

## 국내 6개 대도시의 지하수 수위 및 수질특성 비교

윤상웅<sup>1</sup> · 최현미<sup>1,2</sup> · 이진용<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과

<sup>2</sup>한국환경공단 지하수관리팀

### 요 약

서울, 부산, 대구, 인천, 대전 및 울산 6개의 대도시를 대상으로 도시화에 따른 지하수위 및 수질특성에 대해 비교·분석하였다. 2001년부터 2011년까지 6개 대도시의 지하수위는 불투수성 지표면 증가 및 지하시설 지하수 유출 등과 같은 여러 가지 도시화 요인으로 인한 지하수위 변동이 많이 발생하였으며 도시외곽보다 지하수위가 낮았다. 6개 대도시의 지하수 주 오염원은 총대장균군(coliform)과 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N)였다. 특히 인천은 대도시 중 염소이온(21,120 mg/L) 및 전기전도도(49,400 μS/cm)가 가장 높은 염지하수의 영향이 나타났다. 그 외 각 대도시는 공단을 중심으로 휘발성 유기화합물(TCE, PCE), 중금속류(Hg, Cr<sup>6+</sup>, As, Cd) 및 CN의 오염물질이 일부 지점에서 기준치를 초과하였으나 그 검출빈도는 매우 낮았다.

**주요어:** 대도시, 도시화, 지하수위, 지하수 오염, 지하수질

**Sang Woong Yun, Hyun-Mi Choi and Jin-Yong Lee, 2014, Comparison of groundwater levels and groundwater qualities in six megacities of Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 4, p. 517-528**

**ABSTRACT:** This study was conducted to compare groundwater levels and groundwater qualities among six megacities such as Seoul, Busan, Daegu, Incheon, Daejeon, Ulsan in Korea. To this end, groundwater levels (2001-2011) and groundwater qualities monitoring data (2001-2010) were obtained from the Korea National Groundwater Monitoring Stations. Groundwater levels in the six megacities were affected by impermeable pavement, subway and well pumping. Due to the urbanization effects, groundwater levels in the megacities were lower than those found in the outskirts. Coliform and NO<sub>3</sub>-N were the major groundwater contaminants in the megacities. In particular, groundwater in Incheon showed elevated Cl concentrations (21,120 mg/L) and electrical conductivities (49,400 μS/cm), indicating the infiltration of seawater and salinized river water. Detection frequency of TCE, PCE, heavy metal (Hg, Cr<sup>6+</sup>, As, Cd) and CN contamination were low in the six megacities.

**Key words:** megacities, urbanization, groundwater level, contamination, quality

(Sang Woong Yun, Hyun-Mi Choi and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea; Hyun-Mi Choi, Groundwater Management Team, Korea Environment Corporation, Incheon 404-508, Republic of Korea)

### 1. 서 론

우리나라는 1960~1990년대 '한강의 기적'이라 불리며 고도의 경제성장을 이루었다. 이와 함께 경제 인구 증가와 도시의 팽창이 급격하게 진행되었다. 그러나 이와 같은 급격한 경제발전과 더불어 여러 가지 부작용도 발생하였다. 그 중 도시화로 인해 각 대도시의 지하수는 양과 질에 있어서 큰 영향을 받기 시작하였다. 수리지질학적 관점에서 도시화는 자

연녹지 및 농지의 감소와 도로, 택지, 주거지, 주차장 등 불투수성 지표면(impermeable pavement)의 증가를 의미한다(Lee and Koo, 2007; Lee *et al.*, 2012). 이로 인해 강우 시 침투량이 감소하여 농촌지역에 비해 도시지역의 지하수 함양량(groundwater recharge)은 감소하고 지표유출(surface runoff)이 증가한다(Yun *et al.*, 2013). 더불어 지하철 및 고층건물의 인위적인 지하수 유출(artificial groundwater discharge)과 무분별한 지하수 양수(groundwater

\* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

pumping)는 지하수위 강하, 지하수 개발가능량 감소, 지반붕괴 등 발생 우려가 된다. 반면에 상수도관(waterworks pipelines)에서 누수가 발생하여 일부 지역에서는 지하수위가 오히려 상승하기도 한다 (Lawrence *et al.*, 1998; Lee and Koo, 2007).

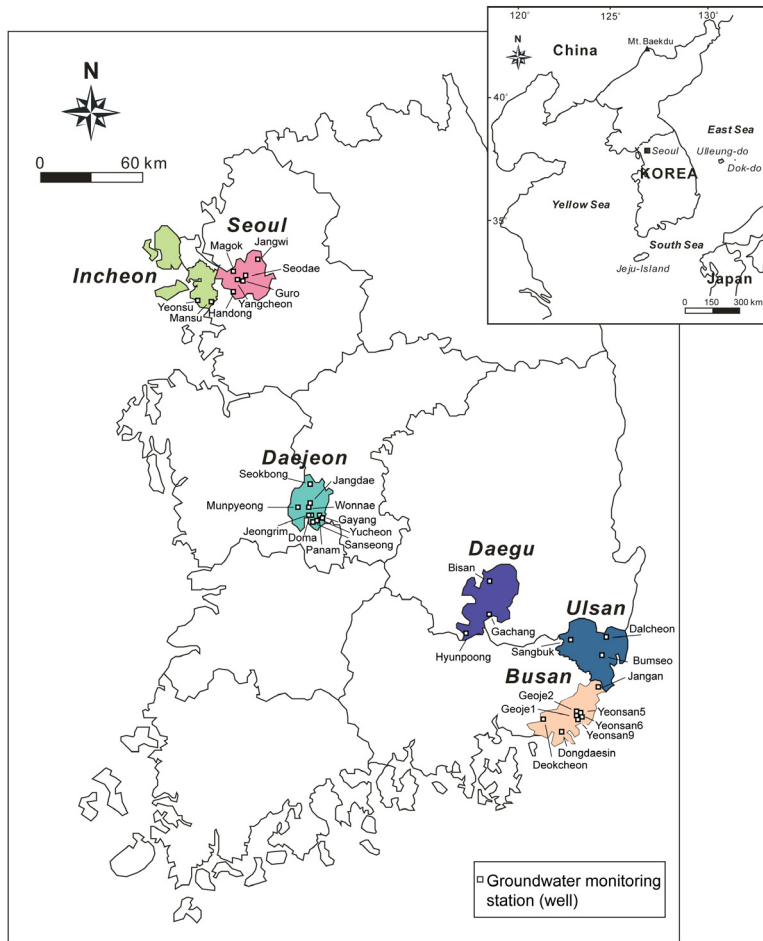
대도시의 지하수 오염에 대한 최근 여러 연구결과, 대都市는 다양한 오염원에 대해 매우 취약한 상태인 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 1997; Cho, 2001; Lee *et al.*, 2002). 도시 내 존재하는 매립지, 낡은 하수도, 주유소, 세탁소, 공장에서 배출되는 다양한 유기화합물(TCE, PCE)과 각종 염류( $\text{NO}_3\text{-N}$ , Cl)가 도시 지하수를 오염시킨다(Lee and Koo, 2007). 그 동안 국내에서는 도시화 영향으로 지하수 시스템 변화에 대한 연구가 수행된 바 있지만(Lee *et al.*, 1997; Kim

