

초음파센서를 이용한 하천 수위/유속 측정 시스템

River level/velocimetry measuring system using the ultrasonic sensor

박희석* 박찬원*

Park, Hee-Suk, Park, Chan-Won

Abstract

In this paper, we study the river level/velocimetry measuring system using the ultrasonic sensor to acquire the more precise data from the river circumstance in rainy season. We design the two ultrasonic sensor system to calculate the water level and surface current speed of the river using the dedicated hardware and software.

We investigate the validity and effectiveness of the proposed system which applied to the real river environment monitoring system that will be extended to the GIS.

키워드 : 초음파센서, 수위/유속계측 시스템

Keywords : Ultrasonic sensor, river level/velocimetry measuring system

1. 서론

국토가 좁고 산악지형이 많은 우리나라는 지리적인 특성상 매년 반복되는 장마 또는 태풍의 영향으로 폭우와 홍수가 자주 발생하여 인명/재산피해와 같은 사회적 경제적으로 엄청난 손실을 가져다준다. 더욱이 이러한 피해는 주로 국지성 집중호우 의한 것이 여서 지역에 따라 다르며 예측이 힘들어 사전의 재해예방이 매우 어려운 실정이다.

한국의 수자원 관리기술은 댐 저수지의 수질/수위 관리, 상/하수 처리기술로 나뉘며 이에 대한 기반기술은 지표수 및 지하수의 흐름의 양적 측정에서 시작된다. 이를 위해서는 여러 장소에서의 수위/유속 측정이 필수적이며 이러한 기술을 확보하기 위해서 다양한 방식으로 접근하고 있으나 대부분이 수입품이어서 고가의 장비이고 측정자가 직접 해당 장소에 접근하여 측정해야하므로 안전사고에 대한 위험도 큰 실정이다. 본 연구는 기존의

측정방법에 따른 불편과 문제점을 해결할 수 있는 수위계와 유속계를 개발함으로써 이를 지리정보시스템(GIS)과 연계하여 효과적인 수자원 관리를 하는 하천 모니터링시스템의 수위/유속 계측부분의 개발을 목적으로 한다.

일반적인 수로나 자연하천에서 유량을 측정하는 다양한 측정장치가 있는데 이는 크게 유속계와 수위계로 나뉜다. 하천의 유량측정에서 가장 어려운 일은 유속의 측정이며 특히 우리나라처럼 여름 장마기에 집중적으로 호우가 집중되는 경우에는 더더욱 어렵다. 대부분의 유속계는 비가 오지 않는 시거나 매우 적은 양일 경우에 측정이 가능하고 유량이 많은 홍수기에는 측정이 거의 불가능하다. 그 이유는 모든 유속계들이 물속에 입수시켜 측정을 하는 접촉식 유속계방식을 사용하고 있어, 장마기처럼 매우 유속이 빠르고 부유물도 많은 경우에는 측정 장비를 수중에 입수시키기가 거의 불가능하기 때문이다[1]. 우리나라의 시형적인 특성을 고려한 소하천에 적용이 가능한 유속계측 시스템은 미국, 덴마크 등의 몇몇 회사에서 입수형으로 개발 생산되는 제품들이 있으나, 물리적 환경조건에 따른 데이터의 정확성, 동작에 따른 수명, 실시간 통

* (주)TGW 연구원

** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수

신의 어려움, 수중에 설치된 후의 유지보수 등에 있어 불리한 점이 많아 설치 후 수년간의 동작을 보장할 수 있는 제품이 거의 없는 실정이다[2]. 또한 국내에서 최근 개발된 비접촉방식의 유속계는 레이저방식을 이용한 것으로서 크기가 매우 크고 장비가 고가여서 측정지의 고정식으로의 사용은 불가능하고 전용차량에 탑재하여 측정하는 방식이다.

이러한 문제점을 해결하고 안정된 데이터를 측정하기 위해서는 비접촉식 유속계를 개발하여 사용하는 것이 최선의 방법이라 판단되어 본 연구에서는 초음파센서를 이용한 무선원격 수위/유속 계측시스템을 입수형이 아닌 표면 수위/유속 계측형으로 개발하여 이를 강원도지역의 하천에 적용하여 그 실용성을 평가하고자 하였다[3].

