

한강수계 수질측정망 개선을 위한 목적 지향 설계 방안에 관한 연구

왕수균* · 나은혜 · 박석순†

*부경대학교 환경 · 해양대학 환경탐사공학과 · 이화여자대학교 공과대학 환경학과

(2005년 1월 20일 접수, 2005년 4월 28일 채택)

Object-oriented Design for Water Quality Monitoring Networks in the Han River System

Sookyun Wang* · Eun Hye Na · Seok Soon Park†

*Department of Environmental Exploitation Engineering, College of Environmental and Marine Science and Technology, Pukyong National University · Department of Environment Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT : Since late 1970s, water quality monitoring had been performed in Korea by various agencies according to their own needs and objectives. Lacking of consistency in principles, such diverse operation has been producing difficulties in management of information on water quality parameters. These difficulties resulted from the fact that the expansion of monitoring networks had been based not on systematic methodology with considerations on scientifically established planning objectives but on personal experiences and subjective judgments in locating monitoring stations. This study aimed, therefore, to develop a selection methodology for locating monitoring stations to provide various informations on water quality to satisfy various monitoring objectives such as understanding short and long term trends of water quality, monitoring violations to water quality standards, identifying external causes and sources affecting water quality changes, supporting utilization of water resources, examining short-term variations in water quality through a concentrated investigation, estimating pollution loads from each unit watershed, supporting water quality modeling, and establishing informative systems for water resources management. Also, we applied the proposed methodology and presented an improved expansion plan for water quality monitoring networks in the Han River.

Key Words : Water Quality Management, Monitoring Network, Monitoring Objectives, Object-Oriented Design, Han River

요약 : 우리나라에서는 1970년대 후반 이후 여러 기관의 상이한 필요성과 측정목적에 따라 별도의 측정망에서 수질측정이 이루어져 왔으며, 이러한 수질측정망의 분산된 운영으로 인한 일관된 측정 원칙의 결여는 수질자료의 관리에 많은 어려움을 야기하고 있다. 이는 과거 수질측정망의 확대 과정에서 과학적인 측정지점 선정 원칙이 결여된 채 수질 악화로 인한 관리의 필요성 증대에 따라 관리자의 경험과 주관적 판단에 의해 이루어졌기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 장단기 수질변화 경향의 파악, 수질환경기준 위반사항 조사, 수질변화를 야기하는 외부 영향 파악, 용수이용 지원, 특정시기의 수질변화 규명 등 전통적인 측정망 운영 목적과 함께 오염총량관리제 시행에 따른 배수구역별 오염부하량을 산정, 과학적인 수질정책 수립을 위한 수질모델 적용 지원, 물관리정보화 지원 등 새로운 물관리 환경 변화에 따른 운영 목적에 대하여 이를 만족시킬 수 있는 수질자료 생산을 위한 수질측정망의 측정지점 선정방법을 개발하고, 이를 한강수계에 적용하여 수질측정망의 개선 확충 방안을 제시하고자 하였다.

주제어 : 수질관리, 측정망, 측정목적, 목적지향 설계, 한강

1. 서론

수질측정망은 전국 하천 및 호소 등 수질보전대상 공공수역에 대한 수질현황을 종합적으로 파악하여 수질변화 추세를 파악하고 이미 집행된 주요 정책 사업의 효과를 분석하여 장래 수질보전정책수립을 위한 기초 자료를 확보하기 위해서 운영된다.¹⁾ 우리나라에서는 환경보전법이 제정된 1970년대 후반부터 수질측정망 단위의 정기적 수질측정이 이루어지기 시작하였으며, 1980년대 이후에는 환경부(당시 환경청)와 시·도 보건환경연구원 그리고 한국수자원공사

등 다양한 기관에서 각각의 측정 목적에 따라 정기 또는 부정기적인 수질측정을 실시하였다. 그러나 이러한 수질측정망의 분산된 운영은 측정지점의 중복이나 측정망별 측정간격의 불일치 등으로 인해 효율적인 수질자료 생산 및 관리에 많은 어려움을 야기하게 되자, 1992년에는 여러 기관에서 독자적으로 운영해 온 수질측정망을 통합하여 중복조사지점과 측정기관을 조정하게 되었다.

이 후 수질오염이 우려되는 지역이 확대됨에 따라 1993년에는 1,348개였던 수질측정지점이 1998년에는 1,540개, 2004년에는 1,886개 지점으로 확충·운영되고 있다. 그러나 과거 수질측정망의 확대 과정은 과학적으로 수립된 측정목적에 따른 체계적 설계 방법에 기초한 것이라기보다는 수질 악화로 인해 관리의 필요성 증대에 따라 관리자의 경

† Corresponding author
E-mail: ssp@ewha.ac.kr
Tel: 02-3277-3546

Fax: 02-3277-3275

협과 주관적 판단에 의해 이루어져왔다. 따라서 현재 운영되고 있는 측정망은 수계 관리를 위해 요구되는 다양한 수질 정보를 효율적으로 생산하고, 최근 오염총량관리제도, 유역통합관리제도, 물관리 정보화 등과 같은 새로운 제도와 기술의 도입에 따른 수질자료의 필요성을 충족하는데 많은 문제점을 내포하고 있다.²⁾ 이러한 현행 수질측정망의 문제점을 개선하기 위해서는 측정목적과 측정위치, 측정횟수 및 시기에 대한 전반적인 재검토가 요구되며, 이 중 과학적인 측정목적의 정립과 이에 따른 측정지점의 위치 선정이 가장 기본적인 개선사항이라고 할 수 있다.

