상온 핵연료봉 미끄럼/충격 마멸특성연구: (I) 장치개발 및 특성분석

이영호† · 이강희* · 김형규*

A Study on the Sliding/Impact Wear of a Nuclear Fuel Rod in Room Temperature Air: (I) Development of a Test Rig and Characteristic Analysis

Young-Ho Lee, Kang-Hee Lee and Hyung-Kyu Kim

Key Words : Fretting wear(프레팅 마멸), Sliding/impact wear(미끄럼/충격 마멸), Nuclear fuel rod(핵연료 피복관), Fuel fretting(핵연료 프레팅), Spacer grid spring(지지격자 스프링)

Abstract

A new type of a fretting wear tester has been designed and developed in order to simulate the actual vibration behavior of a nuclear fuel rod for springs/dimples in room temperature. When considering the actual contact condition between fuel rod and spring/dimple, if fretting wear progress due to the flow-induced vibration (FIV) under a specific normal load exerted on the fuel rod by the elastic deformation of the spring, the contacting force between the fuel rod and dimple that were located in the opposite side should be decreased. Consequently, the evaluation of developed spacer grids against fretting wear damage should be performed with the results of a cell unit experiments because the contacting force is one of the most important variables that influence to the fretting wear mechanism. Therefore, it is necessary to develop a new type of fretting test rig in order to simulate the actual contact condition. In this paper, the development procedure of a new fretting wear tester and its performance were discussed in detail.

1. 서 론

경수로형 핵연료집합체에서 핵연료봉(Nuclear fuel rod)과 이를 지지하는 구조물(지지격자 스프링/딤플)에서 빈번히 발생하는 프레팅 마멸손상 연구는 원전 가동초기부터 진행되어 왔으나, 상세한 마멸기구는 마멸변수(접촉력, 상대 미끄럼 변위, 온도, 분위기 등)사이에서의 상호연관성이 매우 복잡하고, 명확한 규명이 어려워 현재까지도 연구가 진행되고 있다[1-3]. 이러한 원인 중 여러 연구자들에 의해 개발된 마멸시험 장비가 그 특성에 따라 서로 다른 결과를 보여주고 있어 문헌을 통해 보고된 결과의 상호비교가 때로는 모호한 경우도 있다[4-5].

† 한국원자력연구원 선진경수로연료개발센터
E-mail : leeyh@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-8761 FAX : (042)863-0565
* 한국원자력연구원 선진경수로연료개발센터

경수로형 원전의 핵연료 집합체에는 핵연료봉이 수직으로 배열되어 있으며, 제작회사 및 발전소 형태에 따라 다르나 대략 6-8 개의 지지격자체가 16x16 혹은 17x17 의 핵연료봉을 지지한다 (제어관 및 계측관은 고려하지 않음.). 일반적으로 Fig. 1 에서와 같이 지지격자체 내의 핵연료봉은 2 개의 스프링과 4 개의 딤플로 구성된 1x1 셀 내부에 지지되어 전체 6 개의 지지점을 가지고 있다. 이때 개발된 혹은 상용으로 사용되는 지지격자 스프링/딤플의 내마멸성을 평가하기 위한 실험으로, 1 개의 스프링 시편을 사용하여 (즉 1 개의 지지점) 실험을 수행할 경우, 실제 핵연료봉에서 발생하는 마멸현상을 충분히 반영하지 못하게 된다. 왜냐하면 핵연료봉과 하나의 스프링 혹은 딤플 사이에서의 접촉거동은 서로 독립적이지 못하고 다른 3 곳의 접촉과 상호 연관성을 가지기 때문이다. 물론

단품 시편을 이용한 실험이 새로운 형상을 가진 지지격자 스프링의 마멸경향을 빠르게 파악할 수 있는 장점이 있으나, 단품 시험의 수행결과만을 가지고 개발된 스프링 혹은 딤플의 내마멸성을 평가하는 것은 다소 어렵다고 생각한다. 이에 따라 본 연구에서는 현재까지 수행된 마멸시험 결과를 바탕으로 실제 핵연료봉의 마멸거동과 실험과의 차이점을 비교하고, 실제 조건(온도 및 압력은 제외)을 모사할 수 있는 마멸시험기를 개발하며, 개발된 마멸시험기의 시험결과를 기존의 시험기 결과와 상호 비교하여 특성을 분석하고자 한다.

