

효율적인 침전슬러지 배출설비에 관한 연구

박재경* · 오석영* · 이남영* · 오정진**

A Study on effective Discharge Equipment for Sedimentation Basin

Jae-Kyeoung Park*, Sueg-Young Oh*, Nam-Young Lee*, Jeong-Jin Oh**

Key Words : Rake angle(경사각도), Sludge hopper(슬러지 호퍼), Sedimentation sludge(침전슬러지), Rathole(쥐구멍)

ABSTRACT

This research inspects discharge state of inside of sedimentation basin, and, through the aboard literature and data, examine sedimentation sludge about discharge plan of effective sedimentation sludge that can discharge in state of high concentration.

1. 서론

약품침전지는 약품주입, 혼화 및 플록형성단계를 거치며 크고, 무겁게 성장한 플록의 대부분을 침전분리 작용에 의하여 제거함으로써 후속되는 급속여과지에 걸리는 부담을 줄이기 위한 것으로 침전지에서는 침전, 완충, 배니의 3가지 기능을 지닌다.

상수도 정수처리에 있어서 침전지의 중요한 기능은 다음 두 가지로 대별할 수 있다. 하나는 원수중의 고형물을 침전시켜서 깨끗한 상등수를 생산하는 것이고, 또 하나는 침전된 슬러지를 효과적으로 배출하는 것이다. 특히 근래에는 환경의식의 향상과 수질개선이라는 관점에서 효과적인 슬러지 배출이 매우 중요시되고 있다. 이러한 의미로 슬러지 수집기는 바닥에 침전된 슬러지를 기계적으로 슬러지 호퍼내부로 자동 이송하는 역할을 담당하며, 슬러지 배출호퍼로 이송된 슬러지는 유가 지니고 있는 호퍼내부와 침전지 상부의 수면과의 정수역학적인 수두 차이를 이용하여, 수두차이에 상당

하는 침전수 유체의 압력에너지가 운동에너지로 변환되고 이들 변환된 운동에너지가 호퍼내부의 슬러지를 침전지의 밖으로 배제시키는 역할을 담당하게 된다. 이와 같은 정수장내 슬러지호퍼가 역할을 다하지 못할 경우에는 슬러지 배출효율의 저하, 침전처리수질 저하, 침전수의 낭비와 같은 경제성저하 등과 같은 중대한 결과를 초래할 수도 있다.

슬러지배출설비에 대한 상수도시설기준은 (1) 원활하고 고장이 없이 작동할 수 있을 것 (2) 슬러지 양에 알맞은 능력을 가질 것 (3) 소량으로 농도가 높은 슬러지 배출이 가능 할 것과 같이 포괄적인 규정만을 정해놓고 있는 실정으므로, 슬러지 배출에 대한 정립된 기술 및 상세 검토 없이 실시설계가 수행되어 설계 용역사에 따라 형식 등이 각각 다른 실태이다.

국내의 침전슬러지호퍼의 운영실태를 조사하면 슬러지 인발밸브의 개방시에 호퍼 내부에 퇴적되어 있는 슬러지는 배출되지 않고, 물이 水道를 이루면서 물만 배출되는 상태를 유지하고 있어서 설비의 자동화 및 처리된 침전수의 낭비를 초래하고 있는 실정으로서 국내에 정수장이 수없이 많다는 점을 감안하면 경제적으로도 많은 손실을 지니고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 침전슬러지의 원활한 배출을 위하여 설

* 한국수자원공사

** 우송공업대학 컴퓨터응용기계계열

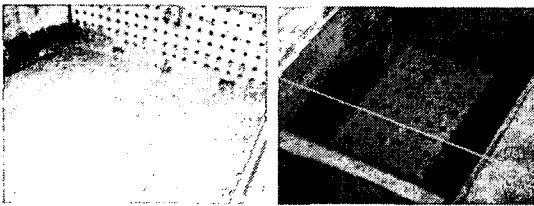
E-mail : sujipg@kowaco.or.kr

치·운영되고 있는 슬러지 배출설비의 설계인자를 실험을 통하여 검토함으로써 최적의 슬러지 배출방안을 제안하고자 한다.

