

정수처리 공정에서 연속식 입자계수기의 적용성 검토에 관한 연구

Discussion of Problems During the Application of the On-line Particle Counter In Water Treatment Process

문성용 · 김승현*

Moon, Seong-Yong · Kim, Seung-Hyun*

경남대학교 토목공학과

(2005년 1월 19일 논문 접수; 2005년 3월 28일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Errors may occur due to analysis methods and water quality during the application of the on-line particle counter in water treatment process. Errors caused by analysis methods include particle destruction by shear force due to inflow speed and tube friction, as well as interruption by screening, bubbles and contaminants. Since errors happen frequently because of these factors, it is necessary to examine and evaluate such errors during the application of a particle counter. Errors can be large due to screening and bubbles. Measurement values are valid for water analysis after filtration process. However, because of screening, only measurement values for particles above $7\mu\text{m}$ are valid for water with a turbidity between 3-10NTU. As particle numbers around $10\mu\text{m}$ increase a lot after ozone treatment, sufficient pretreatment process is necessary. Physical conditions should keep stable for inflow to decrease errors caused by shear force.

Key words: Particle counter, Water treatment, Screening appearance, Shearing force

주제어: 입자계수기, 정수처리, 스크린현상, 전단응력

1. 서론

입도분석기(Particle analysis) 또는 입자계수기(Particle counter)는 입자들의 분포를 크기별 또는 영역별로 나타내는 기기이다. 입자계수기의 종류는 현미경법(Microscopic examination), 전기적 감지영역법(Electrical sensing zone method), 빛의 흡수 또는 차단

법(Light-obscuration or Light-blockage method), 레이저산란법(Laser light-scattering method) 등이 상용화되어 있다(CHMTRC 1999).

정수처리에 입자계수기가 적용이 확대된 것은 1980년대 이후 미국과 일본 등에서 문제시된 병원성 미생물인 *Cryptosporidium*의 감시를 위해서이다. 기존의 탁도 측정법으로는 여과지에서 유출되는 일정 크기의 병원성 미생물의 유출을 발견하기 어려웠기 때

*Corresponding author Tel: +82-55-249-2671, E-mail: shkim@kyungnam.ac.kr (Kim, S.H.)

문에 크기별 입자 분포를 나타낼 수 있는 입자계수기의 적용이 필요하게 되었다 (AWWA, 1999; CHMTRC 1999).

최근의 국내 연구보고에서는 입자계수기를 이용한 정수처리공정 효율평가가 다양하게 이용되고 있다. 이미 다수 정수장에서 여과공정의 감시에 입자계수기를 적용하고 있으며, 응집, 침전, DAF(Dissolved air flotation) 공정 등의 설계분야 및 운전 특성 평가에도 이용되고 있다(한무영 등, 2002; 문성용 등 2003). 이처럼 입자계수기는 현탁 물질의 평균값을 표현하는 탁도계에 비해 크기별 또는 영역별로 구체적인 입자 분포를 표현하기 때문에 공정 내부에서의 입자 거동을 보다 정밀하게 나타낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히, 여과공정 이후의 저탁도 범위에서는 입자계수기가 더욱 높은 재현성을 가진다. 그러나 입자계수기도 측정 방법과 대상 수질에 따라 기기적 오차를 발생시킬 수 있다. 주요 측정 오차로는 유입흐름과 관마찰에 의한 전단파괴 현상, 스크린 현상, 공기와 내부오염물 등에 의한 방해 현상 등이 있다 (CHMTRC 1999).

