



# 단방향 플러싱에 의한 입자성 물질의 제거에 관한 연구

## A study on the removal of particulate matters using unidirectional flushing

김두일·천수빈·현인환\*  
Dooil Kim·Subin Cheon·Inhwan Hyun\*

단국대학교 토목환경공학과  
Civil and Environmental Engineering, Dankook University

### ABSTRACT

Particulate matters in a water distribution system are main causes of turbidity and discoloration of tap water. They could be removed by conventional or uni-directional flushing in a water distribution system. The behaviors and required flow velocity of particles are not well known for their flushing. A model water main and hydrant were made from transparent acrylic pipe of 30mm and 16mm in diameter, respectively. We analyzed the effect of flushing velocity, particle density, and particle diameter. We found that the existence of break-through velocities at which particles begin to be removed, and which are affected by their physical properties. The removal efficiencies seemed to be influenced by resuspension capabilities related to their upward movement from the bottom. Heavy particles like scale were hard to remove through upflow hydrant because the falling velocity, calculated using Stokes' law, was higher. Particle removal efficiencies of upward hydrant and downward drain showed minor differences. Additionally, the length between hydrant and control valve affected flushing efficiency because the particulate matters were trapped in this space by inertia and recirculating flow.

**Key words:** Uni-directional flushing, Water distribution system, Particle resuspension, Drinking water quality, Drinking water discoloration

**주제어:** 단방향 플러싱, 상수관망, 입자 부상, 수질, 관망수질, 적수발생

## 1. 서론

수도꼭지에서 나오는 녹물은 수도물 소비자들에게 불쾌감을 주는 매우 민감한 이슈 중의 하나이다. 최근에는 수도물 수질에 대한 기대수준이 높아져서, 녹물이 발생하는 경우 시민들이 과거보다 더 민감하게 반응하는 경향이 있다. 2013년 수도물 홍보위원회의 수

도물 만족도 조사결과에 따르면, 수도물 음용시 불편사항으로 녹물이 10.4%의 비중을 차지하고 있었다(Lee, 2014). 녹물의 발생원인은 상수관망 안에 존재하는 50~100  $\mu\text{m}$  사이즈의 침적된 입자성물질이 관망에서 용출되어 수도꼭지를 통해 나오는 것으로 알려져 있다(Barkatt et al., 2009, Boxall et al., 2001). Echeverría 등(2009)은 상수관망에서 침적된 갈색의 침전물은 Alumino-silicates 화합물, 석영질(Quartz) 물질 및 유기화합물(휴믹산) 등으로 구성되어 있으며, 흰색의 침전물은 Calcite, 석영질(Quartz) 물질, Alumino-silicates 화합물, 휴믹산 등으로

Received 22 April 2015; Revised 9 June 2015; Accepted 11 June 2015  
\*Corresponding author: Inhwan Hyun (E-mail: ihhyun@dankook.ac.kr)

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

구성되어 있음을 FTIR 분석을 통해 보였다.

상수관망에 침적된 입자성 물질(Particulate Matters)은 원수나 정수 과정에서 기인한 것, 금속관의 부식에 의해 생성되는 것, 그리고 상수관망의 파손 부분이나 공사 중에 유입되는 것이 있다(Vreeburg et al., 2004, Kirmeyer et al., 2000, Slaats et al., 2002). 정수장에서 기인하는 입자성 물질은 정수장에서 입자성 물질을 불완전하게 처리하기 때문에 관망에 누적된다(Vreeburg et al., 2008). 이런 입자성 물질에는 모래 입자, 활성탄 입자 등이 있으며, 알루미늄염(Alum, PAC)을 사용하는 정수장에서 흘러나온 응집제의 영향으로 관내에 플록(Floc) 등의 침전물이 쌓인다(Mouchet et al., 1992). 상수관망 자체에서도 입자성 물질이 만들어 질 수 있는데, 수도관에서 접속부의 부식, 라이닝 물질의 탈락이 원인이다(Boxall et al., 2003, Slaats et al., 2002). 수도관 안에서 생물막이나 화학반응에 의해 입자성 물질이 생성되는 경우도 있다(Clark et al., 1993, Kirmeyer et al., 2000, Walski et al., 1991). 마지막으로 모래, 진흙 등의 입자성 물질이 관로 공사 중에 관망으로 유입되는 침입(Intrusion)과 같은 경우도 있다(Gauthier et al., 1996, Vairavamoorthy et al., 2007, Besner et al., 2011, Propato et al., 2004, Lindley et al., 2002). 관로의 교체 도중 토양이 섞여 들어가서 관망 내에서 축적이 이루어 지는 경우도 있었다(Carrier et al., 2005).

상수관망에서 침적된 입자성물질 등을 제거하기 위해 플러싱(Flushing)을 수행한다(Lehtola et al., 2004). 플러싱이란 수도관의 밸브, 수도관과 연결된 소화전, 수도전, 니트밸브 등을 조작하여 관 내부에서 흐르는 물의 유속을 증가시켜 관 내부를 청소하는 것이다. 플러싱은 입자성의 물질과 느슨한 침적물질(Loose Deposit)을 제거하기 위한 경제적인 방법으로 세계 여러 나라에서 시행되어지고 있다. 플러싱을 통해 상수관망에 침적된 침전물을 제거하면, 이취미 및 탁도 유발물질을 제거되어, 잔류소독제의 농도가 빨리 감소하는 것을 막아 줄 수 있다. 또한 플러싱을 통해 부분적인 생물막의 제거도 가능하다. 미국수도협회(AWWA)의 플러싱 기준에 따르면, 4~5년 마다 1회 이상의 플러싱을 실시하도록 권고하고 있다. 수질문제와 민원에 대한 예방적 조치로서 플러싱을 실시하면, 수질에 대한 민원발생이 감소하고, 수돗물의 신뢰도 향상에도 많은 도움이 될 수 있다.

