

하천규모에 따른 최적 부자 보정계수 추정

The Best Estimation of Float Correction Factor According to River Scale

정문수¹⁾, 임혁진²⁾, 김삼은³⁾, 김치영⁴⁾

Moon Soo Jung, Hyeok Jin Lim, Sam Eun Kim, Chi Young Kim

요 지

최근 우리나라의 수자원 관련 기술의 발전과 연구는 상당한 속도로 이루어지고 있다. 그 중 유량측정 분야는 모든 수자원계획과 관리의 근간이 되는 분야로 그 중요성이 상당한 부분을 차지한다. 대부분의 자연하천에서 저평수기는 물의 흐름이 비교적 안정된 정상류 흐름이므로 유속계를 통해 유속분포 및 평균 유속의 비교적 정확한 측정이 가능하다. 반면, 홍수기 유량측정은 하천의 수리특성이 급변하고 인력, 장비, 안전 등의 문제로 소극적인 측정을 할 수 밖에 없는 것이 현실이다. 홍수기 유량 측정방법은 부자 측정방법과 전자과 표면유속계와 같은 비접촉식 측정방법에 의존하고 있다. 부자법과 전자과 표면유속계는 평균유속과 유량을 계산하기 위해 측정 유속의 보정계수를 활용하여 평균유속으로 환산하여 사용한다.

핵심용어 : 연직 유속분포, 부자 유량 관측법, 흘수/수심 비(R), 평균유속

1. 서론

흐름이 급변하는 하천에서 측정유속과 평균유속의 관계를 나타내는 보정계수는 대단히 복잡하여 실험에 의한 추정은 불가능하다. 현재 적용되는 보정계수는 유속의 연직분포를 단순한 함수형으로 가정하여 이론적으로 추정하고 있다. 본 연구에서는 이론적이라고 하더라도 유속분포에 대해 또 다른 이론식을 만들어 해답을 구하려고 하는 것이 아닌, 현재까지 제안되어 있는 보정계수의 검토를 통해 현재의 단계에서 어떻게 판단하는 것이 가장 합리적인가를 결정하려고 한다. 현재 우리나라에서 적용하는 보정계수(Aki's Eq)와 다른 나라의 보정계수를 비교하고, 각각의 보정계수로 산정된 유량 변동성을 분석하여 최적의 보정계수를 검토하였다.

2. 적용 방법

국내의 부자법 보정계수로 활용되는 방법은 크게 다섯 종류로 조사되었다. 먼저, 국내 및 일본에서 활용하고 있는 Aki 방법, 미국의 Lowell 운하에서 J.B. Francis가 개발한 Francis 방법, Francis 방법을 보완한 Parker 방법, 일본 내무성 토목국 하천유량 측정계산 수칙에 표기한 모노노베 방법, 마지막으로 세계기상기구(WMO)에서 제안한 방법 등이 대표적이다. 본 연구를 수행하기 위해 09년부터 16년까지 유량조사사업단에서 측정된 부자법 측정성과(낙동강 권역의 64개 지점 1,590개의 자료)를 이용하였으며, 확보된 성과의 측정유속 및 1~2단면을 평균단면으로 적용하고, 흘수/수심 비(R)에 따라 각각의 보정계수를 산정하여 유량 변동성을 분석하였다.

-
- 1) 정회원 · 유량조사사업단 낙동강조사실 연구원 · E-mail : jms1470@hsc.re.kr
 - 2) 정회원 · 유량조사사업단 하천조사실 선임연구원 · E-mail : hyukjin@hsc.re.kr
 - 3) 정회원 · 유량조사사업단 품질정책실 선임연구원 · E-mail : sekim@hsc.re.kr
 - 4) 정회원 · 유량조사사업단 연구개발역 책임연구원 · E-mail : cy_kim@hsc.re.kr

2.1 Aki 보정계수(국내 및 일본)

Aki 보정계수의 연직 유속분포는 Eq. (1)로 표현되며, 이는 평균유속에 대한 상대적 비로 Eq. (2)와 같은 형태로 보정계수를 산정할 수 있다.