2. 시스템구성의 개요 및 특징

본 연구에서 개발된 무선원격 수위/유속계측시스템은 그림1과 같이 초음파를 이용한 수위계와 유속계의 센서모듈로 구성되는데 특히 유속계의 경우 기존의 대부분의 유속계가 하천에 침수시켜 측정하는 입수형인데 비해 본연구에서 개발된 유속계는 교각위에서 초음파를 송수신하여 수위와 유속을 측정하는 구성으로 개발되었다. 특히, 수위계(높이A)가 유속계와 가지의 거리(높이B)로 작각되고 유속계 센서 역시 가지의 각도(θ)로 초음파를 발사하여 후술하는 앙고리즘의 공식으로 수위와 유속을 측정하는 것을 본 연구의 특징으로 한다.

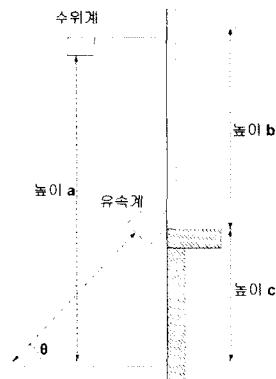


그림 1 초음파 수위/유속 측정시스템의 개요도.

2.1 초음파 수위계측기

2.1.1 구성 및 특징

초음파(Ultrasonic)는 매질과 관계없이 거리 및 수위 측정이 가능하다는 것이 가장 큰 장점이다. 레이저나 광파 측정방식은 일반 고체에서는 측정

이 가능하나 유리나 액체 등 빛을 산란, 흡수하는 매질은 측정이 불가능한 특성이 있다. 이에 비해 초음파는 매질을 구분하지 않고 신호를 반사시켜 측정에 매우 유리하다. 하지만 초음파 측정기는 일반적인 경우 측정가능거리가 10m내외 정도로 측정거리가 짧다는 단점이 있다. 이는 광파가 점 단위 측정지점을 갖는데 비해 초음파는 면 단위 측정지점을 가지고 거리에 비례해 퍼지기 때문이다. 본 제품은 이런 문제를 개선하여 측정 거리를 증가시키기 위해서 후술하는 바와 같은 별도로 제작한 초음파 송신부와 수신부 센서를 사용하여 출력강도와 수신감도를 증강하였으며 최대 30m까지 측정이 가능하도록 설계 하였다.

초음파 수위계는 정확한 계측값 측정/수집 및 Data 전송을 위하여 아래와 같은 사양으로 구성하였다.

- Built-In Temperature Sensor
- 1 UART (자료수집기 전용 통신 포트)
- 1 RS-232C Interface (Debug)
- 1 Channel ADC
- 1 Channel Digital Input Port
- 2 Ultrasonic Transmitter (송신부)
- 2 Ultrasonic Receiver (수신부)

초음파 수위계의 전기적, 물리적 사양은 다음과 같다. 이 사양은 초음파 유속계도 동일하다.

표 1 초음파 수위/유속계의 전기적, 물리적 사양

항 목	Min	Typ.	Max	Unit
동작전압	5.0	12.0	22.0	Vdc
소비전류	10	-	35	mA
동작온도범위	-20	-	70	℃
저장온도범위	-40	-	85	℃
습도범위	0%	-	95%	RH
측정가능범위	1	-	30	m
출력주파수	16	-	17	kHz
측정방식	Ultrasonic			

또한 PC 또는 자료수집기와와의 데이터 송수신 및 상태 확인을 위한 인터페이스 및 장치들을 내장하고 있으며, 열악한 환경에서의 손쉬운 설치와 운용 및 보수를 위하여 최적화된 운용 기법에 따라 최소화된 전력만을 사용함으로써, 독립적인 전원을 사용하는 시스템에서 전력 효율을 최대화시킬 수 있도록 구성되어 있다.