2. 국내정수장 배출설비 현황 분석

2.1. 현장조사

국내 정수장에서 관리운영하고 있는 정수장내 침전 슬러지 배출 설비중 호퍼의 형상은 편정사각콘형, 편직사각콘형, 편 역직사각콘형, 디치(Ditch)형 같이 크게 4개로 구분할 수 있다. 또한, 슬러지 배관의 흡입구 형식은 수평배관형, 수평 벨로우즈형, 수평하부 90°, 수평하부 90°곡관형, 수직배관형으로 구성되어 있다. 이와 같이 침전슬러지의 배출설비의 체계적인 설계기준의 미흡으로 인하여 제각기 다른 설계방법으로 인하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 침전지내 슬러지가 퇴적되어 침전지의 低部가 전혀 볼 수 없는 실정으로 수질오염과 처리수의 낭비를 초래하고 있는 실정이다.



(a) Before (b) After

Fig.1 Accumulated sludge before and after cleaning by mans

2.1.1. 호퍼내 경사각도에 따른 영향

슬러지 호퍼의 전면 혹은 측면경사각도는 현장 조사결과 정수장별로 서로 상이한 다양한 각도로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 서울시에서 관리 운영하는 강북정수장과 암사정수장은 전면경사각과 측면경사각이 共히 50°와 45°로 설치되었는가 하면, 부평정수장은 전면경사각 90°, 측면경사각 79°, 수공에서 관리하는 동화댐정수장은 전면경사각 66°, 측면경사각 56°으로 구성되었으며, 반월정수장의 침전 슬러지 호퍼의 경우에는 측면경사각도 19.43°, 전면 경사각 50.19°구성됨으로서 호퍼의 규격과 경사각도의 크기가 정수장마다 서로 다르게 설치되어 있다. 특히, 반월정수장의 경우에는 침전지의 폭이 8.8 m로 상당히 규격이 크지만 이에 비하여 호퍼는 1개 뿐이며, 이로 인

하여 측면 경사각도 19.43°로 아주 작은 경사각도를 지니고 있어서 슬러지 호퍼내에서 슬러지의 미끄럼 현상이 작아서 슬러지 배출효율이 극히 낮은 실정이다. 이와 같이 국내의 정수장내 침전지 호퍼의 규격은 기준이 없이 설치·운영되고 있음을 알 수 있다.

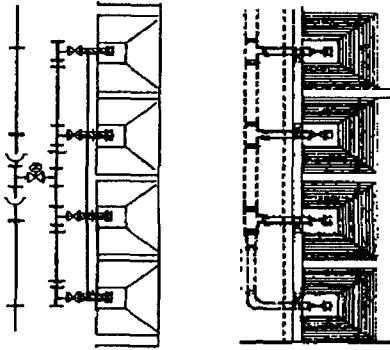
2.1.2. 슬러지 배출관 형식에 따른 영향

Fig. 2는 G 정수장의 침전 슬러지용 호퍼에 연결되어 있는 슬러지 인발밸브의 후단부 배관에 대해서 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서 나타내고 있는 합류관형과 같이 1개의 침전지에 다수개의(그림에서는 4개) 호퍼가 존재하는 경우에는 슬러지 호퍼 후단부의 배관 연결에 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다. Fig. 2에서와 같이 4개의 호퍼를 통과한 유체는 동시에 개방되는 4개의 슬러지 인발밸브를 지나서 1개의 관으로 연결된다. 이때 1개의 관 부근에 위치하고 있는 가운데 지점의 2개의 호퍼에서의 슬러지 인발은 침전지의 양 측면에 위치하고 있는 슬러지 호퍼에 비하여 상대적으로 슬러지 인발이 원활하며, 양 측면에 위치하고 있는 호퍼내의 침전 슬러지는 호퍼 내부의 슬러지 인발 밸브를 통과하여 앞으로 진행하다가 중앙부에 위치하고 있는 슬러지 호퍼에서 인발된 슬러지를 만나게 되므로, 이들 유체에 의하여 유동저항을 받음으로서 좌우 양측의 침전 슬러지는 배출시에 원활한 배출이 되지 못함으로 인하여 지속적으로 배출에 영향을 받게 된다.

