

◆ 특집 ◆ 양동열 교수님 헌정세션 특집

### 3 차원 프린팅 기술을 이용한 신개념 경수로 핵연료 기술 개발에 관한 연구

## Development of Innovative Light Water Reactor Nuclear Fuel Using 3D Printing Technology

김효찬<sup>1,✉</sup>, 김현길<sup>1</sup>, 양용식<sup>1</sup>  
Hyo Chan Kim<sup>1,✉</sup>, Hyun Gil Kim<sup>1</sup>, and Yong Sik Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부 (Division of Light Water Reactor Fuel Technology, Korea Atomic Energy Research Institute)  
✉ Corresponding author: [hyochankim@kaeri.re.kr](mailto:hyochankim@kaeri.re.kr), Tel: +82-42-868-2438

Manuscript received: 2016.2.25. / Revised: 2016.3.21. / Accepted: 2016.3.21.

*To enhance the safety of nuclear reactors after the Fukushima accident, researchers are developing various types of accident tolerant fuel (ATF) to increase the coping time and reduce the generation of hydrogen by oxidation. Coated cladding, an ATF concept, can be a promising technology in view of its commercialization. We applied 3D printing technology to the fabrication of coated cladding as well as of coated pellets. Direct metal tooling (DMT) in 3D printing technologies can create a coated layer on the tubular cladding surface, which maintains stability during corrosion, creep, and wear in the reactor. A 3D laser coating apparatus was built, and parameter studies were carried out. To coat pellets with erbium using this apparatus, we undertook preliminary experiments involving metal pellets. The adhesion test showed that the coated layer can be maintained at near fracture strength.*

KEYWORDS: Nuclear fuel rod (핵연료봉), 3D printing technology (3 차원 프린팅 기술), Direct metal tooling (직접 금속프린팅 기술), Accident tolerant fuel (사고저항성핵연료)

#### 1. 서론

온실가스를 거의 방출하지 않으며, 단위 부피당 생산하는 에너지 밀도가 매우 높아 차세대 에너지원으로 각광을 받고 있는 원자력 에너지는 핵분열성 물질이 가벼운 2개의 핵종으로 분열되면서 발생하는 질량 결손만큼 에너지로 변환되는 원리로 에너지를 발생한다. 하지만, 최근 후쿠시마 원

전 사고 이후 원자력 발전소에 대한 안전에 대한 재검토가 필요하다는 의견이 계속적으로 제시되고 있어, 규제 및 연구계에서는 기존의 원자력 발전소의 안전성을 향상시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.<sup>1</sup>

국내 전력 생산의 30% 이상을 담당하는 국내 원자력 발전소는 80% 이상이 경수로 원자로 (Light Water Reactor) 형태로 건설되었다. 경수로 원자로

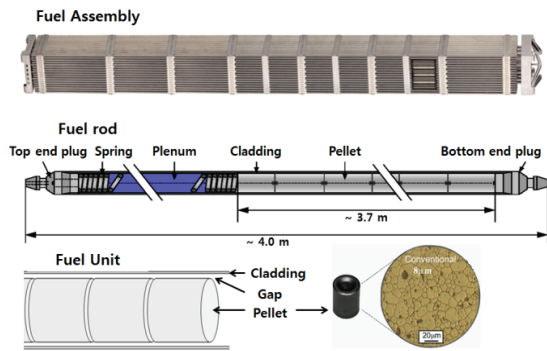


Fig. 1 Light water reactor fuel assembly and components

는 내부에 핵분열이 발생하여 열에너지를 생산하는 핵연료 (Fuel)가 장착되어 있으며, 여러 개의 핵연료 봉을 구조적으로 구속하여 취급 기본 단위가 되는 핵연료 집합체 (Fuel Assembly)로 구성되며, 그 구조는 Fig. 1에서 보는 것과 구성되어 있다. 봉 형태의 지르칼로이 합금 피복관 (Cladding) 내부에 산화 우라늄 형태의 핵연료 (Pellet)가 장전되어 있으며 내부는 불활성 물질이며 열전도도가 우수한 헬륨으로 22.5 bar로 가압하게 된다.<sup>2</sup>

핵연료봉은 핵분열을 수행하는 핵연료에서 방출되는 고방사성 물질을 외부와 차단시켜주어야 하며 핵분열에서 생산되는 열을 효율적으로 제거해줘야 하는 기능을 수행해야 한다. 특히, 안전성 측면에서 원자력 발전의 다단계 방호체계중 1차 방호벽인 소결체의 핵분열 물질의 포집 능력과 2차 방호벽인 피복관은 산화 저항성 및 기계적 건전성은 매우 중요한 역할을 수행하게 된다.

