

## 누설 레일리 표면파를 이용한 TiN 코팅 부재의 특성평가

### Characterization of TiN Layered Substrate using Leaky Rayleigh Surface Wave

권성덕\*<sup>†</sup>, 김학준\*\*, 송성진\*\*

Sung-Duk Kwon\*<sup>†</sup>, Hak-Joon Kim\*\* and Sung-Jin Song\*\*

**초 록** 기계부품의 세라믹 코팅 층은 사용 중 그 표면특성이 변하므로 잔류수명 예측과 신뢰성 확보를 위해 비파괴적으로 세라믹 코팅 층의 특성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구는 AISI 1045 강과 오스테나이트 스테인리스 304 강 모재위에 매우 얇은 TiN 세라믹 층을 코팅한 시편에 대하여 누설 레일리(Rayleigh) 표면파를 이용한 TiN 코팅부재의 특성평가를 시도하였다. 후방복사 측정기법으로 코팅 층 내의 표면파의 전파특성이 평가되었고 표면 거칠기, 코팅 층 두께, 마모조건 등이 다양한 시편들에 대해 후방복사 프로파일이 측정되었다. 후방복사 프로파일의 정점각과 크기는 시편의 조건들에 따라 민감하게 변화였고, 정점각의 증가는 코팅 층 접합 강도의 저하로 설명되었다. 결과들은 후방복사 기법을 이용한 표면파의 분산성 평가가 코팅 층의 특성 평가에 매우 유용함을 보여주었다.

**주요어어:** TiN 세라믹 코팅, 후방복사 초음파, 표면 거칠기, 스키핑, 접합의 질

**Abstract** Since ceramic layers coated on machinery components inevitably experience the changes in their properties it is necessary to evaluate the characteristics of ceramic coating layers nondestructively for a reliable use of coated components and their remaining life prediction. To address such a need, in the present study, an ultrasonic backward radiation technique is applied to investigate the characteristics of leaky Rayleigh surface waves propagating through the very thin TiN ceramic layers coated on AISI 1045 steel or austenitic 304 steel substrate with three different conditions of surface roughness, coating layer thickness and wear condition. In the experiments performed in the present work, the peak angle and the peak amplitude of ultrasonic backward radiation profile varied sensitively according to three specimen preparation conditions. In fact, this result demonstrates a high possibility of the ultrasonic backward radiation as an effective tool for the nondestructive characterization of the coating layers even in such a thin regime.

**Keywords:** TiN Ceramic Coating, Ultrasonic Backward Radiation, Surface Roughness, Scuffing, Bonding Quality

#### 1. 서 론

최근 보통 10  $\mu\text{m}$  이하의 Titanium Nitride(TiN), Diamond-like-Carbon(DLC) 그리고 CrN 세라믹 코팅들이 모재표면에 우수한 마모 저항과 낮은 마찰 특성을 제공하기 때문에 기계부품의 표면에 자주 적

용되고 있다[1]. 그중에서 TiN 세라믹 코팅은 안정성과 가격 면에서의 우월성으로 인해 엔진의 피스톤링, 밸브 그리고 캠 같은 자동차 부품에 가장 널리 사용되고 있다[2]. 보통 자동차 엔진 부품에 코팅된 세라믹 층은 고온 유회의 반복된 마모환경에 노출되기 때문에 사용 중 부품의 표면 거칠기, 두께, 잔류

응력 등이 변하며 종종 산화전이 층과 미세결합들이 형성되고, 반복된 마모로 인해 결국은 표면과피인 스커핑(scuffing)에 이르게 된다. 그러므로 잔류수명 예측과 안정성 확보를 위해서 세라믹 코팅 층의 특성을 비파괴적으로 평가하는 것이 매우 중요하다.

