

沖積河川の河床摩擦變化에 대한 調査·分析

An Investigation of Changes in Bed Roughness of Selected
Alluvial Rivers

유권규* · 김형섭* · 김활곤** · 우효섭***

Yu, Kwon Kyu · Kim, Hyoung Seop · Kim, Hoal Gon · Woo, Hyo Seop

Abstract

Changes in bed forms and subsequent changes in channel roughness by changes in water discharge are discussed with the field data collected from some alluvial rivers in Korea. This study is limited to the following condition of river flow: (1) Medium size alluvial rivers with their widths of 100 m more or less, (2) Straight and prismatic river reach with no additional causes for energy loss but bed friction, (3) Lower-flow regime with Froude number less than 0.5. Major conclusions obtained from this study can be summarized as follows: (1) For the channels considered in this study, the bed roughness expressed by Manning's n increases from 0.02 for the plane beds with no sediment motion to 0.05 for the dune beds, (2) The roughness coefficient for alluvial channels should not be estimated from Strickler-type equations developed for the fixed beds, (3) The method for determining the channel roughness suggested in the present guideline for river works, River Structure Standard, appears to be lack of generality. More research based on the field data collected in Korea is needed in order to improve the existing methods.

요 지

본 연구는 沖積河川에서 실측된 자료를 이용하여 한 하천지점에서 유량의 변화에 따른 하상형태의 변화와 그에 따른 하천마찰의 변화를 검토하는 것이다. 본 연구는 다음과 같은 조건의 하천상태에 국한한다: (1) 하폭 100 m 내외의 중규모 하천, (2) 하천선형이 직선이고 하천단면의 변화가 적어 하상마찰 이외에 특별한 에너지 손실요인이 없는 하천, (3) 프루우드 수가 0.5 이하인 低水流領域 하천. 본 연구에서 얻은 주요 결론을 요약하면 다음과 같다: (1) 매닝의 粗度係數는 平坦河床의 경우 0.02 정도에서 砂丘 형성시 0.05 정도로 2배 이상 증가한다. (2) 충적하천의 조도계수는 Strickler 공식 형태의 고정상 하천에 대한 조도계수 추정방법으로는 얻을 수 없다. (3) 기존의 하천시설기준에 수록된 이동상 하천에서의 조도계수 추정방법은 실제하천에 적용하는데 있어 한계가 있으며, 우리나라 자료를 이용한 구체적인 연구가 요망된다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구소 연구원

** 정회원 · 경북대학교 농공학과 박사과정

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구소 수석연구원

1. 서론

沖積河川은 河床을 구성하는 材料와 水流에 의해 이송되는 流砂가 실질적으로 같은 하천을 지칭하며, 보통 하상이 모래로 구성된 하천을 말한다. 총적하천의 水流는 하상을 변화시키고 그에 따라 河床粗度を 변화시키며 그 달라진 하상조도에 따라 水流 자신도 변한다. 총적하천에서의 하상마찰¹⁾은 하상 재료 자체의 粗度에 의한 '砂粒粗度(grain roughness)'와 河床形態에 의한 '形狀粗度(form roughness)'로 구분된다¹⁾. 홍수시 하상이 砂丘(dunes)로 변하는 경우 하상마찰은 평탄하상의 마찰에 비해 상당히 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 총적하천에서의 하상마찰은 유량의 변화에 의해 변화되는 하상형태에 크게 관계되며, 이러한 하상형태를 예측하여 보다 적합한 하상마찰을 결정하는 것이 중요하다.

현재 우리나라에서는 하천에서 유량의 변화에 따른 하천마찰의 변화는 背水計算을 하여 매닝의 粗度係數 n 값을 逆算하여 추정하고 있다. 이 경우 유량의 증가에 따라 砂洲(sand bars)같은 水流에 대한 저항물체의 잠김, 蛇行의 소멸 등으로 하천 전체의 마찰은 감소하는 것으로 관측되고 있다.²⁾ 그러나 이 경우는 砂洲 등 하상형태보다 규모가 큰 저항물체가 존재하거나 低水時 蛇行이 심한 경우, 혹은 흐름이 高水流領域(upper-flow regime)에 도달하여 하상이 다시 평탄해져 하상마찰이 감소하는 경우에 국한될 것이며, 하천 평면형태와 단면이 일정한 모래하천의 低水流領域(lower-flow regime)에서는 이러한 유량 증가에 따른 하천 마찰의 감소를 기대하지 못할 것이다.

본 연구의 목적은 총적하천에서 유량의 변화에 따른 하상마찰의 변화를 야의 실측자료를 이용하여 검토하는 것이다. 본 연구를 위하여 낙동강 수계 내성천의 2개 지점과 한강 수계 섬강의 1개 지점에서 수심, 유량, 수면경사 등을 실측하고 하상재료 시료를 채취하였다. 부수적으로, 본 연구에서는 1990년에 수집된 한강수계의 청미천 실측자료³⁾도 이용하였다.

본 연구는 低水流領域에서 모래 하천의 마찰변화에 국한하였으며, 따라서 전술한 바와 같이 砂洲 등 하상에서 큰 규모의 장애물이 있는 경우와 사행 등 하천의 평면형태가 추가적인 하천마찰을 야기시키는 경우는 물론 흐름이 高水流領域인 경우는 본 연구에서 제외한다. 즉, 저수류영역의 모래하천에서 유속의 증가에 따른 하상형태의 변화와 이에 따른 하상마찰의 변화에 국한한다. 또한, 본 연구에서 얻은 野外 資料는 홍수시 작업 여건상 어느 정도의 불확실성이 내재되어 있을 것이다.

