

3D 프린팅을 이용한 핵연료부품 개발 현황

2021.10.20

핵연료연구실

목차

- I. 배경
- II. 국내외 현황
- III. 3DP 지지격자 개발
- IV. 3DP 하단고정체 개발
- V. 향후계획

I. 배경

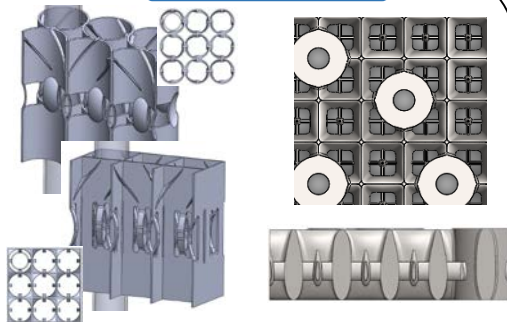
○ '16.10 금속 3D 프린팅 적용 가능성 선행연구

- 3D 프린팅에 대한 이해 및 핵연료 부품 설계 적용 가능성 분석

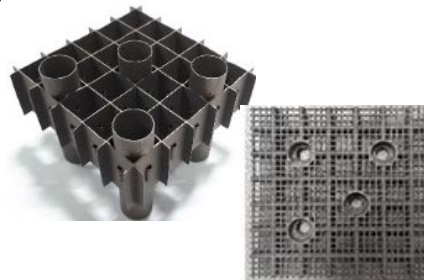
○ '17.12 3D 프린팅 기반 원전부품 제작기술 개발 정부과제(7개기관*) 핵연료분야 참여

- 과제목표: 3D프린팅 기반 핵연료부품(중간* 및 하부 지지격자, 하단고정체) 개발
- 과제기간: '17.12~'22.11(5년) 1단계- '17.12~'20.02(27개월), 2단계- '20.03~'22.11(33개월)

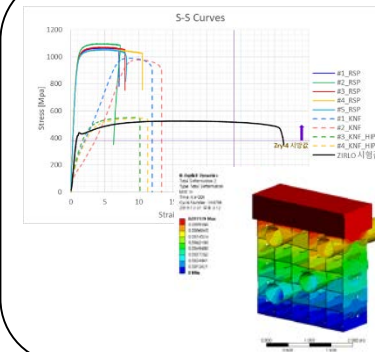
후보모형



3DP 시제품



성능시험



II. 국내외 현황

원자력 산업 3D 프린팅 적용 현황



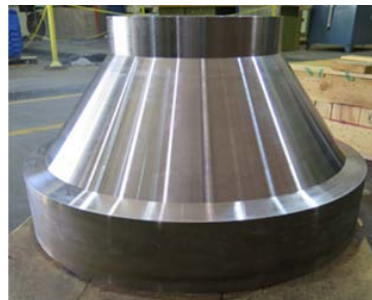
(a) (b) (c)

pump impeller [Slovenia, Siemens]

- (a) : Original impeller
- (b) : 3D Printed Prototype
- (c) : 3D Printed replacement part



waste transfer container **Heat transmitter**
[England, Sellafield]



Feedwater Nozzle[USA]

ASME Code Case 승인(소재 316)

- PM (Powder Metallurgy, 분말야금)
- HIP (Hot Iso-static Pressing, 고온 등압축)

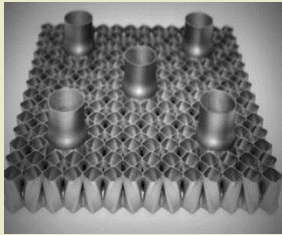
II. 국내외 현황

경쟁사 핵연료 부품 3D 프린팅 기술 개발 현황

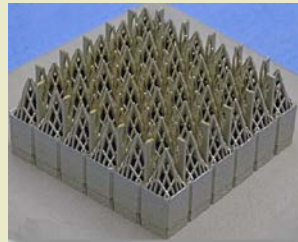
다수의 해외 경쟁사 핵연료 부품 3D 프린팅 개발 추진 중

- WEC, Framatome (AREVA)등에서 하단고정체와 지지격자 개발 진행 중
- 중국은 적극적으로 3D 프린팅 기술을 원자력 분야에 적용하기 위한 연구를 수행 중
- 선진사 대비 KNF는 2~3 년 정도의 기술 격차가 있는 것으로 파악됨

