

# 우리나라 산지하천에 대한 흐름 및 하상변동모의기법에 관한 연구



**최 성 열 ▶▶▶**  
자연재해저감기술개발사업단 단장  
ceo@dpsi.or.kr

## 1. 우리나라 산지 하천의 특성

“산지하천”으로 대변되는 “급류하천”이라는 용어는 일반적으로 선상지나 평야의 구간까지도 포함한 하천 전체의 양상을 나타내는 것이다. 그러나 본 연구의 개발대상이 하천에서의 유사계획이나 관련 시설의 설계·검토를 위한 것임을 감안하면 소위 “소류구간”에 해당하는 산지구간으로 한정하는 것이 마땅할 것이다.

상술한 산지구간에서는 하도선형이 불규칙적으로 만곡·굴곡 하고 있을 뿐만 아니라 횡단면 형상도 매우 복잡하며 국소적인 변화가 현저하다고 할 수 있다. 또한 하상은 전반적으로 급경사를 이루고 그 횡단구배의 변화도 많으며, 역경사 구간도 상당히 많다. 게다가 근년에는 사방댐, 하상공 등 하상고의 급변을 일으키는 구조물이 다수 설치되고 있는 실정이다. 이와 같은 하도에 유량의 시간적 변화가 격하고, 지천 혹은 계곡으로부터의 횡유입도 동반되는 유출수가 통과하게 되면 비정상적이면서 2차원 혹은 3차원성이 높고 상류 및 사류가 혼재하는 복잡한 유황이 출현된다.

한편 하상을 구성하는 토사는 생산직후로서 유수에 의한 연마를 그다지 받지 않고 있으므로 폭 넓은

입도분포를 가지고 있다. 이 때문에 유수에 의한 토사유송은 특히 중소 출수기에는 세립성분에 대해 집중적으로 형성되게 된다. 그리고 장기적으로는 아마 코드의 형성 및 파괴로 상징되는 유량과 다양한 관계를 가지는 이동과정으로서 이해할 수 있게 된다.

하상변동은 토사 이동량의 국소적인 불균형에 의해 야기되나 상술한 바와 같이 토사 이동이 발행하는 산지구간의 경우, 그 속도나 폭이 중하류 총적구간의 경우보다도 현저히 크게 됨과 동시에 홍수이력이 보다 강하게 반영되게 된다. 그러나 산지구간에서는 일반적으로 하상 토사층의 두께가 총적구간 만큼 크지 않기 때문에 하상변동에 따른 기반암의 노출과 재피복이라는 특수현상이 반복되는 구간도 상당히 존재한다고 할 수 있다. 홍수류의 흐름의 에너지가 매우 크고 평지부 하천의 수배의 토사이용능력을 가지고 있다. 사주의 이동이 크기 때문에 물길은 고정하고 않는 경우가 많고, 단열, 복열 사주가 형성된다. 또한 홍수중에 사주의 이동, 하상고의 변화를 동반하는 편류나 흐름의 집중 등의 흐트러짐을 발생시킨다.

## 2. 우리나라 산지하천 하상변동설계기법 실태 조사

### 2.1 하상재료 입도분석

평형하상경사를 산정하고 하상재료의 상태를 파악하기 위하여 각 통상 매 2km 간격으로 대표시료를

채취한 후 입도분석을 실시하며, 조립율 및 비중 등은 실내실험을 통하여 산정한다.

## 2.2 유사량 측정

하도는 그 구조상 사력으로 구성된 하상과 하상을 유하하는 유수로 되어 있으며 하상과 유수와의 작용, 즉 유수현상으로 하상이 변동되고 있으며, 이와 같은 현상을 규명하는 것이 하도계획 입안에 있어서 불가결한 요소이므로 하천정비기본계획에서는 유사량을 산정하게 되었으나 통상 유사량 측정 자료가 전무한 관계로 유사량의 정확한 분석이 불가능하며, 이로 인해 우리나라의 하상변동에 관한 설계에 있어 아직 많은 문제점을 내포하고 있는 실정이다.

