

베르누이 정리를 이용한 혈액 투석관내 혈류량 측정법 개발

관동대학교 의과대학 명지병원 ¹외과, ²진단방사선과 및 ³신장내과,
연세대학교 의과대학 ⁴장기이식연구소 및 ⁵외과학교실

이종훈^{1,4} · 송순영² · 조현경³ · 윤수영³ · 양성자³ · 허규하^{4,5}
김순일^{4,5} · 김유선^{4,5} · 박기일^{1,4}

Development of Simple Flow Measurement in the Vascular Access Conduit Based on the Bernoulli's Theory

Jong Hoon Lee, M.D.^{1,4}, Soon-Young Song, M.D.², Hyeon Kyeong Cho, M.D.³, Soo Young Yoon, M.D.³
Sung Ja Yang, R.N.³, Kyu Ha Huh, M.D.^{4,5}, Soon Il Kim, M.D.^{4,5}, Yu Seun Kim, M.D.^{4,5} and Kiil Park, M.D.^{1,4}

Departments of ¹Surgery, ²Radiology and ³Nephrology, Kwandong University College of Medicine,
Myongji Hospital, Goyang, ⁴Research Institute for Transplantation and ⁵Department of Surgery,
Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Purpose: Early detection of arteriovenous fistula (AVF) dysfunction in hemodialysis patients and prompt corrective procedures reduces the AVF thrombosis rates and lengthens access survival. We tried to develop a new simple and cheap bedside measurement technique based on the Bernoulli's theory. **Method:** From a total of 20 case of vascular accesses for hemodialysis, of at least 3 months of construction, we twice measured the AVF flow rate (Q_D) with Doppler ultrasonography and vascular conduit pressure. Four kinds of pressure were measured: tubing set free from dialysis machine and positioned on the patient's bed (Pr_F), two kinds of artificial stenosis made with tourniquet (Pr_{S1} , Pr_{S2}), pump flow rate at 100ml/min (Pr_{100}), and pump off (Pr_0). We calculated the flow rate of vascular conduit (Q_F) with Pr_F and mean arterial pressure on Bernoulli's equation, and Q_F was compared with Q_D . **Result:** AVF was 26.0 ± 28.6 (3~108) months after operation, with five cases (including 2 PTFE grafts) using brachial artery. Pr_F was closely correlated with Pr_{100} ($R^2=0.914$), and inversely correlated with Q_D ($R^2=-0.026$). Q_F was poorly correlated with Q_D ($R^2=0.003$). There was no statistical difference in the double pressure measurement ($P>0.05$), but there was difference in Q_D ($P<0.05$). When artificial stenosis was made, the pressures increased, and the calculated flow rates decreased in every patients. Thrombosis or stenosis was detected in all patients with decrement of Q_F , but not in all with decrement of Q_D . **Conclusion:** Pressure measurement and calculated flow rate in dialysis vascular conduit represent alterations of AVF flow rate. However its value in long-term follow up awaits further study with accurate constant number.

Key Words: Hemodialysis, Arteriovenous fistula, Flow rates
중심 단어: 혈액 투석, 내동정맥루, 혈류량

책임저자 : 김유선, 서울시 서대문구 신촌동 134, ☎ 120-752, 연세대학교 의과대학 외과학교실
Tel: 02-361-5563, Fax: 02-313-8289, E-mail: yukim@yumc.yonsei.ac.kr

본 연구는 2003년 연세대학교 학술연구비(일반교수) 2003-09 (김유선)의 지원과 연세대학교 의과대학 장기이식연구소 연구보조금의 일부 지원으로 이루어졌음.

본 논문의 내용은 2003년 11월 대한외과학회 추계통합학술대회에서 구연되었음.

서 론

지속적인 혈액 투석 환자에서는 자가 혈관 혹은 인조 혈관 등을 이용한 내동정맥루의 적절한 조성과 기능 유지가 필수적이다. 따라서 부적절한 혈류량 혹은 혈전에 의한 완전 폐색 등의 내동정맥루 기능 부전증은 많은 이환율과 의료 비용을 발생시킨다. 여러 문헌에 의하면 이 같은 내동정맥루 기능 장애를 조기에 발견하여 적절한 방사선과적, 외과적 중재술로 부족한 혈류량을 개선하고 혈전 형성을 미연에 방지 혹은 제거함으로써, 내동정맥루의 기능과 생존율을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(1-4). 내동정맥루 기능 이상을 조기에 발견하기 위해서는 주기적이고 객관적인 기능 평가(surveillance)가 요구된다. 내동정맥루의 기능 평가 방법에는 임상적 이학적 검사, 투석 중 투석관 정맥압 측정, 요소 등의 추적 표시자를 이용한 재순환 측정, 도플러 초음파, 혈관 조영술 등이 있으나, 비침습적 방법인 도플러 초음파 측정법에 의한 내동정맥루 혈류량 측정이 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 도플러 초음파 측정법에 의한 혈류량 측정은 많은 비용과 시간이 소요되고 혈액 투석 중에는 시행할 수 없는 단점이 있다. 더구나 도플러 초음파 측정법에 의한 내동정맥루 혈류량 측정은 검사자의 숙련도나 검사장비에 따라 결과가 달라질 수 있어 정확한 혈류 측정이 가능한지에 대하여서는 의문이 있다.

베르누이 정리에 의하면 비압축성 유동의 유속(velocity)이 증가하면 관내 압력은 감소하며, 유속이 감소하면 압력이 증가한다. 많은 문헌에서 내동정맥루내 정맥측 압력 증가는 중심정맥으로 연결되는 정맥의 협착과 유관하며 이는 곧 기능 부전을 의미한다고 한다고 한다(5-8). 이는 곧 내동정맥루내 혈액의 흐름도 베르누이의 정리가 적용될 수 있다는 가능성을 제시한다. 그러나 투석관 내의 혈류는 중력에 의해 흐르는 유체와는 다르게 심장의 펌프력에 의해 계속적인 가속을 받는 파동류(pulsatile flow)이며, 혈액의 점성으로 인한 상대 운동이 존재하는 점성 유동이다. 그러나

유지 혈액 투석 환자에서는 혈액의 점성을 결정하는 가장 중요한 요소인 적혈구 용적률이 큰 변화 없이 비교적 일정하게 유지된다. 연구자들은 환자 내 비교를 목적으로 동맥압과 투석관내 압력을 반영한 투석관내 혈류량을 계산하기 위해 베르누이의 정리를 적용하였으며, 이를 위해 투석관내 혈류가 상대 운동이 없는 상태이며 점성에 의한 마찰력이나 전단응력이 존재하지 않는 이상유체(ideal fluid)로 가정하고 본 연구를 시행하였다.

