

건식재가공 핵연료 조사시험 리그를 위한  
STS-316L의 타당성 평가  
Evaluation of STS-316L for Instrumented Dry Process Fuel  
Irradiation Rig

박창제, 이철용, 문제선, 송기찬  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

건식재가공핵연료의 조사시험을 위한 리그제작에 핵연료 피복재 외에도 여러 구조물에 고가의 지르칼로이-4가 사용되고 있다. 이를 대체하여 스테인레스 스틸(STS) 316L이 여러 가지 물성면에서 충분한 대안이 될 수 있다. 문헌에서 수집된 내용을 토대로 STS-316L의 사용가능성을 비교 검토하였으며, 방사성동위원소의 생성과 붕괴 현상을 모사할 수 있는 ORIGEN-2 코드를 이용하여 건식재가공핵연료의 4차 조사시험을 모델로 하여 조사 방출 방사능에 대한 비교계산으로 수행하였다. STS-316L의 방출 방사능이 약 4배 정도로 높게 평가되나 충분히 허용할 만한 수치를 보여주고 있다. 본 연구 결과는 향후 하나로 조사시험리그 제작에 있어 STS-316L의 이용 가능성을 평가하는 기본 자료로 활용될 것이다.

Abstract

Zircaloy-4 has been used for not only fuel cladding but also several structural material for dry process fuel irradiation rig. To substitute zircaloy-4 which is very expensive and is not available to obtain, the stainless steel (STS)-316L can be a good alternative considering several characteristics. Literature data of two kinds of materials are compared and the ORIGEN-2 is used to calculate the production and decay phenomenon of radioactive isotopes based on the fourth DUPIC irradiation test model. The radioactivity of STS-316L is evaluated about 4 times higher than that of zircaloy-4 but it can be acceptable enough

considering the structure material of rig. This result will be utilized to substitute zircaloy-4 with STS-316L for the dry process fuel rig in the future.

## 1. 서론

건식재가공 핵연료의 성능평가를 위해 소결체의 조사시험은 상당히 중요한 부분을 차지하고 있다. 1999년 8월부터 시작된 조사시험은 하나로 핵연료를 기본으로 자체 개발된 무게장 리그를 사용하여 조사시험을 수행하여 2002년 8월에는 4차 조사시험을 성공적으로 수행하고 있다. 계장 리그를 설계 및 제작을 완료하여 2003년 11월 경에 하나로 원자로에 장전하여 핵연료 중심온도를 측정할 예정으로 연구가 진행중에 있다. [1]

기존의 조사시험 리그에서 핵연료 피복재를 포함하여 일반적인 구조물에 상당히 비싸며 수입에 의존하는 zircaloy-4가 사용되어 오고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 비핵적인 구조물에서 zircaloy-4 대신 손쉽게 구할 수 있는 스테인레스 스틸(STS-316L)을 이용하고자 한다. 조사장전 재료의 대체는 물론 하나로 승인과 내구성 실험을 거쳐서 결정될 사항이다. 이에 앞서 본 연구에서는 예비 연구로서 각 재료의 특성을 조사하고 나아가 방사성 붕괴현상을 모사할 수 있는 ORIGEN-2 코드 시스템[2]을 도입한 예비계산을 수행하였다.

## 2. 구조물의 특성 비교

그림 1의 조사시험용 리그에서 핵연료 부분과 무관한 rod tip, collar, pin, central rod, grapple head lock, grapple head 등과 같이 주요 부품을 zircaloy-4로 사용되고 있다. Zircaloy-4는 zircaloy-2에 비해 크롬과 철의 함량을 늘리고, 방사능의 문제가 있는 니켈의 함량을 줄인 합금체이다. 물론, zircaloy-4는 고온에서 기계적 성질과 물에 대한 내부식성이 우수하며 중성자 흡수율이 적은 장점이 있다. 이러한 특징은 핵연료봉의 피복재의 특성으로서는 적합하지만 조사시험 리그의 중심봉과 같은 경우 중성자 흡수율이 높아 상대적인 출력을 감소시킬 수 있는 재질이 보다 적합하다. 또한 zircaloy-4의 경우 고가로 구입 절차가 상당히 복잡하며 시간도 오래 걸린다. 이에 비해 STS-316L은 강도와 내부식성이 우수하며 저렴하고 구입이 용이한 반면, 중성자 흡수단면적이 크고 중성자 조사후 연성이 나빠져 균열 발생 가능성이 있다. STS-316L과 316의 차이는 탄소의 함유율에 있다. 316L은 최대 0.03%의 탄소를 함유하고 있으며 316은 최대 0.10%를 함유하고 있다. 탄소는 내식성면에서 적을수록 좋지만 탄소가 너무 낮으면 경도와 강도가 낮아지는 결함이 보고되고 있다.[3] 표 1은 원자력분야에서 두 가지 재료의 이용도를 나타내고 있다. 표 2는 각 재료의 물성을 나타내고 있다. zircaloy-4의 경우 원자력 재료로 구분되어 국내에서 이용하기가 어려운 실정이며 거의 외국에서 수입하여 사용하고 있는

