

우수관망 노선 결정에 따른 침투유출량 변화 분석

이정호^{1*}

¹국립한밭대학교 토목공학과

A Change of Peak Outflows due to Decision of Flow Path in Storm Sewer Network

Jung Ho Lee^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Hanbat National University

요약 우수관망의 설계에 대한 기존의 연구들에서 관망의 노선은 최소의 건설비용을 목적으로 결정하게 되며, 기존의 연구들에서는 관망의 노선 변경에 따른 관거 내 흐름의 중첩효과는 관망 노선 결정에서 고려되지 않고 있다. 그러나 본 연구에서는 관망의 노선 결정에 있어서 관거 내 흐름의 변화를 고려하였으며, 관망 전체의 흐름을 제어 및 분산시킴으로써 내수침수 위험도를 감소시키고자 하였다. 이것은 관망 구성에 따른 관거 내 흐름의 중첩효과를 제어함으로써 가능하며, 이러한 흐름의 제어를 통하여 우수관망에서의 내수침수 위험도가 저감될 수 있다. 본 연구에서는 우수관망에서의 노선 결정에 따라서 달라지는 관거 내 흐름의 중첩효과와 그 결과로서 나타나는 유출구에서의 침투유출량 변화를 분석하였다. 관망의 노선 결정은 유전자알고리즘을 이용하였으며, 이때 목적함수는 유출구에서의 최소 침투유출량이 된다. 가상의 우수관망에 대하여 노선 결정에 따른 침투유출량 변화를 분석한 결과 10년 빈도의 설계강우량에 대하여 강우지속시간 30분의 경우 관망 노선에 따른 최대 및 최소 침투유출량 차이는 약 5.6%이며, 초과강우에 대한 내수침수 발생 분석을 위하여 2002년에 발생한 태풍 '루사'에 대한 적용 결과 월류량이 약 31% 감소되는 결과를 나타냈다.

Abstract In the previous researches for storm sewer design, the flow paths in overall network were determined to minimize the construction cost and then, it was not considered the superposition effect of runoff hydrographs in the sewer pipes. However, in this research, the flow paths are determined considering the superposition effect to reduce the inundation risk by controlling and distributing the flows in the sewer pipes. This is accomplished by distributing the inflows that enter into each junction by changing the flow path in which pipes are connected between junctions. In this paper, the superposition effect and peak outflows at outlet were analyzed considering the changes of the flow paths in the sewer network. Then, the flow paths are determined using genetic algorithm and the objective function is to minimize the peak outflow at outlet. As the applied result for the sample sewer network, the difference between maximum and minimum peak outflows which are caused by the change of flow path was about 5.6% for the design rainfall event of 10 years frequency with 30 min. duration. Also, the typhoon 'Rusa' which occurred at 2002 was applied to verify the reduction of inundation risk for the excessive rainfall, and then, the amount of overflows was reduced to about 31%.

Key Words : Storm Sewer Network, Inundation, Excessive Rainfall

1. 서론

는 유역 내 우수관거의 통수능력을 초과하는 경우가 많아지고 있으며, 이러한 경우 발생하는 내수침수는 인적·물적 피해를 야기한다. 따라서 도시유역에서의 내배수 시

최근 도시유역에서 빈번히 발생하는 국지성 집중호우

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

*교신저자 : 이정호(leejh@hanbat.ac.kr)

접수일 10년 10월 05일

수정일 10년 12월 16일

게재확정일 10년 12월 17일

설물에 대한 내수침수 저감 효과를 증대시키고자 하는 연구가 근래에 주목되고 있다.

