

# TiN 코팅 터빈 블레이드의 액적 충격 침식 기구 및 이론적 응력 해석

이 민 구 · 김 홍 희 · 김 선 재 · 이 창 규 · 김 영 석  
한국원자력연구소

## Liquid Impact Erosion Mechanism and Theoretical Stress Analysis in TiN-Coated Turbine Blade

M. K. Lee, W. W. Kim, S. J. Kim, C. K. Rhee and Y. S. Kim

*Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353, South Korea*

Coating of TiN film was done by reactive magnetron sputter ion plating to improve the liquid impact erosion resistance of steam turbine blade materials, 12Cr steel and Stellite 6B, for nuclear power plant application. TiN coated blade materials were initially deformed with depressions due to plastic deformation of the ductile substrate. The increase in the curvature in the depressions induced stress concentration with increasing number of impacts, followed by circumferential fracture of the TiN coating due to the circular propagation of cracks. The liquid impact erosion resistance of the blade materials was greatly improved by TiN coating done with the optimum ion plating condition. Damage decreased with increasing TiN coating thickness. According to the theoretical analysis of stresses generated by liquid impact, TiN coating alleviated the impact stress of 12Cr steel and Stellite 6B due to stress attenuation and stress wave reactions such as reflection and transmission at the coating substrate interface.

*Keywords : TiN film, reactive magnetron sputter, stellite 6B, liquid impact, steam turbine blade.*

### 1. 서 론

빠른 속도로 이동하는 액적이 구조물 표면에 반복적으로 충돌하여 구조물에 손상을 끼치는 경우가 여러 분야에서 중요한 문제로 제기되고 있으며 특히 스팀 내에 노출된 원자력 발전소 터빈 블레이드의 손상으로 인한 사고 및 전력 손실은 전 세계적으로 상당한 문제점의 하나로 대두되고 있다. 터빈 블레이드의 손상은 주로 스팀 내에 존재하는 습분이 블레이드와 충돌로 인하여 발생하는 침식에 의한 다. 특히 고압 부분으로부터 나온 스팀이 저압 부

분으로 들어갈 때 단열팽창을 하게 되고 포화응결 조건보다도 낮은 온도에서 응결이 일어나기 때문에 터빈 내에서 가장 많은 습분을 형성하게 되며, 이러한 습분이 크기가 큰 습분으로 합쳐져 이동 블레이드와 충돌하며 선 속도가 큰 최종단 블레이드의 leading edge에 심한 침식이 발생하게 된다.<sup>1-3)</sup> 고온, 고압 열기관인 증기터빈은 고속회전체이고 큰 동력을 발생시키는 원동기로서 이의 손상 및 사고는 열효율에 직접적인 영향을 미친다. 실제로 터빈의 경우 국내 원전들에서도 블레이드의 파손으로 인한 터빈 블레이드의 교체가 실시된 예가 상당히

보고되어 왔고 또한 교체 후에도 계속적인 파손현상을 보이고 있기 때문에 원전의 안전성 확보 및 가동률 향상 그리고 수명 연장 측면에서 이를 방지하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 침식이 가장 심하게 일어나는 leading edge 부분을 좀 더 강한 재료로 피복하는 방법이 1920년대 이후로 계속 연구되고 있는데 특히 Baker 등은 코발트 기 합금인 Stellite를 leading edge에 브레이징 하였을 경우 침식에 대한 저항성이 가장 우수하였다고 하였고,<sup>4)</sup> 이외의 다수의 연구자들도 유사한 결과를 보고하였다.<sup>5-7)</sup> 그러나, 현재 원전 터빈 블레이드의 경우에도 Stellite를 이용하여 피복하고 있음에도 불구하고 심하게 침식되고 있고, 터빈 내 습분이 매우 높을 경우에는 기존 재료와 분리되는 현상이 발생한다. 따라서 Springer 이론을 근거로 하여 재료 위에 높은 저항성을 가진 코팅을 함으로써 블레이드 재료인 12Cr steel과 Stellite 6B의 침식 저항성을 향상시키고자 하는 많은 연구가 있었다. TiN은 경한 코팅 재료로 가장 많이 사용되고 있는데, 화학적으로 안정하고 타 재료와의 마찰계수가 작아 마찰열을 감소시킬 수 있으며 산화 및 부식에 대한 저항성이 강하고, 경도 등의 기계적 특성이 우수하기 때문이다.

본 연구에서는 TiN 코팅 블레이드 재료의 침식 기구 및 침식 저항성에 대하여 고찰하였고, 또한 Blowers' model로부터 액적 충격 시 발생하는 재료 내에서의 충격 응력의 변화를 연구 하였다.<sup>8)</sup>

## 2. 실험 및 실험장치

### 2.1 액적 충격 침식 시험

침식 시험을 위해 준비한 시편은 원자력 저압 터빈 블레이드 재료인 12Cr 강과 피복 재료인 Stellite 6B 그리고 TiN 코팅된 12Cr steel과 TiN 코팅된 Stellite 6B 이었다. 모든 시편은 두께가 1.5mm 그리고 직경이 15mm와 25mm인 판상 이었고, 12Cr 강과 Stellite 6B는 알루미늄(1 $\mu$ m)를 사용하여 연마하였다. TiN의 증착은 기계적 특성이 가장 우수했던 조건에서 수행되었고 그 조건은 Table 1에 나타내었다.

