

Study of Doppler Fluid Effects of Carbonated Water in a Bi-directional Flow Phantom Model

Ji-Hye Kim¹, Yeong-Cheol Heo^{1,2,*}

¹Department of Health Science, Graduate School, Eulji University

²Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Eulji University

Received: February 26, 2024. Revised: April 26, 2024. Accepted: April 30, 2024.

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the doppler fluid effects of carbonated water (CBW) in a bi-directional flow phantom model. A bi-directional flow phantom model was chosen to realize arterial and venous flow, and the structure of the inner and outer tanks allowed for fluid circulation and also made the size of the phantom small. Carbonated water (CBW), salt fluid (SAF), sugar fluid (SUF), and distilled water (DW) were used as fluids, and ultrasound scans were performed at depths of 1.5 cm and 3.0 cm from the surface of the tank, using B-mode and color Doppler effects. All fluids tested showed color Doppler effects, but CBW had the highest doppler shift and the least variation with depth. In conclusion, we determined that CBW was the most suitable fluid to be used as a doppler fluid and confirmed that the bubbles dissolved in CBW act as doppler scatterers, just like red blood cells inside human blood. Therefore, it is possible that CBW can be used as a blood-mimicking fluid in doppler ultrasound phantoms through further research, and this study will provide basic data.

Keywords: Flow phantom, Doppler phantom, vascular Doppler, Doppler fluid, Doppler ultrasound

I. INTRODUCTION

인구 고령화와 서구화된 식습관으로 심뇌혈관질환은 사회적으로 중요한 문제로 대두되고 있다. 심뇌혈관질환은 증상이 발생하기 전에 미리 진단하는 것이 사망이나 장애를 예방할 수 있어 조기 진단이 중요하다^[1]. 현재 혈관의 변화를 조기에 발견하기 위한 영상의학 검사에는 투시 조영 장치를 이용한 혈관조영술, 전산화 단층 혈관조영술, 자기공명영상 혈관조영술, 그리고 혈관 초음파 검사 등이 있다. 이 중에서 투시 조영 장치를 이용한 혈관조영술은 정확한 정보와 치료계획을 수립하는 데에 많이 활용되고 있으나 침습적인 방법으로 인해 부작용이 발생할 수 있는 단점이 있다^[2]. 또한, 혈관조영술 시 사용되는 조영제는 알레르기 반응을 일으킬

가능성이 있으며 혈관 영상화를 위해 카테터를 삽입하는 경우 혈관의 손상 위험이 있다^[3]. 비침습적인 검사 방법으로 전산화 단층 혈관조영술이나 자기공명영상 혈관조영술은 혈관을 객관적으로 영상화하여 정밀한 정보를 제공할 수 있어 혈관 검사에서 중요한 비중을 차지한다^[4]. 그러나 전산화 단층 혈관조영술은 X선을 사용하여 혈관 영상을 얻기 때문에 방사선에 노출되며, 장기적으로 방사선 노출에 따른 부작용이 발생할 가능성이 있다^[5]. 자기공명영상 혈관조영술 검사는 검사 시간이 길고 검사 중 소음에 노출되어 불안감을 느낄 수 있으며, 고비용의 단점이 있다. 따라서 선별검사 목적의 혈관 검사법으로는 적절하지 않다^[6]. 반면에 혈관 초음파 검사는 비침습적인 검사법으로서 혈관 내부의 구조와 혈류 상태를 평가하여 혈관의 협착, 폐

* Corresponding Author: Yeong-Cheol Heo E-mail: heoyc@eulji.ac.kr

Tel: +82-31-740-7134

색, 혈전, 동맥류 등 다양한 혈관 질환을 진단할 수 있다^[7]. 검사 방법이 비교적 간단하고 비용이 저렴하여 반복적인 검사가 가능하고 혈관 질환의 조기 발견 및 관리에 적합하다. 방사선을 사용하지 않아 안전하며 도플러 초음파 검사를 통해 혈류의 속도와 방향을 정량적으로 측정하고 이를 통해 혈류 장애나 혈류 순환 이상의 정밀한 검사가 가능하여 혈관 검사의 선별검사로 이용되고 있다^[8,9]. 하지만 혈관 초음파 검사는 실시간으로 영상을 생성하여 해석하기 때문에 검사자의 경험과 기술에 따라 결과의 차이가 발생할 수 있고, 혈류 속도를 측정하는데 여러 요인에 의해 오차가 발생할 가능성이 있다^[10]. 따라서 도플러 초음파 장치의 성능 평가를 위한 정도 관리가 필요하다. 도플러 초음파 장치의 성능 평가를 위해서는 도플러 팬텀을 활용해야 하며 도플러 시프트 효과를 적정히 반영할 수 있는 유체의 개발이 선행되어야 한다. 도플러 유체 연구는 유체의 도플러 시프트 효과의 부족과 복잡한 팬텀 구조, 혈액 모방 유체의 고비용 등으로 연구가 정체되었다^[11]. 하지만 최근 탄산수의 도플러 효과에 대한 연구가 발표되어 도플러 유체로 탄산수의 가능성에 관한 관심이 증가하였다. 선행연구에서는 탄산수의 도플러 유체가능성은 확인하였으나 혈류처럼 흐름이 있는 환경에서의 측정이 아니었기 때문에 유체의 흐름 특성을 반영하지 못하였다^[12]. 이에 본 연구에서는 선행연구에서 실험한 도플러 유체로 사용 가능할 후보 물질 중 탄산수, 소금물, 설탕물, 증류수에 유체의 흐름을 반영할 수 있는 환경을 조성하여 탄산수의 도플러 유체 적합성에 대해 분석하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 도플러 팬텀 제작

