

홍수유속의 전자파표면유속계를 이용한 편각측정

Oblique Angle Measurements of Flood Velocities Using Microwave Water Surface Current Meter

김영성*, 고덕구**

Youngsung Kim, Deuk-Koo Koh

요 지

홍수기 유량측정에 있어서 가장 큰 어려움이었던 유속측정의 정확성을 확보하고 실무자의 안전성을 보장하기 위한 기본 취지에서 1993년 시작된 “대하천 유량 자동측정 설비개발”이라는 연구 주제하에 비접촉식 유속측정 기법에 대한 연구를 수년간 연구개발을 거듭한 결과물인 전자파표면유속계를 1999년도에 상품화하여 현재 국내에서 홍수유속측정 설비로 이용되어지고 있다. 현장에서 유량측정업무에 종사하는 실무자들은 홍수유량측정에 비하여 훨씬 간편함을 몸소 느끼게 되었고, 상품화보급이 시작된지 수년이 지난 상태에서는 더욱 성능이 개선된 전자파표면유속계가 개발되기를 기대하였다. 무엇보다도 홍수기에 유량측정시 기존의 유속측정 방법과 같은 방식으로 각 측선마다 전자파표면유속계를 설치해야하는 번거로움을 피력하였다. 기존의 전자파표면유속계는 하천을 가로지르는 교량위에서 흐름방향에 나란히 측정하는 조건을 고려하였기 때문에 이와 같은 편각인 상태의 유속측정은 검토하지 않았다. 이와 같은 사용자의 요구에 대하여 한국수자원공사에서는 홍수기 유량측정시의 사용자 편의성을 증대하기 위하여 성능개선 작업에 착수하여 편각측정용 전자파표면유속계를 개발하였다. 편각측정의 주된 목적은 전자파표면유속계를 모든 측선에 설치하지 않고 한 지점에서 편각(oblique angle)으로 여러 측선의 유속을 측정함으로써 유속측정의 효율성을 증대시키는 것이다.

전자파표면 유속계에서의 편각 측정은 하천의 유속 방향을 기준으로 정면에서 측정하면 수평 편각이 0도가 되며 좌우로 안테나를 회전하여 움직인 각도가 측정 편각으로 결정된다. 전자파의 물리적 특성 때문에 편각이 증가하면 반사된 신호의 수신 크기가 감소하여 측정이 불가능하게 된다. 이러한 문제를 최대한 극복하는 것이 본 연구의 중점 개선사항이다. 이를 통하여 전자파표면유속계를 교량의 임의 지점에 설치하여 좌우로 편각 20°에 이르는 범위의 유속을 측정하고자 목표로 하였다. 홍수시의 현장 측정 환경은 열악하기 때문에 정확한 측정을 조건으로 측정자에게 최대한의 편리함과 신속한 측정 환경을 제공해야 효과적인 업무수행이 가능하다. 이러한 편각 측정을 가능토록 하기 위해서는 유속측정시 송신되는 전자파의 출력을 기존의 시스템보다 보다 높게 발사하여야 하며 안테나의 수신감도 및 지향성이 개선되어야 한다. 이를 위해서 안테나 형태에 있어 기존 전자파표면유속계와의 차이점은 기존안테나는 파라볼릭 형상이었으나 신규 제작된 안테나는 평면안테나로 이러한 형태의 개선을 통해 안테나 특성 및 구조적인 차이를 유도하였다. 두 가지 안테나 사양 각각 장단점이 있으나 가장 큰 차이점은 빔폭 특성에서 평면 안테나가 우수하며 수신 감도를 향상시킬 수 있다는 강점이 있다. 특히 Tx/Rx 분리의 평면안테나 구조는 파라볼릭 안테나에서 불가능한 기능으로서 편각측정으로 인한 수신감도의 저하의 문제를 해결하기 위한 개선조치이었다.

성능개선 제작된 편각측정용 전자파표면유속계를 이용하여 일반하천의 홍수유속에 대한 편각측정 실험을 안성천에서 실시한 결과 유속 약 1.7 m/s 인 상황에서 편각 20° 까지 편각 0°일때와 유사한 측정 성능을 보였다.

