

자연하천의 연직방향 유속분포 추정을 위한 포물선식 Quadratic Parabolic Equation to Estimate the Vertical Velocity Distribution in the Natural Streamflow

박 승 기* / 김 태 철**

Park, Seung Ki / Kim, Tai Cheol

Abstract

The study was carried out to investigate the characteristics of vertical velocity distribution measured by current meter at Kangkyung station in Keum river during the period of 1995 to 1997. It suggests the quadratic parabola equation to estimate the vertical velocity profile only from the measurement data of surface velocity. The equation was found to be statistically very stable and showed high significance to express the surface velocity and bottom velocity. The vertical velocity profile was determined by the relationships to the surface velocity, and a coefficient of the quadratic parabolic equation. The equation was verified to the reserved survey data, and the results were confirmed to be good for the estimation of the characteristics of the vertical velocity distribution. The vertical velocity profile can be applied to calculating the mean velocity and discharge, and to analyse the dispersion of pollutant materials in the streamflow.

Keywords: vertical velocity distribution, quadratic parabolic equation, surface velocity

요 지

이 연구에서는 1995년부터 1997년까지 금강수계 강경지점에서 유속계로 측정한 유속자료를 분석하여 자연하천의 연직방향 유속분포특성을 규명하였다. 또한, 현장유속 측정조건이 불량하여 다짐법으로 유속분포를 측정하기 곤란한 경우, 간단하게 표면유속만을 측정하여 상대깊이별 유속을 추정할 수 있는 연직 유속분포식을 유도하였다. 2차 포물선식의 유속분포식은 통계적으로 매우 안정적이고, 표면유속과 바닥유속 등과 고도의 유의성을 보였다. 2차 포물선식의 상수 및 계수와 표면유속과의 상관관계를 구하였으며, 실측 검정자료에 적용한 결과, 유속분포특성을 잘 반영하는 것을 확인할 수 있었다. 연직 유속분포식으로 추정된 유속은 실제수심을 적용하여 평균유속과 유량을 결정할 수 있으며, 이는 또한 하천의 오염물질이동 등 수질해석에 적용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 연직 유속분포, 2차 포물선식, 표면유속

* 공주대학교 농공학부 전임강사

Full time Lecturer, School of Agricultural Engrg., Kongju National Univ., Yesan, Chungnam 340 800, Korea
(skpark@knu.kongju.ac.kr)

** 충남대학교 농공학과 교수

Prof., Depart. of Agricultural Engrg., Chungnam National Univ., Taejon 305 764, Korea

1. 서론

자연하천의 연직방향 유속분포는 유량의 변화, 하천의 물질수송해석 등 하천의 수량과 수질해석에 매우 중요하다. 그러나, 자연하천은 단면이 복잡하고 하천바닥의 조도와 유로의 형상이 일정하지 않고, 특히 교량, 수중보, 홍수터내 시설물과 같은 인위적인 시설 등에 의하여 연직방향 유속분포가 매우 복잡하게 나타나고 있다. 우리나라의 경우 수문해석에 중요한 수위표 지점을 선정하여 매년 유량을 측정하고 있으나, 세부적인 유속분포에 대한 측정은 이루어지지 않고 있으며, 다만 소정의 측선에 따라 수심이 0.6m 이하일 때는 1점법, 수심이 0.6m~1.0m 일 때는 2점법, 수심이 1.0m 이상일 때는 3점법으로 평균유속을 측정하여 통수유량을 산정하고 있다(건설부, 1993). 물의 흐름에 의한 유속계의 밀려남 현상, 부유물질의 걸림 현상, 유속 측정원의 위험노출 및 큰 수위변화 등에 의하여 유속 측정은 매우 어렵다. 박승기(1999) 등은 평·저수시에 주로 사용되고 있는 유속계를 이용하여 측정한 금강수계 강경지점의 유속자료를 분석하여, 현행 평균유속 결정방법에 대한 적용성과 표면유속, 최고유속, 바닥유속 및 평균유속간의 상관관계로부터 평균유속을 결정하는 방법을 제시하였다.

이 연구에서는 평·저수시 유속계로 측정한 금강수계 강경지점의 유속자료를 분석하여 자연하천의 연직방향 유속분포특성을 규명하였다. 또한, 현장유속 측정조건이 불량하여 다점법으로 유속분포를 측정하기 곤란한 경우, 간단하게 표면유속만을 측정하여 상대깊이별 유속을 추정할 수 있는 유속분포식을 유도하였으며 적용성을 통계적으로 검증하였다.

2. 개수로 유속분포식

2.1 기본이론

개수로내 유속은 개수로 단면의 다양성, 벽면마찰, 수표면의 공기마찰, 표면장력 등 때문에 유속분포가 일정하지 않고 매우 복잡한 형상을 이루고 있다. 특히 자연하천은 단면이 복잡하고 하천바닥의 조도, 유로의 형상 등이 일정하지 않으므로 유속분포는 더욱 복잡해진다. 개수로의 유속분포는 흐름 상태가 층류 또는 난류인가에 따라 달라지며, 난류상태에서 유속의 분포를 해석하기는 매우 어려우나, Vanoni(1941)는 Prandtl의 혼합거리 이론을 이용하여 유속분포를 다음의 식 (1)과 같이 대수분포로 표시하였다.

$$v = v_x + \frac{2.3}{k_0} v^* \log \frac{y'}{d} \quad (1)$$

여기서 v_x 는 최대유속(m/s), v^* 는 마찰속도 ($\sqrt{\tau_0/\rho}$)(m/s), k_0 는 혼합거리 계수, y' 은 바닥으로부터 수심(m), d 는 전체수심(m)이다.