현재 세계적으로 사용되는 침식 장치의 종류에는 Whirl arm type (미국, Bell aerospace company)

Table 1. Deposition conditions of TiN film

Base pressure	$< 5 \times 10^{-7}$ torr
Working pressure	$6 \times 10^{-3}$ torr
Target power	RF 900W
Deposition temp.	500°C
N <sub>2</sub> /Ar ratio	5 sccm/2 sccm
Substrate bias	-75 V
Deposition rate	2.5~3 $\mu$ m/hr.
Coating thickness	1.2, 2.8, 5.5, 11 $\mu$ m

과 Disk rotary type (영국 Cambridge 대학, 프랑스, 체코 등)이 있다. Whirl arm type 또는 disk rotary type은 300m/s 이상의 물방울 입사 속도를 얻을 수 없을 뿐 아니라 설사 300m/s 이상의 속도를 얻는다 하더라도 "air shock"이 발생할 가능성이 있다. 또한 시편을 disk에 장착하였을 때 균형 문제로 인해 진동의 소지가 있으며 소음이 매우 심하다. 따라서 본 연구에서는 물방울의 속도에 따라 침식률을 결정할 수 있고, single impact 및 multi impacts를 자유롭게 조절할 수 있는 침식 장치를

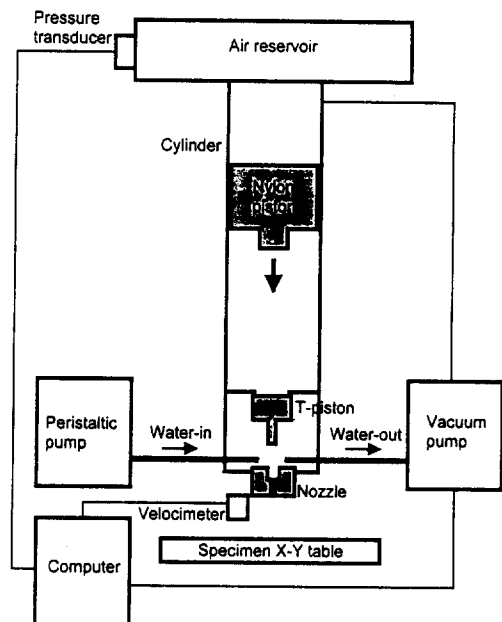


Fig. 1. Schematic diagram of liquid jet apparatus.

설계 제작하였고, 장치의 기본 설계는 특허 출원하였다<sup>9)</sup>. Fig. 1에 본 연구에서 제작한 침식 장치를 나타내었다. Air reservoir내의 대기압 이상 (본 연구에서는 1.3bar 이상)으로 압축된 공기는 nylon piston 상하에 발생된 압력차이에 의해 nylon piston을 하강시킨다. Nylon piston은 T-piston을 치게 되고, T-piston은 nozzle내의 물을 치면서 물을 내보낸다. Nozzle내의 물은 연동 펌프 (peristaltic pump)에 의해 일정량이 연속적으로 공급되도록 하였다. Nozzle내 물이 일정량 이상이 되면 진공 펌프에 의해 연속적으로 뽑히도록 하여 nozzle내에는 물이 항상 일정량을 유지하도록 하였다. 또한 nozzle내 물의 안정화를 위하여 water line으로부터 2mm 상부에 모든 동작은 컴퓨터 제어에 의해 연속적으로 이루어졌다. 물의 속도는 nozzle 바로 밑에 설치된 velocimeter에 의해 측정되었다. 물의 속도는 velocimeter에서 빛을 상하 8mm에서 각각 보내주고 물이 빛을 통과 시 신호를 받음으로써 측정되었다. 침식 시험시 nozzle diameter와 length는 각각 0.5mm, 3mm 이었고 nozzle-to-specimen distance는 11mm, impact angle은 90°로 일정하게 하였으며 nozzle을 통해 나오는 물의 양은 약 0.15cc 유지하도록 하였다. 침식 시험 분위기는 대기 상태였고 온도는 상온이었다. 시편의 침식 정도를 알아보기 위해 침식 깊이를 측정하였고, 이것은 광학 현미경을 이용하여 focal plane의 위치를 변화시킴으로써 이루어졌다. 침식된 표면과 단면 형상 관찰은 광학 현미경과 전자 현미경(SEM)을 이용하였다.

