

도시유역의 우수관거 통수능 및 침수특성 분석

이정호¹, 조덕준², 김종훈¹, 김응석^{3*}

An Analysis about Inundation and Carrying Capacity of Drain Pipes in Urban Area

Jung-Ho Lee¹, Duk-Jun Jo², Joong-Hoon Kim¹ and Eung-Seok Kim^{3*}

요 약 도시지역의 우수관거는 최근 발생 빈도가 높은 국지적 집중호우에 대하여 배수기능 수행이 취약한 실정이며, 특히 저지대 역류 현상에 따른 침수피해는 도시 설계 및 관거 개량사업에 있어서 반드시 해결해야할 사항이다. 본 연구에서는 강우분석을 통한 도시유출특성을 고려하여 현행 우수관거의 설계빈도에 대한 통수능력을 검토하였으며, 방류하천의 계획홍수위 영향을 고려하여 관거 내 역류 및 저지대 침수량을 분석함으로써 도시유역의 원활한 내수배제를 위한 우수지 및 펌프장의 설치 여부 및 규모 산정을 위한 기초자료를 제공하였다.

Abstract The localized rainfall happens frequently in urban areas recently and then, the drain pipes of urban areas do not drain well when the localized rainfalls happen. Specially, the inundation by the backwater on the lowland should be solved certainly in urban planning and sewer rehabilitation. In this study, it was examined whether the carrying capacities of the drain pipe are satisfied about a current design standard of the rainfall considering the outflows of the urban areas by the rainfall analysis. Also, the backwater in the drain pipe and the inundation on the lowland were analyzed considering the water level of the discharged river and the propriety of the design standard was examined by the analysis about the rainfall frequency. Also, the results offered the basic data to decide whether the detention reservoir should be established and the scale of the pump station.

Key Words : Urban Storm Water, Drain Pipe, Drainage, Rainfall Frequency

1. 서 론

도시지역의 배수시스템은 장래 도시개발 여건을 고려하여 신속한 우수배제에 의한 시가지 침수방지 목적으로 건설된다. 서울시의 경우 우수 배제를 위한 우수관거의 설계빈도는 지선의 경우 5년빈도, 간선의 경우 10년 빈도

로 계획되고 있다[1].

도시 배수시스템 상에서 강우 발생 시 우수의 처리는 우수관거를 통해 하천으로 직접 방류되거나 저지대의 경우 우수지의 저류과정을 거쳐 방류되도록 구성되어있다. 그러나 현행 설계빈도에서 우수관거는 그 기능을 충족시키지 못하는 경우가 많으며 특히, 저지대의 경우 역류 발생에 따른 침수 피해가 빈번히 발생하고 있다[2]. 기존의 도시유출에 관한 연구를 살펴보면 도시소유역의 유출량 산정을 위해 도시유출모형인 ILLUDAS모형과 SWMM모형의 EXTRAN을 사용하여 우수지에 의한 배수위 영향을 고려하여 도시유역의 유출분석을 실시하였다[3]. 또한, 지리정보시스템을 이용하여 유출모형에 필요한 매개변수를 산정하고 이를 검증하여 신도시개발로 형성된 도시소유역에 다양한 강우사상을 적용하여 유출특성에 관한 연구를 수행하였다[4]. 이와 더불어 합류식 하수관거가

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03 산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

¹고려대학교 사회환경시스템공학과

²동서대학교 토목공학과

³선문대학교 토목공학과

*교신저자: 김응석(hydrokes@sunmoon.ac.kr)

도시 하천 유출에 미치는 영향을 평가하기 위해 “최대 자연유출 차단량”개념을 도입하여 도시 하천 유역인 청계천 유역에 적용하고 실측 갈수량 자료에 대한 보정 및 합류식 관거를 고려하기 전·후의 유출 수문곡선을 비교하여 연간 자연 차단량을 산정하였다[5]. 또한, 기존의 국내에서 수행한 각종 도시 유출모형의 활용과 적용성 개선에 대한 연구를 바탕으로 도시유출 모형들의 유형과 기본 특성 고찰을 통해 모형에 대한 기본적인 이해와 더불어 향후 이 분야에서 연구 활성화 및 실무 적용성 향상에 대해 고찰하였다[6,7,8].

