

CrN과 TiN 코팅을 적용한 증기 발생기 세관의 프레팅 마모에 대한 연구

박정민 · 정성훈 · 김진선 · 박세민 · 이영제*

성균관대학교 기계공학부

A Study on Fretting Wear of CrN and TiN coated Tubes in a Nuclear Steam Generator

Jung-Min Park, Sung-Hoon Jeong, Jin-Seon Kim, Se-Min Park, and Young-Ze Lee[†]

Dept. of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

(Received August 7, 2008; Accepted August 28, 2008)

Abstract – The steam generator of nuclear power plant is composed with the bundles of long tubes. It is exposed fluid flow and weak in the vibration. The tubes are supported by anti-vibration bars. Due to vibration the wear damage is called as the fretting wear. It should be minimized for the safety of the plants. The hard coatings are very effective to reduce the amount of wear. The coatings of TiN and CrN are introduced in this study to protect the fretting surfaces. The tube-on-flat type tester was used for fretting wear tests. The results show that the wear amounts of the coated tubes were decreased depending on coating thickness. CrN was very effective to reduce the wear. In case of TiN the wear amounts were dependent on the coating thickness. Thick coating of TiN was very effective for wear resistance.

Key words – fretting wear, partial coating, steam generator tube, wear coefficient

1. 서 론

원자력 발전소의 증기 발생기는 길이가 긴 세관들의 모음으로 구성되어 있다. 증기 발생기 내부는 유체의 온도차이로 인한 유체의 유동이 존재하고 있다. 유체의 유동으로 인해 세관은 진동을 일으키게 된다. 유동유체와 증기 발생기 내부의 구조물은 유체에 의해 서로 연동(coupling)되어 있어 유동유체에 의해 발생하는 유체력이 구조물을 변형시키며, 구조물의 변형은 다시 유동의 흐름을 변경하여 유체력을 변화하게 한다. 유체가 구조물에 유체력을 전달하면 구조물은 동일한 크기의 힘을 유체에 전달하는데, 이 때 두 힘이 일치하면 진폭이 큰 진동이 발생할 수 있다. 이와 같이 유동유체의 힘과 구조물의 관성, 감쇠 및 탄성력간의 상호연동작용에 의

한 구조물의 동적 거동과 관련된 현상들을 유체유발진동(flow-induced vibration)이라 한다[1]. 과도한 유체유발진동을 받는 경우 증기발생기 내 세관다발에 프레팅 마모가 발생된다. 프레팅 마모는 접촉하는 재료들이 수 ~수백 μm 의 미세한 진폭을 가진 마모이다. 증기 발생기에서는 진동하는 세관과 지지대 사이에서 발생하게 된다[2]. 특히 이상 횡유동(cross flow)이 존재하는 부위인 U-자형 관 부위는 유체유발 진동에 가장 취약하여 마모로 인한 문제가 자주 발생된다. 지금까지 증기 발생기 세관의 프레팅 마모에 대한 연구는 마모의 현상이나 마모 메커니즘의 정립과 같은 기초적인 분야에 관련된 것이 대부분이었다[3,4]. 앞으로는 기존의 연구 범위에서 벗어나 증기 발생기 세관의 마모에 관련하여 보다 폭 넓은 관점에서 연구가 필요하다. 본 연구에서는 세관 마모를 저감하는 방법으로 세관에 코팅막을 적

*주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

용하여 코팅막이 프레팅 마모에 미치는 영향과 특성을 알아보코자 한다.

