

섬유강화 복합재료

원광대학교 치과대학 치과생체재료학교실

조교수 배 지 명

복합재료란?

치과용 재료뿐만 아니라 모든 재료는 금속, 세라믹, 고분자 재료로 나눌 수 있다. 그런데, 현대 과학 기술의 발달로 인해 이런 재료 단독으로는 얻을 수 없는 성질을 가진 재료가 필요하게 되었다. 예를 들면, 비행기, 전투기, 우주선을 포함한 우주항공 분야, 잠수함, 자동차 부품을 비롯한 운송 분야에서는

강하고 강성이 있으면서도 가벼운 재질을 필요로 한다. 그러나 강한 재료는 상대적으로 밀도가 높기 때문에 이것은 모순되는 성질을 요구하는 것이다. 그러므로 이러한 성질은 복합재료를 개발함으로써 얻을 수 있다. 복합재료란 인공적으로 만들어진 여러 개의 상(phase)을 가진 재료로서 각 상은 화학적으로 다르고, 분명한 경계에 의해 구분되어 있어야 하며, 서로 용해되어서는 안된다. 다양한 금속, 세라믹, 고분



그림 1. 항공분야와 레포츠 용품에서 응용되고 있는 복합재료

자 재료를 조합시켜 복합재료를 제작할 수 있다. 대부분의 복합재료는 강성(stiffness), 인성(toughness), 실온과 고온에서의 강도를 증가시키는 방향으로 개발되어 왔다. 이러한 것들은 일상생활에서 볼 수 있는 스키 보드, 테니스 라켓과 같은 레포츠 용품, 항공기, 자동차 부품 등에 사용되고 있다(그림 1).

복합재료의 구성

복합재료는 두 가지 상으로 구성되어 있다. 하나는 기질(matrix)이고, 다른 하나는 분산상(dispersed phase)인데, 기질이 분산상을 둘러싸고 있다. 치과재료에서 대표적인 예가 복합레진이다. Bis-GMA나 UDMA와 같은 레진 기질이 분산상인 충전재(filler)를 둘러싸고 있는 것이다. 기질은 보통 분산상보다 연성(ductile)이 있고, 분산상은 탄성계수가 기질보다 매우 높아야 한다.

복합재료에서는 복합레진에서와 같이 기질과 분산상의 결합력, 즉 계면강도가 좋아야 한다. 각 상의 성질이 아무리 좋아도 한 상에서 다른 상으로 기계적 응력이나 변형이 이동될 만큼 결합력이 충분히 강하지 않다면 오히려 복합재료의 강도는 더 낮아질 수도 있다. 그러므로 복합재료의 강도를 높이기 위해서는 계면 강도를 높이는 것이 필수적이다. 기질과 분산상의 계면 강도를 높이기 위해서 분산상의 표면 처리가 필요한데, 복합레진에서 세라믹 충전재의 표면을 실란(silane) coupling agent로 처리하여 레진 기질과 화학적 결합을 얻을 수 있도록 하는 것이 그 예이다.

섬유강화 복합재료

복합재료 중 치과용 복합레진의 충전재 같이 분산

상이 입자(particle) 형태인 것도 있지만, 섬유 형태인 것도 있다. 섬유강화 복합재료(fiber-reinforced composite; FRC)란 분산상이 섬유(fiber)로 이루어진 것을 말한다.