핵심용어: 전자파표면유속계, 편각측정, 평면안테나, 파라볼릭 안테나

* 김영성, 한국수자원공사 Kwater-연구원 수자원연구소 책임연구원 yskim@kwater.or.kr

** 고덕구, 한국수자원공사 Kwater-연구원 수자원연구소 연구위원 dkkoh@kwater.or.kr

1. 서론

전자파의 도플러효과를 이용한 유속계인 전자파표면유속계는 물과 비접촉으로 하천의 유속을 측정하므로 홍수시 프로펠러 유속계 및 봉부자 방식에 비교하여 안전하고 정확한 측정을 할 수 있다. 1999년도에 상용화된 기기는 홍수기 0.5 m/sec 이상의 고유속에 대해 측정이 가능하여 개발되었다. 이와 더불어 전자파표면유속계는 개발당시에는 흐름방향에 평행하게 설치한 상태로 측정이 가능하도록 설계 제작되었다. 이와 같이 기존의 전자파표면유속계가 흐름방향에 나란하게 설치하였을 경우에만 유속을 측정할 수 있는 기기의 성능상의 한계성 때문에 교량이 없는 지점에서는 유속측정이 불가하여 유량산정을 할 수가 없었다. 또한 이렇게 편각측정이 불가능하여 기기를 각 측선마다 이동설치하여야 하기 때문에 측정시 효율성 떨어진다. 이에 홍수시 유량측정의 효율성을 증대시키고 전자파표면유속계의 활용도를 높이고자 편각측정이 가능하도록 기기의 성능을 개선하는 것이 수자원연구원에서 추진되었다. 편각측정이 가능해짐으로써 기대할 수 있는 성능개선 효과는 측정유속의 범위를 기존의 측정가능 최저유속 0.5 m/s를 더 확장시킬 수 있다는 점이다. 이렇게 된다면 홍수기 이외의 평수기에도 어느 정도까지는 전자파표면유속계의 활용도가 높아질 수 있다.

전자파표면유속계를 이용한 유속측정에 있어, 편각측정은 하천의 유속방향을 기준으로 정면에서 측정하면 편각이 0도가 되며, 좌우로 안테나를 회전하여 움직인 각도가 측정 편각으로 결정된다. 전자파의 물리적 특성 때문에 편각이 증가하면 반사된 신호의 수신 크기가 감소하여 (Lee, 2002) 측정이 불가능하게 된다. 이러한 문제를 최대한 극복하는 것이 본 연구의 기술적 측면에서의 핵심 사항이다. 본 연구에서는 전자파표면유속계를 임의 지점에 설치하여 하천 폭이 200 m 이내의 하천을 2회에 걸쳐 측정할 수 있도록 성능을 개선함을 목적으로 한다. 이는 측정거리를 100 m까지 확대하여 이동설치 및 측정하는 횟수를 감소시키고 교량이 없는 지점에서 유속측정을 가능하게 한다. 홍수시의 현장 측정 환경은 열악하기 때문에 정확한 측정을 기본 전제조건으로 하면서 측정자에게 최대한의 안전성 및 편리성을 제공할 수 있어야 하고, 신속히 측정을 완료할 수 있는 여건을 제공해야 효과적인 업무 수행이 가능하다. 이상의 열거한 바를 구현하기 위해서, 임의의 지점에서 유속측정시 전자파의 출력을 기존 시스템보다 보다 높여 발사하여야 하며 안테나의 수신감도 및 지향성이 개선되어야 한다. 또한 부가적인 기능으로 다양한 측정모드를 제공하여 현장 조건에 따라 최적화된 측정을 할 수 있도록 측정알고리즘 및 소프트웨어 개선이 이루어져야 한다.

