

## GIS를 이용한 포항시 지형 및 지질과 지하수 산출능력 간의 상관관계 분석

이사로<sup>1\*</sup> · 김용성<sup>2</sup> · 김남진<sup>2</sup> · 안경환<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질자원정보센터, <sup>2</sup>경북대학교 지질학과, (주)유신코퍼레이션,

<sup>3</sup>한국수자원공사 조사기획처 지하수조사부

### Analysis of Relationships Between Topography/Geology and Groundwater Yield Properties at Pohang using GIS

Saro Lee<sup>1\*</sup>, Yong Sung Kim<sup>2</sup>, Nam Jin Kim<sup>2</sup> and Kyoung Hwan Ahn<sup>3</sup>

*1*Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), 92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

*2*Department of Geology, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea,

*3*Yooshin Engineering Corporation, 832-40, Yoksam-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-936, Korea

*3*Groundwater Investigation team, Korea Water Resources Corporation, 560 Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon, 306-711, Korea

The aim of this study is to analyze relationships between topography/geology which affects physically groundwater regime and groundwater yield properties in Pohang City using Geographic Information System (GIS). For the purpose, topographic factors such as ground elevation, ground elevation difference, ground slope, and ground regional slope, and hydrogeologic unit, and groundwater yield properties factors such as transmissivity, specific capacity, and well yield, were constructed to spatial data base. Then the relationships between topography, geology and groundwater yield properties were analyzed quantitatively using GIS overlay technique. As the results, groundwater yield of unconsolidated sediments and porous volcanic rocks is the highest among the hydrogeologic units of study area, and clastic sedimentary rock is the lowest. There are positive relationship between the elevation and elevation difference and the groundwater yield properties and negative relationship between the topographic slope and the groundwater yield properties.

**Key words :** Groundwater, Specific capacity, Transmissivity, GIS, Pohang City

본 연구의 목적은 포항지역에서 지형 및 지질과 같이 지하수계에 물리적인 영향을 미치는 요인과 지하수 산출 특성과의 상관관계를 GIS(Geographic Information System)를 이용하여 정량적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 지형고도, 지형고도차, 단위 지형경사, 광역 지형경사 등의 지형에 관련된 인자, 수문지질단위와 투수량계수(transmissivity), 비양수량(specific capacity), 양수량(well yield) 등의 지하수 산출 특성 인자를 공간 DB로 구축하였다. 그리고 이러한 지형, 지질과 지하수 산출특성 자료들과의 상관관계를 GIS 중첩분석 기법을 이용하여 정량적으로 도출하였다. 그 결과, 수문지질단위의 투수량계수는 미고결퇴적물과 다공질화산암류에서 가장 높고, 쇄설성 퇴적암류에서 가장 낮았다. 지형고도와 지형고도차는 투수량계수와 비양수량에 대해 양의 상관관계를 갖는 반면, 단위 지형경사와 광역 지형경사는 투수량계수와 비양수량에 대해 음의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다.

**주요어 :** 지하수, 비양수량, 투수량계수, GIS, 포항시

## 1. 서 언

최근 들어 지하수 관련 조사 및 연구가 활발하게 진

행됨에 따라 양질의 자료가 축적되고 있으며, 하드웨어와 소프트웨어 등의 급속한 발전에 힘입어 방대한 자료를 과거에 비해 매우 효율적으로 정리, 분석할 수

\*Corresponding author: leesaro@kigam.re.kr

있게 되었다. 따라서 축적된 자료와 발전된 지구 공간 처리기법을 통해 과거 정성적으로 파악된 다양한 정보를 정량적이고 객관적으로 도출할 수 있게 되었다.

지하수계는 기상, 수문, 지표피복상태, 지형, 지질 등 제 환경의 조합 및 상호작용에 따라 종합적으로 형성되는 동역학적 시스템으로서, 지하수계에서 발생하는 복합적인 작용과 대수층의 산출능력을 총체적으로 이해하기 위해서는 시스템을 구성하는 기본 요소의 물리적 특성에 대한 규명이 필요하다. 본 연구에서는 지하수계에 영향을 미치는 것으로 판단되는 각종 인자들 중 지형과 지질에 관련된 항목을 GIS 공간자료의 형태로 전산화하고, 지금까지 연구지역에서 실시된 각종 지하수 조사 및 연구 실적 등을 DB로 구축하여, 지구자료통계 기법을 적용하여 상호간의 상관관계를 정량적으로 규명하였다.

이와 관련되어 국내에서는 Min *et al.*,(1996)은 DRASTIC의 국내 첫 적용 연구사례로 GIS 기법을 통해 지하수 오염가능성을 예측하였으며, Lee and Kim(1996)은 비점오염원 DB와 DRASTIC을 연계해 지하수의 비점오염원에 대한 위험도를 분석하였다. 또한 Jo *et al.*,(1999)은 리니어먼트 밀도와 토지이용 등을 고려한 수정 DRASTIC모델을 제시하였다. Lee and Moon(1999)은 크리깅 등 GIS 분석을 통해 지하수 수위 분포를 추정하였고, Kim and Lee(1999)은 도심지역에서 지하수 산출특성 및 오염현상을 규명하기 위해 다양한 자료에 대해 GIS DB 구축해 분석하였다. Kim(2001)는 GIS DB 및 시스템 구축을 통해 신규 지하수 개발지점에 대한 개략적인 예비평가를 시도하였으며, Han *et al.*,(2002)은 각종 지구물리탐사 자료를 종합해 GIS분석을 통해 지하수 부존과 관련된 천부 파쇄대 분포 특성을 규명하였다. Choi *et al.*(2004)은 연안지역의 해수침투를 평가하기 위해 물리탐사 자료와 수리화학 자료에 대한 통합 DB를 구축해 통합 관리할 수 있는 시스템을 제시하였다. Jo and Shon(2004)은 리니어먼트 밀도, 토지이용인자 등을 추가한 수정 DRASTIC 모델을 통해 오염가능성과 오염원의 발생 부하량을 논리적으로 비교해 수질측면에서의 오염가능 지역을 도출코자하였다. Won *et al.*(2004)은 GIS 공간분석을 통해 지하수내 질산성질소의 공간적 분포에 영향을 미치는 요인에 대해 각각의 기여도를 파악코자 하였다. Lee *et al.*(2004)은 GIS 공간분석을 통해 지하수 산출과 선구조 밀도간의 상관관계를 규명하고, 지하수 산출 특성을 반영한 선구조 밀도 분석 기법을 제시하였다. 이와 같이 본 연구에서와 같이

GIS를 지하수 분야에 이용한 예는 최근 들어 많아지고 있으나, 주로 지하수 관련 DB 구축 및 지하수 오염 예측 분야에 적용되고 있다.

국외에서는 최근 GIS를 이용하여 지하수 개발 분야에 많이 적용되고 있다. Marechal *et al.*(2006)은 관개 농업 지역인 반건조 지하수 분지에서 비산출량 및 자연함량의 종합 평가를 하였고, Israil *et al.*(2006)은 Himalayan foothill 지역의 수리지질학적 구역을 나타내기 위해 전기탐사와 GIS를 적용하였다. Solomon and Quiel(2006)은 에리트레아 중앙 고지대지역에 대하여 원격탐사 및 GIS를 이용하여 지하수 연구를 하였다. Simsek and Gunduz(2006)는 관개용수 평가를 위하여 GIS 통합기술로 관개용수 지수를 개발하였고 Liu(2004)는 타이완 Choushui River에 지하수자원 관리를 위한 의사결정 지원 시스템을 개발하였다. Srivastava and Bhattacharya(2006)는 경암 지형의 사례연구를 통하여 원격탐사, GIS 및 전기탐사를 이용한 통합 접근을 통하여 지하수 평가를 하였고 Thapinta and Huda(2002)는 Central Thailand에서 GIS를 이용하여 농약에 의한 지하수 오염 가능성 평가를 연구하였다. Al-Adamat *et al.*(2003)은 GIS, 원격탐사 및 DRASTIC을 이용하여 Jordan의 Azraq 분지의 현부암 대수층에 대한 지하수 취약성 및 위험도작성에 대하여 연구하였고 Lee(2003)는 영광지역에 대해 GIS 및 DRASTIC 시스템을 이용하여 매립지 적지선정 평가에 적용하였다.

이처럼 최근 들어 국내외에서 GIS를 이용한 연구가 지하수 개발 및 오염 등에 많이 적용되고 있다. 본 연구는 이러한 GIS의 공간분석 기능을 이용하여, 지하수 지형 및 지질과 지하수 산출능력 간의 상관관계를 정량적으로 분석한 연구로 적용분야에서 기존의 국내외 연구와 구분된다고 할 수 있다.

