

HSPDA모형의 대규모 상수관망에의 적용

Application of HSPDA Model to Large Water Network

백천우*, 전환돈**, 김종훈***

Chun Woo Baek, Hwan Don Jun, Joong Hoon Kim

요 지

상수관망의 수리해석기법은 demand-driven analysis(DDA)와 pressure-driven analysis(PDA)로 구분할 수 있다. 관거 파괴나 용수수요 급증과 같이 용수공급시스템이 비정상상태인 경우 절점의 용수수요는 항상 만족한다는 가정을 사용하는 DDA의 경우 비현실적인 결과를 줄 수 있으며, 절점수요와 절점수두를 동시에 고려하는 PDA의 개념을 이용한 관망의 수리해석이 필요하다. PDA의 개념을 사용하여 개발된 기존의 많은 모형들은 복잡한 실제관망에는 적용이 불가능한 문제점들을 가지고 있으며, 본 연구에서는 화음탐색법(Harmony Search, HS) EPANET의 toolkit을 연계하여 개발된 HSPDA모형의 실제 대규모 상수관망에의 적용성을 검토하였다. 실제 대규모관망에의 적용성 향상을 위해 화음탐색법의 새로운 인자인 PIR를 제안하였으며 적용결과 새롭게 제안된 PIR은 HSPDA모형의 최적해탐색효율을 획기적으로 향상시켰으며, HSPDA모형을 이용한 실제 대규모관망의 비정상상태 수리모의가 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 용수공급시설, Water Security, SCADA system

1. 서 론

상수관망의 수리해석은 절점에서의 용수수요는 항상 만족한다는 전제하에 절점수두를 계산하는 demand-driven analysis(DDA)와 절점에서의 수두에 따라 용수공급량이 변하는 것을 고려하여 절점에서의 가능 용수공급량과 수두를 동시에 계산하는 pressure-driven analysis(PDA)로 구분된다. EPANET, KYPipe 등의 모형들은 DDA 개념의 모형으로 상수관망의 설계와 펌프운용 등의 많은 분야에 활용되어 왔다. 그러나 Gupta and Bhave (1996), Tanyimboh and Tabesh (1997) 및 Mays (2003) 등은 용수공급시스템이 정상상태인 경우에는 DDA의 적용에 문제가 없지만 화재가 발생하여 어떠한 절점에서의 용수수요가 급증하거나, 관거의 파손 등에 의해 충분한 절점수두가 보장되지 않는 경우와 같이 용수공급시스템이 비정상상태인 경우, DDA를 이용한 관망해석 결과는 부압이 계산되는 것과 같은 비현실적인 결과를 줄 수 있다고 경고하였다. 절점수요와 절점수두를 동시에 고려하는 PDA의 개념은 Bhave (1981)에 의해 최초로 제안되었으며, PDA 개념이 사용된 모형들이 Wagner et al. (1988), Tanyimboh et al. (2000), Tabesh et al. (2004), 및 Ozger (2003) 등을 포함한 많은 연구자들에 의해 개발되었다. 그러나 기존에 개발된 대부분의 PDA 모형들은 반복계산 방법과 NLP(Non-Linear Programming)을 이용하였으며, 실제 해석해야하는 상수관망이 커질 경우 반복계산방법과 NLP는 관망해석을 위한 많은 시간이 소요되며, 해를 찾지 못하는 경우도 발생한다. 또한 수리계산을 간략화 하여 실제 PDA의 개념이 정확하게 사용되지 않거나, 복잡한 실제관망에는 적용이 불가능한 문제점들을 갖고 있다. 백천우 등 (2006a, 2006b)은 기존의 PDA 모형이 갖고 있는 단점을 보완하기 위해, 화음탐색법(Harmony Search, HS)과 EPANET의 toolkit을 연계한 HSPDA모형을 개발하였으며, 소규모 가상관망에 모형을 적용하여 적용성을 검토하였다. 본 연구에서는 HSPDA모형의 실제 대규모관망에의 적용성 향상을 위해, 화음탐색법의 새로운 인자인 PIR를 제안하였으며 실제 대규모관망에 적용하여 HSPDA모형의 적용성을 검토하였다.

