大韓機械學會論文集 第16卷 第7號, pp. 1373~1380, 1992.

〈論 文〉

ΔA를 파라미터로 이용한 피로크랙전파속도에 미치는 재료 및 응력비의 영향에 대한 연구

박영철* · 오세욱* · 김광영** · 허정원*** · 강정호***

(1992년 3월 27일 접수)

Study of Materials and Stress Ratios on Fatigue Crack Propagation Rate Using Parameter ΔA

Young-Chul Park, Sae-Wook Oh, Kwang-Young Kim
Chung-Weon Hue and Jung-Ho Kang

Key Words: Fatigue Strain Intensity Factor(피로변형률 확대계수), Fine Dot Grid Strain Measurement Method(미소 원형격자 변형률 측정법), Crack Tip(크랙팁), Local Cyclic Strain Field(국소 피로변형률장), Crack Propagation(크랙전파)

Abstract

The local cyclic strain distribution near the crack tip has been investigated by the fine Dot Grid Strain Measurement Method, which had been suggested strain measurement method to resolve experimental difficulties by authors. It has been found that the magnitude of the local cyclic strain distribution($\Delta\varepsilon_{eq}$) near a crack tip has been varied by the applied cyclic load level and material, but the shape of the local cyclic strain distribution near the crack tip has been experimentally scrarcely altered : that is $\Delta\varepsilon_{eq}=\Delta A\cdot f(\theta)\cdot r^{-1}$. Consequently, the local cyclic strain field near the crack tip could be favorably characterized by a single parameter fatigue strain intensity factor ΔA. In addition, with the viewpoint that ΔA depends on material and load level, ΔA has been applied to evaluate the fatigue crack propagation rate and usefulness of the result has been considered. As a result, it has been ascertained that ΔA has been a useful parameter to evaluate the fatigue crack propagation rate.

1. 서 론

피로파괴의 발생은 극히 국소적인 현상이므로 피로파괴 문제를 해결하기 위해서는 사용재료에 대한 크랙팁 부근에서 응력과 변형률에 대한 연구는 매우 중요하다. 이러한 시각에서 피로파괴 문제에 대한 파괴기구이론과 유한요소법(FEM)을 이용한 이론적인 연구가 많이 보고되어져 있다.[1~3] 크랙팁 부근의 변형상태에 대한 이론적인 해를 구하는 것은 본래 수학적으로 매우 복잡한 문제이다. 그러므로 이론적인 해는 재료를 등방성 탄성, 완전소성 등으로 재료의 성질을 단순화시킨 가정 하에서 논의되고 있다.

그러나 실제 구조부재의 크랙팁 부근의 변형상태는 이론적 해석만으로 해명할 수 없는 많은 문제점이 존재한다. 따라서 피로파괴 문제를 해결하기 위

*정회원, 동아대학교 기계공학과
**정회원, 한국기계연구원
***정회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

해서는 크랙팁 부근의 변형상태에 대해 정확한 실험적 해석방법이 요구되며, 이러한 목적으로 실험적연구[4~6]가 활발히 행하여지고 있다. 하지만 크랙팁에서 국소 피로변형률의 측정은 종래의 실험적인 방법[7~9]으로는 충분하지 못한 상태이다.

전보[10]에서 실험상 어려운 문제점인 크랙팁에서의 국소피로변형률분포를 새롭게 제안된 방법인 미소원형격자변형률 측정법으로 해석하고, 그 결과 국소피로변형률($\Delta\varepsilon_{eq}$)의 분포형태는 재료나 하중크기에 의해 변하지 않는다는 것을 알았다. 즉 $\Delta\varepsilon_{eq}=\Delta A\cdot f(\theta)\cdot r^{-1}$이다. 식에서 ΔA는 국소피로 변형률장의 상태를 정량적으로 나타낼 수 있는 새로운 파라미터로 제안하였으며, 이를 피로변형률확대계수라 칭하였다.