현재 도시구역의 우수관거 설계는 최단거리의 관거 노선 설계에 따라 최소비용의 공사비를 산출할 수 있도록 설계되고 있다. 또한 우수관망의 설계에 관한 기존의 연구들 또한 관망의 노선 및 관거 제원의 결정에 있어서 최소비용의 설계에 국한되어 왔다. 우수관망의 최적 설계에 관한 근래의 연구들 중 Tekeli et al.(1986)[3]은 standard shortest path algorithm을 이용하여 우수관망을 설계하기 위한 LGA 모형을 개발하였으며, Weng and Liaw(2003)[4]은 'network layout'의 최적화 문제와 'hydraulic design'의 최적화 문제를 동시에 고려할 수 있는 SSOM/LH 모형을 개발하였다. 또한 Weng et al.(2004)[5]은 우수관망의 최적 설계 문제와 수리학적 설계를 동시에 고려하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용한 최적 설계 모형을 개발하였으며, Jang et al.(2006)[2]은 위험도를 고려한 최적 우수관망 설계 모형을 개발하였다. 이 모형에서는 위험도를 평가하기 위하여 First Order Second Moment(FOSM) 방법에 의한 불확실성 분석이 이용되었다. 그러나 이러한 기존의 연구들에서 관망의 설계는 최소비용을 목적함수로 국한시켰으며, 이때 관거 내 흐름이란 관거 설계를 위한 조건일 뿐 관거 설계에 따른 결과로서 고려되지는 않았다. 즉, 우수관망의 설계에 있어서 관망 노선의 변경에 따라서 달라지는 관내 흐름의 변화로 인한 영향에 대한 고려는 이루어지지 않았다.

그러나 김중훈 등(2009)[1]은 관거의 노선 변경에 따른 관망 내 흐름의 변화에 관한 연구 결과를 제시한 바 있다. 이 연구에서는 현재의 도시구역 관망 노선을 임의적으로 변경시켜 그에 따른 유출구에서의 침투유출량이 저감될 수 있음을 나타내었다. 그러나 관망 노선이 임의적으로 결정되었으며, 침투유출량을 최소화할 수 있는 관망 노선의 결정에 관한 모형의 개발은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 김중훈 등(2009)[1]의 연구결과를 바탕으로 우수관망 유출구 침투유출량 최소화를 목적함수로 하는 최적 노선 결정 모형을 개발하였다.

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 유출구에서의 침투유출량을 최소화하기 위하여 유전자알고리즘을 이용한 최적 노선 설계 모형을 개발하였으며, 이 모형은 수리-수문학적 분석을 위하여 EPA SWMM을 연계 구성하였다. 둘째, 본 연구에서 개발된 최적 노선 결정 모형을 이용하여 관망의 노선 결정에 따른 침투유출량의 변화를 분석하였다. 셋째, 개발된 모형을 통하여 획득된 최적 노선 관망에서의 내수침수 저감 효과를 검증하기 위하여 설계빈도를 초과하

는 경우에 대한 침수 저감 효과를 검증하였다.

2. 유출수문곡선의 중첩 효과

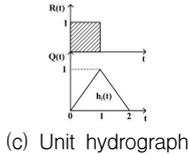
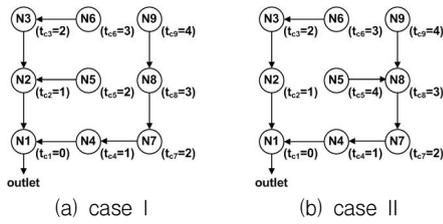
우수관망 내 어떤 한 지점에서의 합성유출수문곡선은 상류 관거로 유입된 유입수문곡선의 합성에 의하여 형성된다. 따라서 우수관거의 관망 구성이 변화한다면 어떤 한 지점에서의 합성수문곡선 또한 변하게 되며, 또한 이것은 상류의 맨홀 지점들 간 관거의 연결 방향이 변하게 되면 상류로부터 유입된 유량이 하류 유출구에 도달하는 시간이 달라짐을 의미한다. 이러한 이유로 인하여 관망이 어떻게 구성되느냐에 따라서 각 지점으로 유입된 수문곡선의 첨두치에 대한 중첩효과(superposition effect)가 달라지며, 관망 구성을 통한 첨두 유출량의 조절이 어느 정도 가능하게 된다. 또한 첨두유출량의 제어는 바로 우수관망 내 흐름들에 대한 중첩효과의 제어를 의미하므로 이것은 관망 구성에 따른 전체 우수관망 내 각 지점별 유입량의 분배를 통해서 가능하다[1].

다음의 그림 1 및 그림 2는 김중훈 등(2009)[1]의 연구에서 관망 노선 변경에 따른 수문곡선의 중첩효과와 그 결과로서 나타나는 유출구 첨두유출량의 변화를 나타낸다. 그림 1에서 연결 관거를 통한 우수의 이동 시간은 단위시간으로 동일하다고 가정하고, 그림 1(c)의 동일한 단위 수문곡선이 모든 지점으로 동일하게 유입된다고 가정하였다.

