

청미천 구하도 복원 설계를 위한 하도형성유량 산정

Evaluation of Channel-forming Discharge for the Abandoned Channel Restoration Design of Cheongmi Stream

지 윤* / 강 준 구** / 여 운 광*** / 한 승 원****
Ji, Un / Kang, Jun Gu / Yeo, Woon Kwang / Han, Seung Won

Abstract

The abandoned channel restoration is one of methods to enhance the environmental function and ecological habitat as well as the functions of water-utilization and flood control. The channel-forming or dominant discharge must be evaluated and defined to design the cross-sectional and plane geometries of the stable and equilibrium channel for the abandoned channel restoration project. In general, bankfull discharge, specified recurrence interval discharge, and effective discharge have been used to decide the channel-forming discharge. In this study, bankfull discharge, specified recurrence interval discharge, and effective discharge were calculated and compared for the abandoned channel restoration site of Cheongmi Stream and their relations to historical bed changes were analyzed. The bankfull discharge, 488 m³/s, of the abandoned channel restoration site of Cheongmi Stream was calculated using HEC-RAS data and ranged between 1.5-year and 2-year recurrence discharges. Also, the effective discharge evaluated with the sediment rating curve and mean daily discharge data is greater than the bankfull discharge. According to the survey data of 1994 and 2008, the bed elevation of the study reach was decreased over time. It is indicated that the channel bed is changing to the stable condition to allow the effective discharge.

keywords : river restoration, abandoned channel restoration, dominant discharge, channel-forming discharge, bankfull discharge, specified recurrence interval discharge, effective discharge

요 지

구하도 및 폐천복원은 하천에서의 이수와 치수적인 기능뿐만 아니라 환경 및 생태 서식처 기능을 강화하고 개선하기 위한 여러 방법들 중 하나이며 이러한 구하도를 복원하기 위해서는 주수로와의 하도 안정성을 고려하여 횡단면 형태를 결정하고 하도선형을 설계하게 된다. 이러한 하도설계시 기준이 되는 유량이 반드시 필요하며 이 기준유량을 하도형성유량 또는 지배유량이라고 한다. 일반적으로 하도형성유량을 산정하는 방법으로는 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량을 계산하여 결정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 구하도 복원 사업이 시행되는 청미천 구

* 명지대학교 토목환경공학과 연구교수
Research Professor, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin-si, Korea
** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원
Senior Research, Dept. of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology
*** 명지대학교 토목환경공학과 교수
Professor, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin, Korea
**** 교신저자, 명지대학교 토목환경공학과 석사과정
Corresponding Author, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin, Korea
(e-mail: wony723@mju.ac.kr)

간에 대해 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량을 산정하여 상호 관계를 분석하고 과거의 하상변동 특성 자료와 비교하여 연관성을 평가하였다.

청미천 구하도 복원구간의 만제유량은 HEC-RAS 자료를 이용하여 만제수위에 해당되는 유량으로 산정하였으며 488 m³/s인 것으로 나타났고 이는 1.5년과 2년 빈도 사이의 유량에 포함되는 것으로 나타났다. 또한 유사량 자료와 과거 일유량 자료를 이용하여 계산된 유효유량은 만제유량보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 과거 측량자료 분석에 의하면 청미천의 대상구간 하도는 1994년에 비해 2008년 현재 하도가 침식된 것으로 나타났으며 이는 유효유량을 소통시킬 수 있는 형태로 하도가 진화하고 있다는 것을 의미하며 곧 하천이 안정한 상태로 변화하고 있다는 것을 의미한다.

핵심용어 : 하천복원, 구하도 복원, 지배유량, 하도형성유량, 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량

1. 서론

자연하천에서의 하도는 물의 흐름과 유사의 평형관계에 의해 형성되며 결과적으로 축적하천의 형태는 오랜 기간 동안 다양한 흐름조건에서 하도 경계가 침식, 이송, 다시 퇴적되는 현상을 반복하면서 형성된 것이다(Lane, 1995). 그 오랜 기간 동안에 발생한 여러 범위의 유량 중 지배적인 하나의 유량을 정의할 수 있다면 이는 곧 실제 유량 범위에 의해 형성되는 것과 동일한 하폭, 수심, 경사, 조도, 그리고 평면적 하도의 선형을 정의할 수 있을 것이다(Watson *et al.*, 2005). 이러한 대표유량은 유사이송 현상의 궁극적인 결과이자 연속적인 흐름에 의해 형성된 강덕 구조의 지형을 가장 잘 표현할 수 있는 변수가 될 수 있다. Dunne and Leopold (1978)는 유사를 움직이게 하고 사주를 형성하거나 제거하며 만곡 또는 사행을 형성하고 변화시키는데 가장 효과적인 유량을 하천유지유량으로 정의하였다. 이러한 하천유지유량의 정의는 하도형성유량(Channel-Forming Discharge) 또는 지배유량(Dominant Discharge)의 개념과 매우 유사하다.

하도형성유량 또는 지배유량이라고 정의되는 유량은 하천의 형태와 크기 및 변화과정을 제어하는 유량으로 일정한 유량이 지속적으로 흐르는 경우 현재하도의 형태를 갖게 만드는 가상적인 유량을 뜻한다. 엄격히 말해서 하도형성유량은 지형학적 개념의 유량이며 관측을 통해 얻어낼 수 있는 변수가 아니다(Watson *et al.*, 2005). 현재하도의 형태와 특성을 결정하는 유량인 하도형성유량 또는 지배유량을 산정하는 방법으로는 만제유량(Bankfull Discharge), 특정 재현기간별 유량(Specified Recurrence Interval Discharge), 그리고 유효유량(Effective Discharge)의 3가지 방법으로 구분할 수 있다.

하도형성유량 또는 지배유량은 하천복원을 위한 하

도설계에 있어 기준이 되는 대표적인 변수이다. 미국과 유럽에서는 하도형성유량을 하천복원 실무에서 보편적으로 이용하고 있으며 국내에서는 하천의 유량 및 유사량에 대한 관측 자료의 부족으로 하도형성유량 산정에 대한 어려움이 있다. 국내에서는 이희철과 이은테(2002)가 섬강과 홍천강에 대해 만제유량과 유효유량을 산정한바 있으며 만제유량의 재현기간을 계산하여 제시하였다. 또한 2003년에는 축적하천의 하도형성유량 산정과 수리기하특성에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과 대상유역에서 만제유량이 재현기간이 1.5년인 유량과 유사하며 유효유량은 만제유량에 비해 10배 이상 작게 산정된 것으로 나타났다(이희철과 이은테, 2003). 또한 유역면적과 만제유량은 연관성이 있으며 안정하도 규모 결정시 기초자료로 활용 가능하다고 제시하였다. 강경석 등(2005)은 문산천 유역의 지배유량을 산정하였으며 계산된 만제유량이 하천의 강덕과 비슷한 수위를 보였다. 문산천의 유효유량도 만제유량과 근사한 값으로 산정되었으며 특정 재현기간별 유량도 1.1년에서 1.5년 사이의 유량임을 보였다. 임창수 등(2006)은 지천을 대상으로 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량을 산정하였으며 지배유량으로 하도특성량을 계산하여 하천환경정비를 위한 기초자료를 구축하였다.

본 연구는 청미천 구하도 복원에 필요한 하도형성유량 결정을 위해 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량을 산정하기 위한 것이며 또한 계산된 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량의 상호관계를 분석하고 하상변동 특성과 비교하여 각각의 연관성을 평가하고자 한다. 따라서 최종적으로 청미천 구하도 복원구간의 가장 적절한 하도형성유량을 결정하고 이를 복원하고자 하는 구하도의 단면 및 선형결정에 반영하고자 한다.

