

# 수중 및 공기 중에서의 지르칼로이-4 튜브마멸 비교분석

김형규\*, 박순종\*\*, 강홍석\*, 윤경호\*, 송기남\*

\* 한국원자력연구소

\*\* 충남대학교 대학원 기계공학과

## Comparison and Analysis of Zircaloy-4 Tube Wear in Air and Water Environment

Hyung-Kyu Kim\*, Soon-Jong Park\*\*, Heung-Seok Kang\*, Kyung-Ho Yoon\*, Kee-Nam Song\*

\* Korea Atomic Energy Research Institute

\*\* Graduate School, Dept. Mechanical Engineering, Chungnam National University

**ABSTRACT** – The wear characteristic of Zircaloy-4 tube, which is used for a cladding of light water reactor fuel rod, is investigated experimentally. The experiment is conducted with contacting the crossed tube specimens in air as well as in water at room temperature with various combination of contact normal force and sliding distance of reciprocating motion. The contour and the volume of each wear are examined to study the effect of contact condition and environment on wear. As a result, it is found that the wear volume in the water environment is larger than that in the air for all the contact (i.e., force and sliding distance) conditions. However, the wear depth is greater in air than in water if the contact normal force and the sliding distance are larger. These are explained by the ease of detachment of wear particles from the contact surface. On the other hand, workrate model is applied with the contact shear force range measured by our wear tester. Investigated is the correlation between the workrate and the wear volume increase rate of the present experiment. The parabolic curve is found to fit well for the present wear data.

**Key Words:** Zircaloy-4 tube wear, Air and water environment, Workrate model

### 1. 서론

두 물체가 접촉하며 상대운동을 하는 경우 접촉면에는 마멸손상이 발생하는 것이 일반적이다. 이때 마멸이란 접촉면에서 물체의 일부가 떨어져 나오는 형태가 되며 이에 따라 유격의 발생에 의한 기밀도 저하, 동력전달의 불확실 등, 접촉 건전성의 저하를 갖고 오게 되어 기계 구조물의 사용수명을 단축시키게 된다. 한편 대부분의 기계 구조물은 접촉부를 가지고 있으므로 설계할 때에 마멸의 발생에 대한 고려가 필수적이고 따라서 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

마멸을 발생시키는 기구는 매우 다양하면서 복잡하다. 그 이유는 접촉하중의 상태 및 접촉물체 사이 상대운동의 형태(예를 들

어 왕복운동, 미끄럼, 구름, 충격 등), 그리고 접촉하고 있는 재질의 조합에 따라 여러 가지의 마멸 형태가 나타나기 때문이다. 일반적으로 자주 거론되는 마멸의 형태는 프레팅(fretting), 스코어링(scoring), 스커피(scuffing), 피팅(pitting), 침식(erosion), 충격(impact) 마멸이 있으며 이들 각각에 대한 마멸기구는 응착(adhesion), 연마(abrasion), 표면박리(delamination), 피로(fatigue), 부식(corrosion), 전식(電蝕; electrical attack) 등이 대부분 하나 이상 연관되어 있다[1]. 따라서 마멸 연구를 위한 주제는 그 범위가 매우 넓게 된다. 그러나 최종적인 목표는 접촉부의 건전성을 오래 지속시키기 위한 방법을 도출하는 것이라 할 수 있다.

원자력발전 관련부품 중 마멸손상에 대해 특히 관심을 갖는 것으로는 핵연료 및 증기

발생기를 들 수 있다. 이때의 마멸은, 핵연료의 경우, 지지격자체와 핵연료봉과의 접촉부 및 안내관과 제어봉과의 접촉부, 또 증기발생기의 경우, 전열관과 고정부와와의 접촉부분에 발생하는 프레팅마멸이다. 이때의 마멸손상은 원자력 발전소의 안전성과 경제적 운용에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

