

자연하천의 연직방향 유속분포 비교

Comparison of the Vertical Velocity Distribution in the Natural Streamflow

박 승 기*(공주대) · 김 태 철(충남대)
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 parabola equation. 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.

I. 서론

자연하천의 연직방향 유속분포는 유량의 변화, 하천의 물질수송해석 등 하천의 수량과 수질 해석에 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. 이 연구에서는 평·저수시 유속계로 측정된 금강수계 강경지점의 유속자료를 분석하여 자연하천의 연직방향 유속분포특성을 규명하였다. 또한, 현장유속 측정 조건이 불량하여 다점법으로 유속분포를 측정하기 곤란한 경우, 간단하게 표면 유속만을 측정하여 상대깊이별 유속을 추정할 수 있는 유속분포식을 유도하였으며 적용성을 통계적으로 검증하였다.

II. 자료 및 방법

2.1 유속측정 및 평균유속 산정

수문자료는 1995년부터 1997년까지 금강하류유역인 강경 수위관측소에서 홍수위 이하 평·저수시 수위에서 하천시설기준(건설부, 1993)에 준하여 연직방향으로 0.5~1.0m 간격으로 측정된 유속자료를 이용하였다. 사용된 유속계는 Valeport사의 BFM. 001이며 측정범위는 0.03~7.0m/s이고, 추 무게는 16.7kg이다. 유속측정시 바람과 수압에 대한 영향은 무시하였으며, 침수선 보정은 현장에서 측정된 연직각을 Gupta(1989)가 제시한 침수선 보정표에 의하여 수행하였으며, 실제 수심은 유속이 완만할 때 측정된 값을 적용하여 보완하였다.

평균유속을 산정하기 위한 기준수위는 유속측정 시작시점의 수위와 끝나는 시점의 수위를 조사하여 평균수위를 적용하며, 통수단면적은 평균단면적으로 구하였다.

2.2 유속별 상대깊이의 실측 연직유속분포

실측 연직유속분포의 수심변화에 따른 객관적인 유속분포를 파악하기 위하여 수심을 식(1)과 같이 상대깊이로 환산하여 유속범위별로 구분하여 작성하였다.

$$D = (d - y) / d \quad (1)$$

여기서 D는 상대깊이, y는 수면으로 부터의 수심(m)이다.

연직 유속분포에 대한 특성을 파악하기 위하여 표면유속(V_a), 최대유속(V_x), 바닥유속(V_b) 및 수면아래 0.2D 측정점의 유속($V_{0.2}$)과 평균유속(V_m)에 대한 비율을 산정하고 분석하였다.

2.3 자연하천의 연직유속분포식 유도

연직 유속곡선식 유도는 상대깊이로 변환한 유속자료를 이용하였다. 연직유속분포식은 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(2)와 같다.

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

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

III. 결과 및 고찰

3.1 유속측정 및 평균유속 산정

3.1.1 측선별 유속측정

강경지점의 연직유속측정은 하천시설기준에 의거하여 황산대교상에서 실시하였으며, 표 1에 제시된 것과 같이 1995~1997년 동안 10회, 43개 측정자료를 적용하였고, 유속측정 최고수위는 4.72m(EL.+3.79m), 최저수위는 2.44m(EL.+1.505m)이며, 측정최대수심은 13.3m이고 최저수심은 2.97m이다.

표 1 강경지점의 실측 연직유속분포 자료

일련 번호	측정일	수위 (m)	단면적 (m ²)	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	175.3	110	130	150	170	190	210	230	0.5
2	1996.7.16.	2.96	1495.30	184.4	100	130	180	220				0.5
3	1996.7.22.	3.92	1680.17	198.3	90	110	120	140	180	220		1.0
4	1996.7.23.	3.76	1650.31	197.8	90	100	120					0.5
5	1996.7.23.	3.28	1648.43	197.2	200	220						0.5
6	1996.8.28.	3.08	1516.46	186.8	90	120	140	160	220	240		0.5
7	1996.8.28.	2.43	1399.59	177.0	90	100	140	160				1.0
8	1997.7. 8.	4.72	1785.35	202.5	130	220						1.0
9	1997.7.10.	3.42	1528.59	189.6	90	100	140	180	230			1.0
10	1997.7.31.	2.89	1432.64	181.6	90	120	140	180				1.0

