

조사 핵연료 피복관의 핫셀 인장시험 기술 개발

Development of Tensile Test Techniques for Irradiated Fuel Cladding in Hot Cell

김도식, 홍권표, 주용선, 안상복, 정양홍, 오완호, 백승제

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료 피복관의 종 및 횡 방향 인장특성 평가를 위하여 개발된 기존의 다양한 시험법들을 비교하고, 핫셀시험에 적합한 인장시험법을 개발하였다. 피복관의 종방향 인장시험은 튜브시험편 또는 게이지부 내에서 균일한 변형률 분포를 얻도록 설계된 도그본 튜브시험편을 사용한다. 피복관의 횡방향 인장시험에 사용되는 링시험편은 게이지부 내에서 균일한 단축 원환변형을 분포 또는 평면변형을 조건을 나타내도록 설계한다. 연소된 피복관으로부터 소결체를 제거하기 위하여 기계적(소결체의 grinding 또는 drilling) 또는 화학적(소결체의 dissolution) 방법을 사용한다. 연소 또는 조사된 피복관으로부터 시험편을 제작하기 위해서는 핫셀 내에서 작업이 가능한 방전가공기를 사용한다. 피복관의 종방향 인장시험용 그립(grip)은 시험기의 작용하중을 핀을 통하여 시험편에 가하는 핀-부하형으로 설계한다. 횡방향 인장시험의 경우는 시험 동안 시험편의 곡률이 일정하게 유지되도록 그립의 형상 및 치수가 결정되어야 하며, 시험편 내부와 그립사이의 마찰을 최소화하기 위한 방법을 사용한다. 피복관의 종 및 횡방향 강도와 변형 등 기계적 특성을 평가하기 위해서는 시험기로부터 측정된 하중 및 변위 값을 응력 및 변형율로 환산하며, 종 및 횡방향 응력-변형율 곡선은 시험기의 복합 강성(K)을 고려하여 결정한다. 이상과 같이 검토된 인장시험법을 적용함으로써 핵연료 피복관의 종 및 횡방향 기계적 특성 자료를 얻을 수 있으며, 이로부터 피복관의 안전성 해석(safety analysis)과 관련 규정(regulatory)에서 사용되는 피복관 손상기준(fuel damage criteria)의 개선에 필수적인 자료를 제공한다.

Abstract

To estimate the longitudinal and transverse tensile properties of fuel cladding in hot cell, existing tensile test techniques are reviewed. The specimen geometries have been optimized to determine the constitutive stress-strain properties of the cladding in both the longitudinal and transverse directions. The dogbone tube specimen for the longitudinal tensile test is designed to have a uniform strain distribution at the gage

section. The ring specimen design for the transverse tensile test is conducted to maximize uniformity of strain distribution in the uniaxial ring specimen and to assure plane strain conditions in the plane-strain ring specimen. Fuel pellets in the cladding are removed by using the mechanical(grinding or drilling) or chemical(dissolution) method. The specimens are machined by a traveling-wire electrical discharge machine in hot cell. The pin-loaded grip is used for the longitudinal tensile test of an irradiated specimen. The grip for the transverse tensile test is designed such that a constant specimen curvature is maintained during deformation, and the interface was lubricated to minimize the friction between the outer surface of the die insert and the inner surface of the cladding specimen. In order to determine the constitutive stress-strain response of the cladding specimens, the machine compliance should be considered. The essential data for fuel damage criteria used in regulation and the material properties used in safety analyses could be obtained.

1. 서론

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]. 이상과 같은 핵연료 피복재로서 요구되는 조건들을 만족하도록 제조된 피복관이라 할지라도 사용 중 중성자 조사 및 수소화합물의 생성 등으로 인하여 피복관이 가지고 있는 기존의 우수한 기계적 성질 특히, 연성이 저하된다. 또한 반응도 사고(RIA, reactivity induced accident) 또는 냉각수유출사고(LOCA, loss of coolant accident) 시 핵연료봉의 피복관에는 핵연료의 갑작스런 열팽창에 의하여 핵연료와 피복관 사이의 기계적 접촉(PCMI, pellet clad mechanical interaction)이 발생하며, 이로 인하여 피복관 내면에는 팽창력이 작용되어 피복관의 파손이 발생할 수 있다. 따라서 파손을 사전에 예측하여 사고를 미연에 방지하기 위한 피복관의 손상기준과 안전성 해석의 기초 자료로서, 연소된 핵연료 피복관의 연성 및 강도 등 기계적 특성을 정확히 이해하여야 할 필요가 있다.

한편 경수로 및 중수로에서는 고온에서의 기계적 성질과 내식성이 우수하고 산화물 연료와 양립성도 양호한 지르코늄 합금(Zr alloy)을 핵연료 피복관 재료로 사용하고 있다. 지르코늄 합금은 hcp 결정구조를 갖고 있으므로, 이방성이 현저하여 소관(shell)을 피복관으로 냉간 가공할 때의 가공모드에 따라 집합조직의 생성 방향이 다르며, 이로 인하여 가공방향을 기준으로 종(longitudinal, 피복관의 길이방향) 및 횡(transverse, 피복관의 원주방향) 방향으로의 기계적 특성에 차이가 나타난다.