본 연구에서는 현행 도시지역 우수관거의 통수능력 검토를 위하여 강우자료에 대한 강우특성을 분석하여 재현기간별 확률강우량에 따른 통수능력 분석을 실시함으로써 현행 관거 설계빈도의 적정성 판단을 위한 기초자료를 제공하였다. 또한, 방류하천의 계획홍수위 영향을 고려하여 호우 발생 시 관거의 역류구간을 분석하였으며 구간 내 침수량을 산정하여 저지대 침수고 계산을 수행하였다. 우수관거 역류구간 분석 및 침수량 산정은 SWMM(Storm Water Management Model)[9]을 이용하였으며 동수경사 분석을 통하여 역류발생 가능 구간을 검증하였으며, 분석된 결과를 통하여 해당 도시지역의 침수 구역에 저류지 및 펌프장의 설치 여부 및 규모를 판단하기 위한 기초자료를 제공하였다.

2. 연구방법

현행 우수관거에 대하여 서울시 42개년 강우기록치를 통하여 산정된 확률강우량에 따른 유출 분석을 통하여 통수능력을 검토하였으며, 방류하천 계획홍수위를 고려한 관거 내 역류 발생에 따른 침수량 및 침수고를 산정하였다. 통수능력 및 역류 분석은 대표적 도시유출해석모형인 SWMM의 EXTRAN 모듈을 이용하였다.

표 1. 서울시 채택 강우강도 공식

재현기간	5년	10년	20년	30년	50년
강우강도공식	$\frac{544.3}{\sqrt{t} + 1.003}$	$\frac{651.1}{\sqrt{t} + 1.014}$	$\frac{753.8}{\sqrt{t} + 1.023}$	$\frac{818.8}{\sqrt{t} + 1.016}$	$\frac{885.0}{\sqrt{t} + 1.014}$

표 2. 서울시 강우강도 공식

재현기간	5년	10년	20년	30년	50년
강우강도(mm/hr)	65.6	77.1	88.2	94.5	102.4
강우강도공식	$\frac{339.5160}{t^{0.41073}}$	$\frac{380.8390}{t^{0.39595}}$	$\frac{418.1911}{t^{0.38321}}$	$\frac{440.9124}{t^{0.37825}}$	$\frac{466.2171}{t^{0.37078}}$

2.1 통수능력 분석 방법

서울시 우수관거 설계기준에 따른 현행 매설 관거에 대한 통수능력 검토를 위하여 서울시 42개년 강우특성 분석을 통한 확률강우량을 SWMM 입력자료로 채택하였다.

(1) 설계기준

서울지역 우수관거의 경우 경제성을 고려하여 시간당 5~10년 빈도의 강우에 대비하는 규모로 설계되어 있으며 빗물펌프장의 경우도 대부분 10년 이내의 규모로 건설되고 있다[10]. 하수도정비 기본계획[2]에 따르면 우수 유출량 산정에는 합리식을 사용하며 서울시의 강우강도 공식으로는 '87 수해백서[1]에서 추천한 건설기술연구원 발표공식을 활용하고 있다. 다음 표 1은 현행 서울시에서 채택한 강우강도공식을 나타내고 있다.

(2) 강우분석

서울시 42개년(1961~2002년) 강우자료에 대하여 강우특성분석을 실시하였으며 재현기간별 강우강도는 다음 표 2와 같다. 확률강우량은 K-S 검정 및 Chi-square 검정을 통해 Log-Pearson Type III 분포형을 채택하였으며 강우강도식은 Talbot, Sherman, Japanese 및 Semi-Log형 등을 분석하여 가장 편차가 적은 Sherman형에 의하여 유도하였다.

2.2 침수 분석 방법

(1) SWMM-EXTRAN 모듈

SWMM의 Extran Model은 대상 우수관거에 대하여 배수현상, 역류현상 등을 모의하며 흐름에 대한 기본방정식은 연속방정식과 개수로에서의 일차원 점면 부정류 방정식으로서 다음의 St.Venant 방정식[11]을 사용하며 그림 1은 우수관거 내 수리해석에 대한 개략도이다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

이때, A는 통수단면적, Q는 관내 유량, H는 수위 그리고 Sf는 관저경사를 나타낸다.