대표적인 플러싱 방법에는 재래식 플러싱(Conventional Flushing)과 단방향 플러싱(Uni-directional Flushing)이

있다. 재래식 플러싱은 제수밸브를 잠그지 않고 소화전을 개방하여 물을 배출하는 방법이다(Friedman et al., 2002). 제수밸브를 조작하지 않기 때문에 작업이 간단하고, 플러싱 유속이 확보되는 경우에는 소수의 소화전 개방으로 보다 넓은 지역의 관망을 플러싱 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 재래식 플러싱은, 메인 수도관의 밸브를 차단하지 않은 상태에서 수행하기 때문에, 상수관망에서 유속이 낮아 플러싱에 필요한 유속을 충분히 얻지 못하는 경우도 있다. 또한 플러싱이 완료되지 않은 상수관망으로부터 물이 유입될 수 있기 때문에, 재오염의 가능성이 존재한다. 플러싱을 위해 필요한 요구수량이 많으며, 수질개선효과가 유지되는 기간이 짧은 단점도 있다.

단방향 플러싱은 메인관의 제수밸브들을 적절히 조작한 후, 관로속의 물을 소화전을 통해 배출하는 방법이다. 즉, 단방향 플러싱은 특정 관로구간을 제수밸브로 고립하여 물을 흘리기 때문에 플러싱 효율이 극대화되도록 높은 유속을 발생키는 것이 가능하다(Antoun et al., 1999, Carriere et al., 2005). 단방향 플러싱은 재래식 플러싱에 비해 소요되는 수량이 40% 이상 절약되는 장점이 있다고 한다. 단방향 플러싱은 제수밸브의 개폐가 수반되기 때문에 대상지역 내의 밸브에 대한 충분한 사전진단, 정확한 관망도와 수리학적 검토가 필요하다.

플러싱에 의해 관벽에 부착된 생물막, 부식부산물 및 침전물 등을 제거하기 위해서 유속이 중요한 운영 인자이다. 플러싱을 이용하여 모래(Silt) 및 침전물을 제거하거나 잔류염소요구량을 감소시키기 위해서는 0.9 m/sec의 유속이 필요하다(AWWA, 1986). 생물막의 제거, 침전물의 제거, 염소요구량 감소를 방지하기 위해서는 1.5 m/sec 정도가 필요하다(AWWA, 1986). Friedman 등은 pilot 규모의 실험을 통해, 관 표면에 약하게 부착된 침전물(Loose Deposit)을 효과적으로 제거하기 위해서는 0.72 m/sec 이상이 필요하고, 점착성 침전물에 대해서는 최소 1.2 m/sec 이상이어야 한다는 것을 보였다(Friedman et al., 2003). 배 등(2014)은 모형 상수관망을 이용한 실험을 통해 2 mm 이하의 GAC(Granular Activated Carbon)는 입자 크기와 관계없이 0.5 m/sec, 2 mm 이하의 모래입자는 0.88 m/sec, 0.425mm 이하의 철 부식 생성물은 0.88 m/sec 이상의 유속에서 완전 부유가 되는 것을 보였다(Bae et al., 2014).

상수관망의 하부에 침적된 입자가 소화전을 통해 제거되는 것은 Fig. 1과 같다. 입자가 먼저 관망의 하



부를 따라 흐르는 현상인 소류가 된 후, 관망의 바닥에서 상부로 이동하여 부유입자(Particle Cloud)가 된다. 다음, 소화전을 통하여 배출되어야 한다. 물이 흐를 때 관의 하부에 침적된 입자에는 소류력과 마찰력이 동시에 작용한다. 입자를 움직이게 하는 소류력(Tractive Force)이 모래입자를 움직이지 못하게 잡고 있는 마찰저항력 보다 크게 되면, 입자가 관의 하부를 따라 흐르기 시작한다. 침적되었던 입자가 관의 바닥을 따라 흐르는 소류를 시작하면 난류장(Turbulence Field) 안에서 유체의 와류(Swirling)에 의해 부상하여 탁질 구름(Particle Cloud)을 형성하게 된다. 상수관망에 침적된 입자가 관의 하부를 따라 흐르는 소류를 시작하는 유속은 입자의 밀도 및 직경에 따라 달라진다. 소류를 시작하는 유속(한계 유속)은 식 (1)과 같이  $u_{cr}$ 로 표시할 수 있다. 이 식에서 실드 계수(Shield Parameter)는 식 (2)와 같이 입자의 레이놀즈 값의 함수이며, Shield Diagram을 통해서 얻을 수 있다. 부유된 입자가 소화전을 통해 제거될 때, 소화전의 유속은 독립입자의 침강속도보다 커야 한다. 독립입자의 침강속도( $u_s$ )는 식 (3)과 같은 Stokes's Law를 이용하여 구할 수 있다.

$$u_{cr} = \sqrt{\Psi_{cr} \times g \times \Delta \times d} \quad (1)$$

여기서,

$\Psi_{cr}$  = Shield Parameter

$u_{cr}$  = Critical flow velocity (m/sec)

$g$  = 중력가속도 (m/sec<sup>2</sup>)

$\Delta$  = 상대밀도 ( $\rho_{particle} - \rho_{water}$ ) /  $\rho_{water}$

$d$  = 입자의 직경 (m)

$$\Psi_{cr} = \phi \left( \frac{u_{cr} \times d}{\nu} \right) \quad (2)$$

여기서,

$\nu$  : Kinematic viscosity (m<sup>2</sup>/sec)

$$u_s = \frac{d^2 \times (\rho_{particle} - \rho_{water}) \times g}{18 \times \mu} \quad (3)$$

여기서,

$\mu$  = Dynamic viscosity (kg/m/s)

$\rho_{particle}$  = 입자의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{water}$  = 입자의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

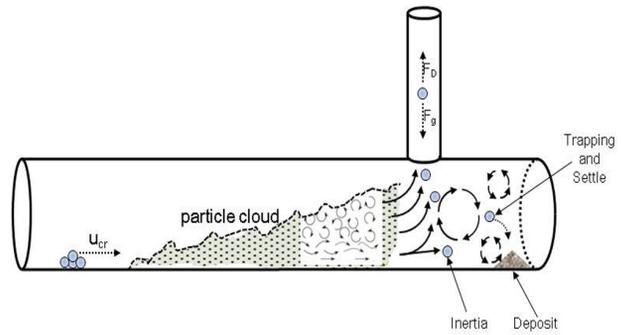


Fig. 1. Illustration for particle movement in the experimental system.

