

Zr 합금에서 Nb 과 Sn 의 함량에 따른 마멸특성분석

이영호*, 김형규

한국원자력연구소

Analysis of wear properties in Zr alloys with variation of Nb and Sn content

Young-Ho Lee*, Hyung-Kyu Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract: In order to evaluate the effect of alloying elements (Nb and Sn) on the wear resistance of advanced Zr fuel claddings, sliding wear tests have been performed in room temperature air and water and these results were compared with those of commercial alloys such as Zircaloy-4, A and B alloys. As a result, the advanced Zr fuel claddings have a similar wear resistance compared with the commercial alloys. The wear resistance of the advanced Zr fuel claddings is closely related to the content of Nb and Sn even though the effects of transition elements are involved in determining wear properties. In the tested specimens with similar Sn content, wear volume became down to a minimum at 0.4 wt % Nb, then rapidly increased at 1.0 wt Nb. This behavior results in the variation of grain size with alloying contents. But Sn did not have a significant effect on the wear volume of advanced Zr fuel claddings below 1.1 wt%. The relationship between alloying elements and wear behaviour was evaluated and discussed using material compatibility factor.

Key Word: Sliding wear, advanced Zr fuel cladding, concave spring shape, compatibility factor

1. 서론

국내외 원자력발전소에서 노심내부의 핵연료 피복관 및 지지격자재 재료로 중성자경제성이 우수한 지르코늄(Zr) 합금이 널리 사용되고 있다. 이중 Zircaloy-4(이하 Z4)는 1960 년대에 개발된 이후 우수한 기계적 특성 및 내식성으로 인해 핵연료 피복관 재료로서 큰 문제없이 사용되어 왔으나 최근 들어 발전효율 향상과 관련된 핵연료의 장주기, 초고연소도의 요구는 원자력발전소의 가동환경을 더욱 가혹한 조건으로 만들게 되며 이에 따라 보다 우수한 피복관 및 지지격자 재료의 개발 필요성이 증가하게 되었다. 이에 따라 국내외 원자력계에서는 Zr 을 기지로 하는 다양한 재료를 개발하고 있다. 국내의 경우 한국원자력연구소에서 여러 종류의 지르코늄합금이 개발되었는데 기존의 상용 재료와의 비교실험에서 다소 우

수한 내식성을 가지는 것으로 나타났다.

그러나 현재까지 국내외에서 추진된 합금 개발은 내식성 향상 및 기계적 건전성이 주된 목적이나 빠른 유속을 가진 원자로 내 1 차 냉각수에 의해 필연적으로 발생하는 핵연료의 유체유발진동으로부터 기인하게 되는 피복관과 지지격자재 사이의 프레팅 손상관점에서 합금에 첨가된 원소 영향의 실험적 평가는 거의 연구되지 않고 있는 실정이다. 그러나 전술한대로 장주기, 초고연소도의 핵연료 개발은 핵연료 노내손상을 필수적으로 극복하여야 하므로 마멸손상에 미치는 합금원소 영향을 분석하는 것이 매우 중요하다.

특히 Zr 합금의 내식성 향상을 위해 첨가하고 있는 Nb 은 β -안정화원소로 1%이상 첨가될 경우 Zr 내에서 내식성과 밀접한 관련이 있는 석출물을 형성하기 때문에 제조과정 과정에서 수행되는 열처리 조건의 최적화가 필요하다. 그러나 프레팅 마멸 특성

*주저자 · 책임저자: ex-leeyh@kaeri.re.kr

Table 1. 신형 핵연료 피복관의 재질특성

피복관	합금조성	항복응력	경도
C1	Zr-0.2Nb-1.1Sn-T.E	595	226
C2	Zr-1.5Nb-0.4Sn-T.E	588	212
C3	Zr-1.5Nb-0.4Sn-T.E	591	220
C4	Zr-0.4Nb-0.8Sn-T.E	554	215
C5	Zr-1.2Nb- -T.E	504	182

* T.E: Transition element

또한 미세조직에 따라 크게 변하므로 합금 원소 첨가에 따른 미세조직이 마멸에 미치는 영향을 충분히 검증할 필요가 있다. 또한 Sn의 경우 Zr 합금에서 α -안정화 원소로 작용하여 강도를 증가시키는 주요 원소로 사용된다. 그러나 내식성 관점에서는 첨가량이 낮을수록 바람직하므로 내식성과 기계적 강도를 모두 고려하여 첨가량을 결정해야 한다. 그러나 이 두 원소의 첨가에 따른 내마멸성 변화와 관련된 연구는 현재까지 수행되지 않고 있다.

