

유량측정 방법의 정확도 분석 -괴산댐 하류 달천 적용 사례를 중심으로-

Inter-comparison of Accuracy of Discharge Measurement Methods
- A Case Study Performed in the Dalcheon River Downstream of the Goesan Dam -

이 찬 주* / 김 동 구** / 권 성 일*** / 김 원****

Lee, Chan Joo / Kim, Dong Gu / Kwon, Sung Il / Kim, Won

Abstract

Relative accuracy of six discharge measurement methods-velocity-area method, rod-float method, ADCP moving-vessel method, ADCP fixed-vessel method, electromagnetic wave surface velocimeter (EWSV), LSPIV- is evaluated by comparing discharges measured by them with dam released discharges. Data from 39 times of concurrent discharge measurement campaigns are analyzed. Except the rod-float method, measured discharges show absolute errors less than 6.2% with dam discharges. When the four methods is evaluated by being compared with discharges measured with the conventional velocity-area method, discharges with electromagnetic wave surface velocimetry shows 7.35% of absolute errors and other three methods shows absolute errors less than 6%. The rod-float method, which shows large discrepancy compared with dam and velocity-area method, need complementary verification.

Keywords : discharge measurement, discharge measurement method, accuracy

요 지

본 연구에서는 괴산댐 하류 달천에서 6가지 직접 유량 측정 방법-유속면적법, 봉부자법, ADCP이동측정법, ADCP정지 측정법, 전자파표면유속계, LSPIV-을 적용하고, 이를 댐 방류량 및 유속면적법과 비교함으로써 정확도를 상호 평가하였다. 이를 위해 2005년부터 2010년까지 실시된 총 39회의 유량측정결과가 분석되었다. 댐 방류량과의 비교 결과, 봉부자법을 제외한 나머지 5가지 방법은 평균 6.2% 이내의 절대값오차를 나타냈다. 유속면적법과 다른 4가지 방법을 비교할 경우, 전자파표면유속계는 7.35%, 나머지 3가지 방법은 6% 이내의 절대값오차를 나타냈다. 봉부자법은 댐 방류량 및 유속면적법과 비교하여도 오차의 범위가 크게 나타났는데, 이에 대해서는 추가적인 검증이 필요하다.

핵심용어 : 유량측정, 유량측정방법, 정확도

* 교신저자, 한국건설기술연구원 감사실 전임연구원 (e-mail: c0gnitum@kict.re.kr)

Corresponding Author, Research Specialist, Audit and Inspection Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 전임연구원 (e-mail:kimdg@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 박사후연구원 (e-mail:ksy1973@kict.re.kr)

**** 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 연구위원 (e-mail:wonkim@kict.re.kr)

1. 서론

정확한 유량 자료는 수자원의 효율적인 관리에 필수적이며, 이는 저수로부터 홍수까지의 넓은 범위에 대한 정확한 유량 측정으로부터 얻어진다. 넓은 범위에 대한 정확한 유량 측정을 위해서는 많은 시간과 인력, 경비가 소요되며, 종종 악천후나 홍수로 인한 위험이 수반되기도 한다. 이 때문에 세계 각국은 측정 여건에 맞고, 정확하며, 인력과 비용이 절감되며, 위험을 줄일 수 있는 다양한 유량측정 장비와 방법을 개발하고자 노력하고 있다.

일단 새로운 유량측정 장비나 방법이 개발되면, 그것을 실제에 적용하기 전에 정확도를 평가하여야 한다. 이때 사용되는 일반적인 방법은 불확실도를 산정하는 방법이다. 불확실도를 산정하는 방법은 각 측정 방법이 갖고 있는 오차 요소를 정량화하여 분석하는 방법이다. 불확실도를 산정하기 위해서는 유량 측정값이라는 최종 산물에 관계되는 요소들을 규명하고 실측을 통해 계량화하여야 한다. 그런데, 여기에는 많은 노력과 시간이 소요되며, 나아가 공적인 표준화가 이루어지기까지는 더욱 그러하다. 하지만, 유량 측정을 보다 정확, 신속, 편리하게 하려는 여러 노력의 일환으로 새로운 방법들과 기기들이 계속 개발되고 있으므로 이에 대한 정확도 평가가 필요한 실정이다.

이러한 필요성으로 불확실도 분석과는 다른 관점의 정확도 평가 방법이 사용되어 왔는데, 이는 장기간 신뢰성을 획득한 기존의 측정 방법과 새로 개발된 방법을 비교하는 정확도 평가 방법이다. 그 방법들을 기준으로 되는 측정 방법에 따라 구분하면, 표준 기계식유속계를 이용하여 유속면적법으로 측정된 유량과 비교하는 방법 (Morlock, 1996; Mueller, 2002; Rehm et al., 2003; Oberg and Mueller, 2007; Anderson, 2007; Fisher and Morlock, 2002), 장기간 안정된 수위-유량 관계를 나타내는 지점에서 계산된 레이팅 유량과 비교하는 방법 (Oberg and Mueller, 2007; Morlock, 1996; Mueller, 2002; Gordon and Marsden, 2002)이 많이 사용되고 있고, 그 외에 보 (weir) 등의 통계구조물로 측정된 유량이나 초음파유량계로 측정된 유량 또는 희석법으로 측정된 유량 등을 기준으로 비교하는 방법 (Pimble et al., 2004; Oberg and Mueller, 2007) 등이 사용되어 왔다. 이와 함께 두 가지 이상의 기존 방법을 함께 비교하거나 동일한 측정 장비라도 여러 대를 동시에 사용함으로써 비교하는 사례도 있었다 (Morlock, 1996; Mueller, 2002; Pimble et al., 2004; Cheng et al., 2003; Muste et al., 2008; Adler et al., 2004; Adler et al., 2007). 이는 유량 측정의 속성을 고려하여 비교하는 방법의 수를 여럿으로 함으로써 가급적 개별 오차에 의한 영향을 줄이고, 이를 통해 새로운 방법의 정확도를 보다 객

관적으로 평가하는 시도라고 볼 수 있다.

우리나라에도 1990년대 후반부터 ADCP, 전자과표면유속계, LSPIV, 전자부자 등과 같은 새로운 유량 측정방법이 개발되거나 도입됨에 따라 이와 유사한 정확도의 평가가 이루어진 바 있다 (이상호 등, 1997; 이찬주 등, 2005; 이찬주 등, 2009; 권성일 등, 2009; 노재경과 이재남, 2009; 김서준 등, 2007). 이러한 연구들은 대개 특정한 방법을 검증하기 위해 수 회 정도의 비교 측정을 실시한 사례들이며, 그에 따라 넓은 유속 및 유량 범위에 대해 포괄적인 정확도 평가는 다소 부족한 실정이다. 본 연구는 이러한 배경 하에서 다양한 유량 범위에 대해 지속적인 측정과 분석을 통해 국내에서 유량 측정에 활용되고 있는 여러 가지 방법들의 정확도를 평가하고자 하는 목적으로 수행되었다.

