

수리계측학 및 수리정보학의 현재와 미래

Hydrometry and Hydroinformatics: Present and Future



김 동 수 |

Research Scientist / PhD, SonTek
kds406@gmail.com

서론

하천에 대한 관심은 최근 4대강 정비사업을 위시해 급속도로 높아지고 있다. 이를 위해 국지적 혹은 광역에서의 자연 및 인공 하천에 대한 심도 있는 이해를 바탕으로 하천 설계 및 운용이 필수적으로 요구되는 시점이다. 일반적으로 하천에 대한 이해와 운용은 수리학 이론, 현장 관측 및 수치해석의 세 요소를 통해 수행되어왔다. 이 중 현장 관측 (hydrographic survey)에 의한 수리학적 이해방식을 수리계측학 (Hydrometry)이라 명명된다. 하천 수리학 이론적 골자는 상당 부분 20세기를 거쳐 정립되었으나 대부분 실험실 및 제한된 현장 측정자료를 바탕으로 한 수학적 모형으로 제안되어 왔다. 그리고 정립된 수리학적 이론의 현장적용은 현장 측정 자료측정의 부족 때문에 수치해석기법을 통해 수행되거나 혹은 실험실에서의 모형실험으로 모의 되어왔다. 수치해석을 통한 하천의 거동해석은 최근 정교한 기법과 컴퓨터 계산능력의 향상으로 비약적으로 발전하였지만 실제 하천에서의 현상은 단순화된 이론이나 수

치해석, 모형실험만으로 이해하기에는 매우 복잡한 변수가 작용하므로 현장에 일률적으로 적용에 있어 오차를 보여주고 있다. 또한, 다수의 수치해석 모델의 경우 제한된 현장자료를 바탕으로 검증되어 사용된 경향이 있어 모델의 정확도가 감소되었다. 모형실험의 경우는 주로 국지적인 영역에만 적용 가능하다는 한계가 있어왔다. 따라서 실제 현장에서 관측된 자료를 바탕으로 한 수리현상의 분석 (Hydrometry)은 이러한 한계를 극복할 수 있는 대안이라 할 수 있다. 하지만 현장관측은 그동안 기술적인 한계로 인해 상대적으로 고비용 및 비효율을 수반하여 매우 제한된 하천 정보만을 제공하여 하천을 전반적으로 이해함에 있어 한계를 보여주었다. 예를 들어 유속측정에 있어 최근까지도 지난 세기 초반부터 사용된 방식인 유속의 힘으로 프로펠러를 회전시키는 기계적인 측정기 (Propeller meter)나 부자를 이용한 방식이 보편적으로 이용되어왔다. 하지만 대부분의 기계적인 측정기기들은 시공간적으로 매우 제한된 정보만을 제공해왔고 이러한 한계로 수리계측학은 수리실험이나 수치해석들의 보조적인 역할을 하거나 매우 제한된 영역의 해석에 사용되는데 국한되어 왔다.