기존에는 원자력 발전소의 핵연료 집합체를 구성하는 피복관, 지지격자 및 안내관등은 내산화성, 기계적 강도 및 중성자 경제성이 우수한 지르코늄 합금 소재가 사용되고 있었다. 그러나, 지르코늄 합금은 정상적인 발전소 운전환경에서는 우수한 성능을 가지고 있으나, 일본 후쿠시마 사고와 같은 사고 환경에서는 고온 산화저항성이 크게 감소된다. 고온에서 피복재의 활발한 산화로 부식 반응 후 생성물인 수소가 다량 발생되며, 이는 원자로 수소폭발과 같은 중대 사고로 이어지게 된다. 따라서, 피복재가 고온상태에서도 산화저항성을 유지하거나 향상시킴으로써 원자력발전소의 사고시 안전성을 향상시키는 방안으로 제시되고 있다.

이러한 사고시 안전성을 향상시킬 수 있는 핵연료를 사고저항성핵연료 (Accident Tolerant Fuel:

ATF)로 정의하며, 전세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 이러한 신개념 사고저항성 피복관 개발은 다양한 형태로 개발이 이루어지고 있다. 특히, 기존 지르칼로이 소재가 아닌 SiC와 같은 세라믹 소재<sup>3</sup>를 활용하거나, 산화저항성 자체가 높은 Fe-Cr-Al 소재<sup>4</sup>를 이용하여 사고저항성 피복관을 개발하고자 하는 노력도 있다. 그러나, 이러한 지르칼로이를 이용하지 않는 피복재의 경우는 산화저항성을 높이는 장점이 있으나, 지르칼로이의 고유 특징이었던 삼중수소 높은 포집율이나, 높은 용융점등의 보완이 필요하여 보다 장기적인 측면에서 연구가 진행되고 있다. 반면에, 기존 지르칼로이 피복재 표면에 산화 저항성 물질을 코팅하여 지르칼로이 피복재의 기존 장점을 살리면서 고온에서의 산화 저항성을 극대화하려는 노력들이 계속되고 있다. 이러한 연구는 새로운 소재인 SiC나 Fe-Cr-Al 에 비해 실현 가능성이 매우 높아 실용화 가능성이 높다.

이러한 새로운 기능성 물질을 코팅하는 연구에서 중요한 요소는 코팅 물질과 코팅 공정이다. 원자로 내에서 출력이나 주기에 영향을 최소화하면서도 내산화성이 큰 코팅 물질과 이를 핵연료 장전 주기 길이 동안 견고하게 코팅되어야 하는 코팅 공정의 개발이 필요하다. 프랑스 CEA 에서는 1000℃에서 지르칼로이 표면에서 PVD (Physical Vapor Deposition) 공정으로 산화 저항성이 큰 크롬 물질을 코팅하였다.<sup>5</sup> 또한, Nieuwenhove 는 CrN와 TiAlN, AlCrN 을 지르칼로이 표면에 PVD 공정으로 코팅하여 산화 저항성을 높이고자 하였다.<sup>6</sup> 또한, Nelson 등은 Mo 을 고온에서 산화 저항성을 높이기 위해 코팅하였는데, 이러한 이유 때문에 EPRI 에서는 Mo 층을 다층 구조 형태로 구성하는 방법을 제안하였다.<sup>7</sup> CVD 방법을 이용하여 SiC 를 피복관 표면에 코팅하는 방법을 제안하기도 하였다.<sup>8</sup> 이러한 다양한 방법으로 전세계적으로 사고저항성 핵연료를 제작하기 위한 코팅 재료와 코팅 공정을 개발하고 있다.

또한, 차세대 경수로 노형 개발을 하기 위해 노심에서의 잉여 출력을 제어하기 위한 붕산의 농도를 낮추기 위한 무붕산 또는 저붕산 운전을 위한 핵연료 개발의 진행이 이루어지고 있다. 일반적으로 원자로에서는 초기 핵연료가 장전되는 경우 잉여 출력이 발생하고 이를 제어하기 위해 냉각수에 일정양의 중성자 흡수 물질 (독물질)인 붕산을 함유시켜 출력을 제어한다. 그러나, 이러한

봉산을 이용하여 원자로의 출력을 제어하는 방식은 안전성 측면에서 불리하며, 냉각수의 수화학측면에서도 좋지 않은 영향을 미친다. 따라서, 차세대 경수로에는 핵연료 자체에서 이러한 잉여 반응도를 조절하기 위한 혁신 핵연료 개발을 수행하고 있으며, 앞서 설명된 사고저항성 핵연료와 유사한 코팅 기술을 접목하여 혁신 핵연료를 개발하고 있다. 관련 연구로는 프랑스 CEA 에서는 이러한 초기 잉여 반응도를 제어하는 가연성 독물질을 피복재 내면에 인발 공정을 이용하여 제조하였다.<sup>9</sup>

앞서 설명된 것과 같이 신개념 경수로 핵연료 개발에 있어서 안전성 향상과 효율 향상을 위해 다기능 소재의 코팅 공정 개발이 중요한 요소 기술로 대두 되고 있다. 특히, 원자로 노내 조건은 고온 고압 조건에 고속 중성자에 의한 재료의 에너지 준위가 높아 매우 안정적인 코팅 기술이 필요하다.

