

모의 사용후핵연료봉 절단 및 소결체 인출장치에 대한 시스템 자동화 연구

A System Automatic Study for the Spent Fuel Rod Cutting and Simulated Fuel Pellet Extraction Device

정재후, 윤지섭, 홍동희, 김영환, 박기용

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료봉 절단공정은 사용후핵연료 건식 재활용 공정중 소결체 인출 공정의 전 단계로서 소결체 인출에 적당한 길이로 연료봉을 절단하여야 한다. 절단 방식의 선정을 위하여 원자력 선진국에서 수행하고 있는 절단 방식을 비교·분석하여 주요 메카니즘을 제작하고, 이에 대한 기초 실험을 수행하였다. 이를 토대로 tube cutter에 의한 절단방식을 선정하였다. 연료봉 절단 장치 개발을 위하여 먼저 지르칼로이 튜브, 펠렛의 재질 및 규격 등 절단하고자 하는 재료의 특성을 조사·분석하였다. 또한, 핫셀 내에서의 사용을 전제로 장치의 원격 조작 방식에 의해서 자동으로 작업이 수행될 수 있는 구조와 유지·보수를 고려하여 구동부를 모듈화하여 설계·제작하였다.

사용후핵연료 소결체 인출 장치를 개발하기 위하여 원자력 선진국에서 사용하고 있는 화학적 방법 및 기계식 방법을 비교·분석하였다. 연료의 회수율과 실제 적용 관점에서 볼 때 화학적 방법은 습식 공정으로 소결체의 회수율은 높으나, 방사성 폐액이 다량으로 발생하기 때문에 국내 실정에는 적합하지 않아서 기계식 소결체 인출방식을 선정하였다. 본 장치의 장점은 다양한 형태 및 크기가 다른 연료봉에도 적용이 가능하다. 사람이 직접 접근할 수 없는 핫셀 내에서 작업을 수행해야 하므로 원격조작 방식인 소결체 인출 장치의 주요 메카니즘을 제작하였다. 제작된 장치는 구조 및 구동부를 모듈화하여 유지·보수가 용이하도록 하였다. 모의 사용후핵연료를 이용하여 제작된 장치의 성능 시험을 수행하고, 이를 고려한 실증용 소결체 인출 장치를 설계·제작하였다. 따라서, 사용후핵연료 건식 재활용 공정에 대해 제작된 절단 및 소결체 인출 장치의 연계 시스템에 대한 실증 실험 데이터를 바탕으로 향후 국내 경수로형 사용후핵연료의 재활용 공정의 확립이 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

A fuel pellet extraction device of the spent fuel rods is described. The device consists of a cutting device of the spent fuel rods and the decladding device of the fuel pellets. The cutting device is to cut a spent fuel rod to an optimal size for the fast decladding operation. To design the device, the fuel rod properties are investigated including the dimension and material of fuel rod tubes and pellets. Also, various methods of existing cutting method are investigated. The design concepts accommodate remote operability for the Hot-Cell(radioactive) area operation. Also,

the modularization of the device structure is considered for the easy maintenance.

The decladding device is to extract the fuel pellet from the rod cut. To design this device, the existing method is investigated including the chemical and mechanical decladding methods. From the view point of fuel recovery and feasibility of implementation, it is concluded that the chemical decladding method is not appropriate due to the mass production of radioactive liquid wastes, in spite of its high fuel recovery characteristics. Hence, in this paper, the mechanical decladding method is adopted and the device is designed so as to be applicable to various lengths of rod-cuts. As like the cutting device, the concepts of remote operability and maintainability is considered. Both devices are fabricated and the performance is investigated through a series of experiments. From the experimental result, the optimal operational condition of the devices is established.

1. 서 론

사용후핵연료봉 절단 공정은 소결체 인출 공정의 전 단계로서 소결체 인출에 적당한 길이로 절단하여야 한다. 국내·외의 연료봉 절단 방식을 살펴보면 크게 줄뚫/연마식, 레이저, Wire EDM (wire electron discharge machining cutting) 및 전단절단 방식 등이 있다. 이상의 4가지 방식을 연료봉 절단부의 압착 정도, 절단 공정의 효율성 및 신속성 등을 조사 분석한 결과 tube cutter 방식이 가장 적합한 것으로 분석되었다. tube cutter 방식은 절단시 불꽃 및 분진이 발생하지 않고, 절단된 연료봉 면의 원형이 거의 유지되었으며, 이는 기초 실험을 통하여 입증되었다. 본 연구에서는 절단면의 원형도가 높고, 폐기물 발생량이 적은 tube cutter 방식을 선정하여 절단 공구의 내구성 및 절단면의 원형도를 만족시키도록 하였다.

사용후핵연료 탈피복 방법은 화학적 방법 및 기계식 방법이 있다. 두 방법 중 사용후핵연료의 회수율 및 실제 적용의 관점에서 볼 때 화학적 방법은 습식 공정으로 소결체 회수율은 높으나, 방사성 폐액이 다량으로 발생한다. 따라서, 이를 고려한 건식 방법인 기계식 소결체 인출 방식을 선정하여 형태 및 크기가 다른 연료봉의 경우에도 간단한 장치의 조작으로 사용이 가능하도록 하였다. 연료봉 절단 및 소결체 인출장치는 핫셀 내의 사용에 대비하여 원격 조작 방식으로 작업이 수행될 수 있는 구조와 구동의 특성에 따라 구동부를 모듈화 하여 상부에 배치함으로써 원격조작에 의한 유지·보수가 용이하도록 하였다.

