

# WaterGEMS모형을 이용한 상수관망 블록시스템의 비상급수계획 평가

## Evaluation of Emergency Water Supply Plan for Block System of Water Network using WaterGEMS

백천우\* · 전환돈\*\* · 김종훈\*\*\* · 유도근\*\*\*\* · 이광춘\*\*\*\*\*

Baek, Chun Woo · Jun, Hwan Don · Kim, Joong Hoon · Yoo, Do Guen · Lee, Kwang Choon

### Abstract

Hydraulic analysis of water distribution system can be divided into demand-driven analysis and pressure-driven analysis. Demand-driven analysis can give unrealistic results to simulate hydraulic conditions under abnormal operating conditions such as sudden demand increase and pipe failure. In Korea, demand-driven analysis has been used to establish emergency water supply plan in many water projects, but it is necessary to use pressure-driven analysis for establishment of emergency water supply plan. In this study, WaterGEMS model that was developed for pressure-driven analysis is used to evaluation of emergency water supply plan of J city. As the results, it was able to draw up more efficient plan for water supply in small block, and established emergency water supply plan of J city was determined to be appropriate.

**Key words** : Water Network, Emergency Water Supply Plan, Pressure-Driven Analysis, WaterGEMS

### 요 지

상수관망의 수리해석 방법은 demand-driven analysis와 pressure-driven analysis로 구분할 수 있으며, 급작스런 용수수요증가, 관거파괴 등과 같이 비정상운영상태인 용수공급시스템의 수리모의에 demand-driven analysis를 사용할 경우 비현실적인 결과를 줄 수 있다. 특히 현재 국내에서는 비상상황에 대한 비상급수계획 수립 시에 demand-driven analysis를 사용하고 있으나, pressure-driven analysis의 적용을 통한 비상급수계획의 적정성 평가가 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 pressure-driven analysis를 위해 최근 개발된 WaterGEMS모형을 이용하여 2007년 수도정비 사업을 계획한 J시의 비상급수계획의 적정성을 평가하였다. 적용 결과 소블럭의 용수공급 안정성 향상을 위한 방안 제시가 가능하였으며, 수립된 비상급수계획이 적합한 것으로 판단되었다.

**핵심용어** : 상수관망, 비상급수계획, Pressure-Driven Analysis, WaterGEMS

### 1. 서 론

상수도는 국민의 일상생활과 경제활동에 없어서는 안 될 기본적인 사회간접시설이며, 상수도시스템은 안정적이고 안전한 용수의 공급을 주목적으로 한다. 상수도시스템을 구성하는 중요 배수관, 배수지 등에 문제가 발생할 경우 전체 시스템에 미치는 파급효과가 매우 크며, 국내에서 10년마다 수립되는 수도정비 기본계획에서는 용수공급의 안전성을 확보하기 위해 가뭄, 수질사고, 관거파괴 등과 같은 비상상황에 대한 비상급수계획을 수립하여 대책을 마련한다. 일반적으로 비상급수계획은 인접한 수원지, 배수지 및 소블럭 등과의 연계를 통해 수립되며, 이때에는 필요한 용수량의 공급 가능여부, 최

소압력수두보장여부 등을 관망의 수리해석을 이용하여 검토하게 된다.

상수관망의 수리해석 방법은 Demand-Driven Analysis (DDA)와 Pressure-Driven Analysis(PDA)로 구분할 수 있다. DDA는 각 절점에서의 용수수요는 항상 만족시킨다는 전제하에 절점의 수두를 계산하는 방법으로 실무에서 많이 사용되는 EPANET, KYPIPE 및 WaterCAD 등에서 적용한 방법이다. PDA는 Bhave(1981)에 의해 최초로 제안된 개념으로 각 절점에서의 용수공급은 절점수두-용수공급량 관계에 따라 변하는 것을 기본가정으로 사용한다. 일반적으로 DDA를 이용하여 정상운영상태인 상수관망을 모의할 경우 그 결과를 충분히 신뢰할 수 있다. 그러나 Gupta(1996) 및 Mays