동작원리는 초음파센서에서 발생된 초음파 신호가 하천의 표면에서 반사되어 다시 초음파 센서로 되돌아올 때까지의 시간을 측정하여 레벨을 산출하는 방법을 사용한다. 따라서 공기 중에서 초음파의 음속을 산출하는 것이 매우 중요하며 일반적으로 공기 중에서의 음속은,

$$V[m/s] = 331 + 0.6 \times t \quad (1)$$

로 산출하며 여기서 t 는 온도[$^{\circ}C$]이다. 위 식에서 공기 중에서는 온도가 1[$^{\circ}C$]변화하면 음속은 0.17% 변화하기 때문에 측정지의 주변 온도를 측정하여 음속을 보정하는 것이 중요하다. 본 장비에서는 온도센서를 내장하여 측정을 할 때 실시간으로 온도를 확인하여 값을 보정하도록 설계하였다. 거리측정은 다음의 식으로 간단히 구할 수 있다.

$$H[m] = \frac{t}{2} \times u [m] \quad (2)$$

u : 기체음속(공기)

t : 소요시간[sec]

H : 초음파센서에서 측정물체까지 거리

초음파 거리측정의 일반적인 특징은, 피 측정물에 비접촉식으로 연속측정이 가능하므로 측정대상물의 물성(비중, 점도등)의 변화에 영향을 받지 않으며 기계적인 가동부가 없고 보수가 용이하므로 장기간 사용이 가능하고 실지가 간편한 특징이 있다.

2.1.2. 초음파 수위계의 동작

(a) 기본 동작

초음파 수위계는 전원이 인가되면 I/O Port, Timer, UART 등 시스템에 대한 설정 및 초기화를 완료하고, 전원 절약을 위해 Sleep Mode로 진입하여 대기한다.

자료수집가로부터 Data Request Signal이 입력되면 시스템은 Sleep Mode로부터 Wakeup되고, Calibration 수행 여부를 확인하여, Calibration이 수행되지 않은 상태이면 Calibration을 위한 동작을 실행한다. Calibration이 완료되면 초음파 수위계는 Data측정을 실시하고 측정된 Data에 대한 온도보정을 실시한다. 측정된 Data 중 50cm이상 ~ 40m이하의 범위에 해당하는 값만을 측정에 성공한 것으로 간주하고 이 범위를 벗어난 측정값은 무시한다. Data측정은 설정된 측정 횟수만큼 수행되며 모든 측정이 완료되면 수집한 측정치 중 최대값, 최소값을 제외한 나머지 값을 합산하여 평균값을 계산한다. 만약 측정 완료 후 유효한 측정치가 2개 이하이면 최대, 최소값을 제외하지 않고 수집된 데이터의 평균값만을 계산한다. 또한 측정 데이터가 0개일 경우 평균값은 0으로 한다. 측정이 모두 완료되면 계산된 평균값을 이용하여 Data Frame을 구성하고 Serial Interface를 이용하여 자료수집기로 전송한다.

(b) Calibration

초음파 수위계는 Calibration을 수행하는데 이는

측정값의 정밀도를 높이기 위해서 실시한다. Calibration은 실제 수위 측정에 사용하기 위한 Tx PWM Level을 찾아내기 위한 과정이며, 최종적으로 0 ~ 32단계의 Tx PWM Level 중 측정에 가장 적합하다고 판단되는 PWM Level로 설정되어진다. PWM Level은 최초 16번째 Step에서 시작하여 측정 성공시에는 PWM 단계를 낮추고, 측정 실패시에는 단계를 높여가는 방식으로 진행된다. Calibration 동작에서의 측정 시도 횟수는 5회로 고정되어 있으며 80% 이상 측정값 수신에 성공할 경우 Calibration 성공으로 간주한다. 1단계의 Calibration 동작을 완료하기 위해서는 5초의 시간이 소요된다. Calibration은 총 5단계의 과정을 거치도록 구성되어있으며, 최종 PWM Level은 마지막으로 성공한 PWM Level을 1증가시킨 값으로 결정한다.

(c) Debounce Time Check

수위 계측시 Noise에 의한 영향으로 잘못된 데이터를 수집하는 것을 방지하기 위해 Debounce Check를 시행한다. 초음파 펄스 발생 후 Block Time 이후에 수신되는 반송파에 대하여 약 103us 간격으로 6회에 걸쳐 검사를 실시하여 Signal이 6회 모두 Low Level을 유지하여야 한다. 검사 과정에서 High Level Signal을 감지하게 되면, Debounce Check를 즉시 중지하고, 다음 수신되는 반송파에서 검사를 재시작한다. 즉, Debounce Check에 성공하기 위해서는 반송파가 약 600us동안 Low Level을 유지하여야만 한다. 데이터 측정이 완료된 이후에 Debounce Time에 해당하는 시간은 거리 산출 과정에서 제외된다.

