

부분 열처리한 기계 구조용 탄소강의 피로균열 전파에 관한 연구

A Study on the Fatigue Crack Propagation of Partly Heat Treated Medium Carbon Steel

김 상 철 김 선 용**
Sang-Chul Kim Seon-Yong Kim

ABSTRACT

It is well known that mechanisms of fracture and fatigue crack propagation depend upon various characteristics such as environmental condition, crack geometry, heat treatment and mechanical properties. It seems to be important for the detailed evaluation of structural integrity to investigate the effects of the above factors on the behavior of structural components which contain flaws. In this paper, it is studied that the fatigue crack propagation of partly heat treated medium carbon steel(SM45C) by high frequency heat treatment.

1. 서 론

각종 기계나 구조물은 사용중 예기치 못한 갑작스런 파괴를 일으켜 인적, 물적 피해를 가져오는 경우가 종종 일어나고 있다. 취성 및 피로파괴는 재료를 제조할 때 부재내에 생기는 미소한 균열과 사용중에 어떤 원인에 의해서 발생되는 미소균열이 외력이나

환경에 의해서 급속하게 또는 점차로 성장하는 결과로 일어나게 된다.

피로균열 전파거동은 여러 인자의 영향을 받으며 그 대표적인 인자로는 판의 두께[1~3], 균열형상[4], 하중주파수[5], 기계적 성질[6~7], 응력비 및 과대하중으로 인한 잔류응력[8~10]등이 있으며 이러한 인자들에 의해 발생하는 피로파괴 양상은 매우 복잡하고 다양하다. 재료의 기계적 성질 중에서 경도는 균열 선단의 소성역과 매우 밀접한 관계가 있으며

* 인하대학교 기계공학과
**유한전문대학교 금형설계과

개구변위에 크게 영향을 미칠 것으로 추측된다. 특히, 구조물의 부재에 부분적인 결함이 발생한다든지 혹은 부분적으로 열처리 되는 환경하에 있는 부분은 기계적 성질이 부분적으로 변화되어 2상재료와 같이 된다.

본 연구에서는 이들에 대한 정확한 피로특성을 규명하여 부분적으로 기계적 특성이 다른 기계 구조물 및 재료의 안정성을 평가하는 기초적인 정보를 제공하기 위하여 열처리후 축, 치차, 커플링, 연결봉 등 기계 구조물에 많이 이용되고 있는 기계 구조용 탄소강(SM45C)에 대하여 고주파 열처리로 부분적으로 기계적 특성이 다른 시편을 제작하여 이 시편에 대한 피로시험을 통하여 피로균열 전파거동을 규명하였다.

2. 피로 시험

2.1 시편 형상

본 실험에 사용된 재료는 두께가 4.35mm의 기계 구조용 탄소강(SM45C)으로서 Table2-1과 Table2-2에 재료의 기계적 성질과 재료의 화학적 성분을 각각 나타내었다.

모든 피로 시험편의 길이 방향은 봉의 압연방향에 수직이 되도록 절단 가공하였고, 피로 시험편은 ASTM E399의 규정에 따라 CT(compact tension) 시험편을 제작하였으며 Fig.2-1에 보였다.

Table 2-1 Mechanical properties

재료	탄성계수 MPa	포아손비 ν	연신률 %	인장강도 MPa	항복강도 MPa	경도 HRc
SM 45C	1701616	0.298	11.53	573.30	269.5	9.49

Table 2-2 Chemical compositions (Wt%)

재료	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SM 45C	0.44	0.22	0.67	0.17	0.18		

2.2 실험 방법

피로 시험편은 순수 모재, 모재 60%와 열처리 40%, 전체 열처리 및 열처리 60%와 모재 40%의

4가지 형상으로 하였으며 Fig.2-2에 보였다.