최근 한국원자력연구원에서는 이러한 사고 저항성 피복관과 무봉산 운전을 위한 핵연료 개발을 위해 레이저 3D 프린팅 기술을 이용하여 다기능 소재를 코팅하는 기술을 개발하고 있다. 기존 3D 프린팅 기술은 다양한 형상 제작과 공정 효율성 향상에 측면에서 일반 생산 기술로 개발되었으나, 최근에는 3D 프린팅 기술이 다양한 기능성 소재 개발을 통해 의료 및 고기능성 부품 개발로 그 활용성이 넓혀져 가고 있다. 특히, 레이저를 이용한 금속 3D 프린팅 공정 기술은 다양한 소재에 대한 공정 적용이 가능하며, 고온에서의 용착등이 가능한 공정이다. 뿐만 아니라, 공정 변수를 최적화 하여 높은 강도의 코팅 접착력을 가지는 코팅면 제작이 가능하다.

본 논문에서는 신개념 경수로 핵연료 개발을 위해 레이저를 이용한 3차원 프린팅 기술을 적용하였다. 사고저항성 피복관 개발을 위해 기존 지르칼로이 계열 합금 피복관 표면에 내산화성이 큰 크롬 계열의 합금을 레이저 3차원 공정을 이용하여 코팅하였다. 코팅된 피복관 소재는 다양한 기계적 강도와 산화 성능 테스트를 통해 그 성능을 입증하였다.

그리고 무봉산 운전을 위한 핵연료 개발을 위해 핵연료 펠릿 표면에 중성자 가연성 독물질을 코팅하는 기술을 적용하여 무봉산 핵연료 제조의 타당성을 볼 수 있었다. 예비 성능 테스트를 통해 금속 3차원 프린팅 기술의 적용성을 확인할 수 있었다.

최종적으로 안전성이 향상된 차세대 원자력 발전소의 기본이 되는 사고저항성 핵연료 개발을 위해 최신 제조 기술 기법은 금속 3차원 프린팅 기술을 접목하여 랩규모의 성공적인 핵연료 개발이 가능해졌으며, 현재 타당성 평가 단계에 있다.

## 2. 3D 프린팅 기술

### 2.1 3D 프린팅 기술 개요

1987년 미국의 3D Systems사에서 처음으로 개발된 3D 프린팅 기술은 제품의 CAD 데이터로부터 플라스틱, 종이, 광경화성 수지 및 금속 등의 재료를 이용하여 제품을 직접 만들 수 있는 새로운 개념의 공정이다. 기술 초기에는 쾌속조형기술이라는 새로운 기술로 명명되었으며, 3차원의 형상을 2차원의 얇은 판의 집합으로 변환하여 순차적으로 한 층씩 적층해 나감으로써 복잡한 3차원 형상을 빠른 시간에 조형 가능한 기술이다.<sup>10</sup>

미국 오바마 대통령은 2013년 연두교서에서 3D프린팅 기술의 혁명적 잠재력과 함께 미국을 구심점으로 한 3차 산업혁명에 대해 언급하였다. 이후 3D프린팅 기반 첨단제조업 육성을 위해 산학연관 공동의 대규모 국가적 노력을 기울이고 있으며, 이러한 현상은 유럽, 일본, 중국 등 제조선진국에 공통적으로 일어나고 있다.

또한 FDM 방식의 3D 프린팅 기술이 오픈소스 기반으로 개발되어 범용화됨에 따라 전문제조현장이 아닌 대중적인 관심도도 크게 높아지고 있다. 3D프린팅 기술은 1980년 대에 광경화수지 기반의 입체리소그래피 (SLA, Stereolithography), 열가소성수지 기반의 용융용착모델링 (FDM, Fused Deposition Modeling) 방식으로 고안되어 현재까지 다양한 파생기술이 개발되어 활용되고 있다.

“ASTM international 2012”에 의하면 적층방식에 따라 크게 일곱가지로 나누어 정의하고 있다. 소재 압출 (Material Extrusion), 소재분사 (Material Jetting), 결합제분사 (Binder Jetting), 판재적층 (Sheet Lamination), 광중합 (Photopolymerization), 분말소결 (Powder Bed Fusion), 직접용착 (Direct Energy Deposition)이 그것이다. 이러한 기술들은 소재의 활용도가 금속, 플라스틱, 세라믹 전반에 걸쳐 넓어지고 공정 자체의 정밀도 및 가공속도의 향상에 힘입어 시작품 제작 수준을 벗어나 실제 제조산업에 직접적으로 적용되는 부품 및 제품의 제작사례가 늘고 있다.

