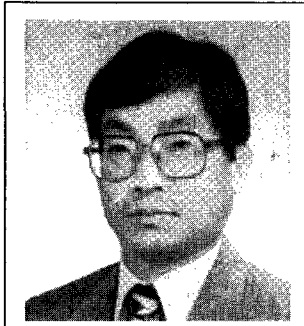


Vantage 5H 원전연료 제조를 위한

소결체 장입장비의 개발



김 봉 오

한국원전연료(주)
기술부장

한국원전연료(주)는 최근 원전연료 제조의 중요장비중의 하나인 소결체 장입장비를 순수 국내기술로 개발했다.

이 장비는 웨스팅하우스사의 V5H 원전연료를 제조하기 위한 장비로서, 기존 장비와는 달리 모든 연료타입 제조에 적용할 수 있으며, 기존의 수입장비에 비해 생산성 효과가 탁월하고, 연료의 제조건전성을 고도로 향상시킬 수 있는 특징을 지니고 있다.

현재 다른 나라에서는 사용하고 있지 않은 독창적인 방식을 채택한 이 장비개발은 앞으로 주변장비 개발에도 활용할 수 있는 기술축적의 성과와 함께 수입대체 효과 및 예산절감효과도 거두게 됐다.

한 국원전연료(주)에서는 금년 하반기부터 첨단 개량형 원전연료인 웨스팅하우스사의 Vantage 5H 연료를 생산할 계획이다.

Vantage 5H라는 연료명에서 5가 가리키는 것은 기존 연료에 비해 기술성과 경제성 향상을 위해 5가지를 개선하여 붙여진 이름이다.

그 5가지 항목의 내용중 1가지가 원전연료주기비를 감소시키기 위하여 Axial Blanket 개념을 도입한 것이다.

이것은 노심에서의 중성자 누출을 감소시켜 주기 위해 도입된 개념으로, 농축우라늄으로 채워진 연료봉 양 끝단에 천연우라늄 소결체를 각각 6인씩 장입하는 것이다(그림 1).

원전연료제조공정은 크게 4가지 단계로 구성되어 있다.

첫째 단계가 농축공장에서 가져온 UF₆를 UO₂ 분말로 만드는 재변환공정이고, 둘째 단계가 UO₂ 분말을 1,750℃에서 소결하여 UO₂ 소결체를 만드는 공정이며, 셋째 단계가 UO₂ 소결체를 4m 길이의 Zircaloy 피복관에 장입하여 연료봉을 만드는 공정이며, 마지막 단계가 안내관과 지지격자

로 구성된 골격체에 연료봉을 장입하는 집합체 제조공정이다.

Axial Blanket이 들어간 원전연료를 제조하기 위해서 셋째 단계인 연료봉 제조공정중의 하나인 소결체 장입공정을 거쳐야 한다.

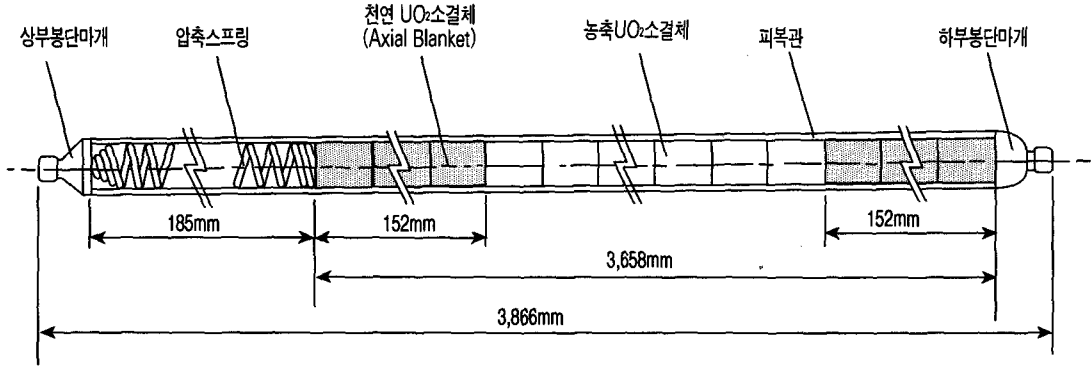
그런데 기존의 가동하고 있는 장입공정은 독일의 지멘스사에서 도입한 기술로서, 소결체가 단일 농축도인 우라늄 소결체만을 취급하게 되어 있어 Axial Blanket 소결체를 장입할 수 없게 되어 있다.

