

제주도 지하수 관정 내 질산성질소 오염도 평가

송성호^{1*} · 황보동준¹ · 장기영¹ · 김진성¹ · 서상기¹ · 양원석²

¹한국농어촌공사 제주지역본부, ²제주특별자치도 물정책과

Evaluation of Nitrate Nitrogen Contamination Degree in Groundwater Wells, Jeju Island

Sung-Ho Song^{1*} · Dongjun Hwangbo¹ · Ki-Young Jang¹ · Jin-Sung Kim¹
Sang-Ki Seo¹ · Won-Seok Yang²

¹Jeju Headquarter, Korea Rural Community Corporation

²Water Policy Division, Jeju Special Self-Governing Province

ABSTRACT

In this study, the evaluation standard for nitrate nitrogen contamination degree (WELCUP) was established using six factors that influence the groundwater quality in Jeju Island. To do this, weightings, ranges, and ratings were assigned for each factor and the relative possibility of nitrate nitrogen contamination degree was evaluated using WELCUP index for each well. As a result of calculating the WELCUP index using groundwater quality data of 5,112 wells in Jeju Island for 27 years (1993-2019), all 61 wells with the WELCUP index value higher than 100 are distributed in Daejung and Hangyung watershed with relatively large area of farmland in Jeju Island. In particular, as the ratio of private wells is more than 64%, it is necessary that systematic management is needed for private wells in terms of nitrate nitrogen contamination. Consequently, based on the results of applying the WELCUP evaluation standard, it is necessary to select the prioritization of nitrate nitrogen contamination pathways project for groundwater wells in Jeju Island.

Key words : Nitrate nitrogen contamination degree, WELCUP index, Groundwater well, Jeju Island

1. 서 론

지하수자원은 적절한 수질을 유지하면서 필요수량을 안정적으로 공급하는 경우 효율성이 극대화된다. 따라서 지하수자원의 안정적 공급을 위해서는, 대수층의 산출특성과 함께 지하수 오염에 대한 정확한 평가가 필요하다. 지하수 오염에 영향을 미치는 잠재오염원은 종류가 다양할 뿐만 아니라 변화양상이 유동적이므로, 관정 내 지하수의

오염원인 분석 및 오염물질의 이동경로를 예측하기 어렵다. 또한 대수층으로 오염물질이 유입되는 경우에는, 원상 복구에 많은 비용과 시간이 소요된다. 결과적으로 효율적인 지하수자원 관리를 위해서는 적절한 오염방지 대책을 수립하여 대수층을 오염원으로부터 사전에 차단하는 것이 필수적이다.

제주도는 지하수 의존도가 매우 높고 유역별로 다양한 수리지질 특성과 관계없이 지하수 관정이 밀집되어 분포하고 있다(Song and Choi, 2012). 또한 농업위주의 1차 산업 비중이 약 11.6%로 전국평균 6%에 비해 높아, 질산성질소 등에 의한 대수층의 오염 취약성이 높은 실정이다(Song et al., 2010). 따라서 농업용수의 이용량 증가 및 이에 수반된 수질 오염 등으로부터 지하수자원의 보전에 대한 문제 제기가 지속되고 있지만, 동위원소를 이용한 질산성질소 오염원에 대한 연구 이외에 대수층을 통한 오염원 경로 및 오염도 평가 등에 대한 연구는 부족한 실정이다.

주저자: 송성호, 한국농어촌공사 제주지역본부 부장
공저자: 황보동준, 한국농어촌공사 제주지역본부 대리
장기영, 한국농어촌공사 제주지역본부 과장
김진성, 한국농어촌공사 제주지역본부 차장
서상기, 한국농어촌공사 제주지역본부 본부장
양원석, 제주특별자치도 물정책과 주무관

*교신저자: 송성호, 한국농어촌공사 제주지역본부 부장
E-mail: shsong@ekr.or.kr

Received : 2021.07.02 Reviewed : 2021.07.07

Accepted : 2021.08.05 Discussion until : 2021. 10. 31

Song et al.(1999)은 제주도 지하수의 질산염 오염원 조사를 위하여, 질산염 농도가 높은 18개 지하수 관정에 대하여 4회(1995~1996)에 걸쳐 질소 동위원소($\delta^{15}\text{N}$) 분석 결과를 제시한 바 있다. 이를 통하여 제주도 전체적으로 화학비료 성분이 지하수 내 질산염 오염의 주요원인인 것으로 밝혀낸 바 있다. Oh and Hyun(1997)은 제주도 지하수 중의 $\delta^{15}\text{N}$ 를 이용한 질산성질소 오염원 추정을 위하여 9개 관정에 대하여 5회(1995~1996) 분석을 실시하여, 주요 공급원인 자연토양, 화학비료, 가정하수, 축산폐기물/퇴비 중 화학비료 성분이 지하수 내 질산성질소 오염에 주로 기여하는 것으로 제시하였다. Kim et al.(2021)은 지하수의 오염원 규명을 위하여 안정동위원소인 $\delta^{15}\text{N}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 와 함께 지하수 연령을 분석하여, 제주도 지하수의 질산성질소 오염 기원을 주로 축산분뇨와 농경지에 살포하는 액비로 추정된 바 있다. 그러나 다양한 연구에도 불구하고 제주도에 분포하는 관정별로 지하수의 질산성질소 오염 정도를 평가할 수 있는 방법이 정립되지 않아, 관정별로 오염도에 대한 정량적인 평가 기법 정립이 필수적이다.

지금까지 대수층의 오염 취약성 평가를 위해 사용되는 대표적인 기법은, 미국 환경보전국(EPA)에서 사용되는 DRASTIC 기법이다(US EPA, 1987). DRASTIC 기법은 지형적인 요소, 토양조건, 기상특성 및 수리지질학적 구조 등의 자료를 이용하여 지하수의 오염을 예측 분석하는 방법이다. 그러나 대수층의 수리지질구조가 복잡한 경우 적용성에 한계가 있어, 기존 DRASTIC 모델의 인자에 인간 활동에 의한 요인을 추가한 V-DRASTIC 방법(Bojorquez-Tapia et al., 2009)과 기존 DRASTIC 모델에 선구조와 토지이용 현황을 추가한 modified DRASTIC 방법(Sener and Davrez, 2013; KRC-G, 2019) 등이 이용되고 있다.

제주도는 해발고도 증가에 따른 불포화대 및 지하수위 심도가 매우 깊고, 유역별로 투수성 지층 분포가 다양하다. 따라서 DRASTIC 기법에서 제시된 7가지 요소 중

특정한 몇 개 요소가 전체 취약성에 미치는 영향이 매우 크게 작용할 수 있다. 또한 제주도의 대수층은 상위지하수, 준기저지하수, 기저지하수로 구분되며, 농업활동이 활발한 일부지역의 경우 상위지하수로부터 유입되는 질산성 질소가 지하수 수질 오염의 주요 요인으로 작용하고 있다(JSSGP and JRI, 2019). 이러한 조건에 따라 제주특별자치도와 한국농어촌공사에서는 신규 지하수 수질측정망 설치 위치 선정 기준으로, 16개 유역별로 오염원 인자와 오염지시자를 점수화하여 활용한 바 있다(JSSGP and KRC-J, 2020).

