

농촌 소하천에서의 재폭기 계수 추정

Prediction of Reaeration Coefficients in Rural Small Streams

송 인 홍* · 권 순 국**
Song, In Hong · Kwun, Soon Kuk

Abstract

Reaeration phenomena, the physical process of absorption of oxygen from atmosphere, is one of the important parameters of dissolved oxygen simulation in streams. This study was aimed at predicting reaeration coefficients in rural small streams, examining the influence of drop structure on reaeration and the seasonal fluctuation of reaeration coefficients. Reaeration coefficients of five streams including four tributaries of Bokha watershed in Gyeonggi Ichon and Onyang stream in Chungnam Onyang were measured. Constant rate injection (CRI) method using propane and Rhodamine-WT as gas and dye tracer was adopted.

Reaeration coefficients ranged between 6.16 and 29.16 reciprocal day, higher than those in USGS database. Prediction equation, $k_2 = C V^{0.593}$, was regressed from the measured data at 95% confidence level, with an absolute error of 21.2% and a standard error of 4.0 reciprocal days. Reaeration coefficients of experimental reaches with drop structure showed percentile increases of 42.3 to 159.2 compared to those without it, an indication that drop structure plays an important role on stream reaeration. Taking into consideration the seasonal fluctuation of reaeration coefficients, the values measured during September and October were the highest, mainly due to the removal of aquatic plants, by intensive rainfall during summer.

I. 서 론

하천의 수질 관리를 위해서는 하천의 자정 능력 (self purification capacity)을 평가하는 것이 중요하다. 하천의 자정 작용은 하천수중에 포함된 유기 오염물질이 유하하는 과정에서 감소되는 현상을 말하며, 감소되는 정도는 자정 계수로 표현된

다. 하천의 자정 계수는 감소된 산소의 재공급과 정인 재폭기 작용과 밀접한 관계를 가진다.

재폭기 작용은 산소가 대기로부터 수중으로 녹아 들어가는 물리적인 현상이며, 산소가 공급되는 정도는 재폭기 계수 (k_2 , reaeration coefficient)로 표현된다. 하천에서는 난류정도에 커다란 영향을 받는 기계적 재폭기 작용이 주된 산소공급원으로

*서울대학교 대학원

**서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 재폭기 계수, CRI, reaeration, tracer

식물에 신진대사의 의한 산소 공급의 영향은 무시할 수 있다 (McConnell and Sigler, 1959).

하천 수질의 지표인 용존 산소 농도를 모의하는데 산소 공급을 표현하는 주요 매개변수인 재폭기 계수를 추정하는 것은 매우 중요하다. 재폭기 계수 추정을 위하여 이론적, 경험적으로 많은 연구를 통하여 많은 모형들이 개발되어 왔음에도 불구하고 보편적으로 적용 가능한 이론적 모형은 아직까지 검증된 바 없으며, 실측 자료로부터 회귀상관분석에 의한 추정이 가장 신뢰성 있는 것으로 알려져 있다.

따라서, 보다 신뢰성 있는 하천에서의 용존산소 농도의 모의를 위해서는 우리나라 하천 특성에 맞는 재폭기 계수의 추정이 필요하다.

본 연구에서는 modified trace method의 CRI method를 이용하여 유량이 적고, 수심이 얇은 특성을 가지는 농촌 소하천에서 재폭기 계수를 측정하고, 예측방정식을 유도하여 소하천 특성에 맞는 재폭기 계수를 추정하고자 한다. 또한, 우리나라 하천의 특성상 보편적으로 존재하는 보에서의 재폭기 작용의 영향과 재폭기 계수의 계절적 변화를 살펴보았다.

II. 연구 방법

1. 시험 구간

본 연구에서는 경기도 이천시 북하천 유역에 위치한 북하천 상류, 식금천, 관리천, 작촌천과 충남은양시에 위치한 은양천 등 총 5개 하천을 선택하여 재폭기 계수를 측정하였으며, 시험구간의 위치는 Fig. 1, Fig. 2와 같다.

시험구간을 포함하는 하천은 유역면적이 약 5~15 km²이고, 하천변으로 농경지가 위치하고 있는 전형적인 농촌 소유역에 위치하고 있다. 시험하천은 평균 하폭이 약 1.0~3.8 m되는 소하천으로 보가 산재하고 있으며, 여름에는 하천을 따라 식물들이 무성하게 자라 흐름의 정체구간이 발생하는 pool and riffle형 하천이다.