**2.2 금속 3D 프린팅 기술**

3D 프린팅 기술은 공정에 따라 소재의 확장성이 매우 뛰어나다. 개발 초기에는 앞서 언급한 SLA나 FDM 공정등을 이용하는 폴리머 기반의 소재들로 제품을 제작하였으나, 기술이 발전함에 따라 SLS (Selective Laser Sintering) 나 DMT (Direct Melting Technology) 기술과 같이 직접 금속 분말을 이용하여 3차원 금속 제품을 금형 없이 제작할 수 있는 기술이 개발되었다.

Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 SLS 공정은 두 개의 Powder Bed가 존재하며, 한쪽은 분말 공급 시스템이고 한쪽은 3차원 형상이 제작되는 시스템이다. 3차원 형상이 제작되는 Bed 에서 CAD 데이터에 따라 스캐닝 되는 Laser 를 이용하여 선택적으로 Powder 를 소결하면서 3차원 형상을 적층해 나가는 방법이다.<sup>11</sup>

이러한 방식은 순수 금속 3D 프린팅 제품을 제작하기에 적합한 방식이나, 3차원 금속 제품을 제작하는 기존의 절삭가공이나 금형 가공에 비해 제품의 양산성 및 질이 떨어지는 특징이 있다.

반면에, Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 Powder Bed를 사용하지 않고 소재를 직접 분사하며 3차원 형상을 제작하는 DMT 기술은 순수 금속 3차원 형상 제작뿐만 아니라, 기존 금속 가공 제품과의 연계를 통해 하이브리드 형태의 제작 공정 기술이 가능하다. 뿐만 아니라, 고가의 금형의 보수나, 기존 재료에 새로운 소재를 코팅할 수 있는 기술로 각광받고 있다.

이러한 DMT 기술의 특징은 DMT 기술은 일반 산업분야에서 3차원 냉각수로 금형 또는 이종합금 금형이나, 의료기기 제작, 항공기 엔진 주요 부품의 재생들에 널리 활용되고 있다.

신개념 경수로 핵연료 개발을 위하여 본 연구에서는 금속 3D 프린팅 기술에서 널리 활용되고 있는 DMT (Direct Metal Tooling)을 적용하였다. DMT 기술은 일반 3D 프린팅 기술에서 널리 사용하는 Powder Bed 를 사용하지 않고, 직접 금속 분말을 분사하고 레이저빔으로 조사하여 형상을 제작한다. 따라서, 기존 금속 3D 프린팅 기술 대비 재료의 소모량이 적으며, 완전 용융으로 치밀하고 미세한 조직을 가지는 제품의 제작이 가능하다.

뿐만 아니라, 소재를 직접 공급하는 형태이기 때문에, 다양한 소재를 이용하여 제품을 제작할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 이러한 DMT 공정의 특징은 신개념 경수로 핵연료 제작에 적합하다고 볼 수 있다.

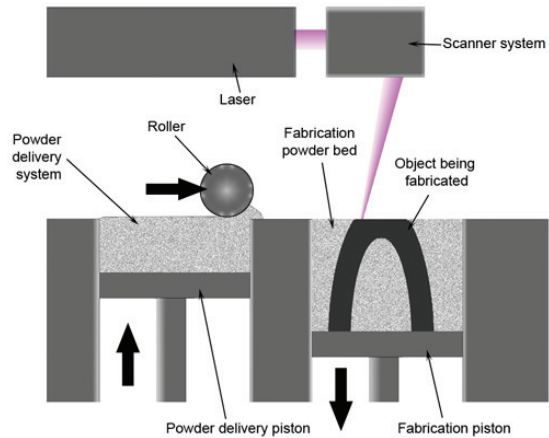


Fig. 2 Schematic diagram of SLS system

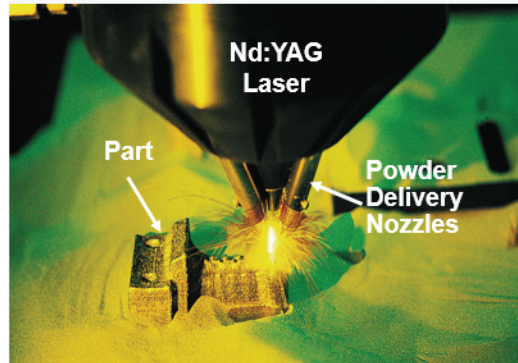
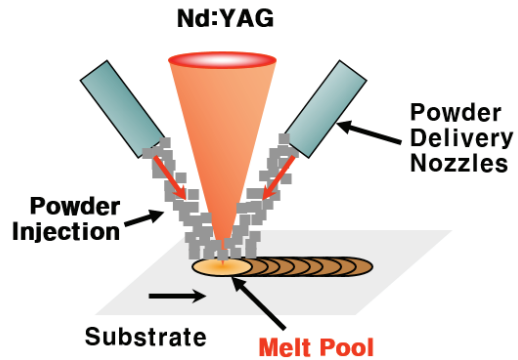


