

기본적인 수리학적 자료에 의한 유속의 공간적 분포 특성

고덕구¹, 추태호^{2*}

Character for Spatial Distribution of Velocity Using Simple Hydraulic Data

Deuk-Koo Koh¹ and Tai-Ho Choo^{2*}

요약 본 연구에서는 Brooks(1954)^[1] 연구에서 유사가 포함된 경우와 순수한 물인 경우를 다 포함하여 심층적으로 시행한 실험실 실측자료를 사용하였다. 이 논문에서 Manning과 Chiu의 연결고리로 제시한 $F(M)$ 과 Manning의 n , R (동수반경), I (수로경사)와 같은 기초적인 입력자료 만을 사용하여, 수로수직단면의 전체유속분포를 잘 표현할 수 있고 동시에 그동안 취득하기 어려운 최대유속(u_{max})도 실측하지 않고 손쉽게 산정할 수 있음을 증명하였다.

Abstract In this study, Chiu's velocity distribution equation recently developed from the probability and entropy concepts is used to establish a linkage between the mean velocity obtained from the Manning's equation and the corresponding velocity distribution in a channel cross section. The linkage to be established enables computing the velocity distribution along with the mean velocity, from simple hydraulic data such as Manning's n , hydraulic radius and channel slope irrespective of including sediment or not.

Key Words : simple inputs, velocity distribution, Chiu's equation, Manning's n , entropy M .

1. 서론

오늘날 수리학 분야에서 Manning의 유속공식과 최근에 그 효용성이 입증된 Chiu의 유속공식은 두 공식이 평균유속을 산정할 수 있다는데 공통점을 갖고 있으며 이를 실무에 적용하여 그 활용성을 높일 수 있는 방안을 고려하였다. 기존의 Manning 공식은 간단한 수리량으로부터 하천의 가장 필요한 인자들을 손쉽게 산정할 수 있는 공식이며, Chiu 유속공식은 기존의 많은 논문에서 증명하였듯이 수로바닥에서부터 수표면까지 전체유속분포를 잘 표현해 줄 수 있는 2차원공식이다.

따라서 본 연구에서는 이들의 장점을 최대한 활용하여, 간단한 수리학적 입력자료부터 전체 유속분포를 표현하는데 그 목적이 있다. 기존의 연구는 Chiu(1989)^[2]와 Choo(1990)^[3]의 논문에서 일부 언급된 것 외에는 찾아볼 수 없으며 이에 대한 최초 연구에서 Chiu(1989)는 Manning과 Chiu의 연결고리로 제시한 $F(M)$ 을 이용하여

수심에 비해 하천 폭이 매우 큰 광폭수로에 적용하였다. Choo(1990)는 $F(M)$ 과 수로형상과의 관계를 이용하여 수심에 비해 하천 폭이 적은 수로에 적용하여 좋은 결과를 얻었으나, 본 연구에서와 같이 유사가 포함된 경우와 순수한 물의 경우를 동시 고려한 경우는 없다.

본 연구에서는 기본적인 수리학적 입력자료 만을 가지고, 수로수직단면의 전체유속분포를 잘 표현할 수 있으며, 동시에 그동안 취득하기 어려운 최대유속(u_{max})도 실측하지 않고 손쉽게 산정할 수 있음을 증명하였다.

2. 이론 특성

본 연구에서 사용된 이론적 근거는 Chiu(1987, 1983, 1986, 1987)^[4-8], Chiu와 Chiu(1989)^[9], Chiu와 Murraray(1992)^[10], Chiu와 Said(1995)^[11] 논문이나 추태호(1999, 2002)^[12-13]의 논문을 인용하였다.

