

이종금속 압출법을 이용한 금속연료 제조

Fabrication of Metallic-Fuel Rods of Two-kind Metals by Co-Extrusion Process

송재숙, 고영모, 이종탁, 주근식, 김태규, 손동성
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

이종금속 압출법을 이용하여 제조한 금속연료봉의 심재와 피복재 및 심재-피복재의 계면형상을 관찰하였다. 연료봉 내부의 U/Zr 심재와 외부의 Zr 피복재는 모두 사각형상을 나타내었다. 연료봉의 단면을 절단하여 연료봉 길이 방향에 따른 심재의 두께를 관찰한 결과 연료봉의 중간부위에서는 균일한 두께 분포를 나타내었다. 그러나 연료봉의 전단면과 후단면 일부에서는 심재의 두께가 불균일한 것으로 나타났다. 이것은 고온압출과정에서 압출 빌렛의 온도저하에 기인하는 것으로 생각된다. 압출 연료봉의 심재와 피복재 계면은 틈새가 없는 금속학적 결합으로 이루어졌고, 부분적으로 물결과 모양이 관찰되었다. 이러한 현상은 이종금속간 소성흐름에서 결정립 크기의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Abstract

Metallic-fuel rods were fabricated of two-kind metals by the co-extrusion process at high temperature, and their morphologies of core, cladding and core-cladding interface were observed. It was observed that both inner U-Zr core and outer Zr-cladding of extruded rods showed a square-shaped morphology. The observation on the thickness of core with the length of extruded rods revealed that the front and rear parts showed a non-uniform distribution while the center part revealed a uniform distribution. It would be attributed to the temperature decrease of billet during the hot-extrusion. The interface between core and cladding was shown to be a metallurgical bond without any gaps. The wave-shaped line was also observed in the core-cladding interface. It was ascribed to the difference in grain size in plastic flows of two-kind materials.

1. 서론

이종금속 압출공정은 제조공정을 단순화시켜 제조비용을 절감하는 경제적 효과와 이종금속간의 금속학적 결합으로 고연소도와 높은 열전도도를 갖는 금속연료를 제조할 수 있으며, 이종금속 개개의 우수한 기계적 특성을 이용하는 장점에도 불구하고 제조공정의 어려움으로 인하여 응용이 제한되고 있다.¹⁻²⁾ 이종금속의 압출공정은 형태가 복잡하고 이종금속이 동시에 많은 변형을 받기 때문에 이종금속 압출에서 금속연료의 형상을 제어하고 제품내부의 균일한 품질을 얻기 위해서는 압출공정변수가 두 재료의 복합거동에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 이종금속 압출공정에서는 금형의 모양, 압출속도, 금형과 재료의 마찰, 압출전의 두 재료의 초기 모양, 압출온도에서의 두 재료의 기계적 성질 등의 공정변수가 있다. 특히 두 재료의 기계적 성질은 이종금속 압출공정을 적용하기 위한 가장 기본적이며 중요한 변수이다.³⁻⁴⁾

이종금속 압출공정을 적용하여 압출하는 경우 이종금속이 동시에 많은 변형을 받기 때문에 압출재의 앞부분 및 뒷부분의 변형은 정상상태에서 얻어진 중간 부분과는 다르게 복잡한 형상으로 발달한다. 또한 같은 위치의 단면에서도 압출재의 내부와 외부의 변형이 다르다. 표면부위는 전단변형을 심하게 받을 것이며, 내부는 압출방향으로 연신되는 변형이 일어나므로 동일한 금속을 단순한 형태로 압출하더라도 조직이 불균일하기 때문에 피복금속의 피복층이 불균일하게 형성되거나 표면결함, 심재(Core)의 외부 노출 또는 압출재 단면형상이 불균일하게 나타날 수 있다. 이러한 불균일 변형은 압출재의 앞부분과 뒷부분에서 더욱 심하게 나타나기 때문에 금속유동의 특성을 분석하는 것이 필수적이다.³⁻⁵⁾ 최근에는 복잡한 제조공정변수에도 불구하고 이종금속의 우수한 기계적 특성을 이용하고 제조비용의 감소와 제조공정을 단순화시킬 수 있는 기술개발에 관심이 증가하고 있다. 또한 압출재의 형상 및 크기의 조절이 용이하여 소규모의 원자력을 이용하는 분야에 광범위하게 적용시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 심재로 Zr-38%U 소결체와 피복금속으로 Zr-1%Nb 합금을 이용하여 이종금속 압출공정법을 적용하여 연료봉을 제조하고 연료봉에서 심재분포, 크기 및 균일성 그리고 피복재 형상과 심재-피복재 계면을 관찰하였다.