2. 연구방법

본 연구에서는 유량 측정방법의 정확도 평가를 위해 기존의 측정 방법 중, 댐에서 방류하는 유량을 기준 유량으로 사용하였다. 수리구조물인 댐에서 방류되는 유량값은 일반 하천에서 측정된 유량값에 비해 상대적으로 불확실도가 낮을 뿐만 아니라, 장기간 통제 특성이 변하지 않고 유지되므로 측정값의 신뢰성이 다른 방법에 비해 높다고 할 수 있다. 다른 이유로 국내 하천의 경우 장기간 일정하고 안정된 수위-유량 관계를 나타내는 관측지점이 거의 없다는 점도 고려되었다. 다만, 댐 방류량 역시 오차가 있고, 단일한 기준값을 사용할 때 발생할 수 있는 판단상의 문제점을 보완하기 위해 외국의 다른 연구에서처럼 표준 기계식유속계를 이용하여 유속면적법으로 측정된 유량도 기준값으로 활용하였다.

본 연구에 활용된 방법은 모두 비연속적인 직접 유량측정 방법으로, 접촉식 방법은 유속면적법, ADCP 이동측정법, ADCP정지측정법 등 세 가지이며, 비접촉식 방법으로는 전자과표면유속계와 LSPIV가 사용되었고, 마지막으로 봉부자법이 함께 사용되어 국내에서 현재 사용하는 대부분의 방법이 적용되었다 (Table 1). 연속적인 유량측정 방법의 경우 직접 유량측정 방법으로 측정된 유량을 토대로 관계식을 수립 (calibration)하므로 직접 측정법에 의존적인 부분이 있고, 시계열 자료를 분석하여야 하므로 본 연구에서는 다루지 않았다.

유량측정 방법의 비교를 위한 실측은 가급적 동일한 시간대 또는 방류량이 일정하게 유지되는 시간적 범위 내에 여러 가지 방법을 함께 적용하는 이른바 동시유량측정 방식으로 실시하였다. 이렇게 함으로써 유량의 시간적 변동에 따른 각 방법별 편차를 최소화하고 유속면적법을 기준

으로 한 비교도 가능하기 때문이다. 다만, 일부 방법의 경우 측정 여건이 맞지 않아 동시유량측정 시 적용되지 못한 경우 별도로 측정된 결과를 댐 방류량과만 비교하였다. 그리하여 두 가지 이상 방법으로 동시유량측정이 시

행된 횟수는 28회이며 (2방법 : 10회, 3방법 : 7회, 4방법 : 8회, 5방법 : 3회), 11회는 한 가지 측정 방법만 사용되었다(Table 2).

개별 방법으로 측정된 유량값을 기준 유량과의 비교하

Table 1. Methods Applied to Make Discharge Measurement

Method	Details		
	Equipment	Period	Time needed
Velocity-Area (Wading/Bridging)	· Standard Price AA type current meter	low / high flow	1 hour
Rod Float	· Standard paper rod float	high flow	30 min.
ADCP Moving vessel	· RioGrande 1.2MHz ADCP (RDI) · StreamPRO 2.0MHz ADCP (RDI) · 3.0/1.0MHz Mini ADP (Sontek)	low / high flow	30 min.
ADCP Fixed vessel	· 3.0/1.5/1.0MHz Mini ADP (Sontek)	low / high flow	40 min.
Electromagnetic wave surface velocity	· Kalesto 24.125GHz (OTT) · Portable Electromagnetic Wave Surface Velocity Meter (MWVM-500) 10GHz (TAEKWANG)	high flow	40 min.
LSPIV	· Digital camera (Canon)	low / high flow	less than 10 min.

Table 2. Measurement Campaign During the Year 2005~2010 Downstream of the Goesan Dam

Year	Day	Dam discharge (m ³ /s)	Methods	Year	Day	Dam discharge (m ³ /s)	Methods	
2005	2005-03-14	6.1	1	2007	2007-07-25	102.0	1	
	2005-03-24	16.5	2		2007-07-26	45.6	1	
	2005-07-01	99.0	5		2007-08-05	246.9	2	
	2005-07-11	1,023.0	1		2007-08-05	290.0	3	
	2005-07-12	171.0	4		2007-08-05	380.0	2	
2006	2006-03-21	7.5	2		2007-08-05	413.5	1	
	2006-05-04	6.9	2		2007-08-07	57.7	4	
	2006-05-24	16.0	3		2007-08-08	35.8	4	
	2006-07-10	146.0	4		2008	2008-07-25	557.9	1
	2006-07-11	61.9	1			2008-07-25	333.0	2
	2006-07-11	67.0	2	2009	2009-07-12	408.0	2	
	2006-07-11	142.0	5		2009-07-13	91.1	3	
	2006-07-17	383.0	4		2009-07-21	382.0	3	
	2006-07-17	544.2	1		2009-07-21	385.1	1	
	2006-07-17	557.9	2		2009-07-21	511.1	1	
	2006-07-18	720.0	2		2009-07-21	622.0	1	
	2006-07-19	292.0	4		2010	2010-08-13	65.7	4
	2006-07-31	64.0	4	2010-08-15		140.0	3	
2007	2007-07-24	104.5	3	2010-09-02		138.0	3	
	2007-07-24	313.5	5	2005~2010 total numbers		39		

여 평가할 때, 기술적인 통계치를 이용하였다. 사용한 통계치는 무차원유량, 평균절대값오차 (Mean Absolute Error), Student t-분포의 신뢰구간값 등이다. 이 중에서 개별 방법으로 측정된 유량을 기준 유량 (댐 방류량 또는 유속면적법)으로 나눈 값인 무차원유량 Eq. (1)과 측정 유량과 기준 유량의 차이를 절대값으로 표현한 평균절대값오차 Eq. (2)를 이용하여 정확도를 평가하였고, 개별 방법에 의해 유량을 측정할 경우의 오차 범위를 파악하기 위해 무차원유량 자료를 이용하여 Student t-분포로 계산한 95% 수준에서의 신뢰구간 Eq. (3)을 계산하였다.

$$r_Q = \frac{\Sigma(Q_m/Q_d)}{n} \quad (1)$$

$$e = \frac{\Sigma|r_Q - 1|}{n} \quad (2)$$

$$(r_Q - t_{0.025}(n-1) \frac{s_{r_Q}}{\sqrt{n}}, r_Q + t_{0.025}(n-1) \frac{s_{r_Q}}{\sqrt{n}}) \quad (3)$$

Eqs. (1~3)에서 r_Q 는 무차원유량, Q_m , Q_d 는 각각 측정유량과 댐 방류량, n 은 측정자료의 수, e 는 절대값오차, $t_{0.025}$ 는 95% 신뢰수준에서의 자유도를 고려한 t-분포 범위, s_{r_Q} 는 무차원유량의 표준편차이다.

3. 대상 지점

본 연구에서 유량측정은 충북 괴산군 칠성면 외사리에 위치한 달천 수전교 지점에서 실시하였다. 이 지점은 괴산댐으로부터 약 1km 하류에 위치하며, 1km² 이상의 유역면적을 가진 지류가 없어 댐 방류량이 그대로 공급된다. 그리고 댐에 의한 유량 통제로 방류량이 일정하게 유지된다. 다만, 유량 자체가 매우 큰 경우 1시간 이내의 짧은 시간에 방류량을 변경하는 경우가 있으므로 이 때 측정된 자료들은 비교에 활용하지 않았다. 이 지점의 하상재료는 호박돌 ($d_{50}=0.138m$)이고 (김지성 등, 2007), 댐에 의해 하상재료의 공급이 차단되므로 비교적 안정적인 하

상을 유지하며, 이에 따라 측량 단면을 기준으로 유량을 계산하는 전자파표면유속계, LSPIV, 봉부자법 적용 시 단면 변화에 의한 영향이 최소화될 수 있다. 다만, 수전교가 주흐름 방향에 34° 정도 경사져서 하천을 횡단하고 있어 유량 측정시 방향 보정을 실시하였다 (Fig. 1).

