

해안지역 지하수유출량의 평가

II. 신뢰성 분석

Estimation of Groundwater Discharge in Coastal Area

II. Reliability Analysis

배상근*, 김용호**, 최윤영***

Sang Keun Bae, Yong Ho Kim, Yun Young Choi

요 지

선행연구를 통하여 평가된 지하수해안유출량에 대한 신뢰성분석을 유출량산정에 이용된 기초자료와 산정된 유출량에 대한 변화특성 및 불확실성분석을 통하여 수행하였다. 본 연구에서는 지역별, 연도별 그리고 계절별 지하수 해안유출량 변화특성을 분석하였으며 지하수 해안유출량의 변화는 지하수면 경사의 변화에 의하여 영향을 받음으로 지하수면 경사의 변화 특성으로부터 지하수 해안유출량 변화특성을 파악하였다. 그 결과, 상관성검정에서는 지표면 경사와 지하수면 경사는 양의 상관관계가 있음을 나타내었다. 지역별 차이는 있으나 지하수면 경사의 계절별, 연도별 차이는 나타나지 않음을 알 수 있었다.

지하수해안유출량을 산정하는데 필요한 자료 수가 정도 높은 계산을 하기에 충분하지 않아 산정된 유출량에 불확실성이 있다. 따라서 기존의 충분하지 않은 자료를 이용하여 산정한 지하수 해안유출량의 불확실성을 분석하였다. 자료의 분석결과, 주요 지역의 각 소유역별 지하수해안유출량의 불확실성은 2% ~ 42%의 범위를 나타내었다. 각 소유역의 불확실성이 가장 적은 지역은 영암지역 이고 각 소유역의 불확실성이 가장 큰 지역은 함평지역임을 나타내었다.

핵심용어 : 지하수해안유출량, 신뢰성분석, 지하수해안유출량의 변화특성, 불확실성

1. 서론

선행연구를 통하여 전국의 해안지역 중 지하수기초조사가 완료된 지역을 대상으로 지하수해안유출량을 산정하였다. 해안을 통한 지하수유출량의 파악은 수문순환해석의 정도향상과 해안지역 지하수자원의 개발과 관리측면에서 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다. 해안지역의 경우 내륙지역에 비하여 수자원의 개발과 공급에서 불리한 측면을 가지므로 해안지역의 용수공급 체계의 효율성을 향상시키기 위해서는 해당 지역의 정확한 수자원 평가와 같은 공간적인 변화특성의 파악이 필요하다. 그리고 유출량산정을 위해 적용된 변수와 지하수 사용량 혹은 강수량 등의 계절별, 연도별과 같은 시간적인 변동은 해안으로의 지하수 유출에도 영향을 미치므로 해안지역의 수자원 확보기술의 현장 적용성 확보 및 경제체로서의 정확한 가치평가를 위해서는 공간적, 시간적 해안지하수 유출량의 변동특성에 대한 파악이 필요하다. 또한 지하수해안유출량의 산정에 적용된 여러자료가 가지는 불확실성에 의하여 산정된 유출량에도 불확실성이 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 지역별로 산정된 지하수해안유출량의 신뢰성분석을 위하여 유출량산정에 이용된 기초자료와 산정된 유출량에 대한 변화특성과 불확실성에 대한 분석을 수행하였다.

* 정회원-계명대학교 토목공학과 교수·E-mail : skbae@kmu.ac.kr

** 정회원-계명대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : kimyhsh@kmu.ac.kr

*** 정회원-상주대학교 환경공학과 조교수·E-mail : yychoi@sangju.ac.kr

2. 지하수해안유출량

2.1 대상지역

지하수의 해안유출량을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있으며 Corbett 등(2000)은 Darcy의 법칙, 침윤계를 이용한 직접측정법, 추적자법 등이 주로 사용된다고 보고하였다. 본 연구에서는 이들 방법 중 Darcy의 법칙을 적용하여 정밀지하수해안유출량을 산정하였다. Darcy의 법칙은 국내외에서 김용호와 배상근(995), 한수영 등(2006), Oberdorfer 등(1990)에 의하여 지하수의 해안유출량 산정에 적용되어 졌다.

지하수해안유출량의 산정대상지역은 그림 1과 같다. 지하수해안유출량의 산정을 위한 연구대상지역은 지하수기초조사(대한광업진흥공사, 1998, 2000; 한국수자원공사, 1999, 2000, 2003a, 2003b, 2003c, 2003d; 한국자원연구소, 1999)가 이루어진 지역으로 산정에 필요한 기초자료의 확보가 가능한 곳이다. 산정대상지역은 주요하천권역별로 보면 낙동강권역의 울진, 영덕, 포항, 부산 등 4개 지역, 영산강/섬진강권역의 고흥, 강진, 해남, 영암, 함평 등 5개 지역 금강권역의 군산, 서천 등 2개 지역으로 모두 11개 시·군지역이다.