2. 실험방법

이종금속간 압출에는 350ton 수평식 압출기를 사용하였으며, 간접압출 방식으로 연료봉을 제조하였다. 연료봉 제조에 사용된 압출 빌렛 모양은 그림1에 나타내었다. 압출용 빌렛은 연료봉 압출후 심재의 크기가 4.1*4.1mm, 피복금속의 두께가 0.5mm로 형성되도록 고안되었으며, 그림에서 보여주는 바와 같이 심재는 연료봉의 심재시작부와 심재끝부분의

균일성을 높이기 위하여 앞부분이 오목하고 뒤부분은 볼록한 형상을 갖는 Zr-38%U 소결체이고, 피복금속은 Zr-1%Nb 합금이며, 외부는 Cu can 구성되어 있다. 빌렛제조시 사용된 심재는 Zr-U압분체를 1500°C에서 2시간 소결하였다. 빌렛제조는 심재와 피복금속 및 Cu can을 결합하고 밀봉하여 진공분위기에서 전자빔 용접하여 만들었다. 연료봉 압출은 빌렛을 710°C에서 1시간 예열한 후 압출하였으며, 적용된 압출비는 30이었다. 연료봉 압출시 압출압력은 70kg/cm², 압출속도는 19.2mm/sec이었다. 연료봉 압출에 사용된 압출금형은 그림2에서 보여주며, SKD 61종으로 제작하였다. 압출금형은 사각형태의 나선형 모양을 지니는 연료봉을 제조하기 위하여 내각이 120°인 원추형이며 사각 나선형 형상을 갖는다. 연료봉의 단면형상과 크기는 투영기를 이용하여 측정하였다. 연료봉의 심재와 피복재 계면관찰은 주사전자현미경을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

압출 빌렛을 710°C에서 1시간 예열한 후 간접압출법으로 제조한 연료봉의 형상을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 연료봉은 피복금속으로 Zr-1%Nb합금, 심재(core)로 Zr-38%U합금으로 구성되어 있으며, 연료봉 단면은 사각모양을 갖고 크기는 4.0~4.2mm이며, 피치가 400mm인 오른쪽 나선을 가지고 있다.

그림4는 연료봉을 절단한 사각단면(a)과 길이방향의 단면(b)을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 연료봉의 단면은 Zr-38%U 심재와 Zr-1%Nb 피복금속 모두 사각형태를 나타내며 Zr-1%Nb 피복금속의 각 모서리는 들출되어 편 형태의 모양을 취하고 있다. 또한 외부의 피복층으로 피복된 Zr-1%Nb 합금은 심재인 Zr-38%U 합금을 균일한 두께로 감싸안고 있는 것을 관찰할 수 있다. 길이방향의 단면에서도 Zr-1%Nb 피복금속은 균일하게 피복되어 있는 것을 알 수 있으며, 계면 또한 직선 형태로 관찰된다. 연료봉의 사각단면과 길이방향 단면 모두 심재크기는 4.0-4.2mm, 피복층의 두께는 0.45-0.55mm로 균일하게 측정되었다.

그림5는 710°C에서 1시간 유지후 압출한 연료봉에서 압출방향에 수직한 면(a)과 압출방향에 평행한 면(b)의 심재와 피복금속 사이의 계면을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 심재와 피복재 간의 결합은 금속학적 결합형태를 나타내며, 계면에서 기공이나 틈새 같은 결함들은 관찰되지 않는다. 압출방향에 수직한 면(a)과 압출방향에 평행한 면(b) 모두 고배율에서 계면을 관찰한 결과 저배율에 관찰되는 것과 다르게 물결과 형상의 모습으로 계면이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 압출공정시 고온에서 이종금속간 변형저항계수와 미세구조상 결정립 크기의 차이로 인하여 형성되는 것으로 여겨지며, Foster와 그 연구진⁶⁾이 연구한 Zr과 Zircalloy-2 합금의 이종금속 압출시 형성된 계면의 관찰결과와 유사하다. 또한 Zr과 Zircalloy-2 합금의 결합강도는 Zr의 인장강도(550MPa)보다 높게 관찰되며 이는 이종금속간 압출시 금속학적 결합이 형성된다고 보고하였다.⁶⁾

압출방향에 수직한 면에서 심재의 미세조직을 보면 리본형태의 Zr상이 미세하고 균일하게 분포하고 있으며, 리본형태를 갖는 Zr상의 두께를 linear intercept법으로 측정된 결과 2.85 μm 로 측정되었다. 압출방향에 평행한 면의 미세조직을 보면 Zr상이 압출방향으로 길게 연신된 형태로 균일하게 분포하고 있으며, Zr상의 평균간격은 2.92 μm 로 측정되었다.

