

◎ 論文

고장력강의 부식피로균열전파에 미치는 하중파형의 영향과 양극용해기구의 역할⁺

하 회 석 · 이 성 근*

(1993년 3월 4일 접수)

Effect of Stress Waveform on Corrosion Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels—The Role of Anodic Dissolution Mechanism

Hwi-Seck Ha · Sung-Keun Lee*

Key Words : High Strength Steel(고장력강), Corrosion Fatigue(부식피로)
Stress Waveform(하중파형), Anodic Dissolution(양극용해)

Abstract

The effect of stress waveforms on corrosion fatigue and the role of dissolution mechanism in 3NiCr steel and 20Ni maraging steel have been investigated in aerated 3% NaCl solution and synthetic seawater under sinusoidal, triangular, square, positive sawtooth, negative sawtooth, and trapezoidal stress waveforms with open circuit at frequency of 1Hz and stress ratio of 0.1.

The crack growth rates under square waveform were substantially lower than under sinusoidal and triangular waveforms, but the crack growth rates under sinusoidal waveform were slightly higher under triangular waveform. For a given frequency the growth rates under the positive sawtooth waveform are higher than those under the negative sawtooth waveform.

The fatigue crack growth rates of most specimens were in good agreement with the values calculated by the model based on the dissolution mechanism.

⁺ 이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음

* 동아대학교 공과대학 금속공학과

1. 서 론

부식피로는 기계적인 반복하중에 의한 피로와 환경의 상호작용으로서 재료, 환경, 시간, 온도와 같은 변수들이 상호협력하여 공기중에서의 균열 생성 및 전파속도보다 빠르게 파손에 도달하게 된다. 이러한 부식피로에 영향을 미치는 변수들은 매우 많으면서 상호간에 복잡하게 얽혀 있기 때문에 수많은 문헌에서 부식피로에 관한 연구가 보고되고 있지만 아직도 완전히 이해되지 않은 상태이다.

하중파형이 부식피로 균열성장거동에 미치는 영향에 대해서는 지금까지 Barsom의 연구결과가 많이 인용되고 있다.¹⁾ 그는 12Ni5Cr3Mo 마르에이징강에 대하여 용존산소가 있는 3% NaCl 용액에서 부식피로시험을 하였는데 K_{min} 에서 K_{max} 로의 인장하중 증가속도가 같은 삼각파형과 양의 톱니파형은 균열성장속도가 같은 반면에 사각파형과 음의 톱니파형도 균열성장속도가 같게 나타났다. 이에 따라 하중파형의 부식피로거동에 미치는 환경의 영향은 한 부하사이클 동안의 인장하중 증가시 변형속도와 관계가 있으며 사각파형과 같이 순간적으로 K_{max} 에 도달하거나 주파수가 매우 높은 경우에는 환경의 영향이 나타나지 않는다고 하였다.

본인등은 이전 연구에서²⁻⁴⁾ 1Cr1Cr강에 대해 하중파형을 달리하여 용존산소가 있는 3% NaCl 용액과 용존산소가 없는 용액에서 그리고 음극전압을 $-800mV(Ag/AgCl)$ 전극을 가한 용액에서 부식피로시험을 한 결과 사인파형에서 균열성장속도가 가장 크고 그 다음 삼각파형, 사각파형 순으로 감소하였다. 이러한 피로균열 성장속도가 가장 크고 그 다음 삼각파형, 사각파형 순으로 감소하였다. 이러한 피로균열 성장속도의 차이를 용해기구에 바탕을 두고 설명할 수 있었다. 그러나 3% NaCl 용액에서 양과 음의 톱니파형, 한 부하사이클 동안 최대하중에서의 유지시간을 달리한 사다리꼴 파형들에서의 균열성장속도 자료와 이전의 사인파형, 삼각파형, 사각파형등에서의 결과를 비교, 검토한 연구에서⁵⁾ 한 부하사이클동

안에 감소용력부분은 균열성장속도에 영향을 미치지 않는다는 초기의 가정을 수정하면서 하중파형과 영향을 정량적으로 잘 설명할 수 있었다. 한편 수소가 발생하는 높은 음극전위와 수소가스 분위기에서는 이와는 달리 수소취성거동이 지배적이었다.

