

# 치과용 복합레진의 파괴인성에 관한 실험적 연구

경희대학교 치과대학 보존학 교실

박진훈 · 민병순 · 최호영 · 박상진

## - 목 차 -

- I. 서 론
- II. 실험 재료 및 방법
- III. 실험 성적
- IV. 총괄 및 고안
- V. 결 론
  - 참고문헌
  - 영문초록
  - 사진부도

## I. 서 론

치과용 복합레진은 레진기질에 filler가 첨가된 입자 강화형복합재료(*particle-reinforced composite*)로서 치아 색조의 재현성이 우수하고 조작이 간편한 잇점 등으로 전치부 수복에 주로 사용되어 왔으나 물리적 성질의 개선으로 최근에는 구치부 수복재료로도 사용되고 있다.

이상적인 수복재료는 치아의 저작기능과 심미성을 충분히 회복시킬 수 있는 물리 화학적 성질을 갖추고 생물학적인 적합성과 구강내 환경변화에 따른 내구성을 필요로 한다. 복합레진의 경도<sup>1~3)</sup>, 인장강도<sup>2,3)</sup>, 압축강도<sup>3,4)</sup>, 피로강도<sup>4,5)</sup>, 내마모성<sup>6~11)</sup>, 및 변연적합성<sup>10~12)</sup> 등에 관한 실험적 또는 임상적 연구들에서 복합레진의 물성이 이러한 이상적인 수복재료의 요구조건에 미흡한 상태임을 알 수 있으며, 복

합레진의 물리적 및 기계적성질에 영향을 미치는 요소중 레진기질<sup>13~15)</sup>, filler<sup>15~19)</sup>, 계면결합력<sup>18~20)</sup> 및 중합반응<sup>21~24)</sup> 등 내적인자가 많이 개선되어 수복재료로서의 미비점들이 보완되기는 하였으나 아직 파절<sup>4,12,25,26)</sup>이나 마모<sup>7~11)</sup>에 대한 약한 저항성이 중요한 결점으로 지적되고 있어서 응력집중이 강한 구치부에서는 복합레진 수복물의 내구성이 의문스러운 실정이다.

Draughn<sup>4)</sup> 및 Asmussen과 Jörgensen<sup>5)</sup>은 복합레진 수복물이 저작력 등 반복된 응력으로 피로한계에 도달하면 압축강도보다 낮은 응력하에서 파괴가 일어난다고 하였으며, Lloyd<sup>26)</sup>는 복합레진과 같이 취성(*brittleness*)이 큰 재료는 쉽게 불안정파괴가 나타나므로 물리적인 강도보다는 기계적인 특성에 따라 파괴저항성이 좌우된다고 보고하였다.

Power와 2인<sup>27)</sup> 및 Leinfelder<sup>28)</sup>는 응력에 따른 복합레진 수복물 표층의 균열진전이 filler 입자의 탈락을 초래하므로써 마모를 가속시킨다고 보고하였으며, Truong과 Tyas<sup>29)</sup>는 복합레진의 중합수축으로 인한 잠재응력이 미세균열의 형태로 발달될 경우 구강내 온도변화와 저작응력에 의해 미세균열이 더욱 진전되어 레진기질과 filler 입자간의 결합을 이완시키므로 이러한 미세균열의 진전은 마모의 전구단계로 간주된다고 보고한 점으로 보아, 복합레진 수복물의 마모는 미시적 파괴현상과 관련된 기계적 특성이며 따라서 수복물의 파괴와 함께 파괴역학적인 방법의 연구가 필요함<sup>30,31)</sup>을 알 수 있다.

한편, Griffith<sup>32)</sup>가 취성역학이론을 통하여 파괴응력은 균열의 진전에 따라 생성되는 파단면의 표면에너지로 해방(release)된다고 하며 취성불안정파괴의 조건(G criterion)을 제시한 이래, 취성재료에 관한 파괴역학적 연구방법<sup>33)</sup>이 정리되어 균열선단에 집중되는 응력의 강도를 응력확대계수(stress intensity factor,  $K_I$ )로, 평면변형상태에서 균열진전에 의한 파괴가 일어나는 임계치를 임계응력확대계수(critical stress intensity factor,  $K_{Ic}$ )로 산출하고 이 수치를 평면변형파괴인성(plane strain fracture toughness)으로 규정하여 취성불안정파괴에 대한 재료 고유의 저항성 평가<sup>34)</sup>에 사용하게 되었다.

치과재료의 파괴저항성 평가에도 파괴역학적 연구방법이 도입되어 acrylic레진<sup>35-38)</sup>, 아말감<sup>39,40)</sup>, 이장재<sup>41)</sup>, 도재<sup>42,43)</sup>, 및 glass ionomer cement<sup>44)</sup> 등의 파괴인성이 연구되었으며, 치과용 복합레진의 파괴인성에 관해서는 Robert와 2인<sup>45)</sup> 이래 여러 선학들의 보고<sup>26,44,46-58)</sup>가 있었고, 복합레진의 파괴인성 측정방법으로는 single edge notch형 시편의 3점굽곡시험법<sup>26,45-51)</sup>이 널리 이용되며 short-rod chevron notch형 시편의 인장시험법<sup>52-54)</sup>, double torsion 시험법<sup>29,55-57)</sup>, 압흔법<sup>58)</sup> 등도 이용되었으나, 측정방법에 따른 파괴인성치에 큰 차이가 없는 것으로 보고되었다.<sup>52,56,58)</sup>

복합레진은 filler를 첨가하지 않은 종래의 레진에 비해 파괴인성이 높으며<sup>44,45,50)</sup> filler함량이 증가할수록 균열진전에 대한 저지효과가 커져 파괴인성도 증

가하는 것으로 여러 연구결과에서 나타났으나<sup>29,44,45,56)</sup>, Ferracane와 2인<sup>49)</sup> 및 Broutman과 Sahu<sup>59)</sup>는 filler함량이 일정정도 이상 증가할 경우 filler 입자간의 거리가 지나치게 감소되어 인접균열간에 상호작용이 일어나 파괴인성이 낮아짐을 보고하였으며, Lloyd와 Iannetta<sup>46)</sup> 및 Pilliar와 2인<sup>52)</sup>은 파괴인성시험과 파단면 관찰을 통하여 filler입자의 크기에 따라 복합레진의 파괴거동에 차이가 나타나 입자가 커질수록 파괴인성이 증가함을 보고하였다.

저자는 복합레진의 파괴저항성을 향상시키기 위해서는 파괴거동에 대해 명확한 이해가 필요하다고 판단되어 수중 수복용 복합레진의 함입 filler에 따른 파괴인성을 평가하고 탄성과 검출을 이용한 비파괴 검사법인 Acoustic Emission<sup>60)</sup> 측정결과와 파단면의 주사전자현미경적 관찰상을 비교 검토하여 다소의 지견을 얻었기에 이에 보고하는 바이다.

## II. 실험 재료 및 방법

### 1. 실험 재료

본 실험은 현재 시판되고 있는 전치부 및 구치부 수복용 복합레진 중 함입된 filler 입자의 크기에 따라 분류하여 macrofilled type인 Clearfil-F II와 Hi-pol, microfilled type인 Heliomolar와 Durafill, hybrid type인 Bisfil- I 과 P-50(이하 CF, HP, HM, DF, BF, 및 PF로 약함)의 6종을 사용하였다 (Table 1).

Table 1. Composite resin materials tested in this study

Code	Brand	Manufacturer	Filler type	Curing mode	Batch number
CF	Clearfil-F II	Kuraray Co., Japan	Macrofilled	Self curing	53193, 53196
HP	Hi-pol	Boopyung Co., Korea	Macrofilled	Self curing	U-paste ; 90301 C-paste ; 90419
HM	Heliomolar	Vivadent Co., Liechtenstein	Microfilled	Light curing	408302
DF	Durafill	Kulzer GmbH., West Germany	Microfilled	Light curing	S138
BF	Bisfil- I	Bisco Inc., U.S.A.	Hybrid	Light curing	068307, 068237
PF	P-50	3M Co., U.S.A.	Hybrid	Light curing	8BL4

## 2. 실험방법

### 1) Filler 함량의 측정

파괴인성시험에 사용할 각 복합레진의 filler 함량을 측정하기 위해 국제표준기구에서 제정한 ISO No. 4049<sup>61)</sup>의 규격에 따라 standard ashing test를 시행하였다.

