

사용후핵연료 차세대관리공정 운반취급계통 분석

홍동희*, 윤지섭*, 정재후*, 김영환*, 박병석*, 박기용*, 진재현*,
(*한국원자력연구소)

Analysis of Transportation and Handling system for Advanced spent fuel management process

D.H. Hong*, J.S. Yoon*, J.H. Jung*, Y.H. Kim, B.S. Park*, K.Y. Park*, J.H. Jin*.

Abstract

The project for "Development of Advanced Spent Fuel Management Technology" has a plan of a demonstration for the Advanced Management Process in the hot cell of IMEF. The Advanced Management Process are being developed for efficient and safe management of spent fuels. For the demonstration, several devices which are used to safely transport and handle nuclear materials without scattering have been derived by analyzing the Advanced Management Process, object nuclear material and modules of process equipment and performing graphical simulation of transportation/handling by computers. For verification, powder transportation vessel and handling device have been designed and manufactured. And several tests such as transporting, grappling, rotating the vessel have been performed. Also, the design requirements of transportation/handling equipment have been analyzed based on test results and process studies. The developed design requirements in this research will be used as the design data for the Advanced Management Process.

Key Words : Spent Fuel(사용후핵연료), IMEF(조사재시험시설)

1. 서 론

본 연구에서는 사용후핵연료의 효율적이고 안전한 관리를 위한 차세대관리공정 실증시험을 조사재 시험시설(IMEF) 예비핫셀에서 수행 할 예정이다. IMEF 예비핫셀은 면적이 협소하여 공정에 필요한 장치들을 모두 설치 할 경우 핫셀의 구조가 대단히 복잡하여 공정운전에 필요한 물질을 이송하고 취급 할 경우와 운전시 장치의 고장에 의한 유지보수를 위하여 부품 및 공정장치의 모듈을 이송 할 경우에 각 공정장치 및 주변에 설치된 설치물과의 간섭으로 이송에 많은 어려움이 예상된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 사전에 그래픽 전산모사로 검토하고, 공정운전의 핵심물질인 사용후핵연료 분말을 핫셀에 비산 시키지 않고 안전하게 운반/취급하는 방안 및 운반/취급에 필요한 장치를 도출하였으며, 장치의 핫셀에 적용을 위하여 모의 운반/취급기구

를 설계/제작하여 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과를 토대로 실증시설에 설치 할 장치의 설계요건을 분석하고 도출하였다.

2. 공정 및 운반취급 물질

2.1 차세대관리 공정

차세대관리공정의 수행에 필요한 물질 이송 현황을 작업 특성별로 살펴보면 공정 운전은 위한 물질의 이송, 공정 운전 중 발생한 경미한 고장에 대한 공정장치의 유지보수를 위한 이송으로 분류 할 수 있으며, 정상적인 공정 운전을 위한 물질 이송 과정은 다음과 같다. 조사후시험시설에서 사용후핵연료 집합체에서 핵연료봉 인출하여 25 Cm 크기로 절단한 후에 연료봉을 Padirac 캐스크에 담아 조사재시험시설로 운반한다. Padirac 캐스크가 조사재시험시설 예비셀의 리

