

## GIS를 이용한 상수관로 설계지원 기법 연구

조효섭<sup>1\*</sup> · 최승철<sup>2</sup> · 이기하<sup>3</sup> · 조복환<sup>3</sup> · 김정엽<sup>3</sup>

### A Study on Design Support Technique for Water Distribution Network using GIS

Hyo-Seob CHO<sup>1\*</sup> · Seung-Chul CHOI<sup>2</sup>  
Gi-Ha LEE<sup>3</sup> · Bok-Hwan CHO<sup>3</sup> · Jeong-Yup KIM<sup>3</sup>

#### 요 약

최근 GIS를 이용한 관망 DB화가 빈번히 이루어지고 있으나 관망해석 모형과의 연계는 미흡한 실정이다. 그 주된 이유는 이들 DB가 관망해석 모형에서 요구하는 전문적인 공간정보의 작성에 어려움이 있기 때문이다. 그로 인해, 배수관망도의 작성과 이의 정확도 향상을 위하여 공간자료를 구축할 수 있는 GIS 기법 적용이 요구되고 있다.

본 연구에서는 배수관망 수리해석 모형구축에 필요한 제반 공간자료를 GIS를 이용하여 손쉽게 작성할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한, 관망해석모형의 계산결과를 활용하여 상수관로 위치의 공간적인 적정성(노후도 분석, 표고별 수압분포, 수용가 관리를 위한 유량공급의 분석 등)을 판단할 수 있도록 하였다.

주요어 : GIS, 관망해석, 상수관로의 설계, 공간분석 방법

#### ABSTRACT

Although there have been many researches to construct a database of water distribution networks using GIS, most of them were not linked with an model for the analysis of pipe networks because it is difficult to make spatial data about complex water distribution networks for building a detail model. Therefore, it is necessary to develop the method based on GIS to build geographical data for design of water distribution pipeline systems.

In this study, an innovated design support technique using GIS is proposed for a hydraulic analysis model of water distribution networks. With the function of spatial analysis in GIS system, the results

2005년 4월 21일 접수 Received on April 21, 2005 / 2005년 6월 15일 심사완료 Accepted on June 15, 2005

1 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 River Information Center, MOCT

2 한국수자원공사 수도권수도건설단 Korea Water Resources Corporation

3 충남대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Chungnam National University

\* 연락처 E-mail : chohs@moct.go.kr

from a pipe network model are used to analyze the suitability of the location of pipeline network, the spatial suitability comprised the analysis of the degree of pipe age, the altitude distribution of water pressure, and the water supply system for the customer.

**KEYWORDS** : GIS, Pipe Network Analysis, Water Distribution Networks Design, Spatial Analysis Method

## 서 론

우리나라는 지방상수도 급·배수 관망해석의 모형구축 및 활용이 저조한 것이 사실로 이는 가장 어려운 부분인 복잡한 관망에 대한 상세한 모형의 구축 및 유지관리가 시간과 투자비용의 한계로 인해 제대로 이루어지지 않고 있기 때문이다. 특히 지금까지 수행되고 있는 관망해석은 일부지역의 확장이나 수도정비기본계획 수립과 같은 설계에 개념을 둔 관망해석이었기 때문에 관망모형을 간략하게 작성하였으며, 시간별로 변하는 운영관리 시스템이 제대로 반영되지 못하는 것이 현실이다.

GIS는 지난 20여년간 지리정보의 효율적 사용을 위한 도구로서 그 효용성을 인정받아 사회 전반에 걸쳐 급속도로 사용이 확산되는 가운데 기존의 수문·수리 분석모형의 입·출력 인터페이스 유형으로 발전하였다. 최근에는 공간분석 기능의 다양화를 통한 실세계의 공간적 변화를 분석하는 의사결정 지원체계에까지 이르고 있다. 이로 인하여 각 지방자치단체별로 GIS를 이용한 관망 DB화가 활발하게 이루어지고 있으나, 상수도 시설물 운영관리에서 필수적인 관망해석 모형과 연계하여 구축하였거나 활용중인 지방자치단체는 아직까지는 거의 없다.

이에 관망해석 과정 중에서 가장 어렵고 오류발생이 많은 배수관망도의 작성과 이의 정확도 향상을 위하여 보다 나은 공간자료를 구축할 수 있도록 GIS 기법 적용이 요구되고 있다. Anderson 등(2001)에 따르면 미국과 캐나다의 약 15% 정도의 상수도시스템에서 GIS를 관망해석 모델에 활용하고 있으며, 가까운 장래에

80% 정도가 상수도시스템에 GIS를 도입할 계획으로 있다. Shamsi(2001)는 관망해석 모델과 GIS를 통합하여 개발하는 데는 자료의 상호교환(interchange), 관망모델과 GIS간의 연계(interface), 자료의 통합(integration) 등 3단계가 필요하다고 기술하였다. Stalford와 Townsend(1995)는 미국 노스캐롤라이나 Charlotte Mecklenbug의 수도시스템 통합계획에 따라 GIS와 관망해석을 연계한 사례를 소개하고 있다. 이에 따르면 시에서는 GIS 구축시 관망해석 모델과 연계하여 DB를 공유하고 이것과 실시간 원격감시제어시스템과 통합하여 상수도 시설물 운영관리에 활용하고 있다고 보고하고 있다. Feinberg와 Uhrick(1997)은 미국 Florida Broward County에 있는 상수도 하수도관련 기반시설 자료와 GIS, 그리고 수리모델을 통합했다. Bahadur 등(2001)은 상수도시스템의 위기(risk) 관리의 일환으로 위기 관리자가 상수도 위험성을 평가하는데 있어 미국환경청(USEPA)에서 개발한 관망해석 프로그램인 EPANET(Rossman, 2000)과 GIS를 통합한 PipelineNet이라는 시스템을 개발하였는데 이 시스템은 상수도에 오염이 발생했을 때 주민들을 고려하여 오염구역을 그림으로 표시하는 등의 기능을 가지고 있으며 이 시스템을 미국 Salt Lake 시에 적용하였다. Ennis 등(2001)은 효율적인 배수관망관리를 위해서 포괄적 결정지원시스템(H2OMAP)을 개발하였는데 이 시스템은 수리관망 계산프로그램과 GIS를 연동하였으며, 그래픽적인 인터페이스는 Map-object기법을 사용하였고 관망구축, 해석, 결과표현을 위해 정보구조체계를 사용하였다.

