



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

유속측정을 위한 위상분석법을 이용한
펄스 도플러 기법에 관한 연구



2011 年 2 月
釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

孫相東

工學碩士 學位論文

유속측정을 위한 위상분석법을 이용한
펄스 도플러 기법에 관한 연구

指導教授 裴 鍾 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2011 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

孫相東

孫相東의 工學碩士 學位論文을 認准함

2010 年 12 月

主審 工學博士 朴 瀚 錫 (印)

委員 工學博士 安 永 炆 (印)

委員 工學博士 裴 鍾 一 (印)



목 차

목차	i
그림 목차	ii
표 목차	iii
Abstract	iv
 제 1 장 서 론	 1
1.1 연구배경	1
1.2 실시간 유량측정의 필요성	2
 제 2 장 도플러 시스템	 4
2.1 도플러 효과	4
2.2 도플러 유속계	7
2.3 연속파 도플러 방식과 펄스파 도플러 방식	10
 제 3 장 도플러 신호	 13
3.1 도플러 신호와 수신파형	13
3.2 상대위치변동에 따른 영향	15
 제 4 장 펄스 도플러 신호	 16
4.1 펄스 도플러 속도계의 원리	16
4.2 거리 분해능	18
4.3 시뮬레이션 실험	19

제 5 장 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법	22
5.1 위상의 개념과 정의	22
5.2 위상 분석법	23
5.3 펄스 신호의 위상 분석	24
5.4 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법	25
제 6 장 결 론	28
6.1 실험 결과 및 고찰	28
6.2 결론 및 과제	31
참고 문헌	32
감사의 글	33



표 목차

표 1 시뮬레이션 조건	19
표 2 실험조건	28



그림 목차

그림 2.1 도플러 효과의 원리	4
그림 2.2 굴포천 실시간 유량측정 시스템	9
그림 2.3 연속파 도플러 방식	11
그림 2.4 펄스파 도플러 방식	12
그림 2.5 연속파 도플러 방식과 펄스파 도플러 방식의 비교	12
그림 3.1 오차 신호의 영향	15
그림 4.1 펄스 도플러의 원리	17
그림 4.2 단순 위상법 개념	17
그림 4.3 시뮬레이션 모델	19
그림 4.4 수신파형	20
그림 4.5 속도분포와 단순위상법에 의한 측정결과	21
그림 5.1 펄스 도플러 신호의 위상곡선	24
그림 5.2 이산처리에 의한 위상 계산	25
그림 5.3 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법	26
그림 5.4 위상분석법에 의한 측정 결과	26
그림 6.1 유속 분포의 이론 값	29
그림 6.2 측정 실험에서 수신된 파형	29
그림 6.3 단순위상법과 위상분석법에 의한 측정 결과의 비교	30

A Study on the Pulsed Doppler Method of Phaser Analysis for Hydrometry

Sang-Dong Son

*Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

Abstract

Most Doppler flowmeters on the market today estimate the flow rate more accurately than methods based on level measurement alone, but do not have the accuracy of magnetic-inductive and Venturi flowmeters. More recently, pulsed doppler technology has been introduced for measuring flow. Pulsed Doppler avoids some important limitations and accuracy problems that continuous wave Doppler flowmeters are plagued with. The pulsed Doppler output spectrum of a moving target is achieved by utilizing the Doppler principle. The Doppler ultrasound system was designed and used to detect information on flow motion.

Most diagnostic ultrasound system is to separate moving target echoes from relatively stationary target echoes. When we observed a moving target using a suitably configured Doppler system, It is shown that for a single approaching target the output spectrum which Doppler system produces is time-dilated replica of the received echo signal. On the other hand, for a receding target the output is time inverted as well as dilated. Doppler output spectra for moving target are presented theoretically, the results are used to calculate an expression for the output spectra of a pulsed Doppler system, and confirmed experimentally.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

UN이 물 부족 국가군으로 분류한 우리나라의 수자원 장기종합계획 보고서에 의하면 2011년도에 30년 빈도의 가뭄이 발생할 경우 11억 톤의 물이 부족할 것으로 예상하였다. 따라서 과학기술부와 건설교통부는 이 상황에 대처하고자 2001년부터 10년간 약 1000억의 연구비를 투입하여 신규 가용 수자원 30억 톤을 확보하기 위하여 수자원의 지속적 확보기술개발 프론티어 연구사업을 시행하고 있다. 프론티어 연구사업과 같이 정부주도의 대규모 연구사업을 효과적으로 추진하기 위해서는 그 결과를 정량적으로 판단할 수 있는 신뢰성 있는 수문자료가 필수적이며 수자원과 관련된 다른 국책사업들도 성공적인 사업을 위해서는 정확한 수자원량의 파악이 선행되어야 한다. 따라서 건설교통부는 전체 수자원량의 정확한 파악을 목적으로 하천유량측점수를 총 293개소로 확충하고 240억 원의 예산을 들여 실시간 유량 측정지점 30개소를 신설하며 총 1,382억 원의 예산을 투입하는 수문조사 선진화 계획을 발표하였다.

이 실시간 하천유량 측정사업의 성공을 위해서는 하천유량을 측정할 수 있는 유속측정 기술개발과 함께 실시간 시스템의 구축 및 운영방안에 대한 기술개발도 동시에 모색되어야 한다. 미래지향적인 실시간 유량측정 시스템 구축을 위하여 본 연구에서는 먼저 실시간 유량측정 필요성한 유속계의 기술과 그 해석법에 대해 알아본다. 실시간 유량측정을 위해 기존의 유량계 방식인 연속파 도플러(Continuous Wave Doppler)를 펄스파 도플러(Pulsed Doppler) 방식으로 대체함과 연속파의 위상 개념을 도입하여 펄스 신호의 위상을 시간영역에서 국소적인 데이터를 이용하여 새로이 정의하고 간단 디지털 계산으로 펄스 신호를 위상으로 변환하는 위상분석법을 제시하였다.

1.2 실시간 유량측정의 필요성

수자원량의 파악을 위한 기초자료는 하천의 유량자료로서 일반적으로 하천의 평균단면에 평균유속을 곱하여 계산된다.

$$\Delta Q = A \times \overline{\Delta V} \quad (1.1)$$

ΔQ : 유량 [m^3/min]

A : 유체가 통과하는 단면적 [m^2]

ΔV : 단면적을 유체가 통과하는 평균속도 [m/sec]

평균단면의 변화가 적은 것으로 가정할 경우 하천유량은 평균유속에 지배되므로 일반적으로 유량측정이란 하천의 단면평균유속을 획득하는 것을 의미한다. 실시간적으로 하천 유량정보를 구하기 위해서는 하천의 평균유속을 실시간으로 얻을 수 있는 방법이 필요하다. 그러나 하천의 유속을 실시간으로 획득할 수 있는 방법 및 기술적인 문제점으로 인하여 정확한 평균유속을 획득하기가 어려웠다. 그러나 점차적으로 실시간 유량정보에 대한 요구가 늘어남에 따라 실시간 유량정보를 얻기 위한 노력과 기술개발이 활발해지고 있어 수자원 관리 선진국에서는 이미 10여 년 전부터 실시간 유량을 측정하기 위한 다양한 유량센서와 시스템이 개발되어 사용되고 있다.

