

# 비접촉식 유량측정의 현황



**노재경**

충남대학교 교수  
jknoh@cnu.ac.kr



**이재남**

충남대학교 석사  
jnlee@cnu.ac.kr

실시하는 방법이 위험하고 곤란해지며, 봉부자나 전자파 표면유속계에 의한 유량 측정을 실시하는 것이 보통이다. 또한 경사가 급한 산지하천이나 집중호우에 의한 큰 홍수에는 하천 유속이 매우 빠르기 때문에 간접적인 방법을 이용한다.

여기서는 비접촉식 유량측정의 정의와 목적에 대해 알아보고 국·내외의 기술을 간단히 살펴보고, 국내 비접촉식 하천유량측정 현황을 소개하고 측정 방법에 따른 유량비교와 개선방안에 대해 알아보고자 한다.

## 1. 여는 말

하천 유량 측정 업무는 1960년대 말의 다목적 댐 건설 및 유역 조사 사업, 치수 사업 등과 더불어 수행되었다. 유량 조사는 일반적으로 유속을 측정하고 수위를 관측하여 수위-유량 관계에 의해 유량으로 환산하는 방법을 사용한다. 유속측정은 회전식 유속계, 봉부자 유속, 전자파 표면유속계 및 초음파 유속계 등이 실용화되고 있으며, 간접 유량측정, 웨어나 플룸에 의한 유량측정 등도 이루어지고 있다.

보통 평·갈수기에 유속계에 의한 유량측정은 수심이 1 m 이하이고, 유속이 1 m/s 이하인 곳에서 측정자가 직접 물속에서 수행하거나 수심이 깊은 곳에서는 배를 타고 실시하는 것이 가능하다. 그러나 홍수기에는 물속에 직접 들어가거나 배를 타고

## 2. 비접촉식 유량측정이란?

홍수기의 유량측정을 '폭우가 몰아치고, 벼락이 쳐도, 비오는 깜깜한 밤에도 해야 하는 위험천만한 일'이라 해도 지나치지 않다. 그만큼 수문조사 종사자들에게는 목숨을 담보로 할 만큼 위험한 일이지만 과학적 수자원 계획 및 관리를 위해 기초자료를 제공하는 가장 근본이 되는 중요한 일이다.

비접촉식 유량측정은 측정자가 물에 접촉하지 않고 실시하는 유량측정을 말한다. 평갈수기에는 유속이 대략 0.6~0.7 m/s 이하로 하천 물에 직접 접촉하여도 안전하게 유속을 측정할 수 있지만 홍수기에는 유속이 1.0~4.0 m/s로 물속에 들어가는 것은 매우 위험하다. 이와 같은 위험을 회피하는 것이

비접촉식 유량측정의 주요 목적이라 할 수 있다.

### 3. 국내·외 비접촉식 유량측정 기술

일본의 경우 토목연구소에서 1980년대 후반 개발하여 유속측정 범위가 0.5~10.0 m/s인 이동식, 고정식 전자파 유속계를 Yokogawa주식회사를 통해 판매하였고, 풍속과 풍향 및 수위를 함께 측정하여 홍수 유량뿐만 아니라 평상시의 유량도 관측할 수 있는 상실 관측 체계로 발전시켰다. 중국은 남경 수리수문자동화 연구소에서 1993년도 개발을 완료하여, 바람에 의한 영향을 고려하지 않은 채로 실용화하였으며 0.5~15.0 m/s의 유속측정이 가능하다(www.nsy.com.cn).

