

ORIGINAL ARTICLE

ADCP를 활용한 제주 강정천의 평균유속 분포 추정

양세창¹⁾ · 김용석 · 양성기* · 강명수 · 강보성

제주대학교 토목공학과, ¹⁾제주특별자치도의회

A Study on the Mean Flow Velocity Distribution of Jeju Gangjung-Stream using ADCP

Se-Chang Yang¹⁾, Yong-Seok Kim, Sung-Kee Yang*, Myung-Soo Kang, Bo-Seong Kang

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

¹⁾Jeju Special Self-Governing Provincial Council, Jeju 63119, Korea

Abstract

In this study, the Chiu-2D velocity-flow rate distribution based on theoretical background of the entropy probability method was applied to actual ADCP measurement data of Gangjung Stream in Jeju from July 2011 to June 2015 to predict the parameter that take part in velocity distribution of the stream. In addition, surface velocity measured by SIV (Surface Image Velocimeter) was applied to the predicted parameter to calculate discharge. Calculated discharge was compared with observed discharge of ADCP observed during the same time to analyze propriety and applicability of depth of water velocity average conversion factor. To check applicability of the predicted stream parameter, surface velocity and discharge were calculated using SIV and compared with velocity and flow based on ADCP. Discharge calculated by applying velocity factor of SIV to the Chiu-2D velocity-flow rate distribution and discharge based on depth of water velocity average conversion factor of 0.85 were 0.7171 m³/sec and 0.5758 m³/sec, respectively. Their error rates compared to average ADCP discharge of 0.6664 m³/sec were respectively 7.63% and 13.64%. Discharge based on the Chiu-2D velocity-flow distribution showed lower error rate compared to discharge based on depth of water velocity average conversion factor of 0.85.

Key words : Chiu, Entropy, ADCP, Surface image velocimeter

1. 서론

최근 전 세계적인 이상기후의 영향으로 과거의 강우기록을 갱신하는 초대형 태풍과 돌발성 집중호우가 빈번하게 발생하고 있어 인명 및 재산피해가 해마다 증가하는 실정이다. 특히 많은 피해 원인 중 수해의 영향에 의한 피해가 가장 크게 나타나고 있어 지역적·유

역적 하천유출 특성이 반영된 치수 목적의 하천관리 대책수립과 수자원의 효율적인 이용 및 관리를 위한 이수 목적의 이용방안이 필요하다.

특정지역의 하천을 대상으로 치수 및 이수 목적의 수자원대책을 수립하기 위해서는 가장 기본적인 수문 자료인 하천유량 자료의 수집과 분석과정이 매우 중요하다. 그러나 정기적·지속적이고 신뢰성이 높은

Received 27 April 2017; Revised 18 September, 2017;

Accepted 20 September, 2017

*Corresponding author: Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3451
E-mail : skyang@jejunu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유량자료의 측정 업무에는 여전히 어려움이 많이 있다. 또한 우리나라의 수자원 관련 관리기술은 시스템 측면에서 많은 발전을 보이고는 있지만 이를 뒷받침할 수 있는 유량자료의 관측과 분석 및 활용에 대한 이론적인 연구는 매우 부족한 실정이다(Choo, 2002).

기존의 하천 유량조사를 위한 유속측정 방법은 주로 접촉식 유속측정방법인 부자 또는 프로펠러 유속계를 이용하는 방법이 사용되었으나 유속 측정 시 많은 시간과 인력이 요구되며 홍수 유출 시에는 관측자의 안전에 위험이 따르며 경우에 따라 불가능한 단점도 있다. 따라서 이를 해결하기 위하여 보다 간편하면서 정밀하게 유속을 측정할 수 있는 장비와 방법을 개발하고자 많은 연구자들이 노력을 기울여 왔다(Kim et al., 2011).

최근 비접촉식 유속측정 방법은 한국수자원공사에서 개발된 전자파 표면유속계와 이미지 분석기법(Image processing method)을 적용한 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimeter)가 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있다(Yu et al., 2005; Kim et al., 2011; Kim et al., 2013). 표면영상유속계는 초기에 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) 명칭이 사용되었으나 본 연구에서는 분석영역 내에 입자(Particle)가 없는 경우에도 분석이 가능하므로 SIV라는 용어를 사용하였다.

두 관측장비는 기존의 접촉식 유속측정 방법의 단점을 보완한 최신 비접촉식 관측기법으로써 수표면의 유속을 관측하여 유량으로 환산한다는 공통점이 있다. 이러한 방법들은 표면유속만을 관측하고 있어 평균유속 산출은 표면유속에 수심평균유속환산계수인 0.85를 일률적으로 적용하도록 제시되고 있다.

개수로의 유속은 횡방향의 수직단면 전체에 대한 평균유속을 의미하고 있지만 실제 자연하천과 같은 개수로의 유속은 관측지점의 단면의 형상과 하도의 조도, 상류부의 굴곡부 등의 영향으로 인해 균일하게 분포하지 않거나 하천의 특성에 따라 각기 다른 유속 분포의 흐름을 나타낸다. 따라서 최신 비접촉식 관측기법으로 표면유속을 관측하여 유량으로 환산하는 과정에서 일률적인 수심평균유속환산계수의 적용에 대한 적정성 및 신뢰성을 파악할 필요가 있으며 특정 하천의 흐름 특징이 적용된 합리적인 하천유량의 산정

과정이 필요하다.

이 연구에서는 2011년 7월부터 2015년 6월까지 제주도 상시 하천인 강정천을 대상으로 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 실측자료와 엔트로피 확률기법의 이론적 바탕에 근거로 한 Chiu-2차원 유속분포식을 적용하여 연구 대상하천의 유속분포에 관여하는 매개변수를 추정하였다. 또한 표면영상유속계(SIV)에 의한 표면유속을 추정된 매개변수에 적용하여 유량을 산정하고, 동시간에 관측된 ADCP의 관측 유량과 비교하여 수심평균유속환산계수의 적정성과 적용성을 분석하였다.