각 복합레진별로 체적 250mm<sup>3</sup>의 장방형 시편(2.5×5×20mm)을 3개씩 제작하여 전자천평(R200D, Sartorius Co., W. Germany)으로 중량을 측정하고 전

$$\text{Vol. \%} = \frac{\text{dr} \cdot \text{Wt. \%}}{\text{dr} \cdot \text{Wt. \%} + \text{df}(100 - \text{Wt. \%})} \times 100 \dots (1)$$

dr : density of resin (g/cm<sup>3</sup>)

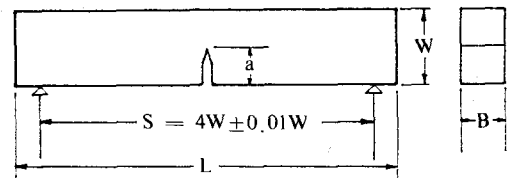
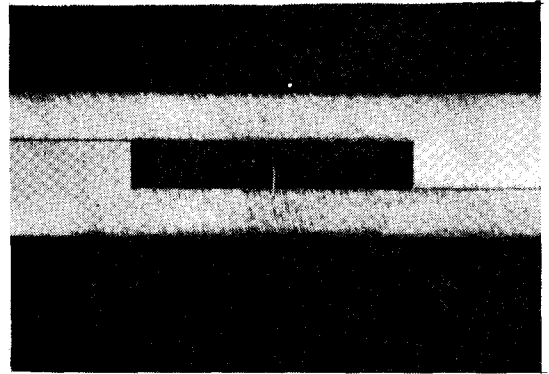
df : density of filler (g/cm<sup>3</sup>)

기소 환로(Jelcraft, Jelrus Co., U.S.A.)에 넣어 600°C, 30분간 가열한 후, 다시 중량을 측정함으로써 시편내 유기질성분을 제외한 무기질의 filler중량비 함량을 구하였다.

산출된 각 복합레진의 filler중량비 함량(이하 Wt. %로 표기)을 다음의 식(1)에 따라 filler체적비 함량(이하 Vol. %로 표기)으로 환산하였으며, 이때 레진기질의 밀도는 1.2g/cm<sup>3</sup>, filler의 밀도는 2.5g/cm<sup>3</sup>로 하였다.

### 2) 파괴인성시험

미국재료시험학회에서 제정한 파괴인성시험법인 ASTM E399<sup>34)</sup>의 규격에 따른 single edge notch (SEN)형의 3점굽곡시험편을 제작하기 위해 Fig. 1과 같이 금속주형을 제작한 후 아래면에 유리판을 깔고 복합레진을 충전하였다. 균일한 광조사를 위해 1.0mm두께의 유리판을 뒷면에 압접하고 광조사기(Visilux II, 3M Co., U.S.A.)를 사용하여 1회당 30초씩 5회 이동하는 방법으로 양면을 광조사하였다. 자가 중합형 복합레진의 시편은 제조회사의 사용방법에 따라 혼합하여 광조사를 제외한 동일한 방법으로 충전, 제작하였으며 각 복합레진마다 제작한 10개씩의 시편을 37°C 증류수내에 24시간 보관한 후 시험에 사용하였다.



$$0.45W < a < 0.55W, B = W/2 \pm 0.01W$$

Fig. 1. Metal mold (above) for single edge notch specimen (below, ASTM E399) (a ; Notch length = 2.5mm, W ; Specimen width = 5.0mm, S ; Span length = 20.0mm, L ; Specimen length = 30.0mm, B ; Specimen thickness = 2.5mm).

파괴인성치를 측정하기 위해 이미 제작한 3점굽곡용 jig를 mechanical testing machine (DCS-500, Shimadzu Co., Japan)에 장착한 후, 20°C의 실온에서 하중속도 0.1mm/min로 시편 상단에 수직하중을 가하여 시편이 파단될때까지의 하중치를 최대하중 10kg용 load cell (SFL-10AG, Shimadzu Co., Japan)로 측정하고 X-Y recorder (D-51P, Riken Denshi Co., Japan)에 기록하였다.

파단후 각 시편의 두께(B), 폭(W), notch길이(a)를 caliper로 정확히 측정하여 다음의 식(2)에 따라 응력확대계수(K<sub>Q</sub>)를 산출 하였다.

각 시편에서 이미 측정한 두께(B)와 notch길이(a)에 따라 다음의 식(3)을 만족시킬 경우, 산출된 응력확대계수(K<sub>Q</sub>)를 평면변형상태에서의 임계응력 확대계수(K<sub>Ic</sub>), 즉 파괴인성치로 하였다.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{B W^{3/2}} \cdot f(a/W) \dots\dots\dots(2)$$

$$f(a/W) = \frac{3(a/W)^{1/2}(1.99 - (a/W)(1-a/W)(2.15 - 3.93a/W + 2.7a^2/W^2))}{2(1 + 2a/W)(1-a/W)^{3/2}}$$

$P_Q$  : peak load of failure(N)

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \dots\dots\dots(3)$$

$\sigma_y$  : yield stress(MPa)

3) Acoustic Emission의 측정

파괴인성시험과 병행하여 3점굴곡시험편의 좌우 측면에 Acoustic Emission(이하 AE로 약함) 변환자(PAC 50, Physical Acoustic Co., U.S.A.)를 각 1개씩 부착한 후(Fig. 2), 하중속도 0.01mm/min로 시편에 수직하중을 가하여 파단이 일어나는 시점까지 시편내 균열진전에 따라 방출되는 탄성파를 검출하였다. 사용한 변환자는 주파수영역이 200~500 KHz인

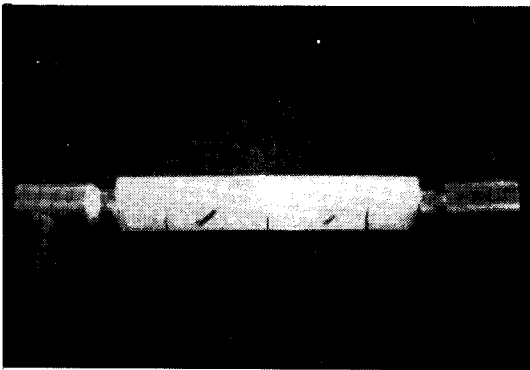


Fig. 2. AE sensors(PAC 50) attached on the specimen.

공진형이며 증폭율 52dB의 증폭기가 내장되어 있어서, 검출된 탄성파는 digital신호로 변환됨과 동시에 1차 증폭되고 다시 예비증폭기에서 20dB, 주증폭기에서 10dB씩 재차 증폭되어 AE분석기(PAC 3104, Physical Acoustic Co., U.S.A.)에 2개의 채널로 입력되었다<sup>93)</sup>. (Fig. 3, 4).

AE분석기를 통하여 각 시편의 AE방출의 정도를

나타내는 사상계수(events), AE신호의 크기를 나타내는 진폭(amplitude), 그리고 시간에 따른 AE의 누적사상계수(accumulative events)를 분석한 후 출력시켰다.

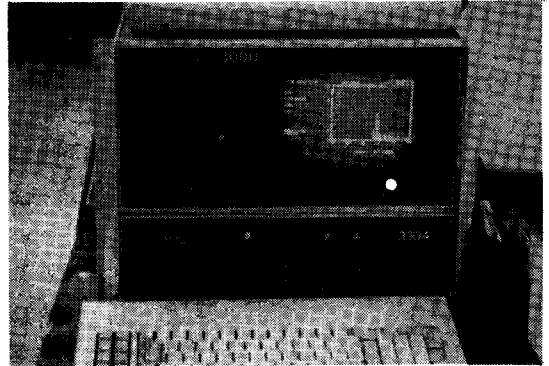


Fig. 3. Computerized AE analyzer(PAC 3104).