## 2.2 임팩트 하중에 의한 반 무한 탄성체의 응력파 해석

Elastic wave가 free surface나 서로 다른 물리적 성질을 갖는 solid사이의 계면에 도달할 때 광학에서와 마찬가지로 아주 복잡한 reflection 및 transmission현상을 나타낸다. 코팅된 재료의 경우 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 실제로 코팅 층 내부에서는 코팅 표면에서 계면으로 응력이 전파함에 따라 stress attenuation이 일어날 것이고, 또한 계면에서는 응력파의 reflection 및 transmission이 발생하여 코팅 쪽 및 모재 쪽으로 전파하는 응력파를 형성하게 된다. 계면에서 반사된 파는 다시 코팅표면으로 진행

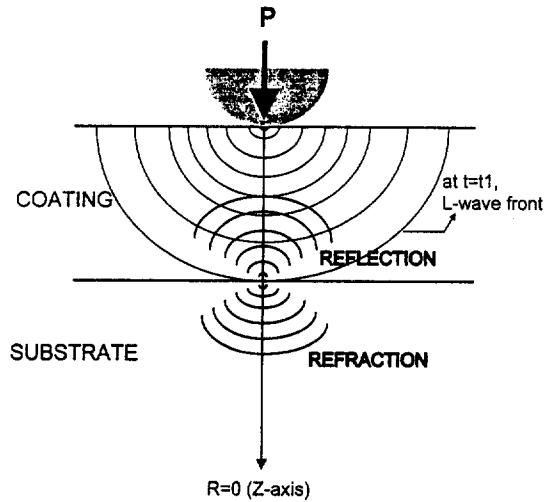


Fig. 2. Reflection and transmission of normally incident longitudinal wave on the interface of coating/substrate system.

하면서 stress attenuation이 일어날 것이고 계면으로 내려오는 응력파와 상호작용을 할 것이다. 예를 들면 반사파가 tension 상태이고 계면으로 내려오는 파가 compression 상태라면 서로 상쇄작용을 할 것이다. 이러한 현상들을 3차원 공간에서 해석하는 것은 코팅 표면에서 진행되어온 wave front가 계면에 닿는 때 순간마다 incident angle (wave front의 접선과 surface normal과 이루는 각도)이 변하기 때문에 매우 복잡한 reflection과 transmission 현상을 해석해야 하기 때문에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 coated material의 경우 oblique incidence의 복잡성을 단순화하기 위해 Blowers' model로부터  $r = 0$  (z-axis)일 때의 stress만을 고려함으로써 TiN 코팅에 의한 블레이드 재료들의 impact stress 변화를 알아보려고 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 TiN 코팅된 블레이드 재료의 침식기구

Fig. 3은 충격 속도가  $350 \pm 20$  m/s일 때 충격 횟수 증가에 따른 TiN 코팅 12Cr steel 및 TiN 코팅 Stellite 6B의 erosion damage의 발전 양상을 보여주고 있다. 변형 형태는 수 개의 고립된 depres-

Fig. 3. Development of erosion damage of TiN coated 12Cr steel and TiN coated Stellite 6B with increasing impact number at an impact velocity of  $350 \pm 20 \text{ m/s}$  : (a) 30, (b) 90, (c) 130 and (d) 290.

sion이었고, depression의 밀도는 충격 횟수가 증가할수록 증가하였다. 이러한 depression은 깊이가 약  $2 \mu\text{m}$  이하의 작은 것들로서 재료 손실과는 관련이

없는 변형 형태이다. 두 시편의 변형 양상은 거의 차이가 없는 것으로 관찰되었다. TiN 코팅의 침식 기구를 규명하기 위해, 얇은 TiN 박막 (TiN thick-

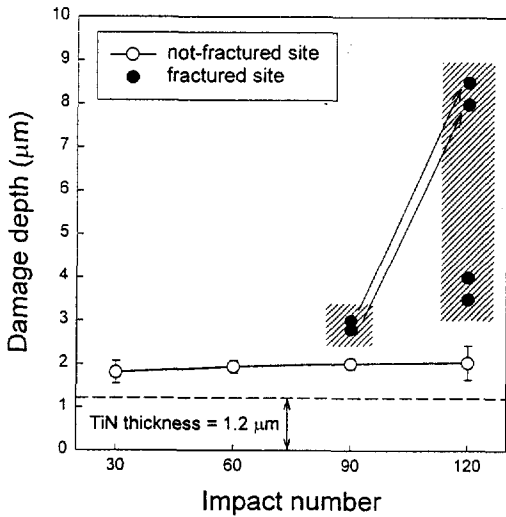


Fig. 4. Damage depth with increasing impact number for TiN coated 12Cr steel (TiN thickness =  $1.2\mu\text{m}$ ) at an impact velocity of  $380\pm 20$  m/s.

ness =  $1.2\mu\text{m}$ )이 코팅된 12Cr steel에 대한 침식 실험을 하였다. Fig. 4는 충격 속도가  $380\pm 20\text{m/s}$  일 때 충격 횟수 증가에 따른 TiN coated 12Cr steel의 침식 깊이의 변화를 보여준다. 충격 횟수가 증가함에 따라 depression(파괴가 발생하지 않은 sites)의 깊이는 약  $1.8\sim 2\mu\text{m}$ 로서 거의 일정한 값을 나타내었다. 약 충격 횟수 90 이후에 TiN의 파

