

77A  
370  
205  
102

工學碩士學位論文

감조하천 주변지역 지하수의  
수리화학적 특성

指導教授 李鍾城

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함



2005年 8月

釜慶大學校 産業大學院

環境工學科

李 鍾 城

# 李鍾城의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005年 6月 16日

主 審 工學博士 李 柄 憲



委 員 工學博士 金 上 旦



委 員 工學博士 姜 壬 錫



# 목 차

List of Figures .....	iii
List of Tables .....	v
Abstract .....	vi
<b>I. 서론</b> .....	1
<b>II. 문헌 연구</b> .....	2
2.1 지하수의 특성 .....	2
2.2 지질별 지하수 부존 및 산출 특성 .....	3
2.3 지하수의 오염 .....	4
2.3.1 심미적 영향물질에 관한 항목 .....	5
2.3.2 유해영향 무기물질에 관한 항목 .....	6
2.3.3 유해영향 유기물질에 관한 항목 .....	7
2.4 해수침입 .....	8
2.4.1 담수와 염수의 관계 .....	8
2.4.2 해수침입의 종류 .....	9
<b>III. 재료 및 방법</b> .....	11
3.1 연구대상지역 .....	11
3.2 분석항목 및 방법 .....	12
3.3 지질조사 .....	12
3.3.1 지형 .....	12
3.3.2 지질 .....	13
3.3.3 지질구조 .....	16
3.4 수분조사 .....	16

3.4.1 지하수 유입량 .....	18
3.4.2 지하수 유출량 .....	20
<b>IV. 결과 및 고찰 .....</b>	<b>22</b>
4.1 지하수의 수질분류 .....	22
4.2 용도별 지하수 특성 .....	24
4.3 지하수위별 지하수 특성 .....	27
4.4 계절별 지하수 특성 .....	31
4.4.1 현장측정항목의 계절적 수질변화 .....	32
4.4.2 일반항목의 계절적 수질변화 .....	34
4.4.3 음이온성 물질의 계절적 수질변화 .....	36
4.4.4 양이온성 물질의 계절적 수질변화 .....	38
4.5 각 성분별 상관계수 .....	44
4.6 지하수의 해수침투영향 .....	45
4.6.1 염도분류에 따른 주요성분 비교 .....	47
4.6.2 각 성분별 해수기원 .....	49
4.7 GIS를 이용한 항목별 농도 분포 .....	57
4.7.1 과망간산칼륨소비량의 농도 분포 .....	57
4.7.2 암모니아성질소의 농도 분포 .....	58
4.7.3 휘발성유기화합물질의 농도 분포 .....	59
4.7.4 중금속물질의 농도 분포 .....	60
<b>V. 결론 .....</b>	<b>63</b>
감사의 글 .....	65
참 고 문 헌 .....	66

## List of Figures

Fig. 2.1 Passive intrusion .....	9
Fig. 2.1 Active intrusion .....	10
Fig. 3.1 Map of study area and Sampling spot .....	11
Fig. 3.2 Geological distribution map of Nam-gu and Jung-gu of Ulsan metropolitan city .....	14
Fig. 3.3 Conceptual model of utilization of ground water system .....	17
Fig. 3.4 Comparison of monthly precipitation in 2004 and recent 10 years of Ulsan Area .....	18
Fig. 4.1 Piper diagram of groundwater in Nam-gu in May .....	22
Fig. 4.2 Piper diagram of groundwater in Nam-gu in October .....	22
Fig. 4.3 Piper diagram of groundwater in Jung-gu in May .....	23
Fig. 4.4 Piper diagram of groundwater in Jung-gu in October .....	23
Fig. 4.5 Piper diagram of groundwater by usage .....	24
Fig. 4.6 Distribution of Hardness and TDS of groundwater by usage .....	26
Fig. 4.7 Distribution of the Anion and the Cation of groundwater by usage .....	26
Fig. 4.8 Grouping of groundwater by depth of pipe .....	28
Fig. 4.9 Piper diagram of groundwater by the depth of pipe .....	28
Fig. 4.10 Distribution of Hardness by the depth of pipe .....	29
Fig. 4.11 Distribution of Cl by the depth of pipe .....	29
Fig. 4.12 Distribution of NH <sub>4</sub> -N by the depth of pipe .....	30
Fig. 4.13 Distribution of NO <sub>3</sub> -N by the depth of pipe .....	30
Fig. 4.14 Comparison of groundwater level and rainfall in study area .....	31
Fig. 4.15 Seasonal changes of Conductivity in study area .....	33
Fig. 4.16 Seasonal changes of Hardness & TDS in study area .....	34
Fig. 4.17 Seasonal changes of consumption of KMnO <sub>4</sub> in study area .....	36
Fig. 4.18 Distribution of NO <sub>3</sub> -N in study area .....	37
Fig. 4.19 Seasonal changes of Cl in study area .....	38
Fig. 4.20 Composition ratio of cation(Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> ) in May .....	39
Fig. 4.21 Composition ratio of cation(Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> ) in October .....	39
Fig. 4.22 Seasonal distribution of unique spot by Cl of groundwater .....	42

Fig. 4.23 Seasonal Stiff diagram of the unique spot in Nam-gu .....	43
Fig. 4.24 Seasonal Stiff diagram of the unique spot in Jung-gu .....	43
Fig. 4.25 Correlation coefficient of $\text{Cl}^-$ , $\text{Na}^+$ and $\text{SO}_4^{2-}$ .....	44
Fig. 4.26 Distribution of $\text{Cl}^-$ in study area .....	47
Fig. 4.27 Distribution of anion and cation by salinity .....	48
Fig. 4.28 Distribution of organic and inorganic compounds by salinity .....	48
Fig. 4.29 Distribution of TDS by the depth pipe of groundwater .....	50
Fig. 4.30 Distribution of TDS in study area .....	51
Fig. 4.31 Factors that prove the influence of seawater ( $\text{HCO}_3^-/\Sigma\text{anion}$ , $\text{Cl}^-/\Sigma\text{anion}$ ratio) .....	52
Fig. 4.32 Factors that prove the influence of seawater ( $\text{Na}^+/\text{Na}^+\text{+Cl}^-$ , $\text{Cl}^-/\Sigma\text{anion}$ ratio) .....	52
Fig. 4.33 Spots of seawater intrusion among groundwater in study area .....	53
Fig. 4.34 Distribution of $\text{KMnO}_4$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$ by salinity .....	55
Fig. 4.35 Conc. ratio of $\text{Br}^-$ , $\text{Cl}^-$ in study area .....	56
Fig. 4.36 Distribution of consumption of $\text{KMnO}_4$ using GIS .....	58
Fig. 4.37 Distribution of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ using GIS .....	59
Fig. 4.38 Detected spot and distribution of VOCs using GIS .....	60
Fig. 4.39 Relation between $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and Mn in study area .....	61
Fig. 4.40 Distribution of Mn using GIS .....	61

## List of Tables

Table 3.1 Monthly and daily rainfall of ulsan metropolitan city during recent 10 years .....	19
Table 3.2 The Amount used of groundwater by authorization of 7 cities .....	21
Table 4.1 Avg., Max., Min. of the on-the-spot measurement items by study area .....	32
Table 4.2 Avg., Max., Min. of the general items by study area .....	34
Table 4.3 Correlation coefficient of Hardness & TDS with $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , Cl .....	35
Table 4.4 Avg., Max., Min. of the anion by study area .....	36
Table 4.5 Avg., Max., Min. of the cation by study area .....	38
Table 4.6 Seasonal analysis data of groundwater at the unique spot .....	41
Table 4.7 Matrix of correlatin coefficient among chemical species .....	45
Table 4.8 Distribution of salinity by the Conc. of Cl .....	46
Table 4.9 Distribution and percentage of groundwater by salinity .....	46
Table 4.10 Statistics data of items by salinity .....	49
Table 4.11 Correlation coefficient of TDS with other items .....	50
Table 4.12 Conc. consumption of $KMnO_4$ and $NO_3^-$ , $NH_4^+$ of brackish & salt water .....	54
Table 4.13 Conc. of $Br^-$ , Cl and Br/Cl ratio in study area .....	56
Table 4.14 Spot of high Concentration of Boron in study area .....	62

# Hydrochemical characteristics of groundwater around tidal river

Jong-Sung Lee

*Department of Environmental Engineering, Graduate school,  
Pukyong National University*

## Abstract

We examined the water quality of ground water of Ulsan area; the level of contamination by the condition of land-use, the quality changes according to water level and season, and whether sea-water intrude into the ground water of downtown by the Tae-wha river or not.

With a view of area, it showed predominantly Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> type at Nam-gu, and Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl type at Jung-gu. We can infer the influence of Cl-ion from the existence of Ca-Cl type at Jung-gu.

With a view of usage, it showed noticeably Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> type at school, dwelling, and industry zone, Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl, Na-Cl, Ca-Cl types at bathing and commerce zone.

With a view of water level, it showed predominantly Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl type at 150m below, and Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl type at 150m above. And we found out that the concentration of NO<sub>3</sub>-N was higher for both. It was not related to the ground water level.

There were 9 brackish water spots and 6 salt water spots ; six were at Nam-gu, nine were at Jung-gu. We noticed that consumption of KMnO<sub>4</sub> and concentration of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N of brackish and salt water were higher than those of fresh water.

So, the origin of Cl-ion was inferred from complex reason, and there are possibilities that it came from remaining sea-water or leakage of waste water.

## I. 서론

우리나라 지하수 개발은 1970년대부터 본격적으로 추진되었으나, 지하수 개발과 이용에 따른 법적 제도적 장치가 완비되지 못한 상태에서 개발이 무분별하고도 무계획적으로 이루어졌다. 이러한 무분별한 지하수 개발은 수량고갈, 과잉양수에 의한 지반 침하, 해수침입 등 각종 지하수 환경재해를 유발하고 있어 지하수의 체계적이고, 합리적인 관리와 개발에 대한 영향평가가 필수적이다.

또한 최근 산업발달로 인한 지표수의 오염증가와 양적부족으로 인하여 지하수의 중요성은 점점 증가하고 있다. 특히 대도시 지역은 용수 수요의 증가, 다양한 잠재오염원의 존재, 인위적 유출과 유입 등의 요인들에 의해서 지하수가 오염 취약성에 노출되어 있다.

특히, 울산 지역의 지하수 환경은 국내 다른 대도시와 다른 환경을 가지고 있다. 울산은 중화학공업 단지 육성정책에 힘입어 대한민국의 대표적 공업도시로 인식되고 있어 공해도시로 화자되고 있다. 지형학적으로 해안에 위치하고 있어서 지하수의 해수 침입 또는 해수와 지하수의 혼합을 예상할 수 있고 지질학적 측면을 고려하면 울산은 중생대 백악기의 울산층으로 이루어져 있어서 지하수 내의 증발잔류물(TDS)의 농도가 높고 수리전도도가 낮아서 지하수 산출량이 다른 대도시에 비하여 매우 낮다. 또한 울산 지역의 상수원은 절대 부족한 실정으로 갈수기에는 원수를 낙동강에서 공급 받고 있으며, 또한 낙동강 원수는 요즈음 상수원수로서 많은 문제점을 가지고 있어, 정수처리시 점점 고도화되고 있는 실정이다. 또한 지역 주민들의 먹는물에 대한 관심은 날로 증가하고 있어 조금 더 깨끗한 물의 공급을 원하고 있으며, 특히 지하수에 대한 관심과 사용량이 점점 증가하고 있는 실정이다. 그러나 현대사회의 발전으로 인하여 토지사용 형태가 변함으로서 다양한 잠재 오염원이 증가하고 이에 따라 지하수의 오염도 더욱 심화될 것으로 보여진다

따라서 울산광역시의 중심지인 중구, 남구 지역을 대상으로 실시하였으며 이들 지역의 물-암석 반응에 의한 지하수의 수질특성을 살펴보고, 토지이용 형태에 따른 지하수의 오염정도를 파악하고자 하였으며, 지하수위 변화에 따른 지하수의 수질변화와 태화강 중심으로 형성되어 있는 연구 지역의 해수침입 여부 등을 여러 가지 수질항목 및 인자를 이용하여 고찰하였다.

## II. 문헌연구

### 2.1 지하수의 특성

일반적으로 대부분의 지하수는 강우 기원으로서 강수에 의하여 지표에 떨어진 물은 증산과 발산 작용에 의하여 대기로 발산되거나, 지표면을 따라 흐르며 일부는 중력작용에 의하여 지하로 침투하게 된다. 지층 내로 침투된 물은 암석의 공극이나 균열을 따라 이동하거나 충전되며, 수시간 또는 수만년을 지나 다시 지표나 지하로 유출되는 일련의 물 순환과정에 의하여 지하수는 형성된다. 지하수는 두가지 다른 영역에서 생겨난다. 지표 바로 아래 부분으로서 물과 공기를 포함하고 있는 불포화대(Unsaturated Zone)와 불포화대 아래는 모든 공극이 물로 가득한 포화대(Saturated Zone)로 구분할 수 있다. 포화대의 물은 정흐나 샘을 통한 지하수 이용이 가능하며, 진정한 의미의 지하수라 할 수 있다. 포화대내로의 지하수 함양은 지표상의 물이 불포화대를 지나 지하수 심부로 침투하여 암반이나 불투수층을 만나면 고이게 되며 이것이 바로 지하수가 되는 것이다. 흙, 모래, 자갈, 암석조각 등이 섞인 흙을 충전층이라 부르며, 충전층속에서 불투수층위에 흐르는 지하수와 암반과 암반사이에 갈라진 틈에 고여 있거나 흐르는 물을 생각할 수 있다. 충전층속의 지하수는 대기의 물과 순환이 자주 일어나고 있으나 암반 사이의 물은 만들어 지는 시간도 길고 순환도 잘 되지 않는다. 따라서 충전층속의 지하수는 강수와 밀접한 관계를 가지게 되며, 생성 시간도 짧은 것이 특징이다. 이와 반대로 암반과 암반사이의 지하수는 충전층 지하수와 반대의 양상을 보인다. 따라서 충전층 지하수가 암반 지하수보다 오염의 가능성이 매우 높음을 알 수 있다. 또한 기반암의 종류를 살펴보면 대체로 3가지로 나눌 수 있다. 마그마가 식어서 굳어진 암석, 입자가 작은 흙, 모래, 자갈 등이 쌓여서 굳어진 암석, 열과 동력을 받아 굳어진 암석 등이 있다. 암반은 반드시 균열된 층이 만들어지고, 가로와 세로 등으로 미세하게 금이 가고 틈이 생기게 되어 있으며, 이곳을 통하여 암반과 암반사이의 지하수가 형성되는 것이다. 따라서 암반층의 물이 화성암, 퇴적암, 변성암이냐에 따라 지하수의 수질이 달라지게 되어 있다. 대체로 퇴적암인 경우 우리나라에는 석회암이 많은데 이곳에서 생성되는 암반수는 석회질성분을 다량 함유하고 있는 것으로 알려져 있다.

## 2.2 지질별 지하수 부존 및 산출 특성

지하수는 지층내에 형성된 공간내에 저류되는데, 이와 같은 공간을 공극이라 하며 이러한 공극의 체적과 수리적 특성은 지층의 구조, 조직 등에 의해 결정되어진다.

공극은 성인에 따라 1차 공극과 2차 공극으로 구분되어진다. 1차 공극은 지층의 형성과 동시에 생긴 것으로서 미고결퇴적물의 공극, 현무암 등과 같은 화산암에 생긴 기공, 용암튜브, 냉각절리이고, 2차 공극은 지층 형성후에 발달한 단층, 절리 등의 단열구조와 탄산염암의 용해공동이 해당되어진다.

퇴적기원의 1차 공극은 퇴적물의 이웃한 입자간의 공간을 말하며, 퇴적 당시에 형성된 것으로서 입자의 분급도와 원마도가 양호하면 공극률이 상대적으로 커 지하수 부존에 양호한 조건을 형성한다. 그리고 화성기원의 1차 공극은 화성암 형성시 만들어진 공극으로서 상당 규모의 기공과 용암튜브등이 수직절리에 의해 서로 연결되어 나타나기 때문에 지하수 유동과 저류에 매우 양호한 조건을 형성한다.

한편 절리 및 단층과 같은 2차 공극은 구조작용에 의하여 형성된 것으로, 이들의 간격, 연속성, 심도, 교차점 그리고 틈새 등은 지하수 저류에 절대적으로 영향을 미친다. 또한 2차 공극은 우리나라 분포암석의 대부분을 차지하는 결정질암에서 매우 중요한 지하수 저류지 역할을 하고 있다. 용해공동과 같은 2차 공극은 화성암과 변성암에서 물과 광물의 화학반응에 의하여 형성된 공동과 석회암내에 형성된 용해성 공동으로 구분된다. 특히, 석회암 내에 발달된 용해공동은 층리 또는 단열구조를 따라 형성된다. 지하수는 지각을 이루는 모든 물질로부터 산출되어진다. 지각물질은 충적층, 봉적층 및 암석의 풍화대와 같은 다공질 매체로서 친층지하수를 형성하는 미고결물질과 암반이 화성암, 퇴적암 및 변성암으로 구성되어 있는 고결물질로 구성된다.

각 지층별 지하수 부존 및 산출 특성은 다음과 같다.

- 1) 미고결퇴적물 : 계곡 또는 하도에 퇴적된 충적층은 자갈, 모래, 점토 등으로 구성되어 있어 공극률과 투수성이 양호하다. 지표수나 강우가 직접 유입되므로써 상당량의 지하수가 부존되어 있는 대수층을 이룬다. 평야에 퇴적된 충적층은 대체로 점토질이 많아 투수성이 불량한 경우가 많으나 부분적으로 투수성이 양호한 대수층을 이룬다.
- 2) 풍화대 : 기반암의 상부에 형성되는 풍화대는 지표수로부터의 직접 충전이 일어나 중요한 대수층을 이룬다. 기반암의 구성 입자가 굵고 장석질이 적은 산성 관입화

성암인 경우에는 깊은 풍화대가 발달하게 되며 점토질이 적어 투수성이 양호한 대수층이 형성된다. 반면 기반암이 염기성 화성암, 세립 퇴적암, 편암, 석회암등인 경우 형성된 풍화대는 점토질을 많이 함유하게 되어 투수성이 낮아지고 대수층 형성이 어렵다.

- 3) 결정질암 : 결정질암은 대부분의 화성암 및 변성암을 포함한다. 화산암을 제외한 대부분의 암석에서는 단층, 절리 등 단열구조에 의한 2차 공극 대수층이 형성된다.
- 4) 화산암 : 현무암과 안산암에는 1차 공극으로서 각각 기공 및 용암튜브와 냉각절리가 발달되어 양호한 대수층이 발달되어 있다.
- 5) 퇴적암 : 석회암, 백운암 및 석고와 같은 퇴적 탄산염암은 용해성이 높아 균열이나 간극을 따라 용해가 수 센티미터에서 수백 미터 규모의 용해공동이 발달되어 있어 매우 양호한 대수층을 형성한다.

## 2.3 지하수의 오염

지하수 오염원은 크게 점 오염원과 비 점오염원으로 나눌 수 있다. 각종 오염원들이 지하수를 오염시킨 흔적들은 특히 소규모 매립지를 복토하고 이를 아파트 단지로 사용하고 있는 곳에서 현저하다. 하수관로의 누수(약10%)로 인한 지하수 오염은 정량적으로 파악하기는 어렵지만 도시 전역에 걸쳐 오염원으로 작용할 수 있으며, 이러한 경우에는 비 점오염원으로 취급된다.

지하수의 오염자로서는 크게 농지, 산업폐수, 광산폐수, 분뇨처리, 제조업체, 주유소 및 지하수 폐공 등을 들 수 있다.

농지지역에서는 농약 및 비료등에 의해 수질이 오염되고, 과거 농지였다가 지금은 주택지나 공장 등의 용지로 사용되는 지역에서는 질산성질소에 의한 오염이 빈번하게 발생하고 있다.

이외에도 10여 m 깊이에 설치된 공장 및 주유소 등의 노후화된 유류탱크에서 누출된 기름 찌꺼기는 비가 오면 기름이 녹아 지하수를 오염시킨다. 환경부는 1996년부터 3년간 전국 16개 시도의 주유소와 지하유류 저장탱크, 석유화학제품 취급업체 주변 땅의 오염도를 조사한 결과 172곳이 토양 오염우려기준을 초과한 것으로 나타났다.

미국 캘리포니아주의 실리콘밸리는 트리클로로에틸렌의 오염이 토양 및 지하수에서

심각한 수준으로 나타나 이와 관련된 회사를 상대로 소송을 제기하여 사람들의 이목을 끌기도 하였다.

우리나라의 경우에도 이와 같이 지하수의 오염으로 인한 사례들은 모든 대도시에서 발생하고 있으며 향후 지속적으로 제기될 것으로 보여진다.

따라서 지하수의 대표적인 수질항목들의 기준 및 특성, 오염경로 등을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.3.1 심미적 영향물질에 관한 항목

#### 1) 과망간산칼륨소비량 (기준 : 10mg/L이하)

과망간산칼륨소비량이란 물 속의 피산화성 물질에 의해서 소비되는 과망간산칼륨의 양을 말하며, 분뇨나 하수 또는 공장배출수 등이 혼입되었을 때 증가한다. 피산화물은 주로 유기물인데 종류에 따라 산화, 분해를 받는 정도가 다르며, 환원성 무기물이 기여하는 량도 포함되어 있다.

#### 2) 염소이온(기준 : 250mg/L이하)

염소는 단일 원소로서 음이온이 되는 중요한 원소로 많은 원소와 결합하여 염화물을 만든다. 염소이온은 지층을 형성하는 토양이나 암석에 흔적 정도로 함유되어 있으며 녹기 쉬운 성질을 가지고 있으므로, 지표수나 지하수에는 항상 약간의 염소이온을 함유하고 있다. 자연수에는 항상 약간의 염소이온을 함유하고 있으나 이는 대개 지질에서 유래된 것이며, 염소이온은 가정하수, 공장폐수나 분뇨 같은 것이 처리되어 물에 혼입되었을 때 증가할 때가 많다.

#### 3) 황산이온(기준 : 200mg/L이하)

자연계에는 매우 많은 종류의 금속원소의 황산염이 광물성분으로서 존재하며, 해수, 광천수 등에도 광범위하게 함유되어 있다. 황산염은 비료, 화학약품, 염료, 유리, 종이, 살충제, 채광, 도금산업 등에 쓰이며, 이들 공장 배출수에 의해 물 속에 배출되기도 한다.

