

혈액 투석을 위한 내동정맥루 감시를 위한 투석관 내 혈류량 측정: 경향 분석

관동대학교 의과대학 명지병원 ¹외과 및 ²신장내과, ³한양대학교 의과대학 방사선과학교실, ⁴연세대학교 의과대학 외과학교실

이종훈¹ · 윤수영² · 조현경² · 송순영³ · 양성자² · 안형준⁴ · 조희은¹ · 김유선⁴ · 박기일¹

Flow Measurement in the Hemodialysis Vascular Conduit for Surveillance of Internal Arteriovenous Fistula: A Trend Analysis

Jong Hoon Lee, M.D.¹, Soo Young Yoon, M.D.², Hyeon Kyeong Cho, M.D.², Soon-Young Song, M.D.³, Sung Ja Yang, R.N.², Hyung Joon Ahn, M.D.⁴, Hee Eun Cho, R.N.¹, Yu Seun Kim, M.D.⁴ and Kiil Park, M.D.¹

Purpose: We have already reported on a new method to calculate the intra-vascular conduit flow rate based on Bernoulli's theory for maintaining surveillance of the arteriovenous fistula (AVF) function. To assess the clinical validity of our methods, we examined a trend analysis on the calculated flow rate in hemodialysis vascular conduits.

Methods: From a total of 27 cases of native AVFs that were at least 3 months after construction, we measured the AVF flow rate (Q_D) with Doppler ultrasonography first. When Q_D was below 600 ml/min, a fistulogram was taken. The intra-vascular conduit static pressure (p_s) was measured, and the flow rate (Q_a) was calculated every month with using the mean arterial pressure. The patients with a decreased Q_a of more than 10% over 3 months were referred for a diagnostic fistulogram.

Results: Twenty-seven AVFs were studied after 29.5 ± 28.5 (4~120) months of operation. The mean Q_D was 980.6 ± 501.6 (144~2,230) ml/min. In 6 patients who showed a Q_D less than 600 ml/min, 4 pathologic lesions were found on the diagnostic fistulogram: juxta-anastomosis stenosis (n=3)

and a draining venous stenosis (n=1). Three patients who showed a Q_a decrement were confirmed as having a draining venous stenosis. However, any unpredictable thrombosis with proximal stenosis (n=2) couldn't be detected.

Conclusion: Q_a represents the narrowing of the draining vein of an internal AVF. However, arterial or venous narrowing that is proximal to the arterial puncture site couldn't be detected with the calculated intra-conduit flow rate. The development of new methods that can detect proximal vascular stenosis and that can be used in combination with our method is anticipated in the near future. (**J Korean Surg Soc 2006;71:139-144**)

Key Words: Pressure measurement, Bernoulli's theory, Vascular stenosis

중심 단어: 압력 측정, 베르누이 정리, 혈관 협착

Departments of ¹Surgery and ²Nephrology, Myongji Hospital, Kwandong University College of Medicine, Goyang, ³Department of Radiology, Hanyang University College of Medicine, ⁴Department of Surgery, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

서 론

지속적인 혈액 투석 치료를 받고 있는 환자에서 적절한 혈로의 확보와 장기간의 기능 유지는 환자의 예후에 매우 중요하다. 이상적인 혈로는 혈액 투석 시에 적절한 혈류량(flow rate)을 유지하여 투석의 효과를 극대화하며, 협착, 폐쇄, 혈전, 감염, 동맥류 및 출혈 등의 합병증이 적어야 한다.(1,2) 문헌에 의하면 혈전에 의한 폐색이 내동정맥루의 기능 이상에 가장 많은 원인을 차지하고 있다.(3) 또한, 이 같은 문제는 교정되지 않은 혈관의 협착에 의하며,(4-6) 이에 대한 예방적 교정으로 내동정맥루의 기능 소실률을 감소시키고 개존율을 증가시킬 수 있다고 한다.(6-8) 내동정맥루의 기능 이상을 조기 발견하기 위해서는 주기적이고 객관적인 기능 평가(surveillance)가 요구되며,(9,10) 초음파 회색

책임저자 : 김유선, 서울시 서대문구 신촌동 134
☎ 120-752, 연세대학교 의과대학 외과학교실
Tel: 02-2228-2115, Fax: 02-313-8289
E-mail: yukim@yumc.yonsei.ac.kr

접수일 : 2006년 3월 2일, 게재승인일 : 2006년 6월 27일
본 논문의 내용은 2005년 10월 대한외과학회 추계통합학술대회(서울)에서 구연되었음.
본 연구는 2005년도 연세대학교 의과대학 장기이식연구소 연구비 지원으로 이루어졌음.

