

매끄러운 관수로 내 난류흐름특성을 반영한 수리학적 매개변수에 의한 마찰속도의 산정

The Estimation of Friction Velocity by Hydraulic Parameters Reflecting Turbulent Flow Characteristics in a Smooth Pipe Line

추태호, 손종근, 권용빈, 안시형, 윤관선
부산대학교 사회환경시스템공학부

Tai Ho Choo(thchoo@pusan.ac.kr), Jong Keun Son(ksca1043@naver.com),
Yong Been Kwon(beens@pusan.ac.kr), Si Hyung Ahn(ash2694@pusan.ac.kr),
Gwan Seon Yun(gsyun@pusan.ac.kr)

요약

스마트워터그리드의 중요한 요소기술로써 그리드(관망)의 설계는 압력, 마찰계수, 마찰속도, 수두손실, 그리고 에너지 경사와 같은 수리학적 매개변수를 추정하는 것이 필수적이다. 특히, 그리드의 마찰속도는 에너지 경사, 마찰계수, 압력, 수두손실 등의 결합에 있어 매우 중요한 인자이다. 그러나 마찰 수두손실, 마찰속도 등 마찰인자를 정확히 산정하는 것은 매우 어려우며, 경험적 마찰 인자는 여전히 약 100년 전에 개발된 공식과 이론을 사용함으로써 산정된다. 따라서, 본 논문에서는 최대유속과 마찰속도 사이의 새로운 공식을 Darcy-Weisbach의 마찰수두 손실공식과 Schlichting 공식 사이의 적분관계 및 회귀분석을 통하여 개발하였다. 개발된 공식을 증명하기 위하여 매끄러운 관 자료가 사용되었으며 제안한 공식은 관측 자료와 비교하여 높은 정확성을 보여준다. 이 연구의 결과는 안정성 향상과 그리드 설계에 사용이 가능할 것으로 판단된다.

■ 중심어 : | 마찰속도 | 마찰인자 | 매끄러운관 | 스마트워터그리드 | 관수로흐름 |

Abstract

Grid(pipe network) design is an important element of Smart Water Grid, which essential to estimate hydraulic parameters such as the pressure, friction factor, friction velocity, head loss and energy slope. Especially, friction velocity in a grid is an important factor in conjunction with energy gradient, friction coefficient, pressure and head loss. However, accurate estimation friction head loss, friction velocity and friction factor are very difficult. The empirical friction factor is still estimated by using theory and equation which were developed one hundred years ago. Therefore, in this paper, new equation from maximum velocity and friction velocity is developed by using integration relationship between Darcy-Weisbach's friction head loss equation and Schlichting equation and regression analysis. To prove the developed equation, smooth pipe data are used. Proposed equation shows high accuracy compared to observed data. Study results are expected to be used in stability improvements and design in a grid.

■ keyword : | Friction Velocity | Friction Factor | Smooth Pipeline | SWG | Turbulent Flow |

* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신006)에 의해 수행되었습니다.

접수일자 : 2016년 02월 04일

심사완료일 : 2016년 04월 01일

수정일자 : 2016년 03월 22일

교신저자 : 윤관선, e-mail : gsyun@pusan.ac.kr

1. 서론

기후 변화로 홍수 및 가뭄 등 물과 관련된 피해가 증가하고, 도시화의 진전으로 물에 대한 수요가 지속적으로 확대되는 반면, 깨끗하고 안전한 물의 공급은 한정됨에 따라 효율적인 물 관리의 중요성이 더욱 강조되고 있다[1]. 수자원의 새로운 이용방법으로 Smart Water Grid(이하 SWG)가 주목받고 있다. SWG는 [그림 1]과 같이 기존 수자원 관리 시스템의 한계를 극복하기 위해 첨단 정보통신기술을 이용하는 ICT기반의 다양한 수자원을 통합, 개발, 운영하는 최적화가 핵심이다. 수자원의 통합 운영을 통해 지역 내 물 격차를 해소하고 안정적인 물 공급을 실현할 것이다. 물 공급이 이루어지는 주 수단은 관망최적설계이고, SWG기술에 의해 물의 양방향 소통이 가능하다. 이를 위해서는 그리드의 안정성 문제가 매우 중요하고, 설계를 위한 그리드의 매개변수 산정 또한 정확히 이루어져야 한다.

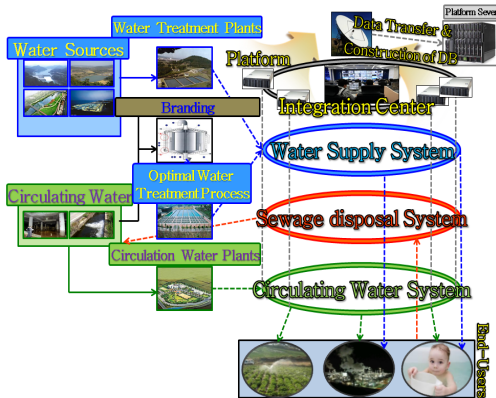


그림 1. Concept map of SWG

물이 건물 혹은 워터루프 내 그리드를 흐를 때 마찰에 의하여 압력강하가 일어나며, 이때 발생하는 마찰손실(Friction loss)을 수두(Head loss)로 나타낸 것이 마찰손실수두다. 이는 그리드의 크기, 종류, 유량 및 유체의 종류에 따라 달라진다. 마찰손실을 구하는 이론식은 다양한 방법들이 존재하고 있으나, 유체역학에서는 Darcy-Weisbach[2]의 공식을 주로 사용하고 있다. 이 공식의 손실수두를 구하기 위해서는 마찰손실계수 f 의

산정이 필수적이다.