#### 4) 수소이온농도(기준 : 5.8~8.5)

pH는 수소이온 활동성의 상용로그의 마이너스 값이다. 자연수의 pH는 산과 염기의

평형에 대한 측정이며 이산화탄소-중탄산염-탄산염 평형 시스템에 의해 조절된다. 또한 일반적으로 pH값이 다른 영향을 받지 않는 한 안정한 상태이지만 강우, 지질에 영향을 민감하게 받으며, 공장폐수와 오염물질의 혼입 및 플랑크톤의 발생 등에도 영향을 받는다. 금속산업 폐수는 pH를 낮게 하며, 석회 공장 등은 pH를 높게 한다.

### 2.3.2 유해영향 무기물질에 관한 항목

#### 1) 암모니아성질소(기준 : 0.5mg/L이하)

수중에 용해되어 있는 암모니아염을 질소량으로 나타낸 것이며, 가까운 시점에서의 오염지표가 된다. 암모니아성 질소 자체는 위생상 해가 없지만, 물 속에 존재하는 이유는 다양하기 때문에 위생학적 의의도 다르며, 지하수에서는 논이나 밭의 부식토, 비료, 분뇨 등에서 유입되어 검출되기도 한다.

#### 2) 질산성질소(기준 : 10mg/L이하)

비료의 사용, 산업폐기물의 유입, 생활하수, 축산폐수, 분뇨 등이 질산성질소의 오염원이 되며, 메트헤모글로빈혈증을 유발시킬 수 있다. 질산성질소 농도가 낮은 수질이 반드시 유기물이 적은 깨끗한 물이라고 할 수는 없지만 수질 청정도와 상관성이 높다.

#### 3) 비소(기준 : 0.05mg/L이하)

지표면에서 광범위하게 분포하고 있으며 가장 흔하게 황화비소나 금속비산염 그리고 비화물로서 존재한다. 원소로서의 비소는 불용성이며, 독성도 약하지만 비소화합물은 매우 유독하다. 무기물이나 원광석의 용해, 관상, 염료, 제화 등의 공업배출수, 그리고 농약 등을 통해 물과 접하게 되며, 급성중독의 경우 복통, 설사, 근육경련, 피진홍반 증상이 나타나며, 만성중독의 경우 말초혈관병, 피부암 등이 나타난다.

#### 4) 카드뮴(기준 : 0.002mg/L이하)

아연광은 모두 소량의 카드뮴을 함유하고 있으며, 보통 카드뮴은 아연정제의 부산물로서 만들어진다. 일반환경에서의 카드뮴 농도는 낮으며 오염되지 않은 자연수계의 카드뮴 농도는 보통  $1\mu\text{g/L}$ 이다. 합금, 도금, 안료제조공장 등의 폐수 및 카드뮴을 함유한 산업폐기물의 방출 등이 오염원이 되며 위장장해, 신장장해 등을 일으킨다.

### 5) 불소(기준 : 1.5mg/L이하)

불소는 상온에서는 기체 원소이지만, 강한 반응성으로 천연에서는 단체로는 존재하지 않고, 화합물로서 존재한다. 지하수의 불소이온농도는 물이 관통하는 암석종류에 따라 다양하나 일반적으로 10mg/L를 초과하지 않는다. 자연계에서 널리 분포되어 있으며, 모든 것에 미량 함유되어 있지만 자원으로는 형석, 빙정석, 인회석 등으로 산출된다. 불소를 배출하는 공업은 알루미늄제조공업, 인산비료제조, 유리, 도자기제조공업, 농약 제조공업 등이 있다.

## 2.3.3 유해영향 유기물질에 관한 항목

### 1) 트리클로로에틸렌(기준 : 0.03mg/L이하)

트리클로로에틸렌은 합성화학물질로서 자연계에는 존재하지 않으며, 금속부품의 탈지를 위한 지방, 왁스, 기름, 고무, 페인트 등에 대한 용제로 주로 사용한다. 지표수의 경우 트리클로로에틸렌은 수일부터 수주사이에 대기로 휘산되어 분해되며, 토양에서는 분해가 느리고, 쉽게 지하수로 이동한다. 지하수에서 트리클로로에틸렌은 수개월부터 수년간 잔류한다.

### 2) 테트라클로로에틸렌(기준 : 0.01mg/L이하)

테트라클로로에틸렌은 합성화학물질로서 자연계에는 존재하지 않는다. 주 용도는 유기물질의 용제, 드라이클리닝 용제, 금속부품의 탈지세정, 섬유공업 등이다. 지표수인 경우 테트라클로로에틸렌이 제거되는 주요한 프로세스는 대기중으로 휘산되는 것이다. 지상인 경우 테트라클로로에틸렌은 토양으로 이행하기 쉬우며 지하수로 이동한다. 지하수에서는 수개월부터 수년간에 걸쳐 잔류한다.

### 3) 1,1-디클로로에틸렌(기준 : 0.03mg/L이하)

1,1-디클로로에틸렌은 합성물질로서 자연계에는 존재하지 않으며, 용도는 염화비닐렌 수지의 제조원료 및 화학중간체로 사용되며, 페인트 용매와 탈지방지, 약품의 세척에도 쓰인다. 환경내 방출은 주로 제조사와 폴리머제조의 원료로서 사용될 때 일어나며 지하수에서는 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌 등과 공존하는 것으로 알려져

있다.

#### 4) 사염화탄소(기준 : 0.002mg/L이하)

염소계 유기용제로서 널리 사용되고 있지만 독성이 강하기 때문에 용제로서의 사용량은 적다. 사염화탄소는 합성화학물질로서 자연계에는 존재하지 않는다.

용도는 클로로플루오르카본 제조, 금속세척 용제, 도료 및 플라스틱 제조, 훈증살균제 등이다. 지하수 중에 존재하는 사염화탄소는 오염에 의해 혼입된 것이라고 생각하는 것이 타당하다.

## 2.4 해수침투(Sea water intrusion)

해수침투는 증발산량에 의한 지하수면의 변화, 조석에 의한 해수면의 변화, 지구온난화로 인한 해수면 상승 등과 같은 자연적인 요인과 연안지역에서 다량의 지하수 사용에 의한 지하수위 변화 및 지하수의 고갈 등과 같은 인위적 요인에 의해 담수와 해수가 혼재하는 전이대의 평행상태가 파괴되어 발생한다. 이와 같은 해수침투는 바다와 접한 해안 지방에서 주로 발생하는 자연재해로서, 대표적인 피해로는 해수침투에 따른 연안지역에서 토양의 염분화에 의한 농작물 수확 감소, 연안지역 지하수 염분화에 따른 생활, 공업 그리고 농업용수의 부족 등이 있다. 지하수의 개발이 불가능한 경우, 내륙에서 연안지역까지 각종 용수공급을 위한 관개로 시설공사에 막대한 비용과 시간이 소요되며, 일단 해수침투가 일어난 지역은 복구하는데 엄청난 비용과 복구기간이 소요된다.

### 2.4.1 담수와 염수의 관계

염수는 용존물질이 많이 포함되어 담수보다 밀도가 큰 물이고 내륙지역의 광화수, 초생수(지층의 생성당시에 포획된 물), 해안, 도서지역의 해수로 구분할 수 있다. 일반적으로 담수는 용해물질 함유량이 일정한 증가에 의해 점차적으로 염수로 변화한다. 담수와 염수의 경계면에는 염도의 점이적 변화대 즉, 분산대가 형성되어 있어서 지하수

의 유동은 담수는 해안선을 향하여 상향하고 염수는 순환류의 형태를 보인다.

## 2.4.2 해수침투의 종류

### 1) 수동적 침투(passive intrusion)

일부 담수가 대수층으로부터 방향이 전환되는 경우에 발생하며 경계는 새로운 유출조건에서 평행에 도달할 때까지 육지를 향하여 느리게 이동한다(Fetter, 1994).

수동적 침투는 가뭄 등에 의한 함양량 감소, 지하수의 소량 양수 등으로 인해 발생할 수 있다.

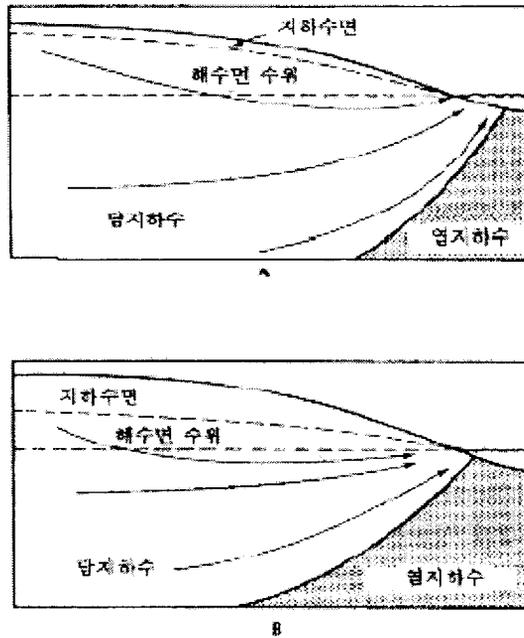


Fig. 2.1 Passive intrusion

### 2) 능동적 침투(active intrusion)

수리경사가 역전되고 담수가 염수-담수 경계에서 상당히 멀어지게 되는 심각한 결과를 가져온다. 이러한 현상은 주로 과잉양수로 지하수면이 해수면이하로 낮아지면서

발생한다. 경계부는 수동적 해수침입으로 매우 빠르게 이동하며, 수리경사가 낮은 지점에 도달하기까지 정지하지 않는다.

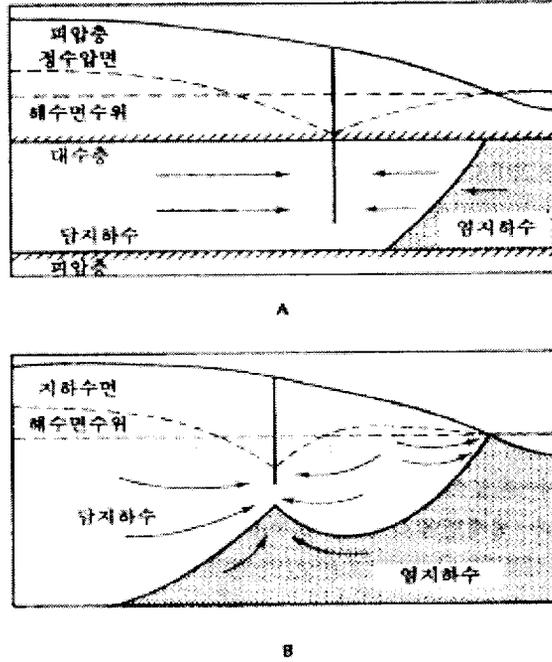


Fig. 2.2 Active intrusion

### Ⅲ. 재료 및 방법

#### 3.1 연구대상지역

울산광역시를 가로질러 흐르는 태화강을 중심으로 연구 지역(남구, 중구)이 나누어져 있으며 남구 지역은 석유화학공단 등 공업지역이 넓게 분포하여 있고 중구 지역은 상권이 발달하여 다양한 잠재오염원이 골고루 분포하고 있다. 또한 연구 지역을 서-동으로 흐르고 있는 태화강을 중심으로 남-북으로 행정구역을 나누고 있다. 태화강은 바닷물의 유입이 자유로운 감조하천으로 지하수의 해수침입 영향을 조사하기에 아주 적당하며, 또한 공업지역 및 상업지역이 골고루 분포되어 있어 다양한 오염원들로부터 노출되어 있다. 연구 대상지점은 남구 35개소, 중구 35개소 총 70개소로 모든 지역이 골고루 분포할 수 있도록 지점 선정에 충실을 기하였고, 연구 지역의 지하수를 지하수위 변동에 따른 수질의 특성을 파악하고자 5월과 10월로 각각 나누어 시료를 채수하였다.



Fig. 3.10 Map of study area and sampling spot

## 3.2 분석 항목 및 방법

지하수의 오염여부 및 수질특성을 파악하기 위하여 먹는물 검사항목중 미생물을 제외한 모든 항목을 분석하였고 현장에서 측정이 가능한 항목(pH, 수온, 전기전도도, 알칼리도)들은 현장에서 측정하였으며 실험실에서 분석할 항목들은 각각의 시험 방법에 따라 시료 보존 및 전처리를 실시하였다. 음이온성물질(황산이온, 질산성질소, 염소이온, 불소, 브롬)은 이온크로마토그래피를 사용하여 분석하였으며, 양이온물질(Mg, K, Na, Ca, Si)과 중금속(아연 등 11개항목)은 유도결합프라즈마발광광도계(ICP-CID), 휘발성유기화합물질(Benzene 등 10개항목)은 가스크로마토그래피(GC/ECD,FID)을 사용하여 분석하였다. 나머지 일반 항목들은 먹는물공정시험방법에 준하여 분석을 실시하였다.

## 3.3 지질조사

### 3.3.1 지형

본 연구지역은 경주와 울산 사이에 북북서-남남동 방향의 울산단층대 구조곡이 발달하고 있으며, 이 구조곡의 동편으로는 불국사 산맥이 북북서-남남동 방향으로 달리고 있다. 산계는 신흥재 북쪽의 511m 고지에서 이 고개 남쪽의 동대산(443.9m), 무룡산(452.3m), 염포산(173.7m)을 연결하는 평균고도 300m 내외이고 산계가 구조곡의 이화-화정-약수-냉천-신천-호계-송정-효문-염포-장생포-울산만을 연결하는 충적지대와 나란히 달리고 있다. 한편 울산단층대의 서쪽은 북쪽으로부터 치술령(765.4m), 옥너봉(416m)에서 갈라져 나온 평균고도 100m 내외의 구룡성 산지를 이루고 있다.

수계의 경우 연양에서 시작하여 서에서 동으로 흐르는 태화강이 있고 울산단층곡을 따라 북북서-남남동 내지 남-북 방향으로 북에서 남으로 흐르는 동천이 울산시 남구 삼산동 부근에서 합류하여 곧 울산만으로 유입한다. 이 외에 북북서-남남동 방향의 산계를 분수령으로 수지상의 소하천들이 동측에서는 동해로 직접 유입하며, 서측에서는 동천으로 직접 유입된다. 태화강으로도 남-북방향의 소하천들이 유입된다.

태화강은 유량이 많지 않으나 비교적 일정한 유량을 보이며, 동천의 경우 유량이 풍

부하지 못하여 건기에는 건조하다. 이들 하천은 유입되는 토사로 하상의 높이를 매년 증가시키고 있다

### 3.3.2 지 질

경상분지의 동남부 해안에 위치하는 울산광역시 일대는 경상누층군 하양층군에 속하는 백악기 울산층과 이를 관입 또는 분출한 백악기 유천층군의 유문대사이트, 그리고 백악기 말 내지 제3기초의 불국사화강암류인 흑운모화강암, 각섬석화강암, 규장반암, 화강반암, 규장암, 산성 및 염기성 암맥으로 구성되어 있으며, 이를 제3기의 당사 안산암과 정자역암이 관입 피복하고 있다.

#### 1) 울산층

본 층은 이 지역에 분포된 경상계 지층 중 최하부에 속하는 지층으로 도폭 남부 및 동부 일대에 광범위하게 분포되며 주로 적색 세일 사암, 진흙(泥)회암 회색~회녹색 세일 사암 등으로 구성되며 여기에 응회암질 사암과 불연속성의 약암 등을 협재하고 있다. 그리고 이들 계층이 불국사통이 관입된 심성화성암류에 영향을 받아 관입 녹변부는 호온벨스화 되어 있고, 본 층의 비교적 하부에는 각악암이 협재하고 있다. 이 층은 화석의 산출이 없어 정확한 시대 비교는 불가능하나, 암상 등으로 보아 함안층에 대비되는 것으로 추정하였다.

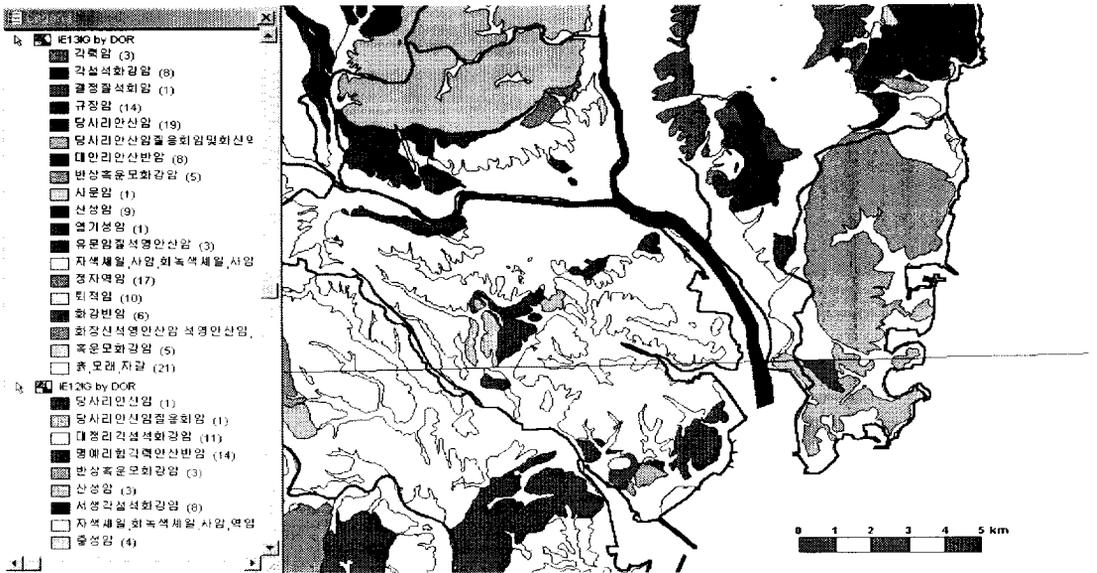


Fig. 3.11 Geological distribution map of Nam-gu & jung-gu of ulsan metropolitan city

## 2) 흑운모 화강암

울산시 범서읍 동부, 경주시 외동읍 동부, 농소, 강동면 북부 등에 광범위하게 분포한다. 이 암은 울산층을 관입하고 부분적으로 적색~회색 세일을 변질시켜 호운펠스화 시키고 있다. 유곡동과 서사리 부근에서는 규장암에 의해 관입 당하고 병영동 서부에서는 정자역암에 의해 피복된다. 주요 구성광물은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모, 녹니암과 소량의 각섬석 및 철분으로 구성되어 있다.

## 3) 각섬석 화강암

울산시 범서읍과 월성군 외동읍 일대에 분포하고 있다. 울산층을 관입 및 변질시켜 호운펠스화 시키고 있다. 흑운모 화강암과 인접하여 분포하는 각섬석 화강암은 동일암장이 암장분화작용에 의한 흑운모 화강암의 연변상으로, 이들 두 암석의 경계는 명확하지 않고 부분적으로 흑운모 화강암 중에 각섬석 화강암이 산재되어 있음을 볼 수 있다. 외동읍 부근에서는 각섬석의 양이 증가되어 회록색을 띠고, 범서읍 부근에서는 각섬석의 양이 감소되면서 흑운모를 함유하고 있다. 이 암은 각섬석의 양이 많게 되면 회록색을 띠나, 일반적으로 회색이며, 중립질 내지 세립질로 구성광물은 석영, 정

장석, 각섬석과 약간의 흑운모 및 백운모를 함유한다.

#### 4) 화강반암

경주시 양남면과 강동면 북부에 소규모로 분포하는 반심성암이다. 울산층과 흑운모 화강암을 각각 관입하고, 당사응회암과 정자역암에 의해 부정합으로 피복되어 있다. 이 암은 담홍색을 띠며, 세립질의 석기에 석영과 장석의 반정을 가지며, 이 암체의 연변부는 규장질암으로 변이한다.

#### 5) 규장암

이 암은 울산시 태화동에서 북서-남동 방향으로 범서읍 서사리에 이르기까지, 울산시 정자동, 효문동, 염포동에 각각 분포한다. 울산시 서부에서 이 암은 울산층과 흑운모 화강암을 각각 관입하고 있으며, 서사리 부근에서는 울산층의 일부를 포획하고 있다. 효문동 부근에서는 울산층을 관입하고, 당사 안산암에 의해 관입 당하며, 정자역암에 의해 피복된다. 이 암은 석영, 사장석, 백운모와 소량의 흑운모, 황철석으로 구성되어 있다.

#### 6) 맥암류

울산시 일원에 발달하는 맥암류는 산성암맥과 염기성암맥으로 구분되며 이들은 모두 울산층을 관입하고 있다. 산성암맥은 대부분 규장암맥으로 울산시 북동부에 발달하는 호온펠스층을 관입하고 있다. 암색은 유백색으로 풍화된 면에서는 황갈색을 띠며, 세립질의 석영과 장석으로 구성되어 있다.

#### 7) 당사안산암류

안산암류는 안산암과 안산암질응회암으로 구성되어 있다. 울산시 남구 함월산 부근에서는 안산암이 울산층을 관입하고, 안산암질응회암이 이를 피복하고 있다. 효문동 부근에서는 울산층과 규장암을 관입하고, 정자역암에 의해 부정합으로 피복된다. 동부지역인 강동면 일대에서는 울산층과 화강반암을 관입 분포한다. 안산암은 관입과 분출의 산상을 보이며, 암회색 내지 회녹색, 그리고 회갈색을 띠며 소립의 장석과 휘석의 반정을 가진다. 안산암질응회암은 안산암과 항상 수반하여 산출되며, 안산암과 울산층 등을 피복하고, 정자역암에 의해 부정합으로 피복된다. 이 암은 회색 또는 회녹

색을 띠며 화산재와 각력들로 고결되어 있고, 층리가 뚜렷하지 않고 안산암과 울산층의 적색 세일 등이 대부분인 각력을 보인다. 당사안산암질 화산암류는 유상구조가 잘 발달하고 반상조직을 가지는 안산암과 이에 수반된 안산암질 응회암 또는 집괴암으로 구성되며, 정자리 일대의 제3기분지의 최하위 지층을 이루고 있다.

#### 8) 제 4기층

북북서-남남서 방향으로 달리는 울산단층대의 산록에는 2~10m 두께의 산록선상지 퇴적층이 분포하고 있다. 산록퇴적층은 둥근 역들을 포함한 사질토양으로 구성되어 있으며 적갈색 내지는 황갈색을 띠고 있다. 동해안을 따라서는 여러 조의 단구면이 발달되어 있다. 이들 단구면을 이루는 단구퇴적층은 주로 원마도가 양호한 잔자갈 역들로 구성되어 있다. 동천강과 태화강 유역 일대는 하성퇴적물층이 발달하며, 이들은 점토사와 역으로 구성되어 있다.

