

## PIV 기법을 이용한 동정맥루 문합에 대한 유동가시화<sup>§</sup>

전민규\*·김형호\*\*·서상호\*\*†·최영호\*\*\*·이현진\*·도덕희\*\*\*\*†

\* 한국해양대학교 냉동공조공학과대학원, \*\* 숭실대학교 기계공학과,

\*\*\* 서울대학교 보라매병원 진단방사선과, \*\*\*\* 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부

### Flow Visualization of Arteriovenous Grafting Using PIV Technique

Min-gyu Jeon\*, Hyoung-Ho Kim\*\*, Sang-Ho Suh\*\*†, Young Ho Choi\*\*\*,  
Hyun-Jin Lee\* and Deog-Hee Doh\*\*\*\*†

\* Graduate School, Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Korea Maritime Univ.

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.

\*\*\*Department of Radiology, Seoul Nat'l University, Boramae Hospital

\*\*\*\* Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime Univ.

(Received May 1, 2013 ; Revised June 11, 2013 ; Accepted July 23, 2013)

**Key Words:** Flow Visualization(유동가시화), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Arteriovenous Grafting(동정맥루 문합), Blood Flow Characteristics(혈액유동특성)

**초록:** 신부전 환자의 신장기능을 유지하는 방법의 일환으로서 사용되는 혈액 투석 시 동정맥루 문합각도에 따라서 혈액 유동상태의 양호가 결정된다. 지금까지의 연구는 CFD에 의한 것이 대부분이었으나 실험적 보고는 없다. 본 연구에서는 동정맥루의 혈류역학적 특성을 분석하기 위하여 PIV기법을 이용하였다. PIV실험을 위한 혈관모델의 문합부 각도는 30°로 정하였다. 유체역학적 상사를 만족시키기 위하여 Re수는 같게 하였고, 동맥부분에 밸브를 달아 개폐 정도를 조절하면서 PIV실험을 수행하였다. PIV 실험 결과 분지부 부분에서 재순환유동이 발생하는 것을 볼 수 있었고, 동맥의 개폐 정도에 따라 전체적인 혈류속도의 변화가 나타났다.

**Abstract:** An arteriovenous fistula is artificially produced using a graft for hemodialysis in patients. In an arteriovenous graft (AVG), the angle of its arterial or venous anastomosis play an important role in producing flows inside blood vessels, through which a stenosis may occur. Most studies thus far have focused on CFD results. In this study, a PIV technique is used to analyze the hemodynamic characteristics at the arterial or venous anastomosis of an AVG having an angle of 30°. For flow dynamic similarity, the Reynolds number is set to be the same for real and simulated flows. A PIV experiment is performed with a control valve in the arterial part. In conclusion, the recirculation flow appeared in the bifurcation area and the total blood velocity changed according to the extent of valve opening.

### 1. 서론

최근 들어, 신부전 환자의 신장 기능을 유지하기 위한 방법으로 혈액투석방법이나 신장이식

시술을 하고 있다. 신장이식은 큰 비용과 기여자의 부족으로 인해 빈도가 낮고, 혈액투석을 사용하는 빈도가 증가하고 있다. 혈액 투석 시 간편하게 인조혈관을 이용한 동정맥루를 만든다. 인조혈관동정맥루 시술 시 문합부의 협착으로 인해 합병증이 발병하고 문합각도에 따라 혈류상태의 양호 여부가 결정되고 있다. 김형호, 서상호 등<sup>(1~3)</sup>은 동정맥루 시술시 최적의 문합각도를 CFD를 통해 연구하였다. 연구결과에 따르면 문합각도가 30° 일 때 재순환영역이 작게 발생하였다. 지금까지의 본 연구진에 의한 연구결과를 검증하기 위하여 PIV

§ 이 논문은 대한기계학회 유체공학부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 5. 9.-10., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, doh@hhu.ac.kr, suhsh@ssu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

실험을 수행하고 그 결과들을 실험결과와 비교하여 검증하고자 하였다. 또한, PIV 유동가시화 실험을 통해 동정맥루의 혈류역학적 특성을 가시화하고 동정맥루 내 유동양상을 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

