

Double Stem Type의 압출기에 의해 동심 압출된 하나로 핵연료
피복관의 파괴 특성

Burst Properties of HANARO Nuclear Fuel Cladding Manufactured
by Double Stem Type Co-Extruder

이돈배, 우윤명, 박종만, 오석진, 김창규
한국원자력연구소

요 약

Double stem type의 동심 압출기를 이용하여 피복 압출한 핵연료의 피복 관이 조사 도중 내압을 받거나 핵연료심의 팽윤(swelling)에 의한 부피팽창이 일어날 때 견딜 수 있는 강도와 연신율을 예측하기 위하여 압력 파열시험과 tapered punch를 이용한 확관 시험을 수행하였다. 시험 결과 낮은 파괴강도와 연신율을 나타낸 시편은 피복관의 내부에 다수의 결함이 관찰되었으며 이형재의 사용이 피복관의 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Abstract

The burst and expansion tests for the cladding using both gas pressure and a tapered punching were performed in order to predict the fracture strength and elongation in case of fuel being under the internal pressure during irradiation. Lots of defect in the cladding, in some cases, were observed in the specimens showing low fracture toughness. It is assumed that the use of lubricant on the punch head during co-extrusion process the affects the strength of the cladding.

1. 서론

하나로 구동 핵연료의 알루미늄 피복관은 정상운전 조건에서 핵연료 심을 유지하고 중성자 흡수를 최소화하며 핵연료 봉의 부식을 억제하고 핵연료 심의 팽윤(swelling)에 의한 변형효과를 적게하고 열수력적인 압력손실을 최소화하는 역할을 한다. 피복재로는 Al 1060을 사용하며 핵연료 심재를 피복하는 방법은 500~540℃의 알루미늄 1060 billet이 압출 die를 통과 할 때 핵연료 심이 cladding 되는 동심 피복압출 방법을 이용하고 있다. 동심 피복압출을 위하여 처음에는 single stem형 압출기를 사용하였으나 die에 작용하는 수직하중에 의해 동심도가 die의 아래 방향으로 편심되는 문제를 해결하기 위하여 좌우 양 방향에서 billet이 결합되면서 cladding이 이루어지는 double stem형 압출기를 제작 도입하였다. 동심 피복 압출은 응고 온도보다 훨씬 낮은 온도에서 이루어지기 때문에 합쳐지는 부분의 결합력이

취약하게 될 수 있으며 더욱이 double stem의 압출방식은 한 쌍의 billet이 합쳐지면서 피복이 이루어지기 때문에 billet 표면의 상태가 피복관의 건전성에 영향을 미칠 수 있으며 billet에 이형재나 윤활유 등이 오염되면 이것이 압출시 피복재에 혼입되어 조사되는 도중에 피복관이 파손되는 원인이 될 수 있다. 하나로 핵연료에서 허용되는 최대 팽윤은 핵연료 수명기간 동안 15vol%이다. 또한 일반적인 목적으로 사용되는 순수 알루미늄 압출관(extruded round tube)의 인장강도는 60~100MPa이며, 연신율은 50mm에서 최소 25%로 규정하고 있다¹⁾. 본 실험에서는 double stem type의 동심 압출기를 이용하여 피복 압출한 핵연료의 피복 관이 조사 도중 내압을 받거나 핵연료심의 팽윤(swelling)에 의한 부피팽창이 이 일어날 때 견딜 수 있는 강도와 연신율을 예측하기 위하여 압력 과열시험과 tapered punch를 이용한 확관 시험을 수행하였다.

2. 실험 방법

2-1 시편 제작

압력 과열 시편은 하나로 핵연료 심재와 동일한 직경(Φ6.35)의 알루미늄 봉을 동심 피복 압출하여 한 쪽은 봉단가공 후 전자빔 용접을 하고 다른 한 쪽은 과열 시험 장치에 설치 할 수 있도록 외경 7.8mm, 내경 6.35mm, 구멍 깊이 20mm로 가공하였고 시편 전체의 길이는 150mm로 하여 그림 1과 같이 제작하였다. 확관 시험 시편은 한 쪽을 drilling 및 선반가공으로 깊이 25mm 내경 6.35mm로 가공하여 심재를 제거하고 다른 한 쪽은 다이 블록 위에 설치하여 하중을 받을 수 있도록 그림 2와 같이 제작하였다. 실험에 사용한 심재와 피복재는 모두 Al 1060을 사용하였으며 대표적 화학조성은 표1과 같다.

