

인공수로 내 물 순환 시스템 운영을 위한 물 순환주기 분석

Evaluation of Water Circulation Period in an Artificial Channel

조훈식*, 여창건**, 이승오***, 송재우****

Hun sik Cho, Chang Geon Yeo, Seung Oh Lee, Jai Woo Song

요 지

인공수로 내 효율적인 물 순환 시스템 운영을 위해서는 지속적인 유량공급을 통해 순환흐름을 유도하는 것이 매우 중요하다. 따라서 수로 내 적절한 유입부 위치를 결정하고 계획 유입유량에 따른 수질개선효과 및 물 순환주기를 분석하는 연구가 대두되고 있어, 모형을 통한 이론적인 예측 및 모형실험을 통한 검증이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 농도-pH 지표곡선을 이용하여 시간에 따른 수로 내 농도변화로 물 순환주기를 분석하였다. 수로 내 설치된 유입부에 평면상 위치변화를 주어 순환흐름에 적합한 유입부 위치를 제시할 수 있었으며, 농도변화가 없어지는 시점을 통해 최소 물 순환주기를 산정할 수 있었다.

핵심용어 : 물 순환 시스템, 유입유량, 물 순환주기, 모형실험, 농도-pH 지표곡선

1. 서론

최근 도심지역의 문화적 역동성과 상업적 활력을 가능케 하는 특화된 공간으로써 워터프론트(water front)에 대한 설계와 시공이 활발하게 진행되고 있지만, 인위적인 공사과 유량공급으로 인해 수로 내 흐름이 자연스럽지 못하여 정체수역 및 사수역(dead zone) 발생이 야기되고 있다(전제복 등, 2008). 인공수로와 같은 워터프론트 개발사례는 국내·외에서 다양하게 찾아볼 수 있지만 수로를 중심으로 물 순환 시스템에 관련된 수리학적 연구는 미흡한 상태이다(이배성 등, 2008).

pH를 분석지표로 사용한 기존의 연구는 다음과 같다. 한무영 등(2000)은 정수공정의 성능 평가 및 개량을 위한 추적자 시험(tracer test)에서 기존의 메틸렌 블루용액 대신 1N의 NaOH 표준용액을 주입하였으며, 시간에 따른 pH변화를 수산화이온(OH⁻)의 농도변화로 표현하여 그 효율성 및 적합성을 입증하였다. 또한 김영선 등(2009)은 연못의 수질변화에 미치는 수질분석항목간의 상관관계를 분석하였고, 그 결과 pH 항목은 용존산소(DO)와 총질소(T-N)에서 99% 수준의 상관성을 보여 수질 평가지표로 사용하기에 적합함을 보였다. 일본에서는 Niigata 지역 및 Gifu지역 하천의 산성 고착화(acid deposition)의 가장 중요한 매개변수로 pH항목을 지정하여 15년 이상의 장기간의 pH 감소경향을 보인바 있다(Hiroki Matsubara 등, 2008).

따라서 본 연구에서는 측정된 pH를 농도지표로 사용하였으며 수로 내 물 순환 시스템의 설계에 있어 계획 유입유량에 따른 수로 내 수질변화 및 영향범위 분석을 통하여 물 순환 주기에 대한 연구를 수행하였다.

* 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : arasumohe@gmail.com

** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : gun1230@empal.com

*** 정회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr

**** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수 · E-mail : jwsong@hongik.ac.kr

2. 과업대상 지역

본 연구에서는 현재 서울시 강서구 마곡동 일대에 사업 중인 마곡 워터프론트 주운수로를 수리모형실험의 대상으로 선정하였으며, 유입유량을 통한 수로 내 유황분석과 물 순환 주기를 분석하였다. 2005년 마곡지구 조성계획 발표 후 2007년 마곡 도시개발구역 확대방안 수립 및 마곡 워터프론트 계획이 수립되었으며, 현재 기본 및 실시설계가 시행 중이다. 사업지구 내에는 주운수를 중심으로 녹색제방, 요트 마리나, 호수공원, 생태공원, 유수지 공원, 갑문, 신설 펌프장, 입체도로 등의 설계가 계획 중이다(SH공사, 2008).

