

● 論 文

3% NaCl 수용액중에서 복합조직강의 부식피로 파괴거동에 미치는 주파수변화의 영향

오 세 옥* · 신 규 동** · 김 응 집***
(95년 9월 1일 접수)

The Influence of the Changing of Cyclic Frequency on the Corrosion Fatigue
Fracture Behavior of the Dual Phase Steel in 3% NaCl Solution

S.W. Oh* · K.D. Shin** · W.J. Kim***

Key Words : Dual Phase Steel(복합조직강), Fatigue Strength(피로강도), Initial Fatigue Crack(초기피로크랙), Corrosion Pit(부식피트), Interference(간섭), Fatigue Fracture Behavior(피로파괴거동)

Abstract

Fatigue tests were carried out by a rotary bending testing machine of cantilever type. M.E.F(ferrite encapsulated islands of martensite) materials were made by a series of heat treatment from a low carbon steel(SM 20 C). The fatigue tests were conducted at stress levels of 302 MPa and 137 MPa with frequencies of 25 Hz, 2.5 Hz and 0.5 Hz in 3% NaCl solution.

The fatigue strength increased with frequency got higher. The microcracks and corrosion pits were generated at the boundary between the matrix and the 2nd phase. The cracks generated by the corrosion pits were coalesced with the pits around the notch and became the initial crack. The N_i/N_f ratio increased as the frequency and stress level decreased. The interference phenomenon increased with stress level and frequency gets higher. The crack propagation rate was delayed as the stress level lowers and the frequency gets higher, however, the range of the stress intensity factor depended only on a stress level.

* 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 부산전문대학 기계설계과

*** 동아공업고등학교 기계과

1. 서 론

해양구조물의 부식피로강도에 관해서 내식성이 우수한 고급재료의 사용이 필수적이지만 경제적인 측면을 고려할 때 저렴한 대체재료의 개발이 필요하다. 이러한 측면에서 모상인 연질상과 제2상인 경질상으로 구성된 연결재 형태의 복합조직강은 모상에 대한 제2상의 소성구속성에 의해 대기중에서 정적^{1,2)} 및 피로파괴^{3,4,5)}에 관한 실험결과 모재에 비해 기계적 성질이 우수하다고 알려져 왔다.

해양환경하에서 사용되는 선박 및 해양구조물에서의 피로파괴에 영향을 미치는 인자로서는 환경, 금속 및 기계적인 영향 등이 있다. 따라서 이러한 인자들에 대한 부식피로강도특성을 규명하기 위해서는 종합적이고 엄밀한 관찰이 요구되며 그 연구결과 등이 발표되고 있다.^{6,7,8)} 그러나 해양환경에서 선박 및 해양구조물의 부식피로파괴는 파동, 풍속 등에 의한 주파수의 변화와 작용응력의 변동인 기계적인 영향이 크게 작용하게 된다. 특히, 주파수와 작용응력이 낮을수록 부식환경에 접하는 기간이 길어져 전기화학적 부식작용이 증가된다. 그러므로 대기중에 비해 현저한 피로수명 저하를 일으켜 피로수명을 예측하기가 어렵기 때문에 이에 대한 연구가 요망된다.

본 연구는 탄소강 SM 20 C를 소재로 일련의 열처리 과정을 거쳐 연결재형상의 복합조직강을 만든 후 자작한 편지식 반복회전굽힘 피로시험기를 이용하여 3% NaCl 수용액중에서 응력레벨을 변화시켰을때 주파수변화에 대한 피로강도, 반복회수와 피로크랙전파길이와의 관계, 피로크랙의 전파속도와 응력확대계수 및 피로파괴의 형상거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

시험편의 소재는 구조용강(SM 20 C)인 열간압연 재료로서 화학성분은 Table 1과 같다. 소재의 열처리 과정은 최적의 결정입경과 조직의 균질화를 위하여 1000℃에서 4시간 유지시킨 후 노냉하였다. 다음에 경질상인 제2상이 연질상인 모상을 둘러싼 연결재형상의 복합조직강을 얻기 위하여 760℃에서 30분

유지시킨 후 공기중에서 냉각시켰으며 재차 780℃에서 30분 유지시킨 후 물속에서 담금질하였다.