2. 실험 방법

코팅막을 적용한 세관의 프레팅 마모 실험을 위해 가진 진폭과 가진 주파수를 정확히 조절할 수 있는 Fig. 1의 시험기를 제작하였다. 시험의 구성은 Fig. 2와 같다. 세관과 지지대를 실험이 용이하도록 가공하였고, 세관의 표면에는 TiN, CrN코팅을 적용하였다. 세관의 재질은 현재 증기 발생기에서 사용 중인 Inconel 690이며 지지대는 STS 409이다. 세관 표면에 적용한 코팅은 내마모성이 우수하며 경도값이 2,000 Hv 이상인 CrN 코팅과 TiN 코팅을 선택하였다. 실험 하중과 코팅막 두께의 조건은 Table 1과 같다. 세관과 지지대 사이의 상대진폭은 300 μm이며 가진 주파수는 33 Hz (2,000rpm)로 일정하게 유지하였다. 실험환경은 상온의 증류수이며, 실험 후 마모량은 표면 조도계와 광학 현미경을 통하여 마모면의 외각형상을 측정하여 work rate model을 사용하여 구하였다.

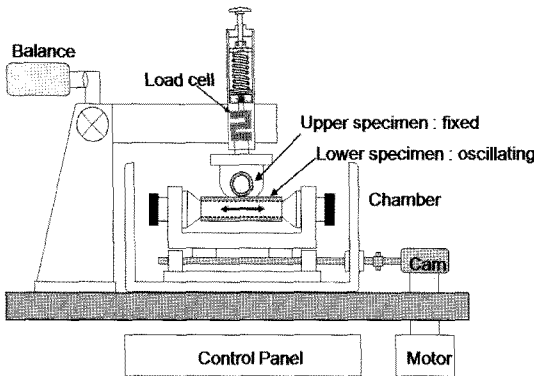


Fig. 1. Schematic diagram of fretting wear tester.

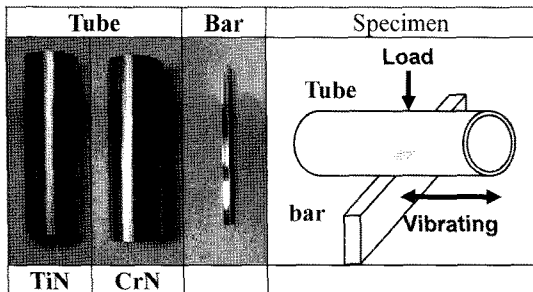


Fig. 2. Configuration of tube and supporting bar.

Table 1. Test condition

	CrN	TiN
Load	10 N, 15 N, 20 N, 25 N	10 N, 25 N, 40 N, 55 N, 70 N
Coating thickness	1 μm	1 μm, 2 μm

3. 실험 결과

3-1. 마모면 광학사진 및 표면 형상 분석

Fig. 3과 Fig. 4는 프레팅 마모 실험 후 CrN과TiN 코팅된 세관의 마모면을 광학 촬영한 것이다. Fig. 3의 CrN 코팅 세관의 사진을 분석한 결과, 10 N 하중에서는 세관 표면에서 프레팅 마모를 발견하지 못했으며, 15 N의 하중부터 작은 크기의 마모면을 확인하였다. 마모면의 크기는 하중이 증가함에 따라 비례하여 커짐을 확인할 수 있었다. 동일 하중에서 코팅막의 유무에 따라 마모흔을 비교했을 때, CrN 코팅을 한 세관의 마모면이 일반 세관의 마모면보다 작은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 25 N의 하중에서는 두 세관의 마모면의 차이가 줄어들었다.

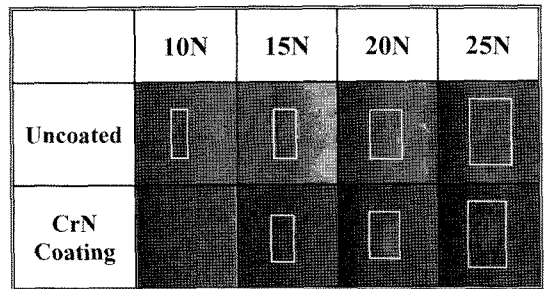


Fig. 3. Wear scars of CrN coated and uncoated tubes.

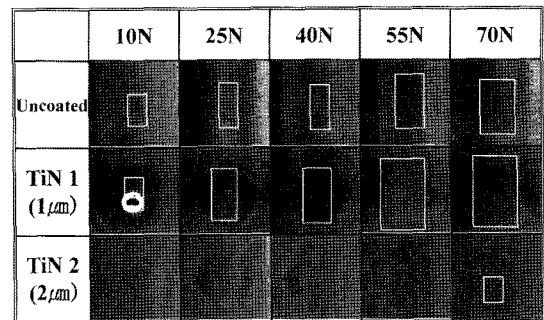


Fig. 4. Wear scars of TiN coated and uncoated tubes.

