

# 초음파 펄스 도플러 속도계의 성능 개선에 관한 연구

이 은 방\* · 이 상 집\*\*

## A Study on the Improvement in Performance of Ultrasonic Pulsed Doppler Velocimeter

*Eun-bang, Lee\* · Sang-Jib, Lee\*\**

### <목 차>

#### Abstract

#### 1. 서 론

#### 2. 초음파 펄스 도플러 속도계의 한계 및 단순위상법의 문제점

##### 2.1 초음파 펄스 도플러 원리 및 한계

##### 2.2 단순위상법의 문제점 분석

##### 2.3 시뮬레이션에 의한 측정정도 분석

#### 3. 순시위상법의 제안

##### 3.1 순시위상법의 원리

#### 3.2 펄스 신호의 위상 변환 이론

#### 3.3 위상 곡선과 위상차 계산

#### 3.4 모델 신호의 측정 결과 분석

#### 4. 계측 시스템 및 결과 고찰

##### 4.1 계측 시스템

##### 4.2 측정 결과의 비교 분석

#### 5. 결 론

#### 참고문헌

### Abstract

In the velocimeter, the ultrasonic pulse signal is used for measuring the profile velocity of moving targets distributed in space because of the merits of its high distance resolution and harmless affect to the human body. The velocity reading in conventional ultrasonic pulsed velocimeter depends on the wave pattern reflecting the spatial distribution of scatterers and includes observational error due to the signal processing of analyzing pulse signal.

In this paper, we evaluate an influence of the received waveform of pulsed signal on the velocity information by setting a model. Subsequently, in order to improve the distance resolution and to obtain precise velocity information without the influence of the spatial distribution of scatterers, we propose a new method for the analysis of Doppler pulsed signal, in which the pulsed signal is transformed into a phase function with local data. Finally, it is confirmed that the performance of the velocimeter is more improved in the proposed method than in the conventional one.

\* 한국해양대학교 해양경찰학과 교수

\*\* 한국해양대학교 해사수송과학부 교수

## 1. 서론

유동 속도는 물질과 물체의 운동 특성 규명을 위한 기본 정보로 파동의 도플러 효과를 이용하는 정량적인 측정 방법이 널리 사용되고 있다. 특히 수중에서는 전파 특성이 우수한 초음파 도플러 속도계가 선박의 대지·대수 속력을 비롯하여 조류, 어군, 수중미립자 등의 유동정보 측정에 널리 활용되고 있을 뿐만 아니라 의학 분야의 혈액의 흐름에 관한 진단 정보의 추출과 해저 및 지질 속의 자원 탐사, 매몰 사고에서의 인명 구조를 위한 기초 장비로 그 활용 범위가 확장되어 가는 추세이다. 특히 최근에는 미립자, 어군 혈액과 같이 속도가 다른 다수의 산란체로 구성되어 있기 때문에 흐름이 전체적으로 일정하지 않고 공간적으로 분포되어 있는 관측 대상물의 순시적인 속도 분포 측정을 위한 연구에 관심이 모아지고 있으며 몇몇 결과들은 실용화 단계에 이르고 있다 [1][2].

그 가운데 초음파 펄스 도플러 속도계는 관측 대상 물체를 향하여 거리 분해능을 가지고 있는 음향 펄스 신호를 일정한 간격으로 송신하고 수신되는 각각의 반향 신호간의 위상차가 송신 간격 동안에 물체가 이동하는 속도 성분과 상호 대응함을 이용하여 특정 영역에서의 속도 정보를 측정하는 방법으로 profile velocity 계측에 적합한 방식으로 기대되고 있다. 연속파 도플러 속도계에서 초음파빔 축상의 모든 위치에 존재하는 반사체의 속도 성분이 중첩되어 전체 평균적인 속도 정보가 측정되는 반면, 특정 영역내의 반사체의 속도 정보가 선택적으로 간단한 신호처리 과정으로 얻어지기 때문에 그 활용 범위가 확대되고 있다. 그러나 다수 존재하는 산란체의 움직임에 대하여 그 측정 모델이 충분히 대응하고 있지 않을 뿐만 아니라 기존의 신호처리과정에서 단순화 조작과 필터를 이용함으로써 수신 파형의 영향에 노출되고, 산란체가 순시적으로 변하거나 공간적으로 속도 분포를 이루고 있는 경우에는 실시간에 신뢰성이 높은 속도 정보를 얻기가 곤란한 경우가 많다.

본 연구에서는 다수 산란체의 움직임이 초음파 펄스 신호에 주는 영향을 검토하고 종래의 측정법에 의한 측정 결과에 미치는 영향을 평가하여 적절한 측정 모델을 고안하였으며 산란체의 공간적 분포를 고려하여 다수 산란체의 평균 속도 정보를 신뢰성 높게 추출하기 위하여 시간 영역에서의 순시위상법을 제안하고자 한다. 또한 모델 신호와 실제 산란체의 속도 정보를 측정하기 위하여 계측 실험 장치를 만들고 종래의 단순위상법과 순시위상법에 의하여 측정 결과를 비교 분석함으로써 제안된 신호처리기법의 신뢰성을 검증하기로 한다.