하성룡과 배명순(1999)은 수리적 및 경제적 으로 합리적인 광역상수도 관로의 관경을 결정 하기 위한 의사결정지원체계를 제안하여 GIS에 의한 공간정보의 추출 및 분석, 최적화기법에 의한 수리적 안정성과 경제성이 확보된 관경의 설정, 대안 분석결과의 도해적 출력 및 GUI(graphic user interface)에 의한 이용자의 편의성을 확보하는데 목적을 두었다. 연상호 (2000)는 중소도시에 산재되어 있는 상수도 관 망관리를 위하여 GIS 적용시 개선되어야 할 중요한 문제점 파악 및 방안을 도출하기 위하여

제천시의 관망도를 중심으로 분석·정리하여 현 재의 상수도 업무를 중심으로 관련분야와의 연 계방안과 그 모형을 도출하였으며, 기설치되어 운영하고 있는 상수도 시설물 관리시스템과의 비교를 통하여 문제점을 찾아 그 개선방안을 제 시한 바 있다.

본 연구는 실제 수도시스템의 관망해석모델 구축에서 가장 복잡하고 시간이 많이 소요될 뿐 만 아니라 오류의 가능성이 높은 관로(link) 및 절점(node)에 관한 자료수집과 모델의 구축에 대하여 GIS 응용기술을 이용하였다. 배수관망의

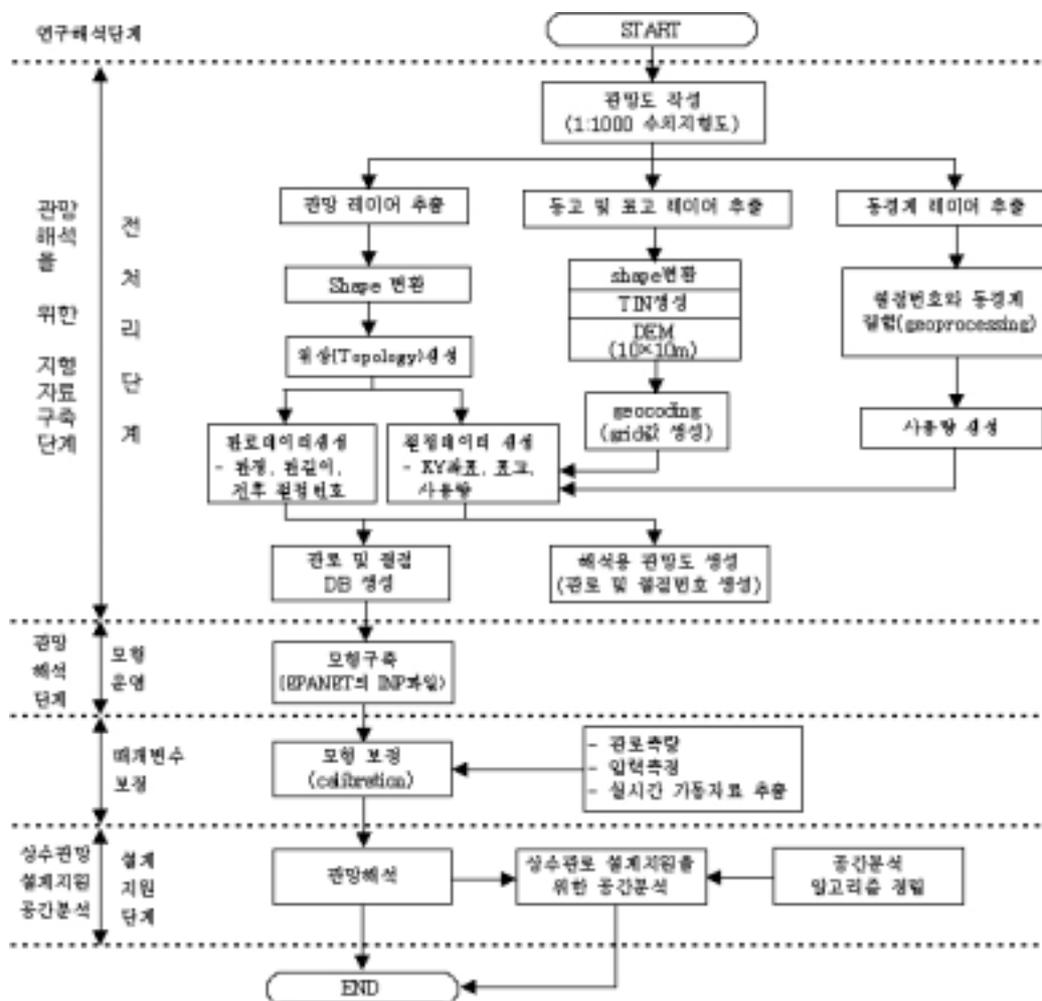


FIGURE 1. 연구 흐름도

수리해석 모델을 구축하기 위하여 우선 실제 관망의 관로시스템을 관경별로 CAD파일의 레이어(layer)를 구축하고 GIS의 상용도구인 ArcInfo, ArcView의 파일형식으로 변환한 후 도형자료의 위상구축(topology)기법에 의해 관로의 직경과 길이를 자동 추출하였다. 또한 절점의 좌표, 표고 및 사용량을 Arc/View의 기능들을 이용하여 관로 및 절점에 관한 데이터베이스를 생성하고 이를 관망해석 모형의 입력자료로 사용하였다. 또한, 시간별 물 공급과 배수지 수위변화 패턴은 원격감시 제어시스템(Telemonitoring/Telecontrol, TM/TC)의 실시간 자료를 수집, 분석하고 이를 모형의 입력자료로 활용하였다. 그리고 관망해석 모형을 대상으로 모형 검증에 위한 압력을 실측하였다. 특히, GIS의 기능을 이용하여 관로 노후도 및 수압분포의 분석, 관로별 유량분포 및 물 수요량 대비분석, 표고분석 등을 통하여 상수관망의 운영관리 및 설계 업무에 공간적인 의사결정을 지원할 수 있는 공간분석기법을 제시하였다. 다음 그림 1은 본 연구의 전체적인 연구 흐름도이다.

### 상수관망 설계지원을 위한 공간분석이론 정립

지형정보를 이용한 공간해석의 가장 기본적인 분석방법은 서로 다른 정보를 중첩하고 필요한 영역을 찾기 위하여 다양한 질의를 통하여 공간적인 분석을 수행하는 기능이다. 본 연구에서는 다음과 같이 상수관망 설계, 유지관리 등에 필요로 하는 몇 가지 공간분석방법을 정립하고 이를 적용하고자 한다.