실정으로 고가로 거래되고 있다. 또한 여러 가지 복잡한 절차를 감수하며 장시간 운반시간도 감수해야한다.

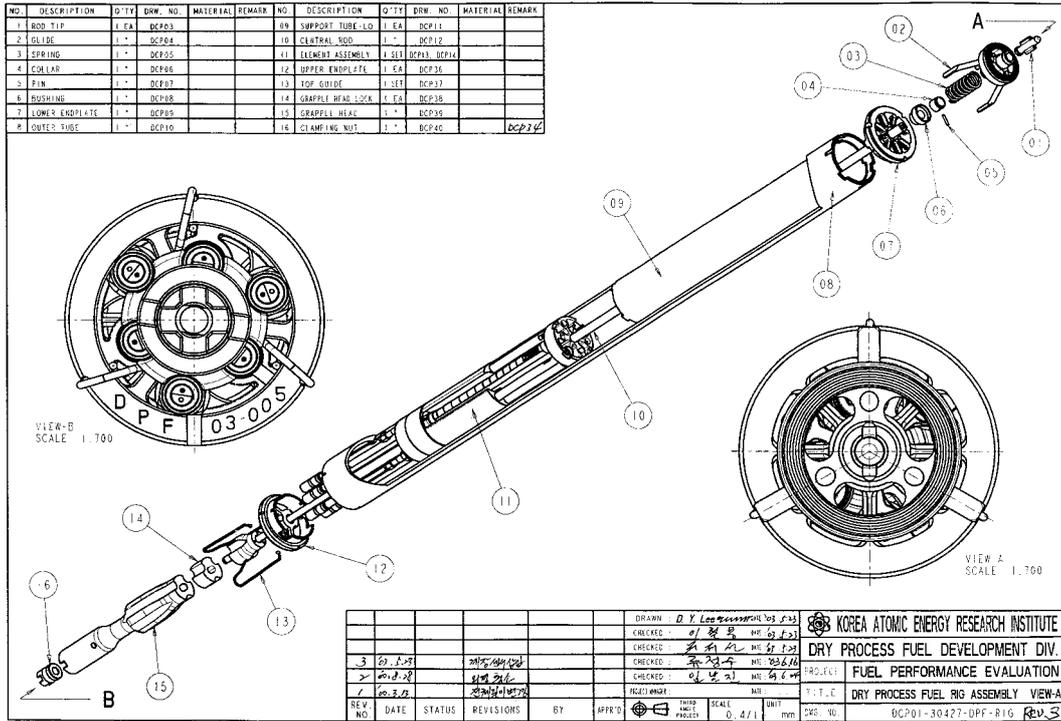


그림 1. 건식재가공 핵연료 조사시험용 리그의 모양

표 1. Zircaloy-4와 STS-316L의 원자력에서의 사용용도

	봉 가격 (원/kg)	열중성자 흡수단면적	사용용도
Zircaloy-4	~220,000	~0.23 barn	경수로, 중수로: 피복관 재료 가압경수로: zircaloy-4(수소화 강함) 비등경수로: zircaloy-2 (내식성 강함)
STS-316L	~4,500	~3.2 barn	경수로: 연료집합체 안내관, 계측관 고속로: 연료피복관 가스로: 연료피복관

