

縱擴散係數에 관한 研究 : I. 既存 縱擴散係數 推定式 比較
Analysis of Longitudinal Dispersion Coefficient :
Part I. Comparative Study of Existing Equations for Dispersion Coefficient

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

.....
 Abstract

Existing equations for dispersion coefficient are analyzed in depth to select proper dispersion coefficient which can represent dispersion characteristics of natural streams. Several equations are tested with measured data which were collected in 26 streams in the United States. Findings of this study are as follows. Elder's equation should not be used to estimate dispersion coefficient of the one-dimensional dispersion model because it underestimates significantly. McQuivey and Keefer's equation is overestimating, whereas Magazine et al.'s equation is underestimating. However, Iwasa and Aya's equation predicts relatively well. Fischer's equation is generally overestimating. Liu's equation predicts quite well. The performance of Liu's equation is the best of all especially in terms of accuracy. However, Liu's equation is generally overestimating in case of large river because the square of channel width is included in the equation. Therefore, it is recommended not to use Liu's equation in case of large rivers, especially rivers of which channel width is larger than 200m.

.....
 요 지

자연하천의 종확산과정을 정확하게 대표하는 縱擴散係數의 선정을 위하여 기 제안된 縱擴散係數 추정공식들을 비교·분석하였다. 縱擴散係數 공식 중 적용성이 비교적 우수한 공식을 선정하여 미국 전역의 26개 하천에서 수집된 실측치와 비교하였다. 本 研究에서 밝혀진 사실은 다음과 같다. Elder공식은 縱擴散係數를 상당히 과소 산정하기 때문에 1차원 확산모형의 종확산계수의 산정에는 부적합하다. McQuivey와 Keefer공식은 전체적으로 과대 산정하는 편이고, Magazine 등 공식은 대부분의 경우에 과소 산정하고 있다. 이들에 비해 Iwasa와 Aya공식은 비교적 양호한 거동을 보이고 있다. Fischer공식은 전체적으로 과대 산정하고 있으나, Liu공식은 양호한 거동을 보이고 있으며 특히 正確度 면에서는 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러나 Liu공식은 하폭의 제곱 형태를 포함하고 있기 때문에 하천의 폭이 큰 대하천의 경우 종확산계수를 과대 산정하고 있다. 따라서 하폭이 큰 대하천(200m 이상)의 경우에는 Liu공식의 사용을 피하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수
 ** 서울대학교 대학원 토목공학과 석사과정

1. 緒 論

자연하천에 오염물질이 유입되었을 때 水深方向과 河幅方向으로의 혼합이 완료된 후의 오염물질의 확산 및 혼합은 1次元 擴散方程式을 이용하여 해석한다. 1次元 擴散模型은 Taylor(1954)에 의해 처음으로 제안되었으며 전단흐름에 의한 종방향 이송과 난류운동에 의한 횡방향 확산이 평형상태를 이룬 후의 자연하천에서의 종방향 확산거동을 해석하기 위하여 널리 사용되고 있다.

1次元 擴散模型을 자연하천에 적용하여 오염물질의 농도를 예측할 때 부딪치는 가장 중요하고도 어려운 문제는 적절한 縱擴散係數의 선정이다. 연구대상 하천의 확산특성이 이미 알려져 있어서 실측된 자료로부터 구한 縱擴散係數를 사용할 수 있다면 큰 문제가 없겠지만, 국내하천의 경우 농도자료의 수집이 이루어지지 않았기 때문에 실측된 縱擴散係數를 사용할 수 없고 縱擴散係數에 관한 기존의 이론식 또는 추정식에 의거하여 결정하여야 한다.

縱擴散係數를 이론적으로 결정하는 방법은 Taylor(1954)에 의해 처음으로 제시되었고, Elder(1959) 등에 의해 확장된 바 있으나, 이들 공식은 흐름과 확산거동이 복잡한 자연하천에서의 종확산을 대표하지 못하고 실측된 縱擴散係數보다 대부분 과소 추정하고 있는 것으로 보고된 바 있다. Taylor(1954)와 Elder(1959)의 연구 후에도 많은 이론식 및 추정식이 개발되었지만 이들 공식에 의한 산정치는 실측치와 많은 차이가 있고, 오차 또한 공식에 따라 매우 다른 양상을 보인다(서일원과 정태성, 1994). 따라서 이 공식들에 의해 산정된 縱擴散係數를 결합한 1次元 擴散模型을 사용하여 자연하천의 확산특성을 예측할 경우 부정확한 결과를 초래하게 된다. 그러므로 제안된 縱擴散係數 공식들에 대한 체계적인 분석과 각 공식의 적용한계, 각 공식의 거동비교, 그리고 하천상황에 따른 적정 공식의 선정지침에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 縱擴散係數에 관한 I 단계 연구로서 縱擴散係數 공식을 매개변수의 수에 따라 분류하였으며, 그 중 적용성이 비교적 우수한 공식을 선정

하여 미국 전역의 하천으로부터 수집된 농도자료로부터 추적방법을 이용하여 구한 실측치와 비교하였다. 실측 縱擴散係數는 실측된 농도분포곡선으로부터 追跡方法을 사용하여 구하였다. 또한 不一致率 검토를 통하여 각 공식들의 특성 및 적용한계를 분석하였으며, 적용대상 하천의 수리 및 지형특성에 적합한 縱擴散係數 공식의 선정지침을 제시하였다.