미국 U.S. Geological Survey에서는 Hydro 21 Committee를 1996년도에 발족하여 멀지않은 미래에는 수위, 유속, 수심, 유향을 무인 실시간 관측할 수 있는 시스템을 연구개발하고 있다. 이를 위하여 Hydro 21 Committee에서는 현재단계에서 적용가능한 기술을 검토하였다(Cheng 등, 2002; Kim, 2006). 주요 기술로는 PIV (Particle Image Velocimetry), Radar, Laser등을 이용하는 측정 기술이다. 이를 토대로 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 주요 산출물로는 Radar 기술을 이용한 홍수시 점표면유속측정을 위한 RiverScat, 2차원 표면유속 측정이 가능한 RiverSonde등이 있다. 또한 미국 Iowa 대학교에서는 실험실내 흐름해석에 주로 이용되어지던 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 하천과 같이 대규모의 흐름 영역에 적용 시킨 LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry)를 개발하였고, 이를 개량하여 실시간 유량 측정이 가능한 RTLSPIV (Real-Time Large-Scale Image Velocimetry)를 개발하였고 이를 Iowa 강에 적용하여 현재 실시간 유량 측정시험중에 있다. 또한 LSPIV에 기동성을 추가하기 위하여 차량탑재 LSPIV인 MLSPIV (Mobile

Large-Scale Particle Image Velocimetry)를 개발하여 운영중에 있으며, 이를 이용하여 Clear Creek 및 Iowa 강에서 성능비교시험한 사례가 있다(Kim 등, 2005; Kim, 2006).

우리나라는 한국수자원공사 수자원연구소에서 전자파를 이용한 전자파 표면유속계를 개발하여 1994년 실험용 측정체계 구성으로 출발하였고 1999년 보급을 개시하였다. 2009년 4월까지 75대가 수자원공사 및 대학, 공공기관, 연구소 등에 보급되어 홍수기 유량측정에 사용하고 있으며, 대전 갑천의 회덕 수위표 지점(2001~2006), 용담댐 유역의 동향 수위표 지점의 교량에 전자파 표면유속계를 고정하여 실시간 유량검정을 하고 있다.

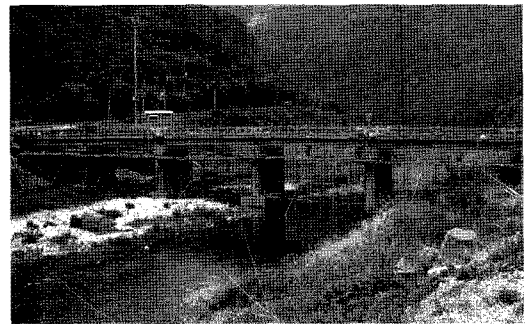


그림 1. 고정식 전자파 표면유속계 (동향)

표 1. 국내 비접촉식 유량측정 현황 (2007)

	국토해양부	수자원공사
봉부자	100	3
전자파	4	44
합계	104	47

### 4. 국내 비접촉식 유량측정 현황

국내에서는 일반적으로 홍수기에 봉부자와 전자파 표면유속계를 사용하고 있으며 2007년을 기준으로 유량조사사업단은 104 개 지점 중 100 지점에서 봉부자를 사용하였고, 수자원공사에서는 47 개 지점 중 44 지점에서 전자파 표면유속계를 사용하여 측정한 것으로 조사되었다. 기관별로 측정 방법

이 한쪽에 치우치는 경향을 볼 수 있다.

#### 4.1 유량측정 방법에 따른 유량 비교

봉부자와 전자파 표면유속계에 의해 동시에 측정 한 자료는 2007년 이원관측소 밖에 없는 것으로 조사되었다. 각각 수위-유량 자료를 수집하여 수위-유량 관계식을 유도하고 일 수문곡선을 작성하여 연 유출률을 비교한 결과는 그림 2와 같다. 봉부자에 의한 유속이 약간 높게 측정되었으며, 연 유출률은 봉부자 46.2 %, 전자파 표면유속계 41.2 %로 나타났다. 1년간의 자료 비교로 어느 방법이 더 정확하다고 단정할 수는 없지만, 두 방법 모두 양호한 결과를 보여주었다.

