

농촌 소하천의 재폭기 계수 추정

Predicting Reaeration Rate in Rural Small Streams

송 인 홍* · 권 순 국(서울대)

Song, In Hong · Kwun, Soon Kuk

Abstract

In this study, using modified tracer method(Constant Rate Injection, CRI method), reaeration rates were measured in the territories of Bokha stream. In case of Kwanri stream, reaeration rates of a diversion were measured simultaneously. Propane gas and Rhodamine-WT were used as gas and dye tracer, respectively.

The experimental results show that reaeration rates of the stream were ranged from 6.16 to 24.52 1/day and those of a diversion in Kwanri stream were ranged from 28.39 to 123.61 1/day. It is resulted that mean velocity of stream is a dominant factor in reaeration process and diversion significantly influence on reareation process.

I. 서론

재폭기는 대기중의 산소가 하천 수중으로 녹아드는 물리적인 현상으로 난류 정도, 수심, 하천 경사 등 하천의 여러 수리적인 조건에 영향을 받으며, 재폭기 과정을 통해 하천으로의 산소 공급정도 정도를 나타내는 것이 재폭기 계수(Reaeration rate, K_2)이다. 재폭기 계수는 하천의 용존산소의 양을 결정하는 중요한 인자로서 탈산소계수(K_1)과 침전과 흡착에 의한 제거계수(K_3)와 함께 하천 자정능력을 나타내는 중요한 지표중 하나이다. 농촌 지역의 경우 그 특성상 하천에 유입된 오폐수의 정화는 하천의 자정능력에 의존할 수밖에 없고, 또한, 하천이나 호소의 수질 예측모형에 있어서 용존산소의 모의를 위해 재폭기 계수는 중요한 매개 변수로 이용되고 있지만, 실제 이용되는 재폭기 계수는 실측에 의한 값보다는 모형 초기값이나 문헌을 통한 외국의 측정값을 참고하는 경우가 많다. 그러나, 일반적으로 적용 가능한 재폭기 계수의 산정 방법이 없고, 특히 보가 보편적으로 산재되어 있는 우리나라의 농촌하천의 특성을 고려할 때 외국의 문헌을 통한 재폭기 계수의 참고는 상당한 오차를 내포하고 있다고 할 수 있으며, 우리나라 실정에 맞는 재폭기 계수의 산정이 필요하다.

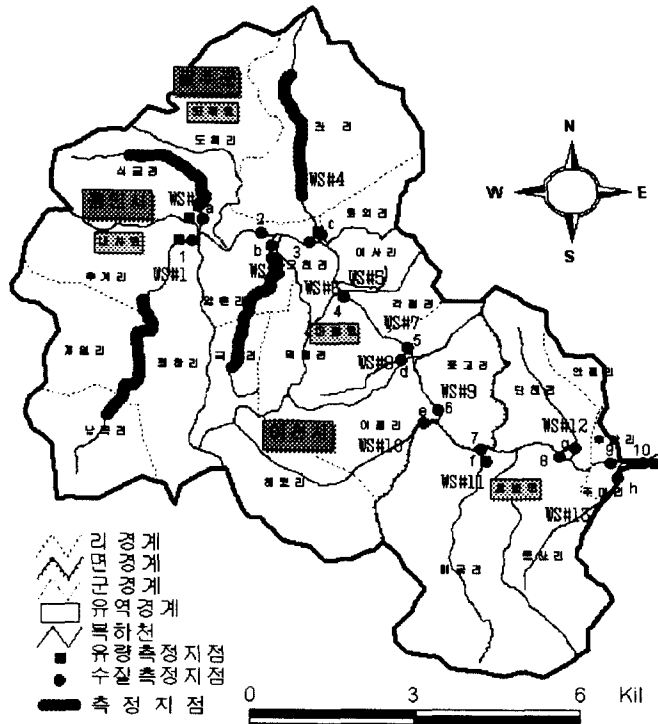
2000년도 한국농공학회 학술발표회 논문집(2000년 10월 14일)

본 연구에서는 재폭기 계수 측정 방법 중의 하나인 Modified Gas Tracer Method를 이용해 재폭기 작용에 상당히 중요한 역할을 담당하고 있는 보와 이를 포함하고 있는 농촌 소하천에서의 재폭기 계수를 추정하고, 측정한 자료를 재폭기 계수에 영향을 미치는 수리인자를 독립변수로 회귀분석하여 농촌 소하천에서의 재폭기 계수 예측방정식을 유도하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시험 구간

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 경기도 이천에 위치한 복하천 지류중 복하천상류, 식금천, 관리천, 작촌천, 매곡천, 충남 온양에 위치한 온양천을 시험 소하천으로 선정하여 재폭기 계수를 측정하였다.



