韓國水資源學會論文集
第37卷 第11號 · 2004年 11月
pp. 915~927

# 어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구

## Estimation of River Instream Flow Considering Fish Habitat Conditions

강 정 훈* / 이 은 태** / 이 주 헌*** / 이 도 훈****

Kang, Jeong Hoon / Lee, Eun Tae / Lee, Joo Heon / Lee, Do Hun

### Abstract

The purpose of this paper is to estimate the instream flow of the South Han River Basin to ensure an adequate supply of suitable quality of water for preservation and enhancement of aquatic ecosystems. Proposed methods is Physical Habitant Simulation System of Instream Flow Incremental Methodology. Accurate estimation on a water depth and a velocity distribution was acquired by applying a two dimensional hydrodynamic model for a simulation of a hydraulic parameter necessary for the habitat evaluation to be used in a physical habitat simulation system. The Habitat Suitability Criteria with the application of univariate curve on *zacco platypus* as a representative fish was able to be established by conducting a field investigation. The establishment of a hydrological materialistic balance between upper and lower streams was confirmed by conducting a simulation simultaneously together with a mainstream section, which was excluded from the considered sections for the inhabitation evaluation of fish.

***Keywords*** : Instream flow, IFIM, PHABSIM, Habitat Suitability Criteria

### 요 지

남한강 수계를 대상으로 대표 어종의 하천 어류 서식처 환경에 대한 서식처 적합도 기준을 작성하고, 어류 서식을 위한 최적유량의 산정방법을 확립하기 위하여, 생태학적 접근 방법 중 어류서식처 환경평가방법의 한가지인 점유량 점증론적방법론(IFIM)의 물리적서식처모의시스템(PHABSIM)을 적용하여 어류서식처 보호 및 유지를 위한 최적유량을 산정 하였다. 서식처 평가에 요구되는 수리인자의 모의를 위해 2차원 동수역학적 모델을 이용하였으며, 현장조사를 실시하여 대표어종으로 선정된 피라미의 단일변량곡선법을 적용한 서식처 적합도 기준을 작성하였다. 이러한 결과를 토대로 유황변화에 어류 서식환경이 가장 민감하게 반응하는 여울 구간과 여울이 형성되지 않음으로서 어류의 서식처 평가의 고려대상에서 제외되었던 본류 구간을 동시에 모의하여 상·하류간의 수문학적 물질균형이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 유지유량, 유량점증론적방법론, 물리적서식처모의시스템, 어류, 서식처 적합도기준

* 한국 종합기술개발 공사 대리. 공학박사. 서울특별시 광진구 구의동 541-1 동서울터미널 4층 우143-715
Ph. D, Assistant manager, Korea Engineering., Gwangjin-Gu, Seoul, 546-1, Korea.
(Email: pobi2@hanmail.net)

** 경희대학교 토목공학과 교수. 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 우449-701
Professor, Dept. of Civil Engineering., Kyung Hee University., Yong-in 449-701, Korea.
(Email: etlee@khu.ac.kr)

*** 중부대학교 토목공학과 부교수. 충남 금산군 추부면 대학로 101번지 우312-702
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering., JoongBu Univresity., Chung-nam 312-702, Korea.
(Email: leejh@joongbu.ac.kr)

**** 경희대학교 토목공학과 부교수. 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 우449-701
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering., Kyung-Hee University., Yong-in 449-701, Korea.
(Email: dohlee@khu.ac.kr)

## 1. 서 론

최근 들어서 하천 생태계의 서식공간을 가능한 한 자연 상태로 보전하고자 하는 노력이 점차 늘어나고 있다. 특히 하천 생태계의 보존 지표로서 다른 대상에 비해 비교적 인간이 접하기 쉬운 어류의 서식처 보전을 위한 적정 흐름 영역을 확보 즉, 생태계를 고려한 하천유지유량 산정에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 이러한 시점에서 타 수생 동·식물들과의 서식활동 및 하천의 시·공간적 연관성이 높고 비교적 관찰이 용이하며, 다른 야생동물과 달리 생활범위가 제한되어 있어 유량의 변화가 그들의 생존에 직접적인 영향을 미치게 되는 어류에 주목하여 서식환경을 검토함으로서 하천 생태계 서식 환경을 간접적으로 고려할 수 있을 것이다.

