

물분위기에서의 인코넬 합금의 마멸기구 Wear Mechanism of Inconel Alloys in Room Temperature Water

이영호, 김인섭

한국과학기술원

ABSTRACT: Wear test has been performed to evaluate the wear mechanism of Inconel alloys against ferritic stainless steels in room temperature water. By means of scanning electron microscopy (SEM), the worn surface and microstructure of subsurface layer have been examined. The wear at steady state conditions result in the formation of 5~7 μ m thick layers with fragmented microstructure. The thickness of these layers seems to depend on the ability of work hardening and deformation accommodation at the contact areas during wear. Therefore, in room temperature water, the wear rate is closely related with the wear resistance of these fragment microstructure which are generated after severe subsurface deformation.

Key Words: Inconel alloys, SEM, fragmented microstructure, Subsurface deformation

1. 서 론

증기발생기 전열관 재료인 인코넬 합금의 프레팅 마멸현상이 원자력발전소의 건전성을 위협하는 매우 중요한 열화기구로 인식되어가고 있으나, 현재까지 연구의 대부분은 설계 및 수명예측과 관련된 마멸계수 값을 산출을 목적으로 수행되었다. 이것은 증기발생기 내부에서 필연적으로 발생하는 유체유발진동(Flow-Induced Vibration, FIV)을 완전히 제거할 수 없기때문에 가동중 검사에서 전열관이 마멸에 의한 열화가 발생할 경우 관막음을 수행하게 된다. 따라서 과도한 마멸계수를 적용할 경우, 가동중 전열관의 파단에 의한 1차 냉각수 유출이 의심되는 전열관에 대한 과도한 예비관막음의 수행하게 되며 이것은 장기적인 측면에서 원전의 효율성을 감소시키게 된다. 따라서 보다 정확한 마멸계수값의 산출이 필요하게 되었으며 이것은 각 실험조건에서의 마멸기구의 이해로부터 가능하다.

원자력발전소 증기발생기는 1차측에서의 핵분열시 발생한 열을 2차측으로 전달하는 기능을 가지고 있으며 이에 따라 전열관은 항상 고온 고압의 냉각수와 접촉하고 있다. 따라서 기존의 공기분위기에서의 실험결과와는 매우 틀린 마멸거동을 보일 것으로 판단된다. 특히 공기분위기하에서 마멸입자들이 지지금속에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되며 주변 분위기 및 마

찰열에 의해 쉽게 산화되어 입자층을 형성할 경우 마멸속도가 현저히 감소하는 경향 [1-2]은 물분위기에서 거의 나타나지 않으며 이러한 마멸입자층은 형성되기 매우 어렵다. 따라서 마멸속도를 결정하는 주요인자는 접촉면에서의 두 기지재료간의 기계적 특성변화와 생성되는 변형층이 주된 역할을 하는 것으로 보인다.

접촉면에서의 마멸과정동안 형성되는 표면 변형층의 형성에 관한 Sauger[3]등의 연구에서 특정 두께의 마찰에 의한 변태구조가 형성되어 이것이 마멸속도와 매우 밀접한 관계가 있음을 보이고 있다. 특히 일반 탄소강의 경우, 마찰 및 마멸에 의한 상변태를 경험하게 되며 이러한 변태는 기존의 구조와는 완전히 다르기 때문에 접촉면에서의 마멸거동 또한 변화하는 것으로 표현하고 있다. 따라서 증기발생기 내부에서 발생하는 전열관의 마멸현상은 마멸입자 방출에 따른 입자층 형성보다는 마멸과정중의 접촉면에서의 기계적 특성변화가 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보이나 이에 대한 연구는 매우 부족하다. 따라서 본 연구에서는 증기발생기 전열관 재료인 인코넬 합금에 대한 마멸실험을 상온 물분위기에서 수행하여 손상면 및 단면에 대한 SEM 관찰을 통해 마멸기구를 규명하고 이것을 실험에서 나타난 마멸속도와 비교하였다. 또한 현재 증기발생기 전열관의 마멸모델로 알려진 Work-rate 모델을 이용하여 실제 마멸계수와

표면아래 형성된 변형층과의 관계에 대하여 알아보았다.

