

# 낙동강 유역의 강변여과수 개발 가능성

Potential for Development of Bank Filtrate in the Nakdong River Basin

## 목 차

- |         |            |
|---------|------------|
| 1. 서론   | 4. 조사결과    |
| 2. 조사지역 | 5. 요약 및 결론 |
| 3. 조사개요 | 6. 참고문헌    |

田 興 培<sup>\*1</sup>  
Jeon, Heung Bae

金 相 一<sup>\*2</sup>  
Kim, Sang Il

## ABSTRACT

In order to obtain safe drinking water, free from surface contamination, a study to determine the potential for developing a bank-filtrate system in the Iryong and Yongsan, Nakdong River Basin, Korea was conducted. The main type of aquifer in the study area is alluvial, consisting mostly of sand and gravel. The hydraulic conductivity(K) of the Iryong and Yongsan test areas were  $8.63 \times 10^{-2} \text{cm/s}$  and  $9.90 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ , respectively, indicating that these areas are satisfactory for bank filtrate production.

Pilot plants(IRPL and YSPL) were set up in Iryong and Yongsan to monitor the change in the quality of bank-filtered water and to determine the effect pumping had on the surrounding hydrogeologic system. The pilot plants operated continuously for about two months and the data obtained were used to validate the groundwater flow model. Computer simulations were conducted to predict the effects of producing bank filtrate using MODFLOW. MODPATH was also linked with the flow model to analyze particle tracking. According to the results of the model simulations and the hydrogeologic study, long-term pumping, the minimization of drawdown and the availability of uncontaminated soil and groundwater conditions for the catchment area were all important factors for successful bank-filtrate system development.

\*1 응용지질기술사, (주)도화종합기술공사 부설연구원 상무.

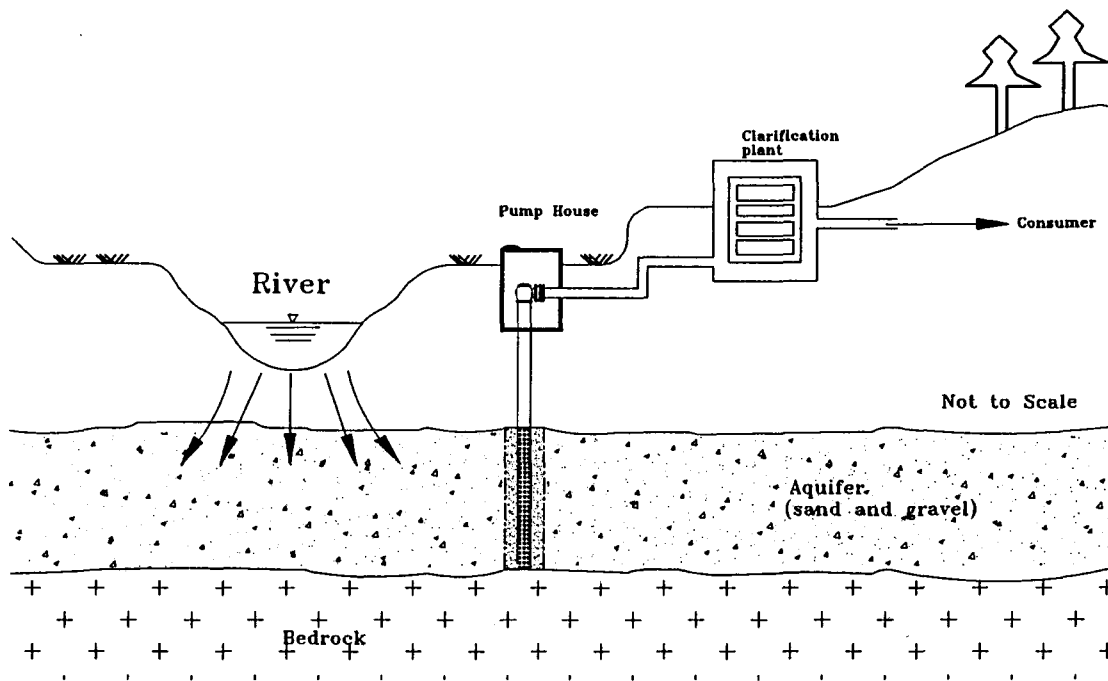
\*2 응용지질기술사, (주)도화종합기술공사 부설연구원 차장.

### 1. 서론

산업의 발달과 인구의 증가로 점차 적절한 상수원수의 확보가 어려워지고 있다. 현재 대부분의 식수는 지표수를 직접 취수하여 정수 처리하는 방식으로 공급되고 있으나 산업화로 인하여 지표수가 오염되어 감에 따라 만족할 만한 식수원을 찾는 것이 한계점에 다다른 상태이다. 물론, 상대적으로 오염이 덜된 지하수를 개발하여 사용하는 것도 좋은 방법이나, 지하수의 경우 대규모의 용수를 개발하는 데는 많은 수리지질학적 제한이 따르게 된다. 따라서 앞에서 제시된 수량과 수질의 2가지 문제점을 동시에 해결하기 위해서는 강변여과수(Bank Filtrate)의 개발이

불가피하다. 강변여과수란 <그림 1>에서 보는 바와 같이 강물(River Water)이 하상으로 침투되어 강변의 모래 층적층을 통과하여 흐르는 동안, 흡착 및 생분해 (Biodegradation) 등의 작용으로 포함되어 있던 오염 물질이 제거되어 수질이 향상된 물을 말한다.

따라서, 엄밀한 의미로 해석하면 강변에서 채취되는 토출수(Raw Water)가 모두 강변여과수는 아니며 여기에는 기존의 지하수흐름 체계로부터 포획되는 천연지하수 (Natural Groundwater)도 포함되게 된다. 토출수에서 여과수와 일반지하수의 혼합 비율은 대수층의 수리지질학적 조건, 강변에서 취수정까지의 거리, 그리고 강물의 수위 등에 따라 달라지게 된다.



<그림 1> Conceptual Diagram of Bank Filtration.

강변 여과수와 비슷한 용어로 복류수가 있다. 복류수는 강이나 하천 등의 하부 또는 측부의 투수성이 큰 지층 중에 포함되어 있는 유동성이 매우 높은 물을 말하는 데 수질 측면에서는 지표수보다 양호하고 지하수보다는 불량하며, 산출량에서는 지표수보다는 적지만 지하수보다는 훨씬 큰 특성을 갖는다. 일반적으로 복류수는 지표수체 부근에서 산출되기 때문에 천연 지하수보다는 여과수의 비율이 훨씬 크게 된다. 따라서 일부에서는 여과수와 복류수를 같은 의미로 혼용하기도 한다. 본 논문에서도 편의상 강변여과수를 광의적으로 해석하여, “강으로 부터 침투(infiltration)된 물과 강변의 천연 지하수가 혼합된 토출수”로 정의하기로 한다.

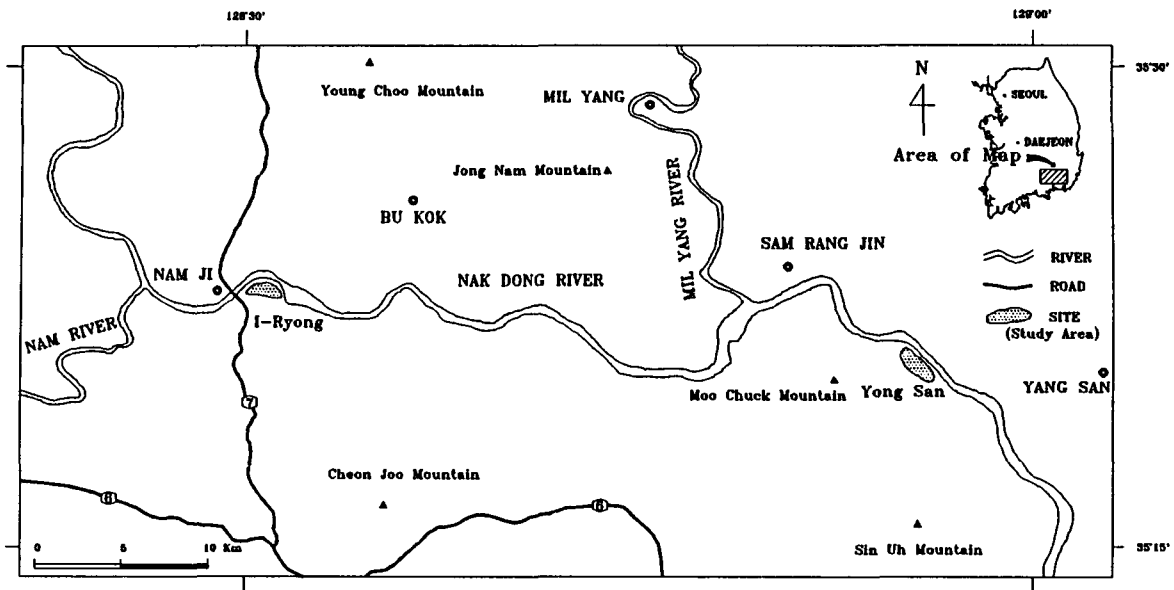
강변여과수는 라인강변에 인접한 독일, 프랑스, 네덜란드, 오스트리아 등 유럽에서 오래 전부터 식수원수로 사용되어 왔다. 독일 뒤셀도르프 정수장 (Duseldorf Waterworks)의 경우 1870년 처음 강변여과수를 생산한 이래 현재까지 130년 가까이 이러한 방식으로 물을 공급하고 있으며, 기타 대부분의 라인강 인접국들에서도 직접 취수 방식을 지양하고 지하 매질을 이용한 간접 취수 방식으로 물을 공급하고 있다 (Schubert, 1997). 유럽의 여러 나라에서 오랜 기간에 걸쳐 실증된 바와 같이 강변여과 방식은 단순한 수질 향상뿐만 아니라, 안정된 성분과 균일한 온도의 상수원수를 제공하며, 표류수의 갑작스런 수질오염 사고에 대해서도 대처할 수 있기 때문에 앞으로 국내에서도 큰 관심을 끌 것으로 전망된다. 본 논문에서는 낙동강변에 시험적으로 설치한 시험시설정(Pilot plant)의 운영 결과와 현장 지하수흐름 모델의 시뮬레이션(Simulation) 분석을 통해 새로운 수자원으로 부

각되고 있는 강변여과수의 개발 가능성을 수리지질학적으로 검토하였다.

