

# 엔트로피 개념에 의한 유량측정 기법 (최대유속을 중심으로)

○ 추태호<sup>1)</sup> · 김현식<sup>2)</sup> · 박노혁<sup>3)</sup>

## 1. 서론

한 유역을 수문시스템(Hydrologic system)으로 볼 때 시스템의 입력은 강수이고, 증발과 증산은 출력이며, 침투와 침투 및 지하수 유출은 과정 변수이고, 하천유량은 시스템의 출력에 해당된다. 그러므로 효율적인 수자원의 계획, 운영 및 관리를 위해서는 수문 시스템의 입출력관계가 명확해야만 비로서 가능하기 때문에 이를 위한 수문관측 과 자료관리의 중요성은 더 이상 설명할 여지가 없다. 현재 수문관측 및 자료관리와 관련하여 국내의 기술 수준은 외국의 기술 선진국에 비하여 뒤지지는 않다고 생각하는 일부 기술자들의 의견도 있기는 하나, 우리 나라와 같이 연간 편중된 강수와 최근의 반복되는 가뭄의 발생과 같은 독특한 수문현상을 갖고있는 특수 상황을 감안할 때 현재와 같은 수준의 수문관측 및 자료관리 기술은 미흡한 점이 많다고 할 수 있다. 과학 기술의 발달과 함께 컴퓨터의 성능 개선 및 통신기술의 급진적으로 관측된 수문자료의 안정적 전송과 다양한 표출 및 무한한 저장 등에 관한 관심과 투자 등의 노력에 비하여 상대적으로 모든 수자원 업무의 기초가 되는 수문관측 및 자료관리에 대한 노력은 심히 부족하다는 산·학·연에서의 공통된 반성의 목소리가 계속적으로 터져 나오고 있는 것이 현재 우리 나라의 수자원 기초 자료 취득 및 분석에 대한 현주소이다. 특히 우리 나라의 수자원 관련 기술의 발달은 매년 놀라울 만큼 빠르게 선진국을 따라잡고 있는 것이 사실이나, 유독 이를 뒷받침하는 수자원 기초자료 중 가장 중요한 유량자료의 획득, 분석 및 활용에 대한 이론적인 연구는 거의 전무한 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 새로운 확률 기법의 이론적 바탕에 근거한 효과적인 유량측정 및 분석방법을 제시하고 실제로 주요하천에 적용한 결과를 소개하며, 아울러 현재 신뢰도 및 활용도 측면에서 문제가 있는 Rating Curve에 대한 개선된 몇 가지 대안을 함께 제안하였다. 끝으로 최대 유속을 측정 할 수 있는 최신 장비만 있다면, 수자원 종사자의 오랜 숙원인 실시간 유량 측정 시스템(가칭 RDMS)을 개발 구축하여 광범위한 수자원 분야에 매우 요긴하게 활용하여 국가의 예산 및 인력을 효과적으로 절약함과 아울러 국가의 수자원 기술 경쟁력을 제고하는 획기적인 전기가 마련될 것이다.

## 2. 유량자료의 활용도

유량자료의 필요성을 이해하기 위해서는 먼저 유량자료의 활용도를 살펴보아야 할 것이며, 수많은 관련 업무중 중요한 업무를 요약하면 다음과 같다.

- 소 유역별 정확한 유출량 산정으로 홍수기 저수지 운영 의사 결정시 신뢰성 확보

1 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

2 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

3 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

- 댐 방류량에 따른 하류 주요지점별 방류 도달시간 산정의 신뢰성 확보
- 저수지 운영계획수립 시, 월-년 단위별 유입량 예측시 연속 유출량의 신뢰성 확보
- 저수지내 단기(일), 중기(월), 장기(년)별 호소수질 예측 및 대책 수립
- 저수지내 오염물질 유입률 결정 및 저수지 수질예측 모형의 주요인자 결정
- 하천 상황을 고려한 하상 변동 및 유로 변경 예측
- 감조 하천내 유량 산정

