

수리학적 용량평가를 위한 모델링

✦ 본 논문은 미국수도협회(AWWA)의 협회지 2004년 4월에 게재된 논문(Modeling for Hydraulic Capacity)을 발췌·번역한 것입니다.

1. 서론

배수관망의 관거에는 내부 부식, 슬라이밍 및 스케일링으로 인해 결절이 자주 형성된다. 이 경우 대체로 관벽의 조도가 증가되며, 관경이 크게 감소된다. 이 같은 변화는 배수관망 내 관거의 수리학적 용량을 감소시킨다. 대부분의 모델 교정은 조도 계수만을 조정함으로써 실시되며 관경의 감소는 무시되곤 한다. 이 경우 유속의

정확한 예측에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이 교정 모델은 배수관망의 각 노드에서 발생하는 압력 분포와 흐름의 균형을 정확히 예측하는 편이다. 그러나 흐름 경로 및 속도 분포의 표시는 예측이 어려울 수도 있으며, 이동 시간의 예측이 부정확할 수 있다. 물의 연대(Water Age)는 이동 시간의 함수로서, 수질에 상당한 영향을 미칠 뿐 아니라, 배수관망 내의 수질 변화 방식에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

이 글에서는 일련의 실제 현장 측정 및 모델링 연구에 기초하여 관거 조도와 유효 관경간의 관계에 대해 설명한다. 연구된 관망에 기초하여, 측정 압력 반응, 흐름 및 속도의 모델을 정확히 수립하려면, 1mm(0.04인치)의 유효 조도 높이의 증가가 유효 직경의 2mm(0.08인치) 감소에 상응해야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 관벽의 결절 형성으로 야기된 직경의 변화는 중요한 매개변수가 된다. 이와 같은 변화는 조도의 변화와 함께 수학적 모델에서 고려되어야 하며, 수질을 중요시하는 모델일 경우 특히 그러하다.

전세계적으로 많은 배수관망에는 상당한 양의 낡은 주철 관거가 존재한다. 배수관망에서 주철관은 부식되는 것으로 알려져 있으며, 이로 인해 관거의 무결성이 손상된다. 즉, 관거가 누수되거나 심한 경우에는 관벽이 붕괴된다. 마찬가지로, 관벽이 부식될 경우 조도의 증가와 흐름 면적의 감소로 인해 관거의 수리학적 용량에도 큰 영향을 미친다. 수리학적 용량의 감소는 주철관으로만 제한되지 않는다. 예를 들어, 모든 관거에 형성되는 망간 슬라임(Manganese Slime)도 조도를 증가시키고 유효 직경을 감소시킨다.

(1) 관거의 조도 처리 방정식

시간의 흐름에 따른 조도의 증가를 설명하기 위해 관거의 조도 처리 방정식이 수립되었다(Colebrook & White, 1937; Sharp & Walski, 1988). 이 방정식은 수리학적 용량에 대한 조도 증가의 예상 영향을 평가하기 위해 사용될 수 있다. 그러나 이 같은 용량의

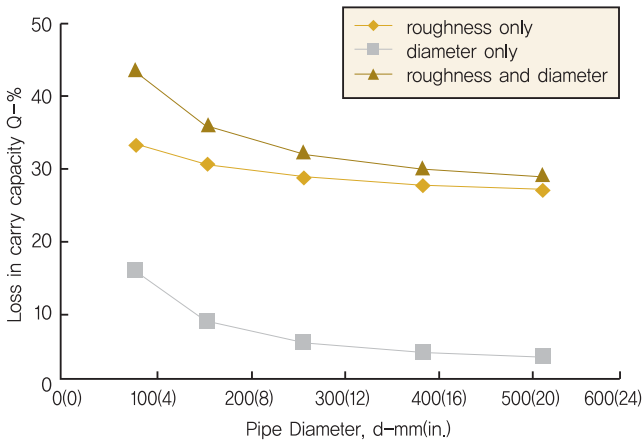


그림 1) 0.01인치(0.25mm)에서 0.1인치(2.55mm)로 조도 높이의 변화에 대한 수리학적 용량 계산

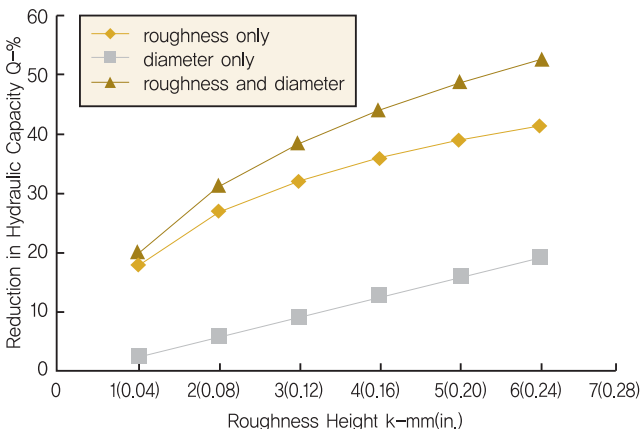


그림 2) 조도가 증가하는 150mm(6인치) 관거의 수리학적 용량*

변화는 흐름 경로, 속도 및 이동 시간을 비롯하여 배수관망 내의 압력 분포에 상당한 영향을 미치며 그 결과, 공급이 제한되거나 중단될 수 있다. 또한, 이 같은 용량의 변화는 수질을 고려할 때 특히 중요할 수 있다. 부식 과정의 2차 영향은 흔히 발생하는 것으로, 변색을 야기시키고 pH를 증가시킬 수 있다(AWWARF, 1996). 수질에 대한 이러한 영향은 산화철 부식생성물의 방출과 주로 관련되어 있다.

