

論 文

용탕단조법으로 제조된 Al₂O₃/AC4C 복합재료의 피로균열 전파거동에 관한 연구

여인동*, 이지환**

A Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior of Al₂O₃/AC4C Composites Made by Squeeze Casting Process

In-Dong Yeo* and Chi-Hwan Lee**

Abstract

This study has been conducted with the purpose of examining the fatigue crack growth characteristics of Al₂O₃ short fiber reinforced aluminum matrix composites made by squeeze casting process with different applied pressure and binder amount. Fatigue crack growth experiments have been performed under constant load amplitude method with a fixed load ratio. The rate of crack propagation was decreased with binder amount as well as applied pressure. Also fatigue crack growth path in matrix was changed from flat to rough mode with an increase of applied pressure. In the composites, fatigue crack was propagated to interface between matrix and reinforcement at 10MPa, but it was propagated to reinforcement at 20MPa. The major reason of the result was considered that interfacial bonding force and microstructure of matrix were improved due to an increase of applied pressure. Localized ductile striation in the composites was observed at low growth rate region and such a phenomenon was remarkable with an increase of applied pressure. At high growth rate region, the propensity of fracture appearance was changed from interfacial debonding to reinforcement fracture with an increase of applied pressure.

1. 서 론

세라믹 섬유강화 알루미늄기 복합재료는 비탄성, 비강도, 내마모성, 저열팽창 및 피로강도의 측면에서 우수한 특성[1-5]을 나타내고 있다. 최근 자동차산업이 발달함에 따라 자동차의 경량화와 엔진효율의 향상 및 소음감소등을 얻기 위하여 대체소재의 개발이 활발히 진행되고 있으며 일부 부품의 경우 기존에 사용된 주강 및 주철의 대체소재로서 알루미늄기 복합재료를 이미 사용

하고 있는 실정이다. 현재 알루미늄 복합재료는 자동차의 피스톤, 커넥팅로드, 실린더 라이너, 실린더헤드 및 그외의 여러부품 등에서 사용이 가능하지만, 이러한 재료의 사용에 앞서 반드시 선행되어야 할 과제는 피로 및 파괴거동에 관한 연구라 할 수 있다. 실용화율이 가장 높은 Saffil 알루미늄기 단섬유강화 금속기 복합재료의 피로균열성장률에 관한 연구는 그 공학적인 적용에 따른 중요성에도 불구하고, Musson[6] 및 Harris[7] 등에 의하여 일부 연구되었지만 아직도 상당히

*생산기술연구원 생산기반기술실용화센터(Foundry Technology Division Production Technology Center, Korea Academy of Industrial Technology)

**인하대학교 공과대학 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering of Inha Univ.)

부족한 실정이다. 무질서하게 배향된 단섬유강화 복합재료의 경우 불균질한 기지조직과 섬유 침단 및 섬유와 기지와의 계면 결합 등과 같은 부분에서의 미세 응력집중은 피로파괴에 중요한 역할을 하게되기 때문에 일반적인 금속재료 및 일방향 복합재료의 경우와는 달리 파괴현상이 복잡하다.

따라서 본 연구는 용탕단조법을 이용하여 제조된 15Vf Saffil 알루미늄 단섬유강화 AC4C기 복합재료를 피로균열 성장속도의 측면에서 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시료의 제조 및 시험편제작

본 실험에서 사용한 모합금은 AC4C 알루미늄 합금으로 Table 1은 화학조성을 나타낸 것이다. 강화재는 SiO₂가 약 3-4% 함유된 δ-Alumina 단섬유를 사용하였다. Table 2는 강화재로 사용한 δ-Alumina 단섬유의 제특성을 나타낸 것이다. 예비성형체는 Na₂O · SiO₂ 수용액을 점결제로 사용하여 press mold에서 제조하였다. 제조된 예비성형체는 직경 110φmm, 두께 20mm로서 상온에서 48시간 자연 건조 후 다시 건조로에서 약 8시간 건조하였다. 제조된 예비성형체는 전기로에서 700°C로 가열하여 300°C로 유지된 금형에 넣은 후 용탕을 가압하여 제조하였다. 이때 가압력은 각각 10, 15, 20MPa로 하였으며 가압 유지시간은 단면두께 mm당 1초로 하였다. 최종 시험편의 두께는 일정크기의 주입용기를 사용하여 복합화 부위 포함 50mm가 되도록 하였다. 일정 응력-진폭 피로균열 성장속도에 관한 시험을 하기 위한 시료는 ASTM E-647규정에 의거하여 제작하였다. Fig. 1의 (a)는 제조된 복합재료로

부터 채취한 피로시험편의 형상 및 방향을 나타낸 것이며 (b)는 본 실험에 사용한 CT시험편의 크기를 나타낸 것이다.

2.2 피로균열성장속도시험

피로균열성장속도에 대한 시험은 10톤 용량의 servo-hydraulic machine을 사용하여 응력비 0.1, 주파수 15Hz의 조건에서 예비균열을 도입하였으며, 예비균열은 각 조건의 시험편에 대하여 약 2mm로 일정하게 도입하였다. 예비균열 도입 후 균열전파거동에 관한 시험은 ASTM E 647-83[8]에 의거 응력비 0.1, 초기하중영역 126Kg, 주파수 10Hz의 조건에서 인장-인장 형태의 반복응력을 가하여 상온에서 시험하였다. 피로균열 성장속도 시험은 균열전파거동을 관찰하기 위하여 50배의 분해능을 가진 이동식 광학 현미경을 이용하였으며, 또한 CT 시험편의 선단에 균열길이 측정장치를 부착하여 하중-컴플라이언스법으로 계산된 컴퓨터의 계산결과와 병행하여 시험하였다. 시험동안 일정 응력-진폭 조건을 얻기 위하여 진폭이득을 95%로 하여 상온에서 시험하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

2.3 미세조직 및 파면관찰

기지금속 및 복합재료의 미세조직 관찰을 위하여 광학현미경을 이용하였으며, 또한 각 시험조건에서 파면관찰을 하기 위하여 주사전자현미경을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

용탕단조법에 의한 주물의 제조는 용탕의 충전

Table 1. Chemical composition of AC4C alloy.

Material	%Si	%Mg	%Cu	%Zu	%Fe	%Mn	%Ti	%Al
AC4C alloy	7.2	0.3	<0.001	0.016	0.32	<0.001	0.15	Bal.

Table 2. Specification of Al₂O₃ short fiber.

