

縱擴散係數에 관한 研究: II. 새로운 縱擴散係數 推定式 開發

Analysis of Longitudinal Dispersion Coefficient: Part II. Development of New Dispersion Coefficient Equation

서 일 원* · 정 태 성**
Seo, Il Won · Cheong, Tae Seong

Abstract

New dispersion coefficient equation which can be used to estimate dispersion coefficient by using only hydraulic data easily obtained in natural streams has been developed. Dimensional analysis was performed to select physically meaningful parameters. One-Step Huber method, which is one of the nonlinear multi-regression method, was applied to derive a regression equation of dispersion coefficient. 59 measured hydraulic data which were collected in 26 streams in the United States and were analyzed in the Part I of this study, were used in developing new dispersion coefficient equation. Among 59 measured data sets, 35 data sets were used in deriving regression equation, and 24 data sets are used for verification. The new dispersion coefficient equation, which has been developed in this study was proven to be superior in explaining dispersion characteristics of natural streams more precisely compared to existing dispersion coefficient equations.

요 지

본 연구에서는 자연하천에서 수집하기 용이한 水理量 資料로부터 縱擴散係數를 추정하는 공식을 개발하였다. 차원해석을 수행하여 물리적 의미를 가진 변수를 선정한 후, 縱擴散係數를 추정하는 回歸式을 유도하기 위하여 비선형 다중회귀방법의 하나인 One-Step Huber 방법을 적용하였다. I 단계 연구에서 분석한 바 있는 미국 전역의 26개 하천 59지점의 수리 및 농도 자료를 사용하여 새로운 縱擴散係數 추정식을 개발하였다. 59지점의 자료중 35지점은 縱擴散係數를 추정하는 회귀식을 유도하는 데 사용하고, 나머지 24지점을 사용하여 유도한 회귀식을 검증하였다. 기존의 공식과 비교한 결과, 본 연구에서 개발한 추정식이 자연하천의 확산 특성을 보다 정확하게 설명할 수 있음이 밝혀졌다.

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수
** 서울대학교 대학원 토목공학과 석사과정

1. 序 論

최근 고도성장으로 인한 산업화 및 도시화로 인하여 다양한 유해성 오염물질이 자연하천으로 유입되고 있으며, 하천에 유입된 오염물질은 하천의 수질을 오염시키고 나아가서 하천 생태계에도 악영향을 미치게 된다. 자연하천에서 오염물질의 확산 및 혼합거동은 하천의 난류특성 및 유속분포, 지형조건 등 여러 요인에 의해 지배받는다. 오염물질이 사고에 의해 순간적으로 방출되었거나, 下·廢水處理場에서 처리된 방류수가 시간적 변동성을 갖고 방출되는 경우에는 하천 흐름방향의 분산이 지배적인 혼합 메카니즘이며 이러한 縱擴散 舉動을 해석하기 위하여 1次元 擴散模型을 사용한다(Fischer 등, 1979). 1次元 擴散模型의 적용시 가장 큰 문제는 적절한 縱擴散係數의 결정이다. Taylor (1954), Elder(1959), 그리고 Fischer(1966) 등에 의해 이론적·경험적인 방법들이 제안되었지만, 대부분의 추정공식들이 흐름과 확산거동이 복잡한 자연하천에서의 종확산을 적절하게 설명하지 못하는 것으로 밝혀졌다(Fischer 등, 1979; 서일원과 정태성, 1995).

본 연구는 縱擴散係數에 관한 연구의 II 단계 연구로서, I 단계 연구(서일원과 정태성, 1995)에서는 기존의 縱擴散係數 추정공식들을 비교·분석하였다. I 단계 연구 결과, 기존의 공식들은 대부분 자연하천의 확산특성을 정확하게 표현하기에는 부적절한 것으로 밝혀졌다. 기존의 공식들은 실측된 縱擴散係數를 대부분 과소 또는 과대 산정하고 있는 것으로 나타났다. I 단계 연구에서 가장 우수한 거동을 보이는 것으로 밝혀진 Liu(1977)의 공식은 하폭이 작은 소하천에서는 비교적 양호한 거동을 보이나, 하폭이 큰 대하천의 경우에는 상당히 과대 산정하고 있기 때문에 우리나라의 주요하천과 같이 하폭이 큰 대하천에는 적용하기 어려운 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 확산실험이 수행되지 않아서 縱擴散係數 실측치를 구할 수 없는 하천의 확산 거동을 예측하기 위해서 1차원 확산모형을 적용할 필요가 있는 경우에 사용할 수 있도록 비교적 수집하기 용

이한 수리량 자료로부터 縱擴散係數를 추정하는 공식을 개발하였다. 본 연구에서는 次元解析을 통하여 물리적 의미를 가진 변수를 선정하여 추정식에 포함시켰다. 독립변수인 수리량 자료 및 지형 자료로부터 종속변수인 縱擴散係數를 추정하는 回歸式을 유도하기 위하여 非線型 多重回歸方法의 하나인 One-Step Huber 방법을 사용하였다. 실측자료로서 I 단계 연구에서 수집·분석한 바 있는 미국 전역의 26개 하천 59지점의 수리 및 확산자료를 사용하였다.