1. 섬유의 종류

섬유는 대개 고분자나 세라믹 재료이다. 사용될 수 있는 섬유로는 폴리에틸렌(Ultra high molecular weight polyethylene), 폴리아로마틱 폴리아마이드(아라미드) 섬유, 탄소 섬유, glass 또는 quartz 섬유 등이 있다(그림 2). 유리 섬유는 조성에 따라 E-glass, S-glass, R-glass 등으로 나뉘는데, 이중 E-glass 섬유가 흔히 사용된다. 유리 섬유는 상대적으로 강한 편이지만, 표면에 흠이 있을 경우 인장력에 취약하다. 탄소 섬유는 강도와 탄성계수가 매우 높으나 비심미적인 어두운 색상 때문에 치의학 분야에서는 잘 쓰이지 않는다. 폴리아로마틱 폴리아마이드 혹은 아라미드 섬유는 대표적인 제품이 듀폰사의 Kevlar 섬유인데, Kevlar-29, Kevlar-49 등이 있으며 탄성계수가 높은 Kevlar-49가 치의학 분야에서는 적절하다. 인장강도와 인장시의 탄성계수가 높으나 압축력에는 상대적으로 약한 편이다. 주로 이것은 로프, 방탄복, 해양 스포츠 용품, 자동차 부품 등에 응용된다.

2. 기질의 종류

기질의 역할은 섬유를 잡아주고 외부 응력이 섬유로 전달되고 분산되게 한다. 또한 개별 섬유가 기계적인 마모나 주변 환경과의 화학적인 반응으로 표면 손상을 입지 않도록 보호해준다. 마지막으로 섬유에 비해 상대적인 연성을 가지고 있어 섬유 사이사이에 들어가 균열이 섬유 사이로 전파되는 것을 막아준다.

금속이나 세라믹이 기질로 사용될 수도 있지만, 주로 레진 기질이 섬유강화 복합재료에 사용된다. 레진

기질은 열경화성(thermoset)과 열가소성(thermoplastic)으로 분류되는데, 열가소성 레진 중에서 널리 사용되면서 값이 싼 재료는 폴리에스터와 비닐 에스터이다. 이것은 유리섬유의 기질로 주로 사용된다. 에폭시 레진의 경우 값이 좀 더 비싸지만 기계적 성질은 더 뛰어나다. 치의학 분야에서는 methyl methacrylate와 Bis-GMA 등도 기질이 될 수 있다. 열가소성 레진은 요즘 그 사용이 증가하고 있는데, polyether ether ketone(PEEK), polyphenylene sulfide(PPS), polyetherimide(PEI) 등이 있다.

3. 섬유의 표면 처리

섬유의 표면 처리의 목적은 기질에 대한 젖음성을 증가시키고, 섬유-기질 계면의 강도를 증가시켜 기질에서 섬유로 또는 섬유에서 기질로 응력의 전달을 효율적으로 하기 위함이다.

1) 유리 섬유

유리 섬유의 표면처리는 특히 중요한데, 유리 섬유 표면에 미세한 흠이라도 있으면 인장력이 크게 감소되기 때문이다. 유리 섬유는 물리적, 화학적 결합을 통해 섬유-기질 계면의 강도를 증가시키고, 수분이나 반응성 용액으로부터 섬유 표면을 보호하기 위해 coupling agent를 처리한다. 흔히 유리 섬유에 사용되는 것은 silane이라고 하는 실리콘 화합물이다.

2) 폴리아로마틱 폴리아마이드 섬유

이 아라미드 섬유는 대부분의 레진 기질과 계면 결합이 약하므로 두 가지 방법으로 결합력을 성공적으로 높일 수 있다. 첫째는 필라멘트 표면 산화 또는 플라즈마 산부식(etching) 방법으로서 섬유의 인장강도는 약화시키나 레진 기질과의 결합력은 증가시킨다. 둘째는 섬유 표면에 아민(-NH₂)과 같은 반응성