## 2. 조사지역

조사지역은 경상남도 함안군 칠서면 이론리의 이론지구와 김해시 상동면 감로리의 용산지구로, 낙동강변의 충적층모래가 잘 발달한 하상둔치(고수부지) 지역이다 <그림 2>. 구마고속도로의 남지대교 부근에 위치한 이론 지구는 주변에 높은 산이 없는 구릉성 평지인데 반해, 낙동강본류의 하류부에 위치하는 용산지구는 하상둔치 바로 배후에 해발 200m에 이르는 산지가 위치하고 있다. 이들 두 지역은 홍수시 일부 침수되기도 하며, 현재 주변에 과수 및 밭작물이 경작되고 있다.

조사 지역 일대의 광역적인 지질은 중생대 백악기에 퇴적된 경상누층군으로 특징지을 수 있다. 이 육성퇴적누층은 주로 역암, 셰일, 사암, 이암 및 이회암의 호층으로 구성되어 있으며, 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군, 불국사관입암군으로 4대분 된다 (장기홍, 1985). 조사 지역의 주 대수층은 2개지역 모두 모래, 자갈, 실트 등으로 구성된 제4기의 충적대수층(Alluvial Aquifer)이다. 지표면은 대부분 세립~중립의 모래로 구성되어 있고, 하부로 내려감에 따라 실트 또는 점토층이 얇게 협재되어 나타나기도 하나 그 연속성은 크지 않다. 따라서 본 지역은 피압을 받지 않는 자유면대수층(Unconfined Aquifer)으로 규정할 수 있으며, 상부는 지하수면, 하부는 암반층으로 경계(Boundary)가 구성되는 One-layer Model의 적용이 가능하다. 지하수위 관리망을 이용한 지



<그림 2> Location of Study Area.

하수위 조사 결과 지하수의 흐름은 산지에서 마을을 거쳐 강쪽으로 이동되는 양상을 보여 조사 지역에서 낙동강이 이득하천 (Gaining stream) 임을 나타낸다.

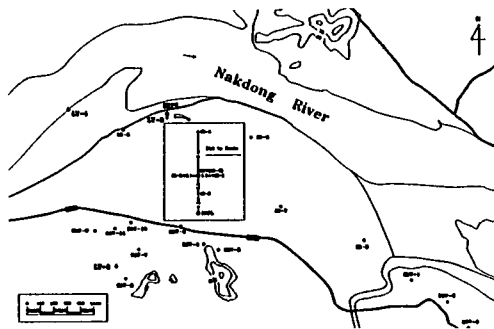
### 3. 조사개요

시험시설 (IRPL 및 YSPL)의 설치에 앞서 지하지질 상태를 파악하고 수위/수질 관리망을 구성하며 대수성시험을 실시하기 위해 관측공 및 양수정을 설치하였다. 이릉과 용산지구의 양수정과 관측공, 그리고 시험시설의 설치 위치는 각각 <그림 3 및 4>와 같다. 그림에서 IHW와 YHW는 금번 조사 전에 설치된 기존의 관측공들을 나타낸다. 관측공 (IB1~8, YB1~8)은 NX size로 지역당 8개공씩 총 16공을 설치하였으며, 심도는 위치에 따라 15m~40m로 하였다. 대수성시험시 사용하기 위한 양수정(IRPW 및

YSPW)은 이릉 40m, 용산 39m 심도로 굴착하였다. 관측공 및 양수정이 완성된 후에는 자동수위 측정기를 이용하여 양수 시험과 회복 시험으로 나누어 대수성 시험을 실시하였다. 또한 이릉지구에서는 강물과 지하수의 동위원소 특성을 파악하기 위해 강물 1개소(LY-1), 지하수 2개소(LY-2, LY-3)의 시료를 채취하여, 안정동위원소인 Oxygen-18( $^{18}O$ )과 Deuterium(D), 그리고 방사성 동위원소인 Tritium( $^3H$ )에 대하여 동위원소 분석도 실시하였다.

약 2달간의 강변여과수 취수를 위한 이릉 및 용산지구의 시험시설은 강변에서 각각 82m와 123m 떨어진 곳에 설치되었으며 심도는 이릉지구(IRPL) 42.0m, 용산지구 (YSPL) 39.0m로 하였다. 시험시설 가동중 현장에서는 관측공들을 이용하여 일정시간 간격으로 수위 변화를 관측 하였으며, 이동식 수질측정기를 이용해 여과수와 강물의 온도, 전기전도도, TDS 및 염도를

측정하였다. 또한, 3일 간격으로 물시료를 채취하여 먹는 샘물 기준으로 실내수질시험도 실시하였다.

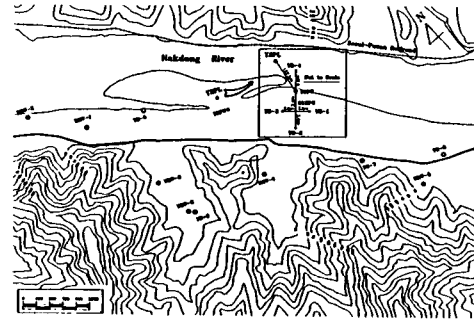


〈그림 3〉 Location of IRPL and Observation Wells.

마지막으로, 강변여과수 개발로 인한 주변수리권에 미치는 영향을 예측하기 위해, 각종 현장시험과 실내실험을 통하여 얻어진 자료를 이용하여 조사 지역의 지하수 환경을 적절히 시뮬레이션 할 수 있도록 지하수흐름 모델을 개발하였다.

사용된 전산코드는 미국지질연구소(USGS)에서 개발한 3-D Finite-Difference Flow Model인 MODFLOW이며, Particle Tracking 분석을 위해 MODPATH도 이용하였다. 개발되어진 모델은 현장 측정치를 이용하여 정상상태(Steady state)에서 Calibration되었으며, 민감도 분석(Sensitive Analysis)을 통해 입력자료(Input Parameter)들의 영향도 검토 되었다. 모델의 검증 을 위해서는 60일 간의 현장 수위자료와 Transient computer simulation 결과가 비교 되었다. 이렇게 Calibration과 민감도 분석이 끝난 모델은 각각의 지역에서 5개의 취수정을 이용하여 총 5,000m<sup>3</sup>/d의 여과수를 개발한다고 가정할

때의 수위강하를 예측하는데 이용되었다.



〈그림 4〉 Location of YSPL and Observation Wells.

#### 4. 조사 결과

##### 4-1 대수성 시험 (Aquifer Test)

양수정(IRPW 및 YSPW) 과 관측공( IB-1, 2, 3, 4 및 YS-1, 2, 3, 4)에서 측정된 시간-수위강하 자료를 이용하여 AQTESOLV 전산 Code로 구한, 각 지역의 수리전도도(K) 및 투수량계수(T)는 다음 〈표 1〉 과 같다.

##### 4-2 동위원소분석 (Isotope Analysis)

동위원소 분석을 위한 시료채취는 Figure 3에 나타난 바와 같이 이룡지구의 강변에서 LY-1을, 양수정(IRPW)에서 LY-2, 그리고 마을 뒷산의 정상부근에서 LY-3을 채취하였다. LY-3은 마을의 공동식수원으로 개발한 깊이 127m인 심정의 시료로서, 강으로부터 지표수 유입이 전혀 없는 전형적인 지하수의 특성을 알아보기 위해 선정되었다. 본 조사의 동위원소 분석결과는 〈표 2〉와 같다.

