

# 하천 직강화에 따른 수리 및 유사 특성 연구

A Study on the Flow and Sediment Transport Characteristics  
of Channel according to Cut-off

이 재형\*, 박 무종\*, 이 지원\*\*

## 1. 서 론

평형하천은 유사의 유,출입 즉 침식과 퇴적이 균형을 이룬 상태로, 이러한 하천은 유사 이송면에서는 최소한의 에너지 소모율을 유지하며 최대한의 유사 이송을 유지한다. 일반적으로 자연 하천은 안정된 상태를 이루고 있는 것으로 알려져있다. 그러나, 이러한 하천에 댐건설, 하도정비사업등과 같은 인위적인 변화가 주어지면 하천은 세굴, 퇴적에 따른 하상변동과 더불어 사행, 측방침식 등 유로변경을 통하여 변화에 대응하게 된다. 하천에서의 자연적, 인위적 변화에 대한 장단기 대응은 하천수심, 유량, 하천폭, 유사량, 하천형태, 하천경사, 만곡도, 미립토사의 농도등 많은 요인에 의해 영향을 받기 때문에 정량적으로 예측하는 것은 현재까지의 기술 수준으로는 매우 어려운 실정이다. 현재 실무에서 직선수로의 규모를 결정하는 방법은 계획홍수량을 통과시킬 수 있는 하폭으로 단면을 결정하고 기존에 제시된 경험식을 통해서 하상경사를 결정하는 과정으로 이루어져 있어 하천의 기존 사행과 직강화에 따른 수류 특성 및 하상의 장단기 변화를 충분히 고려한 설계가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 하천의 홍수 소통 능력과 토지의 고도화를 위해 곡류하천을 직강화하는 경우를 가정하여 직선수로를 설치한 후 발생할 수 있는 하도의 수리 및 유사 특성변화를 최소화시킬 수 있는 하도를 미 공병단에서 개발된 수리모형인 TABS-MD와 개척국에서 개발된 GSTARS를 이용하여 구하였다. 이때, 하천의 最小 水流에너지理論(Minimum Stream Power Theory)을 도입하여 하천개수에 따른 적정 규모의 설계를 시도하고자 하였다.

## 2. 적용 모형

### 2.1 개요

하천을 개수하여 직선수로를 설치하는 경우에 일반적으로 하천경사가 커짐에 따라 세굴에 의한 하상저하 및 유속의 증가에 따른 교량 및 제방의 안정성 문제가 발생하게 된다. 따라서, 이러한 경우 직선수로구간에 낙차언을 설치하여 수로변경 전·후의 수류에너지 차이를 최소화함으로써 인위적인 변화에 따른 하도의 수리 및 유사특성 변화를 최소화시킨다. 본 연구에서는 2차원 수리모형인 TABS-MD와 준 2차원 하상변동모형인 GSTARS를 이용하여 기존 사행하천과 계획 직선수로의 평면수리 특성 및 유사특성을 파악하여 계획 직선수로의 결정에 이용하였고, 계산모형의 검증을 위하여 고정상 수리모형 실험 결과와 비교하였다. 또한 TABS-MD 모형의 결과를 토대로 GSTARS 모형의 중요변수인 유관의 갯수 산정에 활용하여 2차원 흐름모형의 수리특성이 하상변동 모형의 흐름 모형에 반영되도록 하여 흐름 모형과 유사모형의 연계를 시도하였고, 하천폭과 낙차공의 규모결정을 위하여 하천의 최소 수류에너지 이론을 이용하였다.

### 2.2 2차원 수리모형 TABS-MD

미국 공병단에서 개발된 2차원 수리모형인 TABS-MD는 불규칙한 경계면의 적용에 적합한 2차원 유한요소모형으로 Galerkin방법을 이용한다. 이 모형의 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes방정식을 수심방향으로 적분함으로써 유도되며 이를 위해서 연직방향의 가속도항을 무시하고 압력항을 정수압 분포로 처리하며, 유체는 비압축성이라고 가정한다.