표 2. Zircaloy-4와 STS-316L의 재료 물성 비교

	용점(°C)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	열전도도 (W/m-K)	열팽창률 (10 <sup>-6</sup> /°C)	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )
Zircaloy-4	1855	6.56	20°C: 21.1	20°C : 5.85	20°C : 63.3 385°C : 42.2
STS-316L	1375-1400	8.02	100°C : 16.2 500°C : 21.5	100°C : 15.9 540°C : 17.5	20°C : 70.3 360°C : 52.7

### 3. 구조물의 방사화 계산

조사시험용 리그에서의 중심축봉과 같은 비핵연료 구조물의 조사후 방사능을 계산하기 위하여 ORIGEN-2 코드시스템을 활용하였다. 조사시험용 리그의 건식재가공 핵연료의 소결체는 5개씩 3개의 봉으로 구성되어 있으며 총무게는 154g이다. 중심축을 Zircaloy-4 로 제조한 경우 328g이며 STS-316L 인 경우는 394g 이다. 조사 조건에서 필요한 중성자속 레벨은 KWU 핵연료집합체의 봉단마개에서 사용되는 출력비율인 0.011로 지정하여 연소계산을 수행하였다. 4차 조사시험은 110일 정도 지속되었으며 조사당시 하나로의 최고 선출력은 41.94kW/m로 그 변화는 그림 2에 나타내고 있다. 표 3은 ORIGEN-2의 계산에 이용된 재료이 성분을 나타내고 있다. 조사후 냉각기간은 3000일까지 정하였으며 이에 따른 각 동위원소별 방사능을 계산할 수 있다.