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 도플러 시프트 팬텀을 제작하였다. 이중 수조 구조로 30(L) x 20(H) x 15(W) cm³ 크기의 외부 수조 내부에 15(L) x 10(H) x 10(W) cm³ 크기의 수조를 설치하였으며 재질로는 아크릴을 사용하였다. 외부 수조의 양측 벽에는 배수량 300 L/h의 펌프를 설치하고, 내부 수조를 관통하는 튜브를 연결하였다. 유체 펌프를 양방향으

로 설치하여 도플러 유체의 등속 흐름을 지원하고, 내부 수조를 관통한 도플러 시프트 유도관을 통해 유체는 외부 수조로 재수집되어 순환되도록 설계하였다. 이때 내부 수조와 외부 수조는 독립적으로 서로 교통하지 않으며 도플러 시프트 유도관은 인체의 동맥과 정맥의 흐름 방향성을 반영하여 양방향으로 설치하였으나 동맥과 정맥의 압력은 제외하였다. 또한, 깊이에 따른 도플러 효과의 차이를 분석하기 위해 내부 수조의 표면에서부터 1.5 cm, 3.0 cm 깊이에 각각 위치시켰다. 도플러 시프트 유도관으로 사용된 튜브는 내경 8 mm, 두께 1 mm, 길이 20 cm의 실리콘(Silicone, Si)으로 제작하였으며, 탐촉자 거치대를 설치하여 측정자의 움직임에 의한 오차를 최소화하였다.

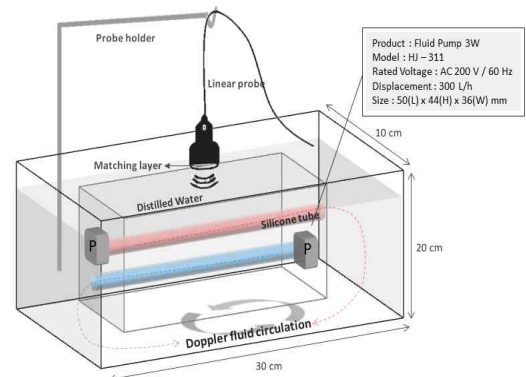


Fig. 1. Phantom is designed for doppler fluid flow in both directions.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 초음파 진단 장비(Affiniti 70G, Philips, Holland)와 선형 탐촉자 (Philips L12-5, Holland)를 사용하였다. 도플러 유체로는 탄산수(Carbonated Water; CBW), 소금물(Salt fluid; SAF), 설탕물(Sugar Fluid; SUF), 증류수(Distilled Water; DW)를 사용하였으며, 이는 선행연구를 참고하여 선정하였다^[12]. 선행연구에서는 기존 혈액 모방 유체와 다른 기전의 접근성이 편리하면서 밀도를 가진 혈액 모방 유체를 제안하고자 하였다. 이를 반영하여 혈류에 있는 적혈구를 구현하기 위해 물을 용매로 사용하고, 용질로 설탕과 소금을 이용하여 증류수 1L에 각각 20 g씩 희석하였다. 유체 펌프는 도플러 시프트 유도관의

양 끝에 설치되고, 등속으로 도플러 유체가 흐르도록 하였다. 이때, 깊이에 따른 도플러 효과 분석을 위해 도플러 시프트 유도관의 깊이를 표면에서 1.5 cm과 3.0 cm으로 설정하였다.

영상 획득은 Fig. 2와 같이 컬러 도플러 영상에서는 이득(Gain)을 47%로 설정하여 민감도에 따른 변수를 통제하였고, 컬러 관심 영역(Region of Interest; ROI)은 전체 영상의 80%를 선택하고 탐촉자의 주파수는 12 MHz로 고정하였다. 측정 변수로는 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency; PRF)를 43.3, 77.0, 86.6 cm/sec로 변화시키고, 반사체의 깊이 (Depth)를 1.5 cm, 3.0 cm로 변화시켜 도플러 유체의 분포를 확인하였다.