$$= h \left(C + \frac{20}{3} - 20a + 40a \frac{z}{h} - 20 \frac{z^2}{h^2} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_z = \frac{u_m}{u_{mz}} = \frac{C}{C + \frac{20}{3} - 20a + 40a \frac{z}{h} - \frac{20}{3} \frac{z^2}{h^2}} \quad (2)$$

여기서, J 는 수면경사, z 는 수면으로부터 깊이, C 는 chezy 계수, α 는 부자 보정계수, a 는 최대 유속의 상대수심이다. Aki 보정계수는 이론적 연직 유속분포와 chezy 계수에 근거한 상대수심을 간단하고 취급하기 쉽게 흘수/수심의 비(R)가 0.4~0.8의 범위에서 적용할 수 있게 설정하였다(표 1).

2.2 WMO(세계기상기구) 보정계수

WMO(1994)에서도 부자의 측정유속으로부터 평균유속으로 변환할 때 보정계수를 적용토록 하고 있다. 보정계수는 측선의 연직 유속분포 형태와 부자가 잠긴 상대 깊이(흘수)에 따라 결정되므로, 보정계수를 적용하기 위해서는 각 하천에서 세밀한 측정을 통해 결정하도록 하고 있다. 그러나 현실적으로 하천별로 보정계수를 결정하기는 어려우므로 일반적으로 수심과 흘수의 비(R)를 이용하여 보정계수를 결정할 수 있도록 표 1과 같이 일반화하여 제안하고 있다.

2.3 J.B. Francis 및 Parker 보정계수

봉부자는 수면부터 하상부근까지 거의 전 수심에 걸쳐 수류의 영향을 받기 때문에 표면부자, 이중부자에 의한 경우보다도 비교적 평균유속을 잘 얻고 있다. 이 점을 착안한 Francis는 1856년 Lowell, Mass.의 실험수로에서 봉부자에 의한 비교 관측의 결과, 부자의 속도가 물의 평균유속보다 크다는 것을 발견하고 부자의 측정유량을 보완하기 위한 Francis 공식을 유도하였다.

$$Q = Q' [1 - 0.116(\sqrt{D} - 0.1)] \quad (3)$$

$$Q = Q' [1 - 0.2(\sqrt{D} - 0.1)] \quad (4)$$

여기서, Q' 는 관측유량, D 는 수로의 수심에서 부자의 흘수를 뺀 길이/수로의 수심이다. Parker는 Francis 공식은 실험수로 조건에서 좋은 결과를 얻지만, 자연하천에서 조도가 증가하면 오차가 발생하기 때문에 Eq. (4)와 같이 매개변수를 조정하였다.

2.4 모노노베 보정계수

모노노베 보정계수는 연직유속곡선(Humphreys-Abott와 Bazin의 공식 적용)에서 부자의 속도와 유속의 차를 제공하여 비례하는 힘을 받아 유하하는 회전 타원체를 가정해 유도한 공식으로 1916년 내무성 토목국 업무자료 하천유량 측정계산 수칙에 나타나고 있는 값으로 표 1과 같이 제안하였다.

3. 적용 결과

유량 산정에 앞서, 각각의 방법에 의한 보정계수를 비교하였다. WMO(세계기상기구), 일본의 방법은 보정계수를 일반화하여 간략하게 제안하고 있다. 일본의 경우 건설성 「유량관측규정」 및 「조사설계기준」의 부자 보정계수의 간략화 원칙에 의해 부자는 5종류(표면, 0.5, 1, 2, 4m), 흘수/수심 비(R)는 0.4~0.8, 또한 측정 단면의 수심에 따라 부자의 흘수를 제안하고 있다. 보정계수의 비교를 위해 일본의 일반화 형태로 동일하게 표 1에 나타내었다.

