

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.5.375>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

소듐냉각 고속로 연료봉단의 접촉부 손상예측을 위한 가속시험 방법[§]

김형규^{*†} · 이영호^{*} · 이현승^{*} · 이강희^{*}

* 한국원자력연구원

Acceleration Test Method for Failure Prediction of the End Cap Contact Region of Sodium Cooled Fast Reactor Fuel Rod

Hyung-Kyu Kim^{*†}, Young-Ho Lee^{*}, Hyun-Seung Lee^{*} and Kang-Hee Lee^{*}

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received August 25, 2016 ; Revised December 9, 2016 ; Accepted December 30, 2016)

Key Words: Acceleration Test(가속시험), Contact-induced Failure Prediction(접촉손상 예측), Sodium Cooled Fast Reactor Fuel(소듐냉각 고속로 핵연료), Fatigue Life(피로 수명)

초록: 본 논문은 한국원자력연구원에서 개발 중인 소듐냉각 고속로 핵연료의 연료봉 하단 마개에 있는 관통구멍과 마운팅 레일의 원기둥 형상과의 접촉부에 발생하는 접촉 손상을 예측하기 위한 가속시험 방법을 연구한 것이다. 가속시험 조건으로서 연료봉의 유체유발진동수 및 진폭을 유한요소 해석을 통하여 구하였다. 약 35000 시간의 연료봉 수명기간을 고려한 가속시험 시간을 결정하기 위해 일반 기계부품류의 신뢰성 평가 방법을 적용하였으며, 이때 가장 보수적인 형상 모수와 원자로 내에서의 연료봉 파손 허용 개수 기준 및 연료봉 피복관 재료인 HT-9강의 피로수명 데이터를 이용하였다. 시편의 개수를 5개로 하였을 때, 최종적으로 계산된 가속 시험시간은 각 시편 당 16.5시간이었다. 가속시험 후 전체 시편에 어떠한 접촉손상도 관찰되지 않을 때 연료봉의 수명기간 중 $B_{0.004}$ 수명이 신뢰수준 99%로 보장되는 것으로 평가하였다.

Abstract: This paper reports the results of an acceleration test to predict the contact-induced failure that could occur at the cylinder-to-hole joint for the fuel rod of a sodium-cooled fast reactor (SFR). To incorporate the fuel life of the SFR currently under development at KAERI (around 35,000 h), the acceleration test method of reliability engineering was adopted in this work. A finite element method was used to evaluate the flow-induced vibration frequency and amplitude for the test parameter values. Five specimens were tested. The failure criterion during the life of the SFR fuel was applied. The S-N curve of the HT-9, the material of concern, was used to obtain the acceleration factor. As a result, a test time of 16.5 h was obtained for each specimen. It was concluded that the $B_{0.004}$ life would be guaranteed for the SFR fuel rods with 99% confidence if no failure was observed at any of the contact surfaces of the five specimens.

- 기호설명 -

AF : 가속 계수

CL : 신뢰도 수준

B : 피로수명 데이터에서 기울기

T : 가속시험 시간

t_m : 무고장시험 시간

β : 형상 모수

1. 서론

화석 연료를 사용하는 화력발전에 비해 원자력 발전의 큰 장점 중 하나는 상대적으로 풍부한 우라늄 자원을 이용하며 이산화 탄소를 배출하지 않는다는 것이다. 이때 지금까지 전 세계 대부분의 원자력발전소는 국제원자력기구의 핵 비확산 조약

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2016.4.28.-29., 부경대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, hkkm1@kaeri.re.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 따라 우라늄 자원을 연소하여 전기를 생산한 후 재처리를 하지 않고 고준위 방사성 폐기물로 처리하고 있다.

