

간접압출법에 의한 하나로봉 제조기술 기초연구

**A Basic Study on the Fabrication Technology of HANARO Fuel Rod  
by Using In-direct Extrusion Method**

박 종만, 고 영모, 주 근식, 이 종탁, 권 선철, 김 창규, 손 동성

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

Al canning을 한 모의 핵연료 billet을 제조한 후 압출온도, 압출금형 각도, 심재 밀도, 심재형상, 직접 및 간접압출 방법에 따른 압출특성의 차이를 비교 분석함으로써 하나로 핵연료 제조를 위한 새로운 공정개발에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다. 간접압출의 경우 정상 압출부위에서는 일정한 피복두께를 가지는 8 각형에 가까운 심재형상이 관찰되었으나 심재 앞부분과 뒷부분에서는 정상 압출부위의 피복 두께보다 매우 얇아지고 Al이 심재의 중심을 관통하여 같이 압출되는 불균일부가 발견되었다. 간접압출시 나타나는 심재 불균일 특성은 압출온도, 금형각도, 심재 압분밀도 차이에는 크게 영향을 받지 않았으나 압분체에 chamfer 가공 등의 형상변화로 인하여 크게 개선되었다. 직접압출 방법으로 핵연료봉을 제조한 결과, billet 내의 이종재료간 유동성이 크기 때문에 간접압출시에 비해 길이에 따른 심재형상 불균일 정도가 매우 심하였다.

**Abstract**

In order to get basic data for developing new fabrication process of HANARO fuel rod, extrusion characteristics by using direct and in-direct extrusion methods were investigated with billets containing dummy fuel core and aluminum can as functions of temperature, conical angle of die, green density of fuel compaction, and shape of fuel core. In case of in-direct extrusion, fuel cross section at the middle of extrusion showed a closely octagonal shaped core with constant cladding thickness. However, at the both front and rear end parts of extruded fuel core, there were imbalances in cladding thickness as well as a penetration of Al into fuel core from the back side of extruded rod. It is of note from the result that the variables such as extrusion temperature, conical angle of die, and green density of the fuel compact did not affect, or did affect

slightly in some case, the degree of imperfections in the extruded fuel rod, but the imperfections were improved greatly by changing the shape of billet core by applying chamfer process. Direct extrusion appeared to have no advantage in improving imperfections fabricating fuel rod due to severe fluctuation between fuel core and cladding materials.

## 1. 서 론

현재 하나로에서는 봉상의  $U_3Si/Al$  분산핵연료를 구동연료로 사용하고 있다. 한국원자력연구소에서는 창안기술인 원심분무방법을 이용하여 구형의  $U_3Si$  및  $U-Mo$  핵연료를 개발하였다[1-2]. 이에 따라 하나로 핵연료 국산화 계획을 수립하여 현재는 하나로 핵연료 제조시설인 핵연료 연구동이 설계, 건조 중에 있으며 2003년 이후에는 자체적으로 생산, 공급될 예정이다. 하나로 핵연료봉의 제조과정은 그림 1에서와 같이  $U_3Si$  용해 및 분말제조,  $Al$  분말과의 혼합 및 압분, 심재압출, 인발, 교정, 연료봉 끝단 가공 및 plugging, 피복압출, end plug 부위의 가공 및 전자빔 용접으로 나누어지는데 크게 핵연료분말 제조공정, 핵연료심재 압출공정, 핵연료심재에 다시 알루미늄 피복하는 동심압출 및 전자빔 용접 공정으로 구성된다.

이에 따라 기존의 핵연료 제조공정은 두 번의 압출공정(직접압출)을 거치면서 필수적으로 핵연료 밀봉을 위하여 봉단마개 전자빔 용접이 필수적으로 수반된다. 현재 하나로 핵연료봉에서 가장 결함발생 요인이 많고 구조적으로 취약한 부분이 전자빔 용접부위와 봉단마개 부위이다.

최근 들어 AECL에서 제조한 핵연료중에 하나로에서 연소중 용접부 근처의 봉단마개 부위에서 ballooning and rupture 현상이 발생하여 피복재 내부로 냉각수가 유입되는 결함이 발견되어 연소도중에 인출한 사례가 발생하였는데, 이는 기존의 핵연료 제조공정이 여러 단계의 복잡한 공정에서 오는 핵연료 제조결함 가능성과도 관계가 있지만 근본적으로는 하나로 구동핵연료에 취약한 부위가 존재한다는 사실이다. 즉 핵연료 심재와  $Al$  피복재 사이에는 두 번에 걸친 압출과정을 통하여 접합 상태(atomic bonding)이 아닌 mechanical contact 상태로 존재하여 불순물이 혼입되면 연소중 발생한 분순물 기체가 구동핵연료의 plug 부위에 모여서 피복재가 파손될 수 있는 가능성이 항상 존재한다.