### 3.3.3 지질구조

울산시 일원에서 가장 뚜렷한 단층 구조는 울산단층대와 일관단층대이다. 이들은 태화강에 거의 평행한 서북서-동남동 방향의 단열군과 울산단층대의 동측에 발달하는 제3기 구조분지와는 구분되며, 울산만에 의해 구조구로 구분될 수 있다. 즉 북부의 울산단층대 구조구와 남쪽의 일관단층대 구조구, 그리고 동쪽의 제3기분지 구조구 등으로 구분할 수 있다. 절리의 경우는 북부에서는 울산단층대를 기준으로 서편절리구와 동편 절리구로 구분이 가능하고, 태화강과 울산만의 남쪽은 또 하나의 절리구로 구분할 수 있다. 이러한 절리구의 암상 분포는 물론 단층운동과 관련한 서로 상이한 응력과 변형과정을 겪었을 것으로 판단되기 때문에, 일견 그 구획의 필요성이 있을 것으로 보인다. 이러한 절리구는 단층구와는 달리 지하수의 중요한 변수인 지표수의 구역과 밀접한 상관성을 가지기도 하므로 구분이 필요할 것으로 보인다.

### 3.4 수문조사

도시화에 따른 토지이용의 변화는 불가피하게 기존 지하수의 충전 기작과 지하수의 수질에 영향을 미치는 것으로 보고되어 왔다. 따라서 아스팔트 도로, 지붕, 하수도의

우수관거 등과 같은 토지 이용에 변화가 생기면 지하수의 유입경로 및 유입량이 변한다. Lawrence and Cheney(1996)는 상수도과 하수도의 누수가 지하수 충전에 가장 중요한 요소라고 하였으며, 도시화에 따른 토지이용의 변화는 기존 지하수 충전기작과 지하수 수질에 영향을 미치며, 토지이용의 변화로는 아스팔트 도로, 지붕, 하수도의 우수관거 등에 의해서 강우가 지하수로 유입되기보다는 강으로 직접 유출하게 되는 경우가 증가하고 있다. Fig. 3.3은 지하수의 수리시스템을 보여주는 개념적 모델이다.

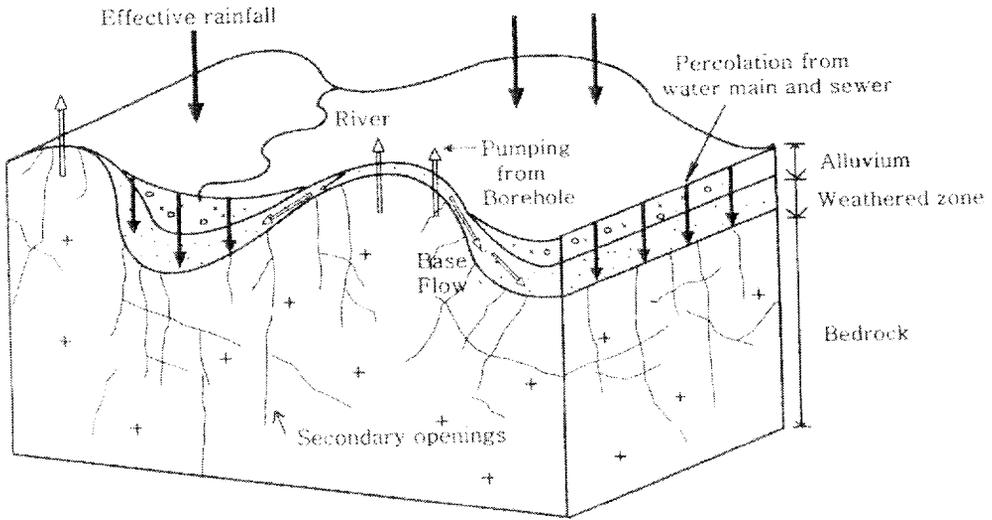


Fig. 12.3 Conceptual model of utilization of groundwater system

### 3.4.1 지하수 유입량

토지이용의 변화에 따른 지하수의 충전기작이 변하고 있지만 대부분 지역의 지하수 유입량은 크게 두가지 형태로 나눌 수 있는데 첫째 강우로부터 유입과 둘째 상,하수도의 누수에 의한 유입을 들 수 있다.

#### 1) 강우로부터의 유입량

강수량은 한 지역의 물순환 체계에 있어서 가장 중요한 요소로서, 연구 지역의 강수량을 보면 울산 기상관측소의 최근 10년(1994~2003)간의 기상관측 자료(Table 1.)에 의하면 연 평균 강수량은 1280.9mm로 나타났고, 연중 최다 월 강수량은 8월의 238.7mm이고 최소는 12월의 19.8mm이다. 강수량의 경우 하절기(6월~9월)에 집중되는 현상을 보이고 있다.

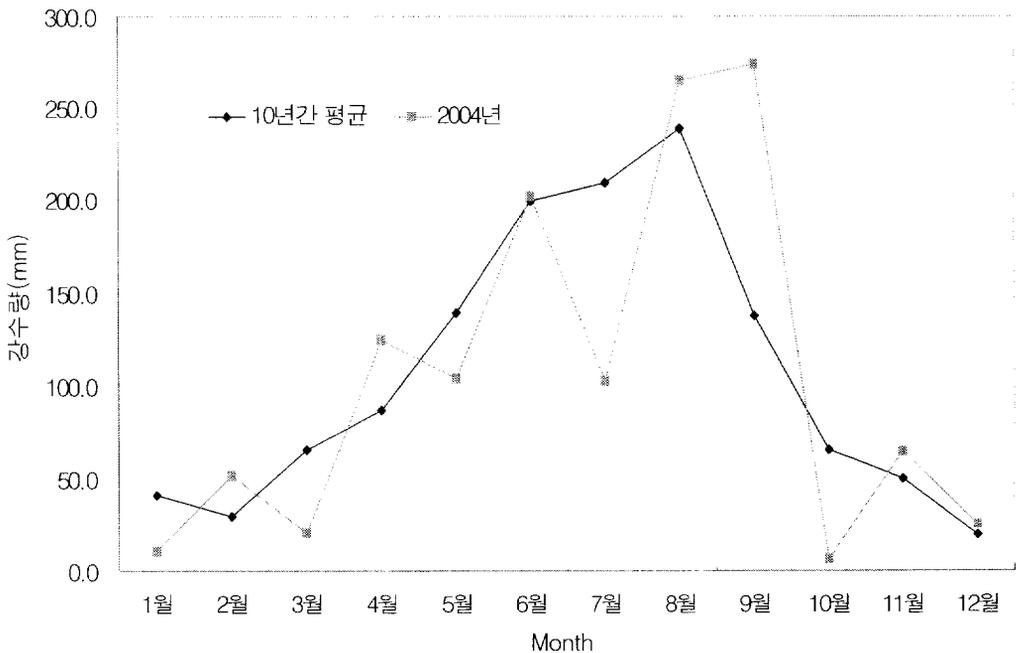


Fig. 3.13 Comparison of monthly rainfall in 2004 and recent 10 years of ulsan area

연구지역의 10년간(1994~2003) 월별 강수량과 2004년 월별 강수량을 비교하여 보면

비슷한 양상을 보여주고 있으며 2004년의 경우 6, 8, 9월에 많은 강우량을 보이고 있으며 7월에는 예년과 다르게 적은 비가 내린 것으로 나타났다. 또한 10월에는 연구기간중 가장 적은 비가 내린 것으로 나타났다.

Table 3.1 Monthly and daily rainfall of ulsan metropolitan city during recent 10 years

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1일	0.8	1.1	1.1	5.6	3.3	0.0	4.7	9.7	0.2	2.7	7.2	0.0
2일	0.0	0.0	0.3	4.2	3.9	4.7	14.9	4.7	1.1	0.5	0.9	0.0
3일	0.7	0.0	0.5	0.5	8.9	8.6	7.6	4.7	3.3	0.1	0.0	3.1
4일	0.1	0.0	0.5	0.5	4.7	0.3	4.3	20.4	0.0	0.0	0.1	2.6
5일	0.9	0.0	1.5	2.2	0.1	1.6	25.9	4.4	5.9	0.0	1.2	0.1
6일	0.1	0.0	2.1	2.7	1.0	0.1	8.1	2.8	3.1	4.6	0.0	4.9
7일	2.7	0.0	6.0	1.1	17.0	5.3	5.5	5.6	2.7	0.6	0.5	1.2
8일	2.9	2.2	0.0	1.1	1.3	4.6	1.6	4.6	1.1	2.0	1.6	2.0
9일	1.1	0.0	2.5	4.1	0.1	2.5	1.4	15.2	4.1	4.7	0.3	0.6
10일	0.0	0.0	1.5	2.5	1.7	1.4	0.2	19.3	6.5	0.8	0.2	0.0
11일	0.5	2.4	1.5	2.0	4.2	0.3	17.0	11.5	2.0	9.0	2.1	0.8
12일	0.8	2.4	0.6	8.8	4.6	5.9	2.1	2.0	10.4	9.3	3.0	1.0
13일	0.1	0.0	0.1	0.7	6.1	7.0	8.3	7.0	6.5	1.0	0.0	0.2
14일	4.4	0.7	5.8	1.5	8.5	0.4	2.0	4.7	6.3	1.8	1.3	0.0
15일	7.6	0.3	7.3	0.3	4.1	0.0	12.7	4.2	6.4	4.4	0.5	0.0
16일	2.4	0.0	7.3	3.3	6.7	2.2	11.0	6.0	14.7	2.5	1.2	0.9
17일	2.4	0.1	0.9	1.7	0.7	13.6	1.2	13.5	6.2	0.3	0.0	0.8
18일	0.2	0.1	3.0	3.9	2.6	15.1	8.6	16.3	1.3	0.0	3.0	0.0
19일	1.6	0.7	4.4	5.7	1.3	20.3	8.7	2.1	1.4	2.8	0.8	0.0
20일	2.0	4.4	0.2	1.4	2.2	3.0	0.5	6.2	2.5	4.1	4.2	0.1
21일	0.1	0.8	4.4	3.0	2.1	0.1	6.9	1.6	2.7	3.6	2.2	0.1
22일	2.8	2.3	0.1	3.5	1.3	2.7	8.5	1.1	1.3	1.2	1.5	0.5
23일	1.9	2.3	0.3	9.6	0.8	8.1	6.0	5.3	7.9	1.4	0.1	0.5
24일	0.4	4.9	1.8	0.6	4.9	21.8	3.8	0.4	11.1	0.3	0.0	0.0
25일	0.1	0.6	0.5	4.5	14.7	25.2	5.5	9.5	0.7	0.0	8.0	0.6
26일	3.0	0.7	0.8	0.3	9.4	15.2	13.5	13.4	0.5	0.0	0.4	0.0
27일	0.6	0.4	1.5	0.5	1.6	16.4	2.6	3.9	0.1	0.8	2.5	0.0
28일	0.1	3.1	3.4	0.1	2.0	5.0	2.0	2.6	0.3	3.0	3.9	0.0
29일	0.0	0.0	3.6	4.9	1.1	4.3	6.7	0.0	7.7	0.1	3.0	0.0
30일	0.0	0.0	2.0	5.7	15.8	3.6	5.5	8.2	19.6	0.0	0.2	0.0
31일	0.9	0.0	0.2	0.0	2.0	0.0	2.2	28.0	0.0	4.6	0.0	0.0
합계	41.1	29.6	65.4	86.4	138.7	199.1	209.3	238.7	137.4	65.8	49.7	19.8

강수량이 지하수로 유입되는 유효 침투량은 다른 문헌에서 보고된 바에 의하면 도시지역의 지하수 유효 침투량은 강수량의 약 10% 내외 정도로 추정하고 있다. 그러나 도심지역의 경우 아스팔트 도로, 빌딩, 지붕 등의 불투수층에 의해서 강우가 지하수로 침투되는 것을 방해하기 때문에 유효침투량은 이보다 낮을 것으로 추정된다.

## 2) 상수, 하수도의 누수에 의한 유입량

울산 지역의 상수도 시설 현황은 2003년 12월31일 기준으로 정수장 9개소, 양수장 1개소, 취수장 7개소 등 관로 총 2,103km이며, 전체 상수도의 생산량은 2003년 현재  $320,036\text{m}^3/\text{d}$ 이고 1인당 급수량은 327L로서 다른 대도시에 비해서 적은 량이다.

따라서 연구 지역에 공급되는 상수도 사용량은  $190,000\text{m}^3/\text{d}$  정도 되는 것으로 나타났다. 또한 하수 발생량의 경우 통상적으로 상수도 사용량보다 약간 많은 량이 배출되는 것으로  $200,000\text{m}^3/\text{d}$  정도 발생하는 것으로 보여진다. 따라서 지하수 유입량은 상수도 사용량  $190,000\text{m}^3/\text{d}$ , 하수도 발생량  $200,000\text{m}^3/\text{d}$ 이라 가정하면 이들 전체의 누수율을 20% 정도 가정하면 연구 지역의 상하수도 누수량은  $78,000\text{m}^3/\text{d}$ 가 된다. 물론 이 누수량 전체가 지하수로 유입되는 것은 아니다. 상하수도 누수량 중 일부는 지하수로 유입되지 못하고 직접 유출이 일어나기 때문이다.

## 3.4.2 지하수 유출량

연구 지역의 경우 다른 대도시 지역과 마찬가지로 치밀한 결정질암의 지질로 이루어져 있어, 지하수의 부존은 층후가 얇은 충적층과 풍화대, 기반암내의 균열대에서 이루어지고 있다. 지하수 유출량은 대부분이 지하수공에서의 양수로부터 이루어지고 있으며, 일부 지하구조물 공사에 의한 지하수 배출 등이 있을 것으로 보여진다. 또한 지하수의 과잉양수는 지하수위의 저하와 함께 지하수의 수질을 저하시키는 결과를 가져올 것이다.

Table 3.2 The Amount used of groundwater by authorization of 7 cities (unit : m<sup>3</sup>/y)

구 분 (시도별)	총 계	용 도 별				허가형태별		
		Total	생활용	공업용	농업용	기 타	허가시설	신고시설
서 울	41,425,977	31,446,455	3,642,457	3,020,081	3,316,984	18,101,050	21,923,108	1,401,819
부 산	59,507,021	48,168,525	6,264,961	2,051,790	3,021,745	9,473,675	47,926,449	2,106,897
대 구	28,910,133	21,837,973	4,945,673	2,018,532	107,955	18,837,383	9,486,878	585,871
인 천	44,072,229	21,726,534	1,632,854	17,240,556	3,472,285	2,948,278	38,492,831	2,631,120
광 주	27,410,776	17,935,913	2,516,907	6,957,956	0	8,306,130	11,024,315	8,080,331
대 전	40,060,858	31,280,333	2,003,851	5,986,521	790,153	1,032,821	22,549,010	16,479,026
울 산	27,461,131	21,825,921	2,663,537	2,284,917	686,756	2,162,293	20,736,516	4,562,322

연구 지역의 지하수 양수량은 건설교통부 통계 자료(2003년)에 의하면 Table 3.2와 같다. 7대도시중 울산 지역의 지하수 사용량은 다른 광역시에 비하여 사용량이 그리 많지 않다.

## IV. 결과 및 고찰

### 4.1 지하수의 수질분류

지하수의 용존 성분들은 대기, 토양, 물-암석반응(풍화작용)에서 기인하며, 지하수 잠재 오염원으로는 주로 광산, 농경지, 매립지, 생활용수, 산업용수 등이 있다. 지하수는 지표수보다 토양 및 암반 내에 잔류하는 시간이 상당히 길어서 다양한 지질물질과 상호반응을 통하여 지하수에 용출되므로 지하수의 수질특성은 물의 진화과정과 지질의 종류에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

지하수 수질 분류의 가장 기본적인 기준은 지하수가 어떤 성분을 갖고 있는가 하는 점일 것이다. 지하수질 분야에서 용존 성분과 관련된 수질 분류중 가장 흔한 것은 주요 양이온 및 음이온 성분에 근거한 수질 분류이다. 이와 같은 지하수질 분류는 소위 '파이버 다이어그램 (Piper diagram; Piper, 1944)', '스티프 다이어그램 (Stiff diagram; Stiff, 1951)' 등을 이용하는 것이 일반화 되어 있다. 연구 지역의 지하수 수질특성을 파악하고자 지하수의 무기성 물질중 8개의 주요 양이온과 음이온 성분들을 이용하여 분류하는 Piper diagram을 통하여 살펴보면 다음과 같다.

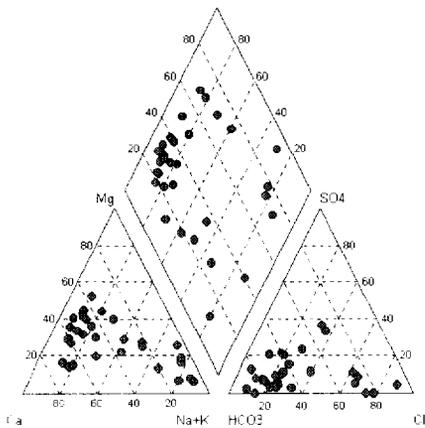


Fig. 4.1 Piper diagram of groundwater in Nam-gu in May

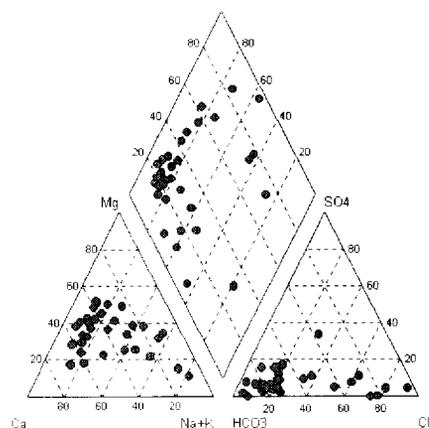


Fig. 4.2 Piper diagram of groundwater in Nam-gu in October

Piper diagram을 통하여 지하수 수질을 분류하면 20가지의 유형으로 세분화 할 수 있으며 남구 지역 35개 지하수에서는 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>, Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl, Ca-Mg-Na-Cl-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl-HCO<sub>3</sub>의 4가지 유형이 전체 시료의 74%를 차지하는 것으로 나타났다. 이 중에서 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>이 가장 우세하게 나타났으며, 이는 기반암에서 주로 나타나는 일반적인 유형이다. 그러나 태화강에 인접한 일부 지역에서는 Na-Cl형을 띄고 있으며, 이들 지점의 경우 생활오수 및 잔류해수 등의 영향을 받는 것으로 보여진다. 시료채취 시기에 따른 남구 지역의 지하수질은 Fig. 4.1, 4.2에서 보듯이 5월과 10월의 수질 변화는 크지 않는 것으로 나타났다.

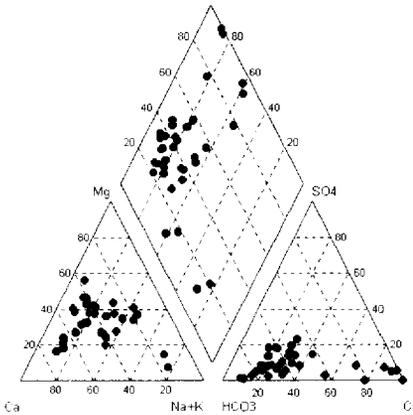


Fig. 4.3 Piper diagram of groundwater in Jung-gu in May

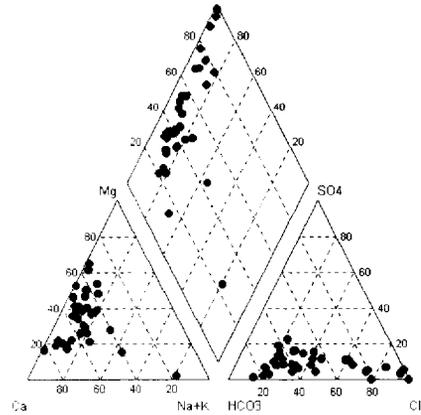


Fig. 4.4 Piper diagram of groundwater in Jung-gu in October

중구 지역 지하수에서는 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl, Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl, Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>의 3가지 유형이 전체 시료의 60%를 차지하는 것으로 나타났으며, 이 중에서 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl형이 가장 우세하게 나타났다. 또한 일부지역에서 Ca-Cl형을 띄고 있어 남구 지역과 다른 양상을 보여주고 있다. Cl의 영향을 일부 지점에서 받는 것으로 나타났으며 남구 지역의 경우 Na-Cl형이 일부 지역에서 나타났다. 이들 이온(Ca, Na)들 간의 반응은 다음과 같이 이루어진다(Appelo & Postma, 1999).



(X : 토양이온교환체)

이 반응에 따르면 나트륨은 이온교환체에 의해 흡수되고 칼슘은 방출되는 것으로 나타나며 이는 해수와 담수가 혼합되는 지역에서 주로 일어난다. 이 때 나타나는 수질 유형이 Ca-Cl형이다. 따라서 중구 지역의 경우 해수의 혼입이 이루어지고 있는 것으로 보여지나, 해수의 직접적인 혼입에 대해서는 다른 수질인자들을 이용해서 해수침입 여부를 살펴보고자 한다.

또한 중구 지역은 남구 지역과 다르게 시료채취 시기에 따른 5월과 10월의 수질변화가 뚜렷하게 나타나고 있으며 특히 5월보다 10월에 염소이온의 함량이 높게 나타나고 있다. 이는 생활오수, 해양성퇴적물, 잔류해수 또는 해수의 혼입 등의 영향인 것으로 보여진다.

## 4.2. 용도별 지하수 특성

최근 도시화가 가속됨에 따라 과거와 달리 토지사용 이력과 인위적 오염에 의한 지하수의 오염 역시 가속화되고 국지적인 경향을 보이고 있다. 따라서 지하수 사용 용도별 지하수 수질 특성 및 오염도 분포를 살펴보고자 한다. 연구 지역의 지하수를 공업, 목욕, 상업, 주거, 학교지역 등 총 5가지로 구분하였으며, 이에 따른 수질 유형은 Fig. 4.5에 나타내었다.

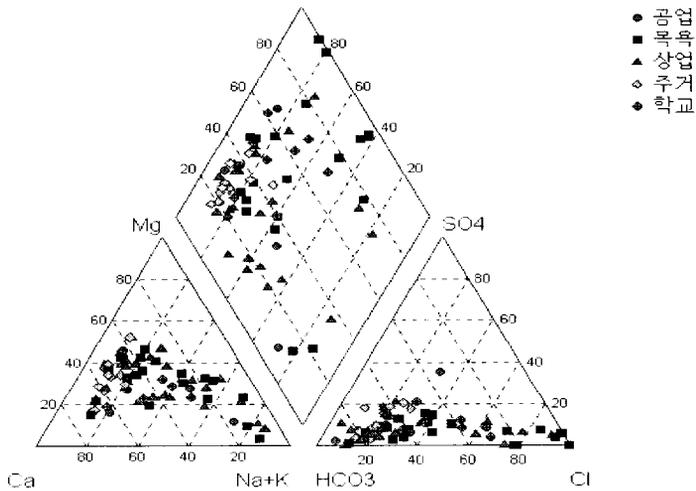


Fig. 4.5 Piper diagram of groundwater by usage

공업지역의 조사대상 시료수는 6개로 나타났으며, 수질유형은 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형을 중심으로 대부분 지점들이 분산되어 나타났다. 목욕용수의 경우 Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl형이 대부분이며 Na-Cl, Ca-Cl형도 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이는 목욕 용수중 일부 지점에서 염소이온이 다량 함유되어 있음을 보여준다.