2. 편각측정을 위한 전자파표면유속계의 시스템 개선

편각으로 유속측정이 가능하도록 전자파표면유속계를 개선하기 위해서는 전자파 도달거리 및 수신감도를 기존 전자파표면유속계에 대비하여 월등히 개선하여야 정확한 측정이 가능하다. 측정거리를 증가시키기 위해서는 송신출력을 증가시켜야 하고, 수신감도를 높이기 위해서는 수신단 이득 증폭률을 증가시켜야 한다. 송신 출력 증가는 전류소모가 지수함수 형태로 증가하므로 사용하는 배터리 용량을 증가시켜야 하며 이에 따른 장비 크기 및 무게가 비례하여 증가하게 된다. 수신 증폭률을 증가하는 부분은 수신감도가 민감해져서 안테나의 부엽레벨(Side-Lobe) 신호에 의한 반응이 민감해져서 후방 및 측방에서의 움직임에 따른 측정값 교란이 예상된다. 즉, 안테나 측면이나 뒤부분으로 전자파가 방사되는데 주엽레벨(Main Lobe) 보다는 작지만 수신 증폭률이 커져서 후방 및 측방의 움직임을 감지하여 물표면의 유속으로 오인할 수 있는 가능성이 높아지게 된다. 이러한 상태를 개선하기 위하여 안테나 개발 단계에서 가능한 Side-Lobe를 억제하는 설계를 하지만 전자파 특성상 한계점이 있다. 위에서 열거한 시스템 상에서 문제점들을 최적화 하는 설계가 필요하며 장비 목적상 이러한 필요한 성능을 주개선 사항으로 설정하였다.

그림 4.1은 안테나의 전자파 방사 특성을 3차원으로 표시한 예이다. 적색으로 표시된 부분이 주엽 부분이 고 녹색 및 청색 부분이 Side-Lobe에 해당된다. 안테나 제작 시에 적색 부분이 길게 표시되고 녹색 및 청색 부분이 짧게 표시되어야 안테나 Gain이 높아질 수 있다. 안테나의 Gain이 높다는 표현은 지향성이 강하다는 의미이며 전자파 표면 유속계에서의 의미는 측정자가 측정하고자 하는 위치를 정확히 지정할 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. 그림 4.2는 안테나의 특성을 2차원으로 표시한 형태이며 이러한 그래프는 Network Analyzer 계측기를 통해서 측정이 가능하다.

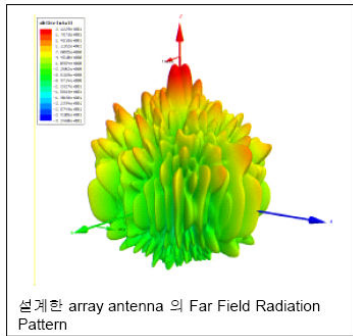


그림 1. 안테나의 3차원 방사 Pattern

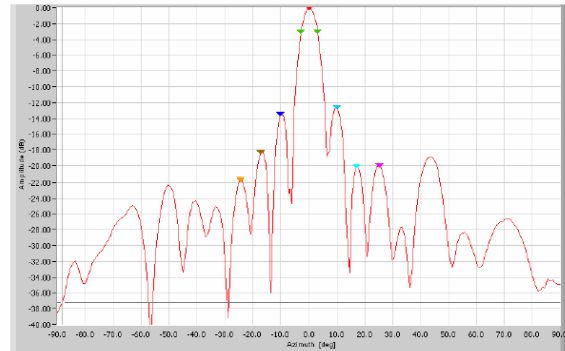


그림 2. 안테나 주엽과 부엽 특성

기존 전자과표면유속계는 Oscillator 라는 모듈에서 출력되는 10GHz 신호를 안테나로 바로 출력하는 형태로 SSPA라는 증폭기가 없다. 또한 하나의 안테나를 적용하여 송수신을 분리하기 위하여 Circulator라는 부품을 사용하였다(그림 3). Circulator를 적용하게 되면 송수신 분리도, 즉 Isolation이 20 dB 정도가 형성되는데 이 수치의 의미는 송신출력이 12 dBm 일 경우 수신부로 -8 dBm 크기의 신호가 누설된다고 해석할 수 있다. 이상적인 상태에서 수신부에서 처리하는 신호는 반사되어 돌아온 도플러 신호만 필요하다. 그러나 송신 출력이 Circulator를 통해서 누설되었기 때문에 미약한 도플러 신호에 영향을 미치고 결과적으로 정확한 신호처리를 하는데 있어 방해요소로 작용한다. 그러므로 Circulator를 적용한 구조는 홍수시 또는 50m 이내의 근거리 측정에서는 가능하지만 평갈수시 및 원거리 측정에서는 측정 오차가 심하게 발생하거나 측정이 불가능한 경우가 발생한다.