따라서 하나로 핵연료봉을 기존의 핵연료 제조방법 개념(심재압출 및 피복압출)을 탈피하여  $U_3Si/Al$  분산핵연료 혼합체를 일정한 크기로 압분한 후 피복재로 사용될  $Al$ 으로 canning 재를 만든 후 압분체를 안에 넣고 밀봉하여 billet으로 제조하여 간접압출 방식으로 한 번에 압출하면 핵연료 심재와 피복재가 동심압출이 같이 적용되어 심재와 피복재 사이의 공간이 없이 한 번의 압출공정으로 제조될 수 있다. 간접압출법은 이중재료의 압출에 일반적으로 사용되는 개념[3]이지만 하나로 핵연료의 제조공정에서는 지금까지 시도된 바가 없다. 만약 간접압출법으로 하나로 규격에 맞는 핵연료를 제조가 가능하다면 기존 공정에서의 핵연료봉 끝단 가공 및

plugging, 피복압출. 전자빔 용접 과정을 생략할 수 있고 간접압출 후 압출된 핵연료봉에 대하여 끝단 기계가공 공정만 추가하면 핵연료봉을 생산할 수 있기 때문에 제조공정을 대폭 축소하여 경제성을 향상시키고 연료심재와 피복재 사이의 공간이 없는 결함발생을 줄일 수 있는 안정성 높은 핵연료 제조가 가능하다. 본 연구에서는 Al canning을 한 핵연료 billet을 제조한 후 압출온도, 압출금형 각도, 심재밀도, 심재형상, 직접 및 간접압출 방법에 따른 압출특성의 차이를 비교 분석함으로써 새로운 공정개발에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다.

## 2. 실험방법

하나로 핵연료 심재는 Al 기지에 61.5 wt%  $U_3Si$ 가 분산된 조직으로서 120  $\mu m$  이하의 핵연료 분말과 약 45  $\mu m$  이하의 미세한 Al 분말을 사용한다. 본 연구에서는 Al 피복재와 Al 기지에 핵연료입자가 분산된 심재를 동시에 압출하였을 때 나타나는 압출특성 기초자료를 얻기 위하여  $U_3Si$  분말 대신에 120  $\mu m$  크기 이하의 Zr 분말을 동일한 핵연료 체적분율이 되도록 하여 일정크기의 모의핵연료 심재를 압분, 제조한 후 이를 다시 Al1060 재질의 Al can에 장입하고 EB 용접하여 압출 billet을 제작하였다. Billet이 장입되는 압출기 container의 sleeve 직경은 32 mm이므로 외경이 30 mm가 되도록 billet의 크기를 결정하였다. Billet 내에 장입되는 모의 핵연료 심재의 직경은 기존의 하나로 핵연료 치수규격에 따라서 피복재와 심재와의 단면적비가 58:42 임으로부터 22.8 mm로 결정하였다. 압출재에서 심재 형상변화를 주로 관찰하기 위하여 실제 하나로 핵연료 심재부피의 반이 되도록 압분체의 양을 사용하였다. 심재압분은 30 Ton 용량의 double action press를 이용하였으며 압분압력을 조절하면서 심재의 압분밀도를 63~74 %TD로 변화를 주었다. 심재용 압분체는 그림 2에서와 같이 cylinder 형태로 제작되었으며 그중 일부는 심재 흐름 변화를 관찰하기 위하여 양단에 약 5 mm의 크기로 champer 가공을 하였다. 압분체를 Al can에 장입한 후 양단을 전자빔 용접방법으로 진공 밀봉하였다.

제작된 billet을 이용하여 300 Ton 용량의 수직압출기에서 직접 및 간접방법으로 압출 mode를 변화시키면서 핵연료봉을 압출하였다. 압출금형은 직접압출의 경우 billet과의 접촉각이 180°인 flat die를 사용하였고 간접압출 시에는 180°와 120°로 변화를 주었다. 압출온도는 340°C~400°C 사이에서 수행하였으며 압출금형의 평행부 길이는 각각 직접압출의 경우 5 mm, 간접압출의 경우 3 mm 이었다.

