창변형을 진행하고 결국엔 파열된다. 이 때 파열시험 동안 시편 내압의 변화는 기록계에 기록된다.

2-5. 파열강도 및 원주연신율 계산

파열시험으로부터 얻은 파열시 튜브의 내압과 원주방향 신장량을 가지고 최대원주응력(ultimate hoop stress) 또는 최대파열강도(ultimate burst strength) 여기서는 같은 의미로 사용한다. 총 원주연신율(total circumferential elongation) 그리고 균일 파열연신율(uniform burst elongation)을 구하였다. 최대원주응력은 다음과 같은 얇은 벽 두께를 가진 원통형 원주응력 공식으로부터 구하였다.

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{2t} \quad \text{---------- (2.1)}$$

여기서 σ_θ : 최대파열강도(total hoop strength, psi or MPa),

P : 튜브 내 최대유체의 압력(maximum fluid pressure, psi or MPa),

D : 평균외경 - 평균 벽두께(average outside diameter minus average wall thickness, in, or mm),

t : 시험 전 최소 벽두께(minimum pretest wall thickness, in. or mm 이다.

총 원주연신율(total circumferential elongation, %TCE)은

$$\%TCE = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100 \quad \text{---------- (2.2)}$$

여기서 C_1 : 시험 전 원주길이(pretest circumference,

C_2 : 파열 개구부를 제외한 시험 후 원주길이(post test circumference excluding burst opening)로부터 구하였다.

균일 파열연신율(uniform burst elongation, %UBE)은 원주길이를 파열 개구부로부터 길이 방향으로 20mm 되는 지점에서 측정한 값이므로 일반적으로 TCE값 보다 작게 나타나나 측정 정밀도 측면에서는 측정에 대한 편차가 작다.

2-6. 인장 시험

2-1에서 기술한 방법으로 제작한 두 종류의 low Sn Zircaloy-4 튜브시편(T1, T2)을 가지고 metal plug를 튜브시편에 넣고 유압그립으로 물린 후 항복강도까지는 cross head speed를 0.127 mm/min로, 항복강도 이후부터는 10배로 cross head speed를 증가시킨 1.27mm/min으로 상온인장시험을 수행하였다. 여기에 사용된 정적 인장시험기는 용량이 10 ton이다.

2-7. 미세조직 및 파단면 관찰

열처리를 달리한 두 종류의 T1과 T2 시편을 가지고 미세조직과 파단면을 관찰하기 위하여 광학 편광 현미경과 SEM을 사용하여 미세조직관찰은 시편의 길이방향에 대한 수직면(단면)에서 시편을 채취하였고, 파단면 관찰은 6 종류의 파열시험 온도에서 파열된 튜브를 가지고 사진 2와 같이 길이방향에 수직인 면을 채취하여 파열변형 후의 파단면을 SEM으로 관찰하였다. 미세조직 관찰을 위한 시편의 연마는 SiC 연마지 #220번으로 1차 연마를 한 후 #2000번의 연마지로 최종 polishing 을 하였고, etching은 HF 10%, HNO_3 45%, 증류수 45%의 비율로 혼합한 용액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 최대파열강도 및 원주 연신율에 미치는 열처리의 영향

열처리를 달리한 두 개의 시편을 가지고 파열시험한 결과를 그림 1에 나타내었다. 그

림 1에서 알 수 있듯이 시험온도 전 구간에서 응력이완 열처리(stress relief annealing)한 시편(T1)이 완전재결정열처리(fully recrystallization annealing)한 시편(T2)보다 높은 파열강도 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 응력이완 열처리된 시편은 냉간가공에 의한 전위(dislocation)들이 기지조직 내에 균일하게 분포된 가공조직의 영향 때문이라 생각된다. 상온에서부터 350℃까지는 대략 180~220 MPa로 큰 차이를 보이다가 시험온도가 더욱 증가함에 따라 두 시편간의 최대파열강도의 차이는 점차적으로 감소하여 마지막 500℃에서는 5 MPa로 거의 차이가 없음을 나타내는데 이는 높은 시험온도와 파열변형속도가 빨라 초소성 현상 때문인 것으로 사료된다. 열처리 변화에 따른 균일파열연신율(%UBE)과 최대원주연신율(%TCE)를 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 두 연신율 역시 전 온도 구간에서 완전재결정열처리한 시편(T2)이 응력이완열처리한 시편(T1) 보다 높은 값을 보인다. 시험온도 전 구간에서 UBE(%)는 대략 10% 이상 높았으며, TCE(%)는 20~60%의 차이를 나타내었다. 이러한 현상 또한 열처리 변화에 의한 미세조직의 영향이라 사료된다. 이러한 시험결과로부터 피복관의 기계적 특성은 열처리 변화에 매우 민감함을 알 수 있다.

