

## 상수원 보호를 위한 유역기반 토지관리 우선순위 모델 적용

이지현 · 최지용\* · 박석순†

이화여자대학교 공과대학 환경학과  
\*한국환경정책·평가연구원, 정책연구부

### Application of a Watershed-Based Land Prioritization Model for the Protection of Drinking Water Reservoir

Jee Hyun Lee · Ji Yong Choi\* · Seok Soon Park†

Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering Ewha Womans University

\*Division of Environmental Policy, Korea Environment Institute

(Received 25 April 2003, Accepted 23 August 2004)

**Abstract** : Due to the growing impact of non-point source pollution and limitation of water treatment technology, a new policy of water quality management, called a source protection, is now becoming more important in drinking water supply. The source protection means that the public agency purchases the pollution sensitive area, such as riparian zone, and prohibit locations of point and non-point sources. Many studies have reported that this new policy is more economical in drinking water supply than the conventional one. However, it is very difficult to determine location and size of the pollution sensitive zone in the watershed. In this paper, we presented the scientific criteria for the priority of the pollution sensitive zone, along with a case study of the upstream watershed of the Paldang Reservoir, Han River. This study includes applications of the analytical hierarchy process(AHP) and a watershed-based land prioritization(WLP) model. After major criteria affecting water quality were selected, the AHP and geographic analysis were performed. The WLP model allowed us to include both quantity and quality criteria, using AHP as the multi-criteria method in making decision and reflecting local characteristics and various needs. By adding a travel-time function, which represents the prototype effectively, the results secured adaptability and scientific objectivity as well. As such, the WLP model appeared to provide reasonable criteria in determining the prioritization of land acquisition. If the tested data are used with a validated travel-time and AHP method is applied after further discussion among experts in such field, highly reliable results can be obtained.

**keywords** : Source protection, WLP model, AHP method, Land acquisition, Prioritization drinking water supply, Watershed management

## 1. 서론

상수원 보호를 위하여 정부가 토지를 매입하여 관리하는 정책이 매우 효과적이라는 것이 최근 크게 부각되고 있다. 미국 연방환경청(USEPA)은 1998년 발표한 맑은 물 실천계획(Clean Water Action Plan)에서 당시 하천이나 호수와 같은 지표수를 오염시키는 주원인은 비점오염원이며 이를 처리하기에는 막대한 경비가 소요되기 때문에 정부가 토지를 매입하여 오염 발생을 사전에 방지하는 것이 경제적인 것으로 보고하고 있다(U. S. EPA, 1999). 뿐만 아니라, 1993년에 일어난 미국 위스컨신주 밀워키 사건에서 소독과 살균을 거친 수처리 시설에서 크립토포리디움(*Cryptosporidium*)이라는 병원성 원생동물이 발견됨으로 인하여 수처리 기술만으로 안전한 수돗물을 보장할 수 없다는 인식이 커

지게 되었다(The Trust for Public Land, 1997). 이러한 보고들은 공공수역의 수질을 개선하고 안전한 수돗물을 공급하기 위하여 공학적 처리에 의존하는 기존의 수질관리 정책에 새로운 제도의 필요성을 알려주었다.

이러한 배경하에서 “원천 봉쇄(Source Protection)”라는 새로운 수질관리 개념이 대두되었다. 이는 상수원의 주요 상류 유역의 토지를 정부가 매입하여 오염원 입지를 사전에 차단하는 것이 가장 안전하고 경제적인 방안이라는 것이다. 즉, 처리장을 건설하여 발생한 오염물질을 처리하는 대신 유역에서 수질오염 발생과 정확히 가장 민감한 부분(습지, 지류, 수변지역 등)을 보호함으로써 오염원을 차단하려는 노력이다(U. S. EPA, 1999). 장기적인 수자원 보호를 위한 가장 효과적인 방법은 물공급자가 유역의 토지소유권을 갖고 이를 관리하는 것인데 실제로 현재 미국 뉴욕, 보스턴 등 여러 도시에서 이러한 정책이 추진되고 있다(The Trust for Public Land, 2000). 우리나라에서도 1998년에 마련된 팔당호에 대한 “상수원 수질관리 특별종합대책”을 시

† To whom correspondence should be addressed.  
ssp@ewha.ac.kr

작으로 이러한 노력이 시도되고 있다.

그러나 상수원 보호를 목적으로 필요한 토지를 공공부문에서 매수, 관리하는 정책은 쉽지 않은 문제이다. 어느 곳을 매입하느냐에 따라 효율이 크게 달라질 수 있고 토지매입은 토지 소유자의 재산권과 관련되어 있으며 토지 가격을 결정해야하는 민감한 부분도 포함하고 있다. 따라서 이러한 문제를 체계적으로 접근하기 위해서는 먼저 수질관리 측면에서 매입되어야 할 토지의 우선순위를 객관적인 방법으로 결정하는 것이 필요하다. 최근 몇몇 연구에서 상수원 수질관리를 위하여 토지 매입의 우선순위를 결정하는 과학적인 기준을 제시하기 위한 정량적 모델을 개발하려는 노력이 시도되고 있다(New York City, 1997; Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, 1996; 1998; 1999). 본 연구는 지금까지 시도되고 있는 상수원 수질관리를 위한 토지매입 우선순위 모델을 검토하고 이를 팔당 상류 유역인 양평군 일부 수계에 적용하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구 대상

본 연구는 팔당호 수질 개선을 위하여 토지 매입이 고려되는 경기도 양평군에 위치한 세 개의 소유역을 대상으로 하였다. 양평군은 남한강과 북한강이 만나는 팔당호에 인접하고 있기 때문에 수도법에 의한 상수원 보호구역, 환경정책기본법에 의한 특별대책지역, 한강법에 의한 수변구역 등 여러 종류의 규제 대상 지역이 위치하고 있다. 수변 구역의 경우, 법정제외지역과 하천부지를 제외한 대상지 전체 면적 256 km<sup>2</sup> 중 44.2 km<sup>2</sup>인 17.3%에 달하며 이것은 경기도 여주군 다음으로 높은 점유율을 보이고 있다(양평군, 2000). 오염원 역시 전체 축산폐수배출시설 59개 중 23개, 식품접객업소는 373개 중 114개, 숙박업의 경우 49개 중 15개를 차지하여 팔당호의 수질에 매우 큰 영향을 준다(한강유역환경관리청, 1998).

### 2.2. 적용 모델 원리

토지우선순위(WLP: Watershed-based Land Prioritization) 모델은 상수원의 수질에 가장 큰 영향을 주는 토지, 즉, 수체에 대한 민감도가 큰 토지를 먼저 매입하는 것을 원칙으로 가정하고 있다. WLP 모델에서 입력 정보는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 지리 정보(A)와 전문가 견해(B)로 구성된다. 지리 정보(A)는 경관 특징과 수문 현상을 포함하고 있으며 GIS-tool에 의해 유하시간 모듈(C)과 결합되어 기준치 척도(D)의 일부가 된다. 또한 전문가 견해(B)를 통해서 다양한 지역 특징에 따라 수질에 미치는 기준치 등급(E)과 가중치(F)가 결정되게 된다. 결정된 기준치 척도(D)와 가중치(F)가 결합, 우선순위지수(G)가 최종적으로 산정된다. 우선순위지수(I)는 유하시간함수( $T(t)$ )와 전문가 견해 항목( $\sum_m w_m X_m$ )이 결합된 다음 식으로 표현될 수 있다(Randhir et al., 2001).