압출후 X-ray 비파괴 시험을 수행하여 압출봉내의 심재길이 및 흐름변화를 측정하였으며 압출된 모의 연료봉의 앞, 중간, 뒤 부분에 대한 단면관찰로부터 공정변수별 압출특성 차이를 비교 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 간접압출

효과적인 압출심재의 flow pattern 변화를 관찰하기 위하여 하나로 핵연료봉의

심재부피의 반이 되도록 약 40 g의 Zr-Al 모의 핵연료 압분체를 약 2-5 Ton의 압분압력 조건에서 압분한 후 Al can에서 EB 용접하여 밀봉하였다. 준비된 billet을 300 Ton 용량의 수직압출기에서 압출온도를 각각 400°C(I-1), 370°C(I-2), 340°C(I-3)로 변화하면서 모의 핵연료봉을 간접 압출하였다. 압출된 모의 핵연료봉의 치수 특성을 표1에 정리하였다. 압출 온도를 변화시킴에 따른 핵연료 심재의 길이는 404 mm ~ 423 mm의 범위이었으며 이는 핵연료봉 심재장입량 기준으로 표준길이인 350 mm에서 약 54 mm ~ 73 mm 정도 길게 심재가 압출되었음을 의미한다. 또한 압출 온도가 감소할수록 심재의 길이는 약간 길어지는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 그림 3에서와 같이 모의 핵연료심재의 정상압출부위에 대한 단면사진에서 그 차이점을 알 수 있다. 핵연료심재를 약 70 %TD의 밀도로 압분하였기 때문에 고온에서 Al 피복재와 동시에 압출할 경우 압분체 심재가 다져지면서 심재 직경이 감소하고 대신 Al 피복재의 두께가 증가하였기 때문이다. 압출된 모의 연료봉의 피복재의 두께는 핵연료 기준규격인  $0.76 \pm 0.08$  mm의 치수에서 증가하여 0.94~0.97 mm의 값을 나타내었으며 온도가 감소할수록 Al 피복재의 강도가 상대적으로 증가하면서 피복재 두께가 약간 증가하였다. 또한 간접압출법으로 압출된 모의 핵연료 심재의 형태는 전 온도영역에서 8 개의 pin에 모서리를 갖는 8 각형 구조에 가까운 단면을 나타내었다. 이는 압출시에 Al can이 피복층으로 압출되면서 pin 부위로의 metal flow가 많아지면서 pin 없는 지역과의 flow balance 차이가 발생하였기 때문이었다. 그림 4와 5는 각각 압출된 모의 연료봉에 대한 심재 앞/뒷 부분의 X-ray 사진과 단면을 나타낸다. 간접압출시 심재 앞부분과 뒷부분에서 정상압출부위의 피복두께보다 매우 얇아진 불균일부가 발견되었다. 간접압출한 모의 핵연료는 압출온도에 관계없이 심재 선단에서 약 30 mm 거리에서 피복층이 거의 없을 정도로 심재가 피복층까지 돌출하였다가 약 50 mm 거리 이후에서는 일정한 피복두께를 나타내었다. 또한 핵연료 심재 끝단부터 약 100 mm의 길이에서 Al이 심재의 중심을 관통하여 같이 압출되는 불균일 영역이 관찰되었다. 핵연료 심재 불균일 특성은 압출 금형의 conical 각도를 180°로 변화시킨 결과(I-4), 오히려 심재 선단부에서의 심재 불균일 정도가 심화되고 심재 끝단에서는 Al이 심재중심을 관통하여 같이 압출되는 불균일 길이가 증가하였다. 이러한 압출심재 앞,뒤의 불균일 영역생성은 간접압출의 일반적인 특성으로서 압출시에 billet이 금형을 통과하면서 중심부는 tensile stress 영역에 있고 sleeve와 마찰이 발생하는 billet 외각은 shear stress가 주된 변형 응력으로 작용하기 때문이다[3].

그림 6은 모의 핵연료 심재의 압분밀도를 각각 74 %TD(I-5), 67 %TD(I-1), 63 %TD(I-6)로 변화함에 따른 정상 압출부위 단면을 나타낸다. 압분밀도가 증가할수록 심재직경은 증가하고 피복재의 두께가 감소되어 핵연료 심재길이가 짧아지는 경향을 발견하였다. 그러나 압출심재 앞,뒤의 불균일영역 형상과 길이에겐 차이가 거의 없었다. 따라서 간접압출 심재의 흐름은 압출금형 각도에 따라 약간의 영향을 받지만 심재의 압분밀도와 온도변화가 큰 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

간접압출에 따른 심재 불균일 현상을 최소화하기 위하여 cylinder 형상의 압분체에 5 mm의 chamfer 가공한 후 압출한 결과(그림 5의 I-7), 핵연료 선단부위에서는 피복층 두께가 0.7~1 mm 로 비교적 일정하였고 정상압출 영역의 피복두께와 유사하였다. 한편 핵연료 심재 후단부에는 Al이 심재중심을 관통하여 같이 압출되는 현상이 현저하게 감소하였으며 피복재 두께 또한 여전히 chamfer 가공과 관계없이 약 100 mm 길이에서 불균일하였다. 이러한 형상개선은 간접압출의 고유특성에 따른 불균일 영역이 chamfer 가공등의 형상변화로 인하여 피복재와 심재 사이의 응력분포 차이 및 단면적 비를 적절히 조절함으로써 이루어졌다고 생각된다. 앞으로 보다 정밀한 billet 형상개선을 통하면 심재 불균일 현상이 더욱 개선될수 있을 것으로 예상된다.