3. 수리모형 실험

현재 마곡 워터프론트 사업의 일환으로 인공수로 내 물을 주기적으로 순환시켜 흐름이 정체되는 것을 방지하고 적정수질을 유지하기 위하여 일 40,000톤의 유량공급이 계획 중이다. 따라서 본 연구에서는 2개의 유입부 사용을 제시하였으며 평면상 사수역 예상 지역을 고려하여 수로 하류단과 수로 중·하류단의 측면위치에 따라 유입부를 설치하였다(그림 1). 본 실험에서 적용한 평상시 수로 내 수심과 수로 폭의 비(h/B)는 0.03~0.07로 매우 작기 때문에 수심에 대한 유속측정의 정확성을 위해 수평축척 1/50, 연직축척 1/25의 왜곡모형을 적용하였으며, 이는 총 연장 28m, 면적 76m²의 모형을 제작되었다.

3.1 실험방법

수로 내 최적의 유입부 위치 결정을 위하여 표 1과 같이 평면상으로는 3개 Type의 실험을 수행하였다. 평면상 유속분포는 유입부를 기준으로 총 20개 측정점의 격자망을 구성하여 수행하였으며 염료 확산실험을 통한 흐름 분포 및 영향범위를 비교·분석하였다(그림 2). 유속 측정은 Sontek사의 3차원 ADV 유속계(16MHz MicroADV)를 이용하여 수행하였다.

또한 유입유량에 따른 수로 내 물 순환주기를 파악하기 위하여 농도(%)–pH 지표곡선을 제시하였고(그림 3), 수로 내 세제를 용해시킨 후 이를 통해 측정된 pH를 세제의 농도로 환산하여 시간에 따른 농도변화를 분석하였다. pH 측정지점은 총 11개로 전체수로를 일정한 간격으로 나눈 7개 지점과 사수역이 예상되는 4개 지점으로 이루어져 있으며, 연직방향에 대한 측정위치는 수심에 따른 pH변화를 고려하여 수심 중간지점으로 일치시켰다.



그림 1. 수로 모형 및 유입부 위치

표 1. 평면상 유입부 위치

구 분	평면상 공급 위치
Type A	유입부 1 + 유입부 2
Type B	유입부 1 + 유입부 3
Type C	유입부 1 + 유입부 4

* 총 유입유량 : 0.074 l/sec



그림 2. 확산실험을 통한 영향 범위 분석

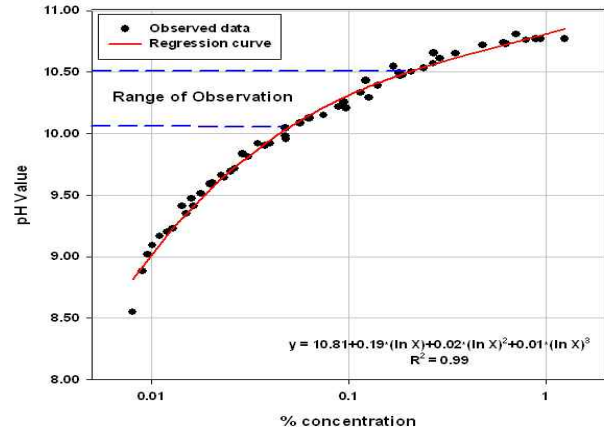


그림 3. 농도-산성도 지표곡선

3.2 농도-산성도 지표곡선

일반적으로 용해된 세제분자는 물분자와 이온화 반응을 거쳐 수산화이온(OH⁻)이 생성하고, 물에 녹아있는 수산화이온의 개수는 몰농도로 표현되어 pOH 및 pH로 계산된다. 세제의 이온화도는 매우 적기 때문에 용해된 세제의 총량에 대하여 가능한 모든 이온화과정이 종료되었다고 가정할 수 있다. 본 연구의 실험조건과 같이 유량공급 이전에 세제를 완전히 용해시켰을 경우 유량공급이 시작되더라도 추가적인 이온화 반응은 나타나지 않으므로 생성된 수산화이온의 전체개수는 초기상태와 동일하다. 따라서 시간이 지날수록 유입유량으로 인해 전체용액의 양은 많아지게 되고 전체적인 수산화이온 농도는 적어져 pH가 감소하게 된다(Snoeyink와 Jenkins, 1980). 본 연구에서는 제시한 농도-산성도 지표곡선을 이용하여 측정된 pH를 농도로 적용하였으며 시간에 따른 세제의 농도변화를 초기농도와 무차원 수로 표현하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 유입부 위치 및 수로 내 흐름 특성

유입부 주변의 유속측정실험과 염료 확산실험을 비교·분석한 결과 모든 Type에서 유속벡터의 크기 및 염료의 확산양상이 대체적으로 일치하였다. Type A의 각 유입부 주변의 유속분포는 유량 공급방향과 다른 일방향으로 치우친 형태를 나타냈으며(그림 4), Type B, C의 경우 각각의 유입부에서 유속분포는 유량 공급방향과 동일한 직선형으로 나타났다.