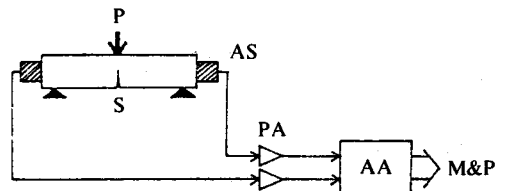


Fig. 4. Schematic drawing of AE detecting system (P ; Load, S ; SEN specimen, AS ; AE sensor, PA ; Pre-amplifier, AA ; AE analyzer, M&P ; Monitor and Printer).

4) 파단면의 주사전자현미경적 관찰

각 시편의 파단면을 ion sputter(E102, Hitachi Co., Japan)에서 백금증착한 후 주사전자현미경(S-450, Hitachi Co., Japan)으로 가속전압 20KV로 하여 관찰하였다.

### III. 실험 성적

#### 1. Filler 함량

실험에 사용된 복합레진의 filler Wt. %는 hybrid type의 PF가 85.0%로 가장 높았으며, 가장 낮은 값은 microfilled type인 DF의 51.2%로서 PF, BF, CF, HP, HM, DF순으로 나타났다. Filler Wt. %를 파괴인성연구에서 필요로 하는 filler Vol. %로 환산한 결과 hybrid type의 PF와 HP가 각각 73.1%, 66.7%, macrofilled type의 CF와 HP가 각각 61.0%, 56.2%, 그리고 microfilled type의 HM과 DF는 각각 42.7%, 33.5%로서 filler Wt. %와 같이 PF, BF, CF, HP, HM, DF순의 filler 함량을 나타내었다(Table 2).

**Table 2.** Inorganic filler contents of tested composite resin materials (n=3)

(Unit ; %)			
Code	Filler type	Wt. %*	Vol. ; %**
CF	Macrofilled	76.5	61.0
HP	Macrofilled	72.8	56.2
HM	Microfilled	60.8	42.7
DF	Microfilled	51.2	33.5
BF	Hybrid	80.7	66.7
PF	Hybrid	85.0	73.1

\*Weight percent of filler

\*\*Volume percent of filler

#### 2. 파괴인성

각 복합레진의 평면변형파괴인성치(이하  $K_{Ic}$ 치로 표기)를 산출한 결과는 Table 3과 같다.

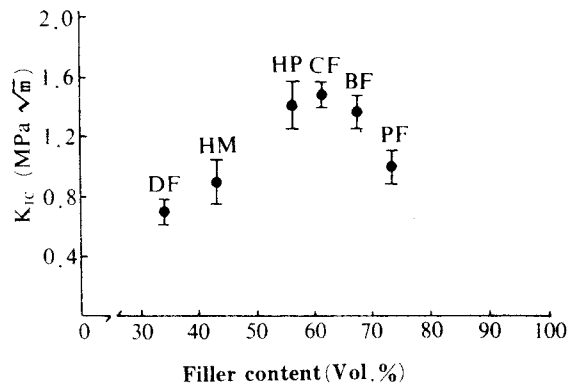
함입된 filler 입자의 크기에 따른 각 복합레진의  $K_{Ic}$ 치는 macrofilled type의 CF와 HP가 각각 1.46  $MPa\sqrt{m}$ , 1.40  $MPa\sqrt{m}$ 로 나타나 비교적 높은 파괴인성을 보였으며, hybrid type인 BF와 PF는 각각 1.34  $MPa\sqrt{m}$ , 0.96  $MPa\sqrt{m}$ 로 macrofilled type보다 다소 낮은 파괴인성을 나타내었고, microfilled type인 HM과 DF는 각각 0.86  $MPa\sqrt{m}$ , 0.69  $MPa\sqrt{m}$ 로 macrofilled type 및 hybrid type에 비해 상대적으로 낮은 파괴인성을 나타내었다.

**Table 3.** Plane strain fracture toughness( $K_{Ic}$ ) of tested composite resin materials (n=10)

(Unit ; $MPa\sqrt{m}$ )		
Code	Filler type	$K_{Ic}$ Mean $\pm$ S.D.
CF	Macrofilled	1.46 $\pm$ 0.08
HP	Macrofilled	1.40 $\pm$ 0.18
HM	Microfilled	0.86 $\pm$ 0.15
DF	Microfilled	0.69 $\pm$ 0.08
BF	Hybrid	1.34 $\pm$ 0.11
PF	Hybrid	0.96 $\pm$ 0.10

Significant differences between the each pair of  $K_{Ic}$  data except CF and HP, HP and BF, HM and PF at  $P=0.05$  level.

Filler 함량(Vol. %)에 따라 각 복합레진의  $K_{Ic}$ 치를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. Macrofilled type인 CF와 HP, microfilled type인 HM과 DF는 filler 함량이 많을수록  $K_{Ic}$ 치도 높게 나타난 양상을 보였으며, CF와 HP간의 통계학적인 유의성은 인정되지 않았으나( $P>0.05$ ) HP와 HM, HM과 DF간에는 유의한 차이를 나타내었다( $P<0.01$ ,  $P<0.05$ ). 그러나 macrofilled type인 CF의  $K_{Ic}$ 치를 정점으로 CF보다 많은 filler 함량을 보인 hybrid type의 BF가 오히려 낮은  $K_{Ic}$ 치를 나타내었으며( $P<0.05$ ), 가장 많은 filler 함량을 보인 PF도 같은 hybrid type인 BF에 비해 낮은  $K_{Ic}$ 치를 나타내어( $P<0.01$ ) filler 함량이 많



**Fig. 5.** Correlation of plane strain fracture toughness( $K_{Ic}$ ) and filler content (Vol. %) of tested composite resin materials.

아짐에 따라 파괴인성도 점차 높아지다가 다시 감소하는 경향을 보였다.

### 3. Acoustic Emission양상

각 복합레진의 AE측정결과를 분석한 결과는 Fig. 6~8과 같다.

Macrofilled type의 CF와 HP에서는 AE사상계수가 각각 426, 512로 나타나 비교적 많은 수의 AE가 발생하였다. CF의 경우는 최대하중의 약 70%정도에서 AE가 발생하기 시작하였으며, AE진폭분포는 잡음여과수준인 52dB부터 약 80dB까지의 진폭대를 나타내었다. HP는 같은 macrofilled type인 CF에 비해 다소 초기부터 AE가 발생하였으나 진폭분포는 비슷한 양상이었다(Fig. 6).

Microfilled type의 HM과 DF에서는 AE사상계수가 각각 59, 50으로 매우 적은 수의 AE가 발생하였으며, 공히 최대하중점 부근에서 발생하였다. AE의 진폭분포는 사상계수가 적은 점을 감안할 때 약 80dB 이상의 AE가 일정량 발생된 양상을 보였다(Fig. 7).

Hybrid type의 BF와 PF에서는 AE사상계수가 각각 391, 114로 macrofilled type보다는 적었으나 microfilled type 보다는 많은 수의 AE가 발생하였으며, 최대하중의 약 90%지점에서 급격하게 발생하는 양상이었다. 특히 같은 hybrid type이지만 PF는 BF에 비해 AE사상계수가 현저히 감소하였고, 진폭분포에서도 거의 소진폭의 AE를 나타내었다(Fig. 8).

AE사상계수는 HP, CF, BF, PF, HM, DF순이었으며 각 복합레진의  $K_{IC}$ 치와 비교한 결과 AE사상계수가 많을수록 파괴인성도 높게 나타났다(Fig. 9).

