

# 엔트로피 개념을 이용한 관수로내의 유속분포에 관한 연구

## A Study on The Velocity Distribution in Closed Conduit by Using The Entropy Concept

추태호\* · 옥치율\*\* · 김진원\*\*\* · 맹승진\*\*\*\*

Choo, Tai Ho · Ok, Chi Youl · Kim, Jin Won · Maeng, Seung Jin

### Abstract

When yields the mean velocity of the closed conduit which is used generally, it is available to use Darcy Weisbach Friction Loss Head equation. But, it is inconvenient very because Friction Loss coefficient  $f$  is the function of Reynolds Number and Relative roughness ( $\epsilon/d$ ). So, it is demanded more convenient equation to estimate. In order to prove the reliability and an accuracy of Chiu's velocity equation from the research which sees hereupon, proved agreement very well about measured velocity measurement data by using Laser velocimeter which is a non-insertion velocity measuring equipment from the closed conduit (Laser Doppler Velocimeter: LDV) and an insertion velocity measuring equipment and the Pitot tube which is a supersonic flow meter (Transit-Time Flowmeters). By proving theoretical linear-relation between maximum velocity and mean velocity in laboratory flume without increase and decrease of discharge, the equilibrium state of velocity in the closed conduit which reaches to equilibrium state corresponding to entropy parameter  $M$  value has a trend maintaining consistently this state. If entropy  $M$  value which is representing one section is determinated, mean velocity can be gotten only by measuring the velocity in the point appearing the maximum velocity. So, it has been proved to estimate simply discharge and it indicates that this method can be a theoretical way, which is the most important in the future, when designing, managing and operating the closed conduit.

Keywords : Chiu's equation, mean velocity, entropy  $M$ , conduit

### 요 지

일반적으로 사용되는 관수로의 평균유속을 구하려면 Darcy-Weisbach의 마찰손실수두공식을 사용하면 되나, 그러나 이 식의 마찰손실계수  $f$ 는 Reynolds수와 상대조도( $\epsilon/d$ )의 함수이므로 사용하기에 매우 불편하며 따라서 보다 편리한 식이 요구된다. 이에 본 연구에서 Chiu 유속공식의 신뢰성과 정확성을 증명하기 위하여 관수로에서 비삽입식 유속측정 장치인 레이저 유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV) 및 초음파 유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F), 삽입식 유속측정장치인 피토관(Pitot Tube)을 이용하여 실측한 유속측정 자료와 Chiu의 공식을 이용한 유속분포가 매우 잘 일치함을 증명하였다. 유량의 증감에 관계없이 실험실 수로에서의 최대유속과 평균유속간의 이론적인 선형관계를 증명함으로써 관수로내 유속의 평형상태, 즉 엔트로피 파라미터  $M$ 값에 대응하는 평형상태에 도달하려 하고 이 평형상태를 지속적으로 유지하려고 하는 경향이 있음을 증명하였다. 또한, 한 단면을 대표하는 엔트로피 파라미터  $M$ 값이 결정되면 최대유속이 발생하는 지점에서의 유속 측정만으로 단면 전체의 평균유속을 쉽게 구할 수 있고 이로부터 간단히 유량을 산정할 수 있음을 증명하였으며, 이는 추후 관수로 설계 및 운영관리 시 가장 중요한 평균유량을 측정할 수 있는 이론적인 도구로 사용될 수 있음을 의미하는 것이다.

핵심용어 : Chiu의 공식, 평균유속, 엔트로피 파라미터  $M$ , 관수로흐름

### 1. 서 론

윤태훈(2002) 등에 의하면, 관수로의 흐름은 수로의 단면이 어떠한 형상이라도 그 속을 물이 가득차 흐르며, 자유표면을 갖지 않고 흐르는 경우를 말한다. 관수로의 단면형은 원형의 것이 보통이나 원형 이외의 단면형이라도 마찬가지로 취급할 수 있다. 관수로 흐름은 수로의 형상과 관계 없

이 수로 내부에서 자유수면(free surface)을 갖지 않아 대기압 이외의 압력이 추가로 작용하는 흐름을 말하며 수돗물의 송배수 관로가 대표적인 관수로 흐름이다. 관수로 내 흐름의 물리적 현상은 점성력 및 관성력에 의하여 크게 지배를 받기 때문에 흐름을 층류(laminar flow) 또는 난류(turbulent flow)로 구분하여 해석을 하게 된다. 층류의 경우에는 일부 해석적 해(analytical solutions)가 가능하나 난류의 경우에는

\*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공 부교수 (E-mail : thchoo@pusan.ac.kr)

\*\*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공 정교수 (E-mail : cyok@pusan.ac.kr)

\*\*\*교신저자 · 한국수자원공사 밀양명관리단 (E-mail : kjwon100@kwater.or.kr)

\*\*\*\*충북대학교 지역건설공학과 부교수 (E-mail : maeng@cbnu.ac.kr)

해석적 해가 불가능하며 일반적으로 경험이나 실험을 통하여 구한 자료에 근거하여 해석을 하게 된다. 현재까지 수리학분야에서 관수로의 평균유속을 구하기 위해 가장 많이 회자되고 인용된 공식은 Darcy-Weisbach의 마찰손실수두공식으로 이를 사용하면 되나, 그러나 이 식의 마찰손실계수  $f$ 는 Reynolds 수와 상대조도( $\epsilon/d$ )의 함수이므로 사용하기에 매우 불편하며 따라서 보다 편리한 식이 요구된다. 관수로의 흐름에 대하여 수리학에서 사용되고 있는 유동저항의 표현식은 다음의 형식을 취한다.

$$h_L = f \frac{l V^2}{d 2g} \text{ (Darcy-Weisbach)} \quad (1)$$

여기서,  $h_L$ 는 마찰손실수두,  $f$ 는 마찰손실계수,  $l$ 는 관길이,  $d$ 는 관경,  $V$ 는 평균유속,  $g$ 는 중력가속도이다. 마찰손실수두는 유속의 제곱에 비례하기 때문에 유속의 증가에 의한 마찰손실이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이들의 식은 유속과 경심, 수면 구배 등과의 관계를 나타내는 식이라고도 생각할 수 있으므로 보통 평균유속 공식(Mean Velocity Formula)이라고 불리어지고 있다.