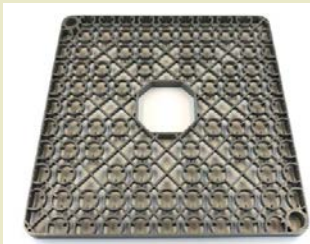
spacer grid



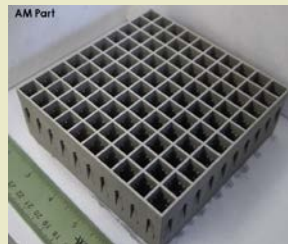
[WEC] PWR spacer grid



[WEC] PWR debris filter grid

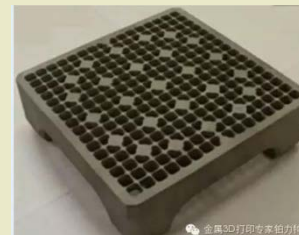


[Framatome]
BWR upper tie plate



[AREVA & Lockheed martin]
PWR spacer grid

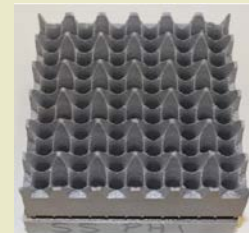
bottom nozzle



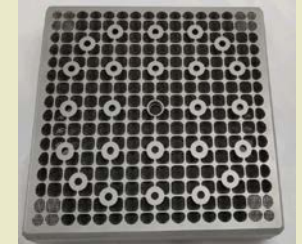
[China] PWR bottom nozzle



[Framatome] BWR bottom nozzle



[WEC] PWR bottom nozzle



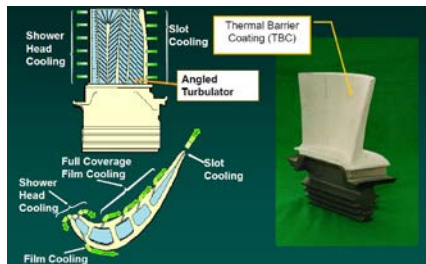
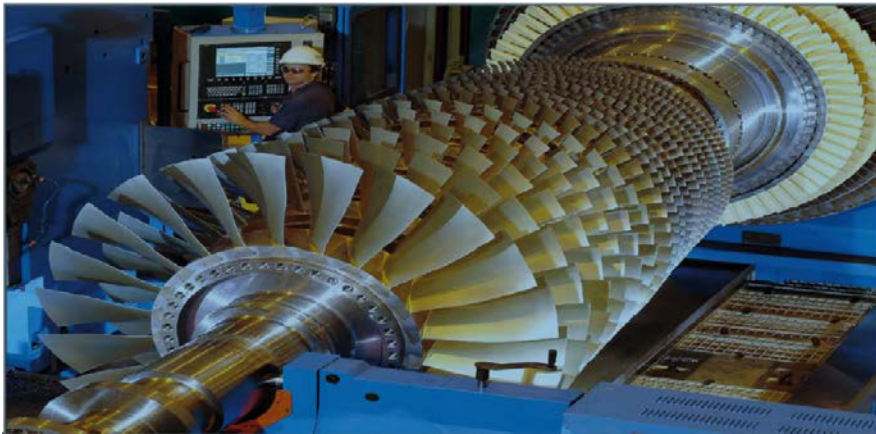
[WEC] PWR debris filter
bottom nozzle

II. 국내외 현황

국내 발전 산업 3D 프린팅 적용 현황

국내 발전산업 관련 업체 발전용 부품 개발 수행

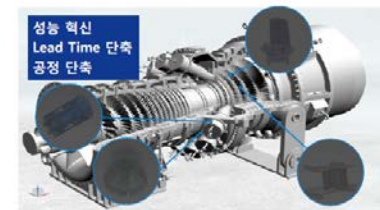
- 두산중공업, 발전 5사, 한수원, 한전 KPS 등 컨소시엄을 구성하여 정부 과제 수행 ('18.07~'20.12)



터빈 Blade



터빈 Vane



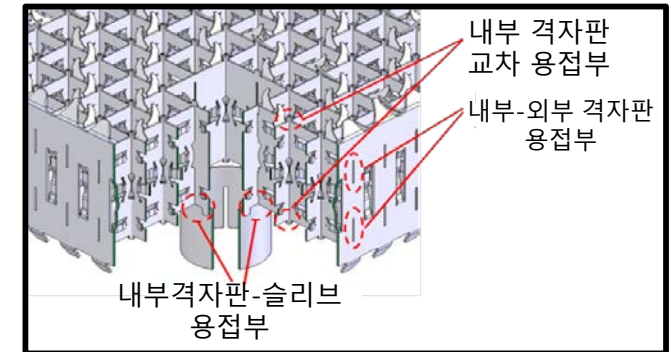
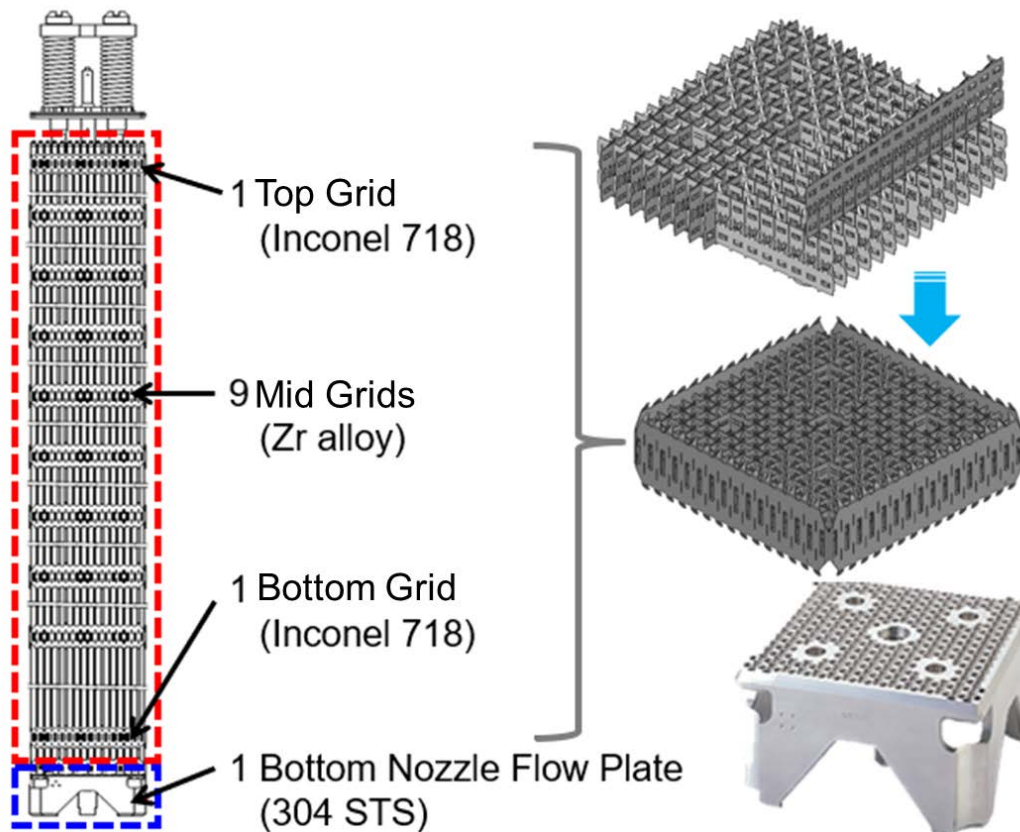
두산중공업 AM 기술개발 현황