연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + u\frac{\partial h}{\partial x} + v\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

\* (주) 대우 건설, 수자원개발팀

\*\* (주) 대우 건설, 수자원개발팀장

운동량 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (3)$$

여기서  $x, y, t$  는 각각 좌표축과 시간,  $g$  는 중력가속도,  $u, v$  는  $x, y$  방향의 수심 평균유속,  $\rho$  는 물의 밀도,  $h$  는 수심,  $a$  는 하상표고,  $\tau_x, \tau_y$  는  $x, y$  방향으로 작용하는 외부응력으로 각각 하상, 바람, Coriolis 효과에 의한 응력이며,  $\epsilon$  는 확산계수를 나타낸다.

### 2.3 준 2차원 유사모형 GSTARS

미 개척국에서 개발된 준 2차원 부동류 모형인 GSTARS는 流管개념을 사용함으로써 모형을 적용하는 대상하천의 흐름방향을 따라서 각 횡단면에서 수리학적 조건과 유사운동 모두의 종방향과 횡방향의 변화를 고려할 수 있다. 즉, 이 모형은 1 차원 모형과는 달리 하상표고의 변동이 전 하폭에 걸쳐서 평균되지 않기 때문에 수로 단면에서 횡방향의 특정위치에서 침식이나 퇴적을 보다 정확하게 모의할 수 있다. GSTARS는 배수곡선 계산부분, 유관계산부분, 유사추적계산 부분으로 구성되어 있다.

배수곡선은 표준측차법에 의해 계산되며, 이 모형의 특징인 유관모형이 다음으로 수행된다. 즉, 하천을 흐르는 전체 유량은 지정된 개수의 유관들에 동등하게 분배하며, 유관의 정의에 의해 인접한 하천 유관으로부터의 횡방향 유입은 허용되지 않는다. 이러한 조건하에서 동유량 위치 혹은 유관의 횡방향 위치는 동 통수능과 동일하게 된다. 개개의 유관내에서 유사 추적계산은 다음과 같은 유사의 연속방정식에 의하여 수행된다.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1-\lambda) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_s = 0 \quad (4)$$

여기서  $\lambda$  는 하상재료의 간극률로서  $1-\lambda$  는 하상토층 당 유사의 체적이 된다. GSTARS모형에서는  $\lambda$  를 보통 사용되는 값인 0.4를 사용한다.  $A_d$  는 단위길이당 퇴적된 유사층의 체적이고,  $A_s$  는 단위길이당 단면에 존재하는 부유사의 체적이고,  $Q_s$  는 체적으로 표시한 총유사량을 의미한다. 이때 부유사 평균체적의 시간에 대한 변화량이 유속과 위치의 함수이고 유 속의 시간에 따라 변화가 거의 없다고 가정하면 식 (5)가 사용된다.

$$(1-\lambda) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{dQ_s}{dx} = 0 \quad (5)$$

GSTARS모형에서 유사이동은 Yang 공식, Ackers와 White 공식, Engelund와 Hansen 공식을 적용하여 계산할 수 있다.

### 2.4 最小水流에너지 理論(Minimum Stream Power Theory)

Yang에 의하면 총적하천은 단위 길이당의 수류에너지  $\gamma QS$ 가 주어진 조건내에서 최소의 값이 될 때 평형상태에 도달한다. 즉 총적하천에서는 유량  $Q$ 와 유사부하량  $Q_s$  가 독립변수로 작용할 때  $\gamma QS$ 가 최소가 되는 하천폭, 수심, 경사로 유지된다. 대상하천 전체에 대한 총수류에너지는 식 (6) 과 같다.

$$\Phi_T = \int_x \Phi_s(x) dx \quad (6)$$

여기서  $\Phi_T = \gamma QS$  이며, 실제로는 다음과 같이 이산화하여 구할 수 있다.

$$\Phi_T = \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{Q_i S_i + Q_{i+1} S_{i+1}}{2} \right) \Delta x_i \quad (7)$$

여기서  $N$  은 하도구간내의 측정점의 수,  $\Delta x_i$  는 각 측정점간의 거리이다.

