

## 소결체 인출장치의 기술현황

### The State-of-the-Art of the Decladding of Nuclear Fuel Elements

오승철, 정재후, 김성현, 윤지섭  
한국원자력연구소

#### 요 약

경수로형 사용후핵연료의 재활용 공정 중의 첫 번째 단계는  $UO_2$  연료와 지르코늄 피복관을 분리하는 공정으로, 이러한 탈피복 공정들의 기술현황을 분석하였으며, 사용후핵연료 해체 공정에 있어서 필수적인 금속 절단 기술에 대해서도 평가하였다. 본 연구에서는 탈피복 연료의 회수율을 높이고 안전성 및 적용성의 관점에서 운전 방식을 확립하기 위하여 이러한 소결체 인출 기술의 조사, 분석을 수행하였으며, 이로부터 국내 현황에 적합한 기계식 소결체 인출 기술을 개발하고자 한다.

#### Abstract

The first process of recycling the spent fuel is accomplished by separating the  $UO_2$  fuel from the zirconium-based cladding. In this paper, to suggest the suitable decladding process for the spent fuel recycling in dry environment, the mechanical processes are surveyed from various decladding processes. Also metal cutting process which is a common process of all decladding options is briefly evaluated. The characteristics and operational procedures of these decladding processes are investigated in terms of fuel recovery efficiency, mechanical safety and remote maintainability, etc.

#### 1. 서론

일반적으로 사용되는 탈피복 공정은 화학적 및 기계적 탈피복, 화학적 및 기계적 방법을 조합한 절단-추출 공정이 있다. 화학적 탈피복은 적절한 용제를 이용하여 핵연료와 분리된 피복관을 용해하는 공정을 포함하며, 이 과정에서 핵분열 물질이 탈피복 용액과 함께 손실된다.

절단-추출 공정은 핵연료 집합체를 짧은 조각으로 절단한 후 질산에 의해 핵연료를 용해시키는 공정으로, 핵연료는 절단에 의해 질산에 노출될 뿐만 아니라 접촉 면적이 증가된다. 사용후 핵연료를 절단할 경우에 방사선 입자의 생성 및 핵분열성 기체의 방출로부터 오염 문제가 발생되며, 용해조로부터 피복관을 지속적으로 제거하여야 하는 문제점이 있다.

기계적인 방식을 채택함으로써 화학적 탈피복 공정에서 발생하는 문제점을 배제할 수 있으며, 화학 물질의 사용량 및 폐기물의 부피를 감소시킬 수 있다. 기계적 방식에 의한 탈피복 공정은 다른 방식으로부터 생성되는 액상의 방사성 폐기물보다 취급 및 저장이 용이한 고체상의 방사성 폐기물이 발생되며, 용해조에 보다 많은 양을 충전할 수 있기 때문에 용해 속도를 증가할 수 있다. 액체금속과 결합된 연료의 경우에도 화학적 방식에서 상존하는 폭발 위험 때문에 기계적 탈피복 공정이 적합하다. 기계적 탈피복 공정은 물질의 시험 원자로에 사용되는 복잡한 형태의 연료 및 피막을 입힌 입자로 구성된 연료의 경우에는 적용이 불가하며, 단순한 기하학

적 구조 형태 및 여러 가지 방식에 의해 부과되는 힘(stress)에 견디는 충분한 강도를 갖는 핵 연료의 경우에 사용된다.

본 연구에서는 다양한 방식의 기계식 소결체 인출 기술에 관해 조사, 분석을 수행한 결과, rolling straightener 및 절단 연료봉의 충격에 의한 탈피복 기법이 가장 적합한 공정으로 선정하였으며, 이 두 가지 기술에 대해 중점적으로 고찰하였다.

## 2. 소결체 인출 기술

### 2.1. 압연-복원에 의한 소결체 인출 기술(Rolling straightener technique)

압연-복원 기법에 의한 탈피복 공정은 축에 근접 접촉되는 연료봉의 나선형 회전에 의하며, 피복관의 직경 및 길이는 회전과 축 방향의 운동에 의해 변형된다. 변형 정도는 연료봉과 회전체 사이에 최대 압력을 발생시킬 수 있는 장비의 용량, 회전체 형태 및 회전체 재질에 관한 성질 등의 다양한 인자에 의해 영향을 받으며, 연료봉 및 회전체의 기계적 성질과 접촉 면적에도 영향을 받는다. 한편, 회전체의 경사도에 의해서도 영향을 받으며, 회전체의 경사도를 증가하면 연료봉의 길이가 적어지고 직경은 증가한다.