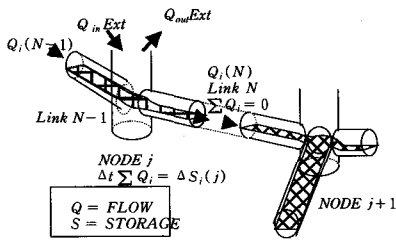


그림 1. 관내 수리분석 개략도

(2) 동수경사 분석

비압축성 유체의 경우에는 유체의 단위중량 γ 를 상수로 취급할 수 있으므로 1차원 흐름의 운동을 표시하는 Euler 방정식의 적분에 의하여 Bernoulli 방정식은 다음과 같다[12].

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = H = \text{일정} \quad (3)$$

여기서, p/γ 를 압력수두(pressure head), $V^2/2g$ 를 속도수두(velocity head), z 를 위치수두(potential head)라 하며, H를 전수두(total head)라 한다. 유관상의 한 단면에서 운동하는 1kg의 유체가 가지는 에너지는 그림 2에서 위치에너지 z 와 압력에너지 p/γ 및 속도에너지 $V^2/2g$

이며 전수두 H는 모든 단면에서 일정한 것으로 표시되어 있다. 이와 같이 각 단면에서의 압력수두를 연결하는 선을 동수경사선(hydraulic grade line, H.G.L.)이라 부른다.

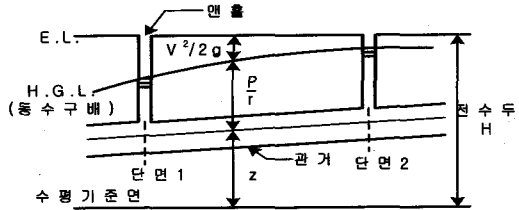


그림 2. 관내 수리분석 개략도

3. 결과 및 고찰

분석 대상 구간은 수서 배수분구로서 유역 내 지반고는 일부 저지대를 제외하고는 대부분 높은 지역으로 우수관거 우수배제는 탄천으로 직접 방류되고 있으며 탄천의 계획 홍수위는 E.L.118.31m이다. 본 연구에서는 서울시 기준 강우강도에 의하여 설계된 우수관거에 대하여 금회 분석된 서울시 42개년 강우특성에 따른 빈도별 확률강우량으로 통수능력을 검토하였다. 또한, 방류 하천의 계획홍수위 영향으로 관거 내 역류 현상의 발생을 SWMM-EXTRAN 모형을 통해 산정하였으며 동수경사 분석으로 역류발생 가능지역을 검증하였다.

3.1 통수능력 분석

서울시 42개년 강우기록치를 분석하여 산정된 강우강도를 통해 해당유역 내 우수관거의 빈도별 통수능력을 검토하였다. 다음 표 3은 수서 배수분구 내 주요 간선관거의 빈도별 통수능력 평가 결과이다.

[표 3] 우수관거 통수능력 평가

관거 번호	지반고	5년 빈도		10년 빈도		20년 빈도		30년 빈도		50년 빈도		100년 빈도		비고
		최대수위 (EL, m)	여유고 (m)	최대수위 (EL, m)	여유고 (m)	최대수위 (EL, m)	여유고 (m)	최대수위 (EL, m)	여유고 (m)	최대수위 (EL, m)	여유고 (m)	최대수위 (EL, m)	여유고 (m)	
12	119.49	116.54	2.95	117.47	2.02	117.75	1.74	118.38	1.11	118.20	1.29	118.61	0.88	관거시점
11	119.37	116.52	2.85	117.43	1.94	117.71	1.66	118.34	1.03	118.14	1.23	118.53	0.84	
10	119.56	116.50	3.06	117.40	2.16	117.67	1.89	118.29	1.27	118.09	1.47	118.48	1.08	
9	119.51	116.47	3.04	117.35	2.16	117.61	1.90	118.23	1.28	118.02	1.49	118.40	1.11	
8	119.46	116.47	2.99	117.34	2.12	117.60	1.86	118.21	1.25	118.00	1.46	118.38	1.08	
7	119.44	116.44	3.00	117.29	2.15	117.54	1.90	118.15	1.29	117.94	1.50	118.30	1.14	
6	119.00	116.43	2.57	117.27	1.73	117.52	1.48	118.13	0.87	117.91	1.09	118.27	0.73	
5	118.49	116.39	2.10	117.21	1.28	117.45	1.04	118.04	0.45	117.82	0.67	118.15	0.34	
4	118.31	116.36	1.95	117.18	1.13	117.42	0.89	118.01	0.30	117.79	0.52	118.12	0.19	
3	118.09	116.32	1.77	117.15	0.94	118.09	0.00	118.09	0.00	118.09	0.00	118.09	0.00	
2	118.67	116.45	2.22	117.27	1.40	117.51	1.16	118.10	0.57	117.87	0.80	118.21	0.46	
1	119.44	116.50	2.94	117.32	2.12	117.56	1.88	118.15	1.29	117.92	1.52	118.26	1.18	
0	120.45	116.54	3.91	117.36	3.09	117.60	2.85	118.19	2.26	117.96	2.49	118.30	2.15	하천방류

