

電磁波 表面流速計 開發

Development of a Microwave Surface Velocity Meter

李相浩*, 李翰九**, 金祐求***

1 序論

1.1 研究 目的 및 背景

한국의 수자원 기술은 '60년대 말부터 시작된 다목적 댐 건설로부터 본격적으로 발전하여, 광역 상수도 설치 및 관리, 댐 저수지 수질관리 및 상/하수 처리기술로 확장되어 왔다. 이러한 수자원 관리의 출발은 지표수 및 지하수 흐름의 양적 측정에서 시작된다. 우리나라의 경우에 지표수의 이용 및 관리가 보다 빈번하게 이루어져 왔으므로 하천 유량의 측정이 매우 중요한 의미를 갖는다.

사회 간접 자본에 귀속될 수 있는 수문 관측은 국가적, 공공적 투자에 의존되어야 하지만, 단시일에 가시적인 성과를 거둘 수 없는 특성상 투자 우선순위에서 배제되기 쉽다. 특히 일부 수자원 기술자들이 하천 유량측정 문제에 많은 관심을 가지고 있음에도 불구하고, 모든 기술의 기초가 측정문제에 있다는 사실을 소홀히 여기는 우리사회의 저급한 과학기술 철학 때문에 유량측정 설비의 확충 및 고도화에 많은 예산을 투자하지 못하고 있다.

현재 국내의 유량 측정기기 제작기술은 거의 전무하여 유속계, 수위계 등을 모두 수입품에 의존하고 있다. 더욱이 측정기기가 고장났을 때 보수할 수도 없으며 현재 사용중인 기기가 신뢰적인지 檢定할 설비도 제대로 갖추어져 있지 못하다. 이러한 현실이 국내의 유량측정 기술을 과거 수준에 머물도록 하고 있으며, 수공학 발전을 가로막는 걸림돌이 되고 있다.

본 연구의 목적은 하천 유량측정에 사용할 유속계를 개발하는 것이고 보다 구체적으로는 홍수 발생시 기존의 유량 측정방법(권양기-유속계)이 가지는 불편한 점을 개선할 수 있는 유속계를 제작하는 것이다. 이 연구는 국내의 하천용 유속계 연구 개발에 시초를 이루는 것으로, 유량 측정기기 제작 기술분야를 개척하는 것이며, 국내 수공학 발전의 장어가 되어온 기초 측정기술 수준을 제고시키는데 의의가 있다.

1.2 研究 內容

유량 측정설비는 보통 유속계와 수위(수심)계로 구성된다. 하천의 유량측정에서 가장 어려운 일은 유속의 측정이며, 특히 우리나라에서는 홍수 유속 측정에 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서 안전하고 간편하게 홍수 유속을 측정하는 일에 초점을 두어 電磁波 表面流速計를 개발하였다. 電磁波 表面流速計는 電磁波를 발사한 후 반사, 수신된 신호로써 도플러 주파수를 추정하고 이로부터 유속을 환산하는 원리를 사용한다.

측정 장비의 개발은 실험용 측정체계 개발, 검교정 설비의 구축, 측정 자료 축적 및 분석, 소형화 및 경량화를 통한 재구성(re-engineering)으로 대별된다. 현재까지의 電磁波 表面流速計 개발 내용은 측정 장비 개발순서에서 첫 단계인 실험용 측정체계 개발에 속한다.

2 電磁波 表面 流速計

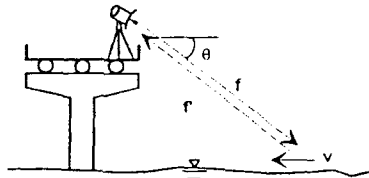
2.1 전자파를 이용한 속도 측정 원리

*,**,*** 한국 수자원 공사 수자원연구소 선임연구원, 연구원, 책임연구원

운동하는 물체에 의하여 산란된 전자파의 주파수가 변하게 되는 현상을 도플러 효과라고 한다. 이때의 주파수 변화량을 도플러 주파수라고 하며, 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (1)$$