최근 제주도에서는 개발 이후 지하수의 질산성질소 농도가 증가되는 관정을 대상으로, 관정 내 원위치 오염물질 유입경로 차단 사업을 시작하였다. 이 연구에서는 오염물질 유입구간 차단 사업의 성공적 추진을 위한 대상관정의 우선순위 선정 방안으로, 관정별로 오염 진행 여부와 오염경로 등을 고려한 질산성질소 오염도 평가 기준을 개발하였다. 이를 위하여 전체 관정을 대상으로 잠재오염원 분포현황 및 유역별 수리지질 특성을 반영하여 정량화한 질산성질소 오염도 인자를 선정하고, 인자별로 등급과 가중치 부여를 통하여 대수층 특성, 오염정도 및 오염경로 등을 고려한 관정별 오염물질 유입구간 차단 사업 우선순위를 제시하였다.

2. 분석 방법

제주도 내 대수층을 통하여 지하수 관정으로 유입되는 대표적인 오염인자는 질산성질소(nitrate nitrogen, $\text{NO}_3\text{-N}$)로, 해발고도가 높은 지역에 투수성 지층구조가 발달하는 경우 상위지하수의 관정 내 유입으로 강수량의 계절적 변동에 수반된 질산성질소 농도 변화가 심하게 나타난다(JSSGP and JRI, 2019; JSSGP and KRC-J, 2020).

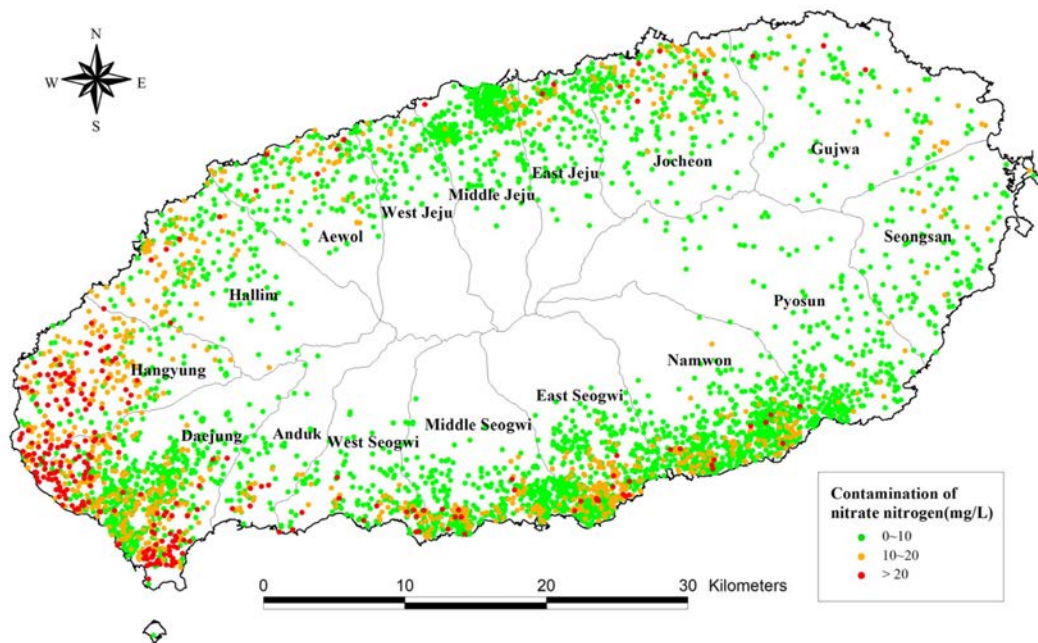
제주도 전역을 대상으로 지하수 수질 현황 파악을 위하

Table 1. Total number of wells and samples for analyzing groundwater quality in each watershed, Jeju Island

Watershed	Number of wells (Public/Private)	Number of sample	Watershed	Number of wells (Public/Private)	Number of sample
Gujwa	132(94/38)	1,427	Daejung	813(188/625)	5,009
Jocheon	273(104/169)	2,985	Anduk	75(24/51)	577
East Jeju	167(56/111)	1,272	West Seogwi	230(56/174)	1,577
Middle Jeju	588(74/514)	4,007	Middle Seogwi	510(67/443)	3,573
West Jeju	84(48/36)	982	East Seogwi	527(61/466)	3,560
Aewol	176(99/77)	1,956	Namwon	653(91/562)	3,794
Hallim	232(113/119)	1,701	Pyosun	247(69/178)	1,698
Hangyung	290(167/123)	2,298	Seongsan	115(52/63)	963
			Total	5,112 (1,363/3,749)	37,379

Table 2. Basic statistics of nitrate nitrogen concentration for groundwater quality data

Watershed	Mean	Standard deviation	Minimum	First quartile	Median	Third quartile	Maximum
Gujwa	2.8	2.6	0.0	1.5	2.1	3.2	27.6
Jocheon	4.8	4.0	0.0	1.7	3.8	6.6	27.4
East Jeju	2.7	2.6	0.0	0.7	1.9	4.1	30.6
Middle Jeju	2.4	2.0	0.0	1.1	1.8	3.2	30.5
West Jeju	2.8	2.6	0.0	1.2	2.1	3.4	18.8
Aewol	3.9	3.6	0.0	1.3	2.8	4.8	29.3
Hallim	4.8	4.6	0.0	1.1	3.3	7.0	29.6
Hangyung	8.9	7.3	0.0	2.3	7.4	14.1	51.9
Daejung	6.4	7.3	0.0	2.1	3.8	7.2	81.5
Anduk	4.3	5.6	0.0	0.5	1.6	6.6	30.4
West Seogwi	4.0	4.8	0.0	0.8	2.2	5.4	38.9
Middle Seogwi	3.5	3.3	0.0	1.1	2.5	5.0	29.6
East Seogwi	4.1	4.1	0.0	1.2	2.8	5.4	32.1
Namwon	2.9	3.3	0.0	1.0	1.9	3.4	35.2
Pyosun	2.4	2.2	0.0	1.0	1.8	3.0	18.7
Seongsan	2.8	2.1	0.0	1.4	2.2	3.5	18.2
Mean	4.0	3.9	0.0	1.3	2.7	5.4	33.1

**Fig. 1.** Distribution of maximum nitrate nitrogen concentration at groundwater wells in Jeju Island.

여 1993~2019년 기간 중 원상복구 관정을 포함한 공공 및 사설관정 5,112공(1,363/3,749공)에 대하여, 총 37,379 번의 성분별 지하수 수질자료를 분석하였다(Table 1). 현재 제주도 내 지하수 수질검사는 음용수와 그 외 용수가 각각 2년과 3년 간격으로 실시하지만, 질산성질소의 경우 1993년 이후 용도별/관정별 수질오염 정도에 따라 7~131 회로 분석 회수의 편차가 매우 크게 나타났다. 이러한 결

과를 토대로 16개 유역에 대한 질산성질소 평균값을 분석한 결과, 전체 평균과 중앙값은 각각 4.0 mg/L과 2.7 mg/L으로 오염 정도가 상대적으로 낮은 반면 최대값은 33.1 mg/L로 일시적인 오염물질 유입으로 인한 관정 내 지하수 오염이 급격하게 악화되는 것으로 나타났다(Table 2).