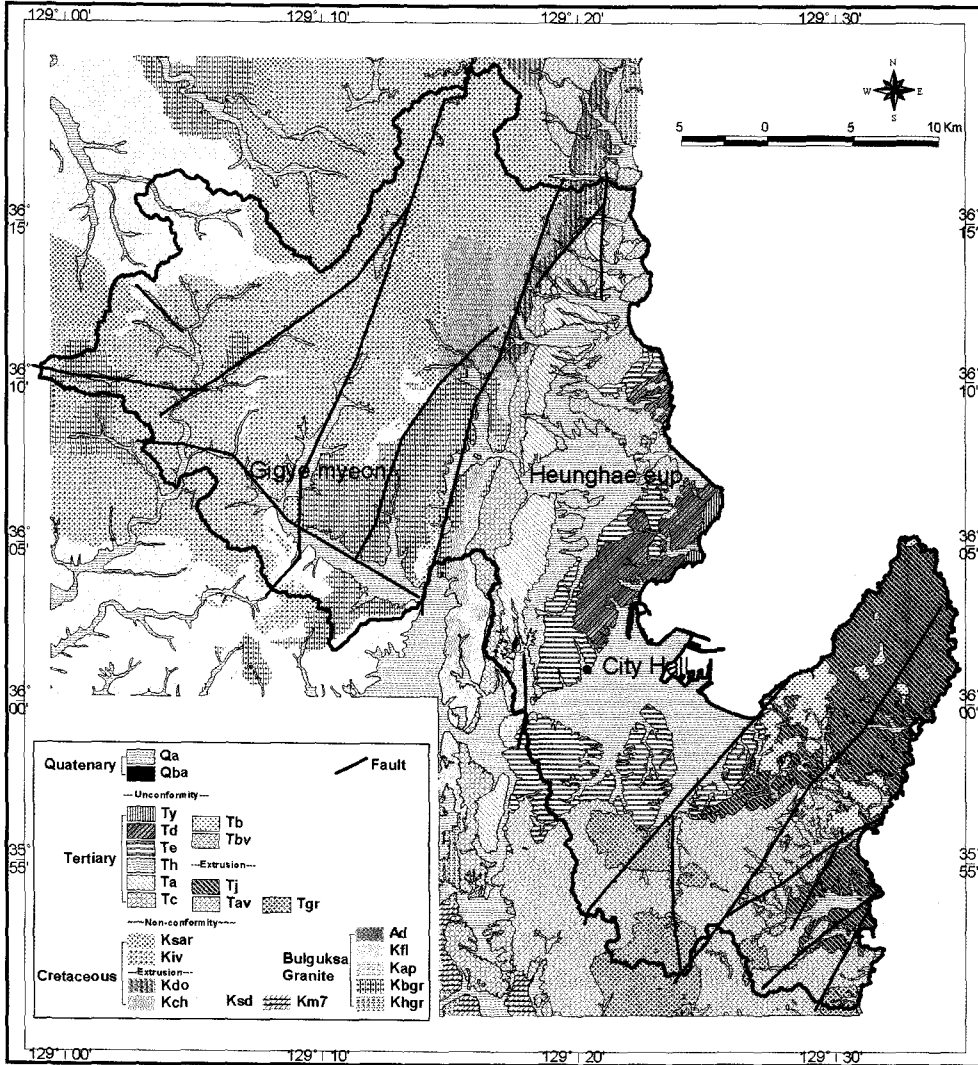
## 2. 연구지역

연구지역은 경상북도 포항시로 북으로 영덕군과 청송군 남으로 경주시 서로는 영천시와 경계를 이루며, 동해안에 접해있는 항구도시로서 경·위도상 북위 35°50'07"~36°19'49", 동경 128°59'20"~129°34'57"에 위치하고 있다. 연구지역의 면적은 1,127.62 km<sup>2</sup>이다.

지형은 대체로 지질분포와 지질 구조 요소를 반영하여, 산계는 대체로 양산단층대의 방향과 유사한 N10~20°E방향성이 가장 우세하며, 이외에 양산단층에서 파생된 단층들의 방향을 따른 N60~70°W의 소규모 산

계들이 발달하고 있는 양상을 보인다. 서북부는 태백산맥의 지맥이 남주하면서 깊고 높은 지형기복의 험준한 산악지역을 형성하고, 해안 및 동남부로는 구릉지와 제 3기층이 용기된 소구릉선이 발달하여 시가지를

둘러싸고 있다. 화산암 및 화강암이 분포하고 있는 양산단층대의 서측의 주요 산체는 대개 해발고도 700 m 이상의 산악지형을 이루고 있다. 이에 비해 제 3기 퇴적암이 주로 분포하고 있는 양산단층대의 동측은 해발



Qa : Alluvium	Tb : Basalt	Kfl : Felsite
Qba : Basalt	Tbv : Basic Volcanics	Kap : Acidic Porphyry
Ty : Yonam Fm.	Tj : Changki Group	Kbgr : Biotite Granite
Td : Duho Fm.	Tav : Acidic Volcanics	Khgr : Hornblende Granite
Te : Idong Fm.	Tgr : Granite	Kdo : Docheonri Fm.
Th : Hunghae Fm.	Ksar : Acidic Volcanics	Kch : Cheonggyeri Fm.
Ta : Hakrim Fm.	Kiv : Intermediate to basic Volcanics	Ksd : Daegu Fm.
Tc : Chumbuk Fm.	Ad : Acidic Dyke	Km7 : Jindong Fm.

Fig. 1. Geological map.

고도 200 m 미만의 얇은 구릉성 산지를 이루고 있다. 3기말에 이어진 화산활동으로 제 4기에 태백산맥이 형성되었고 동해안의 용기작용으로 소구릉지 및 요철지형이 형성되었으며 지각변동에 의해 형산강과 영일만 및 장기반도가 형성되었다.

지질은 크게 중생대 백악기의 퇴적암류와 이를 관입한 화성암류 및 화산암류, 그리고 신생대 제 3기의 퇴적암류와 화산암류 및 화성암류로 구성되어 있다. 지질 분포를 규제하는 가장 큰 구조 요소는 경상북도 영덕에서 부산 양산지방으로 연결되는 대규모 단층대인 N10~20°E방향의 양산 단층과 N10~20°W의 울산 단층을 들 수 있다. 본 양산 단층과 울산 단층을 경계로 서측은 중생대 백악기 화산암류 및 화강암류가 대부분의 분포를 보이고 있으며, 경상분지의 퇴적암층은 비교적 좁은 분포를 보이고 있다. 동측은 주로 신생대 제 3기의 포항분지내의 퇴적층들이 분포하며, 남측에 일부 화산암류와 화강암류가 분포하는 양상을 보인다. 경상분지의 백악기 경상누층군은 크게 유천층군과 하양층군으로 분류할 수 있다. 유천층군은 주로 화산암 계열의 암상으로 이루어져 있으며 하양층군은 의성소분지의 춘산층, 사곡층, 점곡층, 후평동층, 일직층, 진동층과 영양소분지의 도계동층, 청량산층, 가송동층으로 이루어져 있다. 연구지역내의 경상분지 퇴적층은 주로 하양층군의 의성 소분지내의 춘산층과 영양소분지의 가송동층으로 구성되어 있다. 춘산층은 도평도폭(Kwon and Lee, 1973)에 대구층군으로 명명되어 있는 암상으로서 셰일과 실트스톤과 이에 협재하는 석회암, 역암으로 이루어져 있으며, 가송동층은 주로 셰일, 이암, 역암으로 구성된다. 포항분지의 제3기층은 크게 연일층군과 장기층군 그리고 화산암 계열 및 화강암으로 나눌 수 있다. 연일층군은 다시 천북역암, 학림층, 흥해층, 이동층으로 세분된다. 장기층군과 연일층군의 퇴적암류는 주로 사암, 셰일, 역암으로 이루어지며, 대부분의 경우 고화도가 낮아서 반고결이나 미고결층으로 구성되어 있다. 제4기층인 충적층은 주로 자갈과 모래로 구성된 퇴적층으로 하천과 계곡을 따라 제 지층을 부정합으로 피복하며 발달하고 있다. 연구지역의 지질도는 Fig. 1과 같다.

**3. GIS DB 구축**

본 연구에서는 지형과 지질에 관련된 GIS DB를 구축하기 위해 이용한 전산도면은 Table 1에 정리하였다. 지형에 관련된 요인을 분석하기 위해 1:5,000 수치지도

**Table 1.** Spatial database.

Layer	Scale	Sheets
Topographic Map	1:5,000	240
Geological Map	1:50,000, 1:250,000	6, 2

를 이용하여 ARC/INFO Grid 형식의 수치표고 자료로 작성하였으며, 지질에 관련된 요인을 분석하기 위해 도평(Kwon and Lee, 1973), 기계(Oh and Jeong, 1975), 포항(Kim and Yoon, 1968), 청하(Kim *et al.*, 1968), 구룡포(Tateiwa, 1922), 연일(Tateiwa, 1922), 영덕(Tateiwa, 1922) 도폭 등 1:50,000 지질도와 안동(Hwng *et al.*, 1996), 부산(Kim *et al.*, 1988) 도폭 등 1:250,000 지질도를 참고하여 ARC/INFO Coverage로 작성하였다. 또한, 투수량계수, 비양수량, 양수량 등 수리상수 자료는 ‘포항지역 지하수 기초조사’(Ministry of Construction & Transportation, 2003)에서 조사된 자료를 이용하였고 여기에는 연구지역에서 수행된 지하수 영향조사, 수맥조사, 국가지하수 관측망 설치공사, 포항지역 지하수 기초조사의 조사공 등이 포함되며 본 연구에서는 이를 ARC/INFO Coverage로 작성하였다.

**3.1. 지하수 수리상수 자료**

지하수의 수리지질학적 특성은 지하수 투수특성(유동특성)과 저류특성으로 대별할 수 있다. 투수특성의 주요인자는 수리전도도(Hydraulic conductivity)와 투수량계수이며, 저류특성의 주요인자는 저류계수(Storage coefficient), 공극률(Porosity), 비저류계수(Specific storage)와 비산출률(Specific yield)이다. 대수층의 지하수 산출능력을 대표하기 위해서는 지하수 유동특성과 저류특성을 함께 고려하여 하나, 연구지역 내에 저류계수 등에 대한 자료는 매우 제한적이고 자료의 편차가 크므로, 본 연구에서는 투수량계수만을 대상으로 하였다.

본 연구에서는 DB로 작성한 지하수 수리상수자료의 위치는 Fig. 2와 같다. 총 자료수는 450개소이며, 수리전도도, 투수량계수, 비양수량 등 수리특성 외에도 우물제원, 양수량, 지질암상 등을 기록하였다. 이중 충적 지하수는 58개소(13%), 암반지하수는 397개소(87%)이다. 이들 자료에는 양수량은 모두 기록되어 있으나, 수리전도도는 57개소, 투수량계수는 116개소만이 기록되어 있었다.