괴가 발생하였고 일단 파괴가 발생한 지점은 충격 횟수가 더욱 증가하면 급격한 damage 깊이의 증가를 나타내었다 (예를 들면,  $2.8\mu\text{m} \rightarrow 8\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m} \rightarrow 8.5\mu\text{m}$ ). Fig. 4에서 한가지 주목할 것은 파괴가 발생하지 않은 site(depression)의 damage 깊이가 TiN 코팅 두께인  $1.2\mu\text{m}$ 를 초과한다는 것이다. 이러한 site들에서는 TiN 코팅의 취성 파괴 (crack 발생)에 의한 모재의 노출이나 재료 손실을 관찰할 수 없기 때문에 상대적으로 연한 12Cr steel에 의한 변형인 것으로 판단되며, TiN 코팅이 어느 정도의 인성(crack 발생에 대한 저항성)을 나타내고 있음을 암시한다. 충격횟수 120 이후에 발생한 TiN 코팅의 손상된 site에 대한 image를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 손상 부위는 중앙에 원형에 가까운 TiN 코팅 층이 depression되어 있고 그 주변에 circumferential fracture가 발생한 모습을 나타내고 있다. 특히 TiN 코팅 층이 파괴될 때 TiN의 spalling이 일어나지 않고 그대로 보존되어 있는 것은 TiN의 결합력이 매우 우수하다는 것을 암시한다. 또한, depression되어 있는 TiN에서 원형으로 발전된 많은 crack은 (Fig. 5의 A, B, C, D) TiN의 circumferential fracture가 발생할 때 형성된 것으로 보이며 TiN의 취성 파괴를 설명해주고 있다. 충격 횟수가 더욱 증가할 경우 depression되어 있는 TiN

Fig. 5. Features of fractured sites in TiN coated 12Cr steel induced by liquid impingements after 120 impacts at an impact velocity of  $380\pm 20$  m/s.

Fig. 6. Scanning electron micrograph showing the cross-section of fractured site in TiN coated 12Cr steel after 120 impacts at an impact velocity of  $380 \pm 20$  m/s.

은 이러한 crack의 발전에 의해 재료 손실이 일어날 것으로 예측된다. Fig. 5의 관찰은 TiN 코팅의 제거 이탈이 extensive spalling에 의하지 않고 cracking에 의한 미세한 chipping에 기인 할 것임을 예측케 한다. Fig. 6은 TiN 코팅의 파괴가 일어난

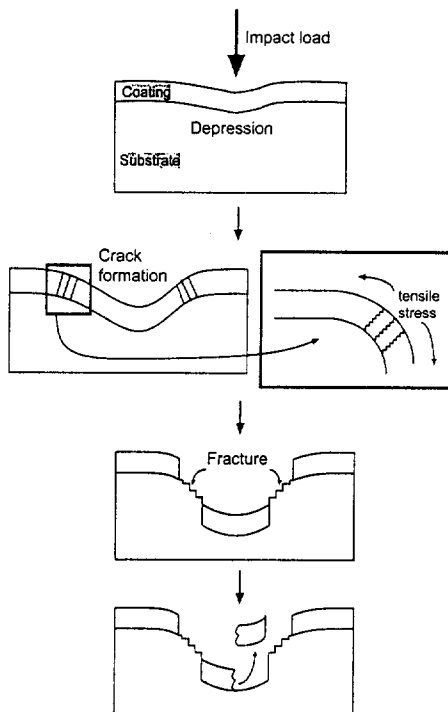


Fig. 7. Liquid impact erosion mechanism of TiN coating.

site의 단면 SEM image를 보여주고 있다. depression 되어 있는 TiN 코팅 층은 평면을 유지하지 않고 roundish한 형태를 나타내고 있고, 이와 함께 모재인 12Cr steel도 roundish한 형태로 depression되어 있는 모습을 나타낸다. Fig. 5의 depressed TiN 내에 원형으로 성장한 많은 crack과 Fig. 6의 12Cr steel의 roundish depression은 TiN이 연한 12Cr steel의 소성 변형에 의해 circumferential하게 파괴되었음을 설명하여 준다. Fig. 7에 이상에서 관찰된 TiN 코팅의 물방울 충격에 의한 파괴 기구를 도식적으로 나타내었다. 충격 초기에 TiN 코팅은 모재의 ductile 변형에 의해 depression을 형성한다. 충격이 계속됨에 따라 depression이 깊어지면서 폭이 증가되고 이 부분에서 tensile stress가 crack formation stress를 초과하면서 crack의 발생 및 전파가 일어난다. depression된 TiN 코팅 층은 cracking에 의해 circumferential fracture가 일어나면서 연한 모재 쪽으로 더욱 depression된다. 반복되는 충격은 depression되어 있는 TiN상에 이미 형성되어 있는 cracks의 발전으로 재료 손실을 초래한다.

