

---

碩士學位論文

# Ceramic 被覆鋼材의 腐蝕疲勞強度特性

濟州大學校 大學院

機械工學科



1995年 12月

# Ceramic 被覆鋼材의 腐蝕疲勞強度特性

指導教授 金 貴 植

玄 暎 樹

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

1995年 12月

玄暎樹의 工學碩士學位 論文을 認准함.



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長 김만수 印

委 員 권기인 印

委 員 김귀석 印

濟州大學校 大學院

1995年 12月

# **Corrosion Fatigue Strength Characteristics of Ceramic Coating Steel**

**Kyung-Soo Hyun**

**(Supervised by professor Gui-Shik Kim)**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER  
OF ENGINEERING**



**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

**1995. 12.**

# 목 차

Summary .....	1
I. 서 론 .....	2
II. 재료 및 방법 .....	5
1. 시험편 .....	5
2. 시험장치 및 시험방법 .....	10
III. 실험 결과 및 고찰 .....	13
1. 부식피로 강도 (S-N 선도) .....	13
2. 부식피로균 발생기구 .....	16
3. 파단면 관찰 .....	26
IV. 결론 .....	30
V. 참고문헌 .....	31

---

## Summary

In order to investigate the corrosion fatigue life and behavior of a high-speed steel (SKH-9) coated titanium nitride (TiN) by physical vapour deposition (PVD) method, the test of rotary bending corrosion fatigue was carried out in the air and 3% NaCl solution, respectively.

The results obtained are summarized as follows ;

1) A fatigue life of TiN coating steel in the air is largely increased as compared with that of the substrate because the hard thin film restricts of dislocation movement in the near surface of the substrate.

2) Under the high stress level in 3% NaCl solution, corrosion fatigue life of TiN coating steel is improved due to the effects of coating as compared with the substrate. But, in the low stress level, corrosion fatigue life of TiN coating steel is equivalent to that of steel without coating because the surface is dissolved by the corrosion of coating layer.

3) The corrosion fatigue surface of TiN coating steel occurs in many corrosion pits at the delamination part of coating layer, and the crack initiates from the bottom of a corrosion pits.

4) The crack of corrosion fatigue of TiN coating steel propagates by the growth and incorporation of the corrosion pits. The density and length of crack are relatively higher in the low stress level than those of the high stress level.

# I. 서 론

최근 우주, 항공, 원자력, 자동차 등의 공업 기술이 급속히 발전함에 따라 기계 구조물은 고속화와 고효용성을 지향하고 있으며, 또 이들은 가혹한 사용 조건 하에서 가동됨에 따라 기계 구조용 재료는 고강도, 고인성, 내식성, 내마모성 등의 사용성능에 대한 요구 조건이 점점 엄격하게 되었다. 한편 재료가 사용환경에 대해 직접적으로 관계하는 부분이 표면이므로 이 요구들을 만족시키기 위하여 신소재 개발에 대하여 많은 연구를 하고 있으며, 이중 재료 표면에 모재(substrate)와는 다른 특성을 주는 표면 개질 기술이 주목받고 있다(天田, 1991; 서창민 등, 1995).

표면 개질법에는 화학증착(Chemical Vapor Deposition ; CVD)법과 물리증착(Physical Vapor Deposition ; PVD)법 및 용사법 등이 있으나 현재 공구류와 금형 등의 코팅에는 CVD 법과 PVD 법이 다른 방법보다 널리 사용되고 있다(Yoshinori 등, 1993). 이 중에서 CVD 법은 코팅층의 화학적 성분을 포함하는 각종 개스들이 약 1000°C 이상의 고온으로 가열된 모재(substrate) 표면에서 화학 반응을 일으키므로 초경 합금을 제외한 고속도강 및 일반 강재형 공구강에서는 자체 연화가 발생하여 기계적 성질 저하 및 치수 변화 등의 문제점이 있다. 또한, 형상이 복잡한 부품에 균일하게 코팅할 수 있는 장점이 있으나(정용수 등, 1994), 이 방법이 효율적으로 실용화되지 못하고 있다.

한편, PVD 법은 코팅층의 화학적 성분을 높은 에너지를 가지는 이온과 전자

및 중성자들의 집합체인 플라즈마 상태로 만들어 모재의 표면에서 화학반응을 일으켜 코팅되도록 하는 방법이다. 특히 PVD 법은 500°C 이하의 비교적 낮은 온도하에서도 코팅이 가능하므로 코팅 공정 온도에 제한을 받는 고속도강, 탄소 공구강, 철 및 비철금속 등에 널리 사용되고 있다(Oki, 1990). 실제로 PVD 법을 통하여 고속도강 공구를 중심으로 엔드밀이나 호브, 드릴 등에 세라믹 재료를 코팅하여 내마모성을 크게 향상시킨 상용재를 사용하므로써 생산성이 증대되고 있다.

표면 개질 기술이 기계 분야에의 이용은 내열성, 내마모성, 내식성 등의 성질이 우수한 세라믹을 표면 개질 재료로 사용하여 금속재료 표면에 코팅하여 기계 부품, 공구, 금형 등의 표면물성 개선 및 재창출을 목적으로 여러 산업에 성능 향상과 수명 연장을 위하여 실시되고 있으며, 금후 기계 구조물 부재에의 응용이 기대되고 있다(Varacalle 등, 1991).

또한, 기계 구조물 부재는 필연적으로 피로 하중을 받게 되므로 표면코팅재의 피로 현상을 파악해야 할 필요가 있고, 특히 세라믹 코팅재의 성능 향상과 광범위한 기계 구조물 부재에의 이용 및 세라믹 코팅층의 피로 강도 향상을 위하여 사용환경에서의 피로 강도 특성을 규명할 필요가 있지만, 지금까지는 TiC 나 TiN을 표면 코팅한 공구강, 고강도강 혹은 탄소강의 잔류응력 측정이 실시되었으나, 세라믹 코팅재의 강도 문제에 관한 연구는 거의 없으며 강도 설계에 반영하기 위한 사용 환경중의 피로 강도 특성은 통일적으로 충분히 설명되고 있지 않은 상황이다(Tashiyuki 등, 1993; Kazuaki 등, 1994). 이러한 세라믹 코팅재의 광범위한 산업 분야에의 이용을 위해서는 사용환경중 피로 강도 특성의 규명을

비롯하여 재료의 강도 측면에서 충분한 연구 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 최근 고압축강도와 내마모성을 함유하여 절삭공구 및 자동차 부품에 적용이 확대되고 있는(夏目 등, 1988) 고속도강 SKH-9에 고경도, 저마찰계수, 고내식성을 갖는 티타늄계 세라믹을 PVD 법에 의해 코팅 처리하고 공기중과 3% NaCl 중에서 회전 굽힘 피로 시험을 실시하여 부식 피로 강도에 미치는 세라믹코팅의 유효성과 부식 피로 특성을 파악하고자 한다.



