

## 제 6 장 하천 취수지점의 선정

최 계 운

### 6.1 서 론

총적하상을 가진 하천이나 강은 흐름이 지속되면서 제방과 하상의 침식과 퇴적 작용을 반복하게 되며, 이에 따른 변경이 끊임없이 일어나게 된다. 이와같은 유로의 변경은 하천의 형성시기, 하상재료의 크기나 종류, 하상경사등에 의하여 영향을 받을 뿐만 아니라 제방의 특성, 하천 주변의 지형상태, 유역내 토지 이용도의 변화 등에 크게 영향을 받는다. 이와같은 유로의 변경은 직선하천보다는 사행(meandering) 하천 또는 망상(braided)하천에서 더 크게 나타나고 있으며 우리나라의 경우 상당한 하천과 강이 사행 또는 망상하천 형태를 이루고 있다.

이와같이 사행하천이나 망상하천을 이루고 있는 경우에는 하천내 곳곳에 쌓여 있는 유사가 하천흐름 형태변화 및 홍수시마다 하류로 이동하면서 유속이 느린 지역에서 퇴적되고 이로 인하여 유로의 형상이 바뀌게 된다. 유로의 형상은 본류로부터의 유사 이동뿐만 아니라 지류로부터의 유사 유입에 의하여도 크게 영향을 받는다.

국내의 경우 취수원으로는 호소수와 하천수가 주로 이용되는데, 이 중에서 하천수를 취수원으로 이용하는 경우에 있어서의 취수지점 선정에는 이와같은 하상 유로의 변경을 고려하지 않으면 않된다. 물론, 하상이나 유로의 변경뿐만 아니라 수질이 양호하고, 자연유하식의 도, 송수가 가능하며, 정수장으로부터 거리가 가깝고 해수역류나 결빙기의 영향을 받지 않는 조건들과 취수장의 지속적 사용성 여부, 유지 관리상의 편리성, 향후 확장의 용이성등의 조건등의 검토가 필요하지만 이와같은 조건들은 검토하기가 과히 어렵지 않거나 기존 문헌에 이미 많이 언급되고 있다. 하천내 취수지점 선정시 지금까지 소홀히 다루어 왔던 장래 하상의 변동이나 유로의 변경에 대하여 보다 신중을 기할 필요가 있다.

그러나 이와같은 하상 조건의 변경이나 유로 변경을 정량적으로 예측하는 일은 여간 어려운 일이 아니다. 이와같은 유로 변경을 예측하기 위하여는 과거 수십 년간의 하천의 지형학적 변화에 대한 검토를 토대로 주변내 토지이용 변화, 수리학적 및 기상학적 조건의 변화, 인위적인 하천 구조물 설치나 하천 형태 변화등 하천내 흐름에 영향을 주는 각종 외부 조건을 종합적으로 판단하고, 하천내 수위, 유량 등 의 변화에 따른 하상 재료의 이동상태를 지속적으로 파악함으로써 이루어질 수 있다.

이와같은 하천내 하상 조건이나 유로의 변경에 대한 세심한 검토가 없이 취수지점을 선정한다면 취수 구조물이 설치되고 취수가 시작된 이후에 유로가 다른 방향으로 이동하거나 유로는 동일하나 유로내 쇠심부가 크게 변경되어 취수지점의 수심이 지나치게 낮아지는 경우등이 발생하게 되고, 설치된 취수시설이 제대로 역할을 감당할 수 없을 것이다. 이와같은 경우 지속적인 취수를 위하여는 설치된 취수시설을 변경하거나 새로운 취수시설을 설치할 수 밖에 없을 것이다.

따라서, 하천내 취수지점을 선정하는 경우에는 하천의 유로변경에 관하여 보다 세심한 검토를 거친 이후에 구체적인 위치선정을 실시하는 것이 바람직하다. 특히, 유로변경에 영향을 미치는 각종 인자들을 조사, 분석하는 것은 이와같은 유로변경 추정에 필수적이라 할 수 있다.

본 장에는 유로변경 추정에 필수적이라 할 수 있는 하천거동 특성 파악을 위한 지침으로 하천거동에 대한 일반적인 원칙을 검토 하였고 취수지점 선정에 관한 검토 사례로서 낙동강의 감천 합류지역 부근을 택하여 구체적인 검토 결과를 예제로서 나타내었다.

### 6.2 하천 거동의 특성

#### 6.2.1 하천의 거동

하천이 불안정한 상태에 있는 경우, 하천내 흐름변화에 따라서 하천 내의 물입자의 동수역학적 현상과 유사의 움직임에 변화를 주며, 이에 따라 하천 거동이 변화된다. 이와같은 하천의 거동 변화로 말미암아 직선하천이 점차 사행화 되며, 실제의

경우 하천의 길이가 하폭의 10배 이상 되는 경우 직선 하천보다는 대부분이 사행 하천을 이루고 있다. 직선하천이 사행하천으로 변화되는 것에 대하여 누구나 받아 들일 만한 이론은 아직 없지만, 우리나라에서 인정되는 이론으로는 아래와 같은 것이 있다.

직선하천부분에서 국지적으로 하폭이 변화되면 흐름에 불규칙성이 일어나고, 이 때 하상재료가 불균질하면 못(pool)과 여울(riffle)이 발생된다. 이때 발생되는 못과 여울은 하폭의 약 5~7배의 거리를 두고 하천 중심부의 좌, 우측에 교대로 반복된다. 여울은 자갈과 같은 굵은 하상재료로 덮여 있으며 못은 수심이 깊은 경우에는 거친 하상재료로 덮여 있지만 수심이 얕은 경우를 지나면서 고운 모래로 덮인다. 낮은 수위에서 여울은 에너지 경사가 크기 때문에 속도는 빠르게 되며, 하천을 횡단하는 광정위어(broad crested weir)의 역할을 한다. 그와는 반대로 수심이 깊고 유속이 느린 못은 댐과 같은 저류기능을 수행한다.

하천의 단면별 속도 분포는 여울과 못이 교대로 발생됨에 따라서 흐름이 빠르고, 느리게 교대로 작용하고 유속이 빠른 단면에서는 침식에 의해서 단면이 확대되고, 이에 따라서 유속은 느리게 된다.

이와는 반대로 유속이 느린 단면에서는 퇴적에 의해서 단면이 감소되고 다시 유속이 증가되게 된다. 하상이 균질한 물질로 구성되었더라도 단면간의 속도가 변화하게 되면 하상은 파상형태를 나타내게 된다.

높은 수위의 유속은 굵은 유사를 이동시킬 수 있고, 못으로부터 쇄굴 된 큰 자갈은 유속이 작은 여울에 쌓이게 된다. 이러한 결과로 인하여 여울에는 큰 자갈이 쌓이게 된다. 낮은 수위에서는 모래가 하천의 전구간에 걸쳐서 이동되며 못에는 델타 형의 침전이 발생한다. 즉, 여울과 못에서 퇴적되는 하상재료의 크기는 유량의 크기와 공급되는 하상재료의 조건에 따라 변화한다.

이와같은 흐름방향의 유속변화에 따른 하상변화와는 달리 한 단면 내에서도 흐름의 진동이 있고 이는 흐름의 회전운동을 강요한다. 즉, 2차흐름(secondary flow)을 발생시킨다. 2차흐름의 원인은 i) 경계조도에 의한 난류의 생성, ii) 온도나 부유사의 농도의 차이에 의한 밀도차이, iii) 단면 모서리에 위치한 사수역 내 흐름과 상호작용등이다.

2차 흐름은 깊이에 대한 하폭의 비에 관계된다. 못(pool)에서의 하천단면 중심부

에서는 2차 흐름에 의하여 하강하는 흐름이 발생하여, 부유물질이 하천단면 중심부로 모이게 된다. 그 반대로 여울(riffle)에서는 하천단면 중심부에서의 흐름이 상승하여 극히 미소한 편경사가 발생한다.

만곡부 정점에서는 2차 흐름이 대칭을 이루지 못하고 외측제방 부근을 침식시키는 비대칭 2차 흐름이 발생한다. 이러한 비대칭 2차 흐름이 만곡 발달의 선형조건이 되며 뭇이 있는 지역에서 제방을 침식하여 만곡을 점차 심화시킨다. 2차 흐름은 하상 전단응력에도 영향을 미쳐, 흐름이 상승하는 곳에서는 전단응력이 감소하고, 반대로 흐름이 하강하는 경우에는 전단응력이 증가하고 세굴되기가 쉽다.

조도(roughness)가 큰 제방 부근에서는 와류가 생성되고, 높은 전단응력 때문에 2차 흐름의 편의가 시작된다. 더욱이 원심력의 작용으로 편경사가 발생하고 외측제방 부근에서는 하강하여 내측 제방까지 도달하는 유동을 일으킨다. 이러한 현상은 횡방향 하상경사를 증가시키고, 최심선을 이동시킨다. 일반적으로 만곡부 정점에는 뭇이 있고 정점과 정점 사이에 여울이 존재한다.

### 6.2.2 하천 지형학의 기초

하천의 기하학적 형상은 침식성 하상에서 시간적으로 끊임없이 변하는 3차원의 유수운동으로 결정된다. 이러한 하천의 형상에 대하여 취급하는 학문을 하천 지형학(river morphology)이라고 부른다. 그러나 물과 유사의 거동은 매우 복합적이므로 이를 정확하게 규명하기는 어려우며, 주로 현상을 서술적으로 취급하게 된다.

하천지형학은 지질학적 접근법과 하천공학적 접근법으로 나눌 수 있는데, 지질학자는 주로 장기간의 변동 성향에 관심이 크고, 하천기술자는 수십년 단위의 중기간의 변동을 정량적으로 예측하는데 관심을 갖는다. 이와 같은 접근법은 다시 추계학적 모형과 확정론적 모형으로 나눈다.

하천의 형상 변동은 여러 가지 자연현상이 복합적으로 작용하여 발생하므로 지형학적 과정을 물리학이나 수학적으로 기술하기는 매우 어렵다. 더구나 확률적 해석은 더욱 곤란하다. 따라서 현재까지의 연구 성과는 경험적 관계식으로서 나타내는데, 이러한 각종 관계식은 지역에 따라 서로 모순되는 결과를 나타내기도 한다. 이와 같은 경험식에 많이 이용되는 관계식은 유량과 하천내 수리학적 및 지형학적

영향 인자들과의 관계를 통하여 주로 표현된다. 이러한 관계는 Leopold와 Maddock(1953)에 의하여 유량의 함수식으로 각 인자들과의 관계를 나타내주는 식으로 표현되고 이와같은 식이 여러경험식의 기초로 이용되고 있다.

$$\begin{aligned}
 W &= a Q^b \\
 y_o &= c Q^f \\
 V &= k Q^m \\
 Q_T &= p Q^j \\
 S_f &= t Q^z \\
 n &= r Q^y
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

식 6.1에서  $Q$ 는 하천내 유량,  $W$ 는 하천의 폭,  $y_o$ 는 하천의 깊이,  $V$ 는 하천의 평균유속,  $Q_T$ 는 하천을 통하여 이동되는 총유사량,  $S_f$ 는 마찰계수,  $n$ 는 Manning의 조도계수를 각각 나타내며, 계수  $a, c, k, p, t, r$ 과  $b, f, m, j, z, y$ 는 하나 또는 여러 하천자료를 이용하여 구할수 있다. 여기에서 하천내 연속방정식인  $Q=W \cdot y_o \cdot V$ 를 적용시키면 식 6.2와 같다.

$$\begin{aligned}
 a \cdot c \cdot k &= 1 \\
 b + f + m &= 1
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

자연하천은 유수를 전달함에 있어서 에너지의 균형 등 여러 요인에 따라 직선으로 되지는 않으며, 대부분 반복적인 사행(meandering)이나 망상(brain)을 이룬다.

Leopold와 Wolman(1957)은 하도형태를 하도경사  $S_b$ 와 만체 유량(bank-full discharge)의 관계로 나타낼 수 있는 경험식을 제안하였으며 이에 의하면 하나의 하천은 망상하도와 사행하도의 형태를 함께 가질 수 있다. 사행이나 망상하천에 관한 해석적 방법은 상당한 주의를 요하며 현재 선형적 안정성 해석 기법도 제안되어 있으나 이를 사용할 경우에도 정성적 가능성을 제시하는 수준에 머물고 있다.

우리나라와 같이 개활지를 통과하는 하천이 적고 대부분 산악지 협곡 하상인 경우에는 이에 적합한 해석방법이 요구된다.

사행현상의 특성은 사행장(蛇行長, meander length)  $\lambda$  와 사행폭(meander amplitude)  $a$ 로 나타낸다. 하천 자체의 특성치로서 만곡비(灣曲比, sinuosity)  $\gamma$  이 있다. 만곡비는 하도 길이와 만곡 길이의 비, 또는 만곡부 경사의 하도경사에 대한 비율로서, 하천 사행을 정현함수(sine)로 근사화하면  $a/\lambda$  의 함수로 다음과 같이 될 수 있다.

$$\gamma = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 + (\pi a/\lambda)^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{(\pi a/\lambda)^2}{1 + (\pi a/\lambda)^2} \sin^2 \phi} d\phi \quad (6.3)$$

이 적분식은 제 2종 Legendre 타원 함수이다. Leopold 등(1964)에 의하면 보통  $\gamma$  은 1~4이며, 실제로 사행하천이 정현함수는 아니므로 만곡주기도 하천을 따라 일정하지 않다. Anderson(1967)은 직선 하도의 기본흐름(base flow)에서 수면 상승(surge)으로 인한 사행 현상의 발생을 설명하였다. 그들은 직선형인 충적층 하도의 어느 단면에서 횡방향 유속  $v$ 를 가정하였다. 이 횡유속은 한쪽 제방바닥을 높게 만든다. 그러면 주 흐름은 상승하고 반대편 제방쪽으로 흐름이 유발된다. 수면상승의 주기  $\theta$ 는 식 6.4와 같이 표현될 수 있다.

$$\theta = 2\pi\sqrt{MK} \quad (6.4)$$

여기서,  $M$ 은 물의 질량이고  $K$ 는 회복력(spring force)이다. 이와같은 물의 질량과 회복력으로 쓰여진 수면상승 주기  $\theta$ 는 아래와 같은 비례관계식으로 표현할 수 있다.

$$\theta \propto \sqrt{\frac{B_s}{gF}} \quad (6.5)$$

여기서,  $B_s$ 는 하폭,  $F$ 는 Froude수이며,  $g$ 는 중력가속도이다. 이러한 진동에서

파장은 아래와 같이 쓰일 수 있다.

$$\lambda \propto \sqrt{AF} \quad (6.6)$$

여기서, A는 하도 단면적이다. 이 파동 때문에 유속은 불규칙해지고, 사주(砂洲, bar)를 교대로 형성하여, 결국 사행장  $\lambda$ 를 가진 사행하천을 이룬다. 이와같은 이론에 기초하여 Anderson(1967)은 다음의 경험적 결론을 제시하였다.

$$\frac{\lambda}{\sqrt{A}} = 72\sqrt{F} \quad (6.7)$$

그는  $\lambda$ 를 유량으로 쓰기 위하여 수심  $h \propto Q^{0.43}$ 을 적용하여 다음을 구하였다.

$$\lambda \propto Q^{0.39} \quad (6.8)$$

그러나, Inglis(1949)에 의하면  $\lambda$ 는 만제 유량의 평방근에 비례한다. Hansen(1967)은 안정성 해석에 의하여 주 사행장을 다음의 관계로 나타냈다.

$$f \frac{\lambda}{h} \approx 14 \quad (6.9)$$

여기서, f는 Darcy-Weisbach의 마찰계수이고, h는 수심이다.

Hansen은  $\lambda$ 를 Q의 함수로 나타내기 위하여 Blench(1952)의 경험적 제안에 따라 다음 관계를 제시하였다.

$$h \propto D^{-1/2} (1 + 3.2 \times 10^{-4} s/q)^{-1/3} q^{2/3} \quad (6.10)$$

이 관계식으로부터 Hansen은 다음을 발견하였다.

$$\lambda \propto Q^{0.525} D^{-0.316} \quad (6.11)$$

아래 표는  $Q$ 와  $\lambda$  사이의 관계식을 정리한 것이다. 표에 위하면 하천사행은 단일 유량(만제 유량)과 단일 과장으로 특성을 타나낼 수 있다.

Ackers 및 Charlton(1970)은 유량 변화에 따른 사행을 연구하여 이러한 현상에 대한 지배유량(dominant discharge)을 “지배유량이란 주기적으로 변화하는 흐름의 범위내에서 확률적으로 존재하는 일정 유량(steady flow)으로서, 다른 실험으로 비슷한 사행장을 만드는 유량이다”라고 정의하였다.

이에 의하면 지배유량은 실험실에서만 사용될 수 있으며, Ackers와 Charlton(1970)은 다음의 두가지 형태의 실험을 하였다.

① 기본 유량에 대하여 정현함수로 유량을 변동시킬 때 실험실의 가상하천에 대한 실험.

② 실제 수문곡선에 입각한 Nigeria Kaduna강의 모형실험.

표 6.1 사행장과 유량(SI단위)

저자	공식	유도방법
Ingris(1947)	$\lambda \propto Q^{0.5}$	경험식
Charlton and Benson(1966)	$\lambda \propto Q^{0.515} D^{-0.285}$	경험식
Anderson(1970)	$\lambda \propto Q^{0.5} h^{-0.5}$	이론식
Anderson(1970)	$\lambda \propto Q^{0.39}$	준경험식
Hansen(1967)	$\lambda \propto Q^{0.525} D^{-0.326}$	준경험식
Ackers and Charlton(1970)	$\lambda \propto Q^{0.467 \pm 0.24}$	경험식

이들은 지배유량  $Q_\lambda$ 에 대한 정의를 도입하여 만곡실험에는  $Q_\lambda/Q_{\max} = 0.95$ 를 제시하고, Kaduna강의 실험에는  $Q_\lambda/Q_{\max} = 0.4$ 를 적용하였다. 이와 같은 차이는 Kaduna강의 경우에 최대 유량은 홍수기에 발생되기 때문에 지배유량이 적게 결정되었다. 많은 실험결과에 의하면 사행현상의 지배유량은 평균유량보다는 크다. 그리고 사행장(과장)  $\lambda$ 는 곡률반경  $R_m$ 보다 결정하기가 더 어렵다. Chang과

Toebes(1970)는 Wabash유역에서  $\overline{R_m}/\overline{B_s} \propto \overline{Q}^{-1/4}$ 의 관계를 발견하였다. 여기서  $\overline{R_m}$ ,  $\overline{B_s}$ 는 평균 유량일 때 곡률반경과 하폭의 평균치를 나타내며  $\overline{Q}$ 는 평균유량을 나타낸다.

