

평형하상 이론을 이용한 청미천 구하도 복원 대상구간의 안정하도 평가 및 설계

Stable Channel Analysis and Design for the Abandoned Channel Restoration Site of Cheongmi Stream using Regime Theory

지 운* · Pierre Y. Julien** · 강준구*** · 여홍구****
Ji, Un · Julien, Pierre Y. · Kang, Joon Gu · Yeo, Hong Koo

Abstract

River restoration or rehabilitation should be conducted in a way to maximize the channel stability with natural river configuration close to the equilibrium condition considering divers aspects of fluvial hydraulics, erosion and sedimentation, fluvial geomorphology, and ecological environment and to minimize the maintenance work. Therefore, the channel stability evaluation for present condition based on the equilibrium channel concept should be preceded for the river restoration project. Methods for equilibrium channel theory have generally been developed following either analytical regime theory or empirical regime theory. The main purpose of this paper is to evaluate the stability of present channel condition for the section of abandoned channel restoration in Cheongmi Stream using the Stable channel Analytical Model (SAM) and equilibrium hydraulic geometry equations. The results of analytical and empirical regime theories should provide fundamental and essential information to design the stable channel geometry. As a calculation result of Copeland's method for the study reach, the equilibrium channel has a narrower channel width, deeper water depth, and more gentle slope than the present channel geometry. As results of equilibrium hydraulic geometry equations, predicted equilibrium widths are less than the channel width in the field. It is represented that the current bed slope must be gentle to reach the equilibrium condition according to the results of Julien and Wargadalam method.

Keywords : river restoration, abandoned channel restoration, stable channel analytical model, regime theory, Copeland method

요 지

하천 복원 설계는 하천 수리 및 유사 수리학적, 하천 지형 및 형태학적, 그리고 생태환경적인 측면까지 모두 고려하여 인위적이지 않고 자연 상태에 가까운 평형하천의 형태를 갖도록 안정성을 최대화하면서 유지 관리 작업은 최소화하는 방향으로 수행해야 한다. 이를 위해서는 우선 평형하상 이론을 고려한 복원 하천 및 하도의 안정성에 대한 평가가 선행되어야 한다. 이러한 평형하상 이론 방법은 일반적으로 크게 해석적 방법 또는 경험적 방법의 형태로 발전되어 왔다. 본 논문에서는 청미천 구하도 복원이 실시되는 구간에 대해서 해석적 방법의 대표적인 Copeland 방법을 기본 모듈로 채택하고 있는 SAM 프로그램을 이용하여 안정하도를 설계하였으며 경험적 방법의 평형공식(하류하천 수리기하 공식)들을 이용하여 현재하도의 안정성을 평가하고 분석하였다. 해석적, 경험적 방법들로 분석된 결과들은 구하도 구간의 하도 형태 설계를 위한 자료로 활용하기 위한 것이다. Copeland 방법을 이용한 분석 결과, 청미천 대상구간의 안정하도는 현재하도보다 폭이 좁고 수심이 큰 그리고 경사가 완만한 하도인 것으로 나타났다. 또한 수리기하공식을 이용하여 복원 하천의 하폭 및 경사를 예측한 결과, 예측된 평형하도의 하폭은 현재 하도의 하폭보다 폭이 좁은 것으로 예측되었으며, 특히 Julien and Wargadalam 방법으로 예측한 결과 현재하도가 평형상태에 도달하기 위해서는 경사가 현재상태보다 더 완만해져야 되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하천복원, 구하도 복원, 평형하상 이론, Copeland 방법, SAM, 하류하천 수리기하 공식

1. 서 론

하천 복원에 있어서 이동 하상의 안정하도를 설계하는 작업은 수리학적, 하천 형태학적, 그리고 유사 수리학적 측면

에서 매우 복잡한 문제들을 포함하고 있으며 더 나아가 다양한 생태서식처 및 환경을 제공할 수 있는 측면까지도 고려하도록 요구되고 있다. 자연계의 다양성 및 복잡성을 고려한 안정하도 설계 작업은 인위적인 변화가 없는 자연적인

*정회원 · 명지대학교 공과대학 토목환경공학과 연구교수 (E-mail : juncivil@gmail.com)

** (미)콜로라도 주립대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : pierre@engr.colostate.edu)

***정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 선임연구원 (E-mail : jgkang02@kict.re.kr)

****정회원 · 한국건설기술연구원 책임연구원 (E-mail : yeo17@kict.re.kr)

하도 형태 및 하천 환경을 갖는 상태로 조성될 수 있도록 해야 하며 하도의 안정성을 최대화하면서 동시에 하천 유지 관리 작업을 최소화할 수 있는 즉, 복합적인 목표를 만족시킬 수 있는 하천 복원 설계안을 제시해야 한다. 이러한 하천 복원 설계시 가장 선행되어야 할 작업은 복원하고자 하는 현재의 하천 및 하도의 안정성에 대한 평가이며 이러한 과정에서 평형 하천의 개념을 반드시 고려해야 한다.

안정하도 및 평형하천 형태를 설계하는 방법은 해석적인 평형하상 이론 혹은 경험적인 평형하상 이론에 기초하여 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다. 먼저 여러 해석적 방법들 중 Copeland의 방법(Copeland, 1994)은 실제로 충적하천에서의 안정하도 평가 및 설계에 가장 많이 이용되고 있으며 미공병단에서 개발한 SAM(Stable channel Analytical Model) 프로그램에서 채택하고 있는 해석적 방법 중 하나이다(Scott, 2006). 이 방법은 Abou-Seida and Saleh(1987) 방법과 유사하며 3개의 미지수(안정하도의 하폭, 경사, 수심) 중 2개를 먼저 계산하고 설계자가 제3의 미지수를 여러 개의 해(solution)들 중 설계 조건 및 지형학적 구속 조건들에 가장 적합한 하나를 채택하도록 되어 있다. 일반적인 가설과는 다르게 SAM 프로그램은 한 개의 해가 아닌 여러 개의 해를 최종적으로 제시해 주며 또한 최소 수류력(minimum stream power)을 갖는 해도 같이 제시한다.

안정하도 설계에 있어서 현재 활용되고 있는 경험적 방법으로는 하류하천의 수리기하(downstream hydraulic geometry) 분석에 기초한 여러 평형이론 방법들이 있으며 Julien and Wargadalam(1995), Simons and Albertson(1963), Lacey (Wargadalam 1993, 재인용), Klaassen and Vermeer(1988) 등의 공식들이 대표적인 경험적 평형하상 공식들이며 대부분 하류하천의 수리기하 관계 공식들이다. 하천 수리기하는 자연 하천의 기하 특성을 규명한다는 점뿐만 아니라, 하천 수리학적 측면에서 안정하도나 인공 수로의 설계에 모델이 될 수 있으며 최근에는 하천 복원 사업시 하도 설계에 활용되고 있다.

본 연구에서는 Copeland(1994)의 해석적 방법을 기본 모델로 채택하고 있는 SAM 프로그램의 기본적인 특성과 활용도에

대해서 알아보고 이를 남한강 제1지류인 청미천의 구하도 복원 예정 구간에 적용시켜 현재하도의 안정성을 평가하였다. 또한 Julien and Wargadalam(1995), Simons and Albertson (1963), Lacey(Wargadalam 1993, 재인용), Klaassen and Vermeer(1988)의 경험적 평형 공식들을 이용하여 청미천 구하도 복원대상 구간에 대한 평형 하폭 및 경사를 예측하고 이를 Copeland 방법의 결과와 비교하였으며 현재하도 상태를 평가하는 자료로 활용하였다. SAM 프로그램과 수리기하 공식(평형 공식)을 이용한 하천의 안정성 분석에 적용하는 유량 조건은 보통 2년에서 10년 빈도 사이에 해당되는 유량 또는 만제유량, 유효유량 등과 같은 지배 유량을 채택하고 있으며 본 연구에서는 복원대상 구간 단면에서의 만제유량을 적용하여 안정하도 형태 예측 및 하도평가를 실시하였다.