법, 도플러 초음파, 이차원 위상 대조 자기공명 영상(2-Dimensional phase-contrast magnetic resonance imaging) 등의 혈류량을 직접 측정하는 방법과 이학적 소견, 투석 중 정맥압 측정, 내동정맥루 내 정압 측정(static intra-access pressure measurement), 요소 재순환율 측정(urea recirculation ratio, URR), 투석 적절도 측정(Kt/Vurea), 동정맥루 조영술, 자기공명 혈관 조영술, 초음파로 혈관의 영상을 얻는 방법 등이 제시되고 있다.(11-15) 현재 이들 방법 중 비침습적 방법인 도플러 초음파 측정법에 의한 내동정맥루 혈류량 측정이 가장 많이 사용되고 있으나, 이 방법은 많은 비용과 시간이 소요되고 혈액 투석 중에는 시행할 수 없는 단점이 있어, 연속적인 측정이 불가능하여 혈관의 협착 시기를 정확히 판단할 수 없다. 더구나 검사자의 숙련도나 검사 장비에 따라 결과가 달라질 수 있으며, 특히 혈관의 내경 측정과 탐촉자의 입사각에 따른 오차가 많아 정확한 혈류량 측정이 불가능하다.(16,17)

경제적이고 간편한 내동정맥루의 기능 평가 방법을 개발하기 위해 저자들은 혈액 투석관을 투석기에서 분리하여 환자와 수평이 되게 위치시킨 후 평균 동맥압에 의한 전압(total pressure)과 투석관 내의 정압(static pressure)을 측정하고, 베르누이 방정식(Bernoulli's equation)을 이용하여 투석관 내 혈류량을 계산한 결과 투석관 내 계산된 혈류량은 내동정맥루 내의 혈류량을 반영하며, 내동정맥루 내의 기능 이상에 의한 혈류량 변화는 혈액 투석관 내의 간단한 압력 측정으로 발견될 수 있다고 이미 발표한 바 있다.(18) 또한 투석관 내에서 측정된 압력과 실제 투석관 내 유량을 비교하여 이들의 상관 관계를 규명하고, 베르누이 방정식에 의해 계산된 도관 내 유량과 실제 유량을 비교하여 그 차이를 알아보고자 생체 외 실험을 진행하여 관류 내의 압력 측정과 이를 근거로 하여 계산한 관류 내의 유량은 실제 관내 유량과 정확히 일치하지는 않았으나, 밀접한 상관 관계를 보여, 관내 유속의 변화에 따른 유량의 변화는 관내 압력의 변화로 나타나며, 관내의 압력의 측정으로 유량의 변화를 진단할 수 있다고 발표한 바 있다.(19)

본 연구의 목적은 실제 투석 환자를 대상으로 투석관 내 압력 측정에 의해 계산된 투석관 내 혈류량의 경향 분석을 통해 내동정맥루 내의 이상 소견을 조기에 발견가능성을

검증하여 이 방법의 임상적 유용성을 평가하고자 함이다.

방 법

2004년 1월부터 2005년 6월까지 조성 후 최소 3개월이 경과한 자가 혈관에 의한 내동정맥루를 통해 혈액 투석을 하고 있는 27명의 환자를 대상으로 하였다. 모든 환자들은 연구 시작 시 도플러 초음파로 내동정맥루의 혈류량을 측정하였다. 한 명의 방사선과 전문의가 5~12 MHz 선형 탐촉자(HDI 5000, ATL, Bothell WA, USA)를 사용하여 도플러 초음파를 시행하였으며, 내동정맥루의 혈류량(Qb)을 혈액 투석 시작 직전에 측정하였다. 도플러 초음파의 영상 변수는 벽여과기(wall filter)를 낮은 값(low)으로, 펄스 반복주파수(pulse repetition frequency)는 5,000 Hz 이상으로, 초음파 탐촉자의 입사각(θ)은 60도 이하를 유지하였다. 도플러 초음파의 측정 위치는 가장 최근에 시행된 혈액투석 시 동맥측 천자 부위를 기준으로 하였으나 천자 부위에 급격한 혈관 직경의 변화 혹은 심한 사행성 주행으로 인한 와류(vortex flow)가 있을 경우 천자부와 최대한 가까운 근위 혹은 원위부의 혈관을 선택하여 측정하였다. 환자는 혈액 투석 시와 동일한 자세를 취하도록 하였고, 상완부에 압박이 없도록 상의를 탈의한 상태에서 검사를 시행하였다. 측정시의 탐촉자에 의한 내동정맥루의 압박이 가해지지 않게 하여 혈관의 직경이 최대로 유지된 상태에서 검사를 시행하였다. 혈류량과 최대 유속은 도플러 스펙트럼을 구한 후 초음파 장비에 내장된 기능을 이용하여 자동으로 계산하였으며 5회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 3회의 값을 평균하여 이를 대표값으로 정하였다. 도플러 초음파에 의한 Qb가 600 ml/min 이하인 환자는 혈관 조영술을 시행하여 이상 유무를 확인하였고, 이상 소견이 발견된 경우에는 즉시 경피적 혈관 성형술을 시도하였다.