## 2. 초음파 펄스 도플러 속도계의 한계 및 단순위상법의 문제점

### 2.1 초음파 펄스 도플러 속도계의 원리 및 한계

초음파 도플러 속도계에서는 측정 대상 물체를 향하여 음파를 송신하고 반사체에 반사되어 오는 반향 신호를 수신하여 분석함으로써 물체의 유동 정보를 측정하고 있다. 음속에 비하여 반사체의 이동 속도가 충분히 작은 경우에는 수신 신호의 주파수는 다음 식에 표시된 주파수만큼 변화하게 된다.

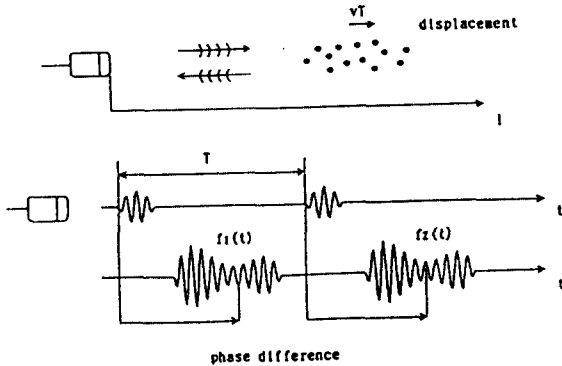
$$f_d = \frac{2v_d}{c} f_0 \quad (1)$$

여기서  $v_d$ 는 음파 진행방향의 반사체 속도 성분으로 도플러 속도라고 하며 도플러 효과에 의하여 변화된 주파수  $f_d$ 는 도플러 주파수라고 부른다. 매질의 음속과 송신 신호의 주파수는 알려진 변수이므로 도플러 주파수를 검출하면 도플러 속도를 구할 수 있다. 이와 같은 속도 정보를 검출하기 위한 방법으로 연속파를 이용한 도플러 속도계와 펄스파를 이용하는 도플러 속도계가 개발되어 있다[3]. 전자에서는 방위 분해능은 송수신기가 지향성을 갖게 함으로써 어느 정도 실현될 수 있으나 거리방향의 분해능은 기대할 수 없어 빔축

상의 모든 위치에 관한 속도 정보가 중첩되어 전체 평균적인 속도 정보가 관측된다. 후자에서는 거리분해능을 가지고 있는 펄스 신호를 이용하므로 펄스의 길이( $\Delta t$ )에 따라 식(2)에 표시되는 거리분해능으로 펄스 신호의 진행 방향 각각의 위치에서 선택적 속도 정보의 검출이 가능하다.

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

그러나 연속파 도플러 방식에서와 같이 송수신 신호간의 주파수차를 직접 검출하기가 어렵기 때문에 <그림 1>에서와 같이 동일 간격으로 펄스를 송신하고 수신되는 펄스 파형을 분석하여 속도 정보를 추출하기 위하여 단순위상법, FFT법, 자기 상관법 등 여러 방법들이 제안되고 있다 [4][5].



<그림 1> 초음파 펄스 도플러 속도계의 모델

펄스 도플러 속도계에서 생성되는 펄스 도플러 신호는 송신 펄스 간격으로 샘플링되는 신호가 되기 때문에 정확하게 측정 가능한 주파수는 샘플링 정의(sampling theory)에 의해 제한된다.

$$|f_d| < \frac{f_s}{2} \quad (3)$$

여기서  $f_s$ 는 송수신 펄스의 반복 주파수이다. 이러한 한계를 넘는 고속도의 움직임을 관측할 경우는 aliasing 현상이 발생하여 반사체 속도가 실제의 속도와는 다른 저속의 운동으로 관측되어

진다[6][7]. 또한 송수신 펄스의 반복 주파수에 의하여 속도 정보가 관측 가능한 거리(D)의 범위도 식(4)에서와 같이 제한 받게 된다.

$$D < \frac{c}{2f_s} \quad (4)$$

식(1), 식(3)과 식(4)의 관계를 정리하면

$$|v_d \cdot D| < \frac{c^2}{8f_0} \quad (5)$$

된다. 이 관계는 일정한 주파수의 펄스 신호를 송신하고 속도 측정이 가능한 범위를 결정하게 되면 거기에 따라서 측정 가능한 최대의 속도가 결정됨을 시사한다[8].

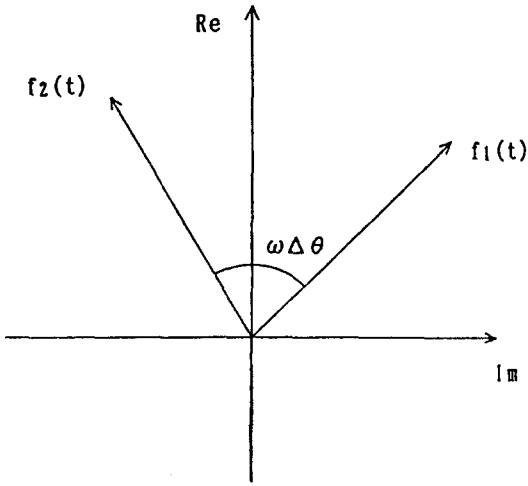
### 2.2 단순위상법의 문제점 분석

<그림 1>에서와 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 동안에 다수 산란체가 파동의 이동 방향으로 전체가 속도  $v_d$ 로 이동하고 있다면, 두 수신 신호간에는 다음과 같은 관계가 성립하고 이들 관계를 복소수 평면상에 표시하면 <그림 2>와 같다.

