

도플러 초음파를 이용한 인공판막 상하의 압력차 측정에 관한 연구

— 승모판막 치환에 사용한 Duromedics 인공판막과
정상인의 승모판막과의 비교연구 —

진 성 훈* · 서 경 필*

— Abstract —

**Noninvasive Assessment of Pressure Gradients across Prosthetic Heart Valve
by Doppler Ultrasound**

**— A comparative study of the Duromedics Bileaflet Valves in mitral position
and Normal Mitral Valves —**

Sung Hoon Jin, M.D.* and Kyung Phill Sub, M.D.*

Doppler echocardiography provides valuable information regarding prosthetic heart valve function rather than structure.

There are three methods of expressing the severity of mitral valve obstruction: the transvalvular pressure gradient, effective valve area, and pressure half-time. Of these, the transvalvular pressure gradient (Δp) can be determined by the measurement of maximum transvalvular blood flow velocity (V) according to the modified Bernoulli's equation ($\Delta p = 4V^2$).

Eleven patients, who underwent mitral valve replacement with Duromedics mechanical prostheses, and 17 normal persons were investigated.

There were significantly higher calculated pressure gradients in prosthetic than normal mitral valves ($9.10 \pm 2.22 \text{ mmHg}$ vs. $3.26 \pm 0.99 \text{ mmHg}$; $p < 0.01$), and there was a inverse relationship between pressure gradient and prosthetic valve size ($11.17 \pm 0.96 \text{ mmHg}$ in size 27mm and 29mm vs. $7.38 \pm 1.12 \text{ mmHg}$ in size 31mm and 33mm; $r = 0.85$, $p < 0.01$).

The noninvasive Doppler technique should be useful in the diagnosis of prosthetic valve obstruction.

I. 서 론

지금으로부터 20여년전 인공판막이 나옴으로써 심장

판막질환의 치료에 비약적인 도약이 이루어지게 되었다.
그 인공판막의 사용이 증가함에 따라 그 기능이 잘 되는지 여부에 대한 평가방법의 필요성 또한 높아져 왔으나, 심도자술과 같은 판형적인 방법이 사용되어 왔을 뿐 만족스러운 방법을 찾지 못하고 있던 실정이었다. 그러나, 심에코법이 그 평가방법에 응용됨으로써 그 문제가 해결되게 되었으며, 이와 같은 비판형적인 방법이 보다 바람직하다는 것은 주지의 사실이다¹⁾.

* 서울대학교 의과대학흉부외과학교실

* Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery,
College of Medicine, Seoul National University
1987년 5월 30일 접수

비관절적 방법중 M-형 심에코법이나 이면적 심에코법은 인공판막의 구조를 검사하는데 유용하나^{2~11)}, 최근에 나온 도플러 심에코법은 심장내부나 대혈관내의 혈류속도를 측정함으로써 구조보다는 인공판막의 기능을 직접적이고 정확하게 알려주고 있다^{12~20)}.

도플러 심에코법을 이용하여 승모판막의 기능을 평가하는 방법에는 판막 상하의 압력차^{1,12,20)}, 판막의 유용 단면적(effective valve area)¹⁹⁾ 및 압력 반감기(pressure half-time)¹⁴⁾등이 있다. 저자는 이중 압력과 속도의 관계를 밝힌 Bernoulli 공식^{12,13,21,22)}을 이용하여 판막 상하의 압력차를 측정하는 방법을 택하여, 정상인의 승모판막과 승모판막 치환에 사용한 Duromedics 인공판막* 상하의 압력차를 측정하였으며, 이 두 판막간 및 인공판막 크기에 따른 압력차의 차이를 밝히고자 하였다.

* Duromedics Bileaflet Valve: manufactured by Hemex Scientific Inc. in Austin, Texas U.S.A.

II. 대상 및 방법

1. 대상

1) 정상군(Table 1)

청진상 심잡음이 없고 일견 건강해 보이는 18세에서 63세 사이의 남자 5명과 여자 12명 총 17명의 정상인을 대상으로 하였다.