핵연료 피복관의 종 및 횡 방향의 기계적 특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 다양한 시험법들이 개발되어 사용되고 있다. 이들 중 종방향 기계적 특성은 ASTM E8에서 추천하는 튜브시편(full-size tube specimen)[2,3] 또는 사용 중 환경조건(특히 급격한 온도 변

화) 및 조사된 피복관의 핫셀시험 용이성을 고려한 도그본시편(dogbone specimen) [4,5,6]을 사용하는 두 가지 튜브 인장시험법으로 평가되고 있다. 횡방향 기계적 특성은 피복관 내부에 압력을 가하는 파열시험(burst test)[3,5], 맨드렐을 삽입하여 팽창력을 가하는 맨드렐시험(mandrel test)[7,8] 및 두 개의 실린더[9] 또는 두 개의 반-실린더[5,6, 10~18]를 삽입하여 링시편을 신장시키는 링시험(ring stretch test, RST)의 주로 세 가지 방법으로 평가되고 있다. 이 들 중 파열시험(burst test)은 상대적으로 큰 시험편이 요구되며, 시험은 응력제어방식으로만 수행되고, 시험온도의 제어가 힘든 단점을 가지고 있다. 또한 맨드렐시험(mandrel test)은 보다 균일한 응력장을 생성시키지만 피복관에 가해지는 힘의 크기를 정확하게 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다. 반면에 링 인장시험(ring tensile test)은 피복관의 실제 사용 중 안전성 해석을 위한 기초 자료인 응력-변형을 선도, 강도 및 연신을 그리고 피복관의 파손거동을 동시에 평가할 수 있으며, 또한 상대적으로 작은 시편을 사용하므로 연소된 피복관의 경우와 같이 제한된 시험재료로부터 보다 많은 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 상·하 실린더 사이에서 피복관 시편에 굽힘모멘트가 작용한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 상·하 실린더 사이의 링시편에서 발생하는 굽힘모멘트를 최소화하기 위한 시험법들이 개발되고 있다.

본 보고서에서는 피복관의 안전성 해석(safety analysis)과 관련 규정에서 사용되는 피복관 손상기준(fuel damage criteria)의 개선을 위한 기초 자료를 제공하기 위하여, 새로 개발된 피복관 재료 및 현재 사용되고 있는 피복관 재료의 인장특성 평가를 위한 시험방법을 개발하였다.

2. 인장 시편 설계

2.1. 종방향 인장 시편

2.1.1. 튜브시편(full-size tube specimen)

ASTM E8M-01[2]에서는 파이프 또는 튜브의 외경(D)이 25 mm 이하인 경우에 튜브시편(full-size tube specimen)의 사용을 추천하고 있다. 시편에서 연신율(elongation)을 측정하기 위한 표점거리(gage length, L_0) $>5D$ 이어야 한다. Garde 등[3]은 고연소된 Zircaloy-4 피복관의 종방향 연성 특성에 미치는 수소화물(hydride) 분포의 영향을 평가하기 위하여 총 길이(total length)=127 mm, 표점거리(gage length)=76 mm인 튜브시편을 사용한 인장시험을 수행한바 있다. 이 시험으로부터 고연소된 피복관의 일정 연신율(uniform elongation, U.E.) 및 총 연신율(total elongation, T.E.)에 미치는 수소화물 함유량의 영향을 검토하였다.

2.1.2. 도그본 튜브시편(dogbone tube specimen)

비조사된(unirradiated) 피복관의 경우는 ASTM E8에서 추천하는 상기의 방법으로 인장시험이 가능하다. 그러나 조사된(irradiated) 경우는 핫셀(hot cell) 내에서 원격조정기(manipulator)를 사용하여 시편을 장착하여야 하는 제약조건이 있으며, 또한 시험조건을 사용 중 환경조건 특히 변형률 속도(strain rate) 및 가열 속도(heating rate)와 최대한 동일하게 하기 위해서는 다음과 같은 도그본 튜브시편(dogbone tube specimen)이 널리 사

용되고 있다.

Balourdet 등[4,5]은 비조사 및 조사된(59 GWd/tU[4], ~64GWd/t[5]) Zircaloy-4 피복관에 대하여 가열조건(furnace heating, transient heating), 변형률속도(strain rate=0.01, 0.2, 5/s) 및 온도(400~1100 °C)에 따른 종방향 인장특성을 검토하였다. 인장시험에서는 도그본 튜브시편을 사용하였으며, 총 길이=60 mm이고 표점거리는 가열조건에 따라 transient heating(100 또는 500 K/s)의 경우는 5 mm 그리고 furnace heating(0.2 또는 0.3 K/s)은 15 mm로 하였다. Daum 등[6]은 비조사 및 조사 Zircaloy-4 피복관에 대한 원자로 천이 조건(reactor transient condition, RIA 및 LOCA 조건)하의 기계적 특성을 평가하기 위하여 외경=9.5와 10.9 mm인 두 가지 피복관에 대한 종방향 인장시험을 수행하였다. 사용된 시편형상은 그림 1과 같으며, 게이지부(gage section) 내에서 최대한 균일한 변형률분포를 얻기 위하여 표점거리와 게이지부 폭(W)의 비(L_0/W) ≥ 4 가 되도록 설계하였다.

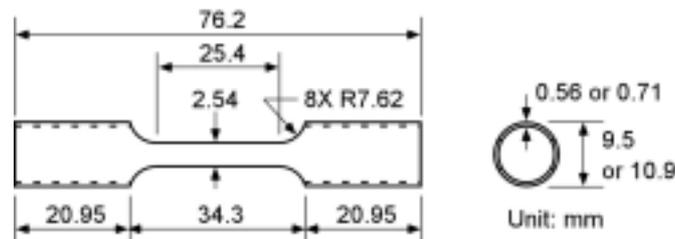


그림 1 도그본 튜브시편[6]

본 연구에서는 이상의 연구결과들을 토대로 그림 2와 같은 종방향 인장시편을 설계하였다. 시편의 치수는 소결체 제거가 비교적 쉽도록 총 길이를 50mm로 축소하였으며, 시험시에는 pin-loading 그림을 사용하여 시편을 고정한다.

