

Evaluation of Long-term Performance of Metal Seal Through Accelerated Test

가속화 시험을 통한 금속 밀봉재 장기성능 평가

Woo-seok Choi*, Jongmin Lim, Yun-young Yang, and Sang Soon Cho

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

최우석*, 임종민, 양윤영, 조상순

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received May 28, 2020 / Revised July 16, 2020 / Approved August 6, 2020)

Metal seals are the main components that establish the containment boundary in bolted casks, which store spent nuclear fuel. These seals are degraded by heat and radiation. In addition, creep occurs when the seals are exposed to intense heat for an extended period. This creep results in the stress relaxation of the seals, which consequently impairs the seal integrity. The stress relaxation can reduce the sealing performance of the metal seal, which can further cause leakage in the storage cask. Moreover, the reduction of bolt tension leads to sealing performance degradation. In this study, the results of high-temperature-accelerated tests were obtained to evaluate the containment integrity of metal seals and the decrease in bolt tension. During the tests, the leakage rate, bolt strain, and ambient temperature of the metal seals were measured and analyzed. The metal seals were found to maintain containment integrity for 50 years of storage. The validity of the acceleration test was also investigated.

Keywords: Long-term storage, Metal seal, Containment integrity, Accelerated test, Stress relaxation, Creep

*Corresponding Author.

Woo-seok Choi, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: wschoi@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4980

ORCID

Woo-seok Choi

<http://orcid.org/0000-0002-0100-9301>

Jongmin Lim

<http://orcid.org/0000-0002-8044-1724>

Yun-young Yang

<http://orcid.org/0000-0003-2585-6019>

Sang Soon Cho

<http://orcid.org/0000-0003-0306-4694>

사용후핵연료를 저장하는 볼트체결 저장용기의 격납경계를 형성하는 주된 구성요소는 금속 밀봉재이다. 이러한 금속 밀봉재는 열과 방사선에 의해 그 성질이 저하된다. 또한, 금속 밀봉재가 강한 열에 장기간 노출되면 크리프 현상이 발생한다. 이러한 크리프는 밀봉시스템에 응력 이완을 가져와서, 결국 밀봉재의 건전성을 해치게 된다. 이러한 응력 이완은 금속 밀봉재의 밀봉성능 저하로 이어지며, 저하의 정도에 따라 저장용기의 누설을 야기할 수 있다. 또한, 볼트 체결력의 감소도 밀봉성능 저하에 영향을 미친다. 본 논문에서는 금속 밀봉재의 격납건전성과 볼트체결력 감소를 평가하기 위해 수행한 가속화 시험의 결과에 대하여 기술한다. 전 시험기간 동안 각 시편에서의 누설률, 볼트 변형률, 금속 밀봉재 주변 온도를 계측하여 분석하였고, 금속 밀봉재는 저장기간 50년 동안 격납건전성을 유지함을 입증하였다. 또한, 가속화 시험의 타당성에 대해서 기술하였다.

중심단어: 장기저장, 금속 밀봉재, 격납건전성, 가속화 시험, 응력이완, 크리프

1. 서론

현재 원자력발전소에서 발생한 경수로 사용후핵연료는 원전 내 습식저장조에 저장되고 있으며 저장용량 대비 약 70% 이상 포화된 상태이다. 습식저장조내 사용후핵연료는 중간 건식저장시설로 이송되어 최종처분 전까지 저장될 예정이다. 사용후핵연료의 건식저장 방식은 크게 용기방식, 모듈방식, 볼트방식으로 구분된다. 건식저장방식의 격납경계는 용기방식의 경우 캐니스터 혹은 금속 밀봉재, 모듈방식의 경우 캐니스터, 볼트방식의 경우 캐니스터로써 크게 보면 캐니스터와 금속 밀봉재로 구분된다. 금속 밀봉재는 볼트체결 저장용기의 격납경계를 형성하는 주된 구성요소이다. 일반적으로 저장용기는 오랜 시간동안 방사능 물질을 내부에 담고 있어야 하기 때문에 내구성이 좋은 금속 밀봉재를 사용한다. 이러한 밀봉재는 열과 방사선에 의해 그 성질이 저하(degradation)된다. 밀봉재가 강한 열에 노출되면 크리프 현상이 발생한다. 이러한 크리프는 밀봉시스템에 응력 이완(stress relaxation)을 가져와서, 결국 밀봉재의 건전성을 해치게 된다.