2. 1次元 擴散模型

자연하천에 위험한 오염물질이 사고에 의해서 방출되었거나, 都市下水 및 工場廢水가 시간적 변화성을 갖고 방류되었을 경우, 오염물질의 종확산거동을 예측하기 위해서 Taylor(1954)에 의해 제안된 1차원 Fickian 확산모형(one-dimensional Fickian dispersion model)이 널리 사용되어 왔다. 오염물질의 生·化學的 減衰 및 生成이 일어나지 않는 保存性 오염물질에 대한 1次元 擴散模型은

$$A \frac{\partial C}{\partial t} = -UA \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(KA \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

이며, 여기서 A 는 흐름단면적, C 는 오염물질의 흐름단면 평균농도, U 는 흐름단면 평균유속, K 는 縱擴散係數, t 는 시간, 그리고 x 는 흐름방향의 거리이다.

1次元 擴散模型은 자연하천의 흐름단면적이 일정하고 초기 및 경계조건들이 주어지는 경우에 해석적인 해를 용이하게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 本 模型 유도시 Taylor(1954)가 가정하 대로 剪斷流 移送과 橫擴散이 평형에 도달할 수 있도록 오염물질이 유입된 후 충분한 시간(初期期間; initial period)이 경과한 후부터, 즉 오염물질이 유입된 지점으로부터 충분한 거리가 떨어진 하류 지점에서부터 적용할 수 있다는 제한성을 가지고 있다(Fischer 등, 1979). Fischer 등(1979)은 1차원 확산모형을 적용할 수 있는 조건을 다음과 같이 제시하였다.

$$L \frac{\epsilon_t}{UW^2} > 0.4 \quad (2)$$

여기서 L 은 오염원으로부터 떨어진 거리, ϵ_r 는 횡방향 난류확산계수이고 W 는 하폭이다.

3. 縱擴散係數의 決定法

3.1 理論式 및 經驗式

前節에서 서술한 바와 같이 Taylor(1954)는 圓形 直線管水路에서의 난류흐름에 대한 1차원 확산 모형[식(1)]을 유도하고, 이에 대한 縱擴散係數를 다음과 같이 제안하였다.

$$K = 10.1rU. \quad (3)$$

여기서 r 은 관의 반경이고, U 는 剪斷流速으로서 다음식으로 계산된다.

$$U = \sqrt{gRS} \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도, R 은 동수반경, S 는 에너지선의 경사(등류인 경우에는 하천의 바닥경사)이다.

Elder(1959)는 Taylor의 난류공식을 무한평면을 흐르는 2차원흐름의 경우에 적용하였다. 그는 연직방향의 유속분포를 對數函數로 가정하여 다음 공식을 유도하였다.

$$K = 5.93dU. \quad (5)$$

여기서 d 는 수심이다. Elder의 공식은 매우 간단하고 이론적인 배경이 확고하기 때문에 縱擴散係數 추정식으로 많이 사용되고 있으나, 흐름과 확산 거동이 복잡한 자연하천에서의 종확산을 대표하지 못하고 실측된 縱擴散係數보다 대부분 과소 추정하고 있는 것으로 보고되어 왔다(Fischer 등, 1979). 이는 이 공식이 하폭방향의 유속분포 및 하상의 불규칙성을 고려하지 못하고 있기 때문이며, 따라서 Elder공식은 자연하천에서의 1차원 擴散模型的 縱擴散係數 산정에는 적합하지 않은 공식이라 생각된다.

Parker(1961)는 Taylor의 난류공식에서 관의 반경대신 동수반경을 도입함으로써 개수로에 적합한 공식으로 유도하였다.

$$K = 14.28R^{3/2}\sqrt{2gS} \quad (6)$$

이 후에도 Glover(1964) 등이 K 와 dU 의 관계를 선형으로 가정하여 Elder형의 공식을 제안하였으나, 대부분 자연하천의 확산을 설명하는 데는 부적합한 것으로 밝혀졌다.

Fischer(1966, 1968)는 하폭이 수심에 비해 매우 큰 자연하천에 더욱 적합한 縱擴散係數를 유도하기 위해서는 Elder가 고려한 연직방향 유속분포 대신에 하폭방향의 유속분포를 고려하여야 함을 제안하고 그 식을 다음과 같이 유도하였다.

$$K = -\frac{1}{A} \int_0^W u' d \int_0^y \frac{1}{\epsilon d} \int_0^y u' d dy dy dy \quad (7)$$

여기서 u' 는 하폭방향의 한 지점에서 수심평균 유속과 단면평균유속 U 와의 차이, y 는 하폭방향 좌표이다. 그는 그의 제안식을 실험실 확산실험자료와 Godfrey와 Frederick(1970) 등의 자연하천 확산자료를 이용하여 검증한 결과, 자연하천의 경우 제안식에 의해 예측된 縱擴散係數가 실측값의 4배 이내의 범위에 들어가고, 균일수로의 경우에는 제안식에 의해 예측된 縱擴散係數가 실측값의 30%내의 범위에 들어간다고 주장하였다. 식(7)을 사용하여 縱擴散係數를 산정하는 데 있어서의 가장 큰 어려움은 하천 단면의 횡방향 유속분포 자료를 수집하여야 한다는 점인데, 이러한 점을 보완하기 위해서 Fischer(1975)는 식(7)의 삼중적분을 간략화하여 다음 식을 제안하였다.

$$K = 0.011 \frac{U^2 W^2}{dU}. \quad (8)$$

식(8)은 자연하천에서 용이하게 수집가능한 하천지형 및 수리학적 변수를 사용하여 縱擴散係數를 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 하폭이 큰 하천의 경우 縱擴散係數를 과대 산정한다는 단

점을 가지고 있다(서일원과 정태성, 1994).