PIV실험을 위한 혈관모델의 문합부 각도는 30°로 하였다. 동역학적 상사를 위해 Re수를 같게 하였다. 실험을 위해 실험에 사용한 모델은 실제 모델보다 2배 크게 아크릴로 Fig. 1과 같이 제작하였다. 그리고 Fig. 2의 장치구성과 같이 촬영원으로서 한 대의 고속카메라(500fps, 1k×1k), 광원으로 Continuous Laser(8W, 532nm)가 PIV실험의 광원으로 이용하였다. 추적입자로서 Vestosint 2157(56μm)를 이용하여 속도벡터를 계산하였다.<sup>(4)</sup>

### 2.2 실험방법

임상에서 동정맥루 문합 시술 시 이식혈관으로 혈액이 원활히 흐르도록 동맥을 막거나 혈관의 크기를 작게 하는데, 실험에서는 모델의 동맥부분에

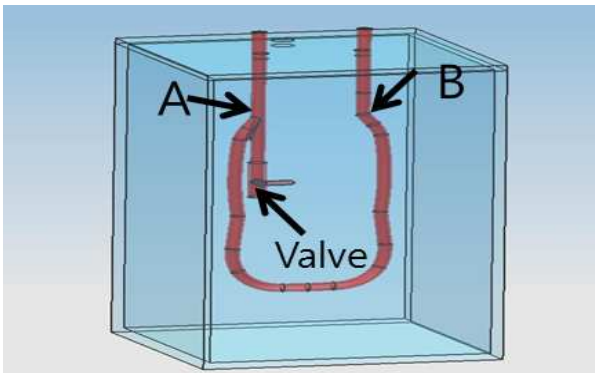


Fig. 1 Arteriovenous grafting model

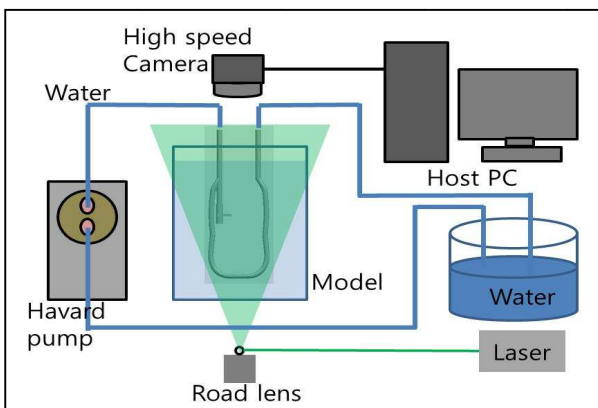


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

밸브를 부착하여 유량을 조절하였다. 또한 실제 혈관에 가해지는 압력의 재현이 가능한 Havard pump를 이용하여 systole과 diastole 비와 Cc(stroke) 그리고 RPM을 조정하였다. 여기서 systole과 diastole의 비는 3:7로 정하였으며, 유체역학적 상사를 고려한 식 (1)을 기반으로 맥동유량을 공급하였다. 사용된 작동유체는 실험의 편의성을 위해 물을 사용하였다. 고속카메라로 촬영된 Raw image에서 속도벡터를 계산하기 위해서 식 (2)를 이용하였다.<sup>(5)</sup>

$$\frac{\rho_B 4Q_B}{\mu_B D_B} = \frac{\rho_w 4Q_w}{\mu_w D_w}, \text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

$$c_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (2)$$

식 (1)에서 ρ는 밀도, Q는 유량, μ는 동점성 계수 그리고 D는 혈관의 직경을 의미하며, B는 혈액(Blood)을 의미하며, w는 물을 의미한다. 식 (2)는 계조치상호상관법을 나타내며, n은 상관영역의 크기이고 시각차를 가진 두 영상 밝기를 나타내는 함수를 각각 f와 g로 하여 상호상관함수를 계산한 결과가 최대치가 되는 점을 입자이동의 위치(속도벡터의 중점)로 하였다. 수식 내의  $\bar{f}_i$ 와  $\bar{g}_i$ 는 평균값을 의미한다.