한국원전연료(주)에서는 이러한 두 가지 농축도의 소결체를 취급할 수 있는 장비구입을 위하여 외국의 유수회사에 견적을 요청했다.

이러한 장비에 대한 공급에 외국회사는 13억원을 요구하여 당초 예상한 가격보다 배이상 비싸 예산상의 문제가 발생했다.

또한 한국원전연료(주)에서 생산하는 소결체는 AUC 공정으로 제조된 분말을 사용하고 있어, 진동을 시켜 장입하는 외국의 소결체 장입장비와의 기술적 양립성 문제가 예상됐다.

이상과 같은 경제성과 기술성의 문제가 대두되어 소결체 장입장비를 자



(그림 1) 원전 연료봉의 형태

체 개발하기로 결정했다.

장비개발과정

1. 기술적 특성분석

회사 실정에 맞는 소결체 장입장비를 제작하기 위하여 기존의 장입공정과 세계 유수의 원전연료제조회사에서 채택하고 있는 장입공정을 면밀히 분석했다.

여러가지 장입공정에 대한 기술적 분석을 수행한 후, 새로 개발할 소결체 장입장비에 대한 기본설계요건과 기준을 작성했다.

〈표 1〉과 〈표 2〉는 V5H 연료봉의 기술적 특성과 소결체 장입방식을 비교한 것이다.

2. 기본설계과정

기술적 분석을 끝내고 다음과 같이 소결체 장입장치 개발목표와 방향을 설정했다.

첫째, 기존 농축 소결체 장입 및

(표 1) Type별 연료봉 형태 비교

연료봉 구분	전체길이	유효길이	장입되는 소결체수	Plenum Length	비 고
기존 국산연료봉 (17×17 기준)	3,847mm	3,658mm	366개	166mm	
영광 3·4형 연료봉	4,904mm	3,810mm	384개	245mm	양단에 Al ₂ O ₃ pellet 각 17개씩 장입
Vantage 5H (17×17 기준)	3,865mm	3,658mm	농축소결체 : 342개 천연소결체 : 30개	185mm	농축우라늄 소결체 stack 양단에 천연 우라늄 소결체를 각각 6inch 장입

주) 우라늄 소결체 크기(V5H): 길이 9.8mm, 직경 8.2mm의 원통형

(표 2) 소결체 장입방식 비교

구 분	기존 지멘스사 방식	웨스팅하우스사 방식
장입방식 및 기기종류	- 소결체 예비적재 장치 : 소결체를 사전에 drum magazine에 예비적재 - 소결체 장입장치 : 소결체가 적재된 magazine을 loading station에서 연료봉 47개에 자동장입	vibratory rod loader : 미세한 축방향 진동에 의한 소결체 장입
유지보수성	공정 및 장비가 복잡하여 운영 및 유지보수에 불리	보 통
자동화 및 생산성	단위공정은 자동화가 되었으나 공정간 연결은 수작업으로 되어 있음	수작업 의존도가 높은 편이나 연료봉 25개가 동시에 장입되므로 생산성은 높은 편임
Axial Blanket 장입가능 여부	한가지 농축도만 취급하도록 설계되어 있어 장입 불가	가능하나 AUC 분말로 된 소결체를 진동에 의한 장입시 파손 가능성

〈표 3〉 장입장비 구성요소

○ 소결체 사전길이 관리 전산시스템
○ 연료봉 자동 이송 및 적재테이블
○ 소결체 pushing 장치
○ 팔레트 공급 및 제거 엘리베이터
○ 소결체 장입길이 최종검사장치
○ 소결체 장입후 빈 팔레트 취출장치
○ 소결체 장입후 피복판 끝단 세척장치

Axial Blanket 소결체가 장입 가능하도록 해야 한다.

이것은 두가지의 소결체 장입길이를 사전에 조절하는 장치를 개발해야 한다는 의미이다.

둘째, 소결체 장입중 소결체 건전성 확보이다.