본 연구에서는 전보에서 실험역학적으로 도출한 ΔA가 재료 및 하중크기에 의존하는 점에 착안하여, SNC631-A, SNC631-B, S45C, A12024-T3 및 A17075-T6 등 5종류 재료를 응력비 $R=0.1$, 0.3, 0.5에서 피로크랙전파속도시험을 실시하고, 피로크랙팁의 국소피로변형률장의 상태를 정량적으로 나타낼 수 있는 피로변형률확대계수 $\Delta A(m,P)$를 이용하여 크랙전파속도 da/dN을 통일적으로 평가하고, 그 결과의 유용성을 명백히 하였다.

2. 시료 및 실험방법

본 실험에 사용한 시료는 철강 재료인 두 종류의 SNC631 합금강과 S45C탄소강 및 비철 재료인 Al2024-T3와 Al7075-T6 합금이다. 그 화학성분은 Table 1과 같다. SNC631 합금강은 본 실험의 목적에 따라 Table 2와 같이 2 종류의 다른 열처리를 실시하여 기계적 성질이 다른 시료를 만들었다. Table 3은 각 시료의 기계적 성질을 나타낸다.

Fig. 1은 피로시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 피로 예크랙은 ASTM E647-88 규정에 따라서 노치끝에서부터 약 4 mm 도입하여, a/W가 약 0.5가 되도록 모든 시험편을 준비하였다.

Fig. 2는 피로크랙이 진전하고 있는 시험편에서 미소원형격자 사진의 한예를 나타내고 있다. 피로예크랙을 도입한 후, 시험편 표면을 경면으로 연마하여 사진전사법 및 전해연마법을 이용하여, 시험편표면에 피치 25.4 μm의 원형격자를 약 2~3 μm의 깊이로 새겨 넣었다.[10]

피로실험에 이용한 시험기는 유압서보 피로시험기(INSTRON 1331, 10tonf)이다. 피로실험 조건은 하중제어 상태에서 하중파형은 정현파(sinusoidal), 주파수는 5 Hz, 상온 대기중에서 실시하였으며, 응

Table 1 Chemical composition of material (wt. %)

items / material	Si	Fe	C	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Al2024-T3	0.07	0.14	4.06	6.67	1.27	0.01	0.06	
Al7075-T6	0.06	0.19	1.52	0.035	2.50	5.27		0.23
items / material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SNC631	0.29	0.22	0.51	0.02	0.02	0.06	2.59	0.70
S45C	0.47	0.24	0.71	0.015	0.01	0.02	0.02	

Table 2 Heat treatment condition of SNC631 alloy steel

items / material	Heat treatment condition	
	quenching	tempering
SNC631-A	1050℃, O.Q.	200℃, O.C.
SNC631-B	〃	600℃, O.C.

Table 3 Mechanical properties of materials

items material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation (%)	Fracture toughness,J_{IC} (MPa·m)
A12024-T3	360.0	480.0	72300	13.5	0.026
A17075-T6	510.7	541.2	73200	11.9	0.020
SNC631-A	1400.2	1723.1	201000	12.6	0.027
SNC631-B	823.8	915.1	198000	19.4	0.214
S45C	303.0	602.0	199000	27.2	0.045

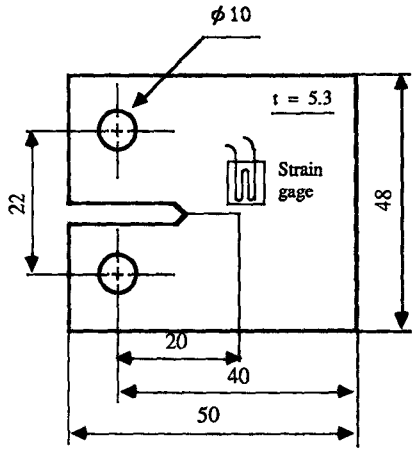

Fig. 1 Specimen geometry and dimensions(mm)

력비의 영향을 알아보기 위하여 R=0.1, 0.3, 0.5 등 3 종류의 응력비를 선택하여 실험하였다. 정확한 피로변형률을 측정하기 위하여 실험을 일시 정지하는 경우가 없이 크랙팁 부근의 미소 원형격자 변형상태를 광학시스템을 통하여 배율 50배로 직접 촬영하였다. 촬영한 필림에서 미소 원형격자 측정법에 따라 변형률을 해석하였다. 미소 원형격자 측정법, 자동화상계측 시스템 및 변형률 해석방법은 전보[10]에서 상세히 설명하였다.