* 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정·E-mail : chunoo@korea.ac.kr

** 정회원·고려대학교 BK21 건설산업 글로벌리더 양성사업단 연구전임강사·E-mail : hwandonjun@gmail.com

*** 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 교수·E-mail : jaykim@korea.ac.kr

2. HSPDA모형

백천우 등 (2006a, 2006b)이 비정상상태의 상수관망 수리해석을 위해 개발한 HSPDA 모형의 기본 개념은 다음과 같다. 용수공급시스템을 구성하는 각 절점의 절점수두(H_j^{ass})를 가정하여 가정된 수두에 따른 가능공급량(q_j^{ass})을 계산하고, 계산된 가능공급량(q_j^{ass})을 절점 용수량으로 입력하여 DDA(EPANET)를 수행한다. DDA에 의해 계산된 절점수두(H_j^{avl})와 가정된 절점수두(H_j^{ass})가 같아질 때 까지 반복계산을 실시한다. 반복계산에 의해 최종적으로 계산된 H_j^{avl} 와 q_j^{avl} 가 실제 절점의 수두와 용수공급량이 된다. 반복계산은 HS에 의해 최소화되며, 수리해석을 위하여 EPANET를 이용하였다. Fig. 1은 이와같은 HSPDA 모형의 흐름도를 나타내고 있다. PDA모형 개발에 필수적인 HOR(Nodal head-nodal outflow relationship)규정 식은 Wagner et al. (1988)가 제안한 식 (1)~(3)을 사용하였다. 식 (1)~(3)에서 q_j^{avl} 는 절점 수두에 따라 변하는 공급 가능한 용수량, q_j^{req} 는 각 절점의 필요한 용수량, H_j^{avl} 는 절점의 실제 수두, H_j^{min} 는 절점에서 용수를 조급이라도 공급하기 위한 최소 수두, H_j^{des} 는 절점의 q_j^{req} 을 충족시킬 수 있는 절점의 수두를 의미한다. 식 (2)의 n 은 절점의 특성에 따라 결정되는 상수로 2.0을 적용하였다.

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

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

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

3. 화음탐색법의 새로운 인자 PIR

유전자알고리즘이 최적해 탐색효율 향상을 위해 최초 SGA (Simple Genetic Algorithm)에서 modGA, Breeder GAs, abstract GA, CM-GA SMGA and GAVaPS 등과 같은 다양한 형태로 진화해 왔듯이 최적해 탐색효율의 향상은 최적화기법과 관련된 가장 중요한 연구 분야이다. 화음탐색법은 국내에서 제안된 최적화 기법으로 대부분의 발견적탐색법이 자연현상의 관찰을 통해 만들어 진 것과 달리 화음(harmony)이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 만들어진 알고리즘(Geem et al., 2001)으로 최초 제안된 이후 최적해 탐색효율을 향상시킨 MHS와 ReHS로 발전하였다. MHS와 ReHS는 범용적 형태의 HS로 다양한 분야의 최적화 문제에 적용할 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안된 PDA모형을 실제 대규모 상수관망에 적용할 경우 결정변수의 수가 수백 개에서 수천 개에 이르게 되고 각 결정변수의 가능해 영역이 광범위하게 분포하므로 범용적 형태의 HS만으로는 최적해 탐색이 비효율적일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ReHS의 최적해 탐색효율을 향상시키기 위한 새로운 인자인 PIR (PIRacy)을 제안하였다. Piracy(표질)의 사전적 의미는 음악, 책, 컴퓨터 프로그램의 내용을 저자의 허락 없이 도용하는 것으로 HS의 새로운 인자인 PIR은 이전 단계의 반복 계산 결과를 활용하여 최적해 탐색효율을 향상시키기 위한 인자이다.

Fig. 2는 하나의 결정변수가 HM안에서 최적해 접근해가는 과정을 나타내고 있다. 만약 결정변수의 최적값(수두)이 75m, 결정변수의 실제 발생 가능한 범위를 70~80m, 결정변수의 이론적 가능 범위를 60~100m라고 가정하고, 20개의 harmony memory size를 갖는 HM를 고려할 경우, 결정변수의 최적값을 탐색하기 위해 최초 HM에서는 전체 가능해 범위(60~100m)에서 무작위로 결정변수의 값을 가정한다. 그 결과 발생된 20개의 화음중 가능해 범위인 70~80m 사이에 값은 가지는 화음은 4개(72.07, 75.71, 70.57, 78.75)가 발생되었다고 가정할 수 있다. 2번째 반복과정에서는 HMCR에 의해 전체 가능해 범위 (60~100m)에서 새롭게 가정하거나 1~20위 사이의 값을 선택하여 19~20위의 HM 값을 대체하게 된다. PIR의 개념을 적용하지 않는 경우 실제 발생 가능한 범위인 70~80m사이의 값이 93.71과

