

핵연료 피복관의 핫셀용 개량 링인장시험기술

Modified Ring Tensile Test Technique for Fuel Cladding in Hot Cell

김도식, 주용선, 안상복, 송웅섭, 유병옥, 백승제, 김기하, 홍권표, 김선기
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료 피복관의 원주방향 인장특성 평가를 위하여 개발된 기존의 다양한 시험법들을 기초로 핫셀시험에 적합한 개량 링인장시험법을 제안하였다. 피복관의 링인장시험에 사용되는 그립의 형상 및 치수는 링인장시험 동안 시편의 곡률이 일정하게 유지되도록 결정하였으며, 링시편 내부와 그립사이의 마찰을 최소화하기 위하여 테프론 테이프와 흑연계 윤활제를 사용하였다. 링시편은 변형이 게이지부 내로 한정되고 게이지부 내에서 균일한 단축 원환변형을 분포를 나타내도록 설계하였다. 제안된 개량 링인장시험법에 대하여 핫셀 내에서의 사용 조건에 대한 적합성, 원격조종기(manipulator) 등에 의한 원격조작의 용이성 그리고 얻어진 시험결과에 대한 정확성 등을 검토하였다. 이상과 같이 제안된 인장시험법을 적용함으로써 핵연료 피복관의 원주방향 기계적 특성을 정확하게 평가할 수 있다. 이로부터 피복관의 안전성 해석과 관련 규정에서 사용되는 피복관 손상기준의 개선에 필수적인 자료를 제공하게 된다.

Abstract

The modified ring tensile test technique was proposed in order to evaluate mechanical properties of fuel cladding under hoop loading condition in hot cell. The hoop loading grip for ring tensile test is designed such that a constant specimen curvature is maintained during deformation, and Teflon tape and graphite lubricant were used to minimize the friction between the outer surface of the die insert and the inner surface of the ring specimen. The ring specimen design for ring tensile test is conducted to limit deformation within the gauge section and to maximize uniformity of strain distribution. Using this test technique, the mechanical properties under hoop loading condition can be correctly evaluated. Therefore, the obtained results will be used to update fuel/cladding behavior databases and computer models, to improve predictions of deformation, and to help establish failure criteria.

1. 서 론

핵연료의 피복재(cladding material)로 사용되는 피복관은 핵연료와 냉각재의 접촉을 차단하여 핵연료와 냉각재 사이에서 일어나는 화학적 반응을 막아 주는 동시에 핵분열생성물이 냉각재로 유출되는 것을 방지하는 중요한 기능을 가지고 있다. 핵연료 피복관은 고온 및 고압의 가혹한 방사선 분위기에서 사용되므로, 연료의 사용 기간 동안에 피복관의 기능이 유지되도록 핵적 조건 외에 고온 강도 등 기계적 조건과 내식성 등의 화학적 조건을 만족해야 한다[1]. 최근에는 상용 원자력발전소의 경제성 향상 및 방사성폐기물 감소 등의 다양한 이점 때문에 경수로 연료의 고연소도화가 각국에서 진행되고 있다. 이러한 고연소도화에 따라 핵연료의 노내 체재시간이 길어지기 때문에 피복관의 부식 및 수소흡수가 진행되어 피복관이 가지고 있는 기존의 우수한 기계적 특성이 열화된다. 그러므로 고연소 핵연료에 대한 이상과도 및 사고시의 안전성을 확인하는 것이 반드시 필요하며, 실제 원자로에서 조사된 고연소도 핵연료를 대상으로 한 ramp 시험, pulse 조사시험 및 피복관 기계적 특성 시험 등이 각 국에서 계획·실시되고 있다.