마찰과 관련된 매개변수는 마찰속도, 마찰손실계수, 바닥전단응력, 에너지경사 등이 존재한다. 여기서, 마찰속도로 부터 바닥전단응력, 마찰손실계수, 에너지경사 등을 산정할 수 있기 때문에 관의 재질 및 관의 두께를 결정하기 위해 관로를 설계할 시 정확한 정보를 제공하는 동시에 합리적인 설계를 할 수 있을 것으로 사료된다.

관수로의 마찰속도, 마찰손실계수 또는 평균유속산정에 관한 연구를 살펴보면, Walski[3]는 관망 시스템의 해석에서 가장 높은 민감도와 불확실성을 가지는 매개변수는 마찰계수라 하였으며, Yoo[4]는 관수로 내 흐름을 관경의 조도의 높이에 대한 비로 결정하여 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류의 조건으로 Nikuradse와 같이 구분하였고, 각 조건에 대하여 원형관 마찰계수를 양해법으로 구하는 식을 개발하여 산정한 결과 Nikuradse의 실험결과와 비교해 상당히 양호한 결과를 나타냈으며, Choo[5] 등은 표면유속 또는 최대유속과 평균유속의 관계를 나타내는 연구를 진행하였으며, Wang[6] 등은 매끄러운 관과 거친 지역의 범위에서 마찰인자를 단순화하는 계산하는 식을 개발하였고, Choo[7] 등은 평균유속 이외의 다른 주요수리인자에 대한 연구가 미진하였다는 한계점을 언급하였다. Kim[8]은 Chiu[9]의 유속공식의 신뢰성과 정확성을 증명하기 위하여 관수로에서 실측한 유속측정 자료와 Chiu[9]의 공식을 적용한 값의 유속분포가 매우 잘 일치함을 증명하였다. 또한, Joseph[10] 등은 매끈한 관에서 층류, 천이류, 난류에 대한 마찰인자 대 레이놀즈 수의 상관 공식을 유도하였고, Afzal[11] 등은 과도기 거친 벽에서 속도분포와 마찰인자가 벽의 조도와는 별개로 새로운 로그법칙에 의해 지배되어짐을 보여주었다. Choo[12] 등은 현재 마찰속도를 결정하기 위한 방법에는 레이놀즈 응력분포방법[13], 점성저층에서 평균유속의 선형법칙의 방법[14], 하상경사 방법[15-17] 등 다양한 방법들이 존재하지만 이들 방법은 많은 매개변수를 필요로 한다는 번거로움이 있음을 밝혔다.

상기의 연구들은 관수로 내 여러 가지 수리학적 매개변수 산정 혹은 추정을 통하여 공식을 개발하거나 매개

변수간의 상관관계를 분석하였다. 그러나 본 논문에서는 여러 가지 수리학적 매개변수를 산정하지 않고 오직 2개의 매개변수인 최대유속과 평균유속만을 이용하여 손쉽게 마찰속도 산정식을 제안하였다. 또한, 제안한 식이 여러 실측한 자료에 의해 추가 검증 및 보완이 된다면, SWG의 그리드 노후도 평가 시 요소기술로써 활용 가능할 것으로 사료된다.

II. 이론적 배경

1. 마찰속도공식

관수로내의 흐름이 층류일 경우의 마찰손실계수를 산정하는 식은 Eq. (1)과 같다.

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (1)$$

여기서, R_e 는 Reynolds수로서 $R_e = \frac{VD}{\nu}$ 이며, ν 는 동점성계수이다. Eq. (1)에서 알 수 있는 바와 같이 층류의 마찰손실계수는 Reynolds수만의 함수이다. 그러나 실제 관수로 흐름은 층류와 난류가 공존하는 흐름이다. 이에 대한 마찰손실계수는 일반적으로 관 벽에서의 마찰응력식인 Eq. (2)로부터 구할 수 있다.

$$\tau_0 = \frac{wh_L}{2l} \cdot a \quad (2)$$

여기서, τ_0 는 관 벽에서의 마찰응력, w 는 물의 단위중량, h_L 은 마찰손실계수, 그리고 a 는 관의 반지름이다. 이와 같은 관계는 흐름의 상태와는 관계가 없으므로 층류와 난류 모두에 대해서 성립한다. 그리고 Eq. (2)에서 손실수두를 산정하는 식으로 Eq. (3)과 같이 정리되었다.

$$\therefore h_L = f \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

여기서, f 는 마찰손실계수, l 은 관의 수직종단거리, D 는 관의 직경, V 는 관의 평균유속, g 는 중력가속도, 그리고 h_L 은 l 사이에서 마찰에 의해 소실되는 단위무게당의 에너지 손실량이다. Eq. (3)을 Darcy-Weisbach [2]의 마찰손실공식이라 하며, 마찰속도, 유속 및 마찰손실계수와의 관계를 나타내기 위하여 Eq. (4)와 같이 정리되었다.

$$\therefore \frac{V}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (4)$$

여기서, V 는 관의 평균유속, U_* 는 마찰속도, 그리고 f 는 마찰손실계수이다. Eq. (4)는 Eq. (5)와 같이 변형되어 보다 다양하게 적용할 수 있다.

$$\frac{V}{U_*} = \frac{1}{U_*} \cdot \frac{Q}{A} = \frac{1}{U_*} \cdot \frac{1}{A} \int_A (u) \cdot dA \quad (5)$$

Eq. (5)에서 알 수 있듯이 개수로나 관수로내의 유속 분포를 나타내는 점 유속분포공식인 u 가 주어지면 적분에 의해서 개수로나 관수로내의 마찰속도를 간편하게 계산할 수 있다.