2. 사용후핵연료봉 절단 장치

2.1. 사용후핵연료봉 절단 장치 개요

사용후핵연료봉 절단은 소결체 인출 공정의 전 단계로서 소결체 인출에 적당한 길이로 연료봉을 절단하여야 한다. 절단 장치는 핫셀 내에서 사용을 전제로 자동화하거나, 또는 원격 조작 방식으로 쉽게 작업이 이루어질 수 있는 구조와 연료봉 절단부의 압착 정도, 절단 공정의 효율성, 신속성 등을 감안하였다. 특히, 소결체 인출시 절단면의 원형 유지도가 매우 중요하기 때문에 이를 고려하였다.

2.2. 사용후핵연료봉 절단 장치 설계

사용후핵연료봉 절단 장치의 설계도는 그림 1에 나타내었으며, 장치의 크기는 길이 2935 mm, 높이 1163 mm, 폭 420 mm 이다. 주요 구성으로는 연료봉 이송부, 연료봉 파지부, tube cutter 절단부 및 절단 연료봉의 수집통 등으로 되어있다. 주요 설계 착안점으로 각 구성부는 고장시 장치의 유지·보수 등을 고려하여 모듈식으로 설계하였다. 표 1~6은 절단 장치의 주요 설계 사양을 나타낸 것이다.

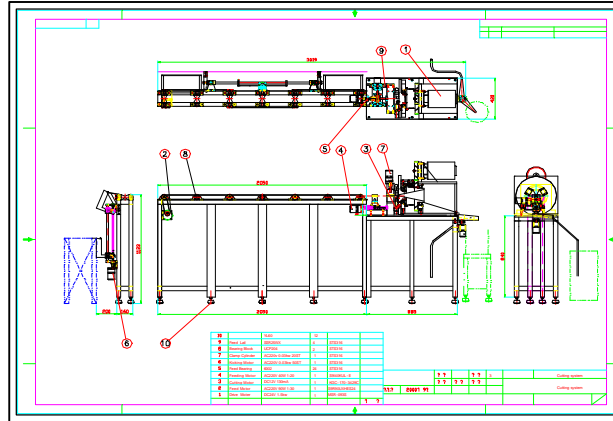


그림 1. 연료봉 절단 장치의 설계도

표 1. 연료봉 kicking 장치부

품 명	규 격	사 양
motor/감속기	SRDS2-15G/8GD 18 MH	220V-HP 15W/감속비 1:15 1200 RPM
ball nut	BNT1404-3	Ø 14 리드 4
ball screw	BNT1404-3-625L-J11	Ø 14 리드 4, 길이 625 mm
ball bush	LM16UU	Ø 16
shaft	LM16K	Ø 16
bearing block	BF10	Ø 10
coupling(motor, ball screw)	SOH25C-10-8	Ø 8 - Ø 10

표 2. 연료봉 feeding 장치부

품 명	규 격	사 양
motor/감속기	S7115/KS	220V-HP 15W/감속비 1:15 1200 RPM
chain	# 25	# 25
chain sprocket	# 25 x 23TH B type	외경 50, 내경 16 mm, 잇수 16개
bearing	UCP 204	내경 20 mm

표 3. 연료봉 clamping 장치부

품 명	규 격	사 양
motor/감속기	S815/GB	220V-HP 25W/감속비 1:15
ball bush	LMF16	내경 16 mm

표 4. 연료봉 분류 장치부

품 명	규 격	사 양
motor/감속기	S7115/GB	220V-HP 15W/감속비 1:15

표 5. 연료봉 cut feeding 장치부

품 명	규 격	사 양
motor/감속기	GRHT7915-32/G7H 기어 헤드	서보모터 HP 100W/감속비 1:30
coupling(motor, Ball Screw)	SOH25C-10-8	
bearing	#6901	내경 12, 외경 24, 폭 6 mm
ball nut	MDK1402-3	외경 14, 리드 2 mm
ball screw	MDK1402-214L	외경 14, 리드 2, 길이 214 mm
LM rell	SR20L-163	외경 20, 길이 163mm
LM block	SR20	
clamp motor	S6R05DB	220V-15W 감속비 1:5
shaft	LM 6106L	외경 6, 길이 106 mm
ball bush	LM6UU	내경 6 mm

표 6. 연료봉 drive system 장치부

품 명	규 격	사 양
drive motor	MSR-093M	24V-HP1.5KW 1750RPM(가변)
bearing	#6022ZZ	내경 110, 외경 170, 폭 28mm
bearing	#6028ZZ	내경 140, 외경 210, 폭 33mm
슬립링	9P	220V 편수 9핀
cutting motor	S6106GB	220V-HP6W 속도조절 1750 RPM(가변)

2.3. 사용후핵연료봉 절단 공정 시물레이션

사용후핵연료봉 절단 공정 시물레이션은 그림 2에서 보는 바와 같이 (A)는 kicking 장치에 의한 연료봉 이송, (B)는 절단부로 연료봉 이송, (C)는 연료봉 절단, (D)는 절단된 연료봉 배출 등에 대한 공정을 3-D 그래픽으로 모델링 한 장치를 이용하여 가상 작업 환경에서 시물레이션한 것을 나타낸 것이다.

