



상수도관의 물 흐름 방향을 고려한 공기주입 세척 및 단방향 플러싱 공법의 세척 효과 비교 연구

Comparative study on cleaning effects of air scouring and unidirectional flushing considering water flow direction of water pipes

서지원¹·이규상²·김기범¹·형진석¹·김태현¹·구자용^{1*}

Jeewon Seo¹·Gyusang Lee²·Kibum Kim¹·Jinseok Hyung¹·Taehyeon Kim¹·Jayong Koo^{1*}

¹서울시립대학교 일반대학원 환경공학과, 서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504

²서울특별시 상수도사업본부 시설안전부, 서울특별시 서대문구 서소문로 51, 03741

¹Department of environmental engineering, University of Seoul, 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

²The office of waterworks Seoul Metropolitan Government, Seodaemun-gu, Seoul 03741, Republic of Korea

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

ABSTRACT

This research proposes an optimal flushing operation technique in an effort to prevent secondary water pollutions and accidents in aged pipes, and to improve the cleaning effect of unidirectional flushing. Water flow directions were analyzed using EPANET 2.0, while flushing and air scouring experiments in forward and reverse directions were performed in the field. In 42 experiments, average residual chlorine concentration and turbidity were improved after cleaning compared to before cleaning. It was found that even when the same cleaning method was used, further improvement of cleaning effect was possible by applying air injection and reverse direction cleaning techniques. By means of one-way ANOVA(Analysis of variance), it was also possible to statistically verify the need of actively utilizing air injection and reverse direction cleaning. Based on correlation between turbidity and TSS, the total amount of suspended solids removal was estimated for 874 flushing operations and 194 air scouring operations. The result showed that air scouring used more discharge water than flushing by an average of 4.9 m³ yet with larger amounts of suspended solids removal by an average of 145.9 g. The result of analysis on turbidity values from 887 flushing operations showed low cleaning effect of unidirectional flushing for the pipes with diameters over 300 mm. In addition, the turbidity values measured during cleaning showed an increasing tendency as pipe age increased. The methodology and results of this research are expected to contribute to the efficient maintenance and improvement of water quality in water distribution networks. Follow-up research involving the measurement of water quality at regular time intervals during cleaning would allow a more accurate comparison of discharge water quality characteristics and cleaning effects between different cleaning methods. To this end, it is considered necessary to develop a standardized manual that can be used in the field and to provide relevant trainings.

Key words: Air scouring, Drinking water quality, Pipe cleaning, Uni-directional flushing, Water distribution network

주제어: 공기주입 세척, 먹는물 수질, 관 세척, 단방향 플러싱, 상수도 관망

Received 6 September 2019, revised 9 October 2019, accepted 10 October 2019.

*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

1. 서 론

우리나라의 상수도 보급률은 99.1%(Ministry of Environment, 2019)로 대다수 국민이 수도물을 공급받고 있으나 물탱크나 옥내 낡은 수도관, 냄새와 이물질 등의 사유로 수도물에 대한 불신을 가지고 있다. 이러한 불신을 해소하기 위해 특·광역시를 중심으로 고도정수처리 공정의 도입, 옥상 물탱크 철거 지원 사업, 노후 옥내급수관 교체 지원 사업, 노후 상수도관 교체 사업 등을 시행함으로써 수도물을 고급화하고 깨끗하고 안전하고 공급하기 위해 노력하고 있다. 하지만 고도정수처리된 수도물의 경우에도 원수 내 미세한 오염물질, 미세 활성탄, 관로 재질 등에 의한 다양한 물질이 존재하며(Mouchet et al., 1992), 상수도관 내에서의 다양한 수리적 거동으로 침전, 축적, 부유 등을 반복한다 (Gauthier et al., 2001; Vreeburg, 2007). 평상시 일정한 수압 및 유속 조건에서는 부유하여 배출되는 물질의 양이 적고, 먹는물 수질기준 내에 있어 직접적으로 인지하지 못한다. 하지만, 수계 전환 등 상수도관에 가해지는 각종 충격 및 급격한 수리 변화 시 침전된 다양한 물질들이 부유하여, 흑수, 적수 등의 형태로 배출되어 시민들의 수도물에 대한 불신을 가중하고 수질을 악화시키게 된다 (Gray, 1988).

상수도 관망의 효과적인 수질관리를 위해 단계적으로 플러싱 등의 세척을 통해 관 내 탁도 유발 물질을 제거하고 잔류염소의 감소 반응을 제어하는 방법, 수도물 공급과정에서의 수질 모니터링을 통한 소독제 농도 제어 및 탁도 관리, 관말 등 수질 취약 구역에서 드레인을 실시하는 방법 등을 검토해 볼 수 있다 (Friedman et al., 2003). 이 중에서 관 세척은 심미적인 수질 문제를 해결하는 데 주로 적용하며 착색의 원인이 되는 연질의 관내 침전물 및 부착 이물질을 제거하고 맛·냄새, 벌레 출현 문제 등을 해결할 수 있다. 또한, 관 내벽에 발달한 물때(슬라임)를 제거하여 통수능을 회복시킬 수도 있다. 상수도 관로에 일반적으로 활용되는 세척 공법으로는 플러싱, 피그 세척, 맥동류 세척(공기주입 세척), 아이스 피깅 등이 있다.

단방향 플러싱(Uni-directional flushing)은 밸브 조작을 통하여 세척 대상 관로에 유량을 집중함으로써 고유속을 유발하여 세척을 수행하는 방법이다. 단방향 플러싱은 수요가의 수도물 사용 제한을 최소화하고, 간단하고 신속하게 관로를 세척할 수 있는 매우 유용

한 방법으로 평가되고 있으며(Friedman et al., 2002), 주로 300 mm 이하의 관로 표면에 약하게 부착되었거나, 침전된 물질의 제거에 적합한 것으로 알려져 있다 (Carriere et al., 2005; Ronald et al., 1992). 따라서 주기적인 세척이 이루어지지 않으면 각종 물질이 관로의 수리적 특성에 의해 반복적으로 침전되고 세척에 사용되는 수도물이 다량으로 사용된다는 단점이 있다.

단방향 플러싱에 관한 기존의 연구들에서 탁질 및 녹물 민원이 잦고 잔류염소 농도가 상시 낮게 나타나는 관말 등 정체 관로에 대해 세척을 수행한 결과, 탁도 저감 및 잔류염소 농도 개선 등의 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다 (Ahn et al., 2008; Baek, 2010; Ko et al., 2011). 또한, 플러싱 배출수의 탁도가 TSS와 높은 상관관계를 나타내어 플러싱 작업 시 탁도의 측정을 통해 세척에 의한 고형물 제거 효과를 평가할 수 있으며(Ahn et al., 2008) 세척 종료 시점을 결정할 수 있다.