¹한국수자원공사 수자원연구원

²부산대학교 산업토목학과

*교신저자: 추태호(thchoo@pusanu.ac.kr)

$$\bar{u} = \int_0^{u_{max}} up(u)du = u_{max} \left[\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right] \quad (1)$$

$$\bar{u} = \left[\frac{M}{e^M - 1} \right] \left[\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right] \left[\frac{\bar{h}_c g R I}{\nu} \right] = \frac{\bar{h}_c g R I}{\nu F(M)} \quad (2)$$

$$F(M) = (e^M - 1) [M e^M (e^M - 1)^{-1} - 1]^{-1} \quad (3)$$

여기서 $F(M)$ 은 Chiu의 유속분포공식의 파라메타인 M 의 함수로서 전체유속분포패턴을 나타낸다.

한편, 현재까지 가장 보편적인 Manning의 유속공식은 식(4)와 같다.

$$\bar{U} = \frac{\psi}{n} R^{\frac{2}{3}} I_f^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

따라서 Chiu의 유속공식과 Manning의 유속공식사이의 관계를 이해하기 위해서 Chiu의 평균유속과 Manning의 평균유속을 비교할 수 있는 방법은 식(5) 및 식(6)에 의한 것과 식(7) 및 식(8)에 의한 것으로 구분된다. 본 연구에서는 두 번째 방법에 의하여 산정된 $F(M)$ 식을 이용하여 Manning의 평균유속과 수로 단면내 유속의 공간적 분포사이의 연결고리 역할을 규명하였다.

1) 식(5) 및 식(6)의 경우에는 일반적인 자연하천이나 실험수로 등에서 측정된 일반적인 수리량(Q, R, I_f)을 가지고는 Manning의 조도계수(n) 또는 평균유속(\bar{u})을 산정하는데 어려움이 있다. 즉, Manning의 조도계수(n) 또는 최대유속(u_{max})을 추정하거나 실측하여야 하는 것이다.

$$\bar{u} = \frac{\psi}{n} R^{\frac{2}{3}} I_f^{\frac{1}{2}} = u_{max} \left[\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right] \quad (5)$$

$$n = \frac{\psi R^{\frac{2}{3}} I_f^{\frac{1}{2}}}{u_{max}} \left[\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right]^{-1} \quad (6)$$

2) 식(7) 및 식(8)의 경우에는 일반적인 자연하천이나 실험수로 등에서 측정된 일반적인 수리량(Q, R, I_f)만 가지고도 Manning의 조도계수(n) 또는 평균유속(\bar{u})을 손쉽게 산정할 수 있는 큰 장점이 있다. 즉, Manning의 조도계수(n) 또는 최대유속(u_{max})을 추정하거나 실측할 필요가 없다.

$$\bar{u} = \frac{\psi}{n} R^{\frac{2}{3}} I_f^{\frac{1}{2}} = \frac{\bar{h}_c g R I_f}{\nu F(M)} \quad (7)$$

$$n = \frac{F(M) \nu \psi}{\bar{h}_c g R^{\frac{1}{3}} I_f^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

본 연구에서는 Manning과 Chiu의 연결고리로 제시한 $F(M)$ 과 Manning의 n, R(동수반경), I(수로경사)와 같은 기본적인 수리학적 입력자료 만을 가지고도, 수로수직단면의 전체유속분포를 잘 표현할 수 있음을 증명하는데 있기 때문에 식(8)을 재정리하면 Manning의 평균유속과 수로 단면 내 유속의 공간적 분포사이의 연결고리 역할을 해주는 식(9)와 식(10)과 같이 된다.

$$F(M) = \frac{[\bar{h}_c \cdot g \cdot n \cdot R^{\frac{1}{3}} I_f^{\frac{1}{2}}]}{\nu \cdot \psi} \quad (9)$$

$$F(M) = \frac{[\bar{h}_c \cdot g \cdot n^2 \cdot \bar{I}]}{\nu \cdot \psi^2 R^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