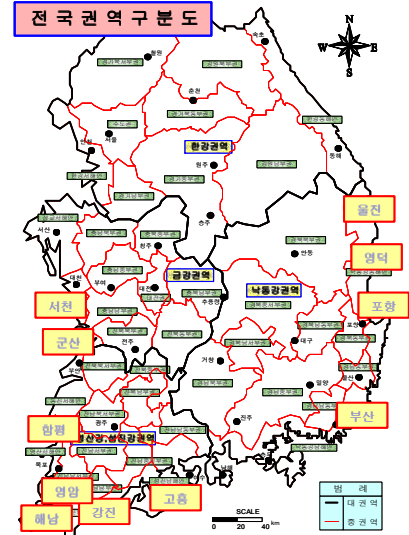


그림 1. 대상지역

2.2 산정결과

지하수해안유출량의 산정결과는 표 1과 같다. 연구대상지역 중 서천과 군산은 하나의 지하수유동체계를 가진 지역으로 간주하여 유출량을 산정하였다. 표 2에 의하면 총 10개 지역 중 포항지역의 유출량이 110,136,200m³/year로 가장 큰 것으로 나타났으며, 함평지역의 유출량이 258,188m³/year로 가장 작은 값은 나타내었다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 지역에 따라 지하수 해안유출량은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 포항, 부산, 영덕 등과 같이 유역의 면적이 크고 해안선의 길이가 길며 큰 하천의 하구에 위치한 지역인 경우에 지하수해안유출량이 많이 발생되는 것으로 나타났다.

표 1. 지하수해안유출량

대상지역	유역면적 (km ²)	해안선길이 (m)	동수경사	년유출량 (m ³ /year)
울진	140.40	64,632	0.0125	71,208,629
영덕	229.19	50,392	0.0218	73,089,233
포항	452.20	89,937	0.0239	110,136,200
부산	327.60	101,216	0.0585	95,767,208
고흥	646.26	207,297	0.0074	30,240,242
강진	300.00	53,497	0.0112	730,781
영암	67.04	45,657	0.0172	413,737
해남	755.85	268,179	0.0133	52,169,035
서천/군산	303.54	100,562	0.0084	2,999,409
함평	105.10	20,152	0.0094	258,188

3. 변화특성 분석

해안지역의 지하수 해안유출량의 변화특성을 파악하기 위하여 지하수 기초조사가 수행된 전 해안지역의 927개 관정에 대한 지하수위 자료와 농업기반공사에서 설치하여 운영 중인 해수침투 관측망으로부터 관측된 지하수위 자료를 이용하여 분석하였다. 농업기반공사에서는 도서 및 해안인접 지역에 해수침투조사를 위한 관측공을 2003년 말 현재 총 45개소 설치하여 해수침투 관측망으로 운영 중에 있다. 지역별로는 경기 8곳, 충남 4곳, 전북 1곳, 전남 19곳, 경남 13곳으로 이루어져 있다.

자료분석은 SPSS/PC(version 11.5) 프로그램을 이용하여 Pearson Correlation, 회귀분석, one-way ANOVA(Analysis of Variable)를 이용하여 분석하였다.

3.1 상관관계 분석

지표면 경사와 지하수면 경사의 상관성 검정을 실시하였으며 결과는 표 2에서 이들 두 인자간의 상관관계는 Pearson Coefficient $r=0.903(p=0.000)$ 로 나타나 양의 상관관계가 있으며 지표면 경사가 증가하면 지하수면 경사도 증가함을 나타내고 있다.

지하수면 경사의 계절별 차이를 분석한 결과가 표 3에 나타나있다. 본 표에 의하면 $F=2.243(p=0.081)$ 로 나타나 지하수면 경사의 계절별 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다.

표 2. 지표면경사와 지하수면경사의 상관성

		G.G	H.G
G.G	Pearson Correlation	1.000	.903**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000
	N	3725.000	3725.000
H.G	Pearson Correlation	.903**	1.000
	Sig. (2-tailed)	.000	.000
	N	3725.000	3725.000

** Correlation is significant at the 0.01 level

G.G : Ground Gradient

H.G : Water Level Gradient

표 3. 계절별 지하수면 경사의 차이검정 결과

Water Level Gradient

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between (Combine)		.006	3	0.002	2.243	.081
Groups Linear Term	Unweighed	.003	1	0.003	3.129	.077
	Weighted	.001	1	0.001	1.580	.209
	Deviation	.005	2	0.002	2.574	.076
Within Groups		3.514	3721	0.001		
Total		3.520	3724			

지하수면 경사의 연도별 차이를 분석한 결과가 표 4에 나타나있다. 본 표에 의하면 $F=1.524(p=0.192)$ 로 나타나 지하수면 경사의 연도별 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다. 지하수면 경사의 연도별 사후검정 결과 각 계절간의 검정에서 p값이 0.05보다 높게 나타나 지하수면 경사의 연도별 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다.

