

수중 물체의 공간 속도 분포 측정을 위한 초음파 펄스 도플러 개발

The Development of Ultrasonic Pulsed Doppler for the Measurement of Velocity Distribution of Underwater Substances

이 은 방*, 大規 茂雄**
(Eun Bang Lee*, Ohtsuki Shigeo**)

* 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

I. 서 론

초음파 도플러 속도계는 관측 대상물에서 반사한 음파의 도플러효과를 이용하여 속도를 측정하는 방식으로 선박의 대지·대수 속도, 조류, 수중 물체의 유동 정보는 물론, 의학 분야에 있어서 생체내의 혈액의 유동 정보를 얻는 방식으로 넓게 사용되고 있다. 특히 수중 미립자, 어군, 혈액과 같이 관측 대상 물체가 다수의 산란체로 구성되어 있기 때문에 흐름이 전체적으로 일정하지 않고 공간적으로 분포되어 있을 경우에는 공간 분해능을 가지고 있는 초음파 펄스 신호를 이용한 펄스 도플러 기술이 제안되어 속도계에 응용되고 있다[1].

초음파 펄스 도플러 속도계는 관측 대상을 향하여 거리 분해능을 가지고 있는 펄스 신호를 일정한 간격으로 송신하고 수신되는 각각의 반향 신호간의 주파수 변동이 송신 간격 동안에 물체가 이동하는 속도 성분과 상호 대응함을 이용하여 속도 정보를 측정하는 방법이다. 그러나 연속파 도플러 속도계와는 달리 측정 속도와 측정 범위가 제한 받을 뿐만 아니라 수신된 펄스 신호의 도플러 주파수의 측정이 간단하지 않다. 수신된 펄스 신호에서 도플러 주파수를 결정하는 방법으로 단순 위상법을 비롯하여 여러 가지 신호처리기술이 개발되었으나 수중의 부유물 또는 산란체가 순시적으로 변하거나 공간적으로 속도 분포를 이루고 있는 경우에는 실시간에 신뢰성이 높은 속도 정보를 얻기가 곤란한 경우가 많다[2]. 이는 다수 존재하는 산란체의 움직임에 대하여 그 측정 모델이 충분히 대응하고 있지 않고 속도 정보를 내포하고 있는 도플러 펄스 파형의 신호처리에 그 특성이 잘 반영되고 있지 않기 때문이다.

본 연구에서는 초음파 수신 펄스 파형의 특성을 고려하여 수중 물체의 속도 분포를 순시적으로 측정하기 위한 새로운 초음파 펄스 도플러 기법의 개발을 목적으로 하고 있다. 본 논문에서는 다수 산란체의 움직임이 초음파 펄스 신호에 주는 영향을 분석하여 적절한 측정 모델을 만들었다. 그리고 연속파의 위상 개념을 도입하여 펄스 신호의 위상을 시간 영역에서 국소적인 데이터를 이용하여 새로이 정의하고 간단한 디지털 계산으로 펄스 신호를 위상으로 변환하는 위상분석법을 고안하였다. 또한 위상분석법을 활용하여 격자에 수신된 도플러 펄스 신호간의 위상차를 결정함으로써 다수 산란체가 공간적으로 분포한 측정 모델에 대해서 속도분포정보를 고분해능으로 신뢰성 높게 측정 가능한 새로운 펄스 도플러 기법을 개발하였다. 끝으로 모델 신호와 실제 산란체의 속도분포정보의 계측을 위한 실험 장치를 만들어 종래의 방법과 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법의 측정 결과를 비교 평가하였다.

II. 측정 모델과 도플러 신호

2.1 도플러 신호

초음파 연속파 도플러 속도계에서는 이동하고 있는 관측 대상을 향하여 일정 주파수의 연속 음파를 방사하고 반사하여 오는 반향신호를 수신한다. 음속에 비하여 반사체의 이동 속도가 충분히 작은 경우에는 수신 신호의 주파수는 식 (1)에 표시된 주파수만큼 변화하게 된다.

$$f_d = \frac{2v_d}{c} f_0 \quad (1)$$

여기서 v_d 는 음파 진행방향의 반사체 속도 성분으로 도플러 속도라고 하며 도플러효과에 의하여 변화된 주파수 f_d 는 도플러 주파수라고 부른다. 매질 속에서의 음속 (c)와 송신 음파의 주파수 (f_0)는 알고 있으므로 도플러 주파수를 검출한다면 도플러 속도를 구할 수 있다. 여기서,

* 한국해양대학교, 해양경찰학과

** 동경공업대학, 정밀공학연구소

접수일자: 1999년 3월 4일

일반적으로 도플러 주파수를 검출하기 위하여 송수신호의 합성 신호를 생성하는데 이 과정은 그림 1과 같은 직교 검파기에 수신 신호를 통과시키는 것과 같으며 식 (2)와 같은 복소 도플러 신호가 생성된다[3].

$$D(t) = ae^{j\omega t} \tag{2}$$

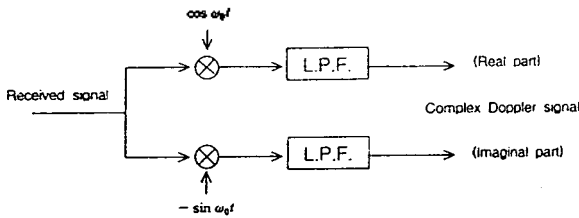


그림 1. 도플러 신호의 생성
Fig. 1. Generation of Doppler signal.