2) 환자군(Table 2)

한미병원* 흉부외과에서 1986년 6월부터 8월까지 3개월간 Duromedics인공판막으로 승모판막을 치환한 14세에서 50세 사이의 남자 4명과 여자 7명 총 11명의 환자를 대상으로 하였으며, 이중 인공판막크기 27mm를 넣은 환자가 3명, 29mm 2명, 31mm 5명, 33mm 1명 등이 있었다.

수술시 인공판막의 추축이 심실중격에 수직이 되게 하

* 경기도 성남시 소재, 1987년 4월 15일부로 '인하병원'으로 개명

Table 1. Normal Group

Serial no. of normal person	Sex	Age	V* (m/sec)			$\Delta P^{**}(\text{mmHg})$
			1st	2nd	mean	
1	F	18	0.95	0.95	0.95	3.61
2	F	19	0.95	0.92	0.94	3.53
3	F	20	1.03	1.03	1.03	4.24
4	F	29	0.86	0.86	0.87	3.03
5	F	29	1.00	0.97	0.99	3.92
6	M	29	0.69	0.69	0.69	1.09
7	M	31	1.08	0.97	1.03	4.24
8	M	34	0.64	0.64	0.64	1.64
9	F	39	0.95	1.05	1.00	4.00
10	F	43	0.85	0.95	0.90	3.24
11	F	43	1.15	1.15	1.15	5.29
12	M	47	0.95	0.97	0.96	3.69
13	M	48	0.92	0.90	0.91	3.31
14	F	49	0.74	0.62	0.68	1.85
15	F	57	0.69	0.74	0.72	2.07
16	F	58	0.77	0.85	0.81	2.62
17	F	63	0.87	0.92	0.90	3.24
Mean \pm SD***			38.6 \pm 14.0			0.89 \pm 0.14
						3.26 \pm 0.99

* V = maximum velocity distal to mitral valve

** ΔP = pressure gradient across mitral valve

***SD = standard deviation

Table 2. Patient Group

Serial no. of patient	Sex	Age	Valve Size (mm)	Associated Procedure	V(m/sec)			ΔP (mmHg)
					1st	2nd	mean	
1	F	50	27		1.61	1.74	1.68	11.29
2	M	14	27		1.64	1.72	1.68	11.29
3	F	29	27		1.61	1.69	1.65	10.89
4	F	48	29	AVR	1.77	1.77	1.77	12.53
5	F	17	29		1.54	1.59	1.57	9.86
6	M	39	31	TAP	1.41	1.46	1.44	8.29
7	F	31	31		1.31	1.38	1.35	7.29
8	F	37	31		1.20	1.23	1.22	5.95
9	M	19	31	AVR	1.44	1.49	1.47	8.64
10	F	37	31		1.41	1.41	1.41	7.95
11	M	34	33		1.24	1.24	1.24	6.15
Mean \pm SD		32.3 \pm 11.9			1.50 \pm 0.19			9.10 \pm 2.22

* AVR = Aortic Valve Replacement

** TAP = Tricuspid Annuloplasty

였고, 송모판막 치환 외의 다른 수술조작을 한 경우는 대동맥판막 치환이 2예, 삼첨판막윤 성형술이 1예 등 총 3예가 있었다.

수술사망자는 없었으며, 수술후 합병증으로 일시적인 경련이 1예, 급작스러운 심정지가 1예 있었으나

모든 환자에서 수술후 제 7일에서 제 10일 사이에 도플러 심에코를 실시하였다.

2. 측정 방법

주파수 2.5 MHz를 주기형 방식(pulsed mode)과 지속형 방식(continuous mode)으로 방출이 모두 가능한 Color Doppler (Model : Aloka SSD-880-CW) 초음파 기계를 사용하였다.

