

## GIS를 이용한 지하저장탱크의 위해성 예비평가체계 개발

### Development of Preliminary Hazard Ranking System for Underground Storage Tanks Using Geographic Information System (GIS)

황상일(Sang - Il Hwang)\* · 이상훈(Sang - Hoon Lee)\* · 이동수(Dong - Soo Lee)\*

**요약 :** 지하저장탱크에서 누출된 유기화합물은 인근의 토양과 지하수를 오염시키고 있다. 지하저장탱크를 관리하기 위해서는 탱크로 인한 환경 위해가능성을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 지하저장탱크의 상대적 위해성을 추정할 수 있는 예비평가체계를 구축하였다. 지하저장탱크에 대한 위해성 예비평가체계를 평가인자의 선정, 평가인자의 계층구조화, 평가인자별 가중치 설정, 위해가능성 총점수 산정, 위해성평가 등 다섯 단계로 구성하였다. 구축된 예비평가체계를 서울시 관악구 소재 주유소에 적용하였고, 지리정보시스템을 이용하여 평가한 결과, 사례지역의 주유소는 위해가능성에 따라 세가지로 분류되는데 상대적으로 위해성이 높은 7개소의 주유소가 파악되었다. 또한 민감도 분석을 통하여 가중치 변화에 영향을 받지 않고 위해성이 높게 나타나는 4개소의 주유소를 파악하였다. 본 평가체계는 계층구조와 쌍대비교에 의한 가중치설정기법을 도입하였으므로 사용자가 자신의 전문적인 경험에 따라 본 평가체계를 유연하게 적용할 수 있을 것이다. 하지만 앞으로 현장조사결과와 비교하여 평가체계를 검증하고 개선하는 작업이 수행되어야 할 것이다.

**Abstract :** Spills or leaks of hazardous organic compounds from underground storage tanks (USTs) are common contaminant sources of soil and groundwater. It would aid in managing USTs to assess and rank the potential environmental hazard posed by the USTs. Therefore, a preliminary hazard ranking system of USTs is developed in this study. The system is combined with GIS and consists of five steps: 1) selection of significant factors, 2) determination of the hierarchy of the factors, 3) determination of the weights, 4) calculation of the potential hazard, and 5) hazard assessment. The system is applied to the gas stations in Kwanak-gu, Seoul. The results indicate that the gas stations can be categorized in three groups as highly hazardous, less highly hazardous, and weakly hazardous. Seven gas stations belong to the highly hazardous group. Through the sensitivity analysis, four stations appear to possess high hazard potentials regardless of weights assigned to the factors. It appears that a user can make flexible application of the hazard ranking system with the user's experience and particular purposes. However, the system still needs validations against field survey data.

#### 서 론

지하저장탱크(Underground storage tanks)의 누유(漏油)에 의한 환경오염문제가 대두되고 있다. 지하저장탱크는 토양 및 지하수의 주요오염원으로 간주되는데, 미국에서는 사용중인 지하저장탱크의 10~30%가 누유되고 있는 것으로 추정하고 있다(Hudak *et al.*, 1995; Taylor, 1986, 1987). 국내의 경우 1993년부터 1995년까지 일부 주유소와 지하저장탱크에 대해 누유상을 조사한 결과 175개 주유소 중 75%인 129개 주유소에서, 529기 탱크 중 36.1%인 191기의 탱크에서 누유가 발생하고 있음이 밝혀졌다(김화중, 1995). 또한 1995년 토양환경보전법이 제정됨으로서 주유소의 지하저장탱크에 대한 누유검사와

정화작업이 의무화되었고, 오염방지에 중심을 둔 지하저장탱크 규제가 시작되었다(이승희, 1996). 따라서 누유가능성이 높은 지하저장탱크와 누유시 위해성이 높은 지역에 위치하고 있는 지하저장탱크를 파악하기 위해 지하저장탱크의 누유가능성과 누유시 주변 환경에 미칠 위해성을 파악할 수 있는 평가방법이 필요하다.

위해성 평가란 특정오염물질의 존재나 존재 가능성 혹은 사용에 의해 인간의 건강과 환경에 부과되는 위해성을 나타내기 위해 수행되는 정량적, 정성적 평가를 의미하는데(U.S. EPA, 1989), 평가의 목적에 따라 예비평가와 완전평가로 나눌 수 있다(Patton, 1993). 일반적으로 지하저장탱크는 그 수가 많을 뿐 더러 넓은 지역에 분포하고 있고, 오염방지를 위해 사용할 수 있는 인적·물적 자원은 한정되어 있으므로 모든 탱크에 대해 동일한 기준으로 가용자원을 할당할 수 없다(Hudak *et al.*,

\*서울대학교 환경대학원(Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

1995). 따라서 완전한 수준의 위해성 평가에 앞서 먼저 오염원에 의한 오염정도 분류 및 오염원 보수의 상대적 우선 순위화하여 위해성이 높은 탱크에 대해 자원을 우선적으로 할당할 수 있는 간편한 예비평가체계를 강구하는 것이 바람직하다(홍상표와 김정욱, 1995).