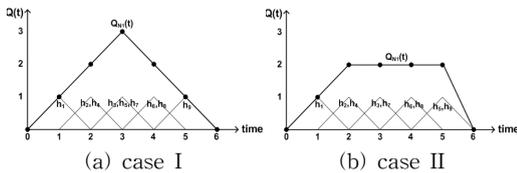
이러한 경우 관망 노선이 달라짐에 따라서 그림 2와 같이 유출구에서의 합성유출량수문곡선의 첨두치는 달라진다. 여기서 $h_1 \sim h_9$ 은 각 맨홀별 유입수문곡선이 유출구부분에 도달하기까지의 지체된 유입수문곡선을 나타내며, 그림 2(a)의 h_2 와 h_4 처럼 동일한 지체시간을 갖는 유입수문곡선들이 나타나며, 이러한 각 유입수문곡선의 중첩 정도에 따라서 합성유출수문곡선의 첨두치가 달라진다.

김중훈 등(2009)[1]의 연구에서는 관망의 노선 변경에 의한 관거 내의 유출수문곡선의 중첩을 분산시킴으로써 유출구에서의 첨두유출량이 변화될 수 있음을 제안하였으며, 실제 유역에 적용하여 현 상태의 관망을 임의적으로 변경하여 그 효과를 검증한 바 있다.

본 연구에서는 이상의 연구 결과를 바탕으로 최적화 기법을 이용하여 관거 노선 변경에 따른 흐름의 중첩효과 변화와 그로 인한 유출구 첨두유출량의 변화를 분석하였다.



[그림 1] 우수관망 구성 예[1]



[그림 2] 유출구에서의 합성수문곡선[1]

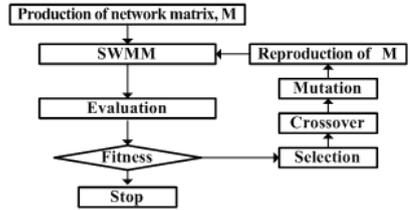
3. 우수관망 노선 결정 모형

우수관거의 설계는 상류로부터 하류로 이어지는 관거의 연결에 따라 순차적으로 이루어져야 하며, 각기 다른 관경 및 관 경사에 대한 단계적 해결을 통하여 다루어져야 한다. 그러나 본 연구에서는 관망에서의 노선 변경에 따른 유출구 침투유출량의 변화 분석에 중점하여 최적 노선 결정 모형을 개발하였다. 즉, 개발된 모형은 우수관망에서의 관경 및 관경사가 결정된 상태에서 관망의 노선에 관해서만 결정변수를 채택하였다. 따라서 관망 노선의 결정에 있어서의 본 모형의 적용은 동일한 관거 경사 및 충분히 큰 관경을 채택한 입의의 관망을 대상으로 한다.

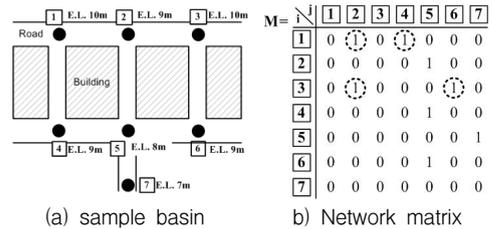
본 연구에서는 관망의 노선 결정에 관한 최적화 문제를 해결하기 위하여 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용하였으며, 다음의 그림 3은 개발된 관망 노선 결정 모형의 흐름도를 나타낸다.

여기서, M(network matrix)은 맨홀간 관거의 연결 방향을 나타내는 결정변수로서 맨홀간 관거의 연결은 지표고가 높은 곳으로부터 낮은 곳으로 연결되도록 한다. 다음의 그림 4(a)는 가상구역의 맨홀별 지표고를 나타내며, 그림 4(b)는 이를 바탕으로 작성된 network matrix를 나

타낸다. 이때 matrix에서의 1은 맨홀간 관거의 연결이 가능함을 나타낸다.



[그림 3] 관망 노선 최적 모형



[그림 4] 도시구역 network matrix

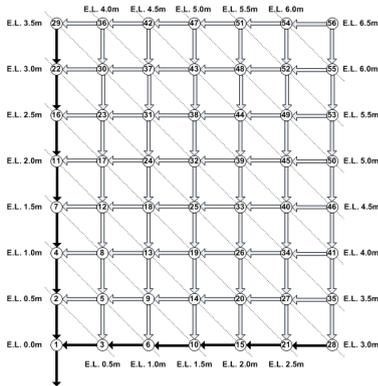
우수관망의 노선 결정을 최적화하는 과정에서 결정변수에 해당하는 M은 재생산되어지며, 생산된 관망 노선에 대해서는 도시구역의 대표적 유출 해석 모형인 SWMM(Storm Water Management Model)을 이용하여 수리수문 분석을 실시한다.

