

관상동맥 내 CTO(Chronic Total Occlusion) 제거를 위한 드릴 툴 연구 Study on Drill Tools for Chronic Total Occlusion(CTO) Removal in Coronary Artery

*김민형¹, 천두만¹, 여준철², 홍영선¹, 박정빈¹, #안성훈^{1,3}, 박종하⁴, 류새희⁴, 이선영⁴

*M. H. Kim¹, D. M. Chun¹, J. C. Yeo², Y. S. Hong¹, J. B. Park¹, #S. H. Ahn(ahnsh@snu.ac.kr)^{1,3}, J. H. Park⁴, S. H. Ryu⁴, C. S. Lee⁴

¹서울대학교 기계항공공학부, ²서울대학교 협동과정 자동차공학, ³정밀기계설계공동연구소, ⁴한양대학교 재료화학공학부

Key words : CTO(Chronic Total Occlusion), Coronary Artery, Drilling Tool, Calcified Deposits

1. 서론

관상동맥과 같은 탄력성 동맥의 내부에 지방과 콜레스테롤로 이루어진 물질의 침착이 진행되면 침착물에 의해 혈관의 내강이 감소하고 이로 인하여 혈류가 감소하게 된다. 특히 심혈관에 이러한 병변이 발생하게 되면 협심증을 유발하게 되며, 심하면 환자의 생명에 치명적인 심장의 경색증이 발생할 수 있다. 이러한 병변이 발생한 동맥의 내강을 넓혀주기 위하여 혈전에 의한 경우에는 약물을 이용하여 용해시키는 방법을 사용하며, 시간이 경과된 병변의 경우는 관상동맥 우회술 또는 경피적 경혈관 관상동맥 확장술(PTCA)을 사용한다. 경피적 경혈관 관상동맥 확장술의 경우 외과적 수술이 아닌 피부를 통하여 동맥에 접근한 후 동맥을 확장하는 방법으로서 풍선을 삽입하여 좁아진 혈관을 확장시키는 방법, 금속망인 스텐트(Stent)를 삽입 후 확장시켜 혈관의 내강을 유지시키는 방법, 그리고 Rotablator(Rotablator® Rotational Atherectomy System, Boston Scientific, Natick, USA)와 같이 다이아몬드 버(Diamond burr)의 고속회전 통하여 병변을 갈아내어 내강을 회복하는 방법 등이 있다. 병변이 장기간 진행되어 동맥의 내강이 침착 물질에 의하여 완전히 차단되는 만성완전협착(이하 CTO)의 경우 침착물질 내부의 칼슘화(Calcification)에 의하여 병변이 단단해 지는데, 이러한 경우에는 다이아몬드 버를 사용하여 병변을 제거하는 방법이 효과적인 것으로 알려져 있다.¹ 그러나 다이아몬드 버의 진행 경로가 되는 가이드 와이어(Guide wire)에 의하여 혈류 방향으로 병변이 관통되지 못하면 시술이 불가능하게 되는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 가이드 와이어에 의한 병변의 관통이 없이도 CTO 병변을 제거할 수 있는 절삭 툴의 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다.

2. 칼슘화 침착물의 특성

관상동맥 내 침착물질은 보통 지방 및 콜레스테롤로 이루어져 있으나 시간이 지남에 따라 침착물질 내에서 칼슘화가 진행되며, CTO 병변의 내부에는 대부분 침착물질의 칼슘화가 심각하게 진행되어 있다. 칼슘화 침착물의 주 성분은 Hydroxyapatite(이하 HA)로서 이는 뼈의 주성분과 동일하며, 칼슘화가 진행된 병변 내에서 칼슘은 50% 이상의 비중을 차지한다.² 칼슘화 침착물의 성분뿐 아니라 병변 내의 칼슘화 침착물의 형성 과정이 뼈의 형성 과정과 유사하다는 연구결과로부터 칼슘화 침착물이 뼈와 유사한 물성을 지닐 것으로 추측할 수 있다.³

