

수위-유량관계곡선 개선에 관한 연구



추 대 호 |

부산대학교 토목공학과 교수
tai316@hanmail.net



맹 승 진 |

충북대학교 지역건설공학과 교수
maeng@cbnu.ac.kr



이 상 진 |

한국수자원공사 Kwater연구원 수자원연구소
책임연구원
sjlee@kwater.or.kr



오 룬 수 |

부산대학교 석사과정
windy0707@naver.com

가뭄과 대홍수로 인하여 지구 전체는 혜택을 얻어야 할 수자원에서 막대한 재산 피해와 인명 피해를 겪고 있는 실정이다. 이에 우리는 수자원을 효율적으로 이용 보전하기 위하여 지구상의 물을 관찰하고 이를 활용하기 위한 각종 시설물을 건설하는 등 온갖 지혜를 모아왔다.

실제로 수자원장기종합계획, 유역종합치수계획, 하천기본계획, 댐 운영, 수리 및 수문 모형의 개발, 수리권과 물분쟁의 소송을 위한 기록, 하천 및 수리구조물 설계, 유역의 유수량, 오염총량제, 4대강 살리기 등의 근간은 가장 기본적이며 중요한 수자원 관측 및 관리, 특히 유량에 대한 정확한 정보를 어떻게 취득하느냐에 따라서 성패가 판가름 날 것이다. 그럼에도 불구하고 현재 수자원관측 및 자료관리와 관련하여 국내의 기술 수준은 외국의 기술 선진국에 비하여 뒤지지는 않다고 생각하는 일부 기술자들의 의견도 있기는 하나, 우리나라와 같은 독특한 수문현상을 갖고 있는 특수상황을 감안할 때 현재와 같은 수준의 수자원관측 및 자료관리 기술은 미흡한 점이 많다고 할 수 있다.

현재의 수자원 기초조사는 관측지점 및 측정횟수의 부족, 관측시설의 노후와 측정자료의 부족 및 관측의 소홀, 수문자료 관리기술 및 체제의 불충분, 물 관리 기술개발의 미흡 등으로 데이터에 대한 신뢰도가 저하된 실정이다. 더욱 심각한 것은 이러한 데이터의 신뢰도에 대하여 문제의 심각성을 갖지

1. 서 론 (연구배경 및 목적)

인간의 문명은 하천에서 시작될 만큼 물은 인류에게 있어서 없어서는 안 될 필수요소이다. 하지만, 이상기후 및 갑작스런 기상이변으로 인한 극심한

못하고 있다는 점이다.

따라서 본 연구에서는 수자원 기초자료 중 매우 중요한 유량 결정 방법에만 국한하여 개선안을 제안코자 한다.

2. 현재 유량측정의 문제점

현재까지 유량자료는 직접측정이 기술적으로 곤란하므로 대부분 간접적으로 취득되며, 다음의 과정을 거쳐 생산된다. 이론에서부터 최종적으로 환산된 유량자료는 다음과 같은 오류가 발생한다. 첫째, 평균유속으로의 환산에 사용된 유속공식 선택 시 1차 오류가 발생한다. 둘째, 수위-유량 측정 시 2차(일반적으로 정밀법 대신 주로 1점법, 2점법, 3점법에 국한된 측정) 오류가 발생한다. 셋째, Rating Curve식 작성 시 3차 오류가 발생하고 넷째, 수위자료로부터 유량자료 환산 시 4차 오류가 각각 발생된다. 이러한 오차는 유량환산 자료에 전파되어 누적되므로 직접측정이 가능한 자료에 비하여 오차의 정도가 매우 심각함을 예상할 수 있다.

