

## 일 유입유량 변동과 공정내 표면파 전파속도 상관성 분석

### Analysis of relationship between daily inflow rate fluctuation and surface wave transfer velocity in water treatment processes

박노석\* · 임성은 · 김성수 · 황준식 · 정남정

No-Suk Park\*, Seong-Eun Lim, Seong-Su Kim, Jun-Sik Hwang, Nahm-Chung Jung

한국수자원공사 수자원연구원

(2007년 11월 27일 접수 ; 2008년 4월 3일 채택)

#### Abstract

The fluctuation of inlet flow to a water treatment plant makes a serious problem that it can change the outlet flow-rate from each process abruptly, and ultimately occur the detachment of the attached particles inside each unit process. Also, since it takes very short time for the surface wave occurred from the fluctuation of inlet flow to reach the latter processes, it is impossible for operators to cope with that stably. Therefore this study was conducted to suggest the methodology for accurately predicting the travel time of surface wave occurred from the fluctuation of inlet flow to reach the latter process. Through the experiment, which was carried out for the full-scale water treatment plants(capacity : 2,000m<sup>3</sup>/d), it could be confirmed that the flow rate fluctuation from equalization tank produce the surface wave. And the wave transfer velocity is a function of the hydraulic radius and the length of each open type tanks which are comprised in the latter processes.

**Key words :** fluctuation, surface wave, shock load

**주 제 어 :** 유량변동, 표면파, 충격부하

#### 1. 서론

원수가 정수장으로 유입되어 가장 먼저 도달하여 수위를 형성하는 수조는 통상 착수정이다. 이러한 착수정으로부터 후단 공정으로의 물 흐름은 위어 및 오리피스를 통해서 연결되고, 각 후단 단위 공정간의 연결은 일반적으로 개수로 및 관수로의 흐름 형태로 건설 운영된다. 착수정의 수위를 변화시키는 요인은 정수장 마다 약간의 특수성이 있을 수 있지만 유입원수의 변화, 회수되는 유량의 변화 및 원수의 사용여부에 따른 가감량의 변화 등이다. 이러한 원인의 합으로 발생하는 착수정의 수위변화는 후단 단위 공정의 효율뿐만 아니라 전체 시스템의 최적 운영에 심각한 영향을 미치는 것으로 보고되었다(AWWA, 1999; AWWA, 1997). 일반적으로 혼

화, 응집, 침전, 여과 및 소독으로 구성된 기존 정수처리 시스템의 경우 하루 중 착수정에서 발생하는 수위변화에 의해 발생하는 유출유량의 변동은 혼화공정에서 약품주입률의 변화 및 혼화강도의 변화가 수반되어야만 공정내 최적화를 이룰 수 있다. 또한 이와 같은 유량 변동은 응집공정에서는 G 값의 변화, 침전공정에서 수위변화 및 침전지내 수리저동의 변화로 이어지며, 여과공정에서 여과속도의 변화로 연계되어 여재에 부착되었던 탁질이 여재표면에 발생하는 전단력의 급격한 변화로 누출될 가능성이 있는 것이다. 이제까지 많은 기존 연구자들은 정수처리와 관련된 단위 공정 및 전체 시스템의 최적화 연구를 수행함에 있어서 운영조건을 정적상태(steady state)로 가정한 것이 사실이다. 그러나 어떤 정수장이라도, 1년 365일 운전하는 동안에, 착수정의 수위

(설계유량 및 운전유량)를 천편일률적으로 고정시켜 운전하는 곳은 없는 게 현실이다. 이와 같이 정수처리공정 및 시스템의 효율에 심각한 악영향을 미치는 착수정의 수위를 일정하게 유지하지 못하는 데에는 다음과 같은 원인이 있다. 첫째, 정수지의 용량 부족으로 인해 수용가의 일간 사용량 추이에 따라 취수량을 수시로 변화시켜야 하기 때문이다. 둘째, 통상 대규모 정수장에서 발생하는 데, 배출수로부터 착수정으로 회수되는 수량의 변화가 착수정의 급격한 수위 변화에 영향을 미친다. 셋째, 정수장의 최말단인 정수지와 가정으로의 급·배수가 시작되는 배수지의 연계운영이 이루어지지 않아 작은 배수지의 용량에 민감하게 정수장의 가동률이 변하기 때문이다. 넷째, 대규모 원수 송수펌프의 설치 및 운전으로 가동 시작 및 정지 시점에 급격한 유량의 변동이 착수정의 수위 변화에 직접적으로 영향을 준다. 이제까지 정수장의 최적운영에 관련된 연구 및 지침의 제시는 각각의 정적 상태에서 단위공정의 최적화에만 집중하여왔고, 하루 중 유입되는 유입유량의 변동과 같은 동력학적 상태(dynamic state)에서 각각의 단위 공정들이 연계된 전체 시스템의 최적화는 간과해온 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 실규모 플랜트 정수장(2,000m<sup>3</sup>/일 규모, 1,000m<sup>3</sup>/일 × 2계열 구성)을 대상으로 착수정에서 발생하는 수위변화에 따른 유량변동이 후단 공정에 미치는 영향과 그러한 영향이 도달하는 시간을 해석적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