#### 1. 물 수요량에 대한 공급유량의 공간분석 절차

본 연구에서는 기본적인 관망해석 이후의 산출물로서 관로별 공급유량을 알 수 있으며, 이에 각 행정구역별(동별)로 필요수량과 관로별 공급유량의 현황을 중첩 분석하여 필요수량의 부족현황 및 잉여 등에 대한 공간적인 현황을 분석할 수 있도록 한 알고리즘은 그림 2와 같다.



FIGURE 2. 물 수요량에 대한 공급유량의 공간분석흐름도

물 공급의 부족 및 잉여 지역에 대한 기준은 행정구역(동단위)별로 물 수요량을 기준으로 현재 상태에서 관망해석 결과를 토대로 상수관로를 통한 공급가능량을 대비하여 1.0인 경우는 공급과 수요가 동일한 경우이고, 1.0이상이면 공급가능량이 충분한 경우이며 1.0이하이면 부족한 경우를 나타내도록 하였다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$WS_{inx} = \frac{P_Q}{R_Q} \quad (1)$$

여기서,  $WS_{inx}$  : 물 공급의 부족(< 1.0) 및 잉여(>1.0)를 나타내는 지표

$P_Q$  : 관망으로부터 공급되는 물 공급량

$R_Q$  : 지역별로 요구되는 물 수요량

#### 2. 관망의 취약지역 분석 절차

관망의 취약지역 분석은 관망해석 이후에 산출되는 관거내의 압력과 관거의 노후정도를 중첩 분석하는 것이다. 여기서 관거의 노후도 정도는 관거 매설년도를 기준으로 다음과 같이 몇 개의 그룹으로 구분하고 관거의 상대적인 평가를 수행할 수 있도록 임의의 평가점수를 부여하였다.

TABLE 1. 평가점수표

관거 매설년도	노후도의 평가점수
5년 이내	1
5년 이상~10년 이내	2
10년 이상~20년 이내	3
20년 이상	4

평가를 위해 관거내 압력에 노후도의 평가점

수를 곱한 값을 취약성지수로 하였으며, 이를 나타내면 식(2)와 같다.

$$WK_{inx} = O \times P \quad (2)$$

여기서,  $WK_{inx}$  : 관망의 취약성 지수

$O$  : 노후도 점수

$P$  : 관거내 압력

관망의 취약성지수를 행정구역의 경계와 중첩하여 지역내 취약한 관거의 정도를 평가할 수 있도록 그림 3과 같이 공간분석을 수행하였다.



FIGURE 3. 관망의 취약지역 분석 흐름도



FIGURE 4. 급수체계의 분석 흐름도

### 3. 급수체계에 대한 공간분석절차

급수체계의 분석은 급수를 받는 지역의 고도와 관거내에 일정 수압을 유지하여 급수 가능한 지역을 파악하고 신설배수지의 필요성, 가압펌프장의 설치여부 등을 파악하는 것이다. 즉, 급수체계에 대한 공간적 분석은 관로내의 일정수압을 유지하여 고지대 및 저지대 등 지형적인 높

이와 관거내의 압력으로 급수지역까지 물이 공급가능한 지역을 판단할 수 있어야 한다. 따라서, 관망해석에 의한 관로별 수압과 해당 공간지형의 DEM정보를 중첩하여 일정 고도의 위치에서의 관로별로 수압현황을 파악할 수 있도록 한다. 여기서 관거 자료는 벡터자료이므로 래스터(raster)정보인 DEM자료와 중첩하여 다중질의 자료를 통하여 해석할 수 있도록 관거의 벡터자료를 래스터자료로 변환하여 사용하였다. 이에 대한 공간적인 분석절차는 그림 4와 같다.

### 관망해석을 위한 수치해석법

관망에서 정상류 상태에 대한 흐름해석은 매우 복잡한 문제이다. 저수지는 물론, 감압밸브, 미소손실, 가압 펌프 및 취수펌프 등과 같은 설비들은 관망해석을 더욱더 복잡하게 한다. 관망해석은 유량법 또는 수두법의 기초방정식을 이용하여 관로내 흐름조건을 만족하도록 방정식의 해를 구하는 기법들이 있으며, 가장 많이 사용되고 있는 수치해석법은 Hardy Cross법, 선형이론법, Newton-Raphson법 및 이들 기초이론에 근거한 변형기법들이 있다.

Hardy Cross법은 Cross(1936)에 의해서 개발되었으며 손쉽게 계산하고 프로그래밍할 수 있는 장점은 있으나 근본적으로 Newton-Raphson 방법을 하나의 폐합관로에 대해서 1회 적용한 것과 대등하다. 이 기법은 다른 두 개의 기법보다 계산시간이 많이 소요되어 대규모의 관로시스템에 대해서는 수렴성이 느린 것으로 연구된 바 있다(Potter와 Wiggert, 1991).

선형이론기법은 Wood와 Charles(1972) 및 Wood와 Rayes(1981)에 의해 단순한 관망의 해석을 위해 제시된 바 있고, Wood(1979)는 이 이론에 펌프나 다른 부속물을 포함시켜 확장시킨 바 있다. Wood와 Funk(1993)는 이 기법을 단순경로법, 동시경로법, 단순절점법, 동시절점법 등으로 구분하여 해석한 바, 이들 중 선형화이론에 의한 동시경로법이 가장 효율적인 것으로 제시한 바 있다. Newton-Raphson기법은 비

선형에너지방정식의 Jacobian을 구해 해석하는 방법으로서 Epp와 Fowler(1970), Jeppson(1977) 등에 의해 연구되어진 바 있다.

본 연구에서 사용한 EPANET모형에서는 관망 해석을 위한 수치해석법으로 ‘hybrid node-loop’ 기법을 이용하였다. Todini, Pilati(1987) 그리고 Salgado 등(1988)은 이 기법을 “Gradient Method”라고 명명하였다. 이와 유사한 기법들로 Hamam과 Brameller(1971)의 Hybrid Method와 Osiadacz(1987)의 Newton Loop-Node Method 등이 있다. 이들 수치해석 기법들은 거의 유사하나 EPANET에서 채택하고 있는 기본방정식은 좀 더 간단한 것이 특징이다.

EPANET의 해석모듈(module)은 그림 5와 같이 입력 프로세서(input processor), 수리해석(hydraulic solver), 수질해석(water-quality solver)과 결과표현(report writer) 등 4단계의 data-flow diagram으로 구성되어 있다.

