

표면유속을 이용한 평균유속 추정방법의 개발

Estimation of Mean Velocity from Surface Velocity

노영신* / 윤병만** / 류권규***

Roh, Young Sin / Yoon, Byungman / Yu, Kwonkyu

Abstract

LSIV (Large Scale Image Velocimetry) is one of the image-based velocity measurement techniques. Since it measures surface velocities, it gives simple and inexpensive way to measure velocity, compared to other methods. Because of these advantages, there have been many studies to apply LSIV to the river discharge measurement in the field. Measuring the discharge by using LSIV requires a method which converts a surface velocity to a mean velocity. In the present study, experiments and analysis of vertical velocity profile of open-channel flow in various conditions were performed to develop methods which estimate a mean velocity from a surface velocity. The result of this experiment reveals that velocity-dip phenomena occur at free-surface layer in open channel flow and Froude number affects more than bed roughness does. Two methods for estimating the mean velocity were proposed. One is to correct the wake law's profiles by using the difference of surface velocity from the mean velocity, and the other is to use the ratio of mean and surface velocities. The result of applying these methods in an experiment shows that they are quite accurate having an error of approximately 6% only.

keywords : LSIV, surface velocity, mean velocity, velocity-dip phenomena

요 지

LSIV은 표면유속을 측정하는 영상기반 유속측정법중의 하나이다. 이 방법은 기존 측정기법에 비해 측정이 용이할 뿐만 아니라 경제적이기 때문에 유량측정 등의 실제 하천의 유속 측정에 활용하려는 연구들이 시도되고 있다. 그러나 이 기법은 표면유속을 측정하기 때문에 유량 산정을 위해서는 측정된 표면유속을 평균유속으로 환산할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 하상 및 흐름조건에 대한 다양한 수리실험을 통해 개수로 난류 흐름에 대한 연직유속분포의 특성을 파악하였다. 수리실험결과 수표면 영역의 유속감소를 확인하였으며, 이러한 유속감소는 조도보다는 Froude 수의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 실험 결과를 이용하여 표면유속으로부터 평균유속을 추정하는 두 가지 방법을 제시하였다. 제안된 방법들은 표면유속 보정량을 이용하여 후류법칙의 유속분포를 보정하는 방법과 평균유속과 표면유속의 비를 이용한 방법이다. 제시된 방법들은 실제 하천의 유속 측정 자료들을 이용하여 검증하였다. 검증결과 이 방법들은 6%이내의 오차를 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : LSIV, 표면유속, 평균유속, 유속감소현상

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 박사후 과정
Post Doc., Korea Institute of Construction Technology, Kyunggido 411-712, Korea
(e-mail: rohys@kict.re.kr)

** 명지대학교 토목환경공학과 교수
Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji Univ., Kyunggido, 449-728, Korea

*** 명지대학교 토목환경공학과 연구원
Researcher, Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji Univ., Kyunggido, 449-728, Korea

1. 서 론

하천에서 유량을 측정하는 대표적인 방법은 유속계나 봉부자를 이용하는 것이다. 이러한 기존 측정 방법들은 시간과 인력, 비용을 많이 소요하는 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해, 최근에는 LSIV 및 전자파 표면유속계와 같이 간편하게 표면유속을 측정하고, 이로부터 유량을 계산할 수 있는 측정기법의 개발이 시도되고 있다. 그러나 LSIV는 표면유속을 측정하기 때문에 유량 산정을 위해서는 측정된 표면유속을 평균유속으로 환산할 수 있는 방법이 필요하다. 표면유속과 평균유속의 관계를 유도하기 위해서는 대상단면의 다양한 조건에 따른 유속 분포를 파악해야 한다. 그러나, 실제 하천단면에서의 유속분포는 자유수면의 존재, 수로 바닥 면에서의 마찰 등으로 인해 매우 복잡한 구조를 가지며, 단면의 형태 및 조도, 수로의 만곡뿐만 아니라 부유되는 유사량의 영향을 받기 때문에 정확한 유속분포를 파악하기는 매우 어렵다. 현재까지 수표면 부근의 흐름특성 및 난류가 유속분포에 미치는 영향은 해결되지 못한 문제로 남아있으며, 따라서 표면유속과 평균유속의 일반적인 관계 또한 아직까지 명확하게 규명되어 있지 않은 실정이다(Rood and Katz, 1994).

미국지질조사국(USGS, 1982)에서는 개수로 흐름의 유속분포가 전형적인 대수법칙에 따른 유속분포의 형태를 띠고 최대유속이 수표면에서 발생한다고 가정하였을 때, 표면유속과 평균유속의 비는 0.85~0.86이며, 따라서 표면유속으로부터 평균유속을 계산하기 위해서 일반적으로 0.85의 값을 사용하도록 하고 있다. 그러나 표면유속과 평균유속 관계에 대해 일정한 계수값을 사용하면 하천의 하상특성 및 수리조건에 따른 유속분포의 변화를 반영하기가 힘들기 때문에 정확한 평균유속을 산정하기가 어렵다. Cheng and Gartner(2003)이 실제로 80 m 하폭의 샌조아퀀강에서 단면을 20 개로 분할하여 각 분할단면의 유속분포를 측정된 결과, 유속감소 현상으로 인해 표면유속과 평균유속의 비가 0.88~0.93으로 나타났다. 이 결과는 USGS에서 제시한 0.85와는 약간의 차이가 있다. 따라서 표면유속으로부터 정확한 평균유속을 산정하기 위해서는 하천의 하상조건 및 수리특성에 따른 유속분포의 변화 및 유속감소현상을 고려하여 평균유속을 추정할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 LSIV를 하천 유량측정에 적용하기 위해서 표면 유속에서 평균 유속을 추정하는 방법을 개발하였다. 이를 위해, 개수로 흐름의 연직유속분포에 대한 기존 이론을 검토하고, 다양한 하상 및 흐름조건에 대해 수리 실험을 수행하였다. 수리 실험 자료의 표면유

속으로부터 평균유속을 추정할 수 있는 방법 두 가지를 제시하고, 이들 방법과 기존의 방법들을 실제 하천 측정 자료와 비교 검토하였다.

