

[총 설]

1930년대 평양지역의 수리지질 특성

오윤영¹ · 함세영^{1*} · 이충모¹ · Wei Ming Laing¹ · 김규범² · 김문수³

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²한국수자원공사 연구원, ³국립환경과학원 토양지하수과

[Review]

Hydrogeological Characteristics of the Pyeongyang Area in the 1930s

Yun-Yeong Oh¹, Se-Yeong Hamm^{1*}, Chung-Mo Lee¹, Wei Ming Liang¹,
Gyoo-Beom Kim², MoonSu Kim³

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Republic of Korea

²Geowater+ Research Center, K-water Institute, Daejeon, 305-730, Republic of Korea

³Soil and Groundwater Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, 404-708, Republic of Korea

Received 11 November 2014; received in revised form 25 November 2014; accepted 1 December 2014

본 연구에서는 1930년대 평양 대동강 유역의 남측(탄산염지역)과 북측(비탄산염지역)의 지하수와 지표수의 수질(pH, CaO, Fe, HCO₃⁻, SO₄²⁻)을 비교 하였다. 그 결과 남측이 북측에 비해 pH와 SO₄²⁻의 농도는 높았고 HCO₃⁻와 Fe의 농도는 낮게 나타났다. 이는 점토층 유기물의 산화에 의해 발생한 수소가 무기염류의 금속이온을 치환하여 산을 형성하는 반응에 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

주요어: 평양, 대동강, 지하수 수질, 지표수 수질, 탄산염암 지역

The chemical properties and composition (pH, CaO, Fe, HCO₃⁻, and SO₄²⁻) of groundwater (GW) and surface water (SW) from the northern (non-carbonate bedrock) and southern (carbonate bedrock) sections of the Daedong River, Pyeongyang were analyzed and compared period of the 1930s. In the southern section, the GW and SW has a higher pH and SO₄²⁻ concentration, but lower HCO₃⁻ and Fe levels than in the north. This finding reflects a reaction that formed acid by replacing metal ions in inorganic salts by hydrogen, which resulted from the oxidation of organic material in a clay layer.

Key words: pyeongyang, daedong river, groundwater quality, surface water quality, carbonate rock area.

서 언

평양은 고조선 이래 왕검(王儉), 기성(箕成), 낙랑(樂浪), 서경(西京), 또는 유경(柳京) 등의 이름으로 한반도

북쪽의 문화유산을 대표하는 고도(古都)로서 대동강의 연안에 위치하며 해발 12 m 내외의 대동강 충적범람원과 주변의 고도 30~50 m에 달하는 구릉성산지로 이뤄져 있다. 1930년대에는 석회석, 철, 석탄 등의 중요자원

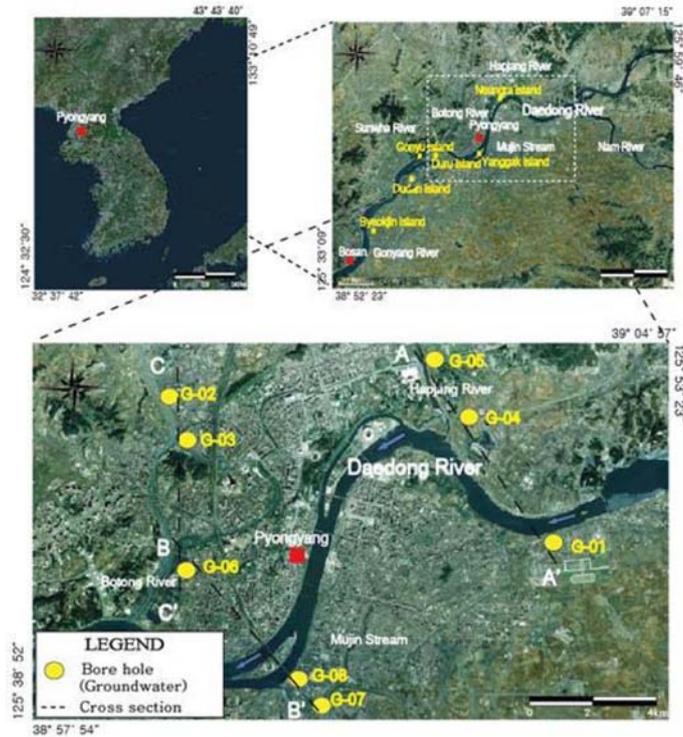
*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Average temperature, rainfall, and evaporation in study area from 1907 to 1934 (Muroi et al., 1939).

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Ave. (Sum)
Temperature (°C)	-8.0	-5.0	1.3	9.3	15.4	20.5	24.0	24.3	18.8	11.8	3.0	-5.1	9.2
Rainfall (mm)	14.8	12.6	24.7	45.1	70.4	72.7	252.7	222.6	119.0	46.9	40.3	19.0	(940.9)
Evaporation (mm)	34.9	49.0	89.0	145.5	177.8	186.2	161.9	151.1	124.9	96.8	54.0	36.1	(1207.3)

**Fig. 1.** Map of the study area (modified from Daum Map).

을 기반으로 경의간선, 평양선, 평원선 등 철도와 도로 및 대동강을 통한 선박 운송을 통해 일본, 만주, 중국 등과의 교역의 중심지이자 당시의 한반도 굴지의 공업 지대였다(Muroi et al., 1939). 당시 이미 모든 공업시설은 주로 수원이 풍부한 대동강 양쪽 연안에 집중되어 추후 증설될 공업시설들은 대동강과 그 지류의 평야지대로 확장되어야 할 만큼 포화상태에 이르러 있었다. 1937년 당시 평양 지역의 지하수 부존 특성과 수질을 분석하기 위해 8개소에서 시추조사를 실시하고, 이들 시추공의 지하수 시료와 대동강 유역 12개소의 지표수 시료에 대해 수질분석을 수행하였다(Fig. 1; Muroi et al., 1939).

본 연구는 일제 강점기인 1937년에 수행된 평양지역 및 대동강 유역의 수리지질 특성에 관한 최초의 조사 내용을 분석한 것으로 향후 북한에 대한 연구를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

기후, 지형 및 지질

기후

1907년부터 1934년까지 평양지역은 대륙성 기후로 기온의 교차가 매우 크고, 연평균 기온은 9.2°C로서 하절기(6월~9월)에 평균 22.9°C, 동절기(12월~2월)에 -6.03°C로 뚜렷한 삼한사온의 특징을 보였다(Table 1). 같은 시

Table 2. Tributaries of the Daedong River.