인체의 동맥에서 발생하는 CTO 병변을 대상으로 절삭 실험을 하는 것은 충분한 양의 시편을 확보하기가 어렵고, 병변마다 물성의 편차가 심할 것이므로, 본 연구에서는 병변을 구성하는 물질 중에서 기계적 물성이 다른 물질에 비하여 우수하고 그 비율이 50% 이상에 달하는 칼슘화된 침착물과 유사한 기계적 물성을 가지는 대체물질을 제작하여 절삭 실험을 수행하도록 하였다.

3. 칼슘화 침착물의 대체물질 제작

칼슘화 침착물의 대체 물질은 위에서 언급한 칼슘화 침착물의 주성분 HA(Powder, Sigma-Aldrich, Buchs, Switzerland)를 다이에 넣고 100MPa의 압력을 가한 후에 꺼내어 900°C의 온도에서 2 시간 동안 소결하여 제작하였다. 제작된 시편은 직경이 25mm, 높이가 9.7mm 인 디스크형태이다. HA의 Young's modulus는 일반적으로 120GPa 이상으로 보고되어 있는데, 이는 일반적인 뼈조직의 Young's modulus(약 10~20GPa)에 비하여 무척 높다. 따라서 본 연구에서는 분말 형태의 HA를 소결공정을 통해 다공성(Porosity) 구조가 되도록 제작하여 본래의 기계적 물성보다 낮은 뼈조직의 물성과 유사할 수 있도록 하였다. 시편의 기계적 물성인 Young's modulus와 Hardness는 Nanoindenter(Nano Indenter XP, MTS, Eden Prairie, USA)를 사용하여 측정하였다. 시편에 대한 측정결과와 척추 해면뼈 조직(Vertebral trabeculae)에 대한 Nanoindentation 결과를 Table 1에 나타내었는데, 시편의 Young's modulus와 Hardness가 척추 해면뼈 조직의 그것에 조금 못 미치는 것으로 나타났다.⁴

4. 실험장치 및 조건

실험장치는 Fig. 1과 같이 1µm의 이동정밀도를 가진 3축 마이크로 스테이지와 그 위에 장착된 절삭력 및 절삭토크 측정을 위한 다이내모미터(9256e2, Kistler, Winterthur, Switzerland) 그리고 드릴링을 위한 치과용 핸드피스(Bora/Unifix, Bien Air, Bienne, Switzerland)로 구성되어 있다. 핸드피스에 의한 회전속도설정을 위하여 압축공기의 압력을 3kg/cm²로 고정하고 유량을 조절하여 15Liter/min이 되도록 하였다. 이때 회전속도는 절삭 깊이나 드릴 종류에 따라 달라졌으나 12만 RPM을 기준으로 아래위로 최대 3만 RPM까지의 차이를 보였다. 드릴의 이동속도는 2mm/sec로 설정하였고, 절삭 깊이는 3mm로 설정하였다. 동일한 드릴로 총 3번의 절삭을 수행하였으며, 테스트 시 냉각수는 사용하지 않았다.

사용한 드릴은 총 8가지로, 5가지의 다이아몬드 입자 코팅이 된 다이아몬드 버와 3가지의 드릴 형상으로 가공된 카바이드 버(Carbide burr)이다. Fig. 2에 각 드릴의 형상을 나타내었다. 실험을 위해 선정된 드릴은 테이퍼형태, 직선형태, 구형태, 그리고 CTO 제거에 사용되는 Rotablator와 유사한 형태로 구성되며, 드릴 형태와 다이아몬드 버 형태 두 가지를 함께 실험에 사용하였다. 사진에서 보여지는 드릴에 붙어있는 하얀색 분말은 HA로, 절삭 후 드릴을 촬영하였기 때문이다. 다이아몬드 입자 코팅된 다이아몬드 버의 경우 드릴 표면에 칩이 많이 묻어있는 것으로 관찰되었다. 드릴 1번의 경우 길이가 4mm, 최대직경은 1.5mm이고

