

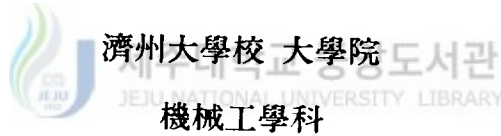
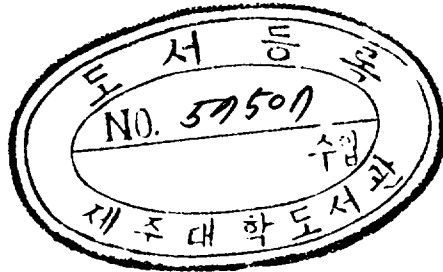
17

681.834

0520

碩士學位論文

Ceramic 溶射材의 機械的 特性
및 疲勞強度



濟州大學校 大學院
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
機械工學科

吳 彰 培

1996年 12月

Ceramic 溶射材의 機械的 特性 및 疲勞強度

指導教授 金 貴 植

吳 彰 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



1996年 12月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

吳彰培의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

印

委 員

印

委 員

印

濟州大學校 大學院

1996年 12月

Mechanical Characteristics and Fatigue Strength of Ceramic-Sprayed Steel

Chang-Bae Oh

(Supervised by professor Gui-Shik Kim)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

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

1996. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	3
II. 재료 및 방법	6
1. 시험편	6
2. 실험장치 및 방법	10
III. 실험 결과 및 고찰	16
1. 용사피막 특성	16
2. 인장 특성	23
3. 피로 특성	26
4. 파단면 및 종단면 관찰	32
IV. 결론	42
V. 참고문헌	43



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

This paper is investigated the microhardness, density, porosity, adhesive strength, tensile strength and fatigue strength of carbon steel S45C with flame sprayed coating layers of Ni-4.5%Al (under-coating) and TiO₂ (top-coating). To study the mechanical and fatigue strengths of the ceramic coating steel, rotary bending fatigue tests have been conducted at room temperature in air and 3% NaCl solution. .

The obtained results are summarized as follows ;

1) The maximum value of microhardness was obtained at 150mm spraying distance, for under-coating specimen and at 70mm spraying distance for top-coating one, respectively, at 800°C heat treatment. The tensile strength of the ceramic coating steel is dependent on only the strength of substrate.

2) Fatigue strengths of the ceramic coating steel in air are decided by strengths of substrate. However, the fatigue strengths can increase by plastic deformation of substrate surface due to blasting and flame spray temperature.

3) The corrosion fatigue strengths of the ceramic coating steel is larger than those of substrate in a low stress region, and will be increased when the

adhesive strength of coating layer is improved.

4) In corrosion fatigue process, corrosion pits are initiated at the interface between the undercoating layer and substrate. Subsequently, cracks are initiated from pits and grow into the substrate.



I. 서론

최근 산업 기술이 발달함에 따라 고온, 부식, 마모 등이 복합적으로 작용하는 가혹한 환경 중에서 사용되는 산업 기계류가 증가하고 있으며, 이러한 가혹한 환경에 종래에 사용되어오던 금속 재료로 대체하기에는 한계가 있으므로 신소재의 개발이 요구되고 있다. 신소재의 보편적인 정의는 재료의 원료를 새로 개발하거나, 종래의 원료에 개선된 제조기술 또는 응용 기술을 적용시켜 종래에 없던 우수한 특성, 기능을 갖게하는 소재라고 한다. 즉, 고 부가가치의 금속, 세라믹스, 폴리머, 복합재료로 총칭하여 신소재 또는 첨단소재(advanced materials)라고 하며, 산업기기의 중요한 기능 소재로서 기계공업의 발전에 필수적이다(朴, 1992).

재료가 사용환경에 직접적으로 관계하는 부분은 표면이므로 기계적 강도가 보장되어 있는 금속 재료의 표면에 내열, 내식, 내마모 등 환경 특성이 우수한 세라믹을 코팅하는 표면 개질이 이종재료의 복합화 기술로서 신소재 개발의 한 분야로 연구되고 있다(서 등, 1996). 재료의 표면성질을 개선시키기 위한 방법으로는 크게 도금법, 화학증착법(CVD), 물리증착법(PVD), 용사법 등이 있는데 이중 용사법은 1910년경 처음 스위스에서 Metallizing process 로 개발되어 미국에서 실용화된 공법으로 금속 및 세라믹, 플라스틱 등의 비금속에 이르기까지 코팅할 수 있는 냉간 공법으로 1971년 항공기 부품의 내열성 향상을 위하여 처음으로 적용하여 현재에 이르고 있다.

용사법은 열원에 따라 플라즈마 용사, 화염 용사로 분류한다. 이중 화염 용사

는 아세틸렌·산소 또는 프로판·산소의 혼합 가스를 열원으로 하며 용사재는 혼합 가스에 의해 용사건 선단에 공급되어 화염과함께 비행하는 과정에서 열에 의해 용착입자로 변화된 후 가공 소재면에 충돌, 부착되어 소재의 표면에 피막을 형성하는 기법으로, 용사에 사용되는 재료는 금속, 세라믹, 플라스틱 등 용융 가능한 거의 모든 재료가 이용될 수 있는데 특히 세라믹은 뛰어난 열적, 기계적 특성으로 인해 그 자체로서도 기계구조물용 재료로 널리 사용되고 있을 뿐 아니라 금속재료와의 복합화에 의한 이종접합 재료 및 봉상 또는 분말상의 용사용 재료로서도 널리 사용되고 있다(溶射 handbook).

세라믹용사는 세라믹이 가진 우수한 내열성 내마모성 및 내식성 등의 성질을 활용하고, 용사법의 특징 즉 소재의 형상과 치수의 제약이 적으며, 두꺼운 피막 형성이 용이하며, 설비구성이 간단하고, 용사작업이 간편하며, 경사를 부여할 수 있는 장점을 갖고 있으므로 공업적으로는 폭넓게 응용이 가능한 방법이다. 그러나 코팅층과 소재간의 낮은 결합력, 계면 박리, 잔류응력 등에 의해 기계적 특성이 저하되는 점등이 문제로 되고 있다(岡部, 1995).

국내에 있어서 용사기술이 응용되기 시작한 것은 불과 10여년전의 일로서, 지금까지의 용사기술은 학문적인 배경이 없이 주로 경험에 의존해 왔다. 앞으로 용사기술이 각종 산업분야에 기계구조용 부재로 이용될 전망이다. 세라믹 용사재를 기계 및 구조 부재에 이용하기 위해서는 용사 피막의 기계적 특성과 반복 부하에 대한 특성, 즉 피로특성의 평가가 필수적이거나 세라믹 용사재의 피로특성은 물론 강도 일반에 관한 학문적인 연구가 적은 것이 실상이다(黃 등, 1993). 따라서 본 연구에서는 기계구조용 탄소강 S45C를 기재(substrate)로 하여 내마모, 내열,

내식성이 우수하고 경도, 인장강도, 굴곡강도가 커서 충격이나 진동 등이 심한 곳에 사용되는 부품의 재료로 적합하며 방적기계의 사도로 널리 이용되고 있는 재료인 산화물계 세라믹인 TiO_2 를 화염용사법에 의해 코팅하여 용사피막 제작과 열처리에 따른 용사피막의 기계적 성질과 용사재의 정적강도 및 피로강도 특성을 검토하였다.



II. 재료 및 방법

1. 시험편

본 실험에 사용된 기재(Substrate)는 기계구조용 탄소강(S45C)이며, 화학적 성분을 Table 1에 나타낸다.

Fig. 1은 실험에 사용된 시험편의 형태와 치수를 나타낸다. S45C 시험편의 전체 길이는 130mm로 하였으며, 표점거리는 50mm이고 직경은 12mm의 소재를 직경10mm로 절삭 후 평행부 8mm의 치수로 CNC선반에 의해 정밀 가공하여 회전 굽힘 피로시험편을 제작하였다. Fig. 1의 사선부는 코팅부를 나타내며, 코팅 두께는 본드코팅은 약 200 μm , 세라믹코팅은 약 100 μm 이다. 코팅 재료는 TiO_2 (티타니아)를, 본드코팅 재료는 Ni-4.5%Al합금을 사용하였다. 코팅에 있어서는 경면 연마한 시험편을 Blasting 처리 후 화염 용사법에 의해 코팅하였으며, 시험편은 용사피막 제작 과정이 강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 아래에 나타낸 5 종류의 회전굽힘 피로시험편을 준비하였다.

BS : S45C를 기계 가공후 Blasting 처리한 시험편

UC : BS재를 본드코팅(Ni-4.5%Al)한 시험편

UCH : UC재를 열처리(800 $^{\circ}\text{C}$)한 시험편

TUC : UC재에 세라믹코팅(TiO_2)한 시험편

TUCH : TUC재를 열처리(800 $^{\circ}\text{C}$)한 시험편

Blasting처리 및 코팅 조건은 Table 2에 나타내며, 피막제작의 각 과정에 대한 코팅층의 종단면 사진을 Fig. 2에 나타낸다.