Table 1. Chemical composition of SM 20 C steel(wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.21	0.23	0.41	0.02	0.006

Table 2. Metallurgical properties of dual-phase steel

	ferrite grain size (μm)	2nd phase volume fraction(%)	connectivity (%)	hardness(Hv), 25 gr		
				ferrite	2nd phase	ratio
M	31	52	97	231	689	3.0

Table 3. Mechanical properties

series	R	M
tensile strength(MPa)	465.8	829.6
elongation (%)	29.6	16.3

또한 200℃에서 2시간 유지시킨 후 공냉시켰다. 모재를 R, 복합조직강을 M재라 하였다. Fig. 1은 모재와 열처리 과정에서 얻어진 복합조직강의 금속현미경 조직사진이다. Table 2는 복합조직강의 금속적 성질을 나타내며 Table 3은 모재와 복합조직강의 기계적 성질을 나타낸 것이다. Fig. 2는 피로시험편 형상으로써 피로크랙발생 영역을 국한하고 크랙의 관찰을 하기 쉽도록 지름 0.5 mm, 길이 0.5 mm의 횡공노치로 가공하였다.

피로시험기는 편지식 회전굽힘피로시험기로서 주파수는 대기중의 경우 25 Hz, 3% NaCl 수용액중의 경우 0.5 Hz, 2.5Hz 및 25 Hz 로 하였다. 3% NaCl 수용액의 유량은 약 60 cc/min로써 시험편 중앙부에 유출시켜 시험편이 2/3이상 침적토록 하였으며 온도는 전자감온장치를 이용하여 25 ± 1℃로 일정하게 유지시켰다. 크랙길이 측정은 일정 시간 시험한 후 면봉을 이용하여 부식생성물을 제거하였으며, 측에 대하여 직각방향으로 크랙발생극면을 따라 금속현미경으로 측정하였다.

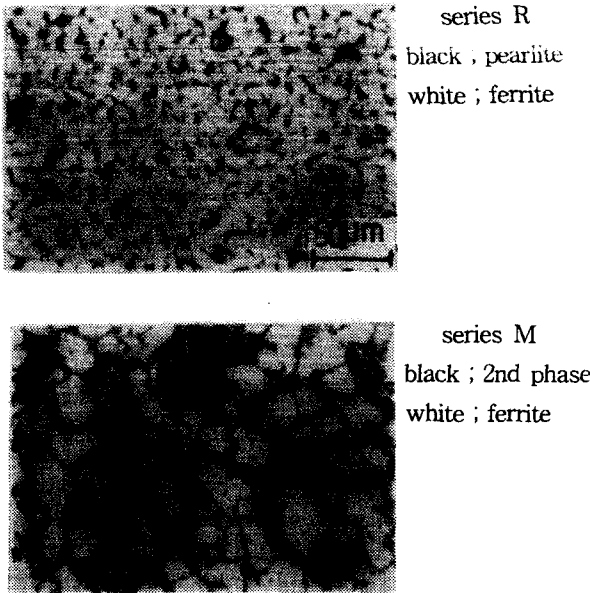


Fig. 1 Microstructure of specimens

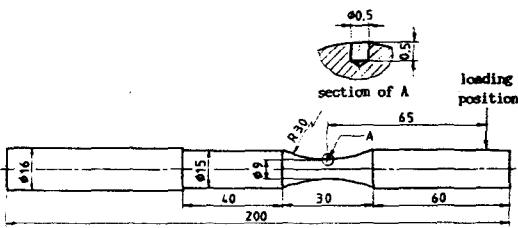


Fig. 2 Geometry of testing specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로강도곡선

Fig. 3은 모재(R)를, Fig. 4는 복합조직강(M)을 대기중 및 3% NaCl 수용액중에서 응력레벨과 주파수를 변화시켜 피로실험한 피로강도곡선을 나타낸 것으로 실온·대기중의 경우 실선으로 표시하였다. 대기중에서 피로한도는 모재의 경우 152 MPa, 복합조직강의 경우 225 MPa로써 모재에 비해 1.48배 증가하였다. 3% NaCl 수용액중에서 피로강도는 주파수가 낮을 수록 감소하며 동일 반복속도에서 저응력레벨일수록 더욱 차이가 증가하였

