

수량·수질 모의치를 이용한 어류 서식 조건 유지에 필요한 적정 유량 산정

Estimation of Suitable Flow Needs for Maintaining Fish Habitat Conditions Using Water Quantity and Quality Simulation

김 규 호* / 조 원 철** / 전 병 호***

Kim, Kyu-Ho / Cho, Woncheol / Jun, Byong Ho

Abstract

The primary objective of this study is to estimate the suitable flow in need for conservation and restoration of the fish habitat in running water ecosystem, which has very important status in the instream flow for stream environment. Year, monthly low flows are estimated to properly maintain the fish habitat. Water depth and velocity are simulated, and also water temperature and Dissolved Oxygen(DO) are predicted at gradually varied flow using estimated low flows. These simulated conditions for each low flow are graphically compared with the requirements to maintain fish habitat at each life stage. These processes were applied to 3 riffle transects located at Dalcheon(Dal stream) in the South Han river. Pirami (*Zacco platypus*) was selected as a representative fish species in Dalcheon. It was shown that the suitable flow for maintaining the representative fish habitat at each life stage depends on hydraulic conditions rather than water quality conditions, and the flow ranges from the 10-year minimum low flow to consecutive 7-day 2.33-year low flow.

keywords: instream flow, fish habitat, riffle, water quantity and quality analysis, low flow

요 지

본 연구는 최근 하천유지유량에서 중요한 위상을 차지하고 있는 하천생태계에서 어류 서식처를 보전하고 복원하는데 필요한 적정 유량을 산정하는 것이 주된 목적이다. 어류 서식처를 적절히 유지할 수 있는 연과 월갈수량을 산정한다. 이 갈수량을 이용하여 점변 흐름에서 어류 서식처 재공에 필요한 수심과 유속을 모의하고, 또한 수온과 용존산소를 예측한다. 예측된 각 갈수량별 서식 조건과 각 성장단계별 어류 서식처 요구 조건을 도식적으로 비교한다. 이 과정을 남한강의 달천 분류에 위치한 3개 여울 구간에 적용하였다. 달천의 대표어종으로 피라미를 선정하였다. 달천의 피라미(*Zacco platypus*) 성장단계별 서식처 유지를 위한 적정유량은 수질보다는 수리 조건에 좌우되며, 그 양은 10년 빈도 연갈수량에서 2.33년 빈도 7일 연속갈수량까지의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하천유지유량, 어류 서식처, 여울, 수량/수질 해석, 갈수량

- * 연세대학교 사회환경·건축공학부 박사수료, 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Doctoral Candidate, School of Civil, Urban, and Archit. Engrg., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea
Senior Researcher, Water Resour. & Environ. Engrg. Research Division, KICT, Koyang 411-712, Korea
- ** 연세대학교 사회환경·건축공학부 교수
Professor, School of Civil, Urban, and Archit. Engrg., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea
- *** 육군사관학교 토목공학과 교수
Professor, Department of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

1. 서 론

일반적으로 하천 생태계에서 어류를 보전하고 복원하기 위해서는 세 가지 기본적인 조건, 즉 수질, 수리, 하도 구조 조건, 다시 말하면, 좋은 수질, 충분한 수량, 서식을 위한 안정된 물리적 구조가 필요하다(Gore, 1985). 인위적으로 악화되는 하천 수질 개선, 여울과 웅덩이가 반복되는 하도의 어류 서식처(또는 서식지)를 제공하기 위해서는 어류 서식 환경을 보호하고 유지하는데 필요한 적정유량으로 흐름 영역을 확보하여야 한다.

미국, 유럽 등 외국에서 어류 서식처 해석과 그에 따른 서식처 보전을 위한 수량 측면의 하천유지유량 연구는 하천 취수 증가와 하천 개발 사업 등으로 인한 하류 하도내 유량 감소와 그에 따른 어류 서식처 공간 축소를 억제할 수 있는 자연 생태의 보전 필요성이 제시된 '70년대부터 시작되었다. 이후 물고기 서식처 보전을 위한 필요유량은 주로 유량 점증 방법론(IFIM: Instream Flow Incremental Methodology) 개념에 입각한 물리적 서식처 모의 시스템(PHABSIM: Physical HABitat SIMulation system) 등으로 추정된 하천유지유량이 댐 개발 및 운영이나 하천 취수 등 하천 저수관리 측면에서 보편적으로 통용되고 있다(Bovee, 1982; Bovee 등, 1998).

우리 나라에서는 우효섭 등(1998)이 물고기 서식처 환경 중, 수심과 유속 등 수리조건을 유지하기 위해 특정 여울에서 흐름을 등류로 가정하여 Manning 공식으로 수리량을 계산하였다. 건설교통부(1998)는 한강 유역에서 조사된 어종에 대해 특정 여울 지점에서 Manning 공식을 적용하여 대상 어종이 요구하는 수심과 유속을 확보하기 위한 통과유량(passage flow)을 어류 보전에 필요한 유량으로 설정한 바 있다. 이 국내 연구들은 수문 계열의 계절성 변화와 하도의 상하류 공간 변화를 고려하지 않고 일정한 최소유량만을 제시하여 왔다. 최근에 전병호(1998)는 자연 하천에 적용하여 1차원 흐름 상태에서 갈수량 크기별로 어류 서식처의 수량 및 수질 변동을 조사한 바 있다.

우리 나라 하천은 그 동안 하천 개발과 정비, 각종 취수 등으로 인해 하도 및 수리, 수문, 하상 재료, 수질 조건이 악화되어 하천 생태계가 서식하기에 부적절한 상태로 진행되고 있으나, 어류 서식 환경에 중요한 3가지 조건, 즉 수량과 그에 따른 수질과 하천 구조적 서식 공간에 대해 시간 변동을 고려하여 검토된 바는

없다. 특히, 하천에서 어류 서식 수질 조건과 수리 조건을 동시에 검토하여 수계 상하류가 연계된 여울 구간의 특성을 파악한 규명한 사례는 없는 실정이다.

하천 어류 서식 활동은 실제로 하천 수문 변동성에 따라 시간과 공간상의 변화가 발생하고, 어류는 이 변화에 맞추어 최적의 서식 조건을 찾아가게 된다(Bovee, 1982; Allan, 1995; Stalnaker 등, 1996). 따라서 하천 어류 서식 조건은 연 단위보다는 계절이나 월 또는 그 이하의 기간에 맞추어 설정하고 검토하는 것이 효과적이다.