\*정회원 · 고려대학교 공과대학 연구교수(E-mail:chunoo@korea.ac.kr)

\*\*정회원 · 한밭대학교 토목공학과 전임강사

\*\*\*정회원 · 고려대학교 공과대학 건축 · 사회환경공학과 교수

\*\*\*\*고려대학교 공과대학 건축 · 사회환경공학과 석사과정

\*\*\*\*\*현대건설 과장

(2003)를 비롯한 많은 연구결과에서는 용수수요 급증, 관거의 파손 등과 같이 용수공급시스템이 비정상운영상태인 경우, DDA를 이용한 수리해석 결과는 부압이 계산되는 것과 같은 비현실적인 결과를 줄 수 있다고 지적하였다. 따라서 이와 같은 DDA의 단점을 보완하기 위해 Goulter and Coal (1986), Su et al. (1987), Germanopoulos (1985), Reddy and Elango (1989), Wagner et al. (1988), Chandapillai (1991), Gupta and Bhawe (1996), Tanyimboh and Tabesh (1997), Ackley et al. (2001), Tabesh et al. (2002), Tanyimboh et al. (2003), Tabesh et al. (2004), Ozger (2003) 및 Ang and Jowitt (2006), Baek et al. (2006) 및 백천우 등(2007)에 의해 PDA를 사용한 모형들이 개발되었다. PDA는 비정상 운영상태에 대한 현실적인 모의결과를 제공할 수 있는 장점이 있으나 개발된 대부분의 PDA모형들은 장시간의 모의시간이 필요하다는 단점이 있다. 그러나 Bentley사(2006)는 WaterGEMS (V8.0) 모형에 획기적으로 모의시간을 단축시킨 PDD(Pressure-Dependent-Demand) 모듈을 추가하여 기존의 PDA모형이 갖는 단점을 보완하였다.

현재 국내에서 수행되고 있는 대부분의 수도정비기본계획에서는 DDA모형을 이용하여 비상급수계획의 적정성을 평가하고 있으나, 비상급수계획은 관과파상항과 같은 비정상운영조건에 해당하므로 PDA의 적용을 통한 비상급수계획의 적정성 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 WaterGEMS모형을 이용한 PDA분석을 실시하여 2007년 수도정비 사업을 계획한 J시의 비상급수계획의 적정성을 평가하였다. J시 전체관망을 구성하는 130개 소블럭 중 2개 소블럭의 용수공급 안전성을 평가하였으며, 또한 관내의 10개 대블럭에 용수를 공급하는 배수지의 문제발생상황에 대한 비상급수계획의 적정성을 평가하였다.

## 2. WaterGEMS모형

절점 용수수요가 고정된 DDA와 달리 PDA에서는 필요한 수두가 보장되지 않는 경우 절점의 용수공급은 필요한 용수 수요를 만족시키지 못할 수도 있으며, 절점수두가 필요한 최소한의 기준치 이하인 경우 용수공급이 전혀 이루어 지지 않을 수도 있게 된다. 즉, PDA는 절점에서의 압력을 고려하여 실제 절점에서 공급 가능한 용수량을 절점수두-용수공급량 관계(nodal Head-nodal Outflow Relationship, HOR)에 의해 계산하는 방법이다. 그림 1은 기존에 개발된 PDA모형들에서 사용된 대표적인 HOR을 나타내고 있다.