독일, 일본, 프랑스, 미국 등의 원자력 선진국에서는 금속 밀봉재의 열적 특성 저하, 부식 등에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 독일은 알루미늄 또는 은 재킷을 가진 금속 밀봉재의 크리프를 150℃에서 측정하였고, 정상 및 사고조건, 기계하중 하에서의 금속 밀봉재의 밀봉성능을 측정하기 위한 시험을 수행하였다[1]. 최근에는 40년을 초과하는 장기저장을 고려하여 장기건전성과 관련된 연구를

수행 중이며, 금속 밀봉재 격납건전성 평가, 볼트 풀림, 온도/시간/외부 환경에 의한 재료 열화 특성 및 금속 밀봉재의 열적 열화에 대한 가속화 시험의 근거를 제시하기 위한 온도-시간 등가성에 대한 다양한 연구를 수행 중에 있다[2, 3]. 일본의 Wataru 등은 장기저장에 따른 금속 밀봉재의 격납건전성을 평가하기 위하여 두 가지 종류의 운반용기 뚜껑을 포함하는 원형시험모델을 만들고, 이를 이용하여 19년 동안 가속화 시험을 수행하였다. 누설률과 Larson-Miller 인자 사이의 관계를 측정하였고 알루미늄으로 쌓인 가스켓은 초기 온도 134℃ 이하로, 은으로 쌓인 가스켓은 초기 온도 125℃ 이하로 운영되는 한 밀봉성능은 약 60년 동안 보장할 수 있다는 결론을 도출하였다[4, 5]. 또한, 금속 밀봉재의 열적열화를 모사할 수 있는 수치적 모델을 개발하고, 이를 다양한 열화 시나리오를 평가하는 데 활용하고 있다 [6]. 본 시험은 국내기술로 개발된 저장용기에 대한 설계수명 기간 내에 금속 밀봉재의 성능 유지여부를 평가하는 입증시험으로 축소시험모델을 이용하여 저장초기조건을 고려한 가속화 시험조건인 165℃와 180℃에서 수행되었다. 시험결과를 바탕으로 누설률과 볼트 변형률의 변화에 대하여 평가하였다.

성능 저하가 예견되는 다른 구성요소 중 하나는 볼트이다. 볼트는 높은 응력을 받기 때문에 열적 사건·사고나 기계적 충격에 의해 손상되기 쉽다. 본 연구에서는 저장기간을 거치며 발생하는 밀봉재의 성능저하와 볼트 체결력의 감소 영향을 평가하기 위해 수행한 가속화 시험을 위주로 기술하고자 한다.

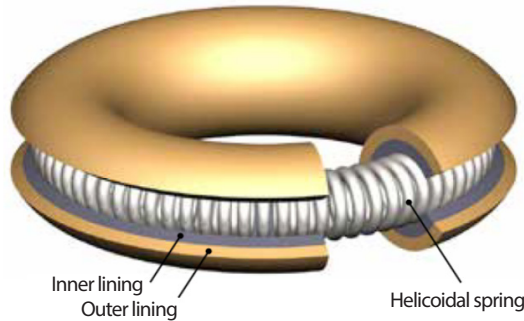


Fig. 1. Overall shape of metal seal.

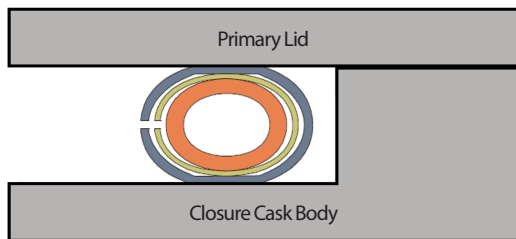


Fig. 2. Compressed metal seal.



Fig. 3. Metal seal HND229 type.

2. 시험장치 및 측정시스템의 구축

2.1 시험모델

금속 밀봉재는 사용후핵연료 저장방식 가운데 볼트체결 방식의 저장용기에 장착되어 방사능 물질의 누설 방지기능을

수행하는 격납구조의 주요 구성요소이다. 일반적으로 널리 사용되는 금속 밀봉재는 테크네틱스 그룹이 특허권을 가지고 제작하여 판매하는 Helicoflex이다. Fig. 1은 Helicoflex의 이중 재킷 금속 밀봉재의 전체적인 모양을 나타내며, 두 개의 재킷에 의해 싸여진 원형모양의 감긴 나선형 스프링 형태로 구성된다. 안쪽 재킷의 재질은 스테인레스강이며, 바깥쪽 재킷의 재질은 일반적으로 높은 연성을 갖는 알루미늄 또는 은으로 만들어진다.

밀봉재는 용기뚜껑에 가공된 홈(groove)에 삽입되고 압축된다. 바깥쪽 재킷의 상부는 용기 뚜껑면과, 하부는 용기 본체면과 접촉된다. 용기뚜껑과 본체가 조립되면 볼트에 의해 하중이 전달되고 바깥쪽 재킷에 뚜껑의 중량과 볼트 체결력에 의한 하중이 작용한다. 안쪽 재킷 대비 바깥쪽 재킷의 높은 연성으로 인해 바깥쪽 재킷은 구조물의 밀봉 플랜지 면의 미세 요철에 국부적으로 소성변형되며 밀봉력을 제공한다. 안쪽 재킷은 Fig. 2와 같이 압축력에 의해 발생한 감긴 스프링의 압축하중이 바깥쪽 재킷에 고르게 분산될 수 있도록 중간대개역할을 수행한다. 이러한 금속 밀봉재는 홈 형상 및 볼트 체결력에 대하여 적절히 설계되고, 조립된 저장용기에 서 높은 밀봉성능을 나타낸다.