따라서 배수관망의 수리학적 성능과 관련하여 발생한 용량 감소의 영향을 정확히 나타내는 모델링 구현이 중요하다. 오늘날에는 배수관망의 수리학적 성능을 평가하기 위해 사용될 수 있는 소프트웨어 툴이 많이 제공되고 있다. 1-3단, 이러한 툴들은 모델 교정 시 직경 변화의 영향에 대해서는 거의 고려하지 않는다.

(2) 교정의 검증

일반적으로, 접합 수요, 관거와 밸브의 운용 상태 및 보다 일반적으로는 관거의 조도 계수에 대하여 교정 변수가 사용되고 있다 (Wu et al, 2002). 교정은 대체로 분포되어 있는 결절점의 압력 프로파일에 대하여 검증되며 구역 미터 면적(DMA) 경계의 미터와 탱크 및 저수장 레벨 데이터로부터의 정보에 의해 보장된다 (Walski, 2000).

비록 이 검증 방법이 압력 기준에 기초할 때 충분한 정확도의 교정 모델을 수립할 수 있지만, 수질 시뮬레이션에 대해서는 정확도가 충분치 않을 수도 있다. 예를 들어, 이 모델은 물의 연대, 물질 전파 및 염소 부식 등을 정확히 예측할 수 없다. 마찬가지로, 플러싱 프로그램의 가동과 같이 운용 및 유지보수 능력을 증진하기 위해 이 모델을 사용하는 경우에도 흐름에 대한 정확한 모델링이 요구된다. 따라서 이를 응용하기 위해서는 흐름, 속도 및 이동 시간 데이터를 모델의 교정에 포함시키고, 관경을 교정 변수로서 포함시키는 것이 중요하다(Skipworth et al, 2002).

압력만으로 수리학적 모델을 교정하는 것은 속도와 흐름 경로 측면에서 매우 부정확할 수 있다. 이처럼 부정확성이 초래되는 이유는 베르누이 방정식(Bernoulli equation)에 의해 정의된 바와 같이 압력이 유속의 제곱과 비례하기 때문이다(Chadwick & Morfett, 1993).

$$\text{식 1) } \frac{P}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z = H$$

여기서, P=압력, ρ=밀도, g=중력 가속도, u=속도, z=위치, H=전수두(Total Head)를 각각 나타낸다. 따라서, 압력의 작은 변화라

도 잠재적으로 유속에 큰 영향을 미친다. 이와 대조적으로, 유속의 변화가 관측 압력 프로파일에 미치는 영향은 미미할 수도 있다. 아래의 그림 3) 결절이 형성된 본관에서 볼 수 있었던 바와 같이, 조도 증가 및 흐름 영역의 감소로 인해 관벽 부식은 수리학적 용량에 큰 영향을 미친다.



그림 3) 결절이 형성된 본관에서 볼 수 있었던 바와 같이, 조도 증가 및 흐름 영역의 감소로 인해 관벽 부식은 수리학적 용량에 큰 영향을 미친다.

(3) 관거 조도로 인한 수송 능력 손실

20인치(500mm) 관거에 대한 계산에 기초하여 Colebrook과 White(1937)는 수송 능력 손실의 주원인은 관경의 감소보다는 관거 조도의 증가에 있다고 주장하였다. 유효 조도 높이 1mm(0.04

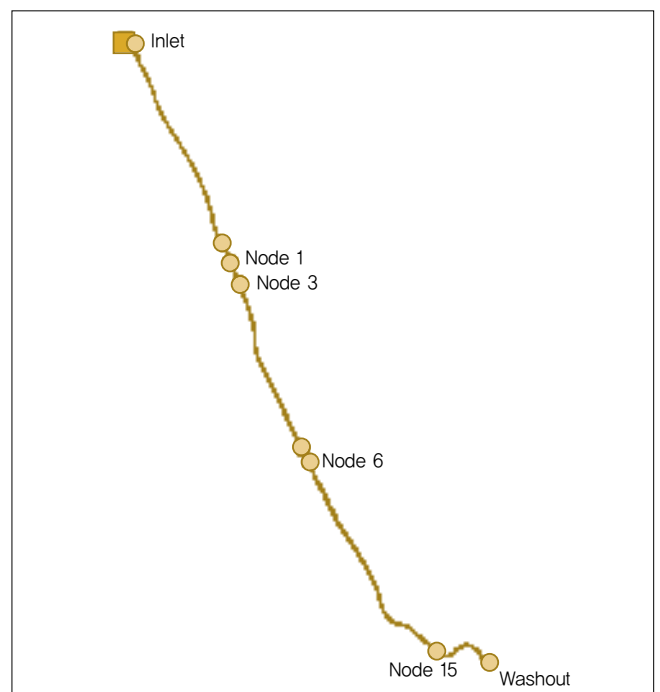


그림 4) 플러싱된 관거의 모델 도식도

인치)가 관경(관거의 전체 주변의 길이는 1mm[0.04인치]) 2mm(0.08인치)의 손실과 같다고 가정할 경우에 이 계산의 실행이 가능하였다.