그림 1의 (c)와 같이 표현되는 Wagner et al. (1988)과 Chandapillai (1991)가 제안한 HOR은 기존의 많은 PDA모형들에서 사용되었으며, 다음 식 (1)-(3)과 같이 Power Function의 형태로 나타낼 수 있다.

$$q_j^{avi} = q_j^{req}, \text{ if } H_j^{avi} \geq H_j^{des} \quad (1)$$

$$0 < q_j^{avi} = q_j^{req} \left( \frac{H_j^{avi} - H_j^{miin}}{H_j^{des} - H_j^{miin}} \right)^{1/n} < q_j^{req}, \text{ if } H_j^{miin} < H_j^{avi} < H_j^{des} \quad (2)$$

$$q_j^{avi} = 0, \text{ if } H_j^{avi} \leq H_j^{min} \quad (3)$$

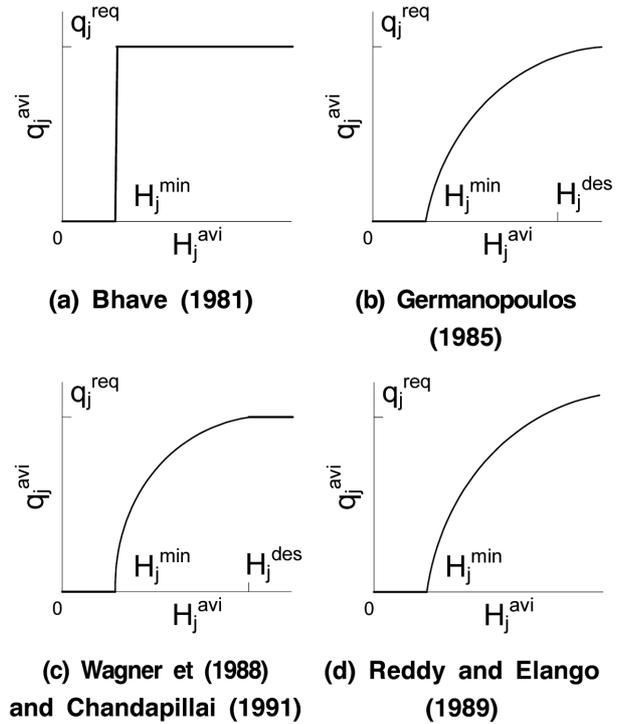


그림 1. Head-Outflow Relationship

여기서,

$q_j^{avi}$  : 절점  $j$ 에서 공급 가능한 용수량(available demand)

$q_j^{req}$  : 절점  $j$ 에서 필요한 용수량(required demand)

$H_j^{avi}$  : 절점  $j$ 의 수두

$H_j^{min}$  : 절점  $j$ 에서 용수를 조금이라도 공급하기 위한 최소 수두(minimum head)

$H_j^{des}$  : 절점  $j$ 의  $q_j^{req}$ 을 충족시킬 수 있는 절점의 수두 (threshold head)

비정상상태의 상수관망 해석 시에 DDA를 기본으로 하는 모형들이 갖고 있는 단점들은 PDA를 통해 해결할 수 있지만(Mays, 2003), PDA에서는 절점수두-용수공급량 관계에 의해 절점에서의 공급량이 계속 변하므로 선형화기법(KYPIPE), Gradient Method(EPANET) 등과 같이 기존의 모형에서 사용된 해석방법으로는 해의 탐색이 어려우며, 반복계산방법과 NLP(Non-Linear Programming)을 이용하는 기존의 PDA 모형들은 대규모상수관망의 해석에 많은 시간을 필요로 하며 해를 찾지 못하는 경우도 발생하였다.

이와 같은 PDA모형의 단점을 보완하기 위해 Bentley사 (2006)는 EPANET에서 수리모의를 위해 사용된 Gradient Method를 수정한 Modified Gradient Method를 이용하여 모의시간을 획기적으로 단축시킨 PDD모듈을 WaterGEMS(V8, XM Edition)모형의 추가모듈로 개발하였다. WaterGEMS모형은 상수관망의 수리, 수질 모의를 통한 설계, 문서화 및 관리 작업의 효율을 높이기 위해 개발된 통합 모형이다. 대표적인 수리 모델링, 분석모형인 Haestad Method와 통합되어 있으며, 기존의 EPANET의 입력화일을 변형 없이 사용할 수

있고, WaterCAD를 비롯하여 GIS관련모형과 연계가 용이하다는 장점이 있다.