식 (1)에 의하면 유속분포는 그림 1(a)와 같이 대수분포를 이루고 있으므로 이를 평균유속(\bar{v})의 함수로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$v = \bar{v} + \frac{v^*}{k_0} (1 + 2.3 \log \frac{y'}{d}) \quad (2)$$

2.2 실험식 및 응용식

春H屋(1953, 1955, 1958)은 작은 수로에서 하폭이 넓은 대하천까지의 많은 실측결과에 의하면 측벽면

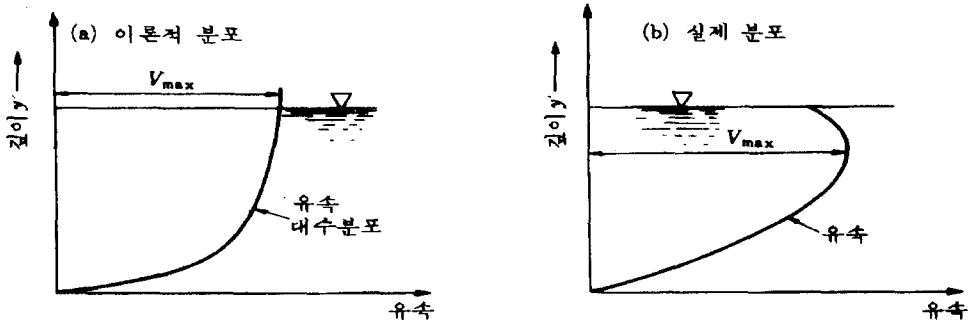


그림 1. 난류상태의 유속분포

의 영향을 받지 않는 부분의 연직분포는 일반적으로 식 (3)과 같이 2차 포물선이 되며, 하천에서 실측자료를 이용하여 식 (4)와 같은 평균유속 및 표면유속의 관계를 적용하여 유속분포식을 유도하였다.

$$v = a + by + cy^2 \quad (3)$$

$$v = \frac{v_m}{b} \left(b\lambda + 2\gamma \frac{y}{d} - \frac{y^2}{d^2} \right) \quad (4)$$

여기서 v_m 은 평균유속(m/s), $\lambda = \frac{v_a}{v_m}$, $b = \frac{1-3\gamma}{3(\lambda-1)}$, γ 는 최대유속발생 수심, v_a 는 표면유속(m/s)이다.

Chiu(1989, 1991)는 확률통계분야에서 사용되는 엔트로피 개념을 도입하여 산정된 2차원 유속공식을 개발하였다. 이는 식 (5)와 같은 유속의 엔트로피 함수가 식 (6), 식 (7)과 같은 엔트로피 극대화에 대한 제약조건들을 만족시킴으로써 식 (8)과 같은 유속의 확률밀도함수를 구할 수 있으며, 이 밀도함수를 각 제약조건별로 다시 대입하여, 필요한 2차원 유속공식 또는 평균유속공식을 얻을 수 있다.

$$H(u) = \int_0^{u_{\max}} p(u) \ln p(u) du \quad (5)$$

$$\int_0^{u_{\max}} p(u) du = 1 \quad (6)$$

$$\int_0^{u_{\max}} up(u) du = \bar{u} = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

$$p(u) = e^{\lambda_1 - 1} e^{-\lambda_2 u} \quad (8)$$

여기서 $H(u)$ 는 유속의 엔트로피 함수, u 는 수로단면에 공간적으로 분포된 시간평균유속, u_{\max} 는 최대유속, $p(u)$ 는 유속의 확률밀도함수, λ_1 과 λ_2 는 Langrange multipliers 이다.

3. 자료 및 방법

3.1 수문자료 및 유속측정

수문자료는 1995년부터 1997년까지 금강하류유역인

강경 수위관측소에서 홍수위 이하 평·저수시 수위에서 하천시설기준(건설부, 1993)에 준하여 연직방향으로 0.5~1.0m 간격으로 측정한 유속자료를 이용하였다. 강경 수위관측소는 1915년 4월부터 보통수위표로 관측을 시작하였고, 1989년 11월 T/M 수위표로 전환되어 황산대교에 이설되었으며, 영점표고는 EL.-0.930m 이다. 강경지점은 유역면적이 9,294.72km²이며 하폭은 1,047m 이다. 좌안에서 70~280m 구간에 형성된 저수로로 편중되어 유로가 형성되어 있고, 홍수터는 비닐하우스가 설치되어 홍수시 수제공 역할을 하기 때문에 대부분의 구역이 사수역이다. 사용된 유속계는 Valeport사의 BFM. 001이며 측정범위는 0.03~7.0m/s이고, 추 무게는 16.7kg이다. 유속측정시 바람과 수압에 대한 영향은 무시하였고, 침수선 보정은 현장에서 측정한 연직각을 Gupta(1989)가 제시한 침수선 보정표에 의하여 수행하였으며, 실제 수심은 유속이 완만할 때 측정한 값을 적용하여 보완하였다(금강홍수통제소, 1995~1997).

3.2 유속별 상대깊이의 실측 연직유속분포

실측 연직유속분포의 수심변화에 따른 객관적인 유속분포를 파악하기 위하여 수심을 식 (9)와 같이 상대깊이로 환산하여 유속범위별로 구분하여 작성하였다.

$$D = (d - y)/d \quad (9)$$

여기서 D 는 상대깊이, y 는 수면으로 부터의 수심(m)이다.

연직 유속분포에 대한 특성을 파악하기 위하여 표면유속(v_a), 최대유속(v_x), 바닥유속(v_b) 및 수면아래 0.2D 측정의 유속($v_{0.2}$)과 평균유속(v_m)에 대한 비율을 산정하고 분석하였다.

3.3 자연하천의 연직유속분포식 유도

연직 유속곡선식 유도는 상대깊이로 변환한 유속자료를 이용하였다. 연직유속분포식은 春日屋(1958)이 제시한 것과 같이 2차 포물선식으로 유도하였으며, 상관식을 유도하기 위하여 Curve Expert(Ver. 1.2) 패키지를 사용하였다. 유도된 연속유속곡선식에 의하여 구한 값과 실측값과의 상관관계를 구하여 적용성을 분석하였다. 2차 포물선식은 식 (10)과 같다.

$$V_{e1} = a_1 + b_1 \times D + c_1 \times D^2 \quad (10)$$

여기서 V_{e1} 는 연속 유속곡선식에 의한 유속(m/s), a_1, b_1, c_1 는 각각 식의 상수와 계수이다.