본 연구는 하천 어류 서식 조건을 유지하기 위한 필요유량의 시간과 공간 변동성 파악을 위한 기초 연구로서, 유량 변화에 어류 서식 공간이 가장 민감하게 변화되는 여울 구간에서 어류 서식처 보전을 위한 수리 조건을 검토하고, 이에 적합한 수질을 갖는 월별 적정유량의 산정과정을 적용한다. 이를 실제 하천에 적용하여 그 적용성을 검토하고, 대상 어종의 서식 조건을 유지하기 위한 적정 갈수량을 산정하여 제시하고자 한다.

이에 따라 한강 지류 달천에서 조사된 현재의 어류상을 이용하여 여울에서 서식하는 유영성 어종을 선정하고, 서식 조건을 설정한다. 어류 서식과 관련된 연 및 월별 갈수량을 산정하여 모의 대상 유량으로 이용한다. 달천에 서식하는 피라미의 서식 조건을 위한 3개 한계 여울 구간에 대해 갈수량에 따른 정상 점변류 상태에서 미국 육군 공병단의 HEC-RAS 수리 모의 프로그램을 이용하여 수리 조건을 모의한다. 마찬가지로 수질 조건, 즉 수온과 용존산소를 미국 환경청 QUAL2E 수질예측 모형으로 예측하여 적합성을 도식적으로 비교한다. 마지막으로 수리와 수질 조건을 모두 만족하는 적정유량을 어류 성장단계별로 산정하여 제시함으로써 하천 취수 허가 및 하천 개발 사업의 하천 유지유량 관리에 기여할 수 있을 것으로 본다.

2. 어류 서식 조건과 모의 이론

하천 어류가 서식하기 위한 구성 성분은 크게 어류가 서식할 수 있는 적절한 수질, 섭식과 생활을 위한 공간, 산란과 부화 공간, 휴식과 피난을 위한 은신처 등이 필요하다. 어떤 하천에서 이와 같은 서식처 각 구성 성분의 범위는 하천의 물리적, 생화학적, 그리고 수리학적 특성에 의존한다. 하천이 크고 작건 완전한 서식처를 제공하기 위해서는 하천 자체가 어류 서식에 적합하게 형성되어 있는 하도의 구성과 형상을 통한

적절한 흐름 영역이 요구된다. 이 흐름 영역에서 어류 서식 요구 조건은 물리적 특성으로 여울, 웅덩이, 하상 재료, 커버(휴식과 은신처) 등의 하도 구조, 생화학적 특성은 적절한 수온과 용존산소, 영양분, 그리고 수리학적 특성은 수심, 유속 등이다(Gore, 1985; Bovee, 1982).

본 연구에서는 어류 서식처 흐름 영역과 관련된 물리적 특성은 여울, 생화학적 특성은 수온과 용존산소, 수리학적 특성은 수심과 유속을 모의 대상으로 한다.

2.1 어류 서식 공간

하천에서 유영성 어종의 섭식과 생활을 위한 공간은 하천의 지형학적 특성상 웅덩이와 여울의 연속적인 형태(pool-riffle sequences)로 나타난다. 이 공간에서 어류 서식 환경 평가를 위한 인자는 유속, 수심, 하상 재료와 같은 수리 조건, 수온과 용존산소와 같은 수질 조건 등이다. 하천의 지질 특성과 인위적으로 변경된 하천 구조 등에 따라 다르지만, 대체적으로 여울은 수리학적 흐름 양상이 하천의 평균 유속보다는 크고, 평균 수심보다는 적으며 자갈과 같은 하상 재료로 구성되는 특성을 갖고 있다. 반면에 웅덩이는 평균 유속보다 적고, 수심은 더 깊으며 하상 재료는 가는 모래와 실트 등으로 구성되거나 피복되는 특성을 갖고 있다. 따라서 여울은 수심이 깊지 않기 때문에 유량 규모에 따라 나타나는 현상으로서 하천 유량 변화에 가장 민감한 수생 생물 서식 공간이라고 할 수 있다(Leopold 등, 1964; Allan, 1995).

2.2 수리 조건 모의 프로그램

일반적으로 어류 서식처에 대한 수리 특성치는 하천 단면에서 대상 어종의 서식 위치와 하도 흐름 구조에 따라 달라야 한다. 수면에 가까운 유영성 어종일 경우 종단 흐름 방향의 1차원 흐름이 지배적이다(Bovee, 1982; Bovee 등, 1998). 1차원 흐름에서 수심과 유속은 미국 육군 공병단의 HEC-RAS 프로그램(HEC, 1997)으로 모의할 수 있다.

이 프로그램은 자연 하도나 인공 수로에서 점변류(gradually varied flow)의 일차원 수면형을 계산하며, 상류, 사류, 혼합류 영역의 수면형을 계산할 수 있다. 수면형은 표준축차계산법으로 에너지 방정식을 풀어 하류 단면에서 그 다음 단면까지 계산되며, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

여기서, Y_1 과 Y_2 는 각각 상하류 수심, Z_1 과 Z_2 는 기준면에서 하상까지 높이, V_1 과 V_2 는 평균 유속, α_1 과 α_2 는 에너지 보정계수, g 는 중력가속도, h_e 는 에너지 손실수두를 각각 나타낸다.

두 단면 사이의 에너지 손실수두(h_e)는 마찰 손실과 단면 축소 또는 단면 확대손실을 포함하며 방정식은 다음과 같다.

$$h_e = L \overline{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

여기서, L 은 유량을 가중한 구간길이, \overline{S}_f 는 두 단면 사이의 대표마찰경사, C 는 단면 확대 또는 단면 축소 손실계수를 각각 나타낸다.

이 프로그램에서는 횡단면을 분할할 수 있고, 조도계수, n 값이 변하는 지점에서 유량을 세분화할 수 있다. 통수능은 다음 Manning 공식으로 계산된다.

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (4)$$

여기서, K 는 통수능, n 은 Manning의 조도계수, A 는 횡단면적, R 은 동수반경을 각각 나타낸다.

