

## 사용후핵연료봉 slitting 장치 성능 평가

정재후\*, 윤지섭\*, 김영환\*, 진재현\*(한국원자력연구소), 김동기\*\*\*(충남대학교)

### Capacity evaluation on the slitting device of the spent fuel rod

J H Jung, J S Yoon, Y H Kim, J H Jin(KAERI), D G Kim(Chung Man Uni.)

#### ABSTRACT

The spent fuel slitting device is an equipment developed for the separation of the pellet and hull from the cutting fuel rod with length of 250 mm, and in order to feed UO<sub>2</sub> pellet. We have analyzed on the existing technologies for designing and producing of the slitting device in the first year(2001), based on these results, designed and produced the rod slitting device. It has effectively separated the pellet from the hull, but demanded the supplement separation work because of the mixing with pellet and hull in the vessel, and required the condition for the reducing time of the process. In the second year(2002), we have reduced the work time, performed the test and capacity evaluation with the improving device, based these results, and ensured the data demanded for designing of the spent fuel rod slitting device. We have compared with the DUPIC(Direct use of spent PWR fuel in CAND reactors) process, and developed the device for the purpose of reducing over 40 % in comparition with the DUPIC operation time(5 minutes). Based on these results, it will is effectively applied to available data for designing and producing of the hot test facility.

**Key Words** : Spent fuel rod(사용후핵연료봉), Slitting device(슬리팅 장치), Dry pulverizing/Mixing device(건식 분말화/혼합 장치), UO<sub>2</sub> pplet(UO<sub>2</sub> 펠릿), Pellet and hull(펠릿과 핵), Design/manufacture(설계/제작)

#### 1. 서론

사용후핵연료봉 slitting 장치는 250 mm의 길이로 절단된 연료봉으로부터 pellet을 분리하기 위한 장치로 1차년도에는 slitting 방안을 분석하였고, 이를 바탕으로 연료봉 slitting 장치를 제작하였다. 1차년도에 개발한 장치는 pellet이 hull로부터 분리되지만 수집 용기에 pellet과 hull이 함께 수집되기 때문에, 추가 분리 작업이 필요하고, 이는 작업 시간 단축을 위해 개선이 필요하다. 2차년도에는 장치의 개조를 통한 작업 시간 단축에 중점을 두었고, 개선된 장치의 시험 및 성능 평가를 수행하였다. 이러한 실험을 토대로 선중용 장치 설계에 필요한 데이터를 확보하였다. 작업 시간은 기존 장치에 비해 40 % 이상 단축시키는 것을 목표로 하였다.

L 800 mm 이다. 장치는 지지부, 동력 전달부, slitting blade, pellet과 hull 분리 및 수집, 센서부로 구성된다. 1차년도에 제작한 장치는 slitting 방식을 실험하기 위해 제작한 것으로, 연료봉을 주입하는 주입구와, slitting blade로 구성된다. 그림 1은 slitting body 개념도와 사용한 slitting blade를 나타낸 것이다.

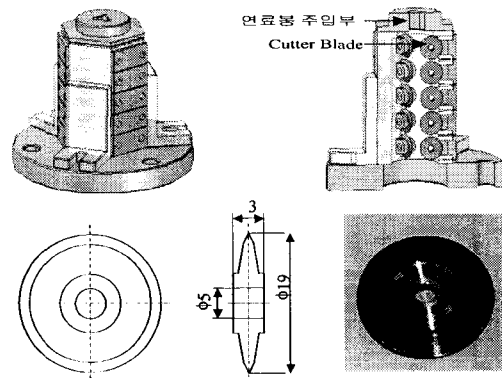


그림 1. Slitting body 개념도 및 slitting blade.

#### 2. 사용후핵연료봉 slitting 장치 개조

##### 2.1. 사용후핵연료봉 slitting 장치 개조

Slitting 장치의 크기는 H 970 mm x W 800 mm x

Slitting 장치의 개조 설계도면 및 장치 제작품은 그림 2에서와 같다. 작업 시간 단축에 중점을 두어 개조하였으며, 개조한 부분은 동력 전달부(1), pellet과 hull 분리 및 수집부(3), 센서부(4) 등이다. Blade body(2)는 1차년도에 제작한 부분이다. 핸들의 회전에 의해 압출 pin이 하강하면서 연료봉에 힘을 가하여 blade를 통과하도록 한다. Slitting과 동시에 pellet과 hull이 분리 및 수집하도록 설계하였으며, motor와 blade의 사양을 결정하는데 필요한 slitting 힘의 data를 얻기 위하여 load cell과 potentiometer를 설치하였다.