3.1.2 평균유속의 비교

다점법에 의한 연직유속분포도로부터 구한 평균유속을 참값이라고 가정하고, 이 값과 일반적으로 적용되고 있는 3점법, 2점법 및 1점법으로 구한 평균유속을 비교한 결과는 표 2와 같다. 잔차는 연직유속분포도로부터 구한 평균유속과 각각의 평균유속 측정방법으로 구한 유속과의 차이에 대한 백분율이다.

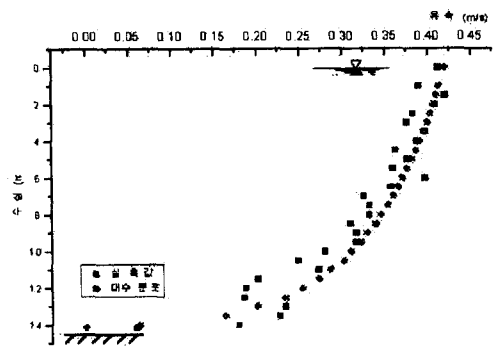
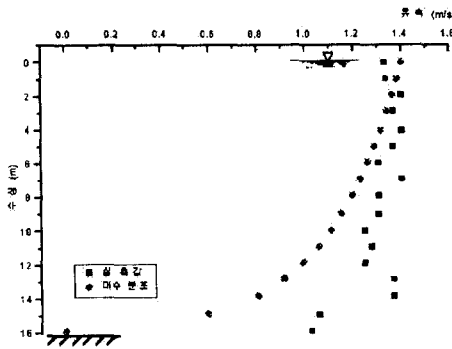
표 2 연직유속분포도로 구한 평균유속과 일반적인 측정방법으로 구한 평균 유속과의 비교

일련 번호	연직유속분포도	3점법		2점법		1점법	
	평균유속 (m/s)	평균유속 (m/s)	잔차 (%)	평균유속 (m/s)	잔차 (%)	평균유속 (m/s)	잔차 (%)
1	0.310	0.314	-1.29	0.309	0.32	0.318	-2.58
2	0.342	0.343	-0.29	0.336	1.75	0.349	-2.05
3	1.111	1.123	-1.08	1.147	-3.24	1.100	0.99
4	0.987	0.983	0.41	0.996	-0.91	0.984	0.30
5	0.688	0.668	2.91	0.697	-1.31	0.679	1.31
6	0.295	0.286	3.05	0.286	3.05	0.289	2.03
7	0.357	0.350	1.96	0.365	-2.24	0.327	8.40
8	1.516	1.534	-1.19	1.566	-3.30	1.512	0.26
9	0.888	0.894	-0.68	0.894	-0.68	0.893	-0.56
10	0.321	0.321	0.00	0.330	-2.80	0.338	-5.30
평균	0.682	0.682	0.38	0.693	-0.94	0.679	0.28