표 1 보정계수 비교

적용 수심 부자출수 (홀수/수심)	0.7m 이하 표면 (표면)	0.7~1.3m 0.5m (0.38~0.71)	1.3~2.6m 1.0m (0.38~0.77)	2.6~5.2m 2.0m (0.38~0.77)	5.2m 이상 4.0m (~0.77)
모노노베 적용(R)	~0.60		0.61~0.7	0.71~0.80	0.9~
Aki(국내/일본)	0.85	0.88	0.91	0.94	0.96
WMO	0.86	0.89~0.93	0.89~0.94	0.89~0.94	0.94~
J.B. Francis	0.90	0.92~0.95	0.92~0.96	0.92~0.96	~0.96
Parker	0.82	0.86~0.90	0.86~0.91	0.86~0.91	~0.92
모노노베	0.94		0.95	0.97	1

모노노베를 제외한 모든 방법은 수심 0.7~5.2m의 범위에서 연직 유속분포 및 평균유속에 대한 상대적 비의 동일한 보정계수가 나타나고 있다. 모노노베 보정계수는 수표면에서 유하하는 타원체를 가정하여 표면유속에 가까운 값이 나타나고 있으며, WMO, Parker 보정계수는 수심 2.6m까지 Aki 보정계수와 비교적 비슷한 값을 보이나, 2.6m 이상의 수심에서는 상대적으로 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면, J.B. Francis의 보정계수는 수심 5.2m까지 상대적으로 크게 발생하나 5.2m 이상에선 보정계수를 0.96으로 제한함으로써 수심이 증가할수록 작은 값이 나타난다. 이와 마찬가지로 Parker 보정계수 역시 최대 보정계수를 0.92로 제한함으로써 가장 작은 값을 보이고 있다.

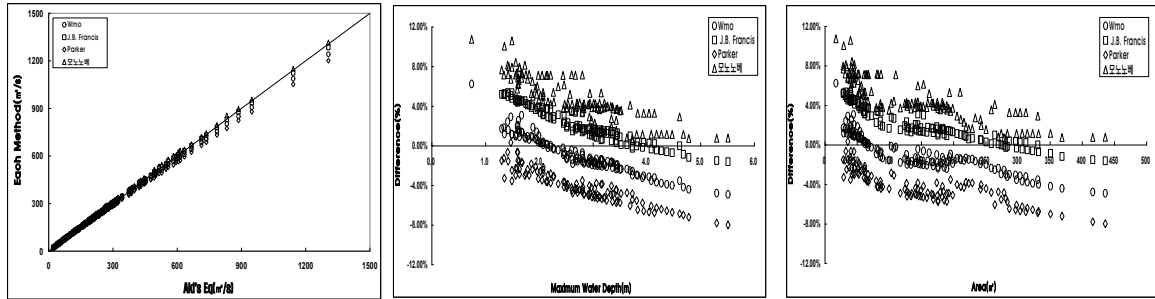
3.1 낙동강 권역의 유량 변동성 비교

각각의 보정계수에 의해 산정되는 유량을 비교하기 위해 낙동강 권역의 64개 지점 1,590개의 자료를 이용하였으며, 하천 규모별 유량 변동성을 파악하기 위해 낙동강 권역을 23개의 단위유역으로 분할하여 분석하였다.

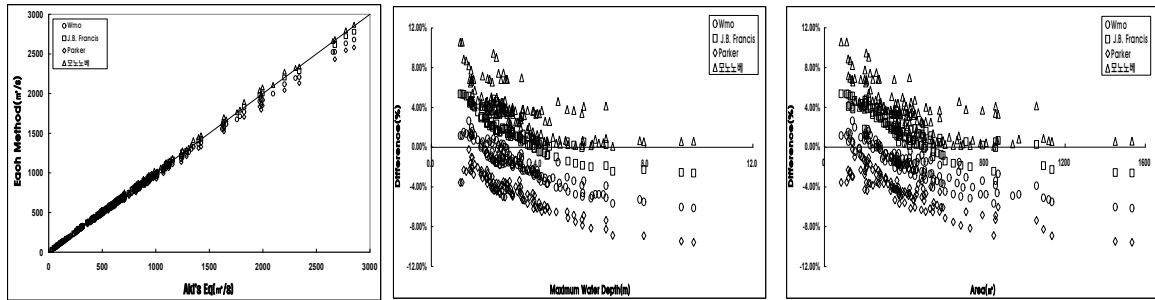
표 2 산정유량 비교(Aki 보정계수 기준)

