

접촉면에서의 변형특성이 마멸속도에 미치는 영향

Effect of Deformation Properties at the Contact Surfaces on the Wear Rate

이영호, 김인섭

한국과학기술원

ABSTRACT : The wear test has been performed to evaluate the wear mechanism of steam generator (SG) tube materials against ferritic stainless steel in water environment. The wear rates of SG tube materials depend on the change of mechanical properties between contact surfaces during wear test. From the subsurface hardness test, Inconel 690 is more work-hardened than Inconel 600 even though these materials have similar hardness values before the wear test. Main cause is due to the difference of stacking fault energy with the chromium content. In water environment, wear mechanism is closely related with the continuous formation and fracture of deformation layers at the contact surfaces.

Key Words : Steam generator, Wear rate, Inconel 690, Inconel 600, Subsurface deformation

1. 서론

최근 들어 증기발생기 전열관의 프레팅 마멸현상이 원자력발전소의 건전성을 위협하는 매우 중요한 열화기구로 인식되어가고 있다. 이러한 현상은 2 차측에서 발생하는 빠른 유속으로 인해 전열관과 지지구조물사이에서의 진동이 주된 원인으로 알려져 있으나, 내부 구조물 파손 및 작업자의 부주의 등으로 인하여 유입된 금속성 물질(이하 이물질)과 유체흐름으로 인한 유체유발진동(Flow-Induced Vibration, FIV)으로 인하여 충격 및 미끄럼 마멸이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 이물질에 의한 전열관의 마멸현상은 기존의 전열관 및 지지구조물에 의한 마멸과는 달리 이물질의 재질 및 형상의 파악이 매우 어렵고, 또한 그 진동형태 역시 확인이 어렵다.

국내외 원자력발전소에서 전열관 재료가 마멸에 의한 손상이 발생할 경우, 잔류수명평가를 위해 Work rate 모델을 사용하고 있다. 이 모델은 기존의 미끄럼 마멸의 고전적인 식인 Archard 마멸식을 기초로 하여 Frick[1]에 의해 변형된 모델로 식 (1) 및 (2)와 같이 매우 간단한 형태를 가지고 있으며 마멸 계수 K 를 이용하여 수명평가를 수행하고 있다.

$$\dot{V} = K \cdot \dot{W} \quad (1)$$

$$\dot{W} = \frac{1}{t} \int F \cdot dS \quad (2)$$

공기분위기하에서 상온 및 고온의 실험 결과를 살펴보면 대부분의 연구는 마멸입자들이 기지금속에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되며 주변 분위기 및 마찰열에 의해 쉽게 산화되어 입자층을 형성할 경우 마멸속도가 현저히 감소하는 경향을 보이고 있다[2-3]. 그러나 물 및 진공분위기하에서는 이러한 마멸입자층의 형성이 매우 어렵고, 이에 따라 마멸속도를 결정하는 주요인자는 접촉면에서의 기계적 특성변화가 주된 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

접촉면에서의 마멸과정동안 형성되는 표면 변형층의 형성에 관한 Sauger[4]등의 연구에서 특정 두께의 마찰에 의한 변태구조(Tribological Transformed Structure, TTS)가 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 연구

Table 1. Chemical composition (w/o) and Vickers hardness values of tested materials

시편	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ti	P	S	Co	Ni	경도 (HV)
I600	16.81	9.1	0.026	0.32	0.81	0.35	0.008	0.002	0.012	Bal.	194
I690	29.5	10.4	0.02	0.33	0.26	0.32	0.004	0.001	0.012	Bal.	193
405SS	11.5 ~ 14.5	Bal.	0.08	1.00	1.00	0.1(Al)	0.04	0.03	-	-	215
409SS	10.5 ~11.75	Bal.	0.08	1.00	1.00	6x%C	0.045	0.045	-	-	229

는 수행되지 않고 있다. 또한 현재까지 국내의 증기발생기 전열관 마멸에 대한 연구 결과를 살펴보면 대부분이 수명평가를 목적으로 수행된 마멸계수 산출 중심으로 수행되었으며 마멸기구에 대한 연구는 거의 없는 실정에 있다[5-9]. 또한 국내 원전 증기발생기 전열관 재료를 부식에 의한 열화로 인해 인코넬 600에서 인코넬 690으로 대체하고 있으나 마멸에 대한 특성연구는 거의 수행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 상온 물분위기하에서의 마멸실험을 수행하여 두 전열관 재료의 마멸속도를 비교하고, 마멸손상면에 대한 관찰을 통하여 전열관 재료의 마멸기구를 파악하였다.