### 3.2 TiN 코팅 두께의 영향

Fig. 8은 충격 속도가  $380 \pm 20$  m/s이고 충격 횟수가 30일 때, TiN 코팅의 두께 변화에 따른 TiN 코팅된 12Cr 강의 침식 현상을 보여 준다. Fig. 9와 Fig. 10은 Fig. 8로부터 측정된 depression의 깊이와 너비를 나타낸다. 동일한 시험 조건에서 TiN을 코팅하지 않은 12Cr 강은 damage 깊이가 약  $12 \mu\text{m}$ 로서 damage가 상당히 컸으나 TiN이  $1.2 \mu\text{m}$ 만 증착 되어도 damage 깊이는 약  $1.9 \mu\text{m}$ 로 현저히 감소하였다. 이것은 얇은 두께의 TiN 코팅이라도 12Cr 강의 침식 저항성을 크게 향상시킨다는 것을 의미한다. TiN 코팅 두께가 증가할수록 depression의 깊이는 감소하였고 너비는 증가하였으며, TiN 코팅 두께가 감소할수록 코팅하지 않은 12Cr 강의 damage 양상과 유사해짐을 관찰할 수 있었다. TiN 코팅에 의한 또는 TiN의 코팅 두께 증가에 따른 damage의 감소는 stress wave의 영향으로 해석될 수 있을 것이다. 액적 충격 하중은 충격 stress의 전파에 의해 재료의 소성 변형을 발생시킨다. 이러

Fig. 8. Damage features of TiN coated 12Cr steel with the variation of coating thickness after 30 impacts at an impact velocity of  $380 \pm 20$  m/s : (a)  $1.2 \mu\text{m}$ , (b)  $2.8 \mu\text{m}$ , (c)  $5.5 \mu\text{m}$  and (d)  $11 \mu\text{m}$ .

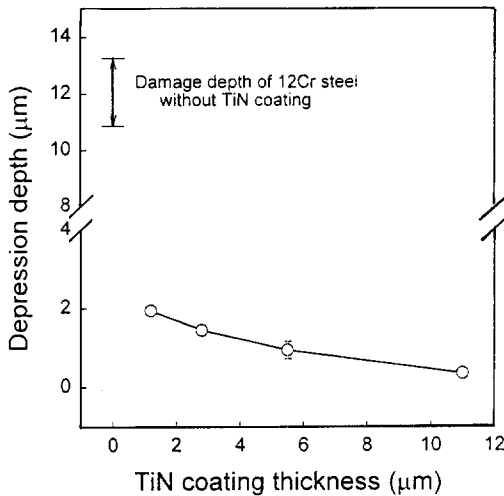


Fig. 9. Variation of depression depth with TiN coating thickness after 30 impacts at an impact velocity of  $380 \pm 20$  m/s.

한 소성 변형의 정도는 재료의 소성에 의존하므로 경하고 취성이 있는 TiN 코팅의 경우 연한 12Cr

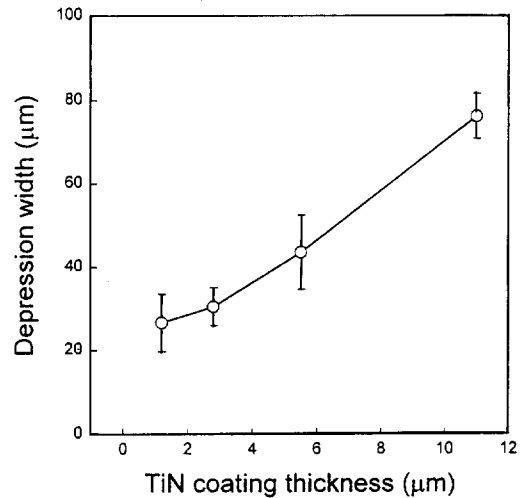


Fig. 10. Variation of depression width with TiN coating thickness after 30 impacts at an impact velocity of  $380 \pm 20$  m/s.

강에 비해서 소성 변형은 작을 것이다. 또한, TiN 코팅이 얇을 경우에는 코팅 층이 두꺼운 경우에 비

해 코팅/모재의 계면에 impact stress wave가 도달하는 시간은 짧다. 따라서 코팅 층이 두꺼운 경우에 비해 코팅 층 내부에서 stress decay 정도는 작을 것이고 코팅/모재의 계면을 통과하여 모재로 전달되는 compression stress는 더 클 것이다. 결과적으로 ductile한 모재의 compression 변형은 더 크게 된다. 따라서 TiN 코팅의 두께가 얇을수록 ductile한 모재의 변형에 의한 영향이 증가할 것이다.