예로서, 핵연료봉의 마멸은 표면에 천공이 되도록 할 수 있고, 이때 핵연료봉 내부의 방사성 물질이 원자로 내로 유출이 되게 되므로 원자력발전소에서 가장 근본적이고 일차적인 방사능 오염원이 된다. 따라서 국내 뿐 아니라 국외의 핵연료 공급자들은 핵연료봉의 프레팅마멸에 대해 많은 주의를 기울이고 있으며, 이에 따라 지지격자체의 설계 개선뿐 아니라 핵연료봉과 지지격자체의 상대 운동의 원인이 되는 유체유발 진동에 대해서도 많은 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 핵연료봉 프레팅마멸에 대한 실험적 연구의 하나로서 지르칼로이-4 튜브의 마멸특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 여러 가지의 접촉하중 및 미끄럼 변위를 조합하여 실험 변수로 사용하였으며 또한 핵연료가 원자로 냉각수 내에서 사용되는 점을 고려하여 공기 중과 수중에서의 분위기 차이에 의한 마멸의 차이를 비교 분석하였다. 한편 실험으로부터 얻은 데이터에 Workrate 모델[2]을 적용하여 수중 및 공기 중에서의 변화를 함께 검토하였다. 본 연구 결과는 핵연료봉과 접촉하여 프레팅마멸을 발생시키는 지지격자체의 설계에 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험

### 2.1 시편 및 실험 장치

실험에 사용된 핵연료봉 피복관 튜브시편은 상용 경수로 핵연료에 사용되는 것으로부터 절단하여 제작하였다. 튜브시편의 재질은 지르칼로이-4 이고 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 평균 거칠기( $R_a$ )는 0.76  $\mu\text{m}$  이었다. 지르칼로이-4의 기계적 성질과 화학 성분을 Table 1에 정리하였다. 접촉하는 두 개의 튜브시편은 서로 직교하게 하였으며 수직한 튜브는 모터의 구동부에 연결되어 상하방향으로 진동하며 수평방향으로 설치한 튜브는 수직방향의 튜브에 접촉 수직하중을 발생하도록 하였다. 이와 같은 튜브시편의 배열 상태를 Fig. 1에 나타내었다. 한편 마멸 실험을 시작하기 전 모든 튜브는 아세톤으로 세척한 후 건조하여 사용하였다.

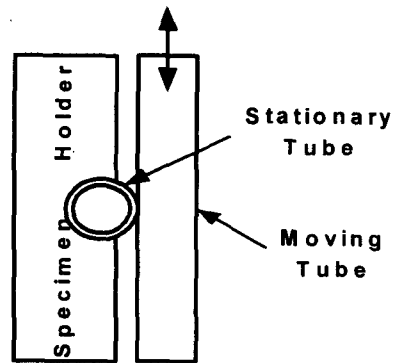


Fig. 1. Alignment of the tube specimen.

Table 1. Mechanical and chemical properties of Zircaloy-4 tube.

Mechanical properties (at room temperature)						
Tensile strength	Yield strength (0.2% offset)	Elongation in 2"	Elastic Modulus	Poisson's Ratio		
470 MPa	315 MPa	31%	136.6 GPa	0.294		
Chemical composition (wt. %)						
Sn	Fe	Cr	O	C	Si	Zr
1.28	0.22	0.12	0.114	0.013	0.010	remained

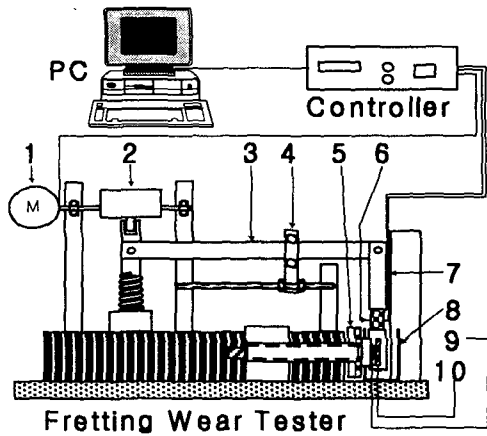


Fig. 2. Schematic diagram of Wear Tester.

Fig. 2 에는 실험에 사용한 마멸 실험장치의 개략도를 보여 준다. 이 장치는 회전 속도를 가변할 수 있는 서보 모터와 편심 원통, 링크 기구 및 지렛대를 이용하고 있으며 실험 변수인 시편 사이의 상대 진폭, 진동수, 수직 하중 등을 조절할 수 있도록 설계되었다. 또한 수중실험을 위해 시편 부위가 물 속에 잠기게 할 수 있는 물통을 갖고 있으며 튜브와 지지부 시편의 상대 미끄럼 변위 방향을 축 방향 또는 횡 방향으로 바꾸어 실험할 수 있다. 실험 장비에 대한 상세한 설명은 참고 문헌[3]을 참조할 수 있다.

