플러싱 공법 적용을 위한 구역정의 및 적정유속 확보여부 모의 방안에 관한 연구

A Study on the Delineation of Flushing Sections and Simulation Method to Verify Appropriate Flushing Velocity for Applying Flushing

김수리* · 김아린** · 하정태*** · 김진혁**** · 전환돈*****

Kim, Suri* · Gim, ARin** · Ha, Jeongtae*** · Kim, Jinhyeok**** · Jun, Hwandon*****

Abstract

Recently, water supply networks have experienced deterioration because of various factors, which result in the accumulation of a large amount of scale on the inside surface of pipes. The scale may enter houses when a surge occurs owing to abrupt velocity or flow direction change in pipes, and eventually, water quality accident such as red-water can occur. The scale should be removed by applying pipe-cleaning practices, such as flushing, to prevent this type of accident. Currently, most studies have suggested only the desirable flow velocity to remove the scale through flushing. In our opinion, it will be more critical to develop a method for determining whether it would be possible to achieve the desired flow velocity. Hence, we developed a method to delineate a flushing section and modify a water supply network in considering the minor loss on the hydrant using the head loss-flow rate curve for the hydrant. Next, we simulated a flow condition using the emitter coefficient to achieve the desired flow velocity for flushing each section. The proposed method was applied to a part of the water supply network of a city in Korea. From the results, the pressure head at the primary water source point of the network was sufficient such that each flushing section experienced the desired flow velocity to complete the flushing process. We lowered the pressure head by 20 m at the primary water source point and simulated a flow condition for insufficient pressure head. Under these conditions, some of the flushing sections could not experience the desired flow velocity, and hence, the scale could not be removed as desired. In this case, we believe that the utility authority should decide whether flushing is still a suitable option for cleaning the pipe, or whether other cleaning methods should be considered.

Key words : Flushing, Delineation of Flushing Sections, Hydrant, Emitter Coefficient, Appropriate Flushing Velocity

요 지

최근 상수관망시스템은 각종 내·외적인 요인에 의해 노후화가 진행되고 있으며, 이에 따라 관 내 침전물인 스케일이 생성된다. 생성된 스케일은 상수관망시스템에 급격한 유속변화, 유향변화에 따른 수충격 발생 시 박리되어 수용가로 유입되며, 적수, 탁수 등의 수질문제를 야기한다. 이를 사전에 방지하기 위해서는 플러싱 공법을 적용하여 관벽에 퇴적된 스케일을 제거해야한다. 그러나 현재 국내외의 연구에서는 플러싱 공법 수립 시 오염물질 제거를 위한 적정 유속에 대한 연구 및 실험만이 제시되어 있으며, 적정 유속이 확보 가능한지 사전에 검토하기 위한 구체적인 방안은 제시되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 플러싱 공법 적용 시 적정 유속을 확보하기 위해 세척구간을 정의하는 방법을 제시하였으며, 용수가 소화전을 통과하면서 발생하는 손실을 고려하기 위해 소화전의 유량-손실수두 관계곡선을 이용하여 모델을 재구축하고, Emitter Coefficient를 통한 압력기반 모의를 실시하여 세척구간별 적정 유속을 확보할 수 있는지 분석하였다. 플러싱 공법 절차를 A시 일부구역에 적용하여 적절성을 검토하였다. 적용 결과 주입점에서 충분한 압력이 확보되어있어 모든 세척구간에서 적정 유속 확보가 가능한 것으로 나타났다. 다음으로, 주입점에서의 압력이 부족한 상황을 모의하기 위해 주입점에서의 압력을 20 m 낮추어 모의한 결과, 일부 세척구간에서 적정 유속 확보를 위한 유량 방출이 불가능한 것으로 나타났으며, 이와 같은 경우 실무자의 판단에 의해 플러싱 공법의 기준을 낮추거나 다른 관세척 공법의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 플러싱공법, 세척구간 정의, 소화전, Emitter Coefficient, 적정 유속

*정회원, 하준이앤씨(주) 기업부설연구소 연구원(E-mail: sl950714@naver.com)

Member, Researcher, Hajon Engineers&Consultants

**정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정(E-mail: garim13579@naver.com)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***하남시 상수도과 상수도공사팀장(E-mail: jeongbal@korea.kr)

Head of Team, Water Supply Division, Hanam City

****하남시 상수도과 주무관(E-mail: joymozzi@korea.kr)

Manager, Water Supply Division, Hanam City

*****교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-2-970-6570, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

1. 서 론

상수관망시스템은 매설년도가 경과함에 따라 화학적 반응에 의해 침전물인 스케일(Scale)이 생성된다. 정상운영상황에서 스케일은 관 벽에 부착된 채 안정화되어 수질에 영향을 거의 미치지 않으나, 공급노선 변경, 관로 교체, 관로 파손 등 상수관망시스템에 급격한 유속변화, 유향변화에 따른 수충격 발생 시 관 벽에 부착된 스케일이 박리되어 수용가로 유입되면서 적수, 탁수 등의 수질 문제를 발생시킨다. 이와 같은 수질 문제를 방지하기 위해서는 관세척 공법을 적용하여 사전에 관 벽에 부착된 스케일을 제거해야 한다. 대표적인 관세척공법에는 플러싱 공법, 피깅, 아이스피깅, 워터제트세척, 맥동류세척 등이 있으며, 가장 보편적으로 이용되는 공법은 플러싱 공법이다. 플러싱 공법이란, 소화전이나 이토변을 열어 높은 압력과 유속을 확보한 다량의 용수로 스케일 등의 부산물을 외부로 방출시키는 공법을 의미하며, 높은 압력 및 유속 확보를 위해 일반적으로 관경 300 mm 이하 관에 적용한다.