그러나 원자로에서 핵연료로 연소된 고준위 폐기물은 당초의 핵연료 물질인 우라늄이 단지 화학적으로 변환된 형태이므로 적절한 처리를 통하여 다시 핵분열을 통해 연소할 수 있다. 이미 연소된 핵연료를 재처리하여 다시 원자력발전소에서 전기를 생산할 수 있다면 지구의 우라늄 자원 이용 효율을 극대화 할 수 있을 뿐 아니라 과급되는 경제적인 효과가 엄청나게 된다. 이와 같이 기존 발전소에서 연소된 핵연료를 재처리 하여 다시 연소할 수 있는 핵연료 주기를 폐회로 핵연료 주기(Closed Fuel Cycle)이라 하며, 현재 전세계적으로 많은 연구가 이루어 지고 있다.

핵연료의 폐회로 주기에 관한 우리나라에서의 연구는 근래에 한국원자력연구원에서 핵 비확산성을 만족하는 재처리 기술로서 파이로 프로세싱 기술을 개발하였고 이로부터 얻는 핵물질을 이용하여 발전할 수 있는 소듐냉각 고속로를 개발 중에 있다. 이 과제의 목표는 150 MWe 급의 고속로 원형로를 2028년도까지 건설허가를 얻어 발전 운영을 시작하는 것이다.

본 연구는 이러한 소듐냉각 고속로에서 연소하게 될 연료봉의 손상문제에 관한 것이다. 소듐냉각 고속로 핵연료는 원자로 운전 중 액체 소듐 냉각재의 유동에 의해 유체유발 진동이 발생한다. 이때 연료봉 하부에 있는 원기둥과 구멍의 결합부에 반복 미끄럼이 발생할 수 있고, 마멸 또는 피로균열(이하 ‘접촉손상’이라 함)이 발생하여 연료봉이 파손될 수 있다. 현재 연구 중인 고속로 핵연료의 수명이 1450일 정도이고, 경수로와 달리 고속로 핵연료는 수명기간 중 핵연료의 해체를 통한 연료봉 교체가 불가능한 구조로 되어 있어 높은 신뢰수준의 손상 저항성을 갖는 핵연료를 설계하는 것이 매우 중요하다.

이를 위해 손상이 예상되는 봉단 마개와 체결부의 시편을 재질과 치수를 동일하게 한 시편을 제

조하고 기존의 마멸시험기를 이용하여 가속시험을 수행하기로 하였다. 이때, 1450일의 수명 기간을 고려한 가속시험 시간을 설계하기 위해 신뢰성공학에서 사용하는 수명평가 이론을 이용하였다. 그러나 접촉손상이 예상되는 부위의 마멸 또는 피로균열 진전에 대한 기존의 데이터가 전혀 없으므로, 일반적으로 많이 사용하는 가속시험 방법을 사용할 수 없다. 이에 따라 해당 재질의 피로수명 데이터를 이용한 가속시험 시간 산출 방법을 사용하였다.

2. 연료봉 봉단 마개 접촉손상 개요

국내에서 설계 중인 소듐냉각 고속로 핵연료집합체는 길이가 약 4.55 m이고, 전체 길이의 대부분이, 면 사이의 거리가 약 133 mm인, 정육각형 단면을 갖는 연필처럼 생긴 형태를 갖고 있다. 핵연료집합체의 상부는 핵연료 취급 장치와 결합되는 약 40 cm 길이의 취급 소켓이 있으며 하부에는 원자로 노심 구조물에 체결되는 길이 약 48 cm인 노즈 피스가 있다. 노즈 피스와 취급 소켓 사이에는 덕트라 불리는 육각 관이 있으며 그 양단에 노즈 피스와 취급 소켓이 용접으로 결합되어 있다.

한편 육각 덕트의 내부에는 가는 와이어로 감싼 지름 약 7.4 mm의 연료봉이 다발의 형태로 들어 있으며, 이 연료봉 영역의 상하부로 핵분열 시 발생하는 방사능을 차폐하기 위한 상하부 반사체가 조립되어 있다. 즉 고속로 핵연료는 경수로 핵연료와 달리 연료봉이 외부로 드러나 있지 않은 구조를 갖는다. Fig. 1에 현재 설계 중인 소듐냉각 고속로 핵연료집합체의 개략적인 형상을 보여 준다.