혈류량(Q)은 직경을 알고 있는 도관에서 단면적(A)을 구하고 관내 흐르는 유속(V)을 측정하면 다음과 같은 공식에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$Q=V \times A \text{ -----(1)}$$

한편 유속은 액주계를 Fig. 1과 같이 유체가 흐르는 관내에 유체의 흐름과 반대 방향으로 7자 관을 설치하여 압력수주의 높이를 측정함으로써 구할 수 있다. 즉, 액주계를 유체가 흐르고 있는 도관 속에 H 만큼의 깊이로 넣었을 때 유체는 액주계를 통과하여 h 만큼 상승 시킨 후 정지하며, 도관속의 유체의 수직 높이(H+h)에 해당 되는 압력과 점 ②에서의 압력이 평형을 이룬다. 따라서 액주계 속의 유체가 정지하므로 점 ②에서의 유체도 정지하게 된다. 정체점인 점 ②에서의 정체압을 p₂, 유속을 V₂, 점 ①에서의 정압을 p₁, 유속을 V₁, 유체의 밀도를 ρ, 중력 가속도를 g라 하여 베르누이 방정식을 적용하면

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = H + h = 0 \text{ -----(2)}$$

가 되고 V₂=0이다.

$$\begin{aligned} \frac{V_1^2}{2g} &= \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} \text{ 이므로} \\ V_1^2 &= \frac{2g(p_2 - p_1)}{\rho g} = \frac{2(p_2 - p_1)}{\rho} \\ V_1 &= \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \text{ -----(3)} \end{aligned}$$

그러므로 관류내에 가는 7자 관을 설치하여 관류내의 압력 측정으로 유속을 구할 수 있으며, 관경(diameter)을 알고 있다면 쉽게 유량(Q)을 계산할 수 있다.

본 연구의 목적은 현재까지 보고된 바 없는, 간단하고 경제적인 방법으로 베르누이의 정리와 피토 튜브의 원리를 이용하여 내동정맥루의 기능에 의한 혈액 투석관내의 혈류량을 측정하고, 이 자료를 도플러 초음파에 의한 내동정맥루내의 혈류량과 비교하고자 한다. 아울러 본 연구 방법의 진단적 가치를 평가한 후, 임상에 적용하여 검사비용의 절감과 검사시간의 절약을 도모하면서 내동정맥루에 발생한 이상을 조기에 진단 하고자 함이다.

방 법

모든 측정은 내동정맥루 조성술 후 최소 3개월이 경과되어 혈액 투석에 이용하고 있는 20명의 환자를 대상으로 1개

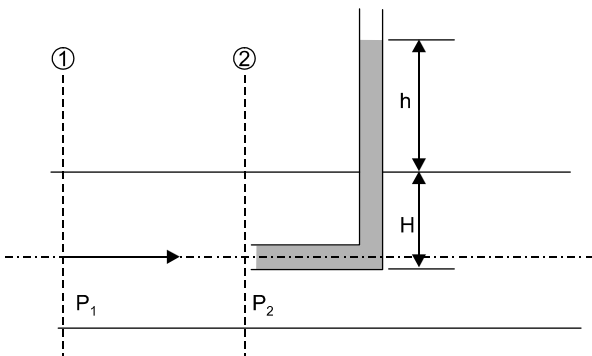
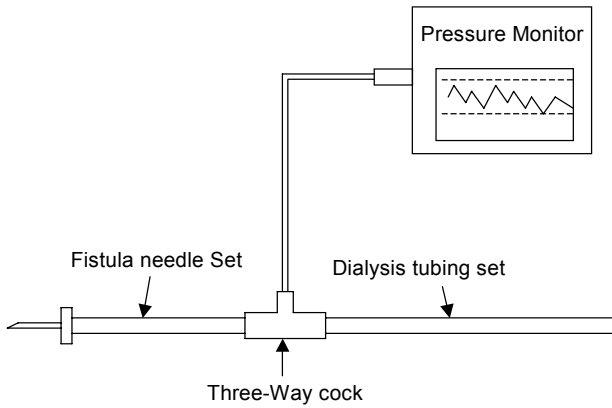
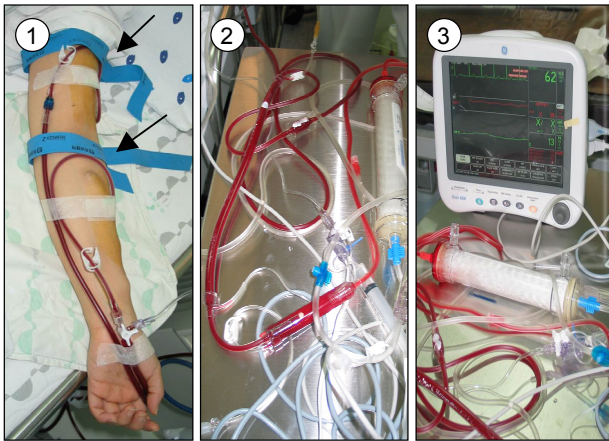


Fig. 1. Manometer for pressure measurement of tube flow.

A. Schematic of pressure measurement in hemodialysis vascular conduit



B. Photographs of pressure measurement during hemodialysis



- ① The 3-way cock was connected to pressure monitor system. Arrows indicate the sites of artificial stenosis.
- ② The hemodialysis vascular conduit was free from the dialysis machine and positioned on the table or patient's bed.
- ③ Pressure monitor system.

Fig. 2. Method of vascular conduit pressure measurement.

월 간격으로 2회 측정하였다. 동일한 방사선과 전문의가 5~12 MHz 선형 탐촉자(HDI 5,000, ATL, Bothell WA, USA)를 사용하여 도플러 초음파를 시행하였으며, 내동정맥류의 혈류량(Q_b)과 최대 유속(V_b)을 혈액 투석 시작 직전에 측정하였다. 도플러 초음파의 영상 변수는 벽여과기(wall filter)를 낮은 값(low)으로, 펄스반복주파수(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

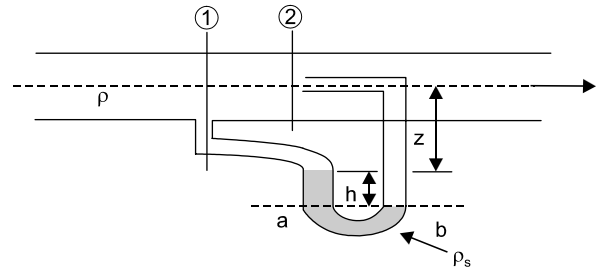


Fig. 3. Pitot-static tube.