2. 개수로 흐름의 연직유속분포 특성

2.1 연직방향 흐름장 분류 및 흐름영역별 유속분포

개수로 흐름에서 연직방향 흐름장의 분류는 자유표면 영역($0.6 \leq y/h \leq 0.1$), 중간영역($0.15 \sim 0.2 \leq y/h \leq 0.6$) 또는 중북구간, 그리고 벽면영역($y/h \leq 0.15 \sim 0.2$)의 세 영역으로 구분할 수 있다. 여기서 y 는 바닥에서 연직방향의 거리이고, h 는 수심이다. 중간영역은 바닥의 특성과 자유표면의 영향이 동시에 나타나는 구간으로 자유표면영역과 함께 외부영역이라 불리며, 벽면영역과 중북구간을 포함한 영역을 내부영역이라고 한다(Coles, 1956). 내부영역과 외부영역의 중북구간에서는 유속분포를 Eq. (1)과 같이 나타내며, 이를 대수법칙이라고 한다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{yu_*}{\nu} \right) + A \quad (1)$$

여기서 u 는 유속, u_* 는 마찰속도, ν 는 동점성계수, κ 는 von Karman 상수, A 는 적분상수이다. 그러나 대수법칙은 $y/h < 0.2$ 인 내부영역에서만 적용할 수 있고, 외부영역에서는 실제의 유속분포와 편차를 보인다고 알려져 왔다(Pope, 2000). 특히, $y/h > 0.6$ 인 자유표면영역에서는 무시할 수 없을 만큼 편차가 발생한다. 따라서 유속분포에 대한 이러한 편차를 재현할 수 있도록 Coles(1956)는 후류함수를 도입한 후류법칙인 Eq. (2)를 제안하였다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + A + W(y/h) \quad (2)$$

$$W(y/h) = \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2h} \right) \quad (3)$$

여기서 두 무차원 변수들은 $u^+ \equiv u/u_*$ 와 $y^+ = yu_*/\nu$ 와 같이 정의되고, Eq. (3)은 후류함수로서, 난류경계층 바깥의 후류에 의한 유속증가를 Coles의 후류강도계수 Π 로 나타낸 것이다.

Eq. (2)의 유속분포는 매끄러운 바닥조건인 개수로 흐름에 대한 난류흐름에 국한된다. 따라서 매끄러운 바닥조건인 개수로 흐름에 대한 유속 분포식을 실제 하천 흐름과 같이 거친 조도의 영향을 받는 흐름에 적용하기 위해서는 분포식에 대한 수정이 필요하다. 매끄러운 바

닥에 대한 후류법칙인 Eq. (2)는 조도의 영향을 고려하면 Eq. (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + A_r + W \left(\frac{y}{h} \right) \quad (4)$$

여기서 k_s 는 조고 (roughness height)이며, 상수 A_r 은 다음과 같이 주어진다.

$$A_r \equiv \frac{1}{\kappa} \ln (k_s^+) + A \quad (5)$$

여기서 A_r 산정을 위한 Eq. (5)는 무차원 조고 $k_s^+ \equiv k_s/u_*\nu$ 의 함수이며, 매끄러운 하상인 경우에도 적용할 수 있다. A_r 은 k_s^+ 가 증가할수록 점차적으로 감소하며, 매우 거친 하상의 경우 상수 8.5가 사용된다.

2.2 유속감소현상

Chow(1959)는 하천 흐름의 연직방향 유속분포는 항상 일정하지 않고 바닥조건, 단면의 불규칙한 형태 그리고 수로의 곡률여부에 따라 달라지며, 연직방향의 최대유속은 보통 수표면으로부터 $(0.05 \sim 0.25)h$ 만큼 내려간 위치에서 발생한다고 하였다. 이와 같이 최대유속이 수표면에서 발생하지 않고 수표면 아래에서 발생하는 현상을 유속감소현상(velocity-dip)이라고 한다. 유속감소 현상은 Sterns(1883)에 의해 처음 보고되었으며, Murphy(1904)에 의해 재차 확인되었다. Rajaratnam and Muralidhar(1969), Sarma, et al(1983)은 그 원인을 이차류(secondary currents)에 의한 운동량의 이동이라고 해석하였다. 즉 수표면의 큰 운동량이 이차류에 의해 바닥쪽으로 이동하기 때문에 최대유속은 수표면에서 어느 정도 내려간 지점에서 발생하며 최대유속 발생지점으로부터 수표면까지는 유속이 점차 감소하게 되는 것이다.

자유표면 부근의 유속감소 현상은 표면유속과 평균유속의 관계에 있어서 매우 중요하다. 기존 이론식인 후류법칙과 잘 일치하는 유속분포의 경우에는 매개변수 κ , A , W 값에 따라 평균유속과 표면유속의 비가 0.85~

0.86의 값을 보이며, 이 경우에는 최대유속이 수표면에서 발생한다. 그러나 실제 하천의 경우 평균유속과 표면유속의 비는 이차류에 의한 수표면의 유속감소 현상으로 이보다 큰 값을 갖게 되며, 표면유속과 평균유속의 비가 큰 값을 가질수록 최대유속은 수표면 아래에서 발생하고 최대유속이 발생하는 지점으로부터 수표면까지 유속은 감소한다.