현재 우리나라 하천에 대한 유사량에 관한 측정 자료는 상당히 미미하며, 거의 대부분이 부유사 실측자료이고 소류사 측정 자료는 거의 전무한 실정이다. 과거 4대강 유역 조사시 각 수계별 주요 수위표 지점에서의 토사유출 특성을 파악하기 위하여 부분적으로 유사량을 측정하여 왔으나 정리된 자료는 거의 없는 실정이다. 유사량 분석은 댐 및 저수지 퇴적 등의 하상변동에 관련된 모든 조사, 분석 및 연구에 대단히 중요하다. 토사이동은 유수의 특성뿐만 아니라 지표면 또는 하상의 입도 등에 의해 크게 좌우되는데 유사량에 대한 분석을 위해서는 유사변동형태 및 유사의 특성에 대한 연구가 필요하며 유사운송 하천의 수리조건과 연관하여 분석하여야 한다.

유사량 조사방법은 ① 유사량 실측, ② 저수지나 댐에서 퇴사량 조사, ③ 인공적 하상굴착에 의한 상류로부터 유입, 하류로 유송되는 유사량과의 상관관계에 의한 조사방법 등을 들 수 있으며, 또한 현장조사가 되지 않은 경우에 있어서는 기 발표된 유사량 산정공식(Einstein, Brown, Toffaleti 등)을 사용하기도 하나, 이것은 실제 우리나라 하천에서의 적용은 아직도 많은 문제점이 있는 것으로 나타나고 있으며, 따라서 궁극적으로는 상기 ①~③항에 의한 실측을 통하여 적용성을 확인하고 정도를 높이는 과정이 필요하다.

## 2.3 유사량 산정

물은 강우가 지표면을 유하할 때 또는 수로, 하천 등을 유수가 유하할 때 침식에 의해 생성되는 토사를 운반하게 되는데 이러한 유사는 주로 하천 유수의 수리적 조건인 수심, 유속, 경사 등과 밀접한 관계가 있으며 토사의 특성인 입경, 밀도, 공극률, 침강속도, 형상 등 개개의 특성과 입도분포의 특성에도 큰 영향을 받는다. 유수에 의한 토사의 이동형태는 하상의 토사입자에 미치는 유수의 흐름 방향이 소류력에 의한 소류와 유수의 난류특성에 의한 확산현상에 기인되는 부류의 2가지 형태가 있으며 이들은 서로 역학적 운동기구가 크게 다른바 유수에 의한 토사의 이동형식을 유송되는 토사의 발생원과 그 유송장에 따라 분류하면 다음과 같다.



하상재료 수송량은 하상에 존재하는 큰 입자의 흐름, 미립유사량은 상류지역의 사면침식 등으로 인해 유송되어 발생하는 미세한 부유토사로서 하상토사보다 작은 입자의 흐름량이다. 또한 소류사는 하상면상을 전동, 활동 또는 하상면을 따라 도약하며 이동하는 유사, 부유사는 유수 중을 부유하면서 이동하는 것을 말하며 그 외 하상면을 접촉하면서 하상상을 전동, 또는 활동하면서 이동되는 접촉유사, 하상을 따라서 도약하거나, 도약한 입자의 충격에 의하여 직간접적으로 움직이는 도약 유사 등이 있으며 일반적으로 미립 유사량의 정확한 산출은 불가하다. 따라서 하상재료의 흐름에 의한 유사를 전유사량으로 한다. 또한 하상변동에 지배적인 영향을 미치는 것은 소류사이다. 유사량 산정은 댐설계기준의 비유사량공식, 수위표지점의 과거관측기록에 의한 비유사량, 하천설계기준, 하상변동예측모형의 비교분석(1991, 한국건설기술연구원), 하상토 입경분포와 수리량을 이용하

여 유입유사량을 제시하는 평형하상경사 추정방법 (1993.12, 한국건설기술연구원), 기타 외국의 경험공식 등을 적용하고 있다.