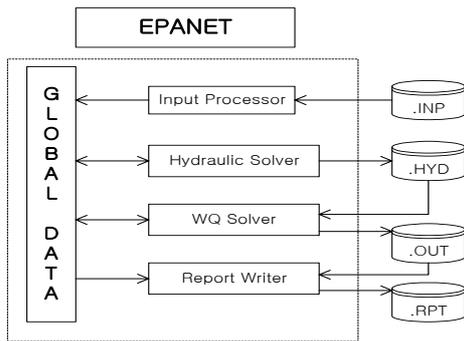


FIGURE 5. EPANET 해석을 위한 흐름도(Rossmann, 2000)

## 공간 데이터베이스 구축

### 1. 기본적인 공간 데이터베이스 구축

실측된 자료와 DEM성과를 비교한 결과 절점의 표고자료로서 표고수치모형을 활용하여도 큰 오차는 발생하지 않을 것으로 판단되지만, 반드시 사전의 수치지도에 대한 오류수정은 필수적이다. GIS를 이용하여 관망해석을 위한 절점의 표고값 작성은 DEM의 결과가 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 작업속도 등 효율성을 위하여 DEM을 이용하기로 한다. 생성된 DEM과 실측 데이터를 비교 검증하기 위하여 연구대상 지역의 대표점에 GPS(global positioning system)을 이용한 실측을 실시하여 이들 실측된 자료를 DEM 생성결과와 비교하였으며, 표 2는 정읍시의 GPS 측량성과를 표시하였다.

측량성과와 DEM 생성결과는 모두 1.0m 오차범위 내에 있었다. 가장 많이 오차가 발생한 지역이 약 80cm정도 발생하였으며, 이곳은 신설도로로서 기존의 수치도면과 신설된 도로의 표고차가 발생하여 나타난 오차라고 판단된다. 오차의 정량적 평가는 RMSE(root mean square error)를 이용하였다. RMSE는 지표면에서 참값의 위치로부터 변위(deviance)상태를 판단하기 위한 위치 정확도 측정의 한 가지 방법으로서, 측정 대상 수치지도에서 일정한 기준에 의해 선택된 점들에 대하여 수치지도의 좌표 값과 실제 현지 조사를 통하여 얻어진 좌표값의 차이를 계산하며 식(3)과 같이 표현된다.

TABLE 2. 정읍시의 GPS 측량성과

번호	X좌표	Y좌표	표고	위치
1	186,610.970	228,832.161	46.931	정읍시 호남중고교 앞 신설도로
2	186,261.079	229,513.393	36.723	정읍시 보건소 앞 인도
3	187,773.937	228,680.467	46.478	상동정수장 옆 차도
4	185,743.158	230,642.808	29.490	정읍역 앞 소화전
5	186,947.089	230,374.515	59.043	정읍 시청뒤 일광사 인근

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (3)$$

여기서,  $X_i$  : 모의치(수치지도 생성값)  
 $Y_i$  : 실측치(현장조사 값)  
 $N$  : 샘플링 개수

표 3은 본 연구대상 지역에 대한 실측자료와 DEM의 성과를 비교한 결과로 RMSE는 0.38m로 계산되어 비교적 만족할 만한 결과라고 판단된다.

TABLE 3. 측량성과와 DEM의 성과비교

번호	실측	DEM 성과
1	46.931	46.20
2	36.723	36.43
3	46.478	46.47
4	29.490	29.76
5	59.043	58.84
RMSE	-	0.38

**(1) DEM 표고와 관망해석을 위한 절점표고와의 연계**

수치표고모형을 이용하여 관망해석을 위한 절점의 데이터 취득을 위해서는 먼저 수치도면을 이용하여 DEM을 만들어야 한다. DEM 작성은 Arc/View를 이용하였고, 기존의 상수로망의 Arc에서 절점파일(node shape file)을 열어 이 데이터베이스와 연결은 Arc/View의 'Get Grid Value Extension'기능을 이용하였다.

**(2) 물사용량 자료의 구축**

TABLE 4. 관망해석을 위한 공간자료 활용

구 분	내 용	비 고
기본도	- 수치지형도(1:1000, 1:5000), 행정동.법정동 경계도, 관로망도 - 관망해석의 물 사용량 입력을 위한 검침자료	
상수관망 자료	- 광역상수도 실시간 공급자료 - 정수장, 가압장, 배수지 등 시설물 현황자료 및 가동자료	
매개변수	- 모형보정을 위한 실측자료(위치, 압력, 유량 등)	

배수관망의 해석에 있어서 중요한 요소 중 하나는 절점에서의 물 사용량에 대한 정보를 구축하는 것이다. 대규모 도시의 경우 절점마다 물 사용량을 입력하는 것은 쉽지 않은 작업이기 때문에 GIS와 같은 지형 및 속성정보가 구축된 데이터베이스를 활용하는 것이 가장 효율적인 방법일 것이다. 따라서 본 연구에서는 관망해석을 위한 자료구축에 직접 활용하기 위하여 관망의 절점 번호와 행정동 정보를 결합하고, 이를 정읍시에서 운영하고 있는 요금고지시스템 DB 자료를 이용하여 동별 사용량 패턴을 각 절점에 입력하는 방식을 택하였다.

**2. 관망해석을 위한 공간 데이터베이스 구축**

수치지형도는 국가에서 제작한 국가지리정보 체계(NGIS, national geographic information System)의 기본도를 이용하였다. 행정동 및 법정동 경계도는 전국 동 경계도면을 활용하였으며, 정읍시에서 추진중인 도시계획수립에서 작성한 도시계획도를 입수하여 기존 도면에서 표현되지 않았거나 오류가 있는 도로, 단지구획 등을 보완하였다. 또한 정읍시에서는 종이 형태의 관로망도만을 보유하고 있어 이를 모두 CAD파일로 변환, 입력하여 수치지도화하였고, 이를 GIS에서 활용하기 위하여 관직경별로 레이어를 부여하여 제작하였다. GIS를 이용한 관망해석을 위하여 표 4와 같이 공간자료를 활용하였다.

**(1) 절점 및 관로 데이터베이스 작성**

기존에 관망해석을 위해서는 절점 및 관로에

대한 데이터베이스를 먼저 작성하여 이를 프로그램에 연계(interface)하는 방법을 주로 사용하였으나, 여기에서는 이를 모두 GIS 응용기법을 이용하여 자동으로 구축하는 것이므로 무엇보다 중요한 것이 관망도에 대한 수치도면이며, 특히 환경별로 다른 레이어로 구성되어야 한다. 이후 ArcInfo에서 관로에 관한 공간정보와 속성정보를 결합하였다. 이를 통하여 환경별로 분기된 절점에 대한 표고 데이터 파일로 형성되게 된다. 그림 6은 관로 정보에 대한 컴퓨터 작업 결과를 나타낸 것이다.