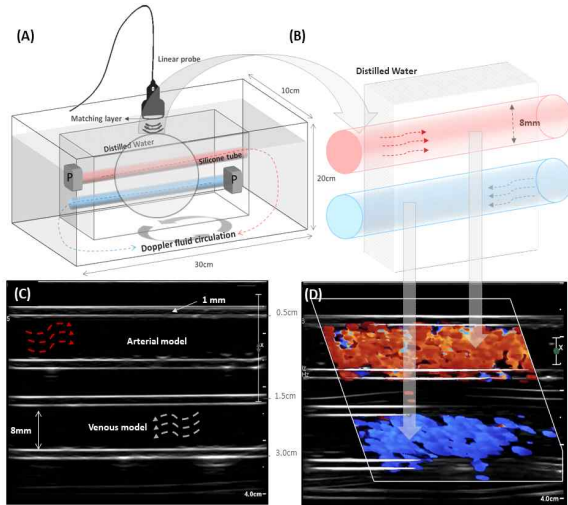


Fig. 2. Bi-directional Doppler phantom(A), magnified image of tank's inner section(B). B-mode image of an ultrasound scan of a bi-directional doppler phantom(C), Color Doppler image of an ultrasound scan of a bi-directional doppler phantom(D).

3. 영상분석

영상분석을 위해 image J(ver 1.51, NIH, USA)를 사용하였으며, 데이터 통계는 SPSS(ver 20.0, IBM, USA)를 이용하였다.

측정된 도플러 영상은 연속으로 34 Frame/sec로 획득하였고, 이를 의료영상 저장 전송장치(Picture Archiving and Communication System; PACS)로 전송한 후 Fig. 3과 같이 jpg 형식의 파일로 추출하였

다. jpg 영상은 image J 프로그램을 사용하여 Fig. 4와 같이 도플러 분포의 평균값과 면적분율(%Area)의 분석에 활용되었다. 분석을 위해 각 영상을 8-bit 타입으로 변환하여 흑백 영상으로 전환하고, Dark background 기능을 이용하여 도플러 신호면적만 분류하였다. 불필요한 신호 배경을 제거하기 위해 Threshold 값을 20으로 설정하고, Clear Outside 기능을 사용하였다.

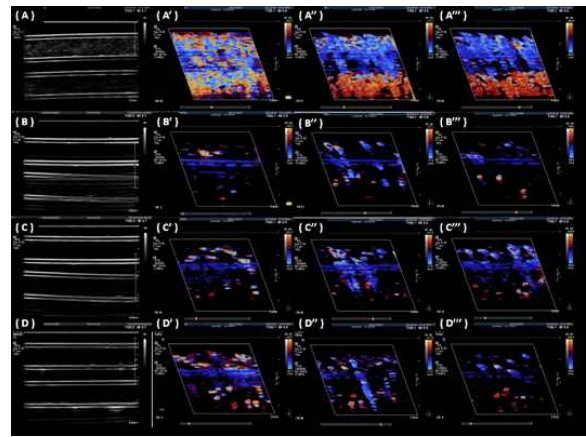


Fig. 3. B-mode images of doppler phantom scans of CBW(A), SAF(B), SUF(C), and DW(D). (A'), (B'), (C'), (D') means the pulse repetition frequency (PRF) was set to 43.3 cm/sec for each fluid, (A''), (B''), (C''), (D'') means the PRF was set to 77.0 cm/sec, and (A'''), (B'''), (C'''), (D''') means the PRF was set to 86.6 cm/sec.

탄산수(CBW), 소금물(SAF), 설탕물(SUF), 증류수(DW)간의 도플러 분포 평균값과 면적분율(%Area) 값을 비교하기 위해 일원배치 분산분석(ANOVA test)을 하였다. 이후, 사후 검정으로 Scheffe 방법을 사용하였다. 이때, p 값이 0.05 보다 작을 때 통계적으로 유의하다고 판단하였다.

탄산수(CBW), 소금물(SAF), 설탕물(SUF), 증류수(DW)의 펄스 반복 주파수(PRF) 변화에 따른 도플러 효과를 비교하기 위하여 컬러 도플러 영상을 획득하여 총 360회 분석하였다.

도플러 팬텀의 표면에서 1.5 cm 깊이에서 각각 도플러 유체가 도플러 시프트 유도관을 통과할 때 도플러 효과를 분석하기 위해 컬러 도플러 영상을 획득하여 360회 분석하였으며 도플러 팬텀의 표면에서 3.0 cm 깊이의 도플러 시프트 유도관 통과하는 도플러 유체의 도플러 효과도 위와 같은 방법으

로 분석하여 총 720회의 도플러 분포의 평균값과 면적분율(%Area)을 산출했다.

깊이 변화에 따른 탄산수(CBW), 소금물(SAF), 설탕물(SUF), 증류수(DW)의 도플러 효과를 비교하여 표면에서 깊어질수록 반사되어 돌아오는 초음파 강도의 차이를 분석하였다.