이러한 기준을 토대로 중 5,109개(원상복구 관정 및 자료누락 관정 제외) 시료에 대한 질산성질소 분석 자료를

이용하여 제주도 전역에 대한 오염현황을 분석하였다. 이 기간 중 가장 높은 질산성질소 농도는 대정구역의 사설관정에서 81.5 mg/L로 분석되었는데, 기간 중 10회의 분석 결과에 대한 평균값은 42.4 mg/L로 심각한 수준의 오염이 발생된 것으로 나타났다. 또한 질산성질소 농도가 30 mg/L 이상으로 분석된 관정들은 대부분 대정구역 및 한정구역에 집중되어 분포하고 있다(Fig. 1).

제주도는 불포화대 및 지하수위 심도가 매우 깊고 유역별로 투수성 지층 분포가 다양하다. 또한 대수층은 상위지하수, 준기저지하수, 기저지하수로 구분되며, 일부지역의 경우 상위지하수로부터 유입되는 오염물질이 지하수 수질 오염의 주요 요인으로 작용하고 있다. 특히 지하수 내 질산성질소 농도는 누적강수에 의한 상위지하수 유입량 변화에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다(JSSGP and JRI, 2019).

현재 제주특별자치도에서는 질산성질소 농도의 최대값이 생활용수 기준(10 mg/L) 이상이며 연간 농도 변화가 심한 관정을 대상으로, 오염물질 유입구간 차단을 통한 관정 개선 사업을 시행하고 있다. 그러나 대상 관정 선정을 위한 구체적인 기준이 없어, 사업 적용 및 효과 분석에 한계가 있다. 따라서 이 사업과 관련하여 JSSGP and KRC-J(2020)가 제주도 지하수 수질전용측정망 위치 선정 기준을 근거로 대수층에 대한 질산성질소 오염 특성과 관련이 높다고 판단되는 인자들을 선정한 후, 각 인자별로 분석 결과의 통계자료를 기초로 등급과 가중치 부여를 통

한 관정별 원위치 오염물질 유입구간 차단 사업 우선순위를 제시하였다. 이때 관정별 오염현황에 이용된 질산성질소 농도값은, 분석기간 중 일시적인 오염물질의 유입으로 인해 관정 내 지하수 오염이 급격하게 상승되는 영향을 감안하여 최대값을 이용하였다.

2.1. 관정별 질산성질소 오염도 평가 기준

현재 제주도에서 지하수 오염상황 모니터링을 위한 목적으로 진행되고 있는 지하수 수질측정망 위치 선정 기준은 오염원 인자(꽃자왈, 습골, 액비살포 지역, 잠재오염원, M-DRASTIC 지수(Panagopoulos et al., 2006), 토지이용 유형)와 오염지시자(질산성질소 농도)의 가중치를 각각 1~10점으로 부여한 후, 유역별로 점수를 중첩한 후 유역 전체 면적으로 나누어 3~5등급으로 구분하여 적용한 바 있다(JSSGP and KRC-J, 2020).

이 연구에서는 제주도 내 전체 관정을 대상으로 관정 내 오염물질 유입구간 차단 사업 우선순위 기준 마련을 위하여, 질산성질소 오염원 인자와 오염지시자를 포함한 6가지 인자들로 구성된 오염도 평가 기준(WELCUP)을 제시하였다. WELCUP은 6가지 인자(유역 특성, 해발고도, 토지이용 특성, 관정별 오염 현황, 이용량, 시료 채수 시기)들의 대표문자를 조합한 용어로, 지하수 내 질산성질소 오염에 대한 상대적인 차이를 평가하기 위해 각 인자에 가중치(weighting), 범위(ranges), 등급(rating)을 수치로 부여하였다.

Table 3. Distribution of maximum nitrate nitrogen concentration in each watershed

Watershed	Nitrate nitrogen concentration (mg/L)			Group
	The first half	The latter half	Total	
Daejung	69.3	81.5	81.5	I (≥ 80.0)
Hangyung	51.9	37.1	51.9	II (50~80<)
West Seogwi	37.2	38.9	38.9	III (30~50<)
Namwon	35.2	31.1	35.2	
East Seogwi	32.1	30	32.1	
East Jeju	18.7	30.6	30.6	
Middle Jeju	30.5	18.4	30.5	
Anduk	30.4	30	30.4	
Middle Seogwi	29.6	22.8	29.6	IV (20~30<)
Hallim	19.5	29.6	29.6	
Aewol	29.3	27.9	29.3	
Gujwa	27.6	26.8	27.6	
Jocheon	21.3	27.4	27.4	
West Jeju	18.8	17.5	18.8	V (<20)
Pyosun	17.2	18.7	18.7	
Seongsan	18.2	17.6	18.2	

2.2. 유역 특성(W, Watershed)

분석 기간 중 유역별 질산성질소 농도 최대값은 대정유역에서 81.5 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 한경(51.9 mg/L)과 서서귀(38.9 mg/L) 순으로 분석되었다. 유역 특성에 따른 오염등급 설정을 위하여 전체기간 중 분기별 최대 농도값에 대하여, 중앙값(median)인 30 mg/L를 기준으로 구간별 편차가 적은 범위의 농도를 나타내는 5가지 그룹으로 구분하였다. 이를 토대로 구간별 최대 농도값을 20.0 mg/L 미만, 20.0~30.0 mg/L 미만, 30.0~50 mg/L 미만, 50.0~80 mg/L 미만, 80.0 mg/L 이상으로 세분하였다(Table 3, Fig. 2).

2.3. 해발고도 특성(E, Elevation)

관정별 질산성질소 최대농도의 해발고도 대표 구간별

빈도분석 결과, 해발고도 구간은 25.0 m 미만, 25~50 m 미만, 50~75 m 미만, 75~100 m 미만, 100~150 m 미만, 150~200 m 미만, 200~300 m 미만, 300 m 이상 등 8구간의 정규 분포로 구분되었다(Fig. 3).

분석 결과 질산성질소 평균농도는 해발고도 25 m 미만과 25~50 m 미만 구간에서 각각 27.7 mg/L로 가장 높았으며, 50~75 m 미만(22.6 mg/L), 75~100 m 미만(20.8 mg/L), 100~150 m 미만(20.7 mg/L), 150~200 m 미만(10.2 mg/L), 200~300 m 미만(9.9 mg/L), 300 m 이상(9.2 mg/L) 순으로 나타났다(Table 4).