이와 같은 주된 원인은 유속분포에 대한 수리학적 이론을 바탕으로 한 연구가 수행되지 못하였으며, 모든 관심사가 단지 손쉽게 접근할 수 있는 수위에만 의존한 H-Q곡선을 추정하고, 단순한 1점법, 2점법, 3점법 등 기존의 한정된 평균유속 측정

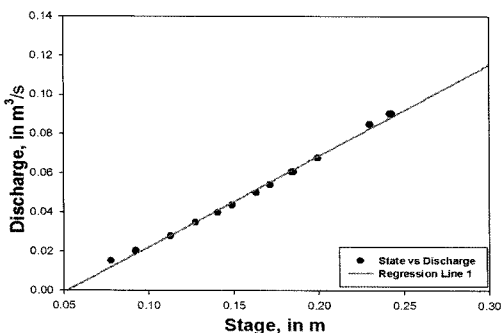
방법에만 국한하여 추진 되었기 때문이다. 즉, 새로운 분야의 이론을 유속 또는 유량산정에 접목시키는 노력이 결여 되었고, 평균유속 이외의 인자에 대한 연구가 극히 미진하였기 때문이다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 흐름을 등류와 정류라고 가정하여, 실측된 평균유속, 하상경사, 경심, 수위 등의 간단한 수리인자를 고려해 산정하는 방법을 개선안으로, 새로운 확률기법인 엔트로피 개념을 활용해서 산정하는 방법으로 제시코자 한다.

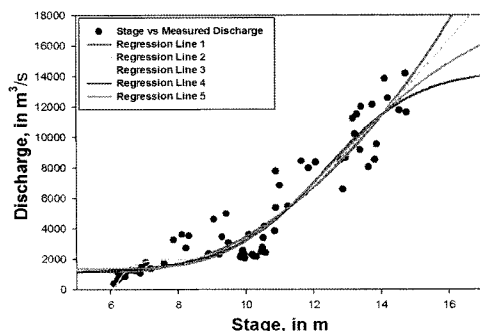
3. 기존 H-Q의 한계성

고수위에 해당하는 유량은 그 측정의 수위-유량 관계곡선을 연장하여 추정하게 되는 방법에는 두 가지가 있고 회귀모형으로 구성 된 방법에는 최소제곱법으로 매개변수를 구하여 최적화시키는 선형 회귀분석과 비선형 회귀분석이 있다.

그러나 일반적으로 고수위에 대한 수위-유량 관계곡선의 연장은 선형보간(외삽)을 통하여 이루어지고 있어 고수위에서의 유량 크기의 차이가 크게 발생한다. 고수위에서의 유량차이는 전체 유량 Volume의 큰 변화를 초래하므로 이수·치수적인 측면에서 물 관리의 효율성을 저해하는 큰 요인이 되고 있다. 이와 같은 문제점을 측정자료를 이용한



(a) Stage-Discharge Curve In Lab



(b) Stage-Discharge Curve in The Natural Open Channel

Fig. 1. Existing Stage-Discharge Curve

Table 1. Results of Two Equations

Fig. 1(a) case		Fig. 1(b) case	
H-Q Curve Eq.	R ²	H-Q Curve Eq.	R ²
$Q = 0.4652H - 0.0242$	0.9949	1 $Q = 6738.8257 - 1744.1611H + 126.5928H^2 + 1.5489H^3$	0.8913
		2 $Q = 103100.8516 + \frac{-2322952.5079}{H} + \frac{17810262.6901}{H^2} + \frac{-45584178.726}{H^3}$	0.8986
		3 $Q = 1306.6878 + \frac{14492.9971}{1 + \left(\frac{H}{12.6254}\right)^{-8.1321}}$	0.8974
		4 $Q = 1077.0457 + \frac{13323.1310}{\left[1 + e^{-\left(\frac{H-12.5432}{1.3151}\right)^{0.8770}}\right]}$	0.8979
		5 $Q = 1397.00 + 18288.2753e^{-e^{-\left(\frac{H-12.6254}{2.9664}\right)}}$	0.8957

여 알아본다.