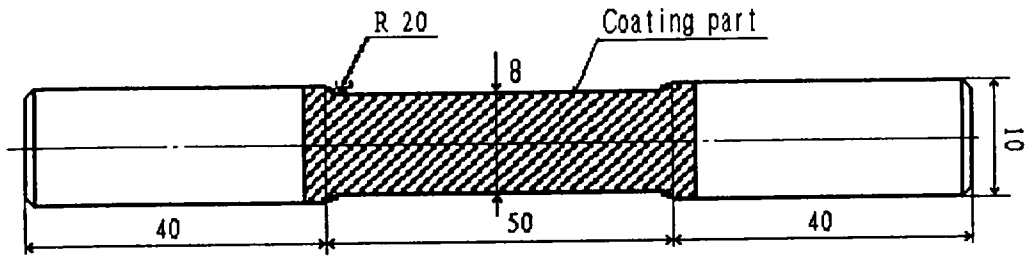


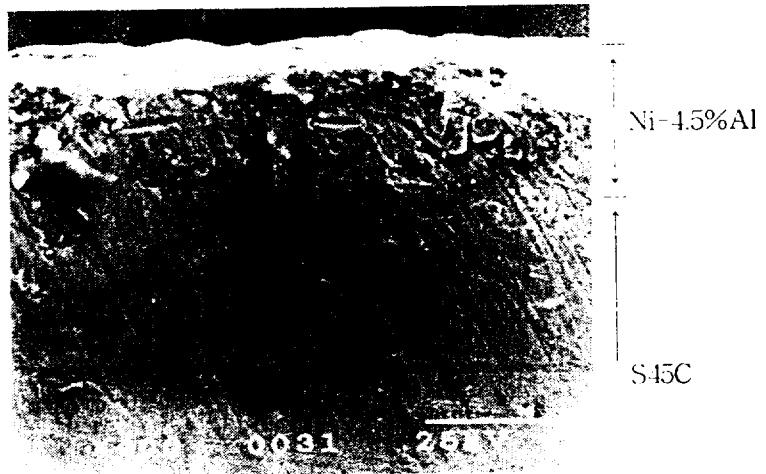
Fig. 1 The shape and dimension of test specimen(unit : mm).

Table 1 Chemical compositions of S45C (wt %).

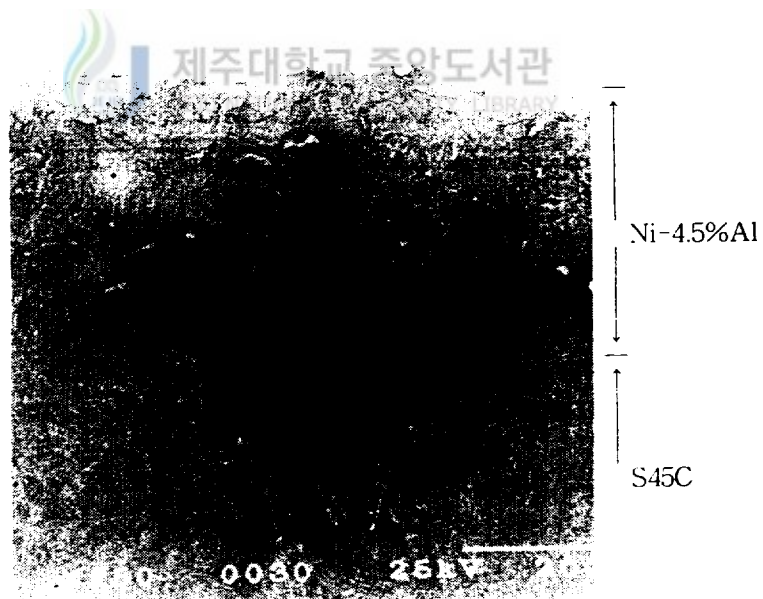
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.21	0.75	0.026	0.013	0.01	0.02	0.13

Table 2 Blasting and spraying conditions.

	Blasting process	Bond coating	Ceramic coating
Material composition	White Alumina	Ni-4.5%Al	TiO ₂
Powder size(μm)	15~53	45~90	10~53
Air pressure(atm)	3		3.7
Distance(mm)	50-100	100~175	70
Speed of specimen(rpm)		250	250

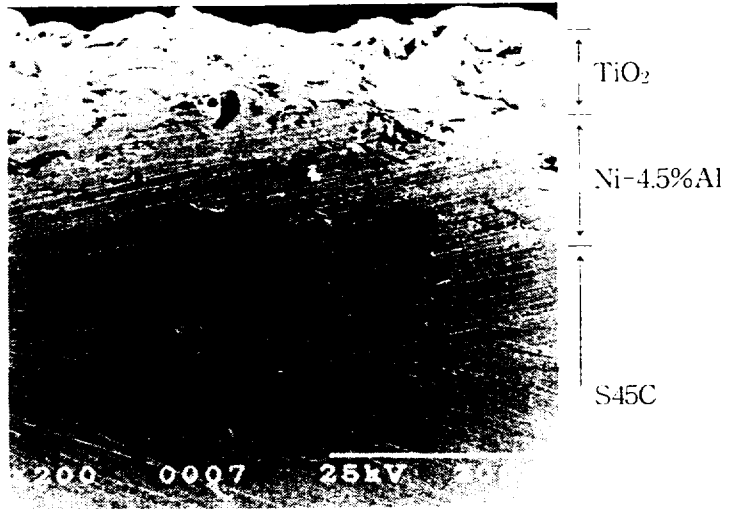


(a) UC

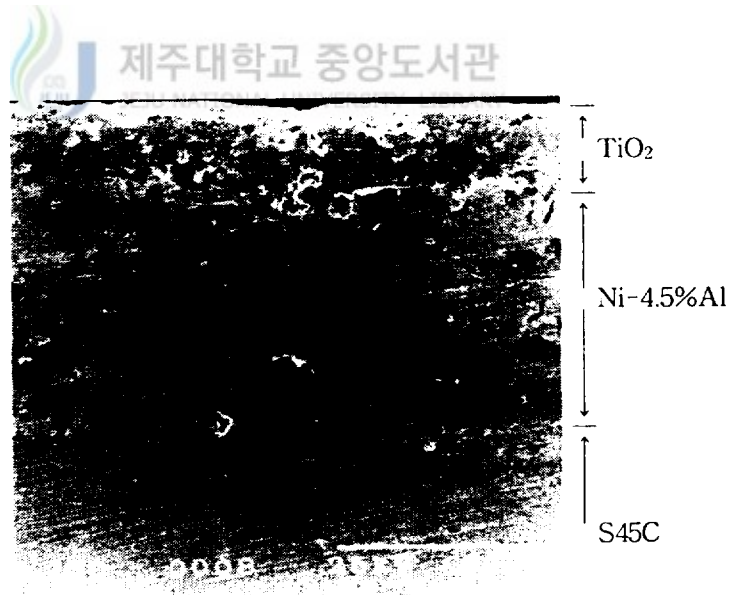


(b) UCH

Fig. 2 Microstructures of coating layer.



(c) TUC



(d) TUCH

Fig. 2 (continued).

2. 실험장치 및 방법

2.1 용사 장치

Fig. 3은 화염 용사 장치의 계통도이며, 용사 실험 장치는 Fig. 4에 나타낸다. 화염 용사는 산소와 연료가스를 열원으로 하여 분말 형태의 용사재료를 코팅하는 기법이다. 연료가스는 주로 아세틸렌이 사용되며 장비에 따라 수소, 프로필렌, 또는 프로판이 사용되는데 화염온도는 약 3100℃이며, 용융입자의 비산속도는 50~60m/s이다(溶射 handbook). 본 실험에서는 아세틸렌을 사용하였다.



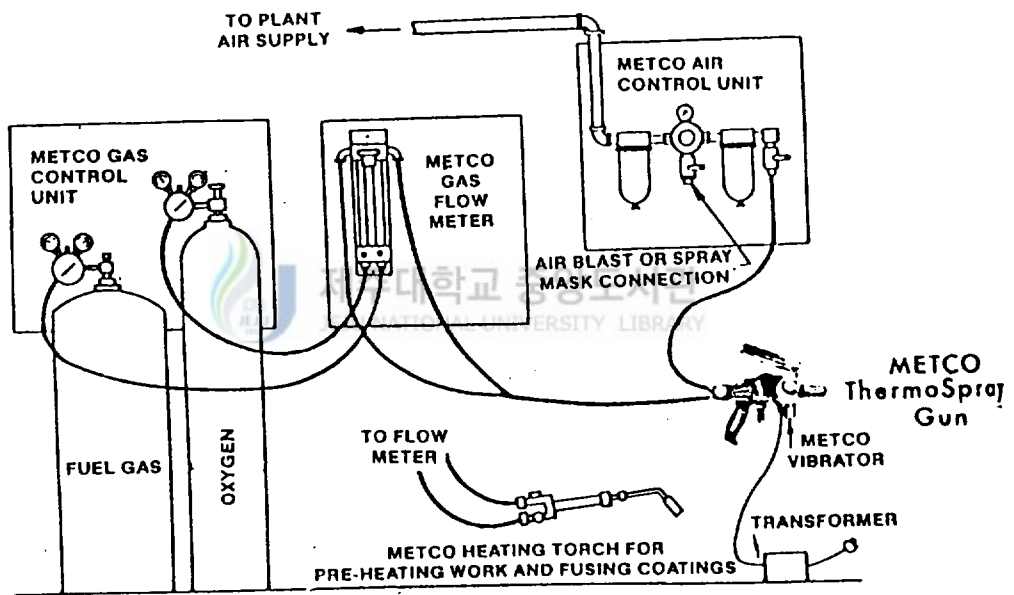


Fig. 3 Installation of thermospray system.