최신 수리계측 기기

최근 20여 년 동안 전기/전자, 컴퓨터, 그리고

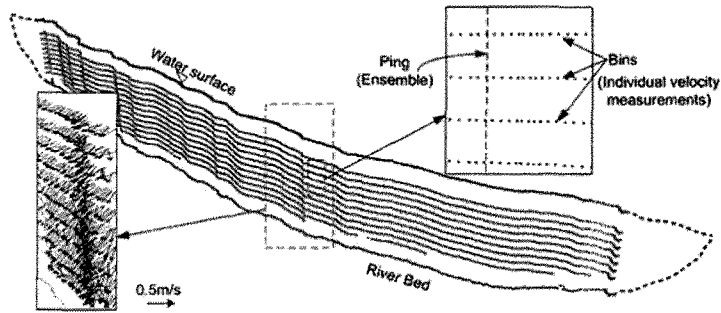


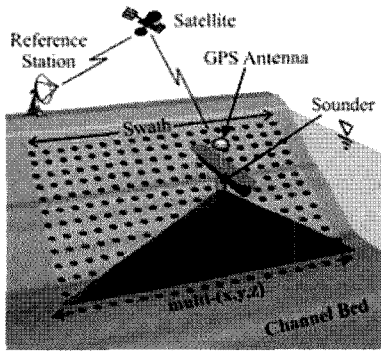
그림 1. 하천 횡단면을 선박에 탑재된 ADCP를 통해 측정된 유속분포

관측기법의 비약적인 발전은 하천의 유동현상을 측정 및 도시하게 해주는 디지털 관측기기들의 개발을 선도했다. 새로 등장한 다양한 관측기기들은 기존의 음파 (acoustic), 전자기적 파동 (light), 그리고 이미지 분석 (image processing) 기법을 디지털 기술과 결합하여 측정기기에 발전적으로 적용하였다. 이들은 하천의 유량과 유동현상을 관측하는 능력을 급속도로 향상시켜 광범위한 지역에서 매우 상세한 정보를 신속, 정확, 저렴하게 취득 가능하게 하여 하천 해석을 현장관측만으로 가능하게 해주는 혁명적인 변화의 가능성을 보여주고 있다. 즉 수리계측학 (Hydrometry)이 보조적인 수단에서 하천해석의 주요 수단으로 부각되고 있는 것이다. 그리고 이러한 현장측정 자료의 괄목할만한 증가는 그 자체로 하천 해석에 사용 가능하게 되었을 뿐만 아니라 기존의 수리학적 이론의 보완 및 발전과 수치모델이 검증에도 매우 긍정적인 효과가 있을 것으로 예상된다.

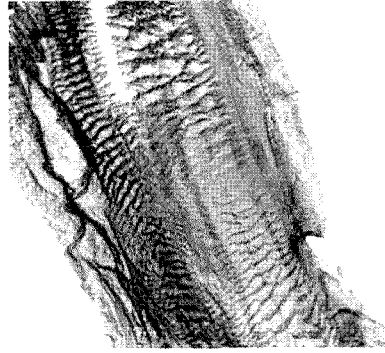
이러한 기술적인 진보로 인해 디지털 방식의 계기들은 전통적인 기계식의 측정방식을 빠르게 대체하고 있다. 특히 초음파를 이용한 계측기기는 최근 매우 활발하게 이용되고 있다. 미국의 경우 지리조사국 (USGS)에서의 약 1/3의 유량관측소에서의 측정이 음파를 이용한 기기를 통해 이루어지고 있다 (Muste 등, 2007). 이중 약 57%의 유량 관측은 선박, 케이블, 교량 등에서 실시한 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하였으며 27%의 경우 ADV (Acoustic Doppler

Velocimeter)를 사용하고 있다. 그리고 그 비중은 계속 높아지고 있다. 기계식의 프로펠러미터가 하천의 한 지점에서의 유속을 제한적으로 측정하는 반면에 ADCP는 선박에 장착해 횡단 운항함으로써 하천 단면의 수천~수만 지점에서 3차원 유속을 매우 신속하게 측정하여 제공한다 (그림 1 참조). ADCP는 20~30도 정도 기울어진 3~4개의 빔을 기하학적으로 위치시키고 (Janus Configuration) 약 200kHz~3MHz 분포의 초음파를 발사하여 하천의 부유물질에 반사된 음파의 도플러 편차를 이용하여 주어진 깊이 (2~100cm) 단위로 빔 진행방향의 유속을 측정하고 각각의 빔에서의 유속을 수학적으로 전환하여 3차원 유속을 측정한다(RDI, 1996; SonTek, 2000). 그리고 각각의 빔에서 부가적으로 수심 정보도 제공한다. ADCP는 하안에 수평으로 설치되어 색인속도방식 (index-velocity method)를 적용하여 실시간 유량 관측에도 사용된다 (Le Coz, 2008).

ADCP는 20여 년 전에 처음 도입된 이후 유량측정에 주로 사용되어 왔으나 최근 그 응용범위를 평균유속장 산정(González-Castro 등, 1996; Muste 등, 2004), 난류 측정, (Stacey 등, 1999, Nystrom 등, 2002), 유사이동속도 (Rennie 등, 2002), 생태연구 (Shields 등, 2003; Gaeuman and Jacobson, 2005), 중분산계수 (Carr and Rehmann., 2007; Kim 등, 2007), 부유사 농도 (Wall 등, 2006; Topping 등, 2007; Gray and Gartner, 2009) 등의 하천과 관련된 다양한 분야



(a)



(b)

그림 2. 복수빔 음파수심계 (Multi-beam Echosounder): a) 선박에 탑재되어 광폭의 하상을 측정하는 방식인 복수빔 음파수심계의 개념도; b) 복수빔 음파수심계로 측정된 하상 자료

로 그 응용범위를 넓히고 있다.