Fig. 3 (a) Principle of DMT process, (b) Image of DMT processing

**3. 신개념 경수로 핵연료 제작 기술 개발**

**3.1 사고저항성 피복관 제작 공정 개발**

사고저항성 핵연료 피복관은 원자로의 안전성을 향상시키기 위해 표면에 내산화성 소재를 코팅하는 기술을 개발하였다. 전세계적으로 핵연료 피



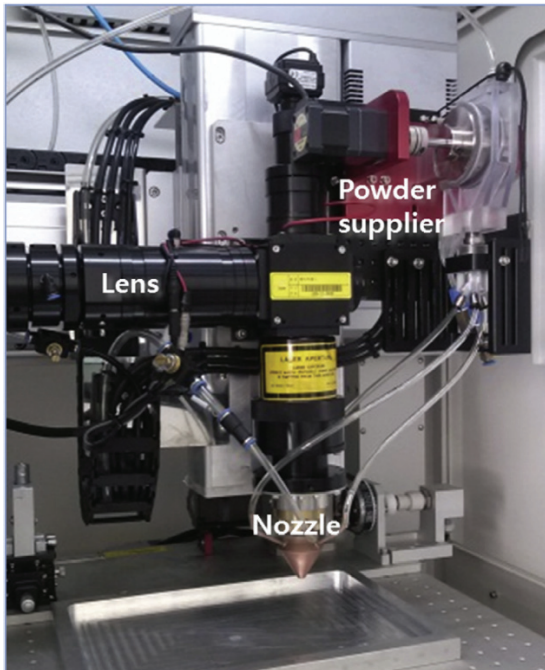


Fig. 4 Apparatus of the 3D laser coating equipment for cladding coating

복관을 코팅하는 공정은 ARC Ion Plating 공정, Cold Spray 공정등 다양한 기술이 적용되고 있다. 이러한 기술은 박막 형태의 코팅이 가능한 기술이나, DMT 공정과 같이 높은 접합력 형성이 난해한 기술이다.

핵연료 피복관은 대략 4 m 길이의 9.5 mm 외경을 가지는 튜브 형태로 지르칼로이 합금으로 구성되어 있다. 랩규모에서 타당성 시험을 하기 위해서 본 연구에서는 50 cm이하의 길이에 코팅을 수행하고자 공정을 개발하였다. 공정 개발에 앞서, 코팅 재료의 선택을 위한 재료 개발이 이루어졌다. 코팅 되는 소재의 특징은 낮은 중성자 흡수율, 좋은 열전도도, 모재와 유사한 열팽창율, 높은 녹은 온도, 고온 산화 저항성등이 고려되었다. 이러한 특징을 고려되어 코팅되는 소재는 크롬계열 합금으로 결정되었으며, 이를 이용하는 DMT 장치 개발 및 공정 변수 최적화 연구를 수행하였다.

### 3.1.1 장치 개발

DMT 공정을 튜브재에 적용하기 위해서는 적합한 지그 개발, 크롬계열 합금 분말을 코팅하기 위해 적합한 레이저 출력 및 노즐 설계, 분말의

산화를 막기 위한 불활성 가스 투입 기술 등을 개발하였다.

Fig. 4에서 보여지고 있듯이 개발 장치는 크게 파우더 공급장치 (Powder Supplier), 레이저렌즈 (Lens), 노즐 (Nozzle)로 구분되고, 튜브재 시편을 고정시켜주는 지그로 구성된다. DMT 공정의 열원이 되는 레이저 소스 및 렌즈 시스템은 HBL Co.사를 통해 구매하였으며, 노즐과 파우더 공급장치는 ㈜에시스템을 통해 자체 제작하였다. 레이저 소스는 CW (Continuous Wave) 다이오드 레이저를 사용하였고, 최대 출력은 300 W 급이다. 렌즈 시스템에서는 레이저 스팟의 크기 및 모양등을 조절할 수 있다. 자체 제작된 노즐과 파우더 공급장치는 코팅 공정에서 코팅 두께의 균일성과 코팅 계면에서의 접착력을 결정하는 중요한 인자이며, 여러가지 설계를 통해 최적의 노즐 및 파우더 공급 장치를 제작할 수 있었다. DMT 공정에 수행동안 고온의 레이저에 의해 코팅재 및 모재의 고온 산화를 막기 위해 노즐에 불활성 가스인 아르곤 가스를 주입하였다.

### 3.1.2 공정 변수 연구

구성된 장치를 이용하여 최적의 코팅두께 및 코팅 접착력을 위해 다양한 공정 변수 시험을 수행하였다. 코팅을 위한 DMT 공정의 공정 변수로는 크게 레이저 출력, 코팅 속도, 이송 가스 속도, 파우더 투입 속도 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 공정변수 변화를 통해 코팅 두께, 밀도, 미세구조 및 조성에 대한 결과를 측정하여 최적 공정 변수 연구를 수행하였다. DMT 공정을 이용하여 코팅 공정을 수행하기 위해, 다음과 같이 공정 단계를 설정하였다.