이전 연구에서는 주로 배어링재료로 사용되거나 열처리를 달리 하여 암반용 굴착기의 드릴소재로도 많이 사용되는 SAE51100 강에 대하여 3% NaCl 용액에서 하중파형에 따른 피로균열 성장속도의 차이를 용해모델로 잘 설명되었으나 다른 합금강에 대해서도 적용될 수 있는지는 확인되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 잠수함 및 해양구조물 재료로서 개발중인 3Ni1Cr 강과 방탄소재로 개발되고 있는 20Ni (250Grade) 마르에이징강을 선택하여 이 용해모델이 다른 고장력강에 대해서도 부식환경에서 하중파형이 피로 균열성장속도에 미치는 영향을 잘 설명할 수 있는지를 검증하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 열처리 및 시편준비

본 연구에서 사용된 3Ni1Cr강은 포항제철에서 제조한 것으로서 열간압연 판재를 $900^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 오스테나이트화 처리를 한 후 수냉하고 $660^{\circ}C$ 에서 1시간 동안 되달굽 처리를 하였다. 이때의 조직은 되달굽 마르텐사이트였다. 20Ni 마르에이징강은 국방과학연구소에서 열연판재를 공급받은 것으로서 실험실에서 $816^{\circ}C$ 에서 1시간 동안 균질화 처리를 한 후 수냉한 다음 냉간압연을 하였으며 그리고 $482^{\circ}C$ 에서 4시간동안 시효처리를 하였다. 사용된 두 시편의 주요 합금원소와 기계적 성질을 Table 1과 2에 나타내었다.

피로시험용 시편은 한면에 노치를 내고 접하중을 가할 수 있는 접하중 일면노치형(pin-loaded single-edge-notched type)으로서 크기는 폭 36mm, 두께 3.2mm, 길이 170mm이다. 접하중은 주기 위해 시편 양단에 위치한 구멍은 $12mm\phi$ 로 구리봉전극을 사용, 방전가공하였으며 노치는 길

Table. 1 Chemical composition of specimens

	(wt%)												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Ti	Al	Cu	Fe
3NiCr	0.07	0.22	0.25	0.006	0.005	3.00	1.0	0.3	—	0.045	—	0.0025	Bal
20Ni Maraging	0.011	0.0018	0.006	0.005	0.005	20.47	0.041	4.83	7.74	0.73	0.105	0.104	Bal

Table. 2 Mechanical properties of specimens

	3NiCr	20Ni Maraging
0.2% offset yield strength	716 MPa	1670 MPa
Tensile strength	814 MPa	1900 MPa
Elongation	20%	5.3%
Hardness	VHN 250	VHN 420

이 7mm, 폭 0.2mm, 노치첨단의 곡률반지름 50~60μm로서 역시 방전가공하였다.⁴⁾

2. 2 피로시험 조건

최대 10톤 용량의 자동유압 재료시험기(Instron 1332)를 사용하여 상온에서 피로시험을 하였다. 본 실험에 앞서 모든 시편은 가공노치 첨단에 1.5~1.7mm 길이의 예비균열을 응력비 R=0.1, 주파수 f=10Hz에서 사인 하중파형으로 만들었다. 예비균열을 만들기 위해 단계적 하중감소법(load shedding reduction method)으로 최대하중(F_{max})의 감소율이 20%를 넘지 않도록 하여 다음 단계의 반복하중에서도 용이하게 균열이 성장할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 예비균열의 최종 단계 반복하중시의 최대응력확대계수보다 큰 값을 갖도록 반복하중을 주어 예비균열시 생성되는 소성역의 영향을 받지 않도록 하였다. 하중파형은 사인파형, 삼각파형, 사각파형, 양의 톱니파형, 음의 톱니파형, 사다리꼴 파형을 사용하였으며 응력비는 R=0.1, 하중주파수는 f=1Hz로 하여 피로시험을 하였다. 1주기 반복하중하에서 인장하중 증가시간을 양의 톱니파형은 0.95초, 음의 톱니파형은 0.05초로 하였으며 사다리꼴 파형은 인장하중 증가시간이 0.3초, 최대인장하중 유지시간을 0.2초로 하였다. Fig. 1에 사용한 하중파형의 모양을 나타내었다. 시편제작 및 피로시험시 ASTM 규격

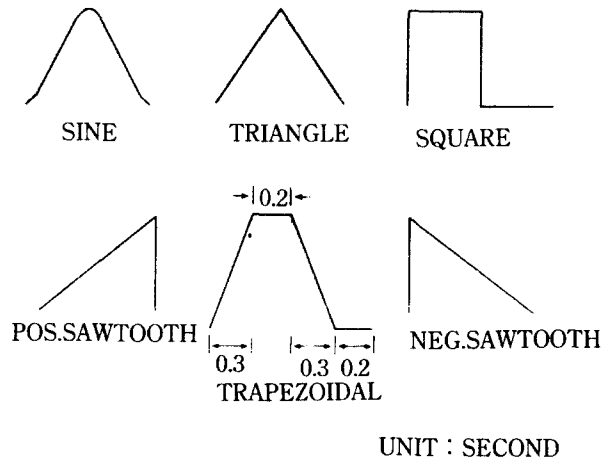


Fig. 1. Various stress waveforms at R=0 during one cycle period.