측정 대상자를 양외위 및 좌측외위 위치로 하여 탐촉자를 심첨부 위에 놓고, 우선 주기형 방식으로 송모판막을 통한 혈류방향이 탐촉자에서 방사된 초음파의 방향과 일치되게 한 후, 채취부위에서의 반향 초음파에 의한 혈류속도를 측정했다. 그러나 주기형 방식으로 측정될 수 있는 최고 혈류속도는 본 기계의 경우 1.22 m/sec 이기 때문에 그 한계를 넘어서 대부분의 환자군에서는 지속형 방식으로 최고 혈류속도를 재측정하였다.

최고 혈류속도는 SSZ-95 기록계를 이용하여 심전도와 함께 50mm/sec의 속도로 기록된 반향 초음파로부터

터 측정하였다(Fig. 1, 2).

3. 계산공식 및 통계적 처리

자 측정 대상자에서 두 차례의 도플러 심에코를 실시하여 판막 원위부의 최고 혈류속도를 구한 후, 그 평균을 그 측정 대상자의 최고 혈류속도로 하였으며, 아래의 Bernoulli 변형 공식^{1,12,13,20,21}을 이용하여 송모판막 상하의 압력차를 계산하였다(Table 1, 2).



Fig. 1. Continuous-wave Doppler recording of antegrade transvalvular flow velocity in a normal person (No. 10).

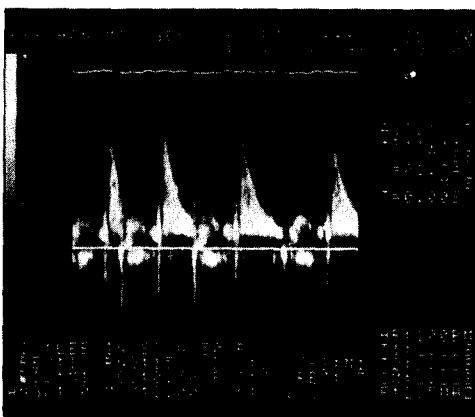


Fig. 2. Continuous-wave Doppler recording of antegrade transprosthetic flow velocity in a patient (No. 1).

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 4V^2$$

ΔP = 판막 상하의 압력차

P_1 = 판막 근위부의 압력

P_2 = 판막 원위부의 압력

V = 판막 원위부의 최고 혈류속도

위의 공식을 통해 구해진 모든 자료의 통계적 분석을 위해 Wilcoxon's rank sum test를 사용하였다.

III. 결 과

1. 정상군과 환자군의 차이

정상군에서 판막 원위부의 평균 최고 혈류속도는 0.89 ± 0.14 m/sec, 승모판막 상하의 평균 압력차는 3.26 ± 0.99 mmHg였으며, 환자군에서는 각각 1.50 ± 0.19 m/sec, 9.10 ± 2.22 mmHg를 보여(Table 3), 정상 군과 환자군의 압력차는 유의한 차이를 나타내어 ($p < 0.01$), 환자군에서 압력차가 더 큰 결과를 보였다(Fig. 3).

Table 3. Measurement Result

	No. of subject	V (m/sec)	ΔP (mmHg)
Normal Group	17	0.89 ± 0.14	3.26 ± 0.99
Patient Group	11	1.50 ± 0.19	9.10 ± 2.22
MVR with smaller size (27 & 29mm)	5	1.67 ± 0.07	11.17 ± 0.96
MVR with larger size (31 & 33mm)	6	1.36 ± 0.10	7.38 ± 1.12

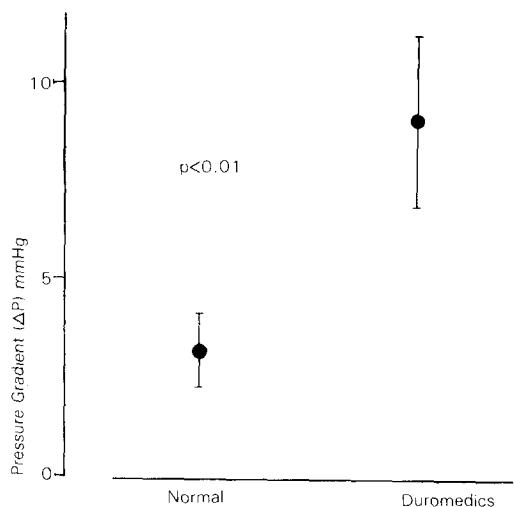


Fig. 3. Doppler pressure gradients across normal and Duromedics mitral valves (mean \pm SD).