일본원자력연구소(JAERI)의 NSRR[2] 및 프랑스의 Cabri[3] 등에서는 고연소 핵연료를 대상으로 한 pulse 조사시험을 수행한 바 있으며, 이러한 실험 결과로부터 연소도가 증가함에 따라 낮은 투입에너지에서 소결체와 피복관 사이의 기계적 상호작용(PCMI, pellet clad mechanical interaction)으로 인한 핵연료의 파손이 발생함을 확인하였다. 따라서 고연소 핵연료의 파손거동을 파악하기 위해서는 PCMI와 같이 원주방향 하중이 작용된 경우 피복관의 원주방향 연성 및 강도 등 기계적 특성을 정량적으로 평가하여야 한다.

핵연료 피복관의 원주방향 기계적 특성을 평가하기 위한 시험방법으로는 피복관 내부에 압력을 가하는 파열시험(burst test)[4,5], 맨드릴을 삽입하여 팽창력을 가하는 맨드릴시험(mandrel test)[6,7] 및 두 개의 실린더[8] 또는 두 개의 반-실린더[5,9~1]를 삽입하여 링시편을 신장시키는 링인장시험(ring tensile test, RTT)이 있다. 이 들 중 파열시험(burst test)은 기체 또는 액체를 매체로 내압을 가하여 PCMI와 동일한 응력상태 및 변형율속도를 재현하는 것이 가능하므로 피복관의 건전성을 확인하기 시험으로는 유효하지만, 응력-변형율 곡선과 같은 기계적 특성 자료를 얻을 수 없다는 단점을 가지고 있다. 또한 맨드릴시험(mandrel test)은 시편에 작용하는 응력이 균일하지 않기 때문에 시험결과의 평가가 어렵다. 반면에 링 인장시험(ring tensile test)은 일반적인 판상재료의 인장시험과 동일한 방법으로 응력-변형율 선도, 강도 및 연신율 등을 동시에 평가할 수 있으며, 또한 핫셀에서의 시험이 용이하고 상대적으로 작은 시편을 사용하므로 연소된 피복관의 경우와 같이 제한된 시험재료로부터 보다 많은 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 종래의 링인장시험에서는 링시편을 직선으로 변형시키는 굽힘모멘트가 작용하기 때문에 원주방향 하중에 의한 피복관의 변형을 재현할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 상·하 실린더 사이의 링시편에서 발생하는 굽힘모멘트를 최소화하기 위한 시험법들이 개발되고 있지만 원주방향 하중에 대한 피복관의 기계적 특성을 평가하기 위한 최적의 링인장시험법은 아직까지 결정되지 못하고 있다.

본 보고서에서는 핫셀 내에서 피복관의 원주방향 기계적 특성을 정량적으로 평가하기 위한 개량 링인장시험법을 제안하였으며, 이 시험법의 핫셀 내에서의 사용 조건에 대한 적합성, 원격조종기(manipulator) 등에 의한 원격조작의 용이성 그리고 얻어진 시험결과

에 대한 정확성 등을 검토하였다.

2. 인장방법의 선정

2.1 그립

링인장시험에 사용되는 그립은 두 개의 반-실린더(그림 1) 또는 두 개의 반-실린더와 중앙고정체(그림 2)로 시편을 고정하고, 반-실린더에 의하여 시편에 단축하중을 작용시킨다. 두 개의 반-실린더(half-cylinder)를 사용하는 그립의 치수는 그림 1에서 보는 바와 같이 시험 중 시편 게이지 부(gage section)의 곡률이 일정하게 유지되도록 시편의 내경보다 약간 작게 하고, 시편의 게이지 부는 그립의 상·하로 위치시킨다. 두 개의 반-실린더와 중앙고정체(central piece)로 구성된 그림 2의 그립에서 시편은 게이지 부가 좌·우로 향하도록 장착되었으며, I-빔 형상의 중앙고정체는 시험 동안 게이지 부의 굽힘을 줄이고 게이지 부에 반경방향 힘(radial force)을 가한다. 이 그립의 치수는 게이지 부에서의 굽힘모멘트가 최소로 되도록 결정된다[12,16,17]. 이상과 같은 두 가지 그립 중 그림 2의 경우는 링시편 게이지 부의 중심선이 하중 부하선과 일치하지 않고 편심되어 있으며, 시험기에 의하여 작용되는 하중이 시편의 게이지 부에 모두 작용하지 않는다는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 링시편 내부에 반-실린더 두개를 삽입하고 게이지 부를 상·하로 위치시키는 그립을 선정하였다.