2. 청미천의 구하도 복원구간

본 연구의 대상하천인 청미천은 남한강의 제 1지류

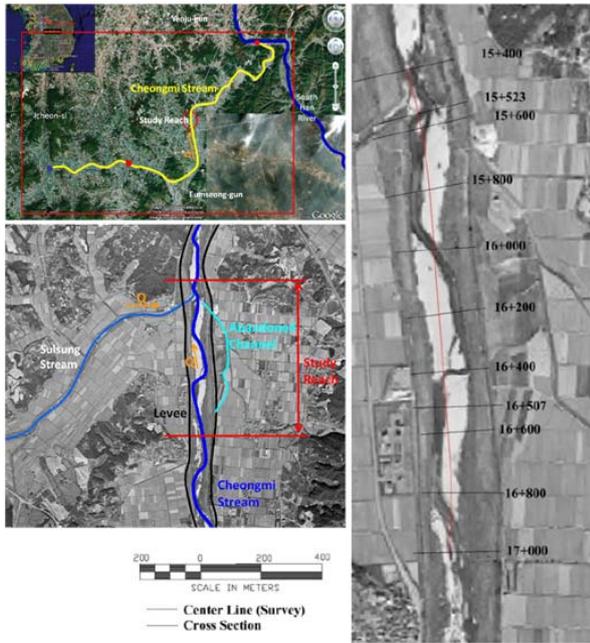


Fig. 1. Study Reach of Cheongmi Stream

로 유역 폭은 약 39 km이며 유역면적은 595.7 km²이다. 청미천의 구하도 복원이 실시되는 구간은 Fig. 1과 같으며 16+800번 단면부터 15+800번 단면 사이에 위치하고 있다. 따라서 본 연구의 대상하천 구간은 이보다 조금 연장된 17+517단면에서 15+400단면 구간으로 선정하였다. 대상구간 16번 단면에서의 하상토 입도 분포는 0.2 mm에서 2 mm로 주로 모래에 해당되며 중앙입경은 1.1 mm인 것으로 나타났다.

유효유량 분석을 위해 사용된 유량-유사량 자료는 과거 청미천에서 관측된 자료가 부재하여 2008년에 새롭게 원부교 지점에서 관측하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. 청미천의 경우 유량자료는 13+946번 단면에 위치하고 있는 원부교의 T/M 자료를 활용하였다. 유량-유사량 관계 곡선식은 2008년에 원부교 현장에서 관측한 부유사량 자료를 이용하여 현장에서 수집된 부유사 샘플을 실험실에서 분석하였다. 일반적으로 현장에서는 유사채취기의 형태로 인해 바닥근처에서 유사이송을 관측할 수 없는 단점이 있으며 이러한 문제점을 해결하기 위해 수정 아인슈타인 방법을 이용하여 측정 불가능한 구간의 유사를 측정 가능한 구간의 관측된 유사량 자료로부터 추정하고 이를 측정부유사와 더해 현장에서 관측된 총유사량으로 간주한다. 본 연구에서도 이와 같은 방법을 활용하여 원부교에서의 총유사량 값을 산정하고 유량-유사량 관계를 도출하였으며 이를 유효유량 계산에 활용하였다. 유량-유사량 관계를 구성하는 데이터는 관계 그래프 상에 세 점으로 나타나지만 각각의 유사량 값은 10개의 샘플을 동시에 수집하여 평균한 값이다. 현장에서 관측된 유사량 값은 여러 다른 유사이송 공식들과 비교하였으며 특히 1.58년 빈도 유량인 610 m³/s에서 100년 빈도 홍수량인 2440 m³/s에 해당되는 유사량 값을 비교한 결과 Fig. 3과 같다. 현장에서 관측된 유사량 값은 유사이송 공식들에 비해 값이 큰 것으로 나타났으며 여러 공식들 중 Yang의 공식과 Engelund-Hansen 공식이 현장 값과 가장 유사한 것으로 나타났다.

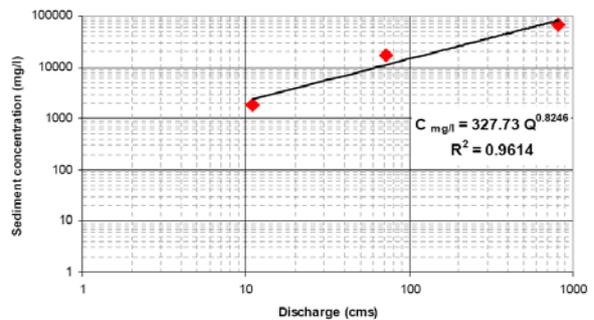
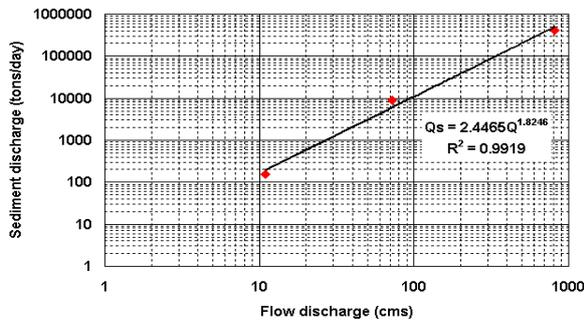


Fig. 2. Sediment Rating Curves of Cheongmi Stream (Wonbu Bridge Station)

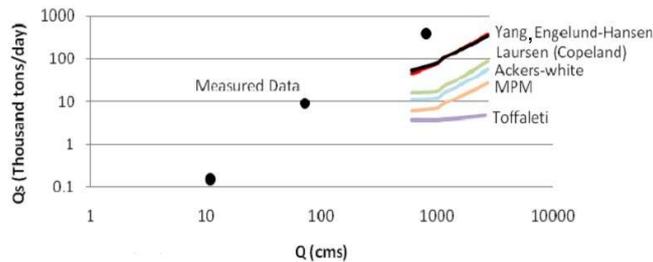


Fig. 3. Comparison of Sediment Field Data and Sediment Transport Equations

3. 하도형성유량

3.1 만제유량

만제유량은 자연하천에서 실제 홍수터의 표고까지 충적하도를 채우는 유량을 말하며 하도의 가장자리에 자연적으로 형성된 턱인 강턱(홍수터)을 월류하지 않고 그 횡단면을 채우는 흐름을 의미한다(Copeland *et al.*, 2005). 이러한 만제유량 산정방법은 주로 Fig. 4와 같이 만제수위(Bankfull Stage)를 구별한 후 그 수심에 대응하는 유량을 계산하는 것으로 현장에서 직접 만제수위를 구별하여 수위-유량 관계곡선을 이용하거나 HEC-RAS 등과 같은 1차원 수면곡선 계산 프로그램을 이용하는 방법 등이 있다. 하지만 현장에서 직접 만제수위를 조사하는 방법에는 몇 가지 문제점이 있으며 현장자료만으로 만제유량을 산정하는 데는 신뢰성이 떨어지는 것으로 분석되고 있다(Williams, 1978).