여기서 f_d 는 도플러 주파수이고 v 는 물체의 속도, λ 는 전자파의 파장, 그리고 θ 는 물체의 속도 방향과 전자파의 진행 방향이 이루는 각이다. 이러한 원리를 이용하여 하천의 유속을 측정하는 경우 그림 1과 같은 형태로 측정 모식도를 나타낼 수 있다. 단, 여기서 기존의 유속계 등에 의한 측정방법과 다른 점은 물 표면의 유속만을 측정할 수 있다는 점이다. 이것은 전자파를 이용한 속도측정의 장점이기도 하고 단점이기도 하다. 즉 하천의 유량을 측정하기 위하여 필요한 물 속 임의 지점의 유속을 알 수 없다는 큰 단점이 있는 반면, 물과 멀리 떨어져서 물 표면 유속을 측정함으로써 매우 빠른 유속에 견딜 수 있는 지지 구조물이 없어도 되며 홍수때 떠내려오는 각종 부유물로부터 센서를 보호할 수 있는 안전성의 장점이 있다. 따라서 이 방법에 의한 유속 측정은 홍수에 대한 측정에 기본 목적을 두고 있다.



$$v = \lambda f_d / (2 \cos \theta), \quad (f_d = f - f')$$

v : water velocity
 λ : wave length
 f_d : Doppler frequency

그림 1. 휴대형 전자파 유속계의 측정 모식도

2.2 電磁波 表面流速 測定體系 hardware 구성

본 측정체계는 크게 초고주파 (Radio Frequency; RF) 부분과 신호처리 부분으로 나눌 수 있다. RF 부분은 전자파를 발생하여 공간상으로 보내고, 산란된 신호를 수집 하여 도플러 주파수를 얻는 과정이며, 신호 처리 부분은 RF 부분에서 얻은 미약한 도플러 신호를 증폭하고, 고속 후리에 변환(FFT)에 의해 주파수를 신속하게 계산한 뒤 이를 속도로 바꾸어 주는 부분을 말한다. 그림 2에 대략적인 시스템의 구성이 되어 있다.

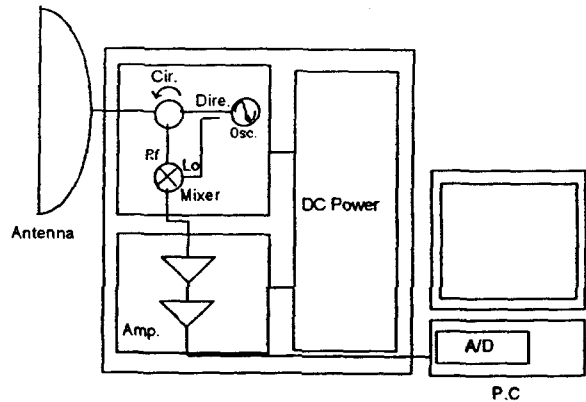


그림 2. 도플러 주파수 측정 장비 전체 구성도

RF 부분은 신호원, 전력 분배기, 안테나, circulator, 혼합기(mixer)로 구성되어 있다. 신호원에서 발생한 10 GHz, 50 mW의 신호는 안테나로 보내지게 된다. 이때 신호의 일부는 혼합기로 가게 하는데 이는 도플러 주파수가 더해진 산란 신호와의 차주파수를 얻는데 이용된다. 안테나를 통해 공간상으로 나간 전파는 수면에서 반사되어 다시 안테나로 돌아 오게 된다. 이때 반사된 신호가 송신단으로 가지 않고 수신단으로 갈 수 있도록 하기 위해서 circulator라는 부품이 이용된다. 즉 circulator는 송신 신호를 안테나로 보내고, 안테나를 통하여 수신된 반사 신호를 수신단으로 보낸다.

신호 처리부는 증폭부와 컴퓨터 접속부로 나누어진다. 증폭부는 analog 신호처리부이고, 컴퓨터 접속부는 digital 신호처리부라고 할 수 있다.