### 2.4 평형하상경사 및 계획하상고 산정

하도에 있어서의 평형하상은 정적평형하상과 동적 평형하상으로 구분할 수 있다. 정적평형하상이란 하도에 있어서 일체의 세굴 및 퇴적현상이 발생되지 않는 하상을 의미하나 실제적으로는 이러한 하천은 존재할 수가 없으므로 하도계획상의 평형하상은 세굴, 퇴적현상이 발생되나 세굴 및 퇴적이 서로 균형을 이루어 국부적인 하상변동이 야기되지 않는 동적 평형을 말하며, 현재 우리나라에서 적용되고 있는 평형하상경사 산정방법은 다음 <표 1>과 같다.

동적 평형하상 산정 모형은 1차원 해석 및 2차원 해석 방법 등 여러 모형이 개발 발표되었으나, 우리나라에서는 대부분의 경우 1차원 해석인 미 육군공병단에서 개발 발표된 HEC-6 모형을 이용하여 장래

표 1. 하천정비계획에 사용되는 하상변동모형

구분	종류	산정방법	비고
정적모형	1차원	Aki Monobe Kubo	대부분 Kubo 사용
		HEC-6 STARS, GSTARS ILLUVIAL CHARIMA UUGRR	대부분 HEC-6 사용
동적모형	2차원	TABS 2 RESSED TWODSR SEDIMENT-4H	

하상 변동 상태를 추정하고 있다.

모의는 먼저 고정상 모형을 수행하여 흐름에 대한 보정을 실시한 다음 이동상 모형을 이용하여 과거 자료로부터 현재의 하상을 모의, 예측한 뒤 실측자료와 비교하여 유사이동모형을 검정하는 절차를 밟는다. HEC-6 모형은 하도의 지형자료, 유사특성, 수문자료 등의 함수로 입력되어지며 그 계산절차를 정리하면 다음 <그림 1>과 같다.

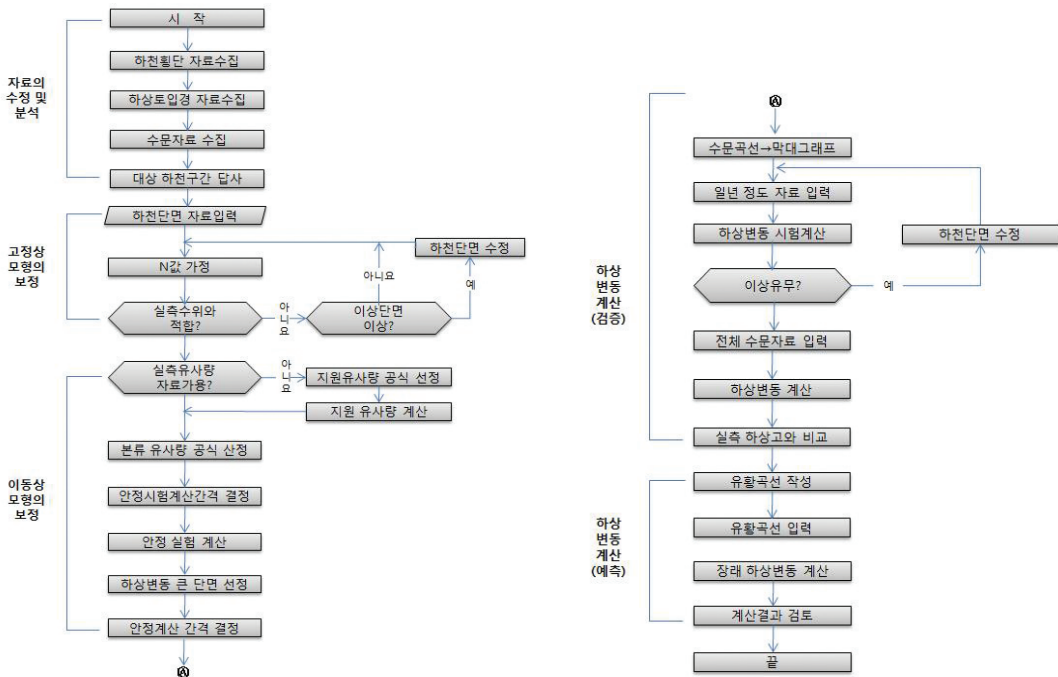


그림 1. HEC-6 모형의 계산 절차 (계속)