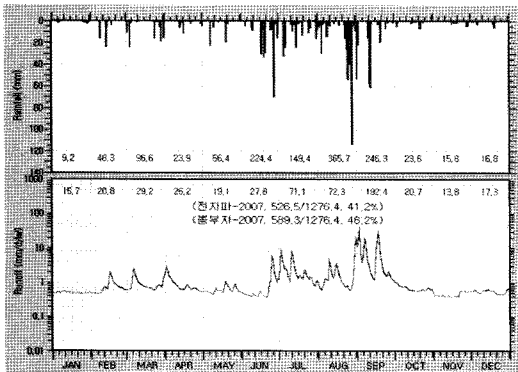


그림 2. 봉부자, 전자파 표면유속계의 유량비교

#### 4.2 유량측정 방법의 특징 비교

측정 방법에 따른 유량 비교 결과 신뢰도 차이는 미소하였다. 그러나 각각의 장점을 살리고 단점을 보완하는 것이 고품질 유량생산을 위해 필요한 것으로 판단하여 봉부자, 전자파 표면유속계 및 ADCP에 의해 동시 유량측정을 실시하고 상호 비교하는 기회를 가졌다.

최근 2009년 5월 14일 14시부터 14시 30분까지 대청댐에서 방류한 241 m³/s를 대청댐 직하류 대청교 지점에서 유량조사사업단, 한국수자원공사 수자원 연구원, 충청본부 팀이 봉부자, 전자파 표면유속

계 및 ADCP에 의해 동시에 유량측정을 실시하여 상호비교, 검토하였다.

유량계산 결과는 표 2와 같으며, 방류량(241 m³/s) 대비 전자파는 7 m³/s, ADCP(대형)은 1 m³/s, ADCP(소형)은 -7 m³/s의 오차가 있었으며, ADCP(대형), 전자파, ADCP(소형)의 순서로 양호한 결과를 보였다. ADCP를 이용한 것은 6회, 9회 측정된 평균값이며 횡수별 편차가 큰 점을 고려할 때 전자파 표면유속계를 이용하여 측정된 성과는 매우 우수한 것으로 판단된다.

표 2. 대청댐 방류량 측정 결과 비교

	봉부자	전자파	ADCP(대형)	ADCP(소형)
유량(m³/s)	-	248	242	234
차이(m³/s)	-7	1	-7	
비교	외류		9회 평균	6회 평균

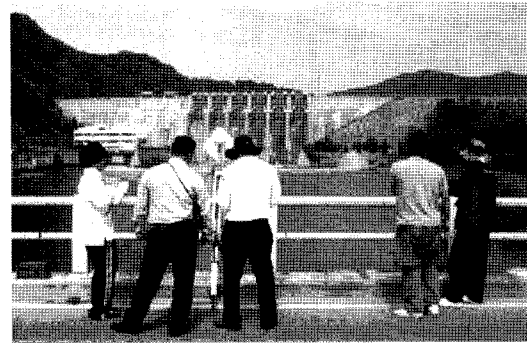


그림 3. 전자파 표면유속계 유량측정 예

봉부자에 의한 측정은 교각하류의 와류로 인하여 정상 측정이 곤란하였다. 그림 4는 봉부자가 와류로 인해 움직이지 않고 멈춰있는 사진이다.

우리나라에서 실용화하고 있는 전자파 표면유속계와 봉부자 측정방법을 인력과 측정시간, 측정효율성, 장비가격 측면에서 살펴보고자 한다.

인력과 측정시간을 살펴보면 측정간격에 따라 다르지만 200 m 하쪽에 대해 대체로 전자파 표면유속계는 2 인이 15 분 정도, 봉부자는 4 인이 30분 정도 걸리는 것으로 파악되었다. 측정 효율성은 전자파 표면유속계는 야간에도 연속으로 쉽고 빠르고

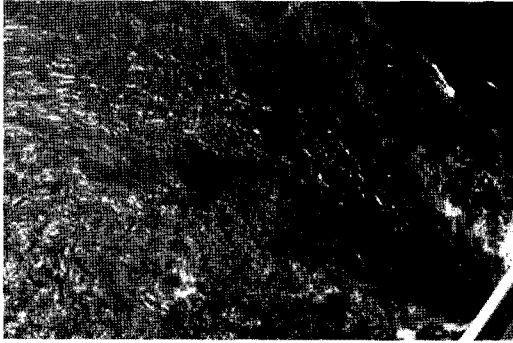


그림 4. 봉부자 측정 장애 예 (교각 하류)

안전하게 측정할 수 있는 것으로 평가되었으며, 봉부자는 하천의 굴곡부나 교각하류부 등 와류부에서는 부자가 편향되거나 지장을 받는 것으로 나타났다. 장비 가격은 전자파 표면유속계는 대당 2,500만원 정도로 다소 고가이며, 봉부자는 개당 1만원 정도로 1회 측정에 10~20만원 정도의 봉부자가 소요되는 것으로 추정된다.