낙동강 권역 (단위유역)	WMO			J.B. Francis			Parker			모노노베		
	최소(%)	최대(%)	평균(%)	최소(%)	최대(%)	평균(%)	최소(%)	최대(%)	평균(%)	최소(%)	최대(%)	평균(%)
1. 안동댐 상류	-4.90	6.26	-0.80	-1.60	5.37	2.17	-7.98	0.33	-4.14	0.58	10.75	4.66
2. 안동댐 하류	-3.46	3.40	-1.04	-0.26	5.46	1.68	-6.33	0.96	-4.03	1.55	7.24	3.86
3. 내성천	-2.80	5.71	0.83	-0.07	6.07	3.66	-5.58	0.59	-2.42	1.30	21.00	5.90
4. 영강	-3.16	5.98	0.73	-0.32	5.43	3.68	-5.80	-0.83	-2.87	1.42	9.14	6.24
5. 병성천	-3.90	3.79	0.34	-0.62	5.05	3.20	-6.63	1.31	-3.03	1.21	9.58	5.58
6. 낙동상주	-5.31	-0.42	-3.15	-2.58	1.57	-0.74	-7.66	-2.83	-5.85	-1.90	3.96	0.85
7. 위천	-4.38	2.88	-0.97	-1.37	5.58	2.28	-6.98	0.27	-4.16	0.27	10.59	4.81
8. 낙동구미	-6.79	1.59	-3.79	-3.69	1.87	-1.37	-9.49	-5.21	-7.41	-1.95	5.56	0.97
9. 감천	-3.54	2.99	0.27	-0.81	5.37	3.50	-6.02	0.61	-2.88	0.51	10.60	5.78
10. 낙동왜관	-6.51	3.32	-4.09	-3.38	1.65	-1.38	-9.31	-2.04	-7.07	-1.75	6.09	0.58
11. 금호강	-6.13	2.65	-1.63	-2.60	5.36	1.73	-9.57	-0.23	-4.53	0.09	10.58	3.68
12. 낙동고령	-8.23	-2.42	-6.22	-4.67	-0.84	-3.18	-11.07	-4.59	-8.79	-2.08	0.56	-1.50
13. 회천	-4.39	1.18	-1.00	-1.20	5.36	2.25	-7.25	-1.60	-4.06	0.41	10.59	4.38
14. 황강	-5.43	-1.93	-3.36	-2.20	0.17	-0.93	-8.73	-4.74	-6.90	0.22	3.95	1.53
15. 낙동창녕	-8.42	-4.30	-6.93	-5.06	-3.04	-3.94	-11.75	-8.70	-10.23	-2.08	0.09	-1.43
16. 남강댐 상류	-4.81	0.69	-2.08	-1.66	3.38	0.97	-7.48	-2.10	-4.81	-1.46	5.79	2.67
17. 남강댐 하류	-6.16	1.71	-3.19	-3.02	4.69	-0.16	-8.78	-1.14	-5.97	-1.42	7.13	1.82
18. 낙동밀양	-7.83	-4.27	-6.59	-4.65	-1.63	-3.59	-11.03	-6.88	-9.34	-2.08	0.15	-1.73
19. 밀양강	-4.65	9.73	-0.33	-0.76	7.81	2.28	-6.74	3.31	-3.42	1.16	11.98	4.66
20. 낙동강하구언	-7.42	-6.28	-6.88	-4.33	-3.29	-3.81	-10.48	-8.82	-9.73	-2.08	-0.77	-1.80
21. 양산천	-2.02	2.04	0.10	1.25	5.62	3.33	-5.00	-1.48	-2.94	3.29	10.59	5.25
22. 형산강	-3.58	3.21	-1.14	-0.42	3.72	1.47	-6.27	-2.45	-4.41	1.21	6.97	3.49
23. 대화강	-4.88	6.43	0.41	-1.69	6.24	2.50	-7.83	1.34	-3.58	0.30	9.12	4.92
전체	-8.42	9.73	-1.99	-5.06	7.81	0.85	-11.75	3.31	-5.21	-2.08	11.98	3.07