3-2. 시험 온도의 변화에 따른 파열특성

어느 일정한 시험온도에 도달하면 가압 미세조정 밸브를 열어 파열시험을 실시한다. 열처리를 달리한 두 종류의 튜브시편을 가지고 6 종류의 시험온도에서 파열시험을 수행하여 얻은 결과를 그림 1, 그림 2 그리고 그림 3에 나타내었다. 그림 1에서는 시험온도 변화에 따른 최대 파열강도를 나타내는데 시험온도가 증가함에 따라서 두 시편 모두 상온에서부터 300℃까지는 직선적으로 급격하게 강도 값이 떨어지다가 300℃ ~ 450℃ 구간에서는 완만하게 감소하는 경향을 보이며 최종 시험온도 500℃에서는 다시 비교적 급격히 강도저하 현상을 보인다. 따라서 최대 파열강도는 파열 시험온도에 대하여 강한 의존성을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 특히 시험 온도 300℃~450℃ 구간에서의 파열강도의 plateau 현상은 동적변형시효 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다[8]. 그림 2는 시험온도 변화에 따른 균일 파열 연신율(uniform burst elongation)을 나타내는데 시편 모두 대체로 시험온도가 증가함에 연신율이 증가함을 알 수 있다. 응력이완열처리한 시편(T1)의 연신율 변화거동을 살펴보면 상온보다 300℃에서 오히려 연신율이 약간 감소함을 보이며, 300℃를 기점으로 하여 연신율이 다시 증가함을 나타낸다. 그러나 완전재결정열처리한 시편(T2)은 400℃까지는 응력이완열처리한 시편과 같은 변형거동을 보이나 400℃부터는 반대로 연신율이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 따라서 응력이완열처리한 시편의 연신율 증가하는 변곡점(inflection point)은 300℃이며, 완전재결정열처리한 시편의 연신율 극대점은 400℃임을 알 수 있었으나 이러한 결과에 대한 해석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 그림 3은 시험온도 변화에 대한 총 원주연신율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 그림 2에서와 같이 시험온도가 증가함에 따라 연신율 또한 증가함을 보이나 응역이완열처리한 시편의 경우 연신율 증가 변곡점이 고온 쪽(450℃)으로 이동되었음을 알 수 있다. 그리고 완전재결정열처리한 시편은 그림 2에서 보여준 변형거동과는 달리 연신율 극대점이 없이 거의 직선적으로 증가함을 나타내었다.

3-3. 열처리 변화에 따른 인장 성질

열처리를 달리한 두 종류의 low Tin Zircaloy-4 피복관을 가지고 인장시험을 실시한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 496℃에서 4시간 동안 최종 열처리한

T1 시편이 580℃에서 완전재결정열처리한 T2시편 보다 인장강도는 약 200MPa, 항복강도는 27MPa 만큼 높은 강도를 나타내었으며, 연신율은 반대로 T2시편이 14.9%나 높은 34.2%의 값을 나타내었다. 그림 5는 T1, T2 시편에 대한 마지막 열처리 후의 미세조직을 보여주는데 그림 5 (a)에서 알 수 있듯이 T1시편의 경우는 주로 가공조직을 보이며, T2 시편은 그림 5 (b)에서 보여주듯이 완전재결정상태를 나타낸다. 이러한 미세조직의 차이가 시편의 기계적 성질에 영향을 주었다고 생각된다. 따라서 같은 화학조성을 갖는 재료라 할지라도 가공공정, 즉 단순히 마지막 열처리만을 변화시켜도 재료의 기계적 성질을 조절할 수 있다는 것을 판단할 수 있다.

3-4 파열시험 후의 파단모드 해석

시험온도의 변화에 따른 파열시험 후, T1, T2 시편의 파단면을 관찰하기 위하여 사진 2에서와 같이 파열시편의 길이방향에서 시편을 채취한 후 시편의 반경방향(radial direction)을 관찰하였다. 그림 6은 T1시편에 대한 파열시험 후의 파단면을 보여주는데 그림 6 (a)의 상온에서는 준 벽개파괴(quasi-cleavage)을 주로 보인다. 이러한 파괴양상은 적은 양의 소성변형으로 재료 내부에 흡수되는 에너지가 작기 때문이다. 시험온도 300℃ 이상부터는 그림 6의 (b), (c), (d), (e) 그리고 (f)의 경우에서와 같이 많은 양의 전단 혹은 소성변형을 필요로 하여 상당량의 에너지를 흡수하는 연성파괴 즉, 전단파괴(shear tearing)에서 작은 딤플들이 서로 연결되어 딤플파괴(dimple rupture)로 파단됨을 보여준다. 그림 7은 T2시편에 대한 파열시험 후의 파단면을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 시험온도가 증가함에 따라서 딤플의 크기가 증가함을 보여주며, 이러한 현상은 최대 원주연신율 증가와 일치한다. 따라서 전형적인 연성파괴 현상을 나타낸다. 그림 8은 T1, T2 시편의 인장시험 후의 파단면을 보여준다. 두 시편 모두 연성파괴를 보이며 T1시편에 비해서 T2시편의 딤플이 큼을 나타내고 있는데, 이러한 딤플 크기의 차이가 연신율에 영향을 주었음을 알 수 있다.