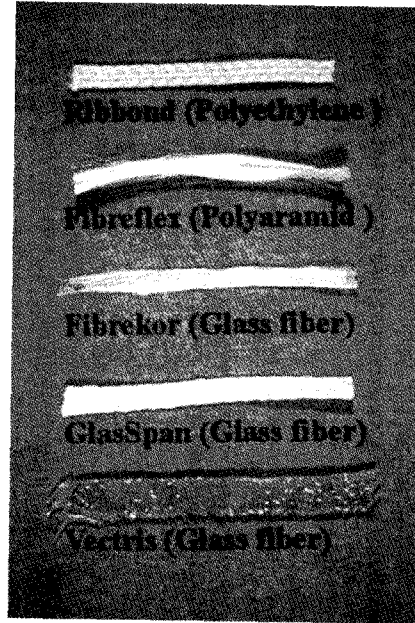


그림 2. 섬유강화 복합재료에 사용되는 여러 가지 섬유들. 위로부터 reno-woven 짜임의 폴리에틸렌 섬유(Ribbond®), 폴리아로마틱 폴리아마이드 섬유(Fibreflex®), 미리 레진 기질에 적셔진 유리 섬유(Fibrekor®), 막은 형태의 유리섬유(GlasSpan®), 미리 레진 기질에 적셔져 있고 bi-directional한 배열의 유리 섬유(Vectris Frame®).

군의 형성인데, 이 반응성 군이 계면 너머의 레진 기질의 에폭시 군과 공유결합을 할 수 있다.

3) 폴리에틸렌(ultra high molecular weight polyethylene) 섬유

플라즈마 처리(plasma treatment with O₂ gas)를 했을 때 에폭시 레진, 폴리에스터 레진, PMMA 레진, Bis-GMA 레진에 최대의 결합력을 보였다. 폴리에틸렌 섬유 표면에 플라즈마 처리를 하면 표면이 거칠어져 벌집모양(cellular) 구조를 갖게 되고 거기에 레진이 흘러들어가 기계적으로 결합하게 된다. 표면적이 증대되어 섬유와 레진이 화학결합할 부위도 증가함으로써 결합강도가 증가하게 된다.

4. 기계적 성질에 영향을 미치는 요인

1) 섬유 종류

각각의 종류에 따른 섬유의 성질이 영향을 미칠 뿐만 아니라 섬유의 길이도 영향을 준다. 섬유는 길이에 따라 장섬유 (continuous, long)와 단섬유 (discontinuous, short)로 나뉜다. 단섬유의 경우, 섬유의 끝에서 섬유와 기질과의 계면결합도 끝나 레진 기질이 변형되고 힘의 전달도 끝나기 때문에 약하다. 복합재료의 강도를 크게 증가시키려면 반드시 장섬유를 사용해야 한다.

2) 레진 기질의 종류

위에서 언급된 대로 레진 기질의 종류에 따라 그 기계적 성질이 차이가 나고, 중합도가 높으면 기계적 성질은 증가한다. 그러므로 레진 기질을 중합시키는 조건도 중요하다. 또한 중합 수축의 정도도 영향을 미칠 수 있는데, 중합수축이 크면 섬유의 배열이 뒤 틀리면서 강도가 저하될 수 있다.

3) 섬유 배열의 방향성(orientation)

섬유는 가닥(strand roving) 형태와 직물로 짜인(woven roving) 형태, 땀은 형태(braided)가 있다(그림 2). 가닥은 레진 기질에 배열방법에 따라 한방향(unidirectional), 양방향(bidirectional), 또는 비방향성(random)이 있다.

보통 섬유강화 복합재료의 기계적 성질을 측정할 때에는 가해지는 힘에 직각 방향으로 unidirectional하게 배열하는 것이 bidirectional한 것 보다 큰 강도를 나타낸다. 하지만 실제 구강내에서는 교합력이 한 방향으로만 가해지지 않기 때문에 실험실 결과와 실제 임상과의 연계성에 한계가 있다는 것을 알아야 한다.

4) 섬유의 위치(location)

섬유는 시편의 바닥, 중간, 위, 또는 이들을 서로

조합하거나 시편 전체에 위치시킬 수 있다. 사용 목적에 맞게 위치시킬 수 있으며, 그 강화시키는 위치에 따라 기계적 성질에 차이가 난다.

5) 레진 기질과 섬유의 함량 비율

일반적으로 유리 섬유의 함량이 증가하면 섬유강화 복합재료의 강도도 증가하지만 어느 한계에 이르러 더 이상 섬유를 넣어도 강도가 증가하지 않는다. 그리고 섬유의 종류에 따라 그 증가 효과가 뚜렷하지 않은 것도 있으므로 최적의 조건을 찾는 것이 중요하다.