## II. 재료 및 방법

### 1. 시험편

본 실험에 사용된 재료는 몰리브덴계 고속도강 SKH-9이며 그 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 실험에 사용된 회전 굽힘 피로 시험편의 형태와 치수를 나타낸다. SKH-9 시험편의 전체 길이는 110mm로 하였으며, 표점거리는 30mm이고 직경은  $\phi$  11mm이다. 이 시험편은 선반을 사용하여 정밀 가공한 후 표면을 에머리 페이퍼(#1500)로 경면 연마를 하였다. 세라믹 코팅 재료는 TiN을 사용하였으며 경면 연마한 시험편을 브라스팅 처리한 후 아크 방전식 이온 플래팅(Arc Ion Plating)의 PVD법에 의해 코팅하였다. 코팅 조건은 Table 2에 나타난 것처럼 진공압력  $0.5 \times 10^{-2}$  Pa, 코팅시간 60분, 바이어스 전압 250V, 전류 55A로 하였다. 코팅 면적은 Fig. 1에 나타난 사선부이며 코팅 두께는 약  $3 \mu\text{m}$ 이며, 코팅부 색상은 TiN 특유의 황동색이다.

SKH-9 모재(substrate)와 TiN 코팅재의 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다. Fig. 2와 3에서 인장 특성을 보면, 모재의 항복 강도는 98.94 MPa이며 연신율은 10.97이다. TiN 코팅재의 항복 강도는 100.87 MPa이고 연신율은 10.89이다. 인장 특성을 구하는 데 있어서는 UTM(독일 Zwick社)을 사용하였으며 인장 속도를 10mm/min으로 하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도계(Tukon 220, Wilson

社)를 사용하여 10개소를 측정하여 평균치를 구하였다. 코팅재의 인장강도 등의 기계적 성질은 거의 변화가 없으나, 경도(HV)는 모재 보다 향상되었다.

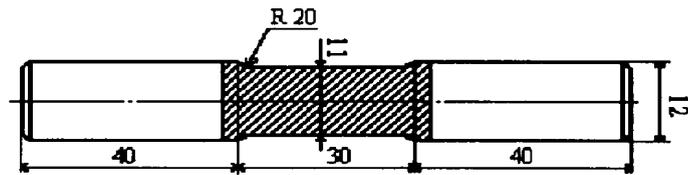


Fig. 1 The shape and dimension of test specimen (mm).



Table 1 Chemical compositions of substrate SKH-9 (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Co	Cu	Ni
0.80 ~ 0.90	≤0.40	≤0.40	≤0.03	≤0.03	3.80 ~ 4.50	4.50 ~ 5.50	5.50 ~ 6.70	1.60 ~ 2.20	-	≤0.25	≤0.25

Table 2 Coating condition.

Vacuum pressure	$0.5 \times 10^{-2}$ Pa
Coating time	60Min
Bias voltage	250V
Electric current	55A

Table 3 Mechanical properties of experimental materials.

	Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Yield strength $\sigma_Y$ (MPa)	Strain at fracture $\epsilon$ (%)	H $\nu$
Substrate SKH-9	1079.65	969.61	10.97	278
TiN coating	1096.22	988.52	10.89	358

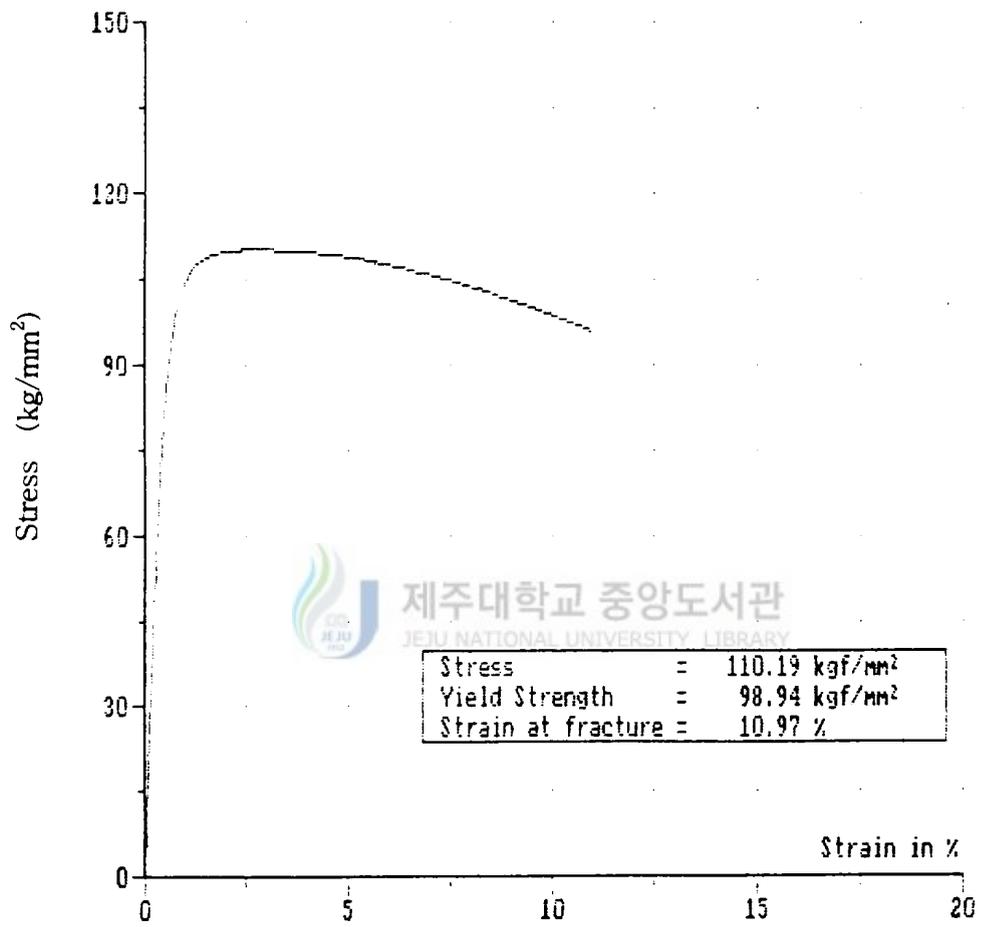


Fig. 2 Tensile strength properties of substrate SKH-9.