어도어에 접촉되면 캐스크 집속부와 연결된 핫셀의 내부 도어를 매니플레이트를 이용하여 개방하고, 절단 연료봉들이 포함된 캡슐 및 Rod-cut을 하역하여 핵물질 보장조치를 위한 계량을 완료한 후 탈피복을 위하여 Slitting장치로 이송한다. Slitting장치에서는 사용후핵연료를 탈피복((펠릿과 Clad로 분리)하며, 이때 분리되는 사용후핵연료 펠릿의 수집을 위하여 수집용기를 분말화 장치에 장착하고, 핵물질의 핫셀내의 비산 방지를 위하여 수집용기의 뚜껑을 닫은 후, 펠릿 수집용기를 장치로부터 분리하여 분말화장치로 이송한다. 이송한 사용후핵연료 펠릿을 분말화장치에 투입하기 위하여 분말화장치의 뚜껑을 개방한 후, 펠릿 수집용기의 뚜껑을 열어 분말화장치에 사용후핵연료 펠릿을 투입하고 뚜껑을 닫는다. 분말화장치에서는 사용후핵연료의 펠릿이 U_3O_8 으로 전환되며, U_3O_8 으로 전환된 사용후핵연료 산화분말은 분말용기에 수집하여 분말용기 취급장치로 금속전환장치로 이송한다. 이송한 분말용기는 마그네시아 필터에 충전을 위하여 분말용기의 밸브를 매니플레이트로 열어 분말을 주입한 후, 분말용기의 밸브를 닫는다. 마그네시아 필터에 분말의 주입이 완료되면 충전된 분말의 양을 측정하고, 충전장치와 분리한 후 금속전환장치에 투입한다. 금속전환장치에서 금속으로 전환된 마그네시아 필터속의 U-분말은 크레인 및 매니플레이터를 이용하여 금속용융장치로 이송한다. 금속용융장치에서 U-분말이 U-금속으로 완전히 전환되면 금속용융로의 뚜껑을 열어 마그네시아 필터속에 용융된 Ingot을 회수하여 냉각한 후에 마그네시아필터와 Ingot를 분리한다. 분리한 Ingot는 계량을 완료한 후에 핵물질관리 절차에 따라 관리한다.

2.2 운반/취급 대상물질

공정의 분석 결과 공정에 필요한 운반/취급 대상물질 및 대상물질을 취급하는 장비는 표 1과 같다. 표를 살펴보면 공정운전 전후의 대부분 운반물질은 M/S Manipulator 및 크레인을 이용하여 이송이 가능하나 M/S Manipulator의 취급 용량(9 Kg)을 초과하는 사용후핵연료 산화분말(U_3O_8)은 분말의 비산 방지를 위하여 별도의 분말용기와 취급기구를 제작하여 이송하여야 한다. 또한, 폐 용융염 및 Ingot는 크레인, M/S Manipulator 및 천정 이동형 조작기 등을 적절히 조합하여 이송하여야 한다. 크레인을 이용하여 분말용기를 이송할 경우 크레인 로프의 흔들림이 발생하기 때문에 흔들림을 방지할 수 있는 대책이 필요하다. 본 연구에서는 크레인의 흔들림을 방지하기 위하여 4층의 로프를 이용한 크레인 및 취급기구의 개념을 고안하였으며, 분말용기 이송 시에는 하단에 분말용기를 파지 할 수 있

는 기구를 부착하고, 기타의 운반물 이송 시에는 후크를 부착하여 크레인의 용도로 사용할 수 있도록 하였다.

표 1. 공정별 운반물질 및 취급장비

공정	운반/취급업무	취급용량	취급장비
Capsule 및 Rod cut 인출	Capsule Unloading	Capsule 1개	MSM, CR
	Capsule 계량	Capsule 1개	MSM, CR
	Capsule 이송 및 저장	Capsule 1개	MSM, CR
	Rod cut 인출 및 이송	Rod cut	MSM
	Empty Capsule 반출	Capsule 1개	MSM
탈피복(Slitting) 장치	Slitting 장치 수입	Rod cut	MSM
	Pellet 회수	5 kg	MSM
	Pellet 및 Hull 계량	5 kg	MSM
	S/T연료봉 Hull 이송	수집용기	MSM, CR
전석분말화/혼합장치	U_3O_8 분말 수집 및 계량	30 kg (용기포함)	용기취급기구, 크레인
	U_3O_8 분말용기 이송	30 kg (용기포함)	용기취급기구, 크레인
금속전환장치	U_3O_8 전환로 투입	30 kg (용기포함)	용기취급기구, 크레인
	Li, LiCl 전환로 투입	Li, LiCl Can	TM, CR
	필터분리	30 kg	TM, CR
	폐용융염 및 수집용기	수집용기	MSM, CR
금속용융로	U 분말 용융로 투입	20 kgHM	TM
	Ingot 계량 및 이송	20 kgHM	TM