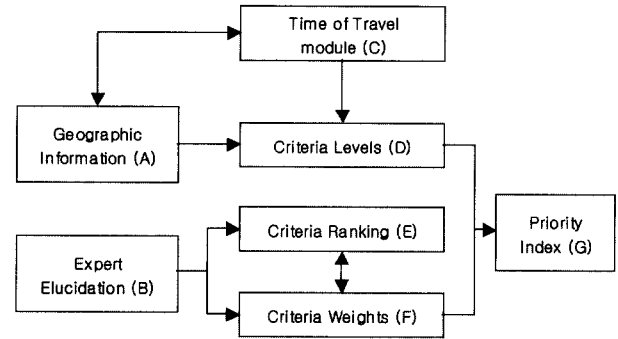


Fig. 1. Components of the WLP model.

$$I = T(t) \left( \sum_m w_m X_m \right) \quad (1)$$

이 때, 수체에 대한 민감성을 결정하기 위해, 위의 식에서 볼 수 있듯이 시간항목과 그 외 요인들로 항목을 이분하여 각각의 지수를 구한 후 통합하는 과정을 거치게 된다. 식에서  $T(t)$ 은 유하시간 함수를 나타내는 것으로써 한 지점에서 최종출구(일반적으로 취수지)까지의 유하시간이 짧을수록 유달률이 높아져 수질에서는 민감한 지점, 즉 매입을 통한 관리가 필요한 지점이 된다.  $\sum_m w_m X_m$ 은 전문가 견해를 나타내는 것으로 유하 시간 항목 외에 수질에 영향을 줄 수 있는 기타 주요 요인의 영향을 반영하는 역할을 한다. 이 때  $m$ 은 주요 요인을 가리키고,  $X_m$ 은 요인  $m$ 에 대한 대안의 수준을,  $w_m$ 은 그 요인에 할당되는 가중치를 나타낸다. 각 요인의 가중치는 다중의사결정기법의 하나인 계층분석과정(AHP: Analytic Hierarchy Process)을 통해 산정되게 된다. 이를 통해 수질에 대한 중요도가 높은 요인일수록, 수질의 민감도를 더 반영하는 하위 요인일수록 가중치가 커지게 되어 결과적으로 이러한 요인을 가진 필지일수록 높은 우선순위지수가 산정되게 되는 원리이다.

#### (1) 유하 시간 함수(Travel-Time Function)

유하 시간 함수는 민감성을 판단하는 두가지 기준 중 하나로 그 자체로서 나머지 전체 요인의 가중치로 작용하는 중요한 의미를 가진다. 유하시간 함수의 개념은 같은 오염부하량이라도 상수원의 최종 출구에서 가까운 지점일수록 수질에 미치는 영향이 크다는 것이다. 즉, 유하시간이 짧을수록 유달률이 높아 민감도가 그만큼 높아지며, 부분적인 지수로 표현되는 함수 값도 커지게 된다. 유하시간 함수( $T(t)$ )는 다음 식과 같이 표현된다(Randhir et al., 2001).

$$T(t) = a - \beta t \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 유역 내 모든 발생지점으로부터 도달하는 최대시간,  $\beta$ 는 단위격자에서 고정된 함수 기울기이며,  $t$ 는 오염발생 격자로부터 최종출구까지의 소요되는 상대유하시간으로 다음 식에 의해 계산된다.

$$t = t_o + t_c \quad (3)$$

각 격자에서  $t_o$ 와  $t_c$ 는 특정 격자에서 최종출구까지 소요되는 시간을 크게 지표유출과 수체흐름으로 구분한 유하시간으로서 경로상에 있는 격자들의 유하시간의 합으로 계산된다. 떨어진 강우가 하천의 최종 출구에 도달하는 과정은 하천까지 도달하는 거리와 하천을 따라 이동하는 거리로 구분된다. 각각의 격자는 지표나 수체로 나누어지게 되며 이 조건에 근거하여 몇 가지 물리적 요인에 의해서 격자내에서의 유하시간이 결정된다. 먼저 지표에서의 격자내 유하시간( $t_o$ )의 계산은 Chow의 Kinematic Wave Equation 식(4)를 이용한다(Chow, 1964).

$$t_o = \frac{0.933(LN)^{0.5}}{(C)^{0.4}S^{0.3}} \quad (4)$$

여기서,  $t_o$ 는 지표에서의 격자내 유하시간, L은 사면거리, N은 Manning의 조도계수, C는 유출계수, I는 강우강도(in/hr), S는 경사도이다. 그리고 수체에서의 격자내 유하시간( $t_c$ )은 Manning equation을 이용한 식(5)로부터 계산된다(Randhir et al., 2001).

$$t_c = \frac{LN}{(1.49R_h^{2/3})S^{0.5}} \quad (5)$$

여기서,  $R_h$ 는 수리반경이다. 나머지 항목 중  $\alpha$ 는 유역에서 얻을 수 있는 최대 상대적 유하시간을 가리키는데 위의 식들로 유역 내 각 셀의 상대적 유하시간을 계산한 뒤 얻어지는  $t$ 값들 중 가장 큰 값이 채택된다.  $\beta$ 는 유하시간함수의 기울기로서 유역에 동일한 값이 적용되는데 본 연구에서는  $\beta$ 값과 우선순위지수의 상관관계를 분석한 후, 이를 바탕으로  $\beta$ 값을 적용한다.

(2) 전문가선택 모델

수질관리를 위한 대상 지역의 중요성에 관한 전문가 견해를 정량적으로 표현하는 항목 ( $\sum_m w_m X_m$ )은 앞에서 설명한 계층분석법을 이용하여 계산하였다(Randhir et al., 2001). AHP는 다수의 목표·평가기준·의사결정 주체가 포함되어 있는 문제를 계층화하여 해결하는 다기준 의사결정법 중 하나이다. 주어진 의사결정문제를 계층화한 후, 상위계층에 있는 한 요소(기준)의 관점에서 직계 하위계층에 있는 요소들의 상대적 중요도 또는 가중치를 쌍별비교(pairwise comparison)에 의해 측정하는 방식을 통해 궁극적으로는 최하위 계층에 있는 대안들의 가중치 또는 우선순위를 구할 수 있도록 해준다(정, 1999).

AHP의 장점은 과제를 계층적으로 파악함에 있어서 복잡한 과제에 대하여 매우 큰 유연성을 갖고 있다는 점이다. 이러한 특징은 반구조적 또는 비구조적인 의사결정 과제에 대하여도 접근의 가능성을 제시한다. 이것은 많은 의사결정

과제들이 규범적이기보다는 서술적이며, 구조적인 결정과제가 드물다는 것을 고려하면 더욱 의의가 크다고 할 수 있다. AHP는 다양한 기준에 따라 여러 가지 대안중 하나를 결정할 때 비합리적(직관적)인 것과 합리적인 것을 항상 동시에 취급할 수 있게 해준다. 문제를 보다 작은 부분으로 나누어 기본이 되는 합리적인 구조로 만들고, 각 계층에서의 우선순위를 얻기 위해서 단순한 쌍별비교를 통하여 판단하게 된다. AHP는 질적 또는 무형적 기준과 양적 또는 유형적 기준을 비율척도를 통해 측정할 수 있다(Saaty, 1980).

AHP를 통한 의사결정문제 해결은 크게 두 가지 과정으로 나누어지는데 하나는 계층구조의 설계단계이고 다른 하나는 평가단계이다. 계층구조의 설계에서는 주어진 문제 영역과 관련된 경험과 지식을 필요로 한다. 동일한 문제를 놓고도 어떤 관점에서 보느냐에 따라서 서로 다른 행동방안이 도출될 수도 있으므로 계층구조는 유일한 것이 아니라 가변적이며 계속적인 수정을 통해 변화하는 상황과 요구에 따라 적합하게 맞추어갈 필요가 있다. 이때 정의된 문제에 대해 최상위 목적들부터 최하위 수준의 대안들까지 계층구조화한다. 최상위 계층에는 가장 포괄적인 목표가 놓여지고, 최하위 계층에는 선택의 대상인 대안들이 위치한다. 계층구조의 중간은 평가기준들로 구성되는데 하위계층으로 갈수록 보다 상세하고 구체적인 내용이 된다.

평가단계는 쌍별비교의 개념에 입각한다. 쌍별비교의 어느 한 수준에 속하는 요소들을 서로 비교하게 되는데 이때 비교대상이 되는 기준들의 바로 위 수준에 속하는 하나의 평가기준의 중요도 또는 기여도에 근거하게 된다. 이같은 비교과정을 통해 하위기준들간의 선호도 즉, 가중치를 나타내는 측정척도가 얻어진다. 쌍별비교의 과정에는 평가기준 등에 대한 의사결정자의 선호 정도를 계량화 과정에 포함시킨다. 이를 위해서는 신뢰할 만한 평가척도가 필요하며, 여기에는 Table 1에 제시한 Saaty의 1~9점 척도가 일반적으로 이용된다. 쌍별비교를 행한 후에는 각 계층에 대하여 비교대상 평가기준들이 갖는 상대적 가중치를 추정한다. 각 수준의 기준들은 본 척도에 따라 쌍별비교되고 그 결과가 하나의 행렬로 도출된다. 어떤 기준에 속하는 기준을  $I_1, I_2, \dots, I_n$ 이라고 할 때, 쌍별비교행렬(comparison matrix) A는  $n \times n$ 의 행렬이 된다. A의 성분  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )는 다음과 같은 성질을 갖게 되는데 곧  $a_{ij} = (\text{요소 } I_i \text{의 중요도}) / (\text{요소 } I_j \text{의 중요도})$ 가 되며  $a_{ii} = 1$ 이고  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 의 역수가 된다. 쌍별비교를 통해 얻은  $a_{ij}$ 를 이용하여 속성  $A_1, A_2, \dots, A_n$ 이 갖는 선호도를 나타내 주는 수치  $w_1, w_2, \dots, w_n$ 을 추정할 수 있다.