시험구간은 상류 및 시험구간에서 유입되는 지

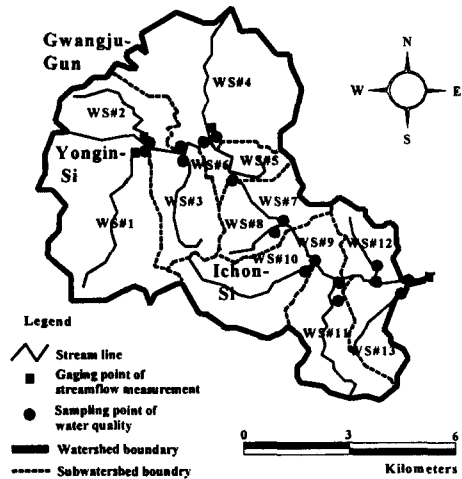


Fig. 1 Experimental stream reaches in Bokha watershed

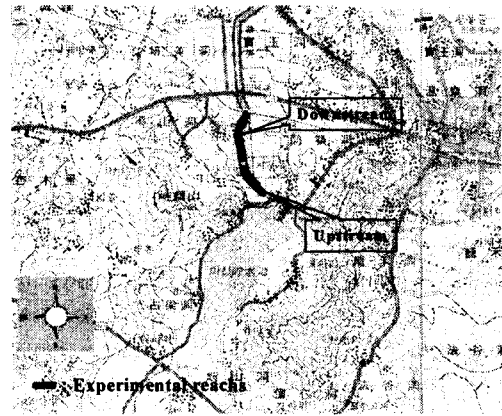


Fig. 2 Experimental reaches in Onyang stream

천이 없고, 하천의 형상이 비교적 일정한 구간을 선정하였으며, 관리천의 시험구간은 계절별로 재폭기 계수를 측정하였다.

또한, 관리천과 작촌천의 시험구간은 보에서의 재폭기 작용을 고찰하기 위하여 보를 포함하는 약 30 m 시험구간을 별도로 선정하여 재폭기 계수를 측정하였다.

2. 실험 방법

가. CRI method

재폭기 계수 측정 방법에는 DO balance method,

distributed equilibrium method, tracer method가 있다. Rathbun et al. (1978)은 가스 추적자로 방사성 동위원소 대신 탄화수소를 사용하여 modified gas tracer method를 확립하였다.

본 연구에서는 modified gas tracer method의 SI(slug injection) method와 CRI(constant rate injection) method 중 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(송, 2001). 가스 추적자로서 프로판 가스를 이용하였고, 수체의 흐름과 이동 확산현상을 관찰하고 시험구간에서 가스의 이동시간을 결정하기 위한 염료 추적자로서 생태학적으로 안전하고 유기물에 대한 흡착성이 적으며, 수체와의 이동확산이 잘 이루어지는 Rhodamine-WT를 이용하였다.

CRI Method은 상·하류 구간의 가스평형농도 차이로부터 가스 방출량을 구하고, 염료 추적자의 첨두농도발생시간으로 가스 이동시간을 구하여 재폭기 계수를 측정하는 방법으로 원리는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 실선으로 표시된 곡선은 일정시간간격으로 시료 채취한 염료 반응곡선이고, 점선으로 표시된 곡선은 가스의 평형농도 곡선이다. 염료 반응곡선의 첨두농도 이동시간으로부터 상·하류 측정지점의 유하시간을 의미하며, 상·하류 측정지점의 가스 평형농도 \bar{c}_g 의 차이는 수중에 녹아 있던 프로판 가스가 대기로 방출된 양을 의미한다.

따라서, 재폭기 계수와 일정한 관계를 가지는 프로판 가스의 방출계수를 구하면 재폭기계수를 구할 수 있다. 프로판 가스의 방출율은 수중의 프로판 가스 농도에 비례한다고 가정할 수 있으므로 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dC_g}{dt} = -K_T C_g \dots \dots \dots (1)$$

여기서, C_g 는 프로판 가스의 평형농도, t 는 시간, K_T 는 프로판 가스의 방출계수, $\frac{dC_g}{dt}$ 는 가스

방출의 결과로 나타나는 가스 농도의 변화율이다.