### 3. 현재 유량측정의 문제점

유량자료의 취득에서 환산시 까지 이론적 배경에 근거한 효과적인 유량산정 방법이 없어 인력, 장비 및 예산 등이 타 수문자료 취득에 비하여 많이 소요됨에도 불구하고 그 신뢰도 및 실 효성에 많은 의문점이 제기되고 있는 것이 현실이다. 그 이유는 최종적으로 환산된 유량자료는 1 차로 평균유속으로의 환산에 사용된 유속공식 선택 시 오류가, 2차로 수위-유량 측정 시 오류가, 3차로 Rating Curve식 작성 시 오류가, 마지막으로 수위자료로부터 유량자료 환산 시 오류가 각각 발생되며, 이러한 오차들은 사용되는 유량환산 자료에 전과 누적되므로 직접측정이 가능한 타 자료에 비하여 오차의 정도가 매우 심각함을 예상할 수 있다. 이의 주된 원인은 유속분포에 대한 수리학적 이론을 바탕으로 한 연구가 수행되지 못하였으며, 모든 관심사가 단지 현장측정, 측정장 비 와 평균유속에만 국한하여 추진 되었기 때문이다 즉 새로운 분야의 이론을 유속 또는 유량산 정에 접목시키는 노력이 결여 되었고, 특히 평균유속이외의 다른 주요수리인자에 대한 연구가 극 히 미진하였기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유량자료의 간접취득 대신 직 접 취득하여 분석하는 방향으로 선회되어야 보다 신뢰성 있는 유량자료를 취득할 수 있는 전기가 마련될 수 있을 것이다

### 4. 새로운 유량관계식 (엔트로피 개념)

log-type형 같은 기존의 유속공식은 최대유속이 항상 수 표면에서 발생하며(약10%의 관측오 차유발), 수로바닥 부분에서는 외삽법(약15%의 관측오차유발) 등의 방법으로 추정하여 미 측정 부 위를 고려하여 평균유속을 구하고 이를 근거하여 간접적으로 수위와의 상관 관계를 통하여 비로 서 요구되는 유량 자료를 획득하는 방법이며, 또한 식 자체 내에 근본적인 문제점을 갖고있는 공 식들이다. 따라서, 엔트로피 개념을 이용하여 최대유속의 발생지점 및 지형학적 형상에 관계없이 이론적으로 2차원 유속분포를 완전하게 나타내며 실제하천 및 관수로 내의 흐름에서도 그 타당성 이 입증된 Chiu의 유속공식을 소개하고 이를 활용하여 현재 문제가 되고 있는 Rating curve에 대 한 개선된 방법을 제안코져 한다

#### 4.1 유속 확률밀도함수

다음은 Chiu(1989)의 유속공식에 대한 유도과정을 소개코져 한다.

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,  $p(u)$  = 유속 확률밀도함수

이 엔트로피의 최대화를 위한 제약조건들은 아래와 같다.

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

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

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

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

여기서,  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 Lagrange multipliers이다.

#### 4.2 유속의 공간적 분포

개수로에서는 최대유속이 수표면 아래에서 자주 일어나는 것은 주지의 사실이다. 따라서 유속의 공간적 분포 즉, 2차원 유속 분포에 사용할 수 있는  $\xi$ 식은 다음과 같다.

$$\xi = Y (1 - Z)^\beta \exp[\beta_i z - Y + 1] \quad (5)$$

여기서  $D$ 는 최대유속이 발생하는 지점의 수심

$h$ 는 수표면 근처의 유속분포형과 경사를 조절하는 계수

$$Y = \frac{y + \delta_y}{D + \delta_y + h} \quad (6)$$

$$Z = \frac{|z|}{B_i + \delta_i} \quad (7)$$

또한 그림 1 에서 알 수 있듯이,  $\eta$  curve는  $\xi$  curve의 직교궤도이며, 다음과 같다.