6) 섬유와 레진기질의 결합강도

위에서 설명한 대로 아무리 각각의 재료의 성질이 뛰어나도 섬유와 레진기질의 계면의 강도가 좋지 않으면 힘을 섬유와 섬유로 효과적으로 전달하지 못해 복합재료의 전체적인 강도는 저하된다. 그러므로 섬유의 표면 처리를 통해 결합강도를 증가시켜야 하고, 표면 처리된 섬유는 다룰 때 오염되지 않도록 조심한다.

7) 섬유가 레진 기질에 미리 적셔져 있는 지 (pre-impregnation)의 여부

미리 레진 기질에 적셔져 있는 섬유(그림 2의 Fibrekor®와 Vectris Frame®)도 있고, 그렇지 않은 섬유도 있다. 미리 적셔진 섬유의 경우, 섬유 표면에 균일하게 레진 기질이 덮이게 되어 섬유강화 복합재료를 제작할 경우 섬유가 기질에 둘러싸이지 않아 노출된 부분이 생기지 않게 된다. 그러나 pre-impregnation된 섬유의 경우 보관기간이 짧고, 다룰 때 표면이 오염되지 않게 조심해야 한다.

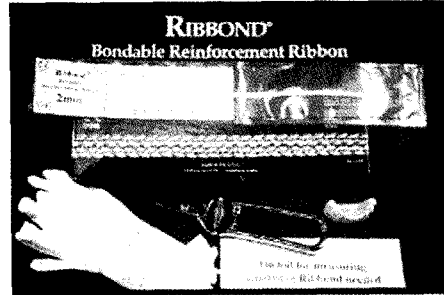
치의학 분야에서의 섬유강화 복합재료

1. 적용 분야

치의학 분야에서도 섬유강화 복합재료가 다양한



(a)



(b)

그림 3. 치주 splint이나 탈구된 치아를 (a), 실면에서 폴리에틸렌 섬유(Ribbon®)를 이용하여 복합레진으로 간단하게 고정할 수 있다 (b).

분야에 적용되고 있다. 치주용 splint(그림 3)나 탈구된 치아를 고정할 때 예전에는 금속 wire를 접어 레진으로 접착하였지만 그림 3의 (b)에 보이는 것과 같은 폴리에틸렌 섬유를 대고 복합레진으로 간단하게 고정할 수 있다.

또한 교정용 장치나 의치상(denture base)을 다양한 섬유로 보강할 수 있다. 금속 wire로 보강하는 것보다 섬유를 사용할 경우 교정용 레진이나 의치상용 레진에 결합력이 우수하여 좋은 보강재가 될 수 있다. 기공용 레진(laboratory composite) 하부에 유리섬유를 적용함으로써 레진 인레이나 온레이, 크라운이나 브리지 등의 계속가공의치를 제작할 수 있다(그림 4). 이런 시스템들로는 Targis and

Vectris (Ivoclar/Vivadent), Sculpture Plus and FibreKor (Pentron Laboratory Technologies), Tescera ATL and Tescera U-BEAM (Bisco) 등이 있다. 이런 시스템은 metal-ceramic system (PFM)에 비하여 기공 시간이 적게 들고 간편하게 제작할 수 있는 장점이 있으나 PFM보다 강도가 낮은 단점이 있다. 일정 강도를 갖기 위해서는 치아의 삭제량이 PFM보다 클 수밖에 없고, 특히 구치부 크라운이나 브리지의 경우 피로 강도가 낮아 일정 기간 후 파절되는 경우가 많아 그 사용이 제한적이다.

심미성을 위해 섬유강화 복합 교정용 선재(arch wire)도 개발되어 곧 시판될 예정에 있다. 그리고



그림 4. 크라운이나 브리지 등의 계속가공의치에 사용되는 섬유강화 복합재료. 결손치가 있는 경우 양 지대치에 beam 형태의 섬유를 위치시키고, 그 위에 mesh 형태의 섬유로 지대치를 덮은 다음 기공용 레진으로 수복한다.

