

세라믹 용사된 S45C강재의 기계적 특성 및 피로강도

오 맹 종* · 오 창 배* · 김 귀 식**
(97년 8월 4일 접수)

Mechanical Characteristics and Fatigue Strength of Ceramic-Sprayed S45C Steel

Maeng-jong Oh* · Chang-bae Oh* · Gui-shik Kim**

Key Words : Ceramic-sprayed steel(세라믹 용사재), Mechanical properties(기계적 성질), Corrosion fatigue strength(부식 피로강도), Heat treatment(열처리), Rotary bending fatigue test(회전굽힘 피로 시험)

Abstract

This paper is to investigate of microhardness, adhesive strength, tensile strength, and fatigue strength of ceramic sprayed steel. Rotary bending fatigue tests have been conducted at room temperature in air and 3% NaCl solution using specimens of carbon steel(S45C) with sprayed coating layers of Ni-4.5%Al(under coating) and TiO₂ (top coating). The microhardness has been improved at 800°C heat treatment and 150mm spraying distance. Tensile strength of the sprayed steel is dependent on the substrate strength. The fatigue strength of the sprayed steel is larger than that of substrate due to blasting and constraint surface of plastic deformation effect. In low stress level, the corrosion fatigue strength of the sprayed steel were lower than that of fatigue strength in air by corrosion

1. 서론

최근, 기계 및 구조물이 점점 가혹한 환경이나 조건하에서 작동이 요구됨에 따라 이들의 구성부재 표면에 소재와는 다른 특성을 부여해서 환경을 극복하는 방법으로 표면개질기술이 주목되고 있다. 그 중에서도 세라믹 용사코팅은 세라믹이 지닌 우

수한 내열성, 내마모성 및 내식성 등의 성질을 활용함과 아울러 소재형상의 제약이 적고, 두꺼운 피막형성이 용이하며, 설비 구성이 간단하고, 용사작업이 간편하며 경사기능(functionally gradient)을 부여할 수 있는 특징을 갖고 있으므로 공업적으로 폭넓게 응용이 가능한 방법이다.¹⁾

이제까지의 세라믹 용사는 주로 내열성 내마모

* 제주대학교 대학원

** 정회원, 제주대학교

성 및 내식성 등의 개선을 목적으로 이용되고 있으나 코팅층과 소재사이의 낮은 결합력, 계면박리, 잔류응력 등에 의해 기계적 특성이 저하되는 결점을 가지고 있다. 금후 세라믹 용사재를 기계 및 구조부재에 이용하기 위해서는 용사 피막의 기계적 특성과 반복부하에 대한 특성, 즉 피로특성의 평가가 필수적이나 세라믹 용사재의 피로특성은 물론 강도 일반에 관한 학문적인 연구가 적은 것이 실상이다.²⁾

따라서 본 연구는 탄소강 S45C를 모재로 세라믹 용사코팅재의 강도특성 평가를 목적으로 용사과정에서 발생하는 피로강도의 영향인자를 파악하고 용사피막의 제작 및 열처리에 따른 용사피막 특성과 용사코팅재의 정적강도 및 피로강도 특성을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 모재(substrate)는 기계 구조용 탄소강 S45C이며 그 화학 성분을 Table 1에 나타낸다. 시험편은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 직경10mm의 봉재를 표점부 직경 8mm로 CNC선반에 의해 가공하고 블라스팅처리를 한 후 본드코팅분말 Ni-4.5%Al과 세라믹분말 TiO₂를 화염용사장치(5P-II, Metco Co.)에 의해 용사하여 다음과 같이 인장 및 피로시험을 위한 5종류의 코팅시험편을 제작하여 각각 BS, UC, UCH, TUC, TOUCH라 칭하기로 하였다.

- BS : 기재에 Blasting 처리한 시험편
- UC : BS재에 본드코팅(Ni-4.5%Al)한 시험편
- UCH : UC재를 열처리(800℃)한 시험편
- TUC : UC재에 세라믹코팅(TiO₂)한 시험편
- TUCH : TUC재를 열처리(800℃)한 시험편

코팅두께는 본드코팅의 경우 약 200 μ m, 세라믹코팅의 경우 약 100 μ m로 하였으며 블라스팅 및 용사 조건은 Table 2에, 용사된 코팅재의 단면은 Fig. 2에 각각 나타내었다.

