

# 江개발로 인한 自然 파괴와 대책

—獨逸의 개발과 사후관리를 중심으로

鄭 東 陽

독일 베를린工大연구원 · 토목공학

독일의 강(하천)개발은 14세기부터 부분적인 개발을 시작하여 19세기초에 전성기를 이루었다. 초기에는 그 목적이 주민들의 식수와 농업용수를 공급하고 강변의 농경지와 문화시설의 보호였으나 산업혁명이 일어나고 문화발달과 인구증가로 인하여 하천개발의 목적이 기본목적에 병행하여 공업용수와 수력자원 확보 및 교통수단(운하개설) 등으로 확대되었다. 그 개발 과정에서 많은 문제점들이 발생하여 지금까지 그러한 문제점을 제거 하면서 초기에 소홀히 다루었던 문제점을 보완하여 문자 그대로 「자연에 가까운 강개발」을 추진 하는 동시에 과거의 문제점을 주어진 범위내에서 제거해 나가고 있다.

## ■ Rhein강의 직강공사(Tulla-Projekt)

라인강은 스위스에서 근원하여 Bodensee로 유입한후 라인강폭포를 거쳐 독일-프랑스국경을 이루며 네덜란드의 Rotterdam으로 통하여 북해로 흘러들어간다. 라인강의 상류인 Basel과 Strassburg

사이의 상류지역은 무수한 가지천(샛강, Verzweigter Fluss)과 홍수때마다 범람하고 늪지대를 형성하였고 재산과 인명피해가 극심하여 Tulla라는 사람에 의하여 창안된 직강공사를 1840~1876년에 걸쳐 강폭을 200m로 마치게 되었다.

### 1. 목적과 결과

그 당시에 이 공사가 끝나면 인명과 문화시설 및 농경지 보호를 할 수 있고 넓은 늪이 사라지고 기온이 온화하여 짙은 안개도 사라져 쾌적한 기후와 주민들의 사기를 돋구며 생산성이 높아지고 수로수송이 원화하여 산업발전에 절대적인 영향을 미치리라 예측하였었다. 수십년후에 하상이 8m 정도 낮아지고 이와 관련하여 강주변의 지하수위가 현저히 떨어졌고 동시에 예상하지 못했던 모래무더기(alternate Bar, Sand bank)가 하류 쪽으로 이동하면서 강변의 좌우로 쌓여지고 강줄기의 굴곡적인 변화로 배들의 운항에 막대한 지장을 초래하였으며 결국 운하는 사용이 불가능해

지고 초기의 부흥은 점차 사라져버려서 100년이 지난 20세기 초에 관계 전문가들은 Tulla-Projekt는 실패작으로 판명하였고, 그 실제의 요인으로 썬 엔지니어들이 수리, 수문학적인 근본문제점에 익숙하지 못하였고 강개발에 필요한 기본 자연법칙을 준수하지 않았음을 들었다.

## 2. 대책과 결과

강수위때의 수로조절을 위하여 1906~1913년 사이에 Strassburg이하에 우리방천(Querbuhnen), 하상턱(Grundschwelle) 및 강물유도장치를 설치하고 운항에 필요한 수심 170cm를 확보하게 되었다. 프랑스에서는 운하시설과 수력발전을 위하여 기존의 강줄기 결을 따라 새로운 운하(Rheinseitenkannal- 라인 결 운하)를 건설하자는 제안을 골자로하여 1919년 독일과 베르사이유 협정을 체결하여 라인강과 병행하는 새로운 라인운하는 1928~1958년까지 지속되었고 설계유량 1400ton/sec와 낙차높이 15m 약 150MW의 전력을 생산하는 4개의 발전소를 Basel과 Breisach사이에 건설하였다. Strassburg이하의 공사는 1931~1955년까지 지속되었고 공사비는 Basel항의 이용목적 이해관계 때문에 전적으로 스위스가 지불하였다. 운하개통과 발전소의 시운전후에 기존의 라인강수위가 2~3m 정도 재차 낮아졌으며 지하수위 사정은 더욱 심각해졌었다. 이러한 문제점을 해결하고자 1954~1956년에 독일정부가 제안하여 Breisach 와 Strassburg구간을 1961년에서 1970년까지 수정공사를 하였지만 마지막 보(淤, Barrage) 밑에서 일어나는 하상침식은 여전히 계속되었다. 계속되는 하상저하현상을 막기위하여 1974~1977년 사이에 Gambshheim과 Iffezheim에 각각 두개의 감문독을 ( $B \times L = 24 \times 270$  m)포함하여 추가로 새로운 보를 건설하여 현재 운행중이다. 이렇게 때마다 보완 조치를 하였지만 문제는 해결되지 않고 계속적으로 마지막 보밑에서 여전히 하상침식이 일어나고 있으며 또한 홍수의 범람위험은 점점 높아져가고 있다. 이유인 즉, 직강공사로 운하화된 강으로 인하여 하천의 늪지대가 배수되어 활용되고 침수지가 사라졌었기 때문이다.