종합하면 전자파 표면유속계는 정확성, 효율성은 우수하지만 장비가격이 다소 고가인 것이 단점이 되고, 봉부자는 장비가격은 저렴하지만 하폭이 일정하지 않은 구간, 와류가 발생하는 구간에서의 사용은 피해야 하며, 측정 인원이 다소 많이 소요되는 것이 단점이라 볼 수 있다.

## 5. 전자파 표면유속계의 적용과 효율성

### 5.1 2008년 용담댐 유역 유량측정

홍수기에 전자파 표면유속계를 사용하기에 앞서 매년 한국건설기술연구원에 의뢰하여 유속검정을 받고 있으며, 기준유속과 유속계의 유속을 비교해보면 신뢰성이 99%로 높다. 실내실험에서의 오차는 발생하지 않을 정도로 정확하지만 현장에서의 측정값과 저유속 측정에서는 면밀한 검토가 필요하다.

용담댐 시험유역에서는 2001년도부터 현재까지 전자파 표면유속계를 이용한 홍수기 유량측정을 실

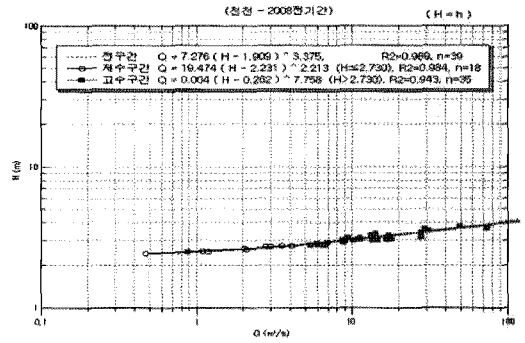


그림 5. 수위-유량 관계식 예 (천천)

표 3. 2008년도 용담댐 시험유역 기상현황

관측소	일 강우량(mm)						하상 변화정도
	5.18	5.28	6.08	7.25	8.18	8.22	
천천	36.7	75.1	30.2	94.8	22.8	20.4	소
동향	35.8	52.2	23.5	91.0	19.8	12.8	소
추천교	47.8	39.2	26.8	100.6	59.2	25.9	소
석정교	40.9	47.1	19.0	41.3	24.9	30.0	소
상도치교	32.0	54.4	23.7	80.1	14.3	16.2	소
봉곡교	41.0	53.0	26.0	121.0	27.0	15.0	소

시하고 있으며, 2008년도에는 유량이 평년 2/3 수준으로 하상변동이 거의 없을 정도로 홍수량 규모가 매우 작았다. 따라서 홍수량 자료가 매우 부족하였으며, 측정 수를 증가시키기 위해 야간에도 전자파 유속계의 측정범위를 벗어난 0.5 m/s 이하의 유속에서도 안전을 고려하여 전자파 유속계에 의한 자료를 다수 활용하였다.

여기서는 0.5 m/s 이하의 전자파의 유속측정 성과를 포함시켜 지점별 수위-유량관계식을 유도하고 유량을 산정한 것을 용담댐 운영의 유입량 자료와 비교하여 연 유출률로 유량측정 성과의 품질을 검토하는 것으로 하였다. 그림 5는 수위-유량 관계식 예이며, 그림 6은 수문곡선을 작성하고 실측자료를 중첩시킨 예이다.