#### 나. 직접압출

하나로 핵연료봉의 심재부피와 동일하도록 22.5 vol% Zr이 분산된 총 79 g의 Zr-Al 모의 핵연료 압분체를 약 3 Ton의 압분압력 조건에서 cylinder 형태로 제조한 후 Al can에서 EB 용접하여 밀봉하였다. 준비된 billet을 300 Ton 용량의 수직 압출기에서 압출온도를 각각 400°C, 370°C, 340°C로 변화하면서 모의 핵연료봉을 직접압출 방법으로 모의 연료봉을 제조하였다. 표 1에서와 같이 X-ray 검사로부터 측정된 압출후 심재부의 총 길이는 880~910 mm로서 하나로 핵연료 심재 규격치인 700 mm를 크게 초과하였는데 이는 간접압출시 보다 2 배 이상 심재영역이 길게 압출되었다. 이러한 직접압출 특성은(그림 4 및 그림 7 참조), 모든 온도영역에서 간접압출과는 상이하게 심재가 Al can에 비해서 먼저 압출되고 압출 후반부에는 Al이 심재의 중심을 관통하여 같이 압출되는 불균일 영역이 300 mm 이상의 길이로 관찰되었다. 그림 8은 여러 온도에서 직접 압출한 모의 핵연료봉의 길이별 정상 압출부 단면이다. 압출 전반부에는 간접압출시와 비교할 때 8 개의 pin을 모서리로 하는 8 각형의 심재 구조가 뚜렷하게 나타나고 있으며 피복층의 두께는 0.17~0.46 mm로 매우 얇았고 온도가 낮을수록 감소하였다. 이후 압출 후반부로 갈수록 심재의 형태는 원형을 유지하지만 피복재가 서서히 두꺼워지다가 Al이 심재의 중심을 관통하여 같이 압출되는 후반부 불균일 영역으로 대체되었다.

이러한 심재형상의 길이별 변화가 큰 이유는 직접압출 방법이 간접압출에 비해 압출시 billet 내의 이종재료간 유동성이 크기 때문에 나타난 현상이기 때문이라 생각된다. 따라서 하나로 핵연료를 동시에 동심압출하기 위해서는 온도, 압분밀도, 압출비, 금형각도, billet 형상을 적절한 조건으로 조절한 후 간접압출 방법으로 시도해야 한다고 생각된다.

#### 4. 결론

Al canning을 한 모의 핵연료 billet을 제조한 후 압출온도, 압출금형 각도, 심재 밀도, 심재형상, 직접 및 간접압출 방법에 따른 압출특성의 차이를 비교 분석하였

다. 간접압출의 경우 정상부위에서는 일정한 피복두께를 가지는 8 각형에 가까운 심재형상이 관찰되었으나 심재 앞부분과 뒷부분에서는 정상 압출부위의 피복두께보다 매우 얇아지고 AI이 심재의 중심을 관통하여 같이 압출되는 불균일부가 발견되었다. 간접압출시 나타나는 심재 불균일 특성은 압출온도, 금형각도, 심재 압분밀도 차이에는 크게 영향을 받지 않았으나 압분체에 champer 가공 등의 형상변화로 인하여 크게 개선되었다. 직접압출 방법으로 핵연료봉을 제조한 결과, billet 내의 이종재료간 유동성이 크기 때문에 간접압출시에 비해 길이에 따른 심재형상 불균일 정도가 매우 심하였다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 자체연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 6. 참고문헌

1. J.M. Park, K.H. Kim, D.B. Lee, E.S. Lee, J.S. Lee, C.K. Kim, Proceedings of Korean Nucl. Society Spring Meeting, Pohang, 1999.
2. C.K. Kim, K.H. Kim, J.M. Park, E.S. Lee, W.H. Sohn, S.H. Hong, Metals and Materials, 15(1999)149-156.
3. Extrusion, K. Laue, H. Stenger, American Society for Metals, 2nd Ed.,(1981)

표 1. 압출된 모의 연료봉의 치수 특성.