상수관망의 단방향 플러싱을 효율적으로 하기 위해서는 입자의 종류 및 물리적 성상에 따른 상수관망에서의 거동을 이해하여야 한다. 이 연구에서는 단방향 플러싱을 이용하여 관세척시 유속과 제거효율과의 관계에 대해 연구를 수행하였다. 특히, 입자의 제거가 시작하는 파과점 유속(Break-through Velocity)이 존재하는데, 이것에 영향을 미치는 인자에 대해 연구하였다. 또한 플러싱에 사용된 물의 배출을 위해 상향인 소화전 또는 하향인 퇴수밸브가 이용되는데, 상향배출과 하향배출시 입자의 제거효율을 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

실제 배관과 유사하게 투명한 아크릴을 이용하여 배관을 구성하였으며, 상향배출과 하향배출이 가능하도록 T자 모양의 분기관을 설치하였다. 실험장치는 Fig. 2에 나타나 있다. 실험 관로에는 유속을 0.6 m/s에서 3 m/s 까지 가능하도록 제어가 가능한 펌프를 설치하였다. 관망에서 유체가 안정상태에서 흐를 수 있도록 아크릴 관과 동일한 직경의 튜브를 약 3 m 통과 후, 아크릴 실험장치로 유입시켰다. 유속의 측정은 Kometer 사의 GSA-500 의 초음파 유량계를 사용하였다. 소화전에 의한 상향배출의 경우 배출관(Fig. 2의 C관) 길이를 실제 소화전의 토출높이와 비슷하도록 1.3 m 로 하였고, 니토편에 의한 하향배출의 경우는 C 관의 길이를 0.5 m 로 하였다. 본관의 관경은 30 mm이며 소화전 및 니토편의 관경은 16 mm였다.

pp. 293-303

pp. 305-317

pp. 319-323

pp. 325-335

pp. 337-345

pp. 337-357

pp. 347-357

pp. 359-370

pp. 371-380

pp. 381-393

pp. 395-406

pp. 407-414

pp. 415-425

pp. 427-436

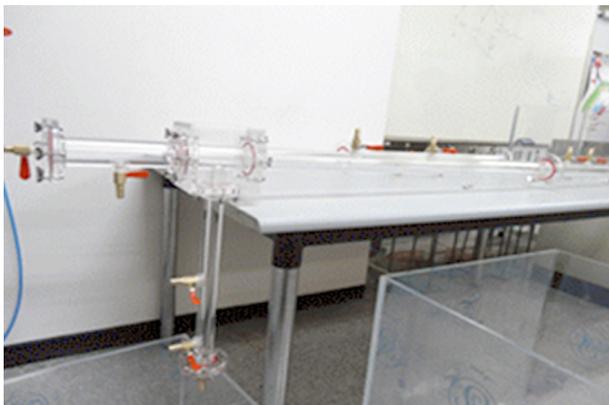
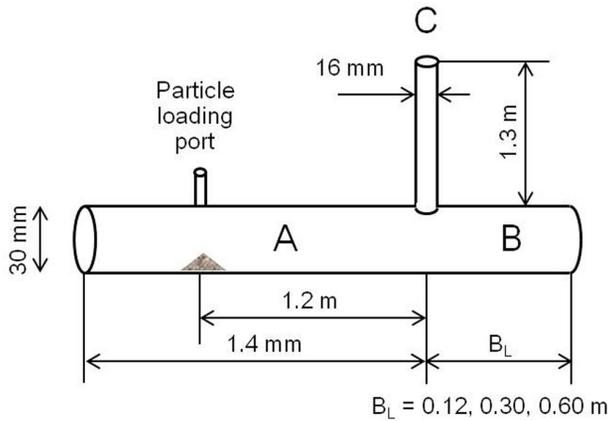


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus (left) and its photo (right).

## 2.2 탁질의 종류

실험에 사용된 입자성 물질은 모래, 안스라사이트, 및 실제 노후관에 생성된 스케일 물질을 그라인더를 이용하여 파쇄 한 것이다. 모래는 주문진 표준사를 사용하였으며, 비중은 2.6 에서 2.65 정도이다. 체에 남은 각 입자의 비율(%)을 Table 1에 보이고 있다. 노후관의 스케일 물질은 A 시에서 관망교체 공사에서 나온 폐관에서 직접 채취하였다. 실제 관으로부터 채취한 스케일을 Grinder로 갈아서 사용하였으며, 스케일 입자의 비중은 3.2에서 3.25였다. 스케일 입자의 입도분포는 150  $\mu\text{m}$  ~ 2.0 mm 사이였다. 안스라사이트는

Table 1. Residual fraction of particulate matters at each mesh

Mesh Size	Sand	Anthracite	Scale Particle
1.4 mm	0 %	30 %	20 %
1.0 mm	5 %	20 %	50 %
0.60 mm	95 %	20 %	20 %
0.15 mm	0 %	30 %	10 %

정수장에서 여과용으로 사용하는 것으로 비중이 1.4 에서 1.5 정도의 입자이다. 입도의 분포는 300  $\mu\text{m}$  에서 2.0 mm 사이였다.