ΔK_{eff}의 산출을 위한 피로크랙 개폐구 거동 평가는 gage length 2mm인 스트레인게이지를 Fig. 1과 같이 시험편 표면에 부착하여 사용하는 탄성컴플라이언스법을 이용하였다.

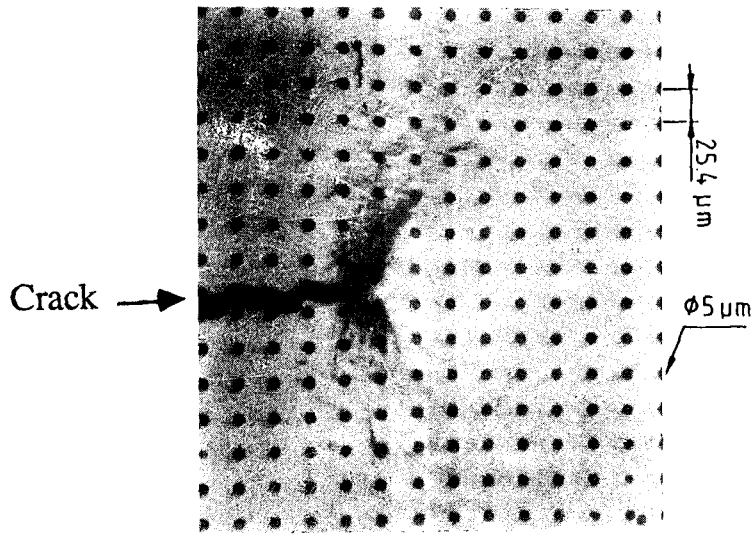

Fig. 2 Photograph of fine dot gird

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로변형률확대계수 ΔA

전보[10]에서 피로크랙팁의 피로변형률 분포는 $r=100\,\mu m$를 천이점으로 기울기가 -1 및 $-1/2$인 두 영역으로 나누어지며, 기울기가 -1인 천이점 내부영역을 피로파괴가 직접 일어나는 크랙팁의 국소영역을 피로변형률장으로 정의하였다. 피로변형률장으로 정의된 크랙팁의 국소영역($r \leq 100\mu m$)에서 피로변형률장의 상태는 Fig.3, Fig.4의 결과로부터 비례상수 ΔA를 포함하는 r과 θ의 함수로써 나타낼 수 있었다. 즉,

$$\Delta\varepsilon_{eq}=\Delta A\cdot f(\theta)\cdot r^{-1}$$
$$f(\theta)=\cos(\theta/2)\cdot(1+3/2\sin^2\theta) \quad (1)$$

윗식에서 크랙팁의 피로변형률장 상태를 표현하는 $\Delta\varepsilon_{eq}$는 비례상수 ΔA를 실험적으로 측정함으로써 정량적으로 나타낼 수 있었다. 윗식에서 $f(\theta)$와 r는 기하학적으로 결정되는 양이므로 $\Delta\varepsilon_{eq}$는 파라미터 ΔA만으로 나타낼 수 있었다. 따라서 피로크랙팁의 피로변형률장의 상태를 정량적으로 나타낼 수 있는 새로운 파라미터로서 피로변형률확대계수 ΔA를 제안하였다.

