

## 사용후핵연료 연료봉 인출장치개발 연구

박병석, 윤지섭, 김진웅, 노성기

한국원자력연구소

### 요 약

사용후핵연료 관리 및 후행핵연료주기 시설에서 요구되는 사용후핵연료 연료봉 인출기술을 확보하기 위하여 연료봉 인출장치를 제작하였으며, 모의 연료봉을 사용하여 이를 인출하는 실험을 수행하여 장치의 성능을 시험하였다. 인출장치는 컴퓨터로 제어할 수 있도록 함으로서 대부분의 인출공정을 자동으로 수행할 수 있도록 하였다. 실험 결과를 분석하여 장치의 개선점을 제시하였고, 또한 향후 실제 사용후핵연료 시설에 적용할 경우에 대비한 보완책도 제시하였다.

### 1. 서 론

사용후핵연료관리는 현재 발전소내 저장시설 용량의 한계, 중앙집중식 중간저장시설 건설용 부지 확보의 지연 등으로 인하여 장기적인 저장 방식으로서 건식 저장하는 방안이 검토되고 있다. 건식 저장 방법으로는 저장 공간을 효율적으로 활용하기 위해 사용후핵연료를 밀집·포장(Rod Consolidation)하는 방안이 있는데, 이에 대한 연구는 스웨덴, 독일, 미국 등을 중심으로 수 년전 부터 진행되었다. 특히 미국은 PCDP(Prototypical Spent Fuel Consolidation Equipment Project) 프로그램을 통해서 비방사성 시험(Cold Test) 까지 마친 상태이다. 밀집·포장기술은 핵연료 집합체의 상단 고정판 혹은 하단 고정판을 제거하고 연료봉을 인출하여 밀집 배열 형태로 정돈한 후 기존 핵연료 집합체와 같은 크기의 캐니스터에 장전하는 것으로서 부피를 약 1/2로 줄이는 기술이다[1,2]. 밀집·포장 기술은 핫셀에서 사용후핵연료를 해체하는 공정이 기본적으로 필요하게 되는데, 핫셀은 시야가 좁고 원거리인 관계로 작업을 수행하는데 어려움이 많다. 따라서, 본 연구에서는 사용후핵연료를 해체하는 장치 및 제어기

술을 확보하기 위하여 연료봉 인출장치를 제작하고, 1차적으로 이의 테스트 및 모의 연료봉 인출시험을 수행하였다.

## 2. 모의 연료봉 인출장치 구성[3]

### 2.1 기계적 구성

연료봉 인출장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 모의 연료 고정장치, 인출 Head, 충격흡수장치 및 측면이송(Side Transfer) 장치로 구성되어 있으며 세부적인 구성과 기능은 다음과 같다.

연료봉 인출 Head는 연료봉(KNFC 17×17 PWR 핵연료[4,5], 길이 1/2)과 하단 고정판을 체결한 조임 너트를 풀기 위한 임팩트렌치(Impact Wrench)와 연료봉을 파지하기 위한 콜렛(Collet)으로 구성된다. 하단 고정판은 안내관(Guide Tube)과 6각 너트로 체결되어 있어, 너트를 풀면 하단 고정판을 제거할 수 있다. 따라서, 너트를 풀어내기 위해 6각 소켓(길이 70mm)을 부착한 임팩트렌치를 제작하였다. 임팩트렌치 구동에 사용한 교류 전동기는 최대 토크가 0.15 N-m인데, 너트의 체결 토크가 약 4.0 N-m인 점을 고려하여 최대 출력토크가 4.5 N-m가 되도록 1/30의 감속기어를 사용하였다. 임팩트렌치의 직선 이송은 임팩트렌치 밑에 부착한 임팩트렌치 이송장치에 의해서 이루어지는데 1/9의 감속기어를 가진 교류 전동기를 사용하여 제작하였다. 콜렛은 연료봉의 끝 부분을 파지하는 역할을 하며 홈이 파인 연료봉의 끝부분을 잡을 수 있도록 원통을 두 조각으로 잘라 제작하였다(길이 130mm). 두조각의 끝부분은 스프링으로 결합되어 외관 속에 끼워진다. 초기 상태에서 두 조각은 외관의 밖으로 튀어나와 벌려져 있는 상태가 되며 연료봉을 파지하기 위하여 외관을 이송하면 두 조각이 닫히도록 설계하였다. 관 이송장치는 1/30의 감속기어를 가진 교류 전동기를 사용하여 제작하였다. 임팩트렌치와 콜렛장치의 뒷부분에는 코일스프링(Coil Spring)을 부착하여 임팩트렌치와 너트, 콜렛과 연료봉사이에서 발생하는 접촉력을 완화시키도록 하였다. 인출 Head는 Head 이송장치에 의하여 X(집합체 가로), Y(연료봉 길이), Z(집합체 세로) 방향으로 이송되도록 하였는데, 정밀한 위치제어를 위해서 LM Guide, Ball Screw 및 서보모터로 구성하였다.