위와같은 경우에서는 유사에 관한 고려가 생략된 경우가 많지만 실제 하도설계나 유사이동이 많은 하천에서는 유사에 대한 고려가 필요하다. 이와같은 유사에 대한 고려는 하상론(regime theory)이라는 용어를 통하여 종종 검토된다.

하상론(regime theory)은 유사를 고려한 인공 안정하도를 설계하기 위한 기본적 기준을 제공한다. 설계기준에는 바닥의 기울기, 선형성(alignment), 조도, 유량의 시간적 변화, 입경 등의 결정이 포함된다. 하상론은 경험적 접근법으로서 안정상태인 기존 하천의 지형학적 관점에 근거를 두고 있다.

Kennedy(1895)는 사질 점토운하의 자료로 비침적(non-silting)유속을 제안하였다. 그는 Manning식의 저항(조도)을 도입했지만, 여러 특성을 반영하지 못하고 너무 단조로운 해석을 실시하였다. 이에 Lindley(1919)는 3개의 독립적인 관계식의 필요성을 인지하여, 비침적 유속을 수심과 하폭의 함수로 함으로서 하폭과 수심의 관계를 도출할 수 있었다. 이후 Lacey(1930)는 최초로 퇴적학(sedimentology)적인 제약인 이토계수(silt factor)를 도입하여 주로 비침적성 유사에 대하여 운하에서 구한 자료에 근거한 하상방정식(regime equation)을 제시하였다.

이러한 하상론은 다각도로 수정되어 왔으며 Inglis(1949)는 설계에 편리하도록 각 종속변수를 유량과 이토계수의 함수로 정리하였다. 또한 Inglis는 소류의 농도  $C_b$ 를 도입하여 더욱 하상론을 일반화 하였다. 하도 특성과 유량이 주어지면 윤변과 단면적을 알 수 있다. 따라서, 동수반경 R과 평균유속 V를 계산하면 바닥경사 S를 구하게 된다.

Kennedy, Lindley, Inglis 및 Blench가 개발한 하상론은 인도 하천 자료만을 쓴 것이므로, 적용 하천의 조건과 다를 경우에 적합성을 신중히 검토하여야 한다. Lacey와 Pemberton(1972)에 의하면 토사 종류에 따른 저항 함수는 다음의 관계를 가진다.

가는 모래 :  $V \propto RS$

중간 모래 :  $V \propto R^{3/4}S^{1/2}$

굵은 모래 :  $V \propto R^{2/3}S^{1/2}$

자갈 :  $V \propto R^{5/8}S^{1/4}$

이밖의 영국, 미국, 캐나다 등에서도 여러 연구자들이 특정 하천에만 적합한 함수식을 제안하고 있다.

### 6.2.3 하천의 형태학적 변화

강수의 하천 유출은 유역의 특성에 의하여 지배되고, 이러한 유역의 특성을 지배하는 요소는 유역 면적, 유로연장, 유역 형상, 지세, 지질, 하도 배열 상태 등이다. 이와 같은 여러 요소 중, 유역의 평면 형상과 유출의 시간적 분포를 살펴볼 때, 유역 형상이 첨두 유량( $Q$ )과 그 발생 시간( $t$ )에 큰 영향을 줄 수 있다.

하천 및 유역의 형태학적 연구는 20세기 초까지도 그 특성을 서술적 입장에서 관찰하여 정성적으로 설명하는데 지나지 않았으나, 미국의 Horton(1932)이 유역의 지형 특성을 양적으로 분석할 수 있는 방법을 제안하면서 하천 형태학이 정량적으로 발전하는 계기가 되었다. 그 후 지형 발달의 과정을 정량적으로 추적하려는 연구가 활발하게 되어 Strahler(1950), Schumm 및 Langbein(1958) 등에 의하여 지형의 정량적 표현 방법이 점차 구체화되었다.

이러한 지형인자의 양적인 표현은 무차원(dimensionless) 양으로 표시함으로써 서로 크기가 다른 유역 상호간의 비교를 용이하게 하여 실용성을 증진시키고 있다.

지금까지 발표한 유역 형태의 양적 표현 중 대표적인 것은 Horton(1945)이 유역의 평균 폭(유역 면적/유로연장)을 다시 유로연장으로 나누어 산출한 유역 형상 계수(basin shape factor)이며, 평균 유출률과 상관성이 크다. 또한, 유역 내의 지류의 대·소 관계를 양적으로 표시하는 지표를 Neuman은 본, 지류의 총 길이를 유역 면적으로 나누어 하천 밀도(river density)라 정의하였다.

하천 밀도는 유역의 지형 및 지표면 상태와 강수량에 관계가 있다. 또한, Horton은 총 하천 수를 유역 면적으로 나누어 수계 빈도(stream frequency)라 정의하였으며,

하천밀도나 수계빈도는 하천수계의 소밀한 정도를 나타내는 지수이다. 그러나 서로 다른 유역에서 하천밀도가 같다 하더라도 수계빈도는 매우 다른 경우가 있고 반대인 경우도 있다. 그럼 6.1에 의하면 그 양적 분석결과 (a)와 (b)에서는 하천밀도가 같으나 수계빈도는 (b)가 (a)보다 크고 (c)와 (d)에서는 수계빈도는 같으나 하천밀도는 (d)가 (c)보다 크게 나타난다.

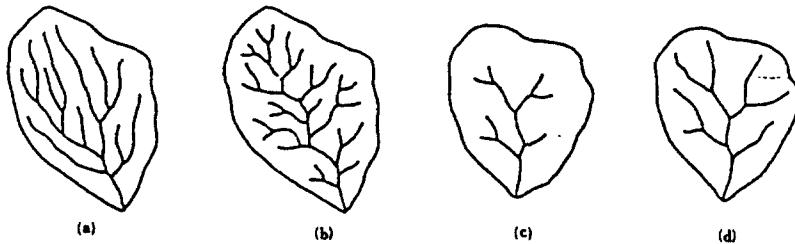


그림 6.1 하천밀도와 수계빈도의 비교

여러 개의 하천이 모여서 이루어지는 수계망의 구조 또는 모양(drainage pattern)은 지표면의 경사, 암석의 굳기, 지질구조, 지각운동 등의 요인에 의하여 지배된다. 수계망의 형상에 대한 분석은 어떤 유역의 지형 및 지질관계의 파악이나 홍수특성의 분류에 도움을 줄 수 있다.

Howard(1965)는 여러 개의 수계형상을 수집하고 전형적인 기본형을 그림 6.2와 같이 제시하였으며, 일반적으로 다음과 같이 분류한다.

- 1) 수지상(dendritic pattern) : 가장 보편적인 형상으로 지류들이 본류에서 나뭇 가지 모양으로 되어 있고, 이와 같은 수계의 유역은 우수가 하천에 일시에 집중하는 일은 없으나 고수위 지속기간이 길 때가 있다. 지질조건으로는 침식에 대한 저항력이 비교적 균등한 경우에 형성되는 수계의 모양이다.
- 2) 평행상(parallel pattern) : 서로 독립된 두 영역을 가진 하천이 거의 평행하게 흐른다. 하구 부근에서 합류하는 형식의 수계이고, 지질학적으로 빙하퇴적, 병행단층 등과 같은 병행적 요소의 지배를 받고 있는 경우이다.
- 3) 격자상(trellis pattern) : 경암층과 연암층이 반복해서 지표에 노출되어 있는

퇴적암 유역에 나타나며, 제 1 지류는 서로 평행하고, 제 2 지류가 이에 직각으로 합류하는 형식이다.

4) 직각상(rectangular pattern) : 직교하는 단층과 같은 지질구조선의 지배를 받아 지류가 본류에 직각으로 합류할 뿐 아니라, 본류 자신이 직각으로 방향을 변화하는 형식이다. 격자상과 다른 점은 직교의 공간적 배열과 규칙성이 뚜렷하지 못하다는 점이다.

5) 방사상(radial pattern) : 하나의 중심고지에서 하천들이 방사상으로 흘러나가는 수계의 형상이며, 화산과 퇴적암층의 돔(dome)에서 전형적인 예를 볼 수 있다. 단순한 분지에 발달하는 구심상(centripetal pattern)은 방사상과는 그 방향이 반대로 몇 개의 지류들이 본류를 중심으로 유입되는 형상이다.

6) 환상(annular pattern) : 경·연암이 교대로 지표에 노출될 때 방사상 패턴과 결부되어 나타난다.

상기 분류방법 외에도 여러 가지 형상을 들 수 있으나, 실제 많은 하천들이 전유역에서 두 가지 또는 그 이상의 복합상(compound pattern)을 이루고 있다.

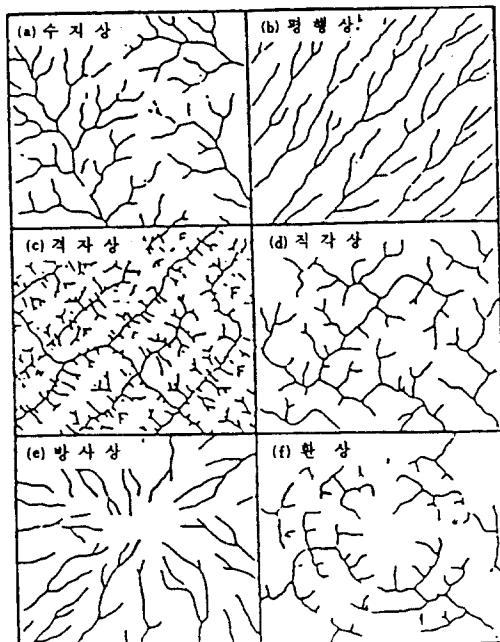


그림 6.2 하천수계의 기본 형태

### 6.2.4 유로의 형태변화

자연하천은 일반적으로 상류에서 계곡을 따라 흐르다가 중·하류의 넓은 범람원을 관류할 때 사행유로를 형성하게 된다. 유로변동이 자유롭지 못한 지역에서는 일부 직선유로도 있고, 하류부에서 경사가 완만해지면 분류되어 망상유로를 이루기도 한다. 또한, 경사의 감소와 함께 유속도 감소되어 유송토사가 퇴적함으로 인하여 선상지가 생기고, 하상이 주위의 평지보다 높은 천정천이 발달되기도 한다.

홍수시 유수력에 의하여 제방이 붕괴되면 유로의 방향이 엉뚱한 방향으로 바뀌면서 사행이 발달되어 간다. 예를 들어 황하는 발해만으로 유입되는 유로로서 현재의 유로는 1852년 이후의 것이며, 그 이전에는 하구가 산동반도 남쪽에 위치하였다.

또한, 인도의 Gendek강은 Bagaha철도교에서 하천수로가 수 마일 이동함으로써 그 교량을 쓸모없게 해버리기도 하였으며, 인도의 Kosi 강은 지난 1세기 동안 무려 100km이상 서쪽으로 이동하기도 하였다.

이러한 하천사행은 일정한 수리기하학적 법칙을 가지고 있음이 많은 연구 결과 밝혀졌으며, 홍수소통과 토지이용을 위한 무계획적인 첨수로(short cut) 공사의 실시로 오히려 역효과를 보는 경우가 많다.

하도사행의 발전에 대하여 Lacey(1930)등은 지구의 자전에 대한 편향력, Schoklitsch(1933)등은 수류의 과잉경사와 과잉에너지, Russell등(1937)은 하상변동, Sukegawa는 상기한 요인 외에 수면의 가로진동을 그 요인으로 들고 있다. 또한, 1940년대까지는 하도사행을 하안이 침식되지 않는 직립벽의 직사각형 단면수로에서도 수로상에 형성된 사력토에 따라 수로의 사행이 발생될 수 있음을 밝히고 있다.

이 외에도 사행이 생기는 것에 대한 여러 학설이 있으나, 실제로는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하기도 하고, 특히 우세한 요인에 의하여 지배되기도 한다.

사행하천을 지형학적 관점에서 분류하면 자유사행(free meander : 하류역에서 발생)과 구속사행(incised meander : 상류역에서 발생)으로 나눌 수 있으며, 다시 구속사행은 생육사행(ingrowing meander : 측방침식)과 굴삭사행(intrenched meander : 수직침식)으로 대별된다.

사행하천은 주변의 지형요소에 따라 구속사행, 반구속사행, 자유사행으로 구분되

는데, 우리나라 하천은 지질학적 관점에서 노년기 또는 장년기로 판단되므로 산지의 계류부와 반구속 상태의 사행유로가 지배적이나, 하류부에서는 자유사행으로 인한 유로의 이동이 많이 발견된다. 직류하도에서 사행하도가 발달하는 과정에 대한 그림 6.3은 초기단계 (a)에서의 최심하상선, 사행의 발달단계 (b)에서의 공격면의 침식과 포인트바의 성장과정, 그리고 평형단계 (c)에서의 사행대의 이동(sweep) 등을 보여준다.

사행수로에 대한 이행특성을 규명하기 위하여 많은 실험이 실시되었으며, 그 중 대표적인 것이 1954년 미국공병단 실험실(U.S. Waterway Experiment Station)에서 행한 실험이다. 그 후 인도에서도 여러 번 실험결과를 발표하였고, 최근 미국과 일본에서도 수리모형실험들이 실시되어 사행현상의 물리적 특성이 밝혀지고 있다.

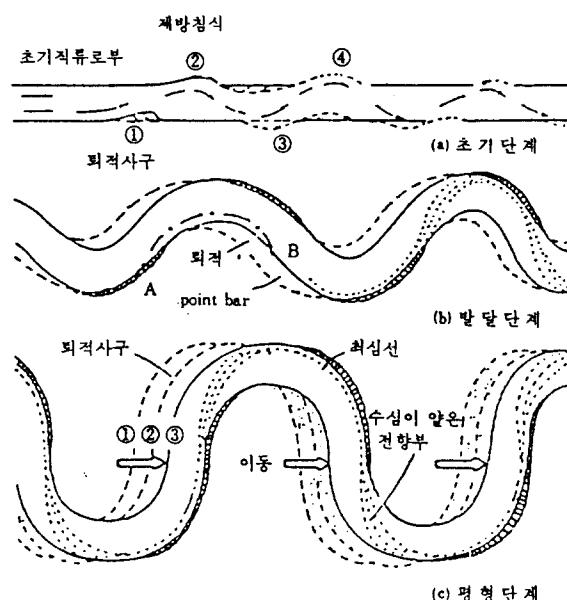


그림 6.3 직류하도에서 사행하도로 발달하는 과정

최근에는 국부적인 만곡수로에 대한 실험이 주로 행해지고 있으며, 물리적인 모형실험뿐 아니라 전자계산기의 대형화에 힘입어 수치해석적 방법에 의한 수치모형 실험을 실시하여 만곡부에서의 흐름특성 및 하상변동을 규명하고 있다.

지금까지 개략적으로 유로의 형태변화에 관하여 기술했으나 좀 더 깊이 있게 유

로 형태 변화에 대한 특성을 연구·분석하기 위해서는, 첫째로는, 더 많은 관련 인자들을 찾아내어 그 특성을 파악해야 하고, 둘째로는, 이들과 수문학적 인자들간의 상관성을 검토해야 하며, 셋째로는, 유역 및 유로의 변동을 수리 및 계량형태학적으로 규명함으로써 유출의 문제가 하천의 형태학적 특성을 간과할 수 없음을 보여 주어야 할 것이다.

### 6.2.5 하천거동에 영향을 주는 지형학적 인자

#### 가. 흐름의 성질

하천의 흐름은 단기적으로만 흐르면서 오랜기간 하천으로 지속되는 경우도 있고 일년내내 흐르는 경우도 있다. 단기적인 하천은 강수의 직접적인 영향을 받을 때에만 흐르며 간헐 하천이 이에 포함된다.

건조 지역에 있는 간헐 하천은 타 지역에 비하여 비교적 크며 불안정한 상태를 보인다. 이를 간헐 하천은 수위-유량관계를 결정하는 것과 세굴심을 예측하는데에 문제점을 나타낼 수 있으며 두부절단(head-cut)에 의한 하천의 침식과 수위로 인하여 변경되는 유심선 역시 문제들을 일으킬 수 있다. 습한 지역에서의 간헐 하천은 크기가 작으며 불안정에 대한 문제는 거의 없다.

#### 나. 하천의 크기

하천의 수심은 하천의 크기에 비례하는 경향이 있으며 세굴에 대한 잠재력은 수심에 따라 증가하는 경향이 있다. 따라서, 잠재적 세굴심은 하천 크기를 증가시키므로써 증가된다.

측면 침식에 대한 잠재력 역시 하천 크기에 비례한다. 예로써 Brice등은 하천 폭이 약 1500m인 미시시피강 하류를 이용한 연구에서, 한 번의 주요 홍수에서 30m 혹은 그 이상이 측면쪽으로 이동 될 수 있다고 하였다. 하천폭이 약 300m인 세크라멘토 강은 단일 홍수로 8m이상 측면 변경이 일어나거나, 폭이 30m 정도인 하천은 단일 홍수로 3m이상 변경된다고 하였다.