### 3. 모형의 적용 및 고찰

본 연구의 대상 구간은 합천댐 직하류 황강의 곡류 구간(그림 1)으로서, 이 구간은 심한 만곡을 이루고 있다. 하상재료는 구간 전체에 걸쳐 거의 동일한 크기의 모래로 구성되어 있어 매우 균일한 특성을 나타내고 있다. 흐름모형과 유사모형의 적용을 위한 대상홍수량은 하천정비 기본계획에 따라 100년 빈도 홍수량인  $3,730 \text{ m}^3/\text{sec}$ 을 사용하였고 하류의 경계조건으로는 측정 41 에서의 수위 24.08 m를 사용하였다. 상류의 유입유사량은 합천댐 직하류인 점을 고려하여 부유사량만이 대상구간에 유입하는 것으로 가정하였고 지천에서 유입되는 유사량은 무시하였으며 유사공식은 Engelund-Hansen 공식을 적용하였다.

#### 3.1 Stream Power를 이용한 하천폭과 경사의 결정

대상구간중 만곡부를 이루는 구간은 7.7 km이고 직선수로 설치할 경우 3.4 km 로 4.3 km 의 연장이 감소하게 되며 수세를 감소시키기 위하여 직선수로 시점 1.5 km 지점에 낙차언을 설치하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 Stream Power를 고려하여 하도의 폭과 경사를 결정하기 위해 하천의 폭을 대상홍수량의 소통능력을 고려하여 260~400 m 의 범위내에서, 경사는 황강의 평형경사인 1/850을 기본으로 1/500~1/1,000 범위내에서 각각을 조합하여 Stream Power를 계산하였다. 이를 직선수로 설치전의 Stream Power 와 비교하였으며 결과는 그림 2와 같다. 직선수로 설치전 원 사행하천의 Stream Power는  $2.32 \times 10^8 \text{ lb}/\text{sec}$ 로 추정되며 이와 동일한 에너지를 갖는 직선수로는 하천 폭이 320 m 이고 경사가 1/870 일 때인 것으로 나타났다.

#### 3.2 수리모형 실험

대상구간은 전형적인 만곡부를 이루고 있으며 직선수로 설치 전후의 수리현상의 변화를 파악하기 위하여 수리 모형 실험을 수행하였다. 수리모형은 평면축적 1:240, 수직축적 1:40 이고 시멘트 몰타르로 마감을 하였으며 모형의 조도를 보정하기 위하여 바닥을 유수방향에 직각으로 깊이 10 mm 정도의 깊이로 1 cm 간격으로 빗살무늬를 내고 추가적으로 망을 설치하였다. 그림 3 (a)와 (b)는 각각 직선수로 설치 전후의 유속 및 유향도를 나타내고 있으며, 직선수로 설치전,후의 실험결과는 대상구간 하류부에서의 수위 및 유속의 변화가 미미한 것으로 나타났다. 모형실험 결과 직선수로 설치전에는 만곡부의 영향에 따라 외곽쪽으로는 원심력이 증가하여 유속이 크게 나타나는 일반적인 결과를 보이나 측정 51 과 측정 52 구간의 만곡부에서는 만곡부의 내측에서 유속이 크고 외곽쪽에 사수역이 발생하는 상이한 결과를 보이고 있다.