### 3.3 침식 저항성의 비교

Fig. 11은 12Cr 강과 Stellite 6B 그리고 TiN coated 12Cr 강과 TiN coated Stellite 6B (TiN thickness =  $11\mu\text{m}$ )에 대해 충격 속도가  $350\pm 20\text{ m/s}$ 일 때 충격 횟수 증가에 따른 최대 damage 깊이를 측정된 결과이다. 12Cr 강의 경우에는 주로 crater에서 측정하였고, Stellite 6B의 경우에는 matrix보다는 탄화 석출물들의 파괴에 의한 damage 깊이가 크기 때문에 주로 파괴된 석출물들에서 측정하였다. TiN이 코팅된 시편들의 경우에는 충격이 290회까지 진행되는 동안 초기에 형성된 depression의 밀도가 증가할 뿐 파괴는 발생하지 않았기 때문에 depression으로부터 측정하였다. 12Cr 강

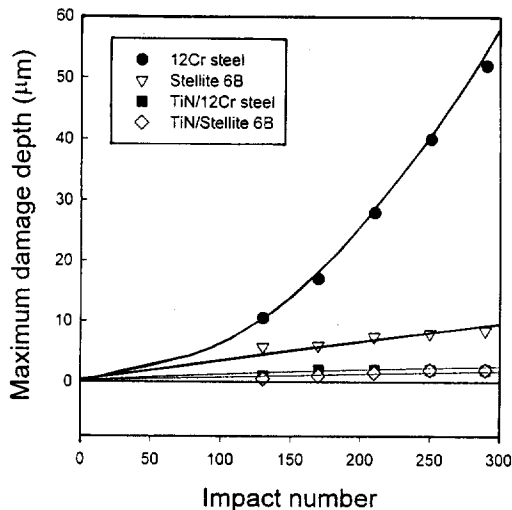


Fig. 11. Maximum damage depth with increasing impact number for 12Cr steel, Stellite 6B, TiN coated 12Cr steel and TiN coated Stellite 6B at an impact velocity of  $350\pm 20\text{ m/s}$ .

이나 Stellite 6B의 경우에 비해 TiN이 코팅된 경우 damage 깊이는 현저히 작은 값을 나타내었다. 충격횟수 290 이후 12Cr 강은  $52\mu\text{m}$ , Stellite 6B는  $8.5\mu\text{m}$ , TiN coated 12Cr 강과 TiN coated Stellite 6B는 약  $2\mu\text{m}$ 를 나타내었다. 12Cr 강에 비해 Stellite 6B의 침식 저항성도 주목할만하나, 이러한 터빈 블레이드 재료들이 TiN으로 이온 플레이팅 되었을 때 현저한 침식 저항성의 향상을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.4 임팩트 하중에 의한 반 무한 탄성체의 응력 파 해석

우선 12Cr steel, Stellite 6B 그리고 TiN에 대해 충격 속도가  $400\text{ m/s}$ 일 때 깊이에 따른 stresses,  $S_{zz}$ 를 Blowers' impact model로부터 구하여 Fig. 12에 나타내었다. 물방울 충격에 의해 발생한 stresses는 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 TiN 및 블레이드 재료 내부로 진행할수록 wave front의 팽창으로 인해 stress 감소를 나타내었다. 특히 12Cr 강과 Stellite 6B에 비해 깊이에 따른 TiN의 stress 감소가 현저히 크다는 것을 알 수 있다. TiN의 경우 깊이를 코팅 두께라고 간주하면, 각 깊이에 도달한 stress wave는 TiN 코팅/블레이드 모재의 계면에

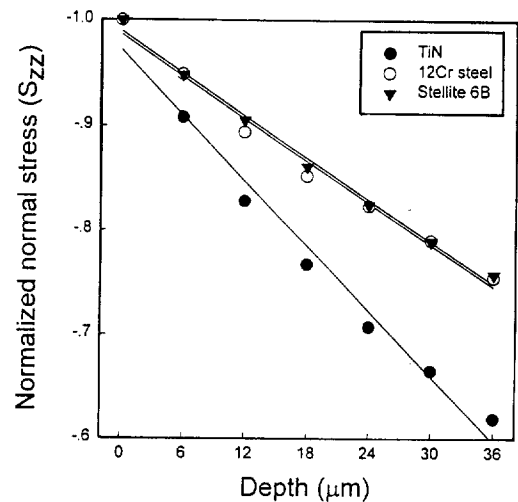


Fig. 12. Stress variation at the instant that the first longitudinal wave reaches at each depth on z-axis ( $r = 0$ ) when impact velocity =  $400\text{ m/s}$ .



서 reflection 및 transmission을 하게 된다.  $r=0$ 일 때는 TiN 코팅/블레이드 모재의 계면에 수직으로 입사하는 경우이므로 입사하는 longitudinal wave는 계면에서 수직하게 reflection되는 한 개의 longitudinal wave와 transmission되어 모재로 전파하는 한 개의 longitudinal wave를 발생시킨다. 이때의 amplitude 관계는 다음과 같다.<sup>10)</sup>

$$\frac{A_{LR}}{A_{LI}} = \frac{\rho_s C_b - \rho_c C_k}{\rho_s C_b + \rho_c C_k}$$

$$\frac{A_{LRI}}{A_{LI}} = \frac{2 \rho_s C_b}{\rho_s C_b + \rho_c C_k}$$

여기서  $A_{LI}$ ,  $A_{LR}$ ,  $A_{LRI}$ 는 각각 incident longitudinal wave의 amplitude, reflected longitudinal wave의 amplitude, transmitted longitudinal wave의 amplitude를 나타내고,  $\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 elastic wave speed를 나타내고  $\rho \times C$ 는 재료의 impedance,  $Z$ 를 나타낸다. 블레이드 재료 위에 TiN이 코팅된 경우 위의 stress amplitude ratio를 구하면 다음과 같다.