- Step 1. 레이저로 모재 표면을 스캐닝 수행
- Step 2. 용융된 모재 스팟 크기 확인 및 불활성 가스 (아르곤) 투입
- Step 3. 레이저 스팟 중앙에 코팅 분말 분사
- Step 4. 시편 스테이지 이동

설정된 공정 변수 값은 Table 1에서 표현되고 있으며, 시편 제작 결과를 SEM 이미지로 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 판재와 튜브재에 대한 코팅 시험을 수행하였으며, 다양한 레이저 출력 및 재료 공급속도와 불활성 가스 공급 양으로 시험을 수행하였다. 시편 제작 결과 CASE4 판재 시편의

Table 1 Process parameter study for the coating process

Test No.	Shape	Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Powder supply (g/min)	Shield gas flow (l/min)
CASE1	Sheet	100	2.5	1.5	2.5
CASE2	Sheet	100	2.5	2.0	2.8
CASE3	Sheet	100	5.0	2.0	3.0
CASE4	Sheet	110	5.0	2.5	3.5
CASE5	Tube	100	5.0	2.0	3.0
CASE6	Tube	110	3.0	2.0	2.5

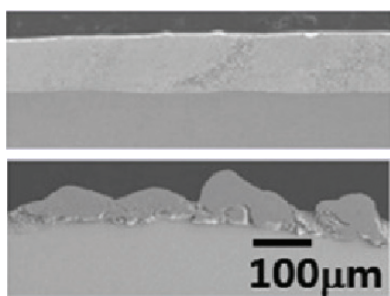


Fig. 5 (a) SEM image of CASE4, (b) SEM image of CASE6

경우 비교적 낮은 출력 100 W 에서 균일한 코팅 특성을 나타내었다. 그리고, 불활성 가스의 양은 3.5 l/min 이상으로 수행해야 함을 확인하였다. 반면에, CASE6 SEM 이미지를 통해 확인할 수 있듯이 튜브재의 경우는 100 W 출력과 2.0 g/min 파우더 공급속도에서 코팅재가 모두 용융되지 않고 남아있었다. 이러한 이유는 튜브재의 경우는 제조된 피복관의 미세조직의 변화를 최소화하기 위해 내부에 냉각수를 흘려주는데, 냉각수에 의해 빠르게 열이 제거되기 때문으로 확인되었으며, 레이저 출력을 120 W 이상으로 높여 코팅을 수행할 경우 양질의 코팅을 얻을 수 있었다.<sup>12,13</sup>

### 3.1.3 제작 시편 성능 평가

DMT 공정을 통해 제작된 코팅 시편의 코팅 접합력 성능 평가를 수행하기 위해 코팅된 시편에 대한 인장 시험을 수행하였다.

튜브재에 대한 코팅이 반경 방향으로 되어 있기 때문에 인장 시험 방향은 링 형태로 절편하여 인장 시험을 수행하여 파단시까지 코팅면의 박리 등의 현상에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 6에 표현되어 있는 링 인장 시험 결과 코팅된 시편이 모재보다 높은 응력에서 파단이 발생

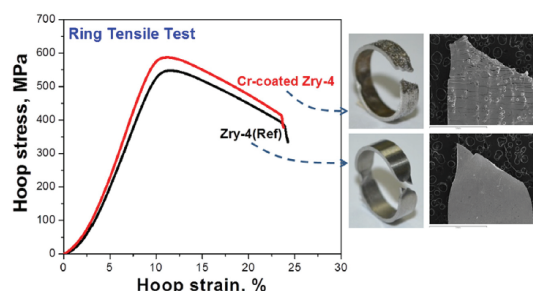


Fig. 6 Ring tensile test results of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube

하는데, 이는 코팅재가 모재보다 파단 응력이 높기 때문이다. 특히, 파단면에 대한 SEM 이미지 분석 결과 파단시 코팅면의 박리와 같은 계면의 분리가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 그 외에도 코팅 면에서 깊이 방향으로 재료 성분 조사를 수행결과를 통해 분석하였을 때, 깊이 방향으로 코팅재와 모재가 점차적으로 섞여 뚜렷한 계면이 형성되지 않음을 확인하였다. 이는 DMT 공정 수행시 모재가 일부 용융되고 코팅재와 용융된 모재와 혼합되는 특성에 의해 계면이 형성되지 않아 발생하는 현상이라 볼 수 있다.

현재, 제작된 사고저항성 핵연료는 연구용 원자로에 장착되어 실증시험을 2015년 12월에 착수하였다.