지금까지 점오염원(point source)·비점오염원(non-point source)에 의한 토양 및 지하수의 오염취약성이나 오염원의 위해성에 관련된 다양한 평가기법이 개발되어 왔는데, 이를 평가기법은 주로 비료나 농약사용 등의 비점오염원 및 폐기물매립지 등을 주요 대상으로 하였고, 평가에 사용되는 기법도 등급에 따른 가중치를 사용하는 선형조합기법에서 복잡한 수치모형을 사용하는 기법 그리고 통계적 기법에 이르기 까지 다양하게 발달되어 왔다. 예를 들면 DRASTIC(Aller *et al.*, 1987)은 대표적인 등급-가중치 기법으로서 각국에서 비점오염원에 의한 지하수 취약성 평가에 널리 사용되어 왔고, 폐기물 매립지의 위해성 평가에 널리 사용되는 Hazard Ranking System(HRS)도 등급-가중치 기법을 사용하는 기법인데, 위해 매립지에 대한 National Priority List(NPL) 작성을 위해 미국에서 널리 사용되고 있다. 국내에서도 비점오염원과 매립지에 대한 위해성 평가 시도되어 왔다. Landfill Site Preliminary Assessment(LASPAS, 홍상표와 김정욱, 1995)는 등급-가중치기법을 사용하여 불량매립지에 대한 위해성을 예비평가하는 모형으로서 난지도와 화성 그리고 김포매립지에 적용되었다. 황난희(1996)는 DRASTIC 모형을 이용하여 제주도 중산간지역에 대한 지하수오염 취약성을 예측하였다. 그러나 기존의 평가체계들은 주로 비점오염원이나 매립지를 대상으로 하는 반면 지하저장탱크를 대상으로 하는 평가체계는 없는 실정이다. 특히 국내의 경우 최근에 들어서야 지하저장탱크를 토양 및 지하수에 대한 오염원으로서 인식하기 시작하였기 때문에 지하저장탱크에 대한 개별적인 오염상황 조사에 머문 채 아직 지하저장탱크를 대상으로 위해성을 평가하려는 시도는 없었다.

또한 지하저장탱크에 의해 야기되는 위해성 문제는 저장탱크의 특성, 오염방지장치 유무, 주변의 토양 및 수리지질 특성, 지표수 특성, 인근지역의 지하수 이용특성 등 다양한 요인에 의해 영향을 받고, 도시지역의 경우에는 주유소와 같은 다수의 지하저장탱크가 존재하므로 탱크 주변의 환경 인자에 관한 공간정보의 효율적인 처리이외에도 탱크 자체에 대한 다양한 정보를 처리하는 것이 필요하다. 따라서 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)이 도시지역에서의 지하저장탱크의 상대적 환경위해성을 평가하는데 유용하게 활용할 수 있다(Hudak *et al.*, 1995).

따라서 본 연구에서는 지하저장탱크에 대한 위해성 예비평가체계를 구축하고 서울특별시 관악구소재 주유소를 대상으로 GIS를 이용하여 구축된 평가체계를 적용하고자 하였다.

## 연구범위 및 방법

### 연구범위

지하저장탱크에서 누출된 유기화합물은 대기, 지표, 지표하부를 거쳐 인간을 비롯한 생태계에 영향을 미치는데 본 연구에서

는 유기화합물의 거동을 지표하부의 토양과 지하수에 초점을 두었다. 따라서 위해성을 평가함에 있어서 지표하부의 매질을 중심으로 고려하였고 탱크 부근의 지하수 이용정도도 고려하였다. 이것은 누유가 발생하더라도 인근의 지하수 이용정도에 따라 누유가 미치는 영향이 달라지기 때문이다. 또한 평가대상탱크는 유류나 유기용매와 같은 Non-Aqueous Phase Liquid(NAPL)를 저장하는 지하저장탱크로 한정하였다.

### 연구방법

위해성 예비평가체계는 평가인자의 선택, 평가인자의 계층구조화, 평가인자의 가중치 결정, 위해가능성 총점수 산출, 위해가능성 평가의 다섯 과정을 통해 구축하였고, 구축된 평가체계를 서울특별시 관악구 소재 주유소에 대하여 사례분석을 실시하였다. 사례분석에서 사용되는 평가인자는 해당자료를 사례지역에서 획득할 수 있는가에 따라 선택여부를 결정하였는데, 지하저장탱크의 위해가능성에 연관된 평가인자중 사례지역에서 획득할 수 있는 자료들을 평가인자로 선택하였다. 선택된 평가인자 각각에 대하여 GIS를 이용하여 주제도를 작성하였고, GIS프로그램은 PC ARC/INFO V3.4D+를 이용하였다. 각 주제도에는 공간분포에 따른 해당 속성자료와 속성별 가중치가 입력되었고, 개별 주유소와 주유소가 위치하고 있는 지점에 대해 평가인자 각각의 속성값과 가중치를 파악하고, 이를 승합산하여 위해 가능성 점수를 산출하였다. 주유소별로 산출된 점수를 비교하여 주유소의 상대적 위해가능성을 평가하였다.

위해가능성 점수를 산출한 후 평가인자들에 대한 가중치를 변경하면서 평가결과의 변화를 파악하였다. 각 부문별로 평가인자사이의 중요성을 동등, 우월, 열등의 세 가지로 나누고 이를 조합하여 여러 개의 가중치 집합을 얻고 각각의 가중치 집합에 대한 위해가능성 총점수를 산출하여 평가하였다.

## 결과 및 고찰

### 지하저장탱크의 위해성 예비평가체계 구축

본 연구에서 구축된 지하저장탱크에 대한 위해성 예비평가체계는 위해성에 영향을 미치는 평가인자의 선정, 선정된 인자의 계층구조화, 평가인자 속성(범위, 등급) 및 인자사이의 상대적 중요성을 반영하는 가중치의 선정, 위해가능성 총점수 산출, 위해성 순위 책정등의 과정으로 구성하였다(Figure 1).

**평가인자의 선정 :** 지하저장탱크에 의한 위해성을 평가하기 위해서는 오염원에서 오염물질이 배출되려는 경향을 나타내는 탱크로부터의 유출 측면과 누유가 지하수계에 도달하려는 경향 및 주변 정호나 하천으로 이동하려는 경향을 나타내는 지하에서의 거동에 관한 측면을 고려하여야 한다. 이에 평가인자는 크게 누유가능성과 누유시 주변 환경의 오염취약성의 두 가지로 나누었다(Figure 2).

