

Cutter blade에 의한 SUS 및 지르칼로이 튜브 절단 실험

Experiment on Cutting the SUS and Zircaloy Tubes by Cutter Blade

정재후, 윤지섭, 홍동희, 김영환, 박기용(한국원자력연구소)

Jae Hoo Jung, Ji Sup Yoon, Dong Hee Hong, Young Hwan Kim, Gee Yong(KAERI)

Abstract

In the dismantling process of nuclear spent fuels, the spent fuel rod cutting process, followed immediately by the decladding process, performs the cutting the spent fuel rods to a proper length for fast decladding operation. In this paper, we analyzed the chemical compositions, mechanical properties, and physical characteristics for SUS and zircaloy tubes in order to identify the feasibility of cutter-blade type in cutting SUS and zircaloy tubes. It is considered that material, shape and angle, and heat treatment for fabricating the highly durable cutter blade and also it is investigated that the round-shape sustenance of cross-section, amount of debris production, and fire occurrence for measuring the cutting performance on SUS and zircaloy tubes. spent fuel rod cutting device is designed to be operated automatically through the remote control system for use in Hot Cell(radioactive) area and the electro-driven mechanical parts are modularized for easy maintenance Results from various experiments confirm the efficiency of this device.

Key words : Spent Fuel Rod, Rod Cutting, Decladding, Zircaloy, Hot Cell

1. 서론

사용후핵연료봉 절단은 소결체 인출의 전 단계 공정으로서 소결체 인출에 적당한 길이로 절단하는 공정을 말한다. 국내·외의 절단 방식으로는 줄뚫/연마식, 레이저, Wire EDM(Wire electron discharge machining cutting) 및 전단 절단방식 등이 있다. 이들 방식들을 연료봉 절단부의 압착정도, 공정의 효율성 및 신속성 등에서 조사·분석한 결과 diamond wheel 및 cutter blade 절단방식이 본 연구에서 적합한 것으로 분석되었다. 본 연구에서 선정된 2가지 절단방식으로 기초실험을 수행한 결과 절단면의 원형도가 높고, 2차 폐기물 발생량이 적은 cutter blade 방식을 선정하였다. 장치는 핫셀 내의 사용에 대비하여 원격조작방식으로 작업이 수행될 수 있는 구조로 설계하였다. 또한, 구동 특성에 따라 구동부를 모듈화 하여 상부에 배치함으로써 원격조작에 의한 유지·보수가 용이하도록 하였다.

는 철강의 주성분으로 크롬을 포함한 것과 크롬 및 니켈을 포함한 것이 있다. Cr 강은 Cr의 함유량이 많을수록 내식성이 강하고, 일반적으로 Cr이 3~30% 사용된다. 크롬니켈 강은 내식성이 뛰어나 원자로 용 구조재료로 사용되며, Cr 강에 비하여 일반적으로 양호하다. 이들의 대표적인 강은 10% Cr 강과 19% Ni 강이다. 표 1, 2는 SUS의 기계적 성질과 화학성분을 나타낸 것이다.

표 1. 기계적 성질

항목	Sheet	Plate	Bar-1 in Rd
인장강도 (kg/mm ²)	63	59.5	59.5
항복강도 (kg/mm ²)	28	24.5	24.5
인신율 (%)	50	55	55
단면 감소율 (%)		65	65
충격저항 (ft-lbs)		100	100
경도	85 HwB	160 BHN	160 BHN
피로강도 (kg/mm ²)	27.3	27.3	26.6
에릭슨 값 (mm)	12		
올센 값 (Olsen value)	0.4~0.5		
냉간규합 (°C)	180	180	180

2. SUS tube 및 Zircaloy tube 제철의 특성

2.1. SUS tube의 특성

SUS tube는 공기 또는 수중에서 쉽게 녹슬지 않

표 2. 화학 성분

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.08 이하	2.00 이하	1.00 이하	0.045 이하	0.030 이하	16.0/18.0	10.0/14.0	2.0/3.0

2.2. Zircaloy tube의 특성

Zircaloy는 지르코늄의 일종이며, 내식성을 개량할 목적으로 제작된 합금이다. 또한, 중성자 흡수 단면적이 작고 훌륭한 기계적 성질을 가지며 판, 봉, 관, 선 등으로 가공할 수 있으며, 노심 탱크, 연료피복, 냉각관 구조재로 사용된다. 표 3, 4, 5는 zircaloy의 성분, 물리적 성질, 기계적 성질을 나타낸 것이다.