실험식으로 한국상하수도협회(2007)에서 제시하고 있는 Hazen-Williams식(미국, 1910), Manning식, Ganguillet-Kutter식(스위스, 1869), Weston식(1890) 등 있으나, 평균유속계수(C) 및 조도계수(n)을 정확히 선정하는 방법이 없으므로 이 값의 결정에 큰 난점이 있다. 현재까지의 지식으로 실제의 이 값의 선정은 주어진 수로의 흐름에 접촉하여 느낄 수 있는 저항의 추정을 의미한다. 노련한 기술자에게는 이 값의 선정은 완전한 경험과 판단에 의한 것이나 초심자에게는 추측에 지나지 않아 개개의 것은 서로 다른 결과를 초래한다.

지금까지의 관수로의 평균유속 측정은 단순히 삼입식 및 비삼입식 유속측정계를 통한 다지점 유속측정을 통한 측정값의 개략적인 산술평균으로 평균유속을 산출하거나, 실험적인 경험공식을 통한 관수로의 평균유속을 산정함으로써 값 선정이 매우 어렵고 많은 경험을 요구하며, 더구나 명확하게 이것이다라고 하는 정해진 값이 없다는 것이다. 이에 기존의 공식들은 전체적인 2차원의 유속분포를 나타내는데 어려움이 있어 2차원 유속분포를 잘 표현할 수 있는 공식과의 연결성을 보여주는 것이 우선적 과제라 사료된다. 따라서 위와 같은 문제를 해결하기 위한 한 가지 대안으로 Chiu의 유속공식을 사용하는 것이다. Chiu는 기존의 결정론적인 흐름 방향 유속분포식의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 확률통계에서 사용되는 엔트로피 개념을 이용한 유속분포 식을 제안하였고, 신뢰성과 정확성을 지속적으로 증명하여 마침내 이에 대한 활용성이 매우 크게 대두되어 Chiu의 유속공식을 적극적으로 사용하고 있다.

## 2. 연구범위 및 내용

본 연구에서는 위와 같은 Chiu의 유속공식의 적용성을 증명하기 위하여 레이저유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV), 초음파유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F), 피토크관(Pitot Tube)을 이용한 실험을 통하여 관수로내의 유속을 측정하고자 한다. 실험실 원형수로에서 유량이 120 l/min에서 170 l/min까지 6회에 걸쳐 변화할 때마다의 유속을 측정하며

수직 직관의 중심선에서 9개 지점에 대하여 주파수 변화가 입자속도에 비례하는 것을 이용해서 유속을 측정하는 장치인 레이저유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV)을 이용하여 측정된 점유속 데이터 및 초음파가 직접적으로 유체를 통과하는 투과파를 이용하는 방법으로 유체의 흐르는 방향의 정방향과 역방향으로 초음파를 투과시켜 일정한 거리를 각각 전파하는 시간이 유속에 따라 다르게 나타나는 것을 이용하는 초음파유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F) 측정으로 구한 데이터를 활용하고자 한다. 또한, 일정한 흐름 원형수로에서 유체흐름의 총압과 정압의 차이를 측정하고 그것에서 유속을 구하는 장치인 피토크관(Pitot Tube)을 이용한 측정방법으로 구한 데이터를 이용하여 실제 실험을 통해 측정된 유속과 Chiu의 유속공식에 적용하여 신뢰성을 증명하고자 한다.

본 연구에서 사용한 유속 측정장치인 레이저유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV) 및 초음파유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F)의  $R_e$ 수 범위는 29,000~42,000이며, 피토크관(pitot tube)의  $R_e$ 수는 470,000정도로 유속측정 Data 취득에 사용된 흐름은 난류 흐름에 해당된다고 할 수 있으며, 위의 조건 및 방법으로 구한 데이터를 이용하여 Chiu의 엔트로피 유속공식에 적용한 결과 실측한 점 유속 자료와 이론적인 Chiu의 공식을 이용한 유속분포가 매우 잘 일치함을 증명하고, 유량이 변화하는 경우에도 평균유속과 최대유속 사이의 관계가 규칙성, 즉 선형관계를 유지하는지 다시 말하면 엔트로피 파라미터(M)가 이에 대응하여 평형상태에 도달함을 증명하고자 한다.

## 3. Chiu의 유속분포 공식(원형 파이프에서의 흐름)

Chiu의 유속공식은 확률 통계분야에서 사용되는 엔트로피 개념을 도입하여 산정된 2차원 유속공식이며, 이는 유속의 엔트로피 함수가 엔트로피 극대화에 대한 제약조건들을 만족시킴으로써 유속의 확률 밀도함수를 구할 수 있으며, 이 밀도 함수를 각 제약조건별로 다시 대입하여, 필요한 2차원 유속공식 또는 평균유속 공식을 얻을 수 있는 방법으로, Dr. Chiu가 최초로 이 개념을 유속에 도입하였기 때문에 그의 이름을 따서 Chiu의 유속공식으로 불리고 있다. 단지 두개의 파라미터를 가지고 파이프안의 전체적인 흐름 영역안의 속도분포를 기술할 수 있으며, 흐름이 층류 또는 난류이든 그리고 매끄럽거나 또는 거칠거나 관계없다.