**3.2. 지형 및 수치고도자료 분석**

공간상에 나타난 연속적인 기복변화를 수치적으로

표현하는 방법을 수치표고 자료(DEM, Digital Elevation Model)라 한다. 본 연구에서는 1:5,000 수치지형도를 지형 DB로 변환한 후 지형곡면을 모사한 TIN (Triangulated Irregular Network)를 발생시켜 DEM을 작성하였다. 지형 DB는 선 및 점 속성을 가지는 ARC/INFO Coverage로 되어 있다. 수치지형도 중 등고선, 수준점 및 삼각점 등 고도를 표시하는 항목만을 추출하여 보간하고, 하천, 호수, 유역경계 등 물리적, 수문학적 지형경계를 이루는 선형요소를 절단선으로 설정하여 TIN을 발생시킨 후 해상도 5 m×5 m의 DEM을 작성하였다. 본 연구에서는 수문학적으로 의미를 갖는 지형형상을 구현하기 위해 Sink와 Source를 제거한

DEM을 이용하였다(Fig. 3).

DEM을 이용해 연구지역의 지형특성을 살펴본 결과, 연구지역의 지형고도는 El. 0~1,109.9 m의 범위를 보이며 평균 지형고도는 El. 207.7 m, 표준편차는 189.9이다. DEM을 이용하여 5 m 해상도로 지형경사를 분석하였다. 연구지역의 북부는 주로 산악지역으로 약 30° 이상의 급경사를 보이고 있으며 중·남부는 15° 이하의 완만한 경사를 보이고 있다. 이와 같은 지형적 특징에 의해 도시와 경작지는 충적층이 넓게 분포하고 있는 중부 지역에 많이 분포하고 있다.

연구지역을 지형경사 혹은 지형경사방향이 급변하거나 지형구배형태에 차이를 보이는 계곡과 능선을 위주

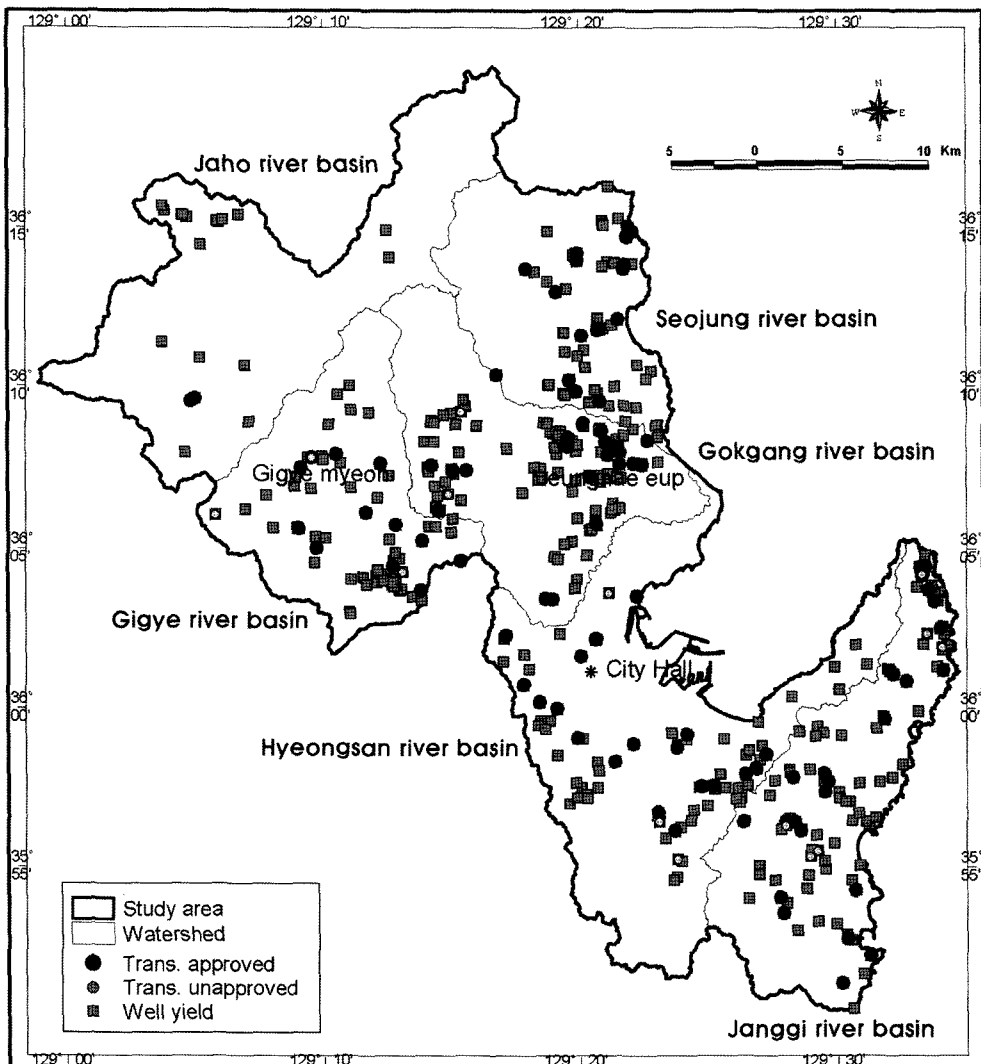


Fig. 2. Groundwater transmissivity and well yield data location.

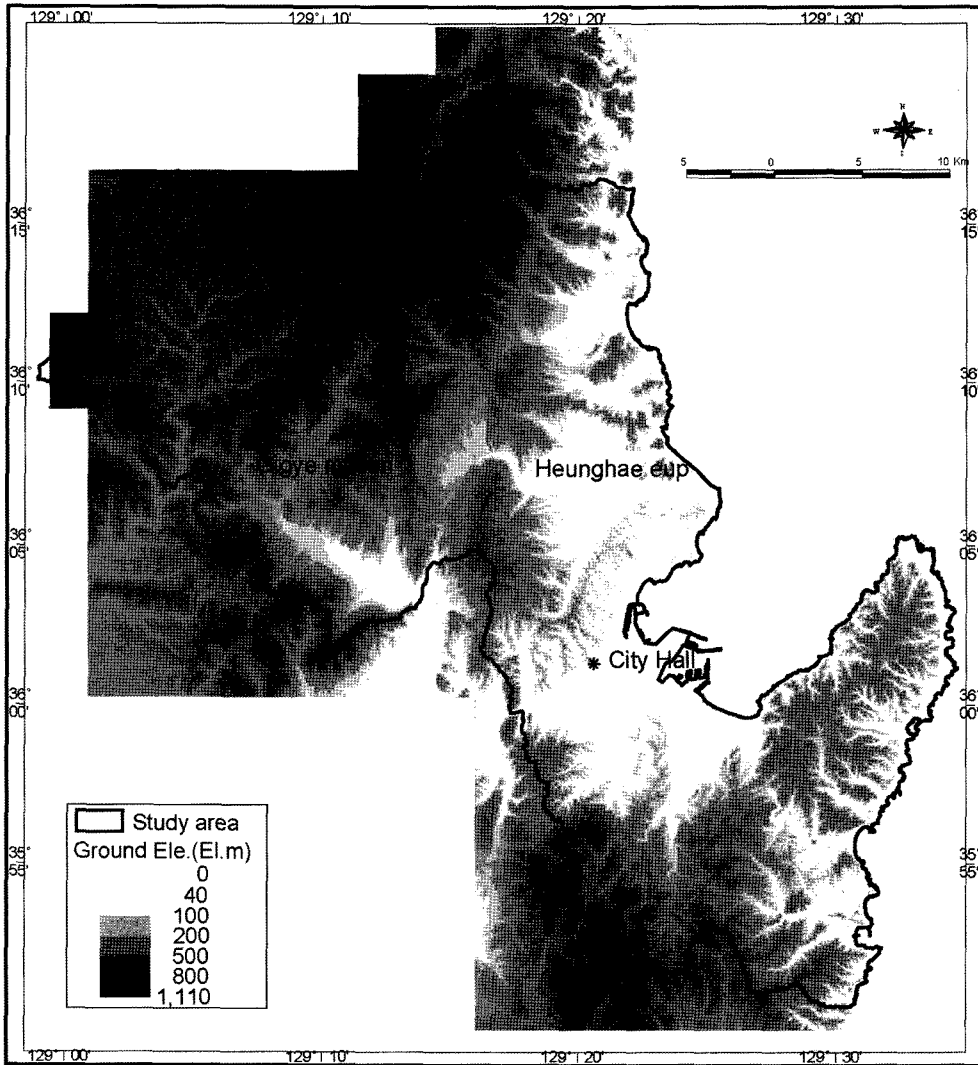


Fig. 3. DEM(Digital Elevation Model).

로 142개 구역으로 구분하여 해당 구역내 지형특성을 분석하였다. 전술한 지형경사의 해상도는 분석 가능한 최소 규모의 지형경사를 반영하는 반면, 이들 구역내에서의 평균 지형경사는 수문과 관련하여 의미를 갖는 구역 단위의 지형경사를 반영하게 된다. 따라서 본 연구에서는 전자를 단위 지형경사(Fig. 4), 후자를 광역 지형경사(Fig. 5)로 구분하였다. 이러한 광역 지형경사는 0.36~35.37°의 범위를 보인다. 또한 142개 구역별로 5m 해상도의 DEM을 이용하여 각 구역내 최대 고도와 각 DEM 격자에서의 고도간의 차를 이용하여 지하수 유동환경과 지형특성이 유사한 구역별 지형고도차를 5m 해상도로 추출하였다(Fig. 6). 이러한 구역

별 지형고도차는 DEM이 의미하는 지형고도에 비해 지하수의 위치포텐셜을 반영하며, 일반적으로 지형고도는 저지대보다 고지대에서 지하수 함양에 유리한 환경을 형성하고, 지형고도차는 해당 지역내에서 고도차가 클수록 지하수 함양에 유리한 환경을 형성한다.

