韓國水資源學會論文集
第42卷 第7號 · 2009年 7月
pp. 513~523

DOI: 10.3741/JKWRA.2009.42.7.513

자동유량측정에 의한 한강대교 조석영향 분석

Analysis of Tidal Effect in Hangang Bridge by Automatic Discharge Measurement

이 민 호* / 김 창 완** / 유 동 훈***
Lee, Min Ho / Kim, Chang Wan / Yoo, Dong Hoon

Abstract

The measuring point of the Hangang Bridge affected by tide has some special topographic characteristics due to Nodle Island. Furthermore the submerged weirs located on the upstream and downstream. Therefore flow is separated and joined by Nodle Island. Discharge measurement at the point of the Hangang Bridge is very important, because Hangang Bridge is key station in managing the discharge and flood forecasting. In the past, it was too difficult to measure discharge in tidal conditions. HRFCO(Han River Flood Control Office) installed automatic discharge measurement facilities for solving this problem. Measuring equipments operates and measures discharge every 10 minutes at 2 points(southern and northern section close to Nodle Island), and calculates flow discharge using Chiu's velocity law(Chiu, 1988). In order to verify the results of automatic discharge measurements, manual discharge measurements were carried out by ADCP. In addition, the monthly discharge were also compared.

keywords : Automatic Discharge Measurement, Tidal River, Hangang Bridge

요 지

한강대교지점은 조석의 영향을 받고 노들섬으로 인해 흐름이 나누어지는 특수한 지형조건을 가지고 있으며, 홍수예보지점이고 한강유역의 유출량을 분석하는 대표지점이기도 하다. 따라서 정확한 수위-유량관계를 도출하기 위하여 많은 노력을 기울였으나 조석의 영향을 받지 않는 홍수기 이외의 기간에 대한 정확도의 확보가 곤란하였다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대책으로 최근 자동유량측정에 관한 연구가 진행되었고, 실무에 적용되어 한강대교지점에서 실시간 유량자료의 획득이 가능하게 되었다. 한강대교지점에는 남단(노량진방향)과 북단(용산방향)에 2대의 자동유량측정시설을 설치하여 운영하고 있다. 수중에 설치된 도플러방식 수평초음파유속계(H-ADCP)가 23개 각도로 회전하며 10분마다 단면의 유속자료를 생산하고, Chiu의 유속분포(Chiu, 1988)를 이용하여 유량을 계산한다. 본 고에서는 자동으로 측정된 성과와 기존의 유량측정 방법에 의한 성과를 비교하였으며, 월별 유출량에 대한 분석결과를 제시하였다.

핵심용어 : 자동유량측정, 감조하천, 한강대교

* 교신저자, 국토해양부 한강홍수통제소 하천정보센터 시설연구사
Corresponding Author, Researcher, River Information Center, Han River Flood Control Office, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Seocho-gu, Seoul 137-049, Korea
(e-mail: leeminho@korea.kr)
** 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 하천 · 해안항만연구실 책임연구원
Research Fellow, River, Coastal and Harbor Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea
*** 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
Professor, Division of Environmental, Civil & Transportation, Ajou University, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-749, Korea

1. 서 론

한강대교지점의 흐름은 서해와 인접한 감조구간으로써 조석의 영향을 받고 있다. 상·하류에 잠실수중보와 신곡수중보가 설치되어 이들 구조물에 의한 영향을 받을 뿐만 아니라 노들섬으로 인해 흐름이 분리되는 지형적인 특성으로 인해 매우 복잡한 흐름특성을 가지고 있다. 한강대교지점은 치수 측면에서 홍수예보지점이며, 이수 측면에서 한강유역 유출분석의 대표지점으로 매우 중요한 의미를 가진다. 따라서 한강대교지점에서 실시간으로 정확한 유량의 측정은 수자원관리의 중요한 기초자료로 그 가치가 매우 크다.

전술한 바와 같이 한강대교의 특수한 조건 때문에 최근까지 유량측정이 곤란하였고, 이에 대한 연구는 수리학적모형을 통한 수치해석적 접근이 주를 이루었다(김원 등, 1998). 다만 신곡수중보에서 유량측정을 통하여 조석에 의한 영향을 분석한 결과로부터 한강본류구간에서 상당한 구간까지 (-)유속과 (+)유속이 번갈아 발생하고 있음을 추정하였으며, 신곡수중보 직하류에서는 -1,619 m^3/s으로 역류하는 유량을 실측하였고, 한강대교에서는 -1,000~1,000 m^3/s 정도로 유량을 추정한 바 있다(김원 등, 2001).

정확도 높은 유량자료를 확보하기 위해서 유량측정방법의 개선과 함께 유량을 산정하는 방법을 개발할 필요성이 있다. 국내에서는 최근 전통적인 유량측정의 정확도 향상을 위하여 유량측정방법 개선 및 유량측정의 불확실도를 줄이기 위하여 노력과 함께 최첨단 장비를 이용한 유량측정의 자동화를 시도하고 있다(김원 등, 2004; 김치영 등, 2006; 김창완 등, 2007a). 이러한 최신장비와 발달된 통신기술이 접합되어 해양의 조류를 측정하기 위해 개발된 이동식 초음파유속계(ADCP)를 하천유량측정에 활용하고 있으며, 전통적으로 해결하기 어려웠던 조석 및 배수영향을 받는 지점에서 유량측정이 가능해졌다.

기존의 대수형 유속분포나 지수형 유속분포에서 벗어나 확률밀도함수와 엔트로피 최대화 이론을 도입한 유속분포를 제안하는 등 국외에서는 보다 근본적인 문제부터 새롭게 접근하는 연구가 진행된 바 있다(Chiu, 1988). Chiu의 유속분포 이론을 이용하여 자연하천에서 유속계 및 봉부자로 측정된 유속과 측정위치로 유량을 산정하는 기법이 적용하여 그 사용성을 확인하였다(김창완 등, 2007b, 김창완 등, 2008). 흐름단면에서 측정위치와 유속의 크기를 알면 이와 같은 기법의 적용이 가능하며, 2006년부터 축적된 자동유량측정결과를 검토하기 위하여 국토해양부 한강홍수통제소에서 수행한 한강유역 유량측정성과(한강홍수통제소, 2007; 국토해양부 2008)와 비교·검토하였다.

2. 유량산정 및 성과분석

2.1 자동유량측정 및 유량산정

한강홍수통제소에서는 2006년 '한강유역 수자원시험장비의 설치 및 운영 연구용역(4·5단계)'이 완료되어 본격적으로 한강대교지점에서 실시간 자동유량측정이 가능하게 되었다(한강홍수통제소, 2006). 남단과 북단에 각각 1대의 자동유량측정시설이 설치되어 있으며, 동시에 23개 각도로 회전하며 1개 각도에서 2 m 간격으로 수면 또는 경계면까지 유속을 측정한다. 유속측정에 소요되는 시간은 5~6분 정도로 매 10분마다 측정을 시작하여 유속자료를 측정한다(김창완 등, 2007a). 이와 같이 측정된 유속자료는 등유속 기반의 곡선좌표계에서 하폭과 수심기준의 직교좌표계로 변환하는 Chiu의 유속분포를 이용하여 Eq. (1)과 같이 유량 산정식을 개발하였다(김창완 등, 2008; 이찬주 등, 2007).