전단파괴는 하나의 큰 입자가 기기의 측정지점 까지 이동하면서 두개 이상의 작은 입자로 파괴된다. 즉, 실제 입자수 보다 작고 많은 입자로 측정된다. 특히, 전단파괴 현상은 유입 펌프가 측정부 전단에 위치할 경우 대부분의 입자가 파괴되기 때문에 최근의 입자계수기 모델들은 이점을 보완하여 유입 펌프의 위치를 측정부 이후에 설치되도록 하고 있다. 스크린 현상은 상대적으로 큰 입자가 측정되면서 가려진 뒷부분의 작은 입자는 측정이 되지 않는 현상이다. 기타 오차로는 관내부의 오염이나 기포 등에 의한 측정값의 증가를 의미한다. 이처럼 입자계수기는 다양한 오차발생의 가능성을 가지며, 실제 정수공정에 이용될 경우 이러한 오차들에 대한 검증과 평가가 실시되어야 한다. 국내의 경우 스크린 현상에 대한 논의는 여러 차례 발표되고 있지만 이외의 오차 및 문제점에 대해서는 전혀 문제시하고 있지 않은 실정이다. 정수공정의 적용을 위해서는 사용기기 자체에 대한 충분한 검증과 적용방법이 마련되어야 한다.

본 연구에서는 정수공정 적용을 위한 연속식 입자계수기의 문제점을 제시하고, 실제 공정에 적용하기 위한 방법 제시를 목적으로 한다.

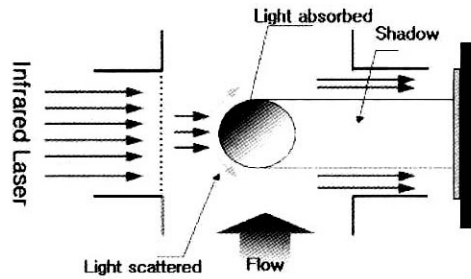


Fig. 1. Principle and structure of laser scattering.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 입자계수기

본 연구에 적용된 입자계수기는 Chemtrac사의 PC 2400PS 모델로 레이저 산란방식이며, 2~200 μm 의 측정 범위를 가진다. 또한, 온라인 방식으로 실제 정수장에 많이 사용되고 있으며, 수처리 연구에 가장 많이 이용되고 있는 모델이다. 기존 모델의 문제점으로 제시된 검출부 전단에 위치한 유입펌프에 의한 입자파괴 현상을 보완하여 유입펌프가 검출부 후단에 위치하고 있는 특징을 가지고 있다.

입자의 측정 범위는 현장에서의 예비실험 결과와 초기 적용 목적이었던 *Cryptosporidium*(4~6 μm), *Giardia*(8~12 μm)와 같은 병원성 미생물의 검출을 고려하여 2~7, 7~11, 11~20, > 20 μm 로 세분화하였다(대한상하수도학회, 1994). 실험에 사용된 연속식 레이저 산란방식 입자계수기의 측정 원리 및 구조를 Fig. 1에 제시하였다.

2.2 실험 재료

원수는 기기의 측정오차를 효과적으로 파악하기 위해 실제 정수장의 공정별 처리수와 실험실 조제수를 적용하였다. 전단파괴 현상과 스크린 현상의 검토는 조제수를 이용한 실험실 실험을 통해 조사하고, 실제 정수공정 적용성 평가를 위해 1일 400,000 m^3 규모의 광역상수도 시설을 대상으로 현장 조사를 실시하였다. 조제수는 무기성분인 Kaolin, Bentonite, 황토를 이용하였다.

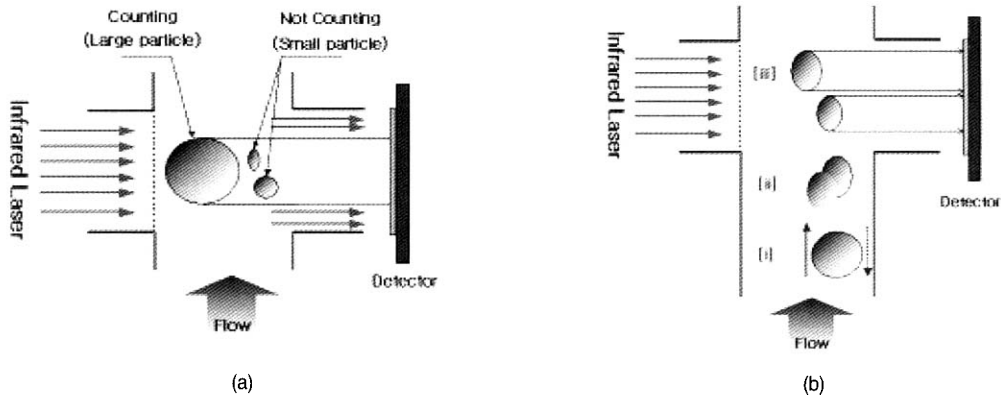


Fig. 2. Screen phenomenon (a) & Destruction by Shear force (b).