일반적으로 가장 많이 사용되는 유속분포공식 중 하나가 Prandtl-Karman[18]의 대수분포식이며, Eq. (6)은 관수로에 적용가능하다.

$$u = \frac{U_*}{k} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{2.3U_*}{k} \log \frac{r}{r_0} \quad (6)$$

여기서, k 는 Karman상수이며, r 는 관의 중앙에서부터 임의의 점까지 거리이고, r_0 는 관 벽으로부터 $u = 0$ 이 되는 지점까지의 거리이므로 이것은 관 벽 바로 근처에서의 흐름의 특성을 나타내는 길이이다. 따라서, Eq. (6)을 Eq. (5)에 대입정리하면 Eq. (7)과 같으며, 이 식은 마찰속도를 산정할 수 있다. 그러나 Eq. (7)은 벽면 $r = 0$ 에서 $u = -\infty$ 가 되므로 관 벽 바로 근처에서는 성립하지 않는 단점도 있다.

$$U_* = \frac{V}{\frac{1}{k} \ln \frac{R}{r_0} - \frac{1.5}{k}} \quad (7)$$

여기서, R 은 관의 반지름이다. 한편, 최근에 가장 많이 사용되는 대표적인 관수로 유속분포식은 Eq. (8)과 같고, Schlichting[19]가 제안하였다.

$$\frac{U_{\max} - u}{U_*} = -\frac{1}{k} \ln \left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad (8)$$

특히 Eq. (8)에서 주목해 볼 사항은 1900년대 중반까지도 Nikuradse[20] 등과 같은 많은 연구자들이 관심을 가졌던 최대유속(U_{\max})에 대한 수리인자에 대하여 현시점에서 심도 있게 재고 할 필요가 있다. 관수로나 개수로의 어떤 단면이든 최대유속은 1개만 존재한다는 점과 평균유속보다 최대유속의 측정이 용이하고, 최대유속의 신뢰성이 더 큰 강점이 있다. 따라서 관수로나 개수로에서 유속이나 마찰속도 등과 관련된 중요한 수리인자들을 산정할 때 매우 유용한 정보를 제공하므로 반드시 고려해야 할 인자로 새롭게 인식해야 될 것으로 판단된다.

따라서 Eq. (8)을 Eq. (5)에 대입정리하면 Eq. (9)와 같이 마찰속도를 산정할 수 있는 식이 된다.

$$U_* = 2k(U_{\max} - V) \quad (9)$$

여기서, k 는 요철의 높이를 나타내는 양이며, U_{\max} 는 최대유속으로 대부분 대칭관수로인 경우는 관의 중앙에서 발생한다.

2. 마찰속도공식의 제안

관수로 내 마찰속도가 정확하게 산정될 수 있다면 관 마찰손실계수, 마찰속도 및 손실수두를 산정하는 것이 가능하므로 관수로에서 매우 중요한 인자임이 분명하다. 따라서 마찰속도를 구할 수 있는 공식인 Eq. (7)과 Eq. (9)를 살펴보면 Eq. (7)에서 구해야할 매개변수는

V , r_0 와 k 이고, 여기서, r_0 는 관 벽으로부터 $u = 0$ 이 되는 지점까지의 거리이며, 관 벽 바로 근처에서의 흐름의 특성을 나타내는 길이라 정의되어 있다. 그러나 아직도 이에 대한 정량적 개념 정립이 되어있지 않아 사용하는 데 한계성이 있다. 이에 비해 Eq. (9)는 보다 정량적이며 손쉽게 구할 수 있는 매개변수인 V , U_{\max} 와 k 로 구성된 장점이 있다. 본 연구에서는 마찰속도를 산정하기 위하여 Eq. (9)보다 효율성을 높일 수 있는 Eq. (10)을 제안한다. Eq. (10)은 Nikuradse에 의해 측정된 데이터를 기반으로 요철을 나타내는 k 값을 상수화하기 위해 회귀분석을 통하여 유도하였다. 실제로 관수로는 폐쇄되어 있으며, 압력에 의해 물의 흐름이 좌우되기 때문에 본 연구에서 제안한 Eq. (10)은 요철을 고려하지 않아도 된다는 장점이 있다.

$$U_* = \sqrt{0.06} * [U_{\max} - V] \quad (10)$$

III. 제안한 식의 검증

본 연구에서 제안한 식의 검증을 위하여 1932년에 Nikuradse[20]가 발표한 ‘부드러운 관에서의 난류흐름법칙’이란 논문에 수록된 관수로실험 실측자료를 채택하였다. 100년 가까이 된 자료를 이용하여 제안한 식의 검증을 실시한 이유는 첫째 Nikuradse의 실험 데이터의 정확성과 광범위성이 확보되었기 때문이며, 둘째 최근에 Nikuradse와 같이 상세하게 실험한 데이터 자료가 존재하지 않기 때문이다. Nikuradse의 자료를 사용한 선행연구자의 예로 Yoo[21]는 Nikuradse의 실험에 대하여 연구한 바 있다. Nikuradse는 부드러운 관의 직경 10mm, 20mm, 30mm, 50mm와 100mm에서 난류흐름을 대상으로 측정하였으며, 다른 연구자들도 이 자료를 이용하여 연구할 수 있도록 [표 1]에서 [표 5]와 같이 U_{\max} , V 및 U_* 등과 Eq. (10)을 이용하여 산정한 마찰속도를 제시하였다.