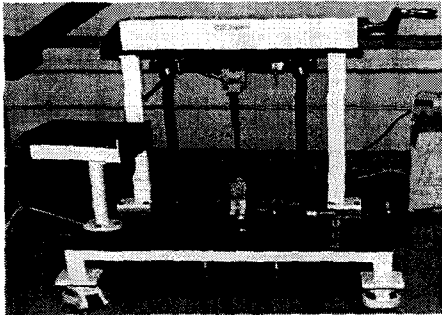
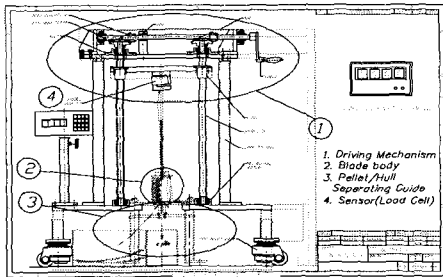


그림 2. 장치 개조 설계도 및 제작품.

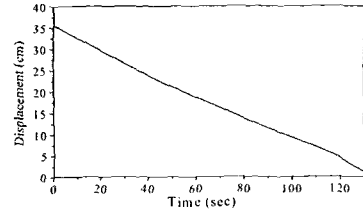
### 3. 사용후핵연료봉 slitting 장치 성능 평가

#### 3.1. 성능 평가 시험

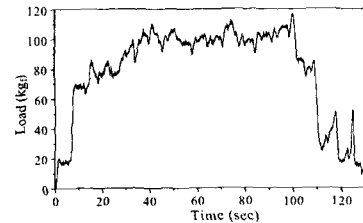
Slitting 장치의 성능 평가 시험에서는 실제 연료봉을 확보하기 어렵기 때문에 모의 연료봉을 사용하였다. 모의 연료봉의 길이 250 mm의 실제 연료봉 tube를 그대로 사용하였으며, 연료봉 속의 pellet은 aluminium을 사용하여 제작하였다.

#### 3.2. 장치 동작속도 변화에 따른 성능 평가 시험

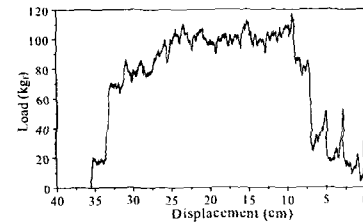
장치를 저속과 고속으로 동작시키면서 각각 3회의 slitting 시험을 수행하였다. 각각의 평균 속도는 저속시 0.27, 0.28, 0.28 cm/sec 이었으며, 고속시의 평균 속도는 0.34, 0.4, 0.47 cm/sec 이었다. 이때 시간에 대한 이동 거리와 압출 pin에 전달되는 힘의 변화는 그림 3, 4에서와 같다.



시간 대 거리 변화

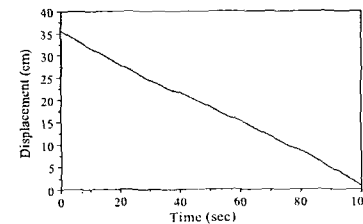


시간 대 힘 변화

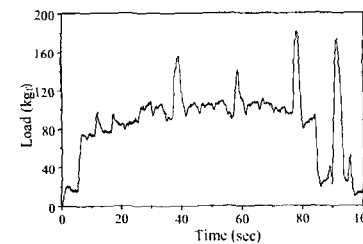


거리 대 힘 변화

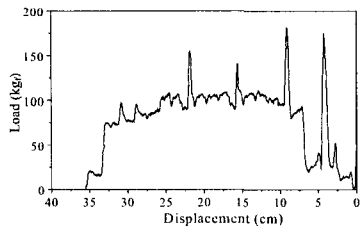
그림 3. 저속 성능 평가 시험(0.27 cm/sec).