2.3. 실험 조건 및 방법

입자계수기 분석상의 문제점을 파악하기 위해 이미 알려진 스크린 현상, 전단파괴에 의한 오차, 기타 오염물에 의한 오차 등에 관한 실험실 실험을 실시하였다. 그리고 실제 정수장 적용성 조사를 위해 운영 중인 정수장을 대상으로 현장 실험을 실시하였다. 일반적으로 알려진 스크린 현상과 전단파괴의 형태를 Fig. 2에 나타내었다.

2.3.1. 스크린 현상

스크린 현상은 연속식 입자계수기의 적용에 있어 일반화된 문제점이다. 특히, 고탁도 시료의 측정값에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 스크린 현상의 관찰을 위해 무기성분인 Kaolin, Bentonite, 황토를 이용한 실험을 실시하였다. 무기성분을 적용한 이유는 전단파괴에 의한 오차가 상대적으로 낮기 때문에 스크린 현상을 효과적으로 나타낼 수 있다고 판단했기 때문이다. 또한 세 종류의 다른 입자크기를 가지는 무기물을 적용한 것은 입자의 평균 크기에 따른 스크린 현상의 특징을 구체적으로 나타내기 위해서이다.

입자 크기가 서로 다른, 세 종류의 무기물 일정량을 희석하여 탁도 100NTU로 제조하고, 일정한 완속 교반 조건에서 탁도와 입자수를 동시에 측정하였다. 이후 2~5배 희석을 반복하면서 탁도와 입자수 분포를 반복하여 측정하였다.

2.3.2 전단파괴 현상

전단파괴 현상에 대한 연구 자료는 거의 찾아 볼

Table 1. The experiment condition for destruction test by shear force

Tubing size (mm)	Q (mL/min)	Re (at 18)	V (cm/sec)
6	100	306	5.9
8	100	230	3.3

수 없지만, 결합력이 약한 응집 플록 등을 측정할 경우에는 반듯이 고려되어야 한다. 전단파괴는 대부분 유입펌프와 유입관 내부 관마찰에 의해 발생한다. 유입펌프에 의한 오차는 현재 적용되고 있는 대부분의 연속식 측정 장치의 유입펌프가 검출부 후단에 설치되어 있기 때문에 문제가 되지 않는다. 유입관 내부의 파괴 현상을 조사하기 위해 응집공정에 의해 입자의 크기를 키우고, 유입부로 유입시켜서 입자의 파괴를 관찰하였다. 원수로 하천수를 사용하였다. 응집 실험은 PHIPPS & BIRD사의 PB-900 모델을 사용하였고, 응집제는 황산반토(sodium sulfate, Alum) 30mg/L을 적용하였다. 교반조건으로 급속교반은 150rpm($G = 250\text{cm}^{-1}$)에서 1분간, 완속교반은 30rpm($G = 21\text{cm}^{-1}$)에서 5분간 실시하였다. 이후에는 20rpm($G = 12\text{cm}^{-1}$) 조건으로 일정하게 교반시켜 입자의 침전을 방지하였다.

유입관 내부의 입자 파괴는 관벽에서 발생하는 마찰력의 크기에 의해 결정된다. 일반적으로 마찰력은 관내부의 평균 유속의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 유입 유량을 동일하게 하고 유입부의 관경을 달리하여 유입관경 내부의 평균유속에 따른 입자 거동을 관찰하였다. 실험 조건과 수리

학적 특징을 Table 1에 제시하였다.