Table 1 Young's modulus and hardness of vertebral trabeculae and porous hydroxyapatite by nanoindentation

Material	Modulus(GPa)	Hardness(MPa)
Vertebral trabeculae	13.4±2.0	468±79
Porous hydroxyapatite	10.6±0.8	219±28

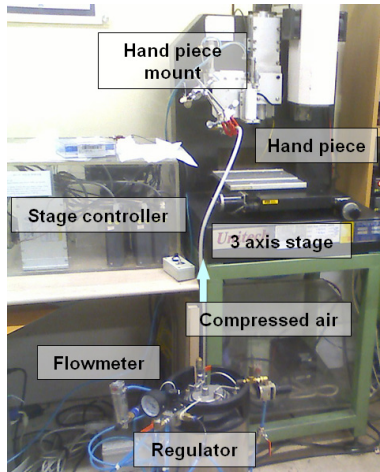


Fig. 1 System configuration for drilling test

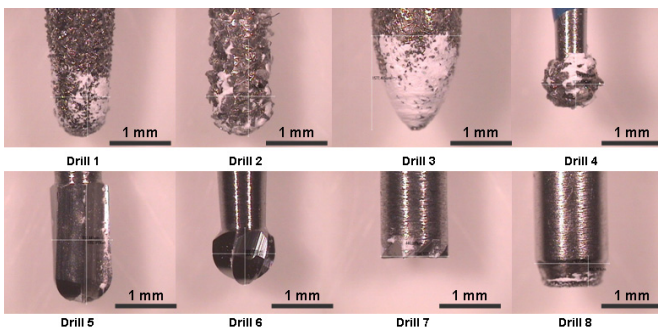


Fig. 2 Drills for test

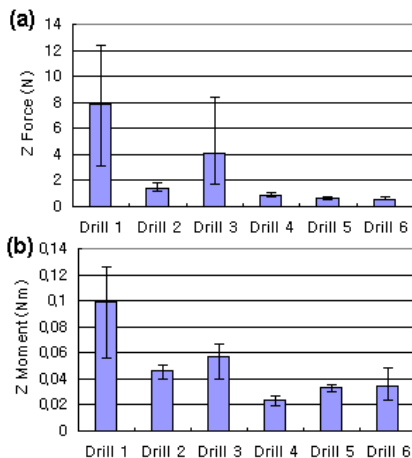


Fig. 3 Maximum forces and moments for 6 drills

드릴 3의 경우 최대직경이 1.7mm, 전체 드릴 길이는 4mm이다. 나머지는 직경이 1mm로 동일하다. 다이아몬드 버의 경우 버의 종류에 따라 다이아몬드 입자크기가 다른데 드릴 2, 4는 입자크기가 106 ~ 125 μ m 이고 드릴 1, 3, 8은 입자크기가 53 ~ 63 μ m 이다.

5. 실험결과

실험에 사용된 드릴의 성능을 평가하기 위해 소결된 HA에 대하여 드릴링을 수행하였고, 드릴링 방향으로의 힘과 토크를 비교해 보았다. 드릴 7, 8번은 드릴링 시 적절한 절삭을 수행할 수 없는 아주 큰 힘을 받아 핸드피스가 드릴 방향의 반대방향으로 밀려나게 되어 적절한 결과를 얻을 수 없었다. 따라서 결과분석에서 드릴 7, 8번은 제외하였다.