플러싱 공법은 재래식 플러싱과 단방향 플러싱으로 구분된다. 재래식 플러싱이란 제수밸브를 조작하지 않은 상태에서 소화전을 개방하여 물을 방출하는 방법을 의미한다(Friedman et al., 2002). 재래식 플러싱은 제수밸브를 조작하지 않은 채 관망 전체를 손쉽게 세척할 수 있으며 적정 유속이 확보될 경우 넓은 지역을 동시에 세척할 수 있다는 장점이 있으나, 모든 관망을 세척하기 때문에 세척에 필요한 적정 유속을 확보하기 어려운 경우가 많다는 단점이 있다.

단방향 플러싱이란 제수밸브 조작을 통해 세척구간을 결정하고, 소화전을 개방하여 물을 방출하는 방법을 의미한다(Antoun et al., 1999; Carriere et al., 2005). 관망 전체에 대한 세척을 실시하는 재래식 플러싱과 달리 특정구역에 대한 세척을 실시하기 때문에 재래식 플러싱보다 높은 유속 확보가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 제수밸브의 개폐가 수반되기 때문에 대상지역 내 밸브에 대한 충분한 사전진단, 정확한 관망도 및 수리학적 검토가 필요하다.

그러나 현재 실무에서는 단방향 플러싱을 적용하지 않고, 재래식 플러싱 방법을 이용하여 관 내 발생한 침전물을 빠른 시간 내에 제거하고 있는 실정이다. 상수관망 내 부유하는 침전물의 경우 통수단계 이전 이토변을 통해 충분히 배수시키므로 거의 존재하지 않으나, 오랜기간 관 벽에 부착된 스케일은 수충격 발생 시 다량으로 박리되어 수질 문제를 발생시키므로, 플러싱 공법 적용 시 높은 유속의 용수로 관 벽에 부착된 스케일을 제거해야 안전한 수질을 확보할 수 있다. 실제 A시 일부관망에서는 관세척을 위해 재래식 플러싱을 적용하여 관 내 침전물들을 모두 제거하였으나, 통수 과정에서 갑작스러운 취수에 의해 발생한 수충격으로 스케일이 박리되어 적수문제가 발생한 사례가 있다.

현재까지 플러싱 공법의 적정 유속에 대한 다양한 기준이 제시되었다. AWWA (1986)에서는 플러싱을 통해 모래 및 침전물을 제거하기 위한 최소 유속으로 0.9 m/s를, 생물막을 제거하기 위한 최소 유속으로 1.5 m/s를 제안하였다. 미국 코네티컷주(State of Connecticut, 2006)에서는 플러싱 공법 적용 시 최소 권장 유속을 0.76 m/s로 제안하였다. 캐나다 퀘벡주(State of Quebec, 2019)에서는 관경 350 mm 이하의 관에 플러싱 공법을 적용할 것을 규정하고 있으며, 플러싱 공법의 유속은 최소 0.8 m/s, 적정 유속은 1.5 m/s로 제안하였다. 캐나다 포르 프랜시스시(The Town of Fort Frances, 2004)에서는 플러싱공법 적용 시 최소 0.75 m/s, 적정 유속은 1.5 m/s로 제안하였다.

Cheon (2014)은 실험을 통해 플러싱공법 적용 시 모래는 1.8 m/s, 스케일은 2.35 m/s, Anthracite는 1.75 m/s를 최적 유속으로 제안하였다. Bac et al. (2014), Kim et al. (2015)은 실험을 통해 플러싱 공법 적용 시 입자별로 GAC는 0.5 m/s, 모래입자는 0.88 m/s, 철부식생성물은 0.88 m/s 이상에서 제거 가능한 것을 확인하였으며, 플러싱공법 적용 시 최소 유속으로 0.9 m/s를 제안하였다. Seo et al. (2019)은 실험을 통해 플러싱공법과 공기주입 세척의 효과를 비교하였으며, 플러싱공법 적용 시 고압(9.0 kgf/cm²)의 용수를 통해 플러싱공법의 효과를 분석하였다.