<표 1> 대수성시험 결과 (환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996)

| 구 분              | 양 수 시 험                    |             | 회 복 시 험                    |             | K평균<br>(Cm/sec)         | 비 고   |
|------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------------------|---|
|                  | T<br>(m <sup>2</sup> /min) | K<br>(cm/s) | T<br>(m <sup>2</sup> /min) | K<br>(cm/s) |                         |   |
| 이<br>룡<br>지<br>구 | IRPW                       | 0.168       | 1.02 × 10 <sup>-2</sup>    | 0.126       | 7.64 × 10 <sup>-3</sup> | Q=900m <sup>3</sup> /day<br>양수시험:1450분<br>회복시험:700분 |
|                  | IB-1                       | 1.151       | 6.98 × 10 <sup>-2</sup>    | 2.864       | 1.74 × 10 <sup>-1</sup> |   |
|                  | IB-2                       | 0.639       | 3.87 × 10 <sup>-1</sup>    | 0.684       | 4.15 × 10 <sup>-2</sup> |   |
|                  | IB-3                       | 1.455       | 8.82 × 10 <sup>-1</sup>    | 2.559       | 1.55 × 10 <sup>-1</sup> |   |
|                  | IB-4                       | 1.742       | 1.06 × 10 <sup>-1</sup>    | 2.816       | 1.71 × 10 <sup>-1</sup> |   |
|                  | 평균                         | 1.031       | 6.25 × 10 <sup>-2</sup>    | 1.810       | 1.10 × 10 <sup>-1</sup> |   |
| 용<br>산<br>지<br>구 | YSPW                       | 0.523       | 2.47 × 10 <sup>-2</sup>    | 0.965       | 4.56 × 10 <sup>-2</sup> | Q=280m <sup>3</sup> /day<br>양수시험:1450분<br>회복시험:320분 |
|                  | YB-1                       | 2.110       | 9.96 × 10 <sup>-2</sup>    | 2.762       | 1.30 × 10 <sup>-1</sup> |   |
|                  | YB-2                       | 2.529       | 1.19 × 10 <sup>-1</sup>    | 2.703       | 1.28 × 10 <sup>-1</sup> |   |
|                  | YB-3                       | 2.449       | 1.16 × 10 <sup>-1</sup>    | 1.710       | 8.07 × 10 <sup>-2</sup> |   |
|                  | YB-4                       | 2.450       | 1.16 × 10 <sup>-1</sup>    | 2.793       | 1.32 × 10 <sup>-1</sup> |   |
|                  | 평균                         | 2.012       | 9.50 × 10 <sup>-2</sup>    | 2.187       | 1.03 × 10 <sup>-1</sup> |   |

<표 2> 동위원소 분석결과 (환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996)

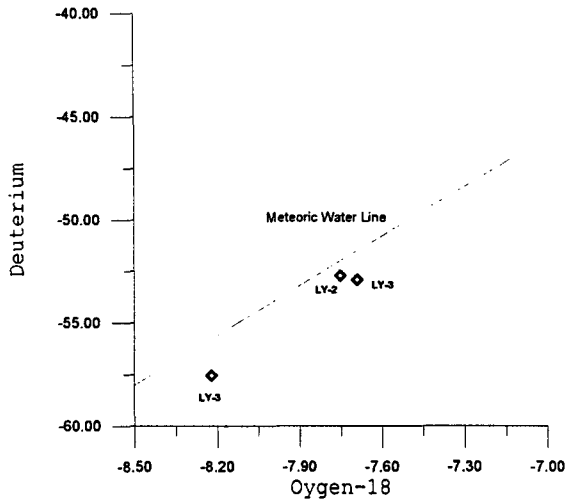
| 분석항목<br>Sample No. | Oxygen-18<br>(%) | Deuterium<br>(%) | Tritium<br>(TU) |
|--------------------|------------------|------------------|-----------------|
| LY-1               | -7.69            | -52.93           | 8.80            |
| LY-2               | -7.75            | -52.72           | 7.80            |
| LY-3               | -8.22            | -57.54           | 1.70            |

앞의 표에서 보는 바와 같이 산소와 수소의 동위원소는 강물(LY-1)로부터 산쪽(LY-3)으로 갈수록 가벼워지는 경향을 보이고 있다. 즉, 지표수보다 지하수의 δ<sup>18</sup>O, δD가 작음을 의미한다. 다만 LY-1과 LY-2는 산소와 수소의 동위원소 분석 오차(각각 0.1% 과 1%)를 고려할 때 동위원소 성분이 유의 (significantly different) 하다고는 볼 수 없으며, 따라서 양수정에 있는 물은 동위원소 기원상 강물과 같은 종류임을 알 수 있다. 이것은 수리지질학적으로 양수정과 강물 사이에 활발한 교류가 있음을 지시한다. 김규한과 中井信之

(1988)에 의하면 남한 순환수 (Meteoric water)의 δ<sup>18</sup>O와 δD의 동위원소 성분은 각각 -5.2 ~ -10.3 % 및 -39.5 ~ -72.7%로 밝혀져 본 조사 지역의 지표수와 지하수는 모두 순환수 기원으로 생각할 수 있다. <sup>18</sup>O 와 D의 상관관계를 그래프로 나타내면 <그림 5>와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 본 조사지역의 δD와 δ<sup>18</sup>O는 Craig(1961)에 의해 발표된 Meteoric water line(δD = 8δ<sup>18</sup>O + 10) 보다 약간 아래에 위치하는 특징을 나타낸다.

3중수소(Tritium, H<sup>3</sup>)는 일반적으로 상층대기권에서 대기와 우주선의 상호작용에 의해 자연적으로 생성되나 인위적인 핵무기 등의 폭발에 의해서도 생성될 수 있다. 자연상태의 강수에서 H<sup>3</sup> 농도는 12.26년을 반감기로 붕괴하여 낮은 수치를 나타낸다. 그러나 1953-1962년 사이의 집중적인 핵실험 결과 인공적으로 생긴 H<sup>3</sup>가 대



〈그림 5〉 Correlation between Deuterium and Oxygen-18

기중에 다량 공급되어 대기와 천연수의  $H^3$  농도는 그 이전의 수천 배에 달하게 되었다. (김규한, 1991) <표 2>의 동위원소분석 결과는 심정 지하수(LY-3)의 경우 낮은 Tritium 농도를 갖고 있으나 강물(LY-1)과 강물에 인접한 지하수(LY-2)는 이보다 훨씬 높은 값을 나타내, Tritium 농도만으로도 지하수와 지표수가 명확히 구분될 수 있음을 보여준다.

이와 같이 LY-1과 LY-2에서 높은 수치가 나타나는 것은 1950년대의 핵실험 영향을 받은 까닭이며 따라서 LY-1과 LY-2는 45년이 채 안된 비교적 젊은 물이며, LY-3은 적어도 45년 이상된 지하수라는 것을 유추할 수 있다. 산소 및 수소 동위원소 분석에서와 마찬가지로 LY-1과 LY-2에서의  $H^3$  농도도 분석오차를 고려하면 서로 상이하다고 볼 수 없다. 즉, 양수정과 강물 사이에는 수리적인 혼합상태가 이루어졌음을 의미하는데 이것은 낙동강이 유량에 따라 때로는

이득하천이 되고 때로는 손실하천이 되어 수시로 지하수의 흐름방향이 변동되고 있음을 시사하기도 한다.

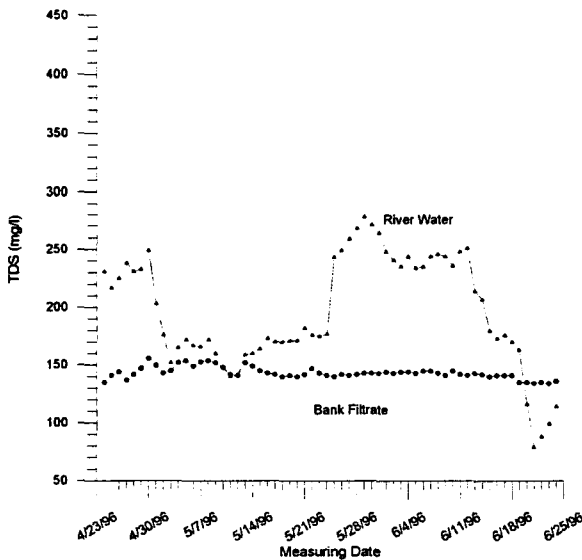
#### 4-3 시험시설 (Pilot Plant) 의 운영

##### 1) 이룡지구

1996년 4월 24일부터 6월 24일까지 62일간 2,000  $m^3/d$ 로 취수할 때 나타난 IRPL에서의 수위강하는 최대 11.16m, 최소 5.8m, 평균 8.03m로 관측되었다. 주변관측공 (IB-1, 2, 3 및 4)들의 수위는 시험시설의 수위 변동 (fluctuation)과 유사한 양상을 보였다. 최대수위강하량은 시험시설과 가장 가까운 위치에 있는 IB-2에서 1.08m로 나타났으며, IB-1, IB-3, IB-4에서는 각각 0.91m, 0.79m, 0.62m로 관측되었다. 이와 같은 결과로 미루어 조사 지역은 투수성이 매우 크며, 따라서 2,000  $m^3/d$ 로 양수시 취수로 인한 영향이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 한편, 시험시설 가동중의 수질 변화상태를 파악하기 위해 배출되는 여과수 및 강물을 대상으로 현장 및 실내 수질시험을 실시하였다. 여기서 여과수란 앞에서 언급한 바와 같이 강바닥으로부터 침투되어 나온 강 유입수와 수위강하로 포획된 주변 지하수를 모두 포함한다.