$$\eta = \pm \frac{1}{Z} \left( |1 - Z| \right)^{\beta_i \cdot ((D + \delta_i - h) / (\beta_i + \delta_i))^2} \exp \left[ Z + \beta_i \left( \frac{D + \delta_i - h}{\beta_i + \delta_i} Y \right) \right] \quad (8)$$

#### 4.3 유속 확률밀도함수와 공간적 분포와 관계

유속과  $\xi$  와 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = G(\xi) \quad (9)$$

$\xi_0$  와  $\xi_{\max}$  사이의  $\xi$  값은  $\xi$  의 밀도함수가 균등하다고 할 수 있으며 다음과 같다.

$$f(\xi) = \frac{1}{\xi_{\max} - \xi_0} \quad (10)$$

따라서,  $u$  와 같거나 또는  $u$  보다 작은 유속의 확률은 다음과 같다.

$$\int_0^u p(u)du = \int_{G^{-1}(0)}^{G^{-1}(u)} p[G(\xi)] \frac{du}{d\xi} d\xi = \int_{\xi_0}^{\xi} f(\xi) d\xi \quad (11)$$

식 (10)을 식(11)에 대입하면 유속의 확률밀도함수와 공간적 분포와의 관계를 나타내는 식(12)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} = \int_0^u p(u)du \quad (12)$$

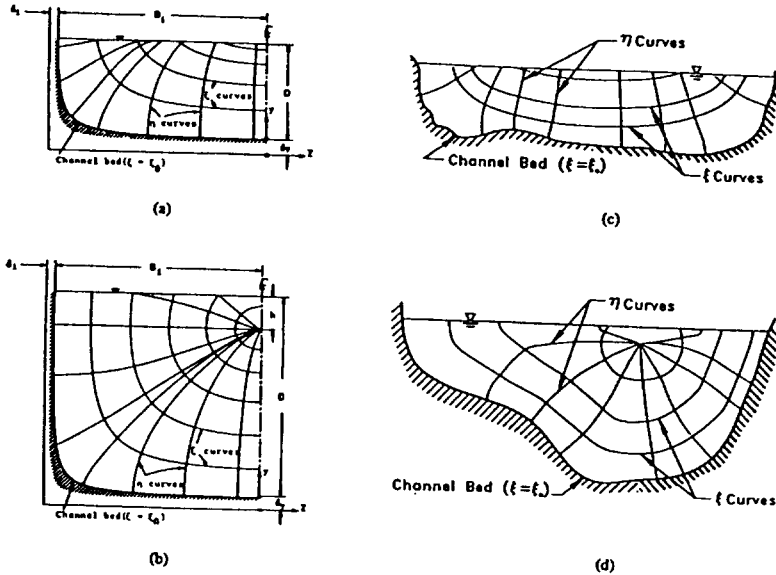


그림 1 2차원 좌표계 및 사용된 매개변수 (Chiu and Chiou 1986)

#### 4.4 1차원 및 2차원 평균유속 공식

따라서 식(4)을 식(12)에 대입 적분하면 Chiu의 2차원 유속공식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (13)$$

또한, 수직 평균유속(1차원)은 식(13)을 1차원에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\bar{u}_v = \frac{1}{D} \int_0^D \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] dy \quad (14)$$

2차원 평균유속은 식(4)을 식(3)에 대입하면 구할 수 있다.

$$\bar{u} = \int_0^{u_{\max}} up(u)du = \phi u_{\max} \quad (15) \quad \text{여기서, } \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (16)$$

그림 2의 (a)는 South Esk강의 실측자료와 식(13)에 의해 도출된 이론치를 비교하기 위하여 함께 Plotting한 것이며 모든 실측치가 식(13)의 이론치와 일치하며, (b)는 M=2.06일때의 발생 가능한 모든 이론치를 하천의 모든 요소들, 평균 및 최대유속과 그 발생 지점을 함께 Plotting하여 유속분포와 관련된 제요소들의 상호관계를 이해하기 쉽게 도시하였으며, 그림 3 역시 M=5일 때와 M=10일때 식(13)의 이론치를 하천의 모든 요소들과 M값의 변화에 따른 상호관계를 이해하기