2. 실험방법

2.1 시편

실험에 사용된 증기발생기 전열관 재료는 현재 국내 원전에서 사용되는 인코넬 600 및 690 합금을 사용하였으며, 이에 대한 지지구조물 재료로 페라이트 계열의 스테인레스 강을 사용하였다. 마멸실험후 마멸량의 측정은 0.1mg의 정확도를 가진 미세저울을 이용하여 실험 전후에 수행하였다. 측정의 오차를 줄이기 위하여 5회 이상 반복 측정과 기준시편을 이용하였으며 측정전에 초음파 용기에서 세척하여 마멸입자를 충분히 제거한 후 건조시켜 질량을 측정하였다.

2.2 실험변수

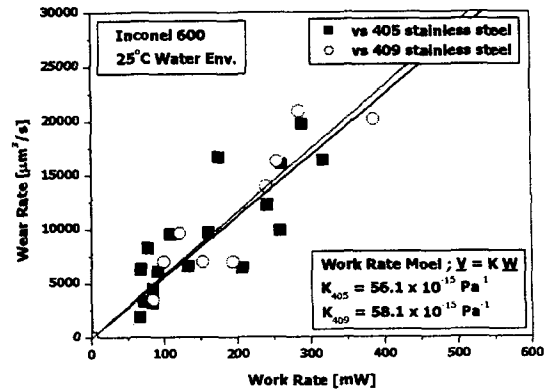
실험에 사용된 변수로 수직하중은 10 ~ 40N, 미끄럼 진폭은 150 ~ 450 m이며 30Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 물은 화학적 영향인자를 제거하기 위하여 증류수를 사용하였으며 실험을 수행하는 동안 연속적으로 실험자료를 수집, 분석하였다.

2.3 변형특성 관찰

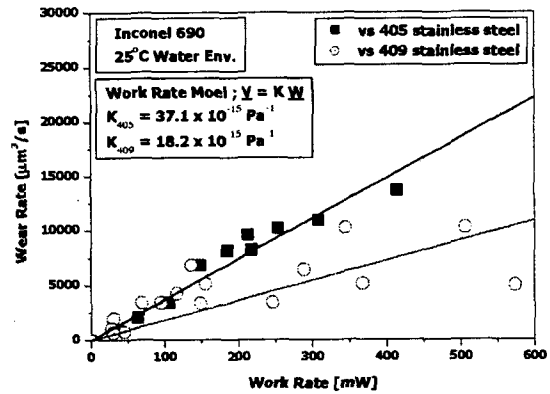
손상면 아래에서의 경도변화를 관찰하기 위하여 단면을 절단하여 소성변형층의 두께를 비교하였다. 또한 기계적 특성변화에 대한 정보를 획득하기 위하여 미세경도 실험을 수행, 표면아래에서의 변형정도를 비교하였다.

2.4 손상면 관찰

물분위기에서의 전열관 재료에 대한 마멸기구를 파악하기 위하여 실험을 수행한 후 손상면에 대한 주사식 전자현미경(SEM) 관찰을 수행하였으며, 표면변형층의 두께를



(a) 인코넬 600



(b) 인코넬 690

Fig. 1 Work-rate 모델에 따른 각 전열관 재료의 마멸계수 값.

확인하기 위하여 단면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인코넬 합금의 마멸거동

Fig. 1에 전체 물분위기에서 Work-rate 모델에 따른 두 전열관 재료의 마멸계수를 산출하였다. 접촉면에서 소모된 일(에너지)이 증가함에 따라 마멸속도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 인코넬 600의 경우, 지지구조물 재료에 따른 마멸계수의 차이는 거의 나타나지 않고 있으나 인코넬 690의 경우 409 스테인레스강을 사용할때 마멸계수가 낮게 나타났다. 본 실험에서 나타난 마멸계수값을 기존의 캐나다에서 발표한 결과와 비교해 볼때 다소 높은 값을 보이고 있다. 이것은 캐나다에서 발표한 자료는 거의 대부분 증기발생기 내부조건을 모사한 조건이