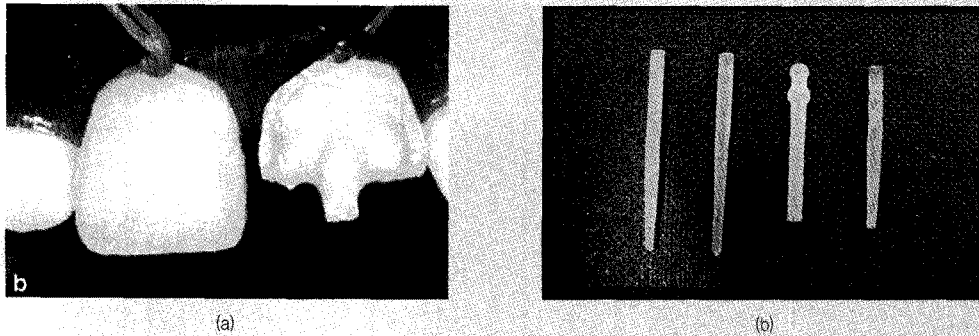


그림 5. 섬유강화 포스트의 사용 예 (a), 시판되고 있는 섬유강화 포스트: 왼쪽부터 FRC Postec (Ivoclar/Vivadent), DT light post (Bisco), Parapost Fiber White (Coltene Whaledent), LuxaPost (DMG) (b).

정형외과 영역과 구강악안면외과 영역에서 bone cement로서 여러 가지 섬유로 보강된 PMMA가 오래전부터 사용되고 있다.

현재 치의학 분야에서 섬유강화 복합재료의 사용이 가장 크게 증가하고 있는 것은 섬유 강화 포스트

(fiber-reinforced composite post)이다(그림 5, 그림 6). 이것은 대부분 유리(glass) 섬유나 석영(quartz) 섬유를 에폭시 레진이나 Bis-GMA 레진을 기질로 하여 포스트 형태로 제작한 것이다. 기존에 많이 사용되던 금속 포스트의 경우 치근보다 탄

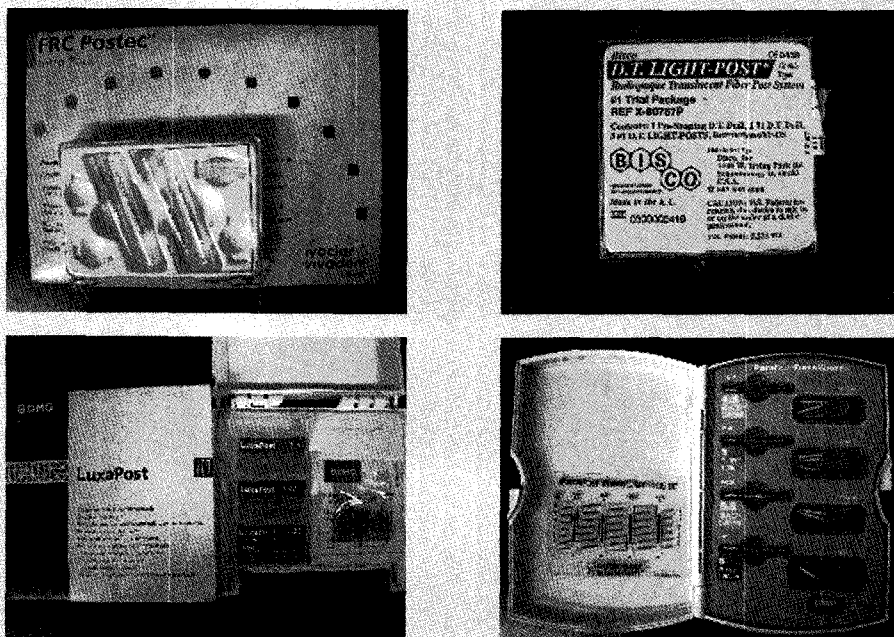


그림 6. 시판되고 있는 여러 가지 섬유강화 포스트: 왼쪽 위부터 시계방향으로 FRC Postec (Ivoclar/Vivadent), DT light post (Bisco), Parapost Fiber White (Coltene Whaledent), LuxaPost (DMG). 치근관의 직경에 맞추어 각각의 드릴과 여러 가지 사이즈의 포스트가 있다.