결국, 슬러지 호퍼내부의 침전 슬러지는 점차적으로 압밀되어 고형물의 농도가 진하게 되어 침전 슬러지 호퍼의 전면 및 측면의 벽면에 고착되는 현상이 발생되므로 침전 슬러지의 배출은 더욱 더 어려운 상태가 된다. 실제적으로 일본 등에서는 1池의 침전지가 다수 개의 호퍼를 지니고 있는 경우에는 합류관식보다는 각각의 호퍼가 주 관로에 직결로 직접 연결되는 방식인 단일관형을 채택하고 있는 것으로 문헌에 의하여 조사되었다. 이와 같은 단일관형 직결방식은 각각의 호퍼를 통과한 슬러지와 물의 혼합된 혼합물의 배출에 상호 간섭의 영향을 최소화시킬 수 있을 것으로 보인다.

수공에서 관리 운영하는 대다수의 정수장은 호퍼의 인발밸브에서 슬러지 배출 주관로까지의 관로는 구배가 없이 배관이 수평으로 설치되어 있다. 따라서 침전지의 상부수위에서부터 슬러지 호퍼의 바닥면까지의 높이에 상당하는 침전수의 위치에너지가 배출되면서

운동에너지로 변환되면서 이들 운동에너지에 상당하는 에너지만이 슬러지를 배출시키는 에너지로 작용되고 있어서 일본에서는 인발밸브 後端部에 슬러지 배출용 펌프를 이용하여 일정량의 슬러지와 물의 슬러리혼합액을 흡인시키는 경우와는 다소 다르게 구성되어 있음을 알 수 있다. 우리나라의 경우에는 자연유하에 의하여 슬러리 혼합액을 배출시키지만 호퍼에서 슬러지 배출 주관로까지의 경사도가 거의 없으므로, 이곳에서의 에너지 손실도 크게 나타난다.



(a) Integration line (b) Single line
Fig. 2 Forms of the sludge discharge line

2.1.3. 슬러지 배관 흡입구 형식에 따른 영향

슬러지 배관흡입구 형식에는 크게 4가지 형식이 설치되어 있으며, 이중에서 수평벨로우즈형식, 수평직관형식, 수평하부 90°곡관형식, 수직배관형식의 순으로 설치되어 운영중에 있다. Fig. 3은 S×B가 300×300의 규격으로 설치된 슬러지호퍼의 슬러지배출 흡입구의 종류를 나타낸 것이다.

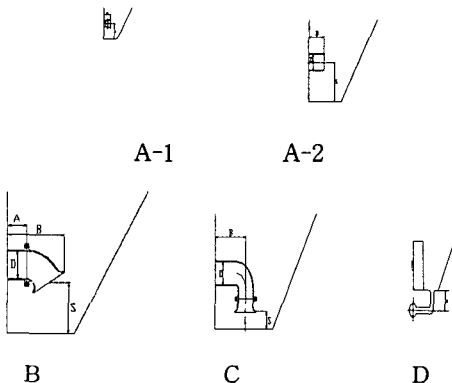


Fig. 3 Entrances of the sludge discharge pipe

슬러지 배출지점에서의 정확한 유속분포를 얻기 위해서는 안정화 시간이 필요하므로, 슬러지 배출을 위한 인발밸브의 개방 3초 후에 출구를 통하여 빠져나가는 유동 평균 속도는 Table 1과 같다.

Table 1 Mean velocity of the flow in the sludge discharge pipe

Hopper type	A-1	A-2	B	C	D
Item					
Mean velocity(m/s)	8.789	7.17	6.41	5.35	8.61

Table 1에서 알 수 있듯이 각 형식 중에서는 슬러지 바닥에서 배출배관의 이격 거리가 300mm일 때보다는 좀 더 높은 400mm일 때와, 벽면에서 짧게 도출된 경우에서 배출속도가 빠르게 나타남을 알 수 있다. 또한, 각 형식중 슬러지 배출배관을 통과하는 슬러지 유출속도는 A-1형이 가장 빠르게 나타났다. 배출배관의 흡입면이 아래를 향하는 B, C 형식은 A, D 형식보다는 슬러지 흡입 효과가 떨어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 A-2 형식이 호퍼내에 배출배관 흡입측에 나팔관이 없음에 따라 손실계수가 커서 A-1 형식보다 출구의 속도가 낮게 나타나는 것으로 보인다. A-2의 경우는 sharp-edged entrance flow로 손실계수(K_L)은 0.5 이고, A-1의 경우는 slightly rounded entrance flow나, well-rounded entrance flow라 하며, slightly rounded entrance flow인 경우 손실계수(K_L)은 0.2이고, well-rounded entrance flow인 경우 손실계수(K_L)은 0.04 이다. D 형식의 경우, 슬러지 배출배관의 높이가 슬러지 호퍼의 바닥면에 인접되어 있어서 유출속도가 가장 빨라야 하지만, A-1 형식보다 출구 속도가 낮은 이유는 A-1 형식의 나팔관의 손실계수가 D 형식의 출구 형상에 대한 손실계수보다 작기 때문으로 판단된다.