AHP의 마지막 단계는 하위계층에 있는 평가기준들의 중요도 또는 가중치를 구하기 위해서 각 계층에서 계산된 평가기준들의 가중치를 종합하는 과정이다. 즉 상위 계층에 있는 의사결정문제의 궁극적인 목표를 달성함에 있어서 하위 계층에 있는 평가기준들이 어느 정도 영향을 미치는지 또는 어느 정도의 중요성을 갖고 있는지를 알아보기 위해

평가기준들의 종합 가중치를 구하는 단계이다. 평가기준의 종합 가중치는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$W_i = \sum (w_j)(u_j) \tag{6}$$

여기서,  $W_i$ 는  $i$ 번째 대안의 종합가중치,  $w_j$ 는 평가기준  $j$ 의 상대적 가중치,  $u_j$ 는 평가기준  $j$ 에 대한  $i$ 번째 대안의 가중치이다. 쌍별비교의 유효성을 확인하기 위해서는 일관성지수(consistency index: CI)를 계산하는 작업이 필요하다. 이를 위해서는 쌍별비교행렬  $A$ 로부터 최대고유치  $\lambda_{max}$ 와 주고유벡터  $\mu$ (dominant eigen vector)를 도출해야 한다.  $n$ 개의 요소들  $A_1, \dots, A_n$ 에 대해 일정한 기준의 특성치(중요도, 선호도 등)인  $W=(w_1, \dots, w_n)$ 가 알려진 경우 쌍별비교 행렬은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{vmatrix} w_{11}/w_2 & w_{11}/w_2 & \dots & w_{11}/w_n \\ w_{21}/w_2 & w_{21}/w_2 & \dots & w_{21}/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1}/w_2 & w_{n1}/w_2 & \dots & w_{n1}/w_n \end{vmatrix} \end{matrix} \tag{7}$$

행렬  $A$ 의 고유치를  $\lambda$ , 그에 대한 고유벡터를  $\mu$ 라 할 때,  $A\mu = \lambda\mu$ 를 만족하는 스칼라  $\lambda$ 는 고유치가 되고 벡터  $\mu$ 가 주고유벡터가 된다. 스칼라  $\lambda$ 는  $A - \lambda I$ ( $I$ 는  $n \times n$ 의 단위행렬)의 행렬식  $|A - \lambda I|$ 가 0이 되는 조건, 즉 고유방정식  $|A - \lambda I| = 0$ 의 해로서 결정되며 이 식은  $\lambda$ 의  $n$ 차 대수방정식으로서  $n$ 개의 근을 갖게 되는데 그중 가장 큰 고유치가 최대고유치  $\lambda_{max}$ 이다.

일관성에 대한 편차는 일관성지수인 식 (8)로 나타낸다.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{8}$$

AHP 비교행렬에 대해서  $\lambda_{max} \geq n$ 의 관계가 항상 성립하

는데 완벽한 일관성을 갖는 비교행렬에 대해서  $\lambda_{max} = n$ 이며, 일관성이 클수록  $\lambda_{max}$ 가  $n$ 에 가까워진다. 최종적인 일관성 검증은 일관성지수를 경험적 자료로 얻어진 무작위지수(random index: RI)로 나눈 일관성비율(consistency ratio: CR)로 가능해진다. 여기서 무작위지수란 1에서 9까지의 정수들을 무작위 추출하여 역수 행렬을 작성한 후 이로부터 일차지수를 구한 것을 말한다. 일관성비율식을 다음 식에, 표본 500개로부터 무작위지수를 구하여 평균한 값인 무작위지수를 아래 Table 2에 제시하였다. 여기서 CR은 그 값이 작을수록 판단의 일관성이 큰 것이며 Saaty에 의하면 CR이 0.1보다 큰 경우 그 판단에는 일관성이 부족하다고 여겨진다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \cdot \frac{1}{RI} \tag{9}$$

여기서는 상수원 보호라는 목표에 따라 연구의 범위 및 내용 가설을 세우고, 주요인들을 선택, 계층구조화하여 쌍별비교한 후 이의 일관성을 판단하게 된다(문, 1998).

### 3. 모델 적용

수질은 여러 가지 요인이 복합적인 과정을 거친 결과이다. 오염물질을 저감하거나 녹지를 조성해서 수질개선을 극대화할 수 있는 토지를 선정하기 위하여 다중의 수질요인 중 무엇을 고려하며 얼마를 반영해야하는가의 문제가 제기 되는데 여기서 '고려할 무엇'이 바로 조성 기준이다. WLP 모델에서 유하시간 항목은 정량적인 것이지만, 그 외의 기준이란 정성적일 수 있고 지역의 특성 및 필요성에 따라 선택 및 중요도가 달라질 수 있다.

본 연구에서는 국내 유역 중에서도 수변구역이 설정된 중요 유역인 팔당상수원 유역으로 그 대상을 제한한다. WLP를 이용한 토지매입 우선순위지수를 모의하기 위해 요인 선정 및 계층구조 구성까지 다루어 실제 토지매입 우선

Table 1. Ratio scale of comparison(Saaty, 1980)

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	equally important	Equal importance or indifference
3	weakly more important	Experience and judgment slightly favour one activity
5	strongly more important	Experience and judgment strongly favour one activity
7	demonstrably important	An activity is favoured very strongly over another; its dominance is demonstrated in practice
9	absolutely more important	The evidence favouring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	intermediate values between adjacent scale values	

Table 2. Consistency random index(RI) value(Saaty, 1980)

Order of matrix(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48

순위설정의 기틀을 마련하고자 한다.

### 3.1. 요인 선정

WLP 모델의 계층분석과정(AHP)을 수행하는데 다수 요인 중 영향력이 큰 요인의 선택, 이의 명확한 정의와 이들 간의 관계 설정은 필수적이다. 본 연구대상 지역에서 중요하게 고려될 수 있는 하천유입구로부터의 거리, 수체인접성, 토지이용도, 개발가능성, 경사도 등을 요인으로 설정하였다. 이 중 하천유입구로부터의 거리는 유하시간함수의 요인으로 고려되었으며, 나머지 AHP 과정에서 요인으로 검토되었다. AHP 과정은 각 요인의 등급을 설정하여야 하며, 다음과 같은 기준에 따라 이루어졌다.

**수체 인접성:** 해당지역의 하천과 일부 저수지 등 수체 주위를 매입하여 관리하는 것과 개발하는 것에 따른 수질에의 영향이 직접적이므로 매우 중요한 기준이 된다. 개발을 고려한 폭의 기준을 정의하기가 모호하므로 여기서는 수변녹지로 조성되었을 때의 효율을 근거로 폭을 설정하고 인접성을 구분한다. 미국 일리노이주 자연조사소(Illinois State Natural Survey)의 수변완충지역 효과분석 사례에서는 수변녹지의 폭 300 m까지 완충 효과가 현저했음을 보여준다(정부합동, 1998). 또한 미국 메릴랜드의 Chesapeake Bay Riparian Handbook에서는 문헌연구에 근거해 특정 수변녹지 목적에 부합하는 최소 폭 범위를 정의하였는데 질소는 약 30 m, 퇴적물과 인체제를 위해서는 약 50 m를 언급하였다(USDA, 1998). 팔당지역의 남한강본류는 하천의 횡방향 거리가 500 m 이상으로 그 규모가 크므로 보호를 고려해 메릴랜드의 연구 결과인 50 m 폭 뿐 아니라 일리노이

주의 사례에서 언급된 300 m 폭까지 적용하는 것이 적절하다. 300 m를 벗어나는 유역은 지류 인접성에 따라 인접한 곳과 기타 유역으로 나누는데 대부분의 지류의 폭이 수미터 정도인 것을 감안하여 최소폭 50 m를 그 기준으로 정한다.