연료봉의 탈피복은 두 단계의 공정으로 구성되는데 처음 공정은 금속 피복관과 연료가 접촉되어 있을 시의 연료봉의 압착이며, 두 번째 공정은 연료봉과 회전체 사이의 접촉 표면 반대편 표면에만 접촉되어 있는 경우의 압착이다. 변형은 회전체의 동작에 의해 주로 영향을 받으며, 연료가 변형되는 과정은 그림 1A, B에서 보는 바와 같다. 회전체에 의한 피복관의 압력을 가하는 단계와 변형이 일어나는 동안의 피복관의 저항성에 의한 단계는 서로 상이하며, 회전하는 동안에 발생하는 평형과 관련한 최대 휨 모멘트는 평형 조건으로부터 다음의 관계를 갖는다(그림 1C).

$$2M = \frac{f}{2} \times \frac{d_0 - t}{2} \quad (1)$$

$M$  : 피복관의 최대 휨 모멘트

$f$  : Plastic deformation을 일으키기 위한 피복관의 단위 길이당 힘

$d_0$  : 연료의 외경

$t$  : 피복관의 두께

평평하게 펼치는 정도가 큰 경우에 휨 모멘트는 다음의 plastic deformation 식에 의한다.

$$M = \frac{\sigma_a t^2}{4}, \quad \sigma_a : \text{연료의 실제 yield stress} \quad (2)$$

피복관을 펼치기 위해 요구되는 단위 길이당 힘은 다음 식에 의해 산출되며,

$$f = \frac{2\sigma_a t^2}{d_0 - t}$$

Plastic deformation에 대한 전체 힘은 다음과 같다.

$$F = \frac{2\sigma_a t^2}{d_0 - t} (L + a) \quad (3)$$

$L$  : 힘을 전달받는 피복관의 길이

$a$  : 변형이 일어나는 영역의 가정된 전체 길이

사용되는 rotary straightening 장비는 연료봉과 회전체 사이에  $\theta$  만큼 각도가 틀어져 있으

며, 연료봉과 회전체 사이의 힘은 연료봉 축으로 투영하여  $F\cos\phi, F\sin\phi$ 로 분석하여 회전체의 접선 방향의 힘은  $F\sin\phi \cdot \cos\theta$ , 축 방향 힘은  $F\sin\phi \cdot \sin\theta$ 로 되며, 이러한 관계를 이용하여 회전체의 토크는 접선 방향의 힘으로부터 계산된다(그림 2).

$$T_r = F\sin\phi \cdot \cos\theta \cdot R = F \cdot \frac{b}{2r} \cdot \cos\theta \cdot R = F \cdot b\cos\theta \cdot \frac{R}{2r} \quad (4)$$

$$\sin\phi = \frac{b}{2r}$$

$b$  : 접촉 폭

$r$  : 연료봉의 반지름

$R$  : 구동 회전체의 반지름

회전하는 동안에 연료봉과 회전체의 접촉 표면은 사각형 형태로 연료봉과 쌍곡선 회전체 사이의 길이를 가지며, 폭은 radial deformation( $\Delta_r$ ), 연료봉의 반지름( $r$ ), 회전체의 반지름( $R$ ), 구동 회전체의 elastic deformation( $\Delta_1$ ), 연료의 elastic deformation( $\Delta_2$ )에 의해 결정된다. 전체 접촉 길이는 식 (3)으로부터 피복관의 형태 및 기계적 성질에 의해 결정되는 plastic deformation을 일으키는 전체 힘과 구동 회전체에 접촉되는 전체 길이와의 관계로부터 실험적으로 결정된다. 접촉 폭은 그림 3에서와 같이  $b_1$  및  $b_2$ 의 두 성분으로 나누어지며, 다음과 같은 관계를 가진다.

$$b_1 = \left\{ \frac{2Rr}{R+r} (\Delta_r + \Delta_1 + \Delta_2) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$b_2 = \left\{ \frac{2Rr}{R+r} (\Delta_1 + \Delta_2) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

