

## 平衡河床 概念과 公式의 河川實務에의 適用性的의 再考察

### A Re-examination of the Applicability of the Concept and Formulas of Equilibrium Riverbed Slope to River Engineering Practice

禹孝燮\* · 柳權圭\*\*

Woo, Hyo Seop · Yu, Kwon Kyu

#### Abstract

A careful re-examination has been conducted on the applicability of the concept of equilibrium riverbed slope to river engineering practice and on the validity of Aki's and Mononobe's formulas that are widely used in Korea for determination of equilibrium riverbed slope. A stream in equilibrium is one in which, over a period of years, slope is naturally adjusted to provide, with available water discharge and with prevailing channel characteristics, just the velocity required for transportation of the sediment load supplied from the upstream. The equilibrium riverbed slope is the bed slope of such river. The present river engineering practice to analyze the riverbed characteristics by applying so called 'the equilibrium riverbed slope formula' to such rivers, therefore, should be avoided. Also, the validities of Aki's and Mononobe's formulas, that are presently used for determination of stable channel slope, are very dubious and should not be used in river engineering practice.

#### 要 旨

平衡河床 개념의 하천 실무에의 적용성 및 우리나라에서 평형하상경사를 추정하기 위해 널리 사용되어온 '安藝공식' 및 '物部공식'의 타당성에 대해 재고찰한다. 평형하천이란 장기간에 걸쳐 하천의 지배적인 水理 특성하에서 상류에서 공급되는 유사의 이송에 꼭 필요한 만큼의 유속이 생기도록 자연적으로 하상경사가 조정되어 실질적인 하상의 퇴적이나 침식이 없는 하천을 말하며, 평형하상이란 바로 그러한 하천의 하상상태를 지칭한다. 자연 상태에 있는 하천에 소위 '平衡河床公式'을 적용하여 그 하천의 하상상태를 분석하는 현재의 하천 실무는 지양되어야 할 것이다. 또한, 하천에서 안정하상 경사를 결정하기 위한 '安藝공식'이나 '物部공식'같은 소위 '평형하상공식'들은 그 타당성이 의심스러우며, 따라서 이러한 공식들의 하천 실무에의 적용은 지양되어야 할 것이다.

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실, 연구원

## 1. 서 론

하상이 자갈, 모래, 진흙 등으로 이루어진 하천은流水에 의해 그 형태가 끊임없이 변하며, 하천 흐름 또한 하천 형태에 따라 변하게 된다. 따라서, 하천 형태와 흐름과의 관계는 곧잘 조각가와 조각품과의 관계로 비유되며, 流水는 하천을 변화시키는 조각가인 동시에 하천에 의해 그 흐름이 변화되는 조각품이 된다. 이러한 하천 형태와 流水와의 상호작용의 매개체는 流水에 의해 이송되는 流砂로서, 流砂移送에 의해 하천의 河床과 평면 형태는 끊임없이 변화된다. 河川 流砂의 공학적 중요성은 100년 이내의 시간대에 걸쳐 일어나는 하상 및 하천형태 변화와 그에 따른 하천흐름의 변화에 있다. 그중 특히 인위적인 하천 변화에 의한 하천의 장·단기 대응을 조사·예측하는 것은 하천에서의 수자원개발 계획이나 하천관리에 필수적인 선행요소로 등장한다.

본 연구에서는 이러한 하천관리의 기본 요소중 하나로서 河床 변화의 조사·분석을 위해 현재 우리나라의 하천실무에 통용되는 평형하상의 개념 및 관련된 공식의 문제점 등을 再考察한다. 즉, 현재 하천계획이나 하천조사에서 자주 수행되는 하천의 평형상태의 검토방법의 타당성에 대해 분석하며, 특히 하천실무에서 널리 사용되는 평형하상경사의 추정공식인 安藝皎一(Aki Koichi)공식과 物部(Mononobe)공식의 문제점 및 한계 등을 심층적으로 분석한다. 마지막으로, 평형하상 개념의 하천실무에의 적용에 대해 바람직한 방향을 제시한다.

## 2. 평형하천 및 평형하상

평형하천(stream in equilibrium)이란 한 하천구간의 상류에서 유입되는 유수량과 하류로 유출되는 유수량이 같아 그 하천구간에서 퇴적이나 침식이 어느 한 방향으로 계속되지 않고 하상의 상승(aggradation)이나 저하(degradation)가 일어나지 않으며, 따라서 실질적인 하상 변화가 없는 안정된 하천을 말한다. 여기서, 실질적인 하상 변화가 없다는 것은 대홍수 등에 의해 일시적으로 하천에 국부적으로 流砂의 과잉 퇴적이나 침식은 가능하지만 상당기간

동안에 평균적으로 하상 변화가 없다는 것을 의미한다. 평형하상이란 이런 하천에서의 하상 상태를 말하며, 평형하상경사는 이러한 평형하상의 흐름 방향의 경사를, 평형 하상고는 평형하상의 표고를 의미한다. 외국 문헌에서는 이러한 하천을 'graded stream'(평탄하천), 'poised stream'(균형하천), 'balanced stream'(균형하천), 'stream in regime'(안정하천) 등 여러 명칭으로 불리우며, 특히 Mackin<sup>(1)</sup>은 'graded stream'을 다음과 같이 정의하였다.