여러 연구자들에 의해 만제수위를 사용하기 위한 기준과 이를 적용하는 적절한 방법들이 제시되어 있어도 만제수위의 현장 결정은 다양한 변화를 보이고 있다. Wolman (1955), Pickup and Warner (1976)의 연구에 의하면 수심에 대한 수면 폭의 비가 최소가 되는 높이를 만제수위로 정의하였으며 Wolman and Leopold (1957)는 사주들 중 가장 높은 것을 이용하기도 하였다. 만제수위를 현장에서 구별하는 것이 때로는 불가능하거나 어려움이 따르는 경우가 있다. 따라서 일반적으로 최소 수면폭과 수심의 관계에 기초하여 결정하는 것이 적절해 보이지만 대상지점들이 인공제방축조 및 하천정비 작업으로 인해 그 관계를 도출하는 것이 의미가 없는 경우도 있기 때문에 일반적으로 현장조사를 실시하여 자연적인 홍수터의 표고를 만제수위로 결정하는 경우가 많다. 청미천의 경우 또한 이러한 방법을 활용하였으며 현장에서 만제지표(Bankfull Indicator)를 이용하여 만제수위를 결정하는 방법으로는 다음과 같은 방법들이 있다. Woodyer (1968)는 물이 월류하는 홍수터가 여러 층으로 이루어진 경우 하천의 중간 단구의 표고로 만제수위를 정의하였으며 Schumm (1960)은 나무와 같은 영구식생의 하한계(Lower Limit) 높이로 만제수위를 구별하였다. Leopold (1994)는 다년생 초본류나 관목류와 같은 식생이 변화하는 곳에서의 수위를 만제수위로 결정하였다. Harrelson *et al.* (1994)은 식생, 강턱 사면을 구성하고 토사의 입도분포, 그리고 퇴적토층의 높이에 따라 만제수위를 현장에서 결정하는 방법을 제시하였다. McCandless (2003)가 미국 Maryland 주에 위치하고 있는 하천을 대상으로 만제유량을 산정

하기 위해 적용했던 만제유량 및 수위 지표들을 정리하면 다음과 같다.

홍수터 경계(Floodplain Break): 수직방향에서 수평방향으로의 급격한 변화가 일어나는 지점으로서 직선 하도 또는 사주가 없는 만곡하도에서 사용할 수 있으며 몇몇의 경우 홍수터의 경계가 제방의 높이와 동일한 경우가 발생할 수 있다.

변곡점(Inflection Point): 수직방향에서 수평방향으로의 급격한 변화를 구분하기 힘들지만 하나 또는 그 이상의 경사 변화가 둔하지만 변곡되는 지점이 있을 경우 그 지점을 만제수위로 지정할 수 있다.

침식선(Scour Line): Fig. 4에서와 같이 수직한 사면 윗부분에서 사면이 침식된 흔적이 있을 경우 그 표고를 만제수위로 지정할 수 있다.

퇴적된 단구의 평탄면(Depositional Bench): 평탄한 면이나 혹은 단면의 측방향 퇴적면이 다른 점사주(Point Bar)들 중에 가장 높은 표고를 만제수위의 지표로 활용할 수 있으며 이러한 하천을 현재 활동 중인 하도(Active Channel)라고 할 수 있다.

점사주(Point Bar): 경사진 점사주 면과 수평한 홍수터 면의 경계를 나타낸다.

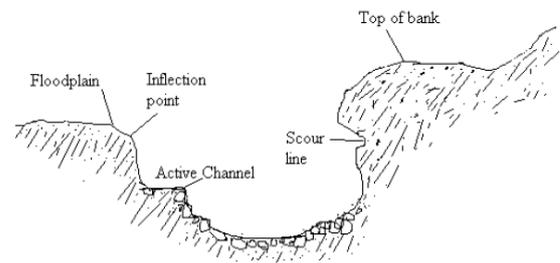


Fig. 4. Bankfull Stage Index (McCandless, 2003)

청미천의 경우 청미천 하류(0번 단면)에서 상류(24번 단면)까지의 총 25 km 구간에 대해 HEC-RAS 모의를 실시한 자료를 활용하여 만제유량을 산정하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 홍수터 경계를 만제수위의 지표로 활용하였으며 만제유량을 산정하기 위한 기준 단면은 청미천 구하도 복원구간인 15+800번 단면에서 16+800번 단면 사이에 있는 단면들로 선정하였으며 특히 홍수터의 구분이 상대적으로 확연하게 나타나는 16+400번 단면에서의 강턱을 기준으로 만제유량이 산정되었다. 16+400번 단면에서 산정된 만제유량은 488 m³/s인 것으로 나타났다.

이러한 만제유량의 산정은 기준이 되는 단면이 어느 단면이냐에 따라 결과 값이 많이 좌우되는 것을 알 수 있다. 특히 구하도 복원 설계가 계획되고 있는 구간 내

에 있는 단면을 기준으로 하지 않고 Fig. 6과 같이 구간 밖의 단면을 기준으로 만제수위 및 만제유량을 산정하였을 경우 16+400번 단면에서 결정한 만제유량과 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 같은 청미천 구간이라 할지라도 위치에 따라 하도의 단면형태와 지형학적 특성들이 달라지기 때문이며 즉 지형학적 특성에만 의존하여 결정되는 만제유량 값이 기준단면 위치에 따라 다르게 산정된다. 대상하천의 유량은 동일하지만 강턱이 다르게 형성된 것이므로 즉 같은 유량에 대한 하도의 안정성 및 평형성은 구간에 따라 다르게 분포한다고 할 수 있다. 따라서 복원하도 설계시 고려되어야 하는 만제유량의 계산은 반드시 복원이 수행되는 구간내의 단면을 대상으로 해야 할 것이다.

3.2 특정 재현기간별 유량

관측 유량자료가 유효할 경우 특정 재현기간을 갖는 유량을 하도형성유량 또는 지배유량으로 종종 고려하고 있으며 보통 만제유량과 유효유량을 특정 재현기간별 유량과 비교하여 분석하기도 한다. Hey (1994), Ministry of Natural Resources (1994), Riley (1998) 등은 약 2년 빈도의 유량이 곧 하도형성유량과 같다고 하였으며 일반적으로 안정하도에서의 만제유량은 1년에

서 2.5년 재현빈도를 갖는 유량사이에 분포하지만 (Leopold *et al.*, 1964; Andrews, 1980) 이러한 간격을 벗어났다 할지라도 특별한 경우로 간주되지는 않는다 (Shield *et al.*, 2003). 연구자들에 의해 권고되고 있는 만제유량의 재현빈도를 정리하면 Table 1과 같다.

만약 특정 재현기간별 유량이 하도형성유량으로 사용된다면 재현빈도가 1년에서 3년 사이인 유량을 선택해야 할 것이다. 그러나 위에서 언급한 여러 연구들을 통해 나타난 불확실성 때문에 현장조사에 의해 결정된 만제유량과 비교 분석하여 결정하는 것이 바람직하다.

홍수사상의 크기와 발생빈도의 함수라는 원리가 포함되어 계산되는 특정빈도 유량을 청미천에 대해 일유량 자료를 이용하여 산정하였다. 경기도 여주군 점동면 원부리에 위치한 원부교의 청미 관측소에서 1998년부터 2007년까지 관측된 일유량 자료를 이용하여 1.5년 빈도와 2년 빈도 유량을 산정하였다. 그 결과 원부교의 관측 유량자료를 이용한 1.5년 빈도 유량은 414 m³/s인 것으로 나타났으며 2년 빈도 유량은 552 m³/s인 것으로 나타났다. 앞서 산정된 청미천의 16+400번 단면 만제유량의 경우 488 m³/s이었으며 즉 1.5년 빈도 유량과 2년 빈도 유량 사이에 만제유량이 포함되는 것으로 나타났다.