3D 프린팅 기술 현황

방식	기본원리	제품	기술개요
PBF (Power Bed Fusion)			<p>금속분말을 편평하게 깔고 레이저를 선택적으로 조사하여 금속분말을 국부적으로 용융 또는 소결</p>
DED (Directed Energy Deposition)			<p>고출력 레이저 빔을 금속 표면에 조사하면 순간적으로 melt pool의 생성과 동시에 공급되는 금속분말을 실시간으로 공급하여 적층</p>
ME (Material Extrusion)			<p>필라멘트 형태의 소재를 열에 녹여 노즐을 통해 압출 및 적층하는 기법</p>

Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

핵연료 지지격자체 및 하단고정체 3DP 제조



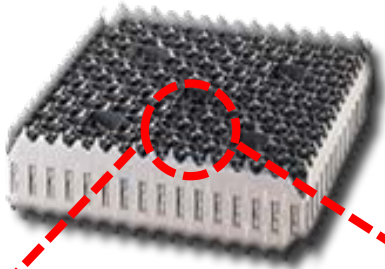
- 지지격자(Mid, Top/Bottom Grid) 주요기능
 - 연료봉의 간격유지 및 지지
 - 외부하중(지진 등) 흡수
 - 핵연료집합체의 골격을 유지
- 하단고정체
 - 냉각수의 핵연료 유입 채널
 - 이물질 여과(옵션)
 - 핵연료집합체의 골격을 유지

Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

개발 목표

정량적 목표

- 허용 공차 상용 대비 동등 수준 유지 : 지지격자 폭 ± 0.20 mm
- 좌굴강도 : 상용 부품 대비 충격강도 20% 향상



지지격자 부품의 현행 제조 방법

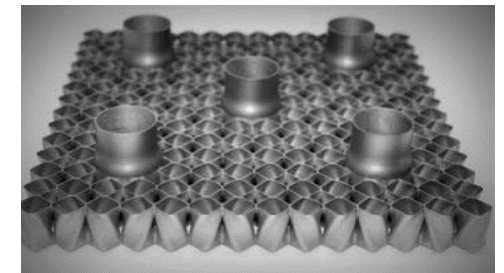
- 지지격자 스트랩 금형 제작
- 스트랩 교차 조립 및 용접(레이저, 경납땜)
- 필요시 후가공(돌출부, 용가재 등 제거)

제약 사항

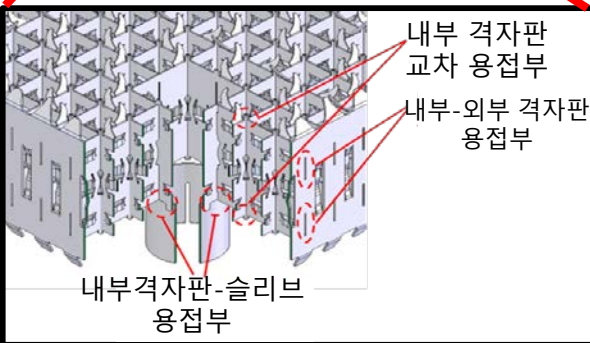
- 판금 가공으로 인한 설계 형상 제한
- 부분 용접 및 불연속부 구조로 내충격성 저하
- 핵연료 피복관 손상 사례

3D 프린팅

- 일체화된 지지격자 부품 제작
- 판금 가공으로 불가능한 복잡한 형상 구현 가능
- 지진 등 외부요인에 대한 내진성능 및 안전성 획기적 향상 목적



3D 프린팅 제조 지지격자 예
(Westinghouse)