실시간 유량측정의 필요성을 확인하기 위해서는 왜 실시간 자료가 중요한가를 생각해 볼 필요가 있다. 실시간 자료는 우리가 쉽게 상상할 수 없는 어떤 물리적 현상의 인과관계, 즉 시스템 내에서의 실시간적인 상호 반응을 보여주기 때문에 단순히 물리량의 실시간 변화를 볼 수 있다는 가능성을 넘어서 시스템의 전체적인 상황을 이해할 수 있는 중요한 기회와 단서를 제공한다. 실시간자료는 현재의 전체 상황을 반영하기 때문에 물리적인 인과관계를 재현하려는 수많은 노력들을 절감시킬 수 있다. 실시간 자료를 통하여 이상현상을 즉시 파악할 수 있고 그 이상현상에 대한 원인추적도 가

능하며 시스템의 반응을 깊게 이해할 수 있게 된다. 만약 우리가 필요한 모든 곳에서 필요한 모든 자료를 측정할 수 있다면 시스템의 반응은 언제나 재현가능하고 이러한 경우에는 실시간 자료의 대한 필요성이 적다고 할 수 있다. 그러나 현실적으로 필요한 모든 곳에서 모든 자료를 측정한다는 것은 불가능하기 때문에 실시간으로 자료를 측정하여 이 같은 요구를 상당부분 감소시킬 수 있다. 실시간 유량측정을 위한 실시간은 일반적으로 수자원분야에서는 물리량의 변화속도를 나타내는 time scale이 타 공학 분야에 비해서는 상당히 느린 특징이 있다. 예를 들어 전자 쪽의 실시간의 개념은 수자원 쪽의 개념과는 차이가 있다. 쉬운 예로 PC에서 CPU의 속도가 보통 GHz단위이기 때문에 실시간적으로 자료를 취득할 때는 GHz이상의 속도를 실시간 이라고 하지만 수자원 분야에서는 이와 다르게 1분 간격, 10분 간격 또는 1시간 간격을 흔히 실시간이라 말한다. 수자원 관련 웹 사이트가 1시간 단위로 자료를 제공하는 것으로 미루어 보아 수자원 분야의 실시간은 1시간정도의 time scale이 널리 받아들여지고 있다.

그러나 실시간의 개념을 새롭게 정의해 보면 다음과 같다. 즉 실시간이란 “측정하는 대상에서 얻고자 하는 가장 작은 물리적인 변화를 파악할 수 있는 시간간격” 이라고 말할 수 있다. 즉 샘플링 이론(Press et al., 1992)에 의하면 1시간 단위의 유량변화를 측정하고자 한다면 1시간의 1/2인 최소 30분 단위로 유량변동을 측정해야 실시간으로 1시간의 유량변동을 측정했다고 할 수 있다.

제 2 장 도플러 시스템

2.1 도플러 효과

도플러 효과는 간단히 설명하면 파동을 발생시키는 파원과 그 파동을 관찰하는 관측자 사이에 상대적 운동이 존재할 경우 본래 발생하는 파동의 주파수와 다른 주파수로 파동이 관측되는 효과라고 할 수 있다. 이 효과는 두 가지 경우에 따라 다른 방식으로 나타난다. 첫 번째로 관측자(observer)가 정지해 있고 파원(source)이 접근하는 경우이다. 파원이 정지상태의 관측자에게 접근하는 경우 파동이 압축되는 효과가 발생한다. 자세히 설명하면 파원이 먼저 발생시킨 파동을 뒤쫓으면서 계속적으로 파동을 발생시키는 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 파장이 짧아지는 효과가 나타난다.

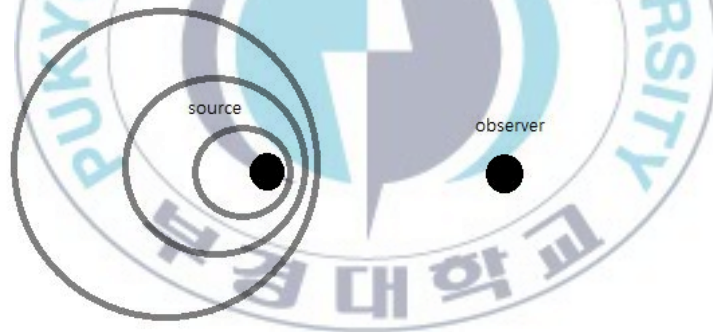


그림 2.1 도플러 효과의 원리

위의 그림2.1은 음원이 오른쪽으로 운동할 경우 파동이 발생하는 양상을 나타낸 모습이다. 위와 같이 파동이 오른쪽으로 진행할 경우 음원의 오른쪽은 파동과 파동 사이의 거리가 좁다. 다시 말해 파동이 짧아지는 효과가 나타

난다. 그리고 음원의 왼쪽은 그 반대의 효과가 나타난다.

두 번째로 파원이 정지해 있고 관측자가 접근하는 경우이다. 관측자가 정지해 있는 파원에 접근하는 경우 파동수가 증가하는 효과가 발생한다. 관측자는 움직이면서 다가오는 파동들을 읽기 때문에 파동이 진행되는 속도와 관측자가 운동하는 속도의 효과가 더해져 관측자는 파동을 더 빠르게 읽게 된다. 이에 따라 파동수가 증가하는 효과가 발생한다. 파동수란 단위 길이 안에 포함되는 파동의 수이며 이는 파장의 역수와 같다. 위의 두 효과의 공통점은 두 경우 모두 파장이 변하는 효과가 발생한다는 점이다. 위에서 는 모두 파장이 짧아지는 경우만을 제시하였다. 위와 반대의 경우인 정지상태의 관측자로부터 파원이 멀어지는 경우, 또는 정지상태의 파원으로부터 관측자가 멀어지는 경우-라면 반대의 효과가 일어난다.

여기서 주목해야할 것은 파동의 물리적 성질이 변하는 효과가 발생한다는 점이다. 파동의 속도는 매질이 변하지 않을 경우 일정하다. 파동의 속도는 파장과 진동수의 곱으로 표현되므로 파장이 변할 경우 진동수 또한 변하게 된다. 그리고 이러한 물리적 변화는 어떤 가시적인 현상으로 나타난다. 예를 들면 음파의 경우 파장이 짧아져 진동수가 커지는 경우 소리의 크기가 커지고 소리의 높이가 높아지는 현상이 나타난다. 또한 빛의 경우 진동수가 커지면 빛의 색이 푸른 계열이 되고, 빛이 가지는 에너지도 커지게 된다.

도플러 효과를 이용해서 수식적 관계를 찾아볼 수 있다. 관측자가 정지해 있고 파원이 접근하는 경우에는 파장이 짧아지는 효과를 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda^* = \lambda - v_s T \quad (\lambda^* : \text{나중파장}, v_s : \text{source 속도}, T : \text{주기}) \quad (2.1)$$

파장은 파동이 한 주기만큼 이동하였을 때의 거리와 같으므로 파장이 짧아진 정도를 파원의 속도와 주기의 곱의 크기 만큼임을 알 수 있다.

식(2.1)을 정리하여 진동수에 관한 식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\nu^* = \frac{v}{v - v_s} \nu \quad (\because \nu^* : \text{나중진동수}, \lambda \nu = \lambda^* \nu^* = v) \quad (2.2)$$

위의 식의 조건인 등식이 성립하기 위해서는 파동이 진행하는 공간(매질)이 균일하다는 가정이 필요하다. 매질이 균일할 경우 파장과 진동수의 곱인 파동의 속력은 일정하기 때문이다.

파원이 정지해 있고 관측자가 접근하는 경우에는 파동 수가 증가하는 효과를 다음과 같은 식(2.3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\lambda^*} = \frac{1}{\lambda} + \frac{\frac{v_o}{v}}{\lambda} \quad (v_o : \text{observer 속도}) \quad (2.3)$$

여기서 파동수의 증분인 $\frac{v_o}{\lambda}$ 은 관측자가 진행한 만큼의 거리를 단위길 이로 변환하였을 때 해당하는 파동수이다. (관측자의 이동거리에 의해 증가한 파동의 수) 여기서 다음과 같은 비례식을 사용하였다.

$$1 : vT = \chi : v_o T \quad (\chi : \text{관측자의 이동거리를 단위거리로 환산한 값}) \quad (2.4)$$

위의 수식을 진동수에 관련된 수식으로 바꾸어 정리하면 다음과 같다.

$$\nu^* = \frac{v + v_o}{v} \nu \quad (2.5)$$

파원과 관측자가 서로 접근하는 경우를 살펴보면 앞의 두 현상, 즉 파장이 짧아지는 현상과 파동 수가 증가하는 현상이 독립적으로 발생한다. 따라서 이 경우의 나중 진동수, 즉 도플러 효과에 의해서 결정되는 최종 진동수에

대한 수식은 다음과 같다.

$$\nu^* = \frac{v + v_o}{v - v_s} \nu \quad (2.6)$$

여기서 v_0 와 v_s 는 방향이 있는 속도 값으로, 관측자와 파원이 멀어지는 경우에는 그 부호가 바뀐다. 중요한 점은 어떤 경우이건 관측자와 파원이 가까워지는 경우에 상대적인 진동수는 항상 커진다는 점이다.