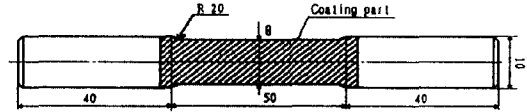


Fig. 1 The shape and dimension of test specimen(mm).

Table 1 Chemical composition 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(μ m)	15~53	45~90	10~53
Air pressure(atm)	3	-	3.7
Distance(mm)	50~100	100~175	65~70
Speed of specimen(rpm)	-	250	250

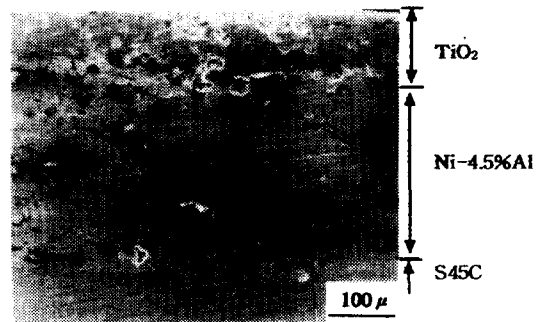


Fig. 2 Microstructures of coating layers.

2.2 실험방법

2.2.1 경도 및 밀착강도

용사피막의 제작에 따른 피막특성을 조사하기 위하여 용사거리와 열처리 온도에 따른 경도와 밀착강도를 조사하였다.

경도는 마이크로 비커스 경도시험기에 의해 시험하중 500gf, 하중 유지시간 15초로 하여 측정하였으며, 10회 측정 후 그 평균치를 경도값으로 하

였다.

밀착강도는 직경30mm의 탄소강 S45C 시험편을 2개 준비하고 각각의 단면에 본드코팅분말 Ni-4.5%Al을 용사해서 Steel bond로 접착한 후 ASTM시험법(633-69)에 의해 실험을 행하였다.

2.2.2 인장강도 및 피로강도

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

피로시험은 회전 굽힘 피로시험기(제일정밀 Co. 용량 10kg·m)를 이용하여 하중반복 속도를 900rpm으로 행하였다. 시험시 하중을 가할 때에는 시험편에 충격이 가해지지 않도록 인버터에 의해 소정의 반복속도(900rpm)까지 서서히 증가시켰다. 시험환경은 실온 공기중과 3% NaCl수용액이며 부식용액의 공급계통은 아크릴 및 플라스틱 수지를 사용하여 부식의 영향을 배제하였다. 부식용액은 1주일에 1회 교환하였다. 시험 후 시험편은 주사형 전자현미경(SEM)으로 종단면 및 파단면 근방을 상세하게 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도 및 밀착강도

Fig. 3은 본드코팅재(UC재)의 용사거리와 열처리에 따른 경도변화를 나타낸다. 먼저 용사거리와 경도의 관계를 보면 용사거리 150mm일 때가 125mm, 175mm보다 높은 경도를 나타낸다. 이는 용사거리 125mm까지는 용사화염의 온도가 용사입자의 융점보다 높지만 용사입자가 용사화염에 노출되어있는 시간이 짧아 완전히 용융될 때까지 시간이 걸리므로 모재에 용착될 때 퍼짐성이 불량하고 용착입자 사이의 결합력도 약해지므로 완전히 용융되어 모재에 용착된 150mm의 경우보다 경도가 낮다. 또한 용사거리 175mm에서는 용사화염의 온도는 대기와의 접촉에 의해 융점 이하의 온도로 점차 냉각되어 용사입자는 응고가 시작된 상태에서 모재에 용착되므로 150mm의 경우보다 경도가 낮은 것으로 사료된다.