혈액 투석관 내 압력은 매일 1회씩 측정하였다. 우선 Fistula needle set (A.V. Fistula Set: Baxter Healthcare Corporation, Deerfield, IL, USA)를 이용하여 동맥 측에 천자를 하고 그 말단에 3-way cock를 연결한 후 투석관(Hemodialysis Blood Tubing Set: Kawasumi Laboratories. Co., Ltd., Klong Nueng, Klong Lueng, Thailand)과 연결하였다. 투석관 내의

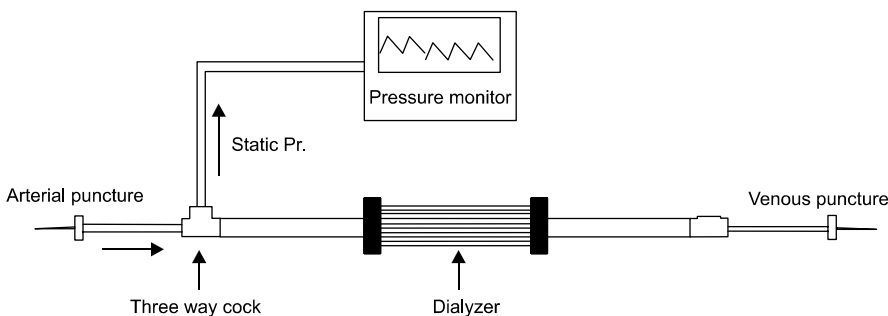


Fig. 1. Schematic of static pressure measurement in hemodialysis vascular conduit.

혈류와 직각 방향의 3-way cock의 말단을 연속 관류 카테터 (Pressure Monitoring Kit with TruWave Disposable Pressure Transducer: Edwards Lifesciences, LLC., Irvine, CA, USA)를 통해 압력을 측정할 수 있는 환자 감시 장치(Dash 4000[®]: GE Medical Systems, Milwaukee, WI, USA)에 연결하였다 (Fig. 1). 정압(static pressure, p_s)의 측정 시 투석관은 투석기에서 분리하고 환자와 같은 높이에 위치시켜 투석기의 펌프력을 배제하고 중력을 최소화하여 내동정맥루의 기능만으로 혈류를 발생하게 한 후, 압력 파형이 안정된 후 5개의 수축기, 확장기 압력을 읽은 후 평균 동맥압을 계산하여 평균값을 구하였다. 이와 같은 방법으로 측정된 정압과 반대 측 상완에서 측정한 평균 동맥압(mean arterial pressure, MAP)을 전압으로 베르누이 방정식에 의한 도관 내 유량 계산 공식 ①에 의해 혈류량(Q_a)을 계산하였다.

$$Q_a = A \{ 2 (MAP - p_s) / \rho \}^{1/2} \dots\dots ① \quad (A: \text{도관 단면적}, \rho: \text{밀도})$$

계산된 혈류량이 연속된 3개월 이상의 기간 동안 10% 이상 감소할 경우 혈관 조영술로 내동정맥루의 이상 유무를 확인하였다.