and Lee, 1999; Lee and Koo, 2007; Lee *et al.*, 2007; Cho and Kim, 2009; Chung, 2010; Lee and Han, 2013) 국내 6개 대도시 대상으로 지하수위 및 지하수 질에 대해 비교·분석한 연구는 드문 편이다. 본 연구의 목적은 6개의 대도시(서울, 부산, 대구, 인천, 대전, 울산)를 대상으로 도시화에 따른 지하수 사용량, 지하수위 및 수질특성에 대해 비교·분석하였다.

## 2. 연구지역 및 방법

### 2.1 연구지역

연구지역은 서울, 부산, 대구, 인천, 대전, 울산으로 6개 대도시이다(그림 1). 6개 대도시들 중 대한민국 수도인 서울은 한국의 북서부에 위치하고 있다.



**Fig. 1.** Location of the six studied metropolitan cities (Seoul, Busan, Daegu, Incheon, Daejeon, Ulsan) and locations of groundwater monitoring stations (wells).

서울의 연평균기온은 12.5°C 이고 1960년부터 2010년까지 51년간 연평균 강수량은 1,413.0 mm이고 여름철(6~8월) 강수량은 892.1 mm로 연강수량의 61%, 겨울철(12~2월) 강수량은 67.4 mm로 연강수량의 5%이다(KMA, 2013). 남해와 접하고 있는 부산은 남동부에 위치하고 있다. 부산의 연평균 기온은 14.7°C 이고 연평균 강수량은 1,519.1 mm이며 여름철 평균 강수량은 778.6 mm, 겨울철 평균 강수량은 106.9 mm이다(KMA, 2013).

인천은 한반도의 중앙부 서해연안에 위치하고 있다. 인천의 연평균기온은 12.1°C 이고 연평균 강수량은 1,234.4 mm이다. 여름철에는 연평균 강수량의 58%에 해당하는 717.4 mm가, 겨울철에는 연평균 강수량의 5%에 해당하는 60.7 mm가 내린다(KMA, 2013). 경상북도 중남부 내륙에 위치하고 있는 대구의 연평균 기온은 14.1°C 이며 연평균 강수량은 1,064.4 mm이다. 이 중 여름철 강수량은 602.5 mm로 연강수량의 57%이고, 겨울철 강수량은 63.7 mm로 연평균 강수량의 6%이다. 대전은 내륙 중앙지역에 위치하고 있으며 연평균 기온은 13.0°C 이며 연평균 강수량은 1,458.7 mm이다. 이 중 여름철 강수량은 776.5 mm로 연강수량의 53%이고, 겨울철 강수량은 97.7

mm로 연평균 강수량의 7%이다(KMA, 2013). 마지막으로 한반도의 남동부에 위치하고 있는 울산은 남해와 동해에 접하고 있으며 연평균 기온은 14.1°C, 연평균 강수량은 1,227.1 mm이다. 이 중 여름철 강수량은 649.4 mm로 연강수량의 53%이고, 겨울철 강수량은 99.9 mm로 연평균 강수량의 8%이다(KMA, 2013).

그림 2는 각 도시별 면적 및 인구변화를 보여준다. 서울은 1960년부터 1961년까지 도시면적 268 km<sup>2</sup>이었지만 1963년에는 1961년에 비해 면적이 613 km<sup>2</sup>로 약 2.3배 급증하였다. 이후 2010년(605 km<sup>2</sup>)까지 도시면적은 약간의 증가 및 감소 변화를 보인다. 또한 서울의 인구수는 1960년부터 1992년까지 증가세를 보여주지만 1993년(1,093만명) 기점으로 인구수는 약간의 증가 및 감소 변화를 보인다. 마찬가지로 인구밀도도 도시면적이 거의 일정한 상태에서 인구유입이 증가하여 1992년(18,120명/km<sup>2</sup>)까지 빠른 증가를 보여주며 이후 일정하게 약간의 증가 및 감소 변화를 보인다(Seoul City, 2013).

부산은 1960년 도시면적은 219 km<sup>2</sup>이었고 이후 지속적으로 도시외곽으로 확장하여 2010년에는 767 km<sup>2</sup>에 이르렀다. 도시 인구수는 1960년부터 1990년

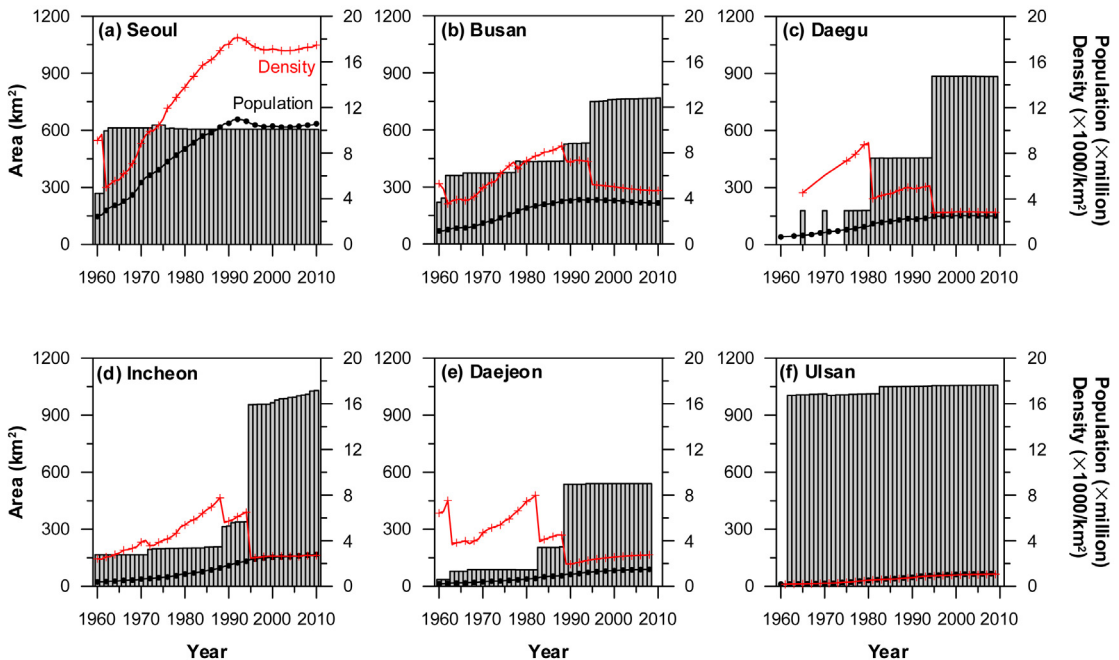


Fig. 2. Population, density and area of the six studied cities for 1960-2010.