2. 청미천 구하도 복원 대상 구간

청미천은 남한강의 제 1지류로 유역 폭은 동서로 약 39 km이며 남북으로는 31 km이다. 청미천 유역 면적은 595.7 km²이며 하도 길이는 25.2 km이다(국토해양부, 2009). 청미천의 구하도 복원을 위한 프로젝트 지점은 Fig 1, 2와 같으며 단면 15+8번 지점에서 16+8번 지점까지가 이에 해당된다(국토해양부, 2009). 청미천의 경우 청미천 하류(0번 단면)에서 상류(24번 단면)까지의 총 25 km 구간에 대해 HEC-RAS 모의를 실시한 자료를 활용하여 만제유량을 산정하였으며 이를 안정하도 계산을 위한 기준 유량 즉, 하도형성유량으로 채택하였다(지운 등, 2009). 만제유량을 산정하기 위한 기준 단면은 청미천 구하도 복원 구간인 15+8번 단면에서 16+8번 단면 사이에 있는 단면들 중 상대적으로 강터의 구분이 확연한 16+4번 단면을 기준으로 한 것이며 산정된 만제유량은 488 m³/s인 것으로 나타났다(지운 등, 2009). 이러한 만제유량의 산정은 기준이 되는 단면이 어느 단면이냐에 따라 결과 값이 많이 좌우되는 것을 알 수 있다. 특히 구하도 복원 설계가 계획되고 있는 구간 내에 있는 단면을 기준 단면으로 하지 않고 구간 밖의 상류단과 하류단 단면

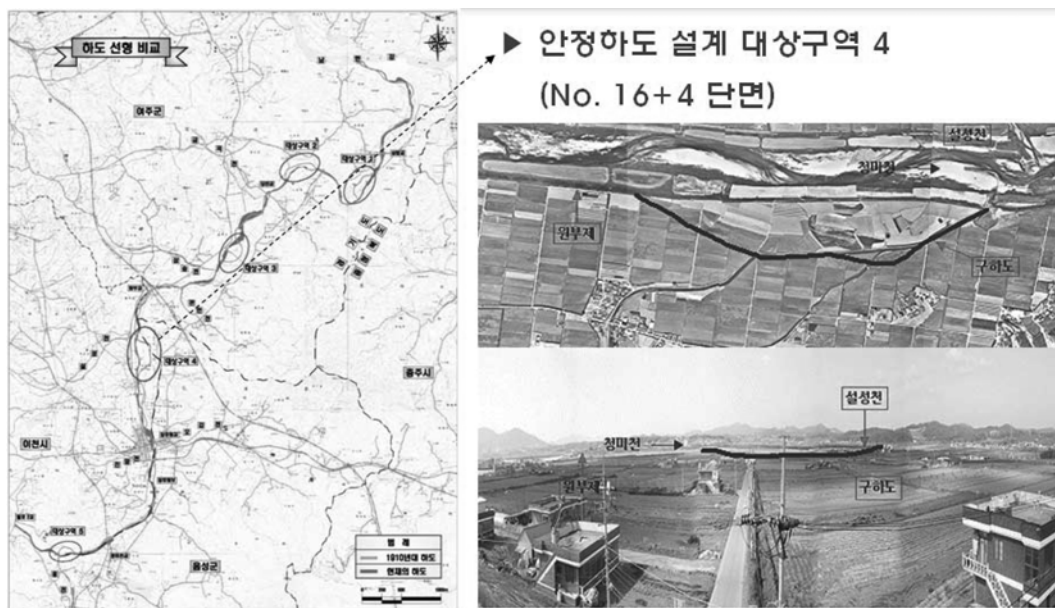


Fig. 1 Abandoned channel restoration site of Cheongmi Stream

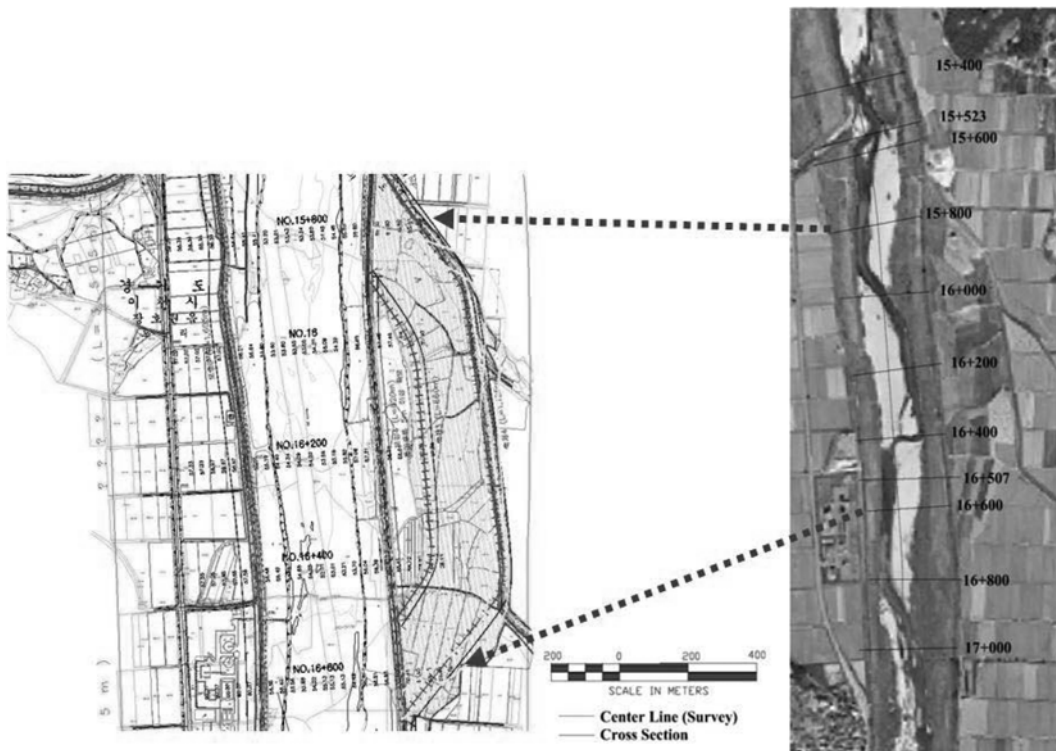


Fig. 2 Abandoned channel section of Cheongmi Stream

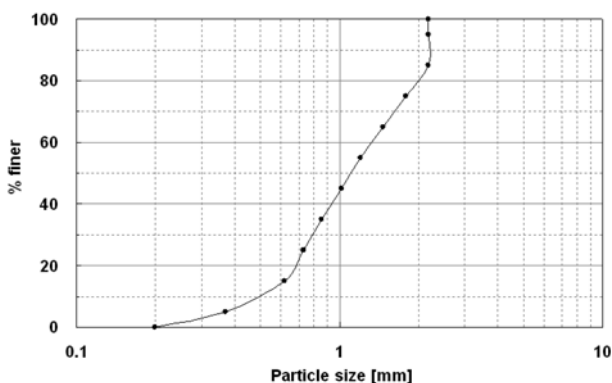


Fig. 3 Particle size distribution in Cheongmi Stream (Cross-Section No. 16)

을 기준으로 강터수위 및 만제유량을 산정하였을 경우 16+4번 단면에서 결정한 만제유량과 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 같은 청미천 구간이라 할지라도 위치에 따라 하도의 단면 형태와 지형학적 특성들이 달라짐으로써 곧 지형학적 특성에만 의존하여 결정되는 만제유량 값도 기준 단면 위치에 따라 달라지기 때문이다.