본 시험에서 사용된 금속 밀봉재는 국내기술로 개발된 KORAD21 금속저장용기에 장착되는 금속 밀봉재 타입으로 써 두 개의 금속 밀봉재가 하나로 연결된 형태를 가진 Helicoflex HND229 타입의 알루미늄 금속 밀봉재이다. 원형크기로 성능시험을 수행하기에는 어려움이 있어 Fig. 3에서 보는 것과 같이 동일한 금속 밀봉재 타입이지만 지름이 작은 금속 밀봉재를 이용하여 시험을 수행하였다. 알루미늄 밀봉재 시편의 치수는 내경 164 mm, 외경 210 mm, 두께 6.2 mm인 이중 밀봉재이며, 기본적인 제원은 내부 스프링은 Nimomic 90, 내부라이닝은 인코넬, 외부라이닝은 알루미늄으로 구성되어 있다.

2.2 시험장비 및 측정기기

금속 밀봉재의 장기격납성능시험을 위해 저장용기의 뚜껑부를 모사한 소형플랜지는 Fig. 4(a)와 같다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)와 같이 저장용기 뚜껑과 본체를 모사한 플랜지를 제작하고 금속 밀봉재를 플랜지 안쪽의 가공홈에 안착시켜 준비하였다. 소형 플랜지는 금속 밀봉재인 HND229모델을

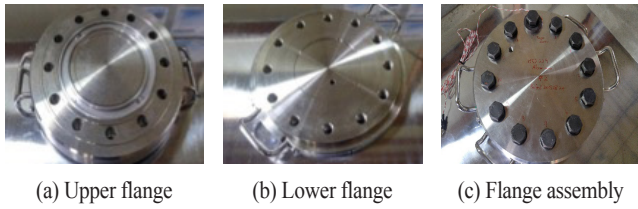


Fig. 4. The shape of flange.



Fig. 5. Helium inlet and outlet of the flange assembly installed in chamber.



Fig. 6. Test chamber.

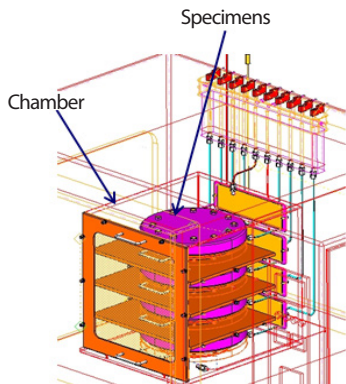


Fig. 7. Piping arrangement in chamber.

적용하기 위해 설계 및 제작되었다. 금속 밀봉재를 상부 플랜지의 홈에 위치시키고 하부 플랜지에 얹어 놓은 후 Fig. 4(c)와 같이 12개의 M20 볼트를 이용하여 200 N·m의 토크로 체결하였다. 이 과정에서 금속 밀봉재가 상부 플랜지에서 떨어지거나 회전이 일어나는 것을 방지하기 위하여 두 개의 나사를 이용하여 상부 플랜지에 고정시켰다. 시간에 따른 볼트 체결력 변화를 측정하기 위해 볼트자리에 와셔타입의 하중센서를 설치하여 볼트의 축방향 하중을 측정하였다. 또한, 금속 밀봉재 주위의 온도를 측정하기 위해 Fig. 4(c)와 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 플랜지의 상부에 홈(groove)이 가공되어 있고 홈에는 열전대가 설치된다.

금속 밀봉재의 누설시험을 위해 Fig. 5에서와 같이 플랜지 측면에 가공된 입구를 통해 플랜지 중앙으로 헬륨을 공급할 수 있는 통로가 가공되어 있다. 또한, 이중 금속 밀봉재의 사이 공간에서 플랜지 측면 출구로 통로가 가공되어 있다. 누설시험은 플랜지 측면에 가공된 헬륨 포트를 통해 1 bar의 압력으로 플랜지 중앙부에 헬륨을 주입하고, 헬륨 출구에 누설장비를 연결시켜 금속 밀봉재의 사이에 진공을 부과하여 새어나온 헬륨을 기준으로 누설률을 측정한다. 일반적으로 운반 및 저장용기의 금속 밀봉재에 대해서 뚜껑 조립 이후 표준 헬륨 누설률($Q_{He/St}$)이 1×10^{-8} mbar·l·s⁻¹ 보다 작아야 한다 [7]. 헬륨을 이용한 누설측정장비는 adixen사의 ASM 143 모델을 사용하였다.