연료봉은 지름과 두께가 각각 약 7.4 mm, 0.5 mm, 그리고 길이 약 2.2 m의 얇은 튜브 내에 절반 정도의 길이는 고속로에서 핵분열 할 수 있는 지름이 가는 봉 형태의 핵연료 물질로 채워져 있고 나머지는 약간의 소듐과 핵분열 기체를 수용할 수 있는 빈 공간으로 이루어져 있다. 한편, 연료봉의 양 끝단은 상단 및 하단 봉단 마개로 용접에

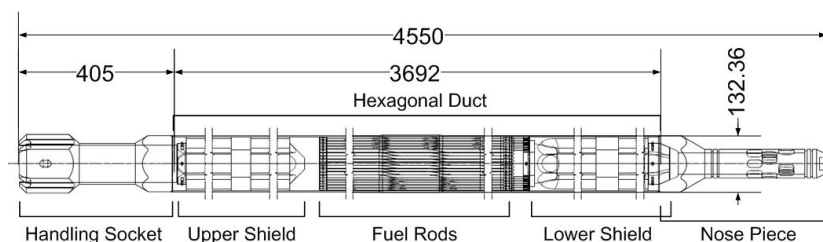


Fig. 1 Schematic view of SFR fuel assembly (unit: mm)

의해 밀봉되어 내부의 소듐이나 핵분열 기체가 외부로 유출되지 않도록 되어 있다.

육각 덕트 내에서 연료봉들을 다발의 형태로 고정하기 위해 연료봉 하단 봉단 마개에는 지름 3 mm의 관통 구멍이 폭 1.1 mm의 슬롯과 함께 가공되어 있으며 이곳으로 마운팅 레일이라 부르는 두께 1 mm의 판과 그 상부에 있는 지름 2.98 mm의 원기둥 형상이 삽입되도록 되어 있다(이 치수들은 공차를 제외한 값임). 이때 연료봉 봉단 마개의 관통 구멍과 마운팅 레일의 원기둥 사이에는 최소 0.02 mm의 틈새가 존재하도록 하고, 봉단 마개의 슬롯과 마운팅 레일 판과의 틈새는 최소 0.08 mm가 존재하도록 하는 보통급 험거운 끼워맞춤으로 각 부품의 치수공차를 설계하였다. 한편, 연료봉의 상단은 별도의 고정 없이 자유 단의 상태이다.

이와 같은 치수 및 공차의 부여는 연료봉의 위치와 조립의 용이성을 위해 결정된 것이다. 이에 따라 원자로 운전 중 연료봉 및 마운팅 레일의 유체유발 진동에 의해 마멸손상이 우려되는 곳은 연료봉 봉단 마개의 구멍과 마운팅 레일의 원기둥 부분의 접촉부가 된다. 한편 마운팅 레일 판의 하부에도 원기둥 형상이 가공되어 있으며 이는 하부 반사체에 연료봉 하단 봉단 마개와 유사하게 가공되어 있는 구멍 및 슬롯에 삽입됨으로써 연료봉 다발이 핵연료집합체 내에 조립된다. Fig. 2에는 연료봉 하단 봉단마개와 마운팅 레일의 조립부를 보여준다.

고속로 핵연료집합체는 500°C 이상의 고온분위기 내에서 거동하며 핵연료 물질은 고속 중성자와의 핵반응으로 연소된다. 따라서, 핵연료집합체 구조부품의 재질요건으로서 가장 중요한 것이 열 크리프와 조사 팽윤에 따른 강도 저하와 변형 발생이다. 현재 설계 중인 고속로 핵연료의 취급 소켓, 육각 덕트, 노즈 피스 및 상하부 반사체는 연료봉 피복관과 함께 Ferriticmartensitic steel인 HT-9으로 제조하여 이와 같은 문제점을 최소화 하도록 되어 있다. 상온에서 HT-9 강의 대략적인 기계적 물성

치는 탄성계수 220 GPa, 프와송 비 0.33, 항복강도 630 MPa 정도로서⁽¹⁾ Austenite 계열의 스텐레스 강에 비해 상당히 높은 강도를 갖는다.