### 3 산지하천에 적합한 흐름 및 하상변동 해석기법의 조사

#### 3.1 하상변동의 시공간적 스케일

토사이동의 불균형에 의한 저면에 발생하는 변형(침식 및 퇴적)을 총칭하여 하상변동이라 하며, 이러한 변형은 매우 다양하고도 복잡한 모양을 취하게 된다. 또한 시간 스케일은 수분에서 수십 년, 공간 스케일은 수cm에서 수십Km로 광범위하게 분포한다. 이들 중에서 대표적인 적에 대해 <그림 2>에 제시한다. 사련 하상파와 같은 사면에 나타나는 소규모적인 파상 요철에서부터 수십 년의 세월을 걸쳐 수십Km 길이로 발생하는 하상중단형상의 변형 등 매우 폭넓은 영역에 걸쳐 다양하게 발생한다. 그림에서 대각선 방향에 물리적 현상이 분포되어 있는 것을 알 수 있듯이 시간 스케일과 공간 스케일의 장단에는 일정한 상관관계가 있다.

일반적으로 작은 스케일의 현상일수록 유사의 운동기구에 직접적으로 관계하며, 스케일이 클수록 흐름의 성질에 영향 받는다고 할 수 있다. 사련, 하상파의 거동을 알기 위해서는 “입자운동의 역학모델”에 기초하는 해석이 유효하며, 어떤 수리조건에서 어떠한 파장의 사련이 탁월한가? 등과 같은 유사역학에 직접 관계하는 문제가 이 해석법의 주된 대상이 된다. 반면 하천에 있어서 교각주변 등에서 보이는 국소세굴의 해석에는 연직2차원 내지 3차원 (2D\_V, 3D)모델이 사용된다. 세굴현상이 3차원성이 높은 현상으로 “국소”라는 단어가 의미하듯 비교적 좁은 범위에 한정된 현상이므로 계산 부담이 큰 3차원 모델을 사용하는 것이 가능하다. 계산 부담을 억제하고 싶은 경우에는 연직 2차원장을 가정한 근사해법도 가능하다. 어떠한 계산법이라 할지라도 이러한 종류의 현상에 적용되는 모델로서는 유사입자의 운동을 직접 해석하는 “역학모델”이 아니라 유사량식(흐름의 저면 전단력과 유사량의 관계를 나타내는 경험식 혹은 반 경험식)이 적용된다. 또한 단일의 홍수나 시간역에

의한 비교적 좁은 영역의 저면형상변형도 2D\_V, 3D 모델로서 해석할 수 있다. 다음으로 하천에 있어서 사련이나 사행, 측안침식 등 평면적인 축적에는 평면 2차원(2D\_H)모델이 사용된다. 마지막으로 장기적인 하상변동의 예측에는 마크로한 토사수지가 문제가 되며 개개의 국소적인 지형적 특성의 영향은 무시된다. 따라서 해석으로서는 1차원(1D)모델이 추가 되며, 하천에 있어서 “해당 구간의 하상이 장기적으로 상승하는 경향인가 혹은 저하하는 경향인가?”, “하상구배는 증가경향이 있나 감소경향인가?” 와 같은 문제가 대상이 된다.