WaterGEM모형의 PDD모듈은 PDA의 개념에 사용되어 개발된 최초의 상용 프로그램이다. WaterGEMS모형에서는 그림 1의 (c)와 식 (1)-(3)과 같이 표현되는 Power Function형태의 HOR을 기본 옵션으로 사용하고 있다.

### 3. 적용 및 결과

#### 3.1 대상관망

2007년 J시는 관내 상수도관망의 정비사업을 계획하였다. 전체 관망을 10개 대블럭과 130개 소블럭으로 구분하는 구역고립을 수행하고, 이 중 50개 소블럭 내의 노후관로를 교체 및 갱생하고, 상수도관련 시설물을 정비하는 것을 사업의 주요 내용으로 수립하였다. 그림 2는 J시 관내의 상수도관망도를 나타내고 있다. J시는 북부에서 광역상수망과 연결된 2개 경로를 통해 용수를 공급하며, 유입된 용수는 관내의 10개의 배수지로 송수된다. 직경 80 mm이상의 관거는 9,100개(총 연장 1,076 km), 상수관 모의를 위한 절점은 총 6,500개로 구성되어 있다.

#### 3.2 소블럭의 용수공급 안정성 평가

구역고립에 의한 소블럭의 경우 유입구에 직결된 관거가 파괴될 경우 필요한 용수량이 다른 관거로 우회하여 공급되게 되며, 이 경우 초기에 과도한 수두손실이 발생하여 소블럭 전체의 용수공급 능력에 영향을 미친다. 이와 같은 비정상운영상태가 발생할 경우 인접한 주변의 소블럭과 연계운동을 통해 문제를 해결할 수 있으나, 문제를 인지하고 조치를 취할 때까지 용수공급의 신뢰성은 저하될 것이다. 그러나 소블럭 유입구 주위에 위치한 우회관거의 적절한 조정을 통해 수두손실을 방지하면, 신뢰성 확보가 가능해 진다.

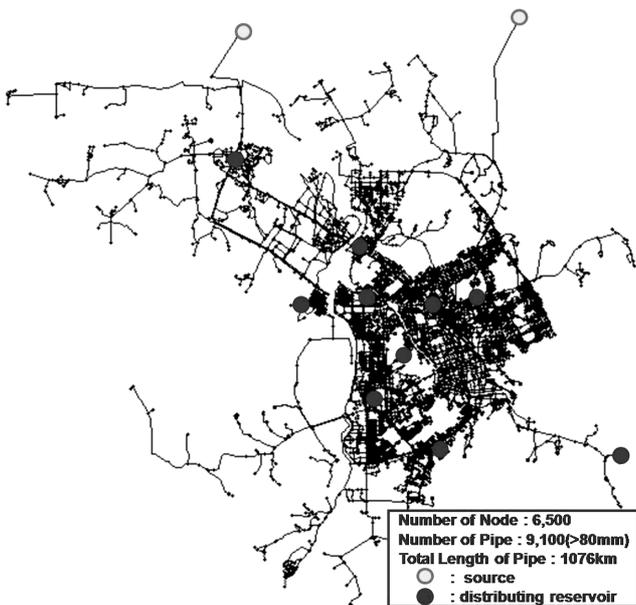


그림 2. J시 상수도관망도

그림 3은 대상 관망인 J시의 130개 소블럭 중 하나인 IH12 소블럭과 DS13 소블럭을 나타내고 있다. IH12소블럭은 총 113개의 수요절점을 포함하고 있고 총 수요량은  $10,994.7 m^3/d$ 이며, DS13소블럭은 총 75개의 수요절점을 포함하고 있고 총 수요량은  $5,958.3 m^3/d$ 이다. J에서 수립한 수도정비기본계획에서는 지역의 지반고와 광역상수망을 고려하여 소블럭 유입구를 IH12 소블럭은 우하단부로, DS13 소블럭은 우상단으로 결정하였다.