배출배관 밸브의 개방이 있는 후 3초 후에 출구를 통하여 빠져나가는 유동장 내의 유선(stream line)은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)에서 배출배관 아래에 순환 영역이 생기며, 슬러지 배출배관 입구 아래의 순환영역은 고형 슬러지와 함께 시간이 지나도 호퍼 내에 남게 된다. Fig. 4(b)는 배출배관 입구 아래에 형성된 순환영역과 나팔관 입구의 위쪽에 박리 유동(separated flow) 영역이 생긴다. 이 때문에 배출배관 입구로 유입

되는 유동은 축소류(contraction flow)에 의한 강한 관성력으로 인하여 배출 배관내 아래쪽에서는 박리 유동 영역을 형성시킨다. 이는 나팔관이 유동을 부드럽게 흡입하는 역할을 못하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 모든 유선이 호퍼의 바닥면에서 배출배관의 입구로 향하기 때문에 비중이 무거운 슬러지 층도 흡입할 수 있는 장점이 있다. 배출배관의 입구와 벽 사이에는 순환 영역이 형성된다. Fig. 4(d)는 순환 영역 없이 모든 슬러지 층이 배출됨을 알 수 있다.

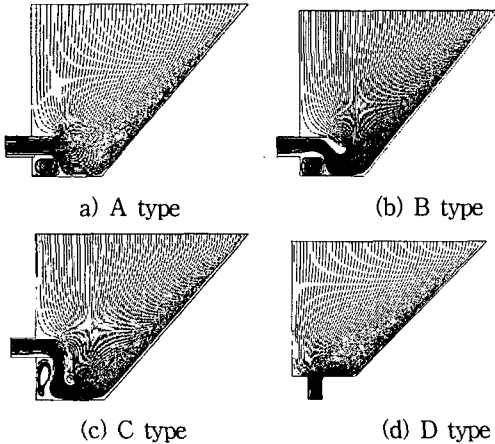


Fig. 4 Stream line at the different hopper types

2.1.4. 급수방식에 따른 영향

국내 정수장의 90 % 이상은 무급수형으로 설치되어 있다. 무급수형은 호퍼부에 잔류하고 있는 슬러지는 슬러지 호퍼의 배출밸브가 개방되는 동안에도 원활하게 슬러지가 배출되지 않는 것이 보통이다. 즉, 배출밸브가 개방시 직상부의 슬러지의 일부만이 배출되고 주변부 슬러지는 제대로 배출되지 못하고 물만 배출되는 물길(水道)을 형성한다.

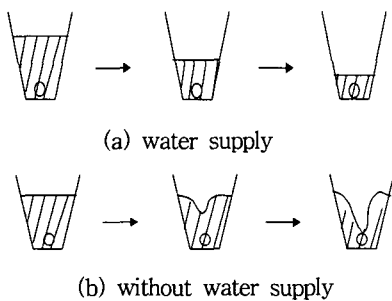


Fig. 5 Sludge discharge process

이와 같이 직상부의 슬러지만 배출되고 주변부의 슬러지는 잔류하며, 일단 형성된 작은 구멍으로 연속적으로 물만 배출되는 水道를 형성하여 처리수의 낭비를 초래하는 작은 구멍을 Rathole(Fig. 5(b))이라고 한다. 이와 같은 Rathole 현상은 슬러지 호퍼에 무급수로 슬러지가 배출될 경우에만 발생하는 현상으로 슬러지 배출을 촉진하기 위하여 슬러지 배출 촉진용 노즐 등을 설치하여 Rathole현상을 방지할 수 있다. 슬러지 배출촉진용 노즐을 사용할 경우의 슬러지 배출상태를 Fig. 5(a)에 나타내었다.