2. 문헌 검토

2.1 외국문헌의 검토

일반적으로 등류하천에서의 유량 Q는 다음과 같은 Manning의 마찰공식을 이용하여 산정된다.

$$Q(≡ AV) = A \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \tag{1}$$

여기서, A = 하천통수단면적, V = 평균 유속, n = Manning의 마찰계수, R = 수리반경, S = 에너지 경사이다.

Manning의 마찰공식에서 조도계수 n 값은 하상의 粗度에 의한 마찰은 물론 하천의 植生, 단면의 불규칙성, 蛇行에 의한 하천 線形의 변화 등과 하상형태의 변화 등이 종합적으로 고려된 'lumped'된 경험적 계수이다.

광범위한 종류의 인공수로 및 자연하천에서의 n 값은 Chow의 책⁴⁾에 자세히 소개되고 있다. 그러나 이러한 n 값 표는 대부분 고정상 하천에서의 값들을 제시하고 있으며, 바닥이 모래로 구성된 총적하천의 경우 바로 적용하기 어렵다. 한편, 미국 토양보존국(SCS)이 제시한 n 값의 추정방법⁵⁾은 일정한 직선수로 및 하천에서의 기본적인 n 값에 식생, 하천단면, 장애물, 하천선형 등에 의한 추가적인 마찰효과를 고려하여 n 값을 조정하도록 되어 있다. 그러나, 이 방법에도 총적하천에서의 n 값의 선택을 위해서 어떠한 기준을 제시하지 못하고 있다. 하상재료의 粗度에 따른 固定床 하천에서의 n 값의 추정에 대해서는, French⁶⁾가 Strickler의 경험공식을 중심으로 자세히 기술하고 있으며, 이러한 공식들에 의하면 n 값은 하상재료 크기의 1/6승에 비례하는 것으로

1) 본고에서 河床摩擽은 하상재료의 조도와 하상형태에 의한 저항을 지칭하며, 河川摩擽은 그 이외에 하천의 평면형태 변화에 의한 추가적인 마찰까지 고려한 것이다.

되어 있다.

한편, 수문학자들은 총적하천에서 홍수의 통과시 수위-유량 곡선이 단일곡선으로 되지 않고 루프 형태로 되거나 끊어지는 현상을 많이 관찰해 왔다. 그러나 1958년 Brooks의 하상형태와 조도에 관한 혁신적인 연구발표⁽⁷⁾ 전에는 그러한 현상들을 단지 홍수터 內로의 홍수의 유입과 유출이나 막연히 하상조도의 변화에 기인한다고 생각하였다. Brooks의 연구 이후 유속의 증가에 따른 하상형태의 변화는 하천의 조도에 직접 영향을 주며, 때로는 形狀粗度가 砂粒粗度의 몇 배가 된다는 것 등이 여러 연구자들의 실제 하천조사에서 밝혀졌다.

유량의 증가에 따라 하상의 형태가 변하여 하천마찰이 증가하는 현상을 하상재료에 의한 砂粒粗度와 하상형태에 의한 形狀粗度로 처음 구분한 것은 Meyer-Peter와 Muller⁽⁸⁾이다. 그 후 Einstein과 Barbarossa⁽⁹⁾는 처음으로 총적하천에서의 유량에 대한 수심을 결정하는 水位-流量 예측방법(stage-discharge predictor)을 제시하였다. 그 후 지금까지 많은 수위-유량 예측방법이 제시되었으며, 그 중 비교적 최근에 개발된 것들은 Brownlie⁽¹⁰⁾, van Rijn⁽¹¹⁾의 방법 등을 들 수 있다.

하천의 수리특성과 기하특성을 이용하여 하상형태를 예측하는 연구는 Simons와 Richardson⁽¹⁾의 연구가 효시로서 그 후 이러한 하상형태 예측에 대한 경험적, 이론적 연구가 지금까지 계속되고 있다. 그들은 주로 실험에 의한 자료를 사용하여 하상형태를 低水流領域, 遷移領域(transition), 高水流領域에 따라 구분하였다. 프루우드 수가 0.5 이하인 저수류영역에는 平坦河床, 砂漣, 砂丘 등이 포함되며 천이영역을 지나 프루우드 수가 0.8 이상인 고수류영역에는 다시 平坦河床, 反砂丘, 여울(chute) 등이 포함된다. 그들의 연구에 의하면, 砂漣과 砂丘로 구성되는 저수류영역에서의 n 값은 0.018~0.05 정도이며, 평탄하상에서는 0.012~0.016 정도, 다시 反砂丘에서는 0.012~0.028 정도로 알려졌다. 한편 최근에 van Rijn⁽¹¹⁾은 하천 및 실험자료를 사용하여 또 다른 하상형태 예측도표를 발표하였다. 이 방법은 그전에 개발된 Simons와 Richardson의 방법이 주로 실험실 자료에 의한 것임에 반해 야외자료를 이용하여 얻은 결과를 토대로 하고 있다.

일본에서는 상대수심과 무차원 소류력과 관계로부터 하상형태를 경험적으로 예측하는 도표에서 유량의 증가에 따른 n 값의 증가를 다음과 같이 추정하고 있다.⁽¹²⁾

$$n = \frac{d^{1/6}}{\sqrt{g\phi}} \quad (2)$$

여기서, d = 평균수심, $\phi = f(\tau, \frac{d}{D_m})$: 유속계수, $\tau = \frac{ds}{(s-1)D_m}$: 무차원 소류력, D_m = 하상재료의 평균입경, $s = (\text{유사입자의 비중}) - 1 \approx 1.65$ 이다.

2.2 국내문헌의 검토

현 하천시설기준⁽¹³⁾에는 총적하천에서 하상형태의 변화에 따른 조도계수 값(실제로는 평균유속)을 추정하는 일본의 기시와 구로기 경험식을 소개하고 있다. 이 방법은 Engelund 방법에 d/D_m 항을 추가하여 하상형태별로 유속계수 ϕ 를 구하는 것이다. 그러나, 이 방법은 우리나라 하천실무에 별로 적용되지 않는 듯하다.