## 2.2 실험 방법

본 연구에서의 프레팅마멸 실험은 상온의 공기 중과 수중에서 수행하였다. 튜브시편 사이의 미끄럼 변위 범위(진폭의 두 배)는 15, 30, 50, 80, 100, 150 및 200  $\mu\text{m}$  로 각각의 범위에 대해 10, 30 및 50 N의 수직력이 작용하는 경우에 대해 실험하였다. 상하 방향으로 진동하는 튜브시편의 반복 주파수는 30 Hz 로 하였으며 반복 횟수 100,000 회가 되었을 때 실험을 종료하였다.

## 2.3 마멸 측정 및 부피의 계산

실험이 종료되면 튜브시편의 표면에 발생한 마멸의 형상을 측정 현미경을 이용하여 관찰하였으며 현미경에 부착된 폐쇄회로 카메라에 의해 화상 데이터를 취득하였다. 또

한 마멸의 정량화를 위해 튜브시편의 마멸부 깊이를 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 측정하였다. 표면 거칠기 측정장비에서 기록되는 마멸부의 3차원 데이터로부터 개발된 마멸부피 계산 프로그램[4]을 이용하여 마멸 부피를 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 마멸부 형상 및 궤적

마멸형상에 대한 현미경 관찰 결과를 Fig. 3 에 특징적으로 보여주고 있으며, 튜브 간의 접촉에 의해서는 원형으로 나타나는 것을 알 수 있다. 표면 거칠기 측정장비로 측정된 마멸부의 궤적 중 10, 30, 50 N/ 50, 200  $\mu\text{m}$  에서 공기 중 및 수중에서의 결과를 Fig. 4 에 특징적으로 나타내었다. Fig. 4 에서 볼 수 있는 것과 같이 마멸부의 궤적은 깊이 방향으로 매우 불규칙하여, 표면에서의 형상이 원형이라 하더라도, 마멸 부피를 계산할 때 마멸부를 원추형 또는 반구형으로 가정할 경우 많은 오차를 포함할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 기 개발된 계산 프로그램[4]을 이용하여 마멸부 형상의 가정으로부터 발생하는 오차를 현저히 줄였다.

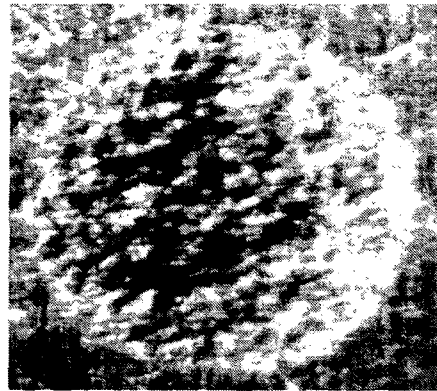


Fig. 3. Typical wear shape on the tube specimen.

Fig. 4 및 Table 2 로부터 마멸부피는 수중 실험의 결과에서 항상 더 큰 것을 알 수 있다. 그러나 이 현상은 마멸 깊이의 비교에 있어서는 일치하지 않았다. 즉 수직하중 10N 에서는 수중에서 마멸 깊이가 더 깊으

Table. 2 Wear depth and volume.