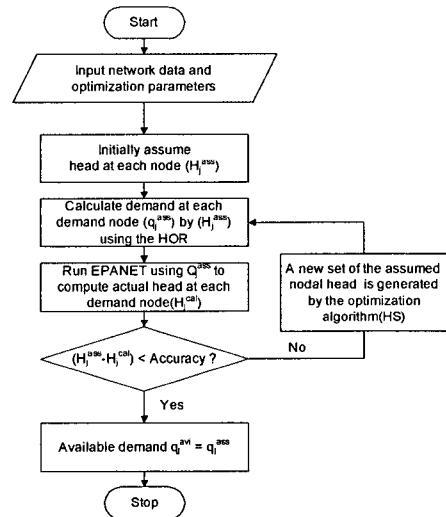


Fig. 1. Flowchart of PDA model

61.78값을 대치할 확률은 HMCR값을 0.9로 적용할 때, 대략 25%의 확률($0.9*5/20+0.1*10/40=0.25$)을 갖게 된다. 그러나 1위와 2위에 랭크된 각 결정변수의 값을 절점용수량으로 적용하여 계산된 H_j^{val} 값이 78.03과 71.66이라고 가정하고 PIR개념을 도입하여 HM 20개의 10%인 2개 화음(17와 18위)을 계산된 수두 값인 78.03과 71.66으로 대치할 수 있다. 이 경우 70~80m사이의 값이 93.71과 61.78값을 대치할 확률은 34%($0.9*7/20+0.1*10/40=0.25$)가 된다. 만약 실제발생 가능한 수두의 범위가 더 작게 되면 PIR적용 여부에 따른 확률 값에는 더 차이가 발생할 것이며 이와 같은 확률과정은 iteration이 반복될수록 최적해 탐색에 더 큰 영향을 미칠 것이다. 이와 같이 PIR은 최적해 주위의 해를 HM안에 위치하게 하여 최적해의 접근속도를 향상시키기 위한 인자이다.