3-5. 변형형태 해석

관찰된 현상 중에서 무엇보다도 주목해야하는 특징은 파열 후의 시편의 형상이다. 사진 3은 시험온도 변화에 따른 파열시험 후의 T2시편의 변형 파열된 모습을 보여준다. 상온을 제외한 모든 시험온도에서의 파열된 시편의 모습은 유사하나 온도가 증가함에 따라서 국부적으로 부풀어 오른 변형량이 커짐을 알 수 있다. 시편의 파열 메카니즘(mechanism)은 최대원주응력까지는 튜브의 모든 방향으로 균일하게 원주방향으로 즉, 초기단계에서는 튜브 직경의 중심축에 대칭으로 변형되다가 시편의 어느 한 부분에 pinhole과 같은 소수의 균열이 생기면 응력이 집중되어 국부적인 두께감소가 일어나, 결과적으로 파열되는 이른바 핀홀 파괴(pinhole fracture)라 생각된다.

4. 결 론

열처리를 달리한 두 종류의 Low Tin Zircaloy-4 피복관을 가지고 시험온도의 변화에 따른 아르곤 가스를 압력유체로 한 파열시험과 인장시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험온도 전 구간에서 응력이완 열처리(stress relief annealing)한 시편(T1)이 완전재결정열처리(fully recrystallization annealing)한 시편(T2)보다 상온에서부터 350℃까지는 대

략 180~220 MPa이고, 시험온도가 더욱 증가함에 따라 두 시편간의 최대파열강도의 차이는 점차적으로 감소한다. 이는 높은 시험온도와 파열변형속도가 빨라 초소성 변형 현상 때문인 것으로 사료된다.

(2) 시험온도가 증가함에 따라서 두 시편 모두 상온에서부터 300℃까지는 직선적으로 급격하게 강도 값이 떨어지다가 300℃ ~ 450℃ 구간에서는 완만하게 감소하는 경향을 보이며, 최종 시험온도 500℃에서는 다시 비교적 급격히 강도저하 현상을 보인다. 따라서 최대 파열강도는 파열 시험온도에 대하여 강한 의존성을 나타낸다.

(3) 균일파열연신율(UBE)은 응력이완열처리한 시편의 연신율이 증가하는 변곡점(inflection point)은 300℃이며, 완전재결정열처리한 시편의 연신율 극대점은 400℃을 나타내었다. 총 원주연신율(TCE)은 응력이완열처리한 시편의 경우 시험온도가 증가함에 따라 연신율은 직선적으로 증가함을 보이나 응력이완열처리한 시편의 경우 연신율 증가 변곡점이 고온 쪽(450℃)으로 이동하였다.

(4) T1시편의 파단은 상온에서는 준 벽개파괴(quasi-cleavage) 보이는데, 이러한 파괴양상은 적은 양의 소성변형으로 재료 내부에 흡수되는 에너지가 작기 때문이며, 시험온도 300℃ 이상부터는 상대적으로 많은 양의 전단 혹은 소성변형을 필요로 하여 상당량의 에너지를 흡수하는 연성파괴를 나타낸다.

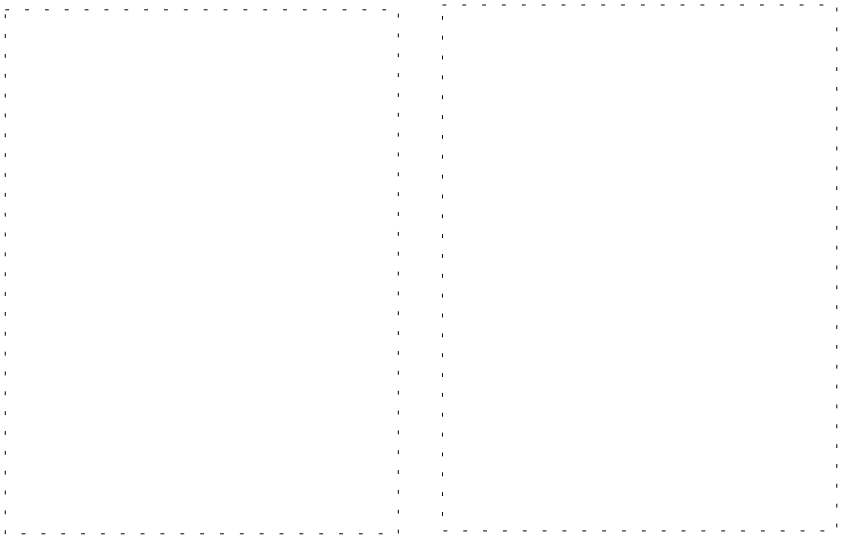
(5) 시편의 파열 메카니즘(mechanism)은 최대원주응력까지는 튜브의 모든 방향으로 균일하게 원주방향으로 즉, 초기단계에서는 튜브직경의 중심축에 대칭으로 변형되다가 시편의 어느 한 부분에 pinhole과 같은 소수의 균열이 생기면 응력이 집중되어 국부적인 두께 감소가 일어나, 결과적으로 파열되는 이른바 핀홀파괴(pinhole fracture)라 생각된다.