Poulin et al. (2010)은 플러싱공법을 적용하기 위해 제수밸브의 위치, 소화전의 위치를 파악하여 블록별로 세척순서를 결정하였으나, 세척블록단위에서의 순서만을 결정할 뿐 블록 내 개별 관로들에 대한 세척 방안 및 수리학적 검토 방안에 대한 연구는 미흡한 실정이다. Deuerlein et al. (2014)은 그래프 이론을 적용하여 세척순서를 제안하였다. 또한, 플러싱 공법의 적용 길이, 유속, 정상상황에서의 최대 유속, 이용 가능한 소화전 수에 대한 기준을 제안하였으며, 각 기준에 따른 적용 가능 범위 및 설명은 Table 1과 같다. 먼저 플러싱 구간의 길이에 대한 기준은 작업의 효율성을 위해 400 m 이상 800 m 이하가 적절한 것으로 제안하였다. 그러나 이는 독일의 관망 특성에 의해 제안된 것으로, 단위면적당 수요량이 큰 국내 관망에는 적절하지 못하다. 국내 관망의 경우 플러싱 공법을 적용하기 위한 관경 300 mm 이하의 관들은 관의 길이가 비교적 짧게 매설되어있어 최소 권장 길이를 400 m로 할 경우 곡선구간이 포함되거나 세척구간 내 관경이 다른 관들이 포함될 수 있다. 이에 본 연구에서는 세척구간의 최소 길이는 100 m, 최대 길이는 손실수두의 영향을 고려하여 800 m가 적절한 것으로 사료된다. 적정 유속 기준은 Cheon (2014)의 실험, 다양한 국가들의 유속 기준 등을 토대로 살펴본 결과, 제안된 바와 같이 최소 0.9 m/s가 적절한 것으로 판단된다. 해당 논문은 이와 같은 기준을 적용하여 플러싱 공법 적용 시 세척구간 결정 방안을 제안하였으나, 세척구간에 따른 적정 유속 확보 방안 등 수리학적 적절성에 대한 언급은 배제되어있다.

Table 1. General Criteria for Optimal Unidirectional Flushing (Deuerlein et al., 2014)

Criteria	Feasible Range	Significance
Length of flushing path	400 m – 800 m	Upper threshold: Limitation of headloss along the flushing path for guaranteeing sufficient flow velocity. Lower threshold: operational efficiency, Reducing risk of re-suspension in upstream pipes that do not belong to the flushing area by inappropriate high flow velocities.
Min. flow velocity during flushing min v_s	0.9 m/s – 1.8 m/s	The minimum flow velocity that is necessary for completely cleaning of the pipe wall by conventional flushing. Is limited by the hydraulic capabilities of the flushing hydrant as well as the hydraulics of the upstream network.
Max. flow velocity of an average demand day under normal condition: max v	0.3 m/s	Determines if flushing of a pipe is necessary. If min v is exceeded on a regular basis → no sedimentation in the pipe.
Accessibility of flushing hydrants	sufficient	Hydrants must be reachable by car and the disposal of flushing water (commonly into the sewer system) must be possible without any negative impact.

현재까지 플러싱공법 적용 시 권장 기준에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔으나, 적정 유속을 실제 상수관망에서 확보하기 위한 방안에 대한 연구는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 플러싱에 필요한 적정 유속을 0.9 m/s로 설정하고, 플러싱 공법 적용 시 세척구간을 정의하고 소화전의 영향을 고려한 수리해석을 실시하여 각 세척구간에서 적정 유속을 확보할 수 있는지 분석하였다.

2. 플러싱공법 적용을 위한 세척구간 정의 및 세척절차

2.1 세척구간 및 세척순서 정의

세척구간을 정의하기 위해서는 이토밸브와 제수밸브의 위치, 소화전의 위치를 확인해야 한다. 단방향 플러싱을 적용하기 위해서는 관 내 용수가 이토밸브 또는 소화전을 통해서만 방출되도록 제수밸브를 조작하여 세척하고자 하는 관로들을 고립시켜야하며, 고립구역 내에 용수를 배출시킬 소화전이 반드시 존재해야한다. 제수밸브가 적절한 위치에 존재하지 않으면 세척구간이 길어지고, 세척구간 내 곡선구간이 존재하게 된다. 소화전이 적절한 위치에 존재하지 않으면 원하는 구간만을 세척할 수 없어지며, 관망의 형태가 수지식일 경우 말단부에 소화전이 존재하지 않으면 세척이 불가능한 관이 발생한다는 문제가 있다.

세척하고자하는 지역 내 이토밸브, 제수밸브와 소화전이 적절한 위치에 존재하는 것으로 확인되었다면, Fig. 1과 같은 절차를 통해 세척순서를 결정해야 한다.

먼저 세척하고자 하는 지역의 관망의 형태에 따라 세척순서를 결정한다. 상수관망이 수지식일 경우에는 주입점으로부터 순차적으로 세척을 실시하면 된다. 그러나 상수관망이 격자식일 경우, 블록단위의 세척순서를 우선적으로 결정한

후 블록 내 세척순서를 결정해야한다. 먼저, 주입점을 포함하는 블록을 우선시 세척한다. 이후 세척이 완료된 블록과 인접한 블록을 세척함으로써 재오염 등의 문제를 방지하여 블록단위의 세척순서를 결정한다.

Fig. 1. Flow Chart of Delineating a Flushing Section

블록단위의 세척순서를 결정한 후 블록 내 관망에서의 세척구간을 정의해야 한다. 세척구간을 정의할 때 고려해야 하는 사항은 관경, 세척구간 내 곡선구간 여부, 세척구간의 길이이다.