**누유가능성에 관련된 인자는** 탱크 자체의 특성과 누유를 방지할 수 있는 장치의 존재 유무로 구분하고, 전자는 탱크의 건설년도, 재질, 저장용량, 저장물질, 점검결과, 운영상태 등으로, 후자는 누유감지장치, 부식방지장치, 훌림/넘침 방지장치, 2차 저장구조 유무 등으로 구분하였다.

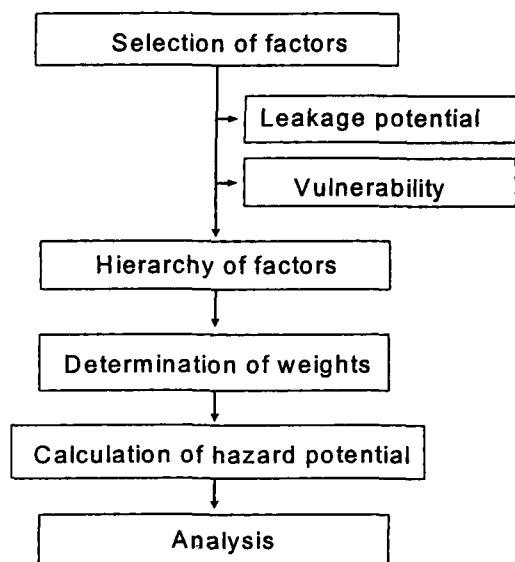


Figure 1. Flow chart of preliminary hazard ranking determination for underground storage tanks.

누유시 주변 지하환경의 오염취약성을 나타내는 인자는 토양 특성, 수리지질 특성, 주변의 지하수이용 특성 등으로 구분하였다. 토양특성을 토성(texture), 공극률, 투수계수, 부식력 등의 인자로 나누었고, 수리지질 특성을 대수층의 종류, 투수계수, 공극률, 지하수위, 하천이나 호수와의 거리 등의 인자로 나누었다.

지하수이용 특성은 정호와의 거리, 지하수 사용량, 용도 등으로 나누었다.

평가인자의 계층구조화 : 계층구조 기법은 1970년대에 등장하여 최근에는 오염원의 위해성 평가, 매립지 적지분석 등에 활용되어 왔다(Saaty, 1980; Siddiqui *et al.*, 1996; Hagemeister *et al.*, 1996). 계층구조를 사용함으로써 상위단계와 하위단계 인자의 상호 연관성을 파악할 수 있고, 평가에 있어서 안정성과 유연성을 얻을 수 있다(Saaty, 1980). 따라서 지하저장탱크의 위해성을 평가하기 위하여 본 연구에서 선정된 평가인자를 Figure 2와 같이 계층구조로 조직화하였다.

가중치 결정 : 본 연구에서는 계층구조내에서 인자들의 가중치를 쌍대비교(pairwise comparison)를 통해서 결정하였다. 두 인자 사이의 중요성에 따라 수치를 할당하여 행렬에 대입한다. 이 때 할당되는 수치는 Table 1을 따른다. 모든 인자에 대해 쌍대비교를 수행하여 행렬이 만들어지면 이 행렬에 대해서 가장

Table 1. Index values representing relative importance of two factors

Relative importance	Given values
Equal importance or indifference	1
Weak importance	3
Strong importance	5
Demonstrated improtance	7
Absolute importance	9
Intermediate	2, 4, 6, 8

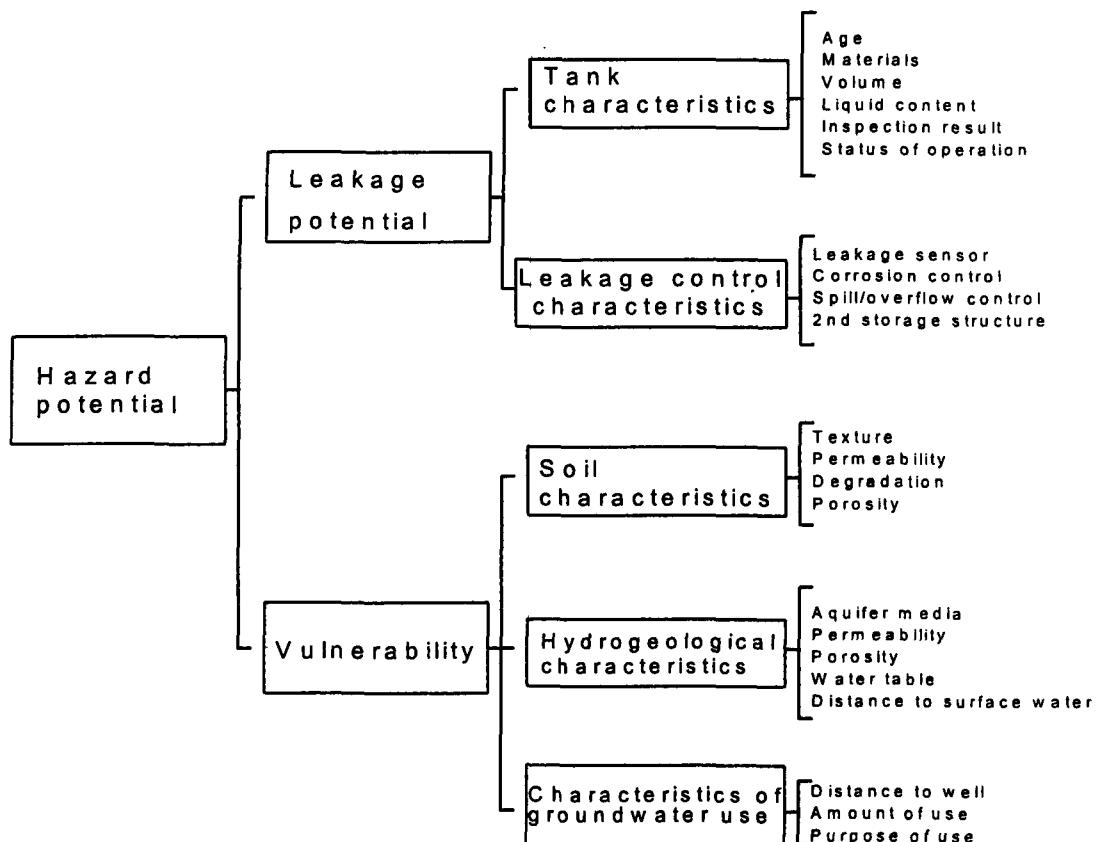


Figure 2. Hierarchy of the selected factors.