최근 우수율 제고 사업과 더불어 무단수 공급체계 구축 등의 목적으로 블록시스템을 도입하는 지자체가 증가하고 있으며, 이에 따라 배·급수관로의 구조가 수지상 관로에서 망목식으로 전환되고 있다. 기존의 수지상 관로에서는 플러싱을 수행하는 경우 세척 방향을 쉽게 결정할 수 있다. 하지만 망목식 관로에서는 고도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 플러싱을 수행하는 것이 세척 효과를 높일 수 있다고 보고된 바 있으나(Ahn, 2005), 고도 차이가 발생하지 않는 관로의 경우 물 흐름 방향을 파악하기 어려워 동일한 방법으로 세척을 수행하는 경우에도 효과에 차이가 발생하게 되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 평상시 물 흐름 방향을 고려하여 세척을 수행하는 경우 세척 방향에 따라 세척 효과의 차이를 비교하고, 플러싱 효과를 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

국내에서 상수도관의 플러싱은 2009년부터 본격적으로 수행되었으며, 최근 2015년 이후 세척 효과의 향상과 효율성 제고를 위해 공기주입을 이용한 세척방법이 시범적으로 적용되고 있다. 공기주입 세척(Air scouring)은 단방향 플러싱을 실시할 수 있는 수압과 관 내부 유속이 부족한 경우 별도의 장치를 이용하여 관 내부에 압축공기를 일정한 간격으로 주입함으로써 물과 고압의 공기가 혼합된 water slug(또는 수리적 피그)를 생성시켜 관 표면의 침전물 등을 제거하는 기술로 알려져 있다 (Vreeburg, 2007). 공기주입 세척 기술



은 압축공기와 물의 비율이 50:50이므로, 일반적인 플러싱에 비해 세척 수량을 절감할 수 있는 기술로 평가되며, 주로 200 mm 이하에 적용하고, 최대로 적용 가능한 관경은 300 mm로 보고된 바 있다 (Bae et al., 2015; Ellison et al., 2003; Vreeburg, 2007). 국내에서는 공기주입 세척 전·후의 관 내부 수질변화와 입자 거동 등 세척에 의한 침전물의 제거 특성과 수질 개선 효과에 대해 스와빙피그 세척 공법과의 비교 연구가 수행된 바 있다 (Bae et al., 2015).

하지만, 국내의 공기주입 세척에 관한 선행연구에서는 단일 관로에서의 세척 수행 결과를 토대로 공법의 세척 효과를 제시하고 있으며, 유사한 관로 조건(관경, 관로 연장, 매설연도)에서 세척 공법별로 세척을 수행하고 전·후의 수질 변화에 대해 비교·분석한 사례가 드물다. 또한, 단방향 플러싱의 경우, 평상시 물 흐름 방향을 고려하여 세척을 수행하는 경우 관내 퇴적물 제거 효과를 향상시킬 수 있음이 보고된 바 있으나(Ahn et al., 2011), 공기주입 세척의 경우 물 흐름 방향과 세척 방향을 고려하여 연구된 사례가 없다.

따라서, 본 연구에서는 상수도 관로의 효과적인 수질 관리를 위해 플러싱 효과 향상 방안으로 공기주입 방법과 물 흐름 방향을 고려한 세척방법을 실제 관로에 적용하여 그 효과를 검증하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상 관로 선정 및 세척 실험 설계

연구 대상 지역인 S 시에서 수행한 플러싱 1,040건, 공기주입 세척 277건의 세척시 전·중·후 수질측정 자료와 관로 현황 자료를 이용하여 수압, 관경, 매설연수에 따른 세척 공법별 세척 효과를 비교·분석한다. 이 중 Table 1과 같이 관로 연장, 구경, 매설연도, 수압 등의 조건이 유사한 42개 관로를 대상으로 수행한 플러싱과 공기주입 세척의 수질 측정 결과를 토대로 공법에 따른 세척 효과를 비교하고, 관망해석을 통해 평상시 물 흐름 방향을 분석하여 정방향과 역방향으로 세척을 수행한 두 가지 공법의 수질측정 결과를 비교·분석한다.

Table 1. Pipe specification and experiment design

No.	Diameter (mm)	Length (m)	Installation year	Average pressure (kg/cm ²)	Average velocity (m/s)	Discharge water (m ³)	Cleaning method	Cleaning direction
1	80	70	1988	4.0	0.26	159	Flushing	Forward
2	80	65	1991	4.0	0.08	177	Air scouring	Forward
3	80	55	1992	3.5	0.09	149	Flushing	Forward
4	80	60	1992	3.5	0.09	165	Air scouring	Forward
5	80	115	1989	3.2	0.15	158	Flushing	Reverse
6	80	85	1989	3.5	0.07	165	Air scouring	Forward
7	150	220	1988	5.4	0.04	226	Flushing	Forward
8	150	78	2001	5.4	0.04	226	Air scouring	Forward
9	80	110	1991	5.5	0.034	228	Flushing	Forward
10	80	58	1992	5.5	0.02	228	Air scouring	Forward
11	80	147	1988	3.0	0.36	169	Flushing	Forward
12	80	55	1992	3.0	0.26	169	Air scouring	Forward
13	100	45	1995	3.8	0.02	60	Flushing	Forward
14	100	43	1993	4.0	0.41	120	Air scouring	Reverse
15	80	72	1992	4.7	0.3	77	Flushing	Reverse
16	80	86	1992	4.1	0.04	73	Air scouring	Forward
17	80	68	1989	4.2	0.04	60	Flushing	Forward
18	80	41	1989	2.0	0.04	63	Air scouring	Reverse
19	80	100	1993	3.6	0.06	282	Flushing	Forward
20	80	75	1988	4.0	0.32	255	Air scouring	Forward

Table 1. Continued

No.	Diameter (mm)	Length (m)	Installation year	Average pressure (kg/cm ²)	Average velocity (m/s)	Discharge water (m ³)	Cleaning method	Cleaning direction
21	150	90	2006	2.7	0.16	288	Flushing	Reverse
22	150	90	2005	2.0	0.17	255	Air scouring	Forward
23	150	100	2004	3.2	0.07	251	Flushing	Reverse
24	150	100	2004	3.2	0.07	294	Air scouring	Forward
25	200	110	1999	2.3	0.43	48	Flushing	Forward
26	200	100	1999	2.3	0.11	45	Air scouring	Reverse
27	150	120	2000	3.5	0.22	49	Flushing	Reverse
28	150	116	2000	3.5	0.14	42	Air scouring	Reverse
29	80	70	1996	3.2	0.07	51	Flushing	Reverse
30	80	92	1996	3.2	0.07	42	Air scouring	Reverse
31	80	180	1985	3.0	0.11	161	Flushing	Reverse
32	80	75	1986	3.0	0.02	161	Air scouring	Forward
33	150	215	1993	3.0	0.49	126	Flushing	Forward
34	150	110	1996	3.0	0.31	172	Air scouring	Forward
35	80	70	1989	3.0	0.03	138	Flushing	Reverse
36	80	80	1989	3.0	0.16	138	Air scouring	Forward
37	100	110	1992	2.7	0.16	233	Flushing	Reverse
38	100	125	1992	2.8	0.21	201	Air scouring	Forward
39	100	90	1995	3.0	0.19	164	Flushing	Forward
40	100	80	1995	3.0	0.74	233	Air scouring	Reverse
41	80	95	1987	2.4	0.17	175	Flushing	Forward
42	80	103	1989	2.4	0.25	153	Air scouring	Forward

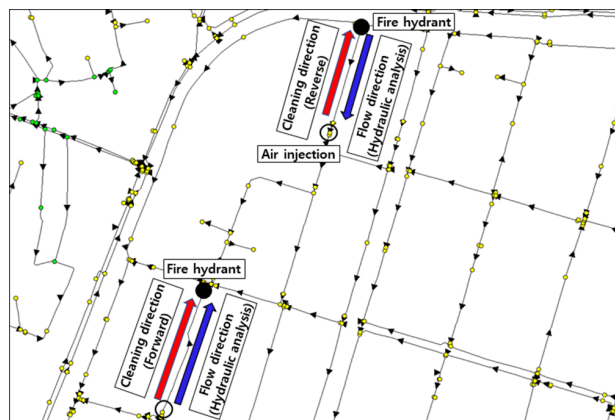


Fig. 1. Experimental design of forward flushing and reverse air scouring based on hydraulic analysis.