2.4. 토지이용 특성(L, Land use)

토지이용 변화는 환경부의 대분류 토지피복도로 분석이 가능하며(<https://egis.me.go.kr>), 1980~2014년 기간 중 산

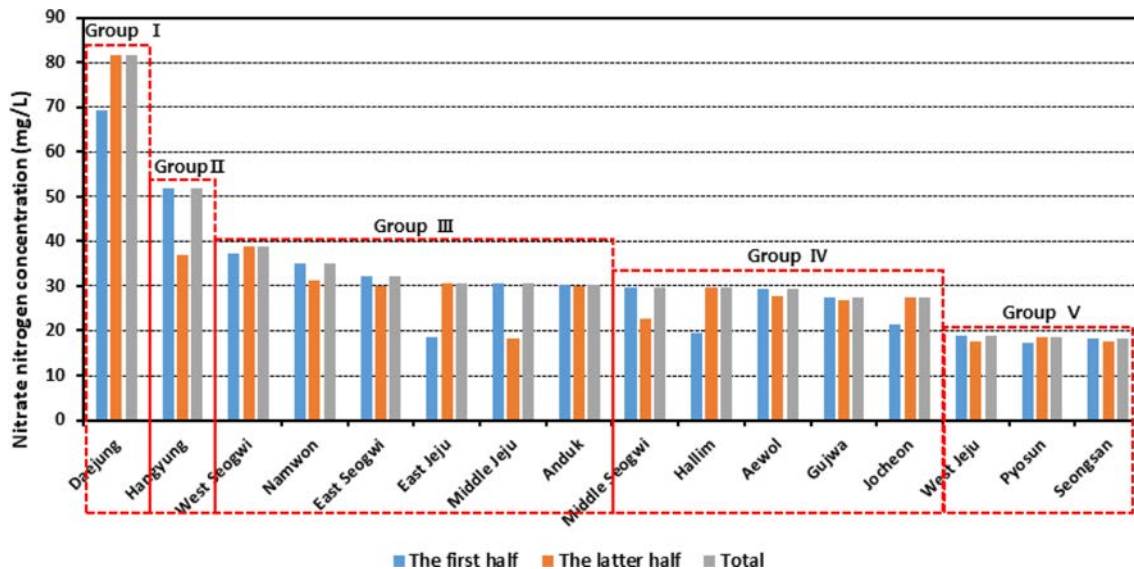


Fig. 2. Grouping of maximum nitrate nitrogen concentration in each watershed.

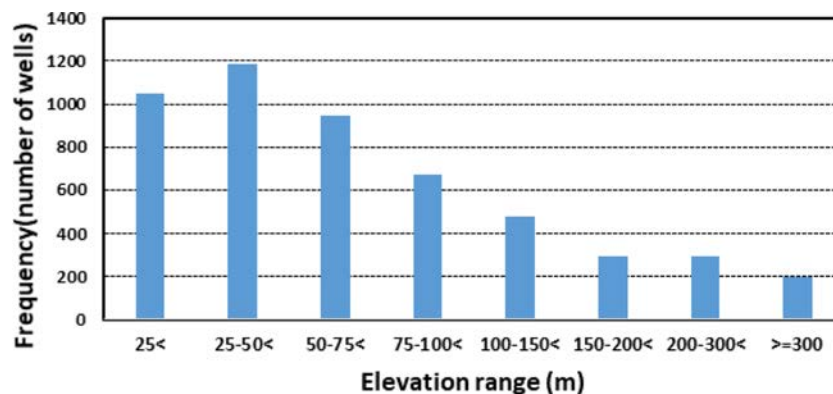


Fig. 3. Frequency distribution of wells in each elevation range.

Table 4. Maximum nitrate nitrogen concentration in each elevation range

(unit: mg/L)

Watershed	Elevation (m)							
	<25	25~50<	50~75<	75~100<	100~150<	150~200<	200~300<	≥300
Gujwa	17.2	16.7	27.6	15.7	12.8	2.6	7.1	-
Jocheon	27.4	24.0	19.7	17.8	22.6	11.1	15.8	10.0
East Jeju	11.8	30.6	10.7	14.3	13.4	6.9	5.4	4.2
Middle Jeju	30.5	15.0	14.6	17.4	11.9	4.0	6.6	4.4
West Jeju	16.9	18.8	11.7	9.3	13.1	8.9	4.2	4.7
Aewol	29.3	20.0	17.8	23.2	17.8	8.8	14.2	15.9
Hallim	25.3	22.8	18.7	13.2	29.6	15.7	18.3	19.2
Hangyung	46.8	43.7	34.5	25.2	51.9	10.6	13.1	17.2
Daejung	81.5	60.0	42.7	39.5	14.7	7.1	9.0	4.1
Anduk	9.6	30.4	20.4	18.9	30.0	19.2	7.5	16.2
West Seogwi	37.2	31.4	30.8	38.9	21.6	21.0	2.4	8.8
Middle Seogwi	23.2	29.6	28.5	17.0	20.4	12.3	17.0	8.5
East Seogwi	27.9	32.1	24.6	19.8	26.5	11.9	11.8	8.4
Namwon	22.0	35.2	28.8	28.3	18.4	12.9	9.8	1.3
Pyosun	18.7	17.2	12.1	16.1	9.4	8.2	6.2	6.1
Seongsan	17.5	16.0	18.2	17.6	17.0	2.2	-	-
Mean	27.7	27.7	22.6	20.8	20.7	10.2	9.9	9.2

Table 5. Maximum nitrate nitrogen concentration in each land use

(unit: mg/L)

Watershed	Urbanized area	Agricultural land	Forest	Grass	Wetland	Barren	Water
Gujwa	17.2	27.6	26.8	16.1	-	10.4	-
Jocheon	27.4	24.0	10.1	17.2	-	10.3	-
East Jeju	30.6	14.3	12.8	1.9	-	13.4	-
Middle Jeju	17.5	30.5	2.5	5.8	3.4	10.7	-
West Jeju	15.4	18.8	9.6	4.7	-	13.1	-
Aewol	29.3	23.2	12.9	9.3	8.5	8.4	-
Hallim	20.4	29.6	22.6	19.2	-	3.1	-
Hangyung	31.8	51.9	27.0	17.0	-	-	-
Daejung	48.5	81.5	18.3	28.4	-	16.9	-
Anduk	18.9	30.4	10.3	16.2	-	14.9	-
West Seogwi	22.5	37.2	5.4	38.9	-	4.8	-
Middle Seogwi	17.6	29.6	6.6	9.9	-	5.5	-
East Seogwi	21.8	32.1	1.5	0.9	-	4.0	-
Namwon	18.2	35.2	13.6	9.4	10.9	5.9	-
Pyosun	18.7	17.2	15.1	6.5	-	4.6	2.6
Seongsan	17.5	18.2	4.8	8.0	-	5.4	-
Mean	23.3	31.3	12.5	13.1	7.6	8.8	2.6

림 면적의 감소가 가장 큰 반면 초지, 시가지, 밭, 시설재배지 등은 면적이 크게 증가한 것으로 나타났다(Song et al., 2018). 이 중 2014년 한경유역과 대정유역의 농경지 면적은 각각 전체면적의 66.0%와 60.9%로 높게 나타났다.