2.3.3. 기타 원인에 의한 오차

기타 원인에 의한 오차는 현장 조사과정에서 제시된 수중 기포에 의한 오차를 중점적으로 조사하였다. 정수공정에서 주입된 오존 등이 수중 미세 기포로 존재할 경우 발생할 수 있는 측정 오차를 현장조사와 실험실 실험을 통해 검정하였다. 그리고 미세기포에 의한 오차를 감소시킬 수 있는 방법을 일부 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

현재 많은 정수공정에 적용되고 있는 연속식 레이저 산란방식의 입자계수기를 대상으로 적용상의 문제점 파악을 위해 실험실 실험과 현장 조사를 실시하였다. 입자계수기의 문제점으로 제시되고 있는 스크린현상, 전단과파현상, 기타오염에 대하여 조사하였다. 문제점 파악과 검토를 통해 효율적 적용 방법을 제시하고자 하였다.

3.1. 스크린현상에 의한 오차

스크린 현상은 전술한 바와 같이 큰 입자에 의한 미세입자의 가림으로 인해, 작은 입자의 수가 실제보다 작게 측정되는 현상이다. 이 현상의 관찰을 위해 무기성분의 Kaolin, Bentonite, 황토를 이용한 조제수를 이용하여 실험을 실시하였다. 각 물질을 탁도기준으로 100NTU까지 용해시키고, 2~5배 희석을 반복하면서 탁도와 입자수를 조사하였다. 2회 반복 측정된 결과의 평균값을 Fig. 3~5에 제시하였다.

Fig. 3~5에 의하면 측정된 탁도 값은 최초 100NTU에서 희석 비율에 따라 일정하게 농도가 감소하였다. 반면 입자수는 입자 크기와 재료에 따라 다른 변화를 보였다. Kaolin의 경우 크기가 11 μm 이상인 입자는 희석을 거듭하면서 그 값이 점점 줄어들지만, 11 μm 보다 작은 입자들은 일정 농도까지 입자수가 증가하고, 이후에 감소하는 것으로 나타났다. 이들 중 크기가 2~4 μm 범위의 입자는 이론 탁도 값이 100NTU에서 0.5NTU 까지 감소하는 동안의 입자수는 감소하지 않고, 오히려 증가하였다. 이후 0.5NTU 이하에서 감소하였다. Kaolin 이외에도

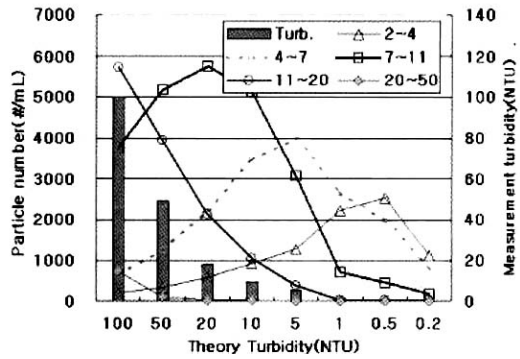


Fig. 3. Variation of particle number and turbidity at kaolin test.

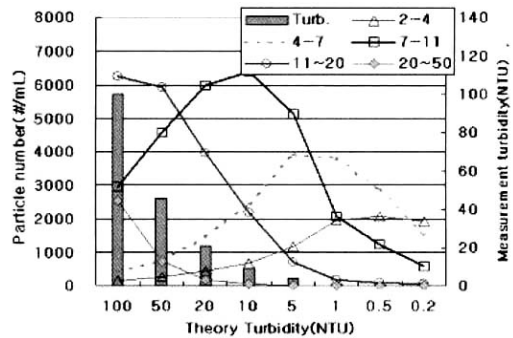


Fig. 4. Variation of particle number and turbidity at bentonite test.

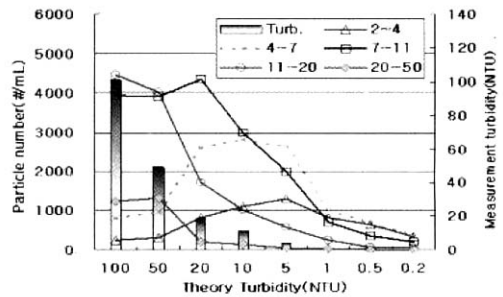


Fig. 5. Variation of particle number and turbidity at loess test.