$\delta$ / $P$	10 N		30 N		50 N	
	Depth Air/Water (Ratio)	Volume Air/Water (Ratio)	Depth Air/Water (Ratio)	Volume Air/Water (Ratio)	Depth Air/Water (Ratio)	Volume Air/Water (Ratio)
15 $\mu\text{m}$	9.4 / 21.7 (0.43)	87.77 / 1262.55 (0.07)	4.8 / 9.5 (0.50)	7.75 / 66.28 (0.12)	- / 6.7 (-)	- / 35.01 (-)
30 $\mu\text{m}$	11.20 / 19.5 (0.57)	219.57 / 1394.11 (0.16)	17.5 / 21.4 (0.82)	376.72 / 1318.24 (0.29)	8.0 / - (-)	54.36 / - (-)
50 $\mu\text{m}$	18.0 / 19.3 (0.94)	975.30 / 2420.19 (0.40)	29.3 / 49.0 (0.60)	1681.21 / 15053.73 (0.11)	23.6 / 81.5 (0.29)	546.26 / 24145.03 (0.02)
80 $\mu\text{m}$	29.2 / 33.3 (0.88)	2589.03 / 7813.25 (0.33)	32.1 / - (-)	4770.82 / - (-)	Not conducted	Not conducted
100 $\mu\text{m}$	27.4 / 38.0 (0.72)	6182.38 / 14482.85 (0.43)	64.0 / 54.3 (1.18)	9428.12 / 25743.80 (0.37)	79.5 / 56.1 (1.42)	9774.83 / 8263.74 (1.18)
150 $\mu\text{m}$	52.8 / 62.5 (0.84)	9385.41 / 18492.62 (0.51)	107.8 / 76.6 (1.41)	18432.87 / 27224.90 (0.68)	44.4 / 89.2 (0.50)	17287.42 / 42236.93 (0.41)
200 $\mu\text{m}$	73.0 / 72.8 (1.0)	16489.30 / 25404.46 (0.65)	152.4 / 96.3 (1.58)	44473.48 / 48431.26 (0.92)	134.1 / 106.1 (1.26)	53327.15 / 52398.52 (1.02)

나 30N 및 50N에서는 미끄럼 변위범위 값이 100  $\mu\text{m}$  이상이 되면 공기 중에서 더 깊은 마멸이 발생한 것을 관찰할 수 있다.

프레팅마멸은 두 접촉물체 사이의 미끄럼 변위범위가 작은 경우에 발생하며 일반적으로 응착마멸(adhesive wear) 기구로부터 시작되어, 접촉면에 마멸입자가 발생하게 되면 이에 의한 연마(abrasion) 기구로 전환되어 마멸이 진행되는 특성을 가지며 이와 같은 마멸 기구가 반복적으로 발생하는 특징이 있다[1]. 따라서 이들 기구의 반복 주기가 빠를 때, 더욱 마멸이 심하게 발생하게 되며 이것은 접촉면으로부터 마멸입자가 방출되기 쉬운 정도에 의존한다.

수중 실험의 경우, 공기 중 실험에 비해 튜브시편 사이의 상대운동에 의해 마멸입자의 이탈이 더욱 쉬울 것으로 예상할 수 있으며 이로부터 마멸부피가 더욱 크게 나타난 것으로 설명할 수 있다.

한편 수직하중이 증가하면 마멸입자가 접

촉면에 잔류하는 기간이 길며 이것은 수중에서보다 공기 중에서 더욱 가능성이 높을 것이다. 접촉면에 마멸입자가 잔류하는 가운데 시편 사이의 상대운동이 지속되면 깊이 방향으로 마멸이 진행되기가 용이할 것이다. 따라서 수직하중이 큰 공기 중 실험에서 수중에서보다 더욱 깊은 마멸이 발생하였다고 생각된다.

마멸부의 궤적으로부터 이와 같은 설명이 타당하다는 것을 보여 줄 수 있다. 즉, Fig. 4에서 공기 중에서의 마멸형상은 “V”형에 가까운 깊이 방향으로 뾰족한 형상을 가지나 수중에서는 아래면이 좀 더 둥근 “U”형에 가까운 마멸형상을 보여준다.

수중에서 마멸부피가 더 커지는 것은 앞선 연구에서 튜브와 지지격자 스프링과의 실험에서도 관찰되었다[5]. 이 실험에서는 튜브 표면에 나타난 마멸 형상으로부터 주어진 실험 조건(수직하중과 미끄럼 변위범위)을 접촉부의 양 가장자리에서만 마멸이