12Cr 강위에 TiN이 코팅된 경우,

$$\frac{A_{LR}}{A_{LI}} = -0.1423 \quad , \quad \frac{A_{LRI}}{A_{LI}} = 0.8577$$

Stellite 6B위에 TiN이 코팅된 경우,

$$\frac{A_{LR}}{A_{LI}} = -0.1072 \quad , \quad \frac{A_{LRI}}{A_{LI}} = 0.8928$$

이었다. 위의 stress amplitude ratio들 중 transmission ratio는 블레이드 재료인 12Cr 강과 Stellite 6B의 impact stress가 TiN 코팅에 의해 얼마나 감소될 수 있는지를 보여준다. Fig. 13에는 12Cr 강과 Stellite 6B 위에 TiN이 코팅된 경우 TiN 코팅과 블레이드 모재의 계면을 통과하는 transmitted stress를 코팅 깊이에 따라 나타내었다. 여기서 오른쪽  $y$ 축의 값은  $P = \rho CV$ 를 가정한 경우 계산된 값이다. Fig. 13으로부터 TiN 코팅에 의해 나타나는

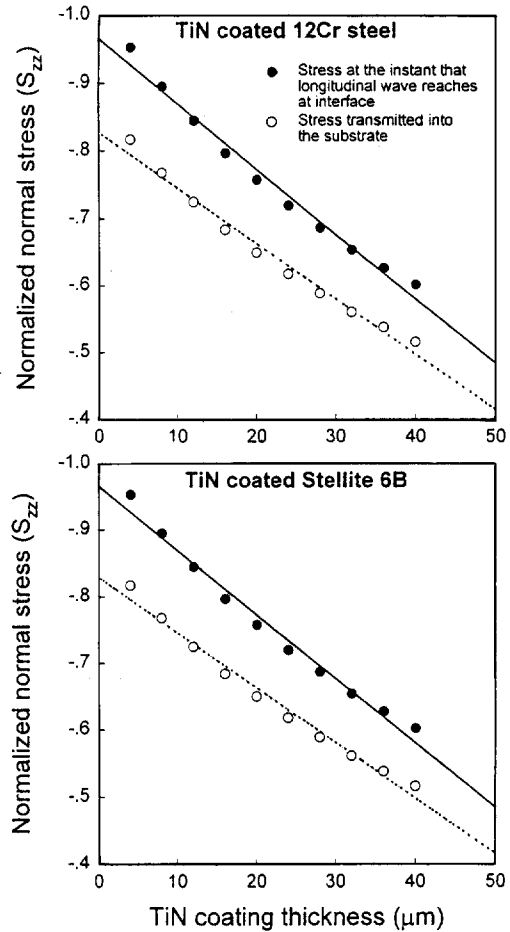


Fig. 13. Stress variation on z-axis ( $r = 0$ ) at each coating depth for TiN coated blade materials when impact velocity = 400m/s.

영향을 정리해 보면 다음과 같다. 우선 TiN 코팅층 안으로 stress wave가 진행함에 따라 wave front의 팽창으로 인해 stress의 크기는 감소하며, TiN의 코팅 두께가 증가할수록 계면에 도달하는 stress는 작다. 또한, TiN이 코팅된 경우 블레이드 모재로 전달되는 transmitted stress는  $\frac{A_{LRI}}{A_{LI}} > 0$ 이므로 compression 상태로서 그 부호는 incident wave와 같으며  $\frac{A_{LRI}}{A_{LI}}$ 의 ratio에 의해 stress의 양이 감소한다. TiN이 코팅된 경우 계면에서 코팅내부로

reflected되는 stress는  $\frac{A_{LR}}{A_{LI}}$ 의 비에 의해 현저히 감소하고,  $\frac{A_{LR}}{A_{LI}} < 0$ 이므로 reflected stress wave는 tension 상태로서 계속해서 입사하는 stress wave와 부호가 반대이기 때문에 상쇄된다. 따라서 계속해서 입사하는 stress의 양은 상쇄효과에 의해 계면에는 더욱 작은 양이 도달할 것이므로 블레이드 모재로 전달되는 stress의 양은 훨씬 더 작아질 것으로 예측된다. 따라서 TiN 코팅은 TiN을 코팅하지 않은 경우에 발생하는 블레이드 재료 위의 impact stress를 감소시켜줌으로써 블레이드 재료의 물방울 충격에 대한 침식 저항성을 향상시킬 것이다. Fig. 14는 충격 압력, P를  $\rho CV$ 라고 가정할 때 블레이드 재료인 12Cr 강과 Stellite 6B의 endurance limit이하로 물방울의 충격 응력을 감소시키기 위해 필요한 TiN의 적정 두께를 충격속도의 변화에 따라 나타내었다. 12Cr 강과 Stellite 6B의 endurance limit이하로 물방울의 충격 응력을 감소시키기 위해 필요한 TiN의 적정 두께는 물방울의 충격속도가 증가함에 따라 증가하였다.  $P = \rho CV$ 일 때 현재 원자력 발전소 low pressure section의 최종단 블레이드의 선속도는 약 250 m/s가 된다. 따라서  $\sigma < \sigma_{endurance\ limit}$ 에 요구되는 TiN의 두께는