## 3. 결과 및 검토

Case 1은 밸브가 완전히 닫힌 조건에서 수행한 PIV실험이다. Case 1에 대한 실험 모델의 입구와 출구 속도파형을 측정된 결과는 Fig. 3과 같다. 모

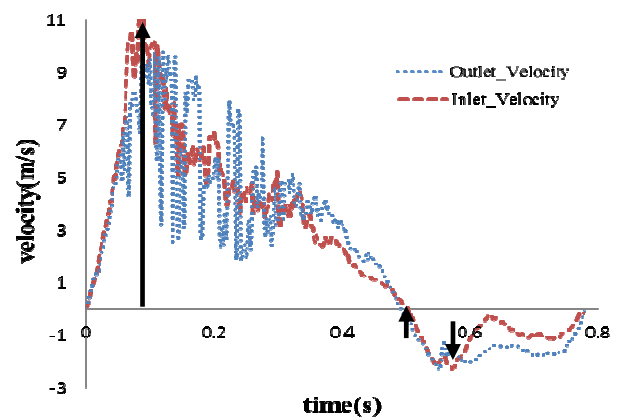
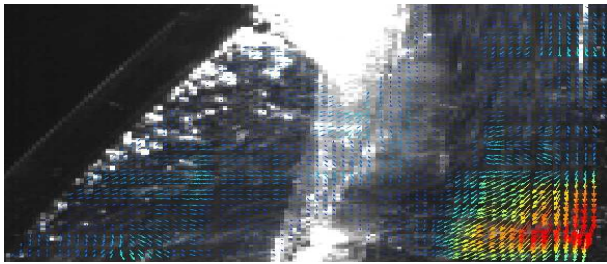
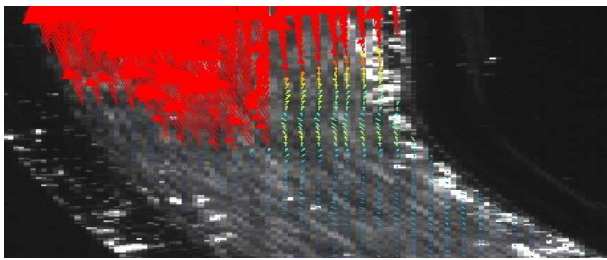


Fig. 3 Measurements of inlet and outlet velocities(Case 1)

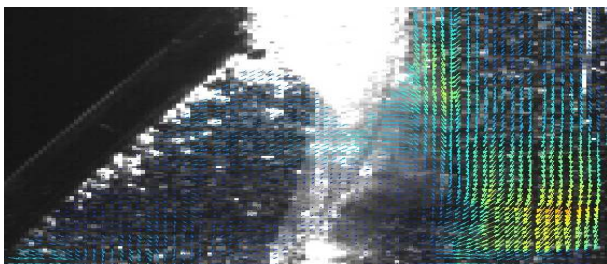


(a) Case 1: Point A

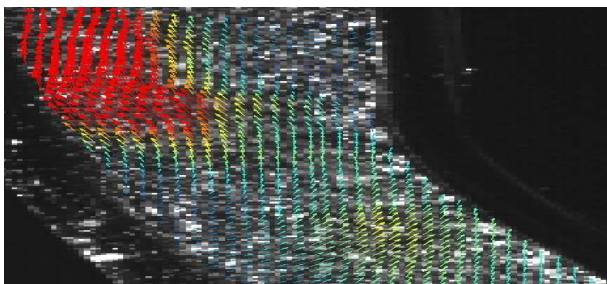


(b) Case 1: Point B

**Fig. 4** Measured velocity vectors in the arteriovenous grafting model at  $t=0.1$  s



(a) Case 1: Point A

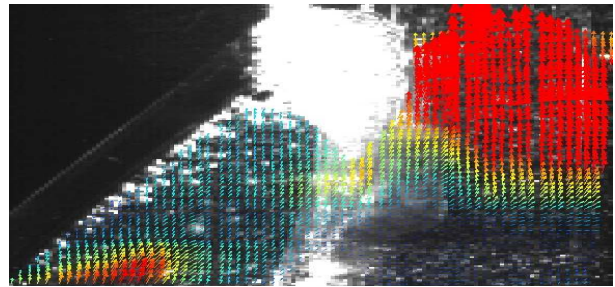


(b) Case 1: Point B

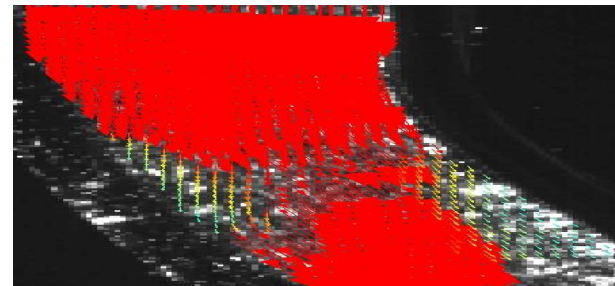
**Fig. 5** Measured velocity vectors in the arteriovenous grafting model at  $t=0.48$  s

