

# 초음파영상을 이용한 생체유동 측정

김 형 범 · 경상대학교 기계항공공학부, 조교수

\_e-mail : kimhb@gsnu.ac.kr

이 글에서는 초음파 영상기법을 이용하여 인체 내부 혈류 유동장의 in vivo 속도측정이 가능한 초음파 PIV(echo PIV)기법에 대해 소개하고자 한다.

심혈관계 질환은 서구에서 사망률 1위를 차지하고 있고, 식생활과 생활습관의 서구화로 우리나라에서도 암의 뒤를 이어 현재 사망률 2위를 기록하고 있다.

임상에서는 이러한 심혈관계 질환을 진단하고 치료하기 위해 다양한 비접촉식 혈류해석기법이 사용되고 있다. 비접촉식 혈류해석기법의 하나로 초음파 도플러 기법(ultrasound Doppler method)은 지난 30년간 심혈관계 질환 진단에 활발히 사용되어 왔다. 초음파 기법과 더불어 최근 각광을 받고 있는 MRI기법은 초음파 진단기법이 제공하지 못하는 측정단면에서의 3차원 속도정

비침투식으로 인체 내부의 혈류 유동장을 측정할 수 있는 MRI 및 초음파 PIV 기법의 개발은 심혈관계 질환의 진단과 치료에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.



그림 1 MRI 기법을 이용하여 획득된 인체 내부 좌심실 유동의 와도장 및 유선분포

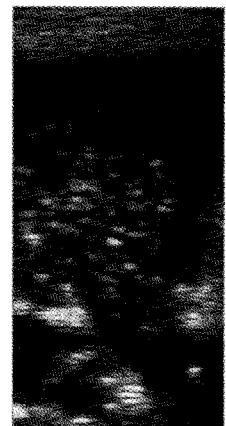


그림 2 초음파 영상기법을 이용하여 획득한 개의 좌심실 내부 미세기포 영상

보 제공 등의 장점으로 그 사용도가 나날이 증가하고 있다.

초음파 기법은 인체 내부 장기의 가시화나 혈류유동과 같은 불투명한 유동에서의 속도측정 등에 많이 사용되고 있다. 초음파를 이용한 기존의 속도측정방법은 반사된 초음파 신호의 도플러 천이를 이용해 초음파 진행방향 성분의 속도를 측정한다. 그러나 도플러 천이를 이용한 속도측정법은 초음파 진행방향과 유동방향의 작은 각도 차이에도 큰 오차(cosine error)가 발생하여 초음파 도플러 속도측정법은 유동방향이 알려진 조건에서만 정확한 속도를 측정할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다중 초음파 프로브를 사용하는 등의 여러 가지 방법들이 연구되었으나, 정상상태의 유동에만 적용가능하고 프로브 설치의 복잡함 등으로 실제 인체내부 혈류 유동에 적용하기는 어렵다.

최근 들어 이러한 문제점을 해결하기 위해 초음파의 도플러 천이를 이용하지 않고 초음파 영상으로부터 직접 속도를 측정하는 연구가 이루어지고 있다. 이 방법은 기본적으로 혈류 영상을 초음파 기법으로 획득한 후, 이 영상 정보로부터 혈류의 속도분포를 구하는 방법이다. 이는 실험유체 역학분야의 입자화상속도계(PIV; Particle Image Velocimetry)와 같은 원리이다, 즉, 알려진 시간간격을 갖는 두 장의

영상 사이에서 유동을 추종하는 입자의 변위를 측정함으로써 속도를 구할 수 있다. 초기의 초음파 PIV 연구에서는 혈류유동의 추적입자로 혈액 속에 포함된 적혈구를 사용하였으나 초음파 영상에서 적혈구와 주위 혈관간의 임피던스 차이가 작아 적혈구의 연전(rouleaux)형성이 존재할 때와 같은 특수한 경우에만 속도측정이 가능하였다.

이러한 혈류 내 세포의 낮은 임피던스 차이를 극복하기 위해 미세기포 형태의 초음파 조영제(ultrasound contrast agent)를 이용하는 연구가 제안되어 적혈구를 사용하였을 경우의 낮은 S/N비 문제를 해결하게 되었다. 현재 연구되는 초음파 영상을 이용한 혈류 유동측정기법은 이와 같은 미세기포를 추종입자로 사용하여 혈류의 유동영상을 획득한다. 이와 같은 초음파 영상을 이용한 혈류유동 측정기법은 여러 연구그룹에서 Echo PIV, DUSIV, USV 등의 다양한 이름으로 발표되고 있다.