식 (1)을 상·하류 구간으로 적분하면 식 (2)와 같으며, 첨자 u 와 d 는 하천의 상류와 하류를 나타낸다.

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

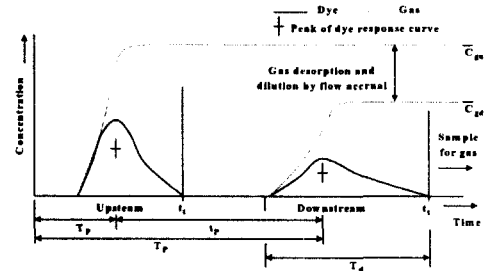


Fig. 3 Principle of experiment using CRI method

식 (2)에서 가스 이동시간($t_d - t_u$)은 염료 추적자 반응곡선의 상·하류간 첨두 농도 이동시간(t_p)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 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$K_T = \frac{1}{t_c} \ln \frac{(\bar{c}_g Q)_u}{(\bar{c}_g Q)_d} \dots \dots \dots (3)$$

프로판 가스의 방출계수와 재폭기계수의 비율은 수리조건 및 온도에 관계없이 일정한 관계를 가지며(Rathbun et al. 1978), 그 비율은 다음의 식 (4)와 같다.

$$R_p = \frac{k_2}{K_T} = 1.39 \dots \dots \dots (4)$$

식 (3)에서 구한 프로판 가스의 방출계수로부터 식 (4)를 이용하여 재폭기 계수를 계산하였다.

나. 프로판 가스 및 Rhodamine-WT 투입
프로판 가스는 97~99%의 순수 프로판 가스와

소량의 메탄, 부탄, 에탄을 함유하는 일반 가정용 가스를 이용하였다. 가스 투입은 Fig. 4와 같이 유효 공극의 크기 약 40 μm , 외경 3 cm, 길이 10 cm 크기의 원통형 모양의 폭기용 노즐 2개를 부착한 가스투입 장치를 제작하여 종·횡방향 확산이 용이하게 하고 충분한 량의 프로판 가스가 수중에 녹아들 수 있도록 하였다.

프로판 가스는 하류 시료채취지점에서 가스농도가 최소 10 $\mu\text{g/L}$ 이상이 될 수 있도록 충분한 량을 시험 시작시간부터 종료시간까지 일정한 비율로 투입하였다.

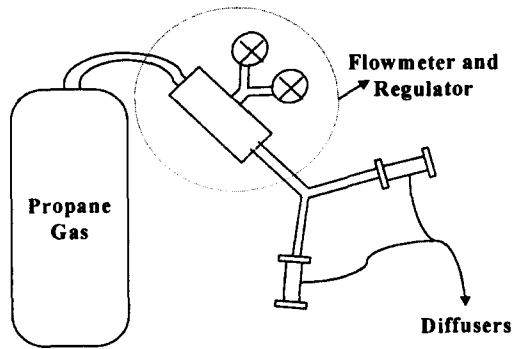


Fig. 4 Apparatus for gas injection

염료 추적자로서 Benmeadows사의 Rhodamine-WT (FWT Red)용액을 이용하였다. 형광특성을 가진 Rhodamine-WT 용액은 수체의 흐름특성을 관찰하기에 용이하고 수중의 부유물질에 대한 흡착성이 적으며, 광분해에 대한 저항성이 큰 특성을 가지고 있다. 염료의 투입은 8 L용량의 버킷에 하천수를 담고 Rhodamine-WT용액 25 mL을 완전히 섞은 후 순간 투입하였다.

시험구간의 상류 가스 및 염료의 투입지점까지의 거리는 식 (5)를 이용하여 추적자의 종·횡방향 확산현상이 충분히 일어날 수 있도록 하였다 (Kilpatrick and Cobb, 1985).

$$L_0 = 6.294 \frac{VB^2}{E_z} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, L_0 는 혼합거리(m), V 는 평균유속(m/s)

B 는 평균하폭(m), $E_z = 6.72D^{1.5}S^{0.5}$ 는 횡방향 혼합계수이다.

하천에서의 가스와 염료의 투입지점은 수체와의 혼합이 쉽게 이루어질 수 있도록 수심이 깊고 유속이 빠른 지점을 선정하였다.