#### 3.3 2차원 수리모형의 적용

그림 4 (a)와 (b)는 TABS-MD를 이용하여 계산한 직선수로 설치전,후의 유속벡터를 나타낸다. 이때, 측정 51 과 측정 52 구간에서는 수리모형의 결과와 유사하게 외곽쪽에서 원심력에 의한 효과가 발생하지 않고 내측에서 유속이 크게 나타남을 잘 모의하고 있다. 그림 5 (a)와 (b)는 1차원 수리계산에 의한 유속과 2차원 수리계산에 의한 최대 및 최소유속을 측정별로 나타낸 것이다. 1차원 평균유속과 2차원 유속의 계산결과에 큰 차이가 있음을 알 수 있었으며 이는 만곡부의 전형적인 수리특성을 잘 나타내고 있다. 한편, 직선수로 설치후의 최대유속도  $3\text{m}/\text{sec}$  이하로 계산되었으며, 이는 수로 안정상 적절한 유속으로 판단되었다.

#### 3.4 유사 모형의 적용

직선수로 설치후의 하상변동을 판단하기 위하여 GSTARS를 이용하여 100 년 빈도 홍수시의 단기간 하상변동과 합천댐 방류량 유향분석을 통한 1 년 방류량에 의한 장기 하상변동을 실시하였다. 분석 결과는 그림 6 (a)와 (b)와 같으며 극심한 하상변동은 보이지 않고 대체적으로 안정화도를 이루고 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

하천의 홍수 소통 능력과 토지의 고도화를 위해 곡류하천을 직강화하는 경우를 가정하여 직선수로  
를 설치한 후 발생할 수 있는 하도의 수리 및 유사 특성변화를 최소화시킬 수 있는 하도의 규모를 결정  
하기 위하여 하천경사와 단면을 변경하여 최소 수류에너지 개념을 이용하여 구하였다. 이 결과를 수리  
모형실험과 수치모형으로 비교 검토하였으며, 직강화 설치 전후에 유사모형을 적용하여 본 결과 직강화  
하는 경우 홍수량 소통과 안정하도 측면에서 적합한 것으로 나타났다. 본 연구 적용 결과 안정하도 설  
계시 적합한 방법으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- ASCE, Sedimentation Engineering, Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54, Vito A.  
Vanoni, ed., 1975
- Chang, H. H., "Fluvial Processes in River Engineering", John Wiley & Sons, 1988
- Molinas, A., and Yang, C. T., "Computer Program User's Manual for GSTARS", Bureau of  
Reclamation, 1986
- Song, C.C.s., and Yang, C. T., "Minimum Stream Power: Theory", Journal of Hydraulics Division,  
ASCE, Vol. 106, No. HY9, August 1980.
- Yang, C. T., "Minimum Stream Power and Fluvial Hydraulics", Journal of Hydraulics Division,  
ASCE, Vol. 102, No. HY7, August 1976.
- William, A. T., William H. M. Jr., "Open Channel Flow and Sedimentation TABS-2", Waterways  
Experiment Station, Corps of Engineers, 1985