2. 理論的 考察

2.1 次元解析

자연하천에 유입된 오염물질의 확산특성에 영향을 미치는 인자는 유체의 역학적 성질, 하천의 흐름 특성, 그리고 지형인자로 분류할 수 있다. 유체의 역학적 성질로 중요한 인자는 밀도, 점성계수 등이며, 하천의 흐름 특성에 포함되는 인자는 유속, 전단유속, 수심 등이며, 지형인자로서 중요한 인자는 하폭, 하상형상, 蛇行度 등이다. 그래서 縱擴散係數, K와 이들 변수 간의 관계를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$K=f_1(\rho, \mu, U, U_s, d, W, S_b, S_n) \quad (1)$$

여기서 ρ , μ 는 유체의 밀도와 점성계수이고, U는 유속, d 는 수심, W는 하천폭, S_b 는 하상의 형상인자, S_n 은 하천의 蛇行度, 그리고 U_s 는 전단유속으로서 다음식과 같다.

$$U_s = \sqrt{gRS} \quad (2)$$

여기서 g 는 중력가속도, S는 하천경사이다. 이들 인자들을 Buckingham Pi 이론을 사용하여 중요한 물리적인 의미를 갖는 無次元項으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{K}{dU_s} = f_2\left(\frac{Ud\rho}{\mu}, \frac{U}{U_s}, \frac{W}{d}, S_b, S_n\right) \quad (3)$$

여기서 K/dU 는 無次元 縱擴散係數이고, $Ud\rho/\mu$ 는 Reynolds수, U/U_c 는 마찰항으로 $(8/f)^{1/2}$ 과 동일하다. 여기서 f 는 Darcy-Weisbach의 摩擦因子이다. W/d 는 하천의 폭-수심비를 의미한다. 하천의 형상인자(S_r)와 사행도(S_n)는 하천 수로의 수심방향 및 횡방향의 불규칙성을 의미한다. 하천 수로의 수심방향 및 횡방향의 불규칙성은 이로 인해 생기는 2차류 및 전단흐름때문에 오염물질의 혼합을 증가시키는 데 영향을 주는 인자이지만, 이들 자료는 일반적으로 자연하천에서 용이하게 수집하기 어려울 뿐 아니라 이들의 영향을 마찰항(U/U_c)에 포함시킬 수 있기 때문에 제외할 수 있다. 또한 자연하천의 수로 바닥이나 양안같이 완전히 거친 영역의 난류흐름에서는 Reynolds수가 오염물질의 혼합특성에 미치는 영향은 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그래서 이 항들을 제거하면 식 (3)은 다음과 같이 간략화된다.

$$\frac{K}{dU} = f_3 \left(\frac{U}{U_c}, \frac{W}{d} \right) \quad (4)$$

식 (4)는 무차원항들로서 표시되어 있으나, 이 항들을 분리하여 보면 자연하천에서 용이하게 수집 가능한 수리량 및 지형자료로 구성되어 있음을 알 수 있다. 즉 식 (4)에 포함된 독립변수는 하폭(W), 수심(d), 유속(U), 그리고 전단유속(U_c)의 4개로서 이들은 Fischer(1975)와 Liu(1977)의 공식에 포함된 변수들과 동일하다. 여기서 Fischer(1975)공식은 다음과 같으며,

$$K = 0.011 \frac{U^2 W^2}{dU_c} \quad (5)$$

Liu(1977)의 공식은 다음과 같다.

$$K = \beta \frac{U^2 W^2}{dU_c} \quad (6)$$

여기서 β 는 자연하천 단면의 不規則性, 수로의 蛇行, 그리고 수로내의 貯藏帶 등에 의한 영향을 고려하기 위한 변수로서, Liu(1977)는 Godfrey

와 Frederick(1970) 등의 현장 분산자료를 사용하여 回歸分析한 결과 다음과 같이 유도하였다.

$$\beta = 0.18 \left(\frac{U_c}{U} \right) \quad (7)$$

2.2 敏感度 分析

본 연구에서 선정된 매개변수의 변화에 따른 종 확산계수의 거동을 알아보기 위하여 민감도분석을 수행하였다. 분석 방법은 식 (3)에 포함된 무차원 항들의 변화에 따른 무차원 縱擴散係數 실측치가 어떻게 변화하는가를 전대수치상에 도시하여 거동을 분석하여 보는 것이다.