**토지 이용도:** 해당지역은 비점오염원 부하를 고려해 구분할 때, 피복분류도와 토지이용구분도에 따라 공업지역, 상업지역, 주택지역이나 시가화지역, 가축사육지역, 과수원, 농지, 나지, 초지, 산림 등으로 구분된다. 여기서 비점오염원은 특히 도시와 가축사육지역에서 그 부하량이 큰데 일례로 SS의 경우 산지의 부하를 1로 봤을 때, 도시는 24.1, 목장용지는 24.2이고 BOD의 경우에는 산지에 대한 배율이 도시, 목장용지 각각 92.2와 37.6이다(최와 신, 1998). 여기에 독성물질 오염의 가능성이 있는 공업, 상업지역과 그 외 주거지역을 구분한 모델의 사례를 감안, 공업·상업지역, 주택·시가화지역, 가축사육지역, 과수원 및 농지, 나지, 초지 및 산림의 6분류로 나눌 수 있다.

**개발 가능성:** 이미 개발된 지역의 토지매입과 복원은 어렵기 때문에 앞으로 개발될 잠재력이 큰 곳을 매입, 더 이상의 개발을 억제하여 유역을 보호하는 것이 현실적 방안이라고 할 수 있다. 개발가능성의 요인으로는 도로인접성, 도심인접성과 표고 등이 있다(박 등, 1993). 대상지역에서 개발된 지역이 도로 주변에 밀집해 있는 것에 착안, 도로버퍼의 폭을 증가시키면서 현재 개발지역을 얼마나 포함하고 있는지를 분석하고, 이를 바탕으로 도로와 도심 인접성을 동시에 나타낼 도로 중심으로부터의 폭의 기준을 설정

Table 3. Reference Data

Raw data	Necessity	Source	Data format
Rainfall intensity	Rainfall intensity(I)	Korea Meteorological Administration(1992~2000)	Excel
Depth of water	Hydraulic radius(Rh)	Korea Environment Institute(2001)	Excel
Depth of water (Han River)	Hydraulic radius(Rh)	Hydraulic Model Experiments in South Branch of Han River(1998)	Report
Topographical map	Water system map, Road system map	National Geographic Information Institute(1996~1998)	DXF
Digital elevation map	Length of travel(L), Elevation layer	Korea Environment Institute(1999)	ASCII
Slope map	Slope(S), Length of travel(L), Runoff coefficient(C), slope layer	Korea Environment Institute(1999)	ASCII
Land surface map	Manning's coefficient(N), Runoff coefficient(C), Land use layer, Development possibilities	Korea Environment Institute(1999)	GEOTIFF
Land use map	Land use layer, Development possibilities	Korea Institute of Construction Technology(2000)	SHAPE
Soil map	Runoff coefficient(C)	National Institute of Agricultural Science and Technology(1999)	ARC/INFO

할 수 있을 것이다. 표고의 경우 50 m 이하를 최적 예상지로, 300 m까지를 가능한 지역으로 설정, 3개 항목으로 구분한다(이, 1997).

**경사도:** 경사는 효율성을 결정하는 가장 중요한 변수라고 할 수 있는데 경사가 커지면 유수의 흐름이 증가하므로 수변녹지 통과시간이 줄어들게 되어 비점오염원 저감의 직접적 효율이 떨어질 뿐 아니라 사면이 침식되어 수로를 형성하는 등 위험성도 커지게 되므로 완만한 경사일수록 비점오염원 저감에 적합하다. 일반적으로 표면유출수에 포함된 오염물은 경사가 5% 이하의 상대적으로 작은 유역에서 얇은 흐름으로 수변녹지에 이르게 될 때, 효과적으로 제거될 수 있다고 알려져 있다. 하지만 연구가들이 주장하는 범위는 40%까지 다양하다. 경사도의 경우 Chesapeake Handbook에서 제시한 유역조건에 따른 퇴적물 부하량에 기인하여 5, 15%를 기준으로 나눌 수 있다(USDA, 1998).

3.2. 자료 수집 및 분석

본 연구에는 지리정보체계(Geographic Information System: GIS)에 기초하여 분석을 수행하므로 속성자료 외에도 공간자료가 필요하며 이를 처리하고 분석할 GIS 소프트웨어가 요구된다. 강우강도와 수심자료는 속성자료이고, 나머지는 공간자료인데 수치지형도, 토지이용현황도, 정밀토양도는 벡터이고 나머지 DEM, 경사도, 토지피복분류도는 래스터(grid) 자료로서 포맷이 다르지만 분석은 그리드에서 수행되기 때문에 최종적으로는 모두 30×30 m 격자 크기의 그리드 포맷으로 변환된다. GIS 소프트웨어로 ArcView 3.2 와 Arc/Info 8.0 Workstation을 사용하였으며 기초자료는

Table 3과 같다.

**유하시간함수:** 유하시간함수의 값을 도출하기 위해서는 그리드 레이어의 각 격자 안에서의 유하시간이 계산되어야 한다. 격자내 유하시간은 지표유출시 유하시간  $t_0$ 와 수체를 따라 이동하는데 소요되는 유하시간인  $t_c$ 로 대분된다. 이는 각각 Kinematic Wave Equation과 Manning's Equation에 의해 계산되는데 조도계수(N)와 경사도(S), 사면길이(L)는 두 식에서 공통적으로 사용되는 인자이다. 지표에서의 유하시간은 여기에 유출계수(C)와 전형적 강우강도(I)가, 수체에서의 유하시간은 수리반경( $R_h$ )의 인자가 더해져 값이 도출된다. 유하시간함수의 지표유출에 사용된 전형적 강우강도 인자를 구하기 위해 양평군의 9년(1992~2000) 강우량 자료를 활용하였으며 최빈도의 값으로 분석된 5 mm/hr를 채택하고 이를 연구대상지역의 전형적인 강우강도로 가정하였다.

인자의 각 그리드 파일을 만들기 위해서는 속성자료로 강우강도를 위한 기상자료, 수리반경인자를 위한 수심자료가 필요하며, 기타 피복분류도, 토양도, 경사도, DEM, 수치지형도 등의 공간자료가 요구된다. 강우강도를 제외한 모든 인자들은 격자별 값이 할당된 각각의 그리드 파일로 만들어져 계산에 이용되게 된다. 유하시간함수를 위한 자료의 처리 및 분석 과정을 Fig. 2에서 요약하였다. 이 때 자료는 Analysis, Grouping, Calculation, Extract, AML 등을 사용하여 가공하는데, 기상자료의 경우 Analysis를 통하여 최빈값 분석을 통한 강우강도를, 피복분류도, 토양도 등은 Grouping을 통하여 유형을 구분하여 해당값을 획득할 수 있었다. DEM의 경우, 경사와 함께 각 격자를 독립된 시험포로 가정하여 Calculation을 통해 사면길이를 계산해내었으며,

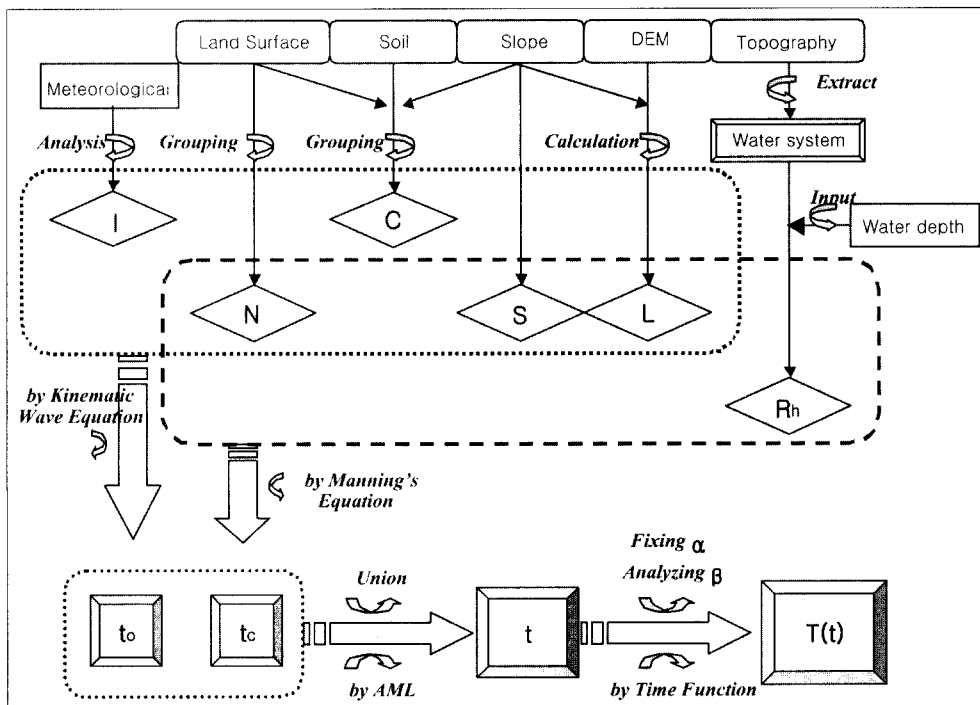


Fig. 2. Flow chart of the travel-time function.