2.1.5. 배출배관의 크기에 따른 영향

Fig. 6은 G정수장의 공업용수도의 침전지 호퍼 後端部の 배관에 대해서 나타낸 것이다. 호퍼 상부의 규격은 4,300 × 3,000이며, 호퍼의 바닥면의 규격은 1,000×1,000, 호퍼의 전면경사각도와 측면경사각도는 약 45°정도를 지니고 있다. 또한, 호퍼내 슬러지 인발밸브의 직경은 300 mm의 크기를 지니고 있다. 300 mm의 크기를 지닌 인발밸브의 開放時間은 약 3분으로 운영되고 있었다. 호퍼내 인발밸브의 직경은 일본에서 제시하는 규격인 슬러지 배출배관의 4.5배 보다 적은 1,000 mm를 지니고 있어서 호퍼내의 인발밸브의 직경 크기는 적절한 것으로 보인다. 그러나, 호퍼내 인발밸브 後端部의 배출배관의 규격이 침전슬러지의 배출효율에 미치는 영향을 알아보고자 Fig. 6과 같이 300 mm 배관에 바이패스 배관을 설치하여 점선으로 나타내었다.

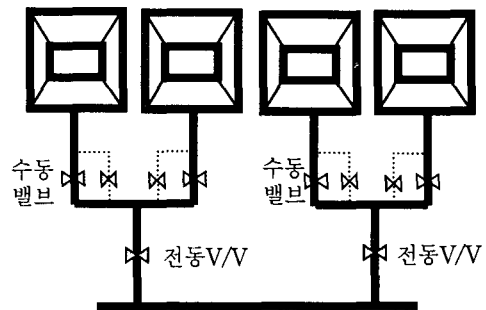


Fig. 6 Sludge discharge pipes

Fig. 6에서와 같이 점선부위를 100 mm의 배관으로 연결하고 Flange의 兩側에 40 mm의 밸브를 취부하고,

300 mm의 수동밸브를 폐쇄시킨 후에 점선으로 구성된 바이패스관을 약 6분 정도 개방시켜, 300 mm를 개방시켜 놓았을 때의 배출된 슬러지의 농도와 비교하였다. 비교 결과 300 mm로 약 3분 동안 개방시킨 경우보다 100 mm의 바이패스관내 밸브를 약 6분간 개방시킨 경우가 배출 슬러지의 농도는 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 육안으로 침전지 상부에 퇴적된 슬러지량들을 상호 비교한 결과와도 동일하게 나타났다. 이와 같은 현상은 슬러지가 호퍼내부에서 밸브를 통하여 많은 양의 침전수와 슬러지가 순식간에 배출되는 것보다 슬러지가 미끄러지면서 서서히 배출되도록 운영하는 경우가 더욱 더 효과가 있는 것으로 보인다. 이것은 호퍼내에서 슬러지가 미끄러져 하강하는 속도와 인발밸브의 개방시간과는 밀접한 관계를 지니고 있음을 알 수 있다.

3. 슬러지호퍼의 개발

3.1. 설치 대상정수장의 배출설비분석

설치하고자 하는 시스템의 대상정수장은 경기도에 위치하고 있는 S 정수장으로 하였다. S 정수장의 슬러지호퍼는 전면경사각도 45°, 측면경사각도 60°로 구성되어 있으며, 침전지 低部는 1.3 m × 1.3 m의 정사각형구조이며, 침전 배출설비의 후단에 설치되어 있는 슬러지 인발밸브의 직경은 200 mm로 설치되어 있다. 이와 같이 구성된 슬러지 배출설비를 Fig. 7에 나타내었다.