III. RESULT

본 연구에서 제작된 도플러 시프트 팬텀은 연속적인 도플러 유체의 흐름을 생성할 수 있었으며, 모든 도플러 유체에서 도플러 효과를 나타냈다. Table 1과 같이 탄산수의 도플러 분포 평균값과 면적분율(%Area)값이 모두 높게 측정되었다.

Table 1. Comparison of the Doppler distribution and area fraction (%Area) was performed for each Doppler fluid

Materials (PRF) cm/sec	N	Mean	p^1	%Area	p^2
CBW(43.3)	30	86.5 ± 3.7		33.9 ± 1.5	
SAF(43.4)	30	31.6 ± 13.2 ^{p¹}	.000	12.4 ± 5.2 ^{p²}	.000
SUF(43.3)	30	24.5 ± 5.3 ^{p¹}		9.6 ± 2.1 ^{p²}	
DW(43.3)	30	31.7 ± 8.6 ^{p¹}		12.4 ± 3.3 ^{p²}	
CBW(77.0)	30	81.4 ± 2.9		31.9 ± 1.1	
SAF(77.0)	30	20.9 ± 2.9	.000	8.2 ± 1.1	.000
SUF(77.0)	30	30.0 ± 6.6 ^{p¹}		11.7 ± 2.6 ^{p²}	
DW(77.0)	30	31.8 ± 12.6 ^{p¹}		12.4 ± 4.9 ^{p²}	
CBW(86.6)	30	80.2 ± 3.7		31.4 ± 1.4	
SAF(86.6)	30	22.2 ± 4.9 ^{p¹}	.000	8.7 ± 1.9 ^{p²}	.000
SUF(86.6)	30	23.7 ± 6.6 ^{p¹}		9.3 ± 2.6 ^{p²}	
DW(86.6)	30	29.2 ± 12.8 ^{p¹}		11.4 ± 5.0 ^{p²}	

M±SD^{p¹} = post hoc test with scheffe of whole means ($p^1 > 0.05$) and M±SD^{p²} = post hoc test by scheffe of whole percentage area ($p^2 > 0.05$)

1. 세부적으로 살펴보면 펄스 반복 주파수(PRF) 43.3 cm/sec로 고정된 상태에서 증류수, 소금물, 설탕물의 도플러 분포 평균값 및 면적분율(%Area)은 서로 다르지 않았지만($p > 0.05$), 탄산수는 평균 86.5±3.7로 가장 높은값으로 측정되었다($p < 0.05$). 펄스 반복

주파수(PRF) 77.0 cm/sec에서 설탕물, 증류수의 도플러 분포 평균값 및 면적분율(%Area)값은 서로 다르지 않았지만($p > 0.05$), 소금물의 평균값은 20.9±2.9 이었고, 탄산수의 평균값은 81.4±2.9으로 가장 높게 측정되었다($p < 0.05$). 펄스 반복 주파수(PRF) 86.6 cm/sec에서 소금물, 설탕물, 증류수의 도플러 분포 평균값 및 면적분율(%Area)은 서로 다르지 않았으며 ($p > 0.05$), 탄산수의 평균값은 80.2±3.7로 가장 높게 측정되었다($p < 0.05$).

2. 내부 수조(Distilled water)의 표면에서부터 1.5 cm 깊이에 설치한 도플러 시프트 유도관에서 탄산수, 소금물, 설탕물, 및 증류수의 펄스 반복 주파수 (PRF) 43.3 cm/sec에서는 Table 2와 같이 네 가지 용액의 도플러 분포 평균값 및 면적분율(%Area)값이 서로 다르지 않았으나, 펄스 반복 주파수(PRF) 77.0 cm/sec와 86.6 cm/sec에서는 소금물과 탄산수의 도플러 분포 평균값 및 면적분율(%Area)값이 다른 세 용액과 비교하여 높게 측정되었다($p < 0.05$).

Table 2. A comparison was made between the Doppler distribution and area fraction (%Area) of a Doppler shift tube at a depth of 1.5 cm

Materials (PRF) cm/sec	N	Mean (1.5cm)	p^1	%Area (1.5cm)	p^2
CBW(43.3)	30	73.1 ± 4.2		35.0 ± 7.7	
SAF(43.4)	30	28.3 ± 12.1 ^{p¹}	.000	33.1 ± 9.3 ^{p²}	.000
SUF(43.3)	30	22.3 ± 4.7 ^{p¹}		31.8 ± 4.9 ^{p²}	
DW(43.3)	30	27.4 ± 9.8 ^{p¹}		62.73 ± 1.24	
CBW(77.0)	30	64.3 ± 1.7		59.2 ± 1.0	
SAF(77.0)	30	18.6 ± 2.8	.000	25.2 ± 2.4	.000
SUF(77.0)	30	26.8 ± 7.9 ^{p¹}		34.9 ± 6.5 ^{p²}	
DW(77.0)	30	28.1 ± 13.1 ^{p¹}		34.5 ± 10.3 ^{p²}	
CBW(86.6)	30	61.6 ± 3.2		58.4 ± 1.5	
SAF(86.6)	30	19.2 ± 4.4 ^{p¹}	.000	27.0 ± 3.9 ^{p²}	.000
SUF(86.6)	30	22.2 ± 7.6 ^{p¹}		30.9 ± 7.6 ^{p²}	
DW(86.6)	30	23.2 ± 9.7 ^{p¹}		29.2 ± 8.9 ^{p²}	

