

Copeland의 해석적 방법을 이용한 청미천의 안정하도 설계 분석

Stable Channel Design Analysis of Cheongmi Stream Using the Copeland Analytical Method

지 운¹⁾, Julien, Pierre Y²⁾, 여흥구³⁾, 강준구⁴⁾, 김권한⁵⁾
Ji, Un-Julien, Pierre Y-Yeo, Hongkoo-Kang, Joongu-Kim, Kwun Han

요 지

지금까지의 하천 설계는 하천의 유량, 유사량, 하상토 입도분포, 강턱의 입자 또는 하도 표면의 특성, 하곡의 경사 등을 고려하여 안정한 횡단면을 결정하기 위한 목적으로 발전되어 왔다. 하지만, 하천 복원에 있어서 이동 하상의 안정 하도 및 하천을 설계하는 작업은 수리학적, 하천 형태학적, 그리고 유사 수리학적 측면에서 매우 복잡한 문제들을 포함하고 있으며 더 나아가 다양한 생태서식처 및 환경을 제공할 수 있는 측면까지도 고려하도록 요구되어 지고 있다. 자연하천 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 계산하는 방법들이 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔고 여러 해석적 방법들 중 Copeland의 방법은 실제로 충적하천에서의 안정 하도 평가 및 설계에 가장 많이 이용되고 있으며 미공병단에 의해 개발된 SAM(Stable Channel Analysis Model) 모형에서 채택하고 있는 해석적 방법 중 하나이다.

본 연구에서는 Copeland의 해석적 안정하도 분석 방법을 기본 모듈로 채택하고 있는 미공병단에서 개발한 SAM(Stable Channel Analysis Model)의 기본적인 특성과 활용도에 대해서 알아보고 이를 남한강 제1지류인 청미천의 구하도 복원 예정 구간에 적용시켜 현재하도의 안정성을 평가하였다. 분석 결과, 안정하도 경사는 현재 하도 경사보다 완만한 것으로 나타났으나 SAM에서 예측하고 있는 청미천의 안정 하폭은 현재 하도의 하폭보다 훨씬 작은 것으로 나타났다. 이는 현재 청미천의 복원 구간에서 사주가 많이 발생하는 이유를 뒷받침 하는 결과라고 할 수 있다. 안정수심은 현재 하도의 수심보다 깊은 것으로 계산되었다. SAM을 이용한 계산 결과들은 현재하도의 안정성 평가뿐만 아니라 복원 구간의 안정하도 설계를 위한 기초자료로 활용될 것이다.

핵심용어 : 하천복원, 안정하도 설계, Copeland 방법, SAM 모형, 청미천

1. 서 론

안정하천 또는 평형하천이란 하천의 침식과 퇴적이 동적으로 평형을 이루는 하천을 말한다. 안정하천에서도 침식과 퇴적의 변화는 지속적으로 존재하며 하폭, 수심, 하천 경사 등이 흐름에

1) 정회원.명지대학교 토목환경공학과연구교수.공학박사.E-mail: jiuncivil@gmail.com
2) Colorado State University 토목환경공학과.교수.공학박사.E-mail: pierre@engr.colostate.edu
3) 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부.책임연구원.공학박사.E-mail: yeo917@kict.re.kr
4) 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부.선임연구원.공학박사.E-mail: jgkang02@kict.re.kr
5) 정회원.명지대학교 토목환경공학과.석사과정.E-mail: hyh@lycos.co.kr

따라 일시적으로 변하지만 장기적으로는 균형을 이루게 된다. 현재의 하천 및 하도의 안정성을 평가하는 사업이나 홍수 조절 하천의 정비 및 하천 복원 사업에서는 평형 하천의 개념을 반드시 고려해야 한다. 특히, 하천의 복원 사업과 같은 하천에 인위적인 변화를 주는 경우 그에 대한 하천 반응을 통해 궁극적으로는 새로운 평형 상태에 도달할 수 있는 하상 경사를 예측하는 것이 매우 중요하다(우효섭, 2001). 본 연구의 대상 하천인 청미천의 경우 현재 구하도 복원이 계획되고 있는 지점으로 새롭게 복원되는 구하도 구간의 단면형태 및 선형을 결정하기 위해 현재 하도에 대한 안정하도 평가가 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 Copeland의 해석적인 평형하천 분석 방식을 기본 모듈로 채택하여 미공병단에 의해 개발된 SAM(Stable channel Analytical Model) 모형의 기본적인 특성과 활용도에 대해서 좀 더 알아보고 구하도 복원 설계가 실시될 청미천의 수리 및 유사 자료를 SAM에 적용시켜 직접 평형 하도를 계산 및 분석해 보고자 한다.