Chao-Lin Chiu(1987, 1989, 1993, 2006)에 의하면 유체 흐름의 한 단면에서의 속도분포 등식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln[1 + (e^M - 1)F(u)] \quad (2)$$

여기서,  $u$ 는 공간적으로 분포된 시간평균 유속,  $u_{\max}$ 는 최대유속,  $F(u)$ 는 누기분포함수 그리고 M은 엔트로피 매개변수이다.

Chao-Lin Chiu(2006)는 유체 흐름의 다양한 유형에서 속도분포를 설명하는데 식 (2)를 사용하기 위해서는 일부 유효한 정보가 물리적 공간에서  $F(u)$ 를 해석하는데 사용될 수 있다. 반경 R의 원형 파이프에서 축을 이루는 좌우대칭의

흐름에서 등유속선은 동일한 중심을 가진 원으로 파이프 내 벽에서  $u = 0$ ,  $u_{\max}$ 는 파이프 중심에서 발생, 그리고 속도경사는 파이프 센터에서 0, 파이프 벽에서는 유한한 값을 갖는다. Monte Carlo Simulation의 개념을 사용할 때는 파이프의 횡단면 내에서 임의적으로 샘플링 지점을 만들어내는 것을 통한 흐름 속도의 랜덤한 샘플링을 고려해야 한다. 큰 횡수  $N$ 의 총합 중 발생횟수를  $n$ 이라 하면, 샘플링 포인트는 파이프 벽과  $0 \leq r \leq R$ 에 속하는 반경  $r$ 의 원 사이에 있는 구간에서 발생한다. 그리고 여기서 속도는  $u$ 이며, 이 지역에서  $u$ 보다 작거나 같은 속도 확률은 다음과 같다.

$$F(u) = \frac{n}{N} = \frac{\pi R^2 - \pi r^2}{\pi R^2} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 나타난  $F(u)$ 를 이용한 원형 파이프에서 흐름을 위한 다음과 같은 속도분포등식을 만들어준다. 이 식은 관수로내의 유속분포를 나타내는 식이다.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \left[ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \right] \quad (4)$$

또한, 관수로 평균유속으로 다시 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\bar{u} = \phi \cdot u_{\max} \quad \text{여기서, } \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (5)$$

여기서,  $\bar{u}$ 는 2차원 평균유속,  $u_{\max}$ 는 최대유속,  $M$ 은 엔트로피 매개변수 그리고  $\phi$ 는 2차원 평균유속과 최대유속의 선형관계를 나타내는 지수이다.

식 (4)은 파이프 흐름안에서 속도 분포를 설명해주는 확률적 법칙이다. 이것은 정확히 최대속도  $u_{\max}$ 가 파이프 중심에서 발생한다는 것을 보여준다. 그리고 파이프 벽에서의  $u$ 는 0이다. 게다가 식 (4)은 속도경사를 다음과 같이 만들어준다.

$$\frac{du}{dr} = \frac{u_{\max}}{M} \frac{\frac{2r}{R^2}(e^M - 1)}{1 + (e^M - 1) \left[ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]} \quad (6)$$

식 (6)는 정확히 파이프 중심에서 속도경사가 0이어야 함을 제시해준다. 그리고 파이프 벽은 식 (7)과 같은 등식을 주고, 이것은 유한한 값을 가진다.

$$\left(\frac{du}{dr}\right)_{r=R} = \frac{2u_{\max}(e^M - 1)}{MR e^M} \quad (7)$$

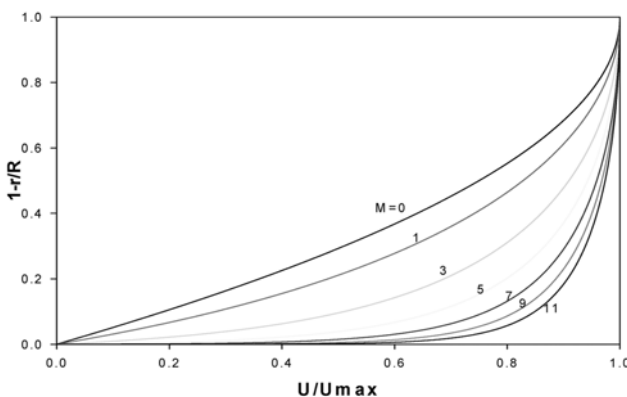


Fig. 1 Velocity Distribution in Circular Pipe Base on Eq. (4)

식 (4)은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이  $u/u_{\max}$ 에 대한  $1-r/R$ 의 값으로 다른 값에 의해 나타난 것처럼 파이프 흐름의 모든 유형에 적용 가능함을 보여주고 있으며, 파이프 흐름에 대한 일반적 등식이라 할 수 있다.