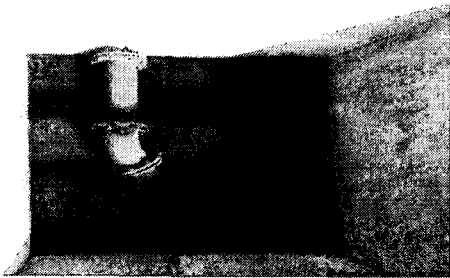


Fig. 7 Hopper type in S-water treatment plant

일본⁽¹⁾에서는 침전 배출설비의 후단에 설치되어 있는 슬러지 인발밸브 단면적(0.0314 m²)의 10배보다 침전지 저부면적(1.69m²)이 작아야만 슬러지가 배출된다고 보고된 바 있다. 이에 비하여 S 정수장은 일본에서 제시하고 있는 설계규격보다도 오히려 침전지 低部 면

적이 인발밸브의 단면적보다 약 5.4배 정도 크게 과다 설계된 것으로 나타났다. 이로 인해 침전지 低部에서 슬러지가 배출되지 않고 잔류되는 현상이 발생된다.

이들 잔류하고 남은 슬러지의 농도는 점차 높아져서 나중에서는 침전된다. 이와 같이 점차 높아진 고형물은 점차적으로 단단하게 되고 이로 인하여 후속되는 슬러지도 이곳으로 연속적으로 쌓이는 현상이 지속되게 된다. 또한, 슬러지 배출촉진용 급수를 사용하지 않는 무급수 방식을 적용하고 있으므로 슬러지의 인발효율을 저하시키는 Rathole현상을 일으키며, Fig. 8과 같이 형성된 Rathole로 인하여 지속적으로 슬러지는 잔류하고 물만 배출된다.

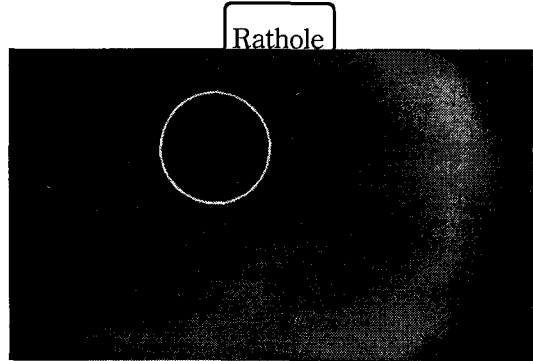


Fig. 8 Ratholes in the hopper without water supply

3.2. 개발된 배출설비의 적용

국내 거의 대부분의 정수장에서 문제점으로 대두되고 있는 Rathole현상에 따른 슬러지 배출 효율저하를 방지하고, 대상정수장의 슬러지호퍼 低部가 넓은 점을 고려하여 침전 슬러지 호퍼의 저부면적과 인발 배출배관의 비를 조정하기 위하여 1개의 슬러지호퍼를 2개의 호퍼로 분할시키고 측면경사각도를 64°로 증가시키고, 전면경사각도를 45°로 유지시킴으로서, 벽면에서의 슬러지 미끄럼율을 증가시키고 침전지내 호퍼 低部の 면적을 대폭 감소시켰다.

발생되고 있는 Rathole현상을 방지하고 슬러지의 원활한 배출을 위하여 슬러지 배출촉진용으로 분사 노즐형을 적용하였다. 적용된 분사노즐은 일본의 布川, 辛男에 의하여 기보고⁽¹⁾된 바와 같이 호퍼의 면적당 9.6개를 사용하였으며, 급수용량은 12 l/개·min이며, 左右 분사각도는 45°, 上下 분사각도는 10°를 적용하였다. 또한, 분사시 작용되는 압력은 4.5 kg/cm²이상시에는 슬러지가 침전지의 상부로 부상되는 逆效果가 있으므로 노즐분사압력은 그 이하가 되도록 급수펌프용

량을 설정하였다. 현장 실험을 위하여 설치된 3단 노즐형을 Fig. 9에 나타내었다.

대상정수장은 침전지 1지당 4개의 호퍼를 지니고 있으며, 이들 중 4개의 호퍼에 각각 2단형 및 3단형, 무급수형을 각각 설치하였다.

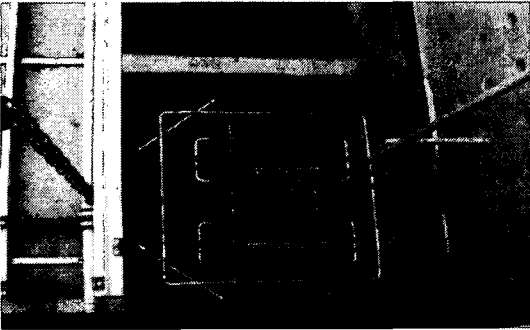


Fig. 9 Water supply nozzle in the hopper

개발된 슬러지호퍼의 성능을 분석하기 위하여 침전지 슬러지호퍼 배출배관에 슬러지 샘플링을 위하여 콕(cock)을 설치하여 슬러지를 채수하였다. 채수된 슬러지는 Dry oven을 통하여 수분을 증발시키고, 증발 후 잔류된 슬러지인 고형물과 증발된 수분량과의 비인 슬러지 함수율을 측정하였다.