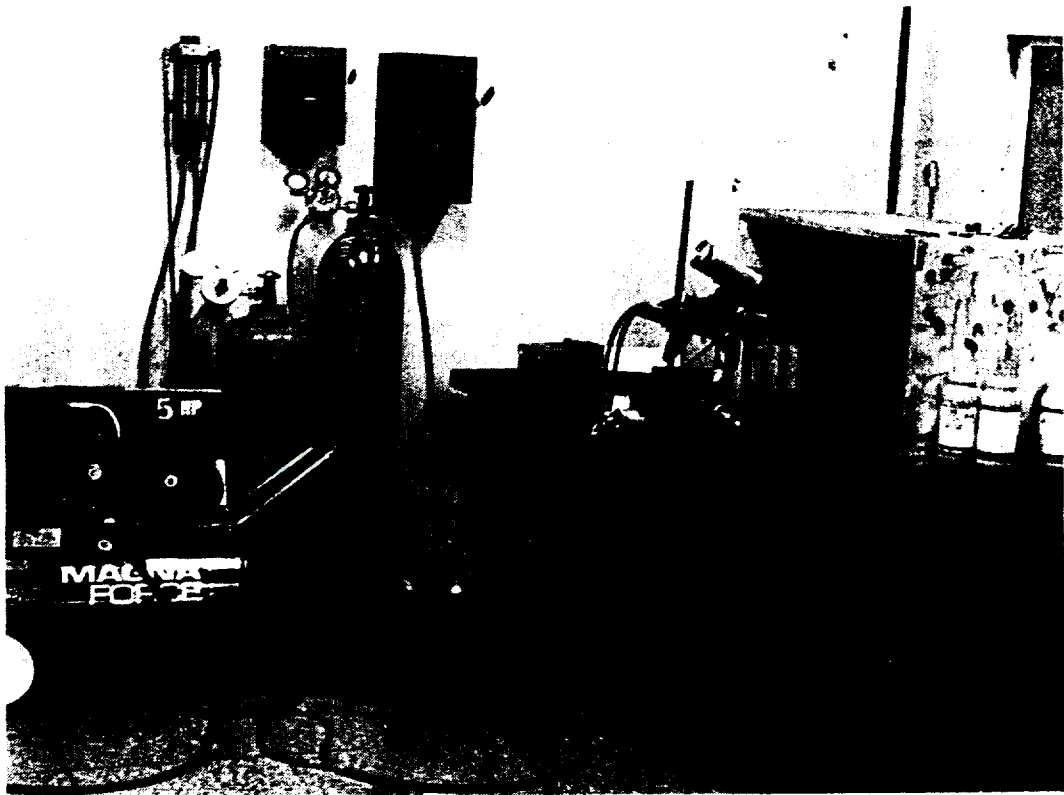


Fig. 4 Experimental apparatus of thermospray system.

2.2 실험방법

2.2.1 용사피막 시험

먼저 용사피막의 제작에 따른 피막특성을 조사하기 위하여 용사거리와, 열처리 온도에 따른 경도, 밀도, 기공도 및 밀착강도를 조사하였다.

1) 경도시험

용사조건이 용착 금속에 미치는 영향과 코팅 금속의 특성을 비교하기 위하여 마이크로 비커스 경도 시험기(Tukon 220, Winson Co.)를 이용하여 500gf의 압자를 용사피막의 단면에 10초동안 눌러 경도를 10회 측정하여 평균값을 측정값으로 하였다.

2) 코팅밀도 및 기공도 시험

용사재의 코팅밀도와 용착 금속내에 함유되어 있는 기공도를 알기 위하여 다음의 방법으로 밀도와 기공도를 조사하였다. 코팅밀도는 {코팅후 시편의 무게(g)-코팅전 시편의 무게(g)} / {코팅후 시편의 부피(cm³)-코팅전 시편의 부피(cm³)} 의 식에 의해 계산하였으며 기공도는 (실제 밀도-코팅밀도)/실제밀도이다.

3) 밀착강도 시험

밀착강도는 직경30mm 탄소강 S45C에 Ni-4.5%Al을 용사해서 Steel bond로 접착한 후 ASTM시험법(633-69)에 의해 시험을 행하였다.

2.2.2 인장강도 시험

인장강도는 UTM(Zwick, Co.)에 의해 크로스헤드속도 10mm/min으로 시험을 행하였다.

2.2.3 피로강도 시험

피로시험은 세라믹 피복강재의 피로강도를 조사하기 위해 회전 굽힘 피로 시험기(제일정밀 Co. 용량 10kg·m)를 이용하여 피로 시험을 행하였다. Fig. 5는 회전굽힘 피로시험기의 형상을 나타낸다. 본 실험에 있어서 하중 반복속도는 15 Hz(900 rpm)이며, 부하 사이클의 경우는 100 : 1의 워엄감속기어를 갖는 카운터로서 측정하였다. 시험기의 본체는 모터, 베어링, 카운터, 프레임 등으로 구성되어 있으며 하중의 조절은 무게추를 사용하여 조절할 수 있도록 되어 있다. 부하시 시험편에 충격이 가해지지 않도록 인버터에 의해 소정의 반복속도(15Hz)까지 서서히 증가시켰다. 실험 환경은 실온 대기과 3% NaCl수용액이며 3% NaCl 수용액은 부식용액의 표준용액으로 ASTM 규격 인공 해수와 부식 특성이 유사함이 보고되고 있으므로 (角田 등, 1987) 해양환경하의 부식 용액으로 간주할 수 있다. 부식 용액의 공급 계통은 아크릴 제작하여 부식의 영향을 배제하였다. 부식 용액은 1주일에 1회 교환하였다. 실험 후 시험 편은 주사형 전자현미경(SEM)에 의해 종단면 및 과단면 근방을 상세하게 관찰하였다.

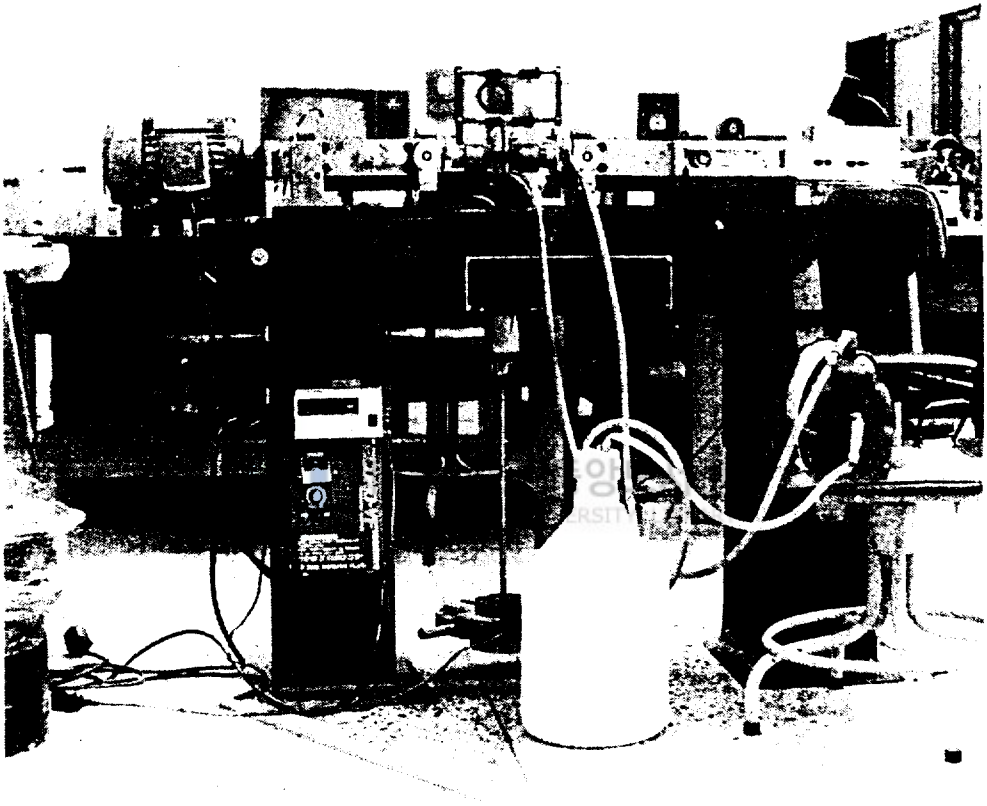


Fig. 5 Experimental apparatus of rotary bending fatigue test.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

1. 용사피막 특성

Fig. 6은 용사거리와 열처리에 따른 본드코팅재의 경도 변화를 나타낸다. 먼저 용사거리와 경도의 관계를 보면 용사거리 150mm일 때 다른 조건보다 높은 경도 값을 나타내고 있다. 용사거리 125mm까지는 용사화염의 온도가 용사 입자의 용점보다 높지만 용사입자가 용사화염에 노출되어 있는 시간이 짧아 완전히 용융될 때까지는 시간이 걸리므로 기재에 용착될 때 퍼짐성이 불량하고 용착입자사이의 결합력도 약해지므로 완전히 용융되어 기재에 용착된 150mm의 경우보다 경도 값이 낮다. 또 용사거리가 175mm에서는 용사화염의 온도는 대기와의 접촉에 의해 용점이하의 온도로 점차 냉각되므로 용사입자는 응고가 시작된 상태에서 기재에 적층되어 피막의 미소경도는 다시 낮아지고 있다. 한편 열처리 온도에 따른 경도의 관계는 150mm, 800℃에서 가장 큰 경도값을 나타내고 있다. 이는 열처리를 하므로써 코팅층의 내부에 존재하는 기공들이 미세화 되고 조직이 치밀해져 재료가 전체적으로 균일하게 되어 경도값이 상승하고 있으며, 金(1991)의 연구 결과와도 좋은 일치를 보이고 있다. 따라서 본드코팅재의 경우 경도 측면에서 볼 때 용사거리는 150mm, 열처리 온도는 800℃일 때 가장 이상적임을 알 수 있다.