다. 시료의 채취 및 분석

가스 및 염료 시료 채취의 채취는 하천 흐름의 중앙에서 실시하였다. 가스 시료는 125 mL 용량의 septum마개를 가진 vial을 이용하여 염료가 완전히 지나간 후 즉, 가스 평형농도에 도달한 이후에 지점당 2개의 시료를 채취하고 혼합하여 분석하였다. 염료 시료는 30 mL 용량의 유리병을 이용하여 침투 농도가 지나기 전까지는 짧은 시간간격을 두어 침투 농도 측정이 용이하도록 하였으며, 지점당 20~30 개의 시료를 채취하였다.

가스 시료의 프로판 가스 농도는 가스 크로마토그래프의 FID(Flame Ionization Detector)를 이용하여 측정하였다.

염료 시료분석은 UV-Spectrophotometer를 이용하여 분석하였다.

라. 온도 보정

재폭기계수의 값은 수온이 높아짐에 따라 감소하기 때문에, 재폭기계수 측정시 실측한 수온으로부터 식 (6)을 이용하여 20°C에서의 재폭기계수 온도 보정을 실시하였다.

$$k_{2T} = k_{20} \theta^{(T-20)} \dots\dots\dots (6)$$

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

3. 하천의 수리조건

재폭기 계수 실험시 각 시료 채취지점의 하천의 유량, 흐름폭, 온도를 실측하였으며, 하천경사 및 시험구간 길이는 측량을 통하여 결정하였다. 평균 유속은 측량한 시험구간의 길이를 침투농도 이동 시간으로 나누어 계산하였고, 평균수심은 평균유량을 평균 유속과 평균 흐름폭으로 나누어 얻은

평균 수리수심이다.

4. 예측방정식의 유도

본 연구에서는 SPSS 통계 프로그램의 stepwise 옵션을 이용하여 실험시 측정된 수리인자들과 회귀 분석하여 재폭기 계수 예측방정식을 유도하였다. 예측방정식의 오차는 식 (7)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Error} = \frac{k_{2\text{calc}} - k_{2\text{exp}}}{k_{2\text{exp}}} \times 100 (\%) \dots \dots \dots (7)$$

여기서, $k_{2\text{calc}}$ 는 예측치, $k_{2\text{exp}}$ 는 실측치이다.

III. 결과 및 고찰

1. 재폭기 계수의 측정

재폭기 계수 측정실험은 5개 하천, 7개 측정구간에서 총 15회 실시하였다. 측정구간 중 관리천은 재폭기 계수의 연중 변화 및 보에서의 재폭기 작용을 고찰하기 위해 높이 85 cm이고 실제의 수체의 낙차는 40 cm되는 보를 포함하여 측정을 실시하였다.

실측한 측정구간의 수리조건은 Table 1와 같으며, 하폭 1.0~3.8 m, 유량 0.007~0.282 m³/s, 평균유속 0.05~0.51 m/s, 수리수심 0.05~0.23 m, 하천경사 0.003~0.023의 범위를 나타내었다.

재폭기 계수는 염료 침투 농도의 이동시간으로부터 가스의 이동시간을 구하고, 측정구간 상·하류의 가스 평형농도의 차이를 측정하여 식 (3), (4), (5)를 이용하여 재폭기 계수를 계산하였다. 식 (6)을 이용하여 20 °C 기준으로 온도를 보정하였으며, 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 보는 바와 같이 재폭기 계수는 00/7/21 온양천과 00/9/27 관리천에서 측정된 재폭기 계수가 28.35, 29.16 1/day로 가장 큰 값을 보였으며, 00/7/06 작촌천의 재폭기 계수가 6.16 1/day로 최소값을 나타내었다. 이는 측정시 온양천과 관리천은 하천에 식물들이 없는 상태였고, 작촌천의 경우는 식물들의 무성하게 자라고 있었는데 식물의 의한 지체현상 때문인 것으로 생각된다.

실측한 재폭기 계수를 USGS에서 미국의 23개 주, 166개 하천 493개 시험구간을 대상으로 측정된 재폭기 계수 자료 (Melching and Flores, 1999)와 비교하면 Fig. 5와 같다.