현장에서 Conductivity meter를 이용하여 측정한 현장 수질시험 결과에 의하면 평균적으로 온도는 약  $3^{\circ}C$ , 전기전도도(Conductivity)는  $110\mu S/cm$ , 염도(Salinity)는 0.1%, TDS(용존고형물)는  $50mg/l$  정도 여과수가 강물에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 일반적으로 오염된 물이 용존 오염물질에 의해 높은 전기전도도와 TDS값을 갖는다는 사실을 고려할 때 여과수의 수질이 보다 양호함을 나타낸다. 현

장 측정치 중의 TDS 변화를 시간 경과별로 그래프로 도시하면 <그림 6>과 같다. 그림에서 지표수는 측정일에 따라서 변동이 크나 지하수는 측정기간 동안 거의 일정한 값을 보여주어 강변 여과수 취수방식이 지표수의 일시적인 수질악화에도 안전하게 대처할 수 있는 수자원 개발방법을 보여준다. <그림 6>에서 TDS가 6월 21일 경에 갑자기 감소한 것을 볼 수 있는데 이것은 이 시기에 현장에 내린 강우의 영향때문이다. Conductivity는 여과수와 강물에서 모두 TDS와 동일한 양상으로 변화하였다.



<그림 6> TDS Change with Time in IRyong

현장수질시험과 병행하여 시험시설에서 배출되는 물시료를 2-3일 간격으로 채취하여 총 25회에 걸쳐 실내수질시험도 실시하였다. <표 3>은 강물 및 여과수의 주요성분에 대한 채취 날짜별 농도를 나타낸 것이다. 이 표에 의하면 여

과수는 강물에 비해 색도, 탁도, 황산이온, 과망간산칼륨 소비량 등이 크게 낮은 수치를 보여주는 반면, 질산성질소가 4배나 높게 검출되었고, 철, 망간, 아연, 경도 등도 강물보다 높게 나타났다. 이중 질산성질소는 시간이 경과함에 따라 적은 폭으로나마 감소되는 경향을 나타냈다. 이와 같이 질산성질소가 높게 검출된 것은 인근에 있는 과수원으로 부터의 농업활동에 의한 지하수오염 때문이며, 시간이 지남에 따라 강물이 유입되면서 지하수가 희석되어 농도가 감소된 것으로 생각된다. 한편, 농약류는 조사 지역 부근에서 작물을 경작하고 있음에도 불구하고 검출되지 않았다.

## 2) 용산지구

2,100m<sup>3</sup>/d의 양수율로 1996년 4월 23일부터 6월 24일까지 63일간 취수할 때 나타난 YSPL의 수위 강하량은 최대 5.60m, 최소 2.10m, 평균 4.15m로서 이룡지구보다 적은 값을 보여준다.

이와 같이 양수량이 비슷한데도 불구하고 수위강하가 적게 일어난 것은 일차적으로 용산지구의 투수성이 보다 양호하기 때문으로 생각할 수 있으나, 시험시설이 강쪽으로 돌출된 사루(Sand bar)에 위치하기 때문에 삼면에서 물이 공급될 수 있어 충전(recharge) 측면에서 유리하다는 것도 또다른 요인이 될 수 있다. 주변관 측공 YB-1, 2, 3 및 4의 최대수위강하량도 각각 0.23m, 0.25m, 0.20m, 0.23m로 매우 적은 값을 나타냈다.

현장수질시험 결과에 의하면 온도는 여과수가 약 3°C 정도 낮으나 전기전도도, 염도 및 TDS는 강물에 비해 오히려 크게 나타났다. 이러한 결과는 바닷물의 역류로 설명될 수 있다.



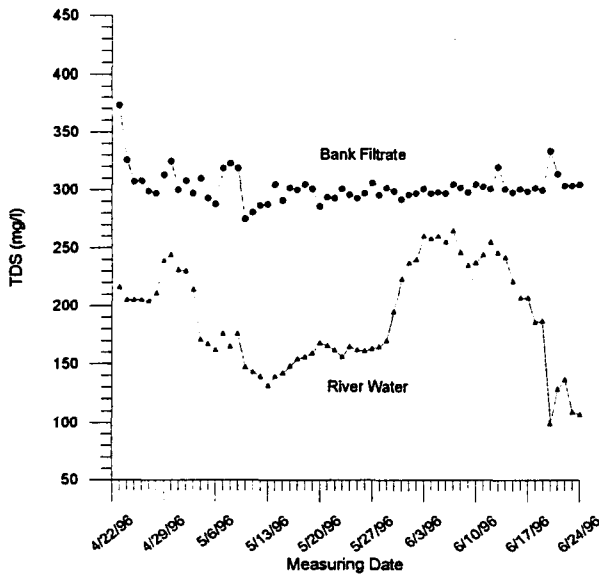
| 채취일                  | 4/24 |      | 4/26 |      | 4/29  |      | 5/2   |      | 5/5   |      | 5/8  |      | 5/10 |      | 5/13 |      | 5/15 |      | 5/17 |      | 5/20 |      | 5/23 |      | 5/27 |      | 5/29 |      | 5/31 |      | 6/3  |      | 6/5  |    | 6/7  |      | 6/10 |      | 6/12 |    | 6/14 |    | 6/17 |  | 6/19 |  | 6/21 |  | 6/24 |  |
|----------------------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|------|----|------|----|------|--|------|--|------|--|------|--|
|                      | 구분   | BF   | RW   | BF   | RW    | BF   | RW    | BF   | RW    | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF | RW   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF | RW   | BF | RW   |  |      |  |      |  |      |  |
| 강변외곽수                | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05  | 0.04 | 0.05  | 0.05 | 0.05  | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | ND   | 0.02 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | ND   | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.15 | 0.15 | ND | 0.94 | 0.12 | 0.09 | 0.06 | 0.07 |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 철산성 철수               | 10.0 | 3.9  | 3.9  | 15.5 | 14.5  | 14.8 | 15.5  | 2.4  | 14.5  | 14.1 | 14.1 | 15.1 | 13.8 | 13.3 | 2.5  | 13.1 | 13.3 | 13.5 | 13.2 | 13.4 | 13.1 | 3.4  | 12.8 | 13.7 | 12.4 | 14.3 | 11.9 | 11.9 | 12.9 | 3.9  |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| pH                   | A    | A    | A    | A    | A     | A    | A     | A    | A     | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A  | A    | A    | A    | A    | A    | A  | A    | A  | A    |  |      |  |      |  |      |  |
| 탁도                   | 15   | 7    | 9    | 20   | 30    | 18   | 7     | 20   | 5     | 5    | 5    | 7    | 13   | 17   | 27   | 9    | 9    | 12   | 12   | 12   | 12   | 17   | 12   | 15   | 10   | 12   | 7    | 8    | 10   | 20   |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 대장균                  | P    | P    | N    | P    | P     | N    | N     | P    | N     | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N    | N  | N    | N    | N    | N    | N    | N  | N    | N  | N    |  |      |  |      |  |      |  |
| 염소이온                 | 17   | 37   | 23   | 22   | 17    | 14   | 17    | 20   | 22    | 24   | 21   | 20   | 21   | 17   | 23   | 21   | 20   | 23   | 60   | 24   | 25   | 35   | 26   | 26   | 27   | 25   | 19   | 18   | 18   | 20   |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| KMnO <sub>4</sub> 배량 | 8.5  | 18.2 | 0.8  | 8.3  | 6.3   | 7.0  | 0.7   | 11.0 | 0.7   | 1.4  | 1.6  | 1.6  | 0.3  | 0.3  | 9.2  | ND   | 0.3  | 2.2  | 25   | 2.5  | 3.0  | 14.2 | 2.2  | 2.4  | 0.9  | 1.9  | 1.5  | 1.8  | 1.2  | 13.9 |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| TDS                  | 420  | 422  | 226  | 388  | 427   | 326  | 244   | 314  | 236   | 238  | 298  | 299  | 275  | 250  | 284  | 270  | 270  | 290  | 276  | 276  | 280  | 295  | 290  | 280  | 250  | 290  | 270  | 270  | 280  | 280  |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 경도                   | 80   | 86   | 780  | 44   | 111   | 38   | 104   | 70   | 106   | 102  | 104  | 110  | 108  | 86   | 104  | 104  | 110  | 112  | 112  | 104  | 96   | 100  | 100  | 100  | 102  | 102  | 110  | 108  | 108  | 84   |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 황산이온                 | 47   | 104  | 39   | 40   | 37    | 36   | 39    | 62   | 38    | 37   | 36   | 35   | 39   | 58   | 35   | 36   | 36   | 36   | 36   | 43   | 99   | 35   | 39   | 35   | 39   | 40   | 36   | 35   | 33   |      |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 동                    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND    | ND   | ND    | ND   | ND    | ND   | ND   | 0.02 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND | ND   |  |      |  |      |  |      |  |
| 아연                   | 0.07 | ND   | 0.05 | 0.03 | 0.10  | 0.16 | 0.06  | ND   | 0.04  | 0.08 | 0.03 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | ND   | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | ND   | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.11 | ND   | 0.10 | 0.13 | 0.14 |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 철                    | ND   | ND   | 0.16 | 0.65 | 1.10  | 0.53 | 0.77  | 0.34 | ND    | 0.58 | 0.14 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | ND   | 0.72 | 0.53 | 1.16 | 0.51 | 0.31 | 0.05 | 0.47 | 0.63 | 0.18 | 0.62 | ND   | 0.21 | 0.33 | 0.07 |      |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 망간                   | 0.45 | ND   | 0.38 | 0.35 | 0.31  | 0.30 | 0.28  | ND   | 0.28  | 0.27 | 0.29 | 0.28 | 0.28 | 0.29 | ND   | 0.31 | 0.29 | 0.32 | 0.30 | 0.30 | 0.27 | ND   | 0.26 | 0.28 | 0.30 | 0.30 | ND   | 0.27 | 0.27 | ND   |      |      |      |    |      |      |      |      |      |    |      |    |      |  |      |  |      |  |      |  |
| 알루미늄                 | ND   | ND   | 0.03 | 0.14 | 0.04  | 0.03 | 0.03  | 0.53 | ND    | ND   | 0.04 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND | ND   |  |      |  |      |  |      |  |
| 불소                   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND    | ND   | ND    | ND   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND | ND   |  |      |  |      |  |      |  |
| 중류액                  | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.010 | ND   | 0.002 | ND   | 0.005 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND | ND   | ND | ND   |  |      |  |      |  |      |  |

