

자기공명유속계를 이용한 경동맥내막절제술 패치 유무에 따른 in-vitro 혈류유동 차이 분석

고승빈* · 송시몬* · 김두상** · 이상형***

Characterization of in-vitro hemodynamic difference between carotid endarterectomy patch and no-patch repair by magnetic resonance velocimeter

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

Abstract : There are two ways to seal the incision after the carotid endarterectomy (CEA). One is primary closure which is a simple suture and the other is patch repair which stitches with a biocompatible patch to increase the lumen size. Numerous studies claim no significant difference in prognosis between patch and no-patch repair (primary closure), however, hemodynamic differences have yet to be uncovered. Here, we studied in-vitro hemodynamic difference between patch and no-patch repair by time-resolved magnetic resonance velocimeter (MRV). Carotid models including control, pre- and post-operation were obtained from the CT images of two patients and real-size, solid phantoms were fabricated with a 3D printer. Patient-specific pulsatile flows were introduced with a custom-built pump system. A glycerin aqueous solution matching a human blood viscosity was used as a working fluid. The MRV results successfully showed time-resolved 3-component velocity field in 3D vessel geometries and we calculated a wall shear stress (WSS) and oscillatory shear index (OSI) from the velocity data. The WSS was decreased after the operation and even lower than the control for both patch and no-patch cases, while the high OSI region agreed with the plaque removal area of the post-operative carotid and the ICA bulb of the control case. The most significant difference in hemodynamics between the patch and no-patch repair was a large separation bubble in the ICA of patch/post case at the early diastole, which made the actual ICA flow passage much narrower than the one of no-patch/post. This kind of large recirculation area is thought to be stimulate the growth of restenosis in the future.

1. 서 론

경동맥내막절제술 이후 절개된 부분을 봉합하는 방법은 크게 단순한 봉합인 primary closure과 생체-친화적 인공 patch를 덧붙여 혈관 내경을 더 확장시키기 위한 patch repair로 나눌 수 있다. 수술 이후 primary closure과 patch repair의 예후는 큰 차이점이 없다는 것이 지배적인 견해이다.⁽¹⁻³⁾ 하지만 수술 전후 및

patch 유무에 따른 혈류역학적 차이에 대한 연구는 매우 미진한 상태이다.

본 연구에서는 자기공명유속계(MRV)를 이용하여 경동맥내막절제술 전후 및 patch 유무에 따른 in-vitro 혈류유동의 특징과 차이를 분석하였다. 2명의 환자로 부터 얻은 정상, 수술 전, 수술 후 경동맥 정보와 3D 프린터를 이용하여 실제 크기의 경동맥 phantom을 제작하고 해당 환자들의 맥동혈류유동을 재현하였다. MRV로 얻은 속도장 데이터를 이용하여 wall shear stress(WSS)와 oscillatory shear index(OSI)를 계산하였으며 혈류역학적 특징을 분석하였다.

* 한양대학교 기계공학과

** 중앙보훈병원 흉부외과

*** 보라매병원 신경외과

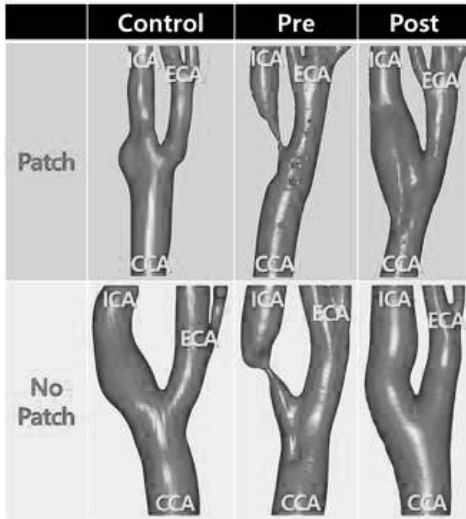


Fig. 1 Carotid models

2. 실험 셋업

실험에 사용할 경동맥 모델은 Fig. 1과 같이 patch repair 환자(이하 patch)와 primary closure 환자(이하 no-patch)에 대해 각각 정상, 수술 전, 수술 후의 경동맥으로 선정하였다. 정상 모델은 해당 환자에서 협착증이 발병한 경동맥의 반대쪽 경동맥(contralateral carotid)으로 선정하였으며 수술 후 모델은 경동맥내막 절제술 이후 일주일 뒤 형상을 기준으로 하였다.

선정된 경동맥 모델에 대한 CT 영상과 3D 프린터를 이용하여 플라스틱 소재의 경동맥 phantom 6개를 제작하였다. Phantom의 벽두께는 1 mm로 하였다.

Phantom에 적용된 유동은 환자로부터 얻은 맥동유동이며 직접 제작한 맥동유동 생성용 폐유동회로를 이용하여 발생시켰다. 작동유체로는 혈액의 점도와 비슷한 약 4 cP의 점도를 가지는 글리세린 수용액을 사용하였다.

3. 실험 결과

Fig. 2는 분지부 기준 ± 12 mm 영역에 대해 각 경동맥에서의 time-averaged WSS 크기를 CCA에서의 dynamic pressure로 normalize하여 box plot으로 나타낸 것이다. Patch 유무와 관계없이 수술 이후 WSS가 줄어들었으며 정상 경동맥에서의 WSS보다도 더 낮은 값을 나타냈다.