유속면적법, 봉부자법, ADCP 정지측정법, 전자파표면유속계, LSPIV는 수전교에서 실시하였으며, ADCP 이동측정법은 바로 하류의 하도에서 측정을 실시하였다.

4. 적용된 유량 측정 방법

유량 측정 방법의 정확도를 평가하기 위한 측정 활동은 2005년부터 2010년까지 총 6년간 39회 실시되었다. 이 중 두 가지 이상의 방법을 동시에 적용한 경우는 28회이며, 나머지 11회의 경우 한 가지 방법만 측정하였다. 총 6가지 방법으로 101개의 측정 성과를 댐 방류량과 비교하였다 (Table 3). 유량 측정에 사용된 구체적인 방법은 다음과 같다.

1) 유속면적법: 본 연구에서는 표준적인 기계식 유속계를 이용한 유속면적법으로 유량을 측정하였다. 유속계는 표준 프라이어스 AA형 유속계를 이용하였다. 발전 방류시에는 수전교 하류에서 도섭법으로 유량을 측정하였고, 40 m³/s 이상 여수로 방류시에는 권양기 (crane)를 이용하여 추내립법을 실시하였다. 도섭법 적용시 수심에 따라 1~3 점법을 사용하였고, 추내립법의 경우 여수로 방류가 지속 시간이 짧은 관계로 정상류 상태 측정을 위해 1점법을 사용하였으며, 측선 수는 유량 변동의 가능성이 우려되는 측정 조건에 해당되는 3개의 성과에서는 20개 미만 (16~19개)을 사용하였으나 나머지 20개의 성과에서는 평균 23.6개를 사용하였다. 측정은 최대 409 m³/s 유량까지만 측정을 실시하였다.

2) 봉부자법: 홍수기 측정 방법인 봉부자법은 지관봉부자를 이용하였고 수전교에서 투하하였다. 측정 단면은 0, 25, 50 m 또는 0, 50, 100 m 등 세 개의 단면을 이용하였



Fig. 1. Field Measurement Site (Dalcheon River)

Table 3. A List of Measurements for Each Method

Method	No.	Time of Measurement	Measured discharge (m ³ /s)	Dam discharge (m ³ /s)	Method	No.	Time of Measurement	Measured discharge (m ³ /s)	Dam discharge (m ³ /s)
Velocity -Area	1	2005-03-14 20:08	6.13	6.1		16	2007-07-24 18:56	328.99	300.50
	2	2006-05-04 14:15	7.99	6.9		17	2009-07-21 14:33	395.90	382.00
	3	2006-03-21 15:01	7.86	7.5	ADCP	1	2006-05-23 16:36	16.94	16.04
	4	2006-05-24 11:00	17.09	16.0		Fixed	2	2007-08-08 14:07	60.87
	5	2005-03-24 15:45	15.70	16.5	-Vessel	3	2007-08-07 15:27	58.40	58.50
	6	2007-08-08 12:49	36.06	35.8		4	2006-07-31 17:51	62.77	63.50
	7	2007-08-07 16:33	52.50	57.7		5	2010-08-13 16:28	68.88	64.70
	8	2006-07-11 17:02	70.00	61.9		6	2009-07-13 16:41	95.10	91.10
	9	2006-07-31 14:46	69.26	63.5		7	2005-07-01 19:36	103.18	99.10
	10	2010-08-13 16:42	70.01	64.7		8	2007-07-24 23:53	109.12	104.50
	11	2009-07-13 16:32	89.94	91.1		9	2010-09-02 12:00	147.70	138.00
	12	2007-07-25 00:00	103.42	104.5		10	2006-07-11 13:08	142.44	144.00
	13	2010-08-16 00:07	134.03	140.0		11	2010-08-16 23:47	153.00	140.00
	14	2010-09-02 12:00	146.25	138.0		12	2006-07-11 01:02	156.43	146.30
	15	2006-07-11 14:00	141.00	142.0		13	2005-07-12 13:57	174.45	171.50
	16	2005-07-12 15:45	167.14	171.5	14	2009-07-15 18:35	192.58	174.00	
	17	2007-08-05 17:44	225.75	210.0	15	2007-08-05 16:36	252.50	246.90	
	18	2007-08-05 13:15	306.99	287.8	16	2007-08-05 11:35	282.17	288.00	
	19	2006-07-19 12:45	255.20	267.4	17	2007-07-24 15:43	329.90	321.00	
	20	2007-07-24 17:08	315.12	313.5	18	2008-07-25 18:56	338.50	332.90	
	21	2007-08-05 08:19	387.82	382.5	19	2007-08-05 08:06	393.69	380.85	
	22	2006-07-17 11:28	376.03	383.1	20	2009-07-21 14:33	391.60	382.00	
	23	2009-07-12 23:30	409.13	408.1	21	2006-07-17 12:31	399.53	383.10	
Rod Float	1	2007-08-31 15:00	68.10	63.0	22	2009-07-12 23:49	418.90	408.08	
	2	2005-07-01 18:07	116.06	99.1	23	2006-07-17 23:29	585.60	544.20	
	3	2006-07-11 13:19	162.61	142.0	24	2008-07-25 17:00	572.90	557.90	
	4	2006-07-10 23:20	172.55	146.3	25	2006-07-18 01:31	753.60	758.50	
	5	2005-07-12 12:51	196.15	171.5	EWSV	1	2007-08-08 13:04	37.90	36.30
	6	2007-08-05 12:22	369.35	288.6		2	2007-08-07 15:17	55.94	58.50
	7	2006-07-19 12:52	394.70	294.7		3	2010-08-13 16:31	71.75	64.70
	8	2007-07-24 16:50	434.35	313.5		4	2007-07-25 00:59	88.09	103.00
	9	2007-08-05 09:24	437.79	373.3		5	2010-09-02 12:00	141.20	138.00
	10	2006-07-17 12:25	421.04	383.1		6	2010-08-15 23:44	147.00	140.00
	11	2006-07-17 23:44	599.29	544.2		7	2007-08-05 12:11	274.30	288.30
	12	2006-07-18 01:23	801.81	758.5		8	2008-07-25 18:56	286.20	332.90
	13	2005-07-11 16:37	1246.75	1022.9		9	2009-07-21 14:25	376.50	382.00
ADCP Moving -Vessel	1	2006-05-04 14:18	7.62	6.92		10	2009-07-12 23:10	418.90	408.00
	2	2006-03-21 17:08	8.69	7.50		11	2007-08-05 04:51	406.51	413.50
	3	2006-05-23 18:16	16.40	16.04	12	2008-07-25 17:00	540.00	557.90	
	4	2005-03-24 13:50	16.98	16.50	LSPIV	1	2007-07-26 06:00	38.80	45.60
	5	2007-08-08 13:22	38.08	36.70		2	2006-07-11 15:30	66.28	61.90
	6	2007-08-07 17:28	60.36	57.70		3	2007-07-25 15:00	106.00	102.00
	7	2006-07-11 17:10	69.44	61.90		4	2006-07-11 13:00	144.80	142.00
	8	2006-07-31 16:19	64.68	64.00		7	2007-07-24 11:00	201.00	190.20
	9	2010-08-13 20:15	66.79	64.70		6	2006-07-19 12:00	288.91	294.70
	10	2009-07-13 18:21	96.91	91.65		7	2007-07-24 19:00	284.20	321.00
	11	2005-07-01 17:11	106.58	99.10		8	2007-09-15 19:00	287.00	309.00
	12	2006-07-11 14:12	135.84	142.30		9	2006-07-17 12:00	336.69	383.10
	13	2006-07-10 23:00	150.19	146.30		10	2007-09-15 17:00	418.00	450.00
	14	2005-07-12 15:12	176.15	171.50		11	2007-09-15 10:00	465.00	499.00
	15	2006-07-19 12:01	301.31	294.70	Total		6 methods, 101 measurements		