혼합기에서 나온 신호는 그 크기가 매우 작으므로 곧바로 컴퓨터로 들어갈 수 없다. 따라서 수신단을 통하여 신호를 증폭시켰다. 그리고 레이더 방정식에 의해 대략적인 신호의 크기를 예상할 수 있고 A/D 변환기의 입력 범위가 넓기 때문에 수신단의 이득을 가변하지 않도록 했다. 수신단 설계에 있어 가장 중요한 것은 다음의 두가지이다.

첫째로, 잡음 지수를 줄이기 위해 저잡음 증폭기를 만든다.

둘째로, 수신 대역폭을 줄여 불필요한 잡음을 줄인다.

위의 두가지를 위하여 저잡음 OP-amp를 사용하였으며, 물의 최대속도 이상의 도플러 주파수 대역을 LPF (Low Pass Filter)를 거쳐서 한정시켰다. 컴퓨터는 증폭된 신호를 고속 후리에 변환하여 주파수를 추정하고 이로부터 물체의 속도를 식 (1)에 의하여 계산한다.

3 電磁波 表面 流速計의 측정실험

제작된 도플러 주파수 측정 장비를 가지고 몇 곳의 장소에서 흐르는 물의 유속을 측정하였다. 하수 처리장 배출구과 교량 아래 하천의 유속을 측정하고, 대청 조정지 댐의 방수로 및 댐 직상류의 흐름 정체구역에서도 유속 신호를 분석하였다. 그리고 최종적으로는 한국 기계연구원 선박해양공학연구센터의 선박 실험용 선형수조에서 정밀 검증을 실시하였다. 여기서는 교량에서의 측정결과와 선박실험용 선형 수조에서의 검증결과만 기술하였다.

3.1 교량에서의 측정

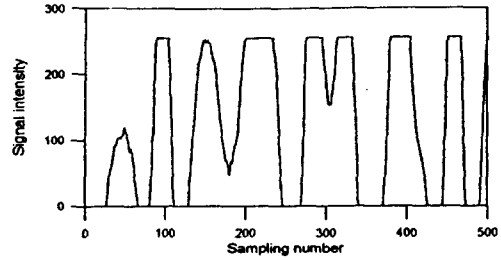
현재 索道-流速計를 사용하지 않는 유량측정에서는 교량에서 유속계를 물속으로 내려 측정하고 있다. 교량은 하천을 가로지르는 매우 유용한 구조물이므로 電磁波 流速計도 교량을 이용하여 하천 각 지점의 유속을 측정하는 것이 전형적인 방법이 될 것이다. 그림 1과 유사한 형태로 대전시의 제 2공단 부근 원촌교에서 교량 아래 물 표면의 유속을 측정하였다. 이를 위하여 유속계와 12 V 건전지, A/D변환기, 신호처리 소프트웨어를 탑재한 소형 컴퓨터로 측정 체계를 구성하였으며, 電磁波 流速計의 안테나에서는 7.5° 각도로 전자파가 발신되고 물 표면까지는 약 45 m이다.

그림 3은 도플러 신호와 주파수 분석 결과를 보여주고 있다. 시간영역의 신호가 윗부분에서 모두 잘려진 것은 수신된 반사파가 너무 강하여 전력 선택범위를 초과하기 때문이다. 또한 양수측에서만 신호 파형을 표시하였다. 그림 3에서 도플러 주파수 성분의 전력비가 가장 큰 것은 $f=35.6$ Hz이므로 유속은 입사각도 7.5°를 고려하여 0.539 m/s이다. 주파수 강도가 상대적으로 큰 것들이 넓은 영역에 걸쳐 퍼져있는 것은 안테나를 통하여 송신되는 電磁波가 7.5° 빔폭으로 퍼져 물표면에 입사하고, 각각의 입사위치에 따라 유속이 다르며, 위치에 따른 입사 각도도 다르기 때문이다. 퍼져있는 주파수 성분으로부터 유속의 도플러 주파수를 추출하는 간단한 방법으로는, 일정한 시간 동안에 측정된 몇 개의 최대 전력 주파수 성분으로써 시간 평균을 취할 수 있다.