### (1) 모래무더기발생과 제거작업

Tulla(1804~1825개발계획수립)의 Rhein강 개발과 함께 진행되었던 라인강개발공사는 계획이 수립된 15년이 지난후에 착공되었다. 개발공사전에 예측하지 못하였던 모래무더기가 강변좌우에 생성하므로써 당시공사를 지도하였던 관계자들을 당황하게 하였었다. 이러한 모래무더기를 제거하기 위하여 많은 연구결과 강변에서 강중심부를 비스듬히 행하는 제수제방(Buhnen 制水堤防)을 설치하였으며, 심한 곡선의과 부분의 하상은 강폭을 형단하는 하상턱과 강줄기가 직접 강변을 스치면서 일어나는 침식을 막기 위하여 유도장치를 설치하였다. 1930년전에 생성하였던 모래무더기를 강변의 유체역학적인 구조개선으로 제거하는데는 많은 투자를 차치하고라도 30년 이상의 세월이 소요되었다.

### (2) 현재의 대책

Iffezheim의 보밑에 일어나는 하상침식을 막기 위하여 1977년에 90,000m<sup>3</sup> 자갈과 모래를 투입하고 있으며 1978년 이후부터는 연간 200,000~400,000m<sup>3</sup>의 자갈과 모래를 홍수의 크기에 따라 투입하고 있다. 이렇게하여 우선 일어나고 있는 하상침식을 보충하고 있으며 강하류의 네덜란드에서는 이러한 조치이후로 하상침식이 중단되고 있으며, 한편 매년 Iffezheim 지역에서 채굴하여 투입하는데 드는 자갈모래비용이 2~3천만 마르크에 달한다. 이러한 비용을 20여년 저축하면 보 하나를 지을 수 있다고 하니 라인강중류에서 하구까지(700km) 보를 지어야 하상침식-저하문제가 해결되는 끝없는 투자에 대안이 없어 매년 임기응변으로 자갈과 모래를 Iffezheim에 있는 보 하류쪽에 투입하고 있다.

### ■ Lech-강의 개발

Lech강은 Donau강의 지류로서 Fuessen-Ausburg 사이에 연장 120km 되는 강이며 1940년에 설립된 Byern-주 전기공사(BAWAG)의 관리하에 있다. 강수위때  $Q = 30$  m<sup>3</sup>/sec., 봄에 비가 오면서 눈이 녹을때 홍수량이  $Q = 915$  m<sup>3</sup>/sec. 되는 조그마한

강인데 1870경부터 부분적인 보수공사를 하였으며 1930년경에 완전한 직강공사를 16개의 구간에 수중보(淤)를 포함 건설하여 하상을 고정시키고져 하였으나 목적을 달성하지 못하고 BAWAG의 전력생산을 목적으로 1940년부터 모든 지금까지의 강개발의 문제점을 고려한 「완전무결한」 강재개발을 시작하였다. 1954년에 Groggensee의 댐공사준공을 본후 1985년까지 새로운 다목적보 20개가 가동되고 또한 6개의 보를 이미 계획해두고 연차적으로 건설하고 있다. 총 26개의 보를 결합 Lech-강개발이 끝날 무렵에는 계획된 용량 300MW에서 연간 1400GWh의 에너지를 생산하게 되면 이것은 남한의 가장 큰 댐 3개의 연간 수력전기 생산과 비슷할 것이다. 왜 남한의 조그마한 강크기와 비슷한 이러한 강 하나에서 이렇게 많은 전력생산이 가능한가?

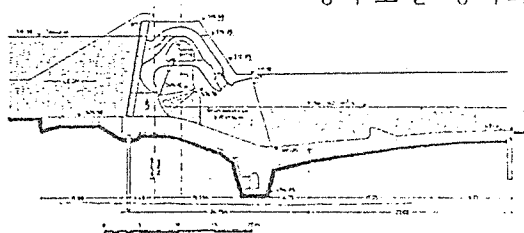
대한토목학회지(Vol.39, No.1/통권 153/1991.2)에 보고된 남한의 소수력생산 경제제후보지가 166개이며 총용량은 약 87KW이다. Lech-강이 도나우강에 합류하기 직전까지의 총연장길이가 120km정도되고 연간 강우량도 1000mm가 조금 상회하고 우리나라 강들도 또한 이 정도의 강우량을 보유할 것이다. 차이점이 많이 있겠지만은 그중에 연중강우량분포와 지형의 차이가 근본문제일 것이다. 그러나 남한의 소수력 적지 166개소의 총용량이 Lech강 26개의 현대식 다목적보의 생산량 1/3도 안된다면 특별한 사정이 있으리라 여겨진다. 그러므로 더욱더 연구를 해볼 필요성이 있다고 본다.

### 1. 계단식 저압력수력발전소(소수력발전소)

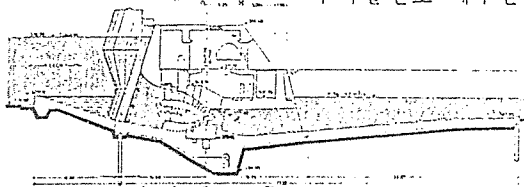
이 강의 상류에 있는 Froggen댐은 1억3천5백만톤의 저수용량(소양강댐홍수조절량의 1/3에 해당)을 보유하며 홍수저지와 연중 일정한 유량이 강으로 흐르도록 조절하여 4km에 하나씩 세워진 보에 설치된 수력발전기 가동에 모체역할을 하고있다. 이 댐하류부분에 설치된 보들에 딸린 수력발전소들의 낙차는 약 10m 정도로 설계되어 있고 최대홍수  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{sec}$ .를 처리할 수 있게 설계되어 있다. 건설비절약을 위하여 대부분의 보구

조가 같으며 싸이폰식의 소규모 홍수조절장치와 세그먼트문을 동시에 가동하여 대규모 홍수조절을 할 수 있게 되어있다. 발전기 3대가(Rohturbine) 초당 약50톤의 유량을 처리할 수 있으며 대당 4MW 용량을 보유하고 있다. 보당 건설비가 6천만마르크 소요되며 연간 약 60GWh에너지를 생산하여 판매하면 13년이내에 공사비가 상쇄된다.