2. Chiu-2차원 유속분포식의 매개변수 추정방법

Chiu-2차원 유속분포식을 실제 자연하천에 적용하는 과정에서 관계식에 관련되는 매개변수를 추정하기 위해 ADCP의 단면 유속분포자료를 분석하였다. 제주도 상시하천의 흐름특성을 분석하기 위해 Chiu-2차원 유속분포식을 적용하는 이유는 특정 하천 단면의 유속분포 특성으로부터 단면평균유속을 유도과정이 실험단면 뿐만 아니라 불규칙한 자연하천에서의 적용성과 효용성이 인정되고 있기 때문이다. Chiu-2차원 유속분포식에 관계되는 매개변수 중 특정 하천단면에서 엔트로피계수(M)는 일정하다고 가정할 수 있으며 표면유속 또는 최대유속을 이용하여 평균유속으로 유도할 수 있다(Lee et al., 2007; Kim et al., 2008; Choo et al., 2010).

Chiu-2차원 유속분포식을 표면유속의 관계로 유도하면 다음 식(1)과 같이 정리할 수 있다(Choo, 1999).

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

여기서 M 은 해당 하천단면의 고유한 특성을 나타내는 엔트로피 계수이며, u 는 수로단면의 공간적인 시간평균 유속, u_{max} 는 최대유속, ξ 는 유속의 공간적 분포를 모델링하기 위해 제시되는 식으로 나타낸다.

Chiu-2차원 유속분포식에서 엔트로피 계수 M 은 해당 하천의 유속분포의 동질성을 결정하며 유도식은 다음의 식(2)와 같다.

$$\Phi(M) = \frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (2)$$

여기서 $\Phi(M)$ 은 최대유속과 평균유속의 비율을 나타내며 엔트로피 계수의 함수이다. 즉 해당 하천의 유속분포에 대한 특성 함수를 의미한다. 이 식을 적용하여 ADCP의 실측자료를 이용하여 역으로 M을 계산한다. 또한, 유속의 공간적 분포를 모델링하기 위해 다음 식(3)을 사용하였다(Chiu, 1989).

$$\xi = \frac{y}{D-h} \exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right) \quad (3)$$

여기서 u_{surf} 는 수표면 유속, ξ_{surf} 는 수표면 유속이 발생하는 곳의 ξ 값을 나타내며, 계산에 필요한 ξ_{surf} 및 ξ_{\max} 는 각각 식(4), 식(5)와 같다(Choo, 2006).

$$\xi_{\max} = \frac{y}{D-h} \exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right) = 1 \quad (\because y = D-h) \quad (4)$$

$$\xi_{surf} = \frac{D}{D-h} \exp\left(1 - \frac{D}{D-h}\right) \quad (5)$$

따라서 하상 바닥에서의 $\xi_0 = 0$ 과 식(4)를 식(1)에 대입하면 다음과 같은 식(6)을 얻을 수 있으며, ξ_{surf} 항으로 정리하면 식(7)과 같다(Choo, 2006).

$$u_{surf} = \frac{u_{\max}}{M} \ln[1 + (e^M - 1) \cdot \xi_{surf}] \quad (6)$$

$$\xi_{surf} = \frac{\exp\left(\frac{u_{surf}}{u_{\max}} \cdot M\right) - 1}{e^M - 1} \quad (7)$$

위와 같이 산정된 식(7)을 식(5)에 대입하여 정리하면 표면유속으로부터 최대유속을 구할 수 있는 식(8)을 구할 수 있다(Choo, 2006).

$$\frac{D}{D-h} \exp\left(1 - \frac{D}{D-h}\right) = \frac{\exp\left(\frac{u_{surf}}{u_{\max}} \cdot M\right) - 1}{e^M - 1} \quad (8)$$

또한 평균유속과 최대유속의 관계는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다(Chiu, 1995).

$$\bar{U} = \Phi \cdot u_{\max} \quad (9)$$

위의 유도식을 적용하여 해당 하천의 Chiu-2차원 유속분포식에 관계되는 특성 매개변수를 추정하고 관측된 표면유속을 이용하여 최대유속을 산정한 다음 각각 평균유속으로 변환하여 중간단면법을 적용하여 유량을 산정하였다.

3. 연구방법

3.1. 대상하천

연구 대상하천인 강정천은 한라산 서쪽 능선에서 발원하여 남류하다가 좌안측으로 지방하천인 고지천, 궁산천을 합류한 후 도순동 녹나무 자생지를 지나

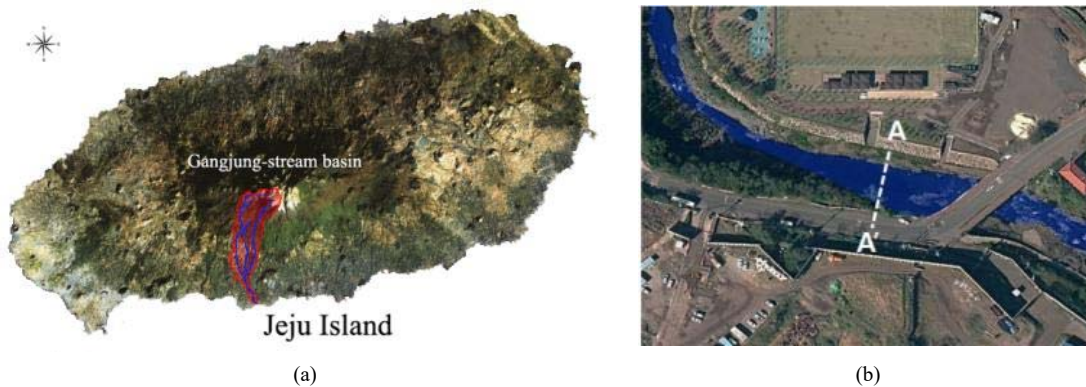


Fig. 1. Observation point of the Gangjung-Stream.

Table 1. Watershed characteristics of the Gangjung-Stream

| Stream | Drainage area (km ²) | Basin length (km) | Average slope (%) | Shape factor |
|-----------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Gangjung Stream | 39.22 | 16.63 | 8.55 | 0.14 |

강정동 해안으로 유입되는 지방하천으로 동경 126°27' ~ 126°30', 북위 33°13' ~ 33°21' 사이에 위치한다. 유로연장은 16.63 km이고 유역면적은 38.23 km²이며 하상경사는 1/12~1/37로 비교적 급경사를 이루고 있으며 상류는 유로전체에 하천유량이 거의 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출 등으로 인하여 하천유출이 발생되고 있다(제주도, 2009; 하천정비기본계획, 2011).