에 명시된 많은 제약과 조건을 엄격히 적용하였다.⁶⁾

시편이 수용성 부식환경에 놓여 있도록 하기 위한 환경조와 부식피로시험이 장시간 진행됨에 따라 일어나는 환경조의 부식용액의 농도 변화를 막기위해 부식용액을 계속 공급할 수 있는 용액 저장조를 제작하고 가운데에 펌프를 설치하여서 용액이 항상 150ml/min의 유속으로 일정하게 순환되도록 하였다. 시편과 부식용액에서만 화학반응이 일어나도록 환경조, 용액저장조 및 기타 장치를 실험에서 사용한 부식용액과 화학반응이 전혀 일어나지 않는 재료를 사용했으므로 이종물질에 의한 화학반응의 영향은 전혀 없었다고 본다.

사용한 부식용액은 3NiCr 강의 경우는 증류수 1ℓ당 NaCl 24.53g, MgCl₂·6H₂O 5.2g, Na₂SO₄ 4.09g, CaCl₂ 1.16g, KCl 0.695g을 용해시켜 만든 인공해수를 사용하였으며 20Ni 마르에이징강에서는 증류수 1ℓ 당 NaCl 30.0g을 용해한 3% NaCl용액을 사용하였다.

3. 실험결과

실험실 공기중에서 사인파형으로 0.1의 응력비, 10Hz의 주파수에서의 3Ni1Cr 강과 20Ni 마르에이징강의 피로균열 성장속도를 Fig. 2에 나타내었는데 Paris 영역에서 두 시편의 피로균열 성장속도는 다음과 같았다.

$$da/dN = 1.38 \times 10^{-8} \Delta K^{2.67}, \text{ 3Ni1Cr강}$$

$$da/dN = 3.2 \times 10^{-8} \Delta K^{2.50}, \text{ 20Ni 마르에이징강}$$

..... (1)

Fig. 3 a~c는 인공해수중에서 3Ni1Cr강을, Fig. 4 a~c는 3% NaCl용액에서 20Ni 마르에이징강을 R=0.1, f=1 Hz에서 하중파형을 달리 했을 때의 실험결과로서 하중파형에 따라 균열성장속도가 다르다. 이 균열성장속도는 그림에서 실선으로 표시한 실온의 공기중에서의 균열성장속도 [식 (1)]와 비교하여 나타내었다. 사각파형에서 균열 성장속도는 사인파형과 삼각파형에서보다 훨씬 낮았으나 공기중보다는 빨랐으며 사인파형에서의 균열성장속도는 삼각파형에서의 속도보다 약간

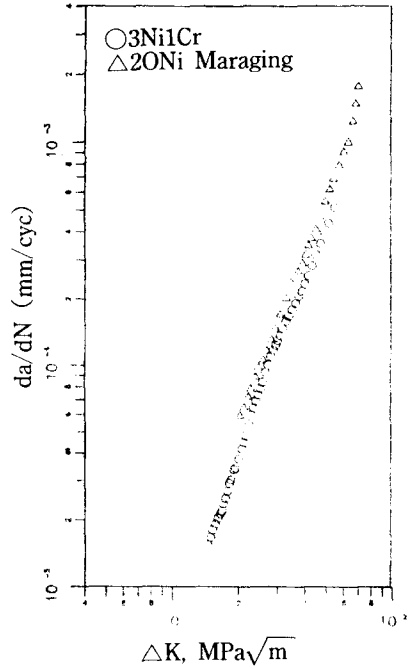


Fig. 2. Fatigue crack growth rates of two steels in laboratory air under sinusoidal wave-form at R=0.1, f=10Hz