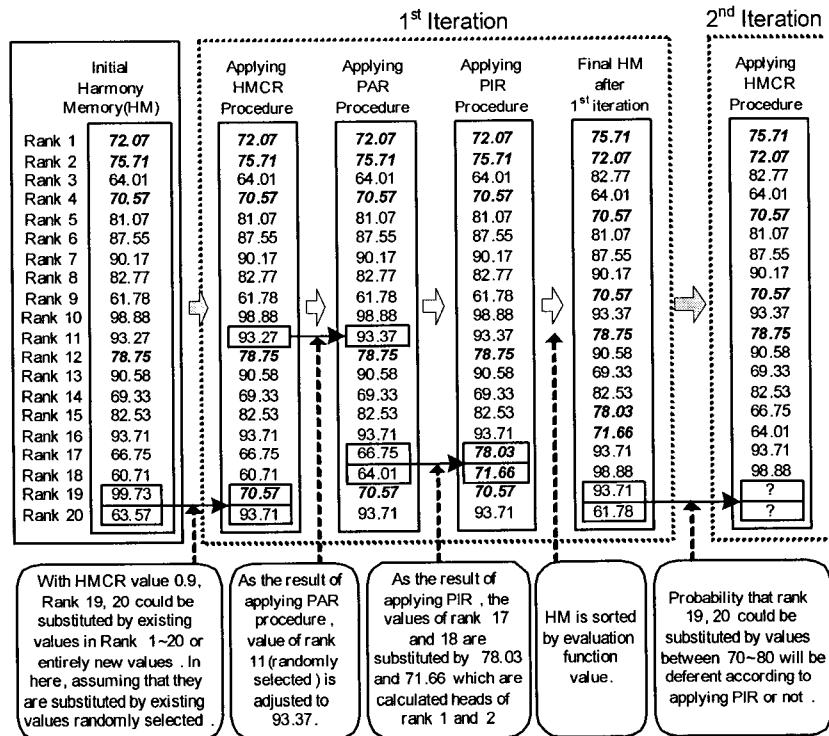


Fig. 2 How PIR works in HM

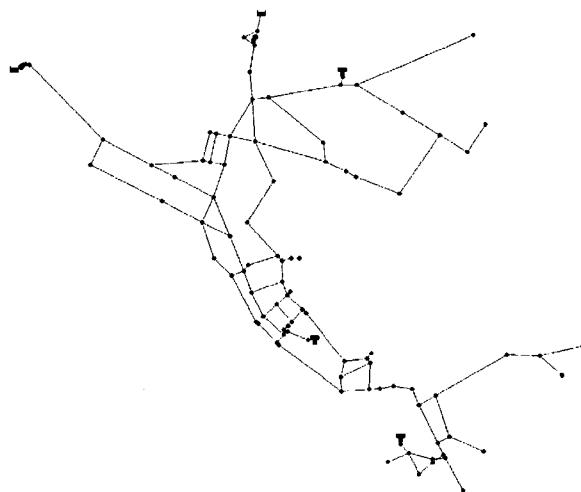


Fig. 3. Net3-Sample network of EPANET

4. 모형의 적용

PIR 적용에 따른 HSPDA모형의 적용성 검토를 위해 Ozger(2003)가 SPDA모형의 적용성 검토를 위해 사용한 EPANET의 샘플네트워크 NET3에 개발된 모형을 적용하였다. NET3는 92개의 절점, 117개의 파이프, 2개의 저수지, 3개의 탱크 및 2개의 펌프로 구성되어 있으며 관망의 구성은 Fig. 3과 같다. NET3의 EPS(Extended Period Simulation)중 모든 탱크와 저수지에서 용수가 공급되는 시간 때인 11:00시의 절점 용수량을 이용하여 모형을 적용하였으며, 이 때 시스템의 총 용수공급량은 12,219GPM이다.

HMS(Harmony Memory Size)는 50개, HMCR=0.8, PAR=0.2를 적용하였으며, 모든 절점에서의 가정수두와 계산수두의 차(dH)가 0.05ft이내가 될 때 모의를 종료하도록 종결조건을 설정하였다. 각 절점의 지반고를 H_j^{\min} 값으로 적용하였고 H_j^{des} 값은 H_j^{\min} 과 Ozger(2003)가 적용한 103.8ft(45psi)와의 합으로 적용하였다. 즉, 압력수두가 103.8ft(45psi) 이상인 경우 필요공급량을 모두 만족시키며 압력수두가 103.8ft(45psi)이하인 경우 식 (1)~(3)에 의해 계산된 available demand만 공급이 가능하게 된다.

정상상태의 EPANET 적용 시에 관내 유량이 4,000GPM이상인 16개의 관이 파괴된 상태에 대한 모의를 실시하였으며 Table 1은 그 결과를 나타내고 있다. 정상상태의 EPANET 수행결과 92개 절점의 평균 압력수두는 60.7psi(140.01ft)로 대상관망은 대부분의 절점압력이 충분한 편이다. 34번 절점의 경우에만 정상상태에서도 압력수두가 40.99psi(94.55ft)로 본 연구에서 H_j^{des} 값 산정시사용한 45psi보다 작으며 다른 절점의 경우 정상상태의 압력이 대부분 45psi이상의 값을 나타내고 있다. Table 1에 나타난 것과 같이 HSPDA모형 적용결과 관내 유량이 4,000GPM이상인 16개의 관거 중 49번과 70번관을 제외하고는 파괴로 인해 관을 닫더라도 전체 92개 절점 중 압력수두가 45psi가 되지 않아 required demand를 만족시키지 못하는 절점의 수는 1~5개 사이로 나타났다. 이 때 전체 시스템에서 공급이 부족한 양도 1.93 ~ 520.56GPM으로 필요한 전체 공급량 12,219GPM의 4% 이내로 계산되고 있다. 그러나 49번과 70번관의 경우 파괴 시에 22개 절점에서 압력이 부족하여 약 1,080GPM의 용수공급이 불가능한 것으로 계산되며 이는 필요한 전체 공급량 용수공급시스템을 사용하는 8%가 용수공급이 불가능한 것을 의미한다. 즉 49번과 70번관의 경우 4, 115, 116, 117번관에 비해 평시 유량은 절반이지만 이들 관이 파괴되는 경우 필요한 용수량이 우회해 공급되므로 이에 따른 수두손실이 증가하여 전체시스템의 용수공급에 영향을 더 크게 미치므로 보다 중요한 관거로 판단할 수 있다.

Table 1. Comparison of Simulation Results

Failed Pipe	Flow on Normal condition	Consider PIR				Not consider PIR			
		Iteration	time (min/sec)	No. of Deficient Node	Deficient Demand (GPM)	Iteration	time (min/sec)	No. of Deficient Node	Deficient Demand (GPM)
4	7759.98	1	/0	2	5.95	5,000	7/08		
115	7759.98	1	/0	2	5.95	5,000	9/09		
116	7759.98	1	/0	1	2.38	1	/1	1	2.38
117	7759.98	1	/1	2	5.95	5,000	9/12		
45	6366.38	1	/0	3	2.51	5,000	8/09		
39	6282.01	1	/1	4	5.61	5,000	7/21		
42	6263.83	1	/1	4	3.53	5,000	8/01		
112	6249.53	1	/1	4	3.48	5,000	9/04		
21	6221.22	1	/1	5	33.45	5,000	7/09		
40	6220.38	1	/0	4	5.35	5,000	7/22		
48	6198.30	1	/0	2	1.93	5,000	7/13		
41	6171.21	1	/1	4	5.15	5,000	7/11		
22	5941.98	1	/1	1	4.65	5,000	8/01		
49	4973.19	1,149	3/22	22	1080.54	5,000	7/15		
70	4973.19	686	1/45	22	1081.78	5,000	7/10		
71	4721.30	24	/3	5	520.56	5,000	8/19		