비슷한 환경을 갖는 하천의 적용 사례 또는 과거의 하천 변형 및 이동에 관한 이력들을 통한 현재 하천 또는 복원 대상 하천의 안정하도 설계 및 분석 결과는 한가지의 절대적인 방법에 의존하기 보다는 여러 해석적인 방법들을 이용하여 어느 정도는 예측되는 불안정한 하도 형태에 적절하게 적용하여야 할 것이다(USACE, 1994).

2. 대상구역 및 입력자료

청미천은 남한강의 제 1지류로 유역 폭은 동서로 약 39 km이며 남북으로 31 km로 뻗어 있다. 청미천 유역 면적은 595.7 km²이며 하도 길이는 25.2 km이다. 청미천의 구하도 복원을 위한 프로젝트 지점은 그림 1과 같으며 단면 15+4번 지점에서 17+0번 지점까지가 이에 해당된다.

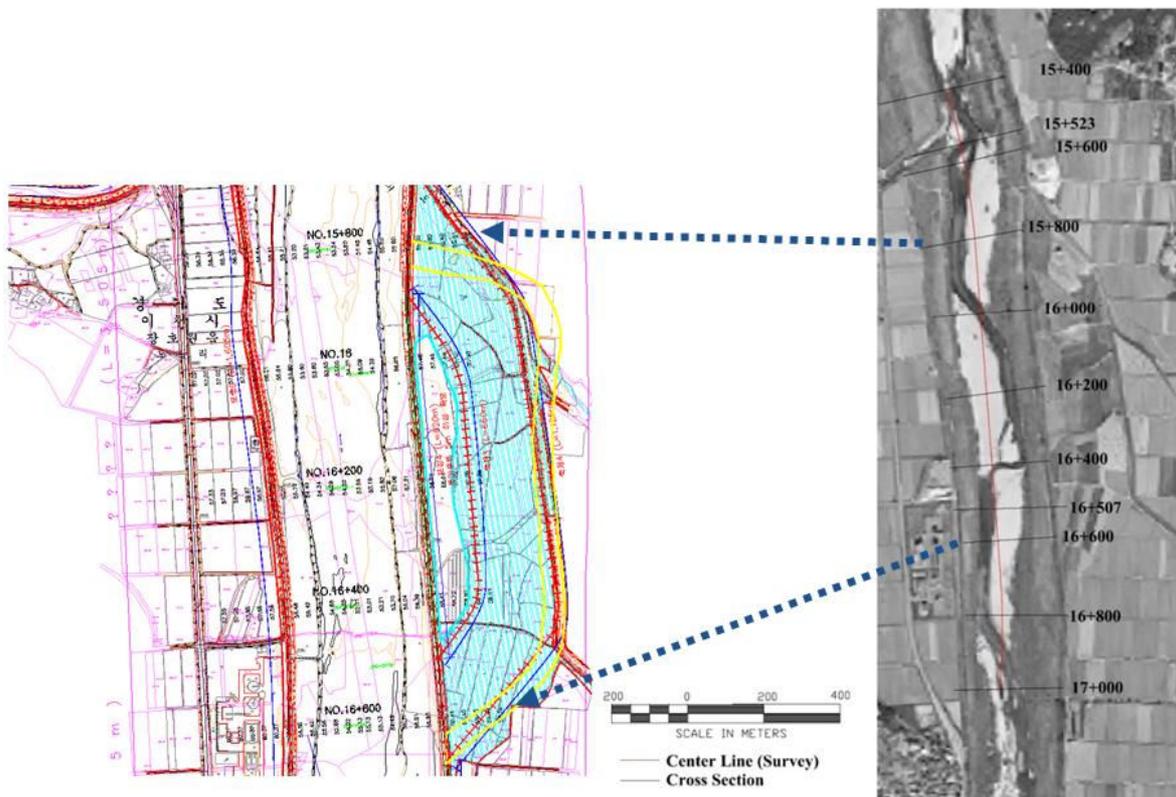


그림 1. 청미천의 구하도 복원 지점

연구 대상 지점에서의 유량 자료는 13+946번 단면에 위치하고 있는 원부교의 T/M 자료를 활용하였으며 이 자료는 한강홍수통제소의 인터넷 웹에서 제공하고 있다. 원부교에서 측정한 1998년 자료부터 2007년 일 유량 자료는 본 연구의 특정재현빈도 유량을 산정하는데 활용되었다. 또한 대상 지점의 조도계수 산정은 Chow(1959)의 방법을 참고하였으며 자연하천에서의 Manning 조도계수 값 범위인 0.025에서 0.06 사이 값 중 현장 조사를 통해 0.03으로 결정하였다. 하상토 입도분포 자료는 한국건설기술연구원(2008)에서 2005년에 청미천의 전 단면을 따라 조사되었으며 수집된 하상토 샘플들은 실험실에서 분석되었다. 대상 지점에서의 하상토는 주로 모래에 해당되며 16번 단면에서의 중앙 입경은 1.1mm인 것으로 나타났다.

3. SAM의 구성과 특징

홍수 조절 능력 향상을 위한 하천 정비 사업 및 하천 복원 사업의 기획 및 예비 설계 단계에서 가장 많이 활용되는 SAM 모형(SAM Hydraulic Design Package for Channels)은 미공병단에 의해 개발되었으며 현재 Hec-Ras 3.0 프로그램에 Stable channel Design Functions로 탑재되어 있다. SAM 모형은 홍수 피해 저감 및 하천 복원 연구 사업을 통해 기술자 및 설계자들에 의해 개발되어진 프로그램들을 종합한 하나의 시스템으로써 주로 사용이 간편하고 정량적이며 또한 비용이 많이 드는 예비 조사 및 연구가 시행되지 못했을 경우, SAM 모형을 통해 얻어진 여러 대안들을 활용하여 예비 검증할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있다.

