

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘 개발

Mechanism Development of the Spent Fuel Dry Pulverizing/Mixing Device

정재후, 홍동희, 김영환, 윤지섭, 진재현, 박기용, 송태길

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘은 사용후핵연료를 재활용 또는 안전하게 처분하기 위하여 250 mm로 절단된 사용후핵연료봉을 탈피복(Slitting) 장치를 이용하여 Hull과 펠렛을 분리한다. 분리된 펠렛을 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 속에 넣어 UO_2 펠렛을 U_3O_8 분말로 산화시키는 것으로 건식 탈피복 방법 중에서 산화 탈피복인 Voloxidation을 모체로 하는 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘을 개발하였다. 이 장치를 개발하기 위하여 기존 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 기술의 차세대관리공정 적용성 분석, 일체형 탈피복/분말화 장치의 구조(수직/수평형)를 비교·분석, 수직형 건식 분말화/혼합 장치의 성능 요건에 필요한 규격 및 용량 등을 도출하였다. 또한, 장치 부품의 내열특성 조사 및 구조에 따른 온도 분포의 특성을 분석, 열변형 분석 자료의 신뢰도를 평가, 열해석 프로그램(I-DEAS)을 이용하여 대상 부품에 대한 열변형 및 항복 응력을 계산, 열변형 분석 결과의 신뢰도 검증 실험(KOLAS) 등을 완료하였으며, 이러한 결과들을 이용하여 장치를 개발하는데 적용하였다. 이 장치는 UO_2 펠렛을 가열기(반응기) 속에 투입(처리 용량은 20 kgHM/batch)한 후, UO_2 펠렛을 공기 분위기에서 약 600 °C 이상으로 가열함으로써 UO_2 펠렛을 U_3O_8 분말로 산화시키고 산화된 U_3O_8 분말을 용기에 수집한다. 반응기 내부에 다단계 다공판 매쉬를 장착하여 분말화 입도(20~100 μm)를 단계적으로 감소시키고, UO_2 의 산화 반응에 요구되는 산소와 반응열을 연속적으로 공급하여 반응 시간을 줄일 수 있고, U_3O_8 의 분말을 회수함에 있어서 장치에 묻어 있는 분말까지 회수할 수 있도록 장치를 개발하였다.

Abstract

The spent fuel dry pulverizing/mixing device mechanism is used to deal with the spent fuels for the safe disposal. The separated pellets from hulls by a slitting device are put and oxidized from UO_2 solid pellet to U_3O_8 powder in the device. The device have been developed based on a voloxidation method which is one of several dry de-cladding methods. We have benchmarked dry de-cladding methods, analyzed applicability to the advanced spent fuel management process, integrated and compared several configuration, and finally derived detailed specifications proper to requirements for the device. Also, thermal characteristics of the device such as thermal stress

and strain have been analyzed by the commercial software, I-DEAS, and the reliability of the results have been verified by the KOLAS(KOrea Laboratory Accreditation Scheme). The UO_2 solid pellets are put in the device which has a capacity of 20 kgHM per a batch, heated up about 600 °C in the air environment. Then, the UO_2 solid pellets are oxidized into the U_3O_8 powder, and the powder is collected in a special vessel. The device has been development as follows: the multi-staged fine hole meshes are used to reduce the size of the powder gradually, heat and air(oxygen) are supplied continuously to reduce the reaction time, and slight vibration effect are applied to collect powder cling to the device.

1. 서론

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘은 사용후핵연료를 재활용 또는 안전하게 처분하기 위하여 탈피복 장치로부터 분리된 펠렛을 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘 속에 넣어 고온 환경에서 UO_2 펠렛을 U_3O_8 으로 산화시켜 분말화 하기 위한 장치이다. 이 장치를 개발하기 위하여 관련된 기존 건식 분말화/혼합 기술의 차세대관리 공정 적용성 분석, 일체형 탈피복/분말화 장치의 수직/수평형에 따른 장단점 비교·분석, 장치의 성능 요건인 규격/용량 등을 도출하였다. 장치 부품의 내열특성 조사 및 구조에 따른 온도 분포의 특성을 분석, 열변형 분석 자료의 신뢰도를 평가, 열해석 프로그램(I-DEAS)을 이용하여 대상 부품에 대한 열변형 및 항복 응력을 계산, 열변형 분석 결과의 신뢰도 검증 실험(KOLAS) 등을 완료하였다. 이 장치의 목표 설정 값은 공정 개념의 타당성 및 핵연료 물질 회수/취급의 용이성과 핵연료 처리용량 20 kgHM/batch, 분말 회수율 99 %, 분말 입도 20~100 μm 등을 만족하도록 하였다. 이 장치는 탈피복된 UO_2 펠렛을 가열기 속에 투입한 후 UO_2 펠렛을 공기 분위기에서 약 600 °C 이상 가열하고, 반응기 내부에 다단계 다공판 메쉬를 장착하여 분말화 입도를 단계적으로 향상시킨다. U_3O_8 의 분말을 회수함에 있어 Vibrator를 이용하여 진동을 주어 장치에 묻어 있는 분말까지 회수 가능하며, 하나의 가열기에서 연속적으로 운전할 수 있는 장치를 개발하였다.