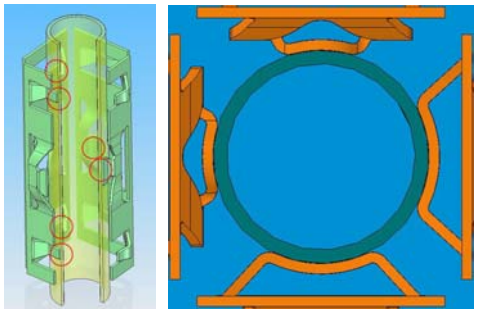

Fig. 1 A schematic views of fuel rod contact points.

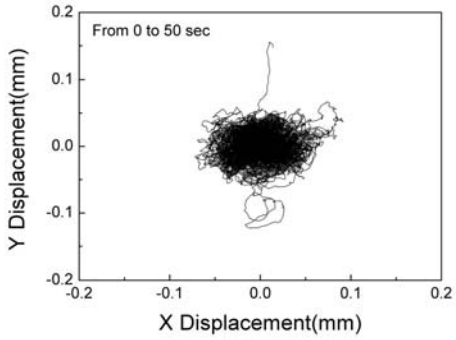

Fig. 2 Evaluation result of flow-induced vibration (FIV) by using a 5x5 partial fuel assembly [6].

2. 시험기 개발 요건

2.1 핵연료봉 진동특성

개발될 장비의 특성요건을 결정하기 위해서는 무엇보다도 실제 핵연료봉이 가동조건에서 어떻게 진동하는지를 규명해야 한다. 그러나 가동 중 원전 내부에서의 유동장에 대한 규명은 해석적인 방법을 이용하는 것이 대부분이다. 이에 따라 최근 본 과제에서는 부분 핵연료 집합체(5x5)를 이용하여 유속에 따른 핵연료봉의 진동 특성을 규명하였으며 대표적인 결과를 Fig. 2 에 나타내었다[6]. 그림에서 실제 원전 가동조건과 유사한 유속조건에서 핵연료봉(지지격자체 사이의 중심)의 진동은 거의 원형으로 나타났으며 대략 지름이 100 ~ 130 μm 이하로 판단할 수 있다. 이에 따라 개발될 마멸시험기는 수직으로 배열된 핵연료봉의 진동궤적을 원형으로 충분히 모사할 수 있어야 하는 동시에 회전 주파수 및 원형궤적의 반경을 다양하게 적용할 수 있어야 할 것으로 생각한다.

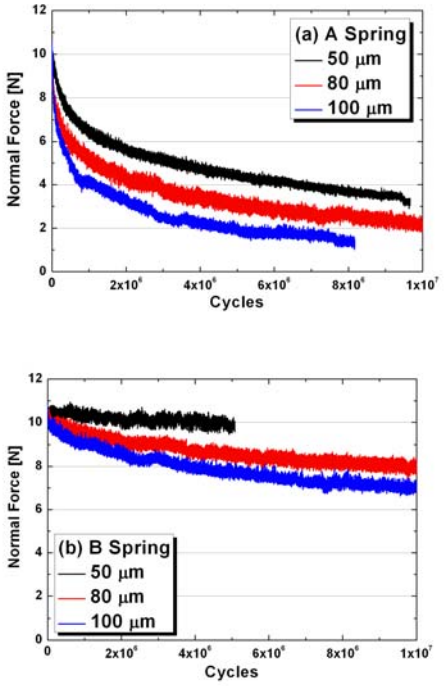

Fig. 3 Variation of the normal force with increasing fretting cycles at each spring condition in room temperature air: (a) concave shape, (b) convex shape [7].

2.2 접촉조건

일반적으로 가동 중 경수로내의 핵연료 집합체에서는 핵연료봉과 이를 지지하는 스프링/딤플 사이의 접촉거동은 시간에 따라 변한다. 상세히 설명하자면 핵연료 집합체 내부에서 핵연료봉은 스프링/딤플의 탄성변형에 의해서 일정한 위치에 지지된다. 원전가동과 함께 온도의 증가로 인해 스프링/딤플의 강성(Stiffness)가 변하게 되어 접촉력의 변화가 생긴다. 이와 동시에 중성자 조사에 의한 조사취화가 발생한다. 결국 결론적으로 시간이 지남에 따라 초기 특정한 접촉력을 가진 조건에서 틈을 가진 조건으로 변하게 될 것으로 예상된다. 이때 핵연료봉이 진동하게 되면 초기 미끄럼 마멸에서 미끄럼/충격 마멸로의 천이가 발생하게 된다. 따라서 이러한 핵연료봉과 스프링/딤플 사이의 접

촉을 모사하기 위해서는 다양한 접촉조건을 수용해야만 한다.