3.4 자연하천의 연직유속분포식 일반화

春日屋(1958)는 하천에서 실측자료를 이용하여 식 (4)와 같은 평균유속 및 표면유속의 관계를 적용하여 유속분포식을 유도하였으나, 이 연구에서는 현장에서 측정된 표면유속(v_a)과 2차 포물선식의 상수와 계수의 관계로 유속분포식을 일반화하였다. 그리고, 강경지점 측정자료중 연직 유속분포식 유도에 적용하지 않았던 자료를 이용하여 실측값과 추정값의 통계적 분석을 실시하여 적용성을 검토하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유속측정

4.1.1 측선별 유속측정

강경지점의 연직유속측정은 하천시설기준에 의거하여 황산대교상에서 실시하였으며, 표 1에 제시된 것과 같이 1995~1997년 동안 11회, 49개 측정이고, 이중 43개 측정자료는 모형유도에 적용하였고, 1996년 7월5일 측정된 6개 자료는 유속분포곡선식의 검증자료로 활용하였다. 유속측정 최고수위는 4.72m(EL.+3.79m), 최저수위는 2.44m(EL.+1.505m)이며, 측정최대수심은 13.3m이고 최저수심은 2.97m이다.

4.1.2 유속분포도 작성

현장에서 측정된 유속은 침수선 보정과 홍수전후 측

정한 통수단면 측량결과를 적용하여 그림 2와 같은 유속분포도를 작성하였다. 유속분포도는 측선의 상황 및 유속에 따라 분포가 불규칙하였으며, 유속이 빠를수록 표면유속과 바닥유속의 차이가 작은 직선형 분포를 보이고 있고 유속이 느릴 경우 전형적인 대수분포형을 보이고 있다.

4.2 유속별 상대깊이의 연직 유속분포

4.2.1 상대깊이 환산 및 연직 유속분포 작성

수심변화에 따른 객관적인 유속분포를 파악하기 위하여 실제 수심을 식 (9)에 적용하여 상대깊이로 환산하였다. 표 1과 같이 측정된 유속자료중 검증자료를 제외한 43개 자료로 그림 3과 같이 평균유속을 0.3 m/s 이하, 0.3~0.6m/s, 0.6~0.9m/s, 및 0.9m/s 이상으로 구분하여 상대깊이의 연직 유속분포도를 작성하였다. 평균유속 0.3m/s 이하에서는 측정지점의 상황에 따라 매우 불규칙하게 나타났고, 평균유속 0.3~0.6m/s 에서는 비교적 안정적인 대수분포형을 보이고 있으며, 평균유속 0.6~0.9m/s에서는 유속의 분포가 매우 불규칙하였다. 평균유속 0.9m/s 이상에서는 일반적인 대수분포형이 무시되었고, 수직적인 분포형을 나타냈으며, 표면유속과 바닥유속의 차가 매우 작게 나타났다.

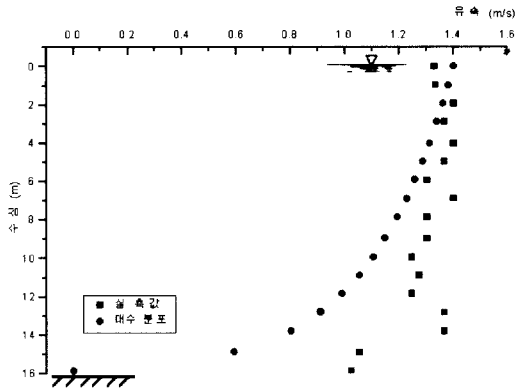
4.2.2 연직 유속분포의 유속요소 특성

상대깊이의 연직 유속분포에 대한 특성을 파악하기 위하여, 표면유속(v_a), 최대유속(v_x), 바닥유속(v_b) 및 현장에서 유속측정특성을 반영하여 수면아래 0.2D

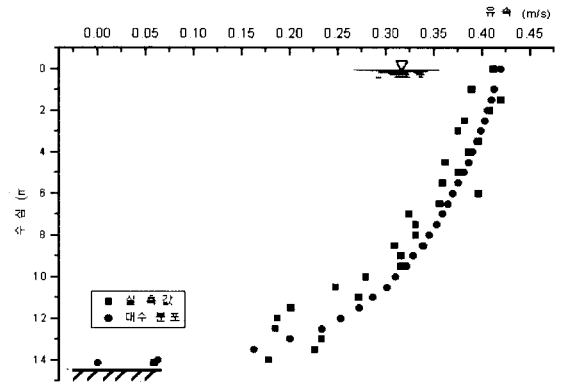
표 1. 강경지점의 실측 연직유속분포 자료

일련 번호	측정일	수위 (m)	단면적 (m ²)	평균 유속 (m/s)	유 량 (m ³ /s)	하폭 (m)	좌안으로부터 횡방향 거리(Z)(m)						측심 간격 (m)	
							110	130	150	170	190	210		230
1	1995.7.12.	2.46	970.96	0.310	300.9	175.3	110	130	150	170	190	210	230	0.5
2	1996.7.16.	2.96	1495.30	0.342	510.7	184.4	100	130	180	220				0.5
3	1996.7.22.	3.92	1680.17	1.111	1866.5	198.3	90	110	120	140	180	220		1.0
4	1996.7.23.	3.76	1650.31	0.987	1628.9	197.8	90	100	120					0.5
5	1996.7.23.	3.28	1648.43	0.688	1134.1	197.2	200	220						0.5
6	1996.8.28.	3.08	1516.46	0.295	447.3	186.8	90	120	140	160	220	240		0.5
7	1996.8.28.	2.43	1399.59	0.357	500.3	177.0	90	100	140	160				1.0
8	1997.7. 8.	4.72	1785.35	1.516	2706.5	202.5	130	220						1.0
9	1997.7.10.	3.42	1528.59	0.888	1358.1	189.6	90	100	140	180	230			1.0
10	1997.7.31.	2.89	1432.64	0.321	456.6	181.6	90	120	140	180				1.0
11*	1996.7.05.	3.17	1534.21	0.807	1237.5	188.6	100	120	140	170	180	195		1.0

* 검증자료

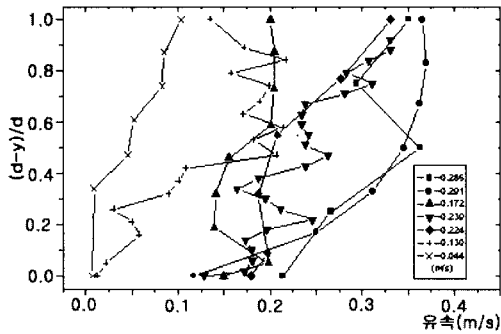


(1996년 7월 22일, 180m, 측정 $V_m = 1.298\text{m/s}$)