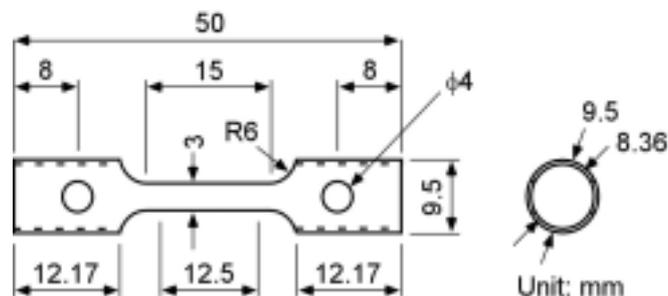


그림 2 종방향 인장시편

2.2. 횡방향 인장 시편

여러 연구자들은 인장시험 중 링시편 내에 균일한 변형율(uniform strain) 분포 또는 평면변형율(plane-strain) 조건을 나타내는 부분을 국한하기 위하여 게이지 부를 가공하여 횡방향 인장시험을 수행하였다.

2.2.1. 링시편(notched ring specimen)

1996년 Studvik Material사의 Josefsson 등[16]은 상·하 반-실린더와 시험 중 게이지 부의 굽힘을 방지하기 위한 I-빔 형태의 중앙고정체(central piece)를 사용한 수정 링 인장시험법(그림 3)을 고안하였다. 이들은 3차원 유한요소해석을 통하여 시편의 게이지부에서 균일 단축 응력분포가 얻어지도록 시편, 실린더 및 중앙고정체를 설계하였으며, 비조사 및 조사 Zircaloy-4 피복관의 시험으로부터 측정된 전체 하중-변위 곡선을 기초로 실제 원환응력-원환변형률(hoop stress-hoop strain) 곡선을 얻는데 성공하였다. 그 후 France의 Arsene 등[17,18]은 Josefsson 시험법의 적용성을 검토하기 위하여, 3차원 유한요소해석과 Al-Si 및 비조사 Zircaloy에 대한 링 인장시험을 수행하였다. 유한요소해석으로부터 링 시편 게이지부에서의 응력분포, 피복관 내면과 실린더 및 중앙고정체 외면 사이의 마찰의 영향 등을 고려하여 링시편, 실린더 및 중앙고정체의 최적 치수를 결정하였다. 또한 실제 링 인장시험결과를 기초로 전체 하중-변위곡선으로부터 실제 원환응력-변형률(hoop stress-hoop strain) 곡선을 산출하는 방법을 개발하였다. 제안된 시험법은 수소화물 함유량이 매우 높은 Zircaloy 시편과 같은 취성 재료에도 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한 한국원자력연구소의 안 등[13]은 유한요소해석을 통하여 비조사 및 조사 Zircaloy-4 피복관의 횡방향 기계적 특성을 얻기 위한 링시편의 최적 치수를 결정하고, 그림 3의 시험방법으로 인장시험을 수행한 바 있다.

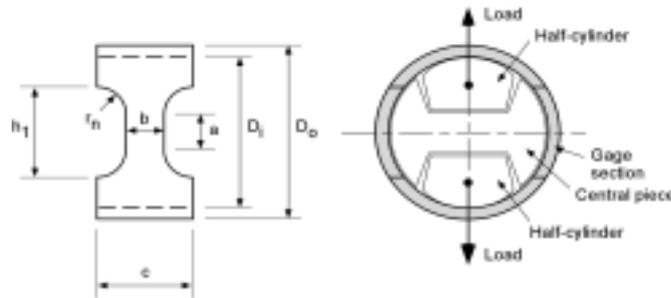


그림 3 링시편 및 인장시험[16,17,18]

1998년에 Link 등[11]은 비조사 Zircaloy-4 피복관을 대상으로 링 시편에서의 실제 국부 변형을 측정 및 파면검토를 통하여, 링 시편의 게이지부에서 균일한 변형을 분포가 발생하는 단축(uniaxial) 링시편을 개발하였다. 그 후 Bates 등[12]은 Link 등이 개발한 시편에 대한 유한요소해석 및 파면관찰 결과를 토대로 피복관의 변형거동에 대한 링시편 형상의 영향을 검토하였다. 이들은 비조사 Zircaloy-4 피복관을 대상으로 표점거리(L_0)와 폭(W)의 비가 1:1(Type C) 그리고 4:1(Type D)인 2종류의 단축 링시편을 제작하고 Link의 시험법(그림 4)을 도입하여 시험을 수행하였다. 시험은 상온과 300 °C에서 초기 변형 속도를 0.001/s로 수행하였다. 단축 링시편으로부터 얻어진 시편의 길이(major)와 폭(minor)방향 변형을 분포 및 파면양상을 검토하였으며, 이를 기초로 단축 링시편은 표점거리와 게이지부 폭의 비(L_0/W) ≥ 4 이어야 함을 밝혔다. 또한 Balourdet 등[5]은 Prometra Programme의 일환으로 RIA 조건에서 고연소(~ 64 GWd/t) 핵연료의 Zircaloy-4 피복관에 대한 기계적 특성을 평가하기 위하여 횡방향 인장시험을 수행하였다. 링시편은 그림 3

의 형상을 가지며, 유한요소해석을 기초로 표점거리(L_0 , 그림 3에서 a 로 표기함.)는 3 mm로 결정하였다. 인장시험은 그림 4와 같이 상·하 반-실린더를 사용하여, 변형률 속도는 0.01, 0.2 및 5/s 그리고 시험온도는 280~600 °C의 조건에서 수행하였다. 그 후 JAERI의 Takeda 등[14]은 그림 4의 시험법을 사용하여 비조사 Zircaloy-4 피복관의 종방향 기계적 특성에 미치는 온도 및 수소함유량의 영향을 검토하였다. 시험은 유한요소해석을 통하여 변형이 게이지부에 집중되고, 게이지부 내에서 균일한 단축 원환변형률(hoop strain) 분포를 나타내도록 설계하였다. 최적화된 시험의 게이지부 치수는 그림 5와 같다.