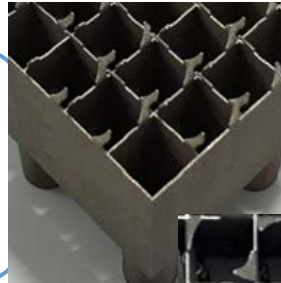


Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

3DP 지지격자 주요성능 향상

충격강도

슬롯이 없고 일체형으로 제작되어 로드베어링 길이가 기존보다 크게 증가하여 충격강도가 우수함



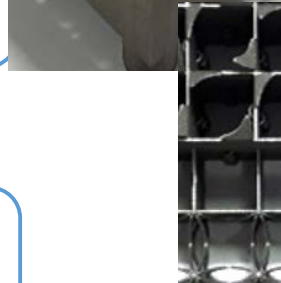
냉각수 혼합성능

혼합날개 형상의 자유로운 설계가 가능하며, 냉각수 혼합 성능이 우수함



내진성능

셀의 형상을 자유롭게 설계하여 강성을 낮춤으로써 내진성능을 높일 수 있음



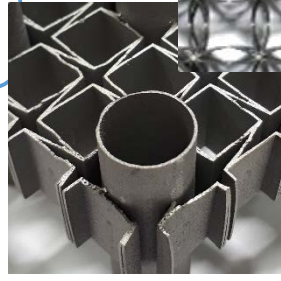
압력강하

지지격자 높이를 감소시키고 형상을 단순화하는 등 유로 단면적을 최대화하여 압력강하를 저감함



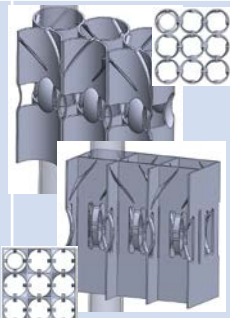

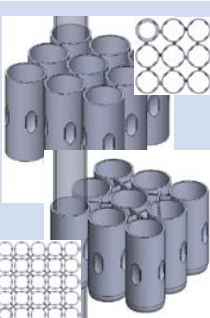
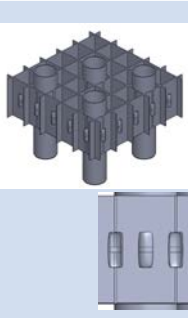
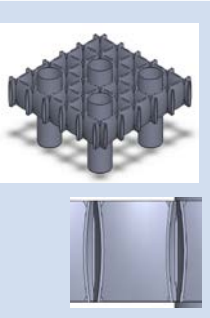
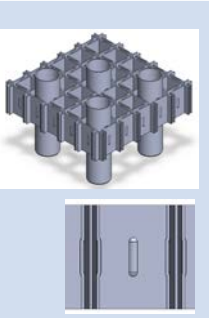
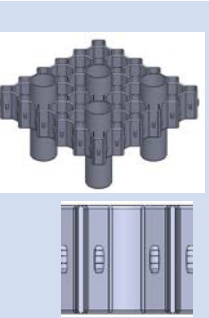
형상최적화

다양한 두께 혹은 형상을 하나의 지지격자체로 제조할 수 있어 형상 최적화 가능



Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

후보모델 및 지적재산권 확보 현황

구분	3DP-MG-01	3DP-MG-06	3DP-MG-07	3DP-BG-01	3DP-BG-02	3DP-BG-03	3DP-BG-04
모델							
특징	<ol style="list-style-type: none"> 1. 혼합성능 강화: 연료 붕을 감싸는 혼합날개 2. 격자셀 내부 나선형 혼합날개 적용 3. 충격성능 향상: 로드 베어링 면적 최대화 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 충격성능 향상: 로드 베어링 면적 최대화 2. 격자셀 내부 나선형 혼합날개 적용 3. 스프링 내부에 원형의 공간이 존재하여 혼합날개 역할을 함 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 격자간 연결하는 면이 특정 각도로 휘어져 있어 혼합날개 역할을 함(위), 격자간 연결하는 면이 X형으로 교차되며 특정 각도로 휘어져 있어 혼합날개 역할을 함(아래) 2. 압력강하 향상: 유로 단면적 최대화 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 전형적인 사각셀 2. 충격성능 향상: 로드 베어링 면적 최대화 3. 압력강하 향상: 유로 단면적 최대화, 높이 최소화 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 강성 완화 구조: 격자판이 스프링 역할 수행 2. 압력강하 향상: 유로 단면적 최대화, 높이 최소화 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 강성 완화 구조: 격자판이 스프링 역할 수행 2. 압력강하 향상: 유로 단면적 최대화, 높이 최소화 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 마름모 벌집 구조 2. 강성 완화 구조: 격자간 변형 3. 압력강하 향상: 유로 단면적 최대화, 높이 최소화
특허 현황	병합) 국내특허등록('21.06.08) 국제출원 완료(미국,유럽,일본,중국)('20.09.15)	국내출원 완료('21.05.24)	병합) 국내특허등록('19.08.13)	국내출원 완료('20.08.18)	국내출원 완료('20.11.12)	국내출원 완료('20.08.18)	국내출원 완료('20.08.18)

Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

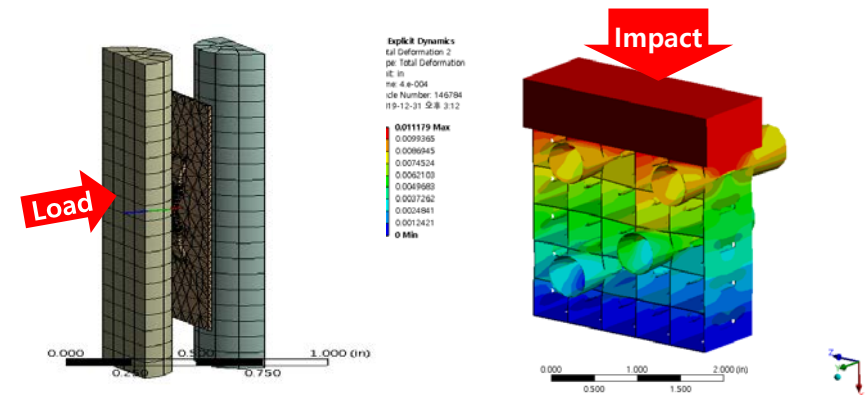
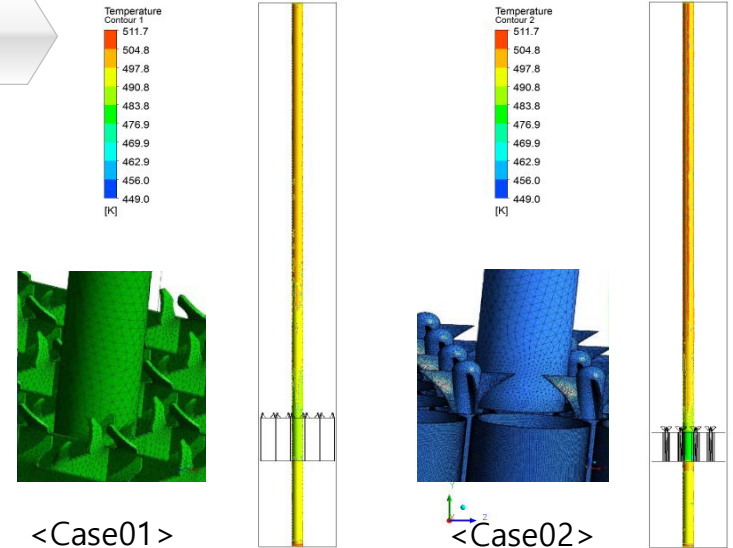
3DP 지지격자 해석(부분 모델)

○ 지지격자 후보모형 컴퓨터 유체 역학(CFD) 해석 수행

- Case 1: 사각셀 사면 혼합날개, Case 2: 원형셀 바람개비형 혼합날개
- CFD 해석 비교 결과
 - 열적 성능 차이: 유사
 - 수력적 성능 차이: Case 1 우수
 - 연료봉 표면 온도 분포: Case 1 우수
 - 난류강도 분포: 유사

○ 지지격자 시험 모사 유한요소해석(FEA) 수행

- 스프링/딴플 하중-변위 해석
- 5x5 지지격자 정적/동적 충격 해석

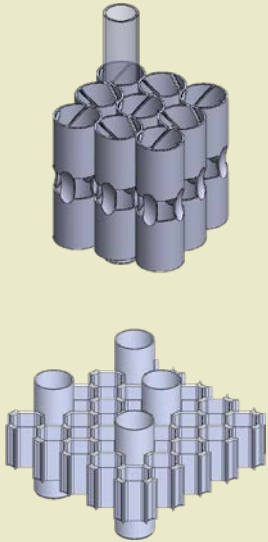


Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

3DP 지지격자 제작(부분 모델)

부품 설계

후보모형 개념
설계 및 3차원
모델 개발



분말 제작

지르코늄 합금
분말 개발



Zry-4 원자재(bar) Zry-4 분말



출력

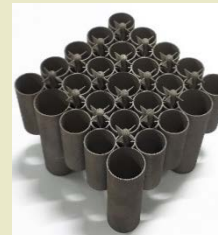
지지격자 시험용 시편 제작
(분말적층용융결합 - PBF)



Zry-4 지지격자
2층 4개

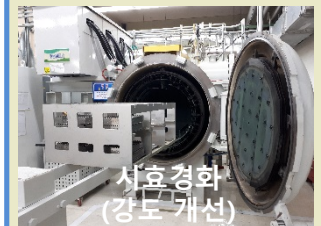


Inc718 지지격자
4층 8개



후처리

제품 성능 개선



Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

3DP 지지격자 시험(부분 모델)

