

개선된 DRASTIC 기법과 퍼지기법을 이용한 밀양지역 지하수오염 취약성 평가

정상용¹ · 후삼 엘딘 엘자인^{2*} · 벤카트라만난 세나파티³ · 박계현¹ · 권해우⁴ · 유인걸⁴ · 오해림¹

¹부경대학교 지구환경과학과

²부경대학교 지구환경시스템과학부

³베트남 통덕탕대학교 과학기술개발관리학과

⁴한국광물자원공사 탐사기술팀

Assessment of Groundwater Contamination Vulnerability in Miryang City, Korea using Advanced DRASTIC and fuzzy Techniques on the GIS Platform

Sang Yong Chung¹ · Hussam Eldin Elzain^{2*} · Venkatramanan Senapathi³ · Kye-Hun Park¹
Hae-Woo Kwon⁴ · In Kol Yoo⁴ · Hae Rim Oh¹

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University

²Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University

³Department for Management of Science and Technology Development, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam

⁴Exploration Technology Team, Korea Mineral Resources Corporation

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the Original DRASTIC Model (ODM) for the assessment of groundwater contamination vulnerability on the GIS platform. Miryang City of urban and rural features was selected for the study area to accomplish the research purpose. Advanced DRASTIC Model (ADM) was developed adding two more DRASTIC factors of lineament density and landuse to ODM. The fuzzy logic was also applied to ODM and ADM to improve their ability in evaluating the groundwater contamination vulnerability. Although the vulnerability map of ADM was a little simpler than that of ODM, it increased the area of the low vulnerability sector. The groundwater vulnerability maps of ODM and ADM using DRASTIC Indices represented the more detailed descriptions than those from the overlap of thematic maps, and their qualities were improved by the application of fuzzy technique. The vulnerability maps of ODM, ADM and FDM was evaluated by NO₃-N concentrations in the study area. It was proved that ADM including lineament density and landuse factors produced a more reliable groundwater vulnerability map, and fuzzy ADM (FDM) made the best detailed groundwater vulnerability map with the significant statistical results.

Key words : Groundwater contamination vulnerability, Original DRASTIC model, Advanced DRASTIC model, Fuzzy DRASTIC model, NO₃-N concentrations

1. 서 론

우리나라에서 지하수는 국민의 주요한 식수원으로 자리 잡고 있는 것은 물론이고, 각종 용수(생활용수 농업용수, 공업용수)에도 활발히 이용되고 있다. 국가지하수관리기본 계획에 의하면 2012년 현재 연간 약 40억 m³의 지하수

가 이용되고 있는 데, 우리나라 전체 수자원 이용량 중 약 12%에 해당된다(MOLTM·K-Water, 2012). 따라서 국내에 부존하고 있는 지하수에 대한 오염취약성 평가는 지하수의 보전과 관리에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

지하수 오염취약성 평가에서 가장 활발하게 이용되고 있는 기법은 미국 환경청(EPA-600/2-86-035)에서 개발한

*Corresponding author : halzain944@gmail.com (Hussam Eldin Elzain)

Received : 2018. 7. 3 Reviewed : 2018. 7. 16 Accepted : 2018. 8. 2

Discussion until : 2018. 10. 31

DRASTIC 모델(Aller et al., 1987)인데. 이 기법은 7개의 인자(지하수면의 깊이, 지하수 함양량, 대수층 구성 암석, 토양 종류, 지형 경사, 불포화대 구성암석, 수리전도도)를 이용하며, 각 인자의 범위(Range)에 따른 등급(Rating)을 부여하여 점수를 계산해서 오염취약성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 평가가 간단하고, 이해하기 쉽기 때문에 우리나라를 비롯하여, 미국, 유럽, 중동, 아프리카 등 전 세계적으로 많이 이용되고 있다. 그러나 DRASTIC 기법은 평가인자의 수가 적고, 우리나라와 같이 암반이 주 대수층을 이루는 경우에는 과소평가되는 경향이 있으며, 또한 오염취약성을 명확하게 구분하기 어려운 경우에 DRASTIC의 결정론적인 방법은 한계를 갖고 있다.

국내에서 지하수 오염취약성 평가는 1990년 초부터 시작되었으나, 대부분이 미국환경청에서 개발한 DRASTIC 기법에 GIS를 결합하여 지하수 오염취약성을 평가하여 왔다(Kim et al., 1993; Min et al., 1996; Lee & Kim, 1996; Lee & Choi, 1997; Jo et al., 1999; Shon, 2001; Jo and Shon, 2004). 또한 DRSTIC 기법을 단순 적용하여 울산 석유화학단지에 대한 지하수오염 취약성 평가연구(Hahn et al., 1990), DRASTIC 기법의 소개에 대한 연구(Woo, 1994; Hahn, 1994), DRASTIC 기법을 도시 지역에 적용할 경우에 지하수 이용량과 개발공 밀도의 고려가 필요하다는 연구(Ham et al., 2004), 지하수오염 취약성 평가기법 동향과 국내적용성 고찰 연구(Kim, 2008), DRASTIC 모델의 평가인자인 지하수위 자료를 수치모델링을 통하여 획득하여 지하수오염 취약성을 평가한 연구(Lee et al., 2008), DRASTIC과 SINTAC 모델을 이용하여 지하수 오염취약성 평가를 비교한 연구(Kang and Park, 2010), 그리고 계층분석법(AHP)과 GIS를 이용한 지하수오염 관리우선순위 평가에 대한 연구(Lee et al., 2013) 등이 있다. 그런데 퍼지기법의 지구과학분야 적용은 광물탐사(Choi et al., 2000), 원격탐사(Park et al., 2004) 및 사면안정성 분석(Park et al., 2005; Park, 2008; Kim & Park, 2013) 등 소수의 논문에서 나타나고 있으나, 지하수 오염취약성 분석 연구에는 아직 적용 사례가 없다. 따라서 국내에서는 지하수 오염취약성 평가에 퍼지이론의 활용이 아직 초기단계에 있다고 할 수 있다.

외국에서도 DRASTIC 평가기법을 GIS와 연계하여 지하수 오염가능성 평가에 많이 이용해 왔다(Evans & Myers, 1990; Secunda et al., 1998; Fritch et al., 2000; Sener et al., 2009; Baalousha, 2010; Boughriba et al., 2010; Hamutoko et al., 2016; Zghibi et al., 2016). Moratalla et al.(2011)도 스페인 동남부 지역에서

DRASTIC 기법과 GIS를 연계하여 지하수 오염가능성 평가를 하였는데, 평가결과와 지하수 수질상태(질산성질소, 염소, 황산염 등)와의 통계학적 상관성이 낮게 나오게 되어, 그들은 DRASTIC 지하수 오염가능성 평가도가 지하수 유동과 지화학적 모델에 의하여 검증될 필요가 있다고 주장하였다. Lathamani et al.(2015)는 인도 Karnataka 지역에서 지하수 오염취약성 평가를 위하여 DRASTIC 모델과 GIS를 이용하였으며, DRASTIC 평가와 질산성질소에 의한 지하수오염과의 상관성이 크다는 것을 규명하였다.

최근에 외국에서 퍼지이론은 자연과학, 공학, 사회과학 등에서 활발히 이용되고 있는 추세이며, 지하수 수질오염 평가(Abyaneh et al., 2011; Senapathi et al., 2015; Senapathi et al., 2017)뿐만 아니라, DRASTIC 모델에 퍼지이론(Gemitzi et al., 2006; Dixon, 2004; Dixon, 2005^a; Dixon, 2005^b)이나 인공신경망이론(Baghapour et al. 2016)을 적용하여, 지하수 오염취약성 평가의 정밀성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. Fijani et al.(2013)은 이란의 Maragheh-Bonab Plain에 발달된 대수층에서 퍼지이론과 인공신경망 이론을 결합한 SCMAI (Supervised Committe Machine Artificial Intelligence) 기법을 적용하여 지하수 오염취약성 평가 기능을 향상 시켰다. Barzegar et al.(2016)도 SCMAI 기법을 적용하여 이란의 Tabriz Plain 대수층에서 지하수 오염 취약성 평가를 실시하여 좋은 결과를 도출하였다. Nadri(2015)는 퍼지기법을 이용하여 이란의 Tasuj Plain 대수층의 수리전도도를 예측하기도 하였다.

기존의 DRASTIC 기법은 평가가 간단하여 이해하기 쉬운 장점이 있지만, 우리나라와 같이 암반이 주 대수층을 이루는 경우에는 지하수 오염취약성 평가에 한계를 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 DRASTIC 기법에서 이용하는 7개의 인자 이외에도, 우리나라 지하수의 오염가능성에 크게 영향을 주는 지질구조선 밀도와 토지이용을 포함하여 국내 지질환경에 적합한 지하수 오염취약성을 평가하고, 또한 퍼지(fuzzy)기법을 적용하여 결정론적 기법의 단점을 보완하여 지하수 오염취약성 평가의 정밀성을 향상시키고자 하였다. 연구지역은 국토교통부·한국수자원공사의 지하수 기초조사가 수행되었던 경상남도 밀양지역이며, 각 종 도면과 퍼지기법의 적용은 ArcGIS 10.4를 기반으로 수행되었다.