2.3 수질 조건 예측 모형

미국 환경청의 QUAL2E 모형(Brown과 Barnwell, 1991)은 정상류에서 흐름 방향에 대한 수온과 용존산소 등을 모의할 수 있다. 이 모형에서 수질 모의를 위한 기본 방정식은 식 (5)와 같이 1차원 이송과 확산에 의한 물질 이동 방정식이다. 오른쪽 항의 왼쪽부터 차례대로 물질 이동 성분인 확산과 이송, 동역학, 그리고 생성·소멸 반응 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x \bar{u} C)}{A_x \partial x} + \frac{dC}{dt} + \frac{S}{V} \quad (5)$$

여기서, C 는 농도(ML^{-3}), x 는 거리(L), t 는 시간(T), A_x 는 단면적(L^2), D_L 은 확산계수(L^2T^{-1}), \bar{u} 는 평균 유속(LT^{-1}), S 는 생성 또는 소멸(MT^{-1}), V 는 체적(L^3)을 각각 나타낸다.

수온 모의시 사용되는 기본 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial T}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x \bar{u} T)}{A_x \partial x} + \frac{H_N}{\rho c d} \quad (6)$$

여기서, T 는 수온, ρ 는 물의 밀도(ML^{-3}), c 는 물의 열량($HM^{-1}D^{-1}$), d 는 수심(L)을 각각 나타내며, 나머지는 식 (5)와 같다. 한편 H_N 은 대가수면의 접촉면을 통해 전달에만 의존하는 에너지 항으로 구성된다. 이 에너지 매개변수는 QUAL2E 모형에서 제공하는 내정값을 이용할 수 있다.

이 모형에서 용존산소(Dissolved Oxygen) 모의는 식 (7)에 인, 질소, 조류 항을 포함하여 모의할 수 있으나, 본 연구에서는 인, 질소, 조류와 관련된 항은 삭제한 것이다.

$$\frac{dO}{dt} = K_2(O_s - O) - K_1L - K_4/d \quad (7)$$

여기서, O 는 DO의 농도(mg/l), O_s 는 DO의 포화농도로서 수온의 함수(mg/l), L 은 최종 화학적 산소요구량(CBOD)의 농도(mg/l), d 는 평균 수심(m), K_1 은 온도의 함수인 탈산소 계수(day^{-1}), K_2 는 온도의 함수인 재폭기 계수(day^{-1}), K_4 는 하상 퇴적물의 산소 소모율로서 온도의 함수($g/m^2 \cdot day$)이다.

3. 적용 및 결과 분석

3.1 하천 특성 및 대상 여울 선정

한강 유역에 중류에 위치한 달천 유역은 유역면적이 1,625.4 km^2 정도인 중규모 하천이다. 달천 유역에는 하류 직할 하천과 중상류 대부분의 지방 하천인 본류와 쌍천, 음성천 등 크고 작은 26개 이상의 지류가 수지상(樹枝狀)으로 구성되어 있다. 대체적인 하폭은 90~340 m 정도이고 하상재료는 한강 중하류의 다른 하천

과 마찬가지로 주로 호박돌과 굵고 작은 자갈, 모래 등으로 구성되어 있다. 달천은 산지 계곡을 흘러 본류에 유입되는 지류 등 하천의 구조적 특성이 다양하며, 갈수시 건천화가 되지 않는 상류 하천이다. 또한, 하천의 유로가 자연스러운 사행을 이루는 구간이 많으며, 해당 유역에서 크고 작은 농경지와 그렁지 및 산이 분포하여 다양한 수생생물과 어류가 서식하기에 좋은 조건을 유지하고 있다(건설교통부, 1996, 1998).

달천 유역에서 어류 서식처와 관련된 한계 단면을 선정하기 위하여 본류 상류 피산댐에서 하류까지 하천 정비기본계획을 참고하고, 현지 답사를 통해 그림 1과 같이 3개 여울 구간을 선정하였다.

3.2 대상 어종과 서식처 요구 조건

최기철 등(1975)에 따르면 여울과 웅덩이로 나누어 어종의 서식처 지위를 조사한 결과, 여울에는 피라미, 쉬리, 배가사리, 그리고 꺾지 등이 서식하고, 웅덩이에는 모래주사, 돌고기, 참마자, 모래무지, 붕어, 그리고 갈겨니 등이 서식한다고 하였다.

본 연구에서 대상 어종은 손영목(1991)과 그림 1의 3개 지점에서 조사한 전상린(1998)의 어류상 결과를 참고하여 다수 출현 어종이며 주로 여울에서 서식하는 유영성 어종 피라미(Zacco platypus)를 선정하였다. 또한 피라미의 서식처 요구 조건은 표 1과 같이 건설교통부(1998)에 제시된 범위를 이용하였다.

3.3 갈수량 산정

달천 유역에서 비교적 과거 수위 자료, 수위-유량 곡선, 그리고 유량 측정 성과가 있는 지점은 중하류에 위치한 달천 수위관측소 하나뿐이다. 이 지점의 1990년부터 1997년까지 8년 동안의 일평균 수위자료를 이용하여 매월 3, 5, 7, 10일 지속기간별 갈수량, 그리고 연 기준갈수량과 평균갈수량을 추출하였다. 이때 수위-유량 곡선식은 최근 유량 측정 성과(건설교통부, 1995-1998)를 위주로 개발한 식($Q = 48.98H^{1.2432}$)을 이용하였다.