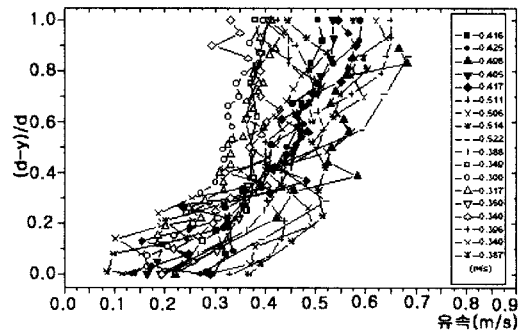


(1996년 8월 28일, 160m, 측정 $V_m = 0.317\text{m/s}$)

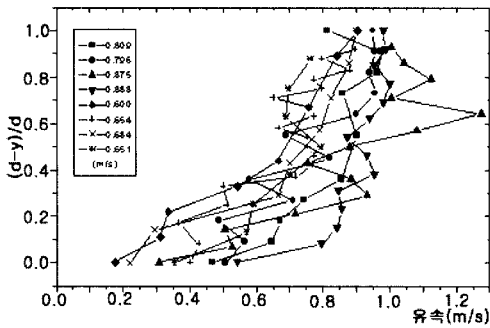
그림 2. 강경지점의 실제 유속분포 예



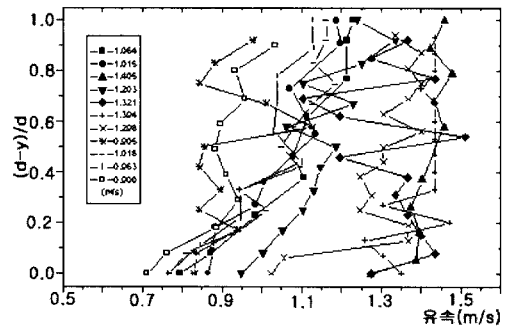
(0.3m/s이하)



(0.3~0.6m/s)



(0.6~0.9m/s)



(0.9m/s이상)

그림 3. 강경지점의 평균유속별 상대깊이의 연직유속분포도

측점의 유속 ($v_{0.2}$)의 평균유속 (v_m)에 대한 비율로 무차원화하여 표 2와 같이 평균유속분포별로 구분하여 산정하였다.

평균유속 0.3m/s 이하에서 표면유속비 (V_a/V_m)는 1.13이고, 바닥유속비 (V_b/V_m)는 0.67이며, 평균유속 0.3~0.6m/s 에서는 표면유속비가 1.149이고, 바닥유

표 2. 유속요소의 평균유속에 대한 평균비율

평균유속 범위	표면유속 (V_a/V_m)	최대유속 (V_x/V_m)	바닥유속 (V_b/V_m)	0.2D측점유속 ($V_{0.2}/V_m$)
0.3 m/s 이하	1.130	1.180	0.670	1.130
0.3~0.6 m/s	1.149	1.229	0.523	1.197
0.6~0.9 m/s	1.252	1.252	0.480	1.238
0.9 m/s 이상	1.009	1.063	0.845	1.035
전 체	1.120	1.180	0.620	1.150

속비가 0.523이었다. 평균유속이 0.6~0.9m/s 에서는 표면유속비가 1.252이고, 바닥유속비는 0.480이며, 평균유속이 0.9m/s 이상에서는 표면유속비가 1.009이고 바닥유속비는 0.845이었다. 이와 같이 평균유속 0.3~0.6m/s 에서는 일반적인 대수분포형을 유지할 수 있으며, 평균유속 0.6~0.9m/s 에서 표면유속과 바닥유속의 차가 2.6배로 유속분포의 굴곡도가 가장 크고 매우 불규칙하였고, 평균유속 0.9m/s 이상에서 표면유속과 바닥유속의 차가 1.2배로 거의 직선분포형을 보이고 있다.

Rankine은 연직유속곡선의 요소를 보통 수로에서 $V_a : V_m : V_b = 5 : 4 : 3 = 1.25 : 1 : 0.75$, 완만한 수로에서 $V_a : V_m : V_b = 4 : 3 : 2 = 1.33 : 1 : 0.66$ 으로 제시하였다(강주복 외, 1998). Rankine의 연구 결과는 보통수로 보다 완만한 수로의 표면유속과 바닥유속의 차이가 큰 것으로 판단할 수 있으며, 이와 같은 결과는 평균유속이 빠를수록 표면유속과 바닥유속의 차이가 작은 이 연구의 결과와 동일하다.

4.3 자연하천의 연직 유속분포식 유도

4.3.1 2차 포물선식의 유도

상대깊이의 측정 유속자료를 이용하여 식 (10)과 같은 2차 포물선의 연직유속분포식을 유도하였으며, 실측값과 유도된 2차 포물선식의 상수와 계수 및 유도된 식으로 추정된 표면유속과 바닥유속은 표 3과 같다. 실측값 평균유속(V_m)의 범위는 0.044m/s~1.722 m/s이고, 표면유속(V_a)의 범위는 0.104m/s~1.754 m/s이며, 바닥유속(V_b)의 범위는 0.007m/s~1.443 m/s 이다. 유도한 2차 포물선식 상수값(a_1)은 0.00 2~1.408 범위이고 평균값은 0.393 이며, 계수값(b_1)은 0.119~2.006이고, 계수값(c_1)은 -0.034~-1.339 이다. 유도한 2차 포물선식의 표준오차는 0.002~0.110

범위이고 평균값은 0.035이며, 상관계수는 0.664~0.999 범위이고 평균값은 0.943으로 고도의 유의성을 보이고 있다. 유도된 2차 포물선식으로 작성된 연직 유속분포와 관측된 연직 유속분포의 형상은 그림 4와 같이 평균유속의 크기에 관계없이 실제유속분포 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

4.3.2 2차 포물선식의 오차

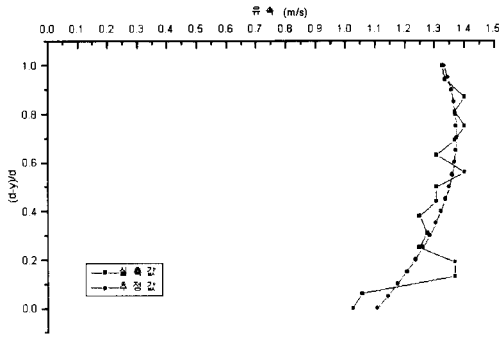
유도한 연직 유속분포식의 오차정도를 파악하기 위하여 표 3에 제시한 43개 자료에 대하여 유도된 2차 포물선식으로 구한 표면유속(V_{ae}) 및 바닥유속(V_{be})값과 실측한 표면유속(V_a) 및 바닥유속(V_b)값과의 상관관계 및 잔차를 그림 5와 같이 구하였다. 표면유속의 상관계수는 0.997, 표준오차는 0.034, 잔차 범위는 0.092m/s~-0.091m/s 이며, 바닥유속의 상관계수는 0.998, 표준오차는 0.028, 잔차범위는 0.063m/s~-0.064m/s로, 통계적으로 매우 안정적이다.