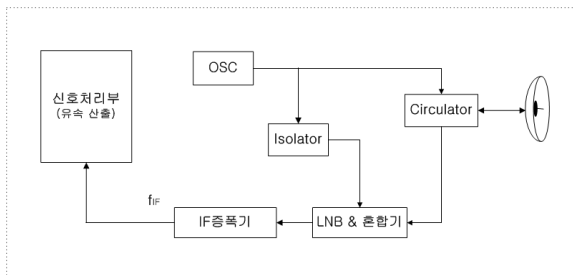


그림 3. 기존 방식의 구조

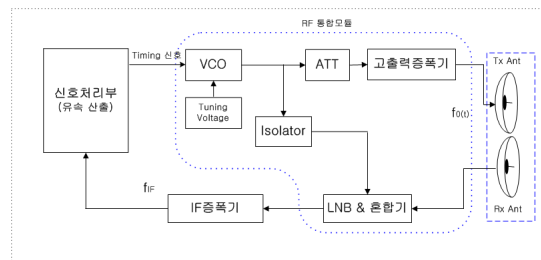


그림 4. 성능개선 이후의 구조

이러한 현상을 개선하기 위하여 두 개의 안테나를 단일 평면상에서 구현하여 Circulator를 제거함과 동시에 Isolation을 30 dB 이상으로 성능을 개선하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 평면 안테나는 외관상으로 하나의 안테나로 보이지만 내부는 두 개의 안테나로 분리되어 있다. 안테나 내부에는 RF 통합모듈과 IF 증폭기 모듈이 장착되어 있으며 외부 커넥터에 의해 전원과 신호를 주고받는 구조로 되어 있다. 송신출력의 증가는 기존 출력 대비하여 18 dB가 증가된 30 dBm으로서 SSPA 추가를 통해서 성능을 개선하였다. 수신부 회로는 기존 장비와 동일한 형태로서 유속에 의해 발생하는 도플러 신호가 안테나로 수신되면 LNB(Low Noise Block)에 의해서 1차 증폭되고, 혼합기에서 송신주파수 10 GHz를 삭제하게 되어 최종 도플러 신호만 IF 증폭기로 전달하는 구조이다. 그러나 개선된 전자과표면유속계는 수신감도를 향상시키기 위하여 IF 증폭기의 증폭도를 10 dB 이상 개선하였다. 그림 3은 기존 방식의 RF부의 구조를 보여주며 그림 4는 개선된 RF부의 구조로서 IF 증폭기를 제외한 모듈들을 하나의 RF 통합모듈로 구성하여 부피를 최소화하였다. 송신부에서 기존 구조와 비교하여 변경된 사항은 10 GHz Oscillator 모듈이다. 기존 방식은 10 GHz를 발생시키기 위하여 세라믹 소재의 DR(Dielectric Resonator)을 이용한 공진기를 채택하였으나, 성능개선 RF부 구조에서는 VCO(Voltage Control Oscillator)를 적용하고 주파수를 안정화하기 위하여 PLL(Phase Locked Loop) 회로를 적용하였다. PLL 기능은 출력단에서 Feedback Loop를 형성하여 PLL IC로 RF (radio frequency)를 입력한 후 위상을 비교한다. 만약 위상차이가 발생하면 설정된 주파수 값과 일치되도록 연속적인 제어를 하여 주파수가 고정되도록 한다. 기존 Oscillator 방식은 Free Run 형태로 주파수가 순간적으로 흔들리는 현상을 방지

할 수 없는 구조였으며 측정시 순간적으로 오차를 크게 발생할 가능성이 높았다. 이러한 구조의 장점은 회로가 다른 방식에 비교하여 간단하며 제작이 용이한 특징이 있다 (이상설과 강정수, 1999). 성능개선 구조의 VCO 출력주파수는 기존 방식에서 순간적으로 흔들리는 주파수가 수백 Hz 이상이었던 현상을 10 Hz 이하로 낮출 수 있었다. 주파수 안정도 향상은 측정값오차를 최소화 할 수 있는 요소로 작용하며, 이에 대해서는 두 가지 방식으로 제작된 기존 및 신규 전자파표면유속계를 이용한 현장시험을 통해서 확인할 수 있었다.