한편 열처리온도와 경도의 관계는 열처리를 행한 UC재가 무열처리재보다 경도가 크다. 이는 열

처리에 의해 코팅층의 내부에 존재하는 기공들이 미세화되고 조직이 치밀해져서 경도가 상승한 것으로 생각된다. 이에 대해서는 金 등³⁾이 상세히 연구하여 보고한 바 있으며 본 실험결과와도 좋은 일치를 보였다.

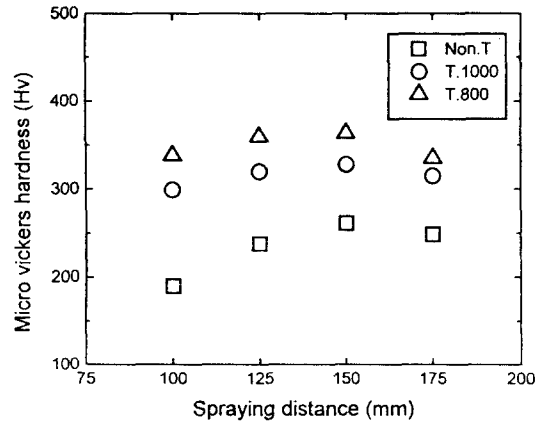


Fig. 3. Relationship of microhardness according to spraying distance and heat treatment.

Table 3은 BS재, UC재 및 TUC재의 열처리 전후의 경도를 나타낸다. 여기에서 TUC재의 경우 용사거리를 70mm로 하여 용사한 후, 본드코팅재와 같은 조건에서 열처리를 실시하여 경도를 측정하였다. TUC재의 경도가 UC재와 BS재보다 높게 나타났으며, 열처리온도에 따른 경도는 800℃의 경도가 1000℃일 때보다 높게 측정되었다. 그 원인은 1000℃로 열처리할 경우 과도한 열응력과 세라믹 결정격자의 전이로 인하여 코팅층을 구성하는 입자 사이의 결합력이 약해져 세라믹층에 미소균열이 발생하여 경도가 낮아지는 것으로 판단된다³⁾.

Table 3 Variation of microhardness by heat treatment.

	spraying distance (mm)	Hv (Non-treatment)	Hv (heat treatment)	
			800(℃)	1000(℃)
BS	-	260	290	280
UC	150	261	363	327
TUC	70	768	999	912

Fig. 4는 밀착강도 실험시의 응력-변위선도를 나타낸다. UC재의 밀착강도는 13.1MPa이고 UCH재는 17.7MPa로 열처리를 행함으로써 밀착강도가 개선되었다. 이는 모재와 코팅층 사이의 계면이 열처리로 인한 원소의 상호확산에 의해 야금학적으로 결합이 이루어진 때문으로 생각된다.

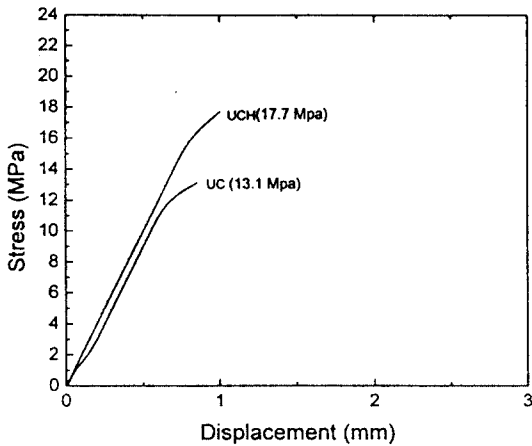


Fig. 4 Adhesive strengths of undercoating specimens.

3.2 인장특성

모재와 각 용사재의 인장특성을 Fig. 5와 Table 4에 나타낸다. Table 4에서 괄호내의 수치는 모재의 단면적으로 계산한 값이다. Fig. 5와 Table 4에서 볼 때 열처리를 하지 않는 UC재와 TUC재의 인장강도, 항복강도 및 연신율은 BS재와 거의 비슷하다. 열처리를 행한 UCH재와 TUCH재는 BS재, UC재 및 TUC재보다 강도는 저하하였으며 연신율은 증가하였다.