국내에서 하천마찰이나 하상형태에 관한 연구는 매우 드물다. 건설부/한국수자원공사⁽²⁾는 '한강주운 개발사업 타당성 조사'에서 한강에 HEC-2 모형과 과거의 홍수기록을 이용하여 n 값을 역산하였다. 이 결과에 의하면, 북한강, 남한강과 한강 분류 모두에 있어 n 값은 저수위시($Q \approx 100$ cms 내외) 0.07 이상에서 고수위시($Q \approx 10,000$ cms 이상) 0.04 이하로 줄어드는 것으로 나타났다. 이렇게 줄어드는 이유로 보고서에서는 저수시 사주나 세굴공 같은 하상의 요철의 영향에 의해 n 값이 커지며, 고수위시에는 이러한 하상 요철부가 물에 잠김에 따라 하상마찰이 줄어드는 것으로 추정하였다. 이 경우 한강과 같은 대하천에서는 하상형태같은 소규모 마찰저항보다는 사주나 기타 하천내 사행과 같은 대규모 마찰저항에 의한 마찰효과가 지배적이기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 이렇게 유량의 증가에 따라 하천마찰이 감소하는 이유는 흐름이 저수류 영역에서 고수류 영역으로 바뀔 때 따라 하상이 평탄하상이나 反砂丘로 변하기 때문일 것으로 추정된다.

한편, 砂洲나 기타 하천의 급축소 및 확대 등 形

狀抵抗이 없는 층적하천에서 유량의 변화에 따른 n 값의 변화에 관한 제한된 범위의 조사가 1990년에 수행되었다.⁽³⁾ 이 조사에 의하면, 하폭이 100 m 이내의 청미천 같은 중·소규모 층적하천에서 하상마찰은 유량의 증가에 따라 저수류영역에서 低水位時 0.02 정도에서 高水位時 0.04 이상으로 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이 연구에서는 이러한 하상마찰의 증가는 하상형태의 변화, 즉 사구의 형성에 의한 것으로 간접적으로 확인되었다.

3. 자료의 수집

본 연구를 위해 야외 실측을 통해 자료를 수집한 지점은 전술한 바와 같이 낙동강 수계 내성천의 석포교와 송리원교 두 지점과 한강수계 섬강의 장현교 지점이다.

3.1 실측지점의 상황

내성천의 상류 측정지점인 석포교는 경북 영풍군 이산면 석포리에 위치하고 있다. 이 지점의 하도는 교량 상류 약 500 m 부분이 약간 곡선을 이루고 있으나 거의 직선이고, 하폭은 약 150 m 정도이다. 하상은 거의 평탄하며 단면은 矩形이다. 양안 모두 제방이 축조되어 있으며, 식생은 거의 없다. 하상 재료는 粗砂, 中砂, 細砂가 섞여 있다.

내성천의 하류 측정지점인 송리원교는 영풍군 평은면 금광리에 위치하고 있으며, 교량 상류 약 200 m 지점에 송리원 철교가 있다. 과거에는 이 송리원 철교에 송리원 수위표가 있었으나, 1982년에 약 2

km 상류인 동호교로 이설되었다. 이 지점의 하도는 교량 상류 약 200 m 부분이 약간 곡선을 이루고 있으나 거의 직선이고, 하폭은 약 100 m 정도이다. 하상은 거의 평탄하며 단면은 矩形이다. 양안 모두 제방이 축조되어 있으며, 식생은 거의 없다. 하상 재료는 粗砂, 中砂, 細砂가 섞여 있다.

섬강의 장현교는 강원도 원주군 호저면 매향리에 위치하고 있으며, 원주천 합류점 약 2 km 정도 하류 지점이다. 이 지점의 하도는 거의 완전한 직선이고, 하폭은 약 120 m 정도이다. 하상은 거의 평탄하며 단면은 구형이다. 양안 모두 제방이 축조되어 있으며, 양안에 약간의 식생이 있다. 하상재료는 자갈, 호박돌, 粗砂가 섞여 있다.

상기 세지점의 상황을 요약하면 표 1과 같다.

3.2 유량측정

본 연구에서는 유량측정을 위해 일점법과 이점법을 이용하였다. 일점법은 수심이 약 60 cm 이하인 경우에 이용하고 그 이상 깊은 경우에는 이점법을 이용하였다.

유량측정에 이용된 장비는 일본 동경정밀에서 제작한 디지털 유속계와 미국에서 제작된 '프라이스'형 유속계이다. 프라이스 유속계는 200 lb(약 100 kg) 정도의 추까지 장착할 수 있어 큰 유속에 적합하다. 따라서, 대체로 유속이 작은 경우에는 디지털 유속계를 이용하고 유속이 매우 큰 경우에는 프라이스 유속계를 이용하였다. 본 측정에서는 50 lb(약 25 kg)의 추를 이용하였다.

유량은 교량상에서 하천단면을 여러개의 소단면

표 1. 야외 실측지점의 상황

수계명	하천명	지점			
		교량명	위치	유역면적(km ²)	하상토 구성
낙동강	내성천	석포교	경북 영풍군 이산면 석포리	288	모래
		송리원교	경북 영풍군 평은면 금광리	481	모래
한강	섬강	장현교	강원 원주군 호저면 매향리	823	자갈/호박돌 /모래

으로 나누어 각 소단면 측선상에서 측정하였으며, 이 때 수심도 같이 측정하였다. 각 조사지점별로 수집된 자료점은 섬강 장현교 11점, 내성천 송리원교 17점, 내성천 석포교 18점 등 계 46점이다.