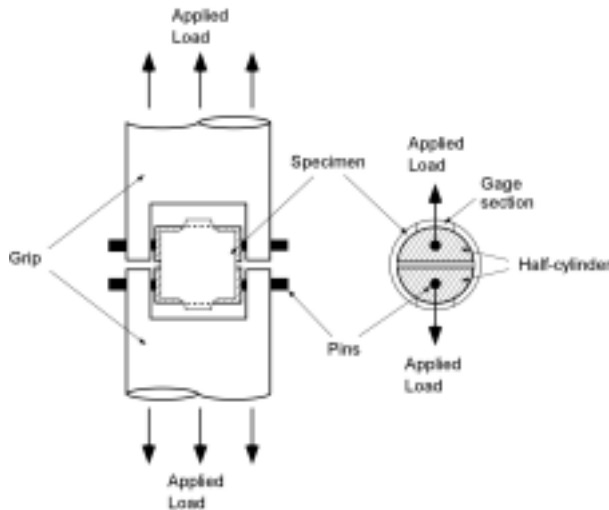


그림 1 그림 1
[5,10,11,13,14,19]

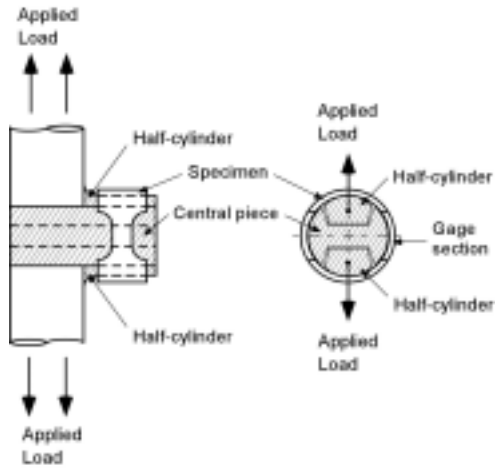


그림 2 그림 2
[12,14,15,16,17,19]

2.2 마찰 저감방법

상·하 반-실린더에 의하여 작용되는 반경방향 하중이 시편에 원주방향 하중으로 손실 없이 전달되기 위해서는 시편 내면과 그립 외면 사이의 마찰이 최소화되어야 한다. 이용 위하여 Arsene 등[17]은 흑연계 윤활제(graphite lubricant, 마찰계수 $\mu=0.125$)를 사용하였으며, Link 등[10], Bates 등[11] 및 Wang 등[18]은 진공용 그리스(vacuum grease)와 테

프론 테이프(Teflon tape)를 사용하여 마찰을 최소화하였다. 그 후 Daum 등[14,19]은 반-실린더 외면에 Tungsten disulfide(WS_2) 코팅을 한 후 그 위에 테프론 테이프를 사용하여 마찰을 좀 더 줄이고자 노력하였다. 한편 Kitano 등[20]은 링인장시험의 최적 인장방법을 결정하고자 링시편과 반-실린더 사이의 마찰계수(μ)를 0, 0.03(Teflon tape) 및 0.125(graphite lubricant)로 가정하고 PWR 17×17 type low tin Zircaloy-4를 대상으로 한 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 탄성영역에서는 마찰의 영향이 나타나지 않아 하중-변위곡선이 일치하지만, 항복점 이상에서는 마찰의 영향이 나타났다. 연신율 및 최대하중에 대한 마찰의 영향을 검토한 결과, 연신율에 대한 마찰의 영향은 거의 없지만 최대하중은 각각 마찰력의 뒤편만큼 커짐을 지적하였다. 또한 그들은 Teflon tape를 사용한 경우 마찰력에 의한 최대하중의 증분이 약 4%로 대단히 작으므로 측정값으로부터 원주방향 하중이 작용한 피복관의 기계적 특성을 직접 평가할 수 있음을 보고하였다. 그러나 Teflon tape의 사용온도 범위가 최대 약 260°C 정도이며, Tungsten disulfide 코팅의 경우도 최대 사용온도가 650°C이므로 서론에서 언급한 고연소 핵연료의 이상과도 및 사고 시의 온도조건에 부합하지 못한다. 따라서 새로운 링인장시험법을 개발하는 현 단계에서는 마찰저감을 위하여 Teflon tape를 선정하였지만, 추후 시험 온도조건에 따라 약 1000°C 정도의 고온에서도 사용이 가능한 흑연계 윤활제($\mu=0.1$)도 사용하였다.