동심 피복 압출에 사용한 압출기의 용량은 200 ton이며 두 개의 billet을 동시에 압출하는 double stem type이다. 동심압출 방법은 먼저 540℃로 예열한 2개의 billet을 가열된 die block에 넣고 3mm/sec의 속도로 압출 하였다. 다이 예열 온도만을 480℃, 500℃, 520℃로 다르게 하고 다른 조건은 모두 동일하게 하여 3종류의 시편을 압출 하였다. 각 시편의 평균 압출 압력은 160 kg/cm²이다. 실험에 사용한 압출 다이 assembly는 nipple 각도 40°nipple과 die 사이의 간극을 0.7~0.8mm로 조립하여 사용하였다. 압력 과열 시편의 한 쪽 끝단의 용접에 사용한 전자빔 용접기는 최대 빔 출력 6kW 용량으로 3극관식 열전자 방출형 전자총(electron gun)을 사용하며 용접 조건은 가속전압 60 kV, 빔전류 8.6 mA, 용접속도 617mm/min를 적용하였다.

표1. Al 1060의 대표적 화학 조성(wt%)

Al	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	others
99.6	0.25	0.05	0.35	0.03	0.03	0.03

2-2 압력 파열시험

실험에 사용한 파열 시험장치는 가압 능력이 최대 20,000 PSI 이며 압력 유체는 아르곤 가스를 사용한다. 시편을 가열하기 위해서 전기로가 장치에 부착되어 있으며 최고 600°C까지 승온 시킬 수 있다. 가열장치는 3-zone type으로서 균일온도 구간(uniform zone)은 10cm 이며 목표온도에서 온도 편차는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이다. 시편의 외경과 내경을 측정 후 용접한 반대쪽 끝단에 swage lock을 사용하여 extension adaptor 에 연결한 후 파열시험 장치에 설치하였다. 시편의 표면온도가 100°C에 도달한 후 약 10분간 $100^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 를 유지한 다음 초기압력 7MPa로부터 가압 조절밸브를 작동하여 일정한 가압 속도로 압력을 가하여 파열순간의 압력을 측정하고 파열 개구를 포함하는 최대 원주길이를 측정하였다.

2-3 환관 파열시험

환관 파열 시험은 30ton 용량의 유압식 프레스를 사용하였으며 100°C의 물 속에 시편을 tapered press punch에 대하여 수직으로 고정하고 하중을 가하여 파열 순간의 하중을 측정하고 관 선단의 최대 원주길이를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 결론

피복관에 작용한 내압에 의한 파열강도 및 원주방향 연신율의 계산은 ASTM B811-97의 규정²⁾을 참고하여 적용하였으며 그 결과는 표 1과 같다. 표 2는 환관 시험 결과를 나타낸 것이다. 파열 양상은 그림 2에서 보는 바와 같이 3종류의 시편 모두 전자빔 용접부 바로 아래의 냉각 fin과 연장선상의 부분에서 파열되었다. Double stem type 동심압출 방식³⁾은 2개의 billet이 다이 블록 안에서 서로 대칭되는 방향으로 만나 성형 die를 통과하면서 피복(cladding)이 이루어지게 되는데 이 때 두 개의 billet이 만나는 부분의 bonding이 약하게 되면 다른 부분보다 상대적으로 취약하게 되어 원주방향의 인장력이 작용할 때 그 부위에서 손상이 발생하는 것으로 생각된다. 또한 압출시 stem의 원활한 작동을 위하여 punch의 표면에 발라주는 이형재(MOS_2)가 cladding에 혼합되어 이 부분에서 취성 파괴를 일으키는 것으로 생각된다. 그림 3의 a) CT480, e) CT520B의 경우처럼 상대적으로 큰 파열강도를 보였던 시편의 파면은 연성 파면을 보이는 반면 그림 3의 b) CT500 및 d) CT500B 시편의 파면의 경우 불순물이 혼합된 흔적을 볼 수 있고 취성 파면을 나타내고 있으며 원주방향 신장량도 가장 작은 값으로 측정되었다. 또한 압력 파열시험에서 가장 약한 파열강도를 나타낸 CT520시편의 직경방향 단면을 금속 현미경으로

관찰한 결과 그림 4의 a)에서 볼 수 있는 것처럼 불순물이 다량 포함된 것으로 관찰되었다. 확관 시험에서 파괴 하중 및 원주 방향 연신율이 가장 작은 것으로 나타난 CT500B 시편의 직경방향 단면을 관찰한 결과 그림 4의 b)와 같이 피복관의 두께 방향으로 결함이 발생한 것을 볼 수 있으며 이것은 두 billet이 합쳐지는 계면에 혼입된 불순물의 흔적으로 생각된다. 따라서 double stem type의 동심 압출기를 사용하여 핵연료를 피복 하는 경우 위에 기술한 것과 같은 결과를 초래할 가능성이 매우 높기 때문에 billet 표면의 전처리에 세심한 주의가 필요하며 이형재의 사용 방법을 개선할 필요가 있는 것으로 생각된다.