우선 K 와 dU 와의 관계를 Fig. 1에 표시하였다. Fig. 1에서 K 와 dU 의 관계가 비선형으로 나타남을 알 수 있다. 이 사실은 Abd El-Hadi와 Davar(1976)가 그들의 실험을 통하여 주장한 바와 같으며, K 와 dU 의 관계를 선형으로 가정하는 Elder(1959)형의 공식이 자연하천의 분산특성을 설명하기에 부적합함을 보여 주는 것이다.

무차원 縱擴散係數와 Reynolds수의 관계를 Fig. 2에 도시하였다. 무차원 縱擴散係數가 Reynolds수의 변화에 관계없음을 알 수 있다. 이는 자연하천의 수로표면같이 완전히 거친 영역의 난류흐름에서는 오염물질의 혼합특성에 대한 Reynolds수의 영향이 무시할 정도라는 가설을 증명하여 주는 것이다.

무차원 縱擴散係數와 마찰항과의 관계, 그리고 무차원 縱擴散係數와 폭-수심비의 관계를 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 무차원 縱擴散係數가 마찰항 및 하천의 폭-수심비의 증가에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

3. 縱擴散係數 推定式 誘導

3.1 回歸分析 方法

從屬變數, Y 에 대하여 獨立變數, X 가 p 개인 비선형 모형은 다음과 같은 표준 비선형 多重回歸模型 형태로 나타낼 수 있다.

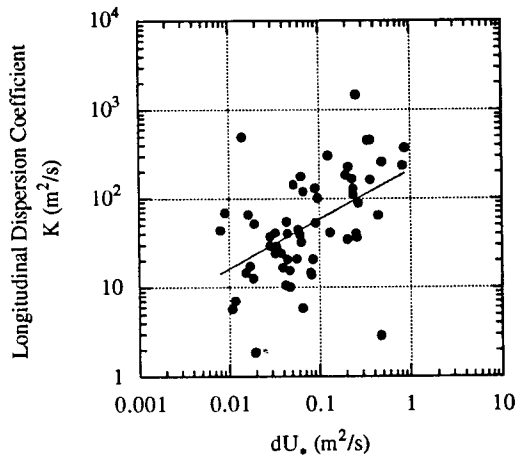


Fig. 1. Longitudinal Dispersion Coefficient K versus dU_a .