홍수조절 장치의



수력발전소 내부단면



SCHNITT DURCH WEHR UND KRAFTWERK IN FLEISSICHTUNG GEGEBEN

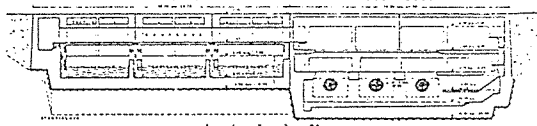


Abb. 30 Die Baukörper der Lechstaustufen 3 und 4, sowie 18 bis 22

그림 1 : 다목적 보의 구조를. 계단 Nr. 3,4,18에서 23까지의 보의 단면과 정면도

### 2. 차수벽설치

수면을 계단처럼 높일려고 하면 강변둑을 높여야 되는데 이것은 고도의 기술을 요하는 Edmo공법을 이용하여 주변의 평야보다 높은 강물이 평야로 최단거리로 흘러나오지 못하도록 차수벽을 둑속과 하상 깊숙이 설치해야만하였다. 일차적으로 I-Profil을 진동기(22ton 중량)를 이용하여 하상표면으로부터 16m 아래에 있는 누수가 적은

지층에 차수벽이 뿌리(1m 정도)를 내리게 하도록 10bar 압력과 함께 Bentonit-Zement-Suspension을 불어넣으면서 평균 20cm두께의 차수벽을 형성하고 그 위에 독을 축조하면서  $k = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  누수속도를 갖는 완벽한 차수벽을 건설하였다.

평야쪽으로는 강둑을 따라 지하수수위조절을 위하여 개울을 파놓고 평야의 배수조절을 임의대로 할 수 있게 하였다. 여러가지 문제점에 대비한 보의 시설물과 특수구조를 완비하였는데 지면관계로 서술을 생략하기로 한다.

### 3. 생태계를 위한 시설

자연보호와 생태계보호를 위하여 매 보마다 2백만마르크(원화 9억)를 투자하여 조류와 어류가 서식하도록 입체공간(그림 2)을 형성하였으며 대분의 강변을 따라 조성된 숲들은 보호림으로 지정하였고 그 주변을 식수보호지역으로 선정하여 자연의 보호는 물론 강물오염을 철저히 단속하고 있다. 泔 안의 침수지속에는 물새들의 서식에 필요한 섬이나 혹은 늪지를 형성하고 물고기들의 서식처와 특별히 산란기에 배란에 지장을 초래하지 않도록 배려와 설계와 시공에 만전을 기하였다.

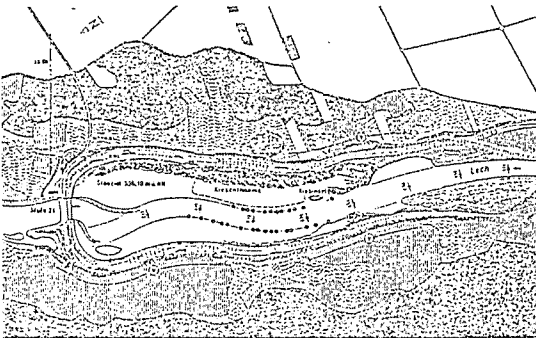


그림 2 : 어류, 조류보호를 위한 보속의 입체환경조성

해마다 조류가 다른 개발된 강주변에서는 줄어든다고 하지만 Lech강변에는 현상태를 유지하고 있다고 한다. 통일전 동독에서 돌이킬 수 없는 강오염이 알려지면서 독일환경청에서는 일차적으로 오염된 동독의 강들을 「살리는」 작업과 병행하며 세계에서 가장 환경법이 엄격한 입법안을

착수하고 있다. 알려진바로는 서독의 전범죄수의 0.2%가 환경오염과 관련되어 있다고 한다.

### 4. 효과

Lech강의 개발로 인하여 홍수조절과 전력생산 외에 계단식보 건설로 인하여 소류력(掃流力, shear stress)저하로 하상침식이 없어지고 유사퇴적문제는 완전히 해결되었으며 주변의 평야에 충분한 지하수공급이 이루어져 기름진 평야에서 많은 생산을 올릴 수 있으며 식수채취원에서 소요되는 지하수도 충분히 제공되고 있다. 강상류의 댐속에 쌓여질 자갈과 모래를 댐상단에 설치된 모래자갈채취댐을 통해서 준설하여 건설골재를 이용하고 있다. 이렇게 함으로써 골재 채취때 일어나는 각종용수 특히 식수의 오염도를 낮출수 있다. 특별한 것은 Nr.22 보에서는 Ausburg에 필요한 용수를 공급하면서 초당 4.5ton의 유량을 특별수문을 통해 방류하면서 Ossbergerturbine을 이용하여 150kw 출력의 전력을 얻은 후에 셋강을 통해 흘려보내고 있다.