3. 링시편 설계

피복관의 원주방향 인장시험에 사용되는 시편은 크게 게이지 부를 가지지 않은 링시편(plain ring specimen)과 게이지 부를 가진 링시편(notched ring specimen)으로 구분된다. 이 둘 중 게이지 부가 없는 경우는 시험 중 시편의 변형을 정확하게 측정할 수 없기 때문에, 주로 피복관 내 수소화물(hydride)의 함량 및 분포 그리고 하중조건인 변형률 속도(strain rate)에 따른 피복관의 연성을 상대적으로 비교 검토하기 위하여 사용되고 있다 [8,9,21]. 반면에 게이지 부를 가진 링시편은 변형이 게이지부 내로 한정되고 게이지부 내에서 균일한 단축 원환변형을 분포를 나타내도록 설계되어 원주방향 기계적 특성의 평가에 활용되고 있다[10~20]. 그러나 여러 연구자들이 제안한 링시편의 게이지 부 치수 및 형상은 다양하며, 원주방향 기계적 특성 평가를 위한 최적의 링시편은 아직까지 결정되지 못하고 있다. 본 연구에서는 2.항에서 선정한 그림 1의 그림 형상을 대상으로 한 유한요소해석 및 시험결과[13,20]를 토대로 그림 3과 같은 최적 링시편 형상 및 치수를 결정하였다.

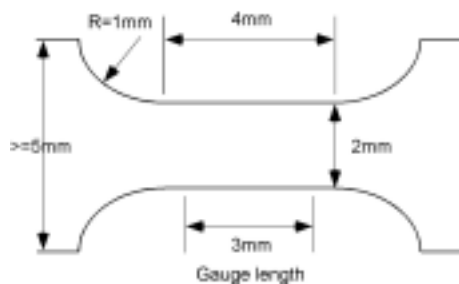


그림 3 최적 링시편

4. 개량 링인장시험법의 핫셀 적용

제안된 개량 링인장시험법에 대하여 핫셀 내에서의 사용 조건에 대한 적합성, 원격조종기(manipulator) 등에 의한 원격조작의 용이성 그리고 얻어진 시험결과에 대한 정확성 등을 검토하였다.

4.1 링시편

시험 대상으로는 내경=8.36 mm, 외경=9.50 mm인 Westinghouse제 PWR 16×16 type Zircaloy-4 비조사 피복관을 이용하였다. 원주방향 단축하중 하의 기계적 특성을 평가하기 위하여 와이어 가공기로 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 게이지 부를 폭=5 mm인 링시편에 가공하였다. 그림 4는 와이어 가공기로 제작된 링시편이다.