델 분지부 3cm위에서 얻은 PIV계산 결과이며, 이 지점에서의 시간연속적 변화를 나타내고 있다. 혈류역학적 특성을 분석하기 위해 최고속도와 최저속도 그리고 속도가 0일 때 속도벡터를 분석하였다. Fig. 4(b)를 보면 벽면에서 재순환영역이 생성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 속도가 0일 때의 속도벡터분포를 나타낸다. Fig. 5의 분지부에서 와류가 발생하는 것

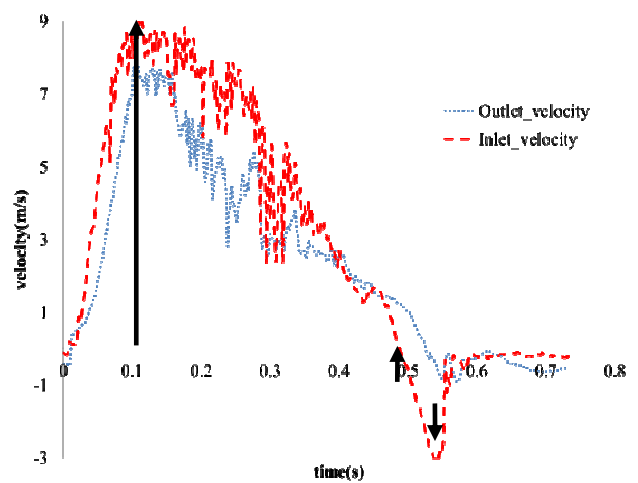


(a) Case 1: Point A



(b) Case 1: Point B

**Fig. 6** Measured velocity vectors in the arteriovenous grafting model at  $t=0.55$  s

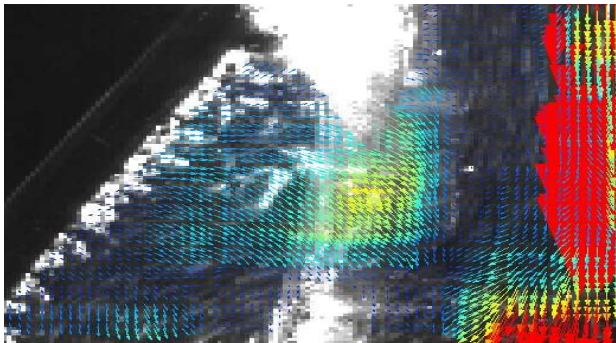


**Fig.7** Measurements of inlet and outlet velocities(Case 2)

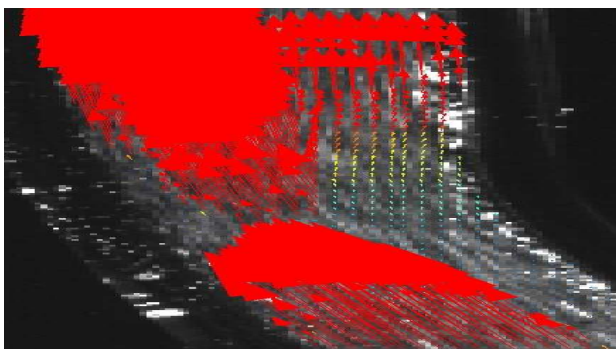
을 볼 수 있고, Fig. 5의 벽면영역에서 이차원유동이 생성됨을 확인하였다. 이 현상이 유동정체현상을 유발함으로 A지점과 B지점에서 전단응력 변화로 인한 협착현상이 발생 할 것으로 유추할 수 있다.

Fig. 6은 속도가 최저일 때의 속도벡터분포를 나타낸다. Fig. 5의 경우와 달리 재순환영역의 발생 없이 원활히 흐르는 것을 볼 수 있다.