2.2 도플러 유속계

지난 10여 년 전부터 하천의 실시간 유속계측 목적으로 각광을 받고 있는 유속계는 도플러 유속계로서 첨단 기술과 제조기술을 토대로 현재 각국에서 널리 이용되기 시작하였다. 이미 우리나라에서도 수자원 프론티어 사업을 통하여 도플러 유속계에 대한 자세한 성능평가가 이루어지고 있다. 도플러 유속계는 초음파가 전파되는 경로에서 이동하는 유체에 의해서 발생된 초음파의 주파수 편이, 즉 도플러 효과를 측정하여 그 물체의 이동속도를 구하는 유속계이다. 이때 순수한 물에서는 초음파의 도플러 현상을 유도하는 부유물이 없기 때문에 도플러 유속계를 적용할 수가 없으나 자연하천, 하수처리장에서는 작은 입자를 비롯한 다양한 부유물이 항상 존재하기 때문에 유속이 변하게 되면 도플러 효과도 따라서 증가한다.

도플러 유속계를 제작하기 위해서는 몇 가지의 요소와 기술이 필요하다. 첫째, 양질의 초음파 펄스를 발생시키기 위한 초음파 transducer가 필요하며, 둘째 transducer를 이용하여 원하는 형태의 펄스를 만들어 내는 회로와, 셋째 transducer를 통하여 입력된 초음파 펄스열로부터 도플러 효과를 추출하는 회로, 넷째로 이 결과로부터 유속을 계산하는 마이크로프로세서, 그리고 시스템을 구동하기 위한 전원회로와 외부의 장비와 통신을 위한 통신

회로가 필요하다.

이 중 양질의 초음파 펄스를 만들기 위한 transducers 제작기술과 구동회로 및 마이크로프로세서에 탑재된 임베디드 소프트웨어는 각 도플러유속계 제조사가 철저히 비밀로 취급될 만큼 도플러 유속계의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다.

도플러 유속계는 초음파가 수중에서 진행하면서 발생된 도플러 편이를 기록하여 유속을 구하는 기계이므로 초음파가 퍼져나간 거리에 따라 유속을 구할 수 도 있다. 이같이 초음파가 퍼져나간 전거리를 일정간격을 나눈 간격을 cell이라고 하며 이 cell안에서의 유속을 cell유속 그리고 여러 cell에 걸쳐서 유속을 구하는 것을 유속의 profiling이라고 한다. 따라서 도플러 유속계는 계기가 위치한 곳에서 일정거리까지의 유속의 변화를 연속적으로 측정할 수도 있다. 그러나 초음파는 transducer표면에서 발사된 후 일정한 beam을 형성하면서 퍼져나가기 때문에 그 도달거리가 제한되며 각 cell크기도 거리에 따라서 달라진다. 실시간 하천유량을 측정하기 위한 앞에서 언급한 초음파 도플러 유속계와 제어를 위한 데이터로거가 부가되어 시스템을 구성하고 이 시스템은 서버와 현장을 연결하는 이동통신망에 의해서 실시간으로 측정된 자료를 전송하게 된다. 서버에서 측정된 유속자료의 품질을 평가한 후 센서의 감도나 설정을 바꿔야할 경우에는 데이터로거 안에 유속계의 설정을 통제하는 기능을 구동하여 설정을 변경하도록 한다. 따라서 만약 현장의 상황과 조건에 의해서 초음파 유속계의 성능이 좌우되는 경우에는 실시간적으로 대처하여 원하는 유량 측정결과를 생산할 수 있도록 한다. 그림 2.2은 이와 같은 기술이 접목된 굴포천 실시간 유량계측 시스템을 나타낸 것이다.



그림 2.2 굴포천 실시간 유량측정 시스템



2.3 연속파 도플러 방식과 펄스파 도플러 방식

연속파 도플러방식은 유체 안으로 발사된 초음파 빔 내에 있는 기포나 현탁 고형물과 같은 산란 입자(scatters)에 반사된 모든 신호를 한꺼번에 받아 유속을 계산해 낸다. 그림2.3 에 나타나 있듯 유체를 따라 흐르는 입자의 속도를 초음파 신호의 송수신 주파수차로부터 계산해 내는 것이다. 그러나 여기에는 공간적인 정보, 즉 어떤 위치에서 어떤 신호가 왔는지 구분할 방법이 없다. 따라서, 유체 내의 입자 분포가 균일하지 않은 경우나 센서로부터 수위가 멀어질수록, 즉 유체의 단면적이 커질수록 매우 부정확하게 되고 적용이 불가능한 경우도 있다. 수학적 혹은 통계적 기법에 따라 주파수차로부터 가상의 유속분포를 알 수 있다고 하는 경우가 있으나 이는 매우 부정확한 것으로 신뢰할 수 없는 경우가 대부분이다. 선진국의 경우, 연속파 도플러가 사용되는 대부분의 이유는, 정확한 시간 조정과 복잡한 실시간 신호 처리가 필수적인 펄스파 도플러 방식에 비해 센서나 변환기 등의 하드웨어 구성이 매우 간단하므로 가격이 저렴하다는 데에 있다. 그러나 현장에서의 보정이 필수적인 연속파 도플러 방식은 이러한 보정이 필요 없는 펄스파 도플러 방식과 비교하여 추가 비용이 드는 것으로 간주되어 최근 해외에서는 일반적이었던 연속파 도플러 방식이 펄스파 도플러 방식으로 급속히 교체되어 가고 있다. 펄스파 도플러 방식은 연속파 도플러 방식과는 달리 유체 내의 실질적인 유속 분포를 알 수 있다. 이는 초음파 신호가 어디로부터 반사되어 왔는지 알 수 있기 때문이다. 이러한 공간적인 정보를 알 수 있는 것은 센서부터 수면까지 발사된 초음파 빔 전체 공간 내에서 반사된 신호가 한꺼번에 수신되는 연속파 방식과는 달리, 셀(cell) 혹은 윈도우(window)로 표현되는 여러 개로 할당된 작은 부피의 샘플 공간 내에서 측정된 각각의 유속 정보가 개별적으로 전달되어 실제의 유속 분포를 구할 수 있기 때문이다. 이와 같은 속도 스펙트럼으로부터 매우 정확한 평균 유속을 계산해 낼 수 있는 것이다. 각각의 공간으로부터 온 정보는 서로 영향을 미치지 않는 독립적인 것들로, 입자분포가 균일하지 않은 경우에도

정확한 측정이 가능하며, 이러한 이유로 보정이 전혀 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 결론적으로, 정확한 평균 유속을 구할 수 없는 연속과 도플러 방식에 비해 실제에 가까운 유속 분포를 구할 수 있는 펄스와 도플러 방식의 정확도가 훨씬 높다.