Table 3는 BS재, UC재 및 TUC재의 열처리 전후의 경도 변화를 나타낸다. TUC재의 경우 용사거리는 코팅성능에 대단히 민감하므로 70mm로 고정하고 본드

코팅재와 같은 조건에서 열처리를 실시하여 경도를 측정하였으며, 측정한 결과 본드 코팅재와 마찬가지로 800℃에서 가장 큰 경도값을 나타내고 있다. 한편, 열처리 온도가 1000℃일 때 800℃보다 오히려 경도값이 저하하고 있는데 이 원인은 과도한 열응력과 세라믹 결정 격자의 전이로 인하여 코팅층을 구성하는 입자 사이의 결합력이 약해져 세라믹층에 미소균열이 발생하여 경도가 낮아지는 것으로 판단된다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

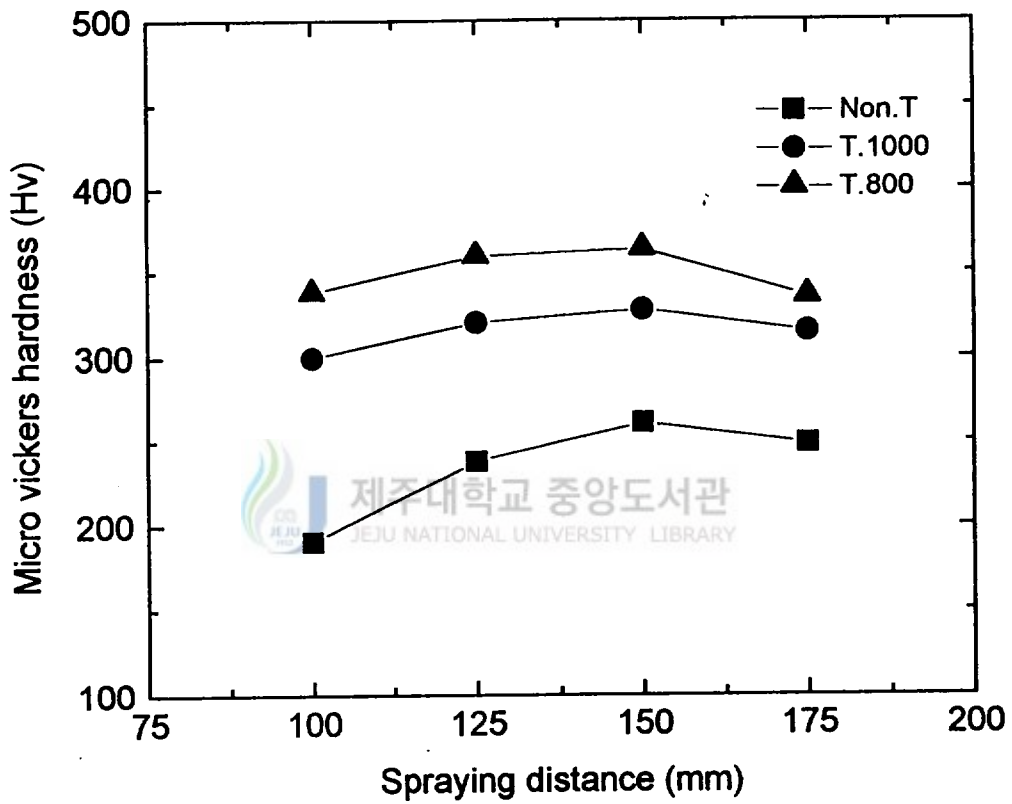


Fig. 6 Microhardness according to spraying distance and heat treatment (under-coating specimen).

Table 3 Microhardness of test specimens after heat treatment.

	Spraying distance (mm)	Hv (in air)	Hv (heat treatment)	
			800 (°C)	1000 (°C)
BS		260	290	280
UC	150	261	363	327
TUC	70	768	999	912

Fig. 7은 UC재의 용사거리별 코팅밀도, Fig. 8은 기공도의 변화를 보여주고 있다. 코팅밀도의 경우 용사거리 100, 125mm일 때 비교적 치밀하며 기공의 함량도 적어지고 있으며 그 이상의 거리에서는 코팅밀도(density)는 점차 떨어지고 기공도(porosity)는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 미소경도 시험에서와 마찬가지로 용사입자가 열원과 접촉하는 시간에 의한 입자의 용융정도 및 용사입자가 기재에 도달, 충돌 및 융착될 때의 퍼짐성에 의해 좌우되고 있다고 사료된다.

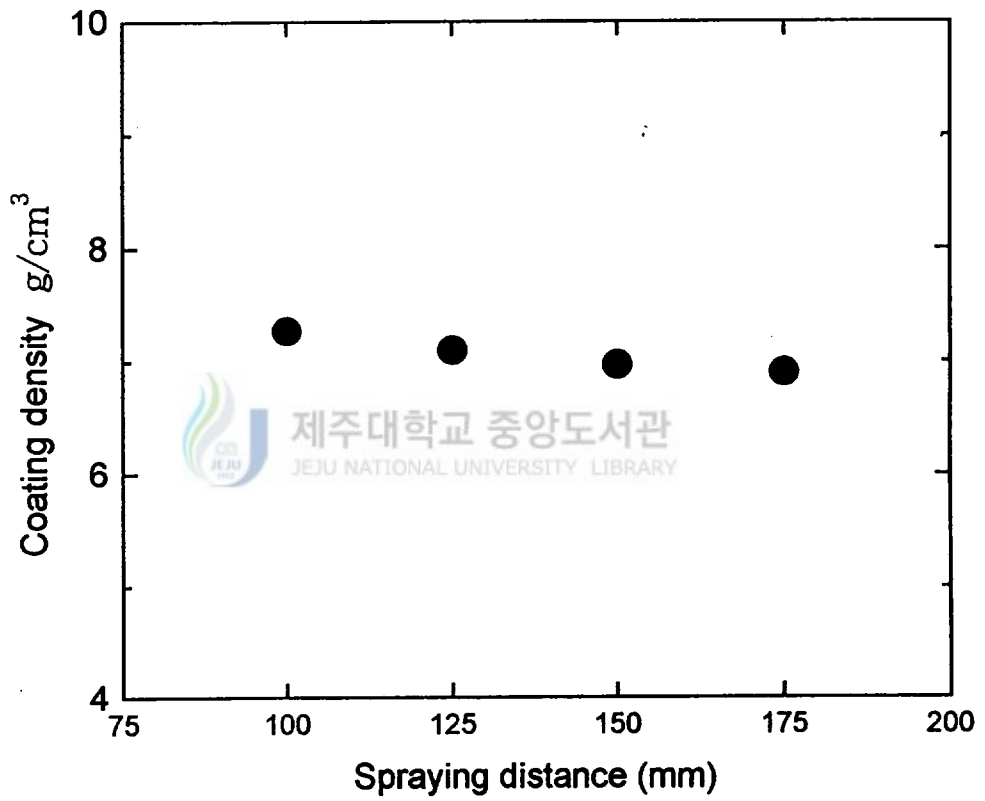


Fig. 7 Variation of coating density according to spraying distance.

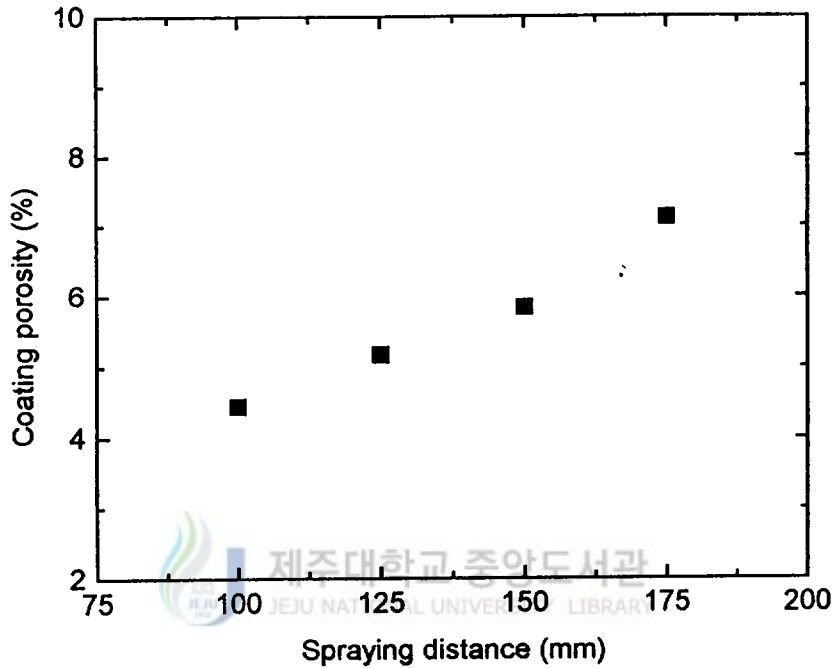


Fig. 8 Variation of coating porosity according to spraying distance.

Fig. 9는 밀착강도 시험시 하중-변위 선도를 나타낸다. UC재의 밀착강도는 13.1 MPa이고 UCH재의 밀착강도는 17.7MPa로 UCH재가 UC재보다 밀착강도는 양호하게 나타났다. 코팅층 단면 모양에서도 알 수 있듯이 열처리를 하지않은 시편보다, 열처리를 행한 시편이 열처리에 의해 소지금속과 본드코팅층 사이의 계면에서 원소의 상호확산에 의한 야금학적인 결합이 이루어져 그 밀착력이 증가되었기 때문인 것으로 사료된다(金, 1996).

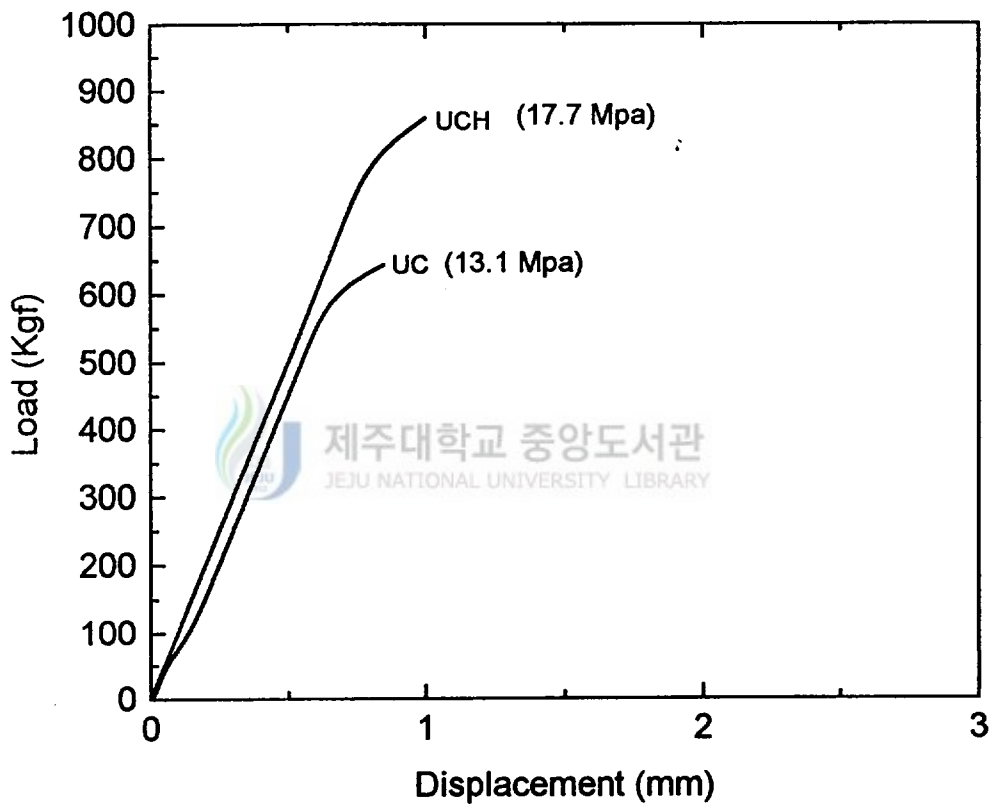


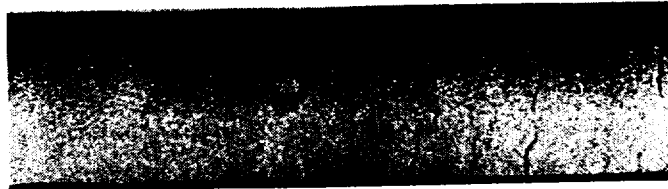
Fig. 9 Adhesive strengths of undercoating specimen.