본 연구에서는 핵연료 피복관을 위해 최근 한국원자력연구소에서 개발된 5종의 Zr 합금 재료와 3종의 국외개발 합금에 대한 프레팅 마멸 저항성 시험결과를 이용하여 합금원소 중 Nb와 Sn이 마멸에 미치는 영향을 재료학적으로 분석하였으며 이때 Adhesion energy 이론을 활용하였다. 본 논문은 향후 합금 개발과정에서 내마멸성과 관련된 합금원소의 선정 및 첨가량 결정에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험방법

2.1 시편

본 실험에 사용된 시편은 Zr 합금 재료로서 한국원자력연구소에서 개발된 5종의 합금을 C1~C5라 하였고 이와 비교하기 위하여 현재 상용으로 사용되고 있는 3종의 국외 개발합금을 A, B 및 Z4라 하였다. 마멸 실험에서 각 합금으로 제조된 외경 9.5 mm의 튜브와 지지격자 스프링을 접촉시켜 미

끄럼 마멸실험을 수행하였다. 이때 지지격자 스프링시편은 (주)한국원전연료에서 한국 표준형 원전용 개량핵연료의 중간 지지격자체로 개발한 KAFD 스프링을 사용하였으며, 이것은 피복관을 감싸는 오목(Concave)한 형상을 가지는 것이 특징이다. C1~C5 합금의 대략적인 합금조성, 항복응력 및 경도값을 Table 1에 요약하였으며 스프링 시편의 재질은 A 합금과 동일하다. 표에서와 같이 Nb와 Sn의 합금 첨가량이 증가함에 따라 항복응력과 경도값이 다소 증가하는 경향이 나타났다.

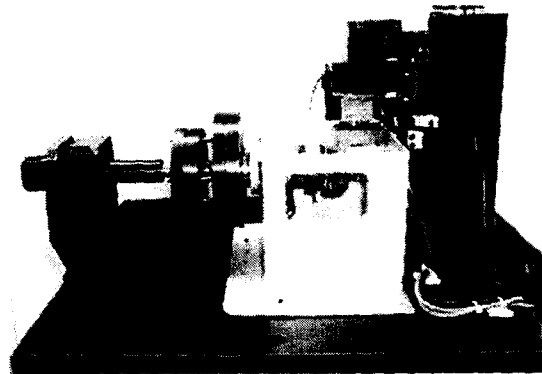


Fig. 1. Fretting wear tester for RT air and water.

2.2 시험장치 및 실험조건

모든 실험에서 10 N의 수직하중, 80 μ m의 미끄럼 진폭, 30 Hz의 주파수 및 10만 사이클의 동일한 시험변수를 적용하였고 상온 공기 및 물속에서 실험을 수행하였다. 일정한 시험조건에서 3회 반복 실험하여 평균 마멸부피, 마멸깊이 및 마멸면적을 측정하

여 각 합금 재질별 내마멸성을 비교하였다. 실험에 사용된 마멸시험기의 개략도는 Fig. 1 와 같으며 상세한 설명은 기존의 문헌에 자세히 설명되어 있다[1].

2.3 실험결과 분석

마멸실험을 수행하기 전에 피복관 시편을 아세톤을 이용하여 초음파 세척하였다. 실험후 손상면에서의 마멸입자의 고착경향을 파악하기 위하여 광학현미경을 이용하여 손상면에 대한 사진을 획득하였으며 형상의 크기를 측정하였고 이것을 이용하여 실제 접촉면에서 생성되는 마멸면의 크기를 계산하였다. 그 후 2 차원 접촉식 표면조도계를 이용하여 마멸면에 대한 3 차원 궤적을 획득한 뒤 상용프로그램을 이용하여 마멸부피를 계산하였고 최대 마멸깊이를 산출하였다[2, 3].