므로 온도에 의한 영향이 본 실험에서는 적용되지 않았으나 마멸계수값은 다소 높게 나타났다[4-8]. 따라서 일반적으로 온도가 증가함에 따라 마멸량이 증가하는 경향을 고려해 볼 때 이러한 원인은 온도증가에 따른 전열관 재료의 기계적 성질 변화가 영향을 미친 것으로 판단된다. 그림 1에서와 같이 상온 물분위기에서 상대적인 마멸량을 비교해 볼 때 인코넬 690이 약 2배 정도 높은 마멸저항성을 보이고 있다 (마멸계수 $K_{avg,1600}=57.1 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$, $K_{avg,1690}=27.7 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$). 이것은 마멸과정중 접촉면에서의 기계적 성질의 차이가 영향을 미친 것으로 보인다.

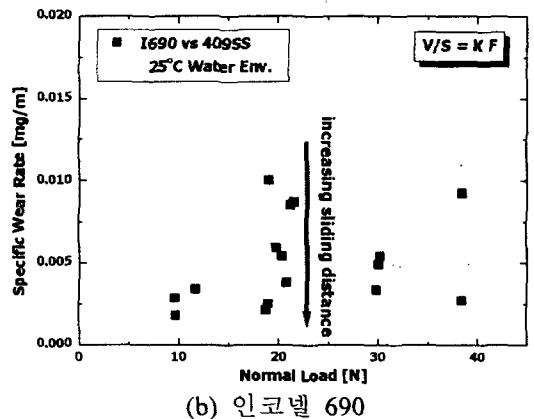
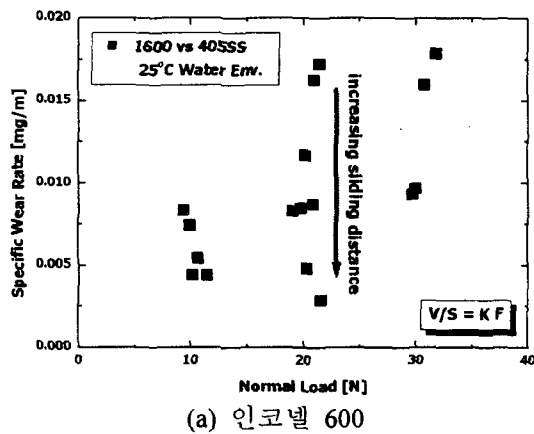


Fig. 2 수직하중에 따른 전열관 재료의 상대적인 마모량의 변화. 수직하중을 적용할 경우 매우 많은 편차를 보이고 있다.

3.2 마멸모델 비교

Work-rate (WR)모델은 Frick[9]에 의해 처

음 제안되었으며 현재 증기발생기 전열관 마멸모델로 널리 사용되고 있다. 특히 이 모델은 기존의 Archard 마멸방정식에서 표현하지 못하고 있는 시간을 포함하고 있기 때문에 전열관 재료의 설계 및 잔류수명에 측에 매우 유용하게 사용될수 있다. 그러나 이 식은 마멸과정시 흡착에 근거를 둔 Archard 식을 바탕으로 하고 있으며 이에 따라 WR 모델 또한 실험조건, 재질 등과 같은 실험변수에 따라 마멸계수 K가 큰 편차를 보이는 단점을 가지고 있다. Sauger의 연구에 따르면 WR 모델과 유사한 Wear Energy Approach (WEA)를 제안하였다. 이것은 기본적으로 WR 모델과 비슷하나 수직하중 대신 수평하중(마찰계수를 고려)을 사용하는 것이 특징이다. 따라서 WR 모델에서의 마멸계수 K와 유사한 wear energy factor (α_v)값 또한 작아지게 된다. 실제 마멸과정을 살펴보면 접촉면에서 충분한 소성변형을 경험하게 된 후 마멸입자가 방출하게 된다. 따라서 접촉면의 소성변형과 관계된 인자는 수직하중보다는 마찰력에 의한 전단하중이 우세하게 작용하므로 이론상으로는 WEA 모델의 적용이 타당하게 생각된다. 그러나 마멸과정은 매우 복잡한 형상이며 특히 실제 증기발생기 전열관 내부에서 마찰력의 측정은 매우 어렵다. 이것은 재질 및 분위기 뿐만 아니라 표면의 거칠기에도 매우 민감하게 변화하기 때문에 적용하기가 매우 어렵다. 본 실험결과에서 나타난 편차 (Fig.2, 마멸량/슬라이딩 거리 vs 수직하중)는 매우 크게 나타났다으나 수직하중 대신 수평하중(수직하중 * 마찰계수)을 사용할 경우 두 변수의 관계가 선형적으로 나타남을 확인하였다(Fig. 3). 다시말하면 물분위기에서 마멸기구에 따른 마찰계수의 변화가 실제 전열관의 정확한 마멸계수의 산출에 필수적이며 이러한 마멸계수와 마찰계수사이의 관계를 규명할 필요가 있다.

