

1991년 낙동강 페놀유출 사고에 대한 수치모의

조 성 우¹⁾ · 오 전 경^{수2)}

1. 서론

하천수질오염 문제는 평상시의 지속적인 오염원의 발생에 의한 장기적인 수질문제와 사고 등으로 인한 독성물질 등의 일시적 방류에 따른 단기적인 수질문제로 구분할 수 있는데, 평상시에는 유역 내 점오염원 및 비점오염원과 하천의 수질관리가 공학적인 관심의 대상인 반면, 수질사고 시에는 사고지점 하류에서의 가능한 피해상황을 정확하고 신속하게 예측함으로써 그에 대한 대책을 수립하는 것이 중요한 문제가 된다.

이와 같은 수질문제의 성격에 따라 적용되는 수치모형의 특성 또한 크게 달라진다. 일반적으로 수치모형은 흐름의 계산을 위한 흐름모형, 오염원의 물리적 확산을 계산하는 확산모형 및 수질요소간의 상호작용을 모의하기 위한 반응모형 등 3개 부모형으로 구성된다. 우발적인 사고 등으로 단시간에 배출된 오염원에 따른 하천수질의 계산모형에 있어서는 물리적 확산에 의해서 시간에 따라 급격히 변화하는 비정상 농도의 계산이 요구되므로 확산모형이 매우 중요한 부분을 차지하게 된다. 한편 이 때의 오염원은 평시에는 하천으로의 방류가 전혀 허용되지 않거나, 그 허용농도가 극소치인 주로 독성물질 등의 단일 오염물질이며, 따라서 서로 다른 오염 물질간의 반응 등을 모의하기 위한 반응모형은 대개 중요한 요소가 되지 않는다.

장기적인 수질변화를 모의하기 위한 계산모형에 관한 연구는 국내외적으로 매우 활발히 수행되어 왔으나, 단기간의 급격한 수질변동을 모의하기 위한 계산모형에 관한 연구는 많지 않은데, 이는 우발적인 수질사고가 자주 발생하는 것이 아니므로 그 활용성이 상대적으로 적기 때문이기도 하지만 시간에 따라 급격히 변화하는 비정상 수질을 정확히 계산하기 위해서는 정교한 확산모형이 요구되기 때문이기도 하다. 우발적인 오염원의 누출 사고는 자주 발생하는 것은 아니나, 일단 이러한 사고가 발생하게 되면 하류의 상수원 등에 심각한 위협을 초래할 수 있으므로 이에 대한 정확한 예측모형의 개발이 필요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 자연하천에 관한 부정류 계산모형과 종확산 계산모형으로 구성되는, 오염물질 누출 사고시의 비정상 하천수질의 모의를 위한 계산모형을 수립하고, 수립된 모형의 적용 대상하천으로서 낙동강 수계를 선정하였다. 낙동강 유역에는 각종 산업시설이 밀집되어 있어 예기치 못한 방류나 사고로 인한 오염물질 누출 가능성이 높고, 이러한 사고 시에 상수원 보호 등의 목적을 위해서는 종확산 계산모형이 필요하다. 특히 1991년 3월에 이미 페놀 누출 사고가 발생한 바 있어, 모형의 보정 등을 위한 관측자료가 부족하나마 가용한 곳이 이 지역이다. 따라서 본 연구에서는 국내 하천들 중 장래 수질사고의 가능성이 가장 크다고 할 수 있는 낙동강 수계를 모형의 적용 대상하천으로 하고, 1991년 3월에 발생한 페놀 누출 사고에 관한 모의계산을 수행하였다.

2. 계산모형

계산모형은 자연하천에 관한 흐름모형과 종확산 모형으로 구성된다. 종확산 모형에 앞서 흐름모형에 의한 계산이 수행되며, 그 결과로서 구해지는 각 지점에서의 평균유속 및 통수 단면적 등이 종확산 모형의 입력자료로 사용된다. 하천 흐름계산 모형으로는 가장 일반적인 수리학적 모형으로서 Preissmann의 4점 음해법과 폐합형 double-sweep 알고리즘을 근간으로 하는 폐합형 부

1 성균관대학교 공과대학 토목공학과 석사(졸)

2 성균관대학교 공과대학 토목공학과 부교수

정류 계산모형을 사용하였다. 흐름 계산모형에 관한 상세한 내용은 황의준과 전경수(1997) 및 황의준(1997)에 기술되어 있으며, 여기서는 종확산 모형에 대하여 기술하기로 한다.