최근까지 수질측정망 설계에 관한 국내·외 연구는 활발하게 이루어지지 않았다. 이는 수질측정망에서 다루는 수질 항목이 대상 수체에 따라 다양할 뿐만 아니라, 각 수질 항목에 따라 영향인자가 상이하기 때문이다. 또한 이러한 영향인자는 하천 주변의 환경요인에 따라 쉽게 영향을 받기 때문에 급속하게 변화하는 하천의 주변 환경이 측정지점의 중요도를 계속적으로 변화시키기 때문이다. Ning and Chang (2001)은 다목적 최적화 접근법(Multi-objective optimization approach)과 전문가를 대상으로 한 설문조사의 결과를 이용하여 과학적인 수질측정망 설계 방법을 제안한 바 있다. 김(2003)은 측정망의 설치 목적별 세부 기준과 이에 대한 가중치를 바탕으로 금강수계내의 수질자동측정망 추가 설치에 따른 우선순위를 분석하였다. 유(1995)는 환경오염측정망 구축에 원격통신을 활용하는 방안을 제시하였으며, 강(1997)은 영산강 수계에서의 수질측정망에 관한 연구를 통하여 최적 채수 계획을 제안한 바 있다.

본 연구는 대상 수계의 수질 상태를 적절히 파악하기 위한 수질측정망의 본래 목적과 함께 새롭게 도입되는 물관리 제도와 기술에 대한 원활한 지원이 가능하도록 수질측정망에 대한 합리적인 설계 기법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 수질측정망의 목적과 목적에 부합하는 측정지점 설계에 요구되는 기본 원리를 제시하였으며, 제안된 설계 기법을 남·북한강 수계를 대상으로 적용하여 현재 운영되고 있는 측정망의 문제점을 개선하기 위한 새로운 수질측정망을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역

한강은 한반도 중부에 위치하여 강원, 충청, 경기, 서울을 거쳐 서해로 유입되는 우리나라 제1의 하천으로 총 유역면적이 26,000 km², 유로연장은 발원지를 기점으로 약 515 km에 이른다. 한강은 수도권을 비롯하여 경기, 충북, 강원권에 거주하는 2천만 주민에게 각종 용수를 공급하는 상수원으로 중요한 역할을 담당하고 있으며, 이러한 관리의 필요성 증대에 따라 2004년 현재 한강 수계에서는 하천수 196개소, 호소수 34개소, 상수원수 92개소, 농업용수 66개소, 도시관류 및 공단배수 10개소 등 총 398개 지점의 수질측정망이 운영되고 있다.¹⁾

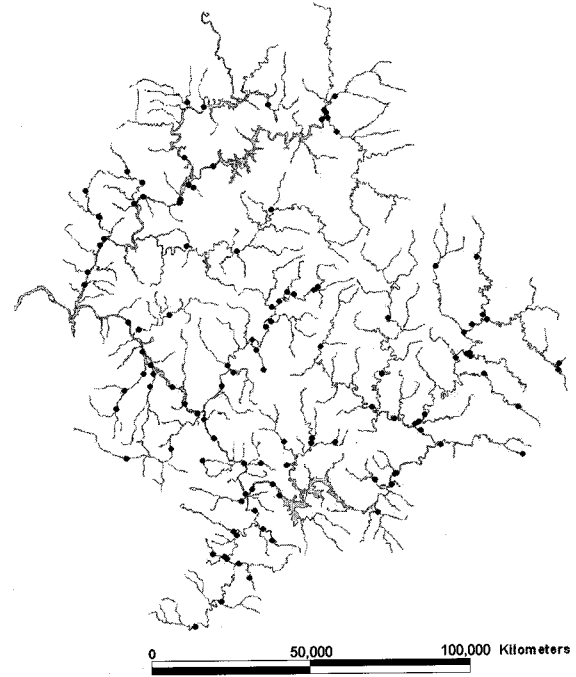


Fig. 1. Water quality monitoring stations in the South and the North Branches of the Han River.

본 연구에서는 한강 수계 중 팔당호 상류 부분에 위치하고 있는 남한강과 북한강 수계를 대상으로 하천수 수질측정망의 측정지점을 설계하였다. 한강의 본류 수계인 남한강은 강원도 삼척시 금대산에서 발원하여 남서류하면서 평창강과 합류한 후 충주호로 유입되며, 이 후 달천, 섬강, 청미천, 양화천, 복하천, 후천과 차례로 합류하게 된다. 한편 북한강은 강원도 금강산 부근에서 발원하여 남쪽으로 흐르면서 금강천, 금성천, 서천, 수입천 등과 차례로 합류한 후 파로호로 유입되며, 이 후 춘천호를 거쳐 의암호에서 소양강과 합류한다. 소양강 합류 후 다시 남하하면서 가평천, 홍천강과 합류하여 청평호를 이루며, 경기도 양평군 양수리 부근에서 남한강과 합류하게 된다. 2004년 현재 남, 북한강 수계에서는 각각 86개, 29개의 하천수 수질측정지점이 설치·운영되고 있으며, 이들 측정지점의 위치를 Fig. 1에 제시하였다.

2.2. 측정망 설계원리

2.2.1. 측정망의 목적

수질측정망의 설계 방향은 측정주체가 설정하는 측정 목적에 의해 결정된다. 따라서 효율적인 수질측정망의 설계를 위해서는 수질 및 수량자료에 대한 다양한 요구를 충족할 수 있는 수질측정망의 목적이 먼저 수립되어야 한다. 지금까지 국내·외에서 운영되고 있는 수질측정망에서 일반적으로 적용되고 있는 수질측정망의 목적은 다음과 같이 요약될 수 있다.⁷⁻⁹⁾

- ① 장기 및 단기적인 수질의 시변화 경향을 파악하기 위한 측정망

- ② 수역별로 지정된 수질환경기준의 위반 사항을 찾아내기 위한 측정망
- ③ 수계내 수질의 변화를 야기하는 외부 영향을 찾아내기 위한 측정망
- ④ 상수원수나 특정 용도 목적의 용수이용을 지원하기 위한 측정망
- ⑤ 특정시기에 집중조사를 통하여 수질변화를 규명하기 위한 측정망