「'graded stream'이란 몇년에 걸쳐 가용한 유량 및 지배적인 하천 특성하에 그 하천 유역에서 공급되는 유사의 이송에 꼭 필요한 만큼의 유속이 생길 수 있도록 하상 경사가 자연적으로 정교하게 조정된 하천을 말한다.」

한편 여러 문헌에 의하면,<sup>(2,3)</sup> 자연 하천은 下方浸蝕이 계속되는 幼年期 하천, 하방 침식이 끝나고 側方浸蝕 및 堆積이 시작되는 壯年期 하천, 본류 및 지류가 모두 완전히 'graded'된 즉 경사가 충분히 완만해진 老年期 하천 등으로 구분되며, 장년기와 노년기 하천은 대부분 평형 상태를 이룬다고 하였다.

우리나라의 경우, 하천의 평형 상태를 다시 하상 재료의 이송이 전혀 없는 靜的 平衡과 하상 재료의 이송은 있지만 평형 상태에 있는 動的 平衡으로 구분하며,<sup>(4)</sup> 이러한 구분은 일본에서 보편화되어 있다.<sup>(5)</sup> 그러나, 엄밀하게 논하면 정적 평형 상태는 특별한 의미가 없으며 하상 재료의 이송이 없는 하천은 '평형' 이전의 고정상 하천이다. 따라서, 하천에서의 '평형'은 당연히 동적 평형을 지칭한다.

그러면, '어떤 하천이 평형 하천인가'라는 의문이 제기된다. 이에 대해서 원래 평형 하천의 의미가 자연 상태에서 오랜 세월에 걸쳐 하천의 下方浸蝕과 堆積이 균형 상태에 도달하여 실질적인 하상 변화(특히, 종단 변화)가 없는 하천이므로, 산지를 흐르는 하방 침식이 왕성한 유년기 하천이나 頭部浸蝕(headcutting)이 계속되는 하천을 제외한 대부분의 자연 하천들은 평형하천이라 할 수 있다.<sup>(3)</sup> 여기서 자연 하천이라 함은 하천의 流況, 유수량, 하상경사, 하천형태, 하상재료 등에 인위적인 변화가 없는 하천을 말한다.

### 3. 평형하상의 개념의 하천실무에의 적용성

인위적인 변화가 하천에 주어졌을 때 그 하천의 대응이 어떻게 될 것인가는 하천 실무에서 상당한 중요성을 가진다. 예를 들어, 자연하천에서 수자원 개발을 하는 경우 하천의 자연적 평형상태는 최소한 일시적으로 깨어지게 되며 그 영향은 수자원 개발의 영향이나 범위 및 하천의 자연적 대응 상태에 따라 장·단기적으로 계속된다. 이러한 인위적인 하천변화는 유량, 유속, 난류특성, 수심, 하폭, 하상경사, 유사량, 하상재료 등 수리 및 流砂 특성과 하천의 평면형태 등 하천특성을 변화시키며, 이러한 변화는 그 하천이 다시 새로운 평형상태를 유지할 때까지 계속된다. 이러한 인위적 변화에 대한 하천의 대응관계는 다음과 같은 Lane<sup>(6)</sup>의 식을 이용하여 정성적으로 예측될 수 있다.

$$Q S \propto Q_s D_{50} \quad (1)$$

윗 식에서 Q는 하천 유량, S는 하상경사, Q<sub>s</sub>는 유사량, D<sub>50</sub>은 하상재료의 평균입경을 표시한다.