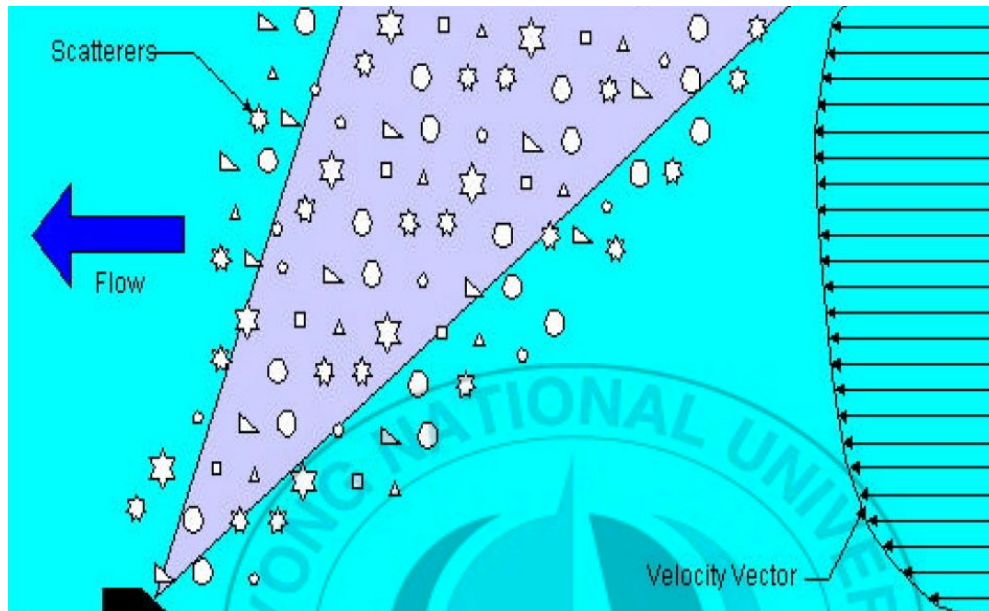


그림 2.3 연속과 도플러 방식

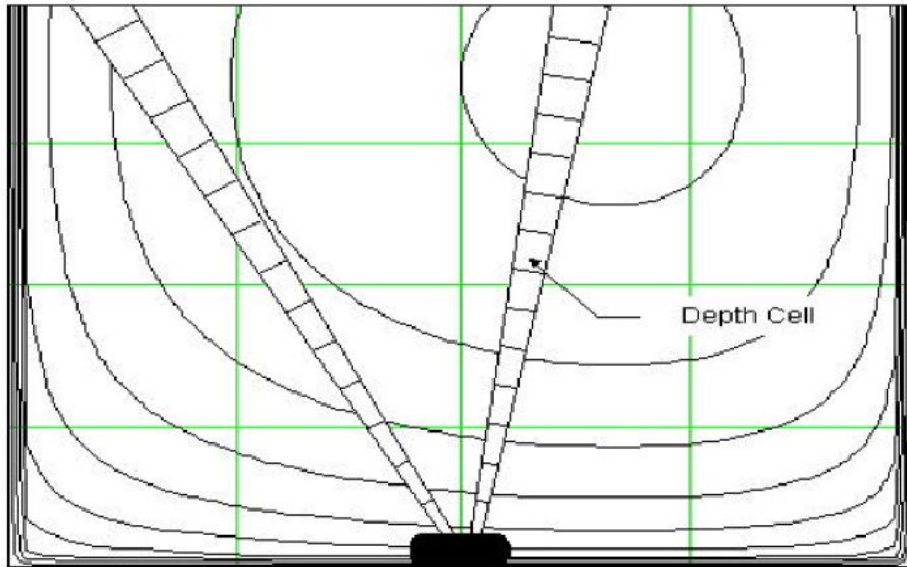


그림 2.4 펄스와 도플러 방식

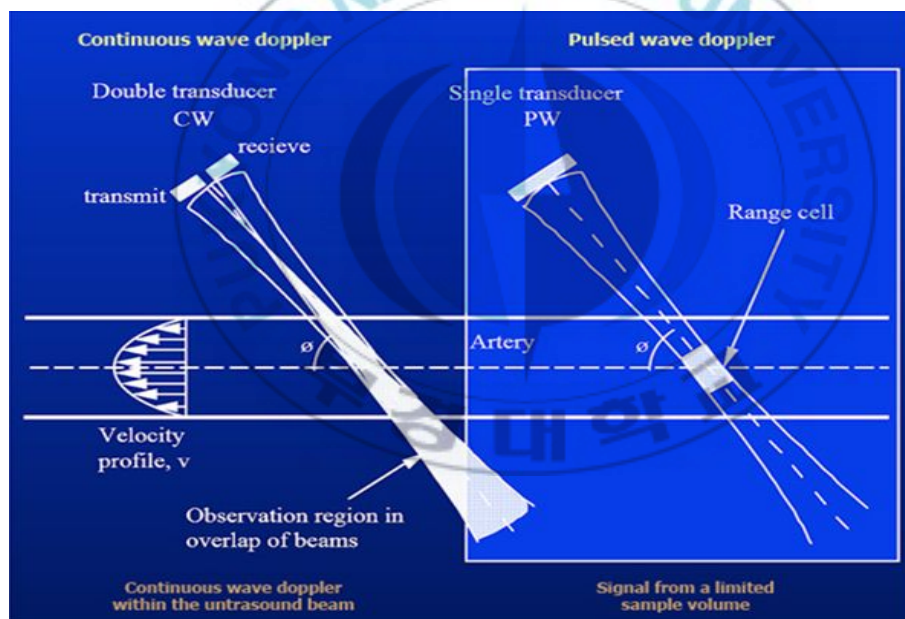


그림 2.5 연속파 도플러 방식과 펄스파 도플러 방식의 비교

제 3 장 도플러 신호

3.1 도플러 신호와 수신파형

연속파 도플러 속도계에서는 이동하는 대상을 향하여 일정 주파수의 연속 음파를 방사하고 반사하여 오는 반향신호를 수신한다. 음속에 비하여 반사체의 이동속도가 충분히 작은 경우에는 수신 신호의 주파수는 식 3.1에 표시된 주파수만큼 변화하게 된다.

$$f_d = \frac{2v_d}{c} f_0 \quad (3.1)$$

여기서 v_d 는 음파 진행방향의 반사체 속도 성분으로 도플러 속도라 하며 도플러효과에 의하여 변화된 주파수 f_d 는 도플러 주파수이다. 매질 속에서의 음속 c 와 송신음파의 주파수 f_0 는 알고 있으므로 도플러 주파수를 검출한다면 도플러 속도를 구할 수 있다. 여기서, 일반적으로 도플러 주파수를 검출하기 위하여 송신신호의 합성 신호를 생성하는데 이는 직교검파기에 수신 신호를 통과 시키는 것과 같으며 식 3.2와 같은 복소 도플러 신호가 생성된다.⁶⁾

$$D(t) = \dot{a} e^{j\omega t} \quad (3.2)$$

공간적으로 분포되어 서로 다른 속도값으로 이동하는 다수의 산란체에 반사되어 수신되는 파형은, 송신파형 $f_{t(t)}$ 을 중심 각주파수 ω 의 펄스 신호로 가정하고 이 신호를 다수의 산란체에 송신하였을 때 얻어지는 수신 파형

$f_{r(t)}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_{t(t)} &= a(t)\cos\omega t \\
 f_{r(t)} &= \sum_n f_t(t-\theta_n) \\
 &= \sum_n a(t-\theta_n)\cos\omega(t-\theta_n) \\
 \theta_n &= \frac{2l_n}{c}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

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

$$f(t) = \sum_n a(t-\theta_n)e^{j\omega\theta_n} \tag{3.4}$$

이 때 도플러 신호 $f(t)$ 의 실수 부분, 허수 부분의 값은 서로 무상관이고 각각 그 평균값이 0인 정규 분포에 따르는 랜덤 신호가 되고, 진폭 $|f(t)|$ 은 Rayleigh⁷⁾ 분포를 따른다.

3.2 상대위치변동에 따른 영향

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

$$e(t) = f_1(t) - f_2(t) \quad (3.5)$$

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

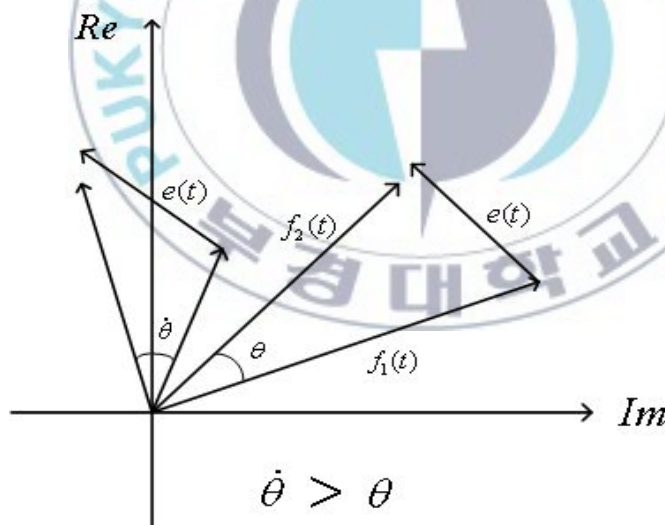


그림 3.1 오차 신호의 영향

제 4 장 펄스 도플러 신호

4.1 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 펄스 도플러 속도계에서는 특정 영역내(거리분해능)의 반사체 속도정보가 선택적으로 얻어질 수 있다.