안정하도 설계 및 평가를 위한 SAM 프로그램의 입력 자료로는 16+4번 단면을 기준으로 했을 경우의 만제유량 488 m³/s, 상류하천 경사 0.000669, 하곡경사(valley slope) 0.00088이며 만제유량에 대응되는 강터수위는 56.4 EL.m이다. 여기서 하곡경사는 하도가 내려오는 계곡의 전체 경사를 말하며 이는 보통 하도가 직선하도일 경우 하곡경사와 하도경사가 동일하지만 대부분의 자연하천은 사행천이므로 하곡경사가 하도경사보다 항상 크다. 대상 지점의 조도계수 산정은 Chow(1959)의 방법을 참고하였으며 자연하천에서의 Manning 조도계수 값 범위인 0.025에서 0.06 사이 값 중 현장 식생상태 조사를 통해 0.03으로 결정하였고 SAM 프

그램에 필요한 강도의 조도 또한 0.03으로 가정하였다. 결정된 조도계수 값은 Hec-Ras 프로그램을 이용하여 수면곡선 계산을 수행한 후 관측소에서 관측되는 수위와 상호 비교하여 검증하였다. 하상도 입도분포 자료는 한국건설기술연구원에서 2005년에 청미천의 전 단면을 따라 조사하였으며 수집된 하상도 시료들은 실험실에서 분석되었다(국토해양부, 2009). 대상 지점에서의 하상도는 주로 모래에 해당되며 16번 단면에서의 중앙 입경은 1.1 mm인 것으로 나타났다(Fig. 3).

3. 해석적 방법을 이용한 청미천 구하도 복원구간의 안정하도 예측

3.1 Copeland 방법의 개요

하도설계에 관한 해석적 방법들은 1950년대부터 Lane(1955), Chow(1959), Henderson(1963, 1966), Langbein(1964), Graf(1971), Shen(1971), Vanoni(1975), Simons and Senturk(1977), Neill(1982), Richard(1982), Ferguson(1986), Chang(1988), Raudkivi(1990), Chadwick and Morfett(1993), Hey(1988, 1997) 등에 의해 검토되어 왔으며 최근 지배방정식들을 동시에 만족시키는 안정하도 및 평형하천 형태를 계산하는 해석적 방법들이 여러 연구자들에 의해 제안되고 있다. 이러한 방법들은 유량, 유사 이송, 그리고 하상 재질의 구성을 독립 변수로 고려하였고 하폭, 수심, 경사를 종속 변수로 정의하였다. 3개의 미지 변수를 계산하기 위해서는 3개의 방정식이 필요하며 유사량 공식과 흐름 저항식이 3개의 방정식 중 2개로 채택되었다. Chang(1980)은 최소 수류력을 제3의 공식으로 제안하였고 Engelund-Hansen 유사량 공식과 흐름 저항식을 최소 수류력 공식과 함께 사용하여 안정하도 설계 방법을 제시하였다. White *et al.*(1982)은 최소 수류력과 같은 맥락인 최대 유사이송을 제 3의 공식으로 채택하였

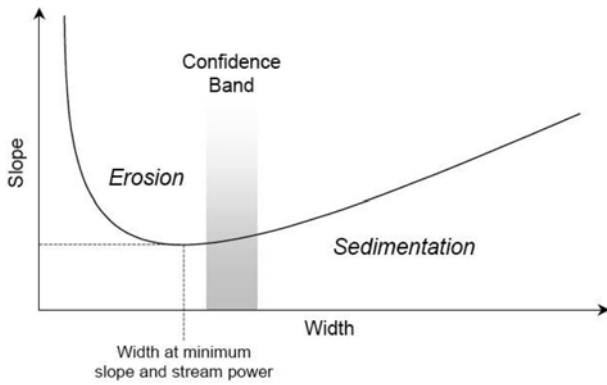


Fig. 4 Analytic channel design for stable depth and slope (Soar and Thorne, 2001)

으며 그들이 직접 개발한 흐름 저항식과 Ackers-White 유사량 공식을 사용하였다(USACE, 1994). Abou-Seida and Saleh(1987)는 Einstein-Brown 유사량 공식과 Liu-Hwang의 흐름 저항식을 하폭, 수심, 하상경사의 종속 변수들 중 2개를 계산하는데 이용하였으며 이 방법은 저수류 영역(lower regime)과 유사이송이 적은 하천을 대상으로 개발되었다.

Copeland의 해석적 방법은 미공병단에서 개발되었고 실제로 충적하천에서의 안정하도 평가 및 설계에 많이 이용되고 있으며 SAM 프로그램이 채택하고 있는 해석적 방법이다. 3개의 미지수 중 2개를 먼저 계산하고 설계자가 제 3의 미지수를 여러 개의 해들 중에서 설계 조건 및 지형학적 구속 조건들에 가장 적합한 하나를 채택할 수 있도록 하였다. 일반적인 가설과는 다르게 SAM 프로그램은 한 개의 해가 아닌 여러 개의 해를 최종적으로 제시해 주며 Copeland 방법에서 나타내고 있는 단면은 제형단면이며 정류와 등류 상태로 가정한다. 이러한 가정들에 의한 단순화에도 불구하고 Copeland 방법은 하도 바닥의 조도계수 값뿐만 아니라 강턱 및 제방의 조도계수 값까지 고려하기 때문에 하천 복원 사업의 주 대상인 소규모 하천에 적절하게 적용된다. SAM은 유사량 공식과 흐름 저항식으로 Brownlie(1981, 1983) 공식을 이용하고 있으며 이 공식의 특징은 하상 형상의 변화로 인한 조도의 변화를 고려하고 있다는 점이다.

SAM 프로그램의 해는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며 안정하도의 하상 경사와 하폭 관계 곡선을 이루고 있는 모든 점들은 이론적으로 안정한 상태를 나타낸다고 할 수 있다. 곡선 위의 영역에 해당되는 하폭, 수심, 하상 경사를 갖는 하천은 침식이 발생되어 불안정화 될 수 있으며 곡선 아래의 영역에 해당되는 하천 형태는 유사 퇴적 현상이 발생하여 하천이 불안정한 상태가 될 수 있다.

Copeland 방법은 높은 에너지를 갖는 직류하천(straight river)과 낮은 에너지의 사행 하천(meandering river) 모두에 적용할 수 있으며 Brownlie(1981, 1983)가 종합한 자료의 범위는 Table 1과 같다. Copeland의 해석적 방법은 안정하도 설계를 위한 현존하는 방법들 중 가장 큰 진화를 보여주고 있는 방법이다.