### 초음파 영상기법의 특징

기본적으로 초음파 영상을 이용한 혈류측정 기법은 B-모드 스캔방식의 초음파 영상획득기법을 이용한다. B-모드는 측정구간에 있는 산란체에 의해 반사된 에코신호의 강도를 가지고 초음파 영상의 계조를 결정하고 초음파 신

호의 방사로부터 에코신호를 받기까지의 시간으로부터 초음파 빔의 진행방향에서의 산란체의 위치를 알 수 있다. 이와 같은 과정을 측정구간에서 반복적으로 스캔하면서 2D스캔영상이 만들어진다. 초음파 영상의 공간분해능과 시간분해능을 향상시키기 위해 프로브의 기계적 제어대신에 다른 각도를 갖는 순차적인 빔의 스캔을 이용하는 위상배열 방식의 프로브가 개발되어 높은 프레임률로 실시간 영상획득에 사용되고 있다.

획득한 입자화상으로부터 속도 정보를 추출하려면 일반적으로 두 장의 연속적인 입자화상이 필요하다. 이 때 두 입자영상 사이의 시간간격은 속도측정 가능범위를 결정하는 매우 중요한 변수로 일반 광학PIV기법의 경우에는 펄스 레이저의 사용으로 매우 짧은 시간 간격을 가질 수 있다. 반면에 초음파를 이용한 PIV의 경우, 두 입자영상 사이의 시간 간격은 한 영상을 획득하는 데 걸린 물리적인 스캔시간과 동일하다. 이러한 영상획득방법의 차이점은 광학PIV의 경우는 전체 측정구간의 입자영상을 동시에 측정하는 스냅샷(snapshot)방식이나 초음파 PIV기법의 경우에는 이와 달리 하나의 영상에서도 처음 스캔이 시작되는 부분과 스캔이 끝나는 부분에서 영상획득시간만큼의 시간지연이 발생한다.

에코 PIV의 영상획득시간은 초

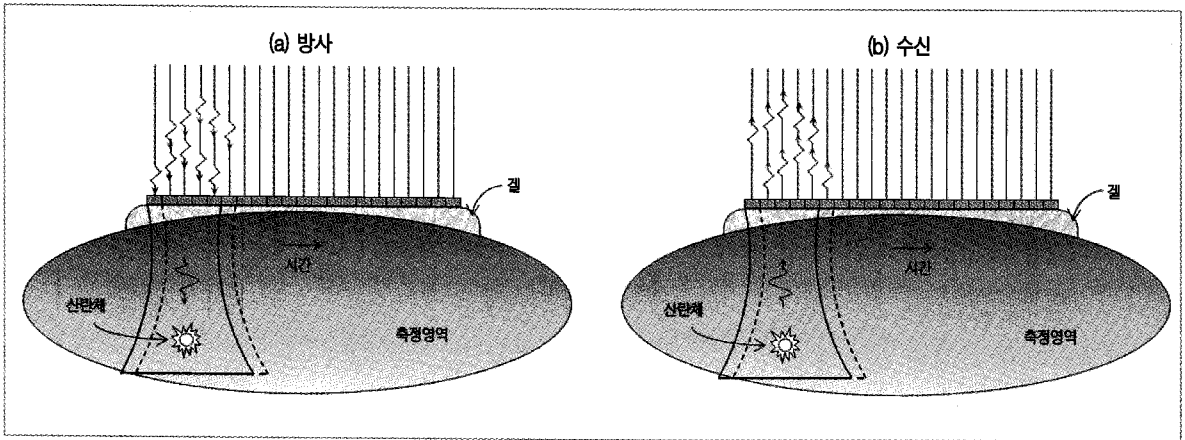


그림 3 선형 프로브를 사용한 B-mode 스캔방식의 초음파 영상획득 모식도

음파영상의 프레임률(frame rate)과 역수관계에 있다. 획득시간이 길어지면 프레임률은 감소한다. 초음파 B-스캔 모드에서 프레임률을 결정하는 여러 가지 요소 중 초음파 PIV기법에서 가장 중요한 것은 스캔 면적이다. 주어진 프로브에서 스캔 면적은 하나의 영상을 구성하는 데 필요한 총 빔의 개수와 측정 깊이로 결정된다. 즉, 하나의 입자영상을 구성하는 빔 수를 줄이면 스캔 면적이 줄고 프레임률은 높아지게 된다. 측정 깊이는 초음파 빔의 이동시간으로 결정되기 때문에 측정 깊이의 증가는 이동시간의 증가로 나타나고 이는 프레임률의 감소를 가져온다.

