

유기복합필러를 함유하는 치과용 컴퍼짓 레진의 파괴와 마멸거동

임정일* · 김영빈** · 김교한** · 김석삼***
(1999년 5월 24일 접수)

Fracture and Wear Behavior of Dental Composite Resins Containing Prepolymerized Particle Fillers

Jing-Ri Ren, Young-Bin Kim, Kyo-Han Kim and Seock-Sam Kim

Key Words: Composite Resin(컴퍼짓 레진), Dental Materials(치과용 재료), Wear Mechanism(마멸기구), Specific Wear Rate(비마멸률)

Abstract

The fracture and wear behavior of dental composite resins containing prepolymerized particle fillers were investigated. Composite resins such as Metafil, Silux Plus, Heliomolar and Palfique Estelite were selected as specimens and contents of filler in specimens in order to evaluate the effect of prepolymerized particle fillers in fracture and wear characteristics. Ball on flat wear tester was used for the wear test at room temperature. The friction coefficient of Metafil was quite high relatively, and the wear resistances of Silux Plus and Palfique Estelite were better than those of Metafil and Heliomolar at the same experimental condition. It was found that the main wear mechanism was abrasive wear containing of plastic deformation of dental material.

1. 서론

치과용 컴퍼짓 레진은 심미성 및 자연치아와의 조화성 등 우수성으로 오랫동안 전치부 수복용으로 사용되어 왔으며, 구치부의 수복에 있어서도 수은성분 용출의 위험성이 있는 치과용 아말감을 대신한 적극적인 사용과 장기간의 임상적용으로 많은 양호한 임상성적들이 발표되고 있다.^(1~3) 그러나 아직도 컴퍼짓 레진의 높은 중합수축, 낮은 내마멸성과 취성 등 문제점으로 심미 전구치부 치과용 재료로서의 안심한 적용을 위하여 많은 연구가 수행되고 있는 실정이다.

최근에도 많은 종류의 치과용 재료가 개발중에 있고 많은 재료는 아직도 임상실험을 통해 그 특

성과 성능을 평가하고 있다. 특히 치과용 재료에서 기계적 특성이나 내구성 평가는 반드시 수행되어야 할 특성으로서 현재 사용중인 치과용 재료의 기계적 및 트라이볼로지적 특성의 평가가 시급한 과제로 판단된다.

교합접촉부에 사용되는 컴퍼짓 레진은 아말감보다 낮은 압축강도, 파괴인성과 내마멸성 등의 기계적인 성질로 구치수복에 있어서의 어려움이 있다. 최근에는 컴퍼짓 레진의 기계적 성질, 내마멸성, 연마성, 중합수축, 심미성 등을 향상시키기 위해 필러, 레진 모노머, 중합개시제 및 실란 커플링제 등에 대한 많은 재료과학적 연구가 다양하게 이루어져 왔다.^(4~6) 필러에 관한 연구에서 내마멸성의 증가, 가공성의 개선, 방사선 불투과성의 증가 등을 목적으로 초미세입자에 관심이 증가되고 있다.⁽⁷⁾ 초미세입자 필러의 사용은 높은 표면적에 의해 함유될 수 있는 필러의 양이 제한되기 때문에 미세입자를 레진 모노머와 혼합하여 미리 중합시키고, 이것을 분쇄하여 다시 미세필러와 함께 레진에 혼합시킴으로써 컴퍼짓 레진의

* 경북대학교 대학원 기계공학과
** 경북대학교 치과대학 치과생체재료학교실 및 생체재료연구소
*** 회원, 경북대학교 기계공학부
E-mail : sskim@bh.kyungpook.ac.kr
TEL : (053)950-5577 FAX : (053)950-6588

필러의 함유량을 증가시키고 있다. 유기복합필러는 단순히 필러의 함량을 증가시키는 효과뿐 아니라 유기복합필러 자체의 강도, 유기복합필러와 매트릭스간의 결합강도를 증가시킨다.⁽⁸⁾

치과용 세라믹이나 컴퍼짓 레진과 같은 취성재료는 재료내부 또는 표면의 작은 결함에 의해 재료의 최종적인 파손이 발생되므로 재료의 파괴인성의 평가가 매우 중요하다.^(9,10) 컴퍼짓 레진 내부에서 마이크로크랙의 발생과 전파는 컴퍼짓 레진 내부의 조직, 필러의 크기 및 형태 등에 영향을 받으며, 특히 유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진의 경우는 유기복합필러의 크기와 형태가 기계적 특성에 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다. 또한 컴퍼짓 레진의 마찰·마멸특성에는 필러의 재질, 형태, 크기, 입도, 분포, 함유농도, 배합방식 및 레진 등이 복합적으로 작용한다.⁽¹¹⁾