2. 건식 분말화/혼합 기술 방법

현재까지 알려진 건식 처리의 대표적인 산화 탈피복 방법에는 Voloxidation과 AIROX (Atomic International Reduction OXide) 방법이 있다. 이들 두 방법에 대한 내용으로서 Voloxidation 방법은 절단된 핵연료를 400~500 °C의 공기 분위기에서 가열하며, 산화로 인하여 UO_2 가 U_3O_8 의 분말로 변화한다. 이와 같은 상변화에 의한 부피팽창으로 인하여 핵연료 펠렛이 분쇄된다. 산화된 핵연료가 용해로에서 용해되어 분리되는 방법이다. AIROX 방법은 핵분열 물질의 함량 조정을 위해 약간 농축된 순수 UO_2 분말의 첨가를 통하여 사용후핵연료의 산화 분말을 직접 재순환하기 위해서 개발되었다. 공정 개념은 산화반응이 일어나도록 공기를 공급하기 위하여 절단된 핵연료봉의 길이 방향에 2.5~4 mm의 간격으로 작은 구멍을 연속적인 Rotary Punch를 이용해 만든다. 공기중 400 °C에서의 산화시 피복관은 구멍이 열에 따라 파괴되고, 핵연료 펠렛이 분쇄된다. Cubic 상에서 밀도가 낮은 Tetragonal 상으로 상변이가 일어날 때, 부피 팽창이 피복관을 파괴하고 펠렛을 분쇄한다. 건식 분말화/혼합 공정의 기존 기술을 살펴보면, 국내에서 사용하고 있는 기술로는 DUPIC의 OREOX(산화환원) 공정이 있다. 국외에서 하고 있는 기술로 미국의 AI사와 ANL, DOE, BNFL 사, Cadarache 시설, RIAR 연구소 등이 있으며, 내용은 아래에 나타낸 바와 같다. 국내의 DUPIC 공정에서는 250 mm로 절단된 핵연료봉의 피복관을 기계적으로 탈피복 한 후, UO_2 펠렛을 OREOX 로에 투입하여 분말화 공정으로 Tray에 펠렛을 고르게 펴고 가열하여 산화하는 방법으로 공기와 접촉하는 면적이 작아 한번에 100~200 g 밖에 분말화 하지 못한다. 또한, 산화 환원에 소요되는 시간도 1 Batch 당 약 4

시간 정도가 소요되어 연구의 목표량 20 kgHM/batch의 핵연료 분말화 할 경우 많은 시간이 소요되며, 이 공정의 적용이 부적합하다. 실증용 장치 설계 자료의 확보를 위하여 조사되지 않은 UO₂ 연료봉의 건식 탈피복 공정과 분말화 공정을 하나의 반응기(Voloxidation)에서 수행할 수 있는 실험실 규모의 반연속식 장치를 제작하고 장치의 성능을 평가하여 UO₂ 펠렛의 산화 조건을 확립(조업온도 400~600 °C 에서 평균 입도 20~60 μm U₃O₈ 분말 회수)한 바 있다. 그러나, 이 장치는 길이 30 mm의 시험용 연료봉을 대상으로 실험을 하였는데, 국제적으로 허가된 250 mm에 대해서는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다.

2.1. AI 사

미국의 AI(Atomics International)사에서 시도한 건식 공정 기술로는 산화물 핵연료의 산화-환원법(AIROX), 금속 핵연료의 수소화-탈수소화법(RAHYD), 탄화물 핵연료의 산화-환원법(CARBOX) 등이 있다. AIROX 기술은 UO₂와 UO₂-PuO₂ 핵연료에 적용이 가능하며, 밀도가 11.0 g/cc인 UO₂가 8.3 g/cc의 저밀도를 갖는 U₃O₈로 산화되면서 발생하는 35 %의 체적 변화를 이용하는 기술이다. 이때 UO₂는 400~500 °C의 산소 분위기에서 U₃O₈로 산화된 후, 600~850 °C의 수소 분위기에서 다시 UO₂로 환원된다. RAHYD 기술은 U, U-Pu, Th 등의 금속 핵연료에 적용 가능하며, 고온의 수소 분위기에서 금속 연료와 수소가 반응하여 수소 화합물이 형성되는 것을 이용한 기술이다. CARBOX 기술은 UC나 ThC와 같은 탄화물 및 핵연료에 적용되는 건식 처리법으로 밀도가 13.63 g/cc인 UC가 8.3 g/cc의 U₃O₈으로, 또는 10.67 g/cc의 ThC가 9.86 g/cc와 ThO₂로 산화되면서 각각 84 %와 17 %의 체적의 변화를 이용하는 기술이다.

2.2. DOE

미국의 DOE(Department Of Energy)에서는 사용후핵연료 중 특히 산화 우라늄 핵연료의 처분을 위한 효율적인 전처리 방안으로 고온 건식 용융염 전해 정련에 의한 우라늄 및 TRU의 분리 공정이 최적 방안이라는 판단하에 1996년부터 ANL 연구소에서 관련 연구를 체계적으로 수행하고 있다. 이를 위한 첫 번째 공정인 산화물 사용후핵연료의 금속 전환 공정에 대해서는 현재 20 kgHM/batch의 Lab. Scale test를 수행 중에 있다.