4.3.3 2차 포물선식의 상수 및 계수와 표면유속(V_a)과의 관계

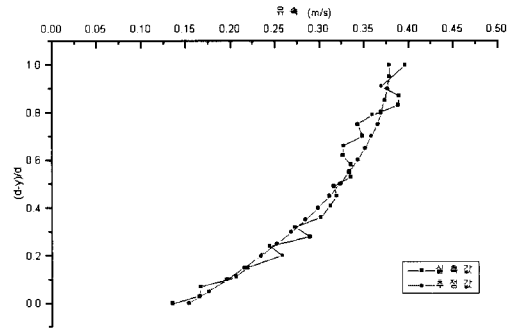
2차 포물선식 상수(a_1) 및 계수(b_1, c_1)와 실측한 표면유속(V_a)과의 상관관계를 표면유속 크기에 따라 구하였다. 박승기(1999)등은 하천흐름의 연직방향 평균유속결정방법에서 평균유속 0.7m/s를 연직방향 유속분포의 변이를 나타내는 한계유속으로 정하였다. 즉, 평균유속이 0.7m/s 이하이면 전형적인 대수분포를 보였지만, 평균유속이 0.7m/s 이상이면 표면유속과 바닥유속의 차이가 매우 작은 거의 균일한 수직분포를 보였다. 평균유속 0.7m/s는 표면유속으로 환산할 때 0.75m/s~0.85m/s에 해당되며, 그림 6과 같이 2차 포물선 연직분포식 상수 및 계수와 표면유속과의 상관관계도에서 표면유속이 대략 0.8m/s를 중심으로 변곡되는 특성을 보이고 있으나, 표면유속 계수 c_1 는 유

표 3. 연직 유속분포식의 상수와 계수의 산정치

구분	실 측 값					2차 포물선식($V_{e1} = a_1 + b_1 \times D + c_1 \times D^2$)						
	Z	d (m)	V_m (m/s)	V_a (m/s)	V_b (m/s)	a_1	b_1	c_1	SE	R	추정 V_{ac} (m/s)	추정 V_{bc} (m/s)
1	110	9.230	0.345	0.330	0.197	0.188	0.667	-0.538	0.028	0.917	0.317	0.188
1	130	6.510	0.416	0.425	0.220	0.220	0.626	-0.398	0.024	0.971	0.447	0.220
1	150	9.530	0.359	0.410	0.115	0.076	0.907	-0.556	0.042	0.951	0.427	0.076
1	170	6.640	0.425	0.445	0.132	0.076	1.138	-0.754	0.038	0.973	0.460	0.076
1	190	4.960	0.421	0.535	0.164	0.154	0.789	-0.412	0.020	0.989	0.531	0.154
1	210	8.800	0.428	0.545	0.175	0.183	0.641	0.244	0.054	0.927	0.580	0.183
1	230	2.970	0.044	0.104	0.007	0.006	0.132	-0.034	0.003	0.998	0.105	0.006
2	100	9.200	0.130	0.135	0.013	0.002	0.491	-0.301	0.010	0.994	0.191	0.002
2	130	11.200	0.455	0.400	0.296	0.262	0.704	-0.550	0.027	0.947	0.416	0.262
2	180	8.400	0.535	0.572	0.364	0.389	0.389	-0.196	0.027	0.940	0.582	0.389
2	220	7.700	0.254	0.226	0.185	0.174	0.349	-0.290	0.011	0.960	0.233	0.174
3	90	4.900	0.667	0.780	0.320	0.329	1.227	0.862	0.035	0.989	0.695	0.329
3	110	10.200	0.930	0.902	0.307	0.329	2.006	-1.339	0.110	0.927	0.996	0.329
3	120	12.400	1.387	1.318	1.262	1.289	0.462	-0.363	0.011	0.977	1.388	1.289
3	140	11.900	1.410	1.424	1.297	1.307	0.364	-0.255	0.051	0.664	1.416	1.307
3	180	9.300	1.287	1.326	1.024	1.106	0.747	-0.523	0.078	0.763	1.330	1.106
3	220	8.600	0.937	0.937	0.768	0.781	0.651	-0.482	0.008	0.995	0.950	0.781
4	90	4.683	0.684	0.903	0.219	0.193	1.537	-0.849	0.066	0.977	0.881	0.193
4	100	9.973	0.796	0.947	0.438	0.473	0.656	-0.134	0.081	0.920	0.996	0.473
4	120	12.230	1.203	1.289	0.948	0.979	0.390	-0.105	0.062	0.854	1.264	0.979
5	200	9.853	0.726	0.864	0.402	0.348	0.917	-0.417	0.078	0.890	0.847	0.348
5	220	8.503	0.501	0.636	0.221	0.243	0.804	-0.426	0.049	0.933	0.621	0.243
6	90	4.020	0.185	0.200	0.149	0.147	0.119	-0.064	0.003	0.994	0.201	0.147
6	120	11.600	0.247	0.311	0.101	0.034	0.527	-0.243	0.052	0.835	0.318	0.034
6	140	11.000	0.315	0.391	0.135	0.153	0.453	-0.228	0.016	0.980	0.378	0.153
6	160	13.200	0.315	0.410	0.126	0.142	0.545	-0.286	0.029	0.951	0.401	0.142
6	220	7.800	0.360	0.400	0.191	0.237	0.419	-0.273	0.032	0.903	0.383	0.237
6	240	5.100	0.263	0.326	0.179	0.183	0.190	-0.044	0.004	0.998	0.329	0.183
7	90	3.373	0.312	0.359	0.117	0.125	0.747	-0.567	0.014	0.992	0.305	0.125
7	100	8.663	0.304	0.527	0.047	0.016	0.749	-0.231	0.034	0.987	0.533	0.016
7	140	10.400	0.530	0.652	0.329	0.324	0.594	-0.265	0.003	0.999	0.633	0.324
7	160	12.500	0.525	0.620	0.320	0.336	0.458	-0.171	0.043	0.923	0.623	0.336
8	130	13.240	1.722	1.754	1.443	1.408	0.917	0.535	0.072	0.889	1.790	1.408
8	220	8.513	1.463	1.463	1.273	1.322	0.328	-0.205	0.034	0.858	1.446	1.322
9	90	3.725	0.542	0.797	0.125	0.122	1.174	-0.494	0.013	0.999	0.803	0.122
9	100	9.313	0.923	0.951	0.467	0.493	1.234	-0.864	0.053	0.956	0.862	0.493
9	140	11.663	1.178	1.225	0.795	0.808	0.812	-0.399	0.029	0.987	1.221	0.808
9	180	8.613	1.126	1.182	0.865	0.841	0.521	-0.169	0.042	0.961	1.192	0.841
9	230	6.143	0.640	0.890	0.175	0.162	1.268	-0.542	0.046	0.990	0.889	0.162
10	90	3.195	0.298	0.349	0.214	0.214	0.243	-0.106	0.002	0.999	0.350	0.214
10	120	11.683	0.462	0.448	0.194	0.209	0.867	-0.679	0.021	0.976	0.397	0.209
10	140	11.133	0.444	0.506	0.295	0.279	0.371	-0.133	0.019	0.976	0.517	0.279
10	180	8.083	0.339	0.380	0.221	0.233	0.459	0.324	0.022	0.947	0.368	0.233
최대값		13.240	1.722	1.754	1.443	1.408	2.006	-0.034	0.110	0.999	1.790	1.408
최소값		2.970	0.044	0.104	0.007	0.002	0.119	-1.339	0.002	0.664	0.105	0.002
평균값		8.620	0.624	0.687	0.392	0.393	0.688	0.392	0.035	0.943	0.689	0.393