표 1. The Measured Data for Diameter 10mm By Nikuradse

V	U_{max}	ν	$\log(R_e \times 10^{-3})$	$\frac{dp}{dx}$	$\lambda = f$	U_*	$\frac{U_*}{E_q(10)}$
42.8	56.2	0.0140	3.49	0.040	0.043	3.124	3.282
48.5	63.4	0.0135	3.56	0.050	0.041	3.481	3.650
51.4	66.6	0.0135	3.58	0.055	0.041	3.673	3.723
57.6	74.6	0.0135	3.63	0.068	0.040	4.073	4.164
62.0	80.4	0.0135	3.66	0.076	0.039	4.313	4.507
70.2	90.0	0.0135	3.72	0.094	0.037	4.785	4.850
76.9	98.5	0.0135	3.76	0.110	0.036	5.190	5.291
98.5	125.7	0.0135	3.86	0.170	0.034	6.455	6.663
118.8	150.8	0.0135	3.94	0.238	0.033	7.633	7.838
121.0	152.5	0.0135	3.95	0.245	0.033	7.730	7.716
137.5	174.0	0.0135	4.01	0.301	0.031	8.580	8.941
163.3	206.0	0.0135	4.08	0.400	0.029	9.902	10.459
189.0	237.8	0.0135	4.15	0.520	0.029	11.263	11.954
183.0	226.0	0.0135	4.13	0.722	0.028	10.805	10.533
253.0	311.0	0.0136	4.27	1.256	0.025	14.206	14.207

표 2. The Measured Data for Diameter 20mm By Nikuradse

V	U_{max}	ν	$\log(R_e \times 10^{-3})$	$\frac{dp}{dx}$	$\lambda = f$	U_*	$\frac{U_*}{E_q(10)}$
114.6	143.5	0.0135	4.23	0.092	0.027	6.711	7.079
148.4	184.0	0.0135	4.34	0.142	0.025	8.330	8.720
175.5	218.0	0.0135	4.41	0.197	0.025	9.793	10.410
212.5	263.0	0.0135	4.50	0.274	0.024	11.551	12.370
240.0	294.0	0.0135	4.55	0.329	0.022	12.676	13.227
214.4	265.0	0.0119	4.56	0.268	0.022	11.426	12.394
233.6	290.0	0.0119	4.59	0.310	0.022	12.353	13.815
258.0	317.0	0.0119	4.64	0.368	0.023	13.430	14.452
259.6	317.3	0.0117	4.65	0.372	0.022	13.475	14.134
275.8	337.0	0.0119	4.67	0.414	0.021	14.269	14.991
315.0	384.0	0.0119	4.72	0.514	0.020	15.879	16.901
349.0	424.0	0.0119	4.77	0.622	0.020	17.451	18.371
370.0	450.0	0.0119	4.79	0.680	0.019	18.266	19.596
392.0	475.0	0.0119	4.82	0.758	0.019	19.292	20.331
425.0	512.0	0.0119	4.85	0.874	0.019	20.688	21.311
454.0	542.0	0.0119	4.88	0.990	0.019	21.800	21.556
495.0	596.0	0.0119	4.92	1.160	0.019	23.877	24.740
533.6	644.0	0.0119	4.95	1.324	0.018	25.426	27.042
638.0	768.0	0.0119	5.03	1.850	0.018	30.170	31.843
687.0	827.0	0.0119	5.06	2.064	0.017	31.868	34.293
752.0	901.0	0.0119	5.10	2.405	0.017	34.345	36.497
811.0	975.0	0.0118	5.14	2.783	0.017	37.066	40.172
863.0	1040.0	0.0118	5.17	3.160	0.017	39.347	43.356
972.0	1155.0	0.0116	5.22	3.880	0.016	43.651	44.826
1053.0	1254.0	0.0116	5.26	4.440	0.016	46.792	49.235

표 3. The Measured Data for Diameter 30mm By Nikuradse

V	U_{max}	ν	$\log(R_e \times 10^{-3})$	$\frac{dp}{dx}$	$\lambda = f$	U_*	$\frac{U_*}{E_q(10)}$
402.0	483.0	0.0114	5.02	0.495	0.018	19.037	19.841
439.0	530.0	0.0114	5.06	0.571	0.017	19.924	22.290
488.0	592.0	0.0114	5.11	0.700	0.017	22.652	25.475
559.0	657.0	0.0114	5.17	0.869	0.016	24.711	24.005
627.0	754.0	0.0114	5.22	1.093	0.016	28.359	31.109
688.0	819.0	0.0114	5.26	1.247	0.015	30.241	32.088
756.0	901.0	0.0114	5.30	1.520	0.016	33.391	35.518
879.0	1045.0	0.0114	5.36	1.973	0.015	38.050	40.662
1010.0	1198.0	0.0115	5.42	2.547	0.015	43.220	46.050
1106.0	1304.0	0.0115	5.46	2.993	0.014	46.996	48.500