수치지형도를 추출하여 수계도를 형성시킨 후 수심자료와 이를 결합하여 수리반경을 표현하였다. 또한 격자내 유하시간인 지표와 수체 2개의 레이어를 통해 상대적유하시간 레이어를 형성하기 위해 Arc/Info의 스크립트 언어인 AML 중 흐름방향(flow direction)과 유하거리(flow length) 명령을 적용하였다.

**전문가 선택모델:** 다음으로 전문가선택모델의 자료의 처리를 위해서는 계층구조에 따른 분류와 가중치의 산정이 선행되어야 하므로 계층구조를 구성하였으며, 쌍별비교를 통한 가중치 계산과 일관성 검정을 거쳐 각 분류에 부여한 가중치를 도출하였다. 첫번째 기준을 중심으로 자료를 처리하고 분석하여 수체인접의 기준에 대해서는 수계 버퍼 레이어를 생성하고, 토지이용 항목에 대해서는 피복분류도와 토지이용현황도를 결합해 토지이용을 분류한 레이어를 구축하고, 개발가능성의 기준에 대해서는 도로 버퍼 레이어와 표고를 분류한 레이어를, 마지막으로 경사도를 표현하기 위해 경사를 분류한 레이어를 구축하여 4개의 기준에 대해 5개의 레이어를 구축하였다. 전문가결정모델을 위한 자료의 처리 및 분석 과정은 Fig. 3과 같다. 이처럼 수치지형도를 추출(extract)하여 수계도와 도로도를 만들었으며 Buffering 과정을 통해 수계 buffer와 도로 buffer를 형성하였다. 나머지는 Fig. 2와 마찬가지로 Grouping, Union, Analysis 등의 과정을 통해 분석을 수행하였다.

**계층구조:** 계층분석과정은 문제의 목표(goal), 기준(cri-

teria), 대안(alternative)으로 이루어진다. 본 연구에서는 유역에서의 토지매입 우선순위라는 목표를 중심으로 위에서 선정된 기준들로 계층구조를 구성하였으며 이를 Fig. 4에 제시하였다. 유역 전체를 모의하고 법적, 경제적인 요인을 배제하였을 때 팔당 유역의 수질에 영향을 미치는 일반적인 요인으로 수체인접성, 토지이용, 개발가능성, 경사도를 선정하였다. 실제 공간 분석을 실행할 경우, 일정 크기의 격자로 전유역이 구분되어 최종 기준이 그 범위를 가지고 있으므로 그 범위에 따라 격자는 해당 가중치를 부여받으며 이의 합은 전문가모델에 의한 우선순위지수로서 표현된다. 격자 하나 하나는 대안으로서 최종적으로 산정된 가중치가 높을수록 토지매입의 목적에 부합됨을 의미한다.

**가중치 산출 및 일관성 검정:** 전문가선택모델을 위한 자료의 처리 및 분석 과정을 위해서는 계층구조에 따른 분류와 가중치의 산정이 선행되어야 하므로 선행 연구에서 구성된 계층구조에 따라 쌍별비교를 통한 가중치 계산과 일관성 검정을 거쳐 각 분류에 부여한 가중치를 도출하고 일관성을 판단한다.

가중치 산출 및 일관성 판단은 ①쌍체비교 행렬 결정, ②대적가중치(W) 계산, ③최대고유치( $\lambda_{max}$ ) 계산, ④일관성 지수(CI) 계산, ⑤일관성비율(CR) 계산을 따르게 되며, 쌍체비교는 가장 상위의 계층에서부터 시작하며 바로 아래에 있는 레벨에서 비교되어야 할 요소를 취한다. 본 계층에서 가장 먼저 산정할 것은 단계 2로, 가중치 산정 및 일관성 검정 계산은 다음과 같다.

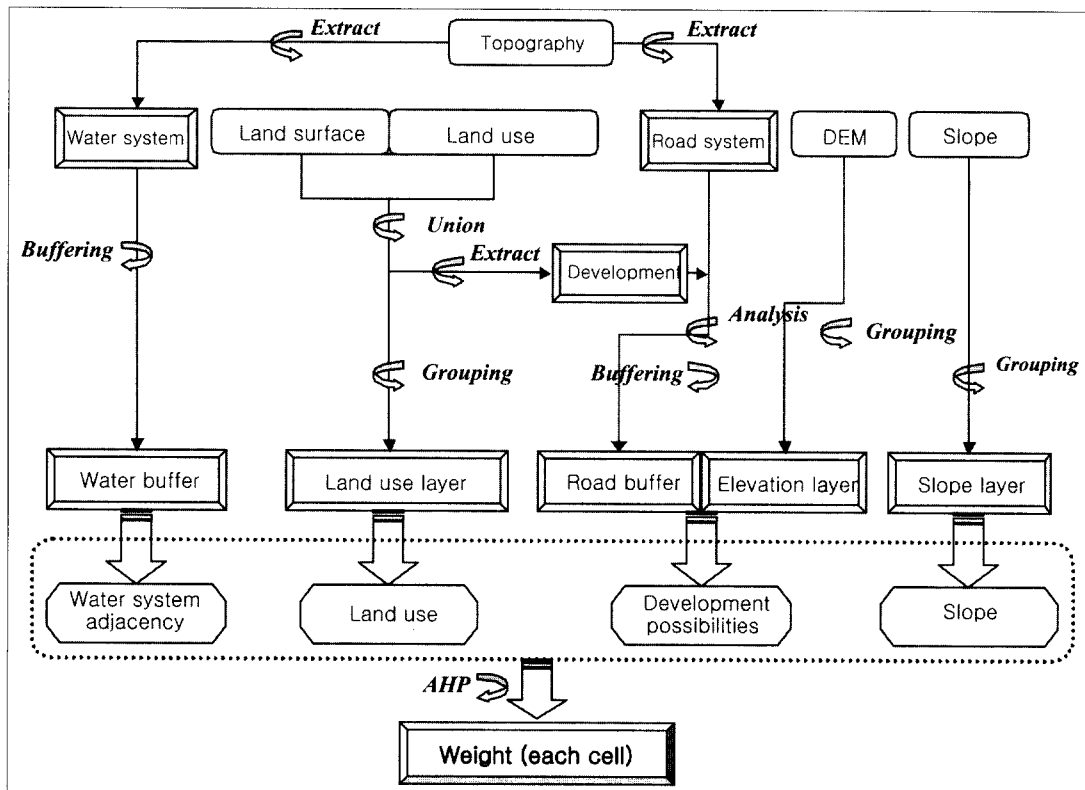


Fig. 3. Flow chart of the expert choice model.