## 3.2 무봉산 운전을 위한 혁신 소결체 제작 예비 기술 개발

### 3.2.1 혁신 소결체 제작 방법

무봉산 운전용 가연성 독물질이 포함된 핵연료 제작을 하기 위해 이산화우라늄 표면에 가연성 독물질인 어비늄-167 (Er-167)을 Fig. 7과 같이 코팅하고자 한다. 즉, 소결체 표면에 어비늄과 지르칼로이를 다층으로 코팅하는 개념이다.

코팅 소재인 어비늄은 크롬 합금과 달리 희토류 광물로 산화성이 매우 높은 금속으로 알려져 있으며, 피복재 대비 물성값은 Table 2와 같다. 이러한 높은 산화성으로 인하여 DMT 공정을 적용하기 위해서는 앞서 개발된 사고저항성 피복관 코팅 공정보다 엄격한 불활성 환경을 구현해야 한다. 따라서, 사전에 코팅재가 고산화성 어비늄 소재에 대한 코팅 공정을 개발에 앞서 이에 대한 예비 타당성을 본 연구에서는 사고저항성 피복재 개발 장비를 통해 평가하였다.

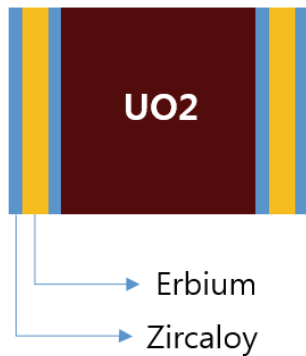


Fig. 7 Concept of burnable poison pellet

Table 2 Material properties of erbium and zirconium

Material properties	Erbium	Zirconium
Atomic weight	167.26	91.22
Density (g/cm <sup>3</sup> )	9.16	6.5
Crystal structure	HCP	HCP
Melting temperature (K)	1802	2128
Thermal conductivity (W/mK)	14.5	22.6
Thermal expansion coefficient (um/mK)	12.2	5.7

### 3.2.2 혁신 소결체 제작 예비 평가

예비 제작 평가를 위해 산화성을 제외한 유사한 특성을 가지는 구리 합금 분말과 SUS 계열 분말을 활용하여 소결체 표면에 코팅 시험을 수행하였다.

소결체 코팅 타당성 시험을 위해 금속 소결체 형태인 SUS 재질, 그라파이트 재질과 실제 소결체와 유사한 물성을 가지는 알루미늄 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)에 DMT 공정을 수행하여 타당성을 평가하였다.

공정변수는 레이저 파워 300 W, 스캐닝 속도는 1 m/min, 분말공급량은 3 g/min, 가스 공급속도는 8 l/min으로 하여 코팅 타당성 평가를 수행하였다. 예비 평가수행 결과 그라파이트와 알루미늄 소재의 경우는 세라믹 재질의 특성인 높은 열팽창률과 낮은 열전도도 및 취성 특성에 의해 DMT 공정 도중 열과단으로 코팅 공정 수행이 불가하였다. 반면에, SUS 재질의 소결체 표면에는 설계한 대로 구리 합금 파우더를 내부에 가지는 혁신 핵연료 유사 시편을 제작할 수 있었다.

Fig. 8은 SUS 재질을 이용하여 DMT 공정을 수행한 결과이며, 상단에는 코팅 단면에 대한 SEM 이미지이다. 분석결과 코팅이 이루어진 것을 확인할 수 있으며, 두께는 15 um 이내로 구성된 것을 확인할 수 있었다. 다만, 공정 최적화 연구가 진행되

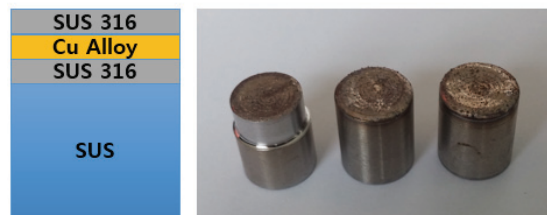
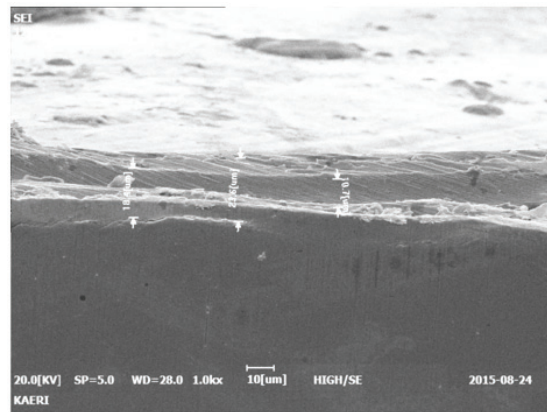


Fig. 8 Results of coated pellet and SEM image

지 않아 코팅 면의 균일하지 못한 특성이 있다.

