

## 충적하천의 유로이동에 관한 연구

### A Study of Channel Migration in Alluvial River

노 섭\* · 정용태\*\* · 송재우\*\*\*

Roh, Sub · Chung, Yong Tai\*\* · Song, Jai Woo\*\*\*

#### Abstract

Under natural conditions, rivers do not in general take straight courses but instead take winding courses. This is known as meandering of rivers. Meandering of rivers are so complicated because of the mutual interactions between flow and movable boundaries. In quantitative information, it is important to predict the future location of a river channel(channel migration) because in selecting a bridge site or a location of a road. It may be valuable to know the future impact of a nearby river on those structures. When the prediction model of the migration of channel is used in domestic rivers with high coefficient of river regime, it is rational to use the periodical dominant discharge (PDD), which is named firstly by the author, instead of the average discharge. According to the analysis of the erosion coefficient, the mean deviation on the channel migration, and the bed scour factor, it can bring shedding light on the fact that the discharge is one of the dominant components in channel migration. In project area, the discharge that can shift the channel is slightly greater than 6,000CMS. The prediction model of the migration of channel estimated the erosion coefficient,  $E_0$  by the data from the South Han River. This estimated value from the South Han River was also used to predict the migration of the South Han River in year 2000.

#### 요 지

자연하천에 대한 합리적인 하천개수계획수립 및 유로의 유지관리면에서 반드시 규명되어야 할 유로만곡부에서의 정량적인 해석은 여러가지 접근방법이 있으며, 사행하천의 유로이동에 대한 예측은 도로, 교량 등의 위치선정과 기존하천구조물의 방재에 필수적이다. 하상계수가 큰 우리나라의 하천에 유로이동 예측모형을 적용할 때 유량은 기간별-지배유량을 고려하는 것이 타당할 것으로 사료되며, 본 연구대상 유역에 대한 침식계수, 유로이동에 대한 평균오차량, 하상세굴계수 등을 비교검토한 결과 유로이동을 지배하는 유량이 존재함을 알 수 있으며, 연구대상유역에서 유로이동에 대한 지배유량은 재현기간 4년에 해당하는 6,000CMS 이상으로 사료된다. 유로이동모형을 실측값이 있는 남한강의 연구대상유로에 적용하여 침식계수를 구하였으며, 계산된 침식계수를 이용하여 그 유로에서의 2000년에 대한 유로이동을 예측하였다.

\* 정회원 · 홍익대학교 대학원 박사과정

\*\* 정회원 · 순천전문대학 환경관리과 전임강사

\*\*\* 정회원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

# 1. 서 론

자연하천의 형태학적 특성에는 여러가지가 있으나 가장 대표적인 것이 사행현상이며, 이러한 하천의 사행현상은 홍수시 하도의 불안정, 취수구의 유지 곤란 및 기능저하, 제방의 파괴, 수공구조물의 국부 세굴에 따른 하천재해 등과 밀접한 관련이 있다. 자연하천의 만곡부는 하천형태학적으로나 수리학적 으로 매우 복잡한 양상을 보이고 있어 하도의 하 상변동에 관한 정량적인 예측의 어려움이 만곡부의 하도설계시 문제점으로 제기된다.

유로평면형의 변화에 관한 연구는 Blue 등<sup>(6)</sup>으로 부터 시작된 이래 유로이동율이 최대가 되는 곡률 비에 대하여 Hickin & Nanson<sup>(10,15)</sup>, Bagnold<sup>(11)</sup>, Leopold & Wolman<sup>(13)</sup>과 Hickin<sup>(8)</sup> 및 Begin<sup>(5)</sup>등이 연구한 바 있으며, Thorne & Samira<sup>(17)</sup>, Johannesson & Parker<sup>(12)</sup>, Hasegawa<sup>(7)</sup>등에 의하여 제방침식과정을 연구되었다. 한편 유로의 변형과정은 Hickin<sup>(9)</sup>, Ikeda, Parker & Sawai<sup>(11)</sup>, Murphy<sup>(14)</sup>등에 의하여 연구되었다.

실제하천에서 유로이동예측에 관한 연구는 長谷川, 伊藤<sup>(18)</sup>에 의하여 이루어 졌으며, Parker<sup>(16)</sup>는 Ikeda, Parker & Sawai<sup>(11)</sup>의 이론을 이용한 computer 모형을 개발한 후 Minnesota강 유역에 대한 유로이동위치를 예측한 바 있다.<sup>(12)</sup> 또한 Beck<sup>(2)</sup> 및 Beck 등<sup>(3,4)</sup>은 실측연구와 이론적인 해석에 Parker 모형을 적용한 바 있다.