수로 내 유황특성을 보면 Type B, C의 경우 수로 하류단과 중류단에 독립적으로 설치된 유입부로 인해 상대적으로 광폭의 하류단에서 사수역 발생을 예상할 수 있었지만, Type A의 경우 수로 하류단에서 시계방향의 큰 순환이 발생하여 Type B, C에 비해 내부 순환흐름을 발생시키는데 유리한 것으로 분석되었다.(그림 5).

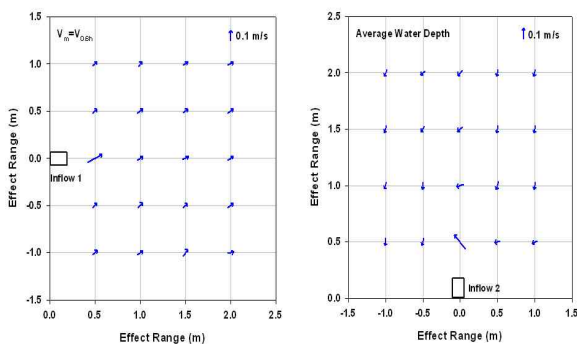
4.2 시간에 따른 농도변화

그림 6과 표 2에 시간에 따른 농도변화를 Type A, B, C와 계획유입유량에 따른 이론적인 수

치값으로 비교하였다. Type B, C의 농도감소형태는 대체로 비슷하였고 Type C가 다소 빠른 감소율을 보였다. 따라서 농도감소의 기준치를 50% 미만의 수준으로 설정한다면 농도감소율이 가장 큰 Type C가 수로 내 물을 순환시키는데 가장 효율적이라고 할 수 있다. Type A는 수로 하류단에 위치한 2개의 유입부로 인해 수로 중·상류단의 농도변화가 하류단에 비해 늦어지고 전체적인 농도 감소에도 영향을 미치게 되어, 다른 두 Type에 비해 농도감소율이 지체되는 양상을 보인다.

그러나 유량공급 후 32시간 이후에는 3가지 Type 모두 평형한 상태($C/C_0 \approx 0.26$)에 이르는 것으로 나타나 평형한 상태에 도달하는데 있어서는 유입부 위치가 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다(그림 6, 표 2). 이러한 평형단계가 나타나는 이유는 유입유량을 통한 충분한 물 순환 과정으로 농도감소율이 현격히 저하되어 상대적인 변화가 거의 없기 때문인 것으로 판단되었으며 따라서 평형단계 시점을 최소 순환주기로 적용할 수 있었다.

또한 이론적인 계산에 따른 농도감소율에 비해 모형실험을 통한 3가지 Type의 농도감소율이 더 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 이는 계획유입유량에 따른 단순한 농도변화와는 다르게 실제 수로에서는 유입유량에 따른 내부 순환흐름이 효과적으로 나타나고, 그로 인한 이송-확산과정이 농도변화에 영향을 미치고 있는 것으로 분석된다. 따라서 이러한 실제 경향을 분석하기 위해서는 본 연구에서 제시한 pH지표를 이용한 농도변화실험 뿐만 아니라 여러 가지 분석방법의 모형실험이 절대적으로 필요하다고 할 수 있다.