3.2 SAM 프로그램의 구성 및 특징

홍수 조절 능력 향상을 위한 하천 정비 사업 또는 하천 복원 사업의 기획 및 예비 설계 단계에서 가장 많이 활용되

Table 1. Ranges of variables used in the Brownlie's flow resistance (1981, 1983) and sediment transport equations for the Copeland method of stable channel design in sand river (Soar and Thorne, 2001)

Variable	Range
Slope, S	0.000003 to 0.037
Discharge, Q	0.003 to 19992 m ³ /s
Median particle size of bed material, d_{50}	0.088 to 2.8 mm
Hydraulic radius, R	0.025 to 17.07 m
Temperature	0 to 63°C
Width-to-depth ratio, W/D	>4
Geometric standard deviation of bed particle sizes, σ	≤ 5

는 SAM 프로그램은 현재 Hec-Ras 프로그램에 Stable channel Design Functions으로 탑재되어 있다(Brunner, 2008). SAM 프로그램은 홍수 피해 저감 및 하천 복원 연구 사업을 통해 기술자 및 설계자들에 의해 개발되어진 프로그램들을 종합한 하나의 시스템으로써 사용이 간편하고 정량적이며 또한 비용이 많이 드는 예비 조사 및 연구가 시행되지 못했을 경우, SAM 프로그램을 통해 얻어진 여러 대안들을 활용하여 예비 검증을 실시할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있다.

과거에는 안정하도 설계의 주된 목적이 하도의 침식 과정에만 초점이 맞춰져 있었지만 침식 과정은 유사 이송 과정의 기본적인 5가지 단계(침식-초기이동-이송-퇴적-다짐)중 하나에 불과하다. SAM 프로그램은 안정 하도 설계에서 다짐 과정을 제외한 모든 단계의 유사 이송 과정을 포함하고 있다. SAM 프로그램은 SAM Hydraulics, SAM Sediment Transport, SAM Sediment Yield, 그리고 SAM Stable Channel Design의 4개의 모듈로 이루어져 있다(Scott, 2006).

SAM Hydraulics 모듈에서는 정상 등류 흐름에 대해 등류 수심을 계산하고 다양한 흐름 저항 조건과 함께 하나의 횡단면에 대해 각각의 수리적 매개변수들을 계산한다. 등류수심을 계산하는데 6가지의 다양한 방법들이 있으며 흐름 저항식의 선택이 가능하다. 입력 자료로는 유량, 경사, 횡단면 좌표, 하도, 강턱, 홍수터의 조도계수 등이 필요하다.

SAM Sediment Transport 모듈은 SAM Hydraulics에서 계산된 수리적 매개변수들과 하상토 입도 분포 곡선을 기초로 하여 각각의 유사 크기 등급 별로 유량-유사량 곡선을 계산한다. 20개의 유사량 공식이 유효하며 모래 하상과 자갈 하상 모두에 대해서 적용이 가능하다(Thomas *et al.*, 2002). 시간과 공간에 따른 유사 입도 크기 분포의 변화는 고려되지 않기 때문에 유사량 공식 선택은 매우 신중하게 이루어져야 한다. 자연 하천에서의 입도 분포는 시간 및 공간 등의 여러 요소에 따라 변화하지만 SAM 프로그램에서는 고정된 평균 입도 분포를 모든 계산에 적용하기 때문에 유사를 계산하는데 있어 결과 값이 그 하천을 대표하는 값이 아닐 수 있다는 가능성을 내포하고 있다. 결과적으로 장기적인 유사 이송과 하천 변형을 분석하고자 하는 경우에는 여러 하천 단면이 활용되는 HEC-6 모형이 적절할 수 있다. 일반적으로 SAM 프로그램은 하천이 평형에 도달해 있는 상태일 경우에 보다 합리적이고 시간 평균된 결과를 제공한다. 그러므로 설계자나 사용자가 가장 대표적인 하상토 입도 분포 곡선을 결정하는 데 있어 매우 신중해야 한다. SAM Sediment Transport

모듈에서 생성된 결과 자료들은 부분적으로 SAM Sediment Yield 모듈의 입력 자료로 활용된다.

SAM Sediment Yield 모듈은 주어진 시간 동안에 총 유사 유출량을 계산하기 위해 유량수문곡선과 유량-유사량 곡선을 종합한다. 이 모듈의 계산 결과는 횡단면 전체를 통한 총 유사 유출량을 제공한다.

SAM Stable Channel Design 모듈은 주어진 유량과 유사량의 조건하에 하폭, 수심, 경사 등의 안정하도 크기를 결정할 수 있는 역할을 제공하고 있으며 계산 결과는 설계자가 하나의 해가 아닌 여러 개의 해 집합에서 최적 안을 선택할 수 있도록 되어 있다.

3.3 청미천 구하도 복원 대상 구간에 적용한 결과

청미천의 복원대상 구간의 안정하도 경사를 Copeland 방법이 적용된 SAM 프로그램을 이용하여 계산하였다. SAM 프로그램에 사용된 Stable Channel Design의 입력자료 내용을 정리하면 다음과 같다.

강터 유량(Bankfull Discharge): $Q_b=488 \text{ m}^3/\text{s}$

비중(Specific Gravity): $G=2.65$

하곡 경사(Valley Slope): $S_v=0.00088$

강터 사면 기울기(Bank Side Slope): 2.3

강터 조도계수(Bank Roughness): 0.03

하상토 입도분포(Bed Material Gradation):

$d_{84}=2.18 \text{ mm}$, $d_{50}=1.1 \text{ mm}$, $d_{16}=0.63 \text{ mm}$

유사가 공급되는 단면 자료는 복원대상 구간의 상류하천

단면의 특성을 평균하여 사용하였으며 대표적으로 사면경사 값은 2.3으로 나타났으며 안정하도의 사다리꼴 단면 사면경사 또한 상류하천 단면과 동일한 2.3으로 설정하였다. SAM 프로그램에서는 상류로부터 유입되는 유사 농도를 입력하는 옵션으로 2가지를 선택할 수 있으며 첫 번째는 유량-유사량 관계 곡선 자료가 유효한 경우 기준 유량에 해당되는 유사량을 직접 유량-유사량 곡선식으로부터 추정하여 유사 농도를 입력하는 방법이다. 두 번째 방법은 HEC-RAS 내에서 유입 유사량을 직접 계산하도록 하는 방법이다. 후자의 경우 유사가 공급되는 단면의 정보를 입력하도록 되어 있으며 유사가 공급되는 단면의 바닥 폭, 사면 높이, 에너지 경사, 사면 경사, 조도계수 값을 입력해야한다. 청미천의 경우 유입 유사량은 프로그램 자체에서 계산되도록 설정하였으며 유사를 공급하는 하도의 입력 값은 청미천 복원대상의 상류하천 자료 값과 동일하게 하였다. SAM 프로그램의 계산 결과 값을 해석할 때 주의할 점은 안정 곡선 그래프에서 보여주는 하폭은 수면 폭(top width)이 아닌 바닥 폭(bottom width)에 해당되기 때문에 반드시 바닥 폭을 수면 폭으로 환산할 필요가 있다. SAM 프로그램의 계산된 안정하도 단면은 역사다리꼴 형태이므로 바닥 폭에 해당하는 아래변과 강터사면 기울기, 그리고 수심 값을 이용하여 수면 폭에 해당하는 역사다리꼴의 윗변을 계산할 수 있다. SAM 프로그램에서 제시하고 있는 안정하도에 대한 결과 값은 20가지의 해와 최소 수류력을 갖는 1가지 해를 동시에 제시하고 있다. SAM 프로그램에서는 안정하도의 하폭을 USACE(1994)에서 제시하는 평형하상 공식($B=2.0Q^{0.5}$)으로 구한 후 Brownlie