과거 생태계 보전을 위한 필요유량 산정은 구체적인 산정기준이나 방법보다는 유역이 갖는 고유의 갈수량과 같은 일정유량을 지배적인 인자로 보아왔으며, 생태계 서식환경의 정량적 평가에 대한 만족도나 유지수준의 조사가 부족한 실정이었다. 특히 하천 생태계 먹이 사슬 상층부에 속하는 어류는 서식처의 수심과 유속 등에 민감한 반응을 보이므로 적절한 유량을 보장해 주는 것이 무엇보다도 필요할 것이다. 이에 유량의 변화에 따라 서식처 수리조건(수심, 유속 등)이 먼저 한계에 달하는 여울(riffle)을 대상으로 서식조건을 만족시키는 수리 및 수질 조건 등을 포함한 하천 어류 서식처 환경에 대한 평가방법의 적용과 이를 이용한 최적유량을 산정 하는 연구가 진행되어 왔다.

이러한 연구는 1960년대 초 미국에서 연어 개체수가 감소하자 이에 대한 대책으로 어류 서식처 보전을 위한 하천유지유량에 관한 연구가 처음 소개되었으며, Loar와 Sale(1981)은 PHABSIM에서 유량과 가중가용면적(WUA)곡선 사이의 관계를 제공하며 PHABSIM에 의해 제공된 데이터로부터 어류서식에 필요한 유량을 얻을 수 있다고 하였다. 우리나라에서는 한국수자원공사(1995)가 최초로 하천유지유량에 하천 생태계 개념을 도입하여 담수성 어류 서식처 제공 및 이동에 필요한 유량을 산정 하였다. 김규호 등(1996)과 우효섭 등(1998)은 여울에서 어류 이동에 필요한 수심과 유속을 확보할 수 있는 통과 유량(passage flow)을 제시한 바 있으며, 김규호(1999)는 달천 상·중·하류의 3개 여울 구간에서 어류 서식처 제공에 필요한 수리조건(수심, 유속)을 점변류로 모의하고 또한 수온과 용존산소를 정상류에서 예측하였으며, 예측된 서식조건과 각 성장단계별 어류 서식처 요구 조건을 도식적으로 비교하여 적정 유량을 산정한 바 있다. 또한 이 연구 결과를 같은 조건에서 점증유량방법론의 물리적서식처모의시스템에 이분법으로 서식처 적합도 기준을 작성하여 생태적 특성을 이용한 어류 서식환경 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 남한강 본류 및 지류 구간에 대하여 현재까지 국내 적용사례가 없는 단일변량곡선법(univariate curve)으로 하천 어류 서식처 환경에 대한 대상 어종의 서식처 적합도 기준(habitat suitability criteria)을 마련하고자 하였으며, 수리·수문학적 특성에 있어서 기존의 일차원 점변류 해석보다 더 실질적이고 정확한 반영을 위해 2차원 동수역학적 모델을 이용한 수리인자(수심, 유속 조건)의 모의를 시도하였다. 또한 생태학적 접근 방법의 어류 서식처 환경평가방법 중 점증유량방법론의 물리적서식처모의시스템의 적용성을 검토하였으며, 여울구간과 여울이 형성되지 않는 본류 구간의 인과 관계를 밝혀냄으로서 생태계를 고려한 하천 유지유량의 산정 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 어류 서식처의 평가방법

### 2.1 물리적서식처모의시스템(PHABSIM: Physical HABitat SIMulation system)

물리적서식처모의시스템은 유량점증론적 방법론의 실행과정에서 물리적 서식처모의를 실시하는 주요 성분으로서, 어류의 수리학적 환경이 변동에 따라 직접적이고 즉각적인 반응을 보인다는 점을 주된 가정으로 하고 있다. 개별 유기체는 각각의 유기체별로 최상의 선호유지 조건을 선택하는 경향이 있어서, 유지조건이 점점 나빠짐으로써 서식처 선호도가 감소하고 이로 인해 이용할 수 있는 서식어가 점점 적어진다고 하는 전제를 배경으로 하고 있다.(Milhous 등, 1989)