얇은 세라믹 코팅 층의 비파괴적 평가를 위해서는 체적파보다는 표면지역을 전파하며 작은 물성변화에도 민감하게 반응하는 표면탄성파가 적절하다[3]. 또한, 표면파는 물속에 잠겨 있을 때 특정방향으로 에너지를 누설하므로 경사각 펄스-에코 수침 법으로 전파특성에 대한 정보를 쉽게 측정할 수 있다. 레일리 표면파는 레일리 각으로 광대역 초음파가 입사할 때 발생하며, 발생된 표면파는 입사지역이나 진행방향에 반사체나 임의의 산란원이 있는 경우 일부 에너지는 후방으로 진행하게 된다. 이 후방으로 진행되는 표면파의 누설에너지는 수침 측정 시스템의 입사방향으로 되돌아가게 되고, 펄스-에코 수침 법에서 초음파를 내보내는 탐촉자가 동시에 후방으로 복사되는 누설파를 측정할 수 있다. 이를 후방복사 초음파라고 한다[4].

Farnell과 Adler[5]에 따르면 모재가 코팅이 되어 있는 다층구조를 가질 경우 일반화 램파(generalized Lamb wave)가 표면에 전파되며, 이 일반화 램파는 코팅 층과 모재의 음향학적 물성 조합에 따라 다양한 분산성을 보인다. 표면에 존재하는 일반화 램파의 다양한 모드중에서 가장 속도가 느린 모드는 주파수가 매우 높거나 코팅 층이 매우 얇아질 경우 레일리 표면파의 전파특성에 근접하게 되는데 이를 유사 레일리(Rayleigh-like)파라고도 한다.

이전 연구들[6,7]에서 후방복사 초음파를 이용하여 부식과 마모로 인해 발생한 표면아래의 물성변화를 평가하는 연구가 수행된 바 있다. 특별히 입사각에 따른 후방복사 초음파의 세기를 표시한 후방복사 프로파일[8]이 측정되었고 후방복사 프로파일의 여러 변수와 측정 시편의 표면 열화사이에 매우 좋은 연관성이 있음을 보여주었다.

본 연구는 AISI 1045 강과 오스테나이트 스테인리스 304 강 모재위에 매우 얇은 TiN 세라믹 층을 코팅한 시편에 대하여 누설 레일리(Rayleigh) 표면파의 전파특성을 조사하기 위하여 후방복사 초음파 기법이 적용되었다. TiN 코팅 층과 모재의 다양한 변화 조건을 특정하기 위해 코팅 전 모재의 표면 거칠기, 코팅의 두께, 마모 조건의 차이로 인한 스커핑의 발생 유무 등이 다른 다양한 시편들을 제작하였다.

## 2. 실험

다양한 조건의 TiN 세라믹 코팅시편들이 준비되었다. 두께 변화와 코팅 전 거칠기의 효과를 보기위한 시편으로는 AISI 1045 강 이 사용되었고 마모로 인한 표면과피인 스커핑의 유무의 영향을 분석하기 위한 시편으로는 오스테나이트 스테인리스 304 강 이 모재(substrate)로 사용되었다. 모재들은 반경 60 mm, 두께 10 mm의 원반형(disk)으로 가공되었다. 거칠기 효과를 보기위한 모재의 표면은 표면 거칠기가 각각,  $Ra=0.022, 0.032, 0.151 \mu\text{m}$ 인 세 가지 시편이 준비되었고, 아크 이온 도금법(arc ion plating)에 의해 모재위에 도금된 TiN 세라믹 코팅 층의 두께는 각기 0.5, 1.0, 3.0 및  $5.0 \mu\text{m}$ 의 네 가지 단계로 제작되었다. 마모효과를 보기위한 304 강은  $Ra=0.032 \mu\text{m}$ 의 표면 거칠기 위에  $1.0 \mu\text{m}$ 의 TiN 코팅 층이 형성되었다.

준비된 시편들에 대해 후방복사 프로파일들이 측정되었으며 물에 잠겨진 시편에 대해 중심주파수 20 MHz의 광대역 탐촉자가 사용되었다. Fig. 1은 후방복사 프로파일 측정을 위해 사용된 자동화 측정 시스템의 개요도이다. 이 시스템은 제어 컴퓨터로부터 입사각과 후방복사 신호가 자동적으로 저장되도록 되어 있다. 본 연구에서 후방복사는 입사지역에서 발생한 후방진행 표면파로 인한 직접 후방복사가 선택되었다[7]. 최종적으로 각 입사각에서 저장된 후방복사 신호들로부터 후방복사 프로파일이 구성되었다.