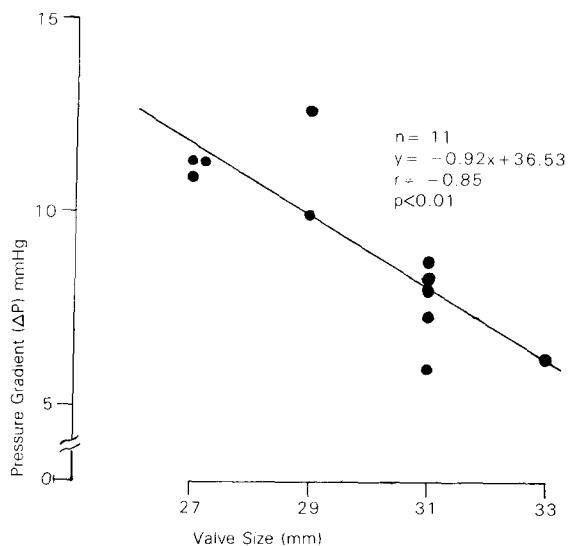


Fig. 4. Relationship of Doppler pressure gradient to valve size in Duromedics prostheses.

2. 인공판막 크기에 따른 차이

환자군에서 인공판막 크기에 따라 판막 상하 압력 차의 차이를 보였다.

즉, 인공판막 크기 27mm와 29mm를 넣은 환자에서 평균 최고 혈류속도 1.67 ± 0.07 m/sec, 평균 압력 차 11.17 ± 0.96 mmHg를 보였고, 31mm와 33mm를 넣은 환자에서 각각 1.36 ± 0.10 m/sec, 7.38 ± 1.12 mmHg를 보여(Table 3), 전자와 후자의 압력차는 유

의한 차이를 나타내어 ($r = -0.85$, $p < 0.01$), 작은 크기의 판막을 넣은 환자에서 더 큰 압력차를 보였다 (Fig. 4).

IV. 고 찰

도플러 심에코가 나오기 전 과거에는 심장판막 상하의 압력차를 측정하기 위해서는 관혈적인 심도자출에만 의존할 수밖에 없었다. 그러나 이 심도자출은 많은 경비와 시간이 소요되고, 여러 합병증을 야기시킬 가능성 이 있으며, 사용 시약의 용량 한계가 있어 반복적이고 보편적으로 쓰일 수가 없었다²⁰.

그러던 중 최근 비관혈적인 도플러 심에코가 나옴으로써, 위의 단점이 없어지게 되었고 심도자출로 해서 얻은 결과와 거의 같은 심장판막 상하의 압력차 측정이 가능하게 되었다^{20~24}. 실제 Hatle¹² 등은 에너지 평형 공식에 따른 비생체 실험연구¹⁹를 인간에 적용하여, 도플러로 측정된 결과가 심도자출로 측정된 결과와 잘 일치한다는 사실을 증명하였다. 그들은 압력과 속도의 관계를 밝힌 Bernoulli 공식, 즉 $\Delta P = P_1 - P_2 = 4(V_2^2 - V_1^2)$ *을 보통 1m/sec 미만인 판막 근위부의 최고 혈류 속도(V_1)를 무시한 $\Delta P = 4V_2^2$ 으로 단순화시켜, 판막 원위부의 최고 혈류속도(V_2)만을 측정함으로써 ΔP 를 계산해 낼 수 있게 하였다.