M±SD^{p¹} = post hoc test by scheffe of whole means ($p^1 > 0.05$) and M±SD^{p²} = post hoc test by scheffe of whole percentage area ($p^2 > 0.05$)

3. 내부 수조(Distilled water)의 표면에서부터 3.0 cm 깊이에 설치한 도플러 시프트 유도관에서 탄산수, 소금물, 설탕물 및 증류수의 펄스 반복 주파수 (PRF) 43.3 cm/sec에서는 Table 3과 같이 소금물과 증류수의 도플러 분포 평균값이 서로 다르지 않았으며($p>0.05$), 설탕물의 평균값은 6.5 ± 2.0 이었고, 탄산수의 평균값은 81.9 ± 10.6 으로 가장 높게 나타났다($p<0.05$). 펄스 반복 주파수(PRFF) 77.0 cm/sec에서는 모든 용액의 평균값이 서로 다르지 않았으며($p>0.05$), 탄산수의 평균값은 59.1 ± 4.0 으로 가장 높게 나타났다($p<0.05$). 마지막으로, 펄스 반복 주파수(PRFF) 86.6 cm/sec에서는 소금물과 증류수의 평균값이 서로 다르지 않았으며($p>0.05$), 설탕물의 평균값은 5.9 ± 2.5 이었고, 탄산수의 평균값은 53.8 ± 6.2 으로 탄산수의 평균값이 가장 높게 나타났다($p<0.05$).

Table 3. A comparison was performed on the Doppler distribution and percentage area fraction (%Area) of a Doppler shift tube at a depth of 3.0 cm

Materials (PRF) cm/sec	N	Mean (3.0cm)	p^1	%Area (3.0cm)	p^2
CBW(43.3)	30	81.9 ± 10.6		70.7 ± 3.1	
SAF(43.4)	30	$14.8 \pm 10.7^{p^{\ddagger}}$.000	$20.5 \pm 11.3^{p^{\ddagger}}$.000
SUF(43.3)	30	6.5 ± 2.0		11.0 ± 3.5	
DW(43.3)	30	14.2 ± 4.6		67.8 ± 2.6	
CBW(77.0)	30	59.1 ± 4.0		67.8 ± 2.6	
SAF(77.0)	30	$7.8 \pm 2.8^{p^{\ddagger}}$.000	$11.7 \pm 3.0^{p^{\ddagger}}$.000
SUF(77.0)	30	$10.0 \pm 3.2^{p^{\ddagger}}$		$17.2 \pm 4.6^{p^{\ddagger}}$	
DW(77.0)	30	$13.5 \pm 8.4^{p^{\ddagger}}$		$19.9 \pm 8.8^{p^{\ddagger}}$	
CBW(86.6)	30	53.8 ± 6.2		67.1 ± 3.1	
SAF(86.6)	30	$7.6 \pm 3.1^{p^{\ddagger}}$.000	$12.4 \pm 4.2^{p^{\ddagger}}$.000
SUF(86.6)	30	5.9 ± 2.5		10.8 ± 3.8	
DW(86.6)	30	$13.4 \pm 9.0^{p^{\ddagger}}$		$21.1 \pm 11.8^{p^{\ddagger}}$	

$M\pm SDp^{\ddagger}$ = post hoc test by scheffe of whole means ($p^{\ddagger}>0.05$) and $M\pm SDp^{\ddagger}$ = post hoc test by scheffe of whole percentage area ($p^{\ddagger}>0.05$)

4. 깊이 변화에 따른 도플러 유체별 신호면적에 대한 도플러 분포 평균값 및 면적분율(%Area)값에 대한 분석 결과 Fig. 4와 같이 소금물, 설탕물, 증류

수에서는 1.5 cm의 도플러 분포 평균값과 비교하여 3.0 cm에서는 상대적으로 낮은 평균값을 보였다($p<0.05$). 반면에 탄산수는 깊이에 영향을 받지 않고 높은 도플러 평균값과 면적분율(%Area)값을 나타냈다($p<0.05$).