Fig. 1과 같이 수심별에 따른 유량측정자료가 있으며, R²값이 큰 기존의 방식을 적용하면 실험실 자료인 Fig. 1(a)의 경우는 0.99이상의 R²값으로 분석 되지만, 자연하천 자료인 Fig. 1(b)의 경우는 난산되어 있는 실측자료에서 상관계수가 큰 회귀식을 찾는다는 어려움이 있다. 또한, 수위-유량곡선식을 추정하더라도 수위와 유량 자료에만 의존하는 것은 한계가 있다. Fig. 1(a)나 (b) 또는 Table 1에서 R²의 값이 높은 수위-유량곡선을 택하는 것은 위험하다. 이유는 R²값의 차이가 작은 것에 비해 추정곡선이 향하는 방향은 매우 다양하게 나타나기 때문이다. Fig. 1에서와 같이 단지 회귀분석결과만을 가지고 미측정된 구간의 고 유량을 추정하는 것은 매우 위험하다는 것을 알 수 있다. 즉, 각종 개발된 수문 시스템(강우-유출모형의 매개변수 검증 등)이나 수리모델의 검증을 위하여 기존의 방법을 그대로 사용한다면 의외의 결과를 가져올 수도 있다는 의미이며 기존 H-Q방법의 한계성을 단적으로 보여준 예이다.

따라서 이러한 한계성을 극복하는 한 가지 대안으로 다음의 평균유속을 이용한 수리학적 접근 방법을 제안한다.

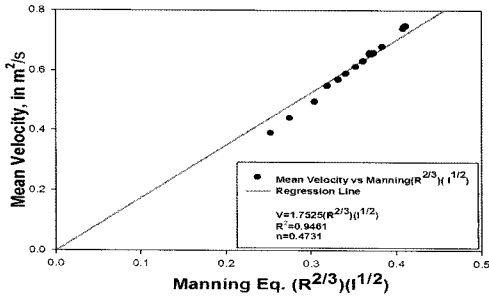
4. H-Q 개선안(평균유속을 중심으로) 제시

지금까지 가장 많이 사용되고 있는 평균유속공식인 Manning과 Chezy식을 활용한 수리학적인 접근방법으로 미측정된 구간의 고 유량을 추정하는 것을 개선안으로 제시코자한다. 우선 간단히 두 공식에 대하여 소개한다.

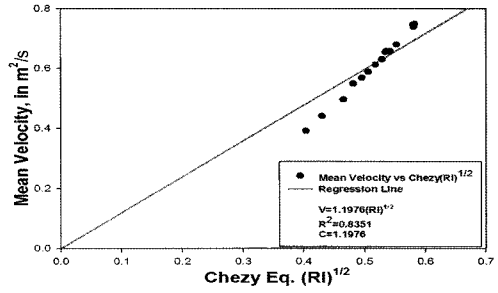
4.1 Chezy Equation

같은 흐름조건에서 전단응력과 유속(velocity)과의 관계식을 유도하여, 차원해석으로부터 경계면의 전단응력과 유체 밀도 그리고 유속의 관계는 $\tau_0 = \alpha \rho V^2$ 로 나타낼 수 있다(Henderson, 1966). 여기서, α 는 경계층의 표면조도(boundary roughness)의 특징에 비례하는 무차원수이며, V는 횡단면에 대한 평균유속(m/s)이며, $\sqrt{\frac{g}{\alpha}}$ 가 C와 같다고 할 때, $V = C\sqrt{RS}$ 로 나타내어진다. 1770년대 방정식을 처음으로 유도한 프랑스 엔지니어 Antoine Chezy(1718~1798)의 이름에 의해서 Chezy방정식으로 명명하였다.

4.2 Manning Equation

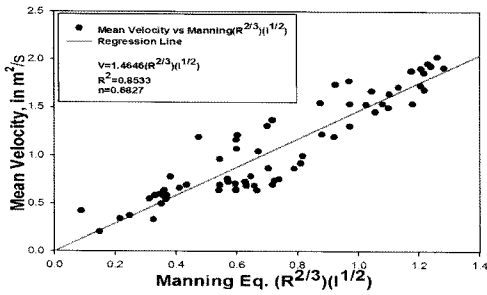


(a) Relationship between Mean Velocity and Manning Eq. in Lab.