금속 밀봉재가 장착된 플랜지 어셈블리를 위치시키는 Fig. 6과 같은 고온 챔버는 금속 밀봉재-플랜지로 구성된 시험시편을 가열하여 온도를 올리고 일정한 온도로 유지시키는 역할을 한다. 고온챔버는 챔버 내의 온도를 최대 300℃까지 올려 유지시킬 수 있으며, 온도를 올려주는 히터와 내부에서 온도 구배가 발생하지 않도록 공기 순환 기능을 가지고 있다.

금속 밀봉재-플랜지 시험시편 2조가 챔버 내에 설치되었다. 금속 밀봉재-플랜지 시험시편을 챔버에 넣어 온도를 올리고 나서 성능시험이 시작되면 일정한 시간마다 누설시험을 수행하여 밀봉성능을 평가한다. 누설시험은 시험을 시작한 초기에는 하루에 수 회 실시하였고, 시간이 지나서 시험의 계측값들이 큰 변화없이 안정적인 값을 유지한 이후에는 하루에 한 번 실시하였다. 주기적으로 측정된 자료는 측정일자, 시간, 누설률, 시편온도, 와셔타입 하중센서에서 측정된 볼트 변형률이다.

Table 1. Accelerated test condition based on Larson-Miller Parameter (C=16)

	Temperature (°C)	Period
Real condition	128	50 years
1 st accelerated test condition	180	9 weeks
2 nd accelerated test condition	165	39 weeks

금속 밀봉재에 대한 선행 연구기관의 시험에서 누설 시험이나 금속 밀봉재의 변형을 측정하기 위해 플랜지를 챔버 밖으로 인출하였다[8]. 이로 인해 금속 밀봉재의 온도가 변화할 수 있다는 불확실성이 존재하였다. 이를 극복하기 위해 플랜지에 헬륨을 주입하고 검출하기 위해 가공된 포트들을 고온챔버 내의 배관과 연결하여 챔버 밖으로 빼내어 콘넥터에 설치하였다. 따라서, 누설시험을 하기 위해서 플랜지를 고온챔버 바깥으로 인출하지 않고 플랜지를 챔버 안에 그대로 둔 상태에서 금속 밀봉재의 온도변화 없이 누설시험을 수행할 수 있도록 고안하여 제작하였다. 또한, 각 시편에서 측정된 온도와 볼트 변형률 값을 실시간으로 나타내는 모니터를 장착하였다.

3. 금속 밀봉재 장기격납성능 평가시험

3.1 가속화 시험조건 설정

사용후핵연료 저장기간동안 금속 밀봉재의 격납성능을 입증하기 위해서 실시간 시험을 수행한다고 할 때 50년 이상의 시험시간을 필요로 한다. 이렇게 장기간의 효과를 모사하는 시험을 상대적으로 짧은 시간으로 유사한 효과를 대상물에 나타나게 하기 위해 가속화 시험을 수행한다. 가속화 시험을 수행하기 위해서는 가속화 방법의 타당성을 입증하여야 한다.

본 연구에서 밀봉재 장기 격납성능을 평가하기 위한 고온가속화 시험의 타당성을 확보하기 위해 라슨-밀러 인자(LMP: Larson Miller Parameter) 방법을 사용하였고 이를 이용하여 시험조건을 설정하였다. 라슨-밀러 인자, LMP를 사용하면, 저온에서 장기간의 영향에 대한 평가를 고온에서 단기간의 영향에 대한 평가를 사용하여 예측할 수 있다. 금속

밀봉재의 가속화 시험은 LMP에 근거해 금속 밀봉재의 운전 조건과 등가인 가속화 시험 조건을 설정하였다. 라슨-밀러 인자 LMP를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$LMP = T(C + \log_{10}t) \quad (1)$$