또한, 피로변형률확대계수 ΔA의 유효성을 검토한 결과, 피로변형률확대계수 ΔA는 피로하중 및 사이클수 등 피로조건에 관계없이 크랙팁의 피로변형률장을 일의적으로 나타낼 수 있는 파라미터로서 유효하며, 그것의 크기는 재료와 피로하중에 의존한다는 것을 알았다.

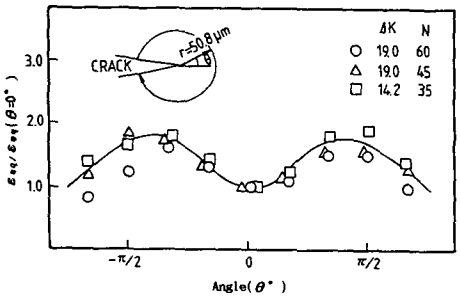

Fig. 3 Angular dependence of the equivalance fatigue strain at r=50.8μm

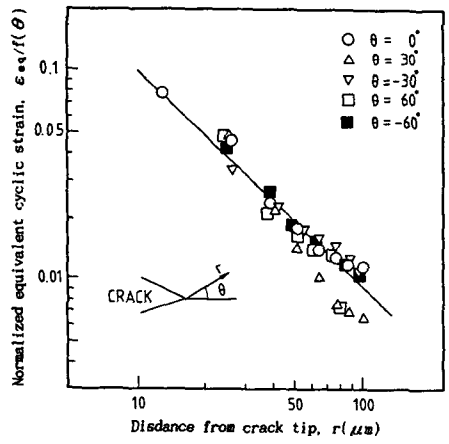

Fig. 4 Relation between the normalized equivalant fatigue strain and the distance from the crack tip

3.2 피로변형률확대계수 ΔA를 이용한 크랙전파속도 평가

실험역학적으로 크랙팁 변형률분포에서 도출한 피로변형률확대계수 $\Delta A(m,P)$를 파라미터로 이용하여 피로크랙전파속도 da/dN의 평가를 시도하였으며, 그 결과를 기초로 피로변형률확대계수 ΔA의 피로크랙전파속도 평가파라미터로서의 유용성을 검토 하였다.

Fig. 5는 A12024-T3의 피로실험에서 피로크랙전파속도 da/dN을 기존의 피로크랙전파속도를 평가하는 파라미터인 응력확대계수폭 ΔK, 유효응력확대 계수폭 ΔK_{eff} 및 새로이 제안한 피로변형률확대계수 ΔA를 이용하여 정리한 결과이다. (a) ΔK로 정리한 결과는 da/dN이 응력비가 증가함에 따라 증가하며, 응력비의 영향을 뚜렷이 보이면서 전체 데이타의 산포가 크다. (b) ΔK_{eff}로 정리한 결과는 ΔK로 정리한 결과에 비하여 상대적으로 응력비의 영향이 조금 감소하여 산포가 줄어 들었다. (c) ΔA로 정리한 결과는 위의 두 경우에서 나타나는 응력비의 영향이 없어지고 전체 데이타가 일직선 상에 분포하고 있다. Fig. 6은 S45C의 da/dN을 ΔK, ΔK_{eff} 및 ΔA 파라미터를 이용하여 정리한 결과이다. Fig. 5의 결과와 마찬가지로 da/dN은 ΔA 파라미터를 이용하여 정리한 경우가 응력비의 영향이 없이 가장 좋은 결과를 보인다. 즉, 철강재료와 비철재료 두 종류 모두에 대하여 ΔA의 유용성이 나타난다.