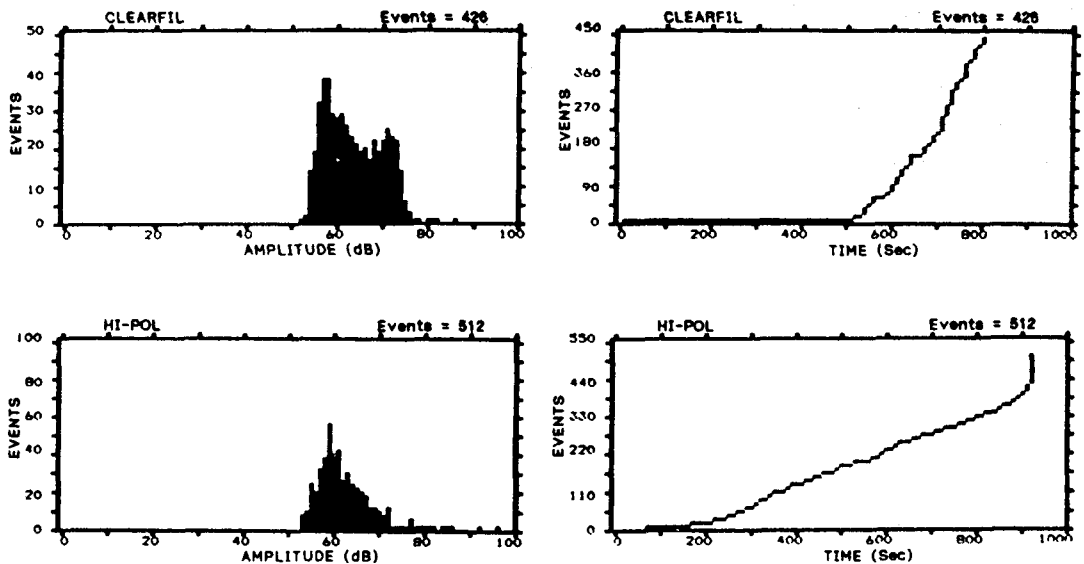


Fig. 6. AE events-amplitude distribution (left) and accumulative AE events (right) of macrofilled type composite resin materials.

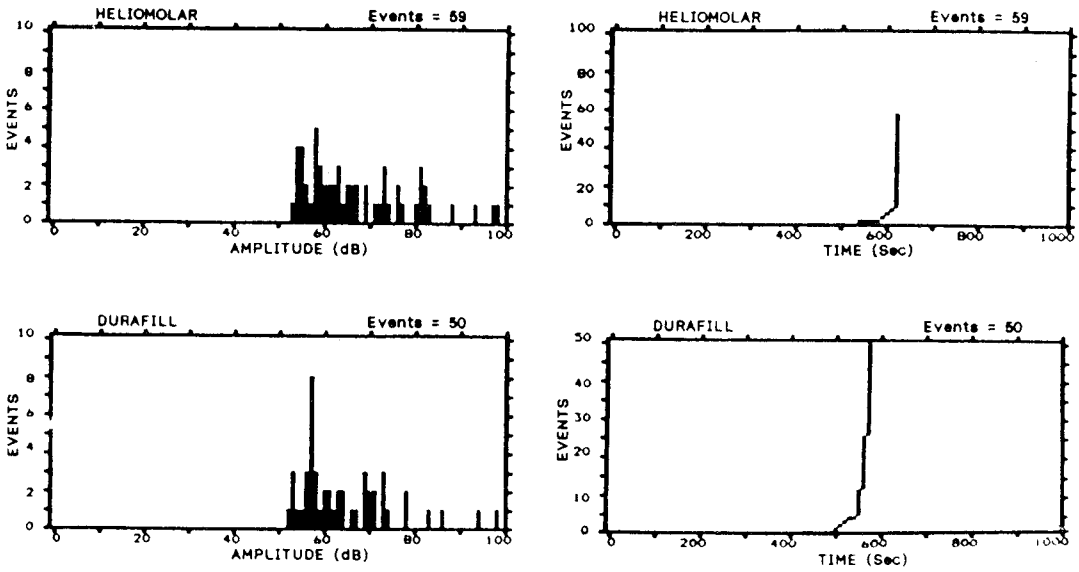


Fig. 7. AE events-amplitude distribution (left) and accumulative AE events (right) of microfilled type composite resin materials.

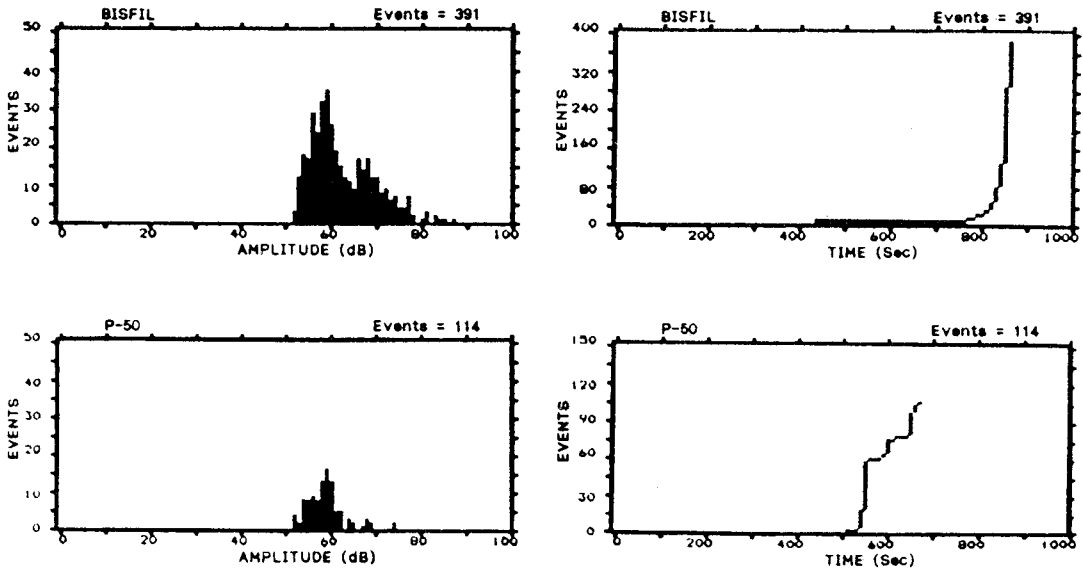


Fig. 8. AE events-amplitude distribution (left) and accumulative AE events (right) of hybrid type composite resin materials.

## VI. 총괄 및 고안

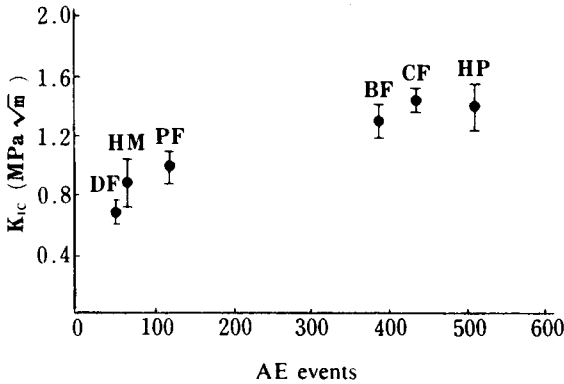


Fig. 9. Correlation of plane strain fracture toughness ( $K_{Ic}$ ) and AE event counts of tested composite resin materials.

### 4. 파단면 소견

Macrofilled type인 CF와 HP에서는 레진기질의 파단면과 직경  $10\mu\text{m}$  이상의 비교적 큰 filler입자와 레진기질간의 계면이 분리된 양상이었고, 직경 약  $5\sim 10\mu\text{m}$  크기의 filler입자는 다소 파괴된 양상을 보여 전체적으로 돌출부가 많은 불규칙한 파단면을 나타내었다(Fig. 10, 11). Microfilled type인 HM에서는 직경 약  $20\sim 30\mu\text{m}$  크기의 prepolymerized filler의 파괴상이 보였고 특히 DF에서는 균열진전방향으로 취성 파면의 전형적인 형상인 river pattern을 나타내었으며, 전체적으로 파괴에 대해 약한 저항성을 나타내는 평활한 파단면을 보였다(Fig. 12, 13). Hybrid type의 BF에서는 직경 약  $5\sim 10\mu\text{m}$  정도의 filler입자가 소수 파괴된 양상과 레진기질간에 계면이 분리된 양상을 함께 보여 다소 불규칙한 파단면을 나타내었으나, PF에서는 직경 약  $1\sim 3\mu\text{m}$  크기의 filler입자와 레진기질간의 계면이 분리된 양상과 전체적으로 미세한 돌출부들을 나타내는 비교적 평활한 파단면을 보였다(Fig. 14, 15).

각 복합레진의 파단면 양상을  $K_{Ic}$ 치와 비교한 결과 파괴인성이 클수록 불규칙하고 거친 파단면을, 파괴인성이 작을수록 비교적 평활한 파단면을 나타내었다.