$$f_1(t) = e^{j\omega_d \Delta t} f_2(t - \Delta t) = e^{j\omega_d \Delta t} f_2(t) \quad (6)$$

$$\Delta \theta = \frac{v_d T}{c} \quad (7)$$

여기서  $c$ 는 음파가 전달하는 매질 속에서 음속이다. 결과적으로 도플러 신호간의 위상차를 알 수 있으면 반사체의 이동 속도를 구할 수 있게 된다. 이와 같이 다수 산란체의 이동 속도가 도플러 신호의 위상에만 영향을 주고 진폭은 거의 일정하다는 가정 하에 두 도플러 신호의 위상차로 속도를 구하는 방법을 단순위상법[9]이라고 하며 신호처리방법이 간단하여 초음파 진단 장치 등에 실용화되고 있다.

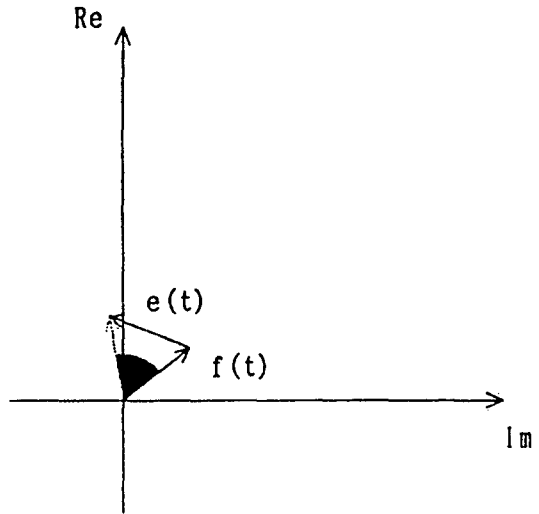
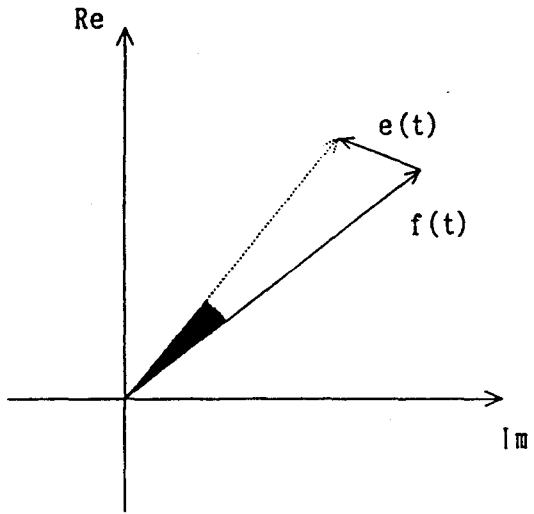


<그림 2> 도플러 신호간의 관계

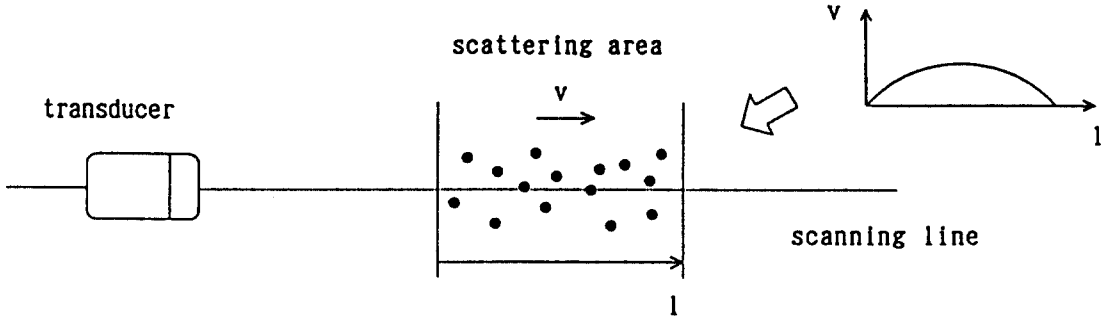
산란체가 공간 내에 다수 분포하고 있고 각각의 산란체의 공간 분포가 랜덤하게 미소 변동하였다고 가정하자. 이 때 변동 전후에 초음파를 송신하고 각각 얻어진 도플러 신호를  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  라고 하고 그들의 차를 오차 신호  $e(t)$  로 하면,

$$e(t) = f_1(t) - f_2(t) \quad (8)$$

이 오차 신호는 산란체의 상대위치 변동이 도플러 신호에 주는 영향이라고 생각할 수 있다. 상대 위치의 변동이 어느 정도 랜덤하다고 본다면, 오차 신호는 레이리 진폭을 갖는 랜덤 신호라고 볼 수 있다. 이와 같은 오차 신호가 도플러 신호에 추가되었을 경우, 도플러 신호의 위상에 주는 영향을 살펴보면 <그림 3>에서와 같이 수신 파형의 진폭이 큰 곳에서는 오차 신호가 미치는 영향이 비교적 적는데 반하여, 수신파형의 진폭이 작아서 거의 0에 가까운 곳에서는 오차 신호가 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.