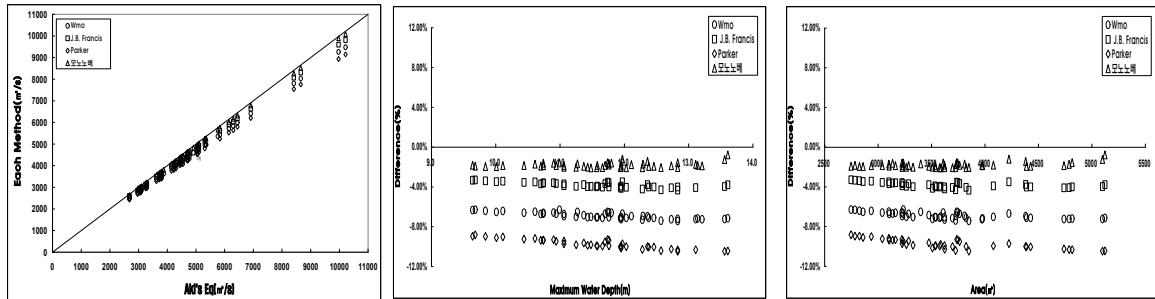
그림 1 산정유량 비교(Aki 보정계수 기준)



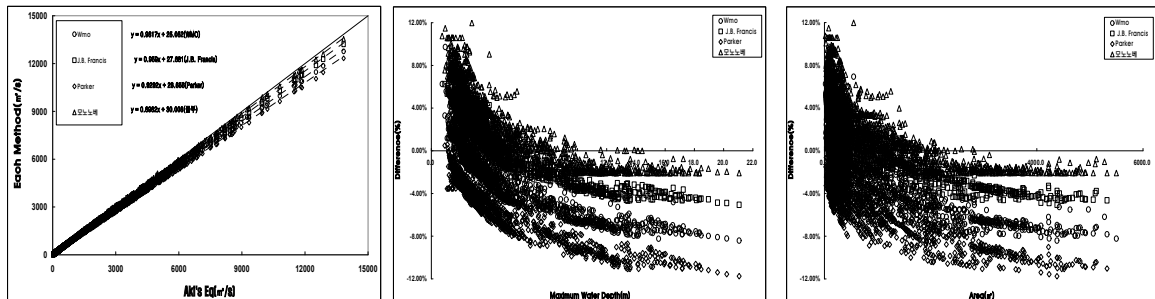
(A) 산정유량 비교(낙동강 상류) (B) 최대수심 비교(낙동강 상류) (C) 단면적 비교(낙동강 상류)



(A) 산정유량 비교(금호강) (B) 최대수심 비교(금호강) (C) 단면적 비교(금호강)



(A) 산정유량 비교(낙동강하구연) (B) 최대수심 비교(낙동강하구연) (C) 단면적 비교(낙동강하구연)



(A) 산정유량 비교(낙동강 전체) (B) 최대수심 비교(낙동강 전체) (C) 단면적 비교(낙동강 전체)

부자법 측정인자와 산정유량과의 상관성을 분석한 ‘부자 보정계수 적용방법별 산정유량 비교(2010, 류성수)’는 최대수심 및 단면적에 따라 산정유량의 상관성이 높게 나타나는 것을 확인 하였다. 표 1과 같이 수심에 따라 보정계수를 일반화시켜 각각의 방법에 대한 유량 변동성을 보였으며, 적용결과는 그림 1 및 표 2와 같다. WMO 보정계수는, -8.42~9.73%, 평균 -1.99%, J.B. Francis 보정계수는 -5.06~7.81%, 평균 0.85%, Parker 보정계수는 -11.75~3.31%, 평균 -5.21%, 모노노베 보정계수는 -2.08~11.98%, 평균