이 공식으로 구해진 ΔP 는 판막 근위부의 최고 혈류 속도를 무시하였기 때문에 실체치보다 약간 높게 나오게 되나, 이와 같은 오차는 모든 계산에 있게 되어 ΔP 치의 상호 비교함에 있어서는 아무 문제가 되지 않는다. 따라서 혈류속도를 측정할 수 있는 적합한 장비, 즉 도플러 심에코를 이용하여 정상 및 인공판막 상하의 압력 차의 양적 측정은 가능한 것이 된다²⁰.

본 연구에서 정상 군의 승모판막 원위부의 평균 최고 혈류속도는 0.89 ± 0.14 m/sec로서 Benchimol²⁵ 등이 밝힌 정상인의 평균치 0.9 m/sec(정상 범위: $0.6 \sim 1.3$ m/sec)와 잘 일치되고 있어, 정상 군의 승모판막 상하의 평균 압력차 역시 잘 일치된다고 볼 수 있다.

그러나 승모판막 치환에 사용된 여러 가지의 인공판막 상하의 압력차 측정치는 보고자에 따라 꽤 차이를 보이고 있다 (Table 4).

Holen^{23,24} 등은 Bjork-Shiley 기계판막의 경우 $3 \sim 11$ mmHg, Hancock 조직판막의 경우 $3.5 \sim 8$ mmHg의

Table 4. Doppler data of transprosthetic pressure gradient for various mitral valve prostheses.

Reporter	Type & Size (mm)	ΔP (mmHg)
Holen	Björk-shiley*	3 ~ 11
	Hancock*	3.5 ~ 8
Hatle	Björkshiley (27, 29, 31)	2 ~ 4
	Hall-Kaster (29)	2 ~ 4
Burckhardt	Hancock (27)	5 ~ 7
	Carpentier-Edwards (29, 31, 33)	5 ~ 7
Kwan	St. Jude (25, 27, 29, 31)	5.4 ± 0.8
	Björk-shiley (27, 29, 31)	$8.2 \pm 1.$
Watson	procine tissue valve*	
	Björk-shiley Starr-Edwards	9.4 ± 2.3
Watson	Duromedics (27, 29, 31)	9.9 ± 2.8

* : size unspecified.

압력차를 보인다고 보고하였으며, Hatle²¹ 등은 Bjork-Shiley 및 Hall-Kaster 기계판막의 경우 $2 \sim 4$ mmHg, Hancock 및 Carpentier-Edwards 조직판막의 경우 $5 \sim 7$ mmHg의 압력차를 보인다고 보고하면서, 이 수치는 심도자출의 결과와 잘 일치하며 운동시 $15 \sim 20$ mmHg로 상승한다고 보고하였다.

Burckhardt²⁶ 등은 St. Jude 기계판막의 경우 5.4 ± 0.8 mmHg, Bjork-Shiley 기계판막의 경우 8.2 ± 1.1 mmHg로 보고하면서, St. Jude의 경우는 그렇지 않으나 Bjork-Shiley의 경우 판막크기에 따라 압력차의 차이를 보여 작은 판막에서 더 높은 압력차를 보였다고 보고하였다 ($r = -0.42$).

또한, Kwan²⁷ 등은 돼지판막으로 만든 조직판막 및 Bjork-Shiley와 Starr-Edwards 기계판막의 경우 9.4 ± 2.3 mmHg로 보고하였으며, Watson²⁸ 등은 본 연구의 환자군에게 사용했던 것과 같은 Duromedics 기계판막의 경우 9.9 ± 2.8 mmHg로 보고하였다.