(d) 온도 보정

시스템이 Sleep Mode로부터 Wakeup되어 거리 측정 동작을 수행할 때, 매 초 1회 온도 보정을 위해 Temperature Sensor로부터 온도값을 읽어들이는 (Calibration 과정 포함) 이 때 첫 번째 측정의 온도값은 비교적 정확하지 않은 값이므로 사용하지 않는다. 온도 보정에 적용하는 온도 Data는 Wake up 시부터 매초 측정되어 누적되는 온도 값으로부터 평균값을 구하여 그 값을 적용한다.

(e) Carrier 주파수 offset 변경

초음파 수위계는 수위 측정 수행 시 측정 성공 확률을 높이기 위해 기본 16Khz의 주파수를 매 측정 시마다 0.5Khz 씩 변화시키며 측정한다. 변화 단계는 3단계로 한정되어 반복되므로 순환되는 주파수 범위는 16Khz ~ 17Khz가 된다.

2.2 초음파 유속계측기

2.2.1 유속측정의 원리

본 시스템에서 유속을 측정하는 방법은 먼저 초음파를 하천의 수면에 발사하여 수면으로 부터 반사되어 수신되는 신호를 분석하여 도플러 주파수를 측정하고 이를 바탕으로 유속을 측정하는 방식이다.

관측자와 음원이 상대적으로 운동하고 있을 경우에는 정지해 있는 경우에 비하여 수신된 초음파의 주파수가 다르게 관측되는 도플러의 원리를 기본으로 하여 유속을 계산하는데 그림 2와 같이 흐름이 있는 하천의 표면을 향해 방사된 초음파의 반사파를 수신하고, 방사된 초음파의 주파수와 수신된 반사파의 주파수 차이를 분석하여, 하천에 흐르는 유체의 속도를 계산할 수 있다. 다음은 유속 계산과 측정부 높이의 계산의 원리를 설명한다. 유속의 계산은[4],

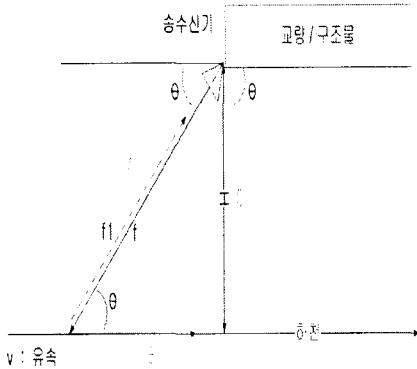


그림 2 유속계산의 개념도

공기중에서의 파장은 $\lambda = 340m / f$ 로 되므로, 도플러 효과의 공식에 의하여

$$f_d = \frac{2V \times \cos\theta}{\lambda} : f_d = f - f_1 \quad (3)$$

$$V = \frac{f_d \lambda}{2 \cos\theta} \quad (4)$$

여기서, V : 유속

f : 주파수 (Hz)

λ : 파장

f_d : 도플러 주파수 (송신신호의 주파수와 수신신호의 주파수 차)를 나타낸다.

송수신부의 높이의 계산은 그림에서와 같이 삼각함수의 정의를 사용하여

$$\sin\theta = C/A, \cos\theta = B/A, \tan\theta = C/B \quad (5)$$

로 표시할 수 있으므로 그림의 삼각형 A, B, C에,

A는 반사파의 측정값 환산을 통해 계산되고, 송수신기의 설치시 입사각을 $\theta = 45^\circ$ 로 고정하면,

$$C = A \cos 45^\circ \quad (6)$$

로 계산된다.

유속 계산의 원리는 송신신호가 매질에 방사되는 입사각을 알고 있고 송신신호 주파수와 수신신호 주파수를 검출하여 그 차이를 측정할 수 있다면 위 공식에 대입하여 속도를 알아낼 수 있다. 본 연구의 경우에는 45° 로 고정하였는데 송신신호가 매질에 반사될 때 신호 손실이 적고 도플러 공식 사용시 계산이 편리하기 때문이다.

2.2.2 하드웨어의 설계

위 공식을 이용하여 구성된 회로의 하드웨어는 아래와 같이 구성되어 초음파 신호를 송신하고 이를 수신하여 분석하도록 설계하였다[4]~[5].