압출 mode	I.D.	압출 온도 (°C)	billet 형상	압분체 밀도 %TD	금형 conical 각도	심재 무게 g	정상부 피복재 평균두께 $\mu\text{m}$	압출후 심재 총길이 cm	심재 불균일부 길이(앞) cm	심재 불균일부 길이(뒤) cm
간접	I-1	400	cylinder	66.7	120°	40	0.94	40.4	5	10
	I-2	370	cylinder	66.3	120°	40	0.96	42.1	4	9
	I-3	340	cylinder	66.4	120°	40.1	0.97	42.3	4	9.5
	I-4	400	cylinder	66.7	180°	39.9	0.95	39.8	5	11
	I-5	400	cylinder	73.6	120°	40	0.94	40.2	5	10
	I-6	400	cylinder	62.9	120°	39.9	0.99	41.3	5.5	8
	I-7	400	champer	66.7	120°	37.2	0.95	37.5	5(0.7-1mm)	9.5
직접	D-1	400	cylinder	68.0	180°	79	0.46-1.19	91	29	21
	D-2	370	cylinder	68.0	180°	79	0.20-1.11	88	30	-
	D-3	340	cylinder	68.0	180°	79	0.17-0.33	95	43	52

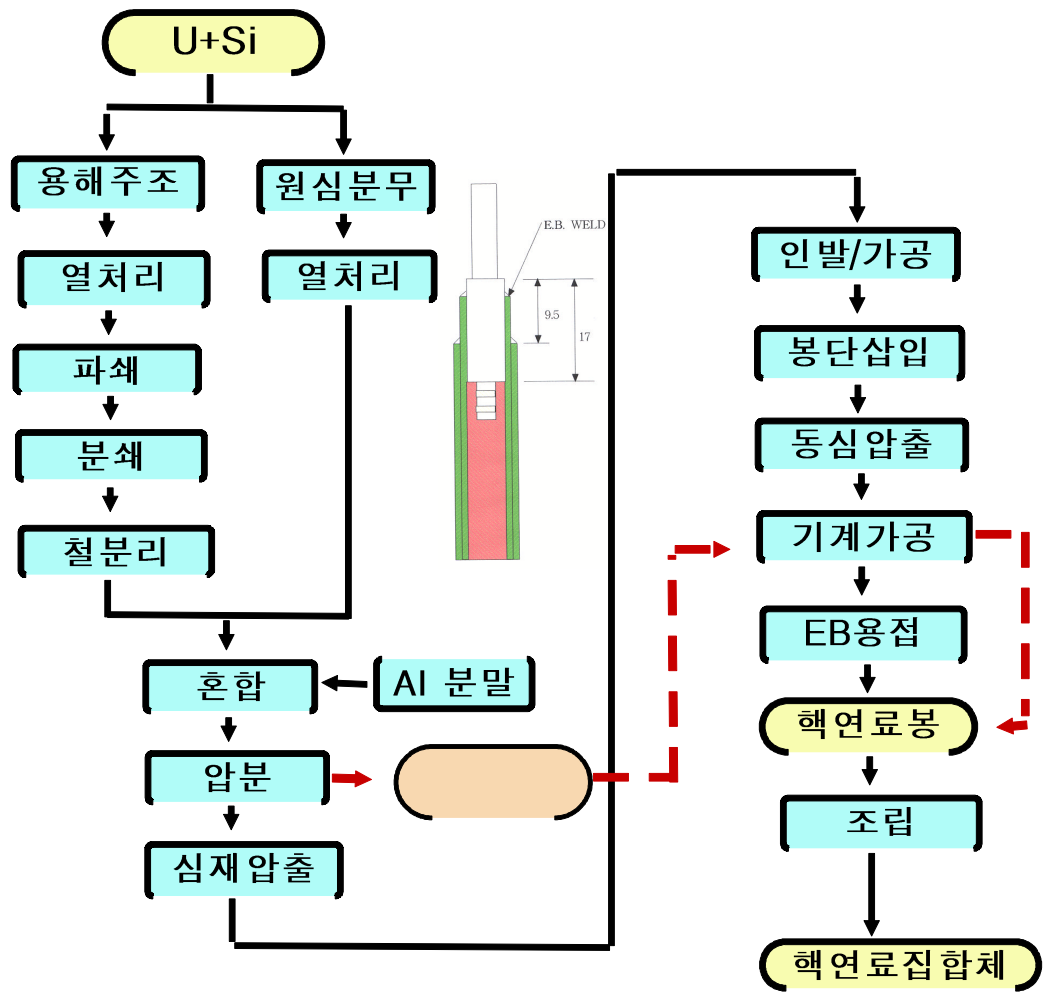
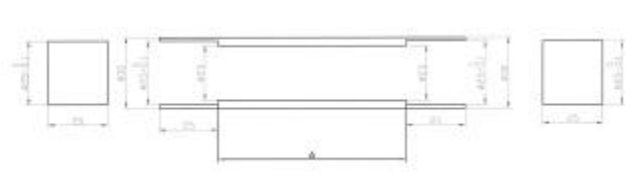
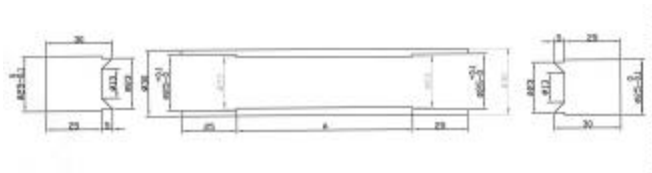