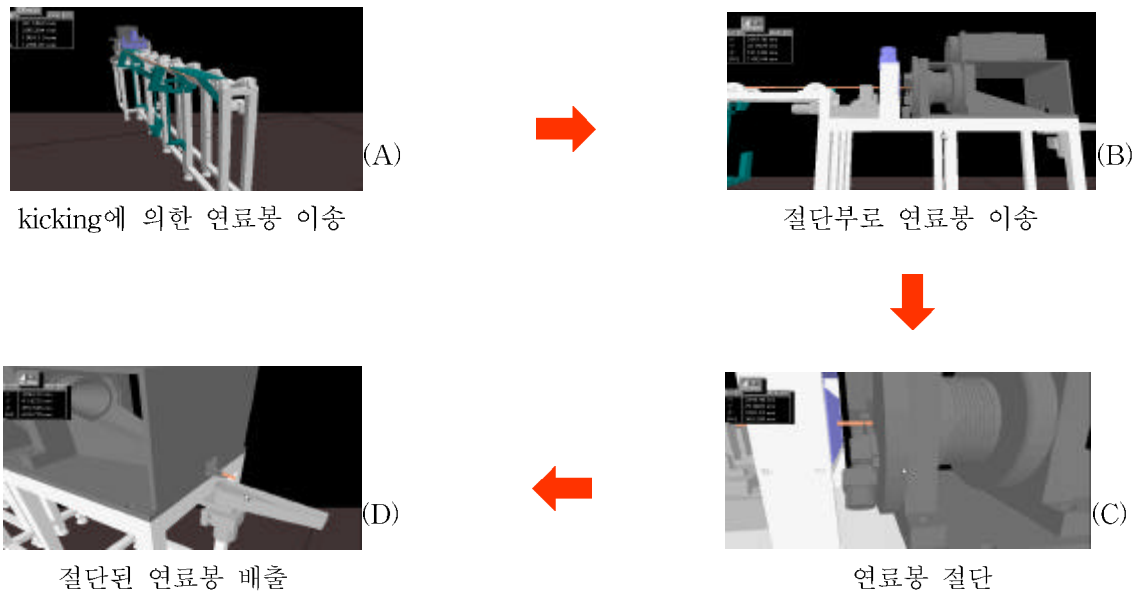


그림 2. 사용후핵연료봉 절단 공정 시물레이션

2.4. 연료봉 절단장치의 device/part 모듈 및 기능

사용후핵연료봉 절단 장치의 kick, roller, feeder, cutter, distributor 등에 대한 device/part 모듈 및 기능은 표 7에서 보는 바와 같다.

표 7. 절단 장치의 device/part 모듈 및 기능

device	part	기능
kick	연료봉 이송대, screw, motor, 지지대	연료봉 인출 장치에서 인출된 연료봉을 절단 장치로 이송
roller	roller, table, motor	이송된 연료봉을 로울러의 구동에 의해 절단부 방향으로 이송
feeder	clamp-1, clamp-2, motor, screw, support	연료봉을 절단 길이만큼 커터부 위로 삽입
cutter	cutter, slipring, gear, bearing, motor, support 등	절단부의 회전과 cutter의 상하 진입에 의하여 연료봉 절단
distributor	분배장치, motor, 수집통, 연결장치 지지구조	절단된 연료봉의 소결체 부분은 소결체 인출 장치로 이송하고, 기타는 수집통에 수집

2.5. 사용후핵연료봉 절단 장치 제작

사용후핵연료봉 절단 장치의 제작품은 그림 3에서 보는 바와 같이 연료봉 이송부, 연료봉 파지부, tube cutter 절단부 및 절단 연료봉의 수집통 등으로 구성된다.

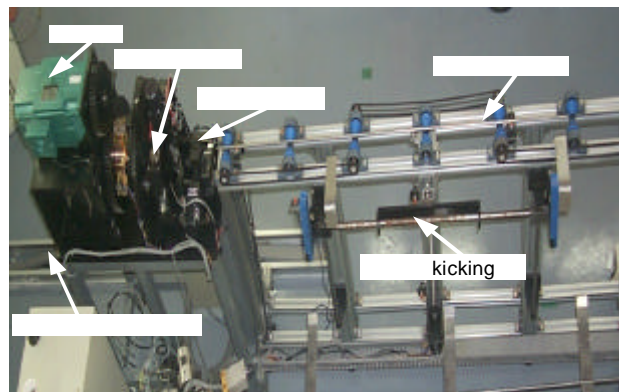


그림 3. 연료봉 절단 장치의 제작품

2.6. 사용후핵연료봉 cutter blade 제작

사용후핵연료봉을 절단하기 위해서 blade의 모양, 크기, 각도 등을 고려하여 효율적인 절단과 내구성이 좋은 blade를 제작하기 위하여 A(날 각도 20.3°), B(날 각도 28.6°), C(날 각도 53.1°) type 등 3종류를 설계 및 제작하였다. 그림 4는 cutter blade의 제작품 A, B, C type 등을 나타낸 것이다.