**Table 2.** Factors selected in the case study

Leakage potential	Tank age, Tank volume
Vulnerability	Soil texture, Aquifer media, Distance to stream and well

큰 고유치(eigenvalue)를 갖는 고유벡터(eigenvector)를 구한다. 고유벡터는 우선 순위를 나타내고 고유치는 이러한 우선순위에 대한 측도가 된다(Saaty, 1980).

위해가능성 점수 산출 : 계층구조의 단계에 따라 환산식은 변형되는데, 4단계 계층구조에 대한 총점수 환산식은 다음과 같다 (Saaty, 1980).

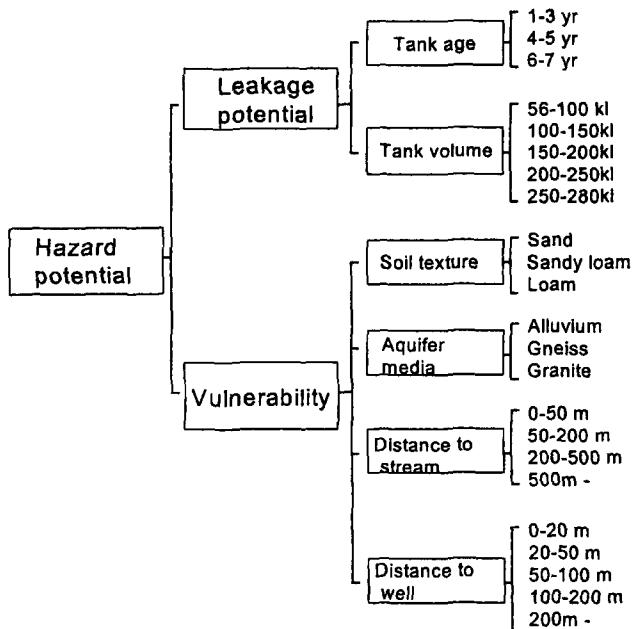
$$\text{위해가능성 총점수} = \sum_i^n [w_i^2 \sum_j^n (w_{ij}^3) (w_{ijk}^4)]$$

여기에서,  $n_2$ 는 2단계의 평가인자 개수,  $w_i^2$ 는 2단계 평가인자 i의 가중치,  $n_3$ 는 2단계 평가인자 i에 연관되는 3단계 평가인자 개수,  $w_{ij}^3$ 는 2단계 평가인자 i의 3단계 평가인자 j의 가중치,  $w_{ijk}^4$ 는 3단계 평가인자 j의 4단계 평가인자 k의 속성값 가중치이다.

### 사례분석

구축된 예비평가체계를 서울시 관악구소재 주유소에 대하여 사례분석을 실시하였다.

평가인자 선정 및 계층구조화 : 지하저장탱크에 의한 위해가능성을 평가하기 위해서 사용하는 평가인자중 사례지역에 대해서 구축된 자료현황과 이용성에 제약을 받아서 획득가능한 자료만을 평가인자로 선택하였다(Table 2). 지하수위에 대한 자료는 본 연구를 수행하는데 중요한 인자지만 아직까지 사례지역에 대해서 지하수위가 조사되지 않아 평가인자에서 제외하였고, 대수총에 대한 조사 역시 이루어지지 않아 기반암 자료를 사용하였는데 이는 사례지역내에서 충적층이 분포하는 이외의 지역은 얇은 토양층 하부에 놓여 있는 편마암 및 화강암이 대수총의 역할을 할 것으로 추측되기 때문이다. 토양특성을 나타내는 인자로는 토양의 토성을 선택하였다. 본 지역의 토양에 대한 종합적인 연구는 없었고 따라서 공극률과 투수계수는 토성에 따라 달라진다고 설정하였다. 하천과 지하수 이용에 관련되어서는 각각 하천과의 거리, 정호와의 거리를 평가인자로 선택하였다.

**Figure 3.** Hierarchy of the factors in the case study.

사례지역 주유소의 지하저장탱크는 모두 강철 탱크이고, 부식방지장치와 누유감지장치를 갖고 있는 반면, 훌림/넘침 방지장치는 구비되어 있지 않았다. 2차저장구조에 대한 자료는 구축되어 있지 않았다. 따라서 주유소별로 탱크재질과 오염방지장치에 대한 상대적 차이가 존재하지 않으므로 평가인자에서 제외하였다. 저장물질의 종류도 평가인자에서 제외하였는데 이는 주유소내 탱크가 전부 LNAPL인 유류를 저장하고 있었기 때문이다(관악구, 1996a). 선택된 평가인자에 대하여 1단계의 위해가능성에서부터 4단계의 속성인자까지 모두 4단계로 구조화하였다(Figure 3).