지점별 결과를 종합하면 표 4와 같으며, 연 유출률은 38.6~50.5%로 용담댐의 34.8%와 비교하여 매우 양호한 수준으로 평가하였으며, 저유속에서도 전자파 표면유속계를 활용할 수 있으리란 기

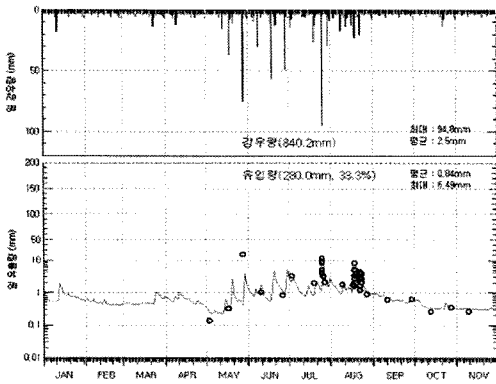


그림 6. 수문곡선 작성 및 측정자료 중첩

표 4. 지점별 유출률 비교

관측소	강우량(mm)	유출량(mm)	유출률(%)	비고
천천	890.0	347.9	39.1	
동향	797.3	319.9	40.1	
주천교	1013.9	512.3	50.5	
석정교	881.8	439.0	49.6	
상도치교	878.1	373.7	42.6	
봉곡교	789.0	304.4	38.6	
용담댐	875.5	304.2	34.8	댐운영

대를 갖는 결과를 얻었다.

### 5.2 평수기 전자파 표면유속계 활용 시도

저유속에서도 전자파 표면유속계의 활용성을 확장하기 위한 장비 개선에 대한 실험을 진행하고 있

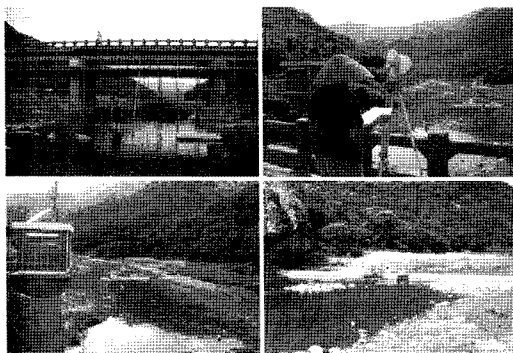


그림 7. 평수기 전자파 유량측정 예

으며, 실내에서는 3 cm/s에서도 측정 가능한 것으로 입증되고 있다. 따라서 개선된 장비를 이용하여 실외의 현장에서 측정의 정확성을 평가하는 시도를 하였다.

2009년 6월 4일 동향 수위표 지점에서 전자파 표면유속계로 유량측정을 실시하였고, 동시에 회전유속계에 의해 선정된 하천단면과 파살플룸에서 직접 유량을 측정하고 계산에 의한 자료와 상호 비교하였다. 그림 7은 하천횡단측량, 전자파 유량측정, 회전식 유량측정, 파살플룸 유량측정 광경이다. 그림 8은 전자파 표면유속 측정의 성과로 측정범위는 7~47 cm/s에 이르렀다.

측정시간은 전자파 유속계는 하폭 50 m에 10분, 회전식 유속계는 하폭 30 m에 30분 걸렸으며, 전자파 유속계는 1 m 당 12 초, 회전식 유속계는 60 초로 계산돼 전자파 유속계에 의한 측정이 5배 정도 빠르다고 할 수 있다.

그림 9는 전자파 표면유속계에 의한 유량계산 결과로 1.203 m³/s였고, 그림 10은 선정된 하천에서 회전식 유속계에 의한 유량계산 결과로 1.110 m³/s였고, 그림 11은 파살플룸에서 회전식 유속계에 의한 유량계산 결과로 0.998 m³/s였다.

한편 유량측정시간의 동향 수위는 2.36 m, 파살플룸의 수위는 48 cm였으며, 2008년 수위-유량 관계식에 의해 계산한 유량은 1.166 m³/s였고, 파살플룸의 유량공식에 적용한 유량은 1.164 m³/s였다.