#### 4. 지형과 지하수 산출능력 간의 상관관계 분석

GIS 중첩분석 기법을 적용하여 지하수의 산출능력에 영향을 미치는 것으로 알려진 지형고도, 경사 등 지형에 관련된 인자와 투수량계수와 비양수량 등 수리상수

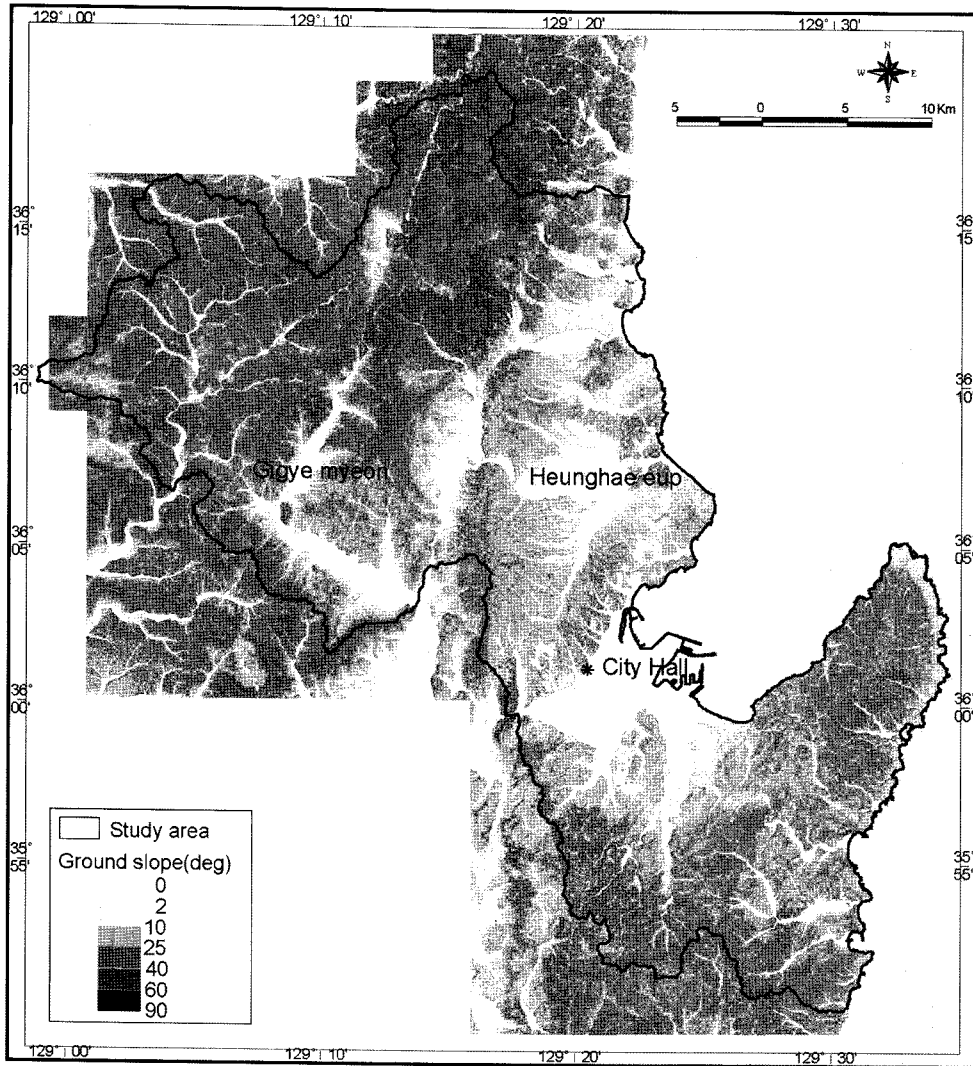


Fig. 4. Ground slope.

간의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 양수량의 경우, 필요 수량을 확보하기 위해 지형효과에 의해 산출 능력이 감소할 경우 개발심도를 깊게하여 이를 보상하므로 지형에 따른 지하수 산출량이 왜곡되어 나타나므로 본 연구에서 제외하였다. 분석에 이용된 수리상수 자료의 위치는 Fig. 2와 같다. ARC/INFO의 Grid 함수를 이용하여 해당 지점에서 지형고도와 단위 지형경사 등 소규모 관점에서의 지형특성과 고도차와 광역 지형경사 등 대규모 관점에서의 지형특성도 함께 고려하였다.

#### 4.1. 지형고도와 지하수 산출능력 간의 상관관계 연구지역을 구성하는 5개 유역 중 서정리천 유역,

곡강천 유역, 형산강 유역 및 장기천 유역은 동해와 접하여 지형고도분포가 EL. 0m에서부터 연속적으로 분포하나, 자호천 유역과 기계천 유역은 그렇지 못할 뿐 아니라 유역별 평균 지형고도는 EL. 100~200m까지 차이를 보인다. 이러한 유역별 지형특성에 의해 지형고도와 지하수 산출특성의 관계가 지형고도 EL. 100 m 부근에서 다소 왜곡되어진다. 연구지역의 지형고도와 투수량계수, 비양수량간의 상관관계는 Fig. 10과 같이 분석되었다.

Fig. 10에서 굵은 점(●)은 전체자료의 고도계급별 평균이며, 삼각형(△)은 충적지하수의 고도계급별 평균, 엑스표(x)는 암반지하수의 고도계급평균, 옅은 점(·)

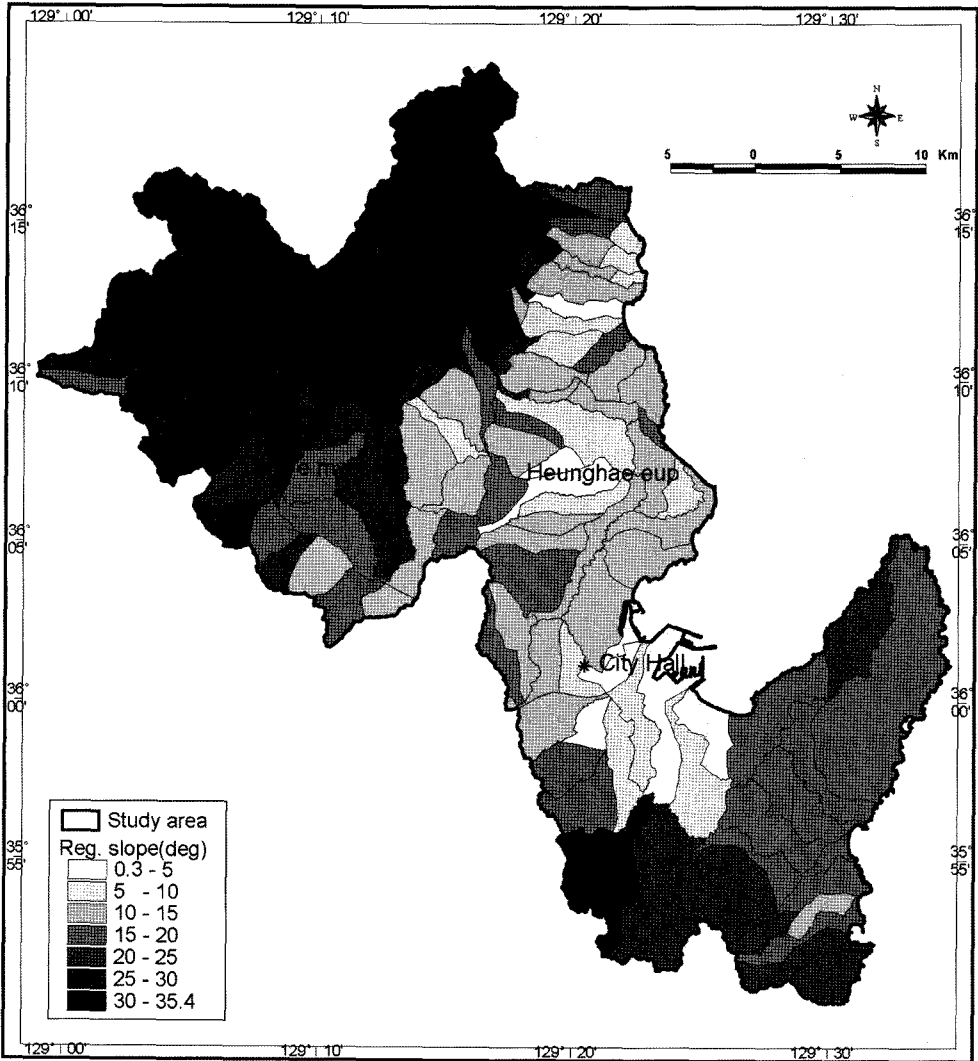


Fig. 5. Ground regional slope.

은 전체자료의 산포도이다. 지형고도와 투수량계수의 상관관계에서 지형고도 80 m와 180~200 m 부근에서 이상치가 기록되었는데, 이에 해당하는 자료는 각각 1 개소씩이며 모두 암반지하수이다. 해당 우물의 위치는 단층대의 교차부로 지형효과 보다는 지질구조의 영향이 크게 작용한 결과로 보이며, 지형고도와 지하수 산출능력간의 상관관계를 규명하는데는 적절치 않은 자료이므로 상관분석시 이들 자료는 제외하였다. 마찬가지로 비양수량 자료에서도 이런 자료는 제외하였다.

지형고도와 투수량계수나 비양수량간의 관계를 종합적으로 고려하면, 지형고도가 낮을수록 지하수 산출능력이 좋고 지형고도가 높아질수록 산출성은 저하된다.

특히 지형고도 700 m 이상에서는 지하수 산출성이 급격히 감소한다. 이러한 효과는 충적지하수에서 두드러지는데 이는 유역 하부의 저지대가 충적층 발달이 양호하여 지형효과에 충적층발달 효과가 가중된 결과로 보인다. 암반지하수의 경우 충적지하수에 비해 상관관계가 다소 둔화되어 나타나는데, 이는 지질구조 등의 영향으로 고지대에서도 높은 지하수 산출능력이 나타나는 것으로 판단되나 지형고도만에 의한 효과를 분리할 수 없어 이들 자료는 본 분석에서 제외할 수 밖에 없었다.