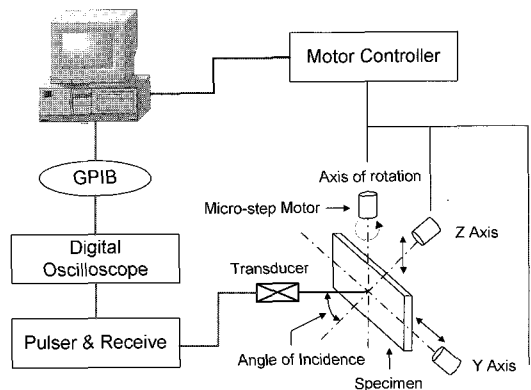


Fig. 1 A schematic representation of the automated measurement system used for obtaining the ultrasonic backward radiation profiles

마모 효과를 보기위해 60rpm의 속도로 도는 오스테나이트 스테인리스 304 강 시편위에 반경 10 mm의 AISI 52100 강으로 된 구(ball)가 미끄러지는 마모시험(ball-on-disk sliding test)이 수행되었다. 시편 표면에 스커핑 같은 심각한 열화를 주기위해 25N과 30N의 하중이 추가되었다. 30N의 하중이 부가된 시편은 표면 일부에 스커핑이 발생하였으며 후방복사 측정은 스커핑이 발생하지 않은 지역에 대해 측정되었다.

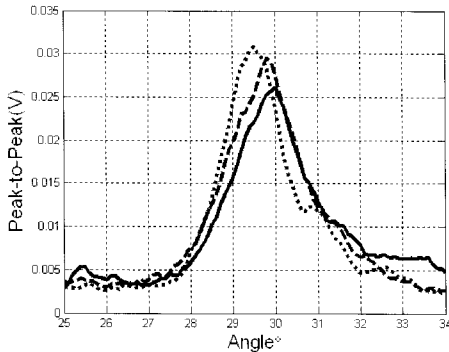


Fig. 2 Effect of the coating thickness on the backward radiation profile (solid: 0.5  $\mu\text{m}$  dash: 3.0  $\mu\text{m}$  dot: 5.0  $\mu\text{m}$ )

### 3. 코팅 두께 효과

코팅 두께는 코팅 층 마모수명과 연관된다고 알려져 있다[1]. 만약  $10\mu\text{m}$  이하의 매우 얇은 코팅 층에서도 후방복사 프로파일은 TiN 세라믹 코팅 층의 두께 변화에 충분히 민감하다면 후방복사 기법을 코팅 층 두께 평가를 위한 비파괴적인 방법으로 사용할 수 있을 것이다. 이러한 가능성을 탐색하기 위해 코팅 전에 같은 거칠기( $R_a=0.022\mu\text{m}$ )를 갖는 모재에 각각 0.5, 3.0 그리고  $5.0\mu\text{m}$ 의 다른 두께의 코팅 층을 가진 AISI 1045 강 시편에 대해 후방복사 프로파일이 측정되었다. 후방복사 프로파일은 프로파일 폭, 정점 각, 정점 크기의 세 가지의 인자를 가지는데, 정점 각에 스넬의 법칙을 적용하여 그때 발생된 레일리 표면파의 속도를 계산할 수 있다[8]. TiN 코팅 층은 AISI 1045 모재에 비해 훨씬 큰 음향 임피던스를 가지므로 코팅 층이 두꺼울수록 표면파의 속도는 빨라질 것이다. Fig. 2는 세 가지 다른 코팅 두께에 대한 후방복사 프로파일의 비교 결과를 보여 주고 있다. Fig. 2에 보인 바와 같이, 두께가 두꺼울수록 후방복사 프로파일의 정점 각은 작아지는데 이는 코

팅 두께가 두꺼울수록 표면파 속도가 증가함을 의미한다. 이러한 변화는 음향 임피던스가 더 큰 재질이 코팅되는 강화된 경우의 시편에서 나타나는 경향과 일치한다.