2.2 수신 파형의 성질

공간적으로 분포되어 제각기 다른 속도를 가지고 이동하는 다수 산란체에 반사되어 수신되는 파형의 성질을 고찰하여 보자. 송신 파형 $f_{\kappa 0}$ 을 중심 각주파수 ω 의 펄스 신호로 가정하고 이 신호를 다수 산란체에 송신하였을 때 얻어지는 수신 파형 $f_{\kappa 0}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{\kappa 0} = a(t) \cos \omega t \tag{3}$$

$$\begin{aligned} f_{\kappa 0} &= \sum_n f_i(t - \theta_n) \\ &= \sum_n a(t - \theta_n) \cos \omega(t - \theta_n) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\theta_n = \frac{2l_n}{c}$$

여기서, l 은 음향 펄스 신호의 송신 방향에서의 거리를 나타내고, l_n 은 각각의 산란체 위치를 표시한다. 여기서, 수신 파형을 직교 검파하면 다음과 같은 복소 도플러 신호 $f(t)$ 를 얻을 수 있다.

$$f(t) = \sum_n a(t - \theta_n) e^{j\omega \theta_n} \tag{5}$$

이 때 도플러 신호 $f(t)$ 의 실수 부분, 허수 부분의 값은 서로 무상관이고 각각 그 평균값이 0인 정규 분포에 따르는 랜덤 신호가 되고 그의 진폭 $|f(t)|$ 은 Rayleigh 분포를 따른다[4].

2.3 상대위치변동에 따른 영향

랜덤하게 공간에 분포하고 있는 다수 산란체가 미소한 속도로 변동하였다고 가정하자. 변동 전후에 초음파를 송수신하여 각각 얻어진 도플러 신호를 $f_1(t), f_2(t)$ 라고 하면 두 신호의 차는 산란체의 상대위치 변동이 도플러 신호에 주는 영향으로 일종의 오차 신호 ($e(t)$) 라고 할 수 있다.

$$e(t) = f_1(t) - f_2(t) \tag{6}$$

상대위치의 변동이 어느 정도 랜덤하다고 본다면, $e(t)$ 는 Rayleigh 진폭을 갖는 랜덤 신호라고 볼 수 있다. 이와 같은 오차 신호가 도플러 신호에 추가되었을 경우, 도플러 신호의 위상에 주는 영향을 살펴보면 수신 파형의 진폭이 큰 곳에서는 오차 신호가 미치는 영향이 비교적 적은 데 반하여 수신 파형의 진폭이 작아서 거의 0에 가까운 곳에서는 오차 신호가 큰 영향을 주게 됨을 알 수 있다.

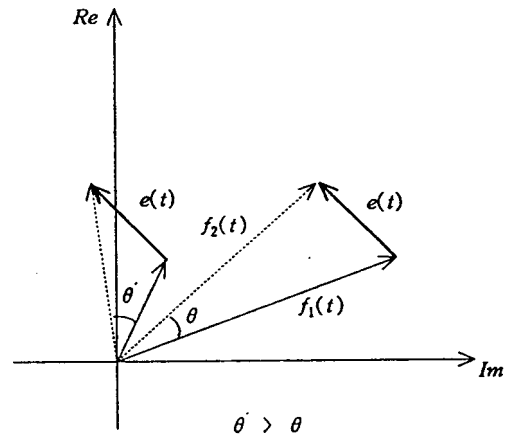


그림 2. 오차 신호의 영향
Fig. 2. The effect of error signal.

III. 초음파 펄스 도플러 방식

3.1 펄스 도플러 속도계의 원리

송신 신호로 연속 초음파를 이용하는 연속파 도플러 속도계에서는 방위 방향의 분해능은 송수신기가 지향성을 갖게 함으로써 실현될 수 있으나, 거리방향의 분해능은 기대할 수 없다. 즉 빔 축상의 모든 위치에 관한 속도 정보가 중첩되어 얻어지는 것이 된다. 그러나 펄스 신호를 이용하는 초음파 펄스 도플러 속도계에서는 특정 영역내(거리 분해능)의 반사체 속도 정보가 선택적으로 얻어질 수 있다.