#### 3.2 하상변동 수치모델의 구성

하상변동 수치모델의 구체적인 구성을 나타낸 것이 <그림 3> 이다. 하천 유사의 유송은 흐름장·유사·하상변동이라는 3자의 상호작용으로 단순화 하여 모델화 하는 것이 가능하다. 흐름장·유사·하상변동의 3자는 3개의 모델(그림 중의 육각형)으로 연

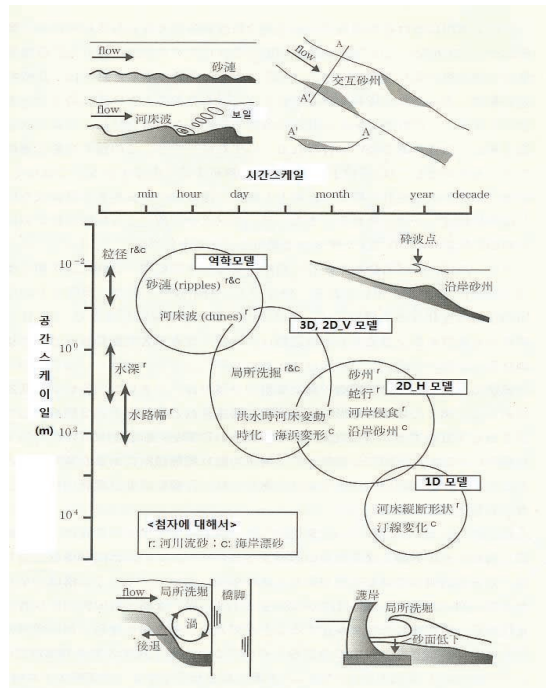


그림 2. 하상변동의 시공간적 스케일

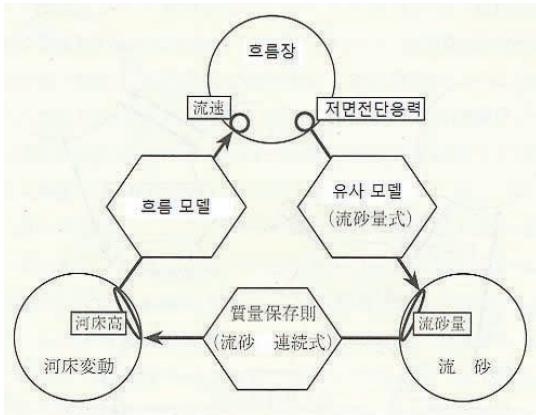


그림 3. 하상변동 모의의 구성(닫힌 상호작용계)

결되어 닫힌 계를 구성한다. 3개의 모델은 입출력계(시스템)으로 생각하면 알기 쉽다. 유사모델은 저면전단력(저면부근의 흐름 특성:입력치)를 유사량(출력치)로 변환하며, 유사량은 질량보전법칙에 의해 하상고로 변환된다. 하상고의 변화를 시공간적으로 추적하면 하상변동이 계산되므로 하상고가 하상변동 모의의 최종 출력치라 할 있다. 그러나 문제가 단순하지 않은 것은 하상고의 변화가 흐름의 경계조건에 변화에 상당하여 흐름장의 변화가 유사의 변화를 가져와 다시 하상고의 변화가 발생한다는 닫힌 계의 존재라 할 수 있다.

흐름의 모델은 통상 주어진 수리조건과 경계조건(하상형상 즉 하상고의 공간분포) 하에서 유속·압력의 시공간 분포를 출력하는 시스템이며, 저면 부근의 유속치로부터 유사모델의 입력치인 저면전단력이 추정된다. 그림 3에서는 시계회전 방향의 일방적인 루프가 표시되어 있으나 실제로는 반시계방향의 변환기구(예로서 유사의 존재가 흐름에 주는 영향 등)도 존재한다. 여기서는 설명의 단순화를 위해 가장 지배적인 폐스인 시계회전방향의 3자(그림 중의 육각형으로 표시한 모델)만을 표시하였으며, 현실의 하상변동계산의 많은 부분에서는 여기서 제시한 시계회전 방향의 상호작용이 상정되고 <그림 3>에 표시하지 않은 폐스는 무시되기도 한다.