그림4.1 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 T 동안에 다수 산란체가 거리방향으로 전체가 속도 v 로 이동하고 있다면, 두 수신 신호간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$f_1(t) = e^{j\omega\Delta\theta} f_2(t - \Delta\theta) \doteq e^{j\omega\Delta\theta} f_2(t) \quad (4.1)$$

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 주고 진폭은 거의 일정하다는 가정 하에 두 도플러 신호의 위상차로 속도를 구하는 방법을 단순 위상법이라고 부른다.⁶⁾

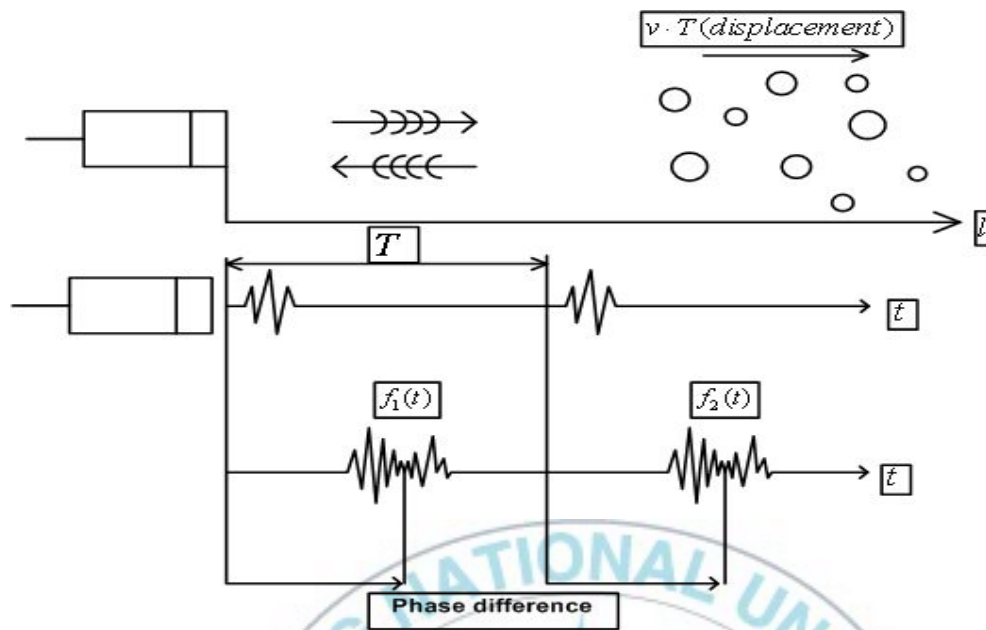


그림 4.1 펄스 도플러의 원리



그림 4.2 단순 위상법 개념

단순 위상법에서 속도 정보는 그림4.2에서와 같이 위상차를 이용하여 식 4.2로 구할 수 있다

$$v \doteq \frac{c}{T} \cdot \Delta\theta \quad (4.2)$$

식 4.1에서 $f_2(t - \Delta\theta) \doteq f_2(t)$ 라고 근사 처리하여 위상차로부터 속도 정보를 얻고 있지만 이와 같은 근사처리는 측정 오차를 야기한다.

$$f_2(t - \Delta\theta) \doteq f_2(t) - \Delta\theta f_2'(t) \quad (4.3)$$

식 4.3과 같이 1차까지 포함하는 근사화 하는 주파수 보정법이 사용되고 있다.

4.2 거리 분해능

펄스 도플러 속도계에서는 그림 4.1에서와 같이 관측 대상물을 향하여 거리분해능을 가지고 있는 펄스 신호를 송신하여 산란체로부터 반사되어오는 수신파형을 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.

$$\Delta d = \frac{c\Delta t}{2} \quad (4.4)$$

즉 수신 파형에서의 어느 한점의 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.

4.3 시뮬레이션 실험

표 2. 시뮬레이션 조건

산란체의 영역	50[mm]
산란체의 밀도	200[개/mm]
초음파의 속도 c	1500[m/sec]
송신 중심주파수 f	2[MHz]
송신 펄스의 길이 Δt	3.5[μ sec]
송신 간격 T	300[μ sec]

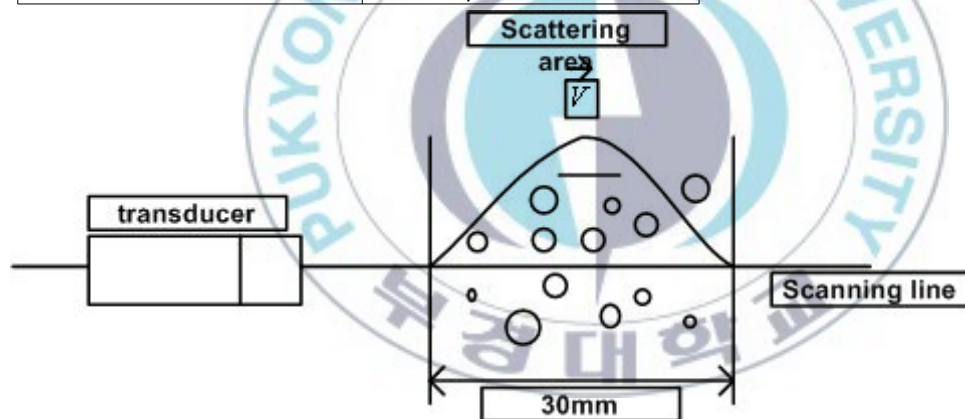


그림 4.3 시뮬레이션 모델

그림 4.3은 위의 조건에서 얻어진 수신 파형을 거리 척도로 표시한 것이다. 그림 4.5는 시뮬레이션에서 얻어진 수신 파형에 단순 위상법을 적용하여 산란체의 속도를 측정한 경과이다. 측정 결과와 부여한 속도 분포를 비

교하여 보면 알 수 있듯이 단순 위상법에 의한 측정 정도는 그렇게 높지 않지만 현재 일반적으로 의학용 도플러 진단장치에 있어서 단순 위상법이 주파수 측정의 기본 원리로 사용되고 있다. 특히 수신 파형의 진폭이 작은 곳에서 측정값이 불안정하여짐을 알 수 있다