ADCP가 주어진 3차원 하천 단면에 분포한 점에서의 순간적인 유동속도를 제공하는 반면 수표면의 연속된 이미지를 바탕으로 한 이미지 유속계 (Large-Scale Particle Image Velocimetry; LSPIV)는 2차원 공간에 분포한 유동장을 동일한 시점에서 자세히 제공할 수 있다 (Creutin 등, 2002). 이 개념은 기존의 실험실에서 사용된 PIV 방식을 현장으로 확장한 기법으로 1990대 중반에 최초로 도입되었다 (Fujita and Komura, 1994; Aya 등, 1995). 그리고 수표면 유속장과 별도로 측정된 수심자료를 기반으로 실시간으로 유량정보를 제공할 수 있다 (Hauet 등, 2008). 이미지 유속계는 비접촉식으로 인해 특히 홍수시의 접근 위험 지역의 유속장을 안전하게 측정하는 데 장점이 있다. 하지만 이미지에 빛이 사용되므로 야간 측정에 한계가 있다.

하천의 유동 관측과 더불어 하상 관측(Morphologic Survey) 또한 전통적인 단면적이나 단면비 등의 1차원 지표 구하는 방식을 넘어 광역에서의 3차원의 실제 하상을 신속하게 음파 혹은 빛을 이용한 측정기기를 통해 가능해졌다. 하천 하상에 대한 상세한 정보는 하천의 유동 특성뿐만 아니라 유사 및 생태적인 특성을 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 대표적인 최신 기기는 복수의 빔의 음파를 활용하는 복수빔 음파수심계 (Multi-beam Echosounder;

MBES)로 선박에 탑재되어 각기 다른 각도로 배치된 빔이 하상을 스캔하는 방식이다 (그림 2a 참조; Eilertsen and Hansen, 2007). 이 수심 자료는 수십~수백만 지점의 수심자료를 매우 조밀하고 단시간에 취득 가능하게 하여 하상의 미세한 형상 변화까지 감지 가능하다 (그림 2b 참조). 또한, 음파의 주파수를 달리하여 바닥 유사의 퇴적두께나 종류를 선별하는 데 사용되기도 한다 (Dunbar 등, 1999).

보다 광범위한 지역에서의 하상의 관측은 항공기에 탑재된 계기에서 두 주파수의 빛을 송출하여 수심 및 수표면까지의 거리를 측정하는 방식인 공중 전파수심계 (Airborne LIDAR Bathymetry; ALB)가 시도되고 있다 (그림 3). 이 방식은 지표면의 고도를 측정하여 고해상도의 지형정보모델 (Digital Elevation Model)을 생성하는 기법인

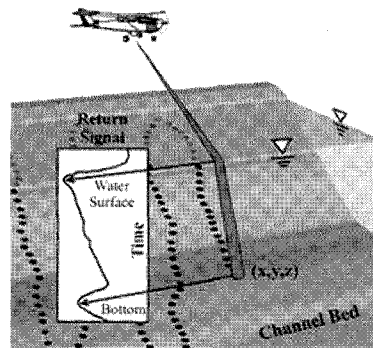


그림 3. 공중 전파수심계의 개념도

LIDAR (Light Detection And Ranging)를 하천에 응용한 경우이다. ALB는 고해상도의 수심자료를 신속 정확하게 측정하여 홍수 범위, 유사이동, 수중생태, 그리고 하천의 형상변화 등을 감시하는데 그 목적을 두고 있다 (Hilldale and Raff, 2007). 하천에 적용된 ALB는 하천의 투명도에 따라 투과 가능 깊이의 제한이 있어 일반적으로 얇은 수심에 주로 사용된다.

현재 위에 언급한 다양한 유동 및 하상 관측 기술들의 보급과 활용은 그 가능성에 비해 아직 과도기적 단계라고 평가할 수 있다. 신기술의 가능성을 주시하고 그 응용범위를 확장시키기 위한 여러 연구자의 노력이 다방면으로 시도되고 있으나 실제 현장에서는 여전히 전통적인 방식과 혼재되어 사용되기도 하고 대용량의 관측 자료의 활용이 기존 방식으로 수행되는 것을 대체 및 보완하는 수준에 머물고 있다. 예를 들어 ADCP의 경우 다방면으로의 적용 가능성에도 불구하고 여전히 정확한 유량계측기 정도로 인식되고 있는 실정이다. 따라서 향후 과제는 획기적으로 증가하고 있는 현장관측자료를 바탕으로 이전에 할 수 없었던 현장자료에 기초한 연구를 어떤 새로운 방식으로 만들어 낼 것인가에 있다.