까지 꾸준히 증가하다가 1991년(389만명) 이후 거의 변화가 없었다. 반면 인구밀도는 1960년부터 1988년까지 도시면적 증가량보다 인구유입량이 커 가파른 상승을 보이다가 1989년(7,330명/km<sup>2</sup>) 기점으로 인구유입량보다 도시면적 증가량이 역전되어 급격히 감소하는 변화를 보였다(Busan City, 2013). 대구는 1960년부터 1980년까지 도시면적(178 km<sup>2</sup>)이 거의 증가하지 않다가 1981년(454 km<sup>2</sup>)과 1995년(885 km<sup>2</sup>)에 크게 팽창되었다. 도시 인구는 지속적으로 증가했지만 인구밀도는 1981년과 1995년의 도시 확장으로 인해 급격히 낮아졌다(Daegu City, 2013).

인천은 1960년부터 1971년까지 도시면적(166 km<sup>2</sup>)로 일정하게 유지하다가 1989년(313 km<sup>2</sup>)과 1995년(955 km<sup>2</sup>)에 두 차례 크게 확장되었다. 그 이후 도시면적은 2010년(1,029 km<sup>2</sup>)까지 계속 증가하였다. 도시 인구는 1960년(40만명)부터 2010년(281만명)까지 꾸준히 증가세를 보이지만 인구밀도는 도시화의 영향으로 인해 1989년(5,600/km<sup>2</sup>)과 1995년(2,470/km<sup>2</sup>)에 크게 감소하는 양상을 보였다(Incheon City, 2013).

대전은 1960년(36 km<sup>2</sup>)부터 1982년(87 km<sup>2</sup>)까지 도시면적이 증가하였다가 1983년(204 km<sup>2</sup>)과 1989년(537 km<sup>2</sup>) 두 차례 크게 확장하였다. 그 이후 인천의 도시면적(540 km<sup>2</sup>)은 거의 변화하지 않았다. 도시의 인구는 1960년(23만명)부터 2008년(277만명)까지 꾸준히 증가를 보인다. 반면 인구밀도는 1983년(3,920/km<sup>2</sup>)과 1989년(1,960/km<sup>2</sup>) 두 차례의 도시면적 확장영향으로 크게 감소하였고 1990년부터는 도시면적이 변화가 없었기 때문에 인구수와 함께 계속 증가세를 보였다(Daejeon City, 2013). 마지막으로 울산은 1960년(1,004 km<sup>2</sup>)부터 2009년(1,058 km<sup>2</sup>)까지 도시면적이 거의 변화가 없었다. 도시의 인구는 1960년(21만명)부터 2009년(113만명)까지 꾸준한 증가세를 보였고 더불어 인구밀도도 같이 증가하는 양상을 보였다(Ulsan City, 2013).

경제발전과 함께 많은 인구의 유입으로 대도시는 도시화가 빠르게 진행되었다. 그림 3과 표 1은 최근 각 도시별로 전체 토지이용률과 불투수성 지표면이 차지하는 비율을 나타냈다. 서울에 경우 2012년 기

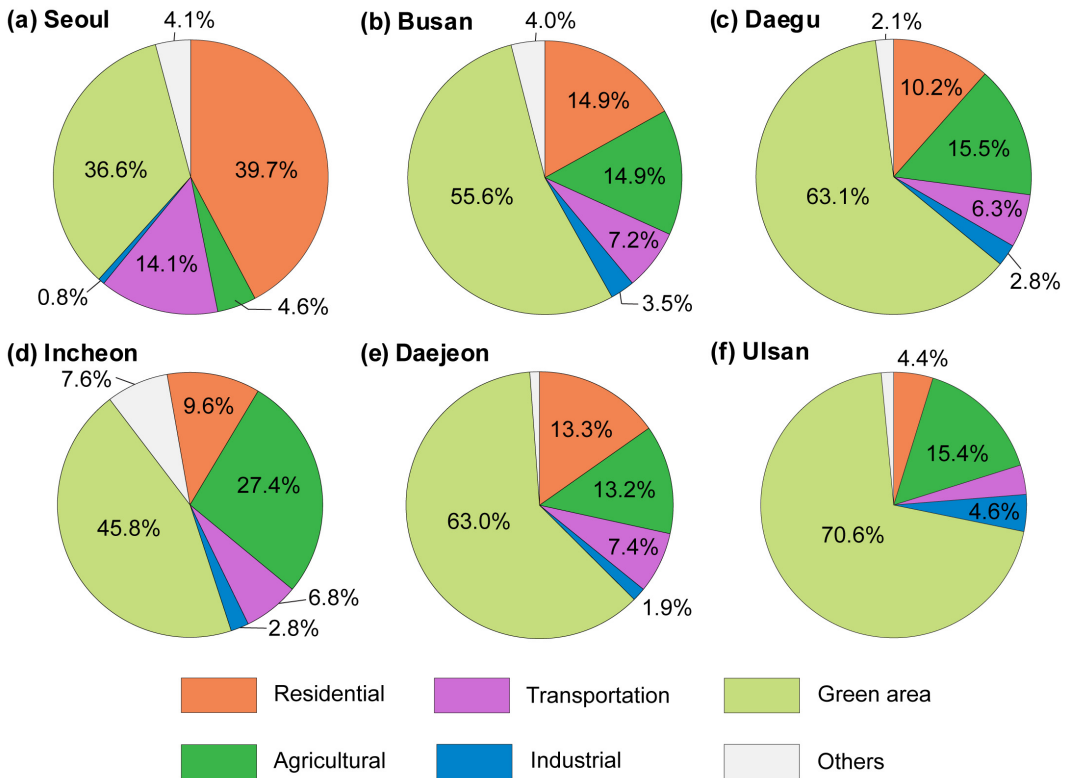


Fig. 3. Areal proportion of land uses in the studied cities.