여기에 최근 새롭게 도입된 물관리 제도와 기술로 인해 변화된 환경에 대처하기 위하여 고려되어야 할 수질 측정망의 목적을 추가하면 다음과 같다.²⁾

- ⑥ 오염총량관리제 시행으로 인한 배수구역별 오염부하량을 산정하기 위한 측정망
- ⑦ 오염총량관리제의 지원과 과학적인 수질정책 수립에 필요한 수질모델 적용을 위한 측정망
- ⑧ 물관리 정보화에 필요한 측정망

대상 수계에 효과적인 수질 측정망을 설계하기 위해서는 이상에서 제시된 각각의 측정 목적에 부합되는 구체적인 측정지점의 선정 기준을 수립하고, 각각의 기준에 따라 선정된 지점을 대상으로 최종적으로 수질측정망을 설계하여야 한다.

2.2.2. 측정지점 선정 기준

수질측정망의 목적을 달성하기 위해서는 먼저 측정지점에 대한 선정 기준이 필요하며, 이 기준에 따라 측정의 위치, 항목, 빈도 등이 결정된다. 앞서 제시된 수질측정망의 목적을 달성하기 위해서는 다음과 같은 선정 기준을 적용할 수 있다.

(1) 수계 대표성

수질측정망의 목적 중 ① 장·단기적 수질 변화 경향 파악과 ⑧ 물관리 정보화 지원 목적을 만족시키기 위해서는 대상 수계를 지리적으로 대표할 수 있는 측정지점이 선정되어야 하며, 이 경우 측정항목은 수질만으로 한정된다. Sanders and Adrian(1978)과 Sanders(1980)는 기존 연구들을 바탕으로 대상 수계의 대표성을 적절히 표현하기 위한 측정지점 선정 방법을 제시하였으며, 제시된 선정 방법은 다음 세 단계의 설계기준에 따른다. 첫 번째 단계는 대략적 위치(macro-location)의 선정으로 전체 하천 유역 내에서 측정망이 배치되어야 할 대략적인 하천구간을 선정하는 것이다. 두 번째 단계는 세부 측정위치(micro-location)의 선정으로 첫 번째 단계에서 선정된 하천 구간 내에서 측정망의 구체적 위치를 결정하는 것이다. 세 번째 단계는 대표지점의 선정(representative location)으로 두 번째 단계에서 선정된 구체적 측정위치의 하천 횡단면에서 시료를 채취하여야 할 특정 위치를 선정하는 것이다.

첫 번째 단계인 대략적 위치 선정 방법은 전체 하천망을 비교적 동일한 지류의 수를 갖는 구역으로 세분화하는 Sharp (1971)의 기법을 기초로 하고 있다. 이 방법은 수질 변화에 영향을 미치는 오염원을 검출하기 위한 수질측정망 설계 시 사용되도록 고안된 것으로, 여기서 하나의 지류는 하나의 오염원의 의미를 갖는다. 우선 전체 하천망에서 유입지류가 없는 지류는 차수 1의 값을 갖게 되며, 지류의 합류 부분에서는 상류에 위치한 지류의 차수를 더한 값의 차수를 갖게 된다. 이러한 방식으로 하천의 차수는 상류에서 하류 방향으로 누적되게 되며, 대상 하천의 하구 부분에서는 최대 차수값을 갖게 된다. 즉 최대 차수 값은 전체 하천망 내 총 지류의 수에 해당한다. 1차 우선순위를 갖는 측정지점이 위치하게 되는 유역의 1차 중심(centroid)은 식 (1)에 의해 계산된 값과 가장 근접한 차수를 갖는 지점에 위치한다.

$$M_1 = \left[\frac{N_0 + 1}{2} \right] \tag{1}$$

여기서, M_1 은 1차 중심 차수, N_0 는 최대 누적 차수이며, 대괄호는 정수화를 의미한다. 1차 중심에 의해 전체 대상 수계는 상류와 하류 부분으로 구분되게 되며, 두 부분 중 상류부분에 위치하는 2차 중심 M_2 는 식 (2)에 의해 계산된다.

$$M_{i+1} = \left[\frac{M_i + 1}{2} \right] \tag{2}$$

여기서, M_i 는 i 번째 중심 차수이다. 반면, 하류부분에 대해서는 1차 중심을 최상류로 하여 새로운 차수가 부여되게 된다. 하류 부분에 위치하는 2차 중심은 새로 부여된 차수에 대해 식 (1)과 같은 방법으로 계산되거나, 또는 기존에 부여된 차수에 대해 식 (3)과 (4)에 의해 계산된다.

$$M_i' = \frac{M_d - M_u + 1}{2} \tag{3}$$

$$M_i'' = M_u + M_i' \tag{4}$$

여기서, M_i' 와 M_i'' 는 대체 가능한 i 번째 중심 차수, M_d 과 M_u 는 각각 2차 중심을 계산하는 유역의 하류부와 상류부의 차수이다. 식 (2)~(4)에 의해 계산된 2차 중심 차수를 바탕으로 1차 중심에 의해 구분된 하류 부분에서 2차 중심을 갖는 측정지점의 위치가 결정되게 된다. 이러한 방식으로 3차, 4차 중심의 측정위치가 결정되면, 선정된 총 지점 수는 차수가 증가함에 따라 기하급수적으로 증가하게 되며, 이 과정은 설계된 측정지점의 목표 개수에 도달할 때까지 반복한다. 즉, 이 방법은 정해진 우선순위에 따라 가용자원의 정도를 고려해서 측정지점을 단계적으로 배치해 나갈 수 있는 장점을 지닌다.