따라서 실제 하천에 대해 기존의 이론식으로부터 표면유속과 평균유속의 관계를 고려하기 위해서는 수표면 영역의 유속감소 현상에 따른 영향을 고려해야 한다.

3. 개수로 유속분포 실험

표면유속으로부터 평균유속을 산정하기 위해서는 실제 개수로 흐름에 대한 연직방향 유속분포를 파악해야 한다. 그러나 기존의 유속분포식으로는 실제 하천에서의 수표면 영역의 유속감소 현상을 고려하지 못한다. 표면유속으로부터 평균유속을 추정하는데 있어서 주요 관심구간은 중북구간과 수표면 영역을 포함한 외부영역이기 때문에, 본 연구에서는 중북구간과 후류구간의 유속분포를 비교적 잘 표현할 수 있는 후류법칙을 적용하고, 개수로 유속분포실험을 통해 수표면 영역의 유속감소를 고려할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

3.1 수리실험

개수로 흐름의 연직유속분포에 대한 실험은 PIV를 이용하여 수행되었다. PIV 실험용 개수로는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 폭 0.3 m, 높이 0.3 m, 길이 12 m인 순환 수로이며, 수로의 바닥과 측벽은 레이저광의 투과 및 촬영이 가능하도록 유리로 제작되었다.

본 연구에서 사용된 PIV 시스템의 레이저는 Vlite 사의 이중헤드 Nd-YAG 레이저로 각각의 레이저는 7 ns 파장에서 최대 532 nm의 레이저 펄스를 발생시키며, 레이저광의 직경은 8 mm이다. 각각의 레이저 헤드로부터 발생된 레이저 빔은 실린더 렌즈에 의해 평면으로 변환된다. 전원 공급장치는 레이저 작동을 위해 전원을 공급하고, 내부 트리거의 신호를 조절하여 각각의 레이저를 1~10 Hz 범위에서 작동시킨다.

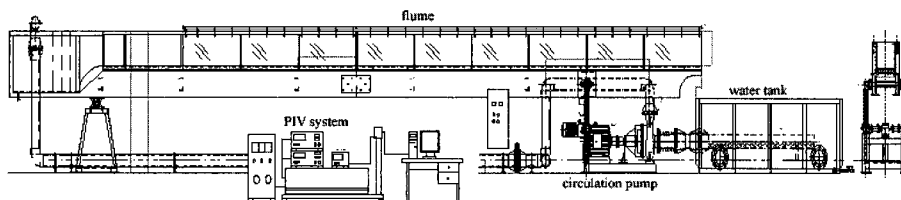


Fig. 1. Experimental flume for PIV analysis

영상의 촬영은 초당 500 프레임의 고속 카메라가 사용되었으며, 촬영된 영상은 1280×1024 화소의 해상도를 갖는다. 동조장치는 레이저 펄스와 영상 프레임간의 동기를 조절하게 되는데, 본 실험에서는 레이저와 카메라 프레임간의 동기를 조절하기 위해 각 레이저 헤드의 시간 간격은 10 ms, 각 레이저 헤드 펄스 쌍 사이의 시간 간격은 100 ms로 설정하였다.

개수로 흐름의 연직 유속분포에 대한 수리실험은 크게 두 가지 조건에 대해 수행되었다. 첫 번째는 하상조건에 따른 유속분포의 변화를 파악하고, 두 번째는 동일한 하상조건에 대해 Froude 수를 변화시켜가며 유속분포를 측정함으로써 흐름특성에 따른 유속분포의 변화를 파악하였다. 각 실험별 하상조건 및 수리조건은 Table 1과 같다. 하상조건은 매끄러운 조건과 k_s 를 각각 3 mm, 8 mm, 13 mm, 18 mm 및 23 mm의 6개 조건을 고려하였다. 하상의 조고를 맞추기 위해 자갈을 여러 회 반복하여 채가름하여 선별한 뒤 하상에 접촉제로 부착시켰다. Froude 수에 따른 수리조건의 변화는 동일한 수로경사에 대해 유량과 수심을 조절하였으며,

수심은 수로 하류부의 수문을 통해 조절하였다.

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 유속분포 측정결과

Table 1의 각 경우별 실험에 대한 연직방향 유속분포를 측정하고, 외부영역의 유속분포를 나타내는 후류법칙과 비교하였다. 매끄러운 조건의 경우에는 Eq. (2)와 비교하였으며, 거친 하상조건의 경우는 조도 k_s 를 고려한 Eq. (4)와 비교하였다. von Karman 상수 $\kappa = 0.41$ 를 사용하였으며, 적분상수 $A = 5.5$ 의 값을 사용하였다. 후류법칙의 후류강도계수 Π 는 흐름조건에 따라 0.1~0.2 범위의 값이 사용되었다. Fig. 2는 몇 가지 경우의 하상조건별 유속분포 측정결과와 후류법칙을 비교한 것을 예로 보인 것이다.

매끄러운 조건 및 하상조건별 유속측정결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 내부영역과 외부영역을 포함한 중복구간의 유속분포는 후류법칙과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 즉, $(0.15 \sim 0.2) < y/h < (0.6 \sim 0.8)$ 의 중복구간에서는 유속분포가 Eq. (2) 및 Eq. (3)의 후류