과거에는 안정하도의 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 모형은 안정 하도 설계에서 다짐 과정을 제외한 모든 단계의 유사 이송 과정을 포함하고 있다. SAM 모형은 SAM Hydraulics, SAM Sediment Transport, SAM Sediment Yield, 그리고 SAM Stable Channel Design의 4개의 모듈로 이루어져 있으며 각각의 모듈에 대한 설명은 다음과 같다(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 다른 방법들이 있으며 흐름 저항식의 선택이 가능하다. 입력 자료로는 유량, 경사, 횡단면 좌표, 하도, 강터, 홍수터의 조도계수 등이 필요하다.

SAM Sediment Transport 모듈은 SAM Hydraulics에서 계산된 수리적 매개변수들과 하상토 입도 분포 곡선을 기초로 하여 각각의 유사 크기 클래스 별로 유량-유사량 곡선을 계산한다. 20개의 유사 이송 공식이 유효하며 모래 하상과 자갈 하상 모두에 대해서 적용이 가능하다. 시간과 공간에 따른 유사 입도크기 분포의 변화는 고려되지 않기 때문에 유사 이송 공식 선택은 매우 신중하게 이루어져야 한다. 자연 하천에서의 입도 분포는 시간 및 공간 등의 여러 요소에 따라 변화하지만 SAM 모형에서는 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 모형은 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 유량수문 곡선과 유량-유사량 곡선을 종합한다. 이 모듈의 계산 결과는 횡단면 전체를 통한 총 유사 유출량

을 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 솔루션이 아닌 여러 개의 솔루션 집단에서 최적안을 선택할 수 있도록 되어 있다.

4. 청미천의 하도 평가 및 안정하도 설계

Copeland의 해석적 방법은 미공병단에 의해 개발되었고 실제로 충적하천에서의 안정 하도 평가 및 설계에 많이 이용되고 있으며 SAM 모형이 채택하고 있는 해석적 방법이다. 이 방법은 Abou-Seida와 Saleh 방법과 유사하며 3개의 미지수 중 2개를 먼저 계산하고 설계자가 제 3의 미지수를 여러 개의 솔루션들 중에서 설계 조건 및 지형학적 구속 조건들에 가장 적합한 하나의 솔루션을 채택하도록 되어 있다. 일반적인 가설과는 다르게 SAM 모형은 한 개의 솔루션이 아닌 여러 개의 솔루션을 최종적으로 제시해 주며 또한, 최소 수류력을 갖는 솔루션도 같이 제시한다. SAM은 유사 공식과 흐름 저항식으로 Brownlie(1981) 공식을 이용하고 있으며 이 공식의 특징은 하상 형상의 변화로 인한 조도의 변화를 고려하고 있다는 점이다.