Fig. 3은 각 드릴에 대한 절삭력과 절삭토크 절대값의 최대값을 나타낸 것이다. 3번의 측정에서 평균을 막대모로 나타내었고 최대, 최소는 오차막대로 나타내었다. 드릴 1, 3

을 제외한 나머지 측정결과에서는 오차가 작은 것으로 나타나는데 이는 드릴 작업의 재현성을 보여주는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 동일한 조건에서 측방향의 힘과 토크가 가장 작은 드릴 4, 5, 6번이 적합한 드릴이라고 예상할 수 있다. 유사한 형상을 가진 드릴 2, 5번에서 5번 쪽이 더 우수한 이유는 절삭 시 발생하는 칩의 배출이 가장 큰 원인으로 판단된다. 유사한 형상인 드릴 4, 6의 경우 비슷한 결과를 보였는데 이는 드릴 4의 경우 드릴 형상이 구형으로 드릴 5와는 다르게 칩이 드릴 뒤쪽으로 잘 빠져 나갈 수 있었기 때문이라고 판단된다.

6. 결론

8가지 다른 종류의 드릴을 이용하여 절삭력을 테스트하였다. 3축 마이크로 스테이지 위에 다이아미터를 두고 치과용 핸드피스를 이용하여 드릴링을 실시하였다. 실험결과 전체적으로 카바이드 버가 낮은 절삭력과 낮은 절삭토크를 보여주었다. 다이아몬드 버 형태는 어려운 칩의 배출과 다이아몬드 입자의 크기에 의해 HA 칩이 입자 사이에 묻는 문제로 인하여 절삭력이 높은 것으로 나타났다. 하지만 구형의 다이아몬드 버의 경우 카바이드 버와 유사한 결과가 관찰되었다. 이는 향후 CTO 제거를 위한 드릴 설계시 형상과 드릴날 또는 다이아몬드 입자의 크기와 형상을 선정할 때 참고자료로 활용이 가능할 것이다.

하지만 아직까지 다이아몬드 입자 크기에 대한 영향을 정확하게 관찰하지는 못하였다. 따라서 동일한 형상을 가지면서 다이아몬드 입자크기가 서로 다른 틀에 대한 드릴링 실험을 수행하여 입자크기의 영향을 파악하는 추가 연구가 필요할 것이다.

가이드와이어를 사용하여 병변을 관통해야 시술이 가능한 Rotablator의 특징 때문에 CTO 제거 시술에서 Rotablator의 사용은 한계가 있다. 따라서 절삭방식을 사용하는 CTO 치료의 경우 새로운 치료방법이 요구되는데, 가이드와이어가 병변을 관통할 필요 없이 시술이 가능한 마이크로로봇 형태의 드릴링 기법은 CTO 치료에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다. 그러므로 이를 위해서 기존 Rotablator와 차별화 될 수 있는 절삭 툴 개발을 위하여 드릴링 방법과 연삭 방법 모두에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술개발사업(과제번호: 10030046) 및 서울대학교 제 2 단계 BK21 사업 그리고 ERC(Micro Thermal System Research Center)의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사 드린다.

참고문헌

1. Robert M. Bersin, C. A. S., "Rotational and directional coronary atherectomy," *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, **58**, 485-499, 2003.
2. Romer, T. J., Brennan, J. F., III, Fitzmaurice, M., Feldstein, M. L., Deinum, G., Myles, J. L., Kramer, J. R., Lees, R. S. and Feld, M. S., "Histopathology of Human Coronary Atherosclerosis by Quantifying Its Chemical Composition With Raman Spectroscopy," *Circulation*, **97**, 878-885, 1998.
3. Wexler, L., Brundage, B., Crouse, J., Detrano, R., Fuster, V., Maddahi, J., Rumberger, J., Stanford, W., White, R. and Taubert, K., "Coronary Artery Calcification: Pathophysiology, Epidemiology, Imaging Methods, and Clinical Implications: A Statement for Health Professionals From the American Heart Association," *Circulation*, **94**, 1175-1192, 1996.
4. Rho, J.-Y., Tsui, T. Y. and Pharr, G. M., "Elastic properties of human cortical and trabecular lamellar bone measured by nanoindentation," *Biomaterials*, **18**, 1325-1330, 1997.