복합레진은 종래의 unfilled acrylic resin에 무기질 filler를 함입시켜 물리적성질이 강화되었으나 구강내 환경에서 충분한 내구성을 발휘하기에는 균열진전에 대한 저항성이 취약하며, 이를 극복하기 위해서는 파절과 마모현상에 관한 더 많은 이해와 복합레진이 단일 조성물질이 아닌 복합재료라는 점을 고려한 기계적 특성의 연구가 요구되고 있다.

Griffith<sup>32)</sup>는 취성재료의 파괴에 관한 연구에서 파괴에너지는 파괴에 따라 새롭게 형성되는 표면에너지량과 같다고 하였으며, 이러한 이론은 더욱 발전되어 재료내 결함부위에 집중된 응력이 균열의 진전을 통하여 표면에너지로 해방되는 과정을 파괴현상이라 하였다. 또한 균열선단에서 균열진전이 시작되는 응력집중정도의 임계치를 임계응력확대계수 ( $K_{Ic}$ )<sup>33)</sup>라 하고 재료에 따라 고유한 이 수치를 파괴에 저항하는 재료의 강도 즉, 파괴인성으로 규정하였다. 파괴를 통한 에너지 해방율의 임계치(critical strain energy release rate)를  $G_{Ic}$ 로, 재료의 탄성계수를 E로 하였을때 식(4)의 관계가 성립됨이 밝혀져<sup>33)</sup> 균열진전에 소모되는 에너지인 파괴에너지가 커질수록 재료의 파괴인성은 증가되는 것을 알 수 있다.

$$G_{Ic} = K_{Ic}^2/E \dots\dots\dots(4)$$

본 실험에서 측정된 파괴인성치는  $0.69\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  내지  $1.46\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 최대치가 최소치의 약 2배가 되어 현재 임상에서 수복재료로 사용 중인 복합레진의 파괴 저항성이 제품에 따라 차이가 많음을 알 수 있었으며, Lloyd와 Mitchell<sup>44)</sup>은 single edge notch형 시편을 사용한 실험에서 복합레진의 파괴인성치가 제품에 따라  $0.63\text{MPa}\sqrt{\text{m}}\sim 1.47\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로, Pilliar 외 2인<sup>52)</sup>은 short rod형 시편을 사용한 파괴인성실험에서 제품에 따라  $0.74\text{MPa}\sqrt{\text{m}}\sim 1.91\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 다양하였다는 보고와 유사한 결과였다. 각 복합레진의 filler함량과의 관계를 비교한 결과 filler함량이 33.5%에서 61.0%사이인 DF, HM, HP, 및 CF는 filler함량이 증가함에 따라 파괴인성도  $0.69\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서



1.46MPa $\sqrt{m}$ 까지의 증가를 나타내어 Ferracane 외 2인<sup>49)</sup>이 filler함량 38.2%~66.7% 범위에서, Pilliar의 2인<sup>52)</sup>이 filler함량 20%~68.4% 범위에서, 그리고 Davis와 Water<sup>56)</sup>이 filler함량 7%~41% 범위에서 filler함량 증가에 따라 파괴인성도 증가하였다는 보고들과 총괄해 볼때 복합레진의 파괴저항성이 filler함량과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

복합재료내에서 입자함입에 따른 파괴인성의 강화현상은 취성재료의 파괴이론<sup>32)</sup>에 따를 경우 입자가 많이 함입될수록 재료의 파단면 면적이 커져 표면에너지로의 해방에 요구되는 파괴에너지량이 증가되는 것에 기인한다. Lange<sup>64)</sup> 및 Lange와 Radford<sup>65)</sup>는 입자 함입에 따른 복합재료의 강화기전을 더욱 구체화하여 파괴에너지를 다음의 식(5)로 나타내었다.

$$\gamma = \gamma_0 + F(D) \cdot T/d \dots\dots\dots(5)$$

여기서  $\gamma$ 는 파괴에너지,  $\gamma_0$ 는 기질의 파괴에너지, F(D)는 입자의 직경에 관련된 인자, T는 균열선단의 진전거리, 그리고 d는 입자간 거리를 나타내므로 복합레진내의 filler입자간의 거리가 레진기질내에서 진전되는 균열의 길이보다 작을때 F(D) · T/d의 값이 증가되어 입자강화현상이 나타나게 되며 따라서 filler함량이 많아질수록 입자간 거리 d값의 감소에 따라 파괴에너지의 량이 증가되고 결국 파괴인성이 높아지게 된다. 또한 입자간 거리 d는 filler체적비 함량에 따라 영향을 받으므로 본 연구에서도 filler중량비 함량을 측정후 filler체적비 함량으로 환산한 값을 filler함량으로 사용하였다.

그러나 hybrid type의 BF와 PF는 macrofilled type에 비해 filler함량은 많으나 파괴인성치는 1.34MPa $\sqrt{m}$ , 0.96MPa $\sqrt{m}$ 로 낮게 나타나 최고치인 CF를 정점으로 BF, PF순으로 감소되었는데(Fig. 5), 이러한 결과는 Lloyd<sup>47)</sup>의 실험에서도 filler함량 66%에서 1.35MPa $\sqrt{m}$ 로 최고치를, filler함량 74%에서는 도리어 1.27MPa $\sqrt{m}$ 로 감소하였다고 보고하였으며, Young 과 Beaumont<sup>66)</sup>는 silica입자로 강화시킨 epoxy레진의 파괴거동에 관한 연구에서 filler 함량이 일정한도를 초과하면 입자간격의 지나친 감소로 입자주위의 응력장끼리 상호작용을 일으켜 결국 파괴

에너지량의 감소에 따라 파괴인성이 저하하였음을 보고하였고, Broutman과 Sahu<sup>59)</sup>, Mallik와 Beaumont<sup>67)</sup>등도 이와 같은 견해를 나타내고 있다. 한편 Lange<sup>64)</sup>의 식(5)에서도 filler입자의 직경이 커질수록 파괴에너지가 증가됨을 나타내고 있으며, filler함량이 동일할 경우 입자의 크기가 커질수록 파괴인성치도 증가 하였다는 Spanoudakis와 Young<sup>68)</sup>의 보고를 참고로 할때 본 실험결과 hybrid type의 filler함량과 상반된 파괴인성치는 macrofilled type에 비해 filler입자의 크기가 상대적으로 작았던 점도 한 요인이 된것으로 생각되며, microfilled type인 HM과 DF의 현저하게 낮은 파괴인성치도 이상의 filler함량 및 filler입자 크기의 두가지 요인이 함께 작용한 결과로 사료된다<sup>69)</sup>.

AE는 재료 내부의 국소적인 파단이나 변형에 따라 해방되는 에너지 중 일부가 탄성파의 형태로 방출되는 현상으로, 압전방식의 변환자(sensor)를 피검체 표면에 부착시켜 AE방출의 정도와 양상을 분석하므로써 재료 내부의 미세한 파괴나 결함 등을 검출하는 비파괴검사법을 AE법<sup>60)</sup>이라 하며, 본 실험에서는 복합레진의 파괴인성에 기인하는 파괴거동을 관찰할 목적으로 AE를 측정후 각 복합레진의 파괴인성치와 비교한 결과 AE발생의 정도를 나타내는 사상계수가 많은 복합레진에서 파괴인성도 높게 나타났다. 특히 macrofilled type의 CF와 HP가 microfilled type의 HM과 DF에 비해 파괴인성치는 약 2배였으나 AE사상계수는 더 큰 차이를 보인점은 사상계수가 에너지해방율( $G_{IC}$ )과 밀접한 관계를 가지므로 식(4)에 따라 파괴인성치의 제곱값( $K_{IC}^2$ )에 따라 큰 차이가 나타난 것으로 사료되며, AE사상계수는 파괴인성치에 의해 민감한 영향을 받는다고한 Evans<sup>60)</sup>의 연구결과와 유사한 양상이었다.