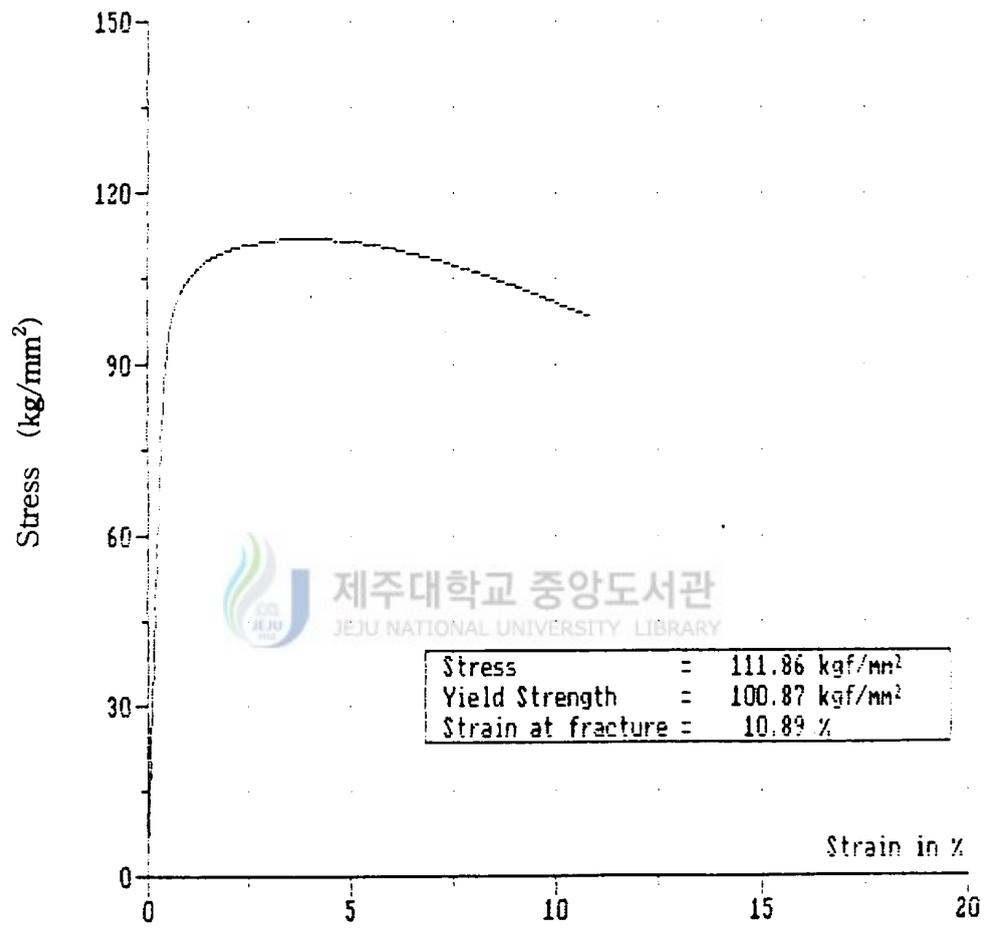


Fig. 3 Tensile strength properties of TiN coating specimen.

## 2. 실험장치 및 실험방법

세라믹 피복강재의 부식 피로 강도를 조사하기 위하여 모재(SKH-9)와 TiN 코팅재의 공기중과 3% NaCl 수용액 중에서 부식 피로 시험을 행하였다.

부식 피로 실험 장치는 Fig. 4에 나타난 것처럼 회전 굽힘 피로시험기와 부식 장치로 구분되어 진다. 본 실험에 사용한 피로시험기는 용량 10 kg·m의 회전 굽힘 피로시험기(제일정밀 Co.)이며 부하시에 시험편에 충격 하중이 가해지지 않도록 시험기에 인버터를 설치하여 회전속도를 최저 0~1800 rpm의 범위 내에서 임의의 회전속도까지 서서히 증가시킬 수 있다. 모터의 회전속도는 디지털 속도계에 의해 측정이 되며, 회전속도는 공기중에 있어서는 900 rpm이며 부식 환경 중에서는 600 rpm으로 하였다. 또 부하 사이클은 100 : 1의 워엄감속기어를 갖는 카운터로서 측정하였다. 시험기의 본체는 모터, 베어링, 카운터, 프레임 등으로 구성되어 있으며 하중의 조절은 무게추를 사용하여 조절할 수 있도록 되어 있다.

부식 피로 시험의 환경 조건은 실온 공기중과 3% NaCl 수용액이다. 여기서 3% NaCl 수용액은 부식용액의 표준용액으로 ASTM규격 인공해수와 부식특성이 유사함이 보고되어 있으므로(角田 등, 1987) 이를 부식용액으로 채택하였다. 부식 수의 순환장치는 부식조와 항온 수조로 이루어지며 부식조는 투명 아크릴로 제작하였으며, 항온 수조는 플라스틱 수조를 사용하여 부식의 영향을 제거하였다. 또한 부식조와 수조사이에 플라스틱제 펌프를 사용하여 3% NaCl 용액을 항온 수조로부터 투명아크릴로 제작한 부식조로 공급하고 다시 수조로 순환되도록 제작하였다. 그리고 수용액량은 5 l로 하여 일주일에 1회 교환하였다.

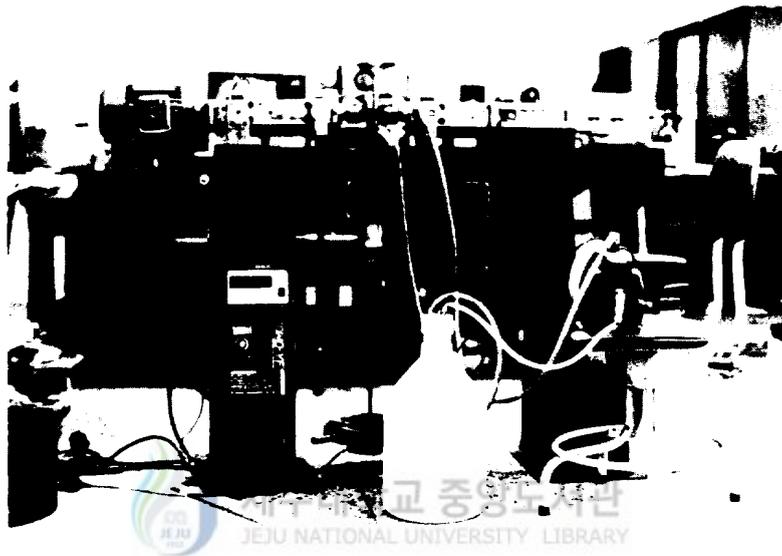


Fig. 4 Experimental apparatus of corrosion fatigue test.

한편 부하 응력은  $\sigma_a = 200, 300, 400$  MPa에서 실험을 행하였고, 피로시험후 시험편의 표면과 파단면을 초음파 세척하여 부식 녹을 제거하고 금속 현미경과 주사형 전자현미경으로 정밀 관찰하여 각각의 조건에 대하여 비교 검토하였다.