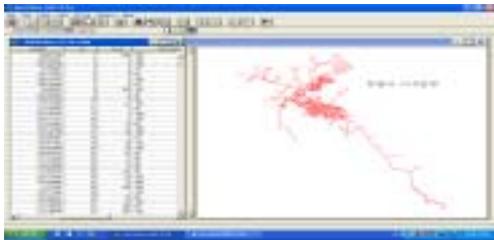


FIGURE 6. 관로에 대한 속성 및 공간정보 연결

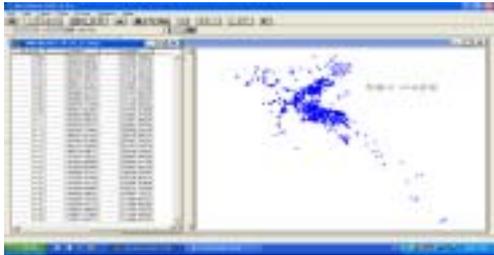


FIGURE 7. 정읍시 관망노드와 좌표추출 결과

절점에 대한 좌표는 Arc의 절점값을 점(point) 사상으로 변환하고 이를 X, Y 좌표값을 갖도록 ArcInfo에서 속성을 생성시켰다. 그림 7은 절점에 대한 컴퓨터 작업결과이다.

**(2) 절점의 표고값 생성**

관망해석은 위치수두와 압력수두의 합인 동수두 위치에 따라 흐르는 물의 양과 방향 등이 정해지게 되므로 각 절점의 위치수두(표고값)를 반드시 입력하여야 한다. 그러나 관로의 분기점, 환경변화점 등 개별 절점에서의 표고값은 관리

되고 있지 않기 때문에 관망해석의 주된 오류의 원인이 되고 있다. 여기에서는 앞에서 언급한 바와 같이 1:1,000 및 1:5,000 축척의 수치지도를 이용하여 DEM을 만들고 이를 절점의 DB와 연계한 GIS기법을 이용하여 각 절점마다 자동으로 표고값을 부여하였다. 그림 8은 DEM을 이용한 표고값 연결 작업결과이다.

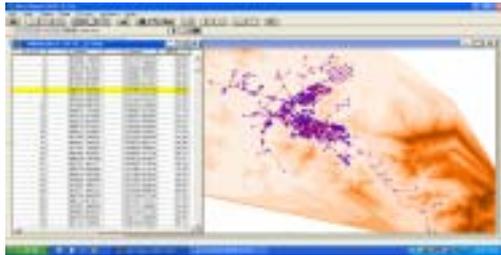


FIGURE 8. DEM을 이용한 표고값 추출결과

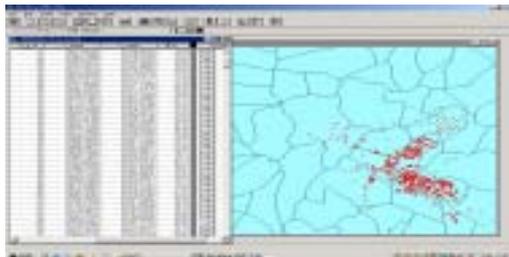


FIGURE 9. 절점데이터에 주소데이터 결합 결과

**(3) 물 사용량 입력을 위한 주소 테이블 연결**

구축한 절점에 물 사용량 자료를 입력하기 위해서 관로도, 지적도 또는 행정동 등의 수치도면을 하나로 결합하여 하나의 커버리지로 데이터베이스를 구축해야 한다. 연구대상인 정읍시에서는 지적에 관한 수치도면이 없어서 행정동 경계 파일을 활용하였는데, 각 절점에 행정동 경계를 결합하여 그 지역에서의 물 사용량을 분배하여 입력하도록 하였다. 서로 다른 수치도면의 결합에는 절점에 관한 shape파일과 행정동 도면 shape를 Arc View에서 다각형(polygon)인 동경계와 점인 절점을 상호결합하는 기능인 geoprocessing 기능을 활용하여 데이터를 추가하였다. 이와 같은 기능을 활용할 경

우 수리해석을 위한 절점 데이터와 가정의 물 사용 데이터를 직접 결합할 수 있을 것이다. 그림 9는 절점데이터에 주소데이터를 결합한 결과를 나타낸 것이다.

**(4) 관망해석 입력자료 구성**

이상과 같은 작업을 통해 얻어지는 데이터파일은 데이터베이스파일의 형태를 가지게 되며, 이를 이용하여 관망해석 파일을 만들 수 있게 되며, 결과적으로 만들어진 관망해석 파일은 절점 989개, 수원(reservoir) 3개, 탱크 1개, 관로 1337개, 펌프 2개의 상당히 규모가 큰 데이터로 구성되었다. 그림 10은 관망도 작성결과를 나타낸 것이다.

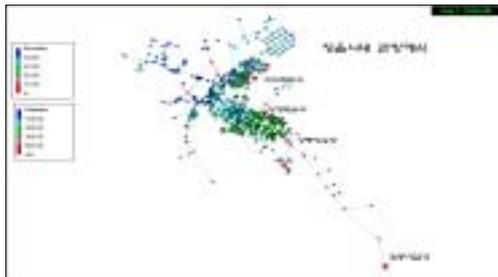


FIGURE 10. 정읍시내 계통 관망해석 모형



FIGURE 11. Data logger를 이용한 압력측정

**3. 관망해석 모형의 보정**

관망해석 모형구축 후 중요한 과정중의 하나가 모형 보정(calibration)으로서, 미국수도협회(AWWA)에서는 모형의 보정은 적정한 범위까지 모형과 실제 관망의 매개변수들을 일치시켜

나가는 과정이라고 정의한 바 있다. 모형의 보정에 관한 기준으로서 Walski(1983)는 평균압력차  $\pm 1.5m$ , 최대압력차  $\pm 5.1m$ 내에 들면 좋은 보정결과라고 할 수 있으며, 평균압력차  $\pm 3.0m$ , 최대압력차  $\pm 10.0m$ 정도는 좋지 못한 보정결과라고 하였다. Cesario와 Davis(1984)는 실측한 압력과 모의한 값의 차가  $\pm 3.5m \sim \pm 7.0m$ 내에 있어야 한다고 주장하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 일반적인 지침을 기준으로 하여 모형 보정을 위한 압력을 시내지역의 5개소에 대하여 실측하였고, 실측장소는 앞에서 언급한 위치 및 표고 측정장소와 동일하다.

압력측정은 자료의 신뢰성 향상을 위하여 실시간 자료의 저장이 가능한 data logger를 이용하여 각 지점마다 4일간 5분 간격으로 실시하였다. 그림 11은 data logger를 이용한 압력측정을 보여주고 있으며, 그림 12~그림 17은 각 5개소에 대한 측정결과와 지점별 압력변화 형태를 나타낸다.