부분적으로 열처리한 피로 시험편은 Fig.2-3에 보인 바와 같이 부분 열처리를 확실히 하기 위하여 15mm, 5mm의 계단형으로 밀링 가공하였고, 두께 5mm 부분을 연삭한 후 두께 5mm 부분을 출력 전력 11KW, 출력전압 13V, 주파수 60KHz로 고주파 열처리(고주파 발전기, 200KW/60KHz, 일본 전자공업주) 하였다. 두께 15mm의 모재부를 두께 5mm로 밀링 가공한 후 시험편 전체를 연삭하였다. 그리고 200℃로 1시간 템퍼링하여 표면을 폴리싱한 후 4% 질산용액으로 표면 부식하여 열처리 경계부를 확인하고, 열처리 경계부를 기준으로 하여 열처리한 부위가 폭(W=64mm)의 60%인 38.4mm 되게 정하고 나머지 부분은 모재로 한 것과 모재가 폭의 60%인 38.4mm 되게 정하고 나머지 부분은 열처리한 것으로 하였다. 시험편 중앙부에 슬리트(slit)의 길이가 12.8mm될 때까지 와이어 방전가공 하였다. 또한, 예비균열의 길이는 피로 시험기를 이용하여 슬리트의 선단으로부터 1.5mm 이상이 되도록 하였다.

피로 시험기는 유압식 Servo피로시험기(Saginomiya Co., 10 ton)를 사용하였으며 피로 시험의 파형으로는 20Hz의 정현파(sine waves)를 택하였다.

균열의 측정은 Fig.2-1의 시험편을 시험기에 장착한 후 1/100mm까지 측정 가능한 이동식 현미경(travelling microscope)을 이용하여 관찰 및 측정하였다.

재료의 인장시험을 바탕으로 각 재료의 최대하중(Pmax)과 최소하중(Pmin) 및 응력비(R=0.2)는 Table 2-3과 같이 설정하고 각 재료의 기본 피로균열 전파거동을 파악하기 위하여 일정응력진폭 피로 시험을 행하였다.

Table 2-3 Load conditions in constant stress amplitude test

Load conditions Materials	Load conditions		
	Pmax(KN)	Pmin(KN)	Stress ratio(R)
SM45C(Base material)	5.88	1.176	0.2
SM45C(Heat treatment)	2.94	0.588	0.2
SM45C(B:60%, H:40%)	5.88	1.176	0.2
SM45C(H:60%, B:40%)	2.94	0.588	0.2