2.3. ANL

미국의 ANL(Argonne National Lab.)에서는 금속전환실증시설을 건설하기 위하여 연구가 수행 중에 있다. Lab Scale Test(모의 사용후핵연료 사용, 처리 용량은 20 kgHM/batch) 중 공정 구성은 금속전환공정, Li 회수공정, LiCl 폐용융염 mold화 공정 및 고정화 공정, 금속전환반응기의 규격은 Ø40 cm x 70 cm(88 L), 글로브 박스 산소 및 수분의 함량 기준은 100 ppm 미만이다.

2.4. BNFL 사

영국의 BNFL 사는 1963년부터 분말 혼합 기술을 축적해왔으며, 1970~1988년까지는 Sellafield에 있는 원형 고속증식로 시설에서 Blending 기술을 적용하였다.

2.5. Cadarache 시설

프랑스는 현재 Cadarache 시설에서 고속증식로형 혼합 핵연료 제조 기술을 이용하였으며, 일명 Coca(Cobroyage Cadarache) 공정을 사용한 15t HM/year 규모의 경수로형 혼합 핵연료 제조 시설을 갖추고 있다.

2.6. RIAR 연구소

러시아의 RIAR 연구소에서 수행한 Vipac을 이용한 핵연료 제조 기술을 수행한 바 있다.

3. 장치의 주요 구성 및 사양

사용후핵연료 수직형 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘의 주요 요건인 규격/용량 등을 도출하기 위한 주요 구성은 Air Compressor, 분말 용기, 메쉬, Cyclone, 가열기, 산화시간, 분말 회수율, 분말 장치 처리 용량 및 규격, 분말 입도 등이며, 주요 사양은 표 1에서 보는 바와 같다. 이들 각각 항목에 대한 국내·외의 기술을 분석하여 제작할 장치의 성능 요건을 도출하는데 적용하였다. 분말 입도와 메쉬에 대한 국내의 자료를 보면 U_3O_8 평균 분말 입도는 20~60 μm 로 분말화 되는 것으로 나타나 있다. 국외의 AIROX 실험 결과 입자 크기는 35~48 메쉬가 70 %, 325 메쉬가 30 % 되는 것을 조사되었다. 가열기는 Voloxidation의 경우 산화 온도가 400~600 $^{\circ}C$ 이며, AIROX의 경우 산화온도가 600 $^{\circ}C$ 인 것으로 조사되었다. 분말 회수율에 대한 국내·외 실험 결과는 DUPIC 공정에서는 99.9 %, AI 사에서는 99.9 %로 나타나 있다.

표 1. 장치의 주요 사양

항목 \ 내용	성능 요건
용량/규격	<ul style="list-style-type: none"> · 용량 : 20 kgHM/batch 기준 · 규격 : 높이 940 mm, 폭 726 mm, 길이 726mm · Hopper 규격 : 높이 300 mm, $\varnothing 300$ mm(윗), $\varnothing 150$ mm(밑)
메쉬	<ul style="list-style-type: none"> · 분말 입도 : 20~100 μm 기준 · 1차 : OD $\varnothing 260$, Hole $\varnothing 4$ x 두께 3 mm, 직경과 직경 사이 6 mm · 2차 : OD $\varnothing 205$, Hole $\varnothing 2$ x 두께 2 mm, 직경과 직경 사이 3 mm · 3차 : $\varnothing 145$ Disk Type, 메쉬 Size 40 메쉬/Inch
Cyclone	<ul style="list-style-type: none"> · Cyclone 장입 속도(V) : 15 m/sec(1,500 cm/sec = 90,000 cm/min) · 단면적(A) : 2.06 cm^2
가열기	<ul style="list-style-type: none"> · 설정 온도 : 600 $^{\circ}C$(1,000 $^{\circ}C$ 까지 상승 가능) · 온도를 다 방면으로 가변 가능
Air Compressor	<ul style="list-style-type: none"> · Cylinder, Vibrator, 가열기 등에 필요한 공기 주입 량 등을 고려하였음 · 공기탱크용량 : 110 ℓ · 실공기 토출량 : 186 ℓ/min · 공기 토출량 : 258 ℓ/min)
산화 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 산화 시간 : 4 시간(다 방면으로 가변)
분말 회수율	<ul style="list-style-type: none"> · 회수율 : 99.9 % 이상
분말 입도	<ul style="list-style-type: none"> · 분말 입도 : 20~100 μm
Vibrator	<ul style="list-style-type: none"> · 규격 : Rpm 32,000 · Cent Force : 1,650 N · Air comsum : 105 L/Min · 진동 형태 : 회전형 · 소음 : 70 db 이하
Thermocouple	<ul style="list-style-type: none"> · 가열기 상승 온도 : 600 $^{\circ}C$ · 규격 : 높이 96, 폭 96, 지름 100 mm
Cylinder	<ul style="list-style-type: none"> · 보증 내압력 : 15.3 kgf/cm^2 · 최고사용압력 : 10.2 kgf/cm^2 · 사용유체온도 : -10 $^{\circ}C$~70 $^{\circ}C$ · 행정 길이 : 허용차 +1.0 · 사용피스톤속도 : 50~500 mm/sec

4. 장치의 설계를 위한 그래픽 모델링

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메카니즘에 대한 핫셀내 배치 및 유지·보수 측면에서의 분석 등을 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 모델링 하였다. 이 장치는 3단 메쉬로 구성된 가열로와 가열로 내 UO_2 분말 투입을 위한 뚜껑 개폐부, 벨로우즈관 및 사이클론, 그리고 분말용기 접속부 및 실린더로 구성되어 있다. 이 장비의 그래픽 모델은 3차원 그래픽 시뮬레이터에 배치되어 실증용 장치 설계 요건 도출을 위한 작업영역 분석, 운반·취급 계통 전산모사, 모듈화 및 유지·보수를 위한 분석 등에 활용되었다.