Sooky(1969)는 하천 단면 형상과 유속분포가 종확산과정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그는 삼각형 및 원호형 직선개수로에서 등류조건인 경우에 유속분포를 對數 및 冪函數로 가정하여 Fischer의 이론식[식(7)]을 이용하여 무차원 縱擴散係數를 유도하고, 이 계수가 수로폭과 동수반경의 비에 비례함을 증명하였다. 그는 또한 Godfrey와 Frederick(1970) 등의 현장 확산자료를 분석하여 정성적으로 無次元 縱擴散係數가 수로폭과 동수반경의 비에 비례하여 증가함을 보여 주었다. 그러나 그의 연구는 하천 단면 형상이 단순하고 수로의 종단 선형이 직선인 개수로에 한정하고 있어 자연하천의 종확산현상을 정확하게 예측하기에는 부적합한 것으로 사료된다. Bansal(1971)은 縱擴散係數를 이론적, 경험적으로 결정하는 공식들을 정리하여 정성적으로 분석하였다.

McQuivey와 Keefer(1974)는 1차원 확산방정식과 1차원 흐름방정식의 유사성을 이용하여 Froude수가 0.5보다 작은 경우에 縱擴散係數를 흐름확산계수의 함수로 유도하였다. 그들은 두 계수간의 관계를 현장자료에 線型回歸시켜서 縱擴散係數를 추정할 수 있는 식을 다음과 같이 유도하였다.

$$K=0.058\frac{dU}{S} \quad (9)$$

그러나 Fischer(1975)는 식(9)를 유도하는 과정에서 McQuivey와 Keefer 등이 가정한 1차원 확산방정식과 1차원 흐름방정식의 유사성이 수학적으로는 타당하나, 물리적으로는 전혀 타당성이 없음을 주장하였다.

Abd El-Hadi와 Davar(1976)는 실험실 개수로에서 확산실험을 수행하여 수로바닥의 조도의 크기 및 밀도가 종확산과정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그는 실험자료를 이용하여 K 와 dU 의 관계가 비선형으로 나타나며, 무차원 縱擴散係數가 조도의 크기 및 밀도의 함수로 나타남을 보여 주었다.

Liu(1977)는 자연하천에서의 縱擴散係數를 추

정하는 식으로 Fischer(1975)의 공식을 개선하여 다음과 같이 제안하였다.

$$K=\beta\frac{U^2W^2}{dU}. \quad (10)$$

여기서 β 는 자연하천 단면의 不規則性, 수로의 蛇行, 그리고 수로내의 貯藏帶(혹은 死帶) 등에 의한 영향을 고려하기 위한 변수로서 Godfrey와 Frederick(1970) 등의 현장 실험자료를 사용하여 回歸分析한 결과 다음과 같이 유도하였다.

$$\beta=0.18\left(\frac{U}{U_c}\right)^{1.5} \quad (11)$$

Chatwin과 Sullivan(1982)은 하천단면의 폭-수심비가 縱擴散係數에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 직사각형 수로에서 층류인 경우에 縱擴散係數를 해석적으로 유도하고, 이를 난류에 확장하였다. 그러나 그들의 방법은 縱擴散係數를 해석적으로 유도하기 위하여 유속 및 농도의 분포를 먼저 알아야 한다는 조건 때문에 자연하천의 확산과정을 해석하기에는 적용성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

Magazine 등(1988)은 자연하천의 縱擴散係數는 하천바닥 및 양안에 존재하는 조도에 의한 마찰과 閉塞效果를 고려하여야 함을 주장하고, 차원해석에 의하여 無次元 縱擴散係數(= K/RU)를 마찰계수, Reynolds수, 그리고 조도밀도 등의 함수로 유도하였다. 그리고 그들의 실험실 실험자료 및 타 연구자들의 실험 및 현장자료를 분석하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\frac{K}{RU}=75.86P^{-1.632} \quad (12)$$

여기서 P 는 일반화된 조도계수로서 마찰과 閉塞效果를 동시에 고려하며, 자연하천의 경우에는 다음 식으로 주어진다

$$P=0.4\frac{U}{U_c}. \quad (13)$$

Asai와 Fujisaki(1991) 그리고 Iwasa와 Aya (1991)들은 하천단면의 폭-수심비가 증가하면 縱擴散係數가 증가함을 보여주었다. 나아가서 Iwasa와 Aya(1991)는 그들의 실험자료 및 Nordin과 Sabol(1974) 등의 현장자료를 분석하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\frac{K}{dU_*} = 2.0 \left(\frac{W}{d} \right)^{1.5} \quad (14)$$

그러나 이 식은 실험실 개수로 내에서의 확산과 자연하천의 확산과정을 함께 분석하여 유도한 경험식이기 때문에, 자연하천의 경우 수로의 不規則性, 蛇行 등에 의해 생성된 貯藏帶에 의한 縱擴散係數의 증가를 감안한다면 이 식에 의해 계산된 縱擴散係數는 실측값보다 다소 작을 것으로 예상된다. 지금까지 제안된 縱擴散係數 추정식 중 대표적인 것을 媒介變數의 수에 따라 분류하면 Table 1과 같다.