쉽게 도시하였다. 또한, 그림 2와 3 및 식(15)와 식(16)으로부터 매개변수  $M$ 은 그 하천단면 만이 가지는 고유한 특성을 대표하는 값이며, 매개변수  $M$ 값은 그 하천단면에서는 일정한 값, 즉 상수 값을 갖는 커다란 특성 있으며, 식(15)에서 알 수 있듯이 어떤 하천단면에서의 평균유속은 최대유속과  $M$ 값과의 선형관계에서 바로 산정 할 수 있음을 의미한다. 즉 주어진 하천단면의  $M$ 값을 알 수 있다면 필요한 최대유속만을 측정하여 곧바로 필요한 평균유속 및 유량을 손쉽게 구할 수 있는 큰 장점이 있다. 따라서, 먼저 최대 유속을 결정하는 방법을 소개한다.

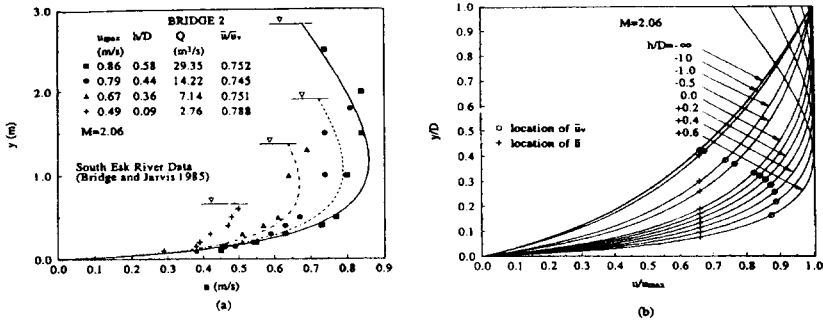


그림 2 (a)  $M=2.06$  때 south Esk강의 측정치 (b)  $M=2.06$  때 식(13)의 이론치

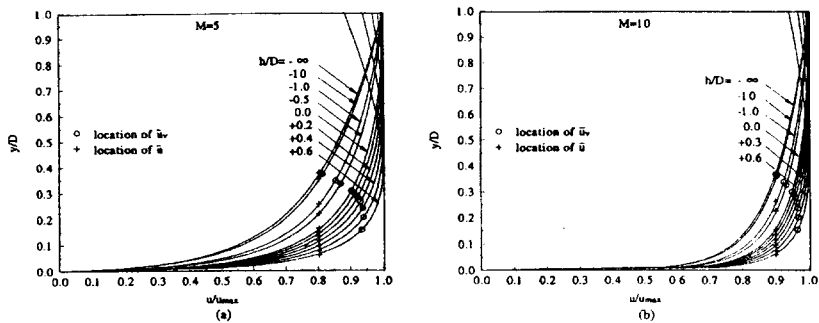


그림 3 (a)  $M=5$  때 식(13)의 이론치 (b)  $M=10$  때 식(13)의 이론치

#### 4.5 최대유속 산정

기존의 모든 연구가 대부분 평균유속을 측정하거나 산정하는데만 치중하여, 상대적으로 최대유속에 대한 중요성이 거의 등한시된 것이 사실이며, 이에 대한 이론적 연구나 실측에 관한 연구가 도외시된 것은 아마도 최대유속을 측정해야 할 필요성이나 동기 등이 거의 없었기 때문이기도 한 것 같다. 그러나 최대유속은 최소유속이 영이 되므로 유속의 범위를 한정하는 중요한 통계적 매개변수이며, 평균유속과 확률밀도함수와 함께 최대유속은 유속분포를 지배하는 확률법칙을 완전히 나타낼 수가 있다. 뿐만 아니라 단면의 형상 및 유속분포에 관계없이 어떠한 단면에서도 최대유속은 1개라는 점에 유의하여야 할 것이다. 즉 최대유속은 엄청나게 중요한 정보를 갖고 있음을 의미한다. 따라서, 평균유속을 직접 구하는 것보다는 최대유속을 구하여 평균유속을 구하는 방법이 더 합리적이고 효과적이며 손쉬운 방법이기 때문이다. 식(15)에서  $\bar{u}$ 는 2차원 평균유속이고  $u_{max}$ 은 2차원 유속분포 내에서 일어나는 유일한 최대유속이므로, 기존의 방법처럼 하천단면을 여러 소 단