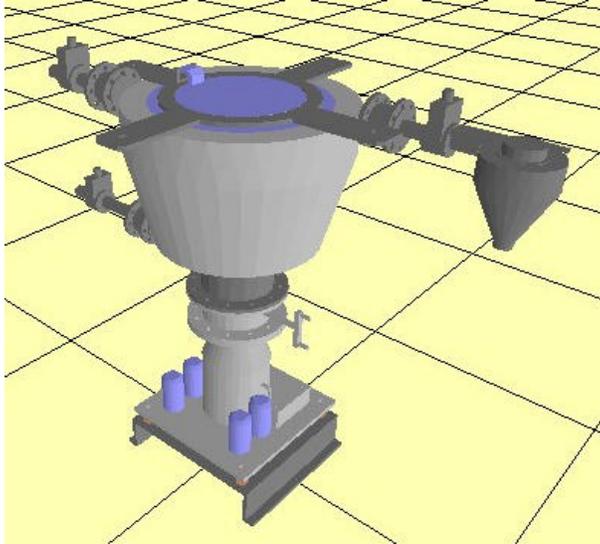


그림 1. 장치의 모델링 모습.

5. 장치의 예측될 수 있는 열영향 고려 대상 요소

장치의 예측될 수 있는 열 영향 고려 대상 요소로 부품 재질 및 온도 등은 표 2에서 보는 바와 같다. 열 영향을 받는 주요 장치 부품에 대한 온도 분위기를 구체적으로 조사해 보았다. 또한 이에 대한 부품 재질의 물리적 영향도 고려해 보았다. 여기서 부식에 대한 영향에 비해 고온 환경의 영향이 상대적으로 크기 때문에 부식에 대한 환경은 배제하였다.

표 2. 장치의 부품 재질 및 온도

번호	구성 요소	온도 분위기(°C)	수량	재질	기타
8	열 온도 센서	600	1	SUS 304	· 고온에 의해 변형 · 길이 350 mm x ϕ 6 mm
10	메쉬	600	3	SUS 304	· 고온에 의해 변형
11	Vibrator	80	1		
	열선	600			· 진동에 의해 변형 및 단선

6. 장치의 열 특성 해석

산화된 분말이 통과되도록 3개의 메쉬 층이 가열로 내부에 존재한다. 온도 분포 특성은 그림 2에서 보는 바와 같다. 장치의 산화 가열기가 내재되어 있는 몸체부에서 400~600 °C의 열 영향을 받는다. 가열로 내부의 온도는 입구부터 3차 메쉬 층까지는 600 °C 이고, 3차 메쉬 층부터 출구까지는 330 °C의 온도 분포를 가진다. 이 때 열변형에 의해 메쉬와 가열로 간에 발생할 수 있는 열 변형량을 파악하여 얼마의 Clearance와 지지부에서의 응력 분포를 파악하였다. 1차(상부) 메쉬에 대한 우라늄 공급량에 따라서 변형량 및 응력 분포를 조사하여 적정 공급량을 결정하였다. 그리고 3차(하부) 메쉬의 우라늄 통과 능력은 20~80 μ 이다. 여기서 열 팽창에 의해서 3차 메쉬의 크기가 UO₂ 펠렛 통과 능력에 어떻게 영향을 미치는지 해석해 보았다.