상업지역의 경우 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>, Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>형이 주를 이루고 있으며, 일부 지점에서는 Na-Cl, Na-HCO<sub>3</sub>형을 보이고 있어 나트륨의 함량이 높게 나타나고 있다. 나트륨의 기원은 생활하수, 제빙염, 공업용 폐수, 해수 등에서 기인하고 있다.

주거지역은 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형이 대부분이며 이온성 물질의 분포가 다른 지역과 달리 조밀하게 나타났다. 이는 기반암질 내의 지하수 유형을 그대로 보여주고 있다.

학교지역의 경우 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl형이 주를 이루고 있어 주거지역과 비슷한 유형 및 분포를 보여주고 있다.

토지이용 형태별 지하수의 특징을 보면 목욕용수 및 상업 지역의 경우 염소이온의 농도가 높아 Na-Cl형을 이루고 있어 일부 지점에서는 생활하수 및 해양성퇴적물, 잔류해수 등의 유입이 이루어지고 있는 것으로 나타났으며, 다른 지역의 경우 기반암질 내의 지하수 유형과 거의 비슷한 수질 유형을 보이는 것으로 나타났다.

또한 지하수의 수질성분을 Box-Whisker Plot를 사용하여 나타내어보면 다음과 같다. 이 도식법은 각 성분들의 최대값, 최소값, 중앙값, 1/4분위수, 3/4분위를 도시한 것으로 제일 위와 아래는 각각 최대값과 최소값이며, 사각형의 윗변과 아랫변은 각각 3/4분위수와 1/4분위수를 나타낸 값이다.

여러 가지 수질 항목중 총경도(Hardness), 중발잔류물(TDS), 양이온물질(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>), 음이온물질(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)들에 대하여 살펴보고자 한다.

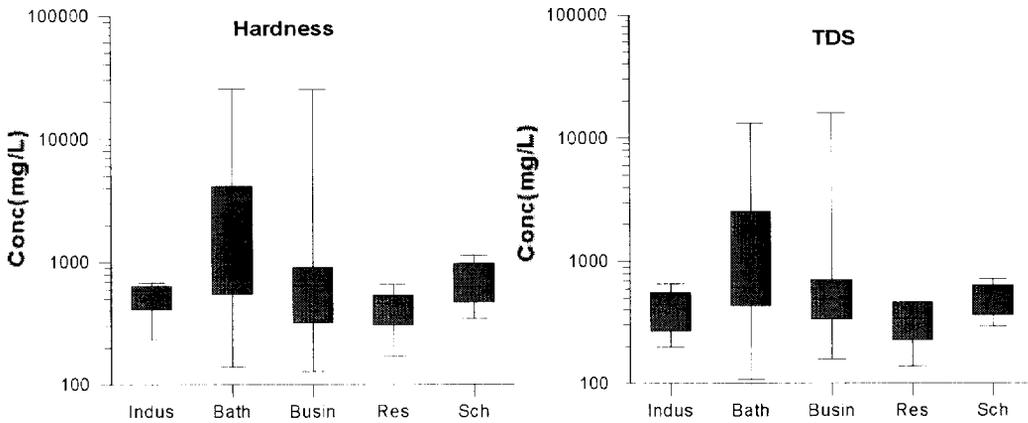


Fig. 4.6 Distribution of Hardness and TDS of groundwater by usage

Fig. 4.6은 총경도의 Box-Whisker Plot를 나타낸 것으로 목욕용수 및 상업지역의 분포도가 가장 넓고 높은 농도를 보이고 있으며, 목욕>상업>학교>공업>주거 순으로 높은 함량과 농도를 보이고 있다. 중발잔류물(TDS)를 역시 총경도(Hardness)와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

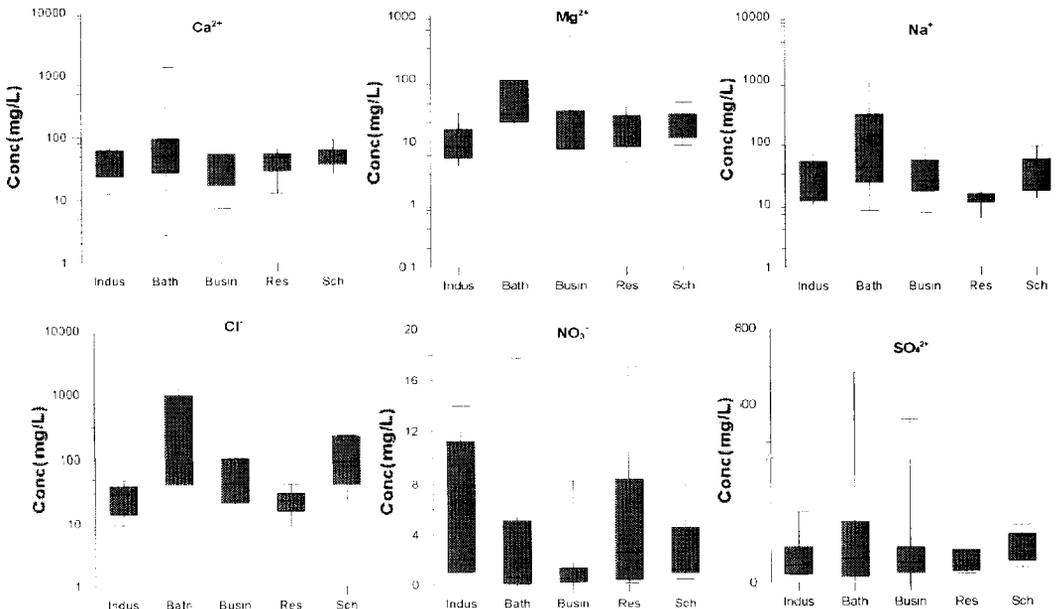


Fig. 4.7 Distribution of the Anion and the Cation of groundwater by usage

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  경우 역시 위 항목들과 비슷한 결과값을 보여주고 있으나, 질산성질소( $\text{NO}_3^-$ )는 위 항목들과 다른 결과를 보여주고 있다. 질산성질소의 용도별 분포를 살펴보면, 대부분의 지역에서 검출되었으며, 농도 역시 일정한 값을 유지하고 하고 있는 것으로 나타났다. 이는 다양한 점오염원의 영향인 것으로 나타났으며, 특히 인위적 오염, 즉 인간활동에 의한 처리되지 않은 유기물(생활하수 등)의 증가, 부실한 지하수공 관리상태 등으로 인해 오염되었을 것으로 추정된다. 특히 주거 지역에서의 분포도는 다른 항목과는 큰 차이를 보이고 있어 질산성질소에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났다.

### 4.3 지하수위별 지하수 특성

지하수위(Groundwater elevation)란 자유면 대수층에서는 지하수위를 말하고 피압 대수층에서는 수두(Potentiometric Surface)라고 이야기한다. 지하수위가 내려가면 대수층내의 지하수량이 감소하고 있으며, 지하수위가 올라가면 반대로 지하수가 유입되어 지하수량이 증가하여 지하수의 수질특성에 커다란 영향을 미친다. 이번 조사에서 지하수위를 직접 측정 할 수 없어 지하수위를 대신하여 각 지하수의 관정 깊이를 조사하여 지하수의 수질 변화를 보고자 한다.

연구 지역의 지하수를 관정 깊이별로 분류하면 다음과 같다.

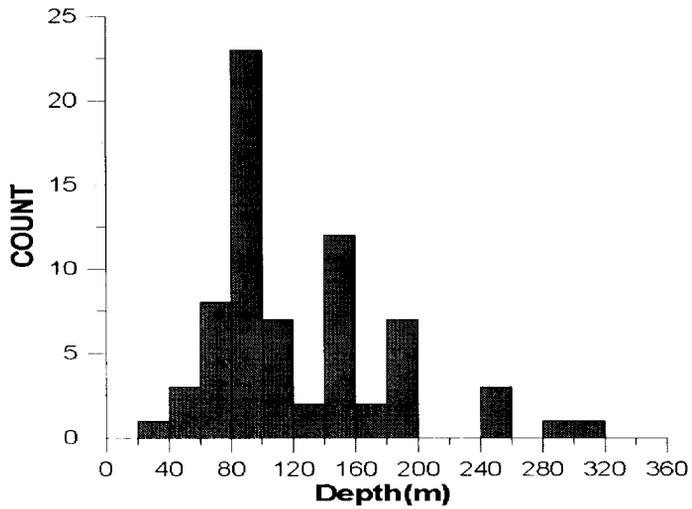


Fig. 4.8 Grouping of groundwater by depth of pipe

Fig. 4.8에 의하면 관정 깊이가 80m이하의 경우 13개소로 전체 18.6%를 차지하고 있으며, 80~200m사이의 지하수는 45개로 전체 64.3%로 가장 많은 분포를 보이고 있다. 또한 200m이상 깊이의 지하수는 12개소로 전체 17.1%를 차지하고 있다.

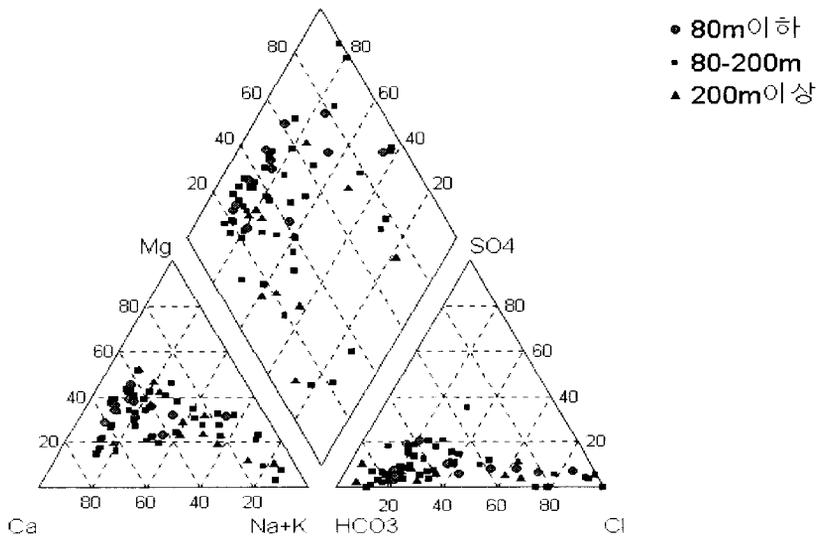


Fig. 4.9 Piper diagram of groundwater by the depth of pipe

Fig. 4.9의 Piper Diagram을 통하여 살펴보면 80m이하의 천부 지하수의 경우 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형 및 Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl형이 대부분을 차지하고 있어 태화강과 인접한 일부 지점에서는 염소이온의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 80~200m 깊이의 지하수 또한 여기에 속하며 지하수질의 형태 역시 다양하게 분포하고 있으나 그 중 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형, Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>형이 주를 이루고 있다. 또한 일부 지점에서는 Na-Cl형과 Ca-Cl형도 나타나고 있다.

200m이상의 심부지하수에서도 다양한 수질분포를 보이고 있으나 그중 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형이 대부분이며, Na-Cl형과 Na-HCO<sub>3</sub>형도 가끔 나타나고 있다. 관정 깊이별로 나타난 지하수질의 경우 80m이하의 천부 지하수에서 가장 높은 분포 밀도를 보이고 있으며, 나머지의 경우 분포밀도가 흩어져 있는 것으로 나타났다.

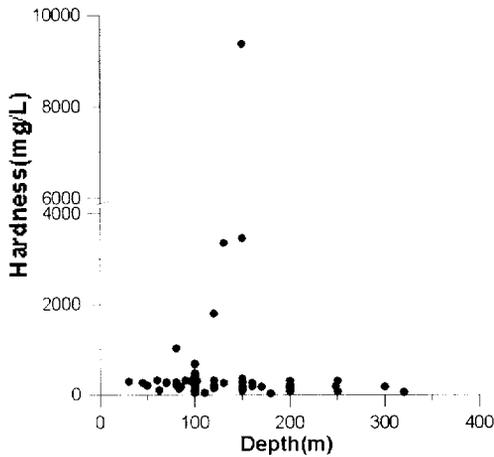


Fig. 4.10 Distribution of Hardness by the depth of pipe

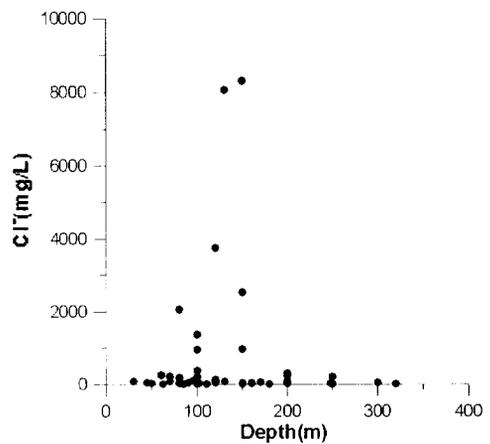


Fig. 4.11 Distribution of Cl by the depth of pipe

Fig. 4.10은 관정깊이에 따라 총경도(Hardness)의 농도를 나타낸 것이고 Fig. 4.11은 염소이온의 농도를 나타낸 것으로 150m이하의 천부 지하수에서 총경도 및 염소이온의 농도가 높게 나타났으며, 150m이상인 심부지하수의 경우 총경도 및 염소이온의 농도가 상대적으로 낮게 나타났다. 먹는물 수질기준에 의하면 80m이하의 지하수에서 부적합한 지하수는 총 경도 2개소, 염소이온 2개소로 부적합 비율이 13.3%와 18.2%를 차지하였으며, 관정깊이 80~200m까지의 지하수에서는 총경도 12개소, 염소이온 8개

소로 각각 80.0%, 72.7%로 아주 높은 부적합 비율을 보이고 있다. 또한 200m이상의 지하수에서는 각각 1개소가 부적합한 것으로 나타났다

따라서 천부 지하수의 경우  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , 및  $Cl$  의 농도가 높게 나타났으며 이는 태화강을 중심으로 가까운 거리에 있는 일부 지점에서 잔류해수 및 생활하수 등의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 태화강 하류 지역은 도시화되기 이전에는 나대지 및 염전이 분포하고 있어 그 영향으로 인해 잔류염분이 지속적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

또한 토지이용의 변화에 따라서 도시화가 가속화되고 이에 따라 생활하수 및 공장폐수 등에 의하여 지하수로의 인위적인 유입이 증가하면서 지하수 오염이 심각해지고 있다. 이런 인위적 오염의 추적자로 많이 이용되는 질산성질소 및 암모니아성질소의 농도 분포도를 살펴보면 다음과 같다.

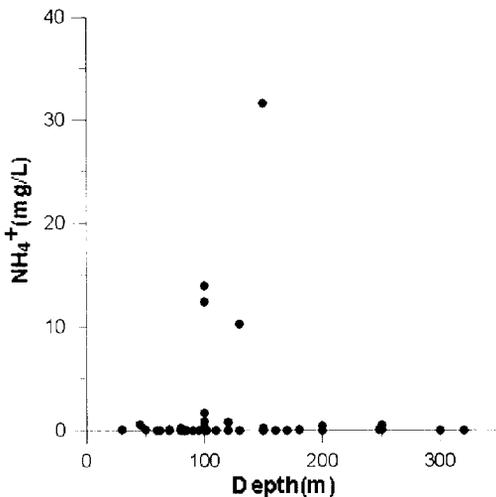


Fig. 4.12 Distribution of  $NH_4-N$  by the depth of pipe

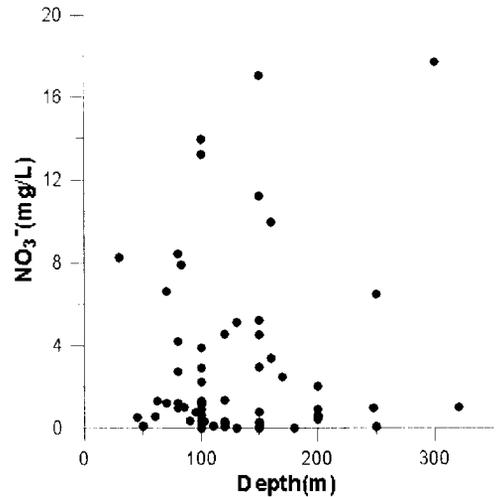


Fig. 4.13 Distribution of  $NO_3-N$  by the depth of pipe

총경도와 염소이온의 경우 깊이 150m이하에서 오염이 심한 것으로 나타났으나 암모니아성질소( $NH_4^+-N$ ), 질산성질소( $NO_3^- -N$ )의 경우 관정 깊이에 상관없이 분포하고 있으며, 특히 질산성 질소의 분포는 모든 구간에 넓게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 먹는물 수질기준을 적용하여 보면 암모니아성 질소의 경우 80m 이하에서 1개소, 80~200m에서 7개소로 나타났으며, 질산성 질소는 80m이하에서는 없으며, 80~200m에서 5개소, 200m이상에서 1개소가 부적합한 것으로 각각 나타났다.

## 4.4 계절별 지하수 특성

지하수의 계절적 변화양상을 보기 위해서는 먼저 지하수위의 변화에 주목하여야 하며, 또한 비슷한 지하수위를 보이더라도 지하수의 체류시간에 따른 지화학적인 반응이 다르게 일어나므로 지하수의 유출(양수)시 지하수질은 항상 일정할 것인가에 대하여 살펴보고자 한다.

Fig. 4.14는 2002년 강수량과 울산시 범서읍에 위치한 장기 지하수위 관측공의 지하수위를 나타낸 것으로 강수량과 지하수위는 정(+)의 관계를 가지며 강우가 지하수로 침투하여 지하수위를 상승시키는데 걸리는 저류시간이 길지 않다는 것을 보여주고 있다. 따라서 계절적 지하수질의 변화를 살펴보기 위하여 5월과 10월로 나누어 년 2회 시료를 채취하였다.

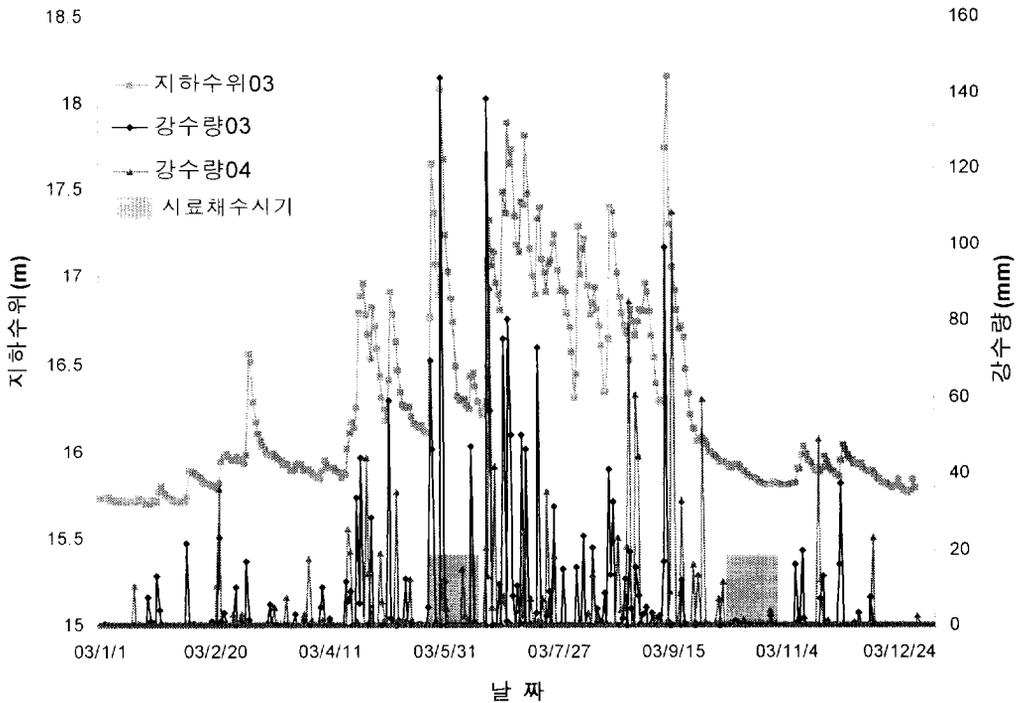


Fig. 4.14 Comparison of groudwater level and rainfall in study area

지하수의 계절적 수질 변화를 보고자 현장측정 항목(수온, pH, 알칼리도, 전기전도

도), 일반 항목(증발잔류물, 총경도, 과망간산칼륨소비량), 음이온물질(F, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 양이온물질(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>)등으로 구분하여 살펴보았다.

또한 각 지역별 특이치, 다시말하면 염도 분류에 따른 염수 지하수의 경우는 별도로 구분하여 분류하고자 한다. 이는 각 지역을 대표하는 값이라기보다는 그 지점만의 특징이기 때문이다.

#### 4.4.1 현장측정항목의 계절적 수질변화

연구 지역의 계절적인 특성 변화를 보기 위해서 각 지역 수질의 대표적인 지점을 선정 하여 수질의 향상성을 보고자 하였다. 따라서 연구 지역의 특이치를 보이는 지점은 제외시켰으며 이는 남구 3개소로 나타났고, 중구는 4개소로 각각 나타났다. 이들은 별도로 분류하여 다루고자 한다.