## 2.3 실험 순서

실험유속은 탁질을 투입하기 전에 먼저 펌프를 가동하면서 밸브를 조작하여 메인관(B 관)과 상향/하향 배출관(C 관)의 유속을 조절하였다. 그 다음 펌프를 정지하고 입자성 물질을 주입구를 통해 투입하였다. 다시 펌프를 가동하여 입자성 물질이 상/하향 배출관을 통해 회수되는 실험을 수행하였다. 펌프를 정지하고, 배출관(C 관)과 메인관(B 관)에 설치된 스트레이너로 탁질을 회수하여 건조한 후 중량을 측정하였다. 탁질 회수용 스트레이너는 200 mesh(74  $\mu\text{m}$ )를 사용하였다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 유속이 입자성 물질의 단방향 플러싱에 미치는 영향

단방향 플러싱에서 유속에 따른 입자의 거동을 보기 위해, 밀도와 입경이 서로 다른 모래, 스케일, 안스라사이트를 이용하였다. 메인관(B관)의 제수밸브는 각각 소화전으로부터 흐름방향으로 0.12 m, 0.30 m, 0.60 m 떨어져 있다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 각각 소화전으로부터 B관의 제수밸브까지의 거리가 0.12 m, 0.30 m, 0.60 m인 경우 모래, 스케일, 안스라사이트 입자의, C관을 통한, 회수율을 보여주고 있다. B관은 완전히 차단이 되었기 때문에, 물은 A관에서 T자형 연결부를 통해 90도로 회전하여 C관을 통해서만 빠져 나갈 수 있고, A관과 C관의 유속은 관의 직경의 제곱에 반비례한다. Fig. 3에 따르면, 모래의 경우는 A관의 유속이 0.29 m/sec (C관 1.0 m/sec)가 일 때 까지 제거가 되지 않다가, A관의 유속이 0.32 m/sec (C관 1.12 m/sec)이 되면 갑자기 입자의 제거가 시작된다. 스케일 입자의 경우는 모래와 초기에는 비슷한 경향을 보이다가 유속이 빨라져도 상대적으로 모래보다 낮은 C관 제거율을 보였다. 안스라사이트의 경우는 모래나 스케일 입자보다 회수가 시작되는 시점의 유속이 낮을 것을 볼 수가 있었다. 이상의 결과에서 보는 것처럼 입자의 밀도와 입경은 C관을 통한 제거율에 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다. 세 가지 입자 모두에 대해



A관에서 유속이 낮은 경우는 입자의 제거가 전혀 이루어지지 않고 있다가, 유속이 파과점(Break-through Point) 보다 증가하면 갑자기 입자의 제거가 시작되는 것을 볼 수 있었다.

파과점 유속은 입자의 한계소류유속, 입자의 부상유속, 소화전인 C관의 유속에 영향을 받을 것으로 추측된다. 입자가 관의 바닥을 따라 움직이기 시작하는 한계소류유속(Critical Tractive Velocity)은 <식 1>에 의해 계산이 가능하다. 이 식에서 쉴드계수(Shield Parameter)는 쉴드곡선(Shield Curve)을 이용하여 구하였는데, 0.35~0.65 였다. 이 식에 의해 계산된 모래, 스케일, 안스라사이트 입자의 한계소류유속은 각각 0.04~0.11 m/sec, 0.04~0.12 m/sec, 0.02~0.05 m/sec이다. 이 값들은 파과점 유속에 비해서는 매우 작은 값들이었기 때문에, 한계소류유속은 파과점 유속에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그러나, <식 1>과 같은 한계소류유속의 계산법은 가상 하천에서 단일 입자층을 가정한 방법으로 구하는 것이기 때문에, 이 방법이 실제 관망에서 필요한 한계소류유속을 계산하기 적합한 방법이라고 판단하기는 어렵다. 실례로, 배등(2014)은 모형관망을 사용한 실험에서 직경 0.106~0.850 mm 모래입자의 한계소류유속은 0.07~0.195 m/sec 임을 보였다 (Bae et al., 2014). 직경 0.106~0.850 mm 모래입자의 한계소류유속을 <식 1>에 의해 구하면, 0.03~0.08 m/sec로 실험값보다 작음을 알 수 있다.

상수관망의 바닥으로만 입자가 움직인다면 단방향 플러싱에 의해 입자가 배출관으로 빠져나가는 것은 불가능할 것이다. 관의 하부를 이동하는 입자는 관의 바닥에서 상부로 난류확산(Turbulent Diffusion) 등에 의해서 부유(Suspension)하게 된다. 입자의 중력보다 난류의 유속변동에 기인하는 상부로 작용하는 힘이 클 때 입자가 부유할 수 있다. 이러한 입자의 수직이동은 난류의 확산작용과 관련이 있다. Fig 1.처럼 입자가 부상하여 입자구름(Particle Cloud)을 만드는데, 이것은 입자의 중력 때문에 관의 하부에서부터 형성되어 난류의 확산이송에 의해 서서히 입자구름의 높이가 증가하게 된다. 입자의 구름층 높이에 영향을 미치는 인자는 입자의 직경과 비중이다. C관에서 회수되는 입자의 양은 난류의 확산에 의해 부상하는 입자의 양과 관련이 있으므로, 안스라사이트와 같이 밀도가 작은 입자는 모래나 스케일 보다 낮은 유속에서 쉽게 제거가 되었던 것으로 보인다.

상향 소화전인 C관을 통해 배출되는 입자의 수직이송에 영향을 미치는 인자는 Fig. 1에서 보는 것처럼 입자의 부력(FB), 입자의 운동방향 저항력(FD), 입자의 중력(Fg)이다. 독립된 입자의 침전을 가정하고 모래, 스케일, 안스라사이트 입자의 부력, 중력, 운동방향 저항력(Drag Force)을 고려한 Stokes Law에 의해 각 입자의 침강속도를 예측해보면, Table 2와 같다. 모래의 침강속도는 0.319~0.885 m/sec 이고, 스케일입자는 0.027~2.374 m/sec 이고, 안스라사이트는 0.006~0.480 m/sec 이다. 이 때, 수온은 20 oC를 가정하였고 모래, 스케일, 안스라사이트 입자의 밀도는 각각 2.625 kg/L, 3.225 kg/L, 1.450 kg/L였다. Table 2 및 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에서 보는 것처럼 모래와 안스라사이트의 침강속도는 C관의 상향유속에 비해 작았기 때문에, 일단 C관으로 입자가 들어온다면 모래와 안스라사이트 입자는 쉽게 회수가 되었을 것이다. 예를 들면, 모래입자의 95%는 0.319~0.885 m/s의 침강속도이기 때문에 파과점에서 C관의 유속인 1.0 m/sec 보다는 훨씬 작은 값이다. 70%의 안스라사이트 입자도 최대 침강속도가 0.480 m/sec로 C관의 파과점 유속보다는 작은 값이다. 그러나 스케일 입자의 경우는 Table 2에서 전체 질량의 50%인 직경이 1.0~1.4 mm인 것들은 1.211~2.347 m/sec의 유속이 필요하고, 상위 20%인 1.4mm 이상의 입자는 2.374 m/sec 이상의 유속이 필요함을 볼 수 있으며, 하위 30%는 침강속도가 0.027~1.211 m/sec 정도로 침강속도가 파과점 유속보다

