

4D MRI를 이용한 경동맥협착증 수술 전후 혈류유동 비교

고승빈*, 김두상**, 이상형***, 송시몬*

Hemodynamic comparison of carotid before and after endarterectomy using 4D MRI

Seungbin Ko*, Doosang Kim**, Sang Hyung Lee***, Simon Song*

Abstract : Hemodynamic characteristics are compared in carotids before and after carotid endarterectomy (CEA) using 4D MRI that enables a simultaneous acquisition of time-resolved, 3-dimensional, 3-component velocity field and carotid anatomy information. Two patients were involved: one who underwent the CEA with patch repair and the other without a patch (primary closure). Real-size, rigid carotid phantoms including contralateral carotids as control cases, pre-operative, and post-operative carotids were fabricated using a 3D printer and served as flow phantoms for an in-vitro experiment. As a result, a clear contrast of normalized time-averaged wall shear stress (NTA|WSS|) and oscillatory shear index (OSI) was found before and after CEA. In addition, the carotid with the patch has an abnormal region larger than the carotid with no patch. The abnormal region is defined by a region of continuous high shear or a stenosis-prone region. It is also found that an over-expanded internal carotid artery bulb due to patch causes a large recirculation zone, which hinders a flow to the internal carotid artery.

1. 서 론

경동맥내막절제술(Carotid endarterectomy, CEA)은 중증 경동맥협착증을 치료하는 외과적 수술법이다. 경동맥을 절개하고 혈액 흐름을 방해하는 플라크를 제거하기 때문에 수술 후 혈류 흐름이 달라진다.

많은 연구를 통해 혈류역학(hemodynamics)과 동맥경화증(atherosclerosis) 사이의 관계가 탐구되어 왔다⁽¹⁻²⁾. 이들 연구의 주요 결과는 크기가 작고 방향이 계속해서 바뀌는 진단 응력이 초기 동맥경화 발병과 관련이 있다는 것이다. 최근, MRI 기술 발전에 힘입어, 3차원

3성분 속도장과 혈관 형상을 동시에 측정할 수 있는 4D MRI 기술이 도입되었다. Harloff et. al.⁽³⁾은 in-vivo 4D MRI를 이용하여 eversion CEA 전후 경동맥에서 벽면전단응력(wall shear stress, WSS)과 진동전단지수(oscillatory shear index, OSI) 변화를 관찰하였고, 술후에 WSS와 OSI가 모두 감소한다는 사실을 발견하였다. 하지만 아직까지 4D MRI를 이용하여 eversion CEA가 아닌 conventional CEA 전후의 경동맥 혈류역학 변화를 조사한 연구는 진행되지 않았다.

본 연구에서는 4D MRI를 이용하여 conventional CEA 전후 경동맥 혈류유동을 비교분석한 결과를 소개한다. 혈관 내경 확장을 위한 patch를 덧붙이는 patch repair CEA를 수행한 환자 1명과 절개 부위를 단순 봉합하는 CEA를 수행한 환자 1명의 경동맥을 대상으

* 한양대학교 기계공학과

** 중앙보훈병원 흉부외과

*** 서울대학교 보라매병원 신경외과

로 하였으며, in-vitro 실험을 위해 3D 프린터를 이용하여 협착이 발생한 경동맥의 반대편 경동맥 (contralateral carotid)과 수술 전후의 경동맥 phantom을 제작하였다. 마지막으로, 4D MRI를 이용하여 맥동 유동장을 측정하였고, CEA 전후의 혈류유동을 비교분석하였다.

2. 실험 셋업

실험에 사용된 경동맥 모델은 CT 영상과 3D 프린터를 이용하여 실제 경동맥 크기와 동일한 플라스틱 소재의 경동맥 phantom을 제작하였다. 4D MRI 실험을 위해 맥동유동을 발생시킬 수 있는 폐유동회로를 구성하였으며, 환자로부터 얻은 실제 맥동유동을 phantom에 적용하였다. 작동유체로는 혈액의 점도와 비슷한 약 4 cP의 점도를 가지는 글리세린 수용액을 사용하였다.

