

로키 산맥 소하천의 조립질 하상 퇴적물에 관한 연구*

김 중 욱**

A Study of Coarse Bed Materials in Small Streams in Rocky Mountains*

Jong-Wook Kim**

요약 : 본 논문에서는 조립질 하상이 잘 발달된 로키 산맥의 소하천들을 대상으로 퇴적물의 입경과 유역 면적과의 관계, 그리고 퇴적물의 입경과 하도 경사와의 관계를 중점적으로 조사하였다. 조사 결과, 퇴적물의 입경은 유역 면적의 증대에 따라 지수적으로 감소되었으며, 산지와 평지의 지형 경계부를 기점으로 그의 상류와 하류간에 입경 변화의 경향성이 서로 달랐다. 하도 경사 또한 유역 면적의 증대에 따라 지수적으로 감소되었는데, 그 분포 패턴은 퇴적물 입경의 경우와 큰 차이가 없었다. 따라서 퇴적물 입경과 하도 경사는 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었다. 이와 같은 조사 결과들을 유역 분지의 지형 및 지질 조건과 관련지어 고찰하여 볼 때, 본 지역에서는 높은 산지로부터 낮은 평지로 급격히 전환되는 지형 조건과 비교적 동질적인 지질 조건이 퇴적물의 입경 및 하도 경사에 영향을 미치고 있는 것으로 생각된다.

주요어 : 로키 산맥, 조립질 퇴적물, 입경, 유역 면적, 하도 경사

Abstract : This study surveyed intensively the relationships between grain size of coarse bed materials and some principal factors in channel system, drainage area and channel slope, in Rocky Mountains. The result of this research shows that there are statistically significant relationships between these factors. Generally, the grain size and the channel slope exponentially decreased in the study area with the increase in drainage area. However, there are great differences in grain size and channel slope between upstream and downstream channels. The boundary lines are commonly located at near the mouth of canyon. From these results, it can be concluded that the bed material characteristics and the channel slope are strongly influenced by the geological and geomorphological background of the drainage basin in this study area.

Key Words : Rocky Mountains, coarse bed materials, grain size, drainage basin area, channel slope

1. 서 론

1) 연구 목적

하천은 지표면을 변화시키는 가장 중요한 기구의 하나이다. 이러한 하천에 의한 지표면의 변화 과정 즉 지형형성작용은 여러 변수들이 종속적 혹은 독립적으로 관여하는 매우 복잡한 과정을 거쳐 이루어진다(Richards, 1982; Schumm, 1977). 그러나 이를 좀 더 단순화시켜 보면, 결국 하도 내를 유하하는 하천수와 그에 실려 이동되는 하상 퇴적물에

의해 결정되는 것이라고 볼 수 있다.

그러므로, Leopold and Maddock(1953) 이래, 눈부신 발전을 거듭해오고 있는 과정 분석 중심의 하천 지형학에서는 하천수의 수리 및 수문학적인 특성과 그와 연계되어 있는 하상 퇴적물에 관한 연구가 큰 비중을 차지하고 있다. 특히, 하상 퇴적물은 그를 적재(積載)하고 있는 하곡 및 하천의 지형학적인 특성을 잘 반영하고 있으므로, 이에 관한 조사가 학계의 각별한 관심을 끌어 왔다.

하상 퇴적물 조사에서는 퇴적물의 입경(粒徑, grain size), 원마도(圓磨度, roundness) 등 퇴적물

* 본 논문은 서울대학교의 해외연수 특별지원을 받아 연구한 것임.

** 서울대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Seoul National University)

자체의 특성에 관한 것과 운반 이동되는 퇴적물의 총량에 관한 것이 구분되는데, 양자 모두 하천 지형 체계를 구성하는 주요 변수들이므로 이들에 관한 조사는 하천 지형 연구에서 매우 중요시된다. 그러나 대상 하천의 특성과 조사 여건에 따라 조사의 중점은 다소 다를 수 있다. 자갈 하상(gravel channel bed)에 관한 연구에서는 흔히 입경을 중심으로 한 퇴적물 특성 조사가 핵심적인 경우가 많다.

본 연구에서는 자갈 하상이 지배적인 로키 산맥(Rocky Mountains)¹¹⁾의 소하천들인 볼더 크릭(Boulder Creek), 레프트핸드 크릭(Lefthand Creek), 세인트브레인 크릭(Saint Vrain Creek)을 대상으로 입경 중심의 하상 퇴적물 특성을 조사하였다. 특히, 퇴적물 입경의 하천 상·하류간 변화, 그리고 퇴적물 입경과 하도 경사와의 관계를 구명하는데 역점을 두었다.

연구 하천들은 높은 산지인 로키 산맥에서 발원하여 산지를 동서로 가로질러 평지인 그레이트 플레인스(Great Plains)로 흘러들고 있어서, 산지로부터 평지로 급격히 변화되는 지형적인 조건이 하천에 어떻게 반영되어 나타나는지를 잘 살필 수 있는 이점을 지니고 있다. 이러한 지형적인 조건은 태백 산지에서 발원하여 동해로 유입하는 영동 지방 하천의 경우와도 유사한 점들이 많다. 이 지역에 관한 연구는 우리 나라의 하천 연구에도 시사하는 바가 적지 않으리라 생각된다.

2) 연구 방법

연구 대상 하천들의 하상 퇴적물의 특성을 파악하기 위해서는, 우선 야외에서 퇴적물 표품을 채취하기 위한 지점을 선정하는 일이 필요하다. 본 연구에서는 상류에서 하류로 가면서 대략 5km 간격으로 볼더 크릭에서 12개, 레프트핸드 크릭에서 9개, 그리고 세인트브레인 크릭에서 11개, 도합 32개 조사지점을 선정하였다. 선정시에는 가급적 인위적인 간섭이 배제된 곳이면서, 하도 내에 기반암이 노출되어 있지 않고, 여울(riffle)과 소(沼, pool)가 연속적으로 잘 발달되어 있는 하도 구간을 택하였다.

퇴적물의 표품 채취는 Wolman(1954)의 방법에 따라 실시하였는데, 각 지점의 여울 구간에서만 행

하였다. 그런 이유는, 소는 수심이 깊어 퇴적물의 채취가 사실상 불가능한 경우가 종종 있기 때문이다. 또한 저수위시에 수면 위로 드러나는 자갈 바아(gravel bar)까지도 하상으로 간주하여 표품을 채취하였다.

표품 갯수는 통계처리의 유의성을 고려하여 각 지점 공히 100개씩으로 하였으며, 표품의 입경은 장·중·단경을 현장에서 자로 재서 구하였다. 그러나 입경의 경향성을 분석할 때에는 퇴적물의 중경(b축) 값만을 이용하였다.

그 밖에도 퇴적물 조사시, 암종(岩種)을 조사하였는데, 입자 크기가 작은 퇴적물은 암질의 자세한 특성을 파악키 어려워 화강암 및 변성암, 그리고 퇴적암(주로 사암)으로 단순화시켜 조사하였다.

한편, 하도 경사는 지도 작업과 야외 실측을 토대로 구하였다. 지도 작업에서는 등고선식으로 기복이 표현된 1 : 50,000 지도상에서 각 조사 지점을 사이에 두고 상류와 하류에서 등고선과 하천이 교차하는 두 지점간의 하도 경사를 계산하여 구하였으며, 야외에서는 퇴적물을 조사한 하도 구간의 수면 경사를 핸드레벨(hand level)을 이용하여 실측하였다.

야외 조사는 1996년 4월에서 11월에 걸쳐 행하였으며, 퇴적물 및 하도 경사의 실측은 7월과 8월에 집중 실시하였다. 실측 시에는 조사의 일관성을 고려하여 일정 기간 동안 강수가 없어 저수위가 유지되는 기간을 조사 기간으로 택하였다.

2 연구지역 개관

1) 지형 및 지질

본 연구 지역은 로키 산맥과 그에 인접한 그레이트 플레인스의 일부 지역을 포함한다. 이 지역은 지형 특성에 따라 크게 산지 체계(mountain system), 호그백 체계(hogback system) 및 산록면 체계(piedmont system)로 분류될 수 있다(Crosby, 1978).

산지 체계는 로키 산맥의 산계에 속하는 산지로 본 하천들의 중·상류 지역에 해당된다. 이 산지는 백악기 말엽에서 제3기 초엽에 걸쳐 있었던 라라미드 융기운동(Laramide uplift)과 제3기 마이오 세

에서 플라이오 세에 걸쳐 진행되었던 요곡 융기 운동(upwarping)을 받아 대체로 남북 방향의 주향을 가진 장대한 산지로 발달하게 되었다(Scott, 1975).

융기 이전에 이 지역을 동서 방향으로 가로질러 그레이트 플레인스로 흐르던 로키의 하천들은 지반 융기 운동과 더불어 하각작용(downward erosion)이 더욱 강화되었으며, 그에 따라 곳곳에 로키 산지를 동서로 가로지르는 협곡(canyon)²⁾이 생겨나게 되었다. 이러한 하곡 발달 과정은 소위 적재하천(superposed stream)에서 전형적인 것인데³⁾, 하천의 두부침식(headward erosion)이 하류에서 상류 방향으로 진행되었으므로 깊은 협곡은 하천의 중·상류 구간에 집중되고 있다.