따라서 본 연구에서는 유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진에 대한 파괴인성치 측정과 선형 왕복 마찰·마멸실험을 수행하여 유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진의 마찰·마멸특성을 규명하였으며 주사형 전자현미경(SEM)을 이용한 조직관찰과 마멸면의 미시적인 관찰 등을 통하여 유기복합필러의 크기와 형태, 필러의 함유량 등이 유기복합필러의 강도, 유기복합필러와 매트릭스 사이의 계면강도 및 컴퍼짓 레진의 파괴인성과 내마멸성에 미치는 영향을 검토하였으며 컴퍼짓 레진의 마멸기구를 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 파괴인성 측정을 위해 3점 굴곡 시험용 지그를 만능시험기(Instron4202, Constant rate of cross head travel)에 장착시키고 그 위에 시편을 얹고 0.1 mm/min의 인장속도로 시편 상단에 수직 하중을 가하여 시편이 파단할 때까지 하중-변위 곡선을 구하여 계산하였으며 경도는 경도측정기(Shimadzu, HMV-200)를 사용하여 측정하였다. 각 시험은 5회 행하여 그 평균값을 구하였다. Fig. 1에서 파괴인성 측정시의 시험편의 형상과 개략도를 나타내었다.

마찰·마멸시험기는 구강내에서의 마멸상태를 실험적으로 재현하기 위해 선형 왕복운동 하는 실험장치를 제작하여 사용하였다. 시험편에 가해

지는 하중은 deadweight를 사용하였으며 마찰·마멸실험시에 발생하는 마찰력은 인장 압축로드셀과 indicator를 통해서 증폭되어서 나오는 전압신호를 아날로그 / 디지털 변환기(PCL812 analog / digital converter)로 변환시켜 컴퓨터에 입력하였다. 실험은 실온~100℃ 사이의 일정 온도에서 할 수 있으며 마찰력은 200N까지 측정이 가능하다.

실험방법은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 평판 위에서 선형 왕복운동을 하는 볼에 일정한 하중으로 가압하는 볼 온 평판 마찰계(ball on flat tribometer)형식을 사용하였으며, 상온, 상압, 무운활상태에서 마찰·마멸실험을 수행하였다. 실험순서는 초음파세척→ 건조→ 마찰·마멸시험→ 초음파세척→ 건조→ 현미경관찰→ 표면거칠기측정 순으로 수행하였으며 실험조건은 볼의 왕복 미끄럼속도 50mm/min, 미끄럼거리 2mm, 하중 9.8N으로 일정하게 하였으며 시험편 접촉부의 최대접촉 압력은 Metafil이 86.2MPa, Silux Plus의 경우 135.8MPa, Heliomolar의 경우 119.1 MPa이고 Palfique Estelite의 경우는 134.9 MPa이었다. 마멸량계산은 표면거칠기 측정기(Mitutoyo, Surf-500)를 사용하여 시험편 트랙부에서 수직되는 두 곳의 단면곡선을 측정하고 그 값을 평균하여 마멸부피를 계산하였다. 그리고 실험수치의 정확성을 위해 모든 실험은 3회이상 반복하여 그 평균치로서 비교하였다.

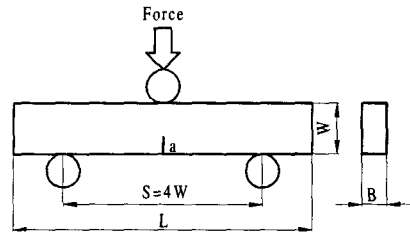


Fig. 1 Schematic illustration of fracture toughness testing

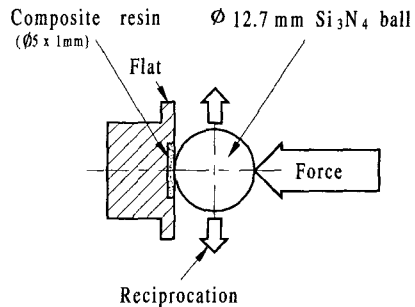


Fig. 2 Schematic illustration of ball on flat wear test

Table 1 Chemical composition of specimens (wt.%)

Brand Name	Elements						
	O	Na	F	Al	Si	Zr	Yb
Metafil	52.72			1.17	46.11		
Silux Plus	50.23			1.15	48.63		
Heliomolar	28.05		1.03	1.45	35.78		33.68
Palfique Estelite	44.17	2.03		1.28	35.55		16.97