하천 어류 서식처 제공에 필요한 유량을 결정하고 평가하는 방법은 과거 관측 유량에 따라 일정 유량 비율을 산정하는 방법, 하도의 기하 특성치를 이용한 수리학적 방법, 서식처 모의에 의한 방법과 같이 크게 3가지 범주로 나눌 수 있다. 미 어류 및 야생동물국의 유지유량국(U.S. Fish and Wildlife Service)이 제시한 서식지 평가에 의한 필요유량 산정방법인 유량점증론적방법론(IFIM : Instream Flow Incremental Methodology)은 여러 방법 중 가장 정교한 방법으로 알려져 있으며, 수중생태계의 필요성을 만족시키기 위한 유지유량 정책에 관련된 다양한 문제점들을 해결하기 위해 서식처의 시간과 공간 양상을 평가하고, 분석하기 위해 해석 절

차를 연결한 일종의 라이브러리이다. 문제의 해결이나 수정을 위해 유량을 점차 증가시켜가며 해를 찾아가는 방법으로서 연구계획의 구성과 현재 여건의 서술에서 시작하여 문제의 해에 대한 최종적인 타협을 통해 수행할 수 있는 하나의 완전한 시스템을 만들어 가는 과정이라 할 수 있다.

PHABSIM은 IFIM의 실행과정에서 물리적 서식처 모의를 실시하는 주요 성분으로서, 어류의 수리학적 환경의 변동에 따라 직접적이고 즉각적인 반응을 보인다는 점을 주된 가정으로 하고 있다. 개별 유기체는 각각의 유기체별로 최상의 선호 유지 조건을 선택하는 경향이 있어서, 유지조건이 점점 나빠짐으로써 서식처 선호도가 감소하고 이로 인해 이용할 수 있는 서식처가 점점 적어진다고 하는 전제를 배경으로 하고 있다(Milhous 등, 1989). 어류가 이용하기에 적합한 물리적 서식처의 양은 유량(수위)에 따라 변하게 되는데 PHABSIM에서는 유량에 따른 수면표고와 유속의 변동을 수리학적으로 모형화하고, 서식처 적합도 곡선과 이 관계를 결합함으로서, 서식처 조건의 조합에 하도 평면적을 곱하여 얻어지는 가중가용면적(WUA)-유량간의 관계를 얻어내는 것을 목적으로 한다.

그림1과 2는 대상 하도 구간을 일정 규격의 셀로 분할한 후 수리학적 모형을 통해 각 셀에 해당하는 수심과 유속을 모의하고 대상 어종에 대한 미시 서식처 조건(수심, 유속, 하도지수) 및 거시 서식처 조건(수온, 용존산소)의 적합도 기준을 결합하여 유량-가중가용면적 관계 곡선을 도출해 나가는 과정을 나타내고 있다.

$$WUA = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \times C_i}{Reach\ length(1000ft)} \qquad (1)$$

여기서, $A_i$ = surface of area cell, $C_i$ = combined suitability of cell $i$(depth, velocity, channel index)

## 2.2 수리학적 인자 모의 및 서식처 적합도 기준의 결합

유량의 변화에 따라 변하는 수심, 유속 등의 수리학적 요소에 의해 어류의 물리적 서식처의 양은 변하게 된다. 본 연구에서는 PHABSIM에서는 유량에 따른 수면표고와 유속의 변화를 수리학적으로 모의하였으며, 이를 위하여 STGQ(Stage-Discharge Analysis using Regression)와 WSP(Water Surface Profile)를 연계하여 적용하였다.