IH12 소블럭의 유입관(350 mm)에 직결된 좌우 200 mm관(A, B)의 경우 총 수요량이 양분되어 소블럭에 용수를 공급하며 이 중 하나가 파괴되는 경우 다른 쪽으로 모든 수요량이 우회하여 손실수두량이 증가하게 된다. 또한, DS13 소블럭의 유입관(450 mm)에 직결된 세 개의 관중 250 mm관은 평상시 전체 공급량의 79%(4687.2  $m^3/d$ )가 통수하여 소블럭에 용수를 공급하며 파괴되는 경우 다른 쪽으로 모든 수요량이 우회하여 손실수두량이 증가하게 된다.

이와 같은 관거파괴 상황을 WaterGEMS모형을 이용하여 모의하였다. PDA분석을 위한 소블럭내 용수수요절점의 압력조건으로 상수도시설기준에서 정하고 있는 최소압력수두 15 m를 PDD모듈의 Threshold Pressure( $P_j^{des}$ )로 적용하였다. 즉 용수수요절점의 압력수두가 15m보다 큰 경우 필요용수량은 전량 공급이 가능하며, 용수수요절점의 압력수두가 0~15m사이인 경우 필요용수량은 Power Function에 의해 일부만 공급 가능하며, 용수수요절점의 압력수두가 0m보다 작은 경우 필요용수량은 공급이 불가능하다. 표 1에는 IH12 소블럭의 A, B관의 파괴상황에 대한, 표 2에는 DS13 소블럭의 유입구에 연결된 250 mm관의 파괴상황에 대한 EPANET과 WaterGEMS모형의 모의 결과를 나타내었다.

IH12 소블럭의 A, B관 파괴시 EPANET은 총 113개 수요절점 중 각각 94개, 89개절점에서 압력이 부족한 것으로 산정되었으나 WaterGEMS모형의 PDD모듈은 각각 50개소, 37개 절점에서 압력이 부족한 것으로 산정되었다. 이 결과는 비정상운영상태를 DDA로 모의할 경우 신뢰성이 과소산정 될 수 있는 문제점을 지적한 Gupta and Bhawe (1996) 및 Mays (2003) 등의 연구결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 비정상운영상태인 상수도관망의 수리모의에 EPANET과 같은 DDA를 사용할 경우 실제 절점에서의 압력이 부족하여 필요한 용수량 공급이 불가능함에도 불구하고 모든 절점에서의 용수공급이 가능하다는 DDA의 기본가정 때문에 더 많은 손실수두가 발생하여 용수공급불가능 절점이 과도하게 산정된다. 즉 이와 같은 비현실적인 결과를 상수도관망의 신뢰성분석에 사용할 경우 상수도관망의 신뢰성이 낮게 산정될 수 있게 되며, Gupta and Bhawe (1996), Mays(2003), Baek et al(2007) 등은 이와 같은 문제점을 지적하였다.

한편 주요 우회관의 관경을 기본계획상의 80 mm에서 200 mm로 변경할 경우 WaterGEMS모형의 PDD모듈 적용결과, 압력부족 절점은 10개소와 0개소로 산정되었다. DS13 소블럭의 250 mm관 파괴시 EPANET은 총 75개 수요절점 중 59개소에서 압력이 부족한 것으로 산정되며 PDD모듈의 결과도 59개소의 압력부족 절점이 산정되었다. 다만, EPANET