냉각재인 액체 소듐은 고속로 원자로 하부로부터 노즈 피스 내부로 유입되어 연료봉 영역을 통과하며 핵분열 시 발생한 열을 흡수한 후 취급 소켓을 지나 핵연료집합체 외부로 빠져 나간다. 이때 냉각재 속도는 초속 약 6 m 정도로서 연료봉과 그에 연결된 마운팅 레일에 유체유발진동을 일으키게 된다. 이때 하단 봉단 마개의 구멍과 마운팅 레일의 원기둥 사이의 접촉부에 반복 회전 마찰이 발생하게 되며 이에 따른 마멸 또는 피로 균열과 같은 접촉 손상이 발생할 수 있다. 특히 하단 봉단 마개 구멍 주위의 재료 두께가 약 2 mm를 조금 넘어 손상이 심할 경우 봉단 마개의 절단이 가능할 수도 있다. 이에 따라 핵연료 수명 말까지 연료봉의 구조적 건전성 유지 관점에서 봉단 마개에 심각한 손상이 발생하지 않는다는 것을 보장할 필요가 있다.

3. 가속시험의 실험변수

3.1 유체유발진동 해석

소듐냉각 고속로 핵연료집합체의 유체유발 진동 시험은 현재 가능하지 않으므로 유한요소 해석을 이용하여 가속 마멸 실험의 조건인 진동수를 구하였다. 본 연구에서의 유한요소 해석을 위해서는 상용 프로그램인 ABAQUS (version 6.14)⁽²⁾를 사용하였다.

소듐 냉각재가 연료봉 영역을 통과할 때 연료봉들은 외부를 감싸고 있는 와이어로 인해 약 0.08 mm 이하의 매우 좁은 틈새가 존재하므로 진동이 거의 발생하지 않는 것으로 생각할 수 있다. 이에 비하여 마운팅 레일은 폭 및 길이가 각각 약 44 mm와 최대 142 mm인 판이며 판과 판 사이의 거리가 약 7 mm로서 상대적으로 매우 넓은 공간을 갖고 있으므로, 연료봉의 진동 보다는 마운팅 레일의 진동이 본 연구에서 고려하고 있는 접촉 마멸에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석하였다.

본 유한요소 해석에서 마운팅 레일을 3차원 4절점 쉘 요소를 사용하여 모델링 하였다. 이때 마운팅 레일의 상부에 조립된 연료봉들은 별도의 요소로 모델하지 않고 상단이 자유인 상태를 고려하여 마운팅 레일 판 상부의 각 연료봉 봉단 마개가 조립되는 위치마다 하나의 연료봉 자중에 해당하는 6 N의 점 질량을 부가하였다. 따라서 하나의 마운팅 레일에 최대 17개의 연료봉이 조립되므로 총

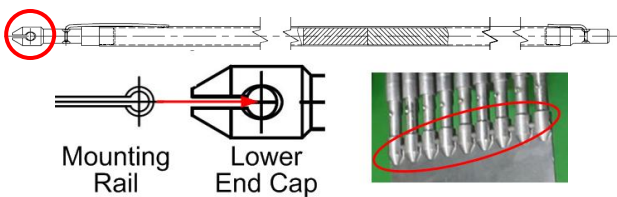


Fig. 2 Schematic view of SFR fuel rod and connection between lower end cap and mounting rail. Actual assembled state is also given