<그림 3> 신호의 크기와 오차 신호



<그림 4> 시뮬레이션 모델

3.3 시뮬레이션에 의한 측정정도 분석

단순위상법의 측정 정도를 비교 분석하기 위하여 공간적으로 분포되어 제각기 다른 속도를 가지고 이동하는 다수 산란체에 반사되어 수신되는 파형의 성질을 고찰하여 보자. 송신 파형  $f_{\lambda(t)}$ 을 중심 각주파수  $\omega$ 의 펄스 신호로 가정하고

$$f_{\lambda(t)} = a(t) \cos \omega t \quad (9)$$

이 신호를 다수 산란체에 송신하였을 때 얻어지는 수신 파형  $f_{\lambda(t)}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{\lambda(t)} &= \sum_n f_i(t - \theta_n) \\ &= \sum_n a(t - \theta_n) \cos \omega(t - \theta_n) \quad (10) \\ \theta_n &= \frac{2l_n}{c} \end{aligned}$$

여기서  $l$ 는 음향 펄스 신호의 송신 방향에서의 거리를 나타내고,  $l_n$ 는 각각의 산란체 위치를 표시한다. 또 이 수신 파형을 적교 검파함으로써 다음과 같은 복수 도플러 신호  $f(t)$ 를 얻어질 수 있다[10][11].

$$f(t) = \sum_n a(t - \theta_n) e^{j\omega\theta_n} \quad (11)$$

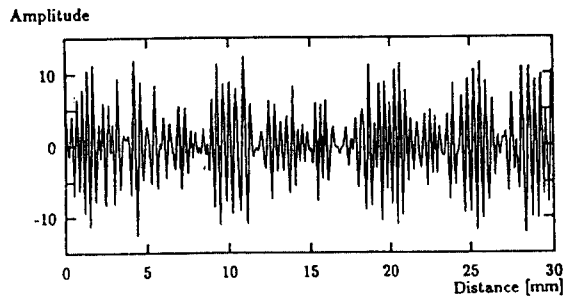
<그림 4>에서와 같이 초음파 펄스빔 방향에

일정한 속도 분포를 이루고 있는 다수 산란체가 존재하는 영역을 설정하고 단순위상법을 이용하여 이 속도 분포를 측정하여 보자. 모델에 주어지는 구체적인 산란체의 성질과 수신 파형에 관한 시뮬레이션 조건은 <표 1>과 같다.

<표 1> 시뮬레이션 조건

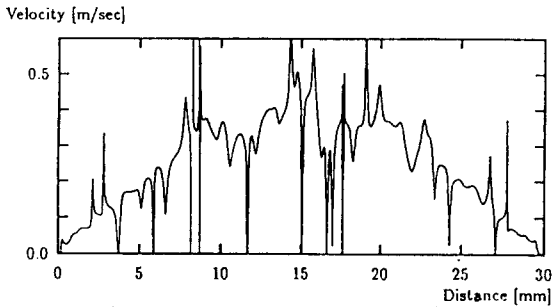
산란체의 영역	30 [mm]
산란체의 밀도	100 [개/mm]
초음파 속도 $c$	1500[m/sec]
송신 중심주파수 $f$	2 [MHz]
송신 펄스의 길이 $\Delta t$	3.0 [ $\mu$ sec]
송신 간격 $T$	200 [ $\mu$ sec]

<그림 5>는 위의 조건에서 얻어진 수신 파형을 거리 척도로 표시한 것이다.



<그림 5> 모델 신호의 수신 파형

시뮬레이션에서 얻어진 수신 파형에 단순위상법을 적용하여 산란체의 속도를 측정된 결과는 <그림 6>과 같다. 측정 결과와 부여한 속도 분포를 비교하여 보면 알 수 있듯이 단순위상법에 의한 측정 정도는 그렇게 높지 않으나 의학용 초음파 도플러 진단장치에 있어서 기본 원리로 사용되고 있다. 수신 파형과 측정 결과를 비교하여 보면 수신 진폭이 작은 곳에서 특히 측정값이 불안정하여짐을 알 수 있다. 측정치가 불안정하게 되는 원인으로써 앞에서 서술한 오차 신호가 생각될 수 있다. 즉, 송신 간격에 있어서 산란체의 상대적인 위치 관계가 변동하게 되면 그 영향이 오차 신호가 되어 수신 파형에 나타나게 되고 결과적으로는 속도 정보의 측정값을 불안정하게 만든다. 이러한 영향은 수신 파형이 미약한 곳에서 더욱 뚜렷하다. 이와 같은 영향은 초음파 빔 방향의 거리분해능에 상당하는 구간 내에 있어서 산란체 속도가 불균일하기 때문에 발생하는 것으로 단순위상법에 있어서는 산란체의 속도 분산이 수신 파형에 불가피한 영향을 주게되어 측정 정도가 약화되어 버린다. 산란체의 속도 분포에 의한 영향을 감소시켜 동일한 수신 파형으로부터 신뢰성이 높은 속도 정보를 추출하기 위하여 새로운 신호처리법을 제안한다.