그림 4 링시편

4.2 그립 및 하중조건

링인장시험은 그림 1과 같이 링시편의 내부에 상·하 반-실린더를 삽입하는 그립으로 수행하였다. 링시편 게이지 부에 원주방향 하중이 작용하도록 게이지 부를 반-실린더의 정점에 위치시키고, 게이지 부의 반경방향으로 인장하중을 가하였다. 링시편 내에 삽입되는 반-실린더의 직경은 8.08 mm로 하였으며, Teflon tape를 상·하 반-실린더에 1회씩 감아서 반-실린더와 링시편 사이의 마찰을 최소화하였다. 또한 추후 고온에서 본 시험방법의 적용성을 확인하기 위하여 흑연계 윤활제를 사용한 실험도 수행하였다. 인장시험은 0.001/s의 일정 변형율 속도로 실시하고, 온도조건은 상온으로 하였다. 그림 1의 그립은 반-실린더 및 하중 핀(pin) 등 소형 부품으로 구성되므로, 그림 5의 시편조립장치를 사용하여 이들을 조립하고 인장시험을 행하였다. 그림 6은 조립된 링시편을 핫셀 내의 인장시험기에 장착한 사진이다.

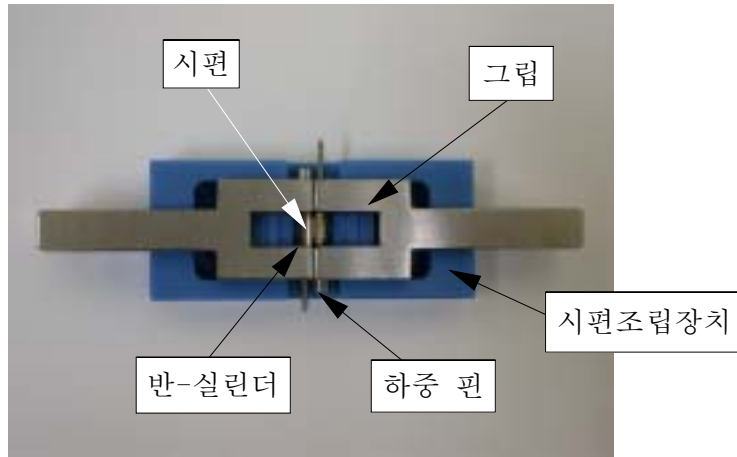


그림 5 시편조립장치 및 조립된 링시편



그림 6 핫셀 내 시험기에 장착된 링시편

4.3 시험결과

4.3.1 하중-변위곡선

시험으로부터 얻어진 하중-변위 곡선의 일예를 그림 7에 나타내었다. 이 그림에서 변위는 인장시험기의 크로스헤드(crosshead) 변위를 나타내며, 링시편과 반-실린더의 마찰을 줄이기 위하여 Teflon tape를 사용한 결과이다.

변위가 작은 초기 영역에서 하중-변위의 관계는 곡선적이고, 변위가 커짐에 따라 곡선은 가팔아진다. 이 영역은 반-실린더의 반경과 링시편의 내경의 간극(gap)때문에 링시편이 원형으로부터 타원형상으로 변형되는 영역이다. 그 후, 하중-변위의 관계는 직선으로 된다. 이 영역은 탄성영역으로서 직선의 기울기는 탄성계수를 나타낸다. 그러나 인장시험으로부터 직접 얻어진 탄성변형율에는 시편의 탄성변형율 외에 시험치구와 시험기 자체의 탄성변형율도 포함되어 있기 때문에 이 자료로부터 시험편의 탄성계수를 직접 평가하는 것은 곤란하다.

변위가 항복점에 도달하면 소성변형이 시작되고 하중-변위의 관계는 다시 곡선으로 된

다. 최대 하중점까지의 영역은 균일변형영역이라고 한다. 본 연구에서는 최대 하중점 변위로부터 탄성변위 성분을 뺀 변위량을 균일소성변위(uniform plastic displacement)로 평가하였다. 또한 최대 하중을 변형 전의 게이지 부 단면적으로 나누어 인장강도를 구하였다.