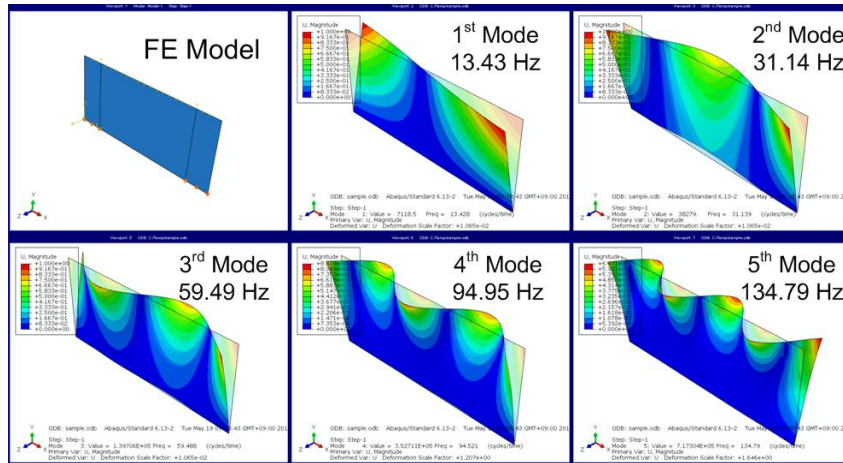


Fig. 3 Vibration characteristics of the mounting rail plate obtained from Finite element analysis

17개의 점 질량이 마운팅 레일 판 상단에 추가되었다. 추가되는 질량을 연료봉의 무게로 한 이유는 모든 연료봉은 하단 부에서만 마운팅 레일 판에 끼워질 뿐 상단 부에는 어떤 구속도 받지 않는 자유 단이기 때문이다.

한편 마운팅 레일의 아래 단은 그곳에 형성되어 있는 원기둥과 하부 반사체 사이의 조립상태가 고정되어 있어 x, y 및 z 방향으로의 이동 및 회전을 구속하였다. 그러나 마운팅 레일 판의 측면에는 어떠한 구속도 없으므로 자유 단으로 모델링하였다.

Fig. 3에는 유한요소 해석에 의한 마운팅 레일 판의 진동해석 결과를 보여 준다. 해석 결과, 1차 고유진동수는 13.43 Hz로 나타났다. 본 해석의 주된 목적은 마멸시험에 사용할 시험 주파수를 결정하고자 한 것이다. 이와 함께 마멸시험의 결과로부터 현재 설계한 봉단 마개 및 마운팅 레일 접촉부의 치수 및 공차에 대한 적절성을 검토하고자 하였다. 현재 액체 소듐 내에서의 마멸시험은 소듐의 폭발성을 고려한 시험 안전성이 확보된 시험기 및 시설이 구비되지 않아 공기 중 시험을 수행할 수 밖에 없다. 따라서 유한요소 해석 역시 공기 중의 조건을 사용하였다.

그러므로 Fig. 3의 결과는 실제의 액체 소듐 내 연료봉 및 마운팅 레일이 존재하는 경우를 제대로 모사하기에는 부족하다. 즉, 본 해석은 유체에 의한 부가 질량의 영향 및 고체-유체 연성의 문제 등이 고려되지 않고 있다. 일반적으로 잘 알려진 것과 같이 유체의 부가 질량을 고려할 경우 구조물의 고유진동수는 다소 낮아진다. 따라서 실제 원자로 내에서의 고유진동수는 Fig. 3에서 보여주는 결과에 비해 다소 낮을 것으로 예상할 수 있다.