세척 실험 대상 관로의 물 흐름 방향은 EPANET 2.0 프로그램을 이용한 관망해석을 통해 분석하며, 세척 방향은 GIS 프로그램을 이용하여 소화전 또는 퇴수

밸브 위치를 고려하여 결정한다. 현장실험은 Fig. 1과 같이 관로 연장, 매설연도, 관경이 유사한 두 관로를 선정하여 물 흐름 방향의 순방향과 역방향으로 플러싱과 공기주입 세척을 수행할 수 있도록 설계하였다.

2.2 상수도 관로 세척 현장실험 방법

단방향 플러싱과 공기주입 세척 모두 소화전 또는 퇴수밸브를 이용하여 실시하며 소화전의 구경은 65 mm, 퇴수밸브의 구경은 80~100 mm이다. 공기주입구는 제수밸브실에 20 mm 새들분수전을 설치하며, 공기주입장치를 활용하여 공기를 주입한다. 플러싱을 실시하기 전에 단수 홍보 후 수도계량기의 앵글밸브를 닫아 가정에 적수가 유입되지 않도록 한다.

단방향 플러싱의 경우 세척 실험 대상 관로의 종점부 제수밸브와 주변 제수밸브를 닫아 세척 구간을 고립하여 수압을 확보하고, 소화전에 소방호스, 유량계



등을 설치하여 세척 준비를 완료한다. 본 연구의 정·역방향 단방향 플러싱 현장실험에서는 소화전에 수압 측정에 필요한 수압계 및 피토크를 별도로 설치하지 않고, 사전에 관망해석을 통해 세척 구간의 수압 확보가 가능할 것으로 판단되는 제수밸브의 위치를 검토하였으며, 현장에서 제수밸브의 조작으로 확보되는 관내 수압을 그대로 세척에 이용하였다.

중점 제수밸브를 제외하고 소화전과 유입지점의 제수밸브를 개방하여 관 세척을 개시한다. 세척 효과 및 종료 시점을 파악하기 위해 현장에서 측정 가능한 탁도와 잔류염소 농도를 세척 전·중·후에 측정하여 기록하며 탁도는 0.5 NTU 이하, 잔류염소 농도는 0.1 mg/L를 만족하면 세척을 종료하도록 한다. 세척 전 탁도와

잔류염소 농도는 세척 구간에 해당하는 인근 수용가의 수도꼭지에서 채수하여 3회 반복 측정하며, 세척 중에는 제수밸브 조작 및 소화전 개방으로 세척 개시 이후 5분 이내에 3회 측정한 평균값을 사용한다. 세척 종료 시점을 파악하기 위해 수시로 세척수를 채수하여 탁도와 잔류염소 농도를 측정하며, 두 항목의 측정값이 세척 종료 기준을 만족하는 시점에서 세척을 종료하고 측정된 값을 세척 후 수질로 기록한다. 또한, 세척수의 TSS, 무기금속 등의 분석을 위해 탁도와 잔류염소 농도 측정과 동일한 시점에 추가적으로 세척수를 채수하며, 세척 완료시 세척 수량과 시간을 기록한다.

정·역방향 공기주입 세척의 경우 공기주입구의 설치가 완료되면, 플러싱과 동일한 절차로 세척 구간을 고립하고 관로 내 수압을 확보한다. 관내 주입되는 압축공기에 의해 관로 파손이 발생하지 않도록 수압계를 설치하여 수압을 확인하며, 본 연구에서는 9.0 kg/cm²를 운영수압으로 설정하고 세척을 진행한다. 공기주입 장치는 Table 2와 같이 관경에 따른 압축공기 발생 장치 선정에 관한 가이드라인(Ellison et al., 2003)을 참고하여 180 L 용량으로 제작하여 실험에 활용한다.

Table 2. Selection method of air compressor capacity by pipe diameter

Division	Pipe Diameter	Proper capacity
Capacity selection criteria	100 mm	38 L/sec
	150 mm	59 L/sec
	300 mm	118 L/sec

Table 3. Field water quality measurement items and equipment specifications

Measurement items	Measuring instrument	Limit of determination	Accuracy	Water quality standard
Turbidity	2100Q Potable Turbidimeter	0~1000 NTU	±2%	below 0.5 NTU
Residual chlorine	Pocket Colorimeter II Cat No. 58700-00	Low Range : 0.02 ~ 2.00 mg/L High Range : 0.1 ~ 8.0 mg/L	±2 nm (wavelength accuracy)	above 0.1 mg/L
Fe	DR890 colorimeter	0~3.00 mg/L	±1 nm (wavelength accuracy)	below 0.3 mg/L
Cu	DR890 colorimeter	0~5.00 mg/L	±1 nm (wavelength accuracy)	below 1.0 mg/L
pH	pH Meter HQ11D	pH 0 ~ 14	±0.002	5.8~8.5

Table 4. Laboratory water quality measurement items and measuring methods

Measurement items	Measuring instrument	Measuring methods	Limit of determination
SS	-	ES 04303.1b	-
CODmn	-	ES04315.1a	-
Mn	ICP-OES (Optima 8300)	ES 04400.3c	0.002
Fe			0.004
Zn			0.002
Cu			0.006

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

1회 공기주입이 완료되면 제수밸브 또는 소화전의 개방으로 퇴수를 진행하며, 탁도 및 잔류염소 농도 측정 결과에 따라 2~3회 반복적으로 공기를 주입한다. 플러싱과 동일하게 세척 종료 기준을 만족하면 세척을 종료하도록 한다. 세척 전·중·후 탁도와 잔류염소 농도의 측정을 위한 채수 및 측정 방법은 단방향 플러싱과 동일하게 수행한다.

정·역방향 단방향 플러싱과 공기주입 세척 시 현장에서 측정하는 수질항목은 Table 3과 같으며, 실험실에서 측정하는 수질항목은 Table 4와 같다.