시간 대 거리 변화



시간 대 힘 변화



거리 대 힘 변화

그림 4. 고속 성능 평가 시험(0.34 cm/sec).

### 3.3. 동작 속도 변화 시험 결과

시험 결과는 표 1에서 보는 바와 같이 저속 성능 평가 시험에서는 순간적인 속도 변화에 의해 압축 힘이 일시적으로 소폭 증가하지만, 전체적으로 압축 힘 변화는 크지 않다. 또한, 기계적인 jamming 현상이 적어 안정적으로 slitting 작업을 진행할 수 있으나 저속 영역이므로 작업 시간이 다소 길어지는 단점이 있다. 반면, 고속의 경우는, 저속의 경우와는 달리 압축 pin 변화는 큰 차이를 나타낸다. 이는 모의 pellet이 원활히 배출되지 못하고 일부 기계적인 jamming으로부터 이탈하기 위한 추가적인 압축 힘을 필요로 하기 때문이다. 또한, 시험 도중 0.6 cm/sec 이상의 속도에서는 모의 pellet이 배출되지 못하고 고착되었고, 0.47 cm/sec 이하의 경우에서 안정적인 slitting 작업이 이루어 졌기 때문에, 실증용 장치에서는 0.47 cm/sec 이하의 압축 속도로 설계함이 바람직하다.

표 1. 동작 속도에 따른 성능평가 시험 결과

저속 성능평가 시험 (평균속도 0.3cm/sec 이하)			고속 성능평가 시험 (평균속도 0.3cm/sec 이상)		
시험 횟수	평균속도 (cm/sec)	최대압축 힘(kgf)	시험 횟수	평균속도 (cm/sec)	최대압축 힘(kgf)
1	0.27	118	1	0.34	177
2	0.28	110	2	0.40	104
3	0.28	107	3	0.47	163

### 3.4. Slitting 후 pellet과 hull 상태

사용후핵연료봉 slitting 후 pellet과 hull의 모양은 그림 5에서와 같다. 시험을 통하여 분리된 pellet과 hull의 모양은 장치 동작속도 변화에 따라 별다른 차이가 없는 것으로 나타났다. 단지 기계적인 jamming 발생시 pellet이 일부 눌림 현상이 발생하

었고, 등속 운동시에는 가변속도의 경우보다 hull의 절단면이 매끈하게 나타났다. 따라서 실증용 장치에서는 등속 운동이 요구된다.

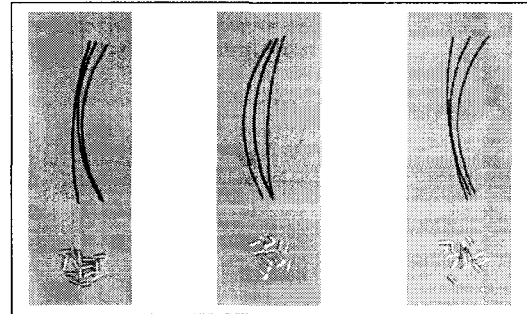


그림 5. Slitting 후 pellet과 hull 모양.

## 4. 성능시험 결과에 따른 실증용 장치 설계시 고려 사항

### 4.1. 압축 속도

압축 속도의 변화는 순간적으로 과도한 압축 힘을 발생시키며, 이와 같은 급격한 변화는 slitting blade에 불규칙한 응력을 발생시켜 blade의 수명을 단축시키는 요인으로 작용하므로 효율적인 slitting 작업을 위해서는 일정한 속도를 유지하는 자동화 공정이 요구된다.

### 4.2. 최대 압축 힘

Slitting 시 소요되는 힘은 최대 200 kgf를 초과하지 않으므로 압축용 motor를 선정할 때 이를 고려해야 한다. 또한, 압축 작업시 200 kgf 이상의 힘을 초과 할 때에는 안전성 측면에서 자동으로 압축이 정지되도록 하는 것이 바람직하다.

### 4.3. 압축 시간

사용후핵연료봉 길이 250 mm를 기준으로 하여 slitting 시 총 소요되는 시간은 130 초를 상회하지 않으므로 이를 고려하여 motor를 선정한다.