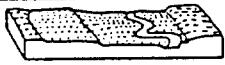
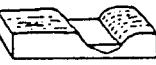
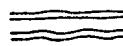
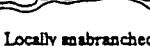
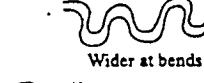
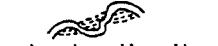
STREAM SIZE (SECT. 2.2.1)	Small (<30 m wide)	Medium (30-150 m)	Wide (> 150 m)	
FLOW HABIT (SECT. 2.2.2)	Ephemeral (Intermittent)	Perennial but flashy	Perennial	
BED MATERIAL (SECT. 2.2.3)	Silt-Clay	Silt	Sand	
VALLEY SETTING (SECT. 2.2.4)				
FLOODPLAINS (SECT. 2.2.5)				
NATURAL LEVEES (SECT. 2.2.6)				
APPARENT INCISION (SECT. 2.2.7)				
CHANNEL BOUNDARIES (SECT. 2.2.8)				
TREE COVER ON BANKS (SECT. 2.2.9)	< 50 percent of bankline	50-90 percent of bankline	> 90 percent of bankline	
SINUOSITY (SECT. 2.2.10)				
BRAIDED STREAMS (SECT. 2.2.10)				
ANABRANCHING STREAMS (SECT. 2.2.11)				
VARIABILITY OF WIDTH AND DEVELOPMENT OF BARS (SECT. 2.2.12)				
				

그림 6.4 하천안정에 영향을 주는 지형학적 인자

(Brice와 Blodgett, 1978 이후)

하천의 크기는 하천폭, 단면적과 같은 하천 규모의 크기나, 유량, 유출, 또는 유역등에 의하여 표시될 수 있다. 하천 형태가 균일하지 않기 때문에 하천 규모를 크기 하나로 표시할 수는 없다. 하천분류 목적을 위하여 한쪽 제방에서 다른쪽 제방까지 나타내는 하천 폭은 가장 일반적으로 사용되는 하천의 폭을 나타내는 크기로 써 쓰여진다.

제방사이의 폭을 나타낼 때 한쪽 제방이 명확하지 않아 규정하기가 어려운 경우도 있다. 바깥쪽 제방이 거의 수직이고 분명히 규정되지만 안쪽 제방이 흥수유역 높이까지 서서히 경사져 올라있는 경우가 있는 만곡부에서 특히 어렵다. 안쪽 제방에 있는 영구적인 식생 선의 위치는 제방선에 대한 가장 효율적인 지표이며 습지에 있는 많은 강을 따라서 분명하게 규정되는 경향이 있다. 하천폭은 하천의 마주보는 제방 사이를 수직으로 그어진 선을 따라 측정되며, 제방은 그 형태로 완성되거나 영구식생 선의 강쪽 끝으로 규정되어진다. 굴곡지거나 굽이쳐 흐르는 하천에서의 하천폭은 직선구간에서 측정되거나, 양립하려는 경향이 있는 만곡부 사이의 굴곡지점에서 측정된다. 복합수로 하천의 경우, 하천 폭은 각각의 비식생 수로 폭의 합으로 계산된다.

#### 다. 하상재료

하천은 하상에 있는 모래의 크기에 따라 구분될 수 있으며 실트-점토 하상, 모래하상, 자갈하상, 호박돌 하상으로 구분된다. 하상재료 입도 분포의 정밀한 측정은 특히 거친 하상재료일 경우에 주의 깊은 채취와 분석이 요구되지만, 하상재료에 따른 하천 지정에 있어서는 협장관찰로부터 얻어진 대략적인 근사값이 많이 이용된다.

최대 세굴심은 많은 경우에 있어서 모래하상이나 모래-실트 하상인 하천에서 발견된다. 일반적으로 세굴문제는 세립 하상 골재를 가진 하천에서와 조립 하상 골재를 가진 하천에서 크게 다름이 없다. 그러나, 매우 깊은 세굴은 세립 하상 골재에서 더욱 문제가 된다. 일반적으로 모래 하상을 가진 충적하천은 조립 혹은 점착성의 하상재료 및 제방재료의 하천보다 안정성이 적은 편이다.

## 라. 계곡형성

계곡의 기복은 둘러쌓인 지역이 일반적으로 편평한지, 구릉지대인지 혹은 산악지형인지의 여부를 알아보는 수단으로써 이용된다. 특별한 지점에서의 기복은 계곡아래에서부터 가장 높이 위치한 분할점의 꼭대기까지(보통 지형도상에서)측정된다. 300m이상의 지형은 산악지형으로 간주되며 30~300m의 지형은 구릉지대로 간주된다. 산악지역의 하천은 급경사와 거친 하상재료 그리고 협소한 홍수터를 갖고 있으며 비충적 하천 즉, 유사공급이 제한된 가운데 유사이동율을 가진 하천이다. 많은 지역에서 하천 경사는 계곡 측면 경사의 기울기가 증가할수록 증가한다. Brice 등은 산악지역에 위치한 23개 연구 지점에 있는 교량에서 특수한 수리학적 문제점이 없는 것으로 보고했으며 그 지점은 모두 자갈 하상 또는 조약돌하상인 것으로 발표했다. 낮은 기복지역의 하천은 보통 충적하천이며 하천에서의 측면 침식 때문에 더 많은 문제점이 나타났다.

건조한 지역의 충적 선상지 혹은 산록경사의 하천은 특이한 문제를 내포하고 있다. 산록경사는 산악 정면을 따라 형성된 넓은 폭의 경사를 말하며, 산악정면으로부터 발원하는 하천은 충적 선상지역에서와 같이 그 경로와 불완전하게 정의된 수로를 이동 시킬 수 있다. 횡단하는 도로 교차점에서 자연적이며 드물게 발생하기는 하지만 퇴적 문제들 중 충적 선상지가 있다. 하상재료와 물이 이보다 평평한 하천 단면에 도달할 때 경사와 유속이 갑작스럽게 감소되고 이와같은 갑작스러운 감소 때문에 거친 하상재료가 가라앉게 된다. 따라서, 홍수터에 이른 물질들이 선상지의 가파름 때문에 가라앉음으로써 봉우리와 선상지가 형성된다. 충적 선상지는 침전지역과 다름없이 보이기는 하지만, 불안정한 하천 지형과 급작스러운 측면 이동으로 특징지어지기도 한다.

충적 선상지 표면에 나타나는 퇴적 선상지의 발생은 하천 안정성 평가의 중요한 인자이다. 트렌치가 형성되지 않은 선상지에서 유사침전지역은 산악정면에 더욱 근접하여 형성될 것이며 동시에 하류측 선상지표면에서보다 상류측 선상지표면에서 더 큰 하천의 불안정을 창출할 것이다. 이와 비교하여, 트렌치가 형성될 선상지는 선상지를 가로질러 유사의 움직임을 증진시킬 것이며, 선상지의 끝쪽에 더욱 근접하도록 침전 지역을 옮기며, 동시에 낮은 선상지표면보다 높은 선상지표면이 더욱

안정하다는 것을 보이게 된다.

### 마. 홍수터

홍수터는 홍수에 의한 침수 대상인 하천을 접하고 있는 상당히 평평한 충적 하류 지역으로써 정의할 수 있다. 많은 지형학자들은 1.5년 빈도로 범람하는 하천에 직접 형성한 표면으로써 홍수유역을 정의 한다. 이 정의에 따르면, 다소 빈번하지 않게 범람하는 표면은 대지, 버려진 홍수터, 혹은 홍수의 경향이 있는 지역들이다. 그러나, 통상적으로 홍수의 경향이 있는 지역은 홍수터의 한 부분으로 간주된다. 식생표층, 토지 사용, 홍수터의 수심들은 하천 수로로 안정에 있어 상당히 중요한 인자들이다.

시간이 흐름에 따라 한 지역의 고지대는 점차 낮아지며 하천은 제방을 침식하고, 침식된 물질은 제방과 사주를 만들 수 있도록 더 멀리 있는 하류 지역으로 운반된다. 하천은 고지대를 뒤로 밀어내면서 측면으로 움직이며 이 결과로 낮고 평평한 계곡지역과 홍수터가 형성된다. 좀 더 평평한 경사지역으로, 특히 유속과 난류가 너무 작아서 물질의 이동을 감당하기 어려울 경우에는 물질들은 퇴적되어 삼각주가 형성된다. 삼각주가 바깥쪽으로 형성됨에 따라, 하천의 상류부분은 침전을 통하여 높아지며 홍수터의 일부가 된다. 또한, 하천 수로는 길어지고 경사는 더욱 감소한다. 상류의 하상은 퇴적이 이루어지고 평균 홍수 수심은 증가한다. 하천이 하천계곡을 가로질러 작용함에 따라, 퇴적은 전체 홍수유역을 상승시킨다. 따라서, 오래된 하천 조차도 정적인 것과는 멀어진다. 오래된 강들은 완만하게 굽이치고 이들 강들은 해수위의 변화에 영향을 받으며 지구의 지각변동에 영향을 받고 삼각주 형성이나 빙결에 의하여 변화되며 기후변화에 기인한 변형의 대상물이 되고 또한 인간의 개발 결과로써의 대상물이 된다.

### 바. 자연적 제방

자연제방은 하천 수위가 둑의 만수위를 넘어섬으로써 홍수기간에 형성된다. 유사는 이러한 범람지역에서 홍수의 유속과 수송능력이 감소되기 때문에 홍수유역에 침

전된다. 하천 근처에 형성되는 자연적인 장애들은 월류유속이 하천유속보다 작아짐에 따라 거친 물질들이 빠르게 낙하하기 때문에 다소 급경사를 이룬다. 하천에서 멀리 떨어진 경사는 더 평평하고 가는 입자들이 퇴적한다.

잘 발달된 자연적 장애가 있는 하천들은 폭을 일정하게 유지하려는 경향이 있고 잘 발달된 자연적인 장애들은 보통 하천의 낮은 경로를 따라 생성되거나 또는 수주 혹은 수년간 침수되었던 홍수유역을 따라 생겨난다. 만약 장애요인들이 파괴된다면 하천 경로는 터진 곳을 통해 변화 될 것이다. 자연제방과 계곡 측면 사이의 지역은 유출될 수 있지만 속도는 늦다. 잘 발달된 자연적 장애요인이 있는 하천에 대한 하천 지류는 큰 하천에 합류하기 전에 긴 거리를 큰 하천과 거의 평행으로 흐를 것이다.

### 사. 수로경계와 식생

충적하천, 준 충적하천, 혹은 비충적하천에 대한 정확한 정의가 내려질 수 없다고 해도 하천 경계에 있는 토질에 대한 침식저항을 고려하는 약간의 구별은 필요하다. 지질학에서 암반은 침식에 대한 저항 측면에서보다는 주로 연령에 기초하여 충적층이나 다른 물질들과 구별된다. 농축된 충적점토는 훨씬 오랜 기간동안 약하게 결합된 사석보다 저항력이 더 크다. 그럼에도 불구하고 암반이란 용어는 침식에 대한 훨씬 더 큰 저항의 함축성을 수반하지 못하게 된다. 충적하천은 충적층에 존재하며 비충적하천은 암반이나 큰 홍수가 아니면 움직이지 않는 매우 큰 물질(사석이나 암석)위에 존재한다. 또한, 준 충적하천은 그 경계에 암반과 충적층이 존재한다. 비충적하천의 암반은 전적으로나 부분적으로 낮은 수위에서 유사로 덮여 있지만 홍수동안에는 세굴에 의하여 노출되지는 않는다.

대부분의 도로와 하천의 교차는 비충적 하천에서 보다 많은 수리학적 문제들에 예민한 충적하천 위에 존재한다. 그러나, 암반위에 있는 기초의 보호는 암반질과 세워진 기초의 관리에 좌우된다. 심각한 문제와 파괴는 혈암, 사암, 라임스톤, 빙결토 및 침식성 바위에 있는 기초 위에 세워진 교량에서 나타났다. 뉴욕주의 Schoharie 하천의 교량 붕괴(1987)는 그러한 붕괴에 대한 최근의 비극적인 예이다. 그 교량 지점의 하상재료는 세굴되기 쉬운 빙결토였다.

시간에 따른 하천 지형의 변화는 충적하천 내에 상당한 유량을 갖는 기간(홍수기간)동안에 특히 현저하며 상대적으로 건기에 발생하는 변화는 거의 없다. 홍수기 동안의 침식력은 간헐기간이나 저수위 기간동안과 비교하여 100배이상 큰 수송력을 지니고 있다. 충적하천의 안정성을 고려할 때 대부분의 경우에서 모든 변화의 약 90%가 유량이 평상시 유량을 초과하는 작은 시간동안에 발생한다는 것을 보여준다. 지배 유량에 대한 토론은 하천환경에 있어서도 논의될 수 있다. 그러나 만수위 상태는 평상시 유량의 자세한 분석이 가능하지 못한 곳에서 추천되고 있기도 한다.

하천 경계를 이루는 물질들의 가장 현저한 특성은 입자의 크기이다. 그것은 가장 측정하기 쉬운 특성이며 일반적으로 많은 실제적인 목적으로 유사 입자의 크기가 사용된다. 모양과 낙하속도와 같은 다른 특성은 대략적으로 나타낼 수 있는 방법에 있어서 크기에 따라 변화하는 경향이 있다.

일반적으로 유사는 공칭치수나 체입경에 기초하여 옥석, 호박돌, 자갈, 모래, 점토로 분류되며 비점착성 물질은 일반적으로 실트( $0.004\sim 0.062\text{mm}$ ), 모래( $0.062\sim 2.0\text{mm}$ ), 자갈( $2.0\sim 64\text{mm}$ ) 혹은 호박돌( $64\sim 250\text{mm}$ )로 구성되어 있다.

하천제방의 출현은 상대적인 안정성의 좋은 지표이다. 하천의 현장조사는 침식율과 관련된 특징들을 정의하는데 도움이 되는데, 높은 침식율에 적당한 비안정성 제방은 보통 30%이상의 경사를 가지며 목재성 식생표면은 거의 나타나지 않는다. 만곡부에서 비안정성 제방에 반대되는 요곡사주는 정상수위에서 거의 나타나지 않지만 일년생 식물, 작은 나무, 특히 버드나무 등으로 덮여 있을 수 있다. 매우 급격한 침식이 발생되는 지역에서 제방은 불규칙한 텁니모양을 보일 수 있다.

- 침식율이 낮은 경우의 불안정한 제방은 부분적으로 안정한 경사로 재 형성될 수 있다. 불안정한 정도를 평가하기는 어려우며 신뢰할 곳은 주로 식생위에 위치한다. 제방의 재성형은 전형적으로 기초에서 떨어진 물질의 누적으로 시작되며 경사가 형성되고 경사의 완화 그리고 식생의 확장에 의하여 진행된다.

- 침식되고 있는 제방의 경우 제방 하부가 침식될 때 이곳에 위치한 나무들이 쓰러지고 이때 부유잡목이 생기게 된다. 이와같이 형성된 부유잡목은 불안정한 제방과 교량 개구부를 막을 수 있는 잠재성이 있기 때문에 상당한 관심이 있다.

- 매우 느린 침식율을 보이는 안정한 제방은 약 30% 이하의 부드러운 경사로 전환하려는 경향이 있다. 완화된 제방 사면에 있는 성숙한 나무는 제방의 안정성에

대한 확실한 증거이다. 대부분 지역에서 안정된 제방의 윗 부분은 초목으로 덮여 있지만 아랫 부분은 제방높이와 하천의 흐름 영역에 좌우되는 정상수위에서 초목이 없이 드러나 있을 수 있다. 제방이 낮은 지역에서 밀집된 식생은 정상수위에서 물의 끝 부분으로 확장할 수 있다. 제방이 높은 곳에서 가끔씩 움푹 들어간 곳은 가장 안정적이고 완화된 제방에서도 발생할 수 있다. 거친 하상의 유사를 수송하는 낮은 산악의 하천은 안정된 제방을 형성하려는 경향이 있다.

활동적인 제방 침식은 제방선을 따라 떨어지거나 이미 떨어진 초목과 제방표면에 따라 발생한 균열, 슬럼프 불력 및 제방선에 밀접한 편향된 흐름형태, 흐름속에서 성장하는 초목, 증가된 탁도, 새로운 수직 표면, 침식지역 하류에 새롭게 형성된 사주 및 몇몇 지역에서 제방 앞쪽에 위치한 세균 웅덩이들에 의하여 인지될 수 있다. 활동적인 제방 침식의 이러한 지표들은 현장과 입체적인 항공사진에서 요약될 수 있다. 특히, 색조 적외선 사진은 위에서 언급한 대부분의 지표들의 발견에 유용하며, 특히 탁도가 다른 경우에 특히 효율적이다.

(1) 제방재료 : 하천제방의 침식에 대한 저항은 제방재료의 몇 가지 특성에 매우 관련되어 있다. 하천에서 퇴적된 제방재료는 점착성, 비점착성 및 복합적인 것으로 광범위하게 분류된다.

· 비점착성 제방재료는 제방으로부터의 흙입자 하나하나를 제거하려는 경향이 있다. 입자제거율, 입자 이동, 이에 따른 제방 침식율은 입자크기, 제방경사, 제방에 인접한 유속의 크기와 방향, 난류 유속의 변동, 제방에 가해지는 전단력의 크기와 변동, 침투력, 및 파력과 같은 요인들에 의해 영향을 받을 수 있다.

· 점착성 물질은 표면 침식에 대한 저항이 더 크며 침투의 영향, 파이핑, 동상, 그리고 제방의 안정성에 대한 지표면하 흐름을 감소시키는 낮은 침투성을 갖고 있다. 그러나, 하부가 절단되거나 포화된 제방은 한꺼번에 셋겨내려가는 과정에 의해 더욱 쉽게 파괴 될 수 있다.

· 복합적이거나 층을 이룬 제방은 여러 크기의 입자와 투수성의 입자 그리고 점착성 입자들의 층으로 구성된다. 비점착성 물질 층은 표면 침식의 대상이 되지만 점착성 물질층에 인접함으로써 부분적으로 방지될 수 있다.

(2) 파이핑 : 파이핑은 충적하천 제방에서 일어나는 일반적인 현상이다. 침투성 층을 통과하는 흐름이 입자들을 움직이거나 수송시킬 수 있다면 그 물질은 제방의

몇 부분을 침식하면서 천천히 움직일 것이다. 겹쳐지는 층을 보완할 수 있는 기초 물질이 없다면 제방재료의 블록은 떨어져 나가고 인장균열의 발달을 초래할 것이다. 이러한 균열들은 흐름이 표면으로 스미도록 하며 더 나아가 영향을 받은 제방재료 블럭의 안정성을 감소시킬 것이다.