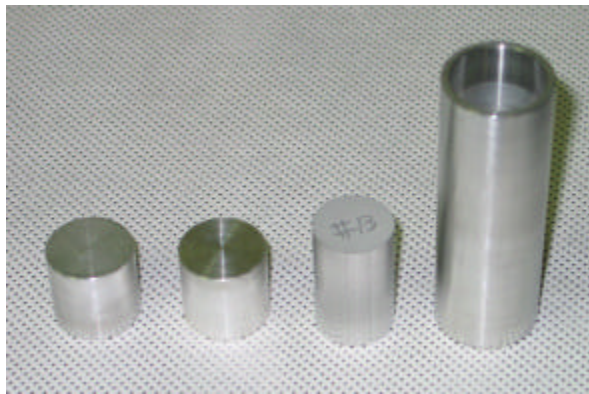
그림 1. 하나로 핵연료 제조공정도.



(a) Cylindrical billet 도면



(b) Chamfer billet 도면

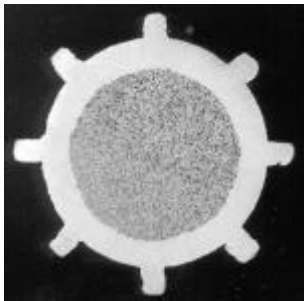


(c) 조립전 사진

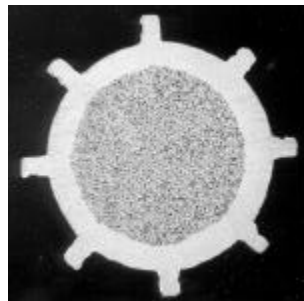


(d) 조립후 사진

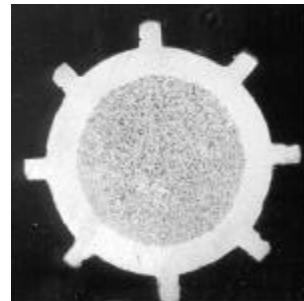
그림 2. 압출 Billet



(a) I-1(400°C)



(b) I-2(370°C)



(c) I-3(340°C)

그림 3. 간접 압출온도 차이에 따른 정상압출 부위에서의 모의 핵연료봉 단면.