우리나라 하천 사행에 관한 연구는 고재웅<sup>(20)</sup>, 송재우<sup>(21)</sup>, 윤세의<sup>(22)</sup> 등의 연구가 있으며, 유로이동에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구의 기본가정은 다음과 같으며,

- 1) 흐름은 상류(subcritical flow)이다.
- 2) 하폭은 일정하다.
- 3) 제방 및 하상재료는 균등하다.
- 4) 곡률반경이 하폭에 비해 크다.( $R \gg b$ )

유로변형에 관한 모형은 다음과 같이 적용한다.

1) 흐름장과 유로이동간의 관계식에 토사의 이동 과 토사의 연속방정식을 적용한다.

2) 미소진폭유로가 일정한 파장을 갖는 사행형으로 충분히 발달된다는 조건하에서 유로이동모형에 선형안정해석을 적용한다.

3) 예측모형은 남한강유역의 여주수위표지점에 적용하여 검토하였으며<sup>(19)</sup>, 실측값과 계산값을 일치 할 때의 침식계수를 구한 후 유로이동을 예측한다.

# 2. 기본 이론

## 2.1 만곡부의 흐름특성

본 연구에서 사용된 흐름특성방정식은 흐름이 비 압축성( $\rho = \text{const}$ )이고, 균질성유체일 경우 평균화된 수심법을 도입하여 그림 1에 도사한 유로좌표계에 따른 2차원 정류에 대한 흐름방정식으로 변환하면 다음 식과 같다.

흐름방향 운동방정식;

$$\left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{s}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{n}} + \left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] \tilde{C} \tilde{u} \tilde{v} = - \left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] g \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial \tilde{s}} - \frac{\tilde{\tau}_s}{\rho h} \quad (1)$$

횡방향 운동방정식;

$$\left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] \tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{s}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{n}} + \left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] \tilde{C} \tilde{u}^2 = -g \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial \tilde{n}} - \frac{\tilde{\tau}_n}{\rho h} \quad (2)$$

연속 방정식;

$$\left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] \frac{\partial(\tilde{u}\tilde{h})}{\partial \tilde{s}} + \frac{\partial(\tilde{v}\tilde{h})}{\partial \tilde{n}} + \left[ \frac{1}{1+\tilde{n}\tilde{C}} \right] \tilde{C} \tilde{v}\tilde{h} = 0 \quad (3)$$

여기서,

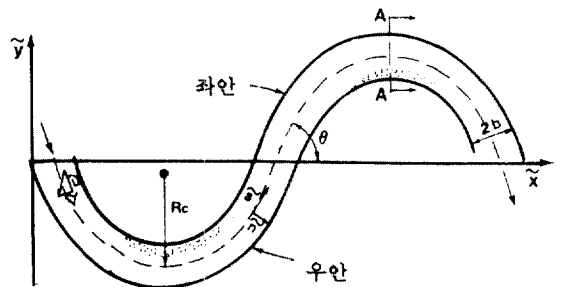


그림 1. 유로좌표계

$\bar{u}, \bar{v}$  : 각각  $\bar{s}, \bar{n}$  방향의 평균수심에 대한 유속성분  
 $g$  : 중력에 따른 가속도  
 $\zeta\bar{\theta}$  : 수표면고  
 $\rho$  : 물의 밀도  
 $\bar{h}$  : 곡부수심  
 $\bar{C}$  : 유로중심선에 따른 곡률 ( $\bar{C}(\bar{s}) = \frac{d\theta}{d\bar{s}}$ )

또한 흐름방향과 횡방향에 대한 하상전단응력성분인  $\bar{\tau}_s$ 와  $\bar{\tau}_n$ 은 각각 다음 식으로 계산한다.

$$\bar{\tau}_s = \rho C_f \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_n = \rho C_f \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (5)$$

여기서,  $C_f$ 는 Chezy의 무차원 마찰계수 ( $\frac{g}{C^2}$ )이다

운동방정식과 연속방정식을 선형화시키기 위하여 섭동도식(perturbation scheme)을 도입하여 선형화한 결과 다음 식과 같다.

$$\frac{d\bar{u}'}{d\bar{s}} + \frac{2C_f}{H} \bar{u}' = -\bar{n}U \left[ \frac{d\bar{C}'}{d\bar{s}} + \frac{C_f}{H} \left( \bar{C}' + \frac{S_t}{H} \right) \right] \quad (6)$$