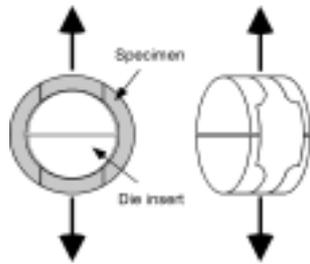


그림 4 링 인장시험[5,14]

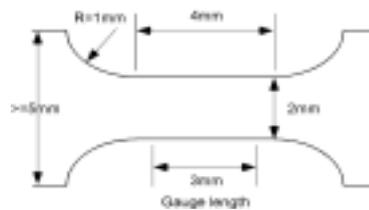


그림 5 링시험의 게이지부[14]

한편 Daum 등[6]은 RIA 또는 LOCA 조건에서 고연소 Zircaloy-4 피복관의 기계적 특성을 얻기 위한 단축 링시험(그림 6)을 개발하였다. 단축 링시험은 표점거리와 폭의 비는 4가 되도록 설계하였으며, 인장시험은 그림 7과 같이 시험 내에 상·하 반-실린더와 중앙 고정체를 삽입하고, 시험의 게이지부가 좌·우측으로 위치하도록 시험을 설치하여 수행하였다. Vickers hardness indentation 법으로 측정된 게이지부 길이방향(major) 변형률 분포로부터 표점거리 내의 일정 변형률(uniform strain)은 약 5 ± 1 %로 균일하게 분포하므로, 개발된 단축 링시험은 피복관의 횡방향 응력-변형률 곡선을 결정하는 데 적합함을 보였다. 그 후 Daum 등[15]은 그림 6의 단축 링시험은 사용하여 Link 등[11]의 시험결과와 Josefsson의 시험법[16]에서의 장점들을 조합한 단축 링인장시험(그림 7)을 실시하고, RIA 조건에서 비조사 Zircaloy-4 피복관의 강도에 미치는 온도(26~400 °C) 및 변형률 속도(0.001과 0.2/s)의 영향을 평가하였다.

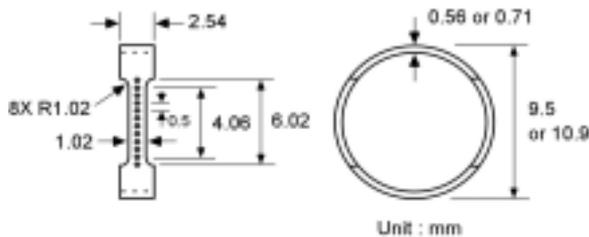


그림 6 단축 링시험[6,11,12,15]

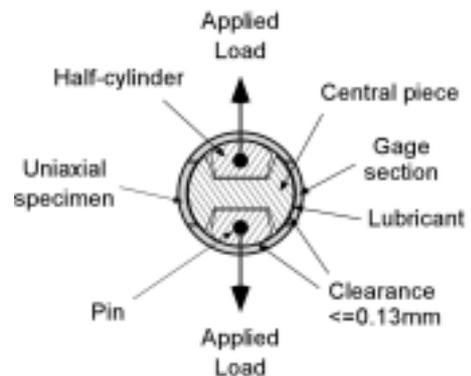


그림 7 단축 링 인장시험 [6,15]

2.2.2. 평면변형을 링시편(plane-strain ring specimen)

Link 등[11]은 그림 8의 평면변형을 링시편에 대하여 Vickers hardness indentation 법으로 측정된 게이지부 폭방향(minor) 변형율이 중앙부(약 2 mm)에서 최소가 되며, 이 값은 게이지부 길이방향(major) 변형율의 15 %미만이므로 개발된 시편의 게이지부 내에서는 거의 평면변형을 상태를 유지함을 보였다. 시편은 그림 9와 같이 게이지부가 반-실린더의 상·하로 위치되며, 인장시험은 상온과 300 °C에서 10^{-3} 과 10^2 /s의 변형율 속도로 수행하였다. 그 후 Bates 등[12]은 비조사 Zircaloy-4 피복관의 수소취화에 의한 파손조건을 결정하기 위하여 평면변형을 링시편의 인장시험을 행하였다. 게이지부에서의 소성변형을 분포와 시편의 파손양상을 검토한 결과, RIA 조건 하에서 피복관의 연성 자료는 평면변형을 링시편에 대한 시험결과로부터 얻는 것이 타당함을 보였다. 또한 Daum 등[6,15]은 조사된 Zircaloy-4 피복관의 RIA 조건 하에서 파손거동을 검토하기 위하여 평면변형을 링시편(그림 8)에 대한 인장시험(그림 9)을 수행하였다. 설계된 링시편의 치수 및 형상은 실제 RIA 조건 하에서 피복관의 파손양상과 동일한 두께방향의 슬립(slip)을 나타내며, 게이지 부에서 평면변형을 상태를 유지하도록 결정하였다. 시험결과로부터 피복관 파손의 기준이 되는 파손변형율(failure strain)을 측정하였다.