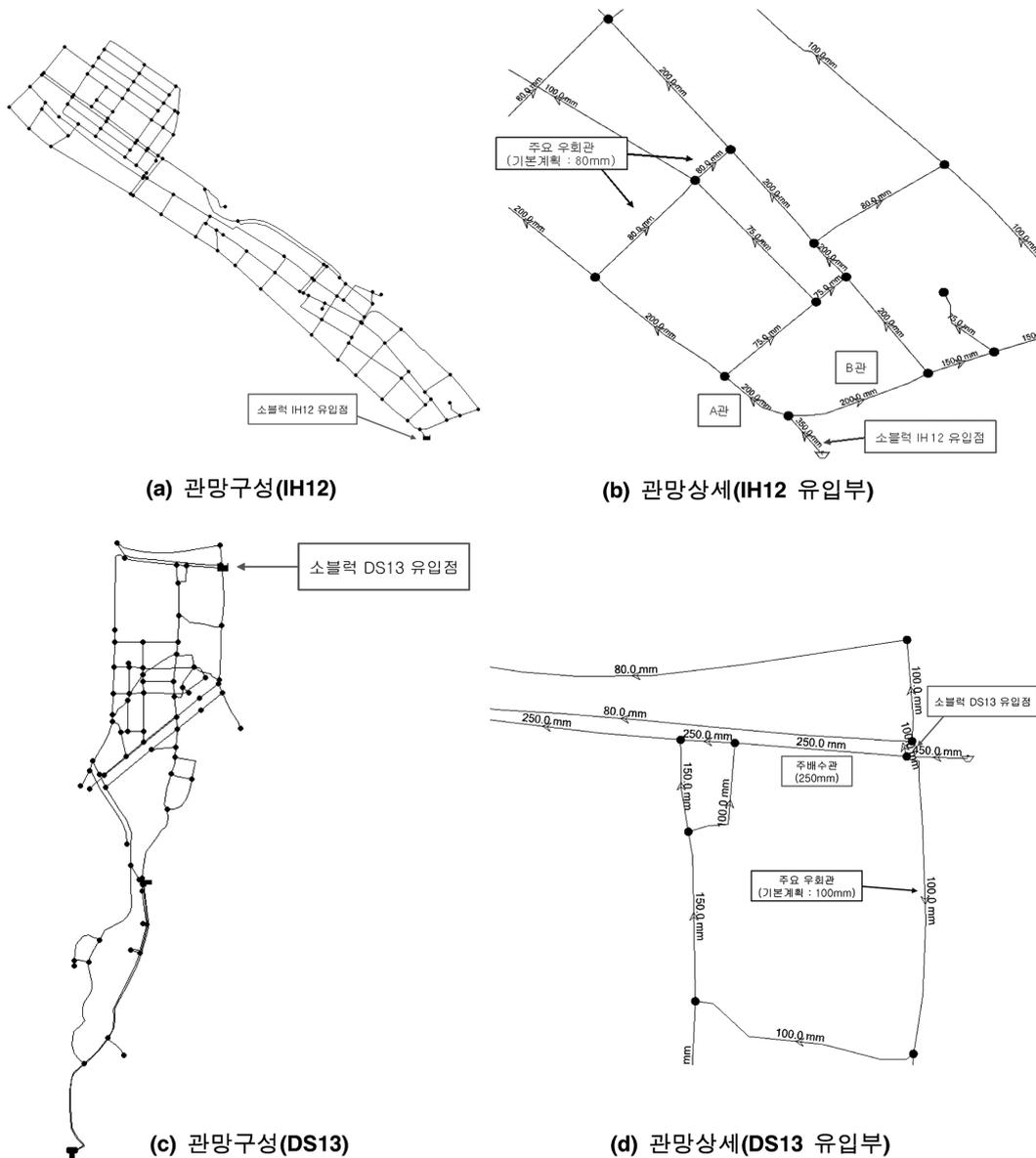


그림 3. 소블럭 관망

표 1. 소블럭(IH12) 모의 결과

구분	압력수두 15 m 이하 절점수		
	EPANET	WaterGEMS (PDD모듈)	
		우회관 관경 80 mm (기본계획상 관경)	우회관 관경 200 mm 로 변경
A관 파괴시	94개소	50개소	10개소
B관 파괴시	89개소	37개소	0개소

표 2. 소블럭(DS13) 모의 결과

구분	압력수두 15 m 이하 절점수		
	EPANET	WaterGEMS(PDD 모듈)	
		우회관 관경 100 mm (기본계획상 관경)	우회관 관경 200 mm로 변경
250 mm 관 파괴시	59개소	59개소	2개소

의 경우 압력부족 59개절점 대부분 부압이 발생되나 PDD모듈의 결과에서는 부압이 발생하지 않았다. 주요 우회관의 관

경을 기본계획상의 100 mm에서 200 mm로 변경할 경우 압력부족 절점은 2개소로 산정되었다. IH12 소블럭과 DS13 소블럭의 주요 우회관의 연장은 각각 139m와 174m로, 이들 관거의 관경을 증가시키는 비용은 전체 사업비에서 극히 일부에 해당한다. 즉 작은 예산의 반영으로 소블럭의 신뢰성 향상이 가능한 것으로 판단된다.