Fig. 10은 측정된 침전 배출슬러지의 함수율을 나타낸 것이다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 2단 무급수형과 3단 무급수형은 배출밸브를 개방한 후 60 초 이후에는 Rathole현상에 의하여 슬러지는 배출되지 않고 물만 배출되고 있음을 알 수 있다. 반면에 급수형은 2단과 3단 공히 100초동안 고농도의 슬러지를 배출하고 있음을 알 수 있다. 특히, 3단형에서는 슬러지배출효과가 뛰어나, 배출밸브를 개방한 후 약 120초가 지나도 슬러지농도가 높게 유지되고 있음을 알 수 있다.

침전슬러지 배출을 위하여 사용된 급수형은 무급수형에 비하여 2단의 경우 60초에는 16배, 80초 14배, 100초 5.5배 정도의 슬러지 배출효과를 보이고 있어서 평균 약 12배 정도의 효과가 있음을 알 수 있다. 또한, 3단의 경우에는 급수형이 무급수형에 비하여 60초에는 6배, 80초 19배, 100초에서는 약 4.27배의 슬러지 배출효과로서 평균 약 10배의 효과를 보이고 있다.

또한, 대상정수장에서 무급수방식을 계속해서 적용할 경우에는 슬러지 배출밸브를 80초이상 개방시에는 물만 배출되므로 현재의 밸브 개방시간인 150초를 80초 미만으로 조정하여 자동운전하는 하는 것이 바람직

할 것이다. 본 실험을 통하여 2단의 배출효과에 비하여 3단이 효과적임을 알 수 있다.

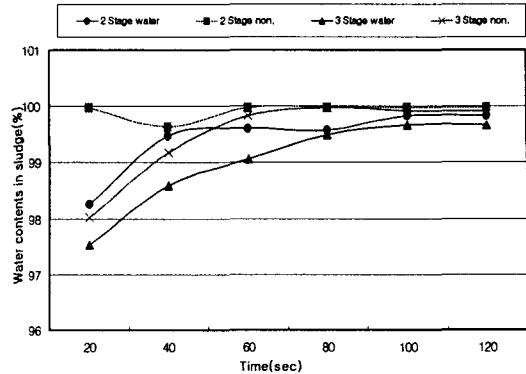


Fig. 10 Water contents in sludge with and without water supply nozzle

또한, 자동화와 연계하여 설치된 노즐數와 급수용량의 적정성에 대해서는 지속적인 실험으로 규명할 예정이다.

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 슬러지 배출 함수율을 낮추기 위하여 개선된 본 설비에서는 2단에 비하여 3단에서 슬러지 배출효과가 높음을 알 수 있다.
- 2) 슬러지호퍼에 설치된 면적(m^2)당 9.6 EA, 급수용량은 $12 \text{ l/EA} \cdot \text{min}$ 의 노즐형(급수형)이 무급수형에 비하여 2단에서는 12배의 효과를 3단에서는 10배의 슬러지 배출효과를 얻었다.
- 3) 대상 정수장에 설치된 무급수형의 경우, 배출밸브의 개방시간을 80초 이상에서는 슬러지배출효과가 미미함을 알 수 있으므로, 무급수 방식의 밸브 개방시간은 80초 이내로 유지해야 한다.

참고문헌

- (1) 布川, 辛男, 1988, "沈澱池의效果的な排泥方式", 日本第38回水道研究發表會, pp. 150-152.
- (2) 환경부, 1997, "상수도시설기준"
- (3) AWWA, 1990, "Water treatment Plant Design", pp. 121-122.
- (4) 한국수자원공사, 2000, "정수처리설비 교육교재"
- (5) 박중현, 1997, "정수시설의 최적설계 및 유지관리", (주)그린테크노, pp. 164-166.