Table 4.1 Avg., Max., Min. of the on-the-spot measurement items by study area

구 분	항 목 월	수온(℃)		pH		알칼리도(mg/L)		전기전도도(μs/m <sup>3</sup> )	
		5월	10월	5월	10월	5월	10월	5월	10월
남구	평균	18.6	17.2	7.4	7.6	202.2	195.2	731.5	529.8
	최대	22.4	21.8	7.9	8.3	520.0	517.5	3,340.0	1,351.0
	최소	16.2	14.3	6.5	6.8	58.0	23.2	135.0	122.0
중구	평균	18.9	17.1	7.3	7.6	179.0	187.3	752.6	621.6
	최대	28.0	26.2	9.3	9.0	430.0	449.7	4,350.0	3,910.0
	최소	15.0	13.9	6.4	6.9	26.0	30.7	166.0	44.4

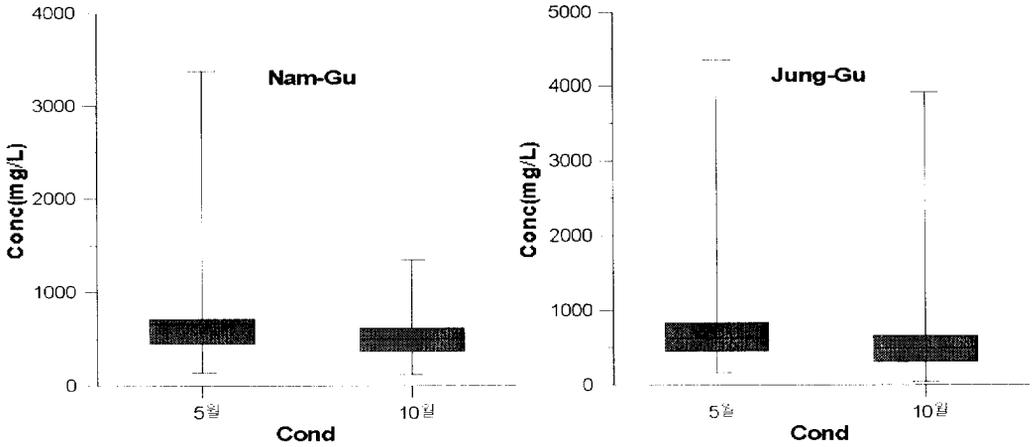


Fig. 4.15 Seasonal changes of Conductivity in study area

Table 4.1에 의하면 수온은 남구의 경우 5월 18.6℃에서 10월 17.2℃로 1.4℃정도 낮아졌으며, 중구 역시 18.9℃에서 17.1℃로 1.8℃정도 낮아졌다. 전기전도도의 경우 남구는  $731.5\mu\text{s}/\text{m}^3$ 에서  $529.8\mu\text{s}/\text{m}^3$ , 중구는  $752.6\mu\text{s}/\text{m}^3$ 에서  $621.6\mu\text{s}/\text{m}^3$ 로 201.7,  $131.0\mu\text{s}/\text{m}^3$ 만큼 작아져 두 지역 모두 같은 양상을 보이며 농도 분포(Fig. 4.15)는 5월보다 10월에 변화폭이 작은 것으로 나타났다. 또한 pH와 알칼리도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

#### 4.4.2 일반항목의 계절적 수질변화

Table 4.2 Avg., Max., Min. of the general items by study area (unit : mg/L)

구분	항목 월	총경도		증발잔류물		KMnO <sub>4</sub> 소비량	
		5월	10월	5월	10월	5월	10월
남구	평균	206.8	176.8	560.5	408.8	1.5	1.3
	최대	890.0	310.00	2,824.0	1,028.0	6.6	9.6
	최소	40.0	37.0	163.0	135.0	0.0	0.0
중구	평균	205.7	205.0	516.9	535.7	2.8	3.2
	최대	680.0	690.0	2,427.0	2,634.0	41.2	54.5
	최소	26.0	20.0	117.0	96.0	0.0	0.0

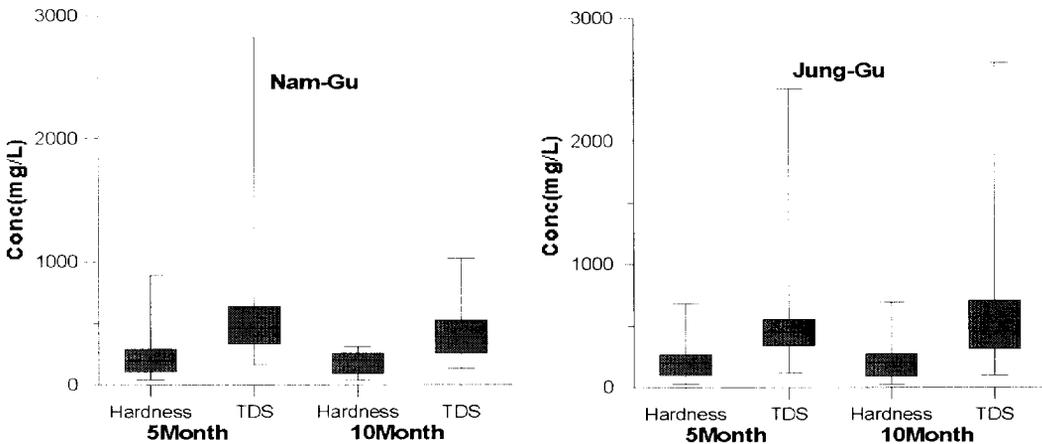


Fig. 4.16 Seasonal changes of Hardness & TDS in study area

Table 4.2를 살펴보면 총경도 및 증발잔류물의 경우 두 지역에서 약간의 차이를 보이고 있다. 남구 지역의 경우 5월보다 10월에 평균, 최대값이 모두 낮게 나타났다. 또한 각 지역별 농도 분포도(Fig. 4.16)를 보면 남구와 중구가 차이를 보이고 있다. 총경도 및 증발잔류물의 농도는 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등에 영향을 많이 받기 때문에 물-암석의 지화

학적 반응에 의해서 생성되는 이들 이온성 물질이 계절적으로 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 Table 5.에서 총경도 및 증발잔류물과 각 이온성물질과의 상관계수를 살펴보면 계절적으로 차이를 보이고 있다. 총경도는 5월보다 10월에  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ 과의 상관계수는 비슷하게 나타났으나 Cl의 상관계수는 현저하게 낮게 나타났다. 그러나 증발잔류물의 경우  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Cl의 상관계수가 5월보다 10월에 모두 낮게 나타났다.

그러나 중구 지역의 경우 남구와는 반대로 5월과 10월에  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Cl 등과 상관계수가 큰 차이를 보이지 않고 비슷하게 나타났다. 이는 두 지역간의 상관계수 차이는 연구 지역의 지화학적인 반응이 서로 다르게 나타나기 때문이다.

Table 4.3 Correlation coefficient of Hardness & TDS with  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Cl

상관계수		항 목	Hardness(mg/L)		TDS(mg/L)	
		월	5월	10월	5월	10월
남구	$Ca^{2+}$		0.62	0.76	0.04	0.00
	$Mg^{2+}$		0.89	0.81	0.58	0.12
	Cl		0.38	0.02	0.84	0.45
중구	$Ca^{2+}$		0.71	0.68	0.84	0.80
	$Mg^{2+}$		0.74	0.82	0.29	0.22
	Cl		0.59	0.66	0.70	0.85

과망간산칼륨( $KMnO_4$ )소비량을 살펴보면 남구는 5월에 분포가 0~6.6mg/l, 평균 1.5mg/l로 나타났으며, 10월에는 0~9.6mg/l, 평균 1.3mg/l로 나타났다. 중구는 5월 0~41.2mg/l, 평균 2.8mg/l, 10월 0~54.5mg/l, 평균 3.2mg/l로 각각 나타났다. 이 항목 역시 남구와 중구가 상이한 결과를 보여주고 있다. 남구 지역이 중구 지역보다 평균, 최대농도가 모두 낮게 나타났다.

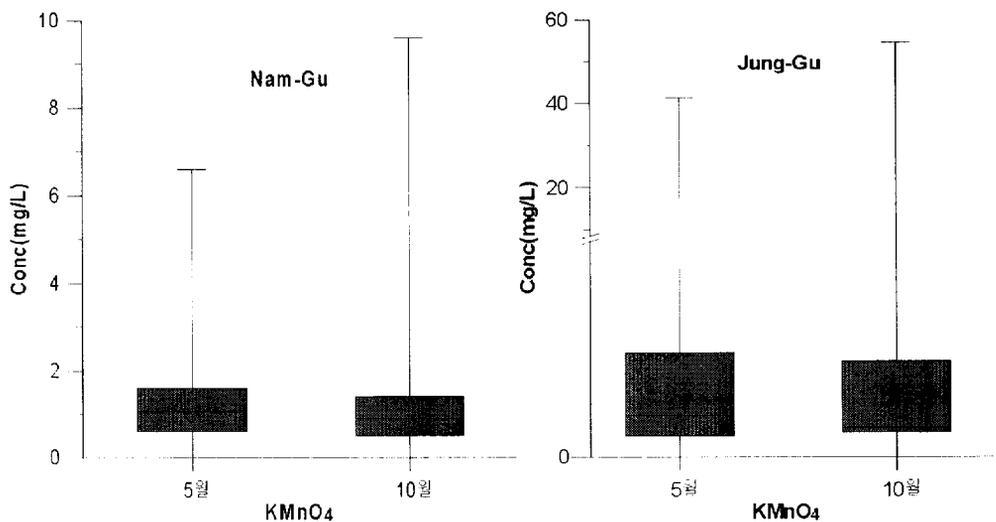


Fig. 4.17 Seasonal changes of consumption of KMnO<sub>4</sub> in study area

### 4.4.3 음이온 물질의 계절적 수질변화

물-암석을 통한 지화학적 반응에 의해서 생성되는 주요 이온 성분들(F, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>)에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 먼저 음이온 성분들에 대하여 살펴보면,

Table 4.4 Avg., Max., Min. of the anion by study area (unit : mg/L)

구 분	항 목 월	F		Cl		NO <sub>3</sub> -N		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
		5월	10월	5월	10월	5월	10월	5월	10월
		남구	평균	0.1	0.2	68.2	61.7	2.1	4.0
남구	최대	1.4	1.7	750.0	298.0	14.5	33.0	77.0	104.0
	최소	0.0	0.0	3.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	중구	평균	0.3	0.3	75.5	122.1	2.9	3.0	18.0
중구	최대	5.1	4.2	915.0	981.0	21.8	18.4	45.0	89.0
	최소	0.0	0.0	7.0	8.0	0.0	0.0	2.0	0.0

불소(F)의 경우 지역적, 계절적으로 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 그러나 최대농도를 살펴보면 남구보다는 중구 지역에서 불소의 최대농도(5.1mg/l)가 높게 나타났다. 이는 황정(2001, 2002)에 의해 전북 금산-완주 지역과 충북 월악산 일대의 일부 지하수에서 높은 불소의 원인을 분화도가 높은 백악기 화강암의 분포와 밀접하게 관련되어 있음을 밝힌 바 있다. 연구 지역의 고불소 지하수 역시 백악기 말 내지 제3기초의 불국사화강암류대에 위치하고 있어 고불소 지하수의 기원이 지하수와 지질 매체의 물-암석반응에 의한 자연기원임을 나타내어 주고 있다.

질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )의 평균농도가 남구는 5월에 2.1mg/l, 10월에는 4.0mg/l로 증가되었으나, 중구 지역의 경우 5월 2.9mg/l에서 10월 3.0mg/l로 거의 변화가 없는 것으로 나타나 지역적으로 다른 양상을 보여주고 있다. 특히 남구 지역의 경우 5월 최고 농도를 보인 지점이 S-33지점이었고 10월 경우 S-26 지점에서 최고농도를 보이고 있어 국지적인 오염의 영향으로 연구 지역 전역에서 골고루 분포하고 있다. 그러나 질산성질소 농도가 2mg/l이하의 빈도분포를 살펴보면 남구는 68.7%, 중구는 68.6%로 나타났다(Fig. 4.18).

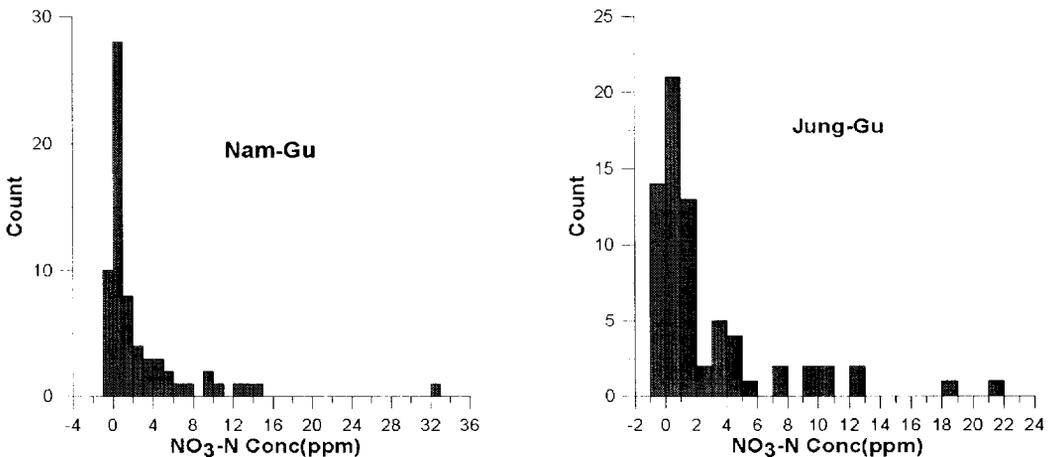


Fig. 4.18 Distribution of  $\text{NO}_3\text{-N}$  in study area

또한 염소이온의 경우 지역적, 계절적으로 큰 차이를 보이고 있으며, 남구는 5월 68.2mg/l, 10월에는 61.7mg/l로 다소 감소하였으나 중구의 경우 5월 75.5mg/l, 10월 122.1mg/l로 다소 증가한 것으로 나타났다. 남구는 계절적 변화에 따른 지화학적 반응

이 안정한 것으로 나타났으며, 중구는 계절적 변화에 따른 지하수질의 차이가 나타나고 있다. 특히 중구 지역은 염소이온의 변화폭이 크게 나타나 인위적 유입원인 잔류해수, 해양성퇴적물, 해수의 침입이 이루어지고 있는 것으로 보여진다.

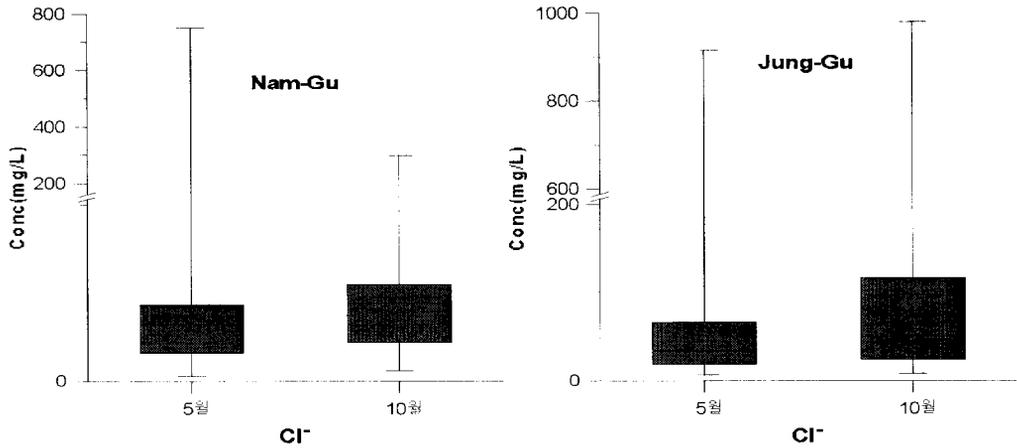


Fig. 4.19 Seasonal changes of Cl in study area

#### 4.4.4 양이온성 물질의 계절적 수질변화

Table 4.5 Avg., Max., Min. of the cation by study area (unit : mg/L)

구 분	항 목 월	Ca <sup>2+</sup>		K <sup>+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>	
		5월	10월	5월	10월	5월	10월	5월	10월
남구	평균	38.5	41.4	0.136	0.158	20.9	18.2	23.9	37.4
	최대	91.4	76.8	0.934	0.725	112.3	41.4	114.9	174.0
	최소	6.1	8.7	0.021	0.023	2.7	2.5	6.6	6.1
중구	평균	35.9	48.1	0.312	0.329	19.2	20.3	23.5	46.1
	최대	183.3	117.8	3.382	2.355	88.5	100.8	204.5	345.6
	최소	2.9	2.6	0.027	0.028	0.9	0.2	4.4	7.8

5월 남구 지역의 양이온 분포도를 살펴보면 Ca>Na>Mg>K 순으로 나타났으며, 중

구 지역의 경우  $Ca > Na > Mg > K$  순으로 나타나 두 지역 모두 똑 같은 양이온 분포를 보이고 있다(Fig. 4.20, 4.21).

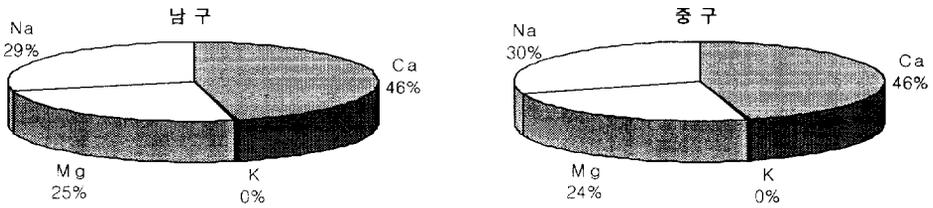


Fig. 4.20 Composition ratio of cation( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ) in May

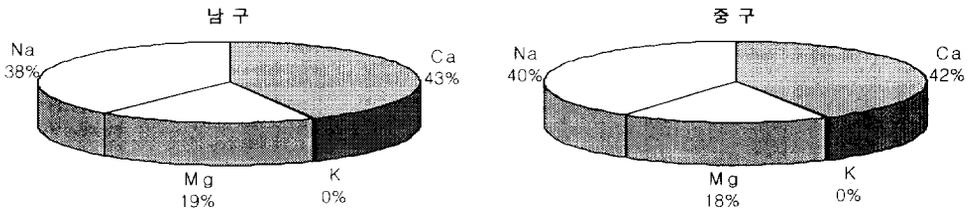


Fig. 4.21 Composition ratio of cation( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ) in October

10월 남구 지역의 양이온 분포도를 보면  $Ca > Na > Mg > K$  순으로 나타났으며, 중구 지역의 경우  $Ca > Na > Mg > K$  순으로 나타나 5월과 같은 양이온 분포를 보여주고 있다.

연구 지역 모두 양이온 분포 비율 및 농도는 비슷하게 나타났으며, 계절적으로 5월보다 10월에 모두 높게 나타났다. 두 지역 모두 양이온물질 중 나트륨의 분포비율 및 농도가 5월보다 10월에 다소 높게 나타났다. 또한 두 지역 모두  $K^+$ 는  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ 에 비하여 그 농도가 현저히 낮게 나타났는데 이는 정장석의 양이 사장석에 비하여 적고 사장석은 풍화에 약하지만, K-장석은 풍화에 강하며  $K^+$ 는 점토광물에 흡착이 잘되기 때문에 다른 양이온 물질보다 낮게 나타난 것으로 보여진다.

연구 지역의 지질중 가장 광범위하게 이루고 있는 지질이 울산층으로 이는 주로 사암, 니회암, 세일 등으로 구성되어 있다. 이들 지층의 주요구성광물은 사장석, 방해석, 장석, 정장석, 녹니석 등으로 이루어져 있으며 이들 내에 부존된 지하수의 경우 지화

학적 반응에 의해서  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  등의 함량이 대체로 높게 나타난다. 방해석은 거의 탄산칼슘( $CaCO_3$ )으로 구성되어 있으므로 석회암(방해석) 내에 부존된 지하수의 경우  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  이온의 함량이 특히 높다. 세일층은 일반적으로 천해성환경에서 퇴적된 것으로 이들 층에 부존하는 지하수는  $Na^+$ ,  $Cl^-$  이온의 함량이 높으며 또한 투수계수가 낮은 지층이므로 개발 가능한 지하수양 또한 극히 제한적이다.

연구 지역 지하수의 계절적 수질변화를 살펴보면 두 지역간의 지하수질 및 분포특성에 있어 다소의 차이를 보이고 있으며, 특히 5월보다는 10월에 이온성물질이 다소 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 나트륨과 염소이온의 증가가 중구지역에서 다소 나타나는 것으로 관찰되었다.

연구 지역 중 특이 지점을 살펴보면 Fig. 4.22에 나타내었으며, 대부분의 지점들이 태화강을 중심으로 인접한 거리에 위치하고 있다. 남구 지역은 5월에 2개에서 10월에는 3개 지점으로 증가하였으며, 중구는 5월, 10월 모두 4개 지점으로 나타났다.

Table 4.6 Seasonal analysis data of groundwater at the unique spot (unit : mg/L)

구 분		남 구			중 구			
		S-20	S-22	S-23	S-43	S-46	S-49	S-59
총경도	5월	4250	430	293	1700	3540	1150	5750
	10월	2480	406	416	1900	3400	890	13000
TDS	5월	17327	3821	1903	8019	5921	5183	8608
	10월	14524	3908	2886	8332	7073	4289	17571
KMnO <sub>4</sub>	5월	82.0	66.3	42.3	42.9	18.1	19.0	39.1
	10월	69.5	90.0	96.3	4.9	23.2	15.5	1.1
NH <sub>4</sub>	5월	8.13	11.03	20.34	1.46	0.25	0.17	0.02
	10월	12.47	13.84	42.74	0.0	0.12	0.20	0.0
Cl <sup>-</sup>	5월	9076	1346	792	3379	2420	2302	4408
	10월	7053	1390	1158	4123	2648	1837	12219
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5월	0.0	0.3	0.3	0.6	0.0	0.5	10.4
	10월	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5월	623	6	6	249	3	267	356
	10월	497	0	0	212	0	210	1013
Ca <sup>2+</sup>	5월	456.0	42.38	22.93	222.0	801.3	114.4	695.8
	10월	103.9	48.14	31.73	348.6	962.0	118.4	1976.0
K <sup>+</sup>	5월	8.903	3.211	3.241	2.159	0.362	1.769	4.010
	10월	4.494	1.863	2.733	1.126	0.275	0.856	3.759
Mg <sup>2+</sup>	5월	575.1	59.23	48.1	176.3	110.9	162.8	476.6
	10월	366.8	68.58	62.4	191.2	117.9	141.8	1351.0
Na <sup>+</sup>	5월	1238.0	195.1	147.4	368.7	150.3	313.3	266.9
	10월	1908.0	611.2	480.2	1355.0	244.6	673.4	1357.0

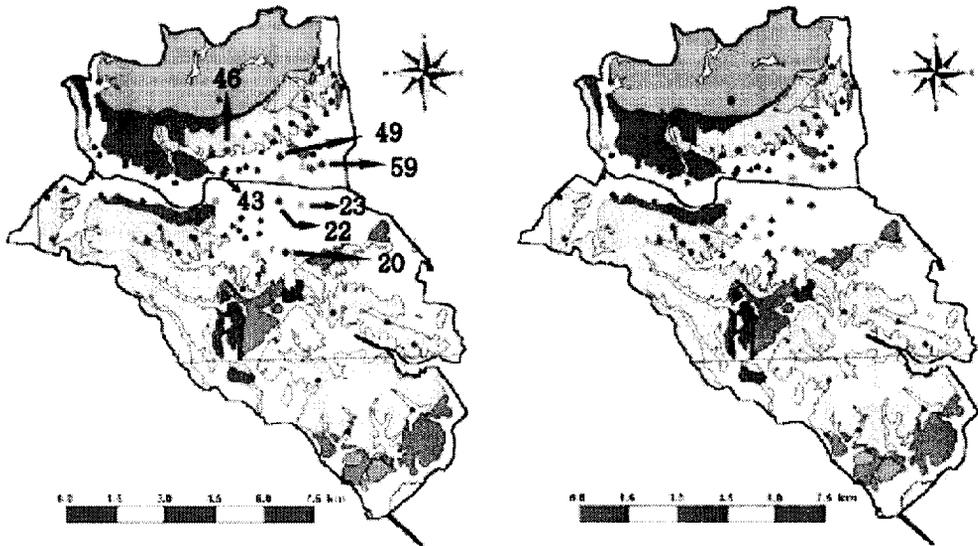


Fig. 4.22 Seasonal distribution of unique spot by Cl of groundwater

일반항목(총경도, TDS)의 경우 남구 지역의 S-20, -22지점은 감소하는 것으로 나타났으며, S-23 지점은 증가하는 것으로 나타났고, 중구 지역은 S-49지점만 감소하였으며 S-43, -46, -59지점은 증가하는 것으로 나타났다.