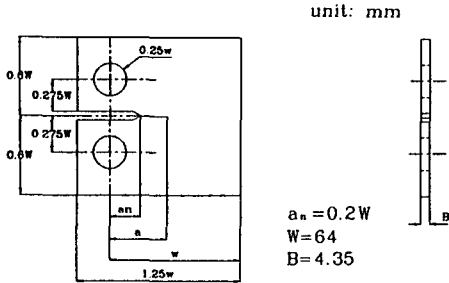


Fig. 2-1 Configuration of fatigue specimen

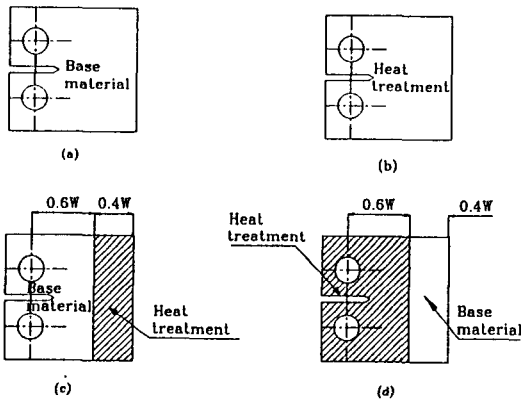


Fig. 2-2 Types of fatigue specimens

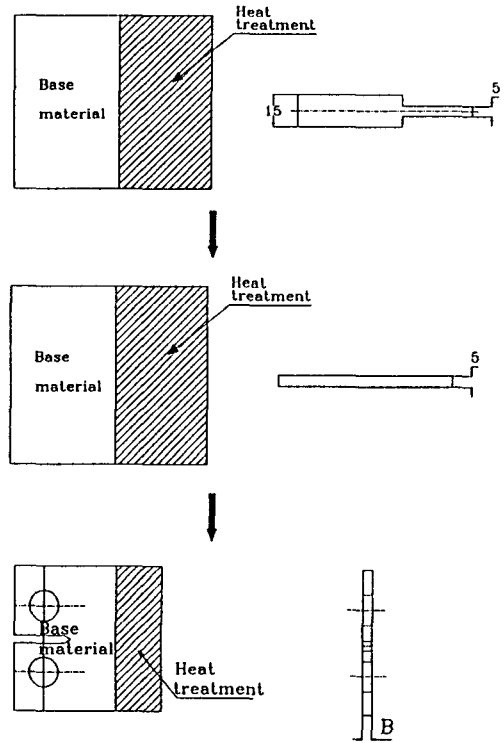


Fig. 2-3 Preparation process of partly heat treated specimen

3. 실험 결과 및 고찰

일정응력진폭시험의 결과를 하중반복회수(N)와 균열 길이(a)에 대한 관계로 모재, 전체 열처리, 모재60%와 열처리40% 및 열처리60%와 모재40% 순으로 Fig. 3-1~Fig. 3-4에 각각 나타내었다. 여기에서 모재와 전체 열처리에 존재하는 피로균열의 전파양상은 하중반복회수(N)의 증가에 따라 초기에는 서서히 증가하다가 점차적으로 증가폭이 커져서 나중에는 급속히 증가한다.

모재60%와 열처리40%에 대한 피로균열 전파양상은 모재에 대한 경향과는 달리 하중반복회수(N)의 증가에 따라 초기에는 모재와 비슷하게 균열길이가 증가하는 양상을 보이다가 점차로 균열길이의 증가폭이 둔화됨을 보이고 있다.

열처리60%와 모재40%에 대한 경향은 전체 열처리한 시편에 대한 결과와는 달리 하중반복회수(N)의

증가에 따라 균열길이가 초기에는 전체 열처리한 시편의 결과와 비슷하게 증가하다가 점차로 균열길이의 증가폭이 둔화됨을 보이고 있다.

각각의 시편에 대한 피로균열 전파거동을 살펴보기 위하여 피로균열 전파시험 데이터를 $da/dN - \Delta K$ 로 정리하여 모재에 대한 결과는 Fig. 3-5에, 전체 열처리한 시편에 대한 경향은 Fig. 3-6에, 모재 60%와 열처리40%한 시편에 대한 경향은 Fig. 3-7에, 열처리60%와 모재40%한 시편에 대한 결과는 Fig. 3-8에 각각 나타내었다.

균열전파속도는 모재 보다는 전체 열처리가 크게 나타났으며, 모재와 모재60%와 열처리40%를 비교해 보면 모재60%와 열처리40%에 대한 피로균열 전파속도가 모재의 피로균열 전파속도보다 오히려 낮게 나타났음을 알 수 있다.

전체 열처리와 열처리60%와 모재40%를 비교해 보면 열처리60%와 모재40%가 전체 열처리 보다 피

로 균열 전파속도가 오히려 낮게 나타났음을 알 수 있다.

이것의 이유로는 모재60%와 열처리40%의 경우는 모재에 비하여 배면 굽힘이 억제되므로 균열 진전이 지연되고, 열처리60%와 모재40%의 경우는 전체 열처리에 비하여 부분적으로 열처리한 재료의 뒷부분(모재40%)에 인성이 추가되므로 균열 진전이 지연되는 것으로 생각된다.

균열전파속도가 지연되는 효과는 전체 열처리가 가장 작게, 모재60%와 열처리40%의 경우가 가장 크게 나타났다. 즉, 경도가 낮은 곳에서 경도가 높은 곳으로 균열이 전파할 때에는 배면의 경도가 큰 재료일수록 균열단합 효과가 더욱 커서 피로균열전파속도가 저하된다고 사료된다.

각 재료에 대한 피로균열 전파거동을 더욱 자세하게 관찰하기 위하여 균열 길이에 대한 피로균열 전파속도와의 관계를 나타내었다. 모재에 대한 것은 Fig.3-9에, 전체 열처리에 대한 것은 Fig.3-10에, 모재60%와 열처리40%에 대한 것은 Fig.3-11, 그리고 열처리60%와 모재40%에 대한 것은 Fig.3-12에 각각 나타내었다. 이들 결과를 보면 균열길이의 증가에 따라 균열전파속도의 가속내지 지연관계가 뚜렷이 나타남을 알 수 있으며 모재60%와 열처리40%, 모재, 열처리60%와 모재40%, 전체 열처리 순으로 지연됨을 알 수 있다.