참고문헌

1. Motoye SUZUKI,"High temperature deformation behavior of gradually pressurized Zircaloy-4 tubes", JAERI-M 82-015, 1982, pp1-21
2. D. G. Hardy,"The effect of neutron irradiation on the mechanism properties of zirconium alloy fuel cladding in uniaxial and biaxial tests",ASTM STP 484, 1970, pp.215-258
3. Mishima, YoshitsugUa,"Standard works on testing procedures for Zircaloy cladding tubes in Japan", ASTM STP 633, 1977, pp. 650-668
4. F. J. Erbacher, et al.,"Burst criterion of Zircaloy fuel claddings in loss-of -coolant accident", ASTM STP 754, 1982, pp.271-283
5. D. G. Hardy et al,"Development of a closed-end burst test procedure for Zircaloy tubing", ASTM STP 551, 1974, pp. 14-30
6. Kallstrom, K., "Priciples of burst testing of Zircaloy canning tubes and factors influencing the result", paper presented at the symposium on mechanical properties of zirconium alloys, Americal Society for Testing and Materials, Williamsburg, Va., 18 Nov. 1970, Report 61479. The Sandvik Steel Research Center. Nov. 1970.
7. Kallstrom, K., Journal of nuclear materials, vol. 31, 1969, p.111
8. 김경호, 남철, 정용환, 정연호,“핵연료피복관 합금의 기계적성질과 동적변형시효”,대한기계학회 2000년도 제1회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, KSME 00MF022, 2000. pp.167-175

Table 1 Chemical composition of low Sn Zry-4 cladding

element (wt%) / alloy I.D	Sn	Fe	Cr	O	Si	C	Zr
DNU51	1.31	0.22	0.12	0.131	0.0092	0.016	bal.



(a) (b)

Photo 1. Burst testing apparatus with Zircaloy-4 cladding and thermocouple for the closed-end burst test : (a) control panel, (b) ruptured Zircaloy-4 cladding

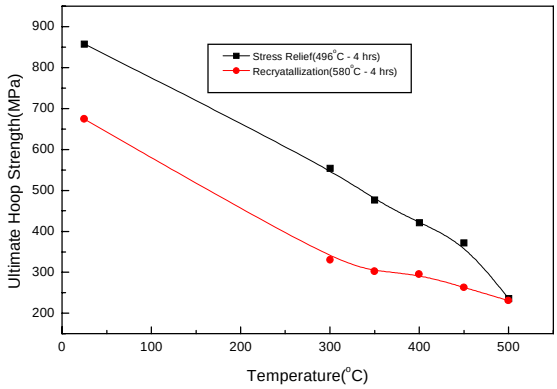


Fig. 1 Ultimate burst strength versus burst temperature of low Sn Zircaloy-4 cladding

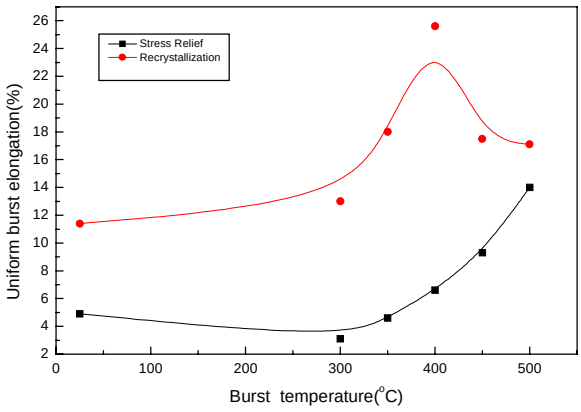


Fig. 2 Uniform burst elongation as function of burst temperature of low Sn Zircaloy-4 cladding

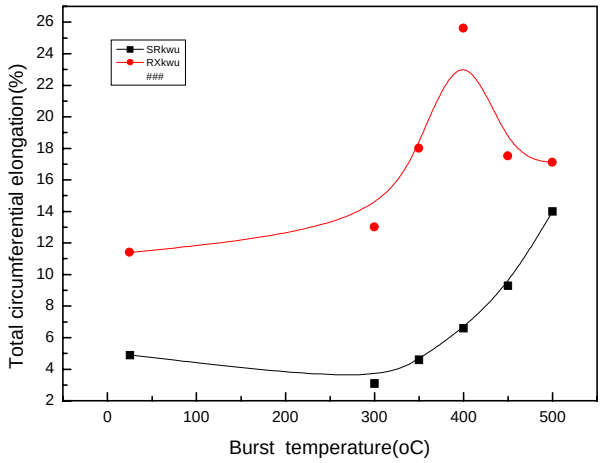


Fig. 3 Total circumferential elongation as a function of burst temperature of low Sn Zircaloy-4 cladding