세척구간을 정의할 때에는 가급적 세척구간 내 환경이 동일하도록 정의해야 한다. 상수관망의 경우 환경에 따라 적정 유속을 확보하기 위한 유량이 달라진다. 이에 환경이 서로 다른 관로들을 동일한 세척구간으로 정의하게 되면, 환경이 큰 관에 적정 유속을 확보하기 위해 많은 유량이 요구되므로 용수가 과다하게 이용된다. Table 2는 플러싱 공법의 적용 대상 환경에 따른 적정 유속을 확보하기 위한 유량을 연속방정식을 이용하여 산정한 결과를 나타낸다. 예를 들어 직경 200 mm인 관은 면적이 0.0314 m²이고 적정 유속은 0.9 m/s이므로, 적정 유속을 확보하기 위해 필요한 유량은 $Q = AV$ 에 의해 101.8 m³/hr가 된다.

Table 2. Flowrate at an Adequate Velocity by Diameters

Diameter (mm)	Area (m ²)	Adequate Velocity (m/s)	Flowrate (m ³ /hr)
100	0.0079	0.9	25.4
150	0.0177		57.3
200	0.0314		101.8
250	0.0491		159.0
300	0.0707		229.0

만약 환경이 200 mm인 관로와 250 mm인 관로를 동일한 세척구간으로 정의하게 되면 환경 200 mm관으로만 세척구간을 정의했을 때 대비, 환경 250 mm에 적정유속을 확보하기 위해 57.2 m³/hr의 유량이 추가적으로 더 소비됨을 의미한다. 따라서 세척구간 내 환경을 동일하도록 설정해야 용수를 효율적으로 이용할 수 있다.

단, 환경별로 세척구간을 정의할 때 세척구간이 과도하게 짧게 선정될 경우에는 제수밸브를 조작하고 소화전을 개방하는데 소요되는 시간에 비해 효율성이 떨어질 수 있으므로, 실무자의 판단에 의해 환경이 다르더라도 하나의 세척구간으로 정의하는 것을 검토해야 한다. 본 연구에서는 국내 관망의 특성을 고려하여 세척구간의 길이가 100 m 이하일 경우 환경이 다르더라도 하나의 세척구간으로 정의하는 것을 제안하는 바이다.

다음으로, 세척구간 내 미소손실구간(곡관, tee 등)이 존재하지 않도록 세척구간을 정의해야 한다. 세척구간 내 미소손실구간이 존재할 경우 와류가 발생하게 되는데, 현재 널리 사용되는 상수관망 수리해석에서는 미소손실만 고려할 수 있고 와류에 의한 유속변화 영향을 정확하게 모의할 수 없으므로 수리해석의 정확도가 감소한다. 따라서 세척구간을 정의할 때 곡선구간이 최대한 존재하지 않도록 정의해야 한다.

마지막으로, 세척구간의 길이가 과도하게 길게 산정되지 않도록 세척구간을 정의해야 한다. 세척구간 내 환경이 동일 하더라도 구간이 길어질수록 시점과 종점에서의 유속이

동일하지 않게 된다. 반대로, 세척구간의 길이가 너무 짧을 경우에는 언급한바와 같이 제수밸브 조작, 소화전 개폐에 소요되는 시간 대비 세척되는 구간이 짧으므로 효율성이 떨어진다. 이를 고려하여 세척구간을 적절한 길이로 정의해야 한다.

마지막으로 세척구간들 간 순서를 결정해야 한다. 세척순서는 환경이 큰 세척구간부터 세척을 실시하며, 환경이 같은 세척구간들의 세척순서는 어느 구간을 먼저하더라도 큰 차이를 보이지 않으므로 실무자의 판단에 의해 결정한다.

2.2 소화전의 영향을 고려한 수리해석

플러싱공법을 통해 스케일을 효율적으로 제거하기 위해서는 정의한 세척구간 내 소화전에서 적정 유속을 확보하기 위한 유량의 방출 가능 여부를 분석해야하며, 이를 위해서는 소화전을 통과하며 발생하는 손실을 고려한 수리해석을 실시해야 한다. 이토밸브로 방출할 경우에는 소화전보다 구조가 단순하기 때문에 밸브개도에 따른 미소손실만 반영하여 수리학적 해석을 실시하면 된다.

상수관망의 대표적인 수리해석 방법에는 수요량을 기반으로 모든 절점에 할당된 수요량을 100% 공급할 수 있다고 가정하는 Demand Driven Analysis (DDA)기법이 있다. 그러나 DDA 기법은 정상운영상황 모의 시 높은 신뢰도를 보이나, 관로 파괴, 화재발생 등과 같은 비정상운영상황 모의 시에도 모든 절점에 용수를 100% 공급하여 부압과 같은 비현실적인 결과를 도출한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 유량과 압력간의 관계식을 통해 공급량을 산정하는 다양한 압력기반 모의 방안이 제안되었다. 본 연구에서는 Emitter Coefficient를 통해 압력기반 수리해석을 실시하여, 압력에 따라 공급량을 산정함으로써 압력 관련 비정상운영상황 또는 압력 부족 상황에 대한 모의 시 DDA보다 높은 신뢰도를 갖는 모델을 구축하였다. 플러싱 공법을 실시하게 되면 세척하고자하는 지역 내 소화전을 통해 정상운영상황보다 많은 양의 용수를 방출하게된다. 이에 정상운영상황보다 압력이 낮아지게되며, 플러싱 공법을 적용할 때 시간적 제한에 의해 여러 구역을 동시에 세척하는 경우 압력의 급격한 저하가 발생하므로, 이를 현실적으로 모의하기 위해서는 압력을 기반으로 유출량을 산정하는 수리해석을 실시해야한다.