그림 1)은 전체 관경에 대한 이 계산의 실행 결과를 보여준다. 수리학적 용량에 대한 직경 감소 영향의 중요성이 직경 감소와 함께 증가되는 것을 알 수 있다. 따라서 직경이 보다 작은 관거(모든 관거 모델)를 포함하여 배수관망의 수리학적 성능 및 압력 분포를 정확히 시뮬레이션하려면 조도의 증가뿐 아니라 관경의 감소도 고려하는 것이 중요하다.

그림 1)은 조도의 고정 변화만을 고려한 것이다. 수리학적 용량이 감소함에 따라 용량 손실에 대한 직경 감소의 중요성이 증가한다(그림 2) 참조).

압력, 유속, 유량 및 모델 조도와 직경간의 관계를 조사하기 위해, 실제 배수관망을 대상으로 일련의 실험이 실시되어, 플러싱 운용에 대한 압력 및 흐름 반응을 측정하였다. 이 실험에서는 압력과 흐름 모두 큰 변화를 보였다.

(4) 현장 실험

실험 대상으로 선택된 현장은 시골 지역에 설치된 내부 직경 75mm(3인치), 길이 1.6km(5,250피트)의 주철 관거였다. 이 관거로부터 물을 공급 받는 소비자는 관거의 길이를 따라 소규모로 분포되어 있거나 관거의 끝 부분에 대규모로 모여 있다. 이러한 구성은 전체 파이프 길이에 걸쳐 대략적으로 균일한 흐름이 이루어지도록 한다.

시험 관수로는 비교적 안정되고 무제한의 공급 기능을 갖춘 대규모 직경의 고압력 본관에 직접 연결되어 있다. 이 관수로에 의해 공급 받는 지역은 전체적으로 위치의 변화가 작으며 비교적 평평하다. 이 모델에서 일별 유량 범위는 0.04~0.22L/s(0.08~0.47cu ft/min)이다.

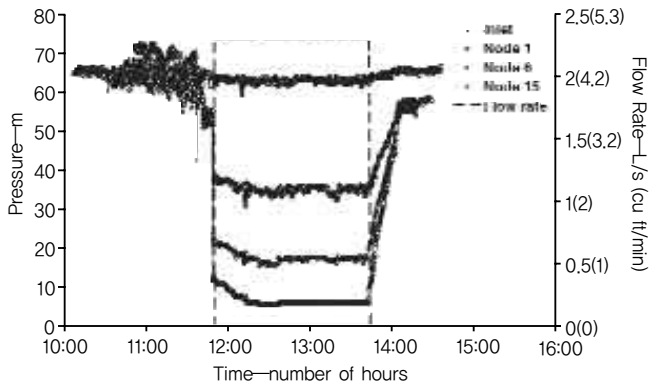


그림 5) 측정 압력 및 유량 데이터 - 최초 플러싱 작업

이 연구에서는 4개의 압력 자동기록장치가 사용되었다. 그림 4)에서 보듯이, 이들 장치는 경계 조건을 기록하기 위해 관거의 입구와 노드 1, 6, 15에 각기 설치되었다. 워시아웃 플러싱 급수전에서 기록된 유량 또한 측정되었다. 자원과 관련된 문제로 관수로 내부 조건을 직접적으로 측정하는 것에 어려움이 있었으며, 수질 연구 목적으로 이 현장을 지속적으로 사용하였기 때문에 샘플 관수로가 철거되지 않았다.

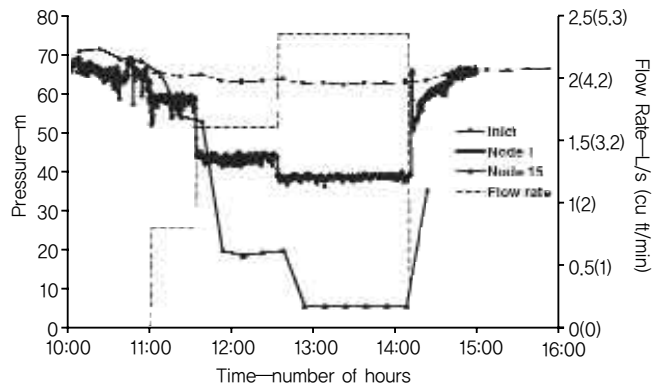


그림 6) 측정 압력 및 유량 - 두 번째 단계적 플러싱 작업

(5) 플러싱 프로그램의 개시

최초 연구는 상수값의 단일 펄스 유량을 제공하기 위해 급수전을 완전히 개방한 상태에서 실시되었다. 이 플러싱 작업에 따라 측정된 압력 및 흐름 데이터는 그림 5)와 같다. 압력은 플러싱 작업 기간에 5초 간격으로 기록되었다. 이 그림은 마찰과 기타 손실로 인해 압력이 관수로를 따라 감소되는 것을 강조하고 있다. 최초 플러싱 작업 기간 중에 노드 1, 6 및 유실 급수전에서 추가 수질 데이터가 입수되었다. 이 추가 정보의 특징을 적용함으로써 평균 유속 0.7m/s(2.3fps)의 추정이 가능하였다.