2. 재료 및 실험 방법

본 연구에서는 Modified Gas Tracer Method중 Yotsukura et. al.(1983)과 Parker and Gay(1987)에 의해 도입되고, Kilpatrick et. al.(1989)에 의해 정식화된 CRI Method를 이용하여 재폭기 계수를 측정하였다. Gas Tracer로서 확산계수가 산소와 비슷하고 독성이 없으며 가격이 저렴한 프로판 가스를 이용하고, 가스의 이동 확산 현상을 관찰하고 가스의 이동시간을 결정하기 위해서 Dye Tracer로서 가시성이 좋고 식생이나 부유물질에 의한 흡착이 적으며 확산이 잘 이루어 지는

Rhodamine-WT를 이용한다.

CRI Method는 가스의 방출과 산소의 흡수 사이에는 하천의 흐름 조건이나 온도에 관계없이 일정한 관계를 가진다는 것이 기본 원리이다. 실험 방법은 Fig. 2와 같이 측정 하천 상류에 가스를 투입하고, 가스가 하류로 이동함에 따라 발생하는 손실량을 측정하는 것으로 Fig. 2와 같다. 일정한 비율로 투입되는 가스는 충분한 시간이 지나면 평형상태에 도달하게 된다. 따라서, 공기중으로 프로판 가스 방출은 측정 구간 상하류의 평형농도 \bar{C}_g 의 차이로 나타난다. 이를 수식으로 나타내면 식-1, 식-2와 같다.

$$\frac{dC_g}{dt} = -K_T C_g \quad \text{식-1}$$

$$K_T = \frac{1}{(t_d - t_u)} \ln \frac{(C_g)_u}{(C_g)_d} \quad \text{식-2}$$

여기서, C_g 는 가스의 평형농도, t 는 시간, K_T 는 가스의 방출계수 $\frac{dC_g}{dt}$ 는 가스 방출의 결과로 나타나는 가스 농도의 변화율이다. 첨자 u와 d는 하천의 상류와 하류를 나타낸다.

식-2에서 가스 이동시간($t_d - t_u$)은 Dye Tracer의 농도 분포 곡선에서 구한 상·하류간 도심 이동시간(t_c)과 같고, 프로판 가스 방출량은 가스 농도(C_g)에 하천 유량을 곱한 $\bar{C}_g Q$ 로 표현할 수 있다. 따라서, 프로판 가스의 방출계수는 식-3으로 나타낼 수 있다.

$$K_T = \frac{1}{t_c} \ln \frac{(\bar{C}_g Q)_u}{(\bar{C}_g Q)_d} \quad \text{식-3}$$

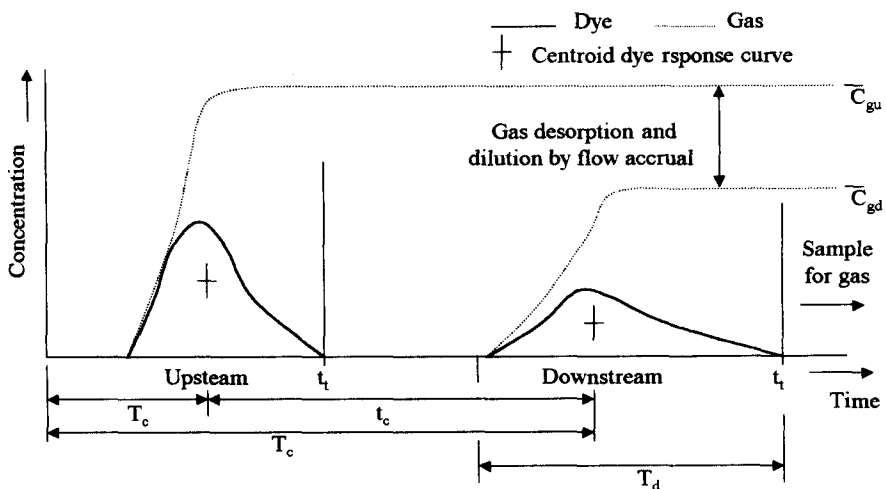


Fig. 2 Principle of experiment of reaeration coefficient using CRI method

프로판 가스의 방출계수와 재폭기계수 사이의 관계는 다음의 식-4와 같다. (Rathbun, Rainwater and Holley, 1978)

$$R_p = \frac{K_2}{K_p} = 1.39 \quad \text{식-4}$$

여기서, K_p 는 각각 에틸렌가스와 프로판가스의 방출계수이고, K_2 는 재폭기계수이다.