표 4. The Measured Data for Diameter 50mm By Nikuradse

V	U_{max}	ν	$\log(R_e \times 10^{-3})$	$\frac{dp}{dx}$	$\lambda = f$	U_*	$\frac{U_*}{E_q(10)}$
91.4	112.5	0.0123	4.57	0.020	0.023	4.895	5.168
124.4	151.5	0.0123	4.70	0.033	0.021	6.361	6.638
172.0	210.0	0.0123	4.84	0.059	0.020	8.495	9.308
203.5	247.0	0.0123	4.92	0.079	0.019	9.812	10.655
237.0	286.0	0.0123	4.98	0.104	0.018	11.285	12.002
71.2	87.5	0.0121	4.47	0.012	0.023	3.857	3.993
90.8	111.8	0.0121	4.57	0.019	0.023	4.832	5.144
102.5	125.4	0.0122	4.62	0.024	0.022	5.390	5.609
116.5	142.3	0.0122	4.68	0.030	0.024	6.043	6.320
140.0	171.0	0.0122	4.76	0.041	0.020	7.071	7.593
153.5	187.0	0.0122	4.80	0.048	0.020	7.665	8.206
179.5	218.0	0.0122	4.87	0.063	0.019	8.783	9.431
214.4	260.0	0.0121	4.95	0.086	0.018	10.265	11.170
103.0	126.0	0.0134	4.58	0.024	0.022	5.297	5.634
141.0	172.0	0.0133	4.72	0.042	0.021	7.205	7.593
194.5	236.0	0.0128	4.88	0.070	0.018	9.266	10.165
423.5	503.0	0.0124	5.23	0.296	0.016	19.020	19.473
395.0	468.0	0.0093	5.33	0.288	0.016	17.463	17.881
570.0	671.0	0.0097	5.47	0.488	0.015	24.432	24.740
652.0	770.0	0.0124	5.42	0.640	0.015	27.922	28.904
733.0	856.0	0.0093	5.60	0.757	0.014	30.508	30.129
740.0	858.0	0.0093	5.60	0.752	0.013	30.335	28.904
912.8	1068.0	0.0093	5.69	1.140	0.013	37.293	38.016
1082.0	1256.0	0.0081	5.82	1.480	0.012	42.657	42.621

표 5. The Measured Data for Diameter 100mm By Nikuradse

V	U_{max}	ν	$\log(R_e \times 10^{-3})$	$\frac{dp}{dx}$	$\lambda = f$	U_*	$\frac{U_*}{E_t(10)}$
345.9	405.0	0.0108	5.50	0.087	0.014	14.611	14.476
377.1	442.0	0.0108	5.54	0.100	0.014	15.666	15.897
392.7	458.0	0.0108	5.56	0.109	0.014	16.356	15.995
466.3	545.0	0.0108	5.64	0.149	0.013	19.068	19.277
482.8	562.0	0.0108	5.65	0.158	0.013	19.663	19.400
510.0	596.0	0.0108	5.67	0.176	0.013	20.740	21.066
533.2	622.0	0.0108	5.69	0.192	0.013	21.773	21.751
569.1	666.0	0.0108	5.72	0.218	0.013	23.062	23.736
602.0	693.0	0.0107	5.75	0.234	0.013	23.904	22.290
660.3	770.0	0.0110	5.78	0.284	0.013	26.367	26.871
704.0	813.0	0.0111	5.80	0.316	0.013	27.839	26.699
769.8	896.0	0.0110	5.84	0.377	0.013	30.387	30.913
876.0	1015.0	0.0121	5.86	0.480	0.012	35.495	34.048
810.0	948.0	0.0111	5.86	0.422	0.013	32.104	33.803
843.4	976.0	0.0109	5.89	0.444	0.012	32.926	32.480
940.0	1085.0	0.0109	5.94	0.536	0.012	36.361	35.518
790.0	915.0	0.0077	6.01	0.372	0.012	30.290	30.619
1248.0	1443.0	0.0113	6.05	0.908	0.012	47.458	47.765
882.0	1015.0	0.0077	6.06	0.455	0.011	33.382	32.578
944.0	1084.0	0.0077	6.09	0.522	0.012	35.734	34.293
1005.0	1155.0	0.0076	6.12	0.576	0.011	37.464	36.742
982.0	1120.0	0.0072	6.13	0.540	0.011	36.295	33.803
1020.0	1170.0	0.0071	6.16	0.496	0.011	37.639	36.742
900.0	1045.0	0.0070	6.11	0.470	0.011	33.865	35.518
685.0	793.0	0.0070	5.99	0.278	0.012	26.575	26.454
761.0	882.0	0.0070	6.04	0.340	0.012	28.807	29.639
830.0	958.0	0.0070	6.07	0.400	0.011	31.289	31.353
958.0	1108.0	0.0070	6.14	0.522	0.011	35.742	36.742
259.0	306.0	0.0109	5.38	0.051	0.015	11.234	11.513
286.8	336.0	0.0108	5.42	0.061	0.015	12.234	12.051
309.5	364.0	0.0108	5.46	0.071	0.014	13.152	13.350
325.4	384.0	0.0108	5.48	0.079	0.015	13.889	14.354
726.0	846.0	0.0122	5.77	0.340	0.013	28.885	29.394
806.0	937.0	0.0121	5.82	0.416	0.013	31.915	32.088
1013.0	1168.0	0.0113	5.95	0.623	0.012	38.866	37.967
1325.0	1528.0	0.0113	6.07	1.016	0.011	49.906	49.725
1691.0	1949.0	0.0110	6.19	1.600	0.011	62.643	63.197
1765.0	2020.0	0.0110	6.21	1.668	0.011	64.544	62.462
1410.0	1620.0	0.0083	6.23	1.070	0.011	51.185	51.439
1926.0	2212.0	0.0083	6.37	2.000	0.011	70.298	70.055
1630.0	1869.0	0.0080	6.31	1.420	0.010	58.947	58.543
1630.0	1870.0	0.0079	6.31	1.416	0.010	58.926	58.788
1758.0	2010.0	0.0083	6.33	1.612	0.010	62.750	61.727
1940.0	2207.0	0.0084	6.36	1.912	0.010	68.387	65.401
1930.0	2208.0	0.0082	6.37	1.940	0.010	68.840	68.096
2150.0	2465.0	0.0110	6.29	2.500	0.011	78.127	77.159
2010.0	2300.0	0.0078	6.41	2.080	0.010	71.331	71.035
2150.0	2446.0	0.0079	6.43	2.320	0.010	75.199	72.505
2162.0	2463.0	0.0077	6.45	2.344	0.010	75.722	73.730