충격흡수장치는 인출장치 테이블 속에 위치하며, 인출된 연료봉을 받아 준다. 즉, 연료봉의 인출 동작이 진행되는 동안에는 대기하고 있다가 인출 작업이 완료되기 직전에 연료봉의 높이까지 이동하여 떨어지는 연료봉을 받아줌으로서 충격을 완화시켜

주는 기능을 한다. 이때 충격흡수장치는 인출되는 연료봉의 높이까지 정확하게 위치 제어가 이루어져야 한다. 따라서, 충격흡수장치는 정밀성이 뛰어난 Ball Screw, LM Guide 및 AC 서보모터를 사용하여 구성하였다.

측면이송장치는 인출된 연료봉을 한곳으로 모으기 위해 사용된다. 하나의 연료봉이 집합체로부터 완전히 분리된 후 충격흡수장치가 내려가면 연료봉만 인출 테이블 위에 남아 있게 된다. 이 때 측면이송장치가 인출된 연료봉을 옆으로 밀어서 인출 테이블에 부착한 보조선반 속으로 떨어뜨린다. 장치의 구동에는 1/5의 감속기어를 갖는 교류 전동기를 사용하였다.

## 2.2 인출 제어장치 구성

인출장치는 여러개의 모터가 사용되고 각각의 모터 제어구조가 서로 다르기 때문에 이들을 제어하는 시스템을 각각의 특성에 맞게 따로 구성하면 제어시스템이 복잡해지고, 연료봉 인출작업의 성능을 크게 떨어뜨린다. 따라서, 486 컴퓨터를 사용하여 하나의 통합된 제어시스템을 구축하였다. 이를 위하여 4개 까지의 서보 모터 혹은 스텝 모터를 제어할 수 있는 MEI(Motion Engineering Incorporation) 다축제어기를 사용하였다. MEI 다축제어기는 모터 제어기능 외에도 A/D 및 디지털 I/O 기능도 가지고 있으며 AC/DC 서보 모터 및 스텝 모터를 제어하는 위치제어 서보 루프를 구성할 수 있다. 본 장치에 사용한 4개의 서보모터중 3개는 MEI 제어기를 통해서 위치제어 루프를 구성하였으며, 인출 Head 장치의 상하 구동에 사용한 DC 서보모터는 RS-232C 통신에 의해서 제어하도록 하였다. 일반 교류모터는 파워 릴레이 보드를 제작하여 다축제어기의 I/O 포트에 제어하였으며, 각 구동장치의 초기화 및 이송위치를 제한시키는데 사용하는 리미트 스위치의 신호도 MEI의 I/O 기능을 통해서 받아들일도록 하였다.

## 3. 실험 및 결과분석

### 3.1 인출 실험

연료봉 인출공정은 그림 2에서 보는 바와 같이 하단 고정판 제거, 연료봉 인출 및 연료봉 측면이송의 순서로 진행되는데, 풀린 너트 및 분리된 하단 고정판을 제거하는 것을 제외하고는 컴퓨터 프로그램의 지령 명령에 의해 자동으로 수행되도록 프로그램 하였다. 프로그램의 실행은 486 CPU를 장착한 산업용 컴퓨터에서 수행하였으