### 3.3 하상변동계산법의 분류

하상변동에 직접 관계하는 토사의 이동은 흐름에 의한 것으로, 흐름과 하상변동은 상호 의존성을 갖고 있다. 따라서 하상변동 계산의 기초식은 기본적으로 흐름에 관한 기초식과 하상변동의 기초식을 동시에 풀 필요가 있다. 그러나 중소규모 하상변동 이상의 하상변동을 대상으로 하는 경우, 하상변동의 변화 속도가 흐름의 시간적 변화에 비해 매우 완만하여 흐름의 해석에서는 통상 정상류 상태를 가정하여 유사에 관한 식과는 분리하여 푸는 것이 일반적이다. 따라서 일반적인 하상변동 해석의 기초식은 흐름의 운동방정식과 연속식, 유사의 운동방정식인 유사량식과 유사의 연속식이며, 계산절차는 다음과 같다.

- ① 흐름의 운동방정식과 연속식에 의한 흐름의 계산
- ② 유사량식에 의한 유사량의 계산
- ③ 유사의 운동량방정식에 의한 하상변동의 계산

통상은 어떤 시간간격 마다 ①~③의 계산을 반복하여 하상고의 시간적 변화를 예측하게 된다. 하상변동계산은 상술한 바와 같이 흐름에 관한 계산과 하상변동에 관한 계산으로 대별할 수 있으나, 대상이 되는 문제에 따라서는 하상변동의 시간적, 공간적 스케일이 크게 다르게 되어, 그 결과 흐름 혹은 하상변동 계산에 사용하는 기초방정식이나 계산모델이 다르게 된다. 특히 흐름의 계산에 있어서는 하상변동의 계산에 걸리는 흐름의 계산시간의 비율이 매우 높기 때문에 대상이 되는 문제에 따라서는 기초식을 간략화 한 다양한 모델이 제안되고 있다.

#### (1) 흐름의 계산모델

흐름의 계산모델에 관해서는 <표 2>와 같이 기본적으로 유하방향, 횡단방향 및 연직방향의 3방향의 유속성분에 대해 풀어야 하나 상술한 바와 같이 대상으로 하는 문제에 따라서 기초식을 간략화 하는 방법이 취해진다.

표 2. 흐름장의 계산모델 특성

흐름의 계산모델	A	B	C	D	E	F
연속식	○	○	○	○	○	○
유하방향의 운동방정식	○	○	○	○	○ <sup>2)</sup>	○
횡단방향의 운동방정식	○	○ <sup>1)</sup>	○	○	○	×
연직방향의 운동방정식	×	×	○	○ <sup>3)</sup>	○ <sup>3)</sup>	×

A : 2차원 모델, B : 준3차원 모델, C : 정수압간이 3차원 모델, D : 정수압 3차원 모델, E : 비정수압 3차원 모델, F : 1차원 모델  
○ : 고려함, × : 고려하지 않음  
1) : 2차류를 고려, 2) : 대수분포를 가정, 3) 정수압 분포를 가정

### (2) 하상변동의 계산모델

하상변동의 기초식은 계산모델에 관해서는 기본적으로 유사 운동방정식인 유사량식과 유사 연속식이다. 유사량에 관해서는 소류사량과 부유사량을 고려할 필요가 있으나 대상으로 하는 문제에 따라서는 소류사만을 고려하는 모델, 부유사만을 고려하는 모델, 양자를 고려하는 모델로 구분된다. 소류사 모델에서 통상 어떤 단면에 대한 유사량은 그 단면에 있어서의 흐름의 소류력에 대응한다고 가정되고 있으며, 흐름에 대한 계산 결과에 기초하여 유사의 평형상태에 대한 유사량식으로 유사량을 평가하여 유사의 연속식을 사용하여 하상의 변동량을 구하게 된다.