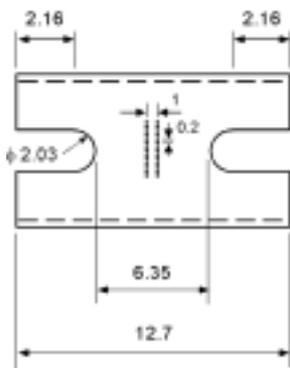


그림 8 평면변형을 링시편[6,11,12,15]

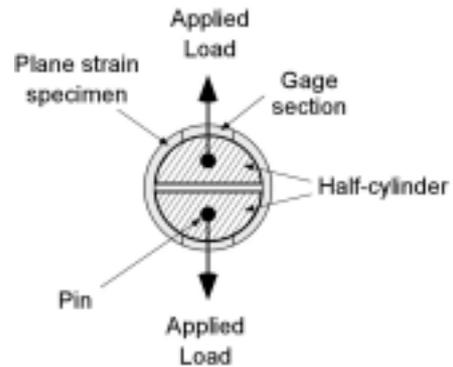
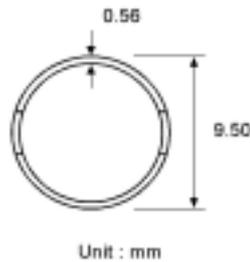


그림 9 평면변형을 링 인장시험[6,11,12,15]

본 연구에서는 횡방향 인장특성을 평가하기 위한 시편으로 그림 5, 6 및 8의 3가지를 준비하였으며, 이들 중 그림 5와 6의 시편으로부터 얻어진 강도 및 연성을 비교·검토하고 이들의 차이점을 분석하여 적절한 시편 형상 및 치수를 결정할 예정이다. 이와 동시에 이들 시편에 대한 유한요소해석을 수행하여 게이지부에서의 변형을 분포를 검토한다.

3. 인장 시편 가공

3.1. 핵연료 소결체 제거법

고연료 핵연료 피복관은 소결체와의 상호반응에 의하여 서로 접착(bonding)될 수 있다. 이러한 접착부위는 핵연료봉 전체 길이에 걸쳐 나타나는 일반적인 현상은 아니고 국부적으로 존재하며, 임의의 높이에서 원주방향으로 발생한다. 그리고 그 위치는 와전류

(eddy-current), 초음파(ultrasonic) 또는 laser-heat dissipation technique과 같은 비파괴적인 방법으로 찾아낼 수 있다. 위의 방법으로 찾아낸 피복관과 소결체 사이의 접촉부위가 시편을 채취하고자 하는 위치 내에 존재한다면, 피복관 내의 소결체를 제거하기 위한 적절한 방법이 필요하다. ASTM E453[19]에서는 소결체 제거기술에 대한 기준은 없지만 가공 중 피복관의 손상을 방지할 수 있는 기계적(소결체의 grinding 또는 drilling) 또는 화학적(소결체의 dissolution) 기술이 사용된다고 언급하였다. 그 예로서 Goll 등[20]은 고연소(54와 64 MWd/kgU) 핵연료 피복관에 대한 단기간 크립(creep)과 파열(rupture) 시험을 위하여 피복관 내부의 소결체를 제거하기 위한 장치를 개발하였다. 장치는 햄머 기능을 가진 드릴기와 작업 중 핵연료봉을 고정하고 회전시키는 하부 고정부로 구성된다. 드릴 가공 중 피복관 내벽의 손상 또는 변형이 발생하지 않도록, 드릴의 직경은 피복관의 내경 보다 약 1 mm 작은 것을 사용하였다. 또한 안 등[13]은 조사후 피복관의 잔류 핵연료제거장치를 개발하였다. 한편 Daum 등[6]은 고연소 Zircaloy-4 피복관의 기계적 특성을 평가하기 위한 시편 및 시험절차를 제안하였으며, 피복관 내부의 소결체를 제거하기 위하여 127 mm 길이의 핵연료봉을 1~2일 동안 질산(HNO₃)에 넣어두는 화학적 방법을 사용하였다. 또한 Balourdet 등[5]은 총 길이가 60mm인 종방향 인장 시편을 가공하기 위하여 화학적 방법으로 소결체를 제거하였다.

3.2. 시편 가공법

비조사 피복관의 경우는 일반적인 기계가공법으로 시편을 제작할 수 있지만, 조사된 피복관으로부터 시편을 제작하기 위해서는 핫셀 내에서 작업이 가능한 특수한 가공기가 필요하다. Daum 등[6]은 핫셀 내에서 링시편을 가공하기 위하여 방전가공기(traveling-wire electrical discharge machine, EDM)를 사용하였다. 가공을 위하여 연소된 피복관의 외면에 존재하는 부전도물질인 산화층(oxide)을 다이아몬드 줄(file) 또는 에머리 페이퍼(emery paper)로 부분적으로 제거하였으며, 그 과정에서 피복관 표면에 관상으로 존재하는 수소화물(hydride)이 제거되지 않도록 주의해야 함을 지적하였다. 또한 방전가공 중에 발생하는 burr 또는 결함을 제거하고, 내벽의 표면거칠기를 적게 하기 위하여 에머리 페이퍼를 사용하였다. 또한 안 등[13]도 비조사 및 조사 Zircaloy-4 피복관의 횡방향 인장시험을 위한 링시편 방전가공기를 개발한 바 있다.