현재 우리나라의 하천 실무에서는 평형하상경사나 평형 하상고를 추정하기 위해 대부분 평형하상경사 예측 공식을 대상 하천 구간에 적용하여 그 공식이 예측한 하천의 종단 경사와 실제의 하천 경사(이 경우 最深線의 경사나 低水位 수면경사)와 비교하여 그 하천이 평형 상태에서 얼마나 벗어났는가를 분석한다. 즉, 실제 측정된 하상고와 계산된 '평형하상고'가 비슷하면 하상이 안정되어 있다고 간주하고 그렇지 않은 경우 두 하상고의 차이 만큼 침식이나 퇴적이 되었다고 분석하고 있다. 그러나 이러한 관행적인 분석은 경우에 따라서 '넌센스'가 될 수 있다. 즉, 앞에서 서술하였듯이 대부분의 자연 하천은 인위적인 변화를 주지 않거나 변화를 준 시간이 상당히 지나 다시 평형 상태에 도달한 경우 일단은 평형하천으로 간주된다. 따라서, 평형하천(자연 하천)과 평형 상태를 예측하는, 후술하지만 그 예측 결과가 매우 의심스러운 공식의 결과와 비교하여 현재 평형 상태에 있는 하천을 평가 분석한다는 것은 주객이 전도되어 평형 하상의 개념이 잘못 적용된 것이라 하겠다. 다만, 이러한 비교 분석은 식 (1)의 어느 한 변량이 인위적으로 크게 변화된 하천에

있어서 그 변화에 대한 하천의 현재까지의 대응 및 앞으로의 대응을 예측하는데 도움을 줄 수 있다.

그러나, 우리나라의 현 하천 실무에서는 대부분 무비판적으로 1940년대 일본에서 개발된 安藝 공식이나 物部공식을 적용하여 '평형하상'을 계산하고 그 결과를 실제 측정된 하상과 비교하여 분석하고 있다. 따라서 앞으로의 하천 실무에서는 인위적이든 자연적이든 하상변동의 개연성이 충분히 있는 하천에 한해서 평형하상의 개념이 적용되어야 할 것이다.

### 4. 평형하상공식의 재검토

일반적으로 자연 상태의 하천은 평형을 이루고 있다고 보며, 이들 자연 하천의 종단 경사는 상류에서 하류로 갈수록 감소된다고 알려져 있다. 이러한 하천 거리에 따른 종단 경사의 변화는 Schoklitsch<sup>(7)</sup>나 Schulits<sup>(8)</sup> 등에 의해 처음으로 다음과 같이 제시되었다.

$$S = S_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2)$$

여기서,

S = 하류 방향으로 거리 x에서의 하상 경사

S<sub>0</sub> = 상류 기준점에서의 하상 경사(α=0)

= 하상재료의 摩耗係數(coefficient of abrasion)

마모계수는 하상 재료 및 하천의 수리적 특성에 따라 결정되며, 각 하천마다 다른 값을 가진다. Schoklitsch에 의하면, 석영이나 화강암으로 이루어진 하상재료는 통상 φ=0.03~0.05(km<sup>-1</sup>)값을 가진다. 윗 식은 하천의 저수위 수면경사측정 자료 등에 의해 그 타당성이 일반적으로 인정되었다. 일찌기 일본에서도 物部는 식 (2)와 비슷한 형태의 평형하상경사식을 제시하였다.<sup>(9)</sup> 다만 그의 공식에서는 식 (2)에 수심에 관련된 항이 추가된다. 비교적 최근에 인도의 Garde<sup>(10)</sup>는 φ값을 하천 유량, 유사량 및 하상재료의 크기와 관련시켜서 표현한 바 있다.

실제 우리나라 하천의 경우 湫 등 많은 하천구조물의 영향으로 하천은 자연상태에서 벗어나 평형을 이루지 못하는 경우가 많다. 그림 1은 남한강 지류인 청미천의 최심선 하상고의 변화로서, '91년 8월 비교적 저수시에 하천 종단측량을 한 성과이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 청미천 조사구간은 많은

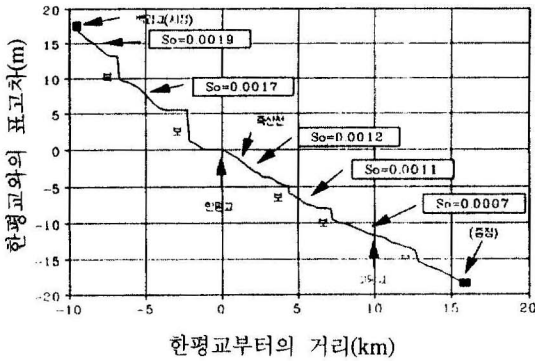


그림 1. 거리에 따른 최심선 하상고의 변화(청미천).

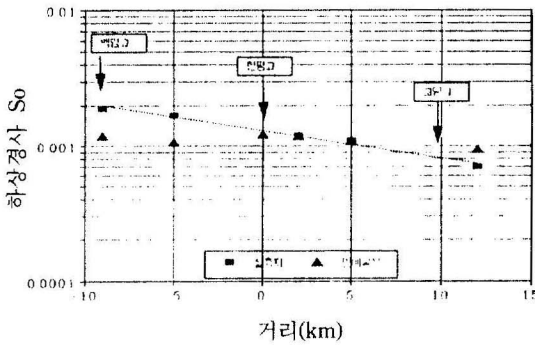


그림 2. 거리에 따른 최심선 하상경사의 변화(청미천).