한편, 협곡사이의 분수계 산지에서는 정부(頂部)가 비교적 평탄한 제3기 침식면(erosional surface)이 나타난다. 이 지형면(geomorphic surface)은 뚜렷한

경사 변환점이 없이 대륙 분수계(Continental Divide) 산지로 연속되기도 한다. 대륙 분수계는 말그대로 북미 대륙의 지붕을 이루는 곳인데, 이 곳의 분수계는 미시시피 강과 콜로라도 강이 갈라지는 곳이다. 이 분수계에는 아파치 피크(Apache Peak, 해발 4097m), 노스 아라파호 피크(North Arapaho Peak, 해발 4115m) 등 해발 약 4000m 이상에 달하는 높은 산지들이 열 지어 남북으로 뻗어 있다(그림 1 참조).

이와 같이 산지의 고도가 높은 관계로 위도가 대략 한반도의 중북부 지방 정도(대략 북위 39°45'~40°15')임에도 불구하고, 비록 소규모이기는 하지만, 빙하들이 분포한다⁴⁾. 이들 빙하는 과거 빙하기 동안에 보다 큰 규모로 발달되어 곳곳에 빙식곡과 빙하 퇴적물(till)을 쌓아 놓았다⁵⁾. 본 하천의 상류 일부 구간에서 곡폭(谷幅)이 넓은 골짜기가 발달된 것은 바로 이 빙하 침식 작용과 밀접한 관

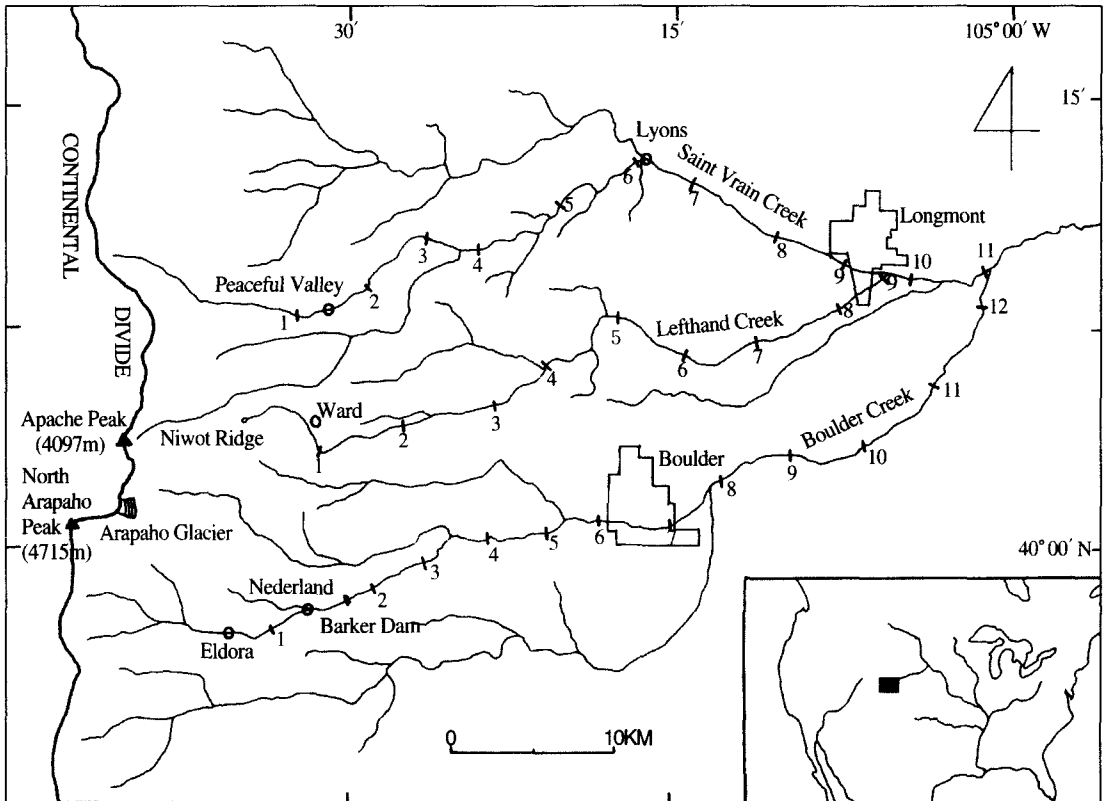


그림 1. 연구 지역 지도

련이 있다. 현 하천의 상류 일부 구간은 과거 빙하가 쌓아 놓은 빙하 퇴적물 혹은 빙하 유수성 퇴적물(glacio-fluvial deposits) 위에 적재된 상태로 흐르고 있다.

호그백 지형 체계는 산지 체계와 산록면 체계의 중간부에 위치한 호그백 산지로 로키 산맥의 외곽을 따라 좁게 띠 모양으로 병풍을 친 듯 남북으로 길게 발달되어 있다. 이 곳에 호그백이 생성된 것은 로키 산맥의 융기 때문인데, 고(古) 로키 산맥의 주변부에 고생대 말엽에서 중생대에 걸쳐 퇴적된 지층이, 지반 융기 운동시에 로키 산지 쪽으로 기울어져 솟아 올라 생겨난 것이다. 소위 '다코다 호그백(Dakota Hogback)'은 그 대표적인 것이다. 산지를 흐르던 로키 산맥의 하천들은 이 호그백 산지에 만들어진 좁디좁은 협곡을 통과하자마자 곧바로 그레이트 플레인스의 광활한 평지로 접어든다. 이 협곡의 입구는 평야에서 바라보면 마치 산지로 통하는 관문과 같다는 느낌을 준다.

산록면 체계는 호그백에 인접한 곳에는 페디먼트(pediment)와 메사(mesa), 그리고 하안 주변으로는 여러 단(段)의 하안단구(river terraces)가 발달된 곳으로, 이 지역 주민들의 주된 거주 공간이다. 덴버(Denver), 콜로라도 스프링스(Colorado Springs), 볼더(Boulder) 등 콜로라도의 주요 도시들은 대부분 이 곳에 입지하고 있다. 이와 같이 산록면 체계가 주요 주거지로 선택된 것은 산지와 평지로 통하는 길목일 뿐만 아니라, 각종 용수의 구득이 용이한 장소이기 때문이다. 로키의 하천들은 이곳에 이르면 산지 및 호그백에서와는 달리 하안에 넓은 범람원이 나타나는 등 평야지 하천에서 전형적으로 나타나는 충적 하도(alluvial channel)의 특징을 보인다.

본 연구 지역의 이러한 지형 특성은 1차적으로는 지반운동과 그에 수반된 하천의 하각작용에 의한 것이지만, 암석의 특성과도 관련이 있는 것으로 생각된다. 암석의 분포를 보면, 대체로 산지 체계에서는 선캠브리아기의 화강암 및 변성암이 기반을 이루고 있는 반면, 호그백 체계와 산록면 체계에서는 중·고생대의 퇴적암이 기반을 이루고 있다.

호그백과 산록면은 같은 퇴적암이라 하더라도, 시기와 구성 물질에서 차이가 있다. 호그백은 고생대 말엽에서 중생대 백악기 동안에 퇴적된 사암층⁶⁾

이 기반암인데 비하여, 산록면은 중생대 백악기의 셰일층이 기반을 이루고 있다. 사암과 셰일은 풍화와 침식에 대한 경연 차가 다르므로, 지반운동과 더불어 이러한 암석들의 분포가 호그백 산지나 산록면의 생성에 영향을 미쳤던 것으로 보고 있다.

2) 연구 하천

본 연구 하천들인 볼더 크릭, 레프트핸드 크릭, 그리고 세인트브레인 크릭은 미시시피 강의 한 지류인 사우스플래트 강(South Platte River)의 지류들로 로키 산맥에서 발원하여 그레이트 플레인스를 향하여 흘러내리는 소하천들이다(그림 1 참조).

이들 하천의 유역분지는 지형 및 지질 조건이 대체로 유사하다. 선캠브리아기 화강암과 변성암 기반 위에 놓인 중·상류는 전형적인 산지 하천(mountain stream)의 특성을 보이는 반면, 셰일 중심의 퇴적암 기반 위에 놓인 하류는 충적 하천의 특성을 보인다. 또한 중·상류는 깊은 협곡과 급경사의 하도, 그리고 거력(boulder) 내지 중력(cobble) 중심의 하상 퇴적물이 특징적이다. 이에 비하여, 하류는 넓은 범람원과 완만한 경사의 하도, 그리고 중력 내지 소력(pebble) 중심의 퇴적물이 특징적이다.

(1) 볼더 크릭

이 하천은 하도 길이(L, km)가 약 76.9km, 유역면적(A, km²)이 약 1,042km²에 달한다. 발원지는 대륙 분수계인 인디언 피크(Indian Peak) 동쪽 산록이며, 롱먼(Longmont) 인근에서 세인트브레인 크릭에 합류한다.