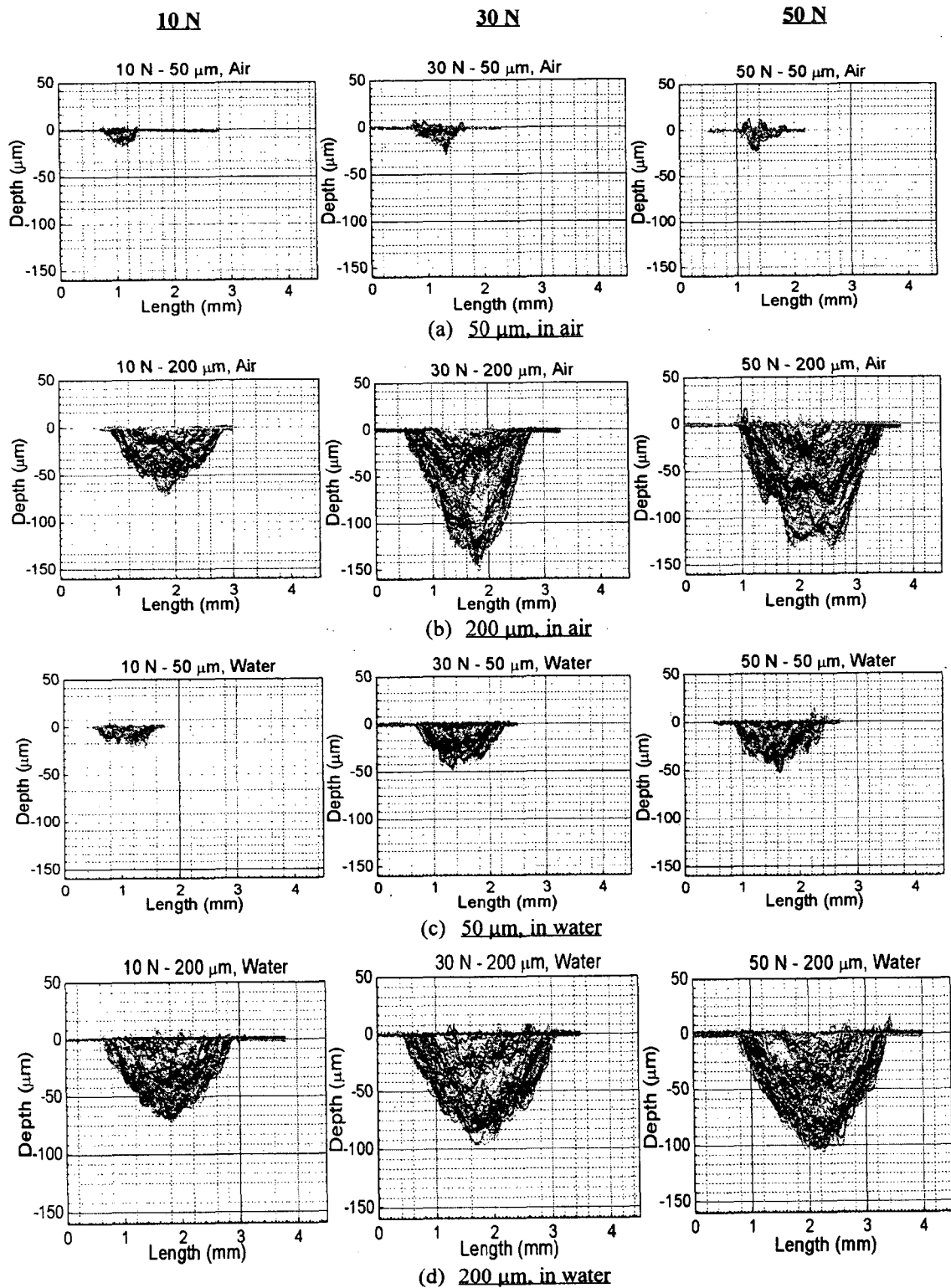


Fig. 4. Comparison of wear in the environment of air and water.

발생한 부분미끄럼과 접촉면 전체에서 마멸이 발생한 전미끄럼으로 구분할 수 있었다. 그러나 본 연구에서의 실험에서는 마멸부의 형상이 모두 Fig. 3 과 같이 원형으로 나타났으며 양 가장자리에서만 마멸이 관찰된 경우를 발견할 수는 없었다.