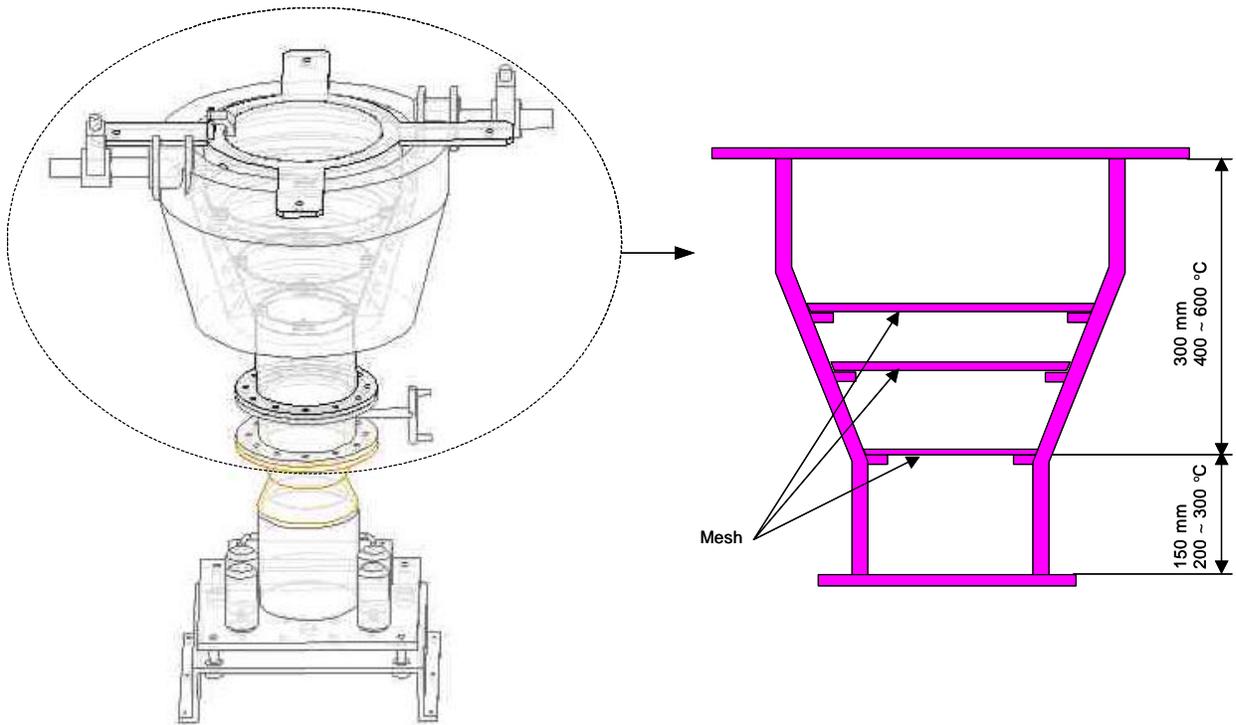


그림 2. 장치의 온도 분포도.

7. 하중 부과시 1차 메쉬의 변형량 계산

7.1. 문제 개요

1차 메쉬에 분말 파우더가 약 20 kg 가량 부과 될 때 1차 메쉬의 변형량과 응력 값을 수치 해석을 통해 확인해 보았다.

7.2. 해석 모델

1차 메쉬의 유한 요소 모델은 그림 3에서 보는 바와 같이 해석하고자 하는 1차 메쉬의 유한 요소 모델이다. 그림 3의 위쪽에 보이는 반구 형상은 파우더가 그림 3과 같은 형상으로 쌓일 것을 가정하여 분포 하중이 부과되도록 하기 위한 압력 경계 조건 부과 방법을 보여주는 것이다.

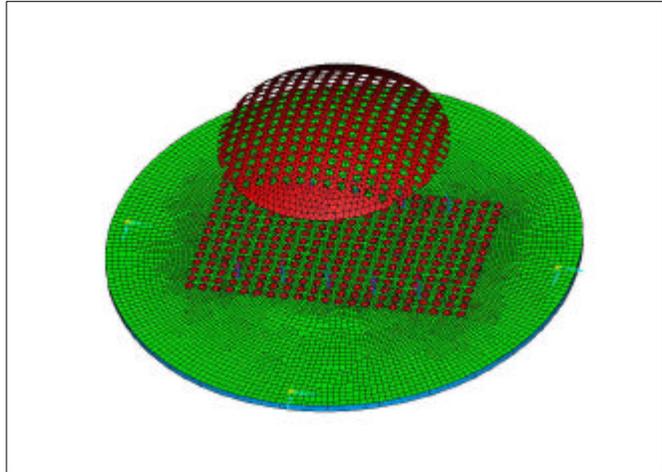


그림 3. 1차 메쉬의 유한 요소 모델.

7.3. 해석 결과

1차 메쉬의 두께 변화와 우라늄 공급량에 따른 해석 결과는 표 3에서 보는 바와 같다. 1차 메쉬의 두께가 3 mm일 때와 7 mm일 때의 결과를 나타낸 것이다.

표 3. 1차 메쉬의 두께 변화와 우라늄 공급량에 따른 해석 결과

구 분	변형량	응력	적용 하중
두께 3 mm	0.407 mm	17.3 kgf/mm ²	20 kg
두께 7 mm	0.0352 mm	3.41 kgf/mm ²	20 kg
두께 3 mm	0.102 mm	4.32 kgf/mm ²	5 kg
두께 7 mm	0.0088 mm	0.852 kgf/mm ²	5 kg

그림 4, 5는 1차 메쉬의 두께가 3 mm일 때와 7 mm일 때의 해석 응력 분포 결과이다. 해석상의 편의를 위해 메쉬의 네 부분을 고정하고 해석을 수행하였다. 우선 변형량은 네 부분을 고정했기 때문에 두께가 3 mm일 때나 7 mm 일 때 모두 크지 않았다. 그러나 자유 상태에서 20 kg의 하중이 작용한다면 중앙부의 처짐량은 좀 더 커질 수 있을 듯 하다. 그리고 처짐량을 줄이기 위해 설계 시에 네 부분을 볼트로 고정한다면 3 mm 두께의 메쉬로는 항복 강도를 넘어서는 문제가 발생한다. 그러므로 처짐량과 항복 응력 등을 고려한다면 1차 메쉬의 경우 볼트로 고정을 하는 것이 좋고, 두께는 7 mm 정도면 3 mm 에 비해 안전한 설계 사양이 될 수 있을 것 같다. 분포 하중이 5 kg 작용할 때의 결과들을 그림 8, 9, 10, 11에서 보는 바와 같다. 해석 결과는 3 mm와 7 mm 모두 응력과 변형량 모두 안전한 결과를 보여줌을 확인할 수 있었다. 그림 6, 7은 1차 메쉬의 두께가 3 mm와 5 mm일 때의 변형량을 나타낸 것이다.