2.3 플러싱 수행 자료를 이용한 탁질 제거 효과분석 및 관리 방안 마련

8개 세척 실험의 세척시간별 탁도, TSS 측정 결과를 이용하여 탁도와 TSS 관계식을 도출하고, 세척시간별 TSS 측정 결과와 총 세척 수량을 토대로 각 실험에서의 탁질제거량을 계산한다. 연구 대상 지역인 S시의 2018년도 세척 수행 자료(플러싱 1,040건, 공기주입 세척 277건)를 이용하여 두 가지 세척 공법의 탁질 제거 효과를 분석하고, 연간 총 탁질제거량을 산정하기 위해 세척 시 측정된 전·중·후 탁도 값을 탁도-TSS 관계식을 활용하여 TSS 추정 농도로 환산한다. 실적 자료 중 세척시간과 퇴수량이 측정된 플러싱

874건과 공기주입 세척 194건의 자료를 이용하며, 세척 중 수질측정의 시점이 상이한 것으로 조사되어 세척 시작 후 5분이 경과된 시점에서 측정된 것으로 가정한다.

또한, 플러싱 수행 자료 중 세척 효과에 영향을 미칠 것으로 판단되는 관경, 매설년가 조사된 887건의 수질측정 데이터를 활용하여 영향요인별 플러싱 효과 향상이 가능한 최적의 관리 방안을 제안하고자 세척 중 탁도 측정 결과를 비교·분석한다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 세척 공법별 전·중·후 수질 측정 결과 비교 분석

2018년 10월에서 11월까지 21개 소블록에 대해 각 소블록마다 2개 관로를 선정하여 1개 관로는 플러싱을 실시하고 다른 1개 관로는 공기주입 세척을 실시하여 총 21개 소블록의 42개 관로에 대한 세척 전·중·후 수질측정 결과를 분석하였다.

Table 5는 21개 소블록의 42개 관로에 대해 실시한 플러싱과 공기주입 세척 실험의 전·중·후 수질 측정값의 평균, 최댓값, 최솟값을 나타낸다. Table 5에서 세척 배출수의 잔류염소 농도는 세척 전 평균 0.23 mg/L에서 세척 후 평균 0.28 mg/L로 21.7% 증가하는 효과를

Table 5. Comparison results of water quality by pipe cleaning methods

Measuring point	Water quality items	Minimum		Average		Maximum	
		Flushing	Air scouring	Flushing	Air scouring	Flushing	Air scouring
Before	Residual chlorine (mg/L)	0.10	0.10	0.24	0.23	0.39	0.37
	Turbidity (NTU)	0.11	0.10	0.25	0.27	1.19	0.85
	pH	7.00	7.00	7.20	7.20	7.60	7.40
	Fe (mg/L)	0.00	0.00	0.04	0.05	0.29	0.29
	Cu (mg/L)	0.00	0.00	0.02	0.03	0.09	0.09
In progress	Residual chlorine (mg/L)	0.13	0.07	0.22	0.22	0.38	0.40
	Turbidity (NTU)	0.43	0.92	9.85	26.16	84.50	183.00
	pH	7.00	7.00	7.22	7.29	7.60	7.70
	Fe (mg/L)	0.00	0.00	0.20	0.67	0.79	3.39
	Cu (mg/L)	0.00	0.00	0.03	0.10	0.08	0.78
After	Residual chlorine (mg/L)	0.14	0.13	0.28	0.28	0.43	0.41
	Turbidity (NTU)	0.09	0.06	0.15	0.15	0.26	0.24
	pH	7.00	7.00	7.23	7.24	7.60	7.50
	Fe (mg/L)	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.03
	Cu (mg/L)	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	0.04



보였으며, 탁도는 세척 전 평균 0.26 NTU에서 세척 중에 평균 18.01 NTU로 상승하였다가 세척 후 평균 0.15 NTU로 측정되어 0.11 NTU 개선되는 효과를 나타내었다. 철 농도의 경우 세척 전 평균 0.04 mg/L에서 세척 중 평균 0.44 mg/L, 세척 후 평균 0.01 mg/L로 나타나 평균적으로 0.03 mg/L 감소하였다. 또한, 구리 농도의 경우 세척 전 평균 0.02 mg/L에서 세척 종료 후 평균 0.01 mg/L로 감소하였다. 플러싱과 공기주입 세척의 세척 전·중·후 수질 측정값을 비교할 때, 세척 작업에 의한 수질 개선 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

플러싱의 경우 21개 관로 실험에서 세척 중 세척수의 평균 탁도가 9.85 NTU로 측정되었으며 공기주입 세척은 21개 관로에서 세척 중 평균 탁도가 26.16 NTU로 플러싱보다 2.7배 높게 측정되었다. 또한, 플러싱 실험의 세척 중 평균 철 농도는 0.20 mg/L, 공기주입 세척은 평균 0.67 mg/L로 3.4배 높게 측정되었다. 플러싱을 실시한 관로의 세척 전 평균 수압은 3.47 kgf/cm²이고 최대 5.51 kgf/cm², 최소 2.35 kgf/cm² 범위에 있으며 공기주입 세척의 경우 세척 전 평균 수압이 3.37 kgf/cm², 최대는 5.51 kgf/cm², 최소는 2.04 kgf/cm²로 플러싱에 비해 낮은 수압 범위를 나타내었다. 하지만 공기를 주입함에 따라 관내 수압이 9.0 kgf/cm²까지 상승하게 되어 유속의 증가로 관벽에 부착된 고형물을 더 많이 제거한 것으로 판단된다.

3.2 물 흐름 방향을 고려한 세척방법별 효과분석

본 연구에서는 평상시 물의 흐름 방향의 반대 방향으로 세척을 실시하는 경우, 관내 퇴적물의 제거 효과가 향상될 것이라는 가정으로 플러싱과 공기주입 세척에 대해 물 방향의 순방향과 역방향으로 세척 실험을 수행하고, 세척수의 수질측정 결과를 토대로 세척 효과를 비교·분석하였다.

8개 소블록을 대상으로 8개 관로는 물방향과 같은 순방향 플러싱을 수행하고, 8개 관로는 순방향 공기주입 세척을 수행한 결과 Table 6에서 보는 바와 같이 공기주입 세척에서의 세척 중 평균 탁도, 철, 구리 농도가 플러싱의 세척 중 평균값에 비해 각각 2.4배, 3.9배, 9배 높게 측정되어 세척 효과가 상대적으로 우수한 것으로 판단된다.

7개 소블록에서 7개 관로는 역방향 플러싱, 7개 관

로는 순방향 공기주입 세척 실험을 수행한 결과, 세척 중 탁도와 철 농도가 순방향 공기주입 세척(평균 탁도 6.64 NTU, 평균 철 농도 0.18 mg/L)에 비해, 역방향 플러싱의 세척수(평균 탁도 16.94 NTU, 평균 철 농도 0.23 mg/L)에서 높게 측정되었다. 이는 관벽에 평상시 물 흐름 방향으로 부착된 물때, 고형물, 슬라임 등이 역방향으로 높은 수압과 유속으로 세척을 수행함에 따라 떨어져 나온 것으로 판단된다.

4개 소블록의 8개 관로를 대상으로 4개 관로씩 순방향 플러싱과 역방향 공기주입 세척을 수행한 결과, 역방향 공기주입 세척의 경우 세척 중 평균 탁도가 89.53 NTU, 철 항목의 평균은 2.04 mg/L로 매우 높게 나타났다. 이는 공기주입으로 관내 압력이 9.0 kgf/cm²까지 상승하게 되어 퇴수를 진행하는 동안 관내 유속이 증가함에 따라 관벽에 부착된 고형물 등이 더 많이 제거되는 현상으로 판단된다. 또한, 평상시 물 흐름 방향의 역방향으로 세척을 수행하는 경우 세척 효과가 향상될 수 있음을 확인할 수 있다.