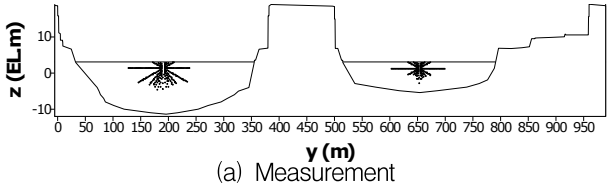
$$Q^* = \iint_A u^* dA = \sum_j \sum_k u^*_{j,k} \Delta y \Delta z \tag{1}$$

여기서 Q^*는 단면을 통과하는 유량이며, u^*는 Chiu의 유속분포로부터 계산된 각 격자의 유속이다. j, k는 하폭, 수심방향 격자번호이며, Δy, Δz는 하폭방향, 수심방향 격자크기이다.

본 연구에서 자동으로 측정된 유속자료를 이용하여 최대유속과 유속지표를 구하기 위하여 무차원 유속분포를 도입하였다. Fig. 1(a)와 Fig. 2(a)에는 흐름단면에서 자동으로 측정된 유속자료의 위치와 크기를 나타내었다. Fig. 1(b)와 Fig. 2(b)에는 무차원 유속분포에 대응시켜 단면에서의 최대유속과 단면격자의 유속분포를 나타내었으며, Eq. (1)을 이용하여 유량을 산정하였다.

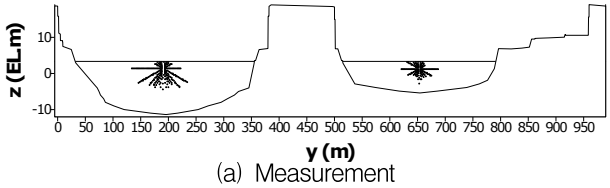
2.2 수동유량측정 및 유량산정

수동유량측정의 경우 평·저수기에는 프로펠러 유속계나 이동식 ADCP를 많이 이용하고 있으며, 한강대교의 경우 남단과 북단으로 나누어 측정해야 한다. 만조시에는 유속이 순간적으로 급격하게 변화하므로 측정에 1~3시간 정도가 소요되는 기존의 봉부자나 프로펠러 유속계보다 자동유량측정 주기내에서 측정이 가능한 ADCP를 이용하는 것이 자동유량측정성과와 직접비교가 가능하고 정확도도 확보할 수 있을 것으로 판단되어 한강홍수통제소에서 2006년과 2007년 수행한 유량조사사업의 결과를 이용하였다(한강홍수통제소, 2007; 국토



(a) Measurement (b) Distribution

Fig. 1. Velocity of Tide is on the Flow by ADVM (20:30 November 21st, 2006)



(a) Measurement (b) Distribution

Fig. 2. Velocity at the Low Tide by ADVM (22:20 November 21st, 2006)

해양부, 2008).

미국 USGS에서는 2002년경부터 공식적인 유량측정에 ADCP를 적용하기 시작하였으며, ADCP를 이용하여 유량측정을 수행한 경우에는 상용프로그램을 이용하여 직접 유량을 산정한다. ADCP를 이용하여 유량을 계산하는 과정은 Eq. (2)에 의해 이루어진다(Gordon, 1989).

$$Q = \iint n(L)\, U(z,L)\, dz\, dL \qquad (2)$$

여기서 Q는 유량이며, L은 하폭방향 거리, n은 L에서 측선을 따른 직각단위벡터, U는 유속벡터, z는 수심이다.

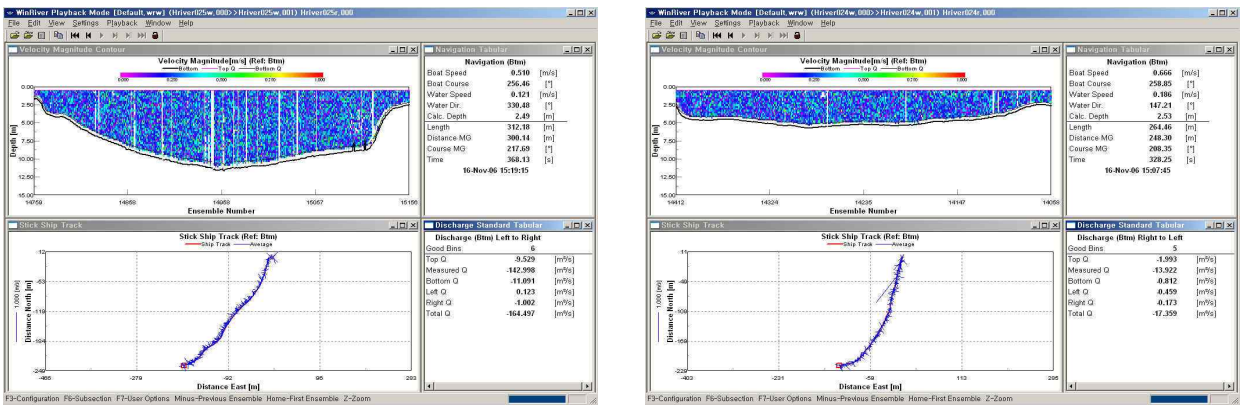
Fig. 3은 2006년 11월 16일에 ADCP를 이용하여 수동으로 측정된 결과이며, 15:07분에 북단에서 -17.4 m^3/s, 15시 19분에 남단에서 -164.5 m^3/s의 유량이 흐른 것으로 측정되었다. 남단과 북단의 유량을 합하면 -181.9 m^3/s가 한강대교지점을 통과한 것으로 계산하였다.

Fig. 3과 같이 노들섬의 남단과 북단을 나누어 유량측정을 수행할 경우에는 남단과 북단에 설치된 자동유량측정시설의 성과를 각각 비교할 수 있는 장점이 있으나, 남단과 북단을 이동하는 시간이 소요되는 단점이 있다. 노들섬 상류에서 전체 단면에 대한 유량측정을 수행하는 경우에는 측정시간이 단축되는 장점이 있으나 각각의 자동유량측정시설을 비교할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 2가지 방법으로 측정된 자료를 모두 이용하였다.

2.3 유량측정 성과검토

한강대교 자동유량측정시설로부터 측정된 10분 간격 유량자료는 2006년 3월부터 지속적으로 축적하고 있다. Fig. 4는 2006년 11월 유출현상을 나타낸 것으로 팔당댐방류량(D, Paldang Dam), 수위-유량관계곡선에 의한 환산유량(Qt by rating), 자동으로 측정된 남단유량(Qs by ADVM)과 북단유량(Qn by ADVM)의 합인 한강대교 전체유량(Qt by ADVM = Qs by ADVM + Qn by ADVM)과 국립해양조사원에서 제공하고 있는 1시간 간격으로 측정된 인천조위(W, Incheon)와 국토부 한강대교 관측수위(H by float) 자료를 함께 나타내었다. 또한 2006년 11월 16일 이동식 도플러유속계로 측정한 수동유량측정 결과(Qt by ADCP)도 함께 나타내었다.