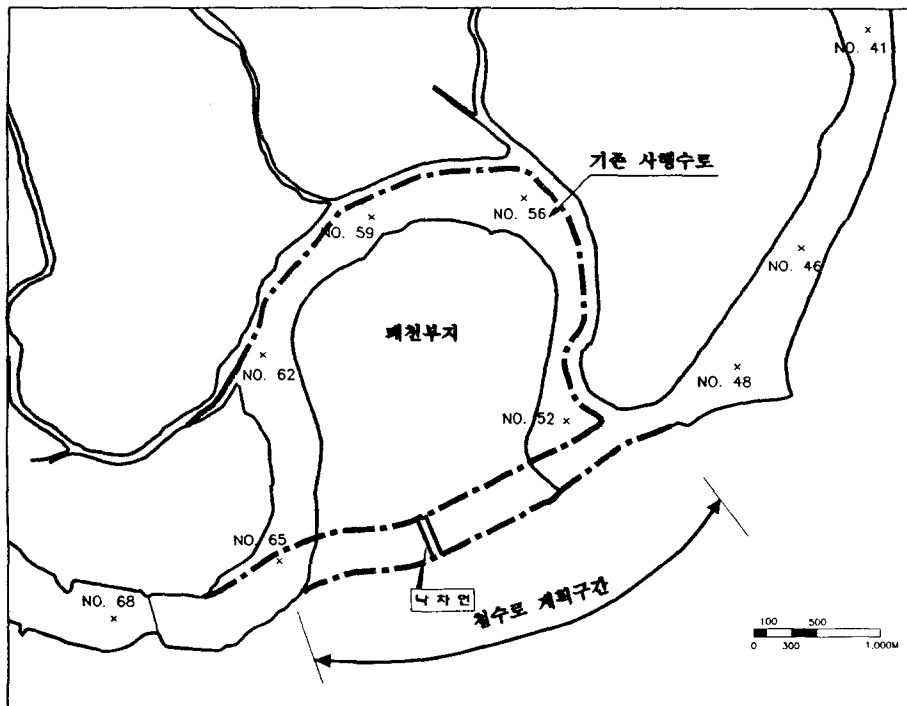


그림 1. 연구대상구간

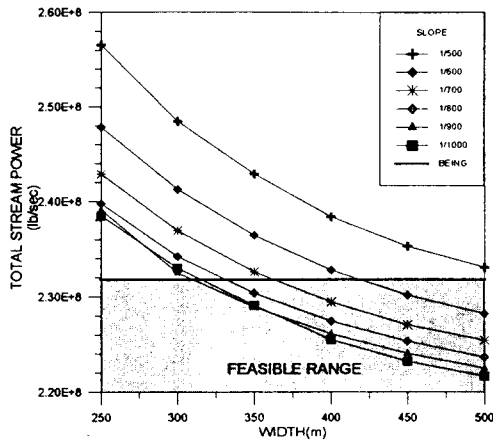


그림 2. 하천폭과 경사에 따른 수류 에너지 곡선

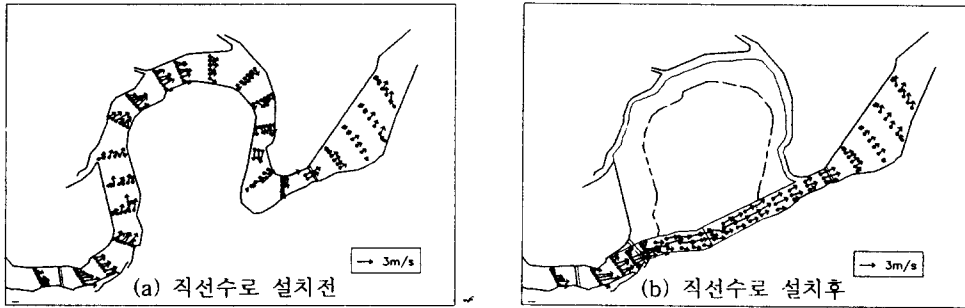


그림 3. 수류 및 유황도(수리모형실험)