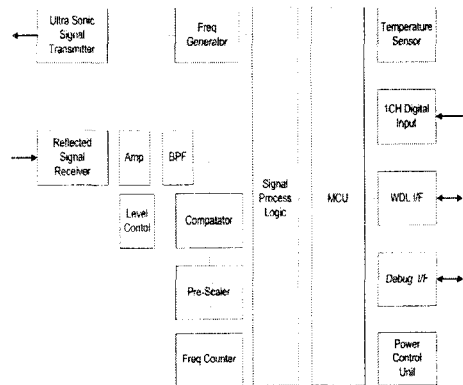


그림 3 초음파 수위/유속계 하드웨어 구성도

주파수 발생기로부터 신호를 발생시켜 송신기를 통해 송신신호를 방사하면 물 표면에 반사되어 주파수가 떨어진 수신신호가 수신기에 들어온다. 이 신호는 매우 작으므로 증폭기를 통해 증폭한 후 B 밴드 패스 필터를 거쳐 불필요한 신호성분을 제거한다. 이렇게 처리한 수신신호를 송신신호와 비교기를 이용하여 비교하면 두 신호의 주파수 차를 구분할 수 있게 된다. 수위 레벨 조절은 비교기에서 비교하는 신호의 기준레벨 값을 조정하여 수신신호의 강·약에 따라 변화하도록 하였다. 그런 다음 프리스케일러를 이용하여 주파수를 작은 수로 만들어 주파수 카운터를 통해 주파수를 측정한다. 이렇게 측정된 주파수가 앞서 설명한 도플러 공식에 이용되는 도플러 주파수이다. 다음은 각각 주요 구성에 대한 설명이다[5].

- Signal Transmitter : 초음파 신호를 생성하여

- 측정대상에 방사
- Reflected Signal Receiver : 하천에 반사되어 되 돌아오는 신호를 수신
- Freq Counter : 수신된 신호의 주파수를 분석
- Comparator : 송신신호와 수신신호를 비교하여 차를 파악
- Signal Process : 도플러 주파수를 분석하고 신호처리

2.2.3 소프트웨어의 설계

(a) 기본 동작

초음파 수위계와 마찬가지로 전력소모를 최소화하기 위해, 전원이 인가된 후 시스템에 대한 설정 및 초기화를 완료한 후 Sleep Mode로 진입하여 대기한다. 이 후 측정주기가 도달하면 자료수집기로부터 Data Request Signal이 입력되고 시스템은 Sleep Mode로부터 Wakeup되어 Calibration 수행 여부를 확인하여, Calibration이 수행되지 않은 상태이면 Calibration을 위한 동작을 실행한다. Calibration이 완료되면 초음파 유속계는 초음파 송신신호를 방사하고 물 표면에 반사된 신호를 수신하여 수신된 주파수를 카운트한 후 송신신호와 비교하여 도플러 주파수를 계산한다.

Data측정을 실시하고 측정된 Data에 대한 온도보정을 실시한다. 측정이 모두 완료되면 계산된 평균값을 이용하여 Data Frame을 구성하고 Serial Interface를 이용하여 자료수집기로 전송한다.

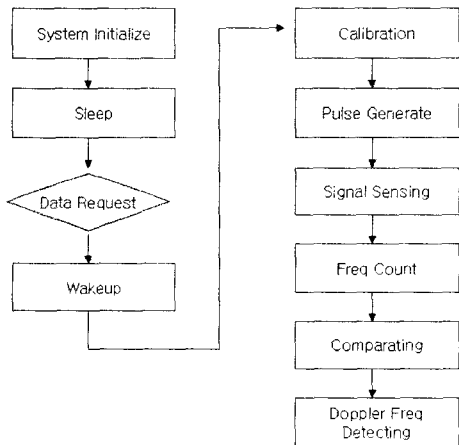


그림 4 유속계 소프트웨어 블록도

3. 제작 및 실험

3.1 초음파센서 혼의 제작

초음파 센서는 진동자를 진동시킨 후 진폭에는 진동자의 강도에 따라 한계가 있으며 20KHz 부근의 진동자에서는 수 μm 이므로 억압해야한다. 또한