결 과

1) 대상 환자의 내동정맥루 관련 정보

전체 27명의 환자 중 남자가 14명이었고 평균 연령은 62.0 ± 13.3세(34~84)였다. 내동정맥루는 조성 후 평균 29.5 ± 28.5개월(4~120) 경과되었으며, 상완 동맥을 사용한 경우

는 4명(14.8%)이었으며, 23명(85.2%)은 요골 동맥을 사용한 내동정맥루였다. 대상 환자들은 평균 12.6 ± 5.6개월(4~18) 동안 추적 조사되었으며, 기간 중 7명(25.9%)의 환자가 사망하였고, 2명(7.4%)의 환자는 타 의료기관으로 전원 되어 모두 9명(33.3%)의 환자가 연구 기간 동안 누락되었다. 연구 기간 동안 내동정맥루의 기능 소실이 발생한 환자는 2명(7.4%)이었다.

2) 도플러 초음파에 의한 내동정맥루의 혈류량(Q_b) 측정과 혈관 조영술

연구 시작 시에 측정된 도플러 초음파에 의한 내동정맥루의 혈류량은 평균 980.6 ± 501.6 (144~2,230) ml/min였으며, 이 중 6명(22.2%)의 환자에서 600 ml/min 이하의 혈류량을 보였다. 이들의 혈관 조영술 결과 정맥 유출로(venous outflow)에 협착이 발견된 환자가 1명(3.7%), 동정맥 문합부나 동맥에 협착을 보인 환자가 3명(11.1%)이었으며, 2명(7.4%)의 환자에서는 이상 소견을 발견할 수 없었다. 혈관 조영술상 이상 소견이 발견된 4명의 환자는 연구 시작 전에 경피적 혈관 성형술로 교정하였다.

3) 투석관 내 계산된 혈류량(Q_b)과 혈관의 변화

투석관 내 계산된 혈류량이 연속된 3개월 이상 동안 10% 이상 감소한 환자는 모두 3명(11.1%)이었다. 이들은 혈관 조영술 결과 모두 정맥 유출로의 협착 소견을 보였으며 (Fig. 2), 2명의 환자는 경피적 혈관 성형술로 교정하였고, 1명에서는 실패하여 새로운 내동정맥루를 시행하였다. 혈관 성형술이 성공한 2명의 환자에서는 혈액 투석관 내 혈류

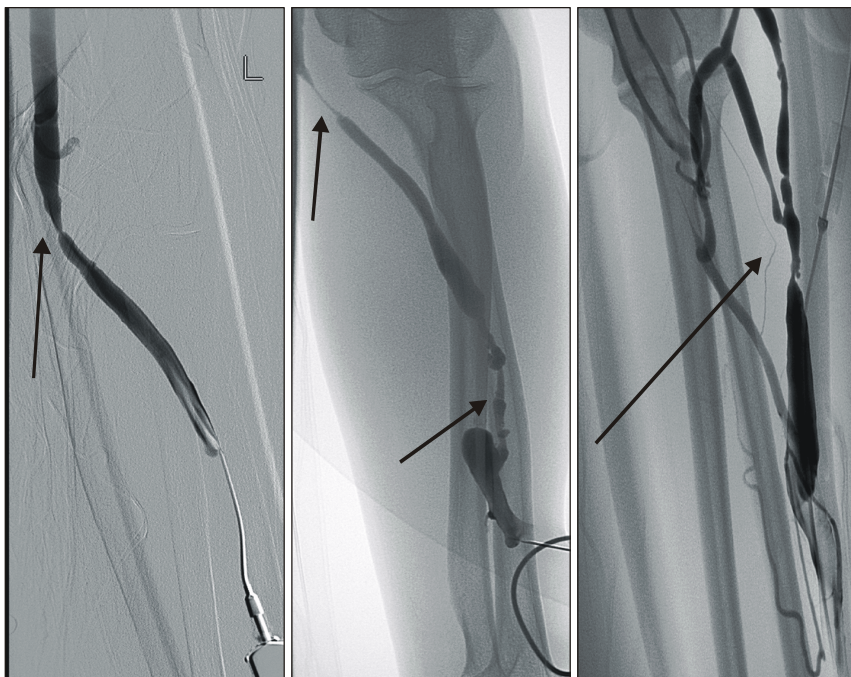


Fig. 2. The fistulographic finding of three flow rate decrement patients represented draining venous stenosis.

량은 다시 증가되는 소견을 보였다(Fig. 3).

그러나 2명(7.4%)의 환자에서는 계산된 혈류량의 감소 없이 갑작스런 혈전 형성으로 내동정맥루의 기능이 소실되었다. 이들은 혈관 조영술 결과 모두 동맥 측 천자 부위 상위의 동맥 및 정맥의 협착 소견을 나타냈다(Fig. 4).