달천 지점에서 8개년의 연갈수량과 월별 지속기간별 갈수량을 빈도 해석하여 확률 갈수량을 산정하였다. 각 확률분포형의 매개변수는 확률가중 모멘트법을 이용하였고, 자료의 적합도를 검정하기 위해 Kolmogorov-Smirnov 검정과 Cramer von Mises 검정을 실시하였다. 빈도 해석 결과 달천 지점 연갈수량과 월별 지속기간 갈수량에는 2변수 Weibull 분포와 2변수

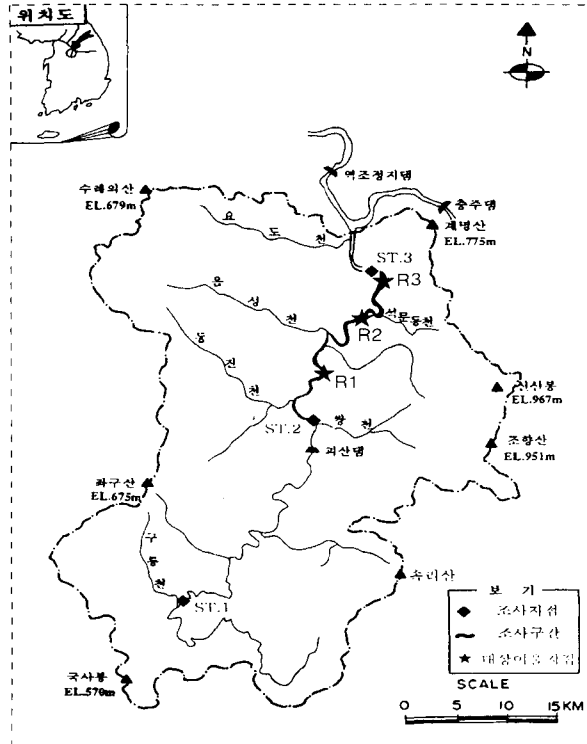


그림 1. 달천 유역과 대상 여울 구간

표 1. 피라미 서식 환경과 요구 조건(건설교통부, 1998)

구분	구역	순위	서식 장소	성장단계(월)				수 질 환경					수 리 환경					
				산란	치어/성어	동면	월동 장소	수 질	수온	DO	BOD	pH	수심 (cm)			유속 (cm/sec)		
													산란	치어	성어	산란	치어	성어
표	중	1	여울	5-7	4-10	11-3	p,r,s	2	30-	3+	2-5	6.5-7.5	10-20	10-30	20-50	10-20	10-20	30-60

【주】 [구분] : 표 ; 우리나라 대표어종 [구역] : 중; 중류 수역 [순위] : 전국 하천에서 출현 빈도 순위임
 [수질환경] : 수질; 등급, 수온; °C, DO 및 BOD; ppm [월동장소] : p; 소, r; 바위밑, s; 돌 사이

Log-normal 분포가 적정 확률분포형으로 나타났다. 두 확률분포형을 비교하여, 재현기간이 20년 이상인 경우 0의 유량이 나타나지 않는 2변수 Weibull 분포 결과를 확률갈수량으로 산정하였다(표 2 참조).

한편, 수량과 수질 모의를 통한 비교 대상 확률갈수량은 2.33, 5, 10, 20년 빈도 연결수량과 2.33, 10년 빈도 5일, 7일 연속 확률갈수량을 3월부터 10월까지 설정하였고, 상하류 미계측 지류 및 잔류 유역의 확률갈수량은 유역면적만을 고려한 비유량으로 추정하였다.

3.4 수리 모의 및 서식 조건 비교

HEC-RAS 프로그램의 검증을 위해 3개(그림 1에

서 R1, R2, 그리고 R3) 대상 여울 구간에서 유량 및 수리 인자, 특히 하천 단면과 횡단면의 부분 수심과 유속을 동시에 측정하였다. 여울에서 횡단면은 하도 흐름 특성을 고려하여 비교적 균일한 구간을 구분하면서 1~3 m 간격으로 측정하였다. 또한, 조사 구간 및 대상 여울 구간에 대한 하천 유형학의 상하류 일관성을 검토하고, 수리 모의 프로그램의 검증을 위해 1998년 10월 21일 조사 구간 최상류 지점과 3개 여울 구간에서 횡단면, 분할 횡단면에서 수심과 유속을 동시에 측정하여 이용하였다.

상하류의 경계 조건과 단면자료는 기존 하천정비기본계획(충청북도, 1987; 건설교통부, 1996)에 표기된

표 2. 달천 지점의 연 및 월별 지속기간
확률갈수량(m³/sec)

항목 월	빈도 (연)	Q ₃₅₅	지속기간			
			3일	5일	7일	10일
연갈수량	2.33	3.8	-	-	-	-
	5	2.8	-	-	-	-
	10	2.1	-	-	-	-
	20	1.7	-	-	-	-
3월	2.33		5.5	5.8	6.2	7.3
	5		2.3	2.4	2.6	3.3
	10		1.1	1.1	1.3	1.7
	20		0.5	0.6	0.6	0.9
4월	2.33		6.5	6.9	7.1	7.4
	5		4.4	4.6	4.7	4.8
	10		3.2	3.3	3.3	3.3
	20		2.3	2.4	2.4	2.4
5월	2.33		4.9	5.1	5.4	6.5
	5		2.8	2.9	3.1	3.6
	10		1.7	1.8	2.0	2.3
	20		1.1	1.2	1.3	1.4
6월	2.33		4.7	5.1	5.4	6.3
	5		2.4	2.7	3.0	3.6
	10		1.4	1.6	1.9	2.3
	20		0.8	1.0	1.2	1.5
7월	2.33		11.3	13.1	13.6	14.8
	5		8.2	9.4	9.4	10.2
	10		6.3	7.2	7.0	7.5
	20		4.9	5.6	5.3	5.6
8월	2.33		7.6	9.1	10.1	12.8
	5		4.0	4.8	5.5	6.9
	10		2.4	2.8	3.3	4.2
	20		1.4	1.7	2.1	2.6
9월	2.33		8.0	8.7	9.5	10.3
	5		3.6	3.9	4.5	5.0
	10		1.8	2.0	2.4	2.8
	20		1.0	1.1	1.4	1.6
10월	2.33		6.0	6.2	6.6	7.1
	5		3.4	3.6	3.7	4.0
	10		2.2	2.3	2.3	2.5
	20		1.4	1.5	1.5	1.6

지점을 위주로 입력하였다. 그리고 본 연구에서 실측한 3개 여울 구간의 상세한 단면을 입력하였다. 최하류 단면에서 초기수위는 하류 단면의 최상하상고 66.800 EL.(m)에 실측한 최대수심 0.623 m를 더한 67.423 EL.(m)를 하류 경계조건으로 이용하였다. 하도 구간에 대한 조도계수는 갈수기 달천의 하천 특성 조사 결과를 참고하여 HEC-RAS 매뉴얼에 제시된 조도계수를 택하되, 시행착오법으로 측정 평균 유속과 수심이 모의치에 가까워질 때까지 보간하여 상하류 구간을 똑같이

0.040을 적용하였다.