수리해석을 통해 산정된 압력은 소화전을 통과하기 이전 상수관망시스템에서의 압력을 의미한다. Fig. 2는 소화전의 구조도를 나타낸다. 수리해석 결과 산정된 압력은 p_{before} 이며, 실제 소화전을 통해 방출되는 용수의 압력은 p_{after} 이다. 소화전은 배수본관보다 환경이 작은 급수관을 통해 용수를 방출시키며, 이 과정에서 추가적인 손실이 발생하므로 소화전을 통과하기 이전(p_{before}) 상수관망에서의 압력은 소화전을 통과한 이후 방출부에서의 압력보다 항상 크게 산정된다. 이는 수리해석 결과 산정된 압력 및 방출 가능한 유량이 실제 소화전에서의 압력, 방출 가능한 유량과 다를 수 있음을

의미하므로, 용수가 소화전을 거치며 발생하는 손실수두를 고려하여 압력을 산정해야만 실제 소화전에서의 방출가능한 유량을 산정할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 2. A Structure of a Hydrant in WDS

소화전에서의 손실수두를 고려한 수리해석 절차는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. Flow Chart for Hydraulic Analysis to Consider the Flow Condition through a Hydrant and to Determine Whether Flushing is Adequate or Not

먼저 소화전에 의한 손실을 고려하기 위해 소화전 유출부 직경에 따른 유량-손실수두 관계곡선을 선정하고, 소화전의 제원을 기입한 모델을 구축한다. 본 연구에서는 AWWA에서 제공하는 직경 2.5 in 소화전의 유량-손실수두 관계곡선을 이용하여 소화전에서의 손실을 고려하였으며, Fig. 4는 소화전에 의한 유량-손실수두 관계곡선을 나타낸다. Fig. 4(a)는 기존 BS단위의 관계곡선을 나타내며, Fig. 4(b)는 단위환산을 통해 SI단위로 환산한 관계곡선을 나타낸다.

소화전의 유량-손실수두 관계곡선을 선정하였으면, 상수관망 모델 소화전의 위치에 Fig. 2와 같이 절점, 관로를 추가하고 소화전의 고도, 소화전 급수관의 길이를 입력하여 소화전의 제원을 입력한 모델을 구축한다.

(a) BS unit

(b) SI unit

Fig. 4. Headloss-Flowrate Curve at a Hydrant (D65 mm)

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 한국소방공사에서 제공하는 옥외소화전의 표준규격을 통해 소화전의 제원을 설정하였다. 직경이 65 mm인 소화전의 급수관으로부터 방출부까지의 높이는 1,110 mm이며, 급수관의 길이는 A시 상수관망 내 소화전과 배수본관의 평균 길이인 7 m로 설정하였다.

이후 사전에 정의한 세척구간 및 세척순서를 확인하고, 세척구간 내 관경을 확인하여 적정 유속 확보를 위한 최소 필요 유량을 산정한다. 이후 유량-손실수두 관계곡선을 수리해석에 적용하기 위해 소화전에서의 손실이 소화전의 유량-손실수두 관계곡선과 일치할 수 있도록 Minorloss Coefficient를 선정하였다. Minorloss Coefficient는 소화전의 급수관으로 용수가 공급될 때 발생하는 급축소, 곡선구간, 밸브의 영향 등을 고려하여 추가적으로 발생하는 압력손실을 고려할 수 있게 해준다. 본 연구에서는 방출부 직경 65 mm 소화전에서 손실 및 유량간의 관계가 곡선과 같아지는 Minorloss Coefficient를 1.56으로 설정하였으며, Minorloss Coefficient 적용에 따른 수리해석 결과 유량-손실수두 관계곡선은 Fig. 6과 같다.

관경에 따라 소화전에서 최소 필요 유량이 결정되면, 소화

전을 통해서 방출할 수 있는 유량을 산정해서 방출가능유량이 플러싱에 필요한 최소필요유량보다 크게 되면 플러싱에 의한 관세척이 가능한 것으로 판단하였다. 문제는 소화전에서 방출할 수 있는 유량은 오리피스공식($v = \sqrt{2gh}$, g 는 중력 가속도 9.81 m/sec^2 , h 는 수두(m))에 의해서 결정되기 때문에 일반적인 DDA 해석에 의한 방법이 아닌 압력에 따른 유량을 계산해야 한다. 이는 스프링클러나 소방용수 가능량을 계산하는 것과 비슷한 수리학적 해석이 필요하다.