소결체가 피복판에 장입중 또는 장입후에 피복판 내부에서 crack이나 깨지는 손상을 입어서는 안된다는 것이다.

이를 위하여 소결체 장입방식을 pushing 방식을 적용하기로 했고 장입속도는 3단으로 조절할 수 있도록 했다.

셋째, 소결체 장입작업중 작업자에 의한 인적실수를 최소화하도록 하는 것이다. 이것은 장비를 될 수 있으면 단순하게 하고 간편하게 조작할 수 있도록 하며 최대한 자동화를 도입한다는 것이다.

넷째, 생산성을 최대 한도로 향상시킨다. 장비의 작업속도를 가능한한 높이기 위해 23개 연료봉에 소결체를 동시에 장입할 수 있도록 했다.

다음 단계로 소결체 장입장비 설계

요건을 확정했다.

설계요건에는 연산 200톤 규모의 생산능력, 소결체 장입력 결정, 장비 자동화 범위, 주변장치와의 인터페이스, double check 개념을 도입한 품질관리방법 설정 등이 포함됐다.

이러한 장입장치 개발목표와 설계요건을 확정된 후 장입장비의 구성을 〈표 3〉과 같이 하여 기본설계를 완성했다.

3. 제작업체 선정

본 장비는 mechatronics 기술이 채택된 첨단장비로 이의 제작을 위해서는 고도의 제작기술을 갖춘 FA 전문업체를 선정해야 했다.

이러한 업체선정을 위해 FA 전문업체들을 물색하여 리스트를 작성하고 해당업체를 방문하여 기술적 조사를 실시했다.

또한 업체선정을 위하여 10여개 항목에 이르는 기술기준 및 선정기준을 작성하여 대상업체들을 평가했다.

이와 같은 절차를 거쳐 자동차산업의 FA 전문업체로 이름난 (주)우신시스템을 선정했다.

(주)우신시스템과 한국원전연료(주) 기술진들은 세부설계를 공동으로 수행했고, 제작을 성공적으로 수행하여 7월 중순에 납품을 했다.

제작과정중 문제점이 몇가지 표출되어 난관에 부딪힌 때도 몇번 있었지만, 그 때마다 양사의 기술진은 술한 기술토의와 협의과정에서 도출된 아

이디어로 해결해 내곤 했다.

장비의 구성 및 내용

본 장치의 구성은 다음과 같다.

- △ 소결체 팔레트 상태에서 소결체의 장입길이를 측정 및 관리하도록 하는 소결체 사전길이 관리 컴퓨터시스템
- △ 소결체가 장입될 피복판 및 장입 완료된 연료봉을 다음 공정으로 자동 이송 시켜주는 연료봉 자동이송 및 적재 테이블
- △ 사전길이 관리되어 팔레트 위에 적재되어 있는 소결체를 23개의 피복판에 동시에 자동으로 장입할 수 있게 한 소결체 pushing 장치
- △ 장입 대기중인 소결체 팔레트를 소결체 pushing 장치에 자동으로 공급해 주고 장입 완료후의 빈 팔레트는 다시 자동으로 제거될 수 있게 한 팔레트 공급 및 제거 엘리베이터
- △ 장입이 완료된 23개 연료봉의 소결체 장입길이가 각각 요구조건을 만족하고 있는지를 자동으로 측정하기 위한 소결체 장입길이 최종검사장치
- △ 소결체 장입이 완료된 빈 팔레트를 자동으로 빼내서 적재해 두는 빈 팔레트 취출장치
- △ 소결체 장입이 완료된 연료봉의 용접부위를 자동으로 닦아주는

피복관 끝단 세척장치

1. 소결체 관리 컴퓨터시스템

연료봉에 장입될 소결체의 길이를 사전에 소결체 팔레트 상태에서 측정하고 측정된 데이터를 컴퓨터의 정해진 기준과 비교하여 필요시 작업자로부터 소결체를 추가로 제거토록 하는 역할을 수행한다.