두 번째 플러싱 작업에서는 단계적 플러싱 프로그램이 사용되었으며, 관거의 유량이 3단계를 걸쳐 약 0.8L/s(1.7 cu ft/min)씩 점진적으로 증가되었다. 그림 5)는 유량의 단계적 증가에 대한 관수로의 압력 및 흐름의 반응을 보여주고 있다. 이 경우에 입구 및 노드 15에서의 압력은 15분 간격으로 기록되었으며, 노드 6에서 자동기록장치는 작동되지 않았다. 압력은 관수로를 따라 다시 감소되는 것으로 나타났으며, 유량의 증가에 상응하여 압력이 감소하였다.

(6) 모델링 예측

모든 모델링 작업은 EPANET2에서 실시되었다(Rossman, 2000). 이 모델을 적용하려면, 관수로의 마찰에 의해 야기되는 손실을 설명할 필요가 있다.

Chezy-Manning(n), Hazen-Williams(C) 또는 Darcy-Weizbach(k) 등의 다양한 접근법을 사용하는 것도 가능하다. 이 가운데 Hazen-Williams와 Darcy-Weizbach는 가장 널리 사용되고 있다. Sharp와 Walski(1988)는 k에서 C로의 변환은, C가 유속에 따라 변하기 때문에, 직접적인 관계가 없음을 밝혔다. 그러나, 수두 손실(Head Loss)에 대한 두 가지 방정식을 모두 푼 다음 Colebrook와 White의 전이식(Transition Formula)에 기초한 근사치를 사용하여 다음과 같은 형태의 매우 거칠고 사나운 흐름에 대한 식을 추출하였다.

식 2) $C=[14.6-25.6\log(k/D)]^{1.08}$

여기서, D는 관경을 나타낸다.

이 연구에서 조도 높이를 나타내는 k값은 1차 변수로 고려되었다. 따라서, C에서 k로의 변환에 Eq2가 사용되었다. 이 모델 연구는 다음과 같은 목적 하에 3단계로 나누어 실시되었다.

- ① 부식으로 야기된 관경의 감소 효과를 무시하는 것과 관련된 오류의 평가
- ② 최초의 단일 유량 데이터 세트에 대하여 해당 모델의 교정
- ③ 두 번째 단계적 플러싱 데이터 세트에 대하여 해당 모델의 검증

(7) 예측된 단일 플러싱 유량

이 영역의 기본 모델은 우량-양질로 간주되었으며, 압력 프로파일, DMA 유량계 및 탱크 레벨 데이터에 대해 교정이 실시되었다. 현장 작업 프로그램을 실시하기 전, 그림 4)에 개략적으로 제시된 배수관망의 일부 성능을 나타내기 위해 이 네트워크의 전체 DMA 모델과 컷다운 버전을 사용하여 최대 실행가능 플러싱 유량에 대한 예측이 이루어졌다. 급수전의 대기 유량 모델링은 Walski(1995)와 EPANET 사용자의 매뉴얼(Rossman, 2000)에 의해 제안된 급수전 설비를 사용하여 이루어졌다. 사용된 값은 연결 길이 1m(3피트), 위치 +0.5m(+1.6피트), 예상 최고 유량의 10 배에 해당되는 방출기 계수, 직경 63mm(2.5인치) 및 모든 밸브, 곡관, 이형관의 국부 손실 13 등이다.

드라운드 오리피스(Drowned orifice) 유량 이론(Chadwick & Morfett, 1993)에 따르면, 유량은 압력 및 직경과 직접 비례한다. 따라서 최소 이형관의 직경은 유량을 제어할 것으로 예상될 수 있으나, 연결 관거나 스탠드 파이프의 직경은 그렇지 못하다. 이 작업을 위해서 사용된 이형관의 최소 직경은 대략 45~50mm (1.77~2인치)였다.

이 모델을 사용하여, 완전 개방 급수전의 침두 플러싱 유량은 5.5L/s(11.7 cu ft/min)로 예측되었다. 이 값은 시험 기간에 기록된 최종적으로 안정된 완전 개방 플러싱 유량 2.3L/s(4.9분당평방피트)를 100% 초과한 것이다. 그러나, 컷다운 및 전체 DMA 모델 간의 예측은 일관되었으며, 이로써 간소화된 모델이나 모델 솔루션의 구축을 통해 오류가 발생되지 않았음을 알 수 있다. 이 모델의 교정에 대한 조도 및 직경의 영향에 대한 조사는 컷다운 모델을 사용하여 실시되었다.