Fig. 5는 2007년 6월 팔당댐방류량, 수위-유량관계로



(a) Southern Channel (b) Northern Channel

Fig. 3. Results of Discharge Measurement by ADCP

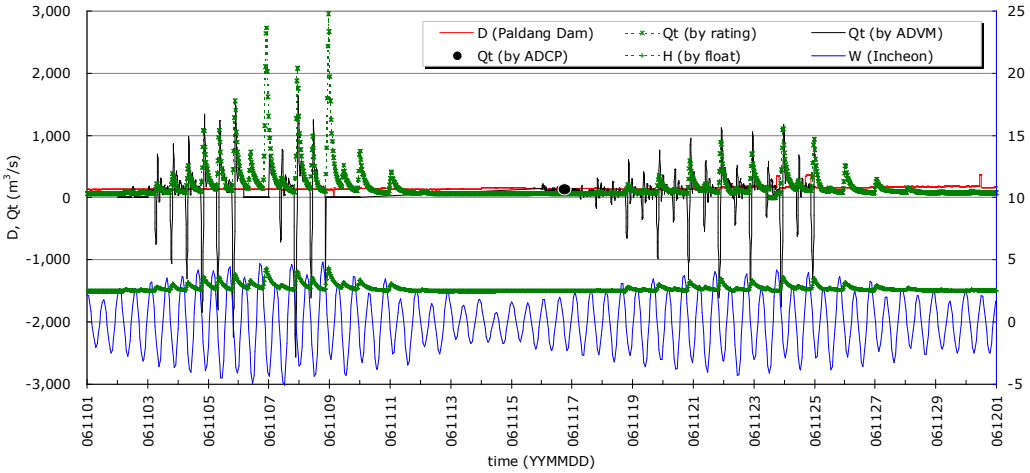


Fig. 4. Discharge and Water Stage during November, 2006 at the Hangang Bridge

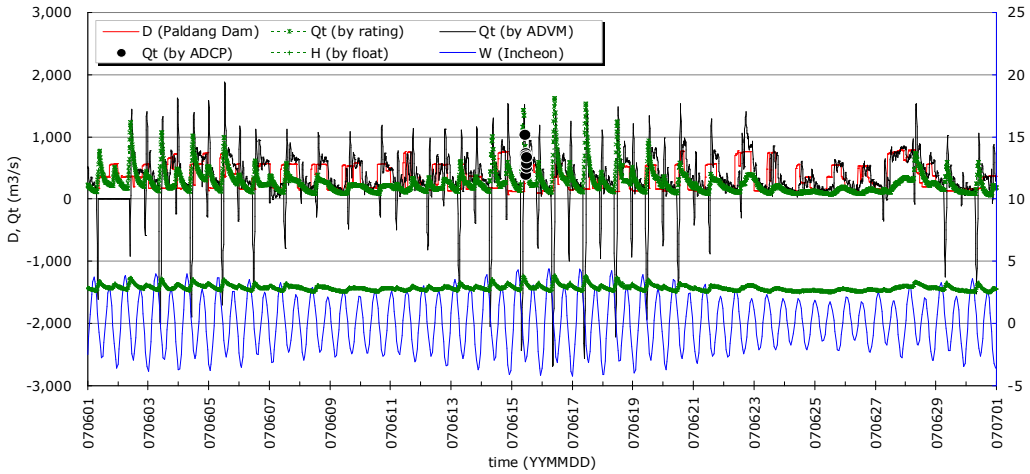


Fig. 5. Discharge and Water Stage during June, 2006 at the Hangang Bridge

부터 환산된 유량, 남·북단에서 동시에 자동으로 측정된 유량과 수동으로 측정한 유량 및 인천조위, 한강대교 수위관측소 관측수위를 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 14일부터 19일에 조차가 크며 조위차는 8.55 m이다. 이 기간에 한강대교지점의 유량의 변화는 (-)유량(만조시)일 경우 최대값이 -2,000 m^3/s보다 크게 발생하였으며, (+)유량(간조시)일 경우 최대값이 1,500 m^3/s 정도로 측정되었다. 조위차가 작은 23일부터 27일에는 신곡수중보 상류로 조석의 영향이 미치지 못하는 기간으로 팔당댐방류량 규모는 작지만 자동으로 측정된 유량을 확인한 결과 직접적인 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 수위-유량관계로부터 환산된 유량은 이를 적절히 반영하고 있지 못함을 알 수 있다.

Fig. 6은 2007년 10월 측정결과로 팔당댐방류량, 수위-유량관계로부터 환산된 유량, 남·북단에서 자동측정된 유량과 수동측정된 유량 및 인천조위와 한강대교 수위를 나타내었다. 2회의 수동유량측정을 수행하였으며, 최대조위차(28일)는 10.25 m이며, (-)유량의 최대값은 -4,500 m^3/s 이고, (+)유량의 최대값은 2,500 m^3/s이다. 조위차가 작은 4일부터 7일, 19일부터 23일에는 팔당댐에서 방류되는 유량이 일정한 시간차를 가지고 한강대교를 통해 흘러 나가고 있음을 보이고 있다.

3. 측정자료를 통한 조석영향 분석

인천조위차가 약 4.0 m 이상인 경우는 신곡수중보 상류로 조석의 영향이 미쳐 한강대교지점에 역류가 발생하고 그 이하인 경우는 팔당댐방류량의 영향을 지배적으로 받고 있으며, 특정한 조건에서는 노들섬을 중심으로 남단에서는 (+)유량이 북단에서는 (-)유량이 발생하고 있음을 확인하였다. 또한 인천조위차가 8.0 m 내외일 때는 역류하는 유량이 -2,000 m^3/s에서 -2,500 m^3/s정도이며, 인천조위차가 10.0 m 내외일 때는 역류하는 유량이 -4,000 m^3/s에서 -4,500 m^3/s 정도로 나타났다. 인천조위가 한강대교에 미치는 시간은 유량이 정

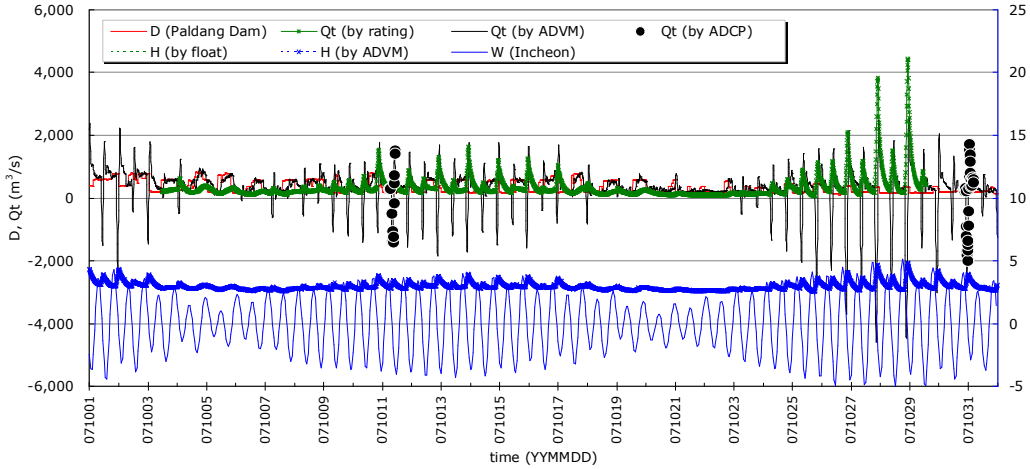


Fig. 6. Discharge and Water Stage during October, 2007 at the Hangang Bridge

체되어 수위가 첨두가 되는 시점을 기준으로 약 4~5시간 정도인 것으로 나타났다.