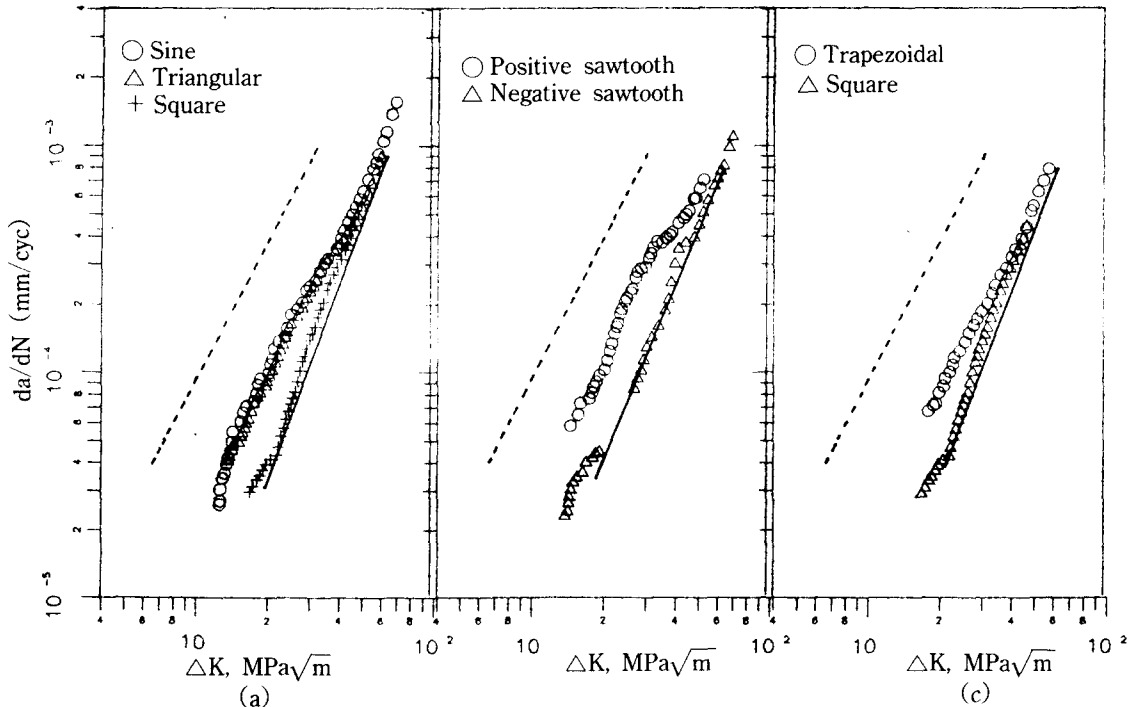


Fig. 3 Corrosion fatigue crack growth rates of 3Ni1Cr steel in synthetic seawater at R=0.1, f=1Hz (a) under sinusoidal, triangular, and square loads, (b) under positive and negative sawtooth loads, (c) under trapezoidal and square loads.

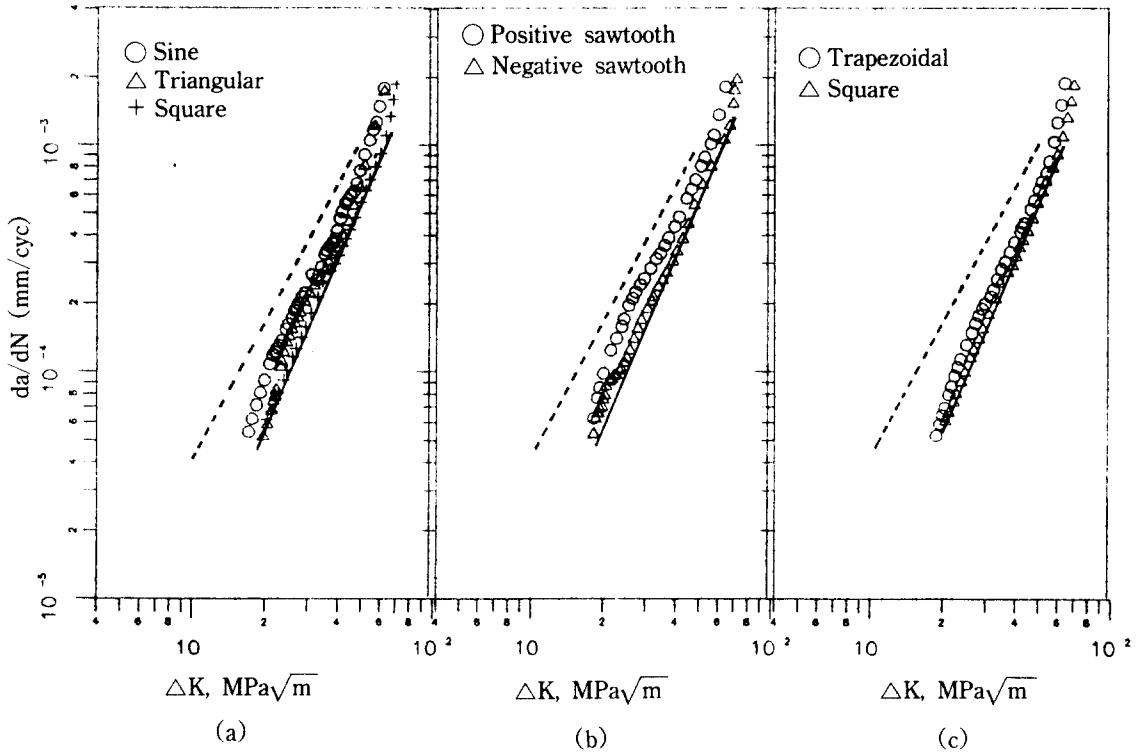


Fig. 4 Corrosion fatigue crack growth rates of 20Ni Maraging steel in 3% NaCl solution at R=0.1, f=1Hz. (a) under sinusoidal, triangular, and square loads, (b) under positive and negative sawtooth loads, (c) under trapezoidal and square loads.