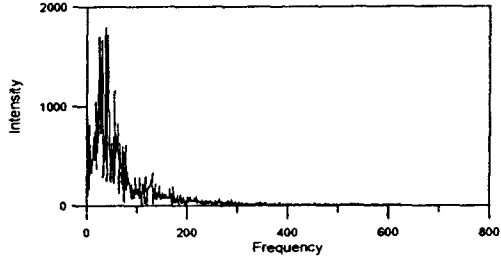
3.2 선박 실험용 線形 水槽에서의 검증

여러차례의 유속 측정 실험을 하여

측정체계의 정상적인 작동을 확인할 수 있었다. 이로써 전자파 표면 유속계의 제작오류가 없음을 확신하고 검증 방안을 모색하였다. 국내의 유속계 검증시설로는 국립 건설시험소의 소형수로가 유일하게 존재하는데, 이는 유속 1.5 m/s 이상을 검증하기 어렵다. 따라서 유사한 검증 설비를 조사하였으며 한국기계연구원, 포항 공대, 현대조선소, 서울대학교 조선공학과 등지에 線形水槽 및 滑車가 있음을 확인하였다. 이 중에서 한국 기계연구원은 3 m/s 이상의 활차속도를 낼 수 있고 가까운 곳에 위치하고 있으므로 이를 이용하였다.



Time domain signal

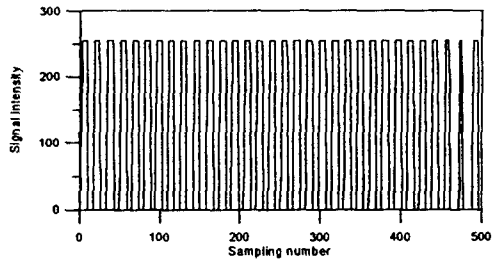


Frequency domain analysis

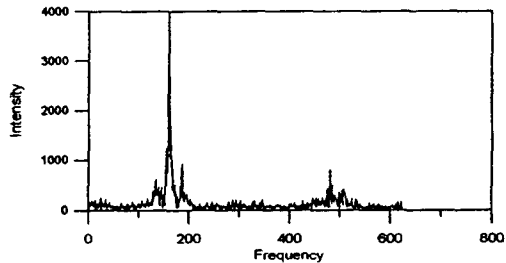
그림 3. 교량 아래의 유속측정 신호 분석

기계 연구원 선박 해양공학 연구센터의 線形水槽는 선박실험을 하기위한 시설로 물은 水槽에 채워져서 흐르지 않고 그 위에 滑車가 정격 속도로 움직이는 시설이다. 이곳에서 측정된 도플러 신호와 주파수 분포가 그림 4에 주어져 있다. 물 표면이 매우 고요한 상태에서 滑車가 움직이므로, 시간 영역에서는 규칙적인 신호를 볼 수 있고 주파수 영역에서는 주파수 퍼짐현상이 매우 제약되고 있다. 즉 강도가 강한 주파수 성분이 분명히 나타나고 있다. 가장 강한 전력의 주파수는 159.5 Hz이고 유속은 2.89 m/s 였다. 이때 활차의 속도는 3 m/s 였다.

현재의 유속측정 체계는 그 자체에 4%의 오차를 가지고 있다. 이것은 A/D 변환기의 표본추출 속도(sampling rate)가 계획과 약간 다르게 제작되었기 때문인 것으로 A/D 변환기를 교체하면 해결될 수 있다. 이러한 상태에서 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 3.5 m/s의 활차속도에 대하여 검증 실험을 수행하였다. 이 중에서 0.5, 0.7, 3.0, 3.5 m/s의 유속측정 신호를 자료로서



Time domain signal



Frequency domain analysis

그림 4. 선박실험용 線形水槽에서의 검증

저장하였다. 선박 해양공학 연구센터의 활차는 3.5 m/s보다 더 큰 속도를 낼

수 있으나 '70년대부터 운용되어온 설비임을 감안하여 최대속도는 내지 않았다.