Material	Composition (wt.%)	Density (g/cm ³)	Diameter (μm)	Length (μm)
Saffil RF grade	Al ₂ O ₃ : 96~67 SiO ₂ : 3~4	3.3	1.0~6.0 Avg. : 3.0	Avg. : 100

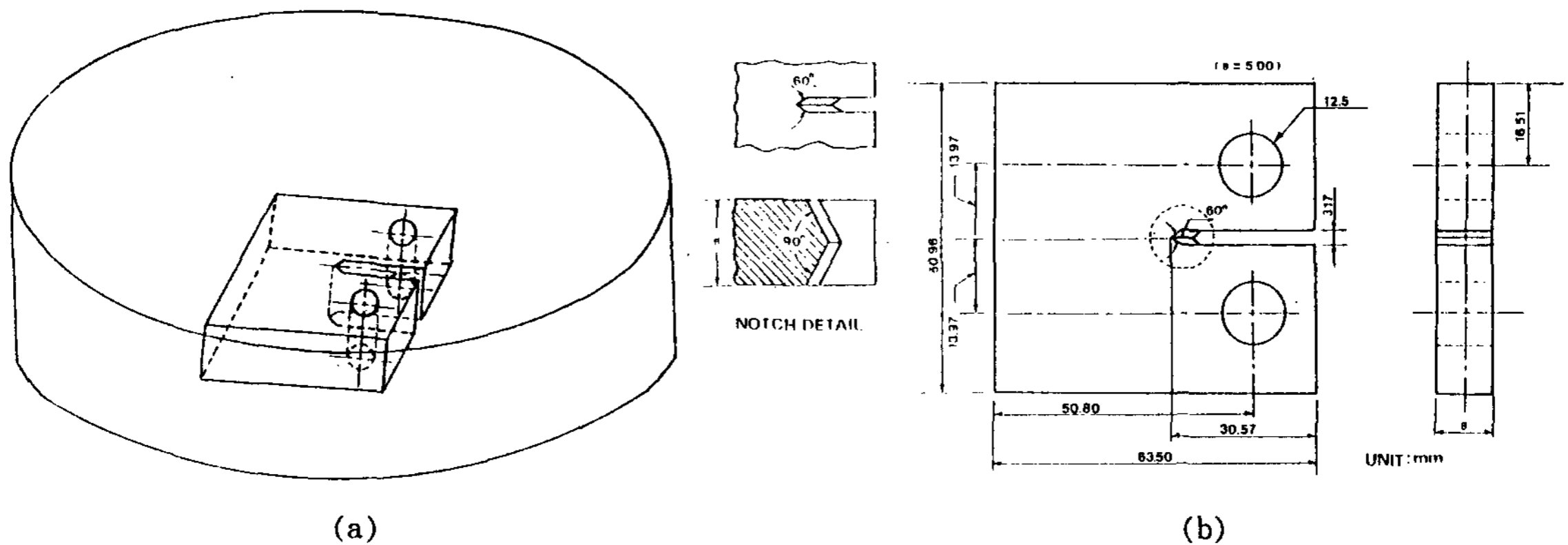


Fig. 1. (a) shape and orientation of fatigue test specimen in the composite casting.
(b) compact-tension(CT) specimen for fatigue crack growth rate test.

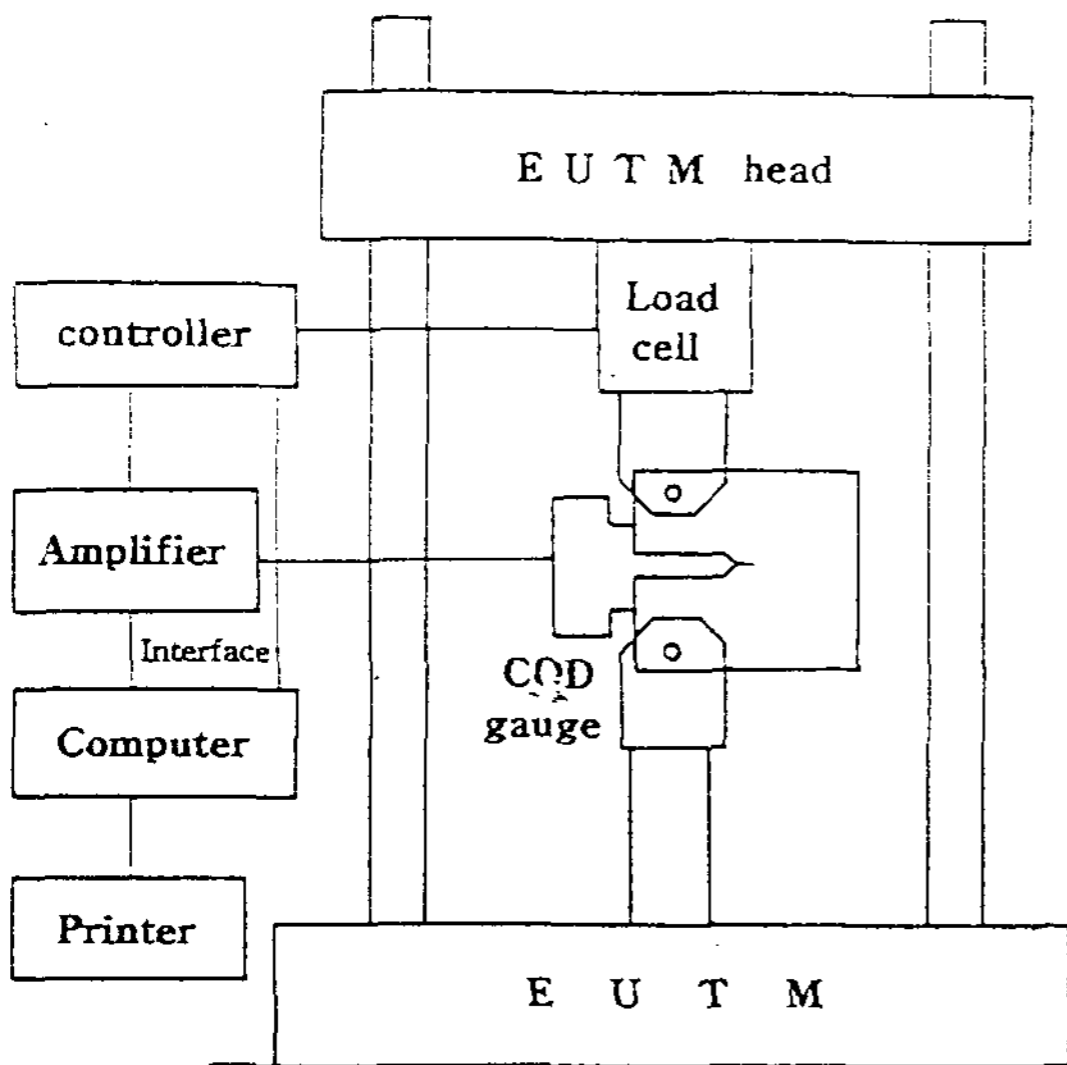


Fig. 2. Schematic representation of experimental apparatus.

도 향상 및 용탕의 가압력 증가에 따른 냉각속도 증가효과와 기포결함 감소 및 용탕단조에 따른 핵생성 site의 증가가 그 주요한 잇점이라 할수 있다. 본 연구에서는 기지합금으로 AC4C 주조용 알루미늄 합금을 선택하였으며 Photo 1은 복합재료의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 사진으로 가압력 증가에 따라 stringer 공정실리콘이 미세화됨을 관찰 할수 있었다.