Table 2 Filler fractions, vickers hardness and fracture toughness of specimens

Brand Name	Filler (wt.%)	Hv	K _{IC} *[MPa√m]
Metafil	41.88	48.18	0.63±0.01
Silux Plus	55.14	63.18	0.81±0.07
Heliomolar	59.31	54.31	0.84±0.02
Palfique Estelite	68.55	71.74	0.85±0.01
Si ₃ N ₄		1,562	

2.2 시험편

본 실험에서 사용된 시험편은 컴퍼짓 레진 중 분쇄 유기복합필러를 함유하는 Metafil, Silux Plus, Heliomolar 및 Palfique Estelite 등 4종류이다.

필러의 크기와 형태 및 함유량은 컴퍼짓 레진의 내마멸성에 관여하므로⁽¹²⁾ ISO No. 4049에 규정된 Standard Ash Method에 의해서 각 시험편 재료를 2.5×5×20mm 크기의 장방형의 모양으로 만들고 경화시킨 다음 무게(W₀)를 전자저울로 측정 한 후 전기소환로 (Accu-therm II 1000, Jelenko Co., Japan)를 사용하여 600℃에서 30분간 가열시켜 레진 성분을 태우고 다시 전자저울로 시험편의 무게(W₁)를 측정하여 그 비(W₁/W₀×100)로써 컴퍼짓 레진 내의 무기질 필러 함유량을 측정하였다. 측정은 3회 행하고 그 평균값을 구하여 최종 필러 함유량으로 하였다. Table 1에서 각 시험편의 화학조성을 중량백분율로 나타내었다.

파괴인성시험편은 분리형 금속 주형에 컴퍼짓 레진을 채우고 슬라이드 글라스로 덮은 후 광조사기(Powerlite 100, USA)로 한 면을 30초간 5회로 양면에 균일하게 광조사하여 경화시켰다. 경화가 끝난 시험편을 30분간 상온 방치 후 시험편을 마무리하여 다시 37℃의 증류수에서 24시간 담구어 둔 후 파괴인성시험을 하였다. 시험편은 2.5×5×25mm 크기의 장방형에 a=2~2.5mm 깊이의 노치가 있는 SEN(single edge notched)형으로 만들었으며 그 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Table 2는 각 시험편의 필러 함유량, 경도 및 파괴인성치를 나타낸 것으로 필러 함유량이 많을수록 높은 파괴인성과 경도를 나타냈음을 알 수 있다.

마멸시험편은 Fig. 2와 같이 직경 5mm, 깊이 1mm의 홈을 만들고 그 홈에 컴퍼짓 레진을 충전하고 슬라이드 글라스로 덮어 광조사기로 30초간 광조사시키고 30분간 실온에 방치한 후 #800Cw SiC 연마지로 1차 연마하고 37℃의 항온로에서 24시간 지난 다음 데이시케이터에서 7일간 보관 후 2차로 #1000Cw, #1500Cw의 연마지에 물을 묻혀서 약 0.1μmRa의 표면조도로 가공하였다.

Fig. 3은 컴퍼짓 레진의 연마면을 SEM으로 촬영한 사진으로서 각 시험편에 함유된 유기복합필러의 크기와 형상, 분포 및 필러의 크기와 분포 등을 나타내고 있다.

Fig. 3(a)는 Metafil로서 30~60μm의 둥근 형태와 5~10μm의 무정형의 분쇄 유기복합필러 및 구상 필러들로 구성되어 있으며 레진 매트릭스에 포함된 구상 필러의 크기는 0.1~0.2μm이며 분쇄 유기복합필러에 포함된 필러는 이보다 더 작은 0.05μm 이하의 구상 필러로 두 사이에는 필러 크기차이에 의한 계면이 형성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b)의 Silux Plus는 5~30μm의 다양한 크기와 형상의 유기복합필러로 구성되어 있으며 0.1~0.2μm 크기의 구상 필러들이 함유되어 있음을 알 수 있다. Fig. 3(c)의 Heliomolar는 30μm 정도의 둥근 형태의 일부와 수μm에서 10μm 크기의 무정형의 유기복합필러로 구성되어 있으며 0.05~0.1μm 크기의 구상 필러들이 함유되어 있으며 이트륨(ytterbium) 글래스 필러의 함유로 표면에 흰 점들이 나타나 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d)의 Palfique Estelite는 수μm에서 30μm이하의 다양한 크기의 무정형 유기복합필러로 이루어졌으며 0.05~0.1μm 크기의 구상 필러들이 함유하고 있음을 알 수 있다.