이같은 응력비의 영향이 소멸되는 결과는 ΔA가 크랙닫힘의 영향을 포함하기 때문이다. ΔA를 도출한 크랙팁의 국소피로변형률분포를 해석하는 미

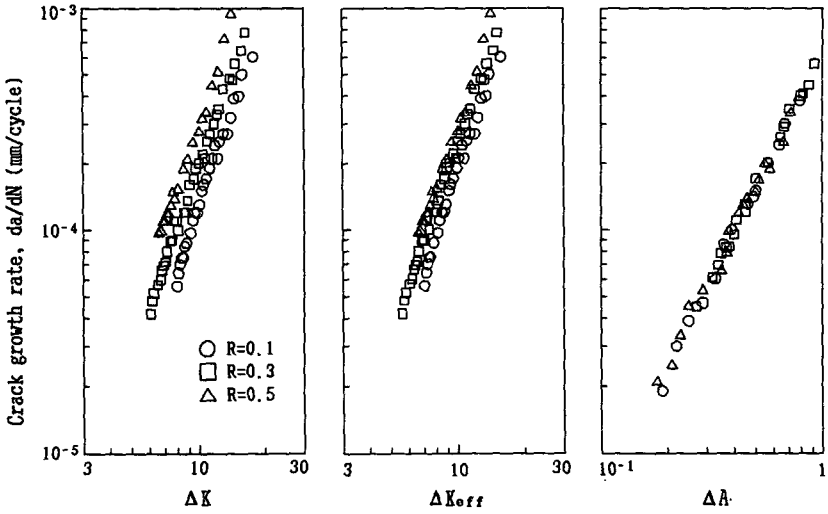

Fig. 5 Relation between ΔK, ΔK_{eff}, ΔK parameters and crack growth rate in A12024-T3

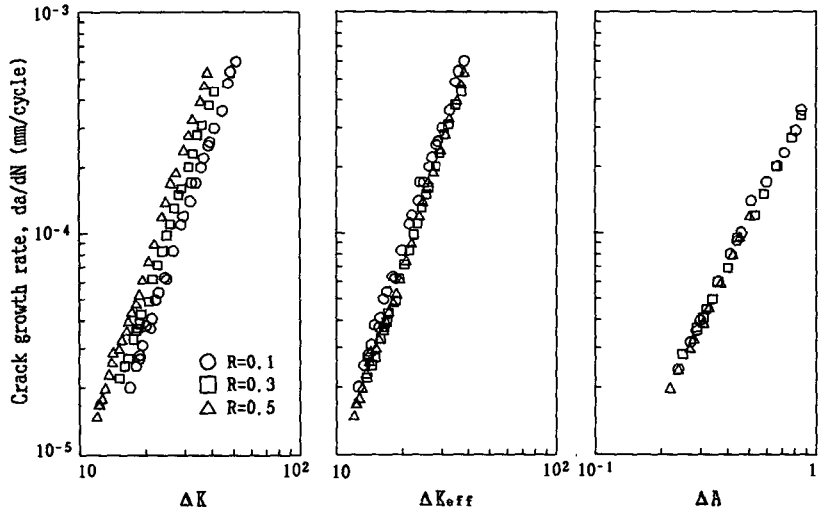

Fig. 6 Relation between ΔK, ΔK_{eff}, ΔA parameters and crack growth rate in S45C

소원형격자측정법[10]은 변형률상태를 약 500배 확대하여 크랙팁 부근의 변형상태를 종합적으로 해석하므로 크랙닫힘의 영향이 측정량에 충분히 포함된다. 결론적으로 ΔA를 이용하여 크랙전파속도를 정리할 경우에 응력비의 영향이 없어지는 물리적 이유는 ΔA가 크랙닫힘이 충분히 고려되는 실험역학량이기 때문이라고 생각된다.[11]

따라서 Fig. 5과 Fig. 6의 결과에서, 피로크랙전파속도를 평가하는 파라미터로서, ΔK_{eff}가 ΔK에 비해서 응력비의 영향에 대하여 일정한 정도의 역학적 유용성을 나타내어서 상대적으로 응력비의 영향이 감소하지만, 여전히 무시할 수 없을 정도의 영향은 나타난다. 그러나 ΔA는 응력비 영향이 없어지고 전체 데이터가 응력비에 관계없이 일직선상에 잘 정리됨을 알 수 있다. 이같은 결과는 응력비가 다른 하중들이 중첩되는 변동하중 하에서 크랙전파속도를 평가하고, 잔존수명을 예측하는 작업 등에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 7은 모든 실험재료의 피로크랙전파속도 da/dN을 응력확대계수폭 ΔK를 이용하여 정리한 결과이다. 모든 재료에서 응력비 영향이 뚜렷이 보이며, 전체 데이터가 비철재료와 철강재료로 분리되

어 2개의 밴드군으로 나타나고 있다.