세라믹 강화 금속기 복합재료의 피로거동에 관한 연구는 취성의 강화재 첨가에 따른 피로균열

성장 저항성이 증가한다는 결과[9-11]와 이와반대로 피로균열 저항성이 감소한다는 서로 상반된 연구결과[12]를 나타내는 등 아직 확립된 연구결과가 없다. 이와같은 피로균열 저항성에 미치는 인자는 강화재의 종류 및 함량, 크기 및 형상, 기지조직의 열처리, 기지와 강화재 사이의 계면반응 등 많은 인자에 의하여 영향을 받는다.

본 연구에서 응력확대계수 영역의 결과는 아래의 Srawley식을 이용하였으며 피로균열성장속도에 대한 결과는 Paris 식[13]의 균열안정성장영역에서 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a)}{B\sqrt{W} (1-a)^{2/3}} f(a)$$

여기서, $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ (P: 하중)

$\alpha = a/W$, $a/W \geq 0.2$ 에 대하여 유효한 표현

a = 균열길이

W = 시험편의 폭

B = 시험편의 두께

f(a) = 균열길이에 의존하는 함수

$$da/dN = C \Delta K^m - \text{Paris law}$$

본 연구에서는 Paris 식이 적용될수 있는 균열안정성장영역인 제II 성장영역에서의 균열성장속도를 구한 관계로 각 시료의 ΔK_{th} 는 실험값으로 구하지 못하였다. 그러나 예비실험을 통하여 복합재의 ΔK_{th} 는 기지금속에 비하여 매우 크다는 것을 정성적으로 확인할수 있었다. 이 사실은 압

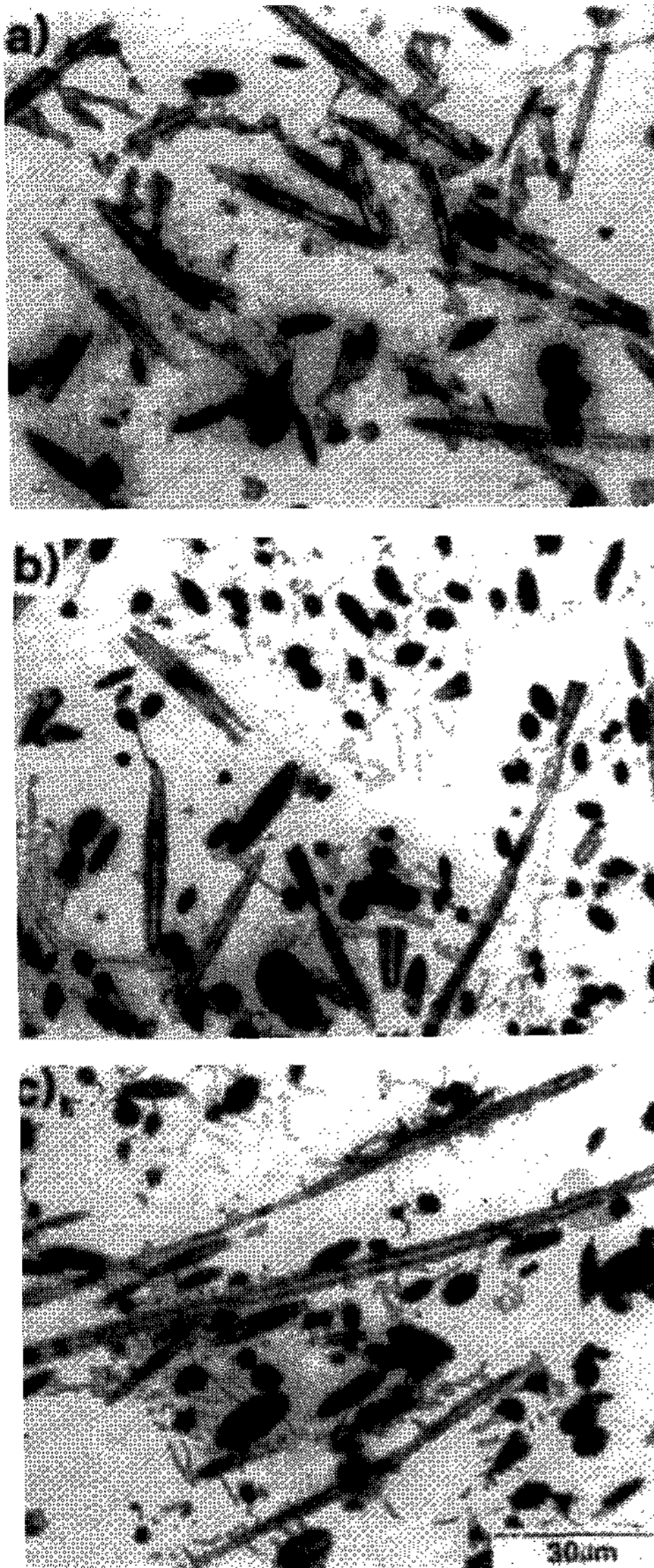


Photo 1. Optical microstructures of composites used 5% binder with applied pressure.
(a) 10MPa (b) 15MPa (c) 20MPa

출재를 비교 실험한 연구결과[14]에서도 잘 나타나고 있다.

Fig. 3은 피로균열성장속도와 응력확대계수영역과의 관계를 나타낸 그림으로 그림의 (a)는 5% 점결제를 사용한 복합재료의 시험결과이고, (b)는 9% 점결제를 사용한 복합재료 시험결과를 나타낸 것이다. 5% 점결제를 사용한 복합재

료의 경우 산포는 심하지만 가압력이 증가함에 따라 균열성장속도의 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있으며, 동일 ΔK 에서는 큰 가압력으로 제조된 시료가 균열성장속도가 느렸다. 이는 가압력이 증가함에 따라 기지조직이 치밀화된 결과라 생각된다. 9% 점결제를 사용한 복합재료의 경우도 가압력이 증가함에 따라 균열성장속도 증가율이 조금씩 둔화되는 것을 관찰할 수 있었다. 이와같은 결과는 가압력이 증가함에 따라 강화섬유의 손상이 있지만 강화재와 계면사이의 결합력이 개선되고 기지조직 또한 더욱 치밀해져 인성이 증가되어 균열성장속도가 둔화된다고 생각된다. Fig. 4는 가압력이 각각 10MPa와 20MPa일때 기지금속과 복합재료의 균열성장속도와 응력확대계수와의 관계를 예비성형체 제조시 사용한 점결제의 분율에 따라서 나타낸 그림으로 가압력이 10MPa일대는 복합재료의 경우가 기지금속의 경우에 비하여 균열성장속도의 증가율이 빠르게 나타났다. 그러나 가압력이 20MPa로 증가함에 따라서 복합재료와 기지금속과의 균열성장속도 증가율의 차이가 많이 개선되어 7% 및 9% 점결제를 사용한 시료에서는 기지금속에 필적할만큼 성장속도 증가율이 둔화됨을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 가압력 10MPa에서는 복합재료의 경우 강화섬유와 기지와 계면결합력이 충분치 못하여 계면이 균열전파를 촉진시킨 결과라 생각되며, 가압력이 20MPa의 경우 균열성장속도의 둔화는 복합재료 제조시 가압력 증가에 따른 계면결합력이 증대되며 기지금속의 치밀화가 그 원인이라 할 수 있다. 즉 δ -Alumina 단섬유강화 알루미늄 복합재료의 피로균열성장속도는 계면결합력 강화에 따른 섬유파괴의 경향이 높을수록 균열성장속도가 둔화되는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 피로균열성장속도에 대한 표현식인 Paris법칙을 적용하여 안정성장속도영역인 제II 성장영역에서의 기울기(m)과 상수(logC)와의 관계를 나타낸 그림으로서 거의 직선적인 관계를 얻을 수 있었다. Fig. 6은 Paris법칙을 적용하여 얻은 기울기와 실험조건인 가압력 및 점결제의 변화에 따른 관계를 나타낸 그림으로서 가압력이 증가할수록 복합재료 및 기지조직 모두 기울기가 작아지는 것을 볼 수 있으며 복합재료의 경우가 기지조직보다 균열성장속도가 빠르게 나타난 것을 관