FIGURE 12. 호남중고교 압력(1번)

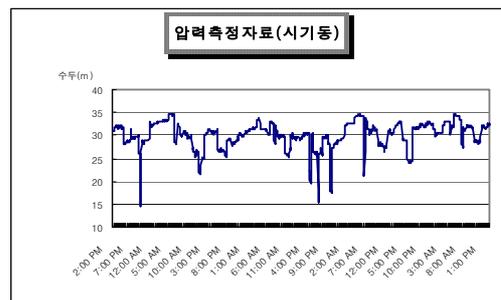


FIGURE 13. 보건소 앞 압력(2번)

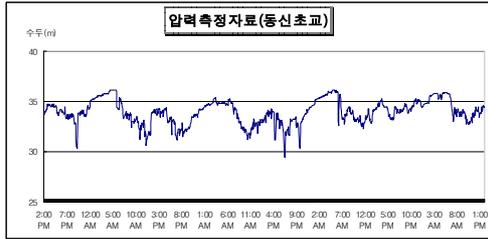


FIGURE 14. 상동정수장 압력(3번)



FIGURE 15. 정읍역 압력(4번)

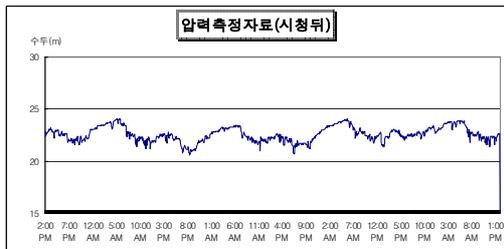


FIGURE 16. 시청위 압력(5번)

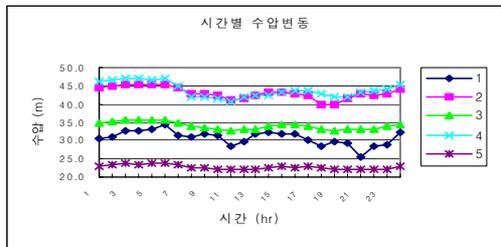


FIGURE 17. 지점별 압력변화 패턴

압력측정 자료를 분석한 결과 정읍역 지점이 최대 48.1m로 가장 높게 나타났으며, 시청위 고지대에서 최저 20.7m로 가장 낮은 압력을 보이고 있으나 대체로 적정 범위내에 압력이 분포되어 있다. 모형의 보정을 위하여 5개 지점의 압

력에 대한 시간별 변화를 분석하였으나 시간별로 일정한 변화패턴을 보이지는 않았다.

따라서 본 분석에서는 각 지점의 시간별 변화에 의한 보정보다는 평균값을 맞추어 Hazen-Williams식의 계수(C값)를 보정하는 방법을 선택하였다. 모든 관로에 대하여 계수 C값은 일반적으로 배수관망에 많이 적용되고 있는 100으로 적용하여 해석한 결과, 표 5와 같이 평균 RMS 오차가 1.870m로 앞에서 언급한 최대 오차범위 내에 있어 비교적 양호한 값을 보이고 있으나, 측정지점 4번을 제외한 모든 지점에서는 측정값보다 계산된 압력값이 적게 나타났다. 4번 지점에서의 평균 RMS 오차는 3.229m로 비교적 크게 나타났으며, 5번 지점의 오차가 가장 적게 나타났다.

각 계통별로 C값을 조정하여 해석을 반복 수행하였으나, 평균오차 및 RMS 오차가 크게 개선되지 않았다. 따라서, 향후 이 지역에 시간별 오류수정과 평균오차를 줄이기 위해서는 계통별 분석과 함께 다른 시간별 변화패턴, C값 등을 적용하여 분석하여야 할 것으로 판단된다.

앞에서도 언급한 바와 같이 현재의 조건이 만족할 만한 오차범위에 있으므로 정읍시 관망의 수리상태에 관한 일반적인 해석을 위해서는 전체 계통에 대한 C값을 100으로 적용하여도 큰 오류는 없을 것으로 판단된다.

## 관망해석결과 및 공간분석의 적용

### 1. 대상지역 현황

본 연구는 전라북도 정읍시를 대상으로 하였다. 2002년 현재 정읍시 인구가 14만명 정도의 중소도시이며, 정읍시 지방상수도는 광역상수도와 지방상수도를 함께 취수원으로 하고 있으며, 시내지역과 읍면지역이 별개의 수도시스템으로 구축되어 있다. 정읍시의 지방상수도의 시설용량은 1일 60,900m<sup>3</sup>이며 이중 정읍시에서 자체 취수 및 정수 처리하여 공급하는 시설용량은

TABLE 5. C=100일 때의 평균 압력비교

측정지점	Node No.	측정 평균(m)	계산평균(m)	평균오차(m)	RMS 오차(m)
1	709	43.07	42.68	1.105	1.401
2	979	30.77	30.99	1.424	1.824
3	1026	33.98	33.48	0.794	0.957
4	341	43.86	45.56	2.748	3.229
5	393	22.71	21.99	0.732	0.928
평균		34.88	35.14	1.361	1.870

TABLE 6. 정읍시 지방상수도 시설용량 및 급수 현황

구 분	시설용량(m <sup>3</sup> /일)	급수량(m <sup>3</sup> /일)	가동율(%)	비고
계	60,900	40,650	66.7	
상동정수장	15,000	8,250	55.0	2002년
광역(섬진강)	45,900	32,400	70.6	2003년

15,000m<sup>3</sup>/일이며, 광역상수도에 정수를 의존하고 있는 시설용량은 45,900m<sup>3</sup>/일이다

정읍시 수돗물의 정수처리를 위한 정수시설은 15,000m<sup>3</sup>/일 규모의 상동정수장 1개소이며, 송수, 배수 및 급수를 담당하는 관로시설은 870km에 달한다. 이들 관로 중 20년 이상 경과한 관로는 187km로서 전체의 21.5%에 달하며, 가압시설은 내장산국립공원 및 주변지역에 급수하기 위한 회룡가압장(1,000m<sup>3</sup>/일) 1개소가 있으며, 배수지는 시내 급수를 위한 2개소와 신대인읍 등 읍면지역 급수를 위한 배수지 6개소 등의 시설물을 갖추고 있다.