3.3 소성변형층의 역할 및 마멸기구

물분위기의 마멸실험을 통하여 표면아래에서 가해진 에너지에 따라 형성된 소성변형층의 두께를 Fig. 4에 나타내었다. 표면아래

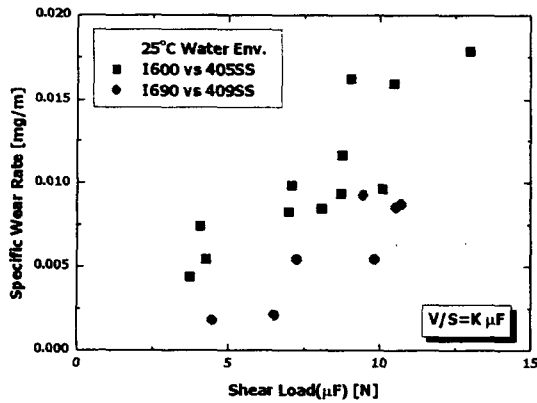
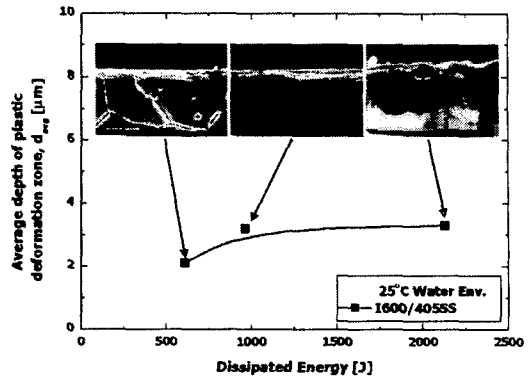
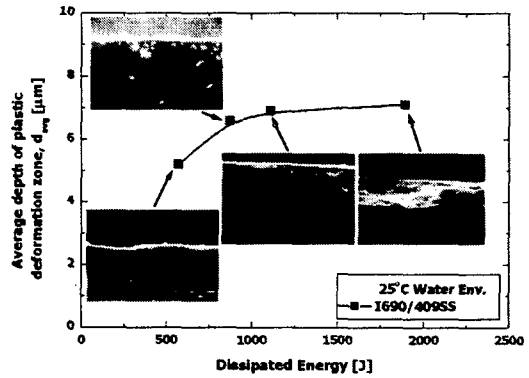


Fig. 3 마찰계수를 고려한 수평하중과 상대적인 마모량 사이의 관계. Fig.2 에서의 수직하중과 마모량 사이의 큰 편차는 거의 없으며 선형적인 관계를 보인다.