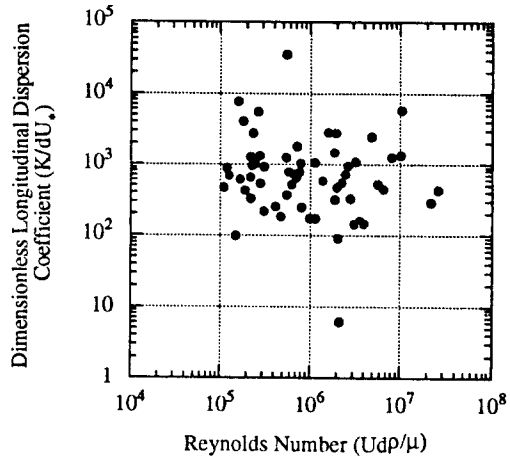


Fig. 2. Dimensionless Longitudinal Dispersion Coefficient versus Reynolds Number

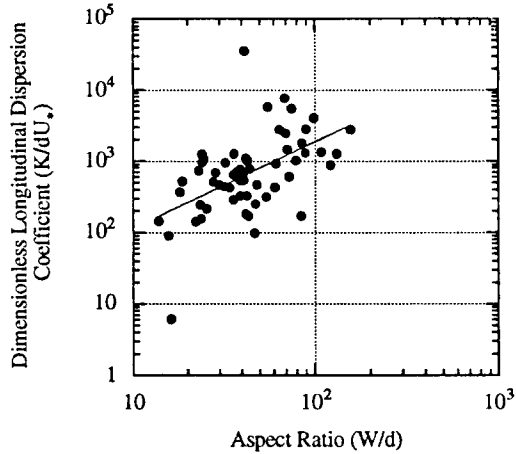


Fig. 3. Dimensionless Longitudinal Dispersion Coefficient versus Aspect Ratio

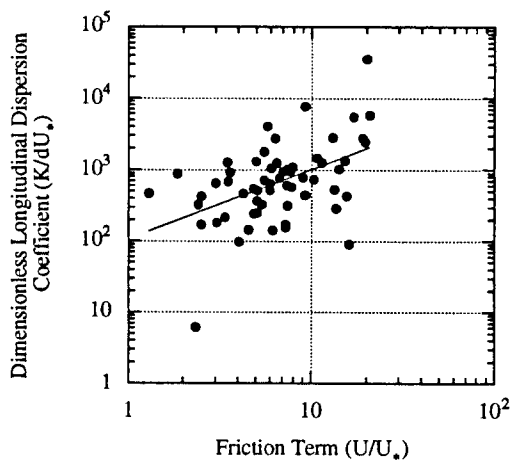


Fig. 4. Dimensionless Longitudinal Dispersion Coefficient versus Friction Term

$$Y = \alpha X_1^\beta X_2^\gamma X_3^\delta \cdots X_p^\lambda \epsilon \quad (8)$$

여기서 X , Y 는 행렬의 형태로서 X 는 자연하천에서 수집된 수리·분산 자료, Y 는 실측된 종확산 계수, $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \lambda$ 등은 미지의 매개변수이며, ϵ 은 잔차로서 정규분포를 따르지 않는 잔차의 형태를 갖는다. 종속변수와 독립변수 모두를 對數變換하여 선형 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\ln Y = \ln \alpha + \beta \ln X_1 + \gamma \ln X_2 + \cdots + \lambda \ln X_p + \ln \epsilon \quad (9)$$

식 (9)의 回歸解는 선형인 경우 일반적으로 최소제곱법을 사용하여 잔차의 제곱합을 최소화함으로써 쉽게 구할 수 있다. 그러나 잔차항이 정규분포를 따르지 않는 경우, 특히 殘差의 꼬리가 두터운 분포는 특이값을 포함하게 되고 이러한 이상점(outlier)은 해에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 이러한 이상점의 영향을 감소시키는 방법이 필요하다. Robust 회귀법은 Robust감소합수를 이용하여 해에 영향을 미치는 이상점의 효과를 줄여 줌으로써 잔차의 제곱합을 최소화하는 최소제곱법을 사용했을 때 영향을 크게 미치는 이상점들의 효과를 보

다 감소시킬 수 있는 방법이라고 할 수 있는데, 본 연구에서는 Robust 회귀법의 하나인 One-Step Huber 방법을 적용하여 回歸式을 유도하였다.

One-Step Huber 방법은 Huber(1981)가 개발하였으며 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^p \rho\left(\frac{y_i - \sum x_{ij} \hat{T}_j}{s}\right) \min, j=1,2,3,\dots,n \quad (10)$$

여기서 ρ 함수는 Robust 감소함수이며, \hat{T}_j 는 Robust 추정치이고, $y_i - \sum x_{ij} \hat{T}_j$ 는 잔차, r 이며 s 는 척도 추정량(scale parameter)으로서 다음식으로 나타낸다.

$$s = 1.48 [\text{med} | (y_i - x_{ij} \hat{T}_j) - \text{med}(y_i - x_{ij} \hat{T}_j) |] \quad (11)$$

여기서 T_{j1} 는 추정치에 대한 근사값이다. 이때 추정치, \hat{T}_j 는 ρ 함수를 최소로 하는 \hat{T}_j 의 추정량이 된다. 만약 다음식이 만족된다면,

$$\frac{\partial \rho(x_{ij}, \hat{T}_j)}{\partial \hat{T}_j} = \phi(x_{ij}, \hat{T}_j) \quad (12)$$

식 (10)은 다음과 같이 변환된다.

$$\sum_{i=1}^p \phi\left(\frac{y_i - \sum x_{ij} \hat{T}_j}{s}\right) x_{ij} = 0 \quad (13)$$

T 를 추정치에 대한 근사값이라고 할 때 Robust 推定值, \hat{T}_j 은 다음과 같은 反復計算式으로 구할 수 있다.

$$\hat{T}_j = T + s(X^T X)^{-1} X^T \phi\left(\frac{Y - X T}{s}\right) \quad (14)$$

본 연구에서는 ϕ 함수로서 Huber(1980)에 의해 제안된 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\phi(r) = r, \quad |r| \leq a \quad (15a)$$

$$\phi(r) = a \sin(r), \quad |r| > a \quad (15b)$$

여기서 a 는 상수로서 1.5이다.