면으로 나누고, 수심 및 유속을 측정 할 필요가 없음을 의미한다. 즉 평균유속을 구하기 위해서는 최대유속이 발생하는 지점에서 유속만이 필요하다. 대체로  $u_{max}$ 을 산정하는 방법은, 첫째는 최대 유속이 발생하는 지점에서 측정된 3개 이상의 유속 샘플을 이용하는 방법과 둘째는 기존의 2점법 또 3점법에 의하여 측정된 자료로부터 산정하는 방법이 있다. 여기서는 기존의 유량측정방법인 2 점법에 의해서 구해진  $u_{0.2}$ 와  $u_{0.8}$ 로부터 최대유속을 산정하는 방법 만 소개한다. 식(13)과 (14)로부터 다음과 같은 3개 또는 4개의 식을 유도할 수 있다.

$$u_{0.2} = \frac{u_{max}}{M} \ln[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_{0.2} - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0}] \quad (17)$$

$$u_{0.8} = \frac{u_{max}}{M} \ln[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_{0.8} - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0}] \quad (18)$$

$$\bar{u}_v = \frac{1}{2}(u_{0.2} + u_{0.8}) = \frac{1}{D} \int_0^D \frac{u_{max}}{M} \ln[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0}] dy \quad (19)$$

위 식에서 필요한 3개의 매개변수(  $u_{max}$ , M, h)을 구할 수 있으며, 여기서 M과 h에 대하여는 더 많은 측정자료에 의한 보완이 요구된다.

#### 4.6 매개변수 M 산정

매개변수 M을 산정하는 방법은 최대유속을 산정하는 방법과 매우 유사하며, 두가지가 있다. 첫째는 최대유속이 발생하는 지점에서 측정된 3개 이상의 유속 샘플을 이용하는 방법과 둘째는 기존의 2점법에 의하여 측정된 자료를 그대로 이용하는 방법이 있다. 첫 번째 방법은 신규 유량관측 지점이나 과거의 관측기록이 없는 지점에서 사용할 수 있으며 비선형 회귀분석을 이용하여 식(13) 으로부터 구할 수 있다. 두 번째 방법은 기존의 유량측정 방법인 2점법에 의해서 구해진  $u_{0.2}$ 와  $u_{0.8}$ 로부터 식(17), (18)과 (19) 3식을 동시에 풀어서 최대유속을 산정 한 후 측정된 평균유속( $\bar{u}$ )과 함께 선형회귀분석 또는 그래프에 plotting하여 산정 할 수 있다

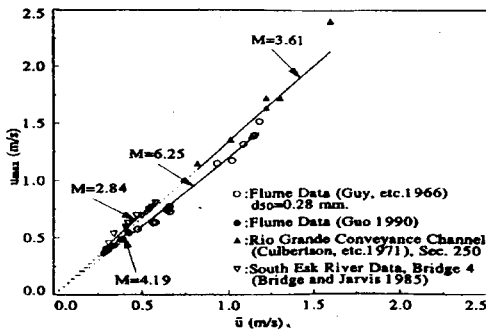


그림 4 실험수로 및 고정상수로의 경우

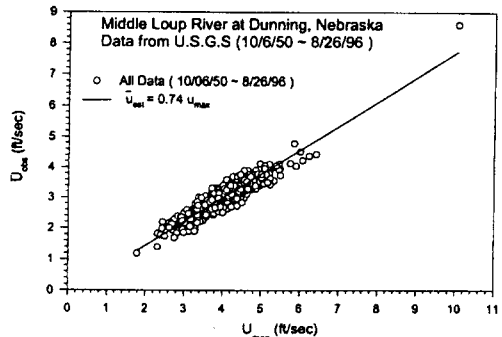


그림 5 이동상수로의 경우

그림 4는 실험수로 및 고정상수로의 M값을 위의 방법에 의해 산정한 결과를 그래프 상에 나타낸 것이며, 그림 5는 대표적인 이동상 수로인 네브라스카주의 상류하천인 미들루프에 적용하여 산정