(3) 집단침식 : 국부적인 질량손실은 제방 파괴의 다른 형태이다. 만약 제방이 포화되고 유수에 의한 하부절단이 가능해 진다면 제방 블록은 하천속으로 움푹들어가거나 미끄러질 것이다. 질량손실은 하천제방위의 가옥건축, 제방에 인접한 설비의 작동, 나무의 성장으로 인한 중력의 증가, 홍수유역에 인접한 지역에서의 농업적 토지사용, 하수 탱크로 부터의 여과면에 의한 제방의 포화, 그리고 토지사용 변화의 결과로써 홍수유역으로 증가하는 물 침투에 의하여 야기되거나 악화된다.

질량손실에는 다양한 힘들이 있다. 흙 또는 유기물질의 하향운동인 산사태는 힘의 불균형에서 야기된다. 이러한 힘들은 사면 중량의 하향 중력요소로 형성된다. 저항하는 이러한 하향힘들은 재료의 전단강도이며 뿌리의 강도를 통해 초목으로부터 보급되거나 인간의 사면 보강 활동으로부터 보급되는 전단강도이다. 종종 이 평형 상태는 원래의 표면 경사보다 완만한 사면 형태를 이루며 파괴된 질량의 언저리는 더 멀리 이동되어 새로운 베텁벽을 제공한다.

### 아. 만곡부

만곡은 계곡의 중심선이나 구간 끝을 연결하는 직선을 따라 측정한 길이에 대한 하천 구간 길이의 비로 하천 구간은 중심선을 따라 측정한다. 계곡의 중심선은 계곡 자체가 굽곡져 있을 때가 바람직하다. 때때로 만곡은 하천경사에 대한 계곡 경사의 비로 정의되며 좀 더 일반적으로는 계곡의 깊이에 대한 유심선 길이의 비로 정의된다. 직선하천의 구간은 만곡이 1이고 자연하천의 만곡에 대한 최대 값은 약 4이다. 하천의 만곡이 한 구간에서 다음 구간에 이르기까지 거의 일정하지 않기 때문에 만곡에 대하여 정확한 측정은 없는 셈이다.

직선 하천이나 계곡 중심선을 직접 따르는 하천은 종종 계곡과 같은 경사를 보인다. 하천의 만곡이 증가함에 따라 직접적인 비율에 있어서 만곡의 경사는 증가한다. 이와 유사하게 만곡 하천이 직선화 된다면 길이의 변화에 대한 직접적인 비율

에 있어 경사는 증가한다.

굽은 만곡부의 크기, 형태 및 규칙은 만곡의 양상이다. 좌우 대칭적인 만곡부는 많지 않으며 둘 혹은 세 개의 이상적인 만곡부의 반복은 거의 없다. 이뿐만 아니라, 만곡의 크기는 거의 균일하지 않다. 가장 큰 것은 작은 직경의 두 배정도가 되는 것이 보통이다. 통계적으로 만곡반지름의 크기-빈도 분포는 정규분포로 되는 경향이 있다. 그럼 6.5는 사주, 못, 굴곡하천의 전형적인 교차, 그리고 수면특성에 대한 영향을 보여준다.

만곡하천, 사행천 및 심하게 굽이친 하천은 다소 규칙적인 굴곡을 보이며 그러한 굴곡은 교차점으로 연결된 일련의 만곡으로 구성된 평면에 존재하는 굴곡이다. 만곡부에 있어 깊은 못은 비교적 큰 유역으로 생긴 오목한 제방에 인접하여 생성된다. 만곡부 안쪽 유속은 느리기 때문에 유사는 요곡사주를 형성하면서 이 지역에서 퇴적된다. 또한 만곡부의 원심력은 횡축의 수면경사를 유발하고 요곡사주쪽의 바깥 쪽 제방에서 떨어져 있는 저면 유속의 나선류를 유발한다. 이러한 횡유속은 퇴적되어 요곡사주를 형성한 불록제방 쪽으로 소류사의 농도를 밀어냄으로써 생성되는 요곡사주를 형성시킨다. 몇몇 나선류들은 평균 하천 유속의 약 15%의 크기를 갖고 있다.

사행천의 만곡은 만곡로에 있는 못과 비교하여 매우 얕은 교차형 만곡부 (짧은 직선 구간)에 의하여 연결된다. 저류상태에서 수로가 잘 제한되어있지 않다면 교차형 만곡부에서 커다란 모래사주가 형성된다. 만곡부에서의 세울은 만곡부를 하류로 이동시키거나 측면쪽으로 이동시키기도 한다. 1년에 750m에 달하는 큰 측방이동이 큰 충격하천에서 관측되어 왔다. 외측 제방으로부터 침식된 유사의 대부분은 교차형 만곡부에 퇴적되거나 만곡 하류에 있는 요곡사주에 퇴적된다. 제방재료의 다양성, 만곡정도와 측면 하천 안정성 사이에는 관계가 적다. 굴곡이 매우 큰 하천은 유사한 크기의 만곡하천 보다 낮은 측면 이동을 보인다. 만곡부의 안정성은 사행사주의 발달과 하천 폭의 다양성등 다른 특성에 좌우된다.

하천은 직선, 사행 또는 망상으로 크게 분류된다.

(1) 직선하천 : 직선하천은 만수위에서 작은 만곡을 나타낸다. 직선하천은 만곡부를 만들 수 있는 과도기적인 수위로 여겨진다. 그 이유는 직선하천은 유사의 크기나 유사 퇴적량이 적거나, 경사, 유속, 흐름변화등이 적은 곳에서만 비교적 안정하

고 하천의 폭-수심비가 비교적 낮기 때문이다. 10개의 하천 폭 이상이 되는 직선하천 구간은 자연상태에서 거의 없다.

(2) 사행하천 : 모든 형태의 충적하천은 직선배열로부터 편향된다. 유심선은 횡축으로 왕복하며 만곡의 형태를 만들기 시작한다. 직선하천에서 사주와 유심선은 끊임없이 변화한다. 따라서 흐름은 단면을 통하여 균일하게 분포하지 않지만 어떤 제방을 향하여 편향되거나 다음 제방을 향하여 편향된다. 제방의 비탈사태, 하상내 불균일한 퇴적, 나무와 같은 부유잡목, 지구의 자전에 의한 콜리올리 힘등은 하천의 만곡에 대한 원인이 된다. 흐름의 방향이 제방쪽으로 향할 때 제방은 충돌지역에서 침식되며, 흐름은 편향되고 멀리 하류쪽의 반대쪽 제방에 부딪치게 된다. 사행띠의 형성은 종종 하천폭의 15배 내지 20배에 이른다.

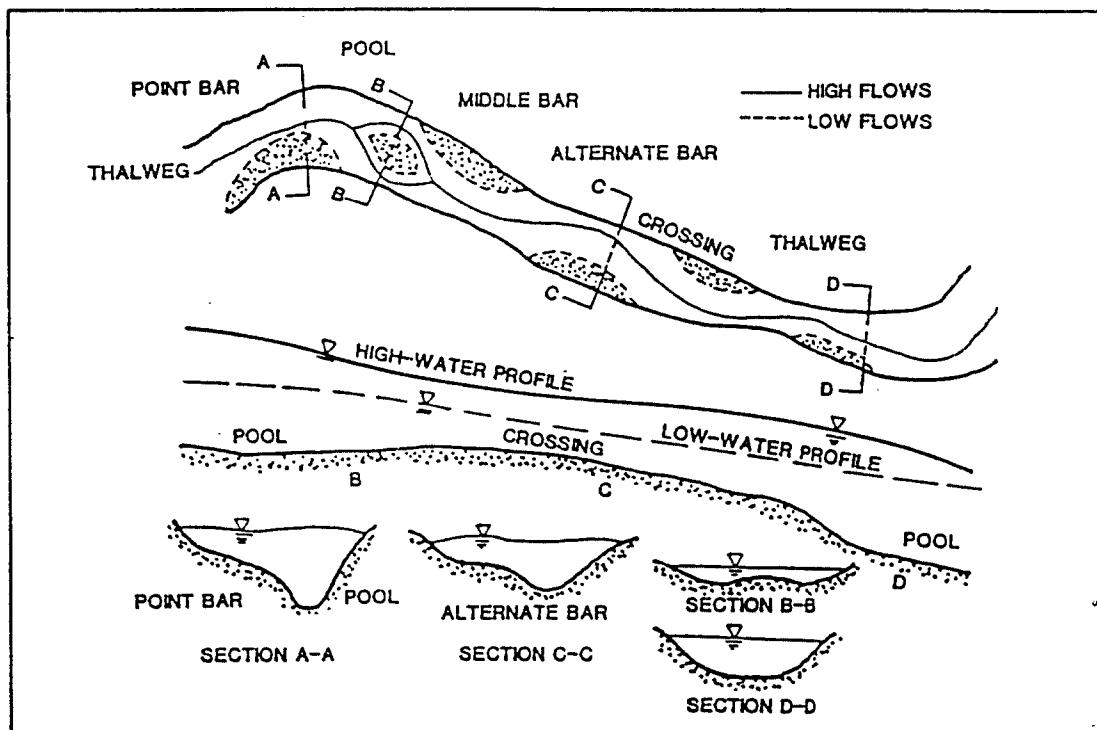


그림 6.5 사행천의 평면도와 단면도

측방이 불안정한 수로에서나 한편으로 안정한 수로 내에서 왕성한 이동이 활발하게 이루어지는 만곡부에서의 요곡사주는 통상적으로 넓고 식생이 없으며 반대쪽

제방은 절단되고 때로는 침식에 의하여 부채모양이 된다.

도로와 하천 교차점이 만곡고리 근처에 위치하고 있다면 이는 만곡고리의 성장률 뿐 아니라 하천의 이동이나 만곡발달을 관망하는데 유용하게 쓰인다. 두 개의 사행이 정확히 동일한 형태로 나타나지는 않겠지만 특별한 하천구간에 있는 사행들은 그림 6.6에 나타낸 특징의 양상중에서 한가지로 귀착되는 경향이 있다. 그림 6.6은 약 200개의 만곡 또는 사행천 구간의 연구에 기초한 것이다.

그림 6.6의 양상은 낮은 진폭의 고리에 대한 전형적인 발달을 나타내며 이 고리는 하류 방향으로 약간 뻗어남으로써 반지름이 감소된다. 적당히 불안정한 제방이 있는 하천에 잘 발달된 사행천은 c양상을 따른다. d양상은 주로 사행부의 큰 고리나 심한 사행천에 적용된다. 사행부는 하천크기, 흐름, 합성된 고리로 전환하는 두 번째 사행부 발달에 크게 관계하게 된다. e양상은 사행부 또는 폭이 같은 요곡사주 형태의 심한 사행천에 적용된다. 제방은 절단없이 형성되는 늘어진 고리에 대해 충분히 안정적이지만 고리의 목부분은 점차적으로 가까워지고 궁극적으로는 목부분의 절단이 발생할 것이다. f와 g양상은 주로 부분적인 망상하천 또는 사행천에 적용된다.

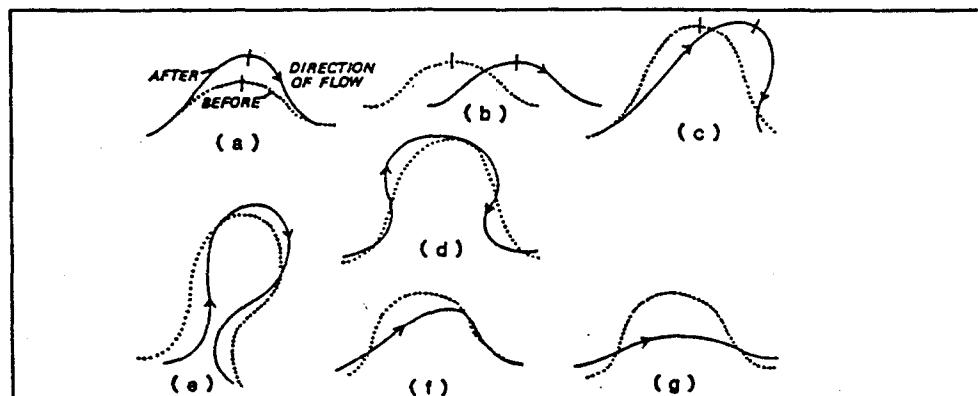


그림 6.8 만곡고리의 발달양상

- (a) 확장 (b) 전이 (c) 회전 (d) 복합고리의 변환 (e) 근접에 의한 목의 차수 (f) 협수부에 의한 대각선 차수 (g) 협수부에 의한 목의 차수

## 자. 망상하천

망상하천은 복합적이고 얹혀있는 수로들로 구성된 하나의 하천이다. 일반적으로 부유사량, 하상과 제방의 소량의 실트와 점토로 비교할 때, 망상하천은 경사가 크고 소유사량이 크다. 흐름에 있어 유사량이 많을 경우, 퇴적이 발생하고, 유속이 증가하며, 복합수로가 발달된다. 복합 수로는 일반적으로 유사의 사주로 형성되며 주 수로내에서 퇴적되고 동시에 전체적으로 수로 시스템이 넓어지도록 유도한다. 그러나 망상하천은 퇴적되지도 않고 침식되지도 않는 다층상태를 발생시킬 수 있다.

복합적인 중간수로 섬과 사주의 형성은 많은 소유사를 운용하는 하천의 특징이다. 흐름과 세줄을 방해하는 사주의 출현은 사주의 양 면에 있는 제방의 측방침식과 사주를 둘러싸고 있는 수로의 세줄중 하나 혹은 모두를 발생시킬 수 있다. 이 침식은 수로를 확대 할 것이며 수위 감소에 따라 자갈 혹은 모래사주의 위치에서 섬이 형성될 수 있다. 가장 좋지않은 경우는 주요 사주 혹은 교량이 위치한 지점에서 섬이 형성되는 것이다. 이것은 하천의 양쪽 제방의 침식을 야기할 것이며 섬의 양면을 따라 하상세줄을 유발할 것이다. 교량 아래의 흐름 수송능력의 감소는 교량 아래에 식생이 있는 섬을 형성하게 될 것이다. 교량의 상류나 하류에 형성되는 섬이나 사주는 흐름 배열을 변화시키고 교량위치에서 제방 침식이나 세줄문제를 야기할 수 있다.

섬의 이동은 한 위치에서 활동적인 침식과 섬 끝의 다른 지점에서의 퇴적이 현장에서 인지되기 때문에 쉽게 확인되어진다. 또한 홍수로의 발달이나 방치, 그리고 섬들의 결합은 식생의 차이와 침식 및 퇴적의 양상을 관찰함으로써 알 수 있다.

수로의 망상정도는 사주와 섬에 의해 나뉘어진 구간길이의 백분율로 예전 할 수 있다.

망상하천은 불안정하고 급격히 배열이 변화하고 많은 양의 유사를 운반하며 매우 넓고 홍수시에도 수심이 얕고 일반적으로 예상이 힘들기 때문에 도로건설에는 어려움을 보일 수 있다. 깊은 세줄공은 자갈 사주의 하류나 두 개의 수로가 만나 흐르는 곳에 있는 하류에서 발달될 수 있다.

망상하천이 전 하천 폭에서 교차되는 경우 긴 교량이 요구되며 수로가 수축된 경우 효과적인 흐름 통제 조치가 요구된다. 제방은 쉽게 침식될 수 있으며 교대나

그 근처에서의 측방 침식을 막기 위하여 특별한 관리가 취해져야 한다. 망상의 위치는 예상치 못한 유속, 접근각이나 교각에서의 수심에 따라 변할 수 있으며 홍수 기간 동안 이동될 수도 있다.

### 차. 귀환지류하천

귀환지류하천은 흐름이 사주보다는 섬에 의해 나뉘어지고 섬들은 수로폭에 크게 관계한다는 점에서 망상하천과는 다르다. 귀환지류나 각각의 수로들은 좀더 넓고 뚜렷이 분리되며 망상하천의 망상을 보다는 위치에 있어서 좀더 고정적이다. 귀환지류는 정상수위에서 전달 흐름이 필요하지는 않지만 식생에 의하여 방해를 받지 않으며 경계가 잘 정의된 수로이다.

망상과 귀환의 구별이 학술적인 것으로 여겨진다고 해도 그것은 공학적인 목적을 위하여도 상당히 중요하다. 귀환지류는 실질적인 흐름을 운송하는 비교적 영구적인 수로이기 때문에 귀환지류하천의 우회와 제한은 망상하천에서 보다 좀 더 어려울 수 있다. 교량을 건설할 때 비귀환지류인 지점을 선택한다면 귀환지류 하천의 교차점과 관련한 문제들은 피할 수 있다. 그렇지 않은 경우 설계자는 한 개 이상의 교량을 건설하고 긴 교량을 건설하거나 귀환지류 하천을 단일 수로에 전환시키는 것 중 한 선택에 직면하게 된다. 귀환지류의 접합점이나 그 부근에 교량이 세워진다면 흐름배열과 관련된 문제들이 발생할지도 모른다. 귀환지류가 분리된 교량에 의해 횡단된 곳에서 교량에 대한 설계유량은 예측하기가 어려울 수 있다. 하나의 귀환지류가 부유잡목 혹은 얼음에 의해서 처럼 부분적으로 막혀 있다면 예상치 못했던 양의 흐름이 다른 귀환지류로 전환될 수도 있다.

### 카. 폭의 다양성과 사주의 발달

비식생 수로폭의 다양성은 수로의 측방 안정성의 유용한 지표이다. 항공사진에서의 비식생 수로폭의 시각적인 효과는 유사나 물의 밝은 명암과 대조하여 식생의 비교적 어두운 명암에 좌우된다. 만약 만곡부에서 비식생 폭이 가장 좁은 곳에서의 평균폭의 1.5배 이하라면 수로는 균일폭(등가폭)으로 간주된다.

폭의 다양성과 측방 안정성의 관계는 요곡사주와 대웅사주의 발달비율에 근거한다. 만곡부에서의 오목하안이 서서히 침식되고 있다면 요곡사주는 서서히 성장하며 식생은 그 위에 나타나게 될 것이다. 사주의 비식생부분은 협소한 초생달 모양으로 나타날 것이다. 만약 제방이 급격히 침식되고 있다면 급격히 성장하는 요곡사주의 비식생부분은 넓어지고 분명히 보이게 될 것이다. 만곡부의 수면폭보다 훨씬 큰 비식생 폭을 지닌 요곡사주는 평균보다 더 넓게 여겨진다. 많은 비가 내리는 남부기후에서와 같이 식생이 바르게 정착하는 지역에서는 만곡부의 제방 절단이 요곡사주의 비식생폭보다 안정성에 대한 더욱 타당한 지표가 될 수 있다.