표 4. 연도별 차이검정결과

Water Level Gradient

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between (Combine)		.006	4	.001	1.524	.192
Groups Linear Term	Weigthed	.000	1	.000	.098	.755
	Deviation	.006	3	0.002	1.999	.112
Within Groups		3.440	3691	0.001		
Total		3.445	3695			

표 5. 지역별 차이검정결과

Water Level Gradient

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between (Combine)		.497	9	.055	71.199	.000
Groups Linear Term	Unweighed	.054	1	.054	70.264	.000
	Weighted	.191	1	.191	246.741	.000
	Deviation	.305	8	.038	49.257	.000
Within Groups		2.796	3607	.001		
Total		3.293	3616			

지하수면 경사의 지역별 차이를 분석한 결과가 표 5에 나타나있다. 본 표에 의하면 $F=71.199(p=0.000)$ 으로 나타나 지역별로는 지하수면 경사의 유의한 차이가 나타남을 알 수 있다.

3.2 회귀분석

지하수면 경사에 영향을 미치는 예측인자를 알아보기 위하여 stepwise 방법으로 회귀분석 하였다.

회귀분석 결과에 의한 회귀식 산정결과에 의하면 전 지역에 대한 지하수면 경사와 지표면 경사와의 관계는 $H.G. = 0.699 \cdot G.G. - 0.001$ 임을 나타내었다.

표 6. 지하수해안유출량의 표준오차

3.3 지하수해안유출량의 변화

산정된 해안지역의 지역별 년 평균 지하수 해안유출량의 변화는 표 6과 같다. 표 6에 의하면 각 지역의 년평균지하수유출량의 오차는 3.9%~15.0%의 범위에서 발생함을 나타내고 있다. 산정된 유출량의 오차는 고흥에서 3.9%로 가장 적으며 영암에서 15.0%로 가장 큰 값을 나타내고 있다.

지역	년평균유출량(m ³ /year)	표준오차(m ³)
울진	71,208,629	6,836,028
영덕	73,089,233	8,843,797
포항	110,136,200	6,498,036
부산	95,767,208	8,810,583
고흥	30,240,242	1,179,369
해남	52,169,035	5,529,918
영암	413,737	62,061
강진	730,781	51,155
함평	258,188	17,040
서천/군산	2,999,409	332,934

4. 지하수해안유출량 산정값의 불확실성 분석

자료의 분석을 위하여 통계 패키지인 Bayesian statistical program R (Bayesian R-cord)를 이용하였다. 주어진 관측값에 대한 분포가 정규분포를 따른다고 가정하고, 모집단 평균에 대한 사전정보가 부정적 사전 분포를 따른다고 가정하였다. 각각의 관측자료(투수계수, 대수층두께, 해안선길이, 동수경사)에서 1000개의 random number를 발생한 후, 이 1000개의 random number에 대한 평균과 편차를 구하여 불확실성을 구하였다. 지하수기초조사를 이용하여 지하수해안유출량을 산정한 10개 지역에 대하여 불확실성을 분석하였으며 분석결과는 표 7과 같다.

표 7. 각 지역별 관측 및 산정자료별 불확실성

지역	투수계수 (%)	대수층두께 (%)	해안선길이 (%)	동수경사 (%)	유출량 (%)
울진	2.312 ~ 21.513	0.744 ~ 6.858	0.003 ~ 0.045	0.752 ~ 7.350	7.955 ~ 25.681
영덕	8.577 ~ 11.691	1.018 ~ 3.403	0.004 ~ 0.014	0.423 ~ 3.723	12.313 ~ 15.863
포항	2.631 ~ 25.476	0.439 ~ 12.918	0.003 ~ 0.032	0.010 ~ 0.501	6.186 ~ 28.136
부산	1.195 ~ 29.933	0.168 ~ 0.987	0.002 ~ 0.018	0.158 ~ 3.845	1.934 ~ 31.291
고흥	6.244 ~ 38.377	0.363 ~ 1.653	0.001 ~ 0.013	0.456 ~ 3.579	7.326 ~ 42.207
영암	3.999 ~ 4.092	2.055 ~ 2.102	0.001 ~ 0.004	0.417 ~ 2.336	6.612 ~ 8.394
강진	6.040 ~ 6.429	1.275 ~ 1.316	0.003 ~ 0.013	0.469 ~ 2.621	7.801 ~ 10.264
해남	4.370 ~ 40.778	0.545 ~ 1.600	0.001 ~ 0.018	0.424 ~ 3.057	6.675 ~ 42.377
함평	9.438 ~ 36.267	0.441 ~ 0.627	0.003 ~ 0.004	0.684 ~ 3.688	10.567 ~ 40.585
서천/군산	6.154 ~ 15.765	1.250 ~ 1.528	0.001 ~ 0.008	0.886 ~ 3.249	8.584 ~ 19.576