그림 4의 ATT(Attenuator)는 RF 감쇄기로서 통과하는 신호의 레벨을 조절할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이 기능이 필요한 이유는 편각 측정을 하는데 있어 최적화된 출력 레벨을 찾기 위하여 추가 되었다. 예를 들어서 편각 측정을 하는데 20 dBm 정도의 레벨이면 적정한데 30 dBm으로 고정된 상태에서 전자파를 발사하면 이는 과출력 상태로 기기를 사용하는 것이고 불필요한 소모전력을 발생시키는 결과이기 때문이다.

편각 측정에서는 안테나의 특성 파라미터 중에서 빔폭이 작은 것이 유리한데, 빔폭은 측정구간을 세밀하게 나눌 수 있는 장점이 있기 때문이다. 빔폭은 전자파를 물표면에 발사할 때 부딪히는 단면적과 관련이 있다. 빔폭이 작다는 것은 작은 단면적을 형성하는 의미로서 측정거리가 멀어지면 단면적도 비례하여 증가한다. 즉 편각 측정은 정면에서만 측정하는 기존 방식보다 원거리 측정을 하게 되므로 빔폭이 크게 되면 측정 구간을 세밀하게 구분할 수가 없다 (김영성 등, 2008). 표 1은 기존 파라볼릭 안테나와 평면안테나의 특성을 비교한 내용으로 형상도 다르지만 특성 파라미터가 차이나는 것을 비교할 수 있다.

표 1. 안테나 특성 비교

항 목	파라볼릭 안테나	편각용 안테나
주파수 대역	10 GHz ± 100 MHz	10 GHz ± 350 MHz
반사판 직경	30 cm (원형)	35 cm (정사각형)
편파	수직 편파	수직 편파
이득	27 dBi	24 dBi
빔폭	7° 이내	6.5° 이내
부엽레벨	-25 dB	-25 dB
Tx/Rx Isolation	구분 없음	30 dB 이상
무게	4.5 kg	1.5 kg

3. 홍수시 유속의 편각측정 현장실험

개발된 편각측정용 전자파표면유속계를 이용한 홍수기 유속측정을 통하여 주된 개선사항인 최대 편각측정의 범위를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 홍수기에 유속측정을 하고자 하였으나 2008년도에는 큰 홍수가 충청지역에는 발생하지 않았다. 다만 국지성 호우로 말미암아 경기도 평택 안성천이 7월말에 범람하는 사태가 발생하였다. 이에 여러 지점에서 여러 가지의 홍수사상에 대해 반복적인 현장시험은 실시하지 못하고, 이 지점만에서 7월말에 실시하였다. 측정당시는 최고수위를 지나서 수위가 점차 하강하고 있는 상태이었다.

편각에 따른 유속측정의 성능을 확인하기 위하여 우선 군문교량위 안성천의 중심선에 편각측정용 전자파표면유속계를 설치한 상태에서의 하류측의 표면유속을 수직각 30°로 설정하고 흐름방향에 일직선으로 기기를 향하게 고정시킨 상태를 수평각 0°로 설정한 상태에서 이때 측정된 유속의 결과를 기준유속으로 정하였다. 기기를 수평각을 10°, 20°로 변화시키었을 때의 유속측정 횡단면상의 수평이동거리를 계산하여 그 만큼의 거리를 교량 위에서 기기를 이동하여 횡단면상 기준유속을 측정된 축선을 향하도록 한후 표면유속을 측정하였다(그림 5, 그림 6, 표 2). 측정당시 군문교 지점 안양천 중앙의 유속은 1.729 m/s로 측정되었으며, 편각을 10°, 20°로 증가시킨 경우 측정된 표면유속이 1.780, 1.781 m/s로 기준유속과 비교시 3 % 내외의 오차를 보였다. 이는 개발된 전자파표면유속계가 편각 20°까지 측정하여도 큰 오차를 발생시키지 않고 유속을 측정할 수 있음을 의미한다. 하지만 편각을 50°로 설정하여 측정하는 경우, 오차가 -9 %에 이르러 그 절대치가 커지고 있다. 즉 개발된 편각측정용 전자파표면유속계는 편각 20°까지 범위에서 유속측정값은 편각 0°로 하여 측정하였을 경우와 거의 동등한 유속측정 결과를 보이지만 편각이 이 이상으로 커지면 유속측정 오차가 커지는 것을 알 수 있다.