#### 4. 관수로 유속측정 Data

심층적으로 Chiu의 유속분포식을 실험실 데이터에 적용하기 위해서는 우선적으로 관련된 매개변수의 추정과 검증이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 세 가지 환경에서 유속을 측정하여 취득한 자료를 사용하였다. 첫째, 레이저광이 유체의 흐름 속의 미소입자에 의해서 산란할 때 도플러효과에 의해 주파수가 변화하며, 그 주파수 변화가 입자속도에 비례하는 것을 이용해서 유속을 측정하는 장치인 레이저 유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV)를 이용하여 측정된 점유속 데이터를 이용하였다. 둘째, 초음파가 직접적으로 유체를 통과하는 투과파를 이용하는 방법으로 유체의 흐르는 방향의 정방향과 역방향으로 초음파를 투과시키면 일정한 거리를 각각 전파하는 시간이 유속에 따라 다르게 나타나는 것을 이용하는 초음파 유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F)를 이용한 실험 데이터를 이용한다. 셋째, 유체흐름의 총압과 정압의 차이를 측정하고 그것에서 유속을 구하는 장치인 피토펜(pitot tube)을 이용한 측정방법으로 구한 데이터를 이용하였다.

본 연구에서 검증을 위해 사용한 데이터 중 레이저 유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV)와 초음파 유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F)의 자료는 「초음파 유량계와 LDV를 이용한 유체의 유동장 측정방법에 관한 연구(2000년, 한국과학기술원)」의 논문을 활용하였으며, 피토펜(pitot tube)을 이용한 측정 유속데이터는 NEL(National Engineering Laboratory East Kilbride, Glasgow)의 「Insertion Meters and Velocity Measuring Probes」 보고서 자료를 활용하여 Chiu의 유속분포 식과 비교 자료로 활용하였다. 아래 Table 1~3의 LDV 및 U/F는 실험실 원형수로에서의 유량이 120 l/min에서 170 l/min까지 6번 변화할 때마다의 측정된 유속이며, 피토펜은 한 단면에서의 연속적인 측정결과 값이다.

#### 5. 적용 및 결과

##### 5.1. 최대유속 및 엔트로피 M 산정

각각의 실측된 점 유속 자료를 이용하여 그 측정횟수만큼의  $M$ ,  $u_{\max}$ 을 산정한다. 산정된 엔트로피 파라미터  $M$ 과  $u_{\max}$ 을 가지고 측정횟수만큼의 평균유속을  $\bar{u}$ 을 산정한다. 마지막으로 각각의 산정된 최대유속과 평균유속 전체자료를 그래프에 함께 도시하거나 전체 자료를 함께 계산하여 전체를 대표하는 평형상태지수인 엔트로피  $M$ 값을 추정하는 것이다. 위와 같은 방법으로 산정된 엔트로피 파라미터  $M$ 과  $u_{\max}$ 의 자세한 도출과정은 다음 Table 4에서 보는 바와 같다.

아래의 Table 5~7은 LDV 및 초음파 유량계로 유량이 120 l/min~170 l/min까지 6번 변화할 때와 피토펜을 이용한

Table 1. LDV를 이용한 유속측정 결과 값(D90 mm)

유량(LPM)	Position(r/R)	-0.8333	-0.6666	-0.3333	0	+0.3333	+0.6666	+0.8333
120	Velocity(m/s)	0.245	0.291	0.316	0.321	0.316	0.294	0.25
130	Velocity(m/s)	0.279	0.330	0.352	0.347	0.353	0.332	0.283
140	Velocity(m/s)	0.297	0.350	0.380	0.375	0.383	0.354	0.303
150	Velocity(m/s)	0.325	0.381	0.410	0.404	0.412	0.385	0.332
160	Velocity(m/s)	0.348	0.406	0.442	0.440	0.444	0.410	0.353
170	Velocity(m/s)	0.370	0.426	0.468	0.461	0.470	0.435	0.380

Table 2. U/F를 이용한 유속측정 결과 값(D90 mm)

유량(LPM)	Position(r/R)	-0.6666	-0.3333	0	+0.3333	+0.6666
120	Velocity(m/s)	0.212	0.259	0.230	0.255	0.208
130	Velocity(m/s)	0.245	0.293	0.284	0.302	0.243
140	Velocity(m/s)	0.281	0.325	0.328	0.330	0.279
150	Velocity(m/s)	0.306	0.350	0.354	0.349	0.303
160	Velocity(m/s)	0.333	0.376	0.388	0.374	0.328
170	Velocity(m/s)	0.359	0.398	0.402	0.399	0.342

Table 3. 피토관을 이용한 유속측정 결과 값(D100 mm)

구분	Position(r/R)	-0.952	-0.800	-0.612	-0.331	+0.331	+0.612	+0.800	+0.952
1회	Velocity m/s	4.00	4.63	5.04	5.30	5.26	5.02	4.58	3.87
2회	Velocity m/s	3.96	4.67	5.07	5.29	5.39	5.12	4.76	3.95

Table 4. 엔트로피 파라미터 M과  $u_{max}$ 의 도출과정

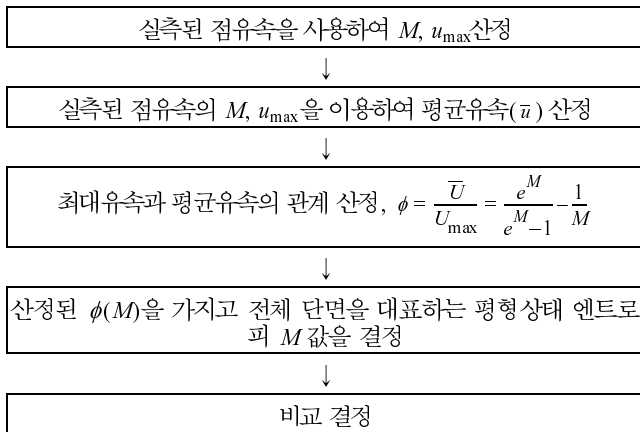


Table 5. 주요매개변수 산정결과(LDV)