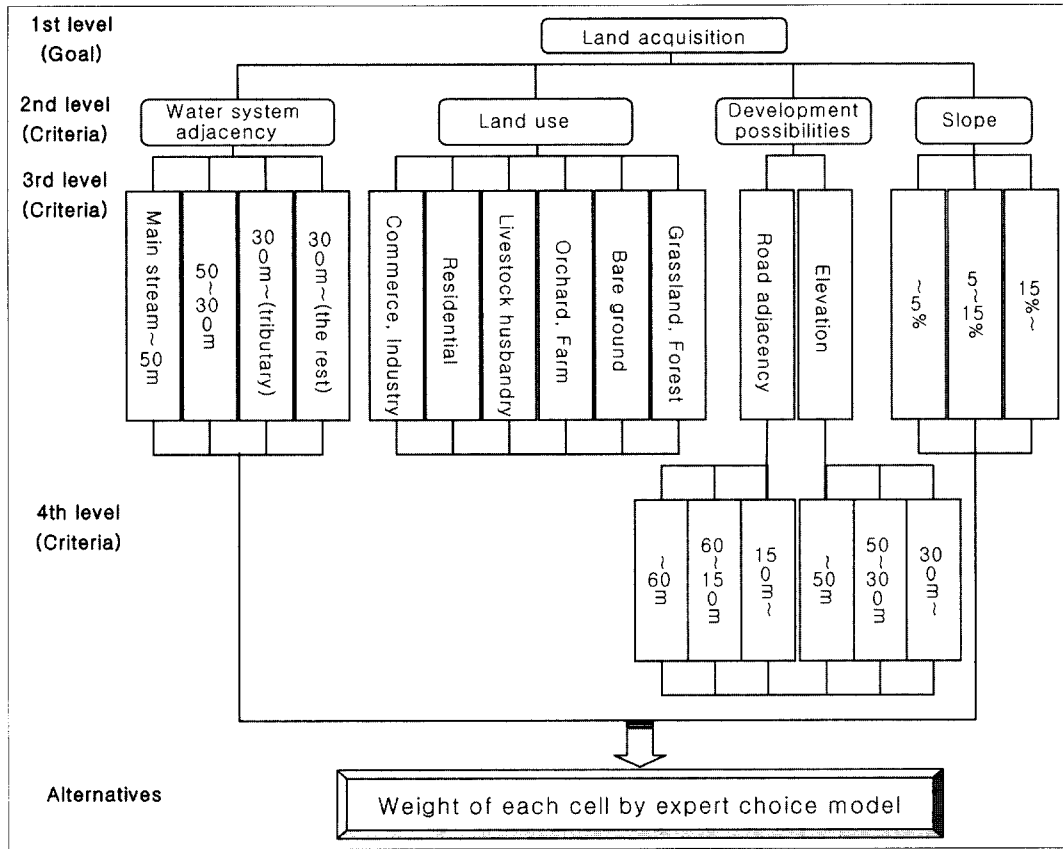


Fig. 4. The hierarchy of land acquisition priority.

① 쌍체비교 행렬 결정

Table 4에서 2단계 속성은 왼쪽 옆에 있는 속성을 기준으로 위쪽 행에 있는 요소를 비교하게 되는데 일례로 수체인접이라는 속성은 토지이용이라는 속성과 비교하여 그 중요도를 정량화하게 되는데 이때 Table 1의 기본 척도에 근거하게 된다. Table 4의 값 3은 기본척도에 근거해 '약간 중요함'을 나타내게 된다. 이때 척도에 근거하여 각 속성을 Table 4처럼 비교하여 수치를 결정하는 작업이 필요하며 본 연구에서는 개별질문조사서를 거치지 않고 2001년 5~7월 두 차례에 걸친 수질 전문가들과의 면담을 통해 각 가중치를 도출하였다.

② 상대적 가중치 계산

Table 4에 근거하여 식 (10) 및 식 (11)의 과정에 따라 상대적 가중치를 계산하였다. 2단계에서 각 속성의 상대적 가중치는 수체인접, 토지이용, 개발가능성, 경사도 순으로

각 0.535, 0.246, 0.150, 0.069로 계산되었다.

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 4 & 5 \\ 0.33 & 1 & 2 & 4 \\ 0.25 & 0.5 & 1 & 3 \\ 0.20 & 0.25 & 0.33 & 1 \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} V_1 = (1*3*4*5)^{1/4} \\ V_1 = (0.33*1*2*4)^{1/4} \\ V_1 = (0.25*0.5*1*3)^{1/4} \\ V_1 = (0.2*0.25*0.33*1)^{1/4} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} 2.783 \\ 1.278 \\ 0.783 \\ 0.359 \end{vmatrix} \quad (10)$$

$$w_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \begin{vmatrix} 2.783/5.203 \\ 1.278/5.203 \\ 0.783/5.203 \\ 0.359/5.203 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.535 \\ 0.246 \\ 0.150 \\ 0.069 \end{vmatrix} \quad (11)$$

③ 최대고유치( $\lambda_{max}$ ) 계산

일관성지수 및 비율을 계산하기 위해 아래 식 (12)와 (13)을 통해 최대고유치의 값을 도출하였다.

Table 4. Reference Data

Criteria (2nd level)	Water system adjacency	Land use	Development possibilities	Slope
Water system adjacency	1.00	3.00	4.00	5.00
Land use	0.33	1.00	2.00	4.00
Development possibilities	0.25	0.50	1.00	3.00
Slope	0.20	0.25	0.33	1.00



$$\lambda_i = \frac{AW_i}{W_i} = \begin{vmatrix} 2.219/0.535 \\ 1.001/0.246 \\ 0.614/0.150 \\ 0.288/0.069 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4.118 \\ 4.075 \\ 4.083 \\ 4.164 \end{vmatrix} \quad (12)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum \lambda_i}{n} = \frac{16.470}{4} = 4.118 \quad (13)$$

④ 일관성지수(CI) 계산

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{4.118 - 4}{4 - 1} = 0.039 \quad (14)$$

⑤ 일관성비율(CR) 계산

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.039}{0.90} = 0.044 \leq 0.1 \quad (15)$$

위 식에서 알 수 있듯이 일관성비율이 0.044로 일관성 기준의 척도가 되는 0.1보다 작으므로 판단의 일관성이 있음으로 검정되었다.

하위 기준 역시 본 절차에 따라 가중치 도출 및 일관성 검정을 실시하였으며 세부기준별 가중치 및 3단계 기준에서의 일관성비율을 Table 5에 제시하였다.

## 4. 연구 결과 및 고찰

### 4.1. 격자내 유하시간( $t_0, t_c$ )

격자내 지면과 하천에서의 유하시간을 Fig. 5에 표현하였다. 100초 이하의 유하시간은 전체면적의 약 75%, 130초 이하는 약 85%의 점유율을 보였다. 유역 전체에서의 유하시간이 대부분 약 100초 전후의 낮은 값을 가지므로 강우 유출 시 비점오염물질이 신속히 다른 격자로 이동할 것임을 예상할 수 있다. 앞부분 값의 범위를 좀 더 세분하여 이를 지도상에 도시한 결과를 Fig. 9(a)에 제시하였다.

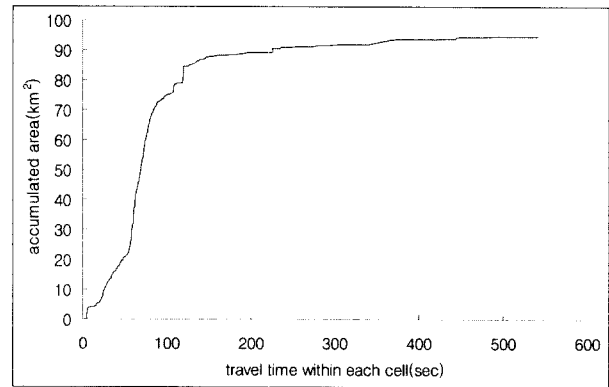


Fig. 5. Accumulated area according to the travel time within a cell.

Table 5. Relative and overall weights for objectives

Criteria		Relative weight	Overall weight	
Level 2	Level 3			Level 4
water body adjacence W=0.535 CR=0.013	adjacence to main stream ~ 50m	0.570	0.305	
	50 ~ 300m	0.239	0.128	
	300m ~ (adjacence to branch stream (~ 50m))	0.138	0.074	
	300m ~ (the rest)	0.052	0.028	
land use W=0.246 CR=0.07	commerce, industry	0.381	0.094	
	residential	0.256	0.063	
	livestock husbandry	0.167	0.041	
	orchard, farm	0.118	0.029	
	bare ground	0.054	0.013	
	grassland, forest	0.023	0.006	
development possibilities W=0.150 CR=0	road 0.833	~ 60m	0.576	0.086
		60 ~ 150m	0.192	0.029
		150m	0.064	0.010
	elevation 0.167	~ 50m	0.127	0.019
		50 ~ 300m	0.026	0.004
		300m ~	0.014	0.002
slope W=0.069 CR=0	15% ~	0.761	0.053	
	5 ~ 15%	0.158	0.011	
	~ 5%	0.082	0.006	

수체에서의 유하시간은 1~87초, 지표에서의 유하시간은 3~541초의 범위를 보임으로 대체적으로 수체에서의 유하시간이 더 짧게 모의되었다. 가장 낮은 값들을 표현하는 푸른 계열 이외의 값들은 경사도가 높지 않은 곳에 속했고, 이 중 유출계수가 작은 지역에서 유하시간이 큰 경향을 보였다.