폭의 다양성에 대한 상대적인 측방 안정성은 사주 발달과 다른 특성들에 연관하여 평가되어야 한다. 통상, 협소한 요곡사주가 있는 균일폭의 하천은 가장 안정된 측방이며 넓고 불규칙한 요곡사주가 있는 일정치 않은 폭의 하천이 가장 안정적이다. 연직 안정성 혹은 세굴 경향은 이러한 특성으로부터 평가될 수 없다. 세굴은 어떠한 충적 수로에서도 발생할 수 있다. 사실 심층 세굴에 대한 가장 큰 잠재성은 측방의 안정한 균일폭 수로에서 제외될 수 있으며 이런 수로는 비교적 깊고 좁은 단면과 실트와 모래 범위의 크기에 있는 하상을 갖고 있다.

## 6.3 향후의 하천 거동 예측

### 6.3.1 지점의 선정

본 장에서는 앞절에서 소개된 하천거동 특성을 구체적으로 적용하는 사례를 보여주고자 한다. 향후의 하천거동을 예측하기 위한 지점으로 낙동강 본류 감천 합류 지점으로부터 낙동강교까지 22km를 선정하였다. 본 사례 지점으로 선정된 지역은 경북 철곡군, 구미시에 인접하여 있으며 이 지역에 설치되어 있는 주요 수중구조물로는 우안측에  $200,000\text{m}^3/\text{일}$  규모의 취수장이 있으며 이 취수장은 감천 합류점으로부터 하류방향으로 약 8km, 구미대교로부터 상류방향으로 약 9km 지점에 위치하고 있다. 이 지역은 최근 들어 구미공업단지의 기존 공장 가동률 증가와 제3공단 신규 입주 및 제4공단 조성으로 인한 공업용수 수요가 크게 증가하고 있고 구미시, 철곡군, 김천시등 인근 주변 도시의 급격한 용수 수요증가로  $400,000\text{m}^3/\text{일}$  규모의 취

수장이 1997년에 설치되었으며 향후 새로운 취수장 설치가 예상되고 있는 지역이다.

### 6.3.2 유역의 특성조사

사례지점의 향후 하천거동을 예측하기 위한 기초 자료로 활용하기 위하여 아래와 같이 유역특성을 조사한다.

#### 가. 유역의 지형적 특성

유역특성 조사의 첫 번째로, 유역의 지형적 특성조사가 필요하다. 유역의 지형적 특성으로는 지질, 토양, 토지이용 현황, 유역면적, 유로연장, 표고별 누가면적 및 구성비, 하상경사등이 조사되어야 한다. 조사 된 지형적 특성자료는 주변에서의 유사의 발생량 변화 예측이나 직접 유출량 변화예측등을 위한 자료로 주로 활용된다.

#### 나. 기상현황

기상현황으로는 기온, 습도 및 증발량, 풍속 및 천기일수 등이 조사되며 하천 내 유출량 검토를 위한 자료로 주로 활용되어진다.

#### 다. 수리 및 수문자료 현황

수리 및 수문자료 현황으로는 주변지역의 우량이나 수위, 유출관계 자료들이 조사된다. 본 자료들은 과거의 하천거동 특성 조사를 위한 직접적인 자료로 활용이며 향후의 하천내 거동변화 예측을 위한 간접적인 자료로 활용되기 때문에 보다 심도 있는 자료 수집 노력이 요구된다.

#### 라. 유사량 조사

거동을 예측하기 위한 지점과 직·간접적으로 관련된 본류 또는 지류로부터 관

측되거나 산출된 유사량을 조사한다. 본 자료는 향후 하천거동 예측시 계산되는 유사량과의 비교분석을 위한 자료로 활용된다.

## 마. 기타

위의 자료외에 향후 하천거동 예측에 도움이 되거나 기타 계산결과 검토등에 필요한 자료들을 조사한다.

### 6.3.3 과거의 하천거동 특성 분석

#### 가. 하상재료 변화

과거의 하천거동 특성을 파악하기 위하여 그동안 변화되어온 하상재료 상태를 조사한다. 본 사례지점에서 그 동안 실시된 하상재료 조사 자료로는 1983년, 1993년에 관측된 자료가 있으며, 이들과 비교하기 위한 최근 자료로 일선교, 선주교, 염산교, 구미대교 등 6개 지점에 대하여 하상재료를 새로이 분석하였다. 표 6.2는 이들 6개 지점에서 분석된 하상재료의 분석 결과이며 그림 6.7은 이 중 한 지점인 일선교 지점에서 과거의 하상재료의 변화상태를 비교한 그림이다.

표 6.2 1997년도 하상재료 분석결과 집계표

(단위 : mm)

하 천	채취 지점	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>90</sub>	Cu	Cg
낙동강 본류	일 선 교	0.45	1.00	1.51	1.75	3.50	3.89	1.27
	구미정수사업소	0.25	0.35	0.41	0.48	0.70	1.92	1.02
	구 미 대 교	0.34	0.48	0.61	0.72	1.75	2.12	0.94
	낙 동 강 교	0.12	0.20	0.29	0.31	0.44	2.58	1.08
감 천	선 주 교	0.40	0.61	0.90	1.15	3.00	2.88	0.81
	염 산 교	0.32	0.49	0.68	0.79	1.55	2.33	0.95

일선교 지점의 입도분포곡선 비교(83년, 93년, 97년)

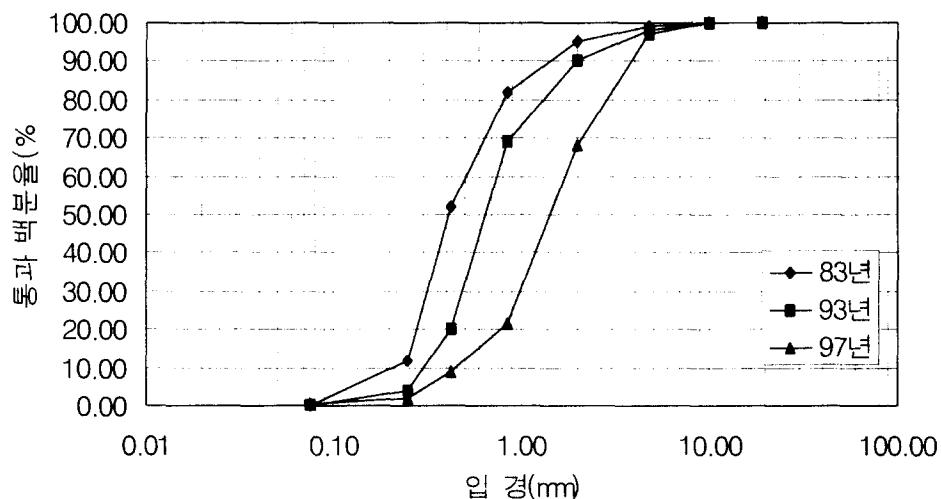


그림 6.7 일선교지점에서의 입도분석 결과의 비교

표 6.2에서 보는 바와 같이 각 지점에서 조사된 하상재료의 특성이 상이하며 그림 6.7에서 보는 바와 같이 일선교 지점에서 조사된 입경은 해가 갈수록 커져가고 있음을 알 수 있다.

#### 나. 하천 개수 현황

우리나라의 하천개수는 오래전부터 시작되긴 하였으나 본격적인 하천개수공사가 실시된 것은 조선총독부때의 1915년부터 1928년까지 14개년에 걸쳐 전국 14개 하천에 대하여 조사를 실시한 직후부터였다.

본 사례조사 지역인 낙동강 본류에 대한 하천개수공사는 해방전인 일제시와 해방후로 구분하여 시행되었는데, 해방전의 하천개수공사는 대부분이 1920년대 ~ 1930년대에 본류하류 및 남강 하류부에 집중되어 시행, 완료되었으며, 해방후인 1945년부터 1948년까지는 치수사업이 거의 시행되지 않았다.

1948년 8월 15일 정부수립후 1949년 남강방수로 공사에 착수하여 시공중 1950년 6·25동란으로 인하여 중단되었으며, 휴전직후인 1954년 전쟁복구를 위한 경제원조

기간인 UNKRA가 창설됨을 계기로 본유역에도 치수사업이 지속적으로 진행되어 1954년 ~ 1960년도 사이에 축조된 제방으로서 낙동강본류의 관기제( $L = 1950\text{m}$  경북 선산군 조개면 소재) 및 우곡제( $L = 5200\text{m}$  경북 고령군 우곡면)와 금호강의 성서제등이 이 기간에 축조되었다.

이 이후 1961년 5.16혁명후 경제개발 5개년계획을 수립함에 따라 본 낙동강 유역도 본격적으로 하천 개수공사가 촉진되었다. 더욱이 1979년 낙동강 연안개발사업이 시작되어 1985년도까지 낙동강 연안개발 1단계사업을 완료하였으며 1단계사업에 이어 2단계사업이 1986년도부터 낙동강 본류의 왜관제, 죽전1,2제, 용신제, 금남제 1차 지류인 백천의 학산제, 대산제를 시작으로 2단계 사업이 추진되었다.

1982년 12월 당시까지의 개수실적으로는 낙동강 유역내 요개수 면적  $8,186.9\text{km}^2$  중에서 개수 실적은  $3,286.8\text{km}^2$ 로 개수율은 40.1%에 달하였다.

낙동강 연안개발 2단계사업이 추진되기 시작한 1983년부터는 직할하천을 중심으로 개수율이 크게 증가하기 시작하여 1992년말에는 직할하천의 개수율이 88.5%에 이르고, 전체적으로는 요개수연장  $8,237.9\text{km}^2$ 중에서  $3,997.0\text{km}^2$ 가 개수되어 48.5%의 개수율을 보이고 있으며, 1996년말 현재로는 표 6.3에서 보는 바와 같이 56.2%의 개수율을 보이고 있다.

표 6.3 1996년 12월까지 낙동강유역 개수실적

구 분	하천연장 (km)	요개수연장 (km)	개 수 실 적		장래개수 연장 (km)	비 고
			기 개 수 (km)	개 수 율 (%)		
계	7,460.2	8,237.9	4,627.4	56.2	3,610.5	
직 할 하 천	629.5	843.1	810.9	96.2	32.2	
지 방 하 천	190.5	208.7	163.7	78.4	45.0	
준 용 하 천	6,440.2	7,186.1	3,652.8	50.8	3,533.3	

※ 자료 : 낙동강 하천정비 기본계획(보완Ⅲ), 1993.4

※ 요개수 연장길이 및 개수실적은 건설교통부 (1997. 11) 자료로 수정하였음.

### 다. 홍수발생 현황

낙동강 유역 중 과거 해방전부터 사용되어온 주요 수위표 지점의 기록을 살펴보면 해방전 1920년 7월 21일 홍수를 기록한 이래, 해방후인 1963년, 1965년, 1968년, 1981년, 1984년, 1989년, 1991년 등에 큰 홍수가 발생하였음을 알 수 있다.

낙동강 수계내 홍수피해를 알아보기 위하여 1981년부터 1990년까지 10년 동안 제해연보(건설부)를 통한 피해액을 살펴보면, 과거 10년간의 년 평균 피해액은 70,575백만원(1990년 말 기준가격)으로서 인명피해 38명, 건물 3,987동, 농경지 899.7 ha, 농작물 34,876.9ha, 공공시설물 피해액은 27,777백만원, 기타시설 피해액은 7,417백만원 이었다.

또한 1991년 제12호 태풍 Gladys호(8월 22일 ~ 8월 24일)의 피해상황은 인명피해 15명, 건물 2,950동, 침수면적 9,125.7ha, 농경지 532.5ha, 농작물 16,230.6ha, 총 피해액은 59,883백만원으로 나타났다.

### 라. 골재채취 현황

낙동강 본류 중 본 사례조사 구간 및 전, 후 지점에서의 골재의 채취는 낙동강 연안 개발 1단계 사업기간중인 1983년부터 크게 시작되었다. 주요 골재 채취 지점으로는 구미시 고아읍 봉한리, 구미시 해평면 낙산리, 구미시 고아읍 문성리, 구미시 선사읍 원리, 구미시 해평면 월곡리, 구미시 선사읍 독동리등이며 골재 채취 심도는 1~4m에 이르고 있다.

### 마. 최심 하상고 변화

그림 6.8은 본 과업구간의 유로변경 예측을 위하여 사용한 측점번호를 보여주고 있다. 그림상에 나타난 측점번호는 '낙동강 하천정비 기본계획'과의 일관성 및 향후

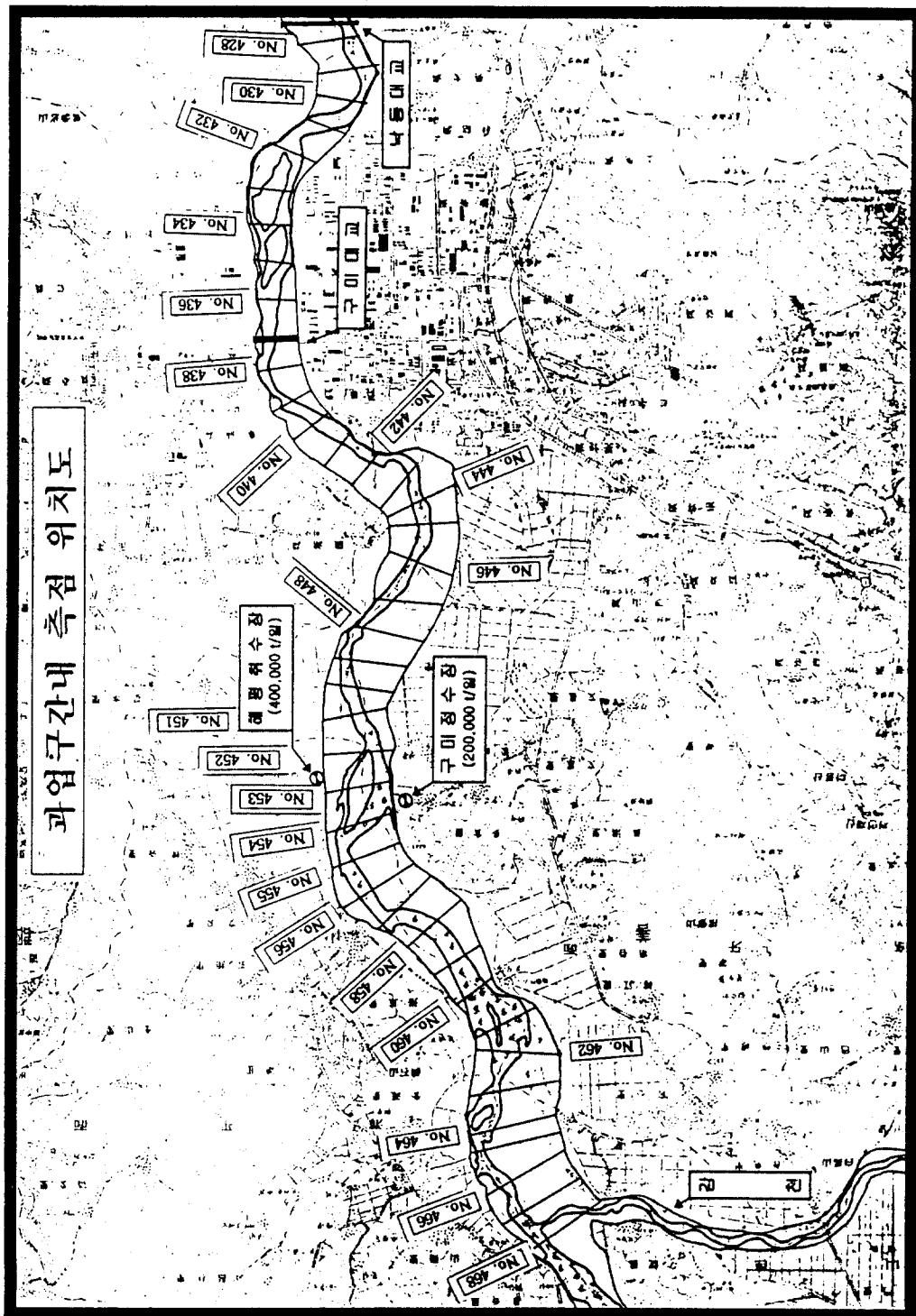


그림 6.8 낙동강 유로 변경 예측시 사용된 측점번호

유사한 연구와의 일관성 유지를 위하여 '낙동강 하천정비 기본계획'에서 이용한 측점번호를 그대로 사용하였다.

그림 6.9는 1977년, 1980년, 1983년, 1993년에 관측된 종단 측량결과를 이용하여 분석된 최심 하상고의 변화를 보여주고 있다.

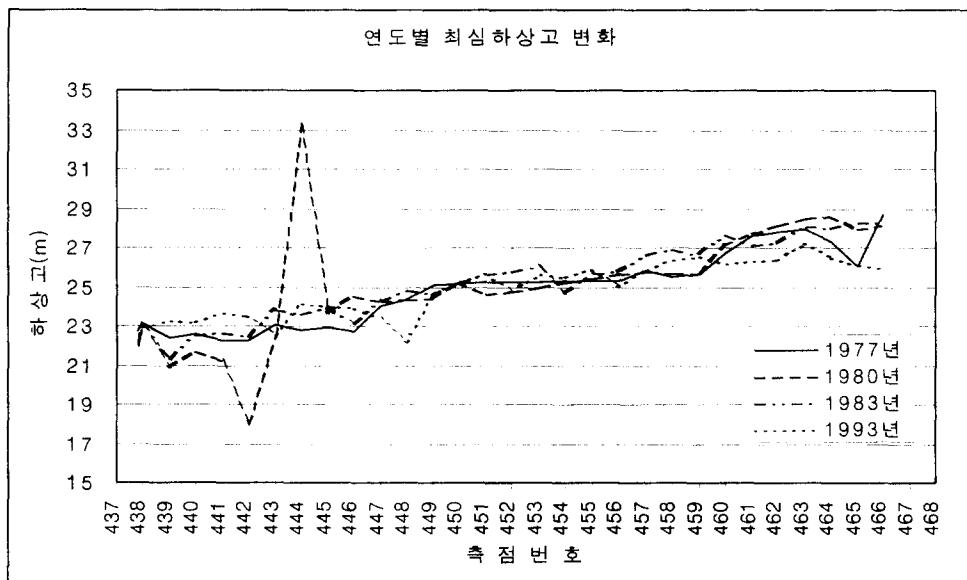


그림 6.9 연도별 최심하상고의 변화 비교

그림 6.9에서 보는바와 같이 1977년의 최심하상고는 최소 표고가 22.25m로부터 최대표고가 27.92m까지 하류부로부터 상류부로 올라갈수록 완만하 상승을 보이고 있다. 그러나, 1980년 들어서는 측점 444지점의 표고가 33.25m에 이르는 등 하상의 불규칙성이 증가하였다. 이후 1983년과 1993년 들어서는 일부 불규칙성은 발견이 되기는 하지만 전반적으로 하상이 상당히 완만한 경사를 보이고 있으며, 전반적으로 최심하상고는 1977년부터 1993년까지 크게 변하지 않았다.