여기서, T는 절대온도(K), t는 시간(h), C는 상수값이다. 식 (1)의 C 값은 재료에 따라 결정되며 가속화 시험조건을 결정할 때 매우 민감한 값이며, 여러 문헌들에서 각각 다르게 사용되고 있다. 상수 C 값이 클수록 시험시간은 짧아지고 가속화 정도가 증가하기 때문에 너무 큰 수를 사용하는 것은 지양하는 것이 좋다. C값을 선정하기 위해서는 메탈 씬에 사용된 재질에 대한 다수의 크립 시험 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 해외 연구결과를 바탕으로 보수성을 고려하여 상수 C 값을 16으로 선정하였다[9]. 실제조건에 대한 t는 저장 용기의 설계수명인 50년으로 설정하였으며, 이에 해당하는 온도 T는 사용후 핵연료 저장조건에 대한 열해석을 수행하여 초기온도인 128°C로 결정하였다. 실제 저장조건에서는 초기온도에서 시간이 경과함에 따라 온도가 떨어지기 때문에 T를 일정한 값으로 대입한다는 것에는 이미 보수성이 포함되어 있다고 할 수 있다. 정해진 상수값 C에 대하여 LMP 식의 등가조건을 이용하여 Table 1의 가속화 시험조건을 설정하였다. 고온가속화 시험은 Table 1과 같이 180°C와 165°C로 나누어 1차와 2차로 수행되었다. 식 (1)의 라슨-밀러 인자 값을 동일하게 하는 1, 2차 시험에 대한 고온가속화 시험 기간은 각각 9주와 39주로 계산되었다. 즉, 라슨-밀러 인자 방법에 기초하여 실제 저장조건에 대한 보수성을 고려한 초기온도 128°C가 50년 동안 지속된다는 조건과 1차 가속화 시험 조건(180°C, 9주) 및 2차 가속화 시험 조건(165°C, 39주)은 모두 금속 밀봉재에 동일한 열화영향을 미친다는 것이다[10].

3.2 가속화 시험 결과

두 가지 가속화 시험의 결과로서 시간의 경과에 따라 측정된 누설률의 변화를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 1차 고온가속화 시험은 180°C의 온도에서 실제기간 50년에 해당하는 9주 동안 수행하였고, 이후 추가적으로 4주 동안 시험을 연장하여 수행하였다. 따라서 1차 가속화 시험은 총 13주 동안 수행하였다. 2차 고온가속화 시험은 165°C의 온도에서

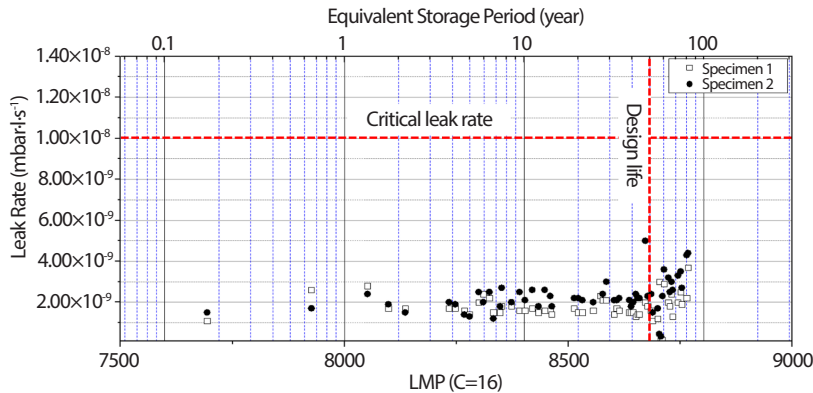


Fig. 8. Variation of leakage rate over time in accelerated test 1.

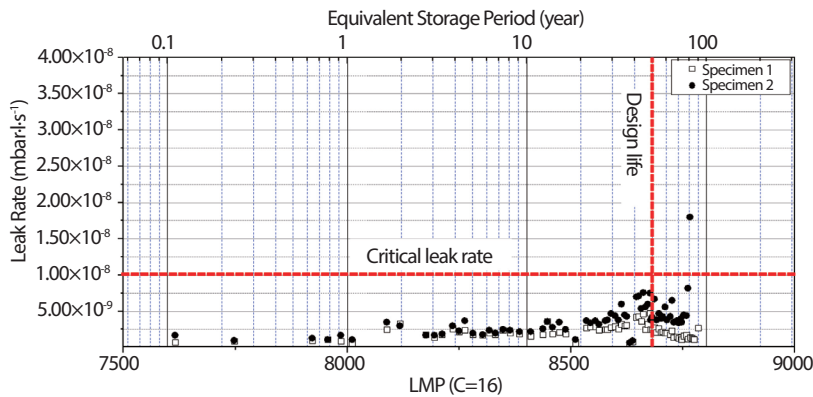


Fig. 9. Variation of leakage rate over time in accelerated test 2.

실제기간 50년에 해당하는 39주 동안 수행하였고, 이후 추가적으로 25주 동안 시험을 연장하여 수행하였다. 따라서 2차 가속화 시험은 총 64주 동안 수행하였다.

Fig. 8과 Fig. 9의 y축의 스케일은 서로 다르게 설정되어 있는 것에 유의해야 한다. 1차 고온가속화 시험에서의 누설률은 Fig. 8과 같이 시험수행 전 기간 동안 허용 누설률 이내에서 안정적으로 유지되었다. 즉, 두 개의 시편에서 모두 설계수명인 50년 동안 누설률이 허용누설률인 $1 \times 10^8 \text{ mbar} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하로 유지되었으며, 1차 가속화 시험이 종료된 시점을 라슨-밀러 인자에 기초하여 환산한 85년 동안 격납건전성이 유지되었다.