토지이용 특성별 관정 분포 현황은 농경지에 가장 많이 분포하고 있으며, 시가지, 초지, 산림, 나지, 습지 순으로 분포하는 것으로 분석되었다. 토지이용 특성별 질산성질

소 평균농도는 관정분포 현황과 유사하게 농경지(31.3 mg/L), 시가지(23.3 mg/L), 초지(13.1 mg/L), 산림(12.5 mg/L), 나지(8.8 mg/L), 습지(7.6 mg/L), 수역(2.6 mg/L) 순으로 분석되었다(Table 5). 제주시와 서귀포시 동지역 시가지 중 동제주유역의 질산성질소 농도가 가장 높은 30.6 mg/L로 나타났는데, 이는 동제주유역이 다른 유역에 비해 전체면적 대비 농경지 면적이 상대적으로 넓은 영향

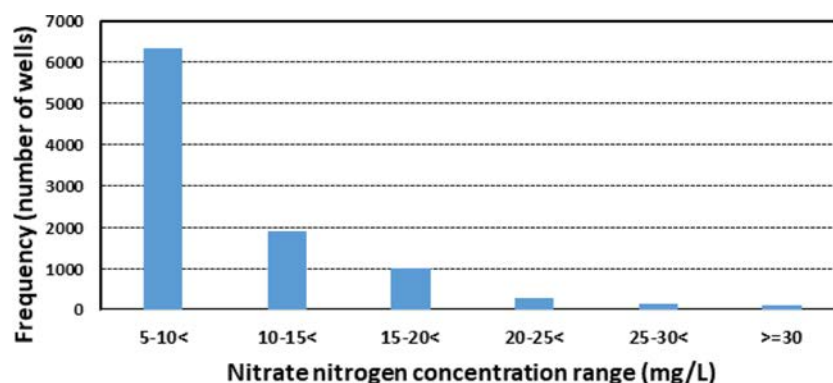


Fig. 4. Frequency distribution of wells in each nitrate nitrogen concentration range except less than 5 mg/L.

Table 6. Maximum values within the range of nitrate nitrogen concentration

Watershed	Nitrate nitrogen concentration (mg/L)						
	<5	5~10<	10~15<	15~20<	20~25<	25~30<	≥30
Gujwa	4.9	10.0	14.4	18.7	20.2	27.6	-
Jocheon	5.0	10.0	14.5	19.9	24.0	27.4	-
East Jeju	5.0	10.0	15.0	18.7	21.4	-	30.6
Middle Jeju	5.0	10.0	15.0	17.5	-	-	30.5
West Jeju	4.7	9.6	13.1	18.8	-	-	-
Aewol	5.0	9.8	14.9	20.0	23.2	29.3	-
Hallim	4.8	10.0	14.9	19.7	22.8	29.6	-
Hangyung	4.9	9.4	15.0	20.0	24.8	29.6	51.9
Daejung	5.0	10.0	15.0	19.8	24.8	29.8	81.5
Anduk	4.9	10.0	14.9	19.2	23.5	26.8	30.4
West Seogwi	4.8	10.0	15.0	19.6	23.5	25.8	38.9
Middle Seogwi	5.0	9.9	15.0	20.0	23.2	29.6	-
East Seogwi	5.0	10.0	14.8	19.8	24.6	27.9	32.1
Namwon	5.0	9.9	15.0	19.5	24.8	29.8	35.2
Pyosun	5.0	10.0	14.9	18.7	-	-	-
Seongsan	5.0	9.9	14.3	18.2	-	-	-
Mean	4.9	9.9	14.7	19.3	24.2	28.4	41.4

으로 판단된다.

2.5. 관정별 오염 현황(C, Contamination degree)

관정별 질산성질소 자료의 농도 구간별 빈도분석 결과, 전체 36,600개 분석 자료 중 5 mg/L 미만인 26,787개를 제외한 6개 구간에 대한 분석 결과는 정규 분포 형태로 나타났다(Fig. 4). 이러한 오염범위별 관정 분포현황을 기준으로 5 mg/L 미만, 5~10 mg/L 미만, 10~15 mg/L 미만, 15~20 mg/L 미만, 20~25 mg/L 미만, 25~30 mg/L 미만, 30 mg/L 이상의 7개 구간으로 구분하였다(Table 6).

2.6. 관정별 이용량 특성(U, groundwater Use)

2014~2019년 기간의 관정별 평균 월별 이용량 자료를

기초로, 빈도분석을 통하여 이용량 범위를 6구간으로 구분하였다. 이때 분석은 이용량이 누락된 사설관정 등을 제외한 총 4,182개 관정 자료를 이용하였다(Fig. 5).

이용량 구간에 따른 질산성질소 최대 농도를 분석한 결과 300 m³/월 미만 구간에서 28.7 mg/L로 가장 높게 나타났다. 또한 1,200~4,000 m³/월 미만 구간과 300~1,200 m³/월 미만 구간에서 각각 23.5 mg/L와 23.3 mg/L로 유사하게 나타났으며, 4,000~7,000 m³/월 미만 구간과 7,000~13,000 m³/월 미만 구간에서 각각 19.8 mg/L와 16.2 mg/L로 분석되었다. 반면 13,000 m³/월 이상 구간에서 9.0 mg/L 순으로, 이용량이 적은 구간에서의 질산성질소 평균농도가 상대적으로 가장 높게 나타났다(Table 7).

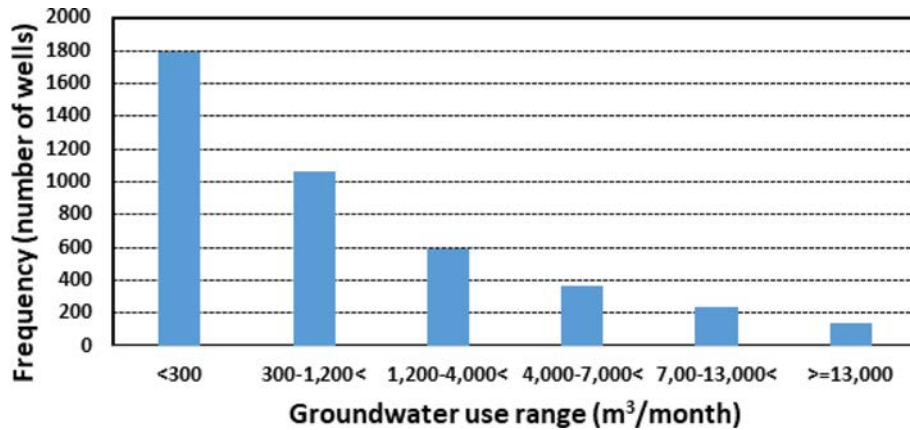


Fig. 5. Frequency distribution of wells in each groundwater use range.