표 1. 순수한 물인 경우의 유속측정결과표

unit: y(ft), u(ft/sec)

table.# (ft)	table 15		table 16		table 17		table 18		table 19	
	0.232		0.171		0.115		0.225		0.179	
verti#	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u
1	0.013	3.1	0.01	2.64	0.01	2.12	0.01	1.32	0.01	2.6
2	0.023	3.34	0.015	2.8	0.015	2.24	0.015	1.39	0.02	2.86
3	0.048	3.68	0.02	2.93	0.02	2.34	0.02	1.47	0.04	3.14
4	0.073	3.88	0.03	3.08	0.03	2.49	0.03	1.54	0.08	3.45
5	0.098	4.03	0.05	3.29	0.05	2.66	0.05	1.66	0.12	3.63
6	0.148	4.16	0.07	3.44	0.07	2.78	0.07	1.74	0.16	3.64
7	0.178	4.16	0.1	3.62	0.1	2.86	0.1	1.84	0.168	3.63
8	0.208	4.12	0.125	3.69			0.15	1.93		
9	0.213	4.11	0.14	3.72						
10			0.15	3.72						

표 2. 유사가 포함된 경우의 유속측정결과표

unit: y(ft), u(ft/sec)

sec.# (ft)	Run 2		RUN 3		RUN 4		RUN 6				RUN 7		RUN 21		RUN 29		RUN29-1	
	0.284		0.243		0.236		0.195				0.243		0.236		0.28		0.28	
verti.#	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u
1	.01	1.53	.011	1.34	.007	1.34	.011	1.48	.041	2.06	.012	1.45	.011	1.5	.013	1.5	.013	1.46
2	.015	1.7	.016	1.56	.012	1.6	.011	1.6	.041	2.09	.017	1.7	.016	1.59	.018	1.59	.018	1.58
3	.02	1.83	.021	1.65	.017	1.72	.016	1.66	.051	2.15	.022	1.81	.021	1.7	.023	1.69	.023	1.65
4	.03	1.96	.031	1.83	.027	1.88	.021	1.81	.051	2.18	.032	1.99	.031	1.86	.033	1.8	.033	1.79
5	.05	2.17	.061	2.14	.057	2.21	.021	1.88	.061	2.24	.062	2.23	.061	2.18	.063	2.09	.063	2.1
6	.075	2.31	.121	2.41	.117	2.55	.026	1.85	.061	2.3	.122	2.49	.101	2.44	.103	2.35	.103	2.36
7	.109	2.49	.161	2.49	.157	2.7	.026	2.01	.061	2.33	.162	2.62	.141	2.64	.163	2.61	.163	2.6
8	.159	2.63	.201	2.52	.197	2.72	.031	1.98	.101	2.49	.202	2.63	.181	2.68	.223	2.65	.223	2.64
9	.209	2.66	.231	2.54	.217	2.71	.031	2	.101	2.51			.211	2.67	.226	2.56	.246	2.61
10	.269	2.59					.041	1.98	.141	2.51							.266	2.56
11							.041	2.03	.141	2.72								
12							.041	2.06	.161	2.72								

3. 사용자료

4. 결과

본 연구에서는 Brooks(1954)가 실험실에서 심층적으로 시행한 실측자료를 사용하였다. 40ft Flume 실험 장치에서 측정된 Raw Data는 [표 1] 및 [표 2]와 같이 자세히 정리하여 추후 유사한 연구수행 시 도움이 될 수 있도록 하였다. [표 1]에서 table15부터 19까지는 순수한 물인 경우이고 [표 2]에서 Run2부터 Run7까지는 유사입경(Ds)이 0.159mm인 경우, Run21부터 Run27-1까지는 유사입경(Ds)이 0.103mm인 경우를 나타내고 있다.

4.1 Manning과 Chiu의 매개변수 산정

유속측정결과를 적용하여 Manning의 유속공식의 주요 변수 및 Chiu의 유속공식의 주요 변수들을 추정하였다. 산정된 주요매개변수들과 Manning의 유속공식 및 Chiu의 유속공식을 연결하여 유도된 식(9)와 식(10)식으로부터 F(M)을 산정한 결과를 주요변수 및 관련 수리학적 자료를 나타낸 것은 [표 3] 및 [표 4]와 같다.