Macrofilled type인 CF와 HP에서 나타난 AE사상계수 및 진폭분포는 재료내부의 입자파괴나 계면분리시 진폭이 비교적 큰 돌발형 파형이 다량 방출되는 AE특성<sup>70)</sup>으로 비추어 볼때 소량의 filler입자 파괴와 직경이 큰 filler입자의 계면분리 등 일련의 파괴거동을 추정 가능케 하며, 파단면 소견에서도 동일한 결과를 나타내어 Ferracane의 2인<sup>49)</sup>이 복합레진의 파단면에서 filler입자의 파괴와 계면분리 양상이 공히

관찰되었다는 보고내용과 일치하고 있다. 또한 균열 선단의 계속적인 진전을 일차적으로 저지시키는 filler입자의 pinning 효과<sup>68)</sup>와 균열선단을 우회시키는 bowing 현상<sup>64)</sup>등도 파괴에너지 방출에 기여하여 불규칙한 파단면과 높은 파괴인성치를 나타낸 것으로 판단된다.

또한 hybrid type의 BF는 AE진폭과 파단면 양상이 CF 및 HP와 비슷하였으나, PF는 BF에 비해 낮은 AE진폭분포와 상대적으로 작은 크기의 filler입자를 파단면에서 나타내어 입자에 의한 인성강화효과가 적었던 것으로 보이며, 이러한 AE양상으로 미루어 입자크기에 따른 에너지방출량의 차이가 AE진폭에 영향을 미친다는 점을 간접적으로 알 수 있었다.

Microfilled type의 HM과 DF는 다른 복합레진에 비해 AE사상계수가 매우 적게 발생하였으나 약 80 dB이상의 고진폭 AE가 소량 나타났으며 최대하중점 부근에서 AE누적치가 급격하게 증가하는 양상을 나타내어(Fig. 7), 파단면에서 관찰된 prepolymerized filler 덩어리의 파괴가 인성강화에 일부 기여한 것으로 볼 수 있으나 균열진전에 대한 microfiller입자의 pinning이나 bowing 효과는 미약하여 급격한 불안정 파괴가 일어난 것으로 판단된다. 특히 DF는 취성파단면의 특징적 소견인 river pattern을 나타내고 측정된 파괴인성치도  $0.69\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로서 Matsumoto<sup>50)</sup>가 보고한 Bis-GMA 레진기질의 파괴인성치  $0.60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 비해 큰 차이를 보이지 않으므로 이러한 microfilled type의 복합레진은 과중한 응력하에서 급격한 파단이 일어나기 쉬우며, 단기적으로는 filler입자의 크기가 미세하므로 마모율이 크지 않으나 장기적으로는 파괴인성이 낮음으로 인해서 저작용력의 반복에 따른 수복물 표층의 미세파괴가 가속되어 피로성 마모현상(fatigue wear)<sup>29)</sup>이 증가될 것으로 예측된다.

본 연구의 파단면 소견에서 Lloyd와 Mitchell<sup>44)</sup>의 보고와 유사하게 계면분리 양상과 레진기질이 입자 표면에 부분적으로 피개된 양상이 함께 관찰되어 filler입자표면의 silane처리가 완전한 접착력을 나타내지는 못한것으로 보이며, Broutman과 Sahu<sup>59)</sup>는 계면접착력이 증대되면 탄성계수가 높아지므로 파괴인성은 감소될수 있다고 하였으나, Agarwal의 2인<sup>71)</sup>

은 레진기질과 입자간의 탄성계수의 차이로 인해 응력은 계면에 집중되며 계면접착력이 커지면 응력집중점이 입자의 양극으로 치우쳐 균열선단이 bowing 현상을 나타낸다고 하여 계면접착력이 파괴거동과 밀접한 관계에 있음을 보고하였으나, Truong과 Tyas<sup>29)</sup>는 계면접착력이 증대될수록 파괴인성이 높아지나 그 효과는 filler함량에 의한 것보다는 영향이 적었다고 보고하였다.

이상과 같은 연구결과로 미루어 보아 filler함량과 입자 크기에 따른 파괴거동이 복합레진의 파괴인성에 중요한 변수로 작용함을 알 수 있었으나 이를 토대로 filler성분, 계면결합, 및 중합인자에 의한 파괴거동의 규명과 레진기질의 파괴인성 증대에 관한 연구는 계속되어야 한다고 사료된다.

## V. 결 론

치과용 복합레진의 파괴인성을 평가하고 함입 filler에 따른 파괴거동과의 관계를 규명하기 위하여 현재 사용되고 있는 6종의 복합레진을 대상으로 3점 굴곡시험을 통한 평면변형파괴인성치( $K_{Ic}$ )를 측정하고 filler함량, Acoustic Emission양상 및 파단면 소견 등과 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Filler함량은 hybrid type이 가장 높았으며 macrofilled type, microfilled type순이었다.
2. 평면변형파괴인성치는  $0.69\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  내지  $1.46\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 macrofilled type, hybrid type, microfilled type순이었다.
3. Acoustic Emission 분석 결과 사상계수(events)가 증가할수록 평면변형파괴인성치도 증가하였다.
4. 평면변형파괴인성치가 클수록 파단면 양상은 불규칙하고 거친 단면을 나타내었다.

## REFERENCES

1. Raptis, C.N., Fan, P.L., and Powers, J. M. : Properties of microfilled and visible light-cured composite resins. J. Am. Dent.

- Assoc., 99 : 631-633, 1979.
2. Harrison, A., and Draughn, R.A. : Abrasive wear, tensile strength, and hardness of dental composite resins-Is there a relationship? *J. Prosthet. Dent.*, 36(4) : 395-398, 1976.
  3. Fujii, K., Ginya, K., Arikawa, H., Kanie, T., Jyoshin, K., Inoue, K., Kuroki, K., and Uchiyama, C. : Composite restorative resins. Part 2 Physical and mechanical properties of UV and visible light-activated composite resins. *Dent. Mater. J.*, 5(2):252-259, 1986.
  4. Draughn, R.A. : Compressive fatigue limits of composite restorative materials. *J. Dent. Res.*, 58(3) : 1093-1096, 1979.
  5. Asmussen, E., and Jörgensen, K.D. : Fatigue strength of some resinous materials. *J. Dent. Res.*, 90 : 76-79, 1982.
  6. Jörgensen, K.D. : Restorative resins : abrasion vs. mechanical properties. *J. Dent. Res.*, 88:557-568, 1980.
  7. Vrijhoef, M.M.A., Hendriks, F.H.J., Letzel, H. : Loss of substance of dental composite restorations. *Dent. Mater.*, 1 : 101-105, 1985.
  8. Vann, W.F., Barkmeier, W.W., and Mahler, D.B. : Assessing composite resin in primary molars : Four-year findings. *J. Dent. Res.*, 67(5):876-879, 1988.
  9. Wendell, J.I., Vann, W.F. : Wear of composite resin restorations in primary versus permanent molar teeth. *J. Dent. Res.*, 67(1) : 71-74, 1988.
  10. Crumpler, D.C., Heymann, H.O., Shugars, D.A., Bayne, S.C., Leinfelder, K.F. : Five-year clinical investigation of one conventional composite and three microfilled resins in anterior teeth. *Dent. Mater.*, 4 : 217-222, 1988.
  11. Osborne, J.W., Gale, E.N., Ferguson, G.W. : One-year and two-year clinical evaluation of a composite resin vs. amalgam. *J. Prosthet. Dent.*, 30(5) : 795-800, 1973.
  12. Loyes, K., Lambrechts, P., Vanherle, G., and Davidson, C.L. : Material development and clinical performance of composite resins. *J. Prosthet. Dent.*, 48(6) : 664-672, 1982.
  13. Dermann, K., Rupp, N.W., and Brauer, G.M. : Effect of hydrophilic diluents on the properties of cured composites. *J. Dent. Res.*, 6(11) : 1250-1254, 1982.
  14. Kawaguchi, M., Fukushima, T., and Horibe, T. : Mechanical and physical properties of 2, 2'-Bis(4-methacryloxyphenoxyphenyl)propane polymers. *Dent. Mater. J.*, 62) : 148-155, 1987.
  15. Ruyter, I.E., and Sjövik, I.J. : Composition of dental resin and composite materials. *Acta Odontol. Scand.*, 39 : 133-146, 1981.
  16. Germain, H.S., Swartz, M.L., Philips, R.W., Moore, B.K., and Roberts, T.A. : Properties of microfilled composite resins as influenced by filler content. *J. Dent. Res.*, 64(2) : 155-160, 1985.
  17. Pallav, P., De Gee, A.J., Davidson, C.L., Erickson, R.L., and Glasspoole, E.A. : The influence of admixing microfiller to small-particle composite resin on wear, tensile strength, hardness, and surface roughness. *J. Dent. Res.*, 68(3) : 489-490, 1989.
  18. Söderholm, K.J. : Degradation of glass filler in experimental composites. *J. Dent. Res.*, 60(11) : 1867-1875, 1981.
  19. Söderholm, K.J.M. : Influence of silane treatment and filler fraction on thermal