표 4. 배수위를 고려한 우수관거 통수능력 검토

맨홀 번호	지반고	5년 빈도		10년 빈도		20년 빈도		30년 빈도		50년 빈도		100년 빈도		비고
		최대수위 (E.L.m)	여유고 (m)	최대수위 (E.L.m)	여유고 (m)	최대수위 (E.L.m)	여유고 (m)	최대수위 (E.L.m)	여유고 (m)	최대수위 (E.L.m)	여유고 (m)	최대수위 (E.L.m)	여유고 (m)	
12	119.49	118.31	1.18	118.42	1.07	118.46	1.03	118.50	0.99	118.56	0.93	118.62	0.87	관거시점
11	119.37	118.29	1.08	118.38	0.99	118.42	0.95	118.46	0.91	118.50	0.87	118.54	0.83	
10	119.56	118.27	1.29	118.35	1.21	118.38	1.18	118.41	1.15	118.45	1.11	118.49	1.07	
9	119.51	118.24	1.27	118.30	1.21	118.32	1.19	118.35	1.16	118.38	1.13	118.41	1.10	
8	119.46	118.24	1.22	118.29	1.17	118.31	1.15	118.33	1.13	118.36	1.10	118.39	1.07	
7	119.44	118.21	1.23	118.24	1.20	118.25	1.19	118.27	1.17	118.29	1.15	118.31	1.13	
6	119.00	118.20	0.80	118.22	0.78	118.23	0.77	118.25	0.75	118.26	0.74	118.28	0.72	
5	118.49	118.16	0.33	118.16	0.33	118.16	0.33	118.16	0.33	118.17	0.32	118.16	0.33	
4	118.31	118.13	0.18	118.13	0.18	118.13	0.18	118.13	0.18	118.14	0.17	118.13	0.18	
3	118.09	118.09	0.00	118.09	0.00	118.09	0.00	118.09	0.00	118.09	0.00	118.09	0.00	
2	118.67	118.22	0.45	118.22	0.45	118.22	0.45	118.22	0.45	118.22	0.45	118.22	0.45	
1	119.44	118.27	1.17	118.27	1.17	118.27	1.17	118.27	1.17	118.27	1.17	118.27	1.17	
0	120.45	118.31	2.14	118.31	2.14	118.31	2.14	118.31	2.14	118.31	2.14	118.31	2.14	
침수량(m ³)		12,240		15,540		15,780		17,100		19,380		22,260		
침수고(E.L.m)		118.44		118.55		118.56		118.60		118.65		118.72		

여기서, 맨홀 내 최대수위는 관거 내 유량 흐름에 따른 수위를 나타내며 맨홀지반고와 맨홀 내 최대수위의 차인 여유고가 0인 경우 통수능력 부족으로 판단된다. 분석결과 수서 배수분구 내 우수관거의 설계빈도(5년, 10년)내에서는 통수능력을 만족시키나 20년 빈도 이상의 호우 발생 시 역류 현상 발생 관거가 나타나고 있다.

3.2 침수 분석

우수관거의 방류 하천의 계획홍수위는 E.L118.31m로써 배수위 영향을 고려하여 빈도별 통수능력을 검토하는 한편 역류 발생에 따른 침수량 및 침수고를 산출한 결과는 표 4와 같다.

표 4 결과에서 살펴보면, 상대적으로 저지대인 3번 맨홀에서 배수위의 영향으로 역류가 발생되며 SWMM-EXTRAN 모델을 통해 산정된 침수량에 대하여 침수고를 산정하였다. 침수고 산정은 해당유역에 대한 수위-저류량 관계곡선을 작성하여 예상 침수고를 산출하였다. 다음의 그림 3은 침수 발생구간에 대한 개략도이며 그림 4는 해당유역 수위-저류량 관계곡선이다.