표 3. Zircaloy tube의 성분

구분	성분	Sn	Fe	Ni	Cr	Zr
Zircaloy-4		1.45	0.15	-	0.1	나머지

표 4. 물리적 성질

구분		내용
원자 번호		40
원자량		91.92
밀도		6.80 (g/cm ³)
격자 구조	α상 (862 °C 이하)	조밀육방격자 (HCC)
	β상 (862 °C 이상)	체심입방격자 (BCC)
용융점		1,852 °C
비등점		3,580 °C
열중성자 흡수 단면적		0.18 barn

표 5. 기계적 성질

구분	상온	340 °C	환산값
인장강도 (N/mm ²)	450	220	45.87 Kg/mm ²
항복강도 (N/mm ²)	320	125~175	32.6 Kg/mm ²
연신율 (%)	20	25	

3. Cutting blade를 이용한 절단에 사용된 재료

3.1. 재료 선정 및 설계

실험 재료로 SUS(304 L)와 zircaloy(zircaloy-4) tube를 대상으로 하였다. SUS는 상용화된 상품을 구입하여 사용하였다. 규격은 내경 7.75 mm, 외경 9.52 mm이다. 그림 1은 zircaloy tube의 설계도와 제작품을 나타낸 것이다. 규격으로 봉단 마개 end plug는 11.48 mm, 피복관 tube는 1791.87 mm, 압축 스프링은 185.17 mm 이며, 외경 9.5 mm, 내경 8.357 mm, pellet과의 간격은 0.528 mm 이다.

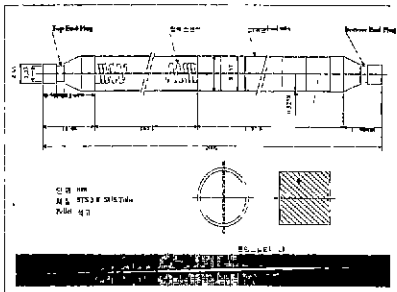


그림 1. Zircaloy 튜브의 설계도 및 제작품

4. Cutter blade 제작

4.1. Cutter blade 설계 및 제작

Cutter blade를 이용한 절단작업에 사용된 재료는 SUS와 zircaloy tube 이다. 따라서, cutter blade의 내구성을 좋게 하기 위하여 날의 모양, 각도, 크기, 두께 등을 고려하여 설계·제작하였다. cutter blade A, B, C type 등의 설계 및 제작품은 그림 2에서 보는 바와 같다.

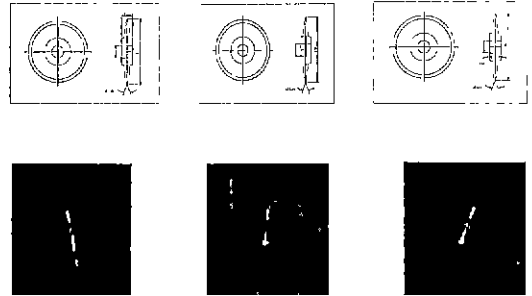


그림 2. Cutter blade A, B, C의 설계도 및 제작품

4.2. Cutter blade의 특징

Cutter blade의 각 형태별 특징으로서, A type의 cutter blade는 날끝이 예리하여 SUS와 zircaloy tube 절단시 마모가 심하다. zircaloy tube의 절단면은 매끈하며, 절단이 잘된다. B type cutter blade는 날 끝이 A type blade 보다는 예리하지 않지만, zircaloy tube 절단시 절단이 잘되나, 절단면은 약간 거칠다. C type의 cutter blade는 날끝이 A, B type cutter blade 보다는 예리하지 않으나 절단시 cutter blade의 손상은 크지 않고, 절단면이 거칠다.

4.3. Cutter blade의 열처리

Cutter blade의 열처리에 따라 내구성, 절단면의 거칠기 정도, 원형도, debris 및 화재 발생 정도가 결정된다. 따라서, cutter blade의 수명을 향상시키기 위해서는 열처리가 가장 중요하다. 사용목적에 따라 강도와 표면의 높은 경도를 동시에 필요로 하기 때문에 열처리를 한다. 이와 같은 경우, 재료의 표면만을 경하게하여 내마모성을 증대시키고, 내부는 충격에 대한 저항을 크게할 수 있는 메탄올을 사용한 가스 침탄법으로 제품의 표층부에 탄소를 투입시킨 후 담금질하여 표층부를 경화 열처리하였다. 열처리 공정은 그림 3에서 보는 바와 같다.