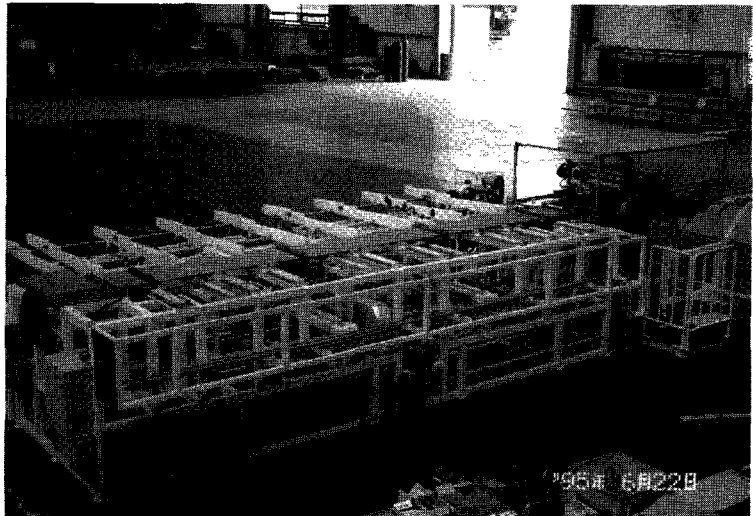
한편 소결체 제조공정에서 투입된 소결체 팔레트에는 농축우라늄 소결체의 경우 23열의 소결체가 대략 28cm 정도의 길이로 채워져 있는데, 17×17 V5H의 Axial Blanket 연료의 경우 12개의 농축우라늄 소결체 팔레트가 차례로 측정돼, 각 열의 소결체 측정길이가 누적 계산되고, 컴퓨터에 기 입력된 기준치와 비교돼서 제거 또는 추가돼야 할 소결체 수량을 컴퓨터 화면에 표시해 주게 된다.

Axial Blanket용 천연우라늄 소결체는, 소결체 제조공정에서 소결체를 팔레트에 담을 때 6인치씩 23열로 미리 적재하도록 하여, 본 장치에서 장입길이가 같은 방법으로 측정되도록 했다.

2. 연료봉 자동이송 및 적재테이블

본 장비를 구성하는 주요 골격으로서 피복관 대기 테이블, 장입된 연료봉 적재 테이블 및 연료봉 세척 테이블로 구성된다.

먼저 작업자가 23개의 피복관을 피복관 대기 테이블에 정렬시켜 올려놓고 작업개시신호를 내리면, 피복관은



소결체 장입장비 전체의 모습. 우측이 소결체 장입부이고 좌측은 Tube(피복관) 고정부이다.

23개가 동시에 연료봉 장입 테이블 위치로 자동 이송되도록 하였고, 다시 소결체의 장입이 완료된 후에도 작업자가 장입완료신호를 주면 소결체가 장입된 연료봉이 다음 작업단계로 자동 이송되게 했다.

이밖에도 본 장치에는 연료봉 장입 공정중에 피복관을 클램핑해 주는 장치, 필요시 피복관을 진동시켜서 소결체 장입을 도와줄 수 있는 피복관 진동장치, 장입완료된 연료봉의 취출장치, 그리고 연료봉 끝단 지지대 등을 포함하고 있다.

3. 소결체 pushing 장치

이 장치를 3단 변속 서보 모터 및 ball screw pushing 장치, 장입력 과부하 감지장치 및 장입력 완충장치 등으로 구성되어 있다.

본 장치에는 특히 장입속도 조절장

치를 포함하고 있어서, 소결체를 밀어 주게 되는 밀대의 끝이 소결체와 접촉하는 점까지는 급속 이송되고, 장입시에는 정상속도로 밀어주다가 장입중에 과부하가 발생되면 최저속도로 밀어주게 되는 3가지의 장입속도 조절능력을 가지고 있어서, 소결체의 장입중 손상 가능성을 최소화할 수 있게 했다.

소결체의 장입순서는 17×17 V5H형의 경우 먼저 6인치 길이의 천연우라늄 소결체 팔레트 1판 23열이 자동으로 장입위치에 공급되어 오면, ball screw pushing 장치에 의해 소결체를 피복관 속으로 밀어 넣어 주게 되고, 다음으로 12판의 농축우라늄 소결체가 차례로 장입위치로 자동공급되어서 pushing 장치가 소결체를 피복관 속에 밀어 넣어 주게 된다.

마지막으로 천연우라늄 소결체 팔레트 1판을 더 장입시킨 다음 장입작

업을 완료하게 되어 있다.