회전체의 elastic deformation,  $\Delta_1 = 2f \frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} = \frac{4\sigma_a t^2}{2r-t} \left( \frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} \right)$

핵연료의 elastic deformation,  $\Delta_2 = 2f \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2} = \frac{4\sigma_a t^2}{2r-t} \left( \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2} \right)$

$f$  : 회전체와 연료봉 사이의 단위 길이당 힘

$\mu_1$  : 회전체 재료의 poisson's ratio

$\mu_2$  : 핵연료의 poisson's ratio

$E_1$  : 회전체 재료의 탄성율(modulus of elasticity)

$E_2$  : 핵연료의 탄성율

식 (3)과 (4)로부터,  $b$  는  $T_r$  과  $\sigma_a$  로 다음과 같이 표현된다.

$$b = \frac{T_r \cdot r(2r-t)}{\sigma_a t^2 (L+a) R \cos\theta} \quad (7)$$

식 (5)-(7)로부터, radial deformation은 다음과 같다.

$$\Delta_r = \frac{R+r}{2Rr} \left\{ \frac{T_r \cdot r(2r-t)}{\sigma_a t^2 (L+a) R \cos\theta} - \left\{ \frac{2Rr}{R+r} (\Delta_1 + \Delta_2) \right\}^{1/2} \right\}^2 - (\Delta_1 + \Delta_2)$$

위 식의 마지막 항 ( $\Delta_1 + \Delta_2$ )은 일반적으로  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 의 값을 가지므로 무시할 수 있으며,  $\Delta r$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta r = c_1 \left[ \frac{(2r-t)}{t^2} c_2 - \left\{ c_3 \frac{t^2}{(2r-t)} \right\}^{1/2} \right]^2 \quad (8)$$

$$c_1 = \frac{R+r}{2Rr}$$

$$c_2 = \frac{T_R \cdot r}{\sigma(L+a)R \cos \theta}$$

$$c_3 = \frac{8\sigma Rr}{\pi(R+r)} \times \left[ \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right]$$

주어진 실험 조건하에서 피복관에 대한 radial deformation ( $\Delta_r$ )을 구하기 위해서는 ( $L+a$ ) 값을 알아야 하며, 이 값은 핵연료 피복관과 유사한 성질을 갖는 알루미늄 피복관 내에 여러 가지 물질을 충전한 연료봉 각각에 대해 실험을 하여 변형 정도를 측정함으로써 실험적으로 결정된다. 사용하는 장비의 자료로부터 재질의 성질이 고려되고, 미리 검증된 관계를 적용함으로써 ( $L+a$ )의 평균값을 얻을 수 있다. Plastic deformation에 대한 전체 힘이 결정되면 식 (4)에 의해 회전체와 연료봉의 접촉 폭을 구할 수 있으며, 식 (5), (6)에 의해 피복관의 radial deformation ( $\Delta_r$ )이 결정된다.

## 2.2. 절단 및 충격에 의한 소결체 인출 기술(Exposed fuel, agitate)

연료봉 절단 후 ball mill에서 충격을 가함으로써 산화 연료를 분쇄하여 피복관 조각과 분리하는 공정으로 최종 분쇄 효율 및 신속성은 절단 길이(일반적으로 절단 길이가 짧을수록 신속하게 분리)와 절단 부분에서의 압착 정도에 영향을 받는다. 연료봉의 절단 방법은 빠른 속도(1회 절단/초)의 재단기 형태의 절단기로서 10 mm 길이로 절단(절단되는 길이가 불규칙함) 하며, 칼날은 피복관의 외형에 따라 경사를 줌으로써 절단면의 압착을 최소화 할 수 있다. 다른 방법으로는 느린 속도의 회전 절단으로 5~10 mm 길이로 절단되고 절단 부위의 가장 자리가 약간 밀폐된다.

### 2.2.1. 비연속 소결체 인출 공정

Jar 분쇄기에서 절단 연료봉을 충전하여 일정 시간 동안 운전한 후, 불을 제거하고 연료봉 조각과 분말을 엉성한 체로 분리하여 체로 거른 분말의 무게를 측정하고, 연료봉 조각은 각각 검사하여 분쇄되지 않은 연료는 회수하며, 탈피복 비율은 취급 연료의 전체 량에 대한 회수된 연료의 양으로부터 계산된다.