표 7에 의하면 울진지역의 각 소유역별 지하수해안유출량의 불확실성은 7.955%~25.681%의 범위를 나타내었고, 영덕지역은 12.313%~15.863%, 포항지역은 6.186%~28.136%, 부산지역은 1.934%~31.291%, 고흥지역은 7.326%~42.207%, 영암지역은 6.612%~8.394%, 강진지역은 7.801%~10.264%, 해남지역은 6.675%~42.377%, 함평지역은 10.567%~40.585%, 서천/군산지역은 8.584%~19.576%의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

5. 결론

지하수해안유출량의 신뢰성분석을 위하여 유출량산정을 위한 기초자료와 산정된 유출량에 대한 변화특성 파악과 불확실성분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지하수조사자료를 이용하여 지하수면 경사의 변화 특성을 분석하고 이 결과로부터 지하수 해안유출량 변화특성을 파악하였다. 그 결과, 상관성검정에서는 지표면 경사와 지하수면 경사는 양의 상관관계가 있음을 나타내었다. 지역별 차이는 있으나 지하수면 경사의 계절별, 연도별 차이는 나타나지 않음을 알 수 있었다.
2. 지하수면 경사에 영향을 미치는 예측인자를 알아보기 위하여 지표면경사를 stepwise 방법으로 회귀분석하였다. 설명력계산 결과에 의하면 지표면경사의 지하수면경사에 대한 설명력이 83.8%임을 나타내었다. 본 모형의 적합성을 검정한 결과에 의하면 $F=18693.331(p=0.000)$ 으로 나타나 본 모형이 적합함을 알 수 있었다. 회귀식 산정결과, 지하수면 경사와 지표면 경사와의 관계는 $H.G. = 0.699 \cdot G.G. - 0.001$ 임을 나타내었다.
3. 지하수해안유출량산정의 불확실성을 분석하였다. 자료의 분석결과, 울진지역의 각 소유역별 지하수해안유출량의 불확실성은 7.955%~25.681%의 범위를 나타내었고, 영덕지역은 12.313%~15.863%, 포항지역은 6.186%~28.136%, 부산지역은 1.934%~31.291%, 고흥지역은 7.326%~42.207%, 영암지역은 6.612%~8.394%, 강진지역은 7.801%~10.264%, 해남지역은 6.675%~42.377%, 함평지역은 10.567%~40.585%, 서천/군산지역은 8.584%~19.576%의 범위를 가지는 것으로 나타났다.
4. 이상의 결과에서 본 연구를 통하여 산정된 지하수해안유출량은 물수지 분석에 있어서의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 해안지역에 대한 지하수개발 및 관리에 다양하게 활용되어질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김용호, 배상근(2005). 지하수위관측자료를 이용한 지하수해안유출량의 산정, 한국환경과학회 2005년 가을 학술발표회 논문집, 제14권 제2호, pp. 422-423.
2. 대한광업진흥공사(1998). 함평-나주지역 지하수 기초조사 보고서.
3. 대한광업진흥공사(2000). 해남지역 지하수 기초조사 보고서.
4. 한국수자원공사(1999). 울진지역 지하수 기초조사 보고서.
5. 한국수자원공사(2000). 영덕지역 지하수 기초조사 보고서.
6. 한국수자원공사(2003a). 포항지역 지하수 기초조사 보고서.
7. 한국수자원공사(2003b). 부산지역 지하수 기초조사 보고서.
8. 한국수자원공사(2003c). 고흥지역 지하수 기초조사 보고서.
9. 한국수자원공사(2003d). 서천-군산지역 지하수 기초조사 보고서.
10. 한국수자원연구소(1999). 영암-강진지역 지하수 기초조사 보고서.
11. 한수영, 홍성훈, 박남식(2006). 권역별 층적층 지하수의 해안유출량 분포, 대한토목학회논문집, 제26권 제1b호, pp. 1-6.
12. Corbett, D.R., Burnett, W.C., and Chanton, J.P.(2000). Submarine groundwater discharge, an unseen yet potentially important coastal phenomenon, SGEB-54.
13. Oberdorfer, J.A., Valentino, M.A., and Smith S.V.(1990). Groundwater contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California, Biogeochemistry 10, pp. 199-216.