### 3.3 대블럭의 비상급수계획 적정성 평가

J시에서 수립한 수도정비기본계획에서는 전체관망의 신뢰성 향상을 위해 관내의 10개 대블럭에 용수를 공급하는 배수지의 문제발생상황에 대하여 주변 배수지와와의 연계를 통한 비상급수계획을 수립하였다. 본 연구에서는 J시의 상수관망을 구성하는 10개 대블럭 중, 7개 대블럭에 대한 비상급수계획의 적정성을 WaterGEMS모형을 이용하여 분석하였다. 각각의 대블럭은 주변에 위치한 1~3개의 대블럭과의 비상급수계획이 수립되어 있으며, 그림 4는 10개 대블럭의 하나인 CM블럭의 비상급수계획을 나타내고 있다.

PDA분석을 위해 130개의 소블럭을 하나의 용수수요 절점으로 간략화하여 모의하였으며, 상수도시설기준(한국상수도협회, 2004)에서 규정한 최소동수압(15 m)이 소블럭내 모든 절점에서 보장되는 유입부 압력수두를 간략화된 소블럭의 압력조건(threshold pressure)으로 적용하였다. J시의 전체용수수요량은 343,214 m<sup>3</sup>/day이며, 표 3은 WaterGEMS모형을 이용한 PDA분석결과를 나타내고 있다.

PDA분석결과 수립한 비상급수계획에 대해 최대 14%(CM 배수구역에 DS연결시)의 용수부족량이 산정되나 대부분 10% 미만의 용수공급부족이 모의되었다. 또한 DS배수구역의 경우 인접한 CM, JH 배수구역과의 비상급수를 수행하더라도 10% 가량 용수공급이 불가능한 것으로 산정되었다. DS배수구역의 경우 광역망으로부터의 거리가 가장 멀어 인접 배수구역과 연계시에도 다른 배수구역의 경우와 비교할 때 상대적으로 높은 손실수두가 발생하여 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 특히 DS배수구역을 제외한 다른 배수구역의 경우 수립된 비상급수계획으로 인해 대부분 2%미만의 용수공급부족이 모의되었다. 즉, 대블럭을 책임지는 배수지에 문제가 발



그림 4. CM배수구역 비상급수계획

표 3. 비상급수계획 분석결과

배수 구역명	연계 배수구역	가능공급량 (m <sup>3</sup> /day)	부족량 (m <sup>3</sup> /day)	부족량 (%)
CM	IH	342,721	493	0.14
	DS	294,529	48,685	14.19
	KA	308,921	34,293	9.99
IH	CM	310,507	32,707	9.53
	KY	343,214	0	0.00
DS	CM	307,975	35,239	10.27
	JH	299,601	43,613	12.71
KA	CM	343,116	98	0.03
JH	DS	336,812	6,402	1.87
	SS	339,909	3,305	0.96
	KY	343,214	0	0.00
SS	JH	342,024	1,190	0.35
SC	KY	343,214	0	0.00

생하는 경우는 비상상황으로 필요한 용수공급량 전체를 만족시키지는 못하더라도 각 대블럭의 필요용수량의 대부분을 만족시키므로 작성된 비상급수계획은 적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

상수도관망이 용수수요 급증, 관거파손 등과 같이 비정상적인 상태의 경우, 실질적인 수리모의를 위한 PDA적용의 필요성이 기존의 많은 연구들을 통해 확인되었다. 특히 현재 국내에서 수행되고 있는 대부분의 수도정비기본계획에서는 DDA모형을 이용하여 비상급수계획의 적정성을 평가하고 있으나, 비상급수계획은 비정상운영조건에 해당되며, PDA의 적용을 통한 비상급수계획의 적정성 평가가 필수적이다. 본 연구에는 2007년 수도정비 사업을 계획한 J시의 비상급수계획의 적정성을 WaterGEMS모형을 이용하여 평가하였다.