### III. 실험결과 및 고찰

#### 1. 부식피로 강도 (S-N선도)

Fig. 5에서는 SKH-9 모재와 세라믹 피복강재에 대한 공기중과 3% NaCl 용액 중에서 응력레벨을 200~400 MPa의 범위에서 응력을 변화시키면서 회전 굽힘 피로 시험한 피로 강도와 수명과의 관계(S-N선도)를 나타낸다.

모재와 코팅재간의 공기중의 피로 강도를 동일 수명에서 비교해 보면 코팅재의 강도가 모재의 강도보다 크다. 그리고 그 피로 강도는 부하응력에 따라 차이를 보이는데, 부하 응력이 크면 그 차이가 크고 부하 응력이 작으면 그 차이는 작다. 코팅재가 모재보다 공기중 피로 수명이 향상된 것은 단단한 표면 피막의 존재에 의해 모재 표면 근방의 전위의 운동이 곤란하게 되며, 균열발생원으로 되는 표면의 소성변형이 구속되어 피로균열 발생이 지연되므로 수명이 향상된다고 추정된다(鹽澤 등, 1990). 저응력역에서는 장시간의 피로 하중의 작용에 의해 표면에 소성변형이 작용하여 구속 정도가 완화되므로 코팅에 의한 수명의 향상 정도는 고응력역보다 작다.

모재의 공기중과 3% NaCl 용액중의 피로 강도를 비교하여 보면  $\sigma_a = 400$  MPa의 고응력역에서는 피로 수명이 거의 비슷하나 저응력역에서는 3% NaCl 용액중의 수명이 공기중의 수명보다 급격히 저하한다. 이는 후술한 바와 같이 공기중에서는 연성 파괴를 보이고 있으며, 3% NaCl 용액중에서는 표면이 부식 용해

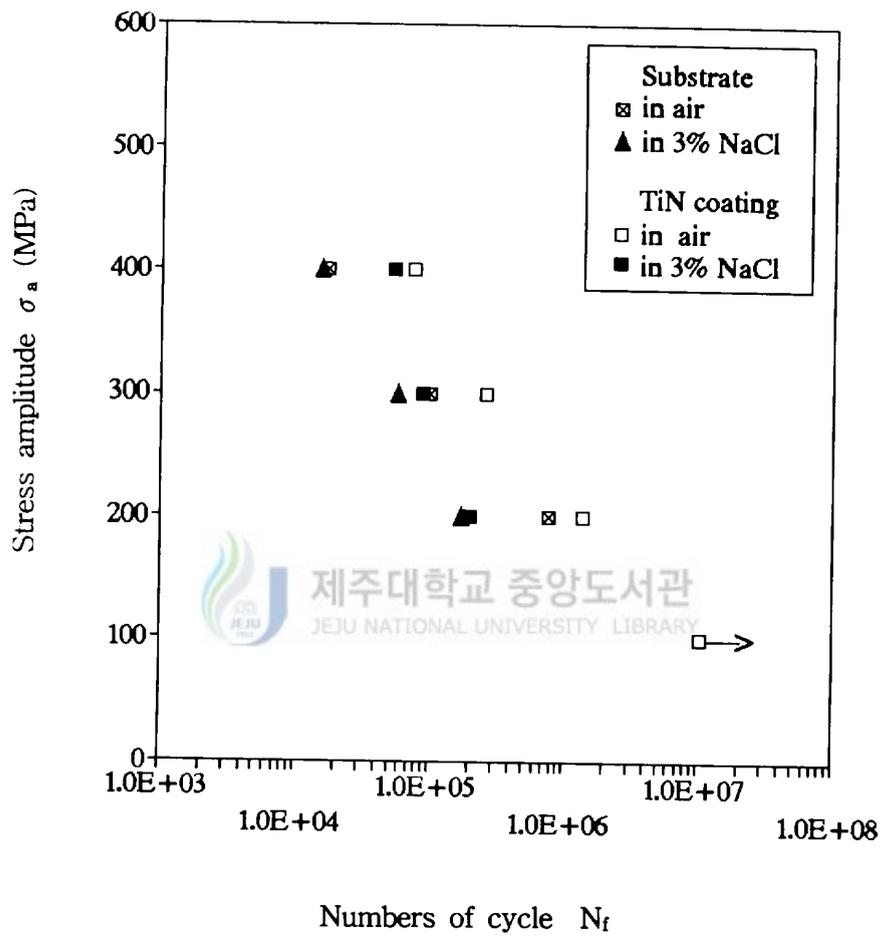


Fig. 5 S-N curve.

되어 파단되기 때문이다.

코팅재의 공기중과 3% NaCl 용액중의 피로 수명을 비교하여 보면  $\sigma_a = 400$  MPa의 고응력역에서는 3% NaCl 용액중의 피로 수명이 공기중보다 조금 저하하지만 부하응력이 감소하면 할 수록 그 저하 정도는 커지며,  $\sigma_a = 200$  MPa에서는 모재의 부식 피로 수명과 거의 같아진다. 이는 3% NaCl 용액중의 피로 수명은 시험편의 표면에 부식 환경에 의해 수많은 부식피트가 발생되어 성장, 합체에 의해 균열이 발생하여 파단되므로 저응력역인 200 MPa에서는 단단한 코팅 피막이 장시간 부식 환경의 작용과 피로 하중의 중첩 작용에 의해 손상되므로 균열 발생 구속 효과가 감소되어 피로 수명이 급격히 저하한다.