BF: Bank Filtrate, RW: River Water, A: Adequate, P: Positive, N: Negative, ND: Non-Detective)

〈표 3〉 이릉지구 강변외곽수 개발 가능성 (환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996)

1987년 낙동강 하구둑이 완공되기 전에는 하구에서 44km나 떨어진 경남 삼랑진까지 바닷물이 올라왔으며, 용산지구와 인접해 있는 물금 취수장에서도 바닷물 때문에 취수가 중단된 사례가 종종 있었다. (조선일보, 1996.3.1) 따라서 이와 같이 전기전도도, 염도 및 TDS가 높게 나타난 것은 바닷물의 침입에 의한 염분이 아직까지도 지층 중에 남아있기 때문이다. 시추 및 착정조사시에도 해성점토 및 조개껍질 등이 채취되었는데 이러한 것도 바닷물이 역류하여 들어왔었다는 사실을 뒷받침해 준다.

현장수질 시험의 TDS 변화를 그래프로 도시하면 <그림 7>과 같다.



<그림 7> TDS Change with Time in Yongsan

그림에서 강물은 측정일에 따라서 변동이 크나, 여과수는 시간에 상관없이 성분이 안정되어 있음을 알 수 있다. 이릉지구에서와 같이 강물과

여과수의 전기전도도는 모두 TDS와 동일한 양상으로 변화하였다. 주요 성분에 대한 실내 수질 시험 요약표는 <표 4>와 같다. 실내수질시험 결과에서는 여과수가 강물에 비해 질산성질소, 색도, 탁도, 황산이온, 과망간산칼륨 소비량 등이 크게 낮은 수치를 보여준다. 그러나 염소이온은 농도가 평균 113.5 mg/l로, 음용수 기준을 초과하지는 않으나 강물 (평균 27.8 mg/l) 보다 약 4배나 큰 값을 나타낸다. 이와 같이 여과수에서 염소이온 농도가 높게 검출된 것은 앞에서 언급한 바와 같이 과거 이 지역이 바닷물에 노출되었기 때문이다. 한편 이릉지구와는 달리, 여과수에서 철, 아연 등의 금속성분의 농도는 미미하다.

#### 4-4 컴퓨터 시뮬레이션

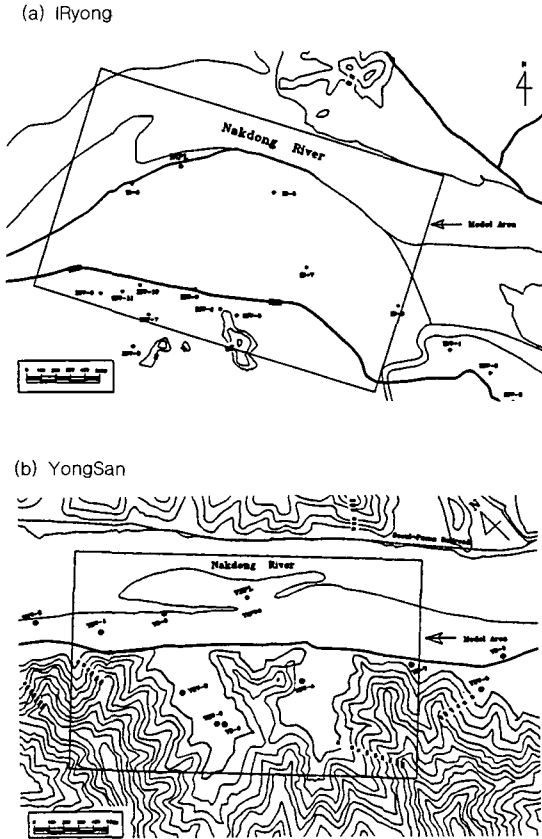
##### 1) 모델개요

이릉과 용산지구의 모델링 위치는 <그림 8>과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 이릉지구와 용산지구의 모델링 범위는 모두 2400m × 1500m 로서 면적은 3.6Km<sup>2</sup> 이다. 두 지구의 Grid System은 112개의 Column과 46개의 Row로 구성되며 전체 활성셀 (Active Cell)은 이릉 5007, 용산 4989개에 이른다. Model grid-spacing의 범위는 3×3m로부터 50×50m에 이르는데 이 간격은 취수정 부근에선 촘촘하게 배치되었고, 주변 경계부로 갈수록 점차 증가 되었다. 이릉과 용산지구 모두 Model area의 북쪽경계부는 강을 시뮬레이션하기 위해 Specified-Head Boundary로 설정하였고, 나머지 3경계부는 Specified-Flux Boundary로 구성 하였다.

〈표 4〉 용산지구 신탄수질시험 요약표 (환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996)

| 채취일                  | 4/23  |      | 4/26 |      | 4/29 |      | 5/2  |      | 5/5  |      | 5/8  |      | 5/10  |      | 5/13 |      | 5/15 |      | 5/17 |      | 5/20 |      | 5/23 |      | 5/27 |      | 5/29 |      | 5/31 |      | 6/3  |      | 6/5  |      | 6/7  |      | 6/10 |      | 6/12 |      | 6/14 |     | 6/17 |  | 6/24 |  |
|----------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|--|------|--|
|                      | BF    | RW   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | RW   | BF   | RW   | BF    | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | RW   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF   | BF  | RW   |  |      |  |
| 강변여과수                | ND    | 0.04 | ND   | 0.04 | ND   | 0.04 | ND   | 0.04 | ND   | ND   | 0.02 | ND   | 0.01  | 0.1  | 0.4  | 0.5  | 0.8  | 0.8  | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 2.6  | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.1  | ND   | ND   | ND   | 0.21 | 0.08 | 0.27 | 0.35 | 0.27 | 0.36 | 0.14 | 0.12 |      |     |      |  |      |  |
| 신탄수질                 | 0.3   | 3.2  | 0.2  | 0.6  | 0.8  | 0.7  | ND   | ND   | ND   | 2.1  | 0.1  | 0.1  | 0.4   | 0.5  | 0.8  | 0.8  | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 2.6  | ND   | ND   | ND   | 0.1  | ND   | ND   | ND   | 0.2  | 1.7  | 0.9  | 0.1  | 1.2  | 0.2  | 3.6  |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 맛                    | A     | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A     | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    |      |     |      |  |      |  |
| 냄새                   | A     | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A     | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    |     |      |  |      |  |
| 색도                   | 3     | 10   | 3    | 5    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 3    | 7    | 3    | 3     | 3    | 3    | 3    | 4    | 10   | 15   | 13   | 3    | 4    | 3    | 3    | 3    | 4    | 3    | 3    | 4    | 5    | 3    | 12   | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    |      |     |      |  |      |  |
| 탁도                   | A     | 9    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | 11   | A    | A    | A     | A    | A    | A    | 3    | A    | A    | 16   | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | 5    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    | A    |     |      |  |      |  |
| 대장균                  | P     | P    | N    | P    | P    | P    | P    | P    | N    | N    | N    | N    | N     | P    | P    | N    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | N    | P    | N    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | P    | N   |      |  |      |  |
| pH                   | 7.6   | 7.9  | 7.8  | 7.8  | 7.7  | 6.8  | 7.5  | 7.6  | 7.9  | 7.8  | 7.9  | 7.8  | 7.9   | 7.9  | 8.3  | 8.4  | 8.3  | 8.4  | 7.8  | 7.8  | 8.5  | 8.3  | 8.0  | 8.0  | 8.5  | 8.3  | 8.0  | 8.0  | 8.1  | 7.7  | 7.6  | 7.7  | 7.8  | 7.5  | 7.7  | 7.9  | 7.0  |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 염소이온                 | 168   | 38   | 134  | 125  | 126  | 101  | 103  | 26   | 110  | 136  | 100  | 100  | 101   | 129  | 123  | 20   | 123  | 124  | 84   | 124  | 77   | 79   | 41   | 113  | 80   | 113  | 120  | 117  | 14   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| KMnO <sub>4</sub> 용량 | 0.2   | 14.6 | 3.5  | 1.0  | 0.7  | 2.4  | 4.5  | 4.8  | 3.9  | 4.2  | 3.6  | 2.3  | 2.4   | 15.6 | 3.1  | 2.6  | 3.8  | 4.4  | 3.2  | 4.1  | 11.7 | 3.3  | 5.4  | 3.2  | 5.4  | 3.2  | 2.8  | 3.4  | 13.8 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| TDS                  | 278   | 398  | 388  | 268  | 196  | 244  | 245  | 288  | 232  | 218  | 264  | 286  | 290   | 275  | 290  | 246  | 258  | 268  | 254  | 240  | 290  | 260  | 250  | 260  | 260  | 260  | 290  | 280  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 경도                   | 64    | 88   | 920  | 26   | 38   | 40   | 26   | 60   | 38   | 36   | 40   | 41   | 50    | 50   | 88   | 52   | 50   | 44   | 50   | 50   | 54   | 106  | 43   | 46   | 48   | 40   | 52   | 70   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 형산이온                 | 39    | 87   | 34   | 30   | 32   | 27   | 48   | 53   | 28   | 31   | 29   | 35   | 25    | 30   | 53   | 25   | 28   | 25   | 26   | 28   | 32   | 99   | 26   | 26   | 25   | 27   | 29   | 28   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 동                    | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.02 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   |      |     |      |  |      |  |
| 아연                   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   |     |      |  |      |  |
| 철                    | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.10  | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | ND   | 0.08 |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 망간                   | 0.09  | ND   | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09  | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.10 | ND   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |  |      |  |
| 알루미늄                 | ND    | 0.06 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.07 | 0.07 | 0.07 | ND   | ND   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   |     |      |  |      |  |
| 불소                   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.4 |      |  |      |  |
| 물투명                  | 0.002 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.003 | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   |     |      |  |      |  |