그러나 본 연구에서는 부가 질량에 의한 다소의

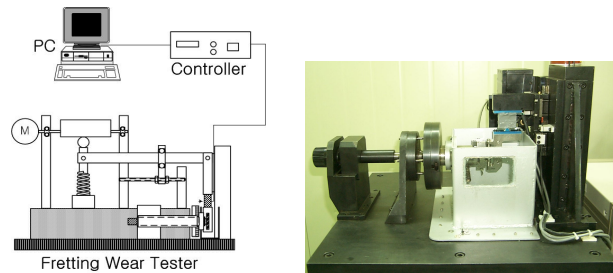


Fig. 4 Wear tester used for the present acceleration test

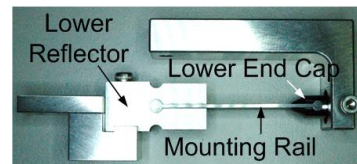


Fig. 5 Specimen set for the present acceleration test

고유 진동수 저감을 깊이 고려하지 않았다. 그 이유는 마멸시험에서는 동일한 접촉하중 조건에서 진동수가 증가하면 마멸량이 증가하게 되므로 본 연구의 궁극적인 목적인 연료봉의 손상예측 관점에서는 실제보다 다소 높은 시험 진동수를 사용하는 것이 결과의 보수성 측면에서 적절한 것으로 판단하였기 때문이다. 그럼에도 불구하고 향후 액체 소듐 분위기에서의 시험이 가능한 시점에 보다 엄밀한 시험을 수행할 예정이다.

3.2 마멸시험 변수

본 연구의 가속 마멸시험을 위해 기존 경수로 핵연료의 연료봉 프레팅 마멸시험 장치를 이용하였다. Fig. 4에 보여주는 이 마멸 시험기는 경수로 핵연료의 지지격자 형상에 따른 연료봉 프레팅 마멸 실험에 사용하여 온 장비로서 최대 접촉 하중

100 N, 시편 간 상대변위 2 mm, 그리고 50 Hz의 진동수로 마멸실험을 할 수 있도록 되어 있다. 이 시험기의 상세는 기 발표된 논문⁽³⁾을 참조할 수 있다.

본 연구의 가속 마멸시험을 위해 Fig. 5에 나타난 것과 같이 실제 고속로 핵연료의 하단 봉단 마개 및 마운팅 레일과 같은 형상 및 치수를 갖는 시편을 실제의 재료인 HT-9 강으로 제작하였다. Fig. 5에서 봉단 마개와 접촉하는 마운팅 레일 위치의 반대편 끝단은 하부 반사체와 조립되는 곳으로서 실제 하부 반사체의 일부를 모사하여 동일한 재질(HT-9)로 제작하였다. 한편 접촉력 조건으로서 연료봉이 수직방향으로 마운팅 레일 위에 있는 실제의 경우를 고려하였다.

이때 소듐 냉각재의 상부 방향 유동과 부력으로 인해 연료봉의 자중 보다 작은 하중이 접촉부에 가해질 것을 예상할 수 있다. 그러나, 가속시험에서는 보수적으로 연료봉의 자중인 6 N을 접촉 수직력으로 사용하였다.

연료봉 봉단 마개 시편과 마운팅 레일 시편 사이의 상대 운동 진동수는 앞 절의 유체유발진동 해석 결과로부터 1차 고유진동수에 근접한 15 Hz로 하였으며, 하나의 마운팅 레일에 가장 많은 17개의 연료봉이 체결되는 경우를 고려하고 모든 연료봉이 같은 방향의 진동변위가 발생하는 가장 보수적인 상태를 가정하여 실험 진폭을 1.28 mm (= 0.08 mm×16)로 하였다.

4. 가속시험 시간

4.1 공식

실제의 수명을 보장하기 위한 가속시험으로서 신뢰성 공학에서 제공하는 방법은 다음과 같다.⁽⁴⁾

우선 식 (1)과 같은 무고장 시험시간을 구한다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

여기서 t_n 은 무고장 시험시간, p 는 손상율로서 100개의 동일 제품 중 p 개의 제품에서 고장이 발생할 수 있는 것을 나타내고, B_{100p} 는 목표 보증수명, CL 은 신뢰도 수준, n 은 시험에 사용할 시편의 수, β 는 형상모수로서 기존의 사용 데이터로부터 통계적으로 얻게 되는 상수이다.

식 (1)의 무고장 시험시간, t_n 이 구해지면 n 개의 시편 각각에 대한 가속시험 시간, t 는 가속계수를 이용하여 식 (2)와 같이 계산한다.

$$t = \frac{t_n}{AF} \quad (2)$$

여기서, AF 는 가속계수로서 식 (3)으로 정의된다.

$$AF = \frac{P_{\text{actual}}}{P_{\text{test}}} \quad (3)$$

여기서, P 는 가속시험에 사용할 인자를 의미하며 하첨자 **actual**과 **test**는 각각 실제 가동조건 및 가속시험에서의 해당 인자 값을 말한다.