심한 사행성 주행으로 인한 와류(vortex flow)가 있을 경우 천자부와 최대한 가까운 위치의 혈관을 선택하여 측정하였다. 환자는 혈액투석 시행과 동일한 자세를 취하도록 하였고, 상완부에 압박이 없도록 상의를 탈의한 상태에서 검사를 시행하였다. 측정시 탐촉자에 의한 내동정맥류에 압박이 가해지지 않게 하여 혈관의 직경이 최대로 유지된 상태에서 검사를 시행하였다. 혈류량과 최대유속은 도플러 스펙트럼을 구한 후 초음파장비에 내장된 기능을 이용하여 자동으로 계산하였으며 5회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 3회의 값을 평균하여 이를 대표값으로 정하였다.

혈액 투석관내 압력의 측정은 fistula needle set (Baxter®: 40 cm, 16 gauge back eyed needle)를 이용하여 동맥측에 천자를 하고 그 말단에 3-way cock를 연결한 후 투석관과 연결하였다. 투석관의 혈류와 직각 방향의 3-way cock의 말단을 동맥압 감시장비에 연결하여 투석관내의 압력, 압력 파형을 환자의 심전도와 동시에 측정하였다(Fig. 2A, B). 압력의 측정은 심전도의 파형과 압력 파형이 안정된 후 5개의 수축기, 확장기 압력을 읽은 후 평균 동맥압을 계산하여 평균값을 구하였다.

투석관내의 압력은 다음과 같은 네 가지의 경우에 측정하였다.

1. 투석관을 투석기에서 분리하고 환자와 같은 높이에 위치 시켜 투석기의 펌프력을 배제하고 중력을 최소화한 후에 압력을 측정하였다(Pr_f).
2. 지혈대로 동맥측 천자 부위와 정맥측 천자 부위를 결찰(Pr_{s1}), 그리고 정맥측 천자부위 상위를 결찰(Pr_{s2})하여 인위적 협착을 유발한 후 각각 압력을 측정하였다.
3. 투석기에 투석관을 거치한 후 펌프에 의한 혈류를 100 ml/min에 맞춘 후 압력을 측정하였다(Pr_{100}).
4. 투석기에 투석관을 거치 시킨 후 펌프의 구동력을 정지시켜 투석관내 혈류의 흐름이 0 ml/min인 시점의 압력을 측정하였다(Pr_0).

이렇게 측정된 압력과 반대측 상완에서 측정한 평균 동맥압으로부터 베르누이 정리를 이용한 피토 튜브의 원리에 의해 유속을 구하였고, 여기에 단면적을 곱하여 투석관내 혈류량(Q_f)을 계산하였다. 즉 Fig. 3과 같이 관벽과 직각으

로 뚫은 작은 구멍에서 흐르는 유체의 정압(static pressure)을 잡고 피토 튜브를 흐름과 반대로 향하게 놓아 전압(total pressure)을 잡은 후 이 둘을 U자관, 또는 시차 압력계의 양 끝을 연결한다. 이렇게 하여 단면 ①과 ②사이에 베르누이 방정식을 이용하면

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \text{ -----(4)}$$

(p: 압력, ρ: 밀도, ρs: 시차 압력계의 밀도, g: 중력 가속도, V: 유속)

이고 여기서 점 ②는 정체점이므로 V2=0가 되어 위 식은

$$\frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = \frac{V_1^2}{2g} \text{ -----(5)}$$

으로 나타낼 수 있다. 그리고 U자관에서 기준면을 a-b로 하면 a-b단면에 작용하는 압력은 같으므로 a-b에서의 압력은

$$p_1 + \rho_s g h = p_2 + \rho g h \text{ -----(6)}$$

이 되고 이 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)h \text{ -----(7)}$$

이 식을 식 (5)에 대입하면

$$\frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = \frac{V_1^2}{2g} = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)h$$

가 되고 따라서 점 ①에서의 유속은

$$V_1 = C \sqrt{2 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)g \cdot h} \text{ -----(8)}$$

혹은 $V_1 = \frac{C}{\rho} \sqrt{2(p_2 - p_1)} = \frac{C}{\rho} \sqrt{2\Delta p}$ 로 표현 될 수 있다.

그러므로 두 지점의 정압차를 측정하여 유속을 구할 수 있다. 여기서 C는 피토 튜브 계수 또는 속도 계수로서 실험적으로 계산해야 하며, 유체의 종류, 피토 튜브의 종류에 따라 다르며 0.9~0.99의 범위에 있다고 실험적으로 증명되어 있으므로, 본 연구에서는 그 값을 무시하고 계산하였다.

그러나 실제로 환자를 대상으로 Fig. 3과 같이 피토 튜브를 투석관내에 장치하는 것은 불가능하므로, V2=0인 시점의 전압을 평균 동맥압으로 가정하여 계산하였다. 이와 같이 측정된 압력을 상호 비교하여 상관관계를 알아 보았고, 도플러 초음파에 의해 측정된 내동정맥류의 혈류량(Qb) 및 최대 유속(Vb)과 비교하였다. 2회의 측정에서 Qb가 25% 이상 감소하거나 Qf이 10% 이상 감소된 환자에서 혈관 조영술을 시행하여 내동정맥류의 이상 유무를 확인하였다.

모든 통계 분석은 컴퓨터 통계 프로그램인 윈도우용 SPSS 11.0을 사용하였다. 압력 상호 간, 혈류량과 압력, 유속과 혈류량의 상관관계를 알아보기 위하여 simple linear regression을 이용하였고, 두 번의 측정 값 사이의 비교는 paired t-test를 시행하였으며, 독립적인 두 군 간의 측정값의 비교는 Student-t test를 이용하였다.

Table 1. Characteristics of 20 patients with internal AVF

Characteristics	
Age (yrs)	59.8±14.2 (36~83)
Sex (M : F)	11 : 9
Vascular access*	
Op. duration (month)	26.0±28.6 (3~108)
Radial A.	15 (75%)
Brachial A.	5 (25%)
Graft	2 (10%)
Antiplatelet or Anticoagulant	6 (30%)
Heparin free HD	2 (10%)
Previous angiogram	5 (25%)
Hct (%)	29.5±3.8 (21.1~39.7)
MAP† (mmHg)	100.9±10.0 (73.3~113.3)
Venous chamber Pressure (mmHg)	103.7±29.2 (70~160)

*AVF = arteriovenous fistula; †MAP = mean arterial pressure on contralateral arm

결 과

1) 대상 환자의 내동정맥류 관련 정보

전체 20명의 환자 중 남자가 11명이었고 평균 연령은 59.8±14.2 (36~83)세였다. 내동정맥류 조성술 후 평균 26.0±28.6 (3~108)개월 경과되었으며, 이 중 인조혈관(PTFE: polytetrafluoroethylene graft)를 가진 환자 2명(10%)을 포함하여 상완 동맥을 사용한 경우는 5명(25%)이었다. 항혈소판제나 항응고제를 복용하고 있는 환자는 6명(30%)이었으며, 본 연구 시작 전에 내동정맥류 기능 이상으로 혈관 촬영을 한 경험이 있는 환자는 5명(25%)이었다. 평균 적혈구 용적률은 29.5±3.8 (21.1~39.7)였고, 반대측 상완에서 측정된 평균 동맥압은 평균 100.9±10.0 (73.3~113.3) mmHg 였다. 투석기의 펌프에 의한 혈류량을 200 ml/min로 하였을 때의 정맥 챔버내의 압력(venous chamber pressure)은 평균 103.7±29.2 (70~160) mmHg로, 125 mmHg 이상인 환자는 5명(25%)이었다(Table 1).