2. 연구지역 개황

밀양시는 행정구역상 경상남도에 속하며, 지리적으로 동

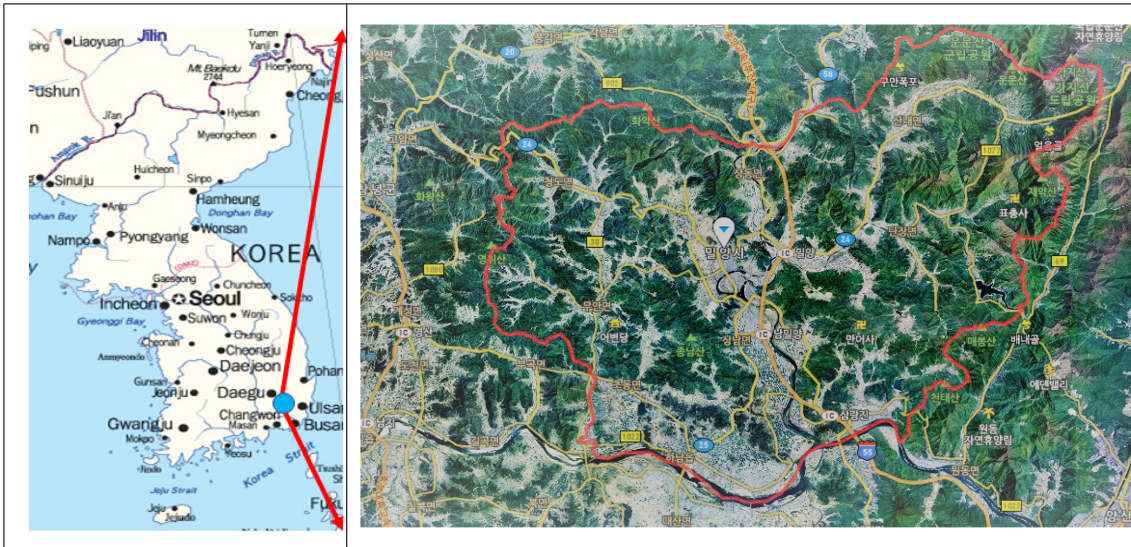


Fig. 1. Location map of the study area.

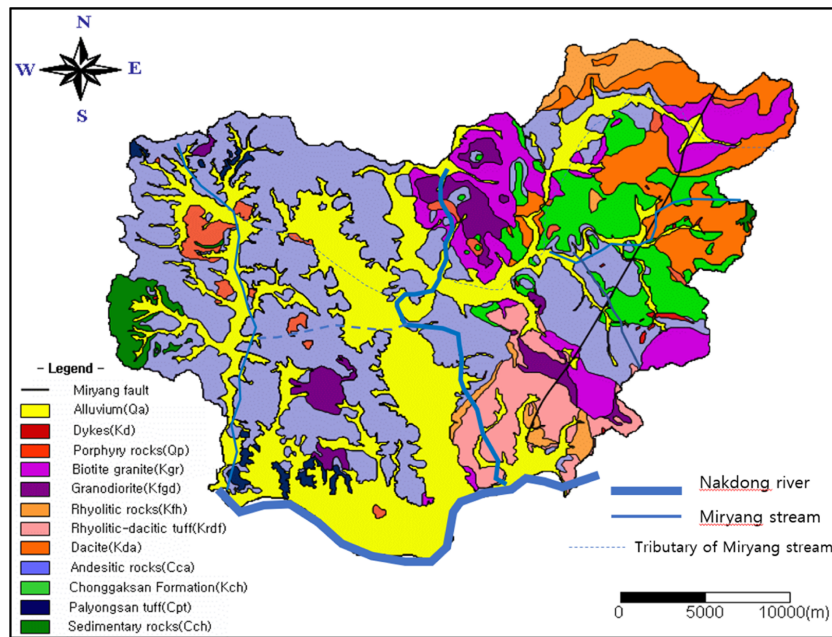


Fig. 2. Geological map of Miryang City (MOCT · KOWACO, 2003).

경 128° 34' 23" ~ 129° 01' 41", 북위 35° 20' 30" ~ 35° 38' 07"에 위치하며, 동서로 38 km 남북으로 24.5 km이고, 면적은 798.98 km²이다. 지형적으로는 북쪽, 동쪽 및 서쪽에 험준한 산계로 경계를 이루며, 남쪽으로는 평야가 낙동강과 접하고 있다(Fig. 1). 밀양시 가운데로는 밀양천이 흐르면서, 남쪽의 낙동강에 합류되고 있다. 밀양시의 북동쪽에는 운문산(1,188 m) 도립공원, 가지산(1,240 m) 도립공원과 얼음골, 표충사 등 유명한 공원과 사찰이 위치하고 있다. 밀양천과 낙동강 주변으로는 인구가 밀집되어 있

으며, 논과 비닐하우스가 많이 설치되어 식량과 채소 및 과일을 많이 생산하고 있다. 따라서 밀양시는 도시기능과 농촌기능 모두를 갖고 있는 현대적 전원도시라고 할 수 있다.

이 지역의 지질은 중생대 백악기 암석과 제4기 충적층이 나타나고 있으며, 백악기 암석으로는 기저퇴적암류의 진동층, 주산안산암류 및 운문산 유문암질암의 유천그룹과 불국사 관입 화강암류로 구성되어 있다(Fig. 2). 불국사 화강암류는 흑운모화강암과 화강섬록암의 형태로 연구 지역 북쪽과 북동쪽에서 가파른 산지를 형성하고, 사암 및

세일로 구성된 진동층은 동쪽 끝과 서쪽끝에서 소규모로 나타나고 있다. 주산안산암질암류는 화산쇄설성 퇴적암류, 안산암류 및 응회암류 등으로 구성되어 연구지역 전체에서 매우 넓게 나타나고 있으며, 유문암질 암석은 북쪽 운문산과 남동쪽 구만산(785 m) 및 만어사 일원에서 비교적 넓게 나타나고 있다. 지질구조로는 밀양단층이 운문산에서 단장면을 거쳐 삼랑진으로까지 발달되어 있으며, 북북동-남남서 방향으로 주변의 양산단층에 평행하게 나타나고 있다.

밀양시 통계자료(2018)에 의하면 지난 30년간의 평균 강수량은 1,246 mm/yr인데, 2012년부터 2017년까지 평균 강수량은 1,066.2 mm으로 상당히 감소하였다. 이는 2015년(951.3 mm)과 2017년(558.1 mm) 기쁨으로 강수량이 크게 줄어든 영향이다. 대부분의 강수량은 6월부터 8월에 집중되어 있다. 국가지하수정보센터(NGIC, 2018)의 2016년도 자료에 의하면 밀양시에는 현재 5,184개의 지하수공이 개발되어 있으며, 2,205공이 생활용, 2905공이 농업용, 산업용이 71공, 기타가 3공이다. 연간 지하수 사용량은 약 825만 m³/yr이며, 이중 생활용이 333만 m³/yr, 농업용이 466만 m³/yr, 산업용이 26만 m³/yr이다. 지하수공의 약 80%가 암반대수층에 개발되었고, 20%가 충적층과 풍화대에 개발되어 있다. 많은 지하수공이 인구가 밀집된 밀양천과 낙동강 주변에 개발되어 있으며, 지하수위는 하천 주변에서는 지표하 5 m 내외이고, 산지의 계곡에서는 지표하 10~20 m 범위이며, 산간지역에서는 지표하 20~50 m 정도이다.

3. 연구자료 및 방법

3.1. 지하수 오염취약성 평가

3.1.1. 기존 DRASTIC 모델(Original DRASTIC Model: ODM)

미국 환경청에서 개발된 기존의 DRASTIC 모델은 7개의 인자를 이용하여 면적이 100 Acre(404,690 m²) 이상이 되는 곳에 적용하며, 오염물질이 지표면에서 강수와 함께 지하로 유입되는 것을 가정하였다. 7개 인자는 지하수면의 깊이(Depth to water), 지하수 함양량(Net recharge), 대수층 구성 암석(Aquifer materials), 토양 종류(Soil media), 지형 경사(Topography), 불포화대 구성암석(Impact to vadose zone), 수리전도도(Hydraulic conductivity)이며, 각 인자들의 가중치는 Table 1에, 각 인자들에 대한 범위와 등급은 Table 2에 제시되어 있다.

DRASTIC Index의 계산은 각각의 DRASTIC 인자들에

Table 1. Weights for DRASTIC factors

Factor	DRASTIC Weight
Depth to Water	5
Net Recharge	4
Aquifer Media	3
Soil Media	2
Topography	1
Impact of the Vadose Zone Media	5
Hydraulic Conductivity of Aquifer	3

Table 2. Ranges and ratings for 7 DRASTIC factors

(a) Water to depth (m)		
Range	Rating	
0 - 1.5	10	
1.5 - 4.6	9	
4.6 - 9.1	7	
9.1 - 15.2	5	
15.2 - 22.9	3	
22.9 - 30.5	2	
30.48 +	1	
(b) Net Recharge (mm)		
Range	Rating	
0 - 50.8	1	
50.8 - 101.6	3	
101.6 - 177.8	6	
177.8 - 254.0	8	
254 +	9	
(c) Aquifer media		
Range	Rating	Representative Rating
Massive	1 - 3	2
Metamorphic/Igneous	2 - 5	3
Weathered Metamorphic/Igneous	3 - 5	4
Glacial Till	4 - 6	5
Bedded Sandstone, Limestone and Shale Sequences	5 - 9	6
Massive Sandstone	4 - 9	6
Massive Limestone	4 - 9	6
Sand and Gravel	4 - 9	8
Basalt	2 - 10	9
Karst Limestone	9 - 10	10
(d) Soil media		
Range	Rating	
Thin or Absent	10	
Gravel	10	
Sand	9	
Peat	8	
Shrinking and/or Aggregated Clay	7	