## 바. 장기간의 유로변화 특성

### (1) 측량결과 이용시

본 사례조사 지역에서 측량된 자료로는 1977년, 1980년, 1983년 및 1993년의 자료가 있으며 유로의 평면적 변화를 분석하였다. 분석은 저수로 폭의 변화, 유심부의 변화를 통하여 분석하였다. 표 6.4는 연도별 저수로 폭의 변화와 유심부의 변화를 분석하였다.

표 6.4 연도별 저수로 폭 및 유심부의 변화

(단위 : m)

측 점	저수로 폭의 변화			유심부의 변화				비 고
	1977년	1980년	1983년	1977년	1980년	1983년	1993년	
437.8	300	316	300	160	150	238	307	
438	356	290	310	165	150	96	210	
439	247	151	128	324	315	400	167	
440	207	159	197	42	412	466	344	
441	283	273	220	201	200	95	298	
442	221	122	303	142	194	253	518	
443	194	125	248	573	740	354	760	
444	179	172	298	287	270	155	376	
445	216	175	390	204	55	59	416	
446	175	182	317	292	249	316	544	
447	229	158	346	292	116	131	207	
448	320	325	415	391	428	329	68	
449	358	281	338	754	729	725	305	
450	397	406	262	546	587	659	479	
451	278	265	315	1120	919	1077	697	
452	355	255	520	1107	1088	858	307	
453	300	280	355	656	1004	425	172	
454	251	175	185	352	274	559	301	
455	238	276	235	206	326	411	484	
456	252	308	270	122	310	509	924	
457	192	192	380	175	330	437	752	
458	242	279	332	446	468	442	239	
459	279	241	255	650	721	605	301	
460	264	281	350	902	315	619	247	
461	354	292	270	281	499	672	403	
462	338	401	194	583	311	227	321	
463	364	445	280	400	134	234	434	
464	378	534	268	116	246	456	63	
465	301	276	192	121	427	302	431	
466	193	228	231	340	251	122	23	

※ 자료 : 1977~1983 : 낙동강 광역상수도 시설 구미 취수장 전면 퇴사 방지시설을 위한 조

사 측량 보고서, 1983. 12

1993 : 낙동강 하천정비 기본계획(보완III), 1993. 4

※ 유심부는 좌안으로부터의 거리 임

표 6.4에서 보는 바와 같이 1977년의 경우 저수로 폭은 최소 175m로부터 최대 397m에 이르고 있어 폭의 변화가 그다지 크지 않다. 그러나 1980년, 1983년에 들어서는 저수로 폭의 최소 폭이 각각 122m, 128m이고 최대 폭이 각각 534m, 520m로 폭이 크게 증가하고 있다.

표 6.4에서 보는 바와 같이 좌안으로부터 유심부까지의 거리는 매년 다르게 나타나고 있다. 1983년도와 1993년의 경우 차이가 크게 나지만 1977년, 1980년, 1983년의 경우는 약간의 유로의 변경은 있으나 유심부까지의 거리를 나타내는 형태적 변화는 크게 차이가 나지 않는다. 따라서, 1983년과 1993년 사이에 유로의 평면적 변화가 크게 나타났으며 이때의 원인으로는 하상의 자연현상과 아울러 낙동강 연안개발 사업으로 인한 인위적 변형도 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다.

## (2) 지형도 활용

1/50,000 지형도를 활용하여 장기간의 유로변화 특성을 분석하였다. 1/50,000 지형도는 1997년 현재까지 1970년, 1975년, 1983년, 1991년 및 1996년 5개년에 걸쳐 제작되었다. 이 지형도들은 지도상에서 유로의 평면적 변화를 나타내고 있어 본 사례조사 지역을 살펴보면 1970년 이전에는 200,000톤/일의 취수장 부근에서 우안으로 유심부가 형성되었으나 1975년과 1983년를 거쳐 유심부가 우안에서 좌안으로 이동하는 경향을 보였으며 1991년도에는 중앙에 렘타를 두고 유로가 양안으로 형성되어 있는 모습을 보이고 있다. 유로의 폭은 우안쪽이 좌안쪽에 비하여 넓게 형성되어 있다. 유로의 폭은 우안쪽이 좌안쪽에 비하여 넓게 형성되어 있다. 1996년도는 1991년도와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그럼 6.10은 1970년 이전부터 1996년까지 5회에 걸쳐 제작된 지형도에 나타난 유로의 평면형태에 대한 비교 그림이다.

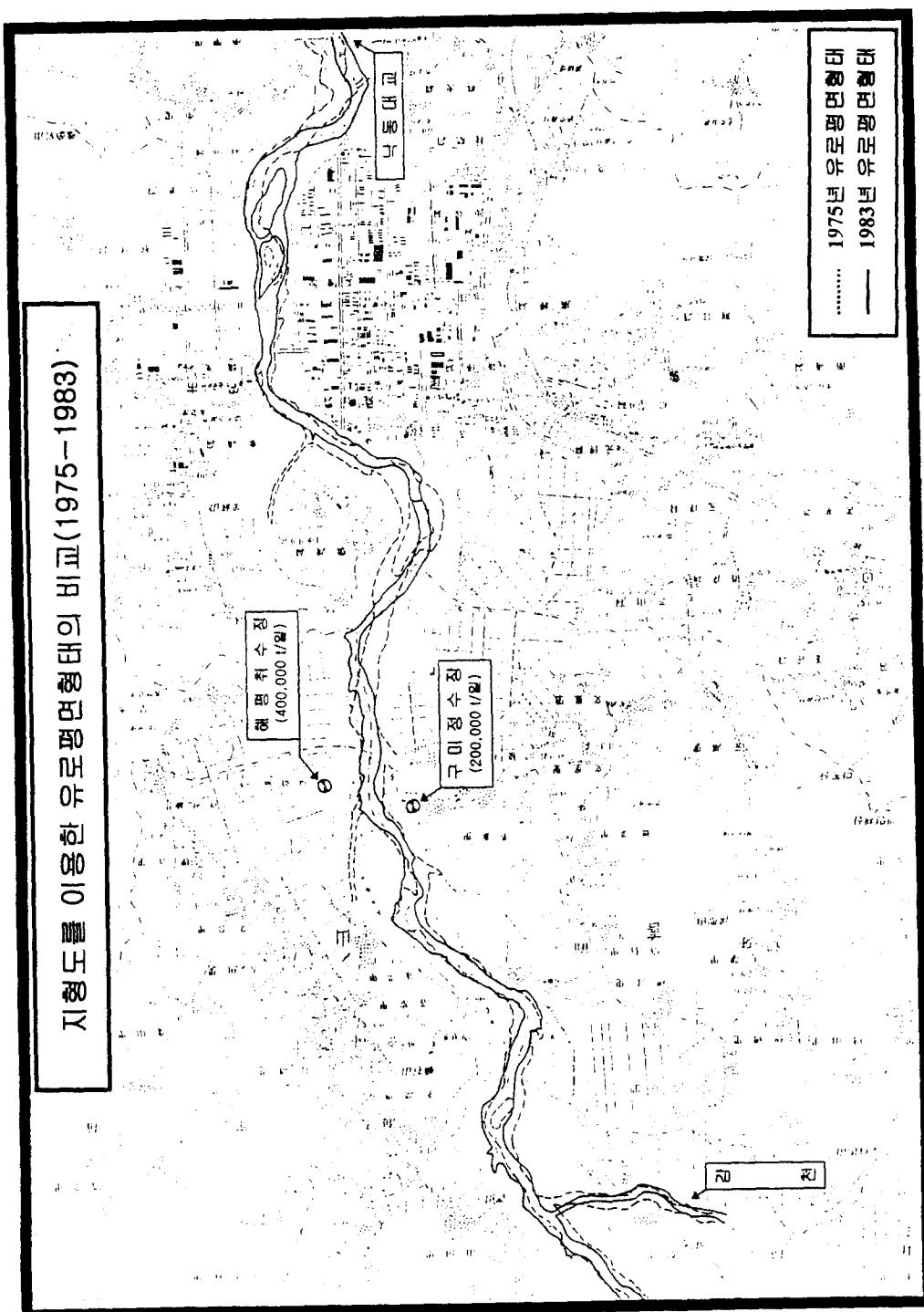


그림 6.10 지형도를 이용한 유로평면 형태의 비교

### 6.3.4 향후 장기간 유로변화 예측

#### 가. 방향설정

유로의 변경등 하천내 복잡한 움직임에 대한 분석은 정성적인 평가와 그에 대한 해답을 포함하는 예측 또는 일반적 평가로부터 시작된 후 점차 정량적인 평가를 통하여 최종 분석결과를 도출하게 된다. 정성적인 평가의 초기단계는 각 구성요소에 대하여 고정관념을 가지지 않은 상태에서 발생된 현상에 대한 통찰과 중요한 물리적인 변화에 대한 이해로써 시작된다. 이와같은 분석을 통하여 유로의 변경등에 대하여 일반적인 경향을 이해하는 것은 이후에 추진되는 세부평가나 정량적인 분석결과에 대한 평가의 기초가 된다.

초기단계의 정성적인 분석을 통하여 하상 및 유로변화에 대한 기본적인 원리나 경향을 이해하고, 그 이후에 좀더 복잡하거나 최첨단의 방법들을 활용하게 되는데 이것은 정확하고 신빙성있는 결과들을 얻기 위하여 시간과 노력의 소비를 최소화하면서 일을 추진하는 것이 된다.

따라서, 유로의 변경등을 예측하는 경우 지형학적 개념의 적용이나 기초적인 수리·수문학적 분석, 유사이동에 대한 개념 정립, 홍수기록, 하천의 수리학적 상태 변화, 유역유사발생 및 이동등에 대한 분석등이 이와같이 정량적인 분석에 속하게 되며 이와같은 분석을 통하여 하천내 유로이동이나 복잡한 유사이동 문제등이 제대로 설명되어진다면 이와같은 정성적인 분석을 통하여 문제를 해결하게 되며, 그렇지 못할 경우 보다 세부적 변화를 살펴볼 수 있는 정량적인 해석방법인 수학적 모델링등을 사용하여 보다 복잡한 해석을 실시하게 된다.

정량적인 해석을 실시할 때 수학적 모형을 사용하게 되는데 이 때 사용되는 2차원 모형은 1차원 모형에 비하여 좀더 구체적인 경향을 파악하는데 도움을 주는반면에 격자구성, 불규칙 경계조건, 하천길이에 대한 제한등에 따라 긴구간에 대한 장기간 모의에는 많이 사용하지 않고 긴 구간에 대한 것은 1차원 모델로 모의한 후 이를 경계조건으로하여 국지적인 변화를 고려할 때 사용되는 경우가 많다. 이와같은 이유 때문에 1차원 이론을 사용하면서도 유관의 개념도입등을 통하여 변형된 준 2차원 모델의 사용이 늘어나고 있으며, 본 과업에서 사용된 Bri-Stars 모형도 이와같

은 장점을 지닌 준 2차원 모형이다. 그러나 준 2차원 모형은 수리학적 또는 하상변화가 극심할 경우에는 사용에 제한을 받는 단점이 있다.

유로변경등을 위하여 사용되는 1차원 모델로는 하상변화, 유로변경등을 위하여 비교적 폭넓게 사용되는 1차원 프로그램으로 미국 육군 공병단에서 개발한 HEC-6 프로그램이 있다. HEC-6프로그램은 일정시간동안 정류상태로 물이 흐른다는 가정과 Yang, Toffaleti, Ackers & White 공식등 12개 하상유사이동 공식과 관측된 자료를 활용하여 만든 유량 - 유사량 곡선식등 13개의 공식을 사용하여 각각의 측점에서 유사의 이동량을 산출하고 산출된 유사이동량을 기준으로 하상의 상승 또는 저하여부를 검토하게 된다. HEC-6 모형이 국내에서 폭넓게 사용되고 있음에도 불구하고 부정류 상태의 흐름을 정류상태의 흐름이 계산시간 간격동안 지속적으로 흐르는 것으로 가정하여 유사이동량을 계산하기 때문에 실제보다 적게 예측하거나 유로특성계산을 제대로 모의하지 못하는 경우가 있기 때문에 상당한 주의를 요한다.

#### 나. 정성적인 유로분석

##### (1) 낙동강 주변 토지이용 변화 분석

1986년 지목별 현황을 보면 임야가 48.8%, 답이 17.0%, 대지가 12.1%를 차지하고 있다.

기 계획된 도시재정비계획상의 용도지역 현황을 보면 주거 지역이 5.7%, 상업지역 0.9%, 공업지역 8.1%로서 총 면적의 14.7%가 시가지 면적이며 77.9%가 자연녹지 지역이고 생산녹지 및 보전녹지는 각각 5.3% 및 2.1%를 차지하고 있다.

개발 가능한 면적은 기 개발지를 포함하여 총 면적의 34.7%에 해당하는  $71.77\text{km}^2$ 이며, 이중 기개발지는  $25.02\text{km}^2$ 이고 미개발지는  $46.75\text{km}^2$ 를 차지하고 있다. 표 6.5는 개발 가능지의 현황을 보여주고 있다. 표 6.5를 통하여 표고가 100m이상이고 경사가 20% 이상지역인 개발 불능지가 58%에 이르고 있어 개발에 한계가 있음을 보여주고 있다.

표 6.5 개발가용지 분석

(단위:km<sup>2</sup>, %)

구분	면적	구성비	비고
계	206.72	100.0	-
기개발지	25.02	12.1	-
개발가능지	46.75	22.6	표고 100m, 경사 20% 이상
개발억제지	15.13	7.3	생산, 보전녹지 및 시설녹지일부
개발불능지	119.82	58.0	표고 100m, 경사 20% 이상

※ 자료 : 구미도시 재정비 계획, 1992. 2

1992년 구미시는 공단조성시 인구 증가에 대하여 용도별 토지공간 확보등 기본 방향을 제시하였고 구미시의 공업지역은 1공단과 산업기지 개발구역으로 기 지정된 2·3공단의 면적을 수용하되 토지이용상황을 고려하여 조정하고, 화물터미널이 입지할 남구미 I·C 주변지역을 공업지역으로 신설하여 공업지역 면적은 16.3146km<sup>2</sup>로 계획하였다.

시가지 개발추세에 따라 녹지내 집단 취락 지역의 일부를 주거지로 개발하고 기타 취락은 최소 대지면적의 한도를 완화하여 주거환경을 개선하고 사곡·상모지역에 지정되어 있는 보전녹지는 시가지 개발계획에 따라 단계별로 해제하며, 낙동강변의 녹지체계를 형성하기 위해 강변에 보전녹지를 신설하여 총 녹지면적은 173.580km<sup>2</sup>로 계획하였다.

구미시는 '95년 통합시로 출범함으로서 총 행정구역 면적이 617.39km<sup>2</sup>로 확대되었으며 행정구역내 4개의 도시지역과 나머지 비도시지역으로 구분하였다. 도시계획법을 적용받는 지역으로 구 구미시를 중심으로 한 구미도시 기본계획구역(154.62km<sup>2</sup>), 선산도시계획구역(6.44km<sup>2</sup>), 고아도시계획구역(3.46km<sup>2</sup>), 옥성공단(0.37km<sup>2</sup>)이 도시계획구역으로 결정되어 있었다. 나머지 지역은 국토이용관리법상의 준도시지역(7.20km<sup>2</sup>), 준농립지역(147.49km<sup>2</sup>), 농립지역(289.04km<sup>2</sup>), 자연환경보전지역(8.80km<sup>2</sup>)으로 결정되었다.

구미 행정구역 총 617.39km<sup>2</sup> 중 본 사례조사 구역은 표 6.6에서 보는바와 같이 총 면적의 49.4%인 305.19km<sup>2</sup>이며 용도별 토지이용 현황은 구미, 선산, 고아 도시지역

(164.52km<sup>2</sup>)과 비도시지역(140.67km<sup>2</sup>)이 포함되어 있다.