성계수가 높아 치근파절을 야기하는 경우가 많은 것에 비해 섬유강화 포스트의 경우 치근과 탄성계수가 비슷하여 치근파절이 거의 보고되지 않고 있다. 또한 심미적이어서 전치부 all ceramic 수복물의 하방에서 금속 포스트보다 매우 유리하다. 그리고 상아질 접착제와 레진 시멘트로 합착시 금속 포스트보다 치질에 접착력이 좋아 반목하중하에서 미세누출 정도가 매우 낮다.

2. 장 점

섬유강화 복합재료의 장점은 다음과 같다. 계속가공의치로 사용되는 경우 주조과정이 필요 없어 가공술식이 간단하다. 의치상과 교정용 장치를 강화할 때 금속을 사용할 경우 금속은 레진과 탈락이 많이 일어나나 섬유의 경우는 레진과의 접착력 우수하고 다루기 쉽다. 또한 부식이 없어 금속 알러지가 있는 환자에게 유용하게 사용할 수 있고, 금속보다 훨씬 심미적이다. 포스트로 사용하는 경우에는 위에서 언급한 대로 탄성계수가 치질과 비슷하여 치질과 하나의 monoblock을 형성함으로써 치근파절을 거의 야기하지 않는다.

복합재료의 전망

보철 분야에서 섬유강화 복합재료의 가장 큰 장점은 심미적이라는 것과 가벼우면서도 꽤 높은 강도를 가지며, 주조가 필요한 금속이나 여러 번 소성해야 하는 세라믹에 비해 가공과정이 간편하다는 것이다. 하지만 기계적인 성질만을 놓고 보면 금속보다는 떨어지며, 심미성만을 비교한다면 세라믹 수복물 자체가 훨씬 우수하다. 그러므로 섬유강화 복합재료는 적절한 기계적 성질과 심미성을 가진 재료임을 염두에 두고, 각 적응증에 따라 가장 적합한 재료를 선택하여야 한다.

심미보철재료로서 세라믹과 레진은 서로 경쟁관계에 있다. 세라믹의 우수한 심미성과 화학적 안정성에도 불구하고, 높은 취성(brittleness)과 가공 단계가 복잡한 단점이 있어 많은 레진 재료가 개발되어 시장에 나와 경쟁하고 있다. 섬유강화 복합재료를 이용한 계속가공의치의 제작은 현재까지는 그 기계적 성질에 한계가 있으나 섬유와 레진 기질 각각의 강도와 탄성계수, 그리고 섬유와 레진 기질과의 계면강도를 증가시킨다면 세라믹 재료에 대하여 경쟁력이 커질 수 있을 것이다.

Bone cement로 사용되는 섬유강화 복합재료의 경우, 섬유와 레진기질 사이의 계면강도를 증가시켜 섬유가 탈락되지 않도록 하는 것이 중요하다. 또한 레진 기질도 경화도중 열이 발생하는 PMMA 외에도 Bis-GMA나 열가소성 레진을 사용하여 기계적 성질이나 생체친화성에 문제가 없다면 그 사용이 더욱 증가될 수 있을 것이다.

섬유강화 복합재료는 세라믹처럼 취성(brittle)이 있는 재료는 부적당하나 심미성이 필요한 곳, 즉, 현재 도입되고 있는 교정용 선재와 같은 분야에 그 사용이 증가될 것이다. 또한 교정용 장치와 의치상을 보강(reinforcing)하는 데도 금속 와이어보다 큰 장점이 있다. 섬유강화 포스트는 전치부는 물론이고, 구치부에서도 성공률이 높고 치근파절을 야기하지 않아 치의학 분야에서 가장 유망한 섬유강화 복합재료로서 사용되고 있다.