(2) 수질기준치 준수

측정 목적 ② 수질기준 위반사항 검사를 위해서는 측정된 수질자료가 대상 수체의 수질환경기준에 대한 위반하는지의 여부와 빈도 및 지속시간 등을 나타낼 수 있어야 한다. 따라서 측정지점은 대상 수체 내에서 수질이 가장 악화된 구간에 설치되어야 하며, 이 경우 측정항목은 수질만으로 한정된다.

(3) 오염원 감시

측정 목적 ③ 수질의 변화를 야기하는 외부 영향 인자 파악을 위해서는 수체 내 위치한 점 및 비점오염원을 상시 감시할 수 있는 지점에 측정지점이 설치되어야 한다. 이 경우 수량 측정도 필요할 수 있으나, 수질 측정만으로 목적을 달성할 수 있다. 점오염원은 산업시설이나 처리장과 같은 오염배출시설과 지류 등이 포함되며, 이들 점오염원 감시를 위해서는 오염배출시설에서의 배출구와 지류의 최하류 지점 그리고 점오염원이 본류로 유입되는 지점의 직상류와 직하류 구간에 수질측정지점이 배치되어야 한다. 단, 하수처리장 등과 같이 수질자료를 배출자 스스로 측정하여 보고하도록 규정되어 있는 점오염원의 경우 국가가 관리하는 수질측정망에서는 제외될 수 있다. 비점오염원의 감시를 위해서는 비점오염원이 시작되는 지점과 끝나는 지점으로 정해질 수 있다.

(4) 물이용 감시

정수장이나 기타 물이용 취수 지점을 중심으로 설치된 수질측정 지점은 목적 ④ 용수이용지원을 만족할 수 있으며, 이 경우 측정항목은 수질로 한정된다. 수질기준치는 일반적으로 대상 수체의 물이용과 그곳에 서식하는 토종 생물에 피해가 없는 경우를 가정하여 정해지기 때문에 수질기준치를 만족하는 경우는 물이용에 큰 장애가 되지 않는다. 따라서 일반적으로 수질기준치 준수를 위해 설치된 측정지점에서의 수질자료가 물이용 감시를 위해 사용될 수 있으며, 수질기준치 준수를 위한 측정지점과 취수지점 사이에 지천의 유입부나 기타 오염원이 위치하는 경우에는 별도의 측정지점을 추가로 설치하는 것이 바람직하다.

(5) 수질변화 규명

수질측정망의 목적 ⑤ 집중조사를 통한 수질변화 규명과 ⑦ 수질모델 적용 지원을 만족시키기 위해서는 하천이나 호수와 같은 자연 수체 내에서 일어나는 수질변화를 정량적으로 규명할 수 있는 지점에 측정망이 설치되어야 한다. 따라서 수질변화 규명을 위한 측정지점을 선정하기 위해서는 대상 수체의 지형, 수리적 특성, 수질 반응, 오염원 그리고 지천 등을 고려하여야 하며, 수질모델을 적용하였을 때 보정과 검증이 용이하도록 설계하여야 한다. 또한 이들 측정지점에서는 수체 내 물질수지(mass balance)와 물수지(water balance)를 수립하는데 필요한 수질과 수량 항목을 반드시 함께 측정하여야 한다.

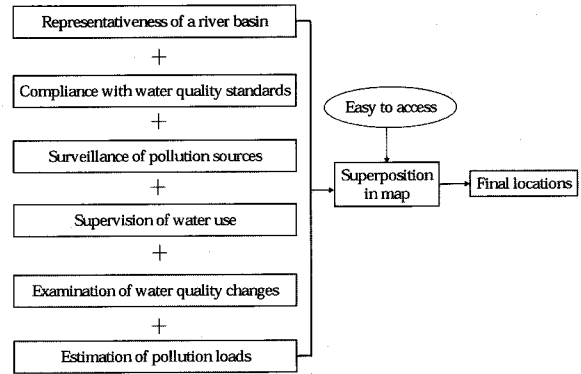


Fig. 2. Selection methodology of water quality monitoring stations.

(6) 오염부하량 산정

오염총량관리제 시행을 위하여 배수구역별 오염부하량을 산정하는 목적 ⑥을 만족하기 위해서는 각 배수구역의 유출지점에 측정지점을 지정하여 수질과 수량을 모두 측정하는 것이 필요하다. 이 경우 오염부하량 산정을 위해 설정되는 측정망은 일반적으로 수질변화 규명을 위해 설정되는 측정 지점과 유사하게 배치될 수 있다.

이상의 방법을 적용하여 선정된 측정망의 후보지점은 지도중첩을 통하여 최종지점으로 선정되는데, 이 때 이론적으로 선정된 측정후보지점에 대한 접근 용이성이 함께 고려되어야 한다(Fig. 2). 수질측정망의 목적에 따라 수질측정지점의 대략적 위치가 결정된 후에는 하천 구간을 대표할 수 있는 세부 측정위치가 결정되어야 하는데, 세부측정위치는 해당 구간 중 횡단면에서의 수질이 동일한 즉 완전 혼합이 이루어지는 지점을 선정하는 것이 이상적이다. 그러나 완전 혼합구간을 찾을 수 없는 경우에는 임의의 지점을 선정하고 그 위치에서의 측정치를 대표값으로 가정한다. 또한 세부측정위치에서 채수지점을 정할 때에는 유속의 클 때 단면상 횡방향으로의 오염 확산이 매우 적어지는 수로화 현상을 고려하여야 한다. 이러한 경우 한 곳에서만 채수해서는 해당 세부측정위치의 수질항목에 대한 대표성을 얻기 어려우므로, 단면상 여러 곳에서 동시에 채수한 후 분석된 값을 평균하여 그 지점에서의 대표값으로 사용하여야 한다.¹¹⁾