찰할 수 있다. 한편 복합재료의 경우 점결제의 양이 5%에서 7%로 증가함에 따라서 기울기가 작아지는 것을 알 수 있으며 7%에서 9%로 증가함에 따라서는 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이와같은 결과는 5% 점결제가 충분한 계면결합을 유지할 수 없음을 나타내어 주는 결

과라 생각된다. 이 결과는 앞선 인장시험의 결과 [15]와 상이한 결과를 나타내어 주고 있는데 이는 시험응력 영역이 탄성영역의 범위에서 행하여진 결과라 생각된다. 즉, 7% 정도의 적정량의 점결제를 함유한 복합재는 강화섬유와 기지합금 간의 계면접합을 용이하게 해주고 양질의 반응생

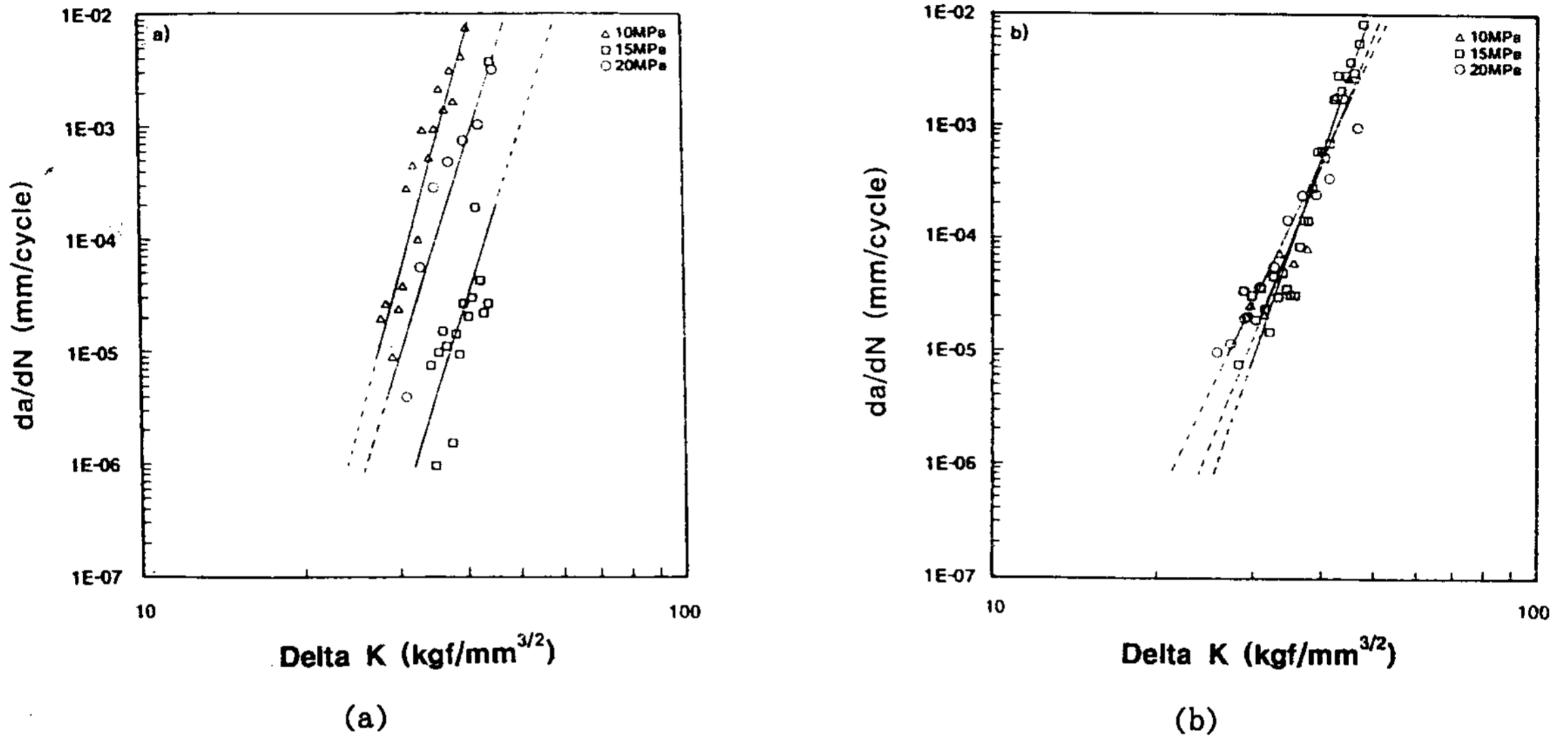


Fig. 3. Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (ΔK) at R=0.1, 15Hz. (a) 5% binder composites (b) 9% binder composites