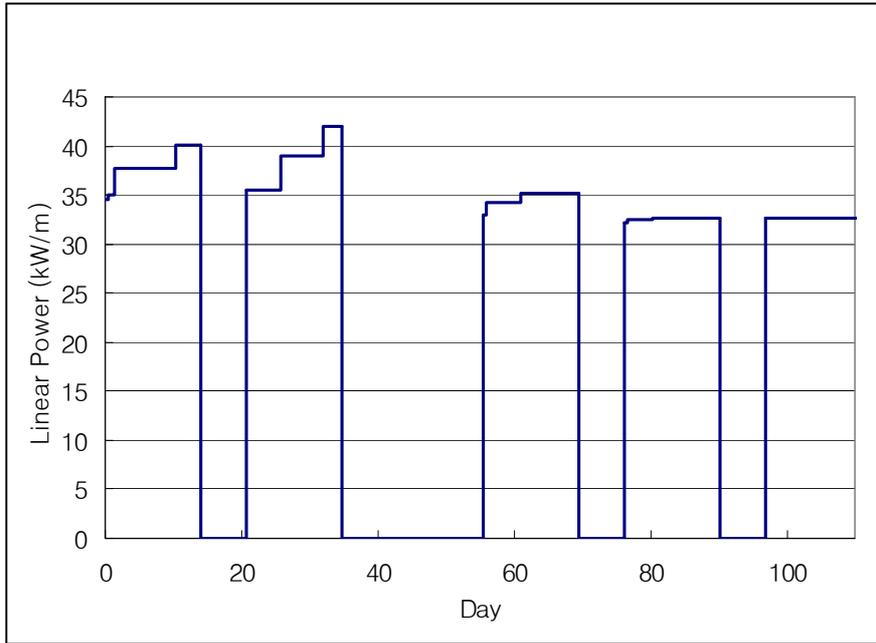


그림 2. 4차 조사시험시 하나로의 선출력 변화

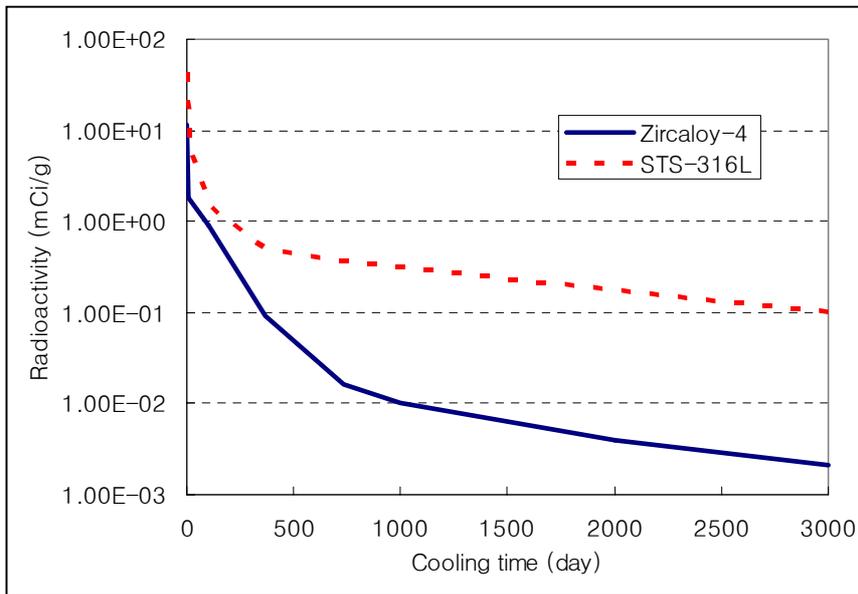


그림 3. 냉각기간에 따른 총 방사능의 변화

표 3. ORIGEN-2 계산에 사용된 구조물의 구성성분(ppm)

	Zircaloy-4	STS-316L
H	13	0
B	0.33	0
C	120	300
N	80	1,300
O	950	0
Al	24	0
Si	0	10,000
P	0	450
S	35	300
Ti	20	0
V	20	0
Cr	1,250	170,000
Mn	20	20,000
Fe	2,250	655,850
Co	10	800
Ni	20	120,000
Cu	20	0
Zr	979,110	0
Cd	0.25	0
Sn	16,000	0
Hf	78	0
W	20	0
U	0.2	0

표 4. 방출 방사능 비교 (mCi/g)

	Zircaloy-4 (Co, Sb)	STS-316L (Fe, Co)
Discharge	1.13E+01 (2.44E-02, 7.33E-03)	4.43E+01 (5.13E-01, 2.68E+00)
1 year	9.03E-02 (1.60E-03, 1.40E-03)	4.94E-01 (3.02E-01, 1.48E-01)
2 years	1.65E-02 (1.40E-03, 4.88E-03)	3.67E-01 (2.31E-01, 1.13E-01)

그림 3는 냉각기간 동안 단위 무게당 총 방사능의 변화를 나타내고 있으며 표 4는 각 재료의 방출방사능을 조사직후, 1년, 그리고 2년후의 기간에 대하여 나타내고 있다. 전반적으로 zircaloy-4에 비해 STS-316L의 방사능이 높게 나오는데 이는 주로 반감기가 비교적 긴 방사성 물질인 Fe-55나 Co-60이 상대적으로 많이 함유되어 있기 때문이다. zircaloy-4의 경우는 Co-60과 Sb-125의 영향이 가장 큰 것으로 나

타났다. 조사 시험의 특성상 계산된 방사능량은 충분히 수용할 정도이며 STS-316L은 zircaloy-4에 비하여 심각하게 높게 산출되지 않아 충분히 대체 가능할 것이다. 또한 중성자흡수율이 높아 장전리그의 핵연료봉의 중심온도를 낮추는데 기여할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

건식재가공 핵연료의 조사시험용 리그에서의 중심축봉과 같은 비핵연료 구조물에서 zircaloy-4를 대체하여 구입이 용이한 STS-316L의 변경을 위한 예비계산을 수행하였다. 계산결과 높은 중성자흡수단면적으로 인하여 STS-316L의 방사능량이 높게 산출되었으나 장전리그의 특성상 zircaloy-4와 비교하면 충분히 허용할 수 있는 수치내의 값임을 확인하였다. 향후 기계적인 건전성 및 내구성 실험을 수행하여 실질적인 변경 조치를 위한 세부 연구를 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

#### 참고문헌

- [1] 송기찬 외, 경중수로 연계 핵연료주기 기술개발 - DUPIC 핵연료 조사시험 및 성능평가 기술개발, KAERI/RR-2236/2001 (2001).
- [2] A.G. Corff, *A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code*, ORNL/TM-7175 (July 1980).
- [3] 김진덕 외, 이론과 실제 - 특수용접, 원창출판사 (1996)
- [4] 이기순, 핵연료개론, 효일출판사 (2001)