Case 2는 협착이 발생된 경우를 모사하고, 저항을 가하기 위한 방법으로 밸브 개도를 절반으로 줄여 실험하였다. 실험모델의 입구와 출구속도파형을 Fig. 7에 나타낸다.



(a) Case 2: Point A



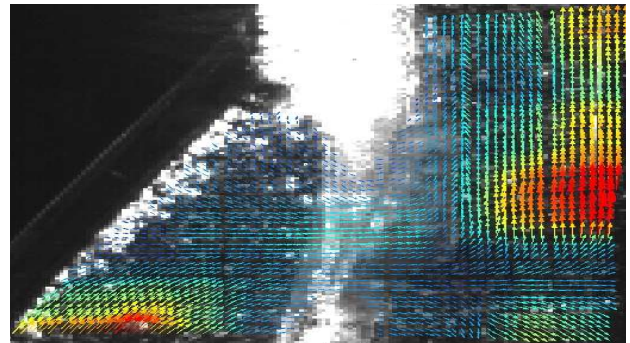
(b) Case 2: Point B

**Fig. 8** Measured velocities in the arteriovenous grafting model at  $t=0.108$  s

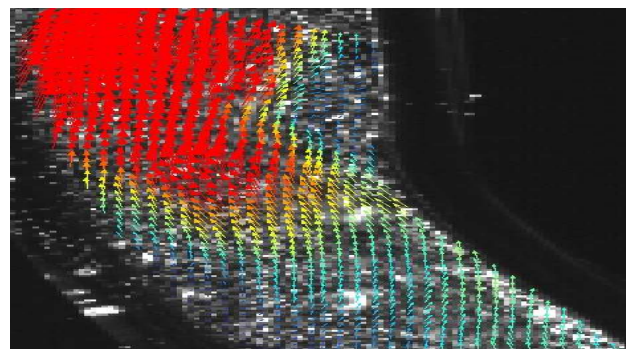
동맥이 폐쇄되지 않는 앞쪽의 결과들에 비해 최대속도가 줄고, 입구속도보다 출구속도가 낮음을 알 수 있다. 동맥의 폐쇄정도에 의해 유속의 흐름이 동맥쪽으로 일부 분리되어 감속이 이루어진 것으로 판단된다. Fig. 8~10은 A와 B지점을 확대해서 속도벡터분포를 나타낸 것이다. Fig. 8은 혈류속도가 최고속도일 때의 속도벡터분포를 나타낸다. 이때 분지부에서 재순환영역이 관찰되었다. Fig. 9의 A지점의 경우 오른쪽 측면유동의 속도가 빠르며 정맥과 동맥의 경계선상의 유동이 Fig. 8의 (b)와 같이 우측 벽면에 속도벡터의 크기가 다른 지역에 비해 작고 유동이 원활하지 못함을 볼 수 있다. 입구방향과 동맥의 중력방향으로 양방향으로 나뉘어지는 소용돌이 유동이 발생한다. Fig. 9의 B영역에서는 우측상단 벽면과 좌측하단 벽면에 소용돌이가 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig. 10에서는 B영역에서 유동이 비교적 원활히 흐르는 반면, A영역에서는 분지부에서 유동박리 현상이 시작됨을 알 수 있다. 이러한 박리현상과 정체체가 A부분에 협착현상이 유발될 것으로 유추된다.