2.3 접촉하중

현재까지 수행된 기존의 연구결과를 살펴보면 단품 단위의 마멸실험을 수행할 때 초기 설정된 접촉하중은 마멸이 진행함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 3 참조) [7]. 수행된 실험결과에서 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이의 접촉하중은 스프링/딤플의 탄성변형의 크기에 따라 결정되므로, 마멸실험에서 감소하는 접촉하중은 핵연료봉 및 스프링에서의 마멸 깊이 증가에 따른 탄성 변형량의 감소와 밀접한 관련이 있다. 실제 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이의 접촉력은 스프링에 의해 지지되므로, 자중이나 일정한 Dead weight 를 이용하여 접촉하중을 일정하게 유지하는 것은 실제 접촉조건과 매우 다르게 된다. 이에 따라 시험기에서의 하중 인가방식은 직선운동을 하는 지그(jig)에 스프링/딤플 시편 치구를 부착하는 방식이 효과적이라 생각된다.

2.4 핵연료봉 시편 길이

핵연료 집합체에서 발생하는 핵연료봉 진동의 크기는 핵연료봉을 지지하는 지지격자체 사이의 거리(span)의 중심에서 가장 크다. 일반적으로 핵연료 집합체에 따라 지지격자체의 개수가 서로 다르기 때문에 span 의 길이도 서로 다르게 된다. 따라서 설계단계에서 다양한 span 의 길이를 수용할 수 있도록 가진부(actuating part)의 위치는 실험 목적에 따라 쉽게 이동되어야 한다.

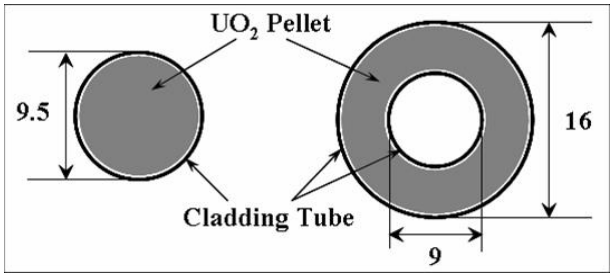

Fig. 4 Schematic cross-sectional configurations of PWR fuel rod and annular fuel.

한편 국내에서 기존의 핵연료 모양과는 전혀 다른 이중냉각형 핵연료에 대한 연구가 시작되었다. 이중냉각형 핵연료란 기존의 핵연료와는 달리 Fig. 4 와 같이 단면이 “도넛(doughnut)”형태인 핵연료로 내부 및 외부에서 냉각수가 흘러 열전달이 빠르며, 핵연료의 중심온도가 낮아 출력증강, 안전성 확도 등 매우 많은 장점을 가지고 있다. 초기 연구 준비단계에서 핵연료봉의 외각 피복관 외경이 기존의 피복관보다 커지고 이를 시험에 적용하기 위해서는 기존의 핵연료봉은 물론 이중냉각형 핵연료 피복관의 최대 외경값을 고려해야 한다. 본 연구에서 개발될 시험장치는 span 의 길이변화가 1 m 이며, 최대 봉 시편 외경은 25.4 mm 로 설계하였다.

2.5 하중 및 변위 측정

가진되는 핵연료봉이 원형의 궤적을 가지면서 스프링 혹은 딤플과 접촉을 일으킬 때, 발생되는 접촉하중(여기서는 수직하중 및 전단하중) 및 미끄럼 변위의 측정은 매우 중요하다. 왜냐하면 현재까지 알려진 마멸 평가모델들은 접촉하중과 미끄럼 변위를 항상 포함하고 있기 때문이다. 핵연료봉은 1x1 셀내부에서 모두 4 개의 면과 접촉한다. 여기서 4 개의 면은 2 개의 스프링과 2 개의 딤플들(한 면에 상하 2 개로 구성)이다. 1 개의 면만을 고려해 보면 최소 1 개의 변위와 2 개의 수직(반경) 및 전단(원주)하중을 측정해야 한다. 본 시험기의 궤적은 2 차원 평면에서의 원형이므로 핵연료봉의 길이방향으로의 전단하중은 고려하지 않았다. 요약하면 1x1 셀 내부에는 4 개의 변위센서와 4 개의 2 축 힘센서(Load cell)가 부착되어야 한다. 또한 가진되는 핵연료봉의 궤적을 측정하기 위해서 최소 2 개의 변위센서가 필요하다.

변위센서의 경우, 접촉방식을 사용하게 되면 가진되는 핵연료봉의 운동을 방해할 수 있으므로 비접촉식을 사용해야 하며 센서의 측정범위는 최소 1 mm 범위를 가져야 한다. 또한 힘센서의 경우, 상용으로 공급되는 센서가 거의 없거나, 제작을 의뢰하더라도 적용이 불가능하여 본 연구에서는 2 축 힘센서의 설계부터 제작 및 교정까지 자체적으로 해결하였다. 개발된 마멸시험기의 데이터 저장은 상용 프로그램인 LabVIEW®를 이용하였고 실험에서 발생되는 거의 모든 변수를 실시간으로 측정하였다.