Table 4 Mechanical properties of sprayed 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

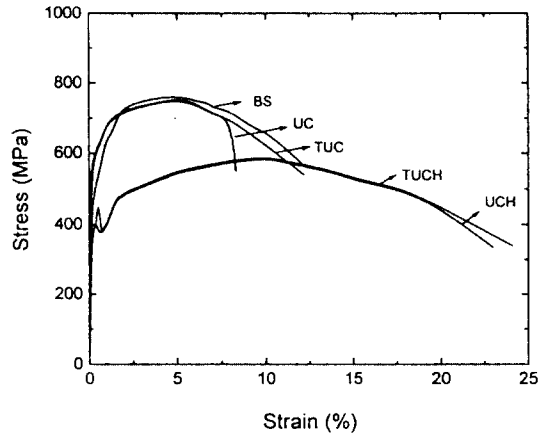


Fig. 5 Tensile characteristics of test specimens.

Fig. 6은 인장시험 중에 발생하는 코팅층의 표면 균열 형태의 대표적인 모습을 나타낸다. 이 표면균열들은 부하 초기에 부하 방향과 수직하게 발생하며, 연신율의 증가와 더불어 성장하여 최대하중 직전 용사층이 모재로부터 완전히 분리, 탈락하였다. 이 관찰결과들로부터 용사재의 인장특성은 열처리에 의해 밀착강도가 다소 증가하여도 코팅층의 하중부담 효과는 경미하여 전적으로 모재의 인장 특성에 의존함을 알 수 있다.

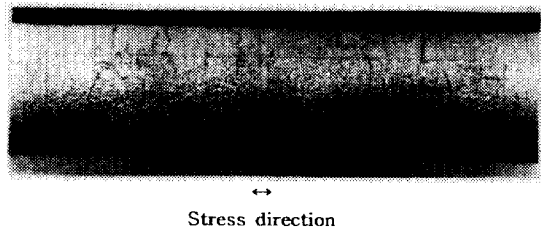


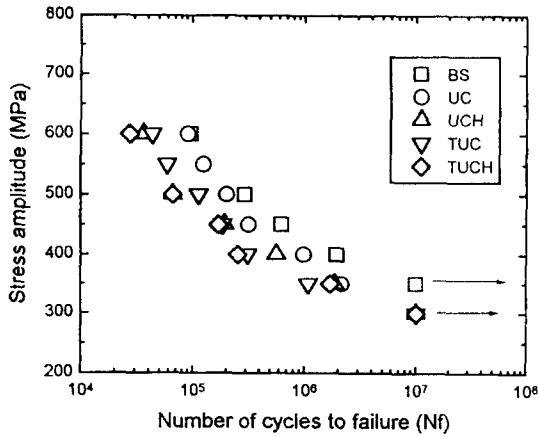
Fig. 6 Surface cracks of TUC in tensile testing.

3.3 피로특성

회전굽힘 피로시험에 의해 얻어진 실은 공기중에서의 S-N선도를 Fig. 7에 나타낸다. (a)는 코팅층을 포함한 실제의 단면적으로 계산된 응력, (b)는 코팅층을 제외한 모재의 단면적으로 계산한 응력으로 나타낸 것이다.

Fig. 7 (a)에서 각 용사재의 피로강도는 BS재보다 저하하였다. 이는 코팅에 의해 단면적은 증가하

였으나 코팅층이 피로하중을 부담할 수 없는 점이 원인이라고 생각된다. 이에 대하여 모재의 단면적으로 계산한 응력으로 나타낸 Fig. 7 (b)에서 보면 UC재는 BS재보다 피로강도가 상승하며 TUC재는 BS재와 비슷하다. 이는 블라스팅에 의해 모재표면에 생성된 압축잔류응력과 코팅에 의한 표면소성변형 구속효과때문으로 생각된다.⁴⁾ UCH재와 TUCH재는 BS재보다 낮은 피로강도를 보이고 있는데 이는 열처리에 의해 모재가 연화되어 가공경화의 소멸 및 압축 잔류응력과 표면소성변형 구속효과의 소멸에 의한 것이라고 사료된다.