표 6.6 용도별 토지이용 현황(행정구역)

구 분	계	주거 용지	상업 용지	공업 용지	녹지 용지	준도시 지역	준농립 지역	농립 지역	자연환경 보전지역
총면적	305.19	14.71	2.27	15.59	131.95	4.02	91.07	42.32	3.26
도시지역	164.89	14.70	2.27	15.96	131.95	-	-	-	-
구미도시 기본계획	154.62	12.11	1.99	15.33	125.19	-	-	-	-
선산도시 계획	6.44	1.57	0.16	0.05	4.66	-	-	-	-
고아도시 계획	3.46	1.03	0.12	0.21	2.10	-	-	-	-
비도시 지 역	140.67	-	-	-	-	4.02	91.07	42.32	3.26

\* 자료 : 2016년 구미도시 기본계획(안), 1997. 1

본 과업지역의 대부분을 차지하고 있는 구미시 및 통합구미시(1995년 이후)의 토지이용변화를 살펴보았다. 1992년 2월에 구미도시 재정비계획이 수립되기 이전에는 구미시의 토지이용은 주거지역이 5.7%, 상업지역이 0.9%, 공업 및 준공업지역이 8.1%이고 녹지지역이 85.3%로 녹지지역이 절대 다수를 차지하고 있었다. 1992년 2월에 1996년도를 목표로 수립된 구미도시 재정비 계획에서는 주거지역 7.1%, 상업지역이 1.0%, 공업지역이 7.9%, 녹지지역이 84.0%로 녹지지역이 1.3%가 줄어든 대신에 주거, 상업, 공업지역의 확장이 이루어졌다. 1997년에 수립된 2016년을 위한 통합 구미시 도시기본계획에 의하면 2016년까지 구 구미시의 경우 주거용지가 0.5km<sup>2</sup>, 상업용지가 0.4km<sup>2</sup>, 공업용지가 3.06km<sup>2</sup> 늘어나는 대신 녹지용지가 3.96km<sup>2</sup> 줄어들도록 하고 있다. 그러나, 이와는 별도로 통합 구미시가 되면서 선산군에 속해 있던 여러 지역의 녹지용지가 크게 늘어나 통합구미시의 경우 122.38km<sup>2</sup>의 녹지용지가 증가하는 것으로 계획하고 있다. 기 수립된 도시 기본계획에 의하면 낙동강 본류 주변의 경우 녹지용지가 그대로 유지되며 또한 본 과업지역의 최상류지역인 감천 합류점 및 감천지류의 경우도 하천 가까이는 여전히 녹지로 유지되도록 계획하고 있

어 토지 이용변화로 인하여 발생되는 유사 공급량의 변화는 크지 않을 것으로 평가된다.

## (2) 장기간의 하상변화

정성적으로 장기간의 하상변화를 예측하기는 매우 어렵다. 그러나, 수위관측지점의 수위-유량 관계곡선의 변화 및 관측년도간의 최심하상고의 변화를 분석하여 봄으로써 이를 어느정도 예측할 수 있다. 그림 6.11은 낙동강교 하류지점인 왜관수위 표 지점의 수위-유량 곡선의 변화를 보여주고 있다.

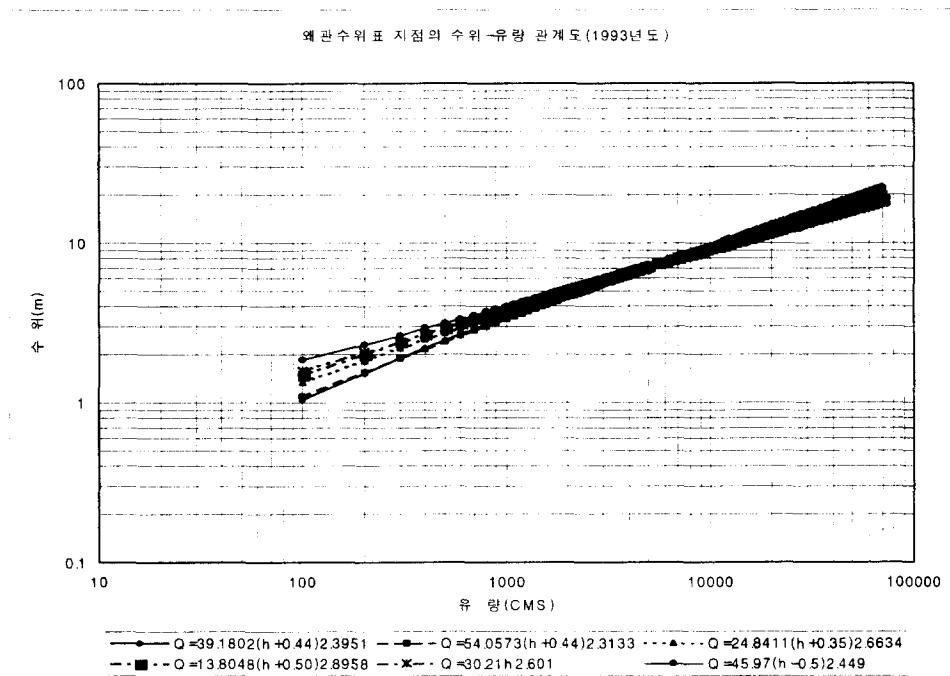


그림 6.11 왜관 수위표 지점의 수위-유량관계 변화

그림 6.11에서 보는 바와 같이 왜관 수위표 지점의 연도별 수위-유량 관계곡선을 살펴보면 유량이 적은 경우 최근 수위-유량곡선에 산출된 수위가 점차 높아지나 유량이 커질수록 최근 수위-유량 곡선에서 산출된 수위가 오히려 감소하는 경향을 보이고 있어 하상변화의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타나고 있다.

또한 그림 6.12는 장기간에 걸쳐 관측된 최심 하상고의 변화를 보여주고 있다.

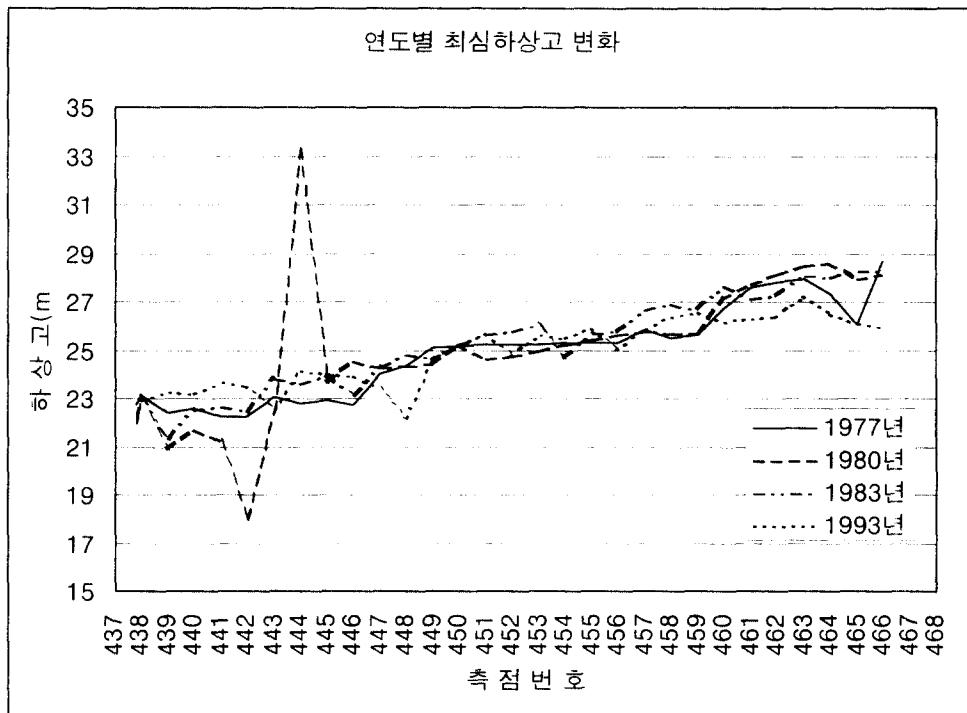


그림 6.12 장기간에 걸친 최심하상고의 변화(1977 ~ 1993)

그림 6.12에서 보는 바와 같이 1980년도에 최심하상고의 불규칙성이 크게 나타나고 있지만 1977년, 1983년, 1993년에는 최심하상고가 상당히 완만한 경사를 보이고 있으며 하상의 높이가 1-2m의 차이가 나기는 하지만 전반적인 면에서 살펴 볼 때 연도별 최심하상고의 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 유사의 이송에 따른 장기간 하상의 변화는 정성적으로 적은 것으로 판단해 볼 수 있다.

### (3) 장기간의 유로변화

유로변화를 예측하는 지표로 장기간의 유로변화를 분석하여 보는 것은 상당히 의미가 있다. 그림 6.10에서 보는 바와 같이 1970년 이전과 1975년과는 유로의 변화가 상당히 심하게 나타나고 있다. 1975년의 경우 감천합류점으로부터 하류로 내려

오면서 1970년 이전에 비하여 좌안에 치우치는 경향이 크고 이로 인하여 하상의 사행이 심하여지고 있다.

일단 만곡의 징조가 표현되면 유심이 만곡축으로 편의하므로, 요안의 수심이 증가하고 동시에 유속을 증가하여 원심력의 작용에 의하여 더욱 하안의 침식을 크게 한다.

급만곡이 되면 될수록 유수의 침식작용을 증대함으로, 시기를 잊지 않고 호안 기타의 공사를 시행하여 하안을 보호하지 않으면 요안은 제한없이 침식이 지속된다. 요안이 침식되어 수심과 유속을 증가하는 것과는 반대로, 철안에서는 수심과 유속을 감소하여 토사의 침전퇴적을 생기게 하여 드디어 최초 직선이던 수로도 완전한 곡선유로로 변한다. 또한 수로의 만곡은 1회만으로 그치는 것은 극히 드물고, 요안에 충돌한 유수는 다시 굴절하여 하류의 대안에 충돌함으로써 다시 전기한 경로를 취하여 대안에 만곡을 생기게 하고, 이와같이 하여 유수는 번갈아가며 좌우 양안으로 침입하면서 사행을 지속하게 된다.

이와같은 유로의 변화는 1983년과 1991년 사이에 극심하게 발생되었다. 사례지역 내 200,000톤/일 규모의 취수장의 경우도 1983년까지는 유로가 우안으로 형성되어 있었으나 1991년에는 유로가 좌안으로 형성되어 있다. 이와같이 1983년과 1991년 사이에 유로의 변화가 극심한 것은 앞에서도 검토한 바와 같이 낙동강 연안 개발계획에 의하여 낙동강 본류의 하상이 정리되고 하상에 존재하는 모래를 상당한 량 채취하므로써 이로인한 영향이 반영된 것으로 추측된다.

1991년과 1994년간에는 유로의 변화가 거의 없고, 낙동강 좌, 우안의 제방이 정리가 되어 제방침식이 거의 일어나지 않을 것이라는 점을 감안한다면 향후의 유로변경은 하상재료인 모래 채취가 극심하게 이루어지지 않는다면 그리 심하게 일어나지 않을 것이다. 특히, 모래를 채취하는 경우 어느 한쪽은 지나치게 깊게 파지 않도록 주의하여야 할 것으로 사료된다.

## 다. 정량적인 유로분석

### (1) HEC-6 모형을 이용한 유로분석

#### (가) 모형의 검증

HEC-6 모형을 이용하여 낙동강 본류의 유로 변동에 관한 정량적인 해석을 실시하기 위하여 모형을 검증하였다. 검증은 2단계로 진행되었으며 1단계에서는 우선적으로 1994년에 발행된 지형도와 1993년도 실측된 측량자료를 평면적으로 비교하였다. 1단계 검증작업이 진행된 사유는 지형도상에는 기존 취수장 부근의 유로가 좌안보다는 우안에 치우쳐 있는 것으로 나타나 있어 이를 확인할 필요가 있기 때문이다. 이를 비교한 결과 기존 취수장 부근의 경우 지형도상에는 유로가 우안에 치우쳐 있는 것으로 나타나 있으나, 측량자료에는 유로가 좌안으로 치우쳐 있어 실제 현장을 잘 나타내 주고 있는 것으로 나타났다. 지형도상에 이와같은 실제와 조금씩 다른 결과가 나타나 있는 것은 지형도 상에 나와있는 유로는 특정일에 항공촬영된 자료를 이용하고 있기 때문에 전반적인 경향에 미치지 못하는 경우가 있기 때문으로, 국립지리원에 문의한 결과 항공촬영은 맑은 날을 위하여 4~5월 또는 9~10월에 실시하며 이때의 하천의 모습대로 지도가 제작되므로 유로의 변동은 예상된다고 밝히고 있다.

2단계 검증작업은 1983년에 실측된 하상자료를 이용하여 HEC-6를 이용하여 10년간 모의한 후 1993년도 실측자료와 비교하였다. 모의를 위한 하류 경계조건으로는 왜관 수위표 지점의 10년간 매일 매일의 수위-유량 곡선이 사용되었으며 모의시간 간격은 1일간으로 실시하였다. 그럼 6.13은 HEC-6를 이용하고 유사이동공식으로 Yang 공식을 사용한 경우로 상류지역등의 실제 지형과 10년간 모의 결과는 약간의 오차를 보이고 있으며, 하류지역은 유사한 형태를 보이고 있다.

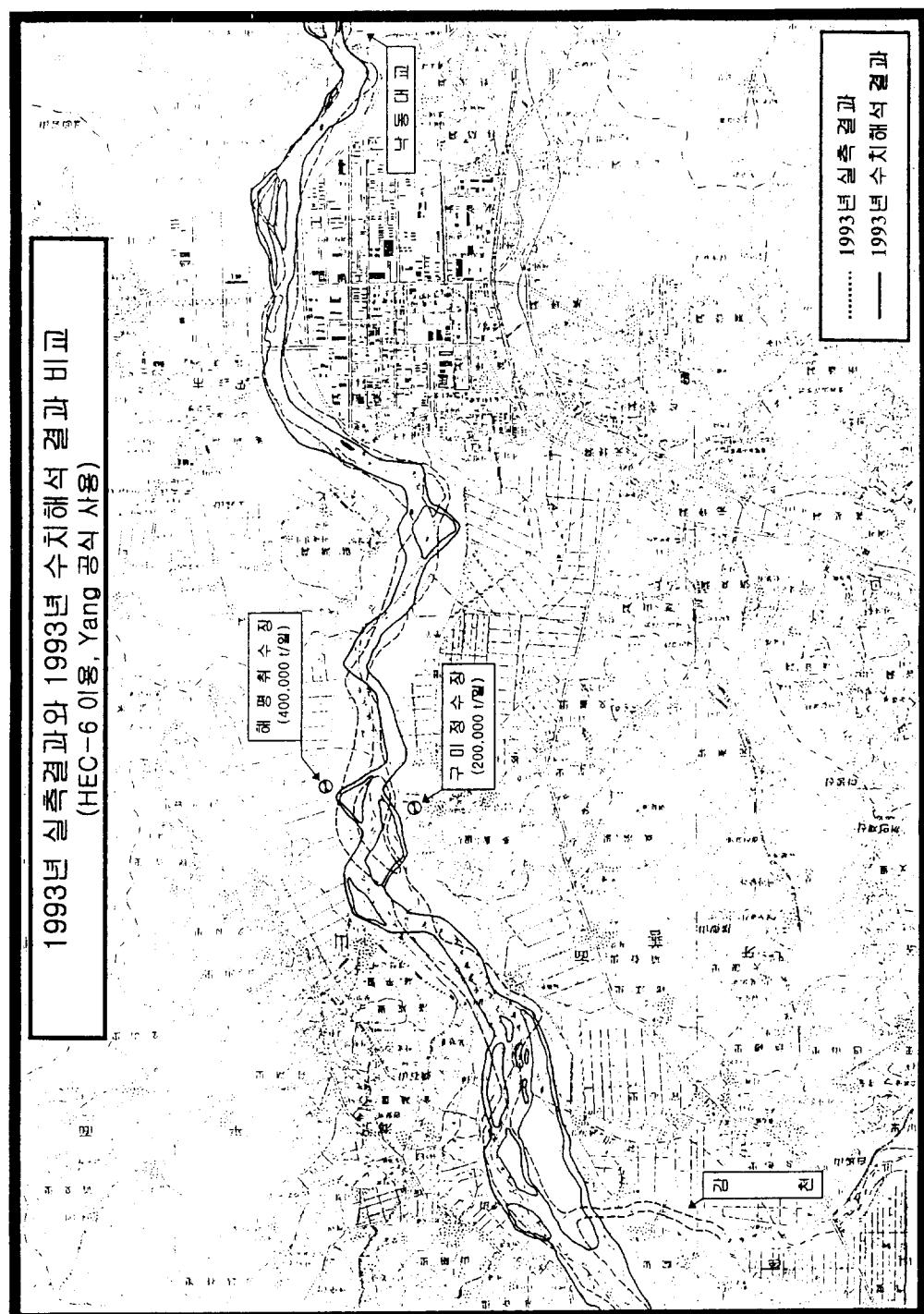


그림 6.13 1993년도 실측결과와 1993년도 수치해석결과 비교(HEC-6, Yang 공식)

## (나) 향후 유로 예측

HEC-6 모델을 사용하여 10년후의 유로를 검증한 결과 실제와는 다른 결과를 보여주고 있다. 물론 이와같은 차이는 1983년 측량자료를 이용하여 10년간 모의하는 동안에 모의에서는 인위적인 변화가 전혀 없다는 가정하에 실시된 것이고, 실제 낙동강에서는 연안개발 사업등으로 인하여 많은 인위적인 변화가 있어 이와같이 차이는 어느 정도 예상이 된다. 향후 종합적인 판단을 위하여 1993년 자료로부터 10년 후(2003년), 20년후(2013년), 30년후(2023년), 40년후(2033년), 50년후(2043년)의 유로의 형태를 모의하였다. 그럼 6.14 HEC-6 모델과 Yang의 유사량공식을 사용하여 10년 후(2003년)를 예측한 유로이다.