강정천의 ADCP 관측지점은 Fig. 1의 (b)와 같으며 유역 특성인자는 Table 1과 같다.

3.2. 관측자료

3.2.1. ADCP 현장관측 자료

연구 대상의 흐름특성과 관련된 매개변수를 추정하기 위해 2011년 7월부터 2015년 6월까지 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)를 활용하여 유량을 측정을 하였다. ADCP는 초음파 속도측정기로써 1980년도에 개발되어 하천 및 해양분야에서 수리동역학적인 특성을 규명하는 능력을 향상시켜왔다. 운영은 3차원 유속과 수심자료를 매우 효율적으로 측정이 가능하며 관측 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 속도 측정방법과 비교하여 매우 세밀한

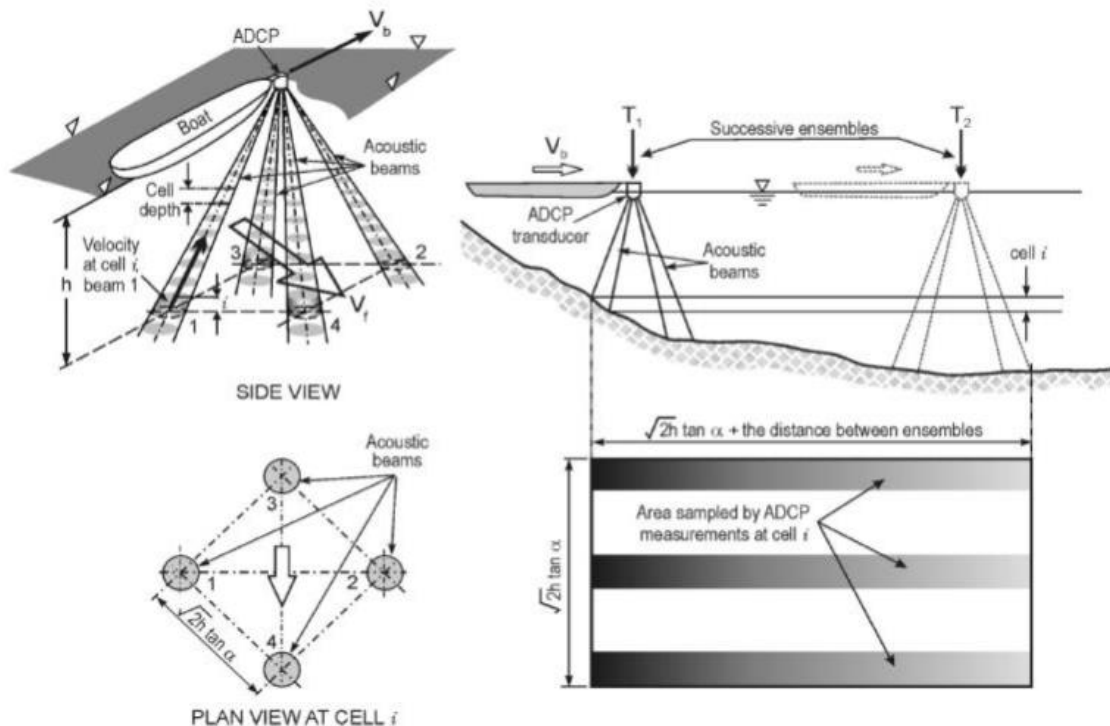


Fig. 2. ADCP operating approaches: a) fixed deployment; b) moving boat; c) cross-sectional area directly measured or unmeasured by ADCP (Kim, 2011).



Fig. 3. Site application of ADCP for discharge observation.

특징을 갖는다. 현재 개발·운영되는 유량 관측 기법 중 매우 정확한 기법으로 알려져 있으며 미국의 경우 지리조사국(USGS; United States Geological Survey)에서 약 57%의 유량 관측소에 설치하여 운영되고 있다(Muste et al., 2007; Kim et al., 2011; Jung, 2013).

ADCP의 원리는 하부에 설치된 음파의 경로(beam)에서 약 200 kHz - 3 MHz 분포의 초음파를 발사하여 하천의 부유물질에 반사된 음파의 도플러 편차(Doppler effect)를 이용한다. 이때 빔 진행방향의 유속을 2~100 cm 단위로 측정하고 각각의 빔에서 측정

된 픽셀단위의 유속을 측정된 단면의 관측 셀의 크기에 따라 전체 유량을 산정한다(RDI, 1996; SonTek, 2010; Jung, 2013).

본 연구에서는 SonTek사의 River Surveyer M9이 사용되었으며 특징은 저수심과 고수심에 사용하도록 설계되었고 수심측정기를 별도로 장착한 9개의 빔으로 구성되어있다(SonTek, 2010).

3.2.2. ADCP 현장관측 자료의 후처리

연구대상 하천의 ADCP 실측 유속은 측정시의 순간유속을 나타내므로 난류의 진동과 불확실성을 그대로

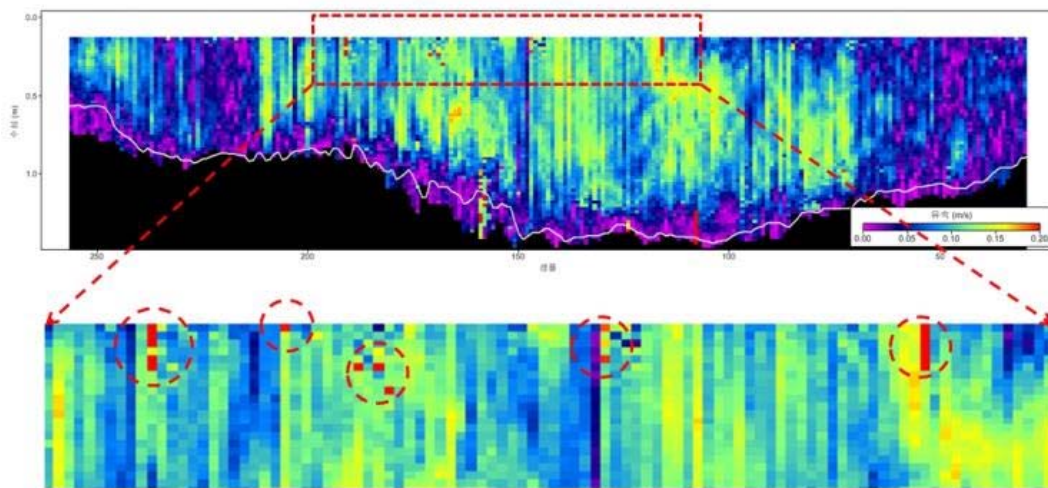


Fig. 4. Observation point of the Yeonoei-stream; a) application point of the ADCP; b) photos of the field application; c) result of the ADCP.