이러한 결과를 바탕으로 혁신 핵연료 펠릿 제작을 위해서 세라믹 재질에 직접 DMT 공정 적용 시 효과적인 열처리 기술 개발이 필요하며, 어비늄 파우더의 완전 용융을 위해 공정변수 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

경수로 핵연료 개발 연구에서는 최근 후쿠시마 원자로 사고 이후에 안전성을 향상시키고자 하는 연구가 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 그러한 연구의 일환으로 기존 피복관 표면에 고온 산화 저항성이 높은 소재를 코팅하는 사고저항성 핵연료 개발이 활발하게 진행되고 있다. 실용화 가능성이 높은 사고저항성 핵연료 개발 개념인 코팅 피복관 개발은 안정적인 코팅 기술 개발이 중요 인자이다. 뿐만 아니라, 안전성이 우수한 혁신 핵연료 개발에도 우수한 코팅 기술이 필요로 되고 있다. 본 연구에서는 금속 3D 프린팅 기술에서 널리 활용되고 있는 DMT 기술을 핵연료 제조 기술에 접목하여 사고저항성 핵연료 및 혁신 핵연료를 제조하고자 하였다. DMT 금속 3D 프린팅 기술은 일반 적층 조형 공정과 달리 파우더 베드를 사용하지 않

아 코팅 공정이나 추가적인 활용성이 매우 높다.

튜브 형태 소재에 코팅 공정을 적용하기 위해 적합한 레이저 소스, 노즐, 파우더 공급장치를 설계하고 제작한 후 공정 변수 연구를 통해 최적 공정 변수 연구를 수행하였다. 추가적으로, 타 소재에 대한 코팅 예비 타당성을 평가하여 혁신 핵연료 제조에 대한 적용성을 확인하였다.

향후에는 코팅된 부품에 대한 원자로 내에서의 실증 평가 결과를 바탕으로 원자력 부품을 DMT 공정을 이용한 연구 개발에 활용될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2014171020166A)

## REFERENCES

- Lamarsh, J. R. and Baratta, A. J., "Introduction to Nuclear Engineering," Prentice-Hall, 3<sup>rd</sup> Ed., 2012.
- Kim, S. W., "Incore Fuel Management," Hyungseul, Vol. 44, No. 22, 2010.
- Stempien, J. D., Carpenter, D. M., Kohse, G., and Kazimi, M. S., "Characteristics of Composite Silicon Carbide Fuel Cladding after Irradiation under Simulated PWR Conditions," Nuclear Technology, Vol. 183, No. 1, pp. 13-29, 2013.
- Hu, X., Terrani, K. A., Wirth, B. D., and Snead, L. L., "Hydrogen Permeation in FeCrAl Alloys for LWR Cladding Application," Journal of Nuclear Materials, Vol. 461, pp. 282-291, 2015.
- Idarraga-Trujillo, I., Le Flem, M., Brachet, J.-C., Lesaux, M., Hamon, D., et al., "Assessment at CEA of Coated Nuclear Fuel Cladding for LWRs with Increased Margins in LOCA and Beyond LOCA Conditions," Proc. of LWR Fuel Performance Meeting/TopFuel, pp. 860-867, 2013.
- Nieuwenhove, R. V., Daub, K., and Nordin, H., "Investigation of the Impact of Coatings on Corrosion and Hydrogen Uptake of Nuclear Components," Proc. of NUMAT, DOI No. 10.1016/j.jnucmat.2015.09.041, 2014.
- Bragg-Sitton, S., "Development of Advanced Accident-Tolerant Fuels for Commercial LWRs," Nuclear News, pp. 83-91, 2014.
- Al-Olayan, Y., Fuchs, G. E., Baney, R., and Tulenko, J., "The Effect of Zircaloy-4 Substrate Surface Condition on the Adhesion Strength and Corrosion of SiC Coatings," Journal of Nuclear Materials, Vol. 346, No. 2-3, pp. 109-119, 2005.
- Brachet, J. C., Olier, P., Vandenberghe, V., Urvoy, S., Hamon, D., et al., "Microstructure and Properties of a 3-Layers Nuclear Fuel Cladding Prototype Containing Erbium as a Neutronic Burnable Poison," Proc. of 17<sup>th</sup> International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, 2013.
- Kim, H. C., Park, S. H., and Yang, D. Y., "Principle and Recent Trend of Rapid Prototyping Technology," Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No. 3, pp. 187-199, 2005.
- Wikipedia, "Selective Laser Sintering," [https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_sintering](https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering) (Accessed 25 March 2016)
- Kim, H. G., Kim, I. H., Jung, Y. I., Park, D. J., Park, J. Y., et al., "High-Temperature Oxidation Behavior of Cr-Coated Zirconium Alloy," Proc. of LWR Fuel Performance Meeting/TopFuel, pp. 842-846, 2013.
- Kim, H. G., Kim, I. H., Jung, Y. I., Park, D. J., Park, J. Y., et al., "Adhesion Property and High-Temperature Oxidation Behavior of Cr-Coated Zircaloy-4 Cladding Tube Prepared by 3D Laser Coating," Journal of Nuclear Materials, Vol. 465, pp. 531-539, 2015.