3.3 하상도의 채취 및 입도분석

본 연구에서는 유량측정과 병행하여 하상도 시료를 채취하였으며, 채취장비는 BM-54 하상도 채취기로 채취기의 무게는 약 50 kg 정도이다. 이밖에 'grab'형 채취기도 일부 사용하였다.

일반적으로 하상이 평탄하여 횡방향 변화가 작고 하도가 직선이며 하상재료의 횡방향 변화가 작은 경우 하상도 시료의 채취는 유량측정이나 부유사 시료 채취만큼 여러번 하지 않아도 좋은 것으로 알려져 있으며, 하상도 시료채취는 유량측정 단면 중에서 몇개를 선정하여 채취하였다. 대부분의 경우 하상도 시료채취 단면수는 유량측정 단면수의 약 절반이다

몇개의 단면에서 채취된 시료는 한데 합하여 각 지점별로 체분석을 통해 입경분포를 분석하였다. 그 결과는 그림 1과 같다. 이 그림에서 각 지점별 입경분포곡선은 유량측정시에 그 지점에서 채취된 하상재료 입경분포의 평균치를 보여준다.

3.4 수면경사의 측정

유량측정시 각 측정지점의 상·하류에 설치된 임시 수위표의 수위차를 읽어서 수면경사를 구하였다.

내성천 석포교의 수면경사 측정은 상류 100 m 지점 우안에 설치한 임시 수위표와 석포교 우측 1번 교각에 설치된 수위표를 이용하여 측정하였다. 송리원교의 수면 경사 측정은 교량 상류 60 m 지점

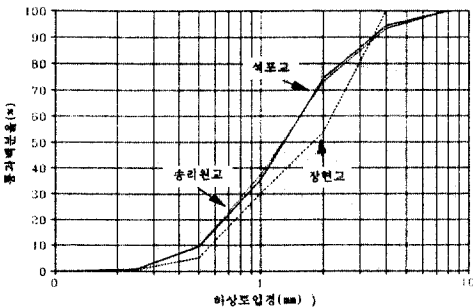


그림 1. 실측지점의 하상도 입경분포

우안에 설치된 임시 수위표와 우측 1번 교각에 설치된 임시 수위표의 수위 표고차를 구하여 산정하였다. 여기서 송리원교의 경우 상·하류 단면간의 거리는 하천시설기준⁽¹³⁾에서 제시한 최소거리(1/500의 경우 50 m) 정도를 유지하고 있다.

섬강의 경우 장현교 지점에 교량 하류 300 여 m 지점과 600 여 m 지점에 있는 배수문에 각각 1개의 임시 수위표를 설치하였으며, 두 수위표간 거리는 295.1 m이다.

3.5 조도계수 n 값의 추정

위의 같이 측정된 수면경사 S_w 와 평균수심 d , 평균유속 V 를 이용하면 다음과 같이 식에서 n 값을 역산할 수 있다.

$$n = \frac{1}{V_{avg}} R_{avg}^{2/3} S^{1/2} \cong \frac{1}{V_{avg}} d_{avg}^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } V_{avg} = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad d_{avg} = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

위의 식에서 첨자 1은 상류단면, 2는 하류단면을 의미한다. 에너지경사 S 는 다음과 같은 에너지 방정식에서 계산된다.

$$S = S_w + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g\Delta x} \quad (4)$$

여기서 S_w =수면경사, g =중력가속도, Δx =두 단면간 거리

본 연구에서 선정한 유량측정지점 상·하류는 비교적 균일하므로, 평균유속의 변화는 크지 않다고 보고 $V_1 \approx V_2$ 으로 놓으면 식 (4)에서의 에너지 경사는 수면경사와 같게 된다. 한편, 본 연구대상하천에서 상·하류의 수심의 평균과 하류수심의 차이도 크지 않다고 보고 식 (3)에서 하류수심만을 이용하여 n 값을 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 계산된 각 하천별 n 값은 표 2~4와 같다.

4. 자료의 분석

4.1 유량과 조도계수의 관계

표 2~4에서 계산된 n 값을 유량에 대해 도시한 결과는 각각 그림 2~4와 같다. 내성천의 경우 그림

표 2. 내성천 석포교 지점의 실측 수리량

번 호	측정 일자	측정 시간	유량 (cms)	평균 유속 (m/s)	하폭 (m)	평균 수심 (m)	수온 (℃)	Froude 수	수면 경사 (m/m)	조도 계수 (n)	비 고
1	920711	1645	8.43	0.49	64.0	0.26	23.7	0.30	0.00148	0.0320	
2	920713	1600	7.87	0.59	64.0	0.21	26.0	0.41	0.00142	0.0226	?
3	920717	1515	21.68	0.59	118.0	0.31	22.0	0.33	0.00272	0.0405	?
4	920808	1550	4.39	0.57	45.0	0.17	27.5	0.44	0.00173	0.0224	?
5	920812	1430	4.59	0.48	45.0	0.21	24.5	0.33	0.00128	0.0264	
6	920825	1500	28.45	0.59	120.0	0.40	23.0	0.29	0.00182	0.0393	
7	920903	1500	25.73	0.57	120.0	0.37	25.2	0.29	0.00243	0.0446	
8	920908	1305	9.78	0.55	60.0	0.29	26.0	0.32	0.00175	0.0333	
9	920909	1410	13.43	0.59	60.0	0.37	26.0	0.31	0.00152	0.0341	
10	920924	1640	19.65	0.61	93.0	0.34	22.0	0.33	0.00251	0.0400	
11	920925	0515	103.25	0.92	123.0	0.90	19.27	0.31	0.00277	0.0533	
12	920925	1150	62.09	0.82	120.0	0.62	21.0	0.33	0.00286	0.0474	
13	920925	1515	52.95	0.77	120.0	0.57	21.0	0.32	0.00260	0.0455	
14	920925	1810	47.20	0.75	120.0	0.51	21.0	0.33	0.00261	0.0435	
15	920926	0905	30.69	0.62	120.0	0.40	20.0	0.31	0.00240	0.0429	
16	920929	1500	11.44	0.60	63.0	0.29	22.0	0.35	0.00162	0.0294	
17	921004	1120	7.75	0.59	63.0	0.21	18.0	0.41	0.00142	0.0226	

주) 수면경사는 실측수면고 차이에서 속도수두($V^2/2g$)를 감하여 보정한 값임.