보에 의해 보 상류는 웅덩이를 이루어 유사가 퇴적되며, 이러한 곳에서의 하상재료는 원 하상재료보다 훨씬 작은 細砂나 微粒土砂로 구성되어 있다. 그러나, 보 등에 의한 영향을 받지 않은 하천구간에서의 하상경사만을 고려하여 하천거리에 따른 변화를 분석하면 그림 2와 같이 지수함수적으로 감소하는 것을 볼 수가 있다. 여기에, 식 (2)를 적용하면  $S_0=0.0019$ (백암교 지점에서  $\phi=0.046(\text{km}^{-1})$ 으로, 상관계수 0.98의 상관을 보여준다. 청미천의 하상재료가 대부분 화강암에서 나온 석영, 장석 등입을 고려하면,<sup>(11)</sup> 본 연구에서 얻은  $\phi$ 값은 Schoklitsch의 값과 거의 비슷하게 나타난다.

그러나, 우리나라에서 하천정비계획의 수립이나 하상 변동조사에 사용되는 평형 하상경사공식은 식 (2) 형태가 아니며, 전술한 바와 같이 일본의 '安藝 공식'이며,<sup>(12)</sup> 일부 物部공식을 사용하고 있다.<sup>(13)</sup> 그 이유는 식 (2)의 경우  $\phi$ 값이 결정되지 않아 실무에서 사용되기 어려운 반면, 安藝공식 등은 하상 재료의

특성과 수심 자료만 있으면 하천의 종단 경사가 계산된다는 실용성과 우리나라에서는 과거부터 일본의 하천공학 관련 기술이 자주 적용되어 왔다는 점으로 추정된다.

따라서, 본 연구에서는 전술한 평형하상 개념의 하천 실무에의 적용성에 대한 토의와 더불어 하천 실무에 자주 사용되는 安藝 공식 및 物部공식을 면밀히 분석하여 그 공식의 타당성을 재검토하고자 한다.

## 4.1 安藝공식

### 4.1.1 공식의 배경

安藝 공식은 1944년 安藝皎一の '河相論'<sup>(9)</sup>에 발표된 평형하상경사 공식으로서, 그 공식의 기본 가정은 평형 하천에서 하상에 작용하는 掃流力의 크기는 流下 거리에 따라 일정하게 변하며 하상 재료의 특성과 연관이 있다는 것이다. 즉, 하천의 평형 상태에서는 소류력  $\tau_0$ 는 하상 재료에 의한 마찰 저항 K와 평형을 이루며, 이때 K값은 다음과 같이 표시된다.

$$K(=\tau_0)=a(\gamma_s - \gamma) \lambda D_m \quad (3)$$

윗 식에서 a는 계수이며,  $\gamma_s$ 와  $\gamma$ 는 각각 하상 재료 및 물의 단위 중량,  $D_m$ 은 하상 재료의 평균 입경이며,  $\lambda$ 는 하상 재료의 조도 곡선의 특성을 나타내는 파라미터로 혼합비라 한다.

또한, 기준점으로부터의 하천 거리 x에 따른 하상재료의 특성을 나타내는  $(\lambda D_m)$ 값을 다음과 같은 경험식으로 제시하였다.

$$x = a - b \log(\lambda D_m) \quad (4)$$

또는,

$$\lambda D_m = 10^{\frac{a-x}{b}} \quad (5)$$

윗 식에서 a, b값들은 하천의 재료 특성에 따라 결정되는 계수들이다. 식 (5)를 식 (3)에 대입하면 소류력  $\tau_0$ 는 다시 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_0 = a(\gamma_s - \gamma) 10^{\frac{a-x}{b}} \quad (5)$$

평형 하천에서 부등류를 고려하면, 하천에서의 에너지경사  $S_e$ 는 하상경사  $S_0$ 와 비에너지 H에 의해

다음과 같이 표시된다.

$$S_e = S_o - \frac{dH}{dx} \quad (7)$$

한편, 수심에 비해 하천의 폭이 넓고 하상이 평형 상태에 있는 두 지점  $x$ 와  $x_o$ 에서 식 (6)을 이용하면 소류력의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\gamma d S_e}{\gamma d_o S_{eo}} = 10^{\frac{x_o - x}{b}} \quad (8)$$

또는,

$$S_e = S_{eo} (d_o/d) 10^{\frac{x_o - x}{b}} \quad (9)$$

여기서,  $S_{eo}$ 는 거리  $x_o$ 에서의 에너지 경사이다. 한편, 유속은 경사의 1/2승과 수심의 2/3승에 비례한다고 가정하면(Manning의 평균 유속 공식), 두 수심의 비  $d_o/d$ 값은 다음과 같이 표시된다.

