

송 용 남 고려대학교 기계공학부 부교수

| e-mail : kurtbain@korea.ac.kr

인공관절은 사용되는 재료의 지속적인 성능 개선이 필수적인 의료 기기이다. 이 글에서는 인공관절 재료의 피로 및 내마모 성능의 향상을 위해 제안된 다양한 기술들을 소개하고자 한다.

빠르게 성장하는 의료 및 바이오 분야의 다양한 문제 해결을 위하여 새로운 의료기기의 개발이 활발히 진행되고 있다. 전통적인 산업분야와 마찬가지로, 적절한 재료의 선택은 의료기기의 사용 환경에서 인체에 부작용을 최소화하면서, 의도한 의료목표를 오랜 시간 동안 안정적으로 수행하기 위한 선결조건으로 고려되어야 하는 사항이다. 특히 재료의 파괴 및 강성에 대한 특성뿐 아니라, 인체 조직과 생리/화학적인 반응을 억제할 수 있는 소재의 개발이 필수적이다.

다양한 분야의 의료기기 중, 재료의 파괴 및 마모에 대한 특성이 중요하게 여겨지는 분야는 인공관절 분야이다. 인간의 일생 동안 수십만 번의 마찰 운동을 견뎌내야 하는 하지 인공관절의 경우, 관절 표면의 피로파괴와 마모로 인한 재료의 debris 거동은 인공관절의 수명과 깊은 관계가 있다. 인공관절 치환수술은

수술과정에서 체내의 근육 및 뼈 조직을 상당부분 절제해야 하는 수술로서 환자에게 커다란 부담이 되고 수술 후 뼈와 인공관절 접합 부위의 골용해 등으로 인해 인공관절의 수명이 다하였을 때 새로운 인공관절로 대체하는 기술이 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 한 번의 기술로 인간의 수명 기간 동안 버틸 수 있는 인공관절의 개발이 인공관절 연구자들의 오랜 숙제로 남아 있으며, 이를 위해 인공관절 재료의 피로 및 마모 특성을 향상시키려는 다양한 연구들이 활발히 이루어지고 있다.

현재 사용되고 있는 인공관절은 재료에 따라 금속, 세라믹, 그리고 금속-폴리머 인공관절로 나눌 수 있다(그림 1). 금속 인공관절은 재료의 강도가 다른 인공관절에 비하여 월등히 뛰어나기 때문에 마모에 의한 debris 발생이 현저히 적으며, 이에 따른 인공관절

의 높은 수명이 기대된다. 하지만, 금속 debris의 이온화에 따른 장기적인 생화학적인 반응이 문제가 되며, debris의 크기가 매우 작아 주변 조직으로의 침투가 용이하여 심각한 생리학적 부작용이 나타나는 것이 보고되고 있다. 또한 높은 표면 강도로 인해 충격의 흡수가 어렵다는 단점이 있다. 반면 세라믹 인공관절은 금속보다 월등히 우수한 내마모 성질



그림 1 금속 인공관절(좌), 세라믹 인공관절(중), 금속-폴리머 인공관절(우)

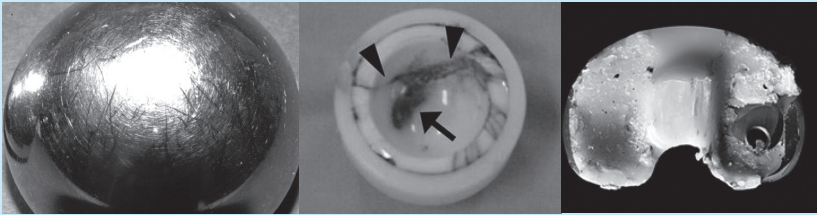


그림 2 피로 및 마모로 인한 금속(좌), 세라믹(중), 폴리머 재료(우) 표면의 마손(Park et al., J Bone Joint Surg Am, 2006)

을 보유하고 있고, 금속 debris 이온화로 인한 부작용에서 자유로우며, 화학적으로 안정적인 세라믹 debris는 주변 조직과의 반응성이 매우 낮아 생리학적 부작용을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 또한 세라믹 debris의 물을 흡수하는 성질(hydrophilic)은 관절표면의 윤활에 긍정적으로 작용하게 된다. 하지만 세라믹 재료의 높은 취성(brittle) 때문에 인공관절 골두의 깨짐 현상이 발생할 우려가 높고, 충격을 흡수하지 못하는 금속 인공관절의 단점이 고스란히 남아 있다. 마지막으로 금속-폴리머 계열의 인공관절은 한쪽 관절면은 금속, 다른 쪽 관절면은 고분자 재료로 이루어진 인공관절로서 충격의 흡수 및 인공관절 움직임에 따른 관절구면의 미세한 부교합에 대한 여유를 가지고 있는 장점이 있으나, 금속 및 세라믹 재료와 비교하여 기계적 강도가 약한 폴리머부의 피로 및 마모 파손이 심각한 문제점으로 인식되고 있다. 고분자 마모 debris로 인한 인체 조직의 반응 역시 완전히 해결되지 않은 과제로 남아 있다. 이렇듯 현재 개발된 다양한 소재의 인공관절은 개별적으로 우수한 장점들을 보유하고 있음에도 불구하고, 각 모델마다 치명적인 약점을 동시에 가지고 있어, 이를 해결하기 위한 다양한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 이 글을 통해 지금까지 수행되어온 인공관절 재료에 대한 연구 결과들을 살펴보고, 다음 단계의 인공관절 재료 연구를 위한 새로운 아이디어를 얻을 수 있는 계기를 마련하였으면 한다.