다. 대기중에서의 정적인장시험 및 피로실험에서와 마찬가지로 부식실험에서도 복합조직강의 경우 모상이 제2상에 의해 둘러싸여 있으므로 제2상에서의 소성구속으로 피로한도와 피로강도가 모재에 비해 증가함을 알 수 있다. 부식상태에서 피로한도가 나타나지 않고 주파수가 낮을 수록 기울기가 증가하고 피로수명이 감소 되는 것은 여러 연구자들^{7,9,10}과 같은 결과를 보여주고 있다. 즉, 응력레벨과 주파수가 높은 경우 부식환경에 접하는 시간이 짧으므로 대기중에 비하여 피로수명의 차이가 적게 나타났다. 응력레벨과 주파수가 낮은 경우 크랙선단이 열린상태로 부식환경에 접하는 시간이 길어지며 재료에 부식생성물과 피트 등의 악 영향에 의해 부식작용이 증가하므로 피로수명과 피로강도가 감소된 것으로 보인다.

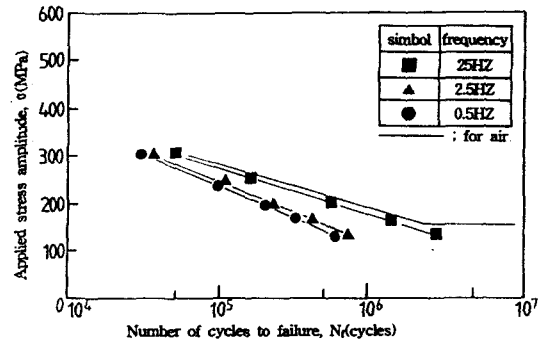


Fig. 3 S-N curves of series R in 3% NaCl solution

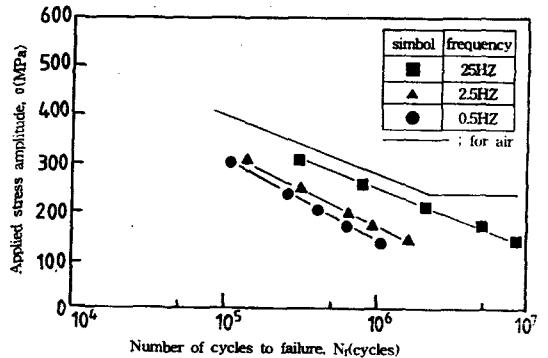


Fig. 4 S-N curves of series M in 3% NaCl solution

3.2. 반복회수와 피로크랙전파길이와의 관계

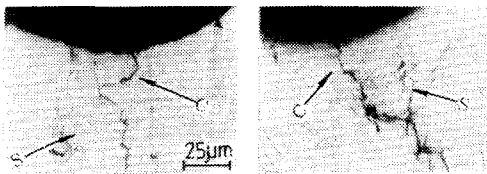
3.2.1. 초기크랙의 발생과 반복회수와의 관계

Table 4는 3% NaCl 수용액중에서 302 MPa와

137 MPa의 응력을 작용시켰을때 주파수 변화에 대한 초기크랙발생회수(N_i)와 파괴수명(N_f)과의 관계(N_i/N_f)를 나타낸 것이다. 초기크랙발생은 대기 중의 경우 작용응력 302 MPa일때 전 파단수명의 10.8%에서 발생하였고 모재에 비해 복합조직강일 때 조기에 발생하였다. 3% NaCl 수용액중의 경우 작용응력 302 MPa일때는 7.3~10.5%로서 대기중에 비해 그리고 주파수가 낮을 수록 초기크랙발생이 지연되었으며 작용응력 137 MPa일때는 10.5~15.4%로서 주파수가 낮을 수록 그리고 302 MPa에 비해 초기크랙발생이 지연되었다.

Table 4. Ratio of number of cycle between to crack initiation and to fracture(N_i / N_f) in 3% NaCl solution (for series M)

Hz	0.5		2.5		25	
stress (MPa)	302	137	302	137	302	137
N_i/N_f	0.105	0.154	0.103	0.152	0.073	0.105

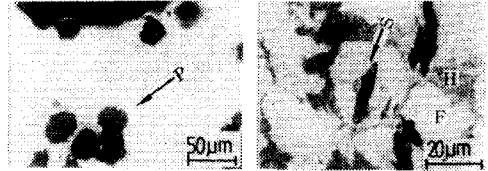


(C ; crack, S ; slip)