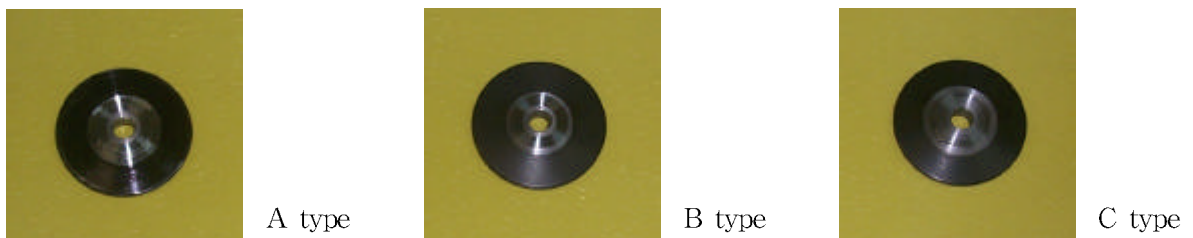


그림 4. cutter blade A, B, C type의 제작품

2.7. 사용후핵연료봉 절단장치 성능실험 방법

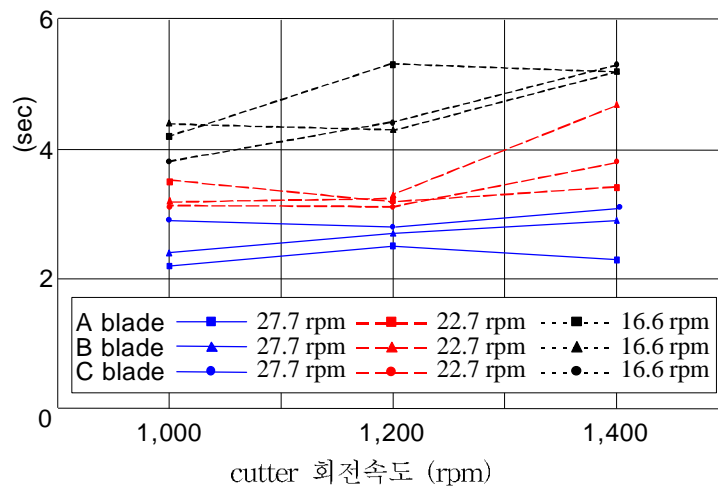
제작된 사용후핵연료봉 절단 장치의 최적 운전 조건을 찾기 위하여, cutter blade의 회전속도, 이송 속도 및 종류(blade의 날 각도) 등을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 즉, 3종의 cutter blade 중 A의 날 각도는 20.3°, B의 날 각도는 28.6°, C의 날 각도는 53.1°를 사용하였다. cutter blade의 회전 속도를 1000, 1200, 1400 rpm으로 변화시키고, 이송 속도를 27.7, 22.7, 16.6 rpm으로 가변시키며 실험을 수행하였다.

2.8. 사용후핵연료봉 절단 장치의 성능 실험 결과

사용후핵연료봉 절단 장치의 성능 실험 결과, 표 8은 blade 별 이송 속도에 따른 절단 시간(초), 그림 5는 cutter blade 별 이송 속도(27.7, 22.7, 16.6 rpm)에 따른 절단 시간(초)을 나타낸 것이다. 성능 실험 결과 값은 각 조건별 10회의 반복 실험의 평균값이며, cutter blade의 회전 속도가 저속일 경우와 이송 속도량이 클수록 절단 시간이 짧다. 또한 cutter blade의 회전 속도와 이송 속도가 동일할 경우 C(날 각도 53.1°)형의 cutter blade를 사용하는 경우가 절단 시간이 가장 짧은 것으로 판명되었다. 따라서 최적의 운전 조건은 cutter blade의 회전 속도를 1000 rpm, cutter blade는 C형, cutter blade의 이송 속도는 27.7 rpm으로 판명되었다.

표 8. blade 별 이송 속도(rpm)에 따른 절단 시간(초) (case 별 10회 시험결과 평균값)

blade/이송속도		rpm 수	1000	1200	1400
A (날 각도 20.3°)	27.7		2.2	2.5	2.3
	22.7		3.5	3.2	3.4
	16.6		4.2	5.3	5.2
B (날 각도 28.6°)	27.7		2.4	2.7	2.9
	22.7		3.2	3.3	4.7
	16.6		4.4	4.3	5.2
C (날 각도 53.1°)	27.7		2.9	2.8	3.1
	22.7		3.1	3.1	3.8
	16.6		3.8	4.4	5.3



(A : 20.3°, B : 28.6°, C : 53.1°)

그림 5. blade 별 이송 속도에 따른 절단 시간

3. 사용후핵연료 소결체 인출 장치

3.1. 사용후핵연료 소결체 인출장치 개요

사용후핵연료의 경제성을 제고하기 위한 재활용 공정으로 소결체 인출 방법에는 화학적 방법 및 기계식 방법이 있다. 두 방법 중 핵연료의 회수율과 실제 적용성의 관점에서 볼 때 화학적 방법은 습식 공정으로 회수율은 높으나, 방사성 폐액이 다량으로 발생하기 때문에 이는 국내 실정에는 적합하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기계식 소결체 인출 방식이 요구된다. 이 장치는 핫셀 내의 사용을 전제로 원격 조작 방식에 의해 자동으로 작업을 수행할 수 있도록 하였다. 또한, 구조 및 구동부를 모듈화 하여 유지·보수가 용이하도록 하였다.