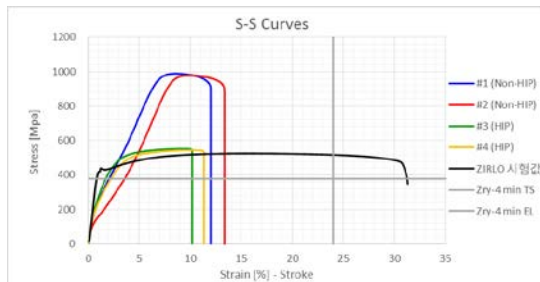
기초시험 인장시험

- 3D 프린팅 제조 시편 인장 특성 확인



기초시험

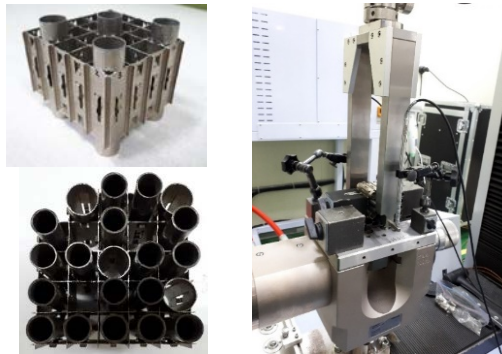
인장시험



인장시험 결과 규격 만족

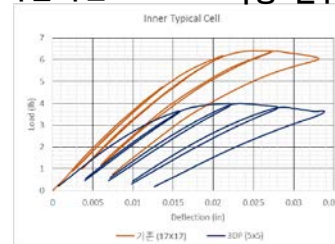
스프링/딴플 하중-변위 시험

- 스프링과 딴플 하중-변위 특성 확인



시험시험

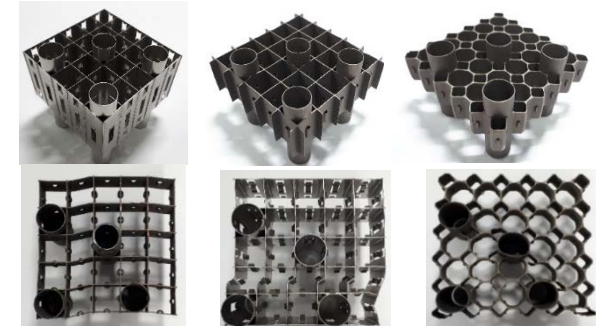
하중-변위 시험



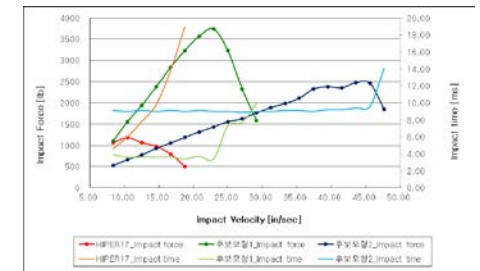
하중-변위 시험 결과

동적 충격시험

- 3D 프린팅 지지격자 동적 충격 특성 확인



좌굴 형상



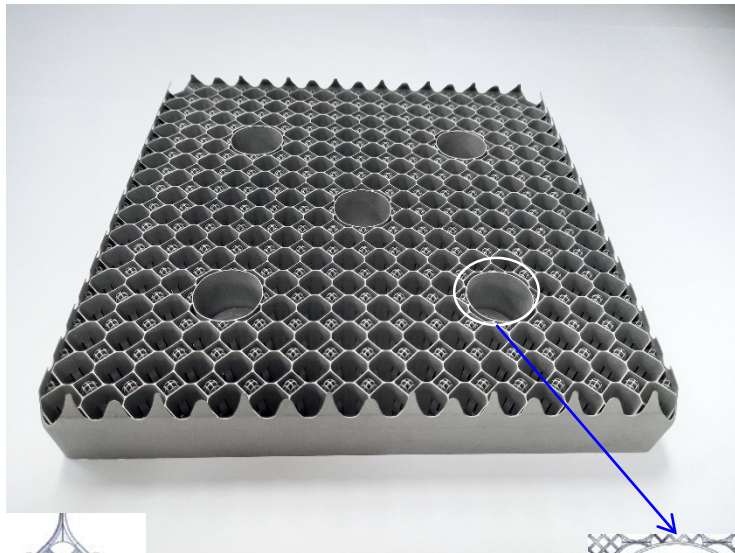
상용 대비 약 200% 수준

Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

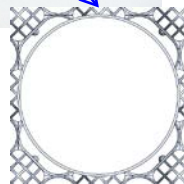
성능평가용 Full Size 시제품 제작

DFBG-1 모델

- 대각선 방향의 격자셀 구조



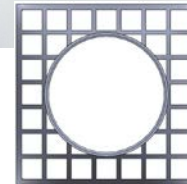
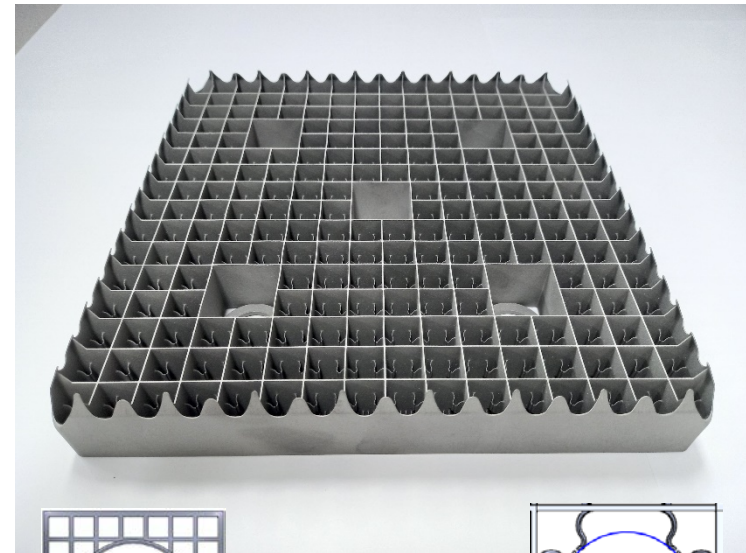
<이물질 여과 구조>



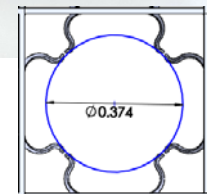
<안내관 셀>

DFBG-2 모델

- 격자형 이물질구조



<이물질 여과 구조>



<연료봉 셀>

Ⅲ. 3DP 지지격자 개발

3DP 지지격자 적용시 개선필요 사항

○ 모델링

- 부품 설계시 3D 프린팅 적층 방향 및 작업 순서를 고려해야 하므로, 설계 제약이 따름
- Over Hang(스프링/딴플)이 있는 구조의 경우, 서포터 생성 및 제거를 고려해야 함