1차원 수로에서 흐름면적에 대하여 완전 혼합된 비보존성 오염물질에 관한 종확산 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(UAC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [DA \frac{\partial C}{\partial x}] - kAC \quad (1)$$

여기서 A는 통수단면적, U는 단면평균 유속, D는 종확산계수, C는 오염물질의 농도, k는 생·화학적 반응에 의한 감쇠계수(decay coefficient)이며, x와 t는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. 식 (1)의 우변 제 2항 -kC는 비보존성 물질에 관한 감쇠 항으로서 선형감쇠를 가정한 것이다. 식 (1)의 각 미분항을 전개하고 수로 흐름에 관한 연속방정식을 적용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC \quad (2)$$

여기서

$$u = U - \left[\frac{\partial D}{\partial x} + \frac{D}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right] \quad (3)$$

식 (2)는 U가 영이면 포물선형의, D가 영이면 쌍곡선형의 편미분 방정식이 된다. 식 (2)에는 포물선형과 쌍곡선형이 동시에 내재되어 있는데 이들 방정식이 갖는 물리적, 수학적 성질 및 그에 따른 적합한 수치해법 또한 다르므로, 각 항을 별도로 취급하여 해를 구하려는 것이 단계 분리, 또는 연산자 분리에 의한 접근방법이다. 즉, 식 (2)를 이송, 감쇠 및 확산에 관한 방정식인 다음 식 (4), (5) 및 (6)으로 각각 분리하고, 이들 각각에 적합한 수치기법을 각각 1/3 시간 간격에 대하여 적용하여 순차적으로 계산하게 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + 3\bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad n\Delta t \leq t \leq (n + \frac{1}{3})\Delta t \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -3kC, \quad (n + \frac{1}{3})\Delta t \leq t \leq (n + \frac{2}{3})\Delta t \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 3\bar{D} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (n + \frac{2}{3})\Delta t \leq t \leq (n+1)\Delta t \quad (6)$$

여기서 \bar{u} 및 \bar{D} 는 시간준위 n과 n+1 사이에서의 u와 D의 평균치를 각각 나타낸다. 즉 이송, 감쇠 및 확산과정이 각각 1/3 시간간격에 대해서만 일어나는 것으로 하되, 이들 과정의 강도를 각각 실제의 세배로 함으로써, 결국 전체 시간간격(one time step)에 대해서는 실제와 같은 이송, 감쇠 및 확산이 일어나도록 하는 결과가 된다.

이상과 같은 계산모형은 비정상 수질모형인 CE-QUAL-RIV1(WES, 1990) 모형의 감쇠항에 대한 계산 방법을 개선한 것으로서, 유명관과 전경수(1999)는 오염물질이 불균일 흐름 내로 연속적으로 유입되는 경우 및 균일 흐름 내로 순간적으로 부하되는 경우에 대한 종확산 문제에 모형을 적용하여 그 결과를 정확해 및 CE-QUAL-RIV1 모형에 의한 계산결과와 비교한 결과, 감쇠계수가 커질수록 본 모형이 기존의 모형에 비하여 더욱 정확한 계산결과를 나타냄을 제시한 바 있다.

3. 계산모형의 적용

국내 하천들 중 장래 수질사고의 가능성이 가장 크다고 할 수 있는 낙동강 수계를 모형의 적용 대상하천으로 하여, 1991년 3월에 발생한 페놀 누출 사고에 관한 모의계산을 수행하였다.

3.1 흐름 계산모형의 적용

흐름 계산모형의 적용 대상 구간은 안동댐부터 낙동강 하구언까지의 총 연장 340 km 구간은

로서 반변천, 미천, 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강, 청도천, 밀양천 등 13개의 주요지천 유입지점을 내부경계로 포함한다. 모형의 상류단인 안동댐, 하류단인 하구연 및 13개 지천의 유입지점에 각각 절점이 위치하도록 하였다. 따라서 흐름모형은 15개의 절점과 14개의 수로로 구성된다. 계산점의 총수는 744개로서 계산점간의 평균거리는 420 m이다. 각 계산점에서의 횡단면 자료는 낙동강 수계 하천정비 기본계획(1993)의 하천측량 자료를 사용하였다.