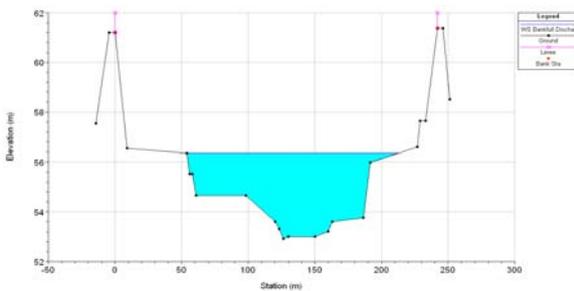


Fig. 5. Calculation of Bankfull Discharge in Cheongmi Stream (No.16+400, 488 m³/s)

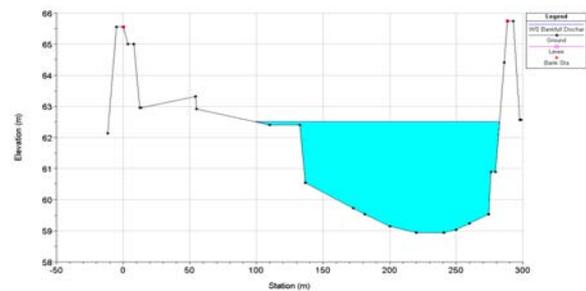


Fig. 6. Calculation of Bankfull Discharge in Cheongmi Stream (No. 21, 980 m³/s)

Table 1. Recommended Frequencies for Bankfull Discharge (Soar, 2000; Watson *et al.*, 2005)

Discharge frequency	Recommended by
1 to 5 years	Wolman and Leopold (1957)
1.5 years	Leopold <i>et al.</i> (1964); Leopold (1994); Hey(1975)
1.58 years	Dury (1973, 1976); Riley (1976)
1.02 to 2.69 years	Woodyer (1968)
1.01 to 32 years	Williams (1978)
1.18 to 3.26 years	Andrews (1980)
1 to 10 years, 2 years	USACE (1994)
2 years	Bray (1973, 1982)

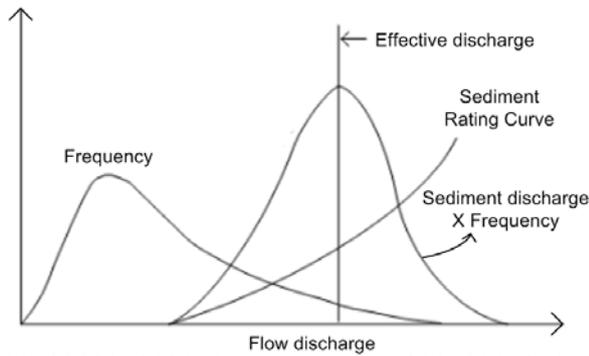


Fig. 7. Calculation Method of Effective Discharge

3.3 유효유량

유효유량은 수년에 걸쳐 연 유사량의 대부분을 이동시키는 유량으로 정의되며(Andrews, 1980; Wolman and Miller, 1960)가 제시한 하도형성유량 또는 지배유량은 유사이송의 크기와 발생빈도의 함수라는 기본 원리와 일치한다. 유효유량 이용의 가장 큰 장점은 유량-빈도분포 곡선과 유사량 곡선을 이용하여 계산할 수 있다는 것이다. 유효유량을 결정하기 위해서는 Fig. 7과 같이 유황곡선(Flow Duration Curve)과 유량-유사량 관계 곡선(Sediment Rating Curve)이 필요하다.

유효유량을 계산하는 일반적인 방법은 우선 유량범위를 동일한 간격(Bin or Class)으로 나눈 후 각 유량구간에 대한 유사량을 계산하고 다시 각 유량구간의 발생빈도를 고려함으로써 전체 해당기간 동안에 이동된 총 유사량을 계산하는 것이다. 이러한 유효유량 산정방법은 매우 간편한 반면 계산 정확성은 선택한 계산 순서 또는 방법에 따라 달라진다.

청미천의 경우 유량자료는 13+946번 단면에 위치하고 있는 원부교의 T/M 자료를 활용하였다. 원부교에서 계측된 1998년 자료부터 2007년 일유량 자료는 본 연구의 유효유량을 산정하는데 활용되었다. 유량-유사량 관계 곡선식은 2008년에 원부교 현장에서 관측한 부유사량 자료를 이용하였으며 현장에서 수집된 부유사 샘플을 실험실에서 분석하였다. 일반적으로 현장에서는 유사채취기의 형태로 인해 바닥근처에서 유사이송을 관측할 수 없는 단점이 있으며 이러한 문제점을 해결하기 위해 수정 아인슈타인 방법을 이용하여 측정 불가능한 구간의 유사를 측정 가능한 구간의 관측된 유사량 자료로부터 추정하고 이를 측정부유사와 더해 현장에서 관측된 총유사량으로 간주한다. 본 연구에서도 이와 같은 방법을 활용하여 원부교에서의 총유사량 값을 산정하고 유량-유사량 관계를 도출하였으며 이를 유효유량 계산에 활용하였다. 유효유량 값은 계산시 유량자료의 간격

을 어떠한 형태로 했는지와 얼마나 많은 수의 간격으로 자료를 활용하였는지에 따라 그 값의 차이가 크게 나타나기 때문에 본 논문에서는 유효유량 산정을 위한 유량 간격 설정을 산술 등간격(Arithmetic Bin)과 로그 간격(Logarithmic Bin) 모두 사용하였으며 각각 간격이 25개, 50개, 100개인 경우에 대해 유효유량을 계산하였다. 유효유량 산정 그래프와 결과는 Fig. 8과 9 그리고 Table 2와 같다. Fig. 8과 9의 그래프는 청미천에 대해 유황곡선(Flow Duration Curve)과 유량-유사량 관계 곡선(Sediment Rating Curve)을 작성한 후 이를 합성한 것(Bin Sediment Load Line)이다. 유효유량 값의 결정은 국내하천과 같이 평수 및 갈수 빈도는 높고 이에 해당되는 유량은 적은 반면 홍수 빈도는 많지 않으나 홍수량은 평수 및 갈수량에 비해 매우 큰 특성을 갖는 하천일 경우 낮은 빈도와 높은 빈도에 해당되는 홍수량 값에서 최대 유사량 값이 산정되기 때문에 이러한 최대 값을 제외하고 다음으로 선정된 최대유량값을 유효유량으로 선정한다.

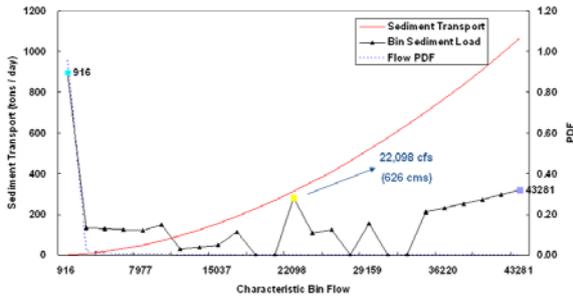
100개의 산술 간격을 사용했을 경우와 25개의 로그 간격을 사용했을 경우를 제외하고는 모두 유효유량이 613 m³/s에서 646 m³/s 사이에 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 계산된 청미천 16+400번 단면에서의 만제유량(488 m³/s)과 1.5년(414 m³/s) 그리고 2년 빈도(552 m³/s) 유량보다 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Effective Discharge Calculation Results Using Different Bins

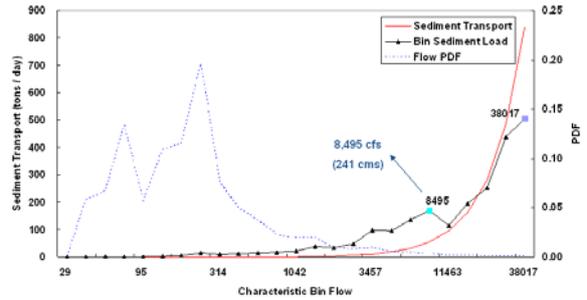
Number of Bins	Effective Discharge (Arithmetic Bin)	Effective Discharge (Logarithmic Bin)
25	626 m ³ /s	241 m ³ /s
50	613 m ³ /s	646 m ³ /s
100	832 m ³ /s	627 m ³ /s