2 인장 특성

Table 4는 기재 및 용사 공정에 따른 각 용사재의 기계적 성질을 나타낸다. 괄호 내의 수치는 기재의 단면적으로 계산한 값이다. Fig. 10은 인장시험시 코팅 표면의 균열 양상이다. 항복 직전 하중 축과 수직하게 세라믹코팅 표면에 다수의 균열이 발생하였으며 이들의 크기는 변형과 함께 증가하여 최대 하중 직전 코팅층이 기재로부터 완전히 분리, 탈락하였다. Fig. 11은 인장시험시 하중-변형을 선도를 나타낸다. 열처리를 하지 않은 UC재와 TUC재의 인장 강도와 항복 강도 및 연신율은 BS재와 거의 비슷하며 열처리를 행한 UCH재와 TUCH재는 BS재, UC재 및 TUC재보다 강도는 저하하나 연신율은 증가한다. 이 관찰 결과들로부터 세라믹 코팅층은 인장 하중을 부담하거나 경감할 수 없어 실질적인 정적 강도에 거의 기여하지 못하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Mechanical properties of test specimens.

	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_Y (MPa)	Elongation δ (%)
BS	760	675	12.1
UC	722(763)	677(710)	8.3
UCH	691(706)	487(496)	23.7
TUC	710(746)	667(701)	12.2
TUCH	669(704)	485(509)	24.1



Stress direction

Fig. 10 Surface cracks of TUC specimen after tensile testing.

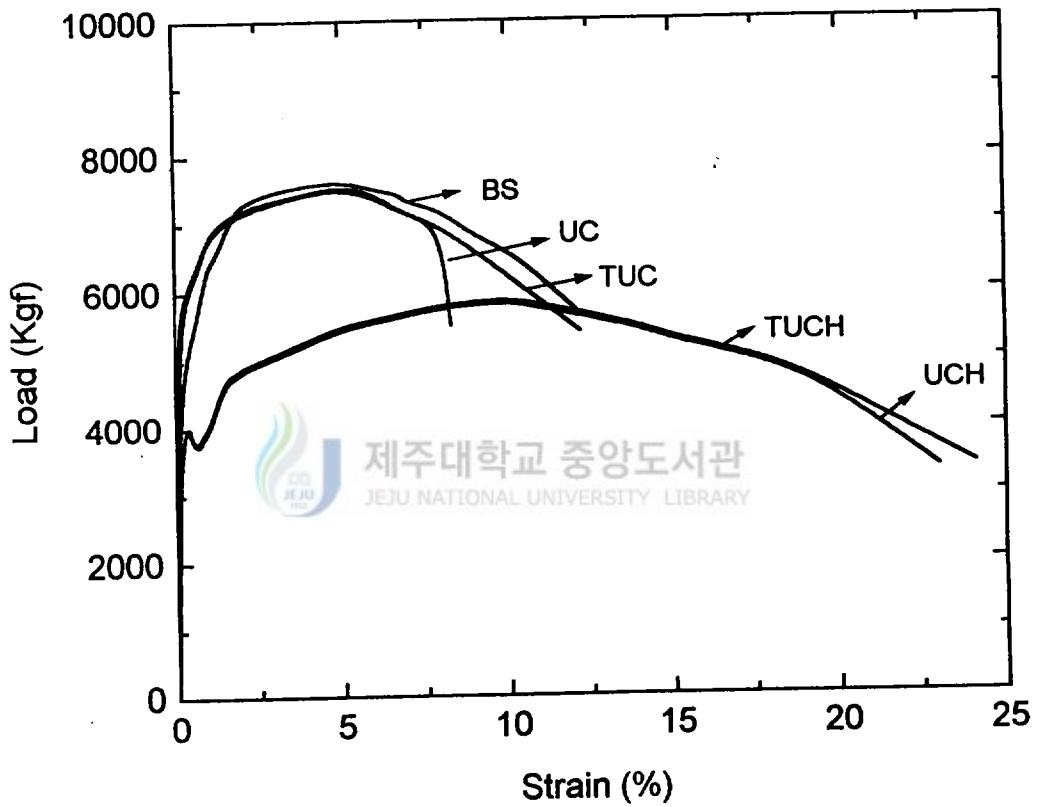


Fig. 11 Tensile characteristics of test specimens.

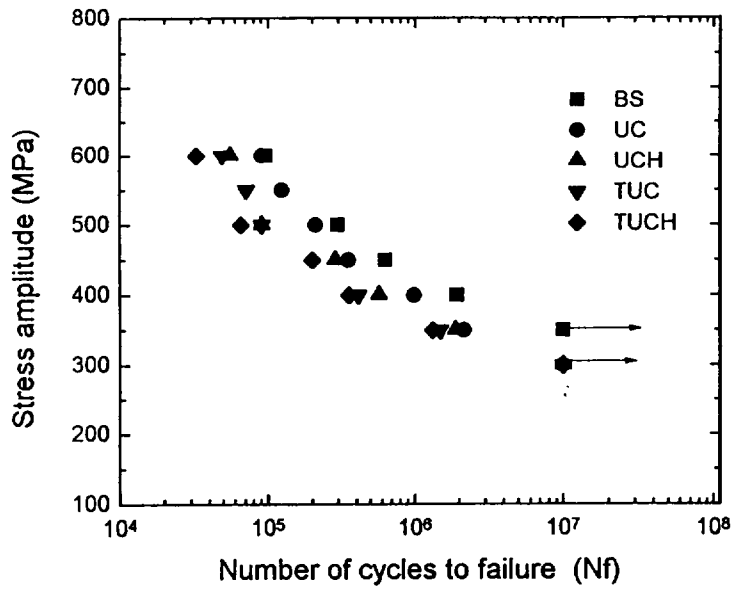
3. 피로 특성

회전굽힘 피로시험에 의해 얻어진 실온 공기 중에서의 S-N선도를 Fig. 12에 나타낸다. (a)는 공기 중에서 코팅층을 포함한 단면적, (b)는 코팅 층을 제외한 기재의 단면적으로 계산한 S-N 선도이다. (a)에서 각 용사재의 피로 강도는 BS재보다 저하한다. 이는 코팅에 의해 단면적은 증가하였으나 코팅층이 기재와 같은 크기의 피로 하중을 부담할 수 없는 점이 주원인이며, 표면 거칠기 효과도 고려할 사항으로 생각된다. 이에 대하여 코팅층을 제외한 단면적에 의해 (b)와 같이 나타내면 UC재는 BS재보다 피로 강도가 상승하며 TUC재는 BS재와 비슷하다. 이는 Blasting 및 코팅에 의해 기재의 표면에 압축잔류응력 및 표면 소성변형의 구속효과가 생기기 때문이다. UCH재 및 TUCH재는 열처리에 의해 압축잔류응력 및 표면 소성변형 구속효과가 소실되고 재료의 연성이 커지므로 가장 낮은 피로 강도를 보이고 있다. 결과적으로 용사재의 경우 Blasting 및 용사에 의해 피로 강도는 약간 향상된다고 판단되나 열처리 재는 표면 소성변형 구속효과를 소실하므로 강도 향상의 면에서 용사재의 열처리의 유무는 신중히 판단되어야 한다.

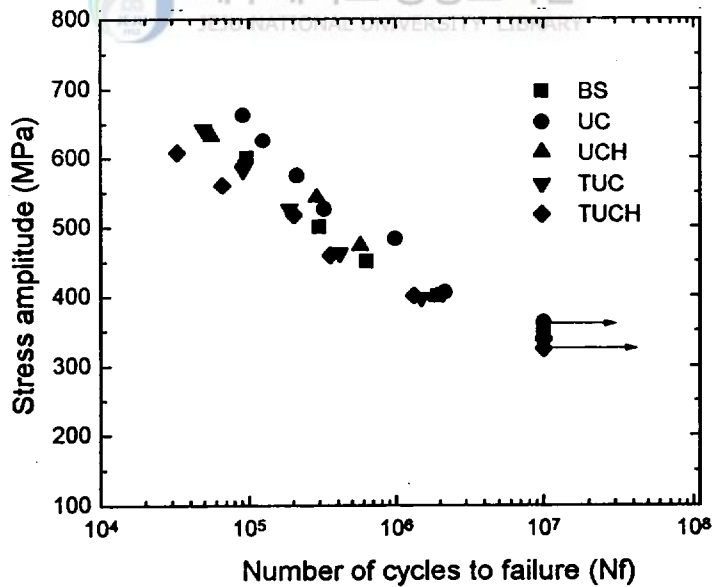
Fig. 13은 3% NaCl 수용액 중에서의 부식 피로 시험의 결과이다. Fig. 13에서도 (a)는 코팅층을 포함한 단면적, (b)는 코팅층을 제외한 기재의 단면적에 대한 응력과 수명을 나타낸다. Fig. 13(a)에서도 Fig. 12(a)와 유사한 경향을 나타낸다. 용사 재는 BS재보다 강도가 저하하나 공기중의 결과보다 그 저하 정도는 작으며 저응력에서는 거의 같다. 그러나 코팅 단면적을 제외한 (b)에서 살펴보면 용사

재의 부식 피로 강도는 BS재보다 향상되고 있으며 Fig. 12(a)에서 피로 강도가 가장 저하했던 TUC재가 Fig. 13(b)에서는 BS재와 거의 같다. 이는 코팅층이 부식 환경을 차단함으로써 기재는 부식 환경으로부터 보호되어 부식 피로 강도는 향상되고 있다. 그러나 피로 과정중에 코팅층의 기공 및 균열로 인하여 환경 차단 효과를 잃음과 아울러 기재와의 낮은 밀착 강도로 인하여 그 효과는 크지 못하다.