표 3. 순수한 물인 경우의 각종 수리량, 매개변수 및 F(M)

table.# (ft)	B(ft)	D(ft)	온도	h(ft)	umax (ft/sec)	M	u (ft/sec)	u/umax
15	0.8750	0.232	18.0	0.0134	4.1444	7.2175	3.5732	0.8622
16	0.8750	0.171	18.5	-1.4659	4.376	10.2954	3.9511	0.9029
17	0.8750	0.115	18.0	-0.3238	3.1263	8.5935	2.7631	0.8838
18	0.8750	0.225	14.5		2.0139	8.8371	1.7863	0.8870
19	0.8750	0.179	27.0	-0.1582	3.7502	8.1289	3.2900	0.8773
table.# (ft)	R	I	N	F(M)	F(M) Manning	M Manning	umax Manning	
15	0.1516	0.0050	0.0084	218.8850	137.6376	6.6610	4.1981	
16	0.1229	0.0050	0.0066	3183.7312	107.0222	6.3548	4.6793	
17	0.0911	0.0050	0.0077	710.3887	108.7568	6.3745	3.2706	
18	0.1486	0.0013	0.0083	878.2419	51.8892	5.4520	2.1761	
19	0.1270	0.0049	0.0080	475.3787	158.3307	6.8301	23.8494	

표 4. 유사가 포함된 경우의 각종 수리량, 매개변수 및 F(M)

RUN.#	B(ft)	D(ft)	온도	h(ft)	umax (ft/sec)	M	u (ft/sec)	u/umax
2	0.8750	0.2840	17.0	-0.0138	2.6473	5.5790	2.1828	0.8245
3	0.8750	0.2430	22.0	-0.0476	2.5575	4.7327	2.0398	0.7976
4	0.8750	0.2360	12.5	-0.6178	3.0346	6.7303	2.5873	0.8526
6	0.8750	0.1950	21.0		2.7672	6.3896	2.3388	0.8452
7	0.8750	0.2430	31.5	-0.0523	2.6702	4.9808	2.1526	0.8061
21	0.8750	0.2360	25.0	-1.2368	3.2307	6.9671	2.7700	0.8574
29	0.8750	0.2800	25.2	-1.1931	3.0928	6.9931	2.6534	0.8579
29(1)	0.8750	0.2800	25.2	-0.1154	2.6681	5.0334	2.1555	0.8079

RUN.#	R	I	N	F(M)	F(M) Manning	M Manning	umax Manning
2	0.1722	0.0018	0.0089	57.3474	110.0400	6.3889	2.5827
3	0.1562	0.0025	0.0106	29.8304	143.9534	6.7153	2.3933
4	0.1533	0.0024	0.0081	145.7560	81.9121	6.0255	3.0932
6	0.1349	0.0024	0.0082	110.1074	81.7139	6.0225	2.7963
7	0.1562	0.0021	0.0092	36.0104	133.3474	6.6227	2.5314
21	0.1533	0.0023	0.0073	177.4689	97.7519	6.2437	3.2907
29	0.1707	0.0019	0.0074	181.3630	111.3757	6.4036	3.1382
29(1)	0.1707	0.0019	0.0091	37.4910	137.0999	6.6563	2.5328

4.2 산정된 F(M)과 실측유속의 공간적 분포와의 관계검증

Manning과 Chiu의 관계로부터 얻어진 $F(M)$ 의 효용성을 증명하기 위하여 실측된 유속을 Chiu의 유속공식이 잘 표현해주는지를 먼저 검증한 후, 간단한 수리량으로부터 산정된 $F(M)$ 이 유속의 공간적분포를 잘 표현해주는 여부를 판단하기 위해 실측유속과 비교분석하였다. $F(M)$ 으로 산정된 유속분포와 비교분석한 결과를 알기 쉽게 [그림 1] 및 [그림 2]로 나타내었고, [그림 3] 및 [그림 4]를 통해서 전체자료에서 Manning과 Chiu의 연결식인 $F(M)$ 공식이 매우 잘 표현해줄음을 알 수 있었다.