$$d_o/d = \left( \frac{S_e}{S_{eo}} \right)^{3/10} \quad (10)$$

윗 식에서, 조도계수는 두 지점에서 같다고 가정한다. 따라서, 식 (10)을 식 (9)에 대입하여 정리하면,

$$S_e = S_{eo} 10^{\frac{10}{7} \frac{x_o - x}{b}} \quad (11)$$

또는,

$$d = d_o 10^{\frac{3}{7} \frac{x_o - x}{b}} \quad (12)$$

마지막으로, 식 (7)에서 비에너지  $H$ 를 수심  $d$ 로 가정하고, 식 (11)에 대입하여  $S_e$ 를 소거하고, 식 (12)를  $x$ 로 미분하여 대입하면 다음과 같은 안藝 공식이 유도된다.

$$S = S_{eo} 10^{\frac{10}{7} \frac{x_o - x}{b}} + \frac{2.3 \times 3}{7b} d_o 10^{\frac{3}{7} \frac{x_o - x}{b}} \quad (13)$$

식 (13)을 유도하기 위해 고려된 기본 가정들을 분석하면 다음과 같다.

① 평형 하천에서 하상에 작용하는 소류력은 식 (3)으로 표시되는 하상 재료의 마찰력과 평형을 이룬다.

② 하상 재료의 종단 변화는 식 (5)와 같이 거리의

함수로 표시된다.

③ 관심 대상이 되는 두 지점  $x$ 와  $x_o$ 에서의 조도계수는 같다.

④ 비에너지 수두  $H$ 는 最深線 수심  $d$ 와 같다.

⑤ 기준점에서의 에너지 경사  $S_{eo}$ 는 그점에서의 하상경사  $S_o$ 와 같다 (동류조건).

#### 4.1.2 공식의 재검토

전술한 바와 같이 안藝 공식은 많은 기본 가정 하에서 유도된 공식으로서 몇몇 가정들은 객관적으로 인정되기 매우 어려운 것들이다. 즉, 이 공식의 기본 가정인 ①항의 경우 이론적으로나 실험적으로 증명되지 못했으며, ②항의 경우 후술하겠지만 하천 거리에 따른 하상 재료의 변화는 상당히 불규칙하며, 따라서 식 (4)의  $a$ ,  $b$ 값의 결정이 실제 쉽지 않다. 또한, ③항의 가정은 일반적으로 인정되기 어려우며, 이 공식에서 거리에 따른 하상 재료의 변화를 고려했으므로 거리에 따른 조도계수  $n$ 의 변화도 다음과 같은 Strickler의 경험식 등으로 고려되어야 할 것이다.

$$n = \beta D^{1/6} \quad (14)$$

여기서,  $\beta$  = 입경  $D$ 의 단위에 따라 결정되는 계수

④항의 가정은 하폭이 넓고 속도수두가 수심에 비해 충분히 작은 경우에 한해 인정될 수 있다. 그러나, ⑤항의 가정을 인정하면 식 (7)에서  $dH/dx=0$ 가 되어야 하며 다시 식 (13)의 우변의 둘째항의 의미가 없어지며, 따라서 식 (13)의 타당성이 기본적으로 흔들린다. 또한 실제 안藝공식의 적용에서는 기준점의 선정시 동류라고 판단되는 곳을 설정한다고 하나 이 역시 애매한 점이 있다.

위와 같이 안藝 공식의 기본 가정에 내재되어 있는 불확실성 이외에 다음과 같은 공식 구조상의 문제가 제기된다.

첫째, 식 (13)에서  $x=x_o$ 인 경우 기준점에서의 하상경사는

$$S_o = S_{eo} + 2.3 \times 3 d_o / 7b$$

가 되며  $S_o$ 로 수렴되지 않는다.

둘째, 하상 재료의 입도 분포의 종단 변화가 식 (4)로 표시되는 경우, 대부분의 경우 그 회귀식의

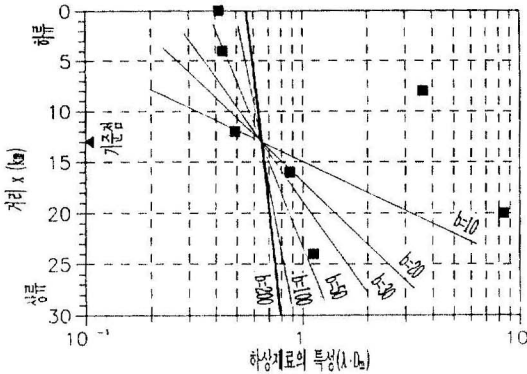


그림 3. 하상재료의 특성( $\lambda D_m$ )과 거리(x)와의 상관관계.