상대시험편은 직경이 12.7mm의 질화규소(Si₃N₄)볼을 선택하였으며 볼의 경도는 Hv 1562로서 컴퍼짓 레진보다 높은 경도를 가지고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴특성

유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진의 필러 함유량과 경도 및 파괴인성과의 관계는 Table 1과 Table 2에서 나타낸 바와 같이 필러 함유량이 가장 낮은 Metafil의 파괴인성치는 0.63 MPa√m, Hv경도는 48.18로 가장 낮게 나타났으며, 필러의 함유량이 많을수록 높은 파괴인성치를 나타내었

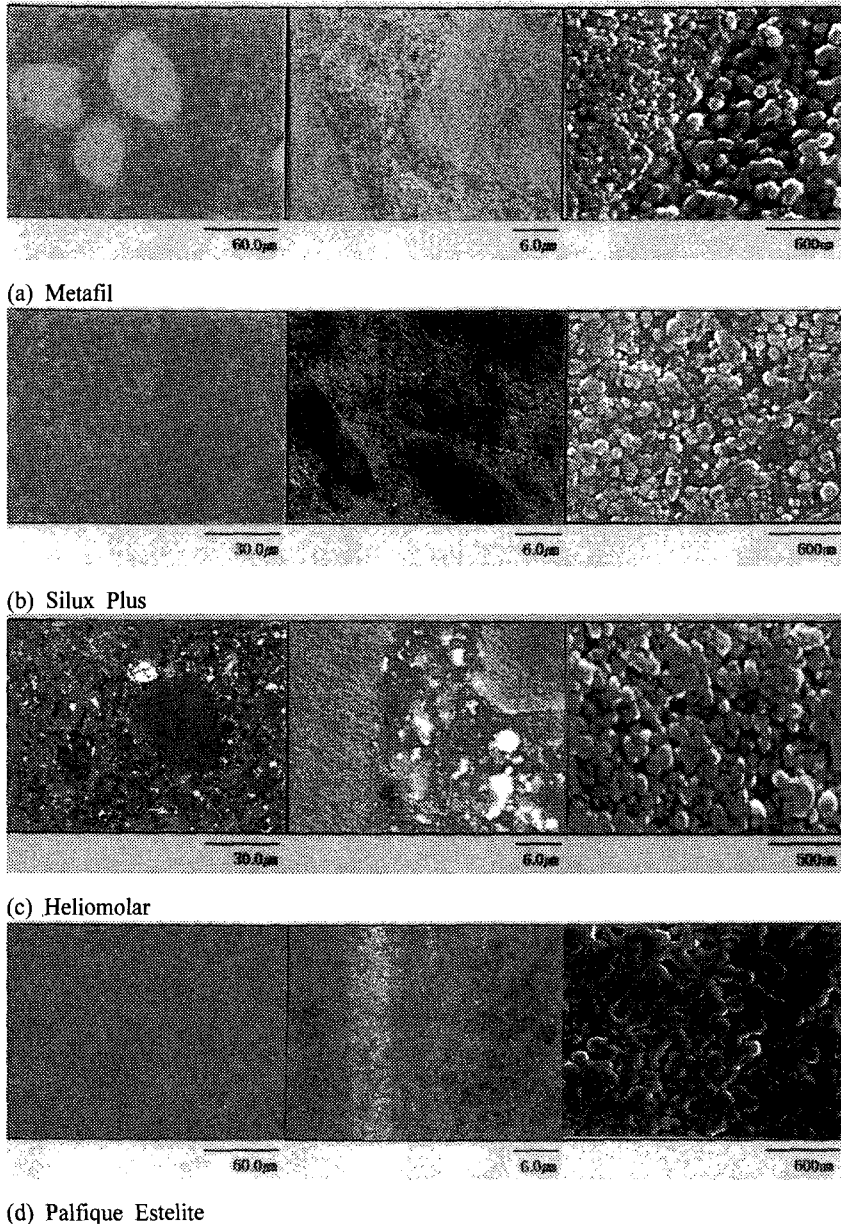


Fig. 3 SEM photographs of ground surface for specimens

다. 이러한 결과들은 작은 구상 필러에 의한 유기복합필러와 필러 함유량의 증가로 필러의 응력장의 간섭에 의한 필러간의 좋은 결합성과 유기복합필러와 매트릭스, 필러와 매트릭스 사이의 계면강도의 증가에 의한 것으로 사료된다.