계산순서는 먼저 추정치에 대한 근사값, T 를 최소제곱법을 이용하여 가정하고 이를 이용하여 척도 추정량(s)을 계산하고, 이것을 식 (14)에 대입하여 Robust 추정치, \hat{T}_j 를 계산한다. 이렇게 구한 Robust 추정치를 초기추정치로 하여 위와 같은 과정을 반복 계산하여 ϕ 함수가 최소화되는 추정치 얻은 때까지 반복함으로써 Robust 추정치, T 를 구할 수 있다.

3.2 回歸式 誘導

본 연구에서는 2.1절에서 유도한 식 (4)의 함수 관계를 풀기 위하여 무차원 縱擴散係數(K/dU)를 종속변수로 하고, 독립변수로서 마찰항(U/U_0)과 하천의 폭-수심비(W/d)를 선정하여 回歸式을 유도하였다. 여기서 縱擴散係數는 I 단계 연구(서일원과 정태성, 1995)에서 수집·분석한 바 있는 미국 전역의 26개 하천에서 실측한 59지점의 분산자료를 이용하였다. Table 1에 이 자료들의 수리학적 인자 및 縱擴散係數의 범위를 나타내었다. 그리고 Table 2에는 무차원화한 수리학적 인자와 縱擴散係數의 범위를 나타내었다.

본 연구에서는 26개 하천 59지점의 자료 중 35지점의 자료를 회귀식 유도에 사용하고, 나머지 24지점의 자료를 유도된 회귀식의 검증에 사용하였다. 자료의 분리시 회귀식 유도와 검증에 사용한 2개의 자료군은 I 단계에서 비교한 종합산계수 추정공식들의 불일치율의 분포가 유사한 분포를 갖도록 분류하였다. 또한 동일한 하천의 여러 지점의 자료는 가능한 2개의 자료군으로 나누어 사용하였다(Table 3 참조). 35지점의 자료에 One-Step Huber 방법을 적용하여 유도한 回歸式은 다음과 같다. 이때 상관계수는 0.75이다.

$$\frac{K}{dU} = 5.915 \left(\frac{W}{d}\right)^{0.620} \left(\frac{U}{U_0}\right)^{1.0428} \quad (16)$$

식 (16)의 무차원량을 분리하여 차원량으로 표시하면 다음과 같다.

Table 1. Range of Measured Hydraulic and Dispersion Data

	Dispersion Coefficient, K(m ² /s)	Width, W (m)	Depth, d (m)	Velocity, U (m/s)	Shear Velocity, U*(m/s)	Slope, S (x10 ³)
Range	1.90-1486	11.9-537	0.30-19.9	0.13-1.74	0.02-0.29	0.007-2.72

Table 2. Range of Dimensionless Variables

	Dimensionless Dispersion Coeff., K/dU.	Aspect Ratio, W/d	Friction Term, U/U*	Reynolds Number, Udρ/μ(x10 ⁵)
Range	6.17-35712	13.8-157	1.29-20.8	1.10-259

$$K = 5.915W^{0.620} d^{0.380} U^{1.428} U_*^{-0.425} \quad (17)$$

식 (17)에 포함된 변수는 하폭(W), 수심(d), 유속(U), 그리고 전단유속(U*)의 4개로서 이들은 자연하천에서 용이하게 수집가능한 수리량 및 지형자료들이다. 또한 식 (17)은 Fischer(1975)와 Liu 공식(1977)에 포함된 변수와 동일한 변수로 구성되어 있음을 알 수 있다.

4. 推定式の檢證

본 연구에서 유도한 추정식을 검증하기 위하여 전절에서 서술한 바와 같이 추정식 유도에서 사용하지 않은 24점의 하천 확산자료를 사용하였다. 본 연구에서 개발한 추정식의 거동을 상대적으로 비교하기 위하여 I 단계 연구(서일원과 정태성, 1995)에서 분석한 바 있는 기존의 縱擴散係數 공식 중 비교적 거동이 우수한 McQuivey와 Keefer 공식(1974), Liu 공식(1977), 그리고 Iwasa와 Aya 공식(1991)을 선정하여 실측치와 비교하였다. McQuivey와 Keefer 공식은 다음과 같으며,

$$K = 0.058 \frac{dU}{S} \quad (18)$$

Iwasa와 Aya 공식은 다음과 같다.

$$\frac{K}{dU_*} = 2.0 \left(\frac{W}{d} \right)^{1.5} \quad (19)$$

Fig. 5는 각 공식들에 의해 계산된 추정치와 실

측된 縱擴散係數를 도시한 것이다. Fig. 5에서 제안된 회귀식에 의한 결과는 대부분 실측치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Liu 공식은 대체로 양호한 거동을 보이고 있으나, McQuivey와 Keefer 공식과 Iwasa와 Aya 공식은 부정확하게 예측한 점이 많음을 알 수 있다. 또한 Liu의 공식은 하폭이 큰 하천의 경우에는 과대 산정하고 있음을 알 수 있다.