Fig. 5. Structure of the Hydrant (D65 mm) (Korea Fire Construction Association)

Fig. 6. Headloss-flowrate Relationship by the Minorloss Coefficient

이에 본 연구에서는 소화전 급수관에 Minorloss Coefficient를 적용하고, Emitter Coefficient를 통해 소화전의 손실을 고려한 수리해석을 실시하였으며 전술한 바와 같이 산정된 Minorloss Coefficient를 상수관 본관과 소화전 연결관에 적용하고 소화전절점에 Emitter Coefficient를 입력하고 세척구간별 수리해석을 실시한다. 소화전에서 적정 유속 확보

를 위한 최소필요유량과 방출가능유량을 비교하여 소화전에서 방출 가능한 유량이 최소필요유량보다 크다면, 해당 세척구간은 소화전을 통해 방출되는 유량에 의해 최소 0.9 m/s 이상의 유속을 확보할 수 있음을 의미하기 때문에 제안된 방법을 토대로 플러싱 공법 적용 계획을 수립할 수 있다.

그러나 압력 부족에 의해 소화전에서 방출가능유량이 최소필요유량보다 작을 경우, 이는 세척구간 내 적정 유속 (0.9 m/s)를 확보하지 못함을 의미하며, 실무자의 판단에 의해 적정 유속 기준을 낮추어 플러싱 공법 적용 계획을 수립하거나, 해당 구역에는 플러싱 공법 외의 다른 관세척 공법을 적용하는 등의 대안이 필요하다.

3. 상수관망에의 적용

3.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 A시 수원 인근에 위치한 일부 구역 (이하 A시)으로, 상세한 위치는 Fig. 7과 같다. 수원으로부터 12,215 CMD의 용수를 공급받으며, 29개의 절점, 31개의 관, 9개의 소화전, 17개의 제수밸브로 구성되어 있다. A시에는 유량은 아파트 단지 1개소와 복합상업시설 1개소가 위치하여, 수요량의 대부분을 차지한다. A시는 신규관망으로, 관망의 규모 대비 제수밸브, 소화전의 수가 많으며, 적절히 분포되어있어 플러싱 공법을 적용하는데 유리한 조건을 갖춘 지역이다. 이토밸브는 존재하지 않아서 소화전만으로 배수를 실시하였다.

Fig. 7. Layout of the Target Network

대상지역은 2018년 7월 아파트 저수조에서 적수사고가 발생한 이력이 있다. 3년간 닫힌 상태로 운용하던 관로를 개방함으로써, 관에 생성된 스케일이 아파트 저수조로 유입됨에 따라 적수사고가 발생하였다. 이와 같은 수질문제에 따른 반복적인 피해를 방지하기 위해 같은 해 11월 플러싱 공법을 실시하여 관내 침전물들을 모두 배출하였다. 그러나 소화전의 개도율을 작게 설정하여 충분한 유속을 확보하지 못чан 플러싱 공법을 실시하여 관 벽에 부착된 스케일이 박리되지 않은 채 플러싱 공법이 실시되었다. 그 결과, 통수와 정에서 갑작스런 취수에 의해 수충격이 발생하여 관 벽에 부착된 스케일이 박리되면서 2차 적수사고가 발생한 이력이 있다. 이에 본 연구에서는 제안한 절차에 따른 플러싱 공법을 해당 지역에 적용하여 세척구간을 정의하고, 세척구간별 적정 유속 확보가 가능한지 여부를 분석하였다.

3.2 세척구간 정의

A시의 경우 관망 시스템의 길이에 비하여 제수밸브의 수, 소화전의 수가 충분하며, 관로의 분기점 또는 곡선구간 전·후 등 적절한 위치에 제수밸브가 위치하여 세척구간을 정의하기에 유리한 특성을 갖는다. 세척구간 및 세척순서는 Fig. 1에서 제안한 절차를 따라 수립한다.

먼저, 주입점을 확인하여 블록단위에서의 세척 순서를 결정해야 한다. Fig. 8은 대상지역의 블록단위에서의 세척순서를 나타낸다. 대상 지역은 크게 2개의 블록으로 구분되며, 주입점을 포함하는 블록을 우선적으로 세척하고 인접한 블록을 후에 세척한다. 검은 색으로 표시된 관로는 말단부에 소화전이 위치하지 않아, 세척이 불가능한 지역을 나타낸다.

Fig. 8. Delineated Flushing Sections in the Water Supply Block

세척블록을 정의한 이후 세척블록 내 관로들에 대한 세척구간을 정의해야 한다. 세척구간을 정의할 때 세척구간 내 환경이 동일하게, 곡선구간이 존재하지 않게, 적절한 길이를 갖도록 선정해야하며, A시에 세척구간을 정의한 결과는 Fig. 9 및 Table 3과 같다. 세척구간A, B는 환경이 동일하며, 두 관을 하나의 세척구간으로 통합하더라도 길이가 지나치게 길어지지 않으나, 세척구간A와 B 사이에 곡선구간이

존재하므로 통합하지 않고 개별 세척구간으로 정의하였다. 세척구간C, D 및 E, F, G 또한 이와 같은 이유로 개별 세척구간으로 구분하였다. 세척구간D의 경우 하나의 세척구간 내 환경이 다른 관로가 하나의 세척구간으로 잡혀있음을 확인할 수 있다. 환경을 고려하여 세척구간D를 두 개의 세척구간으로 구분하게 되면, 세척구간의 길이가 100 m 이하로 감소하여 세척을 위한 소화전 및 제수밸브 개폐에 따라 작업의 효율성이 떨어진다. 이에 환경이 다르더라도 하나의 세척구간으로 정의하였다.