Tributary	Drainage area (km ²)	Main stream length (km)	Navigable distance (km)
Botong River	643.016	59.30	6.0
Gonyang River	376.03	40.20	7.2
Sunhwa River	328.21	63.50	18.10
Bongsang River	213.15	33.38	11.60

Table 3. Planation surface in Pyeongyang area (Muroi et al., 1939).

Geology	Altitude (El., m)	Stratigraphy
Upper	50~60	Reddish brown, sandy gravel layer (0-4 m thick) with granite/quartzite particles (20-60 cm diameter)
Lower	20~30	Reddish brown, sandy gravel (20-60 cm diameter)

기에 연평균 강수량은 940 mm 내외이며, 증발량은 약 1,300 mm를 나타내었다(Muroi et al., 1939).

지형

하천

대동강은 평안남도 영원군(寧遠郡) 낭림산(狼林山)에서 발원하여, 동북에서 서남 방향으로 흐르고, 우안으로는 합장강(合掌江), 보통강(普通江), 순화강(順和江), 봉상강(鳳翔江), 좌안으로는 무진강(戊辰江), 곤양강(昆陽江) 등의 지류가 합류하여 진남포(鎭南浦)의 서남 12 km 지점에서 황해로 흘러들어간다. 1930년대 당시 대동강의 수심은 3~10 m, 강폭은 500~1000 m로서 범람하상의 최대 강폭은 약 4 km에 달하였다. 유로는 완전한 사행천을 보이며, 능라도(綾羅島), 삼월도(三月島), 양각도(羊角島), 이암도(狸岩島), 봉래도(蓬萊島), 두로도(豆老島), 곤유도(鵝遊島), 문발도(文發島), 도랑도(桃浪島), 강도(江島), 벽지도(碧只島), 합도(蛤島), 신도(新島) 등의 방추형 사주를 형성하고 있었다(Muroi et al., 1939). 대동강의 상류지역은 수목이 번창하였고, 수원이 뚜렷하였으며, 토사의 유하(流下)가 비교적 적었다. 또한 하상은 침식으로 인해 매년 조금씩 낮아지는 경향이 있었고, 하류 저습(低濕)지역에서는 상류에서 운반된 토사의 퇴적으로 하상이 상승하여 우기에는 홍수피해가 많이 발생하였다. 대동강의 본류 및 각 지류의 범람원은 해발 6~10 m의 저습지로 조석간만의 영향으로 조차가 약 2 m에 달하였으며, 그 당시 습지를 제외한 대부분은 논으로 이용이 가능하였다. 또한 향후 양안(兩岸)의 독 공사를 통하여 공업용지로서도 이용할 수 있는 곳도 많을 것으로 보고하였다. 당시 대동강 본류와 지류(보통강(普通江), 곤양강(昆陽江), 순화강(順和江), 봉상강(鳳翔江))

의 유량은 비교적 풍부하였고, 지류의 발달은 주요 지질 구조선과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 판단하였다(Table 2; Muroi et al., 1939).

지형

대동강의 남측지역에는 해발 20~60 m의 매우 완만한 기복을 보이는 파랑상 구릉이 발달하였고, 상단과 하단으로 구분되는 2단의 평탄면이 있었다(Table 3). 상부 평탄면은 은산역층(殷山礫層)의 퇴적면에 대비되고, 하부 평탄면은 고기의 하안 퇴적층면에 대비 된다. 대동강의 북측지역에는 합장강(合掌江), 보통강, 순화강, 봉상강 등의 지류가 있고, 남측과 같이 평탄면 및 단구면(terrace surface)이 존재하였으며, 지표는 대부분 해발 100 m 내외로서 남측에 비해 좀 더 높다. 북측은 남측보다 단층애(fault scarp) 및 단층계곡(fault valley)등이 더 많이 분포되어 있다. 1930년대 당시의 시추조사 결과(Table 4)와 지형 특성을 종합하면, 연구지역은 요곡운동(撓曲運動, warping)에 의해서 준평원작용(準平原作用, peneplanation), 1차 융기 및 고기 하안단구면(河岸段丘面) 형성, 2차 융기 및 침식작용, 침강작용, 충적평원 형성단계를 거친 것으로 판단 된다(Fig. 1; Muroi et al., 1939).

지질

지질 및 지질구조는 코토우(古藤)교수를 비롯해서 야베(矢部)교수, 카와사키 시게타로(川崎繁太郎)박사, 토쿠나가(徳永)박사 등의 보고서와 교토제국대학(京都帝國大學) 나카무라 신타로(中村新太郎) 교수의 공동조사연구 보고서에서 인용하였다(Muroi et al., 1939). 본 연구지역은 시생대, 원생대, 고생대, 중생대, 제4기 지층으로 구성되며 제3기층은 나타나지 않는다(Table 4).

Table 4. Stratigraphic sequence in the study area (Muroi et al., 1939).

Lithofacies	Unconformity	Geological section	Thickness (m)	Geological series		Geological Age
Clay, sandy gravel	Unconformity		20	Sandy gravel layers	Quaternary beds	Holocene
Reddish brown sandy garvel	Unconformity		4-5	Upper river terrace		Pleistocene
Reddish brown sandy garvel	Unconformity		4-5	Uensan-conglomerate		
Tuff, red shale, conglomerate and porphyrite	Unconformity		700±	Sun yeon series	Daebo system	Cretaceous
Alternation of gray shale and conglomerat	Unconformity		1.300 +	Upper Daedong formation Lower Daedong formation	Daedong system	Middle jurassic Early jurassic
Alternation of sandy gravel and shale	Clinounconformity		300 +	Taejawon series	Pyongan system	Triassic
Alternation of sandy gravel and shale	Conformity		500	Gobangsan series		Permian - Triassic
Alternation of sandy gravel and shale	Conformity		100	Sadong series		Permian
Alternation of shale and limestone	Conformity		300	Hongjeom series		Late carboniferous
Mass or layerd limestone	Disconformity		600-	Great limestone series	Chosun system	Early ordovician
Crystalline carbonate rocks with black sltate	Conformity		1.000 ±	Jungwha seires		Middle cambrian
Dark gray mica slate, mica schist, black slate and limestone	Conformity		1.200 ±	Yangdeok series		Middle - early cambrian
Limestone and black sltate	Conformity and unconformity		500 -	Guhyeon series	Sangwon system	Proterozoic
Crystalline carbonate rocks, black slate with quartzite	Conformity		1.600 -	Sidangwoo seires		
Mica schist, green gneiss with limestone	Conformity		700 ±	Jikhyeon series		
Granogneiss, mica gneiss	Unconformity				Pre-Sangwon system	Archeozoic