Table 2. continued

(d) Soil media		
Sandy Loam		6
Loam		5
Silty Loam		4
Clay Loam		3
Muck		2
Nonshinking and Nonaggregated Clay		1
(e) Topogprhy (%)		
range		Rating
0 - 2		10
2 - 6		9
6 - 12		5
12 - 18		3
18 +		1
(f) Impact to vadose zone		
Range	Rating	Representative Rating
Confining Layer	1	1
Silt/Clay	2 - 6	3
Shale	2 - 5	3
Limestone	2 - 7	6
Sandstone	4 - 8	6
Bedded Limestone, Sandstone, Shale	4 - 8	6
Sand and Gravel with significant Silt and Clay	4 - 8	6
Metamorphic/Igneous	2 - 8	4
Sand and Gravel	6 - 9	8
Basalt	2 - 10	9
Karst Limestone	2 - 10	10
(g) Hydraulic conductivity (m/sec)		
Range		Rating
$4.72 \times 10^{-7} \sim 4.72 \times 10^{-5}$		1
$4.72 \times 10^{-5} \sim 1.42 \times 10^{-4}$		2
$1.42 \times 10^{-4} \sim 3.30 \times 10^{-4}$		4
$3.30 \times 10^{-4} \sim 4.72 \times 10^{-4}$		6
$4.72 \times 10^{-4} \sim 9.44 \times 10^{-4}$		8
$> 9.44 \times 10^{-4}$		10

서 얻어진 등급에 가중치를 곱해서 모두 합산한다.

$$DRASTIC\ Index = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (1)$$

여기서, R은 등급이며 W는 가중치이다. DRASTIC 지수는 어떤 지역에서 지하수 오염의 상대적인 취약성을 평가 하는데 이용되며, DRASITC 지수가 높은 지역은 지수가 낮은 지역에 비해 오염 가능성이 높다. DRASTIC 지수는 상대적인 평가이며, 절대적인 평가방법은 아니다.

지하수면까지의 깊이(Depth to water)는 현장에서 측정된 지표면하 지하수위 자료를 이용하였다. 지하수함양량(Net recharge)의 산출은 물수지분석, 지하수위 변동분석, 기저유출분석 등 여러 가지 기법에 의하여 복잡한 계산을 통하여 산출되어진다(Park, 1996; Choi and Ahn, 1998; MOLTM · K-Water, 2012; Cho et al., 2008; Koo et al., 2013). 그러나 본 연구에서는 연구지역을 1 km × 1 km의 격자로 구분하여 지하수 오염취약성을 평가하여 격자의 수가 많기 때문에, 위의 방법에 의한 각 격자에서의 지하수함양량 산출은 현실적으로 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 Piscopo(2001)가 제안한 Table 3의 방법을 이용하여, 각 격자에서의 지하수 함양량을 산출하였다. 이 방법에서는 토양의 투수성, 연 강수량 및 지형의 경사 등 3개의 인자를 이용하여 함양량의 등급을 결정하며, 지하수 오염가능성평가에서 많이 이용되고 있다(Chitsazan & Akhtari, 2009; Baghapour, 2016).

대수층 매질(Aquifer media)에 대한 등급결정은 대수층의 지질과 지질구조 조사자료를 이용하여 결정하고, 토양 매질(Soil media)에 대한 등급결정은 현장조사를 통하여 토양의 입도분포를 기준으로 결정하고, 지형의 경사(Topography)는 1:5,000 축척의 수치지형도와 DEM(digital elevation model) 자료를 토대로 GIS를 이용하여 결정하고, 불포화대의 구성물질(Impact to vadose zone)은 토양과 암석에 대한 현장조사 자료로 결정하였고, 수리전도도(Hydraulic conductivity)는 양수시험과 슬러그시험에서 얻어진 자료를 이용하였다.

Table 3. Net recharge parameter

Soil Permeability		Rainfall (mm/yr)		Slope (%)		Recharge Rate	
Range	Factor	Range	Factor	Range	Factor	Range	Rating
High	5	> 850	4	< 2	4	11~13	10
Moderate to High	4	700~850	3	2~10	3	9~11	8
Moderate	3	500~700	2	10~33	2	7~9	5
Low	2	< 500	1	> 33	1	5~7	3
Very low	1					3~5	1

Table 4. Land use classification (Barry & Wayne, 1990)

Range	Rating
Landfill/dump, Industrial waste disposal	10
Agricultural land, Auto junkyard/salvage	9
Quarries/gravel pit, other surface mining, Waste water spray irrigation, Confined feedlot	6
Unconfined feedlot, Miscellaneous urban	5
Golf course, High-density residential	3
Median-density residential, Seasonal trailer park	2
Low-density residential, Wastewater treatment plant	1
All others	0
Weight: 3.5	

3.1.2. 개선된 DRASTIC 모델(Advanced DRASTIC Model: ADM)

1) 평가인자 보완

우리나라에서 암반지하수는 대부분이 암석의 균열을 따라서 부존하는 데, 특히 결정질 암석이 발달된 경상분지 내의 암석에서는 암석에 발달된 2차적 공극인 절리, 파쇄대, 단층 등의 균열이 지하수의 유동과 부존에 중요한 역할을 하기 때문에, 지하수 오염취약성 평가에서 암석에 발달된 균열에 대한 고려가 필요하다. 구조선 분석에는 현장조사 자료와 DEM(digital elevation model) 및 Landsat TM 영상 자료를 이용하였다. 선구조 밀도(Lineament density) 분석에서는 선구조 길이, 선구조 개수, 선구조 교차점 개수, 선구조간의 거리 및 선구조 방향 등이 고려될 수 있다(Casas et al., 2000; Kim et al., 2004; Abdullah et al., 2015). 본 연구에서는 1 km × 1 km 크기의 격자 내에서 선구조의 발생빈도와 길이의 값을 이용하여 산출하였으며, 가중치는 1.5를 설정하였다. 가중치를 적게 할 당한 이유는 연구지역의 암석들은 대부분이 결정질 암석으로서 간극(aperture)의 크기가 크지 않은 것으로 판단되었기 때문이다. 선구조 밀도 산출은 (식 2)의 방법을 적용하였다.

선구조 밀도 =

$$\frac{\text{대상 격자내 선구조 개수}(\Sigma N_i)}{\text{전체 격자내 선구조 평균개수}(\bar{N})} + \frac{\text{대상 격자내 선구조의 길이}(\Sigma L_i)}{\text{전체 격자내 선구조 평균길이}(\bar{L})} \quad (2)$$

지하수 오염취약성은 토지의 이용현황에 따라서 영향을 많이 받게 된다. 본 연구에서는 Table 4와 같이 Barry & Wayne(1990)이 제시한 토지이용 등급을 적용하였다. 토지이용은 지하수 오염취약성에 미치는 영향이 크기 때문에, 가중치는 3.5를 설정하였다.

3.1.3. 퍼지 DRASTIC 모델(Fuzzy DRASTIC Model: FDM)

인간은 사고와 언어에서 종종 불확실하거나 모호한 표현을 쓰게 된다. 우리의 사고와 언어는 흑과 백, 0과 1, 예와 아니오 등의 2분법이 아니다. 이러한 모호한 개념을 퍼지(fuzzy)라고 하며, Zadeh(1965)가 퍼지의 개념을 수학적으로 모델화하였다. 우리는 일상생활 어디에서나 퍼지 상황과 부딪치게 된다. 퍼지와 확률은 비슷할 수도 있지만, 차이가 있다. 확률은 어떤 사건이 일어날 가능성을 지시하지만, 퍼지는 어떠한 일이 특정 계열이나 현상에 속하는 정도를 나타낸다.

1) 퍼지집합과 퍼지소속함수 값

원소 x 가 집합 A 에 소속되어 있으면, x 는 집합 A 의 원소 또는 멤버라고 한다. 원소 x 가 집합 A 의 소속 여부는 퍼지소속함수(Fuzzy membership function)의 값으로 표현된다(Demicco & Klir, 2004).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (3)$$

원소 x 가 집합 A 에 소속되면 소속함수 값은 1, 소속되지 않으면 소속함수 값은 0이 된다. 따라서 보통집합(Crisp set)에서는 소속함수의 값은 0과 1의 2개만 존재한다. 그러나 퍼지집합(Fuzzy set)에서는 원소 x 가 집합 A 에 소속되는지 여부를 뚜렷하게 결정하는 경계가 존재하지 않는다. 따라서 원소 x 는 집합 A 에 소속되는 정도에 따라서 0과 1사이의 값으로 표현될 수 있다. 소속함수 값이 1에 가까우면 소속의 정도가 높으며, 반면에 0에 가까우면 소속의 정도가 낮다는 것을 나타낸다(Park, 2008). 퍼지소속함수의 결정방법에는 Cosine amplitude method (Ercanoglu and Gokceoglu, 2004)와 Frequency ratio (Park et al., 2005)에 의한 방법이 있다. 퍼지소속함수에

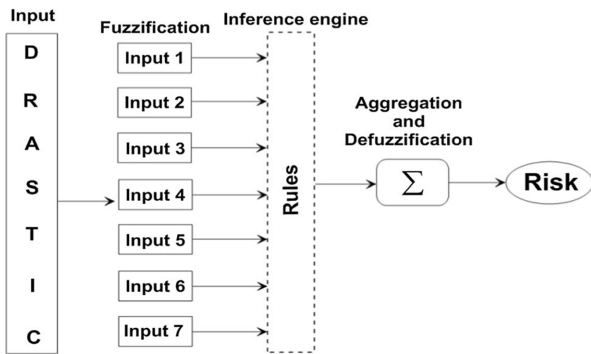


Fig. 3. Fuzzy logic structure.

는 삼각형(Triangle type), 사다리꼴(Trapezoidal type), 종형(Bell type), 사인형(Sinusoidal type), 가우시안형(Gaussian type) 등 여러 가지가 있다(Lee, 2004).