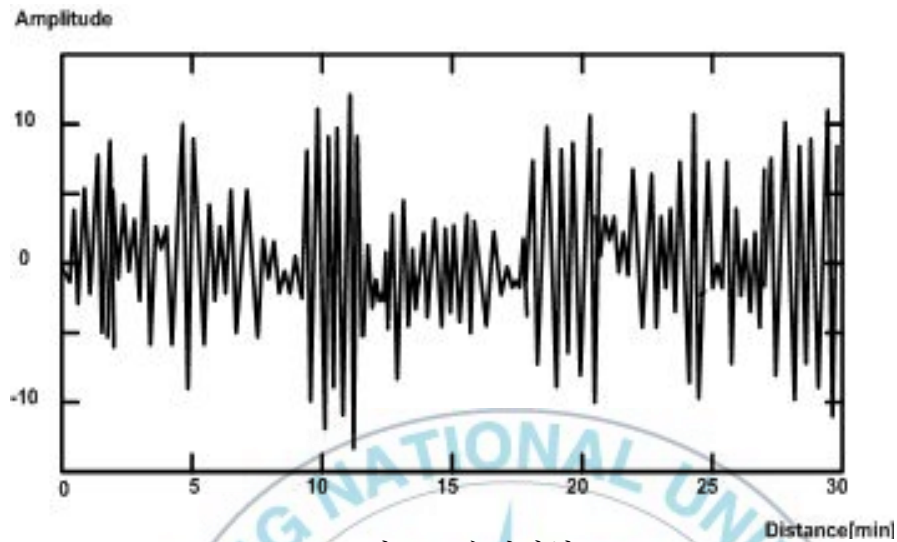


그림 4.4 수신파형

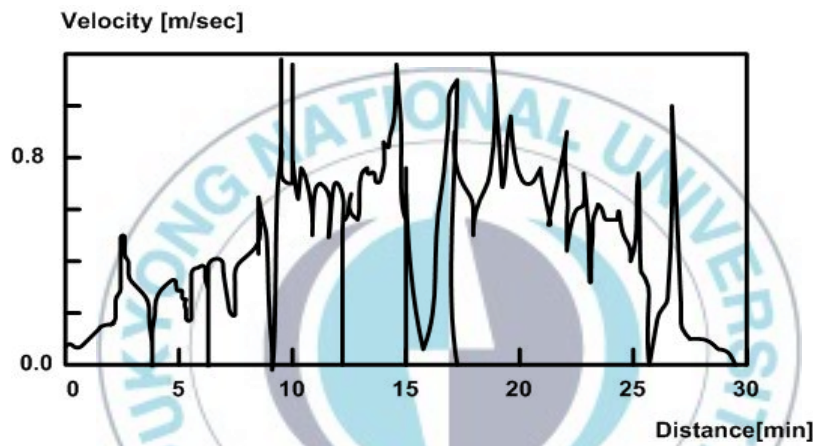
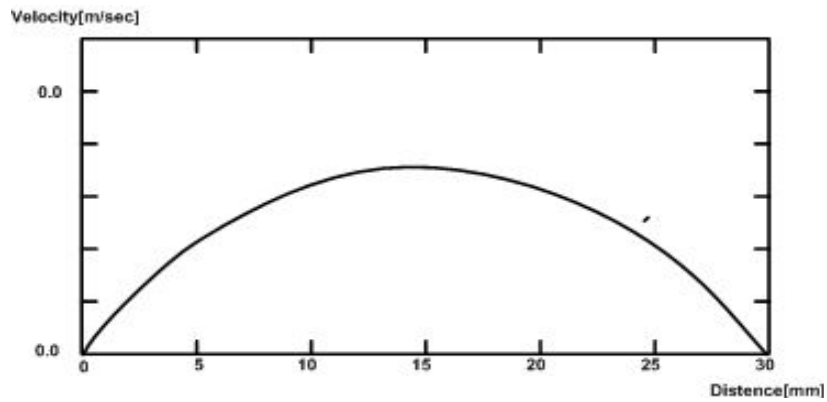


그림 4.5 속도 분포와 단순 위상법에 의한 측정 결과

이러한 원인으로서는 앞에서 서술한 오차 신호가 생각될 수 있다. 즉, 송신 간격에 있어서 산란체의 상대적인 위치관계가 변동하게 되면 그 영향이 오차 신호가 되어 수신 파형에 나타나게 되고 결과 적으로는 속도 정보의 측정값을 불안정하게 만든다. 초음파 빔 방향 의로 단순 위상법에 있어서는 산란체의 속도 분산이 수신 파형에 불가피한 영향을 주게 됨을 알 수 있다. 따라서 산란체의 속도 분포에 의한 영향을 줄이고 도플러 수신 파형으로부터 신뢰성이 높은 속도 정보를 추출하기 위한 신호처리법이 필요하다.

제 5 장 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법

5.1 위상의 개념과 정의

위상은 연속정현파의 한주기내의 미세 시간을 표시하기 위한 변수이기 때문에 신호의 순시적인 평가를 위해서 유용한 정보이다. 시간 영역에서 펄스 신호의 위상이 연속 정현파에서 같이 추출될 수 있다면 펄스 도플러 시스템에서 이동물체의 속도와 그 분포의 측정에 응용될 수 있다. 여기서 펄스 신호의 위상을 새로이 정의하면 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 식과 같이 시간 함수로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \arg(Re(f(t)) + jIm(f(t))) \quad (5.1)$$

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

$$s(t+r) = A\sin\theta(t)\cos\omega\tau + A\cos\theta(t)\sin\omega\tau \quad (5.2)$$

여기서, $\theta(t)$ 는 한 주기 내의 위상 함수이다. 시간 τ 를 정현파의 주기 T 로 한다면 t 에서의 위상 $\theta(t)$ 는 식 5.3와 같이 계산 될 수 있다. 식 5.2는 신호의 위상이 $t-\tau$ 부터 $t+\tau$ 까지의 국소부 데이터로 도출될 수 있음을 시사하여 준다.

5.2 위상 분석법

펄스 도플러 속도계에서 같이 펄스 신호분석에 위상의 개념이 도입되기 위해서는 연속과 뿐만 아니라 모든 신호에서의 위상이 일반화 되어야 한다. 여기서는 펄스 도플러 신호를 위상으로의 분석을 목적으로 식 5.2의 위상 함수를 모든 신호 $f(t)$ 에 적용 가능하도록 확대하여 보자. 그러기 위해서는 먼저 위상의 정의에 이용되는 신호의 국소부 영역의 결정이 필요하다. 본 연구에서는 분석할 신호의 주기성을 이용하여 신호의 자기상관으로부터 정의 구간 (T_b)을 결정함으로써 위상을 모든 신호에 대하여 식 5.3과 같이 일반화하였다. 펄스 도플러 속도계에서는 T_b 는 송신 펄스의 주기를 이용함으로써 송신 주파수 성분이 강조된 함수를 얻을 수 있다.

$$\theta(t) = \arg\left(\int_{-\frac{T_b}{2}}^{\frac{T_b}{2}} f(t+\tau) \sin \omega \tau d\tau + j \int_{-\frac{T_b}{2}}^{\frac{T_b}{2}} f(t+\tau) \cos \omega \tau d\tau\right) \quad (5.3)$$

식(14)은 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.

5.3 펄스 신호의 위상 분석

그림 5.1은 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. bias성분이 제거 되었으며, 진폭이 크기가 다른 신호가 대등하게 위상 함수로 표시되어 모양과 크기가 서로 다른 신호간의 위상차의 결정이 용이함을 알 수 있다. 여기서 위상의 계산은 그림 5.2에서 디지털 처리하여 식 5.4에 의해 구하였다.

$$\theta(t) = \arg\left(c - \frac{a+e}{2} + j(d-b)\right) \quad (5.4)$$

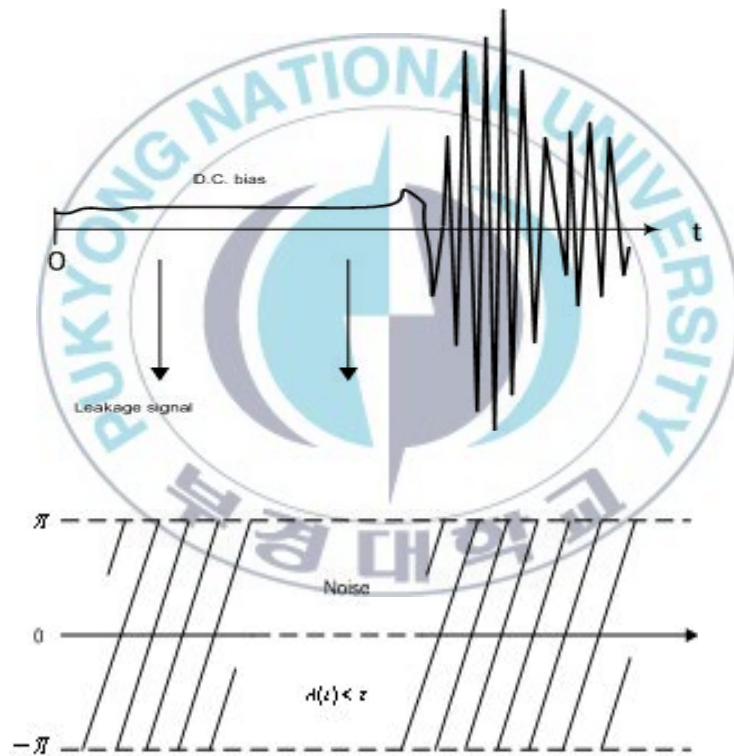


그림 5.1. 펄스 도플러 신호의 위상곡선

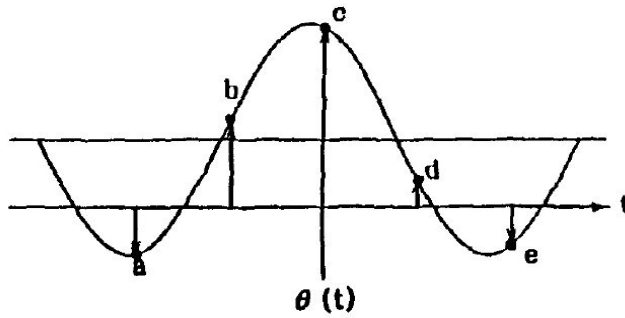


그림 5.2 이산처리에 의한 위상 계산

5.4 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 신호와는 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.