(1) 마천령계(선 상원계)

마천령계는 낭림육괴와 관모봉육괴 사이의 고원생대 습곡대에 분포한다(Park et al., 1996). 1930년대 당시 선 상원계로 명명 되었으며, 주로 회색화강편마암과 흑운모편암으로 되어 있고, 때로 석회암이 협재되어 있다. 회색화강편마암이 주를 이루며 지하 깊은 곳에서 보다 고기의 퇴적암과 이를 관입한 화강암질 마그마의 상호 작용으로 형성되었다. 흑운모편암은 주로 본 계와 상원

계의 접촉면을 따라 발달하고 때로는 편마암 속에 얇은 층을 이루기도 한다.

(2) 상원계

하부는 규암, 운모편암층으로 구성된 전기 상원계 지층으로 화석이 포함되지 않은 지층이다. 본 계는 하부로 부터 직현통(直峴統), 시당우통(視堂隅統), 구현통(駒峴統)으로 나누어진다.

(3) 조선계

본 계는 하위의 상원계와는 정합 또는 평행부정합 관계에 있으며, 고생대 전기(하부 캄브리아기부터 오르도비스기 하부까지)를 대표하며 두께 2,800 m에 달한다. 하부는 주로 흑색 점판암, 상부는 결정질 석회암으로 구성되며, 곳곳에서 삼엽충과 여러 종류의 바다생물화석이 나타난다. 하부로부터 양덕통(陽德統), 중화통(中和統), 대석회암통으로 분류된다.

(4) 평안계

본 계는 하부 조선계(朝鮮系)를 평행부정합으로 덮으며, 두께 1,200 m에 달한다. 최하부에는 해성퇴적층인 석회암이 있고, 그 외 대부분은 육성퇴적층으로서 사암, 셰일의 각 층에 경재성이 있는 무연탄층을 협재하고 있다. 화석으로 볼 때, 지질시대는 후기 석탄기부터 중생대 트라이아스기를 나타내며, 하부로부터 홍점통, 사통층, 고방산층, 태자원통(太子院統)으로 구분된다.

(5) 대동계

본 지역에서는 평안층 퇴적 후 트라이아스기말의 송림변동이 일어나, 현저한 충상단층 및 습곡운동을 동반하였으며, 앞에서 언급된 각 지층의 대부분이 역전되었다. 송림변동이 끝난 뒤 오랜 기간에 걸친 삭박작용 후, 대동층이 퇴적되었으며, 대동층은 앞에서 말한 모든 지층과는 경사부정합 관계를 보인다.

본 층은 주로 회색 또는 암회색의 셰일, 사암, 역암의 호층으로 되어있다. 대동층의 총 두께는 1,300 m 내외로 사료되며, 지질시대는 중기의 전기 쥐라기에 해당한다.

(6) 대보계

대동계 퇴적 후, 이 지역에는 습곡작용, 충상단층을 동반한 대보조산운동이 일어나 지층이 변위 또는 전도 되었으며, 대보조산운동이 끝난 후 대보계가 퇴적되었다. 대보계는 주로 적색 내지 적갈색 응회암, 응회질 셰일, 사암 및 분암(岩), 석영반암, 규장암 및 암맥상의 섬록암, 화강암 등으로 구성되어 있고, 암석의 시대는 백악기 말기이다.

대보계 퇴적 후 소규모의 지각변동이 있었으며, 이로 인해 정단층이 생긴 것으로 추정된다.

(7) 제4기층

대보계 퇴적 후 연구지역에는 지반 상승이 있으며, 계속적으로 활발한 풍화·침식작용으로 인하여, 플라이스토세에 이르러서 준평원이 형성되었다. 제4기층은 하부로부터 상위 평탄면퇴적층(平坦面堆積層), 고기 하성퇴적층, 신기 하성퇴적층으로 구분된다.

수리지질 특성

시추조사

연구지역은 수차례의 지각변동에 의해 매우 복잡한 지질구조를 가지며 석회암층이 넓게 발달되어 곳곳에 균열 및 공동이 존재한다. 일부 지역에서는 상당한 열극수가 용출되나 그 분포는 매우 제한적이며, 제4기의 신기 하성퇴적층을 가장 중요한 대수층으로 판단하였다. 이에 따라 대동강과 그 주요 지류의 충적평원상에 8개소를 선정하여 1937년 5월 12일에서 7월 6일까지 시추조사가 수행되었다(Fig. 1; Table 5).

Table 5. Borehole data from the study area (12 May 1937 - 6 July 1937).

Borehole site	Location	Depth (m)	Casing (m)	Thickness of sediment (m)					
				Clay	Clayey sand	Sand	Shale	Sandy-gravel	Sandstone
G-01	Southern part of Daedong R.	10.50	3.10~8.10	-	1.5	5.08	-	3.92	-
G-02	Northern part of Daedong R.	20.40	1.00~6.00	3.0	1.5	-	-	-	-
G-03		12.00	1.00~6.00	1.5	1.5	2.9	4.6	-	2.5
G-04		9.86	4.80~9.80	0.3	-	0.9	-	8.64	-
G-05		6.80	0.80~5.80	-	1.5	-	-	3.5	-
G-06		7.90	2.90~7.90	2.6	1.2	-	1.5	2.6	-
G-07	Southern part of Daedong R.	12.00	-	8.2		2.9	-	-	-
G-08		23.20	8.0~18.00	4.20	2.9	1.3	-	13.80	-

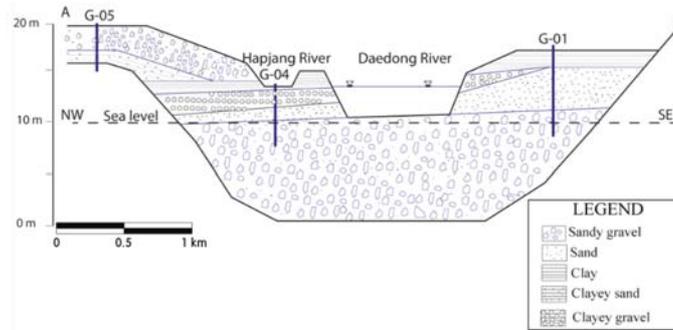


Fig. 2. Cross-section along G-01, G-04, and G-05.