4.2 가속시험 시간 계산

식 (1)의 무고장 시험 시간을 구하기 위해 다음과 같이 변수 값을 취하였다. 우선 손상율, p 로서 현재의 고속로 핵연료 설계기준인, 원자로 내에서 친공을 포함한 허용 연료봉 손상율을 사용한다. 즉, 원자로 내에는 총 24,304개의 연료봉이 있으며 이중 하나의 연료봉 손상을 허용하고 있으므로 $p = 1/24304 = 0.004\%$ 가 된다. 이에 따라 보증 수명은 $B_{0.004}$ 로 표현된다. 한편 신뢰도 수준을 99%로 취하고, 5개의 시편을 실험하기로 하였다. 그런데, 현재 설계 중인 고속로 핵연료에 대한 연소 경험이 전혀 없으므로 기존의 손상 데이터가 존재하지 않는다. 이로부터 형상 모수는 가장 보수적인 값으로서 $\beta = 1$ 로 하였다. 이러한 변수 값을 식 (1)에 대입하면 무고장 시험시간이 $t_n = 8.013 \times 10^8$ 시간으로 계산된다.

기존의 핵연료 손상 데이터가 존재하지 않으므로 본 연구에서는 가속계수의 계산을 위해 해당 재료의 피로수명 데이터를 이용하는 방법을 사용하였다. 이때 가속계수 계산에 필요한 변수(식 (3)에서의 P)는 연료봉 봉단 마개와 마운팅 레일의 접촉부 마멸에 주요한 영향을 미치는 인자로서 연료봉의 진동변위 진폭을 사용하였다.

이에 따라 가속계수는 다음의 유도과정으로부터 구할 수 있다. 우선 **Basquin**의 피로수명 식으로부터 다음을 유도할 수 있다.⁽⁵⁾

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\sigma}{2\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (4)$$

여기서, $\Delta\sigma$ 는 진응력 진폭, N_f 는 파손까지의 교번하중 반복수의 반, σ'_f 은 피로강도 계수, 그리고 b 는 피로강도 지수로서 S-N 선도에서의 기울기를 나타낸다.

이제 식 (4)를 실제 가동조건 및 가속시험 각각의 경우에 대해 생각하여 식 (3)에 대입하면 다음

식 (5)와 같은 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 이때 σ_f' 은 실제 가동조건 및 가속시험의 경우에 관계 없이 동일하다.

$$AF = \frac{(N_f)_{\text{actual}}}{(N_f)_{\text{test}}} = \left[\frac{(\Delta\sigma)_{\text{test}}}{(\Delta\sigma)_{\text{actual}}} \right]^{-\frac{1}{b}} \quad (5)$$

식 (5)의 개념을 이용하여 본 연구에서는 응력의 진폭 대신 연료봉 진동변위의 진폭, Δd 를 사용하였으며, 따라서 가속계수는 다음과 같이 결정된다.

$$AF = \left[\frac{(\Delta d)_{\text{test}}}{(\Delta d)_{\text{actual}}} \right]^{-\frac{1}{b}} \quad (6)$$

여기서 Δd_{actual} 은 현재 설계된 연료봉 봉단마개와 마운팅 레일 사이의 간격인 0.02 mm로 하고 Δd_{test} 는 앞 절에서 기술한 가장 보수적인 연료봉 진동변위인 1.28 mm를 취하였다. 또한 b 는 연료봉 봉단 마개와 마운팅 레일의 재질인 HT-9 강의 S-N 선도(Fig. 6)⁽⁶⁾로부터 상용 프로그램 Origin⁽⁷⁾을 이용하여 기울기 값으로 $b = -0.235$ 를 구하였다. 이로부터 가속계수 $AF = 48514574.83$ 을 얻게 되고, 가속시험 시간은 16.5시간(= $8.013 \times 10^8 / 48514574.83$)으로 구해진다.