따라서 $F(M)$ 공식을 이용한다면, 세부적인 점 유속 자료 없이도 어떤 단면에서 간단히 취득할 수 있는 일반적인 수리량만을 가지고도 전체유속분포를 표현해줄 수 있는 공식으로 사용될 수 있는 매우 유용한 공식임을 증명하였다. 여기서 ●는 실측유속이며, —는 F(M)식을 나타낸다.

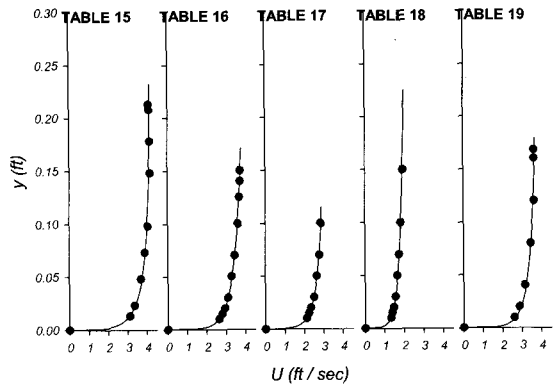


그림 1. 순수한 물의 실측된 전체 점 유속과 Chiu의 유속 분포식과의 비교

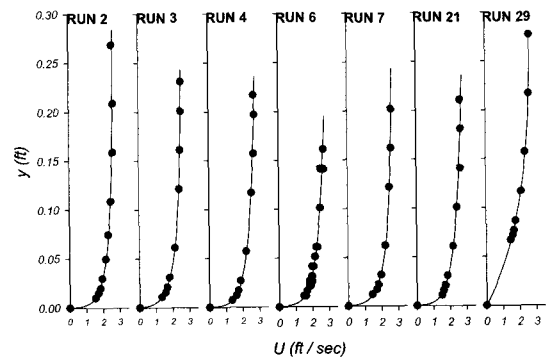


그림 2. 유사가 포함된 물의 실측된 전체 점 유속과 Chiu의 유속분포식과의 비교

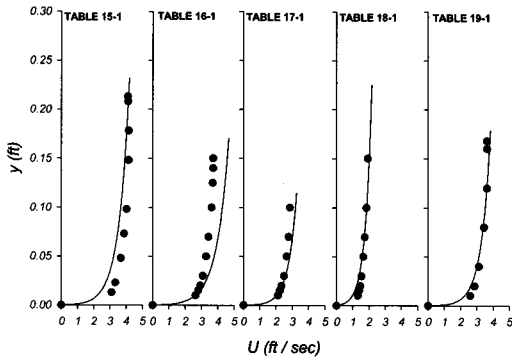


그림 3. 실측유속과 F(M)을 이용한 유속분포식과의 비교 (순수한 물의 전체 경우)

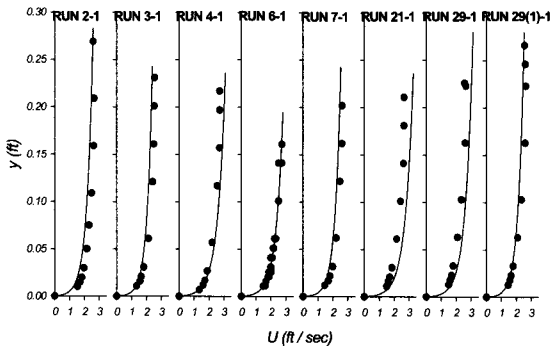


그림 4. 실측유속과 F(M)을 이용한 유속분포식과의 비교 (유사가 포함된 물의 전체 경우)