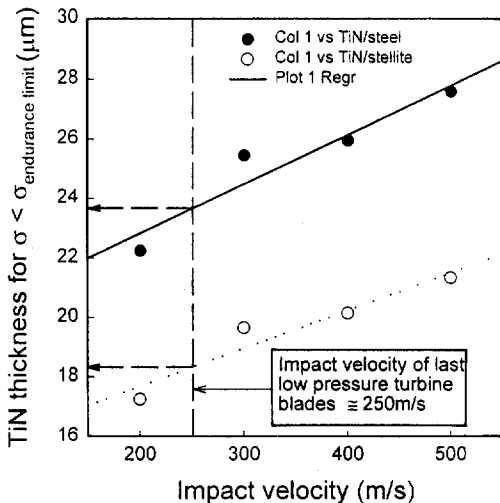


Fig. 14. TiN thickness required for  $\sigma < \sigma_{endurance\ limit}$  with the variation of impact velocity when  $P = \rho CV$ .

12Cr 강의 경우 약  $24\mu\text{m}$ , Stellite 6B의 경우에는 약  $18\mu\text{m}$ 가 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 재료가 받는 충격 압력, P는  $\rho CV$  보다 크다고 보고되고 있기 때문에,<sup>11-13)</sup> 실제로 TiN 코팅 두께는 이 보다 큰 값이 요구될 것이다.

#### 4. 결 론

1. 액적 충격 초기에 TiN 코팅은 주로 연한 모재의 소성 변형에 의해 depression 형태의 변형이 나타났고, 이러한 depressions은 충격 횟수가 증가함에 따라 곡률의 증가를 초래하고 이 부분에서 응력 집중되어 crack이 발생하고 전파하여 TiN 코팅의 circumferential fracture가 일어났다.

2. 터빈 블레이드 재료인 12Cr 강과 Stellite 6B은 본 연구에서 확립한 최적의 증착조건에서 TiN이 코팅되었을 때 액적 충격에 대한 침식 저항성이 크게 향상되었고, TiN 코팅 두께가 증가할수록 침식에 의한 damage는 감소하였다.

3. 물방울 충격에 의해 발생하는 재료의 stress에 대한 이론적인 계산 결과 TiN 코팅은 터빈 블레이드 재료인 12Cr 강과 Stellite 6B의 impact stress를 크게 감소시켜줄 수 있었다. 또한 TiN 코팅 두께가 증가할수록, stress attenuation 정도의 증가와 TiN 코팅과 블레이드 모재의 계면에서 stress wave의 reflection 및 transmission 현상으로 인해 모재로 전달되는 impact stress의 크기가 감소함을 알 수 있었다.

4. 원자력 발전소 low pressure section의 최종단 터빈 블레이드의 선속도가 250 m/s임을 감안할 때 블레이드 재료의 충격 응력을  $\sigma < \sigma_{endurance\ limit}$ 로 낮추기 위해 요구되는 TiN의 적정 두께는 12Cr 강의 경우 약  $24\mu\text{m}$ , Stellite 6B의 경우 약  $18\mu\text{m}$ 가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

#### References

1. E. Hoegger, *Brown Boveri Rev.*, **14**, 95 (1927).
2. O. G. Engel, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **54**, 283 (1955).

3. F. J. Heymann, *J. Appl. Phys.*, **40**, 5113 (1969).
4. D. W. C. Baker, D. E. Elliott, D. G. Jones & D. Pearson, Proc. Int. Conf. Rain Eros., 2nd p. 449 (1967).
5. W. Herbert, Proc. Int. Conf. Rain Eros., 2nd p. 359 (1967).
6. H. Rieger, Proc. Int. Conf. Rain Eros., 3rd p. 147 (1970).
7. A. Behrendt, Proc. Int. Conf. Rain Eros., 4th p. 425 (1974).
8. R. M. Blowers, *J. Inst. Math. Applic.*, **5**, 167 (1969).
9. W. W. Kim, J. S. Kim, J. H. Suh, Y. S. Lim, and S.S. Kim, Patent, Continuous Erosion Testing Apparatus by Water Jet.
10. R. J. Wasley, Stress wave propagation in solids, Marcel Dekker, INC New York p. 87 (1973).
11. M. C. Rochester and J. H. Brunton, "Erosion, Wear, and Interfaces with Corrosion" ASTM STP 567, pp. 128~148, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.
12. W. Johnson and G. W. Vickers, *J. Mech. Eng. Sci.*, **15**, 302 (1973).
13. F. J. Heymann, *J. Appl. Phys.*, **40**, 5113 (1969).