가중치 결정 : 계층구조의 각 단계별로 평가인자사이의 가중치를 쌍대비교를 통해 얻었다(Table 3). 가중치 결정에 있어서 위해가능성이 저장탱크 주변환경보다는 저장탱크 자체의 속성에 더 크게 영향을 받도록 하기 위해서 누유가능성이 오염취약성에 비해 중요하다고 설정하였다. 또한 탱크의 속성중 저장용량에 비해 건설연도가 중요하도록 설정하였다. 오염취약성의

**Table 3.** Weights of the selected factors

	Leakage potential	Vulnerability	Weights		
Leakage potential	1	3	0.75		
Vulnerability	1/3	1	0.25		
	Tank age	Tank volume	Weights		
Tank age	1	6	0.85		
Tank volume	1/6	1	0.15		
	Soil texture	Aquifer media	Distance to stream	Distance to well	Weights
Soil texture	1	5	7	1/3	0.32
Aquifer media	1/5	1	3	1/5	0.11
Distance to stream	1/7	1/3	1	1/5	0.06
Distance to well	3	5	5	1	0.51

경우 정호거리 인자를 가장 중요하게 간주하였는데 이는 위해 가능성이 주유소 주위의 지하수 이용정도에 따른 영향을 충분히 반영하도록 하기 위해서이다. 또한 계층구조의 최하위 단계인 속성범위 및 속성범위별 가중치를 결정하였다(Table 4).

#### 가. 토양의 토성 및 대수층 종류별 가중치

관악구 토양은 크게 양토, 사양토, 모래 등 3가지로 구분할 수 있는데 모래는 두 개의 하천을 따라 협소하게 발달되어 있고 그 외의 지역은 양토와 사양토로 덮여 있다. DRASTIC모형에서 토성별로 모래는 9, 사양토는 6, 양토는 5의 등급(rating)을 각각 할당하였는데(Aller *et al.*, 1987), 본 연구에서는 DRASTIC의 등급값을 기초로 모래는 사양토와 비교해서 매우 강한 우위, 양토에 절대적 우위, 사양토는 양토에 강한 우위로 설정하고 가중치를 모래 0.77, 사양토 0.18, 양토 0.05으로 결정하였다.

관악구 지질은 경기편마암복합체의 일부로서 주로 편마암류, 그 후기에 관입한 화성암류, 충적층 등으로 이루어져 있다. 기반암은 크게 흑운모 괴상, 호상 편마암, 흑운모 편암, 대보 화강암, 충적층으로 구분된다. 이에 관악구의 대수층 종류를 크게 편마암, 화강암, 충적층으로 구분하였는데 가중치는 DRAS-TIC의 등급값을 기초로 설정하였다. 충적층은 편마암과 화강암에 매우 강한 우위, 편마암은 화강암에 약한 우위로 설정하고 편마암 0.16, 화강암 0.08, 충적층 0.76으로 가중치를 할당하였다.

#### 나. 하천거리 및 정호거리별 가중치

관악구에는 두 개의 하천이 있는데 관악산으로부터 발원하여 관악구 서부에서 합류하는데 갈수기의 하천유량은 매우 적으나, 홍수기에는 유량이 크게 증가한다. Kueper and Gerhard (1995) 및 Corapcioglu *et al.*(1996)의 실험 결과를 고려하여 하천으로부터 주유소까지의 거리에 따라 50 m 미만, 50~200 m, 200~500 m, 500 m 이상 등 4단계로 나누어 가중치를 각각 0.62, 0.23, 0.11, 0.04로 정하였다.

관악구 지역의 지하수이용 지점은 주로 고지대를 중심으로 분포하고 있으나, 식품제조업과 목욕탕 등은 평지에 위치하고 있다. 지하수를 이용하고 있는 지점중 가정용이 159지점으로 가장 많은 용도로 쓰이고, 목욕탕은 31지점, 콩나물과 두부 등의 제조업이 8개 지점 등이다. 약수터는 대부분 산악지역에 위치하고 있는데 총 35개 지점이 있다. 일일 사용량은 목욕탕이 지점당 하루 평균 20,000 l로 가장 많은 양을 사용하고 있다(관악구, 1996b). 정호로부터의 주유소까지의 거리는 20 m 미만, 20~50 m, 50~100 m, 100~200 m, 200 m 이상 등 5단계로 분류하고 각각의 가중치는 0.53, 0.27, 0.12, 0.06, 0.02로 할당하였다.

#### 다. 주유소 특성별 가중치

관악구에는 26개의 주유소에 총 144개의 지하저장탱크가 설

**Table 4. Weights of the attributes**

Soil texture	Sand	Sandy loam	Loam	Weights		
Sand	1	7	9	0.77		
Sandy loam	1/7	1	5	0.18		
Loam	1/9	0.2	1	0.05		
Aquifer media	Gneiss	Granite	Alluvium	Weights		
Gneiss	1	3	1/7	0.16		
Granite	1/3	1	1/7	0.08		
Alluvium	7	7	1	0.76		
Distance to stream	0~50 m	50~200 m	200~500 m	500 m~	Weights	
0~50 m	1	5	6	7	0.62	
50~200 m	1/5	1	4	5	0.23	
200~500 m	1/6	1/4	1	5	0.11	
500 m~	1/7	1/5	1/5	1	0.04	
Distance to well	0~20 m	20~50 m	50~100 m	100~200 m	200 m~	Weights
0~20 m	1	5	6	7	9	0.53
20~50 m	1/5	1	5	7	8	0.27
50~100 m	1/6	1/5	1	5	7	0.12
100~200 m	1/7	1/7	1/5	1	5	0.06
200 m~	1/9	1/8	1/7	1/5	1	0.02
Tank age	5~7 yr	3~5 yr	1~3 yr	Weights		
5~7 yr	1	7	9	0.77		
3~5 yr	1/7	1	5	0.18		
1~3 yr	1/9	1/5	1	0.05		
Tank volume	56~100 kL	100~150 kL	150~200 kL	200~250 kL	250~280 kL	Weights
56~100 kL	1	1/4	1/7	1/8	1/9	0.02
100~150 kL	4	1	1/5	1/7	1/7	0.06
150~200 kL	7	5	1	1/6	1/6	0.12
200~250 kL	9	7	6	1	1/5	0.27
250~280 kL	9	7	6	5	1	0.53

치되어 있다. 이들의 건설년도는 89년부터 95년까지 1년에서 7년 정도로 연령이 10년을 넘는 탱크는 없고 현재 사용정지된 탱크는 없다. 가솔린, 등유, 경유의 세 가지 탱크를 모두 소유하고 있으며, 개별 탱크의 용량은 12~40 kL 정도였다. 주유소의 총 저장용량은 56~280 kL 사이의 범위를 보인다(관악구, 1996a).