<그림 6> 단순위상법에 의한 측정 결과

#### 4. 순시위상법의 제안

##### 4.1 순시위상법의 원리

움직이는 반사체에 초음파 펄스를 송신하여 반

사되는 수신 신호는 송수신기의 특성과 매질 전파 특성 등 때문에 동일한 파형이 되지 못하고 넓은 주파수 대역을 갖는 펄스 신호가 되기 때문에 여러 주파수 성분을 포함한 송수신 신호간에 연속파 도플러 방식에서처럼 주파수의 변동으로 도플러 속도를 구하기 어렵다. 따라서 일정한 송신 간격으로 펄스 신호를 송신하여 얻어지는 2개의 수신 펄스신호를 직교 검파하여 복소수 도플러 펄스 신호를 만들고 두 신호의 위상차로부터 속도 정보를 추정하기 위한 여러 가지 신호 처리 기술 방법이 채택되고 있다.

그러나 이와 같은 방법은 필터를 사용하기 때문에 거리분해능의 이외의 파형의 성질이 추정되는 속도 정보에 영향을 미치고 실시간의 계측이 어렵게 되어 신뢰성을 저하시킨다. 결국 주파수를 송신 주파수로 무리하게 가정하여 위상차를 구하고 있기 때문에 이로 인한 오차를 줄이기 위하여 송수신 동작을 100회 이상 반복하여 평균화 동작을 도입되고 있어 산란체의 속도가 순시적으로 변하거나 산란체의 속도가 공간적으로 분포되어 있을 경우 신뢰성 높은 산란체의 평균 속도를 구하는 것이 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 수신 펄스 신호를 시간 영역에서 국소의 데이터를 이용하여 위상 함수로 변환하고 모든 거리에서의 위상차를 일시에 계산하여 거리 변수에 대한 속도 정보를 추출하는 방식을 제안하고자 한다.

##### 4.2 펄스 신호의 위상 변환 이론

신호의 위상은 연속 정현파의 한 주기내의 미세 시간을 표시하기 위한 변수이기 때문에 신호의 순시적인 평가를 위해서 유용한 정보이다. 시간 영역에서 펄스 신호의 위상이 연속 정현파에서와 같이 추출될 수 있다면 펄스 도플러 시스템에서 이동 물체의 속도와 그 분포의 측정에 응용될 수 있다. 정현파의 한 주기 내의 신호  $f(t)$ 를 복소수 좌표로 표시하면 위상  $\theta(t)$ 와 진폭  $A(t)$ 로 표시될 수 있으며 위상  $\theta(t)$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \arg(\operatorname{Re}(f(t)) + j\operatorname{Im}(f(t))) \quad (12)$$

위상  $\theta(t)$ 을 추출하기 위해서는 실 신호와 관계되는 허수 신호가 필요하며 순시적으로 변하는 신호를 실시간에 평가하기 위해서는 국소적인 데이터를 이용하여 위상을 도출하는 것이 필요하다.

여기서 국소 데이터를 이용하여 복소수 신호로 변환하여 위상을 도출에 관한 기본적인 개념을 이해하기 위하여 정현파  $s(t)$ 을 이용하여 보도록 하자.

$$s(t) = A \sin \omega t \quad (13)$$

$t + \tau$ 에서의 신호  $s(t + \tau)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} s(t + \tau) &= A \sin(\omega t + \omega \tau) \\ &= A \sin \omega t \cos \omega \tau + A \cos \omega t \sin \omega \tau \quad (14) \\ &= A \sin \theta(t) \cos \omega \tau + A \cos \theta(t) \sin \omega \tau \end{aligned}$$

여기서  $\theta(t)$ 는 한 주기 내의 위상 함수이다. 시간  $\tau$ 를 정현파의 주기  $T$ 로 한다면  $t$ 에서의 위상  $\theta(t)$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \arg\left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t + \tau) \sin \omega \tau d\tau\right. \\ &\quad \left.+ j \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t + \tau) \cos \omega \tau d\tau\right) \quad (15) \end{aligned}$$

식 (15)는 신호의 위상이  $t - \tau$ 부터  $t + \tau$ 까지의 국소 데이터로 도출될 수 있음을 시사하여 준다.

위와 같은 관계를 바탕으로 위상을 모든 신호에서 일반화하기 위하여 국소 데이터의 범위를 결정할 필요가 있는데 펄스 도플러 속도계에서는  $T_b$ 는 송신 펄스의 주기로 하여 송신 주파수성분에 무게가 실린 위상 함수  $\theta(t)$ 는 시간 영역에서 다음과 같이 정의된다[12].

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \arg\left(\int_{-\frac{T_b}{2}}^{\frac{T_b}{2}} f(t + \tau) \sin \omega \tau d\tau\right. \\ &\quad \left.+ j \int_{-\frac{T_b}{2}}^{\frac{T_b}{2}} f(t + \tau) \cos \omega \tau d\tau\right) \quad (16) \end{aligned}$$

이러한 신호의 위상은 시간 함수로 국소의 데이터를 이용하여 도출되어질 수 있으므로 순시적인 신호의 해석에 유용하다.