부식환경이 피로에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 14에 BS재와 UC재 및 UCH재, Fig. 15에서는 BS재와 TUC재 및 TUCH재의 공기중과 부식피로 시험에 의해 얻어진 S-N곡선을 나타낸다. 부식 피로 강도를 공기 중과 비교하면 350MPa 이상의 고응력에서는 공기 중의 피로강도와 비슷하며, 350MPa 이하의 저응력으로 갈수록 공기중 피로강도 보다 저하한다. 이는 고응력에서는 부식보다 하중의 영향에 의해 파괴에 이르지만 저응력에서는 부식의 영향이 피로 수명을 지배함을 나타낸다(金 등, 1995).

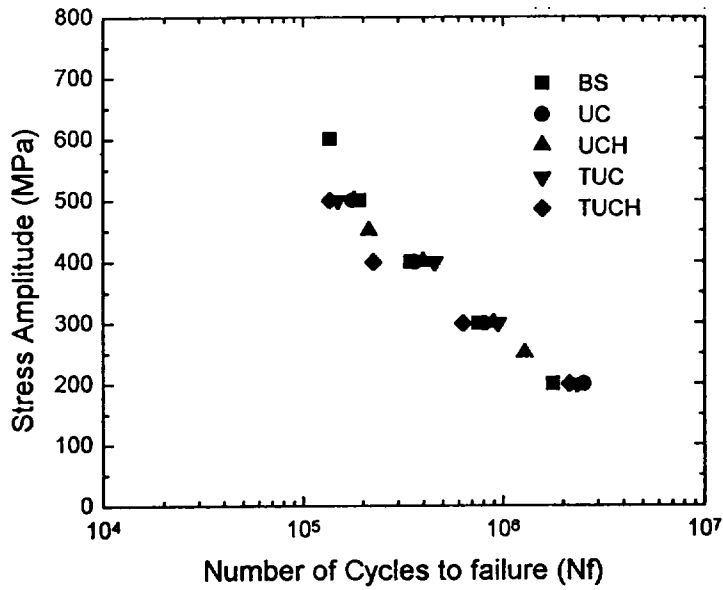


(a) including coating layer

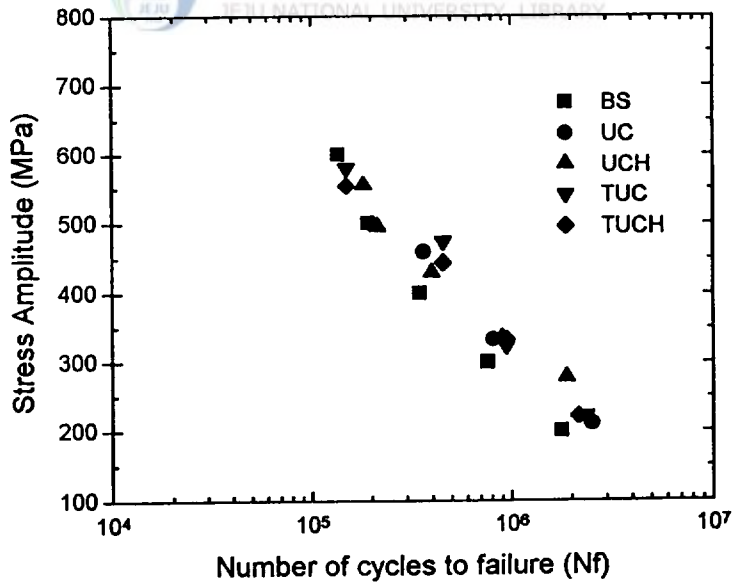


(b) after removing coating layer

Fig. 12 S-N curve of fatigue test in air.

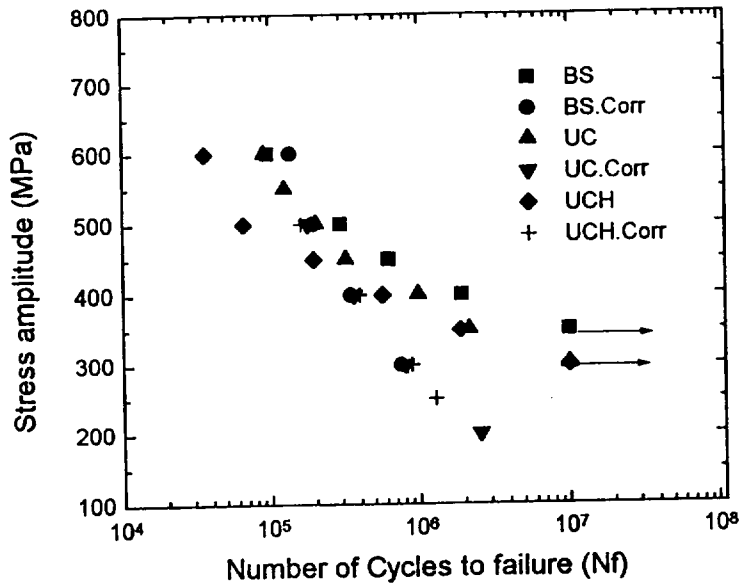


(a) including coating layer

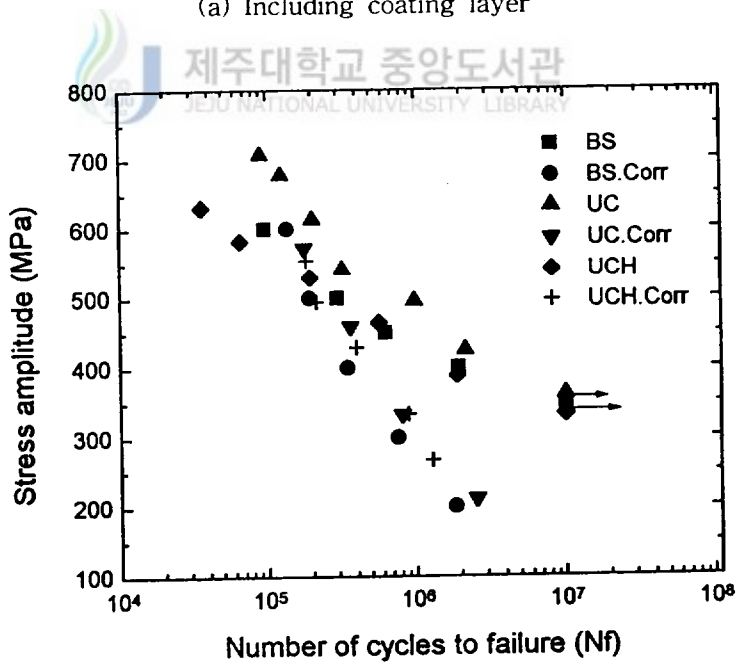


(b) after removing coating layer

Fig. 13 S-N curve of corrosion fatigue test in 3%NaCl solution.

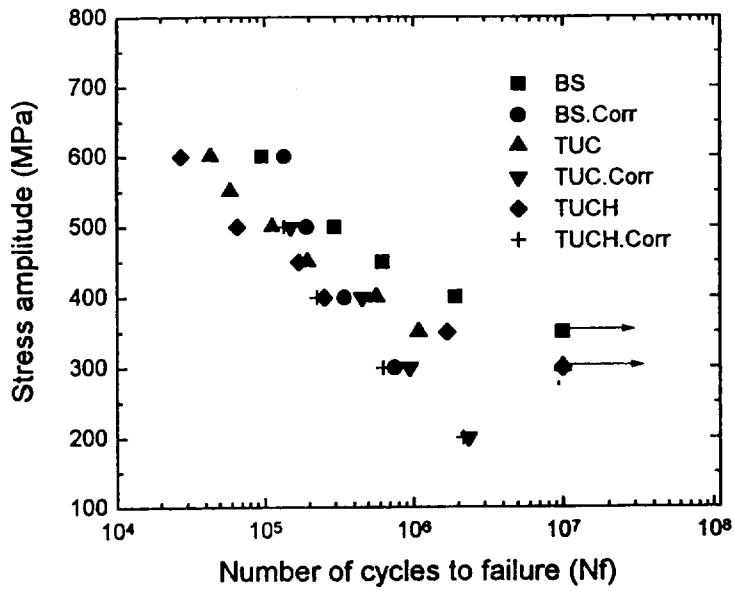


(a) Including coating layer

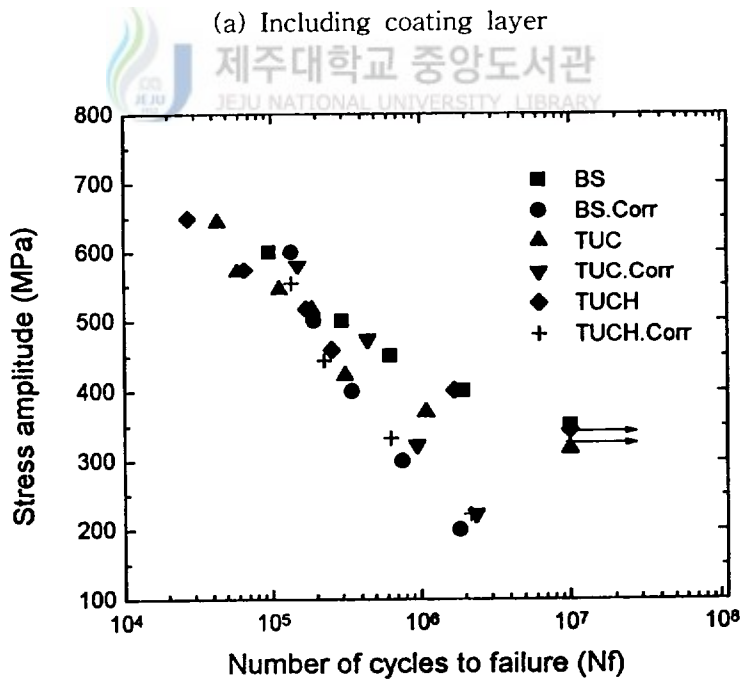


(b) after removing coating layer

Fig. 14 S-N curve of under coating steels in air and in 3% NaCl solution.