3.2 마찰특성

Fig. 4에서는 각 시험편의 마찰계수의 평균값을

나타냈다. Metafil의 평균마찰계수는 0.67으로 다소 크게 나타났다. Metafil은 4가지 시험편중에서 파괴인성과 경도가 가장 낮은 것으로 Si_3N_4 볼파의 경도차에 의한 연삭마멸이 상대적으로 크게 발생하여 마멸량의 증가와 표면돌기가 크게 형성되면서 마찰계수가 크게 나타나는 것으로 추정된다. Silux Plus, Heliomolar와 Palfique Estelite의 마찰계수는 각각 0.48, 0.52, 0.53으로 나타났다.

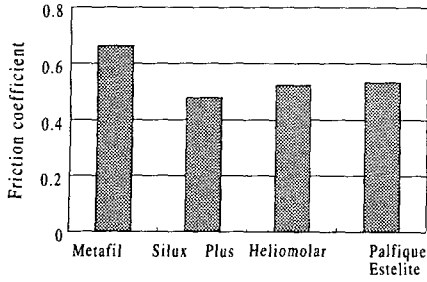


Fig. 4 Average friction coefficient of specimens under 9.8N

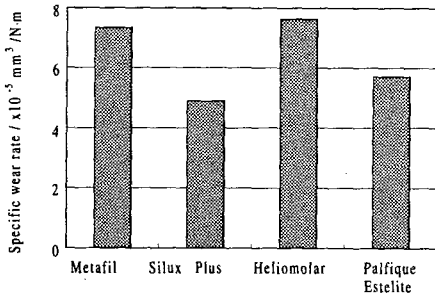


Fig. 5 Variation of specific wear rate for specimens under 9.8N

3.3 마멸특성

Fig. 5는 각 시험편에 대한 비마멸률의 비교로서 비마멸률의 크기는 Silux Plus < Palfique Estelite < Metafil < Heliomolar의 순으로 Silux Plus와 Palfique Estelite가 상대적으로 좋은 내마멸성을 나타냈다. 여기서 Heliomolar는 높은 파괴인성치를 나타냄에도 낮은 경도와 표면결함 등으로 표면의 미소파괴에 의해 높은 비마멸률을 나타내었으며 높은 경도와 파괴인성을 가진 재료가 좋은 내마멸성을 나타내었음을 알 수 있다. 이것으로 시험편의 필러의 함유량에 의한 파괴인성과 경도의 크기가 내마멸성에 영향을 끼침을 알 수 있으며 유기복합필러와 필러가 크면 표면의 피로가 촉진되고 필러와 레진 매트릭스 사이에 계면이 형성되면서 유기복합필러의 파괴 및 필러와 매트릭스 사이의 경계면의 파괴 등으로 마멸량이 증가함을 알 수 있다.⁽¹³⁾

3.4 파단면의 미시적 관찰

유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진의 파괴인성 측정시험 후 파단면의 SEM 사진과 모식도를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다.

Metafil의 경우 30~60 μm 의 등근 형태의 유기복합필러 자체가 파단한 파면이 관찰되었고, 벽계 파면과 벽계파면의 사이에 무정형 필러가 매트릭스로 분리된 파면으로 진전되어 전체적으로 매우 거친 파단면 양상을 나타내었다. 유기복합필러의 파단은 하중에 의해 균열이 진전하기전 균열 주위의 응력집중으로 균열의 상하층부위에서 먼저 구상형의 유기복합필러의 파단이 일어나고, 최대 하중에 도달하면서 균열이 이미 파단된 유기복합필러에 의해서 생성된 마이크로 크랙과 합체하면서 3차원적으로 진전해 나가므로 전체적으로 거친 파면이 형성되었던 것으로 생각된다.

Silux Plus는 30 μm 정도 크기의 무정형 유기복합필러의 파단에 의한 취성적 파면과 무정형 유기복합필러와 매트릭스사이의 계면에서 분리한 비교적 거친 파면을 나타내었다. 유기복합필러 크기의 파단면의 수가 적은 것으로 대부분의 파단은 유기복합필러와 레진 매트릭스사이의 계면분리에 의한 것으로부터 추정할 수 있다.

Heliomolar는 일부 30 μm 정도의 등근 형태의 유기복합필러가 자체 파단된 양상과 대부분 10 μm 이하의 무정형 유기복합필러가 매트릭스에서 분리된 양상을 나타내었으며 Metafil과 Silux Plus에 비해서 무정형의 유기복합필러와 레진 매트릭스와의 분리에 의해서 생성된 파면이 대부분을 차지하였다.