피측정 물체의 반사면이 작으면 정확한 거리 검출이 어렵게 된다. 이것은 초음파의 지향특성에 의한 것으로 이것이 크면 타겟 이외에서의 반사파가 많

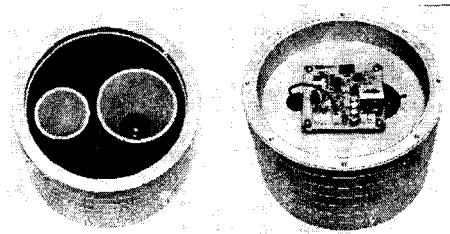


그림 5. 초음파센서의 전면과 후면

아 실용 가치를 잃게 된다. 초음파 센서의 지향성은 센서 소관의 방사면 치수와 주파수에 의해 결정되지만 같은 주파수라도 초음파 센서의 외부에 혼(horn)을 부착하는 것으로 그 특성을 개선하여 측정거리를 연장하고 측정 정밀도를 높일 수 있다 [3].

그림 5는 실제 제작한 초음파센서의 전후방의 사진이며 혼의 강도를 보정하기 위해 알루미늄 합금을 가공하여 제작하였다.

3.2 초음파센서의 특성사항

낮은 주파수를 사용하는 초음파는 같은 유속을 측정할 경우 도플러 주파수가 높은 주파수를 사용하는 광파나 전자파에 비해 더 크게 나타난다. 이런 특성 때문에 초음파 유속계는 고정밀 분해능의 AD변환기 및 DSP가 필요한 광파 유속계에 비해 보다 저가로 시스템을 구성할 수가 있다. 그러나 초음파는 광파에 비해 직진성이 떨어지므로 측정 대상에 부딪히는 면적이 크므로 측정대상이 작으면 오차가 커지는 단점이 있다.

표 2 개발된 초음파 센서 사양

주 파 수	15,625Hz
기준음속	34,000cm
파 장	2.125cm
설치각도	45°
도플러 주파수	6.655Hz
유속 분해능	10cm/s
수위 분해능	2cm
센싱거리	20m이내

3.3 실험과 측정

실험은 기본 신호 측정과 실 유속 측정, 2가지로 진행하였다. 기본 신호 측정은 테스트제품의 오차 범위를 측정하여 제품의 기능을 보완하기 위하여 실시하였으며 총 6차례에 걸쳐 실시되었다. 현재까지의 테스트제품의 오차범위 $\pm 3\text{Hz}$ 이며, 본 시작품의 목표로 하는 빠른 유속의 하천이나 홍수기의 하천 유속인 1m/sec 이상의 측정에서는 아무 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 유속 1m/sec 단위라면 기본주파수를 방사했을 때 도플러 주파수가 66.55Hz가 되게 되기 때문이다.

실제 유속 측정 실험은 각 차별로 2000번씩 측정을 실시하였으며 측정된 결과의 표준편차는 아래 표와 같다. 하천의 유속은 비슷한 시간대에서는 특별한 이유가 없는 한 거의 변화하지 않고 나타나야 하는 데도 불구하고 고정 실험값보다 오차가 크게 나타났다. 이런 현상은 실제 하천이 흐를 때 하천 바닥면이 일정하지 않아 표면이 불규칙하게 변화하기 때문으로 보이며 이를 개선하기 위해 좀 더 정밀한 AD변환기와 시그널컨디셔닝회로를 보완하여 추가적인 실험 및 개발을 진행할 예정이다.

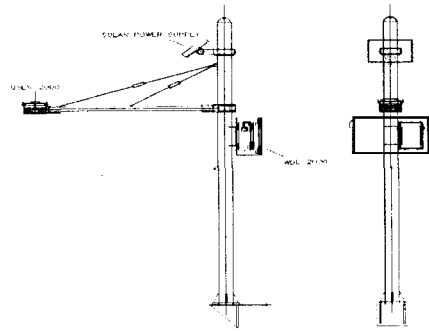


그림 7 초음파 수위계측기 설치도

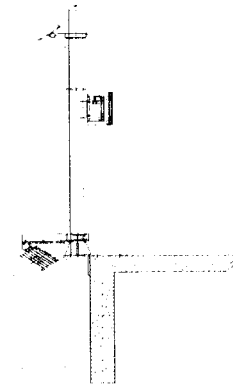


그림 8 초음파 유속계 설치도



그림 6 초음파 유속계 하천 실험 사진

표 3 유속측정실험의 결과

구 분	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	9차
표준편차	19	15	17	16	11	15	13	12	14

3.4 시스템 설치도 및 사진

그림 7과 그림8은 개발된 초음파 수위계측기와 유속계측기의 설치도이다. 본 연구에서는 제작과 실험의 편의상 따로 제작하여 설치하였는데 실용적으로는 같은 지지물에 설치하여 사용할 수가 있다.