(a) Including coating layer



(b) after removing coating layer


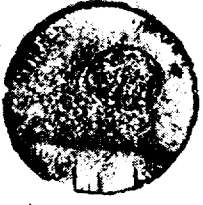
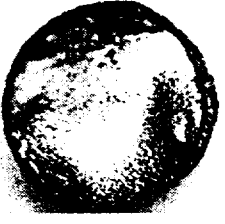

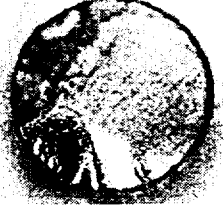




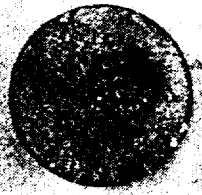


Fig. 15 S-N curve of top coating steels in air and in 3% NaCl solution.

4. 파단면 및 종단면 관찰

4.1 거시적 관찰






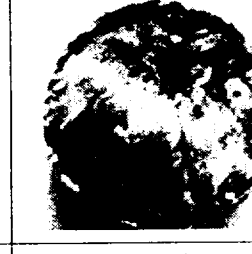
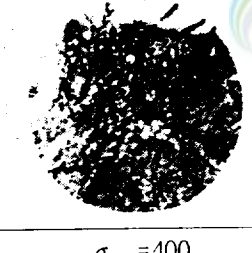
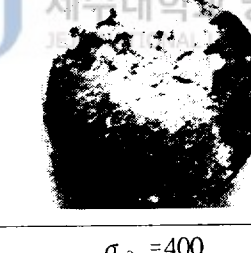
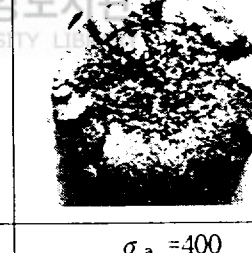
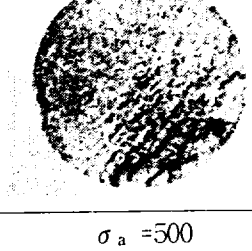
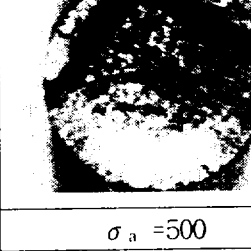
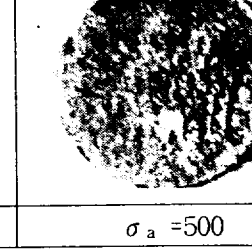
Fig. 16(a)와 (b)는 피로시험후 파단된 면을 관찰한 사진이다. 공기 중에서 시험한 결과(a)를 살펴보면 코팅재와 모재의 파단면의 표면은 평탄하므로 취성과괴로 볼 수 있으며 부식 피로 파단면에서 발견되는 파단면상의 굴곡부를 발견할 수 없다. 이는 전술한 바와 같이 코팅층이 피로에 의해 파손된 부분이 생기나 균열 발생의 주원인은 되지 않고 모재의 취약부가 파단의 원인이 됨을 나타낸다. 따라서 공기중의 피로파괴는 응력의 영향에 의해서 이루어지며 부식환경 하에서 피로파괴는 응력과 환경성분의 상호작용에 의해 파단된다는 것을 알 수 있다(玉井 등, 1995).

3% NaCl 수용액에서 시험한 결과(b)를 살펴보면 코팅재의 경우 파단면의 표면부에서 내부로 파괴 방향이 명확한 굴곡부가 보이며 단차가 큰 것을 알 수 있다. 이는 부식 피로 수명 초기에 시험편 표면의 여러 곳에서 발생한 균열들이 성장, 합체되어 파단에 도달함으로써 생긴 파단선으로 고응력에 비하여 저응력으로 갈수록 단차가 크며 명확히 발생하고 있다. 이는 고응력에서는 부식보다 하중의 영향에 의해 파괴에 이르지만 저응력에서는 부식의 영향이 피로 수명을 지배함을 알 수 있다(後藤 등, 1991). 3% NaCl 수용액중의 파단면을 초음파 세척하여 관찰한 결과, 파단면이 부식 환경에 의해 부식 용해되어 파단되었음을 보여주고 있다.

S45C	Ni-4.5%Al Coating	TiO ₂ Coating
		
$\sigma_a = 400$	$\sigma_a = 350$	$\sigma_a = 350$
		
$\sigma_a = 450$	$\sigma_a = 400$	$\sigma_a = 400$
		
$\sigma_a = 500$	$\sigma_a = 500$	$\sigma_a = 500$
		
$\sigma_a = 600$	$\sigma_a = 600$	$\sigma_a = 600$

(a) in air

Fig. 16 Photographs of fracture surface.

S45C	Ni-4.5%Al Coating	TiO ₂ Coating
		
$\sigma_a = 200$	$\sigma_a = 200$	$\sigma_a = 200$
		
$\sigma_a = 300$	$\sigma_a = 300$	$\sigma_a = 300$
		
$\sigma_a = 400$	$\sigma_a = 400$	$\sigma_a = 400$
		
$\sigma_a = 500$	$\sigma_a = 500$	$\sigma_a = 500$

(b) in 3% NaCl

Fig. 16 (continued).

4.2. 미시적 관찰

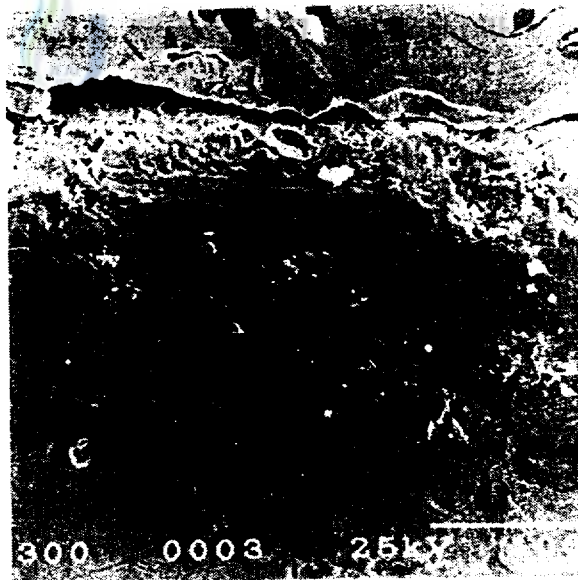
Fig. 17(a)는 공기 중에서 피로시험한 ($\sigma_a=350\text{MPa}$, $N_f=1.1 \times 10^6$) Cycles의 종단면과, (b)는 3% NaCl염수중에서 ($\sigma_a=400\text{MPa}$, $N_f=2.5 \times 10^4$) Cycles에서 파손된 시험편의 파면 근방의 균열 양상이다. 먼저 (a)를 보면 코팅층과 기재사이에서 박리가 발생하고 균열은 기공등의 결함이 원인이 되어 코팅층으로 다수 발생되었음이 관찰되었다. 이들을 중심으로 비교적 광범위하게 기재를 관찰한 결과 기재에는 균열이 확인되지 않았다. 그러므로 코팅층에서 발생한 균열이 기재의 균열과 연결되어 파괴에 이르지 않은 것을 알 수 있다(黃 등, 1994). 종단면을 살펴보면 파단에 이른 주균열을 제외한 다른 균열은 발견할 수 없었다. 이는 기재의 표면 취약부에서 미소균열이 발생, 성장하여 파단에 이른 것으로 사료된다. 즉 용사코팅재의 균열기동은 낮은 결합력 때문에 먼저 층간 박리가 생기고 기공 등의 결함에서 코팅층으로 균열의 발생, 전파에 의해 코팅층은 파괴에 이르지만 기재의 균열 발생에는 영향을 주지 못하는 것으로 사료된다. Fig. 17(b)에서 살펴보면 코팅층이 피로수명의 초기에 기재에서 분리, 탈락하므로 코팅층에 생긴 균열과 용사층에 존재하는 기공 등으로부터 기재의 계면으로 부식수가 침입하여 기재에 부식피트가 발생하고 표면크랙이 생기며 표면크랙들이 균열로 이어져 파단에 이른다. 코팅층은 기재의 파괴용력을 부담, 경감할 수 없기때문에 기재의 균열전파를 구속할 수 없다. 즉 세라믹층에 생기는 균열이 기재의 균열로 성장하는 것이 아니라 기재에서 새로운 균열이 발생하고, 파괴에 이르는 것으로 사료된다. 세라믹 용사재의 피로한도는 기재에 균열 발생 여부에 달려 있다. 따라서 피로수명은 기재의 특성에 의존한다. 코팅층의 피로수명 향상은 높은 계면 결합력에 의

해서 기대되며, 화염용사 코팅재의 낮은 결합력 하에서는 공기중의 피로특성은 기대하기 어렵고 세라믹의 화학적 특성을 이용한 환경차단에 의해 환경피로 수명은 향상될 것으로 사료된다.