**Table 1.** Proportions of pavement in six cities.

	Pavement area (km <sup>2</sup> )	Proportion (%)
Seoul	330.1	54.5
Busan	196.3	25.6
Daegu	170.4	19.3
Incheon	197.4	19.2
Daejeon	122.0	22.6
Ulsan	132.9	12.6
Average	191.5	25.6

준으로 총 도시면적(605 km<sup>2</sup>) 중 거주(39.7%), 녹지(36.6%), 교통(14.1%), 농업(4.6%), 산업(0.8%) 및 기타(4.1%)의 토지이용률 순으로 나타났다. 이 중 전체 도시면적에 대한 불투수성 지표면이 차지하는 비율은 54.5%(330.1 km<sup>2</sup>)로 6개 대도시 중 가장 높은 비율을 보였다(Seoul City, 2013). 부산은 2010년 기준으로 총 도시면적(767 km<sup>2</sup>) 중 녹지(55.6%), 거주(14.9%), 농업(14.9%), 교통(7.2%), 산업(3.5%), 기타(4.0%) 순으로 나타났다. 전체 도시면적에 대한 불투수성 지표면이 차지하는 비율은 25.6%(196.3 km<sup>2</sup>)로 6개 도시 중 2번째로 높았다(Busan City, 2013).

이밖에 대구, 인천, 대전, 울산 중 대구는 2010년 기준으로 총 도시면적(884 km<sup>2</sup>) 중 녹지(63.1%), 농업(15.5%), 거주(10.2%), 교통(6.3%), 산업(2.8%), 기타(2.1%) 순으로 나타났고 전체 불투수성 지표면이 차지하는 비율은 19.3%(170.4 km<sup>2</sup>)이다(Daegu City, 2013). 인천은 2010년 기준으로 총 도시면적(1,029 km<sup>2</sup>) 중 녹지(45.8%), 농업(27.4%), 거주(9.6%), 교통(6.8%), 기타(7.6%), 산업(2.8%) 순으로 나타났고 전체 불투수성 지표면이 차지하는 비율은 19.2%(197.4 km<sup>2</sup>)이다.

대전은 2008년도 기준으로 총 도시면적(540 km<sup>2</sup>) 중 녹지(63.0%), 주거(13.3%), 농업(13.2%), 교통(7.4%), 산업(1.9%), 기타(1.2%) 순이다. 전체 불투수성 지표면 차지하는 비율은 22.6%(122.0 km<sup>2</sup>)이다(Daejeon City, 2013). 마지막으로 울산은 2008년도 기준으로 총 도시면적(1,058 km<sup>2</sup>) 중 녹지(70.6%), 농업(15.4%), 산업(4.6%), 거주(4.4%), 교통(3.6%), 기타(1.5%) 순이다. 전체 불투수성 지표면 차지하는 비율은 6개 도시 중 가장 낮은 12.6%(132.9 km<sup>2</sup>)이다(Ulsan City, 2013).

## 2.2 연구방법

본 연구에서는 1996년부터 2009년까지 각 대도시의 지하수 총 사용량(생활용, 공업용, 농업용, 기타용)과 지하수 관정개수 자료를 국가지하수정보센터(GIMS)에서 수집하였다. 더불어 2001년부터 2010년까지 각 도시별 내·외곽에 위치한 국가지하수관측망(암반관측정 및 충적관측정)과 보조지하수관측망의 수위자료를 수집하였다(GIMS, 2013). 그러나 각 지역마다 그 측정시기가 다르고 연속적이지 않기 때문에 2001년부터 2010년까지 연속된 지하수위 관측자료가 부족하였다. 따라서 이들 6개 대도시의 지하수위 관측 자료가 없는 해당년도를 제외한 지하수위 자료를 이용하였다.

한편 지하수질 자료는 각 도시에 위치한 지하수 수질측정망에서 2001년부터 2010년까지 연 2회(상반기 4~5월, 하반기 9~10월) 측정된 자료를 이용하였다. 총 20개 측정항목 중 연구에 이용된 수질자료는 일반 오염물질인 수소이온농도(pH), 총대장균군(coliform), 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N), 염소이온(Cl)과 특정 유해물질인 카드뮴(Cd), 비소(As), 시안(CN), 수은(Hg), 6가크롬(Cr<sup>6+</sup>), 납(Pb), 트리클로로에틸렌(TCE), 테트라클로로에틸렌(PCE), 1,1,1-트리클로로에탄(1,1,1 TCA), 및 전기전도도(EC)로 총 14개 항목이다. 이 자료는 환경부에서 수집하였다(ME, 2012). 본 연구는 각 도시의 지하수 사용량, 관정개수, 지하수위 및 지하수질 자료를 사용하여 각 도시별 지하수의 특성을 비교·분석하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 지하수 이용통계

그림 4는 각 도시별 1996년부터 2009년까지 연간 지하수 사용량 및 관정개수의 변화이다. 연간 지하수 사용량 및 관정개수는 각 도시 특성에 따라 다른 변화 양상을 보였다. 서울의 경우 1996년부터 2009년까지 지하수 사용량과 관정개수는 인구수 및 도시면적이 일정함에도 불구하고 계속 감소하였다(그림 4a). 이는 도시의 상수도 시설 및 관망 등이 점차 확충됨에 따라 생활용 지하수 사용량은 점차 감소한 것으로 보인다(Lee and Koo, 2007). 공업용수 사용량이 감소한 것은 정부의 엄격한 지하수 개발의 규제로 일부산업이 지방 도시로 계속 이전하였기 때문

이다(Kim *et al.*, 2011). 인천은 인구유입과 급격한 도시 확장으로 지하수 사용량과 관정개수가 함께 증가하는 상관성을 보여준다(그림 4d). 또한 2001년 기점으로 생활용수와 더불어 농업용수는 지하수 사용량의 대부분을 차지한다. 이는 앞서 언급한 각 도시별 토지이용률에서 인천은 농업용지 27.4%로 가장 높았으며 이에 생산비용을 절감 위해 상수도보다 지하수를 더 많이 사용한 것으로 사료된다.

부산의 지하수 사용량은 6개 도시 중 가장 높았고 관정 당 평균 양수량 또한 1999년에 약 85 m<sup>3</sup>/년으로 가장 많았다. 그러나 지하수 사용량은 1997년 이래로 점차 감소하였으며 특히 2002년에는 연간 지하수 사용량이 전년대비 약 33% 감소하였다(그림 4b). 이는 도시개발 초기 때 지하수 의존이 높았지만 1995년 도시면적이 큰 확장 및 상수도 시설 확충과 함께 인근 도시로의 인구유출로 지하수 사용량이 줄어든 것으로 분석된다. 대구 또한 부산과 비슷한 감소 경향성을 보였다. 2001년 기점으로 전년대비 약 36%로 크게 감소하였다(그림 4c). 그 이후 전반적으로 생활용수가 감소로 인해 전체 지하수 사용량이 감소 경향을 보이는 반면 이 기간에 관정 개수는 오히려 소폭으로 증가를 하였다. 관정 개수의 증가는 인구

유입으로 인한 것으로 분석된다.