다. 봉부자법은 2005년부터 2007년까지만 수행하였는데, 이는 봉부자법으로 측정된 유량이 다른 방법에 비해 지속적으로 큰 차이가 발생하였고, 2009년 이후로는 교량 하류 약 50m 지점에 돌보가 축조되어 단면적과 흐름이 왜곡되었기 때문이다. 수전교가 하천에 비스듬하게 횡단하는 관계로 0m 단면의 경우 좌안에서는 부자가 수십 m 유하한 후 시작하는 반면, 우안쪽에서는 투하 후 수 m 이내에 시작하는 관계로 측정에 다소 주의를 기울였다. 부자 측선 수는 28개 측선 수를 적용한 한 개 성과를 제외하면, 10~18개이다.

3) ADCP 이동측정법: ADCP 이동측정법은 저수시 2개 케이스는 케이블을 이용하여 하천을 횡단하면서 측정하였고, 나머지 16회는 고무보트에 ADCP를 장착하여 보트법으로 측정하였다. 측정 장비는 저수시에는 RDI사의 StreamPRO 2.0 MHz ADCP와 Sontek 사의 MiniADP (3.0 MHz)를 사용하였고, 홍수시에는 Sontek 사의 MiniADP (1.0 MHz)를 사용한 1회 (382 m³/s)를 제외하면 RDI사의 RioGrande 1.2 MHz ADCP를 12회 사용하였다. 이동측정법 시행시에는 2회 왕복과 16회 왕복한 성과 2개를 제외하면, 4~8회의 왕복 횡단측정을 실시하였다. ADCP 이동측정법은 홍수시 급류의 영향으로 위험하므로 유량 395 m³/s 이하에서만 실시하였다.

4) ADCP 정지측정법: ADCP의 연직유속분포 측정 기능과 유속면적법을 접목시킨 ADCP 정지측정법은 수전교에서 하류 쪽 방향으로 ADCP를 무인 플랫폼에 설치하여 측정을 시행하였다. 수전교는 교각이 하폭에서 차지하는 비율이 낮은 편이나 교각 하류 쪽에 발생하는 후류의 영향을 최소화하기 위해 ADCP를 설치한 플랫폼을 교량으로부터 최소 30m 이상 하류 쪽으로 이격하여 측정하였다. 급류로 인해 발생하는 수면파동으로 정상적인 측정이 불가능한 경우를 제외하고, ADCP 정지측정법으로는 760 m³/s 이하의 홍수량까지 측정하였다. 측정 장비는 Sontek 사의 RiverCat Mini ADP이며, 측정 수심에 따라 3.0/1.5/1.0 MHz로 주파수에 따른 기종을 변경하여 사용하였다.

5) 전자파표면유속계 (electromagnetic wave surface velocimetry, EWSV): 전자파표면유속계는 수표면에 전자파를 발사하고 수표면에 부딪쳐 돌아오는 신호를 도플러 해석하여 표면 유속을 측정하는 장비로 홍수시 주로 사용된다. 본 연구에서는 40 m³/s부터 550 m³/s까지의 유량 범위에서 활용되었다. 전자파표면유속계는 두 가지 서로 다른 기기로 측정하였는데, 2007~2009년에는 독일 OTT사에서 개발한 수위계 겸용 유속계인 Kalesto (24.125 GHz)를 사용하였고, 2010년에는 한국수자원공사에서 개발하여 활용 중인 전자파표면유속계 (모델 MWVM-500, 10 GHz)를 사용하였다. 표면유속을 수심평균유속으로 변환

하는 보정계수는 공히 0.85를 적용하였고, 수전교에서 상류 쪽을 바라보고 유속을 측정하였다.

6) LSPIV: LSPIV (Large scale particle image velocimetry)는 수표면에 대해 시간적으로 연속적인 두 개 이상의 디지털영상을 촬영하여 2차원적 유속장을 측정하고 이를 토대로 유량을 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 수전교에 설치된 디지털카메라로 촬영한 영상을 이용하여 LSPIV 측정 시스템을 통해 측정된 유량을 사용하였다. 측정 단면은 수전교로부터 약 30m 하류 쪽 단면이며, 2대의 카메라로 측정된 유속장을 이용하여 유량을 계산하였다. LSPIV로 측정된 총 횡수는 11회인데, 이중 6회는 동시유량측정 시 함께 측정되었으나 나머지 5회는 별도로 측정하였는데, 이는 LSPIV가 중간에 고장이 발생하거나 가동 운영이 원활하지 못한 경우에 동시유량측정 시기와 함께 측정하지 못하였거나 동시유량측정이 야간에 이루어져서 비교가 불가능하였기 때문이다. 게다가 2009년에는 수전교 하류에 LSPIV 측정 단면 부근에 돌보가 신축되어 흐름과 단면을 교란함으로써 정상측정이 불가능하였다. 이런 이유로 LSPIV 자료는 제한적으로나마 2006년과 2007년에만 비교되었다.

5. 결과

5.1 댐 방류량과의 비교

댐 방류량을 기준으로 각 방법의 상대적 정확도를 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 그림에서 가로축은 각 방법으로 측정된 유량이며, 세로축은 댐 방류량이다. 그래프의 점선은 측정 유량과 댐 방류량이 완전 일치하는 선이며, 실선은 $\pm 10\%$ 오차 범위를 의미한다.

방류량을 기준으로 볼 때, 유속면적법의 경우 댐 방류량과의 상대오차 (이하 상대오차)는 대부분 $\pm 10\%$ 이며, 최대 범위 -9.01~15.46% 범위에 있고 평균 절대값오차는 4.83%이다. t분포 신뢰구간은 $\pm 2.63\%$ 이고, 무차원유량은 1.026이다. 봉부자법의 경우 전체적으로 +10% 이상 방류량에 비해 유량이 과다 측정되었는데, 상대오차는 5.71~38.55%이며, 평균 절대값오차는 18.26%로 나타났다. ADCP 이동측정법의 경우 10%를 넘는 경우가 20m³/s 이하의 유량에서 2개와 약 62 m³/s에서 1개 성과가 있을 뿐 대부분 $\pm 10\%$ 이내이며, t분포 신뢰구간은 $\pm 2.46\%$, 무차원유량은 1.050이다. 평균 절대값오차는 5.56%인데, 이 값은 이찬주 등 (2006)이 괴산댐을 비롯한 5개 댐의 방류량과 ADCP 이동측정법을 비교한 29회의 성과에서 나타난 평균 절대값 차이 (6%)와 거의 같은 수준이다. 이 결과를 통해 이동측정법은 댐 방류량보다 약간 유량이 크게 산정되는 것을 알 수 있다. ADCP 정지측정법의 경우 10%를