3.2. 사용후핵연료 소결체 인출 장치의 설계

사용후핵연료 소결체 인출 장치의 설계도는 그림 6에 나타내었으며, 장치의 크기는 길이 738 mm, 폭 554 mm, 높이 1050 mm 이다. 소결체 인출 장치는 몸체, 인출핀 구동모터, 인출핀, 힘 측정 센서(로드셀), jig 회전장치, 소결체 고정 jig, 소결체 회수부, 피복관 회수부 및 연료봉 투입 장치 등으로 구성되어있다. 주요 설계 착안점으로는 소결체 회수율, 장치 성능, 유지·보수(장치 모듈화에 의한 원격 분해·조립 가능 여부)을 고려하였다. 장치의 주요 부품에 대한 설계 사양은 표 9~11에서 보는 바와 같다.

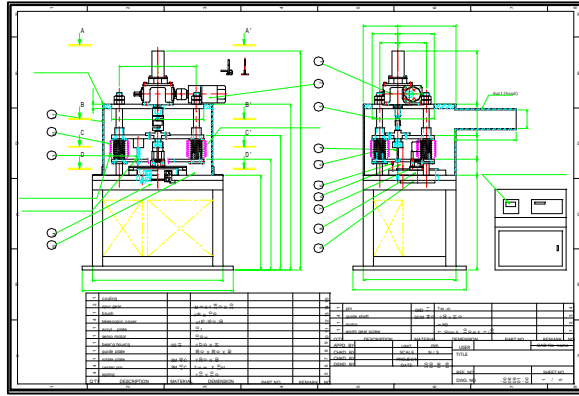


그림 6. 소결체 인출 장치의 설계도

표 9. 모터 부착 jack의 성능

형번	모터			감속비(H)		감속비(L)	
	용량(kw)	주파수(Hz)	회전수(rpm)	승강속도 (m/m/min)	허용가중(kg)	승강속도 (m/m/min)	허용하중(kg)
56	0.75	60	1,800	1878	920	626	1950

표 10. AC 서버 모터 정격 및 사양

형식(모터)	사양(드라이버)	Flange Size	정격출력(W)	정격토크	
				(N·m)	(kgf·cm)
CN02	5002	60	200	0.64	6.5
순시최대토크		정격회전속도 (rpm)	최대회전속도 (rpm)	회전자관성(=GD ² /4)	
(N/m)	(kgf/cm)			(kg·cm·s ²)	(kg·m ² ×10 ⁻⁴)
1.92	19.5	3,000	5,000	0.095	0.093

정격과워레이트(kW/s)	엔코드 형식		중량(kg)
	표준	옵션	
43.6	Incremental 2,000	Absolute11/13bit 2,048(p/rev)	1.14

표 11. AC 서버 모터 드라이버 정격 및 사양

항목 형명	입력 전원		적용 모터		
	정원전압(주1)	전원용량(kVAa)	전압형태	연속출력전류(A)	최대출력전류(A)
FDA-5002C	3상 AC 200~230(V)+10/-15%, 50/60(Hz)	0.8	3상 정현파 구동형 AC 서버모터	2.1	6.3

3.3. 사용후핵연료 소결체 인출 공정 시물레이션

사용후핵연료 소결체 공정 시물레이션은 그림 7에서 보는 바와 같이 소결체 인출 장치의 인출 공정을 3-D 그래픽으로 모델링한 장치를 이용하여 가상작업 환경에서 시물레이션한 것을 나타낸 것이다. 그림 11의 (A)는 절단된 연료봉 배출, (B)는 소결체 인출 장치로 이송, (C)는 소결체 인출 rotary 회전, (D)는 인출핀 하강, (E)는 소결체 인출, (F)는 hull 배출 등에 대한 공정 시물레이션을 나타낸 것이다.

소결체 인출 장치의 3차원 그래픽 모델은 기능별로 프레임, 지그 회전부 및 인출부로 구성된다. 프레임은 부품을 장착하기 위한 기본 프레임, 인출된 소결체를 수집하는 회수통, 소결체 인출 후 피복관을 수집하는 회수통 등의 모듈로 구성된다. 지그 회전부는 절단된 모의 사용후핵연료봉을 장착하기 위한 고정 지그 회전판, 베어링 및 구동 모터 등의 모듈로 구성된다. 또한 인출부는 소결체를 인출하는 인출핀, 워기어 및 모터 등의 모듈과 인출 핀의 동작을 가이드 하는 가이드 샤프트, 플레이트 및 스프링 등의 모듈로 구성되어 있다.

3차원으로 그래픽 모델링된 부품들을 기능별로 조합한 부분 assembly에 구동 특성에 따라 kinematics, DOF(degree of freedom) 등의 값을 부여하여 장치를 설정하고 구동을 검증하였다. 3차원 그래픽 모델 및 kinematics 설정 값에 의한 구동 장치는 표 12에 나타낸 바와 같다.