차후 섬유강화 복합재료의 개발방향은 보철용의 경우 섬유와 레진기질의 계면 강도를 증가시킴과 동시에, 위에서 언급한 각 요인들을 조절하여 전체적인 기계적 성질을 증진시키는 것이다. 심미 재료의 경우 레진 기질과 섬유의 굴절율(refraction index)의 차를 작게 함으로써 투과도를 높여 심미성 증진시키고, 레진 기질의 중합도를 높임으로써 화학적 안정성 높여 변색이 잘 일어나지 않게 해야 한다.

참고문헌

1. Ji-Myung Bae, Kyoung-Nam Kim, Masayuki Hattori, Koji Hasegawa, Masao Yoshinari, Eiji Kawada, Yutaka Oda. The Flexural Properties of Fiber-Reinforced Composite with Light-Polymerized Polymer Matrix. *Int J Prosthodont* 14:33-39, 2001.
2. Ji-Myung Bae, Kyoung-Nam Kim, Masayuki Hattori, Koji Hasegawa, Masao Yoshinari, Eiji Kawada, Yutaka Oda. Fatigue Strengths of Particulate Filler Composites Reinforced with Fibers. *Dent Mater J* 23:166-174, 2004
3. Sung-Ho Jung, Kyung-San Min, Hoon-Sang Chang, Sung-Do Park, Soon-Nyu Kwon, Ji-Myung Bae. Microleakage and Fracture Patterns of Teeth Restored with Different Posts under Dynamic Loading. *J Prosthet Dent* 98(4):270-276, 2007.
4. 손도경, 김의진, 이종삼, 배지명. 섬유유리 종류, 함량과 조합이 레진기질의 강화에 미치는 영향. *대한치과기재학회지* 35(1):29-38, 2008.
5. Yutaka Oda, Ji-Myung Bae. Fiber-reinforced resin. *Dent Eng* 132: 31-34, 2000.
6. William D. Callister. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. Wiley Asia Student Ed. New York: John Wiley & Sons; 2007. p 227-238.
7. William F. Smith. *Principles of materials science and engineering*. 3th ed. International Ed. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1996. p 767-829.
8. P.K. Mallick. *Fiber-reinforced composites*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker; 1993. p 6-84.
9. James F. Shackelford. *Introduction to Materials science for engineers*. 3rd ed. 한국어 번역판. 회중당; 1995. p 500-536.
10. Heumen CCM, Kreulen CM, Bronkhorst EM, Lesaffre E, Creugers NHJ. Fiber-reinforced dental composites in beam testing. *Dent Mater* 24:1435-1443, 2008.
11. Ellades T. Orthodontic materials research and applications: Part 2. Current status and projected future developments in materials and biocompatibility. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 131:253-262, 2007.
12. Garoushi S, Vallittu PK, Watts DC, Lassila LVJ. Effect of nanofiller fractions and temperature on polymerization shrinkage on glass fiber reinforced filling material. *Dent Mater* 24:606-610, 2008.
13. Cheung W. A review of the management of endodontically treated teeth: Post, core and the final restoration. *J Am Dent Assoc* 136:611-619, 2005.
14. Schwartz RS, Robbins JW. Post placement and restoration of endodontically treated teeth: A literature review. *J Endodon* 30:289-301, 2004.
15. Ladizesky NH, Ward IM. A review of plasma treatment and the clinical application of polyethylene fibres to reinforcement of acrylic resins. *J Mater Sci Mater Med* 6:497-504, 1995.
16. Zhou Y, Yue W, Li C, Mason JJ. Static and fatigue mechanical characterizations of variable diameter fibers reinforced bone cement. *J Mater Sci Mater Med* Oct 21, 2008. [Epub ahead of print]