### 4.3 위상 곡선과 위상차 계산

단순위상법에서 일정한 간격으로 수신된 두 개의 펄스 신호를 직교 검파를 하고 range gate로 샘플링하여 펄스 도플러 신호를 얻어 분석하는 방식과는 달리 수신된 두 신호를 직접 시간 영역에서 식 (16)에서 정의된 위상 함수로 변환하여 위상 곡선을 얻는다. <그림 7>은 초음파 펄스를 산란체에 송신하여 얻어진 수신 신호와 정의된 위상으로 변환한 위상 곡선을 나타낸다[13].

수신 신호는 D.C. bias 되었고 수신 신호의 앞부분은 송신 신호가 누수된 신호이다. 수신 신호를 위상으로 분석한 위상곡선에서는 D.C. bias 성분이 제거되었으며, 진폭이 크기가 다른 신호가 대등하게 표시됨을 알 수 있다.

### 4.4 모델 신호의 측정 결과 분석

<그림 8>는 앞에서 만들어진 모델 도플러 신호에 대하여 제안된 순시위상법을 이용하여 속도 정보의 측정 결과를 나타낸다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 단순위상법에 의한 측정 결과<그림 6>에서는 수신 신호의 진폭이 작은 곳에서 큰 오차가 나타나며 전반적으로 산란체의 이동이 측정 결과에 영향을 미치고 있어 그렇게 신뢰성이 높지 않은 측정 결과를 보이고 있다. 한편 본 논문에서 제안된 순시위상법에 의한 측정 결과는 전반적으로 신뢰성이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 이는 정의된 위상이 진폭의 배율에는 무관하고 초음파 펄스빔 진행 방향의 일정 구역의 데이

## 5. 계측 시스템 및 결과 고찰

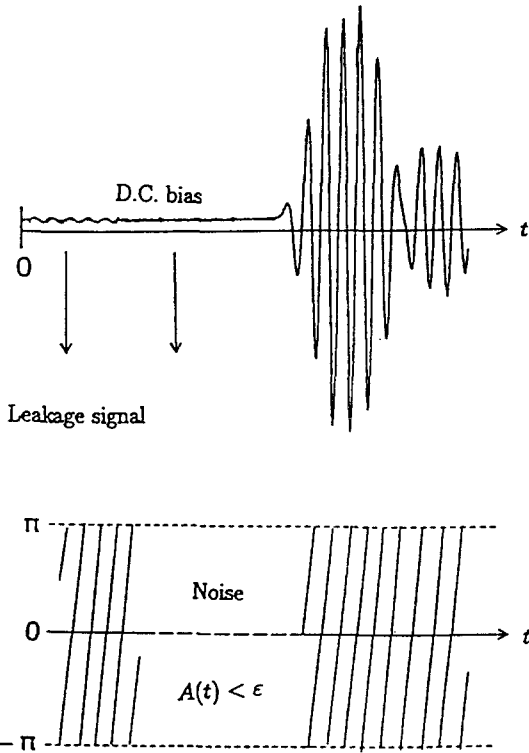
### 5.1 계측시스템

<그림 9>는 산란체의 속도 계측을 위한 계측 시스템의 블럭다이어그램이다. 측정 과정을 요약하면 먼저 수조 내부에 파이프를 통과도록 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. 그리고 파이프에 초음파를 송신하여 파이프 내부에 초음파 펄스를 발사하고 반사된 수신 파형을 waveform recorder에 저장 기록하고 computer로 각각 단순위상법과 순시위상법을 이용하여 속도 정보의 추출하고 측정값을 이론 값과 상호 비교하였다.

초음파의 주사선방향의 거리를  $l$  파이프에 대하여는 입사각  $\phi$ 로 초음파를 송신하고 측정은 초음파 주사선상의 파이프 부근에 측정 영역을 설정하여 측정을 실시하였으며 구체적인 실험 조건은 다음과 같다.

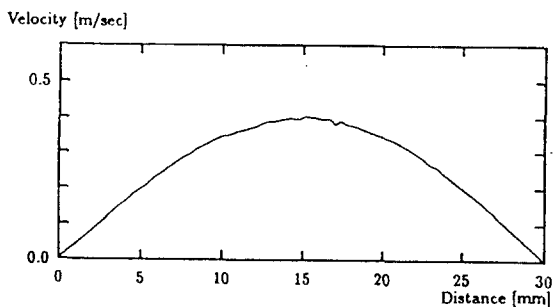
#### <표 2> 실험 조건

송신 파형의 조건	초음파의 음속	1500 m/sec
	송신파형의 중심주파수	2 MHz
	송신 간격	200 $\mu$ sec
	송신펄스의 길이	5 $\mu$ sec
	거리분해능	3.75 mm
수신 파형의 조건	샘플링주파수	20 MHz
	양자화 비트수	10 bit
기타 조건	측정 영역	30 mm
	송신입사각	62°
	파이프 내경	15 mm
	다수 산란체 직경	17 $\mu$