- (1) J시의 2개 소블럭의 용수공급 안정성을 평가한 결과, 주요 우회관의 관경 변경을 통하여 소블럭의 용수공급 안정성 향상이 가능한 것으로 판단되었다.
- (2) J시의 상수도관망을 구성하는 10개 대블럭 중, 7개 대블럭에 대한 비상급수계획의 적정성을 분석하였으며, 수립된 비상급수계획은 적합한 것으로 판단되었다.

#### 참고문헌

백천우, 전환돈, 김중훈 (2008) 비정상 상태의 상수도관망 해석을 위한 HSPDA 모형의 개발. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권, 제5B호, pp. 475-488.

Ackley, J. R. L., Tanyimboh, T. T., Tahar, B. and Templeman, A. B. (2001) *Head-driven analysis of water distribution system*. In : Ulanicki, B., Coulbeck, B. and Rance, J., editors, *Water software systems : theory and applications*, Vol. 1, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England, pp. 183-192.

Ang, W. K. and Jowitt, P. W. (2006) Solution for Water Distribution Systems under Pressure-Deficient Conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 132, No. 3, pp. 175-182.

Baek, C. W, Jun, H. D., Kim, J. H. and Kim, E. S. (2007) Development of a Pressure-Driven-Analysis Model for Water Networks. *Proc. of the Efficient2007*, IWA, Jju, Korea.

Bentley Systems, Inc (2006) *WaterGEMS v8 User Manual*. 27 Siemon Co Dr, Suite200W, Watertown, CT06795, USA.

Bhave, P. R. (1981) Node Flow Analysis of Water Distribution Systems. *Transportation Engineering Journal of ASCE (Proc. Of The ASCE)*, Vol. 107, No. TE4, pp. 457-467.

Chandapillai, J. (1991) Realistic simulation of water distribution system. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 117, No. 2, pp. 258-263.

Goulter, I. C., Coals, A. V. (1986) Quantitative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 112, No. 3, pp. 287-301.

Gupta, R., Bhave, P. R. (1996) Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 122, No. 3, pp. 214-217.

Mays, L. W. (2003) *Water Supply Systems Security*. McGRAW-HILL.

- Ozger, S. S. (2003) *A Semi-Pressure-Driven Approach to Reliability Assessment of Water Distribution network*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Reddy, L. S. and Elango, K. (1989) Analysis of water distribution networks with head dependent outlets. *Civil Engineering System*, Vol. 6, No. 3, pp. 102-110.
- Tabesh, M., Tanyimboh, T. T. and Burrows, R. (2002) Head driven simulation of water supply networks. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-22.
- Tabesh, M., Tanyimboh, T. T. and Burrows, R. (2004) Pressure dependent stochastic reliability analysis of water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, Vol. 4, No. 3, pp. 81-90.
- Tanyimboh, T. T. and Tabesh, M. (1997) The Basis of the Source Head Method of Calculating Distribution Network Reliability. *Proc. of the 3rd international conference on Water Pipeline System*, Hague, Netherlands.
- Tanyimboh, T. T., Tahar, B. and Tabesh, M. (2003) Pressure-driven modeling of water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, Vol. 3, No. 1-2, pp. 255-261.
- Wagner, J. M., Shamir, U., Marks, D. H. (1988) Water Distribution Reliability: Analytical Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 114, No. 3, pp. 253-275.

© 논문접수일 : 08년 10월 17일  
 © 심사의뢰일 : 08년 10월 23일  
 © 심사완료일 : 08년 10월 27일