실측된 상중하류 3개 지점의 동시 유량을 이용하여 달천 하도 구간에서 HEC-RAS 프로그램의 실행 능력을 검증하기 위해 실측 수리 변수, 즉 최대 수심, 평균 수심, 최대 유속과 평균 유속, 수면폭과 모의 결과를 나타내면 표 3과 같다. 이 표에서 보는 바와 같이 전 지점에 걸쳐 대부분의 수리 변수의 상대오차가 거의 ±5 % 수준 이내에 들어와 비교적 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 대상 여울 구간을 제외한 나머지 하도 구간에서는 단면 부족 등으로 인해 믿을 만한 모의를 이루지 못하는 것으로 나타났다.

앞에서 설정된 상하류 지점 및 미계측 지류 확률 갈수량을 입력하여 HEC-RAS 프로그램으로 본류 구간과 3개 여울 지점의 수심과 유속을 모의하였다. 모의한 결과와 대상 어종인 피라미의 서식 요구 수리 조건(표 1 참조)을 표시하여 적합성을 확인하였다. 그림 2는 피라미의 서식 요구 수리 조건과 6월의 확률갈수량 별로 모의된 수심과 유속을 흐름 방향으로 각각 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 6월의 피라미 성장단계별 피라미 수리 조건을 3개 여울 구간 모두를 만족하는 달천 수위관측소 갈수량은 10년 빈도 연갈수량 2.1 m³/sec에서 2.33년 빈도 7일 연속 갈수량 5.4 m³/sec가 적정 유량이다. 이와 같은 방법으로 각 성장 단계를 만족하는 3월부터 10월까지의 확률 갈수량을 정리하면 표 4와 같다.

이 표에서 보는 바와 같이 달천에서 피라미 서식 환경을 위한 수리 조건을 충족시키기 위해서는 산란기에는 대략 2.1-3.8 m³/sec, 치어와 성장을 위한 기간에는 월에 따라 약간의 차이가 있지만 2.1-8.7 m³/sec, 그리고 성어기에는 3.8-10.1 m³/sec 정도가 적정유량으로 추정될 수 있다. 그러나 이 보다 정확한 월별 적정유량 산정을 위해서는 충분한 어류상과 서식 환경 조사를 통한 명확한 어류 성장단계와 서식 요구 조건에 대한 적합도, 그리고 물리적 서식처 모의 시스템과 같은 여울 구간의 서식처 모의 방법을 적용할 필요가 있다.

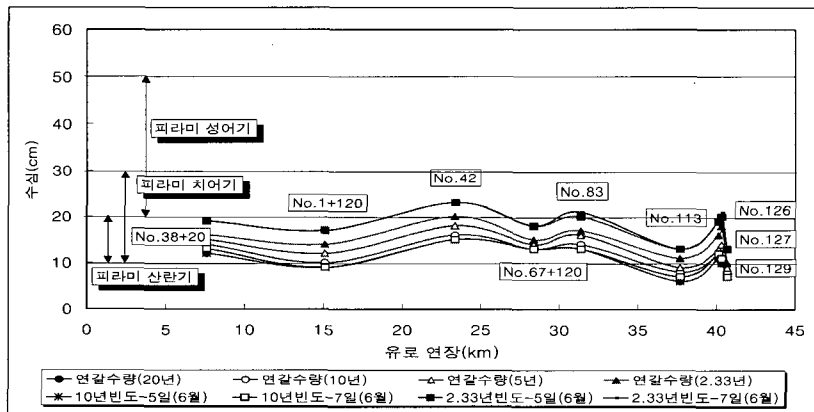
3.5 수질 예측 및 서식 조건 비교

한강 달천 본류 구간에서 측정된 환경부의 최근 자료에 따르면, 3월부터 10월까지 달천 본류 유역 수온은 3월이 가장 낮고, 7, 8, 9월이 높으며, 월별로는 상·하류의 온도 편차가 그리 크지 않았다. 용존산소 농도의 경우 월별로 농도 변화 양상이 일치하지 않지

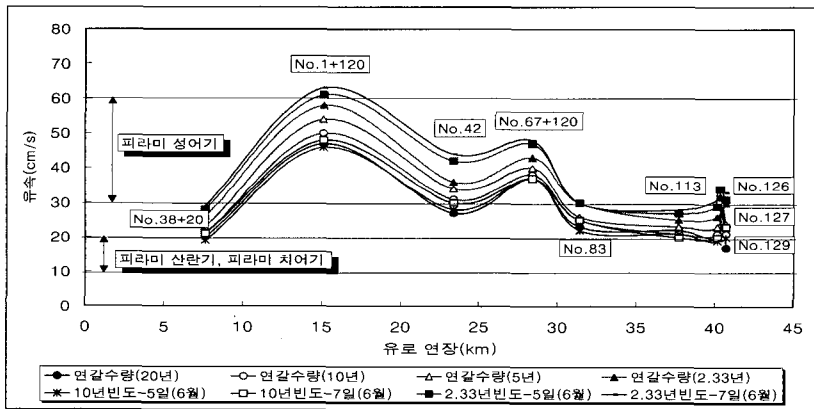
표 3. 대상 여울 구간에서 수리 변수 실측치와 모의치 비교

수리 변수	구 분	대상 여울 구간		
		R1 (No. 38+20) 신항천 합류후	R2 여울(No. 1+120) 팔봉교 아래	R3 여울(No. 67+120) 단월취수장 하류
	측정 유량(m ³ /sec)	20.8	23.5	24.2
최대수심 (cm)	실측치	63.0	61.0	62.3
	모의치	66.0	64.0	66.0
	상대오차(%)	-4.76	-4.92	-5.94
평균수심 (수리수심) (cm)	실측치	38.0	37.0	37.0
	모의치	40.0	36.0	38.0
	상대오차(%)	-5.26	2.70	-2.70
평균유속 (cm/sec)	실측치	69.0	72.0	51.0
	모의치	70.0	73.0	51.0
	상대오차(%)	-1.45	-1.39	0.0
수면폭 (m)	실측치	73.80	88.00	121.00
	모의치	75.35	88.56	125.13
	상대오차(%)	-2.10	-0.64	-3.41

【주】 측정시 4개 지점중 조사 구간 최상류 유량은 16.4 m³/sec 이었음.