Table 1. Experimental conditions

Condition	h (m)	A (m ²)	U_m (m/s)	Q (m ³ /s)	Fr	Condition	h (m)	A (m ²)	U_m (m/s)	Q (m ³ /s)	Fr			
smooth	Case1-1	0.172	0.052	0.366	0.019	0.282	$k_s = 13$ mm	Case4-3	0.172	0.052	0.366	0.019	0.282	
	Case1-2	0.153	0.046	0.349	0.016	0.285		Case4-4	0.118	0.035	0.307	0.011	0.286	
	Case1-3	0.118	0.035	0.308	0.011	0.286		Case4-5	0.136	0.041	0.334	0.014	0.289	
	Case1-4	0.136	0.041	0.336	0.014	0.291		Case4-6	0.13	0.039	0.465	0.018	0.412	
	Case1-5	0.134	0.040	0.532	0.021	0.464		Case4-7	0.1	0.030	0.604	0.018	0.610	
	Case1-6	0.13	0.039	0.579	0.023	0.512		$k_s = 18$ mm	Case5-1	0.225	0.068	0.253	0.017	0.170
	Case1-7	0.116	0.035	0.652	0.023	0.611			Case5-2	0.118	0.035	0.282	0.010	0.262
	Case1-8	0.107	0.032	0.688	0.022	0.672	Case5-3		0.136	0.041	0.306	0.012	0.265	
$k_s = 3$ mm	Case2-1	0.228	0.068	0.308	0.021	0.206	Case5-4		0.172	0.052	0.348	0.018	0.265	
	Case2-2	0.181	0.054	0.382	0.021	0.286	Case5-5		0.153	0.046	0.329	0.015	0.269	
	Case2-3	0.133	0.040	0.594	0.024	0.520	Case5-6		0.12	0.036	0.504	0.018	0.464	
	Case2-4	0.109	0.033	0.740	0.024	0.716	Case5-7		0.12	0.036	0.663	0.024	0.611	
$k_s = 8$ mm	Case3-1	0.229	0.069	0.234	0.016	0.156	Case5-8		0.097	0.029	0.616	0.018	0.632	
	Case3-2	0.224	0.067	0.326	0.022	0.220	$k_s = 23$ mm	Case6-1	0.213	0.064	0.276	0.018	0.191	
	Case3-3	0.172	0.052	0.289	0.015	0.222		Case6-2	0.172	0.052	0.353	0.018	0.272	
	Case3-4	0.158	0.047	0.487	0.023	0.391		Case6-3	0.118	0.035	0.304	0.011	0.283	
	Case3-5	0.121	0.036	0.492	0.018	0.452		Case6-4	0.153	0.046	0.349	0.016	0.285	
	Case3-6	0.12	0.036	0.661	0.024	0.609		Case6-5	0.136	0.041	0.332	0.014	0.287	
	Case3-7	0.097	0.029	0.635	0.018	0.651		Case6-6	0.12	0.036	0.503	0.018	0.464	
$k_s = 13$ mm	Case4-1	0.228	0.068	0.251	0.017	0.168		Case6-7	0.124	0.037	0.57	0.021	0.517	
	Case4-2	0.153	0.046	0.344	0.016	0.281		Case6-8	0.098	0.029	0.597	0.018	0.608	

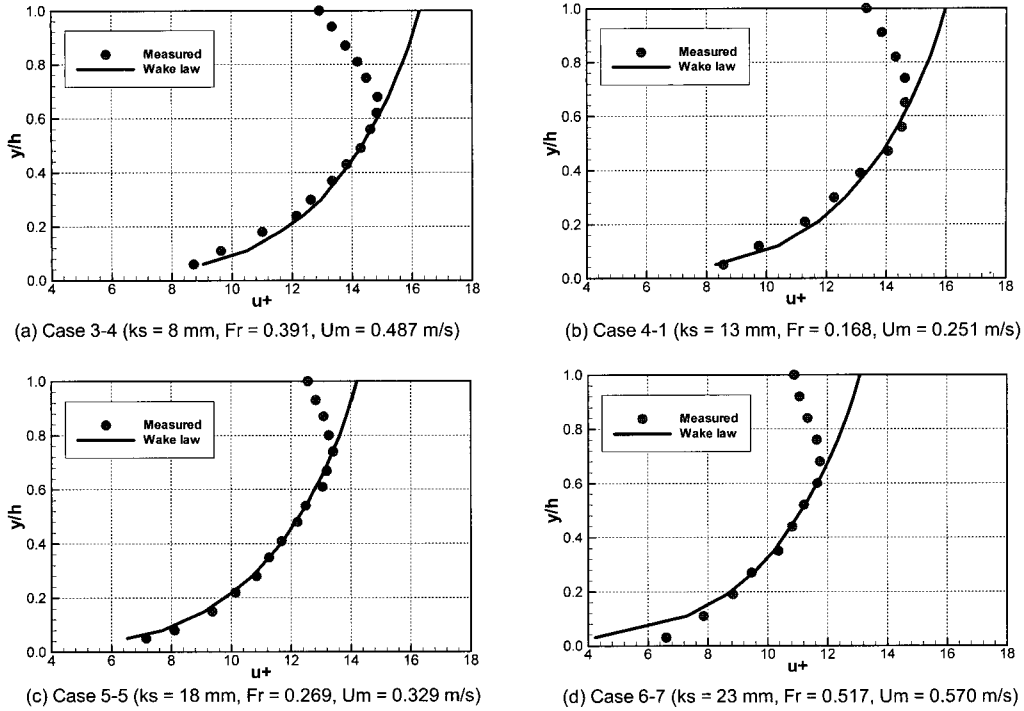


Fig. 2. Comparison of velocity distributions of experiments and the wake-law

법칙과 잘 일치한다. 그러나, 최대유속이 발생하는 지점에서부터 수표면까지 수표면 영역에서는 후류법칙이 유속감소현상을 나타내지 못하기 때문에, 수표면 영역의 유속분포와는 차이를 보이는 것으로 나타났다.

3.2.2 수표면 영역의 유속분포 특성

수표면 영역의 유속분포의 특성은 표면유속으로부터 평균유속을 환산하는데 있어서 매우 중요한 요소이기 때문에, 본 연구에서는 수리실험결과를 토대로 수표면 영역의 유속분포 특성을 검토하였다.