가속화 시험 2에서도 두 개의 시편에서 모두 설계수명인 50년 동안 누설률이 허용 누설률 이하로 유지되었다. 2차 가속화 시험은 라슨-밀러 인자 방법에 기초하여 환산하면

90년이 넘는 시간동안 수행되었다. 2개의 시편 중 시편 1에서는 시험이 종료되는 시점까지 격납건전성이 유지됨을 알 수 있다. 반면에, 시편 2에서는 80년에 해당하는 시점에 허용 누설률을 넘어서는 누설률이 발생하였다. 그 이후 계속 진행된 시험에서 Fig. 9의 y축의 범위를 벗어나는 누설률이 발생하고 누설률이 계속 증가하여 금속 밀봉재의 격납성능이 손상되었음을 알 수 있었다.

비록 시편 2에서 80년을 넘어서는 시점부터 누설성능이 손상된 결과가 발생하였으나 시편 1의 누설률은 50년 이후에서 90년까지 허용누설률 보다 낮게 매우 안정적으로 유지되고 있음을 보여준다. 따라서, 가속화 시험 2의 시험결과를 기초로 금속 밀봉재의 누설성능이 80~90년 정도라고 결론을 내리는 것은 근거가 부족하다고 판단된다. 참고로, 일본에서는 소형 플랜지의 가속화 시험을 근거로 특정 금속

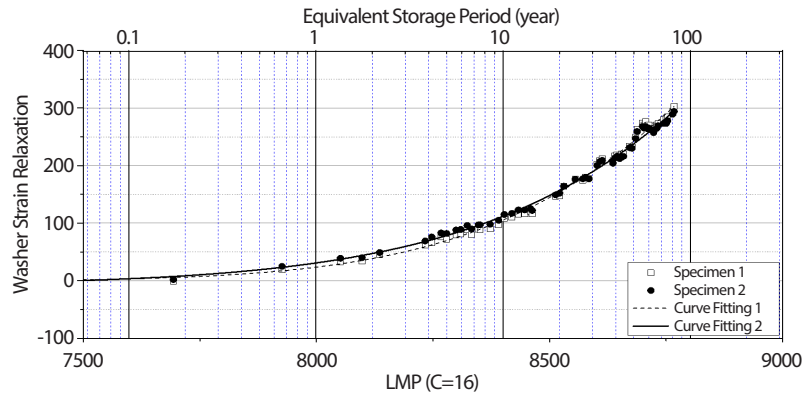


Fig. 10. Variation of washer strain relaxation over time in accelerated test 1.

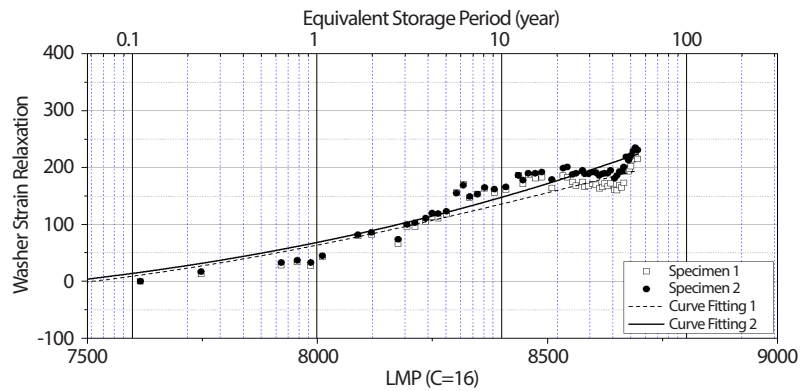


Fig. 11. Variation of washer strain relaxation over time in accelerated test 2.

밀봉재가 약 105년 동안 격납건전성을 유지한다는 의견을 제시한 바 있다[4].

가속화 시험 1과 2의 결과를 나타내는 Fig. 8과 Fig. 9에서 시간이 경과할수록 모든 시편에서 누설률이 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 가속화 경향이 높은 Fig. 8에서는 50년 부근부터 누설률이 그 전보다는 좀 더 급한 기울기를 가지며 증가하였고, 가속화 경향이 상대적으로 낮은 Fig. 9의 시편 2에서도 유사한 경향을 발견할 수 있다.

가속화 경향이 낮은 가속화 시험 2에서의 누설률이 가속화 시험 1에서의 누설률보다 다소 높은 경향이 보이나 가속화 시험 2의 시편 1의 누설률은 안정적으로 유지되고 있기 때문에 일반적인 현상이라고 보기는 어렵다. 또한, 가속화 시험은 실제저장조건의 온도보다 높은 온도에서 수행되었기 때문에 기체의 확산속도 등이 증가하여 헬륨누설률이

변화할 가능성이 존재하나 그 영향이 크지 않을 것이라 사료되어 세부적인 평가는 제외하였다.