현재 관행에 따라, 조도만 검증하는 것을 조건으로 하고 측정 데이터를 사용하여 모델 교정에 대한 초기 조사가 실시되었다. 약 26mm(1.04인치)의 유효 조도 높이에서, 관수로의 손실 수두는 측정된 압력 및 흐름 반응을 재생하기에 충분하였다. 이 정도 크기의 유효 조도는 유효 직경에 반드시 영향을 미친다.

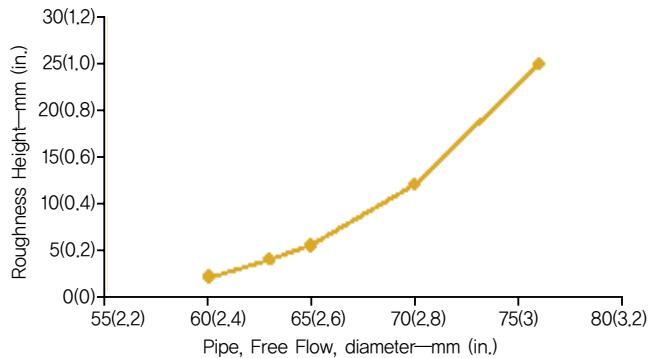
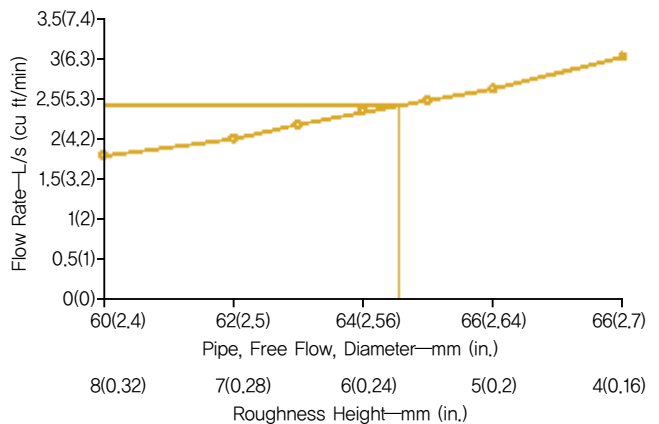


그림 7) 측정 흐름 및 압력을 정확히 재생하는 직경 대 유효 조도 관계



*Assuming 1 mm (0.04 in.) effective roughness caused 2 mm (0.08 in.) loss in effective diameter

그림 8) 유효 직경/조도 * 대 유량간의 관계

(8) 조사된 조도와 직경의 관계

유효 조도와 직경의 상호의존성에 대해 다음 두 가지 방식으로 조사가 실시되었다.

① 그림 7)에 제시된 바와 같이, 관측 압력 및 흐름 반응이 재생될 때까지 직경을 달리하고 유효 조도를 조정함.

② 유효 조도 높이 1mm(0.04인치)가 직경(관거의 전체 주변 길이는 약 1mm[0.04인치]) 2mm(0.08인치) 손실과 동일하다는 가정 아래 관경 및 유효 조도의 값을 선택함. 이 연구의 결과는 그림 8)에 제시되어 있다. 유량은 더 민감한 매개변수이기 때문에 압력에 우선하여 측정치와 예상치간의 적합도 수준의 척도로 계산된다. 이 그림에서는 측정 압력 및 유량을 재생하는 직경 조도 결합이 강조되어 있다. 이 가정은 조도 값이 유효 높이일 뿐이며, 절대 값은 아니기 때문에 의문의 여지가 있다. 그러나 이 방법은 그림2에서 보여진 바와 Colebrook 및 White(1937)의 주장과 일치한다.

그림 7)에 강조된 결과는 유효 조도와 유효 직경을 표시한 값의 모든 결합이 배수관망 내에서 관측 흐름 및 압력을 재생하기 위해 사용될 수 있음을 가리킨다. 또는, 그림 7)에서 보듯이, 유효 조도 높이가 1mm(0.04인치)가 직경 2mm(0.08인치)를 감소시키는 것으로 가정하는 경우, 직경 65mm(2.6인치)와 유효 조도 높이가 5.5mm(0.22인치)의 값은 관측 흐름 및 압력 반응의 모델을 교정하기 위해 사용되어야 한다.

조도 및 직경 값을 조사하기 위해 사용될 수 있는 추가 인자는 관거 속도의 크기이다. 유량을 측정치로 가정할 때 유속과 관경의 관계는 그림 9)에 제시된 바와 같다. 예를 들어, 그림 9)은 (최초 플러싱 중에 수집된 추가 데이터로부터 추정된 바와 같이) 유속 0.7m/s(2.3fps)에서 유효 조도의 높이가 지속적으로 5.5mm(0.22인치)인 약 65mm(2.6인치)의 직경이 필요하다는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 1mm(0.04인치)의 유효 조도 높이가 관거 주변의 1mm(0.04인치) 손실과 일치된다는 가정을 뒷받침한다.