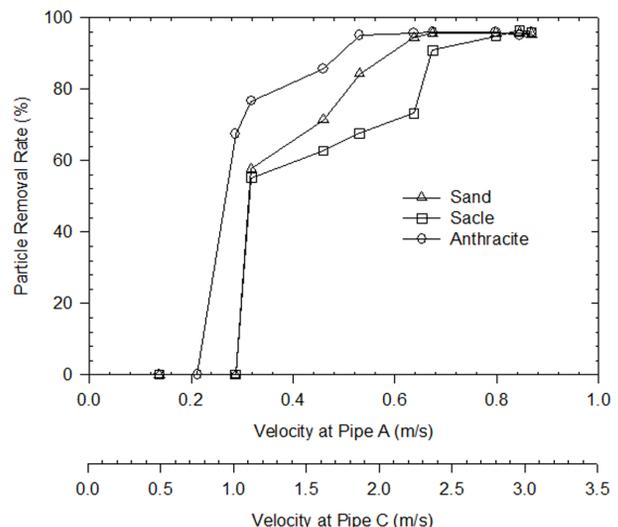


Fig 3. Particulate matters removal using 1.3 m upstream drain pipe C and 600mm pipe B in length

pp. 293-303

pp. 305-317

pp. 319-323

pp. 325-335

pp. 337-345

pp. 347-357

pp. 359-370

pp. 371-380

pp. 381-393

pp. 395-406

pp. 407-414

pp. 415-425

pp. 427-436

대부분 작았지만, 이 파과점 유속 이하에서 제거된 입자는 없었다. 따라서 단방향 플러싱에서 입자를 배출

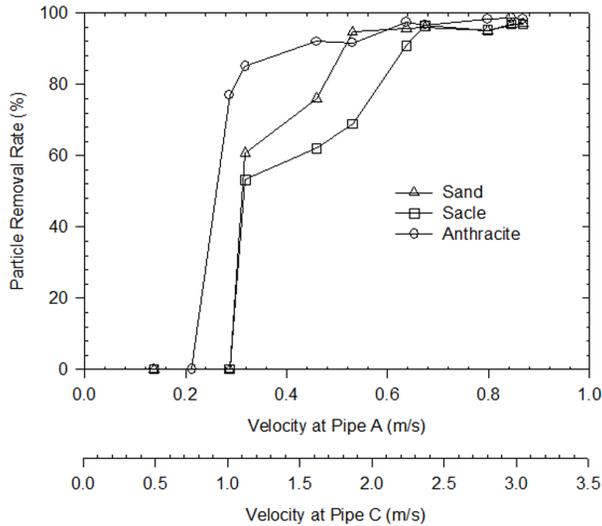


Fig. 4. Particulate matters removal using 1.3 m upstream drain pipe C and 300mm pipe B in length

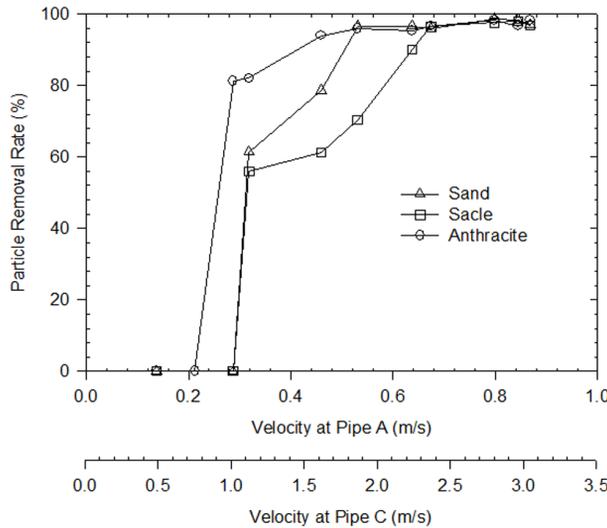


Fig. 5. Particulate matters removal using 1.3 m upstream drain pipe C and 120mm pipe B in length

관을 통해 수직으로 이송하는 것은 파과점 유속에 영향을 거의 미치지 않은 것을 알 수 있었다. 파과점 유속에 영향은 없었지만, 일부 큰 스케일 입자의 경우는 입자의 침강속도가 회수율에 영향을 미쳤다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에서 C관 유속을 기준으로 1.1~2.3 m/sec에서 모래보다 스케일 입자의 제거율이 다소 낮은 이유는 스케일 입자를 C관을 통해 상향 이동시키는 것이 모래보다 어려웠기 때문일 것으로 추측된다.

파과점 유속의 결정에 중요한 역할을 하는 것은 소류유속이나 침강속도가 아니라 난류확산에 의해 입자를 부상(Lift)시키는 작용인 것을 알 수 있었다. 배 등 (2014)의 연구에 따르면 모형관망에서 직경 0.106 mm 이하의 모래가 완전 부상하는데 필요한 유속은 0.62 m/sec (Bae et al., 2014)로 이 실험에 사용된 모래의 파과점 유속보다 높은 값을 보였다. 상수관망에서 난류확산에 의해 입자상 물질을 부상(Lift)시키는데 필요한 유속에 대한 연구는 많지 않았기 때문에 향후 이에 대한 연구가 더 필요 할 것으로 사료된다.