개수로 흐름에서 연직방향에 대한 유속분포를 측정 한 결과, 수표면 영역의 유속분포는 최대유속이 발생하는 지점 y_{max} 에서부터 수표면까지 유속이 감소하여 대수법칙 및 후류법칙에 의한 유속분포와는 일치하지 않는다. 이러한 수표면 영역의 유속감소에 대한 정량적인 해석은 Henderson (1966)에 의해 이차류에 대한 항으로써 설명되기는 했으나, 이에 대해 이론적으로 명확하게 해석한 연구를 찾아보기 힘들다(Yang, et al., 2004). 또한, 유속감소가 발생하는 수표면 영역의 유속 분포도 아직까지 확립되지 못하고 있다(Nezu and Nakagawa, 1993). 본 연구에서는 개수로 흐름에서 수표면 유속분포의 특성을 나타내는 유속감소의 영향을 검토하기 위해, Froude 수 및 하상조건에 따른 수표면 영역의 유속분포 특성 및 유속감소 현상에 미치는 영향

을 파악하였다.

(1) 하상조도에 따른 수표면 영역 유속분포 특성

하상조건에 따른 유속분포의 형태를 검토하기 위해 Fig. 3에서 보는 바와 같이 동일한 Froude 수에서 하상 조건 변화에 따른 유속분포를 도시하였다. Froude 수가 0.61때 각 하상조건별 유속분포를 비교한 결과, 매끄러운 조건에 비해 조도 k_s 의 크기가 증가함에 따라 바닥 영역의 유속이 감소하는 것으로 나타났으며, 중간영역에서는 유속이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 최대유속 발생지점에서부터 수표면까지 유속감소가 발생하는 수표면 영역의 유속분포의 형태 및 유속감소는 하상조건에 따라 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 개수로 흐름의 특성이 내부영역에서는 흐름이 마찰속도 및 점성길이에 좌우되지만 수표면 영역에서는 최대유속과 수심에 의존하기 때문인 것으로 보인다(Nezu and Nakagawa, 1993; Pope, 2000). 따라서 내부영역에서는 하상조건이 유속분포에 영향을 미치지 않지만 외부영역 특히 수표면 영역에서는 하상조건의 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

(2) Froude 수에 따른 수표면 영역의 유속분포 특성

Froude 수 변화에 따른 수표면 영역의 유속분포의 특성을 파악하기 위해서 각 실험의 측정결과를 도시하

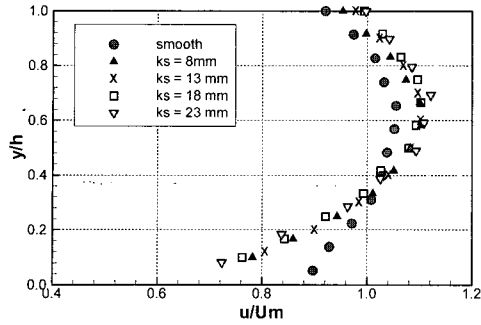


Fig. 3. Velocity change due to roughness height change at $Fr = 0.61$

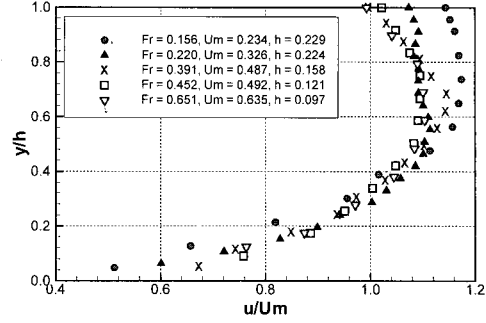


Fig. 4. Velocity change due to Froude number change at $k_s = 8 \text{ mm}$

고 이를 분석하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 Froude 수 변화에 따른 수표면 영역의 유속분포의 특성은 Froude 수가 증가함에 따라 최대유속 발생지점으로부터 수표면까지 유속감소 현상이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수표면 영역의 흐름 특성이 외부 영역 변수인 최대유속과 수심에 크게 좌우되기 때문인 것으로 판단된다. Sarma, et al.(1983)의 실험 연구에서도 Froude 수가 수표면 영역의 유속감소 크기에 영향을 미친다고 하였다. 또한 평균유속의 위치는 하상조건과 Froude 수에 영향을 받지 않고 대략 $y/h = 0.4$ 에서 발생하는 것으로 나타났다.

4. 표면유속을 이용한 평균유속의 추정

4.1 평균유속 추정방법의 개요

개수로 흐름의 연직유속분포를 측정된 결과, 중복구간에서는 유속분포가 후류법칙과 잘 일치하나, 수표면 영역에서는 유속감소현상으로 인해 후류법칙과는 일치하지 않는다. 따라서 후류법칙에 의한 유속분포를 적용하여 평균유속을 산정할 경우 수표면 영역의 유속감소를 고려하지 못하기 때문에 평균유속이 과소 산정된다. 이러한 이유로 후류법칙은 자유표면 영역의 유속분포를 설명하기에는 부족함이 있다. 그러나 개수로 흐름의 전체영역을 설명할 수 있는 더 적절한 공식이 없기 때문에, 본 연구에서는 표면유속과 평균유속의 관계를 도출하는 과정에 후류법칙을 적용하였다.