상관계수가 낮으며, 따라서 계수 b값의 결정은 매우 주관적이 된다는 것이다. 예를 들어, 그림 3은 청미천<sup>(14)</sup>의 하상 재료의 특성( $\lambda D_m$ )과 거리 x의 관계를 보여주며 자료점들이 상당히 흩어져 있음을 알 수 있다. 상기보고서에서는 b=200을 채택하고 있으나, 거리 x=7 km와 20 km 지점의 두개의 이상치를 제외하면 b=50이 오히려 더 타당한 것으로 사료된다.

그림 4는 b값의 변화에 따른 식 (13)으로 추정되는 평형하상경사의 변화로서, b값에 대한 식 (13)의 민감도를 나타낸다. 그림 4에서 기준점은 x=13 km이며 기준점 하상경사  $S_0=0.00085$ 이며, 최심선 수심  $d_0=5.33$  m이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 b값의 변화에 대한 S값의 변화는 매우 크며 이러한 변화는 x값이 커질수록, 즉 기준점에서 상, 하류로 갈수록 크게 나타난다. 그러나, 그림 3에서 볼 수 있듯이 b값의 결정은 객관성이 약하며, 따라서 식 (13)으로 계산되는 하상경사 S는 그림 4와 같이 극단적으로 100배까지 차이가 날 수가 있다. 이러한 사실들은 식 (13)의 적용상의 문제점을 단적으로 시사하고 있으며 안藝 공식의 적용성에 강한 의문을 제시하고 있다.

셋째, 우리나라에서 안藝공식을 실제 하천에 적용시 하상경사는 통상 계획홍수시 最深線의 경사로 간주되나, 평형하상의 개념은 계획홍수와 같은 극단적인 경우가 아닌 그 하천의 지배적인 하상형성에 관련된 하천유량(지배유량이라고 함; dominant discharge) 조건에서의 상태이다. 또한, 평형하상공식에 의해 계산된 경사를 최심선의 경사와 비교하기 보

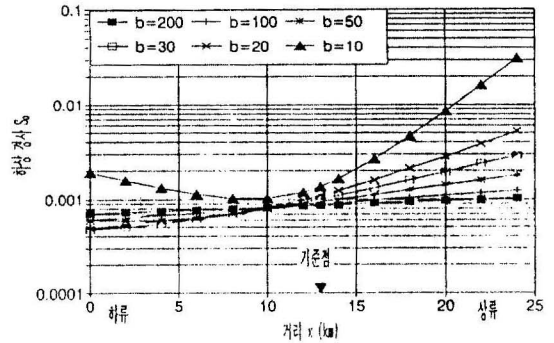


그림 4. b값의 변화에 따른 안藝공식의 민감도.

다는 그 하천의 평균경사로 볼 수 있는 저수위시 일제관측수위와 비교하는 것이 보다 타당할 것으로 사료된다. 외국에서는 평형하상경사 공식에 의한 계산 결과를 저수위시 수면경사와 비교하고 있다.<sup>(9)</sup>

마지막으로, 안藝공식은 우리나라의 하천자료와의 비교를 통해 그 적용성이 입증되지 못했다는 점을 지적하고자 한다. 그 한 예로서 그림 2에서 보는 바와 같이, 안藝공식에 의한 청미천의 평형하상 계산결과<sup>(14)</sup>는 실제 하천 경사와 상당한 차이를 보이고 있다.

안藝 공식은 이러한 여러가지 불확실성 및 구조상 문제점들을 안고 있으며, 이 공식이 개발된 일본의 경우 더 이상 사용되지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>(15)</sup> 현재 일본에서 발간되는 많은 하천 공학, 流砂 水理學 관련 서적에서도 안藝 공식은 거론되지 않고 있다.

## 4.2 物部 공식

### 4.2.1 공식의 배경

物部 공식은 안藝공식 보다 일찍 소개된 듯하며, 안藝공식과 같이 河相論에 소개되어 있다. 物部 공식은 19세기 소위 Sternberg의 법칙과 du Boy의 소류력과 유사 입경과의 관계에서 시작된다. Sternberg의 법칙이란 하천에서의 하상토 입자들은 하류로 내려오면서 충돌이나 마찰 등에 의해 마모되어 그 무게 W는 다음과 같이 지수 함수적으로 감소한다는 것이다.

$$\frac{W}{W_0} = e^{-\alpha x} \quad (15)$$

윗 식에서  $W_0$ 는 기준점( $x=0$ )에서의 하상토입자의 무게이다. 物部는 이러한 하상재료의 무게는 그 하천의 소류력에 관계하며 또한 소류력은 하상재료의 크기에 비례한다고 하여 폭이 넓은 구형 수로에 대하여 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\frac{W}{W_0} \left[ = \left( \frac{D}{D_0} \right)^3 \right] = \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^2 = \left( \frac{\gamma d S_c}{\gamma d_0 S_{c0}} \right)^3 \quad (16)$$