**4.2. 단위 지형경사와 지하수 산출능력 간의 상관관계**  
 단위 지형경사와 지하수 산출능력의 상관관계를 규



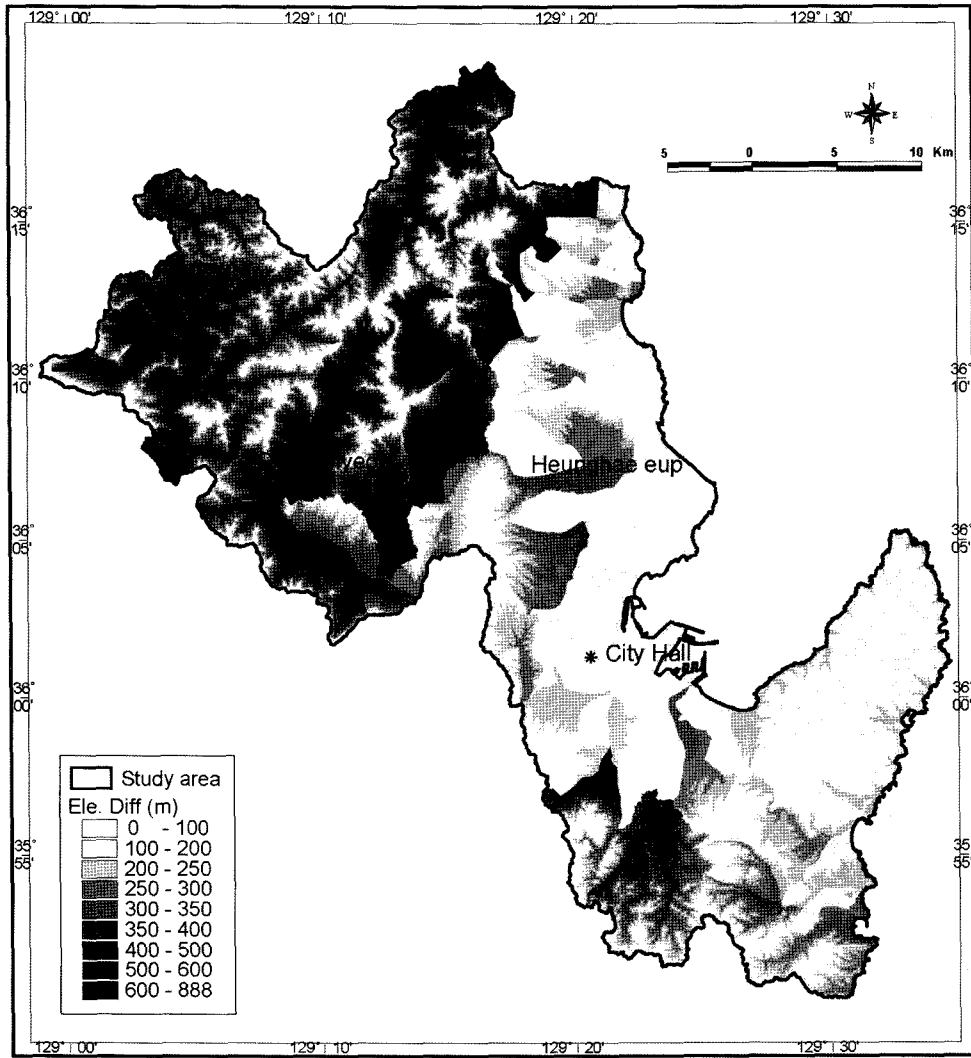


Fig. 6. Elevation difference.

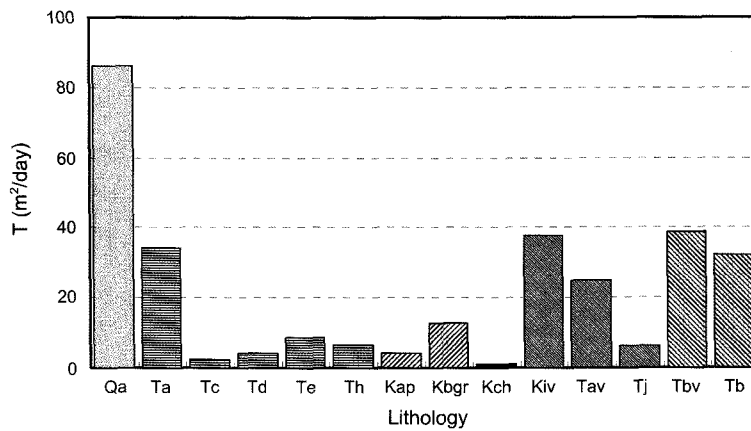


Fig. 7. Transmissivity of each lithology.

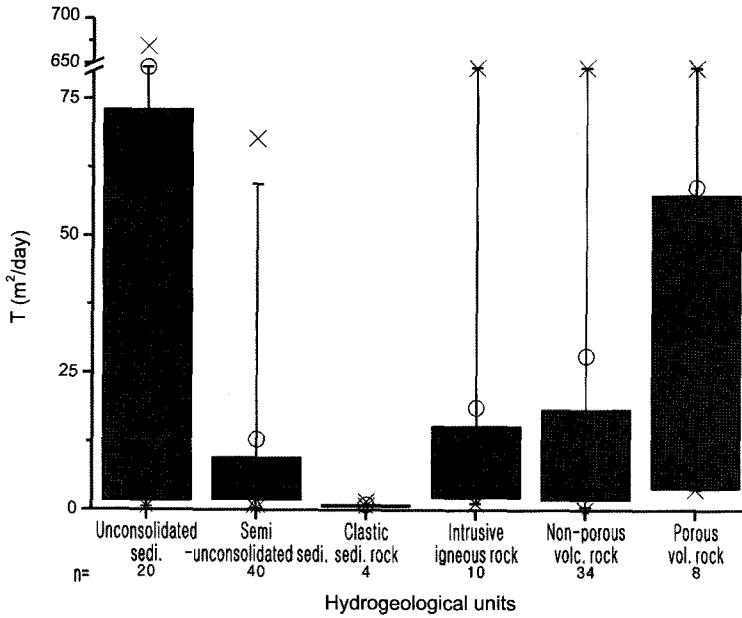


Fig. 8. Transmissivity of each hydrogeological unit.

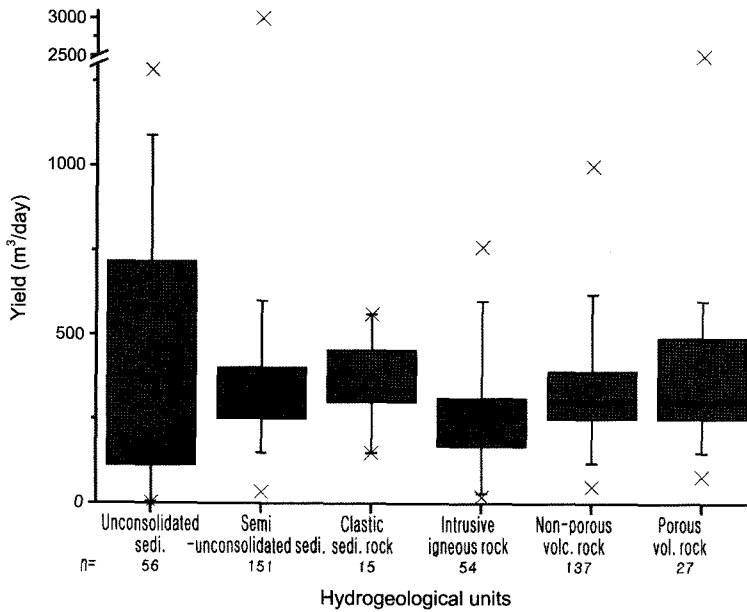


Fig. 9. Groundwater yield of each hydrogeological unit.

명하기 위해, GIS 중첩기법을 적용하여 수리상수가 기록된 자료에서의 단위 지형경사를 추출하였다. 단위 지형경사의 경우 5m 해상도의 자료를 그대로 적용하기에는 인근 지형형상에 비해 너무 급한 이상치가 발생하는 경우가 빈번하므로 이를 그대로 적용하기에는 대표성이 떨어진다. 따라서 해당 자료의 단위 지형경사

는 250 m 반경의 원형경계를 설정해 구한 평균 지형경사로 적용하였다. 자료위치에서 지형형상과 지하수 유동방향을 고려하여 적절한 다각형을 설정해 대표지형경사를 획득하여야 하나 자료처리 량을 고려해 250 m의 원형경계를 채택하였다. 이에 따른 단위 지형경사와 지하수 산출능력 간의 상관관계는 Fig. 11과

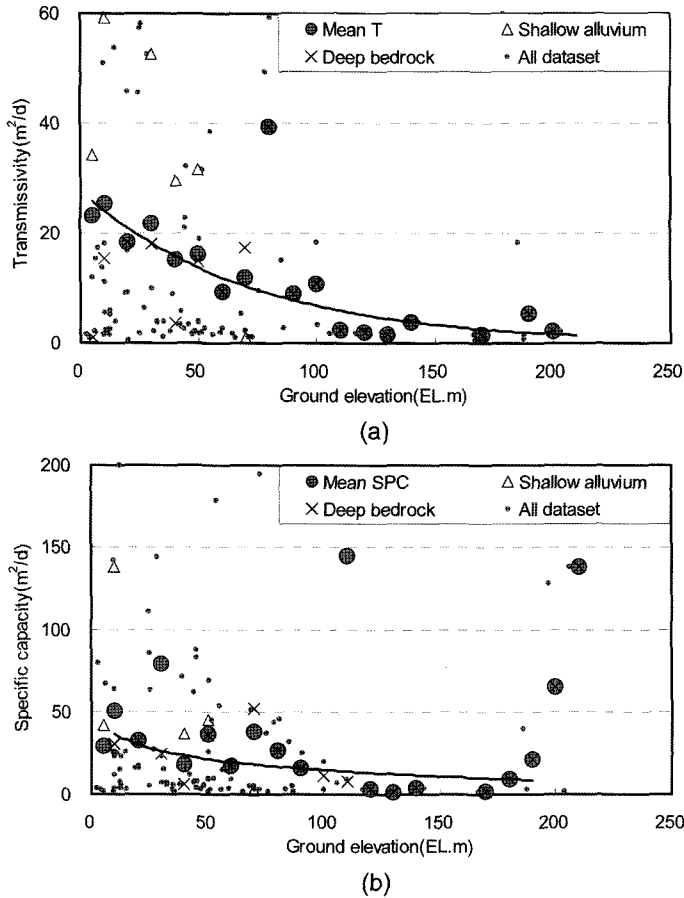


Fig. 10. (a) Relationship between ground elevation and transmissivity, (b) Relationship between ground elevation and specific capacity.