4. 유효유량과 만제유량의 관계

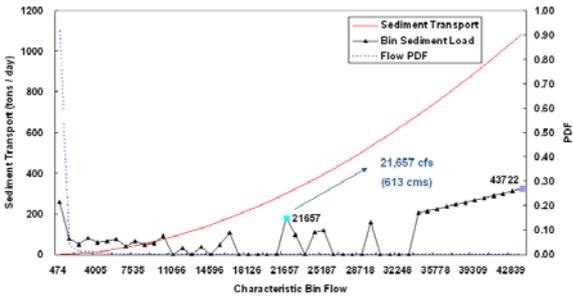
Wolman and Miller (1960)는 하천의 유량 크기와 빈도가 하천의 하도형성과 직접적인 연관이 있다는 기본원리를 제안하였으며 이후 유사자료의 부족으로 부유사 측정 자료들이 유효유량 계산에 활용되어 왔다(Ashmore and Day, 1988; Nash, 1994). 부유사량(Suspended Load Sediment)은 같은 크기의 유량이 발생하더라도 유사공급 환경에 따라 매우 다양한 값을 갖기도 하며 부유사 관측 자료를 이용하여 계산된 유효유량 값은 만제유량 값 보다 작은 값을 나타낸다(Knighton, 1998). 반대로 소류사(Bedload Sediment)



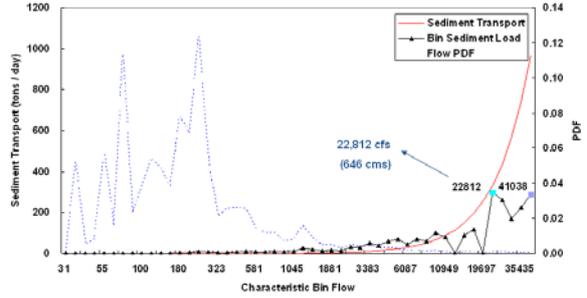
(a) 25 Arithmetic Bins



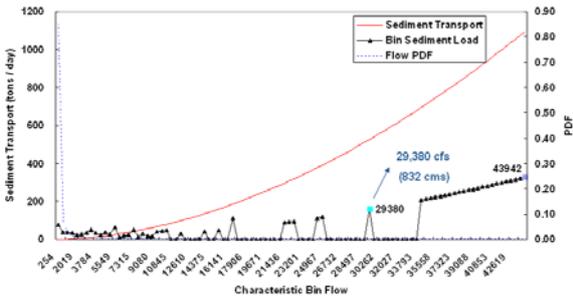
(a) 25 Logarithmic Bins



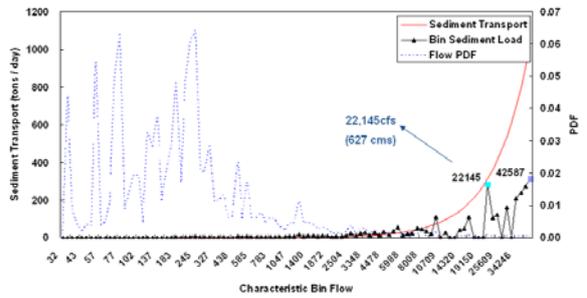
(b) 50 Arithmetic Bins



(b) 50 Logarithmic Bins



(c) 100 Arithmetic Bins



(c) 100 Logarithmic Bins

Fig. 8. Effective Discharge Calculation Results Using Arithmetic Bins

Fig. 9. Effective Discharge Calculation Using Logarithmic Bins

관계식이 유효유량 계산시에 이용된 경우, 특히 유사이송에 있어 유사 공급의 제한을 받거나 홍수와 평수의 중간에 해당되는 유량이 발생하는 장갑화된 하천의 경우 유효유량 값이 만제유량의 30% 이상 많게 계산되는 경우가 있다(Emmett and Wolman, 2001). 만약 유효유량이 발생했을 경우의 수위가 홍수터 높이 즉, 만제수위보다 낮은 경우라면 이는 곧 하천의 하상에 침식 및 절개(Incising)가 발생하고 있다는 증거가 될 수 있다. 반대로 유효유량의 수위가 만제수위보다 높은 경우 하상에는 퇴적현상이 발생하고 있음을 예측할 수 있다(Fig. 10). 하천을 관리하는 관점에서 봤을 때 하도의 단면이 유효유량을 소통시킬 수 있는 형태로 변화하고 있다는 것은 곧 하천이 안정한 상태로 변화하고 있다고 판단할 수 있으며 최소한의 하천 단면 정비만이 필요할 것이다(Goodwin, 2004).

만제유량을 산정하기 위한 현장 검증 방법 및 절차들이 많은 연구자 및 기술자들에 의해 제시되어 왔다(예를 들어 Leopold *et al.*, 1964; U. S. Forest Service, 1996; Smelser and Schmidt, 1998). 이러한 방법들은 주로 홍수터와 주수로 사이의 경계를 만제유량의 기준으로 구분하고 있으며 하천의 변화를 이해하는데 있어 매우 중요한 요소이기도 하다. 그러나 조사를 수행하는 사람에 따라 현상을 이해하고 관찰하는데 일관성이 결여될 수 있기 때문에 이러한 현장조사 방법에는 상당한 불확실성이 잠재되어 있기도 하다. Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 동적 평형상태에 있는 하도의 경우 유효유량의 수위는 만제수위와 일치하는 것을 알 수 있다. 절개 하도(Incised Channel)의 경우 새로운 홍수터가 발생하며 이전 상태의 홍수터는 단구(Terrace)로 전환된다(Fig. 10(b)). Fig. 10(c)와 같이 하상이 퇴적되는 하도의

경우 만제유량을 시각적으로 판단하기 매우 힘들다. 지금까지의 여러 연구에 의하면 몇몇의 안정하도의 경우 유효유량과 만제유량, 그리고 특정 재현기간을 갖는 빈도유량이 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다(e.g., Wolman and Miller, 1960; Andrews, 1980; Emmett and Wolman, 2001). 이러한 경우 특정 재현기간별 유량과 만제유량이 종종 유효유량의 근사값으로 제안되기도 한다. 그러나 유효유량과 특정 재현빈도 유량의 관계가 항상 유사한 값을 갖지 않는 것처럼 만제유량과 유효유량이 항상 일치하는 것은 아니다(Doyle *et al.*, 2007). 따라서 하도설계시 특히, 다지하천 또는 절개하천에 하도형성유량 개념을 적용하는데 있어 설계자의 주의가 요구된다. 주로 하도형성유량으로 만제유량을 많이 사용하고 있음에도 불구하고 만제유량(Q_{bf}), 유효유량(Q_{eff}), 특정 재현빈도 유량(Q_{ri})이 유사한 것으로 가정하는 방법이 유효하지 않은 경우가 발생한다. 보통 상대적인 Q_{ri}/Q_{eff} 와 Q_{bf}/Q_{eff} 값이 주로 일정한 한계 내에서 발생하는 경우가 있지만(e.g., Simon *et al.* 2004) 여전히 하천에 따른 지역적 편차는 상당히 큰 것으로 나타난다. 특히 하천에 인위적인 정비나 개수공사가 수행된 경우 만제유량(Q_{bf}), 유효유량(Q_{eff}), 특정 재현빈도 유량(Q_{ri})의 하도형성유량을 산정하는 3가지 값의 편차가 큰 것으로 나타났다. 하도형성유량의 값들이 상이한 값을 갖는다는 것은 하천의 불안정(Instability)한 상태를 나타내는 하나의 지표이기도 하며 주로 이러한 하천에서 하천 복원 사업이 진행되는 경우가 많다.