4. 그립(grip) 설계 및 시편 장착

4.1. 종방향 인장시험

시편은 웨지(wedge) 또는 핀(pin)형 그립으로 고정되며, 시험 중 그립부에서 시편의 변형이 발생되지 않도록 한다. ASTM E8M[2]에서는 웨지형 그립의 사용을 추천하고 있다. 시험 중 시편의 반경방향 변형을 막기 위하여 플러그(plug)를 시편의 상·하부에 삽입하여 사용한다. 이 방법은 비조사 피복관에 대해서는 쉽게 적용될 수 있지만, 조사 피복관과 같이 핫셀 내에서 시험을 수행하여야 할 경우는 로봇손에 의한 조작이 어렵고 특히 고온시험에서는 로(furnace) 내의 공간이 좁기 때문에 웨지형 그립의 사용이 불가능한 문제점이 있다. 따라서 많은 연구자들은 종방향 인장시편의 상·하단에 구멍(hole)을 가공하거나 Swagelock fitting을 사용하여 핀(pin)으로 하중을 작용시키는 핀형(pin-loading)

그립을 사용하고 있다. Balourdet 등[4,5]은 인장시편에 직접 구멍을 가공하고 편형 그립을 사용하였다. 한편 Daum 등[6]은 시편의 상·하부에 플러그(plug)를 삽입하고 Swagelock compression fitting을 사용하여 편형 엔드캡을 고정한 후 편형 그립을 사용하여 인장시험을 수행하였다. 또한 fitting부가 미끄러지지 않고 하중을 전달할 수 있도록 게이지부의 단면적을 작게 하였다.

그림 2의 종방향 인장시편은 핫셀 내에서 시편 장착의 용이성을 고려하여 pin-loading 그립으로 고정하고 인장시험을 수행한다.

4.2. 횡방향 인장시험

두 개의 반-실린더(그림 10) 또는 두 개의 반-실린더와 중앙고정체(그림 11)로 시편을 고정하고, 반-실린더에 의하여 시편에 하중을 작용시킨다. 두 개의 반-실린더(half-cylinder)를 사용하는 그림의 치수는 그림 10에서 보는 바와 같이 시험 중 시편 게이지부(gage section)의 곡률이 일정하게 유지되도록 시편의 내경보다 약간 작게 하였으며, 시편의 게이지부는 그림의 상·하로 위치시켰다. 두 개의 반-실린더와 중앙고정체(central piece)로 구성된 그림 11의 그림에서 시편은 게이지부가 좌·우로 향하도록 장착되었으며, I-빔 형상의 중앙고정체는 시험 동안 게이지부의 굽힘을 줄이고 게이지부에 반경방향 힘(radial force)을 가한다. 이 그림의 치수는 게이지부에서의 굽힘모멘트가 최소로 되도록 하며, 시편과 그림사이의 마찰을 고려한 유한요소해석으로부터 결정된다 [13,17].

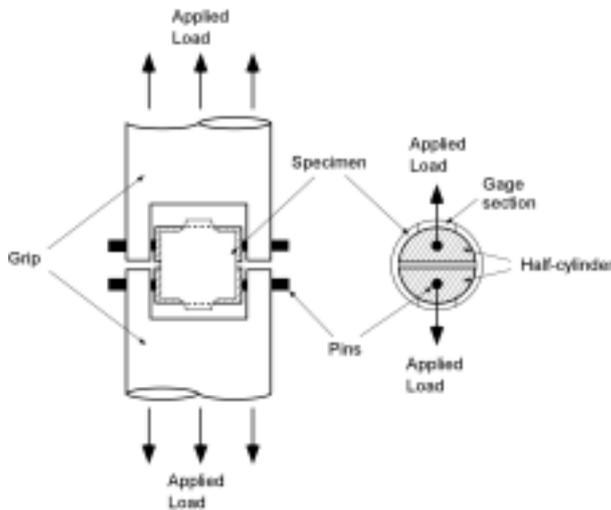


그림 10 링 인장시험
[5,6,11,12,14,15]

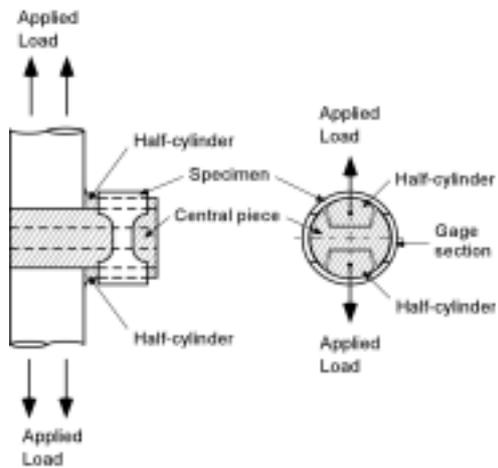


그림 11 링 인장시험
[6,13,15,16,17,18]

그립의 재료로서 Link 등[11]은 충분한 굽힘 저항성을 가진 17-4 precipitation hardenable stainless steel을 사용하였으며, 안 등[13]은 열처리한 고속도강을 선정하였다. 또한 Wang 등[21]은 외경=95.25 mm, 두께=2.2 mm인 링시편의 인장시험에서 표면 경도가 33 HRC 이상인 강(steel)으로 제작된 반-실린더를 사용하였으며, 하중편은 표면경도

가 62 HRC인 합금강(alloy steel)으로 가공하였다.