하천의 중·상류는 대체로 곡사면 경사가 급하며, 곡저지가 좁은 전형적인 산지 하곡을 이루고 있다. 그렇긴 하지만, 상류와 중류 구간간에도 다소의 지형 차이가 식별된다. 대략, 바커댐(Barker Dam) 상류 지역 즉, 조사 지점 2까지(L > 24.1km)는 빙하 침식을 받은 골짜기로 하곡의 곡저지가 그런대로 넓은 편이어서 그 위에 엘도라(Eldora), 네델란드(Nederland) 등 소규모의 산지 취락들이 입지하고 있다. 그러나 이로부터 지점 6(L = 42.6km)에 이르는 하도 구간에는 완전한 V자형의 협곡이 발달되어 있다. 범람원은 하천의 활주사면을 따라 소규모로 드문드문 나타난다. 따라서 취락

다운 취락은 없으며, 고립 가옥이 드물게 산재할 뿐이다. 이 하천은 지점 6을 벗어나면서부터 바로 넓은 평야로 흘러든다.

(2) 레프트핸드 크릭

이 하천은 하도 길이가 약 51.3km, 그리고 유역면적이 약 192.1km²로 연구 하천들 중에서 가장 규모가 작다. 발원지는 대륙 분수계에 인접한 나이윳리지(Niwot Ridge)이며, 최상류에는 저수지(Left-hand Reservoir)가 건설되어 있다. 또한 상류 일대에는 모레인(moraine)이 널리 나타나며, 곡저지가 넓다. 그러나 이 하천 최상류 취락인 워드(Ward)를 지나면서 완전한 협곡으로 달라진다. 협곡은 대략 지점 1(L=9.1km)에서 지점 5(L=31.6km)까지 연속되며, 그 사이에는 취락다운 취락이 없다. 지점 5의 직하류로는 넓은 평야가 나타난다. 이 하천 역시 통면에서 세인트브레인 크릭에 합류한다.

(3) 세인트브레인 크릭

이 하천은 연구 하천들 중 가장 규모가 크다. 레프트핸드 크릭으로의 합류 지점까지만 해도 하도 길이가 약 59.7km, 유역 면적이 약 878.8km²에 달한다. 본 연구의 고찰이 자갈 위주의 조립질 하상 퇴적물 분석에 있으므로, 하천 조사는 하상에서 자갈이 잘 관찰되는 곳까지만(L)65.5km, 대략 11 지점) 행하였다.

발원지는 볼더 크릭과 마찬가지로 대륙 분수계이다. 지점 1(L=13.1km)의 상류에는 넓은 빙식곡이 분포하며, 이의 곡저지에는 빙하 퇴적물이 널리 나타난다. 그러나 이 지점 직하류에 위치한 취락인 피스플 밸리(Peaceful Valley) 하류로는 협곡 모양이 완전한 V자형을 이룬다. 이 협곡은 산지에서 평지로 이어지는 곳인 리용(Lyons)까지(L)39.5km, 대략 지점 6까지) 연속된다. 리용의 하류로는 하곡이 넓으며, 충적 하도의 특성이 나타난다.

이 하천은 산지 하도로부터 충적 하도로의 변화가 다른 두 하천에서 보다 덜 급격한 것으로 관찰된다. 이는 산지에서 평지로 전환되는 일대의 지형 조건과도 관련이 있다. 즉, 이 지역에서는 산지 체계와 호그백 체계 사이에 넓은 분지가 발달되어 있어 산지로부터 평지로의 지형 전환이 다른 두 하천에 비하면 점적이다. 리용은 바로 이 분지에

입지한다.

3. 퇴적물의 입경 변화

1) 일반적 경향

하천의 하상 퇴적물은 결국 그 지역의 기반암에서 기원하는 것이지만, 기반암으로부터 풍화 침식을 받은 물질이 하도에 공급되는 과정은 그리 단순치는 않다.

그러나 이는 대략 두 경로로 요약될 수 있다. 그 하나는 하천의 직접적인 하각 및 측방침식을 받아 기반암으로부터 암편이 떨어져나와 하도에 유입되는 것이고, 다른 하나는 곡사면 구성 물질이 매스 무브먼트(mass movement), 뮐 침식(rill erosion) 등 사면 과정(hillslope process)을 통하여 하도에 공급되는 것이다. 이와 같이 퇴적물의 기원과 그것이 하도 내로 유입되는 과정이 서로 다를 수 있으므로, 하도 내의 거의 동일한 장소에 놓인 퇴적물이라 할지라도, 입경이 서로 같지 않은 경우가 많다.

그럼에도 불구하고, 퇴적물이 일단 하도 내에 유입되면, 비록 운반되는 양태는 서로 달라도, 결국은 하천수에 의하여 하류 방향으로 이동되어 가기 때문에, 하천의 상·하류간에 입경 변화에 있어서 일정한 경향성이 나타나게 된다. 이것은 하천수에 의해 퇴적물이 하류 방향으로 운반되면서, 도중에 마모(abrasion)되거나 풍화되며, 또 입자 크기에 따라 하류 방향으로 분급(sorting)되기 때문이다. 따라서 퇴적물의 평균적인 입경은 하류 방향일수록 감소되는 것이 일반적이다.

그러나 마모와 풍화 중 무엇이 입경 감소에 더 큰 영향을 미치는 것인지에 대해서는 확실치 않다. 근래에 콜로라도의 산지 하천을 대상으로 하천수에 의해 퇴적물이 운반된 거리를 조사한 한 연구에 의하면, 일반적으로 기대되는 것과는 달리, 퇴적물의 입경과 그것의 운반 이동 거리간에는 별 상관성이 없었다고 한다(Leopold, 1994, pp.215-216). 이는 분급 작용보다는 운반 과정에서 일어나는 마모 및 풍화작용이 퇴적물의 입경 감소에 더 큰 영향을 미친다는 것을 시사하고 있어 주목된다. 입경의 감소율은 흔히 지수(指數)적인 것으로 알려진

다.

이상과 같이 퇴적물의 입경이 하류 방향으로 감소되는 것이 일반적인 경향이라 할지라도, 자연 상태의 하천들은 각기 상이한 기후, 지형 및 지질 조건하에 놓여 있으므로, 한 하천의 상·하류간에, 또는 서로 다른 하천들간에 입경 변화의 양상이 매우 다양하다. 사실, 상·하류간 뿐만이 아니라, 동일한 하상 단면상에서도 위치에 따라 입자 크기가 서로 다르다. 이것은 유속 분포와 그와 연관된 하천수의 흐름이 하상 단면상의 위치에 따라 달라지기 때문이다. 단면상에서 나타나는 입경 차가 단 거리에 걸친 상·하류간의 입경 차보다 오히려 더 큰 경우가 많다. 그러나 여기서는 일정 하도 구간에 걸쳐 퇴적물의 평균적인 입경에서 나타날 수 있는 경향성을 살펴보는 것이 주된 연구 목적이므로 이에 관하여는 상술하지 않는다.

퇴적물 입경 변화가 일정한 경향성만을 보이는 것이 아니라는 것은 Hack(1957), Brush(1961), Miller(1958), Kim(1989) 등의 연구에서도 알 수 있다. 이들에 의하면, 퇴적물의 입경은 하류 방향으로 반드시 감소되는 것만이 아니라, 때로는 일정

하도 구간에 걸쳐 입경 변화가 거의 없거나 불규칙하며, 심지어 하류 방향으로 가면서 역으로 증가 되는 경향을 보이기도 한다. 그러나 이와 같은 입경 변화의 내용은 바로 그 하천이 놓인 지역의 지형, 지질 등 환경적인 조건을 반영하는 것이므로, 하천의 지형 특성을 파악하기 위해서는 퇴적물 입경 특성을 조사하는 것이 필수적으로 요구된다.

2) 퇴적물 입경과 유역 면적과의 관계

본 연구에서는 산지로부터 평지로의 지형 변화가 급격한 로키 산맥의 소하천들을 대상으로 하상 퇴적물의 입경에 어떤 경향성이 있는지 조사하였다.

이를 위하여 볼더 크릭에서 12개, 레프트핸드 크릭에서 9개, 세인트브레인 크릭에서 11개 등 총 32개의 조사 지점을 선정하여, 각 지점에서 100개씩 도합 3,200개의 표품을 채취하였다. 입경은 b축을 기준으로 하였으며, 통계 처리시 100개 표품의 산술 평균값을 각 지점의 평균적인 입경으로 정하였다.