각 공식들의 거동을 정량적으로 비교하기 위하여 I 단계 연구에서 사용한 바 있는 불일치율을 비교적으로 사용하였다. 불일치율은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{不一致率} = \frac{\text{縱擴散係數 算定値}}{\text{縱擴散係數 實測値}} \quad (20)$$

여기서 불일치율이 1.0이면 그 공식의 산정치는 실측치와 완전히 일치하는 것이며, 1.0보다 크면 縱擴散係數를 과대 산정하는 것이고, 1.0보다 작으면 縱擴散係數를 과소 산정하는 것이다. 각 공식의 정확도는 불일치율이 0.5-2.0 사이에 있는 자료점의 전체에 대한 비율로 정의하였다.

Fig. 6에 각 공식별 불일치율의 분포를 나타내었다. 또한 각 공식의 추정치의 정확도를 Table 4에 수록 하였다. Fig. 5에서 밝혀진 바와 유사하게, 제안된 추정식의 불일치율 분포가 McQuivey와 Keefer 공식, Iwasa와 Aya 공식 그리고 Liu 공식보다 양호함을 알 수 있다. 제안된 추정식의 경우, 불일치율이 대체적으로 0.25와 2.0사이에 들어가며 정확도는 79% 정도임을 알 수 있다.

본 연구의 분석결과, 본 연구에서 개발한 추정식

Table 3. Summary of Hydraulic and Dispersion Data Measured at 26 Streams in the United States

Natural Streams	Width	Depth	Vel.	Slope	Shear Velocity	Dispersion Coefficient	Reference
	W(m)	d(m)	U(m/s)	S	U _* (m/s)	K(m ² /s)	
Antietam Creek, MD	12.80	0.30	0.42	0.00095	0.057	17.50	Nordin & Sabol(1974)
	24.08	0.98	0.59	0.00135	0.098	101.50	
	11.89	0.66	0.43	0.00095	0.085	20.90	
	21.03	0.48	0.62	0.00100	0.069	25.90	
Monocacy River, MD	48.70	0.55	0.26	0.00050	0.052	37.80	
	92.96	0.71	0.16	0.00045	0.046	41.40	
	51.21	0.65	0.62	0.00040	0.044	29.60	
	97.54	1.15	0.32	0.00045	0.058	119.80	
	40.54	0.41	0.23	0.00045	0.040	66.50	
Conococheague Creek, MD	42.21	0.69	0.23	0.00060	0.064	40.80	
	49.68	0.41	0.15	0.00060	0.081	29.30	
	42.98	1.13	0.63	0.00060	0.081	53.30	
Chattahoochee River, GA	75.59	1.95	0.74	0.00072	0.138	88.90	
	91.90	2.44	0.52	0.00037	0.094	166.90	
Salt Creek, NE	32.00	0.50	0.24	0.00033	0.038	52.20	
Difficult Run, VA	14.48	0.31	0.25	0.00127	0.062	1.90	
Bear Creek, CO	13.72	0.85	1.29	0.02720	0.553	2.90	
Little Pincy Creek MD	15.85	0.22	0.39	0.00130	0.053	7.10	
Bayou Anacoco, LA	17.53	0.45	0.32	0.00054	0.024	5.80	
Comite River, LA	15.70	0.23	0.36	0.00058	0.039	69.00	
Bayou Bartholomew, LA	33.38	1.40	0.20	0.00007	0.031	54.70	
Amite River, LA	21.34	0.52	0.54	0.00048	0.027	501.40	
Tickfau River, LA	14.94	0.59	0.27	0.00117	0.080	10.30	
Tangipahoa River, LA	31.39	0.81	0.48	0.00061	0.072	45.10	
	29.87	0.40	0.34	0.00069	0.020	44.00	
	253.59	1.62	0.61	0.00007	0.032	143.80	
	161.54	3.96	0.29	0.00009	0.060	130.50	
	152.40	3.66	0.45	0.00009	0.057	227.60	
	155.14	1.74	0.47	0.00008	0.036	177.70	
Sabine River, LA	116.43	1.65	0.58	0.00014	0.054	131.30	
	160.32	2.32	1.06	0.00013	0.054	308.90	
Sabine River, TX	14.17	0.50	0.13	0.00029	0.037	12.80	
	12.19	0.51	0.23	0.00018	0.030	14.70	
	21.34	0.93	0.36	0.00013	0.035	24.20	
Mississippi River, LA	711.20	19.94	0.56	0.00001	0.41	237.20	
	533.40	4.94	1.05	0.00012	0.069	457.70	
Mississippi River MO	537.38	8.90	1.51	0.00012	0.097	374.10	
Wind/Bighorn River, WY	44.20	1.37	0.99	0.00150	0.142	184.60	
	85.34	2.38	1.74	0.00100	0.153	464.60	
Copper Creek, VA	16.66	0.49	0.20	0.00135	0.080	16.84	Godfrey & Frederick(1970)
Clinch River, VA	48.46	1.16	0.21	0.00085	0.069	14.76	
Copper Creek, VA	18.29	0.37	0.15	0.00332	0.116	20.71	
Powell River, TN	36.78	0.87	0.13	0.00032	0.054	15.50	
Clinch River, VA	28.65	0.61	0.35	0.00039	0.069	10.70	
Copper Creek, VA	19.61	0.84	0.49	0.00132	0.101	20.82	
Clinch River, VA	57.91	2.45	0.75	0.00041	0.104	40.49	
Coachella Canal, CA	24.69	1.58	0.66	0.00010	0.041	5.92	
Clinch River, VA	53.24	2.41	0.66	0.00043	0.107	36.93	
Copper Creek, VA	16.76	0.47	0.24	0.00135	0.080	24.62	
Missouri River, LA	180.59	3.28	1.62	0.00020	0.078	1486.45	Yotsukura et al.(1970)
Bayou Anacoco, LA	25.91	0.94	0.34	0.00049	0.067	32.52	McQuivey & Keefer(1974)
	36.58	0.911	0.40	0.00050	0.067	39.48	
Nooksack River, WA	64.01	0.76	0.67	0.00936	0.268	34.84	
Wind/Bighorn River, WY	59.44	1.10	0.88	0300131	0.119	41.81	
	68.58	2.16	1.55	0.00133	0.168	162.58	
John Day River, OR	24.99	0.58	1.01	0.00346	0.140	13.94	
	34.14	2.47	0.82	0.00134	0.180	65.03	
Yadkin River, NC	70.10	2.35	0.43	0.00044	0.101	111.48	
	71.63	3.84	0.76	0.00044	0.128	260.13	