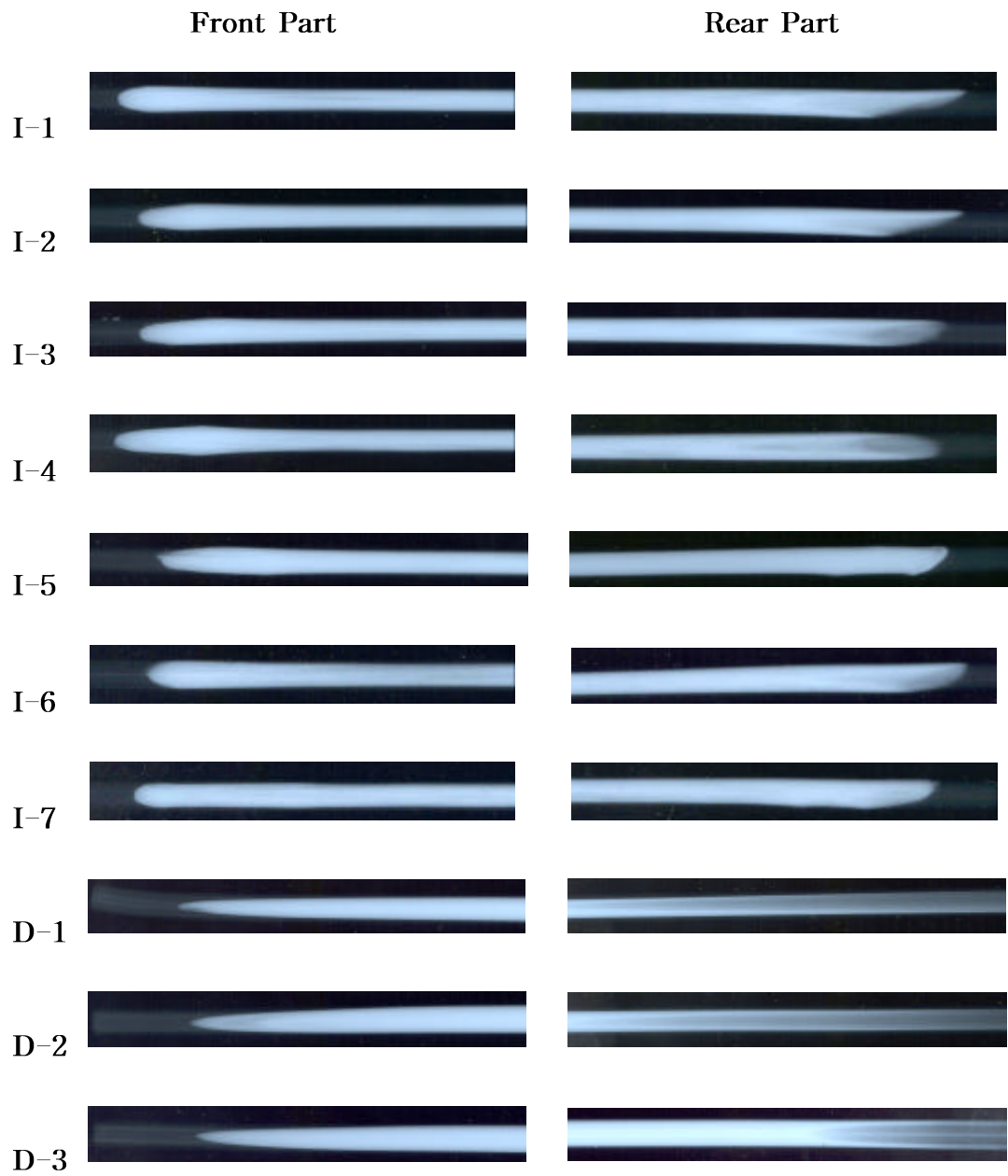


그림 4. 압출된 모의 핵연료봉의 X-ray 단면

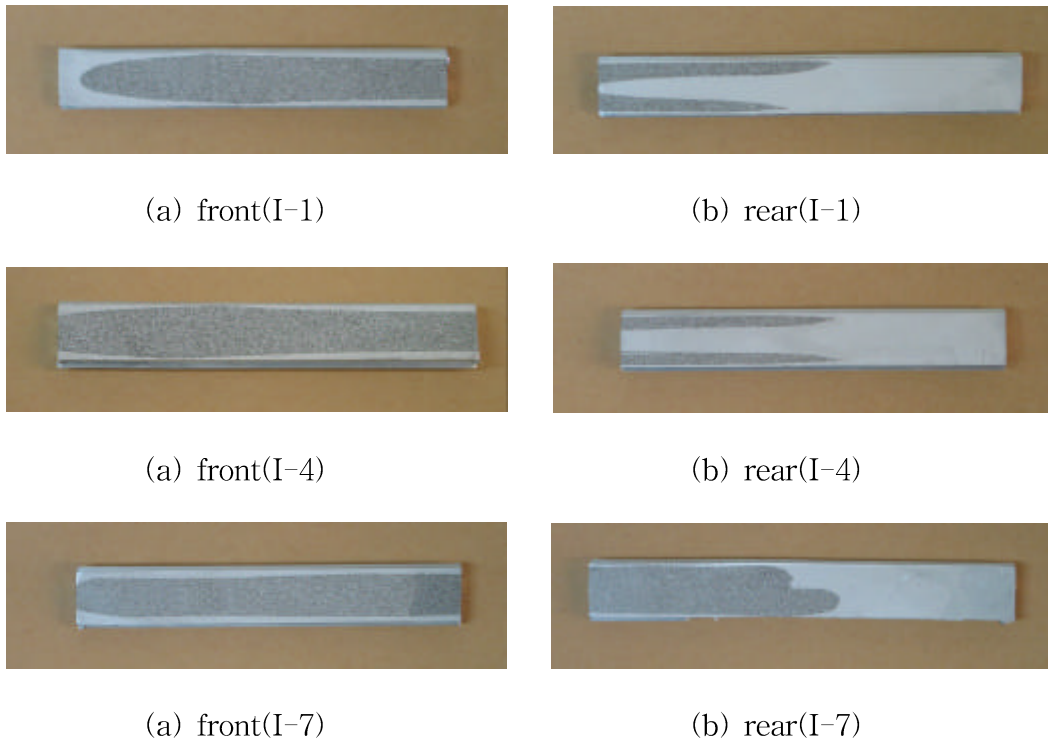


그림 5. 간접 압출된 모의 핵연료봉의 길이방향 심재단면

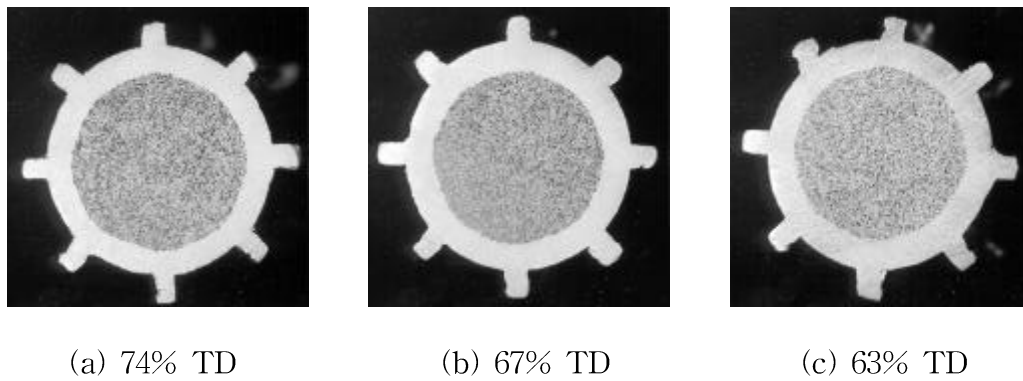
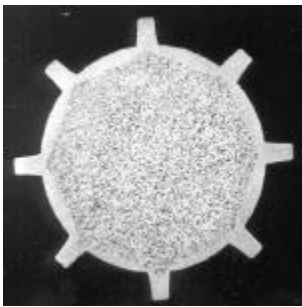


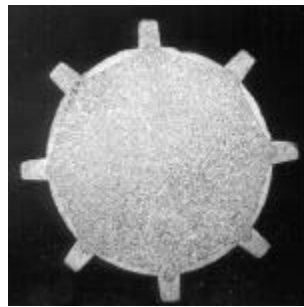
그림 6. 심재의 압분밀도 차이에 따른 정상압출 부위에서의 모의 핵연료봉 단면.



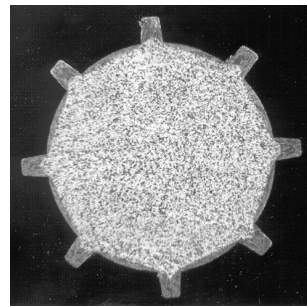
그림 7. 직접 압출된 모의 핵연료봉(D-2)의 길이방향 심재단면