대전은 지하수 사용량 평균 39만 m<sup>3</sup>/년으로 거의 변화 없는 경향을 보이지만 1998년에 관정개수가 급증하였다(그림 4e). 이는 급격한 도시 확장이 빠르게 진행되는 것에 비해 인구유입량이 적어 발생한 것으로 판단된다. 울산은 꾸준한 인구유입 증가에 따라 지하수 사용량과 관정개수도 증가하였다(그림 4f). 도시의 관정은 거의 대부분 생활용으로 인구가 증가와 함께 지하수 사용량도 증가한 것으로 판단된다.

### 3.2 지하수위

그림 5는 각 도시 내·외곽에 위치한 국가지하수관측망과 보조지하수관측망의 2001년부터 2010년까지의 지하수위 변동기록이다. 서울의 경우 도시외곽에 위치한 4개 지하수관측소는 평균 지하수위 6.00 m이며 계절적 변화(강수량)에 따라 안정적인 지하수위 변화를 보였다(그림 5a). 그러나 도심 내 3개 지하수관측소는 평균 지하수위 18.78 m이고 계절적 변화와 다른 변동 및 급격한 수위강하가 나타나 전반적으로 불규칙한 지하수위 변동을 보였다. 특히, 서울지하철 4호선에서 불과 180 m 떨어진 지하수관측소(사당동)는 가장 큰 변동폭을 보였으며 2005년

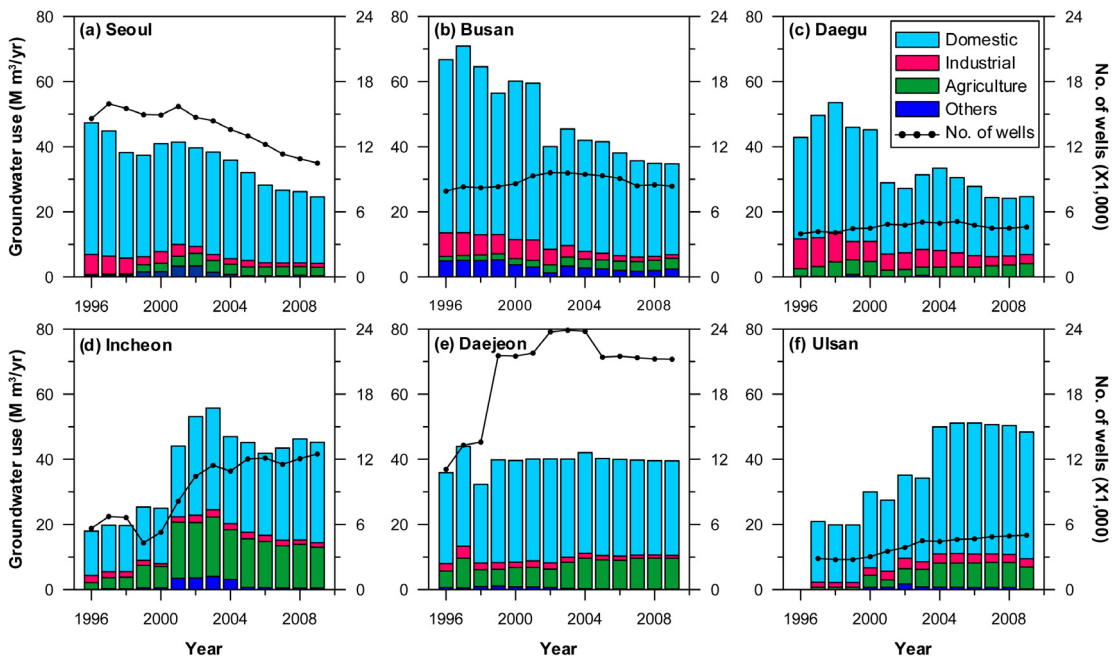


Fig. 4. Groundwater use and number of wells in the studied cities for 1996-2010.



9월에 심도 65.79 m까지 급감하였다. 부산도 서울과 비슷한 지하수위 변동양상이 나타났다(그림 5b). 도심 외곽에 위치한 2개 지하수관측소는 평균 지하수위 10.01 m이며 계절에 따라 안정적인 변화를 보였다. 반면 도심 내 6개 관측소는 평균 지하수위 20.61 m이고 그 중 5개 관측소는 불규칙한 수위변동 및 급격한 수위강하를 보였다. 이 중 3개 관측소(거제 1동, 거제 2동, 연산 9동)는 대학교 및 경기장 등 대형 건물 인근에 위치하고 있으며 2010년 5월에는 최저 수위인 심도 41.47 m까지 급감하였다. 또한 도심지역의 2개 관측소(연산 5동, 연산 6동)는 부산지하철 1호선과 3호선에 인접하여 있었다. 도심에 위치하고

있는 동대신 관측소는 계절에 따라 규칙적으로 변동하였지만 도시외곽에 비하여 수위가 매우 낮았다.

대구의 도시 내·외곽 지하수는 전반적으로 계절의 변화에 따른 지하수위 변동 양상이 유사하였다. 하지만 도심 지하수위는 7.67 m로 도시외곽 평균 지하수위 4.04 m보다 낮게 형성되어 있었다(그림 5c). 또한 도심지역의 지하수위는 2006년 9월부터 2007년 8월까지 급격히 하강 후 예전보다 낮은 지하수위를 유지하다가 회복하는 것으로 나타났다. 인천의 도심 지하수관측소 3개는 평균 지하수위 5.78 m이며 그 중 만수동 관측소는 비교적 녹지지역에 위치하고 있으며 규칙적인 계절적 수위변동 양상이 나타