유량(LPM)	D(m)	R(m)	$u_{max}$ (m/sec)	M	$\bar{u}$ (m/sec)	$\phi(M)$	R <sup>2</sup>
120	0.09	0.045	0.3244	5.1104	0.2629	0.8104	0.9993
130	0.09	0.045	0.3583	5.8031	0.2976	0.8307	0.9980
140	0.09	0.045	0.3868	5.4642	0.3176	0.8212	0.9985
150	0.09	0.045	0.4167	5.8516	0.3467	0.8320	0.9984
160	0.09	0.045	0.4502	5.4858	0.3700	0.8219	0.9992
170	0.09	0.045	0.4739	5.8066	0.3937	0.8308	0.9988

실측유속 측정 횟수에 대한 주요매개변수를 나열한 것으로, 최대유속( $u_{max}$ ) 및 엔트로피 파라미터 M값은 실측된 유속을 가지고 식 (4)을 풀어서 통계프로그램인 SYSTAT를 사용하여 그 측정횟수 만큼의 값들을 산정 정리하였다.

Table 6. 주요매개변수 산정결과(U/F)

유량(LPM)	D(m)	R(m)	$u_{max}$ (m/sec)	M	$\bar{u}$ (m/sec)	$\phi(M)$	R <sup>2</sup>
120	0.09	0.045	0.2513	3.7061	0.1898	0.7554	0.9894
130	0.09	0.045	0.2988	3.1297	0.2170	0.7262	0.9959
140	0.09	0.045	0.3343	3.5280	0.2497	0.7468	0.9994
150	0.09	0.045	0.3578	3.8715	0.2730	0.7630	0.9998
160	0.09	0.045	0.3870	3.9049	0.2958	0.7645	0.9999
170	0.09	0.045	0.4067	4.2113	0.3162	0.7776	0.9991

Table 7. 주요매개변수 산정결과(피토관)

Traverse	D(m)	R(m)	$u_{max}$ (m/sec)	M	$\bar{u}$ (m/sec)	$\phi(M)$	R <sup>2</sup>
1회	0.1	0.05	5.3006	8.9528	4.7092	0.8884	0.9991
2회	0.1	0.05	5.3833	8.8395	4.7751	0.8870	0.9996

### 5.2. 실측유속과 Chiu 공식의 유속분포식과의 관계검증

아래의 Fig. 2~7은 대표적인 측정값에 대한 Chiu공식과 실측값의 상관분석 관계를 보여주고 있으며, 원형수로의 LDV 및 초음파 유량계로 유량이 120 l/min~170 l/min까지 변화하는 곳에서 측정된 값과 피토관을 이용한 측정값이 Chiu공식 유속분포식과의 관계가 매우 잘 일치함을 보여주고 있다.

### 5.3. 평형상태 결정

Fig. 8~9는 최대유속과 Chiu의 평균유속식의 관계로부터 얻어진 평형상태의 M값은 유량이 변화함에도 최대유속과 평균유속사이의 일정한 평형상태를 유지하려 한다는 사실을 보

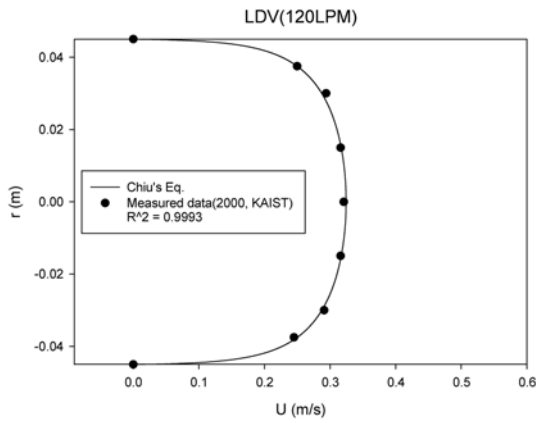


Fig. 2 Chiu공식과 실측값의 상관분석(LDV 120 //min)

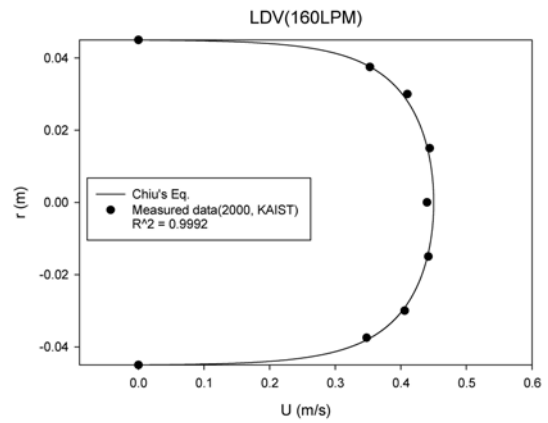


Fig. 3 Chiu공식과 실측값의 상관분석(LDV 160 //min)

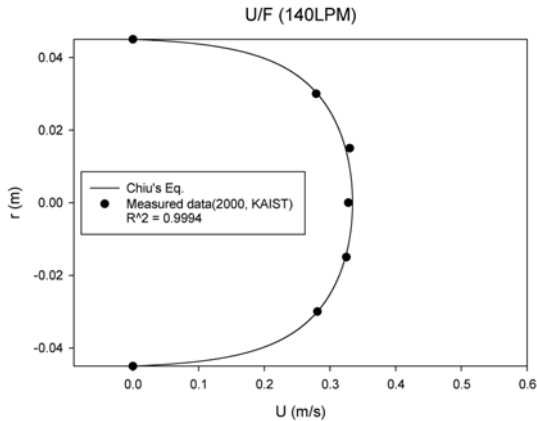


Fig. 4 Chiu공식과 실측값의 상관분석(U/F 140 //min)