대상지점에서 조석영향의 검토는 평·저수기를 대상으로 하였으며, 고조위와 저조위의 조석조건에 따른 유출특성 검토하였다. 홍수기에 대한 분석은 보다 많은 자료가 수집된 후에 수행될 필요성이 있다. 또한 지형적인 특성으로 인해 남단과 북단을 나누어 유량측정을 수행하고 있으므로 남단과 북단에서 측정된 유량을 각각 검토하였으며, 남단과 북단의 유출량비 및 월별 유출량을 비교·검토하였다.

3.1 고조위

Fig. 7에는 2006년 4월 4일 남단에서 반일주조에 대한 자동유량측정성과와 ADCP를 이용한 수동유량측정성과를 나타내었다. 북단의 경우 자동유량측정시설의 고장으로 유량측정이 이루어지지 않았다. 남단에 대한 수동유량측정 결과를 검토하면 인천조위에 따라 한강대교 지점에서 최대 -835 m^3/s의 (-)유량이 발생하였으며, 785 m^3/s의 (+)유량이 발생하였다.

Fig. 8에는 2007년 6월 15일 반일주조에 대한 자동유량측정성과와 남단과 북단으로 나누어 ADCP를 이용한 수동유량측정성과를 나타내었다.

Fig. 9에는 2007년 10월 10일 반일주조에 대한 자동유량측정성과와 05시부터 10시까지 5시간 동안 노들섬 상류에서 ADCP를 이용한 총 14회의 수동유량측정성과를 나타내었다. 2007년 10월 11일 06시 조석의 영향을 받기 전 팔당댐방류량과 수위-유량관계로부터 환산된 유량, 한강대교 자동측정유량 및 수동측정유량이 모두 같음을 확인할 수 있다. 그러나, 13시간 후인 10월 11일 19시에 185 m^3/s에서 354 m^3/s로 팔당댐방류량이 증가하였으며, 팔당댐방류량과 자동측정유량은 354 m^3/s로 같은 유량을 보이고 있다. 그러나 수위-유량관계로부터 환산된 유량은 179 m^3/s로 다른 값을 보이고 있다. 이는 같은 수위에서 팔당댐방류량의 영향을 수위-유량관

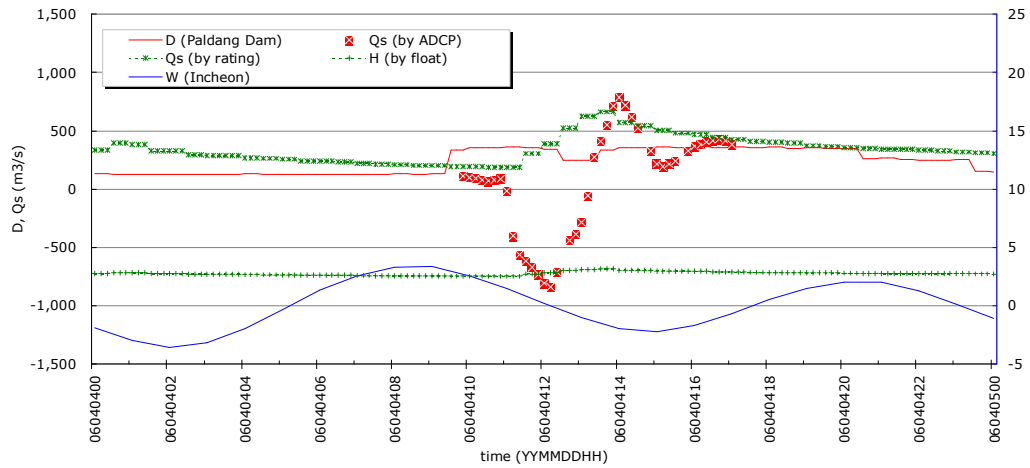


Fig. 7. Discharge of Southern Channel and Water Stage during High Tide in April, 2006 at the Hangang Bridge

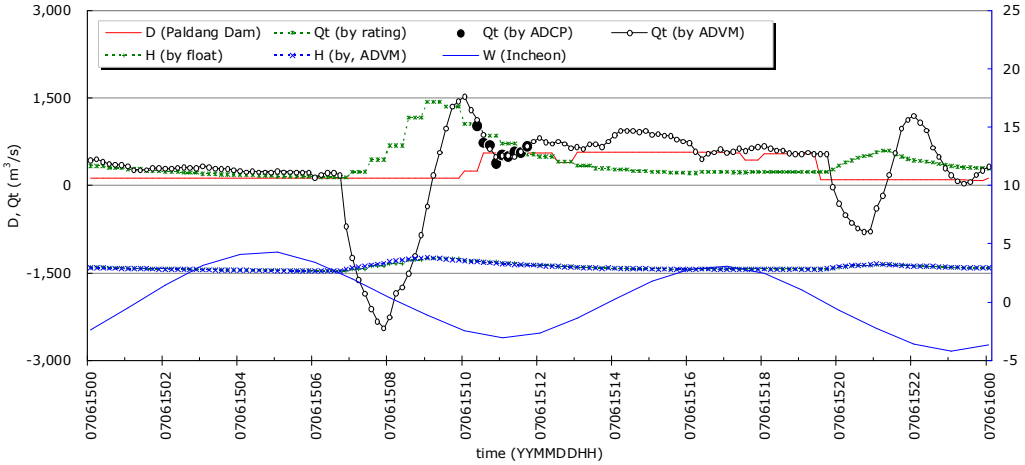


Fig. 8. Discharge and Water Stage during High Tide in June, 2007 at the Hangang Bridge