Fig. 5 Crack propagation of series M in air

Fig. 5는 대기중에서의 슬립발생을 나타낸 것이다. 슬립발생은 Tomota등¹¹⁾의 연구결과와 마찬가지로 모상과 제2상의 경계에서 발생하였으며 소성 변형이 발생하기 쉬운 모상내로 전파한 후 모상과 제2상의 경계에서 정지하였다. 경계근처에서는 열처리 과정때 모상과 제2상간의 체적율 차이가 발생하며 미용해 탄화물과 전위가 존재하게 된다. 이곳에 반복응력이 가해지면 전위운동에 의해 준안정탄화물의 절단, 세분화가 일어나 입계에서 입내로 성장하는 무석출대가 형성되어 우선적으로 국부적인 반복소성력이 작용되어 미시크랙이 발생하

게 된다. 따라서, 슬립은 모상과 제2상의 경계에서 발생하였으며 반복회수와 응력레벨의 증가와 함께 모상내에서 슬립의 수가 증가하였고 이들 슬립이 포화영역에 도달하여 크랙으로 발생 성장하였다.



(S ; slip, P ; pit, H ; 2nd phase, F ; ferrite)

Fig. 6 Initiation of corrosion pit and slip in 3% NaCl solution (for series M)

Fig. 6은 3% NaCl 수용액중에서의 슬립과 부식피트와의 관계를 나타낸 것이다. 부식피트는 대기중에서의 슬립의 발생과 마찬가지로 결정면상에 노출된 전위, 적층결합 등의 격자결합이 발생하기 쉽거나 금속조직학적으로 불안정한 모상과 제2상의 경계근처에서 발생하여 소성변형이 발생하기 쉬운 모상으로 성장하였다. 주파수와 작용응력이 높은 경우 경계면에서 발생된 부식생성물의 용해작용에 의해 보호피막이 파괴되어 슬립의 폭을 증가시켜 파괴를 촉진시켰다. 주파수와 작용응력이 낮은 경우 슬립은 관찰되지 않고 경계면 근처에서 부식피트만 발생하였으며 크랙이 발생한 이후의 피트크기는 증가하지 않았다. Goto등¹²⁾은 작용응력이 높은 경우 고밀도의 부식피트가 슬립대에 우선적으로 발생하고 피트의 크기가 작고 수가 많으며 작용응력이 낮은 경우 슬립대와는 관계없이 고응력에 비해 피트크기가 크고 수도 적게 발생한다고 하였다. 따라서 작용응력과 주파수가 높은 경우 슬립에서 크랙으로 진전되는 기간이 짧으므로 부식피트가 성장하지 않지만 작용응력과 주파수가 낮은 경우 크랙으로 진전되는 기간이 길어져 부식피트가 페라이트상의 입경크기로 성장한 후 인접한 부식피트와 연결 합체된 후 크랙으로 발생하였다. 이와 같이 부식피트가 주파수 변화에 밀접한 관계를 가지는 것은 한 사이클당 금속이 용해되는 양이 다르기 때문이며 응력레벨의 대소에 따라 재료에 가해

지는 소성력이 다르기 때문이다.

3.2.2. 반복회수와 피로크랙전파길이와의 관계

Fig. 7은 302 MPa와 137 MPa의 응력을 작용시켰을 때의 주파수 변화에 대한 반복회수(N)와 피로크랙전파길이(L)와의 관계를 나타낸 것으로 대기중의 경우 302 MPa의 응력을 작용시켰으며 실선으로 표시하였다. 대기중에서 피로크랙전파는 크랙길이 0.5 mm이하의 초기단계에서는 거의 완만한 수평이지만 그 이상의 크랙길이에서는 급속하게 전파하였다. 이러한 거시적인 크랙은 슬립면에 대한 전위의 움직임으로 미시크랙의 영향을 받으며 응력레벨에 의존하는 경향이 크게 나타났다.

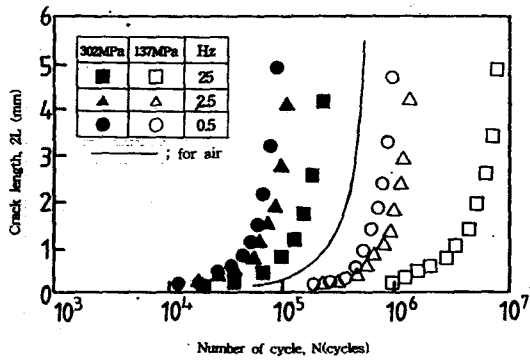
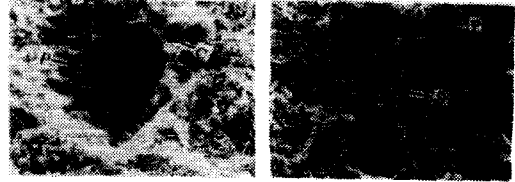