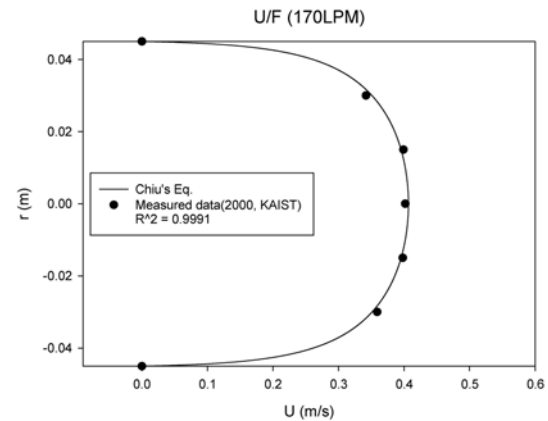


Fig. 5 Chiu공식과 실측값의 상관분석(U/F 170 //min)

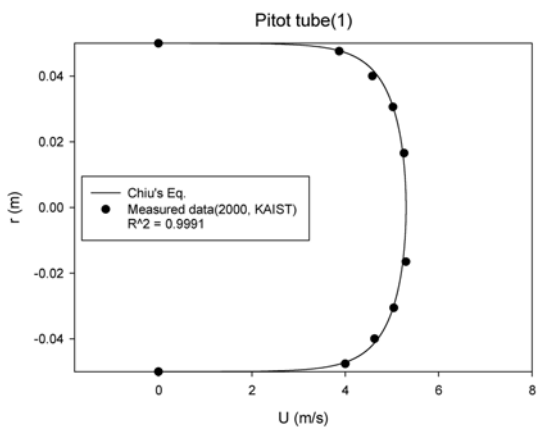


Fig. 6 Chiu공식과 실측값의 상관분석(Pitot tube-1)

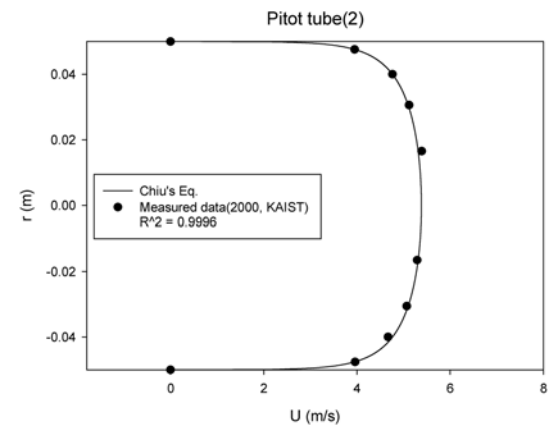


Fig. 7 Chiu공식과 실측값의 상관분석(Pitot tube-2)

여주고 있다. 원형 관수로는 임의적인 외력이나 자연에 인위적 변형을 하지 않는 한 관수로의 횡단면은 이 엔트로피 파라미터에 대응하는 평형상태에 도달하려하고, 또한 이 평형상태를 지속적으로 유지하려하고 하기 때문에 이 엔트로피 파라미터  $M$ 값이 결정되면 최대유속이 발생하는 지점에서의 유속측정만으로 평균유속을 구할 수 있고 이로부터 간단히 유량을 측정할 수 있다는 것이다. 이렇게 구해진 최대유속과 평균유속을 선형 회귀분석하여  $\phi(M)$  값을 산정하였다. 매개변수  $M$ 은 엔트로피 유속분포의 유일한 수리학적 매개변수로서 단면의 최대유속과 평균유속의 관계를 나타낸다. 또한 한 지점에서는 유량이 변화하더라도 일정한 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Chiu와 Said, 1995).

#### 5.4. 평형상태의 $M$ 과 유속의 공간적 분포와 관계

본 연구에서는 실용적 측면에서의 활용성 여부를 판단하기 위하여 레이저 유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV)와 초음파 유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F)의 실측자료를 이용하여 효율성을 증명하고자 한다. 즉, 간단한 수리량으로 부터 산정된  $M$ 이 유속의 공간적분포를 잘 표현해 주는지 여부를 실측유속과 비교분석 하였다.

이를 위해서 앞에서 산정한 평형상태 비, 즉 최대유속과 평균유속의 선형 회귀분석 값  $\phi(M) = 0.8548, 0.8275$ 을 식 (5)에 대입하여  $M$ 값으로 6.8365, 5.6851을 구하였다. 이러한 결과로 인공수로인 경우도 임의적인 외력이나 인위적 변형을 하지 않는 한 유량 변화에도 불구하고 이 엔트로피 파

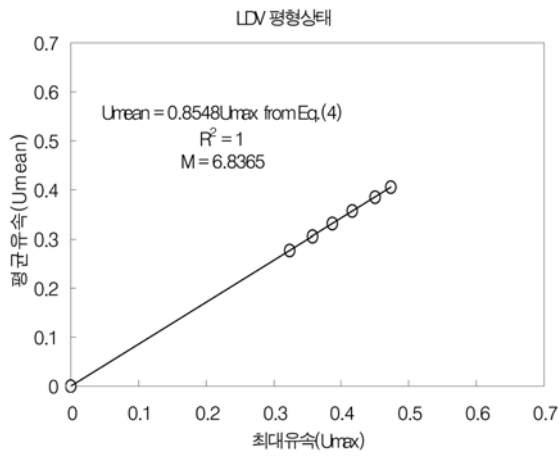


Fig. 8 평형상태 비(LDV)