금속 인공관절 표면의 코팅처리

금속제 인공관절의 경우 Ti 합금(Ti_6Al_4N)이 보편적으로 사용되고 있으나, 아무런 표면처리를 하지 않을 경우, 반복적인 마찰에 따른 심각한 표면 마모가 보고되고 있다. 따라서 TiN 계열의 얇은 피막을 코팅하는 방

법이 일반적이며 현재 시판 중인 다양한 인공관절에 적용되고 있다. 다양한 연구에서 TiN 코팅이 적용된 인공관절은 표면 강도의 향상을 통한 스크래치에 대한 저항성 증가, 표면 마찰계수의 감소, 마모 debris의 감소, 금속 재료의 내부식성(corrosion) 증가 등의 효과가 보고되고 있다.

최근 단단하고 내마모성이 우수한 DLC(Diamond Like Carbon) 재료의 코팅을 통해, 관절 표면의 피로 및 마모 특성을 향상시키고, 불활성인 carbon의 특성으로 인해 인체에도 안전한 코팅방법이 연구되고 있다. CVD(Chemical Vapor Deposition) 및 PVD(Physical Vapor Deposition) 방법을 이용한 기존의 DLC 코팅은 상당한 고온($800\sim 900^{\circ}C$)에서 진행되어 다양한 재료에 적용할 수 없었으나, 최근에는 그 적용 온도를 $400^{\circ}C$ 이하까지 낮추어 다양한 재료에 대하여 적용할 수 있게 되었다. 인공관절 재료와 DLC 코팅막의 접착력을 향상시키기 위해 재료와 DLC 코팅막 사이의 얇은 중간막을 형성하는 방법이 개발되었으며, 다공질의 DLC 코팅이 적용된 경우, 인공관절 재료에 대한 일차 보호막을 형성하여 재료의 내부식성을 향상시키는 효과도 얻을 수 있다고 보고되었다. 금속-폴리머 인공관절을 이용한 연구에서 DLC 코팅이 적용된 금속부와 마찰을 일으킨 폴리머부의 표면 마모량이 최대 14배까지 감소하는 것이 보고되어, 인공관절의 폴리머부 보호를 위한 가능성을 보여주었다. DLC 코팅뿐만 아니라 세라믹 재료(NbN)와 같이 다양한 재료를 활용한 표면 코팅을 통

해 폴리머부의 마모량을 감소시키는 연구들이 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 각 코팅법에 따른 일관된 마모성능 향상의 결과를 보여주지는 못하고 있어 코팅의 일관성을 향상시키는 노력이 절실하다.

차세대 세라믹 인공관절 재료

세라믹 인공관절은 높은 내마모성과 마모 debris가 이온화하지 않아 체내에서 안전하게 사용할 수 있다는 장점을 보유하고 있으나, 높은 취성으로 인한 인공관절의 파손이 가장 큰 문제였다. 이를 개선하기 위해 크랙(crack)에 대한 저항성이 강한 zirconia와 강성과 내마모성이 좋은 alumina를 조합하여, 세라믹 재료의 장점을 유지하면서 인공관절의 파손을 억제할 수 있는 복합 세라믹 재료들이 개발되고 있다.

‘Biolox Delta’라고 하는 4세대 복합 세라믹 재료의 경우 zirconia 17%, alumina 82%의 배합을 통해 크랙의 성장이 복합 세라믹 내부에서만 억제되도록 하는 기술을 실현시켜 세라믹 인공관절의 파손을 획기적으로 감소시켰으며, 2000년 이후 판매된 6만 5,000개의 인공관절 중 단 한 개의 인공관절에서만 골두 파손이 보고될 만큼 커다란 진보를 이룩하였다.