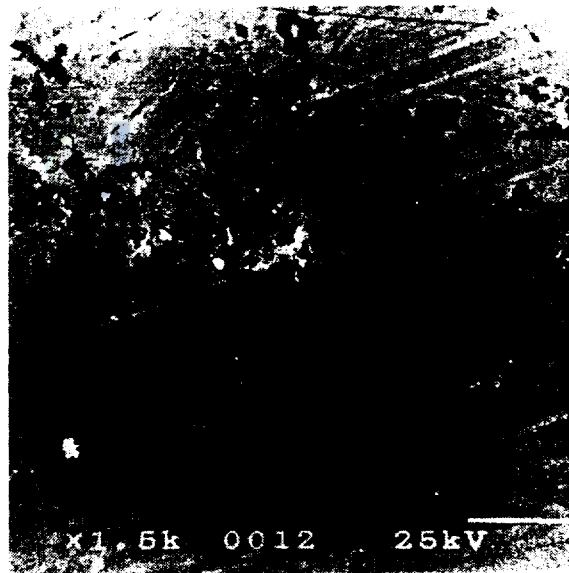
(a) in air ($\sigma_a=350$ MPa, $N_f=1 \times 10^6$ cycles)



(b) in 3% NaCl ($\sigma_a = 400$ MPa, $N_f=2.5 \times 10^4$ cycles)

Fig. 17 Fractographs of ceramic coating steel.

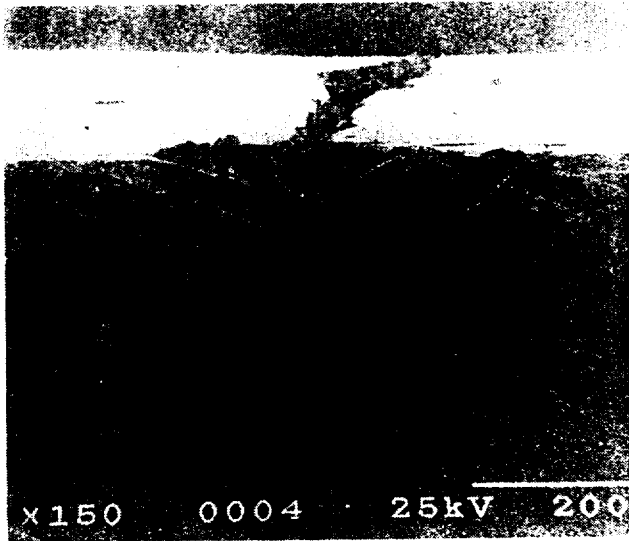
Fig. 17(c)는 용사재의 코팅층과 기재와의 계면 사이에 부식수가 침입한 사진을 나타낸다. 부식수는 코팅층에 생긴 균열과 용사층에 존재하는 기공 등으로부터 기재의 계면으로 부식수가 침입하여 기재에 부식피트가 발생하고 표면크랙이 생기며 표면크랙들이 균열로 이어져 파단에 이른다.



(c) in 3% NaCl ($\sigma_a=200\text{MPa}$, $N_f=2.1 \times 10^6$ cycles)

Fig. 17 (continued).

Fig. 18(a)와(b)는 코팅층을 제거했을 때의 표면그랙이다. 공기중(a)를 살펴보면 파단된 표면에서는 주균열을 제외한 다른 균열은 관찰할수 없으며, 3% NaCl 수용액(b)에서는 부식피트를 기점으로 하여 많은 균열들을 관찰할수 있었다. 이는 공기 중에서는 주균열에 의해 파단되었음을 나타내고 있으며 3% NaCl 수용액에서는 코팅층 표면이 코팅층의 기공과 부식환경에 의해 부식용해되어 코팅에 의한 환경차단 효과가 상실되므로 기재표면에 피트가 발생, 성장 함체되어 다수의 균열이 형성되어 파단에 이른 것으로 사료된다.



(a) in air ($\sigma_a=450\text{MPa}$, $N_f=2.2 \times 10^4$ cycles)



(b) in 3% NaCl ($\sigma_a=400\text{MPa}$, $N_f=4.5 \times 10^5$ cycles)

Fig. 18 Pits and cracks at surface after fatigue tests.

IV. 결 론

기계구조용 탄소강 S45C에 금속분말 Ni-4.5%Al과 세라믹 TiO_2 를 화염 용사법에 의해 세라믹 용사재를 제작하여강화 열처리에 따른 용사피막 특성과 용사재의 기계적 성질 및 부식 피로강도에 대해 검토한 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세라믹 용사재의 경도(Hv)는 용사거리가 본드코팅재의 경우 150mm, TiO_2 의 경우 70mm 에서 800℃로 열처리를 했을 때 가장 좋은 값을 보였다. 그리고 용사재의 인장특성은 코팅층이 인장하중을 부담하거나 경감 할 수 없어 인장강도는 개선되지 않고 기재의 인장 특성에 의존하므로 실질적인 정적 강도에 거의 기여하지 못하고 있다.
- 2) 세라믹 용사재의 공기 중 피로 강도는 기본적으로는 기재의 특성에 의해 결정되나 Blasting 블라스팅 처리와 코팅층의 표면 소성변형 구속효과에 의해 약간 개선된다.
- 3) 세라믹용사에 의한 부식 피로 억제 효과는 저응력으로 갈수록 효과가 크며 부식 피로 억제 효과는 밀착 강도의 개선에 의해 더욱 효과가 클 것이다.

4) 세라믹 용사재의 공기 중 피로 파괴는 코팅층과 기재사이에서 층간 박리가 생기고 피막 결함들에 의해 코팅층에 균열이 발생하나 기재의 균열 발생은 구속하지 않고 기재에서 새로운 균열이 발생하여 파괴된다. 그리고 부식피로 파괴는 피막의 기공과 균열에 부식 수가 침입하여 기재에 부식피트가 발생하고 균열의 발생, 성장을 촉진하여 파괴에 이른다.



참고문헌

- 黃貞雄 小川武史 戶梶惠郎, 1993. 세라믹溶射材의 疲勞強度와 破壞機構, 日本機械學會論文集(A編), 60, 570, pp. 90-99.
- 黃貞雄 小川武史 戶梶惠郎, 1994. 세라믹溶射材의 腐食環境における 疲勞強度および 破壞機構, 日本機械學會論文集(A編), 59, 563, pp. 90-94.
- 金貴植 玄暲樹, 1995. TiN被膜剛材의 腐食疲勞強度特性, 韓國舶用機關學會誌 19, 3, pp. 240-248.
- 金永植外, 1991. 세라믹 溶射皮膜의 強度向上에 관한 研究, 大韓鎔接學會誌 9, 9, pp. 18~25.
- 金永植, 1996. 알루미나 세라믹(Alumina Ceramic) 코팅층의 機械的인 特性和 殘留應力の 解析에 관한 研究, 韓國海洋工學會誌 10, 20, pp. 88-97.
- 後藤眞宏外, 1991. 3%食鹽水中における S45C調質材의 疲勞舉動에 關する 統計的性質, 日本機械學會論文集(A編), 57, 543, pp. 270-32.
- 後藤眞宏外, 1991. S45C 調質材의 疲勞舉動에 關する 統計的性質, 日本機械學會論文集(A編), 57, 539, pp. 11-16.
- 文秀中, 1994. 亞鉛被覆鋼材의 腐食疲勞特性, 碩士學位論文, 濟州大學校大學院, pp. 27-35.
- 增田千利外, 1984. S45C, SCM435鋼의 回轉曲げ 腐食疲勞破壞機構, 日本機械學會論文集(A編), 50, 453, pp. 1019-1025.
- 岡部永年, 1995. 세라믹즈의 材料開發.適用技術에 關하여 信賴性評價.解析의 動向,

- 日本機械學會論文集(A編), 61, 589, pp. 1864-1871.
- 日本溶射學會, 溶射 handbook, pp.461-541.
- 朴順子, 1992. 새로운 技術에 대한 國內.外洞向, 月刊세라믹 51, pp. 25-33.角田,
- 鹽澤和章外, 1993. PVD法によるTiN被覆炭素鋼の 低サイクル疲勞試験, 日本機械
學會論文集, 59, 559, pp. 237-244.
- 서창민, 허정훈, 남승훈, 1996 시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V 강의 고온하의 회전
굽힘 피로강도에 관한연구, 대한기계학회논문집, 20, 9, pp. 2819-2832.
- 角田, 西島, 1987. 人工海水自然海水 3.5%NaCl.水中 腐食特性, 鐵鋼の環境強度部
會, 38, pp. 540-545.
- 玉井富士夫, 平野一美, 1995. アルミナセラミック接合体の靜的強度と疲勞特性, 日
本機械學會論文集, 61, 590, pp. 19-25.
- W. E. Ballard, 1963. Metal Spaying and the Flame Deposition of Ceramics
and Plastics, 2, Griffin.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 성심으로 지도하여 주신 김귀식 교수님께 감사를 드리오며, 논문 교열을 위하여 애써 주신 권기린 교수님과 임종환 교수님, 그리고 세심한 지적과 조언으로 항상 관심을 갖고 격려해 주신 허종철 교수님과 현명택 교수님께도 감사 드립니다.

아울러 본 연구 기간중 항상 옆에서 많은 어려움을 같이 해결하여 주시고, 많은 도움을 주신 오맹종 선생님, 김성익 선생님, 박경석 선배님, 그리고 대학원생 여러분께 감사 드립니다.

한편, 바쁘신 가운데 많은 도움을 주신 제주 중소기업 사무소 관계자 여러분과, 해양연구소의 강태연 연구사님께도 감사 드립니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 성심으로 뒷바라지를 하여주신 부모님과 진생, 영생누님 그리고 동생 형주와 사랑하는 해숙에게 감사드리며 오늘이 있기까지 정성과 사랑으로 보살펴 주신 모든 분들께 이 작은 결실을 드립니다.