Palfique Estelite는 4가지 재료 중 가장 평탄한 파단면을 나타낸 것으로 알 수 있다. 이는 유기복합필러의 강도가 크고 또 매트릭스와의 계면강도가 강해 최대하중에 도달하기까지 유기복합필러의 파단도 나타나지 않고, 또 주균열의 진전시에도 유기복합필러와 매트릭스의 계면강도가 크기 때문에 주균열은 오히려 유기복합필러와 매트릭스를 관통하여 전체적으로 평탄한 파단면이 형성되었다. 결과적으로 가장 많은 필러를 함유하면서도 파괴인성 향상의 기전이 다른 컴퍼짓 레진에 비해서 없었던 것으로 생각된다.

이것으로 유기복합필러를 함유하는 치과용 컴퍼짓 레진에 대한 파괴인성 향상에 기여하는 요소로는 필러 첨가에 의한 필러와 레진 매트릭스사이의 계면강도의 증가로 파괴에너지의 향상으로 알 수 있다. 또한 유기복합필러의 파단에 의한 균열 주위의 응력완화에 의한 파괴인성 향상과 균열의 진전이 이미 파단된 유기복합필러와

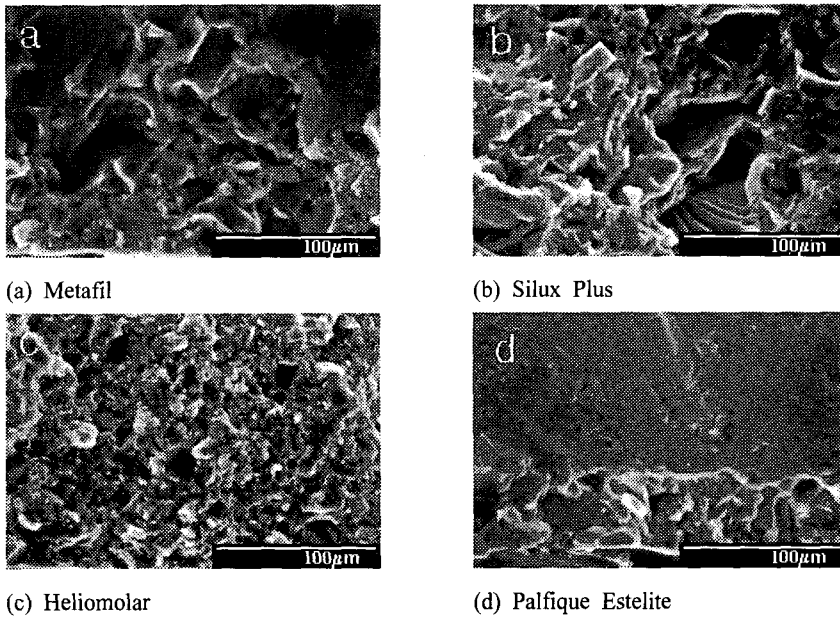


Fig. 6 Scanning electron micrograph of fractured surface of composite resin containing prepolymerized fillers

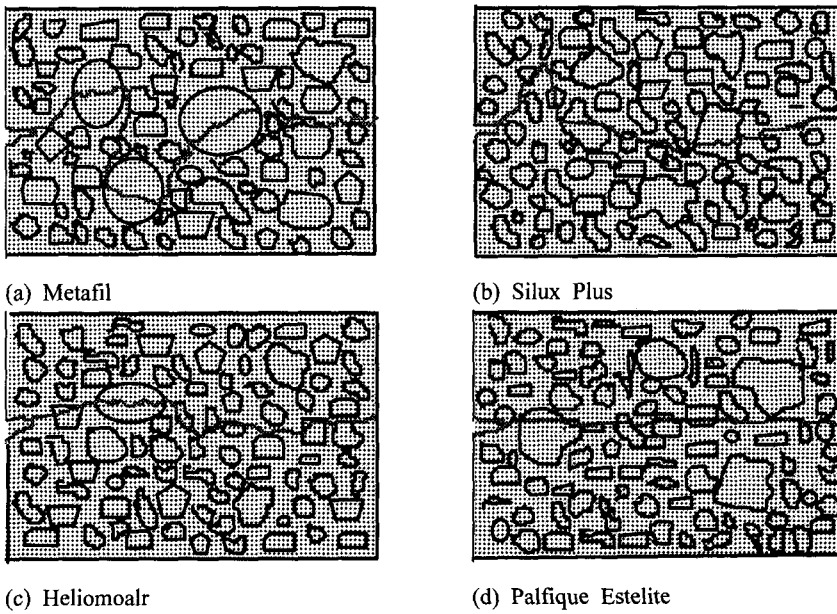


Fig. 7 Schematic presentation of crack extension procedure in dental composite resin

합체하면서 나타나는 균열의 분기현상에 의한 파괴인성 향상으로 알 수 있다. 실험결과 치과용 컴퍼짓 레진에 있어서 구상형의 유기복합필러의 함유는 파괴인성 향상에 효과가 있었으며 필러 함유량의 증가에 따라 파괴인성치가 증가되는 것으로 나타났다.