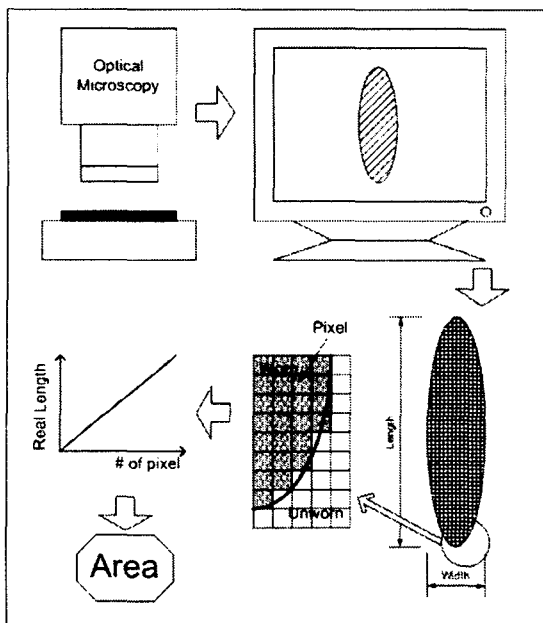


Fig. 2. Procedure of worn area calculation.

2.4 손상면적 계산

본 실험결과에서 마멸면적을 관찰한 결과 피복관 및 스프링 시편의 형상이 일정함에

도 불구하고 나타난 마멸면의 크기는 각 시편 및 실험환경에 따라 서로 상이하게 나타났다. 이러한 경향을 분석하기 위하여 마멸면적의 크기측정은 필수적이다. 본 연구에서는 마멸실험 후 관찰된 마멸부의 사진을 상용 그래픽 프로그램을 이용하여 픽셀의 크기와 실제 거리사이의 관계를 확인한 뒤 마멸이 발생한 부위와 발생하지 않은 부위의 경계를 이미지의 그레이 레벨(Gray Level) 이 급격히 변화하는 특성을 이용하여 결정하였고 마멸이 발생한 부위에서의 픽셀을 계산하여 면적으로 환산하였다. 이러한 절차를 Fig. 2 에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마멸부피의 변화

상온 공기 및 물분위기에서 각각의 피복관 시편에서 나타난 마멸부피의 변화를 Fig. 3 에 나타내었으며 첨가된 합금성분의 차이로 인해 마멸부피가 서로 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 우선 현재 상용으로 사용되고 있는 A, B 및 Z4 합금의 경우, 상온 공기 및 물속에서 마멸부피는 B 합금이 다소 작은 값을 보이며 A 및 Z4 합금은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

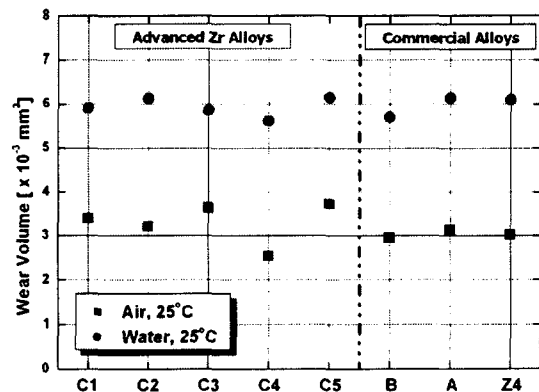


Fig. 3. Variation of wear volume with tested materials conditions.

신형 핵연료 피복관의 경우, 다소 낮은

마멸부피를 보이는 시편은 C4 로 나타났으며 다른 4 가지 시편에서는 공기 및 물 분위기에 따라 마멸부피가 다소 변하고 있다. 이것은 환경에 따라 특정 시편에서의 마멸 경향에 미치는 인자가 서로 다를 수 있음을 나타내는 것이며 이에 따라 각 합금원소 첨가량과 마멸부피사이의 관계를 확인해볼 필요가 있다. 그러나 여기서 나타난 마멸부피만의 결과를 가지고 비교해 볼 때 내마멸성을 가지는 조건은 C4 합금으로 나타났다.

3.2 마멸면적 관찰

실험을 수행한 후 손상면을 광학현미경으로 관찰하면 Fig. 4 와 같이 공기 및 물 분위기에서의 손상면은 현저한 차이를 보인다. 공기분위기의 경우, 마멸과정중에 생성된 마멸입자가 외부로 방출되지 못하고 접촉면에서 입자층을 이루고 있는 반면 물속에서는 이러한 입자들이 거의 다 외부로 방출된 것을 쉽게 확인할 수 있다.



Fig. 4. Results of worn area observation.