청미천의 구하도 복원이 계획되고 있는 지점의 수리, 단면 지형, 유사 자료등을 SAM 모형에 적용시켜 평형 하천에 도달하는 안정 하도 조건들을 예측해 보았다. 먼저, 안정하도 설계 및 평가를 위한 SAM 모형의 입력 자료로는 16+4번 단면을 기준으로 했을 경우의 강터유량 488 m/s, D_{84} 2.2 mm, D_{50} 1.1 mm, D_{16} 0.63 mm, 상류하천 경사 0.000669, 계곡경사(valley slope) 0.00088이며 강터유량에 대응되는 강터 수위는 56.4 EL.m이다. Manning 공식에 의해 계산된 조도계수 값은 0.03이었으며 SAM 모형에 필요한 강도의 조도 또한 0.03으로 가정하였다.

SAM 모형의 솔루션은 그림 2와 같이 도시되어지며 안정하도의 하상 경사와 하폭 관계 곡선 위의 모든 점은 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.

SAM 모형을 이용하여 안정하도 조건의 20가지 솔루션과 최소수류력을 갖는 솔루션 1가지 경우를 요약하면 표 1과 같다. 최소수류력을 갖는 조건에서의 바닥 하폭은 43.7 m에 해당되며 이는 실제 하천의 현재 하폭보다 훨씬 작은 조건이다. 또한 수심의 경우 SAM에 의한 예측 값은 4.83m로서 현재 하천의 수심보다 깊은 것으로 나타났다. 마지막으로 경사의 경우 SAM에서 예측한 안정하도 경사는 0.00058이었으며 현재하도의 경사와 거의 비슷하나 약간 완만한 것으로 나타났다. 이처럼 SAM을 이용한 안정하도 조건에 대한 분석 결과들은 왜 현재하도가 현장에서 많은 사주를 형성하며 변화하고 있는지를 설명하고 있다.