고찰

자가 혈관에 의한 내동정맥루는 인조혈관에 의한 경우보다 혈전에 의한 폐색의 발생이 월등히 낮은 것으로 보고되고 있으나, 특별한 감시 프로그램이 없을 경우 연중 약 4.0~18.0%의 발생률을 보이고 있다. 비록 상대적으로 낮은

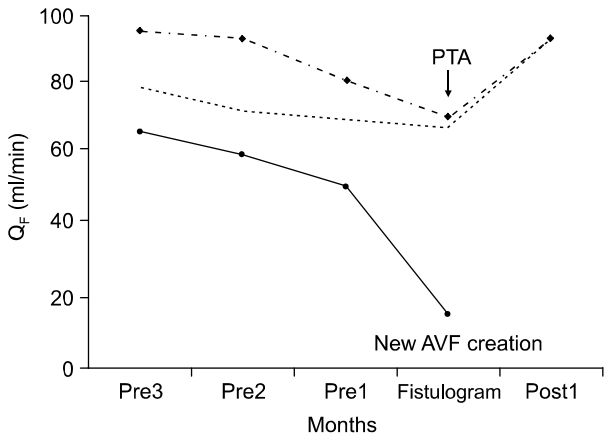


Fig. 3. The trend of calculated flow rate (Q_F) in 3 draining venous stenosis patients. The flow rate was re-increased after percutaneous angioplasty (PTA).

폐색률을 보이고는 있으나, 자가 혈관에 의한 내동정맥루에서도 혈관 협착에 의한 이상 소견을 조기 진단하여 치료함으로써 유병률을 감소시키고 내동정맥루의 개존율을 증가시키고자 정기적인 평가 프로그램들이 권고되고 있다(1).

내동정맥루 기능의 정기적 감시를 위한 방법은 서론에 기술한 것과 같이 많은 방법들이 이용되고 있다. 이 방법들을 크게 분류하면(이학적 검사 방법을 제외하고) 주로 방사선 영상을 통해 혈관의 해부학적 이상을 관찰하는 방법, 재순환율의 측정, 내동정맥루 내의 압력 측정 및 혈류량의 측정법 등이 소개되고 있다. 그러나 현실적으로 경제성, 반복성, 편리성, 정확성, 비침습성 등의 요소를 고루 갖춘 이상적 방법을 찾기는 쉽지 않다.

문헌에 의하면 내동정맥루의 기능 평가를 위해 혈류 역학적 접근이 시도된 예가 많이 있다. 투석 기계를 이용하여 내동정맥루의 압력을 측정하여 내동정맥루의 감시에 이용하는 방법이 보고된 바 있다.(1,4,13) 혈액 투석 중 투석 기계에서 자동적으로 측정되는 정맥압(dynamic venous pressure)은 특별한 장치나 추가 비용 없이 비교적 간편하게 측정할 수 있으며, 인조 혈관의 내동정맥루의 감시에 유용하다고 보고된 바 있다.(4,13) 그러나 이 측정 방법은 체액량, 주사 바늘의 구경 및 위치, 혈류 속도, 심박출량, 투석기와 투석관의 종류에 의해 영향을 받으며, 여러 연구에서도 밝혀진 바와 같이 혈관 협착에 대한 정확한 진단이 불가능하며, 특히, 정맥 유출로의 협착 소견은 발견 가능하나, 동맥 천자 부위와 정맥 천자 부위 사이에 발생한 협착은 진단되지 않는다.(18,20-22)