부정류 계산모형의 상·하류단 경계조건인 상류단 유량과 하류단 수위 및 내부경계인 지천 유입량은 일반적으로 시간에 따라 변화하도록 부여할 수 있다. 그러나 지천 유입량의 추정에 필요한 수위 관측소 자료로서 일별 자료만이 가용한 관계로, 정확산 모형 계산 시에 요구되는 시간별 또는 그 이하의 시간 단위에 대한 지천 유입량의 산정은 사실상 불가능하다. 이러한 가용자료상의 제약점과 폐놀 유출 사고 당시가 우기가 아닌 평시로서 유량변동이 그리 크지 않음을 감안하여 사고 기간 중의 평균 유량이 지천으로부터 계속적으로 유입되는 것으로 하여, 경계조건을 일정한 값으로서 부여되도록 흐름모형의 입력자료를 구성하였다.

상류단 경계조건인 안동댐 방류량은 1991년 폐놀 누출 사고 기간인 3월 14일부터 23일까지의 기간 중 평균 방류량인 $37.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 하였으며, 하류단 경계조건인 낙동강 하구연 수위도 마찬가지로 El. 0.9 m로 일정하게 부여하였다. 각 지천 유입량의 산정을 위해서는 수위 관측 자료와 수위-유량 관계곡선이 필요하다. 그러나 이러한 자료가 가용한 곳은 일부 지천에 국한되기 때문에 다음과 같은 방법으로 지천 유입량 자료를 구성하였다. 우선 각 지천의 가장 하류단에 위치하며, 수위-유량 관계 곡선이 존재하는 8개 수위 관측소에서의 모의 계산기간인 1991년 3월 14일부터 3월 23일까지의 수위 관측치와 수위-유량 관계 곡선으로부터 각 관측 지점에서의 일별 유량을 산정하고, 일별 유량의 평균치를 산정하였다. 이와 같이 산정된 각 관측소에서의 평균유량을 사용한 회귀분석에 의하여 배수유역 면적과 지천 평균 유입량간의 관계식을 도출하였다. 이와 같이 도출된 다음의 회귀식을 사용하여, 미계측 지천을 포함한 13개 지천에 대한 유입량을 추정하였다.

$$Q_r = 0.013A_d \quad (7)$$

여기서 Q_r 는 지천 유입량(m^3/s)을, A_d 는 배수유역 면적(km^2)을 각각 나타낸다.

그 밖의 입력자료로서 계산시간 증분은 1분, Newton-Raphson 반복계산 최대 수는 2회, Newton-Raphson 반복 계산 시 수위 및 유량 보정치의 수렴 범위는 각각 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 및 1 cm, 차분식의 시간 가중치와 운동량 보정 계수는 1로 하여 계산을 수행하도록 모형을 구성하였다.

흐름모형의 매개변수인 Manning 조도계수의 추정을 위한 목적함수로는 구포, 수산, 임해진, 진동, 적포교, 고령교, 왜관, 일선교, 및 낙동 등 본류 수위 관측지점에서의 수위 관측치와 계산치간의 오차 제곱합이 최소화되도록 하였다. 지천 수위 관측치의 경우와 마찬가지로 이들 본류의 수위 관측치 또한 사고 기간 중에 거의 일정한 값을 보였기 때문에 그 평균치를 계산된 수위와 비교하였다. 최적 추정 방법으로는 Gauss-Newton 방법에 Marquardt(1963)의 기법을 적용한 수정 Gauss-Newton 방법이 적용되었으며, 이를 위하여 상용 소프트웨어인 PEST(Doherty 등, 1994)가 사용되었다. 최적화 기법에 관한 상세한 내용은 Hill(1992) 등에 잘 기술되어 있다. 이와 같이 추정된 조도계수의 값은 0.0343이며, 제품평균제곱근(RMS) 오차는 0.24 m이다.