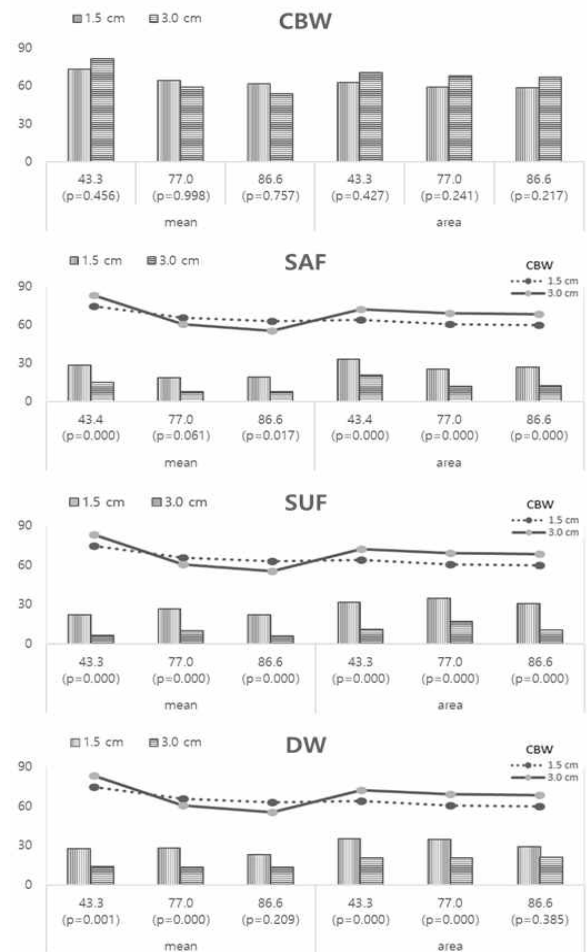


Fig. 4. A comparison was made between the Doppler distribution and percentage area fraction (% Area) for each Doppler fluid at depth of 1.5 cm and 3.0 cm.

IV. DISCUSSION

도플러 초음파 검사는 다양한 임상 의학 분야에서 적용되는데 혈관의 협착, 기형 평가뿐만 아니라 장기의 관류 등급, 판막 기능장애, 심장의 구혈율 평가, 혈관 내 장치 및 심근 움직임 평가 등 다양한 측면에서 사용되고 있다^[13]. 이에 따라 본 연구에서는 도플러 초음파 진단장치의 성능 평가를 위해 양방향 도플러 시프트 팬텀을 제작하고, 기존의 혈액

모방 유체와 다른 기전의 도플러 유체의 적정성을 알아보았다.

본 연구에서는 도플러 시프트 효과를 반영하는 도플러 유체로 탄산수, 소금물, 설탕물, 증류수를 선택하여 실험을 진행하였다. 선행연구에서 유체 내 흐름을 고려하지 않고 라텍스 풍선 내부에 저장된 상태로 실험을 진행하였기 때문에, 본 연구에서는 유체의 흐름을 만들어 도플러 효과의 정도 차이를 검증하였다.

초음파 검사의 펄스 도플러 처리에 영향을 미치는 펄스 반복 주파수(PRF)를 43.3 cm/sec, 77.0 cm/sec, 86.6 cm/sec로 변화하면서 총 4가지 물질의 도플러 시프트 효과를 측정된 결과 모든 펄스 반복 주파수에서 탄산수가 가장 높은 도플러 시프트 효과를 나타내었다. 나머지 소금물, 설탕물, 증류수에서도 도플러 시프트 효과를 나타내었으나 그 정도가 미미하였고 탄산수가 약 4배 정도의 더 높은 도플러 시프트 효과를 보였다. 소금물, 설탕물, 증류수에서 나타난 도플러 시프트 효과는 선행연구와 비교하였을 때, 비슷한 환경에서 유속의 유무가 도플러 시프트 효과를 유발한다고 추정할 수 있으나 정도가 미미하여 도플러 유체로 사용하기에는 부적합하다고 판단된다. 반면에 탄산수는 펄스 반복 주파수 43.3 cm/sec, 77.0 cm/sec, 86.6 cm/sec 모두에서 높은 도플러 시프트 효과를 나타내어 깊이에 따라 감소하는 초음파의 물리적 한계의 영향을 받지 않았는데 이는 탄산수 내부의 버블이 혈액 내 적혈구 역할을 하면서 초음파 신호를 강하게 산란, 반사하는 것으로 추정된다^[14]. 도플러 유체인 혈액 모방물질의 적합성 판단조건에는 일정한 밀도와 적절한 점성을 유지해야 한다는 기준 있는데 본 연구에서는 상품화된 탄산수를 사용하여 버블의 크기 및 밀도를 조절할 수 없었다. 추후 연구에서 초음파 조영제인 소나조이드(Sonazoid)나 소노뷰(SonoVue)와 같이 마이크로 버블로 탄산수의 버블 크기와 밀도를 안정화할 수 있다면 도플러 유체로서의 활용도를 더 높일 수 있을 것이다^[15]. 해외 연구에서 초음파 조영제를 증류수와 희석하여 도플러 유체로 활용하였고 높은 도플러 시프트 효과를 나타내어 가능성을 확인할 수 있었다^[16].