여기서, V 는 관의 평균유속(cm/s), $\frac{dp}{dx}$ 는 x 축에 대한 압력변화량, U_{max} 는 관내 최대유속(cm/s), ν 는 동점성 계수(cm^2/s), $\log(R_e \times 10^{-3})$ 은 레이놀즈수, $\lambda = f$ 는 마찰손실계수, 그리고 U_* 는 마찰속도이다.

관수로의 직경 10mm, 20mm, 30mm, 50mm와 100mm에서 실측자료와 제안한 Eq. (10)에 의해 산정된 마찰속도 U_* 를 비교하기 위하여 $y=x$ 꼴인 선형회귀분석을 다음 [그림 2]와 같이 수행하였다.

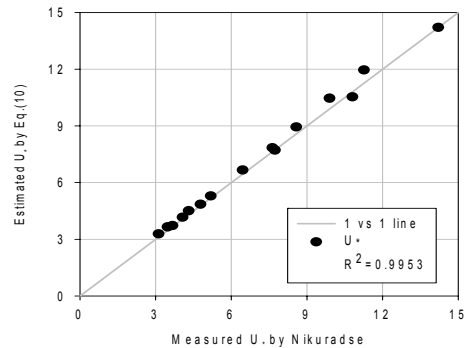


그림 2. The Comparison of the Measured and Estimated data for Diameter 10mm

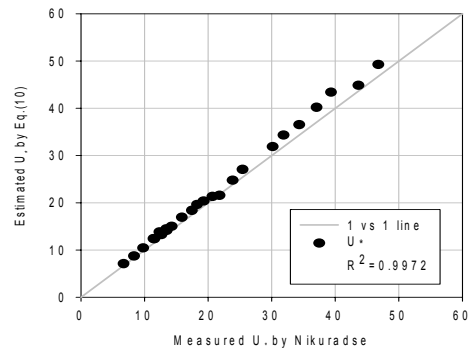


그림 3. The Comparison of the Measured and Estimated data for Diameter 20mm

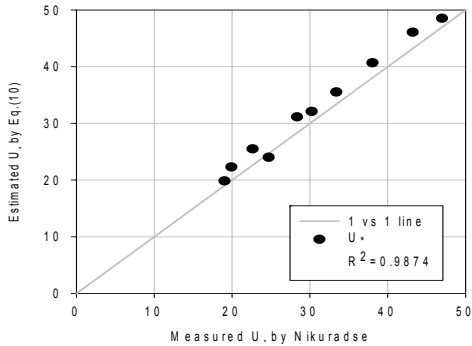


그림 4. The Comparison of the Measured and Estimated data for Diameter 30mm

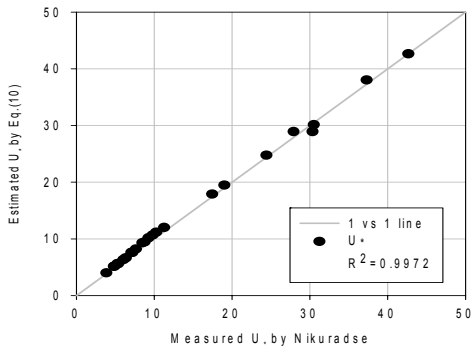


그림 5. The Comparison of the Measured and Estimated data for Diameter 50mm

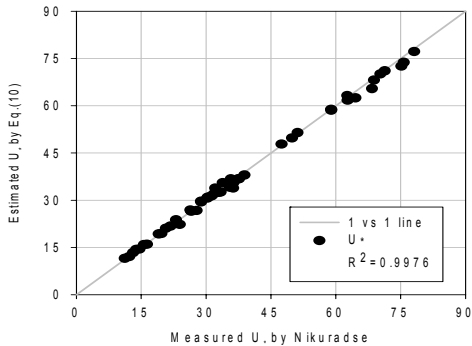


그림 6. The Comparison of the Measured and Estimated data for Diameter 100mm

[그림 2]에서 [그림 6]은 각각 관의 직경 10mm, 20mm, 30mm, 50mm와 100mm일 때 Eq. (10)에 의해 산정한 마찰속도와 Nikuradse의 실측자료에 의해 산정한 마찰속도를 비교한 그림이다. 여기서, x축은 Nikuradse에 의해 산정한 마찰속도, y축은 Eq. (10)에 의해 산정한 마찰속도, 검정색 원은 마찰속도, 회색 실선은 $y=x$ 꼴인 값을 나타내는 선으로 두 마찰속도 값이 얼마나 잘 일치함을 표현하기 위해 도시화하였다. 제안한 Eq. (10)에 의해 산정한 마찰속도와 Nikuradse의 실측자료에 의해 산정한 마찰속도의 결정계수는 0.9874에서 0.9976으로 분석되었다.