Fig. 8은 모든 실험재료의 da/dN을 ΔK_{eff}를 이용하여 정리한 결과이다. ΔK의 경우에 비해서 상대적으로 응력비 영향만이 조금 감소할 뿐 재료의 영향은 동일하다.

Fig. 9는 da/dN을 피로변형률확대계수 ΔA를 이용하여 정리한 결과이다. 모든 재료에서 응력비 영향이 없어지고 데이터가 일직선 상에 정리됨과 동시에 재료의 영향도 감소하여 전체 데이터가 분포하는 분포밴드폭이 현저하게 좁아졌음을 볼 수 있다. ΔK_{eff}를 이용하여 da/dN을 정리한 경우는 ΔK를 이용한 경우에 비해서 응력비에 의한 데이타의 산포에 대해서만 유용성을 보이지만, ΔA를 이용하여 da/dN을 정리한 경우는 재료에 의한 산포에 대해서도 좋은 유용성을 나타낸다.

그리고 da/dN과 ΔA 관계를 Paris식[11]〔$da/dN = C(\Delta K)^n$〕의 형태로 각 재료에서 구하여 보았다.

$$\begin{aligned}
&\text{SNC631-A} : da/dN = 1{,}1\times10^{-3}(\Delta A)^{2.04}\\
&\text{SNC731-B} : da/dN = 4.8\times10^{-44}(\Delta A)^{2.07}\\
&\text{S45C} \quad\ : da/dN = 4.7\times10^{-4}(\Delta A)^{2.03}\\
&\text{Al2024-T3} : da/dN = 6.3\times10^{-4}(\Delta A)^{2.04}\\
&\text{Al7075-T6} : da/dN = 8.9\times10^{-4}(\Delta A)^{2.00} \qquad (2)
\end{aligned}$$

Paris식〔$da/dN = C(\Delta K)^n$〕에서 C와 n은 응력비나 응력반복속도, 응력파형 및 시험편 두께 등의 영향이 포함되는 재료정수이다. Paris식과 동일하

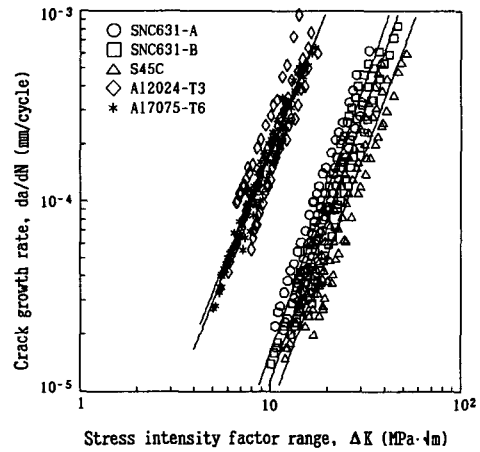

Fig. 7 Relation between stress intensity factor range and crack growth rate in all materials

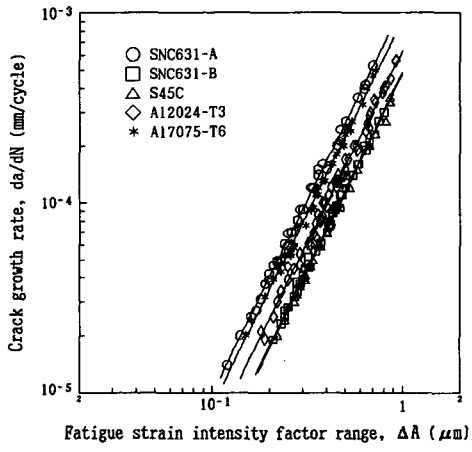

Fig. 9 Relation between fatigue strain intensity factor range and crack growth rate in all materials