2개 소블록 내의 2개 관로는 역방향 플러싱을 실시하고, 2개 관로는 역방향 공기주입 세척을 수행하였다. 세척 중 평균 탁도를 비교한 결과 역방향 공기주입 세척 실험에서 39.29 NTU로 측정되어 역방향 플러싱보다 15.40 NTU 더 높게 측정되었으며, 철 농도의 경우에도 역방향 플러싱에서 0.50 mg/L, 역방향 공기주입 세척 시 0.72 mg/L로 측정됨에 따라 공기를 주입함에 따라 세척 효과를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

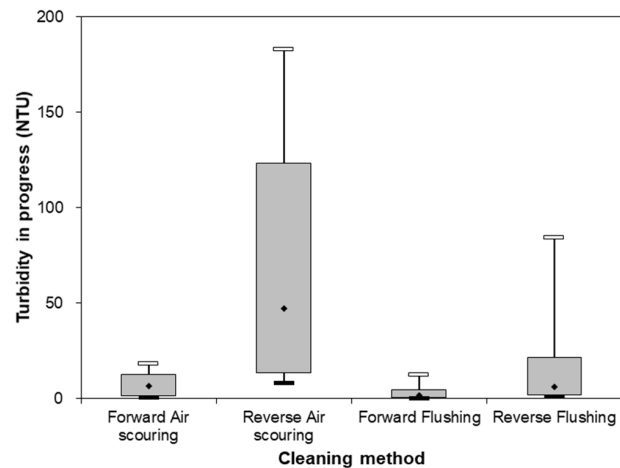


Fig. 2. Comparison of the turbidity values measured during cleaning according to cleaning methods and directions.

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

Table 6. Comparison results of flushing and air scouring experiments by directions

Measuring items		Forward Flushing	Forward Air scouring	Reverse Flushing	Forward Air scouring	Forward Flushing	Reverse Air scouring	Reverse Flushing	Reverse Air scouring
Number of experiment		8	8	7	7	4	4	2	2
Before	Residual chlorine (mg/L)	0.24	0.21	0.29	0.25	0.23	0.25	0.14	0.18
	Turbidity (NTU)	0.19	0.20	0.32	0.30	0.21	0.27	0.35	0.45
	pH	7.14	7.18	7.17	7.16	7.23	7.30	7.45	7.20
	Fe (mg/L)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09	0.09	0.16	0.17
	Cu (mg/L)	0.01	0.03	0.01	0.02	0.04	0.03	0.05	0.05
In progress	Residual chlorine (mg/L)	0.22	0.22	0.28	0.27	0.16	0.15	0.21	0.22
	Turbidity (NTU)	3.41	8.28	16.94	6.64	3.31	89.53	23.89	39.29
	pH	7.20	7.24	7.17	7.22	7.28	7.40	7.40	7.50
	Fe (mg/L)	0.10	0.39	0.23	0.18	0.18	2.04	0.50	0.72
	Cu (mg/L)	0.02	0.18	0.02	0.04	0.03	0.08	0.04	0.05
After	Residual chlorine (mg/L)	0.27	0.27	0.32	0.30	0.23	0.28	0.28	0.26
	Turbidity (NTU)	0.14	0.14	0.13	0.13	0.14	0.15	0.24	0.21
	pH	7.18	7.17	7.20	7.21	7.23	7.33	7.50	7.45
	Fe (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
	Cu (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03

21개 소블록의 42개 관로를 대상으로 물 흐름 방향의 순방향과 역방향으로 플러싱과 공기주입 세척을 수행하여 각각의 실험 조건에서의 세척 중 탁도 측정값의 분포를 Fig. 2와 같이 box-plot으로 나타내었다. 4가지 실험 결과를 종합적으로 비교해 볼 때, 물 흐름 방향과 동일한 순방향으로 세척을 수행하는 경우 공기주입을 통해 탁질 물질의 제거 효과를 향상시킬 수 있으며, 동일한 공법이라도 평상시 물 흐름 방향의 역방향으로 세척을 수행한다면 순방향에 비해 세척효과를

더 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 관로의 물방향 분석 및 현장 퇴수밸브 또는 소화전 설치여건을 파악한 결과, 평상시 물 방향의 역방향으로 세척이 가능한 경우에는 공기주입 없이 역방향 플러싱만으로도 세척 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 추가적으로 공기를 주입하는 경우 가장 큰 세척 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 역방향 플러싱을 적용하기 어려운 경우에는 순방향 플러싱보다 탁질 제거 효과가 큰 공기주입 세척



을 수행하는 것이 타당하다고 판단된다.

다만, 본 연구의 결과는 관로 연장, 밸브의 개도, 관망 내 세척 대상 관로의 위치, 평상시 유속 등 세척 효과에 영향을 미칠 수 있는 개별 인자들의 영향 정도를 평가하는 데 한계가 있다. 따라서, 추후 각각의 인자들의 영향도를 정량적으로 비교하여 평가할 수 있는 명확한 실험 조건의 설정과 반복 실험을 수행하여 세척 공법과 세척 방향에 따른 세척 효과를 비교·분석할 필요가 있다고 판단된다.

3.3 세척방법별 세척수 수질측정 결과에 대한 일원분산분석

21개 소블록에서 수행한 42건의 플러싱 및 공기주입 세척 수질 측정 결과를 이용하여 물 흐름 방향에 대해 순방향 또는 역방향으로 세척을 수행하는 경우, 세척 효과에 차이가 있는지 분석하기 위해 세척 방향과 공법을 구분하여 세척수의 탁도와 철 농도에 대한 일원분산분석을 실시하였다.

Table 7은 세척 공법별 세척 방향에 따른 세척수의 탁도 측정값의 기술통계를 나타내며, Table 8은 동일한 세척 공법에서 세척 방향에 따른 세척수 탁도의 분산분석 결과를 나타낸다. 공기주입 세척의 경우 세척 방향에 따라 탁도 측정 결과에 대한 차이가 없다는 영가설이 기각되어(유의확률 0.002) 측정 결과에

차이가 있는 것으로 분석되었으며, 평균 탁도 측정결과에서도 역방향에서 9.7배 높게 측정됨에 따라 순방향 공기주입 세척에 비해 효과가 높은 것으로 판단된다. 플러싱의 경우에는 95% 신뢰수준에서 유의확률이 0.080으로 유의수준인 0.05보다 높아 세척 방향에 따른 탁도 측정 결과 간에 유의미한 차이가 없는 것으로 분석되었다. 하지만 세척 방향에 따른 탁도 측정결과 역방향 플러싱의 평균값이 18.48 NTU로 순방향에 비해 5.47배 높게 측정됨에 따라 물 흐름 방향의 역방향으로 세척을 수행하는 경우 보다 효과적인 세척이 가능할 것으로 판단된다.

다음 Table 9는 물 흐름에 대해 세척 방향이 순방향 또는 역방향으로 동일한 조건에서 플러싱을 실시하는 경우 공기를 주입하는 것이 세척 효과를 향상시킬 수 있는지 검증하기 위한 일원분산분석 결과를 나타낸다.