따라서 식 (6)은 비제차, 선형-상미분방정식이므로 평균수심-유속분포에 대한 일반해는 식 (7)과 같다.

$$\bar{u}' = U - \frac{\bar{n}U \int_{-\infty}^{\bar{s}} \exp\left(\frac{2C_f \bar{s}'}{H}\right) \left[ \frac{d\bar{C}'}{d\bar{s}'} + \frac{C_f}{H} \left\{ \bar{C}'(\bar{s}') + \frac{S_t}{H} \right\} \right] d\bar{s}'}{\exp\left[\frac{2C_f \bar{s}}{H}\right]} \quad (7)$$

유로의 상류단에서의 경계조건이  $\bar{n} = b$ 일 때  $\bar{u}'_b = \bar{u}'(0)$ 이므로 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$\bar{u}' = U - \frac{\bar{u}'(0) + bU\bar{C}(0) - bU\bar{C}(\bar{s})}{\exp\left(\frac{2C_f \bar{s}}{H}\right)} + \frac{bUC_f \int_0^{\bar{s}} \exp\left(\frac{2C_f \bar{s}'}{H}\right) \left[ -\bar{C}'(\bar{s}') + \frac{S_t}{H} \right] d\bar{s}'}{H \exp\left(\frac{2C_f \bar{s}}{H}\right)} \quad (8)$$

## 2.2 사행유로의 도해

사행유로에서 흐름장의 발달이 유로만곡의 정도에

따라 다르므로 직교좌표계를 곡선의  $\theta - \bar{s}$  좌표계로 변환해야 하는 데, 좌표변환에 이용되는 변수들은 다음과 같다.

$$\tan\theta = \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} \quad (9)$$

$$d\bar{s}^2 = d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2 \quad (10)$$

또한 유로곡률은 다음과 같다.

$$\bar{C} = \frac{d\theta}{d\bar{s}} \quad (11)$$

유로의 좌표변환을 위한 첫째 단계는 식 (9)를 이용하여  $\theta$ 를 결정하는 것으로서  $i$ 점에서의 방향각,  $\theta$ 는 점  $i$ 와 점  $i-1$ 에 인접한 점을 지나는 보간함수를 이용하여  $\bar{x}$ 에 대한  $\bar{y}$  값에 의하여 얻어진다. 따라서 좌표변환에 이용되는 회전각,  $\theta_{i1}$ (angle of rotation)은 다음과 같다.

$$\theta_{i1} = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_{i-1}}{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_{i-1}} \right) \quad (12)$$

각 점에서  $\theta$ 가 결정되면, 두번째 단계는 식 (10)을 사용하여  $\bar{s}$ 를 결정한다. 점 1에서  $\bar{s}$ 를 zero라 가정하여 점 2에 따라 시작되는 연속적인 점에 대한  $\bar{s}$ 는 다음 식으로 구한다.

$$\bar{s}_i = \bar{s}_{i-1} + \int_{\bar{x}_{i-1}}^{\bar{x}_i} \left[ 1 + \left( \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} \right)^2 \right]^{1/2} d\bar{x} \quad (13)$$

다음은 마지막 단계로 식 (11)을 이용하여 유로 곡률을 결정하는 것으로서 그림 2에 보는 바와 같이  $i$ 점의 곡률은 흐름방향길이에 대한 방향각의 도함수로서 3차 스플라인함수를 적용하여 구한다. 각 점에서 유로이동은 좌우측제방 모두를 나타내야 하므로 각 점에 대한 두개의 침식계수가 필요하게 된다. 이때의 계수들은 각각 우안과 좌안의 침식성을 나타내는 것으로서  $E_r$ 과  $E_l$ 로 표시한다.