### 2.2.2. 연속 소결체 인출 공정

그림 4에 나타낸 바와 같이 연료봉 조각이 출구 쪽의 다른 구역으로 이동시에 불이 함께 이동하지 못 하도록 일반 탄소강 재질의 구역이 분리된 실린더 형태의 용기로서 절단 연료봉의 인입구 및 분쇄된 분말의 회수를 위한 수집 용기로의 출구가 있어야 하며, 먼지로부터 회전 부분의 보호를 위한 felt 패킹 장치가 있고 또한 용기를 회전시키기 위한 모터의 회전 속도는 60~160 rpm의 범위에서 가변할 수 있고 분쇄기의 경사도는 0 ~ 15° 로 조절할 수 있다.

이 장치의 운전은 분쇄기의 회전 중에 일정량의 절단 연료봉을 충전하고 장비의 체류 시간을

결정하기 위해 분쇄기로부터 처음 및 마지막으로 나오는 시간을 측정하며, 회수된 연료의 무게를 측정함으로써 회수율을 산출한다.

### 2.2.3. 산화 분위기에서의 소결체 인출 공정

그림 5에서 보는 바와 같이 완전 밀폐된 회전 가열로에 상온에서 불과 함께 일정량의 절단 연료봉을 주입하고, 질소를 주입하면서 가열로를 일정한 온도로 가열한다. 일정 시간 동안 공기 혹은 공기를 함유한 산소, 또는 질소를 주입하면서 회전시킨 후에 가열로의 온도를 상온으로 떨어뜨리고 가열로를 개방하여 연료를 검사한다.

### 2.2.4. 원격조작에 의한 소결체 인출 공정

원격제어에 의한 기계식 탈피복 장비로서 그림 6에서 보는 바와 같이 500℃의 공기 분위기에서 분쇄가 수행된다. 낮은 절단 속도(6초에 1회 절단)의 회전 절단기에 의한 일정 길이의 절단 연료봉은 공압 모터에 의해 작동되고 전기적으로 가열되는 ball mill에 주입된다. 출입구는 원격 제어에 의해 연결되는 흑연 회전 연결자를 이용하여 밀폐하고 장비는 한쪽 끝에 고정된 수평축 주위를 회전하며, 스테인레스 스틸 재질의 필터를 내장한 cyclone에 의해 연료를 회수한다.

### 2.2.5. 미리 분쇄된 연료봉의 소결체 인출 공정

Ball mill에 투입하기 전에 충격 분쇄기를 추가함으로써 기계적 탈피복 공정을 개선한 방식으로 충격 분쇄기를 통과하는 동안에 피복관 내부의 산화물을 분쇄한다. 장비로는 탄소강 프레임에 부착된 한 개는 고정되고 한 개는 움직이는 특수 금속 망치를 사용하며 고정된 망치는 guide wheel에 의해 일정 간격으로 설치하고 이동 망치는 guiding wheel까지 연장되는 분쇄기 축에 부착된 봉의 진동 스프링에 설치하며 guide wheel은 폴리 역할도 수행한다.

## 3. 결론

핵연료 형태 및 운전조건의 다양함으로 인해 현재까지 사용되거나 제안된 탈피복 기술 및 장비는 매우 광범위하나, 사용후핵연료의 전체적인 재활용 공정에 부합되는 탈피복 공정을 선택하여야 한다. 본 연구에서는 기계적 방식에 의한 탈피복 공정을 개발하기 위하여 용이한 운전 및 보수, 원격 조작의 용이성 및 방사성 물질에 의한 오염의 최소화 등과 같은 중요한 기준에 기초하여 여러 기술을 비교, 검토하였다.

Slitting 또는 cutting 기술은 용이하게 사용되고, 원격 조작이 가능하나, 공구의 잦은 파손, 핵연료의 고정 및 절단 깊이 조정의 어려움, 핵연료와 미세한 피복관 입자와의 분리 등이 문제될 수 있다.