그림9는 실제 교량에 고정 설치된 사진이며 교량의 하중부담을 최소화하기 위해 제품을 경량화(82kg)하였다. 사진위의 상층부는 상용전원의 공급이 어려운 지역을 위한 태양광(solar cell) 충전장치이다. 또한, 별도의 상용전원과 유선신비를 사용하지 않으므로 설치가 간편하고 유지보수 비용이 적은 특징을 가진다.

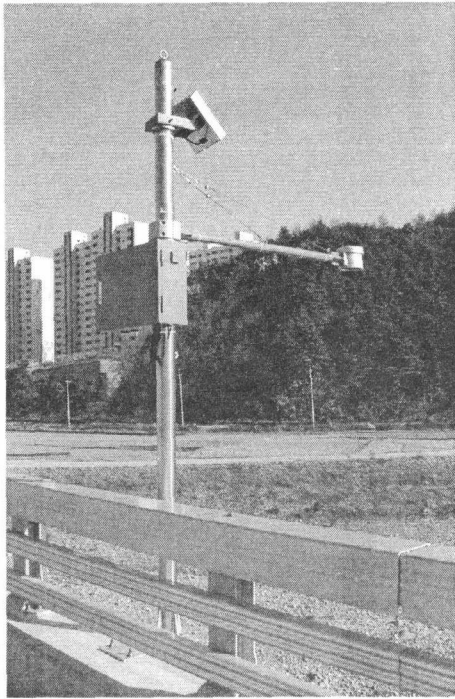


그림 9 실제 시스템 설치사진

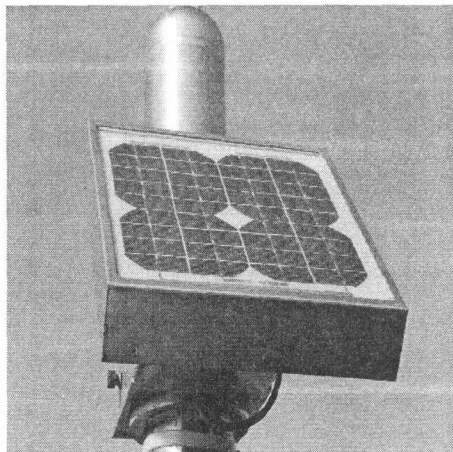


그림 10 태양광 충전장치

탐을 개발하였다. 개발된 장치는 데이터수집기로 전송되고 무선으로 서버와 연결하여 GIS를 근거로 한 하천종합모니터링시스템으로의 운용을 최종 목표로 한다.

본 연구에서 개발된 수위/유속시스템은 입수형이 아닌 표면 계측형으로 우리나라의 장마기와 같은 혹독한 하천수위/유속계측에 적합한 특징을 가진다. 한편 유속 계측의 경우 하천 유속의 특성상 수심의 위치에 따라 유속이 다르고 외부풍속의 영향으로 표면유속과 내부유속의 차이가 있을 수 있으므로 보다 많은 실험적 데이터를 확보하여 정확한 유속보정 알고리즘을 수립하여야 하는 보완할 사항은 추후 지속적인 연구과제이다.

참 고 문 헌

- [1] 이상호외 2명, “전자파를 이용한 하천수 표면 유속 측정”, 한국수자원학회논문집, 28권, 1995.12월
- [2] 이상호외 2명, “전자파 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성”, 한국수자원학회논문집, 30권, 1997.12월
- [3] 박병규외 3명, “혼 해석을 통한 초음파 폴리싱 시스템의 개발 및 연마특성”, 한국공작기계학회, Vol13, 53-60, 2004.6월
- [4] J.G. Webster, “The Measurement instrumentation and sensors handbook”, CRC press, 1999
- [5] AMD, “AM188ER”, Datasheet, 2002

4. 결론

본 연구에서는 초음파센서를 이용하여 하천의 수위/유속을 계측하는 장치를 개발하였다. 두개의 초음파송수신 모듈을 이용하여 서로의 위치상관관계를 계산하고 송수신된 초음파신호를 분석함으로써 이를 해석하는 소프트웨어알고리즘을 가하여 경제적이면서 실용성 있는 시스