그림 3에서와 같이 다수 산란체에 펄스 신호를 T 시간 간격으로 2회 송신하여 얻어지는 2개의 도플러 신호를 각각 $f_1(t), f_2(t)$ 로 하고 펄스 신호의 송신 간격 T 동안에 다수 산란체가 거리방향으로 전체가 속도 v 로 이동하고 있다면, 두 수신 신호간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$f_1(t) = e^{j\omega \Delta \theta} f_2(t - \Delta \theta) = e^{j\omega \Delta \theta} f_2(t) \tag{7}$$

여기서 $\Delta \theta$ 는 vT/c 이고, c 는 관측 매질 속에서 음파의 속도이다. 따라서, 두 개의 도플러 신호간의 위상차를 알면 다수 산란체의 이동 속도를 구할 수 있다. 이와 같이 다수 산란체의 이동 속도가 도플러 신호의 위상에만 영향을

주요 진폭은 거의 일정하다는 가정 하에 두 도플러 신호의 위상차로 속도를 구하는 방법을 단순 위상법이라고 부른다[5].

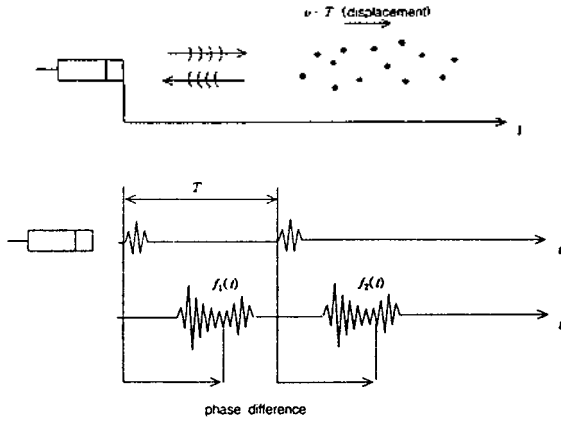


그림 3. 펄스 도플러의 원리
Fig. 3. The principle of pulsed Doppler.

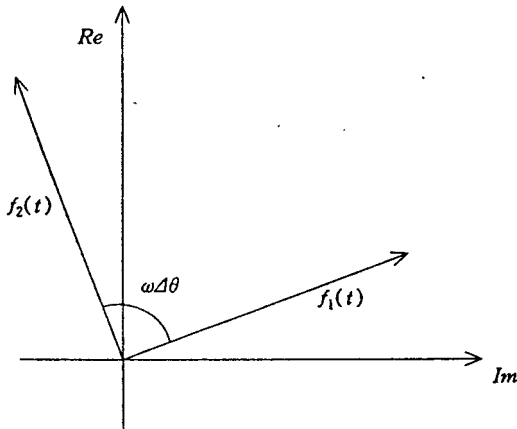


그림 4. 단순 위상법의 개념
Fig. 4. A concept of simple phase technique.

단순 위상법에서 속도 정보는 그림 4에서의 같이 위상차를 이용하여 식 (8)으로 구할 수 있다.

$$v = \frac{c}{T} \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

식 (7)에서 $f_2(t - \Delta\theta) = f_2(t)$ 라고 근사 처리하여 위상차로부터 속도 정보를 얻고 있지만 이와 같은 근사치라는 측정 오차를 야기한다. 따라서 근사식을

$$f_2(t - \Delta\theta) = f_2(t) - \Delta\theta f_2'(t) \quad (9)$$

식 (9)와 같이 1차까지 포함하여 근사화 하는 주파수 보정법이 사용되고 있다.

3.2 거리 분해능

초음파 펄스 도플러 속도계에서는 그림 3에서와 같이 관측 대상물을 향하여 거리분해능을 가지고 있는 펄스 신호를 송신하여 산란체로부터 반사되어오는 수신 파형을 이용하여 특정 거리에 존재하는 물체의 속도 정보를 측정하고 있다. 연속파의 도플러효과를 이용하는 경우와는 달리 송신되는 펄스의 길이(Δt)에 따라 다음과 같은 거리분해능(Δd)을 갖는다.

$$\Delta d = \frac{c\Delta t}{2} \quad (10)$$

즉, 수신 파형에서의 어느 한 점의 값은 그의 전후 $\frac{\Delta d}{2}$ 의 범위에 포함되어진 산란체의 정보를 반영하게 된다. 그러므로 펄스 도플러 속도계에서는 거리 분해능(Δd)으로 펄스 신호의 진행 방향에 각각의 위치에서의 속도 정보의 검출이 가능하다.

3.3 시뮬레이션 실험

종래의 단순 위상법의 측정 결과와 문제점을 검토하고 새로이 제안할 기법과 비교 분석하기 위하여 그림 5와 같이 초음파 빔 방향에 일정한 속도 분포를 이루고 있는 다수 산란체가 존재하는 측정 모델을 설정하였다. 그리고 얻어진 수신 파형을 단순 위상법을 이용하여 속도 분포를 측정하였다. 여기에 주어진 산란체의 성질과 수신 파형에 관한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 조건
Table 1. Simulation condition.