며, 프로그램 언어로는 Borland C 4.0을 사용하였다. 연료봉 인출실험 과정을 자세하게 설명하면 다음과 같다. 첫째, 제어 시스템을 power ON 한 후 연료봉 인출 프로그램을 실행시켜 구동장치를 초기화시킨다. 이때 임팩트 렌치의 선단은 소켓 선단보다 앞에 있게 된다(60mm). 두번째, 모의 연료를 집합체 고정장치에 올려 놓고 고정시킨다. 세번째, 인출 Head를 하단 고정판 20mm 전방까지 전진시킨다. 다음에는 임팩트 렌치의 선단 중심이 하단 고정판 좌측아래 모서리와 일직선이 되도록 한다. 이때부터 하단 고정판에 체결된 너트의 배열 정보와 너트의 깊이(50mm) 정보를 이용하여 인출 Head를 X, Y, Z 방향으로 구동시키면서 모든 너트를 제거한다(그림 3). 네번째, 하단 고정판을 제거한다. 다섯번째, 임팩트 렌치를 후진시킨다. 여섯번째, 연료봉의 배열 정보를 이용하여 인출 Head를 X, Y, Z 방향으로 구동시킨다. 콜렛을 이용하여 하나의 연료봉을 파지한후 인출 Head를 뒤로 후진시켜 연료봉을 인출한다(그림 4). 일곱번째, 충격흡수장치를 연료봉 10mm 아래까지 상승시킨다. 다시 연료봉이 집합체로부터 완전히 분리되도록 인출 Head를 뒤로 구동시킨후 연료봉을 파지하고 있던 콜렛을 열어 충격흡수장치에 떨어뜨린다. 여덟번째, 충격흡수장치를 하강시킨다. 아홉번째, 측면이송장치를 구동시켜 테이블위에 올려진 하나의 연료봉을 측면 홈통으로 밀어 넣고 원 위치로 되돌아 간다. 이상의 과정이 완료되면 다시 세번째 과정부터 되풀이 하며 전체 연료봉이 홈통으로 옮겨지게 되면 연료봉 인출작업을 끝마친다.

### 3.2 실험 분석

연료봉 인출실험은 RS-232C 보드 및 다축제어 보드를 장착한 486 컴퓨터를 이용하여 풀린 너트 및 분리된 하단 고정판을 제거하는 것을 제외하고는 전과정을 자동화 하였다. 실험은 비교적 성공적으로 수행되었지만 다음과 같은 몇가지 문제점을 발견할 수 있었다. 첫째, 연료봉 인출 Head를 X, Y, Z 방향으로 구동시키는 데 있어서 인출 Head의 초기 위치를 찾아내면 너트를 풀고, 연료봉을 인출하는데 큰 어려움은 없었으나 초기 위치가 틀리게 되면 계속적으로 위치오차가 누적되어 인출이 불가능하게 된다. 본 실험에서는 초기 위치를 찾는데 리미트 스위치를 사용하였으나, 초기 위치 선정의 오차를 줄이기 위해서는 보다 정밀한 센서를 사용하거나 핵연료 집합체를 항상 일정한 위치에 놓을수 있도록 고정장치를 고안하여야 한다. 둘째, 임팩트렌치 소켓을 너트에 삽입할 때 서로 각이 맞지 않으면 삽입되지 않는다. 따라서, 실험에서는 임팩트렌치를 회전시키며 너트에 삽입함으로써 이와 같은 문제를 해결할 수 있었으나 보다 삽입 성공률을 높이기 위해서는 소켓의 유격을 증가시켜야 한다. 셋째, 분리된 너