### 2.2.1 STGQ

수위-유량관계곡선을 이용하여 식2와 같이 각 단면의 수위를 계산한다. 각 단면은 독립적으로 이용되며, 관측된 수위-유량관계곡선을 짝으로 하여 식3과 같이 대수 회귀 방정식을 이용해 계산하고 유량의 함수로써 수위를 모의한다.

$$(WSL - SZF) = aQ^{b} \qquad (2)$$

$$\log(WSL - SZF) = \log(a) + b * \log(Q) \qquad (3)$$

여기서, Q = 유량, WSL = 수위, SZF = 0 유량의 수위, a, b = 수위-유량관계곡선 상수

### 2.2.2 WSP

표준축차계산법을 이용하여 수위를 모의하고 조도계수(n) 값을 이용하여 보간을 하도록 되어 있으며, 미 육군공병단의 수면형 계산 프로그램 HEC-2를 PHABSIM과 상호 교환하여 적용하였다. 한편 PHABSIM에서는 수심, 유속 및 하도지수(CI)의 적합도 기준을 조합하여 성장단계별 복합 서식처 지수 $S_i$를 산정하며, 곱셈방법, 기하평균방법, 최소치 방법 중 한가지를 선택하도록 되어 있다(Gordon 등, 1993). 본 연구에서는 시스템내 각

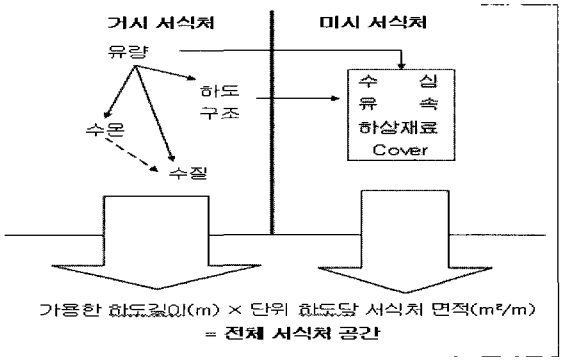


그림 1. PHABSIM의 구성성분(USGS, 2001)

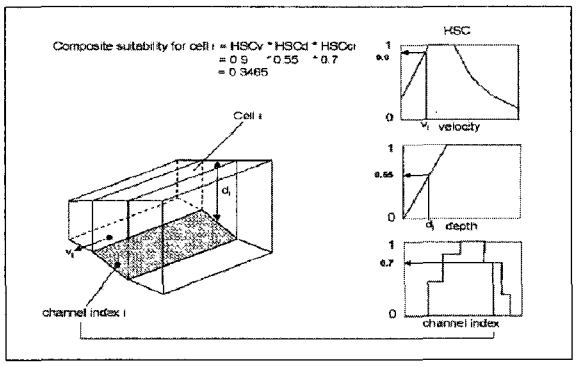


그림 2. 가중가용면적(USGS, 2001)

성분간의 에너지를 최상으로 하는 상호작용을 의미하는 것으로서 최적서식처는 모든 변수의 적합도 지수가 최적(1.0) 상태일 때만 존재하는 것을 의미하는 식 4와 같은 곱셉방법(standard computation)을 이용하여 모의하였다(Palmer 와 Snyder, 1985).

$$C_i = f(v)_i \times f(d)_i \times f(s)_i \quad (4)$$

여기서, $C_i$ = cell i의 복합 서식처 적합도 지수, $v_i$ = cell i의 유속에 대한 석식처 적합도 지수, $d_i$ = cell I의 유속에 대한 서식처 적합도 지수, $s_i$ = cell i의 하상지수에 대한 적합도 지수

### 2.3 서식처 적합도 기준

어류의 서식처 조건에 대한 모의는 서식처 적합도 기준(HSC)에서 본격적으로 시작된다고 할 수 있으며, 작성된 서식처 적합도 기준의 적절성에 따라 최적유량은 크게 차이가 나타난다. Thomas와 Bovee(1993), 우효섭(1998) 등은 성공적인 서식처 모의를 위해서는 서식환경과 어류에 대한 자료를 최대한 수집하여 대상어종의 실제에 가까운 서식처 적합도 기준을 작성하여 적용해야 한다는 연구결과를 발표한 적이 있으며, 서식처 적합도 곡선은 어류 상호 작용보다는 특정 어종의 각 서식 조건에 따른 조사 지점의 출현 개체수(population)를 대상으로 하고 있다.