Table 3-1에는 모재와 전체 열처리한 경우에 대하여 기본피로시험의 결과에서 Power 함수를 사용하여 구한 Paris의 재료상수 m , C 를 나타내었는데 모재의 기울기가 전체 열처리의 기울기에 비하여 완만함을 알 수 있다.

Table 3-1 Material constants in Paris' equations

Material Const.	Paris' equation	
	m	C
SM45C(Base material)	4.63	1.23×10^{-11}
SM45C(Heat treatment)	4.92	1.08×10^{-10}

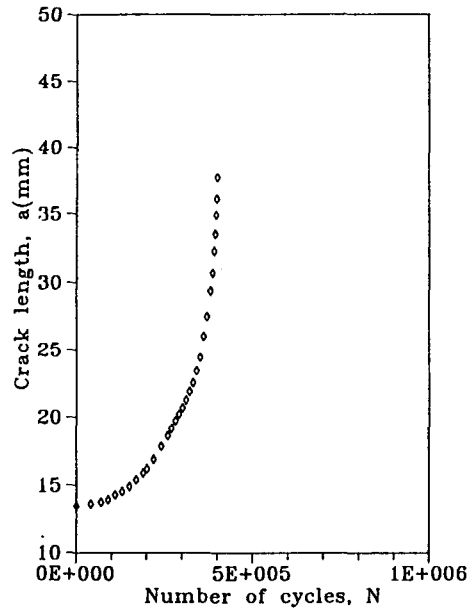


Fig. 3-1 Crack length vs. number of cycles for raw SM45C in constant stress amplitude test(ΔK increasing test)

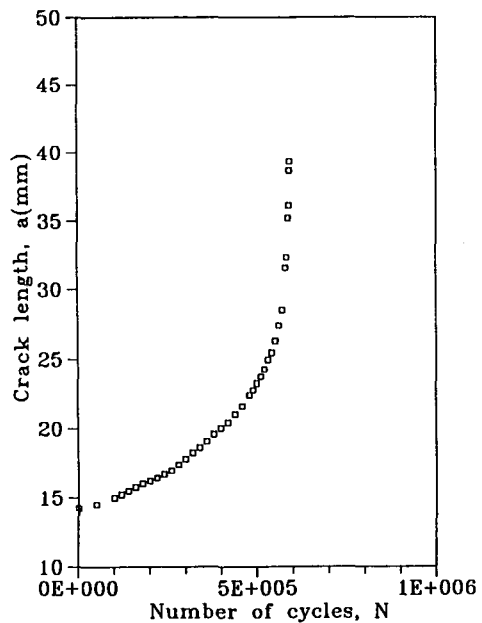


Fig. 3-2 Crack length vs. number of cycles for heat treated SM45C in constant stress amplitude test(ΔK increasing test)

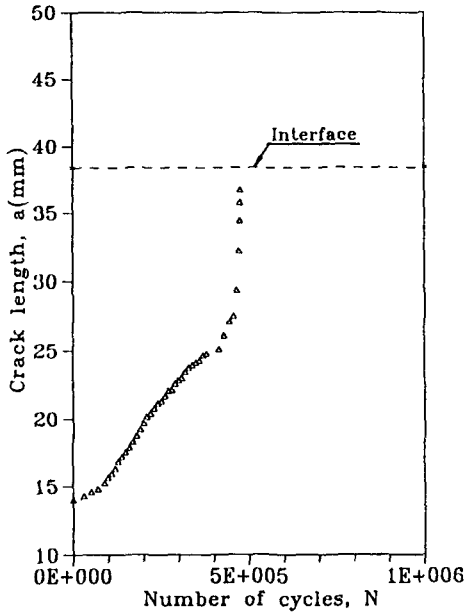


Fig. 3-3 Crack length vs. number of cycles for partly heat treated SM45C (B:60%.H:40%) in constant stress amplitude test (ΔK increasing test)