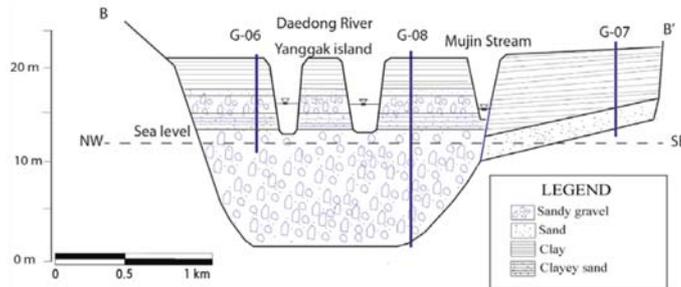


Fig. 3. Cross-section along G-06, G-07, and G-08.

G-01번 시추공에서는 1.5 m까지 황갈색 사질점토, 1.5~6.73 m 구간은 황갈색 세사(細砂)-자갈 섞인 세사, 6.73~10.65 m 구간은 투수성이 매우 큰 황갈색 사력층이 분포한다. G-04번 시추공에서는 상부 약 0.3 m까지는 점토층, 0.3~1.2 m까지는 안에 매목층(埋木層)을 포함한 조립질 모래층, 1.2~4.71 m 구간은 황갈색의 점토를 포함한 사력층, 4.71~9.86 m 구간은 투수성이 매우 양호한 사력층이 나타났다. 그러나 이곳에서 약 북쪽 2.5 km인 G-05 번 시추공에서는 지표에서 3.5 m까지 당시 합장강의 하상인 사력층, 3.5~4.8 m 구간은 황갈색의 사질점토층이 나타나고, 20 cm 두께의 경질세사의 협재층을 거쳐 대동계의 녹색 내지 암청색의 사암이 나타났다. G-01, G-04, G-05의 시추결과에 의한 대동강을 가로 지르는 남북방향의 단면도는 Fig. 2와 같다.

장진리 지역의 G-07번 시추공의 경우 지표에서 8.2 m까지 황갈색 점토 내지 사질점토층, 그 아래에는 두께 2.9 m의 황갈색 사질층이 나타나고, 기반암은 조선계의 대석회암층이 나타났다. 본 석회암층 바로 위의 기저사층(基底砂層)은 비교적 양호한 대수층으로 조사당시인 1937년에는 지름 65 mm 토출관을 통하여 55 m³/d의 지하수가 용출되었다. 이는 상류지역에서 지하로 침투한 지하수

가 상부의 불투수성 점토층의 압력에 의해서 피압되는 것으로, 대수층의 두께 및 점토층의 분포 형태로 미루어 보아 다량의 지하수 산출은 어려울 것으로 판단하였다.

G-08번 시추공의 경우 지표면에서 2.9 m까지는 석회각(石灰殼)의 성토(盛土)로, 2.9~4.2 m까지는 청회색 세립사층, 4.2~6.0 m 구간은 사력층, 6.00~8.15 m 구간은 청회색 사질점토층, 8.15~18.10 m 구간은 사력층으로 전체 두께 11.75 m의 대수층이 있는 것으로 판단하였다. 이후 18.10~20.75 m 구간은 황갈색 점토질력층, 20.75~22.80 m는 황갈색의 점토층이며, 그 이하는 평안계 최하부인 홍점토층으로 이루어져 있다. G-07, G-08번 시추공과 반각도(半角島)를 사이에 둔 평양부근의 여러 공장들 내부의 저심도 우물의 굴착정보를 취합하여 유추한 지질단면은 Fig. 3과 같다.

보통강에서의 시추결과를 보면 G-02번 시추공에서는 지표 아래 3.0 m까지는 하상퇴적층인 사력층, 3.0~4.5 m 구간은 점토 섞인 사력층이 분포하며, 그 이하는 대보계의 적갈색 응회질 집괴암이 나타난다.

G-03번 시추공은 지표에서 1.5 m까지는 점토층, 1.5~3.0 m 구간은 적갈색 점토섞인 모래층, 3.0~5.9 m 구간은 회색 또는 암청회색을 띠며 운모를 현저하게 포

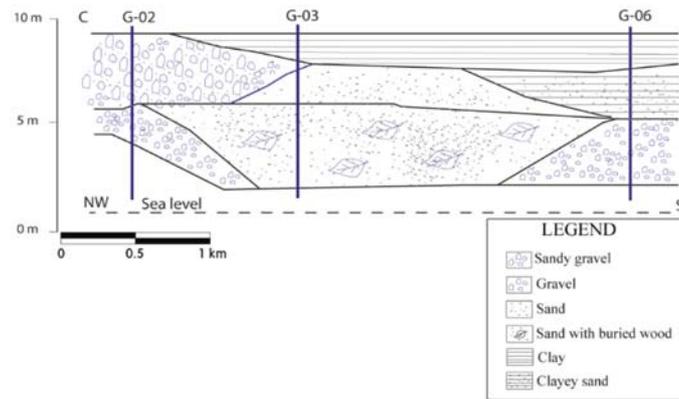


Fig. 4. Cross-section along G-02, G-03, and G-06.

Table 6. Water level change with distance from the mouth of the Daedong River, caused by the tidal effect based on tidal data from August 1922 (Muroi et al., 1939).

Site	Jinnampo	Wuyi-dong	Cheoldo river island	Gyeomy-ipo	Yeon-bong	Daean	Seokhojeong	Hwaseok	Man-kyeongdae	Kyeo-nyiseon rail bridge	Neungrado river island
Distance from the mouth of the river (km)	12.0	20.0	34.3	46.3	54.5	66.0	70.25	74.0	86.0	89.0	93.3
Calculated water level difference (m)	5.02	5.21	5.56	5.84	6.04	5.71	5.56	5.29	3.55	2.91	1.84
Measured water level difference (m)	5.01	-	5.59	5.83	-	5.76	-	5.00	3.81	-	1.64

함한 자는 모래층이 있다. 여러 곳에 부식물과 매목층(埋木層)을 함유하며, 하구 또는 호소 퇴적상인 것으로 판단하였다. 5.9~10.5 m 구간은 암회색의 작은 자갈이 일부 포함된 세일층, 이후 10.5~12.0 m 구간은 암청색 사암으로 이들은 모두 대동계에 속한다.