표면유속으로부터 유속분포를 추정할 때, 수표면의 유속감소의 영향을 고려하지 않고, 후류법칙에 의한 유속 분포식을 적용할 경우, Fig. 5의 가는 실선으로 표시된 유속분포와 같다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 후류법칙에 의해 계산된 유속 분포는 평균유속이 실제 유속분포에 비해 작은 값이 산정된다. 만약 후류법칙에 의한 유속분포의 평균유속이 점선으로 표시된

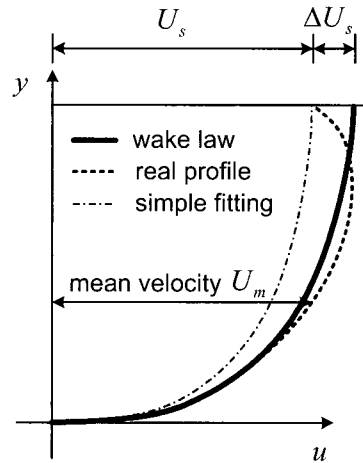


Fig. 5. Definition of notations

실제 유속분포의 평균유속과 동일한 값을 가질 수 있도록 후류법칙의 유속분포를 보정(굵은 실선)한다면 정확한 평균유속을 추정할 수 있다. ΔU_s 는 보정되지 않은 후류법칙의 유속분포와 보정된 유속분포의 표면유속 차이이다. 두 유속분포간의 표면유속 차이(ΔU_s)와 측정된 표면유속(U_s)의 비(표면유속보정비)를 새로운 기호 $\Lambda \equiv \Delta U_s / U_s$ 로 나타내기로 한다(Fig. 5). 앞으로, 대문자 U 는 유속의 시간평균, 하첨자 s 는 수표면, m 은 연직평균을 의미한다. 만일 Λ 의 분포나 특성을 안다면, 측정된 표면유속으로부터 평균유속을 손쉽게 산정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 수리 실험에서 측정된 유속결과를 분석하여 각 실험조건에 따른 Λ 를 산정하였다. 그 결과, Froude 수가 증가할수록 수표면 영역의 유속감소가 크게 나타나고, Froude 수가 증가할수록 Λ 도 증가하는 것으로 나타났다. 그런데, Froude 수는 미지인 평균 유속의 함수이므로 실제 적용하기가 곤란하다. 따라서, Λ 의 변화를 이미 알고 있는 값인 표면유속 Froude수

($Fr_s \equiv U_s/\sqrt{gh}$)의 변화에 따라 다시 도시하면 Fig. 6과 같다. 이때 Λ 와 Fr_s 와의 관계를 선형회귀분석하면 다음 Eq. (6)과 같다.

$$\Lambda = 0.268Fr_s + 0.0038 \quad (6)$$

여기서 Eq. (6)의 결정계수는 $R^2 = 0.64$ 이며, Λ 의 평균값은 0.1이다. 즉, 평균적으로 U_s 에 1.1을 곱하면, 보정된 표면 유속 ($U_s + \Delta U_s$)를 구할 수 있다.

표면유속을 보정하는 방법으로 Eq. (6)을 이용하여 Λ 를 산정하는 방법(방법 I)과 Λ 의 평균치인 0.1을 이용하는 방법(방법 II)을 생각할 수 있다. 이 과정을 다시 살펴보면, 측정된 표면유속을 Eq. (6)에 의해서 산정된 ΔU_s 를 이용하여 보정하고, 보정된 표면유속에 의한 후류법칙의 유속분포를 수심 적분하여 평균 유속을 산정하는 것이다.

4.2 표면유속과 평균유속의 관계 검증

4.2.1 적용방법

표면유속으로부터 평균유속을 추정하기 위한 방법을 검증하기 위해 피산, 팔당, 내성 지점에서 측정한 유속 분포 자료(한국건설기술연구원, 2002)를 이용하였으며, 경안천과 능원천의 유속분포를 직접 측정하였다. 표면 유속으로부터 평균유속을 추정하는 방법은 Table 2와 같이 다섯 가지가 있다. 이들 방법을 이용하여 평균 유속을 추정하고, 이 결과를 측정치의 평균유속과 비교하

였다 (Table 3). 이 표의 방법 I과 방법 II는 본 연구에서 개발된 방법이며, 방법 WAKE, 방법 USGS, 방법 FRS는 기존의 연구에서 제시된 방법들이다.

4.2.2 검증결과

각 지점별로 측정된 유속분포로부터 산정된 평균유속과 다섯 가지 방법을 이용하여 표면유속으로부터 평균유속을 산정한 결과는 Table 3과 같다. 괄호 안에 표시된 오차는 평균유속이 작게 산정되어 발생한 오차이다. 후류법칙을 적용한 WAKE 방법과 USGS 방법의 경우 수표면영역의 유속감소현상을 고려하지 못하기 때문에 실제 평균유속에 비해 작은 값이 산정된 것을 알 수 있으며, 10% 이상의 오차가 발생하였다. 이에 비해 방법 I과 방법 II는 10% 이내의 정확성을 보이는 것으로 나타났으며, 각 지점별 평균오차를 계산한 결과 6% 이내의 정확도를 보였다. 또한 수리실험결과와는 달리 방법 II가 4%이내의 평균오차를 보여서, 방법 I에 비해 더 정확한 것으로 나타났다.

방법 FRS의 경우에는 방법 II와 유사한 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 조도의 영향을 고려한 후류법칙을 보정한 방법 I, II와는 달리 방법 FRS는 Froude 수에 따른 영향만을 고려하기 때문에 경안천과 같이 수심에 비해 조도 k_s 의 값이 큰 경우에는 10% 이상의 큰 오차를 보이는 것으로 나타났다. 경안천의 경우 수심은 0.3~0.5 m 범위에 대해 k_s 는 0.1~0.15의 범위로 나타났다. 따라서 Fr_s 와 U_m/U_s 의 관계를 이용

Table 2. Methods for estimating mean velocity from surface velocity

Methods	Applications	Remarks
I	relation of Fr_s and Λ , Eq. (6)	correction of WAKE using Λ
II	use of $\Lambda=0.1$ in method I	
WAKE	velocity profile of wake law	
USGS	$U_m/U_s = 0.85$	USGS(1982)
FRS	relation of Fr_s and U_m/U_s	