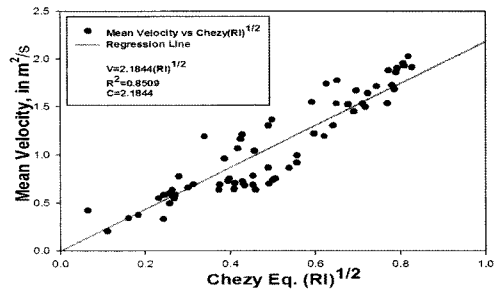


(b) Relationship between Mean Velocity and Chezy Eq. in Lab.

Fig. 2. Analysis of Relationship between Mean Velocity and Two Equations(Manning Eq, Chezy Eq.)



(a) Relationship between Mean Velocity and Manning Eq. in The Natural Open Channel



(b) Relationship between Mean Velocity and Chezy Eq. in The Natural Open Channel

Fig. 3. Analysis of Relationship between Mean Velocity and Two Equations(Manning Eq, Chezy Eq.)

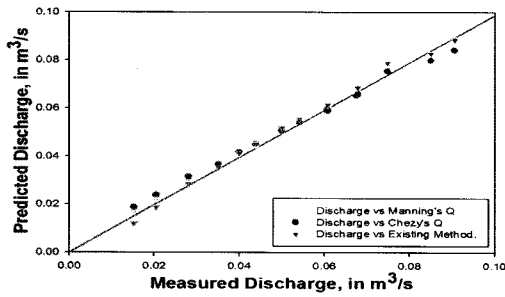
Table 2. Estimation Manning and Chezy Eq.

	Manning	n	R ²	Chezy	C	R ²
1	$V = 1.7525 R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	0.4731	0.9461	$V = 1.1976 \sqrt{RI}$	1.1976	0.8351
2	$V = 1.4646 R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	0.6827	0.8533	$V = 2.1844 \sqrt{RI}$	2.1844	0.8509

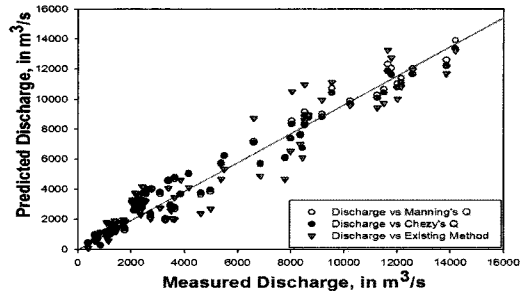
Manning 공식은 Chezy 공식의 특별한 경우이며 $V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S}$ 로 표현되며, FPS단위계에서 $(3.28)^{\frac{2}{3}} = 1.485$ 이므로 Manning 공식은 $V = \frac{1.485}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S}$ 로 표현된다.

그동안 수위만으로 산정되는 단순한 수위-유량 관계곡선의 관계를 벗어나 R(경심)=A(횡단면적)/P(윤변), S_f(에너지경사)=Δh(수심)/L(길이), S₀(하상경사)=Δz/L=tanα(수로바닥경사각도) 등을 이용하여 수리학적 특성이 포함된 Manning과 Chezy의 유속공식과 실측된 유속 값과의 관계를 우

선 분석한다. 실측된 평균유속, 하상경사, 경심, 수위로부터 $y = a \times x$ 형태를 가진 Manning과 Chezy 공식 형태를 산정하여 조도계수(n), Chezy계수의 (C) 값을 도출한다. 이를 위해서 사용된 첫번째 실측자료는 1948년 Meter-Peter, E. And Muller, R.가 B=0.5(m), D₅₀=2.690(mm)의 실험실 조건에서 측정된 19개 자료이다. 두번째는 자연하천의 경우로 1968년 Toffaleti가 Atchafalaya River에서 측정된 72개 자료이며 유사량 크기가 0.062 mm보다는 큰 입자들을 가지고 있는 흐름이다. 산출된 결과는