3. 실험 결과

Fig. 1는 시간 평균 WSS 크기를 common carotid artery(CCA)에서의 dynamic pressure로 normalize한 $NTA|WSS|$ 를 나타낸다. 수술 전, 협착된 ICA에서 높은 $NTA|WSS|$ 가 관찰되었으며, 이는 수술 후에 control 경동맥과 비슷한 수준으로 낮아졌다.

심장주기 내에서의 WSS 방향 변화를 나타내는 OSI는 $NTA|WSS|$ 와 반대되는 경향을 보였다. 특히, 수술 후 넓어진 ICA bulb에서 주로 높은 OSI가 나타났다.

$NTA|WSS|$ 와 OSI를 조합하여 abnormal region을 정의하였다. Abnormal region은 continuous high shear region(High $NTA|WSS|$ & Low OSI)과 stenosis-prone region(Low $NTA|WSS|$ & High OSI)으로 이루어져 있다. 예상대로, 협착된 ICA에서는 continuous high shear region이 관찰되었다. Patch/post 경동맥의 경우, patch로 인해 넓어진 ICA bulb에 stenosis-prone region이 집중되었으며, no-patch/post보다 더 넓은 영역에서 관찰되었다.

ICA bulb에서의 stenosis-prone region 넓이 차이는 Patch 사용으로 ICA가 과도하게 넓어졌고 이로 인해 재순환 영역(recirculation zone)이 크게 성장하기에 충분한 공간이 생긴 것이다. 재순환 영역에서는 유속이 낮고 유동 방향이 계속해서 바뀌게 되며, 이는 곧 서

론에서 서술한 ‘크기가 작고 방향이 계속해서 바뀌는 진단 능력’에 상응한다. 따라서 재순환 영역이 큰 지역에서는 향후 재협착(restenosis)이 발생할 수도 있으며, 추적관찰 연구를 통해 long-term 결과를 확인할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 in-vitro 4D MRI를 이용하여 CEA 전후 혈류유동을 비교분석하였다. Patch CEA 환자와 primary closure CEA 환자를 대상으로 patch와 no-patch의 차이 또한 분석하였다. 그 결과, WSS와 OSI를 통해 수술 전후 혈류유동이 뚜렷한 대비를

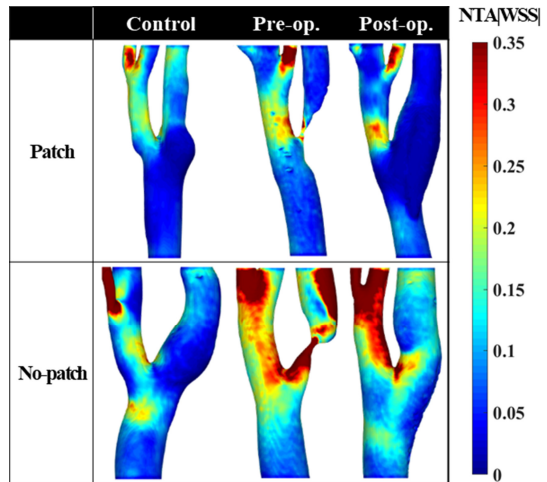


Fig. 1. Normalized time-averaged wall shear stress (NTA|WSS|).

보이는 것을 확인하였다. 또한, continuous high shear region과 stenosis-prone region으로 이루어진 abnormal region을 정의하여 patch 경동맥의 ICA에서 stenosis-prone region이 많이 나타남을 보였다. 이는 patch 사용으로 과도하게 넓어진 ICA에서 발생한 큰 재순환 영역 때문인 것으로 나타났다. 향후 CEA를 진행할 때에는 재순환 영역이 최소화되도록 하여 재협착 확률을 낮출 필요가 있다고 판단된다.

후 기

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B3009541).

참고 문헌

- (1) Malek A. M., et. al., 1999, "Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis," JAMA, pp. 2035~2042.
- (2) Peiffer V., et. al., 2013, "Does low and oscillatory wall shear stress correlate spatially with early atherosclerosis? A systematic review," Cardiovasc. Res., pp. 242~250.
- (3) Harloff A., et. al., 2013, "Wall shear stress distribution at the carotid bifurcation: influence of eversion carotid endarterectomy," Eur. Radiol., pp. 3361~3369.