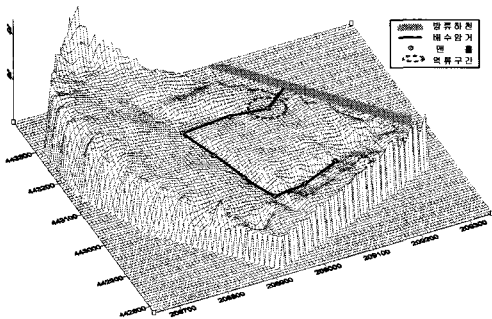


그림 3. 침수 발생구간

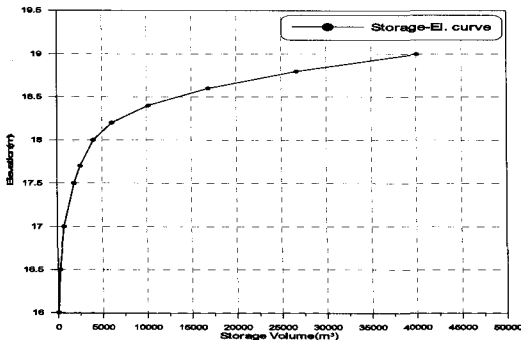


그림 4. 수위-저류량 관계곡선

3.3 동수경사 검토

방류하천 배수위 영향을 고려하여 SWMM-EXTRAN 모델을 통해 역류 발생구간을 검토한 결과 3번 맨홀구간에서 침수가 진행됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 역류 발생구간 검증을 위하여 배수위 영향을 고려한 맨홀 간 동수경사를 검토하여 동수경사선이 지반고 위로 산정되는 구간을 침수 위험구간으로 판정하였다. 다음 표 5는 맨홀 간 빈도별 동수경사 산정값을 나타내며 SWMM 모델결과와 동일한 3번 맨홀 구간이 침수 가능 구간으로 판정되었다.

표 5. 배수위를 고려한 맨홀 간 동수경사

맨홀번호	지반고 (E.L.m)	관하단고 (E.L.m)	관상단고 (E.L.m)	빈도별 동수구배(E.L.m)							맨홀위치	
				5년	10년	20년	30년	50년	80년	100년		
12	119.49	115.28	116.17	118.31	118.42	118.46	118.50	118.56	118.60	118.62	관거시점	
11	119.37	115.45	115.42	118.29	118.38	118.42	118.46	118.50	118.53	118.54		
10	119.56	115.35	115.44	118.27	118.35	118.38	118.41	118.45	118.48	118.49		
9	119.51	115.26	115.33	118.24	118.30	118.32	118.35	118.38	118.40	118.41		
8	119.46	115.03	115.26	118.24	118.29	118.31	118.33	118.36	118.38	118.39		
7	119.44	113.50	114.66	118.21	118.24	118.25	118.27	118.29	118.30	118.31		
6	119.00	111.83	113.50	118.20	118.22	118.23	118.25	118.26	118.28	118.28		
5	118.49	111.17	111.33	118.16	118.16	118.16	118.16	118.17	118.16	118.16		
4	118.31	110.97	111.17	118.13	118.13	118.13	118.13	118.14	118.13	118.13	침수가능구간	
3	118.09	110.80	110.97	118.11	118.11	118.11	118.11	118.11	118.11	118.11		
2	118.67	110.74	110.80	118.22	118.22	118.22	118.22	118.22	118.22	118.22		
1	119.44	110.47	110.74	118.27	118.27	118.27	118.27	118.27	118.27	118.27		
0	120.45	110.50	110.70	118.31	118.31	118.31	118.31	118.31	118.31	118.31		
												하천방류

4. 결 론

참 고 문 헌

서울시 우수관거의 경우 지선은 5년, 간선은 10년 빈도로 설계되며 현행 설계빈도 하에 매설된 우수관거에 대하여 서울시 42개년 강우특성분석을 통한 재현기간별 강우강도를 적용하여 통수능력 검토를 하였다. 이 결과 20년 빈도 이상에서 통수능 부족관거가 발생하였으며, 방류하천의 계획홍수위의 영향을 고려한 결과 5년 및 10년 빈도에서도 저지대 매설관거에서 역류가 발생하여 침수가 진행되는 것으로 분석되었다. 또한, 맨홀 간 동수경사선에 의하여 역류 발생구간을 검증한 결과 동일 구간 내에서 침수 위험이 판정되었다.