당시 평남선(平南線)이 지나던 보통강 철교 아래에 위치하는 G-06번 시추공의 층서는 G-03번 시추공과 매우 유사하다. 지표 아래 2.6 m까지는 적갈색 점토층, 2.6~3.8 m 구간은 운모질 사질점토, 3.8~6.4 m 구간은 점토질 사력층, 6.4~7.9 m 구간은 일부 풍화된 암회색 세일층으로 대동계에 해당한다. 따라 G-02, G-03, G-06 번 시추의 결과를 종합해 볼 때 보통강을 따라서 지질 단면은 Fig. 4와 같다.

시추결과에 의하면, 층적층의 두께는 대동강 본류에서는 20 m 이상이나, 보통강, 함장강과 무진천 등의 각 지류에서는 대부분 5~10 m 내외로 본류의 1/4~1/3 정

도밖에 되지 않는다. 이중 가장 깊은 G-07번 시추공의 경우에도 본류의 절반 정도에 불과하다. 각 지류의 하상은 본류 보다 약 10 m 가량 높기 때문에, 지류와 본류의 합류점에서는 상당히 급격한 낙차가 발생할 것으로 예측하였다.

**일반 수리지질
대동강의 유량**

대동강 본류의 유역면적은 20,135.46 km², 유로연장은 431.05 km로 평양 부근의 유량은 평수(平水)시 3,000~7,000 m³/s, 최저 갈수(渴水)시 1,600 m³/s 내외이며 최대 홍수시에는 24,746 m³/s에 달한다. 또한 대동강에서 1930년대 당시 조석에 의한 수위 변화는 매우 크게 나타났으며 진남포의 경우 약 5.01 m, 평양의 경우 1.64 m에 달하였다(Table 6). 평양 부근의 대동강 유량은 아래 경험식으로 산정된다(Muroi et al., 1939).

$$Q = 20 \cdot h^{2.96} \quad (h \geq 6.3 \text{ m}) \quad (1)$$

$$Q = 200 \cdot h^{1.92} \quad (h < 6.3 \text{ m}) \quad (2)$$

여기서 h 는 강의 수위(m)이고, Q 는 유량(m^3/sec)이다.

한편 Table 6의 수위관측값을 이용하여 대동강 입의 지점과 하구간의 거리가 Y (km)이고, 각 지점의 조석에 의한 일일 수위차가 X (m)라고 할 때, 다음의 관계식을 얻을 수 있다(Fig. 5; Muroi et al., 1939).

$$\ln(Y) = 0.1905 \ln(X) + 1.3382 \quad (Y < 60 \text{ km}, R^2 = 0.99) \quad (3)$$

$$Y = -11.1853 \ln(X) + 52.9172 \quad (Y > 60 \text{ km}, R^2 = 0.92) \quad (4)$$

식 (3)은 1930년대 당시 대동강 하구에서 보산(保山) 아래쪽 대안리(大安里) 부근(66 km) 까지 적용 가능하다. 또한 조석의 영향이 직접 미치는 범위에는 한계가 있고, 그보다 상류 지역에는 하류의 조석의 영향보다 상류에서 내려오는 수압을 더 크게 받게 되므로, 인상배수

(堰上背水, Weir raised backwater)에 의해서 하류만큼 수위가 올라갈 수도 있다(Wataru et al., 1938). 따라서 대안리(大安里)에 수문을 만들어 수위를 조절하는 경우 인상배수(堰上背水, Weir raised backwater)의 원리에 의해서 수위변화를 계산할 수 있을 것이다(Table 6).

수심에 따른 수온변화

1930년대 대동강은 평양 부근의 두노도(豆老島) 상단리(上端理) 부근까지 대부분 전석이 섞인 사암층으로 구성되어, 우기나 홍수기 이외의 계절에는 지표수가 항상 맑고 깨끗하였다. 그러나 하류로 향할수록 하상 퇴적물이 세립화되고, 조석에 의한 조차의 증가와 더불어 지표수는 부유성 점토질물질에 의해 점점 탁도가 높아졌으며, 서호정(西湖亭) 이남 지역에서는 지표수가 항상 백탁(白濁)되어 있었다. 이에 따라 탁도가 매우 낮은 상류와 탁도가 높은 하류지역은 태양광의 수중 전도율 차이가 발생할 것으로 보였다. 전반적으로 평균기온이 23~25°C 일때 지표수는 20~22°C의 범위로 기온보다 약 3°C 정도 수온이 낮게 나타났으며, 상류 및 하류지역에서 기온의 수심에 대한 변화의 비율은 실험적으로 아래 식과 같이 나타내었다(Table 7).

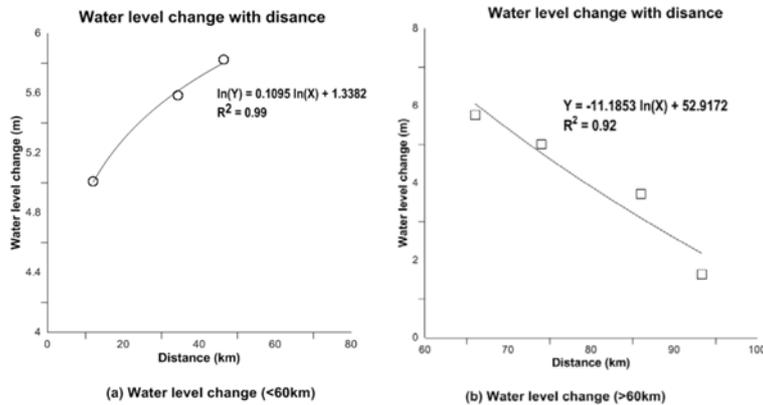


Fig. 5. Water level change with distance from the mouth of the Daedong River, caused by the tidal effect (Muroi et al., 1939).

Table 7. Water temperature change with water depth in the Daedong River (Muroi et al., 1939). The temperature of the water surface was assumed to be 0°C.