이러한 단점을 보완하기 위해 고안된 내동정맥루 내 정

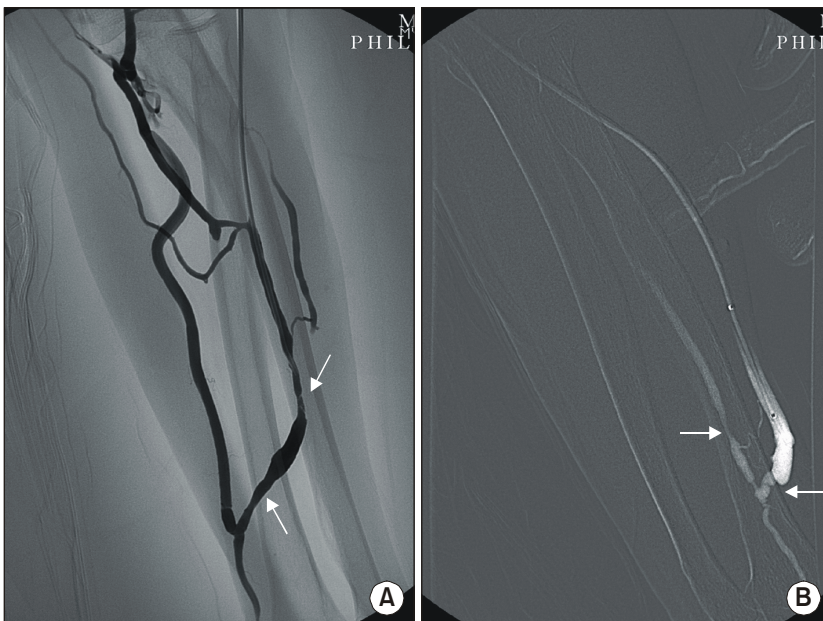


Fig. 4. The fistulographic findings of sudden thrombotic occlusion without flow rate decrement. (A) Venous stenosis proximal to arterial puncture site was noted. (B) Arterial and juxta-anastomosis stenosis was noted.

압비(static intra-access pressure ratio, SIAPR) 측정법은 내동정맥루에 Fistula needle set으로 천자하여 정압(static intra-access pressure, SIAP)을 측정하고, 환자의 혈압에 대한 요소를 반영하기 위해 반대편 상완에서 측정한 평균 동맥압(mean arterial pressure, MAP)으로 나누어 비율을 구한 것이다(공식 ②).

$$SIAPR = SIAP / MAP \dots\dots\dots ②$$

그러나 이 방법은 투석기에 특수 장치를 부착해야 하고, 계산과 해석이 복잡한 편이다. 특수 장치의 부착을 간편화하기 위해 Access Alert device (Medisystems, Inc., Seattle, WA, USA)가 고안되어 국내에 소개되기도 하였다.(23,24) Spergel 등(25)은 최근 내동정맥루 내 정압비와 혈류량과의 상관관계에 관한 연구 결과를 발표하였다. 그는 내동정맥루의 혈류량을 Poiseuille 법칙에 의해 수학적으로 식 ⑤와 같이 해석하여, 내동정맥루 내 정압비는 혈관 내 전체 저항에 대한 유출 경로의 저항과 상관 관계가 있으며, 혈류량과는 상관 관계가 없다고 주장하였다. 즉, 식 ⑤에서 내동정맥루 내 정압비는 혈관의 저항에 관한 요소만을 가지며, 혈류량에 관한 요소는 없다.

$$Q_a \approx MAP / (Rout + Rin) \dots\dots\dots ③$$

$$SIAPR \approx Q_a \times Rout / MAP \dots\dots\dots ④$$

$$SIAPR \approx Rout / (Rout + Rin) \dots\dots\dots ⑤$$

(Q_a = access flow; Rin = inflow resistance upstream of venous needle; $Rout$ = outflow resistance downstream of venous needle; $SIAPR$ = static intra-access pressure ratio)

또한, 내동정맥루 내 정압비의 증가는 혈류량 감소에 의한 내동정맥루의 기능 저하와 관계된 정맥 유출경로의 저항 증가에 의할 수도 있지만, 동맥 및 문합부 혹은 주위 정맥 등의 유입 경로의 저항 감소로도 가능하여, 내동정맥루 내 정압만으로 기능 부전을 진단할 수 없다고 하였다. 이와 같은 현상은 본 연구에서 예측하지 못한 두 명의 환자의 갑작스런 혈관 폐쇄로 설명된다. 즉, 압력 측정 부위 이전의 동맥이나 문합부 혹은 정맥의 협착에 의한 유입 경로의 저항 증가로 혈류량이 감소하고 압력 전달에 장애를 초래하여, 측정 부위 이후의 내동정맥루 내의 압력은 감소된 상태에서 반대편 상완에서 측정한 평균 동맥압을 전압으로 하여 혈류량을 계산한 결과이다. 이와 같은 오류를 개선하기 위해서는 압력 측정 부위에 전달되는 전압을 정확하게 측정할 수 있는 방법의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용된 투석관과 측정 장비는 모두 동일한 제품을 사용하였으나, 연구 종료 시점에서 투석기와 투석관의 모델이 변경되었으며, 결과적으로 유출 경로의 저항 값이 달라지므로 더 이상의 경향 분석에 대한 연구를 지속

하기 어려웠다. 투석관 내 혈류량을 구하는 베르누이 방정식(식 ①)에서 혈액의 점성도와 밀도를 무시한다면 전압과 정압의 차를 제외하고는 모두 일정하다. 저자들의 앞선 보고에서 투석관 내 압력과 혈류량은 내동정맥루의 기능에 따라 결정되므로,(18) 투석관 내 혈류량은 전압과 정압의 차이에 의해서 결정되며, 실제 임상적 적용에서는 정확한 전압의 측정이 가능하다면 전압과 정압의 차이만을 비교해도 무관할 것으로 생각된다.