※ MSM : Master slave

TM : Telescopic manipulator, CR : Crane

2.3 원격취급 장치 작업영역 분석

공정의 실증시험을 성공적으로 수행하기 위해서는 실증용 공정장치가 공정상의 고유 기능을 수행해야 함과 동시에, 주어진 실험환경인 예비핫셀에 적합한 규모로 설계되어야 하고, 공정운전에 필요한 물질의 이송이 원활한 최적 배치개념이 도입되어야 한다. 따라서, 실증용 공정장치의 규모, 부품의 구조 등에 대한 설계요건과 공정운전 및 유지보수를 고려한 최적배치 요건을 도출하기 위하여, 3차원 그래픽으로 사용후핵연료 차세대관리공정 실증시험용 예비핫셀 가상 작업환경을 구축하고, 주요 운반/취급장비인 기계식 마스터/슬레이브 매니플레이터와 인셀 크레인의 예비핫셀에서의 작업영역을 그림. 1과 같이 분석하였으며, 분석결과 마스

터/슬레이브 매니플레이터와 인셀 크레인으로 작업이 불가능한 사각지역은 별도의 방안을 고려하고 있다.

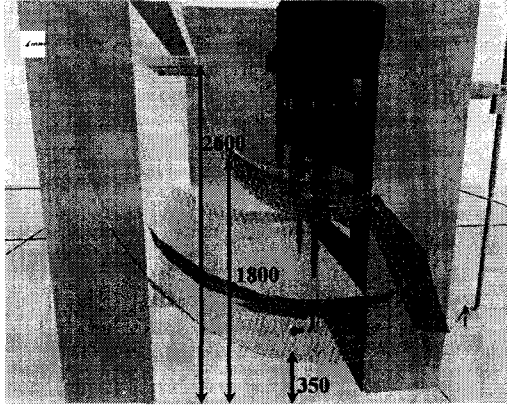


그림. 1 운반장치의 작업영역 분석.

3. 시험용 분말용기 및 취급기구 제작

3.1 시험용 분말용기 및 취급기구 설계/제작

공정 및 운반/취급 대상물질 분석 결과에 따라 사용후핵연료 산화분말(U_3O_8)의 공정장치간 이송 및 취급을 위한 상용제품의 활용을 검토하였으나 분말의 비산 방지방안 및 이송시의 크레인 로프의 흔들림에 의한 간섭이 예상되어 본 공정에 적합한 운반용기 및 취급기구를 설계하여 제작하였다. 분말용기는 공정규모인 20 kg/batch를 기준으로 용량을 10 ℓ(가밀도 4 g/cm³, 진밀도 8.3 g/cm³)로 하였으며, 용기의 형태는 분말용기를 180° 회전하여 분말을 주입하는 회전형 분말용기, 분말용기를 회전시키지 않고 분말을 주입하는 비 회전형 분말용기로 하였다. 구조는 분말용기와 취급기구를 기어로 연결하여 접속할 수 있도록 하였으며, 취급장치에 접속하여 이송을 완료한 후 분말용기의 분말을 다른 장치에 부을 때, 핫셀에 설치된 조작기(매니플레이터)로 취급기구의 회전기어 손잡이를 조작하여 분말용기 속의 사용후핵연료 산화분말을 다른 장치에 완전히 주입(잔여 분말 없이) 할 수 있도록 하였다. 또한 분말용기의 안전한 이송 및 취급을 위한 취급장치는 크레인의 드럼에 4줄의 로프를 늘어뜨려 취급기구를 매달아 분말용기를 접속하고 이송함으로써 이송시의 흔들림을 최소화 하도록 하였다. 제작한 분말용기 및 취급장치 도는 그림 2와 같으며, 본 연구에서는 이러한 장치를 활용하여 사용후핵연료 분말의 안전한 이송 및 비산 방지를 위하여 이송시험, 분말용기의 파지시험, 회전시험, 모의 금속전환장치에 분말주입시험 등을 수행하였으며, 시험결과는 다음과 같다.