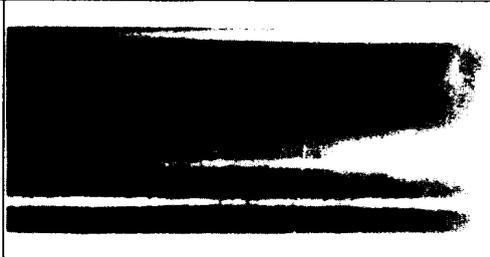
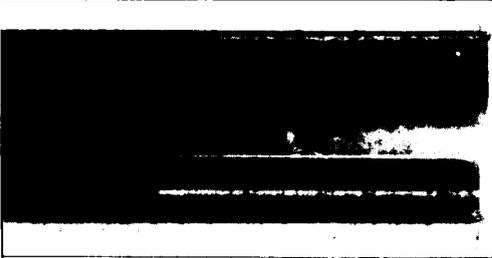
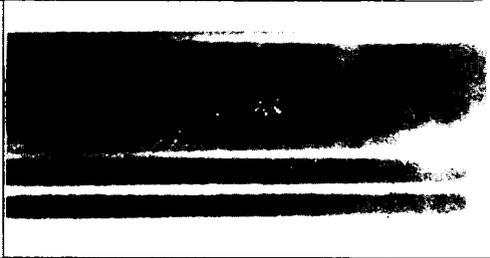
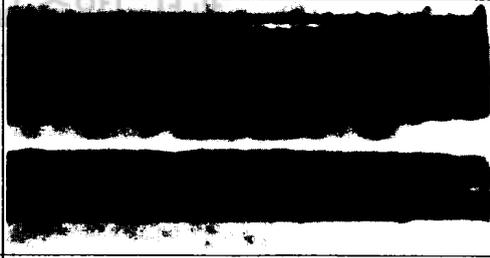
모재와 코팅재의 3% NaCl 용액중의 부식 피로 수명은 고응력인  $\sigma_a = 400$  MPa에서는 코팅재의 피로 수명이 모재보다 큰 차이를 보이고 있으나, 부하응력이 저하하면 그 차이는 감소하며  $\sigma_a = 200$  MPa에서는 모재와 코팅재의 수명이 거의 같아진다. 고응력에서는 코팅재 표면에 균열 발생 구속 효과가 부식 환경에 의한 균열 발생 효과보다 크기 때문에 코팅재의 수명이 모재보다 크며, 저응력역에서는 균열의 발생보다 균열 성장 과정에서 부식 용해에 의해 파괴가 이루어지므로 거의 비슷한 수명을 나타내며, 저응력의 부식 환경에서는 코팅에 의해 부식 피로 강도 및 수명 향상은 기대되지 않는다. 이는 TiN 코팅 탄소강재의 부식 피로 특성에 대하여(鹽澤 등, 1990; 鹽澤 등, 1990) 코팅막의 화학적 안정성에 의한 환경 차단 효과로 균열 발생이 지연되나 피막의 내식성과 결함의 유무에 의해 부식 피로 강도가 지배된다고 보고하고 있는데, 본 연구에서의 저응력역의 경우는 후술하는 것처럼 코팅층의 손상이 커서 코팅 효과를 잃기 때문으로 생각된다.

## 2. 부식피로균열 발생기구

파단시험편의 표면을 금속 현미경에 의해 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 우선 공기중에서 시험한 결과[ Fig. 6(a) ]를 살펴보면 코팅재나 모재의 표면에는 파단에 이른 주균열을 제외한 다른 균열은 전혀 발견할 수 없다. 이는 수명 초기에 표면 취약부에서 미소 균열이 발생, 성장하여 파단에 이른 것을 나타낸다.

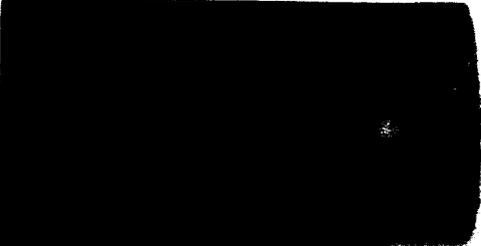
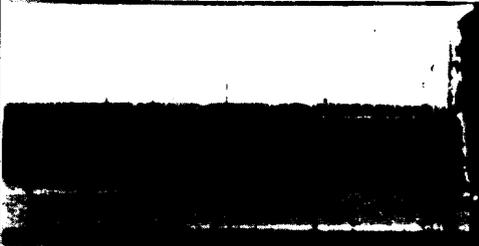
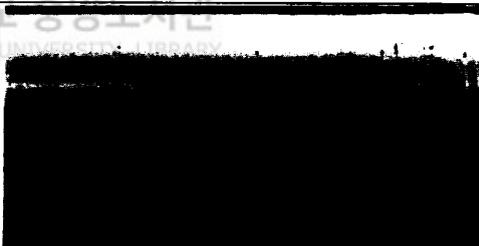
한편 3% NaCl 용액중의 모재와 코팅재의 표면[ Fig. 6(b) ]을 비교하여 보면 모재의 경우 표면이 부식을 하여 작은 부식 피트가 있으며 미소 균열이 관찰되나 소수이다. 이 부식 피트와 균열은 부하응력이 작고 파단수명이 길수록 많다. 코팅재의 경우 부식 피트와 응력축에 대하여 수직 방향인 다수의 긴 균열이 관찰되었다. 이는 코팅층 표면에 부식 환경에 의해 부식 전지가 형성되어 부식 피트가 발생하기 때문이며, 코팅 소재인 TiN은 경도가 큰 취성재료이므로 결합이 발생하기 용이하다. 양자의 요인이 상승 작용을 하므로써 코팅층의 박리 및 파단현상이 발생한다. 이러한 현상으로 인해 환경차단 효과를 잃게 되어 모재가 부식 용해되어 코팅층 두께를 포함하는 부식 피트를 형성한다. 이러한 부식 피트를 기점으로 하여 균열이 다수 발생하고 이들이 합체, 성장되어 파단에 이른 것으로 간주된다. 이는 종래에 보고되고 있는 TiN 피복 탄소강의 경우와 유사하다.

코팅재와 모재의 파단후 단면을 Fig. 7에 나타낸다. 공기중에서 시험한 결과[ Fig. 7(a) ]를 살펴보면 코팅막이 파손된 부분과 코팅막이 모재와 밀착성이 양호하여 피로과정중 파손 및 박리 현상이 발생하지 않는 부분을 보이고 있다. 코팅층이 파손된 부분에서 균열이 관찰되지 않는 점으로 미루어 보아 피로에 의해 피

Substrate specimen	TiN coating specimen
	
$\sigma_a = 200 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 200 \text{ MPa}$
	
$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$
	
$\sigma_a = 400 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 400 \text{ MPa}$

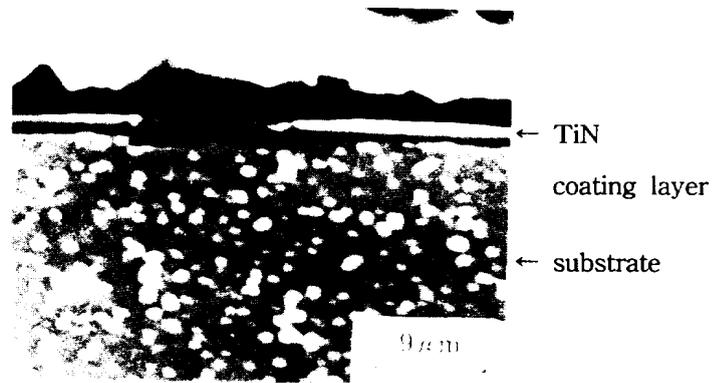
(a) in air

Fig. 6 Macro-photographs of specimen surfaces.