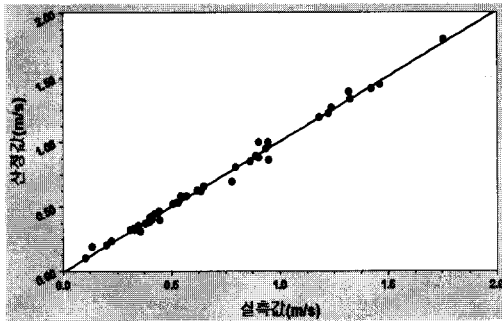


(1996년 7월 22일, 180m, 측정 $V_m = 1.298\text{m/s}$)

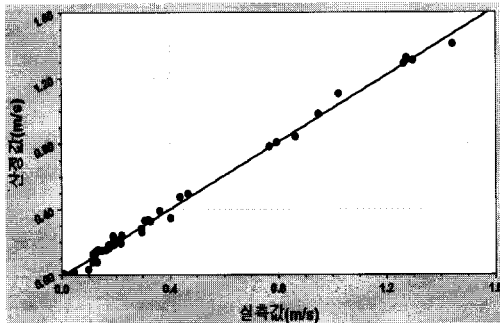
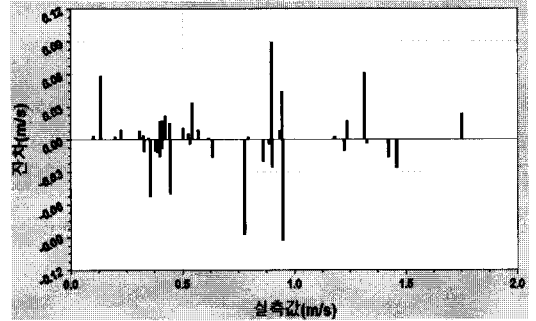


(1996년 8월 28일, 140m, 측정 $V_m = 0.300\text{m/s}$)

그림 4. 2차 포물선의 연직 유속분포식을 적용한 연직 유속분포의 비교 예



(표면유속)



(바닥유속)

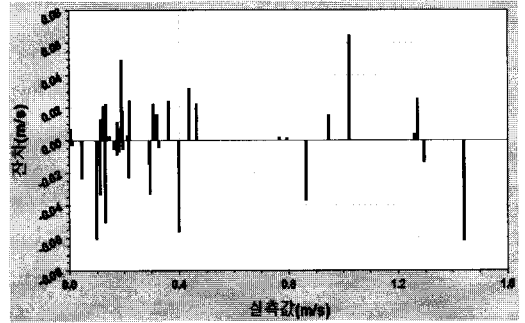


그림 5. 2차 포물선의 연직 유속분포식으로 구한 값과 측정값의 상관관계와 잔차도

의성을 파악하기 어려웠다.

2차 포물선식의 상수 a_1 과 표면유속 (V_a) 및 2차 포물선식의 계수 b_1 과 표면유속 (V_a) 간에 상관분석을 실시하였으며, 상수 (a_e)와 계수 (b_e)는 표 4와 같

이 구하였다. 표면유속이 0.8m/s 이하에서 표면유속-상수 a_1 는 표준오차가 0.069 , R 가 0.754 이며, 표면유속-계수 b_1 는 표준오차가 0.198 , R 이 0.600 이었다. 표면유속이 0.8m/s 이상에서 표면유속-상수 a_1