산란체의 영역	30 [mm]
산란체의 밀도	100 [개/mm]
초음파 속도 c	1500[m/sec]
송신 중심주파수 f	2 [MHz]
송신 펄스의 길이 Δt	3.0 [μ sec]
송신 간격 T	200 [μ sec]

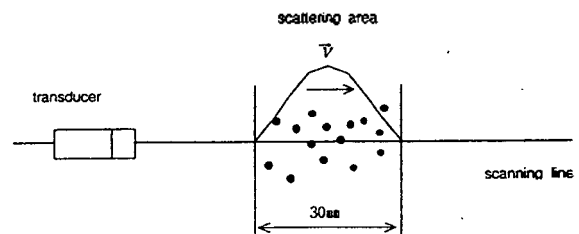


그림 5. 시뮬레이션 모델
Fig. 5. A model of simulation.

그림 6은 위의 조건에서 얻어진 수신 파형을 거리 척도로 표시한 것이다. 그림 7은 시뮬레이션에서 얻어진 수신 파형에 단순 위상법을 적용하여 산란체의 속도를 측정

한 결과이다. 측정 결과와 부여한 속도 분포를 비교하여 보면 알 수 있듯이 단순 위상법에 의한 측정 정도는 그렇게 높지 않지만 현재 일반적으로 의학용 초음파 도플러 진 단장치에 있어서 단순 위상법이 주파수 측정의 기본 원리로 사용되고있다. 특히 수신 파형의 진폭이 작은 곳에서 측정 값이 불안정하여짐을 알 수 있다.

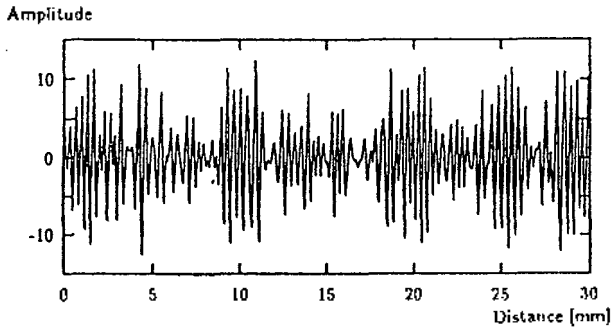
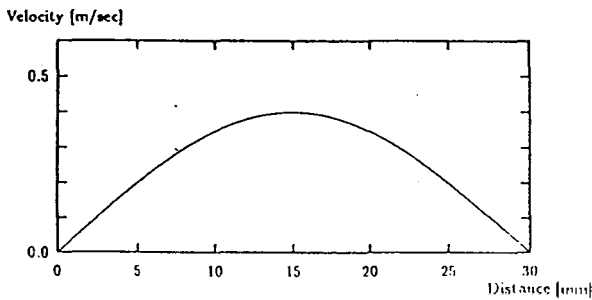
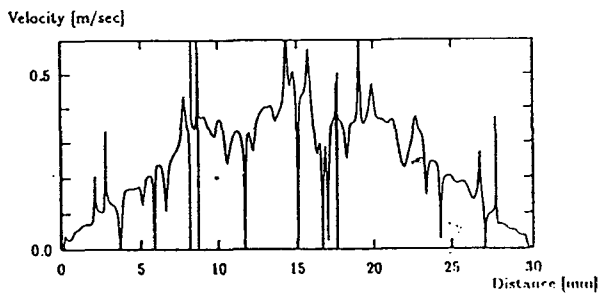


그림 6. 수신 파형
Fig. 6. Received waveform.



(a)



(b)

그림 7. 속도 분포(a)와 단순 위상법에 의한 측정 결과(b)
Fig. 7. Velocity distribution(a) and results measured by simple phase technique.

이러한 원인으로서는 앞에서 서술한 오차 신호가 생각될 수 있다. 즉, 송신 간격에 있어서 산란체의 상대적인 위치 관계가 변동하게되면 그 영향이 오차 신호가 되어 수신 파형에 나타나게 되고 결과적으로는 속도 정보의 측정값을 불안정하게 만든다. 초음파 빔 방향의 거리분해능에 해당하는 구간 내에 있어서 산란체 속도가 불 균일하기

때문에 발생하는 것으로 단순 위상법에 있어서는 산란체의 속도 분산이 수신 파형에 불가피한 영향을 주게됨을 알 수 있다. 따라서 산란체의 속도 분포에 의한 영향을 줄이고 도플러 수신 파형으로부터 신뢰성이 높은 속도 정보를 추출하기 위한 신호처리법이 필요하다.

IV. 위상 분석법에 의한 펄스 도플러 기법

4.1 위상의 개념 및 정의

위상은 연속 정현파의 한 주기내의 미세 시간을 표시 하기 위한 변수이기 때문에 신호의 순시적인 평가를 위해서 유용한 정보이다[6,7]. 시간 영역에서 펄스 신호의 위상이 연속 정현파에서와 같이 추출될 수 있다면 펄스 도플러 시스템에서 이동 물체의 속도와 그 분포의 측정에 응용될 수 있다. 여기서 펄스 신호의 위상을 새로이 정의하여 보자.