인위적 오염물질의 추적자로 사용되는 과망간산칼륨소비량과 암모니아성질소의 경우 지역별로 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 남구 지역은 모든 지점에서 5월보다 10월에 증가하는 것으로 나타났으며, 중구 지역은 반대로 모든 지점에서 감소하는 것으로 나타났다. 남구의 특이 지점은 인위적 오염 즉 생활하수 및 정화조 등의 누수에 따른 국지적 오염의 영향인 것으로 보여진다. 그러나 중구 지역의 경우 인위적 오염물질은 줄어드는 반면 이온성물질 중  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}$  는 S-43, -59 지점에서 증가하고 있어 이들의 또 다른 공급원 즉 잔류해수, 해양성퇴적물의 영향, 또는 해수의 직접 침입이 이루어지고 있는 것으로 보여진다.

이온성 물질의 성분과 상대적인 비를 가지고 도식적으로 나타내는 방법에는 Stiff에 의해서 제안된 Stiff diagram이 있다. 이 diagram은 도시지역과 같은 다양한 오염원의 존재와 원인 파악에 효과적인 방법이며, 매립지 주변 지하수의 오염 범위 추적에도 유용하게 사용된다.

Fig. 4.23은 남구 지역의 계절적 변화(5월, 10월)에 따른 특이 지점들을 나타내었으며

이온성 물질의 분포 특성을 보면 그다지 큰 변화를 보이지 않고 있으며  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  이 약간 증가하는 것으로 나타났다.

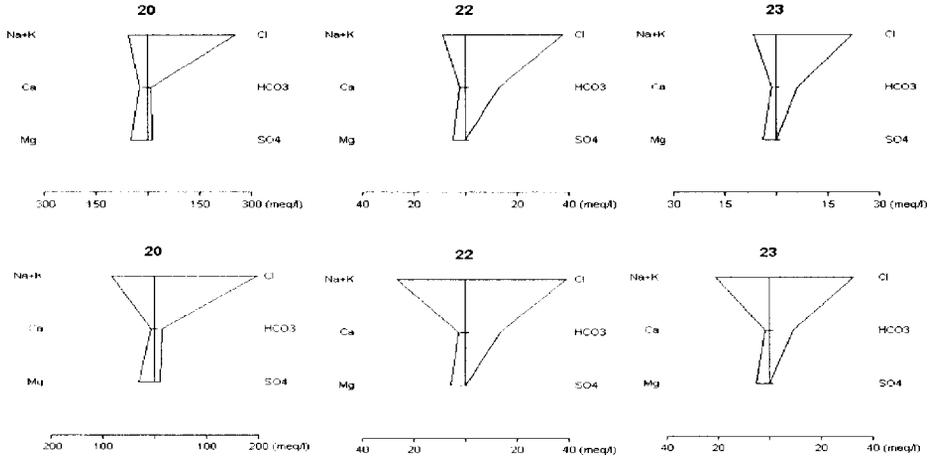


Fig. 4.23 Seasonal Stiff diagram of the unique spot in Nam-gu

Fig. 4.24은 중구 지역의 계절적 변화에 따른 지하수질을 나타낸 것으로 남구 지역과는 차이를 보이고 있으며 이온성 물질의 분포가 5월보다 10월에 증가하고 있으며, 특히 S-43, -59 지점은 현격한 차이를 보여주고 있다. 이온성 물질중  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  이 가장 많이 증가한 것으로 나타났다.

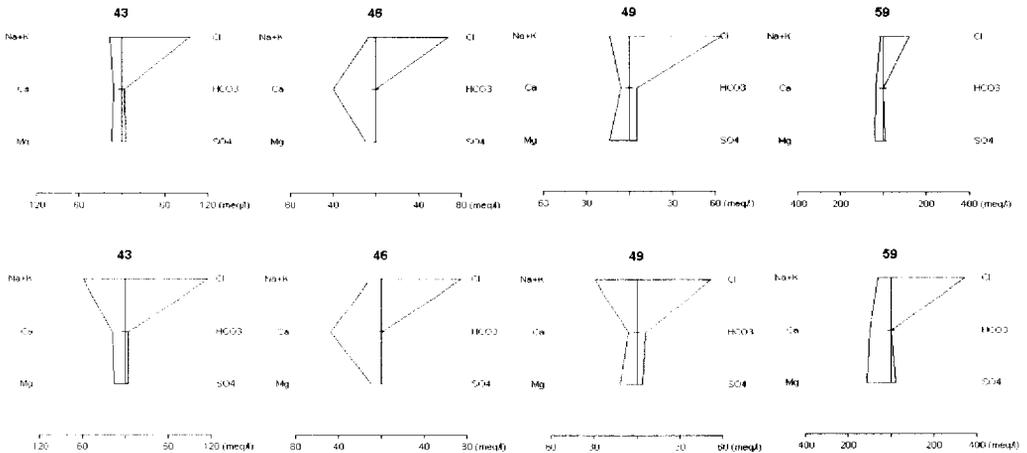


Fig. 4.24 Seasonal Stiff diagram of the unique spot in Jung-gu

## 4.5 각 성분별 상관 계수

지하수의 수질성분간 관련성을 알아보기 위하여 각 항목 상관계수를 MICROSOFT EXCEL CORREL 통계 분석을 통하여 Table 9.와 같이 구하였다. 일반적으로 상관계수의 절대값이 0.2이하이면 상관관계가 거의 없는 것으로, 절대값이 0.4이상이면 상관성이 있는 것으로 보며, 또한 절대값이 0.6이상이면 아주 높은 상관관계를 가진다고 볼 수 있다.

연구 지역의 수질성분간 상관계수를 살펴보면 전기전도도는 양이온, 음이온 물질과 높은 상관성을 가짐을 알 수 있고 특히, 염소이온과는 높은 상관도(0.99)를 가지고 있고, 중발잔류물과도 높은 상관도(0.98)를 가지는 것으로 나타났다.

충경도의 경우 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ), 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ )과 가장 높은 상관도(0.92, 0.93)을 보여주고 있다.

과광간산칼륨소비량( $\text{KMnO}_4$ )의 경우 암모니아성질소(0.70)와 보론(0.73)에 높은 상관계수를 보였으나, 암모니아성질소와 질산성질소는 아주 낮은 상관계수를 보여주고 있다. 이는 서로간의 산화-환원 전위가 다른데 따른 것으로 보여지며, 질산성질소가 존재하는 곳은 산화-환원 전위 값이 높은 지하수임을 의미하는 것이다.

염소이온( $\text{Cl}^-$ )의 경우는 지하수의 해수 기원을 설명하는 인자로 사용되며 황산이온, 양이온( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ )등과 높은 상관계수를 보이고 있다(Fig. 4.25).

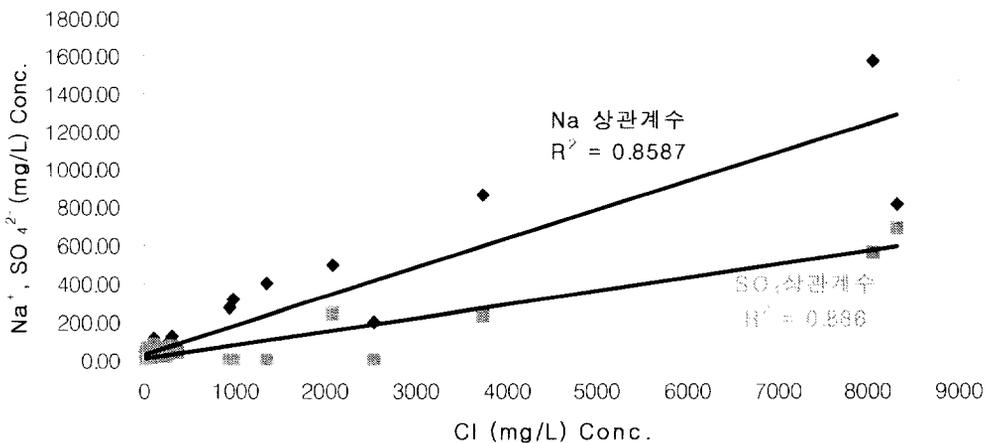


Fig. 4.25 Correlation coefficient of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$

Table 4.7 Matrix of correlatin coefficient among chemical species

	전도도	총경도	TDS	KMnO <sub>4</sub>	F	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	B	Ca	K	Mg	Na
전도도	1.00	0.76	0.98	0.40	0.00	0.99	0.00	0.88	0.08	0.39	0.56	0.73	0.85	0.89
총경도		1.00	0.69	0.12	0.00	0.79	0.00	0.73	0.01	0.06	0.92	0.37	0.93	0.43
TDS			1.00	0.44	0.00	0.97	0.01	0.80	0.09	0.44	0.54	0.73	0.77	0.91
KMnO <sub>4</sub>				1.00	0.01	0.36	0.03	0.17	0.70	0.73	0.06	0.73	0.18	0.54
F					1.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Cl						1.00	0.06	0.89	0.06	0.34	0.60	0.70	0.88	0.86
NO <sub>3</sub>							1.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02
SO <sub>4</sub>								1.00	0.01	0.19	0.49	0.56	0.89	0.72
NH <sub>3</sub>									1.00	0.39	0.00	0.39	0.02	0.15
B										1.00	0.02	0.60	0.12	0.62
Ca											1.00	0.20	0.72	0.26
K												1.00	0.53	0.81
Mg													1.00	0.58
Na														1.00

## 4.6 지하수의 해수침투영향

연안 지역의 경우 해수로 인한 내륙지하수의 염수화가 심화되고 있어 체계적이고 장기적인 관리를 위해 정확한 해수침투의 분포양상을 파악할 필요가 있다. 특히, 연구지역의 경우 태화강을 통하여 해수가 하천으로 자유로이 유입되는 전형적인 감조하천(Tidal river)이며 이를 중심으로 울산광역시 남구, 중구지역으로 나뉘어져 있다.

지하수 수질분석 자료중 일반적으로 전기전도도, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Br<sup>-</sup>, TDS, Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup> 등을 많이 이용하고 있으며, 특히 Cl<sup>-</sup>은 해수의 염분중 가장 많은 비율을 차지하고, 또한 비 반응성 물질중 하나이므로 해수 침투 여부에 관한 추적자로 가장 많이 활용되고 있다.

염소이온(Cl<sup>-</sup>) 농도에 따라 지하수의 염도를 분류하면 다음과 같다.

Table 4.8 Distribution of salinity by the Conc. of Cl

Water Type	염소이온(Cl <sup>-</sup> ) 농도(mg/L)
담수 (Fresh water)	200이하
기수 (Brackish water)	200~1,000
염수 (Salt water)	1,000이상

연구 지역의 지하수를 염소이온 농도에 따라 염도를 분류하면 Table 4.9와 같다.

Table 4.9 Distribution and percentage of groundwater by salinity

Water Type	조사지역		시료수(개수)	분포도(%)
	남구	중구		
담수 (Fresh water)	29	26	55	78.5
기수 (Brackish water)	4	5	9	12.9
염수 (Salt water)	2	4	6	8.6

총 70개의 지하수중 55개의 시료가 담수에 속하며, 12.9%인 9개의 시료는 기수, 그리고 8.6%에 해당하는 6개의 시료는 염수지하수에 해당하는 것으로 나타났다. 조사 지역별로 살펴보면 담수(Fresh water) 지하수는 남구 29개소, 중구 26개소로 각각 나타났다. 기수(Brackish water) 지하수의 경우 각각 4개소, 5개소로 나타났으며, 염수(Salt water) 지하수의 경우 2개소, 4개소로 중구 지역이 남구 지역보다 상대적으로 높은 빈도를 보이고 있다.

연구 지역의 담수, 기수, 염수 지하수의 분포를 Fig. 4.26에 나타내었다.

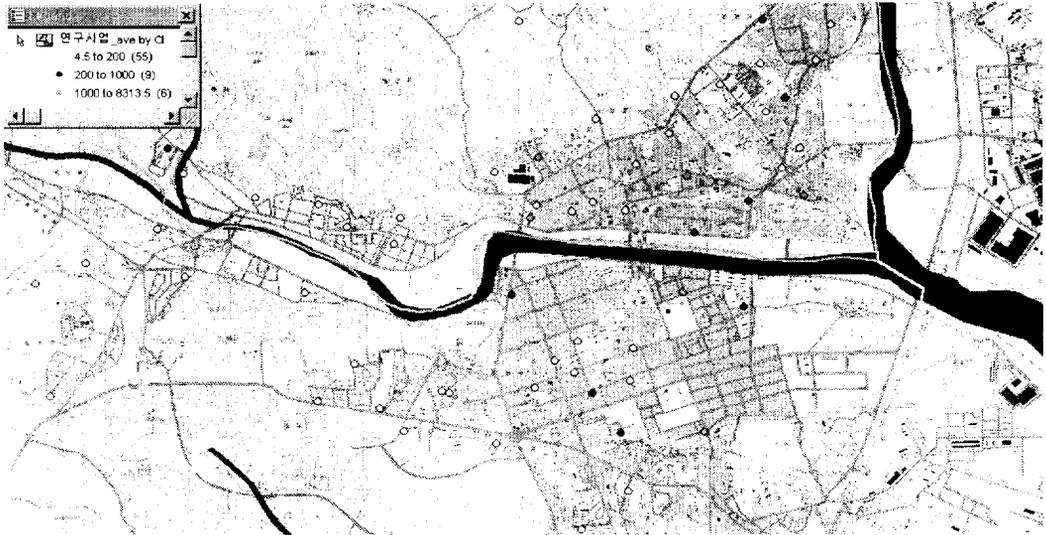


Fig. 4.26 Distribution of Cl in study area

#### 4.6.1 염도 분류에 따른 주요성분 비교

지하수 염도 분류에 따른 주요 성분들( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Si}$ )의 분포 특성과 농도범위를 Fig. 4.27에 표시하였다.

총 9개의 주요 성분 중 담수지하수에서는  $\text{HCO}_3^-$ 가 가장 높은 농도와 분포를 보여주고 있으며, 기수지하수의 경우 담수지하수와 비교하면  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ 의 농도가 증가되었으며 분포도 역시 증가하는 것으로 나타났다. 염수 지하수는 주요 성분들의 농도가 높게 나타나지만 상대적으로 염소이온( $\text{Cl}^-$ )의 농도 및 분포도가 가장 뚜렷한 특징을 보이고 있다.

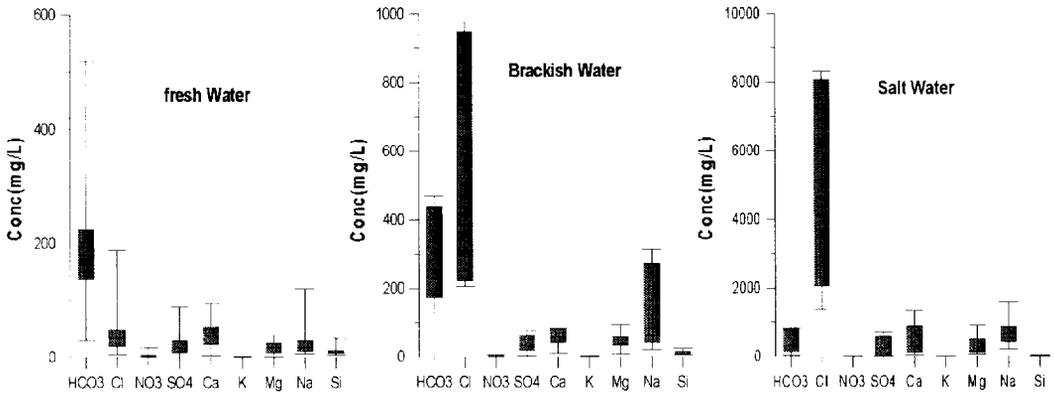


Fig. 4.27 Distribution of anion and cation by salinity

담수 지하수의 경우 증발잔류물이 13개 지점에서 수질기준을 초과하였으며, 암모니아성 질소 3개 지점, 보론 및 망간이 각각 2개 지점에서 초과한 것으로 나타났으나, 농도 및 분포가 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 기수지하수는 증발잔류물이 총 9개 지점 중 8개 지점에서 초과되었으며, 암모니아성 질소 및 보론은 각각 2개 지점에서 수질 기준치를 초과하였다. 또한 농도 및 분포도에서도 담수지하수보다 큰 것을 알 수 있다. 염수 지하수는 모든 항목들에서 담수지하수보다 농도 및 분포도에서 크게 나타났다. 또한 Table 4.10에 의하면 염도에 따른 수질 항목별 분류에 따라 담수지하수에서 염수지하수로 갈수록 부적합 비율이 높게 나타났다.

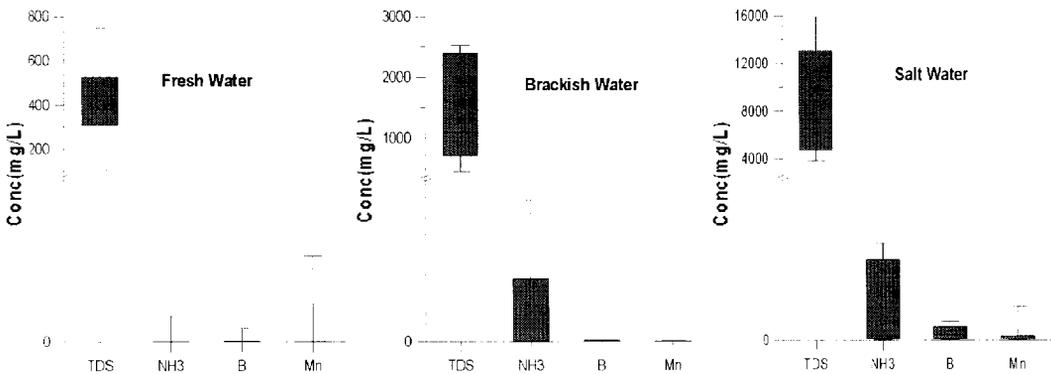


Fig. 4.28 Distribution of organic and inorganic compounds by salinity

Table 4.10 Statistics data of items by salinity

염도분류	증발잔류물(TDS)			암모니아성질소(NH <sub>3</sub> -N)			보론(B)			망간(Mn)		
	담수	기수	염수	담수	기수	염수	담수	기수	염수	담수	기수	염수
부건건수 (부적용)	13 (23.6)	8 (88.9)	6 (100)	3 (5.5)	2 (22.2)	2 (33.3)	2 (3.6)	2 (22.2)	3 (50.0)	2 (3.6)	0 (0.0)	4 (66.7)
평균값	418.1	1249.3	8714.7	0.086	5.103	3.974	0.075	0.243	0.959	0.122	0.033	1.003
최대값	749	2530.5	15926	1.660	31.540	12.435	0.890	1.225	2.355	5.447	0.201	4.336
최소값	106.5	452	3864.5	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.035	0.000	0.000	0.006

## 4.6.2 각 성분별 해수 기원

### 1) 증발잔류물(TDS)

증발잔류물(TDS)의 경우 물-암석반응이 활발하면 이온성물질이 지하수로의 용출이 가속화 되어 증발잔류물의 농도가 높아진다. 따라서 지하수의 심도가 증가하면 증발잔류물(TDS)의 농도도 증가할 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 4.29를 보면 심도가 깊어질수록 증발잔류물의 농도가 증가하는 것은 아니며, 또한 일정한 패턴을 보이는 것도 아니다. 따라서 연구지역 지하수의 TDS 증가는 물-암석 반응의 증가에서 기인하기 보다는 대도시 지하수의 특징인 인위적 오염 및 해수의 혼합에 의한 것으로 보여진다. 증발잔류물(TDS)이 해수 혼합의 주요인자로 이용되고 있으며 증발잔류물(TDS)과 여러 가지 수질분석 항목간의 상관계수를 살펴보면 Table 11.과 같다. 증발잔류물(TDS)은 염소이온(Cl<sup>-</sup>), 나트륨(Na<sup>+</sup>), 황산이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)등과 높은 상관계수를 보이고 있다. Cl의 기원은 생활하수, 비료, 제빙염, 해수에서 기인하며, 나트륨의 역시 생활하수, 제빙염, 공업용폐수 및 해수에서, 황산이온은 산업용폐수 및 황산비료 등에서 기인하는 것으로 나타나 연구지역 지하수는 인위적 오염 및 해수의 혼합에 의한 것으로 보여진다.