2) 투석관내 압력 파형

투석관내 압력의 파형은 그 모양이 동맥파형과 유사한 형태를 취하였다. 최고점은 심전도의 T파와 시간적으로 일치하였고, 인조 혈관을 가진 환자의 파형은 자가 혈관과는 다르게 비교적 완만한 파형을 보였다. Pr100의 파형에서도 자가혈관에서는 펌프에 의한 압력 전달로 투석관이 펌프에 의한 압박 시의 압력이 높게 그려지는 반면, 인조 혈관에서는 압력파가 비교적 균일하게 그려졌다(Fig. 4).

3) 투석관내 압력(Pr_F , Pr_{100}) 및 혈류량(Q_F)과 내동맥 루내 혈류량(Q_D) 및 유속(V_D)과의 상관 관계

Pr_F 와 Pr_{100} 사이에는 $R^2=0.914$ 로 긴밀한 상관 관계를 나타냈으며($P=0.000$), 이들의 관계는 $Pr_F=0.76 \times Pr_{100} + 35.357$ 의 함수로 표시할 수 있었다(Fig. 5A).

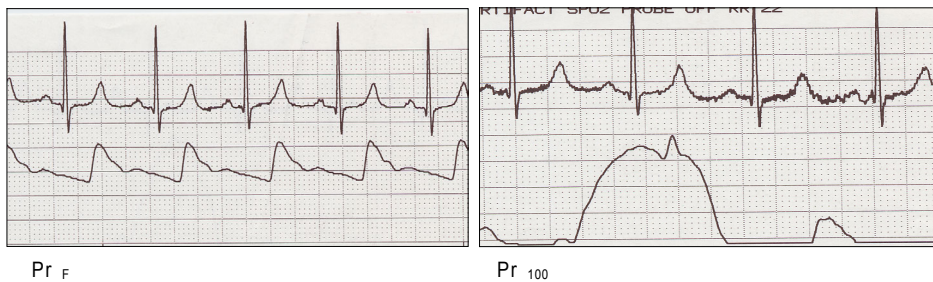
Q_D 와 Pr_F 의 관계는 음의 상관관계($R^2=-0.026$)를 나타내었으나 정확히 반비례 관계는 아니었다($P=0.989$)(Fig. 5B). Pr_0 은 15명(75%)의 환자에서 Pr_F 보다 낮은 값을 보였으며, 나머지 5명의 환자에서는 Pr_F 와 비슷한 값을 보였다.

투석관의 압력 측정값으로부터 계산한 투석관내 혈류량(Q_F)은 Q_D 와 $R^2=0.003$ 로 상관 관계를 규명하기는 어려웠으며($P=0.597$)(Fig. 6A), 오히려 V_D 와 $R^2=0.291$ 로 더 상관 관계가 있는 것으로 나타났다($p=0.001$) (Fig. 6B).

4) 투석관내 압력 측정 결과와 혈류량 계산

두 번의 측정에서 Pr_F , Pr_{100} 은 통계학적으로 유의한 차이는 없었다($P>0.05$). 상완동맥을 이용한 환자에서의 압력이 요골동맥을 사용한 환자들보다 통계적으로 유의하게 높았다($P<0.05$). Pr_{100} 에서 음의 값을 나타내는 환자는 15명

A. Native AVF



B. PTFE graft

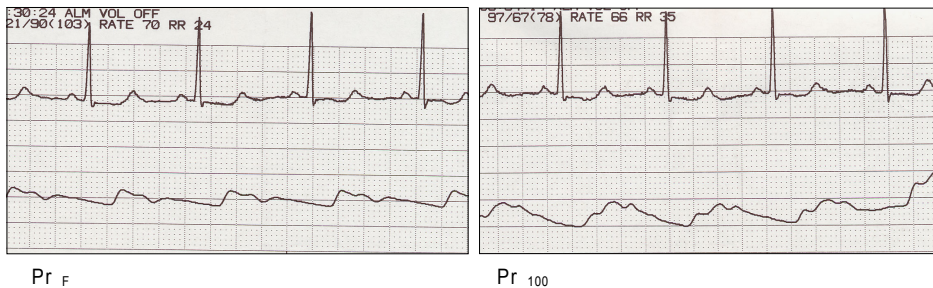


Fig. 4. Pressure wave form in native AVF and PTFE graft.

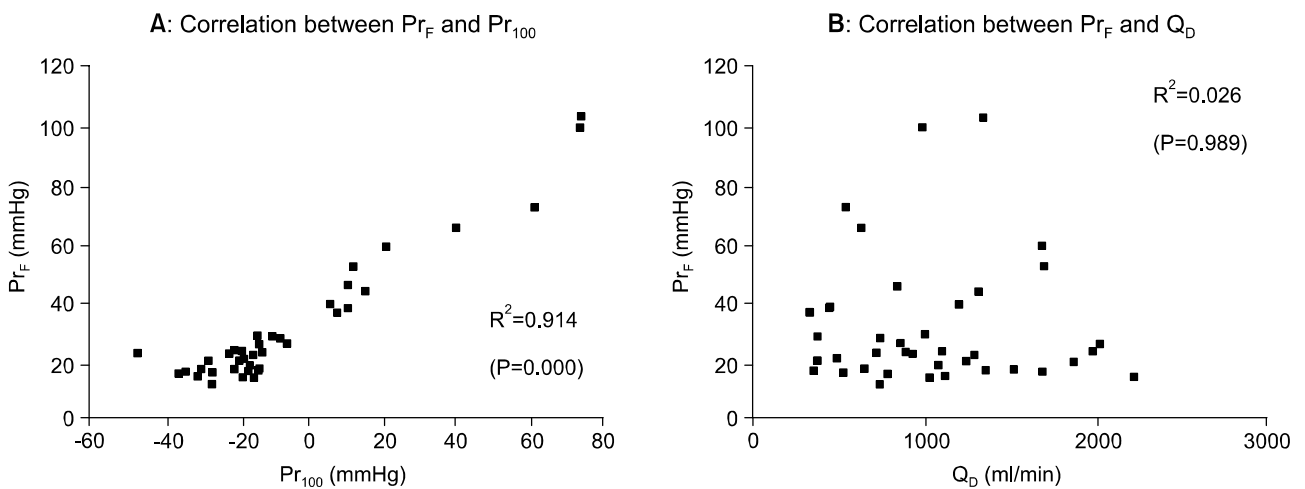


Fig. 5. Comparisons of vascular conduit pressure and Doppler flow rate.