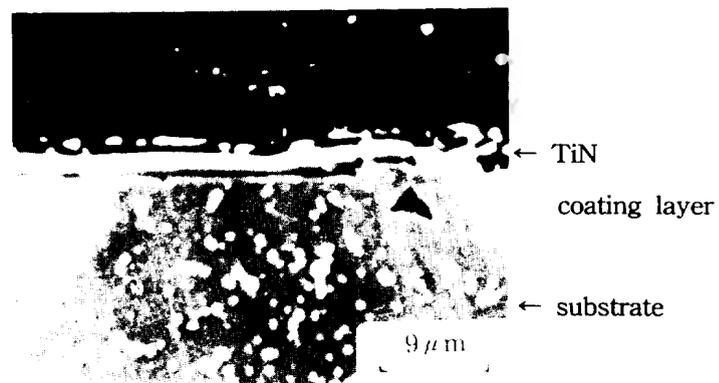
Substrate specimen	TiN coating specimen
	
$\sigma_a = 200 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 200 \text{ MPa}$
	
$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$
	
$\sigma_a = 400 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 400 \text{ MPa}$

(b) 3% NaCl

Fig. 6 Macro-photographs of specimen surfaces.



(a) in air



(b) 3% NaCl

Fig. 7 Failure apparatus of TiN coating layer ( $\sigma_a = 300\text{MPa}$ ).

막에 손상이 생기고 균열 발생의 원인이 되지 않음을 입증한다. 3% NaCl 수용액에서의 결과[ Fig. 7(b) ]는 코팅층이 부식과 피로 하중의 증첩 작용에 의해 피로 과정중 코팅막 자신의 파괴 및 박리 현상이 발생되며 이 코팅막의 손상부에서 균열이 발생함을 나타낸다.

코팅재의 파단후 코팅 표면을 Fig. 8에 나타낸다. 공기중[ Fig. 8(a) ]을 살펴보면 파단된 표면에서는 주균열을 제외한 다른 균열원은 관찰할 수 없으며, 3% NaCl 수용액중[ Fig. 8(b) ]에서는 피트를 기점으로 하여 수많은 균열들을 관찰할 수 있다. 또한 부하응력에 따라 표면의 균열 상태가 차이를 보이고 있는데 저응력으로 갈수록 균열이 길이가 길고 다수 관찰할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 공기중에서는 주균열에 의해 파단되었음을 나타내고 있으며, 3% NaCl 수용액에서는 코팅층 표면이 부식 환경에 의해 부식 용해되어 코팅에 의한 환경 차단 효과가 상실되므로, 코팅층 표면에 피트가 발생, 성장, 합체되어 다수의 균열이 형성되어 파단에 이른 것으로 생각된다.

3% NaCl 수용액에서의 피로시험 후 코팅재의 부식 피트와 그 단면을 Fig. 9에 나타낸다. 코팅 표면[ Fig. 9(a) ]을 살펴보면 코팅층이 부식 환경에 의해 수많은 부식 피트가 발생하였음을 볼 수 있다. 이러한 부식 피트는 코팅 표면이 부식 용해에 의해 코팅막이 파손되어 피트의 발생 및 성장이 이루어지고 있다. 피트의 단면[ Fig. 9(b) ]을 살펴보면 코팅 단면이 손상된 피트를 기점으로 하여 응력축에 수직으로 균열이 다수 발생하였다. 이는 코팅 표면이 부식 환경에 의해 부식 용해되어 모재에 환경 차단 효과를 상실하여 코팅 표면에 발생한 피트를 기점으로 하여 모재에 수직하게 균열이 다수 발생되었음을 나타낸다.



(a) in air



(b) 3% NaCl

Fig. 8 Micro-photographs of surface crack on the TiN coating specimens ( $\sigma_a = 300$  MPa).



(a) Pits of surface



(b) Crack at cross section

Fig. 9 Micro-photographs of pits and cracks ( $\sigma_a = 300$  MPa).

Fig. 10은 코팅 시험편의 3% NaCl 수용액에서 파단된 후 코팅 표면에 조사된 균열 밀도와 부하 응력과의 관계를 나타낸 것이다. 균열 밀도는 시험편 둘레를 6 등분하여 Macro 사진을 찍어 확대한 후 5mm 간격으로 선을 그어 균열이 선과 교차하면 카운터 하여 전체 면적에 대한 균열의 수의 비로 나타낸 것이다. 이에 의하면 저응력인 200 MPa에서 균열의 밀도가 크고 고응력으로 갈수록 작다.

Fig. 11은 3% NaCl 수용액에서 파단된 후 코팅 시험편의 각각의 부하 응력에 대하여 균열 길이와 균열의 수를 나타낸 것이다. 저응력  $\sigma_a = 200$  MPa의 경우 1.1mm의 균열 길이가 많고 0.3mm의 것이 적다. 또한 고응력  $\sigma_a = 300$  MPa과 400 MPa의 경우는 0.3mm의 균열이 많고 1.1mm의 것이 적다. 저응력에서 긴 균열이 많은 것은 장시간 부식 환경의 작용에 의해 코팅층이 파손되고 균열이 발생, 성장, 합체되어 파단에 도달하였기 때문이다.

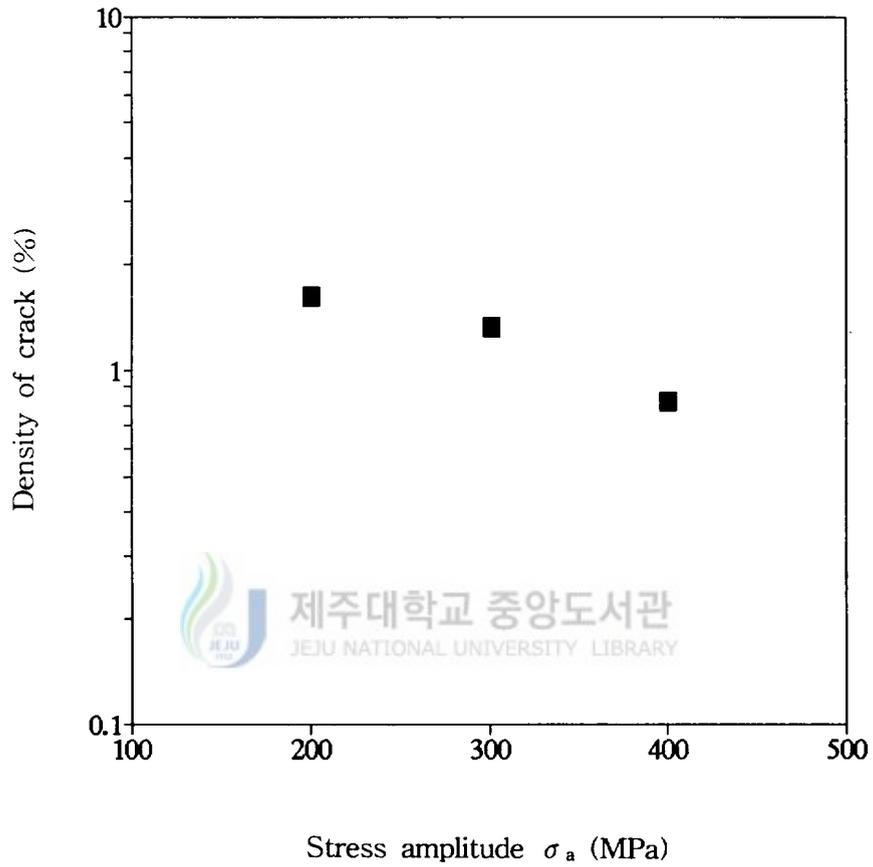


Fig. 10 Relation between density of crack and stress amplitude.