윗 식에서  $\tau_0$ 와  $D_0$ 는 기준점에서,  $\tau$ 와  $D$ 는 거리  $x$ 에서 각각 소류력과 하상재료의 크기를 나타낸다. 윗 식의  $d/d_0$ 에 식 (10)을 대입하여 정리하면,

$$\frac{W}{W_0} = \left( \frac{S_c}{S_{c0}} \right)^{2.1} \quad (17)$$

따라서 식 (15)를 고려하면 식 (17)에서  $S_c$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$S_c = S_{c0} e^{-\frac{0.21}{2.1}x} \approx S_{c0} e^{-\frac{0}{2}x} \quad (18)$$

여기서 에너지 경사를 수면 경사로 하고, 기준점  $x_0$ 에서  $x$ 만큼 떨어진 곳의 하상고를  $z$ , 수면고를  $Z$ 라고 하면  $z = Z - d$ 에서,

$$\int_0^x S_c dx = S_{c0} \int_0^x e^{-\frac{0}{2}x} dx = S_{c0} \frac{2}{\phi} (1 - e^{-\frac{0}{2}x}) \quad (19)$$

따라서,

$$z = Z_0 - S_{c0} \frac{2}{\phi} (1 - e^{-\frac{0}{2}x}) \quad (20)$$

한편, 식 (10)과 (18)에서 수심  $d$ 는

$$\begin{aligned} d &= d_0 \left( \frac{S_{c0}}{S_c} \right)^{3/10} \\ &= d_0 (e^{\frac{0}{2}x})^{3/10} = d_0 e^{\frac{3}{20}0x} \end{aligned} \quad (21)$$

따라서, 하상고  $z$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$z = Z_0 - S_{c0} \frac{2}{\phi} (1 - e^{-\frac{0}{2}x}) - d_0 e^{\frac{3}{20}0x} \quad (22)$$

단, 原典에서는 윗식의 우변의 세번째 항의 계수가 3/20 대신 3/18(=1/6)으로 표시되어 있으며, 이 차이는 평균유속공식에서 수심의 지수값의 차이 때문

으로 사료된다. 즉, 安藝공식에서는 Manning식과 같이 2/3값을 사용하였으나, 物部공식에서는 0.7값을 사용하였다.

따라서, 하상경사  $S$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} S &= -\frac{dz}{dx} \\ &= S_{c0} e^{-\frac{0}{2}x} + \frac{\phi}{6} d_0 e^{\frac{3}{6}x} \\ &\approx S_{c0} e^{-\frac{0}{2}x} + \frac{\phi}{6} d_0 e^{\frac{3}{6}x} \end{aligned} \quad (23)$$

식(23)의 유도를 위해 사용된 기본 가정들은 다음과 같다.

- ① 하상재료의 무게는 하류이송시 마모에 의해 Sternberg의 법칙[식(15)]에서와 같이 지수함수적으로 감소한다.
- ② 소류력은 하상재료의 크기에 비례한다.
- ③ 에너지 경사는 수면경사와 같다.
- ④ 기준점에서의 하상경사는 에너지 경사와 같다 (등류조건).

#### 4.2.2 物部공식의 재검토

物部공식은 19세기에 제시된 Sternberg의 하상토입자의 마모에 관한 경험식과 du Boy의 소류력과 하상토입자 크기와의 경험식을 기초로 한 식으로, 일면 전술한 安藝공식 보다는 유도상의 논리가 간단하고 분명하다. 즉, 物部공식에서는 安藝공식과 같이 공식 유도를 위해 무리한 가정들을 도입하지 않았으며, 사용된 가정들도 전술한 바와 같이 경험적으로 인정될 수 있는 것 들이다. 예를 들어, 가정 ①의 경우 여러 하천 자료에 의해 입증되어, 계수  $\phi$ 의 값들이 제시되고 있다.<sup>(3,16)</sup>

이런 면에서 物部공식은 安藝공식보다 일견 합리적으로 사료된다. 다만, 가정 ②는 실증적으로 입증되지 못한 가정이며, 가정 ④는 전술한 安藝공식의 경우와 같이 기준점 선정시 불확실성을 야기시킨다.

이러한 공식 유도상의 간단 명료성에도 불구하고 物部공식이 安藝공식보다 덜 알려지고 쓰여진 것은 무엇보다도 物部공식은 실제 하천에 적용하는데 있어  $\phi$ 값을 쉽게 결정하기 어렵다는 점이다. 즉,  $\phi$ 값은 하상재료의 암석 특성에 따라 다르며, 또한 하천에 따라 다르기 때문에 실제 적용시 그 하천에 적절한  $\phi$ 값을 결정하기가 어렵다.