이상의 보고에서 보듯이 모든 인공판막은 그 본질상 어느 정도 혈류의 장애를 일으키며, 인공판막 중 기계판막과 조직판막간에 큰 차이는 없는 것으로 생각할 수 있겠다. 또한, Holen과 Hatle 등이 보고한 수치와 본 연

* V_1 = 판막 근위부의 최고 혈류속도

V_2 = 판막 원위부의 최고 혈류속도

구 및 Kwan 과 Watson 등이 보고한 수치에는 상당한 차이가 있는데, 이는 다음의 이유로 후자들의 높은 수치가 타당하리라 생각된다. 즉, 도플러 초음파에 의한 압력차 측정치는 사실은 판막 원위부의 최고 혈류 속도로 구한 압력차의 최고치(peak)의 평균인 반면에, 심도자술에 의한 압력차는 이완기의 좌심방과 좌심실의 평균 압력을 구해서 그 차를 압력차로 하기 때문에, 후자들의 보고에서와 같이 도플러 측정치가 심도자술의 것보다 더 높은 것이 오히려 타당하리라 본다^{1,27)}.

본 연구의 대상이었던 Duromedics 인공판막은 세계적으로 그 첫 사용이 1982년 3월로서²⁸⁾ 그 사용 경험이 아직 짧고 그에 대한 보고도 적기 때문에, 현재로선 다른 인공판막과 비교 분석하기란 때가 좀이른 감이 있다고 보나, 적어도 판막의 기능을 판단하는 하나의 방법으로서 판막 상하의 압력차 측정을 놓고 볼 때, Watson등의 보고나 본 연구의 결과로 미루어 다른 인공판막과 큰 차이는 없으리라 예상할 수 있겠다.

본 연구에서와 같이 Duromedics 인공판막의 크기에 따라 압력차의 차이가 있어 큰 판막의 경우 압력차가 적은 것은 당연하다고 볼 수 있으나, 판막의 크기 이외에 압력차의 영향을 미칠 수 있는 요소로서 환자의 크기 및 심박출량을 들 수 있어²¹⁾, 인공판막 상하의 압력차라는 것은 보다 더 복합적인 면을 갖고 있다는 사실을 감안해야 할 것으로 생각된다. 또한, Duromedics판막 제작시 27mm(orifice area ; 3.58 cm²)를 제외한 29, 31 및 33mm의 판막이 꽤 같은 단면적(orifice area ; 4.25 cm²)을 갖게 만들었다고 하나, 위의 요소들의 영향 및 제작시의 단면적이 인공판막의 occluder나 leaflet의 장애 효과 때문에 꽤 유용단면적과 일치하지 않는다는 점을 고려할 때³⁰⁾, 본 연구의 결과와 같이 판막의 크기에 따라 압력차 차이를 보일 수 있다고 본다(Fig. 4 ; r = -0.85, P < 0.01).

그간 비관혈적으로 인공판막의 상태를 보기 위해서는 M-형이나 이면적 심에코법으로 그 구조적인 면밖에는 평가할 수 없었고 그 기능에 관해서는 추측할 뿐이었으나, 도플러 심에코법의 등장으로 앞에서 말한 바와 같이 그 기능 또한 평가할 수 있게 되었다. 그러나, 도플러 측정에 의한 판막 상하의 압력차라는 것은 혈류 속도에 의해 결정되기 때문에 장애의 정도를 표시하는 절대치가 못 된다는 점³⁰⁾과 도플러 측정의 정상치에 대한 보고가 아직 적으며 정상치와 이상치의 구분이 명확히 정립되어 있지 않은 점¹⁾ 및 인공판막의 기능 고장이 아니라더라도 환자와 인공판막간의 부조화(mismatch)와 인

공판막에서 정상적으로 역류가 있을 수 있는 점³¹⁾ 등을 고려할 때, 인공판막 치환을 받은 모든 환자에서 수술후 되도록 빨리 도플러 심에코를 실시하여 기준치(baseline)를 확립해 놓는 것이 바람직하다. 그리하여 이 기준치를 기본으로 하여 치환 후 환자를 추적 관찰할 때 도플러 심에코의 유용성은 매우 크다고 볼 수 있겠다¹⁾.