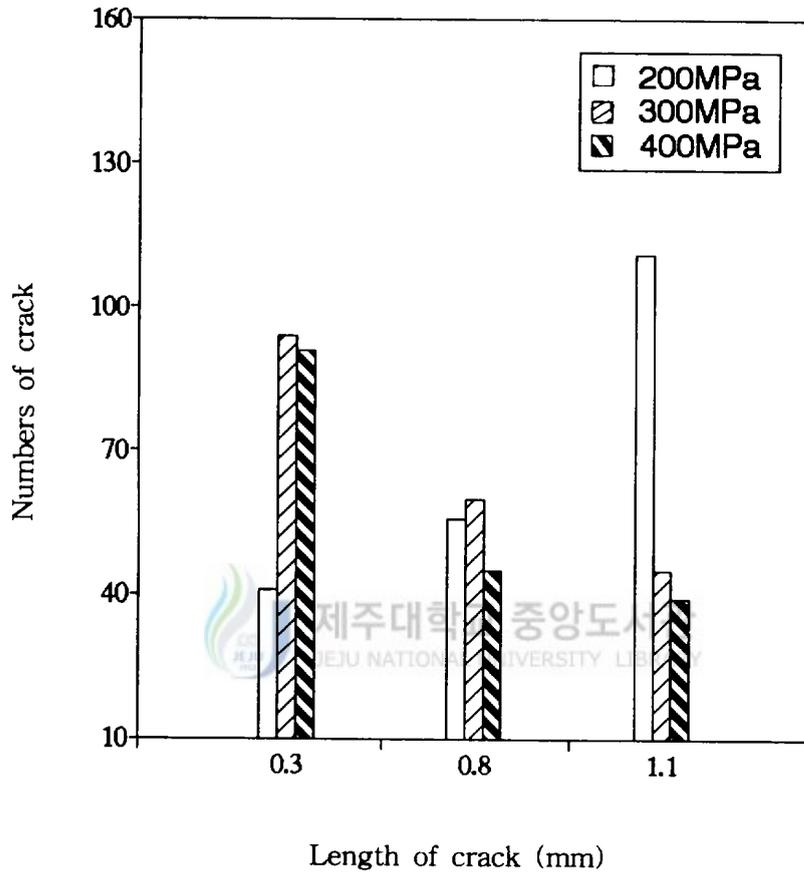


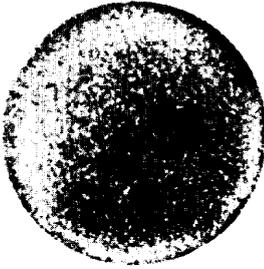
Fig. 11 Relationship between numbers and length of crack.

### 3. 파단면 관찰

Fig. 12는 피로시험후 파단된 면을 관찰한 사진이다. 공기중에서 시험한 결과[ Fig. 12(a) ]를 살펴보면 코팅재와 모재의 파단면의 표면은 평탄하며 부식 피로 파단면에서 발견되는 파단면상의 굴곡부(라체트마크)를 발견할 수 없다. 이는 전술한 바와 같이 코팅층이 피로에 의해 파손된 부분이 생기나 균열 발생의 주원인은 되지 않고 모재의 취약부가 파단의 원인이 됨을 나타낸다.

3% NaCl 수용액에서 시험한 결과[ Fig. 12(b) ]를 살펴보면 코팅재의 경우 파단면의 표면부에서 내부로 파괴 방향이 명확한 라체트마크가 보이며 단차가 큰 것을 알 수 있다. 이는 부식 피로 수명 초기에 시험편 표면의 여러 곳에서 발생한 균열들이 성장, 합체되어 파단에 도달하므로써 생긴 파단선으로 고응력역에 비하여 저응력으로 갈수록 단차가 크며 명확히 발생하고 있다.

피로시험후 코팅재의 파단면을 전자현미경에 의해 관찰하여 Fig. 13에 나타낸다. 공기중[ Fig. 13(a) ]에서는 연성 파괴가 나타났고, 3% NaCl 수용액중[ Fig. 13(b) ]의 파단면이다. 또한 [ Fig. 13(c) ]는 3% NaCl 수용액중[ Fig. 13(b) ]의 파단면을 초음파 세척하여 관찰한 결과, 파단면이 부식 환경에 의해 부식 용해되어 파단되었음을 보여주고 있다.

Condition	$\sigma_a$	Substrate specimen	TiN coating specimen
in air	200 MPa		
	300 MPa		
	400 MPa		

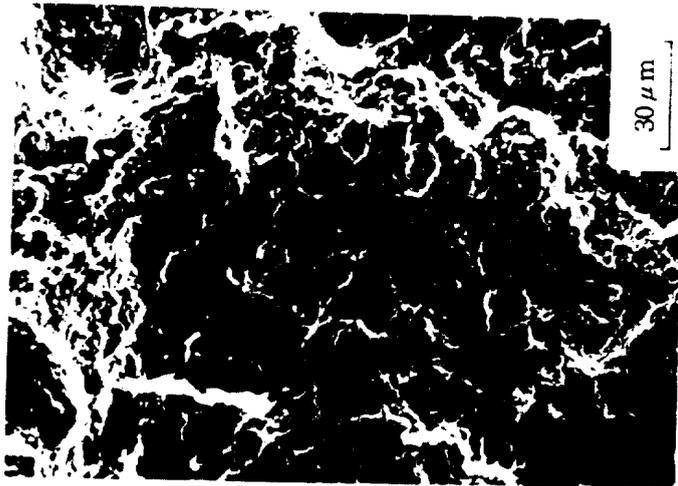
(a) in air

Fig. 12 Micro-photographs of fracture surface.