Table 2. Stable channel dimensions calculated using the SAM program

Bottom Width (m)	Depth (m)	Top Width (m)	Energy Slope	Hyd Radius (m)	Velocity (m/s)	Froude Number	Bed Regime
7.92	7.61	42.93	0.000912	4.21	2.53	0.29	Lower
16.15	6.90	47.89	0.000688	4.35	2.21	0.27	Lower
24.08	6.20	52.60	0.000617	4.30	2.05	0.26	Lower
32.00	5.58	57.67	0.000589	4.16	1.95	0.26	Lower
39.93	5.05	63.16	0.000579	3.98	1.87	0.27	Lower
43.70	4.83	65.92	0.000580	3.90	1.84	0.27	Lower
48.16	4.59	69.27	0.000580	3.77	1.81	0.27	Lower
56.08	4.22	75.49	0.000587	3.59	1.76	0.27	Lower
64.01	3.90	81.95	0.000598	3.40	1.71	0.28	Lower
71.93	3.63	88.63	0.000609	3.23	1.67	0.28	Lower
80.16	3.39	95.75	0.000623	3.06	1.64	0.28	Lower
88.09	3.18	102.72	0.000637	2.91	1.61	0.29	Lower
96.01	3.00	109.81	0.000651	2.78	1.58	0.29	Lower
103.94	2.85	117.05	0.000665	2.66	1.55	0.29	Lower
112.17	2.70	124.59	0.000680	2.54	1.53	0.30	Lower
120.09	2.57	131.91	0.000694	2.43	1.5	0.30	Lower
128.02	2.46	139.34	0.000709	2.34	1.48	0.30	Lower
135.94	2.36	146.80	0.000723	2.25	1.46	0.30	Lower
144.17	2.26	154.57	0.000737	2.17	1.45	0.31	Lower
152.10	2.17	162.08	0.000751	2.09	1.43	0.31	Lower
160.02	2.09	169.63	0.000762	2.02	1.41	0.31	Lower

(1981, 1983)의 흐름저항 공식으로 안정하도의 하상경사를 계산하며 계산된 안정하폭과 하상경사 값을 이용하여 최종적으로 안정하도의 수심 값을 예측한다. 하지만 SAM 프로그램은 평형하상 공식(USACE, 1994)으로 구한 안정하폭을 기준으로 $\pm 10\%$ 씩 증감한 19가지의 하폭에 대해서도 하도의 안정성(유입 유사량과 유출 유사량이 같은 상태)을 만족하는 하상경사와 수심을 추가로 계산하고 마지막으로 2차 Lagrangian 내삽 형식을 적용하여 최소 수류력을 만족하는 해를 계산한다(Brunner, 2008). 따라서 궁극적으로 SAM에서 제시하는 안정하도 크기에 대한 해는 총 21가지가 되며 이러한 예측 방법은 하폭, 경사, 수심 중 한 가지 요소에 설계 제한이 있을 경우 나머지 두 가지 요소를 안정성을 만족하는 조건에서 취사선택할 수 있도록 함으로써 자연하천에서 안정하도를 분석하고 설계하는 것을 가능하게 한 것이다.

청미천 구하도 복원 구간에 대해서 계산된 바닥 폭은 Table 2와 같으며 이를 수면 폭으로 환산하였다(Fig. 5). 청미천의 경우는 안정 하폭(바닥 폭)에 대한 결과가 작게는 7.92 m에서 크게는 160.02 m까지 분포하고 있으며 이에 해당되는 만제유량에 대한 수심은 7.61 m에서 2.09 m로 분포하고 있고 경사의 경우 0.000912에서 0.000762 사이에 21가지 해가 분포하고 있다. 프로그램에서 보여주는 실제적인 결과 값들은 SI 단위지만 프로그램 상에는 수심과 하폭의 단위가 ft로 나타나는 오류가 있다. 따라서 계산 결과를 Fig. 5와 6에 다시 표기하였으며 이 때 하폭과 경사 관계 그래프에서 하폭은 환산한 수면 폭을 이용하였다.

Fig. 7에서 보여주고 있는 자료는 2008년도에 측정된 지

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch Elev	W/S Elev	Hyd Depth	E.O. Elev	E.G. Slope	Vel Chl	Flow Area	Top Width	Friction
Reach#1	17.517	Bankfull D	488.00	54.14	57.23	2.13	57.31	0.000491	1.22	400.78	187.90	0.27
Reach#1	17.4	Bankfull D	488.00	53.90	57.20	2.30	57.25	0.000338	1.06	453.17	199.90	0.22
Reach#1	17.2	Bankfull D	488.00	53.38	57.11	1.92	57.17	0.000472	1.11	438.36	227.97	0.26
Reach#1	17	Bankfull D	488.00	53.33	56.95	1.59	57.04	0.000500	1.36	399.24	225.78	0.34
Reach#1	16.8	Bankfull D	488.00	53.63	56.76	1.52	56.86	0.000580	1.38	384.90	232.88	0.36
Reach#1	16.6	Bankfull D	488.00	53.58	56.49	1.65	56.63	0.001288	1.64	297.13	179.99	0.41
Reach#1	16.507	Bankfull D	488.00	53.34	56.44	2.09	56.54	0.000669	1.40	348.65	166.97	0.31
Reach#1	16.4	Bankfull D	488.00	52.91	56.35	2.08	56.46	0.000747	1.48	329.92	198.60	0.33
Reach#1	16.2	Bankfull D	488.00	52.82	56.19	1.79	56.29	0.000988	1.46	333.17	186.31	0.35
Reach#1	16	Bankfull D	488.00	52.60	56.01	1.81	56.12	0.000950	1.43	340.77	188.78	0.34
Reach#1	15.8	Bankfull D	488.00	52.90	55.85	1.57	55.94	0.000873	1.32	370.33	236.08	0.34
Reach#1	15.6	Bankfull D	488.00	52.78	55.66	2.01	55.77	0.000806	1.50	325.74	182.36	0.34
Reach#1	15.523	Bankfull D	488.00	52.46	55.70	2.47	55.73	0.000110	0.64	766.58	310.63	0.13
Reach#1	15.4	Bankfull D	488.00	52.60	55.58	1.85	55.69	0.000331	1.44	336.00	182.22	0.34
Reach#1	15.2	Bankfull D	488.00	52.29	55.48	1.86	55.54	0.000532	1.16	420.89	225.91	0.27
Reach#1	15	Bankfull D	488.00	51.73	55.42	2.28	55.46	0.000278	0.96	510.05	223.99	0.20
Reach#1	14.8	Bankfull D	488.00	51.54	55.33	2.02	55.39	0.000447	1.12	436.76	215.67	0.25
Reach#1	14.6	Bankfull D	488.00	51.75	55.26	2.28	55.31	0.000310	1.01	483.14	211.97	0.21
Reach#1	14.596	Bankfull D	488.00	51.64	55.25	2.22	55.30	0.000324	1.01	491.61	217.29	0.22
Reach#1	14.4	Bankfull D	488.00	51.22	55.18	2.01	55.24	0.000444	1.11	438.52	218.13	0.25
Reach#1	14.2	Bankfull D	488.00	51.58	55.08	2.25	55.15	0.000439	1.19	410.24	182.39	0.25
Reach#1	14	Bankfull D	488.00	51.10	54.86	1.99	55.01	0.001134	1.74	281.14	141.05	0.39
Reach#1	13.952	Bankfull D	488.00	51.12	54.43	2.22	54.90	0.002930	3.01	162.00	72.94	0.85
Reach#1	13.946	Bridge										
Reach#1	13.940	Bankfull D	488.00	51.12	54.31	2.12	54.83	0.003475	3.18	153.38	72.95	0.70

Fig. 7 Hydraulic characteristics of the bankfull discharge condition for Cheongmi Stream