손상면 관찰과정에서 측정된 광학현미경 사진과 크기에 대한 정보를 이용하여 마멸면적의 크기를 측정하였으며 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 마멸면적은 공기분위기보다

물분위기에서 더욱 크게 나타났으며 이것으로 부터 마멸부피는 마멸면적의 확장과 관계가 있는 것으로 보인다. 특히 낮은 마멸부피를 보인 C4 시편의 경우 물속에서 가장 큰 마멸면적을 보인 반면 공기분위기에서는 가장 작은 마멸면적을 보이고 있다.

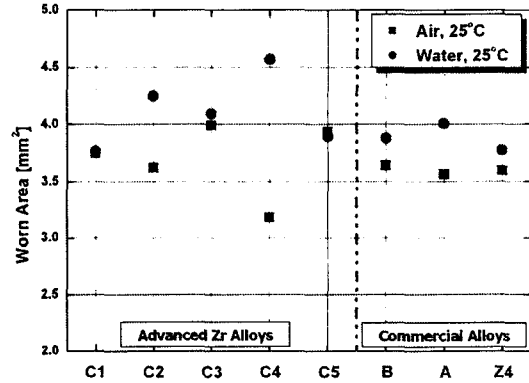


Fig. 5. Results of worn area calculation for each fuel cladding.

3.3 합금성분의 영향

본 실험에서 사용된 신형 핵연료 피복관의 주요 합금원소는 Nb 와 Sn 이며 미량의 천이원소가 첨가되었다. 여기에서는 미량으로 첨가된 천이원소의 영향을 무시하고 Nb 과 Sn 의 영향을 살펴보았다.

3.3.1 Nb 의 영향

본 연구에서 사용된 합금의 경우 처음부터 합금원소의 영향을 관찰하기 위하여 수행된 실험이 아니므로 다른 합금원소의 영향을 배제하고 Nb 만의 영향을 확인하는 것은 다소 무리가 있을 수 있다. 그러나 본 실험에서 수행된 시편의 화학적 성분중에서 유사한 Sn 함량을 가진 C1(1.1 wt%), C4(0.8 wt%) 및 A(1.0 wt%)합금에서의 Nb 첨가량에 따른 마멸경향을 비교하였다. 이러한 비교가 가능한 이유는 Zr 에서 Sn 의 고용한도는 약 1.5 wt%이므로 현재 비교하고자 하는 합금에서의 Sn 석출상은 나타나지 않고 대부

본 Zr 기지내에 고용되며 또한 0.8~1.1 wt%의 Sn 첨가에 의한 고용강화의 크기가 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예상되기 때문이다. 일반적으로 Nb은 Zr 합금에 0.5 ~ 1.0 wt% 이하로 첨가될 경우 내식성이 증가하며 가공성이 향상되는 것으로 보고하고 있으나 마멸의 영향에 대해서는 현재까지 문헌에 발표된 것은 없다.

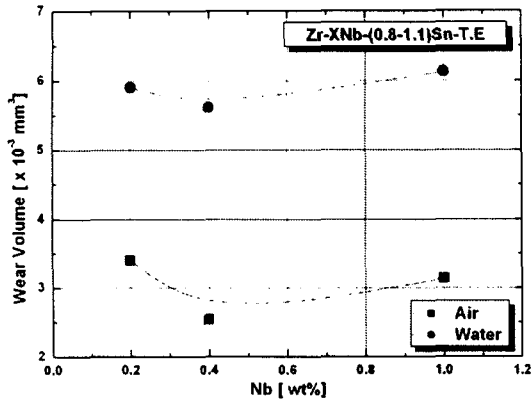
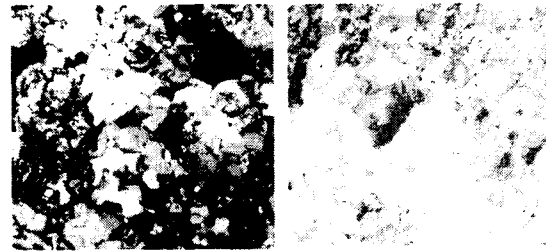


Fig. 6. Effect of Nb content on the wear volume of fuel claddings.