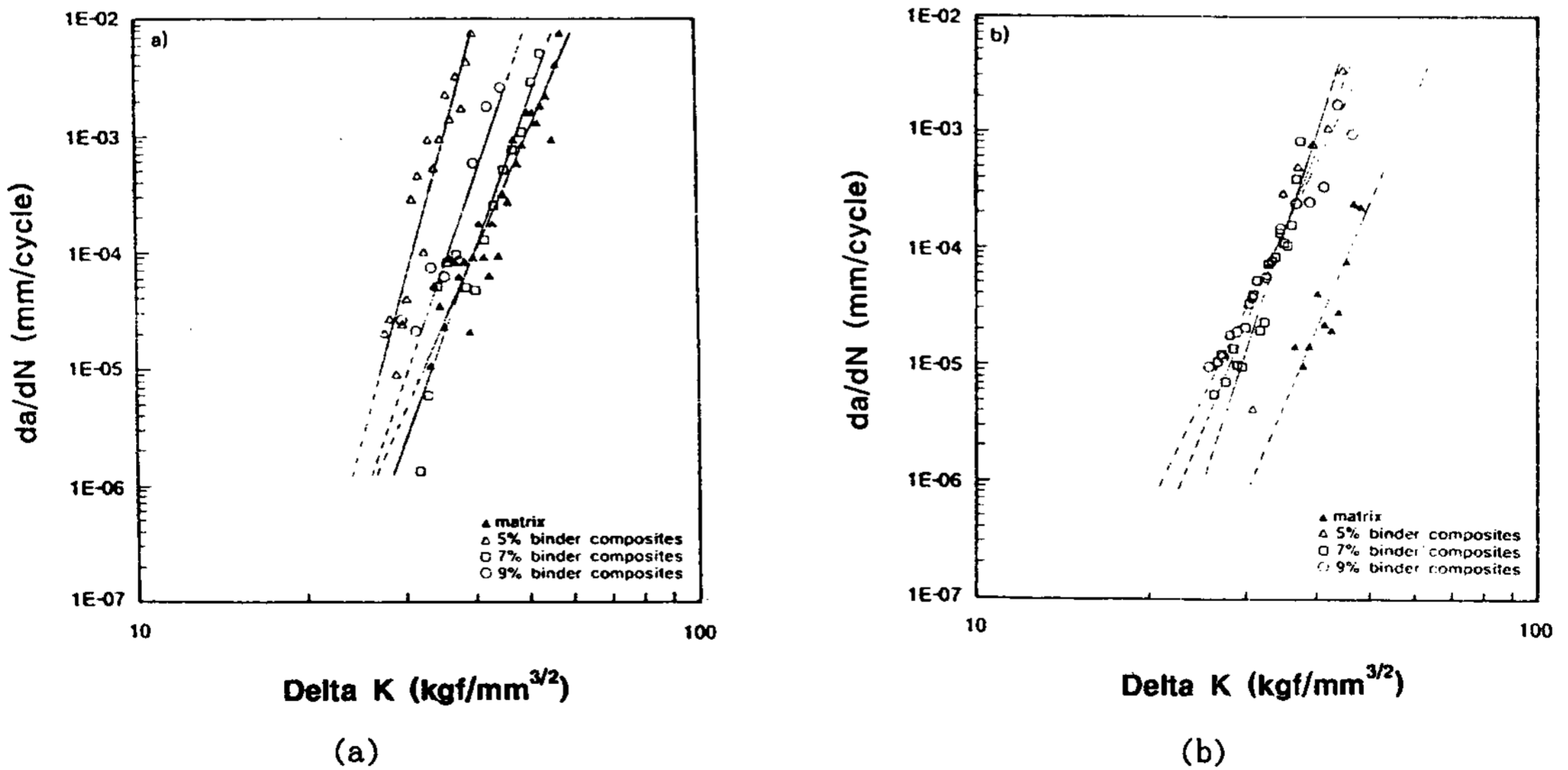


Fig. 4. Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (ΔK) at R=0.1, 15Hz. (a) 10MPa (b) 20MPa

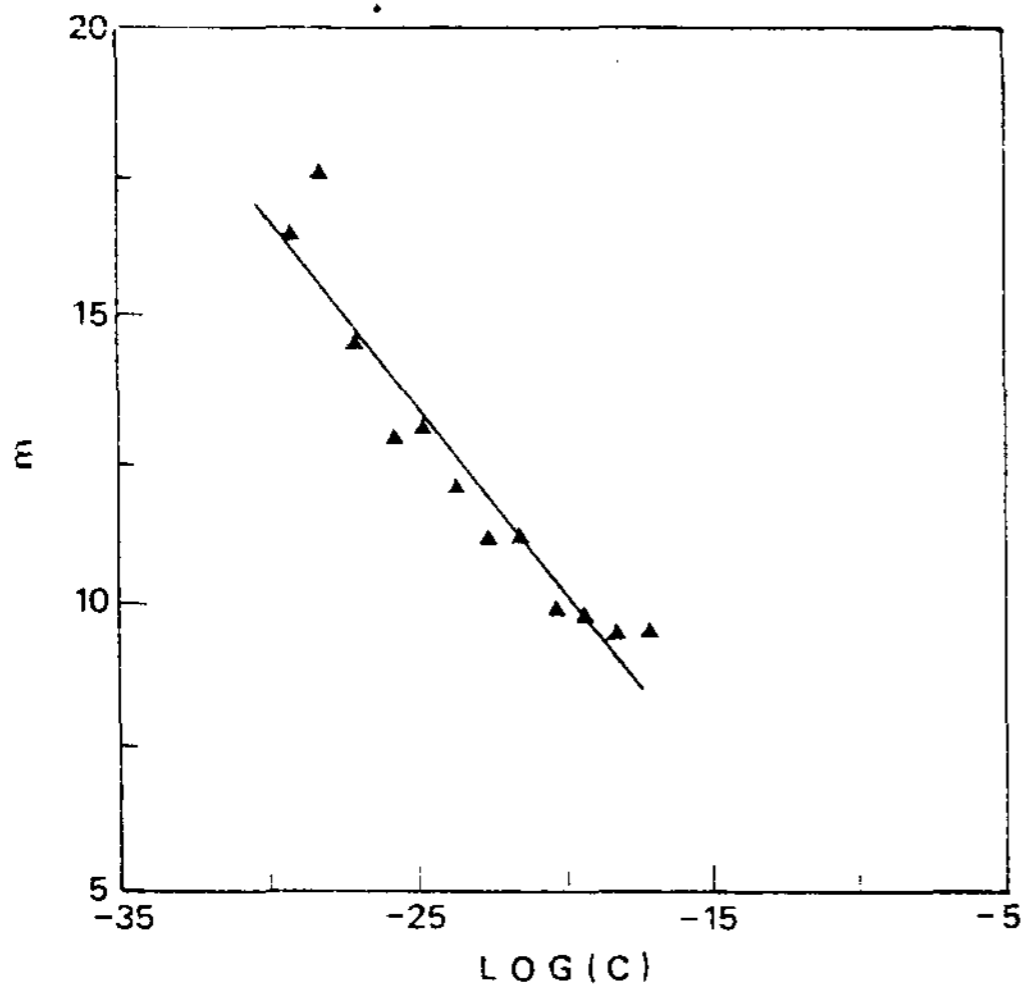


Fig. 5. Relation between constant C and m.