관측한다(Lee et al., 2007). ADCP의 순간유속은 시간 평균 유속과 동일하게 사용될 수 없으므로 유속분포 범위를 파악하는데 문제가 있다. 그러나 측정된 단면 유속분포 자료의 이상치를 제거하는 후처리 과정을 거칠 경우 시간평균 유속과 거의 비슷한 결과를 나타낸다(Lee et al., 2005).

Fig. 4와 같이 2011년 7월부터 2015년 6월까지 관측된 각각의 ADCP 자료에서 관측단면의 연속된 유속분포 범위에서 이상치가 측정된 경우 인접한 상·하·좌·우의 셀의 유속값을 평균하여 사용하였다.

ADCP로 관측한 표면유속은 수표면 하 약 0.07 m로 잠긴 흐름(ADCP 센서부 깊이)을 관측하므로 기체부와 접하는 수표면유속을 관측한다고 할 수 없다

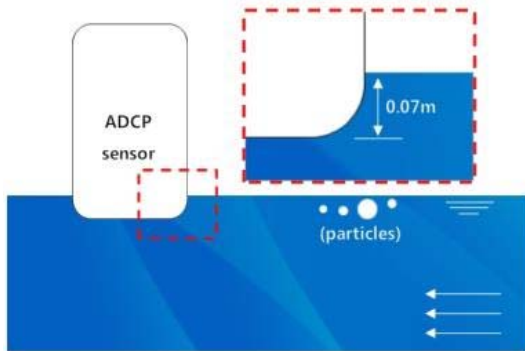


Fig. 5. Field observational characteristics of ADCP sensor (observe the flow of about 0.07 m of lock).

(Fig. 5). 그러나 Fig. 6과 같이 관측 지점의 수표면은 바람의 영향에 의해 추적입자의 반대방향으로 물결을 형성하며 흐름을 나타냈으나 추적 입자는 하천의 상, 하류의 형성에 맞게 이미지상의 우측으로 흐름을 나타냈다. 따라서 기체부와 접하는 수표면의 유속이 아닌 ADCP의 센서부가 잠긴 깊이의 유속을 본 연구에 적용하였다.

3.2.3. 표면영상유속계(SIV) 적용을 위한 관측자료 구축

표면영상유속계(SIV)의 적용을 위한 표면유출 영상은 휴대용 캠코더인 SAMSUNG HMX-S16BD 기종을 사용하였다. 제주도 상시하천인 강정천은 Fig. 7(a)와 같이 평상시 흐름이 하도가 투시될 정도로 맑은 물의 상태를 유지하고 있으므로 표면영상유속분석에 적합한 유출영상을 수집하기 매우 부적합하다. 따라서 Fig. 7과 같이 추적입자를 투입하여 표면유속을 촬영하였다. 추적입자는 환경오염에 무해한 강냉이를 수표면에 투입하였으며 표면영상유속계(SIV)를 적용하는 과정 중 연속된 이미지 상에서 적절하게 추적입자의 이동거리를 계산할 수 있었다.

하천단면측량은 SOKKIA사의 CX-105 모델을 이용하여 1 m 간격으로 정밀한 단면을 측량하였으며 유출량 계산 시 관측된 수위에 따라 AutoCAD를 활용하여 중간단면법으로 유출량을 산정하였다.



Fig. 6. The direction of movement of the tracking particle and the direction of movement of the water surface; a) 1 sec image, b) 15 sec image.



Fig. 7. Observation point: a) state of the usual flow; b) using tracer-particle.

4. 결과 및 고찰

4.1. ADCP 실측자료에 의한 Chiu-2차원 유속분포식의 매개변수 추정

Chiu-2차원 유속분포식을 자연하천에 적용하기 위해서는 매개변수의 추정이 필요하며, 이론적 유속분포를 검증할 자료가 필요하다. 이 연구에서는 ADCP로 실측한 단면 2차원 유속분포를 사용하여 매개변수를 추정하는데 사용하였다.

ADCP의 유속자료는 Chiu-2차원 유속분포식과 관계된 매개변수 추정을 위해 단면 최대유속과 평균유속을 얻기 위해 사용되며 추정된 유속분포 매개변수의 검증에 사용되었다. ADCP로 측정된 유속은 순간 유속이며 난류의 진동과 불확실성을 그대로 반영한다. 따라서 시간평균 유속과 동일하게 취급할 수 없으므로 관측 단면의 이상치를 제거하고 인접한 연직유

속자료를 평균하여 이용하였다.

2011년 7월부터 2015년 6월의 ADCP 현장 실측자료를 이용한 유속분포 현황은 Fig. 9와 같다. 연도별 평균 유속분포 범위를 분석하는 과정에서 ADCP의 순간적인 유속변화의 불확실성을 제거하기 위해 관측 자료의 연도별로 필터링 작업을 실시하고 표면유속과 최대유속의 관계를 Chiu-2차원 유속분포식에 적용하였다.

ADCP 자료를 활용하여 각각의 최대유속과 평균유속을 분석하고 엔트로피 계수(M)를 산정한 결과와 유속의 공간적 분포를 모델링하기 위해 제시되는 ξ_{surf} 를 추정하였다. 산정된 계수 값을 이용하여 강정천의 표면유속을 계산한 결과와 ADCP의 관측된 표면유속의 R^2 는 0.911로 나타났다. 이러한 결과는 Chiu-2차원 유속분포식을 연구대상하천에 적용하는 과정에서