3.2 實測值 決定法

실측자료로부터 縱擴散係數를 결정하는 방법에는 1차원 확산모형의 統計學的 특성을 이용하는 모멘트방법(Method of Moment)과 Fischer

(1966)가 제안한 追跡方法(Routing Method)이 있다. 모멘트방법은 실측된 2개지점 이상의 농도분포곡선의 분산(variance)을 이용하여 비교적 용이하게 縱擴散係數를 결정할 수 있으나, 자연하천의 경우 수로의 不規則性, 蛇行 등에 의해 생성된 貯藏帶의 오염물질 貯藏效果때문에 농도분포곡선이 왜곡되고 감소부분에 긴 꼬리를 가지게 되어 적절한 분산을 계산하기에 큰 어려움이 있다. 추적방법은 실측된 농도분포곡선을 초기입력분포로 하고 이를 1차원 선형 반응함수를 이용하여 回積分(convolution integral)하기 때문에 자연하천의 확산특성을 표현하는 데 모멘트방법보다 우수한 방법이다. 그러나 두 방법 모두가 1차원 확산모형에 기초하고 있기 때문에 전단류이송과 난류확산이 평형을 이룬 후부터 적용가능하다.

3.2.1 모멘트 方法

1차원 확산모형[식(1)]의 통계학적 특성에 기초하여 縱擴散係數와 농도분포곡선의 분산과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma_x^2}{dt} = 2K \quad (15)$$

이 식에서 자연하천에 오염물질이 유입된 후 경과시간이 증가함에 따라 오염물질의 분산정도는 선

Table 1. Classification of Dispersion Coefficient Equations

Investigator	Equation	Channel Condition
2-Parameter Equation		
Taylor (1954)	$K = 10.1rU_*$	Circular Pipe
Elder (1959)	$K = 5.93dU_*$	2-D Open-Channel
Parker (1961)	$K = 14.3R^{3/2}(2gS)^{1/2}$	Open-Channel
Glover (1964)	$K = 500-800RU_*$	Natural Stream
3-Parameter Equation		
McQuivey와 Keefer (1974)	$K = 0.058U_*d/S$	Natural Stream
Magazine 등 (1988)	$K/RU_* = 75.86(0.4U_*/U_*')^{-1.632}$	Natural Stream
Iwasa와 Aya (1991)	$K/dU_* = 2.0(W/d)^{1.5}$	Open-Channel & Natural Stream
4-Parameter Equation		
Fischer (1975)	$K = 0.011U_*^2W^2/(dU_*)$	Natural Stream
Liu (1977)	$K = 0.18(U_*/U_*')^{1.5}U_*^2W^2/(dU_*)$	Natural Stream

형적으로 증가함을 알 수 있다. 나아가서 Fischer (1966)는 오염물질이 1차원 확산모형에 따라 확산된다면, 초기 농도분포의 형상과 관계없이 분산은 선형적으로 증가함을 증명하였다.

자연하천에서 확산실험시 측정상의 어려움 때문에 距離-濃度 分布曲線 대신에 대부분 時間-濃度 分布曲線을 수집한다. 만약 난류확산이 유속에 비해 충분히 작다면 다음 식을 사용하여 時間-濃度 分布의 分散, σ_t^2 을 距離-濃度 分布의 分散, σ_x^2 으로 변환시킬 수 있다(Godfrey와 Frederick, 1970).

$$\sigma_x^2 = U_u \sigma_t^2 \quad (16)$$

여기서 U_u 는 오염물질이 대상구간을 이동하는 평균 이동유속이다. 식(16)을 식(15)에 대입하면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$K = \frac{1}{2} U_u^2 \frac{d\sigma_t^2}{dt} \quad (17)$$

3.2.2 追跡方法

추적방법은 Fischer(1966)가 처음 제안한 방법으로서 2개 이상의 지점에서 측정된 농도분포 자료가 있는 경우에 상류지점의 농도분포를 추적하여 하류지점의 농도분포를 예측하는 방법이다. 상류지점의 농도분포를 초기 입력조건으로 하고 이를 1차원 선형 반응함수를 이용하여 回旋積分하면 하류지점의 농도분포를 구할 수 있다. 이렇게 구한 계산치를 실측된 농도분포와 비교하여 두 값이 가장 잘 일치하도록 縱擴散係數를 선정하는 방법이다. 이 때 하류지점의 농도분포는 다음 식으로 계산된다.

$$C(x_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(x_1, \tau) \frac{\exp\left[-\frac{\{U(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau)\}^2}{4K(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right]}{\sqrt{4\pi K(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}} U d\tau \quad (18)$$

여기서 \bar{t}_1 과 \bar{t}_2 는 각각 상류 및 하류지점에서 농도 분포곡선의 도심(centroid)이 이동하는데 걸리는 시간이고 x_1 과 x_2 는 상류 및 하류지점의 좌표이다. 縱擴散係數 K 는 식(18)에 의해 계산된 농도분포와 측정된 농도분포의 평균자승 추정오차(least square error)가 가장 작은 값으로 결정한다.