형자료를 이용하여 현재 상태의 청미천 수면곡선을 HEC-RAS 프로그램을 이용하여 계산한 결과이며 특히 15+8면 단면에서 16+8면 단면이 구하도 복원이 수행될 예정 구간이다. 따라서 이 구간의 만제유량 발생시 수면 폭을 살펴보면 대체적으로 158 m에서 236 m인 것으로 나타났으며 현 상태의 하폭은 Copeland 방법에서 제안하고 있는 안정하도 수면 폭에 비해 훨씬 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 구하도 복원이 수행될 경우 기존의 하폭에 새롭게 복원되는 하폭이 더해지기 때문에 안정하도 폭 보다 더 큰 값을 가질 것으로 예측된다. 수심 또한 SAM 프로그램 결과에서는 안정하도의 수심이 2.09 m에서 7.61 m 사이에 분포하고 있으나 현재 하도의 수리 수심은 1.52 m에서 2.09 m 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다. 경사의 경우 안정하도의 경사에 비해 현재 하도의 경사가 약간 큰 것을 알 수 있으나 큰 차이는 발생하지 않았다. 따라서 Copeland 방법으로 예측한 청미천의 안정하도 형태는 현재 하도의 형태 보다 더 좁은 하폭과 깊은 수심 그리고 완만한 경사를 갖는 형태인 것으로 예측되었다. 특히 현재 하도의 하폭이 안정하도의 하폭보다 크게 나타나는 현상은 현재 하도에서 왜 사주들이 발달하고 있는지를 잘 설명해 주고 있다.

4. 경험적 평형하상 공식들을 이용한 하도평가

4.1 하류하천의 수리기하 관계 공식

안정한 충적하천의 설계와 공학적 계산은 단순히 한 가지 방법에 의한 접근이 아닌 이론적인 분석 방법과 경험적인 분석 방법을 통해 접근할 수 있다. 지형학적인 또는 하천의 형태학적인 복잡성을 갖고 있는 자연하천을 설계할 수 있는 완벽한 이론적 방법은 아직까지 존재하지 않으며 경험적인 방법에 의존하기 위해서는 여러 안정하천의 현장 자료를 획득하고 분석할 필요가 있다. 안정하도 설계에 있어서 활용되고 있는 경험적 방법은 하류하천의 수리기하 분석에 기초하고 있다.

충적 하천은 하류로 갈수록 유량이 증가하고 하상 경사가 완만해지며 따라서 하천의 단면 형태가 변화를 통해 안정한 상태에 도달하게 된다. 이러한 하류 하천의 수리기하 변화에 대한 연구는 Leopold and Maddock(1953)에 의해 처음으로

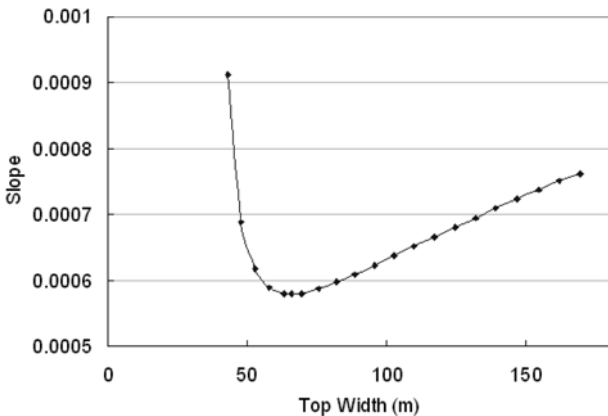


Fig. 5 Stable channel width and slope in SAM

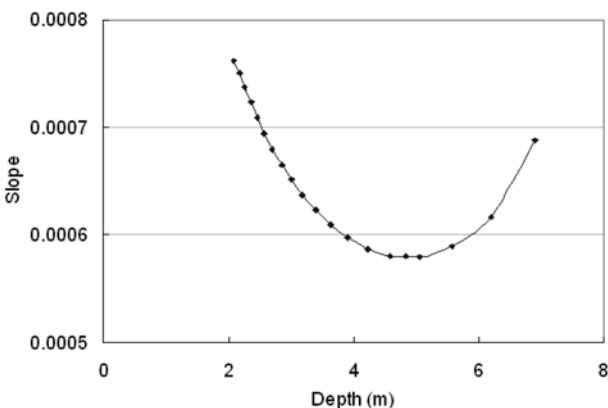


Fig. 6 Stable channel depth and slope in SAM

시도되었으며 하천 거리 대신 하류로 가면서 증가하는 유량을 독립 변수로 하여 수면 폭, 평균 수심, 평균 유속 등의 값을 수집하였다. Leopold and Maddock(1953)은 기준 유량을 연평균 유량인 2.33년 빈도 유량으로 하였으나 보통 하천복원 설계 절차에 있어서 요구되어지는 수리기학 공식들은 만제유량(bankfull discharge)을 기준 유량으로 하여 관계식을 표현하고 있다. 이러한 관계식들은 때로 다른 변수들과 함께 조합하여 표현되기도 한다. 여러 수리기학 공식들이 평형하상 하폭을 결정하는데 활용되고 있으며 이러한 방법들은 하폭, 경사, 유사농도, 유량 등의 하도 특성을 변수로 이용한다.

Julien and Wargadalam(1995)은 경험적 방법들 중 해석적 방법을 통해 총적 하천의 하류 수리 기하 특성을 강턱 하폭, 평균 수심, 평균 유속, 경사 등의 관계식으로 표현한 것이며 흐름 저항, 유사 이송, 흐름의 연속성, 이차류의 개념을 해석적 하류하천의 수리기학 식을 개발하는데 이용하였다.

$$h = 0.2Q^{\frac{2}{(5+6m)}} d_s^{\frac{6m}{(5+6m)}} S^{\frac{-1}{(5+6m)}}$$

$$W = 1.33Q^{\frac{(2+4m)}{(5+6m)}} d_s^{\frac{-4m}{(5+6m)}} S^{\frac{-(1+2m)}{(5+6m)}}$$

$$V = 3.76Q^{\frac{(1+2m)}{(5+6m)}} d_s^{\frac{-2m}{(5+6m)}} S^{\frac{(2+2m)}{(5+6m)}}$$

$$\tau_* = 0.121Q^{\frac{2}{(5+6m)}} d_s^{\frac{-5}{(5+6m)}} S^{\frac{(4+6m)}{(5+6m)}}$$

$$S = 12.4Q^{\frac{-1}{(3m+2)}} d_s^{\frac{5}{(6m+4)}} S^{\frac{(6m+5)}{(6m+4)}} \left(\text{Where, } \tau_* = \frac{\gamma h S}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right)$$

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{12.2h}{d_{50}}\right)}$$

여기서, h는 평균 수심, W(m)는 평균 수면 폭, V(m/s)는 평균 유속을 나타내며 τ_* 는 Shield's parameter, d_{50} (m)은 하상토의 중앙입경이다. Julien and Wargadalam (1995)의 해석 결과는 835개의 현장자료와 45개의 실험실 자료와 비교되었으며 그 결과 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다.

Simons and Albertson(1963)은 평형 하상 폭을 결정하기 위한 공식을 개발하기 위해 인도와 미국의 수로에서 획득한 자료들을 활용하였다. 미국의 Wyoming, Colorado, Nebraska 주의 관개 수로에서 수집된 자료를 이용하였으며 이러한 수로들은 하상과 사면이 점착성 유사와 비점착성 유사로 구성된 수로였다. 인도에서 수집된 수로자료는 Punjab과 Sind에서 수집된 자료이며 하상토의 평균 입경은 Punjab에 있는 수로에서는 0.43 mm 정도였으며 Sind에 위치하고 있는 수로에서는 0.0346 mm에서 0.1642 mm 사이였다. Colorado 주에서는 San Luis Valley에서 USBR(U.S. Bureau of Reclamation) 자료가 수집되었으며 이 하도는 비점착성 유사로 이루어진 하상이었다. 마지막으로 수집된 자료는 Imperial Valley 수로에서 수집되었으며 이 수로는 인도의 수로와 미국의 관개 수로 조건과 비슷하였다. Simons and Albertson (1963)은 수집된 자료를 이용하여 평형 하상 폭을 산정하기 위한 2개의 그래프를 작성하였다. 이 관계 그래프들은 유변

과 유량의 관계 그리고 평균 하폭과 유변의 관계를 나타내고 있다.