### ■ 댐과 직강공사로 인한 문제점

어느 나라 없이, 특히 개발도상국에서 여러가지 도약을 위하여 시작하는 대대적인 국가사업은 강개발이라 하겠다. 인명피해방지, 식량증산과 홍수조절, 문화시설보호, 용수확보를 위하여 강의 상류계곡에 댐을 건설하고 있으며 많은 장점을 안겨다 주었으며 없으면 안될 중요한 국가-국민의 재산이며 우리나라와 같은 강우량분포가 연중 고르지 않은 계절 풍기후에 속하는 나라에서는 댐건설은 불가피하며 앞으로도 지속될 것이다.

#### 1. 하류의 범람과 잦은 「변화된」 대규모 홍수유출

일반적으로 홍수의 크기는 채수지와 강우량의 크기에 비례하지만 직강공사와 하천부지 이용극대화, 도시면적 확대등으로 최대강우량이 아닐지라도 짧은 시간내에 빗물이 강으로 모이고 빠른 속도로 강의 중,상류가 배수되어 합쳐진 강물은

하류에서 빈번한 침수현상을 유발하게 된다.

특히 많은 강우량일 경우에는 조절할 수 없는 상태를 유발하게 되며 하류의 범람피해나 제방의 파괴현상으로 그 피해가 갈수록 심화될 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 강개발후에 홍수 때 필요한 침수지를 확보하여 침수에 피해가 적은 초지를 형성하여 관리함이 홍수의 수두를 꺾는 합리적인 방법이라고 할 수 있겠다. 또한 여러 가지 이해관계 때문에 저장된 유량을 기본목적에 (홍수조절) 위배되는 활용을 하게되는 것이 문제가 되며 수자원이 부족한 우리나라에서는 주목적보다 부수적인 목적을 중요시여겨 경우에 따라서는 댐의 기능이 마비되어 홍수의 조절이 마비되는 경우가 나타날 수 있다고 본다. 이러한 문제를 보완하기 위하여서는 강의 중류나 도시 근교에 침수지를 확보하여 폭우때 표면수를 「잡아두는」 시설을 갖추어야겠지만 지면확보가 어려운 우리나라에서는 깊은 계곡에 홍수와 자갈(유사) 저지를 위한 소규모의 간단한 댐건설이 시급하다. 이러한 구조물은 그림 3에 보는 바와같이 간단한 구조물에 구멍만 몇개 뚫어 놓으면 된다. 홍수가 지나간 후에는 대부분 자갈과 모래만 쌓여 있으므로 경우에 따라서는 골재를 용이하게 얻을 수 있겠다. 이렇게 되면 다목적댐이 토사로 퇴적되어 감소되는 용적도 막을 수 있으며 식수채취원 부근에서 얻고 있는 골재채취 때문에 일어나는 오염 또한 방지할 수 있을 것이다.

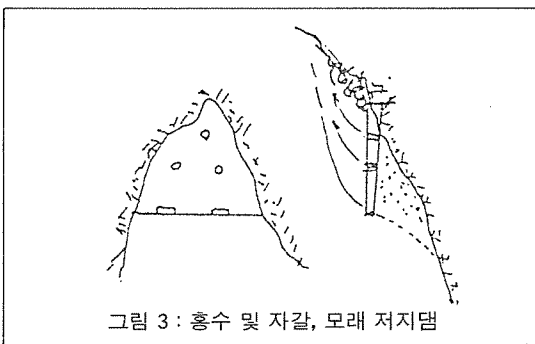


그림 3 : 홍수 및 자갈, 모래 저지댐

## 2. 하상저하와 지하수고갈현상

강상류에 댐을 건설하고 나면 잇점이 많은 동시에 문제점도 많이 있는 것은 알려진 일이지만

얼마나 자연보호를 감안한 강개발을 하느냐가 관건일 것이다. 강개발에서 생기는 문제중에 가장 심한것이 하상저하현상이다. 하상으로 움직이는 자갈과 모래의 균형이 깨어진다. 댐하류쪽에서부터 하상이 침식되어 알지못하는 기간에 돌이킬 수 없는 자연파괴와 생태계변화가 공해와 무관하게 일어나게 되어 있다. 독일의 경우 이러한 공해와 무관한 자연파괴를 보완하는데 Rhein강의 경우에는 수십년이 걸렸고 매년 엄청난 투자를 하면서 고심하고 있다.