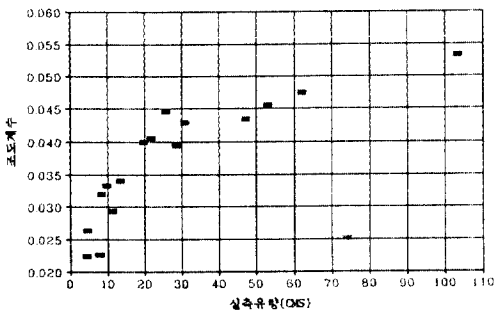


그림 2. 내성천 석포교 지점에서의 조도계수 변화

2와 3에서 보는 바와 같이, 각 지점에서의 n 값은 유량의 증가에 따라 공히 0.02에서 0.05까지 2배 이상 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 총적하천에서 다른 큰 마찰 요인이 없는 경우 하상형태의 변화에 의한 마찰이 중요한 역할을 하고 있음을 잘 보여주고 있다. 다시 말하면, 하상이 모두

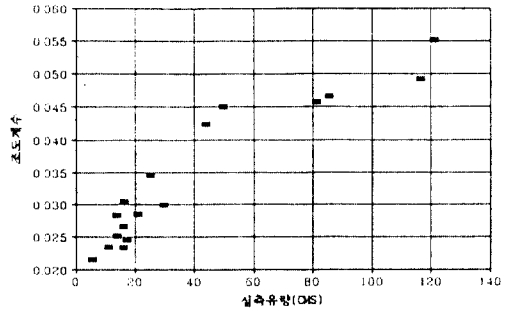


그림 3. 내성천 송리원교 지점에서의 조도계수 변화

모래로 구성된 하천에서 마찰은 하천단면의 급축소나 확대, 分·合流, 曲流 등에 의한 形狀抵抗과 같은 다른 주요 요인이 없는 한 그림 2와 그림 3에서 보는 바와 같이 砂丘 등 하상형태의 발달에 따라 증가한다는 사실을 보여주고 있다. 섬강 장현교 지점의 경우인 그림 4에서는 유량의 증가에 따른 n 값의

표 3. 내성천 송리원교 지점의 실측 수리량

번 호	측정 일자	측정 시간	유량 (cms)	평균 유속 (m/s)	하폭 (m)	평균 수심 (m)	수온 (℃)	Froude 수	수면 경사 (m/m)	조도 계수 (n)	비 고
1	920711	2005	15.86	0.69	77.0	0.30	23.0	0.40	0.00130	0.0234	
2	920713	1700	15.91	0.65	77.0	0.31	28.0	0.37	0.00144	0.0267	
3	920717	1745	49.68	0.69	105.0	0.72	21.8	0.26	0.00150	0.0450	
4	920808	1730	5.28	0.63	59.0	0.14	27.5	0.53	0.00186	0.0185	
5	920812	1550	5.36	0.59	55.0	0.17	27.0	0.45	0.00170	0.0215	
6	920825	1115	13.70	0.62	83.0	0.26	23.0	0.38	0.00147	0.0252	
7	920825	1450	29.50	0.70	105.0	0.40	23.5	0.35	0.00148	0.0299	
8	920903	1820	25.03	0.69	105.0	0.34	27.8	0.37	0.00240	0.0346	
9	920908	1525	13.51	0.59	84.0	0.27	28.0	0.36	0.00160	0.0284	
10	920909	1600	16.11	0.60	85.0	0.31	27.0	0.34	0.00159	0.0305	
11	920924	1750	20.85	0.66	88.0	0.35	23.0	0.35	0.00143	0.0285	
12	920925	0545	121.09	0.96	105.0	1.19	20.0	0.28	0.00222	0.0551	
13	920925	0910	116.46	0.99	105.0	1.11	21.0	0.30	0.00207	0.0492	
14	920925	1700	85.50	0.95	105.0	0.85	21.2	0.32	0.00243	0.0466	
15	920925	1930	81.22	0.94	105.0	0.81	21.0	0.33	0.00245	0.0457	
16	920926	1040	43.76	0.74	1105.0	0.54	21.0	0.32	0.00223	0.0424	
17	920929	1740	17.15	0.77	60.0	0.36	22.0	0.41	0.00140	0.0246	
18	921004	1430	10.78	0.67	60.0	0.27	19.0	0.41	0.00142	0.0235	

주) 수면경사는 실측수면고 차이에서 속도수두($V^2/2g$)를 감하여 보정한 값임.

표 4. 섬강 장현교 지점의 실측 수리량

번 호	측정 일자	측정 시간	유량 (cms)	평균 유속 (m/s)	하폭 (m)	평균 수심 (m)	수온 (℃)	Froude 수	수면 경사 (m/m)	조도 계수 (n)	비 고
1	900730	2315	265.3	1.35	120	1.64	22	0.34	0.00103	0.033	
2	900731	1330	111.5	0.99	120	0.94	22	0.33	0.00077	0.027	
3	900808	1120	221.3	1.31	120	1.41	23	0.35	0.00112	0.032	
4	900808	1600	177.7	1.20	120	1.23	23	0.35	0.00090	0.029	
5	900812	1200	38.0	0.58	105	0.62	23	0.24	0.00043	0.026	?
6	900828	1340	340.9	1.52	120	1.86	23	0.36	0.00120	0.034	
7	900828	1340	288.4	1.42	120	1.69	23	0.35	0.00112	0.033	
8	900902	1645	58.9	0.72	105	0.78	22	0.26	0.00090	0.035	?
9	900925	0010	201.3	1.18	120	1.42	19	0.32	0.00099	0.034	
10	900925	0113	223.8	1.25	120	1.50	19	0.33	0.00099	0.033	
11	900925	0500	228.3	1.28	120	1.48	19	0.34	0.00103	0.033	

주) 표 2~4에서 ? 표는 자료의 신뢰성이 상대적으로 떨어짐을 의미함.