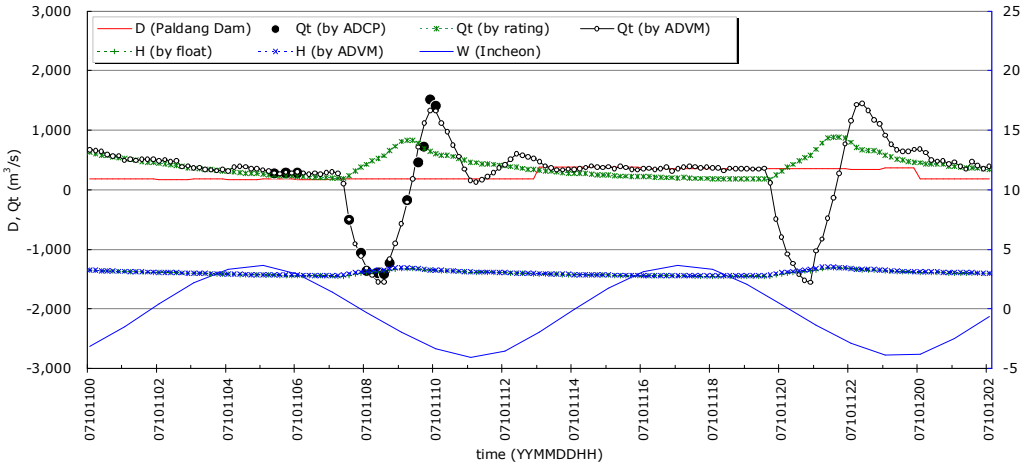


Fig. 9. Discharge and Water Stage during High Tide in October, 2007 at the Hangang Bridge

계로는 반영하지 못하고 있으나, 자동측정유량은 정확하게 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 이 기간에 노들섬을 중심으로 유출량비를 비교하면 남단이 83~64 %, 북단이 17~36 %의 유량이 흐른 것으로 분석되었다.

Fig. 10에는 2007년 10월 30일 반일주조에 대한 자동유량측정성과와 20시부터 31일 04시까지 8시간 동안 31회에 걸쳐 노들섬 상류에서 수동유량측정을 수행하여 반일주조에 대한 주기를 모두 측정한 결과를 나타내었다. (-)유량 발생시에는 순간적으로 많은 유량이 유입되었다가 (+)유량 발생시에는 (-)유량 발생시보다 유량의 규모가 작고 오랜 시간에 걸쳐서 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. (+)유량 발생시에는 진동하며 유출하는 현상이 나타나는데 정확하지는 않지만 상하류에 위치하는 보의 영향으로 추정된다. 이 기간에 노들섬을 중심으로 유출량비를 계산하면 남단으로 70~80 %, 북단으로 30~20 %의 유량이 흐른 것으로 분석되었다.

3.2 저조위

저조위일 경우 조석의 영향이 신곡수중보 상류로 미치지 못하며, 팔당댐방류량이 150 m^3/s 이하로 방류될 때 각각 남단과 북단으로 나누어 수동유량측정을 수행한 결과 노들섬을 중심으로 회전하는 현상이 나타났다. Fig. 11은 2006년 11월 16일 조위영향이 신곡수중보 상류로 미치지 못하는 기간에 실시된 자동유량측정결과와 수동유량측정결과를 비교한 것으로 주흐름이 발생하는 남단에서는 (+)유량이 북단에서는 (-)유량이 발생하여 노들섬을 중심으로 흐름이 순환하고 있음을 확인할 수 있다(김창완 등, 2007a). 이 기간의 팔당댐방류량은 140 m^3/s 정도로 일정하였으며, 남단에서는 약 155 m^3/s, 북단에서는 -10 m^3/s의 유량이 발생하여 전체적으로는 145 m^3/s의 유량이 하류로 흘렀다.

Fig. 12는 팔당댐에서 178 m^3/s를 방류하였고 조석의

영향이 한강대교에 미치지 못하는 기간에 남단과 북단의 자동유량측정성과를 비교하였다. 북단에서는 최대 -76 m^3/s의 유량이 흐르고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 노들섬을 중심으로 회전하는 현상이 반복해서 발생하고 있음을 확인하였으며, 이는 하류에 위치한 신곡수중보의 영향인 것으로 추정되나, 이 또한 명확하지 않아 추후 연구가 필요하다.

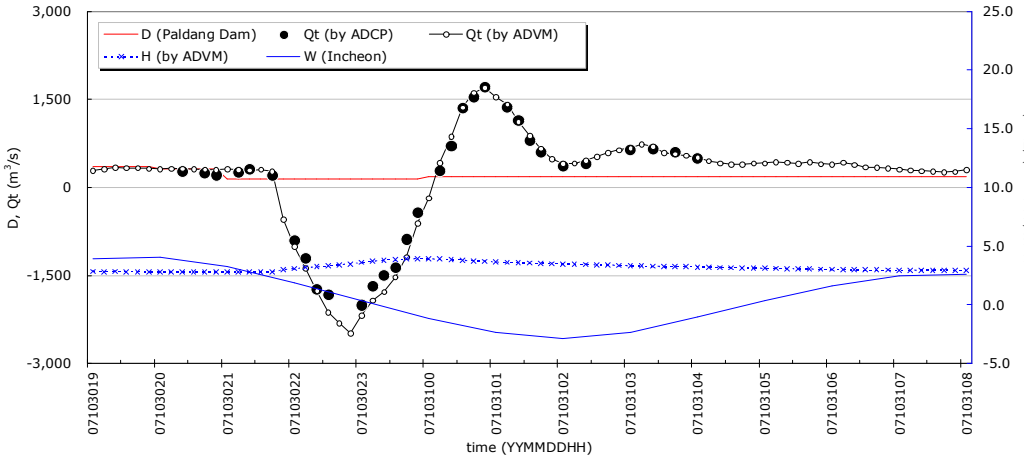


Fig. 10. Discharge and Water Stage during High Tide in October, 2007 at the Hangang Bridge

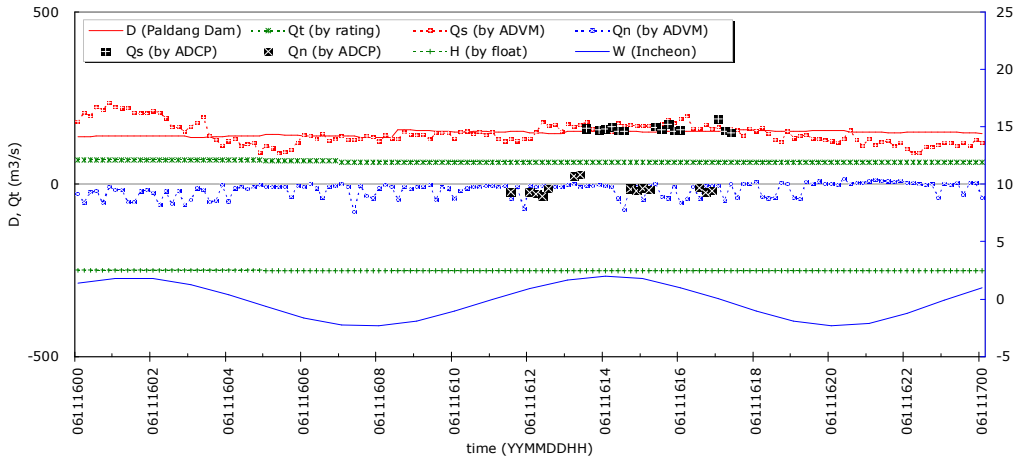


Fig. 11. Discharge and Water Stage during Low Tide in November, 2006 at the Hangang Bridge