그림6는 Zr-38%U 소결체를 사용하여 빌렛을 제조하고 710 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 예열한 후 이중금속압출법으로 압출한 연료봉을 절단하여 심재의 크기를 측정하고 연료봉 길이에 따른 심재(core) 크기를 나타내었다. 절단하기 전의 연료봉의 단면크기는 4.0~4.2mm이고 피치가 400mm인 오른쪽 나선을 가지며 심재 길이가 800mm로 측정되었다. 압출방향에 수직한 심재 단면을 측정하기 위하여 심재의 시작부와 끝부분 100mm는 10mm 단위로 절단하고 나머지 부분은 50mm 단위로 절단하였다. 절단된 연료봉은 투영기를 이용하여 심재와 피복층의 두께를 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 심재 시작부와 끝부분으로부터 40~80mm 부근에서 심재의 최소 및 최대 두께가 4.3mm까지 급격하게 증가하고 있으며, 균일한 변형을 가지는 중심부는 심재의 최소 및 최대 두께가 4.0~4.2mm로 균일하게 관찰된다. 앞부분에서 심재의 두께 증가는 압출시 압출 빌렛이 상대적으로 온도가 낮은 압출다이와 접촉하면서 급격한 온도저하로 인하여 심재인 Zr-38%U 합금의 강도가 피복금속인 Zr-1%Nb 합금의 강도보다 급격히 증가하여 이중금속간 강도비가 증가하기 때문으로 여겨지며, 뒤부분의 심재증가 현상도 앞부분과 마찬가지로 피압출물이 대부분 압출되어 나가기 때문에 급격한 온도저하 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 피복금속으로 사용된 Zr-1%Nb 합금의 인장강도는 상온에서 553MPa이며, 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서는 95MPa로 급격히 감소하며, 심재로 사용된 Zr-38%U 합금의 인장강도는 상온에서 1154MPa, 600 $^{\circ}\text{C}$ 에서 119MPa 값을 갖는다.⁷⁾ 600 $^{\circ}\text{C}$ 에서 Zr-38%U 합금과 Zr-1%Nb 합금의 강도비는 1.25를 나타내며, 600 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 두 합금간 강도비는 거의 비슷해질 것으로 예측되어 심재와 피복층이 균일하게 형성될 것이며, 반대로 온도가 낮아지는 경우 두 합금간 강도비는 급격히 증가하여 심재크기가 증가하며 피복층은 얇게 형성될 것으로 예측되며, 관찰되는 결과와 잘 일치한다.

4. 결론

이중금속간 압출에서 심재로 Zr-38%U 합금을 사용하고 피복금속으로 Zr-1%Nb 합금을 이용하는 압출 연료봉 제조결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이중금속간 압출공정을 이용하여 압출온도 710 $^{\circ}\text{C}$ 에서 사각형태의 나선형모양을 갖고 심재와 피복층 두께가 균일한 압출 연료봉을 제조할 수 있었다.
- 2) 압출 연료봉에서 심재와 피복금속간 계면은 금속학적으로 접합되어 있음을 관찰할 수 있었으며, 계면결함은 관찰되지 않았다.
- 3) 심재길이에 따른 심재 두께 측정결과 심재 시작부와 끝부위 40~80mm 부근에서 심

재두께가 급속히 증가하는 양상을 보인다. 이는 압출시에 급격한 빌렛온도 저하로 이중금속간 강도비의 증가와 연관된다.

- 4) 고배율에서 계면을 관찰한 결과 저배율에 관찰되는 것과 다르게 물결과 형상의 모습으로 계면이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 압출공정시 이중금속간 기계적 특성과 미세구조상 결정립 크기의 차이로 인하여 형성되는 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) J.C. Tverberg and J.J. Holmes, HW-62347, UC-25, Metals, Ceramics and Materials, 1961.
- 2) C.W. Wu and R.Q. Hsu, J. of Materials Processing Technology, 123(1) (2002) p.47.
- 3) K.V. Sudhakar, Eng. Fail. Analys. 9 (2002) p.159.
- 4) K. Morsi, H.B. McShane and M. McLean, Mater. Sci. and Eng., A290 (2000) p.39.
- 5) Y.M. Hwang and T.F. Hwang, J. of Mater. Proc. Techno., 121 (2002) p.226
- 6) John Paul Foster, Herbert L. Dirks and John F. Bates, J. of Nuclear Materials, 206 (1993) p.101.
- 7) 이중금속 압출조건 설정을 위한 Simulation, kaeri/CM-468/2000.
- 8) U-Zr합금의 소결특성, 조항식, 송재숙, 이중탁, 주근식, 손동성 한국원자력학회, 2002. 10