Blench(1957)는 실험 수로 자료를 평형 공식을 개발하는데 활용하였으며 하상과 사면 인자(F_s)를 개발하여 하상과 사면을 구성하는 물질의 차이를 공식에 고려하였다. 개발된 식은 다음과 같다.

$$W = \left(\frac{9.6(1+0.012c)}{F_s} \right)^{1/2} d^{1/4} Q^{1/2}$$

여기서, W(ft)는 하폭을 나타내며 c(ppm)는 유사 농도, d(mm)는 중앙입경, Q(cfs)는 유량을 나타낸다. 사면을 구성하는 유사에 점착성이 약간 있을 경우 F_s 값은 0.1을 사용한다.

Lacey(Wargadalam 1993, 재인용)는 기준 유량 값을 이용하여 유변을 결정하는 공식을 다음과 같이 개발하였다.

$$P = 2.667Q^{0.5}$$

여기서, P(ft)는 유변을 Q(cfs)는 유량을 나타낸다. 하폭이 상대적으로 넓고 수심이 얇은 하도의 경우 유변은 대략 하폭과 동일하다.

Klaassen and Vermeer(1988)는 방글라데시의 Jamuna 강의 자료를 활용하여 다지하천(braided river)의 하폭과 유량 관계식을 개발하였다.

$$W = 16.1Q^{0.53}$$

여기서, W(m)는 하폭, Q(cms)는 유량을 나타낸다.

Nouh(1988)는 사우디 아라비아의 남쪽과 남서쪽에 위치한 매우 건조한 지역의 하도 자료를 이용하여 평형 하폭 공식을 개발하였다.

$$W = 2.83 \left(\frac{Q_{50}}{Q} \right)^{0.83} + 0.018(1+d)^{0.93} c^{1.25}$$

여기서 W(m)는 하폭, Q_{50} 은 50년 빈도 최대 유량, Q는 연평균 유량, d(mm)는 중앙입경, c(kg/m³)는 평균 부유사 농도를 나타낸다.

4.2 침미천 구하도 복원 대상 구간에 적용한 결과

침미천의 구하도 복원대상 구간을 기준으로 앞장에서 설명한 평형 공식들을 이용하여 안정하도 즉 평형하도의 하폭을 예측하였다. 앞장에서 설명한 공식들 중 특수한 환경에서 개발된 공식들과 입력자료가 유효하지 않은 공식들을 제외한 Julien and Wargadalam(1995), Simons and Albertson(1963), Lacey(Wargadalam 1993, 재인용), Klaassen and Vermeer (1988) 공식들이 사용되었으며 계산에 사용된 입력자료는 다음과 같다.

강턱 유량(Bankfull Discharge): $Q_b = \text{m}^3/\text{s}$
 15+8번 단면에서 16+8번 단면 경사(Slope): $S=0.00073$
 16+4번 단면 수리 수심(Hydraulic Depth): 2.08 m
 하상토 입도(Bed Material Size): $d_{50} = \text{mm}$

해당되는 하폭을 계산하였으며 평형 공식으로 예측된 평형 하폭 결과와 비교하였다(Fig. 8). 16+4번 단면은 Fig.7에서도 확인할 수 있듯이 복원 구간내의 단면들 중 하폭이 가장

Table 3. Equilibrium widths using downstream hydraulic geometry equations in Cheongmi Stream

	Bankfull Discharge (m ³ /s)	Predicted Width (m)	Description
Julien and Wargadalam (1995)	488	143.9	Using the hydraulic depth of cross-section No.16+4
Simons and Albertson (1963)	488	112.9	Assuming that the wetted perimeter equals to the channel width
Lacey (from Wargadalam 1993)	488	106.7	Assuming that the wetted perimeter equals to the channel width
Klaassen and Vermeer(1988)	488	428.2	Using the data in Bangladesh only
HEC-RAS (Present Condition)	488	158.6	Using the channel width of cross-section No.16+4

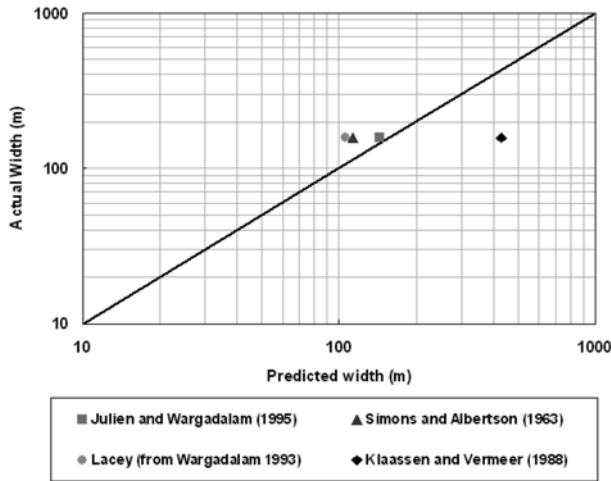


Fig. 8 Comparison of a Actual width with equilibrium equations and measured width in cheongmi Stream (2008)

좁은 단면이다. 그럼에도 불구하고 여러 경험적 공식에 의해 예측된 안정 하폭들 보다 작은 값이다. 즉, SAM 프로그램을 이용하여 예측된 안정하도의 하폭 결과와 마찬가지로 현재 하도의 하폭은 평형 공식에서 예측된 하폭에 비해 큰 것으로 나타났으며 폭이 좁은 하도가 청미천의 경우에는 보다 수리적으로 효과적이며 지형학적으로 안정한 하도가 될 수 있을 것이다.

또한 Julien and Wargadalam(1995) 방법을 이용하여 청미천 대상 구간의 평형 경사를 예측하였으며 그 결과를 SAM 프로그램을 이용하여 예측한 해 중 최소 수류력을 갖는 하도 경사, 실제 현재하도의 경사와 비교하였다. 그 결과, Table 4에서 알 수 있듯이 SAM 프로그램에서 예측한 최소 수류력을 갖는 하도 경사와 Julien and Wargadalam(1995) 방법으로 예측한 평형 경사는 현재 하도 경사 보다 작게 산정된 것으로 나타났다. 즉, 현재하도의 경사가 안정하도 경사에 비해 큰 것으로 나타났다. 따라서 청미천의 경우는 하도의 제방 한계로 인해 하천 경사를 완만하게 만들기 위한 자연적인 사행천으로의 변화가 제한되기 때문에 새롭게 복

원되는 구하도 설계시 낙차공 등과 같은 경사 조절 구조물을 설치함으로써 이를 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Copeland(1994)의 해석적 안정하도 분석 방법을 기본 모델로 채택하고 있는 미공병단에서 개발한 SAM(Stable Channel Analysis Model) 프로그램과 Julien and Wargadalam(1995), Simons and Albertson(1963), Lacey (Wargadalam 1993, 재인용), Klaassen and Vermeer(1988)의 경험적 평형하상 공식을 이용하여 청미천 구하도 복원대상 구간에 대한 안정하도 예측 및 현재하도 평가를 실시하였다.