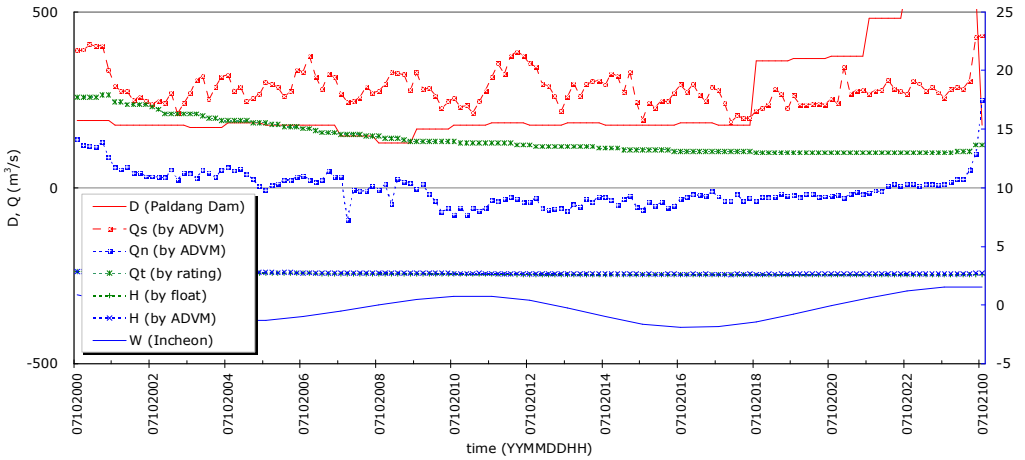


Fig. 12. Discharge and Water Stage during Low Tide in October, 2007 at the Hangang Bridge

Table 1. Comparison of Discharge, Error and Ratio of Q Each Channels at the Hangang Bridge

time yyyymmddhhmm	Q by ADVM (m^3/s)			Q by ADCP (m^3/s)			Error (%)			Ratio of Q (%)	
	① Qs	② Qn	③ Qt	④ Qs	⑤ Qn	⑥ Qt	⑦ Es (①-④)/④×100	⑧ En (②-⑤)/⑤×100	⑨ Et (③-⑥)/⑥×100	⑩ Rs ①/③×100	⑪ Rn ②/③×100
200706151020	748.6	380.8	1,129.4	708.2	324.2	1,032.4	5.7	17.5	9.4	66.3	33.7
200706151030	561.9	310.9	872.8	475.7	267.5	743.1	18.1	16.2	17.5	64.4	35.6
200706151040	399.6	230.6	630.2	458.6	237.7	696.3	-12.9	-3.0	-9.5	63.4	36.6
200706151050	319.9	174.0	493.9	244.8	141.7	386.5	30.7	22.8	27.8	64.8	35.2
200706151100	324.0	190.4	514.4	327.7	198.0	525.6	-1.1	-3.8	-2.1	63.0	37.0
200706151110	316.1	197.5	513.6	334.0	173.2	507.2	-5.4	14.0	1.3	61.5	38.5
200706151120	322.2	170.0	492.2	425.3	161.9	587.2	-24.2	5.0	-16.2	65.5	34.5
200706151130	376.6	203.5	580.1	382.0	186.5	568.6	-1.4	9.1	2.0	64.9	35.1
200706151140	463.2	211.6	674.8	460.6	208.6	669.2	0.6	1.4	0.8	68.6	31.4
200710110520	231.9	48.5	280.4			278.0			-21.6	82.7	17.3
200710110540	242.6	49.1	291.7			280.8			-7.5	83.2	16.8
200710110600	249.2	53.6	302.8			279.1			0.6	82.3	17.7
200710110730	-355.3	-144.3	-499.6			-505.7			3.6	71.1	28.9
200710110750	-807.1	-309.5	-1,116.6			-1,055.6			2.3	72.3	27.7
200710110800	-977.6	-337.3	-1,314.9			-1,364.6			3.1	74.3	25.7
200710110820	-1,139.1	-404.4	-1,543.5			-1,396.5			0.8	73.8	26.2
200710110830	-1,147.4	-400.4	-1,547.8			-1,417.6			-11.8	74.1	25.9
200710110840	-878.6	-288.8	-1,167.4			-1,231.4			-9.4	75.3	24.7
200710110910	-193.2	-16.0	-209.2			-176.5			3.1	92.4	7.6
200710110930	447.3	270.3	717.6			459.3			5.5	62.3	37.7
200710110940	721.2	398.5	1,119.7			724.2			0.9	64.4	35.6
200710110950	854.7	478.0	1,332.7			1,509.8			3.9	64.1	35.9
200710111000	886.5	438.1	1,324.6			1,414.1			8.5	66.9	33.1
200710302020	257.3	62.4	319.7			269.5			-1.2	80.5	19.5
200710302040	240.7	67.3	308.0			253.7			5.8	78.1	21.9
200710302050	250.8	52.7	303.5			214.0			-3.6	82.6	17.4
200710302110	239.9	59.0	298.9			257.4			10.5	80.3	19.7
200710302120	234.4	58.8	293.2			316.4			9.2	79.9	20.1
200710302140	219.1	52.1	271.2			213.3			-5.2	80.8	19.2
200710302200	-730.8	-272.7	-1,003.5			-900.1			18.5	72.8	27.2
200710302210	-967.8	-409.2	-1,377.0			-1,210.8			56.2	70.3	29.7
200710302220	-1,264.0	-497.5	-1,761.5			-1,730.4			54.6	71.8	28.2
200710302230	-1,528.9	-602.0	-2,130.9			-1,820.0			-11.7	71.7	28.3
200710302300	-1,619.3	-563.1	-2,182.4			-2,002.8			-6.3	74.2	25.8
200710302310	-1,440.9	-482.9	-1,923.8			-1,673.5			18.6	74.9	25.1
200710302320	-1,318.3	-460.3	-1,778.6			-1,490.4			21.4	74.1	25.9
200710302330	-1,150.8	-376.4	-1,527.2			-1,359.0			41.8	75.4	24.6
200710302340	-909.5	-274.4	-1,183.9			-880.4			16.1	76.8	23.2
200710302350	-511.6	-95.5	-607.1			-428.9			-7.3	84.3	15.7
200710310010	179.7	238.9	418.6			282.3			27.2	42.9	57.1
200710310020	464.1	404.2	868.3			705.9			11.5	53.4	46.6
200710310030	777.6	586.4	1,364.0			1,350.4			13.7	57.0	43.0
200710310040	965.7	647.0	1,612.7			1,538.8			1.8	59.9	40.1
200710310050	1,060.3	635.8	1,696.1			1,716.8			17.1	62.5	37.5
200710310110	950.0	467.1	1,417.1			1,373.9			9.0	67.0	33.0
200710310120	756.0	362.6	1,118.6			1,146.7			15.0	67.6	32.4
200710310130	599.3	280.0	879.3			807.5			19.3	68.2	31.8
200710310140	477.9	184.3	662.2			603.0			12.4	72.2	27.8
200710310150	371.7	115.4	487.1			440.7			34.5	76.3	23.7
200710310200	311.8	91.1	402.9			370.5			41.6	77.4	22.6
200710310210	321.6	89.8	411.4			285.1			48.3	78.2	21.8
200710310220	340.9	119.0	459.9			400.7			23.0	74.1	25.9
200710310230	381.4	147.8	529.2			474.6			1.0	72.1	27.9
200710310250	456.9	181.7	638.6			654.8			4.8	71.5	28.5
200710310300	480.7	189.8	670.5			639.9			-1.2	71.7	28.3
200710310320	511.3	185.2	696.5			653.8			3.1	73.4	26.6
200710310340	416.9	151.8	568.7			601.9			-2.5	73.3	26.7
200710310350	407.2	137.0	544.2			587.9			8.9	74.8	25.2
200710310400	389.3	119.7	509.0			499.2			9.8	76.5	23.5