폴리머 재료의 기계적 성능 향상

현대의 인공관절은 금속-금속 및 세라믹-세라믹 재료의 인공관절보다는 폴리머 재료와 조합된 인공관절이 선호되고 있으며, 특히 금속-폴리머 인공관절이 주를 이루고 있다. 하지만 금속에 비해 상대적으로 무른 폴리머의 특성상 폴리머부의 파손이 큰 문제이며 이를 위한 폴리머 재료에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 인공관절의 폴리머부에는 주로 UHMWPE(ultra high molecular weight polyethylene) 재료가 쓰이고 있으며, UHMWPE에 gamma radiation을 조사함으로써 폴리머의

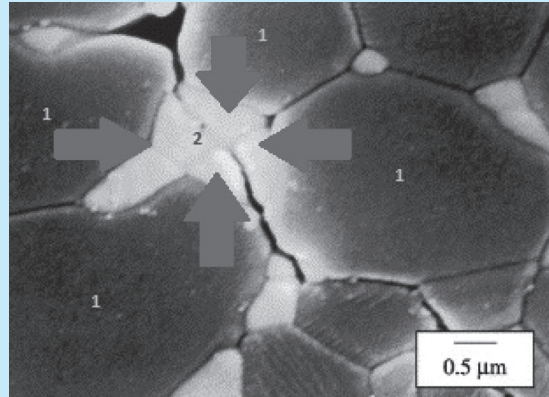


그림 3 zirconia-alumina 복합 세라믹에서 크랙이 zirconia 입자(2)에 막혀 진행이 멈춤(Macdonald et al., Arch Orthop Trauma Surg, 2014)

crosslinking를 증가시켜 폴리머 표면의 내마모 성질을 향상시키는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 하지만 다량의 방사선에 의해 폴리머 분자의 산화가 일어나 지속적인 하중에 대한 재료의 피로강도가 저하되는 부작용이 보고되기도 하였다.

이처럼 gamma radiation을 통한 폴리머 재료의 산화를 방지하기 위하여, UHMWPE 파우더에 vitamin-E를 혼합하여 인공관절의 폴리머부를 제작함으로써 재료의 내산화성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. Vitamin-E를 혼합한 UHMWPE에서는 crosslinking이 줄어들어 많은 양의 방사선 조사가 필요하지만, 재료의 피로강도는 향상되는 것이 관찰되었다. 또한 다양한 in vitro 및 in vivo 실험에서 vitamin-E를 혼합한 UHMWPE의 마모 debris가 기존의 UHMWPE 재료와 비교하여 체내에 미치는 유해한 영향이 미미한 것으로 나타나 안전성 측면에서도 장점이 있다.

최근에는 물리적으로 매우 안정되고 강하다고 알려진 carbon 계열의 나노입자(carbon nano tube, graphene)를 UHMWPE와 혼합하여 사용하려는 연구들도 시도되고 있다. Carbon 나노입자와 혼합된 UHMWPE 복합재료는 기계적 강성과 관련된 모든 수치가 월등히 상승하는 결과를 보여주었다. 특히 재

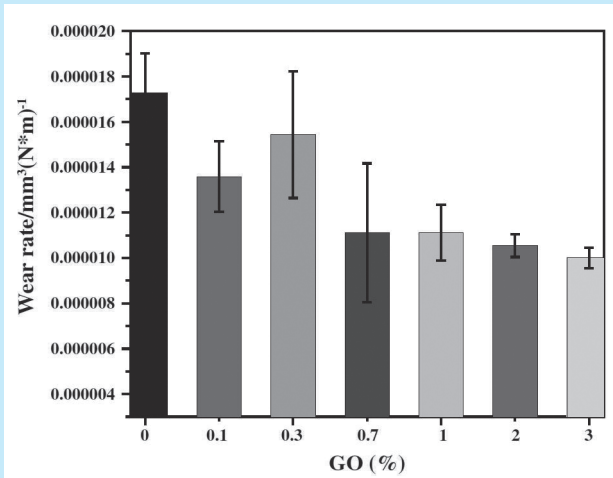


그림 4 GO(graphene oxide) 함유량에 따른 인공관절 폴리머부의 마모율(Tai et al., Tribol.Lett, 2012)

료의 마모 특성은 나노입자들로 인해 표면 마찰계수는 증가하였으나, 향상된 강성에 의해 결과적으로 마

모율(wear rate)이 감소하는 효과를 나타내었다(그림 4). 다만, carbon 나노입자가 체내에 흡수되어 주변 조직에 나타날 피해와 독성에 대한 연구는 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

인공관절 치환술은 아주 흔하게 시행되고 있는 외과 수술의 하나이며, 고령화 시대에 발맞추어 그 성장세가 가파르다. 하지만, 인공관절의 수명이 종료된 후 새로운 인공관절로 대체하기 위한 재수술이 어려운 경우가 많아, 한번 시술한 인공관절의 수명을 향상시키는 것이 필수적인 요소이다. 다가올 미래에는 인공관절의 재료에 대한 연구가 더욱 발전하여 인공관절의 수명이 영구화되고, 마모 debris에 따른 부작용이 최소화된 인공관절의 개발을 기대해본다.