3.5 마멸면의 미시적 관찰

Fig. 8은 9000사이클(미끄럼거리 36m) 시험후의 각 시험편의 마멸면을 주사형 전자현미경으로 관찰한 사진이다.

Fig. 8(a)는 Metafil의 마멸면으로서 미끄럼 방향에 수직으로 많은 표면균열과 필러들이 탈락된 모습을 볼 수 있다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 큰 마찰력의 작용으로 마멸표면에 발생한 반복되는 강한 인장력에 의해 표면균열의 생성·진전으로 유기복합필러가 파괴되고, 적은 필러 함유량에 의한 낮은 계면강도로 필러와 매트릭스간의 박리로 필러가 탈락되면서 마멸이 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 Silux Plus의 마멸면으로 주로 필러와 레진 매트릭스간의 결합의 박리로 필러들이 탈락되면서 마멸된 상태를 보이고 있다. 이것은 유기복합필러와 레진 매트릭스, 필러와 레진 매트릭스 사이의 강한 결합성으로 인한 높은 파괴

인성과 경도로 접촉면의 소성변형과 파괴에 의한 필러의 탈락으로 마멸이 진행됨을 알 수 있으며 양호한 내마멸성을 나타내었다.

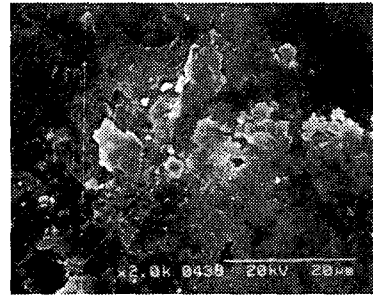
Fig. 8(c)는 Heliomolar의 마멸면으로서 표면균열의 생성으로 유기복합필러의 파괴와 탈락에 의한 마멸과 거친 마멸면을 나타내고 있다. 이것은 압축응력과 전단응력의 복합작용하에서 유기복합필러 및 이트륨글래스 필러와 레진 매트릭스 사이의 계면에서의 응력집중에 의한 균열의 생성·진전으로 유기복합필러의 탈락과 파괴로 마멸이 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 8(d)는 Palfique Estelite의 마멸면으로서 유기복합필러들이 박편상으로 탈락되면서 마멸된 상태를 나타내고 있다. 이것은 많은 함유량의 필러로 필러와 레진 매트릭스 사이의 강한 결합성으로 필러와 레진 매트릭스가 일체화 되면서 높은 계면강도 및 파괴인성으로 접촉부의 미소파괴에 의한 유기복합필러의 탈락으로 마멸이 발생함을 알 수 있다.

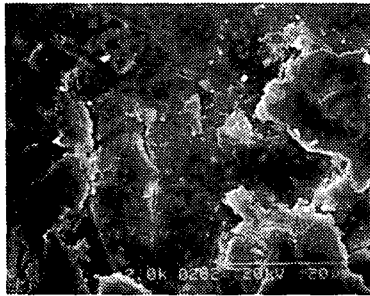
본 실험은 접촉부가 질화규소 불과 치과용 재료의 평면과의 접촉한 상태에서 왕복미끄럼운동을 한다. 마멸기구는 접촉부에서 심한 정도차에 의한 치과용 재료 평면에서의 소성변형에 의해서 마멸길이가 정해지고 접촉소성변형부가 미소파괴를 일으키는 연삭마멸기구로 마멸과정이 진행되