구분	누가거리 (m)	목적관수위 (EL,m)	유속1 (m/s)	유속2 (m/s)	유속3 (m/s)	유속4 (m/s)	유속5 (m/s)
기록자 영점표고 (EL,m)	291.452						
기록자 수위, 시작 (m)	2.36						
기록자 수위, 끝 (m)	2.36						
수위계 수위, 시작 (m)	2.36						
수위계 수위, 끝 (m)	2.36						
측정수	14						
1	22.3	293.81	.07	.07	.07	.05	.06
2	25	293.81	.25	.24	.16	.13	.22
3	27.5	293.81	.17	.24	.17	.33	.23
4	30	293.81	.15	.1	.33	.13	.15
5	33	293.81	.001	.001	.001	.001	.001
6	44	293.81	.001	.001	.001	.001	.001
7	45	293.81	.28	.26	.34	.21	.27
8	47.5	293.81	.24	.34	.22	.22	.16
9	50	293.81	.24	.22	.28	.34	.25
10	52.5	293.81	.33	.47	.3	.23	.3
11	55	293.81	.34	.32	.37	.37	.36
12	57.5	293.81	.24	.23	.29	.32	.37
13	60	293.81	.21	.23	.15	.27	.29
14	62.5	293.81	.17	.12	.16	.14	.16

그림 8. 전자파 표면 유속측정 결과

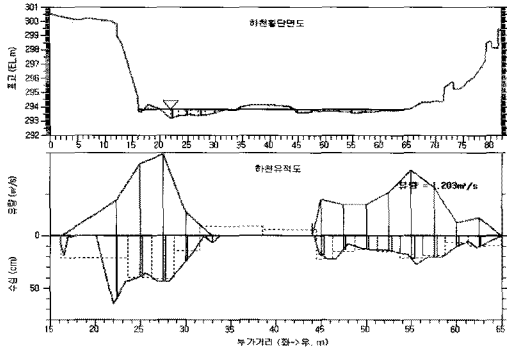


그림 9. 전자파 표면유속계 유량측정 결과

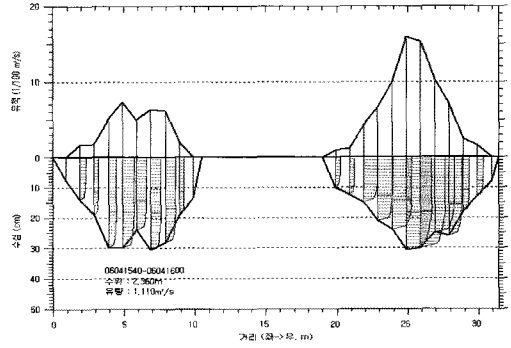


그림 10. 회전식 유속계 유량측정 결과

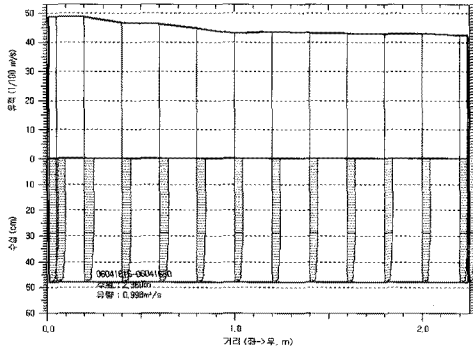


그림 11. 파살플름 유량측정 결과

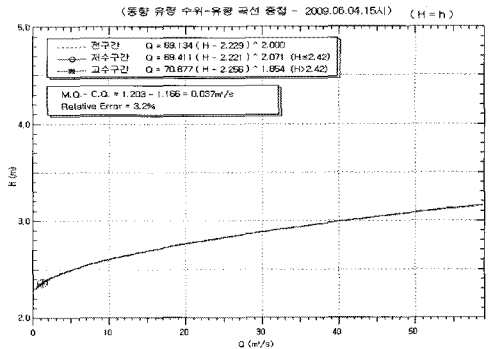


그림 12. 2008 관계식에 의한 평가

표 5. 측정방법별 유량 비교

측정방법	측정장소	수위	유량(m³/s)	상대오차
전자파	교량	2.36 m	1.203	3.2 %
회전식	하천	"	1.110	-4.8 %
(관계식)	"	"	1.166	기준
회전식	파살플름	48 cm	0.998	-14.3 %
(공식)	"	"	1.164	기준

주) 관계식은  $Q = 69.411(H - 2.211)^{2.071}$ 로 2008년 성과이며, 공식은  $Q = 3.732H^{5.67}$ 로 5" 이하의 파살플름 유량공식이다.