그림 5는 滑車 속도 3.5 m/s에 대하여 측정된 값들을 나타낸다. 3.5 m/s를 주위로 약간씩 흩어져 있음을 볼 수 있으며 낮은 값과 높은 값이 교대로 나타나고 있다. 이러한 현상은 측정환경의 특이성 때문에 발생하는 것으로, 線形·水槽 건물의 지붕 구조물에 강철보가 규칙적으로 가로질러 설치되어 있기 때문이다. 즉 안내나에서 발사된 전자파의 主葉은 물 표면에 반사되어 수신되지만 附葉의 전자파가 강철보에 반사되어 보다 강하게 수신되는 것으로 추측된다. 전자파는 일반적으로 고체 표면에서 반사되는 강도가 훨씬 크므로 이러한 현상이 나타날 수 있다.

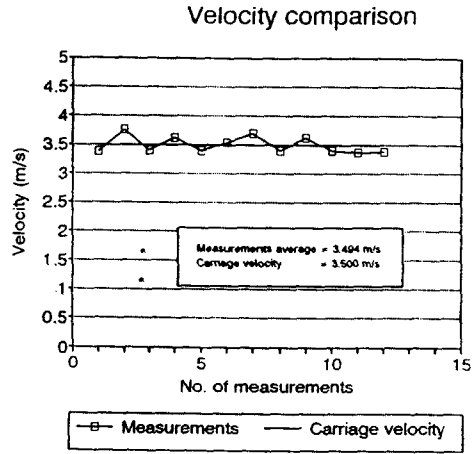


그림 5. 활차속도 3.5m/s일 때의 측정자료

그림 6에서는 滑車속도에 대하여 각 측정 속도의 평균을 도시하였다. 평균값에는 A/D 변환부의 표본추출률에서 생기는 오차와 附葉의 전자파가 지붕 구조물에 반사되어 나타난 오차가 혼재되어 있어서 명확한 오차를 기술하기 어렵지만, 측정값들이 대각선에 위치하고 있음을 볼 수 있다. 즉 활차 속도에 대한 측정속도의 선형관계가 우수함을 확인할 수 있다.

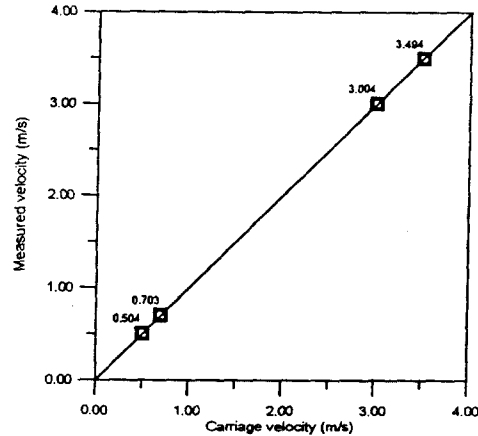


그림 6. 활차속도에 측정 평균값 관계

3.3 電磁波 表面 流速 측정체제의 문제점

여러 조건에서 현장실험을 수행하면서 많은 문제점을 파악하였다. 가장 중요한 것은 전자파 主葉의 빔 각도에서 발생하는 것으로, 물 표면의 한 점이 아니라 영역에서 반사된 신호를 수신하는 문제이다. 즉, 각 지점별로 유속과 입사각이 달라서 강도가 큰 주파수가 여러개로 형성되는 문제이다. 과연 어느 값을 표면유속 값으로 할 것인가는 매우 어려운 문제이다. 그러므로 안정된 신호를 얻기 위한 평균 방법을 여러가지로 적용하여야 한다. 평균 방법으로는 시간평균, 주파수 영역평균, 중앙값(median) 선택등 여러가지를 사용할 수 있다.

서론에서 이 측정체제의 용도를 홍수 유속 측정용이라고 밝힌 바 있다. 이 체제의 용도가 위와같이 한정될 수 밖에 없는 이유는 물 표면의 유동이 바람에 영향받기 때문이다. 대청

조정지점에서 댐상류의 유속이 없는 경우에 표면 유속계로 측정실험을 수행한 결과 바람의 영향을 확인하였다. 풍속이 매우 작다가 갑자기 크게 변하면 물 표면은 표면장력파가 형성된다. 이때 유속 측정체제에는 0.1-0.2 m/s의 크기를 가진 신호가 수신되었다. 이와같이 유속이 0.5 m/s 이하로 낮을 때는 물 표면의 속도가 바람에 크게 영향받게 되므로 평상시 유속측정은 다른 방법을 사용하여야 한다. 거꾸로 홍수시에는 바람의 영향이 줄어들게 되므로, 유속 측정이 간편한 장점을 이용하여 안전하고 편리하게 유속을 측정할 수 있다.