서식처 적합도는 특정 조사구간에서 출현한 어종의 개체수를 기준으로 작성되며 조사기간 동안 출현한 최대 개체수를 1.0으로 설정하고 나머지는 최대 개체수에 대한 상대비율로 설정한다. 어류 서식처 적합도 곡선 형태는 이분법, 단일변량곡선법(univariate curve)이 주로 이용되고 있으며, 본 연구에서는 이분법보다 더 유연하게 서식처 적합도 표현이 가능한 단일변량곡선법을 적용하였다. 단일변량곡선법은 이분법보다 더 많은 현장 조사를 요하며, 서식처 분포를 보다 세밀하게 표현하여 어류 서식처 적합도를 나타낼 수 있는 방법이다. 물리적서식처 모의시스템에서는 서식의 전체 범위를 잡아 상하꼬리 부분까지 연장하고, 비교적 폭이 좁은 첨두 부분을 최적으로 평가한다. 현장 조사 결과에 따라 편의성을 가질 우려가 있어 전문가의 조언과 문헌조사를 병행하여야 한며, Water(1976)가 처음 개발한 형태로서 본 연구에 이용하여 그적용성을 검토하였다.

수심, 유속 및 하상재료의 분포도를 기준으로 현장조사를 통한 어류채집 결과와 문헌자료, 전문가의 의견을 수렴하여 WDFW(Washington Department of Fish and Wildlife)에서 제시한 Instream flow study guidelines (1996)를 토대로 서식처 적합도 곡선을 작성하였으며 작성 예를 표 1에 나타내었다. 하상재료에 대한 서식처 적합도 곡선은 입자의 크기를 기준으로 구분한 Bovee와 Milhous(1978)의 기준을 참고하고, Brusven(1977) 지수를 이용한 Bovee(1986)의 기준에 따라 지배입자 입경을 설정하였다. 현장조사를 통하여 그 분포 상태를 육안으로 확인하고, 시료를 채취하여 점토, 점토+모래, 모래, 모래+잔자갈, 잔자갈, 잔자갈+굵은자갈, 굵은자갈(호박돌)로 분류하여 이용하였다.

## 3. 어류서식 환경을 고려한 필요유량 산정

### 3.1 대상하천 구간 및 특성

본 연구에서 대상구간은 비교적 장기간에 걸쳐 수문관측이 이루어져 서식처 조건 모의 시 이용되는 수문자료의 신뢰성이 높고, 자료의 확보가 용이한 지점을 우선적으로 선정하였다. 또한 대표어종의 선정이나, 서식지 분포 현황 조사를 위한 어류 채집에 신중을 기하기 위해 상대적으로 대상 지점의 지리·지형 정보와, 생태계 정보에 밝은 인근 주민과의 접촉성 등을 고려하였으며, 어류조사에 어려움이 있는 곳은 어류전문가의 자문협조가 가능한 곳을 고려하여 채택하였다. 이러한 고려사항을 기준으로 본 연구에서는 한강 수계 하천수 사용

**표 1.** 유속 조건에 대한 HSC작성(문막 수위관측소 지점)

| 유속 범위(m/s) | D | O | E | O/E | P |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.000~0.135 | 25.3 % | O = 6 | E = 4.81 | O/E = 1.25 | P = 0.89 |
| 0.135~0.155 | 29.8 % | O = 8 | E = 5.66 | O/E = 1.41 | P = 1.00 |
| 0.155~0.175 | 17.0 % | O = 4 | E = 3.23 | O/E = 1.23 | P = 0.87 |
| 0.175~0.195 | 15.8 % | O = 1 | E = 3.00 | O/E = 0.33 | P = 0.23 |
| >0.195 | 12.1 % | O = 0 | E = 2.30 | O/E = 0.00 | P = 0.00 |
| 계 | 100.00 % | O = 19 | | | |

* D:전체면적에 대한 해당유속 면적 백분율, O:관측 어류 마리수, E:관측 기대치(D×총 관측어류수)
O/E:관측기대치에 대한 관측 마리 수 비율, P:최대값을 1.0으로 한 적합도지수

실태 조사 및 하천유지유량산정(1998)에서 수리학적 방법의 일종인 '간단한 필요유량 산정방법'이 적용된 바는 있으나 아직까지 물리적서식처모의시스템이 적용된 적이 없는 남한강 본류 구간의 여주, 목계 수위관측소 지점, 그리고 남한강의 지류인 섬강의 문막, 청미천의 청미 수위관측소 지점을 대상 지점으로 하여 어류 서식처 평가 및 모의 방법을 적용하고 대상 어종에 대한 산란기, 성어기 단계의 최적유량을 산정하였다. 표 2는 대상 지역의 유역특성을 보여주며 그림 3은 대표지점의 위치를 표시하였다.