Table 4.11 Correlation coefficient of TDS with other items

	알칼리도	총경도	KMnO <sub>4</sub>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
TDS	0.20	0.69	0.44	0.97	0.80	0.54	0.73	0.77	0.91

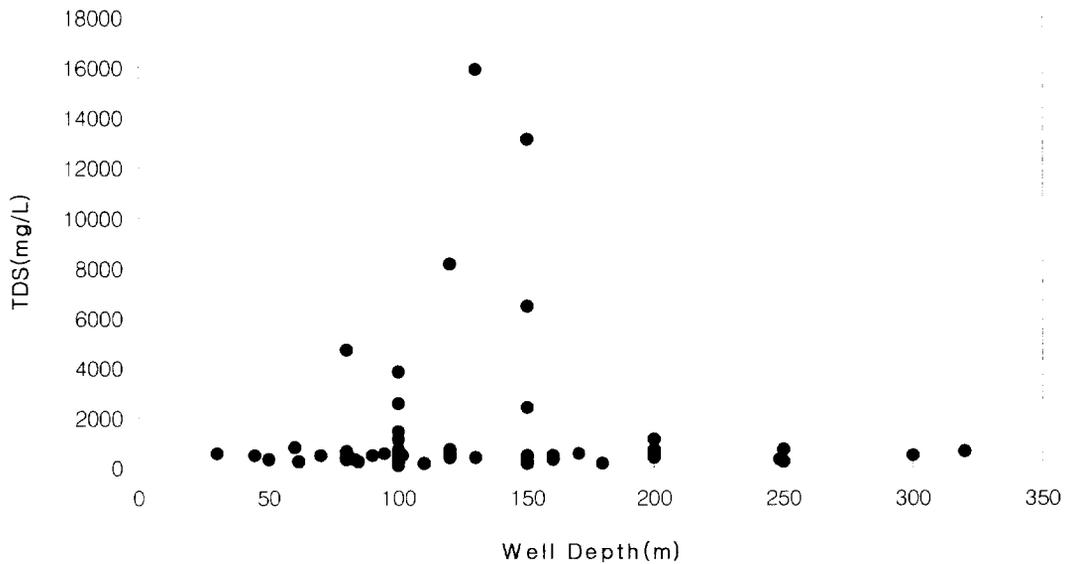


Fig. 4.29 Distribution of TDS by the depth pipe of groundwater

연구지역 지하수의 증발잔류물(TDS) 분포를 보면 태화강을 중심으로 직선상 가까운 거리에 위치하고 있는 지점이 높은 농도를 보이고 있다. 따라서 증발잔류물(TDS)의 증가는 생활하수 등과 같은 인위적 오염에 의한 것과 잔류해수와 같은 자연적 요인에 의한 것으로 복합적인 요인에 의한 것으로 보여진다.

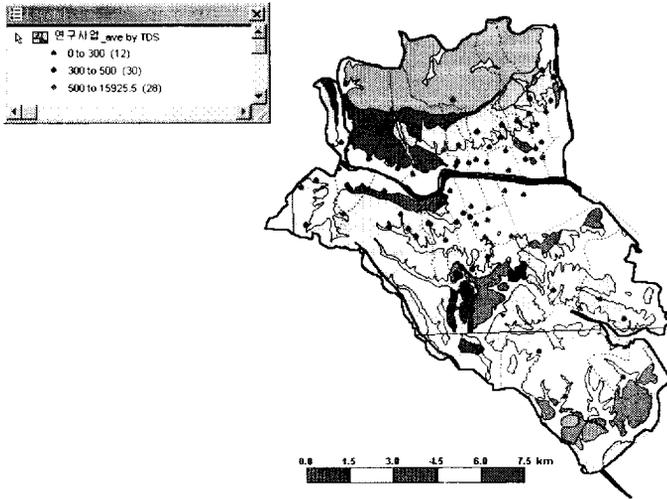


Fig. 4.30 Distribution of TDS in study area

## 2) 나트륨(Na')와 염소이온(Cl )

해안지역의 경우 해수에 의한 염염(NaCl) 성분이 지하수에 공급되어 용해되는 경우 Na'과 Cl 성분은 같은 몰농도로 증가하게 된다. 또한 세계 평균해수의 Cl/Na'의 몰농도의 비가 1.8로 알려져 있다. 따라서 Cl의 성분이 인위적으로 오염된 경우 Cl/Na'의 비가 2.0이상 초과할 것으로 생각된다. 또한 연구 지역은 해안선에 인접하고 있으며 바다와 연결된 태화강이 도심지를 가로지르고 있어 국부적인 해수의 영향을 받을 것으로 여겨진다. 지하수의 성분 중에서 해수로부터 공급되는 주요성분들의 당량비를 이용하여 해수의 영향을 살펴보았다.

(Hounslow, 1995)에 의하면  $Cl/\Sigma 음이온$ 의 값이 0.8이상이고  $HCO_3/\Sigma 음이온$ 의 값이 0.8이하의 영역에 속하는 지하수는 해수의 영향을 받는 것으로 기술하였다. 연구 지역의 지하수를 위와 같이 계산하여 도시하면 Fig. 4.31과 같다.

연구 지역의  $Cl/\Sigma 음이온$ 의 값은 0.030~0.987의 범위를 보이고 있으며 담수 및 기수 지하수 중에는 없으며 염수지하수중 4개 지점이 여기에 포함된다. 이 인자들을 통하여 보면 이들 지하수는 해수의 영향을 받는 것으로 나타났다.

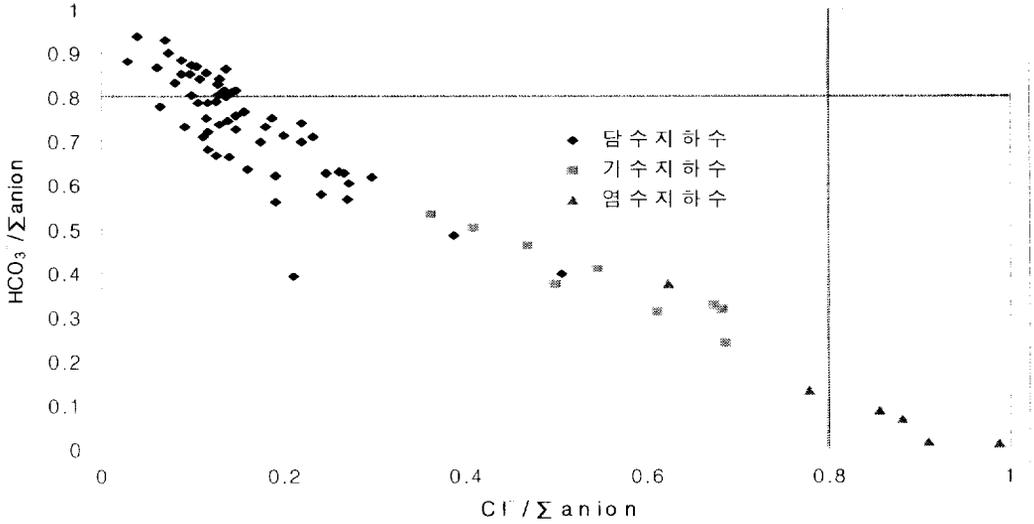


Fig. 4.31 Factors that prove the influence of seawater ( $\text{HCO}_3^-/\Sigma\text{anion}$ ,  $\text{Cl}^-/\Sigma\text{anion}$  ratio)

또한 Cl 성분이 해수의 염염으로부터 기인되었다면  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Cl})$ 비의 값이 0.5정도 되며, 해수 침투에 의한 것은  $\text{Cl}/\Sigma\text{음이온}$ 의 값이 0.8이상이고  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Cl})$ 비의 값이 0.3보다 작아야 한다.

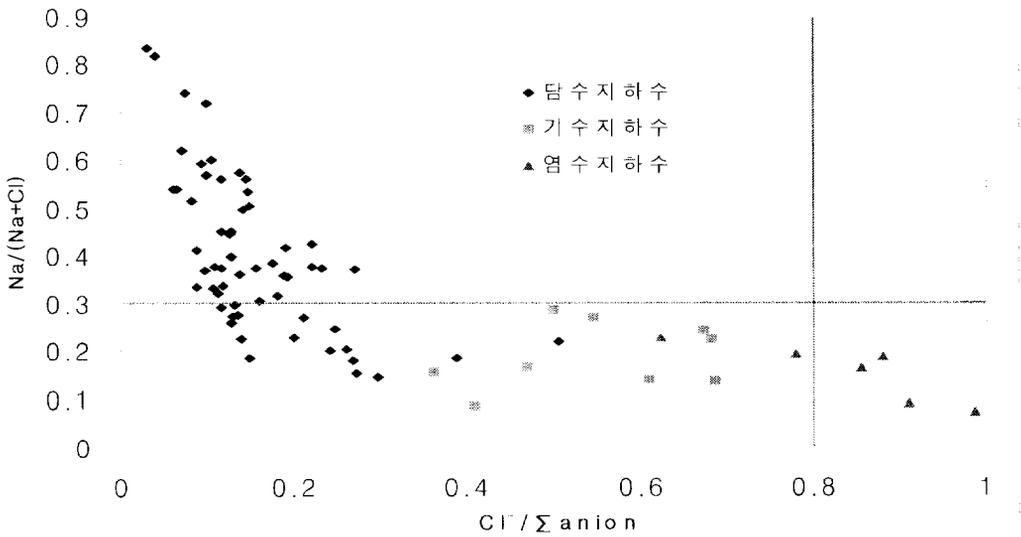


Fig. 4.32 Factors that prove the influence of seawater ( $\text{Na}/\text{Na}+\text{Cl}$ ,  $\text{Cl}/\Sigma\text{anion}$  ratio)

연구 지역 중 이 영역에 속하는 것을 Fig. 4.33에 나타내었으며, 전체 지하수중 4개 지점에서 해수 영향을 받는 것으로 나타났다.

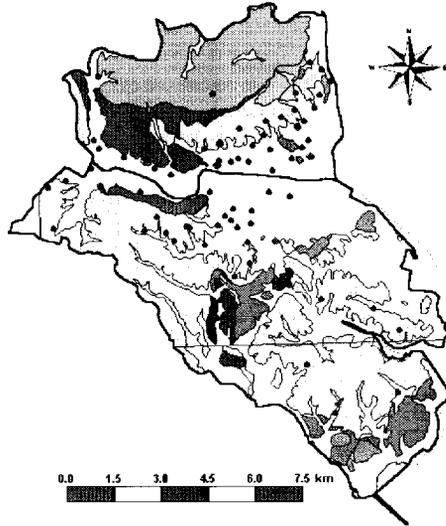


Fig. 4.33 Spots of seawater intrusion among groundwater in study area

위 분포도를 통하여 보면 태화강을 중심으로 직선상으로 가까운 거리에 위치하는 지점도 있지만 다소 떨어진 지점도 있는 것으로 나타났다. 만약 지하수가 해수의 직접적인 영향을 받는다면 태화강으로부터 인접한 거리에 위치하여야 할 것으로 사료된다. 또한 염소이온의 기원이 되는 것들을 살펴보면 정화조와 하수도의 누수, 물 연화제 등 인위적인 부분과 물-암석의 반응, 해수에 의한 압염의 영향, 해수의 직접적인 영향 등 자연적인 부분으로 나누어진다. 지금까지 자연적인 부분에 대하여 살펴보았고 다음으로 인위적인 요인들에 대하여 살펴보자.

지하수의 인위적 오염원에 의한 항목들로 널리 이용되는 것이 과망간산칼륨소비량, 질산성질소, 암모니아성질소등이 많이 사용된다. 따라서 조사 지역의 기수 및 염수지하수의 과망간산칼륨소비량, 질산성질소, 암모니아성질소의 농도를 살펴보면 Table 4.12와 같다.

담수지하수의  $\text{KMnO}_4$  농도의 평균값은 1.3mg/L이고, 최대값은 7.8mg/L으로 나타났으며, 기수지하수는 14.9, 69.3mg/L, 염수지하수는 39.3, 78.2mg/L로 각각 나타났다.  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  농도는 담수지하수는 3.31, 17.7mg/L, 염수지하수는 1.44, 6.45mg/L, 기수지하

수는 1.10, 5.20mg/L로 각각 나타났다. 또한  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 담수지하수는 0.086, 1.660mg/L, 기수지하수는 5.103, 31.540mg/L, 염수지하수는 3.974, 12.435mg/L로 나타났다. 이들 항목들에 의하면 기수 및 염수 지하수가 담수 지하수보다 더 많이 오염되어 있는 것으로 나타났다. 따라서 CI의 기원을 해수에 의한 것으로 단정하기 곤란하며 정화조 및 하수도에 의한 누수일 가능성도 배제할 수 없다.

Table 4.12 Conc. consumption of  $\text{KMnO}_4$  and  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  of brackish & salt water

구 분	항 목	$\text{KMnO}_4(\text{mg/L})$	$\text{NO}_3^- (\text{mg/L})$	$\text{NH}_4^+(\text{mg/L})$
기수 지하수	S-12	2.8	2.0	0.000
	S-21	1.3	6.5	0.015
	S-23	69.3	0.2	31.540
	S-29	3.8	1.3	0.000
	S-38	1.9	0.9	0.375
	S-47	47.9	0.0	13.98
	S-48	2.5	0.6	0.000
	S-56	4.1	0.5	0.000
	S-60	1.1	1.2	0.015
염수 지하수	S-20	75.8	0.0	10.300
	S-22	78.2	0.2	12.435
	S-43	23.9	0.3	0.730
	S-46	20.7	0.0	0.185
	S-49	17.3	1.0	0.185
	S-59	20.1	5.2	0.010

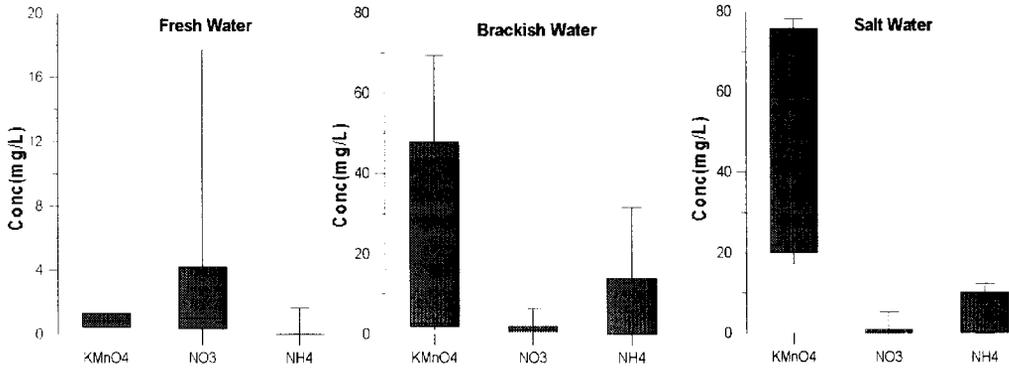


Fig. 4.34 Distribution of KMnO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub> by salinity

### 3) 브롬(Br<sup>-</sup>)와 염소이온(Cl<sup>-</sup>)

물 속의 브롬과 염소이온은 자연적인 지질환경에서 비 반응성이고 화학적으로 가장 안정한 이온물질중의 하나로 알려져 있다. 이들은 다른 원소와 반응하지 않을 뿐만 아니라, 환원환경에서 침전하지 않고, 다른 광물이나 유기물에 흡착되지 않으며, 비용해성 침전물을 형성하지도 않는다. 따라서 브롬과 염소의 함량비는 지하수중 염의 기원을 추적하는데 널리 이용되고 있다. 해수 침입의 영향을 받은 지하수의 Br:Cl 함량비는 해수의 함량비와 비슷하며, 해수의 Br:Cl 함량비는  $34.7 \times 10^{-4}$ 로 알려져 있다 (Morris & Riley, 1966). 따라서 연구지역의 Br:Cl 함량비가 해수의 비와 비슷하면 지하수의 높은 Cl은 해수로부터 유래되었다고 추정할 수 있으며, 다르다면 지하수의 높은 Cl은 다른 기원에서 유래되었다고 볼 수 있을 것이다. 이는 해수 침입보다는 잔류해수 및 해양성퇴적물이 오랫동안 지질매체와 반응을 거친 결과로 나타나는 현상일 것이다.

연구 지역 지하수의 브롬(Br) 검출 지역 중 Cl, Br/Cl의 농도를 살펴보면 Table 4.13과 같다.

Table 4.13 Conc. of Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> and Br/Cl ratio in study area

시료채취지점	Br <sup>-</sup> (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	Br/Cl( $\times 10^{-4}$ )ratio
S-12	1.074	298	36.0
S-20	27.235	7053	38.6
S-21	1.619	273	59.3
S-22	5.579	1390	40.1
S-23	5.004	1158	43.2
S-38	0.892	327	27.3
S-43	15.637	4123	37.9
S-46	10.002	2648	37.8
S-47	4.560	981	46.5
S-49	6.032	1837	32.8
S-56	0.913	353	25.9
S-59	62.332	12219	51.0

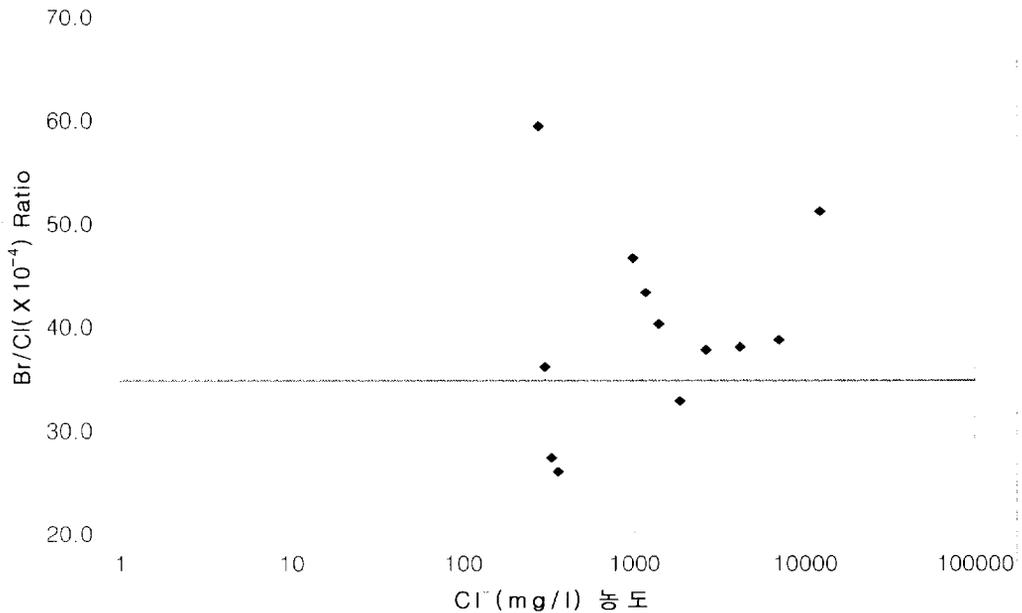


Fig. 4.35 Conc. ratio of Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> in study area

연구 지역 지하수 70개소중 브롬이 검출된 지점은 12개소(17.1%)로 남구 5개소 중구 7개소로 각각 나타났으며 농도 범위는 0.892~62.332mg/L로 나타났다.

염소이온의 농도가 증가할수록 브롬이온의 농도 역시 증가하는 양상을 보여주고 있으며 Cl의 함량이 100mg/l이하의 지하수에서는 브롬이 전혀 검출되지 않았으며 대부분 기수 및 염수지하수에서만 검출되었다.

해수의 Br/Cl 함량비가  $34.7 \times 10^{-4}$ 으로 연구 지역의 함량비는 이보다 대부분 높게 나타났다(Fig. 4.35). 이들의 Br/Cl의 함량비가 해수의 함량비를 벗어나고 있어서 해수의 침입과 같은 직접적인 영향은 아닌 것으로 보여진다. 따라서 해수의 직접적인 침입보다는 잔류해수 및 해양성퇴적물에 의한 영향과 생활하수 및 정화조 누수에 의한 염소이온의 증가에 의한 것으로 보여지며, 또한 해수와 담수의 혼합에 의한 것으로 추정된다.

## 4.7 GIS를 이용한 항목별 농도 분포

지하수의 개발 및 이용에는 적극적이고 높은 관심을 보이고 있으나 보존대책 및 오염방지에는 실제로 미흡한 실정이다. 이로 인해 도시지역에 다양하게 분포하고 있는 잠재오염원에 대한 철저한 조사 및 관리가 절실히 요구되는 상황이다. 따라서 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)을 이용하면 보다 체계적이고 과학적인 지하수 관리 및 오염현황을 분석하는 것이 가능하여 질 것으로 보여진다. 이번 연구에서는 위성사진(IRS-1D,25m) 및 1/25,000 축적의 울산광역시 행정구역도를 이용하였으며, 더불어 한국지질자원연구원 지질조사소에서 발행한 1/50,000 지질도(울산도폭, 방어진도폭)를 사용하여, 이를 Geo-media professional GIS-tool을 이용하여 도시하였다. 연구 지역의 경우 태화강을 중심으로 양분되어 있어 지하수 검사항목들 중에서 검출빈도가 높고 수질특성을 파악하는데 도움을 주는 항목을 중심으로 총 70개 지점을 대상으로 실시하였으며, 각 지역의 오염 분포도 및 지하수의 해수침입 여부 등을 살펴보고자 한다.

### 4.7.1 과망간산칼륨소비량(KMnO<sub>4</sub>)의 농도 분포

인위적 오염물질의 주요인자로 사용되며 수중의 피산화성 물질의 정도를 나타내는 것으로 주로 토양에서 유래하는 휴민질이 많이 포함된 지하수에 나타나며, 하수 및

정화조의 누수에 의하거나 공장배수등이 혼입될 때 주로 나타나며 수질오염의 지표로서 사용된다. 연구 지역의 과망간산칼륨소비량의 농도 분포를 나타내었다(Fig. 4.36).

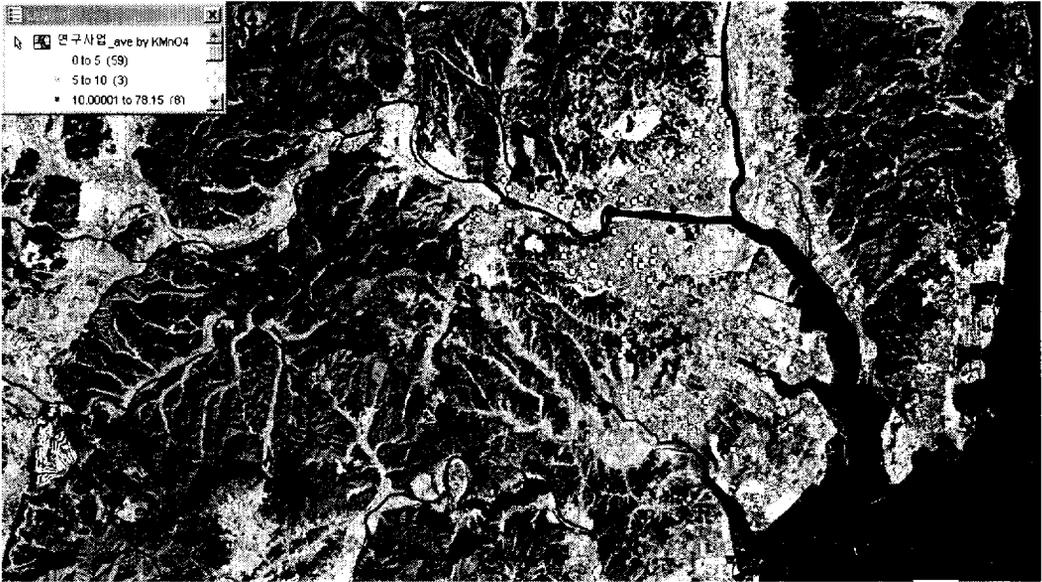


Fig. 4.36 Distribution of consumption of  $\text{KMnO}_4$  using GIS

과망간산칼륨소비량의 먹는물 수질기준(10.0mg/L)을 초과하는 지점은 중구 5개소, 남구 3개소로 각각 나타났으며 주거지역 및 공단지역에는 분포하고 있지 않으며, 대부분의 지점들이 태화강을 중심으로 인접한 거리에 위치하고 있는 것이 특징적이다.