(a) including of coating layer

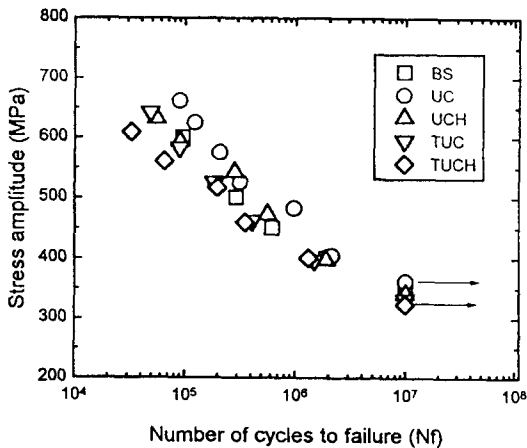
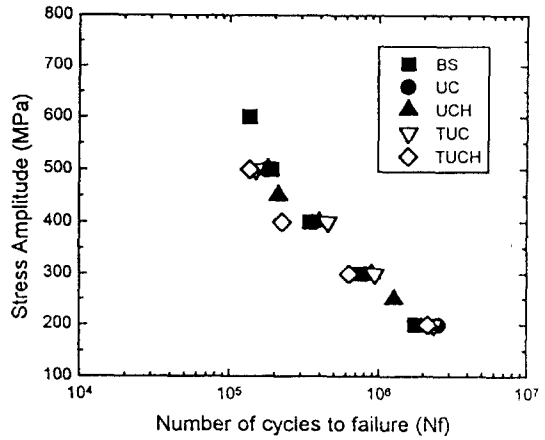
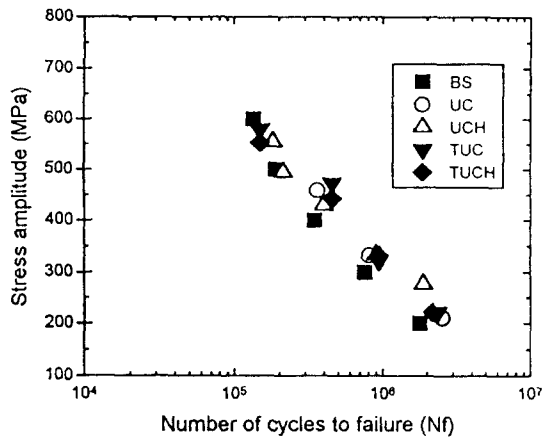


Fig. 7 S-N curve of fatigue test in air

Fig. 8은 3%NaCl 수용액 중에서의 부식피로시험의 결과를 나타낸다. Fig. 8에서도 Fig. 7과 동일하게 (a)는 코팅층을 포함한 실제의 단면적, (b)는 코팅층을 제외한 모재의 단면적으로 나타내었다.



(a) including of coating layer



(b) exception of coating layer

Fig. 8 S-N curve of corrosion fatigue test in 3%NaCl solution

Fig. 8(a)에서 용사재의 부식피로강도는 BS재보다 다소 저하하나 공기중의 결과보다 저하 정도는 작으며 저응력에서는 거의 같다. 그러나 코팅단면적을 제외한 Fig. 8(b)에서 살펴보면 용사재의 부식피로강도는 BS재보다 향상되고 있으며 Fig.

8(a)에서 피로강도가 가장 저하했던 TUC재가 Fig. 8(b)에서는 BS재와 거의 같다. 이는 코팅층이 부식 환경을 차단하므로 모재가 부식환경으로부터 보호되어 부식피로강도는 향상되었다고 생각되나⁵⁾ 코팅층의 기공 및 피로과정중에 발생한 균열로 인하여 환경차단효과를 잃음과 아울러 모재와의 낮은 밀착강도로 인하여 그 효과는 크지 못하다.