Table 1 Hydraulic conditions on experimental reach

Site	Date	Travel time (min)	Width (m)	Mean velocity (m/s)	Mean depth (m)	Discharge (m ³ /s)	Slope	Reaeration coeff. (1/day)
Kwanri stream	99/10/06	19.12	1.80	0.27	0.20	0.097	0.0041	24.52
	99/12/23	19.41	2.37	0.16	0.14	0.052	0.0030	9.74
	99/12/23	9.74	2.37	0.22	0.10	0.051	0.0050	12.84
	00/03/22	32.23	2.80	0.10	0.13	0.035	0.0030	15.03
	00/03/22	23.35	2.80	0.09	0.13	0.035	0.0050	13.80
	00/05/30	50.75	1.87	0.06	0.13	0.015	0.0030	6.54
	00/05/30	16.85	1.87	0.13	0.06	0.014	0.0050	10.86
	00/09/27	10.40	3.57	0.30	0.15	0.159	0.0030	29.16
Sikgum stream	00/05/30	4.85	1.00	0.17	0.18	0.031	0.0225	12.74
Upstream of Bokha	99/10/26	6.40	3.50	0.26	0.21	0.191	0.0050	14.35
Jakchon stream	00/07/06	34.95	1.46	0.05	0.09	0.007	0.0038	6.16
Upstream of Onyang	00/06/20	12.55	3.06	0.27	0.05	0.044	0.0012	17.60
	00/07/21	8.07	3.84	0.40	0.15	0.232	0.0012	23.31
Downstream of Onyang	00/07/21	5.58	3.68	0.51	0.15	0.282	0.0025	28.35
	00/07/21	5.67	3.10	0.37	0.23	0.270	0.0023	19.22

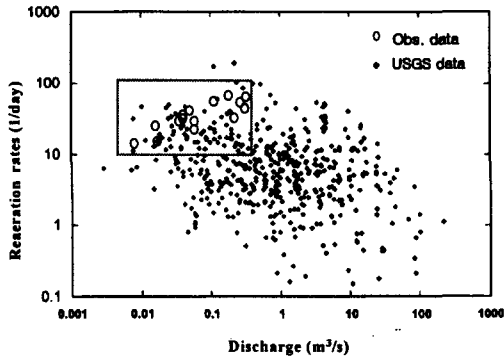


Fig. 5 Comparison observed k_2 with USGS dataset of k_2 measurements

Fig. 5에서 보는 바와 같이 본 연구에서 실측한 재폭기 계수는 동일한 유량 조건에서 비교하였을 때 USGS에서 측정한 재폭기 계수 자료들 중 비교적 높은 부분에 위치하는 것으로 나타났으며, 이는 소하천의 수리 조건이 수심이 얕고, 상대적으로 평균 유속이 커서 재폭기 작용이 활발하게 일어난 것으로 생각된다.

2. 예측방정식의 유도

하천에서의 재폭기 작용은 수심, 유속, 하천경사 등의 여러 가지 수리조건에 영향을 받으며, 하폭의 영향은 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Bennett and Rathbun, 1972).

회귀 분석을 위하여 실측한 5개의 수리인자를 독립변수로 예측방정식의 형태를 표현하면 식 (8) 과 같다.

$$k_2 = CV^a H^b Q^c S^d W^e + E \dots \dots \dots (8)$$

여기서, V는 평균유속(m/s), H는 수심(m), Q는 유량(m³/s), S는 하천경사(m/m)이며, C, a, b, c, d, e는 상수이다.

회귀 분석을 하는데 있어서, 독립변수의 수가 많아질수록 결정계수가 높아지는 다중공선상(multicollinearity)의 문제를 방지하기 위하여 각 독립변수들의 조합으로 회귀 분석할 때마다 각 독립변수

들에 대한 t-검정을 통하여 5% 유의 수준에서 무의미한 변수를 제거하는 SPSS 통계 프로그램의 stepwise option을 이용하여 회귀 분석하였다.

SPSS 통계 프로그램을 이용한 회귀 분석 결과는 Table 2에서 보는 바와 같이 결정계수가 0.741로 비교적 큰 값을 보였다. 식 (8)의 예측방정식의 상수 중 C, a값만이 유의미하며, C, a 값 및 95% 신뢰구간은 Table 3와 같다.