새로운 시간  $\bar{t}$ 는 다음 식으로 정의한다.

$$\bar{t} = \bar{t}_0 + \Delta \bar{t} \quad (14)$$

시간  $\bar{t}$ 일 때, 각 점에 대한 새로운 좌표계는 다음과 같다.

$$\bar{x} = \bar{x}_0 + \xi \Delta \bar{t} \sin\theta \quad (15)$$

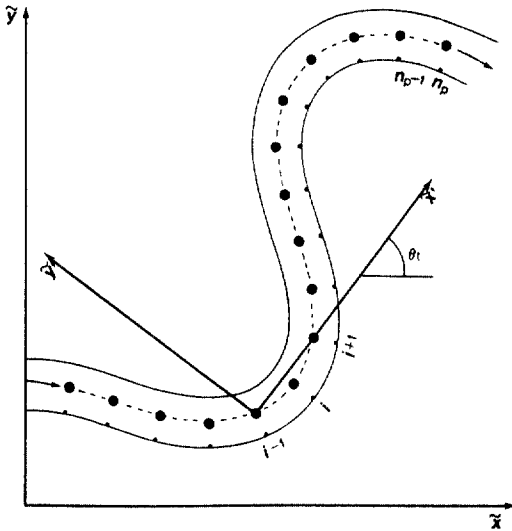


그림 2. 사행유로의 도해를 위한 좌표계

$$\hat{y} = \hat{y}_0 - \xi \Delta \bar{t} \cos \theta \quad (16)$$

### 3. 유로이동모형의 적용 및 비교분석

#### 3.1 대상하천 및 입력자료

본 모형을 적용한 대상유로의 길이는 3.5~7 Km 로써 유로 중심선의 직교좌표점  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ 는 디지털 구 격기 X-PLAN 360K를 사용하여 구하고, 지배유량은 여주수위표 지점의 수위관측자료를 유황곡선도에 적용하여 일유량을 구한 후 일유량에 대한 기간별-지배유량을 구한 결과 표 1과 같다. 또한 수면의 평균유로폭과 평균수심은 횡단면도로부터 구하였으며, 수면경사, I는 지형도나 횡단면도로부터 유로의 상류부와 하류부간의 종단면도를 그려서 구하고, 하류방향에 따른 유로경사(valley slope)는 하천축의 종단면도로부터 구한 결과 표 2와 같다.

#### 3.2 모형의 적용

유로이동모형은 한강의 상류에 위치한 남한강에 대하여 적용하였으며(그림 3), 유로이동모형을 적용 하고자 하는 연구대상유역의 선정기준은 다음과 같다.

- 1) 일정기간 동안 대상하천의 유로이동에 대한 자료가 있어야 한다.
- 2) 예측모형의 수정이나 검증을 위하여 유로이동

표 1. 기간별-지배유량 및 여주수위표지점의 유황

기준유량(CMS)	지배일수(day)	평균유량(CMS)	비고
최대유량	1	9,687	
4,000 이상	20	4,850	
2,000 이상	68	3,350	

표 2. 산정된 입력자료

적용유역	b <sub>0</sub> (m)	H(m)	I	D <sub>m</sub> (mm)
case I	353	8.51	0.00036	1.25
case II	352	7.30	0.00049	1.48
case III	335	6.03	0.00070	2.14

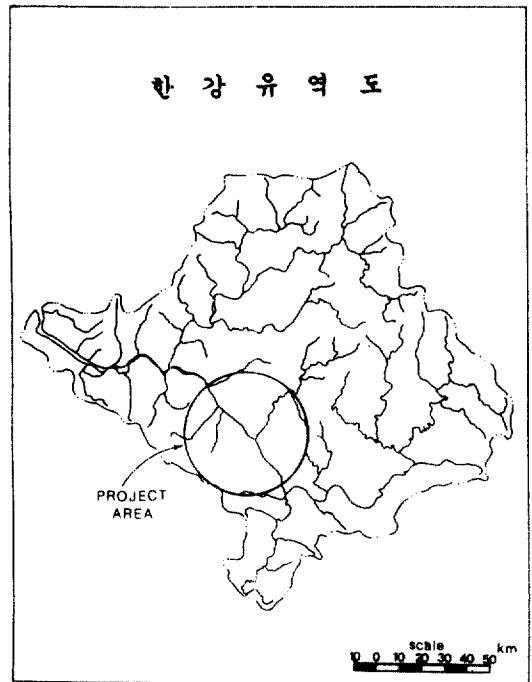
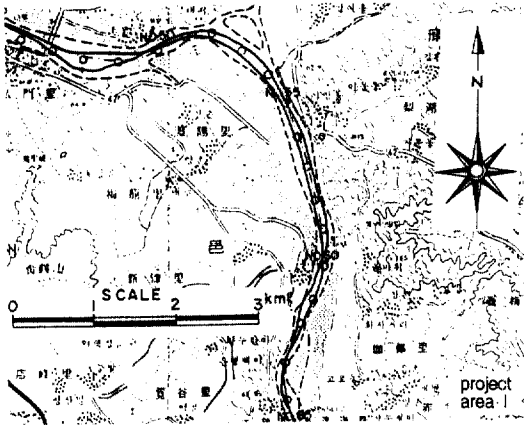