Table 7. Maximum nitrate nitrogen concentration in each groundwater use range

(unit: mg/L)

Watershed	Groundwater use (m³/month)					
	<300	300~1,200<	1,200~4,000<	4,000~7,000<	7,000~13,000<	≥13,000
Gujwa	14.4	9.0	16.7	20.2	13.6	7.0
Jocheon	21.5	27.4	24.0	15.8	11.1	11.1
East Jeju	30.6	12.4	18.7	12.5	7.5	1.0
Middle Jeju	17.5	30.5	13.9	10.2	5.8	4.1
West Jeju	18.8	8.9	13.1	13.0	6.0	-
Aewol	29.3	18.4	23.2	16.1	27.9	12.1
Hallim	20.4	29.6	21.4	22.8	19.2	7.0
Hangyung	39.8	30.3	46.8	37.1	23.3	19.8
Daejung	81.5	60.0	69.3	38.0	22.5	6.1
Anduk	30.4	11.7	16.2	30.0	26.8	-
West Seogwi	37.2	31.4	38.9	25.7	22.5	4.4
Middle Seogwi	29.6	20.4	17.5	15.2	17.0	3.4
East Seogwi	32.1	27.9	24.6	13.0	11.0	13.1
Namwon	22.9	29.4	15.4	19.5	26.9	9.4
Pyosun	16.1	18.7	6.5	9.1	10.6	9.2
Seongsan	17.5	7.5	10.5	18.2	7.3	17.6
Mean	28.7	23.3	23.5	19.8	16.2	9.0

2.7. 시료 채수 시기(P, Period for sampling)

관정별 수질분석 시기별 오염등급 구분을 위하여, 지하수 이용 시기를 고려한 관정별 지하수 시료의 채수 시기를 3개월 단위(2~4월, 5~7월, 8~10월, 11~1월)로 구분하여 분석하였다. 분석 결과 5~7월에 가장 높은 분석결과가 나타났으며, 8~10월, 2~4월, 11~1월 순으로 나타났다 (Table 8).

3. 연구결과

앞서 제시한 6가지 인자별 가중치와 등급을 곱한 결과

로 관정별 WELCUP 지수를 산출하고, 이 결과를 토대로 관정별로 오염물질 유입구간 차단 사업에 대한 우선순위를 평가하였다. 각 인자별 가중치는 지하수 관정 내 질산성질소 오염에 미치는 영향과 오염상태를 순서대로 부여하였는데, JSSGP and KRC-J(2020)가 지하수 수질측정망 위치 선정 시 영향이 크게 나타난 관정별 질산성질소 농도와 유역 인자를 각각 가장 높은 6점과 5점으로 부여하였다(Table 9). 또한 질산성질소의 잠재 오염원으로 작용하는 토지이용 특성 및 질산성질소 농도가 상대적으로 높을 가능성이 큰 상위지하수 유입의 영향을 각각 4점과 3점으로 설정하였으며, 상대적으로 영향이 적은 해발고도

Table 8. Maximum nitrate nitrogen concentration in each sampling period

(unit: mg/L)

Watershed	Groundwater sampling period (month)			
	11~1	2~4	5~7	8~10
Gujwa	18.7	16.7	27.6	26.8
Jocheon	24.0	17.8	27.4	19.9
East Jeju	30.6	10.4	21.4	14.3
Middle Jeju	10.6	17.4	30.5	10.2
West Jeju	16.9	18.8	18.2	13.0
Aewol	17.8	29.3	27.9	23.2
Hallim	19.1	19.2	29.6	25.3
Hangyung	43.7	36.8	51.9	37.1
Daejung	58.2	69.3	60.0	81.5
Anduk	24.2	19.2	30.4	26.8
West Seogwi	21.3	37.2	38.9	25.0
Middle Seogwi	17.5	18.1	29.6	22.8
East Seogwi	26.5	32.1	27.9	30.0
Namwon	18.9	26.9	35.2	29.4
Pyosun	10.6	15.1	17.2	18.7
Seongsan	17.5	16.0	18.2	17.6
Mean	23.5	25.0	30.7	26.4

Table 9. Weighting distributions for each characteristic using WELCUP criteria

Characteristics	Weighting
Watershed (W)	5
Elevation (E)	2
Land use (L)	4
Contamination degree (C)	6
groundwater Use (U)	1
Period for sampling (P)	3

와 지하수 이용량은 각각 2점과 1점으로 부여하였다.

WELCUP 기준에 의한 질산성질소 오염도 평가 기준을 수립하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, WELCUP 기준에 의한 오염도는 관정 내 지하수 수질 특성을 지시하기 때문에, 유역, 해발고도 및 토지이용 특성 등 면적인지는 해당 관정에 영향을 미치는 것으로 간주하였다. 둘째, 향후 지하수 수질측정망 및 신규 지하수 관정 개발 위치 선정 시 활용이 가능하다.

WELCUP 기준을 이용한 질산성질소 오염도는 아래와 같이 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{WELCUP index} = W_R W_W + E_R E_W + L_R L_W + C_R C_W + U_R U_W + P_R P_W \quad (1)$$

여기서, R: 등급(rating) W: 가중치(weighting)

제주도 내 관정별 질산성질소 오염도 평가를 위해 고안된 WELCUP 기준을 적용한 지수는 최고 108, 최저 21 점으로, 질산성질소 오염에 상대적으로 더 민감한 관정을 확인하는 것이 가능하다. 따라서 WELCUP 지수가 높을수록 질산성질소에 의한 지하수의 오염 가능성이 상대적으로 큰 반면, 지수가 낮을수록 오염 가능성이 상대적으로 적다는 상대적인 평가 도구로 활용이 가능하다.

3.1. 유역 특성

유역 특성은 16개 유역 내에 위치한 5,109공의 총 37,379회의 질산성질소 수질 분석 결과를 이용하여, (Table 3)에서 분석된 결과를 기초로 각 유역을 인자로 설정하여 등급과 가중치를 부여하는 방식으로 적용하였다.

Table 10. Rating distribution for watershed characteristics (Weighting: 5)

Watershed			
Watershed	Rating	Watershed	Rating
Gujwa	2	Daejung	5
Jocheon	2	Anduk	3
East Jeju	3	West Seogwi	3
Middle Jeju	3	Middle Seogwi	2
West Jeju	1	East Seogwi	3
Aewol	2	Namwon	3
Hallim	2	Pyosun	1
Hangyung	4	Seongsan	1

이때 등급 부여는 앞서 분석된 유역별 질산성질소 최대 오염 농도를 기준으로 가장 높은 I그룹(80.0 mg/L 이상)인 대정유역을 5등급, II그룹(50~80 mg/L 미만)인 한경유역을 4등급, III그룹(30~50 mg/L 미만)인 서서귀, 남원, 동서귀, 동제주, 중제주, 안덕유역을 3등급, IV그룹(20~30 mg/L 미만)인 중서귀, 한림, 애월, 구좌, 조천유역을 2등급, V그룹(20 mg/L 미만)인 서제주, 표선, 성산유역을 1등급으로 각각 구분하였다(Table 10).

3.2. 해발고도 특성

해발고도 특성은 제주도의 지형적 특성에 따른 해발고도별 관정의 분포 특성을 이용하여, 해발고도 구간을 인자로 설정하여 등급과 가중치를 부여하는 방식으로 적용하였다. 분석에 이용된 관정은 총 5,109개로, (Table 4)에서 제시된 해발고도별 질산성질소 최대농도 분포에 따라 8개 구간에 대한 등급을 부여하였다,

이때 질산성질소 최대 농도는 25 m 미만과 25~50 m 미만 구간에서 각각 27.7 mg/L로, 해발고도가 낮은 구간에서 질산성질소의 농도가 높게 나타났다. 또한 50~75 m 미만 구간은 22.6 mg/L인 반면, 75~100 m 미만과 100~150 m 미만 구간에서는 각각 20.8 mg/L와 20.7 mg/L로 거의 같은 값으로 분석되었다. 상류부인 150~200 m 미만과 200~300 m 미만 구간에서는 각각 10.2 mg/L와 9.9 mg/L로 거의 같은 값인 반면, 300 m 이상 구간에서의 농도는 9.2 mg/L로 가장 낮은 값으로 나타났다. 따라서 이러한 분포 특성을 고려하여, 해발고도 구간별 질산성질소 최대 농도를 기준으로 1~5등급을 부여하였다(Table 11).