퍼지모델은 퍼지화(fuzzification), 추론기구(inference engine)와 탈퍼지화(defuzzification)의 3단계로 구성되어 있다(Nadiri, 2015). 퍼지화 단계에서는 보통의 입력자료를 퍼지 집합으로 바꾸어주고, 추론엔진은 규칙(rules)으로 구성되어 복합자료를 한 개의 자료로 만들어 준다. 최종적으로 추론 규칙은 탈퍼지화된 보통의 자료를 만들어낸다(Fig. 3). 퍼지 이론에는 Sugeno fuzzy logic(SFL), Mamdani fuzzy logic (MFL), Larsen fuzzy logic(LFL) 등이 있다(Nadiri, 2015).

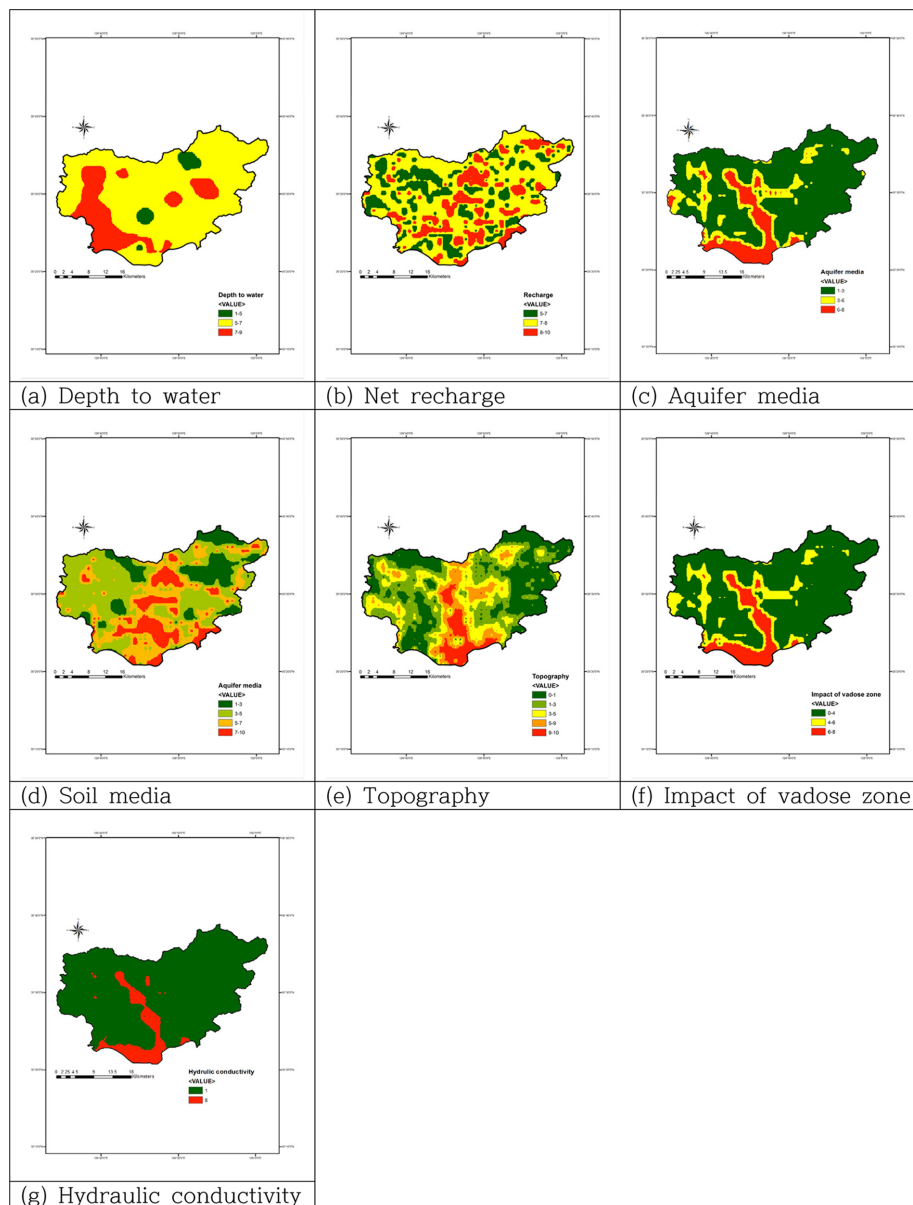


Fig. 4. Thematic maps for 7 layers of Original DRASTIC model.

4. 연구결과 및 고찰

4.1. 기존 DRASTIC 모델(ODM) 적용

4.1.1. 각 인자의 분포도

밀양지역을 1 km × 1 km의 격자로 구분한 후, 각 격자의 질점(Node)에서 7개의 인자에 대한 등급(Rating)을 결정하였다. 연구지역에는 모두 894개의 질점이 정해졌고, 각 질점에 대한 TM 좌표가 설정되었다. 7개 인자의 등급에 대한 분포도는 ArcGIS 10.4를 이용하여 작성하였으며, Fig. 4에 정리되어 있다.

지하수위(Depth to water)에 대한 분포도(Fig. 4(a))에서는 대부분 지역이 5~7 등급에 해당되는 데, 7~8 등급에 해당되는 지역도 적지 않았다. 지하수함양량(Net recharge) 분포도(Fig. 4(b))에서는 7~8 등급이 우세하나, 5~7과 8~10 등급도 비중이 컸다. 그 이유는 밀양지역의 강수량이 크기 때문에 나타난 현상이다. 대수층매질(Aquifer media) 분포도(Fig. 4(c))에서는 대부분이 1~3 등급에 속하며, 밀양시 중심부를 흐르는 밀양천과 밀양시 남부를 지나가는 낙동강유역이 모래와 자갈로 구성되어 6~8의 등급분포를 보인다. 토양매질(Soil media)분포도(Fig. 4(d))에서는 점토질 loam~loam에 해당되는 3~5 등급이 우세하며, 밀양천과 낙동강 부근에서 오염에 취약한 모래와 자갈층이 우세하게 나타난다.

지형의 경사(Topography) 분포도(Fig. 4(e))에서는 12% 이상의 가파른 경사에 해당하는 0~3의 등급이 대부분을 차지하며, 밀양천과 낙동강에서는 6% 이하의 완만한 지형을 이루는 9~10 등급을 나타내고 있다. 불포화대 매질(Impact of vadose zone)의 분포도(Fig. 4(f))에서는 암석을 나타내는 1~4등급이 대분이며, 산지에 발달한 계곡에서는 실트나 점토가 섞인 토양층이 4~6등급을 이루고, 밀양천과 낙동강에서는 모래와 자갈로 구성되어 6~8 등급을 나타낸다. 수리전도도(Hydraulic conductivity) 분포(Fig. 4(g))는 지하수공이 대부분 암반대수층에서 개발되어 매우 낮은 투수성을 나타내는 1등급(K: 0.2~2 m/day)의 분포를 나타내며, 밀양천과 낙동강 일원에서는 충적층에 개발된 지하수가 대부분이어서 비교적 높은 투수성을 나타내어 8등급(K: 23~46 m/day)까지 나타난다.

4.1.2. Original DRASTIC Index 분포도

연구지역의 각 질점에서 7개 인자에 대한 등급을 결정한 후, 각 질점에서 획득된 인자의 등급과 가중치를 곱하여 모두 합하면 DRASTIC Index가 산출된다. 이와 같이 산출된 DRASTIC Index를 이용하여 분포도를 만들어서 밀양지역의 지하수 오염취약성을 평가할 수 있다. 7개의 인자를 이용하여 산출된 DRASTIC Index 분포도는 Fig. 5(a)와 같으며, 분포도의 범위에 따른 취약성 구분은

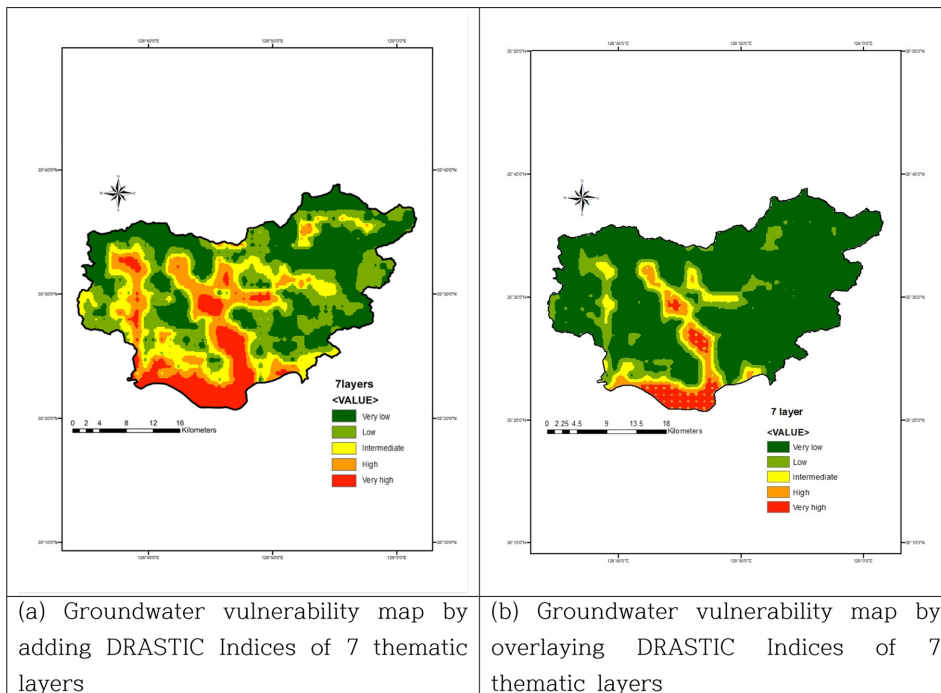


Fig. 5. Groundwater vulnerability maps of DRASTIC Index using 7 factors.