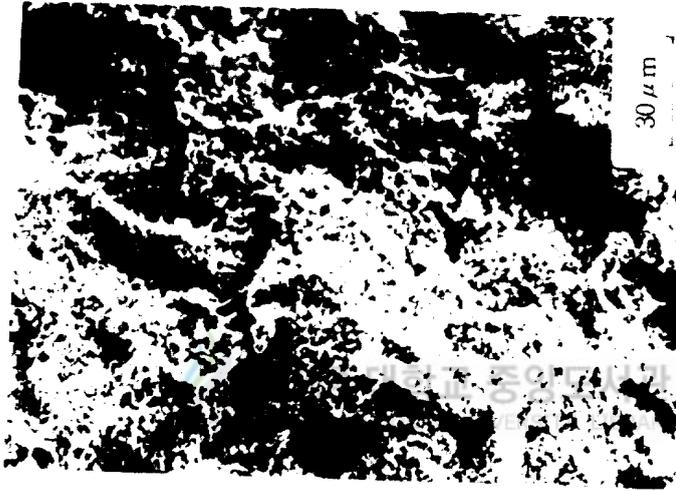
Condition	$\sigma_a$	Substrate specimen	TiN coating specimen
3% NaCl	200 MPa		
	300 MPa		
	400 MPa		

(b) 3% NaCl

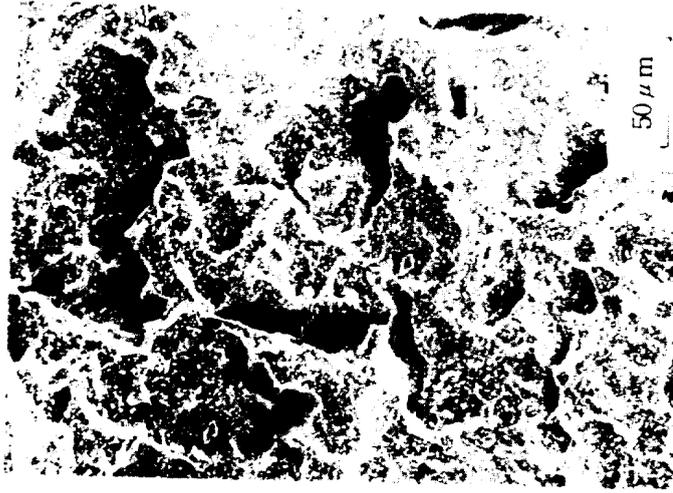
Fig. 12 Micro-photographs of fracture surface.



(a) in air



(b) 3% NaCl



(c) 3% NaCl

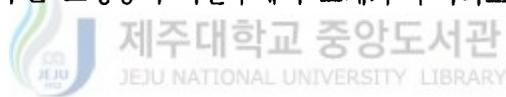
Fig. 13 Fractographs of TiN coating specimens ( $\sigma_a = 300$  MPa).

## IV. 결 론

고속도강 SKH-9에 질화티타늄(TiN)을 PVD 법으로 코팅하여 공기중과 3% NaCl 용액중에서 부식 피로 시험을 행하고 부식 피로 수명과 피로 기구에 대하여 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공기중에서 코팅재의 피로 강도는 단단한 표면 피막의 존재에 의해 모재 표면 근방의 전위의 운동이 곤란하게 되고, 균열발생원으로 되는 표면의 소성변형이 구속되어 모재보다 향상되었으며, 그 수명 향상의 정도는 부하 용력이 클수록 크다.

2. 3% NaCl 수용액중에서 TiN 코팅재의 부식 피로 강도는 부식의 영향이 적은 고응력역에서는 코팅 효과에 의해 모재에 비해 크게 개선되지만, 부식의 영향이 큰 저응력역의 경우는 코팅층의 파손부에서 모재가 부식되므로 코팅에 의한 효과는 없다.



3. TiN 코팅재의 3% NaCl 수용액중에서의 코팅 단면은 부식 환경의 영향에 의해 코팅층이 파손 및 박리된 손상부에서 다수의 부식 피트가 발생되며, 균열은 부식 피트의 저면으로부터 발생하였다.

4. 3% NaCl 수용액중 TiN 코팅재의 부식 피로 균열은 부식 피트로 부터 성장, 합체되어 발생되므로, 그 형상의 크기와 밀도는 부식 환경의 영향이 큰 저응력역에서 상대적으로 고응력에 비해 크다.

## V. 참고문헌

- 天田, 最近の溶射技術, 機械の研究, 43, 10, pp. 1065~1183, 1991.
- T. Oki, High capability Imparting Technique for Industrial Materials by surface Modification, Boshoku Gijutsu, 39, 4, pp. 201~210, 1990.
- D. J. Varacalle et. al, Coating Applied with the plasma-spray process using Ni-Al Powders, ICLASS-91, pp. 113~120, 1991.
- Tashiyuki T., Kazuo H., Akira M., Mutsumi T., "Study of Fatigue Crack Propagation Behavior of Film Materials", 日本機械學會論文集(A編), 59, 563, pp. 1575~1581, 1993.
- 정용수, 백운송, 변용선, 이상로, 항공재료의 표면기술 현황, 機械와 材料, 6, 2, pp. 140~165, 1994.
- Kazuaki S., Seiichi N., Ling H., "Strength Evaluation of Coating Film and Low-Cycle Fatigue Strength of Steel Coated with TiN", 日本機械學會論文集(A編), 60, 569, pp. 9~16, 1994.
- 管野, 八島, 化, 吉村, TiC, TiN, TiCN, TiCNO, CVD 코팅膜の水熱酸化腐食, 材料, 42, 478, pp. 780~783, 1993.
- 鹽澤, 大島, 炭素鋼の腐食疲勞強度に及ぼす窒化チタン被覆の影響, 材料, 39, 442, pp. 958~964, 1990.
- 鹽澤, 大島, 炭素鋼の腐食疲勞強度に及ぼす窒化チタン被覆の影響, 材料, 39, 442, pp. 958~964, 1990.

---

서창민, 김경렬, 권현옥, 세라믹 코팅된 1Cr-1Mo-0.25V 강재의 피로균열의 발생  
성장거동, 대한기계학회논문집, pp. 185~190, 1995.

夏日, 官川, 村松, 高速度工具鋼の引張・壓縮疲勞強度に及ぼす平均應力の影響に關  
する検討, 材料, 37, 417, pp. 606~611, 1988.



## 감사의 글

본 논문을 위해 헌신적인 지도와 격려를 베풀어주신 김귀식 지도 교수님의 은혜에 깊은 감사를 드리오며, 논문 심사과정중 세심한 지적과 조언으로 많은 가르침을 주신 김만수 교수님과 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님께도 감사 드립니다.

아울러 바쁘신 가운데 많은 도움과 격려를 주신 제주공업기술원의 박경석 선배님과 응용역학실험실 여러분, 그리고 대학원생 여러분께 감사드립니다. 또한, 어려운 여건속에서 많은 배려를 해 주신 고경남 선생님, 양순량 선생님 그리고 공과대학 조교 선생님들에게 감사드립니다.

그리고 이 논문이 있기까지 변함없는 관심과 사랑으로 보살피 주신 큰 형님과 형수님께 깊은 감사의 마음을 전하며, 아울러 영순, 명숙, 명희누님과 매형들, 그리고 사랑스런 조카들과 막내동생 경봉에게 기쁨을 나누고 싶습니다.

끝으로 지금까지 물심양면으로 애써 주셨던 작고하신 부모님 영전에 미흡하나마 이 영광을 드립니다.