Table 11. Rating distribution for elevation characteristics (Weighting: 2)

Elevation (m)			
Elevation	Rating	Elevation	Rating
<25	5	100~150<	3
25~50<	5	150~200<	2
50~75<	4	200~300<	2
75~100<	3	≥300	1

3.3. 토지이용 특성

토지이용 특성은 환경부 토지피복도의 대분류 기준을 적용하여 총 7가지로 분류하였으며, 각 특성별 질산성질소 평균농도가 높은 농경지(31.3 mg/L)와 시가지(23.3 mg/L)를 각각 5등급과 4등급을 부여하였으며, 평균농도가 유사한 초지(13.1 mg/L)와 산림(12.5 mg/L)은 3등급으로 설정하였다. 또한 평균농도가 유사한 나지(8.8 mg/L)와 습

지(7.6 mg/L)은 2등급으로, 평균농도가 가장 낮은 수역(2.6 mg/L)은 1등급을 부여하였다(Table 12).

Table 12. Rating distribution for land use characteristics (Weighting: 4)

Land use			
Category	Rating	Category	Rating
Urbanized area	4	Wetland	2
Agricultural land	5	Barren	2
Forest	3	Water	1
Grass	3		

3.4. 관정별 오염 현황

관정별 오염 현황 특성은 질산성질소 수질 분석 결과를 이용하여, 각 관정에 대한 질산성질소 농도별로 등급과 가중치를 부여하는 방식으로 적용하였다. 관정별 오염등급은 (Table 6)에서 제시된 결과를 토대로 질산성질소 최대 농도가 높은 30 mg/L 이상 6등급, 20~30 mg/L 미만 5등급, 15~20 mg/L 미만 4등급, 5~10 mg/L 미만 3등급, 10~15 mg/L 미만 2등급, 5 mg/L 미만을 1등급으로 각각 부여하였다(Table 13).

Table 13. Rating distribution for contamination degree characteristics (Weighting: 6)

Contamination degree (mg/L)			
Range	Rating	Range	Rating
<5	1	15~20<	4
5~10<	2	20~30<	5
10~15<	3	≥30	6

3.5. 관정별 이용량 특성

이용량 특성은 공공 및 관정의 월별 이용량 분석 결과를 이용하여, 각 관정별 분기별 이용량에 따른 질산성질소 농도의 상관성에 따른 등급과 가중치를 부여하는 방식으로 적용하였다. (Table 7)에서 제시된 질산성질소 평균 농도를 기준으로 300 m³/월 미만 구간(28.7 mg/L)은 5등급, 1,200~4,000 m³/월 미만 구간(23.5 mg/L)과 300~1,200

Table 14. Rating distribution for groundwater use characteristics (Weighting: 1)

Groundwater use (m³/month)			
Range	Rating	Range	Rating
300<	5	4,000~7,000<	3
300~1,200<	4	7,000~13,000<	2
1,200~4,000<	4	≥13,000	1

m³/월 미만 구간(23.3 mg/L)은 4등급을 부여하였다. 또한 4,000~7,000 m³/월 미만 구간(19.8 mg/L)과 7,000~13,000 m³/월 미만 구간(16.2 mg/L)은 각각 3등급과 2등급으로 구분하였으며, 13,000 m³/월 이상 구간(9.0 mg/L)은 가장 낮은 1등급을 부여하였다(Table 14).

3.6. 시료 채수 시기

시료 채수 시기 특성은 질산성질소 수질 분석 결과를 이용하여, 각 관정의 수질분석 시기(갈수기와 풍수기)에 대한 질산성질소 농도별로 등급과 가중치를 부여하는 방식으로 적용하였다. (Table 8)에서 제시된 결과를 토대로 오염등급 구분을 위한 기간별 평균농도값이 가장 높은 5~7월(30.7 mg/L)을 4등급, 8~10월(26.4 mg/L)을 3등급, 2~4월(25.0 mg/L)을 2등급, 11~1월(23.5 mg/L)을 1등급으로 부여하였다(Table 15).

Table 15. Rating distribution for period of sampling characteristics (Weighting: 3)

Period for sampling (month)			
Range	Rating	Range	Rating
5~7	4	2~4	2
8~10	3	11~1	1

3.7. 질산성질소 오염도 평가 결과

앞서 제시된 인자별 수질분석 결과를 기초로 WELCUP 기준을 적용한 결과, 질산성질소 오염도 지수가 100점 이상으로 상위권에 속한 관정은 총 61공으로 대부분 서부지역에 속하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 WELCUP 기준 인자 중 가중치가 오염 현황, 유역 및 토지이용이 각각 6점, 5점, 4점으로, 나머지 해발고도, 이용량 및 수질분석 시기 인자들보다 높은 영향을 반영한 것으로 판단된다. 즉 현재 오염현황과 농경지 등의 영향이 질산성질소 오염도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다(Fig. 6). 이러한 결과는 Fig. 1에서 제시한 관정별 질산성질소 농도 최대값이 집중되어 분포하는 서부지역의 질산성질소 오염도가 상대적으로 높은 결과와 유사하며, 이 결과를 토대로 향후 이들 지역에 대한 체계적인 관리 방안 수립이 시급한 것으로 나타났다.

질산성질소 오염도 지수가 100점 이상에 속하는 관정 61공 중, 공공과 사설관정은 각각 22공과 39공으로 나타났다. 또한 전체 61공은 대정유역과 한경유역에 분포하며, 각각 57공(20공/37공)과 4공(2공/2공)으로 분석되었다. 특히 사설관정의 비율이 약 64%로 높게 나타남에 따라, 질산성질소 오염도 측면에서 사설관정에 대한 지속적인 관리가 필요한 것으로 판단된다.