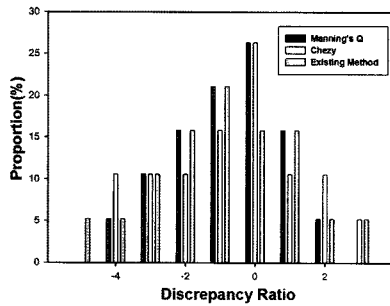


(a) Case in Lab.

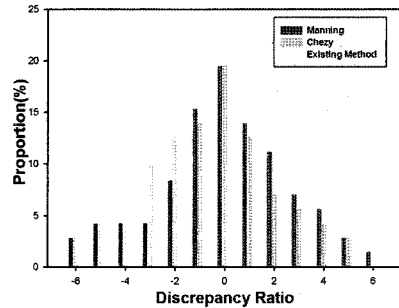


(b) Case in The Natural Open Channel

Fig. 4. Analysis of Relationship between Measured Discharge and Predicted Discharge



(a) Case in Lab.



(b) Case in The Natural Open Channel

Fig. 5. Comparison of Discrepancy Ratio between Rating Curve and Two Equations

Fig. 2와 Fig. 3 및 Table 2와 같다.

개선안에서는 실측자료로부터 실측평균유속과 이론적인 Manning과 Chezy 유속공식의 관계를 산정하여 선형관계를 유지하는 상관분석의 값으로 기울기를 구한다. 여기서 구해지는 기울기는 당해 하천의 수리학적 특성이 반영된 Manning의 조도 계수 n 값과 Chezy의 C 값이다. 따라서 고수위에 해당하는 기울기 값을 구하고, 이에 대응하는 유속이 수정된 고유속 값이며 여기에 그 단면적을 곱하여 필요한 고유량을 추정하는 방법이다.

기존의 방식 $H-Q$ 에서 추정된 유량에 비해 Manning, Chezy 유속공식을 적용해 산출된 유량이 실측값과 일치함을 Fig. 4에서 알 수가 있다.

검증방법으로 계산유량과 실측유량의 Discrepancy Ratio를 택하였다. $R_D = \log(Q_p/Q_m)$ 식을 사용하였으며, 차이 값이 0보다 크면 예측 값이 과잉추정 된 경우이고, 0보다 작은 음의 값을 가지

면 과소평가 된 경우이다. Fig. 5에서 평균유속공식에 의한 예측유량 값의 분포도와 기존방식인 $H-Q$ 에 의한 예측유량 값의 분포도를 비교해 보았을 때, 해당하천의 수리학적 특성이 잘 반영된 개선안이 우수하다는 것을 알 수가 있다.

본 개선안은 기존의 수위만 고려한 $H-Q$ 관계곡선보다, 당해하천의 정류 및 등류하의 수리학적 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났으나 역시, 홍수기의 특성인 부정류, 부등류 흐름 특성을 반영하는 데는 한계성이 있다. 따라서 이러한 한계성을 근본적으로 극복할 수 있는 최적으로 다음의 엔트로피 접근방법을 제안한다.

5. H-Q 최적안 제시

확률 통계분야에서 사용되는 엔트로피 개념을 도

입하여 산정된 2차원 유속공식인 Chiu공식은 유속의 엔트로피 함수가 엔트로피 극대화에 대한 제약 조건들을 만족시킴으로써 유속의 확률밀도함수를 구할 수 있으며, 이 밀도 함수를 각 제약조건별로 다시 대입하여, 필요한 2차원 유속공식 또는 평균 유속 공식을 얻을 수 있는 방법으로, Dr. Chiu가 최초로 이 개념을 유속에 도입하였기 때문에 그의 이름을 따서 Chiu의 유속공식으로 불리고 있다.