예측방정식의 정확성을 검토하기 위한 분산분석의 결과는 Table 4과 같다. F값은 유의수준 5%에서 F(2, 14 : 0.5)값 3.82보다 크므로 예측방정식이 유의하다고 할 수 있다. 즉, 회귀에 의한 제곱합이 잔차의 제곱합보다 상대적으로 많이 커서 예측방정식이 실측한 재폭기 계수를 충분히 설명한다고 할 수 있다. 또한, 잔차의 상관관계를 알아보기 위하여 이용되는 Durbin-Watson 통계량은 0또는 4에 가까울수록 잔차들 간에 상관관계가 있음을 나타내는데 본 연구의 회귀 결과는 2.005로 잔차들 간에 상관관계가 없으며, 회귀모형이 적합함을 알 수 있다.

Table 2 Coefficients of correlation and determination

Mean k_2 (1/day)	Pearson r	R ²	Adjusted R ²
14.72	0.861	0.741	0.721

Table 3 Estimates of coefficient

Coefficient	Estimate	95% confidence intervals
C	40.528	27.550 ~ 59.561
a	0.598	0.386 ~ 0.810

Table 4 Results from the analysis of variance of the prediction equation

Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	Durbin-Watson
Regression	1	2.370	2.370	37.151	2.005
Residual	13	0.829	0.064		
Total	14	3.199			

따라서, 예측방정식은 식 (9)와 같다.

$$k_2 = 40.528 V^{0.538} \dots\dots\dots(9)$$

회귀분석 결과 5개의 수리인자 중 수심, 유량, 하천경사, 하폭의 4개의 수리인자들은 다중공선상의 문제로 제거되고 평균 유속만이 독립변수로서의 의미가 있는 것으로 나타났다.

재폭기 계수는 일반적으로 수리조건 중 평균 유속에 비례하고 수심에 반비례하는 것으로 알려져 있으나, 회귀 분석결과 평균 유속만의 함수로 나

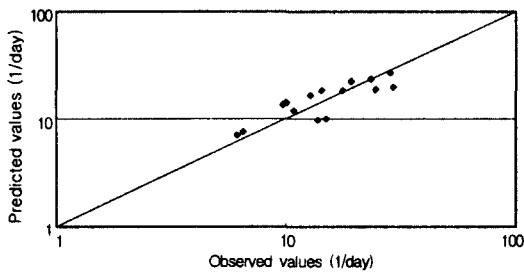


Fig. 6 Plotting of observed values versus predicted ones

Table 5 Comparison observed k_2 with predicted ones

Site	Date	Obs. k_2 (1/day)	Pre. k_2 (1/day)	Error (%)	Abs. error (%)
Kwanri stream	99/10/06	24.52	18.71	-23.71	23.71
	99/12/23	9.74	13.49	38.49	38.49
	99/12/23	12.84	16.50	28.47	28.47
	00/03/22	15.03	9.96	-33.72	33.72
	00/03/22	13.80	9.78	-29.14	29.14
	00/05/30	6.54	7.59	16.17	16.17
	00/05/30	10.86	11.89	9.49	9.49
	00/09/27	29.16	19.59	-32.83	32.83
Sikgum stream	00/05/30	10.13	14.14	39.53	39.53
Upstream of Bokha	99/10/26	14.35	18.13	26.29	26.29
Jak hon stream	00/07/06	6.16	7.03	14.15	14.15
Upstream of Onyang	00/06/20	17.60	18.34	4.24	4.24
	00/07/21	23.31	23.53	0.95	0.95
Downstream of Onyang	00/07/21	28.35	26.98	-4.84	4.84
	00/07/21	19.22	22.40	16.51	16.51
Average					21.23

타난 것은 유역의 상류에 위치한 농촌소하천의 특성상 수심이 얇고 수심 변화가 적으며, 유량이 증가함에 따라 수심의 증가율보다는 평균 유속의 증가율이 상대적으로 크기 때문인 것으로 생각된다.

평균 유속과 유량을 예측방정식에 대입하여 재폭기 계수를 산정하여 실측 재폭기 계수와 비교하여 보면 Fig. 6과 같다. 실측치와 예측치의 평균 오차는 Table 5과 같다.

Table 5에서 보는 바와 같이 -33.72 ~ 39.53%의 오차 범위를 나타내었으며, 평균 절대값 오차는 21.23%, 표준 오차는 4.0 1/day로 나타나 예측방정식이 실측값을 잘 설명하는 것으로 생각된다.