Fig. 7 Crack length vs, number of cycles in 3% NaCl solution(for series M)

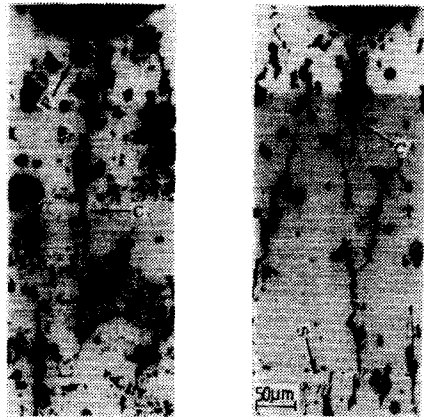
3% NaCl 수용액중에서 피로크랙전파는 302 MPa의 경우 주파수 변화에 대한 차이가 비교적 적으나 137 MPa의 경우 주파수 2.5, 0.5 Hz에서는 차이가 적게 나타나지만 25 Hz에서는 차이가 크게 나타났다. 일반적으로 부식환경에서 피로크랙은 역학적인 하중에 의해 부식의 영향이 증가한다. 즉 크랙선단이 열리고 닫히는 크랙의 펌프작용에 의해 크랙내에 발생한 부식생성물이 사이클의 압착기간때 빼기 작용을 하여 크랙내에 발생한 부식생성물이 크랙개구 작용을 상승시켜 크랙선단을 넓히게 된다. Fig. 8은 주파수 2.5 Hz에서 302 MPa와 137 MPa의 응력을 작용시켰을때 슬립과 피트 그리고 피트에서의 크랙을 나타낸 것이다. 작용응력 302 MPa의 경우 피트와 피트사이에 미시크랙

이 발생하여 합체되며, 작용응력 137 MPa의 경우는 전면이 부식되었으며 피트에서의 부식용해작용이 증가되어 크랙이 발생하였다.



(P ; pit, S ; slip, C ; crack)

Fig. 8 S.E.M fractography on pit, slip and micro crack at 2.5 Hz in 3% NaCl solution (for series M)



(P ; pit, S ; slip, C ; crack)

Fig. 9 Crack propagation at 25 Hz in 3% NaCl solution (for series M)

Fig. 9는 주파수 25 Hz에서 302 MPa와 137 MPa의 응력을 작용시켰을 때의 결과로서 작용응력 302 MPa의 경우 부식피트에서 응력집중이 발생하여 거시적인 크랙으로 성장하였으며 주크랙과 합체 또는 간섭현상에 의해 일시적인 정지 또는 가속화 현상이 일어났다. 작용응력 137 MPa의 경우 노치선단에서 형성된 주크랙과 피트에서 발생한 크랙이 공존하는 간섭현상이 적게 일어나므로 파괴가 지연되었다. 이러한 크랙의 합체에 대

해 Tanaka 등¹³⁾은 응력레벨과 주파수가 높은 경우 부식피트가 클수록 크랙이 발생하기 쉬우며 파단 수명의 73%에서 크랙합체가 일어나기 시작하여 95%에서 거의 합체된다고 하였다. 본 실험의 경우 작용응력 302 MPa에서는 137 MPa에 비해 기계적 인 영향이 크므로 피트크기가 적고 폭이 좁은 크랙이 발생되지만 작용응력 137 MPa에서는 부식의 영향이 크므로 피트크기가 크고 폭이 비교적 넓은 크랙이 발생하며 크랙길이 1 mm 이상에서의 크랙 전파는 피트에서 발생한 크랙과 주크랙과의 합체 현상에 의해 크랙전파가 가속되었다. 결과적으로 작용응력과 주파수가 높은 경우 피로작용에 의한 크랙과 부식작용에 의한 피트에서의 크랙이 함께 작용하므로 크랙전파가 빠르게 진행되었다. 응력레벨과 주파수가 낮은 경우 크랙전파 초기에 전기화학적인 부식용해 작용에 의해 크랙전파가 지연되었으며 크랙길이 1 mm 이상에서는 시험편 파단면의 면적증가와 피트에서 형성된 크랙 등으로 인하여 실용력이 증가되므로 크랙전파가 가속되었다.