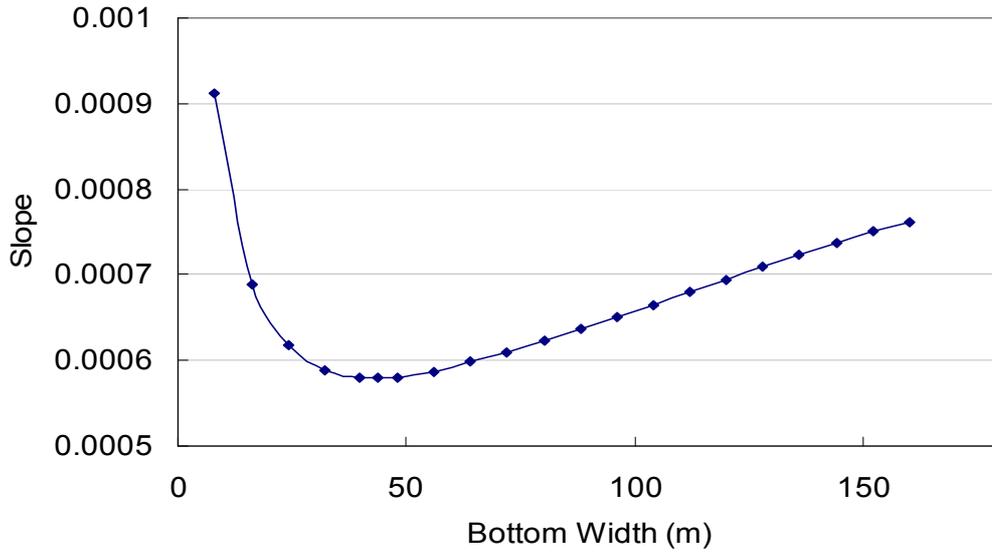


그림 2. 경사-하폭 관계 곡선

표 1. SAM을 이용한 청미천(No. 16+4)의 안정하도 계산 결과

Bottom Width	Depth	Energy Slope	Composite n-value	Hyd. Radius	Velocity	Froude Number	Shear Stress	Bed Regime
7.92	7.61	0.000912	0.0313	4.21	2.53	0.29	67.97	Lower*
16.15	6.9	0.000688	0.0317	4.35	2.21	0.27	46.57	Lower*
24.08	6.2	0.000617	0.0319	4.3	2.05	0.26	37.48	Lower
32	5.58	0.000589	0.0321	4.16	1.95	0.26	32.16	Lower
39.93	5.05	0.000579	0.0321	3.98	1.87	0.27	28.65	Lower
43.7	4.83	0.00058	0.03235	3.9	1.84	0.27	27.46	Lower
48.16	4.59	0.00058	0.03222	3.77	1.81	0.27	26.06	Lower
56.08	4.22	0.000587	0.0324	3.59	1.76	0.27	24.26	Lower
64.01	3.9	0.000598	0.0322	3.4	1.71	0.28	22.84	Lower
71.93	3.63	0.000609	0.0322	3.23	1.67	0.28	21.67	Lower
80.16	3.39	0.000623	0.0321	3.06	1.64	0.28	20.66	Lower
88.09	3.18	0.000637	0.032	2.91	1.61	0.29	19.85	Lower
96.01	3	0.000651	0.0319	2.78	1.58	0.29	19.15	Lower
103.94	2.85	0.000665	0.0318	2.66	1.55	0.29	18.54	Lower
112.17	2.7	0.00068	0.0317	2.54	1.53	0.3	17.98	Lower
120.09	2.57	0.000694	0.0316	2.43	1.5	0.3	17.5	Lower
128.02	2.46	0.000709	0.0316	2.34	1.48	0.3	17.07	Lower
135.94	2.36	0.000723	0.0315	2.25	1.46	0.3	16.69	Lower
144.17	2.26	0.000737	0.0314	2.17	1.45	0.31	16.31	Lower
152.1	2.17	0.000751	0.0314	2.09	1.43	0.31	15.98	Lower
160.02	2.09	0.000762	0.0310	2.02	1.41	0.31	15.61	Lower

5. 결 론

본 연구에서는 SAM 모형을 이용하여 침미천 구하도 복원 구간의 안정하도 예측 및 현재하도 평가를 실시하였으며 그 결론은 다음과 같다.

SAM의 예측에 의한 안정하도 조건들 중 안정하도 경사 및 하폭 조건의 경우는 현재 하도의 특성보다 더 작은 값을 갖는 것으로 나타났으며 안정하도 수심의 경우 현재 하도의 수심보다 더 깊은 것으로 나타났다. 이는 현재 하도에 사주가 발달되고 있는 특성을 증명하는 결과이기도 하다.

분석된 결과에 따르면 구하도 복원 설계는 하상 변화 및 강둑 침식등과 같은 지형 변화가 최소가 되는 방향으로 진행되어야 하며 복원되는 구하도에는 강터우량 이상의 홍수가 발생하였을 경우 분류로부터의 유량 공급을 차단할 필요가 있다. 또한 유사 이송의 영향이 최소인 갈수기 또는 평수기 기간 동안에만 하도에 유량 소통을 허가함으로써 유사이송에 따른 하상변화가 최소가 될 수 있도록 해야 하며 즉 습지 형태의 얇고 폭이 넓은 하도로 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

현재의 하천 및 하도의 안정성을 평가하거나 하천의 홍수 조절 능력을 향상시키기 위한 하천 정비 사업 그리고 환경적, 수리학적 개선을 위해 하도를 복원하는 하천 복원 사업에서는 평형 하천 또는 안정 하도 분석을 반드시 수행하여야 한다. 하천에 인위적인 변화를 주는 경우 또는 불안정한 상태의 하천을 평형 하천 상태로 복원시키는 사업에는 변화로 인한 하천 반응을 통해 최종적으로 평형 하천에 도달하는지에 대한 평가가 반드시 필요하다. 현재 가장 많이 활용되고 있는 SAM 모형은 기술자 및 설계자들에 의해 개발되어진 프로그램들을 종합한 하나의 시스템으로써 주로 사용이 간편하고 정량적이며 또한 안정하도에 대한 여러 대안들을 동시에 제공함으로써 예비 설계 및 기획 단계에서 설계자들에게 보다 넓은 선택의 폭을 제공할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 우효섭(2001). 하천수리학, 대한민국. 청문각.
2. 한국건설기술연구원(2008). "<http://www.kict.re.kr>", 한국건설기술연구원.
3. Brownlie, W. R. (1981). "Prediction of Flow Depth and Sediment Discharge in Open Channels." California Institute of Technology, Pasadena,CA.
4. Chow, V. T.(1959). Open Channel Hydraulics, Mcgraw-Hill Companie
5. 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.
6. U.S. Army Corps of Engineers, 1994. Channel Stability Assessment for Flood Control Projects. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics laboratory, EM 1110-2-1418.