4.2. 상대적 유하시간(t)

격자 내 유하시간으로부터 계산된 상대적 유하시간 역시 누적면적에 대한 시간에서 초단위를 분단위, 시단위, 일단위로 단계적으로 환산, Fig. 6에서 그래프로 제시하였다. 상대적 유하시간은 격자내 유하시간에 비해 시간분포가 고른 것이 관찰되는데 이는 격자의 값들이 중첩되면서 평균성을 나타내기 때문이다. 일단위에서는 1일 미만의 값들이 정수인 0으로 처리되는 자료의 손실이 일어나지만 분단위와 시단위를 볼 때, 0분부터 무리없이 면적이 누적되며, 동일한 그래프의 양상을 나타내므로 일단위까지 자료를 생략하지 않는 경우 자료의 반영에 무리가 없다고 판단, 자료량을 최소화하며 값을 제대로 반영해줄 수 있는 시단위를 분석에 적용하였다.

Fig. 9(b)에서 상대적 유하시간이 차지하는 면적을 분석하여 이를 Fig. 7에 제시하였다. 유역전체의 상대적 유하시간의 범위는 0~534시간으로 200시간 이하가 면적의 상당

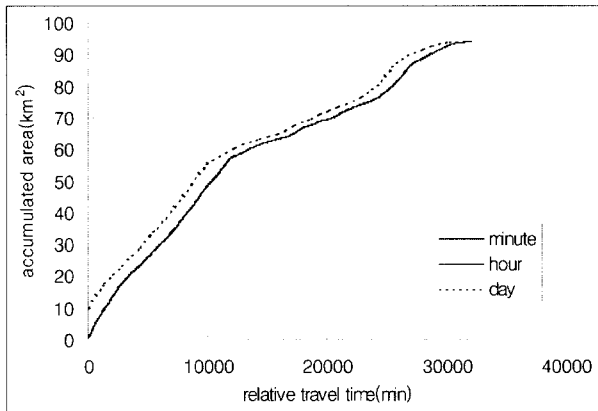


Fig. 6. Accumulated area according to the relative travel time.

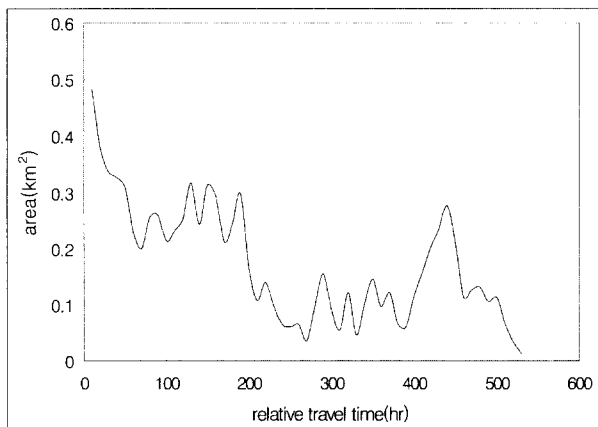


Fig. 7. Area according to the relative travel time.

부분을 차지하지만 유하시간의 경계를 2차원적인 면적으로 구분하여 상대적 유하시간에 따라 지수적인 면적의 증가를 나타내는 Hakanson이 사용한 유하시간 산정 결과에 비해 고른 분포를 보인다. 이는 실제 현실에서의 유하시간의 패턴을 더 잘 반영한 결과로 판단된다(Randhir et al., 2001).

전체적으로 격자 내 유하시간 및 상대적 유하시간은 실제 유하시간보다 값이 작게 나온 것으로 사료되는데 이는 국내에 획득이 어려운 자료를 가공하여 만드는데 따른 문제점으로 여겨진다. 그러나 유역의 전체적인 유하시간이 실제보다 작다 하더라도 근거 논문과 유사한 명확한 패턴을 나타낸다. 정확한 raw data에 근거해 수치상으로 정확한 유하시간이 나오는 것이 가장 바람직하겠으나 수치의 절대적인 크기가 아니라 비율에 의해 우선순위지수가 도출되므로 결과적인 값에는 영향을 주지 않는다. 향후 향상된 data로 유하시간을 계산하고 실험을 통해 이를 실제 검증하는 노력을 기울인다면 더 신뢰성 있는 연구 결과가 있을 것으로 사료된다.

4.3. 우선순위지수(I) 산정

우선순위지수의 나머지 한 부분인 전문가결정모델을 표현하는 격자별 가중치 레이어를 Fig. 9(c)에 제시하였다. 전문가결정모델의 격자별 가중치 레이어는 대체로 하천과 도로 인접 지역에 높은 값이 부여되어 선형의 경계를 보이고, 해당 토지이용의 가중치가 높을 때, 산발적으로 높은 가중치를 나타내었다. 이는 어떤 한 요인에 의해 결정된 것이 아니라, 수질에 영향을 미치는 주요 요인들이 그 중요성의 강도에 따라 고려되어 각 격자의 특성에 따라 반영된 결과로, 이러한 접근법은 우선순위지수의 산출을 위해 의미가 있다고 사료된다.

전문가결정모델을 표현하는 레이어에 상대적 유하시간으로부터 구축된 유하시간함수 레이어를 결합함으로써 최종 값이 산정되었으며 이를 Fig. 9(d)에 제시하였다. 최종적으로 산정된 우선순위지수는 하나의 요인이나 특정 지역으로 설명할 수 없는데 이처럼 수질에 대해 민감도가 높은 지역이 전유역 걸쳐 존재한다.  $\beta$ 가 변화더라도 우선순위지수에서의 영향이 없음을 확인하였으므로 Fig. 6의 유하시간함수 값은  $\beta$ 가 1이라는 가정하에 산정되었다. 또한 Fig. 8은 면적에 대한 누적우선순위지수(%)를 알려준다. 누적우선순위지수란 산정된 우선순위지수를 가장 높은 순으로 정렬시키기에 1~100까지의 순위를 부여한 후 위에서부터 누적시킨 값으로, 값 60이라면 전체 우선순위지수 중 상위 60%의 우선순위지수를 포함함을 의미한다. 그래프에서 초기에 면적에 대한 값이 급속히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 본 연구에서는 총 94 km<sup>2</sup>의 유역면적 중 10 km<sup>2</sup>의 면적만으로도 상위부터 약 70%에 해당하는 우선순위지수에 도달할 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 유역 전체 면적 중 수질에 대해 민감도가 높은, 비교적 작은 면적의 토지를 매입하여 관리함으로써 상수원 보호의 목적을 효율적으로 달성할 수 있음을 의미하며 이를 위해서는 적지의 선택적인 토지매입이 요구됨을 시사한다.

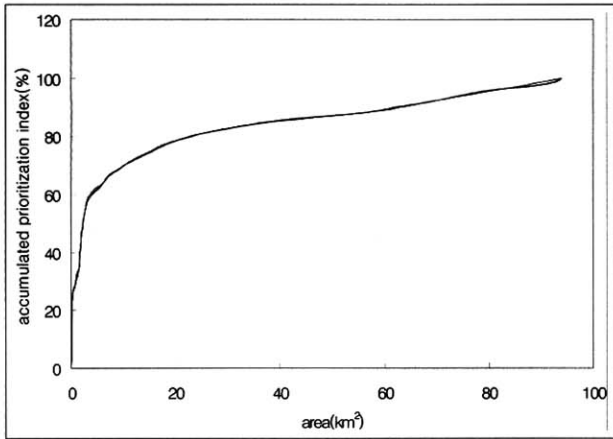


Fig. 8. Accumulated prioritization index according to area.