2. 실험방법

2.1 시편

본 실험에 사용된 재료는 현재 국내 원전에서 사용되는 인코넬 600 및 690 합금을 사용하였으며, 이에 대한 지지구조물 재료로 페라이트 계열의 스테인레스 강을 사용하였다. 각 시편의 조성 및 경도값은 Table 1에 나타내었으며, 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 실험장치 및 변수

마멸실험에 사용된 장치의 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 반복 미끄럼 진폭, 수직 및 수평하중은 실험중에 연속적으로 측정하여 마찰계수를 산출하였으며, 모터의 속도로 주파수를 조정하였다. 실험에 사용된 변수로 수직하중은 10 ~ 40N, 미끄럼 진폭은 150 ~ 450 μ m이며 30Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다.

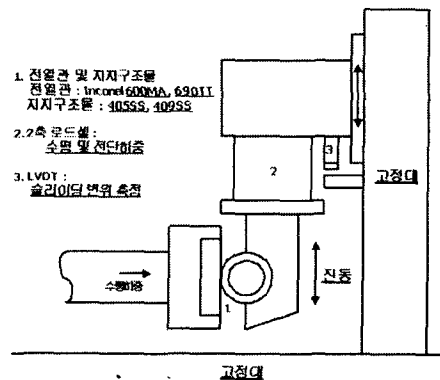


Fig. 1 Schematic diagram of the reciprocating sliding wear test machine

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 주사적 전자현미경(SEM) 관찰을 수행하였으며, 표면변형층의 두께를 확인하기 위하여 단면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전열관 재료의 마멸거동

Fig. 2 에 전체 미끄럼 거리에 따른 마멸량의 변화를 나타내었다. 미끄럼 거리가 증가함에 따라 두 재료 모두 마멸량이 증가함을 보이고 있다. 또한 수직하중이 증가함에 따라 마멸량의 증가 역시 두 재료에서 유사하게 나타났다. 두 재료의 마멸속도를 비교해 보면 모든 하중조건하에서 인코넬 690 이 보다 낮은 마멸량을 보이는 것으로 나타났다.

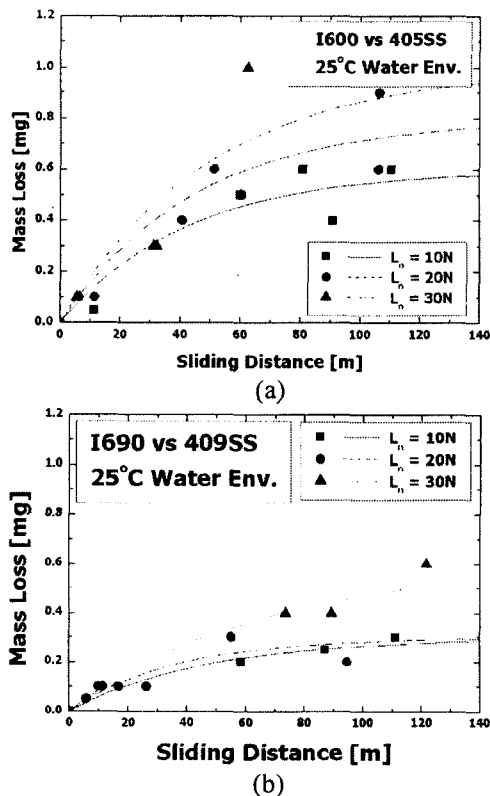


Fig. 2 Effect of sliding distance on the mass loss of tube materials. (a) Inconel 600 tube vs 405 stainless steel, (b) Inconel 690 tube vs 409 stainless steel.