3점법으로 구한 평균유속과 다점법에 의한 연직유속분포도 방법으로 구한 평균유속과 비교한 결과 잔차는 -1.29%~3.05% 범위이며 평균치는 0.38%로 3점법으로 구한 평균유속이 약간 느린 편이다. 2점법으로 구한 평균유속과 다점법에 의한 연직유속분포도 방법으로 구한 평균유속과 비교한 결과 잔차는 -3.24%~3.05% 범위이며 평균치는 -0.94%로 2점법으로 구한 평균유속이 약간 빠른 편이다. 1점법으로 구한 평균유속과 다점법에 의한 연직유속분포도 방법으로 구한 평균유속과 비교한 결과 잔차는 -5.30%~8.04% 범위이며 평균치는 0.28%로 1점법으로 구한 평균유속이 약간 느린 편이다. 잔차범위는 3점법, 2점법, 1점법 순으로 안정적이었으나, 측정값의 정도는 대체로 비슷한 결과였다. 이것은 Savini and Bodhaine(1971)이 평균유속을 2점법으로 측정된 값과 10점법에 비하여 0.7%의 오차를 갖는 것으로 조사한 결과와 유사한 결과이다. 따라서, 1점법에 의한 유속측정만으로도 현행의 평·저수시 수심이 0.6m 이하 1점법, 수심 0.6~1.0m 2점법, 수심 1.0m 이상일 때는 3점법으로 측정하는 방법의 필요성에 대한 재검토가 요구된다.

3.1.3 유속분포도 작성

현장에서 측정된 유속은 침수선 보정과 홍수전후 측정된 통수단면 측량결과를 적용하여 그림 1과 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.



(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 1 강경지점의 실제 유속분포 예

3.2 유속별 상대깊이의 연직 유속분포

수심변화에 따른 객관적인 유속분포를 파악하기 위하여 실제 수심을 식(1)에 적용하여 상대 깊이로 환산하였다. 연직유속분포의 특성은 평균유속 0.3m/s 이하에서는 측정지점의 상황에 따라 매우 불규칙하게 나타났고, 평균유속 $0.3\sim 0.6\text{m/s}$ 에서는 비교적 안정적인 대수분포형을 보이고 있으며, 평균유속 $0.6\sim 0.9\text{m/s}$ 에서는 유속의 분포가 매우 불규칙하였다. 평균유속 0.9 m/s 이상에서는 일반적인 대수분포형이 무시되었고, 수직적인 분포형을 나타냈으며, 표면유속과 바닥유속의 차가 매우 작게 나타났다. 상대깊이의 연직 유속분포에 대한 특성을 파악하기 위하여, 표면유속(V_a), 최대유속(V_x), 바닥유속(V_b) 및 현장에서 유속측정특성을 반영하여 수면아래 0.2D 측정의 유속($V_{0.2D}$)의 평균유속(V_m)에 대한 비율로 무차원화하여 표 3과 같이 평균유속분포별로 구분하여 산정 하였다.

표 3 유속요소의 평균유속에 대한 평균비율

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

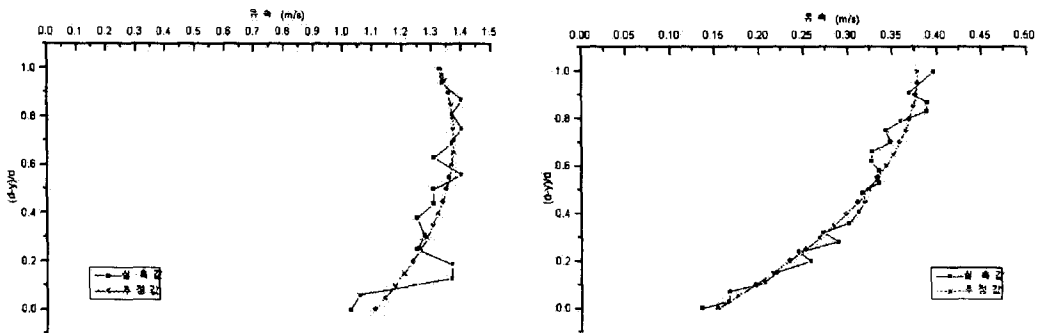
평균유속 0.3m/s 이하에서 표면유속비(V_a/V_m)는 1.13이고, 바닥유속비(V_b/V_m)는 0.67이며, 평균유속 $0.3\sim 0.6\text{m/s}$ 에서는 표면유속비가 1.149이고, 바닥유속비가 0.523이었다. 평균유속이 $0.6\sim 0.9\text{m/s}$ 에서는 표면유속비가 1.252이고, 바닥유속비는 0.480이며, 평균유속이 0.9 m/s 이상에서는 표면유속비가 1.009이고, 바닥유속비는 0.845이었다. 이와 같이 평균유속 $0.3\sim 0.6\text{m/s}$ 에서는 일반적인 대수분포형을 유지할 수 있으며, 평균유속 $0.6\sim 0.9\text{m/s}$ 에서 표면유속과 바닥유속의 차가 2.6배로 유속분포의 굴곡도가 가장 크고 매우 불규칙하였고, 평균유속 0.9 m/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 차가 큰 것으로 판단할 수 있으며, 이와 같은 결과는 평균유속이 빠를수록 표면유속과 바닥유속의 차가 작은 이 연구의 결과와 동일하다.