Fig. 9. A Result of Delineating Flushing Sections in the Target Network

Table 3. Properties of the Flushing Section

Block	Section	Diameter (mm)	Length (m)
First Loop	A	250	198.07
	B	250	375.73
	C	200	238.95
	D	200	145.83
		250	56.31
Second Loop	E	100	302.97
	F	100	344.09
	G	100	223.88

세척구간을 정의한 이후, 세척구간별 세척순서를 결정한다. 본 연구에서 세척순서는 환경이 큰 세척구간부터 작은 구간으로 결정하였으며 세척구간A~G순으로 결정하였다.

3.3 소화전을 고려한 수리해석 방안

세척구간을 정의한 이후 세척구간별 적정 유속 확보가 가능한지에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 이를 분석하기 위해 소화전에서의 손실을 고려한 수리해석을 실시하였으며, 플러싱 공법 적용 시 정상운영상황보다 많은 양의 용수를 단시간 내 사용하게 되므로 압력 부족현상이 발생할 우려가 있으므로 Emitter Coefficient를 적용하여 수리해석을 실시하였다.

Fig. 3에서 제안한 절차에 따라 수리해석을 실시하였다. 먼저, 각 세척구간별 환경에 따른 적정 유속 확보를 위한 최소 필요 유량(Q_{req})을 산정하였으며, 소화전에서의 손실수두를 고려하기 위해 소화전 급수관에 Minorloss Coefficient 값으로 1.56을 설정하여 소화전의 영향을 고려한 모델을 구축하였다. Fig. 10은 소화전의 영향을 고려하기 위해 기존의 관망에 소화전을 추가한 모델을 나타낸다. 표시된 절점 및 관로는 소화전 모델링을 위해 추가한 소화전 및 급수관을 나타낸다. 급수관의 길이는 A시 소화전 급수관 평균 길이인 7 m로 설정하였으며, 소화전의 고도는 기존 절점의 고도에 소화전 방출부까지의 높이인 1.11 m를 더한 값으로 설정하였다. 플러싱 공법 적용 시 모든 수용가를 단수시키므로, 소화전 이외에 모든 절점에서의 수요량은 0으로 설정하였다. 각 소화전의 Emitter Coefficient는 Water Supply and Waste Water Removal (Shammas and Wang, 2010)에서 제안한 Eq. (1)의 식을 Eq. (2)와 같이 CMH로 단위 환산하여 45.56으로 설정하였다. 해당 식은 실험을 통해 Fig 11과 같이 소화전 유출부에서의 압력과 유량을 측정하여 Emitter Coefficient를 도출하였다.

Fig. 10. The Modified Target Network for Hydraulic Analysis

$$Q = 242.42 \sqrt{p} \quad (1)$$

여기서, Q 는 유량(l/m), p 는 압력(kpa)

$$Q = 45.56 \sqrt{p} \quad (2)$$

여기서, Q 는 유량(CMH), p 는 압력(m)

이번 연구의 모든 단위는 SI 단위계를 사용하기 때문에 각 세척구간별 소화전 절점에서의 Emitter Coefficient를 45.56 (Eq. (2) 참조)으로 설정하고 수리해석을 실시하여 방출가능한 유량(Q_{avl}) 및 소화전에서의 압력을 산정하였다. 수리해석 결과는 Table 4와 같다.

Fig. 11. Use of Hydrant Pitot and Pressure Gage

Table 4. A Result of the Hydraulic Analysis for Flushing

Section No.	Q_{req} (CMH)	Q_{avl} (CMH)	Pressure (m)
A	159.0	241.72	28.1
B	159.0	229.59	25.4
C	101.8	205.79	20.4
D	159.0	209.42	21.1
E	25.4	82.13	3.2
F	25.4	56.65	1.5
G	25.4	94.27	4.3

수리해석 결과, 모든 세척구간에서 적정 유속 확보를 위한 최소 필요 유량보다 방출가능한 유량이 크게 나타났다. 이는 각 세척구간별 소화전을 통한 용수 방출 시 적정 유속(0.9 m/s) 이상의 유속을 확보 가능함을 시사한다.

A시 용수 주입점의 수압은 42.93 m로 적정 수압이 확보되어 있는 상태이며, A시는 고도차가 크지 않은 평지 지형이므로, 플러싱 공법 적용 시 전구간소화전에서 적정 압력이 확보되어 적정 유속에 필요한 유량을 방출할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 일부 지역의 경우 A시와 다르게 지역 내 고도차가 클 수 있으며, 주입점에서의 수압이 충분하지 않을 수 있다. 이에 본 연구에서는 용수 주입점의 압력을 20 m 감소시킨 모델을 구축하고, 플러싱 공법 적용 시 적정 유속 확보가 가능한지에 대한 분석을 실시하였다. 수리해석 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Result of Hydraulic Analysis (head -20 m)

Section No.	Q_{req} (CMH)	Q_{avl} (CMH)	Pressure (m)
A	159.0	174.21	14.6
B	159.0	164.75	13.1
C	101.8	150.20	10.9
D	159.0	147.13	10.4
E	25.4	57.64	1.6
F	25.4	39.70	0.8
G	25.4	66.21	2.1

주입점의 압력을 20 m 감소시킨 후 수리해석한 결과, 세척구간 A, B, C, E, F, G는 적정 유속 확보를 위한 최소 필요 유량보다 방출가능한 유량이 크게 산정되어 0.9 m/s 이상의 유속을 확보할 수 있으나, 세척구간 D는 방출가능한 유량이 적정 유속 확보를 위한 필요 유량보다 낮게 산정되어 적정 유속을 확보할 수 없다.