Bentonite와 황토를 이용한 실험 결과에서도 이러한 현상이 관찰되었다. 세 종류의 무기물 실험에서 고농도의 시료를 측정할 경우 상대적으로 작은 입자는 측정되지 않고 가려진다는 것을 알 수 있었다. 고농도 시료를 측정할 경우 일정 크기 이상의 측정값만이 신뢰성을 가진다고 할 수 있다. 따라서 실험결과를 바

Table 2. Maximum turbidity for effective particle number with different particle size

[unit: NTU]			
size(μm)	Kaolin (4.9 μm)*	Bentonite (9.0 μm)	Loess (15.0 μm)
2~4	2.5**	0.6	6.4
4~7	6.1	3.3	12.4
7~11	40.5	13.9	33.1
11~20	100.0	100.0	100.0
20~50	100.0	100.0	100.0

* average particle size

** maximum turbidity: the point when particle number decreases

탕으로 한계측정 범위를 결정하여 **Table 2**에 제시하였다.

Table 2에서 한계측정 범위는 각 크기의 입자가 감소하기 시작하는 이론 탁도를 기준으로 결정하였다. 즉, 벤토나이트의 경우처럼 4~7 μm 크기의 입자는 탁도 3.3NTU까지는 입자수가 증가하지만 3.3NTU 이하에서 입자수가 감소하고 있다. 따라서 벤토나이트 4~7 μm 크기의 한계측정 범위는 약 3.3NTU라고 할 수 있다.

Table 2에 의하면 2~4 μm 크기의 입자는 황토의 경우 6.4NTU 이하에서 적용이 가능하다는 것을 의미하게 된다. 또한 크기가 11 μm 이상인 입자는 최대 이론 탁도인 100NTU 영역까지 적용이 가능한 것을 의미한다. 즉, 입자계수기에 의해 측정된 값은 입자 크기와 탁도에 의해 적용성이 평가되어야 한다고 말할 수 있다. 정수처리에 입자계수기를 적용할 경우 평균 탁도가 1NTU 미만인 여과 공정 이후에는 입자계수기의 측정값 모두가 유효하지만 탁도 범위가 3~10NTU인 착수정, 혼화지, 침전지에서는 7 μm 이상의 측정값만이 적용가능하고 할 수 있다.

3.2. 전단파괴현상에 의한 오차

정수처리의 주공정인 응집, 침전 공정에서 입자들의 크기는 수 μm ~수 mm까지 증가한다. 수처리 과정에서 형성된 플록은 결합력이 약하고 쉽게 파괴되기 때문에 플록형성지와 침전지에서는 낮은 유속을 유지하게 된다. 다른 연구에서도 응집에 의해 형성된 플록의 낮은 결합력 때문에 다단 플록형성지 월유부의 빠른 유속으로 플록이 파괴되고, 이것은 전체 공

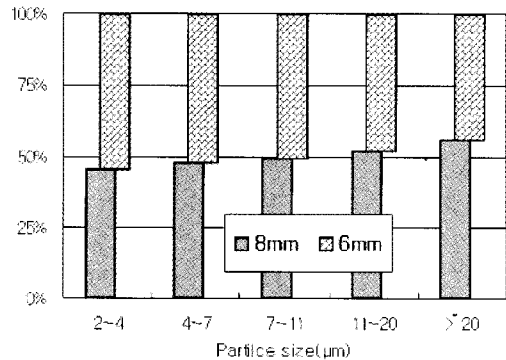


Fig. 6. Size distribution with different particle size.

정의 제거율에 악영향을 미친다고 발표되고 있다(한무영, 1999).

연속식 입자계수기는 구조상 펌프와 시료 유입관이 반드시 필요하게 된다. 따라서 유속에 따른 입자의 전단파괴가 예상된다. **Fig. 6**에 **Table 2**의 실험 조건을 바탕으로 유입관경이 다른 두 조건에서 입자수를 비교한 결과를 제시하였다.