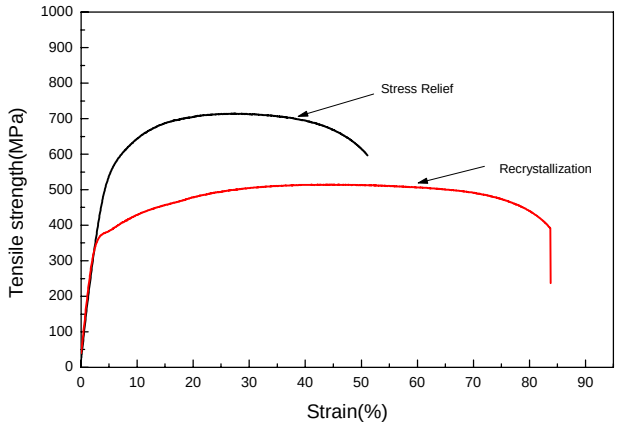


Fig. 4 Stress Versus curves of low Sn Zircaloy-4 cladding with heat treatment at room temperature

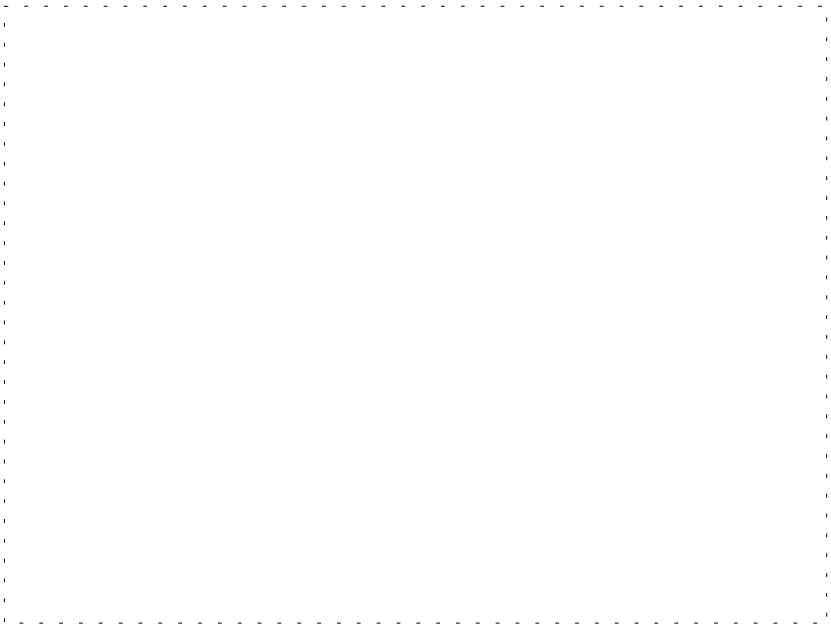
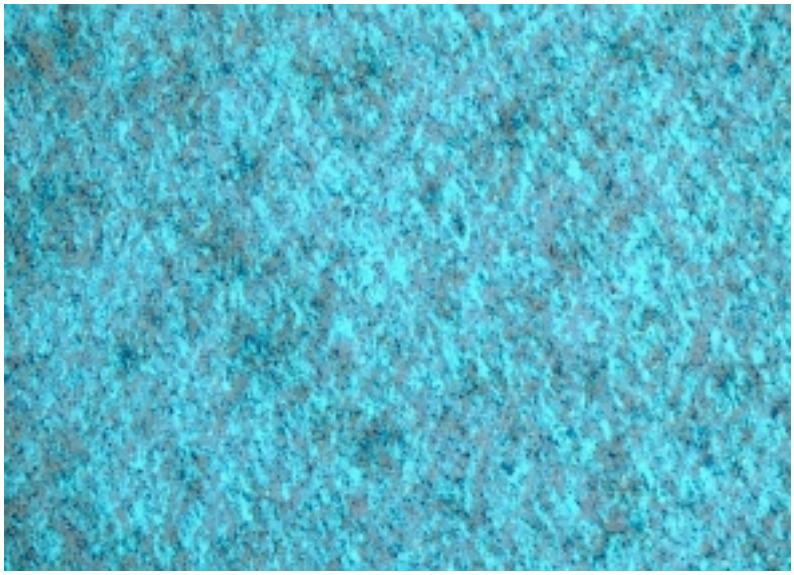
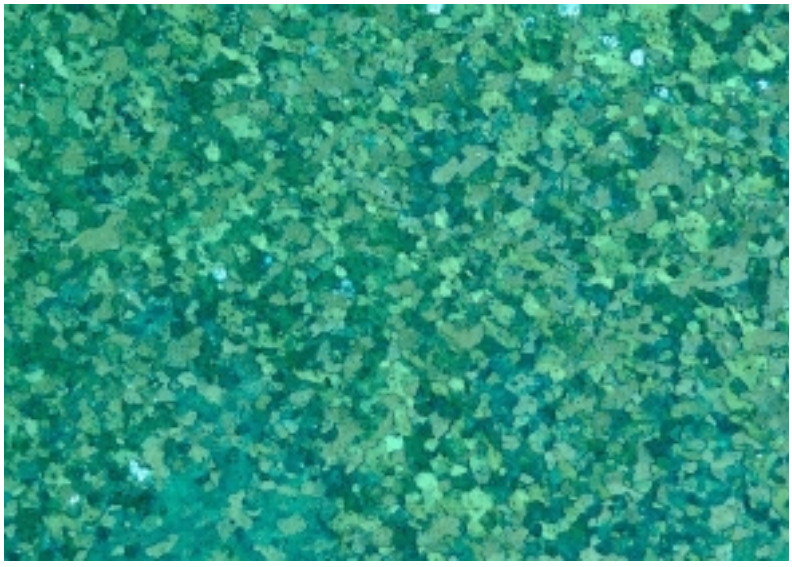