부분미끄럼의 경우, 마멸이 발생하는 (접촉부 양 가장자리) 위치는 접촉면에서의 전단 응력이 수직응력과 마찰계수와의 곱과 같은 곳이 된다. 따라서 마멸이 발생하는 영역은 수직응력의 형태에 의존하게 된다. 이에 대한 실험적 관찰과 설명은 앞선 연구에서 발표한 적이 있다[6]. 즉, 접촉 물체의 접촉부 형상에 따라 수직응력의 형태가 달라지며 양단이 라운딩 되어 있는 편치에 의한 접촉에서는 비록 부분미끄럼에 해당하는 접촉조건에 대해서도 양 가장자리에 마멸이 발생하는, 부분미끄럼의 특징적인, 마멸형태를 관찰하기 힘들다. 튜브와 튜브가 서로 직교하는 본 연구에서의 실험에서도 접촉 수직응력이 부분미끄럼 조건의 경우에도 양 가장자리에 마멸을 가져오는 형태가 되지 않았을 것으로 추정하였다.

### 3.2 Workrate Model 의 적용

마멸량에 대한 정량화로는 마멸부의 무게, 깊이 또는 체적으로 비교적 간단히 정리할 수 있으나, 마멸을 발생시키는데 영향을 미친 파라미터로는 수직하중, 전단하중, 상대 미끄럼 변위 등을 포함하여 마멸실험에 사용되는 수많은 실험변수들을 포함시킬 수 있을 것이다. 마멸에 대한 연구의 목적이 마멸손상을 억제할 수 있는 방법을 찾는 것이므로 주어진 조건에서 마멸이 전개되는 과정을 파악할 수 있는 모델을 개발하는 것은 매우 중요하다.

그러나 서론에서 언급하였듯이 마멸의 형태와 그에 대한 기구가 매우 다양하므로 모든 경우에 적용할 수 있는 마멸모델을 개발하기는 거의 불가능하며 따라서 어떤 특정한 경우에 대해 모델을 제안하는 경우가 많다. 그에 따라 많은 마멸모델이 제안되어 왔으며, 최근의 통계로서 1957년부터 1992년까지 마멸 학술지에 발표된 마멸모델 관련 연구의 수가 5400 건이 넘고 모델에 이

용된 파라미터의 수도 100 개를 초과하였다는 발표도 있었다[7].

본 연구에서는 증기발생기 전열관의 마멸에 적용되었으며[8] 핵연료봉의 마멸에도 최근에 적용된 적이 있는[9] Workrate 모델[2]을 이용하여 실험 결과를 적용하여 보았다. Workrate 모델은 접촉면에 가해진 일률(workrate)이 마멸부피의 증가율과 비례관계가 있다고 생각하는 것으로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{V} = K \dot{W}, \text{ 여기서 } \dot{W} = \frac{1}{t} \int P ds. \quad (1)$$

식 (1)에서  $\dot{V}$ 와  $\dot{W}$ 는 각각 마멸부피의 증가율과 일률을 나타내며  $K$ 는 Pa<sup>-1</sup>의 차원을 갖는 마멸계수이다. 한편 일률에서  $t$ 는 시간을 나타내며  $P$ 는 접촉 수직하중을 의미하는데 마멸을 발생시키는 미끄럼 변위의 방향과 수직하중은 서로 직각이므로 수직하중과 미끄럼 변위의 벡터 곱은 0이 되므로 일의 개념으로부터 모순이 된다. 따라서  $P$ 는 접촉면에서의 전단하중이 되어야 논리적 모순이 없으며 본 연구에서는 마멸 시험장치에서 전단하중  $Q$ 를 측정할 수 있으므로 일률을 계산할 때 다음과 같이 전단하중을 사용하였다.

$$\dot{W} = \frac{1}{t} \int Q ds. \quad (2)$$

Fig. 5는 전단하중을 사용한 Workrate 모델을 이용하여 본 연구에서의 실험 결과를 공기 중과 수중으로 분류하여 정리한 것이다. 여기서 일률이 증가함에 따라 마멸부피의 증가율이 증가하는 일반적인 경향을 볼 수 있으며 그 증가율이 수중에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

식 (1)의 Workrate 모델은 일률과 마멸부피 증가율 사이에 선형적인 비례관계가 있다는 것이므로 Fig. 5에는 수중 및 공기 중에서 얻은 실험 데이터를 표현할 수 있는 Curve fit을 나타내었다. 이를 위해 수중과 공기 중에서의 데이터를 분리하였으며 각각에 대해 선형(Linear fit) 및 이차 함수적(Parabolic fit) Curve fit을 수행하였다.