Fig. 6은 유입부 관경을 다르게 적용한 것으로 유입관 내부의 유속을 달리하여 입자 파괴현상을 관찰한 실험 결과이다. 일반적으로 관 내부마찰력은 유속의 제곱에 비례한다. 따라서 유입관경이 작을 경우 유속이 빠르고 마찰력이 크게 작용하여 입자의 파괴가 크게 발생할 것으로 예상할 수 있다. **Fig. 6**에 의하면 관경 8mm와 6mm 두 종류를 비교한 결과 관경 8mm 보다는 6mm에서 작은 입자의 수가 상대적으로 많이 분포하였다. 이것은 관마찰에 의한 입자파괴의 결과이며, 관마찰과 같은 수리학적 특성이 입자 파괴에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 유입부의 수리학적 특성을 일정하게 유지하면서 측정이 이루어져야 한다. 수리학적 특성에는 유입부 유속, 유입관의 종류 그리고 유입부의 수두차 등이 있다.

3.3. 기타 원인에 의한 오차

현장 측정에서 측정용 셀 내부 오염, 유입관 내부 오염, 공기 등에 의한 오차가 발생할 수 있다. 실제 정수공정 적용을 위해서는 이러한 측정오차가 검증되어야 한다. 정수 공정 적용을 위해서는 염소나 오존의 주입공정에 관한 조사가 필요하다. 본 연구에서는 후오존 공정을 포함하는 광역상수도 시설을 대상으로

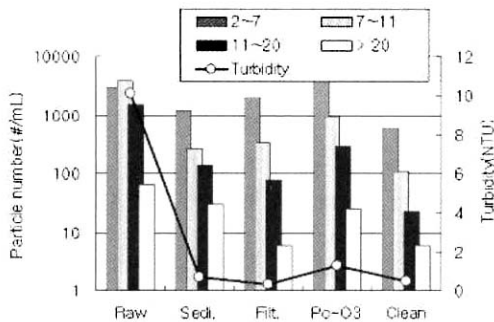


Fig. 7. Particle number in water treatment process.

공정별 입자수 조사를 실시하였다. Fig. 7에 공정별 입자분포를 나타내었다(문성용 등, 2003).

Fig. 7는 각 공정의 처리수를 대상으로 입자수를 조사한 결과이다. 후오존 공정 이후의 입자수가 여과지 공정 처리수 보다 많은 것으로 조사되었다. 이것은 후오존 주입에 의해 입자가 파괴된 경우와 후오존 접촉과 반응에 의해 형성된 기포상태 기체가 입자로 잘못 측정되었기 때문이다. 이 같은 기포의 측정 원리는 DAF공정의 평가에 적용한 입자계수기의 적용성 평가에 대한 다른 연구 결과에서 잘 나타나고 있다(한무영 등, 2001). 이러한 오차의 확인을 위해 실험실 실험을 실시하였다. 추가적으로 공정 중간에 적용될 수 있는 펌프에 의한 입자 파괴현상을 고려하여 실험을 실시하였다. 실험 결과를 Table 3에 제시하였다.

Table 3는 수돗물을 대상으로 입자수를 측정된 뒤, 원심력펌프를 이용하여 10분간 순환시키고, 순환수(Pumping)의 입자 분포를 측정하였다. 다시 순환수에 10분간 0.5L/분의 오존을 주입하고(P + O₃) 입자수를 측정하였다. 마지막으로 잔류 오존 및 기타 기

체의 제거를 위해서 30분간 질소(N₂) 가스를 분사시키고(P + O₃ + N₂) 입자수를 측정하였다.

Table 3에서 펌프에 의한 파괴에 의해 크기가 2~4, 4~7μm인 입자의 수가 각각 1.9, 1.6배 증가하였을 뿐 아니라 전체 입자수도 1.7배 증가하였다. 이것은 원심력 펌프의 운전에 의해 발생하는 빠른 유속에 의한 입자 파괴 또는 공정에서 발생 가능한 부압에 의해 용존성 기체가 형성된 것이라 판단된다. 그리고 오존 주입 후, 4~7, 7~11, 11~20μm의 입자수가 크게 증가하였다. 이것은 오존 주입에 따른 미세기포가 입자로 잘못 측정되었기 때문이며 수중 기체에 의한 측정오차가 매우 크다는 것을 알 수 있게 한다. 이러한 오차의 제거를 위해 질소 가스 분사를 적용하였다. 이 결과 전체 입자 분포가 오존 주입전과 비슷한 값으로 낮아졌다. 이것을 질소 가스 주입에 의해 수중 기포가 대기중으로 증발되었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 두 공정의 비교 결과 전체 입자수에 있어 30%가량이 감소한 것으로 나타났으며, 7μm 이상의 입자 감소율이 50%인 반면 상대적으로 작은 7μm 이하의 입자 감소율은 약 27%인 것으로 나타났다. 전체 입자수 감소는 오존에 의한 산화로 유기화합물이 일부 제거되었기 때문이며, 같은 이유에서 오존의 산화력에 의해 큰 입자가 작은 입자로 전환된 것으로 설명할 수 있다.