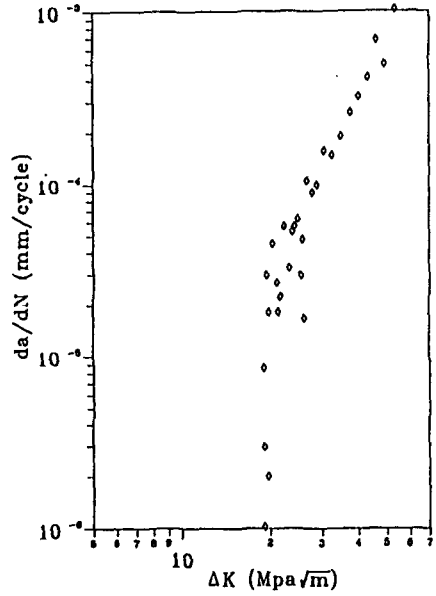


Fig. 3-5 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for raw SM45C (ΔK increasing test)

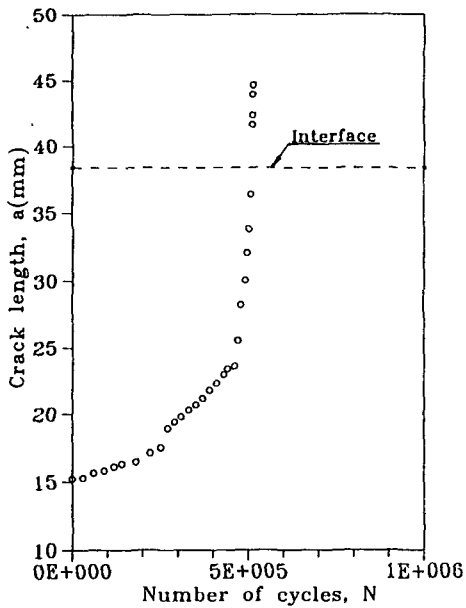


Fig. 3-4 Crack length vs. number of cycles for partly heat treated SM45C (H:60%.B:40%) in constant stress amplitude test (ΔK increasing test)

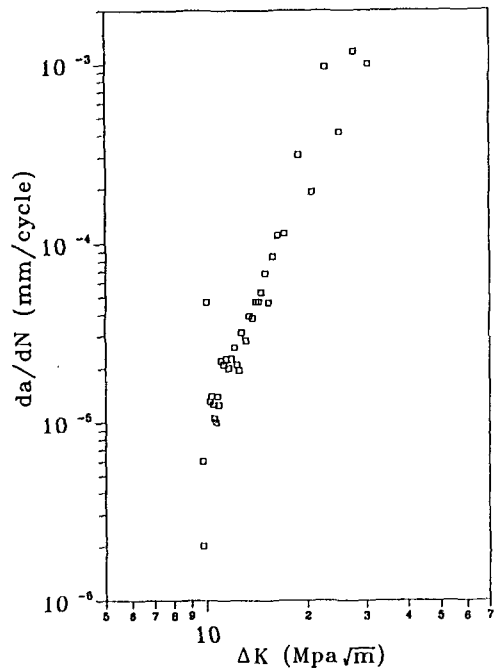


Fig. 3-6 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for heat treated SM45C (ΔK increasing test)

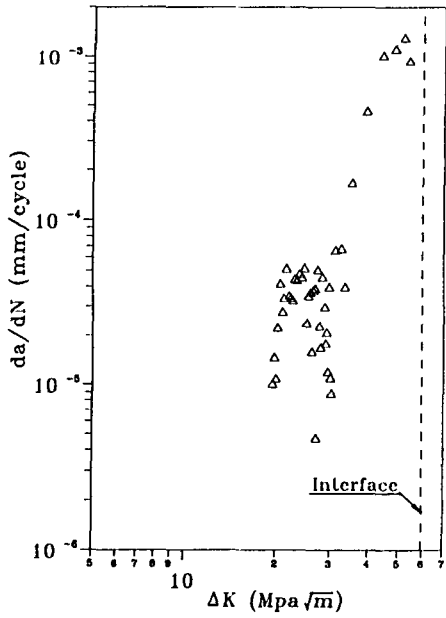


Fig. 3-7 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for partly heat treated SM45C(B:60%,H:40%) (ΔK increasing test)