(a) 수심 조건



(b) 유속 조건

그림 2. 각 여울지점에서 피라미 수리 조건과 갈수량별 모의치 비교(6월)

표 4. 3개 여울 구간의 피라미 성장단계를 만족하는 달천 지점의 월별 적정유량

월	성 장 단 계								
	산 란 기			치 어 기			성 어 기		
	수심	유속	적정유량 (m ³ /sec)	수심	유속	적정유량 (m ³ /sec)	수심	유속	적정유량 (m ³ /sec)
3	YQ2.33	YQ10	2.1-3.8	7Q2.33	YQ10	2.1-6.2	7Q2.33	YQ2.33	3.8-6.2
4	7Q10	YQ10	1.3-2.1	7Q2.33	YQ10	2.1-7.1	7Q2.33	YQ2.33	3.8-7.1
5	YQ2.33	YQ10	2.1-3.8	7Q2.33	YQ10	2.1-5.4	7Q2.33	YQ2.33	3.8-5.4
6	YQ2.33	YQ10	2.1-3.8	7Q2.33	YQ10	2.1-5.4	7Q2.33	5Q2.33	3.8-5.4
7	YQ2.33	YQ10	2.1-3.8	7Q10	YQ10	2.1-7.0	7Q2.33	YQ2.33	3.8-13.6
8	7Q10	YQ10	2.1-3.3	7Q10	YQ10	2.1-3.3	7Q2.33	YQ2.33	3.8-10.1
9	YQ2.33	YQ10	2.1-3.8	5Q2.33	YQ10	2.1-8.7	7Q2.33	YQ2.33	3.8-9.5
10	YQ2.33	YQ10	2.1-3.8	7Q2.33	YQ10	2.1-6.6	7Q2.33	YQ2.33	3.8-6.6

【주】 (1) YQ10, YQ2.33은 각각 10년, 2.33년 빈도 연갈수량, (2) 5Q2.33, 7Q10, 그리고 7Q2.33은 해당 월의 2.33년 빈도 5일 연속갈수량, 10년과 2.33년 빈도 7일 연속갈수량.

만, 일반적으로 최하류인 지점에서 농도가 많이 감소하고 있으며, 3월부터 10월까지 월평균 용존산소 농도는 환경부 기준 I 등급(7.5 mg/ℓ 이상)을 유지하고 있다 (건설교통부, 1998).

예측 하도 구간은 그림 1에서 어류 조사 지점 ST.2에서 ST.3까지이며, 이 구간내 위치한 3개 여울 구간을 포함한 본류이다. 대상 구간 유로 연장은 약 40.85 km이고, 본류에 유입하는 지류는 동진천, 음성천, 그리고 석문동천이다. 소구간 요소는 하도 길이를 1.0 km 간격으로 구분하였으며, 대구간은 수리학적 특성이 유사하다고 판단되는 소구간을 조합하여 3개 구간으로 구성하였다.

조도계수는 수리 조건 모의에 사용된 0.040을 전구간에 적용하였다. 각 구간별 평균 유속과 수심은 하천

단면 자료를 이용하지 않는 유량 계수법을 적용하였다. 각 구간별 유량 계수는 갈수기 측정 유량을 이용하여 작성한 수위-유량 회귀식을 이용하였다.

모형의 보정과 검증에 위해 3회에 걸쳐 유량과 수온, pH, 용존산소(DO), 생물화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD_{Mn}), 고형물질(SS), 총질소, 그리고 총인을 측정하였다. 측정지점은 표 5에 나타낸 바와 같이 1, 2차는 ST.2와 ST.3, 그리고 3차는 ST.2와 ST.3를 포함한 중간 2개 지점이다. 본류에 합류하는 동진천, 음성천, 석문동천 지류는 3차례 측정 시기와 같은 월의 환경부 자료를 사용하였다.

이 입력 자료를 이용하여 QUAL2E 모형의 매개변수를 추정하였다. 보정은 1, 3차 수질 및 유량, 그리고 검증은 2차 수질 및 유량을 각각 이용하였다. 모의

표 5. 모형 보정과 검증에 사용한 실측 수질 및 유량 자료

하 도	항 목 측정지점	DO(mg/ℓ)			BOD(mg/ℓ)			유량(m ³ /sec)		
		보정		검증	보정		검증	보정		검증
		1차	3차	2차	1차	3차	2차	1차	3차	2차
본 류	ST. 2	11.1	12.2	11.1	2.2	1.1	0.9	15.6	14.6	14.6
	괴강교 직하류	-	12.2	-	-	1.1	-	-	-	-
	목도교	-	12.0	-	-	1.1	-	-	-	-
지 류	ST. 3	11.5	10.6	9.7	2.7	0.9	1.2	-	-	-
	동진천	11.4	9.7	10.4	2.5	1.5	2.1	3.9	2.3	2
	음성천	10.4	10.2	9.5	1.7	2.1	2.2	2.5	2.7	2.3
	석문동천	9.1	8.7	9.1	4.5	2.1	3.1	1.5	1.9	1.7

수질과 실측 수질의 편차가 최소가 되도록 시행착오법으로 매개 변수를 추정하였다. 모형 보정 및 검증을 통해 추정된 매개 변수는 표 6과 같다.

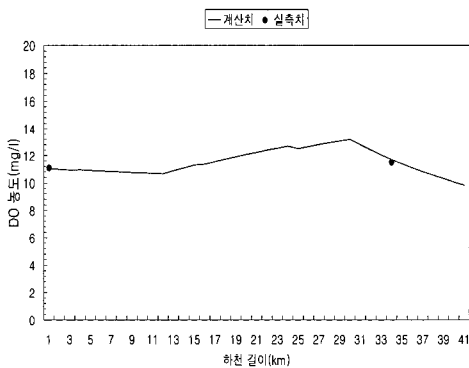
용존산소에 대한 보정 및 검증 결과는 그림 3과 같으며, 검증에 사용된 매개 변수는 보정에 의해 추정된 매개 변수의 평균치이다. 보정 및 검증 결과 모든 매개 변수는 QUAL2E 매뉴얼에 제시된 범위 내에 있는 것으로 나타났고, 예측치와 실측치가 비교적 잘 일치함

을 알 수 있다. 이 수온 및 기온의 보정 계수는 QUAL2E 모형의 내정값을 이용하였다.