3. 연구 결과

3.1. 선정기준 적용

(1) 수계대표성

한강 수계를 대표할 수 있는 측정 지점의 위치 선정을 위하여 앞서 제시한 Sanders의 측정위치 선정 방법을 이용하였다. 이를 위하여 전국하천일람(2000)에 제시된 한강 수계 내 하천 현황을 기초로 남한강과 북한강 수계에 대한 누적차수를 산정하였으며, 그 결과 지방 2급 하천까지 고려한 팔당호 유입부까지의 누적차수는 남한강의 경우 271,

북한강의 경우 155였다. 따라서 남한강 수계의 경우 1차 중심이 위치하게 되는 차수는 $[(271+1)/2] = 136$ 으로 이러한 차수를 갖는 섬강 합류점 직상류에 1차 우선 순위의 측정지점을 배치하였으며, 북한강 수계의 경우 1차 중심이 위치하게 되는 차수는 $[(155+1)/2] = 78$ 으로 이러한 차수를 갖는 가평천 합류점 직하점에 1차 우선 순위의 측정지점을 배치하였다. 또한 남, 북한강의 유입이 팔당호 수질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 남, 북한강의 하구 지점 즉 최대누적차수를 갖는 팔당호 유입지점에 1차 우선 순위의 측정지점을 배치하였다. 한편 남, 북한강 유역 내에는 각각 21개와 9개의 행정구역이 포함되어 있으며, 수질측정망의 관리 효율을 고려하기 위하여 남, 북한강 수계 내 이들 행정구역 경계 지점에 1차 우선 순위의 측정지점을 추가로 배치하였다.

한편 수질측정지점의 위치를 결정하기 전에 대상 수계에 설치되어야 할 측정망의 규모가 우선적으로 결정되어야 한다. 2004년 현재 남, 북한강 수계에는 각각 86개와 29개의 하천수 수질측정지점이 설치·운영되고 있다. 따라서 본 연구에서는 남, 북한강 수계 내 측정지점의 수가 현재의 규모와 유사하도록 남한강 수계의 경우 6차, 북한강 수계의 경우 5차 우선순위까지의 측정지점을 배치하였으며, 1차 중심 이후 2, 3, ..., 6차 중심이 위치하게 되는 차수와 측정지점의 위치는 1차 중심과 동일한 방식으로 결정되었다. 결과적으로 남한강 수계에 76개, 북한강 수계에 34개의 측정지점이 배치되었으며, 이 결과를 Fig. 3에 제시하였다.

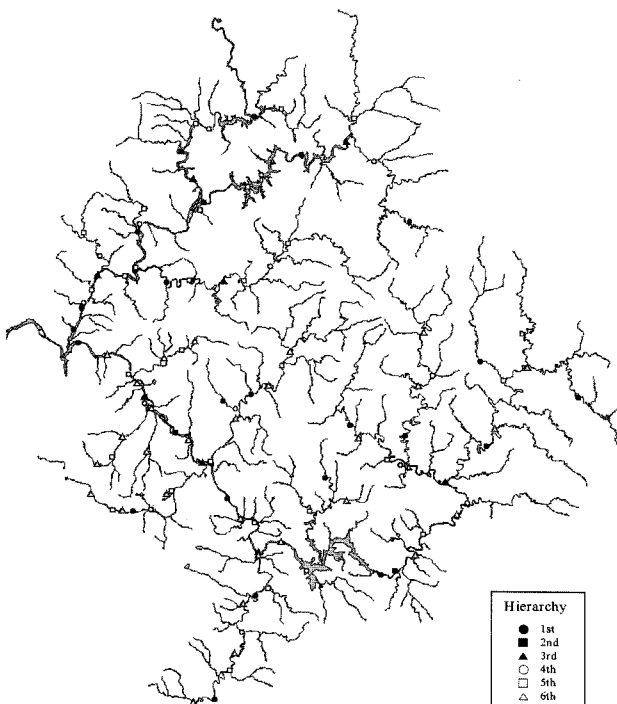


Fig. 3. Proposed monitoring stations in the South and North Branches of the Han River based on selection criteria : representativeness of a river basin.

(2) 수질기준치 준수

한강 수계를 비롯하여 일반적인 하천의 경우 하류로 갈수록 수질이 악화하는 경향이 나타난다. 따라서 수질기준치에 대한 위반 사항을 알아보기 위한 측정지점 선정을 위하여 남, 북한강 수계의 발원지로부터 팔당호 합류지점에 이르기까지의 본류 구간을 등간격(10 km)을 갖는 하천구간으로 구분하였으며, 구분된 하천 구간을 바탕으로 각 구간의 경계 지점과 하구지점에 측정지점을 배치하였다. 결과적으로 남한강 수계에 87개, 북한강 수계에 35개의 측정지점이 배치되었으며, 그 결과를 Fig. 4에 제시하였다.

(3) 오염원 감시

오염원 감시를 위한 측정지점의 위치 선정을 위해서는 우선 수계 내 오염원 즉 대상 수계 내 점 및 비점오염원이 결정되어야 한다. 본 연구에서는 한강유역환경관리청(2001)에 제시된 남, 북한강 배수구역도를 바탕으로 본류 유역 중 최상류 유역과 지류 유역을 점오염원으로 고려하였으며, 최상류 유역을 제외한 본류 유역을 비점오염원으로 고려하였다. 또한 수계 내 오염배출시설 중 배출용량이 2,000 m³/day 이상인 시설을 점오염원으로 고려하였다. 그 결과 남한강 수계에서는 총 120개 유역 중 80개의 유역(최상류 유역 13개, 지류 유역 67개)이 점오염원으로 40개의 본류 유역이 비점오염원으로 간주되었다. 북한강 수계에서는 총 73개 유역 중 36개 유역(최상류 유역 4개, 지류 유역 32개)이 점오염원으로 37개의 본류 유역이 비점오염원으로 간주되었다. 이들 오염원을 기준으로 오염원 감시를 위한 측정지점을 선정하였으며, 점오염원으로 고려된 배출용량 2,000