Nikuradse의 경우 마찰속도를 산정하기 위해 Eq. (2)와 Eq. (3)을 이용하여 산정한 마찰손실계수를 Eq. (4)에 대입하여 마찰속도를 산정하는 절차로 진행되었다. 즉, 기존 방식은 마찰속도를 구하기 위해 필요한 매개변수들이 많은 반면 본 연구에서 제안하는 Eq. (10)의 경우 최대유속과 평균유속 두 가지 매개변수만을 이용하여 마찰속도를 산정하는 방식으로 효율성이 우수함을 잘 나타내고 있다.

마찬가지로 [그림 7]은 관의 직경 10mm, 20mm, 30mm, 50mm, 100mm의 전체 실측자료와 제안한 식의 마찰속도를 함께 도시한 그래프이며, 그림에서 확인할 수 있듯이 결정계수는 0.9958로 매우 일치함을 보여준다.

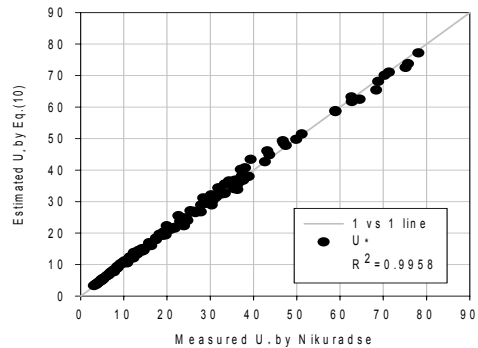


그림 7. The Comparison of the Measured and Estimated data for all

IV. 결과분석

3장과 같이 측정에 의해 계산한 마찰속도와 Eq. (10)으로 산정한 마찰속도의 정확성은 통계분석 기법인 Discrepancy Ratio방법을 사용하였다. 이 방법은 두 값의 비율에 상용로그를 취하여 분석하는 방법으로 다음 Eq. (11)과 같다.

$$\log\left(\frac{\text{estimated } U_*}{\text{measured } U_*}\right) = \text{constant} \quad (11)$$

각각의 값을 오름차순으로 정리한 다음 임의의 계급 구간에 해당하는 값의 수를 세어 백분율로 나타냄으로써 막대그래프의 형태로 그 양상을 쉽게 표현할 수 있다. 그래프가 0 에 가까울수록 값이 잘 일치함을 의미하고, 0 보다 크면 과다산정, 0 보다 작으면 과소산정을 의미한다.

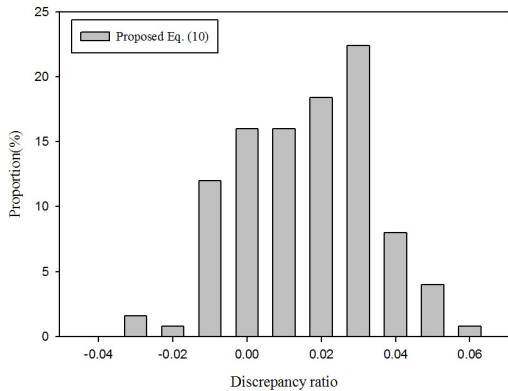


그림 8. Discrepancy Ratio between the Measured and Estimated data for all calculations

[그림 8]은 전체 실측자료의 마찰속도와 제안한 식에 의해 산정한 마찰속도를 비교한 그래프로써, 이를 살펴보면 -0.01에서 0.03 구간 내의 백분율은 84.8%로 제안한 식이 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

V. 결론

매끄러운 관수로에서 난류의 흐름일 때 여러 매개변수 중 최대유속과 평균유속으로부터 마찰속도를 산정할 수 있는 공식을 제안하여 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 매끄러운 관수로 내 난류흐름일 경우 제안한 Eq. (10)과 같이 마찰속도의 산정은 최대유속과 평균유속으로부터 손쉽게 산정할 수 있다.
- (2) 실측자료로 산정한 마찰속도와 제안한 식으로 산정한 마찰속도를 비교한 결과 결정계수는 0.9874에서 0.9976로 매우 정확함을 보여주었고, Discrepancy Ratio로 분석한 결과 -0.01에서 0.03 구간 내의 백분율은 84.8%로 0에 높게 분포됨을 알 수 있다.
- (3) 관 노후도를 평가하기 위해서는 초기 관 혹은 그리드의 수리학적 매개변수를 이용하여 산정한 마찰속도를 기반으로 사용기간에 따른 수리학적 매개변수 자료가 존재한다면 관 혹은 그리드의 노후도를 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 앞서 언급한 바와 같이 부드러운 관뿐만 아니라 거친 관, 노후화된 관 등 추가 연구를 통하여 본 연구에서 제안한 식이 보완 및 검증 된다면, 스마트워터그리드의 요소기술로써 활용할 수 있을 뿐만 아니라 수자원 실무에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] C. H. Kim, "How to change korean water management system? : Focused on expert's recognition analysis," The Korea Contents Society, Vol.13, No.10, pp.266-277, 2013.
- [2] H. Rouse, "Evaluation of boundary roughness," Proceedings Second Hydraulics Conference,