정현파의 한 주기 내의 신호 $f(t)$ 를 복소수 좌표로 표시 하면 위상 $\theta(t)$ 와 진폭 $A(t)$ 로 표시될 수 있으며 위상 $\theta(t)$ 은 다음 식과 같이 시간 함수로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \arg(\text{Re}(f(t)) + j\text{Im}(f(t))) \quad (11)$$

위상 $\theta(t)$ 을 계산하기 위해서는 실 신호와 관계되는 허수 신호가 필요하며 순시적으로 변하는 신호를 실시간에 평가 하기 위해서는 국소부의 데이터를 이용하여 위상을 도출 하는 것이 필요하다. 먼저, 위상 도출에 관한 기본적인 개념을 이해하기 위해 정현파 $s(t)$ 에서 위상을 구하여 보 도록 하자. 시간 $t+r$ 에서의 신호 $s(t+r)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s(t+r) = A \sin(\theta(t) \cos \omega r + A \cos(\theta(t) \sin \omega r) \quad (12)$$

여기서, $\theta(t)$ 는 한 주기 내의 위상 함수이다. 시간 r 를 정현파의 주기 T 로 한다면 t 에서의 위상 $\theta(t)$ 는 식 (13)와 같이 계산 될 수 있다. 식 (13)은 신호의 위상이 $t-r$ 부터 $t+r$ 까지의 국소부 데이터로 도출될 수 있음을 시사하여 준다[8].

$$\theta(t) = \arg\left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t+r) \sin \omega r dr + j \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t+r) \cos \omega r dr\right) \quad (13)$$

4.2 위상 분석법

펄스 도플러 속도계에서 같이 펄스 신호분석에 위상의 개념이 도입되기 위해서는 연속파 뿐만 아니라 모든 신호 에서의 위상이 일반화되어야 한다[9,10]. 여기서는 펄스 도플러 신호를 위상으로의 분석을 목적으로 식 (13)의 위상 함수를 모든 신호 $f(t)$ 에 적용 가능하도록 확대하여 보자. 그러기 위해서는 먼저 위상의 정의에 이용되는 신호의

국소부 영역의 결정이 필요하다. 본 논문에서는 분석할 신호의 주기성을 이용하여 신호의 자기상관으로부터 정의 구간(T_s)을 결정함으로써 위상을 모든 신호에 대하여 식 (14)와 같이 일반화하였다. 펄스 도플러 속도계에서는 T_s 는 송신 펄스의 주기를 이용함으로써 송신 주파수 성분이 강조된 위상 함수를 얻을 수 있다.

$$\theta(t) = \arg\left(\int_{-\frac{T_s}{2}}^{\frac{T_s}{2}} f(t+\tau) \sin \omega \tau d\tau + j \int_{-\frac{T_s}{2}}^{\frac{T_s}{2}} f(t+\tau) \cos \omega \tau d\tau\right) \quad (14)$$

식 (14)는 신호를 국소부의 데이터를 이용하여 정의된 위상으로 분석함으로써 시간 가변적인 신호의 실시간 해석에 유용하며, 특히 펄스 도플러 신호를 이와 같은 위상분석법으로 변환한다면 간단히 펄스 도플러 신호간의 위상차가 결정됨으로 속도 정보의 추출이 가능할 수 있다.

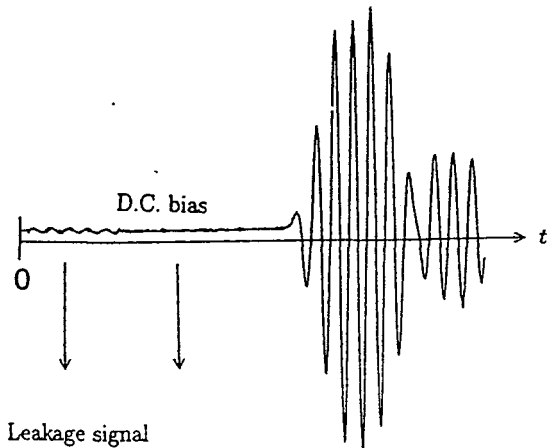


그림 8. 펄러 신호의 위상곡선
Fig. 8. The phase curve of pulsed Doppler signal.