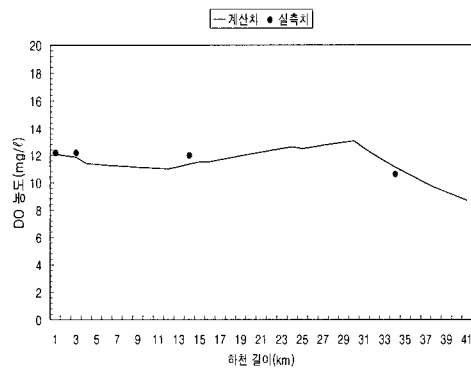
월별 예측 입력 수질은 환경부가 1992년부터 1998년까지 측정된 3월부터 10월까지 월평균 수온과 용존산소를 이용하였다. 3개 여울 구간에 대해 예측된 월별 수질의 수온과 용존산소(비교를 위해 생물화학적 산소요구량 포함시킴) 변화 양상은 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 수온은 대상 갈수량에 따라 지

표 6. 수질 반응계수의 보정 및 검증 결과(at 20℃)

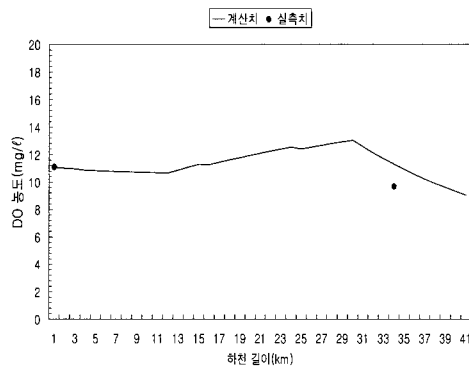
구 간	K_1 (탈산소 계수)			K_3 (침전 계수)			K_4 (SOD)		
	1차 보정	2차 보정	3차 검증	1차 보정	2차 보정	3차 검증	1차 보정	2차 보정	3차 검증
제 1 구간	0.05	0.05	0.05	0.001	0.001	0.001	-3.0	-3.0	-3.0
제 2 구간	0.80	0.02	0.41	-0.070	-0.200	-0.135	-8.0	-8.0	-8.0
제 3 구간	1.00	0.02	0.51	-0.150	-0.360	-0.323	3.0	2.0	2.5



(a) 1차 보정



(b) 3차 보정



(c) 2차 검증

그림 3. 달천 본류 구간에서 QUAL2E 모형의 보정 및 검증 결과

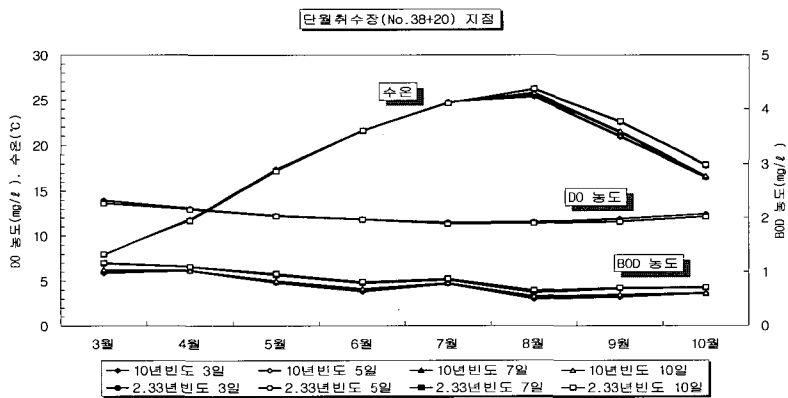
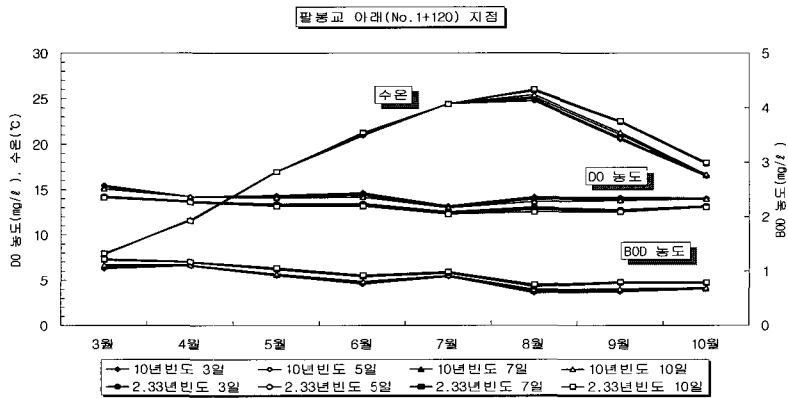
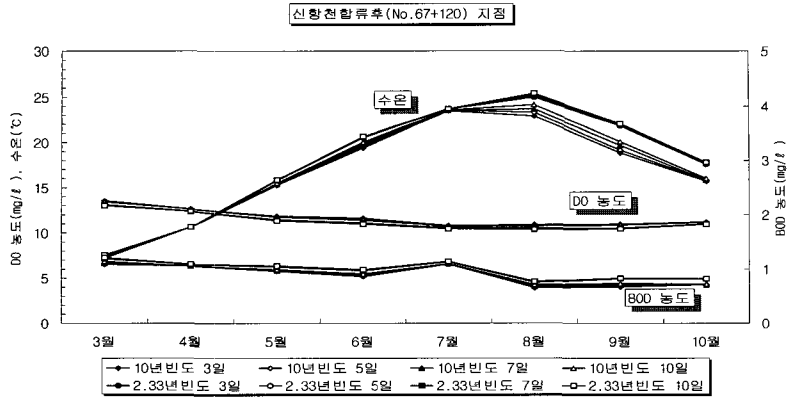


그림 4. 3개 여울 구간의 월별 수질 예측 결과

점간의 온도차가 크지 않고, 상하류 역시 큰 차이가 나지 않았다. 용존산소는 3월부터 10월까지 모든 달(月)에서 I 등급을 유지하는 것으로 예측되었다. 단지, 음성천 합류이후부터 석문동천이 합류한 달천 수위관 측소 하류에서는 하상의 퇴적층에 의해 농도가 다소 감소하는 경향으로 환경부의 용존산소 농도와 유사한 변화 양상을 보였다.