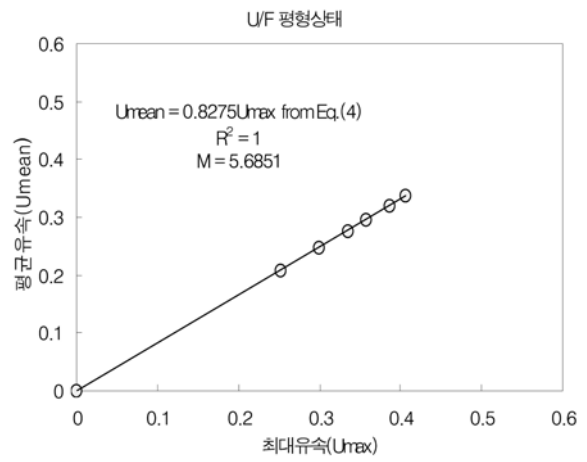


Fig. 9 평형상태 비(U/F)

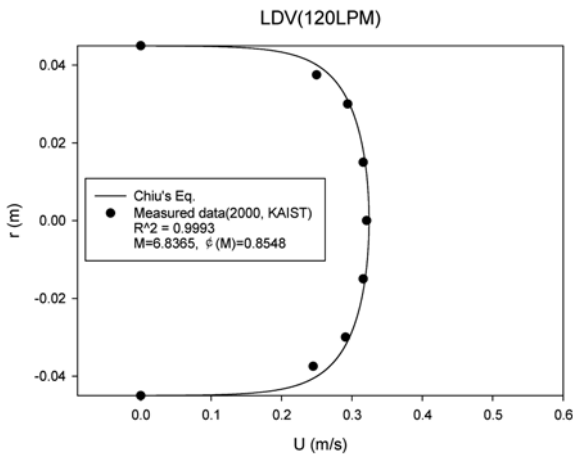


Fig. 10 Chiu공식(평형상태 M)과 실측값의 상관분석(LDV 120 //min)

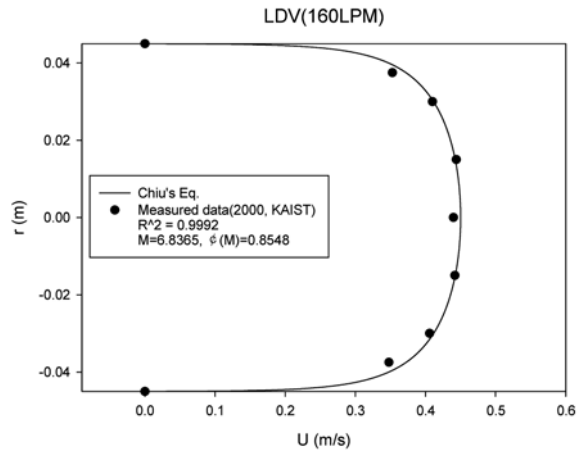


Fig. 11 Chiu공식(평형상태 M)과 실측값의 상관분석(LDV 160 //min)

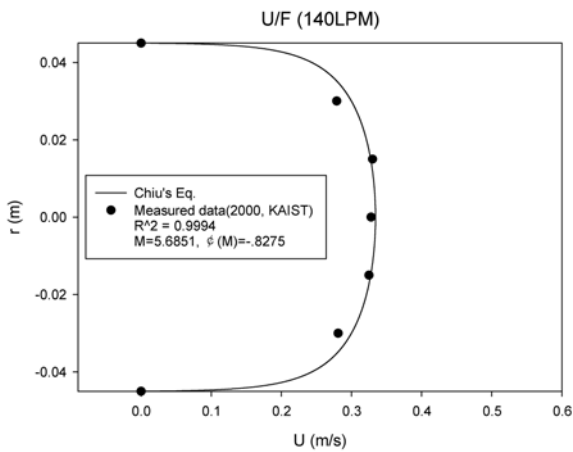


Fig. 12 Chiu공식(평형상태 M)과 실측값의 상관분석(U/F 140 //min)

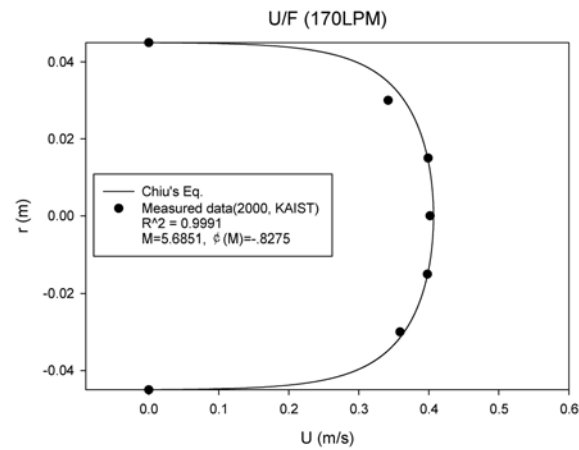


Fig. 13 Chiu공식(평형상태 M)과 실측값의 상관분석(U/F 170 //min)

라미터  $M$ 값에 대응하는 평형상태에 도달하려 하고, 또한 이 평형상태를 지속적으로 유지하려고 하는 경향이 있음을 Fig. 10~13까지 보여주고 있다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 Chiu 유속공식의 신뢰성과 정확성을 증명하기 위하여 관수로에서 비삽입식 유속측정장치인 레이저유속계(Laser Doppler velocimeter: LDV) 및 초음파유량계