3.2 정확산 계산모형의 적용

앞에서 기술한 바와 같이 흐름계산 모형은 폐합형 부정류 계산모형인 반면, 정확산 모형은 단일 하도에 관한 모형으로 구성하였다. 부정류 계산모형을 구성하는 수로 중 필요한 부분을 배열 시킴으로써 정확산 모형을 구성하도록 하였다. 여기서는 1991년의 폐놀 누출 사고에 관한 모의모형의 구성이라는 관점에서 정확산 모형의 상류단은 흐름계산 모형의 경우와는 달리 구미 지점으로 하고, 하류단은 마찬가지로 낙동강 하구연으로 하여 총 214 km의 구간에 대한 모형을 구성하였다. 계산점의 총수는 471개로서 계산점간의 평균거리는 446 m이다. 금호강, 회천, 황강, 남강, 청도천, 밀양천 등 6개 지천이 이 구간에 포함된다. 앞 절에서 기술된 흐름모형에 의하여 계산된 수위, 유량, 통수면적 및 하폭 등의 수리학적 변수들은 각 지점에 대한 정확산계수의 산정에 사용된다. 정확산계수는 흐름에 따라 결정되는 수리학적 매개변수로서, 간단하게는 원형 관수로 흐름(Taylor, 1954) 및 광폭 개수로 흐름(Elder, 1959)에 관한 해석적 연구로부터 불규칙한 자연하천에 이르기까지 정확산계수를 하천 단면의 형태특성 및 흐름과 관련된 변수들의 함수로서 나타

내기 위한 많은 연구가 수행되어, 이 결과로 종확산계수에 관한 많은 경험식들이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 이들 식 중 McQuivey와 Keefer(1974), Liu(1977), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)에 의하여 각각 제안된 다음 식들을 적용하여 각 단면에서의 종확산계수를 산정하였다.

각각의 산정식에 의하여 추정된 종확산계수의 비교는 그림 1에 도시된 바와 같다. Liu(1977)의 산정식에 의한 계산결과가 변동폭이 지나치게 크고 다른 식들에 의한 결과와 큰 차이를 나타내는 반면, McQuivey와 Keefer(1974), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)에 의한 계산 결과는 단면에 따른 변화가 비교적 작은 안정적인 결과를 보임을 알 수 있다. 특히 McQuivey와 Keefer(1974) 및 Seo와 Cheong(1998)의 계산 결과는 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

1991년 페놀유출 사고에 대한 언론기관, 환경단체 등의 조사기록에 기초하여 모형의 상류단인 구미에 1991년 3월 14일 22시부터 8시간 동안 30톤의 페놀이, 이후 3월 20까지는 일 평균 2.5톤의 페놀이 유출된 것으로 상류단 경계조건을 부여하여, 이 경우에 대한 모의계산을 수행하였다. 종확산계수의 산정식 중 다른 식들에 의한 결과와 큰 차이를 보이는(그림 1 참조) Liu(1977)의 식을 제외하고, McQuivey와 Keefer(1974), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하는 각 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

그림 2는 페놀의 감쇠계수를 0이라 가정하여 계산된 수산 지점에서의 농도의 시간분포를 나타내고 있다. 그림에서 점으로 표시된 것은 이 지점에서 특정 시각에 관측된 농도 값을 나타내는 것이다. McQuivey와 Keefer(1974) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하여 계산된 농도분포가 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용한 경우에 비하여 상대적으로 서로 잘 일치함을 볼 수 있는데, 이는 이들 두 식에 의하여 산정된 종확산계수 분포가 서로 근사하다는 점에서(그림 1 참조), 당연한 결과라 할 수 있다. Iwasa와 Aya(1991)의 식에 의하여 산정된 종확산계수를 사용하여 모의된 농도분포는 침투농도의 도달시간이 다른 두 식을 사용하는 경우에 비하여 24 시간 정도 짧은 것으로 나타나고 있는데, 이는 종확산계수의 값이 전반적으로 더 큰 데 따른 것으로서(그림 1 참조), 타당한 결과라 할 수 있다. 수산 지점의 침투농도 도달시간이 약 120 시간인 점을 감안하면 24 시간의 차이는 약 20%에 해당하는 상당한 것으로 판단된다.