높았다(Fig. 3a, 4a). 양의 톱니파형에서의 균열성장속도는 음의 톱니파형에서보다 크게 나타났으나(Fig. 3b, 4b), 이전 연구에 의하면⁵⁾ 같은 파형에서 주파수만 달리했을 때 주파수가 높을수록 균열성장속도는 작았다. 만일 부하사이클중에서 감소응력부분이 Barsom¹⁾ 이나 Lee²⁻⁴⁾가 가정 한 것처럼 균열성장속도에 영향을 주지 않는다면 음의 톱니파형에서는 다른 주파수에서도 균열성장속도의 차이를 얻지 못할 것이며 공기중과 균열성장속도가 같게 나타나야 할 것이다.

Fig. 3c 및 4c는 사다리꼴파형과 사각파형에서의 균열성장속도를 비교한 것으로서 부하사이클중에서 최대하중에서의 유지시간에 비해 상승하는 부하시간이 매우 짧더라도 균열성장속도에 매우 크게 영향을 미침을 보여주고 있다.

4. 고 찰

4.1 용해모델

부식환경에서의 균열성장속도는 역학제어 성장과 환경 제어성장에 바탕을 두고 설명을 하는 것이 편리하다. 수용액 환경에서는 환경촉진 균열형성에 대하여 두 가지 주기구, 즉 용해기구와 수소취성 기구가 제안되고 있다. 용해기구에서는 환경 균열형성 성분이 전기화학적으로 제어되며 균열첨단 용해속도와 직접 관계가 있다. 수소 취성기구에서는 균열첨단에서 산화물 형성으로 인한 부동태화가 일어나지 않으며 재료속, 특히 심하게 변형된 영역으로 피로사이클 중 항상 수소가 확산해 들어갈 수 있어서 재료의 취성을 가져온다.

관련전위에서 시간의존 양극전류 감쇠를 나타내는 금속과 환경의 조합의 경우에 금속에 소성 변형을 가하면 전류 전이가 생기는데 전류의 극대값은 변형의 크기에 좌우되고 따라서 ΔK 에 좌우되며 변형이 작용되는 속도에 좌우된다. 한 부하 사이클 동안의 전기량은 한 사이클 동안의 전류-시간곡선 아래의 면적과 같고 이 면적은 용해량에 비례한다. 만일 용해가 균열성장을 지배한다면, 균열성장속도는 용해량에 비례할 것이고 따라서 전류-시간 곡선 아래의 면적에 비례할 것이다.

3% NaCl용액에서의 SAE51100강의 부식피로에 대한 이전의 연구²⁻⁴⁾에서는 용해와 부동태화를 일으키는 환경에 침적된 금속 시편에 사인파형, 삼각파형, 사각파형의 하중을 가할 때의 전류-시간 곡선을 다음과 같다고 제안하였다. 상승전류는 균열침단에 새로이 생긴 표면적에 비례하며 이 표면적은 균열침단 개구변위에 비례하고 따라서 응력확대계수의 자승 또는 작용응력의 자승에 비례한다고 가정하였다($\delta \propto K^2 \alpha \sigma^2$). 전류의 최대값으로부터 감쇠하는 전류는 영이라고 근사하였다. 왜냐하면 하중제거중이나 압축부하에서는 균열침단 근처의 소성영역에 생긴 압축응력때문에 용해가 거의 없을 것이고 균열침단에서 부동태막이 생길 수 있기 때문이다. 최대하중에서 유지되는 동안에는 전류 i 가 부동태막의 형성 때문에 시간에 따라 지수 함수적으로 감소한다고 가정하였다. 즉,

$$i = i_0 \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 i_0 는 최대 전류이고 τ 는 부동태막 형성력을 나타내는 시간상수이다. 예를 들면, 삼각파와 사인파에서는 감쇠전류를 0이라고 근사하고 사각파의 경우는 식(2)로 근사하였다. 따라서 한 사이클 동안의 전류-시간 곡선 아래의 면적은 부하파형에 따라 변한다. 삼각파형에서의 면적이 사인파형에서의 면적보다 약간 작다. 만일 사각파형에서 전류가 최대값에서 매우 급속히 감쇠한다면, 즉 시간상수가 매우 작다면, 사각파형에서의 면적이 삼각파형에서의 면적보다 훨씬 작을

것이다. 이전의 연구에서는 1Hz와 10Hz에서 측정 한 피로균열성장속도가 같았기 때문에 시간상수가 매우 작은 값을 가져야 되었다.