이와 같이 달천 3개 여울 구간에서 대표어종인 피라미가 성장단계별로 서식하는데 필요한 수질 조건 중에서 용존산소는 갈수량의 크기에 관계없이 전 구간에서 걸쳐 건설교통부(1998)가 제시한 3.0-5.0 mg/l 이상을 유지한다. 또한 수온은 피라미 성장단계별 차이가 있어 객관적인 비교가 어려우나 3, 4월을 제외하고 대체적인 서식 요구 조건을 유지한다. 그러나 본 연구에서 규명하지 못하였지만, 수온에 대한 서식 요구 조건 검토는 유량 변화보다는 계절별 변동성이 더 주요한 인자가 된다.

결과적으로 한강 지류 달천은 현재까지 안정된 수질을 유지하고 있기 때문에 대상 어종 피라미의 서식 조건을 만족하여 특별한 유량 증가 요인이 발생하지 않고, 달천 본류의 피라미 서식에 적합한 수리 조건을 유지하기 위한 유량 변화가 서식 환경을 변화시키는 주요 요인으로 판단된다. 특히, 달천의 월별 갈수량만을 가지고는 어류 수질 조건중 수온을 변화시킬 수 없어서 피라미 서식을 위한 수온은 자연 현상에 의존할 수밖에 없다. 단지, 추후 달천 중상류 본류에 위치한 피산댐 방류수의 수온이 하류 본류에 미치는 영향은 조사할 필요가 있다고 본다.

4. 결 론

하천수 취수 등 하천 밖으로의 물 이용과 하천 수생 서식처 유지를 위한 유량간의 갈등을 조절할 수 있는 정보가 필요하다. 수생 생태계에서 하천 어류 서식 환경을 보호하고 유지하기 위해서는 적절한 서식 공간으로서 흐름 영역의 확보가 중요하다.

본 연구에서는 유량 변화에 어류 서식 환경의 변화가 민감한 하천 여울 구간에서 어류 서식 조건에 맞는 적정유량을 제시하고자, 연과 월별 갈수량에 대한 수심과 유속의 수리 조건을 모의하고, 수온과 용존산소의 수질 조건을 예측하여 그 적합성을 검토하였다. 이 과정을 한강의 지류인 달천 본류 구간에 적용한 결과 다 음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 중규모 하천의 여울 구간에서 수심과 유속, 그

리고 수온과 용존산소의 실측치를 이용하여 범용 1차원 모형을 비교적 정확하게 보정하고 검증할 수 있었다. 미국 육군 공병단의 HEC-RAS 수리 모의 프로그램과 미국 환경청의 QUAL2E 수질예측 모형을 이용하여 점변 흐름에서 연과 월별 갈수량을 모의한 결과, 어류 서식에 필요한 수리와 수질 조건을 잘 모의할 수 있었다.

(2) 달천 본류 3개 여울 구간에서 서식하는 대표어종 피라미(Zacco platypus)의 성장단계별 서식처 요구조건과 갈수량별 수리와 수질 모의치를 도식적으로 비교한 결과, 현재 하천 상태에서는 수질 조건보다는 수리 조건에 의해 좌우되는 것으로 나타났다. 이 피라미의 서식 환경을 위한 수리 조건을 충족시키기 위해서는 산란기에는 대략 2.1~3.8 m³/sec, 치어와 성장을 위한 기간에는 월에 따라 다소 차이가 있지만 2.1~8.7 m³/sec, 그리고 성어기에는 3.8~10.1 m³/sec 정도가 필요한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 대한민국 육군사관학교 화랑대 연구소의 연구비 지원을 받아 일부를 수행하였기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1995-8). 유량 연보, 건설교통부 하천계획과.
- 건설교통부 (1996). 달천 하천정비기본계획(보완), 건설교통부 대전지방국토관리청 하천국.
- 건설교통부 (1998). 한강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정: 하천유지유량 산정, 건설교통부 서울지방국토관리청 하천국.
- 손영목 (1991). 충청북도산 담수어류, 서원대학교 기초과학연구소, 제5권, pp. 1-38.
- 우효섭, 이진원, 김규호 (1998). "물고기 서식처를 고려한 하천 유지유량 결정방법의 개발: 금강 본류에의 적용." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-4호, pp. 339-350.
- 전병호 (1998). 하천 어류 생태계 보전을 위한 수량 및 수질의 기초 조사, 연구보고서, 육군사관학교 화랑대 연구소.
- 전상린 (1998). 한강 유역 하천생태계(어류) 및 서식 환경 조사, 한국건설기술연구원.
- 최기철, 김익수, 전상린 (1975). "조종천산 어류에

- 관한 생태적 연구: 2. 식성과 서식처 지위에 관하여.” *Report for the Korean IBP*, No. 5, pp. 21-32.
- 충청북도 (1987). 하천정비기본계획보고서(지방하천 달천), 충청북도 도청.
- Allan, J.D. (1995). *Stream ecology: structure and function of running waters*. Chaman & Hall, New York, N.Y.
- Bovee, K.D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper No. 12, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-82/26.
- Bovee, K.D., Lamb B.L., Bartholow J.M., Stalnaker C.B., Taylor J., and Henrikson J. (1998). *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report, USGS/BRD-1998-0004.
- Brown, L.C., and Barnwell Jr. T.O. (1991). The Enhanced Stream Water Quality Models *QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*, EPA/600/3-87/007, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- Gore, J.A. (1985). *The restoration of rivers and streams: theories and experience*. Ann Arbor Science Book, Butterworth Publishers, Stoneham, Miami.
- HEC (1997). *User's Guide of HEC-RAS*, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- Leopold, L.B., Wolman M.G., and Miller J.P. (1964). *Fluvial processes in geomorphology*. W.H. Freeman, San Francisco.
- Stalnaker, C.B., Bovee K.D., and Waddle T.J. (1996). “Importance of the temporal aspects of habitat hydraulics to fish population studies.” *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol. 12, pp. 145-153.

(논문번호:99-085/접수:1999.10.08/심사완료:1999.10.28)