Photo 3. Overall view of ruptured low Sn Zircaloy-4 claddings with pressurization rate of 50 bar/min in Ar gas as a function of burst temperature



(a)



(b

Fig. 5 Optical microstructures of low Sn Zry -4 cladding as a function of heat treatment : (a) stress relieved(496^{o}C –4hrs) and (b)recrystallized (580^{o}C – 4hrs) specimens

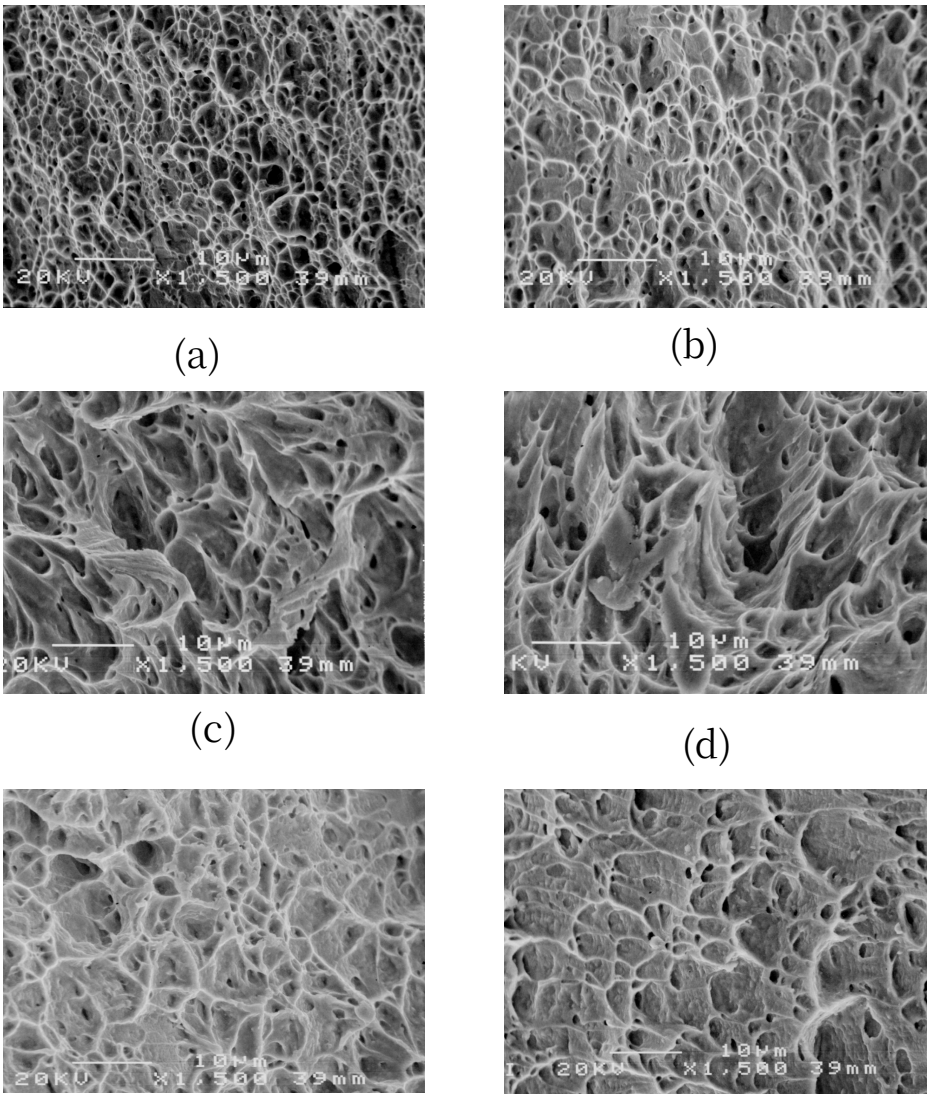


Fig. 6 SEM fractographs of low Sn Zry -4 cladding of recrystallized specimen at 580°C for 4hrs with testing temperature after burst test : (a) RT, (b) 300, (c) 350, (d) 400, (e) 450 and (f)500°C