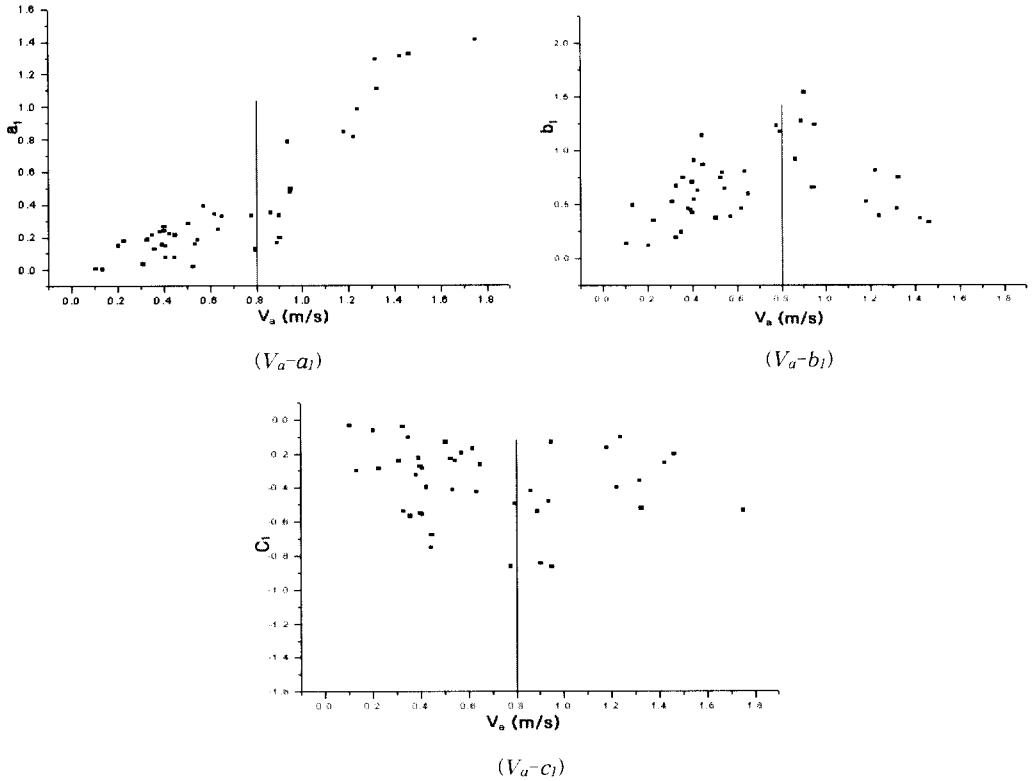


그림 6. 2차 포물선식의 상수 및 계수와 표면유속과의 상관관계도

표 4. 2차 포물선식의 상수 및 계수와 표면유속과의 관계

범 위	구 분	a_e	b_e	SE	R	잔 차
표면유속 0.8m/s 이하	표면유속-상수 a_1	-0.009	0.476	0.069	0.754	0.130 ~ -0.125
	표면유속-계수 b_1	0.162	0.885	0.198	0.600	0.345 ~ -0.263
표면유속 0.8m/s 이상	표면유속-상수 a_1	-1.281	1.809	0.110	0.971	0.20 ~ -0.16
	표면유속-계수 b_1	2.618	-1.581	0.326	0.776	0.82 ~ -0.48

는 표준오차가 0.110, R가 0.971이며, 표면유속-계수 b_1 는 표준오차가 0.326, R가 0.776 으로 높은 유의성을 보이고 있다.

4.4 자연하천의 연직 유속분포식 적용

4.4.1 연직유속분포 일반식의 설정

이 일반식은 표 4의 결과와 같이 표면유속이 0.8m/s 이상으로 현장에서 유속측정에 의한 연직유속 분포 결정이 곤란한 경우에 추천한다. 2차 포물선식의

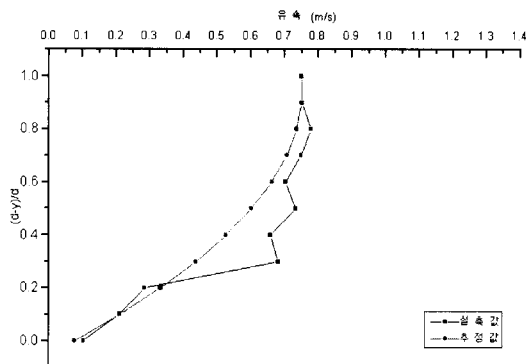
상수와 계수는 표면유속의 크기를 고려하여 구한 표 4의 표면유속과 2차 포물선식의 상수와 계수의 상관관계를 적용하여 구하는 방법이다. 2차 포물선식에서 상수 a_1 는 상대깊이(D)가 영(0)인 점의 유속, 즉 바닥 유속을 나타내며, 상대깊이(D)가 1인 점은 표면유속을 나타낸다. 따라서, 상수 a_1 와 계수 b_1 는 표 4의 상수(a_e)와 계수(b_e)를 적용하여 식 (12)와 식 (13)과 같이 실측한 표면유속의 관계로 구할 수 있으며, 계수 c_1 는 실측한 표면유속과 식 (12)와 식 (13)으

로 구한 상수 a_1 와 계수 b_1 값을 식 (14)에 대입하여 구할 수 있다.

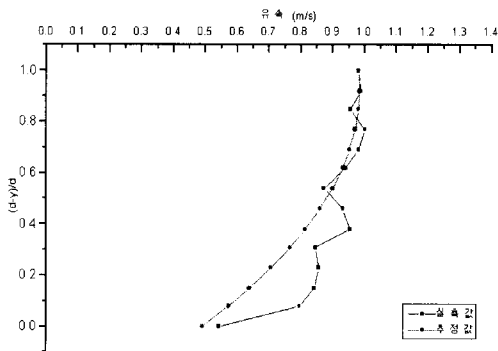
$$V_{e1} = a_1 + b_1 \times D + c_1 \times D^2 \quad (11)$$

$$a_1 = a_e + b_e \times V_a \quad (12)$$

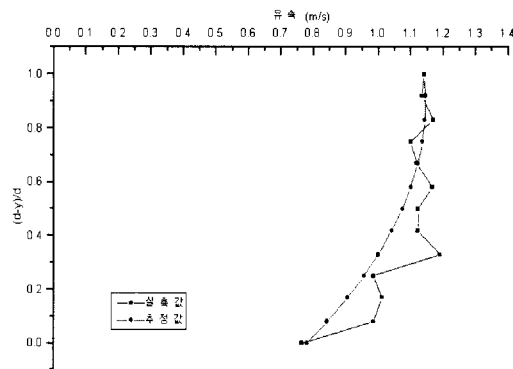
$$b_1 = a_e + b_e \times V_a \quad (13)$$



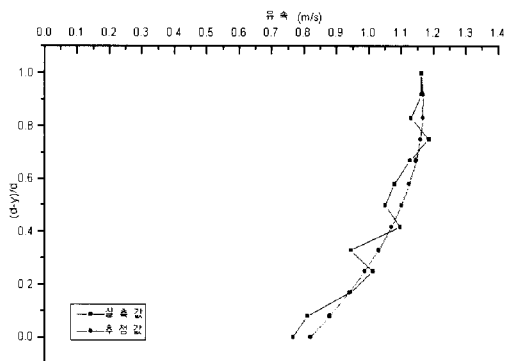
(100m지점 $V_m : 0.588\text{m/s}$, $V_a : 0.750\text{m/s}$)