Water depth (m)		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature (°C)	Upstream of the Daedong R.	-0.90	-0.97	-1.08	-1.09	-1.17	-1.12	-1.23	-1.30	-1.34
	Downstream of the Daedong R.	-0.10	-0.29	-0.39	-0.46	-0.54	-0.60	-0.65	-0.71	-0.75

$$\ln(Y) = 0.2360 \ln(X) - 0.2784$$

(상류 청정수 지역, $R^2 = 0.95$) (5)

$$Y = 0.3943 \ln(X) - 0.1628$$

(하류 탁수 지역, $R^2 = 0.99$) (6)

여기서 Y는 임의의 깊이에서의 수온(°C), X는 수심(m)이며 하류 탁수지역에서는 $X > 1.86$ m이다.

수질특성

지표수

대동강은 주로 석회암 지역을 흐르기 때문에 대동강 물의 경도는 비교적 높으며 일반적으로 총 경도는 50 mg/L 내외이다. 평양지역 남안의 석회암지대를 통과하는 무진강(戊辰江)과 곤양강(昆陽江) 등의 수질은 대동강 본류뿐만 아니라 북안의 화강편마암질 평안계, 대동계 및 대보계 등의 사질 세일 지역을 흐르는 순화강과

보통강 등 보다 훨씬 높은 경도를 나타낸다(Muroi et al., 1939). 또 염소농도는 대동군 남곶면 석호정(南串面石湖亭)의 상류에서는 평양시내의 일부지역을 제외하면 거의 20 mg/L 이내 였으나, 벽지도(碧只島) 하류에서는 조석의 직접적인 영향을 받아 염소농도가 점점 증가한다고 하였다. 또한 1930년대 당시 일반적으로 벽지도(碧只島) 북단 부근까지는 조석의 영향이 미치지 않았으나 이보다 하류인 보산(保山)까지는 시간에 따른 조석의 영향이 나타났다. 1937년 진남포에서의 조사결과에 의하면 강서군 초리면 강선리(草里面 降仙里) 부근에서는 조석의 영향으로 염소농도가 150 mg/L~600 mg/L로 보고 하였다(Muroi et al., 1939). 또한 보산 부근에 이르면 염소농도가 매우 증가하여 간조시 150 mg/L 정도이나 만조시 지표수는 해수가 거의 과반에 달한다고 하였다. 1937년 9월 6일 만조시 분석결과에 의하면(Table 8) 평양에서 보산 사이 구간은 양호한 담수로 판단 할 수 있을 만큼 염소농도가 일정하게 나타났다. 즉 대동강의 수

Table 8. Surface water quality in Pyeongyang area.

Sample no.	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09	S-10	S-11	S-12	Average
Water type	Dae-dong River	Hap-jang River	Hap-jang River	Botong River	Botong River	Botong River	Mujin Stream	-					
pH	-	7.11	-	6.74	7.04	7.05	6.4.	6.7.	6.74	6.84	6.5.	7.05	6.82
Total hardness (mg/L)	61.3	66.5	57.8	71.8	70.0	77.0	31.5	31.5	36.8	45.5	66.5	105.0	56.0
Temporary hardness (mg/L)	-	54.3	-	47.3	57.8	61.3	19.3	24.5	19.3	36.8	42.0	75.3	40.3
Permanent hardness (mg/L)	-	12.3	-	24.5	12.3	15.8	12.3	7.0	17.5	8.8	24.5	29.8	15.0
TSS (mg/L)	74.0	94.0	77.8	98.7	114.4	107.4	81.6	66.2	83.2	119.8	156.4	219.5	97.6
CaO (mg/L)	28.1	28.9	25.9	32.0	30.5	33.0	13.8	13.2	14.0	17.9	27.9	38.9	24.1
Fe (mg/L)	0.07		0.80	0.15	0.37	0.12	0.23	0.14	0.25	0.49	1.20	1.00	0.38
Al ₂ O ₃ (mg/L)	2.1	0.8	1.9	4.0	3.6	2.8	0.3	3.9	1.3	0.5	8.9	9.9	2.7
Na ₂ O (mg/L)	5.0	5.2	8.7	8.1	5.8	7.1	12.2	9.9	10.9	28.2	6.3	13.7	9.8
SiO ₂ (mg/L)	6.7	5.6	5.3	9.2	16.8	6.2	11.8	12.2	12.4	9.5	39.2	24.4	12.3
Mn (mg/L)	ND	ND	0.5	0.2	0.2	0.4							
Cl (mg/L)	6.5	5.5	9.1	14	14.4	14.4	16.7	17.9	10.5	18	12.8	22.9	12.7
SO ₄ (mg/L)	10.3	7.1	9.6	3.1	2.8	5.4	10.5	4.7	15.6	5.6	5.1	28.7	7.3
CO ₂ (mg/L)	2.7		3.3	4.7	4.0	3.2	25.9	3.7	5.3	1.4	10.1	10.6	6.4
HCO ₃ (mg/L)	27.9	32.2	28.9	34.4	35.6	38.7	10.7	19.2	13.2	26.1	33.3	39.8	27.3
NO ₃ (mg/L)	ND	3.3	ND	2.6	4.4	3.8	12.8	4.9	5.6	1.1	4.8	4.3	4.8
NO ₂ (mg/L)	ND	0.004	0.008	0.006	0.010	ND	0.008	0.009	0.008	0.010	0.003	0.014	0.008
NH ₄ (mg/L)	ND	0.11	ND	1.32	0.17	0.18	4.70	0.40	0.10	2.50	0.27	0.44	1.08
KMnO ₄ (mg/L)	2.0	3.6	2.0	6.1	8.5	2.9	8.0	2.5	3.2	13.6	5.9	9.9	5.3

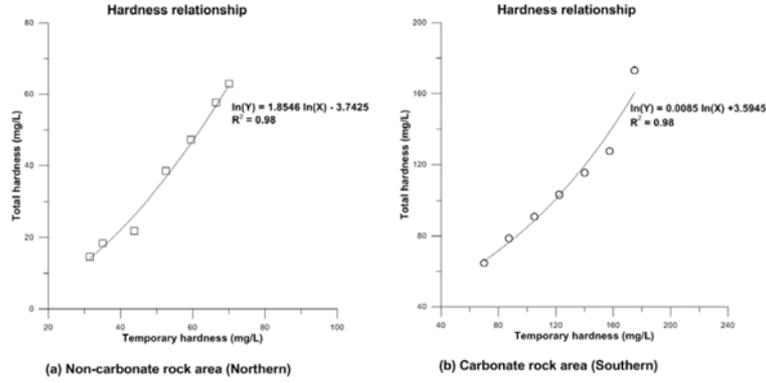


Fig. 6. Total and temporary hardness in the north (non-carbonate rock) and south (carbonate rock) of Pyeongyang area.