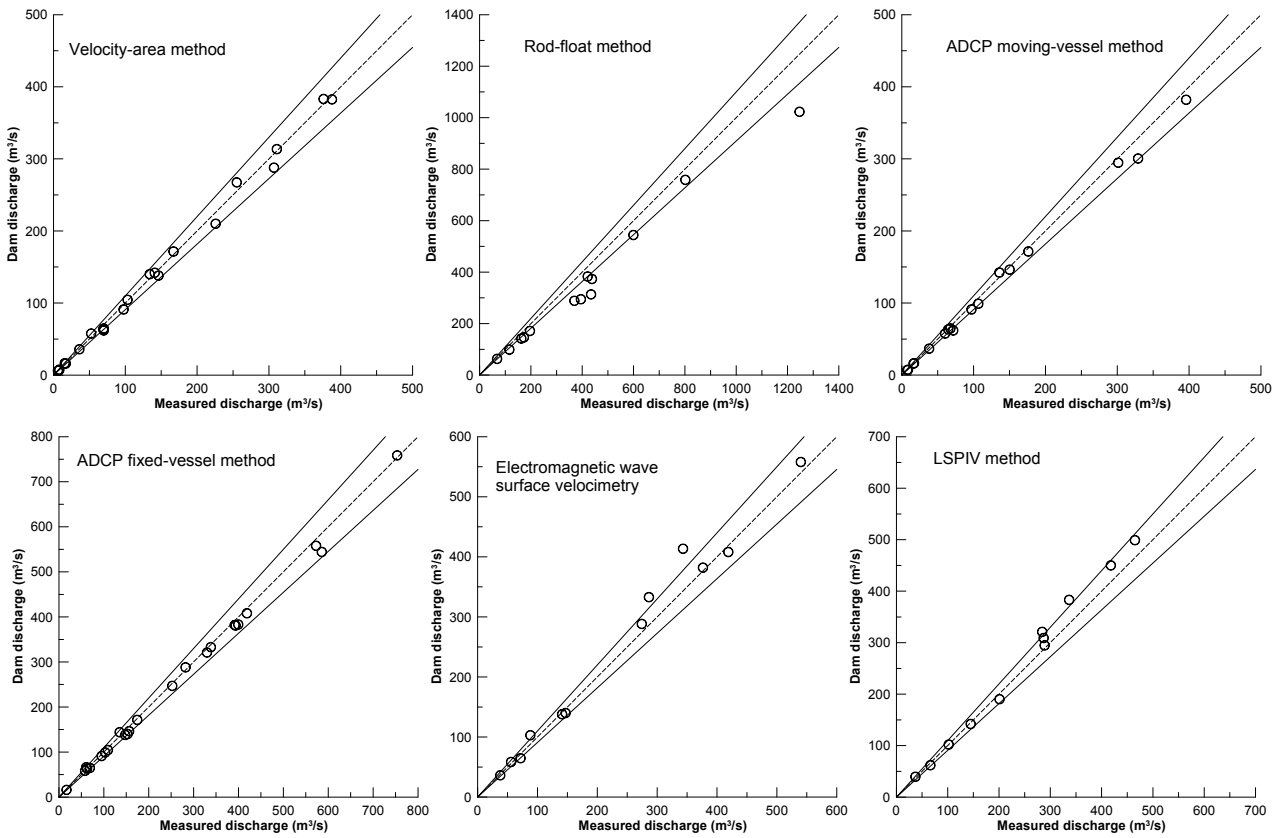


Fig. 2. Comparison of Measured and Dam Discharges for Each Method

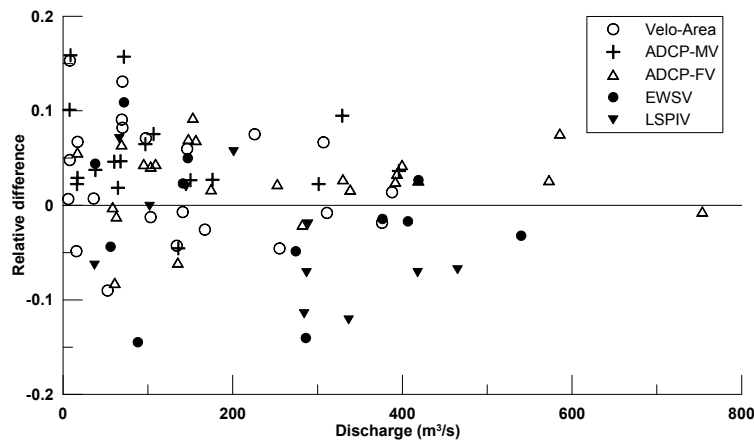


Fig. 3. Distribution of Relative Difference to Dam Discharge for Each Method

넘는 오차는 총 25개 중 단 1개이며, 상대오차 범위는 -8.19~10.68%, 평균절대값오차는 4.15%로 가장 낮게 나타났고, t분포 신뢰구간 역시 $\pm 1.66\%$ 로 가장 낮다. 무차원유량은 1.031이다. 전자파표면유속계는 250~350 m³/s 범위에서 다소 큰 오차가 나타났는데, 전체적으로 보면 상대오차는 -14.48~10.90%이고, 평균절대값오차는 5.78%, 무차원유량은 0.984로 1보다 약간 작다. LSPIV의 상대오차 범위는 -12.11~7.07%이며, 평균절대값오차는 6.16%

이다. 무차원유량은 역시 0.965로 1이하이다. 유속면적법과 두 가지 ADCP법은 댐 방류량에 비해 유량이 약간 크며, 전자파표면유속계와 LSPIV는 댐 방류량에 비해 유량이 약간 작은 것으로 나타났다.

봉부자법을 제외한 5가지 방법에 대해 유량 범위에 따른 상대오차 (relative difference)의 경향성을 Fig. 3을 통해 보면, 유량이 증가하면서 전체적인 상대오차가 감소하는 특성을 보이고 있다. 즉, 유속면적법의 경우 100 m³/s

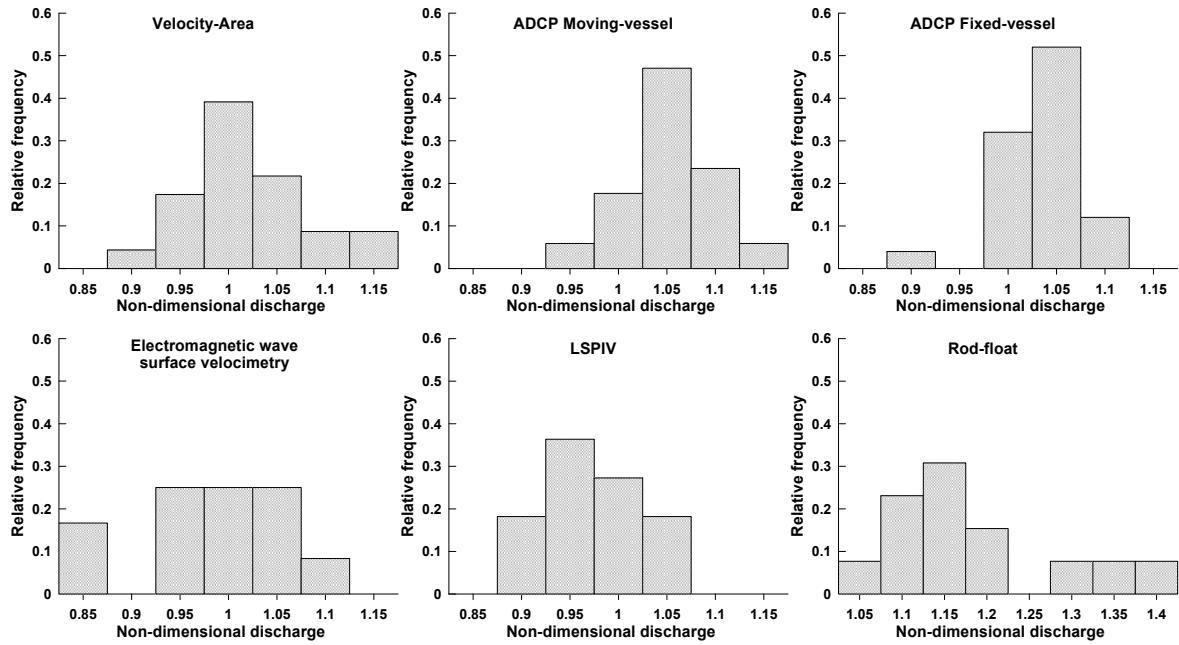


Fig. 4. Histogram Showing Relative Frequency according to Non-dimensional Discharge