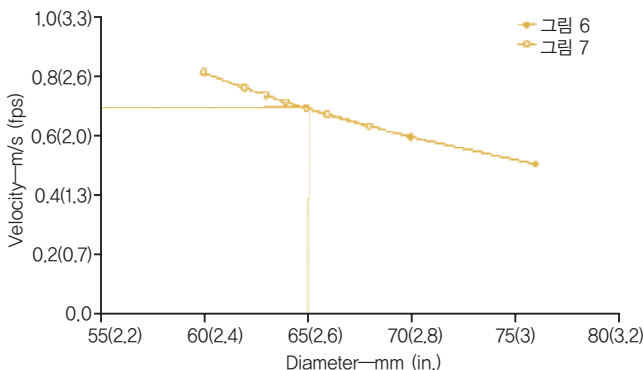


그림 9) 그림 7)과 8)의 유효 직경에 대한 직경 대 속도의 관계

그림 10)는 65mm(2.6인치)의 유효 직경과 5.5mm(0.22인치)의 유효 조도를 사용하여 예측 및 측정된 압력 반응을 보여주고 있다. 분명한 것은 예측 압력이 실제 측정치와 일치된다는 점이다.

출구 직경-D	방출기 계수-k	예측 유량
0 mm(인치)	L/s/m0.5(gpm/psi0.5)	QL/s(cu ft/min)
45(1.8)	7.45(101)	2.56(5.42)
20(0.8)	1.39(19)	2.54(5.38)
10(0.4)	0.35(4.7)	2.52(5.34)
5.4*(0.2)	0.1(1.4)	2.47(5.23)
0.61*(0.02)	0.001(0.014)	1.7(3.60)
0.24*(0.009)	0.0002(0.0027)	0.88(1.86)

* 관측 유량을 대략적으로 재생하는 값을 나타냄.

표 1) 가변식 방출기 계수를 사용하여 작성된 수리학적 예측, Eq3을 사용하여 계산된 계수 값

매개변수	최초	교정
관경 - mm(인치)65(2.6)	64(2.5)	
관거 조도 - mm(인치)	5.5(0.22)	5.6(0.2)
급수전 직경1 - mm(인치)	10(0.4)	11(0.43)
급수전 직경2 - mm(인치)	20(0.8)	19(0.75)
급수전 직경3 - mm(인치)	45(1.7)	50(2.0)
급수전 조도 - mm(인치)	1.5(0.05)	1(0.04)
급수전 국부 손실-13(-0.51)	-5(0.2)	
급수전 길이 m(ft) 1(0.04)	0.5(0.02)	
방출기 계수* - L/s/m0.5 (gpm/psi0.5)	25(338)	100,000(1,352)

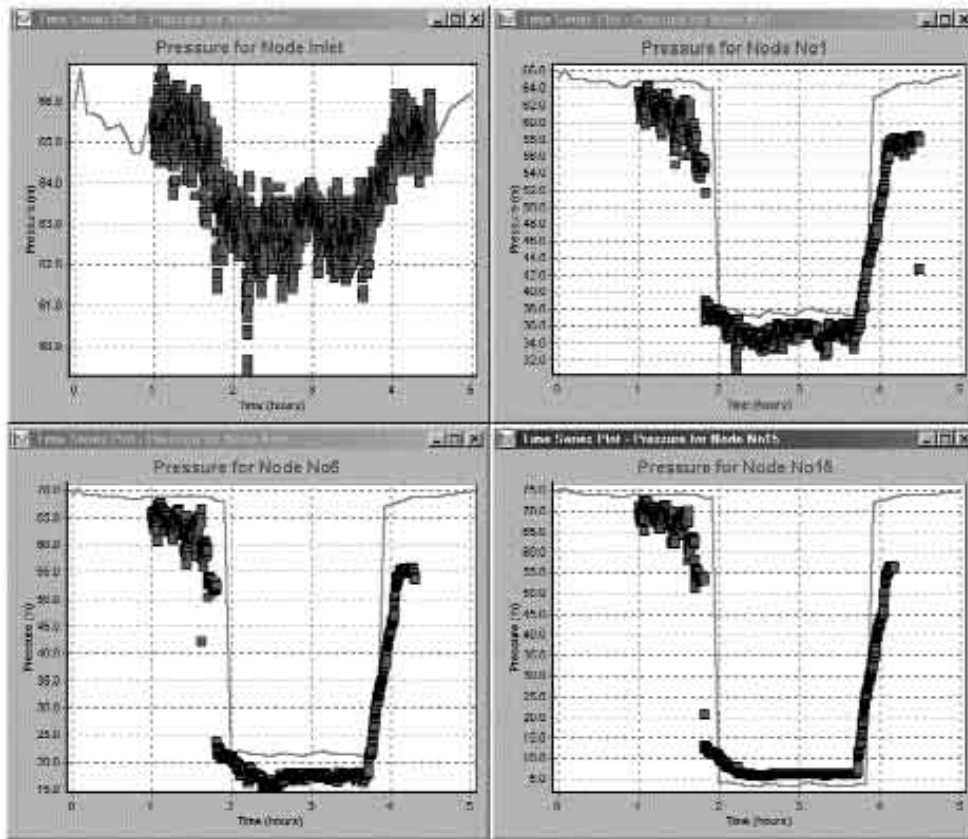
* 방출기 계수의 대규모 값에 둔감한 것으로 관측된 예측, 기본값: 교정 범위의 상한한계