4. 縱擴散係數 推定式 比較

4.1 自然河川 擴散資料

본 연구에서는 Table 1에 제시된 공식들의 거동을 비교·분석하기 위하여 자연하천의 실측자료를 수집하였다. 적용대상 하천의 선정조건으로는 우선 현장실험이 수행되어서 농도분포곡선이 존재하는 하천이어야 하고, 유량, 유속분포, 수심 등의 수리량 자료와 하천경사, 蛇行度 등의 지형학적 자료가 존재하는 하천이어야 한다. 국내하천의 경우 현장실험이 수행된 하천이 거의 없는 실정인바 국내 하천의 실측자료는 전혀 수집하지 못하였다. 미국 전역의 하천에서 수행된 현장실험 결과를 수록한 Godfrey와 Frederick(1970), McQuivey와 Keefer(1974), Nordin과 Sabol(1974), 그리고 Yotsukura 등(1970)의 보고서에서 26개 하천의 59지점의 자료를 수집·분석하였다.

수집된 수리 및 농도자료를 Table 2에 요약하여 수록하였다. Table 2에서 縱擴散係數는 실측된 농도분포곡선으로부터 추적방법을 이용하여 계산한 것이다. 본 연구에서는 모멘트방법과 추적방법을 이용하여 縱擴散係數를 계산하였으나 前節에서 설명한 바와 같이 자연하천의 경우 貯藏帶 등의 영향으로 인해 모멘트방법으로는 물리적인 의미를 가진 縱擴散係數를 계산하기에 큰 어려움이 있기 때문에 추적방법을 이용하여 계산된 縱擴散係數를 실측치로 결정하였다. Fig. 1은 추적방법을 이용하여 縱擴散係數를 계산한 예를 나타내고 있다. Fig. 1에 도시한 자료의 경우 농도분포곡선의 형태 및 실측시간의 간격이 촘촘하여 추적방법을 적용하여 縱擴散係數를 계산하기에 큰 어려움이 없었으나, 농도분포곡선이 심하게 왜곡되었거나 실측시간의 간격이 넓은 때에는 추적방법을 적용하기에 다소 어

Table 2. Summary of Hydraulic and Derspersion Data Measured at 26 Streams in the United States

Natural Streams	Width	Depth	Velocity	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	
Monocacy River, MD	21.03	0.48	0.62	0.00100	0.069	25.90	
	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	
Conococheague Creek, MD	97.54	1.15	0.32	0.00045	0.058	119.80	
	40.54	0.41	0.23	0.00045	0.040	66.50	
	42.21	0.69	0.23	0.00060	0.064	40.80	
	49.68	0.41	0.15	0.00060	0.081	29.30	
Chattahoochee River, MD	42.98	1.13	0.63	0.00060	0.081	53.30	
	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	
Red River, LA	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	0.041	237.20	
Mississippi River, MO	533.40	4.94	1.05	0.00012	0.069	457.70	
	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	0.38	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, IA	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	0.91	0.40	0.00050	0.067	39.48	
Nooksack River, WA	64.01	0.76	0.67	0.00963	0.268	34.84	
Wind/Bighorn River, WY	59.44	1.10	0.88	0.00131	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	