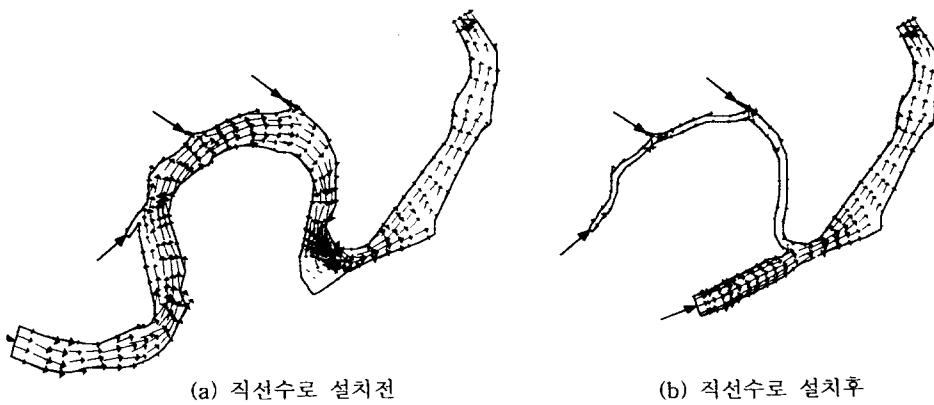
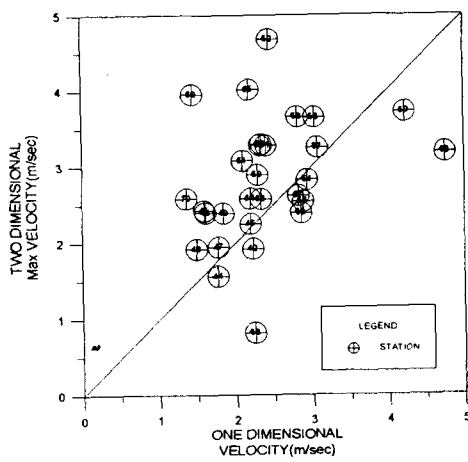
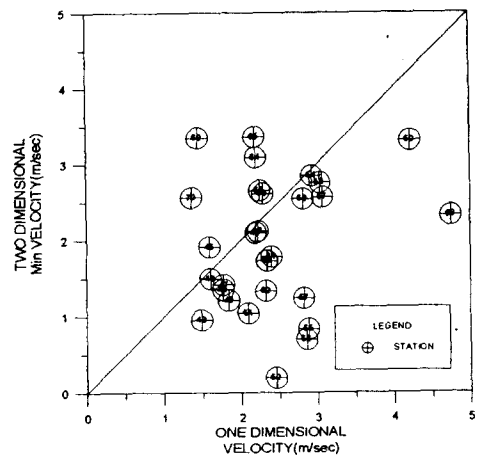


그림 4. 유속 및 유황도(TABS-MD)

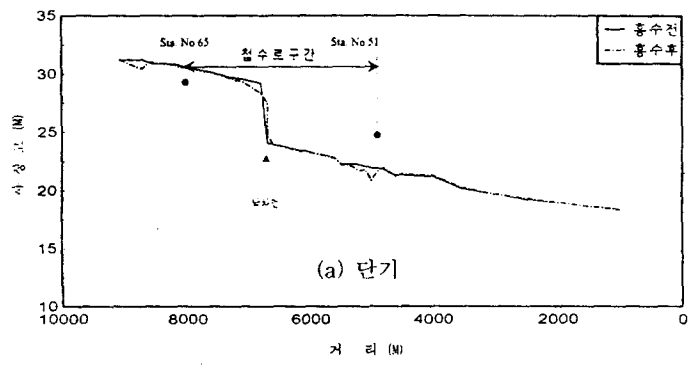


(a) 직선수로 설치전

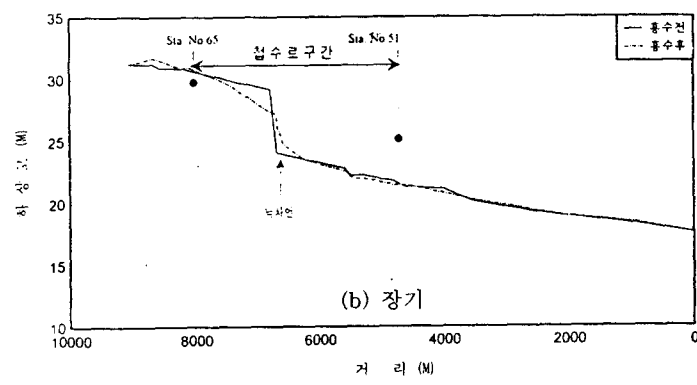


(b) 직선수로 설치후

그림 5. 1차원 평균유속과 2차원 유속비교



(a) 단기



(b) 장기

그림 6. 하상변동예측