위의 모델에 의하면 사각파형에서의 균열성장속도가 가장 작아야하고 다음에 삼각파형, 사인파형순으로 증가하여야 한다. Fig. 3a, 4a의 결과는 이와 잘 부합된다.

그러나 1Hz와 2Hz에서의 음의 톱니파형 하에서의 da/dN 값과 공기중에서의 결과를 비교한 이전 연구⁵⁾에 따르면 상승하중-시간 곡선만이 균열성장속도를 지배한다는 앞서의 가정이 수정되어야 함을 알 수 있다. 만일 그 가정이 옳다면, 앞의 세 개의 다른 하중에서 다른 성장속도를 얻을 수 없을 것이다. 1Hz에서의 균열성장속도가 2Hz에서의 균열성장속도보다 크다는 사실은 감소하는 하중-시간 관계도 고려되어야 한다는 것을 제시한다.

그러므로 이제 용해에 바탕을 두고 만든 이전의 모델에 약간의 수정을 하였다.⁴⁾ 앞에서 설명한 바와 같이 금속에 소성변형을 시키면 전류의 전이가 생기고, 만일 용해가 균열성장속도를 지배한다면 전류-시간 곡선 아래의 면적이 균열성장속도에 비례한다고 가정한다. 상승전류는 균열침단에서 새로 생긴 표면적에 비례하고 이 새로 생긴 표면적은 균열침단 개구변위에 비례하기 때문에 응력의 자승에 비례한다고 가정한다($\delta \propto K^2 \alpha \sigma^2$). 최대 전류에서 감쇠하는 전류는 상승전류의 몇분의 일이라고 가정하였다. 왜냐하면 하중제거 시간이나 압축부하중 균열침단 소성역에 생긴 압축응력에서는 인장때 보다는 작게 용해될 것이기 때문이다. 최대하중에서 유지하는 동안에는 앞에서 설명한 바와 같이 전류가 시간에 따라 식(2)에서와 같이 변한다고 가정하였다.

4. 2 하중파형에 따른 피로균열성장속도의 계산식

상기 모델에 의하여 여러가지 부하 파형하에서의 균열성장속도를 계산할 수 있다. Fig. 5의 부하 파형의 경우 균열성장속도 da/dN 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^2\beta\left[\int_0^{t_1}\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 dt + \int_0^{t_2} \exp(-t/\tau) dt + \alpha\int_0^{t_3}\left(\frac{t}{t_3}\right)^2 dt\right] + f(\Delta K) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 C와 α는 비례상수이고, t는 시간, f(ΔK)는 시간에는 무관한 응력확대계수 범위의 함수이고, β는 ΔK에 따라 0에서 1까지 변하는 인자이다.

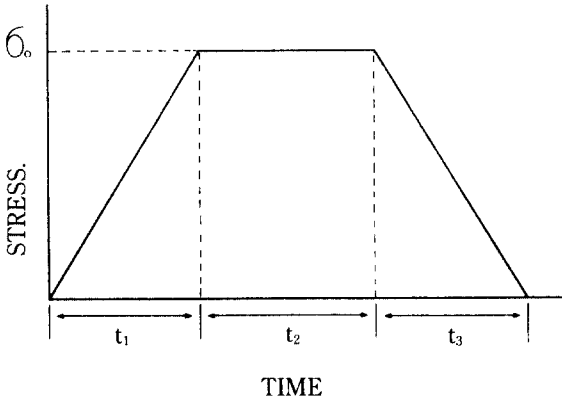


Fig. 5 A stress-time relation

낮은 ΔK영역과 높은 ΔK영역에서처럼 역학 제어 성장이 균열성장을 지배할 때 β는 영에 접근한다. 식(3)에서 상승응력, 유지응력, 감소응력이 독립적으로 거동한다고 가정하였다. 상승응력에서의 최대전류는 유지응력에서의 최대전류와 같으나 감소응력에서의 전류는 상승응력에서의 전류보다 α배 작다고 가정하였다(α<1). 식(3)을 풀면

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^2\beta\left\{t_1/3 + \tau\{1-\exp(-t_2/\tau)\} + t_3\alpha/3\right\} + f(\Delta K) \dots\dots\dots (4)$$

같은 방법으로 R=0에서 사인파형에 대한 da/dN는 다음과 같이 된다.