4.3 가속시험 결과의 평가

시편 5개에 대해 각각 16.5시간의 가속시험을 수행하여 연료봉 봉단마개의 구멍과 마운팅 레일 원기둥 부분의 접촉부에 어떠한 마멸 흔적이거나 균열이 발견되지 않을 경우 현재의 고속로 핵연료 연료봉의 봉단마개는 수명 말까지 99%의 신뢰도로 $B_{0.004}$ 수명을 갖는다고 할 수 있다. 현재까지 수행한 예비 시험에서는 손상이 관찰되지 않았으

며 향후 본 시험을 통해 최종 결론을 도출할 예정이다.

5. 결 론

국내에서 폐회로 핵연료 주기의 달성을 위해 설계 개발 중인 소듐냉각 고속로 핵연료의 손상 예측을 목적으로 수행한 본 연구는 가능한 손상 형태 중 하나인 연료봉 봉단 마개와 연료봉 지지부인 마운팅 레일의 접촉손상을 예측할 수 있는 가속시험 방법을 설계한 것이다.

이를 위해 신뢰성 공학에서 제공하는 무고장 시험시간 및 피로수명 데이터를 이용한 가속계수 계산 방법을 사용하였으며, 이때 형상 모수와 신뢰도 수준을 각각 1과 99%로 하였고 연료봉 손상 허용 기준을 적용하였다. 시편 5개를 시험할 경우 시편 당 16.5 시간의 가속시험 시간이 소요되며, 시험 결과 시편에서 어떠한 접촉 손상도 발생하지 않을 경우, 현재 설계된 연료봉 봉단 마개는 99%의 신뢰수준으로 $B_{0.004}$ 의 보증 수명을 갖게 된다.

후 기

본 논문은 원자력연구개발 사업의 지원을 받아 수행되었으며(과제번호: 2012M2A8A2025646), 특히 한국기계연구원 신뢰성평가센터의 백동천 박사의 피로수명 데이터를 이용한 가속시험 시간 계산에 관한 조언에 감사드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) Kim, S.-H., 2004, "Tensile Properties of 12Cr-1MoW Martensitic Stainless Steel," *KAERI Internal Report*.
- (2) Simulia, *ABAQUS version 6.14 User's Manual*.
- (3) Kim, H.-K., Kim, S.-J., Yoon, K.-H., Kang, H.-S., Song, K.-N., 2001, "Fretting Wear of Laterally Supported Tube," *Wear*, Vol. 250, pp. 535~543.
- (4) Reliability Evaluation Center, Korea Institute of Machinery and Materials, 2016, *Reliability Engineering of Machinery and Automobile Industry*, Sigma Press, pp. 422~479.
- (5) Fuchs, H.O. and Stephens, R.I., 1980, *Metal Fatigue in Engineering*, Wiley, New York.
- (6) Haidyrah, A.S.R., 2015, *Characterization of Bending Fatigue Mini-specimen for Nuclear Materials*, PhD Thesis, Missouri University of Science and Technology, p. 55.
- (7) Origin Lab, *Origin version 9*.

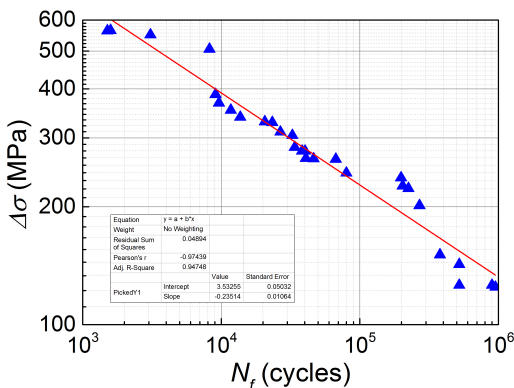


Fig. 6 Fatigue life data of HT-9.⁽⁶⁾ The slope of the linear regression is -0.235