3. 마멸시험기 개발 및 특성분석

3.1 마멸시험기

Fig. 5 에 개발된 상온 직립형 마멸시험기의 개략도를 나타내었다. 마멸시험기 상부에 모터가 설

치되어 있으며 여기서 모터의 축은 편심원통과 탄성변경이 가능한 부품으로 연결되어 있다. 또한 편심원통은 90° 의 각도를 가진 4 개의 회전롤러와 접촉하여 회전롤러의 수직변위를 고정함으로써 편심원통과 연결된 핵연료봉이 2 차원 평면에서 원형궤적을 가질 수 있다. 원형궤적의 크기는 편심원통의 편심량과 회전롤러의 수직변위의 변화로 제어될 수 있다. 프레팅 마멸시험을 수행하는 동안 실시간으로 각 하중(4 개의 면에서 수직 및 전단하중)과 변위(2 개의 가진변위, 4 개의 접촉변위)를 저장하였으며 일부 관심 있는 영역에서는 1kHz 의 주파수로 데이터의 저장이 가능하도록 설계되었다. 특히 가진부의 궤적에 따른 접촉부에서의 궤적을 실시간으로 평가함으로써 실제 접촉면에서 발생하는 마멸거동을 쉽게 추정할 수 있다.

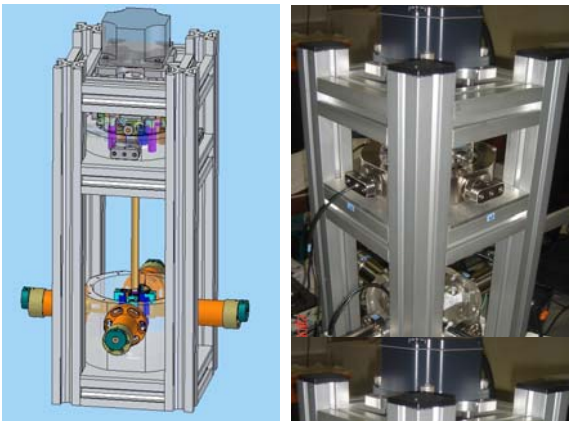

Fig. 5 Schematic diagrams of the developed fretting wear test rig.

3.2 변위 및 하중센서

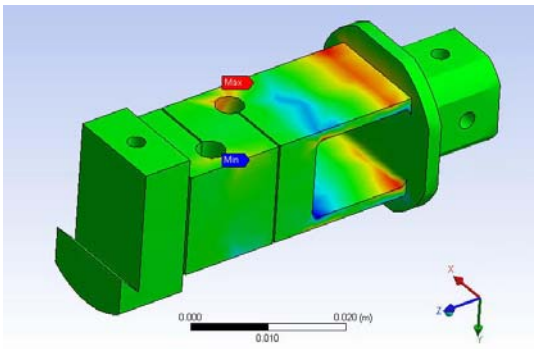

Fig. 6 Result of FE analysis for developing a bi-axial load cell of a fretting wear test rig.

본 마멸시험기에서 특성과 관련하여 설치된 변위센서는 비접촉식 방식을 사용하였으며 가진부에 2 개를 부착하여 평면상의 원궤적(X 및 Y 축)을 측정할 수 있다. 이와 동시에 아래쪽 접촉부의 각 스프링/딤플 시편에 각각 1 개씩 설치하여 실험과정에서 핵연료봉과 스프링/딤플 사이의 상대변위를 측정할 수 있다.

힘센서의 경우, 상용으로 공급되지 않기 때문에 스프링/딤플 치구의 구조를 힘센서로 만들기 위하여 설계초기에 유한요소해석을 수행하였고 Fig. 6 과 같이 스트레인 게이지 부착위치를 결정한 후 2 축 힘센서로 제작하였다. 각 센서의 교정은 교정검사를 수행한 정밀분동을 이용하여 수행되었으며 2 축 힘센서의 각 축간 상호간섭오차는 5%이내임을 확인하였다.

3.3 핵연료봉 진동 특성

Fig. 7 에 상온 직립형 마멸시험기 가진부에서의 핵연료봉 궤적을 나타내었다. 궤적의 회전주파수는 30 Hz 이며 모터의 속도로 제어가 가능하다. 본 실험장비를 이용하여 핵연료봉의 진동을 모사한 결과는 Fig. 2 에 나타낸 5x5 부분집합체에서의 연료봉의 궤적과 매우 유사함을 알 수 있다.