프로판 가스의 투입을 위하여 Fig. 3과 같이 유효 공극의 크기 약 40 μm , 외경 3 cm, 길이 10 cm 크기의 원통형 모양의 폭기용 노즐을 부착한 가스 투입장치를 제작하여 사용하였다.

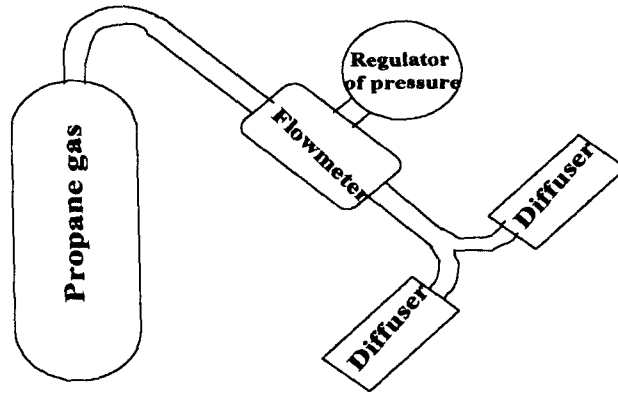


Fig. 3 Apparatus for gas injection

3. 실험 조건

프로판 가스의 투입은 가스 농도는 최소 10 $\mu\text{g/l}$ 이상이 되도록 3 l/min로 일정하게 하천에서 수심이 깊고 유속이 빠른 지점에서 주입하였으며, Dye tracer인 Rhodamine-WT는 25 ml를 8 l의 하천수와 섞어 투입하였다. Dye Tracer는 Rhodamine-WT 혼합 용액을 한 번에 모두 쏟아 붓는 방법으로 투입하였고, 프로판 gas는 Dye Tracer의 투입과 동시에 실험이 끝나는 시간까지 일정한 비율로 투입하였다.

4. 시료의 채취 및 분석

Dye 시료 채취는 30 ml 유리병을 이용하고, 가스 시료는 125 ml 용량의 Septum 마개를 가진 Vial을 이용하여 흐름의 중심에서 와류 및 거품이 발생하지 않도록 채취하였다.

시료 속의 프로판 가스의 농도는 가스 크로마토그래피를 이용하여 분석하였다. 분석 방법의 원리는 Purge장치를 이용하여 시료 속의 프로판 가스를 모두 추출하고, 추출된 가스를 헬륨가스를 이용하여 Trap으로 이동시키고 -140°C의 저온으로 냉각시킨 후, 일시에 220°C의 고온으로 팽창시키면서 시료가 가스 크로마토그래피를 통과하는 동안 FID(Flame Ionization Detector)를 이용하여 분석하는 것이다.

Dye Tracer 시료의 경우는 UV-Spectrophotometer를 이용하여 분석한다.

재폭기 작용의 중요한 수리인자로서, 난류 정도와 관계되는 수심, 유속, 하천경사 등을 측정하였다.

5. 온도 보정

재폭기계수의 값은 수온에 따라 변화하므로, 20°C를 기준으로 보고 재폭기 계수 시료 채취시 수온을 측정하여 기준온도에서의 재폭기 계수 값으로 보정하여 예측방정식의 유도에 이용한다. 본 연구에서는 식-5를 이용하여 온도에 대한 보정을 실시하였다.

$$K_{2_T} = K_{2_{20}} \theta^{(T-20^\circ)} \quad \text{식-5}$$

여기서 θ 값은 1.0241(Elmore and West, 1961)을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시험 측정구간의 수리조건

실측한 측정구간의 수리조건을 정리하면 Table 1과 같다. 하폭 1.4~3.8m, 평균유량 0.014~0.273 m³/s, 평균유속 0.08~0.44 m/s, 평균수심 0.05~0.21 m, 하천경사 0.004~0.023의 범위를 갖는다.