하상이동 균형파괴는 지하수수위문제를 야기시킨다. 오늘날 지하수수위 저하현상을 촉진하는 것은 직강공사 뿐만아니라 강물의 오염으로 혹은 상수도가격 인상으로 인하여 많은 업체가 생산공장이 허가없이 지하수를 남용하거나 오염시키게 된다. 펌프로 매일 퍼내고 있는 지하수는 어디서 오고 있는지 그들은 생각할 여유가 없겠지만 사실은 표면수가 지층으로 스며들어가서 없어지는 지하수량을 보충해주어야 지하수고갈 현상이 줄어들게 된다. 하상저하와 함께 강수위저하로 강 주변의 지하수가 강으로 배수되는 현상이 심하고 직강공사후에 생긴 하천부지 혹은 늪지는 홍수때 표면수를 저장하여 지하수가 보충되는 역할을 하여야 하는데 흙을 메워 이용함으로써 지하수사정을 악화시키며, 또한 직강공사후의 강진로는 고속도로와 비교할 수 있으며 빗물이 고일 높이 없으므로 바로 강으로 모여 대수를 이루고 「고속」으로 하류로 흐른다. 마치 고속도로위에 오른 자동차의 운전수가 신바람이 나서 질주하는 모습과 비교할 수 있다. 이러한 과정에서 표면수와 강물은 「순식간」에 배수되고 지하수를 형성시킬 시간적 여유를 잃게 되어 지하수사정을 격심하게 한다. 지하수 관리면에서, 백림시의 예를 들면 : 서백림의 경우 1500 여곳에 지하수 관측소를 설치하여 주기적인 지하수변화 검사를 하며 모든 지하수사용은 엄격히 규제하고 있다. 백림은 비교적 낮은 지역이며 호수의 분포가 유럽의 어느 도시보다 많은 편이어서 지하수사정이 원만한 상태인데도 (제일 높은 산이 해발 30m 정도) 지하수 관리와 오염에 대한 방지에 만전을 꾀한다. 또

한 빙하시대 때 형성된 북유럽의 지형이 대부분 모래로 이루어져 있고 강우량분포가 우리나라와 비교할 수 없이 균일한 편이며 더욱이 모래는 지하수보충이 용이하지만 엄격한 지하수관리는 불가피하다. 참고로 백령시 전역의 모래층속에 평균 지하수 이동 속도는 5~10cm/day 이지만 우리나라와 같이 경사가 심하며 점토질인 지층속에 지하수가 고갈되면 보충되는데 소요되는 시간은 점치기 어렵다.

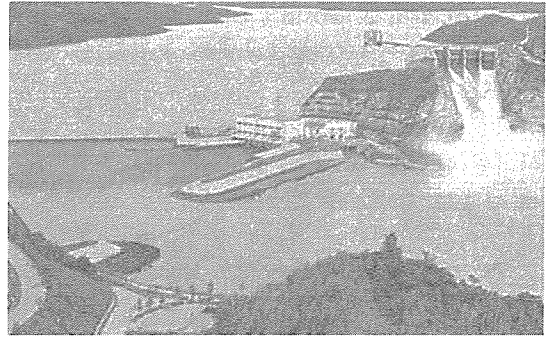
### 3. 평야의(농경지) 건조현상과 지하수분포

우리나라의 대부분의 논농사는 벼농사를 주로 함으로 2~3개월의 농사철에 눈에 표면수를 방류하여 지하수보충에 결정적인 도움을 주리라고 여긴다(이미 알려진 사실이지만, 무절제한 농약살포와 함께 병행하여 보충되는 지하수가 국민보건에 어떤 영향을 미치는지는 장기간조사와 연구를 하여야 알게 될 것이다).

지하수의 흐름의 속도나 방향은 지형과 퇴적층의 입자분포상태와 함수관계를 갖는다. 일반적으로 퇴적층평야의 경우 강물의 흐르는 방향과 평행하여 흐를때 정상적이라고 볼수 있겠다. 그와 반대로 강물흐름의 「수직」 방향으로 흐를때 지하수사정이 매우 약한 상태로 구분할 수 있으며, 이것은 지하수가 대부분 강으로 배수됨을 의미하게 된다.

#### (1) 상수원의 위치선정

식수공급은 법적으로 모든 용수공급 순위의 첫 번째로 규정하고 관리하며 식수채취원은 자연보호지역으로 엄격한 규제를 하여야 한다. 그렇게 함에도 산업발전과 모든 분야의 극대화로 말미암아 표면수(산성비를 포함하여)는 오염되게 된다. 일시적인 해결을 위하여 식수채취원을 상류로 이전하는 경우가 많다. 독일의 경우 표면수를 직접 정수하여 식수로 사용하는 예는 드물다고 하겠다. 대부분 호변 및 강변의 지하수를 양수기로 퍼올린 후에 정수를 하여 가정으로 송수한다. 지하수를 이용하면 표면수가 일차적으로 지층으로 통과하는 과정에서 많이 여과된다. 부주위로 인하여 표면수(상수원)가 오염되었을 때에 예를 들어 :



수심이 깊은 호수나 보의 수면에 뜨는 기름들은 하상을 통하여 지층 깊숙히 통과할 확률이 드물다고 하겠다. 펌퍼로 정수장까지 퍼올리는데 드는 비용은 직접 강물을 퍼올리는 것과 차이가 없다고 볼수 있으므로 앞으로 표면수를 상수원으로 하는 지역은 단기일내에 상수원 부근의 지하수이용을 권장하고자 한다. 이러한 측면에서 지하수 수위 관측과 공급을 위하여 앞에서 지적한 Lech-강개발은 좋은 본보기가 된다(이러한 강변이나 호수가의 지하수채취에 관계되는 공법이나 장비의 언급은 여기서 피하기로 한다).