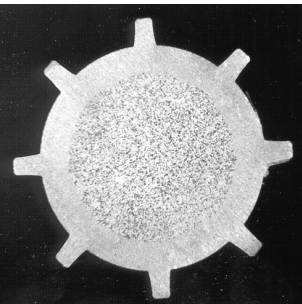
(a) 직접(400°C)-15cm



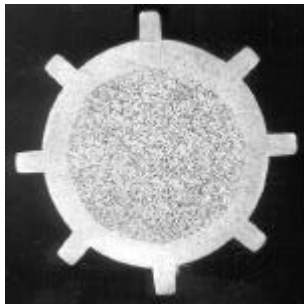
(b) 직접(370°C)-15cm



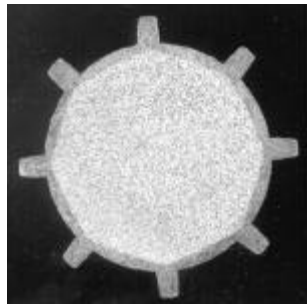
(c) 직접(340°C)-15cm



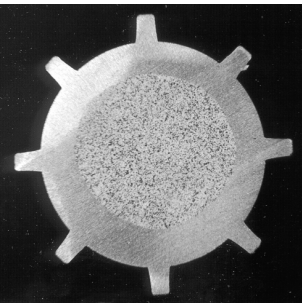
(d) 직접(400°C)-35cm



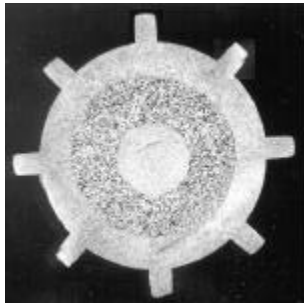
(e) 직접(370°C)-35cm



(f) 직접(340°C)-35cm



(g) 직접(400°C)-65cm



(h) 직접(370°C)-65cm

그림 8. 직접압출법으로 압출된 모의 핵연료의 압출온도 및 심재 길이에 따른 단면.