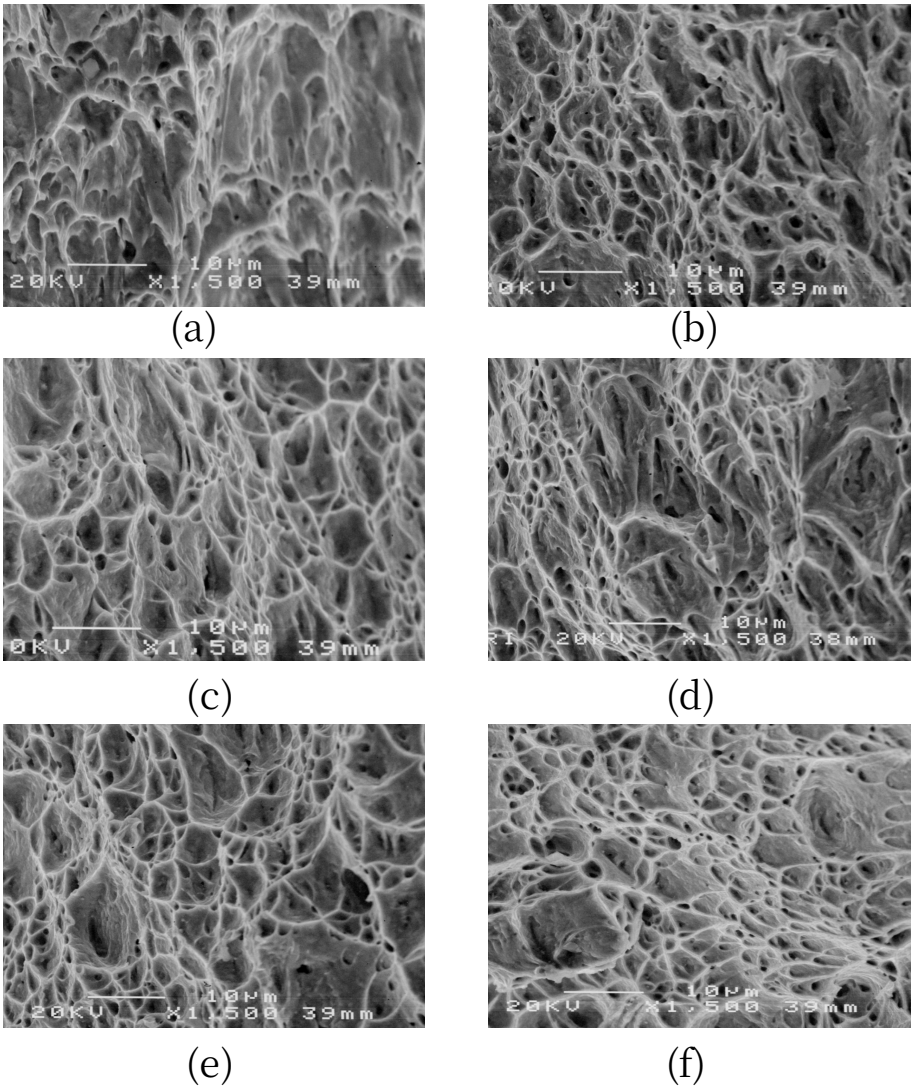
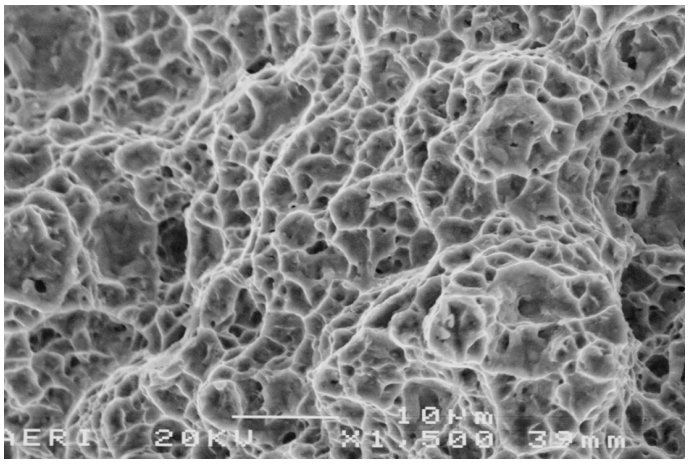
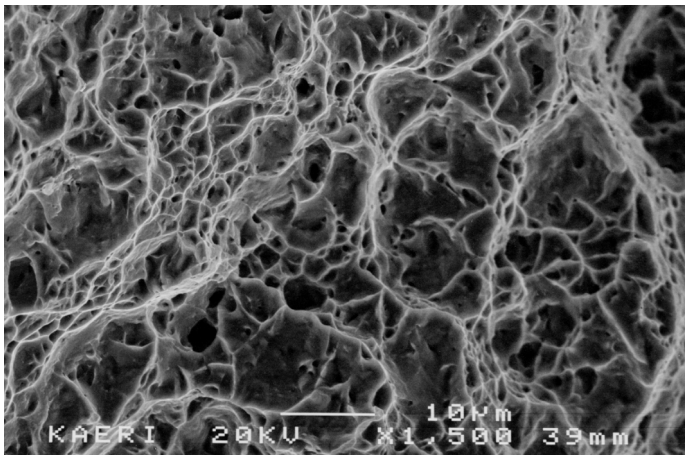