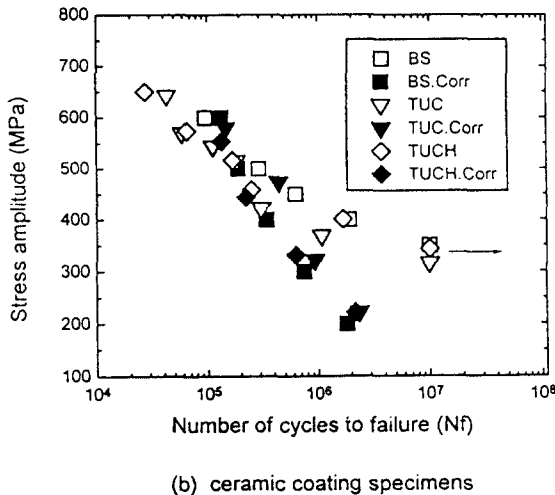
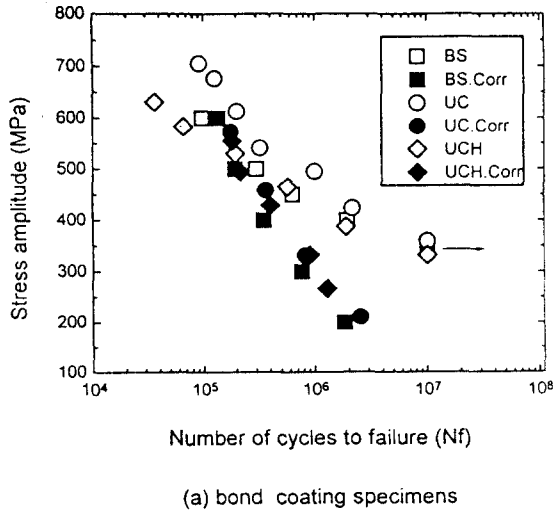


Fig. 9 S-N curve in air and in 3%NaCl solution

Fig. 9는 부식환경이 피로에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 7(b)와 8(b)의 공기중과 부식피로 시험 결과를 함께 비교한 것이다. BS재와 UC재

및 UCH재에 대해서는 Fig. 9(a)에, BS재와 TUC재 및 TUCH재는 Fig. 9(b)에 나타내었다. 용사재의 부식피로강도는 약 450MPa이상의 고응력역에서는 공기중과 비슷하며 450MPa이하의 저응력역으로 갈수록 공기중 피로강도보다 저하하였다. 이는 저응력역에서 부식작용이 피로수명에 크게 영향을 미침을 나타낸다.

Fig. 10은 공기중에서 피로시험한 TUC재의 종단면을 나타낸다. 코팅층과 모재사이의 박리와 코팅부의 균열이 관찰된다. 이러한 모습은 종단면의 다른 부위에서도 다수 관찰되었지만 모재와의 균열 연결은 보이지 않았다. 鹽澤 등⁴⁾은 PVD법에 의한 TiN피복처리재의 저 사이클 피로시험에서 피막 균열이 피로크랙발생의 기점이 된다고 하였으며 黃 등⁵⁾은 plasma용사에 의한 CrO₂용사재의 피로강도시험에서 세라믹층의 표면에 발생한 균열이 모재 중에 연속적으로 성장하지 않는다고 보고하고 있다.

본 실험의 경우는 黃 등의 연구결과⁵⁾와 같이 용사재의 피로파괴는 코팅층에서 발생한 균열이 파괴의 기점이 아니고 모재의 응력집중부에서 발생한 균열에 의해 파단되었다고 생각된다.

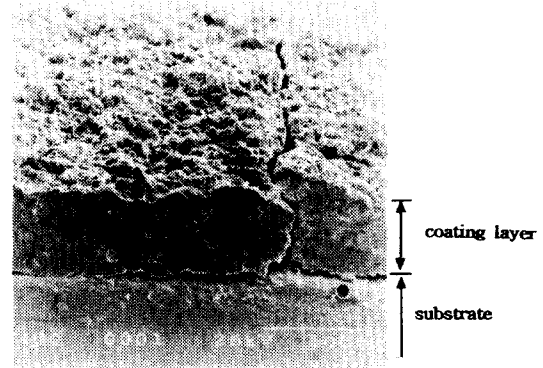


Fig. 10 Photograph of cross section for TUC specimen in air ($\sigma_a=400\text{MPa}$, $N_f=1.1 \times 10^6$ cycles).