- univ. of Iowa Studies in Engrg., Bulletin, No.27, 1943.
- [3] T. M. Walski, "Water supply system rehabilitation," Task Committee on Water Supply Rehabilitation Systems, ASCE, New York, 1987.
- [4] D. H. Yoo, "Friction factor for circular pipe with uniform roughness," KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.13, No.5, pp.165-172, 1993.
- [5] T. H. Choo and S. J. Je, "A study on the maximum velocity and the surface velocity," The Korea Contents Society, Vol.4, No.1, pp.351-355, 2006.
- [6] Wang, Yong Ruan, Qi, "A new Explicit Equation for Calculating the Friction Factor for the Turbulent Flow in Pipes," Engineering science, Vol.8, No.6, pp.83-88, 2006.
- [7] T. H. Choo and S. K. Lee, "Measurement of discharge using the entropy concept," The Korea Contents Society, Vol.4, No.1, pp.342-346, 2006.
- [8] J. W. Kim, *A study on the estimation of the mean velocity in closed conduit by using the Chiu's Velocity Equation*, M. S. Thesis, Department of Civil Engineering, Pusan University, Busan, Korea, 2009.
- [9] C. L. Chiu, "Application of probability and entropy concept in pipe-flow sturdy," Journal of Hydraulic Engineering, Vol.119, No.6, p.742, 1993.
- [10] D. Joseph and B. H. Yang, "Friction factor correlations for lamina, transition and turbulent flow in smooth pipes," Physica D, Nonlinear phenomena, Vol.239, No.14, pp.1318-1328, 2010.
- [11] N. Afzal, A. Seena, and A. Bushra, "Turbulent flow in a machine honed rough pipe for large Reynolds numbers: General roughness scaling laws," Journal of hydro-environment research, Vol.7, No.1, pp.81-90, 2013.
- [12] T. H. Choo, H. S. Son, G. S. Yun, H. S. Noh, and H. S. Ko, "The proposal for friction velocity formula at uniform flow channel using the entropy concept," The Korea Contents Society, Vol.15, No.2, pp.499-506, 2015.
- [13] B. R. Pearson, P. A. Krogstad, and W. van de Water, "Measurements of the Turbulent Energy Dissipation Rate," Physics of Fluids, Vol.14, 2002.
- [14] W. Szablewski, "Turbulente Drenzs-chichten in Ablosenae," Z., Angrew. Math., Vol.49, p.215, 1969.
- [15] G. Gust and J. B. Southard, "Effects of weak bed load on the universal law of the wall," Journal of Geophysical Research, Vol.88, No.C10, pp.5939-5952, 1983.
- [16] I. Nezu and H. Nakagawa, "Turbulence in open-channel flows," Journal of Hydraulic Engineering, Vol.120, No.10, pp.1235-1237, 1994.
- [17] A. Gyr and A. Schmid, "Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes," Journal of Hydraulic Engineering, Vol.35, No.4, pp.525-544, 1997.
- [18] L. Prandtl, "The mechanics of viscous fluids, in W.F. Durand (editor-in-chief) : Aerodynamic Theory," Springer-Verlag, Berlin, Vol.3, div. G, p.142, 1935
- [19] H. Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, McGraw - Hill, New York, 1979.
- [20] J. Nikuradse, *Laws of turbulent flow in smooth pipes*, NASA TT F-10, 359, Washington, 1932.
- [21] D. H. Yoo, "Pipe friction in transition flow," KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.13, No.4, pp.101-109, 1993.

저자 소개

추 태 호(Tai Ho Choo)

정회원



- 1990년 12월 : Pittsburgh 대학교 일반대학원 토목공학(수리학 석사)
- 1998년 12월 : Pittsburgh 대학교 일반대학원 환경토목공학과 (환경수리학 박사)

- 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : K-Water 연구원 책임연구원 등
- 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수

<관심분야> : 댐, 수리수문, 하천

손 중 근(Jong Keun Son)

정회원



- 2004년 2월 : 창신대학교 건설환경과(공학사)
- 2006년 2월 : 밀양대학교 토목공학과 졸업(공학사)
- 2008년 2월 : 부산대학교 산업토목공학과 대학원(공학석사)

- 2015년 8월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야> : 댐, 수리수문, 스마트워터그리드

권 용 빈(Yong Been Kwon)

준회원



- 2015년 2월 : 동아대학교 토목학과(공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<관심분야> : 댐, 수리수문, 스마트워터그리드

안 시 형(Si Hyung Ahn)

준회원



- 2015년 8월 : 경남대학교 토목학과(공학사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<관심분야> : 댐, 수리수문, 기후변화, 풍수해

윤 관 선(Gwan Seon Yun)

정회원



- 2011년 2월 : 순천대학교 토목공학과(공학사)
- 2013년 2월 : 순천대학교 토목공학과(공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사수료

<관심분야> : 댐, 수리수문, 하천