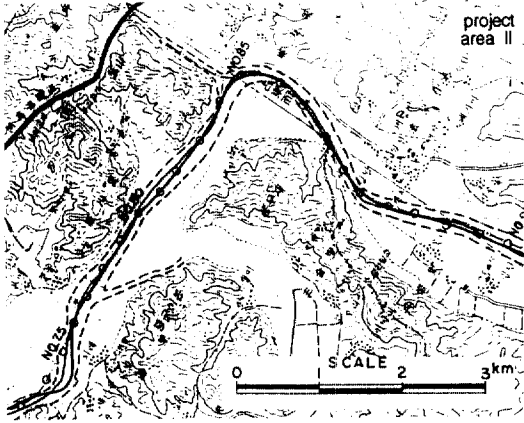
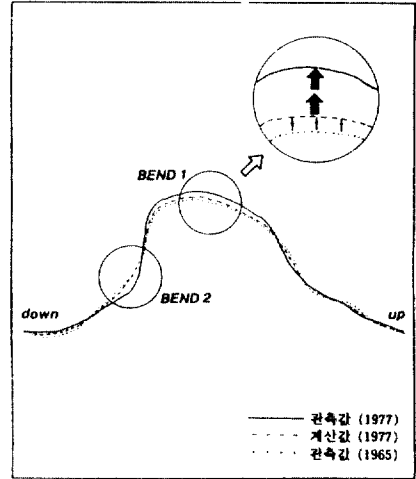
그림 3. 연구대상 하천유역도

을 나타낼 만한 서로 다른 3개 년의 유로위치를 나타내는 항공사진이나 지형도가 있어야 한다.

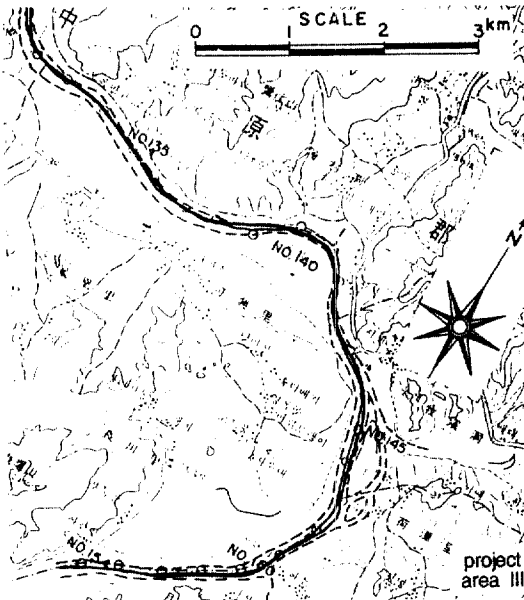
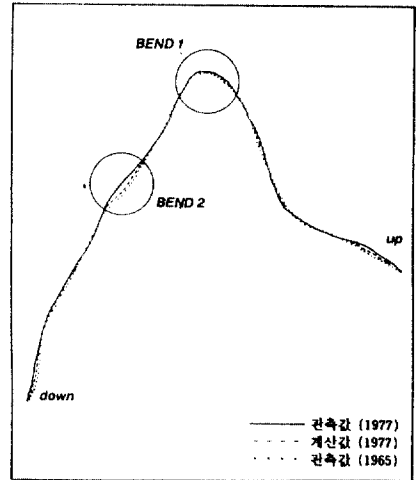
- 3) 연구대상유역내의 유로횡단면도가 있어야 한다.



<CASE I>



<CASE II>



<CASE III>

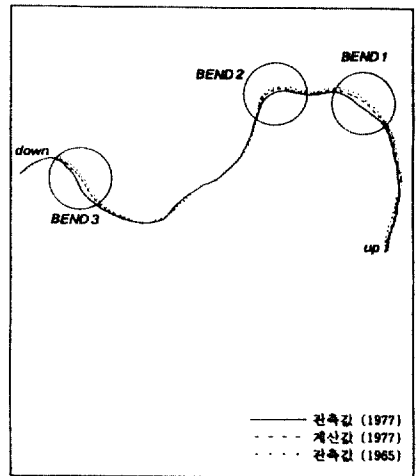


그림 4. 유로이동의 비교(case study I, II, III: 초기조건, 1965~1977)