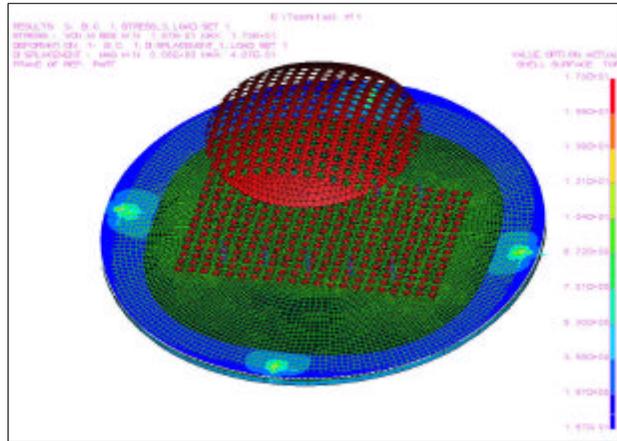


그림 4. 1차 메쉬 응력 해석 결과(두께 3 mm, 20 kg).

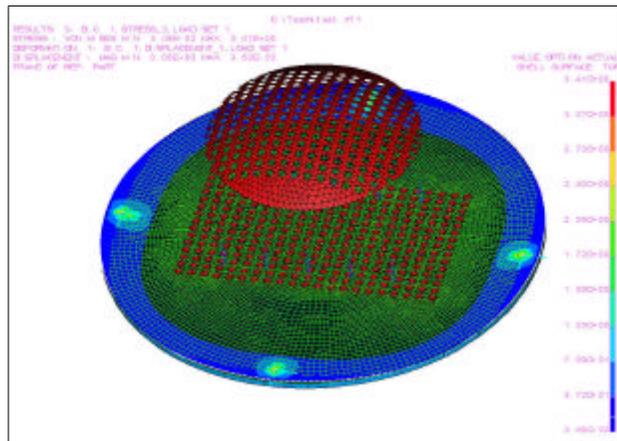


그림 5. 1차 메쉬 응력 해석 결과 (두께 7 mm, 20 kg).

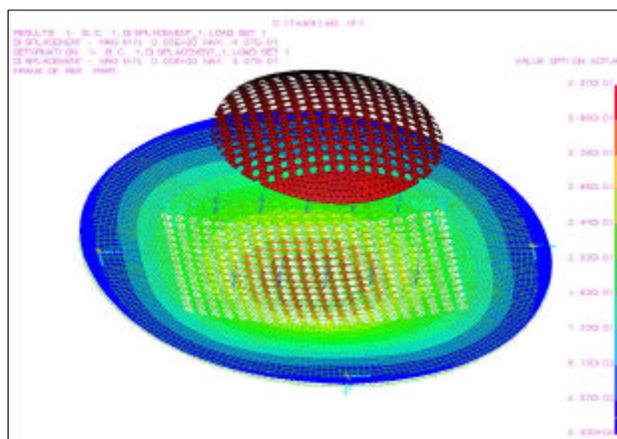


그림 6. 1차 메쉬 변형량 해석 결과 (두께 3 mm, 20 kg).

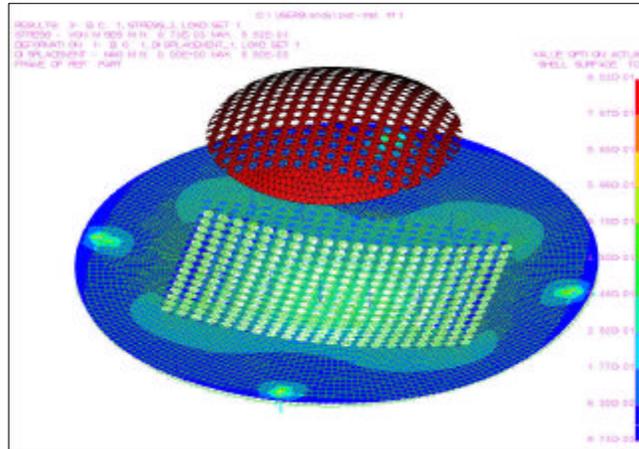


그림 10. 1차 메쉬 응력 해석 결과(두께 7 mm, 5 kg).

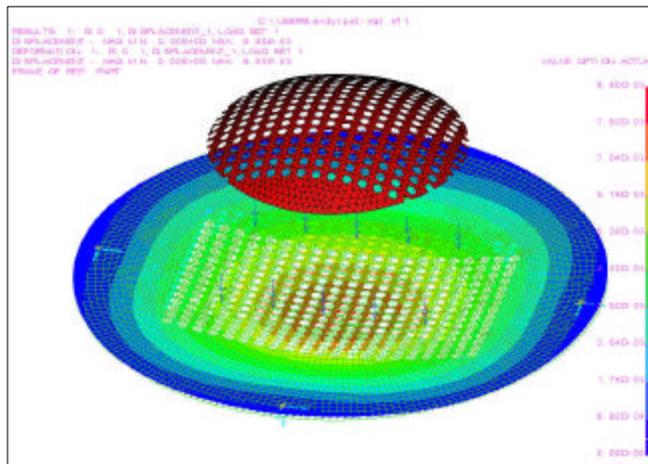


그림 11. 1차 메쉬 변형량 해석 결과(두께 7 mm, 5 kg).