(BF: Bank Filtrate, RW: River Water, A: Adequate, P: Positive, N: Negative, ND: Non-Detective)

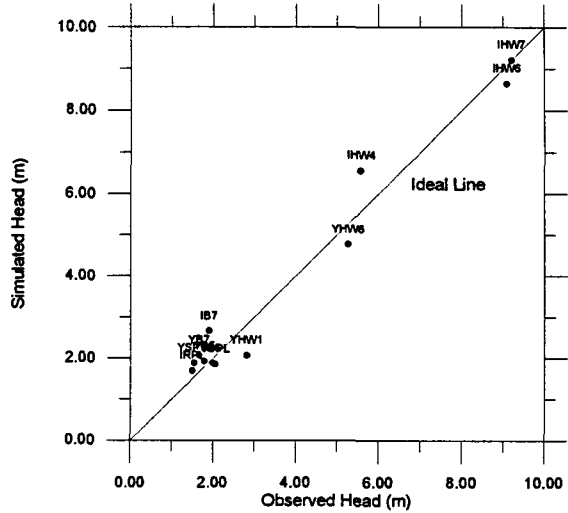


〈그림 8〉 Model Area.

2) Calibration

Groundwater flow Model은 시험시설 가동 전의 현장 수위자료와 Steadystate의 Simulated Head의 비교를 통해 Calibration되었다. 〈그림 9〉는 steady state에서 이룡지구 6개의 Target (IRPL, IB6, IB7, IHW4, IHW6, IHW7) 및 용산지구 6개의 target (YSPL, YSPW, YB5, YB7, YHW1, YHW6)들에 대한 simulated head와 observed head간의 비교를 보여준다. 그림에서 x축은 현장에서 측정된 수위를, y축은 컴퓨터로 시뮬레이션된 수위를

나타낸다. 이론적으로 현장측정치와 컴퓨터 계산값이 완전히 일치할 시는 모든 관측지점에서 수위가  $y=x$ 의 직선상에 위치하게 된다.



〈그림 9〉 Correlation between Observed and Simulated Head (Steady State).

〈그림 9〉는 이룡과 용산의 Target들이 어느 한 방향으로 편향됨이 없이 대체적인  $y=x$ 의 trend를 갖고 있음을 보여준다. 통계처리결과 이룡과 용산의 Residual Standard Dev. / Observed Range in Head의 비는 각각 0.064 및 0.114로 나타나 Calibration이 비교적 양호하게 이루어 졌음을 지시한다. Steadystate 에서의 model inflow와 Model outflow에 대한 전체적인 물 수지(water balance)분석결과는 〈표 5〉와 같다.

3) 민감도분석

구축된 Model에 있어서 각 Parameter들의 상대적인 중요도와 입력 data 및 boundary conditions의 불확실성(Uncertainty)을 평가하기 위하여 Calibration된 모델의 민감도분석(Sensitivity analysis)을 실시하였다. 민감도 분

〈표 5〉 Steadystate Groundwater budget for Iryong and Yongsan.

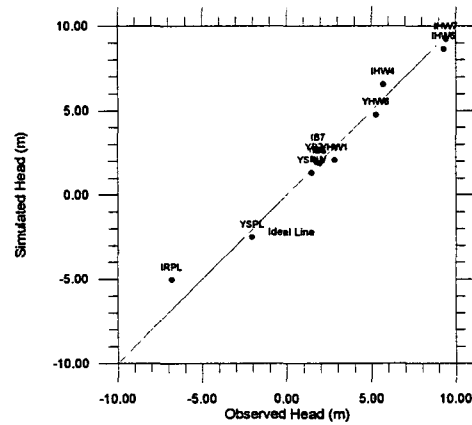
|         | Inflow Rate (m3/d)         | Outflow Rate (m3/d)       | Percent Discrepancy(%) |
|---------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| IRyong  | Leakage from River=0.16863 | Discharge to River=839.40 | -0.04                  |
|         | Recharge=838.91            | Total Outflow=839.40      |                        |
|         | Total Inflow=839.08        |                           |                        |
| YongSan | Leakage from River=8.2786  | Discharge to River=948.24 | -0.07                  |
|         | Recharge=939.32            | Discharge to River=948.24 |                        |
|         | Total Inflow=947.60        |                           |                        |

석에서는 주요 input parameter들의 값을 일정한 율로 독립적으로 변화시키면서 Simulated head와 Observed head 값의 차이인 Residual을 점검함으로써 모델의 민감도를 평가하였다. 이룡 및 용산지구 모델의 민감도 분석 결과는 〈표 6〉과 같다.

4) Model Validation

모델의 검증(Validation)을 위해 시험시설 가동시의 수위관측 자료를 이용하여 컴퓨터 계산

결과와 비교하였다. 검증시에도 Calibration에서와 동일한 각 지구 6개씩의 Target을 이용하였다. 〈그림 10〉은 두달간의 시험시설 가동을 막 끝낸 시점에서 simulated와 observed head 간



〈그림 10〉 Correlation between Observed and Simulated Head (Transient)

의 비교를 보여준다.

그림에서 보는 바와 같이 대부분의 target에서

〈표 6〉 Results of the Sensitivity Analysis (Steady state)

(RSS: Residual Sum of Squares)

| Site | Parameter |         |        | Sensitivity Statistics |           | Sensitivity Rank |
|------|-----------|---------|--------|------------------------|-----------|------------------|
|      | Parameter | Zone    | 증가계수   | RSS                    | RSS변화율(%) |                  |
| 이룡   | Base      |         |        | 1,802                  | 0         |                  |
|      | K         | 1       | 1.3    | 1,721                  | -4.5      | 5                |
|      | K         | 2       | 1.3    | 3,979                  | +120.8    | 2                |
|      | K         | 3       | 1.3    | 1,512                  | -16.1     | 4                |
|      | Sy        | 1       | 1.3    | 1,802                  | 0         | 6                |
|      | Porosity  | 1       | 1.3    | 1,802                  | 0         | 6                |
|      | Recharge  | 1       | 1.3    | 12,947                 | +618.5    | 1                |
|      | Boundary  | No-flow | 경계의 제거 | 2,554                  | +41.7     | 3                |
| 용산   | Base      |         |        | 1,132                  | 0         |                  |
|      | K         | 1       | 1.3    | 1,459                  | +28.9     | 2                |
|      | K         | 2       | 1.3    | 1,249                  | +10.3     | 3                |
|      | K         | 3       | 1.3    | 1,790                  | +58.1     | 1                |
|      | Sy        | 1       | 1.3    | 1,132                  | 0         | 6                |
|      | Porosity  | 1       | 1.3    | 1,132                  | 0         | 6                |
|      | Recharge  | 1       | 1.3    | 1,065                  | -5.9      | 5                |
|      | Boundary  | No-flow | 경계의 제거 | 1,021                  | -9.8      | 4                |

는 결과가 서로 잘 일치되나 제일 하부의 IRPL에서는 다소 차이가 발생하고 있다.