○ 원자재

- 지르코늄의 경우, 3D 프린팅용 분말(구형, 15~45 μ m)을 수급하기 어려움

○ 제조

- 분말이 적층·용접되는 제조방식으로, 제품의 표면이 거침
- 얇은 형상 제조 시, 열이 가해지고 식는 제조 과정에서 수축 및 응력 집중으로 변형 발생
- 지르코늄의 경우 미세조직, 상변태(α & β) 연구 필요

○ 시제품 특성

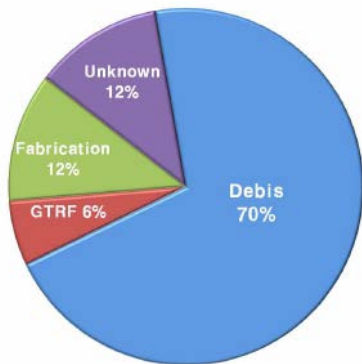
- 기존 판금가공 방법에 비해 강도는 높으나, 신율이 저하되는 공통적인 특징이 있음
- 지르코늄의 경우 중성자 조사에 대한 기초 데이터가 전무한 상태임

IV. 3DP 하단고정체 개발

개발 목표

정량적 목표(하단고정체)

- 허용 공차 상용 대비 동등 수준 유지 : 유로판 두께 ± 0.12 mm
- 이물질여과 효율 : 상용대비 여과 효율 7% 향상
- 압력강하 성능 : 상용대비 동등 수준 유지



국내 핵연료 손상원인
(2009~2018)

핵연료 손상원인 제거

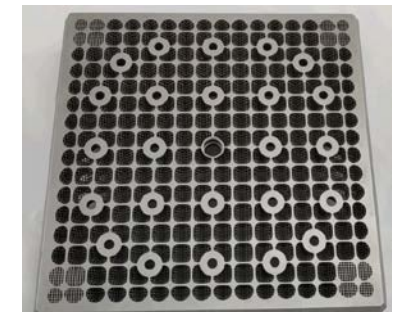
- 국내 핵연료 손상원인 중 이물질에 의한 손상이 가장 빈번 함
- 하단고정체 설계 개선을 통한 이물질 여과 효율 강화 필요

하단고정체 설계 제약 사항

- 기계가공에 통한 이물질 여과 구조 구현이 어려움
- 좁은 유로 구멍을 통한 압력강하량 증가

3D 프린팅 적용 하단고정체

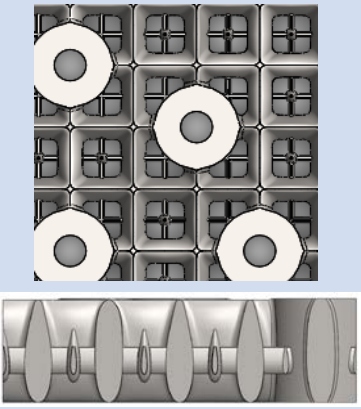
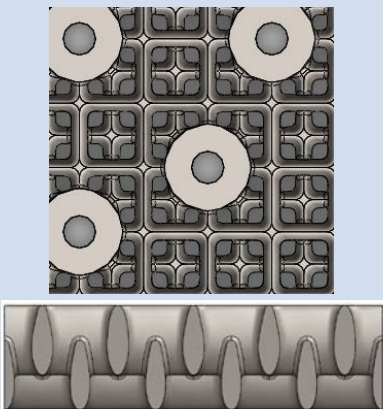
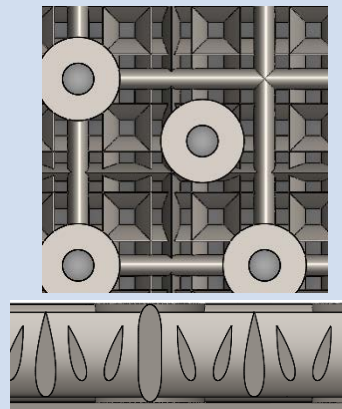
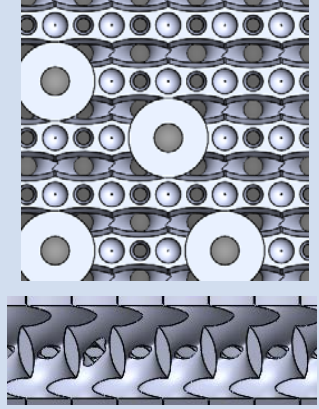
- 이물질 여과 구조 개선을 통한 여과효율 상승 (손상원인 제거)
- 유선형 구조 설계를 통한 압력강하 성능 유지



3D 프린팅 제조 하단고정체
(Westinghouse)

IV. 3DP 하단고정체 개발

3DP 하단고정체 지적재산권 확보 현황

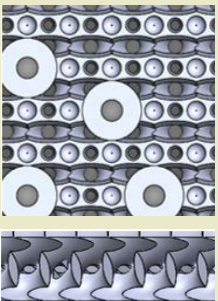
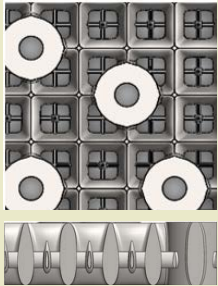
항목	3DP-BN-01	3DP-BN-02	3DP-BN-03	3DP-BN-04
모델				
특징	<ol style="list-style-type: none"> 1. 압력강하를 줄이기 위한 유선형 구조 2. 교차되는 내부 구조물을 통한 이물질 여과 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 압력강하를 줄이기 위한 유선형 구조 2. 2단 유로판으로 구성 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 압력강하를 줄이기 위한 유선형 구조 2. 경사면을 가지는 유로판 구성 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 타원을 회전 컷 하여 유로 구멍을 구성 2. 복잡한 유로판 내부 구조를 통한 이물질 포집 기능
특허 현황	국내출원 완료('19.10.02)	국내특허등록('20.09.25) 국제출원 완료(미국,프랑스)	국내출원 완료('20.05.18)	국내특허등록('20.09.25)