표 2) 최초 및 유전적 알고리즘 교정된 수리학적 매개변수

(9) 예측된 단계적 플러싱 유량

플러싱 유량을 단계적으로 증가시키기 위한 여러 모델링 방법에 대한 조사가 실시되었다. 이 방법들에는 급수전 이형관과 관련된 가변식 경미 손실 계수의 사용, 가변식 방출기 계수, 급수전 관경의 변화 또는 직경이 다른 병렬 급수전 연결 관거의 사용이 포함되었다. Walski 등(2003)은 오리피스 유량 이론에 기초하여 일정 출구 크기에 대한 방출기 계수 값을 추정하는 공식을 제시한다.

$$K = \frac{1}{\left[\frac{1}{2gc_f} \left(\frac{1}{D_o^4} - \frac{1}{D_p^4} \right) + \frac{1}{k_b^2} \right]^{0.5}}$$



*제곱(Squares) † 라인(Lines) 그래프상의 시간 0은 실시간으로 오전 10:00시임

그림 10) 최초 플러싱에 대한 측정 플러싱 프로파일* 및 모델 예측 †

여기서, K는 방출기 계수(L/s/m^{0.5})를, cf=0.000785, D0는 급수 전 출구 직경(mm)을, Dp는 관경(mm)을, kh는 급수전 전반에 걸친 압력 강하 계수이다(63mm[2.5인치] 급수전의 최소 AWWA 기준은 18L/s/m^{0.5}[243gpm/psi^{0.5}]). 출구 직경은 플러싱을 제어하기 위해 사용된 게이트 밸브를 열기 위해 필요한 회전의 회수로부터 추정되었다. 이 직경은 초기에 10mm(0.4인치), 20mm(0.8인치) 및 45mm(1.8인치)로 추정되었다. 표 1)에 제시된 것은 직경, 방출기 계수 및 예측 유량이다. 이 표에서는 관측 유속을 예측하기 위해 필요한 방출기 계수가 비현실적으로 작은 급수전 출구 직경과 일치되는 것을 알 수 있다.

직경이 다른 병렬 급수전 연결 관거의 사용은 단계적 플러싱 방식을 모델링하기 위한 가장 효과적이고 의미 있는 실용적 방법으로 간주되었다. 이 병렬 관거는 처음에 모두 폐쇄된 상태였지만, 이후 시간 기준 제어 명령을 통해 번갈아 열리고 닫혔다.

관경은 플러싱을 제어하기 위해 사용된 게이트 밸브를 열기 위해 필요한 회전 수로부터 추정되었다. 이 직경은 초기에 10mm(0.4인치), 20mm(0.8인치) 및 45mm(1.8인치)로 추정되었다. 단계적 플러싱 방식에 일치하는 플러싱 유량과 압력 반응을 예측하기 위

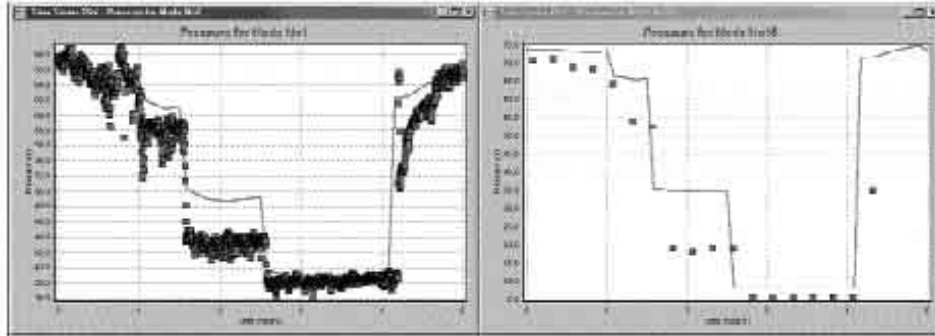
해, 65mm(2.6인치)의 관경 및 5.5mm(0.22인치)의 관벽 조도와 함께 이 값을 사용하여 이 모델이 적용되었다. 예측 압력 반응은 그림 10)과 같다.

예상대로, 침투 완전 유량에서의 예측(압력 및 흐름)이 비교적 잘 들어맞는다. 해당 설비가 최초 플러싱 시험 설비와 일치하기 때문이다. 유량이 증가함에 따라 압력은 감소하였다. 그러나 2개 하위 유량에서 예측 압력은 측정 압력보다 컸으며, 유량은 예측에 미치지 못하였다.