Case 3의 경우 동맥이 1/4 폐쇄되어 동맥부로의 혈류량을 증가시킨 경우를 의미한다. Fig. 11은

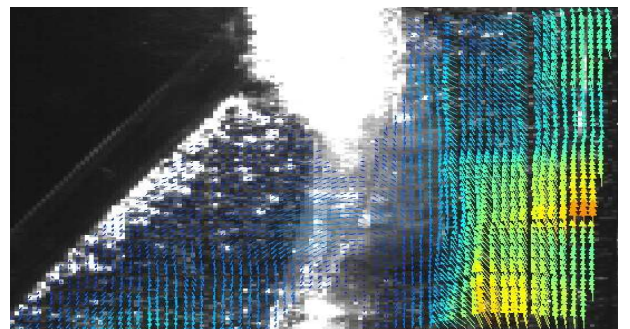


(a) Case 2: Point A

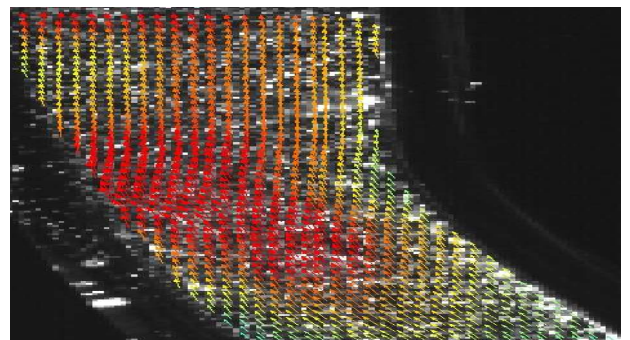


(b) Case 2: Point B

**Fig. 9** Measured velocities in the arteriovenous grafting model at  $t=0.48$  s



(a) Case 2: Point A



(b) Case 2: Point B

**Fig. 10** Measured velocities in the arteriovenous grafting model at  $t=0.53$  s

Case 3의 입구와 출구속도의 파형을 나타낸 것이다. Case 3의 입구속도는 Case 1과 비슷하지만 출구속도는 Case 2와 같이 감소하며 그 폭은 더 크게 나타났다. 3가지 Case의 입구와 출구속도 파형을 비교한 결과 동맥혈관의 개폐 정도에 따라 속도파형이 달라짐을 확인할 수 있었다. 동맥에서의 개폐가 절반인 Case 2의 경우, 혈액유동이 Case 1에 비해 총 유량이 줄어들고 속도파형의 크기가 작아졌음을 알 수 있다. 또한, Fig.11에서 출구속도의 감소로 인하여 동맥의 개폐여부가 속도변화를 유발함을 알 수 있다.

Fig. 12~14는 A, B영역을 확대해서 속도벡터분포를 나타낸 것이다. Fig. 12는 혈류속도가 최고속도일 때의 속도벡터분포를 나타낸다. Case 1과 2와는 달리 재순환영역이 거의 발생하지 않고 유동이 원활히 진행되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 12의 (b)는 속도벡터의 크기가 크고 균일하게 흐르는 것을 보여준다. 하지만 분지부의 오른쪽 벽면을 따라 큰 속도벡터가 발생하는 것을 Fig. 8의 (a)와 같이 볼 수 있다. Fig. 13은 속도가 0일 때의 속도벡터분포를 나타낸 것이다. Fig. 13의 (a)는 분지부의 좌측벽면에 재순환영역이 발생하는 것을 보여주고, 우측벽면에서는 주유동과 역류하는 유동이 만나 정체되는 것을 볼 수 있다. Fig. 13의 (b)에서 Fig. 9의 (b)와 같이 좌측하단과 우측상단에 와류와 재순환영역이 생성된 것을 볼 수 있다.

이로 인해 유체의 체류시간이 길어지기 때문에 임상에서는 전단응력변화에 따른 동맥경화가 발생할 가능성이 높아질 것이다. Case 1과 2의 경우와 마찬가지로 재순환영역이 생성되며, 이러한 정체현상이 A, B영역에 협착현상을 유발할 것으로 판단된다. Fig. 13은 속도가 최저일 때의 속도벡터분포를 나타낸 것이다. Fig. 13에서 A 부분은 오른쪽