즉, 초음파 영상 획득률은 측정 면적 및 초음파 빔의 매질 내 진행속도와 같은 물리적인 요소에 의해 제한되고, 이를 극복하는 것이 현재의 초음파 영상기반의 속도측정기법이 해결해야 하는 커

다란 과제 중의 하나이다.

속도측정기법의 성능을 결정하는 또 다른 변수인 공간해상도의 경우, 일반 광학 PIV 기법은 사용된 CCD카메라와 렌즈 등의 광학시스템에 의해 결정되나 초음파 영상의 경우에는 빔 폭과 초음파 빔의 주파수로 결정된다. 일반적으로 초음파 영상은 CCD 카메라로부터 획득된 일반적인 광학영상과 비교하여 낮은 해상도를 갖는다. 이로 인해 낮은 영상 해상도에서 속도벡터의 공간 해상도를 향상시키기 위한 새로운 속도추적알고리즘의 개발도 초음파 영상을 이용한 속도측정기법이 극복해야 하는 중요한 문제다.

이와 같은 초음파 영상만이 갖는 여러 가지 특징을 고려하여 초음파 하드웨어 및 소프트웨어 측면에서의 다양한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다.

## 초음파 조영제를 이용한 영상 획득

처음 제안된 초음파 PIV 기법은 적혈구를 산란입자로 사용하였고 산란입자로서의 특징이 좋지 않은 적혈구의 사용으로 초음파 PIV 기법의 초기 결과는 많은 오차를 포함하였다. 이 문제를 해결한 것이 초음파 조영제로 사용되는 미세기포의 산란입자로서의 사용이다. 초음파 조영제는 혈류 유동에서 초음파의 에코신호 강도를 증가시켜 초음파 영상에서 혈관을 가시화하기 위해 개발되었고 현재 임상에서 사용되고 있는 물질이다. 일반적인 초음파 조영제의 구성은 혈류와 임피던스 차이가 큰 가스로 채워지고 알부민과 같은 지질 등의 막을 갖는 미세기포이다. 초기에는 내부 충전가스로 공기가 사용되었으나 확산에 의해 수명이 짧은 관계로 현재는 혈류에 대한 용해도가 낮

은 과불화탄소 등의 분자량이 큰 가스가 사용되고 있다. 이러한 초음파 조영제는 특성상 폐에서의 마이크로 순환을 통과하기 위해 평균직경이 10 $\mu$ m보다 작다. 기본적인 초음파 조영제의 목적은 물에서의 염료와 같은 역할로 혈관의 가시화를 위해 사용된다. 초음파 조영제인 미세기포는 임상 허가를 받았으나 가능한 한 적은 양을 투입하는 것이 가장 좋다.

초음파 PIV 기법 산란입자로서의 미세기포 관련 연구는 다음과 같은 두 가지 주제로 나눌 수 있다. 일반적으로 초음파조영제는 초음파 가진하에서 주기적인 압축과 팽창을 거치면서 최종적으로 파괴된다. 이는 산란입자의 투입 후, 측정 가능한 초음파 영상의 획득시간 제한을 의미한다. 인체 내 순환 및 초음파 가진하에서 오랫동안 파괴되지 않는 미세기포의 개발은 매우 중요하다. 초음파 조영제의 수명을 향상시키기 위한 연구는 초음파 PIV 측정 기법 개발과는 별도로 많은 연구 그룹에 의해 지속적으로 연구가 진행되고 있고 최근에는 두 장의 폴리머 막을 사용해 생존시간을 향상시킨 새로운 미세기포의 개발도 발표되고 있다.

두 번째 연구주제는 초음파 가진하에서의 미세기포의 반응연구로 초음파 가진 시, 다양한 산란파 모드가 존재하는 것이 밝혀졌다. 이로부터 미세기포로부터 나온 산란파는 가진된 초음파와 동

초음파 조영제는 혈관가시화를 위해 개발되었으나, 초음파 PIV 기법의 산란입자 및 약물 전달, 그리고 특정 세포의 타게팅 등의 다양한 분야로의 응용연구가 이루어지고 있다.

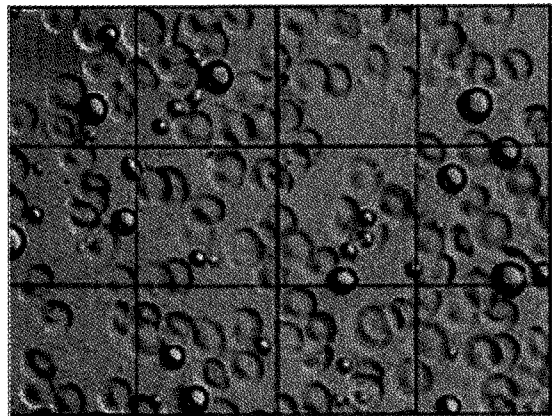


그림 4 적혈구와 초음파 조영제(Optison®)의 현미경 사진 (<http://www.amershamhealth-us.com/optison/>)

일한 기본파를 포함하여 서브 하모닉에서 2차 및 3차 고조파까지 다양한 주파수를 갖는다. 이를 이용하면 산란입자로부터 반사된 초음파 신호의 S/N비를 증가시킬 수 있다. 현재 초음파 기기에 고조파 모드, PI(Pulse Inversion) 기법 등으로 이러한 특성이 적용되고 있다. 이와 더불어 가진파의 파형도 최적화시키는 연구 등도 이루어지고 있다.