수리정보화시스템

전통적으로 현장 측정은 그 자료의 규모도 한정되었을 뿐만 아니라 자료의 저장 및 이용도 개별 프로젝트 단위로 한정되어 개인이나 기관에 한정되어 처리되어왔다. 하지만 최신 수리계측기법을 활용한 광범위하게 시공간 걸쳐 분포하는 대규모의 측정자료를 효과적으로 활용하기 위해서는 기존의 자료 처리방식을 넘어 자료에 대한 새로운 접근방식이 요구되고 있다. 이러한 새로운 경향에 대해 세계 수자원 학계는 방대한 양의 관측자료를 수집, 저장, 처리, 검색, 그리고 분석할 수 있게 하는 수리정보

화시스템 (Hydroinformatics 혹은 Hydrologic Information System: <http://his.cuahsi.org>)을 설계하고 개발하기위해 노력하고 있다. 이에 연관되어 우선 정보화시스템의 근간을 이루는 표준화된 자료모형 (data model)이 수자원의 특정 영역별로 개발되어왔다. 예를 들어 유역 수문 자료 모델로 Arc Hydro (Maidment, 2002), 해양의 경우 Arc Marine (Wright et al., 2007), 지하수는 Arc Hydro Ground Water (Strassberg, 2005), 그리고 시계열 (time series) 모델로 ODM (Horsburgh 등, 2008)이 있다. 그 중 하천에 특화된 자료 모델로 Arc River (Kim 등, 2009)가 Arc Hydro를 계승 발전시켜 개발되었는데 이는 하천의 1차원 네트워크에 관측된 2차원 혹은 3차원 유동 및 하상 자료를 상호 연계하여 저장하고 관계되는 하천의 시공간적인 변화를 GIS에 기반하여 관리하는 시스템이다. Arc River등의 하천 자료모델은 하천정보화시스템 (River Information System)의 근간을 이루는 GIS에 기반한 관계형 데이터베이스 (relational database)를 구축하는 데 필요한 설계도의 역할을 한다. Arc River는 서두에 언급한 ADCP, LSPIV, MBDS 등의 최신 기술로 측정된 자료를 단일한 자료 구조로 효과적으로 저장하여 하천정보의 통합적인 관리에 일조할 것으로 예상된다. 그림 4는 ADCP의 측정 자료를 1차원 하천 네트워크에 결합하여 저장한 Arc River 데이터베이스

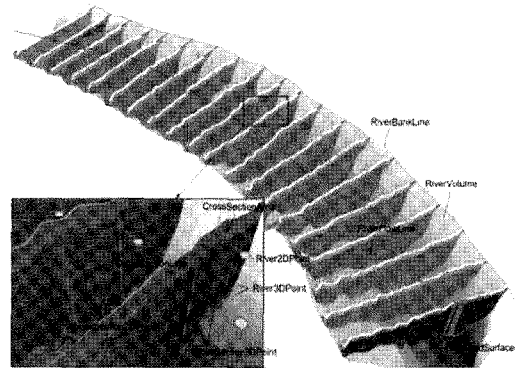


그림 4. Arc River 자료 모델에 기반하여 저장된 ADCP 자료 (미시시시장)

스를 3차원 GIS 소프트웨어 (ESRI ArcScene)에서 도시한 결과이다.

하지만 하천정보화시스템의 실질적인 구축을 위해서는 대규모 자료의 저장 및 추출의 효율성 제고, 하천환경에 적합한 자료 추출 형식의 표준화 (예를 들어 WaterML: <http://his.cuashi.org/wofws.html>), 그리고 웹을 통한 공간정보와 결합한 다차원의 하천정보의 효율적 제공 등이 추가적으로 해결되어야 하천정보화시스템을 직접하게 운용할 수 있을 것이다. 하천정보화시스템은 서로 상이한 종류 및 다차원의 하천 자료를 지역 혹은 국가적으로 통합 관리하여 하천의 복잡한 수리현상을 이해하고 필요한 자료를 효과적으로 연구자 및 대중들에게 제공하여 하천을 보다 효율적으로 관리할 수 있게 하는 미래형 정보화시스템이라 하겠다.

결론

지금까지 간략하게 최근에 활발하게 이용되고 있는 하천 계측기기들을 살펴보고 폭발적으로 증가하고 있는 관측자료들을 효율적으로 이용하려는 노력의 일환인 하천정보화시스템에 대해 소개하였다. 지난 20여 년 사이에 급속도로 발전한 디지털 혁명에 힘입어 하천의 이해에 있어서도 이전에 존재하지 않았던 새로운 계측 및 처리 방식이 가능하게 되었다. 그리고 광범위하고 정확한 관측자료로 하천을 이해하고 연구하는 데 있어 새로운 장을 열었다고 할 수 있다. 하지만 이러한 자료를 활용하여 새로운 지식을 만들고 활용하는 것은 여전히 연구자들의 몫으로 남는다고 할 수 있다. 최근 추진되고 있는 정보화시스템도 현재 개발 및 보급 단계에 있으나 보다 활발한 적용을 위해 사용자의 자료 융합과 공유에 대한 인식 전환이 요구된다고 하겠다. 🍷