총 4가지 물질의 깊이 변화에 따른 도플러 시프트 효과를 알아보기 위해 도플러 팬텀의 내부 수조 표면에서 1.5 cm, 3.0 cm의 깊이에서 도플러 분포 평균과 면적분율(%Area)을 측정하였다. 탄산수는 1.5 cm 깊이에서 3.0 cm 깊이보다 높은 도플러 시프트 효과를 나타내었고 그 차이가 크지 않았으나 소금물, 설탕물, 증류수에서는 1.5 cm 깊이보다 3.0 cm 깊이에서 도플러 시프트 효과가 1/2 정도로 낮게 측정되었다. 이것으로 보아 탄산수 내부의 버블이 산란과 반사를 일으켜 도플러 시프트 효과를 유발하는데 적합한 조건을 가지고 있다고 판단되며 소금물, 설탕물, 증류수는 내부의 반사체가 부족하여 유체의 흐름만으로는 도플러 시프트 효과를 유발하기에 부족했다고 생각된다. 본 실험에서는 도플러 유체의 유속변화에 따른 도플러 시프트 효과의 차이를 확인하지 못하였고 유속에 영향을 미치는 다양한 깊이 및 내경의 크기에 따른 혈관 모델을 반영 않았다. 추후 연구에서 유속 센서를 도플러 시프트 유도관 내부에 설치하고 제어 밸브를 유체 펌프와 연결하여 실제 유속과 측정 유속의 정확도 및 유속변화에 따른 도플러 효과를 분석하고 혈관 모델을 다양화한다면 신뢰도 높은 도플러 유체 선정에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다^[17]. 본 연구의 한계점으로 도플러 유체 조건인 일정한 밀도와 적절한 점성 유지하여 탄산수를 제작하지 못하였으나 추후 연구에서 초음파 조영제와 같이 탄산수 내에 마이크로 버블을 주입하고 버블 크기와 밀도를 안정화할 수 있다면 탄산수의 도플러 유체로서의 활용도가 향상될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 혈관 모델의 다양화 및 유속에 따른 도플러 시프트 효과의 차이를 확인할 수 있도록 유속 센서를 활용한다면 도플러 유체에 대한 폭넓은 연구가 가능할 것이다.

V. CONCLUSION

본 연구에서 설정한 모든 펄스 반복 주파수에서 탄산수가 가장 높은 도플러 시프트 효과를 나타냈으며 소금물, 설탕물, 증류수에서도 도플러 시프트 효과가 나타났지만, 그 정도가 미미하였고 탄산수가 약 4배 정도 높은 효과를 나타냈다. 이는 탄산수

내부의 기포가 혈액 내 적혈구 역할을 하면서 초음파 신호를 강하게 산란, 반사하는 것으로 추정되며 이를 통해 탄산수의 도플러 유체 사용 가능성을 확인 할 수 있었다.