아울러, 물 속의 유속을 측정할 수 없다는 점이 단점 중의 하나이다. 그러나 기존의 권양기-유속계 체제를 사용하기 힘든 경우는 2-3 m/s 이상의 홍수 유속 측정이므로 電磁波 表面流速計는 이러한 경우에 유용한 측정수단이 된다.

4 결론 및 향후과제

4.1 電磁波 表面流速計 개발 성과

電磁波 表面流速計는 도플러 주파수 생성 원리를 이용한 유속측정 장비이다. 이는 電磁波의 발진과 안테나를 통한 반사파 수신, 차주파수 신호의 추출로 이루어지는 RF 부분과 차주파수 신호의 A/D 변환 및 고속 후리에 변환, 유속의 환산으로 이루어지는 수신부로 구성된다. 부속되는 설비는 안테나를 지지하는 다리부분과 신호처리 하드웨어가 있다. 이 측정체제는 교량 등의 하천 횡단 구조물을 이용하여 마치 사진기로 교량 아래의 물을 촬영하듯이 물 표면의 유속을 측정한다. 따라서 대홍수가 발생하여 유속이 매우 빠를지라도 안전하게 표면 유속을 측정할 수 있다. 가장 큰 단점은 표면 유속만을 측정한다는 것이다.

구성된 실험용 측정체제로 여러 차례 현장 유속을 측정하여 측정신호를 분석하였으며 한국 기계연구원의 선박 실험용 線形 水槽에서 검증실험을 실시하였다. 현장의 유속 신호를 분석한 결과 몇 차례의 측정 결과를 평균하여야 안정적인 유속을 결정할 수 있음을 알았다. 線形 水槽에서 0.5~3.5 m/s 속도를 측정한 결과는 본 연구에서 제작한 측정체제가 홍수 유속측정에 부합될 수 있는 장비로 개발되었음을 입증하였다. 그리고 동일 滑車 속도에 대하여 몇 개의 측정값 평균을 비교할 때, 4~7 % 이내의 오차를 가지고 있음을 파악하였다. 이 오차는 A/D 변환부에 내재된 것과 측정 환경 그리고 전자파 방사 각도 측정 등에서 기인된 것이다.

4.2 문제점 및 향후과제

현재의 電磁波 表面유속 측정체제는 여러가지 개선사항을 가지고 있다. 무엇보다도 A/D 변환기의 오차를 제거하여야 한다. 현재의 변환기는 4%의 오차가 내재되어 있으므로 이를 개량하거나 상용 제품으로 교체하여야 한다.

컴퓨터 및 부속 체제로 측정신호를 처리하는 것도 개선해야 한다. 측정 장비의 최초 개발단계에서는 각종 자료를 저장하고 통신 및 화상출력용 프로그램을 개발, 수정하기 위하여 PC가 매우 유용하게 쓰인다. 그러나 시제품의 개발을 목표로 한다면 단순 조작으로 유속신호만 제시하는 형태로 개선해야 한다.

전자파의 방사 각도를 결정하는 것도 매우 어려운 문제중의 하나이다. 현재는 경사면에 올려 놓아 각도를 측정하는 각도계를 사용하고 있으나, 트랜실과 같이 수평을 맞춘 후, 수직각을 측정하는 부대 설비가 일체로 부착되어야 한다.

또한 측정 환경(바람의 속도, 바람의 방향, 난류, 강우 등)을 고려한 신호 처리 방법에 대한 연구가 필요하다. 안정된 유속을 지시하기 위한 신호 처리 방법의 개발을 위하여 여러 측정 환경하에서의 실험이 요구되며, 충분한 측정 자료의 확보가 필요하다. 측정 자료 취득에 병행되어야 할 연구는 表面流速對 水深平均 流速의 관계 도출이다.