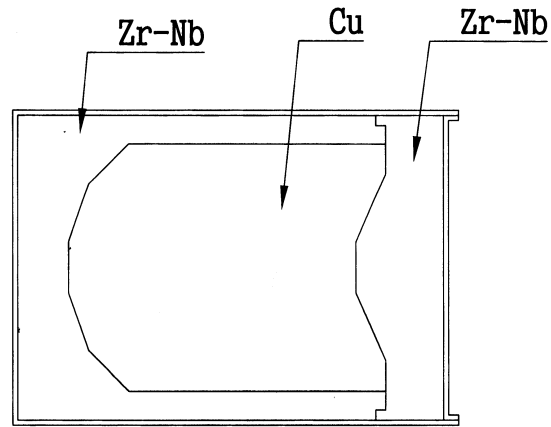


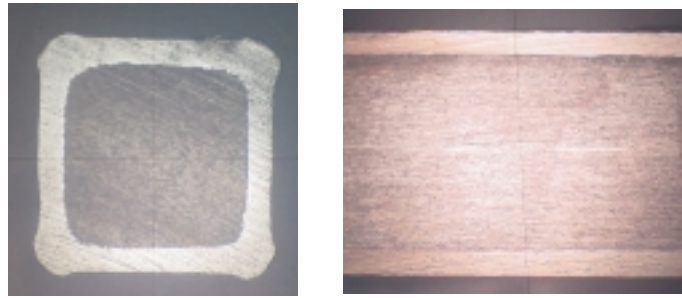
Fig. 1. Schematic drawing illustrating the shape of Cu-Zr-U/Zr billet for co-extrusion.



Fig. 2. Photograph of die for Indirect co-extrusion.



Fig. 3. Extruded rod fabricated by indirect co-extrusion process.



a)

b)

Fig. 4. Photographs of core-to-clad interface in the coextruded rod.

a) Transverse and b) Longitudinal section

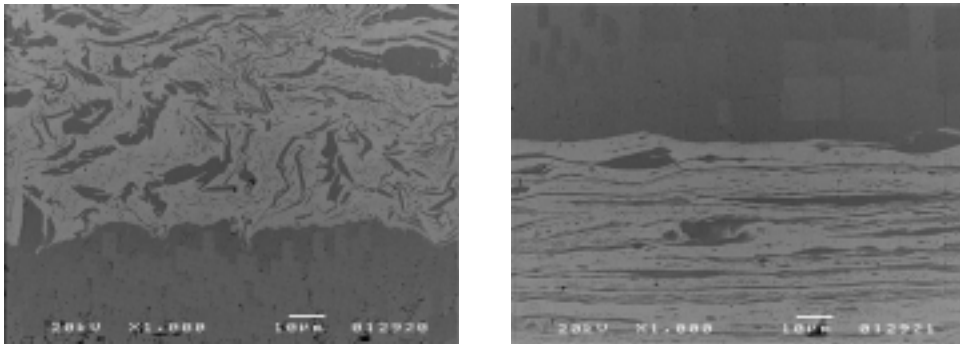


Fig. 5. Micrographs of the core-cladding interface in the coextruded rod.

a) Transverse and b) Longitudinal section

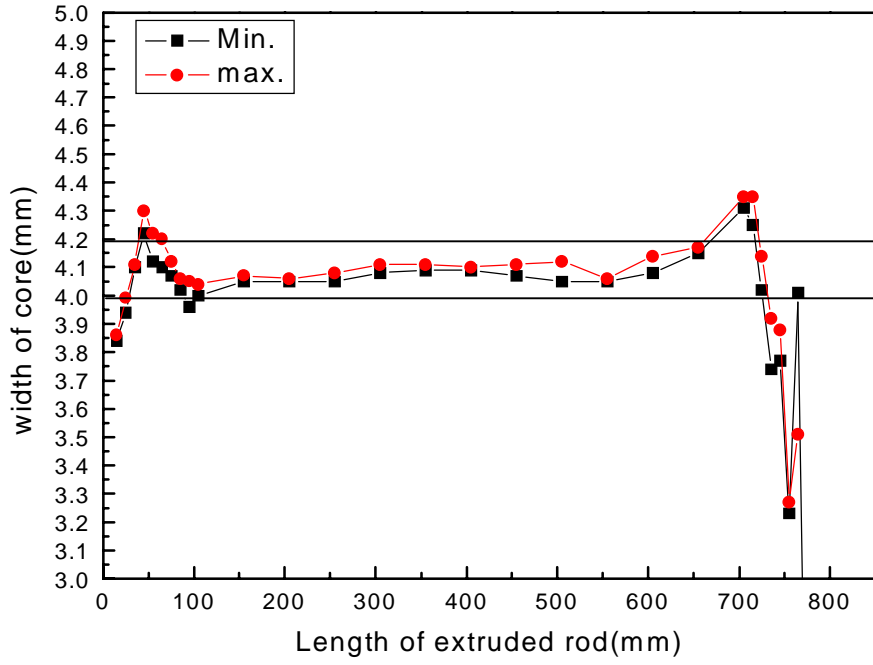


Fig. 6. Distribution of the width of core with the length of coextruded rod.