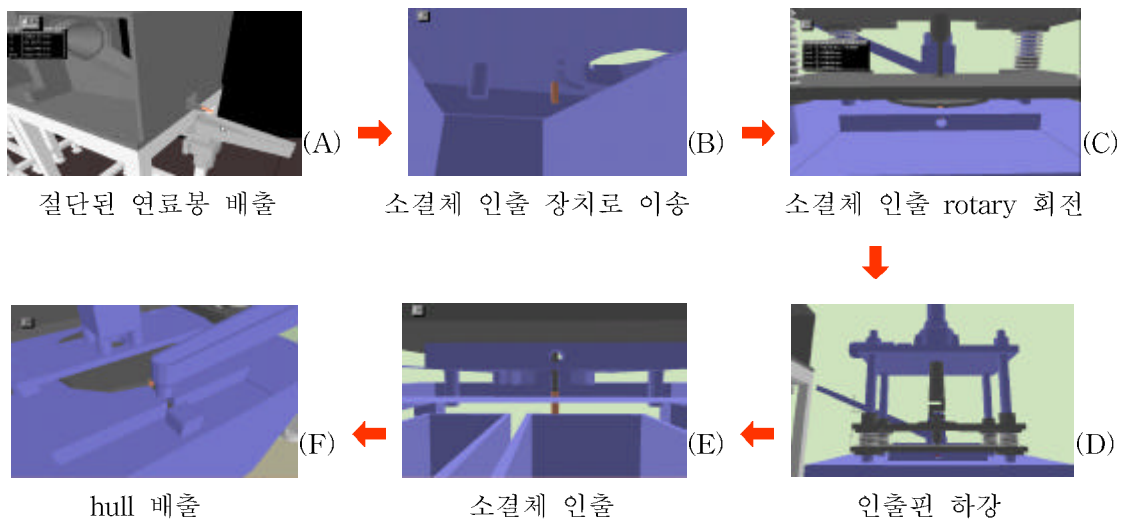
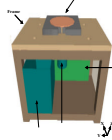
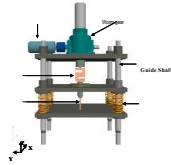


그림 7. 사용후핵연료 소결체 인출 공정 시물레이션

표 12. 장치별 모듈 구성 및 kinematics 값

장치명	내용	모듈 구성	kinematics 설정 값
frame/rotary	- frame - 소결체 및 피복관 회수통 - 지그 회전판 - rotary bearing - 구동 모터, shaft		- shaft · set home · rotate Z : 1 - 지그 회전판 · set home · rotate Z : DOF(1)
3 차원 그래픽 모델링			
인 출	- 인출 핀 - 로드 셀 - plates - guide shaft, spring - worm gear, 구동 모터		- motor · set home · rotate Y : 2 - 인출핀 · set home · translate Z : DOF(2)
3 차원 그래픽 모델링			

2.4. 사용후핵연료 소결체 인출 장치 제작

사용후핵연료 소결체 인출 장치의 제작품은 그림 8에서 보는 바와 같다. 소결체 인출 장치는 압출핀 구동모터, 로드셀, 소결체 고정 jig 회전판, 분진 포집 장치, 브러싱 메커니즘, 카운터 메터기, 스프링 보호막, 서보 모터, 사용후연료봉 투입 감지 센서, 피복관 회수부, 회전 판 영점 센서 등으로 구성되어 있다. 주요 부품들의 재료는 STS 316, SS41, SCM-41 중 강재 및 SCM-21 중의 기계 구조강을 사용하였다.

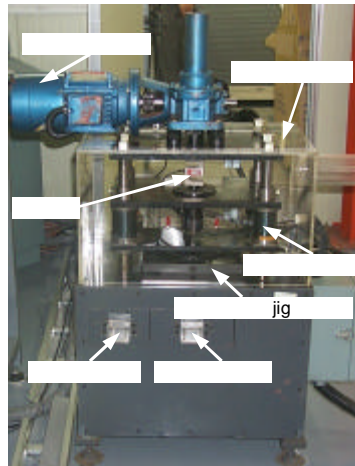


그림 8. 사용후핵연료 소결체 인출 장치의 제작품

2.5. 사용후핵연료 소결체 인출 장치의 성능 실험 방법

제작된 사용후핵연료 기계식 소결체 인출 장치의 회수율, 힘, 시간 등을 측정하기 위하여 소결체 인출 장치의 성능 실험을 수행하였다. 성능 실험에서는 길이 30 mm의 연료봉을 사용하였으며, 1회 실험

힘 당 10 개의 연료봉을 사용하여 연료봉 속의 소결체를 인출하여 의 평균값을 취하였다.

2.6. 사용후핵연료 소결체 인출 장치의 성능 실험 결과

사용후핵연료 기계식 소결체 인출 장치의 성능 실험 결과는 그림 9~10 및 표 13에서 보는 바와 같이 소결체 회수율은 98.97 % 이며, 소결체 인출 최대 힘은 96.3 kgf로 나타났다

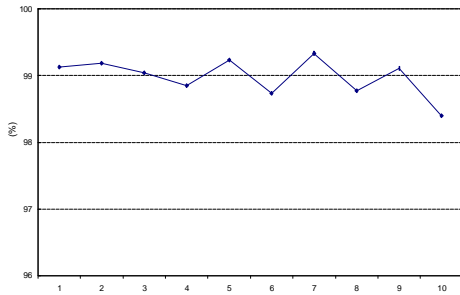


그림 9. 모의 소결체 회수 율 (%)

