

## 장기저장 밀봉재의 성능평가 연구동향

최우석, 이상훈, 방경식, 서중석, 서기석, 이주찬, 박근일  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111  
[wschoi@kaeri.re.kr](mailto:wschoi@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

사용후핵연료를 저장하는 볼트체결 캐스크의 격납경계 (confinement boundary)를 형성하는 주된 구성요소는 밀봉재 (Seal)이다. 밀봉재의 종류는 크게 탄성중합 밀봉재 (Elastomer seal)와 금속 밀봉재 (Metallic Seal)로 대변된다. 탄성중합 밀봉재는 일반적으로 방사능물질 운반용기에, 금속 밀봉재는 방사능물질의 저장용기에 사용된다. 이러한 밀봉재는 열과 방사선에 의해 그 성질이 저하 (degradation)된다. 또한, 밀봉재가 강한 열에 노출되면 크리프 현상이 발생한다. 이러한 크리프는 밀봉시스템에 응력 이완 (stress relaxation)을 가져와서, 결국 밀봉재의 건전성을 해치게 된다. 크리프와 더불어 지속적인 온도의 오르내림이 반복되면 열적 기계적 피로 (fatigue)를 가져오게 되고 균열이 생성되며 중국에는 파손에 이르게 된다. 독일, 일본, 프랑스, 미국 등의 원자력 선진국에서는 금속밀봉재의 열적 특성 저하, 부식 등에 대하여 지속적인 연구를 수행하고 있다. 본 논문에서는 장기저장으로 인한 밀봉재의 성능저하 메카니즘과 관련 연구의 내용을 정리하였다.

### 2. 장기저장 밀봉재 관련 연구

#### 2.1 일본의 장기저장 밀봉성능 시험

일본 CRIEPI에서는 장기저장에 따른 금속 가스켓의 격납건전성을 평가하기 위하여 두 가지 종류의 캐스크 뚜껑을 포함하는 원형시험모델을 만들고, 이를 이용하여 19년 동안 가속화 시험을 수행하였다. 이는 60년 기간을 모사한 것이었다.

시험에서의 온도 조건을 결정하기 위하여 ABAQUS 코드를 이용하여 열해석을 수행하였다. 붕괴열의 감소량을 고려하여, 온도 분포의 시간이력을 계산하였다. 시험시 온도측정을 위해, 뚜껑 모델의 외부면과 내부에 열전대를 설치하였고, 두 번째 뚜껑의 누설율을 2주에서 3주에 한 번씩 측정하였다. 시험은 1990년에 시작하여 2010년에 종료되었다.

Type-I 과 Type-II 모델에서 측정된 누설율은

각각  $10^{-10}$ 과  $10^{-11}$  Pa·cm<sup>3</sup>/s의 차수를 갖는다. 격납 성능은 은으로 둘러 쌓인 가스켓이 알루미늄으로 둘러 쌓인 금속 가스켓보다 좋은 결과를 나타내었다. 19년이 넘는 시간동안 매우 안정적인 격납 성능을 가지고 있음이 검증되었다.

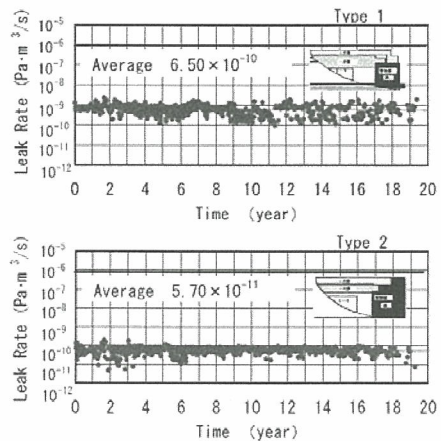


Fig. 1. Leak rate of Type-I and Type-II lid model.

원형시험모델과는 별도로 누설발생의 한계조건을 찾아내기 위하여 작은 플랜지 모델을 이용하여 가속화조건하에서 실험을 수행하였다. 플랜지 모델은 한 개의 금속 가스켓이 있는 두 개의 플랜지로 구성되고 두 개의 플랜지를 볼트로 연결된다. 플랜지 모델은 화로 (furnace)에 넣어 최대 10,000 시간 동안 가열되었다. 최대 가열 온도는 300 °C이다. 가스켓의 변형은 Larson-Miller Parameter (LMP)와 관계가 있다고 가정하여, 가스켓에서의 누설은 다음의 식으로 주어지는 LMP와 관련이 있음을 주장하였다.

$$LMP = T \times (C + \text{Log}_{10}(t)) \dots\dots\dots (1)$$

Eq. (1)에서 T는 절대온도(K)이고, t는 시간(h), C는 상수값이다. LMP를 사용하면, 저온에서 장시간에 대한 평가는 고온에서 단시간에 대한 결과를 사용하여 예측할 수 있다.