Copeland 방법을 적용한 결과, 현 상태의 하폭은 SAM 프로그램에서 제안하고 있는 안정하도 수면 폭에 비해 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 구하도 복원이 수행될 경우 기존의 하폭에 새롭게 복원되는 하폭이 더해지기 때문에 안정하도 폭 보다 훨씬 큰 값을 가질 것으로 예측된다. 수심 또한 SAM 프로그램 결과에서는 안정하도 수심이 현재 하도 수심보다 큰 값을 나타냈으며 경사의 경우 안정하도의 경사에 비해 현재 하도의 경사가 크게 나타났다. 따라서 Copeland 방법으로 예측한 청미천의 안정하도 형태는 현재 하도의 형태보다 폭이 좁고 수심이 깊은 그리고 완만한 경사를 갖는 형태인 것으로 예측되었다. 특히 현재 하도의 하폭이 안정하도의 하폭보다 크게 나타나는 현상은 현재 하도에서 왜 사주들이 발달하고 있는지를 잘 설명하고 있다.

또한 본 연구에서는 해석적 방법뿐만 아니라 여러 경험적인 평형 공식을 이용하여 평형하도의 하폭을 예측하였으며 그 결과, 현재 하도 하폭은 평형 공식에서 예측된 하폭에 비해 큰 것으로 나타났다. 즉, 폭이 좁은 하도가 청미천의 경우에는 보다 수리적으로 효과적이며 지형학적으로 안정한 하도가 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Julien and Wargadalam(1995) 방법으로 평형 경사를 예측한 결과, 현재 하도의 경사가 평형 경사보다 큰 것으로 나타났다. 따라서

Table 4. Equilibrium slope using the SAM model and Julien and Wargadalam(1995) equation for Cheongmi Stream

	Bankfull Discharge (m ³ /s)	Predicted Slope or Present Slope	Description
SAM 프로그램 결과	488	0.00058	Result with minimum stream power condition based on the cross section of No.16+4
Julien and Wargadalam (1995)	488	0.00040	Using the hydraulic depth and energy slope of cross-section No.16+4
Present Field Condition	488	0.00073	Hec-Ras Data

칭미천의 경우는 하도의 제방 한계로 인해 하천의 평면적 변화가 불가능하기 때문에 새롭게 복원될 구하도 구간의 설계시 낙차공 등과 같은 경사 조절 구조물을 설치함으로써 평형하상에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

- 국토해양부(2009) **홍수터 보전/복원 기술**. 연구보고서, 한국건설기술연구원.
- 지운, 강준구, 여운광, 한승원(2009) 칭미천 구하도 복원 설계를 위한 하도형성유량 산정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 42, No. 12, pp. 1113-1124.
- Abou-Seida, M.M. and Saleh, M. (1987) Design of stable alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research.*, Vol. 25, No. 4, pp. 433-446.
- Blench, T. (1957) Regime behavior of canals and rivers. *Butterworths Scientific Publications*, London.
- Brownlie, W.R. (1981) *Prediction of flow depth and sediment transport in open channels*. California Institute of Technology, Pasadena, California. Report No. KH-R-43A, November, pp. 230.
- Brownlie, W.R. (1983) Flow depth in sand-bed channels. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers.*, Vol. 109, No. 7, pp. 959-990.
- Brunner, G.W. (2008) *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, California.
- Chadwick, A. and Morfett, J. (1993) *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*. Second Edition. E and FN Spon, an imprint of Chapman and Hall, London, pp. 557.
- Chang, H.H. (1980) Stable alluvial canal design. journal of the hydraulics division, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers.*, 106(HY5), pp. 873-891.
- Chang, H.H. (1988) *Fluvial Processes in River Engineering*. Wiley-Interscience, New York, pp. 429.
- Chow, V.T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Copeland, R.R. (1994) *Application of channel stability methods - Case studies*. Technical Report HL-94-11, September. United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Ferguson, R.I. (1986) *Hydraulics and hydraulic geometry*. Progress in Physical Geography, Vol. 10, pp. 1-31.
- Graf, W.H. (1971) *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw Hill, New York, pp. 513.
- Henderson, F.M. (1963) Stability of alluvial channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 128, Paper 3440, pp. 657-686.
- Henderson, F.M. (1966) *Open Channel Flow*. Macmillan, New York, pp. 522.
- Hey, R.D. (1988) Mathematical models of channel morphology. In: Anderson, M.G. (Ed.), *Modelling Geomorphological Systems*. Wiley, Chichester, pp. 99-126.
- Hey, R.D. (1997) Stable river morphology. In: Thorne, C.R., Hey, R.D. and Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Wiley, Chichester, pp. 223-236.
- Julien, P.Y. and Wargadalam, J. (1995) Alluvial channel geometry: theory and applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 4, pp. 312-325.
- Klaassen, G.J., and Vermeer, K. (1988) Channel characteristics of the braiding jamuna river. bangladesh. *International Conference on River Regime*, 18-20 May 1988, W. R. White, ed., Hydraulic Research Ltd., Willingford, UK, pp. 173-189.
- Lane, E.W. (1955) Design of stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 120, pp. 1234-1279.
- Langbein, W.B. (1964) Geometry of river channels. Journal of the Hydraulics Division, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 90(HY2), pp. 301-312.
- Leopold, L.B. and Maddock, T. (1953) *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. USGS Professional Paper 252, USGS, Washington, D.C.
- Neill, C.R. (1982) *Hydraulic design of stable flood control channels: I - Selective overview of state of art*. Northwest Hydraulics Consultants Ltd., Report prepared for United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Nouh, M. (1988) *Regime Channels of an Extremely Arid Zone*. International Conference of River Regime, 18-20 May 1988, W.R. White, ed., Hydraulic Research Ltd., Willingford, UK, pp. 55-66.
- Raudkivi, A.J. (1990) *Loose Boundary Hydraulics*. Third Edition. Pergamon, Oxford, pp. 400.
- Richards, K.S. (1982) Rivers: Form and Process in Alluvial Channels. Methuen, London, pp. 361.
- Scott, S.H (2006) *Application of the SAM Computer Program for Truckee River Stable Channel Analysis*. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Laboratory, ERDC/CHL CHETN -VII-7.
- Shen, H.W. (1971) Stability of alluvial channels. In: Shen, H.W. (Ed.), *River Mechanics*. Volume 2, Fort Collins, Colorado, Chapter 16.
- Simons, D.B. and Albertson, M.L. (1963) Uniform water conveyance channels in alluvial material. *Transactions of the American Society of Civil Engineers.*, Vol. 128, pp. 65-107.
- Simons, D.B. and Senturk, F. (1977) Sediment transport technology. *Water Resources Publication*, Littleton, Colorado, pp. 897.
- Soar, P.J. and Thorne, C.R. (2001) *Channel Restoration Design for Meandering Rivers*. ERDC/CHL CR-01-1, U.S. Army Corps of Engineers. Coastal and Hydraulics Laboratory.
- USACE (1994) *Engineering and Design: Channel stability assessment for flood control channels*. Engineering Manual 1110-2-1418, CECW-EHD, United States Department of the Army, Washington, D.C.
- Vanoni, V.A. (Ed.), (1975) *Sedimentation Engineering*. Manual 54, *American Society of Civil Engineers.*, New York, pp. 745.
- Wargadalam, J. (1993) *Hydraulic Geometry of Alluvial Channels*. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- White, W.R., Bettess, R. and Paris, E. (1982) Analytical approach to river regime. *Journal of the Hydraulics Division.*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 108(HY10), pp. 1179-1193.

(접수일: 2010.3.10/심사일: 2010.4.9/심사완료일: 2010.4.19)