(Ultrasonic Flowmeter: U/F), 삽입식 유속측정장치인 피토관(Pitot tube)을 이용하여 실험실 실측 유속측정 자료와 Chiu의 공식을 이용한 유속분포가 매우 잘 일치함을 증명하였으며, 유량의 증감에 관계없이 실험실수로에서의 최대유속과 평균유속간의 이론적인 선형관계를 증명함으로써 관수로내 유속의 평형상태, 즉 엔트로피 파라미터  $M$ 값에 대응하는 평형상태에 도달하려하고, 또한 이 평형상태를 지속적으로 유지하려고 하는 경향이 있음을 확실히 증명하였다. 또한 실제 산업현장에 바로 적용 가능하도록 실용적인 측면에서도 그

적용성이 우수함을 아울러 증명하였으며, 본 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 실측유속과 Chiu 공식의 유속분포식과의 관계를 검증하기 위하여 본 연구에서 레이저유속계(Laser Doppler Velocimeter: LDV), 초음파유량계(Ultrasonic Flowmeter: U/F), 피토관(Pitot tube)을 활용하여 비교 검증한 결과, 실험실에서 실측한 유속측정 값과 Chiu의 공식을 이용한 유속분포가 매우 잘 일치함을 증명하였다.
2. 기존의 관수로 흐름연구에 적용된 공식들의 대안으로 확률과 엔트로피 개념을 근간으로 하는 새로운 유속공식으로, 오직 두 개의 변수인 엔트로피 파라미터  $M$ 과  $u_{max}$ 을 갖는 새로운 이 공식은 관수로에서의 전체 유속분포를 잘 나타낼 수 있음을 증명하였다.
3. 관수로의 유량 값이 120 l/min~170 l/min으로 변화하는 경우의 실험실 수로에서 그 주어진 단면에서의  $M$ 값은 최대유속과 평균유속과의 선형관계를 보여주고 있으며, 엔트로피 파라미터  $M$ 값에 대응하는 평형상태에 도달하려고 하고 이 평형상태를 지속적으로 유지하려고 하는 경향이 있음을 증명하였고, 이는 이론식 (4)을 실제 측정된 자료를 이용하여 최대유속과 평균유속과의 이론적인 선형관계를 다시금 증명하였다.
4. 관수로 흐름(conduit)의 한 단면을 대표하는 엔트로피 파라미터  $M$ 값이 결정되면 최대유속이 발생하는 지점에서의 유속측정만으로 단면 전체의 평균유속을 쉽게 구할 수 있고 이로부터 간단히 유량을 산정할 수 있다. 이는 추후 관수로 설계 및 운영관리 시 가장 중요한 평균유량을 측정할 수 있는 이론적인 도구로 사용될 수 있음을 의미하는 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구 되었습니다.

## 참고문헌

강주복(1996) 수리학. 구미서관.  
 김용범(2003) 파동전파 특성을 이용한 관내 평균유속 측정방법. 박사학위논문, 한국과학기술원.  
 곽승진(2008) Chiu 유속분포공식의 적용성에 관한 연구. 석사학위논문, 부산대학교.  
 노명근(2008) 엔트로피 개념을 이용한 유속의 평형상태에 관한 연구. 석사학위논문, 부산대학교.  
 양석준(2000) *A Study Flow Measurement Methods using Ultra-*

*sonic Flowmeter and LDV*. 석사학위논문, 한국과학기술원.  
 윤태훈 외 공저(2002) 수리학. 형설출판사.  
 제성진(2008) Manning과 Chiu 공식을 이용한 유속의 공간적 분포에 관한 연구. 석사학위논문, 부산대학교.  
 추태호(2002) 엔트로피 개념에 의한 유량측정 기법(II) - 표면유속을 중심으로 -, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제22권 제4B호, pp. 507-515.  
 한국상하수도협회(2007) 정수시설운영관리사. 도서출판 건설도서.  
 황상윤(2004) *초음파 유량계 강좌*. (주)창민테크.  
 Chiu, C.-L. (1986) Structure of 3-D flow in rectangular open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1050-1068.  
 Chiu, C.-L. (1987) Entropy and probability concepts in Hydraulics, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 583-599.  
 Chiu, C.-L. (1988) Entropy and 2-D velocity distribution in open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 738-756.  
 Chiu, C.-L. (1989) Velocity distribution in open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 576-594.  
 Choo, T.H. (1998) Efficient Method of Discharge Measurement in Sandys Rivers. Ph. D. Thesis, Dep. of Civ. & Env. Engrg. Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, 1998.  
 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.  
 Chiu, C.-L. and Murray, D.W., and Choo, T.H. (1992) Variation of velocity distribution along nonuniform open-channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 989-1001.  
 Chao-Lin Chiu (1993) Application of probability and entropy concepts in pipe-flow sturdy. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 6, pp. 742.  
 Chiu, C.-L. and Said, C.A.A. (1995) Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp. 26-35.  
 Chiu, C.-L. and Tung, N.-C. (2002) Maximum velocity and regularities in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 390-398.  
 Chiu, C.-L. and Hsu, S.-M. (2006) Probabilistic approach to modeling of velocity distributions in fluids flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 316, pp. 28-42.  
 Mr D Boam, *Insertion Meters and Velocity Measuring Probes*, National Engineering Laboratory.  
 Moramarco et al. (2004) Estimation of Mean Velocity in Natural Channels Based in Chiu's Velocity Distribution Equation, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 1, pp. 42-50.

(접수일: 2009.3.31/심사일: 2009.5.8/심사완료일: 2009.6.22)