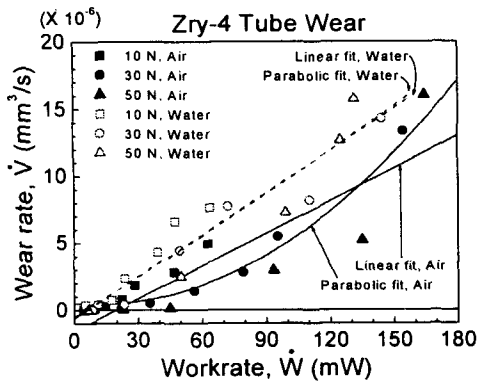


Fig. 5. Application of workrate model to the present experimental data.

수중에서의 데이터는 선형 및 이차 함수적 Curve fit 이 거의 일치하였으나 공기 중에서의 데이터는 각 Curve fit 의 결과가 상이하다는 것을 볼 수 있다. 한편 공기 중에서의 데이터는 일률과 마멸부피 증가율 사이에 선형 보다는 이차 함수적 비례관계로 더욱 근사하게 나타낼 수 있는 것으로 판단되었다.

이와 같이 마멸부피 증가율과 일률 사이의 관계가 선형뿐 아니라 역(Power) 함수적으로도 나타난다는 것은 앞선 연구에서도 발표된 적이 있다[8]. 즉, 증기발생기 전열관 재료인 Incoloy 800 튜브와 Inconel 600 지지체에 대하여 상온, 증류수에서 마멸실험을 하였을 때에는 마멸부피 증가율과 일률 사이에 역 함수의 관계를 보인 반면, Inconel 600 튜브와 탄소강 지지체에 대한 265°C 수중 시험 결과에서는 선형적 비례관계가 있음을 보고하였다[8].

따라서 일률과 마멸부피의 증가율 사이에는 항상 선형 비례관계가 존재하지 않으며, 접촉물체의 재료, 시험 분위기 등의 조건에 따라 달라진다고 추정할 수 있어 식 (1)을 적용할 때에는 이와 같은 점이 고려되어야 할 것이라 사료된다. 이 경우, 일률과 마멸부피 증가율 사이의 비례관계를 일반적으로 나타내기 위해서 식 (1)을 다음과 같이 바꿀 수 있다[10].

$$\dot{V} = K' \dot{W}^n \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 본 연구와 앞선 연구들[8,9]에서의 실험 조건을 고려할 때 접촉물체의 재료, 시험 분위기 등에 의존하는 1 이상의 실험 상수라 할 수 있으며  $K'$ 은 식 (1)의 마멸계수와는 다른 상수가 된다.

한편 Fig. 5에서 수중 및 공기 중에서의 실험결과를 선형 Curve fit 할 때 공기 중에서의 데이터가 일률이 큰 경우 특히 분산 정도가 컸다. 이때의 분산을 무시한 선형 Curve fit 에서 기울기(마멸계수,  $K$ )는 수중 및 공기 중에서 각각  $0.1 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$  과  $0.08 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$  로 계산되었다. 이로부터 수중에서의 마멸부피 증가율이 공기 중에서도보다 크다는 것을 알 수 있다.

지르칼로이-4 재료의 지지격자 스프링과 튜브시편 사이의 마멸시험을 수행한 앞선 연구[5]에서는 튜브시편 표면에 나타난 부분미끄럼과 전미끄럼에 대해 각각 서로 다른 마멸계수를 적용할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 부분미끄럼과 전미끄럼을 명백히 구분할 수 없었다. 이러한 결과는 미끄럼 상태(즉, 부분 또는 전미끄럼)에 따라 마멸계수(혹은 마멸 거동)가 달라진다고도 추정할 수 있다. 이에 대한 검증을 위해서는 부분미끄럼과 전미끄럼 상태를 구분할 수 있는 실험이 필요하며 향후 이에 대한 연구를 수행하고자 한다.