Fig. 7 SEM fractographs of low Sn Zry -4 cladding of stress relived specimen at 496°C for 4hrs with testing temperature after burst test : (a) RT, (b) 300, (c) 350, (d) 400, (e) 450 and (f) 500°C



(a)



(b)

Fig. 8 SEM fractograghs of low Sn Zry -4 cladding after tensile test at room temperature : (a)stress reliived and (b) recrystallized specimen

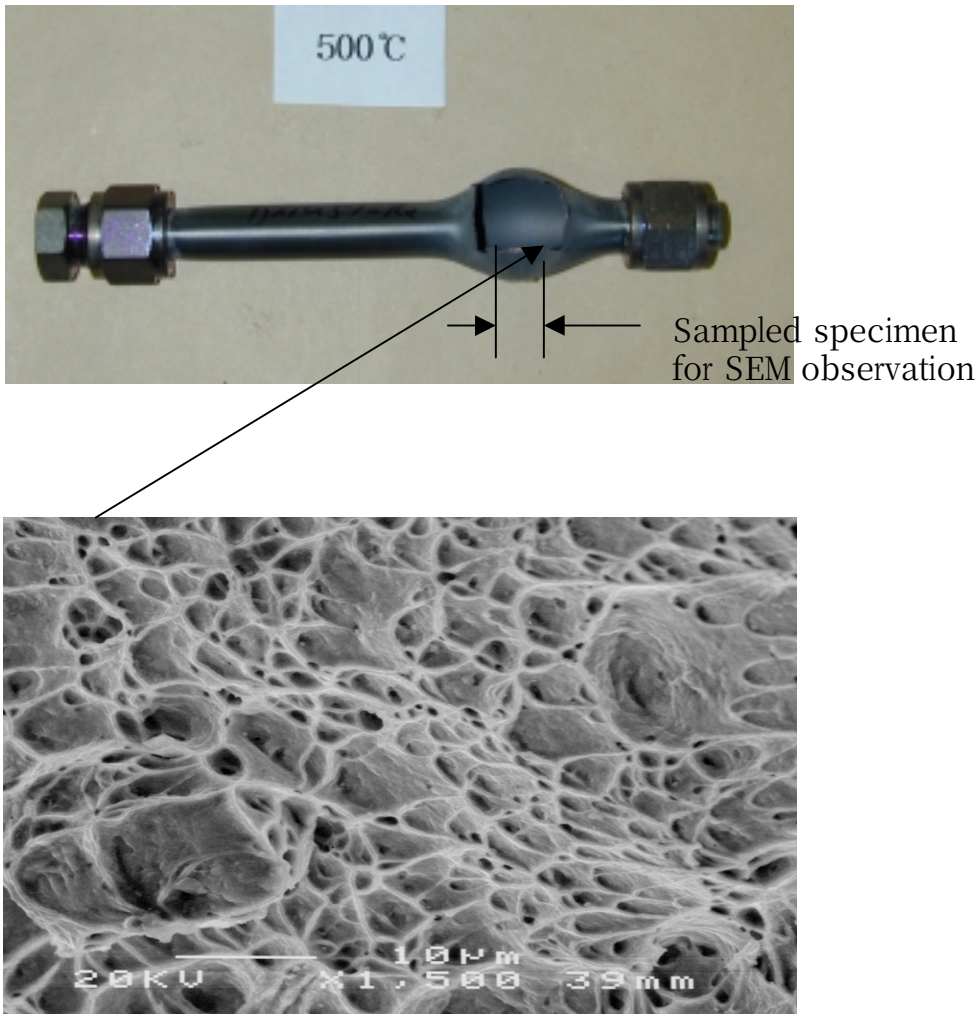


Photo 2. SEM fractograph and ruptured low Sn Zircaloy-4 Cladding after burst test at 500°C