Table 5. Vulnerability degree of several indices

Vulnerability	Ranges (Original DRASTIC Index)
Very low	< 130
Low	130~150
Moderate	150~170
High	170~190
Very high	> 190

Table 5와 같다.

지하수 오염취약성도를 작성하는 데는 Fig. 5(a)와 같이 각 질점에서 계산된 DRASTIC Index를 이용하여 작성하는 방법과 Fig. 5(b)와 같이 7개 인자에 대한 주제도를 중첩해서 지하수 오염취약성도를 만드는 방법이 있다. 2가지 경우를 비교하면, DRASTIC Index를 이용하는 방법이 7개 인자의 주제도를 중첩하는 방법보다 더 세밀한 분포도를 만들 수 있었다.

4.2. 개선된 DRASTIC 모델(ADM) 적용

4.2.1. 추가 인자 등급분포도

개선된 DRASTIC 모델에서는 우리나라의 지하수 산출이 암반의 균열과 밀접한 관련이 있으므로, 대수층에 발달된 균열들을 고려하였다. 선구조의 빈도수와 길이를 고려하여 산출된 밀양지역에서의 선구조 밀도는 0.0~4.5의 범위로 나타났다. 선구조밀도의 범위에 대한 등급은 Table 6과 같이 설정하였으며, 가중치는 1.5를 할당하였다.

Table 6. Classification of lineament density

Range	Rating
0.0~0.9	1
0.9~1.8	2
1.8~2.7	3
2.7~3.6	4
> 3.6	5

그리고 토지의 이용이 지하수 오염취약성에 큰 영향을 주게 되므로, 개선된 모델에서는 토지이용을 고려하여 지하수 오염취약성을 평가하였다. 토지이용의 등급은 Table 4를 기준으로 하였으며, 가중치는 3.5를 할당하였다. 선구조밀도와 토지이용에 대한 주제도는 Fig. 6과 같다. 개선된 DRASTIC 모델에서는 7개의 인자 이외에 선구조밀도와 토지이용에 대한 등급을 추가하여, 오염취약성을 평가하였다.

4.2.2. Advanced DRASTIC Index 분포도

연구지역의 각 질점에서 획득된 9개 인자의 등급과 가중치를 곱하고 합산하여 Advanced DRASTIC Index를 산출하였고, 그 지수 범위에 따른 취약성 구분은 Table 7과 같으며, 취약성분포도는 Fig. 7(a)와 같다.

지하수 오염취약성도를 작성하는 데는 Fig. 7(a)와 같이 각 질점에서 계산된 DRASTIC Index를 이용하여 작성하는 방법과 Fig. 7(b)와 같이 9개 인자의 주제도를 중첩해

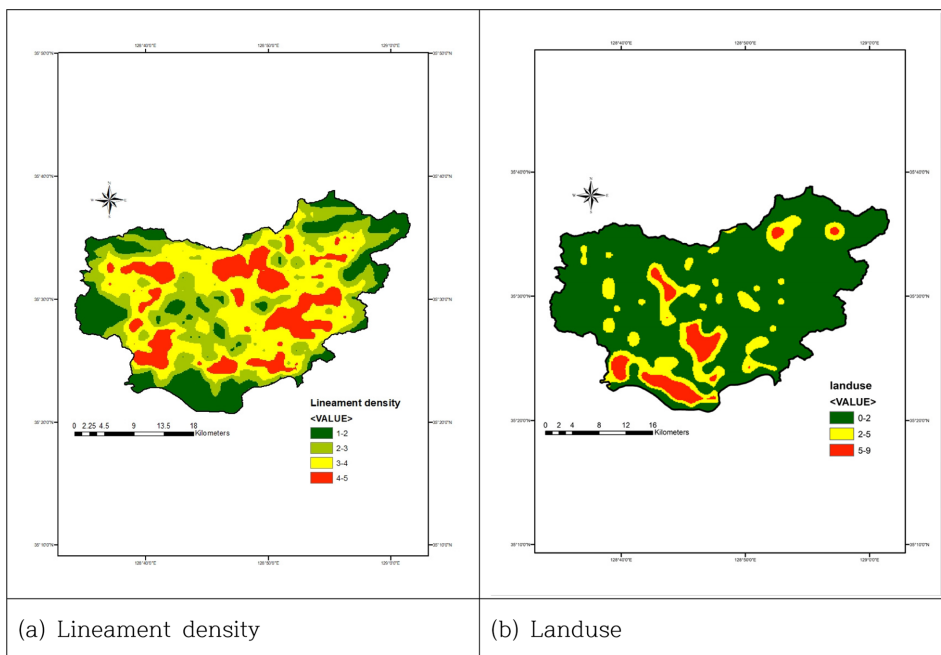


Fig. 6. Thematic maps for lineament density and landuse of Advanced DRASTIC model.

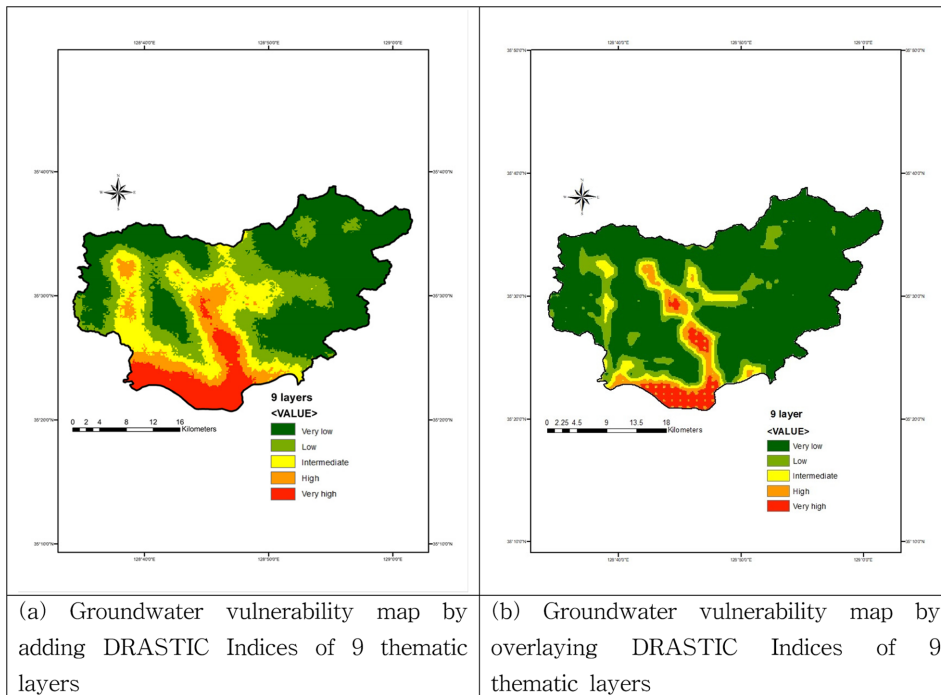


Fig. 7. Groundwater vulnerability maps of DRASTIC Index using 9 factors.

Table 7. Vulnerability degree of several indices

Degree of vulnerability	Ranges (Advanced DRASTIC Index)
Very low	< 130
Low	130~150
Moderate	150~170
High	170~200
Very high	> 200

서 지하수 오염취약성도를 만드는 방법이 있다. 2가지 경우를 비교하면, DRASTIC Index를 이용하는 방법이 인자의 주제도를 중첩하는 방법보다 더 세밀한 분포도를 만들 수 있었다.

4.2.3. ODM과 ADM의 비교

ODM의 7개 인자를 이용한 지하수 오염취약성도와 ADM의 9개 인자를 이용한 오염취약성도를 비교하면, DRASTIC Index를 합하여 만든 오염취약성도(Fig. 5(a) 및 Fig. 7(a))에서 9개 인자를 이용한 경우가 좀 더 단순한 분포도를 만들었으며, 오염취약성이 낮은 지역이 약간 더 증가되어 나타났다. 이것은 구조선 밀도와 토지이용 정보가 추가된 결과이다. 그런데, 각 인자들을 중첩한 경우(Fig. 5(b)와 Fig. 7(b))의 오염취약성도는 거의 유사하게

나타났다. 따라서 ODM보다는 ADM이 더 합리적인 지하수오염 취약성도를 만들었으며, DRASTIC Index를 이용하여 만든 취약성도가 각 인자의 주제도를 중첩하여 만든 취약성도 보다 훨씬 정밀하였다.

4.3. 퍼지 DRASTIC 모델(FDM) 적용

4.3.1. DRASTIC 인자 등급 분포도

DRASTIC 모델의 7개 및 9개 인자들의 등급에 퍼지이론을 적용하여, 퍼지소속값(Fuzzy membership value)을 산출하여 분포도를 작성한 결과가 Fig. 8에 있다. 모든 퍼지소속값들은 0과 1 사이에 있다. 지하수위 심도에 대한 원자료 분포도(Fig. 4(a))와 퍼지기법을 적용한 분포도(Fig. 8(a))를 비교하면, 지하수 오염취약성이 큰 지점은 거의 같지만, 퍼지분포도에서 오염취약성이 적은 범위가 훨씬 넓어졌다. 지하수함양(Fig. 4(b)와 Fig. 8(b))에서도 지하수 오염취약성이 큰 지점은 거의 같지만, 퍼지분포도에서 오염취약성이 적은 범위가 훨씬 넓어졌다. 반대로 대수층매질(Fig. 4(c)와 Fig. 8(c))의 경우 퍼지분포도에서 오염취약성이 큰 범위가 연구지역의 서쪽과 북동쪽에서 넓어졌다.