같다.

투수량계수에 기초한 단위 지형경사와 지하수 산출능력간의 관계를 살펴보면, 단위 지형경사가 급해질수록 투수량계수가 감소하며 특히 충적지하수의 경우 더욱 그러하다. 비양수량의 경우 충적지하수는 단위 지형경사 5°정도까지는 음의 상관관계가 잘 나타나지만 그 이상의 단위 지형경사에서는 다소 불규칙하게 나타나는데 이들은 각 계급별로 자료수가 1개로 대표성을 부여하기 어렵다. 암반지하수의 경우 단위 지형경사가 급해짐에 따라 비양수량이 감소하는 양상이 나타나지만 충적지하수에 비해 명확하지는 않다.

**4.3. 광역 지형경사와 지하수 산출능력 간의 상관관계**

지하수 유동규모가 대규모, 중규모, 소규모로 구분되듯이 지하수 산출특성에 영향을 미치는 지형요소도 이와 같이 규모에 따라 구분할 수 있다. 전술된 단위 지

형경사와 지하수 산출능력은 해당 자료를 중심으로 반경 250 m의 평균 지형경사를 이용한 소규모 지형특성을 고려한 것이다. 광역 지형경사는 보다 거시적인 규모로 수문학적으로 의미를 갖는 구역단위별 지형특성과 지하수 산출능력간의 관계를 파악하기 위한 것으로 그 상관관계는 Fig. 12와 같다.

투수량계수와 비양수량은 광역 지형경사가 급해짐에 따라 지하수 산출능력이 감소하는 음의 상관관계를 보인다. 부분적으로 광역적 경사가 급한 지역에서 산출성이 높게 나타나기도 하는데 이는 해당 단층교차부에 해당하는 자료들로 지질구조의 영향이 더 크게 작용한 것으로 보인다. Fig. 12를 통해 지형경사가 급할수록 지형에 의해 유출이 가속화되어 지하수 함양에 불리하며, 경사가 완만할수록 유출이 느려져 지하수 함양에 유리하다는 정성적인 개념이 정량적으로 규명되었다. 또한 전술한 단위 지형경사와 결합하면 단위구역별로

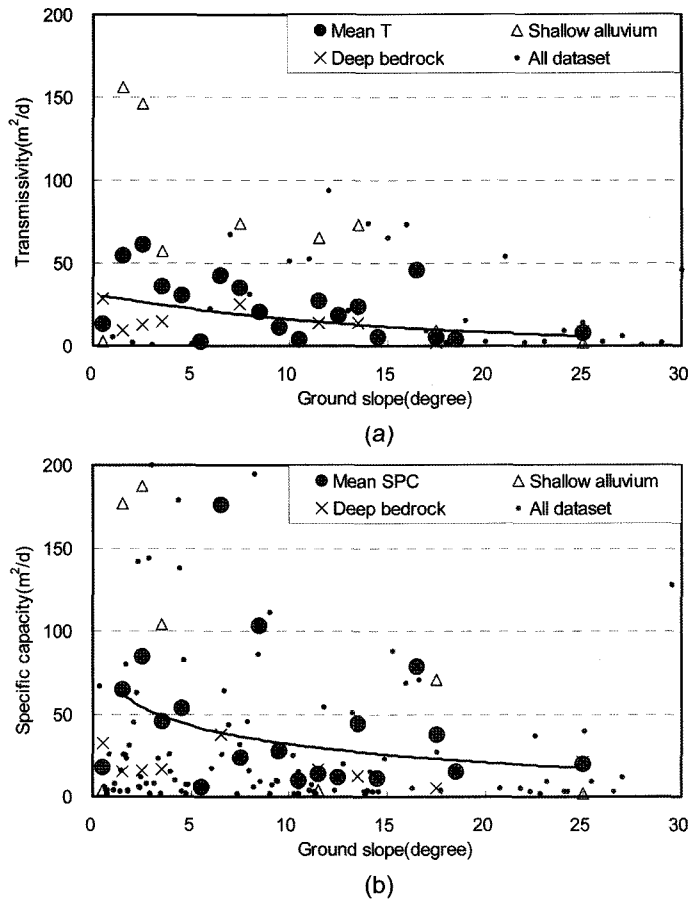


Fig. 11. (a) Relationship between ground slope and transmissivity, (b) Relationship between ground slope and specific capacity.

광역적 지형경사 정도와 해당 단위구역내에서의 소규모 지형효과를 동시에 효과적으로 고려할 수 있다.

#### 4.4. 고도차와 지하수 산출능력 간의 상관관계

지형 고도차와 지하수 산출능력간의 상관관계는 Fig. 13과 같다. 고도차가 200 m 이하로 낮은 지역에서는 지하수 산출능력이 낮게 나타났으며, 지형 고도차가 증가함에 따라 투수량계수 및 비양수량이 모두 증가하는 양의 상관관계를 보인다.

### 5. 수문지질단위별 지하수 산출능력

#### 5.1. 지하수 수리상수자료 검증

본 연구에서는 지질암상별로 투수량계수를 통해 지하수 산출능력을 판단하기 위해 가용한 116개의 투수량계수 자료중 이상치로 판단된 15개를 제외한 101개

의 자료를 이용하였다. 연구지역에 분포하는 24개 지질암상 중 투수량계수가 기록된 14개 지질암상에 대한 투수량계수의 통계는 Fig. 7과 같다. 이들 자료는 DB 구축시 원시자료상의 오기나 단위 미기재된 자료들로 인해 신뢰도가 낮은 자료가 포함되어 있으므로, 이들 자료가 갖는 이상치에 대한 판별기준이 필요하다. 지질암상별로 갖는 수리상수의 범위는 차이가 크므로 이상치에 대한 판별기준을 일률적으로 적용하는 것보다는 수리지질학적으로 유사하다고 판단되는 수문지질단위별로 판별기준을 설정하여 제거하였다. 이중 쇄설성 퇴적암류에 해당하는 자료수가 매우 제한적이다. 따라서 쇄설성퇴적암류는 투수량계수 자료를 모두 사용하고, 나머지 5개 수문지질단위에 해당하는 투수량계수 자료에 대해서는 이상치를 제외한 나머지 자료를 이용하였다. 이를 위해 해당 수문지질단위에 해당되는 투수량계수자료를 정규분포로 변환한 후 5% 기각역을 적

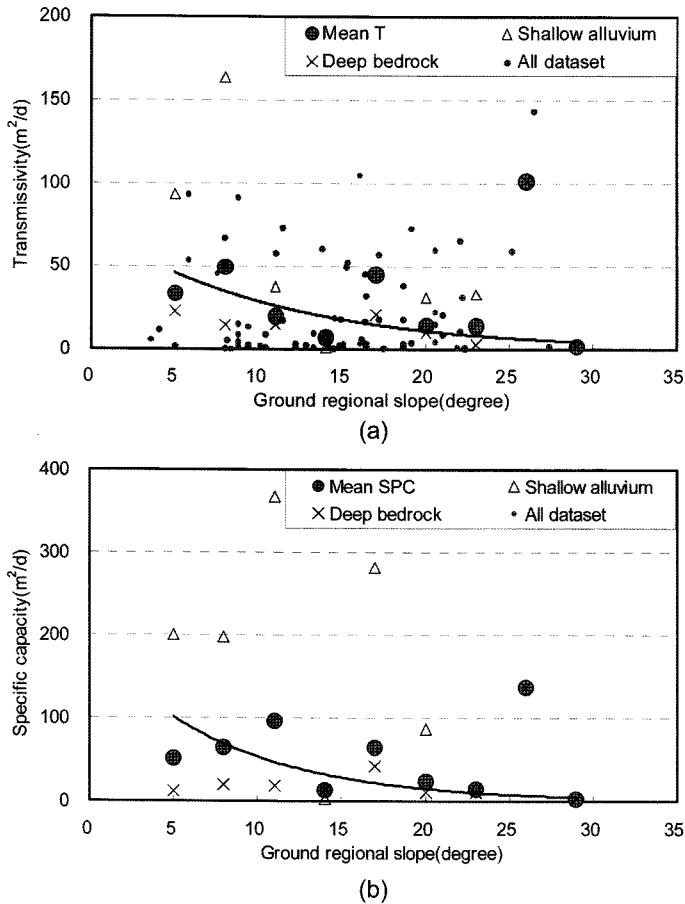


Fig. 12. (a) Relationship between ground regional slope and transmissivity, (b) Relationship between ground regional slope and specific capacity.

용하여 이에 해당하는 자료는 이상치로 간주하여 제외하였다. 이를 통해 수문지질단위별 투수량계수를 분석하기 위해 선별된 자료는 총 101개소이다. 이들 자료의 분포는 Fig. 2에 채택된 투수량계수 자료는 짙은 원으로, 이상치로 판단된 투수량계수 자료는 회색 원으로 나타내었다.