여기서는 그림 5.3에서와 같이 위상 분석법을 이용하여 간단히 고 분해능의 속도 정보 추출을 위한 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법을 제안한다. 일정한 간격 (T_b)으로 격시에 수신된 펄스 도플러 신호를 식 5.4으로 분석하여 두 위상 곡선에서 위상차를 구함으로써 속도 정보를 식 5.5에서 간단히 얻을 수 있다.

$$v \doteq \frac{c}{T_b} \cdot \Delta\theta \quad (5.5)$$

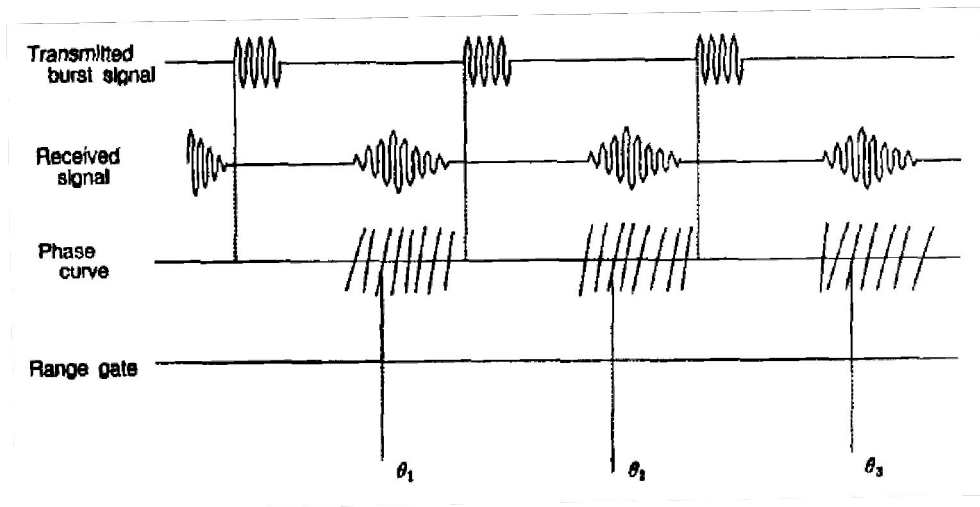


그림 5.3 위상분석법에 의한 펄스 도플러 기법

앞에서 기술한 모델 도플러 신호에 대하여 제안된 위상 분석법에 의한 펄스 도플러 기법으로 속도 정보의 측정 경과를 그림 5.4에서 나타내었다.

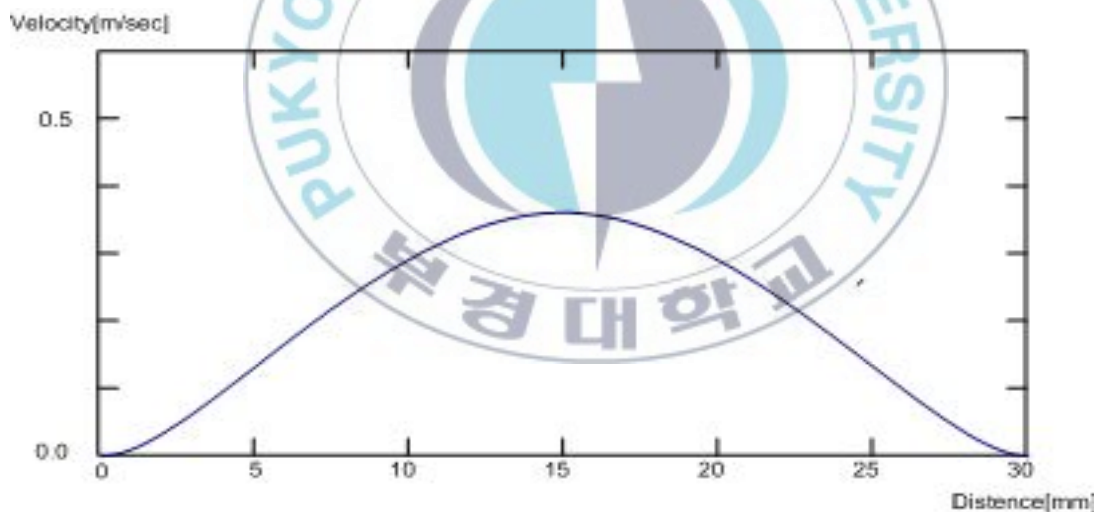


그림 5.4 위상분석법에 의한 측정 결과

그림 4.5는 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.



제 6 장 결 론

6.1 실험 결과 및 고찰

표 3. 실험조건

송신 파형의 조건	수신 파형의 조건
초음파음속:1500[m/sec]	샘플링 주파수:20[MHz]
중심주파수:2[MHz]	양자화 비트수: 10[bit]
송신 간격: 300[μ sec]	
펄스 길이: 3.5 [μ sec]	
거리 분해능: 3.75[mm]	

단위 시간에 유출되는 물의 체적은 $10.7[cm^3/sec]$ 이었고 이 경우 유속분포의 이른 값은 그림 6.1과 같고 그림 6.2는 측정 영역에 있어서 수신 파형을 거리척도로 표시한 것이고 그림 6.3은 각각 유속분포를 단순위상법과 위상분석법으로 측정한 결과이다.