### 4. 제방의 탈수분현상과 파괴위험

각종용수 이용으로 강으로 흐르는 유량은 엄청나게 줄어들고 있으며 우리나라의 경우 전기때 이 현상은 심각할 것이다. 가뭄이 지속되고 제방이 탈수분하게 되면 제방표면의 풀들이 죽거나 혹은 각종 공관이 제방속에 생길수 있으며 이러한 현상은 갑자기 상류에서 내려온 홍수 때문에 붕괴되거나 파괴될 위험이 커진다. 제방은 자체 하중이 강물쪽 수중에서도 1.5배 이상이나 되므로 역학적인 측면에서 볼때 수압에 제방이 밀려나서 파괴되는 경우는 있을 수 없다고 본다. 붕괴나 파괴는 홍수때 지진이 오지않는 가정하에, 누수로 인한 침식으로 야기된 파괴와 범람으로 독의 공기쪽부분이 씻겨나감으로써 일어나는 침식 파괴가 원인이므로 우기가 시작되기 전에 반드시 전기때 혹은 계절이 바뀔때 점검하고 보수하여야 된다. 제방 밑부분(Deichfuss)이 유속관계와 강물진로변화로 침식되어 붕괴되는 경우도 있지만 이것은 다음대목에서 언급하기로 한다.

### 5. 강개발과 생태계파괴

인구밀집과 산업발달로 인한 수요공급 확보를 위하여 댐을 건설하지만 중국 양자강상류의 댐건설로 흑한이 오며 산사태가 일어나 많은 인명, 재산피해를 입는 것을 들 수가 있다. 기후변화 뿐만 아니라 이러한 현상들은 수천년을 통하여 적응하였던 생태계에 중대한 변화를 가져다준다. 깨끗한 자연 공간에는 인간보다 낮은 등급의 생태계가 형성되며 이들은 환경조건에 그들 생명의 사활이 직결되어 있다. 강변에서 강줄기까지 이어지는 측면경사가 완만하면 수심이 얕은데서부터 깊은 곳까지 건강한 생태계가 이루어진다. 그리고 햇빛과 물속의 산소와 관계하여 미생물이 주변의 오염도를 자체정화를 할 수 있는 능력이 있다.

그림 4에서 보는 바와같이 점선부분이 직강공사나 부지확보때문에 변형되는 경우가 최근에 들어서면서 우리나라의 경우 극대화되어 간다. 결과를 보면 공해와 무관한 저등급 생태계와 어류, 조류들의 생태계는 순식간에 사라지게 된다.

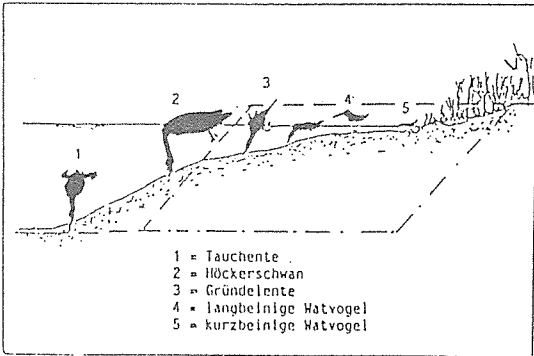


그림 4 : 강, 간척사업으로 공해와 무관한 어류, 1번에서 5번까지의 조류가 사라진다. 뿐만 아니라 부지활용으로 변화된 환경에 종전의 저등급 생태계가 파괴된다.

직강공사를 하게되면 강물의 수심(가파른 제방 등)과 유속이 인위적으로 변화되어 종전의 생태계는 파괴되고 경미한 오수의 자체정화능력마저 사라져 버린다. 저급생태계 파괴는 고급생태계(동물)는 물론 끝내는 인간에게도 배상할 수 없는 영향을 미치게 된다. 깨끗한 환경속에는 건강한

생태계가 형성되며, 그러한 환경은 주민들의 건강생활과 직결되어 있음을 알 수 있다. 백림에는 1875년까지 하수도가 없었고 1870년경에 (장)티부스로 죽는 환자수와 1920년경까지 상하수도 시설이 늘어남에 따라 티부스로 사망하는 환자가 없어져 갔음을 볼 수 있다. 생태계보호를 위하여 독일의 강개발중에는 문화의 보(洑, Kultur Wehr)라는 것을 강개발에 첨가하였고 그 효과는 좋았다. 강진로를 인공적으로 불가피하게 옮길때 생기는 종전의 강줄기를 흙으로 매우거나 초지, 논으로 활용하지 않고 종전의 수위를 그대로 유지할 수 있는 보를 설치하여 생태계의 서식처를 확보하고 보호한다는 것이다. 프랑스의 개발지역은 운하가 강줄기를 따라 건설되었고, 독일에서 개발한 구역의 운하는 종전의 강을 부분적으로 이용하면서 운하를 개설하였는데 이것이 결국 자연을 살리면서 현대의 필요에 부합하는 강개발이며 자연파괴를 최대한 방지하자는 목적이 있다.

### ■ 강개발과 관련된 기초연구의 방향

독일의 강개발은 세계에서 모델케이스로 들만한 것이 많고 환경파괴와 피해도 많았다. 그러한 과정에서 많은 경험들을 토대로 대책을 간구하고 차기의 개발에 보완을 하였으며 여기에 관계되었던 기초과학 연구도 많이 하였으나 20세기 중반으로 접어들면서 그 연구중심이 미국쪽으로 옮겨졌다. 현재에는 강물변화와 관계되는 여러가지 기초연구를 이웃나라 일본에서 진행중이며 강개발과 관계하여 연구중심이 중국으로 옮겨질 전망이다. 소련을 경유하여 다시 유럽으로 연구중심이 옮겨질 것이라고 보는 견해가 있다.