이상과 같은 방법으로 각 지점의 평균 입경을 구한 결과, 볼더 크릭에서는 52mm~182mm, 레프

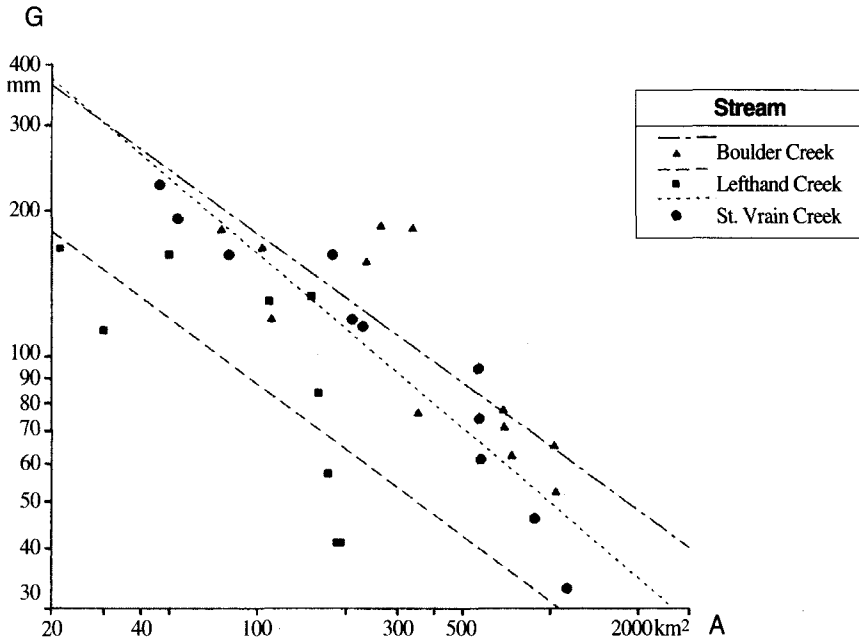


그림 2. 유역 면적(A)과 하상 물질 입경(G)과의 관계

트랜드 크릭에서는 41mm~165mm, 그리고 세인트 브레인 크릭에서는 46mm~226mm의 분포를 각각 보였다. 또한 대체로 입경의 최대치는 조사 구간의 상류에서, 그리고 최소치는 하류에서 나타났다(그림 2 참조).

입경 변화의 경향성은 입경과 유역 면적, 또는 입경과 하도 길이와의 관계를 토대로 파악될 수 있다. 그러나 퇴적물의 입경은 하도 길이보다는 유역 면적과 더 관련이 있으므로 여기서는 주로 유역 면적과의 관계를 토대로 입경 변화의 경향성을 조사하였다.

그림 2와 아래의 회귀식들은 연구 하천들을 대상으로 유역 면적(A, km²)과 퇴적물 입경(G, mm)과의 관계를 조사한 것이다.

- 볼더 크릭 $G = 10^{3.13} * A^{-0.44} \quad r = -0.81 \quad (31)$
- 레프트핸드 크릭 $G = 10^{2.84} * A^{-0.45} \quad r = -0.70 \quad (32)$
- 세인트브레인 크릭 $G = 10^{3.24} * A^{-0.52} \quad r = -0.94 \quad (33)$
- 전체 하천 $G = 10^{2.77} * A^{-0.33} \quad r = -0.67 \quad (34)$

여기서 전체 하천이란 볼더 크릭, 레프트핸드 크릭, 그리고 세인트브레인 크릭의 값들을 다 포함한

경우이며, r은 피어슨 상관계수(Pearson coefficient)를 의미한다.

이들 식 3.1~3.4의 상관계수는 -0.67에서 -0.81사이로 그리 높다고는 볼 수 없다. 그러나 통계적으로 볼 때, 네 경우 모두 95%의 신뢰수준에서, 유역 면적과 퇴적물 입경 사이에 의미 있는 상관관계가 성립되는 것으로 분석되었다. 또한 식들의 지수가 부(負)의 값을 보이는 것을 보면, 본 연구 지역에서는 유역 면적이 증대 또는 감소됨에 따라 그와는 정반대로 퇴적물의 입경이 감소 또는 증대되는 관계에 있다고 말할 수 있다.

여기서 유역 면적이 증대 또는 감소된다는 것은 곧 하도의 길이가 증대 또는 감소된다는 것과도 같은 말이다. 유역 면적(A, km²)과 하도 길이(L, km)와의 관계는 그림 3과 아래의 식 3.5~3.8에 잘 나타나 있다.

- 볼더 크릭 $L = 2.72 * A^{0.47} \quad r = 0.98 \quad (35)$
- 레프트핸드 크릭 $L = 1.45 * A^{0.65} \quad r = 0.98 \quad (36)$
- 세인트브레인 크릭 $L = 2.95 * A^{0.45} \quad r = 0.98 \quad (37)$
- 전체 하천 $L = 3.02 * A^{0.45} \quad r = 0.95 \quad (38)$

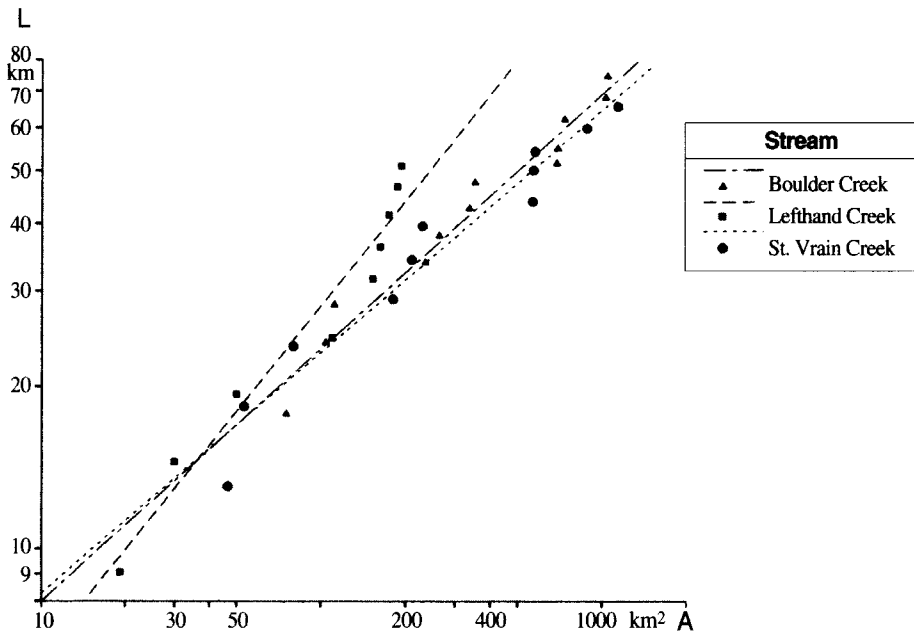


그림 3. 유역 면적(A)과 하도 길이(L)와의 관계

상기 식 3.5~3.8의 지수 값을 보면, 레프트핸드 크릭의 0.65를 제외하고는 지수 값들이 0.5 이하의 값을 보이고 있다. 이는 미국 동부의 하천들 또는 세계의 주요 하천들에서 나타나는 평균적인 값(대체로 0.6~0.7)보다 다소 낮은 것이다(Hack, 1957: Leopold et al, 1964, pp.144-145). 이것은 유역 면적의 증가에 대한 하도 길이의 증가율이 평균적인 경우보다 낮다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 볼더 크릭과 세인트브레인 크릭의 하천 특성과도 관련이 깊은 것으로 해석된다. 즉, 이 두 하천은 중·상류 구간에서 여러 큰 지류들로 분기되어 흐르다 하류에서 합류되고 있어, 본류 구간만을 대상으로 유역 면적과 하도 길이를 조사할 경우, 유역 면적에 비하여 하도 길이가 작게 산정될 가능성이 있다.

그럼에도 불구하고, 상기 식 3.5~3.8에서 분명한 것은 유역 면적과 하도 길이가 정(正)의 상관관계를 보인다는 사실이다. 그러므로 유역 면적을 중심으로 퇴적물 입경의 경향성을 살펴본다 하더라도 그것은 바로 하도 길이를 중심으로 살펴본 것과 다르지 않다는 것을 의미한다. 따라서 본 지역에서는 유역 면적이 증대될수록, 즉 하천의 하류 방향으로 가면서, 퇴적물의 입경이 증대되는 경향을 보인다고 분명하게 말할 수 있다.

한편, 식 3.1~3.4의 지수값은 전체 하천의 경우인 -0.33을 제외하면, -0.44에서 -0.52 사이로 하천별 차이가 크지 않다. 그 주된 이유는, 상기의 지역 개관에서 살펴보았듯이, 연구 하천의 유역 분지들 간에 지질 및 지형 조건이 유사할 뿐만 아니라, 지리적으로 서로 인접하여 있고, 규모 또한 하천간 큰 차이가 없는 점에서 찾을 수 있다.

또한 볼더 크릭과 레프트핸드 크릭의 경우, 지수 값이 각각 -0.44와 -0.45로 거의 차이가 없다는 점이 눈길을 끄는 데, 이는 두 하천이 세인트브레인 크릭과는 달리, 지형 및 지질 조건에서 보다 더 공통적인 점들을 많이 간직한 때문으로도 생각될 수 있다. 그러나 퇴적물의 입경(G, mm)과 하도 길이(L, km)와의 관계를 조사한 결과, 아래 식 3.9~3.11의 지수 값에서 보듯이, 볼더 크릭과 레프트핸드 크릭이 세인트브레인 크릭과 크게 구별되는 것은 아니어서 이를 단정적으로는 말할 수 없다.

볼더크릭	$G = 10^{3.53} * L^{-0.93}$	$r = -0.83$	(3.9)
레프트핸드 크릭	$G = 10^{3.08} * L^{-0.79}$	$r = -0.82$	(3.10)
세인트브레인 크릭	$G = 10^{3.72} * L^{-1.11}$	$r = -0.93$	(3.11)

3) 중·상류와 하류간의 입경 차

그림 2에서 식별되는 중요한 특징 중의 하나는 중·상류 및 하류의 하도간에 퇴적물 입경의 변화 양상이 서로 다르다는 점이다. 볼더 크릭과 레프트핸드 크릭의 입경 값들을 자세히 살펴보면, 볼더 크릭에서는 지점 6(L=42.6km, A=335.6km²)과 7(L=47.5km, A=352.0km²)사이, 그리고 레프트핸드 크릭에서는 지점 5(L=31.6km, A=152.0km²)와 6(L=36.2km, A=161.6km²)사이를 기준으로 그의 상류와 하류간에 입경 차가 매우 크다.