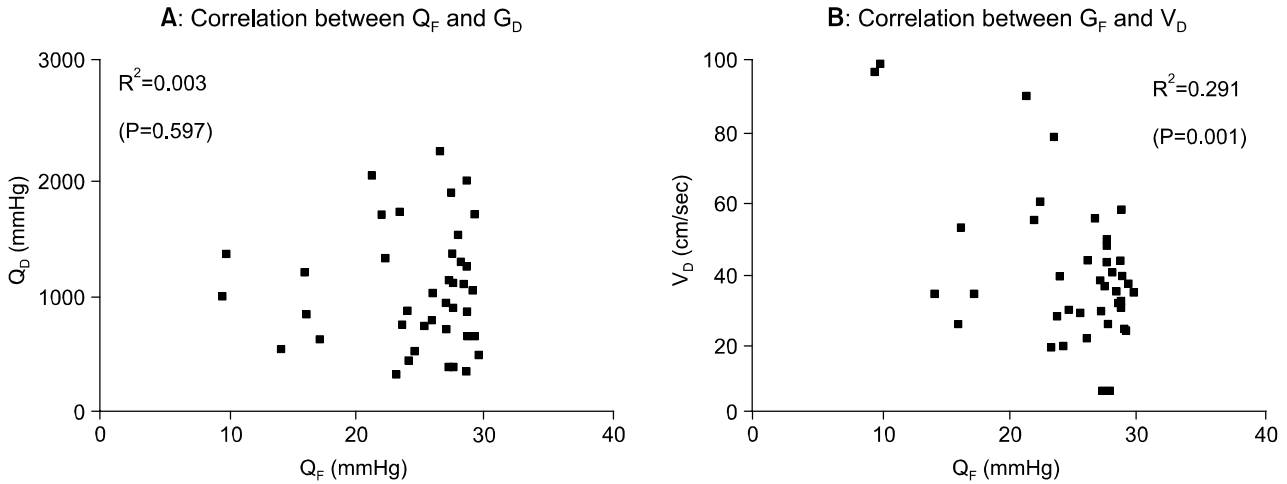


Fig. 6. Comparisons of vascular conduit flow rate (Q_F) and internal AVF flow rate (Q_D) or velocity (V_D).

Table 2. Results of pressure and flow rate measurement

	First	Second	p-value**
Pr_F^* (mmHg)			
Radial A. (n=15)	21.1±7.7	23.8±8.0	0.078
Brachial A. (n=5)	54.6±31.8	54.9±35.5	0.122
	P=0.007***	P=0.000***	
Pr_{100}^\dagger (mmHg)	-7.3±26.6	-5.1±29.0	0.363
$Pr_F > Pr_0^\ddagger$		15 (75%)	
Q_F^\S (ml/min)	24.3±5.5	25.1±5.1	0.262
Q_D^\parallel (ml/min)	952.5±435.6	1112.0±566.0	0.031
$Q_D < 600$ ml/min	3 (15%)	5 (25%)	
$Q_D > 20\%$ decrement		2 (10%)	
V_D^\P (cm/sec)	36.6±20.4	43.5±22.1	0.043

* Pr_F = intravascular conduit pressure free from dialysis machine;
 $^\dagger Pr_{100}$ =intravascular conduit pressure with pump flow rate on 100 ml/min; $^\ddagger Pr_0$ = intravascular conduit pressure with pump off; $^\S Q_F$ = intravascular conduit flow rate calculated with Pr_F and mean arterial pressure; $^\parallel Q_D$ = internal AVF flow rate measured with Doppler ultrasound; $^\P V_D$ = internal AVF velocity measured with Doppler ultrasound

P-value was calculated by paired t-test; *P-value was calculated by student t-test

(75%)이었다. 두 번의 투석관내의 압력과 평균 동맥압의 측정에서 계산된 Q_F 은 각각 24.3±5.5 ml/min와 25.1±5.1 ml/min로 통계적으로 유의한 차이는 없었다(P=0.262). 그러나 Q_D 과 V_D 은 두 번의 측정에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(P<0.05). Q_D 가 600 ml/min 이하인 환자는 각각 3명과 5명이었다(Table 2).

Table 3. Results of flow decrement patients

Pt.	Type*	Q_D (%)	Q_F (%)	Venous Pr. (mmHg)	Fate [†]
1	n	-25.0 [‡]	+3.2 [§]	72	N
2	n	-28.7	-12.3	80	S
3	n	-11.3	-9.8	130	S
4	g	+26.8	-10.0	146	T
5	g	-14.5	-18.1	78	T

*Type: g = PTFE graft; n = native vessel; [†] Fate: T = Thrombosis; S = Stenosis; N = No abnormality; [‡] : flow decrement; [§]: flow increment

5) 혈류량 감소 환자의 결과

두 번의 측정 결과 Q_F 가 10% 이상 감소한 환자는 3명이었고, 1명은 9.8% 감소를 보였다. Q_D 의 측정에서 25% 이상의 혈류량 감소를 보인 환자는 3명이었다(Table 3). 2명의 인조 혈관을 가진 환자는 2차 측정 후 1주일 내에 혈전에 의한 완전 폐색을 일으켰다. 이들 중 한 명의 환자에서는 2차 측정에서 오히려 Q_D 가 증가한 소견을 보였으나 Q_F 는 두 환자에서 모두 10% 이상 감소하였다. 나머지 3명의 환자에서 혈관 조영술을 시행한 결과 Q_F 와 Q_D 가 모두 감소한 2명의 환자에서 정맥의 협착 소견이 발견되었고, Q_F 는 감소되지 않고 Q_D 의 감소만 보인 한 명의 환자에서는 이상 소견을 관찰할 수 없었다(Fig. 7). 두 명의 환자를 제외한 나머지 환자에서 연구 기간 동안 내동정맥루내의 혈전 형성에 의한 폐색을 일으킨 환자는 없었다.