문헌에 따르면 도플러 초음파에 의한 내동정맥루의 혈류량 측정으로 기능 소실의 위험성을 예측할 수 있다고 한다.(14,15) 그러나 Krivitski(12)는 도플러 초음파에 의한 내동정맥루의 혈류량 측정의 부정확성을 인식하고 초음파 회석법을 이용하여 내동정맥루의 혈류량 측정의 정확도를 높이기 위해 초음파 회석법에 의한 내동정맥루 혈류량 측정법을 개발하였다. 초음파 회석법은 혈액 투석 중 투석관의 동맥측과 정맥측을 투석기에 거꾸로 연결하고 펌프를 200~250 ml/min의 속도로 유지하여, 정맥측 투석관의 투입구에 생리식염수를 주입하여 회석된 혈류의 재순환율을 투석관에 부착할 수 있게 고안된 초음파 센서 기기(Transonic HD01 hemodialysis monitor)를 통해 측정하는 방식이다. 그러나 많은 문헌들에서 초음파 회석법에 의한 내동정맥루 혈류량 측정은 임상적으로 유용하지 않다고 발표하였다.(26-28) 그 이유는 심박출량, 혈액 펌프 속도, 바늘의 구경 및 혈관 내 위치, 바늘 사이의 간격 등의 요소에 의해 측정값이 영향을 받으며, 가장 중요한 요소는 내동정맥루 내 정압 측정에서나 저자들의 연구 방법에서 밝혀졌던 바와 같이 유입 혈관의 상태에 대한 정확한 평가가 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다.

결 론

베르누이 정리를 이용하여 계산한 투석관 내 혈류량의 경향 분석에서 혈류량의 감소는 내동정맥루의 정맥 유출로의 협착 소견을 반영하였다. 그러나 이 방법으로 동맥 측 천자 이전 부위, 즉 내동정맥루 유입로에 해당하는 동맥 및 문합부와 그 부근 정맥의 협착은 발견할 수 없는 한계가 발견되었다. 이는 정확한 전압의 측정 없이 반대편 상완에서 측정한 평균 동맥압을 전압으로 가정하였기 때문이다. 향후 내동정맥루의 유입로의 이상 소견을 조기 발견하기 위해서는 정확한 전압의 측정과 이를 이용한 혈류량 측정의 경향 분석이 필요할 것이다.

REFERENCES

1) National Kidney Foundation. K/DOQI clinical practice guidelines for vascular access, 2000. Am J Kidney Dis 2001;37: S137-81.