본 실험결과로부터 각각 0.2, 0.4 및 1.0 wt%의 Nb을 가진 C1, C4 및 A 합금에서의 마멸부피를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 Nb 함량이 증가함에 따라 마멸부피는 감소하다가 1.0 wt%에서는 다시 증가하는 경향을 보인다. 이러한 이유를 확인하기 위하여 Nb 첨가량에 따른 Zr 합금의 미세조직변화를 문헌[4]에서 확인해 본 결과 0.2 wt%를 가진 C1의 경우 Nb은 기지에 모두 고용되었으며 불순물로 들어간 천이원소(T.E)에 의해 Zr(T.E)₂ 형태의 미세한 석출물을 가진 구조를 보이는 반면 0.4 wt%의 C4의 경우, Zr내에서의 고용한도보다 작은 양의 Nb가 첨가되었음에도 불구하고 천이원소의 영향에 의해 상대적으로 낮아진 고용한도로 Zr(T.E)₂ 혹은 (Zr,Nb)₂(T.E) 형태의 석출물이 나타나며 고용한도 이상으로 첨가한 A 합금의 경우 과도한 Nb 석출물과 동시에 β-Zr 석출상이 나타나는 것으로 보고하고 있다. 또한

석출물 분포 또한 Nb 함량이 증가함에 따라 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 Nb 첨가에 따른 마멸부피의 경향을 두 가지 현상으로 설명할 수 있는데 하나는 결정립의 크기 영향으로 보인다. 일반적으로 마멸과 결정립 크기사이에는 반비례하는 것으로 알려져 있다[5]. 즉 결정립의 크기가 작을수록 마멸은 빠르게 진행된다. 이러한 이유는 결정립이 작을수록 두 물체사이에 작용하는 흡착에너지가 증가하여 전단력이 보다 크게 걸리며 또한 결정립이 큰 재료일수록 보다 많은 변형수용이 가능하기 때문이다.



(a) C1 (b) C4
Fig. 7 Microstructure of C1 and C4 alloys.

두번째 영향인자는 석출물의 영향으로 결정입내 혹은 입계의 석출물이 다소 많을 경우 영향을 미치게 된다. 따라서 본 실험결과에서는 Nb의 함량이 증가함에 따라 결정립의 크기는 감소하게 되며 또한 과도한 Nb의 첨가는 열처리과정에서 석출물에 의한 결정립 성장 억제효과 또한 발생하기 때문에 더욱 결정립이 작아질 것으로 예상된다. Fig. 7에 C1 및 C4의 미세조직을 나타내었다. Nb 함량이 다소 많은 C4 합금에서 다소 큰 결정립을 보이고 있는데 이것은 천이원소로 첨가된 불순물과 중간열처리 단계에서의 온도 및 시간변수의 차이로 생각된다. 따라서 Nb 첨가량에 따라 나타난 마멸의 영향은 결정립의 크기와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다.

3.3.2 Sn의 영향

Sn 첨가의 영향을 확인하기 위하여 각 시편조건중에서 Nb 함량이 1.0~1.5 wt%를 가진 C5(0 wt% Sn), C2(0.4 wt% Sn) 및 A(1.0 wt% Sn) 조건을 선택하였다. 이러한 이유는 Nb의 고용한도가 0.6 wt%이하임을 고려해보면 과도한 Nb를 첨가한 합금의 경우 유사한 석출물을 가질 것으로 예상되기 때문이다. Zr 기지내에서의 Sn의 고용한도는 발표된 문헌에 따라 다소 차이를 보이거나 거의 대부분이 1.6 wt% 이하로 알려져있다. Sn의 역할은 Zr의 기계적 강도를 위해 첨가하나 과도할 경우 내식성을 감소시킨다.

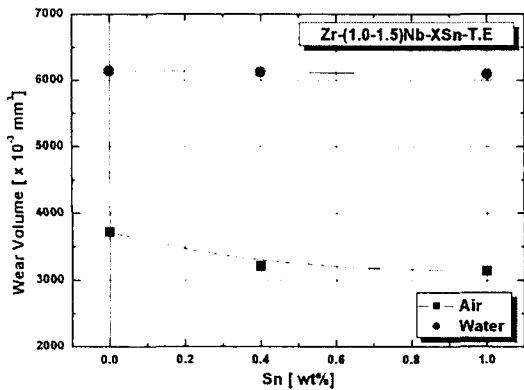


Fig. 8. Effect of Sn content on the wear volume of fuel claddings in RT air and water.