페놀의 감쇠계수 대략 0.0 - 1.0 1/day의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 감쇠계수에 대한 계산결과와 민감도를 알아보기 위하여 감쇠계수를 0.5 1/day로 하여 모의 계산을 수행하였다. 그림 3은 역시 수산 지점에서 대하여 계산된 농도의 시간분포를 실측치와 함께 나타내고 있다. 그림 2와 3을 비교해 보면 침투 농도의 발생 시각을 비롯하여 농도분포의 모양은 일치함을 알 수 있다. 그러나, 감쇠계수 0.5 1/day로 계산된 농도분포는 감쇠계수가 0인 경우에 비하여 약 10%로 감소됨을 볼 수 있다. 즉, 농도분포의 모양은 감쇠계수에 무관하지만, 그 값들은 상당히 민감함을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 모형에 의한 계산결과는 감쇠계수에 상당히 민감하므로 모형의 보정을 위한 매개변수로서, 관측자료에 근거한 추정이 필요하다고 볼 수 있다. 당시 하천구간 내의 어떤 지점에서든 연속적인 측정자료가 없고, 다만 7개 지점에서의 순간 관측자료만이 가용한 관계로 이들 자료를 사용하여 감쇠계수의 추정을 수행하였다. 즉, 특정한 시각에서 특정 지점에서의 관측된 농도값들과 그에 상응하는 계산치들간의 차의 제곱합이 최소가 되도록 감쇠계수를 추정하였으며, 조도계수의 추정시와 동일한 최적 추정기법을 사용하였다. 표 4는 종확산 계수식으로서 McQuivey와 Keefer(1974), Seo와 Cheong(1998) 또는 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용하는 각 경우에 대한 감쇠계수 추정결과를 정리한 것이다. 종확산의 산정을 위하여 어떤 식을 사용하더라도 계산치와 관측치의 오차가 상당히 크게 나타나고 있다. 또한 McQuivey와 Keefer(1974) 또는 Seo와 Cheong(1998)의 식을 사용하는 경우에 대하여 계산된 농도분포가 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용하는 경우에 비하여 서로 잘 일치함에도 불구하고(그림 2 및 3 참조), 추정된 감쇠계수의 값들은 그러한 일관성을 나타내지 못하고 있다. 이는 감쇠계수의 추정이 연속적인 관측자료를 사용한 것이 아니기 때문에 농도분포의 유사성이 모형의 보정에 있어서 별 의미를 가질 수 없기 때문으로 판단되며, 또한 계산치와 관측치의 오차가 매우 커서 가용한 순간 관측자료를 사용하여 추정된 감쇠계수의 값 자체에는 별다른 의미를 부여할 수 없을 것으로 판단된다.

4. 결론

자연하천에 관한 부정류 계산모형과 종확산 계산모형으로 구성되는, 오염물질 누출 사고시의 비정상 하천수질의 모의를 위한 계산모형을 수립하고, 낙동강 수계에 모형을 적용하여 1991년에 발생한 폐놀 누출 사고에 대한 모의계산을 수행하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

우선 McQuivey와 Keefer(1974), Liu(1977), Iwasa와 Aya(1991) 및 Seo와 Cheong(1998)에 의하여 제안된 식들을 사용하여 종확산계수를 산정하여 비교한 결과, McQuivey와 Keefer(1974) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식에 의한 산정 결과가 비교적 서로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, Liu(1977)의 산정식에 의한 계산결과는 변동폭이 지나치게 크고 다른 식들에 의한 결과와 큰 차이를 나타내었다. 또한 하류 지점에 대하여 계산된 농도분포는 종확산계수 산정식으로 어떠한 식을 사용하는가에 큰 차이를 나타내었다. 종확산계수의 산정식에 따른 계산결과의 민감도는 매우 큰 것으로 나타났으며, 따라서 기존의 종확산계수 산정식 중 본 연구의 대상하천인 낙동강 수계에 가장 적합한 것을 선정하거나 새로운 산정식의 도출을 위해서는 연속적인 농도 관측자료가 필수적인 것으로 판단된다.

또한 폐놀의 경우 계산된 농도값은 감쇠계수에 상당히 민감한 것으로 나타났으며, 따라서 사용한 관측자료를 사용하여 감쇠계수의 추정을 수행하였다. 종확산 계수식으로서 McQuivey와 Keefer(1974), Seo와 Cheong(1998) 또는 Iwasa와 Aya(1991)의 식을 사용하는 각 경우에 대하여 최적화 기법을 사용하여 감쇠계수를 추정하였으나, 연속적인 관측자료가 아닌 순간 농도의 관측자료로부터 의미 있는 매개변수의 값을 추정하기는 어려움을 알 수 있었다. 결론적으로 자연하천에서 비보존성 오염물질의 종확산 거동은 종확산계수 및 감쇠계수에 모두 매우 민감하며, 또한 이러한 민감도는 하천의 하류로 갈수록 증가하게 된다. 따라서 연속적인 농도 관측자료에 의거한 종확산계수 산정식의 개발 및 매개변수의 추정이 필요하며, 이러한 필요성은 낙동강의 경우뿐만 아니라 국내의 모든 대하천에 대하여 공통적으로 해당된다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비 지원에 의하여 수행되었으며(과제번호: 1997-001-E00715), 이에 사의를 표한다.