이처럼 2차원 유속분포를 잘 나타내고 실용적인 Chiu공식을 앞에서 서술한 각종 한계성을 극복하는 최적안으로 제안하고, 중요한 부분만 발췌 수록 하였으며 지면관계상 참고문헌은 생략하였다.

5.1 Chiu의 유속공식

유속의 엔트로피 함수는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$H(u) = \int_0^{u_{max}} p(u) \ln p(u) du \quad (1)$$

여기서, u : 수로단면에 공간적으로 분포된 시간평균 유속, u_{max} : 최대유속, $p(u)$: 유속확률밀도함수

위 엔트로피 최대화를 위한 제약조건들은 아래와 같다.

$$\int_0^{u_{max}} p(u) du = 1 \quad (2)$$

$$\int_0^{u_{max}} up(u) du = \bar{u} = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

제약조건들인 식(2)와 (3)를 식(1)에 대입하여 유속의 확률밀도함수를 구하면 다음과 같다.

$$p(u) = e^{\lambda_1 - 1} e^{\lambda_2 u} \quad (4)$$

여기서, λ_1 과 λ_2 는 Lagrange multipliers이다.

유속의 확률밀도함수와 공간적 분포와의 관계를 나타내는 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} = \int_0^u p(u) du = \frac{\pi R^2 - \pi r^2}{\pi R^2} \quad (5)$$

여기서, 좌변은 개수로인 경우이며, 우변은 관수로인 경우를 각각 나타낸다.

따라서 식(4)을 식(5)에 대입 적분하면 Chiu의 2차원 유속공식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$u = \frac{u_{max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} \right] \quad (6)$$

여기서 $M = \lambda_2 u_{max}$ (통상 엔트로피 계수라고 함) 2차원 평균유속은 식(4)을 식(3)에 대입하면 구하면 식(7)과 같다.

$$\bar{u} = \int_0^{u_{max}} up(u) du = \phi u_{max} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (8)$$

식(7)에서 \bar{u} 는 2차원 평균유속이고 u_{max} 은 2차원 유속분포 내에서 일어나는 유일한 최대유속이므로, 기존의 방법처럼 하천단면을 여러 단면으로 나누고, 수심 및 유속을 측정 할 필요가 없음을 의미한다. 즉 평균유속을 구하기 위해서는 최대유속이 발생하는 지점에서 유속만이 필요하다. 따라서 각종 한계성을 극복할 수 있는 최적안으로 식(7)을 제

Table 3. Results of Two Equations

	Chiu	$\phi(M)$	R^2	Manning	C	R^2
1	$V = 0.8535 V_{max}$	0.8535	0.9993	$V = 98.867 R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	0.0101	0.7582
2	$V = 0.9126 V_{max}$	0.9126	0.9974	$V = 1.5332 R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	0.6522	0.8301