여기서 낮은 미끄럼 거리에서는 마멸량의 증가가 선형적으로 나타나는 것을 알수 있으나 미끄럼 거리가 클 경우 마멸량의 증가속도가 서서히 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이것은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 접촉면에서 마멸에 대한 저항성을 가지는 것으로 생각된다.

일반적으로 초기 미끄럼 과정에서는 돌출부들간의 상호작용이 우세하게 작용하여 방출되는 마멸입자의 크기도 다소 크며 이에 따라 마멸량의 증가속도는 매우 빠르다. 그러나 이러한 영향은 마멸초기에 끝나게 되며 이후의 마멸량은 접촉면 사이에서 변화된 기계적 특성에 의해 결정된다. 특히, 물분위기하에서 마멸입자의 방출이 더욱 용이하게 되며 이에 따라 계속적인 접촉면에서의 입자방출은 충분한 소성변형을 경험한 표면 가공경화 정도에 따라 결정되는 것을 알 수 있다. 접촉면의 가공경화에 따른 정도의 변화는 결국 마찰계수의 변화로 나타나게 된다. 일반적으로 표면의 경도가 높을 경우, 마멸실험에서 흡착경향은 다소 감소하게 되어 마찰계수값 또한 변화하게 된다. 따라서 본 실험에서의 마찰계수변화를 파악하기 위하여 각 실험에서 산출된 평균 마찰계수값의 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 마찰계수는 감소하는 경향을 보이고 있으나 미끄럼 진폭에 따라 다소 편차를 보이고 있다. 따라서 일정한 하중하에서도 미끄럼 거리가 증가함에 따라 평균 마찰계수값 또한 변화함을 관찰하였으며 이것을 확인하기 위하여 미끄럼 진폭이 210 μ m 에서의 실험 사이클에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 4 에 나타내었다. 초기 수천 사이클 내에서 마찰계수값은 인코넬 690 이 인코넬 600 에 비해 매우 높은 값을 보이고 있다. 그러나 마멸이 진행됨에 따라 두 전열관 재료의 마찰계수값은 다소 비슷한 경향을 보이다가 4 만사이클 이상에서는 인코넬 690 이 더욱 낮은 값을 보이고 있다. 이러한 경향은 물분위기에서는 마멸 입자층의 형성이 용이하지 못하기 때문에, 반복적인 변형에 의한 표면에서의 가공경화가 인코넬 690 에 더욱 크게 작용하여 마찰계수의 감소로 나타났다. 이에 따라 인코넬 690 에서의 마멸량 증가속도가 미끄럼 거리가 증가

함에 따라 급격히 둔화되는 것으로 생각된다.

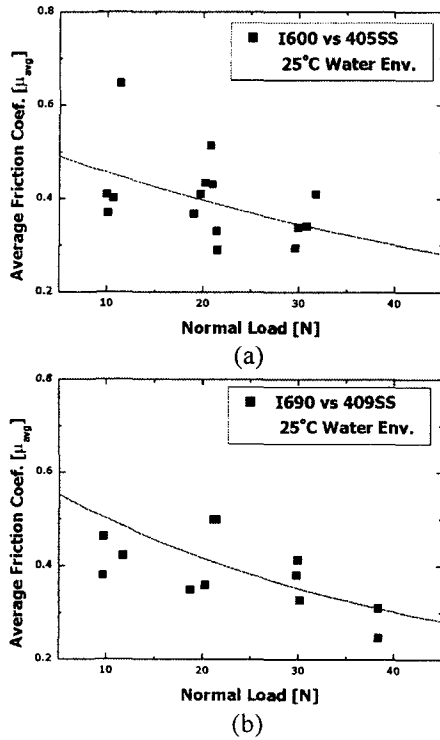


Fig. 3 Variation of average friction coefficients with applied normal load. (a) Inconel 600 (b) Inconel 690