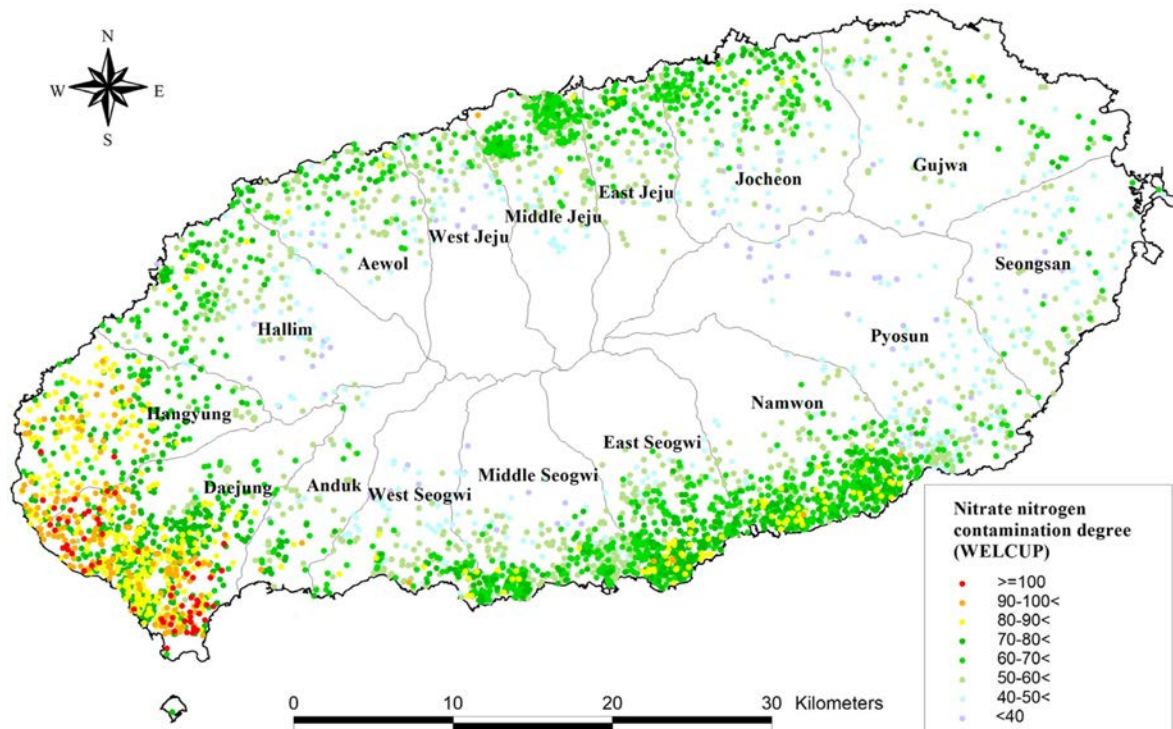


Fig. 6. Evaluated result for nitrate nitrogen contamination degree (WELCUP).

4. 결 론

이 연구에서는 최근 제주도에 시행하고 있는 오염물질 유입구간 차단 사업을 위한 대상관정의 우선순위 선정 방안으로, 관정별로 오염 진행 여부와 오염경로 등을 고려한 질산성질소 오염도 평가 기준을 개발하였다. 이를 위하여 질산성질소 오염도 평가 기준(WELCUP)을 6가지로 설정한 후, 각 요인별로 가중치, 범위, 등급을 수치로 부여하여 각 관정별로 WELCUP 지수를 산출하여 관정별 지하수 오염도를 정량적으로 평가하였다.

WELCUP 기준은 유역(W), 해발고도(E), 토지이용(L), 관정별 오염 현황(C), 지하수 이용량(U), 시료 채취 시기(P)로, 각각의 가중치는 5, 2, 4, 6, 1, 3이다. 6가지 기준의 가중치와 각 기준별 등급을 곱한 값으로 계산된 WELCUP 지수의 범위는 21~108점이다.

이러한 WELCUP 기준을 이용하는 경우 질산성질소에 의한 지하수 오염도가 상대적으로 높은 관정을 확인하는 것이 가능하다. 따라서 WELCUP 지수가 높을수록 질산성질소에 의한 지하수 오염도가 높은 반면, 지수가 낮을수록 오염도가 상대적으로 낮다는 상대적인 평가 도구로 활용이 가능하다.

WELCUP 기준을 이용하여 총 5,112공을 평가한 결과 질산성질소 오염도 지수의 최대값인 108점에 가까운 100점 이상은 총 61개 관정으로 분석되었다. 이들 관정은 농경지 면적이 가장 넓은 대정유역과 한경유역에 각각 57공과 4공이 분포되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 관정 내 질산성질소 오염 현황과 잠재오염원으로서의 농경지 분포가 복합적으로 작용한 영향으로 판단된다. 또한 이들 관정 중 사설관정의 비율이 약 64%인 39공으로 높게 나타나며, 사설관정에 대한 지속적인 관리가 필요한 것으로 판단된다.

사 사

논문심사를 위해 수고해 주신 익명의 세 분 심사위원과, 도면 작성에 도움을 준 제서희씨에게 감사드립니다.

References

Bojórquez-Tapia, L.A., Cruz-Bello, G.M., Luna-González, L., Juárez, L., and Ortiz-Pérez, M.A., 2009, V-DRASTIC: Using visualization to engage policymakers in groundwater vulnerability assessment, *J. Hydrol.*, **373**(1-2), 242-255.

JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) and JRI (Jeju Research Institute), 2019, Research report on improvement of groundwater quality and prevention of groundwater contamination.

JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) and KRC-J (Jeju Headquarter, Korea Rural Community Corporation), 2020, Report for establishment of groundwater quality measurement network and operation plan.

Kim, S.H., Kim, H.R., Yu, S., Kang, H.J., Hyun, I.H., Song, Y.C., Kim, H., and Yun, S.T., 2021, Shift of nitrate sources in groundwater due to intensive livestock farming on Jeju Island, South Korea: With emphasis on legacy effects on water management, *Water Res.*, **191**, 116814.

KRC-G (Gyeonggi Headquarter, Korea Rural Community Corporation), 2019, Report for management of rural groundwater (Yangcheon District)

MOE (Ministry of Environment) Environmental Geospatial Information Service (<https://egis.me.go.kr>)

Oh, Y.K. and Hyun, I.H., 1997, Estimation of nitrate-nitrogen contamination sources in Cheju Island groundwater using $\delta^{15}\text{N}$ values, *J. Korean Soc. Groundw. Environ.*, **4**(1), 1-4 (in Korean with English abstract).

Panagopoulos, G.P., Antonakos, A., and Lambrakis, N.J., 2006, Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS, *Hydrogeol. J.*, **14**(6), 894-911.

Sener, E. and Davrez, A., 2013, Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey), *Hydrogeol. J.*, **21**(3), 701-714.

Song, S.H. and Choi, K.J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju island with climate change (I), *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(2), 62-70 (in Korean with English abstract).

Song, S.H., Myoung, W.H., An, J.G., Jang, J.S., Baek, J.H., and Jung, C.Y., 2018, Estimation of regional future agricultural water demand in Jeju Island considering land use change, *J. Soil Groundw. Environ.*, **23**(1), 92-105 (in Korean with English abstract).

Song, S.J., Park, W.B., and Kang, B.R., 2010, Identification of sources of nitrate contamination to groundwater in the north-western part of Jeju-do using multi-isotope analysis, *J. Radia. Indus.*, **4**(2), 185-194 (in Korean with English abstract).

Song, Y.C., Koh, Y.K., and U, J.G., 1999, Estimation of nitrate sources in Cheju Island groundwater using $\delta^{15}\text{N}$, *J. Korean Soc. Groundw. Environ.*, **6**(3), 107-110 (in Korean with English abstract).

US EPA, 1987, DRASTIC: A Standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings (US EPA 600/2-87-035).