Reference

- [1] S. H. Cho, G. S. Jeon, "Uncertainty, Self-care Agency and Physiological Index in Acute Myocardial Infarction Patients who Underwent Primary Percutaneous Coronary Intervention", *The Korean Journal of Health Service Management*, Vol. 9, No. 4, pp. 105-117, 2015. <https://doi.org/10.12811/kshsm.2015.9.4.105>
- [2] J. S. Kim, H Y. Seok, B. J. Kim, "The significance of muscle echo intensity on ultrasound for focal neuropathy: The median- to ulnar-innervated muscle echo intensity ratio in carpal tunnel syndrome", *Clinical Neurophysiology*, Vol. 127, No. 1, pp. 880-885, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.04.055>
- [3] V. C. Ntola, T. C. Hardcastle, "Diagnostic Approaches to Vascular Injury in Polytrauma - A Literature Review", *Diagnostics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1019, 2023. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13061019>
- [4] S. H. Suh, "Comparison of Non-invasive Imaging Studies in the Evaluation of Carotid Artery Stenosis and Occlusion: CT Angiography, Time-of-Flight MR Angiography and Contrast-Enhanced MR Angiography", *Journal of the Korean Society of Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 15, No. 3, pp. 234-241, 2011. <https://doi.org/10.13104/jksmrm.2011.15.3.234>
- [5] G. Y. Jin, "Use of Coronary CT Angiography as a Screening Tool for Coronary Artery Disease in Asymptomatic Healthy Individuals or Patients", *Journal of the Korean Society Radiology*, Vol. 83, No. 1, pp. 54-69, 2022. <https://doi.org/10.3348/jksr.2021.0161>
- [6] T. C. Arnold, C. W. Freeman, B. Litt, et al., "Low-field MRI: Clinical promise and challenges", *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 57, No. 1, pp. 25-44, 2022. <https://doi.org/10.1002/jmri.28408>
- [7] A. Saati, D. Puffenberger, L. Kirksey, et al., "The role of hemodialysis access duplex ultrasound for evaluation of patency and access surveillance", *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, Vol. 13, No. 1, pp. 190-195, 2023. <https://doi.org/10.21037/cdt-22-129>
- [8] H. Y. Choi, "Carotid duplex ultrasound: interpretations and clinical applications", *Carotid duplex ultrasound: interpretations and clinical applications*, Vol. 23, No. 2, pp. 82-91, 2021. <https://doi.org/10.14253/acn.2021.23.2.82>
- [9] B. L. Mintz, R. W. Hobson, "Diagnosis and treatment of carotid artery stenosis", *J Am Osteopath Assoc*, Vol. 100, No. 11, pp. 22-26, 2000. <https://doi.org/10.7556/jaoa.2000.20009>
- [10] M. S. S. Hashuro, K. Daibo, T. Ishii, et al. "Ultrasound flow phantom for transcranial Doppler: An assessment of angular mismatch effect on blood velocity measurement in comparison to optical particle image velocimetry", *Frontiers in Physics*, Vol. 11, 2023. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1134588>
- [11] S. J. Chai, A. S. Shuib, S. W. Phang, et al. "Blood mimicking fluid for application in angiography imaging: The effect of surfactant addition towards density and viscosity", *Asian Journal Of Medical Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 17-36, 2023. <https://doi.org/10.32896/ajmedtech.v3n1.17-36>
- [12] H. K. Lee, D. J. Jung, Y. C. Heo, et al., "Feasibility study on carbonated water for Doppler imaging in medical ultrasonic applications", *Optik*, Vol. 222, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165480>
- [13] F. A. Rasulo, E. De Peri, A. Lavinio, "Transcranial Doppler ultrasonography in intensive care", *European Journal of Anaesthesiology*, Vol. 25, pp. 167-173, 2008. <https://doi.org/10.1017/S0265021507003341>
- [14] S. J. Shin, B. J. Jeong, "Principle and Comprehension of Ultrasound Imaging", *Journal of the Korean Orthopaedic Association*, Vol. 48, No. 5, pp. 325-333, 2013. <https://doi.org/10.4055/jkoa.2013.48.5.325>
- [15] J. Baranger, L. Mertens, O. Villemain, "Blood Flow Imaging with Ultrafast Doppler", *Journal of*

Visualized Experiments, Vol. 14, No. 164, pp. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3791/61838>.

- [16] M. B. Rominger, E. M. Müller-Stuler, M. Pinto, et al., "Easy Pulsatile Phantom for Teaching and Validation of Flow Measurements in Ultrasound", *Ultrasound international open*, Vol. 2, No. 3, pp. 93-97, 2016. <https://doi.org/10.1055/s-0042-106396>
- [17] G. Edward G, B. Carol B, L. Gregory, et al., "Carotid Artery Stenosis: Gray-Scale and Doppler US Diagnosis—Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference", *Ultrasound quarterly*, Vol. 39, No. 3, pp. 464-540, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2003.12.013>

양방향 흐름 팬텀 모델에서 탄산수의 도플러 유체 효과 연구

김지혜¹, 허영철^{1,2,*}

¹을지대학교 대학원 보건학과

²을지대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

본 연구에서는 양방향 흐름 팬텀 모델에서 탄산수의 도플러 유체 효과를 확인하고자 하였다. 양방향 흐름 팬텀 모델은 동맥과 정맥의 흐름을 구현한 것이며 이중 수조 구조를 통해 유체의 순환이 가능하고 팬텀의 크기를 줄일 수 있게 고안되었다. 사용된 유체는 탄산수, 소금물, 설탕물, 증류수를 이용하였고 수조 표면에서 깊이 1.5 cm, 3.0 cm에서 초음파 B-mode와 컬러 도플러 효과를 이용해 초음파 스캔하였다. 컬러 도플러 효과는 탄산수, 소금물, 설탕물, 증류수 모두 도플러 시프트 효과를 나타냈으나 탄산수의 도플러 시프트 효과가 가장 높았고 깊이에 따른 변화에서도 탄산수의 도플러 시프트 효과 편차가 가장 적었다. 결론적으로 탄산수의 도플러 유체 사용 가능성을 확인할 수 있었고 탄산수의 기포가 적혈구의 도플러 반사체 역할을 하고 있음을 확인하였다. 따라서 도플러 초음파 팬텀 제작에서 혈액 모방액과 유사한 물질로 탄산수를 이용한 추가 연구가 필요하며 이에 본 연구가 기초자료를 제공할 것이라 사료 된다.

중심단어: 유체팬텀, 도플러팬텀, 혈관도플러, 도플러유체, 도플러초음파, 도플러변수

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김지혜	을지대학교 대학원 보건학과	박사과정
(교신저자)	허영철	을지대학교 보건과학대학 방사선학과	교수