순방향과 역방향 모두 95% 신뢰수준에서 세척 공법에 따라 측정된 탁도의 평균값에 유의미한 차이가 없는 것으로 분석되었으며, 90% 신뢰수준에서 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 물 흐름 방향에 순방향으로 세척을 수행하는 경우에는 공기를 주입함에 따라 세척 중 평균 탁도가 7.51 NTU로 순방향 플러싱보다 평균 4.13 NTU 높게 측정되어 관내 이물질 제거 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7. Results of basic statistical analysis on measured turbidity values according to cleaning methods and directions

Cleaning method	Cleaning direction	Count	Sum	Mean	Variance
Air scouring	Forward	15	112.69	7.51	44.01
	Reverse	6	436.68	72.78	5459.61
Flushing	Forward	12	40.54	3.38	16.00
	Reverse	9	166.34	18.48	790.50

Table 8. Results of the one-way ANOVA of measured turbidity values according to cleaning directions for individual cleaning methods

Cleaning method	Groups	Sources	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Air scouring	Forward / Reverse	Between groups	18256.39	1	18256.39	12.43	0.002
		Within groups	27914.14	19	1469.17		
		Total	46170.53	20			
Flushing	Forward / Reverse	Between groups	1173.23	1	1173.23	3.43	0.080
		Within groups	6500.03	19	342.11		
		Total	7673.25	20			

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

Table 9. Results of the one-way ANOVA of measured turbidity values according to cleaning methods for individual cleaning directions

Cleaning direction	Groups	Sources	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Forward	Air scouring / Flushing	Between groups	113.95	1	113.95	3.60	0.070
		Within groups	792.143	25	31.69		
		Total	906.09	26			
Reverse	Air scouring / Flushing	Between groups	10613.70	1	10613.70	4.10	0.064
		Within groups	33622.02	13	2586.31		
		Total	44235.72	14			

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

Table 10. Results of basic statistical analysis on measured Fe concentrations according to cleaning methods and directions

Cleaning method	Cleaning direction	Count	Sum	Mean	Variance
Air scouring	Forward	15	4.38	0.29	0.17
	Reverse	6	9.60	1.60	1.83
Flushing	Forward	12	1.50	0.13	0.03
	Reverse	9	2.60	0.29	0.08

Table 11. Results of the one-way ANOVA of measured Fe concentrations according to cleaning directions for individual cleaning methods

Cleaning method	Groups	Sources	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Air scouring	Forward / Reverse	Between groups	7.33	1	7.33	12.04	0.003
		Within groups	11.57	19	0.61		
		Total	18.90	20			
Flushing	Forward / Reverse	Between groups	0.14	1	0.14	2.79	0.111
		Within groups	0.94	19	0.05		
		Total	1.08	20			

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

또한, 역방향 플러싱의 경우 세척 중 평균 탁도가 18.48 NTU로 순방향 플러싱의 세척 중 평균 탁도인 3.38 NTU에 비해 5.5배 이상 크므로 공기를 주입하지 않더라도 충분한 세척 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 역방향의 경우에도 공기를 주입하는 경우 세척 중 평균 탁도가 72.78 NTU로 측정되어 역방향 공기주입 세척이 가장 효과가 높은 세척방법이라고 할 수 있다.

Table 10은 세척 공법별 순방향-역방향 세척 시 측정된 철 농도에 대한 기술통계를 나타내며, Table 11은 동일 세척 공법에서 세척 방향에 따른 세척수 철 농도의 일원분산분석 결과를 나타낸다.

Table 11에 나타난 바와 같이 공기주입 세척의 경우 철 농도에서 세척 방향에 따라 측정 결과에 차이가 있는 것으로 결과가 도출되었으며, 플러싱의 경우 세

척 방향에 따라 측정된 철 농도 사이에는 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의미한 차이를 확인할 수 없었다.

Table 12는 동일한 세척 방향에서 세척 공법에 따른 철 농도에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. 순방향인 경우 세척 공법별 철 농도 측정 결과, 95% 신뢰수준에서 유의미한 차이가 확인되지 않았으나, 역방향의 경우에는 공기주입 세척과 플러싱의 철 농도 측정값의 평균에 차이가 있는 것으로 분석되었다.

따라서 세척 공법과 세척 방향에 따른 탁도 평균값의 비교 결과와 연계하여 해석할 때, 세척 중 탁도가 높게 측정된 역방향 공기주입 세척의 경우 관내 탁질의 제거뿐만 아니라 덕타일 주철관의 부식에 의해 발생하는 녹, 스케일 등에 포함된 철 성분의 제거에도 효과가 있는 것으로 판단된다.



Table 12. Results of the one-way ANOVA of measured Fe concentrations according to cleaning methods for individual cleaning directions

Cleaning direction	Groups	Sources	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Forward	Air scouring / Flushing	Between groups	0.19	1	0.19	1.71	0.203
		Within groups	2.72	25	0.11		
		Total	2.90	26			
Reverse	Air scouring / Flushing	Between groups	6.19	1	6.19	8.22	0.013
		Within groups	9.79	13	0.75		
		Total	15.98	14			

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

3.4 세척수의 수질분석을 통한 탁질 제거 효과분석

본 연구에서 측정된 세척수의 탁도와 TSS의 상관관계를 분석한 결과, Fig. 3과 같이 결정계수(R^2)가 0.8328로 매우 높은 상관성이 확인되었다. 따라서 현장에서 탁도의 측정만으로 대상 관로의 세척에 고형물 제거 효과를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 13은 8개 현장 실험에 대해 세척 방법별 세척수의 TSS 측정 결과를 토대로 각 실험에서의 탁질제

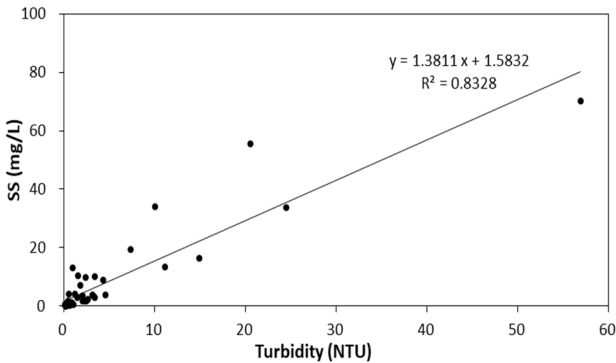


Fig. 3. Relationship between turbidity and TSS.

거량을 산정한 결과이며, 동일한 방법으로 S시 2018년 플러싱 및 공기주입 세척 실적에 대해 Table 14와 같이 세척공법별 탁질 제거량을 산정하였다. 플러싱은 874회 세척을 통해 총 144.29 kg의 탁질을 제거한 것으로 나타났고, 공기주입 세척은 194회 세척을 시행하여 총 79.49 kg의 탁질을 제거한 것으로 분석되었다. 총 탁질 제거량은 플러싱이 많지만, 1회 평균 탁질 제거량은 공기주입 세척이 플러싱에 비해 145.9 g 만큼 더 많이 제거할 수 있어 세척 효과가 상대적으로 우수한 것으로 판단된다.