4. 소결체 장입길이 최종검사장치

장입된 소결체의 최종길이를 다시 한번 자동으로 측정하고 조정해 주는 역할을 수행한다.

본 장치는 피복관 23열에 장입된 소결체의 장입길이를 각각 차레로 측정하여 각 측정 열마다 적색 또는 청색 램프의 점등신호를 발생한다.

이때 기준 길이를 벗어났을 때는 적색 램프가 점등되어지고 작업자에 의해 장입길이 재조정될 때까지 다음의 작업을 진행할 수 없도록 설계됐으므로 장입길이가 완벽하게 관리되도록 했다.

5. 팔레트 공급 및 제거 엘리베이터

소결체 사전길이 관리시스템에서 팔레트 선반에 적재된 상태로 제공된 소결체 팔레트를 최대 15개까지 수용할 수 있도록 하며, 팔레트 세팅장치에 팔레트가 자동으로 이송될 수 있도록 장입될 팔레트의 위치를 순차적으로 자동 결정해 주고, 작업자가 팔레트 공급을 용이하게 하기 위해 주장비의 외부로 이동될 수 있는 구조 및 제어장치를 가지고 있는 장치이다.

6. 빈 팔레트 취출장치

사용된 팔레트의 제거 및 적재 테이블로 구성되어 있어서 30개의 빈 팔레트가 쌓이면 슬라이딩되어 수동으로 취출시킬 수 있게 되어 있다.

〈표 4〉 소결체 장입장비 작업순서

순서	작업명	작업방법	작업내용
1	소결체 사전길이 관리	자동/수동	○ 팔레트의 소결체 적재길이 사전측정 ○ 작업자 소결체 가감
2	소결체 준비	수동	○ 작업자는 23개 연료봉 분량(14개 팔레트)의 소결체 팔레트를 팔레트 공급 엘리베이터에 공급
3	피복관 준비	수동	○ 피복관을 피복관 대기 테이블에 적재 ○ 피복관 번호 컴퓨터 입력
4	피복관을 장입위치에 setting	자동	○ 피복관이 대기 테이블에서 장입 테이블로 자동 이송 ○ 피복관 clamping
5	소결체를 장입위치에 setting	자동	○ 팔레트 공급 엘리베이터에서 팔레트를 장입위치에 setting
6	소결체 장입	자동	○ 천연 및 농축 UO ₂ 소결체를 피복관 내로 pushing
7	연료봉 장입길이 검사	자동/수동	○ 장입된 소결체 길이 자동검사(double check) ○ 소결체 길이 초과분 자동 제거·추가는 작업자가 수행
8	원성 연료봉 제거 및 피복관 끝단 세척	자동	○ 연료봉 장입위치로부터 원성 연료봉 제거 ○ 피복관 끝단 자동세척

7. 피복관 끝단 세척장치

소결체 장입중에 피복관의 끝단에 묻어 있을 수 있는 이산화우라늄 분진을 제거하기 위한 장치로서, 로터리 액츄에이터에 의한 270도 회전 및 역회전 운동에 의하여 굵은 면사로 피복관의 끝단을 닦아 주는 장치이다.

이러한 구성을 가진 소결체 장입장비의 작업순서는 〈표 4〉와 같다.

장비개발의 의의

이번에 개발된 장비는 V5H 뿐만 아니라 다른 개량된 원전연료에도 적용할 수 있어, 원전연료 제조의 건전성과 생산성을 향상시킬 수 있게 됐다.

다.

이 장비는 다른 어느 나라의 원전연료 제조회사에서도 사용하고 있지 않는 독창적인 방식을 채택하고 있다.

이러한 기술축적 및 개발능력을 바탕으로 고연소도의 첨단연료를 제조할 수 있는 기술능력을 갖추게 됐다.

경제성의 측면에서도 외국으로부터 도입할 경우 13억원의 비용이 들 것을 국내에서 제작함에 따라 약 8억원의 예산절감 및 수입대체효과를 기할 수 있었다.

특히 출원중인 본 장비의 개발로 외국에 원전연료 제조장치를 수출할 수 있는 능력을 갖추게 된 것도 본 장비 개발이 가지는 또 하나의 의의라 하겠다.