이와같이 IRPL에서 simulated head가 observed head 보다 높게 나타나는 것은 Finite-Difference Model이 정호 또는 정호 인근에서는 실제적인 수위강하(drawdown)를 정확히 시뮬레이션 할 수 없는 한계를 갖고 있기 때문이다 (Lima and Olimpio, 1989).

5) Particle Tracking 분석

IRPL과 YSPL 주변에 40개의 입자(Particle)을 설치하고 이들의 이동을 역으로 추적한 Reverse Particle Tracking 결과는 <그림 11>과 같다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 시험시설에서 양수되는 대부분의 물은 강으로부터 공급되며 마을쪽에서의 유입은 매우 미약하다. Particle Tracking 분석결과에 의하면 이룡과 용산지구에서 배출되는 여과수 중 강물이 차지하는 비율은 각각 80%와 2.5%로 나타났다.

6) 시뮬레이션 결과

IRPL 과 YSPL의 측방으로 100m 간격의 취수정을 4개씩 추가하여 지역당 5개의 정호에서  $Q=1,000\text{m}^3/\text{day}$  씩 총  $5,000\text{m}^3/\text{day}$ 의 용수를 개발할 때 주변 수리권에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다.

**A** 이룡지구

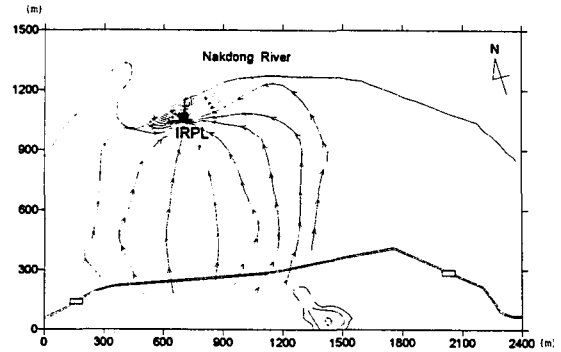
① Steady state

<그림 12>에서 보는 바와 같이 대부분의 지역에서 0.5m 이상의 수위강하가 일어나며, 정호장(well field) 으로부터 1Km 정도 떨어진 마을 중앙의 도로까지 2.0m의 수위강하 등고선이 확장되어 있다.

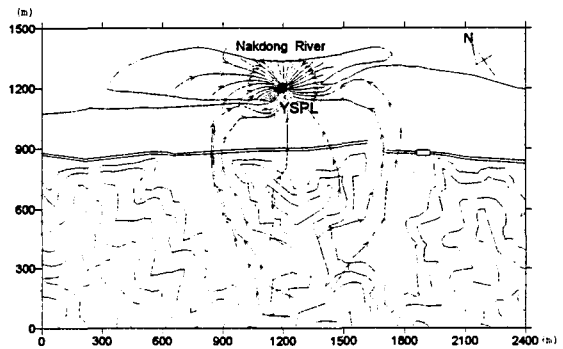
② Transient state

40개의 Time Step을 이용하여 2년간 취수시

(a) IRyong



(b) YongSan



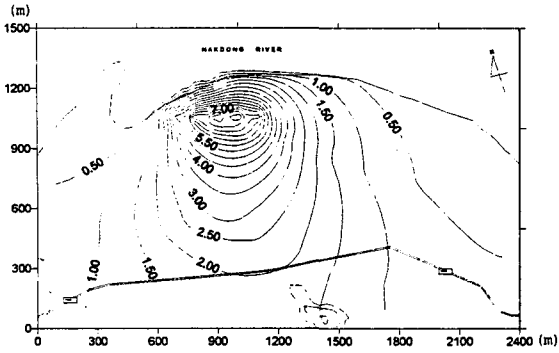
<그림 11> Particle Tracking Analysis

의 수위강하를 주요 Time Step 에 대하여 나타내면 <그림 13>과 같다. Steady state에 비해 수위강하가 적으며, 2년간의 취수에도 불구하고 정상상태(Steadystate)에는 이르지 못하고 있음을 볼 수 있다.

**B** 용산지구

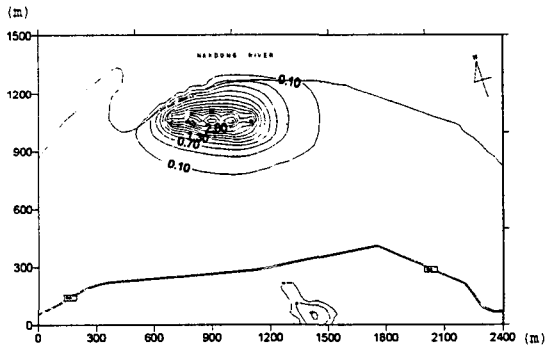
① Steady state

이룡지구에 비해 영향원이 멀리 퍼져 나가지 않음을 볼 수 있다 <그림 14>. 이것은 정호장이 강쪽으로 돌출된 사주에 위치하기 때문에 나타

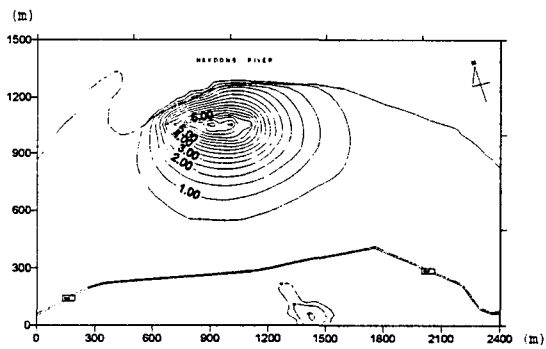


<그림 12> Steady-State Multiple Well Simulation (Iryong)

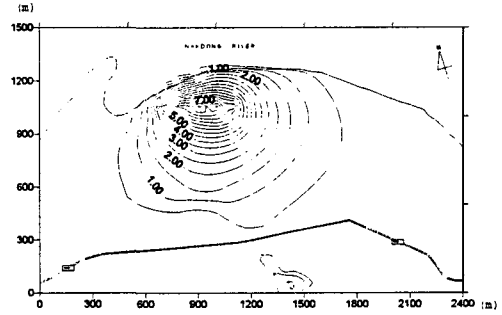
(a) Time Step = 1(18days)



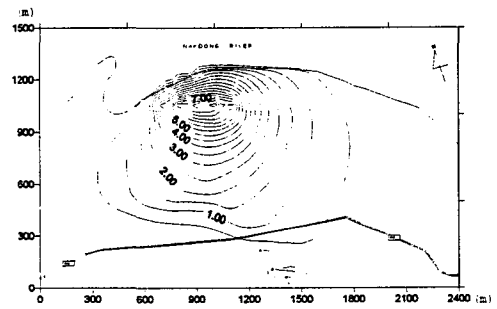
(b) Time Step = 10(183days)



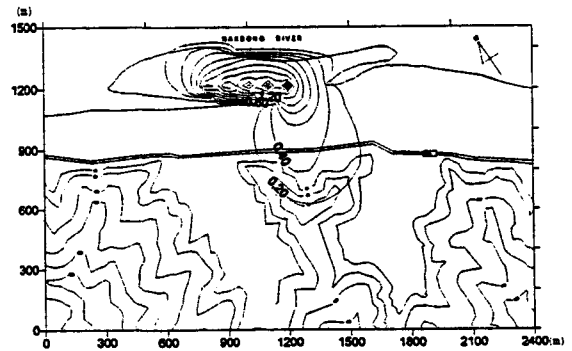
(c) Time Step = 20(365days)



(d) Time Step = 40(730days)



<그림 13> TransientState Multiple Well Simulation (Iryong)



<그림 14> SteadyState Multiple Well Simulation (YongSan)

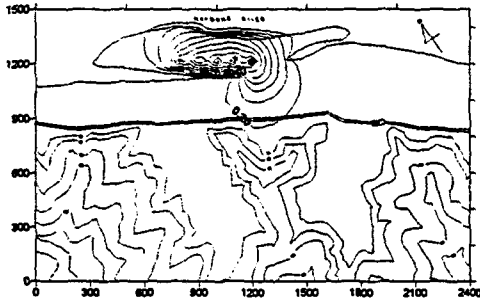
난 현상이다. 사주의 뿌리부분으로는 영향원이 일부 퍼져 나갔으나 수위강하는 크지 않다. 따라서 용산지구에 <그림 14>와 같이 취수정을 배치

할시는 채수에 따른 주변수리권에 미치는 영향은 크게 염려하지 않아도 된다.