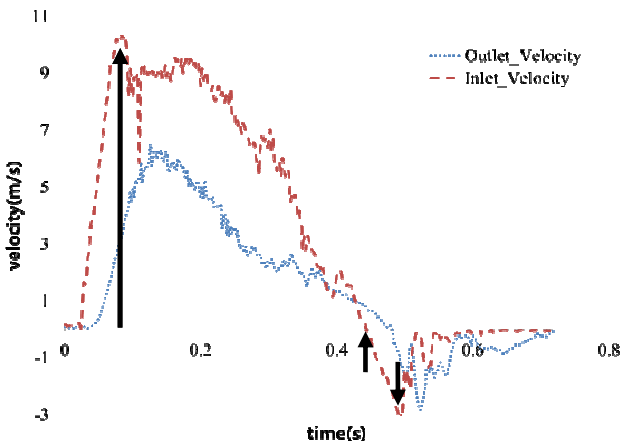
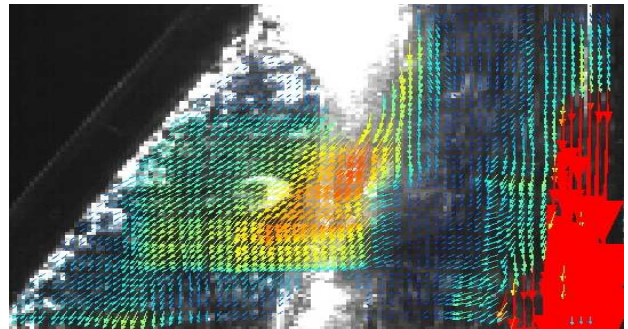
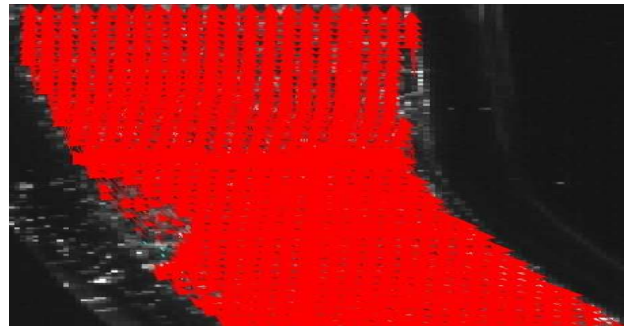


Fig. 11 Measurements of inlet and outlet velocities(Case 3)