참고문헌

1. Aya S., Fujita I., Yagyu M. (1995). "Field Observation of Flood in a River by Video Image Analysis", Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE, 39, 447-452.
2. Carr L., Rehmann CR (2007) Measuring the dispersion coefficient with an acoustic Doppler current profiler. Journal of Hydraulic Engineering, 133, pp. 977-982.
3. Creutin JD, Muste M and Li Z, (2002). Traceless Quantitative Alternatives for Measurements in Natural Streams, Proceedings Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM).
4. Dunbar, J., Allen, P., Higley, P. (1999). "Multifrequency acoustic profiling for water reservoir sedimentation studies", Journal of Sedimentary Research, 69(2), pp. 518-527.
5. Eilertsen S. and Hansen L. (2007). "Morphology of river bed scours on a delta plain revealed by interferometric sonar", Geomorphology, 94 (1-2), pp. 58-68.
6. Fujita I and Komura S (1994) Application of Video Image Analysis for Measurements of River-surface Flows. Annual Journal of Hydraulic Engineering, Japan Society of Civil Engineers, 38, pp.733-738, (in Japanese).
7. Gaeuman D., Jacobson B. (2006). "Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river", Journal of Geophysical Research, 111, F02005.
8. González J., Melching C., and Oberg K. (1996). "Analysis of open-channel velocity measurements collected with an Acoustic Doppler Current Profiler", Proceedings RiverTech 96, IWRA, Vol. 2, 838-845, Chicago, IL.

9. Gray J. and Gartner J. (2009). "Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring", *Water Resources Research*, 45, doi:10.1029/2008WR007063
10. Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J-D., Wilson, M. (2008). "Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method", *Journal of Hydrology*, 13(2), pp. 105-110.
11. Hilldale R. (2007). "Using bathymetric LiDAR and a 2-D hydraulic model to quantify aquatic habitat", *Proceedings of the ASCE World Environmental and Water Resources Congress*, Tampa, FL, May pp. 15-19.
12. Kim, D., Muste, M. (2009). "Multidimensional spatio-temporal representation of riverins and their behavior using customized gis-based data model", 33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada.
13. Kim D, Muste M and Weber L (2007a) Software for Assessment of Longitudinal Dispersion Coefficient using Acoustic-Doppler Current Profiler Measurements. 32nd IAHR Congress, Venice, Italy.
14. Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro - GIS for Water Resources*. Redlands, California, ESRI.
15. Muste M., Yu K., Pratt T. and Abraham D. (2004). "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics: part II: Fixed-vessel measurements", *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 15(1), pp. 17-28.
16. Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R. and Oberg, K. (2007). *Acoustic Velocimetry for Riverine Environments*, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 925-936.
17. Nystrom, E., Oberg K. and Rehmann C. (2002). "Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers - sources of error and laboratory results", *Proceeding of Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, VA.
18. Rennie C., Millar R. and Church M. (2002). "Measurement of bedload velocity Using an acoustic Doppler current profiler", *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), pp. 473-483.
19. RDI (1996) *Acoustic Doppler Current Profilers - Principle of operation, A Practical Primer*. San Diego, CA, RD Instruments.
20. Shields F., Knight S. and Church M. (2003). "Use of acoustic Doppler current profilers to describe velocity distributions at the reach scale", *Journal of the American Water Resources Association*, 39(6), pp. 1397-1408.
21. SonTek (2000) *Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications*, SonTek Newsletter, 6(1), SonTek, San Diego, CA.
22. Stacey M., Monismith S. and Bureau J. (1999). "Observations of turbulence in partially stratified estuary", *Journal of Physical Oceanography*, 29, pp.1950-1970.
23. Strassberg, G. (2005). *A Geographic Data Model for Groundwater systems*. Civil and Environmental Engineering, The University of Texas at Austin. Doctoral Dissertation.
24. Horsburgh, J. S., Targoton, D.G., Maidement, D.R., Zaslavsky, I. (2008). "A Relational Model for Environmental and Water Resources Data," *Water Resources Research*
25. Topping D., Wright S., Melis T. and Rubin D. (2007). "High-resolution measurements of suspended-sediment concentration and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system", *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*, Aug 1-4, Moscow, Russia, Vol III.

26. Wall G., Nystrom E. and Simon L. (2006). "Use of an ADCP to Compute Suspended Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York", USGS Scientific Investigation Report 2006-5055
27. Wright, D. J., Blongewicz, M.J., Halpin, P.N., Breman, J. (2007). Arc Marine: GIS for a Blue Planet. Redlands, California, ESRI Press.