하도형성유량으로 만제유량을 사용하는 것은 복원되는 하천에 대한 하천 형태 및 기하(Geometry)를 결정하기 위해 참고가 되는 하천을 이용한다는 개념에서 출발한다(Rosgen, 1994; 1998). 이러한 접근 방법의 장점으로는 우선 기본개념의 단순성, 계산의 용이성, 생태 서식처에 중요한 요소가 되는 하천 반응성 등이 있다. 그러나 하천복원이 실시되는 위치들은 종종 상류 또는 하류의 흐름과 유사이송을 지배하는 체제변화로 인해 불안정한 상태에 있는 경우가 많다. 따라서 복원 목표가 되는 하도와 비슷한 형태로 평형을 유지하고 있으며 물리적인 하천형태가 유사한 하도만이 참조하천(Reference Channel)으로 고려될 수 있다(Doyle *et al.*, 2007).

하도설계는 경험적으로 규명된 평형상태에 기초하기 보다는 일반적인 물리적인 원칙에 기초하여 수행되어야 한다(Wilcock, 1997). 하천의 불안정한 상태는 종종 만제유량이나 특정 재현빈도 유량이 아닌 유효유량으로 정량화할 수 있는 하천의 총 유사이송량에 반영되어 나타나기도 한다. 하지만 유효유량 방법이 다른 두 방법

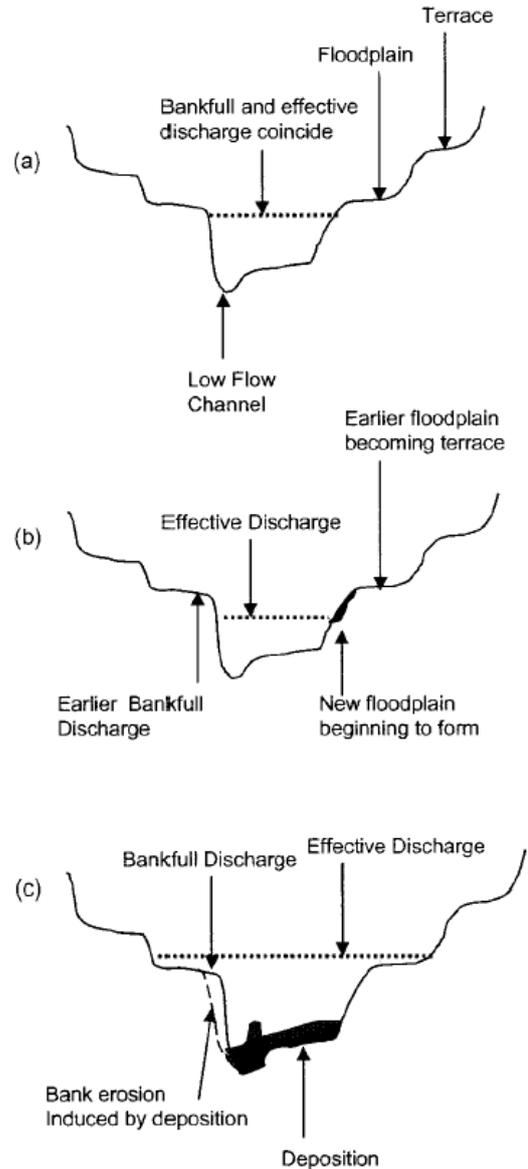


Fig. 10. Theoretical Relation of Effective and Bankfull Discharges: (a) Dynamic Equilibrium State (b) Incising Channel (c) Aggrading Channel (Goodwin, 2004)

과 비교하여 월등한 방법이라고 말할 수 없으며 실제로 유효유량을 계산하는 방법에는 몇 가지 문제점이 있는 것으로 나타난다(Crowder and Knapp, 2005). 하지만 이러한 유효유량 산정방법의 문제점이 하도형성유량을 산정하는 3가지 방법 중에서 유효유량 방법을 제외시킬 수 있는 정당성을 포함하고 있지는 않다. 유효유량 방법이 만제유량 방법과 특정 재현빈도 유량 방법에 비해 더 많은 하천자료를 필요로 하는 분석적 방법이지만 하천 복원 사업에서 하도설계를 수행하고자 하는 기술자에게 상당한 이점을 제공하는 방법이다. 수년에 걸쳐 연 유사량의 대부분을 이동시키는 유량으

로 정의되는 유효유량은 안정하도 복원 설계자에게 현재와 미래의 하천 불안정화를 발생시킬 수 있는 요소들에 대한 통찰력을 제공할 수 있을 것이다. 따라서 단순히 만제유량 혹은 특정 재현빈도 유량만으로 안정하도 설계 또는 하도평가를 수행하기 보다는 최대한 하천자료를 확보하여 유효유량도 함께 분석하는 것이 최적의 하도형성유량을 선정하고 하도의 불안정한 상태를 복원 설계시 예방할 수 있는 현명한 방법이 될 것이다(Doyle *et al.*, 2007).

5. 청미천 구하도 복원구간의 하도형성유량

청미천에서 시행 중인 구하도 복원대상 구간은 15+800번 단면에서 16+800번 단면 사이이며 하도형성유량 산정을 위해 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량을 계산하였다. 계산 결과는 Table 3과 같으며 예측된 만제유량은 488 m³/s로써 계산된 유효유량의 수위가 만제유량 수위 보다 큰 것으로 나타났다. 또한 만제유량은 1.5년 빈도 유량과 2년 빈도 유량의 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 3장에서 언급한 Goodwin (2004)이 제시한 만제유량과 유효유량과의 관계를 적용해 보면 Fig. 10(c)와 같은 조건이며 이는 곧 청미천 복원 대상 구간의 하상이 오랜 시간 퇴적되어 전체적인 하상 표고가 상승했을 것으로 예측되어진다. 그러나 Goodwin (2004)의 이론적 관계에 의한 예측과는 달리 실제 청미천에는 반대되는 현상이 발생하였다.

Table 3. Channel-forming Discharge Using Three Methods

Bankfull Discharge	Specified Recurrence Interval Discharge	Effective Discharge
488 m ³ /s	414 m ³ /s (1.5-year)	613 - 646 m ³ /s
	552 m ³ /s (2-year)	

하도의 변화 과정을 직접 1994년과 2008년 측량 자료를 이용하여 비교 분석하였으며 그 결과는 Fig. 11에서 15와 같다. 1994년에 측정된 단면과 2008년에 측량한 단면이 서로 일치하는 단면만을 선정해 비교하였으며 15+523번 단면에서 17+517번 단면까지의 총 5개 단면이 활용되었다. 과거 측량 자료를 이용하여 하천 단면 변화 과정을 분석한 결과 전체 비교 단면에서 1994년 단면에 비해 2008년 단면이 전반적으로 하강한 것으로 나타났으며 주수로와 홍수터의 구분이 1994년에 비해 확연해진 것으로 나타났다. 또한 강턱을 기준으로 했을 경우의 2008년 하폭도 1994년에 비해 감소한 것

을 알 수 있으며 15+523번 단면의 경우 좌안의 제방이 크게 변화된 것을 제외한 주수로에서의 하상변화는 대략 최대 2.5 m 정도인 것으로 나타났다. 16번 단면의 경우는 하상이 최대 약 3 m 하강한 것을 알 수 있으며 좌안의 제방 쪽 하상은 오히려 퇴적되어 홍수터가 된 것으로 나타났다. 16+507번 단면의 경우 비교 단면 5개 중 가장 하상변화가 적은 것으로 나타났으며 최대 변화고는 약 1.5 m인 것으로 나타났다. 17번 단면의 경우는 주수로의 절개가 가장 심하게 나타난 단면이며 1994년에 비해 2008년의 주수로와 홍수터 구분이 확연한 것으로 나타났다. 마지막으로 17+517번 단면은 좌안의 제방 근처 수로 변화가 상대적으로 크게 발생한 것을 알 수 있다. Goodwin (2004)이 제시한 Fig. 10에 의하면 청미천의 복원 대상 구간의 유효유량 수위가 만제유량 수위보다 높게 나타나기 때문에 Fig. 10(c)와 같은 현상이 나타나야 하지만 1994년과 2008년 측량자료에 의하면 주수로 하상은 침식되고 하폭은 감소하여 전체적으로 홍수터와 주수로의 경계가 확연해진 것으로 나타났다.