#### 4. 결론

본 연구는 재질이 지르칼로이-4 인 핵연료 피복관의 프레팅마멸 특성을 분석하기 위하여 공기 중 및 수중의 분위기에서 여러 가지 하중 및 미끄럼 변위범위 조건으로 실험한 결과를 정리한 것으로서, 분위기 및 실험조건(하중 및 미끄럼 변위)에 따른 영향을 분석하고, 접촉면에서의 전단하중을 고려한 Workrate 모델을 적용하여 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 마멸부피는 수중에서 항상 크게 나타났다. 그러나 수직하중이 크고 미끄럼 변위범위가 클 때(수직하중 30 N, 미끄럼 변위범위 100  $\mu\text{m}$  이상) 공기 중 실험에서의 마멸 깊이가 수중에서보다 더 컸

- 다. 이것은 마멸 기구가 응착마멸로부터 시작하여 접촉면에 마멸입자가 개재된 연마로 진행되며 이러한 주기의 반복속도가 빠를 경우 마멸이 더욱 심하게 나타난다는 것으로부터 설명할 수 있다. 즉 수중에서는 마멸입자의 방출이 공기 중에서보다 쉬우므로 마멸부피가 크게 나타난 것이며 공기 중에서 수직하중이 클 경우 마멸입자의 이탈이 용이하지 못하며 이로부터 깊이 방향으로의 마멸이 더욱 쉽게 발생한 것으로 사료된다.
2. 튜브 표면과 마멸부의 깊이방향 궤적으로부터 본 연구에서의 마멸형태를 부분 미끄럼과 전미끄럼에 의한 마멸로 구분하기 어려웠다. 한편, 실험에서 얻은 데이터를 Workrate 마멸모델로 표현하였을 때, 수중에서는 일률과 마멸부피 증가율 사이에 선형적 관계가 있다고 판단되나 공기 중에서의 결과는 오히려 이차 함수적 비례관계에 더욱 근사한 것으로 나타났다. 따라서 Workrate 모델이 의미하듯이 일률과 마멸부피의 증가율 사이에 항상 선형적 비례관계가 있다고 보기는 어려우며 재질 및 실험의 조건, 그리고 미끄럼 상태에 따라 달라진다고 생각된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

1. Ko, P.L., "Metallic wear - a review with special references to vibration-induced wear in power plant components," Tribology International, Vol.20, No.2, pp.66-78, 1987.
2. Frick, T.M., Sobek, T.E. and Reavis, J.R., "Overview on the development and implementation of methodologies to compute vibration and wear of steam generator tubes," ASME Special Publication Symposium on Flow-Induced Vibrations: Vol.3 Vibration in Heat Exchangers, ed. Paidoussis, M.P., Chenoweth, J.K. and Bernstein, M.D., pp.149-161, 1984.
3. 김형규 외 4 인, "미끄럼 방향과 접촉부 형상에 따른 핵연료봉 프레팅마멸의 시험 분석," 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
4. 김형규, 김선재, "표면 Profile 해석을 이용한 마멸량 계산 알고리즘 개발," 한국원자력학회지, 제 17 권, 제 1 호, pp.33-39, 2001.
5. 김형규, 정용환, 정연호, "핵연료봉 프레팅마멸에서의 수중분위기 영향과 마멸 모델에 관한 연구," 한국원자력학회 2001 추계학술발표회 논문집, 발표예정.
6. 김형규 외 3 인, "지르칼로이-4 튜브 및 지지부의 접촉조건과 미끄럼 상태의 차이," 한국원자력학회 2001 춘계학술대회 논문집, pp.81-88.
7. Meng, H.C. and Ludema, K.C., "Wear models and predictive equations: their form and content," Wear, Vol.181-183, pp.443-457, 1995.
8. Fisher, N.J., Chow, A.B. and Weckwerth, M.K., "Experimental fretting-wear studies of steam generator materials," J. Pressure Vessel Technology (Trans. ASME), Vol.117, pp.312-320, 1995.
9. Joulin, T.P. et al., "Effects of loading conditions and types of motion on PWR fuel rod cladding wear," Trans. SmiRT-16, paper no. 1239, 2001.
10. Pettigrew, M.J. et al., "Flow-induced vibration and related technologies in nuclear components," Nuclear Engineering and Design, Vol.131, pp.81-100, 1991.