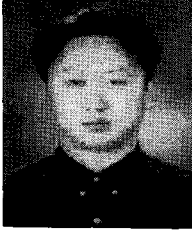
최근 10년간 발생한 서울지역 국지적 집중호우는 20~100년 빈도로 판별되었으며 본 연구결과 해당 지역의 우수관거는 20년 빈도 이상의 국지적 집중호우 발생 시 원활한 배수기능을 충족시키지 못하는 것으로 분석되었으며, 배수기능이 원활한 5년 및 10년 빈도 호우에 방류하천의 배수위를 고려할 경우 역류 발생에 따른 저지대 침수가 진행되는 것으로 분석되었으므로 해당 지역에는 침수 방지를 위한 저류지 및 펌프장의 건설이 요구되는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 침수가능구역 판정, 침수량 예측 및 저지대 침수고 산정을 통하여 해당 구역 내 우수관거의 통수능력의 검토와 함께 저류시설의 설치 여부를 결정할 수 있는 근거를 제시하는 한편, 침수량 및 침수고를 정량화시켜 저지대 안전을 고려한 저류시설의 설치규모 산정을 위한 기초자료를 제시하였다.

- [1] 서울특별시, 하수도 정비 기본계획, pp. 325-485, 1998.
- [2] 서울특별시, 한국수문학회, '87 수해백서, pp. 48-73, 1998.
- [3] 오규창, 문용주, "배수위 영향을 고려한 도시구역에서의 유출분석", 대한토목학회 2002년 학술발표회 논문집, pp.664-668, 2002.
- [4] 이삼노, 박진형, 조재연, "지리정보를 이용한 도시 소구역의 유출특성 연구", 대한토목학회 2003년 학술발표회 논문집. pp.2323-2328, 2003.
- [5] 노성진, 김현준, 장철희, "합류식 하수관거가 도시 하천 유출에 미치는 영향평가", 대한토목학회지 2005년 학술발표회 논문집, pp.235-235, 2005.
- [6] 김문모, 이종태, "도시 유출 모형의 특성 및 활용방안", 대한토목학회지 제53권, 제9호, pp21-27, 2005.
- [7] 이종태, 윤세의, 김정환, "지표면유출 해석방법이 도시구역의 홍수량 산정에 미치는 영향", 대한토목학회지, 제14권 제5호, pp.1167-1175, 1994.
- [8] 이정호, "도시유출 해석과 불명수 산정 모형을 통한 하수관거 최적개량 시스템의 개발", 석사학위논문, 고려대학교, 2002.
- [9] EPA, Storm Water Management Model User's Manual Version 4: Extran Addendum; Third Printing, EPA/600/3-88/001b, Environmental Protection Agency, 1992.
- [10] 한국수도협회, 하수도시설기준, pp. 41, 1998.
- [11] Chow, V.T., Urban Stormwater Runoff, E.P.A, pp.43-129, 1976.
- [12] 윤용남, 공업수문학, 청문각, pp. 168-191, 1998.

이 정 호(Jung-Ho Lee)

[정회원]



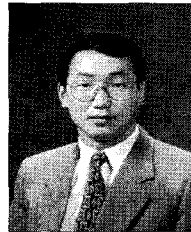
- 2001년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 고려대학교 토목공학과 (공학박사수료)

<관심분야>

수공학, 수자원시스템공학

김 중 훈(Joong-Hoon Kim)

[정회원]



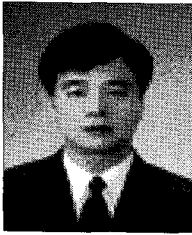
- 1984년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1986년 12월 : 미국 Virginia tech. (공학석사)
- 1992년 2월 : 미국 University of Texas at Austin (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

<관심분야>

수리학, 수자원시스템공학

조 덕 준(Deok-Jun Jo)

[정회원]



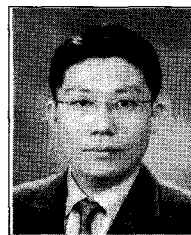
- 1989년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 동서대학교 토목공학과 전임강사

<관심분야>

수문학, 환경수리학, 수자원시스템공학

김 응 석(Eung-Seok Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동국대학교 토목공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

수자원시스템, 상하수도시스템