한편 상·하 반-실린더에 의하여 작용되는 반경방향 하중이 시편에 원주방향 하중으로 손실없이 전달되도록 시편 내면과 그립 외면 사이에는 마찰을 최소화하기 위한 방법이 적용된다. 1998년 Arsene 등[18]은 흑연윤활제(graphite lubricant)를 사용하였으며, 마찰 계수 실험으로부터 Zircaloy-4와 그립 재질인 강(steel) 사이의 정적마찰계수=0.125임을 보고하였다. 또한 Link 등[11], Bates 등[12] 및 Wang 등[21]은 진공용 그리스(vacuum grease)와 테프론 테이프(Teflon tape)를 사용하여 마찰을 최소화하였다. 그 후 Daum 등 [6,15]은 그립 외면에 Tungsten disulfide(WS_2) 코팅을 한 후 그 위에 테프론 테이프를 사용하여 마찰을 좀 더 줄이고자 노력하였다.

본 연구에서는 핫셀 내에서 시편의 설치 및 시험 특성을 고려하여 그림 10의 링 인장시험법을 적용한 링 인장시험을 수행한다.

5. 응력-변형을 특성 자료 평가법

5.1. 종방향 인장시험

일반적으로 단축 인장하중을 받는 시편에 대한 종방향 공학 인장응력 σ_{axial} 은 다음의 식(1)로 계산된다[6].

$$\sigma_{axial} = \frac{P}{A_o} \quad (1)$$

여기서, P : 시험기의 로드셀에서 측정된 하중값(N)
 A_o : 시편 게이지부의 초기 단면적(mm^2)

한편 핫셀 내에서 변위신장계를 사용하여 시편 게이지부에서의 변형량을 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에, 대부분의 연구자들은 시험기의 크로스헤드(crosshead) 또는 액츄에이터(actuator) 변위를 측정하고 이 값으로부터 시편의 변형을 계산하고 있다. 초기 표점 거리가 L_o 인 시편에 대한 인장시험에서 크로스헤드가 Δ 만큼 움직이면, 표점거리는 $L_o + \Delta$ 로 늘어난다. 그런데 이 변위에는 시험기의 탄성변위가 포함되어 있으므로, 시편 표점 거리의 변형(δ)은 $\Delta - F/K$ 이다. 따라서 이상과 같이 시험기의 복합 강성(K)를 고려하면, 실제 변형을 ϵ_{axial} 은 식(2)로 나타낼 수 있다[21].

$$\begin{aligned} \epsilon_{axial} &= \frac{\delta}{L_o} \times 100(\%) \\ &= \frac{\Delta - F/K}{L_o} \times 100(\%) \end{aligned} \quad (2)$$

이상의 식(1)과 식(2)를 사용하여 시편에서의 종방향 인장응력과 변형을 곡선을 얻을 수 있으며, 이 곡선으로부터 피복관의 기계적 특성 값인 항복강도, 인장강도, 일정 변형을(uniform strain) 및 파괴 변형을(fracture strain) 등의 자료를 결정한다. 또한 인장하중을

받는 시편에 대하여 식(3)과 같이 신장 후 표점거리의 변형(δ)을 초기 표점거리(L_o)로 나누어 결정되는 연신율(elongation) 중 최대하중 도달시의 일정 연신율(U.E.)과 시편 파괴 후에 측정된 총 연신율(T.E.) 자료도 얻을 수 있다.

$$Elongation = \frac{\delta}{L_o} \times 100(\%) = \frac{L_1 - L_o}{L_o} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서, L_1 : 신장 후의 표점거리 (mm)
 L_o : 초기 표점거리 (mm)

5.2. 횡방향 인장시험

횡방향 인장시험의 경우 단축인장시험기로부터 시편에 가해지는 원주방향 하중과 변형을 정확하게 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에, 시편에 가해진 반경방향 하중을 원주방향 하중으로 그리고 크로스헤드 변위를 시편 표점거리의 변형으로 환산하는 과정이 필요하다. 링시편을 사용하는 횡방향 인장시험의 경우 여러 가지 방법으로 시편과 그림사이의 마찰을 최소화하여 시험기에 의하여 작용된 반경방향 하중이 시편의 원주방향 하중으로 모두 작용한다고 가정하였다. 또한 피복관의 경우 두께가 얇기 때문에 반경방향 하중에 대한 피복관의 두께방향 변형을 무시할 수 있다.

링 시편의 횡방향 인장시험을 위하여 상·하 반-실린더를 사용한 시험법을 적용한 Takeda 등[14]과 Wang 등[21]은 단축 인장시험기에 의하여 링시편에 작용된 반경방향 하중을 직접 측정하고, 상·하 반-실린더와 링시편 사이의 마찰은 무시할 수 있으며, 시험 중 링시편의 두께 변화는 링시편의 반경에 비하여 매우 작고 상·하 반-실린더는 강체라는 가정 하에 공학 원환응력(engineering hoop stress) σ_{hoop} 및 변형율(engineering hoop strain) ϵ_{hoop} 를 식(4) 및 식(5)로 계산하였다. 식(5)에서 각 기호들은 그림 13에 나타난 바와 같으며, 이 그림에서 게이지 길이의 변형(δ)은 크로스헤드 변위의 2배와 같음을 알 수 있다.

$$\sigma_{hoop} = \frac{P}{2A_o} = \frac{P}{2(w \times t)} \quad (4)$$

여기서, P : 시험기의 로드셀에서 측정된 하중값 (N)
 A_o : 시편 게이지부의 초기 단면적 (mm^2)
 w : 시편 게이지부의 폭 (mm)
 t : 시편 게이지부의 두께 (mm)

$$\begin{aligned} \epsilon_{hoop} &= \frac{\delta}{L_o} \times 100 (\%) \\ &= \frac{\text{Crosshead displacement} \times 2}{L_o} \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (5)$$