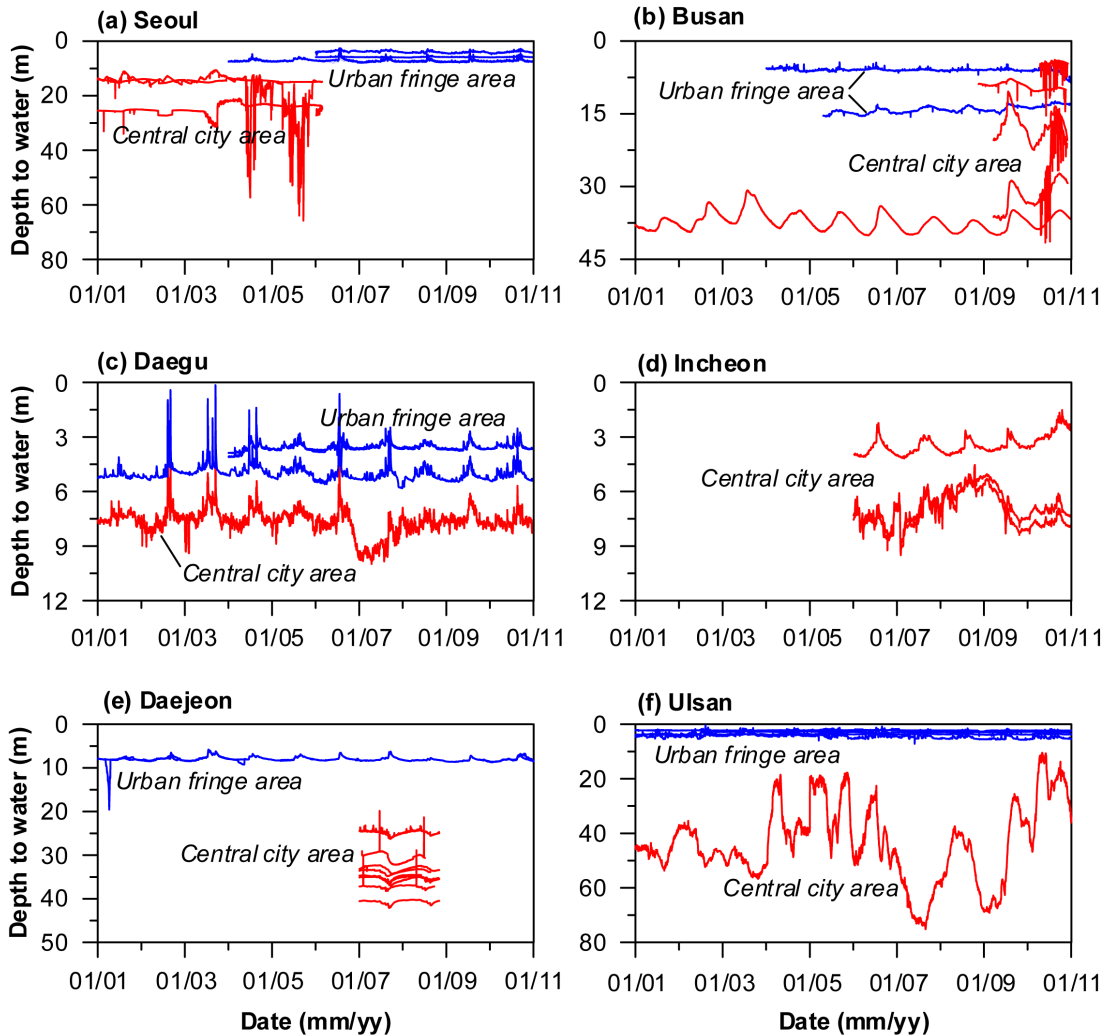


Fig. 5. Groundwater levels (depth to water) for 2001-2011 at the groundwater monitoring wells.

**Table 2.** Levels of pH, coliform, NO<sub>3</sub>-N, Cl and EC of groundwater for 2001-2010.

Parameter	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Daejeon	Ulsan
pH (SU)	2390 <sup>a</sup>	2363	3461	1165	960	1085
	8.7 <sup>b</sup>	8.5	9.2	8.6	8.6	8.5
	5.2 <sup>c</sup>	4.6	5.8	3.7	5.9	5.7
	7.2 <sup>d</sup>	7.1	7.4	7.0	7.1	7.3
	7.2 <sup>e</sup>	7.1	7.4	7.0	7.0	7.4
Coliform (CFU/100 mL)	2389	1791	2582	1178	818	906
	22000	3500	3000	12000	1300	2300
	0	0	0	0	0	0
	44.3	29.6	22.5	96.0	11.1	26.6
	0	0	0	0	0	0
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	2375	2324	3506	1147	940	1037
	507.0	95.0	22.1	109.0	37.3	22.9
	0	0	0	0	0	0
	5.6	54.3	2.1	5.6	3.2	2.6
	4.4	2.9	1.1	3.8	2.0	1.3
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	2387	2343	3444	1168	952	1079
	497.0	953.0	506.0	21120.0	180.0	1003.0
	1.0	0.6	0.2	1.0	0.2	0.3
	48.1	51.7	53.4	188.0	23.6	36.0
	44.0	37.4	47.5	47.0	19.0	24.9
EC ( $\mu$ S/cm)	397	843	1087	260	475	574
	1500.0	2645.0	2906.0	49400.0	1095.0	4940.0
	6.4	6.8	11.0	39.0	13.3	45.0
	523.0	438.0	669.0	1456.0	305.0	449.0
	517.0	377.0	600.0	463.0	273.0	392.0

<sup>a</sup>Number of data<sup>b</sup>Maximum<sup>c</sup>Minimum<sup>d</sup>Average<sup>e</sup>Median

났다. 반면 주거지역에 위치하고 있는 연수동의 심부관측정과 천부관측정은 지하수위가 불규칙하게 변동했다(그림 5d). 대전의 9개 도심 관측소의 평균 지하수위(33.87 m)는 2개 도시외곽 관측소의 평균 지하수위(7.93 m)보다 더 낮게 형성되어 있으며 일시적인 급격한 수위 변동이 있었다(그림 5e). 울산의 경우 외곽에 위치한 5개 관측소는 평균 지하수위 3.21 m이고 안정적인 변화양상이 나타나고 있는 반면 도심 주거지역에 위치한 도심관측소는 평균 지하수위 43.54 m로 매우 불규칙한 지하수위 변동양상

을 보인다. 2007년 8월에 심도는 75.16 m로 지하수위가 가장 낮게 나타났다(그림 5f).

6개 도심지역의 지하수위 전반적인 특성을 정리하면 도시외곽에 비해 지하수위가 낮게 형성되어 있으며 불규칙적으로 변동한다는 것이다. 도심지역 지하수의 불규칙적인 변동 양상은 일반적으로 지하수 과잉 채수(생활용수, 공업용수) 및 각종 시설물에서의 인위적 양수 등 복합적 요인에 의해 나타날 수 있다(Lee and Koo, 2007). 6개의 도시 중 지하철 지하수 유출량은 서울 8개 노선의 경우 3,498만 m<sup>3</sup>/년,