### 3.2 B관 길이가 입자의 제거에 미치는 영향에 대한 분석

메인관에 설치된 소화전에서 차단밸브까지의 거리(B관의 길이)는 입자상 물질의 단방향 플러싱에 영향을 미칠 수 있다. 상향배출 C관(1.3m)을 통해 입자를 제거하는 경우, B관의 길이에 따른 모래 입자의 제거 특성을 알아보았다. Fig. 6에서 B관의 길이가 길어질수록 모래는 더 적게 제거 되는 것을 볼 수 있다. 모래의 제거율은 B관의 길이가 0.12 m 와 0.30 m 일 때는 차이가 거의 없었지만, 600 mm인 경우는 제거율이 더 적은 것을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 이것은 Fig. 1에서 보는 것처럼 관성(Inertia)에 의해 모래 입자가 B관으로 들어가는데, 일단 들어가면 B관 내부에서 발생한 선회류(Circulation)에 잡혀 회전하다가 흐름이 약한

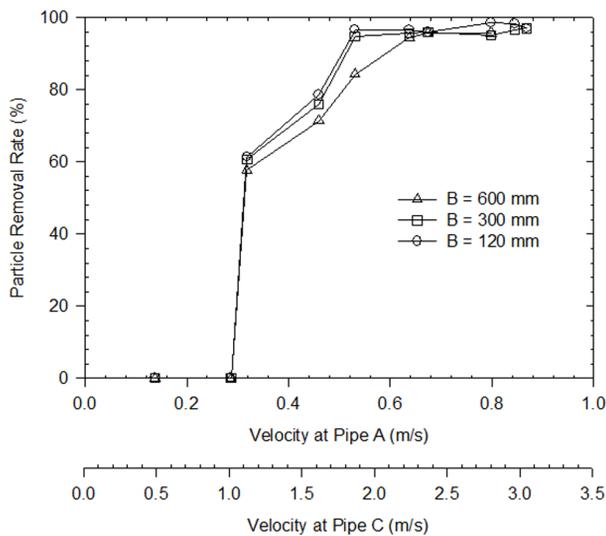
Table 2. Independent sedimentation velocity of particles by Stokes' law and residual fraction at each mesh

Mesh Size	Sand		Anthracite		Scale Particle	
	Velocity (m/sec)	Residual (%)	Velocity (m/sec)	Residual (%)	Velocity (m/sec)	Residual (%)
1.40 mm	1.734	0	0.480	30	2.374	20
1.00 mm	0.885	5	0.245	20	1.211	50
0.60 mm	0.319	95	0.088	20	0.436	20
0.15 mm	0.020	0	0.006	30	0.027	10

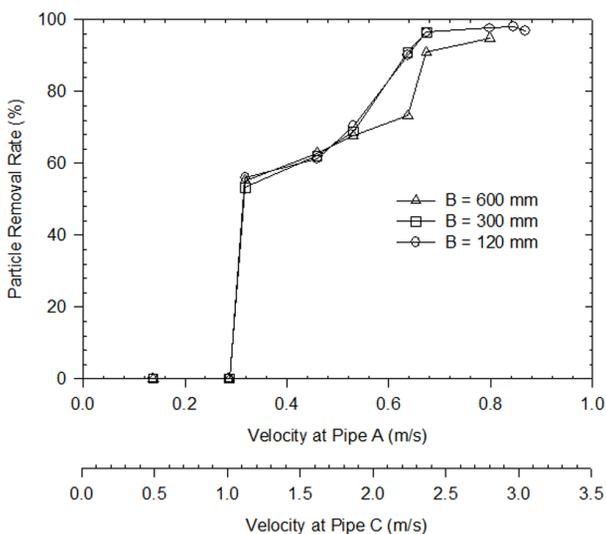


곳에서 침전되기 때문이다. 그러나 C관의 유속이 2.3 m/sec 정도가 되면, 길이에 관계없이 입자가 95% 이상 제거되는 것으로 나타났는데, 이는 B관 내부에서 발생한 선회류의 강도가 커서, B관에 들어간 모래가 다시 밖으로 빠져나올 수 있었기 때문이다.

상향배출 C관(1.3 m)을 통해 스케일 입자를 제거하는 경우, B관의 길이에 따른 제거율 비교하였다. Fig. 7에서 보는 것처럼 B관의 길이가 0.12 m 와 0.30 m인 경우, 모래입자와 유사한 움직임을 보였다. B관의 길이가 0.60 m인 경우는 C관 유속 1.86 ~ 2.80 m/sec



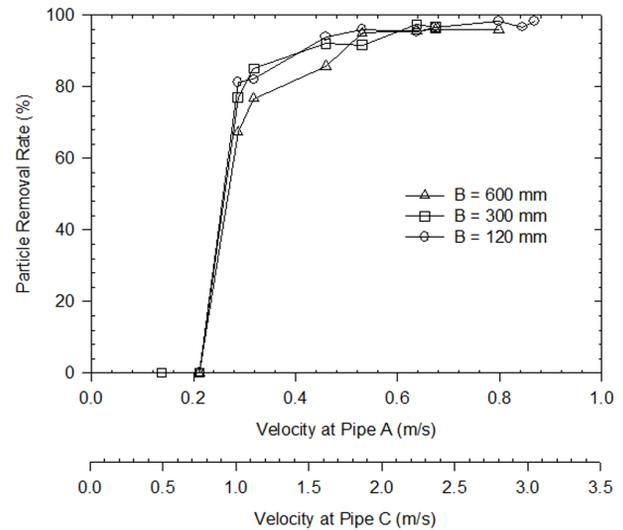
**Fig. 6.** Sand removal using 1.3 m upstream drain pipe C and pipe B in diverse length



**Fig. 7.** Scale particle removal using 1.3 m upstream drain pipe C and pipe B in diverse length

범위에서 제거율이 더 낮게 나타났다. 그 이유는, 스케일 입자의 경우도, 모래와 비슷하게 설명이 가능하다. 상향배출 C관(1.3m)을 통해 안스라사이트 입자를 제거하는 경우, B관의 길이에 따른 제거율은 Fig. 8과 같다. B관의 길이가 0.12 m 와 0.30 m인 경우는 서로 유사한 제거율을 보였지만, 0.60 m 인 경우에 C관 유속 1.11 ~ 1.86 m/sec 범위에서 제거율이 더 낮게 나타났다. 안스라사이트 입자의 경우도, 모래 및 스케일 입자와 비슷한 방법으로 설명이 가능해 보인다.