### 5. 결론

본 연구는 상수원 보호를 위한 토지매입의 우선 순위를 결정할 수 있는 과학적 기준을 제시하고자 하였다. 이를

위해 수질에 영향을 미치는 주요 요인들을 선정, 다중요인 의사결정기법 중 하나인 계층분석법을 통해 그 중요도를 산출하였고 WLP 모델을 적용하여 토지우선순위를 결정하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

유역 전체를 모의하고 법적, 경제적인 요인을 배제하였을 때 팔당 유역의 수질에 영향을 미치는 일반적인 요인으로 수체인접성, 토지이용, 개발가능성, 경사도를 선정하였다. AHP를 사용해 이를 분석한 결과, 다중 요인들이 가중치에 맞게 반영된 레이어가 구축되었다. 상대적 유하시간은 최종 유입구에서 떨어진 평면적인 거리뿐 아니라 지형에 따른 물의 흐름과 이동경로에 의해 좌우되었다. 따라서 본 연구에서 구해진 상대적 유하시간은 선형적인 증가가 아니라 자연 환경적인 요인이 반영된 유하시간으로 기존의 평면적 거리에 따른 유하시간보다 현실을 더 정확히 모사할 수 있었다.

우선순위지수는 하천인접, 도로인접 등 어느 한 특징적인 요인이나 지역에만 국한된 것이 아니라 전체 유역에서 각 격자의 특성에 맞게 산정되어 나타났으므로 효과적인 수질 보호 목적을 달성하기 위해서는 적지의 선택적 매입이 요구된다. 연구대상지역에서 누적우선순위지수는 면적에 대해

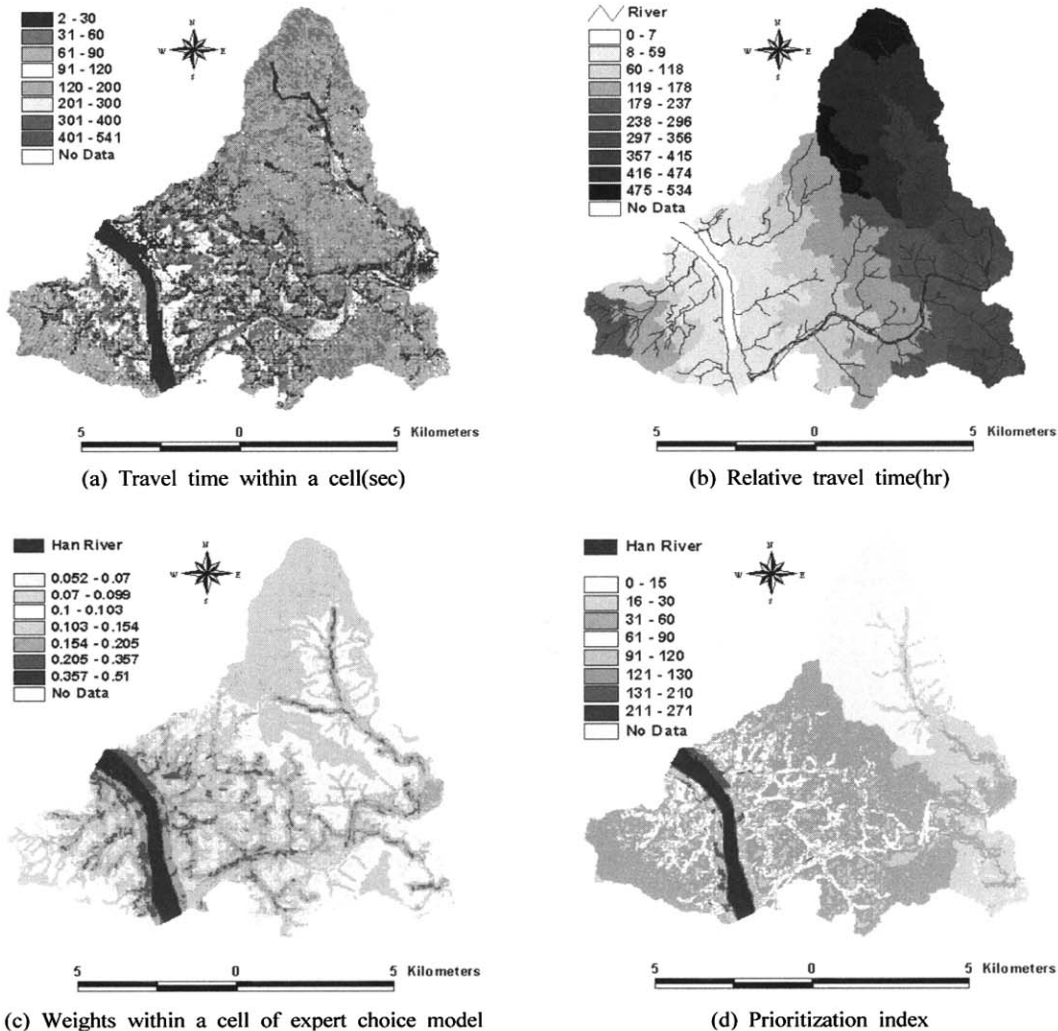


Fig. 9. The results displayed in map.

로그함수적 증가를 보였다. 따라서 유역 전체의 수질에 대해 민감도가 높은, 비교적 작은 부분의 토지를 매입하여 관리함으로써 일정 예산에서 극대의 수질개선 효과를 도모할 수 있다.

WLP 모델은 AHP를 다중요인 의사결정의 기법으로 사용하여 정량적, 정성적인 기준을 비율척도로 동시에 반영함으로써, 지역의 특성과 필요에 따라 융통성 있는 조절이 가능하다. 여기에 현실을 잘 반영하는 유하시간 항목을 결합함으로써 현실적 요구사항을 포괄하면서도 과학적 근거가 명확한 장점을 가지고 있다. 본 모델은 국내의 토지매입 우선순위설정에서 적용가능성이 크다고 사료되며, 향후 지가나 소유자의 정보 등과 결합할 경우, 경제적인 요인을 고려한 현실적인 토지매입 여부의 결정에도 기여할 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 금수강산21 과제 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 문현주, 수계 수질개선을 위한 효율적인 관리체계 및 적정 투자 비용분담 정책에 관한 연구, 한국환경정책평가연구원, pp. 95-107 (1998).
- 박종화, 서창완, 김원주, 이동근, 생태도시 계획개념을 적용한 서울시 토지이용 적지분석, *한국GIS학회지*, 4(2), pp. 107-119 (1993).
- 양평군, 양평군 환경보전 종합계획, 양평군, pp. 25-29 (2000).
- 이명우, 지리정보체계를 이용한 생태환경분석 및 적지분석-자연생태계 보전지역 설정 및 평가 모형을 중심으로, *환경영향평가학회지*, 6(2), pp. 61-80 (1997).
- 정규봉, AHP를 이용한 탄약 지속일수 산정방법 선정에 관한 연구, 연세대학교 석사학위 논문 (1999).
- 정부합동, 판당호 등 한강수계 상수원 수질관리 특별종합대책, 정부합동, pp. 77-84 (1998).
- 최지용, 신은성, 도시지역 비점오염원 관리방안 연구, 한국환경정책평가연구원, pp. 5-11 (1998).
- 한강유역관리청, 경안천 유역 오염원 현황 보고서, 한강유역관리청 (1999).
- Chow, V. T., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, p. 900 (1964).
- Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, MDC Land Acquisition Plan Wachusett, Quabbin, Ware River, and Sudbury Watersheds, 1996-2006, Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, Massachusetts (1996).
- Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, Watershed Protection Plan Update for Metropolitan Boston Water System Wachusett Reservoir, Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, Massachusetts (1998).
- Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, Land Acquisition Fact Sheet, FS98.01, Metropolitan District Commission/Division of Watershed Management, Massachusetts (1999).
- New York City, New York City Watershed Memorandum of Agreement, [http://www.nysecf.org/tas/MOA/moa\\_2.htm](http://www.nysecf.org/tas/MOA/moa_2.htm) (1997).
- Randhir, T. O., O'Conner, R., Penner, P. R., Goodwin, D. W., A watershed-based land prioritization model for water supply protection, *Forest Ecology and Management*, 143, pp. 47-56 (2001).
- Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, pp. 70-92 (1980).
- The Trust for Public Land, TPL Report-Protecting the Source, The Trust for Public Land, San Francisco, pp. 2-28 (1997).
- The Trust for Public Land, Building Green Infrastructure: Land Conservation as a Watershed Protection Strategy, The Trust for Public Land, San Francisco, pp. 2-35 (2000).
- USDA, Chesapeake Bay Riparian Handbook: A Guide for Research, Establishing and Maintaining Riparian Forest Buffers, NA-TP-02-97, USDA, Washington, D. C. (1998).
- U. S. EPA, Protecting Sources of Drinking Water: Selected Case Studies in Watershed Management, EPA 816-R-98-019, Washington, D. C. (1999).