즉, 볼더 크릭은 입경이 상류에서 119mm~185mm, 하류에서 52mm~76mm, 그리고 레프트핸드 크릭은 상류에서 113mm~165mm, 하류에서 41mm~84mm의 값을 보이고 있다. 또한 상기한 기준점들간에는 볼더 크릭은 입경 차가 107mm(지점 6은 183mm, 지점 7은 76mm), 그리고 레프트핸드 크릭은 49mm(지점 5는 133mm, 지점 6은 84mm)에 달한다.

야외 조사에 의하면, 중·상류와 하류를 가르는 기준이 되는 지점들은, 한결 같이 산지 체계가 호그백 체계를 거쳐 산록면 체계로 전환되는 일대에 위치하고 있었다. 이로 미루어 볼 때, 본 지역에서 이와 같이 중·상류와 하류간에 입경 차가 현저한 것은 중·상류 지역인 로키 산지로부터 하류 지역인 평지로의 지형 전환이 매우 급격한 때문인 것으로 해석된다.

이는 산지와 평지의 고도차를 조사해보면, 확연히 알 수 있다. 볼더 크릭은 하천의 연장선상에 놓인 분수계 고도가 해발 약 4070m, 그리고 지점 6이 해발 약 1660m로 고도차가 무려 2410m에 달하며, 레프트핸드 크릭은 분수계 고도가 해발 약 3500m, 그리고 지점 5의 고도가 해발 약 1710m로 고도차가 1790m에 달한다. 이를 경사(100*tanθ)로 환산하면, 두 하천 모두 약 5.7로, 평지의 하류 구간 경사(볼더 크릭 0.5, 레프트핸드 크릭 1.1)에 비하면 매우 급하다.

중·상류에서 하류로의 지형 변화가 큰 것은 아

의 관찰로도 알 수 있다. 평지 즉, 그레이트 플레인 스로부터 연구 하천들의 중·상류가 놓인 로키 산맥을 바라다보면, 로키 산맥의 산자락을 따라 병풍처럼 길게 뻗은 호그백 산지와 그의 평야쪽 전면에 위치한 산록면이 매우 급한 각을 이루면서 만나고 있음을 보게 된다. 본 하천들은 이 산지들을 동서로 절개하듯이 관류하여 평야로 흘러내린다.

그러므로 하천은 협곡의 곡구를 벗어나면서 하도 경사가 완만해질 뿐만 아니라, 특히 하폭과 하곡이 크게 넓어지므로, 운반력이 급격히 약화되게 된다. 이 결과, 곡구 일대에는 거력 퇴적물이 많이 쌓이는 반면, 그 하류로는 퇴적물의 입경이 급격히 감소된다. 따라서 곡구의 상하류간에 퇴적물 입경차는 클 수밖에 없다.

실제로, 야외 조사시 관찰한 바에 의하면, 곡구의 하상에는 거력이 다량으로 쌓여 있었다(Bradley and Mears, 1980)⁷⁾. 이들의 상당수는 대홍수시⁸⁾가 아니면 거의 이동되지 않는다. 볼더 크릭의 경우, 거력들의 일부, 특히 곡구의 여울 구간에 퇴적된 것들은 효과적인 하천 관리를 위해 콘크리트 구조물로 인위적으로 하상에 고정되기도 하였다.

입경 변화에서 흥미로운 것은 배후 산지에서 비롯되는 화강암 및 변성암만을 대상으로 조사한 결과인데, 볼더 크릭에서는 기준점 중심으로 상·하류간(지점 6과 7 사이) 입경 차가 무려 121mm에 달하였다. 이는 전체 퇴적물을 조사한 경우보다 14mm가 많은 것이다. 그러나 이것이 상술한 바와 같은 인위적인 퇴적물 변화에 기인한 것인지는 판단키 어렵다. 한편, 기준점의 하류로 가면서는 암석에 따른 입경 차가 두드러지지 않은 것으로 조사되었다.

이와 같이 중·상류와 하류간의 퇴적물의 입경 차이가 현저하다는 것은 현 하천과 그것의 그루이 되는 하곡 지형간에 서로 적응 조절된 상태 즉, 평형 상태(graded state)가 아니라는 느낌을 주기도 한다. 이는 중·상류 하도의 곳곳에 암반 노출 지점이 많다는 사실에서 더욱 그러하다. 그러나 이 일대 하천의 종단곡선에서는 분명한 경사변환점들이 식별되지 않으며(Campbell, 1964), 평형 하천(graded stream)이라 할 지라도 불균등한 입경 분포 때문에 반드시 평활한 concave 곡선이 나타나지는 것은 아니므로(Yatsu, 1955), 평형 하천 여부에

관해서는 좀 더 조사가 필요하다.

한편, 그림 2의 세인트브레인 크릭은 다른 두 하천과는 다소 다른 모습을 보여준다. 즉, 중·상류와 하류간에 입경 변화가 보다 점이적이다. 세인트브레인 크릭의 경우, 산지에서 평지로 달라지는 길목에 비교적 넓은 분지가 자리잡고 있어, 배후 산지와 평지 사이의 지형 전환이 다른 두 하천에 비하여 보다 점이적인 것에 원인이 있다고 생각된다.

4) 중·상류에서의 불규칙한 입경 변화

그림 2를 잘 살펴보면, 상술한 기준점들의 상류로는 퇴적물의 입경 변화가 매우 불규칙하여 어떤 경향성을 언급하기가 곤란하다. 다시 말하여, 중·상류 하도만을 살핀다면, 하천의 하류 방향일수록 퇴적물의 입경이 감소된다고 말하기는 어렵다. 이와는 달리, 기준점들의 하류에서는 감소의 경향성이 충분히 인정될 수 있다. 특히, 레프트핸드 크릭에서 더욱 그러한데, 이의 입경 감소율은 다른 하천들에 비하여 큰 편이다.

이와 같이 중·상류의 하도들에서 입경 변화의 경향성이 분명치 않은 것은 이들 하도가 전형적인 산지 하천의 성격을 지니고 있기 때문이다. 야외 조사에 의하면, 본 지역의 분수계에 가까운 상류 하곡에서는 현 하천의 지형형성작용과는 거의 무관하게 계곡 내에 지난 빙하기 동안에 퇴적된 빙하 퇴적물이 하도에 유입되는 환경 하에 놓여 있으며, 중류에서는 협곡의 가파른 곡사면으로부터 사면 물질이 공급되거나, 하상 및 하안으로부터 암편이 끊임없이 하도 내로 투입될 수 있는 지형적인 조건하에 놓여 있음을 알 수 있었다. 이런 이유로 중·상류의 하도에서는 퇴적물 입경이 하류 방향일수록 감소되는 경향을 보이지 않는 것으로 판단된다. 이런 입경 변화의 불규칙성은 볼더 크릭과 레프트핸드 크릭에서 두드러진다. 반면에, 세인트브레인 크릭에서는, 미약하긴 하지만, 입경 감소의 경향성이 식별된다.

산지 하천에서 이와 같이 입경 변화가 불규칙하게 나타나는 것은 김종욱(1991), Miller(1958)등 여러 선행 연구들에서 이미 확인된 바 있다. 이 중 김종욱의 연구는 지질 및 지형 조건이 본 지역과 유사한 점들이 많은 하천들에 관한 것이어서 관심을 끈다.

그의 연구에 의하면, 태백산맥에서 발원하여 동해로 유입하는 영동 지방의 하천들, 특히 화강암 기반 위를 흐르는 하천들인 사천내와 신리천에서는 거력 내지 중력 퇴적이 지배적인 중·상류 구간만을 놓고 본다면, 하류 방향일수록 입경이 감소되는 경향이 그리 분명치 않다(김종욱, 1991, 그림 2 참조). 또한 중·상류 및 하류간에 입경 차가 큰 것으로 조사되었다.

이러한 사실은 본 연구의 결과와도 일치하는 것이다. 이로 미루어 볼 때, 유사한 지형 및 지질 조건하에서는 퇴적물의 입경 분포 역시 유사한 경향성을 보여 준다고 판단된다.

4. 퇴적물 입경과 하도 경사와의 관계

1) 하도 경사 변화

하도 경사는 지도 작업 및 야외 실측을 통하여 구하였다. 지도 작업에서는 등고선식으로 기록이 표현된 1 : 50,000 지도상에서 각 조사 지점을 사이에 두고 등고선과 하천이 교차하는 두 지점간의 하도 경사를 계산하여 구하였으며, 야외에서는 퇴적물을 조사한 여울 구간의 수면 경사를 핸드레벨을 이용하여 실측하였다.

이상과 같은 방법으로 구한 각 하천별 하도 경사는 표 1과 같다. 표 1에서 평균 경사란 각 지점의 하도 경사를 합하여 산술 평균한 값을 말한다.