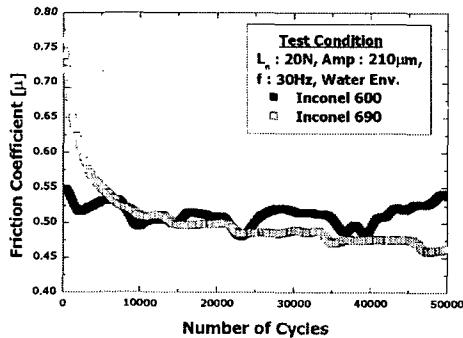


Fig. 4 Variation of friction coefficients of two tube materials with increasing number of cycles. As increasing cycles, Inconel 690 shows a low value of friction coefficient compared with Inconel 600.

3.2 손상면 아래에서의 경도변화

두 전열관 재료의 마멸실험결과로 부터 미끄럼 거리가 증가함에 따라 표면에서의 기계적 특성변화와 관련된 마찰계수의 변화로 인하여 마멸량은 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 변화를 확인하기 위하여, 마멸 손상면 아래에서의 경도변화를 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 초기 두 전열관 재료의 경도 값은 매우 비슷하게 나타났으나, 마멸실험 후 인코넬 690의 경우 표면에 가까울수록 더욱 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이러한 높은 표면경도 값이 마멸속도에 영향을 미친 것으로 보인다.

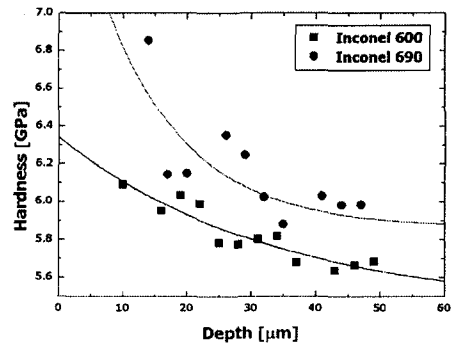


Fig. 5 Variation of subsurface hardness with depth Inconel 690 is more work-hardened near worn surface.

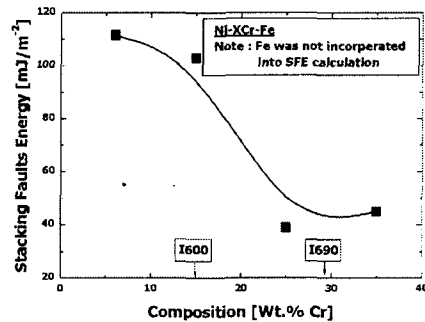


Fig. 6 Effect of chromium content on the stacking fault energy of Ni-Cr-Fe alloy. (Ref. Metal. & Mat. Trans. A V.28A, p655)

두 전열관 재료는 니켈 기지합금으로 기본적인 차이점은 크롬의 함량이다. 일반적으로 크롬의 함량이 증가함에 따라 니켈의 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)는 Fig. 6과 같이 감소하게 된다[10]. SFE가 낮

을 경우, 소성변형에 의한 손상면 아래에서의 전위밀도는 급격하게 증가하게 되며 표면의 경화가 빠른 시간내에 발생하게 된다. 따라서 미끄럼 거리가 증가함에 따라 표면에서의 소성변형 및 변형경화로 인해 생성된 마멸 변형층이 마찰계수를 감소시켜 마멸속도의 증가가 둔화되는 것으로 보인다. 따라서 물분위기하에서는 마멸입자의 방출이 접촉면에서 생성된 마멸변형층에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되므로 마멸속도가 낮게 나타난 인코넬 690의 경우, 소성변형을 일으키는데 더욱 많은 에너지가 필요하게 된다. 이것을 확인하기 위하여 Nano-indentation 실험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 하중 및 깊이에 따른 면적은 단위부피의 변형을 일으키는데 필요한 에너지로 정의될 수 있으며 그 결과 인코넬 690은 인코넬 600에 비해 약 13%정도의 많은 에너지를 소모하는 것으로 나타났다. 따라서 기본적인 변형특성의 차이가 마멸속도에 영향을 미친 것으로 파악되었다.