Fig. 4는 TiN 코팅 세관의 프레팅 마모면을 광학 촬영한 것이다. TiN 코팅 세관의 마모면을 분석한 결과 CrN코팅 세관과는 다른 경향을 확인하였다. 두께가 1 μm 인 경우 세관의 마모가 매우 크게 진행되었으나, 2 μm 의 두께에서는 55 N의 하중까지 세관의 표면에서 마모가 발견되지 않으나, 70 N 하중에서 매우 작은 마모가 발생한다.

광학 사진으로 CrN코팅과TiN코팅의 마모 저감을 확인 하였으나, TiN 코팅의 경우에는 마모저감을 위해서는 일정 두께 이상 코팅이 되어야 하는 것을 확인하였다.

Fig. 5는 프레팅 마모 실험을 실시한 CrN 코팅세관의 마모면을 조도계로 측정하여 그래프로 정리한 것이다. Fig. 5a)는 코팅을 하지 않은 세관의 프레팅 마모 깊이 선도이다. 하중 10N과 15N에서는 마모 깊이의 차이가 크지 않았으나, 20 N부터는 하중이 증가함에 따라 마모의 깊이와 길이가 증가하였다. Fig 5b)는 CrN 코팅을 한 세관의 프레팅 마모 깊이 선도이다. 10 N에서는 마모가 거의 일어나지 않았으며, 15 N이후의 하중에서는 하중이 증가함에 따라 마모 깊이가 증가하였고 코팅을 하지 않은 세관과 비슷한 마모 깊이

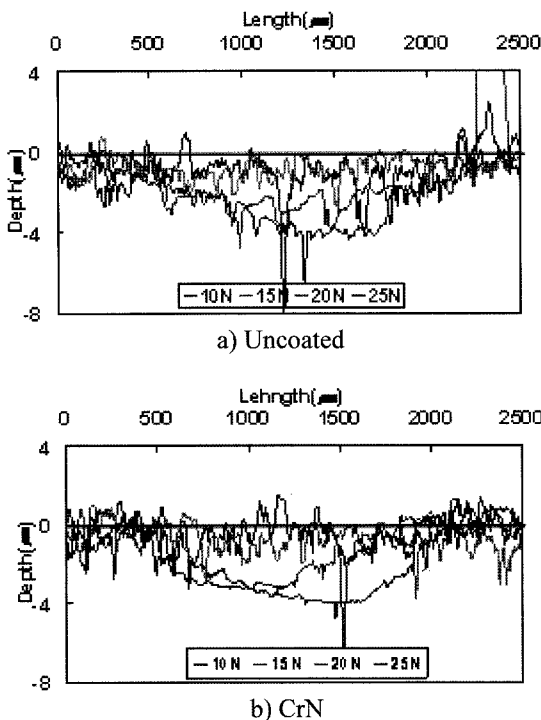


Fig. 5. Wear depth profiles of CrN Coated tubes.

를 나타내었다. 그러나 일반 세관의 마모 길이에 비하여 코팅 세관의 마모 길이가 짧아 코팅을 적용한 경우 전체적으로 마멸량이 적음을 알 수 있다.