3.3. 피로크랙전파속도와 응력확대계수와와의 관계

Fig. 10은 3% NaCl 수용액중에서 302 MPa와 137 MPa의 응력을 작용시켰을 때의 피로크랙전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계를 나타낸것으로 대기중의 경우 302 MPa의 응력을 작용시켰으며 실선으로 표시하였다. 응력확대계수의 값은 간편식 $\Delta K = 0.7 \pi \cdot a$ 를 사용하였으며, da/dN와 ΔK 의 관계를 Paris법칙으로 표시하였다. ΔK 와 da/dN관계에서 동일 ΔK 에 대한 da/dN의 차이는 25 Hz의 경우 크지만, 2.5와 0.5 Hz에서는 감소하였다.

응력확대계수의 범위는 작용응력레벨에 따른 차이가 뚜렷하며 고응력의 경우는 고 ΔK 영역에 저응력의 경우는 저 ΔK 영역에 위치하였다. 기울기(m)는 302 MPa의 경우 2.93~1.72이며 137 MPa의 경우 1.32~1.78로서 고응력 레벨의 경우 주파수가 클수록 m이 크지만 저응력 레벨의 경우 주파수가 클수록 m이 감소하였다.

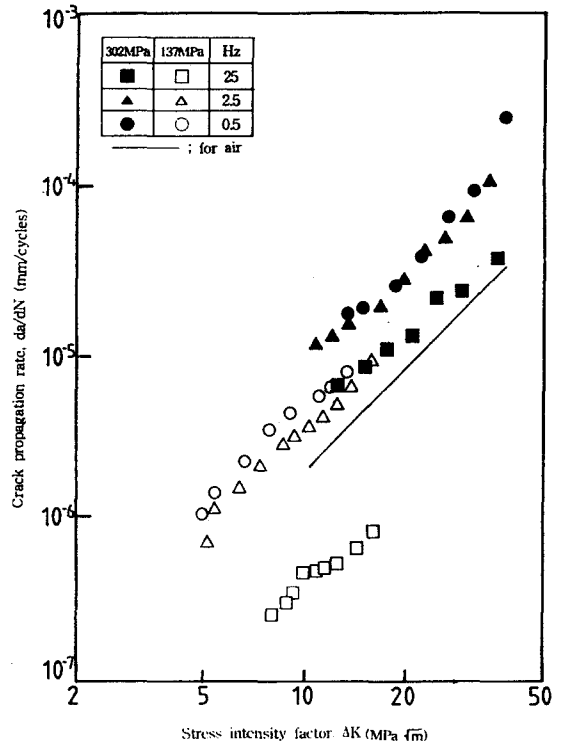


Fig. 10 Crack propagation rate vs. stress intensity factor in 3% NaCl solution (for series M)

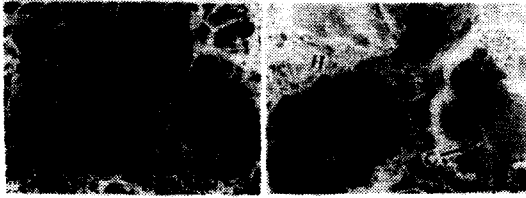
결과적으로 응력확대계수범위는 응력레벨에 따라 변화되며 크랙전파속도는 응력레벨이 낮은 경우 주파수 변화에 대한 차이가 크게 나타났다.

3.4. 파단면 형상

Fig. 11은 복합조직강을 대기중에서 정적인장시험한 후의 파단면 형상이다. 모상에서는 벽개크랙을 동반한 취성적인 리버패턴형상으로 제2상에 의해 저지되며 제2상에서는 연성적인 덤플형상으로 나타났다.

Fig. 12는 3% NaCl 수용액중에서 피로실험한 거시적인 파단면 형상으로 주파수와 작용응력이 낮은 경우 역학적인 영향보다는 전기화학적인 부식용해작용이 크므로 피트에서 발생한 크랙의 간섭현상에 의해 방사형의 단수와 스텝간 높이도 증

가하여 파단면이 거칠고 단이 증가된 형상으로 파단되었다.