에서의 균열은 대부분이 특정두께 범위내에서만 존재하는 것으로 나타났으며 균열의 전파도 결정입계보다는 입내에서 우선적으로 전파하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 프레팅에 의한 재료의 손상은 두가지로 나눌수 있다. 첫째로 프레팅에 의한 마멸 (Wear induced by fretting, WIF)이며 이러한 모드가 우세할 경우, 접촉초기에 표면에서 매우 얇은 산화막이 우선적으로 제거되며 이레 따라 접촉형태가 기지-기지접촉이 이루어져 새로운 구조를 가진 결정이 접촉면 아래에서 형성된다. 이것을 마찰에 의한 변태 구조 혹은 소성변형층으로 제안하고 있으며, 이러한 구조는 경도가 매우 높으며 다소 낮은 인성을 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 소성변형층이 형성되면 접촉면에서의 전단하중 및 변위의 수용이 가능하다. 둘째로 프레팅에 의한 균열생성 및 전파 (Cracking induced by fretting, CIF)이며 이러한 모드에서는 마멸입자의 방출보다는 균열생성이 더욱 우세하게 나타난다. 생성되는 균열은 초기 접촉면에서 많이 형성되며 특정깊이 이하에서는 수직 혹은 진동방향에 평행한 수평방향으로 전파하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 그림과 같이 접촉면에서 소모된 에너지가 증가함에 따라 소성변형층의 두께가 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 다시말하면 접촉면에서 소모되는 에너지가 증가함에 따라 이러한 소성변형층이 계속



(a) 인코넬 600



(b) 인코넬 690

Fig. 4 접촉면에서 소모되는 에너지에 따른 각 전열판에서의 소성변형층 두께의 변화

gross slip fretting cycle

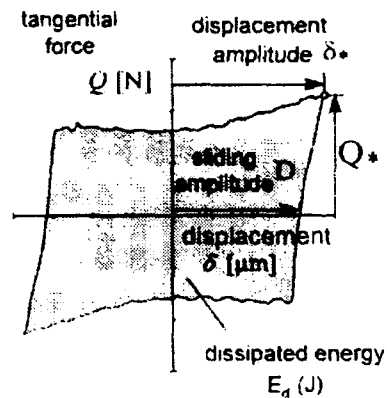


Fig. 5 일반적인 프레팅 마모에서 두 재료의 접촉면에서 소모되는 에너지(E_d)의 정의

유지되기 위해서는 표면에서 마멸입자 방출 속도와 표면아래로의 소성변형층 두께 증가 속도가 거의 유사해야만 한다. 즉, 표면에서

형성된 소성변형층의 특성이 실제 마멸계수의 크기에 영향을 미치게 된다.

접촉면에서 소모되는 에너지(E_d)는 접촉면에서 균열생성 및 마멸입자의 방출에 필요한 에너지(E_{cd})와 표면아래에서 소성변형층 형성에 필요한 에너지(E_p)으로 나눌수 있다. 즉 $E_d = E_{cd} + E_p$. 실험조건과 같이 한 사이클 당 접촉면에서 소모되는 에너지가 일정할 경우, 생성되는 소성변형층의 단위부피당 변형에너지가 크면 에너지가 표면 균열생성 및 마멸입자 방출에 많이 소모되기 때문에 표면아래쪽에서의 소성변형층 확장은 다소 작아지게 된다. 이와 반대로 균열 및 마멸입자방출에 필요한 에너지가 적을경우 마멸입자의 방출과 소성변형층의 확장은 더욱 용이하게 되며 이것은 상대적으로 얇은 두께의 소성변형층을 형성하게 된다(Fig.4 에서의 인코넬 600).

따라서 물분위기에서 마멸속도는 이러한 소성변형층의 특성에 따라 결정되며 이것을 확인하기 위하여 우선 마멸계수(K) 혹은 wear energy factor (α_v)의 물리적인 의미를 살펴보면 접촉면에서 소모된 에너지에 따른 마멸량으로 정의될수 있다($\text{Pa}^{-1}=\text{m}^3/\text{J}$). 이것은 프레팅 마멸에서 표현하는 접촉면에서 소모되는 에너지당 마멸부피와 같은 단위를 가진다. 그러나 프레팅 마멸에서 소모되는 에너지는 Fig. 5 와 같이 정의되며, Gross slip 영역에서는 각 사이클에 대한 수평하중 및 진동진폭의 면적적분량이며, 이 값이 실제 접촉면에서 소모되는 에너지이다. 따라서 WR 모델의 마멸계수 K 보다는 실제 접촉면에서 소모되는 에너지(마찰력을 고려한)에 따른 WEA 모델의 α_v 와 소성변형층의 단위부피당 변형에너지가 보다 더 타당한 관계를 가질것으로 보인다. Fig.6 에 프레팅 마멸에서의 에너지 마멸계수 α_v 값과 소성변형층에서의 단위부피당 변형에너지(Wp/V)의 관계를 나타내었다. 접촉면에서 소모되는 에너지가 증가할수록 마멸계수 값은 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이것의 주된 원인은 일정부피를 변형시키는데 필요한 변형에너지의 증가가 주된 원인으로 나타났다. 따라서 물분위기에서 생성된 표면변형층의 특성에 따라 마멸계수 값의 산출이 가능함을 보여주고 있다.