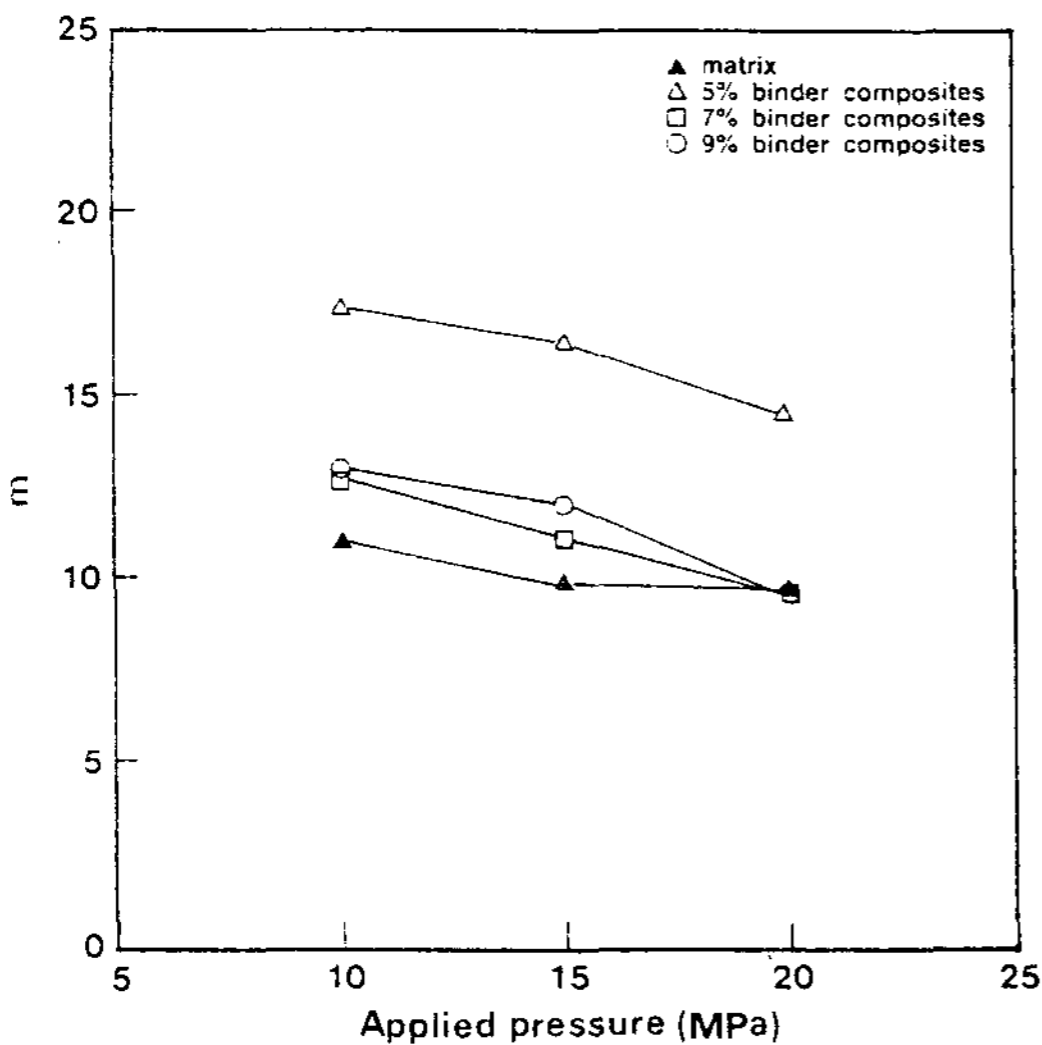


Fig. 6. Relation between constant, c and applied pressure.

성물인 $MgAl_2O_4$ [16]의 생성을 도와주지만, 5% 점결재 복합재는 접합력이 약하여 탄성영역의 피로파괴에 충분한 계면저항력을 갖지 못한다고 볼 수 있다. Table 3은 각 시험조건에 따른 Paris법칙에서의 기울기와 상수값을 종합하여 나타낸 것이다. Photo 2는 기지금속 및 복합재료의 가압력에 따른 균열경로를 나타낸 사진으로 기지금속의 경우 가압력이 10MPa에서 20MPa로 가압력이 증가함에 따라서 균열경로를 따라 표면거칠기가 증대된 것을 볼 수 있으며, 복합재료의 경우 가

Table 3. The value of constant c and m resulted in different manufacturing condition.

첨가제 첨가량 (mol.%)	가압력 (MPa)	LOG(C)	m
5% binder composites	10	-30.05	17.41
	15	-28.66	16.44
	20	-25.90	14.47
7% binder composites	10	-24.50	12.79
	15	-21.09	11.15
	20	-18.50	9.55
9% binder composites	10	-24.06	12.99
	15	-22.50	11.97
	20	-18.60	9.53
Matrix	10	-22.46	11.09
	15	-20.80	9.84
	20	-19.71	9.79

압력이 10MPa에서는 균열이 섬유와 가지와의 계면을 따라 전파되는 것이 관찰되었지만, 가압력이 20MPa로 증가함에 따라 균열이 섬유를 파괴시키면서 전파되는 것을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 가압력이 증가함에 따라 기지의 격자변형에 따른 기지조직의 치밀화 및 강화섬유와 기지와의 계면상태가 개선되기 때문이라 생각된다.

Photo 3은 기지금속 피로시험편의 파단면을 관찰한 사진으로 기지조직은 응력확대계수영역 $30Kgf/mm^{3/2}$ 에서 관찰하였으며 가압력이 10MPa에서 20MPa로 증가함에 따라 연성파면의 줄무늬가 증가되는 것을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 가압력 증가에 따른 기지조직의 치밀화가 그 원인이라 생각된다. Photo 4는 복합재 피로시험편의 파단면 사진으로 5% 점결재를 사용한 복합재료는 10MPa의 가압력으로 제조되었으며 응력확대계수영역이 $30Kgf/mm^{3/2}$ 의 (a)에서 $45Kgf/mm^{3/2}$ (b)로 증가함에 따라 초기의 낮은 응력확대계수영역에서 관찰된 기지의 연성 줄무늬가 점차 사라지며 강화섬유와의 계면부분에서 debonding 현상이 나타난 것을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 응력확대계수 영역이 증가함에 따라, 즉 피로균열전파속도가 증가함에 따라 파단면의 양상도 피로균열성장의 형태에서 인장파단의 양상으로 천이되는 현상을 관찰할 수 있었다. 사진의 c)-f)는 7% 점결재를 사용한 시료에서 관찰한 사진으로 c), d)는 가압력이 10MPa의 경우