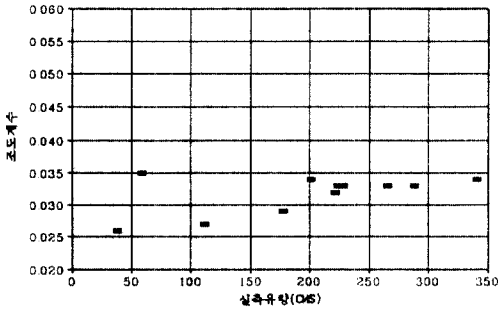


그림 4. 섬강 장현교 지점에서의 조도계수 변화

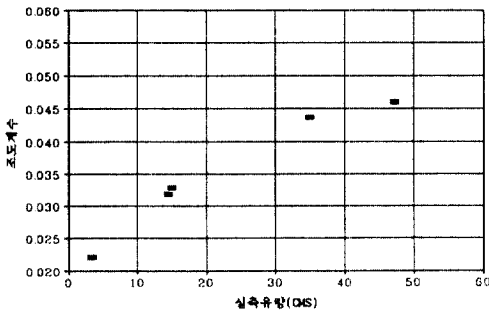


그림 5. 청미천 한평교 지점에서의 조도계수 변화
(한국건설기술연구원, 1990)

증가는 전술한 내성천의 경우보다 분명하게 나타나지 않고 있다. 그 이유는 섬강 장현교 지점의 경우 하상재료가 주로 자갈과 호박돌이며 모래는 50% 미만으로 완전한 의미의 총적하천이 아니기 때문에 유량의 증가에 따른 하상형태의 발달이 순수한 모래하천에 비해 못하기 때문인 것으로 사료된다.

한편, '90년에 조사된 청미천 한평교의 경우 유량과 n 값과의 관계는 그림 5와 같다. 청미천 한평교 지점 역시 D_{50} 이 1.0 mm 정도인 완전한 모래하천으로 하상재료의 조도 자체와 사구의 형성 이외에 타 마찰 요인이 없기 때문에 이러한 결과도 유량의 증가에 따른 사구의 발달에 의한 것임을 알 수 있다. 청미천의 경우 실제로 현장조사에서 사구 형성을 확인한 바 있다.

한편, Chow에 의하면⁽⁴⁾ 본 연구에서와 같이 하폭이 30 m가 넘고 직선하천이며 하상에 호박돌이나 관목 등이 없고 가득차 흐르는 경우 n 값은 0.025~0.06으로 매우 폭넓게 제시하고 있다. 따라서 본

연구에서 고려된 하천의 경우 기존 자료에 의한 n 값의 추정 은 사실상 어렵다. 또한, Strickler식 형태의 Meyer-Peter와 Muller⁽⁸⁾의 n 값 추정식은 다음과 같다

$$n = 0.038 D_{90}^{1/6} \quad (5)$$

여기서, D_{90} =meter로 표시된 90% 통과 입경 이 방법에 의하면 석포교 지점의 경우 $D_{90} \approx 3.0 \sim 3.5$ mm 이므로 $n = 0.014 \sim 0.015$ 이며, 송리원교의 경우 $D_{90} \approx 3.0 \sim 3.9$ mm 이므로 $n = 0.014 \sim 0.015$ 가 된다. 이러한 n 값들은 실측치에 비해 1/2~1/3 정도로서 이동상 총적하천에서 식(5)와 같은 방법에 의한 일률적인 조도계수의 추정은 사실상 받아들일 수 없음을 알 수 있다. 사실, 식(5)에 의한 n 값들은 표 2와 3의 n 값들 중 최저치에도 미달하고 있다.

지금까지 본 연구에서 제시한 유량증가에 따른 하상조도의 증가현상은 하천 한 단면의 수리량만 가지고 식 (3)과 (4)를 산정하는데 따른 어느 정도의 불확실성에도 불구하고 분명히 나타나고 있다. 다만, 본 연구에서 제시한 결과는 프루우드 수가 0.5 이하로 흐름이 저수류 영역이고 하상형태는 평탄하상/사런/사구에 국한된다. 흐름이 더 커지는 경우 고수류영역(프루우드 수 0.8 이상)에서 오히려 n 값은 감소하게 되며 이러한 결과는 외국 사례에도 나타나고 있다.⁽¹⁴⁾ 특히, 하천실무에서는 계획홍수시의 수위계산이 주요대상이 되므로 저수류영역시의 조도변화보다는 고수류영역시의 조도변화에 더 많은 관심이 있을 것이며, 이에 대한 추가적인 야외관측이 요망된다.