표 1 과열시험 데이터 계산결과

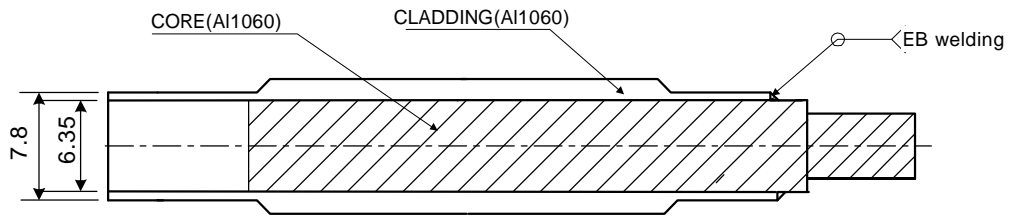
시편 번호	과열 압력 (bar)	시험전 피복관 외경 (mm)	시험 후 원주길이 (mm)	원주방향 연신율 (%)	과열 강도 (Mpa)
CT480	170	7.82	26.8	9.16	80.1
CT500	157	7.83	25.2	2.6	73.9
CT520	138	7.82	27.8	13.2	65.0

표2 확관 시험 결과

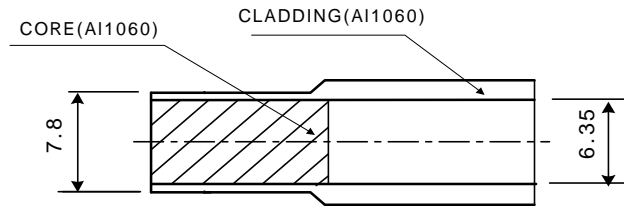
시편번호	시험 하중 (kg)	시험 전 원주길이 (m)	시험후 최대 원주길이 (mm)	원주방향 연신율 (%)
CT480B	150	19.9	26.7	33.8
CT500B	40	19.9	20.4	2.5
CT520B	240	19.9	29.8	45.8

참고 문헌

1. ASTM B491-88, Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Extruded Tubes for General-purpose Applications
2. ASTM B11-97, Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless tube for Nuclear Reactor Fuel Cladding
3. 김창규 등, KAERI/MR-360/200, 하나로 핵연료 가공