8. 3차 메쉬 Hole 변형량 계산

8.1. 문제 개요

3차 메쉬에 대한 Hole의 크기는 20~80 μm 이다. 이 때 열변형에 의한 Hole의 변형량을 계산해 보았다.

2. 해석 모델

그림 12는 해석하고자 하는 3차 메쉬의 유한 요소 모델이다. 해석 모델은 요소의 수와 해석 시간의 단축을 위해 Hole의 크기 80 μm 을 기준으로 세 개를 생성했다. 80 μm 의 변형량을 파악해서 고온 상태에서의 열변형에 의한 문제점을 파악해 보았다.

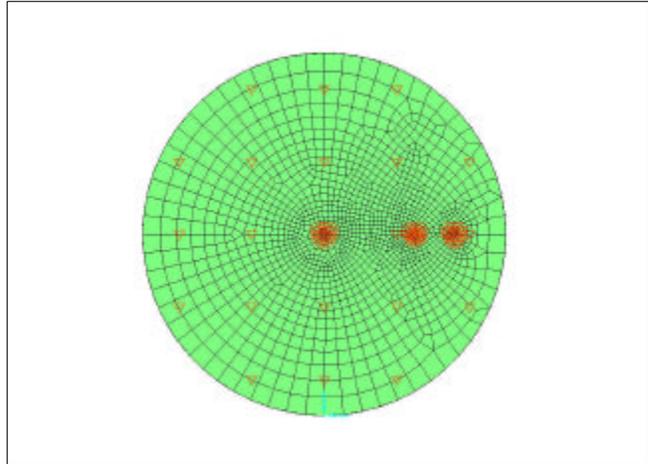


그림 12. 3차 메쉬의 유한 요소 모델.

8.3. 해석 결과

표 4는 3차 메쉬에 대한 세 곳에서 80 μm Hole 노드들의 X 방향 변형량을 비교한 것이다. 모든 홀에서의 직경 변화량이 0.0004764 mm로 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 실제 직경이 80 μm 에서 0.4764 μm 직경이 증가했다. 그러므로 열변형에 의해 개별 Hole 들의 직경 변화는 크지 않음을 알 수 있었다.

표 4. 직경 변화량

구분	Hole 1	Hole 2	Hole 3
1차 Node	-0.2382 μm	0.2230722 mm	0.3201502 mm
2차 Node	0.2382 μm	0.2235486 mm	0.3206266 mm
직경 변화량 (μm)	0.4764	0.4764	0.4764

9. 장치의 설계 및 제작

장치를 설계하기 위하여 기존 기술의 차세대관리 공정 분석, 일체형 탈피복/분말화 장치 적용 분석 및 장치의 성능 요건인 규격/용량 등을 도출하였다. 이에 대한 분석 자료와 각 부품에 대한 내열 특성을 조사하기 위하여 외부 기관인 테크노 넷 기술 연구소에 용역을 의뢰하여 열 해석 프로그램 (IDEAS)으로 모사 실험(Simulation)을 수행하였다. 이들의 결과 자료를 활용하여 장치를 설계하였으며, 장치의 설계도는 그림 13에서 보는 바와 같다. 장치의 제작품은 크게 몸체, Hopper, 가열기, 메쉬, Vibrator, Cyclone, Thermocouple, 배관 시스템, Butter fly valve 및 Sintered filter, 분말 용기, Control panel 등으로 구성된다. 이 장치는 탈피복(Slitting) 장치로부터 분리된 펠렛을 수직 반응기 속에 투입한 후 다단계 메쉬, Heat, Vibrator 등을 이용한다. 반응기 내부로 열과 산소를 공급하여

UO₂ 펠릿을 U₃O₈으로 분말화 할 수 있도록 하였다. 장치의 규격은 높이 940 mm, 폭 726 mm, 길이 726 mm로 제작하였으며, 제작품은 그림 14에서 보는 바와 같다.

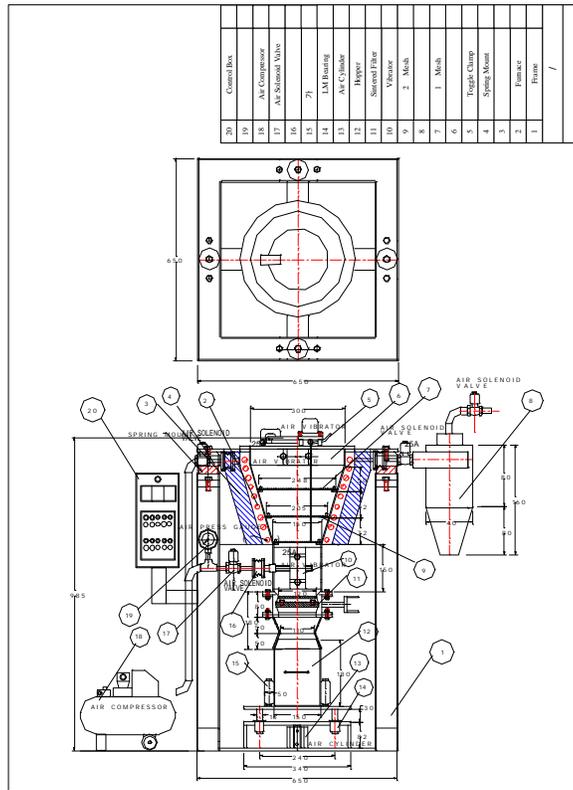


그림 13. 장치의 설계도.