Remark : Shaded data sets are used for derivation of new regression equation.

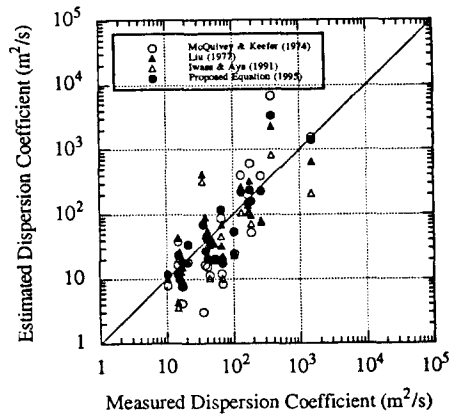


Fig. 5. Comparison of Estimated Dispersion Coefficients with 24 Measured Dispersion Coefficient Data Used Verification

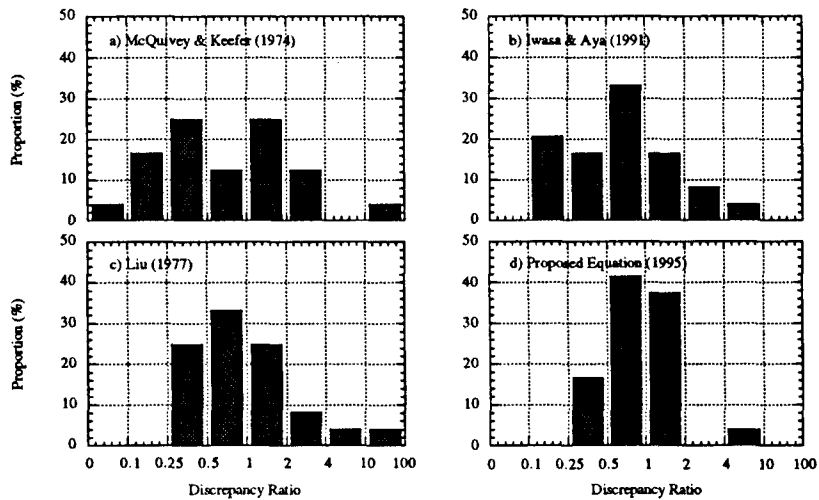


Fig. 6. Discrepancy Ratio of Selected Dispersion Coefficient Equation

Table 4. Accuracy of Selected Dispersion Coefficient Equations

Dispersion Coefficient Equation	Accuracy (%)
McQuivey & Keefe(1974)	50.0
Liu(1977)	66.7
Iwasa & Aya(1991)	58.3
Proposed Equation(1995)	79.2