(a) 유입부 1 (b) 유입부 2
그림 4. Type A의 유입부 주변 유속분포

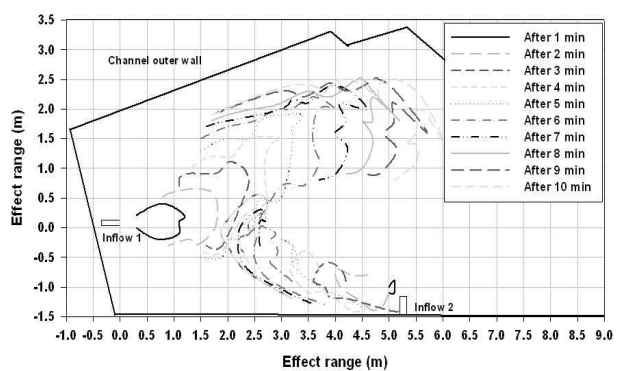


그림 5. Type A의 염료확산 양상

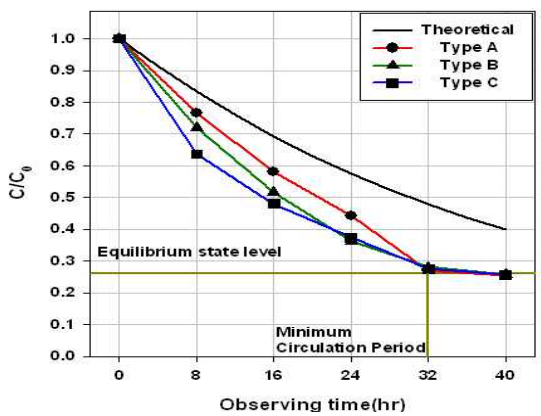


그림 6. 시간에 따른 무차원 농도비 변화

표 2. 시간에 따른 수로 내 농도변화

유량 공급 시간	모형 값	8	16	24	32	40					
	(hr)										
C/C ₀	원형 값	3.3	6.7	10.0	13.3	16.7					
	(day)										
	Type A						0.77	0.58	0.44	0.27	0.25
	Type B						0.72	0.52	0.36	0.28	0.26
	Type C						0.64	0.48	0.37	0.27	0.26
이론적인 값	0.83	0.69	0.58	0.48	0.40						

* 음영부분 : 최소 순환주기 및 평형상태 농도비

5. 결 론

유입부 위치 및 수로 내 유황특성을 종합적으로 분석하였을 때 Type A의 경우 하류단에서 시계방향의 순환흐름을 발생시켜 하류단의 사수역 발생을 감소시키는 등 주운수로 내 순환흐름을 유도하는데 가장 적합한 것으로 판단되었다.

농도변화양상을 볼 때 유량공급 후 32시간 이후에는 3가지 Type 모두 농도변화가 거의 없는 평형상태에 이르게 되고 이 시점을 최소 순환주기를 적용하여 수로 내 물 순환주기를 분석하였다. 원형에 대한 최소 순환주기는 13일로 분석되었으며 약 13일에서 17일 사이를 물 순환주기로 판단할 수 있었다. 최소 순환주기 선정에 있어서는 유입부의 위치가 큰 영향을 미치지 못하지만, 최소 순환주기에 이르는 농도감소율에 비해 상대적으로 기준치를 적게 설정한다면 최소 순환주기 이전의 농도감소율이 가장 큰 Type C가 효율적인 것으로 분석되었다.

계획유입유량에 따른 이론적인 농도감소율에 비해 pH지표를 통한 감소율이 크게 산정된 것으로 볼 때 수로 내 이송흐름에 따른 영향이 크게 작용하는 것으로 나타나 실제 연구에 있어서 모형실험의 병행이 필요함을 보였다.

본 연구는 유입부 주변의 흐름분포 및 유입유량에 따른 영향범위 등의 유황분석을 토대로, 물 순환 주기분석의 기초자료로 사용하거나 전체적인 인공수로 내 물 순환 시스템 운영에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대 홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 홍익대학교 방재연구센터 (2008). 광교신도시 물순환시스템 조성공사 수리모형실험 보고서.
2. SH공사 (2008). 마곡 도시개발사업 재해영향평가서.
3. 이배성 등(2008). 도시 물 순환 시스템 구축 방안에 대한 연구, 한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집, pp.405-409.
4. 전제복 등(2008). 지속가능한 개발을 위한 주운시설 도입에 관한 연구 (인천 청라지구를 중심으로), 한국수자원학회, 한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집, pp.1462-1466.
5. 김영선 등(2009). 골프코스에서 강수량, 관수량 및 시비관리가 연못의 수질 변화에 미치는 영향, 한국잔디학회, 한국잔디학회지 23(1), pp.1-8.
6. 한무영 등(2000). pH를 이용한 트레이서 테스트 방법의 개발, 대한토목학회, 대한토목학회논문집 20(1-B), pp. 95-101.
7. Hiroki Matsubara 등(2008). Long-Term Declining Trends in River Water pH in Central Japan, *Water, Air, & Soil Pollution*, 200, pp253-265.
8. Snoeyink와 Jenkins (1980), *Water Chemisty*, John Wiley & Sons, Inc.