3. 보에서의 재폭기 계수 산정

관리천, 작촌천에서 보를 포함하는 시험구간을 별도로 선정하여 재폭기 계수를 측정하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 측정 시험 보는 관리천의 경우 보높이 80 cm, 물의 실제 낙폭 40 cm정도인 콘크리트 보이고, 작촌천은 보높이 70 cm, 물의 실제 낙폭이 60 cm인 돌로 쌓은 자연형 보였다.

Table 6에서 보는 바와 같이 보에서의 재폭기 계수는 28.39 ~ 276.83 1/day로 나타났으며, 하천의 6.16 ~ 29.16 1/day보다 훨씬 활발한 재폭기 작용이 일어남을 알 수 있다. 또한, 보에서의 재폭기 계수는 보 하류의 정체구간에서의 정체시간에 큰 영향을 받는 것으로 나타나 보의 높이 뿐만 아

Table 6 Experimental results of reaeration coefficients in drop structure

Site	Date	Travel time (min)	Conc. of gas (mg/L)	Reaeration coefficients (1/day)
Kwanri stream	99/12/23	6.95	0.170 0.098	99.90
	00/03/22	5.10	0.143 0.086	123.61
	00/05/30	3.20	0.145 0.118	78.92
	00/09/27	1.20	0.270	276.83
			1.586	
Jakchon stream	00/07/06	14.10	0.155 0.091	28.39

Table 7 Percentile increase of reaeration coefficients involved drop structure

Site	Date	Reaeration coefficients (1/day)	Reaeration coefficients with DS* (1/day)	Percentile increase (%)
Kwanri stream	99/12/23	10.78	27.93	159.2
	00/03/22	14.51	23.68	63.2
	00/05/30	7.61	10.84	42.3
	00/09/27	29.16	54.78	87.9
Jakchon stream	00/07/06	6.16	12.55	103.8

* DS : Drop structures

나라 보의 형상이 재폭기 계수에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

보에서의 재폭기 영향을 고찰해 보기 위하여 보를 제외한 구간과 보를 포함하는 구간의 재폭기 계수를 비교하였으며, Table 7 같다.

Table 7에서 보는 보와 같이 보를 포함하는 구간의 재폭기 계수는 12.55 ~ 54.78 1/day로 보를 포함하지 않는 구간의 재폭기 계수 6.16 ~ 29.16 보다 42.3~159% 증가하는 것으로 나타났다. 농촌 소하천에서 보가 재폭기 작용에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 생각된다.

4. 재폭기 계수의 계절적인 변화

Table 8은 재폭기 계수의 계절적 변동을 파악하기 위해 여러시험 구간중 관리천 시험구간을 선택하여 계절별로 5회 측정된 결과이다.

Table 8에서와 같이 재폭기 계수는 봄·여름·

Table 8 Seasonal change of reaeration coefficients

Site	Date	Mean velocity (m/s)	Mean depth (m)	Discharge (m ³ /s)	Reaeration coefficients (1/day)
Kwanri stream	99/10/06	0.27	0.19	0.097	24.52
	99/12/23	0.18	0.15	0.051	10.78
	00/03/22	0.09	0.20	0.035	14.51
	00/05/30	0.08	0.10	0.014	7.61
	00/09/27	0.30	0.15	0.159	29.16

겨울보다는 가을에 측정된 값이 24.52, 29.16 1/day로 높게 나타났다. 이는 하천 유량의 영향도 있겠지만 유하시간에서도 확인할 수 있듯이 여름에 하천에 무성한 식물들로 인한 지체현상으로 재폭기 작용이 활발하지 못했던 반면, 가을에는 집중 호우로 식물들이 쓸려 내려감으로써 하천의 지체현상이 사라지고 유속이 증가하면서 재폭기 작용이 활발하게 일어난 것으로 생각된다.

IV. 요약 및 결론

1. 시험구간의 수리조건은 하폭 1.0~3.8m, 평균 유량 0.007~0.282 m³/s, 평균유속 0.05~0.51 m/s, 평균수심 0.05~0.23 m, 하천경사 0.005~0.023의 범위였다.

2. 소하천에서 재폭기 계수는 6.16~29.16 1/day의 범위를 나타내었으며, 이는 미국 23개 주, 166개 하천을 대상으로 측정된 USGS의 재폭기 계수 자료와 비교하였을 때 동일한 유량 조건에서 높은 재폭기 계수값을 나타내었다.