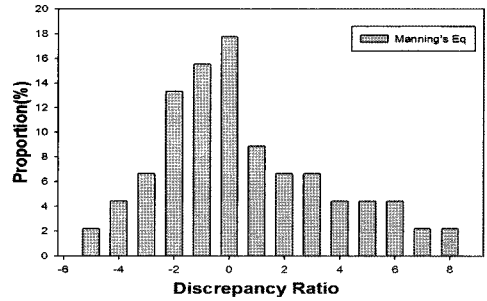
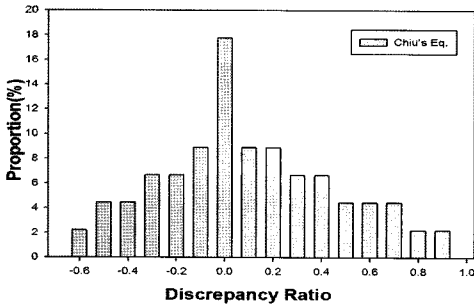
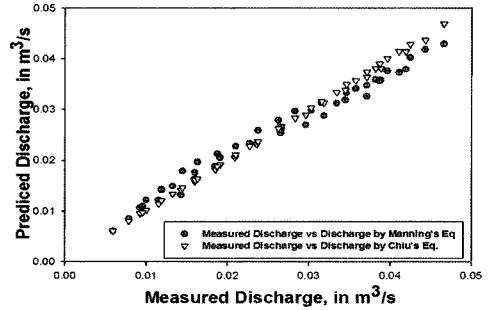
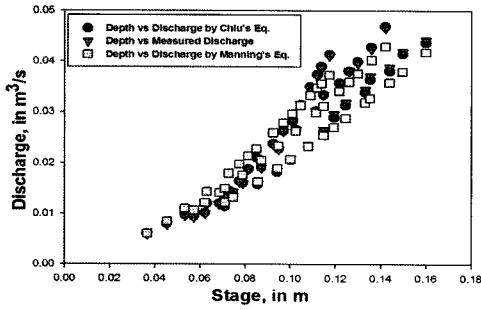


Fig. 6. Analysis Results by using Chiu's Equation with USACE's Data

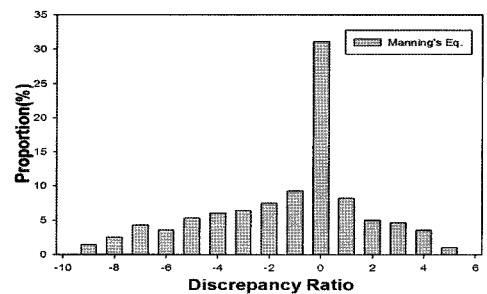
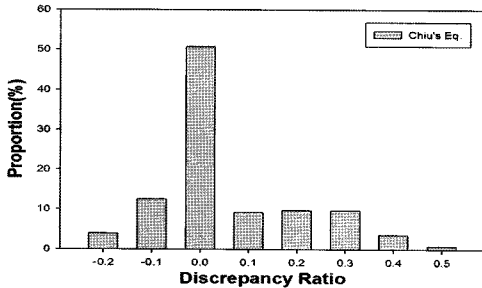
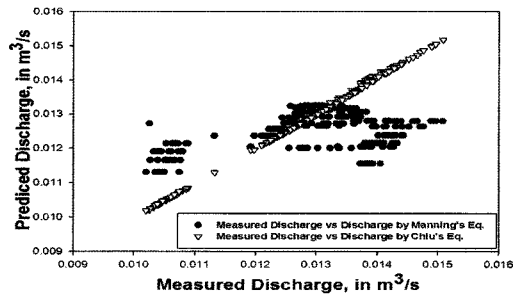
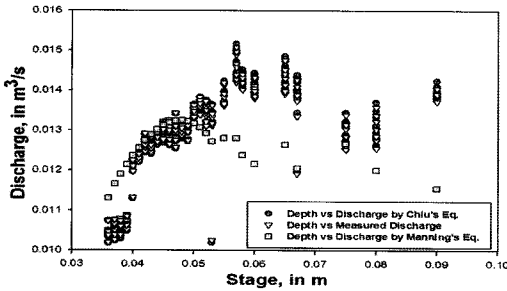


Fig. 7 Analysis Results by using Chiu's Equation with PNU's Data

안한다.

우선, 실측된 평균유속, 하상경사, 경심, 수위로부터 $y = \alpha \times x$ 형태인 식(7)인 Chiu 공식 형태를 산정하여 지수 값인 $\alpha = \phi$, 즉 하천의 평형상태를 나타

내는 엔트로피 함수를 도출한다. 이를 위하여 첫 번째 자료는 United States Army Corps of Engineers에서 1935년 실험실 수로실험에서 실측한 45개 자료와 부산대학교 수리실험실에서 실측

한 280개 자료를 사용하였으며, 그 결과 값은 Table 3과 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

최적 안에서는 실측자료로부터 실측평균유속과 이론적인 Chiu의 유속공식과 관계를 산정하여 선형관계를 유지한 상관분석의 값으로 기울기를 구한다. 여기서 구해지는 기울기는 당해하천의 모든 수리학적 특성이 반영된 Chiu의 엔트로피 값 M이다.