표 2. 편각에 따른 유속측정 결과

	편각 10 °	편각 20 °	편각 50 °	기준유속 편각 0 °일때 V = 1.729 m/s
측정유속 (m/s)	1.780	1.781	1.572	
오차 (%)	2.9	3.0	-9.1	

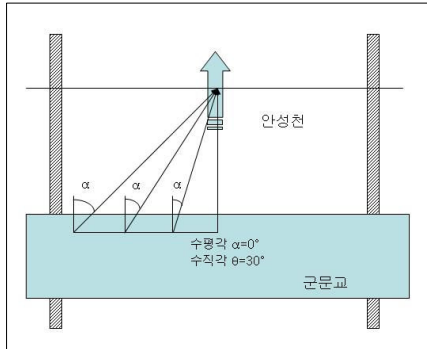


그림 5. 편각 표면유속측정모식도

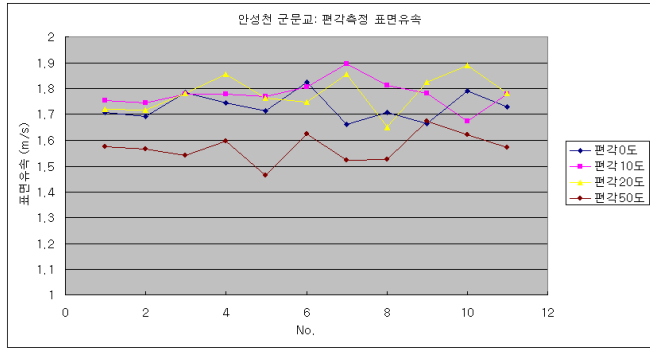


그림 6. 표면유속의 편각측정 결과

5. 결론

홍수기 유량측정시의 사용자 편의성을 증대하기 위하여 기존 전자파표면유속계 성능개선 작업의 일환으로 편각측정용 전자파표면유속계를 개발하였다. 편각측정의 주된 목적은 홍수시 전자파표면유속계를 모든 측선에 설치하지 않고 한 지점에서 편각(oblique angle)으로 여러 측선의 유속을 측정함으로써 유속측정의 효율성을 증대시키는 것이다. 편각측정용 전자파표면유속계를 이용한 현장 성능시험은 홍수기 경기도 평택 안양천의 군문교에서 수행되었다. 군문교의 중앙에서 편각측정용 전자파표면유속계의 편각 0°일때 측정된 유속을 기준유속으로 설정하고, 편각을 10°, 20°, 50°로 증가시키면서 동일횡단면, 동일측선의 표면유속을 측정된 결과, 군문교 지점 안양천 중앙의 유속은 1.729 m/s로 측정되었으며, 편각을 10°, 20°로 증가시킨 경우 측정된 표면유속이 1.780, 1.781 m/s로 기준유속과 비교시 3 % 내외의 오차를 보였다. 편각을 50°로 설정하여 측정하는 경우, 오차가 -9 %에 이르러 그 절대치가 커지고 있다. 즉 개발된 편각측정용 전자파표면유속계는 편각 20°까지 범위에서 유속측정값은 편각 0°로 하여 측정하였을 경우와 거의 동등한 유속측정 결과를 보이지만 편각이 이 이상으로 커지면 유속측정 오차가 커지는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 김영성, 김우구, 양재린, 고덕구 (2008). “편각측정을 위한 위한 전자파표면유속계의 성능개선”, 2008 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
2. 이상철, 강정수, (1999), 레이더공학, 보성문화사, 서울.
3. Ming-Ching Lee, William J. Plant (2002), “Non-contact flood discharging measurements using an X-band pulse radar (I) theory“, Flow Measurement and Instrumentation, 13, pp265-270.