이 기존의 공식과 비교할 때 자연하천의 확산특성을 설명하는 데 보다 우수한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 연구에 비하여 많은 양의 현장자료를 사용하여 추정식을 유도하였을 뿐만 아니라, 이론적 고찰을 통하여 물리적으로 의미있는

무차원 변수들을 모두 추정식에 포함시켰기 때문이라 생각된다. 또한 One-Step Huber 방법을 사용하여 회귀식을 유도함으로써 회귀해에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 이상점의 효과를 극소화시킨 것도 본 연구에서 개발한 추정식의 우수성에 크게 이바지한

것으로 사료된다. 따라서 확산특성이 밝혀지지 않은 자연하천에 1차원 확산모형을 적용하고자 할 때, 본 연구에서 개발된 추정식에 의해 계산된 縱擴散係數를 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 단, 이때 본 연구에서 추정식의 유도 및 검증에 사용한 자료의 범위에서 벗어나는 하천의 경우에는 본 연구에서 개발한 추정식을 적용함에 있어서 주의를 필요로 한다.

5. 要約 및 結論

본 연구에서는 현장실험이 수행되지 않아서 縱擴散係數 실측치를 구할 수 없는 자연하천의 확산거동을 예측하기 위해서, 1차원 확산모형을 적용할 경우에 사용할 수 있도록 비교적 수집하기 용이한 수리량 자료로부터 縱擴散係數를 추정하는 공식을 개발하였다. 본 연구에서는 次元解析 및 민감도분석을 통하여 물리적 의미를 가진 변수를 선정하여 추정식에 포함시켰다.

독립변수인 수리량 및 지형자료로부터 종속변수인 縱擴散係數를 추정하는 회귀식을 유도하기 위하여 비선형 다중회귀방법의 하나인 One-Step Huber 방법을 사용하였다. 실측자료로서 I 단계 연구에서 수집·분석한 바 있는 미국 전역의 26개 하천 59지점의 수리·분산자료를 사용하였다. 59지점의 수리·분산자료 중 35지점의 자료에 대하여 One-Step Huber 방법을 적용하여 縱擴散係數를 추정하는 회귀식을 유도하고, 나머지 24지점의 자료를 사용하여 유도한 회귀식을 검증하였다. 제안된 회귀식에 의한 결과는 대부분 실측치와 잘 일치하고 있으나, 기존의 추정공식들은 대부분 과대 추정하거나 과소 추정하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발된 추정식이 기존의 공식과 비교하여 자연하천의 확산특성을 대표하는 데 보다 우수한 거동을 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 확산특성이 밝혀지지 않은 하천에 1차원 확산모형을 적용하고자 할 때 본 연구에서 개발된 추정식에 의해 계산된 縱擴散係數를 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 수행되었다.

참 고 문 헌

- 徐一源, 鄭泰星 (1995), “縱擴散係數에 관한 研究: I. 既存 縱擴散係數 推定式 比較.” 한국수자원학회지, 제28권, 제3호, pp. 205-216.
- Abd El-Hadi, N.D., and Daver, K.S. (1976). “Longitudinal dispersion for flow over rough beds.” *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. HY4, pp. 483-498.
- Elder, J.W. (1959). “The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow.” *J. Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 544-560.
- Fischer, H.B. (1966). “Longitudinal dispersion in laboratory and natural streams.” *Report KH-R-12*, W.M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Fischer, H.B. (1975). Discussion of “Simple method for predicting dispersion in streams,” by R.S. McQuivey, and T.N. Keefer, *J. Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, No. EE3, pp. 453-455.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York, N.Y.
- Godfrey, R.G., and Frederick, B.J. (1970). “Stream dispersion at selected sites.” *United States Geological Survey Professional Paper 433-K*, Washington, D.C.
- Huber, J.P. (1981). *Robust statistics*. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). “Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows.” *Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics*, pp. 505-510.

Liu, H. (1977). "Predicting dispersion coefficient of stream." *J. Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. EE1, pp. 59-69.

McQuivey, R.S., and Keefer, T.N. (1974). "Simple method for predicting dispersion in streams." *J. Environmental Engineering Divi-*

sion, Vol. 100, No. EE4, pp. 997-1011.

Taylor, G.I. (1954). "Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *J. Proceedings of the Royal Society*, London, England, Series A., Vol. 223, pp. 446-468.

〈집수 : 1995년 4월 20일〉