트는 임팩트렌치의 소켓내에 끼워있어 다음 너트 분해작업을 수행할 수 없다. 또한, 너트를 모두 풀어내면 연료 집합체의 하단 고정판이 안내관에 끼워있어 다음 작업을 수행할 수 없다. 본 실험에서는 분리된 너트와 고정판을 수작업으로 제거하였으나 이를 자동으로 제거할 수 있는 자동화 기구의 설계를 고려하여야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 KNFC의 17x17 PWR 모의연료 집합체로부터 연료봉을 한개씩 자동으로 인출할 수 있는 연료봉 인출장치를 제작하여 이의 성능 실험을 수행하였다. 실험 결과는 대체적으로 만족스러웠으나 기계/전기/전자적인 개선점을 발견하였으며, 향후 개선을 통해서 성능이 크게 향상되리라 여겨진다. 또한, 실제 핫셀에서 사용하는 장비들은 오랜 시간동안 고방사선에 노출되기 때문에 인출장치에 사용되는 부품(모터, 카메라, 신호 케이블 및 센서 등)의 내방사선 성능은 인출장의 성능에 커다란 영향을 미친다. 따라서, 이들 부품에 대한 내방사선 성능을 조사하여 이에 따라 인출장치를 설계하여야 한다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Halibuton NUS CO., Fuel Rod Consolidation Project, Phase II Final Report, Vol.1 (1987)
- [2] Krishna Vinjamuri, et. al., Dry Rod Consolidation Technology Project at the Idaho National Engineering Laboratory, Submitted to US DOE (1988)
- [3] 노 성기 외, “사용후핵연료 저장기술 개발”, 한국원자력연구소 보고서 (KAERI-NEMAC/RR-157/95) (1995)
- [4] 이 재설 외, “사용후핵연료 원격취급기술 개발”, 한국원자력연구소 보고서 (KAERI/RR-60/92) (1992)
- [5] 이 재설 외, “사용후핵연료 기술개발 시설 건설”, 한국원자력연구소 보고서 (KAERI-NEMAC/PR-28/93) (1993)

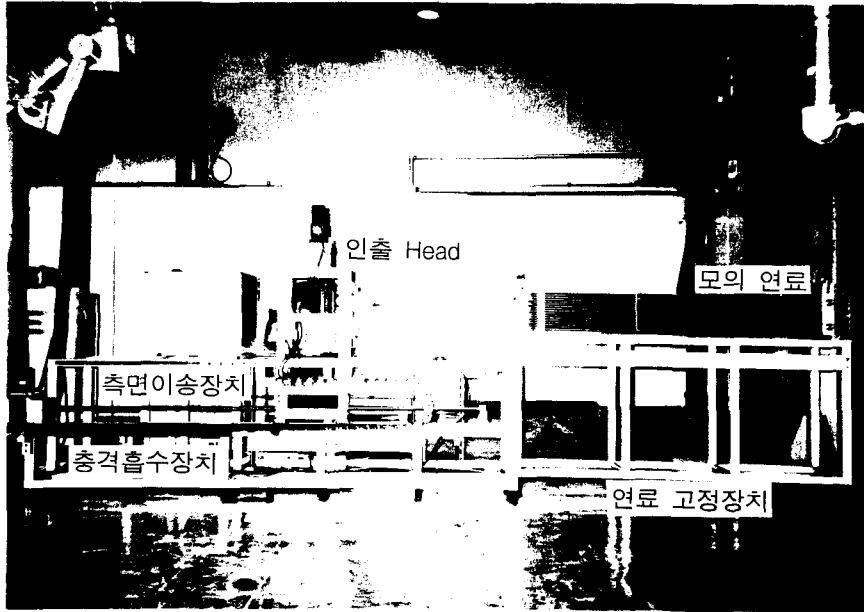


그림 1. Prospective view of fuel rod extraction system

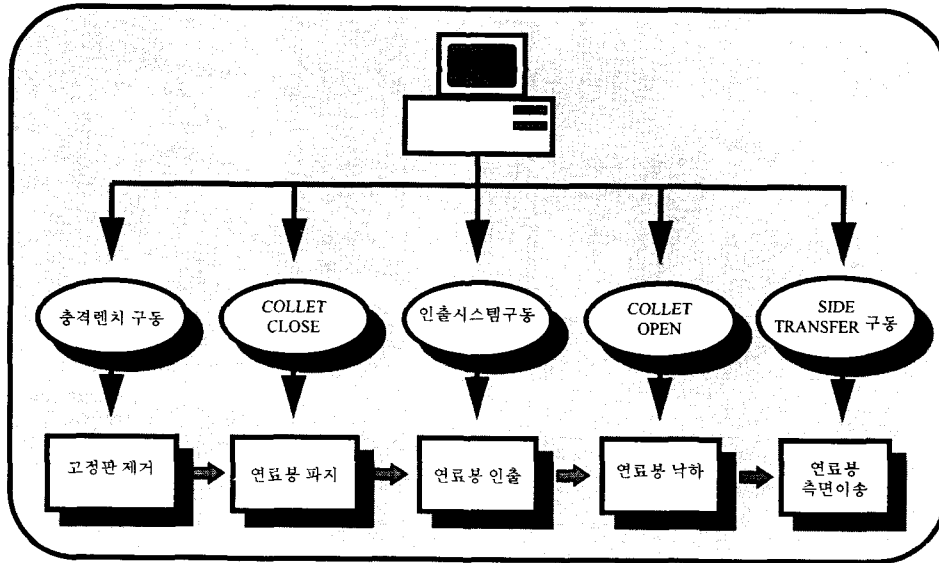


그림 2. Operational sequence of fuel rod extraction system.