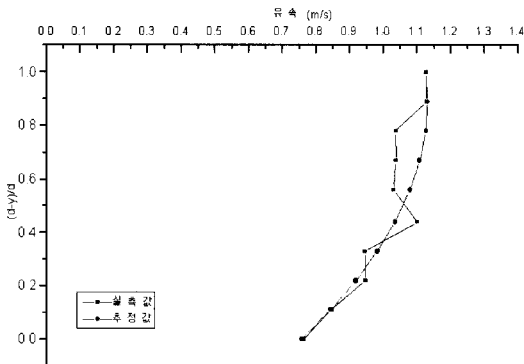
(120m지점 $V_m : 0.888\text{m/s}$, $V_a : 0.980\text{m/s}$)



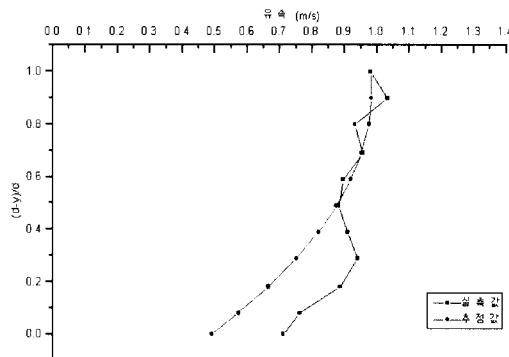
(140m지점 $V_m : 1.044\text{m/s}$, $V_a : 1.140\text{m/s}$)



(170m지점 $V_m : 1.018\text{m/s}$, $V_a : 1.162\text{m/s}$)



(180m지점 $V_m : 0.963\text{m/s}$, $V_a : 1.127\text{m/s}$)



(195m지점 $V_m : 0.900\text{m/s}$, $V_a : 0.980\text{m/s}$)

그림 7. 연직 유속분포식의 검증 결과 (1996년 7월 5일)

$$c_1 = V_a - a_1 - b_1 \quad (14)$$

여기서 a_1 는 2차 포물선식의 상수, b_1 , c_1 는 2차 포물선식의 계수, V_a 는 실측 표면유속이다.

4.4.2 연직유속분포 일반식의 검증

연직 유속분포 일반식의 검증을 위하여 보류한 1996년 7월 5일 (표 1)에 금강수계 강경지점에서 실측한 자료를 이용하였다. 측정지점의 평균수위는 3.17m이며, 측정지점은 황산대교 좌안으로부터 100, 120, 140, 170, 180, 195m 지점에서 전체 측심에 대하여 1.0m 간격으로 측정하였다. 연직 유속분포식을 강경지점의 검증자료에 적용한 결과는 그림 7과 같다. 교각과 측정지점의 상황에 따라 연직 유속분포가 불규칙하여 정확한 검증은 어려우나 그림 7에서 보는 것과 같이 표면유속이 빠를수록 유속분포식이 잘 반영되는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

자연하천의 연직방향 유속분포는 유량의 변화, 하천의 물질수송해석 등 하천의 수량과 수질해석에 중요하나, 여러 가지 불리한 자연적 조건에 의하여 측정이 매우 어렵다. 따라서, 이 연구는 평·저수시 유속계로 측정된 금강수계 강경지점의 유속자료를 분석하여 자연하천에서의 연직 유속분포특성을 규명하였다. 또한, 현장유속 측정 조건이 불량하여 다점법으로 유속분포를 측정하기 곤란한 경우, 간단하게 표면유속만을 측정하여 상대깊이별 유속을 추정할 수 있는 유속분포식을 유도하여 적용성을 통계적으로 검증하였다.

연직 유속분포의 특성은 평균유속 0.3~0.6m/s에서는 전형적인 대수분포를 보이고 있으며, 평균유속 0.6~0.9m/s에서 표면유속과 바닥유속의 차가 2.6 배로 유속분포의 굴곡도가 가장 크고 매우 불규칙하였으며, 평균유속 0.9 m/s 이상에서 표면유속과 바닥유속의 차가 1.2 배로 거의 직선분포형을 보였다. 2차 포물선식의 유속분포식은 통계적으로 매우 안정적이고, 표면유속과 바닥유속 등과 고도의 유의성을 보였다. 2차 포물선식의 상수 및 계수와 표면유속과의 상관관계를 구하였으

며, 실측 자료에 적용한 결과, 유속분포특성을 잘 반영하는 것을 확인할 수 있었다. 연직 유속분포식으로 추정된 유속은 실제수심을 적용하여 평균유속과 유량을 결정할 수 있으며, 하천의 오염물질이동 등 수질해석에 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 강주복, 임병대, 민병형 (1998). 수리학. 기문당.
 건설부 (1993). 하천시설기준.
 건설교통부 (1995). 유량관측개선방안 연구 조사.
 건설교통부, 금강홍수통제소 (1995~1997). 금강수계 주요지점 유량측정조사.
 박승기, 김태철, 윤종필 (1999). "하천흐름의 연직방향 평균유속결정방법." 한국관개배수, 제6권 제1호, pp. 48-59.
 Chiu, C. L.(1989). "Velocity Distribution in Open Channel Flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 576-594.
 Chiu, C. L. (1991). "Application of Entropy Concept in Open Channel Flow Study." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 615-627.
 Gupta, R. S.(1989). *Hydrology and Hydraulic Systems*. Prentice-Hall, pp. 248
 Vanoni, V. A. (1941). "Velocity Distribution in Open Channels." *Civil Eng.*, Vol. 11, pp. 356-357.
 春日屋伸昌 (1953). "開水路における垂直流速曲線について." *土木學會誌*, Vol. 38, No. 9, pp. 395-400.
 春日屋伸昌 (1955). "開水路の垂直流速曲線における平均流速の位置の分布性について." *土木學會誌*, Vol. 40, No. 5, pp. 230-235.
 春日屋伸昌 (1958). "縦平均流速算定式について." *土木學會論文集*, Vol. 54, pp. 26-34.

(논문번호:99-056/접수:1999.08.03/심사완료:1999.12.27)