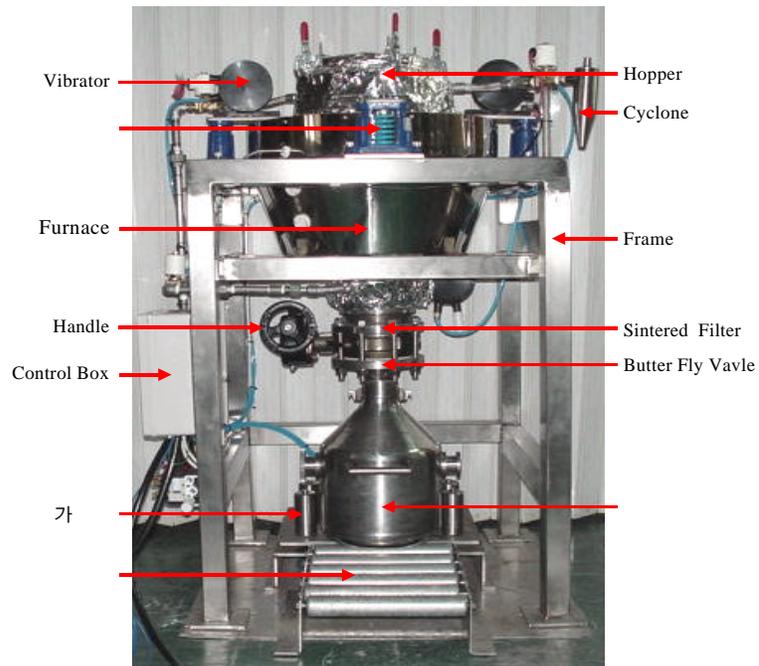


그림 14. 장치의 제작품.

10. 결론

사용후핵연료의 탈피복은 운전 방식에 따라 습식법과 건식법으로 분류되며, 건식법을 좀더 세분화하면 화학적 방법과 기계적 방법으로 분류한다. 화학적 탈피복은 화학 반응물과 연료 물질 또는 피복관 재료와의 화학 반응을 기초로 탈피복을 하는 것이다. 기계적 탈피복은 절단된 250 mm의 사용후핵연료봉을 기계적인 도구를 사용하여 물리적 힘에 의해 피복관과 펠렛을 분리하며, 분리된 펠렛은 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치에 사용한다. 본 연구에서 채택한 것은 사용후핵연료 건식 탈피복 방법 중에서 산화 탈피복인 Voloxidation을 기반으로 하는 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메커니즘을 제작하였다. 이 장치를 제작하기 위하여 기존 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 기술의 차세대관리공정 적용성 분석, 일체형 탈피복/분말화 장치의 구조(수직/수평형)를 비교·분석, 사용후핵연료 수직형 건식 분말화/혼합 장치 성능 요건에 필요한 규격 및 용량 등을 도출하였다. 또한, 장치 부품의 내열특성 조사 및 구조에 따른 온도 분포의 특성을 분석, 열변형 분석 자료의 신뢰도를 평가, 열 해석 프로그램(I-DEAS)을 이용하여 대상 부품에 대한 열변형 및 항복 응력을 계산, 열변형 분석 결과의 신뢰도 검증 실험(KOLAS) 등을 완료하였다. 이러한 결과들을 이용하여 장치를 설계·제작하는데 적용하였다. 이 장치는 탈피복된 UO_2 펠렛을 가열기 속에 투입(처리 용량은 20 kgHM/batch)한 후, UO_2 펠렛을 공기 분위기에서 약 600 °C 이상으로 가열함으로써 UO_2 펠렛을 U_3O_8 의 분말로 산화시키고, 산화된 U_3O_8 분말을 용기에 수집한다. 반응기 내부에 다단계 다공관 메쉬를 장착하여 분말화 입도(20~100 μ m)를 단계적으로 감소시키고, UO_2 의 산화 반응에 요구되는 산소와 반응열을 연속적으로 공급하여 반응 시간을 줄일 수 있고, U_3O_8 의 분말을 회수함에 있어 장치에 묻어 있는 분말까지 회수할 수 있도록 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치 메커니즘을 제작을 제작하였다.

참고 문헌

1. Matcheret and M. Bourgeois, 1973, "Mechanical Decladding of Stainless-steel-clad Oxide Fuels", CEA-R-4469.
2. 양명승 외, 1986, "핵연료제조 및 품질관리 기술개발," KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처.
3. K. Fukudome, 1997, "Mechanical Decladding by Rolling Straightener", Technical Report, Kobe Steel Ltd., July.
4. 김성현 외, 2000, "사용후핵연료 수직/수평 회전기구 및 핵연료봉 절단장치 개발", KAERI/TR-1604/00, 한국원자력연구소.
5. Fuel Rod Consolidation Project Final Design Report Contract No. DE-ACO7-86ID 12651. DOE/ID/12651-2-Vol. 1 DE88 004219.
6. 박장진 외, 1999, "경·중수로 연계핵연료주기 기술개발," KAERI/RR-2009/99, 한국원자력연구소, 과학기술처.