4. 측정성과 평가 및 오차분석

자동유량측정의 정확도 평가는 짧은 기간에 직접 측정을 통하여 비교하는 방법과 장기간에 걸쳐 측정된 자료를 분석하는 방법을 선택하였다. 우선 직접 비교가 가능한 ADCP를 이용하여 수동으로 측정된 유량자료를 비교하여 오차를 분석하였으며, 연간 자동으로 측정된 자료를 이용하여 팔당댐방류량과 한강대교 유출량을 비교・분석하였다.

4.1 측정성과 비교・분석

연중 10분 간격으로 측정된 자동측정 유량과 수동측정 유량측정결과를 Table 1에 비교・제시하였다. 2007년 6월에는 남단과 북단을 나누어 수동유량측정을 수행하였으며, 10월에는 노들섬 상류에서 측정한 전체 유량 값이다. Table 1은 수동으로 측정한 유량을 참값으로 가정하여 자동으로 측정된 유량의 오차를 분석한 것이다.

자동으로 측정된 유량으로부터 남단과 북단을 통하여 하류로 흘러나간 유량과 전체유량에 대하여 남단과 북단으로 흘러나간 유출량비를 계산한 결과 조석의 크기와 팔당댐의 방류량에 따라 다소 차이가 있지만 남단에서 60~80 %, 북단에서 20~40 %를 분담하여 유출되고 있음을 확인하였다. 자동으로 측정된 유량과 수동으로 측정된 유량의 오차를 비교하면 흐름이 (-)유량에서 (+)유량으로 변화하는 순간에 50 % 정도의 오차가 발생한다. 이는 유속이 정체되는 순간으로 유량의 규모가 크지 않지만 순간적으로 유속의 변화가 크기 때문에 발생하는 것으로 측정오차이기 보다는 저유속에 대한 측정장비의 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 유량이 (-)에서 (+)로 바뀌는 순간을 제외하면 자동으로 측정된 유량의 정확성이 10 % 이내로 확보되고 있음을 나타낸다.

4.2 연간 팔당댐방류량과 한강대교 유출량의 비교

2007년 3월부터 2008년 2월까지 팔당댐방류량과 수위-유량관계로부터의 환산유량, 자동으로 측정된 유량의 유출율을 분석하여 Table 2에 제시하였다. 환산유량의 경우 105.8 %의 유출율(③, 이후 H-Q 유출율)을 보였으며, 자동으로 측정된 유량의 경우 96.7 %의 유출율(⑦, 이후 ADVM 유출율)을 보였다.

H-Q 유출율은 2007년 4월부터 8월까지 100 % 이하이고, 그 외 기간에서 100 % 이상이다. 특히 2007년 10월과 11월에는 200 %의 유출율을 나타내었으며, 이는 홍수기가 아닌 기간에 방류량보다 많은 유출량을 보이는 것은 일반적으로 알려진 바와 같이 감조구간에서 수위-유량관계곡선의 한계를 보여주는 것으로써, 조석의 영향을 받는 갈수기의 물관리에 있어서 검토가 필요한 부분으로 나타났다. ADVM 유출율은 홍수기인 6월부터 9월에 100 % 내외였으며, 이는 연평균 유출율인 96.7 %보다 크게 나타났고, 나머지기간에는 연평균 유출율보다 작게 나타났다. 그러나 2008년 1월에는 104.7 % 의 유출율을 나타내었는데, 이에 대한 원인은 보다 많은 자료의 축적을 통해 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Comparison between Each Discharge from March, 2007 until February, 2008

time yyyymm	① D Paldang Dam (m^3/s)	② Qt by rating (m^3/s)	③ $R_{R/D}$ ②/①×100 (%)	Q by ADVM (m^3/s)			⑦ $R_{A/D}$ ⑥/①×100 (%)	Ratio of Q (%)	
				④ Qs	⑤ Qn	⑥ Qt ④+⑤		⑧ Rs ④/⑥×100	⑨ Rn ⑤/⑥×100
200703	186.1	265.8	142.9	108.8	19.1	127.9	68.7	85.1	14.9
200704	330.9	149.0	45.0	150.1	85.1	235.3	71.1	63.8	36.2
200705	341.6	333.1	97.5	225.1	94.8	319.9	93.6	70.4	29.6
200706	322.9	262.6	81.3	234.9	94.7	329.6	102.1	71.3	28.7
200707	709.5	611.3	86.2	557.8	252.5	810.2	114.2	68.8	31.2
200708	2,469.4	2,300.5	93.2	1,663.0	769.0	2,432.0	98.5	68.4	31.6
200709	1,691.9	1,716.8	101.5	1,165.0	488.7	1,653.8	97.7	70.4	29.6
200710	343.4	656.9	191.3	239.9	84.9	324.7	94.6	73.9	26.1
200711	252.1	531.9	211.0	172.0	45.7	217.7	86.4	79.0	21.0
200712	183.4	276.8	150.9	127.2	22.8	150.0	81.8	84.8	15.2
200801	173.5	222.9	128.4	147.0	34.8	181.8	104.7	80.9	19.1
200802	161.9	254.5	157.2	121.9	26.0	147.9	91.4	82.4	17.6
계	7,166.6	7,582.1	105.8	4,912.6	2,018.1	6,930.7	96.7	70.9	29.1