토양매질(Fig. 4(d)와 Fig. 8(d))과 지형의 경사(Fig. 4(e)와 Fig. 8(e))에서는 퍼지분포도에서 오염취약성이 적은 범위와 오염취약성이 큰 범위가 모두 넓어졌다. 불포화대(Fig. 4(f)와 Fig. 8(f))의 경우 퍼지분포도에서 오염취

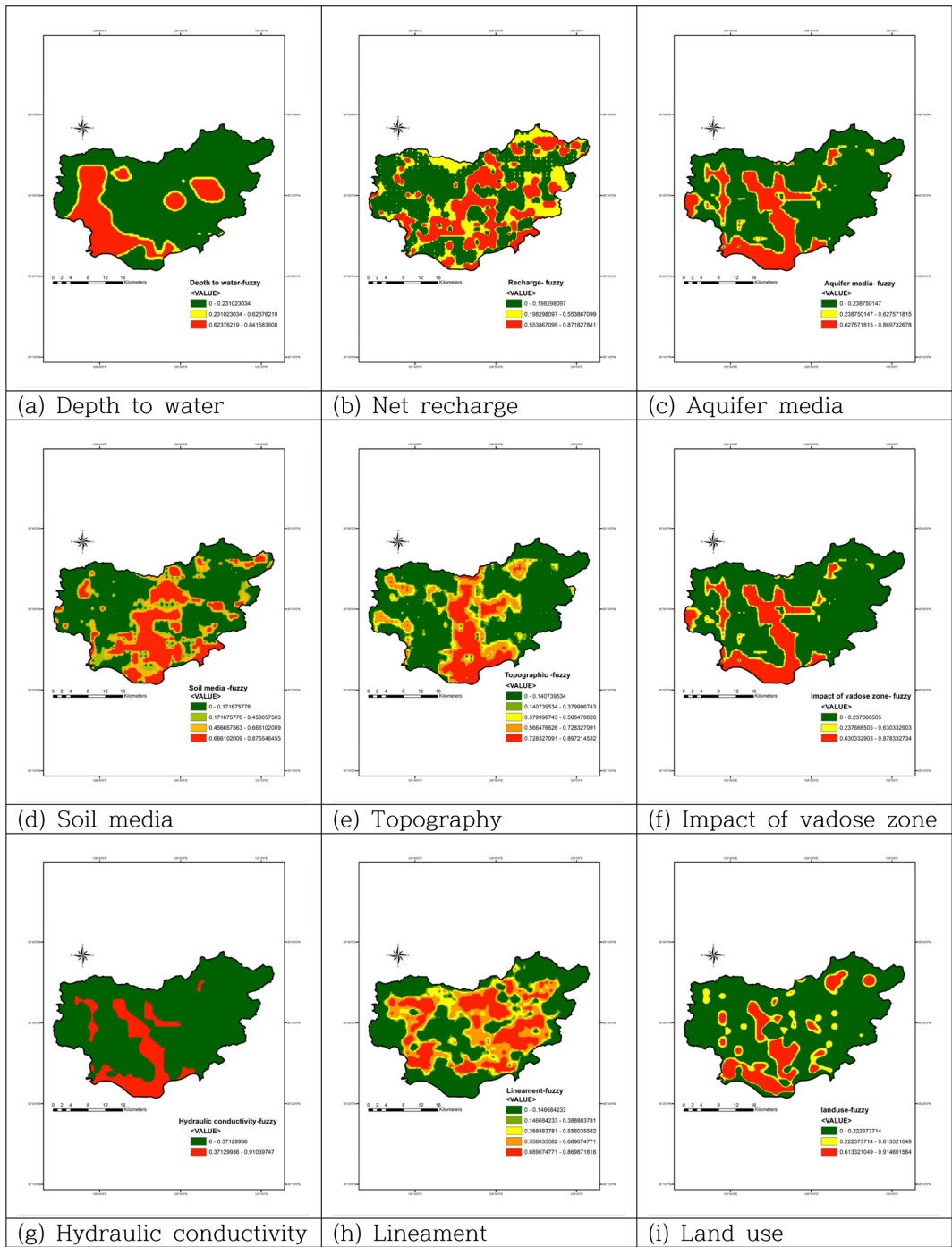


Fig. 8. Thematic maps of 9 Fuzzy DRASTIC layers.

약성이 큰 범위가 연구지역의 서쪽과 북동쪽에서 넓어졌다. 수리전도도(Fig. 4(g)와 Fig. 8(g))의 퍼지분포도에서 오염취약성이 큰 범위가 연구지역의 서쪽과 중앙에서 약간 넓어졌다. 구조선밀도(Fig. 4(h)와 Fig. 8(h))와 토지이용(Fig. 4(i)와 Fig. 8(i))의 경우 퍼지분포도에서 오염취약

성이 큰 범위가 전체적으로 넓어졌다. 따라서 DRASTIC 모델의 7개 및 9개 인자들의 등급에 퍼지이론을 적용하여 만든 분포도가 원 분포도보다 훨씬 좋은 결과를 만들어 냈다.

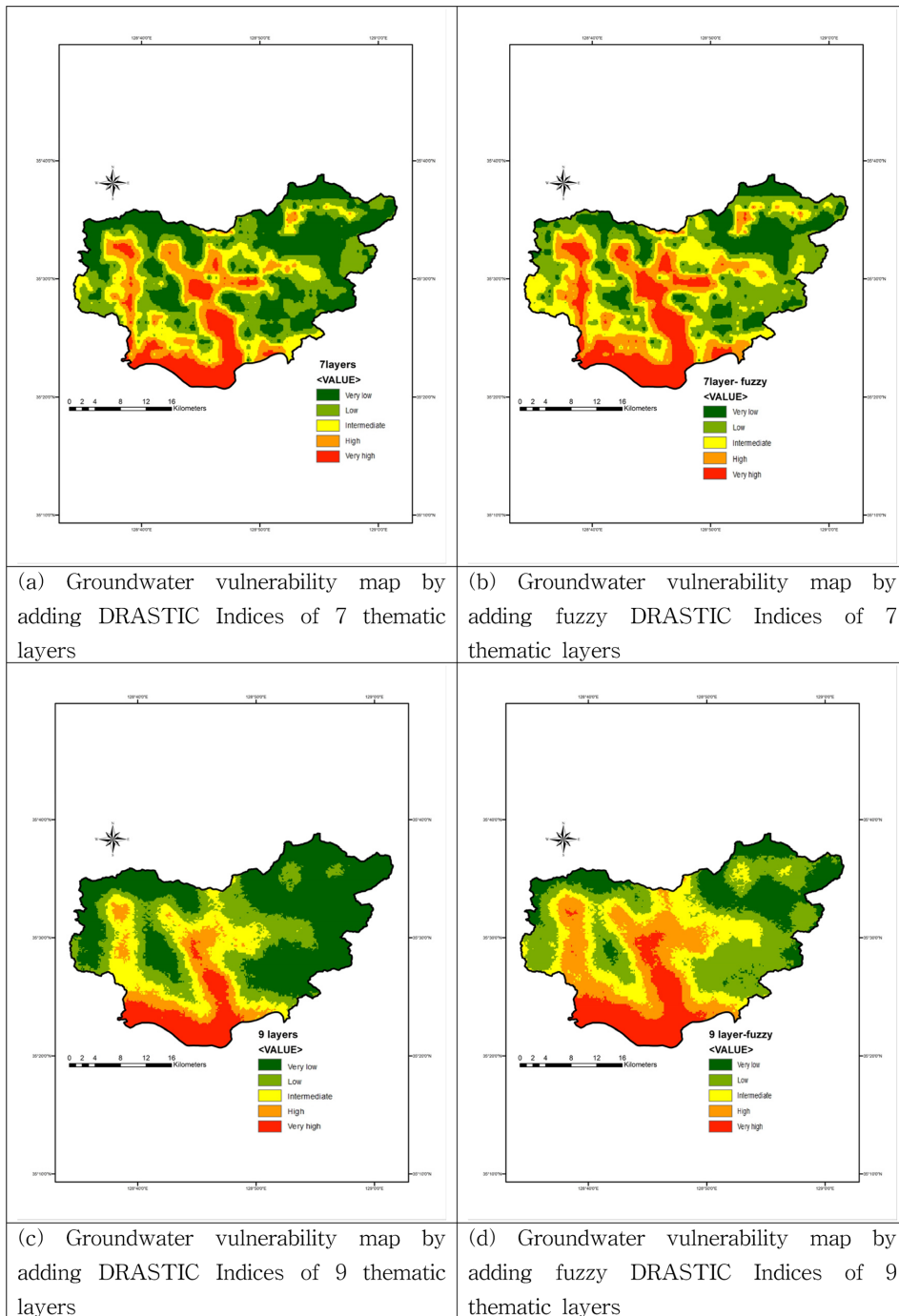


Fig. 9. Groundwater vulnerability maps of DRASTIC Index using fuzzy technique.

4.3.2. DRASTIC Index 분포도

7개 인자를 이용하여 산출된 DRASTIC Index의 지하수 오염취약성도(Fig. 9(a))와 퍼지기법을 적용하여 만들어진 지하수 오염취약성도(Fig. 9(b))를 비교하면, 퍼지기법을 적용한 오염취약성도가 오염취약성이 낮은 지역(밀양천 우측과 낙동강 좌상측)에 대하여 더 상세한 구분을 하였다.