PIR개념의 적용에 따른 HSPDA모형의 효율 향상은 Table 1에 잘 나타나 있다. 모형을 적용한 16개 관기의 파괴 상황에서 PIR을 적용하지 않은 15개 경우에서 반복계산 5,000회까지 수렴된 해를 제공하지 못하였으나, PIR을 적용한 결과 대부분 첫 번째 반복계산에서 해를 찾았으며, 49번관 파괴 시 3분 22초, 70관 파괴 시 1분 45초, 71번관 파괴 시 3초에 수렴된 해를 제공하였다. 116번관의 경우 PIR 적용하지 않더라도 1번의 반복과정에서 해를 찾았으나, 이는 116번관의 경우 open, close와 상관없이 전체시스템의 수두가 같은 계산되기 때문이다. 개발된 모형은 해의 빠른 수렴을 위해 최초 HM생성 시에 정상상태의 계산된 수두를 하나의 화음으로 구성하는데 그 결과 open, close와 상관 없이 전체시스템의 수두가 동일하게 계산되는 116번관 파괴상황은 바로 해에 수렴하게 된 것이다. PIR적용에 따른 HSPDA모형의 적합도 합수값 변화를 비교해 보면, PIR 적용 시에는 반복계산 50이내에 최적해에 근사한 값으로 수렴하여 최종적인 최적해를 탐색하나, PIR 미적용 시에는 반복계산 1000회까지도 최적해와 많은 차를 보였다. 즉 새롭게 제안된 개념인 PIR은 개발된 HSPDA모형의 최적해 탐색효율을 획기적으로 향상시키는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비정상상태의 상수관망 해석을 위한 HSPDA모형의 실제 대규모 상수관망에의 적용성을 검토하였다. 기존에 개발된 PDA 모형들의 단점을 보완하기 위해 화음탐색법의 새로운 인자인 PIR을 실제 대규모관망에의 적용성 향상을 위해 제안하였다. 적용결과 새롭게 제안된 PIR은 HSPDA모형의 최적해탐색효율을 획기적으로 향상시켰으며, HSPDA모형을 이용한 실제 대규모관망의 비정상상태 수리모의가 가능한 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호:R01-2004-000-10362-0)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 백천우, 전환돈, 김중훈, 김웅석 (2006a). 비정상 상태의 상수관망 해석을 위한 PDA모형의 개발, 2006 대한 토목학회 학술발표회 논문집, pp.1207~1210.
2. 백천우, 전환돈, 김중훈 (2006b). Pressure-Driven-Analysis 모형의 화재발생 상황에의 적용, 2006 한국물환경학회 추계학술발표회논문집, B31~B36.
3. 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.
4. Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Technique: Harmony Search, Simulation, Vol. 14, No. 1, pp.34 ~ 39.
5. Gupta, R, Bhave, P. R. (1996). Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance, J. of Water Res. Plan. and Mana., Vol. 122, No. 3, pp. 214 ~ 217.
6. Mays, L. W. (2003). Water Supply Systems Security, McGRAW-HILL.
7. Ozger, S. S., (2003). A Semi-Pressure-Driven Approach to Reliability Assessment of Water Distribution network, Ph.D. Dissertation, Dep. Civil and Envir. Eng., Arizona State University, Tempe, Arizona.
8. Tabesh, M., Tanyimboh, T. T. and Burrows, R. (2004). Pressure dependent stochastic reliability analysis of water distribution networks, Water Science and Technology: Water Supply, Vol. 4, No. 3, pp.81 ~ 90.
9. Tanyimboh, T. T., Tabesh, M. (1997). Discussion Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance, J. of Water Res. Plan. and Mana., Vol. 123, No. 6, pp. 369 ~ 370.
10. Tanyimboh, T. T., Tabesh, M. and Burrows, R. (2000). Appraisal of source head methods for calculation reliability of water distribution networks, J. of Water Res. Plan. and Mana., Vol. 127, No. 4, pp.206 ~ 213.
11. Wagner, J. M., Shamir, U., Marks, D. H., (1988). Water Distribution Reliability : Analytical Methods, J. of Water Res. Plan. and Mana., Vol. 114, No. 3, pp. 253 ~ 275.