착수정에서 발생하는 수위변화에 따른 유출 유량의 변동이 후단공정에 미치는 영향과 영향의 도달 시점을 계산하는 데에는 다음과 같은 두 가지 시나리오를 작성해 볼 수가 있다.

첫 번째는 착수정으로부터의 유량변동이 궁극적으로 영향을 미치는 공정사이에서 운전 중인 공정내의 체류시간의 합을 근간으로 영향의 도달 시점을 계산하는 것이다.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 이론적 체류시간( $T$ ),  $V$ 는 공정의 용량( $L^3$ ) 그리고  $Q$ 는 유량( $L^3/T$ )이다.

Fig. 1은 본 연구에서 대상이 되는 2,000m<sup>3</sup>/일 규모의 실규모 정수처리플랜트의 모식도이다. 체류시간의 합을 근간으로 하는 첫 번째 시나리오대로라면 여과지 수위에 유입유량의 변동이 도달하는 시간은 다음 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$t^* = t_{\text{착수정}} + t_{\text{전오전점축조}} + t_{\text{혼화지}} + t_{\text{응집지}} + t_{\text{침전지}} + \sum t_{\text{관수로}} \quad (2)$$



Fig. 1. 1 Schematic of water treatment plant.  
(2,000m<sup>3</sup>/day, 2 trains×1,000m<sup>3</sup>/day)

$$t^* = \frac{\sum V_{\text{개수로 형태의 공정수조}} + \sum t_{\text{관수로}}}{Q} \quad (3)$$

여기서,  $t^*$ 는 착수정에서 발생하는 유입유량의 변동이 침전지 후단 또는 여과지 수위에 도달하는 시간을 의미한다. 또한, 실증플랜트는 착수정으로부터 여과지까지 자연유하 방식으로 설계되어 운영 중에 있다.

다음 Table 1은 첫 번째 시나리오대로 각 공정의 체류시간을 구하고 합을 계산한 것이다. 공정에서 대부분의 관수로는 압력관으로 운전됨에 따라 관수로내의 체류시간을 무시하였다. Table 1에서 도출된 대로 계산하면 착수정에서 발생하는 수위 변동에 따른 유입유량의 변동이 침전지 말단 및 여과 공정의 수위에 영향을 미치는 데에는 약 16시간이 걸릴 것으로 예상된다. 이것은 설계용량 대비 가동율이 25%로 현저히 낮기 때문에 실제 정수장의 일반적인 체류시간 보다 2~3배 긴 시간을 나타내었다.

상기 언급한 바와 같이, 유입 유량변동이 각 공정에 미치는 영향의 도달 시간을 예측하는데 있어서, 체류시간의 합을 근간으로 하는 방법론과 대분하여 두 번째 방법으로 표면파 전파속도를 근간으로 계산하는 방법을 제시할 수 있다. 이는 다음 식(4)와 같은 Froude number의 분모 항의 물리적인 의미가 표면파 전파속도임을 감안하고 제안하는 것이다.

Table 1. Detention time of each process

구분	착수정	전오전점축조	혼화지	응집지	침전지	총 합
용량(m <sup>3</sup> )	7.42	5.31	1.49	27.84	124.8	
이론적 체류시간(min)	44.5	31.9	8.9	167.0	744.0	996.3(min) 16.6(hr)