$$da/dN = (3/16)(1 + \alpha)C\Delta K^2\beta T + f(\Delta K) \dots\dots\dots (5)$$

식(4)로부터 양의 톱니파형, 음의 톱니파형, 삼각파형, 사각파형, 사다리꼴 파형에 대한 아래의 da/dN을 쉽게 얻을 수 있다.

$$da/dN = (1/3)C\Delta K^2\beta T + f(\Delta K) \dots\dots\dots (6)$$

$$da/dN = (1/3)\alpha C\Delta K^2\beta T + f(\Delta K) \dots\dots\dots (7)$$

$$da/dN = (1/6)(1 + \alpha)C\Delta K^2\beta T + f(\Delta K) \dots\dots\dots (8)$$

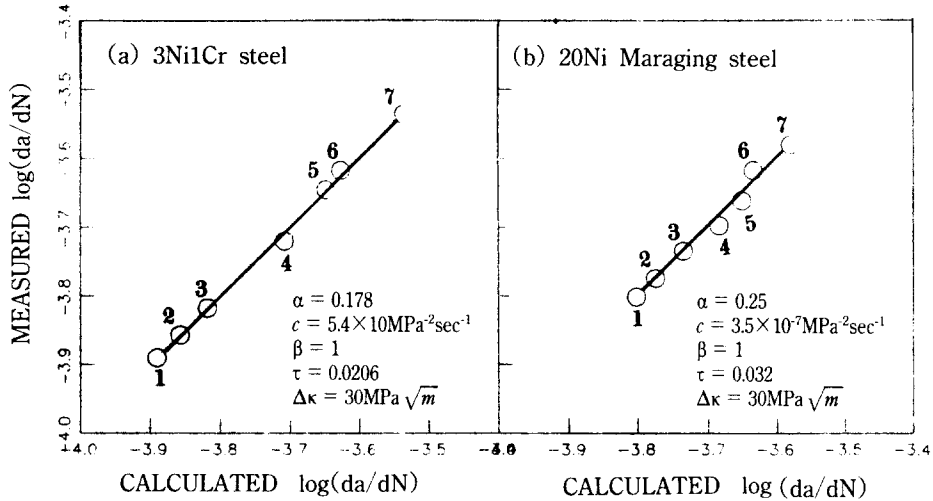
$$da/dN = C\Delta K^2\beta\tau\{1-\exp(-T/2\tau)\} + f(\Delta K) \dots\dots\dots (9)$$

$$da/dN = C\Delta K^2\beta\left\{(1/3)(1 + \alpha)t_1 + \tau\{1-\exp[-(t_1-T/2)/\tau]\}\right\} + f(\Delta K) \dots\dots\dots (10)$$

여기서 T는 주기이다.

상수 α, C, τ는 log da/dN-logΔK곡선의 기울기가 약 2이고 β를 1로 놓을 수 있는 ΔK에서의 da/dN의 값과 관련식을 이용하여 계산할 수 있다. 식(6)와 (7)에 의하면 음의 톱니파형과 양의 톱니파형에 대한 da/dN의 비가 α이다. Fig. 3b와 4b의 값으로부터 α를 구하면 C도 결정된다. 그리고 사각파형에 대한 da/dN측정값과 식(9)로부터 τ가 계산된다. 3Ni1Cr 강과 20Ni 마르에이징강 모두 ΔK = 30MPa√m에서 α, C, τ값을 구하였는데 각각의 값은 3Ni1Cr강의 경우는 0.178, 5.4×10⁻⁷MPa⁻²sec⁻¹, 0.0206sec이고 20Ni 마르에이징강의 경우는 0.25, 3.5×10⁻⁷MPa⁻²sec⁻¹, 0.032sec이었다. 이 값들을 이용하여 여러가지 파형의 경우 주어진 ΔK에서의 da/dN을 계산하고 그 결과를 측정값과 비교한 결과가 Fig. 6a와 b이다. 측정값과 계산값이 두 강 모두 잘 일치함을 보여주고 있다.

용해모델이 균열성장속도의 상한값을 준다는 것에 유념해야 한다. 부식반응이 진행함에 따라 국부적 균열첨단 모양에 상당한 수정이 일어날 수 있다. 부식에 의한 균열둔화와 전위에 의한 자연적 균열둔화가 동시에 일어나 전체 개구에 대한 후자의 기여가 작아진다. 응력 반전중에 보통 방법으로 연성피로 줄무늬가 두드러질 수 있으며 파괴면은 2단계 피로균열 성장중 불활성 분위기에서 얻어지는 것과 비슷해 질 수 있다. 용해가 균열첨단에 제한되기 때문에 균열첨단 모양이 수정될 수 있다. 이것으로부터 Tomkins⁷⁾는 용해가 균열확장에 미치는 하나의 한계 효과는 기계적 개구, 즉 최대 균열첨단 개구변위의 1/2과



1. Air Data 2. Negative sawtooth 3. Square 4. Trapezoidal 5. Triangle
6. Sinusoidal 7. Positive sawtooth

Fig. 6 Fatigue crack growth rate calculated based on dissolution model against measured data at 30 MPa \sqrt{m} (a) 3Ni1Cr steel, (b) 20Ni Maraging steel.