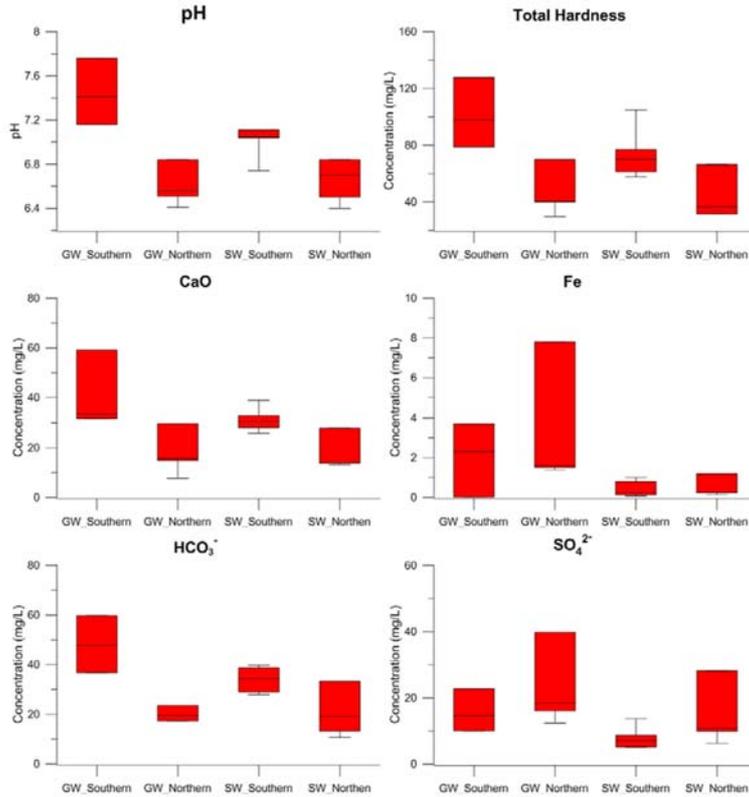


Fig. 7. Chemical constituents of groundwater (GW) and surface water (SW) in the south and north of Pyeongyang area.

질은 갈수기, 홍수기 및 고조기, 저조기의 기후 및 조석 영향에 따른 환경적 요인에 의해 매우 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었고, 이후 대동강 연안지역의 개발을 위한 수질조사의 필요성을 제기하였다.

지하수

시추공 지하수 수질분석은 충분한 양수가 이뤄지지 않은 상태에서 이뤄진 관계로 대부분 탁도가 높았으나 평양을 기준으로 대동강 남측의 석회암지대와 북측의 비석회암 지대에서 수질의 분명한 차이가 관찰되었다(Table

Table 9. Groundwater quality in Pyeongyang area.

Sample no.	G-01	G-07	G-08	G-02	G-03	G-04	G-05	G-06	Average (Southern)	Average (Northern)	Average (Total)
Temperature (°C)	17.0	14.3	15.5	13.0	20.0	18.0	13.5	20.0	16.8	16.2	16.4
pH	7.41	7.16	7.76	6.84	6.41	6.56	6.70	6.51	7.44	6.60	6.92
Total hardness (mg/L)	127.8	98.0	78.8	70.0	40.3	40.3	52.5	29.8	101.5	46.6	67.2
Temporary hardness (mg/L)	103.3	91.0	68.3	66.5	21.0	21.0	35.0	14.0	87.5	31.5	52.5
Permanent hardness (mg/L)	24.5	7.0	10.5	3.5	19.3	19.3	17.5	15.8	14.0	15.1	14.7
TSS (mg/L)	229.6	140.6	189.2	219.4	123.0	128.0	162.6	152.4	186.5	157.1	168.1
CaO (mg/L)	59.2	33.6	31.8	29.7	15.7	15.0	20.0	7.7	41.5	17.6	26.6
Fe (mg/L)	0.02	3.70	2.30	7.80	1.60	1.40	1.50	3.60	2.01	3.18	2.74
Al ₂ O ₃ (mg/L)	0.9	4.3	13.6	19.5	7.4	5.4	4.5	11.0	6.3	9.6	8.3
Na ₂ O (mg/L)	22.7	10	14.7	39.8	12.4	24.5	16.1	18.5	15.8	22.3	19.8
SiO ₂ (mg/L)	27.1	12.7	34.1	39.0	10.0	14.1	20.0	16.0	24.6	19.8	21.6
Mn (mg/L)	ND	ND	0.70	ND	0.14	0.14	ND	ND	0.70	0.14	0.33
Cl (mg/L)	13.5	15.3	16.5	12.4	16.0	19.5	16.0	17.8	15.1	16.3	15.10
SO ₄ (mg/L)	61.5	4.7	13.4	4.1	8.8	9.6	12.1	10.5	26.5	9.0	15.6
CO ₂ (mg/L)	6.2	12.2	9.3	18.2	16.2	8.1	10.6	22.2	9.2	15.1	12.9
HCO ₃ (mg/L)	59.8	47.8	36.8	ND	18.4	17.3	20.7	23.6	48.1	20.0	32.1
NO ₃ (mg/L)	0.99	5.60	4.30	ND	1.00	0.07	0.70	ND	3.63	0.59	2.11
NO ₂ (mg/L)	0.004	0.009	0.006	0.005	ND	ND	ND	ND	0.006	0.005	0.006
NH ₄ (mg/L)	0.98	0.54	0.62	0.03	0.18	0.08	0.03	0.04	0.71	0.07	0.31
KMnO ₄ (mg/L)	2.2	0.6	10.9	3.2	6.0	4.9	4.8	6.8	4.6	5.1	4.93

9, Fig. 7). 즉, 남측의 석회암지대 시료(G-01, G-07, G-08)는 모두 약알칼리성(pH 7.16~7.76, 평균 7.44)을 보이거나 북측시료(G-02, G-03, G-04, G-05, G-06)는 모두 약산성(pH 6.41~6.84, 평균 6.60)을 보였다. 또한 북측의 비탄산염암지대의 보통강을 따라 분포하는 시추공 (G-02, G-03, G-06번공) 지하수에서는 유리탄산(遊離炭酸, CO₂)의 농도가 16.2~22.2 mg/L(평균 18.9 mg/L)로서 높게 나타났다. 이와 같이 북측의 지하수가 약산성을 보이는 이유는 대수층 상부에 유기물을 다량 함유하는 사질점토가 존재할 때 유기물의 산화에 의해 이산화탄소가 발생하고, 이 때 생성된 수소의 일부가 유기물 내 금속무기염류의 금속이온을 치환해 산을 생성하기 때문으로 보았다.