참고문헌

- 유명관, 전경수 (1999). "비보존성 오염물질에 대한 종확산 방정식의 수치해법." 한국수자원학회는 문집, 제32권, 제6호, pp. 607-616.
- 황의준 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형," 석사학위논문, 성균관대학교.
- 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정." 한국수자원학회는문집, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- Doherty, J., Brebber, L., and Whyte, P. (1994). *PEST: model-independent parameter estimation*. Watermark Computing.
- Elder, J.W. (1959). "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow." *J. Fluid Mech.*, Vol. 5, pp. 544-560.
- Hill, M.C. (1992). "A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression." *Open-File Report 91-484*, U.S. Geological Survey.
- Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows." *Proc. Int. Symp. on Envir. Hydr.*, Hong Kong, pp. 505-510.
- Liu, H. (1977). "Predicting dispersion coefficient of stream." *J. Envir. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 103, No. EE1, pp. 59-69.
- Marquardt, D.W. (1963). "An algorithm for least-square estimation of nonlinear parameters." *J. Soc. of Ind. and Appl. Math.*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.
- McQuivey, R.S., and Keefer, T.N. (1974). "Simple method for predicting dispersion in stream."

J. Envir. Engrg. Div., Vol. 100, No. EE4, pp. 997-1011.

Seo, I.W., and Cheong, T.S. (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 25-32.

Taylor, G.I. (1954). "The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *Proc. Royal Society of London, Series A.*, Vol. 223, pp. 446-468.

Waterways Experiment Station (1980). "CE-QUAL-RIV1: A dynamic, one-dimensional (longitudinal) water quality model for streams." *Instruction Report E-90-1*, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

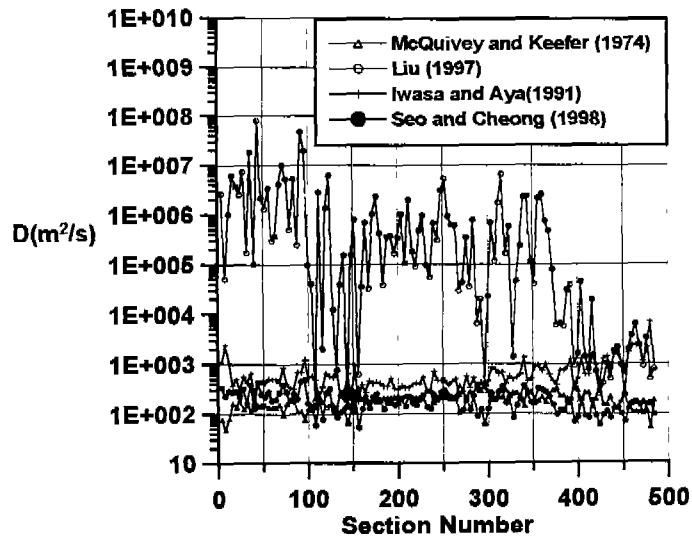


그림 1. 각 경험식에 의한 종횡산계수 분포 산정결과와의 비교

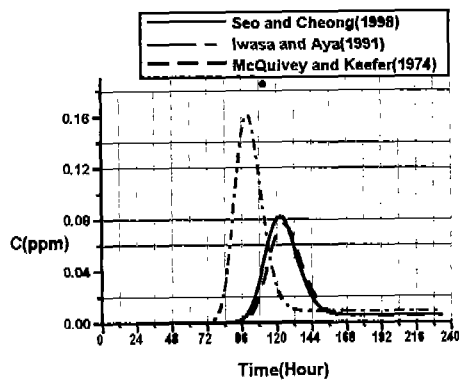


그림 2. 수산 지점에 대한 농도분포 계산결과(k = 0)

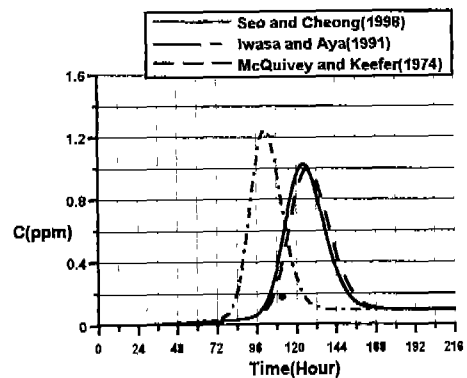


그림 3. 수산 지점에 대한 농도분포 계산결과(k = 0.5 1/day)