정읍시 상수도의 유수율 제고를 통한 경영개선 등 운영효율화를 위해서는 무엇보다 이 지역의 관로상태와 수압, 수량 등의 파악이 중요하며, 이를 위해서는 관망해석이 필수적이다. 그러나, 정읍시 시내지역의 관로망도의 경우에도 절점의 개수가 1,000개, 절점구간별 관로의 개수가 1,500개 이상이 되는 등 복잡하게 구성되어 있어 기존의 직접입력에 의한 관망해석은 거의 불가능한 실정이다. 따라서, 이 지역의 정확하고 신속한 관망해석을 통한 진단과 개선방안 수립을 위하여 GIS 분석기법을 이용한 관망모형구축과 실측을 통한 보정을 실시하게 되었다. 그

림 18은 정읍시 시내 급수구역 관로망도이다.

TABLE 7. 정읍시 관로현황

계(km)	870
도수관(km)	-
송수관(km)	33
배수관(km)	298
급수관(km)	539

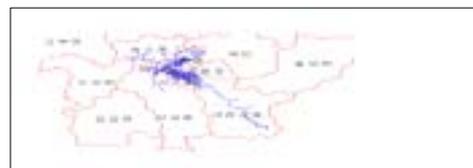
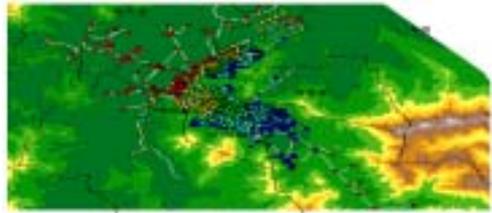


FIGURE 18. 정읍시 시내 급수구역 관로망도

## 2. 급수체계에 대한 공간분석 결과

그림 19는 관망해석을 실시한 결과 압력분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 직결가압 급수지역을 제외하고 시내전역에 비교적 안정적인 5.0 kg/cm<sup>2</sup> 이하의 수압상태를 보이고 있으나, 일부의 고지대 지역에서 상수도 시설기준에서 정하는 적정수압의 하한범위인 1.5kg/cm<sup>2</sup> 이하의 낮은 압력이 분포하여 이 지역에 대한 수돗물 공

급방안이 제고되어야 함을 알 수 있다. 따라서 이 지역은 별도의 급수구역으로 설정하여 가압 펌프장 및 배수지 신설에 의한 수압상승과 안정적인 급수가 요구된다.



범례	20.98 이상	18.84-20.98	16.99-18.84	14.95-16.99	14.95 이하
압력					

FIGURE 19. 관망해석 결과(압력분포)

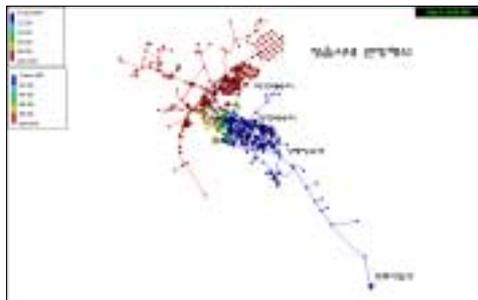


FIGURE 20. 관망해석결과(배수지 공급체계)

향후 배수관망의 누수예방 및 지방상수도의 운영효율화를 위하여 시내 관망을 규격화·조직화하는 블록 시스템을 구축할 계획으로 있는데, 이를 위해서는 현재 2개의 배수지에서 시내지역에 통합하여 급수하고 있는 체계를 별도의 급수 체계로 분리하여야 한다. 급수체계 분리를 위해서는 우선 두 배수지의 급수영역을 구분하여야 하는데, 이때 활용할 수 있는 해석이 수질모의 중의 한 기법인 trace이다.

이 기법을 활용하여 분석한 결과 마곡배수지는 정읍시 서북부 지역에 급수하고 있으며, 정읍역 인근지역에서는 물 사용량, 배수지 수위 등에 따라 두 배수지 물이 혼합되어 공급되는 것을 알 수 있다. 그림 20은 trace기능을 이용한

배수지간의 공급체계를 모의한 것으로서 붉은색은 마곡배수지, 파란색은 장명배수지 공급계통이며 나머지 색은 비율에 따라 물이 혼합된 정도를 나타낸다.

### 3. 물 수요량에 대한 공급유량의 분석결과

그림 21은 관망해석을 실시한 결과 유량분포를 나타낸 것이며, 그림 18에서와 같이 각 행정구역별로 요구수량을 기준으로 각 공급량을 평가한 결과가 그림 22이다. 그림 22에서 보는 바와 같이 대부분이 수요량(2001년도 기준의 요구수량)을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림 21에서 보는 바와 같이 유량이 많은 것은 빨강색으로 표시되고 있는 정읍시내부분이 많은 유량이 흐르고 있음을 알 수 있다. 향후 각 행정구역별로 수요량을 추정하고 이에 대한 유량공급의 부족 및 잉여 등을 평가할 때 매우 용이한 공간분석을 수행함을 알 수 있다.

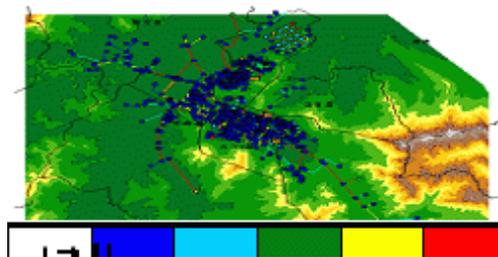


FIGURE 21. 관로(절점)별 유량분포도

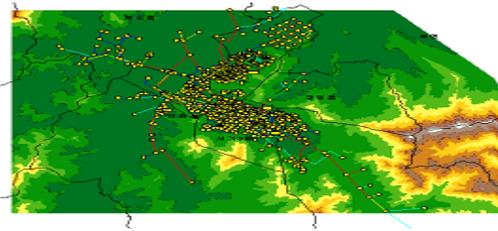


FIGURE 22. 물수요량에 대한 공급유량분석결과

### 4. 관망의 취약지역 분석결과

그림 23은 관망의 취약지역을 분석하기 위하여 각 관로별·매설연도별로 표시한 것이다. 대

부분이 1991년에 매설되어 있고, 이후 1995년, 1997년, 2001년 등에 매설된 것으로 나타났다. 따라서 관망의 취약지역분석에 있어 매설년도에 따른 등급은 대부분이 2, 3의 평가점수를 갖고 있으며, 여기에 각 관로의 수압분포도인 그림 18를 중첩하여 가장 취약한 부분을 나타낸 것이 그림 24이며, 보는 바와 같이 가장 취약한 부분은 붉은색으로 표시하였다. 가장 취약부분은 매설이 오래 되었고 수압도 비교적 높은 편으로 평가되었다. 공간적으로 보면 정읍시내의 중앙 부분에 위치하고 있으며 이 부분은 물 수요량도 많이 요구하고 있는 곳으로 판단된다.