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8을 보면 C관에서 회수율이 세 가지 입자가 모두 100%에 미치지 못하는 것을 볼 수 있다. 이것은 입자가 B관에 Fig. 9에서 보이는 것처럼 입자가 침전되기 때문이다. 입자가 B관에서 발생한 선회류에



**Fig. 8.** Anthracite removal using 1.3 m upstream drain pipe C and pipe B in diverse length



**Fig. 9.** Sand particles deposited at the mouth of pipe B

pp. 293-303

pp. 305-317

pp. 319-323

pp. 325-335

pp. 337-345

pp. 347-357

pp. 359-370

**pp. 371-380**

pp. 381-393

pp. 395-406

pp. 407-414

pp. 415-425

pp. 427-436

**Table 3.** The removal rates of three particulate matters according to hydrant direction and length

Draw direction	Length (m)	Pipe A (m/s)	Pipe C (m/s)	Sand (%)	Scale (%)	Anthracite (%)
Upstream	1.30	1.01	3.56	95.9	95.2	96.3
Downstream	0.50	0.90	3.15	99.8	98.0	99.0

잡힌 후 흐름이 약한 곳에 침적되면, 유속을 증가시켜도 입자를 100% 제거하는 것은 불가능해 보인다. 제수밸브가 소화전에 가깝게 있다면, B관에 침적된 탁질의 양이 줄어들어 제거율이 향상에 기여할 것으로 보인다.

### 3.3 입자의 배출방향에 대한 연구

입자의 배출방향 (상향의 소화전 혹은 하향의 니토밸브)이 단방향 플러싱의 효율에 미치는 영향을 연구하기 위해 실험을 수행하였다. Table 3에서 보는 것과 같이 소화전을 통해 상향배출하는 경우는 A관과 C관의 유속이 각각 1.01 m/sec, 3.55 m/sec 였고, 니토밸브를 통해 하향배출의 경우는 A관과 C관의 유속이 각각 0.90 m/s, 3.15 m/s 였다. 1.3 m 길이의 상향 소화전을 이용하여 모래를 회수할 때와 0.5 m 길이의 하향 니토밸브를 이용하여 회수할 때의 최종회수율은 각각 95.9%, 99.8% 였다. 하향 니토밸브를 통한 배출이 약간 나은 제거율을 보였다. 스케일 입자의 경우 상향배출 및 하향배출의 최종회수율은 각각 95.2%, 98.0% 였다. 안스라사이트의 경우 상향배출 및 하방배출의 최종회수율은 각각 96.3%, 99.0% 였다. 스케일 입자와 안스라사이트 모두 상향배출에 비해 하향배출의 제거효율이 조금 더 우수하기는 하였으나, 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 니토밸브를 통한 하향배출의 효율이 조금 우수한 것은 관의 바닥에 형성된 입자의 이동양상(Movement Behavior)이 영향을 미치기 때문이다. 입자의 구름(Particle Cloud)은 입자의 밀도 때문에 수도관의 바닥 층으로부터 형성되므로, 수도관의 아래쪽에 입자의 농도가 더 높으므로 하향으로 배출하는 것이 입자의 최종회수율이 약간 더 나은 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

입자상 물질은 상수관망에서 탁질문제와 적수발생의 원인으로 알려져 있다. 이 연구에서는 입자상 물질의 밀도와 직경이 단방향 플러싱에 미치는 영향을 알

아보기 위해, 밀도와 직경이 서로 다른 모래, 스케일, 안스라사이트 입자를 이용하여 실험을 수행하였다. 모래, 스케일, 안스라사이트 입자는 각각 파과점 유속 (Breakthrough Velocity) 이상이 되어야 제거되기 시작한다는 것을 알 수 있었다. 이 파과점 유속은 입자가 관망의 바닥으로 움직이는 시작하는 소류유속, 침강속도 보다는, 입자를 난류확산에 의해 부상시키는 정도와 관련이 있었다. 비중이 큰 스케일 입자를 소화전을 통해 제거하는 경우 소화전에서 유지해야 하는 최소 한계유속을 Stokes's Law를 통해 계산이 가능하였다. 상수관에 연결된 소화전에서 제수밸브까지의 거리는 플러싱을 통한 입자의 제거율에 영향을 미칠 수 있었다. 이는 관성에 의해 B관에 진입한 입자상의 물질이 B관에서 빠져나오지 못하고 침적되었기 때문이다. 따라서 소화전에서 제수밸브까지의 거리를 가능한 짧게 설계하는 것이 플러싱에 유리할 것으로 보인다. 상향 소화전을 통해 단방향 플러싱액을 배출하는 것과 하향 니토밸브를 통해 배출하는 것을 비교하면, 하향배출이 약간 더 나은 제거효율을 보였으나, 제거효율 측면에서 큰 차이가 없었다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “차세대 EIS사업(코드번호 : GT-11-G-02-001-1)”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

Ahn, J. C., Park, K. I., (2005), Application of Flushing for Water Quality Improvement in Water Distribution System, *Journal of Korean Society of Water & Wastewater*, 19(11), pp. 66-77

AWWA, (1986), Manual on maintaining distribution system water quality, Denver, Colorado