### 4. 마모 효과

표면 파괴의 갑작스러운 발생을 스커핑(scuffing)이라고 한다[9]. 스커핑 상태에서는 마찰의 급격한 증가를 경험하며 연쇄적으로 여타 문제를 일으킨다. 따라서 스커핑 발생 단계를 인지하는 것은 매우 높은 속도로 회전하는 기계 부품의 신뢰도 향상을 위해서 매우 중요하기 때문에 이를 효과적으로 모니터링 할 수 있는 비파괴적인 기법이 필요하다.

후방복사 기법이 스커핑 발생 단계를 모니터링 할 수 있는지 알아보기 위해 TiN 코팅 두께  $1\mu\text{m}$ 인 두 개의 오스테나이트 스테인리스 304 시편에 구 미끄러짐 마모 시험(ball-on-sliding test)이 각기 25N과 30N의 하중으로 수행되었다. 30N 하중 마모시편은 스커핑이 발생한 직후 미끄러짐 하중이 제거되어 표면 파괴가 시편의 작은 영역에 한정되었다. 따라서 스커핑이 발생한 시편이지만 표면파괴가 발생하지 않은 지역에 대해 충분히 후방복사 측정이 가능하였다. 한편 25N 하중의 마모시편은 스커핑 발생직전에 하중이 제거되었으며 낮은 하중과 스커핑 전 단계 하중계로서 30N의 스커핑 시편에 비해 상대적으로 작은 열화(degradation)를 받은 것으로 간주된다.

Fig. 3은 측정된 후방복사 프로파일을 비교한 결과를 보여주고 있다. Fig. 3으로부터 후방복사 인자 중 정점 각과 폭에서 확실한 차이가 있음을 알 수 있다. 스커핑 시편(30N의 하중을 가한 경우)의 정점 각이 스커핑 되지 않은 시편(25N의 하중을 가한 경우)의 정점 각보다 크게 나타났는데, 이는 스커핑 시편에 발생된 레일리 표면파의 속도가 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 또한, 스커핑이 발생한 시편의 경우 후방복사 프로파일의 폭도 상대적으로 큼을 볼 수 있다. 이는 존재하는 표면파의 분산성이 스커핑이 발생하지 않은 시편에 비해 더 크다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 Si모재 위에 Si코팅 층이 존재하는 경우 코팅 층과 모재와의 접합의 질 (bonding quality)에 따라 변하는 일반화 램파 중 가장 낮은 속도의 모드 (일명 "유사 레일리 표면파"라 부름)의 분산선도이다. Fig. 4에서 1번 곡선은 완전 접합의 경우이며 변

호가 증가할수록 접합의 질이 떨어져 5번 곡선은 코팅 층과 모재가 분리되어 램파의  $A_0$  모드가 된 경우이다. Fig. 4에 보인 바와 같이 접합의 질이 떨어질수록 우물형태의 분산선도는 낮은 속도방향인 아래로 더 내려가며 곡선의 경사도 더 증가한다[10]. 본 실험에 사용된 시편은  $10\mu\text{m}$  이하의 작은 코팅 층을 가진 다층구조(layered substrate)이므로 일반화 램파가 존재하며 우리가 측정하는 레일리파는 실제로 가장 작은 속도 모드인 유사 레일리파이다.

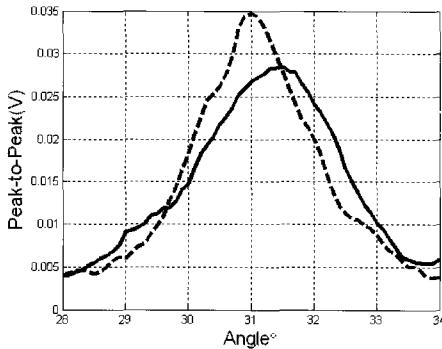


Fig. 3 Effect of the scuffing on the backward radiation profile (solid: scuffing; dash: non-scuffing)