**Table 3.** Concentrations of TCE, PCE and 1.1.1 TCA of groundwater for 2001-2010 (1.1.1 TCA: 2004-2010).

Parameter	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Daejeon	Ulsan
TCE (mg/L)	2416 <sup>a</sup>	2367	3506	1176	962	1083
	3.444 <sup>b</sup>	4.501	1.861	1.001	0.172	0.100
	0.000 <sup>c</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.0049 <sup>d</sup>	0.0097	0.0019	0.0065	0.002	0.0009
	0.000 <sup>e</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PCE (mg/L)	2416	2367	3506	1174	962	1083
	0.475	0.026	0.045	0.060	0.017	0.018
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.001	0.0001	0.0001	0.0005	0.0002	0.0001
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.1.1 TCA (mg/L)	1803	1652	2496	885	669	760
	0.110	0.039	0.006	0.078	0.015	0.010
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.0006	0.0001	0.000	0.0011	0.0001	0.0001
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

<sup>a</sup>Number of data

<sup>b</sup>Maximum

<sup>c</sup>Minimum

<sup>d</sup>Average

<sup>e</sup>Median

부산 4개 노선의 경우 548만 m<sup>3</sup>/년으로 지하철 주변의 지하수위 강하에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Chung, 2010; Chung *et al.*, 2012). 또한 대형건물의 지하공간은 지속적인 유지관리를 위해 인위적인 지하수 유출을 한다. 이 영향으로 건물 주변 지하수위는 일시적인 수위강하 및 낮은 지하수위가 형성될 가능성이 있다.(Hurst and Wilkinson, 1986). 특히 도심지는 도로 포장 및 주거지역 밀집으로 불투수층이 넓게 형성되어 있다. 또한 강우가 하수도로 대부분 빠져나가기 때문에 강우가 지하수로 함양되기 어려운 조건을 가지고 있다. 따라서 도심 지역의 지하수의 사용량에 비해 지하수의 함양량이 매우 부족하기 때문에 지하수위가 낮게 형성된 것으로 보인다. 그러나 도시화가 진행되면서 상하수도의 누수로 인한 지하수함양량의 순증가와 산업지역 이전에 따른 지하수의 사용량의 감소의 영향으로 오히려 지하수위가 상승한 외국 대도시 사례도 있다(UKDoE, 1992; Lawrence *et al.*, 1998; Galloway, 2001).

### 3.3 지하수질

2001년부터 2010년까지 각 도시별 지하수의 수소이온농도(pH), 총대장균군(coliform), 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N), 염소(Cl) 및 전기전도도(EC)를 표 2에 정리하였다. 도시별 평균 수소이온농도는 7.0~7.4로 중성 내지 약알칼리성 환경이었다. 총대장균군은 각 도시별 평균이 11.1~44.3/100 mL로 비음용 생활용수 기준치(5,000/100 mL)를 초과하지 않았다. 그러나 서울과 인천의 총대장균군 최대값은 각 기준치의 5.5배와 2.5배 초과하였다. 부산을 제외한 5개 도시의 평균 질산성질소는 2.1~5.6 mg/L로 비음용 생활용수 기준치(20 mg/L)를 초과하지 않았지만 질산성질소의 최대값은 6개 도시들 모두 초과를 하였다. 특히 부산은 평균 질산성질소 54.3 mg/L로 기준치의 2.7배 초과하였다. 수질기준을 초과한 서울, 부산, 인천은 상대적으로 인구수 및 인구밀도가 높고 낡은 정화조 및 하수관 균열로 생활하수 및 오폐수 등이 지하로 침투하여 총대장균군과 질산성질소의 오염이 높게 나타난 것으로 판단된다(Eiswirth and Hotzl,

**Table 4.** Concentrations of metal ions and CN of groundwater for 2001-2010.

Parameter	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Daejeon	Ulsan
Hg (mg/L)	2417 <sup>a</sup>	2367	3506	1176	962	1083
	0.000 <sup>b</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000 <sup>c</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000 <sup>d</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000 <sup>e</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb (mg/L)	2417	2367	3506	1176	962	1083
	0.040	0.000	0.070	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.0001	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr <sup>6+</sup> (mg/L)	2417	2367	3506	1176	962	1083
	0.000	0.000	1.180	4.000	0.010	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.0003	0.0034	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As (mg/L)	2417	2367	3506	1176	962	1083
	0.050	0.048	0.047	0.030	0.034	0.188
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.0003	0.0011	0.0001	0.0003	0.0004	0.0022
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cd (mg/L)	2417	2365	3506	1176	962	1082
	0.005	0.030	0.007	0.006	0.008	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CN (mg/L)	2416	2367	3506	1176	962	1083
	0.000	0.000	0.002	0.000	2.000	0.009
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0022	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

<sup>a</sup>Number of data<sup>b</sup>Maximum<sup>c</sup>Minimum<sup>d</sup>Average<sup>e</sup>Median

1997; Won *et al.*, 2004). 각 도시별 평균 염소이온농도는 평균 23.6~188.0 mg/L였으며 인천은 6개 도시 중 평균값과 최대값이 가장 높았다. 또한 인천은 염소이온 뿐만 아니라 평균 전기전도도가 1,456  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 최대 전기전도도가 49,400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 다른 도시에 비

해 매우 높았다. 따라서 일반적인 도시지역에서의 염소이온은 생활하수, 도로 제설염이 오염원이지만 인천의 경우 도심지하수 과잉 양수로 해수침입에 의한 염지하수의 영향이 있는 것으로 사료된다(Chung *et al.*, 2012).

표 3은 2001년부터 2010년까지 각 도시별 특정유해물질인 트리클로로에틸렌(TCE), 테트라클로로에틸렌(PCE), 1,1,1-트리클로로에탄(1,1,1 TCA)의 농도이다. 이들 항목은 오염우려지역으로 분류된 공업단지 등에서 분석하는 항목이다. 6개 도시의 TCE, PCE, 1,1,1 TCA 평균 농도범위는 각 0.0009~0.0097 mg/L, 0.0001~0.001 mg/L, 0.000~0.0011 mg/L로 비음용 생활용수 기준을 초과하지 않았다. 그러나 각 도시별로 최대 TCE, PCE 농도값이 기준치 이상으로 초과한 사례가 있다. 이는 오염우려지역인 공단, 저장탱크 주변 및 세탁소 등에서 배출된 TCE 및 PCE가 지하수에 유입되어 검출된 것으로 분석된다.

표 4는 2001년부터 2010년까지 각 도시별 각종 중금속 및 CN의 농도이다. 서울을 제외한 대도시 중 부산은 카드뮴 0.03 mg/L, 대구는 크롬 1.18 mg/L, 인천은 크롬 4.0 mg/L, 대전은 시안 2.0 mg/L, 울산은 비소 0.188 mg/L로 비음용 생활용수 기준에 초과된 것으로 나타났다. 즉 각 도시의 지하수는 일시적으로 중금속에 노출된 바가 있으며 측정망 인근의 공단폐수 등으로 인해 발생했을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 국내 6개 대도시 국가지하수관측망 및 보조지하수관측망의 수위자료와 지하수 수질측정망의 수질자료를 이용한 도시별 지하수위 및 수질특성을 분석·비교하였다. 도심의 지하수위는 불투수성 지표증가, 지하철 지하수유출 그리고 지하수 양수 등 도시화 요인으로 인한 영향을 받으며 본 연구의 각 도시별 지하수위 자료는 도시외곽보다 낮은 지하수위 형성 및 불규칙한 지하수위 변동을 보였다.