표 1에 의하면, 평균 경사가 가장 큰 하천은 레프트핸드 크릭이며, 가장 작은 하천은 볼더 크릭이다. 이는 지도에서 계측한 경사(Sm)이든, 야외에서 실측한 경사(Sr)이든 마찬가지로인데, 분수계에서 최

하류 조사 지점까지의 하도 경사를 비교하여 보아도 결과는 동일하다. 즉, 레프트핸드 크릭은 3.93, 볼더 크릭은 3.47, 그리고 세인트브레인 크릭은 3.54의 값을 보이고 있다.

한편, 표 1를 보면, Sm이 Sr보다 거의 모든 경우에 있어서 다소 높은 것으로 조사되었다. 그런 이유는 소(沼)에 비하여 대체로 경사가 급한 여울 구간만을 대상으로 경사를 실측하였기 때문이다. 이에 대하여 지도상의 계측에서는 한 개의 여울보다는 긴 하도 구간 즉, 수개의 여울과 소를 포함하는 하도 구간의 경사를 구하였으므로 실측 경사 값보다 작을 수밖에 없다.

Sm과 Sr간의 상관관계는 표 2에서 보듯이 그리 높은 편이 아니다. 또한 Sm을 토대로 유역 면적 및 입경과의 상관관계를 조사한 경우가 Sr을 토대로 조사한 경우보다 상관계수가 더 높은 값을 보인다(표 2 참조). 이는 Penning-RowSELL and Townshend (1978)가 여울의 하상 경사(local slope, 약 6.1m 이상의 거리 기준)는 퇴적물의 입경, 그리고 구간 경사(reach slope)는 유량과 더 높은 상관성을 갖는다고 밝힌 사실과는 다소 다른 것이라 할 수 있다. 여기서 유량은 유역 면적과 정(正)의 상관관계에 있으므로, 본 연구에서 Sm이 Sr보다 유역 면적과 더 높은 상관성을 보인다고 한 것은 Penning-RowSELL and Townshend(1978)의 연구 결과와 배치되지 않는다. 그러나 Sr은 상기한 local slope와 마찬가지로 여울을 대상으로 실측한 것이어서 그들의 연구와는 다른 결과인 것으로 생각된다. 이에 대해서는 차후의 연구에서 더 밝혀야겠지만, 아마도 실측 구간의 길이가 서로 다른 데에 원인이 있는 것으로 생각된다.

표 1. 하도 경사 분포와 평균경사

(단위: 100*tanθ)

하천 이름	경사 분포 (지도)	경사 분포 (야외조사)	평균 경사 (지도)	평균 경사 (야외조사)
볼더 크릭	2.8 - 0.3	3.6 - 0.6	1.33	1.88
레프트핸드 크릭	5.8 - 0.4	4.3 - 1.1	2.44	2.96
세인트브레인 크릭	4.0 - 0.3	5.5 - 1.5	1.80	2.59
전체 하천	5.8 - 0.3	5.5 - 1.5	1.81	2.43

표 2. 유역 면적과 하도 경사와의 상관계수

하천 이름	A-Sm	A-Sr	Sm-G	Sr-G	Sm-Sr
볼더 크릭	-0.8\6	-0.44	0.95	0.67	0.59
레프트핸드 크릭	-0.82	-0.59	0.97	0.86	0.81
세인트브레인 크릭	-0.95	-0.84	0.98	0.87	0.92
전체 하천	-0.86	-0.68	0.91	0.67	0.76

(Sm은 지도에서 계측한 경사, 그리고 Sr은 야외에서 실측한 경사임)

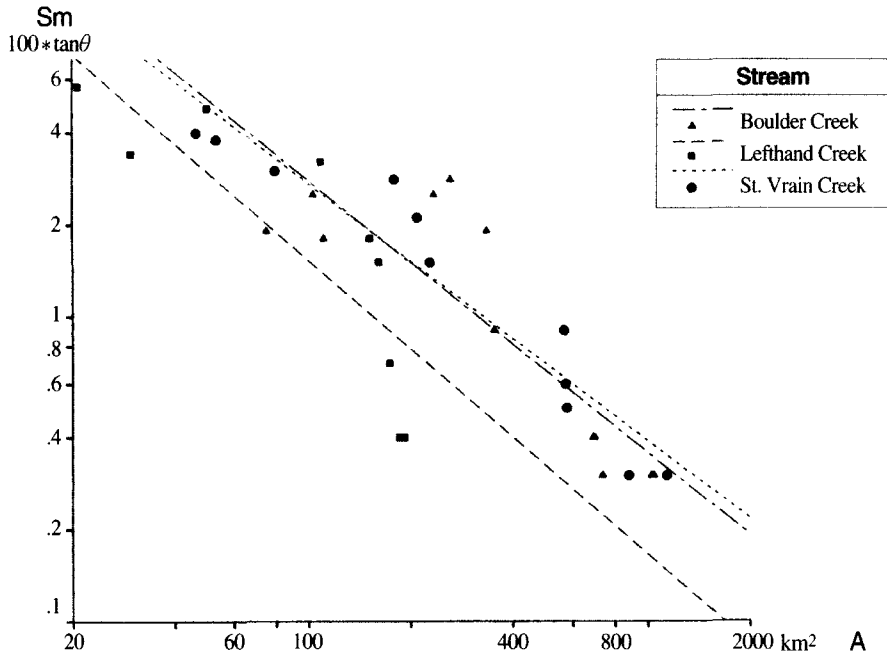


그림 4. 유역 면적(A)과 하도 경사(Sm)와의 관계

하도 경사(Sm, $100 \cdot \tan \theta$)의 상하류간 경향성은 유역 면적(A, km^2)과의 관계를 토대로 조사하였다. 아래의 회귀식 4.1~4.4와 그림 4는 이를 잘 보여준다.

볼더크릭	$Sm = 10^{2.0} \cdot A^{-0.89} \quad r = -0.86 \quad (4.1)$
레프트핸드 크릭	$Sm = 10^{2.0} \cdot A^{-0.96} \quad r = -0.82 \quad (4.2)$
세인트브레인 크릭	$Sm = 10^{2.0} \cdot A^{-0.84} \quad r = -0.95 \quad (4.3)$
전체하천	$Sm = 10^{2.0} \cdot A^{-0.76} \quad r = -0.86 \quad (4.4)$

이에 의하면, 유역 면적과 하도 경사는 반비례하는 관계에 있다. 즉, 본 연구 지역에서는 하천의 하류 방향일수록 하도 경사가 감소되는 경향을 보인다. 한편, 위 식들의 지수 값을 보면, 세인트브레인 크릭이 가장 작은 반면, 레프트핸드 크릭이 가장 크다. 여기서 지수 값은 경사 감소율을 의미하므로, 이를 달리 말하면, 세인트브레인 크릭의 경사 감소율이 가장 작은 반면, 레프트핸드 크릭의 경사 감소율은 가장 크다고 하겠다(그림 4 참조).

그림 4의 세부적인 모습을 보면, 대체로 하류 구간에서는 유역 면적이 증대됨에 따라 즉, 하류 방향일수록 경사 감소가 비교적 뚜렷하지만, 중·상

류에서는 경사 변화의 경향성이 분명치 않은 것을 알 수 있다. 특히 볼더 크릭은 지점 6(L=42.6km, A=335.6 km^2), 그리고 레프트핸드 크릭은 지점 4(L=24.6km, A=109.3 km^2)까지 유역 면적과 하도 경사 사이에 일정한 관계가 성립된다고 보기는 어렵다. 이러한 경향성은 퇴적물 입경과 유역 면적과의 관계에서 살펴본 것과 거의 마찬가지로 생각된다(그림 2 참조).

2) 퇴적물 입경과 하도 경사와의 관계

하도 경사는 유속에 영향을 미치며, 유속은 다시 금 퇴적물의 운반에 영향을 미치므로 하도 경사와 퇴적물의 입경과는 밀접한 관련이 있다. 그러나, 하도 경사에는 퇴적물의 입경 이외에도 유량, 지형 및 지질 조건 등 여러 하천 변수들이 개재되므로 하도 경사와 퇴적물 입경과의 관계는 복잡한 양상을 보인다.