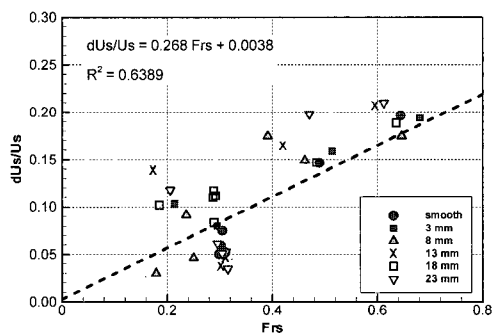


Fig. 6. Change of Λ due to Fr_s change

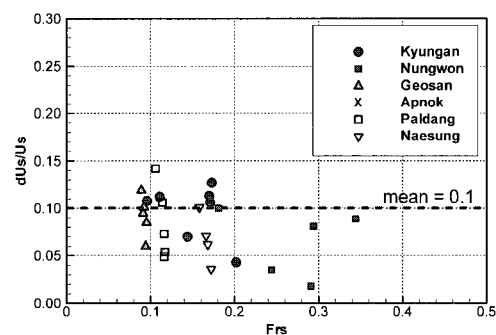


Fig. 7. Relation of Fr_s and Λ in field measurements

Table 3. Results for evaluation of the relation of surface velocity and mean velocity

	measured U_m (m/s)	Method WAKE		Method USGS		Method FRS		Method I		Method II	
		U_m (m/s)	Error(%)	U_m (m/s)	Error(%)	U_m (m/s)	Error(%)	U_m (m/s)	Error(%)	U_m (m/s)	Error(%)
Geosan	0.246	0.225	(8.8)	0.233	(5.4)	0.242	(1.6)	0.231	(6.3)	0.247	0.3
	0.249	0.226	(9.1)	0.235	(5.7)	0.244	(1.9)	0.233	(6.5)	0.249	0.0
	0.246	0.219	(10.9)	0.228	(7.6)	0.237	(3.9)	0.225	(8.5)	0.241	(2.0)
	0.252	0.233	(7.6)	0.241	(4.2)	0.251	(0.2)	0.240	(4.9)	0.256	1.6
	0.244	0.230	(5.6)	0.238	(2.1)	0.248	2.0	0.237	(2.9)	0.253	3.9
absolute value averaging			8.4		5.0		1.9		5.8		1.6
Paldang	0.756	0.720	(4.8)	0.707	(6.6)	0.741	(2.1)	0.745	(1.5)	0.792	4.7
	0.768	0.716	(6.8)	0.703	(8.5)	0.737	(4.1)	0.741	(3.5)	0.788	2.6
	0.781	0.706	(9.5)	0.693	(11.2)	0.726	(7.0)	0.731	(6.4)	0.777	(0.5)
	0.750	0.656	(12.5)	0.644	(14.2)	0.673	(10.3)	0.677	(9.7)	0.722	(3.8)
	0.766	0.726	(5.2)	0.713	9.7	0.747	(2.4)	0.752	(1.8)	0.799	4.3
absolute value averaging			7.8		9.5		5.2		5.7		3.2
Naesung	0.376	0.342	(9.2)	0.321	(14.6)	0.341	(9.4)	0.358	(5.0)	0.376	(0.1)
	0.383	0.357	(6.8)	0.336	(12.3)	0.357	(6.8)	0.374	(2.3)	0.393	2.6
	0.385	0.372	(3.3)	0.350	(9.1)	0.373	(3.1)	0.391	1.5	0.409	6.4
	0.382	0.357	(6.6)	0.336	(12.2)	0.357	(6.6)	0.374	(2.1)	0.393	2.7
	0.385	0.362	(6.0)	0.341	(11.6)	0.363	(5.9)	0.380	(1.4)	0.398	3.4
absolute value averaging			6.4		11.9		6.4		2.4		3.0
Kyungan	0.201	0.184	(8.5)	0.187	(7.0)	0.195	(3.2)	0.189	(5.9)	0.200	(0.7)
	0.267	0.245	(8.3)	0.255	(4.5)	0.272	1.7	0.257	(3.8)	0.270	(1.1)
	0.320	0.308	(3.9)	0.323	0.8	0.355	10.8	0.326	1.7	0.339	5.8
	0.305	0.274	(10.2)	0.285	(6.7)	0.354	16.2	0.287	(6.0)	0.301	(1.2)
	0.300	0.266	(11.5)	0.280	(6.9)	0.353	17.5	0.280	(6.8)	0.293	(2.6)
	0.230	0.218	(5.2)	0.225	(2.0)	0.238	3.4	0.227	(1.3)	0.237	3.0
absolute value averaging			9.1		5.8		1.92		5.6		3.1
Nungwon	0.233	0.233	(9.2)	0.204	(12.6)	0.218	(6.7)	0.223	(4.5)	0.233	(0.1)
	0.292	0.282	(3.5)	0.272	(6.9)	0.296	1.3	0.302	3.4	0.301	6.2
	0.430	0.430	(7.4)	0.381	(11.4)	0.419	(2.5)	0.431	0.3	0.438	1.9
	0.566	0.566	(8.1)	0.496	(12.3)	0.554	(2.0)	0.569	0.6	0.572	1.1
	0.462	0.462	(1.5)	0.435	(5.8)	0.481	4.2	0.494	7.0	0.501	8.4
absolute value averaging			5.9		9.8		3.3		3.2		3.5