본 시험은 금속 밀봉재의 고온환경에서 시간의 경과에 따라 성능이 저하되는 상황을 가속화하여 모사하였다. 금속 밀봉재의 성능 저하에 영향을 주는 크리프 현상을 평가하기 위해 금속 밀봉재의 면압을 주는 볼트 축력의 변화를 살펴보는 것이 필요하다고 판단하였다. 볼트 축력의 영향은 볼트 하단의 와셔타입 하중센서에 의해 측정된 변형률의 변화를 통해 관찰하였다.

시간의 경과에 따른 볼트 와셔에 부착된 하중센서의 변형률의 변화를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 시편 1과 시편 2의 와셔의 변형률은 Fig. 10과 Fig. 11에서 빈 네모와 찬동그라미로 나타나 있다. 와셔 변형률의 시간에 따른 변화를 커브피팅한 경향선이 시편 1에 대하여는 점선으로 시편 2에

대하여는 실선으로 표현되었다. Fig. 10의 경향선은 시간의 흐름에 따라 기울기가 가파르게 증가하는 2차원 곡선의 형태를 갖는 반면에 Fig. 11의 경향선은 기울기의 변화가 완만한 직선에 가까운 곡선의 형태를 가진다. 경향선으로 본 와서 변형률의 초기값은 정확히 0은 아니다. 초기값이 0이 아닌 이유는 다음과 같다.

Fig. 4와 같은 금속 밀봉재-플랜지 시험시편은 열전대와 하중센서가 장착된 상태로 챔버 내에 설치된다. 센서들과 연결된 케이블은 챔버 밖으로 나와 데이터 취득장비에 연결된다. 그 이후 계측을 시작하여 정상작동여부가 확인되면 챔버 내의 온도를 설정값으로 상승시킨다. 온도를 먼저 상승시키지 못하는 이유는 챔버 온도를 상승시킨 이후에 계측장비의 오작동 여부가 발견되면 챔버를 식혀야 하기 때문이다. 따라서, 온도가 설정값에 도달하고 정상상태가 되면서 하중센서에서 계측되는 변형률은 오프셋 값을 가진다. 온도가 설정값에 도달했을 때부터 계측을 시작하면 오프셋 값은 발생하지 않을 것이다. 따라서, Fig. 10과 Fig. 11은 오프셋을 보정한 그래프이고, 와서 변형률의 절대적인 값보다 두 시점에서 와서 변형률의 차이값이 유의미한 결과값이라 볼 수 있다.

두 종류의 가속화 시험에서 시간이 경과할수록 볼트 체결력이 감소하고 이는 와서 변형률의 증가로 표현된다. 이는 금속 밀봉재의 반력이 열화로 인해 감소한 것에서 그 이유를 찾을 수 있다. 독일에서는 볼트가 아닌 유압장치를 이용하여 금속 밀봉재에 작용하는 면압을 일정하게 유지하면서 시간의 경과에 따른 금속 밀봉재의 회복력(resilience)을 측정하였다[8]. 그러나, 실제 저장조건에서는 금속 밀봉재에 크리프 현상이 발생하여 볼트 체결력이 감소하게 되고 금속 밀봉재에 부과되는 면압의 크기는 감소한다. 볼트 자체도 시간이 지날수록 축력이 감소한다. 저장용기의 밀봉성능은 (1) 금속 밀봉재의 열화에 의한 복원력의 상실 정도와 (2) 크리프에 의한 볼트 축하중의 감소 정도가 연성되어 영향을 준다고 할 수 있다. 따라서, 볼트가 아닌 유압장치를 이용하여 힘을 일정하게 유지하는 실험은 실제 저장조건에서 금속 밀봉재의 하중조건을 모사하기 보다는 일정한 면압 상태 하에서 평가를 수행한 것이라 볼 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 와서 변형률의 증가량은 50년을 기준으로 할 때 가속화 시험 1의 시편 2에서는 약 $250 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ 이고, 가속화 시험 2의 시편 2에서는 약 $240 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ 이다. 시편 1에서는 $250 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$, $225 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ 정도로 차이가 조금 더