## 5.2. 수문지질단위별 투수량계수

이상의 투수량계수 자료에 대한 검토를 통해 금번 연구에서 채택된 자료를 이용한 수문지질단위별 투수량계수는 Table. 2와 같으며 이를 상자도식으로 표현하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 빈원은 평균값, 굵은 가로선은 중앙값, 직사각형은 25%, 75%에 해당하는 분위수, 지시선(┊·┊)은 5%, 95%의 범위를 지시한다.

연구지역의 수문지질단위 중 투수량계수가 비교적 높은 비다공질화산암류중 장기층군(T)은 해당 수문지

질단위를 구성하는 다른 지질암상들에 비해 투수량계수가 상당히 낮게 나타났다. 투수량계수가 낮게 나타난 반고결퇴적암류 중 연일층군 학림층(Ta)의 경우 해당 수문지질단위에 속하는 다른 지질암상에 비해 높게 나타났다. 또한 관입화성암류에 해당하는 불국사 관입암류 중 흑운모 화강암(Kbgr)은 산성반암(Kap)에 비해 투수량계수가 높게 나타났다. 이와 같이 투수량계수를 이용하여 연구지역에 분포하는 수문지질단위별 투수량계수를 살펴본 결과, 전반적으로 수문지질단위별로 해당 지질암상들은 유사한 투수량계수를 보이거나 일부에서는 그렇지 않은 경우도 나타났다. 이는 연구지역에 분포하는 24개의 다양한 지질암상별로 지역적 특성을 반영할 만큼 충분한 자료가 축적되지 못해 지역적 이상치가 강조 혹은 지역적 특성이 누락된 결과로 보인다. 투수량계수를 통한 연구지역의 수문지질단위별 지하수 산출능력은 미고결퇴적층과 다공질화산암류가 가

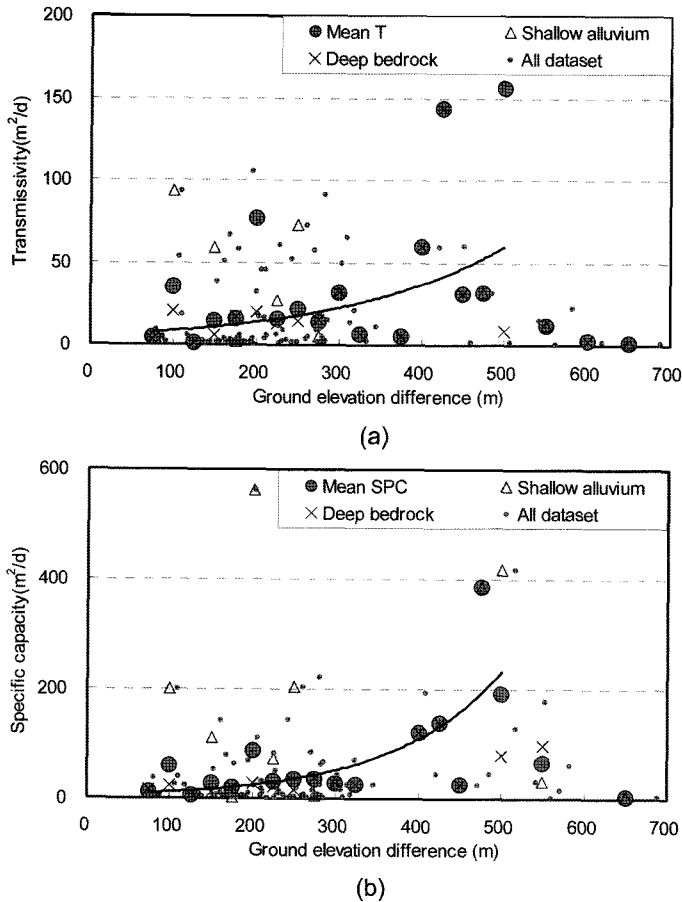


Fig. 13. (a) Relationship between ground elevation difference and transmissivity, (b) Relationship between ground elevation difference and specific capacity.

장 좋으며 그 다음으로 비다공질화산암류, 반고결퇴적암류 그리고 관입화성암류의 순이나 이들은 서로 큰 차이를 보이지 않는다. 연구지역 내에서는 쇄설퇴적암류의 지하수 산출능력이 가장 낮은 것으로 분석되었다.

5.3. 수문지질단위별 비양수량

비양수량을 통한 지하수 산출능력 분석결과는 투수량계수 분석결과와 유사하게 미고결퇴적층과 다공질화산암류의 산출성이 가장 높고, 근소한 차이로 비다공질화산암류, 반고결퇴적암류 및 관입화성암류의 순으로 나타났으며, 쇄설성퇴적암류가 가장 낮았다. 연구지역의 수문지질단위중 비양수량이 비교적 높은 비다공질화산암류중 장기층군(T1)의 경우 비다공질 화산암류를 구성하는 다른 지질상에 비해 비양수량이 낮게 나타났다. 다공질화산암류를 구성하는 제3기현무암(Tb) 및 염기성화산암(Tbv)의 경우 비양수량이 미고결퇴적층 다

음으로 높게 나타났다. 비양수량자료에 나타난 지질암상중 불국사관입암류 중산성반암(Kap)과 해양층군을 구성하는 청계리층멤버(Kch)는 자료수 1개로 제한적이기는 하나 가장 낮은 비양수량을 보인다. 비양수량을 통한 지하수 산출능력 분석 결과, 본 연구에서 설정한 지질암상을 기초한 수문지질단위 분류와 그에 따른 산출특성이 잘 일치함을 보여준다.

5.4. 수문지질단위별 양수량

반면, 양수량을 분석한 결과 미고결퇴적층과 다공질화산암류가 가장 높고, 반고결퇴적암류, 쇄설성퇴적암류 및 비다공질화산암류의 순으로 나타났으며, 관입화성암류가 가장 낮았다. 쇄설성퇴적암류의 경우 투수량계수는 낮게 분석되었으나 양수량이 높게 분석된 것은 수문지질단위별 우물자료의 평균 개발심도를 고려할 때, 쇄설성퇴적암류에 해당하는 우물은 평균 개발심도 약 160 m

**Table 2.** Transmissivity of hydrogeological unit.

Transmissivity (m <sup>2</sup> /day)	Unconsolidated Sediments	Semi-unconsolidated Sedimentary Rock	Clastic Sedimentary Rock	Intrusive Igneous Rock	Non-Porous Volcanic Rock	Porous Volcanic Rock
Number	18	37	4	8	29	5
Maximum	532.32	60.66	1.53	59.95	143.47	105.08
Minimum	0.95	0.55	0.67	1.53	0.99	16.87
Mean	86.33	12.03	0.94	11.72	15.98	51.44
Median	41.31	3.41	0.79	3.55	3.90	45.61
Std. Dev.	151.08	18.16	0.40	19.97	31.08	33.60

**Table 3.** Groundwater yield and well depth of hydrogeological unit

Yield (m <sup>3</sup> /day)	Unconsolidated Sediments	Semi-unconsolidated Sedimentary Rock	Clastic Sedimentary Rock	Intrusive Igneous Rock	Non-Porous Volcanic Rock	Porous Volcanic Rock
Number	56	151	15	54	137	27
Maximum	1,283	3,000	561	760	1,000	2,500
Minimum	3	34	150	20	50	80
Mean	436	358	356	258	336	413
Median	379	310	336	261	300	300
Standard Deviation	366	264	108	159	160	441

Well depth (GL. -m)	Unconsolidated Sediments	Semi-unconsolidated Sedimentary Rock	Clastic Sedimentary Rock	Intrusive Igneous Rock	Non-Porous Volcanic Rock	Porous Volcanic Rock
Mean/Median		150/130	163/155	157/150	137/121	130/120

로 다른 수문지질단위의 평균 개발심도 150~130 m보다 우물심도가 깊는데 기인한 것으로 보인다. 수문지질단위별 양수량은 Table 3과 같으며 이를 상자도식으로 표현하면 Fig. 9와 같다.

### 5.5. 수문지질단위별 지하수 산출능력

연구지역은 지질 및 지질구조가 복잡하고 가용한 지하수 수리상수자료에 비해 연구지역이 광범위하나, 본 연구에서는 지질암상에 기초하여 수문지질단위를 분류하고 투수량계수, 비양수량 및 양수량 등 수리상수자료를 이용한 GIS 공간분석 및 통계기법을 적용하여 보다 정량적으로 수문지질단위 분류하고 지하수 산출능력을 구분할 수 있었다. 지질암상을 기초로 한 수문지질단위분류는 투수량계수를 통해 확인한 결과 부분적으로 차이를 보이나 수문지질단위별 지하수 투수특성이 적절히 나타났다. 또한, 비양수량의 경우도 수문지질단위 설정과 일치한다. 이중 반고결퇴적암류와 비다공질화산암류간의 구분은 뚜렷하지는 않지만 평균 양수량을 고려하면 비다공질화산암류에 비해 반고결퇴적암류의 산출성이 다소 높게 나타난다. 수문지질단위별 지하수 산출능력을 종합하면, 미고결퇴적층의 산출능력이 가장 좋고 다공질화산암류이 그 다음이다. 반고결퇴적암류와 비다공질화산암류는 투수성과 산출성이 유사하나, 양수량을 고려하면 반고결퇴적암류의 산출능력

이 다소 앞선다. 관입화성암류는 투수량계수는 낮지 않지만 양수량은 다소 낮아 종합적인 산출능력은 낮아 보인다. 쇄설성퇴적암류는 연구지역내의 수문지질단위 중 지하수 산출능력이 가장 낮다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 포항지역을 대상으로 지하수 산출능력에 관련된 수리상수 자료를 정리해 GIS DB로 구축하고, 지하수계에 영향을 미치는 중요한 물리적 요인으로 알려진 지형과 지질에 대해 GIS DB를 구축하였다. 이를 위해 기초조사의 성과로 도출된 방대한 양의 자료를 효율적으로 관리·처리하여, 유기적이고 심화된 결론을 유도하고, 분석성과를 가시적으로 표현하고자, 분석 기초자료 일체를 전산 입력한 후, 공간정보를 부여하였다. 그리고 GIS 중첩기법과 공간자료 처리를 통해 지하수 산출능력과 지형 및 지질간의 상관관계를 정량적으로 도출하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

지형과 지하수 산출능력 간의 상관관계는 다음과 같다.