한 방법 FRS의 경우 수심과 조도비를 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 다섯 지점에서 측정된 유속분포로부터 Λ 를 산정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 Fr_s 의 범위 0.08~0.37에 대해 Λ 가 0.014~0.193의 범위를 보이고 있으나, Fr_s 의 변화에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 있다. 그러나, 현장 검증 자료는 Froude 수의 범위가 0.4이하인 자료들뿐이기 때문에 좀 더 광범위한 자료를 이용한 검증이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 표면유속으로부터 평균유속을 환산할 수 있는 방법을 개발하기 위해 여러 가지 하상조건에 대해 개수로 유속분포를 측정하고 이를 분석하였다. 표면유속과 평균유속의 관계를 도출하는 과정에 후류법칙을 이용하고, 유속감소현상을 고려하기 위해 표면유속

보정량 ΔU_s 을 도입하였다. 또한, 수리 실험결과를 바탕으로 표면유속과 평균유속비 U_m/U_s 를 이용하여 표면유속으로부터 평균유속을 산정하는 방법도 제시하였다. 제안된 방법의 현장 적용성을 검증하기 위해 실제 하천에서 유속분포를 측정하여 수리실험 결과로부터 제시된 표면유속의 평균유속 추정방법을 검증하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 하상조건에 따른 개수로 흐름의 유속분포 변화를 측정된 결과, 최대유속은 Froude 수에 따라 바닥에서부터 0.6 ~ 0.8h 지점에서 발생하며, 최대 유속발생 지점으로부터 수표면까지 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 수표면 부근의 유속감소 현상은 개수로 유속분포식으로 많이 사용되고 있는 후류법칙으로도 설명할 수 없는 현상이며, 단순히 후류법칙에 의한 유속 분포만으로 표면유속과 평균유속관계를 도출하는 것은 문제가 있다고 판단된다.

둘째, Froude 수가 증가함에 따라 수표면의 유속감소 현상은 크게 증가하며, 이에 따라 평균유속과 표면유속의 비가 증가하여 Froude 수가 0.5이상이 되면 표면유속이 평균유속보다 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 조도가 유속감소현상에 미치는 영향은 Froude 수에 비해 미미한 것으로 나타났다.

셋째, 표면유속 보정량(ΔU_s)은 후류법칙의 유속분포를 적용할 경우 수표면영역의 유속감소 현상으로 인해 평균유속이 과소 산정되는 것을 보정하기 위한 것이다. 또한, 표면유속보정비(Λ)를 정의하고 수리실험을 통해 Λ 의 변화를 관찰하였다. 실험결과 Froude 수가 증가함에 따라 Λ 가 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, Λ 의 평균치는 약 0.1로 나타났다.

넷째, 개발된 두 가지 방법과 기존의 세 가지 방법을 비교한 결과, 유속감소현상을 고려하지 않고 후류법칙을 단순히 적용한 방법과 USGS의 방법($U_m/U_s = 0.85$)은 평균유속이 측정치에 비해 과소 산정되는 것으로 나타났으며, 최대 10% 이상의 평균오차가 발생하였다. 따라서 표면유속을 이용하여 좀 더 정확한 평균유속을 추정할 경우에는 유속감소 현상을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

다섯째, 표면유속 보정량을 고려하여 후류법칙을 평수시 실제 하천에 적용한 경우, 6% 이내의 평균오차가 발생하였다. 그러나 수리실험결과와는 달리 Froude 수와 Λ 의 관계를 적용한 방법에 비해 평균치 $\Lambda = 0.1$ 을 적용한 방법이 4% 이내의 평균오차를 보여 더 정확한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실제 하천 측정시 Λ 값이 수리실험결과와는 달리 Froude 수에 대해 선형적으로 변화하지 않기 때문이며, 따라서 실제 하천의 경우 Λ 의 변화는 단지 Froude 수만으로 결정하기는 어렵다고 판단된다.

마지막으로, 후류법칙에 의한 유속분포를 사용하지 않고 단순히 Froude 수와 U_m/U_s 의 선형적 관계를 이용한 방법도 대부분의 경우 후류법칙을 이용한 방법과 비슷한 정확도를 보였다. 그러나, 경안천과 같이 수심과 조도의 비가 큰 경우에는 오차가 큰 것으로 나타났다. 따라서 이 방법을 적용하는 경우에는 대상지점의 조도와 수심비를 고려한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 한국건설기술연구원 (2002). 지표수조사기술개발 보고서; 1차년도, 수자원의 지속적인 확보기술 개발 사업단.
- Cheng, R. T., and Gartner J. W. (2003). "Complete velocity distribution in river cross-sections measured by acoustic instruments." *Proceedings of the IEEE/DES 7th Working Conference in Current Measurement Technology*, pp. 21-26.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill.
- Coles, D. (1956). "The law of the wake in the turbulent boundary layer." *J. of Fluid Mechanics*, 1, pp. 191-226.
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan, New York.
- Murphy, C. (1904). "Accuracy of stream measurement." *Water Supply and Irrigation Paper*, 95, pp. 111-112.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, IAHR Monograph series, Balkema, Rotterdam.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent flows*, Cambridge University Press.
- Rajaratnam, M., and Muralidhar, D. (1969). "Boundary shear distribution in rectangular open channels." *La Houille Blanche*, 24(6), pp. 603-609.
- Rood, E. P., and Katz, J. (1994). "Free-surface turbulence." *ASME-FED*, 181, pp. 1-14.
- Sarma, K. V. N., Lakshminarayana, P., and Roa, N. S. L. (1983). "Velocity distribution in smooth rectangular open channels." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(2), pp. 270-289.
- USGS (1982). *Measurement and computation of stream flow; Vol. 1, Measurement of stage and discharge*, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2175.
- Yang, S. Q., Tan, S. K., and Lim, S. Y. (2004). "Velocity distribution and dip-phenomenons in smooth uniform open channel flows." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(12), pp. 1179-1186.

(논문번호:05-108/접수:2005.07.20/심사완료:2005.09.26)