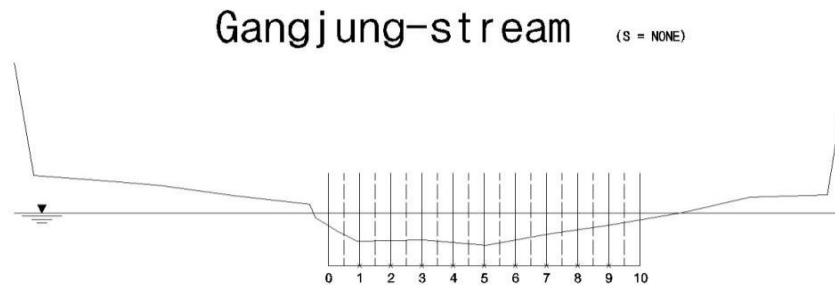
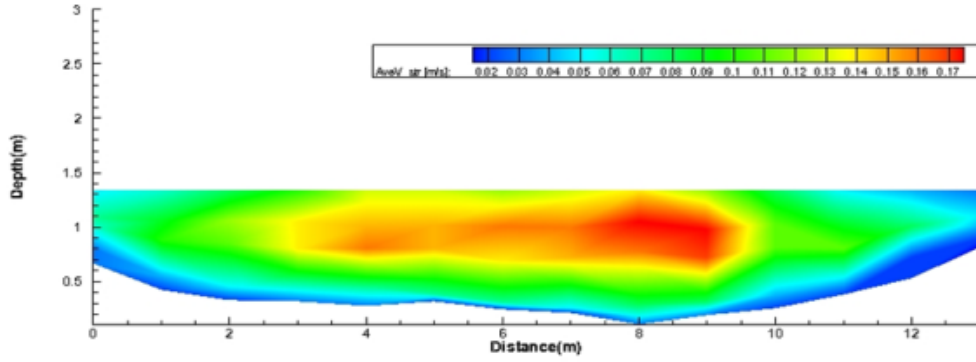
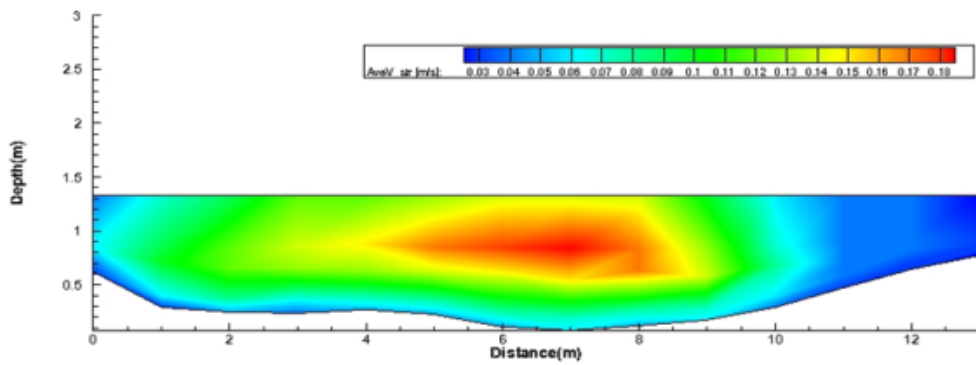


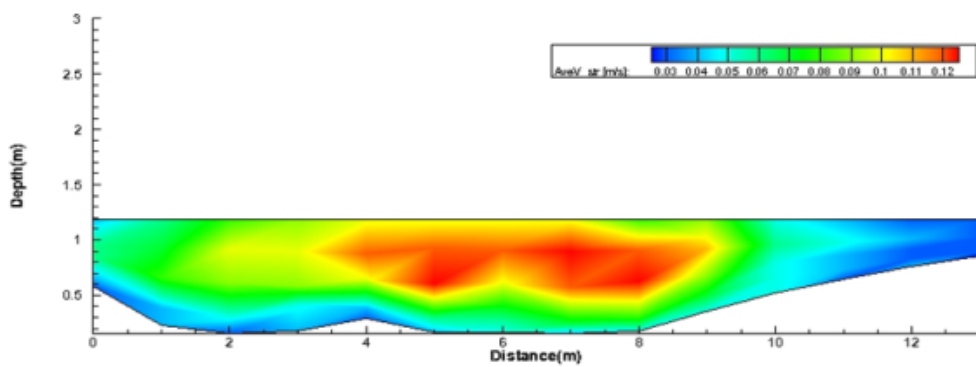
Fig. 8. Cross sectional areas for discharge calculation.