#### 4.7.2 암모니아성질소( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )의 농도 분포

지하수중의 암모니아성질소는 공장배수, 하수, 분뇨 등의 혼입에 의해 생기는 경우가 많아 오염의 정도를 의심할 수 있어서 지하수 오염의 지표로 이용된다. 그러나 심부 지하수의 경우 질산성질소의 환원에 의해서 암모니아성질소 농도가 증가하는 경우도 있는 것으로 나타났다.

암모니아성질소의 먹는물 수질기준(0.5mg/L)을 초과하는 지점은 연구 지역 중 중구 4개소, 남구 4개소로 같은 빈도를 보이고 있다(Fig. 4.37).

초과 지점을 살펴보면 과망간산칼륨소비량과 마찬가지로 내륙 지역에는 존재하지 않으며 태화강과 직선상 가까운 거리에 있는 지점들이 주를 이루고 있다. 또한 과망간산칼륨소비량의 농도가 높은 지점과 암모니아성질소가 높은 지점이 거의 일치하고 있으며, 이는 국지적 오염으로 인위적 오염물질 즉 생활하수 및 정화조의 누수로 인해 지하수에 유입된 것으로 보여진다.

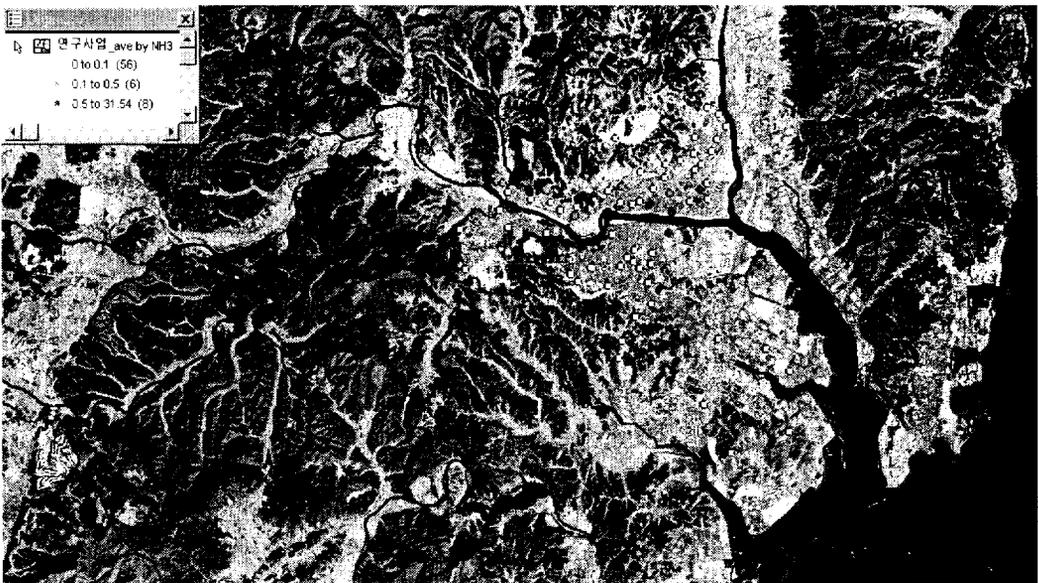


Fig. 4.37 Distribution of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  using GIS

### 4.7.3 휘발성유기화합물질(VOCs)의 농도 분포

지하수중의 VOCs 오염은 연료, 가솔린, 용매제, 세탁제, 페인트 등 여러 가지 요인에 의해서 유출되며 산업용, 상업용, 가정용등 다양한 배출원으로부터 지하수로의 유입이 이루어지고 있다.

연구 지역중 VOCs의 검출빈도는 매우 희박하였으며 검출항목 역시 3가지( $\text{CCl}_4$ , TCE, PCE)로 나타났다(Fig. 4.38).

사염화탄소( $\text{CCl}_4$ )의 경우 공업지역 1개 지점에서 0.0025mg/L로 검출되었으며 테트라클로로에틸렌(PCE)는 상업지역 2개 지점에서 0.002, 0.001mg/L로 미량 검출되었고,

트리클로로에틸렌(TCE)는 연구지역 골고루 분포하고 있으며 4개 지점에서 0.001~0.0088mg/L로 미량 검출되었다. 따라서 연구 지역의 휘발성유기화합물질 오염은 다른 대도시에 비하여 양호한 것으로 나타났으며 일부 공업지역에서 사업화탄소의 오염이 국지적으로 나타나고 있다.

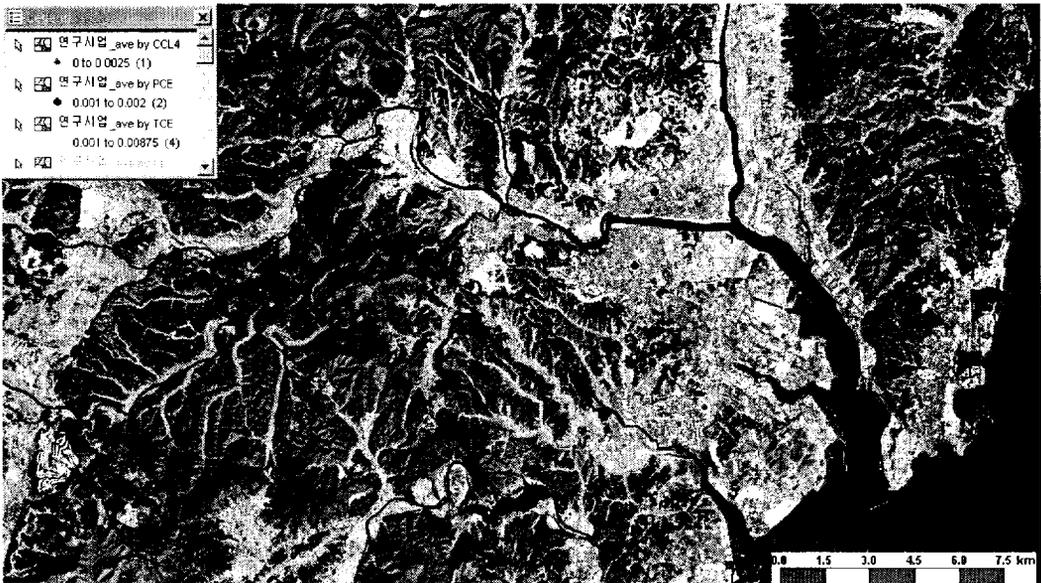


Fig. 4.38 Detected spot and distribution of VOCs using GIS

#### 4.7.4 중금속의 농도 분포

지하수중의 중금속 함량 및 농도는 대부분 지질적인 요인에 의한 것이 많으며, 일부 인위적인 오염에 의해서 지하수중 중금속 농도가 높게 나타나고 있다. 먹는물 수질감사항목 중 연구 지역에서 다량 존재하는 중금속은 망간(Mn)으로 나타났다. 남구, 중구 지역 모두 3개소씩 먹는물 수질기준에 부적합 한 것으로 나타났으며, Fig. 4.39에 의하면 연구 지역 지하수중 Mn의 분포형태를 살펴보면 질산성질소의 농도가 높은 지점에서는 Mn의 농도가 매우 낮거나 거의 검출되지 않았으며, 질산성질소의 농도가 5mg/L이하의 지하수에서는 Mn의 농도가 높게 나타났다. 이는 연구지역 지하수의 산화환원전위가 높음을 의미하는 것으로 지하수중의 Mn 성분이 산화물 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다.

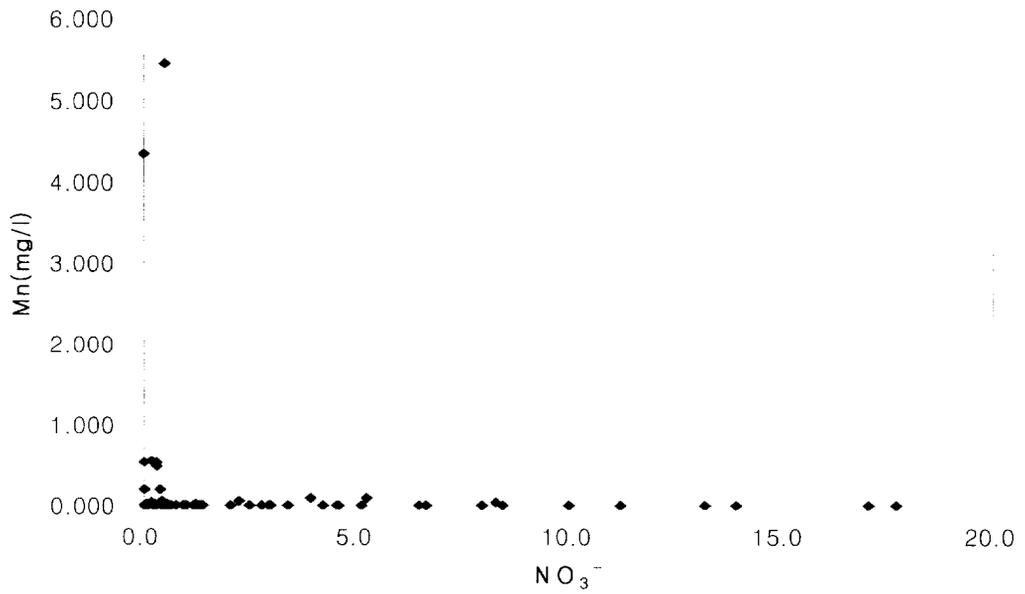


Fig. 4.39 Relation between NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and Mn in study area

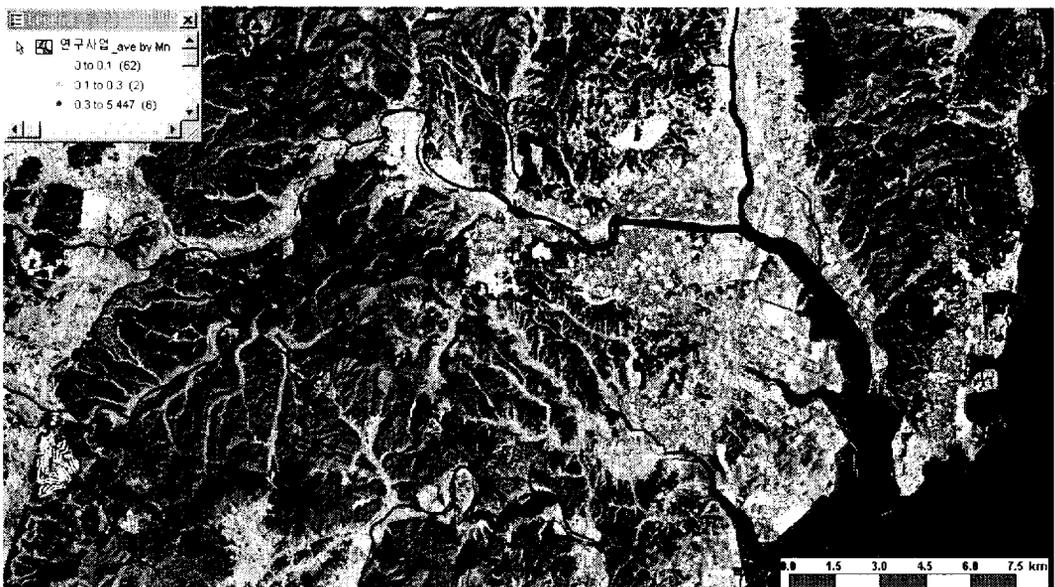


Fig. 4.40 Distribution of Mn using GIS

망간(Mn) 다음으로 많이 존재하는 중금속은 보론(B)으로 나타났다. 연구지역 중 남구 5개소, 중구 2개소가 먹는물 수질기준에 각각 부적합한 것으로 나타났다. Table 4.14에 의하면 모든 지점에서 5월보다는 10월에 보론(B)의 농도가 낮게 나타났다.

또한 S-14, S-35지점을 제외한 모든 지점들은 염소이온의 농도가 높은 염수 지하수로 분류된 지점들이다. 따라서 이들 지하수의 보론 기원은 잔류해수 및 해양성퇴적물에 의한 것으로 추정된다. 특히, S-35지점은 공업지역으로 폐수중의 중금속 조절제로 사용되는 보론(B)이 오염된 것으로 보여진다. 또한 카드뮴(Cd)은 폐기물 매립지역에서 1개소가 부적합한 것으로 나타났다.

Table 4.14 Spot of high Concentration of Boron in study area (unit : mg/l.)

		평균	5월	10월
남구	S-14	0.89	1.00	0.78
	S-20	2.36	3.32	1.39
	S-22	1.68	1.77	1.59
	S-23	1.23	1.10	1.35
	S-35	0.68	0.81	0.54
중구	S-43	1.22	1.33	1.10
	S-47	0.32	0.61	0.02

## V. 결 론

본 연구에서 감조하천 주변 지역 지하수의 수질특성 및 토지이용 실태에 따른 지하수의 오염 정도, 지하수위 변화에 따른 지하수의 수질변화와 태화강 중심으로 형성되어 있는 도심 지역 지하수의 해수침투 영향 등을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연구 지역의 지질은 대부분 백악기 말의 하양층군에 속하는 울산층과 이를 관입한 화강암류로 구성되어 있으며, 주 단층은 울산단층과 일광단층으로 이루어져 있다.
2. 지하수 유입량은 강수량과 상하수도 누수량을 들 수 있으며 연구 지역의 년 평균 강수량은 1280.9mm로 나타났으며, 상하수도 누수량은 약 78,000m<sup>3</sup>/d(상수도 사용량 190,000m<sup>3</sup>/d, 하수도 발생량 200,000m<sup>3</sup>/d, 누수율 20%추정)정도 이며, 지하수 유출량은 남구 562개소 9277m<sup>3</sup>/d, 중구 224개소 8588m<sup>3</sup>/d로 나타났다.
3. 연구 지역의 지하수 수질유형을 살펴보면 남구는 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형이 가장 우세하게 나타나 화강암 및 퇴적암 지질 유형을 보였고, 중구는 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl형이 가장 우세하게 나타났으며 일부 지점에서 Ca-Cl형도 나타나고 있어 염소이온의 영향을 받는 것으로 나타났다.
4. 지하수 용도별 수질특성을 살펴보면 학교, 주거, 공업지역의 경우 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형이 가장 우세하게 나타났고, 목욕, 상업 지역은 Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl, Na-Cl, Ca-Cl형 등 여러 가지 수질 유형을 보이고 있으며, 특히 Cl 형이 가장 우세하게 나타나고 있다.
5. 지하수위별 수질유형을 살펴보면 천부지하수(150m이하)의 경우 Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl형이 주를 이루고 있으며, 심부지하수(150m이상)는 Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>형이 우세하게 나타났다. 또한 수질검사 항목중 총경도 및 염소이온의 경우 150m이하의 천부 지하수에서 높게 나타났으며, 질산성질소는 지하수위에 관계없이 모든 구간에서

높게 나타났다.

6. 계절별 지하수질을 살펴보면 남구는 5월보다는 10월에 지하수질이 양호한 것으로 나타났으며, 중구는 반대로 5월보다 10월이 지하수질이 더 나빠진 것으로 나타났다. 이는 일부 지점에서 지하수가 오염되는 것으로 추정된다.
7. 각 성분별 상관계수를 보면 총경도는 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ), 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ )과 가장 높은 0.92, 0.93의 상관계수를 보이고, 과망간산칼륨소비량은 암모니아성 질소와 0.70의 높은 상관계수를 보이며, 염소이온은 특히, 황산이온, 양이온( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ )등과 높은 상관계수를 보여 지하수의 해수침입 여부를 판단하는 기초자료로 사용되었다.
8. 연구 지역의 기수 지하수는 9개, 염수 지하수는 6개로 남구(6개) 보다 중구(9개)에서 우세하게 나타났다. 이들 지하수의 Cl 이온이  $\text{Na}^+$  이온을 2배 이상 초과하고 있어 인위적 오염에 의한 Cl 이온이 공급된 것으로 보여진다.
9. 기수 및 염수 지하수의 과망간산칼륨소비량, 암모니아성 질소의 농도를 살펴보면 담수 지하수보다 월등히 높게 나타나고 있어 이들 지하수가 인위적으로 오염되고 있음을 보여주고 있다.
10. 따라서 이들 지하수의 Cl 의 기원은 복합적인 요인으로 추정되며, 직접 해수에서 유입되었다기보다는 총적층내에 있던 잔류해수일 가능성과 생활하수 및 정화조 등의 누수에 의한 가능성으로 보여진다.
11. 연구 지역의 휘발성유기화합물질(VOCs)에 의한 지하수 오염은 다른 대도시에 비해 양호한 것으로 나타났으며, 사염화탄소( $\text{CCl}_4$ )에 의한 일부 공업지역에서 국지적으로 나타나고 있다.
12. 또한 연구 지역의 중금속 오염은 망간(Mn), 보론(B), 카드뮴(Cd) 등에 의한 것으로 나타났으며, 이들 대부분은 지질적인 요인에 의한 것으로 보여진다. 그러나 일부 공업 지역에서는 인위적인 요인에 의하여 지하수가 오염된 것으로 나타났다.

## 감사의 글

부족함이 많은 저에게 언제나 용기와 희망을 가지도록 일러주신 모든 분들에게 먼저 감사의 말씀을 드립니다.

특히 본 논문이 결실을 맺을 수 있도록 많은 조언과 부족한 저를 이곳까지 이끌어 주신 강임석 지도교수님께 깊은 감사를 드리며, 논문의 심사를 맡아 학문적 지도와 세심한 조언을 해주신 이병헌 교수님, 김상단 교수님께도 깊은 감사를 전하며, 가르침에 인색하지 않았던 박청길 교수님, 이석모 교수님께도 감사를 드립니다. 더불어 논문이 끝날 때까지 많은 도움을 주신 상수도공학 실험실의 이철우 박사님과 여러 후배님들께 감사를 드립니다.

학위과정을 무사히 마칠 수 있도록 배려하시고 격려해주신 울산보건환경연구원의 함유식 원장님, 정수근 부장님 및 수질연구과 이진열 과장님과 직원여러분들께도 감사의 뜻을 전합니다. 특히 대학원 동기생으로 많은 격려와 조언을 아끼지 않은 경남보건환경연구원의 김상모 선생님께 미안한 마음과 더불어 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

일생을 통해 당신의 모든 것을 주시고도 더 주지 못함을 늘 안타까워하시는 어머니와 불편한 몸이면서도 자식의 앞날의 행복을 기원하시는 아버님과 가장 사랑하는 막내딸을 이 사람에게 보내주신 장모님께도 고마움을 전합니다.

남들은 아이 하나 키우기도 힘들다고 하는데 셋이나 낳고도 힘든 표정 하나 없이 잘 키워주는 아내 미영이에게 진심으로 고맙다는 말과 사랑을 전하며, 나의 믿음직한 두 아들 진한이, 동환이와 사랑스런 나의 공주 은지와 이 모든 기쁨과 영광을 함께 나누고자 합니다.

## 참고 문헌

- Appelo, C. A. J. and Postma, D., Geochemistry, groundwater and pollution, A.A. Balkema, Rotterdam, 535p, (1999).
- Appelo, C. A. J. and D. Postma, Chemical analysis of groundwater, Geochemistry, groundwater and pollution, (1999).
- Hounslow, A. W, Water Quality data Analysis and interpretation, Lewis Publishers, Boca Raton, New York., (1995).
- Morris, A. W. and Riley, J. P., The bromide/chorinity and sulphate/chorinity ratios in seawater, Deep-sea Research and oceanographic abstracts 13, No., 4, (1966)
- Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, Prentice Hall, (1994).
- 건설교통부, 지하수조사연보, (2003).
- 김남천, 상수시험방법, 동화기술, (1993).
- 김학명, 지하수오염론, 동화기술, (1996).
- 김연태, 우남칠, 축사가 밀집된 농촌지역 천부지하수의 질산염 오염특성, 한국지하수도양환경학회지, 8(1), 57~67, (2003).
- 김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 한국지하수도양환경학회지, 4(2), 61~72, (1997).
- 박양대, 윤형대, 한국지질도(1:50,000), 울산도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, (1968a)
- 박양대, 윤형대, 한국지질도(1:50,000), 방어진도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, (1968b)
- 심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 김병우, 지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성, 한국지하수도양환경학회지, 7(3), 3~17, (2002).
- 성익환, 도시지역 지하수오염 저감기술 연구, 한국지질자원연구원, (2003).

- 양해근, 김인수, 최희철, 김정우, 광주, 본촌지역 지하수의 수화학적 특성과 오염, 한국지하수토양환경학회지, 6(4), 83~95, (2001).
- 우남철, 최미정, 정성욱, 이승구, 경기도 용인시 일대 천부지하수의 수질특성, 한국지하수토양환경학회지, 6(2), 53~58, (1999).
- 윤정수, 박상운, 제주도 용천수의 수리화학적 특성, 한국지하수토양환경학회지, 5(2), 66~79, (1998).
- 이인호, 조병욱, 이병대, 성익환, 광주광역시 지하수의 수리지화학적 특성 연구, 한국지하수토양환경학회지, 7(3), 115~132, (2002).
- 이종운, 전효택, 전용원, 국내 화강암질암내 지하수의 지구화학적 특성, 한국지하수토양환경학회지, 4(4), 199~211, (1997).
- 이평구, 박성원, 전치완, 신성천, 서울시 도로변 빗물과 지하수의 VOCs 오염, 한국지하수토양환경학회지, 6(3), 73~91, (2001).
- 전효택, 안홍일, 지리정보시스템을 이용한 지하수 오염 평가, 한국지하수토양환경학회지, 5(3), 129~140, (1998).
- 정기영, 김강주, 김종용, 박재형, 이도영, 박순길, 포항-경주지역 양산단층대 주변의 고분소 지하수 산출특성, 대한자원환경지질학회지, 39(3), 371~384, (2003).
- 최선영, GIS의 통계적 공간분석을 이용한 해수침투 분포 양상 파악, 전남대학교 대학원, 석사학위논문, (2004).
- 함세영, 조병희, 성익환, 부산 남부지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리화학적 특성 비교, 한국지하수토양환경학회지, 6(3), 140~151, (1999).
- 황성, 허순도, 금산-완주지역 형석광화대내 석회암 및 화강암지역 지하수의 불소분포 특성 및 저감방안, 대한자원환경지질학회지, 34(1), 105~117, (2001).