산란입자로서의 미세기포 연구의 최종 목표는 초음파 입자영상의 신호 대 잡음비를 향상시켜 측정결과의 정확도를 향상시키고 복잡한 인체조직 내에서 미세기포의 위치를 정확히 추적하는 것이다.

초음파 조영제로 처음 개발된 미세기포는 초음파 PIV기법의 산란입자 역할뿐만 아니라, 약물 전달, 특정 세포 타게팅 등의 다양한 분야의 응용 연구가 활발히 이루어지고 있다.

### 초음파 영상을 이용한 속도측정기법의 미래

초음파 도플러기법의 단점을 극복하기 위해 처음 제안된 초음파 영상 속도측정기법은 산란입자의 문제를 해결하고 인체내부 혈류유동에의 응용가능성을 보여 주었다. 초음파 영상의 특성으로 인한 시공간 해상도를 향상시켜야 하는 연구과제가 있으나 이를



그림 5 개의 좌심실 이완 시의 초음파 영상

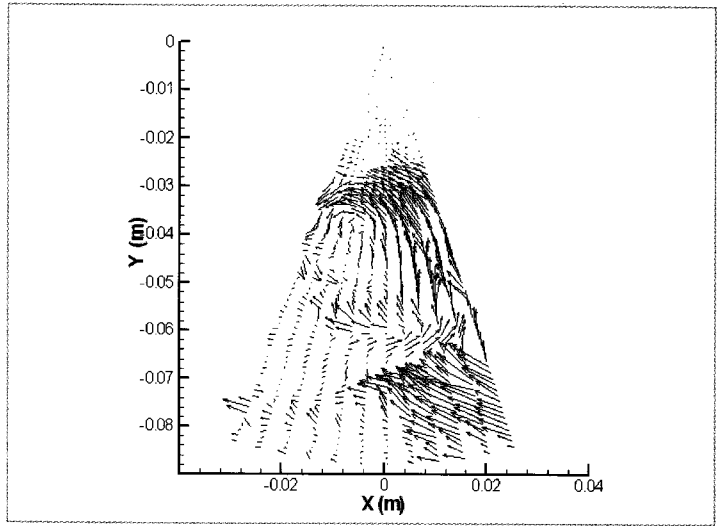


그림 6 좌측의 초음파 영상으로부터 획득한 심실 내부 유동의 속도장 분포

극복하기 위해 하드웨어와 소프트웨어 측면 모두에서 활발히 연구가 진행되고 있다.

현재 초음파 영상을 이용한 속도측정기법은 동물실험을 통해 심실 내부유동, 대동맥 유동 측정 등에 사용되어 성능을 검증하고 있다. 이러한 연구과정을 거쳐 가

초음파 PIV 기법은 하드웨어 및 소프트웨어의 모든 측면에서 개발연구가 이루어지고 있다. 현재 동물실험을 통해 성능 검증 연구가 진행되고 있다.

까운 미래에는 초음파 기기에 탑재되어 도플러 기법이 제공하지

못하는 인체내부 혈류 정보를 제공할 수 있으리라 기대된다.

## 기계용어해설

자동열차정지장치(automatic train stop)

ATS로 약기. 정지신호에 근접하면 경보를 울리며, 기관사가 시간내에 제동하지 않으면 비상 제동을 작동, 열차를 정지시키는 장치.

열차속도제어(automatic train control)

ATC로 약기. 운전실내 신호기에 6단계의 속도지시신호가 나타나는데 신호보다 열차속도가 빠르면 자동으로 제동이 걸리는 장치.

열차자동운전(automatic train operation)

ATO로 약기. 자동으로 역간 정시운전, 적정속도 유지, 역 플랫폼의 정위치 정지 등이 이루어지는 운전.

자동 프로그래밍(automatic programming)

부품가공을 위해 작업순서를 결정한 뒤에, 프로그램 언어로 된 프로그램을 컴퓨터를 이용하여 수치제어 테이프에 내장시킨 것.