1회 평균 세척시간의 경우 56.51분으로 플러싱에 비해 6.41분 더 적게 소요되나 1회 평균 퇴수량은 113.58 m³으로 플러싱보다 4.9 m³만큼 많이 필요한 것으로 나타났다. 플러싱 수행시 관내 평균 수압은 3.84 kg/cm²으로 조사되었으나 공기주입 세척의 경우 공기주입 시 관내 수압이 최대 9.0 kg/cm²으로 증가하게 되므로 동일한 65 mm 소화전으로 퇴수하는 경우 수압이 높아 더 많은 퇴수량을 배출하게 되기 때문으로 판단된다.

Table 13. Estimation of suspended solids removal according to cleaning methods

Cleaning method	Cleaning direction	Installation year	Pipe diameter (mm)	Pipe length (m)	Cleaning duration time (min)	Average discharge per minute (m ³)	Suspended solids removal (g)
Flushing	Forward	1987	80	95	17	2.188	227.72
		2000	150	120	18	0.408	16.37
	Reverse	1989	80	115	26	3.160	82.16
Air scouring	Forward	1989	80	103	31	2.186	1078.65
		2005	150	90	26	1.500	78.15
		1989	80	85	38	3.300	185.46
	Reverse	2000	150	116	28	0.420	393.04
		1992	100	75	45	2.822	478.93

pp. 329-339

pp. 341-351

pp. 353-366

pp. 367-377

pp. 379-388

pp. 389-394

pp. 395-404

Table 14. Results of estimating the amount of suspended solids removal based on the pipe cleaning data of S-city collected during 2018

Cleaning method	Number of experiment	Total cleaning duration time (h)	Total discharge (m ³)	1 time average cleaning duration time (min)	1 time average discharge (m ³)	1 time average suspended solids removal (g)	Total suspended solids removal (kg)
Flushing	874	917.95	94987.0	63.02	108.68	263.82	144.29
Air scouring	194	183.05	22033.5	56.61	113.58	409.72	79.49

현장 여건상 TSS의 측정이 어렵고 시간마다 퇴수량의 측정이 어려운 경우가 많으므로 비교적 쉽게 측정이 가능한 탁도와 세척 종료 후 누적 퇴수량의 산정을 통해 본 절에서 제시한 방법으로 세척에 의한 탁질 제거량을 산정하여 세척의 효과와 세척수 방류에 의한 하수관거 내 퇴적물 유입 정도를 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

다만, 앞서 언급하였듯이 세척 중 탁도 측정 결과를 세척 시작 후 5분이 경과한 시점으로 가정하여 계산한 결과이므로 추후 세척 시 탁도 측정 시점과 간격 등을 표준화하여 일정하게 측정한다면, 보다 정확하게 탁질 제거량의 산정이 가능할 것으로 판단되며, 세척 공법별 세척수의 수질 특성 분석과 세척 지속시간 및 세척 수량 절감에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 관로 조건별 세척 효과분석 및 관리 방안

3.5.1 세척 대상 관로의 구경별 세척 효과 비교 분석 결과

연구 대상 지역에서 1년간 수행된 887건의 플러싱 구간 중 80 mm 덕타일 주철관이 268건으로 가장 많은 비중을 차지하였으며, 전체 887건 중 87.75%가 150 mm 이하의 관로에서 수행되었다. 200 mm 관로는 120건, 300 mm 관로는 33건 플러싱이 수행된 것으로 확인되었다. Fig. 4는 관경별 세척 중 탁도 측정값의 분포를 나타낸다.

관경별 세척 중 탁도 측정값을 분석한 결과 최댓값은 80 mm에서 4.50 NTU로 가장 크게 측정되었으며 300 mm 관로에서는 0.90 NTU로 측정되어 관경이 증가할수록 탁도의 최댓값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 관경별 탁도 평균값의 경우에서도 200 mm를 제외하고 관경이 커질수록 감소하는 경향이 나타났다. 일반적으로 배수지에서 가까운 배수분관의 관경이 상대적으로 크고 수돗물의 공급 경로에 따라 배수지관, 관말에 가까워질수록 관경이 작아지며 탁도에 영향을 미치는 입자성 부유물질의 농도가 증가하는 경향이 있으므로(Kim et al., 2013), 세척 시 관 내부의

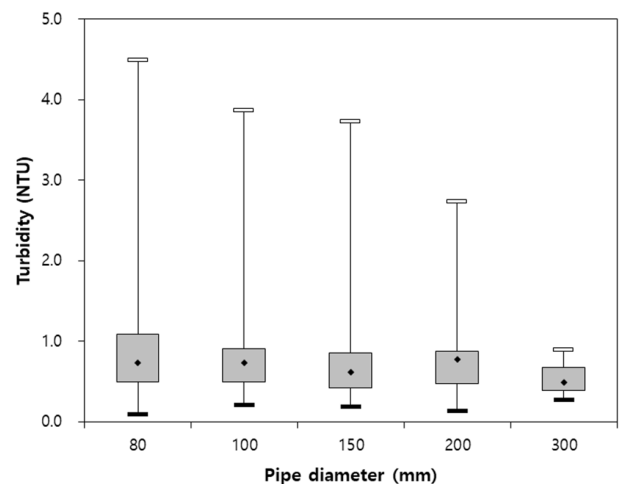


Fig. 4. Box plot of turbidity according to pipe diameters.

탁질 물질들이 외부로 배출됨에 따라 세척 중 탁도 측정값이 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 관경이 300 mm(12 in)보다 큰 대형관의 경우에는 퇴적물과 생물막 제거 등 세척 효과를 확보하기 위한 유속의 확보가 어려워 플러싱 공법의 적용이 효과적이지 않다고 보고된 바 있다 (Ellison et al., 2003). 따라서 세척 계획의 수립 시 300 mm 이상의 대형관의 경우 플러싱 이외의 세척 공법을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.5.2 매설 경과연수에 따른 플러싱 세척효과 비교분석

관로의 매설 경과연수 범위에 따라 세척 중 탁도 측정결과를 분석한 결과, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 경과연수가 증가할수록 최댓값과 평균값이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 관로가 노후화되어 관내 물때나 각종 탁도 유발 물질들이 증가하게 됨에 따라 세척 수행 시 탁도가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 매설 경과연수에 따른 세척 건수를 비교한 결과, 신관(5년 이하 : 11건)에 비해 노후관(26년 이상 : 379건)에서의 세척 수행 횟수가 상대적으로 많은

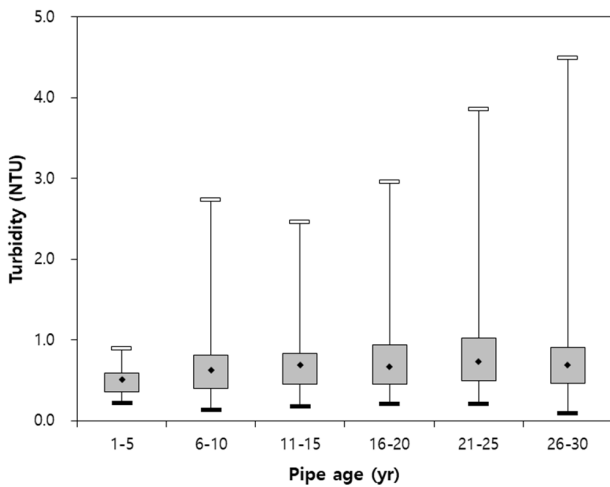


Fig. 5. Box plot of turbidity according to pipe ages.