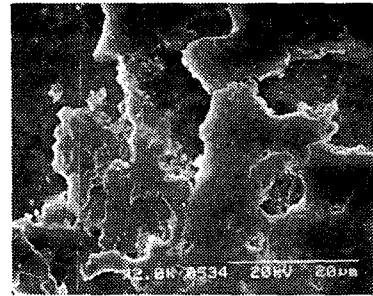
(a) Metafil



(b) Silux Plus



(c) Heliomolar



(d) Palfique Estelite

Fig. 8 SEM photographs of worn surface for specimens

므로 진실접촉부의 접촉면적의 크기에 관계되는 재료의 경도치와 비마멸률과는 약간의 상관관계를 보였으나 파괴역학적 파라미터인 재료의 파괴인성치와의 상관관계는 본 실험에서는 평가하기가 곤란했다. 이에 대한 결과는 여러 종류의 시험편을 제작·실험한 후 다음기회에 보고하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 유기복합필러의 형태와 크기, 함유량 및 필러와 레진 매트릭스 사이의 계면강도 등 요소들이 치과용 컴퍼짓 레진의 파괴인성과 내마멸성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진에 대한 파괴인성 측정과 마찰·마멸실험을 수행하여 각 시험편에 대한 정성적이고 정량적인 검토와 SEM을 이용한 조직관찰 및 마멸면의 미시적인 관찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 필러의 함유량이 가장 적은 Metafil이 높은 마찰계수를 나타내었으며 필러의 함유량이 많은 Palfique Estelite, Heliomolar와 Silux Plus는 상대적으로 낮은 마찰계수를 나타냈다.

(2) 동일한 시험조건에서 필러의 함유량이 많은 Palfique Estelite와 Silux Plus이 높은 파괴인성과 경도를 나타냈으며 좋은 내마멸성을 나타냈다.

(3) 유기복합필러를 함유하는 컴퍼짓 레진의 마멸은 압축응력에 의한 소성변형과 세라믹볼과 치과용 재료의 접촉부에서 소성변형부의 미소파괴에 의한 연삭마멸이 주된 마멸기구를 나타냈다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단 학술연구 조성비에 의하여 일부 지원되었으며 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

(1) 福島正義, 仲又俊夫, 平田伸明, 佐藤量子, 岡本明, 岩久正明, 1991, "化學重合型 コンポジットレジンの磨耗量に關する長期的臨床評價" 日齒

保誌 34, pp. 1~8.

- (2) 福島正義, 仲又俊夫, 佃 美宏, 湯田純子, 岡本明, 岩久正明, 1993, "臼齒用コンポジットレジン修復物の壽命-化學重合型レジンの10年間の觀察を通して-", 日齒保誌 36, pp. 331~340.
- (3) 清水建彦, 北野忠則, 井上正義, 小林美保子, 成川公一, 藤井弁次, 1995, "臼齒用コンポジットレジン(LITE-FIL P)の12年後の臨床成績," 日齒保誌 38, 秋季特別號, 73.
- (4) Lutz, F, Phillips, R.W., Roulet, J.F. Setcos JC, 1984, "In Vivo and in Vitro Wear of Posterior Composites," 63, pp. 914~920.
- (5) Bayne, SC, Heymann, HQ and Swift, E.J., 1994, "Update on Dental Composite Restorations," 125, pp. 687~701.
- (6) Ferracane, J.L., Hopkin, J.K. and Condon, J.R., 1993, "The Properties of Heat-Treated Composites After Aging(abstract)," (Sepc. Iss.): 135.
- (7) Seghi, R.R., Sang, J., Hayes, D. and Culbertson, B., 1993, "Relative Abrasion Rates of Sol-gel Derived Dual Matrix Composites(abstract)," (Sepc. Iss.): 113.
- (8) Suzuki, H., Taira, M., Wakasa K. and Yamaki, M., 1991, "Refractive-Index-Adjustable Fillers for Visible Light Cured Dental Resin Composites; Preparation of TiO₂-SiO₂ Glass Powder by the Sol-gel Precess," 70, pp. 883~888.
- (9) Higo, Y., Danri, D., Nuhomura, S., Kumada, K., Sawa, N., Hanoka, K., Teranaka, T. and Iwamoto, T., 1991, "The Fracture Toughness Characteristics of Three Dental Composite Resins," *Bio-Med. Mater. Eng.*, 1, pp. 223~231.
- (10) 김석삼, 김재호, 1990, "세라믹의 마멸기구에 관한 파괴역학적 연구," 대한기계학회논문집, 제 14권, 제3호, pp. 636~645.
- (11) 久保至誠, 内藤 みゆき, 横田廣彰, 大澤雅博 松元 仁, 1996, "コンポジットレジンの磨耗に關する研究," 日齒保誌 39(2), pp. 492~502.
- (12) Li Y, Swartz ML, Phillips RW, Moor BK, Roberts TA, 1985, "Effect of Filler Content and Size on Properties of Composites," 64, pp. 1396~1401.
- (13) 堀江恭一, 1984, "臼齒用コンポジットレジンの磨耗に關する研究, 第2報 臨床評價," 口病誌 51, pp. 45~65.