즉, 실측자료인 평균유속과 하천의 특성을 나타내는 각 수리학적인자로부터 Chiu공식의 지수인 M값을 추출하여 고수위에 해당하는 고유속을 추정하고, 여기에 그 단면적을 곱하여, 필요한 고유량을 추정하는 방법이다(Fig. 6 상단그림참조).

기존의 방식인 H-Q관계나 개선안으로 추정된 유량에 비해 Chiu의 유속공식을 적용해 산출된 유량 값이 실측값과 매우 일치함을 Fig. 6 및 Fig. 7 상단 우측 그림에서 보는바와 같다.

검증의 방법으로 각각의 데이터를 분석하여 산출된 예측유량과 실측유량의 Discrepancy Ratio를 검증방법으로 택하였다. Fig. 6과 Fig. 7의 하단 그림에서 보는 바와 같이 유속공식에 의한 예측 유량 값의 분포도와 기존의 방식에 의한 예측 유량 값의 분포도를 비교해 보았을 때, 해당하천의 모든 수리학적 특성이 반영된 최적안이 매우 우수함을 알 수가 있다.

본 최적안은 기존의 수위만 고려한 H-Q관계곡선의 문제점 뿐만 아니라, 하천의 모든 수리학적 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

6. 결론 및 추가적 제언

기존의 수위에만 의존한 H-Q곡선을 대신하여, 수리학적 특성을 반영한 평균유속공식을 활용한 개선안과 수리학적 특성을 반영한 정보를 활용하여 정밀한 평균유속의 추정을 통하여 보다 신뢰성 있

는 유량값의 연속적인 획득이 가능한 최적안의 결과 및 추가적 제언은 다음과 같다

1. 경심, 하상경사, 수심 등 비교적 쉽게 취득할 수 있는 하천의 수리특성인자를 활용한 개선안이 기존의 H-Q보다 향상된 유량을 산정할 수 있음을 증명하였다.
2. 엔트로피 개념을 활용한 산정방법인 최적안은 정밀한 평균유속의 추정을 통하여 보다 신뢰성 있는 연속적인 유량값의 획득이 가능함을 증명하였다.
3. 최적안을 통한 유량관계식을 사용한다면, 수자원 조사계획에서부터 관리운영까지 효율적인 활용이 가능하며, 지속적인 사회문제인 수질관리업무 뿐만 아니라, 현재 전 국민의 지대한 관심 속에 진행 중인 4대강 살리기에 매우 효과적으로 활용할 수 있다. 특히 4대강 살리기의 설계핵심인 하천단면결정근거인 지배유량산정과 운영관리의 핵심인 유입량 및 유출량을 정확하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라, 본 사업에 적용된 각종 수리수문시스템의 검증시스템 개발에 크게 기여하리라 사료된다.
4. 기존의 Rating Curves식과 같은 고정관념적 접근방식에서 벗어나, 이론을 바탕으로 합리적이고 실용적인 유량관계식으로서의 전환이 절실히 요구된다.
5. 현장의 실측데이터 취득의 신뢰성확보차원에서 기존 유속계의 단점보완 및 새로운 유속계 개발 등을 위한 세부추진계획을 시급히 추진해야 한다.
6. 국가하천, 지방하천 및 소하천까지 포함된 국가 관측망 구축을 통한 지속적인 측정 및 검증작업을 병행할 수 있도록 “4대강 살리기 사업” 내에 일정예산을 확보하여 선진국처럼 지속적이고도 안정성이 담보된 신뢰성 있는 자료취득 및 보전이 절실히 요구된다. ☞