변위가 최대 하중점 변위를 넘어서면, 인장하중은 변위의 증가와 함께 감소하고, 머지않아 파단에 이른다. 이 영역은 necking 변형영역이라고 부르며, 평행부 내의 일부분에 소성변형이 집중되는 영역이다. 일반적으로 탄성성분을 포함한 파단점 변위까지를 파단변형율로 정의하여 연성의 평가에 이용하지만, 본 연구에서는 파단점 변위로부터 탄성변위 성분을 뺀 변위량으로 소성변위(plastic displacement)를 평가하였다.

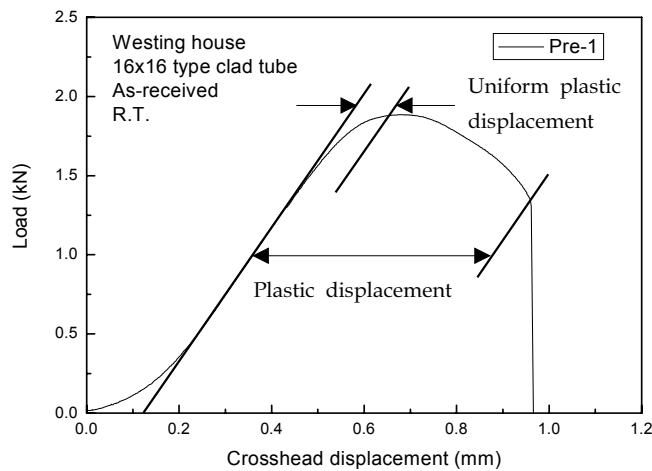


그림 7 하중-변위 곡선

4.3.2 기계적 특성에 미치는 마찰의 영향

앞의 2.2 항에서 언급한 바와 같이 Teflon tape의 사용온도는 최대 약 260°C 정도이므로, 그 이상의 고온시험에서는 이의 사용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 고온시험시에 적용 가능한 흑연계 윤활제를 사용한 링인장시험도 수행하였으며, 이의 결과를 그림 8에 나타내었다. 탄성영역에서는 마찰의 영향이 거의 보이지 않지만 항복점 이상에서는 마찰의 영향이 나타나고 있다. 최대 인장하중은 Teflon tape($\mu=0.03$)를 사용한 경우 1.89 kN 그리고 흑연계 윤활제($\mu=0.125$)의 경우에는 2.05 kN로서 흑연계 윤활제의 경우가 약 1.08배 큰 최대 인장하중을 나타내었다. 이러한 윤활제에 따른 인장하중의 증가양상은 마찰계수의 차이로 인하여 최대 인장하중 값이 $\mu=0$ 을 기준으로 Teflon tape에서는 1.04배, 흑연계 윤활제에서는 1.16배로 각각 마찰력의 뒀만큼 증가함을 보고한 Kitano 등[20]의 유한요소해석결과와 일치하는 것이다. 따라서 이와 같은 최대 인장하중의 차이는 두 가지 윤활제의 마찰계수 차이에 기인한다고 할 수 있다.

이상에서 검토한 바와 같이 고온시험을 위하여 흑연계 윤활제를 사용하는 경우는 최대 인장하중 값이 Teflon tape를 사용한 것보다 약 8% 과대평가되었으며, 이를 보완하기 위하여 다른 종류의 마찰저감방법 또는 시험결과 처리기법을 확보할 필요가 있다.