된 M값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 실험수로에서부터 이동상 수로까지 그 주어진 단면에서의 M값은 최대와 평균유속과의 선형관계를 보여주고 있으며, 이는 이론식(13)을 실측자료에 이용하여 최대와 평균유속과의 이론적인 선형관계를 다시금 확실하게 증명하고 있다.

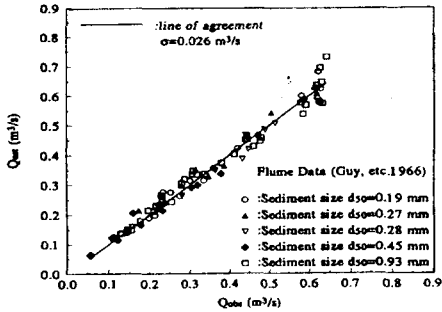


그림 6 실험수로의 경우

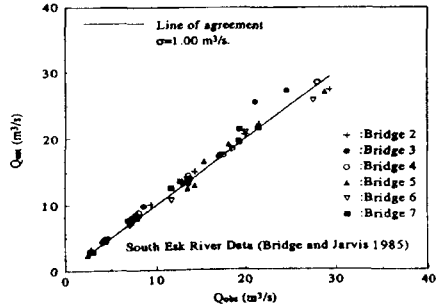


그림 7 자연하천의 경우

#### 4.7 유량산정

최대유속 및 M값 산정에서 알 수 있듯이, 다음과 같이 두 가지 방법에 의하여 유량을 산정한다  
가) 첫 번째 방법 : 측정된 3개이상의 점 유속을 이용할 경우

- ① 식(13)을 사용하여 3가지 매개변수인 M,  $u_{max}$ , h를 구한다.
- ② 구한 M과  $u_{max}$  값을 식(16)에 대입하여 평균유속  $\bar{u}$ 을 구한다.
- ③ 측정 또는 알고있는 단면적 A에  $\bar{u}$ 을 곱하여 유량을 산정한다.

나) 두 번째 방법 : 2점법에 의하여 기 측정된  $u_{0.2}$ 와  $u_{0.8}$ 을 이용할 경우

- ① 전단면의  $u_{0.2}$ 와  $u_{0.8}$ 을 등고선 프로그램에 입력하여 등 유속선을 그린다.
- ② 등 유속선에서 최대유속  $u_{max}$ 을 선정한다.
- ③ 측정된  $\bar{u} = \frac{Q}{A}$ 와  $u_{max}$ 을 그래프에 plotting한다.
- ④ 모든 측정값(대략 10년이상)을 그래프에 plotting 또는 회기분석을 수행하여 M값 산정.
- ⑤ M값이 산정되면, 식(16)을 이용하여  $u_{max}$ 만을 알면 언제든지 평균유속을 구한다.

(여기서  $u_{max}$ 는 그 발생 단면지점에서만 측정하여  $u_{max}$ 을 구하면 된다)

그림 6은 유사가 포함된 실험수로의 실측한 유량과 위의 방법에 의해 산정된 유량의 결과를 그래프 상에 나타낸 것이며, 그림 6은 자연하천인 South Esk river에서 실측한 유량과 위의 방법에 의해 산정된 유량의 결과를 나타내고 있다. 위 그림에서 알 수 있듯이 실험수로에서부터 자연하천까지 위의 방법에 의해 산정된 유량이 측정된 유량과 일치하는 것을 보여 주고 있다.