3. SPSS 통계 프로그램을 이용하여 회귀분석한 결과 평균 유속을 독립 변수로 예측방정식 $k_2 = 40.528 V^{0.598}$ 이 유도되었으며, 신뢰도 95%에서 F검정을 실시한 결과 유의성이 인정되었다.

4. 예측 방정식이 평균 유속만의 함수로 나타난 것은 소하천이 수심이 얕고 수심 변화가 적으며, 유량이 증가함에 따라 수심의 증가보다는 상대적으로 유속의 증가가 크기 때문인 것으로 생각된다.

5. 재폭기 계수 실측치와 예측치를 비교한 결과 -33.72 ~ 39.53%의 오차 범위를 나타내었으며, 평균 절대값 오차는 21.23%, 표준 오차는 4.0 1/day로 나타났다.

6. 보의 재폭기 계수는 28.39 ~ 276.83 1/day로 나타나 하천의 6.16 ~ 29.16 1/day보다 훨씬 활발한 재폭기 작용이 일어남을 알 수 있었고, 보를 포함하는 구간과 보를 포함하지 않는 구간의 재폭기 계수를 비교한 결과 보를 포함하는 구간의 재폭기 계수가 42.3~159.2% 증가함을 알 수 있어

소규모 하천에서의 보의 자정효과를 확인할 수 있었다.

7. 재폭기 계수의 계절적인 변화를 고찰한 결과 봄·여름·겨울보다는 가을이 크게 나타났다. 이는 여름에 하천에 무성한 식물들로 인하여 재폭기 작용이 활발하지 못했던 반면, 가을에는 여름철의 집중 호우로 식물들이 제거됨으로써 재폭기 작용이 활발했기 때문인 것으로 생각된다.

8. 본 연구는 농촌 지역의 소하천이라는 제한된 범위에서 재폭기 계수를 측정하였으므로, 하천에 대한 보다 보편적인 연구 결과를 얻기 위해서는 수리 조건의 범위를 보다 확대시켜 지속적인 재폭기 계수 측정이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 농림부의 첨단농업기술개발사업 과제인 “농촌하천유역의 종합적 수질관리시스템 개발”의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 송인홍, 2001, 농촌 소하천에서의 재폭기 계수 추정, 서울대학교 대학원 공학석사학위 논문.
2. 조영준, 1999, Modified gas Tracer Method를 이용한 하천 재폭기 계수의 측정, 서울대학교 대학원 공학석사학위 논문.
3. 조영준, 권순국, 1999, Modified gas tracer method를 이용한 하천 재폭기 계수의 측정, 한국농공학회지, Vol. 41, No. 4, pp.57~65.
4. Bennett, J. P. and R. E. Rathbun, 1972, Reaeration in Open-Channel Flow, U. S. Geological Survey Professional Paper 737.
5. Cleveland K. D., 1988, Predicting reaeration rates in Texas streams, J. of Environ. Eng., Vol. 115, No. 3, pp. 620-632.
6. Elmore, H. L., and W. F. West, 1961, Effect of water temperature on stream reaeration, J. of the San. Eng. Division, Proceedings of ASCE, 87(SA6), pp.59-71.
7. 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.
8. 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, Chap. A18.
9. McConnell, W. J. and W. F. Sigler, 1959, Chlorophyll and productivity in a mountain river, Limnology and Oceanography, Vol. 4, No. 3, pp. 335-351.
10. Melching C. S. and H. E. Flores, 1999, Reaeration equations derived from U. S. geological survey database, J. of Environ. Eng., Vol. 125, No. 5, pp. 407-414.
11. Parker, G. W. and F. B. Gay, 1987, A Procedure for Estimating Reaeration Coefficients for Massachusetts Streams, U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Rep. 86-411.
12. Rathbun, R. E., 1977, Reaeration coefficients of streams - state-of-the-art, J. of Hydraulics Division, 103(HY4), pp.409-424.
13. Rathbun, R. E., D. W. Stephens, and D. Y. Tai, 1978, Laboratory Studies of Gas Tracers for Reaeration, J. of Environmental Engineering, 104(EE2), pp.215-229.
14. Yotsukura, N., D. A. Stedfast, R. E. Draper, and W. H. Brutsaert, 1983, An Assessment of steady-state propane-gas tracer method for reaeration coefficients-Cowaselon Creek, New York, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations 83-4183.