이하에서는 상대오차가 $\pm 7.23\%$ 인데 비해, $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 초과 유량에서는 $\pm 3.41\%$ 이며, ADCP 이동측정법과 정지측정법은 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하에서 $\pm 6.82\%$, $\pm 4.33\%$, $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상에서 $\pm 4.69\%$, $\pm 4.00\%$ 이다. 전자파표면유속계의 경우 $286 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 -14% 의 상대오차가 있는 것을 제외하고는 역시 유량에 따라 상대오차가 작아지는 경향을 보이고 있다. 다만, LSPIV의 경우 유량에 따른 상대오차의 변화 경향이 뚜렷하지 않다 (Fig. 3).

Fig. 4는 각 방법별로 방류량 대비 유량(무차원유량)의 비율 히스토그램을 보여준다. 이 그림은 각 방법들이 댐 방류량과 비교하여 유량이 더 많거나 적게 측정되는가와 각 상대오차 범위에서의 빈도를 나타낸다. Fig. 4의 히스토그램은 봉부자법을 제외하고는 무차원유량을 0.05 간격(상대오차 5%)으로 구분하였으며, 0.825~1.175 범위를 7개 구간으로 나누어 상대빈도를 표시하였다. 봉부자법은 1.025~1.425 범위에서 역시 0.05 간격으로 8개 구간으로 표시하였다. 유속면적법의 경우 무차원유량 1.0을 중심으로 비교적 대칭적 분포를 나타내고 있는 반면, 유사한 대칭 분포를 보이는 ADCP 이동측정법의 경우 1.05에 최빈값이 있다. ADCP 정지측정법의 경우 1.05가 최빈값이나 좌측에 자료가 다소 많은 특성을 보이고 있다. 전자파표면유속계의 경우 전체 자료 수는 적으나 비교적 고른 분포를 보이고 있으며, LSPIV의 경우에도 역시 측정 성과 수는 적지만, 무차원유량 0.95를 중심으로 우측에 다소 자료가 많은 분포를 보이고 있다. 봉부자법의 경우 1.15에서 가장 높은 빈도를 보이지만, 1.3 이상의 자료 역시 3개가 있다. 봉부자법은 전체 자료 모두 유량이 과도한 특성을

보이고 있다.

5.2 유속면적법과 비교

기계식 유속계를 이용하는 유속면적법은 전통적으로 표준적인 유량측정 방법으로 사용되어 왔으며, 지금도 여러 가지 새로운 측정 방법의 정확성을 검증할 때 기준이 되는 유량값으로 사용되고 있다. 이에 따라 본 연구에서도 댐 방류량과 함께 유속면적법을 기준으로 다른 유량 측정 방법의 상대오차를 분석하였다. 다만, 본 연구에 사용된 유속면적법은 대부분 홍수시 시간적 제약 속에서 측정된 것으로 1점법 측정 성과인 점이 고려될 필요가 있다. 비교에 사용된 유속면적법 유량성과의 불확실도는 4.96~7.34% 범위이다. 상대오차 분석을 위해서, 유속면적법과 동일한 시간대에 동일한 댐 방류량 조건에서 측정된 동시 유량측정 자료만을 대상으로 하였다.

봉부자법의 경우 유속면적법과 6회의 동시에 측정된 자료를 분석하였는데, 댐 방류량과의 비교 때와 마찬가지로 오차의 편차가 매우 큰 것으로 확인되었다.

ADCP 이동측정법의 경우 유속면적법과 13회 동시 측정이 이루어졌으며, 상대오차는 $-6.61\sim 14.98\%$, 평균절대값오차는 5.81%, 무차원유량은 1.023으로 나타났다. 95% 신뢰수준의 오차범위는 $\pm 4.04\%$ 였다. ADCP 정지측정법은 유속면적법과 함께 적용된 경우는 14회인데, $-9.37\sim 14.15\%$ 의 상대오차를 보였고, 평균절대값오차는 5.49%, 평균무차원유량 1.017, 95% 신뢰수준의 오차범위는 $\pm 3.91\%$ 였다.

비접촉식인 전자파표면유속계와 LSPIV의 경우 유속

Table 4. Accuracy of Each Method in Comparison with Discharges of the Dam and Those Obtained Using the Velocity–Area Method

Method	Year	Measured discharge range (m ³ /s)	No. of measurement		Compared with					
					Dam discharge			Discharge of velocity–area		
			with dam	with VA	Mean absolute error (%)	Non-dimensional discharge	Confidence range (±%)	Mean absolute error (%)	Non-dimensional discharge	Confidence range (±%)
Velocity–Area (Wading/Bridging)	2005~2010	6.1~383.0	23	-	4.83	1.022	2.63	-	-	-
Rod Float	2005~2007	64.0~1,023.0	13	6	18.26	1.183	6.03	19.59	1.196	10.80
ADCP Moving vessel	2005~2010	6.9~382.0	17	13	5.56	1.050	2.46	5.81	1.023	4.04
ADCP Fixed vessel	2005~2010	16.0~720.0	25	14	4.15	1.031	1.66	5.49	1.017	3.91
Electromagnetic wave surface velocity	2007~2010	35.8~557.9	12	7	5.78	0.984	4.73	7.35	1.001	8.46
LSPIV	2006~2007	45.6~499.0	11	5	6.16	0.965	4.37	5.96	0.962	7.72

면적법과 동시간대에 측정된 횡수가 각각 7회, 5회로 적은 편이다. 전자과표면유속계는 유속면적법과 비교하여 상대오차는 -14.64~9.68% 범위에 있고, 평균절대값오차는 7.35%, 무차원유량 1.001로 나타나 평균적으로 유속면적법과 유량값이 동일한 것으로 나타났다. LSPIV의 경우 유속면적법 대비 상대오차는 -10.46~2.71%, 평균절대값오차는 5.96%, 무차원유량 0.962으로 댐 방류량에서처럼 유량이 약간 작게 측정되었다.

요약해 보면, ADCP 이동측정법과 정지측정법, LSPIV의 경우 5~6% 범위의 절대값오차의 범위에 있으나 전자과표면유속계는 약간 높은 절대값오차를 나타내며, 봉부자법의 경우 역시 유량이 과다하게 산정된다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 두 가지 ADCP 법의 경우 t분포 신뢰구간의 범위도 5% 이내로 비교적 고른 측정 결과를 나타내고 있다.