## (2) BRI-STARS 모형을 이용한 유로분석

## (가) 모형의 검증

BRI-STARS 모형을 이용하여 하상 유로변동에 관한 정량적인 해석을 실시하기 위하여 모형을 검증하였다. BRI-STARS 모형을 이용하여 10년간 모의한 후 1993년도 실측자료와 비교하였다. BRI-STARS 모형은 HEC-6 모델과는 달리 최대 측점의 수가 30개로 제한되고 있으므로 하류경계조건은 수위변화가 측정되고 있고 수위-유량관계 곡선식이 있는 왜관 수위표 지점을 하류경계 조건으로 하여 낙동강교까지 1차 모의하여 낙동강교에서의 수위와 유량관계 곡선식을 얻고 이를 하류경계 조건으로 하여 과업지역내 흐름을 모의하였다. 흐름 모의시 시간간격은 5일간으로 하였다. BRI-STARS 모형을 이용하고 유사이동 공식으로 Yang 공식을 사용한 경우에는 상류지역과 기존 취수장 부근, 하류지역이 실제 지형과 상당히 유사한 모의 결과를 보이고 있으나 실제 지형보다 일찍 사행을 형성하는 것을 보여주고 있다. 사행형성에 있어서도, HEC-6에 의한 결과가 사행보다는 분류하천 특성을 나타내지만 BRI-STARS 모델에 의한 결과는 사행 특성을 나타내고 있고 상당히 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 이는 사행을 형성하는 기본 접근과 동일한 접근을 나타내 주는 것이며 단순히 하상이 감소하거나 증가하는 것 보다는 횡방향 변형, 즉 유로의 변형을 모의하고 있음을 나타내 주는 것이다. 정량적인 모의에서도 정확하게 1993년도의 실측결과와 일치하지 않지만, 앞에서도 검토한 바와 같이 낙동강 연

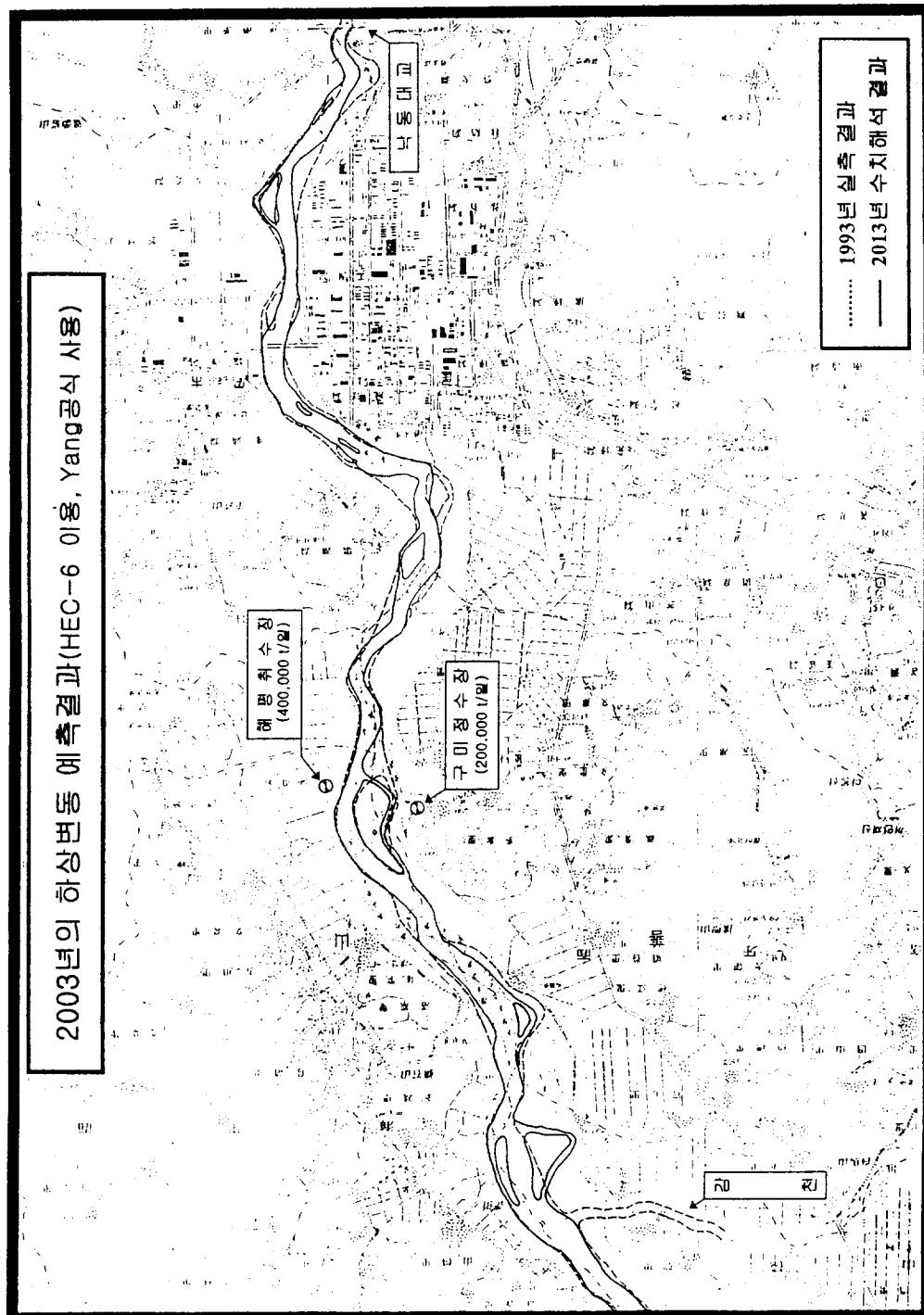


그림 6.14 2003년의 하상변화 예측(HEC-6, Yang 공식)

안개발 사업에 의하여 상당한 영향을 받았다는 것을 감안할 때 이 모델의 적용성이 큰 것으로 사료된다.

#### (나) 향후 유로예측

BRI-STARS 모델을 사용하여 10년후의 유로를 검증한 결과 이를 사용하여 정량적인 분석을 실시하고 정성적인 개념을 통하여 결과분석이 가능함을 파악하였다. 향후 낙동강 유로 변경 예측에 대하여 종합적인 판단을 위하여 1993년 자료로부터 10년 후(2003년), 20년 후(2013년), 30년 후(2023년), 40년 후(2033년), 50년 후(2043년)의 유로의 형태를 모의하였다.

또한, 유사채취에 의한 영향을 살펴보기 위하여 앞에서 검토한 구미시의 유사채취 지점 중에서 본 사례지역내에 위치하고 있는 고아읍 봉한리에서 채취된 유사만을 고려하여 BRI-STARS 모델을 모의하고 유사채취가 없는 경우와 비교하였다. 모의결과 고아읍 봉한리에서 유사채취량이 다른 채취량에 비하여 많지 않음에도 불구하고 일부 하상변화가 일어나고 있음이 보여진다.

### 6.4 하천내 취수지점 선정

하천내 취수지점을 선정하기 위하여는 앞에서 검토한 하천내 거동특성을 기초로 하여 향후 충분하고 지속적인 취수량 확보가 가능한지를 판단하고 취수된 원수가 소요의 수질을 만족하는지와 취수장 설치 이후 지속적인 사용이 가능한지를 검토하여야 한다. 아울러, 유지관리에 대한 편리성이나 향후 확장의 용이성등도 검토가 된 이후에 취수지점이 선정이 되어야 한다.

#### 6.4.1 지속적 취수량 확보

하천내 취수지점 선정시 가장 먼저 고려하여야 할 사항은 지속적인 취수량 확보가 가능한지를 판단하는 것이다. 이와같은 지속적인 취수량 확보는 갈수시 및 홍수시의 취수를 특히 고려하여야 한다. 취수량 확보는 크게 2가지 측면에서 검토되어야 한다. 첫째는 유역특성 조사부분에서 조사된 수리, 수문자료를 기초로 하여 향후

에도 취수에 충분한 유량이 하천을 흐르는지를 검토하여야 하며, 둘째로는 앞장에서 검토된 바 있는 하천거동 특성에 기인하여 취수장 설치지점에서 하상의 변화나 제방의 변화등이 충분한 취수량 확보에 문제가 없는지가 검토되어야 한다. 수리, 수문에 관한 검토는 갈수량, 평수량, 홍수량등의 계산과 하천내 물 사용량과의 관계를 통하여 이루어지며 기존 문헌에 많이 나와 있으므로 본 검토에서는 생략하기로 한다. 또한, 하상의 변화나 제방변화등 하천의 거동에 관련되는 문제는 앞에서의 검토 결과를 참고로 하여 충분한 취수량 확보지역을 선정한다.

사례지점의 경우 HEC-6 및 BRI-STARS 모델을 이용하여 향후 10년 후 (2003년), 20년 후(2013년), 30년 후(2023년), 40년 후(2033년), 50년 후(2043년)에 대하여 유로변경을 예측하였다. 검증 부분에서 검토된 바와 같이 HEC-6 모델보다는 BRI-STARS 모델이 보다 실제에 가까운 결과를 예측하는 것으로 나타나고 있다. 우선적으로 BRI-STARS 모델의 적용결과를 살펴보면, 50여년이 지나는 동안 외부에서 영향을 미치지 않는다면 1983년과 1993년 사이에 발생되었던 것과 같은 유로가 크게 변경되는 일은 발생되지 않는 것으로 예측되고 있다. 물론 10년마다의 예측결과를 비교 하여볼 때 횡방향 유로변경 및 최심하상고의 변화가 지속적으로 일어나고 있지만 그 크기는 그리 크지 않다. HEC-6를 이용한 결과도 BRI-STARS를 이용한 결과와 약간의 차이가 발생하기는 하지만 심각한 횡방향 유로이동이나 최심하상고의 변화를 나타내고 있지 않다. 이와같은 정량적인 결과와 함께 정성적인 검토결과도 정량적인 검토결과와 맥을 같이 하고 있다.

### 6.4.2 지속적인 양호 수질 확보

하천에서 충분한 수량을 확보하였다 할지라도 취수되는 원수가 사용목적에 맞지 않으면 건설된 취수장이 제 몫을 다할 수 없다. 이와같은 양호한 수질확보는 하천 취수를 결정하기 이전에 주로 검토되며 본 연구에서는 하천 취수 결정 이후 부분만을 주로 다루고 있다. 다만, 검토구간 내 지천이 있는 경우 지천에서 유입되는 수질이 양호하다면 지천 하류부가 비교적 양호하며, 지천 유입 수질이 양호하지 못한 상태이면 지천 유입 이전 상류부가 수질에 관하여 보다 나은 지점이 된다. 본 사례 조사에서는 감천 합류점 이후부터 22km 지점에 취수장을 선정하는 것이므로 상류부

또는 하류부를 선정하는 선택을 할 수 없다. 다만, 향후의 낙동강 본류의 수질 예측 결과를 토대로 취수장 건설이후에 양호한 수질로 지속적인 취수가 가능한 가를 판단케 되며, 기존의 낙동강 수질 예측결과를 활용거나 새로운 수질 예측을 실시한 이후에 향후 양호한 수질의 취수가 가능한지를 판단한다.

### 6.4.3 취수장의 지속사용 여부

취수장은 건설된 이후 상당한 기간동안 사용되게 된다. 그러나, 주변의 여건변화, 즉 도시의 축소나 주변 공업지역의 축소등에 따라 취수된 원수의 사용량이 줄어들거나, 보다 유리한 지점에 새로운 취수장이 건설될 경우 취수장의 지속사용이 어렵게 된다. 본 사례 검토지역에서는 구미시의 지속성장 및 공업지역 확장등으로 향후 원수 사용량은 점차 증가할 것으로 예상되어 취수장의 사용 중단등의 문제는 적을 것으로 판단된다.

### 6.4.4 유지관리상의 원활

취수장 유지관리의 원활도 취수장 선정시 또 다른 고려사항이 된다. 취수장 선정 시 유지관리에 대한 고려가 없이 단순한 결정에 의하여 선정된다면 유지관리를 위한 사무실 확보 및 유지, 관리 인원 확보에도 어려움이 있고, 기타 유지관리상의 문제가 발생되었 때 대처가 쉽지 않다.

### 6.4.5 향후 확장의 용이

국내 대부분 지역의 경우 도심이 점차 확대되는 추세에 있어 향후 더 많은 취수량이 요구될 것으로 판단된다. 따라서, 향후 늘어나는 취수량은 기존 취수장을 확장하여 사용하든가 다른 지역에 새로운 취수장을 건설하여 감당하게 된다. 그러나, 많은 경우에 있어 새로운 취수장을 건설하는 방법보다는 기존 취수장을 확장하는 방법이 유지관리등 장점이 많이 있기 때문에 최초 취수장 선정시 향후 확장 가능성에 관하여도 검토하는 것이 필요하다.

#### 6.4.6 기타

기타 취수지점 선정에 도움을 줄 수 있는 사항으로 자연유하식 취수 및 도·송수 가능성 여부, 정수장으로부터의 거리, 해수역류나 결빙기의 영향등 특별히 검토되어야 할 부분은 구체적으로 검토하여야 한다.

#### 6.4.7 종합적 검토

위와같은 사항등을 종합적으로 검토하여 최종적인 취수지점을 선정하게 된다.

### 6.5 결론

사행(meandering)하천이나 망상(braided)하천의 경우 제방의 침식, 하상의 침식 및 퇴적등에 의한 영향을 받아 하천내 하상이나 유로가 변경되게 된다. 이와같은 하상이나 유로의 변경은 하천자체의 안정성 뿐만 아니라 하천내 구조물 축조에 상당한 영향을 미치게 되므로 하상 및 유로변경에 대한 보다 정확한 예측은 하천구조물의 안정성 유지나 안정적인 취수량 확보등에 상당히 중요한 역할을 하게 된다.

그러나, 이와같은 하상이나 유로변경 예측은 단순하게 실시되기가 어려우며 과거 자료를 활용한 과거의 정성적인 변화 특성을 파악하여 향후 변경에 대한 예측을 실시하게 된다. 이와같은 과거의 정성적인 예측은 이미 발행된 지형도나 과거 조사자료, 대상하천 유역의 특성을 조사하여 하천의 거동을 판단하게 된다. 이때, 과거 자료와 보다 세심한 관계를 설정하는 작업이 요구된다. 이와같은 정성적 예측에는 향후 하천주변의 토지 이용도의 변화나 수리, 수문자료, 하상자료의 변화등에 관한 조사도 보다 정확한 예측을 위한 자료로 활용될 수 있다.

이와같은 정성적인 예측을 통하여도 향후 유로의 이동이나 하상이동에 대한 예측이 불가능하거나 미진한 경우에는 수치해석 프로그램을 이용한 정량적인 예측을 실시하게 된다. 정량적인 예측을 위하여는 기존 프로그램을 많이 이용하게 되는데 유로 변경은 주로 하천의 긴 구간에 걸쳐 이루어지므로 1차원 또는 준 2차원 모델이 이용된다. 국내에서 많이 이용되는 모델로는 미 공병단에서 만든 HEC-6 프로그

램이 많이 이용되고 준 2차원 모델로는 미 연방도로국에서 나온 BRI-STARS 프로그램등이 이용되고 있다. 그러나, 보다 정확한 해석이나 국지적인 변화를 위하여는 2차원 또는 3차원 모델들이 이용될 수 있으나, 프로그램의 적용 공식이나 해석방법 등에 큰 차이가 발생하게 되므로 해석결과를 분석하는데 상당한 노력이 요구되고 있다. 특히나, 대부분의 정량적인 변화들은 향후 하상이나 제방등에 현저한 변화가 없다는 가정하에서 도출된 것이므로, 하천에서 급격하거나 커다란 인위적인 변화가 나타난다면, 산출된 정량적 변화결과를 단순 사용하기에는 무리가 따르므로 정성적인 예측과 함께 판단할 필요가 있다.

취수지점 선정에는 이와같이 산출된 하천의 거동문제 뿐만 아니라 지속적으로 양호한 수질의 확보여부, 취수장의 장기적 사용여부, 유지관리상의 원활여부, 향후 확장의 용이 여부, 기타 특별히 고려되어야 할 부분들을 포함한 종합적인 검토를 통하여 취수지점이 선정되어야 한다.

본 절에서는 이와같이 취수지점 선정에 필요한 여러 사항 중 기존 문헌에 크게 언급되지 않은 하천의 거동과 이로 인한 하상 및 유로의 변경을 중심으로 기술하였다.

## 참 고 문 헌

1. Ackers, P. and Charlton, F. G. (1970) "Meander Geometry Arising from Varying Flows", Journal of Hydrology, 11, 230-52.
2. Anderson, A. G. (1967) "On the Development of Stream Meanders", Proceedings of the International Association for Hydraulics Research, 12th Congress, Fort Collins, pp.1371-1378.
3. Blench, T. (1952) "Regime Theory for Self-formed Sediment-bearing Channels", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 117, 383-400, discussion pp.401-408.
4. Chang, T. P. and Toebe, G. H. (1970) "A Statistical Comparison of Meander Planforms in the Wabash Basin", Water Resources Research, No. 6, 557-578.
5. Horton, R. E. (1933) "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle",

- Transactions of the American Geophysical Union, 14, pp.446-60.
6. Horton, R. E. (1945) "Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins : Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology", Bulletin of the Geological Society of America, 56, pp.275-370.
  7. Howard, A. D. (1965) "Geomorphological Systems - Equilibrium and Dynamics", American Journal of Science, 263, pp.303-12.
  8. Inglis, C. C. (1949) "The Effect of Variations of Charge and Grade on the Slopes and Shapes of Channels", International Association for Hydraulic Structures Research, 3rd meeting, Grenoble, pp. II.1-II.9.
  9. Kennedy, R. G. (1895) "The Prevention of Silting in Irrigation Canals", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 119, pp.281-90.
  10. Lacey, G. (1930) "Stable Channels in Alluvium", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 229, pp.259-92.
  11. Lacey, G. and Pemberton, W. (1972) "A General Formula for Uniform Flow in Self-formed Alluvial Channels", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 53, pp.373-81.
  12. Langbein, W. B. and Schumm, S. A. (1958) "Yield of Sediment in Relation to Mean Annual Precipitation", Transactions of the American Geophysical Union, 39, pp.1076-84.
  13. Leopold, L. B. and Maddock, T. (1953) "Relation of Suspended-sediment Concentration to Channel Scour and Fill", Proceedings of the 5th Hydraulic Conference, University of Iowa, Bulletin 34, pp.159-78.
  14. Leopold, L. B. and Wolman, M. G. (1957) "River Channel Patterns - Braided, Meandering and Straight", Professional Paper. United States Geological Survey, 282B.
  15. Leopold, L. B., Wolman, M. G. and Miller, J. P. (1964) Fluvial Processes in Geomorphology, San Francisco, W. H. Freeman.
  16. Lindley, E. S. (1919) "Regime Channels", Proceedings of the Punjab Engineering Congress, 7, pp.63-74.

17. Russell, R. D. and Taylor, R. E. (1937) "Roundness and Shape of Mississippi River Sands", *Journal of Geology*, 45, pp.225-67.
18. Schoklitsch, A. (1933) "Über die Verkleinerung der Geschiebe der Flussläufen", *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, 142, pp.343-66.
19. Strahler, A. N. (1950) "Equilibrium Theory of Erosional Slopes Approached by Frequency Distribution Analysis", *American Journal of Science*, 248, pp.673-96, pp.800-14.