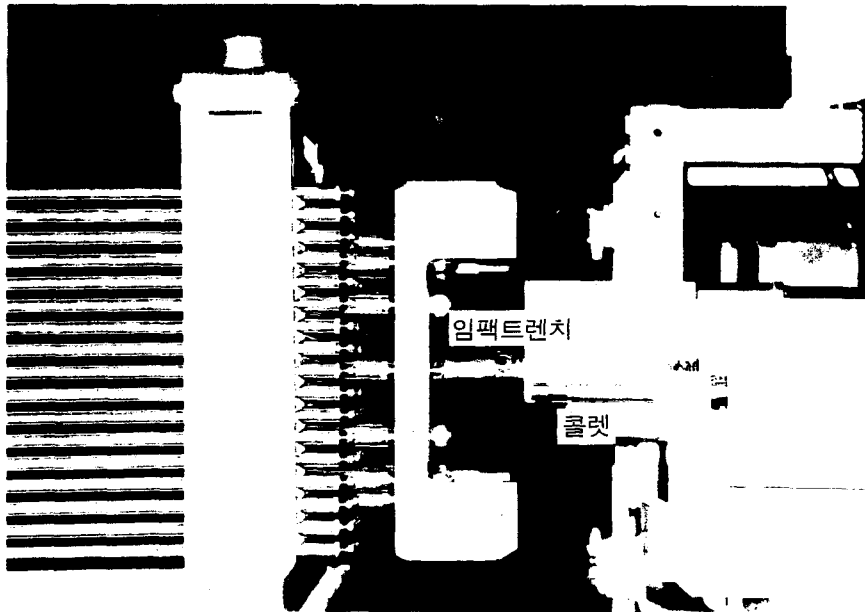


그림 3. Insertion of the impact wrench in nut.

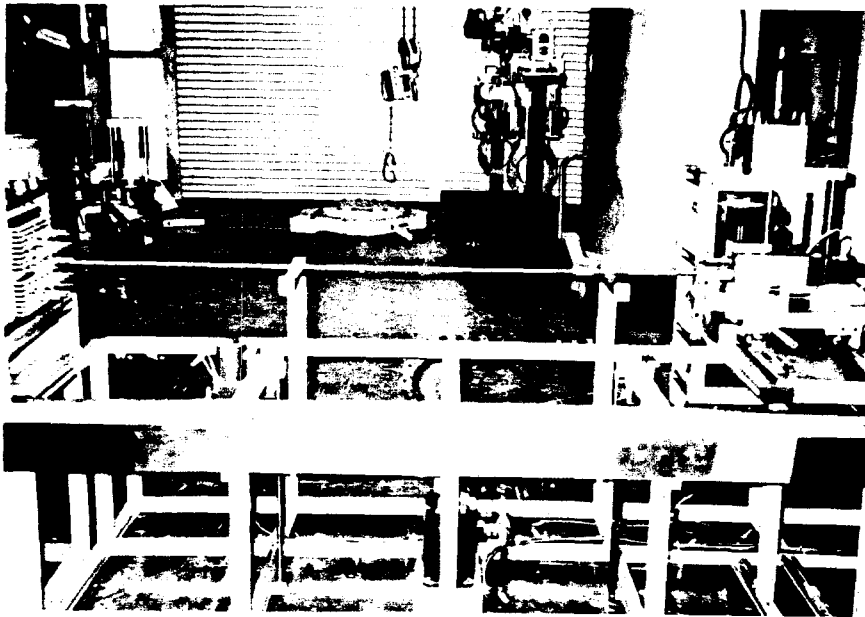


그림 4. Pulling of rod and lifting of cradle device.