(H ; 2nd phase, F ; ferrite, D : dimple, C ; cleavage crack)

Fig. 11 Microscopic tensile fracture surface in air



25 Hz, 302 MPa 0.5Hz, 137MPa

Fig. 12 Macroscopic fatigue fracture surface in 3% NaCl solution (for series M)

4. 결 론

저탄소강(SM 20C)을 소재로 일련의 열처리과정을 거쳐 연결재 형상의 복합조직강을 대기중과 3% NaCl 수용액중에서 켄티레버식 반복회전굽힘 피로시험기를 이용하여 25Hz, 2.5 Hz 및 0.5 Hz의 주파수에서 302 MPa과 137 MPa의 응력레벨을 작용시킴으로써 부식피로파괴거동을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 피로강도는 주파수가 높을 수록 증가하였다.
2. 부식피트는 모상과 제2상의 경계에서 발생하였으며 대기중에 비해 주파수와 응력레벨이 낮을 수록 N_i/N_f 가 증가하였다.
3. 응력레벨과 주파수가 높을 수록 피트에서 발생 성장한 크랙과 주크랙과의 간섭현상이 증가하였다.
4. 응력확대계수는 응력레벨에만 의존하며 크랙 전파속도는 응력레벨이 낮고 주파수가 클수

록 지연되었다.

5. 피로파단면형상은 응력레벨과 주파수가 낮을 수록 레이디얼 크랙과 중앙에서의 의사 벽개 크랙이 명확하게 나타났다.

5. 참 고 문 헌

- 1) Tanaka, T., Nishida, M., Hashiguchi, K., and Kato, T., "Structure and Properties of Dual Phase Steels", TMS-AIME, pp. 22~23, 1979.
- 2) 金楨圭, 宋森弘, 李漲鉉, "鋼의 微視 및 巨視的 破壞舉動에 미치는 第二相 形態의 영향", 大韓機械學會論文集, 第6卷, 第3號, pp. 239~246, 1982.
- 3) 石原 豪, "2相鋼の高平均應力下における疲労龜裂の組織選擇性", 日本金屬學會論文集, 第47卷, 第1號, pp. 67~72, 1983.
- 4) 吳世旭, 金雄執, "複合組織鋼의 微視組織變化가 疲労破壞傳播에 미치는 影響", 韓國海洋工學會誌, 第5卷, 第2號, pp. 58~66, 1991.
- 5) Kawagoishi, N., Nisitani, H. and Toyohiro, T., "Effect of Microstructure on the Fatigue Crack Growth Resistance in Dual-Phase Steels", JSME Trans. (A), Vol. 59, No. 560, pp. 922~926, 1993.
- 6) Okada, T., Hattori, S. and Takeda, T., "Relation between pH in HCl+NaCl or NaOH+NaCl Solution and Torsional Corrosion Fatigue Strength of Carbon Steel" JSMS, Vol. 34, No. 382, pp. 830~835, 1985.
- 7) Komai, K. and Minoshima, K., "Current Status and Future Trends on Environmental Strength of Materials" JSME Trans. (B), Vol. 54, No. 498, pp. 181~189, 1988.
- 8) Ebara, R., "Current Status and Future Problems on Corrosion Fatigue Research of Structural Materials", JSME Trans. (A), Vol. 59, No. 557, pp. 1~ 11, 1993.
- 9) Sawaki, Y., Tada, S., Kawasaki, T. and Nomura, S., "Environmental Fatigue Fracture Toughness and Crack Propagation Behavior",

- JSME Trans. (A), Vol. 52, No. 482, pp. 2324~2330, 1985.
- 10) 大塚昭夫, 森 要, 岡村 弘之, 高野 太刀雄, “鋼種別人工海水中腐食疲勞き裂進展速度”, 鐵鋼の環境強度部會, 第3回シンポジウム前刷集, pp. 160~187, 1987.
- 11) Tomota, Y., Taghieana, N., Tanabe, K. and Kuroki, K., “Fatigue Strength of Steels Composed of Two Phases”, Met. Trans., Vol. 6, pp. 962~970, 1977.
- 12) Goto, M., Fukushima, S., Nisitani, H. and Miura, A., “Fatigue Process of a Heat Treated 0.45% C Steel in 3% NaCl Solution”, JSME Trans. (A), Vol. 57, No. 542, pp. 2314~2320, 1991.
- 13) Tanaka, T., Sakai, T. and Okada, K., “Statistical Aspect of Fatigue Crack Propagation from Micro Surface Defects”, JSMS, Vol. 30, No. 332, pp. 483~489, 1981.