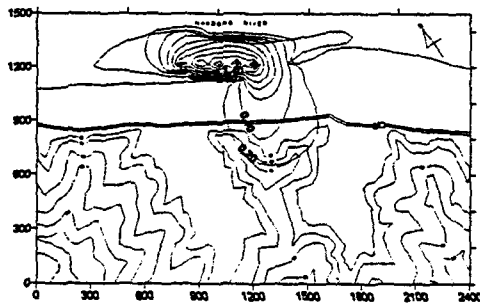
② Transient state

이룡지구에서와 같이 40개의 Time Step을 이용하여 지하수위 강하를 2년간 시뮬레이션하였다. 주요 Time Step별 수위강하는 <그림 15>와 같다. 이룡지구와는 달리 2년 후에는 거의 정상

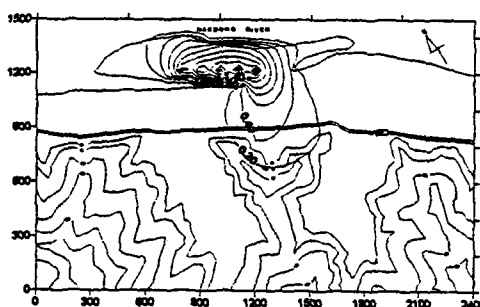
(a) Time Step = 3(54days)



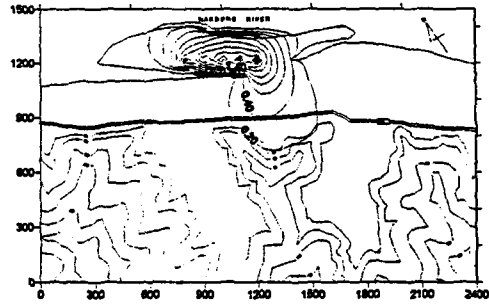
(b) Time Step = 10(183days)



(c) Time Step = 20(365days)



(d) Time Step = 40(730days)



<그림 15> TransientState Multiple Well Simulation (YongSan)

상태에 도달됨을 볼 수 있다.

5. 요약 및 결론

1) 낙동강변의 이룡과 용산지구에 각각 강변 여과수개발 시험시설 IRPL 과 YSPL을 설치하여 약 두 달간 장기취수를 함으로써, 강변여과수의 수질변화와 장기 양수로 인한 주변 수리권에 미치는 영향을 조사하였다. 각 지구별 조사결과는 다음과 같다.

A 이룡지구

① 2,000 m<sup>3</sup>/d의 양수율로 취수할 때 나타난 수위강하는 취수정(IRPL)에서 최대 11.16m, 주변관측공에서는 최대 1.08m로 관측됐다.

② Conductivity meter로 현장에서 수질을 측정 한 결과, 온도는 약 3°C, Conductivity는 110µS/cm, 염도는 0.1%, TDS는 50mg/l 정도 여과수가 지표수에 비해 낮은 값을 나타냈다. 이와 같이 여과수의 수질이 강물에 비해 양호한 것은 강물이 지층을 통과 하는 동안 충전모래층에서의 여과(filtration)작용 및 주변 지하수와의 희석(dilution)이 있었기 때문이다.



③ 실내수질시험 결과에서는 여과수가 강물에 비해 색도, 탁도, 황산이온, 과망간산칼륨 소비량 등이 크게 낮은 수치를 보여주는 반면, 질산성질소가 기준치를 초과하여 검출됐다. 이와 같이 여과수에서 질산성질소가 높게 나타난 것은 인근 과수원의 농업활동에 의한 지하수오염에 기인된 것으로 생각되며, 시간이 지남에 따라 강물 유입수와 혼합으로 인하여 농도가 다소 감소하는 양상을 보였다.

#### **B** 용산지구

① 2,100 m<sup>3</sup>/d의 양수율로 취수할 때 나타난 최대 수위강하는, 취수정(YSPL)에서 5.6m, 주변관측공에서 0.64m로 측정됐다. 이것은 이룡지구의 수위강하량보다 훨씬 낮은 수치로 양수량이 서로 비슷하다는 점을 고려할 때, 용산지구의 투수성과 충전(Recharge) 여건이 보다 양호함을 나타낸다.

② 현장수질측정결과, 전기전도도, 염도 및 TDS가 강물보다 여과수에서 오히려 높은 값을 나타냈다. 이렇게 여과수에서 전기전도도 및 염도가 높게 검출된 것은 과거 이 지역이 바닷물에 노출되어, 지층중에 염소이온이 상당량 축적되었기 때문이다. 이와같은 사실은 시추 및 착정 조사시에도 확인되었다.

③ 실내수질시험 결과에서는 여과수가 강물에 비해 질산성질소, 색도, 탁도, 황산이온, 과망간산칼륨 소비량 등이 크게 낮은 수치를 보여주나, 염소이온 농도는 평균 113.5 mg/l로 강물보다 약 4배나 큰 값을 보여준다.

2) 현장조사와 실내실험을 통하여 얻은 이룡과 용산지구의 수리지질학적 정보를 이용하여 현장모델 (Site-Specific Model)을 디자인하고 Calibration하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의하면,

5개의 정호에서 각각 Q=1,000 m<sup>3</sup>/day 로 730일간 양수할 때 1m 이상의 수위강하가 발생하는 지역은 취수정을 중심으로 이룡은 1,000m까지, 용산은 이보다 훨씬 적은 100m 떨어진 지점까지로 예측되었다. Steady State의 시뮬레이션 결과는 이보다 훨씬 수위강하가 크게 나타났다. 이룡지구의 경우 정호장 으로부터 1Km 정도 떨어진 마을 중앙의 도로까지는 2m의 수위강하가 발생하는 것으로 나타나 장기적인 측면에서는 취수에 따른 영향이 주변에 미칠수 있음을 말해준다. 다만, 정호장을 사주에 배치한 용산지구의 경우는 Steady State 에서도 취수정으로부터 180m 이상 떨어진 곳에서는 0.6m 이하의 수위강하만이 발생해 수위강하에 따른 문제는 발생하지 않을 것으로 생각된다.

3) 시험시설에서 배출되는 물 중에 강으로부터 침투된 유입수와 배후 지역으로부터 포획된 천연지하수의 비(Ratio)를 Particle Tracking Analysis를 통하여 계산하였다. 이 결과에 의하면 시험시설에서 배출되는 전체 배출수중에서 강으로부터 유래한 침투수의 비율은 이룡지구에서는 80%, 용산지구는 이보다 조금 많은 82.5%로 밝혀졌다. 그러나 Reverse Particle Tracking에 의한 이와 같은 비율추정은 배후 지역으로부터의 충분한 수량 공급이 전제된 것으로 만약 장기 양수로 인해 배후 지역의 지하수 공급량이 이에 미치지 못할 경우 배출수의 대부분은 강으로부터 유입되게 된다. 동위원소 분석 결과에서도 양수정에서의 배출수가 강물과 동위원소 성분상 상이함을 나타내지 않는데 이것은 여과수가 대부분 강물로부터 기원됨을 뒷받침해준다.

4) 결론적으로, 본 연구의 여러 결과들 (충적

대수층의 높은 투수도 및 일부 항목들에서 나타난 수질향상 등)은 낙동강변의 강변여과수개발에 대한 밝은 가능성을 제시해 준다. 다만, 이릉과 용산지구의 경우에서 볼 수 있는 바와 같이 취수지 자체의 오염문제와 추후 여러개의 정호를 이용한 장기취수시 인근 지역에 나타날 수 있는 수위강하에 대한 대책이 중요한 현안으로 부각되었다. 따라서 본 연구의 경험을 토대로 추후 본격적인 강변여과수 개발시 이상적인 입지조건을 제시하면,

- A. 강변여과수 개발시설 주변의 토양 및 지하수의 오염이 심각하지 않은곳 (반드시 지하수 및 토양 오염 조사가 선행되어야 함),
- B. 대수층이 강물(지표수)과 수리적 연계성을 갖고 있으며 투수성이 큰 곳 ( $10^{-1} \sim 10^{-2}$

cm/s 정도),

- C. 가능하면 강변여과수개발로 인한 주변 수리권에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 강 중간에 위치한 섬이나, 둔치 주변을 준설하여 인공 사주를 만든 곳 등이다.

이 밖의 고려 사항으로서 강물의 지하침투 속도를 크게 떨어뜨릴 수 있는 실트 등의 퇴적이 활발한 곳, 강물(지표수)의 수질이 매우 불량한곳, 유로변경 가능성이 있는 곳, 그리고 하상골재채취지역등 개발예정지구는 피하여야 한다. 그러나 이러한 여러 조건에도 불구하고 낙동강은 하상계수가 매우 크기 때문에 대부분의 강변에 넓은 하상둔치를 형성하고 있어 강변여과수개발을 위한 부지 선택의 폭은 여전히 넓다고 할 수 있다.

## 6. 참고문헌

1. Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, Science, 133, pp.1702-1703.
2. Lima, V.D. and Olimpio, J.C., 1989, Hydrogeology and Simulation of Ground-WaterFlow at Superfund-Site Wells G and H, Woburn, Massachusetts, USGS Water-Resources Investigations Reports 89-4059, Boston, Massachusetts, 99p.
3. Schubert, J., 1997, Experience with Bank Filtration for the Public Water Supply in Duseldorf, Germany. International Environmental Symposium in Commemoration of the 50th Anniversary of Yeungnam University, 204p.
4. 김규한, 中井信之, 1988, 남한의 지하수 및 강수의 안정동위 원소. 지질학회지, 24-1, pp. 39-46.
5. 김규한, 1991, 동위원소 지질학. 민음사, 서울, 552p.
6. 장기홍, 1985, 한국지질론. 민음사, 서울, 270p.
7. 조선일보, 1996. 3. 26, 환경연재 기사: 바다를 살리자 <11>. 서울.
8. 환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996, 부산·경남지역 복류수 및 강변여과수개발 타당성조사 보고서. 63p

(원고 접수일 1997. 7. 4)