(a) 2011-Average of flow velocity distribution

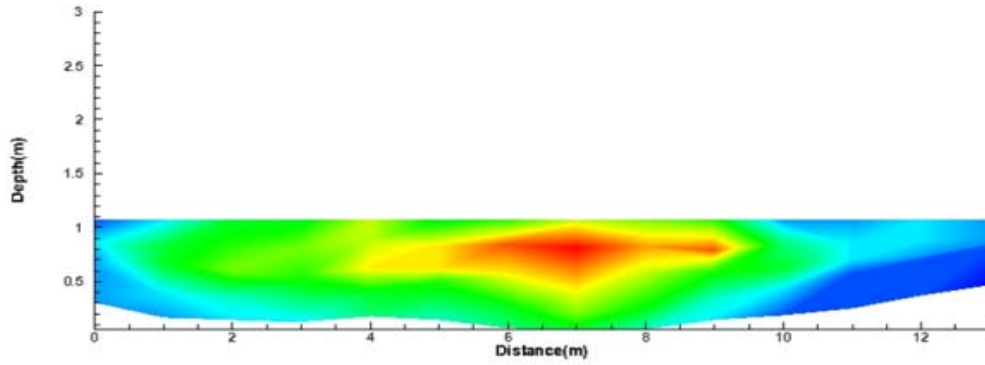


(b) 2011-Average of flow velocity distribution

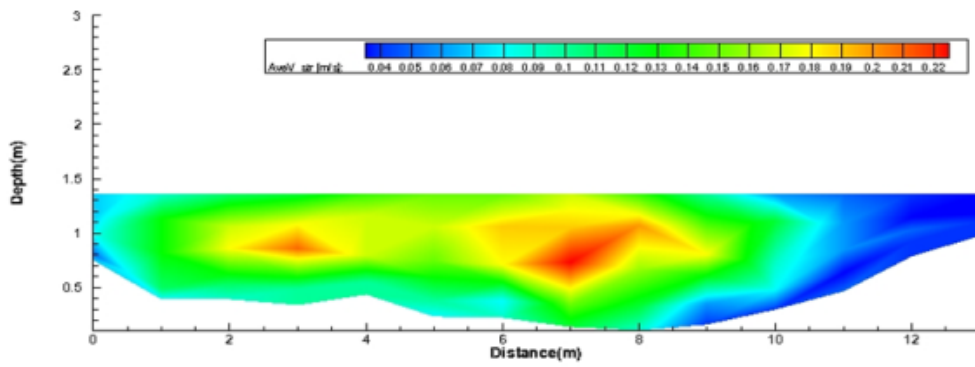


(c) 2011-Average of flow velocity distribution

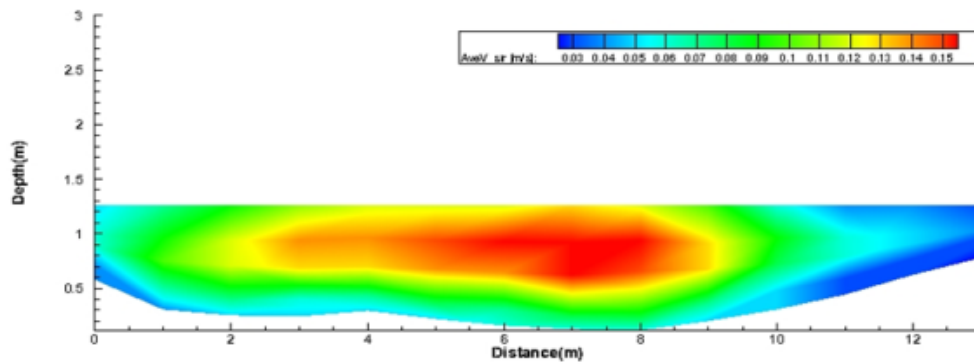
Fig. 9. Analysis result of flow velocity distribution (2011 ~2015).



(d) 2011-Average of flow velocity distribution



(e) 2011-Average of flow velocity distribution



(f) Total-Average of flow velocity distribution

Fig. 9. Continued.

Table 2. Result of flow velocity distribution using observation ADCP data

| Date (year) | \bar{u} (m/s) | u_{\max} (m/s) | u_{surf} (m/s) | $Q(\phi)$ | M | ξ_{surf} | u_{surf} -calculation (m/s) |
|----------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------|-------|--------------|----------------------------------|
| 2011.07.22 | 0.11 | 0.15 | 0.11 | 0.709 | 2.823 | 0.438 | 0.07 |
| 2011.08.05 | 0.10 | 0.15 | 0.10 | 0.673 | 2.244 | 0.411 | 0.06 |
| 2011.08.19 | 0.10 | 0.16 | 0.12 | 0.633 | 1.669 | 0.580 | 0.13 |
| 2011.09.02 | 0.10 | 0.16 | 0.11 | 0.652 | 1.934 | 0.470 | 0.13 |
| 2011.09.16 | 0.12 | 0.18 | 0.11 | 0.667 | 2.154 | 0.358 | 0.12 |
| 2011.09.30 | 0.11 | 0.18 | 0.12 | 0.637 | 1.723 | 0.468 | 0.12 |
| 2011.10.28 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.671 | 2.214 | 0.474 | 0.05 |
| 2011.11.11 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.703 | 2.722 | 0.362 | 0.06 |
| 2011.12.09 | 0.07 | 0.11 | 0.08 | 0.682 | 2.382 | 0.474 | 0.07 |
| 2011.12.23 | 0.06 | 0.09 | 0.05 | 0.670 | 2.199 | 0.299 | 0.06 |
| 2012.01.06 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | 0.639 | 1.751 | 0.465 | 0.08 |
| 2012.02.03 | 0.09 | 0.14 | 0.10 | 0.667 | 2.154 | 0.480 | 0.09 |
| 2012.02.16 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.672 | 2.229 | 0.310 | 0.05 |
| 2012.03.03 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.625 | 1.559 | 0.412 | 0.03 |
| 2012.03.16 | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.750 | 3.593 | 0.239 | 0.05 |
| 2012.03.31 | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.690 | 2.509 | 0.424 | 0.06 |
| 2012.04.14 | 0.08 | 0.12 | 0.09 | 0.672 | 2.229 | 0.412 | 0.05 |
| 2012.04.28 | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.692 | 2.541 | 0.440 | 0.09 |
| 2012.05.11 | 0.11 | 0.15 | 0.11 | 0.700 | 2.672 | 0.453 | 0.06 |
| 2012.06.08 | 0.08 | 0.13 | 0.08 | 0.615 | 1.426 | 0.444 | 0.08 |
| 2012.06.22 | 0.09 | 0.13 | 0.09 | 0.677 | 2.305 | 0.436 | 0.08 |
| 2012.07.06 | 0.11 | 0.17 | 0.11 | 0.667 | 2.154 | 0.398 | 0.11 |
| 2012.08.17 | 0.12 | 0.18 | 0.12 | 0.674 | 2.260 | 0.409 | 0.12 |
| 2012.08.31 | 0.10 | 0.17 | 0.09 | 0.588 | 1.079 | 0.397 | 0.11 |
| 2012.09.14 | 0.11 | 0.17 | 0.10 | 0.655 | 1.978 | 0.353 | 0.11 |
| 2012.09.28 | 0.14 | 0.19 | 0.15 | 0.732 | 3.237 | 0.486 | 0.12 |
| 2012.10.12 | 0.11 | 0.17 | 0.13 | 0.673 | 2.244 | 0.460 | 0.11 |
| 2012.10.26 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.689 | 2.493 | 0.385 | 0.06 |
| 2012.11.09 | 0.13 | 0.18 | 0.11 | 0.722 | 3.052 | 0.271 | 0.12 |
| 2012.12.22 | 0.06 | 0.09 | 0.05 | 0.667 | 2.154 | 0.211 | 0.06 |
| 2013.01.18 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | 0.667 | 2.154 | 0.404 | 0.08 |
| 2012.02.01 | 0.09 | 0.13 | 0.09 | 0.692 | 2.541 | 0.303 | 0.08 |
| 2013.02.15 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.644 | 1.821 | 0.457 | 0.06 |
| 2013.03.03 | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.680 | 2.352 | 0.441 | 0.06 |
| 2013.03.15 | 0.08 | 0.10 | 0.06 | 0.731 | 3.219 | 0.246 | 0.06 |
| 2013.03.29 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | 0.650 | 1.906 | 0.448 | 0.05 |
| 2013.04.27 | 0.09 | 0.12 | 0.09 | 0.726 | 3.125 | 0.433 | 0.05 |
| 2013.06.01 | 0.09 | 0.12 | 0.08 | 0.720 | 3.016 | 0.333 | 0.05 |
| 2013.06.16 | 0.09 | 0.14 | 0.10 | 0.696 | 2.606 | 0.433 | 0.09 |
| 2013.06.29 | 0.09 | 0.12 | 0.08 | 0.756 | 3.719 | 0.272 | 0.05 |
| 2013.07.12 | 0.12 | 0.19 | 0.14 | 0.654 | 1.963 | 0.531 | 0.12 |
| 2013.07.26 | 0.12 | 0.19 | 0.14 | 0.647 | 1.864 | 0.541 | 0.12 |
| 2013.08.23 | 0.12 | 0.18 | 0.12 | 0.703 | 2.722 | 0.362 | 0.12 |