4.3 펄스 신호의 위상 분석

그림 8은 초음파 펄스(tone burst pulse)를 산란체에 송신하여 얻어진 도플러 펄스 신호를 위상분석법으로 변환하여 얻은 위상 곡선을 나타낸다. 수신 신호를 위상으로 분석한 위상곡선에서는 D. C. bias 성분이 제거되었으며, 진폭이

크기가 다른 신호가 대등하게 위상함수로 표시되어 모양과 크기가 다른 신호간의 위상차의 결정이 용이함을 알 수 있다. 여기서 위상의 계산은 그림 9에서와 디지털 처리하여 식 (15)에 의해 구하였다.

$$\theta(t) = \arg\left(c - \frac{a+e}{2} + j(d-b)\right) \quad (15)$$

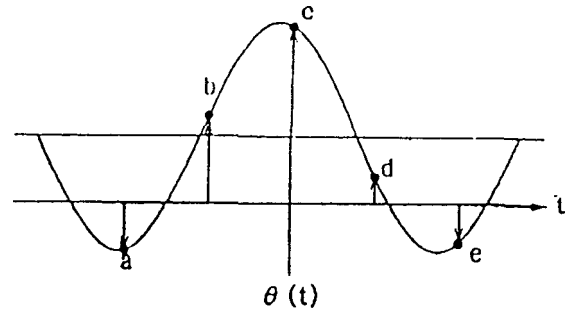


그림 9. 이산처리에 의한 위상계산.
Fig. 9. The phase calculation by digital processing.

4.4 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법

펄스 도플러 속도계에서는 일정한 간격으로 송신하고 수신된 펄스 도플러 신호를 분석하여 주파수 편이에 해당하는 속도 정보를 측정하고 있다. 그러나 수신된 도플러 신호는 송신 신호(tone burst pulse)와는 달리 진동자와 매질의 전달 특성 등이 반영된 복수의 주파수 성분을 갖는 복잡한 파형이 된다. 이러한 수신 파형 간의 주파수 변동을 직접 측정하기 어려워 단순 위상법 등에서의 같이 송수신 주파수를 동일한 것으로 무리하게 가정하여 위상차를 구하고 있다. 따라서 산란체의 속도가 시간적으로 가변하거나 산란체의 속도가 공간적으로 분포되어 있을 경우 실시간에 고 분해능의 속도 정보를 신뢰성 높게 구할 수 없다.

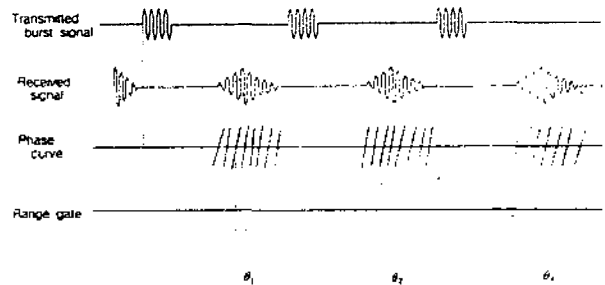


그림 10. 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법
Fig. 10. The principle of pulsed Doppler by phase analysis technique.

여기서는 그림 10에서와 같이 위상분석법을 이용하여 간단히 고 분해능의 속도 정보 추출을 위한 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법을 제안한다. 일정한 간격(T_s)으로 격시에 수신된 펄스 도플러 신호를 식 (14)으로 분석

하여 두 위상 곡선에서 위상차를 구함으로써 속도 정보를 식 (16)에서 간단히 얻을 수 있다.

$$v = \frac{c}{T_b} \cdot \Delta\theta \quad (16)$$

4.5 모델 신호에 대한 측정 결과 비교

앞에서 기술한 모델 도플러 신호에 대하여 제안된 위상 분석법에 의한 펄스 도플러 기법으로 속도 정보의 측정 결과를 그림 11에 나타내었다.

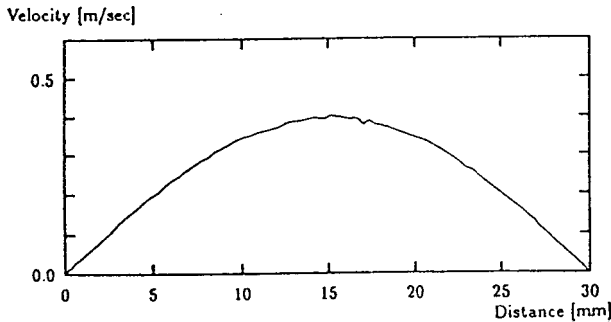


그림 11. 위상분석법에 의한 측정 결과
Fig. 11. The results measured by phase analysis technique.

그림 7의 단순 위상법에 의한 측정 결과에서는 수신 신호의 진폭이 작은 곳에서 큰 오차가 나타나며 전반적으로 산란체의 이동이 측정 결과에 영향을 주고 있어 신뢰성이 높지 않았다. 한편 제안된 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법에 의한 측정 결과는 신뢰성이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 이는 위상을 시간 영역에서 구할 때 초음파 빔 진행 방향의 일정 구역의 데이터를 이용함으로써 다수 산란체의 속도를 평균하는 효과가 작용하였기 때문이라고 생각된다.