본 연구에서는 관망 노선 변경에 따른 침투유출량의 변화를 비교·분석하기 위하여 최적 노선 결정 모형에서의 목적함수를 최소의 유출구 침투유출량 및 최대의 침투유출량 두 가지 경우를 적용하였다. 즉, 유출구에서의 침투유출량이 최대가 되는 관망 노선을 결정하고 침투유출량이 최소가 되는 관망 노선을 결정하여 각각을 비교하였다.

4. 가상 관망에서의 노선 결정

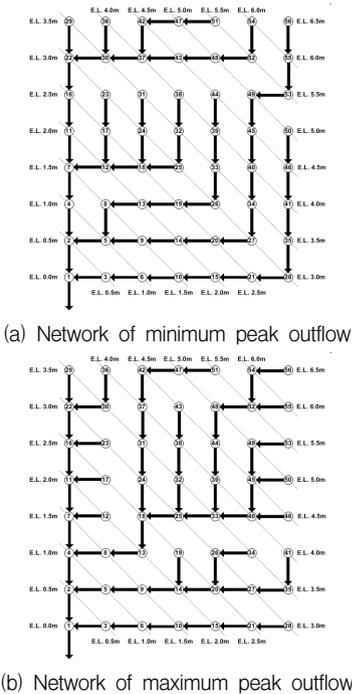
도시구역에서의 우수관망 노선 결정에 따른 침투유출량 변화 분석을 위하여 본 연구에서는 그림 5와 같이 총 56개의 맨홀 지점들로 이루어진 가상의 관망을 구성하였다. 여기서, 흰색의 화살표는 지표고를 바탕으로 맨홀간 관거의 연결 가능한 방향들을 나타내며, 검은색의 화살표는 지표고를 고려할 때 노선이 확정된 관거를 나타낸다. 각 맨홀 지점에 대한 유역면적 및 지표경사, 각 관거의 관경, 관연장 및 관경사 등은 일관되게 설정하였다. 각 유

역 면적은 0.1ha, 지표경사는 0.007, 관경은 1.0m, 관연장은 100m이며, 관경사는 0.005이다.



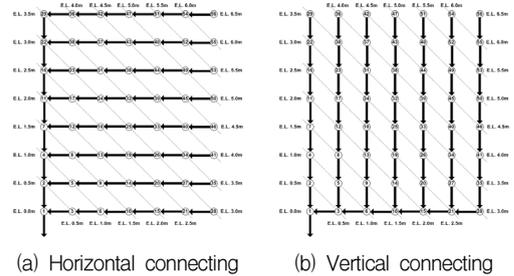
[그림 5] Sample sewer network

이에 대하여 유출구에서의 침투유출량이 최대 및 최소가 되는 관망 노선을 각각 최적화를 통하여 탐색한 결과는 다음의 그림 6과 같다. 이때 적용된 강우사상은 10년 빈도의 huff 4분위 강우이며, 강우의 지속기간은 30분, 1시간 및 2시간을 적용하였다. 이상의 다양한 강우사상에 대한 최대 및 최소 침투유출량의 관망 노선은 그림 6에서 나타난 각각 한 개씩의 관망 노선이 최적해로 탐색되었다.



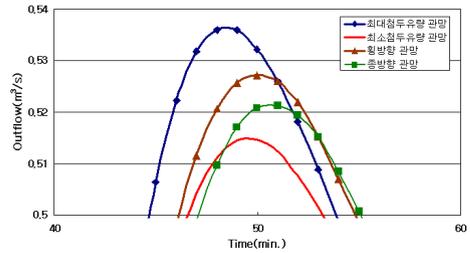
[그림 6] 최소 및 최대 침투유출량 관망 노선

또한 본 연구에서는 관망 노선의 변경에 따른 침투유출량의 변화에 대한 추가 검토를 위하여 그림 7과 같이 관거의 연결 방향을 횡방향 및 종방향으로 일간되게 구성한 관망 예를 적용하였다.