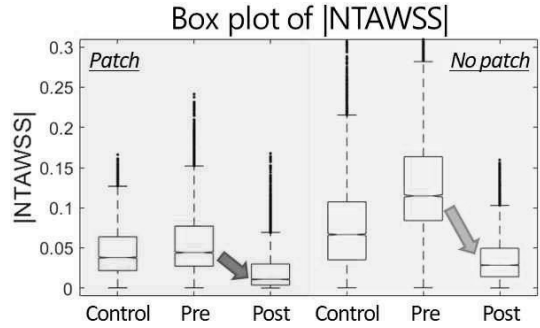


Fig. 2 Box plot of magnitude of normalized time-averaged WSS

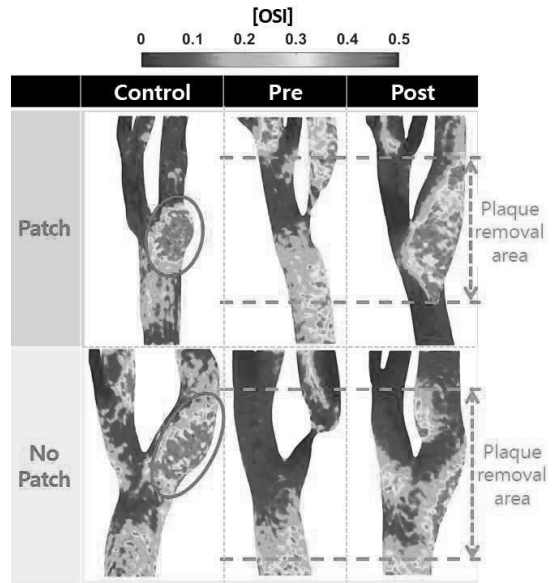


Fig. 3 OSI contour

OSI는 한 심장주기 내에서 WSS의 방향이 얼마나 변했는지를 알려주는 지표로 0은 방향변화 없음, 0.5는 방향이 완전히 뒤바뀌는 것을 의미한다. Fig. 3는 각 경동맥에서의 OSI를 contour로 나타낸 것이다. 녹색 점선으로 표시된 수술로 plaque가 제거된 부위 및 빨간색 원으로 표시된 ICA bulb 부분에서 높은 OSI를 보이는 것을 알 수 있다. 해당 부분들은 유로가 갑자기 확장되는 영역들로, flow separation이 일어나고 그에 따라 OSI가 높게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 심장주기 중 혈류가 감소하는 early diastole에서의 단면 속도장을 나타낸다. 수술에 따른 유동장을 비교하기 위해 수술 전 경동맥은 생략하였다. 주황색 원으로 표시한 부분은 separation bubble로, patch/post에서 가장 큰 크기를 보였다.

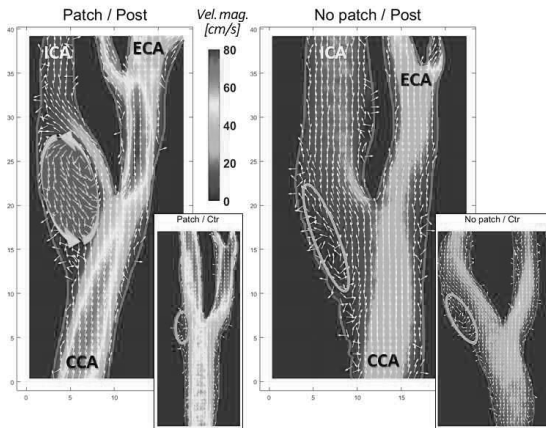


Fig. 4 Cross-sectional velocity field at early diastole

Separation bubble은 앞서 언급했듯이 유로가 갑자기 확장되는 곳에서 발생하며 혈류유동장에서 자주 관측된다. 하지만 patch repair로 인해 patch/post와 같이 과도하게 넓어진 혈관에서는 매우 큰 separation bubble로 인해 실제 유로가 좁아지게 되고 ICA로 흐르는 혈류의 양이 줄어들게 된다. 또한 앞서 OSI contour에서 확인한 것과 같이 separation bubble로 인해 WSS의 방향이 계속해서 바뀌는 영역에서는 낮은 유동 속도로 인해 경동맥내막절제술 이후 협착증이 재발하는 restenosis가 발생할 가능성이 높다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 MRV를 이용하여 경동맥내막절제술 전후 및 patch 유무에 따른 경동맥 phantom에서의 혈류유동의 특징을 분석하였다. 실험에 사용한 경동맥 모델로는 patch를 적용한 환자와 적용하지 않은 환자로부터 얻은 정상, 수술 전, 수술 후의 총 6개 모델을 선택하고 이를 바탕으로 phantom을 제작하였다. Phantom에는 각 환자로부터 얻은 환자-특이적 맥동유동을 적용되었다.

MRV로 측정된 속도장 데이터로부터 WSS와 OSI를 계산한 결과, 수술 이후 WSS가 줄어들었으며 유로가 갑자기 확장되는 영역에서 높은 OSI를 보였다. 혈류량이 감소하는 early diastole에서 속도장에서는 patch로 인해 지나치게 넓어진 ICA에서 큰 separation bubble이 발생하였고 이에 따라 실제 유로가 매우 좁

아지는 것을 발견하였다. Separation bubble이 크게 존재하는 영역은 혈류속도가 매우 낮으므로 향후 재협착이 발생할 가능성이 높다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B3009541).

참고 문헌

- (1) Economopoulos, K. J., et. al., 1999, "Comparison of Carotid Endarterectomy Using Primary Closure, Patch Closure, and Eversion Techniques," The American Journal of Surgery, pp. 505~509.
- (2) Maertens, V., et. al., 2016, "Complication Rate after Carotid Endarterectomy Comparing Patch Angioplasty and Primary Closure," Annals of Vascular Surgery, pp. 248~252.
- (3) Avgerinos, E. D., et. al., 2016, "Primary closure after carotid endarterectomy is not inferior to other closure techniques", Journal of Vascular Surgery, pp. 678~683.e1.