5.3 종합 분석

댐 방류량을 기준 유량으로 볼 때, 유속면적법, ADCP 법 (이동, 정지측정법)은 평균적인 절대값 차이는 4~6% 수준이고, 자료 중 75%는 ±10% 이내에 해당된다 (Fig. 5). t-분포의 무작위오차 범위 역시 1.66~2.63%로 댐 방류량과 비교하여 비교적 고른 오차를 보이고 있다. 유속면적법으로 기준해 볼 때에도, 두 가지 서로 다른 ADCP 측정법은 6% 이내의 차이를 나타내고 있고 한 두 개 성과를 제외하면 10% 이내에 모두 포함된다. 그러므로 이 세 가지 방법은 유량 측정에 있어 어느 기준으로 본다 해도

평균 6% 정도의 정확도로 측정이 가능하다는 점을 보여 준다 (Table 4). 다만, 종종 댐 방류량 또는 유속면적법 대비 10%를 상회하는 오차가 발생하는 경우가 있는데, 이는 저유량 조건 (3건)을 제외하면 총 측정 성과 수의 55개 중 3회에 불과하다. 그런데, 방류량 대비 10% 오차를 상회하는 자료를 유속면적법을 기준으로 할 경우 5% 이내의 오차가 되기도 하며, 그 반대의 경우도 있다는 점을 고려하면, 이 세 가지 방법들이 10% 이상의 오차를 보일 가능성은 매우 작다고 볼 수 있다. 나아가, 댐 방류량만을 절대적 기준으로 받아들이거나 단 한 가지 방법으로 측정된 유량을 기준으로 삼아 측정 방법의 정확도를 평가하는 것은 불충분할 수 있음도 시사한다.

수표면 유속을 측정하여 유량을 산정하는 전자과표면 유속계와 LSPIV의 경우 댐 방류량 기준으로 각각 5.78%, 6.16% 정도의 절대값 차이를 보이고 있고, 무차원 유량은 0.965~0.984 정도로 유량이 약간 작게 나타났다. 하지만, ±10%를 초과하는 경우도 역시 매우 적은 것으로 나타났다. 이 두 가지 방법은 측정 성과의 수가 적고, 특히 LSPIV의 경우 특정 연도에 집중적으로 측정된 성과만을 분석하였으므로 결과가 제한적일 수 있다. 다만, 본 연구 결과의 범위에서 볼 때, 비접촉식 방법으로서 과도한 오차가 발생하는 것은 아니며, 유속면적법이나 ADCP법보다 오차의 범위가 다소 커지는 정도라고 할 수 있겠다.

다른 5가지 방법과는 달리 봉부자법의 경우 댐 방류량이나 유속면적법 또는 다른 어떤 방법과 비교해도 상대차이의 범위가 크고 유량 오차가 큰 특성을 보이고 있어 다

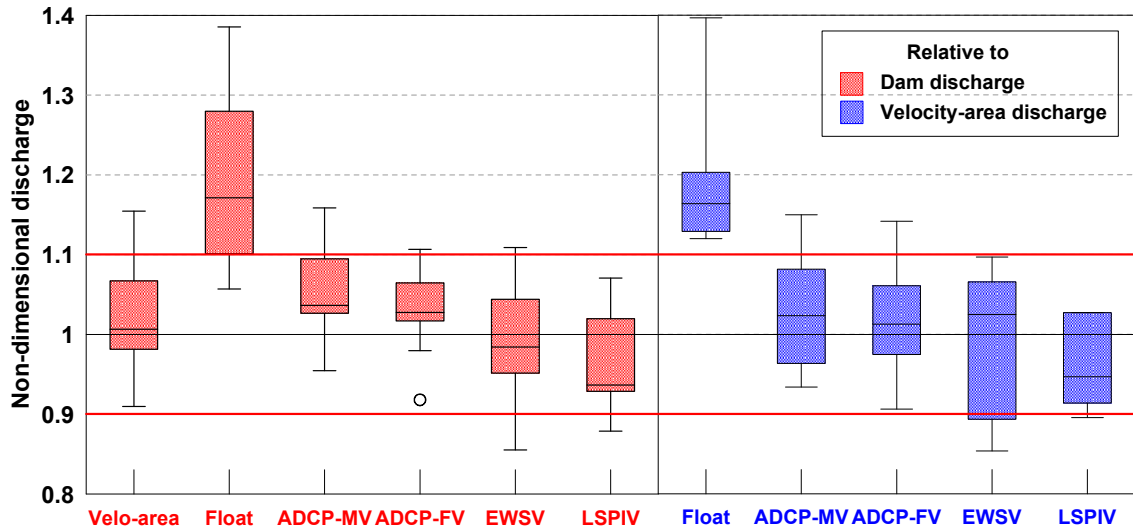


Fig. 5. Box-Whisker Plot for Non-dimensional Discharge for Each Method

소 조심스런 해석이 필요하다. Fig 4의 히스토그램을 보면, 무차원유량 1.15를 중심으로 좌우 비교적 대칭적인 분포를 보이는 자료들 (총 13개 중 9개)과 20%를 상회하는 자료들 4개로 구분되고 있으며, Fig. 5에서도 댐 방류량 및 유속면적법과 비교한 거의 모든 자료가 $\pm 10\%$ 를 넘는 것으로 확인된다. 4개의 자료를 우연오차로 판단하여 제외하더라도 역시 $+15\%$ 까지의 유량 오차가 발생한다고 볼 수 있다. 그런데, 이러한 자료들이 방류량 및 다른 방법들과 비교하여 큰 차이를 나타내는 원인을 찾기 어렵거나 이러한 오차의 경향이 일반적인 것이라고 보기는 어렵는데, 이는 다른 지점에서 부자로 측정된 유량이 댐 방류량과 비교하여 상대오차가 작은 사례 (이찬주 등, 2009)가 보고되어 있기 때문이다. 다만, 수전교에서 측정 시 나타난 부자의 중앙 집중 특성이나 비스듬하게 놓여진 교량의 배치방향 및 교량 하류의 다소 휘어진 하도의 특성의 영향으로 본 측정 지점에서 유속이 과다 산정되었을 가능성이 있다. 한편, 이러한 결과는 봉부자법으로 측정된 유량이 지점에 따라서는 과다할 수도 있음을 시사하지만, 이에 대한 검증은 충분하지 않은 실정이다. 이는 봉부자법은 홍수시의 고수위 조건에서 주로 사용되고 있고 시간적 긴박성 등으로 인해 다른 방법에 의한 검증 측정이 병행되기 어렵기 때문이기도 하다. 그러므로 본 연구의 결과가 다소 특별한 사례라고 하더라도 고수위에서 봉부자법에 대한 검증과 확인이 필요하다는 것을 시사하는 데는 충분할 것으로 보인다. 아울러 봉부자법의 검증을 위해서는 이찬주 등 (2010)이 제시하였던 바 ADCP 정지측정법 등을 활용할 수도 있겠다.