(Q<sub>operation</sub> : 240m<sup>3</sup>/day, Q<sub>designed</sub> : 1,000m<sup>3</sup>/day)

$$Froude\ No. = \frac{v}{\sqrt{g \times R}} \quad (4)$$

여기서,  $v$ 는 평균유속( $L/T$ )을 의미하며,  $g$ 는 중력가속도 ( $L/T^2$ ),  $R$ 은 동수반경( $L$ )을 의미한다. 통상적으로 *Froude number*는 관성력과 중력의 비를 나타내는 척도 지표로 알려져 있지만, 또한, 평균유속과 표면파 속도의 비를 나타내는 지표로 사용되기도 한다. 또한, 2차원 개수로 해석에서는 동수반경( $R$ ) 대신 주로 수심( $H$ )가 사용되나 정수처리공정의 개수로 및 반응조에서는 흐르는 수체와 접촉하고 있는 윤변( $P$ , perimeter)을 정확하게 도출할 수 있으므로 동수반경을 사용하는 게 합리적이다. 따라서 각 공정 수조에서 발생하는 표면파의 전파속도는 다음 식(5)로 도출할 수 있다.

$$v_s = \sqrt{g \times R} \quad \text{식(5)}$$

여기서,  $v_s$ 는 표면파 전파속도( $L/T$ )를 나타낸다. 다음 Table 2는 본 연구의 대상이 된 2,000m<sup>3</sup>/일 규모의 실규모 정수처리플랜트(Fig. 1 참조)에서 1계열(1,000m<sup>3</sup>/일)을 대상으로 각 공정 수조에서 발생하는 표면파 전달 속도를 구하여 정리한 것이다.

Table 2에서 나타난 바와 같이 각 공정 수조내에서의 표면파 전파속도를 합하면 계산상 10.53초 정도가 된다. 이는 Table 1의 체류시간을 근간으로 도출한 유입 유량변동 영향 도달 예측시간(16.6시간)과 비교하면 엄청난 차이의 차이가 나타난다. Table 1과 2에서 제시한 유량변동 영향 도달시간을 확인하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1에서 제시한 실규모 플랜트를 대상으로 유량 변동 실험을 수행하였다.

### 3. 실험방법

앞서 언급한 바와 같이, 1계열 1,000m<sup>3</sup>/일 규모의 플랜트(Fig. 1 참조)를 대상으로 착수정으로 유입되는 유량을 임의로 변화시키면서 침전지 유출 유량의 변화 시기, 침전지 유출수의

Table 2. Propagation velocity of surface wave to each process

content	Intake facility	Pre_ozone contactor	Rapid mixing basin	Flocculation basin	Sedimentation basin	Sum
Stream area ( $A=H \times B$ , m <sup>2</sup> )	2.12	3.25	0.99	4.8	9.6	
Wetted premier ( $P=2H+B$ , m)	6.1	12.4	3.1	6.4	10.4	
Hydraulic radius ( $R=A/P$ , m)	0.348	0.263	0.319	0.75	0.92	
Surface wave velocity (m/sec)	1,847	1,611	1,768	2,711	3,00	
Propagation time ( $S=L/v_s$ , sec)	1.9	1.2	0.9	2.2	4.33	10.53

탁도 변화 시기, 여과지 수위가 변하는 시기, 여과지 유출수 탁도의 변화 시기 및 여과지 유출수 유량의 변화 경향을 실시간으로 측정하였다. 각 유량변동은 0.5초 단위로 기록하였다. 착수정의 유량변동은 *ABB*사의 전자계(모델: 150A)를 사용하였으며, 침전지 유출수의 유량 변동은 *GEPanamatrix*사의 초음파 유량계(모델 : *PT-878*)를 각각 사용하였다. 침전수 및 여과수 탁도의 변화는 *DKK*사의 표면 산란식 탁도계(검출한계 : 0~20NTU)로 측정하였으며, 여과지내의 수위는 리테크사의 초음파 펄스 반사식 수위계를 이용하여 측정하였다. 유량변동에 의한 공정내 영향을 미치는 시간을 실증하는 실험은 2007년 7월 4일 13시 50분부터 15시 20분까지 진행되었다. 침전지 유량측정 지점은 침전수가 모두 집수되는 지점에서 측정하였으며, 여과지 유출수는 플랜트 여과지가 2계열로 구성되어 있음에 따라 1계열 여과처리수가 집수된 지점에서 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 공정간 유량변동 특성

다음 Fig. 2는 착수정으로 유입되는 유량을 임의로 약 11m<sup>3</sup>/hr 에서 급격히 변화시켜 약 22m<sup>3</sup>/hr로 2배 상승시켰을 때 침전지로부터 유출되는 유량과 여과지로부터 유출되는 유량의 변동 경향을 나타낸 것이다.