Table 2. Continued

| Date (year) | \bar{u} (m/s) | u_{max} (m/s) | u_{surf} (m/s) | $Q(\phi)$ | M | ξ_{surf} | u_{surf} -calculation (m/s) |
|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|-------|--------------|----------------------------------|
| 2013.09.06 | 0.10 | 0.13 | 0.08 | 0.759 | 3.784 | 0.215 | 0.08 |
| 2013.10.12 | 0.07 | 0.11 | 0.07 | 0.648 | 1.877 | 0.416 | 0.07 |
| 2013.11.01 | 0.09 | 0.13 | 0.08 | 0.692 | 2.541 | 0.323 | 0.08 |
| 2013.12.06 | 0.04 | 0.06 | 0.03 | 0.650 | 1.906 | 0.278 | 0.03 |
| 2014.01.03 | 0.09 | 0.13 | 0.09 | 0.692 | 2.541 | 0.412 | 0.09 |
| 2014.02.07 | 0.07 | 0.12 | 0.08 | 0.617 | 1.453 | 0.499 | 0.05 |
| 2014.03.07 | 0.09 | 0.14 | 0.09 | 0.667 | 2.154 | 0.393 | 0.09 |
| 2014.04.04 | 0.08 | 0.13 | 0.10 | 0.625 | 1.559 | 0.340 | 0.08 |
| 2014.05.02 | 0.12 | 0.15 | 0.11 | 0.752 | 3.635 | 0.363 | 0.06 |
| 2014.06.08 | 0.09 | 0.13 | 0.09 | 0.692 | 2.541 | 0.411 | 0.08 |
| 2014.07.11 | 0.10 | 0.14 | 0.09 | 0.714 | 2.910 | 0.316 | 0.09 |
| 2014.09.05 | 0.07 | 0.11 | 0.05 | 0.636 | 1.710 | 0.260 | 0.07 |
| 2014.10.05 | 0.10 | 0.14 | 0.09 | 0.733 | 3.256 | 0.281 | 0.09 |
| 2014.12.12 | 0.07 | 0.11 | 0.05 | 0.625 | 1.559 | 0.275 | 0.07 |
| 2015.01.16 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | 0.678 | 2.320 | 0.403 | 0.05 |
| 2015.02.07 | 0.06 | 0.10 | 0.04 | 0.632 | 1.654 | 0.222 | 0.06 |
| 2015.03.06 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.722 | 3.052 | 0.234 | 0.05 |
| 2015.05.01 | 0.05 | 0.08 | 0.04 | 0.625 | 1.559 | 0.314 | 0.05 |
| 2015.06.05 | 0.07 | 0.10 | 0.05 | 0.700 | 2.672 | 0.208 | 0.06 |
| Average | | | | 0.677 | 2.345 | 0.380 | |

추정되는 매개변수의 평균값 사용에 대한 타당성을 보여준다.

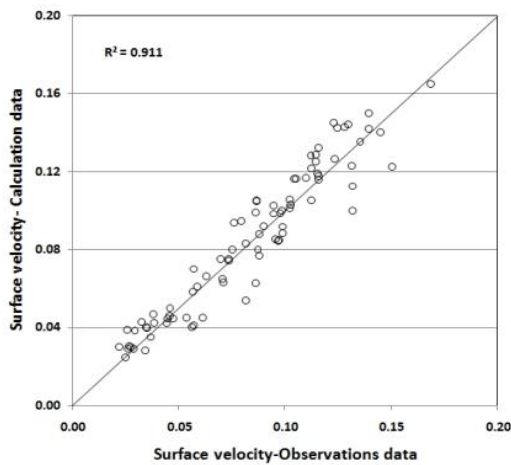


Fig. 10. One-to-one relationships of velocity measurement between the observation data and the calculation data.

4.2. 표면영상유속계(SIV)에 의한 표면유속분포와 평균유속 및 유량산정

추정된 하천 매개변수를 하천현장에 적용성 확인을 위해 강정천의 동일 관측지점에서 표면영상유속계(SIV)를 사용한 표면유속과 유량을 산정함과 동시에 ADCP에 의한 유속 및 유량과 비교·분석하였다. 표면영상유속계(SIV)로 분석된 유속 벡터를 Chiu-2차원 유속분포식에 적용하여 산정된 유량과 기존의 수심평균유속환산계수 0.85를 적용한 유량은 0.7172 m³/s과 0.5759 m³/s로 나타났다. ADCP 평균유량 0.6664 m³/s과 Chiu-2차원 유속분포식을 적용한 유량의 오차는 7.63%, 수심평균환산계수 0.85를 적용한 유량과의 오차율은 13.64%로 나타났다.