a) 압력 파열시험 시편



b) 환관 파열시험 시편

그림 1. 시험 시편 제작 개략도



a) CT480

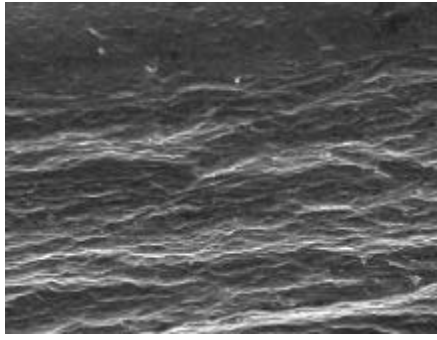


b) CT500

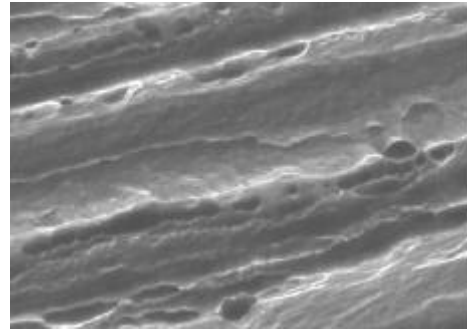


c) CT520

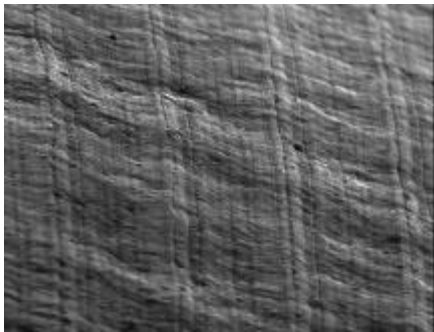
그림 2. 내압에 의한 하나로 모의 핵연료 시편의 피복관 파열 모양



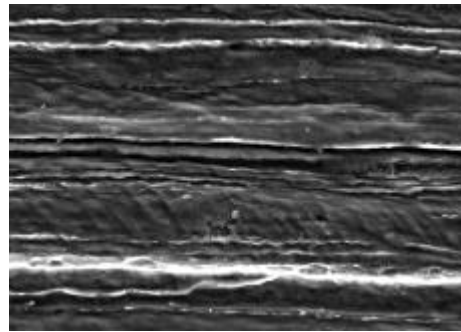
a) CT480



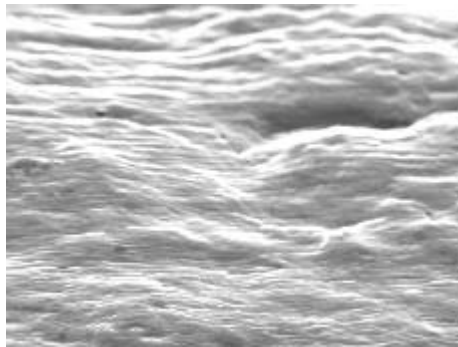
b) CT500



c) CT520

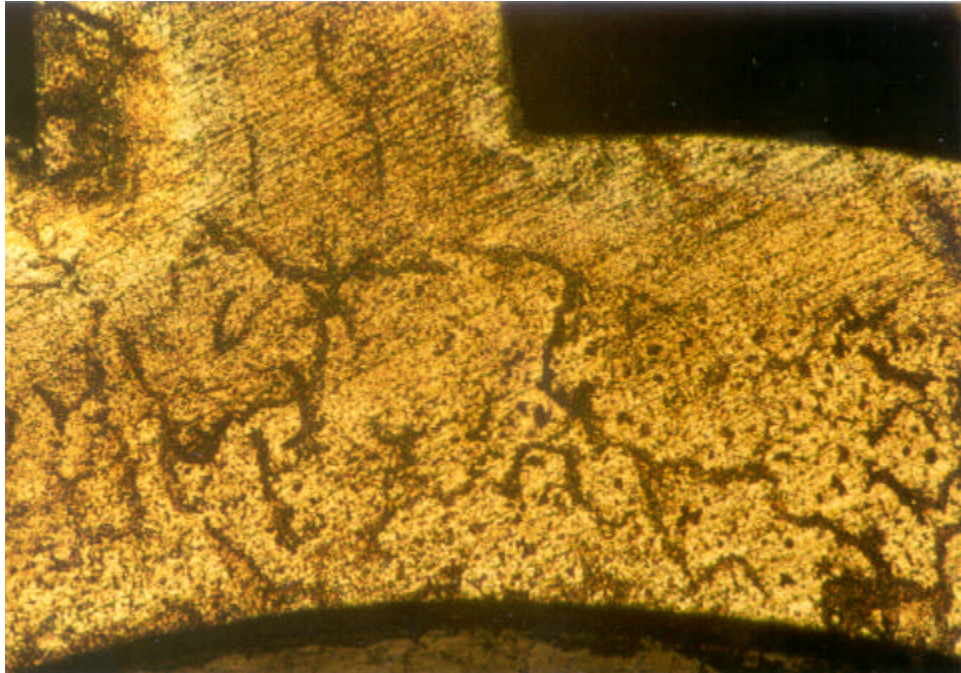


d) CT500B

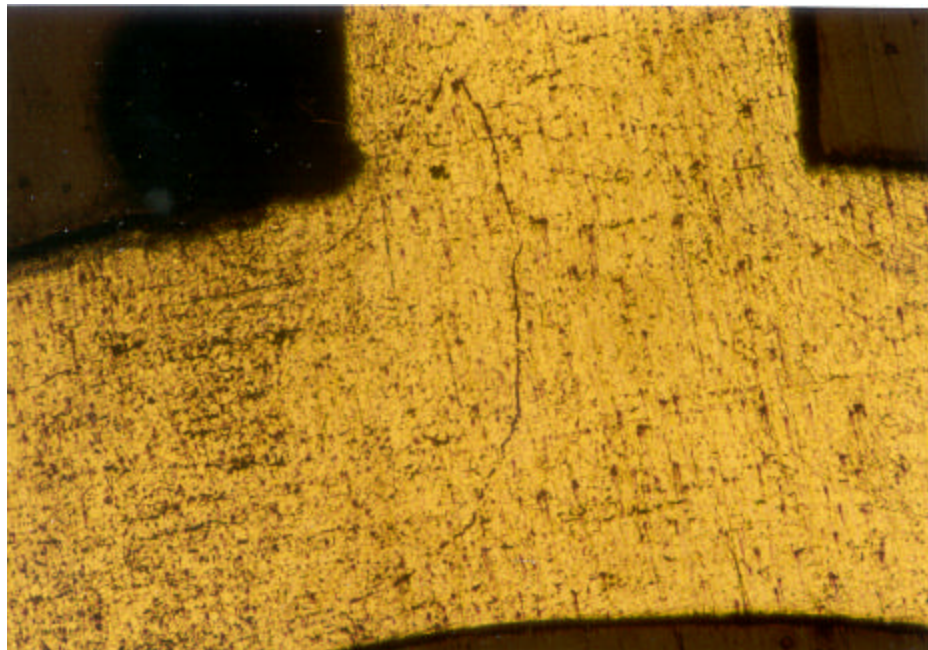


e) CT520B

그림 3. 하나로 모의 핵연료 피복관 시편의 압력 파열시험 및 확관 파열시험 파단면을 보여주는 주사전자 현미경 사진



b) CT520



a) CT500B

그림 4. 하나로 모의 핵연료 피복관 파열시험에 사용한 시편에 나타난 결함을 보여주는 금속현미경 사진