여러 변수를 사용하여 3개 연결 관경, 본관의 유효 조도 및 유효 직경, 급수전 설비의 표시와 같은 결과에서의 차이를 설명할 수 있다. 이 매개변수의 잠재적 결합의 수는 크다. 따라서, 자동 검색 및 교정 기능을 개발하는 것이 타당한 것으로 간주되었다. 이 단계는 상용 유전적 알고리즘(GA) 소프트웨어4와 EPANET의 툴킷 기능을 사용하여 수행되었다. GA에 관한 일반적인 정보를 보려면 Goldberg(1989)를 참조하도록 한다.

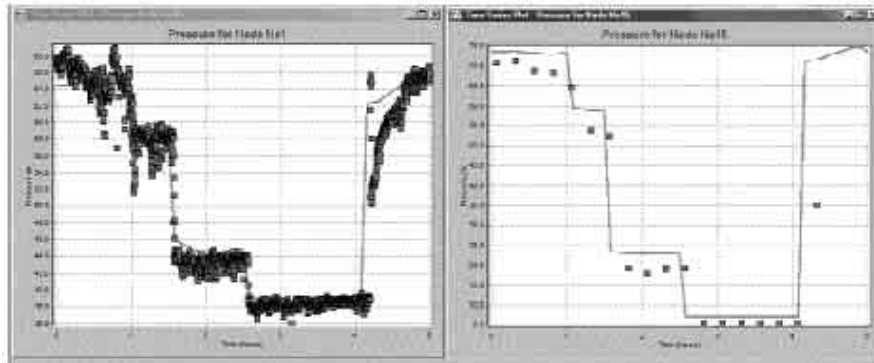
(10) 효율성이 입증된 결합 최소화 기준

GA 최적화 및 교정에 있어서는 목적 함수(최소화 기준)의 형성 및



*제곱(Squares) †라인(Lines) ‡최초 플러싱 데이터로 교정 후에 예상 급수전 개방 및 조도/직경을 사용하여 작성된 예측 주) 그래프상의 시간 0은 실시간으로 오전 10:00시임

그림 11) 단계적 플러싱‡에 대한 측정* 및 예측† 압력 반응



*제곱(Squares) †라인(Lines) ‡최적의 자동 교정 값을 사용하여 작성된 예측 주) 그래프상의 시간 0은 실시간으로 오전 10:00시임

그림 12) 단계적 플러싱‡에 대한 측정* 및 예측† 압력 반응

정의가 중요하다. 결합 최소화 기준은 이 문제를 효과적이고 효율적으로 처리하기 위해 마련되었다. 이 기준은 ① 각 유량, ② 완전 개방 유량에서의 유속(최초 플러싱에서 0.7L/s), ③ 3개 유량에 대하여 노드 1 및 15에서의 평균 압력의 측정값과 예측값간에 일치된 가중 오류의 최소화이다. 솔루션의 안정성을 확보하기 위해 GA 실행이 반복되었으며, 최적에 가까운 솔루션은 대체로 2분 내에 얻게 되었다.

이 자동 교정 절차로부터, 최적 변수 값은 표2에 제시된 바와 같으며, 측정값과 예측값간의 비교 결과는 그림 12)에 제시된 바와 같다. 이 모델 교정은 최적화 절차에 의해 크게 개선되었다. 표 2)에 제시된 데이터는 수리학적 매개변수 값의 매우 작은 변화에 의해 야기된 압력 및 흐름의 반응에서 중요한 변화를 보여준다.

요약하면, 개발된 자동 수리학적 교정 방법 및 기능을 통해, GA가 제한적인 사용자 지식 및 경험만으로도 그레이 박스 검색 및 교정 기법으로서 쉽고 안정적으로 사용될 수 있음을 보여주었다고 단정된다.

2. 결론

이 연구에 기초하여, 저자들은 다음과 같이 결론을 맺었다.

- (1) 측정 압력 데이터를 설명하기 위해 관벽 조도의 변화를 사용하는 수리학적 모델의 교정은 배수관망의 전체 수리학적 성능의 모델을 정확히 수립하기에 부족할 수 있음이 제시되었다.
- (2) (내부 부식에 의해 야기된) 유효 직경의 감소가 무시될 경우, 수리학적 용량, 급수전 유량(플러싱 또는 소화수량(fire flow)) 및 기타 매개변수에 대한 예측이 큰 오류에 빠질 수 있다.
- (3) 수리학적 용량에 대한 관경 감소 영향의 중요성은 관경이 감소됨에 따라 증가된다. 직경 감소의 중요성은 조도의 증가와 함께 증가된다.
- (4) 운용 프로그램의 일부로 수행된 플러싱 작업은 모델 교정의 개선을 위한 이상적인 정보원을 제공한다.
- (5) 연구 결과, 유효 조도의 1mm(0.4인치) 증가는 관거 주변(유효 직경 2mm[0.08인치] 손실)의 수리학적 용량의 1mm(0.4인치) 손실과 동일한 것으로 밝혀졌다.
- (6) GA는 제한적인 사용자 경험 및 지식만으로도 그레이 박스 교정 기법으로서 효과적으로 사용될 수 있다.

* 이 글에 대해 의견이 있으신 분은 journal@awwa.org로 연락하시기 바랍니다. ☺