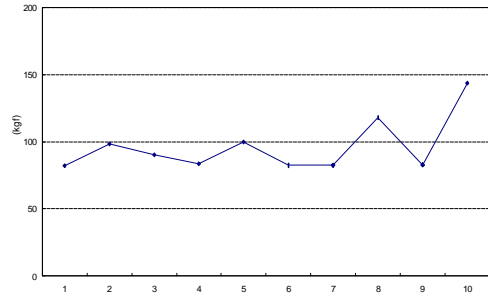


그림 10. 소결체 인출 최대 힘 (kgf)

표 13. 회수율(%), 시간(초), 힘(kgf)

실험 횟수	구분		실험전 무게(g)	실험후 무게(g)	힘 (kgf)	시간(초)	회수율(%)
	내용						
1	tube 무게		5.694	5.705	82.1	6	99.1
	tube+소결체		6.952	6.952			
	소결체 무게		1.258	1.247			
2	tube 무게		5.5	5.512	98.5	6	99.2
	tube+소결체		6.981	6.981			
	소결체 무게		1.481	1.469			
3	tube 무게		5.702	5.712	90.1	6	99.0
	tube+소결체		6.744	6.744			
	소결체 무게		1.042	1.032			
4	tube 무게		5.419	5.431	83.5	6	98.8
	tube+소결체		6.462	6.462			
	소결체 무게		1.043	1.031			
5	tube 무게		5.494	5.502	100	6	99.2
	tube+소결체		6.535	6.535			
	소결체 무게		1.041	1.033			
6	tube 무게		5.497	5.509	82.4	6	98.7
	tube+소결체		6.446	6.447			
	소결체 무게		0.949	0.937			
7	tube 무게		5.492	5.499	82.4	6	99.3
	tube+소결체		6.545	6.545			
	소결체 무게		1.053	1.046			
8	tube 무게		5.41	5.429	118	6	98.8
	tube+소결체		6.962	6.962			
	소결체 무게		1.552	1.533			
9	tube 무게		5.399	5.41	82.8	6	99.1
	tube+소결체		6.636	6.636			
	소결체 무게		1.237	1.226			
10	tube 무게		5.702	5.543	143.6	6	98.4
	tube+소결체		7.074	7.074			
	소결체 무게		1.372	1.190			
평균값	tube 무게		5.531	5.543	96.3	6	98.97
	tube+소결체		6.7337	6.7337			
	소결체 무게		1.203	1.190			

4. 사용후핵연료봉 절단 및 소결체 인출 장치의 연계 공정

사용후핵연료봉 절단 장치와 소결체 인출 장치간의 시스템 자동화 공정을 그림 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 시스템 자동화 공정은 연료봉 인출 장치에서 인출된 4 m의 연료봉을 절단 장치로 이송하기 위하여 절단 장치의 측면에 설치된 kicking 장치에 의해서 연료봉을 이송하게 된다. 이송된 연료봉은 연료봉 절단부에서 소결체 인출에 알맞는 길이(30 mm)로 연료봉을 절단하고, 절단된 연료봉은 소결체 인출 장치 쪽으로 이송하게 된다. 이때, top end plug 및 bottom end plug는 별도의 용기에 담겨지게 된다. 소결체 인출 장치로 이송된 연료봉은 소결체 인출 rotary 회전판에 부착된 센서에 의해 진입되었는지를 확인한 후, 소결체 인출 rotary plate가 회전하면 연료봉은 소결체 인출 홈 위치에 놓이게 된다. 이때, 인출핀이 하강하면서 사용후핵연료봉으로부터 소결체와 hull이 자동으로 배출되면서 분리된다. 따라서, 이러한 시스템 자동화 공정은 control room에서 PC에 의해 제어가 된다.