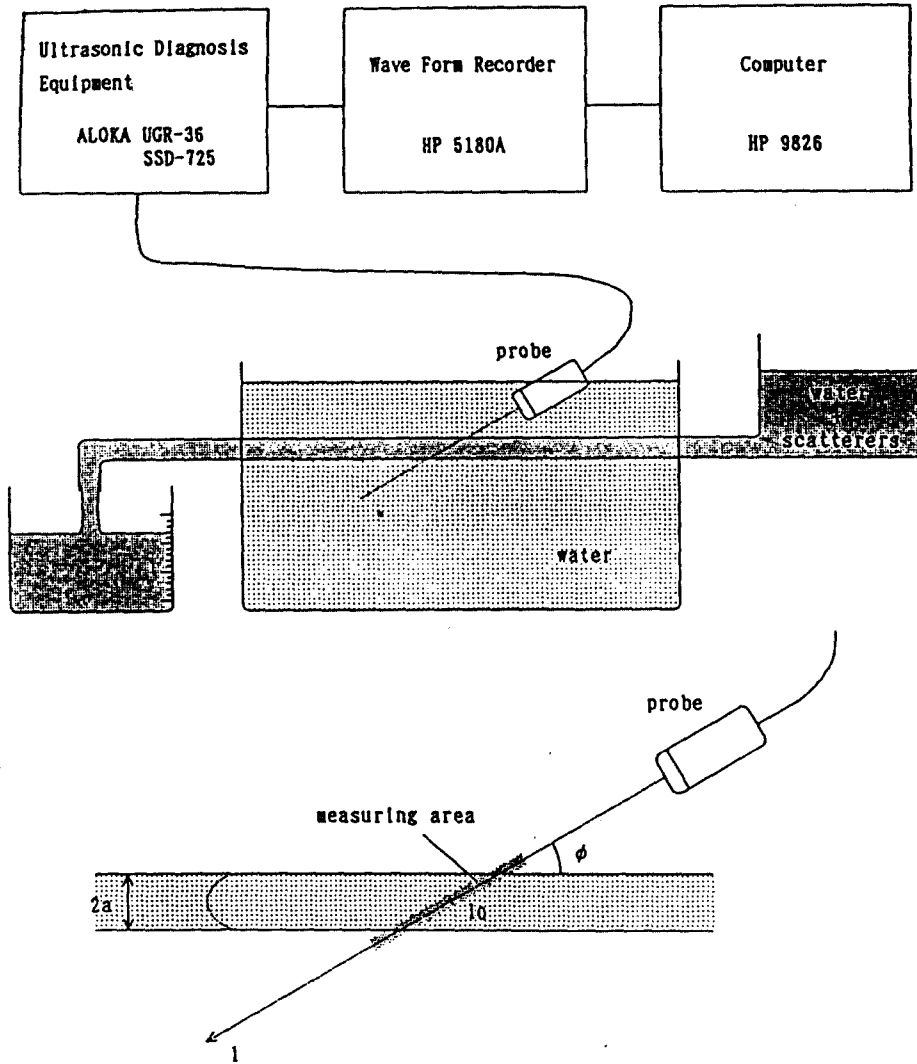
<그림 7> 펄스 신호의 위상 곡선

터를 이용하여 다른 부분의 파형 영향이 감소되었고 송신 펄스의 주기( $T_b$ )내에서 산란체의 속도를 평균하는 효과가 작용하였기 때문이라고 생각된다.



<그림 8> 순시위상법에 의한 측정 결과





<그림 9> 계측 시스템

### 5.2 측정 결과의 비교 분석

단위 시간에 파이프로부터 유출되는 물의 체적은  $10.7 [cm^3/sec]$  이었고 이 때 유속 분포의 이론 값은 <그림 10>과 같으며, <그림 11>은 측정 영역에 있어서 수신 파형을 거리척도로 표시한 것이다. <그림 12>, <그림 13>은 각각 유속분포를 단순위상법과 순시위상법으로 측정된 결과가

다. 결과를 살펴보면 수신 파형의 진폭이 표시(1)된 부근에서는 서로 간섭으로 상쇄되어 거의 영에 가깝게 되어 있다. 단순위상법을 이용한 경우가 부근에 있어서 이론치의 유속분포와는 많은 차이가 있고 매우 불안정한 측정결과가 얻어졌다. 그러나 순시위상법을 이용한 경우에는 비교적 이론치에 가까운 양호한 측정 결과를 얻었다[14].

## 6. 결 론

종래의 초음파 펄스 도플러 속도계에서는 공간 분포를 이루고 있는 산란체의 개개의 움직임에 영향을 받기 쉽기 때문에 측정 정도가 불안정하게 되어 정량적인 속도 정보로서 신뢰성이 저하되었다. 본 연구에서는 이와 같은 점에 주목하여 수신 파형에 주는 성질을 검토하고 보다 신뢰성이 높은 속도 정보를 수신 파형으로부터 도출하기 위하여 순시위상법에 의한 펄스 도플러 방식을 제안하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 다수 산란체의 속도 분산에 의하여 송신 간격 중에 산란체간의 상대적인 위치 관계의 변동에 의한 영향이 도플러 신호 상에서 불가피한 오차신호가 되어 나타나는 것을 정량화하였다.

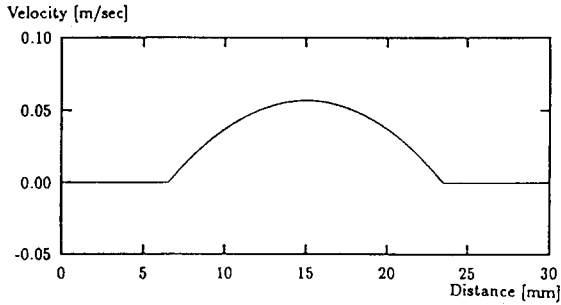
둘째, 종래의 초음파 펄스 도플러 방식에서 오차 신호가 측정 정밀도를 저하시키는 것을 알 수 있었으며, 그 크기는 특히 수신파형의 진폭이 작은 곳에서 현저하게 나타남을 발견하였다.