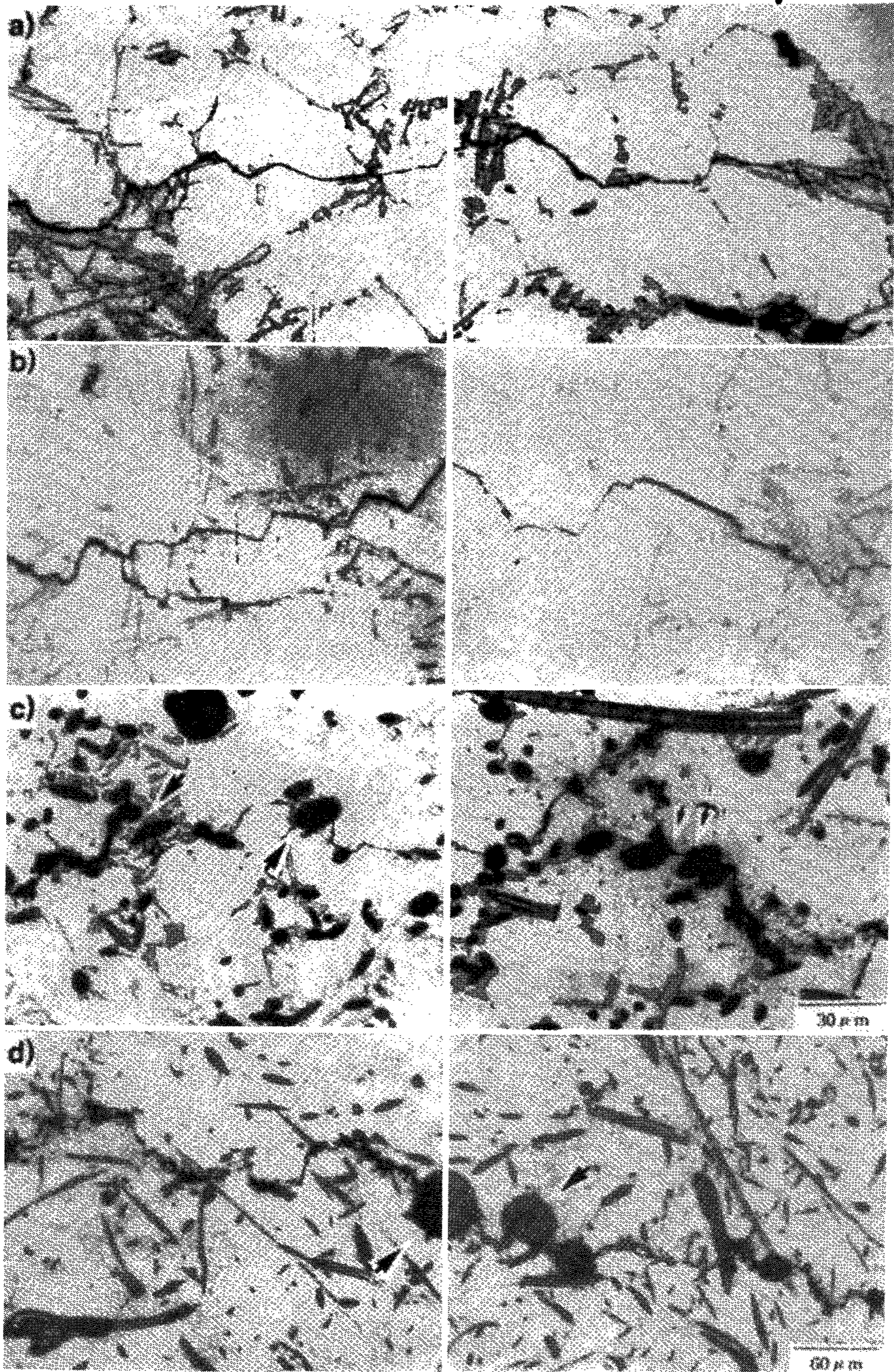


Photo 2. Optical micrographs of fatigue crack path of matrix and composites with different applied pressure and binder amount. (a) matrix, 10MPa (b) matrix, 20MPa (c) 9%, 10MPa (d) 9%, 20MPa

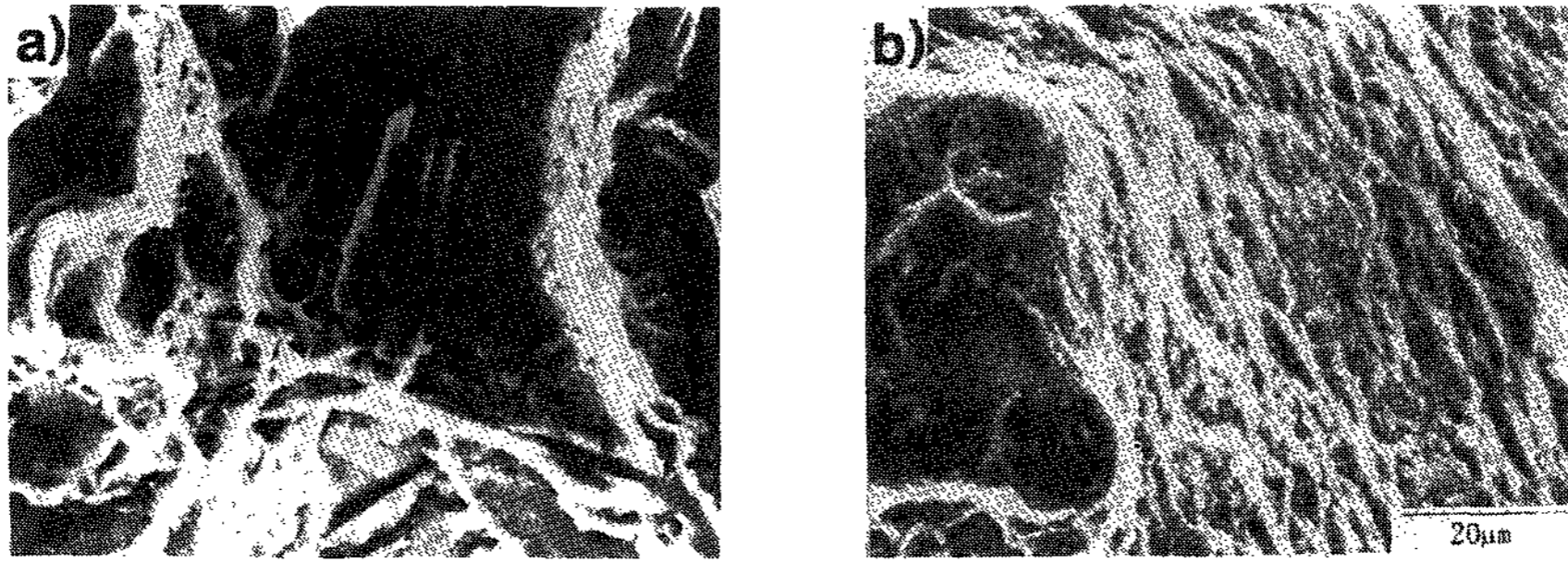


Photo 3. SEM fractographs of fatigue fracture surface of matrix.
 (a) 10MPa (b) 20MPa