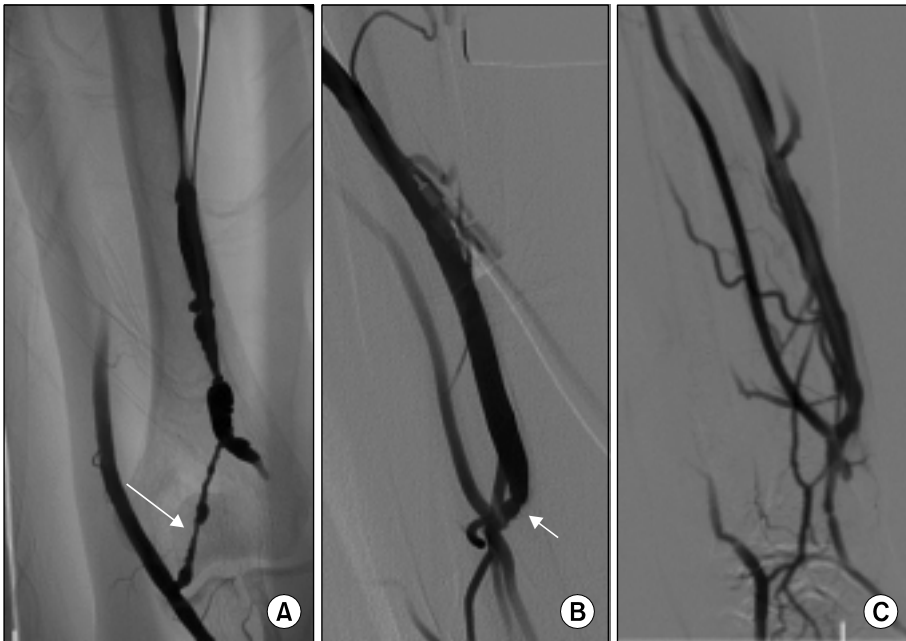


Fig. 7. Angiographic findings of patients with flow decrement. (A) Long segment of venous stenosis was detected in a patient with 28.7% decrement of Q_D and 12.3% decrement of Q_F , (B) Stenosis was detected in a patient with 11.3% decrement of Q_D and 9.3% decrement of Q_F around anastomosis site, (C) No abnormal finding was detected in a patient with 25.0% decrement of Q_D but no decrement of Q_F .

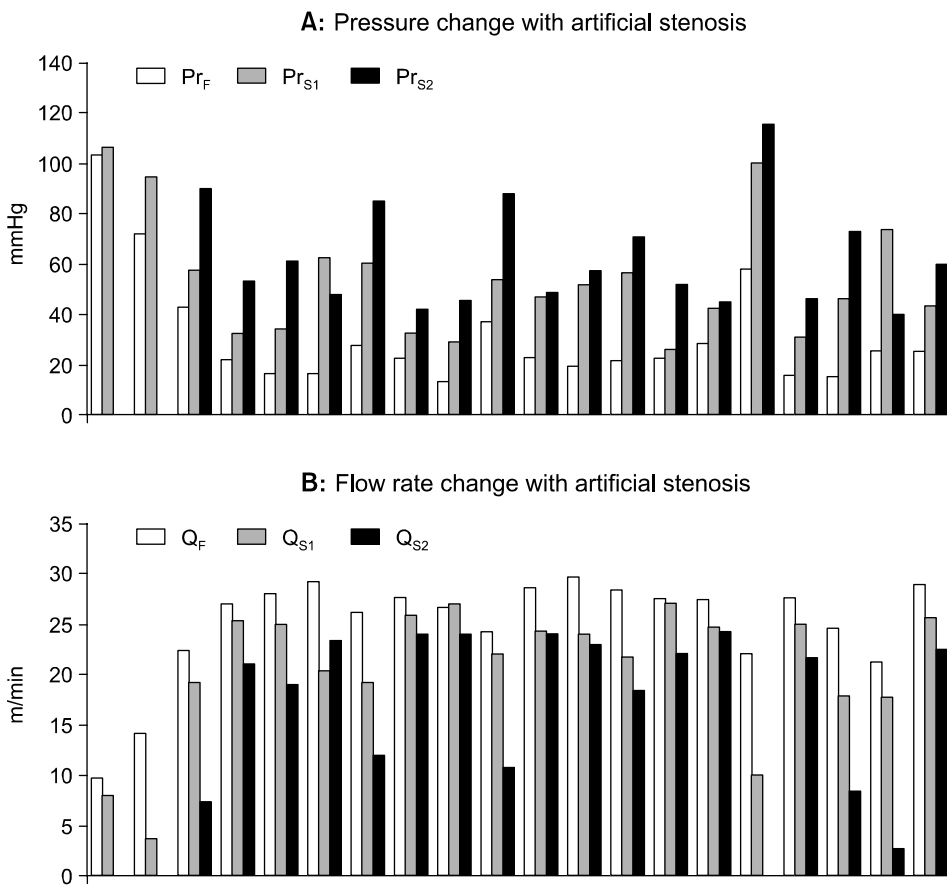


Fig. 8. Pressure and flow rate change in hemodialysis vascular conduit with artificial stenosis. (A) Pressure change with artificial stenosis, (B) Flow rate change with artificial stenosis.

6) 내동정맥루의 인위적 협착 유발 시 투석관내 압력과 혈류량의 변화

모든 환자에서 지혈대로 인위적 협착 유발 시 투석관내의 압력(Pr_{S1} , Pr_{S2})은 증가하였고(Fig 8A), 계산된 투석관내 혈류량(Q_{S1} , Q_{S2})은 감소하였다(Fig. 8B). 동맥 천자 부위와 정맥 천자 부위 사이를 결찰 시보다 정맥 천자 상부를 결찰 하였을 경우 투석관내 압력이 더욱 증가 되며, 혈류량이 더 감소되는 것으로 관찰되었으나 정확한 통계적 자료를 제시할 수는 없었다.

고 찰

혈액투석을 위한 내동정맥루는 말기신부전 환자에게 생명선과 같이 매우 중요한 역할을 하는 만큼 이의 기능 부전은 많은 의료 비용의 발생과 이환율을 증가시킨다. 그러므로 내동정맥루 기능의 정기적 평가는 반드시 필요하며, 이를 통한 기능 이상의 조기 진단과 적절한 중재술이 강조된다. 조기 진단을 위한 정기적 평가에는 여러 가지 방법이 있었으나, 경제성, 반복성, 편리성, 정확성, 비침습성 등 이상적 방법이 갖추어야 할 조건들을 모두 충족하는 방법은 찾기 힘들다.