이후 약 40분간 유지하다가 다시 유입유량을 22m<sup>3</sup>/hr 에서 11m<sup>3</sup>/hr로 급격히 감소시키고 약 20분간 유지하다가 다시 상승시켰다. 이후 20분마다 상기와 같은 변동(유량의 감소와 증가)을 한 번 더 반복하였다. Fig. 2에서 나타나듯이, 착수정으로 유입되는 유량변동이 시작된 시점과 침전지로부터 유출되는 유량변동이 시작되는 시점은 약 11초의 차이를 두고 있다. 또한, 착수정으로 유입되는 유량변동의 경사가 거의 90° 임에 반하여 침전지로부터 유출되는 유량변동 곡선의 기울기는 상대적으로 완만한 것으로 나타났다.

여과지 유출 유량변동 곡선의 경우 유출 유량변동 곡선의 기울기가 더욱더 완만함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는

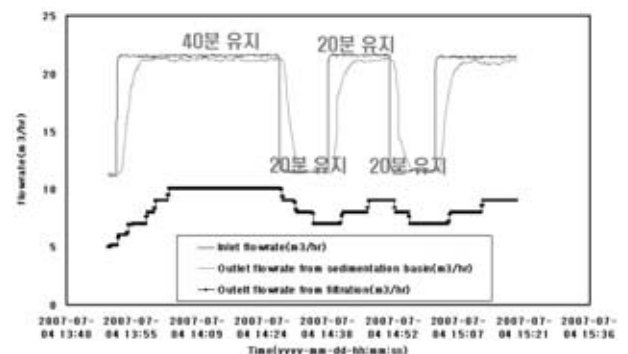


Fig. 2. Characteristics of flow fluctuation among the process.

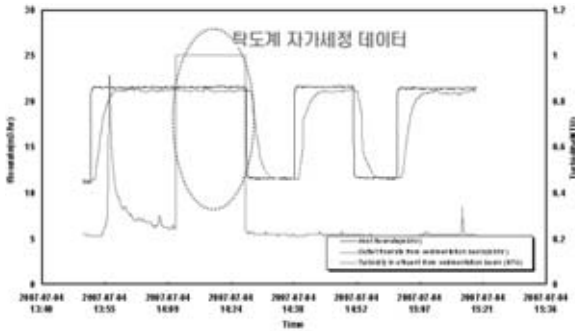


Fig. 3. Variation of turbidity in effluent from sedimentation basin.

Thomas Walski(2005)가 하수처리장을 대상으로 유입 유량 변동을 주기적으로 시켰을 때 하수처리장 유출 유량변동이 상대적으로 완만한 변화를 보이는 것과 유사하다. 본 그래프에서 중요한 시사점은 앞서 언급한 바와 같이 착수정으로 유입되는 유량변동이 시작된 시점과 침전지로부터 유출되는 유량변동이 시작되는 시점은 약 11초의 차이를 두고 있다는 것이다. 이는 앞서 "이론적 배정"에서 기술한 두 가지 시나리오 중에서 앞단의 유량변동이 후단 임의의 단위 공정에 영향을 미치는 시기를 예측하는 데에 있어서는 표면파의 전파속도가 근간이 되어야 한다는 것을 뒷받침하고 있기 때문이다. 이론적으로 체류시간의 합을 근간으로 예측할 경우, 침전지 말단 또는 여과지 유입유량에 그 영향이 도달하는 시간은 16.6시간 정도로 나타나야 하나, 본 실험에서는 11초 정도가 관측되었다. 즉, 첫 번째 시나리오(Table 1)인 공정내 체류시간의 합으로는 이와 같은 현상을 설명할 수 없고 표면파 전파속도를 근간으로 하는 예측 시나리오(Table 2)를 이용하여야만 설명할 수 있다.

#### 4.2. 유량변동이 수질에 미치는 영향

정수처리 공정에서 착수정의 유량이 변동되는 경우 후단 공정의 운영최적화를 위해서는 여러 가지 수반되어야 할 운영상의 변동이 생기게 된다.

전오존 공정에서의 오존주입률 변동, 혼화공정에서의 약품주입률과 혼화강도의 조절, 응집공정에서의 교반강도 조절, 여과속도 변동 등이 발생하게 되며, 그에 따라 적절하게 대처하지 않는 경우 수질저하 현상이 나타나게 된다.