4.2 하상형태의 추정

청미천 한평교 경우 이외에는 실제로 하상형태의 변화를 확인할 수 없었으며, 본 연구에서는 van Rijn⁽¹¹⁾에 의해 개발된 하상형태 예측도표를 이용하여 유량 측정시 하상형태를 추정하였다. van Rijn의 도표는 하상토 중앙입경 D_{50} 과 'Transport Stage Parameter' T를 이용하여 그림 6에서와 같이 하상형태를 경험적으로 추정하는 방법으로 다양한 하천자료를 이용하여 개발된 것이다. 이 도표는 '저수류영역'과 '천이영역'에서만 적용가능하며 프루

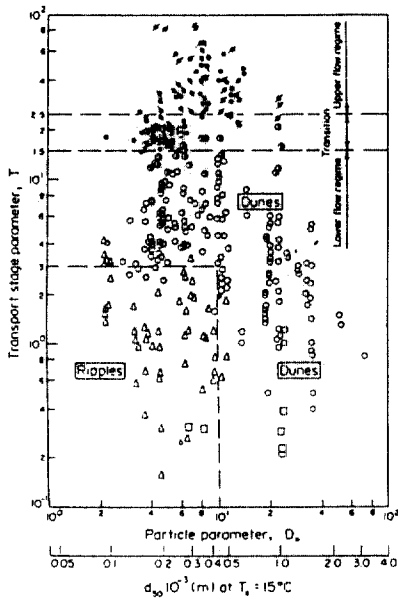


그림 6. 하상형태의 예측도(van Rijn, 1984)

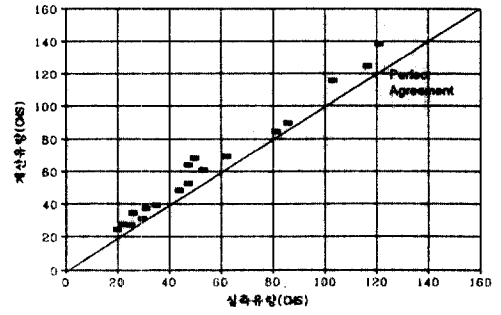


그림 7. 기시·구르기 방법에 의한 유량 산정

우드 수가 0.8 이상인 ‘고수류영역’에는 적용하기 어렵지만, 대부분의 자연하천의 흐름은 ‘천이영역’ 이하이므로 실제적으로 적용상의 문제는 별로 없다. 이 도표를 이용하기 위한 T 값은 표 5와 같이 계산되었다. 본 연구에서는 평균수심이 0.3m 이상인

표 5. van Rijn의 하상형태 예측방법 적용결과

하천	지점	번호	일자	평균 유속 (m/s)	평균 수심 (m)	수면 경사 (m/m)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	T	하상 형태 (추정)	사구 높이 (m)	사구 길이 (m)
내성천	석포교	1	920717	0.59	0.31	0.00272	1.4	3.5	1.00	사구	0.06	2.3
		2	920930	0.57	0.37	0.00243	1.3	3.2	0.88	사구	0.06	2.7
		3	920924	0.61	0.34	0.00251	1.4	3.5	1.07	사구	0.07	2.5
		4	920925	0.92	0.90	0.00277	1.2	3.1	3.11	사구	0.24	6.6
		5	920925	0.82	0.62	0.00286	1.2	3.0	2.61	사구	0.17	4.5
		6	920925	0.77	0.57	0.00260	1.2	3.1	2.29	사구	0.15	4.2
		7	920925	0.75	0.51	0.00261	1.2	3.1	2.23	사구	0.14	3.7
		8	920926	0.62	0.40	0.00240	1.2	3.1	1.38	사구	0.09	2.9
천	송리원교	1	920717	0.69	0.72	0.00150	1.4	3.9	1.16	사구	0.13	5.3
		2	920825	0.70	0.40	0.00148	1.4	3.8	1.66	사구	0.10	2.9
		3	920903	0.69	0.34	0.00240	1.4	3.8	1.73	사구	0.10	2.5
		4	920925	0.96	1.19	0.00222	1.2	3.0	3.11	사구	0.29	8.7
		5	920925	0.99	1.11	0.00207	1.2	3.0	3.45	사구	0.28	8.1
		6	920925	0.95	0.85	0.00243	1.2	3.0	3.42	사구	0.23	6.2
		7	920925	0.94	0.81	0.00245	1.2	3.0	3.38	사구	0.22	5.9
		8	920926	0.74	0.54	0.00223	1.2	3.1	2.09	사구	0.14	3.9
청미천	한평교	1	900901	0.75	0.65	0.00195	0.9	2.4	3.05	사구	0.17	4.7
		2	900912	0.66	0.91	0.00108	1.2	2.8	1.06	사구	0.13	6.6

경우의 흐름에 대해서만 고려하였다. 여기서 砂漣은 하상재료의 중앙 입경이 0.6 mm 이하의 모래인 경우에만 형성되나 본 연구 대상하천의 하상재료는 표 5에서와 같이 0.9 mm 이상이므로 사련은 형성되지 않았을 것으로 추정되며, 유사이송이 없는 평탄하상에서 바로 砂丘로 전이되었으리라 추정된다. 한편, 그림 6에서 평탄하상과 사구의 경계는 $T \approx 0.5$ 정도이며 본 연구의 경우 T 값이 모두 1.0~5.0 정도이므로 측정시의 하상형태는 모두 砂丘이었을 것으로 추정된다. 한편, van Rijn 방법에 의한 사구의 높이와 파장을 계산한 결과가 표 5에 나타나 있다. 이 결과에 의하면, 석포교와 송리원교 측정시 형성되었던 사구의 높이는 0.1~0.3 m 정도이며, 파장은 2~9 m 정도로 추정된다.