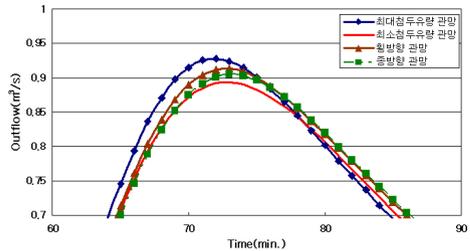


[그림 7] 횡방향 및 종방향 연결 관망

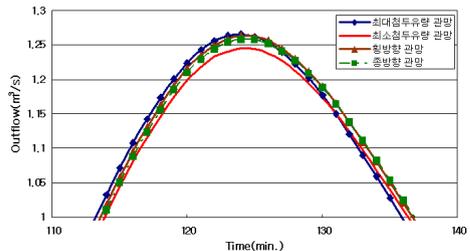
다음의 그림 8은 각 관망 구성에 따른 유출구 유출수문곡선에서 침투유출량 부근에서의 유출량 변화를 관망별로 비교하여 나타내고 있다. 이에 대한 결과는 다음의 표 1과 같다.



(a) 강우지속기간 30분 유출수문곡선



(b) 강우지속기간 60분 유출수문곡선



(c) 강우지속기간 120분 유출수문곡선

[그림 8] 강우지속기간별 관망별 유출수문곡선

이상의 결과에서 최대의 침투유출량 대비 최소의 침투 유출량의 감소는 비록 30분 및 1시간 강우에서 5.6% 및 4.3%로 작게 나타났으나 노선의 변경 폭이 제한적인 상황에서 고려할 때 결코 낮은 수치의 감소효과는 아니며, 실제 유역에 적용하여 최적의 우수관망을 결정할 경우에는 그 감소효과가 더욱 크게 나타날 것이다.

[표 1] 강우지속기간별 관망별 침투유출량

| 강우 지속기간 (분) | 관망 유출구 침투유출량 (m ³ /s) | | | |
|-------------|----------------------------------|-------------|--------|--------|
| | 최대 침투유출량 관망 | 최소 침투유출량 관망 | 횡방향 관망 | 종방향 관망 |
| 30 | 0.54 | 0.51 | 0.53 | 0.52 |
| 60 | 0.93 | 0.89 | 0.91 | 0.90 |
| 120 | 1.27 | 1.24 | 1.26 | 1.26 |

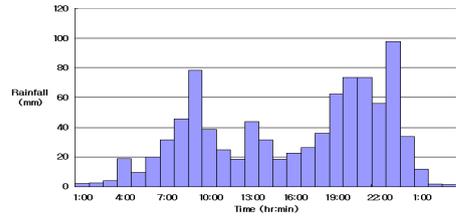
관망의 구성을 횡방향 및 종방향으로 구성한 경우 침투유출량은 최적화를 통하여 구성한 관망에 비하여 높은 침투유출량을 나타냈다. 관망의 연결 구성이 어떤 획일적인 방향성을 갖는다 하더라도 그것이 어떤 경향성을 가지고 침투 유출량을 발생시키는 것이 아님을 본 연구 결과에서 알 수 있다.

본 연구에서는 또한 각 관망에 대하여 내수침수 발생 현상을 모의하기 위하여 2002년에 발생한 태풍 '루사'를 실강우 사상으로서 적용하였다.

다음의 표 2 및 그림 9는 당시 관측된 강우기록을 나타낸다. 당시 시간당 최고 98.0mm의 강우가 발생하여 이것은 서울지방 약 40년 빈도의 강우사상에 해당한다.

[표 2] 태풍 '루사' 시강우자료

| Time | Rainfall (mm) | Time | Rainfall (mm) | Time | Rainfall (mm) |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| 01:00 | 2.0 | 10:00 | 38.5 | 19:00 | 62.5 |
| 02:00 | 2.5 | 11:00 | 25.0 | 20:00 | 73.5 |
| 03:00 | 4.0 | 12:00 | 18.5 | 21:00 | 73.5 |
| 04:00 | 19.0 | 13:00 | 44.0 | 22:00 | 56.0 |
| 05:00 | 9.5 | 14:00 | 31.5 | 23:00 | 98.0 |
| 06:00 | 20.0 | 15:00 | 18.5 | 00:00 | 34.0 |
| 07:00 | 31.5 | 16:00 | 22.5 | 01:00 | 11.5 |
| 08:00 | 45.5 | 17:00 | 26.0 | 02:00 | 1.5 |
| 09:00 | 78.5 | 18:00 | 36.0 | 03:00 | 1.3 |



[그림 9] 태풍 '루사' 강우주상도

이상의 태풍 '루사'에 대한 관측 강우량을 각 관망에 적용하여 월류 발생량 및 발생 맨홀 지점의 개수에 대한 결과는 다음의 표 3과 같다.