Fig. 6은 프레팅 마모 실험을 실시한 TiN코팅 세관의 표면을 조도계로 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig 6a)는 코팅을 하지 않은 세관의 프레팅 마모 깊이 선도이다. 하중이 증가함에 따라 마모의 깊이와 길이가 증가하였으며, 70 N의 하중에서는 2.5 mm 정도의 마모길이와 약 8 μm 의 마모 깊이를 나타낸다. Fig. 6b)와 c)는 TiN 코팅을 한 시편의 프레팅 마모 깊이 선도이다. 코팅막의 두께가 1 μm 인 TiN 1 시편에서는

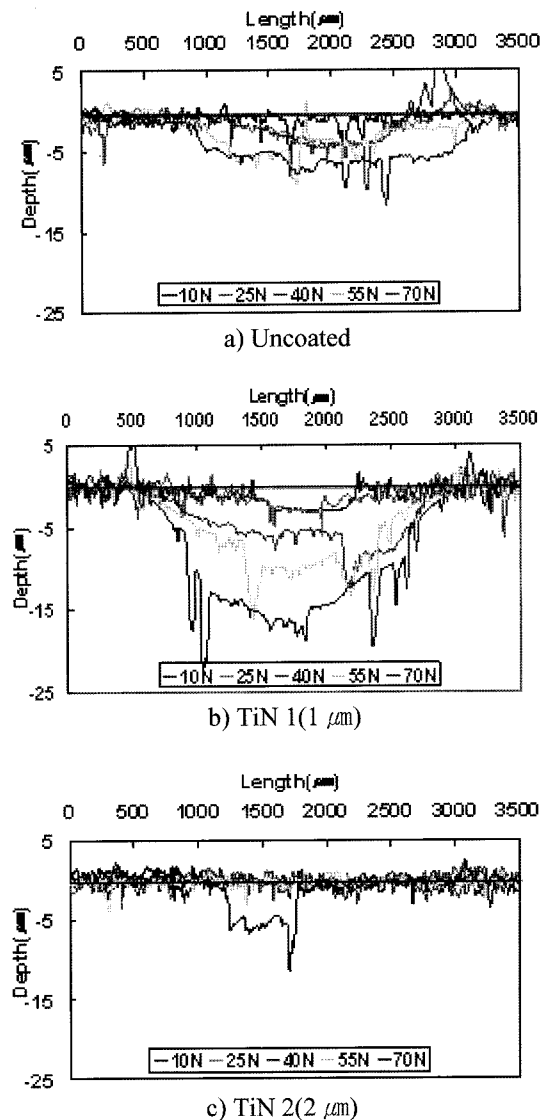


Fig. 6. Wear depth profiles of TiN Coated tubes.

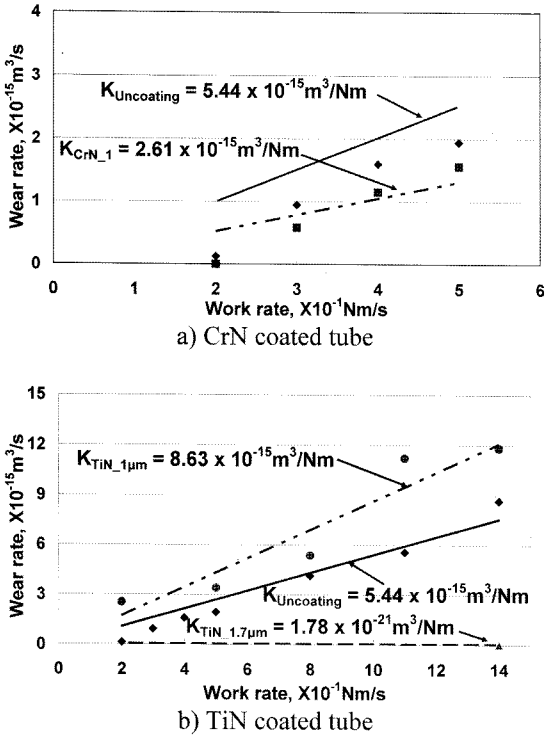
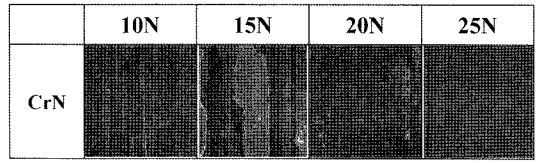


Fig. 7. Wear coefficients of coated tubes.