비교적 경제적이고 간편한 비침습적 방법인 도플러 초음파를 이용한 내동정맥루 혈류 측정을 통한 기능평가와 협착, 폐색 등을 조기 진단하고자 하는 노력들이 많이 보고되고 있다(9-14). 도플러 초음파 검사에 의한 혈류 검사는 비침습적인 혈역동 검사법으로 혈류에 민감한 특성으로 인하여 다양한 혈류 이상 질환에 이용할 수 있는데, 주로 혈류 속도를 측정하거나 도플러 스펙트럼을 분석하여 혈관의 협착 정도 등을 평가하고 있다. 도플러 초음파 검사에 의한 혈류량 측정은 측정 부위에 따라서 혈류의 속도와 혈류량의 차이가 나고, 심장주기가 일정하지 않거나, 환자의 자세 변화에 따라서 측정치가 일정하지 않을 수 있으므로 여러 번 측정하여야 한다. 따라서 검사 시간이 길어지고, 검사 시행자에 대한 장기간의 훈련과정이 필요하다(15,16).

관류의 정확한 유량을 측정하기 위해서는 관의 한 끝을 개구하여 단위시간 동안 관을 통해 흘러 나오는 유체를 받아 그 양을 측정하면 될 것이나, 실제로 환자를 대상으로 한 생체 내 연구에서 이러한 측정법은 불가능하다. 본 연구에서는 베르누이 방정식을 이용하여 혈액 투석 중인 환자에서 혈류량을 구하고자 하였다. 관경이 일정한 상태에서는, 관류의 유속을 구하고 여기에 도관의 단면적을 곱하면 단위 시간당 유량을 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 관류를 이루고 있는 유체가 점성에 의한 마찰력, 전단응력 등이 존재하지 않는 이상 유체일 경우에만 정확한 측정값을 구할 수 있을 것이다. 혈액이 갖는 점성은 여러 요소에 좌우되나, 주로는 적혈구 용적률에 의해 결정되는데(17), 이의 변화에

따라 혈류량이 변화할 수 있다. 그러나 실제 투석 환자들의 유지 적혈구 용적률은 크게 변화가 없으므로 이 연구에서는 혈액 투석관내의 혈액의 적혈구 용적률에 의한 혈류량의 변화를 무시하였다.

투석관내 압력의 파형은 요골동맥 압력파와 유사하여 그 최고점이 심전도의 T파와 시간적으로 일치하였다. 인조혈관의 경우 Pr_F 와 Pr_{100} 에서 비교적 완만한 곡선을 보여 자가 혈관과는 차이가 있었고, Pr_{100} 에서도 펌프에 의해 투석관이 압박될 때의 높은 압력 곡선이 그려지지 않아 혈관의 탄력성이 감소되어 있음을 시사하였다.

Pr_F 와 Pr_{100} 사이의 긴밀한 상관 관계는 혈액 투석관내의 혈류량이 내동정맥루 내의 혈류량을 반영한다는 증거가 될 수 있으며, 향후 이들 사이의 정확한 함수관계가 정립되면 Pr_F 의 측정 시 투석관을 투석기에서 분리하는 번거로움을 피할 수 있을 것으로 기대된다.

Q_D 와 Pr_F 의 관계는 음의 상관관계를 나타내었으나 정확히 반비례 관계는 아니었다. 이 현상은 베르누이의 방정식이 관류 내 한 점에서의 위치에너지와 운동에너지의 합이 일정하며, 그 곱이 일정한 값을 갖는 것이 아니기 때문으로 해석된다. 즉 압력과 유속은 역학적으로 반대방향이기는 하나 반비례 관계는 아니기 때문이다.

본 연구에서 Pr_F 와 Pr_0 를 이용하여 Q_F 를 계산하려고 하였으나, Pr_0 가 Pr_F 보다 낮은 값을 보이는 경우가 많았으며, 이 현상은 Sullivan 등(7)의 연구 방법에서 밝혀진 바와 같이 Pr_0 가 혈류 속도가 0 m/sec인 시점의 투석관내 압력을 반영하지 않고, 내동정맥루 내의 혈류에 대한 압력을 반영하는 것으로 설명된다. 따라서 Q_F 의 계산에는 투석관내 유속이 이론적으로 0 m/sec인 시점의 전압을 반대측 팔에서 측정된 평균 동맥압으로 하고 Pr_F 와 함께 베르누이 방정식에 대입하였다. 이때 평균 동맥압은 반대측 팔의 동맥의 상태나 측정 자세, 시간에 따른 차이가 발생할 수 있어 혈류량 계산에 차이를 가져올 수 있을 것이다. 요골동맥을 사용한 경우와 상완동맥을 이용한 내동정맥루의 경우, 투석관내 압력은 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, 이에 대한 보정이 있어야만 환자 내에서의 비교뿐만 아니라 환자간의 비교에도 유용할 것이다. Paun등(12)은 혈액 투석 중에 도플러 초음파를 이용한 내동정맥루의 혈류량의 측정에 관한 연구에서 내동정맥루 내의 바늘의 방향과 위치에 따른 측정값의 차이를 발표하였으며, 본 연구에서도 이와 같은 오차의 발생이 가능하므로, 연구 기간 동안 한 명의 숙련된 간호사가 이전 투석시의 천자 부위에 가장 가까운 위치에 천자하였다.

Q_F 와 Q_D 가 유의한 상관관계가 없는 것으로 나온 것은 두 가지 측정 값의 오차로 생각되나, 오히려 V_D 와의 상관관계가 깊은 것은 도플러 초음파 측정 시 내동정맥루의 내경 측정에 오차가 발생한 것으로 생각된다. 또한 두 번의 도플러 초음파 측정값에서 통계적 차이를 보이는 것은 도플러 초음파를 이용한 혈류 측정의 문제점을 시사하며, 본 연구

방법으로 측정된 압력에서는 통계적 차이가 발견되지 않아 반복성에 대한 신뢰도를 높여준다.