우선 표 1에 나타낸 바와 같이 유사한 Nb 첨가량에서 Sn의 첨가량이 증가함에 따라 인장강도가 다소 증가하는 것을 알 수 있으며 이것은 Sn에 의한 고용강화효과와 합금원소 첨가에 따른 결정립 감소가 주요 원인으로 보인다. 그러나 마멸부피결과(Fig. 8)에서 나타난 바와 같이 Sn 첨가에 따른 마멸부피의 변화는 실험환경에 따라 다소 차이를 보이는데 물속에서는 큰 변화가 없는 반면 공기분위기에서는 Sn의 첨가량이 증가함에 따라 마멸부피가 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 공기분위기에서는 마멸입자층에 Sn이 존재할 경우 다소 내마멸성을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 물분위기에서는 Sn 첨가량에 따른 마멸부피의 변화가 나타나지 않고 있는데 이러한 원인

은 Sn 첨가에 따른 결정립의 변화(C2)가 Nb의 과도한 첨가로 큰 영향이 나타나지 않은 것으로 보이며 Sn이 첨가되지 않은 C5의 경우 상대적으로 낮은 경도값에 의해 보다 많은 변형수용이 가능하여 실제 실험결과에서는 유사한 마멸부피를 보이는 것으로 사료된다.

3.4 Compatibility factor

현재까지의 실험결과로부터 각각의 시편에서의 마멸부피를 비교하였으며 그 결과 같은 시험조건하에서 같은 형상을 가지는 스프링을 사용하였음에도 불구하고 부피의 차이가 나는 원인은 재질 특성에 따른 마멸 거동의 차이로 해석할 수 있다. 이러한 마멸부피 차이와 동시에 기본적으로 접촉에 의한 마멸면적 또한 Fig. 5에서와 같이 차이를 보인다. 경향에서 차이를 보일 수 있으나 마멸부피의 변화에 따른 마멸면적의 변화는 분위기에 따라 다소 틀리게 나타났다. 즉 물분위기에서는 접촉면적 증가에 따라 마멸량이 감소하는 반면 공기분위기에서는 마멸부피가 증가하였다. 공기분위기의 경우 마멸면에서의 광학현미경 관찰결과로부터 다량의 마멸입자가 외부로 방출되지 못하고 실험이 끝난 후에도 다량 존재하고 있음을 알 수 있으나 물속에서는 거의 대부분의 마멸입자가 외부로 방출되므로 실제 접촉은 Metal-to-Metal에 가깝다. 따라서 물분위기에서 측정되는 평균 마찰계수값은 합금성분에 따른 Compatibility factor에 영향을 받을 것으로 예상된다. 일반적으로 두 금속 a 및 b 사이의 adhesion energy는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (1)$$

여기서 W_{ab} 는 두 금속의 adhesion energy이며 γ_a 및 γ_b 는 표면에너지이며 γ_{ab} 는 계면에너지이다. 다시 말하면 두 금속을 분리하

Table 2. Compatibility parameter C_m of clear metals [6]

	Identical	Compatible	Partially compatible	Partially incompatible	Incompatible
C_m	1.00	0.50	0.32	0.20	0.12

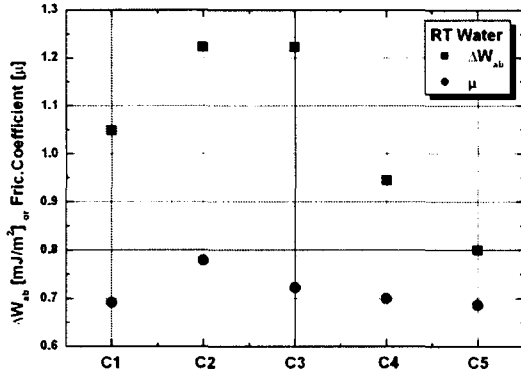


Fig. 9. Variation of ΔW_{ab} and friction coefficient of Zr fuel cladding materials in RT water.

는데 필요한 에너지 W_{ab} 는 새로운 표면을 형성하기 위한 에너지 γ_a 및 γ_b 와 두 계면을 분리하는데 필요한 에너지 γ_{ab} 로 표현할 수 있다. 그러나 γ_{ab} 에 대한 정보가 거의 없기 때문에 다음과 같은 식이 일반적으로 사용된다.

$$W_{ab} = C_m * (\gamma_a + \gamma_b) \quad (2)$$

여기서 C_m 은 compatibility parameter 로 0 에서 1 사이의 값을 가진다. 이것은 두 금속이 금속학적으로 완전고용체를 형성할 경우 마찰과정에서 흡착력이 증가하게 되어 마멸 및 마찰이 커지게됨을 알 수 있다.