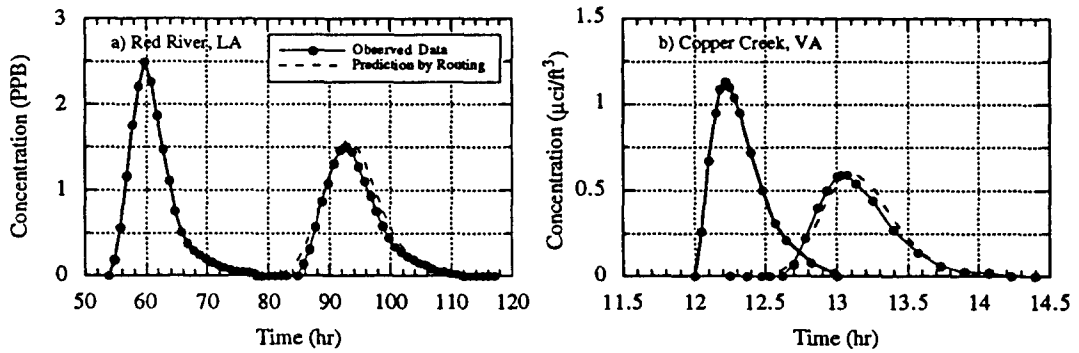


Fig. 1. Illustrations of Routing Method

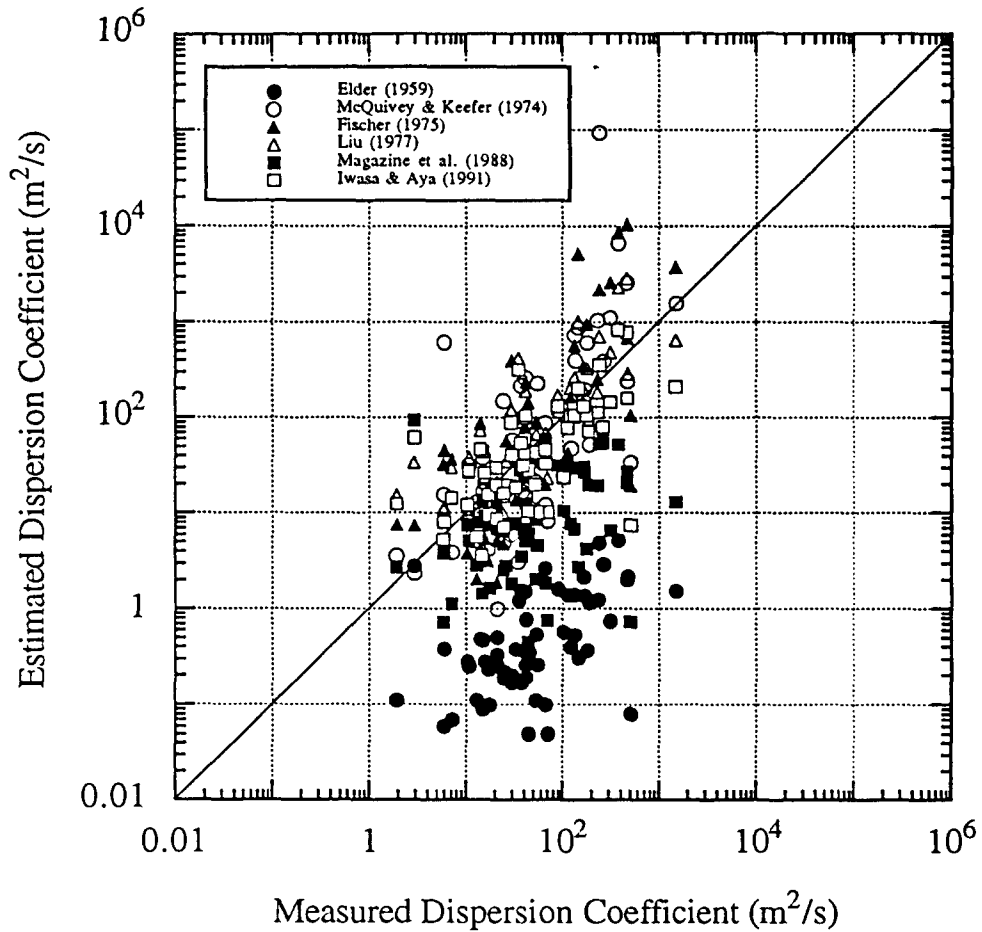


Fig. 2. Comparison of Estimated Dispersion Coefficients with Measured Data

려운 경우가 발생하였는데, 이 경우 선형보간법을 이용하여 중간값을 추가한 후 縱擴散係數를 계산하였다.

4.2 推定式 比較

자연하천에서 실측한 자료를 사용하여 공식의 거동을 분석하기 위하여, 전절에서 서술한 縱擴散係數 추정식 중에서 비교적 사용빈도가 높고 적용이 용이하고 이론적인 배경이 확고한 공식을 선정하였다. 선정된 공식은 2변수 공식 중에서 Elder 공식, 3변수 공식 중에서 McQuivey와 Keefer 공식, Magazine 등 공식, 그리고 Iwasa와 Aya 공식, 그리고 4변수 공식인 Fischer 공식과 Liu 공식의 6개

공식이다.

선정된 6개 공식을 자연하천에서 실측한 縱擴散係數와 비교하여 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에서 Elder 공식의 경우 대부분 縱擴散係數를 과소 산정하고 있음을 알 수 있다. 3변수 공식 중에서 McQuivey와 Keefer 공식은 비교적 양호한 거동을 보이나 과대 산정하는 자료점의 수가 많은 편이며, Magazine 등 공식은 대부분의 경우에 과소 산정하고 있음이 밝혀졌다. Iwasa와 Aya 공식은 비교적 양호한 거동을 보이고 있다. 4변수 공식 중에서 Fischer 공식은 縱擴散係數를 과대 산정하는 편이며, Liu 공식은 Fischer 공식보다는 우수한 거동을 보이고 있으나 하폭이 큰 하천의 경우에는 과대 산정하는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