것을 확인할 수 있었으며, 이는 S 시가 관망 내 수질 관리를 위해 노후관로에 높은 우선순위를 두고 있음을 간접적으로 확인할 수 있는 자료라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 관망 내 2차 수질오염을 방지하고 노후관에서의 적수 및 수질 사고 발생을 예방하기 위해 국내·외에서 가장 일반적으로 활용하고 있는 단방향 플러싱 세척 효과의 향상 방안으로 간헐적으로 공기를 주입하는 방법과 평상시 물 흐름의 역방향으로 세척을 수행하는 방법을 제안하였다.

현장실험을 통해 물 흐름 방향의 순방향 및 역방향으로 플러싱과 공기주입 세척을 수행한 결과, 순방향으로 세척을 수행하는 경우, 공기주입을 통해 탁질 물질의 제거 효과를 향상시킬 수 있었으며, 동일한 공법이라도 평상시 물 흐름 방향의 역방향으로 세척을 수행하는 경우, 세척 효과가 우수함을 확인할 수 있었다.

특히, 공기주입 세척의 경우 순방향과 역방향 세척 중 측정된 탁도와 철 농도의 평균값에 통계적으로 유의미한 차이가 확인됨에 따라 역방향 세척이 탁질 물질 제거와 철 농도 저감에 더 효과적인 것으로 판단된다. 또한, 역방향 세척의 경우 두 가지 세척 공법의 세척 중 측정된 탁도의 평균값에서 통계적으로 유의미한 차이가 확인됨에 따라 현장여건에서 역방향 세척과 공기주입이 가능한 경우, 적극적으로 활용할 필요가 있음을 통계적으로 검증하였다.

현장 세척 실험을 통해 탁도와 TSS 간의 높은 상관성($R^2 = 0.8328$)이 확인됨에 따라 현장에서 간편하게 측정이 가능한 탁도로 대체하여 관내 부유물질 및 탁질 제거 효과를 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 2018년 S 시의 관 세척 수행에 따른 총 탁질제거량을 분석한 결과, 플러싱에 비해 공기주입 세척 시 1회 평균 4.9 m^3 더 많은 세척수가 사용되었으나, 1회 평균 탁질제거량은 145.9 g 더 높게 나타나 공기주입 세척을 통해 관 내부 고형물 제거를 통한 효과적인 수질관리가 가능할 것으로 판단된다.

887건의 플러싱 수행 결과를 분석한 결과, 300 mm 이상의 관로에서는 플러싱에 의한 세척 효과가 낮으며, 관경이 작을수록, 매설 경과연수가 증가할수록 탁도가 높게 측정되는 경향이 나타났다. 따라서 추후 소블록 단위의 세척 계획 수립 시 상대적으로 탁질의 퇴적이 많이 이루어질 것으로 예상되는 배수지관과 관말지역의 매설 경과연수가 높은 노후관에 대해 우선적으로 세척을 수행하는 것이 바람직하며, 300 mm 이상의 관로에서는 플러싱 이외의 세척 공법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 방법론 및 연구의 결과는 향후 상수도 관망의 효율적인 유지관리와 수질 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 추후 세척 수행 시 일정한 시간 간격으로 수질을 측정한다면 세척수의 수질 특성과 세척 공법별 효과를 보다 정확하게 비교할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 현장에서 활용할 수 있는 표준화된 매뉴얼 개발과 교육이 필요하며, 향후 세척 수행 시 발생하는 고농도의 세척수 처리 기준 및 관리 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업(2016002120006)”으로 지원받은 과제입니다.

References

- Ahn, J.C. (2005). Optimal water quality management in water distribution system, Ph. D. Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, 192.

- Ahn, J.C., Lee, S.W., Baek, K.I., Choi, Y.J., Choi, J.H., Jeong, E.S., Park, H. and Koo, J.Y. (2008). Hydraulics and water quality characteristics of flushing in distribution pipes, J. Korean Soc. Water Wastewater, 22(1), 93-103.
- Ahn, J.C., Lee, S.W., Choi, K.Y., Koo, J.Y. and Jang, H.J. (2011). Application of unidirectional flushing in water distribution pipes, J. Water Supply Res. Technol., 60(1), 40-50.
- Bae, C.H., Lee, D.J., Choi, D.Y., Jun, H.J., Park, S.H. and Choi, T.H. (2015). An assessment of the effect of air scouring and swabbing pig cleaning technique on water distribution pipes, J. Korean Soc. Water Wastewater, 29(4), 459-468.
- Baek, K.I. (2010). Study on the improvement of water quality in the water supply system already in service using Flushing, Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, 77.
- Carriere, A., Gauthier, V., Desjardins, R. and Baebeau, B. (2005). Evaluation of loose deposits in distribution systems through unidirectional flushing, J. Am. Water Work. Assoc., 97(9), 82-92.
- Ellison, D., Duranceau, S.G., Ancel, S., Deagle, G. and McCoy, R. (2003). *Investigation of pipe cleaning methods*, AWWA Research Foundation, Denver.
- Friedman, M., Kirmeyer, G.J. and Antoun, E. (2002). Developing and implementing a distribution system flushing program, J. Am. Water Work. Assoc., 94(7), 48-56.
- Friedman, M., Martel, K., Hill, A., Holt, D., Smith, S., Ta, T., Sherwin, C., Hilterbrand, D., Pommerenk, P., Hinedi, Z. and Camper, A. (2003). *Establishing site-specific flushing velocities*, AWWA Research Foundation, Denver.
- Gauthier, V., Barbeau, B., Milette, R., Block, J.C. and Prevost, M. (2001). Suspended particles in the drinking water of two distribution systems, Water Sci. Technol. : Water Supply, 1(4), 237-245.
- Gray, J.F. (1988). "Pipe cleaning with foam pigs", *Proceedings of Cleaning and Lining Water Mains*, 11-14 September, 1988, Boston, USA, American Water Works Association.
- Kim, D.H., Lee, D.J., Hwang, J.S. and Choi, D.Y. (2013). Characteristic analysis and effect of particulate material in drinking water distribution networks, J. Korean Soc. Environ. Eng., 35(5), 312-320.
- Ko, K.H., Kweon, J.H., Kim, I.J. and Lim, W.H. (2011). Effects of flushing techniques on water quality at extremity with low chlorine residuals in drinking water distribution systems, J. Korean Soc. Water Wastewater, 25(3), 313-324.
- MOE(Ministry of Environment). (2019). 2017 Statistics of waterworks.
- Mouchet, P. (1992). From conventional biological removal of iron and manganese in France, J. Am. Water Work. Assoc., 84, 158-166.
- Ronald, A., Chadderton, G., Christensen, L. and Henry-Unrath, P. (1992). *Implementation and optimization of distribution flushing programs*, AWWA Research Foundation, Denver.
- Vreeburg, J.H.G. (2007). Discolouration in drinking water system: a particular approach, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, TU Delft, Delft, Netherlands.