엄밀한 의미에서 완벽한 참값은 알 수 없으며, 다만 여러 가지 방법으로 정밀한 측정을 함으로써 측정 오차를 줄이는 방법을 강구할 필요가 있다. 이를 위해 동일한 측

정 장비를 여러 대 사용하여 동일한 측정 시간에 동일한 장소에서 측정하여 비교하거나 (Adler et.al., 2004, 2007), 여러 가지 서로 다른 방법을 동시, 동일 지점에서 적용함으로써 비교하는 바, 본 연구에서 활용한 방법을 적용함으로써 유량 기준값을 측정하고 이를 통해 개별 측정 자료를 평가할 수 있을 것이다. 본 연구에서 유속면적법, ADCP 이동측정법, 정지측정법 등 세 가지 방법이 함께 사용된 7개 케이스의 자료를 분석해 보면, 세 방법의 평균값과 개별 방법의 비교 결과 무차원 유량은 유속면적법 1.002, ADCP 이동측정법 1.002, ADCP 정지측정법 0.996으로 1% 이내의 거의 비슷한 결과를 보였고 상대차이의 범위 역시 1건의 자료를 제외하면 $\pm 6\%$ 이내이다. 그런데, 1건의 자료에서 유속면적법이 세 방법이 평균값보다 최대 -8.0% 차이를 나타내는 경우가 있었는데, 이 자료는 댐 방류량과의 비교에서도 가장 낮은 -9.0% 의 상대차이를 보이는 경우였다. 이처럼 여러 가지 또는 한 가지 방법이라도 여러 대의 장비를 동시에 활용하여 측정함으로써 각 방법 및 측정에서의 오차를 줄이고 측정 방법의 정확도를 평가하는 방법이 필요하다.

6. 결론

본 연구에서는 2005년부터 2010년까지 괴산댐 하류 달천에서 6가지 방법으로 측정된 유량 성과에 대해 불확실도 분석과 댐 기준의 측정 방법-댐 방류량 및 유속면적법과 비교하여 각 방법의 상대적 정확성을 분석하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 댐 방류량을 기준으로 각 방법의 정확도를 평가한 결과, 봉부자법을 제외한 5가지 방법에서 평균절대값오차가 6.2% 이내로 비교적 정확한 측정이 가능

한 것으로 분석되었다.

- 2) 유속면적법을 기준으로 상대적 정확도를 평가한 결과, 봉부자법을 제외한 각 방법의 평균절대값 오차는 댐 방류량과 비교한 결과와 유사하게 나타났는데, 두 가지 ADCP 측정법과 LSPIV법은 6% 이내, 전자파표면유속계는 7.35%의 오차를 보였다.
- 3) 본 연구에서 적용된 봉부자법의 경우 총 13개 자료 중 10개 자료에서 10%를 넘는 상대오차를 보였고, 특히 4개 자료는 +20% 이상의 오차를 보이는 등 오차의 범위가 컸다. 이러한 결과를 봉부자법의 일반적인 정확도 특성으로 보기는 어렵겠으나 적어도 큰 유량 측정시 봉부자법에 대한 검증 측정이 필요함을 시사한다.

본 연구에서는 연속적인 자동유량측정 기법을 제외하면 국내에서 현재 활용 중인 대부분의 방법의 정확도를 피산댐의 방류량과 유속면적법을 기준으로 평가하였다. 댐 방류량이나 유속면적법 역시 일정 수준의 오차가 있을 수 있다는 점, 일부 측정 성과에서는 약간의 시간적 유량 변동이 반영되어 있다는 점, 본 연구에 활용된 자료가 여러 지점이 아닌 피산댐 하류의 단일한 지점에서 수행되었다는 점 등을 고려하더라도 봉부자법 결과를 제외한 5가지 방법에 대한 본 연구의 결과는 각 방법의 대략적 정확도를 평가하는 데는 무리가 없을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 상대 오차가 크게 산정된 부자법의 경우 다른 지점에서 추가적인 분석을 통해 그 정확도 특성이 확인되는 것이 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 2-1-3). 또한, 2005년부터 2010년까지 수전교에서의 동시유량측정에 참여하였던 모든 연구진들과 학생실습생들에게 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- 권성일, 김용전, 이찬주, 김원 (2009). “비접촉식 레이더 표면 유속계를 이용한 유량 측정.” **2009년 한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1841-1844.
- 김서준, 윤병만, 류권규, 주용우 (2007). “LSPIV기법을 이용한 탄천(대곡교) 유량측정.” **2007년 한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 911-915
- 김지성, 이찬주, 김원 (2007). “실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자

- 원학회, 제40권, 제10호, pp. 755-768.
- 노재경, 이재남 (2009). “비접촉식 유량측정의 현황.” **한국수자원학회지** (물과 미래), 한국수자원학회, 제42권, 제6호, pp. 51-57.
- 이상호, 김우구, 김영성 (1997). “전자파 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 671-678.
- 이찬주, 김원, 김치영, 김동구 (2005). “ADCP를 이용한 유속과 유량 측정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제10호, pp. 811-824.
- 이찬주, 김원, 김동구, 김치영 (2006). “ADCP를 이용한 유량 측정.” **제1회 수문관측심포지엄발표논문집**, 건설교통부, pp. 127-134.
- 이찬주, 김원, 김치영, 김동구 (2009). “전자부자 시스템을 이용한 자연하천의 유속과 유량 측정.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제4B호, pp. 329-338.
- 이찬주, 김용전, 김동구, 김원 (2010). “ADCP 정지측정법을 이용한 유량측정.” **한국수자원학회지** (물과 미래), 한국수자원학회, 제43권, 제2호, pp. 58-65.
- Adler, M., Nicodemus, U., Fritsch, R., and Bertram, R. (2004). *4. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 05.10. bis zum 07.10. 2004 in Koblenz*, BfG-JAP-Nr.: 2263.
- Adler, M., Nicodemus, U., Fritsch, R., and Bertram, R. (2007). *5. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 11.-13. September 2007 in Koblenz*, BfG-SAP-Nr.: M39610102263.
- Anderson, S. (2007). “Acoustic stationary measurements.” *Proceedings of Sontek/YSI Users Forum*, Sontek, Barcelona.
- Cheng, R.T., Gartner, J.W., Mason, R.R., Costa, J.E., Plant, W.J., Spicer, K.R., Haeni, F.P., Melcher, N.B., Keller, W.C., Hayes, K. (2003). *Evaluating a Radar-Based, Non Contact Streamflow Measurement System in the San Joaquin River at Vernalis, California*, US Geological Survey Open-File Report 2003-1015.
- Fisher, G.T., and Morlock, S.E. (2002). “Discharge measurements in shallow urban streams using a hydroacoustic current meter.” *Proceedings of Hydraulic Measurements & Experimental Methods*, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM).
- Gordon, L., and Marsden, R. (2002). “The BoogieDopp: a New Instrument for Measuring Discharge in Small

- Rivers and Channels.” *Proceedings of Hydraulic Measurements & Experimental Methods*, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM).
- Morlock, S.E. (1996). *Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge*, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4218.
- Mueller, D.S. (2002). “Field assessment of acoustic-doppler based discharge measurements.” *Proceedings of Hydraulic Measurements & Experimental Methods*, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM).
- Muste, M., Kim, W., and Fulford, J.M. (2008). “Developments in hydrometric technology: new and emerging instruments for mapping river hydrodynamics.” *WMO Bulletin*, WMO, Vol. 57, No. 3, pp. 163-169.
- Oberg, K., and Mueller, D.S. (2007). “Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 12, pp. 1421-1432.
- Pimble, L., Sloat, J., and Hull, M. (2004). *New River Surveyor/RiverCAT Features and Field Trials*, Sontek/YSI document.
- Rehmel, M.S., Stewart, J.A., and Morlock, S.E. (2003). *Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow*, US Geological Survey Open-File Report 03-237.

논문번호: 10-089	접수: 2010.10.18
수정일자: 2010.11.19	심사완료: 2010.11.19