또한 이러한 유사모형은 각각 “일정자갈모형”과 “혼합자갈모형”으로 분류할 수 있으며, 현재까지의 각종 문헌에 의하면 산지구간의 하상변동문제의 검토에는 후자를 선택하는 것이 필수적이라는 것은 명백하다. 단 대규모 출수에 의한 하상변동이 매우 격하게 이동하는 경우에는 유송량에 입도분포 효과가 거의 나타나지 않으며, 이러한 조건하에서의 검토를 행하는 경우에는 전입경을 평균입경으로 대표시킨 “일정자갈모형”으로서도 충분하다. 본 연구에서는 “일정자갈모형”을 기초로 하여 그 구조와 계산법을 결정하고 여기에 “혼합자갈모형”의 특성을 도입하는 것으로 한다. “일정자갈모형”은 대별하면 앞선 절에서 기술한 ①~③으로 구성되며, “혼합자갈모형”에서는 여기에 추가하여 ④입경분포의 변화계산이 필요하게 된

다. 이중 ①~③에 관해서는 특히 흐름에 상류와 사류의 구간이 혼재하는 경우에 대한 대응법에 중점을 두어 개발하고 한다. 더욱 ②~③에 대해서는 기암의 노출과 재피복이 반복되는 경우의 계산법에 대해서도 도입하고자 한다.

### 3.4 수치기법

유사량을 산정하는 대표적인 수치기법으로는 정상 부동류에 대한 표준축차계산법을 들 수 있으며, 이것은 실용적인 측면에서 충분히 확립된 기법으로 인정받고는 있으나 급류하천 특유의 상류·사류 혼재 흐름을 취급하고자 할 때 매우 번잡한 것으로 판명되어 있기도 하다.

이에 대해 최근 상류·사류 혼재 흐름을 보존형식으로 기술된 부정류방정식에 기초하여 수치해석 하는 방법이 눈부시게 발전하고 있으며, 또한 하상변동이라는 비정상적인 현상의 계산에서는 본래 흐름도 비정상적인 것으로 취급하는 것이 마땅하다고 할 수 있다. 물론 부정류의 추적에는 대량의 계산노력이 필요하게 되므로 장기예측 등에는 적합하지 않다거나 안정적인 계산을 위해서는 하천단면을 매우 짧게 취해야 하는 등의 몇몇 난점이 있기는 하지만 취급하는 문제의 종류에 있어서는 표준축차법을 능가하는 이용 가치가 있다고 할 수 있으므로 본 연구에 있어서는 그 대표적인 방법인 MacCormack의 양해적 2단계 차분법 등을 활용하고자 한다.

### 4 결론

본 연구는 우리나라 산지하천의 하상변동특성을 분석함에 있어서 제기되는 여러 현황에 대해 정리한 것이다. 우선 하상변동을 모의하기 위해서는 우리나라 산지하천의 특성을 명확히 바라볼 필요가 있으며, 이러한 의미에서 우리나라 산지하천이 갖는 흐름 및 하상변동의 특성을 정리하였고, 현재 우리나라에서

적용되고 있는 하상재료의 입도분석, 유사량 측정, 유사량 산정 및 평형하상고 산정에 관한 설계기법에 대해 분석하여 문제점에 대해 정리하였다. 마지막으로 우리나라 산지하천에 적합한 흐름 및 하상변동 해석기법에 대해 분석하여, 가장 적절한 수치분석기법

에 대해 언급하였다.

『본 내용은 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원('08 지역기술혁신 B-01)에 의해 수행중인 과제의 일부이다.』

## 참고문헌

1. (사)사방학회 (2002), 산지하천에서의 하상변동의 수치계산
2. 고토 니시 (2006), 수치유사수리학
3. 세키네 마사토 (2006), 이동상흐름의 수리학
4. 미치우에 마사키 (1995), 협착부를 갖는 산지하천이 하상변동계산, **수공논문집**, 제40권.
5. 오카베 켄지 (1995), 상사류가 혼재하는 2차원천수류의 수치계산법, **수공논문집**, 제39권.
6. 미치우에 마사키 (1996), 상사류 혼재하상변동시뮬레이션, **제48회토목학회연구발표회개요집**.
7. 카하라 삼로 (1993), TVD-MacCormack법을 사용한 상사류 혼재된 산지하천에서의 흐름계산법, **수공학논문집**, 제37권.
8. 하야시 마사오 (1983), 상사류가 혼재하는 구간의 부등류계산법, **토목기술자료**.
9. 오카베 켄지 (1992), 상사류 천이에 따른 부등류 계산법에 대해, **수공학논문집**.