#### 2.2 금속밀봉재 성능저하 영향인자 평가

독일 BAM에서는 용기의 운반시 발생하는 정상 조건 및 사고조건에서 금속 밀봉재의 거동을 평가하는 시험을 수행하였다. 독일은 격납시스템의 중요 구성요소인 밀봉재에 대한 품질보증 및 평가기준을 개발하고 있으며, 이러한 기준들은 제작자에 대한 자질검증, 시험 밀봉재의 제작, 밀봉재의 기계적/열적/단기/장기 거동에 대한 종합적인 검증 프로그램, 원형 밀봉재 제작기간 동안의 품질보증, 조립 및 장착 이후의 계획, 일반적인 운전기간 동안의 격납시스템 재검사 시험 등을 포함한다.

GNS는 CASTOR 캐스크의 격납시스템 구성요소로서 금속 이중 자켓 스프링 밀봉재의 설계 및 특성에 대한 검증을 신청했고, 이로 인해 금속 밀봉재, 뚜껑, 볼트, 캐스크 본체로 구성된 시스템의 거동에 대한 일부 수정된 기준이 개발되었다. 이러한 설계기준들은 탄성 압축 및 인장거동과 표준화 헬름 누설율을 주요하게 다루고 있다. 또한, 이중 재킷 금속 밀봉재에 대한 주된 이슈를 포함하고 있다. 즉, 재료의 사양, 하중-변위 선도, 축방향 하중에 대한 밀봉 (플랜지/밀봉재의 변위), NCT와 ACT 하에서 최대 및 최소온도의 영향, 미세입자 (particle) 실험 (밀봉재와 접합 면의 다른 크기의 미세입자가 밀봉에 미치는 영향), 부식, 장기성능 등의 이슈를 포함한다.

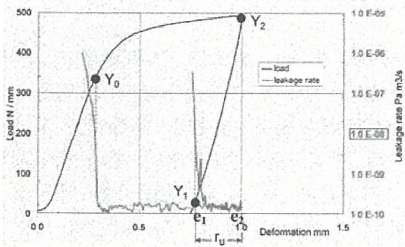


Fig. 2. Example of a load deformation curve of a double jacket seal.

### 2.3 Viton O-ring의 밀봉성능 시험

SRNL은 플로토늄을 KAMS (K-Area Material Storage) 시설에 보관하고 있다. 플로토늄은 DOE-STD-3013 기준에 따라 패키징되어 Savannah River Site으로 Type B 9975 Package로 운반되었다. 초기에 9975 이송용기는 장기저장을 위한 용도로 설계되지는 않았으나, 9975는 명확한 저장 시설의 일부이므로, KAMS 시설 안전기준은 9975 설계를 격납구조로 인정하였다. 9975 용기는 스테인레스강 격납용기가 Viton fluoroelastomer 기반

의 이중 O-ring seals로 단혀있다. 저장을 위한 O-ring의 수명예측 모델을 개발하기 위해, O-ring 집합체의 노화거동에 관한 연구가 진행되고 있다.

### 3. 결론

독일, 일본, 프랑스, 미국 등의 원자력 선진국에서는 금속밀봉재의 열적 특성 저하, 부식 등에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 프랑스에서는 1973년에 시작된 테스트 프로그램을 통해 밀봉재에 증대한 변화는 없다는 사실을 찾아내었다. 독일은 알루미늄 또는 은 재킷을 가진 금속 밀봉재 Helicoflex의 크리프를 150 °C에서 측정할 결과 밀봉 성능 상실을 아직까지 발견하지 못했다. 일본은 금속 밀봉재 Helicoflex의 성능시험을 1990년에서 2010년까지 수행하였고, 누설율과 Larson-Miller 인자 사이의 관계를 측정하였다. 그리고 알루미늄으로 쌓인 가스켓은 초기 온도 134 °C 이하로, 은으로 쌓인 가스켓은 초기 온도 125 °C 이하로 운영되는 한 밀봉성능은 약 60년 동안 보장할 수 있다는 결론을 내놓았다.

2012년 발간된 Gap analysis 리포트에서도 장기저장시 O-ring에 대한 성능평가에 대한 필요성과 중요성이 강조되어 있으며, 우리나라에서도 조속히 이에 대한 체계적인 시험계획이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

### 4. 참고문헌

- [1] FCRD-USED-2011-000136, "Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, Rev.0", U.S. DOE UFDC, 2012.
- [2] NWTRB., "Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel", 2010.
- [3] SRNL-STI-2012-00023, "Aging Behavior of Viton O-Ring Seals in the 9975 Shipping Package", Waste Management Conference, 2012.
- [4] Sven Schubert et al., "Behavior of Metallic Seals in CASTOR®-Casks under Normal and Accident Conditions of Transport: Qualification Requirements", PATRAM 2007.
- [5] M. Wataru et al., "Long-term Containment Test using Two Full-Scale Lid Models of Metal Cask with Metal Gaskets for Interim Storage", The 3rd East Asia Forum on Radwaste Management, 2010.