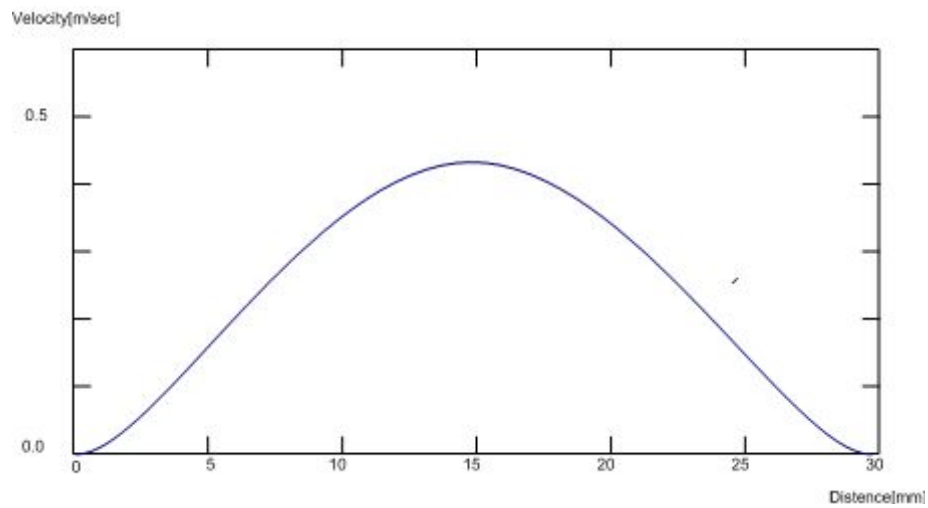


그림 6.1 유속 분포의 이론 값

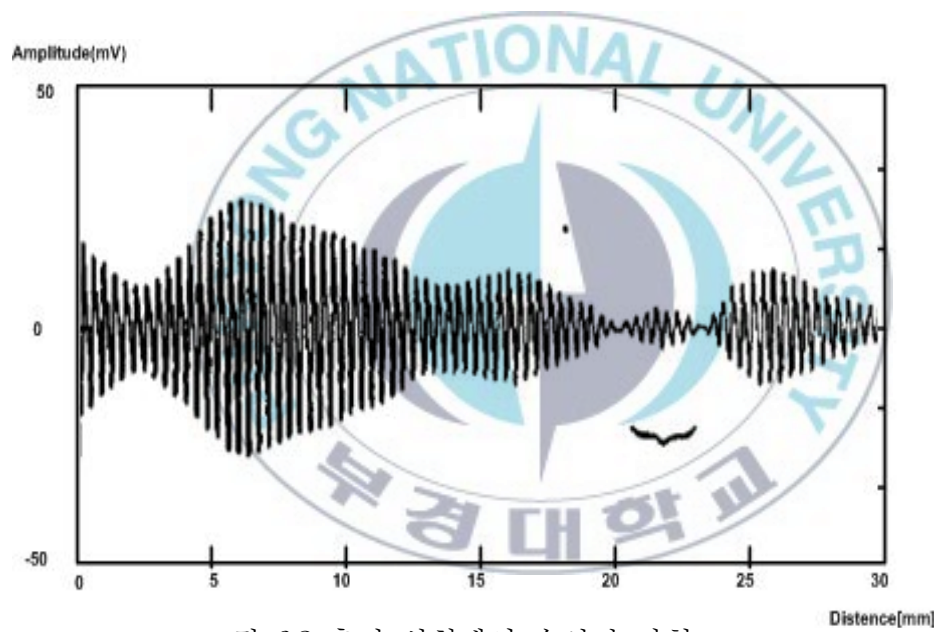
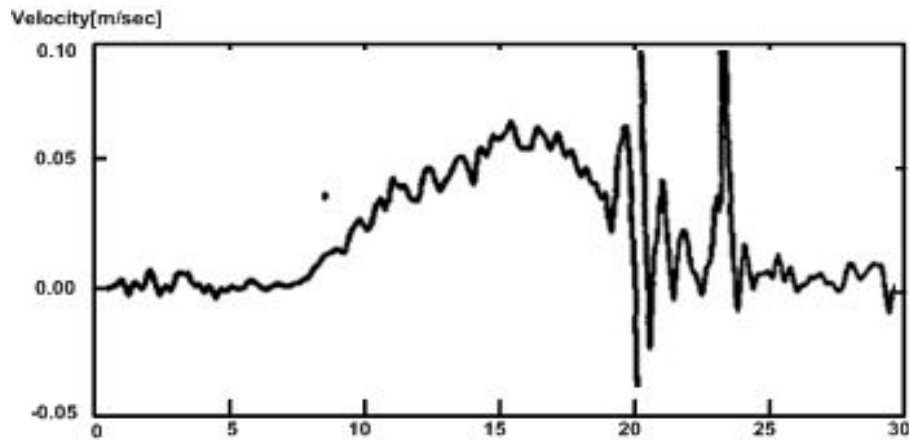
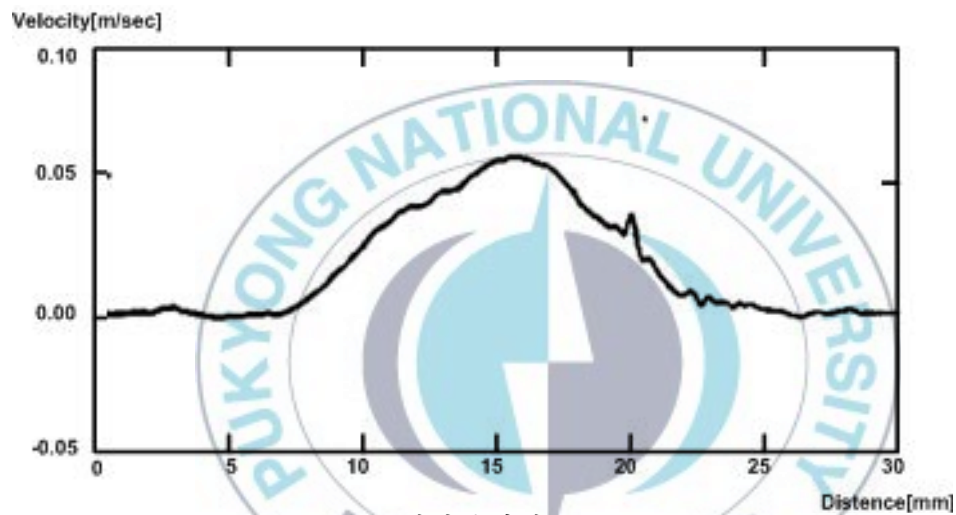


그림 6.2 측정 실험에서 수신된 파형



단순위상법



위상분석법

그림 6.3. 단순위상법과 위상분석법에 의한 측정 결과의 비교

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

6.2 결론 및 과제

본 논문에서는 실시간 유량측정을 위해 기존의 유량계 방식인 연속파 도플러(Continuous Wave Doppler)를 펄스파 도플러(Pulsed Doppler) 방식으로 대체함과 연속파의 위상 개념을 도입하여 펄스 신호의 위상을 시간영역에서 국소적인 데이터를 이용하여 새로이 정의하고 간단 디지털 계산으로 펄스 신호를 위상으로 변환하는 위상분석법을 제시하였다.

종래의 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 계측 실험을 통해서 고정밀도 속도 정보 측정이 가능함을 확인하였다.

제안된 펄스 도플러 기법은 수중의 산란체의 형상 등의 영향에 관한 계속적인 연구가 필요하다. 앞으로 다양한 상황에서의 측정 실험과 정밀도 개선을 통한 연구가 필요하다고 생각한다.

참고문헌

- [1] 김승(2005). 한국의 GEOSs 구축 의의, 전지구관측시스템 사용자 포럼, GEO 한국사무국.
- [2] 박광준(2005). 한국의 GEO 활동 현황, 전지구관측시스템 사용자 포럼, GEO 한국사무국
- [3] 이종국(2004). 수자원의 지속적 확보기술 개발 프론티어 연구사업 1-1-2 세부과제 제2단계 1차년도 성과보고서
- [4] 이찬주, 김원, 김치영, 김동구(2005)“. ADCP를 이용한 유속과 유량 측정” 한국수자원학회 논문집, 제38권제10호, pp. 811-814.
- [5] 허철(2005). “수문조사 선진화 5개년 계획”수자원학회지, Vol.38 No.5, pp.16-22.
- [6] N. Tanaka and S. Ohtsuki, "Signal processing technique as a simple extensive Doppler Method", pp. 783-784, Sept. 1990.
- [7] T. A. Tuthil, R. H. Sperry and K. J. Parker, "Deviation from Rayleigh statistics in Ultrasonic speckle" Ultrasonic imaging 10, pp.81-89, 1988

감사의 글

부족한 저를 학문의 길로 불러 들여 오늘의 제가 여기까지 있게 해 주신 평생의 스승인 지도교수 배종일 교수님의 은혜에 고개 숙여 깊은 감사를 드리며, 바쁜 시간 중에도 초라한 논문을 맡아서 열과 성의로 심사해 주신 박한석 교수님, 안영주 교수님의 세심한 배려 덕분에 비로소 논문으로서 틀을 갖추게 되어 대단히 감사하게 생각합니다.

학업을 일과 병행해야하는 어려움이 있었지만 벽산건설(주) 현장 선배, 동료, 후배의 많은 도움과 격려가 있었기에 좋은 결실을 맺을 수 있었고, 졸업을 할 수 있다는 것이 정말 믿어지지 않습니다.

또한 지금까지 동기라는 명분으로 몰심양면으로 저를 대신해 많은 시간을 허락해 준 동기생 신동락님께 감사드리며, 이 논문이 나오기까지 많이 고민하고 연구하며 도움을 준 심창수 후배에게 정말 고마운 마음과 미안한 마음을 전합니다.

마지막으로 남편이 하는 학업이기에 아무 말 없이 헌신적으로 내조해준 사랑하는 아내 신화자에게 이 작은 기쁨을 전하고 아빠가 하는 일이라면 무조건 찬성하고 내 편이 되어 힘을 실어준 사랑하는 딸 현영이와 아들 진혁이에게 많이 사랑한다는 말과 함께 이 기쁨을 전합니다.

2010년 12월

손 상 동