3.3 자연하천의 연직 유속분포식 유도

3.3.1 2차 포물선식의 유도

상대깊이의 측정 유속자료를 이용하여 식(2)와 같은 2차 포물선의 연직유속분포식을 유도하였다. 유도한 2차 포물선식 상수값(a_1)은 0.002~1.408 범위이고 평균값은 0.393 이며, 계수값(b_1)은 0.119~2.006이고, 계수값(c_1)은 -0.034~-1.339이다. 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 2와 같이 평균유속의 크기에 관계없이 실제유속분포 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.



(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 2 2차 포물선식의 연직 유속분포식을 적용한 연직 유속분포의 비교 예

3.3.2 2차 포물선식의 오차

유도한 연직 유속분포식의 오차정도를 파악하기 위하여 분석에 적용한 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 구하였다. 표면유속의 상관계수는 0.997, 표준오차는 0.034, 잔차범위는 0.092m/s~-0.091m/s 이며, 바닥유속의 상관계수는 0.998, 표준오차는 0.028, 잔차범위는 0.063m/s~-0.064m/s로, 통계적으로 매우 안정적이다.

IV. 결론

자연하천의 연직방향 유속분포는 유량의 변화, 하천의 물질수송해석 등 하천의 수량과 수질 해석에 중요하나, 여러가지 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.

다점법에 의한 연직유속분포도로부터 구한 평균유속을 참값이라고 가정하고, 이 값과 현행의 3점법, 2점법, 1점법으로 구한 평균유속과 비교한 결과, 잔차범위는 3점법, 2점법, 1점법 순으로 안정적이었으나, 의미 있는 차이는 없었다.

연직유속분포의 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/s이상에서 표면유속과 바닥유속의 차가 1.2 배로 거의 직선분포형을 보였다. 2차 포물선의 유속분포식은 통계적으로 매우 안정적이고, 표면유속과 바닥유속 등과 고도의 유의성을 보였다. 2차 포물선식의 상수 및 계수와 표면유속과의 상관관계를 구하였으며, 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.

참고문헌

1. 강주복, 임병대, 민병형 (1998). "수리학". 기문당.
2. 건설부 (1993). "하천시설기준"
3. 건설교통부, 금강홍수통제소 (1995~1997). "금강수계 주요지점 유량측정조사"
4. 박승기, 김태철, 문종필 (1999). "하천흐름의 연직방향 평균유속결정방법."
한국관개배수, 제6권 제1호, pp. 48-59.
5. 박승기, 김태철 (2000). "자연하천의 연직방향 유속분포 추정을 위한 포물선식."
한국수자원학회논문집, 제33권 제2호, pp. 169-179.
6. Gupta, R. S.(1989). "Hydrology and Hydraulic Systems." Prentice-Hall, pp. 248
7. Savini, J., G. L. Bodhaine (1971). "Analysis of Current-meter Data at Columbir River Gaging Station", Water Supply Paper 1869-F, U. S. Geological Survey, Washington, D.C.
- 8.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.
- 9.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.
- 10.春日屋伸昌 (1958), "縱平均流速算定式について", 土木學會論文集, Vol.54, pp.26-34.