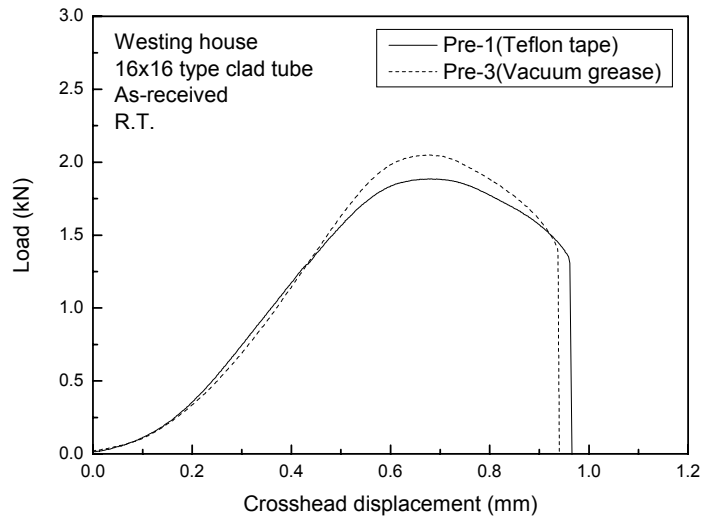


그림 8 인장강도에 미치는 마찰의 영향

4.4 시편 관찰

링인장시험 종료 후 링시편의 파단양상을 검토하기 위하여 stereo microscope를 사용한 외관관찰을 행하였다. 그림 9는 파단된 링시편의 사진으로 기존의 연구결과들[10,13]과 동일한 파단양상을 보였다. 사용한 윤활제의 종류와 무관하게 게이지 부에서 소성변형량이 크게 발생하며, 인장하중 방향에 대하여 45°의 기울기를 가진 전단파단 양상을 나타내었다.



(a) Pre-1(Teflon tape)



(b) Pre-3(Graphite lubricant)

그림 9 파단된 링시편 사진

5. 결 론

최근 상용 원자력발전소의 경제성 향상 및 방사성폐기물 감소 등의 다양한 이점 때문에 핵연료의 고연소도화가 진행되고 있다. 이에 따라 핵연료의 노내 체재시간이 길어지기 때문에 피복관의 부식 및 수소흡수가 더 많이 진행되어 피복관이 가지고 있는 기존의 우수한 기계적 특성이 열화된다. 이 때문에 고연소된 핵연료의 이상과도 및 사고시의 안전성을 확인하는 것이 반드시 필요하다. 이를 위하여 핫셀 내에서 피복관의 원주방향 기계

적 특성을 정량적으로 평가하기 위한 개량 링인장시험법을 제안하였으며, 비조사 피복관의 링인장시험을 수행하여 제안된 시험방법에 대한 핫셀에서의 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 링시편의 게이지 부에 원주방향 하중이 작용하도록 링시편 내부에 상·하 반-실린더를 삽입하고 게이지 부를 상·하로 위치시키는 인장방법을 선정하였다. 링시편 내에 삽입되는 반-실린더의 직경은 8.08 mm로 하였다.
2. 상·하 반-실린더에 의하여 작용되는 반경방향 하중이 시편에 원주방향 하중으로 손실없이 전달되도록 시편 내면과 그림 외면 사이의 마찰을 최소화하여야 한다. 이를 위하여 Teflon tape와 1000°C 정도의 고온에서도 사용이 가능한 흑연계 윤활제를 사용하였다.
3. 피복관의 원주방향 인장시험에 사용되는 링시편은 기존의 유한요소해석결과들을 토대로 링폭=5 mm, 게이지 길이=3 mm, 게이지 부 폭=2 mm로 결정하였다.
4. 내경=8.36 mm, 외경=9.50 mm인 Westinghouse제 PWR 16×16 type Zircaloy-4 비조사 피복관을 대상으로 제안된 링인장시험을 수행하였다. 이로부터 개량 링인장시험법에 대한 핫셀 내에서의 적합성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 이기순, 2001, “핵연료개론,” 효일출판사.
- [2] Fuketa, T., Nagase, F., Ishijima, K. and Fujishiro, T., 1996, “NSRR/RIA Experiments with High-Burnup PWR Fuels,” *NUclear Safety*, Vol. 37, pp. 328.
- [3] Schmitz, F. and Papin, J., 1999, “High Burnup Effects on Fuel Behavior Under Accident Conditions: the Tests CABRI REP-Na,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 270, pp. 55.
- [4] Garde, A. M., Smith, G. P. and Pirek, R. C., 1996, “Effects of Hydride Precipitate Localization and Neutron Fluence on the Ductility of Irradiated Zircaloy-4,” *ASTM STP 1295*, pp. 407-430.
- [5] Balourdet, M., Bernaudat, C., Basini, V. and Hourdequin, N., 1999, “The Prometra Programme: Assesment of Mechanical Properties of Zircaloy 4 Fuel Cladding During an RIA,” *Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT-15)*, Seoul, Korea, August 15-20, pp. II-485~II-492.
- [6] Chung, H. M., Yaggee, F. L. and Kassner, T. F., 1987, “Fracture Behavior and Microstructural Characteristics of Irradiated Zircaloy Cladding,” *ASTM STP 939*, pp. 775-801.
- [7] *Metallic Materials-Tube Ring-Expanding Test*, International Standard ISO-8495-1998.
- [8] *Metallic Materials-Tube Ring-Tensile Test*, International Standard ISO-8496-1998.
- [9] Hong, S. I., Lee, K. W. and Kim, K. T., 2002, “Effect of the Circumferential Hydrides on the Deformation and Fracture of Zircaloy Cladding Tubes,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 303, pp. 169~176.