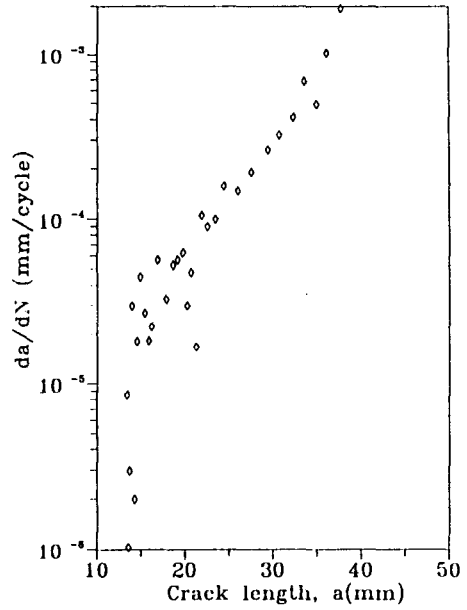


Fig. 3-9 Fatigue crack growth rate vs. crack length for raw SM45C (ΔK increasing test)

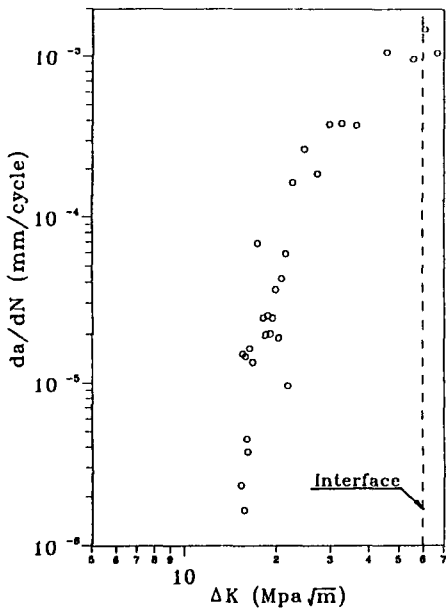


Fig. 3-8 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for partly heat treated SM45C(H:60%,B:40%) (ΔK increasing test)

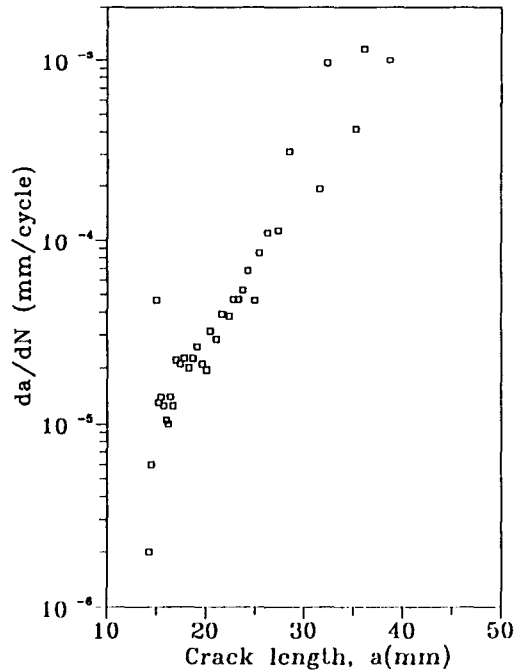


Fig. 3-10 Fatigue crack growth rate vs. crack length for heat treated SM45C (ΔK increasing test)

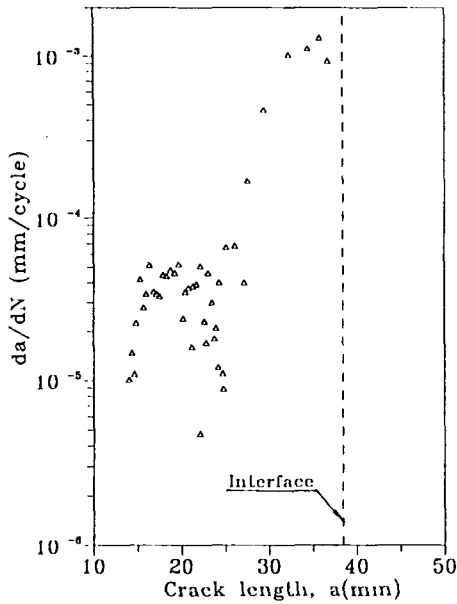


Fig. 3-11 Fatigue crack growth rate vs. crack length for partly heat treated SM45C(B:60%,H:40%) (Jk increasing test)