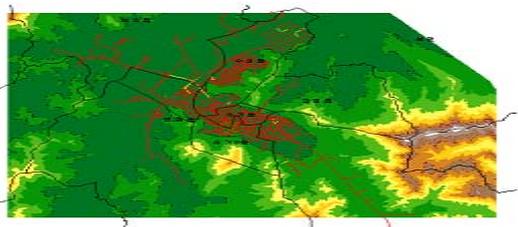


FIGURE 23. 관망매설년도(1991년도 현황)

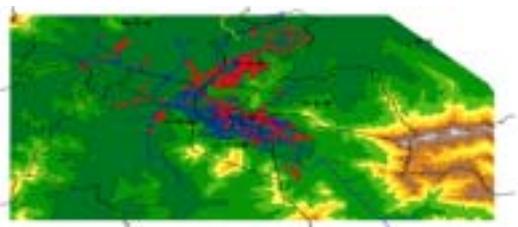


FIGURE 24. 관망의 취약지역분석결과

## 결론

본 연구는 GIS 응용기술을 이용한 관망해석 시 관로 및 절점데이터의 자동생성 및 DB화하는 기법을 개발하였고, 상수관로 설계지원을 위하여 GIS의 공간분석기능에 의한 공간적인 의사결정을 지원할 수 있는 체계를 마련하였다. 본 연구의 타당성 검증을 위하여 전북 정읍시 지방상수도 관망을 대상으로 적용하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) GIS의 위상구축, 속성 및 공간 data 결합과 DEM 작성을 통한 절점표고 연결 등 GIS 기술을 이용한 급배수관망 모형 구축이 가능할 뿐만 아니라, 모형구축시 발생하는 시간과 오류를 줄일 수 있었다. 축척 1:1,000과 1:5,000 지형도의 표고 및 등고 자료를 결합하여 DEM을 생성한 결과 RMSE를 0.38m까지 줄일 수 있었다.

(2) 모형의 보정을 위한 실제 압력측정 결과 각 지역마다 다른 시간별 압력변화 패턴을 보였으며, 이에 따라 정확한 모형보정을 위해서는 구역분할을 통한 압력 및 사용량의 상세한 조사가 함께 실시되어야 한다고 판단된다. 또한 관망해석 결과 일부지역에서 상수도 시설기준에서 정한 적정수압보다 낮은 압력이 분포하는 것으로 나타났으며 이 지역의 급수체계 변경을 통한 안정적인 급수가 요구된다.

(3) GIS를 이용하여 물수요량과 공급량의 대비현황 및 관망의 취약지역분석 등을 분석하였다. 이로부터 상수관로의 적정규모 뿐만 아니라 실제 설계에 있어 필요수량의 공간적 분포자료를 취득함에 따라 실수요량에 대한 공급가능수량의 공간적인 분포량을 체계적으로 산출할 수 있음을 확인하였으며, 취약지역분석에 있어서는 관로의 매설년도에 대한 충분한 자료만 취득할 수 있으면 관망의 취약한 구역에 대한 공간적 분석이 수행 가능함을 제시할 수 있었다.

관망해석을 통하여 누수통제를 위한 블록시스템 구축, 시간별 변화 패턴 분석을 통한 시설물 가동 등 실제 상수도 운영관리 업무에 유용하게 사용될 수 있는 것으로 나타났으나, 좀 더 효과적인 활용을 위해서는 각 가정별 급수량과 모형의 연계 및 모형 보정의 정확도 향상 등에 관한 연구가 향후 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- 연상호. 2000. GIS기반 상수도 관망관리시스템 구축의 개선 방안에 관한 연구. 한국지리정보학회지 3(3):90-97.

- 하성룡, 배명순. 1999. GIS를 기반으로 한 광역 상수도 관경의 최적화 시스템. 대한환경공학회 '99추계 학술연구발표회 논문집(I).
- Bahadur, R., J. Pickus, D. Amstutz and Samuels, W. 2001. A GIS-based Water Distribution Model for Salt Lake City. UT. ESRI International User Conference.
- Cesario, A.L., and J.O. Davis. 1984. Calibrating network models, *Journal of the American Water Works Association* 76(9)
- Cross, H. 1939. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Bulletin No. 286. Univ. of Illinois Engineer Experiment Station. Urbana. IL.
- Ennis, J., P.F. Boulos, J.E. Heath and P. Hauffen. 2001. Improved Water Distribution System Modeling and Management Using Mapobjects. ESRI International User Conference.
- Epp, R., and A.G. Fowler. 1970. Efficient code for steady-state flows in networks. *J. of Hyd. Div. ASCE*, 96(1):43-56.
- Feinberg, D., and S. W. Uhrick. 1997. Integrating GIS with Water and Wastewater Hydraulic Models. ESRI International User Conference.
- Hamam, Y.M., and A. Brameller. 1971. Hybrid method for the solution of piping networks. *Proc. IEE*. 113(11):1607-1612.
- Jeppson, R.W. 1977. Analysis of flow in pipe networks. Ann Arbor Science. Ann Arbor. MI.
- Osiadacz, A.J. 1987. Simulation and Analysis of Gas Networks. E. & F.N. Spon. London.
- Potter, M.C., and D.C Wiggert. 1991. Mechanics of fluids. Prentice-Hall.
- Rossman, L.A. 2000. Computer Models / EPANET in Water Distribution Systems Handbook. McGraw-Hill.
- Salgado, R., E. Todini and P.E. O'Connell. 1988. Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. Proc. Inter. Symposium on computer Modeling of Water Distribution Systems. University of Kentucky. May.
- Shamsi, U.M. 2001. GIS and Modeling Integration. CE News.
- Stalford, P.E., and P.E. Townsend. 1995. Water Distribution System Modeling, GIS, and Facility Management Systems, What do they have in common? A Case Study. ESRI International User Conference.
- Todini, E. and S. Pilati. 1987. A gradient method for the analysis of pipe networks. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution. Leicester Polytechnic. UK. September 8-10.
- Walski, T.M. 1983. Technique for calibrating network models. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. 109(4):360-372.
- Wood, D.J., and C.O. Charles. 1972. Hydraulic network analysis using linear theory. *J. of Hyd. Div. ASCE*. 98(7):1157-1170.
- Wood, D.J., and A.G. Rayes. 1981. Reliability of algorithm for pipe network analysis. *J. of Hyd. Div. ASCE*. 107(10):1145-1161.
- Wood, D.J., and J.E. Funk. 1993. Hydraulic analysis of water distribution systems. Water supply systems: State of the art and future trends, E. Cabrera, and F. Martinez, eds., Computational Mechanics Publications, pp.43-85.