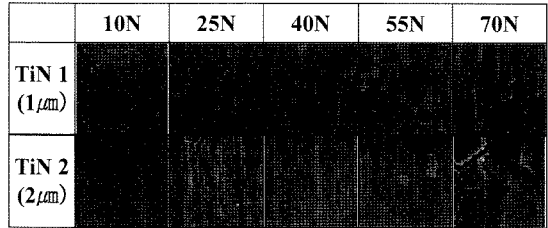
10 N의 하중에서부터 세관의 마모 깊이가 더 깊다. 하중이 증가할수록 마모의 길이와 깊이는 증가하여 70 N에서는 마모의 깊이가 18 μm, 길이는 약 2.6 mm 정도의 마모 길이를 나타낸다. 코팅막의 두께가 2 μm인 TiN 2 시편에서는 55 N하중까지 세관의 마모가 없으며, 70 N의 하중에서는 길이 0.7 mm와 깊이 10 μm로 마모된다.

3-2. 마모계수 산출 및 마모 성분 분석

코팅 세관의 프레팅 마모 특성을 정량적으로 파악하기 위해서 work rate model을 이용하여 세관의 마모 계수를 구한 후 비교하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 코팅 세관의 마모계수 추세 선도를 통해 각 코팅에서 마모의 차이를 보다 확실히 알 수 있다. 세관의 경우 코팅막을 적용하지 않은 일반 세관의 마모 계수 값은 $5.44 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 였으나, CrN 코팅막을 적용한 세관의 경우 $2.61 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 로 일반 세관의 약 50%이다. TiN 코팅의 경우에는 두께가 1 μm인 TiN 1의 경우 마모 계수의 값이 증가하여 일반 세관의 값에 비하여 59% 증가한 값을 보였다. 그러나 두께가 2 μm인 TiN 2 세관의 경우에는 마모계수가 매우 작게



a) CrN coating



b) TiN coating

Fig. 8. SEM image of CrN & TiN coated tubes.

나타났으며, 그 값은 $1.78 \times 10^{-21} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 이다.

마모 계수 선도에서 코팅의 종류에 따라 그 값을 비교했을 때 CrN 코팅을 적용한 경우 얇은 두께의 코팅막에서도 마모가 줄었으나, TiN 코팅의 경우 마모를 저감하기 위하여 두께 2 μm 이상의 코팅막이 필요함을 확인하였다.

Fig. 8은 코팅 세관 표면을 SEM 촬영한 그림이다. Fig. 8a)는 CrN 코팅을 한 세관의 마모면이다. 10 N의 하중에서는 코팅막이 온전히 존재하였으며, 15 N부터 코팅막이 부분적으로 파괴되어 25 N에서는 코팅이 완전히 파괴되었다. Fig. 8b)는 TiN 코팅을 한 세관의 프레팅 마모면이다. 코팅막의 두께가 1 μm인 TiN 1세관의 표면에서는 전 하중에서 코팅이 파괴되어 연삭과 응착의 마모가 발생하였다. 코팅막의 두께가 2 μm인 TiN 2세관의 표면에서는 55 N까지 코팅막이 존재함을 확인하였다. 70 N의 하중에서는 표면의 미세한 부분에서 코팅막이 파괴되어 세관까지 마모가 발생하였다.

Table 2는 CrN 코팅 세관의 프레팅 마모면을 EDX 분석한 결과이다. 이는 코팅 표면에서의 정확한 마모

Table 2. Component ratio of CrN coated tube

원소	N	Cr	Ni	Fe	ETC
코팅 표면	12.7	81.2	2.3	0.8	3
10 N	12.9	81.8	1.7	0.6	3
15 N	0	29.9	48	13.7	9
20 N	0	23.3	49.6	16.4	10.7
25 N	0	24.9	53.4	15.6	6.1