### 3.2 어류 조사

어류는 하상에서 먹이를 취하며 하상에 주로 생활하는 종류, 흐르는 물에서 먹이를 취하며 생활하는 종류, 그리고 수초대에서 먹이를 취하며 생활하는 종류 등 각각의 생태적 특징에 따라 생활하는 영역이 다르기 때문에 한가지 조사 방법으로 어류의 분포종과 분포량을 모두 적절히 조사하기는 어렵다. 또한 어류는 서식처의 수온과 유량 등 주변 환경에 따라 산란 및 먹이 섭취, 월동을 위해 서식처를 이동하는 경향이 있으므로 본 연구에서도 현장조사 시기를 계절성을 고려할 수 있도록 4~5월, 5월 말~6월, 9월 초를 택하였다. 어류의 채집 방법에는 투망, 자망, 권망, 삼각망, 반도 등 각종 그물과 체, 그리고 육안관찰 등의 방법이 이용되고 있으며, 본 연구에서는 각 조사지점별로 상하 200m 구간에서 채집을 실시하고, 채집 어구는 투망, 족대, 통발 등을 이용하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정 분류하고, 미확인 어종은 사진촬영을 통하여 어류전문가에게 의뢰하여 분류작업을 실시하였다. 어류의 동정에는 국내에서 현재까지 발표된 검색표(정문기, 1977; 한국 물고기 과

표 2. 지점별 특성 요약

| 구 분 / 대상 지점 | 평균 하폭(m) | 수 심(m) | 유 속(m/sec) | 하상 경사 | 하상 재료 | 수변 이용 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 목계 수위관측소 (남한강) | 220 | 0.10~3.00 | 0.01~0.1 | 0.006 | 잔자갈+모래 | 낚시 |
| 문막 수위관측소 (섬 강) | 180 | 0.52~1.57 | 0.05~0.3 | 0.009 | 잔자갈 | 낚시, 야유회 |
| 청미 수위관측소 (청미천) | 120 | 0.20~0.58 | 0.10~0.5 | 0.011 | 모래 | 낚시 |
| 여주 수위관측소 (남한강) | 250 | 0.10~7.00 | 0.10~0.3 | 0.007 | 잔자갈+모래 | 수상레저, 낚시, 공원조성 |