즉, 심장내부 및 큰 혈관의 혈류속도를 측정할 능력이 있는 도플러 심에코법은 인공판막의 기능을 평가할 수 있는 가장 좋은 방법이며, 구조적인 면의 평가를 위해 M-형이나 이면적 심에코법과 동반하여 사용할 때 인공판막 치환후의 추적 관찰에 만전을 기할 수 있으리라 본다.

V. 결 론

판막의 기능을 평가하는 방법으로 도플러 심에코를 이용하여 판막 상하의 압력차 측정을 택하였다. 17명의 정상인과 Duromedics 인공판막으로 승모판막을 치환한 11명의 환자를 대상으로 승모판막 상하의 압력차를 측정한 결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정상인보다 인공판막 치환수술을 받은 환자에서 더 큰 압력차를 보였다($3.26 \pm 0.99 \text{ mmHg}$ -vs- $9.10 \pm 2.22 \text{ mmHg}$; $P < 0.01$).
2. 인공판막 치환수술을 받은 환자 중 크기가 큰 인공판막(31, 33mm)을 치환받은 환자보다 크기가 작은 인공판막(27, 29mm)을 치환받은 환자에서 더 큰 압력차를 보였다($7.38 \pm 1.12 \text{ mmHg}$ -vs- $11.17 \pm 0.96 \text{ mmHg}$; $r = -0.85$, $P < 0.01$).

REFERENCES

1. Gross CM, Wann LS: Doppler echocardiography in the assessment of prosthetic cardiac valves. In Nanda NC(ed): *Doppler Echocardiography*. New York, Tokyo, Igaku-shoin, 1985, pp293-335.
2. Feigenbaum H: *Echocardiography*, ed 3. Philadelphia, Lea & Febiger, 1981, pp298-315.
3. Horowitz MS, Goodman DJ, Hancock EW, et al: Noninvasive diagnosis of complications of the mitral bioprosthesis. *J Thorac Cardiovasc Surg* 71:450-457, 1976
4. Horowitz MS, Tecklenberg PL, Goodman DJ, et al: Echocardiographic evaluation of the stent mounted aortic bioprosthetic valve in the mitral position: *In vitro* and *in vivo* studies. *Circulation* 54:91-96, 1976.
5. Bloch WN Jr, Felner JM, Wichtliffe C, et al: Echocardiogram of the porcine aortic bioprosthetic valve in the mitral position.