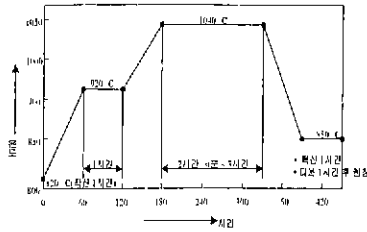
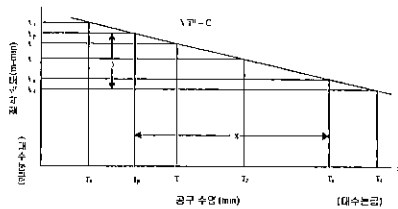


그림 3. Cutter blade의 열처리 공정

4.4. Cutter blade의 수명

Cutter blade의 수명이란 공구를 사용하여 재료를 일정한 조건으로 절단하기 시작하여 cutter blade가 마모되어 절삭할 수 없게 되기까지의 시간이나, 소요된 절삭 공작물의 개수로 표시한다. 그림 4는 대수 방한지에 표시한 공구 수명식을 나타낸 것이다. 공구의 수명은 조건이 일정한 경우에는 절삭속도 V 와 절삭 깊이의 증가에 따라 급격히 감소된다. 특히 공구수명과 절삭 속도와의 관계식은 $VT^n=C_1$ 가 성립된다. 여기서, T 는 공구수명(min), C_1 는 공작물과 공구의 재질 및 절삭 깊이, 이송, 절삭재 등에 따른 정수($T=1$ 일 때의 속도), n 는 공작물 및 공구의 재질 등에 따른 정수이며, 보통의 절삭조건 범위에서는 $n=1/5 \sim 1/10$ 이다.



$$N = \frac{y}{x} = \frac{\log V_p - \log V_q}{\log T_q - \log T_p}$$

그림 4. 대수 방한지에 표시한 공구 수명식

5. SUS와 Zircaloy tube 절단 실험 방법

최적의 절단조건을 찾기 위하여, cutter blade의 회전속도, 이송속도, cutter blade의 날 각도를 변화시켜가며 실험을 하였다. 즉, 3 type 중 A의 날 각도는 20.3° , B의 날 각도는 28.6° , C의 날 각도는 53.1° 를 갖는 cutter blade를 사용하였다. 실험시 cutter blade의 회전속도는 1000, 1200, 1400 rpm, 이송속도는 27.7, 22.7, 16.6 rpm으로 실험을 수행하였다.

6. SUS tube와 Zircaloy tube의 실험 결과

6.1. SUS tube

SUS tube의 실험 결과 표 6은 cutter blade의 type 별 feed 량과 회전수에 따른 절단시간(초)을 나타낸 것이다. 그림 5, 6, 7은 절단 회전수와 feed 량 27.7, 22.7, 16.6 rpm에 따른 절단시간(초)을 각각 나타낸 것이다.

표 6. Feed 량과 회전수에 따른 절단시간(초)

blade type/feed 량	rpm 수			
	1,000	1,200	1,400	
A type (20.3°)	27.7	2.3	2.4	2.3
	22.7	3.4	3.5	3.4
	16.6	6.2	6.2	6.4
B type (28.6°)	27.7	2.9	2.9	3.1
	22.7	3.5	3.4	3.5
	16.6	5.6	5.7	6.7
C type (53.1°)	27.7	2.3	3.2	3.1
	22.7	3.4	3.5	3.7
	16.6	5.1	5.2	5.8

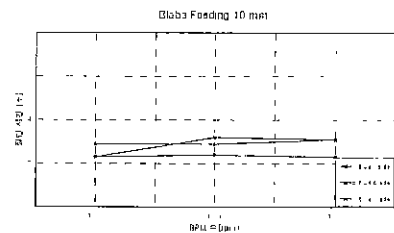


그림 5. 회전수와 feed 량(27.7 rpm)의 절단시간(초)

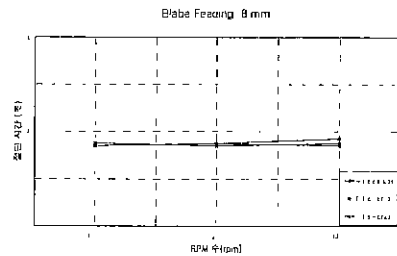


그림 6. 회전수와 feed 량(22.7 rpm)의 절단시간(초)

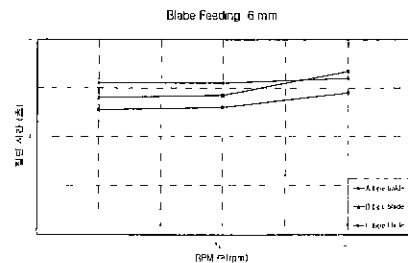


그림 7. 회전수와 feed 량(16.6 rpm)의 절단시간(초)

6.2. Zircaloy tube

Zircaloy tube의 실험 결과 표 7은 cutter blade의 type 별 feed 량과 회전수에 따른 절단시간(초)을 나타낸 것이다. 그림 8, 9, 10은 절단 회전수와 feed 량 27.7, 22.7, 16.6 rpm에 따른 절단시간(초)을 각각 나타낸 것이다.