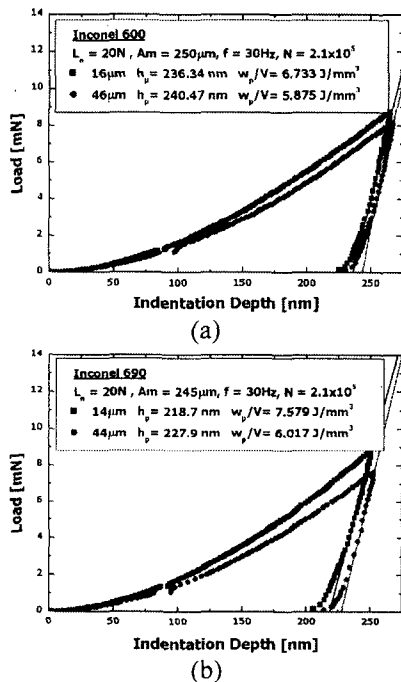


Fig. 7 Comparison of plastic deformation energy per unit volume in two tube materials. (a) Inconel 600 (b) Inconel 690

3.3 물분위기에서의 전열관 마멸 기구

마멸실험을 수행한 후 손상면에 대한 관찰을 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 생성되는 마멸입자는 접촉면 내부에 존재하는 물의 영향으로 인해 거의 대부분 외부로 방출되었다. 인코넬 600의 경우, 변형층에서 떨어져 나갈 마멸입자의 크기는 다소 크며 두께 또한 굵은 형태로 보이거나 인코넬 690은 변형층 끝단에서 우선적으로 얇은 입자가 방출되는 것으로 나타났다.

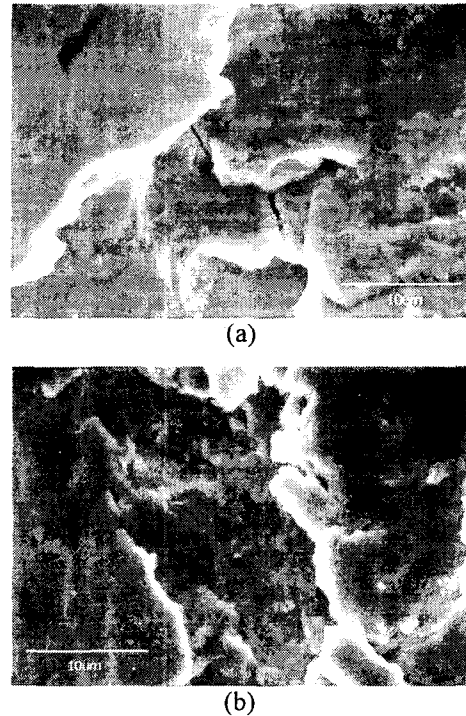


Fig. 8 Worn surface observation using SEM. (a) Inconel 600 (b) Inconel 690

표면아래에서의 변형특성을 파악하기 위하여 손상면의 단면을 Fig. 9와 같이 관찰하였다. 그림에서와 같이 특정두께의 균열을 포함한 변형층의 형성을 관찰하였다. 따라서 이러한 변형층이 두 전열관 재료의 마멸에 영향을 미치는 것으로 보인다. 마멸입자의 방출이 이러한 특정 두께의 손상면에서 방출된다면 이러한 소성변형층의 형성과 파괴가 마멸속도를 결정하는 중요인자로 생각

된다. 우선 초기 사이클이 증가함에 따라 우선적으로 표면에서의 마멸입자방출이 우세하게 작용하며 평활한 접촉면을 형성한다. 계속적인 변형에 의해 접촉면 아래에서의 소성변형층을 형성하게 되며 표면에서의 변형을 이러한 층에서 수용하기 때문에 마멸입자의 방출은 다소 느려진다. 따라서 접촉면에서 실제 변위는 소성변형층에 의해 매우 낮아지게 되며 이에 따라 마멸입자의 방출보다는 소성변형층 아래의 균열생성이 더욱 우세하게 된다.