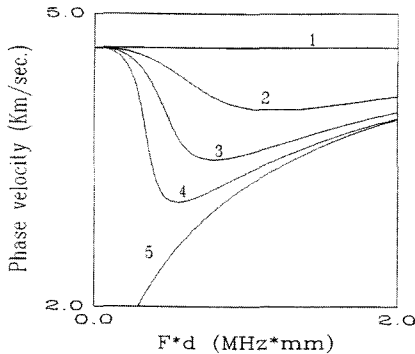


Fig. 4 Calculated dispersion curves of the lowest order mode on layered substrates of various bond qualities. After Ref.[10]

Fig. 3에서 보듯이 스커핑이 발생한 시편이 더 큰 정점 각(낮은 표면파 속도)과 더 큰 프로파일 폭을 보이는 것은 스커핑이 발생한 시편이 상대적으로 열화를 훨씬 심하게 받아 TiN 코팅 층의 접합의 질 역시 현저히 떨어져 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 분산선도가 낮은 속도 방향으로 이동하여 존재하는 유사 레일리파의 속도는 작아지고 동시에 분산선도

의 변화가 커져 후방복사 프로파일 폭도 넓어진 것으로 설명할 수 있다[8]. 마모나 열악한 환경 그리고 시편 준비과정의 차이로 인해 접합의 질이 떨어진 경우 후방복사 프로파일의 정점 각과 폭의 변화로 평가가 가능함을 보여주는 유용한 결과이다.

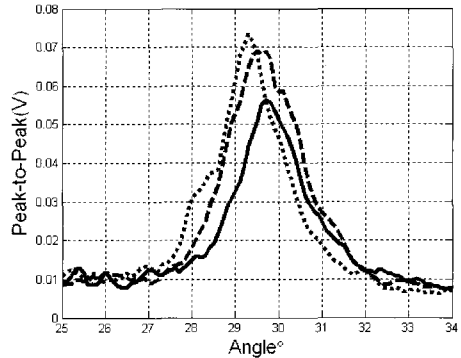


Fig. 5 Effect of the substrate surface roughness on the backward radiation profile (solid:  $Ra=0.151\mu\text{m}$ ; dash:  $Ra=0.032\mu\text{m}$ ; dot:  $Ra=0.022\mu\text{m}$ )

### 5. 모재 표면 거칠기 효과

코팅 전 단계에서 모재의 표면 거칠기는 모재와 세라믹 코팅 층 사이의 접합 강도와 관련이 있다고 알려져 있다[11]. 따라서 모재 표면 거칠기의 차이가 코팅된 시편의 후방복사 프로파일에 미치는 영향을 조사하기 위해 Ra값이 0.022, 0.032 그리고 0.151  $\mu\text{m}$ 의 표면 거칠기를 가진 AISI 1045 모재에 1  $\mu\text{m}$ 의 같은 두께의 TiN 코팅된 시험편들을 이용하여 후방복사 프로파일을 측정하였다. Fig. 5는 측정된 후방복사 프로파일의 거칠기 효과를 보여주고 있다. Fig. 5에 보인 바와 같이 제작된 표면 거칠기의 범위 내에서 거칠기가 커질수록 후방복사 프로파일의 정점 각이 커짐을 알 수 있다. 이는 발생된 표면파의 속도가 거칠기에 따라 감소함을 의미한다. 그러나 최대 0.151  $\mu\text{m}$ 인 거칠기는 발생된 레일리파의 파장이 약 150  $\mu\text{m}$ 라고 볼 때 파장 대 거칠기 비는 천분의 일에 해당하는데, 이렇게 작은 비의 거칠기 영역에서는 거칠기 효과로 표면파 속도의 차이를 설명할 수 없다. 그러나 이러한 거동 또한 Fig. 4의 접합의 질에 따른 분산성 변화를 고려하면 설명이 가능하다. 즉, 속도 감소는 접합의 질이 상대적으로 떨어짐을 의미하므로 모재의 표면 거칠기가 클수록 접합의 질은 떨어진다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 현상을

확인하기 위해서는 거칠기가 접합의 질에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 6. 결 론

최근 얇은 세라믹 코팅이 낮은 마찰 및 마모 저항 특성으로 인해 기계부품에 사용이 증가하고 있다. 세라믹 코팅 층은 고온의 윤활조건에서 반복적인 마모에 노출되므로 부품의 잔류수명 예측과 안정성 확보를 위해 비파괴적인 평가가 필수불가결하다.