ADCP로 측정된 유속은 순간유속을 나타내며 난류의 불확실성을 그대로 나타내므로 관측기간 동안 연도별 구분하여 평균유속분포를 산정하였다. 또한 ADCP로 관측된 표면유속은 수면을 기준으로 약 0.07 m 정도 잠긴 흐름을 관측하지만 이 연구에서는 표면

Table 3. Comparison of surface velocity and discharge (Gang-jung Stream)

| No. | A (m^2) | u_{surf} (m/s) *SIV | \bar{u} (m/s) *Chiu | \bar{u} (m/s) *0.85 | Discharge (m^3/s) *Chiu | Discharge (m^3/s) *0.85 |
|-------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0.04 | 0.0452 | 0.0478 | 0.0384 | 0.0019 | 0.0015 |
| | 0.13 | | | | 0.0062 | 0.0050 |
| 1 | 0.21 | 0.0542 | 0.0575 | 0.0461 | 0.0121 | 0.0097 |
| | 0.3 | | | | 0.0173 | 0.0138 |
| 2 | 0.38 | 0.0504 | 0.0533 | 0.0428 | 0.0203 | 0.0163 |
| | 0.46 | | | | 0.0245 | 0.0197 |
| 3 | 0.53 | 0.0539 | 0.0572 | 0.0458 | 0.0303 | 0.0243 |
| | 0.6 | | | | 0.0343 | 0.0275 |
| 4 | 0.68 | 0.0508 | 0.0539 | 0.0432 | 0.0367 | 0.0294 |
| | 0.76 | | | | 0.0410 | 0.0328 |
| 5 | 0.85 | 0.0466 | 0.0494 | 0.0396 | 0.0420 | 0.0337 |
| | 0.94 | | | | 0.0464 | 0.0372 |
| 6 | 0.94 | 0.0540 | 0.0573 | 0.0459 | 0.0539 | 0.0431 |
| | 0.9 | | | | 0.0516 | 0.0413 |
| 7 | 0.86 | 0.0489 | 0.0512 | 0.0416 | 0.0440 | 0.0358 |
| | 0.83 | | | | 0.0425 | 0.0345 |
| 8 | 0.83 | 0.0381 | 0.0404 | 0.0324 | 0.0335 | 0.0269 |
| | 0.84 | | | | 0.0339 | 0.0272 |
| 9 | 0.84 | 0.0644 | 0.0682 | 0.0547 | 0.0573 | 0.0459 |
| | 0.72 | | | | 0.0491 | 0.0394 |
| 10 | 0.46 | 0.0685 | 0.0726 | 0.0582 | 0.0334 | 0.0268 |
| | 0.07 | | | | 0.0051 | 0.0041 |
| Total | | | | | 0.7172 | 0.5759 |

유속으로 구분하여 계산된 값과 비교하였다. 그 이유는 ADCP가 현재 개발된 유량관측관측기 중 높은 정밀도를 나타내며, 표면영상유속계의 비교목적으로

ADCP 외의 관측기기로는 정밀한 표면유속의 관측이 불가능하기 때문이다.

**Fig. 11.** Result of velocity vector in Gangjung-Stream using Surface Image Velocimeter (SIV).

5. 결론

2011년부터 2015년까지 제주도 강정천을 대상으로 72회의 ADCP 현장관측 자료를 활용하여 각각의 최대유속과 평균유속을 분석하고 엔트로피 계수(M)와 유속의 공간적 분포를 모델링하기 위해 제시되는 ξ_{surf} 를 산정하였다.

산정된 매개변수의 계수를 이용하여 표면유속을 계산한 결과와 ADCP 표면유속의 R^2 는 0.874로 분석되어 Chiu-2차원 유속분포식을 연구대상 하천에 적용하는 과정에서 추정되는 매개변수의 평균값 사용에 대한 타당성을 확인하였다.

추정된 하천 매개변수의 적용성 확인을 위해 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 표면유속과 유량을 산정하고 ADCP에 의한 유속 및 유량과 비교·분석하였다. 표면영상유속계(SIV)로 분석된 유속 벡터를 Chiu-2차원 유속분포식에 적용하여 산정된 유량과 기존의 수심평균유속환산계수 0.85를 적용한 유량은 각각 0.7171 m³/s과 0.5758 m³/s로 나타났다. ADCP 평균유량 0.6664 m³/s과의 오차율은 각각 7.63%, 13.64%로 분석되어 Chiu-2차원 유속분포식을 적용한 유량이 수심평균유속환산계수 0.85를 적용한 유량에 비해 작은 오차율을 나타냈다.

ADCP로 측정된 유속은 순간유속을 나타내며 난류의 불확실성을 그대로 나타낸다. 따라서 자연하천의 유속분포를 분석하기 위해서는 측정기간 동안 연도별로 구분하여 평균유속분포를 모의해야만 하천 매개변수를 결정할 수 있다. 특히 72회의 ADCP 관측자료를 활용하는 과정에서 홍수시 유출사상을 제외한 평수기의 불규칙한 유속분포를 연도별 평균값으로 구분하여 분석하였으므로 유사한 유속분포 특성을 보이는 것을 확인하였으며, 향후 보다 다양한 사상의 유속에 대한 연구가 필요하다. 이 같은 자연하천의 유속분포에 대한 엔트로피 해석 결과는 기존 비접촉식 유량관측기법에 일률적으로 적용하는 수심평균환산계수의 한계점에 대한 개선방안이라고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 제주대학교 교원성과지원사업

에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Chiu, C.-L., 1987, Entropy and probability conception hydraulics, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 583-599.
- Chiu, C.-L., 1988, Entropy and 2-D velocity distribution in open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 783-756.
- Chiu, C.-L., 1989, Velocity distribution in open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 576-594.
- Choo, T. H., 2002, A Method of discharge measurement using the entropy concept (based on the maximum velocity), *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 22, 495-505.
- Choo, T. H., Je, S. J., 2006, A Study on the maximum velocity and the surface velocity, *Journal of the Korea Contents Association*, 4, 351-355.
- Fujita, M. M., Anton, K., 1998, Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, 36, 397-414.
- Kim, S. J., Yu, K. K., Youn, B. M., 2011, Real-time discharge measurement of the river using fixed-type surface image velocimetry, *Magazine of Korea Water Resources Association*, 44(5), 377-388.
- Kim, Y. S., Yang, S. K., Yu, K. K., Kim, D. S., Flood runoff measurements using surface image velocimetry, *Journal of Environmental Science*, 22, 581-589.
- Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R., Oberg, K., 2007, Acoustic velocimetry for riverine environments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 925-936.
- RDI, 1996, Acoustic doppler current profilers-principle of operation, a practical primer. San Diego, CA, Instruments.
- SonTek, 2010, Doppler velocity log for ROV/AUV applications, *SonTek Newsletter*, 6(1), SonTek, SanDiego, CA.
- Yu, K., Kim, D. S., Yoon, B. M., 2005, Development of fast and exact FFT algorithm for cross-correlation PIV, *Journal of Korea Water Resources Association*, 38, 851-859.