벌어진다. 가속화 시험 1과 2의 와서 변형률 저감 크기를 서로 비교해 보면 최대 10%의 차이를 보인다. 만약, 기준시점을 10년, 혹은 80년 등으로 선정하면 가속화 시험 1과 2의 경향선의 형태가 서로 다르기 때문에 볼트 변형률의 저감 크기에 차이가 발생할 수 있다. 가속화 시험의 유효성이 입증되려면 서로 다른 두 종류의 가속화 시험에서 결과의 경향이 유사하여야 한다. 그런데 Fig. 10과 Fig. 11에서 경향선의 증가 추세는 유사하나 세부적인 유사성은 부족하다고 판단된다. 이 사실은 가속화 시험이 가지는 한계성을 나타낸다고 볼 수 있다. 가속화 시험 1은 가속화 정도가 높았다. 즉, 50년의 저장기간을 9주의 시험기간으로 모사하기 위해 시험온도가 180°C 로 상당히 높았다. 반면에, 가속화 시험 2는 가속화 정도가 상대적으로 낮았다. 가속화 시험 1과 2에서 가속화 정도가 낮아지면 경향선은 완만한 직선 형태로 표현되었다. 가속화 정도가 더 낮아지면 경향선은 어떠한 형태가 될지 파악하기 위해서는 더 긴 시험시간이 필요하다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 가속화 시험과 함께 비가속화 시험을 병행하여 수행하여 상호 연관성을 파악하는 것이 필요하다. 또한, 라슨-밀러 인자는 시간, 온도, 상수 C의 함수로 표현되지만 다른 물리량을 추가로 포함한 함수를 구성하여 가속화 경향을 연구하는 방법도 필요하다.

Fig. 11의 시편 2에서는 와서 변형률이 표시된 약 60년 이후에 y축의 범위를 벗어나는 와서 변형률이 발생하였다. 와서 변형률이 증가하면서, 즉 볼트 축력이 낮아지면서 Fig. 9의 시편 2는 80년 이후에는 밀봉성능이 손상됨을 보여주었다.

4. 결론

사용후핵연료 저장기간동안 금속 밀봉재의 격납성능을 입증하기 위한 두 가지의 가속화 시험을 수행하였다. 가속화 시험을 위해 라슨-밀러 인자방법을 이용하여 실제 저장조건에 상응하는 2가지의 가속화 시험조건을 수립하고, 각각의 조건에 대하여 가속화 시험을 수행하였다.

시험 전주기 동안 각 시편에서의 누설률, 볼트 변형률, 금속 밀봉재 주변 온도를 계측하여 분석하였다. 금속 밀봉재는 저장기간 50년 동안 격납건전성을 유지함을 입증하였다. 저장기간 모사 시험기간을 넘겨서 추가적으로 수행된 시험의

결과를 바탕으로 금속 밀봉재의 수명은 80년 이상임을 추론하였다. 두 가지의 가속화 시험의 볼트 변형률 감소이력 결과를 바탕으로 가속화 정도가 서로 다른 가속화 시험의 병행 수행 및 비가속화 시험의 수행을 통해 가속화 시험의 타당성을 추가 확보하는 것이 필요함을 제시하였다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20201710200010)

REFERENCES

- [1] S. Schubert, F. Koch, U. Probst, and H.P. Winkler, "Behavior of Metallic Seals in CASTOR®-Casks under Normal and Accident Conditions of Transport: Qualification Requirements", The 15th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2007), October 21-26, Miami (2007).
- [2] H. Volzke, "Research activities at BAM related to extended spent fuel and HLW storage", The 28th Annual regulatory information conference, March 8-10, Bethesda (2016).
- [3] L. Qiao, S. Nagelschmidt, and U. Herbrich, "Application of a modified Arrhenius equation to describe the time-temperature equivalence in relaxation analysis of metal seals", J. Civ. Eng. Archt., 11, 853-861 (2017).
- [4] M. Wataru, K. Shirai, T. Saegusa, and C. Ito, "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, November 1-4, Gyeongju (2010).
- [5] T. Saegusa, K. Shirai, M. Wataru, H. Takeda, and K. Namba, "Basis and Safety Case of Spent Fuel Storage", IAEA International Workshop on the Development and Application of a Safety Case for Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuel, IAEA, May 19-21, Vienna (2014).
- [6] F. Ledrappier, J.F. Juliaa, A. Beziat, K. Vulliez, L. Mirabel, M. Wataru, K. Shirai, H.P. Winkler, and R. Hueggenberg, "Numerical simulation of HELICO-FLEX metallic gasket ageing mechanism for spent fuel cask", Proc. of the 18th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2016), cea-02439458, September 18-23, 2016, Kobe.
- [7] American National Standard Institute, American National Standard for Radioactive Materials – Leakage Tests on Packages for Shipment, ANSI N14.5 (2014).
- [8] D. Wolff, "Metal and Elastomer Seal Investigation", Proc. of 2015 Used Fuel–High Level Waste Extended Storage Collaboration Program, 153-174, December 1-3, 2015, Charlotte.
- [9] K. Namba, K. Shirai, and M. Wataru, "Long-Term Leak-tightness Test using the Full-Scale Lid Model of the Metal cask, (5) Evaluation of Residual Gasket Load considering Compressive Creep Characteristics of Aluminum Outer Jacket", Japan Nuclear Society Conference (2012). (in Japanese)
- [10] Ministry of Trade, Industry and Energy, Development of a comprehensive safety test technology for the transport/storage system of spent nuclear fuel, MOTIE Final Report No. 201471020173B (2016).