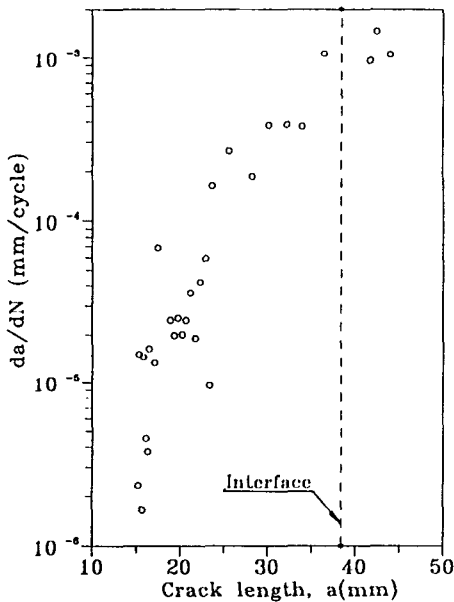


Fig. 3-12 Fatigue crack growth rate vs. crack length for partly heat treated SM45C(H:60%,B:40%) (Jk increasing test)

4. 결 론

본 연구에서는 재료가 부분적 결함을 포함하거나 방사선등과 같은 외적 요인에 의하여 부분적으로 기계적 성질이 변화되었을 때 피로균열 전파거동을 규명하기 위하여 고주파 열처리에 의하여 부분적으로 열처리된 기계 구조용 탄소강 시편을 제작하고 이들 시편에 대하여 피로균열 전파거동을 실험적으로 규명하였다.

기계 구조용 탄소강(SM45C)의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부분적으로 열처리한 재료의 피로특성이 균질재료에 비하여 일반적으로 향상되었다.
- 2) 피로균열 전파는 경도가 낮은 곳에서 경도가 높은 곳을 향하여 균열이 진전할 때 모재보다도 지연 효과가 나타났다.
- 3) 피로균열 전파는 경도가 높은 곳에서 경도가 낮은 곳을 향하여 균열이 진전할 때는 모재에 비하여 균열 진전 속도가 약간 빨라졌으며, 전체 열처리한 것은 더욱 균열 진전 속도가 빨라졌다.

참 고 문 헌

- [1] Tanaka, K. Hoshide, T. and Nakata, M., "Elastic-Plastic Crack Propagation under High Cyclic Stresses", ASTM STP 803, pp.708~722, 1983.
- [2] 田仲啓介, 中村研, 星出敏彦, 仲田摩智, "疲勞破壊靱性(R_p 曲線)", 日本機械學會講演論文集, No.814~2, pp.77~81, 1981.
- [3] Hertzberg, R.W. and F.J.E. von Euw, "A Note on the Fracture Mode Transition in Fatigue", Int.J.Fract.Mechs., 7, 3, pp.349~354, 1971.
- [4] McGowam, J.J. and Liu, H.W., "The Role of Three-Dimensional Effects in Constant Amplitude Fatigue Crack Growth Testing", Trans. ASME J.Eng. Meter. Technol., 102, 4, pp.341~346, 1980.
- [5] Kocanda, S., "Fatigue Failure of

- Metals". Sijthoff and Noordhoff International Publishers, pp.241, 1978.
- [6]Jaske, C.E., Mindlin, H. and Perrin, J.S., "Cyclic Stress-Strain Behaviors of Two Alloys at High Temperature", ASTM STP 519, pp.13~27, 1973.
- [7]Feltner, C.E. and Michell, M.R., "Basic Research on the Cyclic Deformation and Fracture Behavior of Materials", ASTM STP 465, pp.27~66, 1969.
- [8]Kawasaki, T., Nakanishi, S., Sawaki, Y., Hatanaka, K. and Yokobori, T., "Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation in High Strength Steel from Room Temperature to -180°C ", Eng. Frac. Mech., 7, 3, pp.465~472, 1975.
- [9]長谷川光彦, 兒玉昭太郎, 川田雄一, "低温度における疲労き裂進展挙動", 日本機械學會論文集, 43, 370, pp.2003~2010, 1977.
- [10]安證溪, 小倉信和, 中島良夫, "軟鋼材における疲労き裂進展挙動の温度依存性" 日本機械學會論文集, 46A, 401, pp.1~12, 1980.
-