#### 6. 결론

지금까지 살펴본 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 현재 유량 측정시 가장 큰 문제점은 많은 인원과 시간이 소요되며, 단 시간내에 유량자료가

필요한 홍수시 실시간 데이터 취득이 거의 불가능하고, 홍수시 장비 및 생명에 위험성이 상존하고 있으며, 특히 수위와의 상관관계로 유량을 획득함으로써 신뢰도 및 실효성에 많은 의문점이 제기되고 있는 것이 현 실정이다.

2. 현재까지 유량자료는 대부분 간접적으로 취득되며, 최종적으로 환산된 유량자료는 평균유속 공식 선택시 1차 오류가, 수위-유량 측정 시 2차 오류가, Rating Curve식 작성 시 3차 오류가, 수위자료로부터 유량자료 환산 시 4차 오류가 각각 발생되며, 이러한 오차는 전파되어 누적되므로 직접측정이 가능한 타 자료에 비하여 오차의 정도가 매우 심각함이 예상된다.
3. 위의 주된 원인은 유속분포에 대한 수리학적 이론을 바탕으로 한 연구가 수행되지 못하였으며, 모든 관심사가 단지 현장측정, 측정장비와 평균유속에만 국한하여 추진되었기 때문이다. 즉 새로운 분야의 이론을 유속 또는 유량산정에 접목시키는 노력이 결여되었고, 평균유속이외의 인자에 대한 연구가 극히 미진하였기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유량자료의 간접취득 대신 직접취득으로 방향이 선회되어야 하며 이를 위해서는 이론적인 접근방법을 시도하여야만 신뢰성 있는 유량 자료를 취득할 수 있다.
4. 그 타당성이 입증된 Chiu의 유속공식을 이용한 새로운 유량관계식을 사용한다면 다음과 같은 큰 장점이 있다. 즉 단면의 형상에 관계없이 최대유속은 한 개만 나타나므로, 최대유속을 구하면 된다. 즉 기존의 방법처럼 하천단면을 세분하여 유속을 측정할 필요가 없어 예산 및 측정시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 매개변수 M값은 흐름시스템의 특성을 나타내며, 유량이나 수위의 변동에 전혀 영향을 받지 않는 매우 큰 특징이 있다. 따라서 이러한 특징을 이용하여, 수자원종사자의 오랜 숙원인 실시간 유량 측정 시스템(가칭 RDMS)을 구축 광범위한 수자원 분야에 매우 요긴하게 활용하여 국가의 예산 및 인력을 효과적으로 절약함과 아울러 국가의 수자원 기술 경쟁력을 제고하는 획기적인 전기가 마련될 것이다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, "유량관측개선방안 연구 조사", 1995
2. 박노혁, 제 33회 수공학 연구 발표회 초록집, 한국수문학회, pp. 5-12, 1991
3. 이한구, "하천유량 측정자료의 수리 수문학적 검증" '98 기술본부 성과 발표 논문집, 한국수자원공사, pp. 101-123, 1998.
4. Chiu, C.-L., and Chiou, J. -D." Structure of 3-D. Flow in Rectangular Open Channels." Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol.112, No.11(1986),pp.1050-1068.
5. Chiu, C.-L." Entropy and 2-D. Velocity Distribution in Open Channel Flows." Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol.114, No.7(1988),pp.738-756.
6. Chiu, C.-L." Velocity Distribution in Open Channel Flows." Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol.115, No.5(1989),pp.576-594.
7. Chiu, C.-L., Murray, D. W.,and Choo T. H." Variation of Velocity Distribution in Non-Uniform Open Channel Flows." Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol.118, No.7(1992),pp.989-1001.
8. Choo Tai Ho."Estimation of Energy Momentum Coefficients in Open Channel Flow by Chiu's Velocity Distribution Equation." (M.S. Thesis, Dep.of Civ.Engrg.,Univ. of Pittsburgh,Pittsburgh,1990).
9. Choo Tai Ho."An Efficient Method of Discharge Measurement in Sandy Rivers." (Ph.D. Dissertation, Dep. of Civ.& Envir. Engrg., Univ.of Pittsburgh, Pittsburgh,1998).