K/DOQI guidelines에 의하면 내동정맥루의 혈류량이 600 ml/min 이하인 경우나, 혈류량 1,000 ml/min 이상이면 4개월 동안 연속 측정 시 25% 이상의 혈류량 감소가 관찰되면 내동정맥루내의 협착이 강력히 의심되며 반드시 혈관 조영술을 하도록 권고하고 있다(18). 1차 측정 시 Q_D 의 값이 600 ml/min 이하인 3명의 환자에 대해 연구 시작 초기에 혈관 조영술을 하지는 못하였고, 이 중 두 명의 환자는 2차 측정에서 Q_D 가 증가된 소견을 보였다. 2차 측정 후 완전 폐색을 일으킨 인조혈관을 가진 두 명 중에서 한 명은 Q_D 가 두 차례의 측정에서 14.5% 감소하였고 다른 한 명은 오히려 26.8% 증가하였다. 또한 정맥 챔버내의 압력도 한 명은 146 mmHg로 높았으나 다른 한 명은 78 mmHg로, K/DOQI guidelines에서 이상 소견을 의심할 수 있는 압력으로 제시한 125 mmHg 보다 낮은 값을 보였다. 이는 초음파 검사에 의한 혈류량 측정이 동정맥루 폐색 등의 임상적 상황과 일치하지 않고 있다는 것을 보여주고 있다. 반면 Q_F 의 계산에서는 내동정맥루 폐색이 일어난 두 명의 환자 모두 10% 이상의 감소를 보였다. Q_D 의 측정에서 25% 이상의 혈류량 감소를 보인 환자는 2명이었으며, 이들은 Q_F 에서 각각 12.3%의 감소와 3.2%의 증가를 보였고, 혈관 조영술 결과 Q_D 및 Q_F 가 모두 감소한 환자에서는 협착을 발견하였으나 Q_D 는 감소하고 Q_F 는 증가한 환자에서는 이상 소견을 관찰할 수 없었다. 혈관 조영술에서 문합부 상방의 협착이 발견된 환자에서 Q_D , Q_F 모두 감소하기는 하였으나, Q_D 의 감소 정도는 K/DOQI guidelines의 기준에 달하지 못했다.

내동정맥루의 협착 발생 시 투석관내의 압력과 혈류량의 변화를 알아보기 위해 지혈대를 이용하여 두 곳을 결찰하여 인위적인 협착을 유발하여 실험한 결과, 모든 환자에서 투석관내 압력의 증가와 혈류량의 감소를 관찰할 수 있었으며, 실제 내동정맥루내의 협착 발생 시에도 같은 결과가 나타날 것으로 생각된다. 아쉬운 점은 인위적 협착 유발 시 내경의 협착 정도를 같이 측정하지 못한 점이며, 향후 협착 정도에 따른 투석관내의 압력 증가 및 혈류량 감소 정도에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

결 론

혈액 투석관내의 압력 측정과 이를 근거로 하여 계산한 투석관내의 혈류량은 내동정맥루 내의 혈류량을 반영하며, 내동정맥루 내의 기능 이상에 의한 혈류량 변화는 혈액 투석관내의 간단한 압력 측정으로 발견할 수 있다. 이 방법은 간편하고 경제적인 방법으로 매 투석 때마다 침상 옆에서 측정하여 비교할 수 있다. 본 연구의 결과를 종합해 보면 도플러 초음파에 의한 혈류 측정이나 정맥 챔버 내의 압력 측정에 의한 방법보다는 투석관내의 압력 측정에 의한 혈

류량 계산이 내동정맥루의 감시에 더 유용하다고 할 수 있다. 그러나 이 측정 방법의 임상적 유용성과 정확도의 평가를 위해서는 생체 외에서 가상 모델 실험을 통한 상수의 보정과 장기적인 임상적 자료의 수집 및 통계 분석이 필요하다고 생각된다.

REFERENCES

- Schwab SJ, Raymond FR, Saeed M, Newman GE, Dennis PA, Bollinger RR. Prevention of hemodialysis fistula thrombosis. Early detection of venous stenosis. *Kidney Int* 1989;36:707-711.
- Levy SS, Sherman RA, Noshier JL. Value of clinical screening or detection of asymptomatic hemodialysis vascular access stenosis. *Angiology* 1992;43:421-424.
- Sands JJ, Miranda CL. Prolongation of access survival with elective revision. *Clin Nephrol* 1995;44:334-337.
- Palder SB, Kirkman RL, Whittemore AD, Hakim RM, Lazarus JM, Tilney NL. Vascular access for hemodialysis. Patency rate and results of revision. *Ann Surg* 1985;202:235-239.
- Besarab A, Sullivan KL, Ross R, Moritz M. Utility of intra-access monitoring in detecting and correcting venous outlet stenosis prior to thrombosis. *Kidney Int* 1995;47:1364-1373.
- Besarab A, Al-Saghir F, Alnabhan N, Lubkowski T, Frinak S. Simplified measurement of intra-access pressure. *Am Soc Artif Organ J* 1996;42:M682-687.
- Sullivan KL, Besarab A, Bonn J, Shapiro MJ, Gardiner GA, Moritz MJ. Hemodynamics of failing dialysis grafts. *Radiology* 1993;186:867-872.
- Besarab A, Dorrell S, Moritz M, Michael H, Sullivan K. Determinants of measured dialysis venous pressure and its relationship to true intra-access venous pressure. *Trans Am Soc Artif Intern Organs* 1991;37:M270-271.
- Schwab SJ, Oliver MJ, Suhocki P, McCann R. Hemodialysis arteriovenous access: detection of stenosis and response to treatment by vascular access blood flow. *Kidney Int* 2001;59(1):358-362.
- Begin V, Ethier J, Dumont M, Leblanc M. Prospective evaluation of the intra-access flow of recently created native arteriovenous fistulae. *Am J Kidney Dis* 2002;40(6):1277-1282.
- 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(6):554-557.
- Paun M, Beach K, Ahmad S, Hickman R, Meissner M, Plett C, Strandness DE Jr. New ultrasound approaches to dialysis access monitoring. *Am J Kidney Dis* 2000;35(3):477-481.
- Robbin ML, Chamberlain NE, Lockhart ME, Gallichio MH, Young CJ, Deierhoi MH, et al. Hemodialysis arteriovenous fistula maturity: US evaluation. *Radiology* 2002;225(1):59-64.
- Nonnast-Daniel B, Martin RP, Lindert O, Mugge A, Schaeffer J, vd Lieth H, et al. Colour Doppler ultrasound assessment of

- arteriovenous haemodialysis fistulas. *Lancet* 1992;339(8786):143-145.
- 15) Myer JI, Khalil RM, Obuchowski NA, Baus LK. Common carotid artery: variability of Doppler US velocity measurement. *Radiology* 1997;204:339-341.
- 16) Westra SJ, Levy DJ, Chaloupka JC, Hill JA, Robert JM, Sayre JW, et al. Carotid artery volume flow: in vivo measurement with time-domain-processing US. *Radiology* 1997;202:725-729.
- 17) Berga L, Dolz J, Vives-Corrans JL, Feliu E, Rozman C. Viscometric methods for assessing red cell deformability and fragmentation. *Biorheology* 1984;1(Supp 1):297s-301s.
- 18) National Kidney Foundation: Kidney Disease Outcomes Quality Initiative(NKF K/DOQI). Clinical practice guidelines for vascular access. *Am J Kidney Dis* 2001;37(Suppl 1):s137-s181.
-