V. 계측시스템 및 결과 고찰

5.1 계측시스템

그림 12는 산란체의 속도 계측을 위한 계측시스템의 블록도이agram이다. 측정 과정을 요약하면 다음과 같다. 먼저 수조 내부에 파이프를 통과하도록 하여 파이프 내에 다수 산란체(미소 유리 파편)를 포함한 물을 중력차를 이용하여 정상류를 만들어 흘려보내고 이 때 단위 시간당 파이프로부터 유출되는 물의 양을 측정하였다. 다음은 파이프에 초음파를 송신하여 파이프 내부의 유속분포를 측정하기 위하여 수신 파형을 초음파진단장치로부터 waveform recorder에 저장 기록하고 computer를 이용하여 데이터처리를 실시하였다. 여기서는 단위 위상법과 위상분석법 2가지 방법을 이용하여 속도 정보의 측정하고 측정 결과는 이론 치와 비교하여 평가를 하였다.

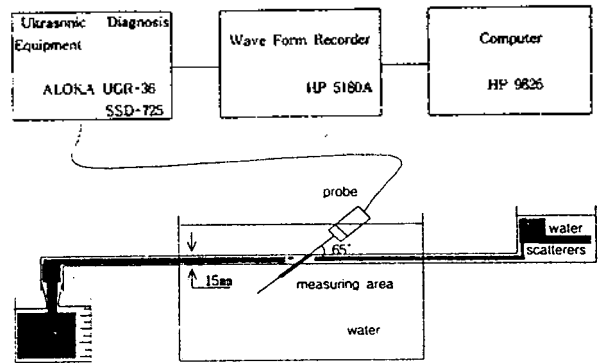


그림 12. 측정 시스템의 개요
Fig. 12. The diagram of experimental system.

초음파의 주사선방향의 거리를 파이프에 대하여서는 입사각 65°로 초음파를 송신하고 측정은 주사선상의 파이프 부근에 측정영역을 설정하여 측정을 실시하였다. 구체적인 실험 조건은 표 2와 같다.

표 2. 실험 조건
Table 2. Experimental condition.

송신 파형의 조건	수신 파형의 조건	그 밖의 조건
초음파음속: 1500[m/sec]	샘플링 주파수: 20[MHz]	측정영역: 30[mm]
중심주파수: 2[Mhz]	양자화 비트수: 10[bit]	송신입사각: 65°
송신 간격: 200[μ sec]		파이프내경: 15[mm]
펄스길이: 5.0[μ sec]		다수산란체 지름: 17[μ]
거리분해능: 3.75[mm]		

5.3 실험 결과 및 고찰

단위 시간에 파이프로부터 유출되는 물의 체적은 10.7 [cm³/sec] 이었고 이 경우 유속분포의 이론 값은 그림 13과 같다. 그림 14는 측정 영역에 있어서 수신 파형을 거리척도로 표시한 것이고 그림 15는 각각 유속분포를 단순위상법과 위상분석법으로 측정한 결과이다.

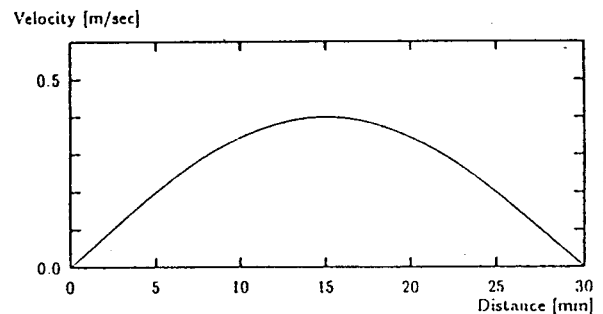


그림 13. 유속 분포의 이론 값
Fig. 13. The theoretical values of current speed.

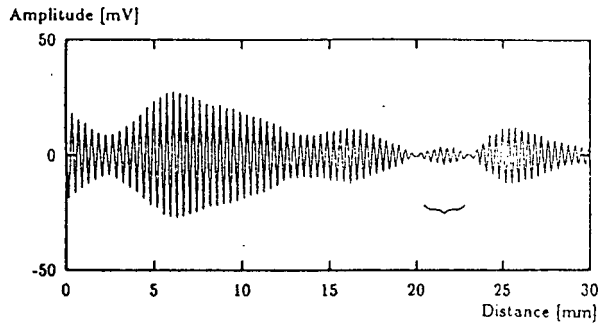
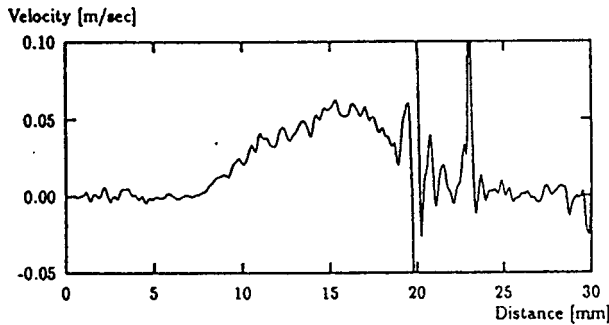
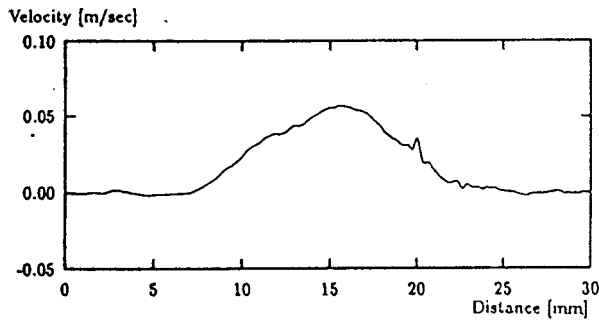


그림 14. 측정 실험에서 수신된 파형
Fig. 14. The waveform received in measuring experiment.