Table 1. Hydraulic condition of experimental reach

Site	Date	Width (m)	Flow rate (m ³ /s)	Mean velocity (m/s)	Hydraulic depth (m)	Slope	Rearation Coeff. (1/day)
Kwanri stream	99-10-06	1.87	0.097	0.27	0.19	0.0041	24.52
	99-12-23	1.87	0.051	0.18	0.15	0.0041	10.78
	00-03-22	1.87	0.035	0.09	0.20	0.0041	14.51
	00-05-30	1.87	0.014	0.08	0.10	0.0041	7.61
Sikgum stream	00-05-30	1.40	0.031	0.14	0.16	0.0225	10.13
Upstream of Bokha	99-10-26	3.50	0.191	0.26	0.21	0.0050	14.35
Upstream of Onyang	00-06-20	3.06	0.044	0.27	0.05	0.0012	17.60
Jakchon stream	00-07-06	1.46	0.007	0.05	0.09	0.0038	6.16
Upstream of Onyang	00-07-21	3.84	0.232	0.40	0.15	0.0012	23.31
Downstream of Onyang	00-07-21	3.43	0.273	0.44	0.18	0.0024	23.75

2. 재폭기 계수 산정결과

소하천에서 측정된 재폭기계수는 Table 2와 같다. 재폭기 계수는 유하시간과 가스 평형농도를 측정하여 식-3으로부터 산정하였다.

Table 2. Experimental Results of reparation coefficient in stream

Site	Date	Travel Time (min)	Conc. Of Gas(mg/l)		Reparation Coeff. (1/day)
			Up	Down	
Kwanri stream	99-10-06	19.12	Up	0.049	24.52
			Down	0.028	
	99-12-23	29.15	Up	0.098	10.78
			Down	0.078	
	00-03-22	55.58	Up	0.086	14.51
			Down	0.045	
	00-05-30	67.60	Up	0.118	7.61
			Down	0.075	
Sikgum stream	00-05-30	6.10	Up	0.105	10.13
			Down	0.098	
Upstream of Bokha	99-10-26	6.40	Up	0.134	14.35
			Down	0.122	
Upstream of Onyang	00-06-20	12.55	Up	0.556	17.60
			Down	0.442	
Jakchon stream	00-07-06	34.95	Up	0.203	6.16
			Down	0.155	
Upstream of Onyang	00-07-21	8.07	Up	0.487	23.31
			Down	0.407	
Downstream of Onyang	00-07-21	11.25	Up	1.015	23.75
			Down	0.750	

재폭기 계수는 6.16~24.52 1/day의 범위를 나타내었으며, 수심의 증가 보다 상대적으로 유속의 증가에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 소하천에서의 재폭기 작용은 큰 하천에 비해 수심의 변화가 적은 소하천 특성상 유하시간 즉, 평균유속에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

보에서의 재폭기 작용을 고찰하기 위해 관리천 측정시 보를 포함하는 구간을 선정하여 보에서의 재폭기 계수를 산정하였으며, Table 3과 같다. Table 3에서 보는 바와 같이 보에서의 재폭기 계수는 28.39~123.61 1/day로 나타나 하천에서보다 훨씬 활발한 재폭기 작용이 이루어 지고 있음을 알 수 있었으며, 보 직하류부에 흐름이 정체되는 시간에 따라 재폭기 계수가 크게 영향을 받는 것일소 생각된다.

Table 3. Experimental Results of reparation coefficient in drop structure

Site	Date	Travel time (min)	Conc. of gas(mg/l)		Rearation Coeff. (1/day)
			Up	Down	
Kwanri stream	99-12-23	6.95	Up	0.170	99.90
			Down	0.098	
	00-03-22	5.10	Up	0.143	123.61
			Down	0.086	
00-05-30	3.20	Up	0.145	78.92	
		Down	0.118		
Jakchon stream	00-07-06	14.10	Up	0.155	28.39
			Down	0.091	

IV. 요약 및 결론

경기도 이천시 북하천, 북하천 지류와 충남 온양시 온양천에서 총 10회에 걸쳐 재폭기 계수 측정을 실시하였다.