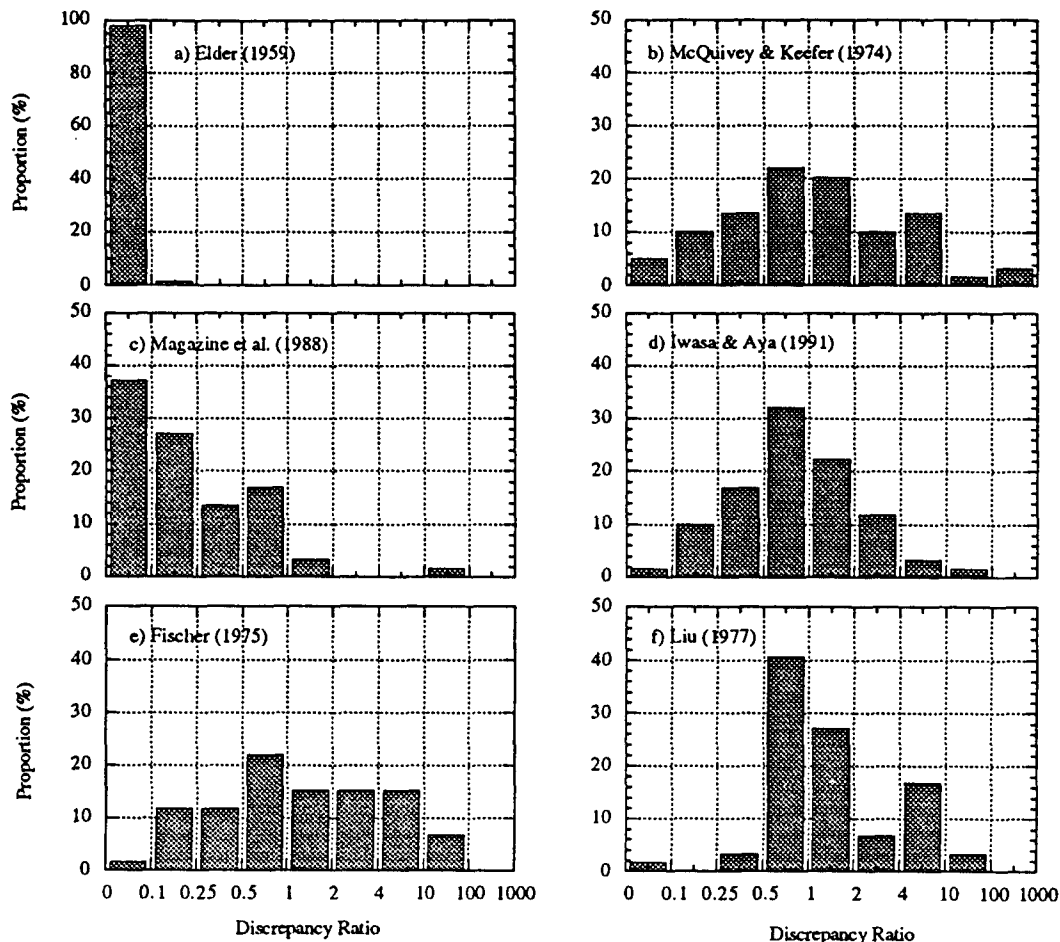


Fig. 3. Discrepancy Ratio of Selected Dispersion Coefficient Equations

Table 3. Accuracy of Selected Dispersion Coefficient Equations

Dispersion Coefficient Equation	Accuracy (%)
Elder (1959)	00.0
McQuivey & Keefer (1974)	42.4
Fischer (1975)	37.3
Liu (1977)	67.8
Magazine et al. (1988)	20.3
Iwasa & Aya (1991)	54.5

각 공식들의 거동을 定量的으로 비교하기 위하여 다음 식과 같은 不一致率을 비교척도로 사용하였다 (White 등, 1973).

$$\text{不一致率} = \frac{\text{縱擴散係數 算定值}}{\text{縱擴散係數 實測值}} \quad (19)$$

여기서 不一致率이 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 正確度는 불일치율이 0.5-2.0 사이에 있는 자료점의 전체에 대한 비율로 정의하였다.

각 공식별 불일치율의 분포를 Fig. 3에 도시하였고, 각 공식의 正確도를 Table 3에 수록하였다. Elder공식의 경우 대부분 자료의 不一致率이 0.1이하에 들어가고 0.5-2.0 사이에 있는 자료점이 하나도 없는 것으로 나타났다. 이는 Elder공식이 縱擴散係數를 과소 산정하고 있음을 확연하게 보여주는 것이다. 3변수 공식 중에서 McQuivey와 Keefer공식은 비교적 양호한 분포를 보이고 있으나, 전술한 바와 같이 전체적으로 과대 산정하는 편이다. 이에 비해 Magazine 등 공식은 대부분의 경우에 과소 산정하고 있다. Iwasa와 Aya공식은 不一致率의 분포가 정상분포를 보이고 있으며 正確度도 약 55%로서 비교적 양호한 거동을 보이고 있다. 4변수 공식 중에서 Fischer공식은 縱擴散係數를 과대 산정하고 있는 것으로 나타났다. Liu공식의 正確度는 약 68%로서 비교적 양호하나 하폭이 큰 하천(200m 이상)의 경우에는 불일치율의 범위가 2.72부터 11.52사이의 값을 나타내고 있는 등 전체적으로 과대 산정하고 있는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 2변수 공식 중에서 Elder공식은 縱擴散係數를 과소 산정하기 때문에 1차원 확산모형의 확산계수의 산정에는 부적합한 것으로 생각된다. 이는 Fischer(1979), Abd El-Hadi와 Davar(1976) 등에 의해 보고된 바대로 Elder의 공식이 흐름과 확산거동이 복잡한 자연하천에서의 종확산을 대표하지 못한다는 사실과 부합하는 것으로서, 그 이유는 이 공식이 하폭방향의 유속분포 및 하상의 불규칙성을 전혀 고려하지 못하고 있기 때문이라 생각된다. 3변수 공식 중에서는 Iwasa와 Aya공식이 비교적 양호한 거동을 보이고 있다. 4변수 공식인 Fischer공식과 Liu공식은 모두 과대 산정하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 두 공식 모두 하폭의 제곱 형태를 포함하고 있기 때문에 하천의 폭이 매우 큰 대하천의 경우 과대 산정하는 것으로 생각된다.