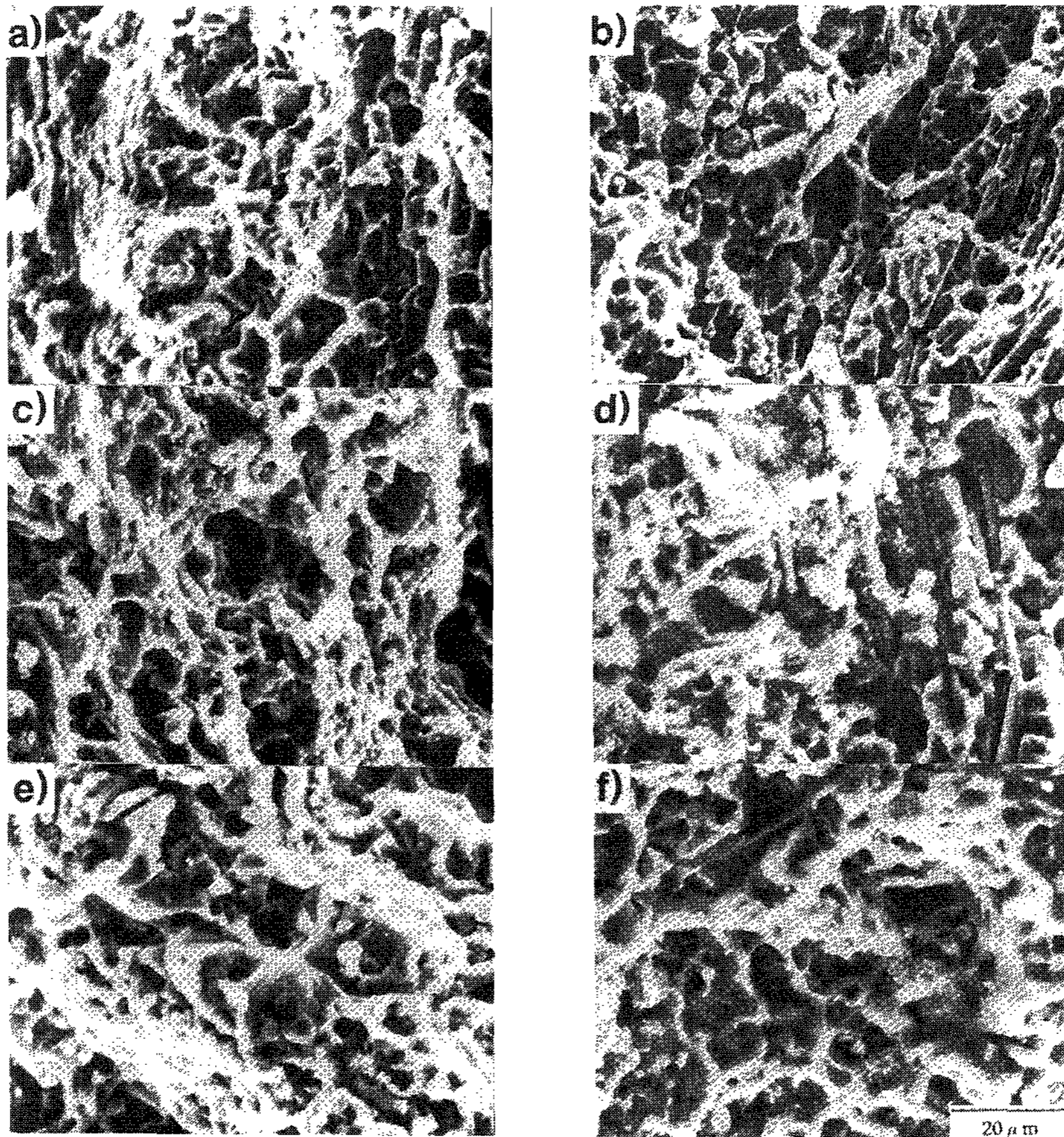


Photo 4. SEM fractographs of fatigue fracture surface of composites.
 (a) 5% binder, 10MPa, 30Kgf/mm^{3/2} (d) 7% binder, 10MPa, 45Kgf/mm^{3/2}
 (b) 5% binder, 10MPa, 45Kgf/mm^{3/2} (e) 7% binder, 20MPa, 30Kgf/mm^{3/2}
 (c) 7% binder, 10MPa, 30Kgf/mm^{3/2} (f) 7% binder, 20MPa, 45Kgf/mm^{3/2}

이고, e), f)는 가압력이 20MPa, c), e)는 응력 확대계수영역이 30Kgf/mm^{3/2}일때, d), f)는 45Kgf/mm^{3/2}일때 관찰한 사진으로 낮은 응력확대계수 영역에서는 가압력 증가에 따른 연성 파괴파면을 나타내며 섬유와 기지간의 debonding이나 pull-out현상은 관찰되지 않았다. 그러나 높은 응력확대계수영역에서는 가압력 10MPa의 경우 섬유가 빠져나간 자리와 debonding현상이 관찰되었으며, 가압력 20MPa의 경우는 낮은 응력확대계수영역에서 관찰된 연성의 줄무늬는 거의 없었으나 기지와 강화섬유의 계면이 좋은 결합을 하고있는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

용탕단조법으로 제조된 δ-Alumina 단섬유강화 AC4C기 복합재료의 피로균열성장시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

1) 균열안전성장영역에서의 피로균열성장속도는 가압력이 증가함에 따라 가지조직 및 복합재료 모두 둔화되었으며 점결제의 양에 따라서도 성장속도가 둔화된 것을 관찰하였다.

2) 가지조직의 피로균열 경로는 가압력이 10MPa에서 20MPa로 증가함에 따라 flat mode에서 rough mode로 바뀌었으며, 복합재료의 경우 가압력이 10MPa일때 기지와 강화재 사이의 계면으로의 전파형태가, 가압력 20MPa에서는 강화섬유를 자르고 지나가는 형태로 바뀌었다.

3) 복합재료의 파괴파단면을 관찰한 결과, 저성장속도영역에서는 국부적인 줄무늬가 관찰되며, 이와같은 현상은 가압력 증가에 따라 뚜렷이 관찰할 수 있었으나 고 성장속도 영역에서는 가압력이 10MPa인 경우 기지와 강화섬유사이의 계면에서 debonding현상을 관찰하였지만, 가압력이 20MPa에서는 우수한 결합특성으로 debonding현상을 관찰할 수 없었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Christman, A. Needleman and S. Suresh, Acta Metall. Vol. 37, No. 11, PP. 3029-3050, 1989.
- [2] W. A. Logsdon and P. K. Liaw, Engineering Fracture Mechanics Vol. 24, No. 5, PP.737-751, 1986.
- [3] D. L. Davidson, Enginnering Fracture Mechanics Vol. 33, No. 6, PP.965-977, 1989
- [4] Y. Sugimura and S. Suresh, Metall. Trans. A. Vol. 23A, PP.2231-2241, 1992.
- [5] David L. Davidson, Metall. Trans. 22A, PP.97-123, 1991
- [6] Musson, N. J. and Yue, T. S., Mater. Sci. and Engng135, PP.237-242, 1991.
- [7] Harris, S. J. and Wilks, T. E. Proc. 6th Int. Conf. on Composite Materials. London. 1987 edited by F. L. Matthews, N. C. R. Buskell and J. M. Morton PP. 2.113-2.127
- [8] ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Section 3, Vol. 03.01, PP.739-759, 1985
- [9] T. Christman and S. Suresh, Mater. Sci. Eng., Vol. 102, P.211, 1988
- [10] J. K. Sang and R. O. Ritchie, Acta Metall., Vol. 37, PP. 2267, 1989
- [11] D. L. Davidson, Eng. Fract. Mech., Vol. 33, PP. 965, 1989
- [12] S. Kumai, J. E. King, and J. F. Knott, Fat. Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 13, PP. 511, 1990
- [13] P. C. Paris and F. Erdogan, Trans. ASME J. Basic Eng., Vol. 85, PP. 528-534, 1963
- [14] M. Levin and B. Karlsson, Composites, Vol. 24 (1993), PP.288
- [15] 여인동, 이지환 : 한국주조공학회, Vol. 15, No. 2 (1995) PP. 138-145
- [16] 여인동, 이지환 : 한국주조공학회, Vol. 14, No. 2 (1994) PP. 345-352