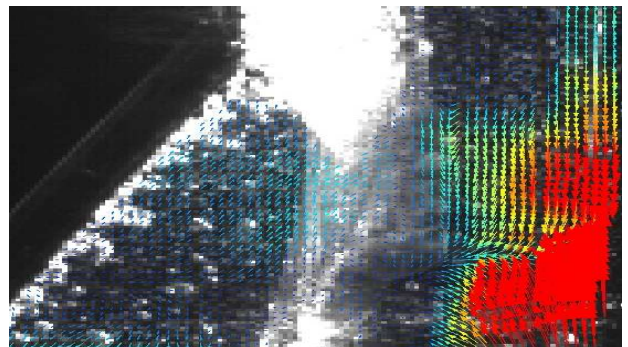


(a) Case 3: Point A

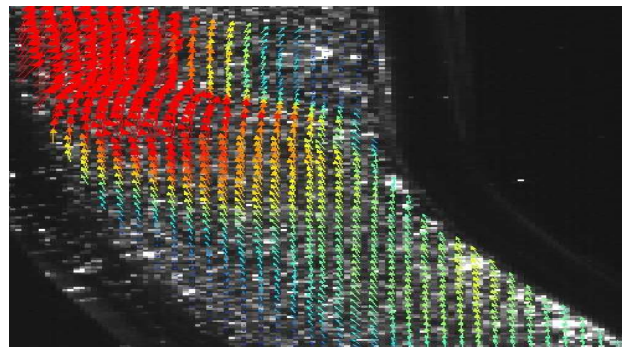


(b) Case 3: Point B

Fig. 12 Measured velocities in the arteriovenous grafting model at t=0.076 s

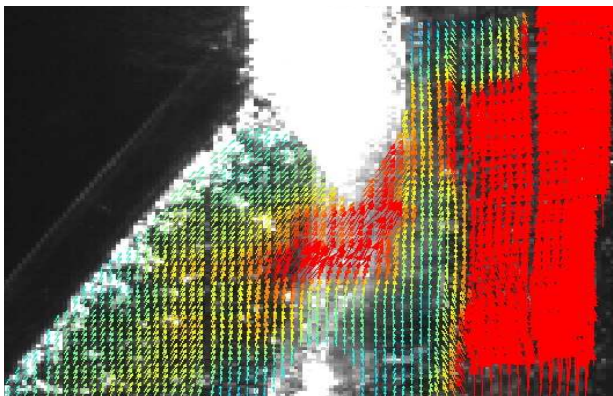


(a) Case 3: Point A

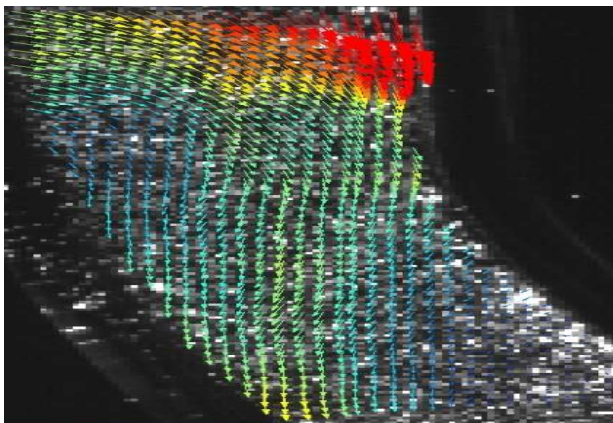


(b) Case 3: Point B

Fig. 13 Measured velocities in the arteriovenous grafting model at t=0.44s



(a) Case 3: Point A



(b) Case 3: Point B

**Fig. 14** Measured velocities in the arteriovenous grafting model at  $t=0.49$  s

벽면에서 큰 속도벡터가 생성되면서 원활히 유동이 진행되는 것을 볼 수 있다.

반면에 B부분에서는 Fig. 12의 (b)와 달리 좌측 상단에 시계방향의 와류가 발생하는 것과 우측 하단에 재순환영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig 11에서 보는 바와 같이 한 주기의 시간은 거의 같지만 속도의 크기가 0이 되는 시간대와 최고속도가 되는 시간대가 점점 줄어들어 드는 것을 알 수 있다. 이로 인해 동맥부분에서 혈류량의 크기는 전체시스템상의 속도변화에 밀접한 관계가 있음이 판단된다.

### 3. 결론

동정맥루의 혈류역학적 특성을 PIV기법을 활용

하여 구하였다. 그리고 협착의 발생 원인을 평가하고자 하였다. 그 결과, 분지부에서 재순환영역이 발생하는 것을 볼 수 있었고, 정맥쪽 분지부 부분의 벽면에 횡방향으로 유동이 진행되는 것을 알 수 있었다. 또한, 동맥의 개폐 정도에 따라 전체적인 혈류속도의 변화가 나타났으며, 이를 통해 분합시술을 시행할 시 동맥 개폐 정도를 조절하여 혈류속도를 조정한다면 보다 안정적인 시술이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 A, B영역에서 저항값의 변화에 따른 Case 1~3 모두 속도의 크기가 0이 될 때, 와류가 발생함으로 혈액의 정체를 유발하며 협착발생의 가능성이 있을 것으로 유추된다.

### 후 기

연구는 한국연구재단 도약과제(No.2008-0060153)의 지원으로 이루어진 연구결과입니다.

### 참고문헌

- (1) Kim, H. H., Choi, Y. H., Suh, S. H., Lee, J. S., Jung, Y. H. and So, Y. H., 2012, "Arteriovenous Graft Modeling and Hemodynamic Interpretation," *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 2, No. 4A, pp. 324~330.
- (2) Choi, Y. H., Kim, H. H. and Suh, S. H., 2012, "Progress of Stenosis in the Arteriovenous Graft for Kidney Dialysis," *The 12<sup>th</sup> Annual Conference of the Biomedical Engineering Society for Circulation*, pp. 17~18.
- (3) Choi, Y. H., Kim, H. H., Suh, S. H. and Lee, J. S., 2012, "Modeling and Hemodynamic Interpretation of Arteriovenous Fistula Graft," *Proceedings of the 7<sup>th</sup> National Congress on Fluids Engineering*, pp. 205~206.
- (4) Kim, H. H., Suh, S. H. and Choi, Y. H., 2012, "Blood flow Visualization in Femoral Pseudoaneurysm," *The 12<sup>th</sup> Annual Conference of the Biomedical Engineering Society for Circulation*, pp. 21~22.
- (5) Torii, R., Oshima, M., Kobayashi, T. and Takagi, K., 2001, "The Hemodynamic Study of the Cerebral Artery Using Numerical Simulations Based on Medical Imaging Data," *The Visualization Society of Japan and Ohmsha, Journal of Visualization*, Vol. 4, No. 3, pp. 277~284.