Rabinowicz[6]은 여러가지 중요한 금속 및 비금속에서의 Compatibility pairs 를 정리하였으며 또한 각 금속간에 나타날 수 있는 C_m 값을 Table 2 와 같이 표현하였다. 이러한 경향으로부터 유사한 재질을 가지는 마멸시험에 있어 마멸이 크게 나타날수 있는 이유를 확인할수 있다. 현재까지 Zr-Nb 및 Zr-Sn 의 계면에너지에 대한 문헌정보는 거의 없으며

또한 각 금속에 대한 표면에너지를 확인하는 것도 용이하지 못하다. 그러나 일반적으로 금속의 녹는점과 표면에너지 사이에는 일정한 관계가 있으며[7] Zr, Nb, Sn 및 T.E 에서의 녹는점을 이용하여 각 합금의 표면에너지를 추정할 수 있다. 이러한 값을 이용하여 합금 첨가량에 따른 adhesion energy 의 변화량 ΔW_{ab} 값을 합금 첨가량 분율을 이용하여 산술적으로 계산하였으며 이 값과 물속에서의 마찰계수를 Fig. 9 에 나타내었다. 그 결과 Nb 및 Sn 첨가에 따른 ΔW_{ab} 값의 크기는 마찰계수와 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 Zr 합금에 첨가된 Nb 및 Sn 의 양이 각각 0.4 및 0.8 wt%인 C4 합금에서 낮은 마찰계수를 보였으며 이것은 내마멸성을 가지는 하나의 이유로 생각된다. 여기서 C1 및 C5 합금의 경우 각각 상대적으로 높고 낮은 Sn 함량으로 인한 경도값의 차이가 마멸 및 접촉과정에 영향을 미친 것으로 생각되며, 다른 천이원소 및 불순물의 영향은 고려하지 않았다. 일반적으로 Zr 합금에서 천이원소 및 불순물의 고용도도가 수백 ppm 단위이므로 미세한 양이 첨가되었을 경우에도 대부분 석출상으로 존재하기 때문에 이에 대한 충분한 검증이 필요한 것으로 사료된다.

4. 요약

내식성 및 기계적 특성을 향상시키기 위해 Zr 합금에 첨가된 Nb 과 Sn 의 함량이 마멸특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 상온 공기 및 물속에서 미끄럼 마멸시험을 수행하였으며 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있었다.

(1) 내식성을 향상시키기 위해 소량 첨가된 Nb 은 천이원소가 미치는 영향을 완전히 배제하지는 못하였으나 마멸실험결과 1.0 wt%의 Sn 이 첨가된 합금의 경우, 0.4 wt%의 Nb 함량에서 가장 낮은 마멸을 보인 반면 0.2 및 1.0 wt% Nb 에서는 오히려 마멸이 증가하는 경향이 나타났다.

(2) 기계적 강도 향상을 위한 Sn 의 경우 물속에서는 큰 영향이 없으나 공기분위기에서는 첨가량이 증가함에 따라 마멸부피가 감소하였다.

(3) 금속간의 Compatibility parameter 를 이용하여 Metal-to-metal 접촉시 발생 가능한 adhesion energy 를 추정할 수 있었으며 실제 실험에서 나타난 마찰계수값과 일정한 관계가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

[1] 김형규 외, “프레팅 마멸 시험장비 개발”, KAERI/TR-1570/2000, 2000

[2] 김형규 외, “표면 프로파일 해석을 이용한 마멸량 계산 알고리즘 개발”, 한국윤활학회지, 제 17 권 제 1 호 33-39, 2001.

[3] 이영호 외, “마멸손상 평가의 신뢰도 제고를 위한 측정 자동화 및 분석방법 개선”, KAERI/TR-2479/2003, 2003.

[4] 정용환 외, “경수로용 신형핵연료 개발 - 핵연료 피복관용 신소재 개발”, KAERI/RR-2020/99, 1999.

[5] Bharat Bhushan, in: Principles and applications of tribology, Wiley, 1999.

[6] Ernest Rabinowicz, in: Friction and wear of materials, Wiley, 1995.

[7] David. A. Porter & Kenneth E. Easterling, in: Phase transformations in Metals and alloys, Van Nostrand, 1981.