이처럼 필요 유량보다 방출가능한 유량이 작게 산정되면, 소화전을 통한 용수 방출 시 적정 유속을 확보하지 못함을 시사하며, 적정 유속의 기준을 낮추거나 다른 세척공법을 적용하는 등 실무자의 판단에 의한 대안책이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 세척구간을 정의하고, 소화전의 영향을 고려한 수리해석을 실시하여, 플러싱공법의 수립 절차를 제안하고 세척구간별 적정 유속을 확보할 수 있는지 수리학적 검토 방안을 제안하였다. 기존의 플러싱공법은 수질문제를 해결하기 위한 적정 유속에 대한 연구는 원활하게 진행되었으나, 실제 상수관망에서 적정 유속을 확보하기 위한 방안에 대한 연구는 미흡하여, 실제 플러싱 공법을 적용 시 적정 유속을 확보할 수 있는지 모의하는데에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 단방향 플러싱 공법을 위한 세척구간을 정의하는 방안을 제안하였으며, 각 세척구간별 적정 유속 확보 여부를 Minorloss Coefficient와 Emitter Coefficient를 통해 소화전의 영향을 고려한 수리해석을 통해 분석하였다.

제안하는 절차를 통하여 소화전을 통과하며 발생하는 수리학적 조건을 반영함으로써 실제 소화전을 통해 방출가능한 유량에 따른 적정 유속 확보 여부를 판단할 수 있다. 이를 통해 대상지역에 효율적인 플러싱 공법의 적용이 가능한지, 다른 관세척 공법의 적용이 필요한지 여부 등을 파악할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 적정 유속은 0.9 m/s로 기존의 연구 및 실험 결과를 기반으로 결정한 값이나, 실무자에 의해 더 낮은 유속에 의해서도 원하는 목표만큼의 세척이 가능할 것으로 판단될 경우 적정 유속 기준을 변경하여

플러싱 공법의 계획을 수립하는 것이 타당하다.

향후 연구에서는 세척구간별 순서를 정의할 때 제수밸브 및 소화전의 개폐 횟수 등 플러싱 효율화 지표를 고려하여, 플러싱 공법을 수립할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950002).

References

- American Water Works Association (AWWA). (1986). *Manual on maintaining distribution system water quality*. Denver, CO, USA.
- Antoun, E.N., Dyksen, J.E., and Hildebrand, D.J. (1999). Unidirectional flushing: A powerful tool. *Journal - American Water Works Association*, Vol. 91, No. 7, pp. 62-72.
- Bae, C.H., Choi, D.Y., Kim, J.H., and Kim, D.H. (2014). The assessment of self cleaning velocity and optimal flushing velocity in water distribution system. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 28, No. 4, pp. 441-451.
- Carrière, A., Gauthier, V., Desjardins, R., and Barbeau, B. (2005). Evaluation of loose deposits in distribution systems through unidirectional flushing. *Journal - American Water Works Association*, Vol. 97, No. 9, pp. 82-92.
- Cheon, S.B. (2014). *A study on the water velocity and drain direction for the effective particulate matter removal*. Master's thesis, Dankook University.
- Deuerlein, J., Simpson, A.R., and Korth, A. (2014). Flushing planner: A tool for planning and optimization of unidirectional flushing. *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 497-506.
- Friedman, M., Kirmeyer, G.J., and Antoun, E. (2002). Developing and implementing a distribution system flushing program. *Journal - American Water Works Association*, Vol. 94, No. 7, pp. 48-56.
- Kim, D.I., Cheon, S.B., and Hyun, I.H. (2015). A study on the removal of particulate matters using unidirectional flushing. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 29, No. 3, pp. 371-380.
- Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., and Villeneuve, J. (2010). Planning unidirectional flush-

- ing operations as a response to drinking water distribution system contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 6, pp. 647-657.
- Seo, J.W., Lee, G.S., Kim, K.B., Hyung, J.S., Kim, T.H., and Koo, J.Y. (2019). Comparative study on cleaning effects of air scouring and unidirectional flushing considering water flow direction of water pipes. *Journal of Korea Society of Water and Wastewater*, Vol. 33, No. 5, pp. 353-366.
- Shammas, N.K., and Wang, L.K. (2010). *Fair, Geyer, and Okun's, water and wastewater engineering: Water supply and wastewater removal* (3rd ed.). Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- State of Connecticut. (2006). *Water main design and construction guidelines*.
- State of Quebec. (2019). *Guidelines on drinking water distribution systems best practices*.
- The Town of Fort Frances. (2004). *Standard operating procedure for flushing of water mains*.

Received	July 21, 2020
Revised	July 22, 2020
Accepted	August 5, 2020