주유소의 건설년도에 따라 1~3년, 3~5년, 5~7년으로 나누고 각각 0.05, 0.18, 0.77의 가중치를 할당하였다. 저장용량의 범위는 전체 저장용량의 범위내에서 56~100 kL, 100~150 kL, 150~200 kL, 200~250 kL, 250~280 kL로 다섯 개의 범위로 구분하여 각각 0.02, 0.06, 0.12, 0.27, 0.53의 가중치를 할당하였다.

**분석을 위한 자료구축 :** 관악구는 봉천동, 신림동, 남현동 등 총 27개 동으로 구성되어 있고 신림 2동, 4동, 5동, 11동과 봉천 본동, 6동, 8동, 11동 및 남현동 등에 주유소가 분포하고 있다. 축적 1:10,000도를 사용하여 구의 경계선과 각 동별 경계선, 주유소의 위치를 입력하였다. 또한 본 지역의 토성을 크게 양토, 사양토, 모래로 구분하고, 1:25,000 정밀 토양도를 사용하여 토양 분포를 입력하였다. 대수층을 크게 편마암, 화강암, 층적층으로 나누어 1:50,000 한국지질도를 사용하여 관악구의

대수층 주제도를 작성하였다. 하천 위치는 1:10,000도를 사용하여 입력하였고 지하수 이용지점은 1:10,000 기본도와 지적도를 통해 정호위치도를 작성하였다. 지하수용도, 일일사용량을 속성자료로 입력하였다. 또한 1:10,000의 지적도를 통해 주유소의 위치도를 작성하였다. 입력된 주유소별로 이름, 주소, 탱크 수, 건설년도, 저장용량을 입력하였다.

**위해가능성 총점수 산출 및 평가 :** 본 사례지역에 위치하는 26개 주유소에 대하여 위해가능성 점수를 산출하였고(Table 5), 점수가 높을수록 주유소의 위해가능성은 크고 순위별 주유소의 위치를 Figure 4에 제시하였다. 26개 주유소에 대한 위해가능성 점수는 0.06~0.56 사이의 값들 갖는데 평균 0.21, 표준 편차 0.19를 나타낸다. 점수분포구간은 크게 3가지로 구분되는 테 0.06~0.10 점수 구간에는 12개의 주유소가, 0.15~0.23 구간에는 7개의 주유소가 그리고 0.52~0.56 사이에는 7개의 주유소가 있다. 따라서 상대적 위해가능성에 따라 주유소를 세 분류로 나눌 경우 0.52~0.56 구간에 포함되는 7개 주유소를 위해가능성이 가장 높은 우선관리대상으로 선정할 수 있다.

위해가능성이 가장 높은 주유소는 탱크연령은 7년으로서 전체 탱크연령의 범위인 1~7년에서 가장 오래된 연령을 보인다. 저장용량은 전체용량범위 56~280 kL에서 평균 149 kL보다 작은 120 kL이다. 저장탱크가 매설된 지역의 토양은 모래, 사양토, 양토 중 가중치가 가장 낮은 양토인 반면, 대수층 종류는 가중치가 가장 높은 층적층이다. 하천과의 거리는 50 m 이내로서 4단계로 구분된 속성중 가장 가중치가 높은 것이다. 인근의 가장 가까운 정호와의 거리는 속성별 가중치가 전체 5개중 4번째에 해당하는 100~200 m로 나타났다. 정호거리가 먼 곳의 주유소가 높은 총점수를 얻은 것은 비록 정호거리 인자의 가중치를 토성, 대수층의 종류, 하천거리에 비해 높은 0.51로 설정하였으나 오염취약성 인자 가중치를 누유가능성 인자에 비해 0.25:0.75로 낮게 설정하였기 때문에 상대적으로 정호거리 인자의 중요성이 상쇄되었기 때문이다. 한편 위해가능성이 가장 높은 탱크인 1위에서 5위까지의 주유소에 대해서 탱크연령을 살펴보면 전체 연령범위에서 가장 높은 7년으로 나타난다. 이는

Table 5. Estimated hazard potential of gas stations in Kwanak-gu

ID No. of gas station	Hazard potential	A	B	C	D	E	F
5	0.56	7	120	3	2	50	200
6	0.55	7	160	3	2	10000	10000
7	0.55	7	104	3	2	200	200
8	0.54	7	86	3	2	200	10000
9	0.54	7	160	1	2	10000	10000
11	0.54	7	145	3	4	200	10000
12	0.52	6	120	1	4	10000	10000
17	0.23	4	190	3	3	50	10000
23	0.19	2	280	1	3	50	200
18	0.18	4	250	1	2	10000	100
15	0.18	4	180	3	2	10000	100
13	0.17	5	210	1	2	200	10000
16	0.16	4	150	3	2	10000	10000
2	0.15	4	60	1	1	10000	200
26	0.10	2	160	3	2	200	100
4	0.10	2	190	1	2	10000	50
3	0.09	1	56	3	2	50	200
10	0.09	2	80	3	1	10000	10000
20	0.08	3	150	3	2	500	10000
14	0.08	3	100	3	2	50	10000
1	0.08	2	72	3	2	200	200
24	0.07	2	200	1	2	10000	10000
21	0.07	2	160	1	2	10000	10000
25	0.07	2	200	1	2	200	10000
19	0.06	1	160	1	2	500	10000
22	0.06	2	120	1	2	10000	10000