Fig. 11은 3% NaCl 수용액 중에서 부식피로 시험한 TUC재의 파단면을 나타낸다. 모재와 코팅층의 박리부가 관찰되고, 모재부의 부식피트와 부식 피로균열이 관찰되었다. 파단면관찰과 아울러 표면

관찰을 행한 결과, 용사재의 부식피로과정은 부식액이 코팅층에 생긴 기공과 균열을 통하여 모재와의 계면에 침입하고 이 침입액이 모재의 표면에 부식피트 및 부식피로균열을 발생시키며 균열이 성장 및 합체에 의해 파단에 이르는 것으로 생각된다.

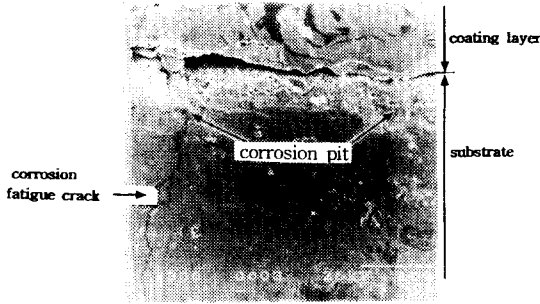


Fig. 11 Fractograph for TUC specimen in 3%NaCl ($\sigma_a=400\text{MPa}$, $N_f=2.5 \times 10^4$ cycles).

4. 결 론

화염 용사법으로 기계구조용 탄소강 S45C에 본드코팅재 Ni-4.5%Al과 세라믹 TiO_2 를 코팅하여 열처리를 행하고 열처리에 따른 용사재의 기계적 성질과 피로강도특성에 대해 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용사거리 및 열처리에 따른 용사재의 경도(Hv)는 용사거리 150mm, 열처리온도 800°C일 때 가장 우수하며, 밀착강도는 열처리를 행함으로써 개선되었다. 그리고 용사재의 인장특성은 코팅층의 하중부담효과가 거의 없어서 모재의 인장특성에 의존하였다.
- 2) 세라믹용사재의 공기중 피로 강도는 기본적으로는 기재의 특성에 의해 결정되나 블라스팅

처리와 코팅층의 표면소성변형 구속효과에 의해 약간 개선된다.

- 3) 용사재의 부식피로강도는 코팅층의 환경차단 효과에 의해 모재의 강도보다 개선되며, 특히 450MPa이하의 저응력역에서 그 효과가 현저하였다.
- 4) 세라믹 용사재의 공기중 피로파괴 기구는 피로 초기에 코팅층과 모재사이의 계면에서 박리가 발생하지만 모재에 연속적으로 성장하는 것은 아니며 모재의 응력 집중부에서 새로운 균열이 발생, 전파에 의하여 파괴에 이른다. 부식피로 파괴기구는 코팅층의 기공 및 피로 초기에 발생한 균열에 부식액이 침입하여 모재 표면에 부식 피트 및 부식피로 균열이 발생하였다.

참고문헌

- 1) 屋良秀夫, 生田明彦, 小武幸司, “腐食環境下における溶射部材の疲労特性”, 材料と環境, 第43卷, 第11号, pp.648-653, 1994
- 2) 黄貞雄, 小川武史, 戸梶恵郎, “セラミック溶射材の疲労強度と破壊機構”, 日本機械學會論文集, 第59卷, 第563号, pp.89-94, 1993
- 3) 金永植, 金永植, “티타니아 세라믹 溶射被膜의 強度向上에 관한 研究”, 韓國鎔接學會論文集, 第10卷, 第4号, pp.181-189, 1992.
- 4) 鹽澤和章, 西野精一, 韓玲, “被膜の強度評價とTiN被覆鋼の低サイクル疲労強度”, 日本機械學會 論文集, 第60卷, 第569号, pp.9-16, 1994.
- 5) 黄貞雄, 小川武史, 戸梶恵郎 “セラミック溶射材の腐食環境における疲労強度および破壊機構”, 日本機械學會論文集, 第60卷, 第570号, pp.90-94, 1994.