Roller straightener 기술은 운전 및 보수, 오염의 최소화 등의 관점에서 볼 때 가장 단순한 기술이며, 이 기술은 길이가 긴 핵연료봉에도 적용되고, 절단 공정을 최소화할 수 있다. 이 기술의 적절한 개발에 의해 End-cap 절단 공정이 배제될 수 있으며, 기계적 또는 금속학적으로 결합된 피복관 및 다양한 재질의 피복관에도 적용이 가능하다. 각각의 공정에 대한 장·단점을 비교 분석한 결과, rolling straightener 및 절단 연료봉의 충격에 의한 탈피복 기법이 가장 적합한 공정으로 사료되며, 이 공정들은 차폐된 셀 내부에서 원격 조작에 의해 이루어지도록 하기 위한 장치 개선 연구가 수행되어야 한다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. K. Fukudome, "Mechanical Decladding by Rolling Straightener", Technical Report, Kobe Steel Ltd., July (1997)
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. 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)
4. G. Matcheret and M. Bourgeois, "Mechanical Decladding of Stainless-steel-clad Oxide Fuels", CEA-R-4469 (1973)

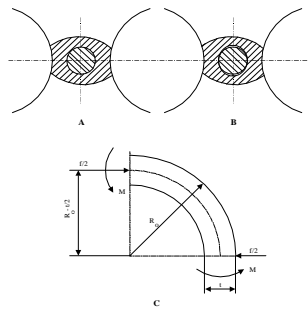


Fig. 1. Deformation Diagrams

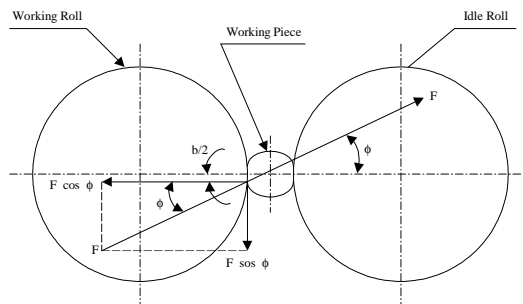


Fig. 2. Forces between rolls and work piece

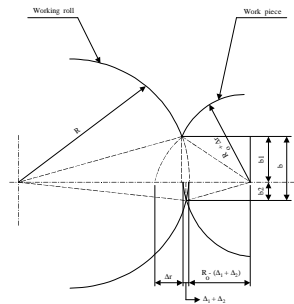


Fig. 3. Breadth of contact during rolling

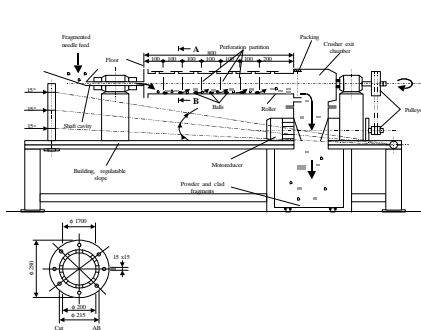


Fig. 4. Continuous crusher

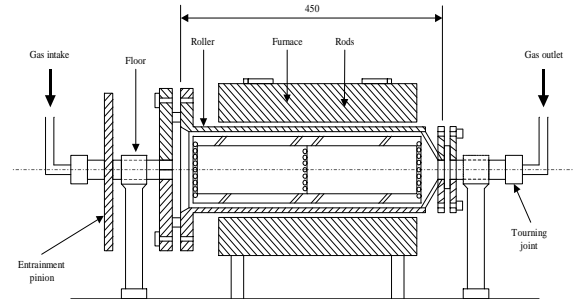


Fig. 5. Decladding apparatus in oxidizing atmosphere

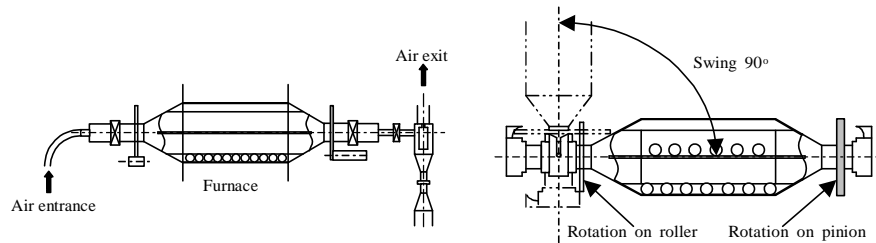


Fig. 6. Remote control crusher