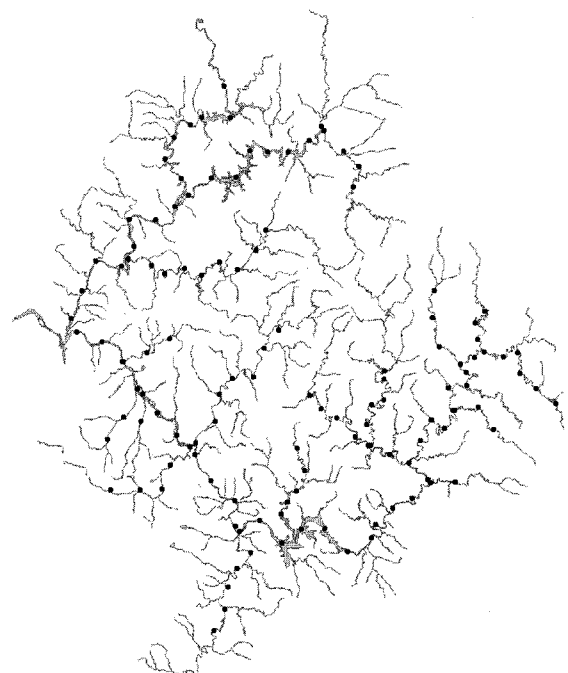


Fig. 4. Proposed monitoring stations in the South and North Branches of the Han River based on selection criteria : compliance with water quality standards.

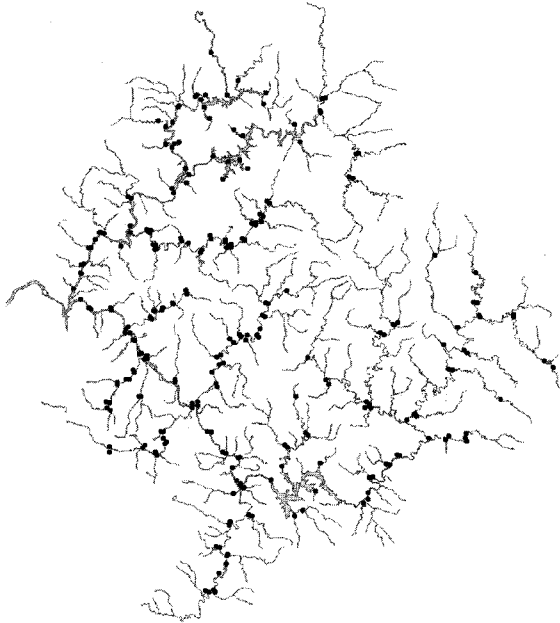


Fig. 5. Proposed monitoring stations in the South and North Branches of the Han River based on selection criteria : surveillance of pollution sources.

m³/day 이상의 오염배출시설은 자체적으로 배출 농도를 측정하고 있으므로 이들 점오염원의 배출 농도 측정을 위한 측정지점은 선정에서 제외하였다. 결과적으로 남, 북한강 수계에서는 각각 161개, 91개의 수질측정지점이 배치되었으며, 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

(4) 물이용 감시

수질측정지점 선정 기준에서 살펴본 바와 같이 일반적으로 수질기준치 준수를 위해 설치된 측정지점에서의 수질자료가 물이용 감시를 위해 사용될 수 있다. 따라서 물이용 감시를 위한 측정지점은 수질기준치 준수를 위한 측정지점과 취수지점 사이에 오염원이 위치하는 경우 이들 오염원의 감시와 수질오염사고에 대한 경보를 위해 취수지점 직상류 지점에 수질측정지점을 추가로 배치될 수 있다. 결과적으로 남, 북한강 수계에서는 물이용 감시를 위한 수질측정지점이 각각 50개와 20개씩 배치되었으며, 그 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

(5) 수질변화 규명

한강유역환경관리청(2001)에서는 남, 북한강 수계의 수질변화 규명을 위해 각 수계에 대한 배수구역 구분 결과를 바탕으로 하천수질모델을 적용하였다. 본 연구에서는 남, 북한강 수계에 대한 하천수질모델의 구획화 과정에서 고려된 점 및 비점오염원에 대한 물질수지와 물수지를 분석하기 위하여 각 배수구역의 유출구 지점에 측정 지점을 배치하였다. 한편 점오염원으로 고려된 배출용량 2,000 m³/day 이상의 오염배출시설은 자체적으로 배출 농도를 측정하고 있으며, 수질모델의 보정 및 검증을 위해 요구되는 수질자

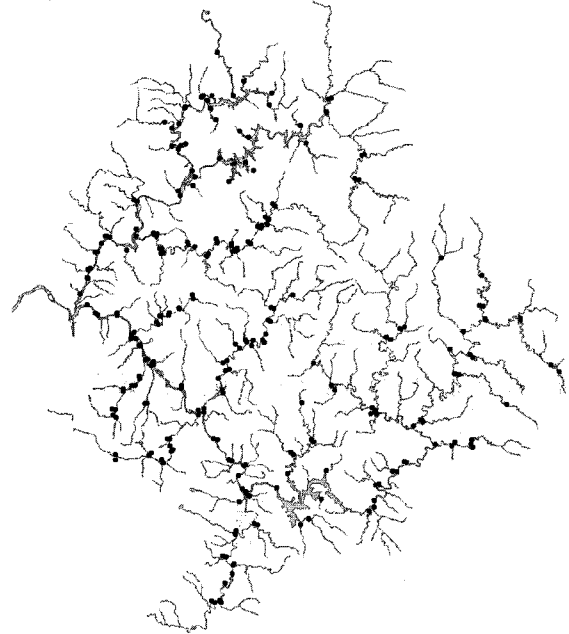


Fig. 6. Proposed monitoring stations in the South and North Branches of the Han River based on selection criteria : supervision of water use.