9개 인자를 이용한 DRASTIC Index의 지하수 오염취약성도(Fig. 9(c))와 퍼지기법을 적용하여 만들어진 지하수 오염취약성도(Fig. 9(d))에서도, 퍼지기법을 적용한 오염취약성도가 오염취약성이 낮은 지역(밀양천 우측과 낙동강 좌상측)에 대하여 더 상세한 구분을 하였다. 따라서 7개 및 9개 인자를 이용하여 만들어진 지하수 오염취약성

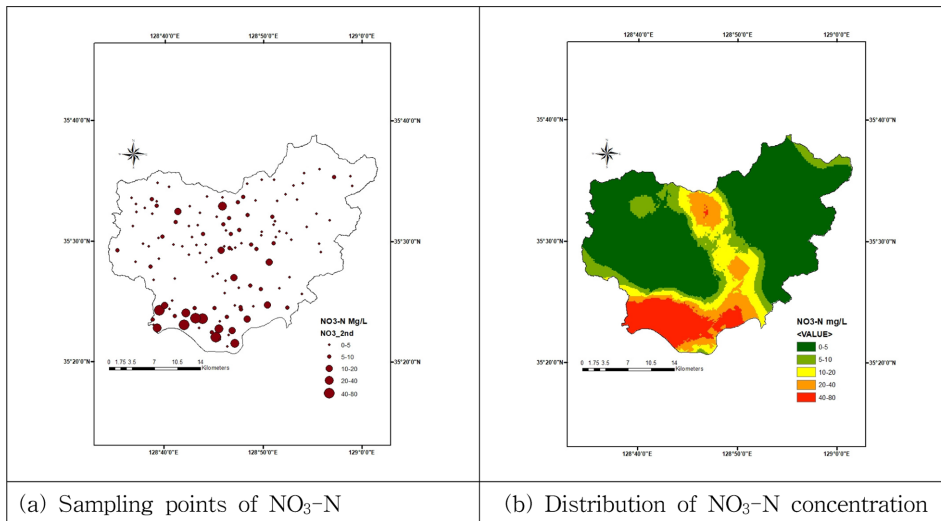


Fig. 10. Sampling points and concentration distribution of NO₃-N in the study area.

Table 8. Correlation between 4 DRASTIC models and NO₃-N concentration

Model	Original DRASTIC Model (7 layer)	Advanced DRASTIC Model (9 layer)	Fuzzy Original DRASTIC Model (7 layer)	Fuzzy Advanced DRASTIC Model (9 layer)
Correlation coefficient	0.24	0.35	0.40	0.53

도에서 퍼지기법을 적용한 경우에 더 상세한 오염취약성 구분이 나타났다.

4.4. 모델 우수성 검증

지하수 오염취약성 평가에 3가지의 방법(ODM, ADM, FDM)을 적용하여, 각 인자의 등급분포도와 오염취약성도를 작성하여 비교하였다. 그 결과 퍼지기법을 적용한 경우에 좀 더 상세한 등급분포도와 오염취약성도를 만들 수 있었다. 이러한 분포도 이외에, 질산성질소 자료와 3가지 방법에 의한 DRASTIC Index를 비교하여 각 기법의 우수성을 평가하였다. 질산성질소는 우리나라뿐만 아니라, 전 세계적으로 지하수에 가장 흔하게 나타나는 오염물질 이어서, 지하수 오염상태를 평가하는 기준이 되고 있다 (Fijani et al., 2013; Nadri, 2015; Lathamani et al. 2015; Barzegar et al., 2016; Nadri et al., 2017). 밀양지역에서 130개의 질산성질소 자료를 이용하여 나타난 질산성 질소의 농도분포도는 Fig. 10과 같으며, 낙동강 일원과 밀양천 주변으로 그 값들이 높게 나타나고 있다. 그 이유는 하천 주변으로 각 종 농사가 활성화 되어 있기 때문이다.

3가지 기법의 우수성을 평가하기 위하여 130개 샘플링 지점의 질산성질소(NO₃-N) 농도와 ODM, ADM 및 FDM의 DRASTIC Index와의 상관성을 비교한 결과가

Table 8에 있다. ODM의 경우에는 상관계수가 0.24이며, ADM의 경우에는 0.35이다. ODM 모델에 퍼지기법을 적용한 경우에는 상관계수가 0.40이고, ADM 모델에 퍼지기법을 적용한 경우에는 0.53으로 나타났다.

따라서 ODM보다 ADM이 질산성질소 농도와의 상관성이 더 크게 나타났고, 퍼지기법(FDM)을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 더 큰 상관성을 보여주었다. 결론적으로 기존의 DRASTIC 기법(ODM)보다는 구조선 밀도와 토지이용이 적용된 개선된 DRASTIC 기법(ADM)이 더 우수한 결과를 만들었으며, 또한 기존의 DRASTIC 기법과 개선된 DRASTIC 기법에 퍼지기법(FDM)을 적용한 경우가 더 정밀한 분포도와 통계적으로 유의한 결과를 만들 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 경상남도 밀양시를 대상으로 기존 DRASTIC 기법에서 이용하는 7개의 인자(ODM) 이외에도, 우리나라 지하수의 오염가능성에 크게 영향을 주는 지질구조선 밀도와 토지이용을 포함한 9개 인자(ADM)를 이용하여 지하수 오염취약성을 평가하였다. 또한 7개 및 9개 인자의 DRASTIC 평가에 퍼지(FDM)기법을 적용하

여 우수성을 검증하고, 지하수 오염취약성 평가의 성능을 향상시켰다. 그 결과는 다음과 같다.

1. DRASTIC 모델의 7개 및 9개 인자들의 등급 (rating)에 퍼지이론(FDM)을 적용하여 만든 분포도가 ODM과 ADM의 분포도보다 정밀성이 향상된 결과를 만들어 냈다.

2. ODM의 7개 인자를 이용한 지하수 오염취약성도와 ADM의 9개 인자를 이용한 오염취약성도를 비교하면, DRASTIC Index를 합하여 만든 오염취약성도에서 9개 인자를 이용한 경우가 좀 더 단순한 분포도를 만들었으며, 오염취약성이 낮은 지역이 약간 더 증가되어 나타났다. 이것은 구조선 밀도와 토지이용 정보가 추가된 결과이다. 그런데, 각 인자들을 중첩한 경우의 오염취약성도는 2가지 경우에 거의 유사하게 나타났다.

3. 지하수 오염취약성도를 작성하는 방법에는 각 질점에서 계산된 DRASTIC Index를 이용하여 작성하는 방법과 DRASTIC 인자의 주제도를 중첩해서 만드는 방법이 있다. 2가지 경우를 비교하면, ODM과 ADM에서 모두 DRASTIC Index를 이용하는 방법이 인자의 주제도를 중첩하는 방법보다 더 세밀한 분포도를 만들 수 있었다.

4. ODM과 ADM에서 산출된 DRASTIC Index의 지하수 오염취약성도와 퍼지기법을 적용하여 만들어진 지하수 오염취약성도를 비교하면, 퍼지기법을 적용한 오염취약성도가 오염취약성이 낮은 지역(밀양천 우측과 낙동강 좌상측)에 대하여 더 상세한 구분을 하였다.

5. 3가지 기법의 우수성을 평가하기 위하여 130개 샘플링 지점의 질산성질소(NO₃-N) 농도와 ODM, ADM 및 FDM의 DRASTIC Index와의 상관성을 비교한 결과, ODM의 경우에는 상관계수가 0.24이며, ADM의 경우에는 0.35이다. ODM 모델에 퍼지기법을 적용한 경우에는 상관계수가 0.40이고, ADM 모델에 퍼지기법을 적용한 경우에는 0.53으로 나타났다. 따라서 기존의 DRASTIC 기법(ODM)보다는 구조선 밀도와 토지이용이 적용된 개선된 DRASTIC 기법(ADM)이 더 정밀한 분포도와 통계적으로 유의한 결과를 나타내었으며, 또한 기존의 DRASTIC 기법과 개선된 DRASTIC 기법에 퍼지기법(FDM)을 적용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 세밀한 분포도와 통계적으로 유의한 결과를 만들었다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No.

2016R1D1A3B03934558).

References

- Abdullah, T.O., Ali, S.S., Al-Ansari, N.A., and Knutsson, S., 2015, Groundwater Vulnerability Mapping Using Lineament Density on Standard DRASTIC Model: Case Study in Halabja Sidsadiq Basin, Kurdistan Region, Iraq, *Engineering*, **7**, 644-667.
- Aller, L., T. Bennett, Lehr, J.H., Petty, R., and Hackett, G., 1987, DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, *U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma* 74820.
- Baghapour, M.A., Nobandegani, A.F., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A.A., Gharekhani, M., and Chitsazan, N., 2016, Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, **14**(1), 13 (online).
- Baalousha, H., 2010, Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand, *Agricultural Water Management*, **97**(2), 240-246.
- Barry, M.E. and Wayne, L., 1990, A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRAS-TIC, *J. Soil and Water Conservation*, **45**(2), 242-245.
- Barzegar, R., Moghaddam, A.A., and Baghban, H., 2016, A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **30**(3), 883-899.
- Boughriba, M., Barkaoui, A.E., Zarhloule, Y., Lahmer, Z., El Houadi, B., and Verdoya, M., 2010, Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment, *Arabian Journal of Geosciences*, **3**(2), 207-220.
- Casas, A.M., Cortes, A.L., Maestro, A., Soriano, M.A., Riaguas, A., and Bernal, J., 2000, LINDES: A program for lineament length and density analysis, *Computers & Geosciences*, **26**, 1011-1022.
- Chitsazan, M. and Akhtari, A., 2009, A GIS-based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran, *Water Resour. Manage.*, **23**, 1137-1155.
- Choi, S., Moon, W.M., and Choi, S.-G., 2000, Fuzzy logic fusion of W-Mo exploration data from Seobyeog-ri, Korea, *Geosciences J.*, **4**(2), 43-52.
- Choi, B.-S. and Ahn J.-G., 1998, A study on the estimation of **J. Soil Groundwater Environ. Vol. 23**(4), p. 26~41, 2018