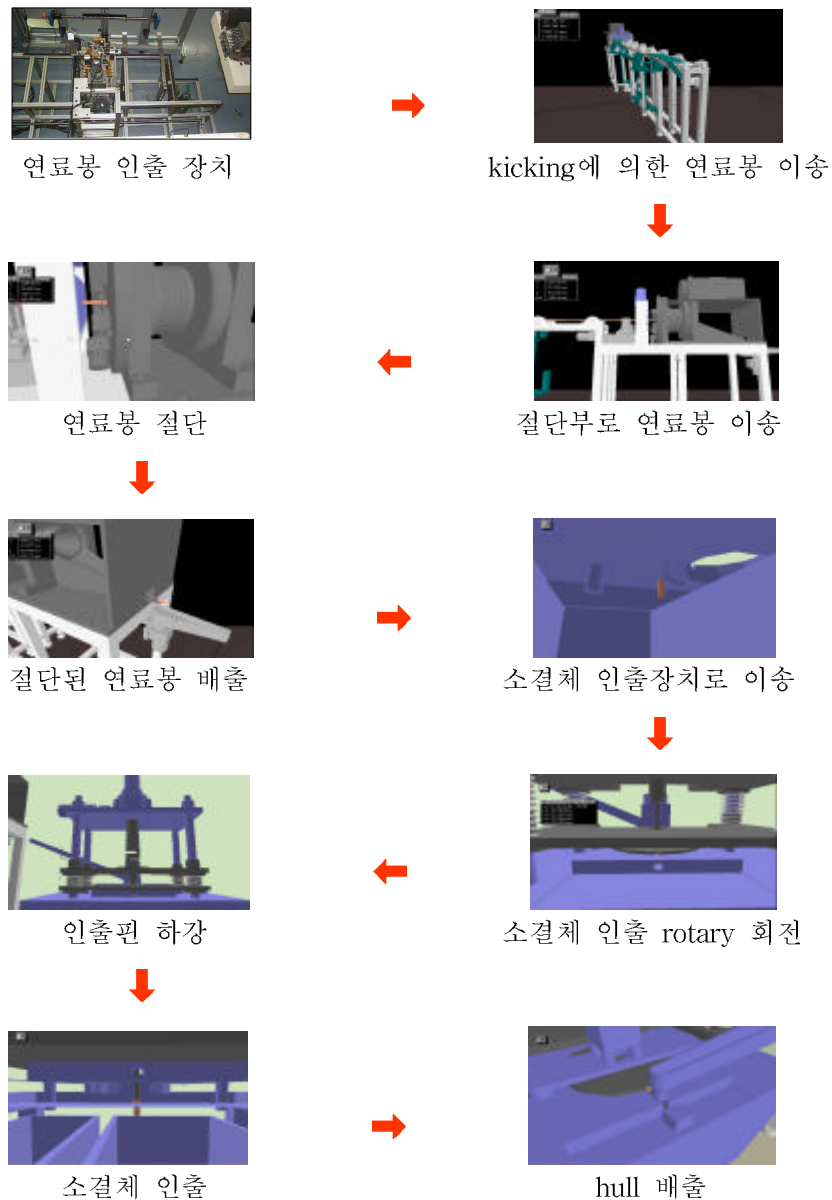


Fig 11. 절단 및 소결체 인출 장치의 공정도

5. 결 론

본 연구에서는 첫 번째, 연료봉 절단에 있어서 tube cutter 방식을 채택하여 제작된 장치의 성능 실험을 수행한 결과, 연료봉 절단시 불꽃 및 분진이 발생하지 않고, 절단면의 원형도가 좋은 것으로 분석되었다. 장치의 최적 운전 조건으로는 C type의 blade에 대해 절단 회전 모터의 회전수(1000 rpm)가 저속이고, 이송 속도(27.7 rpm)가 클수록 절단 시간이 짧은 것으로 판명되었다. 두 번째, 소결체 인출 장치는 연료봉 절단 공정과의 연계성을 고려하여 자동 조작 방식으로 구동되는 장치를 설계·제작하였다. 장치의 성능 실험을 수행한 결과, 소결체 인출 최대 힘은 96.3 kgf 이고, 소결체 회수율은 98.87 %로 개발된 선진국의 기술과 동등함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 연료봉 절단 장치와 소결체 인출 장치에 대한 두 장치간의 시스템 자동화를 도입하여 실험을 수행한 결과, 연료봉 절단 장치의 경우, 절단 시간이 단축되었다. 소결체 인출 장치의 경우, 인출시 소요되는 힘과 소결체 회수율은 시스템 자동화를 도입하기 전보다 향상되었음을 알 수 있었다. 따라서, 연료봉 절단 및 소결체 인출 장치의 시스템 자동화에 대한 실증 실험 데이터를 바탕으로 향후 국내 경수로형 사용후핵연료의 재활용 공정의 확립이 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] A.A. Abdel-Rassoul, H.R. Higgy, and F.H. Hammad, "Decladding of Nuclear Fuel by Rolling-Straightener Technique", J. Nucl. Energy, 23, 551 (1969).
- [2] F.H. Hammad, H.R. Higgy, and A.A. Abdel-Rassoul, "Mechanical Decladding of Nuclear Fuel Elements", J. Brit. Nucl. Soc., 21 (1971).
- [3] Matcheret and M. Bourgeois, "Mechanical Decladding of Stainless- steel-clad Oxide Fuels", CEA-R-4469 (1973).
- [4] 양명승 외, "핵연료제조 및 품질관리 기술개발," KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1986.
- [5] W. D. Bond and J. C. Mailen and G. E. Michaels, "Evaluation of Methods for Decladding LWR Fuel for a Pyroprocessing Based Reprocessing Plant", October, 1992.
- [6] Westinghouse Proprietary Class 2, Chapter 2 : Zircaloy-4, Rev. 6, Oct., 1993.
- [7] K. Fukudome, "Mechanical Decladding by Rolling Straightener", Technical Report, Kobe Steel Ltd., July (1997).
- [8] 이은표 외, "사용후핵연료봉 절단장치 제작", KAERI/TR-1084/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [9] 박장진 외, "경·중수로 연계핵연료주기 기술개발," KAERI/RR-2009/99, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1999.
- [10] 정재후 외 "비산화식 (기계식) 모의 소결체 인출장치 메커니즘 개발," KAERI/TR-1418/99, 한국원자력연구소, 1999.
- [11] "Fuel Rod Consolidation Project" Final Design Report Contract No. DE-ACO7-86ID 12651. DOE/ID/12651-2-Vol. 1 DE88 004219.
- [12] 김성현 외, "사용후핵연료 수직/수평 회전기구 및 연료봉 절단장치 개발", KAERI/TR-1604/00, 한국원자력연구소, 2000.
- [13] 정재후 외, "모의 사용후핵연료 기계식 소결체 인출 실험 분석", KAERI/TR-1676/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [14] 정재후 외, "Blade cutter 방식에 의한 사용후핵연료봉 절단 장치 개발", KAERI/TR-1662/2000, 한국원자력연구소, 2000.