[표 3] 태풍 '루사'에 대한 관망별 월류 발생 결과

| | 최대 침투유출량 관망 | 최소 침투유출량 관망 | 횡방향 관망 | 종방향 관망 |
|-----------------------|-------------|-------------|--------|--------|
| 월류량 (m ³) | 1122.4 | 771.2 | 852.1 | 827.9 |
| 월류발생 맨홀개수 | 5 | 3 | 5 | 4 |

이상의 결과에서 유출구에서 침투유출량이 최소가 되도록 구성된 관망에서 월류 발생량 및 월류발생 맨홀 지점의 개수가 가장 낮게 나타났다. 월류 발생량의 경우 최대 침투유출량 관망 대비 최소 침투유출량 관망에서 약 31.3% 감소되는 것으로 나타났으며, 이것은 침투유출량을 최소화함으로써 관망 전체에서의 관내 흐름을 적절히 분배하여 흐름의 중첩효과를 분산시킨 결과이다.

5. 결론

우수관망 설정에 관한 기존의 연구들은 최소비용의 관망 노선 및 제원 결정에 국한되어 왔으며, 이러한 기존의 연구들은 관내 흐름을 관망 설계에 따른 결과로써만 고려하였을 뿐 관망 설계에 따른 관내 흐름의 변화 자체는 고려대상이 아니었다. 그러나 본 연구에서는 관망의 노선 결정에 따라서 관망 전체의 흐름이 변화되게 되며, 이것은 수문곡선의 중첩효과를 고려할 때 전체 관망에서의 관거 내 흐름의 분산에 관한 문제임에 주목하였다. 연구 결과 관망의 노선 변화에 따라서 관망 유출구에서의 침투유출량을 감소시킬 수 있으며, 이것은 설계빈도를 초과하는 강우량에 대해 월류 발생량을 저감시키는 효과를 나타낸다. 본 연구에서는 이를 위하여 유출구 침투유출량

을 최소화하는 것을 목적함수로 하는 우수관망의 최적 노선 결정 모형을 개발하였으며, 가상의 관망에 대하여 최적화된 노선의 침수 저감 효과를 검증하였다. 따라서 본 연구의 결과는 도시구역에서의 내수침수 방재에 보다 효과적인 우수관망의 설계에 기본 모형으로서 활용 가능할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 관거의 제원 결정은 최적화 문제에서 제외되었으므로 향후 관망의 노선 및 제원 결정을 동시에 고려한 최적 설계 모형의 개발에 관한 연구가 이루어져야 한다.

참고문헌

- [1] 김중훈, 주진걸, 전환돈, 이정호, “우수관거 흐름 제어 위한 관망 설계에 관한 연구”, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제9권, 제1호, pp.1-7, 2009.
- [2] Jang, S., Roesner, L.A. and Park, D., "Development of Urban Storm Sewer Optimal Layout Design Model Considering Risk", Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2006, May, omaha, Nebraska, USA., 2006.
- [3] Tekeli, S. and Belkaya, H., “Computerized layout generation for sanitary sewers”, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 112, No. 4, pp. 500-515, 1986.
- [4] Weng, H.T. and Liaw, S.L., "Studying a Sewer System Layout Optimization Model with Applied Enumeration Algorithm(SSOM/LH)", Proc. 16th Environ. Planning & Management Conf., Taiwan CIEnvE, pp.28-29, 2003.
- [5] Weng, H.T., Liaw, S.L. and Huang, W.C., "Establishing an optimization model for sewer system layout with applied genetic algorithm", Environmental Informatics Archives, Vol. 5, No. 1, pp. 26-35, 2004.

이 정 호(Jung Ho Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 공과대학원 토목환경공학과 (수공학석사)
- 2008년 8월 : 고려대학교 공과대학원 토목환경공학과 (수공학박사)
- 2008년 9월 ~ 2009년 8월 : 고려대학교 부설 방재과학기술연구원 연구교수
- 2009년 9월 ~ 현재 : 국립한밭대학교 토목공학과 전임강사

<관심분야>
상하수도공학, 수공학