표 7. feed 량과 회전수에 따른 절단시간(초)

blade type/feed 량		rpm 수	1,000	1,200	1,400
A type (20.3°)		27.7	2.2	2.5	2.3
		22.7	3.5	3.2	3.4
		16.6	4.2	5.3	5.2
B type (28.6°)		27.7	2.4	2.7	2.9
		22.7	3.2	3.3	4.7
		16.6	4.4	4.3	5.2
C type (53.1°)		27.7	2.9	2.8	3.1
		22.7	3.1	3.1	3.8
		16.6	3.8	4.4	5.3

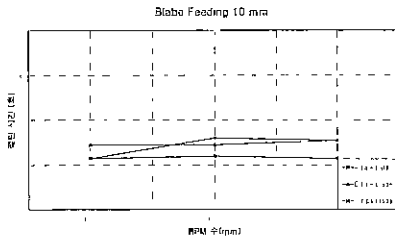


그림 8. 회전수와 feed 량 (27.7 rpm)의 절단시간(초)

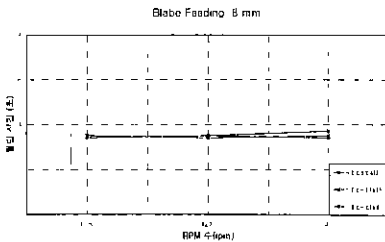


그림 9. 회전수와 feed 량(22.7 rpm)의 절단시간(초)

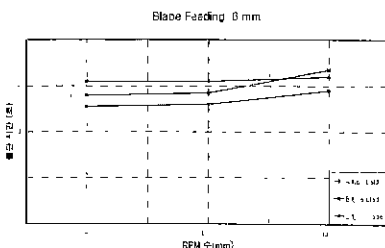


그림 10. 회전수와 feed 량(16.6 rpm)의 절단시간(초)

7. 결론

Cutter blade를 이용하여 SUS와 zircaloy tube를

절단하기 위해서 화학성분, 기계적 성질, 물리적 성질, Pellet의 재질 등에 대하여 분석하였다. 이를 토대로 cutter blade를 이용한 SUS 및 zircaloy tube를 절단할 수 있는 절단장치를 제작하였다. 제작한 절단 장치에 cutter blade를 장착하여 절단 실험을 수행하였다. 실험결과 Zircaloy tube가 SUS tube에 비해 cutter blade의 회전속도가 저속이고 cutter blade의 이송속도 량이 클수록 절단시간이 짧고, cutter blade의 회전 속도와 이송속도가 동일할 경우 C(날 각도 53.1°) 형의 cutter blade를 사용할 경우 절단 시간이 짧았다. 최적의 cutter blade의 조건은 cutter blade의 회전 속도를 1000 rpm, cutter blade의 형태는 C형, cutter blade의 이송속도는 27.7 rpm일 때 가장 좋은 것으로 판명되었다. 따라서, 향후 핵연료 재활용 공정을 위한 절단 장치를 제작할 경우 효율적으로 연료봉을 절단하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. "Fuel Rod Consolidation Project" Final Design Report Contract No. DE-AC07-86ID 12651. DOE/ID/12651-2-Vol. 1 DE88 004219.
2. 양명승 외, "핵연료제조 및 품질관리 기술개발", KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1986.
3. W. D. Bond and J. C. Mailen and G. E. Michaels, "Evaluation of Methods for Decladding LWR Fuel for a Pyroprocessing Based Reprocessing Plant", October, 1992.
4. Westinghouse Proprietary Class 2, Chapter 2 : Zircaloy-4, Rev. 6, Oct., 1993.
5. K. Fukudome, "Mechanical Decladding by Rolling Straightener", Technical Report, Kobe Steel Ltd., July (1997).
6. 이은표 외, "사용후핵연료봉 절단장치 제작", KAERI/TR-1084/98, 한국원자력연구소, 1998.
7. 박장진 외, "경·중수로 연계핵연료주기 기술개발", KAERI/RR-2009/99, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1999.
8. 정재후 외, "Blade cutter 방식에 의한 사용후핵연료봉 절단 장치 개발", KAERI/TR-1662/2000, 한국원자력연구소, 2000.