IV. 3DP 하단고정체 개발

3DP 하단고정체 제작(부분 모델)

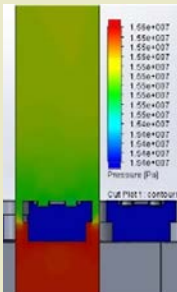
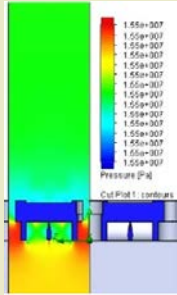
부품 설계

후보모형 개념
설계 및 3차원
모델 개발



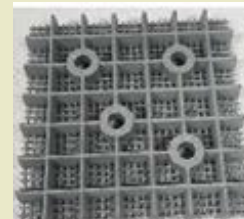
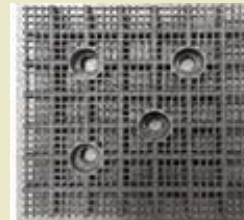
성능 해석

압력강하 해석을
통한 성능 예측



출력

하단고정체 시험용 시편 제작
(분말적층용융결합 - PBF)



하단고정체 6종 12개

후처리

제품 성능 개선



IV. 3DP 하단고정체 개발

3DP 하단고정체 시험

기초시험 인장시험

- 3D 프린팅 제조 시편 인장 물성 확인



인장강도 규격 만족(124% 수준)

압력강하 시험

- 상용 하단고정체와 비교 시험 수행



상용 하단고정체 대비 107.5% 수준

이물질 여과 시험

- 상용 하단고정체와 이물질 여과 효율 비교 시험 수행



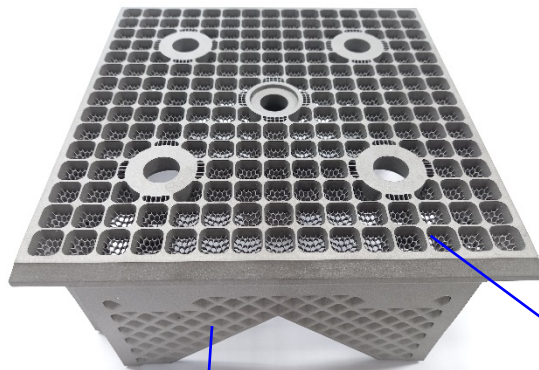
상용 하단고정체 대비 약 35% 상승

IV. 3DP 하단고정체 개발

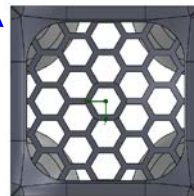
성능평가용 Full Size 시제품 제작

DFBN-1 모델

- 벌집형 이물질구조



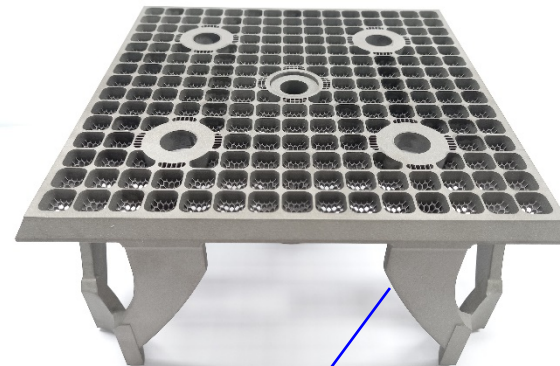
<FA-FA 이물질 여과기능>



<이물질 여과 구조>

DFBN-2 모델

- 벌집형 이물질+구조 최적화



<하부구조 최적화>

IV. 3DP 하단고정체 개발

3DP 하단고정체 적용시 개선필요 항목

○ 하단고정체 설계 및 제조

- 이물질 여과기능 보유 유로판 설계 시 좁은 유로로 인한 압력강하 상승 발생
- 유로판의 표면조도 및 제조 공차의 영향으로 설계치 보다 높은 압력강하를 보임
- 표면 조도 개선 및 정밀 제조 필요

○ 상용화

- 3DP 하단고정체 제조시 기존 상용에 비해 2배 이상의 비용 발생
(하단고정체 및 보호지지격자를 통합한 일체형 하단고정체 개발을 통한 가격 경쟁력 획득 필요)
- 대량생산 시 제작시간 증가

V. 향후계획

- 표면조도 개선 : 건식 전해연마 등 최신 연마 기술 적용성 연구 수행, 표면연마 가능 구조 설계
- 지르코늄 분말 수급 : 국내 업체 개발을 통한 지르코늄 분말 양산 가능성 연구
- 지적재산권 확보 : 핵연료 부품 지적재산권 확보를 통한 3DP 경쟁력 보유
- 기초 물성 확보 : 기초 물성 시험을 통한 물성 Data 확보 (조사시험 수행)
- 제조공차 : 3DP 공정 개선을 통한 설계 공차 구현
- 비용절감 : 상용화 경쟁력을 높이기 위한 생산 비용 절감 연구

감사합니다