이에 관한 연구로 잘 알려진 Hack(1957)에 의하면, 퇴적물의 입경과 하도 경사와의 관계는 동일한 지질 조건을 가진 곳에서는 일정한 경향성을 가지지만, 그렇지 않은 경우에는 그들간에 통계적으로

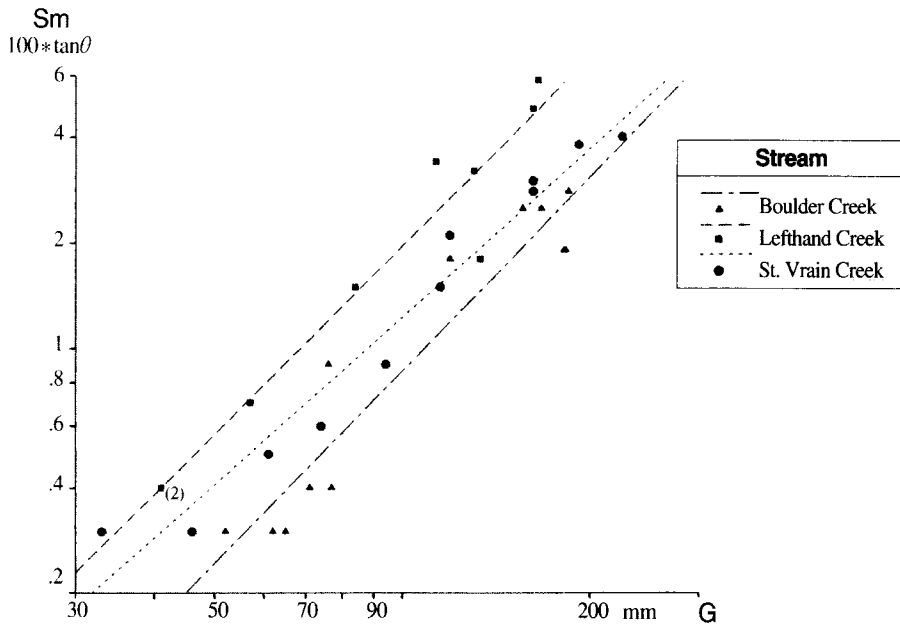


그림 5. 하상 물질 입경(G)과 하도 경사(Sm)와의 관계

의미 있는 상관관계가 성립되지 않는다고 한다.

본 지역의 경우, 중·상류 지역은 대체로 유사한 암석의 조건 즉, 선캠브리아기의 화강암 및 변성암, 그리고 하류 지역은 중·고생대의 퇴적암이 기반을 이루고 있는 등 지질 조건이 비교적 단순하면서도 동질적이므로 퇴적물의 입경과 하도 경사 간에는 의미 있는 상관관계가 성립될 것으로 예측된다.

아래의 식 4.5~4.8은 본 지역에서 퇴적물의 입경(G, mm)과 하도 경사(Sm, $100 \cdot \tan \theta$)와의 관계를 회귀분석을 토대로 조사한 것이다(그림 5 참조).

- 볼더크릭 $Sm = 10^{-3.72} \cdot G^{1.83} \quad r = 0.95 \quad (4.5)$
- 레프트핸드 크릭 $Sm = 10^{-3.27} \cdot G^{1.78} \quad r = 0.97 \quad (4.6)$
- 세인트브레인 크릭 $Sm = 10^{-3.08} \cdot G^{1.58} \quad r = 0.98 \quad (4.7)$
- 전체하천 $Sm = 10^{-3.20} \cdot G^{1.65} \quad r = 0.91 \quad (4.8)$

이에서 알 수 있듯이, 본 지역에서는 퇴적물의 입경과 하도 경사간에 통계적으로 의미 있는 상관관계가 성립된다. 즉, 퇴적물의 입경이 증대될수록 하도 경사가 그에 비례하여 증대되는 관계에 있다.

이러한 것은, 이미 살펴본 바와 같이, 퇴적물의

입경과 하도 경사가 각각 유역 면적과 반비례하는 관계에 있었으므로 이미 예견된 것이기도 하다. 그러나 이들의 상관계수는 세 하천 모두 0.95 이상으로 매우 높다. 또한, 유역 면적과 퇴적물 입경, 그리고 유역 면적과 하도 경사와의 관계에서 각각 얻었던 상관계수보다 더 높게 나타난다(식 3.1~3.4 와 4.1~4.4 참조). 이것은 본 지역에서 퇴적물 입경과 하도 경사와의 관계가 다른 것들과의 관계보다 더 높은 상관성을 지니고 있음을 의미한다.

이러한 사실은 본 연구 지역과 유사한 지형 및 지질 조건하에 놓여 있는 하천들을 조사한 김종욱(1991)의 연구에서도 마찬가지로 확인된다. 이로 미루어 볼 때, 하도 경사가 퇴적물 특성에 의해서만이 결정되는 것은 아닐지라도, 산지로부터 평지로 지형 전환이 급격히 이루어지고, 지질 조건 또한 비교적 동질적인 하천들에서는 양자간의 관계가 매우 높은 상관성을 지니는 것으로 생각된다.

이러한 사실을 입증하는 또 다른 증거는 회귀식 4.5~4.7의 지수 값이다. 이들을 보면, 볼더 크릭이 1.83, 레프트핸드 크릭이 1.78, 그리고 세인트브레인 크릭이 1.58로 연구 하천간에 큰 차가 없다. 이 또한 김종욱(1991)의 연구에서와 다를 바 없다. 김종

육의 연구에서는 화강암 기반 위를 흐르는 사천내와 신리천의 경우, 각각 1.36과 1.37로 거의 차가 없었다.

5. 종합고찰 및 결론

1) 종합고찰

하상 퇴적물의 입경은 하도 체계의 주요 구성요소로서 기원암의 암질(lithology)이나 운반 과정에서 발생하는 마모 및 풍화 작용, 그리고 하천수의 분급 작용에 영향을 받는다. 그러나 퇴적물의 입경은 이와 같이 하도 체계 내에서 종속적으로만 결정되는 변수는 아니며, 때로는 하폭, 수심, 유속, 하도 경사 등 하천의 수리기하학(hydraulic geometry)적인 특성에 독립 변수로서 영향을 미치기도 한다.

그러므로 하천의 역동적인 지형 변화 과정을 분석하는 것에 관심의 초점을 두고 있는 기능적인 접근(functional approach)에서는 퇴적물의 입경과 다른 하천 변수들과의 관계를 구명함으로써 하천의 지형학적인 특성을 파악하고자 하는 노력을 경주하여 왔다. 로키 산맥의 소하천 하상 퇴적물의 입경을 조사한 본 연구는 바로 그런 연장선상에 있는 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 퇴적물 입경 변화에 내재한 경향성을, 주로 유역 면적 및 하도 경사와의 관련성을 토대로 조사하였다. 유역 면적은 유량에 대신할 수 있는 하천 체계 변수이므로, 하상 퇴적물과는 논리적으로 볼 때, 유의미한 관계에 있다고 하겠다. 그러나 퇴적물의 운반에는 유량 이외에도 하곡의 지형 및 지질 조건이 영향을 미치기 때문에 동일한 하천일지라도 상·하류간에 입경 변화의 경향성이 일관되게 유지되지만은 않는다.

이러한 점은 본 연구에서도 마찬가지로 확인되었다. 중력 내지 거력 중심의 산지 하도가 전형적인 중·상류에서는 유역 면적과 퇴적물 입경과의 관련성을 거의 식별키 어려웠으며, 중력 내지 소력 중심의 충적 하도가 발달된 하류에서는 변화의 경향성이 비교적 분명한 편이었다. 또한 중·상류 및 하류 하도 간에는 입경 차가 큰 폭에 달하였다. 이는 중·상류 지역과 하류 지역의 지형 및 지질 조건이 현저히 다른데 기인하는 것으로 해석되었다.

즉, 중·상류에서는 산지 협곡이 대부분이어서 하도 주변으로부터 새로운 퇴적물이 많이 유입되고 있을 뿐만 아니라, 산지로부터 평지로의 지형 전환이 매우 급격하여, 하천은 산지의 협곡을 벗어나면서 운반력이 크게 약화되어 거력들이 주로 곡구 주변의 하도에 퇴적되는 반면, 그 하류로는 퇴적물의 입경이 크게 감소되고 있다. 그러므로 퇴적물은 산지와 평지의 접점부 일대를 기점으로 상·하류간에 큰 차이가 있는 것으로 판단되었다.

한편, 하도 경사는 퇴적물의 입경 분포와 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었다. 양자간의 상관계수가 공히 0.95 이상에 달하고 있다. 이는 유역 면적의 증대에 따라 퇴적물의 입경, 그리고 하도 경사가 통계적으로 의미 있는 상관관계를 이루며 반비례하는 것에서도 이미 예측된 결과이다.

Hack(1957)등의 연구에 의하면, 퇴적물의 입경과 하도 경사와의 관계는 동일한 지질 조건이 전제된 경우를 제외하고는 상관관계가 매우 낮으며, 제 3의 변수 즉 유역 분지를 고려한 때에만 높은 상관관계가 성립된다고 한다. 사실, 아래의 Rubey(1952) 수식에서도 알 수 있듯이, 하도 경사는 퇴적물 입경 이외에도 유량, 퇴적물의 양, 하상의 형태지수 등 여러 하도 변수들이 영향을 미친다.

$$S^3 = k Q_s^2 M / Q^2 X$$

여기서 S는 하도 경사, M은 퇴적물의 입경, Q는 유량, Q_s 는 퇴적물의 양, X는 형태지수(=수심/하폭), 그리고 k는 상수를 의미한다.

그럼에도 불구하고, 본 연구에서 퇴적물의 입경과 하도 경사와의 관련성이 매우 높은 것으로 조사된 것은 우선 첫째로 유역 분지의 지형 및 지질 조건이 비교적 등질적인 것에 이유가 있는 것으로 생각된다. 즉, 중·상류의 대부분 하도 구간이 동일한 기반암(주로 화강암) 위에 놓여 있으며, 산지, 호그백 및 산록면 체계로 이어지는 지형 변화 패턴이 비교적 단순한 편이다.