셋째, 제안된 순시위상법은 시뮬레이션과 실측 실험에 의하여 기존의 방법보다 신뢰성이 높은 속도 정보의 측정이 가능함이 확인되었다.

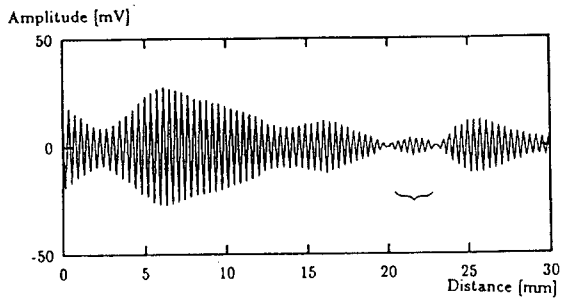
본 논문에서 제안된 시간 영역에서 국소의 데이터로 위상차를 추출하는 순시위상법은 속도 분포를 이루는 다수 산란체 평균적인 유동 정보를 신뢰성 높게 추출할 수 있는 유용한 방법으로 기대되며 앞으로 다양한 모델과 실측을 통하여 정량적인 파형의 영향과 오차 분석이 필요하다.

## 참 고 문 헌

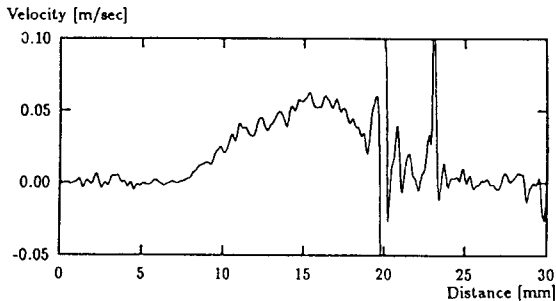
- [1] J. Delsing, "A New Velocity Algorithm for Sing-Around-Type Flow Meters", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. UFFC-34, No. 4, July 1987.
- [2] N. Tanaka and S. Ohtsuki, "Signal Processing Technique as a Simple Extensive Doppler Method", 日本音響學講演文集, pp.



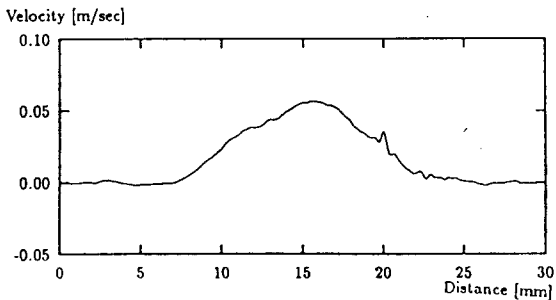
<그림 10> 유속 분포의 이론 값



<그림 11> 실측된 수신 파형



<그림 12> 단순위상법으로 실측된 속도 분포



<그림 13> 순시위상법으로 실측된 속도 분포

- 783-784, Sept. 1990.
- [3] L. Y. Mo and R. C. Cobbold, "A Nonstationary Signal Simulation Model for Continuous Wave and Pulsed Doppler Ultrasound", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 36, No. 5, pp. 522-530, Sept. 1989.
- [4] K. Namakawa, "Real Time Processing of Ultrasound Pulse Doppler Signals Using FFT and their Simultaneous Display with Echocardiogram," 2nd WFUMB meeting abstract, pp.249, 1979.
- [5] K. Namakawa, "Imaging of Blood Flow Using Autocorrelation," *Ultrasound in Med. & Biol., Suppl. 1*, pp138, 1982.
- [6] 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.
- [7] P. Tortoli, "A Tracking FFT Processor for Pulsed Doppler Analysis Beyond the Nyquist Limit", *IEEE Transaction on bio-medical Engineering*, Vol. 36, No.2, Feb. 1989.
- [8] D. W. Ricker, "The Doppler Sensitivity of Large TW Phase Modulated Waveforms", *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol. 40, No. 10 Oct. 1992.
- [9] Z. S. Haddad and B.E.Parkins, "Designing Doppler Signals to Overcome Transmission Nonlinearities", *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 40, No. 10 , Oct. 1992.
- [10] G. E. Sleafle and P.P. Lele, "Tissue Characterization Based on Scatterer Number Density Estimation", *IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 35, No. 6, Nov. 1988.
- [11] T. A. Tuthil, R.H. Sperry and K.J.Parker, "Deviations from Rayleigh Statistics in Ultrasonic Speckle", *Ultrasonic Imaging* 10, pp. 81-89, 1988.
- [12] 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, Nov., 1994.
- [13] 이은방, 이상집, "수중물체의 속도 분포 측정에 관한 기초 연구", *해양안전학회지*, pp.1-10, Jan. 1996.
- [14] 이은방, 이상집, "산란체의 공간 속도 분포를 고려한 초음파 펄스 도플러 기법", 제11회 수중음향 학술발표회 논문집, 한국음향학회, pp 63, 1996.