- expansion of composite resins. *J. Dent. Res.*, 63(11)1321-1326, 1984.
20. Kurata, S., and Yamazaki, N. : Effect of isocyanatosilane coupling agents on silica surface. *The journal of Japanese Society for Dental Materials and Devices.*, 7(5) : 729-735, 1988.
  21. Ferracane, J.L. : Correlation between hardness and degree of conversion during the setting reaction of unfilled dental restorative resins. *Dent. Mater.*, 1 : 11-14, 1985.
  22. Taira, M., Urabe, H., Hirose, T., Wakasa, K., and Yamaki, M : Analysis of photo-initiators in visible-light-cured dental composite resins. *J. Dent. Res.*, 67(1) : 24-28, 1988.
  23. Rueggeburg, F.A., and Craig, R.G. : Correlation of parameters used to estimate monomer conversion in a light-cured composite. *J. Dent. Res.*, 67(6) : 932-937, 1988.
  24. McCabe, J.E., and Carrick, T.E. : Output from visible-light activation units and depth of cure of light-activated composites. *J. Dent. Res.*, 68(11) : 1534-1539, 1989.
  25. Lambrechts, P., Ameye, C., and Vanherle, G. : Conventional and microfilled composite resins. part II ; Chip fractures. *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 527-538, 1982.
  26. Lloyd, C.H. : The fracture toughness of dental composites. II. The environment and temperature dependence of the stress intensification factor ( $K_{Ic}$ ). *J. Oral Rehabil.*, 9 : 133-138, 1982.
  27. Powers, J.M., Roberts, J.G., and Craig, R.G. : Surface failure of commercial and experimental restorative resins. *J. Dent. Res.*, 55(3) : 432-436, 1976.
  28. Leinfelder, K.F. : Composite resins in posterior teeth. *Dent. Clin. North. Am.*, 25 : 357-364, 1981.
  29. Truong, V.T., and Tyas, M.J. : Prediction of in vivo wear in posterior composite resins ; a fracture mechanics approach. *Dent. Mater.*, 4 : 318-327, 1988.
  30. Suh, N.P. : An overview of the delamination theory of wear. *Wear*, 44 : 1-16, 1977.
  31. Rosenfield, A.R. : A fracture mechanics approach to wear. *Wear*, 61 : 125-132, 1980.
  32. Griffith, A.A. : The phenomena of rupture and flow in solids (*Philosophical Transactions of Royal Society*, 221A : 163-177, 1920). Republished with additional momentary in *Transactions of American society for Metals*, Metals Park, Ohio, pp871-887, 1968.
  33. Irwin, G.R., and Paris, P.C. : Fundamental aspects of crack growth and fracture. *Fracture, An advanced treatise* edited by Liebowitz, H., Vol.3, Academic Press, New York, pp1-46, 1971.
  34. ASTM E 399-74 : Standard test method for plain-strain fracture toughness of metallic materials, American National Standards Institute, 1974.
  35. Causton, B.E. : Fracture mechanics of dental poly(methyl methacrylate). *J. Dent. Res.*, 54(2) : 340-343, 1975.
  36. Lloyd, C.H., and Craigon, J. : Mechanical properties of injected P.M.M.A. *J. Dent. Res.*, 59 : 1810, I.A.D.R. Abst. No.77, 1980.
  37. Stafford, G.D., and Causton, B.E. : Fracture toughness of denture base acrylic. *J. Dent. Res.*, 59 : 1842, I.A.D.R. Abst. No. 205, 1980.
  38. Hargreaves, A.S. : The effect of the environment on the crack initiation toughness of dental poly(methyl methacrylate). *J.*

- Biomed. Mater. Res., 15 : 757-768, 1981.
39. Roberts, J.C., Powers, J.M., and Craig, R.G. : Fracture toughness and critical strain energy release rate of dental amalgam. *J. Mater. Sci.*, 13 : 965-971, 1978.
  40. Lloyd, C.H., and Adamson, M. : The fracture toughness ( $K_{IC}$ ) of amalgam. *J. Oral Rehabil.*, 12 : 59-68, 1985.
  41. Lloyd, C.H., and Anderson, J.N. : The strength and fracture toughness of calcium hydroxide preparations. *J. Oral Rehabil.*, 7 : 155-165, 1980.
  42. Rosenstiel, S.F., and Porter, S.S. : Apparent fracture toughness of dental porcelain with a metal substructure. *Dent. Mater.*, 4 : 187-190, 1988.
  43. Rosenstiel, S.F., and Porter, S.S. : Apparent fracture toughness of metal ceramic restorations with different manipulative variables. *J. Prosthet. Dent.*, 61(2):185-191, 1989.
  44. Lloyd, C.H., and Mitchell, L. : The fracture toughness of tooth coloured restorative materials. *J. Oral Rehabil.*, 11 : 257-272, 1984.
  45. Roberts, J.C., Powers, J.M., and Craig, R.G. : Fracture toughness of composite and unfilled restorative resins. *J. Dent. Res.*, 56(7) : 748-753, 1977.
  46. Lloyd, C.H., and Iannetta, R.A. : The fracture toughness of dental composites. *J. Oral Rehabil.*, 11 : 393-398, 1984.
  47. Lloyd, C.H. : Resistance to fracture in posterior composites. *Br. Dent. J.*, 155 : 411-414, 1983.
  48. Lloyd, C.H. : The fracture toughness of dental composites. III. The effect of environment upon the stress intensification factor ( $K_{IC}$ ) after extended storage. *J. Oral Rehabil.*, 11 : 393-398, 1984.
  49. Ferracane, J.L., Antonio, R.O., and Matsumoto, H. : Variables affecting the fracture toughness of dental composites. *J. Dent. Res.*, 66(6) : 1140-1145, 1987.
  50. Matsumoto, H. : The fracture toughness of composite resins. *The journal of Japanese Society for Dental Materials & Devices.* 7(5) : 756-768, 1988.
  51. De Groot, R., Van Elst, H.C., and Peters, M.C.R.B. : Fracture mechanics parameters for failure prediction of composite resins. *J. Dent. Res.*, 67(6) : 919-924, 1988.
  52. Pilliar, R.M., Smith, D.C., and Maric, B. : Fracture toughness of dental composites determined using the short-rod fracture toughness test. *J. Dent. Res.*, 65(11) : 1308-1314, 1986.
  53. Pilliar, R.M., Vowles, R., and Williams, D.F. : The effect of environmental aging on the fracture toughness of dental composites. *J. Dent. Res.*, 66(3) : 722-726, 1987.
  54. Mair, L.H., and Vowles, R. : The effect of thermal cycling on the fracture toughness of seven composite restorative materials. *Dent. Mater.*, 5 : 23-26, 1989.
  55. Goldman, M. : Fracture properties of composite and glass ionomer dental restorative materials. *J. Biomed. Mater. Res.*, 19 : 771-783, 1985
  56. Davis, D.M., and Waters, N.E. : An investigation into the fracture behavior of a particulate-filled bis-GMA resin. *J. Dent. Res.*, 66(6) : 1128-1133, 1987.
  57. Davis, D.M., and Waters, N.E. : Fractography of a bis-GMA resin. *J. Dent. Res.*, 68(7) : 1194-1198, 1989.
  58. Yoshimoto, S., Nakajima, N., Kubota, A., and Iwamoto, T. : Fracture toughness of posterior composite resin. *J. Dent. Res.*,