- [10] Link, T. M., Koss, D. A. and Motta, A. T., 1998, "Failure of Zircaloy Cladding under Transverse Plane-Strain Deformation," Nuclear Engineering and Design, Vol. 186, pp. 379~394.
- [11] Bates, D. W., Koss, D. A. and Motta, A. T., 2000, "Influence of Specimen Design on the Deformation and Failure of Zircaloy Cladding," Proceedings of the ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, pp. 1201-1210.
- [12] 안상복 등, 2000, "사용후 핵연료 피복관의 횡방향 인장 및 파괴인성 시험기술개발," KAERI/RR-2156/2000.
- [13] Takeda, T. and Uchikawa, S., 2002, "Studies on Fracture Behavior and Mechanical Properties of Cladding," Fuel Safety Research Specialist's Meeting, March 4-5, in JAERI, Session 2a-4.
- [14] Daum, R. S., Majumdar, S., Bates, D. W., Motta, A. T., Koss, D. A. and Billone, M. C., 2002, "On the Embrittlement of Zircaloy-4 under RIA-Relevant Conditions," Zirconium in the Nuclear Industry: Thirteenth International Symposium, ASTM STP 1423, pp. 702~719.
- [15] Josefsson, B. and Grigoriev, V., 1996, "Modified Ring Tensile Testing and a New Method for Fracture Toughness Testing of Irradiated Cladding," Studsvik Material AB.
- [16] Arsene, S. and Bai, J., 1996, "A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 24, No. 6, pp. 386~391.
- [17] Arsene, S. and Bai, J., 1998, "A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test-Experimental Investigation," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 26, No. 1, pp. 26~30.
- [18] Wang, H., Bouchard, R., Eagleson, R., Martin, P. and Tyson, W. R., 2002, "Ring Hoop Tension Test(RHTT): A Test for Transverse Tensile Properties of Tubular Materials," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 30, No. 5, pp. 382-391.
- [19] Daum, R. S., Majumda, S., Tsai, H., Bray, T. S., Koss, D. A., Motta, A. T. and Billone, M. C., 2002, "Mechanical Property Testing of Irradiated Zircaloy Cladding under Reactor Transient Conditions," Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume, ASTM STP 1418, pp. 195-210.
- [20] Kitano, K., Fuketa, T., Sasajima, H., and Uetsuka, H., 2001, "Optimization of Tensile Method and Specimen Geometry in Modified Ring Tensile Test," JAERI-Research 2001-011.
- [21] Lee, K. W., Kim, S. K., Kim, K. T. and Hong, S. I., 2001, "Ductility and Strain Rate Sensitivity of Zircaloy-4 Nuclear Fuel Claddings," Journal of Nuclear Materials, Vol. 295, pp. 21~26.