3.2 분말운반/주입 실험 및 실험결과

분말의 운반 실험에 사용하기 위한 분말은 입자의 크기가 미세하고 U-분말과 성질이 유사한 유허분말로 선정하였으며, 차세대관리공정의 1 Batch 규모와 동일한 20 kg을 운반용기에 담아 용기의 이송시험, 용기의 회전시험, 분말주입 시험 등을 다음과 같은 절차로 수행하였다. 첫째, 이송장치의 핸들을 조작하여 바닥에 놓여 있는 분말운반 용기의 트리니언에 취급기구를 접속시킨다. 둘째, 분말용기의 이송시험을 위하여 이송장치의 핸들을 조작하여 분말 수납통 상부까지 분말 운반용기를 이송시킨다. 셋째, 분말용기의 회전시험을 위하여 회전형 분말 운반용기를 이송하고 조작기로 취급기구의 핸들을 돌려 분말용기를 180° 회전시킨 후 이송장치를 미세 조종하여 모의 분말 수납통과 접속시킨다. 비회전형 분말용기인 경우는 이송장치만을 미세 조종하여 접속시킨다. 넷째, 분말 주입 시험을 위하여 분말 수납통에 접속된 분말용기의 게이트 밸브를 조작기로 연다. 실험결과 이송장치의 핸들을 조작하였을 때 취급기구는 손쉽게 상하 이송이 가능하고 분말용기의 트리니언에 취급기구가 접속되었으며, 분말용기의 이송시험시 취급장치의 핸들을 조작하여 분말용기를 상,하 및 좌, 우 방향으로 이송하여도 분말 수납통은 로프의 흔들림 없이 이송이 가능하였다. 그러나 분말용기의 회전시험을 위한 회전형 분말 운반용기의 회전시 조작기로 취급기구의 핸들을 돌려 분말용기를 180° 회전시켰을 때 분말 수납통과의 접속은 잘 이루어 졌으나 회전형 분말용기의 회전 시에는 흔들림이 다소 발생하여 다른 한 조작기로 취급기구를 고정하여야 하였다. 또한, 분말용기 회전시 90° 이내에서 취급기구의 핸들을 잡고있지 않으면 용기 자체 무게에 의하여 분말용기가 역회전하는 경향이 있었으며, 90° 이상에서 취급기구의 핸들을 잡고 있지 않으면 회전방향으로 스스로 회전하였다. 따라서, 실증장치를 설계 할 때에는 취급기구와 분말 운반용기 기어는 적절한 감속비가 요구되었다. 분말주입 시험을 위한 분말용기의 게이트 밸브를 조작기로 조작할 때 분말 로프의 흔들림은 발생하지 않았으며, 분말용기와 분말 수납통은 깔때기 모양의 분말용기 배출구와 분말 수납통 주입구가 접속되므로 X, Y 좌표점이 정확히 일치하지 않더라도 접속이 원활히 이루어졌으며, 분말용기의 분말을 분말 수납통에 주입할 때 깔때기 모양의 배출구와 주입구가 서로 깊숙이 접속되므로 분말의 비산은 전혀 발생하지 않았다. 그러나, 분말운반용기의 유허시료를 분말 수납통에 주입시 회전형 분말용기 및 비회전형 분말용기의 삼각신형 구조의 게이트가 조밀하여 분말 주입에 많은 시간이 걸리는 단점이 발견

되었다. 이러한 단점은 실증장치 제작 시 개선 보완하여 할 사항이다.

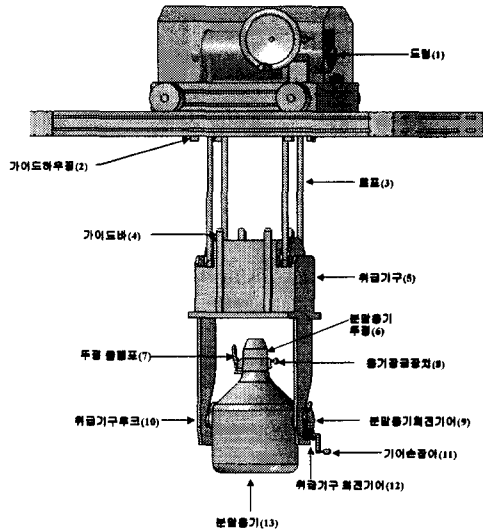


그림 2. 시험용 분말용기 및 취급기구.