또 다른 이유로는 분석에 이용한 하도 경사의 값이 여울 정도의 하도 길이가 아니라, 그보다 긴 하도 구간에 걸친 경사라는 점에서 찾을 수 있을 것 같다. 조립질 퇴적물의 운반은 만수 수위(bankfull stage)와 같은 고수위시에 주로 이루어지

며, 따라서 이때에 관련되는 하도 경사는 적어도 구간(reach) 규모의 경사이므로, 본고에서 이용한 하도 경사가 퇴적물의 입경과 높은 상관성을 보인 것으로 생각된다. 실제로, 여울 경사와 퇴적물 입경과의 상관관계를 분석한 결과, 세 하천 모두 상관관계가 지도에서 측정한 경사와 퇴적물 입경과의 상관관계보다 두드러지게 낮게 나타났다.

2) 요약 및 결론

이상과 같이 로키 산맥의 소하천을 대상으로 퇴적물 입경과 유역 면적 및 하도 경사와의 관련성을 중점적으로 조사하였는데, 이는 다음과 같이 간략히 요약될 수 있다.

- ① 퇴적물의 입경은 유역 면적의 증대에 따라 지수적으로 감소된다. 그러나 산지와 평지의 지형 경계부를 기점으로 그의 상류와 하류간에 입경 변화의 경향성이 서로 다르며, 양자간의 입경 차는 크다.
- ② 하도 경사는 퇴적물의 입경과 마찬가지로 유역 면적의 증대에 따라 지수적으로 감소된다. 또한 그 분포 패턴이 퇴적물의 입경과 크게 다르지 않다. 따라서 퇴적물의 입경과 하도 경사는 비례하는 관계에 있으며, 상관계수는 매우 높다.

이와 같은 조사 결과를 종합적으로 고찰하여 볼 때, 본 연구지역에서는 산지로부터 평지로 급격히 전환되는 지형 조건과 비교적 동질적인 지질 조건이 하상 퇴적물의 입경 분포와 그 변화의 경향성에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

註

- 1) 이 곳의 로키 산맥은 정확히는 남 로키 산맥(Southern Rocky Mountains)인데, '후론트 레인지(Front Range)'라고도 불린다. 이 후론트 레인지는 대략 와이오밍(Wyoming) 주에서 콜로라도 주에 걸쳐 있으며, 그 폭이 약 60km~80km에 달한다.
- 2) 백악기 말엽에서 팔레오세를 거쳐 에오세에 이르는 동안 라라미드 용기 운동에 의해 하천 침식이 강화되어 고(古)하곡이 발달되었으며, 에오세 초기 이후에는 지반이 점차 안정되면서 평탄한 지형면 즉, 에오세면(Eocene surface)이 생겨났다. 그러

나 이 지형면은 다시금 마이오세 - 플라이오세 용기 운동에 의해서 파괴되었으며, 깊은 협곡이 발달되었다. 협곡의 발달은 제4기에 이르러서도 지속되었는데, 제3기 동안만큼 활발한 것은 아니었다. 제4기 동안에는 용기 운동에 의한 영향보다는 기후 변화가 지형 발달에 더 큰 영향을 미친 것으로 보고 있다.

- 3) 중생대 및 제3기 퇴적층 위를 흐르던 하천이 지반 용기와 더불어 하각작용이 강화되어 퇴적층을 깊게 개석하고 있으므로 적재하천의 개념을 적용하여 하천 발달을 설명할 수 있다.
- 4) 이들 중 아라파호 빙하는 로키산맥 최남단의 것으로 알려지고 있는데, 권곡빙하(cirque glacier)로 대략 해발고도 3675m~3990m 사이에 분포한다. 이 일대의 만년설 고도 한계는 약 3780m정도인 것으로 알려진다.
- 5) 이 곳의 제4기 빙하기는 오래된 것부터 프레벌 레이크(Pre-Bull Lake), 벌 레이크(Bull Lake), 파인 데일(Pinedale) 등으로 분류된다. 본 지역의 상류는 주로 벌 레이크(Bull Lake)와 파인 데일(Pinedale) 빙하기에 퇴적된 것들이다.
- 6) 고생대의 Fountain formation, Lyons sandstone 등과 중생대의 Morrison formation, Dakota group 등이다. 이중 선캠브리아기의 화강암 위에 부정합적으로 퇴적된 Fountain formation과 그 상부의 Lyons sandstone은 적색 혹은 핑크 빛 사암으로 콜로라도에서는 거의 수직에 가까운 노암을 이루어 나타나는 곳이 많다. 콜로라도 스프링스의 유명한 '신들의 정원(Garden of Gods)'이나 볼더의 '다리미산(Flatiron Mountain)'은 그 대표적인 예이다.
- 7) Bradley and Mears(1980)가 볼더 크릭의 곡구에서 100개의 거력 퇴적물을 조사한 바에 의하면, D_{75} 의 값이 1880mm에 달하였으며, 이러한 퇴적물을 운반하기 위해서는 평균 유속이 6.04m/s, 그리고 평균 수심이 3.75m에 달했던 것으로 추정했다.
- 8) 기록이 남아있는 대홍수는 1894년에 있었다. 당시에 유량이 $310m^3/s$ 에 달했던 것으로 추정한다. 오늘날 거의 동일한 지점에서 관측한 연 평균 유량이 $3m^3/s$ 인 것을 감안하면 이는 막대한 양이다.

文獻

- 김종욱, 1991, "하천지형 발달에 관여하는 주요 변수들의 기능적인 관계에 관한 연구 : 신리천, 사천내, 군선강을 사례지역으로 하여",

- 地理學, 26(1), 1-29.
- 김종욱, 1993, "지형학에서의 시간의 역할과 기능", 地理教育論集, 서울대학교 사범대학 지리교육과, 30, 1-15.
- Bradley, W.C. and Mears, A.I., 1980, Calculations of flows needed to transport coarse fraction of Boulder Creek alluvium at Boulder, Colorado, *Geological Society of America Bulletin*, Part II, 91, 1057-1090
- Brush, L.M., 1961, Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in Central Pennsylvania, *United States Geological Survey Professional Paper*, 282F, 145-181.
- Campbell, I.A.N., 1964, Apparent relationships between stream profiles and pediments near Boulder, Colorado, *Master thesis, University of Colorado*.
- Crosby, E.J., 1978, Landforms in the Boulder-Fort Collins-Greeley area, Front Range urban corridor, Colorado, *United States Geological Survey Miscellaneous Investigations Series*, Map I-855-H.
- Gintz, D., Hassan, M.A. and Schmidt, K.-H., 1996, Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 433-445.
- Hack, J.T., 1957, Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, *United States Geological Survey Professional Paper*, 294B, 1-53
- Hey, R.D., Bathurst, J.C., and Thorne, C.R., 1982, *Gravel-Bed Rivers : Fluvial processes, Engineering and Management*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Kim, J.-W., 1989, Funktionale Fluvialmorphologie der Kall, *Aachener Geographische Arbeiten*, 21, RWTH Aachen.
- Leopold, L.B. & Maddock, T., 1953, The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, *United States Geological Survey Professional Paper*, 252, 1-56.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P., 1964, *Fluvial Processes in Geomorphology*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Leopold, L.B., 1994, *A View of the River*, Harvard University Press, London.
- Miller, J.P., 1958, High mountain streams : effects of geology on channel characteristics and bed material, *New Mexico State Bureau of Mines and Mineral Resources, Memoir*, 4.
- Penning-Rowsell, E. & Townshend, J.R.G., 1978, The influence of scale on the factors affecting stream channel slope, *Transactions of the Institute of British Geographers*, New Series 3, 395-415
- Richards, K., 1982, *Rivers : Form and Process in Alluvial Channels*, Methuen, London and New York, 24-28.
- Rubey, W.W., 1952, Geology and mineral resources of the Hardin and Brussels quadrangles(1n Illinois), *United States Geological Survey Professional Paper*, 218.
- Schick, A. P., 1991, Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams, *Water Resources Research*, 27(4), 503-511.
- Schumm, A.A., 1977, *The Fluvial System*, John Wiley & Sons, New York, 1-39.
- Schumm, S.A. and Lichty, R.W., 1965, Time, space, and causality in geomorphology, *American Journal of Science*, 263, 110-119.
- Scott, G.R. and Taylor, R.B., 1986, Map showing Late Eocene surface, Oligocene-Miocene paleovalleys, and Tertiary deposits in the Pueblo, Denver, and Greeley 1° × 2° Quadrangles, Colorado, *United States Geological Survey Miscellaneous Investigations Series*, Map I-1626.
- Scott, G.R., 1975, Cenozoic surfaces and deposits in the Southern Rocky Mountains, *Geological Society of America, Memoir*, 144, 227-248.
- Smith, P., 1987, History of floods and flood control in Boulder, Colorado, *City of Boulder*, Colorado.

Thorne, C.R., Bathurst, J.C., and Hey, R.D., 1987, *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester.

Wolman, M.G., 1954, A method of sampling coarse bed material, *Transactions of the American*

Geophysical Union, 35, 951-956.

Yatsu, E., 1955, On the longitudinal profile of the graded river, *Transactions of the American Geophysical Union*, 36, 655-663.