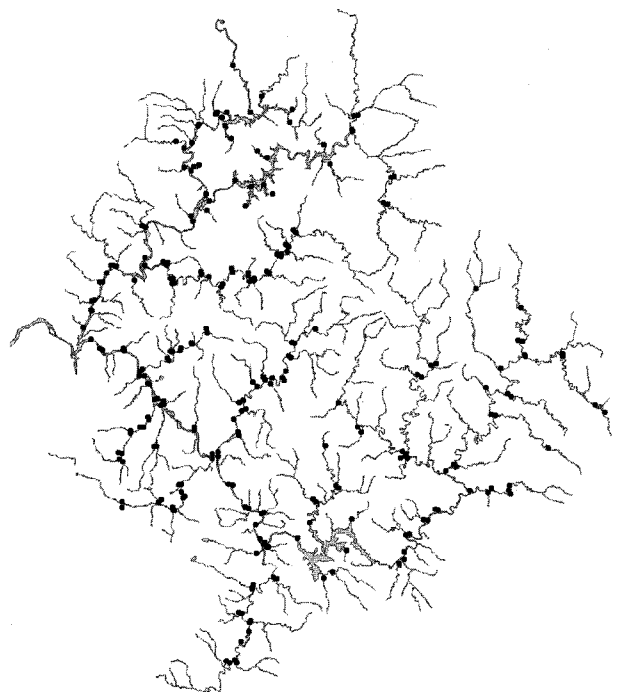


Fig. 7. Proposed monitoring stations in the South and North Branches of the Han River based on selection criteria : examination of water quality changes.

료는 앞서 다른 목적에 따라 각 수계의 본류 구간에 배치된 측정지점에서 획득 가능하므로 이를 위한 별도의 측정지점은 배치하지 않았다. 결과적으로 남, 북한강 수계에서는 각각 120개, 73개의 수질변화 규명을 위한 수질측정지점이 배치되었으며, 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다.

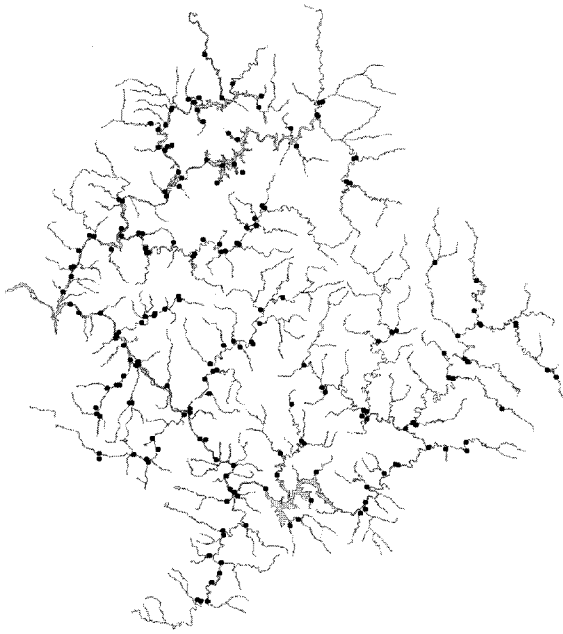


Fig. 8. Proposed monitoring stations in the South and North Branches of the Han River based on selection criteria : examination of pollution loads.

(6) 오염부하량 산정

오염총량관리제 시행을 위한 배수구역별 물질수지와 물수지 분석을 위하여 한강유역환경관리청(2001)에 제시된 남, 북한강 배수구역도를 바탕으로 남한강 수계 내 120개와 북한강 수계 내 73개의 각 배수구역 유출구 지점에 측정지점을 배치하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 제시하였다.

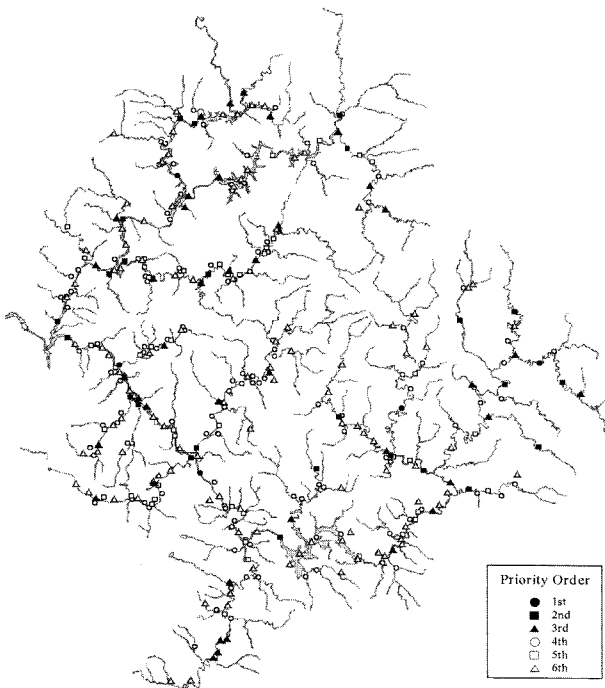


Fig. 9. Final selection for proposed monitoring stations in the South and the North Branches of the Han River.

3.2. 최종 위치 선정

남, 북한강 수계 내 측정지점의 최종 위치 선정을 위하여 앞서 제시된 6가지 기준에 따른 측정지점 위치 선정 결과를 기초로 지도 중첩을 통해 각 지점의 우선순위를 도출하였다(Fig. 2). 각 지점에 대한 우선 순위는 하나의 측정지점이 6가지 선정기준에 모두 부합되는 경우 1순위, 5가지 선정기준에 부합되는 경우 2순위와 같은 방식으로 1가지 기준에만 부합되는 6순위까지 차등하여 부여되었다.