한편 도시별 수질자료 분석결과, 6개 대도시의 주지하수오염원은 총대장균군, 질산성질소였다. 특히 인천은 대도시 중 Cl 및 EC가 가장 높게 나타나 염지하수의 영향이 있는 것으로 판단된다. 그 외 공단을 중심으로 휘발성 유기화합물(TCE, PCE), 중금속류(Hg, Cr<sup>6+</sup>, As, Cd) 및 CN의 오염물질이 검출되었지만 검출빈도는 매우 낮았다. 이는 폐수처리 및 하수도 관리부실로 오염물질 누출이 발생한 것으로 사료되며 주기적인 관리가 필요하다.

본 연구는 비교적 제한적인 자료로 6개 도시의 지하수 특성을 분석하였다. 따라서 향후 연구에서는

도시의 수리지질학적 특성 및 정량적인 영향 요소별 자료를 추가한 도시화 영향 분석이 수행되어야 할 것이다.

#### 사 사

본 논문은 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업(173-092-010)”에서 지원받았습니다. 건설적인 심사의견을 주신 공주대 구민호 교수님, 부산대 함세영 교수님, 정훈영 교수님 그리고 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

#### REFERENCES

Busan City, 2013, Homepage of Busan City (<http://www.Busan.go.kr>). Accessed on April 7, 2013.

Cho, B.W., 2001, Hydrogeological characteristics of the groundwater resources in the Busan area, Korea. Ph.D. thesis, Kyungpook National University, pp. 127-132 (in Korean with English abstract).

Cho, H.J. and Kim, J.M., 2009, Three-dimensional numerical simulation of impacts of urbanization on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Suyeong-Gu, Busan, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14(6), 1-18 (in Korean with English abstract).

Chung, S.Y., 2010, Groundwater obstructions and Countermeasures for groundwater discharge from subway in Seoul, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46(1), 61-72 (in Korean with English abstract).

Chung, S.Y., Kim, T.H. and Park, N.S., 2012, The influence of the surrounding groundwater by groundwater discharge from the subway tunnel at Suyeong district, Busan city. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17(2), 28-36 (in Korean with English abstract).

Daegu City, 2013, Homepage of Daegu City (<http://www.Daegu.go.kr>). Accessed on April 9, 2013.

Daejeon City, 2013, Homepage of Daejeon City (<http://www.Daejeon.go.kr>). Accessed on April 8, 2013.

Eiswirth, M. and Hotzl, H., 1997, The impact of leaking sewers on urban groundwater. *Proceedings of the 27th congress on Groundwater in the urban environment*, Nottingham UK, September 21-27, P. 399-404.

Galloway, A., 2001, Londons' rising groundwater. WS2001, GARDIT (General Aquifer Research and Investigation Team).

GIMS (Integrated Groundwater Information Service),

- 2013, Homepage of GIMS (<http://www.gims.go.kr>). Accessed on May 21, 2013.
- Hurst, C.W. and Wilkinson, W.B., 1986, Rising groundwater levels in cities. Geological Society, Engineering Geology Special Publications 1986, 3, 75-80.
- Incheon City, 2013, Homepage of Incheon City (<http://www.incheon.go.kr>). Accessed on April 8, 2013.
- 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, 7(1), 103-117 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Jeon, W.H., Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2011, Urbanization and groundwater condition in a metropolitan city of Korea: implication for sustainable use. Earth Resources Research, 25, 1-24.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2013, Homepage of KMA (<http://www.kma.go.kr>). Accessed on April 15, 2013.
- Lawrence, A.R., Morris, B.L. and Foster, S.S.D., 1998, Hazards induced by groundwater recharge under rapid urbanization, In: J.G Maunds and M. Eddleston (eds.), Geohazards in Engineering Geology, Engineering Geology Special Publications, No. 15, Geological Society of London, P. 319-328.
- Lee, B.S., Hong, S.W., Kang, H.J., Lee, J.S., Yun, S.T. and Nam, K., 2012, Groundwater recharge and discharge in the urban-rural composite area. Journal of Soil and Groundwater Environment, 17(2), 37-46 (in Korean with English abstract).
- Lee, I.H., Lee, J.Y. and Kim, T.K., 1997, Geochemical study on the quality of groundwater in Daegu city, Korea. Economic and Environmental Geology, 30(4), 327-340 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on groundwater environment. Journal of Geological Society of Korea, 43, 517-528 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Moon, S.H., Cho, M., Won, J.H., Ahn, K.H. and Lee, J.M., 2007, Causes of the changes in groundwater levels at Daegu, Korea: the effect of subway excavations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 251-258.
- Lee, J.Y. and Han, J., 2013, Evaluation of groundwater monitoring data in four megacities of Korea: Implication for sustainable use. Natural Resources Research, 22(2), 103-212.
- Lee, I.H., Cho, B.W., Lee, B.D., Sung, I.H. and Lim, Y.S., 2002, Hydrogeochemical characteristics of groundwater in Kwangju City. Journal of Soil and Groundwater Environment, 7, 115-132 (in Korean with English abstract).
- ME (Ministry of Environment), 2012, Groundwater quality data for 2001-2010. Received on July 10, 2012.
- Seoul City, 2013, Homepage of Seoul City (<http://www.seoul.go.kr>). Accessed on April 7, 2013.
- UKDoE, 1992, The UK environment. UK Department of the Environment HMSO, London.
- Ulsan City, 2013, Homepage of Ulsan City (<http://www.ulsan.go.kr>). Accessed on April 9, 2013.
- Won, J.S., Woo, N.C. and Kim, Y.J., 2004, Analysis of influential factors on nitrate distribution in groundwater in an urbanizing area using GIS. Economic and Environmental Geology, 37(6), 647-655 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.W., Kim, Y.S., Kim, D.H., Kim, H.C., Shin, M.C., Park, J.Y., Kim, H. and Lee, J.Y., 2013, Comparative study on waterlevel fluctuation and recharge characteristic in groundwaters of urban and rural areas in Gangwon Province. Journal of Geological Society of Korea, 49, 503-516 (in Korean with English abstract).

---

투 고 일 : 2014년 4월 8일

심 사 일 : 2014년 4월 14일

심사완료일 : 2014년 6월 1일