Table 3. Component ratio of TiN coated tube

원소	TiN_1 (1 μm)						TiN_2 (2 μm)					
	Ti	N	Cr	Ni	Fe	ETC	Ti	N	Cr	Ni	Fe	ETC
코팅 표면	61.8	28.9	1.7	2.4	0.8	4.3	67.7	24.7	1.6	2.3	1.3	2.4
10 N	1.0	0	25.4	49.4	14.1	10.1	65.1	15.6	1.4	2.4	2.4	13.1
25 N	0	0	22.1	37.8	25.7	14.4	58.3	14.0	1.6	2	4.2	19.7
40N	0.3	0	24.7	49.3	18.4	7.3	49.1	18.2	1.4	1.7	3.7	23.8
55N	0	0	21.9	34.8	27.8	10.5	56.7	18.6	2.7	3.7	3.8	14.5
70N	0.3	0	23.8	47.7	18.9	9.3	0	0	17.2	24.5	31.7	26.6

정도를 보다 정량적으로 확인하기 위함이다. 하중10N에서는 EDX 분석한 결과 코팅 표면과 마모된 세관 표면에서 성분비의 변화가 나타나지 않았다. 그러나 15N 이상의 하중에서는 CrN코팅의 성분인 N이 나타나지 않았으며, Cr 역시 그 비율이 낮았다.

Table 3은 TiN 코팅 세관의 마모면을 EDX 분석한 것이다. 세관 표면의 마모를 쉽게 확인 할 수 있었던 TiN 1은 10N에서부터 TiN코팅의 주요 성분인 Ti가 미량이거나 검출되지 않았다. 그러나 세관 표면에 마모가 거의 없었던 TiN 2에서는 55N의 하중까지 높은 Ti의 비율을 확인하였으며, 세관의 성분인 Cr, Ni, Fe는 낮은 비율을 보였다.

EDX분석을 통하여 코팅을 적용한 세관의 마모 진행 정도를 보다 분명하게 확인할 수 있다. 10N의 하중에서는 CrN코팅이 세관을 완전히 보호하며 이후 하중이 증가하였을 때는 코팅하지 않은 경우보다 세관의 마모를 저감시키기는 하나, 완전히 보호하지는 못한다. TiN의 경우 2 μm 두께에서는 55N까지 표면이 완전히 보호되며, 70N에서도 코팅막이 세관을 대부분 보호하였다.

4. 결 론

증기발생기에서 세관의 마모를 저감하기 위해 부분 코팅막을 적용하여 프레팅 마모 실험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 두께가 약 1 μm인 CrN코팅 세관의 마모계수는 코팅하지 않은 세관의 마모계수인 $5.44 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 에 비하여 약 50%인 $2.61 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 을 보였다. 그러나 25 N 하중에서는 코팅 세관의 마모량이 일반 세관의 마모량과 비슷해짐을 확인하였는데, 이를 통해 코팅막의 두께와 작용하는 하중에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

2. 코팅막의 두께가 1 μm인 TiN코팅 세관의 마모계수는 $8.63 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ 로서 일반 세관의 마모계수에 비하여 59% 높은 값을 보였다. 이는 코팅막이 파괴되어 세관에서 분리되면 오히려 마모를 촉진하는 것을 의미한다. 그러나 코팅막의 두께가 2 μm인 경우에는 하중이 70N이 되어도 마모가 거의 진행되지 않는 것을 확인하였다. 이를 통해 TiN 코팅의 경우 코팅막의 두께가 충분하다면 높은 하중에서도 세관의 프레팅 마모 저감을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

1. C.E Taylor, M.J.Pettigrew, et al., "Vibration Damping in Multispan Heat Exchanger Tubes", *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 283-289, 1988.
2. P.L. Ko and H. Basista, "Correlation of Support Impact Force and Fretting - Wear for a Heat Exchanger Tube", *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 69-77, 1984.
3. S.H. Jeong, B.J. Lee, and Y.Z. Lee, "Wear Transitions of Tube-Support Materials for a Nuclear Steam Generator Through Sliding Wear Test and Fretting Wear Test", *Key Engineering Materials*, Vol. 321-323, pp. 430-433, 2006.
4. S.H. Jeong, J.M. Park, J.H. Lee, and Y.Z. Lee, "Wear Transitions of Tube-Support components for Nuclear Steam Generator under Fretting Conditions", *Key Engineering Materials*, Vol. 326-328, pp. 1253-1266, 2006.