1. 측정구간의 수리조건은 하폭 1.4~3.8m, 평균유량 0.014~0.273 m³/s, 평균유속 0.08~0.44 m/s, 평균수심 0.05~0.21 m, 하천경사 0.004~0.023의 범위이다.
2. 소하천에서 재폭기 계수는 6.16~24.52 1/day의 범위를 나타냈으며, 수심의 변화가 적은 소하천의 특성상 평균유속이 재폭기 작용에 영향을 미치는 지배적인 인자로 나타났다.
3. 보에서 재폭기 계수는 28.39 ~ 123.61 1/day으로 나타나, 소하천에서의 재폭기 작용에 중요한 역할을 수행하는 것으로 생각되며, 보 하루에서의 정체 시간이 재폭기 계수에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.
4. 하천의 상류부에 위치하여 수심이 얇고 유속이 빠른 소하천에서의 재폭기 작용은 준용하천 이상의 큰 하천에서보다 훨씬 활발한 것으로 나타났다.

V. 향후 계획

재폭기 기작에 있어서 대기중의 산소가 수중으로 녹아들기 위해 새로운 표면의 지속적인 대기와의 접촉 즉, 자유수면의 난류 정도가 가장 중요한 역할을 한다는 것은 주류 이론으로 받아들여지고 있다. 난류정도에 영향을 미치는 주요 인자로서 기존의 재폭기 예측방정식에서 이용하였던 평균수심, 평균유속 2가지의 인자를 독립변수로 측정한 재폭기 계수를 종속변수로 SPSS 통계프로그램을 이용한 회귀분석을 통하여 재폭기 계수 예측 방정식 식-6과 같이 유도한다.

$$K_2 = CV^lH^m \quad \text{식-6}$$

C, l, m : 계수, V : 평균유속, H : 평균 수심

식-6에 양변에 상용로그를 취하여 선형의 형태로 변환하면 다음의 식-7과 같다.

$$\log K_2 = \log C + l \log V + m \log H \quad \text{식-7}$$

즉, 식-7은 측정된 자료에 로그값을 취하여 다중회귀분석한 결과이다.

필요한 경우 하천경사는 회귀식의 독립변수에서 제외시키는 것도 고려할 수 있다. 왜냐하면 본연구의 대상이 되는 농촌 소하천의 경우 경사가 지역적인 특성에 관계없이 어느정도 범위내에서 일정하다고 생각할 수 있기 때문이다.

참고문헌

1. Churchill, M. A., H. L. Elmore, and R. A. Buckingham, 1962, The Prediction of Stream Reaeration Rates. J. of Sanitary Engineering Div., SA4.
2. Grant, R. S., and Steven Skavroneck, 1980, Comparison of Tracer Methods and Predictive Equations for Determination of Stream-Reaeration Coefficients on Three Small Streams in Winsconsin, USGS/WRI-80-19.
3. Hubbard, E. F., F. A. Kilpatrick, L. A. Martens, and J. F. Wilson, Jr., 1982, Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing, U. S. Geological Survey, Techniques of Water-Resour. Investigations Book 3, Cahp. A9.
4. Karen D. Cleveland, 1989, Predicting Reaeration Rates in Texas Streams. J. of Environmental engineering, Vol. 27.
5. Kilpatrick, F. A. and E. D. Cobb, 1985, Measurement of Discharge Using Tracers, U. S. Geological Survey, Techniques of Water-Resour. Investigations Book 3, Chap. A16.
6. Kilpatrick, F. A., R. E. Rathbun, N. Yotsukura, G. W. Parker, and L. L. Delong, 1989, Determination of Stream Reaeration Coefficients by Use of Tracers, U. S. Geological Survey, Techniques of Water-Resour. Investigations Book 3, Cahp. A18.
7. Lam Lau, Y., 1972, Prediction Equation for Reaeration in Open-Channel Flow. Proceedings of ASCE, Vol. 98, No. SA6.
8. Negulescu, M., and V. Rojanski, 1969, Recent Research to Determine Reaeration Coefficient, Water Research. Pergamon Press, Vol 3. No. 3.
9. Rathbun, R. E., 1977, Reaeration Coefficients of Streams - State-of-the-Art, J. of Hydraulics Div., Vol. 103, No. HY4.
10. Rathbun, R. E., D. W. Stephens, and D. Y. Tai, 1978, Laboratory Studies of Gas Tracers for Reaeration, J. of Environmental Engineering, Vol. 104, No. EE2.
11. Tung, Y. K. and Hathhorn, W. E., 1989, Determination of the Critical Locations in a Stochastic Stream Environment. Ecol. Modelling, 45 : 43-61.
12. 조영준, 권순국, 1999, Modified gas tracer method를 이용한 하천 재폭기 계수의 산정, 한국 농공학회, 한국농공학회지, Vol. 41, No. 4, p.57~65.