3.07%을 나타내고 있다. 하천규모(단위유역)별로 살펴보면 상대적으로 수심이 얇은 곳에서는 WMO, Parker 방법이 국내 보정계수를 적용한 산정유량 보다 작게 나타나며, 반대로 J.B. Francis, 모노노베 방법은 크게 나타나고 있다. 최저수심이 약 5m 이상인 비교적 수심이 깊은 단위유역(NO. 12, 15, 18, 20)에서는 WMO - 6.65%, J.B. Francis - 3.63%, Parker - 9.53%, 모노노베 - 1.61%로 나타나고 있다. 현재 국내에서 적용하고 있는 부자 보정계수(Aki 보정계수)는 흘수/수심 비(R) 0.4~0.8로 설계되어, 최대 흘수인 4m 부자를 활용할 때 측정수심 10m까지 측정유속에 대한 타당성을 가질 수 있다. 따라서, 수심 10m 이상에서는 가능한 4m 이상의 흘수를 사용할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결론

부자에 의한 측정유속의 보정계수는 부자의 흘수/수심 비(R)로 결정된다. 동일지점에서 수위가 높을수록 흘수/수심 비(R)는 증가하며, 수로 주변 조도계수에 의해서도 동일한 현상이 발생한다. 이에 따라 각각의 보정계수를 적용하여 산정된 유량을 검토하면 WMO는 2.6m 이하에서 국내 보정계수와 비슷한 경향을 보인다. 다만, 10m 이상에선 R값이 0.38 이하로 산정되면서 유량이 작게 산정되는 결과를 얻었다. J.B. Francis 및 모노노베 보정계수는 흘수/수심 비(R)가 각각 0.50, 0.70 이상에서 수심이 깊고, 수로 주변의 조도계수가 작은 수로에 적합하다. 마지막으로, Parker 방법은 조도계수에 의한 매개변수를 증가시켜 하폭 및 수심이 작고 조도계수가 높은 산지하천에 적합한 것으로 판단하였다.

본 연구를 통해 부자법 적용시 정확한 유량산정을 위한 한국형 보정계수의 필요성을 인식할 수 있었으며, 추후 부자 보정계수 산정에 관한 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부에서 출연한 ‘낙동강 측정 조사’ 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (2009). 하천설계기준
2. WMO (2008). Guide to Hydrological Practices: Volume I-Hydrology-From Measurement to Hydrological Information
3. K. Aki (1932). "On correction of coefficient of the measured velocity of float, specially of float rod, to the mean velocity of flow in a vertical", proc. of the JSCE, vol.18(1), pp.105~244
4. Bentley Systems, Inc., 2007. "CulvertMaster User's Guide".
5. USGS (1982). Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge
6. E. Y. Kra G.P Merkley (2004). "Mathematical modeling of open-channel velocity profilers for float method calibration", Agricultural Water Management
7. M. salih kirkgoz (1989). Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow
8. Md Abdullah Al Faruque (2014). "open channel flow velocity profiles for different reynolds numbers and roughness conditions", Journal of Research in engineering and Technology, 47(1), 400-405.
9. Kirkgöz, M. S., and Ardıçoğlu, M. (1997). "Velocity profiles of developing and developed open channel flow." Journal of Hydraulic Engineering, 123(2), 1099-1105.
10. Nezu, I. (2005). "Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century." Journal of Hydraulic Engineering, 131(4), 229-246.
11. Sarathi, P., Faruque, M. A. A., and Balachandar, R.(2008). "Scour by submerged square wall jets at low densimetric Froude numbers." Journal of Hydraulic Research, 46(2), 158-175.
12. Schlichting, H. (1979). Boundary-Layer theory. McGraw-Hill Classic Textbook Reissue Series, McGraw-Hill, Inc., United States of America.