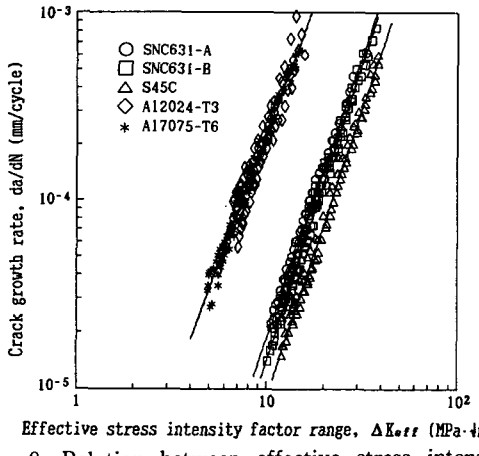

Fig. 8 Relation between effective stress intensity factor range and crack growth rate in all materials

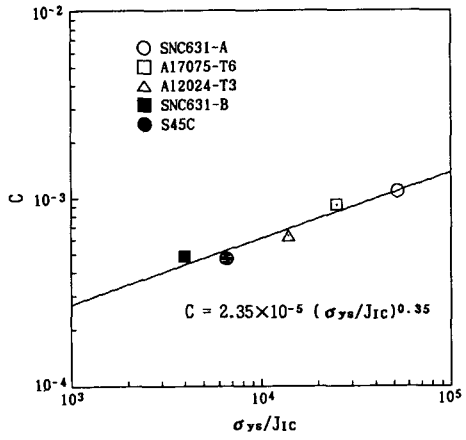

Fig. 10 Relation between σ_{ys}/J_{IC} and material constant C

게 $da/dN=C(\Delta A)^n$ 식에서도 C와 n은 재료정수이지만 Fig. 5, Fig. 6의 결과로부터 응력비의 영향은 나타나지 않는다.

또한, $da/dN=C(\Delta A)^n$식에서 각 재료의 da/dN과 $\Delta A(m, P)$관계는 재료에 따라서 계수 C값은 변하지만, 그 경사는 재료에 관계없이 일정하며 각 재료는 모두 $n\fallingdotseq 2$임을 알았다. 따라서 모든 재료에 대해서 da/dN과 $\Delta A(m,P)$관계는 식 (3)과 같이 통일적으로 표현할 수 있다.

$$da/dN=C(\Delta A)^{2.0} \quad (3)$$

C ; 재료상수

즉, 본 실험 범위 내에서 n값은 모든 재료에서 일정 상수이므로 C 값이 증가하면 da/dN도 비례적으로 함께 증가하며, ΔA를 알면 C 값만으로 모든 재료의 da/dN을 정리하는 것이 가능함을 알았다. 따라서 피로변형률확대 계수 ΔA는 피로크랙전파속도를 평가할 수 있는 유용한 역학적 파라미터임을 확인할 수 있다.

3.3 비례상수 C의 간이 계산법

3.2 절에서 $\Delta A(m,P)$가 da/dN을 평가하는 파라미터로서 대단히 유용한 것 임을 알았다. 특히 식(3)에서 C는 재료의 피로크랙전파속도를 결정하는 중요한 재료상수임을 알았다. 그러나 C값을 전체 피로실험에 의하여 구하려면 많은 실험시간과 해석시간이 필요하다. 만약 C값을 재료의 기계적 성질을 이용하여 간편하게 추정할 수 있다면 재료의 크랙전파속도를 결정하는 목적에 대단히 유용할 것으로 생각된다. 따라서, 이러한 관점에서 재료의 C값을 계산하는 문제를 검토하였다.