- regional groundwater recharge ratio, *J. Kor. Soc. Groundwater Environment*, **5**(2), 57-65.
- Cho, S.-H., Cho, M., Moon, S.H., Kim, Y., and Lee, K.-S., 2008, Estimation of groundwater recharge in a district-scale using ^{18}O tracer, *J. Geol. Soc. Korea*, **44**(3), 331-340.
- Demico, R.V. and Klir G.J. 2004, Fuzzy logic in geology, Elsevier, Academic Press.
- Dixon, B., 2004. Prediction of groundwater vulnerability using integrated GIS-based neuro-fuzzy techniques, *J. of Spatial Hydrology*, **4**(2), 1-38.
- Dixon, B., 2005^a, Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting groundwater vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis, *J. of Hydrology*, **309**, 17-38.
- Dixon, B., 2005^b, Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool, *J. of Applied Geography* **25**, 327-347.
- Ercanoglu, M. and Gokceoglu, C., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey), *Engineering Geology*, **75**, 229-250.
- Evans, B.M. and Myers, W.L., 1990, A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC, *J. of Soil and Water Conservation*, **45**(2), 242-245.
- Fijani, E., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Tsai, F.T.C., and Dixon, B., 2013, Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh-Bonab plain aquifer, Iran, *J. of Hydrology*, **503**, 89-100.
- Fritch, T.G., Mcknight, C.L., Yelderman Jr, J.C., and Arnold, J.G., 2000, An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy aquifer, central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach, *Environmental Management*, **25**(3), 337-345.
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tshirintzis, V.A., and Pinaras, V., 2006, Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques, *Environmental Geology*, **49**(5), 653-673.
- Hahn, J., 1994, The best management practice and protection strategies of groundwater resources of USA, *Kor. J. Engineering Geol.*, **4**(1), 57-77.
- Hahn, J., Hahn, K.S., Lee, Y.D., and Yoo, D.H., 1990, An assessment of groundwater pollution potential of a proposed petrochemical plant site in Ulsan, South Korea, *J. Kor. Inst. Mining Geol.*, **23**(4), 425-452.
- Ham, S.Y., Cheong, J.Y., Kim, M.J., Kim, I.S., and Hwang, H.S., 2004, Assessing groundwater vulnerability using DRASTIC method and groundwater quality in Changwon city, *Kor. Soc. Econ. Environ. Geol.*, **37**(6), 631-645.
- Hamutoko, J.T., Wanke, H., and Voigt, H.J., 2016, Estimation of groundwater vulnerability to pollution based on DRASTIC in the Niipele sub-basin of the Cuvelai Etosha Basin, Namibia, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **93**, 46-54.
- Jo, S.B., Min, K.D., Woo, N.C., and Lee, S.R., 1999, A study on groundwater contamination potential of Pyungtaek-Gun area, Kyunggi-Do using GIS, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **6**(2), 87-94.
- Jo, S.B. and Shon, H., 2004, A study on the prediction of groundwater contamination using GIS, *J. Kor. Geophysical Soc.*, **7**(2), 121-134.
- Kang, J. and Park, E., 2010, A comparative application of DRASTIC and SINTACS models for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo area, *Korean J. Soil & Groundwater Environ.*, **15**(5), 32-39.
- Kim, G.B., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004, Application of representative elementary area (REA) to lineament density analysis for groundwater implications, *Geosciences J.*, **8**(1), 27-42.
- Kim, G.B., 2008, Consideration of trends and applications of groundwater vulnerability assessment methods in South Korea, *J. Soil & Groundwater Environ.*, **13**(6), 1-16.
- Kim, J.Y. and Park, H.-J., 2013, A Comparative study of fuzzy relationship and ANN for landslide susceptibility in Pohang area, *Kor. Soc. Econ. Environ. Geol.*, **46**(4), 301-312.
- Kim, Y.J., Sung, I.H., Kim, W.Y., Yu, I.H., and Park, J.D., 1993, A GIS technology for groundwater protection, *Kor. J. Engineering Geol.*, **3**(3), 253-266.
- Koo, M.H., Kim, T.-K., Kim, S.-S., Chung, S.-R., Kang, I.-O., Lee, C.-J., and Kim, Y., 2013, Estimating groundwater recharge using the water-table fluctuation method: Effect of stream-aquifer interactions, *Korean J. Soil & Groundwater Environ.*, **18**(5), 65-76.
- Lathamani, R., Janardhana, M.R., Mahalingam, B., and Suresha, S., 2015, Evaluation of aquifer vulnerability using drastic model and GIS: a case study of Mysore city, Karnataka, India, *Aquatic Procedia*, **4**, 1031-1038.
- Lee, H., Park, E., Kim, K., and Park, K.H., 2008, A joint application of DRASTIC and numerical groundwater flow model for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo-Eup area, *Kor. J. Soil & Groundwater Environ.*, **13**(1), 77-91.
- Lee, K.H., 2004, First Course on Fuzzy, Theory and Applications, *Springer, Berlin*, p.335.
- Lee, M.-J., Hyun, Y., Kim, Y., and Hwang, S.-I., 2013, Priority assessment for groundwater contamination management using analytic hierarchy process (AHP) and GIS approach, *Kor. J. Soil & Groundwater Env.*, **18**(5), 26-38.
- Lee, S.R. and Kim Y.J., 1996, Analysis of groundwater pollu-

- tion potential and risk using DRASTIC SYSTEM, *J. GIS Ass. Korea*, **4**(1), 1-11.
- Lee, S.R. and Choi, S.H., 1997, Groundwater pollution susceptibility assessment of Younggwang area using GIS technique, *Kor. J. Soil & Groundwater Environ.*, **4**(4), 223-230.
- Min, K.-D., Lee, Y.-H., Lee, S.-R., Kim, Y.-J., and Hahn, J.-S., 1996, Analysis of groundwater pollution potential and development of graphic user interface using DRASTIC system, *J. Kor. Soc. Groundwater Environ.*, **3**(2), 101-109.
- Miryang City, General statistical Data of Miryang City, <http://www.miryang.go.kr> [accessed 18.04.03.]
- MOCT·KOWACO, 2003, Report on groundwater basic investigation in Miryang city.
- MOLTM·K-Water, 2012, Report on national groundwater management plan (2012~2021).
- Moratalla, Á., Gómez-Alday, J.J., Sanz, D., Castaño, S., and De Las Heras, J., 2011, Evaluation of a GIS-Based integrated vulnerability risk assessment for the Mancha Oriental system (SE Spain), *Water Resources Management*, **25**(14), 3677-3697.
- Nadiri, A.A., 2015, Application of artificial intelligence methods in geosciences and hydrology, *OMICS Publication*, p.124.
- Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Khatibi, R., Sadeghfam, S., and Moghaddam, A.A., 2017, Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM), *Science of the Total Environment*, **574**, 691-706.
- National Groundwater Information Center (NGIC), <http://www.gims.go.kr>, Groundwater of Miryang City [accessed 18.06.11]
- Park, C.-K., 1996, Estimation of the available amount of groundwater in South Korea: 1. Development of the method, *J. Kor. Soc. Ground. Environ.*, **3**(1), 15-20.
- Park, H.-J., 2008, Evaluation of the probability of failure in rock slope using fuzzy reliability analysis, *J. Kor. Soc. Econ. Environ. Geol.*, **41**(6), 763-771.
- Park, N.-W., Chi, K.-H., and Kwon, B.-D., 2005, Application of fuzzy information representation using frequency ratio and non-parametric density estimation to multiple-source spatial data fusion for landslide hazard mapping, *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **26**(2), 114-128.
- Park, N.-W., Chi, K.-H., and Kwon, B.-D., 2004, Classification of multi-sensor remote sensing images using fuzzy logic fusion and iterative relaxation labeling, *Kor. J. Remote Sensing*, **20**(4), 275-288.
- Piscopo, G., 2001, Groundwater vulnerability map, explanatory notes-Castlereagh catchment, Parramatta NSW: *Australia NSW Department of Land and Water Conservation*.
- Secunda, S., Collin, M.L., and Melloul, A.J., 1998, Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region, *J. of Environmental Management*, **54**(1), 39-57.
- Senapathi, V., Chung, S.Y., Rajesh, R., Lee, S.Y., Ramkumar, T., and Prasanna, M.V., 2015, Comprehensive studies of hydro-geochemical processes and quality status of groundwater with tools of cluster, grouping analysis, and fuzzy set method using GIS platform: a case study of Dalcheon in Ulsan City, Korea, *Environ. Sci. and Pollut. Resear.*, **22**(15), 11209-11223.
- Senapathi, V., Chung, S.Y., Selvam, S., Lee, S.Y., and Elzain, H.E., 2017, Factors controlling groundwater quality in the Yeonjegu District of Busan City, Korea, using the hydrogeochemical processes and fuzzy GIS, *Environ. Sci. and Pollut. Resear.*, **24**(30), 23679-23693.
- Sener, E., Sener, S., and Davraz, A., 2009, Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey), *Hydrogeology J.*, **17**(8), 2023-2035.
- Shon, Howoong, 2001, A study on the prediction of groundwater contamination using the GIS in Hwanam 2 sector, Gyeonggi Province, Korea, *Kor. Soc. Geophysics*, **4**(4), 267-285.
- Woo, N.C., 1994, Introduction to DRASTIC: a method for groundwater vulnerability assessment, *Kor. J. Econ. Environ. Geol.*, **27**(6), 611-612.
- Zadeh, L.A., 1965, Fuzzy sets, *Information Control*, **8**(3), 338-353.
- Zghibi, A., Merzougui, A., Chenini, I., Ergaieg, K., Zouhri, L., and Tarhouni, J., 2016, Groundwater vulnerability analysis of Tunisian coastal aquifer: an application of DRASTIC index method in GIS environment, *Groundwater for Sustainable Development*, **2**, 169-181.