3.3 운반취급계통 설계요건 분석

차세대관리공정 운전의 핵심물질인 사용후핵연료 분말을 핫셀에 비산 시키지 않고 안전하게 운반하고 취급하기 위하여 차세대관리 공정분석, 운반 취급 대상물질 분석, 유지보수 대상장치 등을 분석하였으며, 분석한 결과를 바탕으로 운반/취급장치를 도출하였다. 또한, 도출한 장치의 실증장치에 적용할 설계요건 도출을 위하여 운반 및 취급장치를 제작하여 실험을 수행하고 장치의 문제점을 분석하였다. 이러한 결과를 근거로 운반취급계통 설계요건을 다음과 같이 분석하였다.

- ① 크레인 및 분말용기운반/취급장치 등은 관련코드 및 기준에 따라 최소한의 요구조건으로 사용이 용이하도록 설계하고 모든 부품은 부수적인 추가제작이 없는 완성품으로 한다.
- ② 크레인의 용량은 1 톤, 거더의 길이 및 폭은 예비핫셀의 크기를 고려하여 각각 1,800 mm, 1,000 mm로 한다.
- ③ 핫셀 내부에 설치하는 크레인은 사용후핵연료 분말용기 이송을 위하여 분말용기 취급기구를 부착 할 수 있도록 하고, 운반물 이송 시는 후크를 부착한다.
- ④ 크레인은 방사선 영향을 고려하여 핫셀내 모터 등 전기적인 동력의 사용을 가능한 배제하고, 핫셀 밖에서 상하 및 좌우 이송 운전이 가능하도록 한다.
- ⑤ 크레인은 흔들림의 방지를 위하여 4개의 와이어

로프에 취급기구를 매달며, 분말 운반용기의 트러니언(Trunnion) 및 크레인 후크를 걸 수 있는 구조로 하고, 취급기구의 드럼 상부 4군데에는 가이드 바를 부착하여 분말용기 이송 시 로프를 드럼 상부로 끌어 올려 취급기구가 하우징 속에 안전하게 장착되도록 한다.

- ⑥ 크레인은 로프의 흔들림 억제를 최소화하기 위하여 Soft start 및 Stop 기능을 가져야 한다.
- ⑦ 분말운반용기 취급기구는 분말용기를 회전시키고자 하는 경우 분말용기의 자중에 의한 자유낙하가 일어나지 않아야 한다.
- ⑧ 크레인 및 분말용기 취급기구는 원격 유지보수가 가능하도록 유지보수 대상 부품이 모듈화하여야 한다

4. 결 론

본 연구에서는 고방사성 물질인 사용후핵연료 분말을 공간이 협소한 조사재시험시설 예비핫셀에서 안전하게 운반하고 취급하기 위하여 공정에 필요한 이송물질 및 취급장비를 분석하고 취급장비의 활용성을 그래픽으로 검증하였으며, 그 결과를 바탕으로 상용의 장비들로서는 운반 및 취급이 곤란한 운반용기 및 취급장치를 설계/제작하여 안전 이송시험, 분말용기 파지시험, 분말용기 회전시험, 분말주입시험을 수행하였다. 이러한 시험 결과 및 모의 장치의 설계자료를 참고하여 실증시설에 활용할 운반 및 취급계통 장비의 설계 요건을 분석하였다. 이러한 자료들은 차세대관리 실증시설의 설계자료 및 이와 유사한 핫셀의 운반취급장치의 설계자료로 유용하게 활용 될 것이다.

참고 문헌

1. 신영준, "사용후핵연료 차세대관리공정개발", KAERI/RR-2128/2000.
2. 윤지섭, "사용후핵연료 원격취급장치개발", KAERI/ RR-2115/2000.
3. S. Glasstone and A. sesonske, Nuclear Reactor Engineering, Van Nostrand, New York, 1997.
4. 김영환, "중합공정장치 모듈화 요건설정", KAERI/ TR-2060/2002, 2002.
5. 이호희, "원격유지보수 장비의 설계지침", KAERI/ TS-25/97, 1997.
6. American Robotics, "Pipe Rehabilitation Systems", [http://www.thomasregister.com/olc/american robotics/the bot. htm](http://www.thomasregister.com/olc/american%20robotics/the%20bot.htm).