이상의 결과를 통해 여과공정 이후의 입자수 증가는 오존에 의한 것으로 설명할 수 있으며, 결과적으로 입자계수기는 수중 기포에 의해 측정값이 크게 증가할 수 있기 때문에 산화공정에 입자계수기를 적용하기 위해서는 수중 기체의 제거를 위한 전처리 공정이 선행되어야 한다.

Table 3. Particle number in unit process

Particle (mm)	Raw	Pumping	P + O ₃	P + O ₃ + N ₂
2~4	593	1,143	1,204	862
4~7	595	954	4,149	659
7~11	190	276	4,163	135
11~20	22	38	498	21
>20	0	2	4	2
Total	1,400	2,413	10,018	1,679

4. 결 론

최근 정수처리 공정에 다양하게 적용되고 있는 연속식 입자계수기를 이용한 현장 측정 결과 기기특성에 의해 몇 가지 측정오차가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 실제 발생 가능한 오차들을 검토하고 입자계수기의 적용 방법과 측정한계를 제시하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 입자계수기의 오차와 정수 처리공정 적용을 위한 방안은 다음과 같다.

1) 스크린 현상은 고탁도 범위에서 크게 나타났으며, 무기물을 이용한 실험결과에서 평균 탁도가 1NTU 미만인 여과 공정 이후에는 입자계수기의 측정값 모두가 유효하지만 탁도 범위가 3~10NTU인 착수정, 혼화지, 침전지에서는 7 μ m 이상의 측정값만이 적용 가능하다고 할 수 있다.

2) 관마찰에 의한 입자 파괴 현상이 뚜렷하게 나타났으며, 전단파괴에 의한 입자 파괴현상을 감소시키기 위해서는 유입부 유속, 유입관의 종류 그리고 유입부의 수두차 등과 같은 수리학적 특성을 일정하게 유지하면서 측정이 이루어져야 한다.

3) 오존 산화공정 이후 10 μ m 전후의 입자수가 크게 증가하였다. 이것은 오존 주입에 따른 미세기포가 입자로 잘못 측정되었기 때문이며 수중 기체에 의한 측정오차가 매우 큰 것으로 조사되었다. 이 오차의 감소를 위해서는 질소가스 등에 의한 전처리 공정의

적용이 필요하며, 충분한 수중 기체의 제거 이후에 측정이 이루어져야 한다.

사 사

본 연구는 경남대학교 학술논문게재연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- American Water Works Association (1999) *Water Quality and Treatment 5th Ed*, McGraw Hill, USA.
- CHMTRAC (1999) Operations manual, Chemtrac Systems, Inc.
- American Water Works Association (1992) *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes*, MANUAL M37.
- 대한상하수도학회(1994) 수돗물의 미생물학, 화학공업조사회, pp. 297-323.
- 문성용, 최성민, 김승현, 윤조희(2003) 입자계수기를 이용한 정수처리공정 평가, *환경공학회지*, 25(4), pp. 421-425.
- 한무영, 박용효(2003) DAF에서 기포크기의 영향, *상하수도학회지*, 17(4), pp. 528-533.
- 한무영, 이 준, 심재수, 박용효(2002) DAF에서 압력에 따른 미세기포의 크기특성, *상하수도학회지*, 16(2), pp. 177-182.
- 한무영, 김영진(1998) 정수장 플록형성지 운영 효율 평가 및 개선방안, *대한토목학회지*, 18(I-5), pp. 511-519.
- 한무영(1999) 정수장 응집 공정의 최적 설계와 운전을 위한 고려 사항, *대한토목학회지*, 19(II-2), pp. 239-254.