### 4.4. 부품 모듈화

Slitting blade의 재질에 따른 수명, 사양 및 응력을 고려하여 slitting blade를 선정하여야 한다. 장치의 효율적인 유지·보수를 위하여 slitting blade의 module 전체를 하나의 module로 구성한다.

### 4.5. 구동 모터 선정

실증용 장치의 motor 용량은 최대 압축 힘 200

kgf, 최대 압축 속도 0.5 cm/sec를 고려하면 순수한 motor의 출력은  $200 \text{ kgf} \times 0.005 \text{ m/s}$  ( $1 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 9.81 \text{ W}$ )이 되므로 동력 전달 효율 등을 고려하여 약 20 W 이상으로 선정하는 것이 바람직하다. 기 타, slitting 시 pellet과 hull와의 분리되는 지점에서 pellet의 jamming 현상이 발생할 수 있으므로 실증용 장치 설계시 이러한 문제점을 수정하여 반영하여야 한다.

### 5. 기존 장치(DUPIC의 실험용 장치)와의 비교

사용후핵연료봉 slitting 장치 성능 평가 결과와 기존의 slitting 장치인 DUPIC 과제에서 개발한 장치와의 비교 결과를 요약하면 표 2에서 보는 바와 같다(절단된 연료봉 250 mm 1 개 기준).

표 2. DUPIC 공정과 차세대관리 공정(개선 사항)의 slitting 장치비교

공정 내용		DUPIC 공정	차세대관리 공정 (개선 사항)
Slitting 방법		· 수동 개념	· 시험용 장치는 수동 개념이나 실증용은 자동화 개념 적용
Pellet/hull 분리 방법		· Pellet과 hull이 분리되지 않음	· Pellet과 hull이 자동 분리
Slitting blade 수		· 3개 사용(3 단 구조)	· 5 개 사용(5 단 구조)
Slitting 시간	Slitting 준비 시간	· 소요시간 : 약 125 초 · Slitting 지지대와 몸체가 분리된 구조 · 연료봉 주입시 주입을 위한 guide 없음	· 소요 시간 : 약 55 초 · Slitting 지지대와 몸체가 결합된 구조 · 연료봉 주입시 주입을 위한 guide 없음
	Slitting 시간	· 약 125 초 (1 cycle)	· 약 125 초 (1 cycle)
	Pellet과 hull 분리 시간	· 60 초	· 0 초(slitting 시 자동 분리)
Slitting 총 소요시간		· 약 310 초	· 약 180 초 (약 41.9 % 단축)

### 6. 결론 및 향후 방안

장치의 성능 시험을 통하여 일정 속도 이하에서 안정적인 slitting 작업이 이루어짐을 알 수 있었다. 또한, 최대 압축 힘은 저속보다는 고속에서 평균적으로 높았다. 이러한 결과를 통하여 slitting 시 작업 속도가 모의 pellet의 원활한 배출에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한, slitting 된 연료봉 hull의 내면을 관찰해 보면 속도가 일정할 경우 slitting 면이 다소 매끈하게 절단되었다. 하지만, 이러한 두 결과는 수동 작업에서 이루어진 결과이므로 속도 가변에 대한 적절한 slitting 작업 구현과 기계적인 jamming 이탈을 위한 최적의 속도 판별을 위해서는 자동화 작업을 통한 추가적인 시험이 요구된다.

### 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. O.Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering", 2nd Ed., p.361, McGraw-Hill, New York, 1972.
4. Matcheret and M. Bourgeois, "Mechanical Decladding of Stainless-steel-clad Oxide Fuels", CEA-R-4469, 1973.
5. 양명승 외, "핵연료제조 및 품질관리 기술개발," KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1996.
6. Mattias Hartrumpf and Roland Munser, "Optical three-dimensional measurements by radially symmetric structured light projection", Applied Optics, Vol. 36, No. 13, pp. 2923-2928, 1997.
7. K.Fukudome, "Mechanical Decladding by Rolling Straightener", Technical Report, Kobe Steel Ltd., July, 1997.
8. 박장진 외, "정·중수로 연계핵연료주기 기술개발," KAERI/RR-2009/99, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1999.
9. 정재후 외 "비산화식 (기계식) 모의 소결체 인출 장치 메커니즘 개발," KAERI/TR-1418/99, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1999.