「자연에 가까운 강개발」을 위하여서는 무엇보다도 물리, 수학적 근거를 둔 여러가지 유량변화와 하상사이에 일어나는 현상을 정확히 묘사할 수 있어야겠다. 현재 볼 수 있는 강들은 수십년 동안 자연스스로가 다스리고 균형을 이루어 왔지만 그러한 균형은 인위적으로 파괴되었다. 강들은 그들의 진로변화를 수십년 혹은 수백년에 걸쳐 그들 스스로가 쌓은 퇴적층을 좌우로 혹은 강

하류로 운반하면서 지금 우리가 볼 수 있는 강줄기의 모습을 들어내고 있다. 이러한 변화현상을 관찰하는데는 시간적인 제약이 뒤따르므로 Leonardo da Vinci(1452~1519)가 유체의 여러가지 현상을 실험한 이후로, 이론이 미치지 못하는 분야는 모형실험으로 대체되었다. 모형실험이 이론이나 실제 자연의 변화하는 과정의 총괄적인 자료를 제공하지는 못하며 이론을 대신 할 수는 없는 분야가 많다. 그 분야중에 하나가 사행선 하천문제(Meander)이다. 모형실험은 유체연구분야에 발전을 가져왔으며 특별히 강개발과 관계되는 하상물질이동과 하상변화문제는 19세기 말부터 20세기초까지 유럽에서 많은 결실을 보았다.

물리학자 아인슈타인도 베를린공대 근무당시 Meander(사행선 하천)에 관하여 연구를 한 바 있고 Shields(1936, 미국인)는 베를린공대수공학연구소에서 하상물질이동(한계사항)에 관한 연구를 하였으며 스위스의 Meyer-Perter와 아인슈타인 아들(Einstein)등이 역시 하상물질 이동에 관하여 많은 연구(알프산지역의 급경사 하천에 관계하는 유사이동공식, 우리나라 강에 적합할 것으로 봄)를 취리히에 있는 ETH-대학에서 하였다. 아인슈타인 아들은 그후에 미국에 건너가서 그곳의 지역과 조건에 적합한 유사이동 계산식을 정립하고, 영국의 식민지 정책의 일환으로 인도의 관개수로의 설계와 관리를 하였던 Kennedy는 Regimtheory를 개발하여 그 당시에 상당히 공헌하였다. 또한 Lepold, Wolmann, Paker등의 학자들은 많은 북아메리카 강들의 진로와 Geometry를 통계학적으로 분석하여 하천설계에 필요한 수식을 유도하였다. 그러나 그러한 모형실험, 혹은 통계에서 유도한 공식들도 물리적인 관계식이 분명히 존재하여야 하였는데 지금까지 알려지고 있는 것은 매우 미비한 상태이다. Hickin & Nanson은 캐나다의 Beaton-River를 폭넓게 조사하여 강의 곡선반경(R)과 강폭(B)의 비율(R/B)과 강변의 이동(Expansion)에 중요한 관계도표를 발표하였다.(그림 5)

그들은 강변의 이동이 가장 심한 범위는  $3R/B < 4$ 로 구분하였다. 나의 연구에 의하면  $R/B = \pi$  (3.14)일때 가장 심한 강변의 이동이 있음을 알게

되었고 그리고 가장 이동이 적을때의 R/B의 비율은  $\pi/2 = 1.57$  이하라고 볼 수 있다.

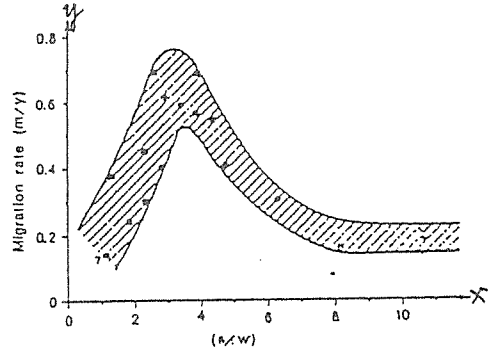


그림 5 : 강변이동과 상대곡선(R/B)의 관계도

### 1. 강물 좌우로 쌓이는 모래무더기(alternate Bars, Sand Bank)

강물은 항상 하상과 마찰하며 「일」을 하면서 하상물질(하류로) 이동시킨다. 그러한 과정에서 하상의 형태를 임의대로 변화시킨다. 그들 하상형태중에는 : Rippel, Dunes, alternate Bars, Sand bank 등이있는데 자연 혹은 인공수로에 좌우로 생성하는 모래무더기는 설계홍수를 유통시킴에 문제점을 야기시키고 경우에 따라 강물의 범람과 강물진로를 변경하여 강줄기가 강둑에 접하여 강둑 아래부분을 침식시키고 결국 강둑과피를 초래하게 되고 나아가서는, 교통에 사용되는 인공수로일 경우에는 수심이 일정하지 못하므로 내륙선 박운항에 막대한 지장을 초래한다. 이러한 현상이 라인강개발 후에 일어났을 때에 엔지니어들은 당황하였고, 우리방천(제수제방)의 건설과 강수위 유량유도장치로 소정의 효과를 보았고 독일의 많은 강변에서 흔히 볼 수 있는 오래된 구조물들이다.