Fig. 3은 착수정으로 유입되는 유량변동이 침전지 유출수의 탁도에 미치는 영향을 도시한 것이다. 그래프 상에서 두 번째로 나타나는 peak(사각형 모양)는 탁도 측정에 사용되었던 탁도계 자체에서 자가 세정 시간동안 나타난 데이터므로 관심의 대상이 아님을 밝혀둔다. 착수정으로 유입되는 유량변동 시점과 침전지 유출수의 탁도 변화가 시작되는 시점과의 차이는 약 2분 30초정도이다. 이는 침전수를 샘플링하는 지점에서 탁도계 측정지점까지의 시료가 도달하는 유달

시간(travel time)이 약 2분 정도임을 감안할 때 11초 후에 나타나는 침전수 유량변동은 동시에 탁도변화를 발생시키는 것으로 유추할 수 있다. 침전지 유출수 탁도가 표면파에 의해 증가하는 것은 침전지 내부의 수리거동 변화에 의한 침전 플록의 월류에 의한 것이라기보다는 유출측 오리피스에 부착되어 있던 플록들이 급격한 수위변동에 의해 탈리된 것으로 판단된다. 왜냐하면, 추후 반복되는 유량 변동에 있어서는 침전수의 탁도가 변하지 않는 것으로 관측되었는데, 이는 실험 초기에 오리피스에 부착되었던 플록들이 탈리되고 나서 다시 부착될 충분한 시간을 가지지 못하였으므로 유량변동에 의한 침전수의 탁도가 증가하지 않았기 때문이다. 그러나 실제 정수장에서도 이러한 웨어 부근에서는 항상 부착조류나 침전되지 않은 플록들이 부착되어 있고, 이러한 유량변동 등의 영향으로 탈리되어 여과지로 유입되어지는 현상은 자주 나타나고 있다.

이러한 유량변동에 의한 수질저하 현상은 실 정수장 운영 결과에서 보고되고(박동학 외, 2007) 실제 관측되어지는 현상으로서 특히 여과지 운영에 있어서 충격부하의 영향으로 여층 내 억류된 탁질을 유출시키는 주요한 원인으로 작용하고 있다. 결론적으로 정수장내로 유입되는 일간 유량변동은 표면파 전파속도로 각 후단 공정에 수리적으로 영향을 미치며, 동시에 같은 속도로 공정별 유출수의 수질에도 영향을 미치는 것이 확인되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 실규모 정수장(2,000m<sup>3</sup>/일 규모)을 대상으로 착수정에서 발생하는 수위변화에 따른 유량변동이 후단 공정에 미치는 영향과 그러한 영향이 도달하는 시간을 해석적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정수장에서 발생하는 일간 유입 유량변동은 착수정부터 이어지는 후단공정(혼화, 응집, 침전 및 여과)에 심각한 수리적, 수질적 영향을 미치며, 그 영향을 미치는 시간은 개수로에서 발생하는 표면파의 전파속도로 예측이 가능하다.
- 2) 단위 공정 수조가 자유수면을 가지는 경우, 표면파의 전파속도는 Froude number의 분모 항으로 계산할 수 있으며 전파속도를 결정하는 중요 인자로서 동수반경과 수조의 길이가 선정되었다.
- 3) 현재 국내에서 운영 중인 대부분의 정수장에서는 대용량 펌프위주로 유입유량을 제어하고 있어 착수정 및 정수지의 용량이 충분하지 못할 경우, 펌프의 운휴가 심각한 유량변동을 야기하고 있다. 이러한 유량변동은 정수장내에서 표면파 전파속도와 같이 단시간에 후단공정으로 전파되기



때문에 충분한 여유를 두고 대처할 수가 없다. 정수처리 기작의 근본이 고액분리임을 감안할 때, 급격한 변동 없이 유입 유량을 일정하게 제어하는 것이 처리 효율을 제고하는데 우선적으로 고려되어야 할 사안으로 판단된다.



## 참고문헌

1. American Water Works Association, (1999) "*Water Quality and Treatment*", 5th ed., New York, McGraw-Hill.
2. American Water Works Association, (1997) "*Water Treatment Plant Design*", 3th ed., New York, McGraw-Hill
3. Thomas Walski (2005) "*Haestad Methods: Civil Storm Dynamic Modeling Software*", Bentley, Waterbury, Ct.
4. 박동학, 박노석, 김성수, 배철호, 정남정, 최승일(2007), "일유량 변동에 따른 여과수질 악화에 대처하기 위한 최적 여재구성에 관한 연구", *상하수도학회지*, 21권 4호, pp.485~491