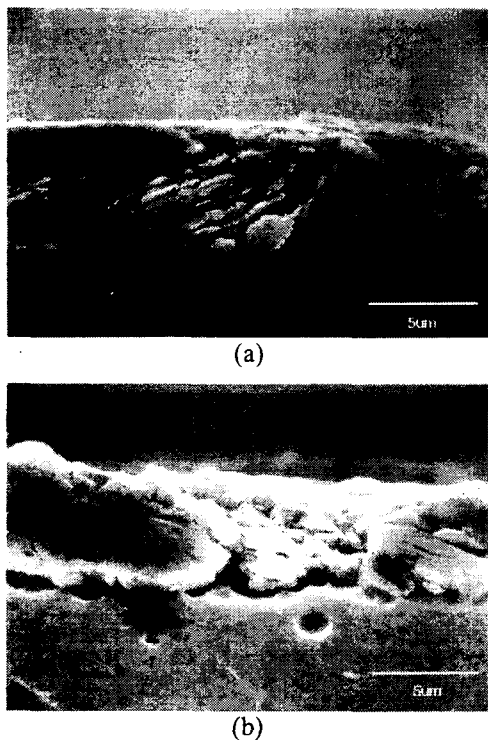


Fig. 9 The results of subsurface observation using SEM. Two tube materials have a specific thickness of deformation layer during wear test.

접촉면에서 생성된 균열은 특정 깊이까지 전파한 후 delamination 기구와 유사하게 균열이 수평으로 전파하여 결정크기가 큰 마멸입자의 형태를 띠고 있으나 표면에서의 계속적인 마멸로 인해 접촉면에 가까워질수록 미세균열이 더욱 증가하여 특정 크기에서 표면과 완전히 분리된다. 따라서 물분위기하에서 마멸속도에 영향을 미치는 인자는

접촉면에서 생성되는 소성변형층에서 마멸입자의 생성과 깊이방향으로의 균열생성이 상호 경쟁적인 관계를 유지한다. 따라서 결과적으로 마멸속도는 이러한 소성변형층에 따라 결정되며 결국 표면에서의 변형특성과 마멸계수는 매우 밀접한 관계를 보이고 있다.

4. 결론

원자력발전소 증기발생기 전열관 재료인 인코넬 600 및 690 합금에 대한 마멸실험을 페라이트 계열의 지지구조물을 이용하여 물분위기에서 수행하였다. 그 결과 인코넬 690 이 인코넬 600 에 비해 더욱 큰 마멸저항성을 보이고 있다. 이러한 주된 원인은 기본적인 차이인 크롬함량으로 인해 인코넬 690 이 낮은 SFE 값을 보이고 있어 마멸과 정중 변형특성의 차이로 나타났다. 이것은 손상면 아래에서 높은 경도값을 가지는 소성변형층을 형성하게 되며 이에 따라 마멸량이 감소하였다. 물분위기하에서의 마멸기구는 이러한 소성변형층의 생성 및 파괴가 균형을 이루어 진행하는 것을 확인하였다.

후 기

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

참고 문헌

- (1) 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.
- (2) Stott, F. H., 1998, "The role of oxidation in the wear of alloys," *Tribology International*, Vol. 31, p. 245 ~ 256
- (3) Jiang, J. et al., 1998 "The role of tribo-particulates in dry sliding wear," *Tribology International*, Vol. 31, p245 ~ 256
- (4) Sauger, E. et al., 2000, "Tribologically transformed structure in fretting," *Wear*, Vol.

- 245, p39 ~ 52
- (5) Fisher, N. J. et al., 1995, "Experimental fretting-wear studies of steam generator materials," *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 117, p312 ~ 320
 - (6) 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
 - (7) 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,
 - (8) Au-Yang, M. K., 1998, "Flow-induced wear in steam generator tubes - Prediction versus operational experience," *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, p138 ~ 143
 - (9) 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
 - (10) Symons, D. M., 1997, "Hydrogen embrittlement of Ni-Cr-Fe alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 28A, p655 ~ 663