1. 지형고도가 낮을수록 지하수 산출능력이 좋고 지형고도가 높아질수록 산출능력은 저해된다. 특히 지형고도 100 m 이상에서는 지하수 산출능력이 급격히 감

소한다.

2. 단위 지형경사와 지하수 산출능력간의 관계는 단위 지형경사가 급해질수록 투수량 계수가 감소하며 특히 충적우물에서는 더욱 그러하다.

3. 광역 지형경사가 급해짐에 따라 투수량계수와 비양수량이 감소하는 음의 상관관계를 보인다.

4. 고도차 200 m 이하로 지형 포텐셜이 낮은 지역에서는 지하수 산출능력이 낮게 나타났으며, 고도차가 증가함에 따라 투수량계수와 비양수량이 모두 증가하는 양의 상관관계를 보인다.

지질과 지하수 산출능력 간의 상관관계는 다음과 같다.

1. 지질시대의 암상 및 암종에 따른 수문지질단위 분류는 해당 수문지질단위별로 투수량계수, 비양수량 및 양수량을 확인한 결과 대체로 적절한 것으로 나타났다.

2. 연구지역의 수문지질단위중 투수량계수는 미고결 퇴적층과 다공질화산암류가 가장 좋으며 그 다음으로 비다공질화산암류, 반고결퇴적암류 및 관입화성암류의 순이나 이들은 서로 큰 차이를 보이지 않는다. 연구지역 내에서는 쇄설성퇴적암류의 투수량계수가 가장 낮은 것으로 분석되었다.

3. 비양수량의 경우도 투수량계수와 마찬가지로 미고결퇴적층과 다공질화산암류에서 가장 높고, 근소한 차이로 비다공질화산암류, 반고결퇴적암류, 관입화성암류의 순으로 나타났으며, 쇄설성퇴적암류가 가장 낮았다.

4. 양수량을 이용한 지하수 산출능력은 미고결퇴적층과 다공질화산암류가 가장 높고, 반고결퇴적암류, 쇄설성퇴적암류 및 비다공질화산암류의 순으로 나타났으며, 관입화성암류가 가장 낮았다.

## 7. 토 의

지하수 수리상수나 산출능력은 우물심도, 구경, 우물 시공방식 등에 의해 많은 차이와 변동을 보이며, 같은 지점에서 우물의 노후화에 따른 산출능력 저하 등이 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 수리상수 자료의 DB를 구축함에 있어 이러한 문제를 해결하기 위해 가장 신뢰성 높은 국가지하수 관측망과 최근에 수행된 '포항지역 지하수 기초조사'(Ministry of Construction & Transportation, KWATER, 2003)의 자료를 중심으로 GIS 기법을 적용, 자료 상호간의 오류수정 및 중첩 분석을 실시함으로써 과거에 수행된 다소 불확실성이 내재된 자료를 검증함으로써, 기초 자료간의 모순을 최소화하고 기초 자료의 불확실성이 결론에 미치는 영향

을 최대한 배제하도록 하였다. 또한 지금까지 지하수 산출능력이 양호한 지역을 선정하는데 있어 수작업에 의해 경험이 풍부한 평가자의 주관적인 판단에 크게 의존해 왔으나, 본 연구의 정량적인 평가기법을 통해 향후에는 보다 객관적이고 개량화된 평가가 가능할 것으로 여겨진다.

본 연구에서 지질암상별 투수량계수는 전반적으로 해당 수문지질단위의 특성과 유사하나 일부 지질단위에서는 동일한 수문지질단위에 속하는 다른 지질단위에 비해 투수성이 높거나 낮게 나타났다. 이는 연구지역을 구성하는 24개의 다양한 지질암상별로 지역적 특성을 반영할 만큼 충분한 자료가 축적되지 못해 지역적 이상치가 강조되거나 지역적 특성이 누락된 결과로 보인다.

## 사 사

본 연구에 적극적으로 협조해 주신 한국수자원공사 조사기획처 지하수조사팀과 (주)유신코퍼레이션, 그리고 본 연구에 사용된 자료를 제공해 주신 여러 분들께 감사드립니다. 본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '동북아 지각의 지체구조적 대비 및 지질정보 구축' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Al-Adamata, R.A.N., Foster, I.D.L. and Babanc, S.M.J. (2003) Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, v. 23, p. 303-324.
- Choi, S.Y. Hwang, S.H., Park, K.G., Shin, J.H. and Yoon, W.J. (2004) Application of Geographic Information System for Synthetic Analysis of Multidisciplinary Data in Seawater Intrusion Assessment. *The Journal of GIS Association of Korea*. v. 12, n. 3, p. 49-60.
- Han, S.H., Kim, J.S., Shin, J.W. and Kweon, I.R. (2002) GIS interpretation on the multi-attributes from the various geophysical survey, *Journal of the Korean Geophysical Society*. v. 5, n. 1, p. 29-39.
- Hwang, J.H, Kim, D.H. Cho, D.L. and Song, K.Y.(1996) 1:250,000 Geological map of Andong Sheet, Korea Institute of Geology, Mining and Materials.
- Israil, M., Al-hadithi, M. and Singhal, D.C. (2006) Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area, Himalayan foothill region, India. *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 753-759.
- 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, *Journal*



- of the Korean Society of Groundwater Environment, v. 6, n. 2, p. 87-94.
- Jo, S.B. and Shon, H.W. (2004) A Study on the Prediction of Groundwater Contamination using GIS, Journal of Korean Geophysical Society, v. 7, n. 2, p. 121-134.
- Kim, D.H., Hwang J H, Park, K.H. and Song, K.Y. (1998) 1:250,000 Geological Map of Pusan Sheet, Korea Institute of Geology, Mining and Materials.
- Kim, O.J, Yoon, S. and Gil, Y.J. (1968) 1:50,000 Geological Map of Cheongha Sheet, Geological Survey of Korea.
- Kim, Y.Y and Lee, K.K. (1999) GIS Application to Urban Hydrogeological Analysis of Groundwater System in Seoul Area, The Journal of GIS Association of Korea, v. 7, n. 1, p. 103-117.
- Kim, M.K. (2001) The Support System for Groundwater Development Design using GIS, The Journal of GIS Association of Korea, v. 9, n. 2, p. 207-225.
- Kwon, Y.I and Lee, I.K. (1973) 1:50,000 Geological Map of Do Pyeong Sheet, Geological and Mineral Institute of Korea.
- Lee, C.K. and Moon, C.Y. (1999) Estimation of Groundwater Table Using Well Data and GIS Digital Map, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, v. 6, n. 3, p. 133-139.
- Lee, S. R., Kim, Y. S., Lee, J. W., Park, J. H. and Woo, I.K. (2004) Development of a technique for lineament density calculation and its application to groundwater yield, Journal of the Geological Society of Korea, v. 40, n. 3, p. 293-304.
- Lee, S.R. (2003) Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea, Environmental Geology, v. 44, p. 654-664.
- Lee, S.R. and Choi, S.H. (1997) Groundwater Pollution Susceptibility Assessment of Younggwang Area Using GIS Technique, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, v. 4, n. 4, p. 223-230.
- Lee, S.R. and Kim, Y.J. (1996) Analysis of Groundwater Pollution Potential And Risk using DRASTIC System, The Journal of GIS Association of Korea, v. 4, n. 1, p.1-11.
- Liu, C.W. (2004) Decision support system for managing ground water resources in the Choushui River alluvial in Taiwan, Journal of the American Water Resources Association, v. 40, p. 431-442.
- Marechal, J.C., Dewandel, B., Ahmed, S., Galeazzi, L. and Zaidi, F.K. (2006) Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture, Journal of Hydrology, v. 329, p. 281-293.
- 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, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, v. 3, n. 2, p. 101-109.
- Ministry of Construction & Transportation, KWATER, 2003, Groundwater survey in Pohang area, p. 462.
- Oh, I. S. and Jeong, G.S. (1975) 1:50,000 Geological Map of Gi Gae Sheet, Geological and Mineral Institute of Korea.
- Simsek, C. and Gunduz, O. (2006) IWQ Index: A GIS-Integrated Technique to Assess Irrigation Water Quality, Environmental Monitoring and Assessment, v. 128, p. 277-300.
- Solomon, S. and Quiel, F. (2006) Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea, Hydrogeology Journal, v. 14, p. 729-741.
- Srivastava, P.K. and Bhattacharya, A.K. (2006) Groundwater assessment through an integrated approach using remote sensing, GIS and resistivity techniques: a case study from a hard rock terrain, International Journal of Remote Sensing, v. 27, p. 4599-4620.
- Tateiwa, I. (1922) Geological map of Yongil Sheet, Geological Survey of Korea.
- Tateiwa, I. (1922) Geological map of Kuryongpo Sheet, Geological Survey of Korea.
- Tateiwa, I. (1922), Geological map of Youngduk Sheet, Geological Survey of Korea.
- Thapinta, A. and Huda, P.F. (2002) Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand, Environment International, v. 29, p. 87-93.
- Um, S. H. Lee, D.W. and Bak, B.S. (1964) 1:50,000 Geological Map of Pohang Sheet, Geological Survey of Korea.
- Won, J.S., Woo, N.C. and Kim, Y.J. (2004) Analysis of Influential Factors on Nitrate Distribution in Ground Water in an Urbanizing Area Using GIS, Economic and Environmental Geology, v. 37, n. 6, p. 647-655.