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*, 28(4), pp. 441-451
- Barkatta, A., Pulvirentia, A. L., Adel-Hadadia, M. A., Viragha, C., Senftleb, F. E., Thorpeb, A. N., Grantb, J. R., (2009), Composition and particle size of super paramagnetic corrosion products in tap water, *Water Research*, 43, pp. 3319-3325
- Antoun, E. N., Dyksen, J. E., and Hildebrand, D. J. (1999), Unidirectional flushing: A powerful tool. *J. American Water Works Association*, 917, pp. 62-71.
- Besner, M. C., Preost, M., Regli, S., (2011), Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges, *Water Research*, 45, pp. 961-979
- Boxall, J. B., Skipworth, P. J., Saul, A.J., (2001), A novel approach to modelling sediment movement in distribution mains based on particle characteristics., *Proceedings of the Computing and Control in the Water Industry Conference*, De Monfort University, UK.
- Boxall, J. B., Skipworth, P. J., Saul, A. J., (2003), Aggressive flushing for discolouration event mitigation in water distribution networks. *Water Sci. and Technol. Water Supply* 3(1/2), pp. 179-186.
- Carriere, A., Gauthier, V., Desjardins, R., Barbeau, B., (2005), Evaluation of loose deposits in distribution systems through unidirectional flushing., *J. American Water Works Association*, 97(9), pp. 82-92
- Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M., Hess, A. F., (1993), Modeling contamination propagation in drinking water distribution systems. *J. Environ. Eng. ASCE* 119(2), pp. 349-354.
- Chadderton, R. A.; Christensen, G. L.; Henry-Unrath, P., (1993), Planning a Distribution System Flushing Program, *J. American Water Works Association*, 85(7), pp. 89-94
- Echeverría, F., Castaño, J. G., Arroyave, C., Peñuela, G., Ramírez, A., Morató, J., (2009), Characterization of deposits formed in a water distribution system, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 17(2), pp. 275-281
- Friedman, M., Kirmeyer, G. J., and Antoun, E., (2002), Developing and implementing a distribution system flushing program. *J. Am. Water Works Assoc.*, 947, pp. 48-56.
- Friedman, M., et al. (2003). Establishing site-specific flushing velocities, *AWWA Research Foundation*, Denver.
- Gauthier, V., Rosin, C., Mathieu, L., Portal, J. M., Block, J. C., Chaix, P., Gatel, D., (1996), Characterization of the deposits in drinking water distribution systems., *Proceedings of the Water Quality Technology Conference of American Water Works Association*
- Lee, H., (2014), Current perception for tap water and suggestions to promote its direct consumption., *March, Water Journal*, <http://www.waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=19295>
- Jang, M., *Biofilm Formation and Microbiologically Induced Corrosion in Water Distribution System.*, A doctoral dissertation, The university of Seoul, Republic of Korea, February 2009.
- Kirmeyer, G. J., Friedman, M., Clement, J., Sandvig, A., Noran, P. F., Martel, K. D., Smith, D., LeChevallier, M., Volk, C., Antoun, E., Hildebrand, D., Dyksen, J., Cushing, R., (2000), Guidance manual for maintaining distribution system water quality. Report No. 90798, *Research Foundation and American Water Works Association*, AWWA Denver, USA.
- Koizumi, A., (2005), The experimental study about the turbid matter motion in the conduit line, *Journal of Japan Water Works Association*, 74(11), pp. 2-12.
- Koizumi, A., (2005), The research on the interpretation of the flow field related to the turbid matter motion in the water pipeline, *Research Conference in the national capital research presentation handbook*, 56(5), pp. 368-369
- Lindley, T. R., Buchberger, S. G., (2002), Assessing intrusion susceptibility in distribution systems., *Journal of American Water Works Association* 94(6), pp. 66-79
- Markku J. L., Tarja K. N., Ilkka T. M., Pertti J. M., Terttu V., (2004), Removal of soft deposits from the distribution system improves the drinking water quality, *Water Research* 38, pp. 601-610
- Poulin, A., Mailhot A., Periche N., Delorme L., and Villeneuve J.P., (2010), Planning unidirectional flushing operations as a response to drinking water distribution system contamination, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Nov./Dec., pp. 647-657
- Propato, M. and Uber, J., *Vulnerability of Water Distribution Systems to Pathogen Intrusion: How Effective Is a Disinfectant Residual*, (2004), *Environ. Sci. Technol.*, 38, pp. 3713-3722
- Sadiq, R., Kleinera Y. and Rajania, B., (2006), Estimating risk of contaminant intrusion in water distribution networks using Dempster - Shafer theory of evidence, *Civil Engineering and Environmental Systems*, Special Issue: Papers selected from the Eighth International Conference on Computing and Control for the Water Industry, 23(3),

pp. 293-303

pp. 305-317

pp. 319-323

pp. 325-335

pp. 337-345

pp. 347-357

pp. 359-370

pp. 371-380

pp. 381-393

pp. 395-406

pp. 407-414

pp. 415-425

pp. 427-436

pp. 129-141

- Slaats, P. G. G., Rosenthal, L. P. M., Sieger, W. G., van den Boomen, M., Beuken, R. H. S., Vreeburg, J. H. G., (2002), Processes involved in generation of discoloured water. Report No. KOA 02.058, American Water Works Association Research Foundation/Kiwa, The Netherlands.
- Vairavamorthy, K., Yan, J., Harshal, M. G., Sunil, D., (2007), (2007), A GIS-based risk analysis tool for water distribution systems, *Environmental Modelling & Software*, 22, pp. 951-965
- Vreeburg, J. H. G., Schaap, P. G., van Dijk, J. C., (2004),

Particles in the drinking water system: from source to discolouration. *Water Sci. Technol.* 4(5/6), pp. 431-438.

- Vreeburg, J. H. G., Schippers, D., Verberk, J. Q. J. C., and van Dijk J. C., (2008), Impact of particles on sediment accumulation in a drinking water distribution system, *Water Research*, 42, pp. 4233-4242
- Walski, T. M., (1991) Understanding solids transport in water distribution systems. *Proceedings Water Quality Modelling in Distribution Systems*, AWWA Research Foundation, USA, pp. 305-309.