우리나라의 서울주변 한강개발은 독일의 100년전 강개발과 비슷하다. 이러한 개발초안을 하였을 당시 경제적인 여건이 문제가 되었지만은 조금만 더 주의하면 근대의 유럽 강개발과 동등한 개발을 할 수 있을 것으로 본다.

### 2. 사행선 강진로(Meander)



자동차산업이 종합산업이라고 부른다면 강의 변화를 총괄한 연구대상이 사형선 강진로 변화라고 말할 수 있다. Meander의 생성에 관하여는 여러 학자들의 의견이 분분하다. Meander연구과정에서 확인하고있는 유체의 횡단진동(Transversal-Oscillation)이 작용하며 생성된다. 횡단진동을 야기시키는 요인과 관계되는 서술은 생략하기로 한다. 그외 정확한 물리수식에 근거한 Holtorff의 수식을 기초로 하여 시간과 유사량에 관계하여 강변진로를 수식으로 계산할 수 있도록 개발하는 과정에 있으며 Delft-Uni에서도 현재 Meander연구가 진행중이다.

20세기 중반에 Leopold & Wolman, Yalin등이 실험치와 통계에 의하여 개발한 관계식을 이번에 연구중에서 상대적 Meander의 이동관계식에서 이론적으로 유도하였다. 강변이 y-축이동(Expansion E)을 E로 표시하고 x-대 쪽으로 이동(Migration M)하는 것을 M으로 표시할때 강의 상대적이동은 E/M으로 표시할 수 있다. 그리고 이것은  $q_{by}/q_{bx}$  함수관계를 갖는다. 하천진로변화에 관계하는 변수들은

$$y(x,t) = f(q_{by}, q_{bx}, Q, L, h, a, R, B, ds, J, \dots) \quad (1)$$

또한 “곡선커버이론(Meander Bend-Theory)”이나 혹은 「유체진동이론 Transversal-Oscillation」에서 강진로 변경을 식 1과 연관하여 식 2와 같으며 직선 하천, 수로, 강진유도할 수 있다. 후자의 이론에서 얻어지는 이론치는 그 미분방정식은 식 2와 같다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\delta_* \sin kx \cosh jy}{1 - (k/j)\delta_* \cosh kx \sinh jy} \quad (2)$$

여기서  $q_{by}, q_{bx}$  = 하상물질이 y, x-대쪽으로 이동하는 양을 뜻하며, k, j 사형선하천의 x 및 y대의 파장계수를 각각 뜻한다.  $\delta_*$ 는 Meander 방향전환점의 경사를 뜻한다. 식 2는 단순히 보이지만 20여개의 변수를 정확히 알아야 계산된다.

기존하는 강이나 혹은 운하등의 부분적 혹은 전면적인 설계에 필요한 Meander의 파장, 파곡의 관계식은 다음과 같다.

$$L_{meander} = \pi(2a_0 + B) = \pi A_T \quad (3)$$

Alternate Bars 혹은 Sandbank의 경우는 식.3의

팔호속에 있는  $2a_0 = B$ 로 된다. 이때 모래무더기의 파장과 강폭의 관계식은 식 4와 같다.

$$L_{sandbank} = 2\pi B \quad (4)$$

그리고 강변계산관계식의 유도와 계산 및 Meander 유체역학과 전력(shear stress)분포등은 지면관계로 생략하고자 한다.

### ■ 맺음말

강개발은 어느 나라던 필연의 사업으로서 문화의 발달과 병행하여 그 시대 보다 앞서가는 강개발을 추진하여야겠다. 강줄기의 '고정과 모래무더기를 제수제방의 설치로 해결하는 데는 30여년 이상이 소요되었으며 그림 2에서 보는 지하수사정을 개선하는 데는 80여년 이상이 소요되었다.

과거와 현재 독일의 강개발경험을 분석해 본 결과 수자원개발은 사회, 문화 및 경제발전에 지대한 영향을 미쳤으며 그 반면에 여러가지 문제점들이 야기되었다. 독일등 선진국에서 1세기전에 시작하였던 초기 강개발사업중의 하나인 직강공사로 심화된 하상저하와 함수관계를 갖는 지하수고갈현상은 오늘날 우리나라에서 심각한 문제로 대두됨을 지적할 수 있으며 또한 공해와 무관한 인위적인 자연파괴가 수반하게 됨을 알 수 있다(그림 4). 독일의 경우 이러한 문제점들을 제거하고 보완하는데는 전면적인 「강유역 재개발」이 이미 반세기 전부터 불가피하여 보완되었고, 강우량분포 사정이 고르지 못한 우리나라도, 특히 다가올 식수난 해소를 위하여 고갈되고 오염(일용, 산업쓰레기매립, 폐수유출)되는, 지하수사정을 원만히 하는데 계단식 다목적(지하수보충, 홍수조절, 전력생산 및 용수확보, 생태계보호, 휴식처...) 보(淤)를 강들 유역에 건설하여 지난 30여년 동안 방치되고 중첩된 자연 및 생태계파괴를 환원시키고 보호함으로써 초기의 강개발목적을 실현하게 될 것이다.

◇이 글은 '91國內外 한국과학기술자학술회의 夏季심포지움에서 발표된 내용을 전재한 것임 ..... 편집자