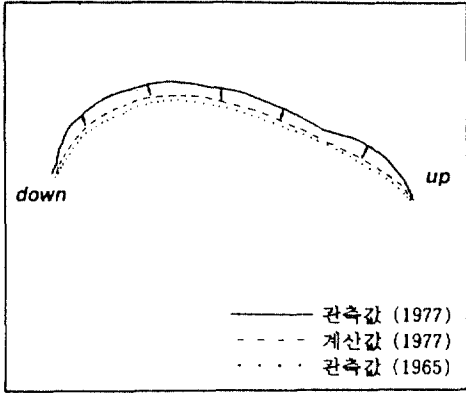


그림 5. 침식계수의 산정과정(CASE I, BEND 1)

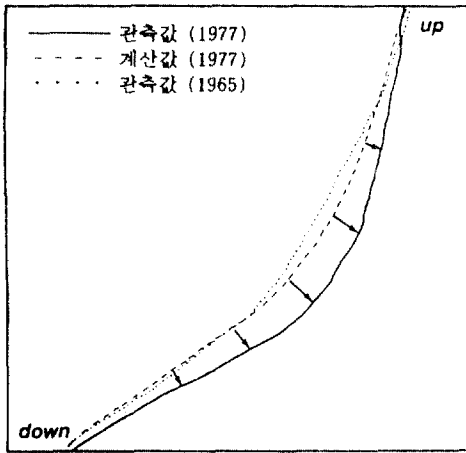


그림 6. 침식계수의 산정과정(CASE I, BEND 2)

본 연구에 사용된 유로이동예측모형의 적용과정은 산정된 자료들을 유로예측모형에 입력한 후, 1965년에서 1977년 사이의 이동현황(그림 4)을 계산하게 하며, 이는 침식계수의 초기조건 하에서의 모습을 나타낸다.

실측값이 있는 연구대상유역에 유로이동모형을 적용하여 시산법으로 침식계수의 계산과정(그림 5, 그림 6)을 나타내고, 또한 실측자료가 있는 1982년도까지 예측(그림 7)한 결과에 대한 계산값과 실측값 사이의 평균오차량을 구하였다. 계산된 계수들을 사용하여 2000년의 유로이동상황을 예측하였으며(그림 8), 이러한 과정은 case I, case II, case III에 모두 동일한 방법으로 적용하였다.

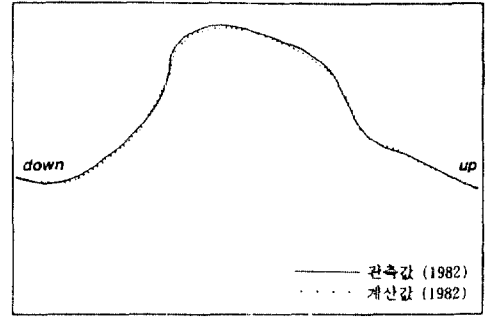


그림 7. 계산된 침식계수에 의한 유로이동의 비교

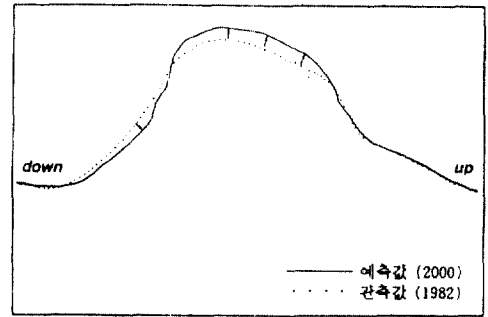


그림 8. 2000년에 대한 유로이동의 예측(case study I)

실측 좌표값과 계산된 좌표값 사이에 오차를 이용하여 침식계수를 산정(그림 5, 그림 6, 표 3)하였다.

case I의 경우 계산된 침식계수와 평균오차량은 case II, case III에 비해 상대적으로 높은 값을 갖으며, 유속에 영향을 받는 마찰계수 또한 큰 값을 갖는다. 계산된 침식계수로부터 1982년의 유로이동 예측에 대한 계산값과 실측값은 잘 일치함을 볼 수 있으며, 산정된 침식계수를 사용하여 2000년에 대한 유로이동의 예측을 시도했으며, 평균유로이동은 80 m였다.