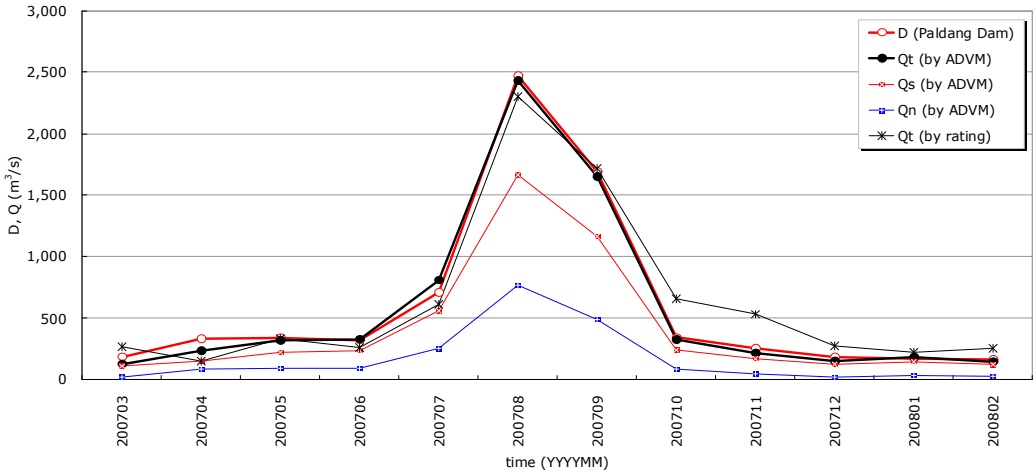


Fig. 13. Comparison between Each Discharge from March, 2007 until February, 2008

Table 2에 제시된 바와 같이 노들섬을 중심으로 남단과 북단을 통해 유출된 유량은 남단에서 70.9 %, 북단에서 29.1 %의 유량이 유출된 것으로 나타났다. 홍수기에는 남단과 북단의 유출량비가 2:1 정도로 나타났고, 저수기에는 남단과 북단의 유출량비가 4:1 정도로 나타났다. 이러한 원인은 남단과 북단의 하폭은 약 400 m 정도로 비슷하지만 수심은 남단이 12 m, 북단이 6 m 정도로 작아 흐름단면적은 남단이 2배 정도 크기 때문에 유속이 큰 경우에는 2:1 정도의 유출량비를 보이지만 유속이 작은 경우에는 주흐름이 남단에 형성되어 4:1까지 남단의 유량이 증가하는 것으로 판단된다.

월간 팔당댐 일평균 방류량과 한강대교 남단과 북단에서의 일평균유출량을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 팔당댐방류량과 자동으로 측정된 유량(Qt by ADCP)을 비교하면 3월과 4월에는 방류량보다 작게 유출되었으며, 7월에는 방류량보다 크게 유출되었고 나머지 기간에는 팔당댐방류량과 거의 같거나 작게 나타났다. 팔당댐 하류부터 한강대교까지 생활용수 사용량(건설교통부, 2007)은 약 50 m^3/s 정도로 갈수기인 3월과 4월에 이러한 영향을 반영된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 한강대교에 설치되어 지속적으로 운영되고 있는 자동유량측정시설로부터 측정된 유량자료의 정확도 및 신뢰도를 검토하기 위하여 수동유량측정과 월별유출량 분석을 실시하였다.

자동유량측정시설의 측정주기 내에 비교적 짧은 시간동안의 유량을 확인하기 위하여 ADCP를 이용하여 수동으로 유량측정을 수행하여 자동유량측정성과와 비교하였으며, 한강대교지점의 수위가 정점에 도달하여 유량이 정체되는 기간에는 오차가 다소 발생하지만 그 이외의 경우에는 정량적으로 만족스러운 정확도를 확인할 수 있었다.

또한 1년 동안 측정된 자료를 월단위 유출량 분석을 통하여 노들섬을 중심으로 남단과 북단을 통해 유출되는 유량을 검토하였다. 남단의 유출량은 조석영향과 팔당댐방류량 규모에 따라 적게는 63.8 %에서 많게는 85.1 %까지 차지하였으며, 평균 70.9 %가 남단에서 흐름이 발생한 것을 확인하였다.

인천조위는 반일주조 현상을 나타내고 이에 따라 저·평수시의 한강대교의 유량곡선도 (-) 또는 (+)유량이 반복적으로 발생하는 반일주조 현상을 확인하였다. 인천조위차에 따라 한강대교에서 (-)유량의 규모가 달라짐을 확인하였으며, 10.0 m 정도에서는 -4,000~-4,500 m^3/s, 8.0 m 정도에서는 -2,000~-2,500 m^3/s의 (-)유량이 발생하였고, 4.0 m 이하에서는 신곡수중보의 영향으로 상류방향으로 조석이 전파되지 못하고 팔당댐 방류량의 조건에 따라 노들섬을 중심으로 순환하는 현상을 발견하였다.

이와 같이 자동유량측정성과는 감조하천에서 수위-유량관계로부터 발생하는 기간별 유출량 오차를 감소시켜 신뢰성있고 효과적인 수자원관리가 가능해질 것으로 기대된다. 그밖에 조석의 영향과 노들섬으로 인해 남단과 북단에서 각각 측정되는 유량은 분류 또는 합류되는 지점의 해석이 가능한 수치해석프로그램의 검증자료 등으로 활용가능하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한강홍수통제소 '원격 자동유량측정시설 설치' 및 '초음파유량계 설치' 용역에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2007). **2006년도 유량조사 보고서 III · 한강 유량측정**, 건설교통부.

건설교통부 한강홍수통제소 (2007). **원격자동유량측정 시설 설치 보고서**, 한강홍수통제소.

건설교통부 한강홍수통제소 (2007). **초음파유량계 설치 보고서**, 한강홍수통제소.

건설교통부 한강홍수통제소 (2007). **하천수사용관리체계개선(I)**, 한강홍수통제소.

국토해양부 (2008). **2007년도 유량조사 보고서 III · 한강 유량측정**, 국토해양부.

김원, 김창환, 윤광석, 윤태훈 (2001). "신곡수중보와 조석운동을 고려한 한강 본류의 흐름특성." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권 제3-B호, pp. 305-314.

김원, 원유승 (1998). "수리학적 모형을 이용한 한강실시간 홍수예보시스템 구축." **1998년도 학술발표회 논문집(III)**, 대한토목학회, pp. 181-184.

김원, 윤광석, 이을래, 김치영, 김동구, 차준호, 박은희 (2004). **하천 유량측정 지침**. SWRRC Technical Report TR 2004-01, 과학기술부/건설교통부 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, CD-ROM.

김창완, 이민호, 정상화, 김기정 (2007a). "실시간 자동유량관측 시스템 개발." **한국수자원학회 학술대회지, 한국수자원학회 07 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 551-555.

김창완, 이민호, 정성원, 유동훈 (2007b). "자연하천에서 무차원 유속분포-지표유속법을 이용한 유량산정." **한국수자원학회:학술대회지, 한국수자원학회 07 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp.855-859.

김창완, 이민호, 유동훈, 정성원 (2008). "자연하천에서 Chiu의 유속분포와 최대유속 추정을 이용한 유량산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제6호, pp. 575-585.

김치영, 김원, 이찬주, 김동구 (2006) "유속지수법을 이용한 자동유량측정." **2006년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.

이찬주, 서일원, 김창완, 김원 (2007). "Chiu가 제안한 2차원 유속분포식의 자연하천 적용성 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 801-810.

한강홍수통제소 (2006). **한강유역수자원시험장비의설치및운영(4 · 5단계)보고서**, 한강홍수통제소.

한국건설기술연구원 (2006). **하천유량측정 교육자료**, 한국건설기술연구원.

Chiu, C. L. (1988). "Entropy and 2-D Velocity Distribution in Open Channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 7, pp. 738-758.

Gordon, R. L. (1989). "Acoustic measurement of river discharge." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7, pp. 925-936.

www.nori.go.kr 국립해양조사원 홈페이지.

(논문번호:09-040/접수:2009.04.06/심사완료:2009.06.01)