반면 남측은 북측에 비해 비교적 높은 황산염농도(4.7~61.5 mg/L, 평균 26.5 mg/L)와 낮은 중탄산농도(6.2~12.2 mg/L, 평균 9.2 mg/L)를 나타내었다. 남측의 지하수가 약알칼리성을 나타내는 이유는 지하수 내 용해된 이산화탄소에 의해 중탄산을 형성하는 반응으로 설명하였다. 또한 남측의 비교적 높은 철분농도(1.6~7.8 mg/L, 평균 4.3 mg/L)는 지층내 유기물의 산화에 의해

발생한 이산화탄소가 지층 중의 황철석(FeS₂), 갈철석(FeO(OH)·nH₂O)과 반응하여 가용성의 중탄산철(重炭酸鐵, Fe(HCO₃)₂)을 생성하는데 그 원인이 있는 것으로 설명하였다.

남측의 석회암지대와 북측의 비석회암지대의 경도를 보면, 남측에서는 총경도가 78.8~127.8 mg/L, 평균 101.5 mg/L이나 북측에서는 29.8~70.0 mg/L, 평균 46.6 mg/L로 나타났으며(Table 9), 지표수의 경도 경향성도 이와 유사하였다(Table 8). 또한 평양지역에서 지하수 내 총경도와 일시경도(temporary hardness) 사이에 아래와 같은 관계를 도출하였다(Fig. 6; Table 9).

$$\ln(Y) = 1.8546 \ln(X) - 3.7425$$

(북측 비탄산염암, R²=0.98) (16)

$$\ln(Y) = 0.0085 X + 3.5945$$

(남측 탄산염암지역, R²=0.98) (17)

여기서 X는 일시경도, Y는 총경도이다.

결 론

1937년 평양지역의 대동강 유역에서 최초로 수행된 지형, 지질 및 시추조사를 통한 수리지질특성과 지표수 및 지하수 수질 특성은 다음과 같다.

(1) 평양부근에서 다량의 수량이 사용 가능한 지역은 대동강 연안지대로, 1937년 조사 결과에 따르면 대동강 남쪽면 석호정과 그 상류 일대로 보였다.

(2) 대동강은 강서군 보림면(江西郡 普林面) 보산이하의 구간에서는 하천수가 조석의 직접적인 영향을 받고 있으나, 보산 석호정의 수질은 만조시(1937년 9월) 담수의 성질을 나타내기도 하므로 향후 정밀한 조사의 필요성을 제기하였다.

(3) 평양부근의 대동강 본류 충적층의 경우 두께가 20 m를 초과하는 곳도 있고, 비교적 양호한 대수층을 형성하지만, 지류들에서는 충적층의 두께가 모두 10 m 미만으로 충분한 지하수를 개발하기는 힘든 것으로 보였다.

(4) 지표수(대동강 본류 및 지류)와 지하수의 수질은 지질의 직접적인 영향을 받아 지표수의 경우 총경도는 평균 61.3 mg/L, 지하수는 평균 67.2 mg/L로 비교적 높은 값을 보였다. 특히 대동강 남측의 석회암지대와 북측의 화강편암암 지대간에는 뚜렷한 수질의 차이를 보였다. 남측에서는 약알칼리성(pH 7.16~7.76, 평균 pH 7.44), 비교적 높은 황산염농도(4.7~61.5 mg/L, 평균 26.5 mg/L), 높은 중탄산농도(36.8~59.8 mg/L, 평균 48.1 mg/L)를 나타냈으며, 북측에서는 산성(pH 6.51~6.84, 평균 pH 6.6), 비교적 낮은 황산염농도(4.1~12.1 mg/L, 평균 9.0 mg/L), 상대적으로 낮은 중탄산농도(17.3~23.6

mg/L, 평균 20.0 mg/L)를 나타냈다. 남측이 약알칼리성을 나타내는 이유는 지하수 내 용해된 이산화탄소에 의해 중탄산이 형성되는 반응으로 설명하였으며, 북측이 약산성을 보이는 이유는 점토층 유기물의 산화에 의해 발생한 수소가 무기염류의 금속이온을 치환하여 산을 형성하는 반응 때문으로 보였다.

(5) 1930년대 당시 대동강의 평균 수온은 하절기(6월~8월)에는 25°C에 달하였다. 반면 모든 복류수의 수온은 하절기에는 최고 17°C 이하였다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화'연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Muroi, W., Tsukamoto, M., and Haino, M., 1939, Drill survey report in the Pyeongyang area, Central Research Laboratory report of Government General of Joseon, 18(5), Industrial water survey report (no. 6), 1-20 (in Japanese).
- Park, R. J., Kang, H. G., and Jon, G. P., 1996, Geology of Korea, Foreign Language Books Publishing House, Pyongyang, Democray of Korea, 631p (in English).
- Wataru, M., Maso, T., and Matsuo, H., 1938, Water survey of Jeju Island, Central Research Laboratory report of Government General of Joseon, 17(11), Industrial water survey report (no. 4), 1-32 (in Japanese).

오윤영

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2
Tel: 051-510-3453
E-mail: magojina@naver.com

함세영

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2
Tel: 051-510-2252
E-mail: hsy@pusan.ac.kr

이충모

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2
Tel: 051-510-3451
E-mail: lcmo1006@naver.com

Wei Ming Liang

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2
Tel: 051-510-3451
E-mail: wei.mingliang@hotmail.com

김규범

한국수자원공사 K-water연구원 수변지하수활용고도
화연구단
305-730 대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125
Tel: 042-870-7640
E-mail: gbkim@kwater.or.kr

김문수

국립환경과학원 토양지하수과
404-708 인천 서구 환경로 42(종합환경연구단지)
E-mail: hyd009@korea.kr