Fig. 8에 제시된 바와 같이 남한강 수계에 대해 제안된 총 수질측정지점의 수는 234개이며, 이들 중 1, 2, ..., 6 순위까지의 측정지점 수는 각각 5, 15, 23, 85, 29 그리고 77개 지점으로 분석되었다. 한편 총 234개 측정지점 중 156개 지점에서는 수량이 함께 측정되어야 하는 것으로 나타났다. 또한 북한강 수계에 대해 제안된 총 수질측정지점 수는 113개이며, 이들 중 1, 2, ..., 6 순위까지의 측정지점 수는 각각 1, 9, 17, 41, 15 그리고 30개 지점으로 분석되었다(Fig. 9). 북한강 수계 내 배치된 총 113개 측정지점 중 수량 측정이 함께 이루어져야 하는 지점은 31개 지점인 것으로 나타났다.

4. 결론

1970년대 말부터 시작된 우리나라의 수질측정망은 공공수역의 수질 악화로 인하여 수자원 관리의 필요성 증대에 따라 계속적으로 확대 운영되어 왔다. 그러나 지금까지 수질측정망의 설치와 운영은 체계적인 원칙이 결여된 채 관리자의 경험과 주관적 판단에 의해 이루어져 왔으며, 따라서 현재 운영되고 있는 측정망에서 수계 관리에 필요한 정보를 효율적으로 생산하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 수질변화 경향의 파악, 수질환경기준의 준수 여부 감시, 수질변화에 영향을 미치는 외부 영향 파악, 용수이용 지원을 위한 지속적인 수질 측정, 집중조사를 통한 특정시기의 수질변화 규명과 같은 수질측정망 운영의 본래 목적을 달성하는 동시에 오염총량관리제나 물관리 정보화 추진 등 새로운 물관리 제도의 시행을 지원할 수 있는 과학적이고 체계적인 수질측정망 설계 지침을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 수계 대표성, 수질기준치 준수, 오염원 감시, 물이용 감시, 수질변화 규명, 오염부하량 산정을 위한 수질측정지점 선정 기준 및 방법을 설명하였으며, 본 연구에서의 측정지점 선정 기준을 남, 북한강 수계에 적용하여 수질측정망 운영의 개선방안을 제시하였다.

남한강 수계에서는 본 연구에서 제시된 6가지 선정 기준에 따라 각각 76, 87, 161, 50, 120, 120개의 측정지점이 배치되었다. 최종적으로 남한강 수계에는 총 234개의 수질측정지점이 설치되어야 하는 것으로 제안되었으며, 각 측정지점의 우선순위는 6순위까지 차등적으로 부여되었다. 또한 이들 측정지점 중 156개 지점에서는 수량이 동시에 측정되어야 하는 것으로 판단되었다. 한편 북한강 수계에서는 6가지 측정지점 선정 기준에 따라 각각 34, 35, 91, 20, 73,

73개의 측정지점이 배치되었으며, 이들 결과를 기초로 지도 중첩을 통해 각 지점의 우선순위를 6순위까지 설정하였다. 최종적으로 북한강 수계에는 총 113개의 수질측정지점이 설치되어야 하는 것으로 제안되었으며, 이들 측정지점 중 수량이 함께 측정되어야 하는 지점은 81개 지점인 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 현재 남, 북한강 수계에서 운영되고 있는 측정지점의 수와 비교할 때 크게 증가된 규모로 수질측정망의 목적에 부합하는 수질 및 수량 자료의 생산을 위해서는 다수의 수질 및 수량 측정지점이 추가로 설치되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제시된 측정망의 규모는 효율적인 한강 수계 물 관리를 위하여 반드시 이루어져야 하는 최종 목표를 의미하는 것은 아니며, 적용 우선순위에 의한 단계적 확충 방안의 지침으로서 그 활용가치가 있을 것으로 사료된다. 또한 제시된 규모는 수질측정망 운영과 관리에 투입 가능한 인적·물적 자원에 따라 선정 기준에서 적용된 범위를 조정함으로써 최종적으로 결정되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 교육인적자원부 BK21 환경공학 신규사업 “지표수 환경관리 시스템 연구(이화여자대학교)” 사업의 일부 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, 수질측정망 운영계획(2004).
2. 박석순, “수질측정망 통합운영관리방안,” 제 3차 물관리 정책토론회 발표자료집, 국무총리실 수질개선기획단, pp. 5~36(2002).
3. Ning, S. K. and Chang, N. B., “Multi-objective, decision-based assessment of a water quality monitoring network in a river system,” *J. Environ. Monitor.*, **4**(1), 121~126(2001)
4. 김주식, “금강수계 수질 자동 측정망 추가설치를 위한 우선순위 분석,” 충남대학교 석사학위논문(2003).
5. 유병천, “환경오염 측정망 구축을 위한 원격통신 활용 방안,” 연세대학교 석사학위논문(1995).
6. 강기훈, “자동 및 수동 수질 측정망의 최적 설계에 관한 연구,” 서울대학교 석사학위논문(1997).
7. Lettenmaier, D. P., “Dimensionality problems in water quality network design,” *Water Resour. Res.*, **15**(6), 1692~1700(1979).
8. Liebetrau, A. M., “Water quality sampling: some statistical consideration,” *Water Resour. Res.*, **15**(6), 1717~1725(1979).
9. U.S. Environmental Protection Agency, Elements of a State Water Monitoring and Assessment Program, Assessment and Watershed Protection Division, Office of Wetlands, Oceans and Watershed(2003).
10. Sanders, T. G. and Adrian, D. D., “Sampling frequency for river quality monitoring,” *Water Resour. Res.*, **14**(4), 569~576(1978).
11. Sanders, T. G., Principles of Network Design for Water Quality Monitoring, Colorado State University(1980).
12. Sharp, W. E., “A topologically optimum river sampling plan for South Carolina,” *Water Resour. Res.*, **7**(6), 1641~1646(1971).
13. 건설교통부, 전국하천일람(2000).
14. 한강유역환경관리청, 한강유역통합시스템 구축사업(2001).