## 감사의 글

결론적으로, 物部공식도 일반적인 타당성이 의심스러우며, 이 공식 역시 현재 일본에서 사용되지 않고 있다. 오히려 일본에서는 '60년대 이후 보다 합리적인 평형 하상 경사를 측정하려는 노력이 행하여져 왔으며, 그 예로서 Manning의 평균 유속 공식, Brown의 유사량 공식, 유사량의 연속식 등을 이용하여 평형하상경사를 추정하는 공식들이 소개되었다.<sup>(17)</sup>

본 논문은 1991년도 한국건설기술연구원 수자원 연구실의 기본연구과제인 '하상변동 예측모형의 비교 분석'에서 연구된 것을 논문 성격에 맞게 편집한 것입니다. 본 연구를 수행하는데 있어 도움을 준 연구원내 많은 분들에게 감사를 표합니다.

## 참 고 문 헌

### 5. 결 론

본 연구에서는 평형하상의 개념과 하천 실무에의 적용성에 대해 논하였고 아울러 우리나라에서 평형하상경사를 추정하기 위해 널리 사용되어온 安藝 공식 및 物部공식의 타당성에 대해 분석하였다. 평형하천이란 전술한 바와 같이 장기간에 걸쳐 하천의 지배적인 수리 특성하에서 상류에서 공급되는 유사의 이송에 꼭 필요한 만큼의 유속이 생기도록 자연적으로 하상경사가 조정되어 실질적인 하상의 퇴적이나 침식이 없는 하천을 지칭한다. 여러가지 문헌 분석에 의하면, 장 노년기 지형을 흐르는 대부분의 자연상태의 하천들은 인위적인 변화가 없는 한 평형상태에 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 완전히 또는 비교적 자연 상태에 있는 하천에 소위 '평형하상공식'을 적용하여 그 하천의 하상상태를 분석하는 현재의 하천 실무는 지양되어야 할 것이다. 한편, 하천에서 안정된 하상경사를 결정하기 위한 현 '평형하상공식'들은 그 타당성이 불확실하므로 지금과 같은 하천 실무에의 적용은 지양되어야 할 것이다. 즉, 현재 우리나라에서 '하천정비 기본계획'이나 '하상변동조사사업', 또는 '한강 종합개발'과 같은 대규모 하천개발 사업의 계획 및 설계시에 안정하상의 결정을 위해 安藝공식이나 物部공식 같은 소위 평형하상공식을 적용하는 현 하천실무는 지양되어야 할 것이다. 대신, 하도의 인위적인 변화로 새로운 安定河床을 설계하고자 하는 경우 실제적으로 대부분의 여천상 시행하기 어려운 하상경사의 조정보다는 하천단면과 하폭의 조정을 통한 안정하상의 결정이 보다 현실적이게 된다. 저자들은 추후 우리나라의 실측 하천 자료를 이용하여 보다 합리적인 평형하상경사 추정 방법을 개발하는 연구를 계획하고 있다.

1. Mackin, J.H., "Concept of the Graded River", *Geological Survey of America Bulletin*, Vol. 59, pp. 561-88, 1948.
2. Simons, D.B. and Senturk, F., *Sediment Transport Technology*, Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado, 1976.
3. Garde, R.J. and Ranga Raju, K.G., *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, N.Y., 1985.
4. 김희중, 하천공학, 동명사, 1985.
5. 日本 土木學會, 水理公式集, 1985.
6. Lane, E.W., "The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering", *Proc. ASCE*, Paper No. 745, July, 1955.
7. Schoklitsch, A., *Handbuch des Wasserbaues*, Springer, Vienna, Austria, 1930.
8. Schulits, S., "Rational Equation for River Bed Profile", *Trans., AGU*, Vol. 22, 1941.
9. 安藝峻一, 河相論, 日本, 1944.
10. Garde, R.J., "Longitudinal Profile of an Alluvial Stream", *Engineering Geosciences*, B. B. S. Singhal ed., Sarita Prakashan, New Delhi, 1982.
11. 한국건설기술연구원, 수정아인쉬타인 방법의 한국 하천에의 적용, 건기연90-WR-112, 1990.
12. 건설부, 한강 하천정비 기본계획(청미천, 복하천, 경안천), 1983.
13. 건설부, 낙동강(감천) 하천정비 기본계획, 1985.
14. 경기도, 청미천 하천정비 기본계획, 1984.
15. 한국건설기술연구원, 하천환경관리 기본 조사 연구 과업을 위한 일본 출장 북명서, 1991.
16. Graf, W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1971.
17. 土屋昭彦, "河道平衡理論に關する 2,3の考察", 제 12회 수리강연회 강연집, 土木學會, 日本, 1968.

(接受: 1992. 1. 30)