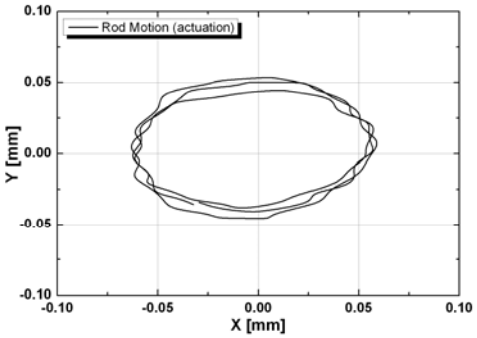

Fig. 7 Rod motion at an actuating position.

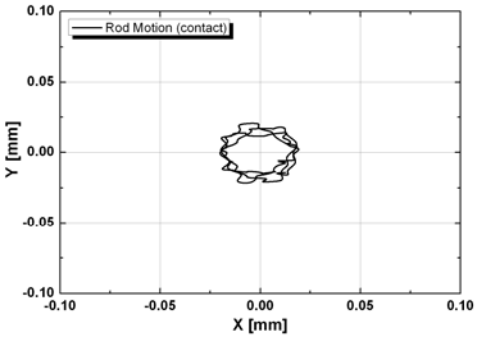

Fig. 8 Rod motion at a contacting position.

가진부에서 핵연료봉의 원궤적이 반경 100 μm 로 가진 될 때 접촉부에서의 상대변위는 초기 접촉조건에 따라 변하게 된다. Fig. 8 에 핵연료봉과 스프링/딤플 사이의 접촉조건을 0.05 mm 간격으로 설정하였을 때 핵연료봉의 운동궤적을 각각의 변위센서로 측정한 결과로 나타내었다. 핵연료봉의 원궤적 운동에 따라 스프링/딤플과 충격/미끄럼 마멸이 발생함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 제작된 프레팅 마멸시험기는 실제 핵연료봉의 진동을 상온에서 잘 모사할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

상온에서 핵연료봉과 지지격자 스프링 사이의 프레팅 마멸현상을 모사하기 위한 마멸시험기를 제작하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실제 환경에서 나타나는 핵연료봉의 가진 특성을 분석하기 위하여 5x5 부분집합체를 이용하여 마멸시험기에서의 핵연료봉 가진 범위를 결정하였다.

(2) 마멸시험과정에서 나타난 결과의 정확한 분석을 위하여 비접촉 변위센서를 가진부에 2 개, 접촉부에 4 개를 설치하였다. 이와 동시에 접촉부 각 축에 2 축 힘센서를 부착하여 접촉하중과 전단하중을 모두 실시간으로 측정할 수 있다.

(3) 제작된 마멸시험기의 특성을 분석한 결과, 기존의 진동시험과 매우 유사한 형태로 핵연료봉이 가진 되었으며, 이를 이용하여 향후 다양한 핵연료봉 진동에 따른 프레팅 마멸실험이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

(1) P. L. Ko, 1997, “Wear of zirconium alloys due to fretting and periodic impacting.” *Wear*, Vol. 55,pp.369-385.

(2) Y.-H. Lee, H.-K. Kim and J.-H. Jung, 2003, “Evaluation of spring shape effect on the nuclear fuel fretting using worn area.”, *Proceedings of KSTLE Autumn meetings*, pp 313-323.

(3) H.-K. Kim and Y.-H. Lee, 2003, “Influence of contact shape and supporting condition on tube fretting wear.”, *Wear* , Vol.255, pp1183-1197.

(4) S. Fouvry, T. Liskiewicz, Ph. Kapsa, S. Hannel and E. Sauger, 2003, “An energy description of wear mechanisms and its applications to oscillating sliding contacts.”, *Wear*, Vol.255, pp287-298.

(5) 이영호, 김형규, “스프링으로 지지된 튜브의 프레팅 마멸에서 사이클 증가에 따른 접촉하중의 변화.” 2005 년도 대한기계학회 추계학술대회 논문집.

(6) K.-H. Lee, K.-H. Yoon, J.-Y. Kim, K.-N. Song and D.-S. Oh, 2007, “Orbital Vibratory Motion of a Fuel Rod in a 5x5 Partial Fuel Assembly in a Confined Axial Flow.”, *Proceedings of ICAPP ’07*,Nice, France, May 15-19, 2007, Paper 7241

(7) 이영호, 김형규, “프레팅 마멸에서 접촉하중 감소가 연료봉 마멸깊이에 미치는 영향.” 2005 년도 한국윤활학회 추계학술대회 논문집.