단순 위상법(a)



위상 분석법(b)

그림 15. 단순 위상법(a)과 위상분석법(b)에 의한 측정 결과의 비교
Fig. 15. The comparison of results measured by simple phase technique and phase analysis technique.

단순 위상법을 이용한 측정 결과는 진폭이 영에 가까운 부근에 있어서 이론 값의 유속분포와는 많은 차이가 있고 매우 불안정한 측정결과가 얻어졌다. 그러나 위상분석법 이용한 경우 동일 장소에서도 비교적 이론 값에 가까운 양호한 측정 결과를 얻었다.

VI. 결론 및 과제

종래의 초음파 펄스 도플러 방식에 있어서 다수 산란체의 공간 분포에 의한 파형의 영향에 대해서 대응 모델을 만들어 검토하고 초음파 수신 펄스의 특성을 고려할 수

있는 시간 영역에서의 위상 분석법을 제안하였다. 또한 수중 물체의 속도 분포를 고 분해능으로 실시간에 신뢰성 높게 측정할 수 있는 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법을 제안하고 시뮬레이션과 계속 실험을 통해서 고정밀도로 속도 정보의 측정이 가능함을 확인하였다.

제안된 펄스 도플러 기법은 수중의 산란체의 속도 정보의 추출에 유용한 방법으로 생각되나 거리 분해능의 개선과 산란체의 형상 등의 영향에 관한 계속적인 연구 필요하다. 앞으로 다양한 상황에서의 측정 실험과 정밀도 개선을 통하여 시제품의 시스템 제작을 해 나갈 계획이다.

참고문헌

1. C. J. Hartley, "Resolution of Frequency Aliases in Ultrasonic Pulsed Doppler Velocimeters," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-28, No. 2 pp.69-74, Mar. 1981.
2. 이은방, 이상집, "수중물체의 속도 분포 측정에 관한 기초 연구", *해양안전학회지*, pp.1-10, 1996.
3. N. Tanaka and S. Ohtsuki, "Signal processing technique as a simple extensive Doppler Method," *日本音響學講演論文集*, pp. 783-784, Sept. 1990.
4. T. A. Tuthil, R. H. Sperry and K. J. Parker, "Deviation from Rayleigh statistics in Ultrasonic speckle," *Ultrasonic imaging* 10, pp.81-89, 1988.
5. C. J. Hartley, "Resolution of frequency aliases in ultrasonic pulsed Doppler velocimeters," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* SU-28, pp.69-74, 1981.
6. E. B. Lee and S. Ohtsuki, "Phase-time method for measuring sound speed in inhomogeneity," *WESTPRAC 5*, Seoul, 1994.
7. E. B. Lee and S. Ohtsuki, "A phase analysis of ultrasonic pulse signal for measuring travel time," 128th conference of acoustical society of America, Texas, 1994.
8. E. B. Lee and S. Ohtsuki, "An extended zero-crossing method for ultrasonic velocity measurements," *J. Acoustical Society of Japan(E)*, Vol. 16, No. 6, pp341-344, 1995.
9. E. O. Papadakis, "Absolute accuracy of the pulse-echo overlap method and the pulse-superposition method for ultrasonic velocity," *J. Acoust. Soc. Am.* 52, pp843 -846, 1972.
10. P.Y. Ktonas and N. papp, "Instantaneous envelop and phase extraction from real signals," *Signal processing* 2, No.4 pp-373-385, 1980

▲이 은 방(Eun Bang Lee)



1985년 2월 : 한국해양대학교 항해학과 졸업

1988년 2월 : 한국해양대학교 대학원 항해제기학 전공 공학 석사

1995년 3월 : 동경공업대 대학원 전자시스템(초음파 공학)전공 공학 박사

1991년 4월 ~ 1992년 3월 : 동경공업대학 정밀공학연구소 연구원

1995년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양경찰과 조교수

※ 주관심분야 : 초음파 공학, 수중음향학, 해양장비 및 해양안전공학

▲大規 茂雄(Ohtsuki Shigeo)

1965년 3월 : 동경공업대학 이공학부 전자공학과 졸업

1967년 3월 : 동경공업대학 이공학연구과 전자공학전공 공학석사

1980년 3월 : 동경공업대학 공학박사

현재 : 동경공업대학 정밀공학연구소 교수

※ 주관심분야 : 의용 초음파, 초음파 도플러, 음장계산