A : Tank age, B : Tank volume (kL), C : Aquifer material's code(1: Gneiss, 2: Granite, 3: Alluvium), D : Soil texture's code(1. Sandy loam, 2: Loam, 3: Sand, 4: Unknown), E : Distance to stream (m) (50: below 50 m, 200: 50~200 m, 500: 200~500 m, 10000: above 500 m), F : Distance to well (m) (20: below 20 m, 50: 20~50 m, 100: 50~100 m, 200: 100~200 m, 10000: above 200 m)

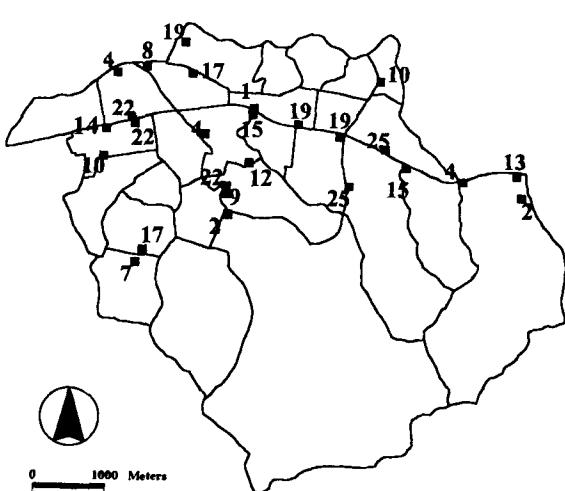


Figure 4. Hazardous potential ranking of gas stations in the case study.

건설년도 인자와 이 인자를 포함하는 누유가능성 인자에 대해서 각각 0.86, 0.75로 매우 높은 가중치를 할당하였기 때문인데 평가 결과에 미치는 가중치의 영향이 뚜렷하게 반영됨을 보여주고 있다. 따라서 평가인자에 대한 가중치를 변동함으로써 다양한 평가 결과를 얻을 수 있고 이로부터 평가지역의 특성과 평가자의 관점에 따라 적합한 평가결과를 선택할 수 있다.

**가중치 변경에 따른 민감도분석 :** 가중치의 변화에 따른 가능성 평가결과를 고찰하기 위하여 계층구조내의 평가인자 중에서 먼저 누유가능성과 오염취약성이 지하저장탱크의 위해 가능성에 미치는 상대적 중요성을 누유가능성이 오염취약성과 동등한 경우(A), 우월한 경우(B), 열등한 경우(C)의 세 가지로 나누고 각각 1, 5, 1/5의 쌍대비교 값을 할당하였다(Table 6). 또한 건설년도와 저장용량이 누유가능성에 미치는 상대적 중요성도 건설년도가 저장용량에 대해 동등(a), 우등(b), 열등(c)하다고 구분하고 각각 1, 6, 1/6의 쌍대비교 수치를 할당하였다. 오염취약성을 구성하고 있는 토양의 토성, 대수층의 종류, 하천거

리, 정호거리 중에서 대수층의 종류는 하천거리에 대해 약한 우위에 있다고 설정한 후 인자들의 중요순위를 첫째, 토성, 대수층의 종류, 하천, 정호 순으로 설정하였고(I), 둘째, 토성과 정호가 서로 동등하고 대수층의 종류와 하천이 그 다음으로 중요한 경우(II), 그리고 정호 인자가 가장 중요하고 다음으로 토성, 대수층의 종류, 하천의 순(III)으로 중요성이 감소되도록 가중치를 설정하였다. 따라서 누유가능성과 오염취약성, 건설년도와 저장용량, 그리고 토성, 대수층의 종류, 하천, 정호의 세 가지 부문에 대해 각각 서로 다른 세 가지의 가중치를 부여하고 이를 조합함으로써 총 27개의 가중치 집합을 유도하였다.

상이한 가중치를 적용한 결과, 상위 1위부터 5위에 해당하는 주유소는 모두 13개 주유소로 이 중 17번 주유소가 27회, 15번 주유소는 25회, 18번 주유소는 22회, 13번 주유소는 18회 등으로 나타났다. 이들 주유소들은 상이한 가중치를 적용하더라도 위해 가능성이 전체 26개 주유소에 대해 상대적으로 높은 곳임을 알 수 있었다.

Table 6. Change in weights for the sensitivity analysis

A	Leakage potential	Vulnerability	Weights		
Leakage potential	1	1	0.5		
Vulnerability	1	1	0.5		
B	Leakage potential	Vulnerability	Weights		
Leakage potential	1	5	0.83		
Vulnerability	1/5	1	0.17		
C	Leakage potential	Vulnerability	Weights		
Leakage potential	1	1/5	0.17		
Vulnerability	5	1	0.83		
a	Tank age	Tank volume	Weights		
Tank age	1	1	0.5		
Tank volume	1	1	0.5		
b	Tank age	Tank volume	Weights		
Tank age	1	6	0.86		
Tank volume	1/6	1	0.14		
c	Tank age	Tank volume	Weights		
Tank age	1	1/6	0.14		
Tank volume	6	1	0.86		
I	Soil texture	Aquifer media	Distance to stream	Distance to well	Weights
Soil texture	1	5	6	7	0.62
Aquifer media	1/5	1	3	5	0.22
Distance to stream	1/6	1/3	1	4	0.11
Distance to well	1/7	1/5	1/4	1	0.05
II	Soil texture	Aquifer media	Distance to stream	Distance to well	Weights
Soil texture	1	5	6	1	0.41
Aquifer media	1/5	1	3	1/5	0.11
Distance to stream	1/6	1/3	1	1/6	0.06
Distance to well	1	5	6	1	0.42
III	Soil texture	Aquifer media	Distance to stream	Distance to well	Weights
Soil texture	1	5	6	1/7	0.21
Aquifer media	1/5	1	3	1/8	0.07
Distance to stream	1/6	1/3	1	1/8	0.05
Distance to well	7	8	8	1	0.67