- 2) Schwarz C, Mitterbauer C, Boczula M, Maca T, Funovics M, Heinze G, et al. Flow monitoring: performance characteristics of ultrasound dilution versus Doppler ultrasound compared with fistulography. *Am J Kidney Dis* 2003;42:539-45.
- 3) Hakim R, Himmelfarb J. Hemodialysis access failure: a call to action. *Kidney Int* 1998;54:1029-40.
- 4) Schwab SJ, Raymond JR, Saeed M, Newman GE, Dennis PA, Bollinger RR. Prevention of hemodialysis fistula thrombosis. Early detection of venous stenosis. *Kidney Int* 1989;36:707-11.
- 5) Besarab A, Sullivan KL, Ross RP, Moritz MJ. Utility of intra-access pressure monitoring in detecting and correcting venous outlet stenoses prior to thrombosis. *Kidney Int* 1995;47:1364-73.
- 6) Sands JJ, Miranda CL. Prolongation of hemodialysis access survival with elective revision. *Clin Nephrol* 1995;44:329-33.
- 7) Either J, Falardeau P, Vandeville B, Roy L, Legault L, Gascon M, et al. Access flow monitoring of native fistula using ultrasound dilution technique: 30 months experience. *J Am Soc Nephrol* 2000;11:A183.
- 8) Safa AA, Valji K, Roberts AC, Ziegler TW, Hye RJ, Ogleivie SB. Detection and treatment of dysfunctional hemodialysis access graft: effect of surveillance program on graft patency and the incidence of thrombosis. *Radiology* 1996;199:653-7.
- 9) McCarley P, Wingard RL, Shyr Y, Pettus W, Hakim RM, Ikizler TA. Vascular access blood flow monitoring reduces access morbidity and costs. *Kidney Int* 2001;60:1164-72.
- 10) Krivitski NM, Gantela S. Access flow measurement as a predictor of hemodialysis graft thrombosis: making clinical decisions. *Semin Dial* 2001;14:181-5.
- 11) Paulson WD. Blood flow surveillance of hemodialysis grafts and the dysfunction hypothesis. *Semin Dial* 2001;14:175-60.
- 12) Krivitski NM. Theory and validation of access flow measurement by dilution technique during hemodialysis. *Kidney Int* 1995;48:244-50.
- 13) Frinak S, Zasuwa G, Dunfee T, Besarab A, Yee J. Dynamic venous access pressure ratio test for hemodialysis access monitoring. *Am J Kidney Dis* 2002;40:760-7.
- 14) Strauch BS, O'Connell RS, Geoly KL, Grundlehner M, Yakub YN, Tietjen DP. Forecasting thrombosis of vascular access with doppler color flow imaging. *Am J Kidney Dis* 1992;19:554-7.
- 15) Finlay DE, Longley DG, Foshager MC, Letourneau JG. Duplex and color Doppler sonography of hemodialysis arteriovenous fistulas and grafts. *Radiographics* 1993;13:983-9.
- 16) Bay WH, Henry ML, Lazarus JM, Lew NL, Ling J, Lowrie EG. Predicting hemodialysis access failure with color flow Doppler ultrasound. *Am J Nephrol* 1998;18:296-304.
- 17) Oates CP, Williams ED, Mchugh MI. The use of diasonics DRF400 duplex ultrasound scanner to measure volume flow in arteriovenous/fistulae in patients undergoing hemodialysis: an analysis of measurement uncertainties. *Ultrasound Med Biol* 1990;16:571-9.
- 18) Lee JH, Song SY, Cho HK, Yoon SY, Yang SJ, Huh KH, et al. Development of simple flow measurement in the vascular access conduit based on the Bernoulli's theory. *J Korean Vasc Surg Soc* 2004;20:115-24.
- 19) Lee JH, Huh KH, Kim YS, Cho HE, Park K. Flow measurement in vascular access conduit: an ex vivo experimental model. *J Korean Surg Soc* 2005;68:253-7.
- 20) Hoeben H, Abu-Alfa AK, Reilly RF, Aruny JE, Bouman K, Perazella MA. Vascular access surveillance: evaluation of combining dynamic venous pressure and vascular access blood flow measurements. *Am J Nephrol* 2003;23:403-8.
- 21) Cayco AV, Abu-Alfa AK, Mahnensmith RL, Perazella MA. Reduction in arteriovenous graft impairment: results of a vascular access surveillance protocol. *Am J Kidney Dis* 1998;32:302-8.
- 22) Kleinekofort W, Kraemer M, Rode C, Wizemann V. Extracorporeal pressure monitoring and the detection of vascular access stenosis. *Int J Artif Organs* 2002;25:45-50.
- 23) Besarab A, Moritz M, Sullivan K, Dorrell S, Price JJ. Venous access pressures and the detection of intra-access stenosis. *ASAIO J* 1992;38:M519-23.
- 24) Besarab A, Frinak S, Sherman RA, Goldman J, Dumler F, Devita MV, et al. Simplified measurement of intra-access pressure. *J Am Soc Nephrol* 1998;9:284-9.
- 25) Spergel LM, Holland JE, Fadem SZ, McAllister CJ, Peacock EJ. Static intra-access pressure ratio does not correlate with access blood flow. *Kidney Int* 2004;66:1512-6.
- 26) Work J. Does vascular access monitoring work? *Adv Ren Replace Ther* 2002;9:85-90.
- 27) Garland JS, Moist LM, Lindsay RM. Are hemodialysis access flow measurements by ultrasound dilution the standard of care for access surveillance? *Adv Ren Replace Ther* 2002;9:91-8.
- 28) Shahin H, Reddy G, Sharafuddin M, Katz D, Franzwa BS, Dixon BS. Monthly access flow monitoring with increased prophylactic angioplasty did not improve fistula patency. *Kidney Int* 2005;68:2352-61.