한편, 표 1의 값을 이용하여 기간별-지배유량을 고려한 경우와 기간별-평균유량으로 흐를 경우에 대한 유로이동량의 평균오차량분석의 결과 표 4에서 보는 바와 같이 기간별-지배유량을 고려한 경우의 실제이동좌표와 계산에 의한 이동좌표간의 오차량이 기간별-평균유량을 고려한 경우보다 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 유로이동을 발생시키는

표 3. 기간별-지배유량에 의한 침식계수의 산정 (1965~1977)

산정인자 적용인자	침식계수 ( $E_s, 10^{-7}$ )			마찰계수 $C_f$	세굴계수 A	평균오차량 (m)
	BEND 1	BEND 2	BEND 3			
case I	250~750	250~500	—	0.0011	13.90	69
case II	1	80	—	0.0009	13.11	26
case III	2	200	200	0.0007	13.13	30

표 4. 실제유량으로부터의 모의결과 (1965~1977)

적용된 유량	유로이동량의 평균오차 (m)	비 고
기간별-지배유량을 고려한 경우	69	
20일간 평균유량이 4,850CMS로 흐를 경우	90.5	4000CMS 이상-20일
68일간 평균유량이 3,350CMS로 흐를 경우	161.5	2000CMS 이상-68일

수위 년도	저 수 위		평 수 위		최 고 수 위	
	수위 (m)	유량 ( $m^3/sec$ )	수위 (m)	유량 ( $m^3/sec$ )	수위 (m)	유량 ( $m^3/sec$ )
1965	1.75	36	1.84	47	8.22	6,600
1966	1.81	42	2.16	104	7.78	5,800
1967	1.75	36	1.91	58	5.69	2,650
1968	1.59	20	1.87	53	6.50	3,800
1969	1.80	41	2.19	108	7.97	6,200
1970	1.84	47	1.99	68	6.74	4,000
1971	1.74	35	1.96	64	6.99	4,500
1972	1.88	54	2.65	235	10.11	11,000
1973	2.77	275	2.66	236	4.28	1,180
1974	2.06	72	2.35	146	6.71	4,000
1975	2.18	106	2.40	160	6.72	4,050
1976	1.86	50	2.20	113	7.60	5,600
1977	1.78	39	2.18	106	5.63	2,550
1978	1.90	56	2.12	96	9.05	8,300
1979	1.88	54	2.49	182	8.15	6,500
1980	1.90	56	2.35	146	8.36	6,800
계	30.49	1,019	35.32	1,922	116.50	83,530
평 균	9.41	63.7	2.21	120.1	7.28	5,220.6

표 5. 기존모형과의 비교검토 (단위, m)

적용유역	실측값	Parker 모형	Brice 모형	본모형
case I	72	11.6	35.3	48.3
case II	38	8.4	35.2	20.4
case III	16	9.2	33.5	33.3

중요인자로는 유하기간보다는 유량으로써 기간별-지배유량으로는 침두유량이 고려되지만, 평균유량은 이러한 침두유량이 평균화되므로 상대적으로 작은 유량으로 모의를 하게 된다.

기존의 유로이동예측모형을 하상계수가 높은 우리나라의 하천에 대하여 적용할 경우에는 유량을 기간별-지배유량으로 고려하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

### 3.3 모형의 비교분석

5년 동안(1977~1982)의 유로이동량에 대한 기존 모형과의 비교결과는 표 5에서 보는 바와 같이 년 평균유량을 사용한 Parker의 모형은 이동량이 실측값보다 작게 나온 반면 Brice모형과 본 모형은 실측값과 같은 경향을 따르고 있으나 case I의 지역에서의 본 모형과 Brice모형에 의한 계산값이 만족부 정점에서 실측값보다 작게 나왔으며, 그 차이가 case II와 case III 지역보다 큰 것은 평균오차량이 크게 나온 결과와 부합됨을 알 수 있다.

또한 연간 유로이동율이 유로폭의 0.01배로 단순 비례하여 증가된다는 Brice의 모형은 case II의 경우에 실측값과 근접한 결과를 보였으며, case III 지역에서는 본 모형과 Brice모형에 의한 계산된 유로이동이 과대하게 나타난 것은 case III의 유역특성에 인한 실제 이동이 구속을 받고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

한편 표 4에서 보는 바와 같이 평균유량의 개념을 사용한 Parker의 모형은 유로이동량의 평균오차량이 지배유량을 고려한 본 모형에 의한 평균오차량보다 약 3배 이상으로 나타난 것으로 보아 본 모형의 타당성이 더 큰 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기존의 유로이동예측모형을 하상계수가 높은 우리나라의 하천에 적용할 경우 유량은 유로이동에 영향을 줄 수 있는 기간별-지배유량을 고려하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

2) 본 연구대상유역에 대한 침식계수, 유로이동에 대한 평균오차량, 하상세굴계수 등을 비교검토한 결과 유로이동을 지배하는 유량이 존재함을 알 수 있으며, 연구대상유역에서 유로이동에 대한 지배유량은 재현기간 4년에 해당하는 6,000CMS 이상으로 판단된다.