5. 결론

Chiu의 유속공식과 관련된 기존의 많은 연구에서 그 신뢰성과 정확성이 증명된 것처럼 Norman Herrick Brooks이 실측한 점 유속 자료와 Chiu의 공식을 이용한 유속분포가 매우 잘 일치함을 증명하였다. Manning의 유속공식과 Chiu의 유속공식과의 연결고리로 제시한 $F(M)$ 과 Manning의 n , R , I 와 같은 아주 간단한 입력 자료 만을 가지고도, 수로수직단면의 전체유속분포를 잘 표현할 수 있음을 증명하였다. 이는 기존의 평균유속공식들이 가지고 있는 한계성과 이론적 제약을 극복할 수 있는 대안으로 사료된다. 그동안 취득의 한계성 및 연구가의 큰 관심을 갖지 못한 u_{max} 를 실측하지 않고도 손쉽게 산정할 수 있는 대안으로서 본 연구결과가 활용될 수 있을 것이다. 즉, $F(M)$ 에서 산정된 엔트로피 M 과 Chiu의 평균유속공식으로부터 u_{max} 를 손쉽게 산정할 수 있다. 또한, 유사유무에 관계없이 주어진 단면에서의 엔트로피

값, 즉 평형상태를 유지하려는 경향이 있음을 또한 증명하였다.

따라서 인공수로에 관련된 간단한 수리입력 자료만 있다면 그동안 취득하기 어려운 u_{max} 과 전체유속분포 산정에 매우 유용하게 사용될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

- [1] Brook, N. H.(1954) "Laboratory studies of the mechanics of streams flowing over a movable bed of fine sand." Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California. 1954
- [2] Chiu, C-L.(1989) "Velocity distribution in open channel flow," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(5), pp. 576-594
- [3] Choo, T. H(1990) "Estimation of energy and momentum coefficients in open channel flow by Chiu's velocity distribution equation." M. S. Thesis, Dep. of Civ. Engrg., Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, 1990.
- [4] Chiu, C-L(1978) "Three-dimensional open channel flow." Journal of Hydraulic Division, ASCE, 104(8), pp. 1119-1136.
- [5] Chiu, C-L.(1983) "Computation of 3-D flow and shear in open channels," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(11), pp. 1424-1440.
- [6] Chiu, C-L.(1986) "Structure of 3-D flow in rectangular open channels," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112(11), pp. 1050-1068.
- [7] Chiu, C-L.(1987) "Entropy and probability concepts in Hydraulics," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113(5), pp. 583-599
- [8] Chiu, C-L.(1988) "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10), pp. 738-756
- [9] Chiu, C-L., and Chiou, J.-D.,(1989) "Mannings Equation and Velocity Distribution in Open channel", Proceedings of the International Conference on Channel Flows and Catchment Runoff, pp 22-26
- [10] Chiu, C-L., Murray, D. W.(1992) "Variation of velocity distribution along nonuniform open-channel flow," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(7), pp. 989-1001
- [11] Chiu, C-L., Said, C. A. A.(1995) "Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(1), pp.

26-35

- [12] 추태호 등(1999) "낙동강하구둑 방류량 산정방법개선" 한국수자원공사, WRR1-WR-99-3보고서.
- [13] 추태호(2002) "엔트로피 개념에 의한 유량측정 기법 (II) - 표면유속을 중심으로-", 대한토목학회논문집, 제22권 4B호, pp. 507-515.

고 덕 구(Deuk-koo Koh)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 농공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 농공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 서울대학교 농공학과 (공학박사)
- 1992년 9월 ~ 1995년 8월 : 충북대학교 수자원수질연구센터 조교수

■ 1995년 10월 ~ 현재 : 한국수자원공사 수자원연구원 선임, 책임, 수석연구원, 연구위원

<관심분야>

수문학, 수자원공학, 수자원정보화, 재해관리.

추 태 호(Tai Ho Choo)

[정회원]



- 1984년 2월 : 경희대학교 토목공학과(공학사)
- 1990년 12월 : 미국 피츠버그대학교 토목공학과(공학석사)
- 1998년 12월 : 미국 피츠버그대학교 토목환경공학과(공학박사)
- 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : 한국수자원공사 재직

• 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 산업토목학과 조교수

<관심분야>

수리학, 방재공학, 상하수도공학, 수자원공학.