Fig. 10은 각 재료의 C값과 σ_{ys}/J_{IC}〔σ_{ys} ; yield strength, J_{IC} ; fracture toughness〕 관계를 조사한 결과이다. 이 결과로 부터 C와 σ_{ys}/J_{IC} 관계는 다음식으로 표현되는 일정한 관계가 있음을 알았다.

$$C=2.35\times10^{-5}(\sigma_{ys}/J_{IC})^{0.35} \quad (4)$$

위식을 이용하면 각 재료상수 C값은 재료의 항복강도와 파괴인성값 등, 기본적인 기계적성질을 이용하여 간단히 근사값을 구할 수 있다.

4. 결론

SNC631-A, SNC631-B, S45C, A12024-T3 및 A17075-T6등 5종류의 재료를 응력비 $R=0.1$, 0.3, 0.5에서 크랙전파속도시험을 실시하고, 피로크랙팁의 국소피로변형률장의 상태를 정량적으로 나타낼 수 있는 피로변형률확대계수 ΔA를 이용하여 크랙전파속도 da/dN을 통일적으로 평가하고, 결과의 유용성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로변형률확대계수 ΔA로 크랙전파속도를 정리한 결과, ΔK, ΔK_{eff} 등의 경우와는 달리 응력비의 영향이 없어지고, 전체 데이터가 일직 상에 잘 정리되었다. 또한, ΔA는 응력비의 산포뿐만 아니라 재료에 의한 산포에 대해서도 좋은 유용성을 보였다.

(2) 본 연구범위 내에서 피로크랙전파속도와 피로변형률확대계수 ΔA의 관계는 재료에 구애없이 기울기는 $n\fallingdotseq 2$로 동일하며, 그 관계는 다음과 같이 통일적으로 나타낼 수 있었다.

$$da/dN=C(\Delta A)^{2.0}$$

C ; 재료 상수

따라서 (1) 및 위의 결과로부터 피로변형률확대계수 ΔA는 피로크랙전파속도를 평가할 수 있는 유용한 파라미터임이 확인되었다.

(3) 피로크랙전파속도식에서 재료상수 C를 재료의 기계적성질을 이용하여 간단히 산출하는 간이계산식을 제안하였다. C값은 σ_{ys}/J_{IC} 값과 좋은 관계가 있음을 알았다.

$$C=2.35\times10^{-5}(\sigma_{ys}/J_{IC})^{0.35}$$

참고문헌

(1) Rice, J.R. 1967, "Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue," ASTM STP 415, pp. 247~311.

(2) Rice J.R. and Rosengren, G.F. 1968, "Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material," J.Mech. Phys.Solids 16, pp. 1~12.

(3) Hutchinson, J.W. 1968, "Plastic stress and strain fields at a crack tip," J.Mech Phys 16, pp. 337~347.

(4) Furuya T. and Shimada H., 1986, "Fatigue crack initation from notch root(Local strain

damage accumulation process on crack initation)," Eng. Fracture Mech 23-6, pp. 983~989.

(5) Kang T.S. and Liu, H.W. 1974, "Fatigue crack propagation and cyclic deformation at a crack tip," J.Fracture 10, pp. 201~222.

(6) Davidson D.L. and LankfordJ., 1980, "Fatigue crack tip plastic strain in high strength aluminum alloy," J.Fatigue of Eng.Materials and structure 3, pp. 289~303.

(7) Ohta, A. Kosuge M. and Sasaki, E. 1977, Int. J. of Fracture 13, p. 289.

(8) Post, D. 1965, Exp. Mech., p. 368.

(9) Daniel, I.M. 1964, Trans. ASME, Ser. E32, p. 598.

(10) Park, Y.C. Oh, S.W. and Kim, K.Y. 1991, "The local fatigue strain distribution near a carack tip by using fine dot grid strain measurement method," KSME 15,1, pp. 209~217.

(11) Shimada H. and Furuya, Y. 1981, "Application of Crack-tip-strain Loop to Fatigue-crack Propagation," Experimental mechanics, Vol.21, No.11, pp. 423~428.

(12) Paris D.C. and Erdgon, F. 1963, Transaction ASME, Series D.85, pp. 528~534.