여러가지 가중치 조합을 적용하여 나타나는 결과가 17번 주유소의 경우처럼 모두 높은 순위(1위에서 5위 사이)를 보이거나 혹은 모두 낮은 순위를 나타낼 경우 해당 주유소는 상이한 가중치 조합에 영향을 받지 않고 전체 평가대상 중에서 위해가능성이 높거나 낮다고 말할 수 있다. 따라서 위해가능성을 평가하는데 있어서 평가인자의 가중치 설정이 중요한 역할을 하므로 상이한 가중치를 적용함으로써 일회의 가중치 적용으로 인해 유발될 수 있는 평가 오류를 배제하는 한편, 가중치의 영향을 받지 않고 순위가 일정하게 높게 나타나는 대상을 파악할 수 있다.

## 결 론

본 연구에서는 평가인자의 선택, 평가인자의 계층구조화, 인자별 가중치 설정, 위해가능성 총점수 산출, 위해가능성 평가의 단계로 구성되고, GIS를 적절하게 이용할 수 있는 지하저장탱크의 위해가능성 예비평가체계를 개발하였다.

구축된 평가체계를 서울시 관악구 소재 주유소에 적용하였다. 지리정보시스템을 이용하여 평가인자별 주제도와 주유소의 위치 및 지하저장탱크 속성을 나타내는 주제도를 작성하였다. 산출된 점수를 분석한 결과, 사례지역 소재 주유소는 위해가능성에 따라 위해가능성이 높은 주유소 7개소, 중간 수준 7개소 그리고 낮은 수준 12개소의 세가지로 분류되었다.

또한 평가인자에 대하여 다양한 가중치를 할당하여 산출된 위해가능성 점수를 비교하였는데 평가인자에 할당된 가중치에 따라 위해가능성이 달라질 수 있음을 파악하였고 이로부터 평가과정에서 가중치 설정은 매우 중요한 단계임을 지적할 수 있었다. 민감도분석을 통해 위해가능성을 평가한 결과, 사례지역 내 26개 주유소중 가중치의 변화에 영향을 받지 않고 항상 점수가 높게 나타나는 4개소를 파악할 수 있었다.

본 연구에서 시도된 평가체계는 기존의 평가체계와 달리 그 대상을 지하저장탱크로 발전시켰다. 오염원으로서 지하저장탱크가 가지고 있는 독특한 속성을 기준의 평가체계에서 사용되는 인자들과 결부시킴으로써 지하저장탱크에 대한 위해가능성을 평가할 수 있었다. 또한 평가기법에 계층구조와 쌍대비교에 의한 가중치설정 기법을 도입하여 평가인자의 선택과 가중치 설정에 있어 평가자의 전문적 지식에 따라 유연성을 제공할 수 있었다. 그러나 앞으로 현장조사결과와 비교하여 평가체계를 검증하고 개선하는 작업이 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

관악구, 1996a, 관악구 관내 주유소 저장탱크 현황에 관한 관악구

### 청자료.

- 관악구, 1996b, 관악구 관내 지하수 이용 현황에 관한 관악구청자료.
- 김화중, 1995, 우리나라 뉴유실태조사, 건국대학교(개별접촉에 의해 얻은 자료임).
- 이승희, 1996, 주유소가 땅을 썩힌다, 과학동아, 11(9), p. 166-169.
- 홍상표, 김정욱, 1995, 수자원 오염 특성에 의한 불량매립지 예비평가모형 정립, 환경영향평가, 4(1), p. 17-23.
- 황난희, 1996, DRASTIC과 지리정보시스템을 이용한 제주도 지하수의 오염취약도 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J. and Hackett, G., 1987, DRASTIC: A standardized system for evaluating ground-water pollution potential using hydrogeologic settings, EPA-600/2-87-035.
- Corapcioglu, M. Y., Tuncay, K. and Ceylan, B. K., 1996, Oil mound spreading and migration with ambient groundwater flow in coarse porous media, Water Resources Research, 32(5), p. 1299-1308.
- Hagemeister, M. E., Jones, D. D. and Woldt, W. E., 1996, Hazard ranking of landfills using fuzzy composite programming, Journal of Environmental Engineering, 122(4), p. 248-258.
- Hudak, P. F., Speas, R. K. and Schoolmaster, F. A., 1995, Underground storage tanks in urban environments: Geographic information systems approach, Water Resources Bulletin, 31(3), p. 439-445.
- Kueper, B. H. and Gerhard, J. I., 1995, Variability of point source infiltration rates for two-phase flow in heterogeneous porous media, Water Resources Research, 31(12), p. 2971-2980.
- Patton, D. E., 1993, The ABCs of risk assessment, EPA Journal, Jan.-Mar., p. 10-15.
- Saaty, T. L., 1980, The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, Inc.
- Siddiqui, M. Z., Everett, J. W. and Vieux, B. E., 1996, Landfill siting using geographic information systems: A demonstration, Journal of Environmental Engineering, 122(6), p. 515-523.
- Taylor, J., 1986, Tackling pollution from underground storage tanks, EPA Journal, 12(3), p. 20-21.
- Taylor, J., 1987, Underground storage tanks in the spotlight, EPA Journal, 13(5), p. 28-29.
- U.S.EPA., 1989, Glossary of environmental terms and acronym list, Office of Communications and Public Affairs, 19K-1002.