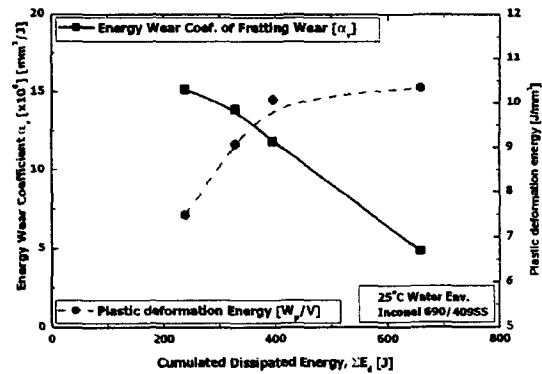


Fig. 6 프레팅 마멸에서 에너지 마멸계수 값 (α_v)과 소성변형층에서의 단위부피당 변형에너지(Wp/V)의 관계

4. 결 론

원전 증기발생기 전열관 재료인 인코넬 600 및 690 합금에 대한 마멸실험을 페라이트 계열의 자지구조물을 이용하여 물분위기에서 수행하였으며 Work-rate 모델을 적용하여 마멸계수를 산출하였다. 그 결과 인코넬 690의 평균 마멸계수가 인코넬 600에 비해 두배 정도 낮은 값을 보였다. 이러한 주된 원인은 접촉면에서 형성된 소성변형층의 기계적 특성차이로 보이며 이것이 실제 마멸과정에서 큰 영향을 준것으로 나타났다. 또한 접촉면에서 형성된 소성변형층과 에너지 마멸계수(α_v)사이의 관계로 부터 소성변형층의 변형에너지가 클 경우 낮은 마멸계수 값을 보이는 것으로 나타났다. 이것은 물 분위기에서의 마멸기구가 소성변형층에서 마멸입자의 방출과 기지 방향으로의 층의 확장이 균형을 이루어 진행되는 것을 의미한다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 차세대 원자로 기술개발과제와 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21에서 지원되었음.

참고 문헌

- (1) Stott, F. H., 1998, "The role of oxidation in the wear of alloys," *Tribology International*, Vol. 31, p. 245 ~ 256

- (2) Jiang, J. et al., 1998 "The role of triboparticulates in dry sliding wear," *Tribology International*, Vol. 31, p245 ~ 256
- (3) Sauger, E. et al., 2000, "Tribologically transformed structure in fretting," *Wear*, Vol. 245, p39 ~ 52
- (4) Fisher, N. J. et al., 1995, "Experimental fretting-wear studies of steam generator materials," *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 117, p312 ~ 320
- (5) Guerout, F. M. et al., 1996, "Effect of temperature on steam generator fretting-wear," *ASME Int' Conf, of PVP, Flow-Induced Vibration*, Vol. 328, p233-246
- (6) Ko, P. L. et al., 1996, "Friction and wear studies of nuclear power plant components in pressurized high temperature water environments," *ASME Int' Conf, of PVP, Flow-Induced Vibration*, Vol. 328, p211-218,
- (7) Au-Yang, M. K., 1998, "Flow-induced wear in steam generator tubes - Prediction versus operational experience," *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, p138 ~ 143
- (8) Guerout, F. M. and Fisher, N. J., 1999, "Steam generator fretting wear damage: A summary of recent findings," *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 121, p304 ~ 310
- (9) Frick, T. M. et al., 1984, "Overview on the development and implementation of methodologies to compute vibration and wear of steam generator tubes," *ASME Int' Conf, of PVP, Flow-induced Vibration*, Vol. 3, p. 149 ~ 161.