표면지역 특히 코팅 층의 평가에는 체적파보다 표면탄성파가 적절함이 널리 알려져 있으며 후방복사 기법이 표면지역에 발생한 표면파의 전파특성을 분석하는데 사용될 수 있다. 최근 연구는 후방복사 프로파일의 인자인 정점 각과 폭 등이 평가대상의 표면 아래 물성변화와 좋은 연관성이 있음을 보여주었다.

본 연구에서는 모재로는 AISI 1045 강과 오스테나이트 스테인리스 304 강을 사용하고 코팅 두께, 마모 조건, 모재의 표면 거칠기 등에 변화를 주어 그 효과들을 후방복사 프로파일을 이용하여 조사하였다. 코팅 층이 두꺼워 질수록 후방복사 정점 각이 감소함은 발생한 표면파의 속도가 증가한 것으로 높은 음향 임피던스를 가진 TiN 코팅 층의 강화(stiffening) 효과에 기인함을 알 수 있다. 마모가 심하여 스키핑이 발생한 시편이 낮은 표면파 속도와 더 큰 분산성을 보인 것은 열화로 인한 코팅 층 접합이 질 저하하기 때문이며 표면 거칠기에 따라 접합의 질도 영향을 받음이 관찰되었다.

이와 같이 코팅 층 두께, 열화 그리고 표면 거칠기에 대한 후방복사 프로파일 인자들의 민감한 변화는 후방복사 프로파일이 표면파의 속도와 분산성을 평가할 수 있는 훌륭한 도구임과 동시에 접합의 질을 정량적으로 평가할 수 있는 매우 유용한 기법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 안동대학교 연구교수 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

[1] K. Holmberg, H. Ronkainen and A. Matthews, "Tribology of thin coatings, Ceramics

- International," Vol. 26, pp. 787-795, (2000)
- [2] Y. Z. Lee and K. H. Jeong, "Wear-life diagram of TiN-coated steels," *Wear*, Vol. 217, pp. 175- 181, (1998)
- [3] I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb waves*, Plenum Press, New York, (1967)
- [4] T. L. Szabo, "Obtaining subsurface profiles from surface-acoustic-wave velocity dispersion," *J. Appl. Phys*, Vol. 46, No. 4, pp. 1448-1454, (1975)
- [5] G. W. Farnell and E. L. Adler, *Physical Acoustics*, W. P. Mason and R. N. Thurston, eds., Vol. IX, p. 35, Academic Press, New York, (1972)
- [6] S. D. Kwon, S. S. Yoon, S. J. Song, Y. H. Kim, and Y. Z. Lee, "Simultaneous Determination of Ultrasonic Wave Velocities and Thickness of Solid Plates," *Key Eng. Mater*, Vol. 270-273, pp. 290-301, (2004)
- [7] Y. H. Kim, S. J. Song, D. H. Bae and S. D. Kwon, "Assessment of material degradation due to corrosion-fatigue using a backscattered Rayleigh surface wave," *Ultrasonics*, Vol. 42, No. 1-9, pp. 545-550, (2004)
- [8] S. D. Kwon, M. S. Choi and S. H. Lee, "The applications of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid," *NDT & E International*, Vol. 33, No. 5, pp. 275-281, (2000)
- [9] K. C. Ludema, *Friction Wear Lubrication: A Textbook in Tribology*, CRC Press, p. 158, (1996)
- [10] Ray T. Ko, Sung D. Kwon and L. Adler, "Ultrasonic Evaluation of Interfacial Properties in Layered Substrate," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti., Vol. 12B, 1459, Plenum Press, New York, (1993)
- [11] C. W. Cho and Y. Z. Lee, "Friction transition diagram considering the effects of oxide layer formed on wear track of AISI 1045 steel disk against TiN coated AISI 52100 steel ball in siding," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 179, pp. 1-9, (2004)