이러한 분석 결과는 Fig. 10(c)의 현상이 하천의 형태 변화를 설명할 수 있는 절대적인 지표가 될 수 없음을 보여주고 있다. 하도의 변화는 매우 복잡하고 영향을 미치는 인자가 매우 다양하기 때문에 단순히 유효유량과 만제유량 값의 비교만으로 설명할 수 없는 것이다. 또한 유효유량 산정에 활용된 유량-유사량 자료가 2008년에 측정된 유사 자료만으로 개발된 곡선이므로 과거의 유사이송 특성이 유효유량 계산과정에 반영되지 못하였을 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 점들은 지속적인 유사량 관측을 통한 자료의 축적을 통해 유사량 자료 또는 유사이송 공식의 선택이 유효유량 산정에 미치는 영향을 검토할 수 있을 것이다. 2008년에 측정된 유사량 자료와 경험적인 총유사량 공식들과 비교해 본 결과(Fig. 3), 2008년의 유사량이 다른 경험적인 총유사량 공식에 비해 유사량을 월등히 크게 산정하는 것으로 나타났다. 이러한 유사량의 과다 산정은 전체적으로 유효유량의 산정 값이 크게 산정되는데 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 하지만 무엇보다도 가장 중요한 사실은 과거에 비해 현재 하상이 침식되고 있는 현상이 유효유량을 소통시킬 수 있는 형태로 변화하고 있다는 것을 의미하며 곧 하천이 안정한 상태로 변화하고 있다고 판단할 수 있다는 것이다. 이러한 경우 Goodwin (2004)이 제시한 것처럼 최소한의 하천정비만이 필요하다고 할 수 있으며 이점은 반드시 구하도 복원 대상 구간의 하도설계에 있어 고려해야 할 사항이다.

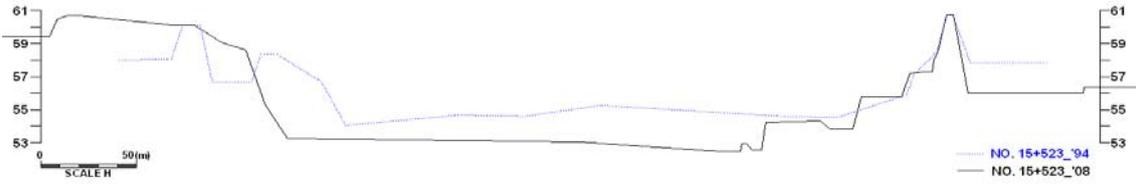


Fig. 11. The Comparison of Cross Sections in 1994 and 2008 (No.15+523)

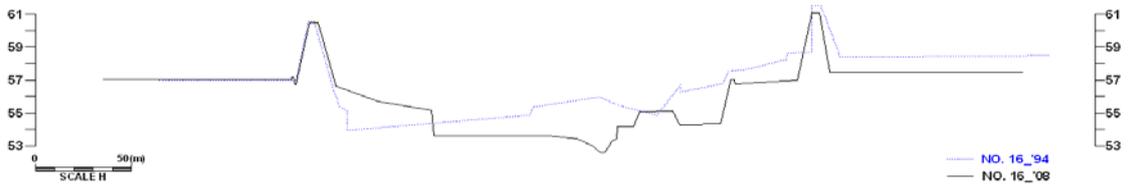


Fig. 12. The Comparison of Cross Sections in 1994 and 2008 (No.16)



Fig. 13. The Comparison of Cross Sections in 1994 and 2008 (No.16+507)

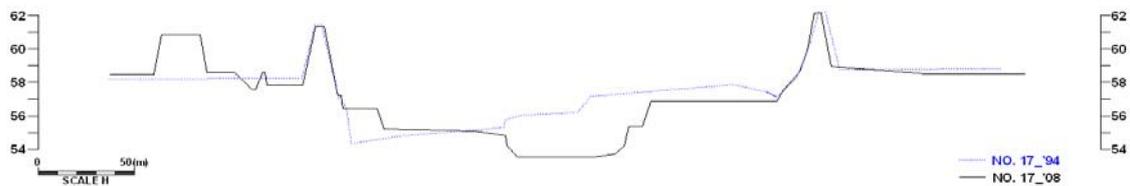


Fig. 14. The Comparison of Cross Sections in 1994 and 2008 (No.17)

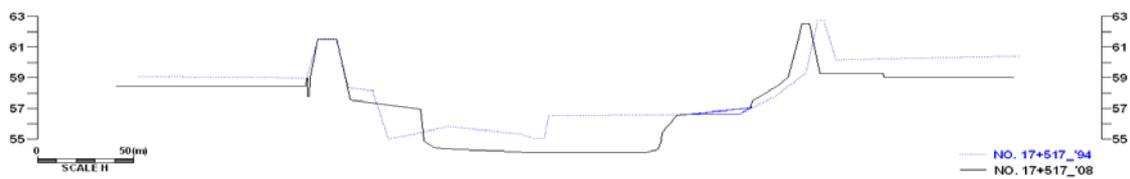


Fig. 15. The Comparison of Cross Sections in 1994 and 2008 (No.17+517)

6. 결론

본 연구는 청미천의 구하도 복원구간 단면 설계 기준유량인 하도형성유량을 결정하기 위해 만제유량, 특정 재현기간별 유량, 유효유량을 각각 산정하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

청미천 구하도 복원구간 내에 위치한 대표 단면에서 홍수터 경계를 만제수위의 지표로 선정하고 HEC-RAS 모의를 수행하여 만제유량을 산정하였다. 그 결과 만제유량은 $488 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 것으로 나타났으며 이는 1.5년(414

m^3/s)에서 2년($552 \text{ m}^3/\text{s}$) 빈도 유량사이에 해당되는 값이다. 또한 유효유량 값을 산정하기 위해 원부교에서 계측된 1998년부터 2007년 일유량 자료를 활용하였고 유량-유사량 관계 곡선식은 2008년에 원부교 현장에서 관측한 총유사량 자료를 이용하였다. 유효유량 산정시 유량 간격은 산술 등간격과 로그 간격 모두를 사용하였으며 각각 간격이 25개, 50개, 100개인 경우에 대해 유효유량을 계산하였다. 그 결과 산술 등간격에서의 최대값 $832 \text{ m}^3/\text{s}$ 과 로그 간격에서의 최소값 $241 \text{ m}^3/\text{s}$ 을 제외한 유효유량은 $613 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $646 \text{ m}^3/\text{s}$ 사이에 분포하

는 것으로 나타났다.