종합하면 표 5와 같으며, 2008년 수위-유량 관계식과 파살플름의 유량공식을 기준으로 각각 상대 오차를 구하면 전자파 유량성과는 3.2 %, 회전식 유량성과는 -4.8 %로 나타나 오히려 전자파에 의한 성과가 우수한 것으로 나타났다. 한편 파살플름에서의 회전식 유량성과는 -14.3 %를 나타냈다. 그림 12는 전자파에 의한 성과를 2008년 수위-유

량 관계식에 중첩시켜 유량측정의 신뢰도를 살펴본 것이다. 2008년부터 2009년 현재 까지 가뭄이 심하였으며, 큰 홍수가 없었기 때문에 하천단면의 변화가 거의 없는 것으로 관찰돼 이와 같은 비교, 평가는 매우 유의한 것으로 판단한다.

1 회의 평가로 결론을 내리기는 어렵지만 저유속에서도 전자파 표면유속계를 사용할 수 있는 가능성을 충분히 보여준 것이라 판단하며, 다양한 사례에 적용, 개선한다면 평수기 유량측정의 업무 개선에도 많은 도움이 될 것이라 믿어 의심치 않는다.

## 6. 맺는 말

평수기 하천의 저유속에서도 홍수기에 사용하는 전자파 표면유속계의 활용 가능성을 확인하였다고

글을 맺을 수 있으며, 몇 가지 검토한 내용을 요약하고 유량측정의 개선에 대한 고찰을 한다.

전자파 표면유속계의 측정 편의성, 정확성, 유량 측정 범위의 확장 가능성을 확인하였음에도 불구하고, 장비 보급이 저조한 현실을 감안하여 점진적이고 지속적인 기능 개선과 가격인하의 방법을 모색하는 것이 절실하다고 볼 수 있다.

붕부자에 의한 댐 방류량 유속측정의 시도가 중도에서 멈춘 상황을 연출해 상호 비교할 수 없었던 아쉬움이 컸지만 아직도 붕부자에 의해 홍수기 유량측정의 실적이 매우 크고 이원 관측소의 측정성과가 매우 우수하게 나타나고 있어, 굴곡부, 와류부 등에서 어려움이 있지만 붕부자를 이용한 유량측정의 효율성 증가에도 비중을 두어야 할 것으로 판단

하며, 측정의 제한 및 유의 사항에 대한 지침이 마련되어야 할 것이다.

장비 가격, 측정의 편의성, 정확성 등을 고려하여 각 측정 방법의 장점을 살려 상호 보완하는 방안을 지속적으로 강구되어야 할 것이며, 어렵게 축적한 유량측정 성과로 수위-유량 루프 관계도 적용하지 못하고, 기껏 수위-유량 관계식에 의해서만 1년 기간 단위로 유량을 생산하는 현실을 판단해 홍수사상별 유량품질 평가 기술 등 기술 개발도 좀 더 현실적으로 이뤄져야 하며, 장기적으로 미래의 건전한 수자원 환경을 조성하기 위해 고품질 유량 생산을 위한 예산과 인력을 수반되는 제도정비가 절실하다고 생각한다. ☞

## 참고문헌

1. 이상호, 김우구, 김영성, 1997, 전자파 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성, 한국수자원학회논문집, 제30권 6호, pp. 671-678.
2. 김영성, 양재린, 추태호, 고익환, 2002, 표면유속을 이용한 하천유량 측정기법 개선, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 940-945.
3. Cheng, R.T., Costa, J.E., Haeni, F.P., Melcher, N.B., and Thurman, E.M., 2002, In search of technologies for monitoring river discharge, in Younos, Tamin, ed., Advances in Water Monitoring Research, Water Resources Publication, p. 203-219.
4. Kim, Y., 2006, Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry. PhD Dissertation, The University of Iowa.
5. Kim, Y., Muste, M., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., and Weber, L., 2005, "Real-Time Stream Monitoring Using Mobile Large-Scale Particle Image Velocimetry," Proceedings of the XXXI IAHR Congress, Seoul, South Korea.
6. YAMAGUCHI, T., NIIZATO K., 1994, Flood Discharge Observation Using Radio Current Meter, Journal of JSCE No. 497/II-28, pp 41-50.