- Am J Cardiol* 38:293-298, 1976.
6. Chendraratna PAN, San Pedro SB: Echocardiographic features of the normal and malfunctioning porcine xenograft valve. *Am Heart J* 95:548-554, 1978.
 7. Alam M, Madrazo AC, Magilligan DJ, et al: M-mode and two-dimensional echocardiographic features of porcine valve dysfunction. *Am J Cardiol* 43:502-509, 1979.
 8. Schapira JN, Martin RP, Fowles RE, et al: Two-dimensional echocardiographic assessment of patients with bioprosthetic valves. *Am J Cardiol* 43:510-519, 1979.
 9. Martin RP, French JW, Popp RL: Clinical utility of two-dimensional echocardiography in patients with bioprosthetic valves. *Adv Cardiol* 27:294-304, 1980.
 10. Alam M, Goldstein S: Echocardiographic features of a stenotic porcine aortic valve. *Am Heart J* 100: 517-519, 1980.
 11. Alam M, Lakier JB, Pickard SD, et al: Echocardiographic evaluation of porcine bioprosthetic valves: Experience with 309 normal and 59 dysfunctional valves. *Am J Cardiol* 52: 309-315, 1983.
 12. Hatle L, Angelsen B: *Doppler Ultrasound in Cardiology. Physical principles and clinical applications*. Philadelphia, Lea & Febiger, 1982.
 13. Hatle L, Brubakk A, Tromsdal A, Angelsen B: Noninvasive assessment of pressure drop in mitral stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* 40:131, 1978.
 14. Hatle L, Angelsen B, Tromsdal A: Noninvasive assessment of atrioventricular pressure half-time by Doppler ultrasound. *Circulation* 60:1096, 1979.
 15. Hatle L, Angelsen B, Tromsdal A: Noninvasive assessment of aortic stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* 43: 284, 1980.
 16. Holen J, Aaslid R, Landmark K, Simonsen S: Determination of pressure gradient in mitral stenosis with a non-invasive ultrasound Doppler technique. *Acta Med Scand* 199:455, 1976.
 17. Hlocean J, Simosn S: Determination of press gradient is mitral stenosis with Dppler echocardiogrpphy. *Br Heart J* 41: 5,299-79.
 18. Lima CO, Sahn DJ, valdes-Cruz LM, Allent HD, Goldberg SJ, Grenadier E, Barron JV: Prediction of the severity of left ventricular outflow tract obstruction by quantitative two-dimensional echocardiographic Doppler studies. *Circulation* 68:348, 1983.
 19. Holen J, Aaslid R, Landamark K, Simonsen S, Ostrem T: Determination of effective orifice area in mitral stenosis from non-invasive ultrasound Doppler data and mitral flow rate. *Acta Med Scand* 210:83, 1977
 20. Goldberg SJ, Allen HD, Marz CR, Flinn CJ: Doppler measurement of pressure gradients. In *Doppler echocardiography*. Philadelphia, Lea & Febiger, 1985, pp113-137.
 21. Hatle L: Combined 2D-echo and Doppler compared to Doppler without imaging. Assessment of prosthetic valves. In Spencer MP(ed): *Cardiac Doppler Diagnosis*. Boston, Nijhoff, 1983, pp327-335.
 22. Requarth JA, Goldberg SJ, Vasko SD, Allen HD: In vitro verification of Doppler prediction of transvalve pressure gradient and orifice area in stenosis. *Am J Cardiol* 53:1369, 1984.
 23. Holen J, Simonsen S, Frøysaker T: An ultrasound Doppler technique for the noninvasive determination of the pressure gradient in the Björk-Shiley mitral valve. *Circulation* 59:436, 1979.
 24. Holen J, Simonsen S, Frøysaker T: Determination of pressure gradient in the Hancock mitral valve from noninvasive ultrasound Doppler data. *Scand J Clin Lab Invest* 41:177, 1981.
 25. Benchimol A, Desser KB, Cartlan JL: Left ventricular blood flow velocity in man studied with the Doppler ultrasound flowmeter. *Am Heart J* 85:294, 1973.
 26. Burckhardt D, Hoffmann A, Amann FW, Grädel E: Noninvasive assessment of pressure gradients across prosthetic heart valves by Doppler ultrasound. In DeBakey ME(ed): *Advances in Cardiac Valves*. Yorke Medical Books, 1983.
 27. Kwan OL, Handshoe S, Smith M, et al: Application of Doppler flow recordings in the ssessment of prosthetic heart valves. *Circulation* 68(suppl III): III-88, 1983.
 28. Watson DA: An early experience: Hemolysis and Doppler echocardiography results with Duromedics bileaflet valve. In *First International Hemex Symposium on the Duromedics bileaflet valve*. Colorado, Vail, 1985.
 29. Tomeo A: Three years clinical experience with the Duromedics bileaflet valve. In *First International Hemex Symposium on the Duromedics Bileaflet Valve*. Colorado, Vail, 1985.
 30. Holen J: Quantification of flow obstruction in mitral stenosis and prosthetic mitral valves with Doppler ultrasound. In Spencer MP(ed): *Cardiac Doppler Diagnosis*. Boston, Nijhoff, 1983, pp337-342
 31. Dellsperger KC, Wieting DW, Beahr DA, et al: Regurgitation of prosthetic heart valves: Dependence on heart rate and cardiac output. *Am. J Cardiol* 51:321, 1983.