3) 유로변형모형을 실측값이 있는 남한강의 연구대상유역에 적용하여 침식계수를 구하였으며, 계산된 침식계수를 이용하여 그 유로의 2000년에 대한 유로이동을 예측하였다.

## 참 고 문 헌

1. Bagnold, R.A., "Some Aspects of the Shape of River Meanders", *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 282-E.*, 1960, pp. 135-144.
2. Beck, S.M., "Mathematical Modelling of Meander Interaction", *RIVER MEANDERING, Proceeding of the Conference Rivers'83, ASCE, New Orleans, Louisiana, October 24-26, 1983*, pp. 932-941.
3. Beck, S.M., Melfi, D.A. and Yalamanchili, K., "Lateral Migration of the Genesee River, New York", *RIVER MEANDERING, Proceedings of the Conference Rivers'83, ASCE, New Orleans, Louisiana, October 24~26, 1983*, pp. 510-517.
4. Beck, S.M., Harrington, R.A. and Andres, D.D., "Lateral Channel Stability of the Pembina River near Rossington, Alberta", unpublished report, *Alberta Research Council, Edmonton, Alberta, Canada*, 1983.
5. Begin, Z.B., "Curvature Ratio and Rate of River Bend Migration-Update", *Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 112, No. 10, October, 1986*, pp. 904-908.
6. Blue, F.L., Herbert, J.K. Jr. and Lancefield, R.L., "Flow around a River Bend Investigation", *Civil Engineering, Vol. 4, May, 1984*.
7. Hasegawa, K., "University Bank Erosion Coefficient for Meandering Rivers", *Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 115, No. 6, 1989*, pp. 744-765.



8. Hickin, E.J., "The Development of Meanders in Natural River-Channels", *American Journal of Science*, Vol. 274, April, 1974, pp. 414-442.
9. Hickin, E.J., "Mean Flow Structure in Meanders of the Squamish River, British Columbia", *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 15, 1978, pp. 1833-1849.
10. Hickin, E.J. and Nanson, G.C., "The Character of Channel Migration on the Beatton River, Northeast British Columbia, Canada", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 86, April, 1975, pp. 487-494.
11. Ikeda, S., Parker, G. and Sawai, K., "Bend Theory of River Meanders. Part 1. Linear Development", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 112, Nov., 1981, pp. 363-378.
12. Johannesson, H. and Parker, G., "Computer simulated Migration of Meandering Rivers in Minnesota", Project Report No. 242, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Univ. of Minnesota, 1985.
13. Leopold, L.B. and Wolman, M.G., "River Meanders", *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 71, 1960, pp. 769-794.
14. Murphy, R.W.L., "*The Migration of Meanders in Alluvial Rivers*", Ph. D. dissertation, University of Minnesota, 1982.
15. Nanson, G.C. and Hickin, E.J., "Channel Migration and Incision on the Beatton River", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 109, No. 3, March, 1983, pp. 327-337.
16. Parker, G., "Stability of the Channel of the Minnesota River near State Bridge No. 93, Minnesota", St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory Project Report No. 205, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, 1982.
17. Thorne, C.R. and Samira, R., "Secondary Current Measurements in a Meandering River", *RIVER MEANDERING*, Proceedings of the Conference Rivers '83, ASCE, New Orleans, Louisiana, October 24-25, 1983, pp. 675-686.
18. 長谷川和義, 伊藤仁, "蛇行流路の經年變動に關する電算器シミュレーション", 日本土木學會北海道支部論文報告集, 第34號, 1978, 2.
19. 건설부, "남한강하상변동조사보고서", 1982. 12.
20. 고재웅, "만곡유로에서의 하상변동에 관한 연구", 한국수문학회지, 제8권, 제2호, 1975, 12, pp. 75-80.
21. 송재우, "우리나라 하천의 사행특성에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1980.
22. 윤세의, 이종태, 이원환, "만곡수로에서의 2차원 흐름해석", 대한토목학회논문집, 제6권 제1호, 1986. 3, pp. 87-94.

(接受: 1993. 8. 30)