Goodwin (2004)이 제시한 유효유량과 만제유량과의 관계 이론에 의하면 청미천의 복원 대상 구간의 유효유량 수위가 만제유량 수위보다 높게 나타나기 때문에 하상이 퇴적되는 현상이 나타나야 하지만 1994년과 2008년 측량자료에 의하면 주수로 하상은 침식되고 하폭은 감소하여 전체적으로 홍수터와 주수로의 경계가 확연해진 것으로 나타났다. 이는 하도의 변화가 단순히 유효유량과 만제유량과의 관계로만은 분석될 수 없는 매우 복잡한 현상임을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 수행된 유효유량의 산정의 경우 계산에 사용된 2008년의 유사량 자료들이 다른 경험적인 총유사량 공식에 의해 추정되는 유사량 값에 비해 월등히 크게 나타났으며 이러한 유사량의 과다 산정은 전체적으로 유효유량의 산정 값이 크게 산정되는데 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 하지만 과거에 비해 현재 하상이 침식되고 있는 현상은 유효유량을 소통시킬 수 있는 형태로 하도가 진화하고 있다는 것을 의미하며 곧 하천이 안정한 상태로 변화하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 구하도 복원 대상 구간의 하도설계에 있어 최소한의 하천정비 또는 하도변형만이 적용될 수 있도록 해야 할 것이며 현재의 수리적 특성이 크게 변화되지 않는 조건하의 구하도 복원 설계가 필요할 것이다.

현재까지 수집된 청미천의 유사량 관측 자료는 유효유량을 하도형성유량으로 선정하기에는 자료의 양적인 면에서 부족한 것으로 판단되며, 따라서 청미천 구하도 복원사례의 경우 만제유량을 하도형성유량으로 선택하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다. 또한 향후 지속적인 자료수집을 통해 유효유량 산정 값의 정확성을 높이고 만제유량의 현장 관측 자료와 특정 재현빈도 유량을 같이 고려하여 하도형성유량을 결정할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원건설(핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

강경석, 이춘호, 최용승, 김국일 (2005). “문산천 유역의 지배유량 산정.” **2005년도 학술발표대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2547-2550.

이희철, 이은태 (2002). “충적하천의 안정하도 계획을 위한 지배유량 산정에 관한 연구.” **2002년 학술발표**

대회, 대한토목학회, pp. 514-517.

이희철, 이은태 (2003). “충적하천의 하도형성유량 산정과 수리기하특성에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, Vol. 36, No. 5, pp. 823-838.

임창수, 이준호, 김태희, 이재철, 윤세의 (2006). “하도 특성량 조사를 위한 지배유량의 산정.” **2006년도 학술발표대회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 66-71.

Andrews, E.D. (1980). “Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River Basin, Colorado and Wyoming.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 46, pp. 311-333.

Ashmore, P.E., and Day, T.J. (1998). “Effective discharge for suspended sediment transport in streams of the Saskatchewan River Basin.” *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 6, pp. 864-870.

Copeland, R., Soar, P., and Thorne, C. (2005). “Channel-forming discharge and hydraulic geometry width predictors in meandering sand-bed rivers.” *2005 World Water and Environmental Resources Congress: Impacts of Global change* (CD-ROM), ASCE, Reston Va.

Crowder, D.W., and Knapp, H.V. (2005). “Effective discharge recurrence intervals in Illinois streams.” *Geomorphology*, Vol. 64, pp. 167-184.

Doyle, M.W., Shields, D., Boyd, K.F., Skidmore P.B. and Dominick, D. (2007) “Channel-Forming discharge selection in the river restoration design.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 7, pp. 831-837.

Dunne T., and Leopold, L.B. (1978). *Water in Environmental Planning*. New York, NY: W. H. Freeman and Company.

Emmett, W.W., and Wolman, M.G. (2001). *Effective discharge and gravel-bed rivers*. Earth Surf. Processes Landforms. Vol. 26, pp. 1369-1380.

Goodwin, P. (2004). “Analytical solutions for estimating effective discharge.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, pp. 729-738.

Harrelson, C.C., Rawlins, C.L., and Potyondy, J.P. (1994). *Stream channel reference sites: An illustrated guide to field technique*. General Report No. RM-245, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Fort Collins CO.

- Hey, R.D. (1994). *Restoration of gravel-bed rivers: Principles and practice*. Natural channel design: Perspectives and practice, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ont., pp. 157-173.
- Knighton, A.D. (1998). *Fluvial forms and processes: A New Perspective*. London: Arnold, pp. 383.
- Lane, E.W. (1995). "Design of stable channels." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120, pp. 1234-1279.
- Leopold, L.B. (1994). *A View of the River*, Cambridge: Harvard University Press.
- Leopold, L.B. Wolman, M.G., and Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco, CA: W. H. Freeman and Co., pp. 522.
- McCandless, T.L. (2003). *Maryland stream survey ; Bankfull discharge and channel characteristics of streams in the allegheny plateau and the valley and ridge hydrologic regions*, U.S. Fish and Wildlife Service.
- Ministry of Natural Resources. (1994). *Natural channel systems: An approach to management and design*, Queen's Printer for Canada, Toronto.
- Nash, D.B. (1994). "Effective sediment-transporting discharge from magnitude-frequency analysis." *Journal of Geology*, Vol. 102, pp. 79-95.
- Pickup, G. and Warner, R.F. (1976). "Effects of hydrologic regime on the magnitude and frequency of dominant discharge." *Journal of Hydrology*, Vol. 29, pp. 51-75.
- Riley, A.L. (1998). *Restoring streams in cities: A guide for planners, policymakers, and citizens*, Island Press, Washington, D.C.
- Rosgen, D. (1994). "Applied river morphology." *Wildland Hydrology*.
- Rosgen, D. (1998). "The reference reach—A blueprint for natural channel design." *ASCE Wetlands Engineering and River Restoration Conference*, Denver.
- Schumm, S.A. (1960). "The shape of alluvial channels in relation to sediment type." *U.S. Geological Survey*, Professional Paper No. 352B, Washington, DC, pp. 30.
- Shields, F.D., Copeland, R.R., Klingeman, P.C., Doyle, M.W., and Simon, A. (2003). "Design for stream restoration." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 8, pp. 575-584.
- Simon, A., Dickerson, W., and Heins, A. (2004). "Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States: Transport conditions at the bankfull and effective discharge." *Geomorphology*, Vol. 58, pp. 243-262.
- Smelser, M.G., and Schmidt, J.C. (1998). *An assessment methodology for determining historical changes in mountain streams*. Technical Report, No. RMRS-GTR-6, Rocky Mountain Research Station, U.S. Forest Service, Ogden, Utah, pp. 29.
- Soar, P.J. (2000). *Channel restoration design for meandering rivers*. Ph. D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- United States Forest Service. (1996). *A guide to field identification of bankfull stage in the western United States*. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Stream Systems Technology Center. 31 minute video, Fort Collins, Colo.
- Watson, C.C., Biedenharn, D.S. and Thorne, C.R. (2005). *Stream Rehabilitation*. Cottonwood Reaserch LLC Fort Collins, Colorado.
- Wilcock, P.R. (1997). *Friction between science and practice: The case of river restoratio*. EOS Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 78, No. 41, pp. 454.
- Williams, G.P. (1978). *Bankfull discharge of rivers*. Water. Resources. Research, 14:1141-1154.
- Wolman, M.G. (1955). "The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania." *U.S. Geological Survey*, Professional Paper No. 271, Washington.
- Wolman, M.G., and Leopold, L.B. (1957). "River flood plains: Some observations on their formation." *U.S. Geological Survey*, Professional Paper 282C, pp. 87-107.
- Wolman, M.G., and Miller, J.P. (1960). "Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes." *Journal of Geology*, Vol. 68, pp. 54-74.
- Woodyer, K.D. (1968). "Bankfull frequency in rivers." *Journal of Hydrology*, Vol. 6, pp. 114-142.

논문번호: 09-071	접수: 2009.06.23
수정일자: 2009.09.18/10.19	심사완료: 2009.10.19