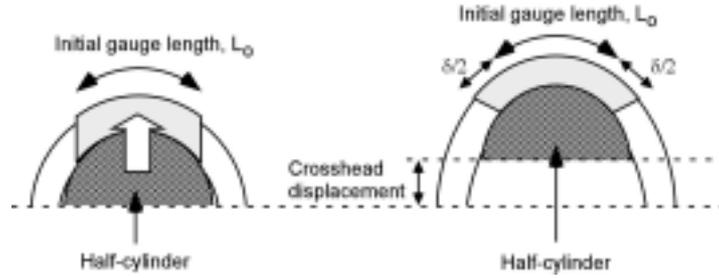


그림 12 원환변형율(hoop strain)[14]

6. 결 론

핵연료 피복관은 고온 및 고압의 가혹한 방사선 분위기에서 사용되므로, 산화, 수소취화 및 조사손상 등으로 인하여 기존의 우수한 기계적 성질이 저하된다. 따라서 파손을 사전에 예측하여 사고를 미연에 방지하기 위한 피복관의 손상기준과 안전성 해석의 기초 자료를 확보하기 위해서는 연소된 핵연료 피복관의 연성 및 강도 등 기계적 특성을 정확히 이해하여야 할 필요가 있다. 따라서 비조사 및 조사된 피복관의 종 및 횡 방향의 기계적 특성을 평가하기 위하여 개발된 다양한 시험법들을 비교하고, 핫셀시험에 적합한 시험 방법을 개발하였다.

1. 피복관의 종방향(longitudinal) 기계적 특성은 튜브시편 또는 도그본시편을 사용한 인장시험으로 평가한다. 튜브시편에서 연신율을 측정하기 위한 표점거리(gage length, L_0) $> 5D$ 이어야 한다. 도그본 시편의 경우 게이지부 내에서 최대한 균일한 변형률분포를 얻기 위하여 표점거리와 게이지부 폭의 비(L_0/W) ≥ 4 가 되도록 설계한다.
2. 피복관의 횡방향(transverse) 인장시험에 사용되는 링시편은 유한요소해석을 통하여 변형이 게이지부에 집중되고, 게이지부 내에서 균일한 단축 원환변형률 분포를 나타내도록 설계한다. 또한 실제 사용 중 피복관에서의 응력상태와 동일한 조건 하에서 파손거동을 평가하기 위하여 평면변형률 링시편을 사용한다.
3. 연소된 피복관으로부터 소결체를 제거하는 방법으로는 1차 기계적으로 소결체를 제거하고, 2차로 화학적 방법에 의하여 잔류 소결체를 제거하는 기술을 사용한다. 연소 또는 조사된 피복관으로부터 시편을 제작하기 위해서는 핫셀 내에서 작업이 가능한 방전가공기(EDM)를 사용한다.
4. 종방향 도그본 인장시편은 pin-loading 그림을 사용한다. 횡방향 인장시험의 경우는 시험 동안 시편의 곡률이 일정하게 유지되도록 그림의 형상 및 치수가 결정하며, 시편 내부와 그림사이의 마찰을 최소화하기 위한 방법들이 사용한다.
5. 피복관의 종 및 횡방향 강도와 변형 등 기계적 특성을 평가하기 위해서는 시험기로부터 측정된 하중 및 변위 값을 응력 및 변형률로 환산한다. 종 및 횡방향 응력-변형률 곡선은 시험기의 복합 강성(K)을 고려하여 결정한다.

이상과 같이 검토된 시험법을 적용함으로써 핵연료 피복관의 종 및 횡방향 기계적 특성 자료를 얻을 수 있으며, 이로부터 피복관의 안전성 해석(safety analysis)과 관련 규정(regulatory)에서 사용되는 피복관 손상기준(fuel damage criteria)의 개선을 위하여 필수적인 자료를 제공한다.

참고문헌

- [1] 이기순, 2001, “핵연료개론,” 효일출판사.
- [2] ASTM E8M-01, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric].
- [3] 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.
- [4] Balourdet, M. and Bernaudat, C., 1995, “Tensile Properties of Irradiated Zircaloy 4 Cladding Submitted to Fast Transient Loading,” Proceedings of the CSNI Specialist Meeting on Transient Behaviour of High Burnup Fuel - Session IV, Cadarache Sept. 12-14, pp. 417-431.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] Metallic Materials - Tube Ring-Expanding Test, International Standard ISO-8495 -1998.
- [9] Metallic Materials - Tube Ring-Tensile Test, International Standard ISO-8496 -1998.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 안상복 등, 2000, “사용후 핵연료 피복관의 회방향 인장 및 파괴인성 시험기술개발,” KAERI/RR-2156/2000.
- [14] 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.

[15] 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.

[16] Josefsson, B. and Grigoriev, V., 1996, "Modified Ring Tensile Testing and a New Method for Fracture Toughness Testing of Irradiated Cladding," Studsvik Material AB.

[17] 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.

[18] 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.

[19] ASTM E453-79(Reapproved 2001), "Standard Practice for Examination of Fuel Element Cladding Including the Determination of the Mechanical Properties".

[20] Goll, W., Spilker, H. and Toscano, E. H., 2001, "Short-Time Creep and Rupture Tests on High Burnup Fuel Rod Cladding," Journal of Nuclear Materials, Vol. 289, pp. 247-253.

[21] 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.