본 연구에서 각 공식들의 특성 및 적용한계를 분석한 결과, 하천 특성 및 수리량·지형량 자료의 존재유무에 따른 적합한 縱擴散係數 公式의 선정지침은 다음과 같다. 수리량 및 지형량 자료 중에서 평균수심, 하폭 그리고 전단유속(하천경사)자료가 존재하는 경우에 Iwasa와 Aya공식을 사용하여 縱擴散係數를 산정하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 만약 상술한 수리량 및 지형량 자료에 추가하여 유속자료가 존재하는 하천인 경우 Liu공식을 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 Liu공식의 경우 하폭이 큰 대하천(200m 이상)의 경우에는 사용을 피할 것을 제안하는 바이다.

5. 要約 및 結論

본 연구에서는 자연하천의 종확산과정을 정확하

게 대표하는 縱擴散係數의 적절한 선정을 위하여 기 제안된 縱擴散係數 추정공식들을 비교·분석하였다. 縱擴散係數 공식을 매개변수의 수에 따라 분류·제시하였으며, 그 중 적용성이 비교적 우수한 공식을 선정하여 미국 전역의 26개 하천으로부터 수집된 실측치와 비교하였다. 실측 縱擴散係數는 실측된 농도분포곡선으로부터 追跡方法을 사용하여 구하였다. 또한 본 연구에서는 不一致率 검토를 통하여 각 공식들의 특성 및 적용한계를 분석하였다.

본 연구의 결과 다음의 사실을 발견하였다. Elder공식은 縱擴散係數를 과소 산정하기 때문에 1차원 확산모형의 종확산계수의 산정에는 부적합한 것으로 생각된다. 3변수 공식 중에서 McQuivey와 Keefer공식은 전체적으로 과대 산정하는 편이고, Magazine 등 공식은 대부분의 경우에 과소 산정하고 있다. 이들에 비해 Iwasa와 Aya공식은 비교적 양호한 거동을 보이고 있다. 4변수 공식인 Fischer공식과 Liu공식은 모두 전체적으로 과대 산정하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 두 공식 모두 하폭의 제곱 형태를 포함하고 있기 때문에 하천의 폭이 매우 큰 대하천의 경우 과대 산정하는 것으로 생각된다. 따라서 수심, 하폭 그리고 전단유속(하천경사)자료가 존재하는 하천의 경우에는 Iwasa와 Aya공식을 사용하여 縱擴散係數를 산정하는 것이 바람직하고, 수심, 하폭, 전단유속, 그리고 유속자료가 존재하는 하천인 경우 Liu공식을 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 Liu공식의 경우 하폭이 큰 대하천(200m 이상)의 경우에는 사용을 피하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구의 일부는 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 수행되었다.

參 考 文 獻

徐一源, 鄭泰星 (1994). “自然河川에서 縱擴散係數 推定式 開發.” 1994年度 大韓土木學會 學術發表會 概要集(II), pp. 101-104.

- 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.
- Asai, K., and Fujisaki (1991). “Effect of aspect ratio on longitudinal dispersion coefficient.” *Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics*, pp. 493-498.
- Bansal, M.K. (1971). “Dispersion in natural streams.” *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 97, No. HY11, pp. 1867-1886.
- Chatwin, P.C., and Sullivan, P.J. (1982). “The effect of aspect ratio on longitudinal diffusivity in rectangular channels.” *J. Fluid Mechanics*, Vol. 120, pp. 347-358.
- 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 B.H. (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 B.H. (1968). “Dispersion predictions in natural streams.” *J. Sanitary Engineering Division*, ASCE, Vol. 94, No. SA5, pp. 927-943.
- Fischer B.H. (1975). Discussion of “Simple method for predicting dispersion in streams.” by McQuivey, R.S., and Keefer, T.N., *J. Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, No. EE3, pp. 453-455.
- Fischer B.H., 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.
- Glover, R.E. (1964). “Dispersion of dissolved and suspended materials in flowing streams.” *United States Geological Survey Professional Paper 433-B*, Washington, D.C.
- Godfrey, R.G., and Frederick, B.J. (1970). “Stream dispersion at selected sites.” *United States Geological Survey Professional Paper 433-K*, Washington, D.C.

- 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.
- Magazine, M.K., Pathak, S.K., and Pande, P.K. (1988). "Effect of bed and side roughness on dispersion in open channels." *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 7, pp. 766-782.
- McQuivey, R.S., and Keefer, T.N. (1974). "Simple method for predicting dispersion in streams." *J. Environmental Engineering Division*, Vol. 100, No. EE4, pp. 997-1011.
- Nordin, C.F., and Sabol, G.V. (1974). "Empirical data on longitudinal dispersion in rivers." *United States Geological Survey Water Resources Investigation 20-74*.
- Parker, F.L. (1961). "Eddy diffusion in reservoirs and pipelines." *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 87, No. HY3, pp.151-171.
- Sooky, A.A. (1969). "Longitudinal dispersion in open channels." *J. Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 95, No. HY4, pp.1327-1346.
- 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.
- White, W.R., Milli, H., and Crabbe, A.D. (1973). "Sediment transport : An appraisal methods." Performance of Theoretical Methods, *Station Report*, Vol. 2, No. IT119, Wallingford, U.K.
- Yotsukura, N., Fischer, H.B., and Sayre, W.W. (1970). "Measurement of mixing characteristics of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska." *United States Geological Survey Water-Supply Paper 1899-G*.

〈접수 : 1995년 4월 20일〉