- 64 : 179, I.A.D.R./A.A.D.R. Abst. No. 37, 1985.
59. Broutman, L.J., and Sahu, S. : The effect of interfacial bonding on the toughness of glass filled polymers. *Mater. Sci. Eng.*, 8 : 98-107, 1971.
  60. Evans, A.G. : Acoustic Emission sources in brittle solids. *Fundamentals of Acoustic Emission* edited by Ono, D., UCLA, California, pp 209-227, 1978.
  61. ISO 4049 : Resin based dental filling materials, International Organization for Standardization, 1978.
  62. Söderholm, K.J., Zigan, M., Ragan, M., Fischlschweiger., and Bergman, M. : Hydrolytic degradation of dental composites. *J. Dent. Res.*, 63(10) : 1248-1254, 1984.
  63. Kim, K.H., and Kishi, T. : Three dimensional AE source location in metals. *Non-destructive testing communications*, 3 : 75-88, 1987.
  64. Lange, F.F. : Fracture energy and strength behavior of a sodium borosilicate Glass-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite system. *J. Am. Cera. Soc.*, 54 : 614-620, 1971.
  65. Lange, F.F., and Radford, K.C. : Fracture energy of an epoxy composite system. *J. Mater. Sci.*, 6 : 1197-1203, 1971.
  66. Young, R.J., Beaumont, P.W.R. : Failure of brittle polymers by slow crack growth. *J. Mater. Sci.*, 10 : 1343-1350, 1975.
  67. Mallick, P.K., and Broutman, L.J. : Mechanical and fracture behaviour of glass bead filled epoxy composites. *Mater. Sci. Eng.*, 18 : 63-73, 1975.
  68. Spanoudakis, J., and Young, R.J. : Crack propagation in a glass particle-filled epoxy resin. *J. Mater. Sci.*, 19 : 487-496, 1984.
  69. 박 영호, 민 병순, 박 상진, 최 호영 : 구치부 수복용 composite resin의 파괴거동에 관한 연구. *대한치과보존학회지*, 12(2) : 33-44, 1987.
  70. Sano, K., and Fujimoto, K. : Microscopic aspects of fracture and Acoustic Emission in metals. *Fundamental of Acoustic Emission*, edited by Ono, K., UCLA, California, pp.131-164, 1978.
  71. Agarwal, B.D., Panizza, G.A., and Broutman, L.J. : Micromechanics analysis of porous and filled ceramic composites. *J. Am. Cera. Soc.*, 54(12) : 620-624, 1971.

— Abstract —

## A STUDY ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF DENTAL COMPOSITE RESINS

Jin Hoon Park, Byung Soon Min, Ho Young Choi, Sang Jin Park

*Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Kyung Hee University*

The purpose of this study was to evaluate the fracture toughness of dental composite resins and to investigate the filler factor affecting the fracture behaviour on which the degree of fracture toughness depends.

Six kinds of commercially available composite resins including two of each macrofilled, microfilled, and hybrid type were used for this study. The plane strain fracture toughness ( $K_{IC}$ ) was determined by three-point bending test using the single edge notch specimen according to the ASTM-E399. The specimens were fabricated with visible light curing or self curing of each composite resin previously inserted into a metal mold, and three-point bending test was conducted with cross-head speed of 0.1mm/min following a day's storage of the specimens in 37°C distilled water.

The filler volume fractions were determined by the standard ashing test according to the ISO-4049.

Acoustic Emission(AE), a nondestructive testing method detecting the elastic wave released from the localized sources in material under a certain stress, was detected during three-point bending test and its analyzed data was compared with scanning electron fractographs of each specimen.

The results were as follows :

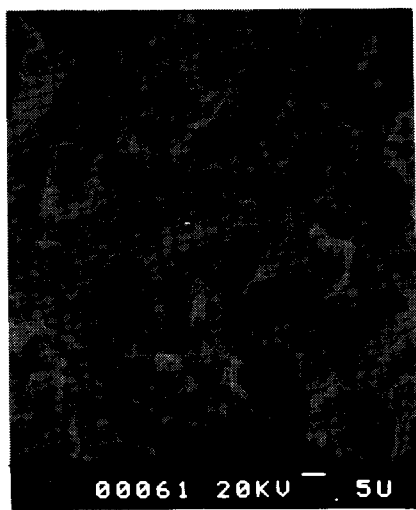
1. The filler content of composite resin material was found to be highest in the hybrid type followed by the macrofilled type, and the microfilled type.
2. It was found that the value of plane strain fracture toughness of composite resin material was in the range from 0.69  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  to 1.46  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  and highest in the macrofilled type followed by the hybrid type, and the microfilled type.
3. The consequence of Acoustic Emission analysis revealed that the plane strain fracture toughness increased according as the count of Acoustic Emission events increased.
4. The higher the plane strain fracture toughness became, the higher degree of surface roughness and irregularity the fractographs demonstrated.

## EXPLANATION OF FIGURES

- Fig. 10.** Scanning electron fractograph of a macrofilled type composite resin (CF) shows protrusions of coarse filler particle from the surface and fractures of smaller sized particle. The surface demonstrate uniformly rough and irregular pattern (original magnification, x1000).
- Fig. 11.** Scanning electron fractograph of a macrofilled type composite resin (HP) shows mixed appearance of fractured particles and interface debonding (original magnification, x1000).
- Fig. 12.** Scanning electron fractograph of a microfilled type composite resin (HM) shows mixed appearance of fractured particles and interface debonding (original magnification, x1000).
- Fig. 13.** Scanning electron fractograph of a microfilled type composite resin (DF) shows strong trend of unstable crack propagation. Note a river pattern of typical brittle fracture (original magnification, x1000).
- Fig. 14.** Scanning electron fractograph of an hybrid type composite resin (BF) shows somewhat similar findings with macrofilled type composite resins and more irregular fractured surface than that of microfilled type composite resins (original magnification, x1000).
- Fig. 15.** Scanning electron fractograph of an hybrid type composite resin (PF) shows small round filler particles protruding from the surface and not distinct appearance of particle fractures. The surface demonstrate not enough toughened appearance as composite resins with the highest filler content (original magnification, x1000).



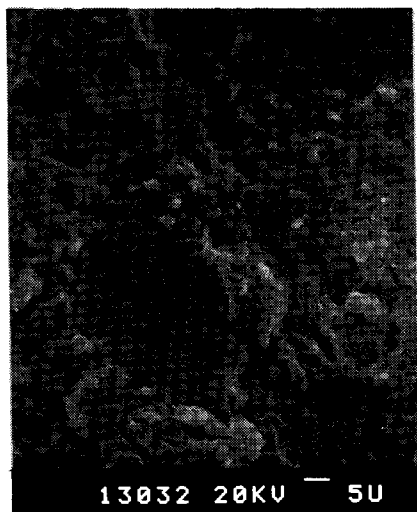
논문 사진 부도



10



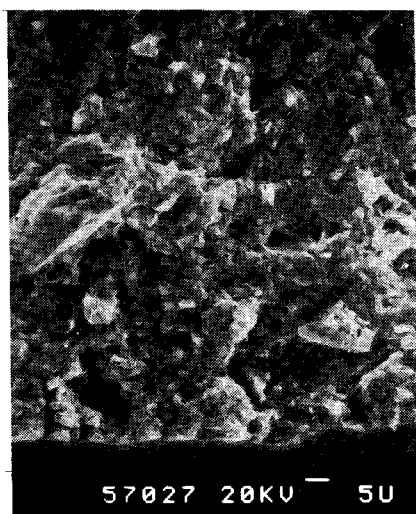
11



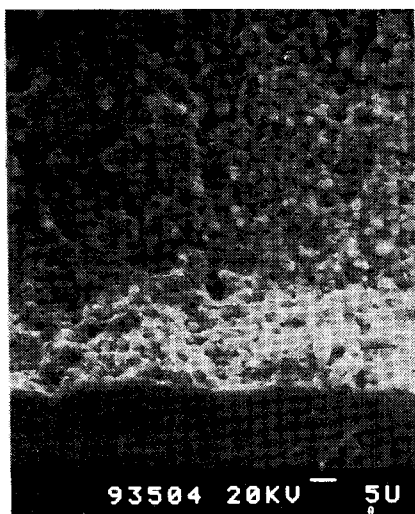
12



13



14



15