하천시설기준에 제시된 총적하천에서의 평균유속 추정방법을 검토하기 위해 표 5에 나타난 자료를 기시 구르기 방법에 적용하였다. 하천시설기준에 나와 있는 '갈데 라쥬'의 구분에 의하면 본 연구에서 수집한 자료들은 $d/D_m \approx 200 \sim 1,000$ 이며 $S/1.65 \approx 0.001$ 내외로 대부분 천이영역과 사구로 나타난다. 여기서, 하상형태는 모두 사구로 가정하고 다음과 같은 하천시설기준에 있는 식 (6) [사구하상(I)]을 적용하면 계산된 유량과 실측 유량과의 관계는 그림 7과 같다.

$$\phi_0 \left(\equiv \frac{V}{u_*} \right) = 2.4 \left(\frac{d}{D_m} \right)^{1/6} \tau_*^{-1/3} \quad (6)$$

여기서, $u_* =$ 마찰속도 ($= \sqrt{gdS}$)
이 그림에서 보는 바와 같이, 계산유량은 실측유량과 비교적 일치하고 있으며 여기서 나타나는 오차의 정도는 수면경사 측정시의 오차나 기타 측정지점의 상 하류 조건에 대한 가정들의 불확실성을 고려하면 식 (6)은 만족할 정도라 사료된다. 다만, 하천시설기준에서 제시되는 하상형태의 구분방법은 d/D_m 값이 1,000 이하로 제한되어 있고, 하상형태별 평균유속을 결정하는데 있어 천이영역에서는 유속계수 ϕ_0 값을 결정할 수 없는 등 적용상의 한계가 있으므로 국내자료를 이용한 하상형태의 변화에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 야의 실측자료를 이용하여 총적하천에서 유량의 변화에 따른 하상형태의 변화와 그에 따른 하상마찰의 변화를 검토하였다. 본 연구에서 이용된 실측자료는 낙동강수계 내성천 2개 지점과 한강수계 섬강 1개 지점이며, 이 밖에 '90년에 수집된 한강수계 청미천 자료이다.

본 연구는 다음과 같이 제한된 조건의 하천상태에서의 마찰변화에 초점을 맞추었다.

- (1) 중규모(하폭 100 m 내외) 총적하천으로 하상재료가 모래인 경우,
- (2) 하천 선형이 직선이고 하상마찰 이외에 다른 에너지 손실 요인이 없는 경우,
- (3) 흐름은 저수류 영역으로 프루우드 수가 0.5 이하인 경우(실제 0.3~0.5)

상기 경우에 대해 야의 실측자료를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 총적하천에서 조도계수 n 값은 고정된 값이 아니며, 유량의 증감과 그에 따른 하상상태의 변화에 따라 크게 변한다는 사실을 확인할 수 있다.
- 2) 본 연구에서 고려된 하천의 경우 조도계수 n 값은 평탄하상에서 0.02 정도부터 사구에서 0.05 정도로 2배 이상 증가는 것으로 나타났다.
- 3) 조도계수 n 값을 추정하는 기존의 Strickler 공식이나 Meyer-Peter와 Muller 공식 등은 유량 변화에 따른 조도계수 변화를 예측하지 못하므로 본 연구에서 고려된 하천과 같은 총적하천에 적용될 수 없다.
- 4) 기존의 하천시설기준에서 제시한 기시와 구르기의 이동상 하천 마찰공식은 실제하천에 적용상 한계가 있으며, 우리나라 하천에서 수집된 자료를 이용하여 저수류영역 뿐만 아니라 고수류 영역에서 하상형태를 예측하고 하상마찰을 결정하는 일반적인 방법의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1991년 10월~1992년 11월에 걸쳐 건설부 수자원국 댐계획과에서 한국건설기술연구원에 의뢰한 '댐설계를 위한 유역단위 비유사량의 조사 연구' 과업의 일환으로 조사된 내용을 근간으로 시작된 것으로, 본 과업을 위해 많은 지원을 해 준

담계획과 담당자들에게 심심한 사의를 표하는 바이다. 아울러, 본 논문을 세세히 검토해준 심사위원들에게 감사드리는 바이다.

参 考 文 献

1. Simons, D.B. and Richardson, E.V., "Form of Bed Roughness in Alluvial Channels", *Proceedings of ASCE*, Vol. 87, No. HY3, 1961, pp. 87-105.
2. 건설부/한국수자원공사, 한강주운개발사업 타당성 조사 보고서, 1989, pp. 219.
3. 한국건설기술연구원, 수정아인쉬타인방법의 한국하천에의 적용-하천 총유사량의 추정, 건기연 90-WR-112, 1990, pp. 234-246.
4. Chow, V.T., *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1959, pp. 108-123.
5. Anonymous, Report of the American Society of Civil Engineers "Task Force on Friction in Open Channels", *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 89, No. HY2, 1963, pp. 97-143.
6. French, R.H., *Open-Channel Hydraulics*, R.R. Donnelley & Sons Company, 1985, pp. 159-161.
7. Brooks, N.H., "Mechanics of Streams with Movable Beds of Fine Sand", *Transactions*, ASCE, Vol. 123, No. 2931, 1958, pp. 526-594.
8. Meyer-Peter, E. and Muller, R., "Formulas for Bed-Load Transport", *Report on Second Meeting of IAHR*, Stockholm, Sweden, 1948, pp. 39-64.
9. Einstein, H.A., and Barbarossa, N., "River Channel Roughness", *Transactions*, ASCE, Vol. 117, No. 2528, 1952, pp. 1121-1146.
10. Brownlie, W.R., *Prediction of Flow Depth and Sediment Discharge in Open Channels*, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Report No. KH-R-43A, California Inst. of Tech., Pasadena, Calif., 1981.
11. van Rijn, L.C., "Sediment Transport, Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness", *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 110, No. 12, 1984.
12. 建設省 土木研究所, 一次元河床變動計算法の改良, 河川部 河川研究室, 第3099號, 日本, 1992, pp. 10-11.
13. 建設部, 河川施設基準, 1980, pp. 232-237.
14. Simons, D.B., and Sentürk, F., *Sediment Transport Technology*, Water Resources Publication, Fort Collins, Colo., 1977, pp. 380-381.

(接受 : 1993. 5. 17)