근사적으로 같은 균열성장속도를 가져온다는 것이라고 결론을 내렸다. 이는 만일 용해되어 더 큰 유효 개구가 얻어진다면, 하중을 제거할 때 균열이 충분히 다시 날카롭게 되는 능력을 잃게 되고 노치가 될 것이기 때문이다. 노치 뿌리에서 균열이 다시 생긴 후에라야만 성장이 더 일어날 것이다.

최대 균열첨단 개구변위 δ_{max} 는 다음과 같다.⁸⁾

$$\delta_{max}/2 = 0.12K^2_{max}/(E\alpha_0) \dots\dots\dots (14)$$

여기서 E와 σ_0 는 각각 탄성계수와 항복응력이다. 그러므로 Tomkins가 제안한 성장속도의 상한값은 다음과 같다.

$$da/dN = \delta_{max}/2 = 0.12\Delta K^2/[E\alpha_0(1-R)^2] \dots\dots\dots (15)$$

만일 E = 21.3 x 10⁴ MPa(철의 탄성계수), R=0.1 그리고 Table 2의 항복응력값을 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$da/dN = 9.7 \times 10^{-7} \Delta K^2, \text{ 3Ni1Cr 강}$$

$$da/dN = 4.16 \times 10^{-7} \Delta K^2, \text{ 20Ni 마르에이징강}$$

..... (16)

여기서 da/dN과 ΔK 의 단위는 각각 mmcycle⁻¹과 MNm^{-3/2}이다.

식(16)의 결과를 Fig. 3, 4에 점선으로 나타내었다. Fig. 3, 4의 균열성장속도가 이 한계성장속도를 초과하지 않는다는 것은 흥미있는 일이다. 이 사실이 Fig. 3, 4의 피로균열 성장속도가 용해모델을 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

인공해수중에서 3Ni1Cr 강 및 3% NaCl용액에서 20Ni 마르에이징강의 자유부식시 피로균열 성장속도에 미치는 하중파형의 영향을 조사하고 용해기구의 역할을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인공해수 중과 3% NaCl용액에서 3Ni1Cr 강과 20Ni 마르에이징강의 하중파형이 피로균열 성장속도에 미치는 영향을 모델로 잘 설명할 수 있었다.
2. 감소하중 동안의 용해속도가 상승하중 동안의 용해속도의 α 배이고 최고하중에서 유지하는 동안에 시간상수를 고려하여 계산한

$\Delta K = 30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서의 피로균열 성장속도는 두 강 모두 측정결과와 매우 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

1. J.M. Barsom, "Effect of Cyclic Stress Form on Corrosion Fatigue Crack Propagation Below K_{ISCC} in a High Yield Strength Steel," Proc. Int. Cont. on Corrosion Fatigue NACE-2, Univ. Connecticut, pp. 424~436, 1972.
2. D.N. Lee, S.K. Lee, "Corrosion Fatigue of 1% C-1%Cr Alloy Steel." Proc. 2nd ROC-ROK Conf. on the Fracture of Metals, Nationl Tsing Hua Univ, Taiwan, pp. 39~56, 1986.
3. S.K. Lee, D.N. Lee, "Corrosion Fatigue of High Carbon Chromium Steel." Proc. 2nd Conf. of Asian-Pacific Congress on Strength Evaluation, Seoul Nationl Univ., Seoul, PP. 395~402, 1986.
4. D.N. Lee, S.K. Lee, "Corrosion Fatigue of SAE 51100 Steel in 3%NaCl Solution," Mater. Sci. Tech., Vol. 5, pp. 477~486, 1986.
5. D.N. Lee, S.K. Lee, "Effects of Stress Waveforms on Fatigue Crack Growth Rates of SAE51 100 Steel in 3%NaCl Solution," Proc. Int. Conf. on Evaluation of Materials Performance in Severe Environments, Kobe, pp. 167~174. 1989.
6. ASTM Standards E399-83, pp. 480~483, 1988.
7. B. Tomkins, "Role of Mechanics in Corrosion Fatigue," Metal Sci., Vol. 13, pp 387~395, 1979.
8. J.R. Rice, J. Mech. Phys, Solids, Vol. 22, p. 17, 1974.