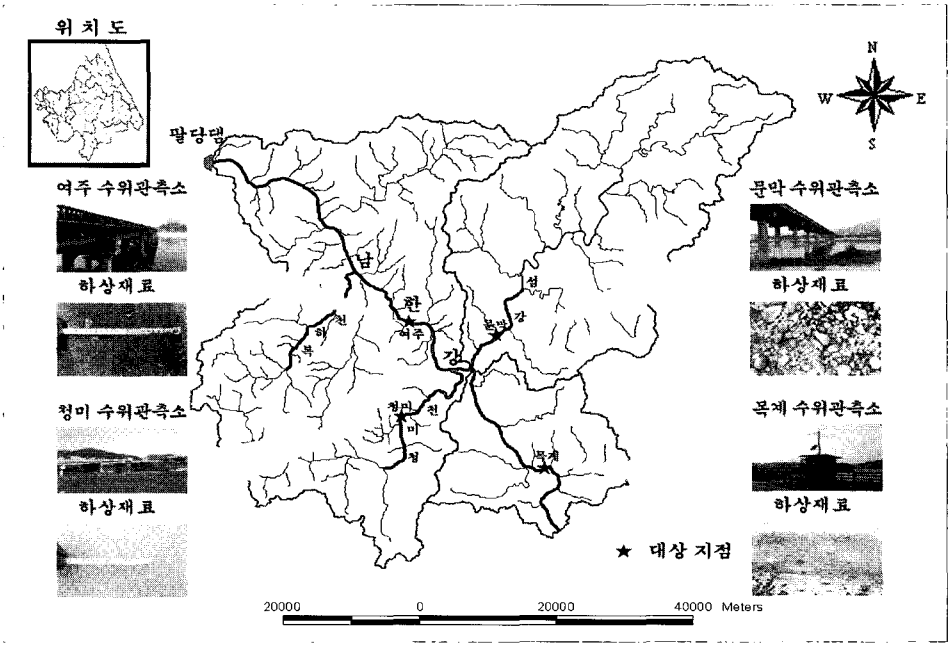


그림 3. 필요유량 산정 지점

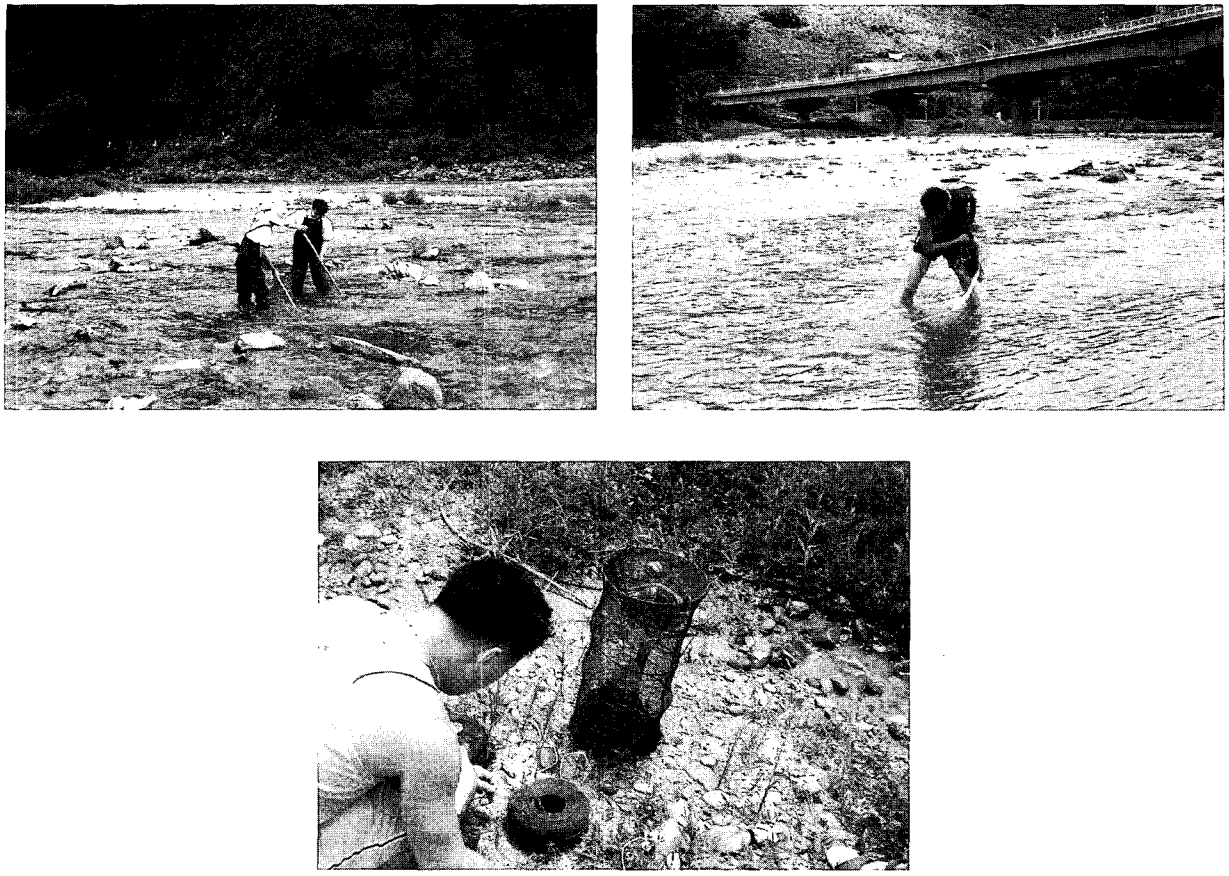

**그림 4.** 어류 채집(족대, 투망 및 통발 사용)

학관-http://www.aquanature.co.kr)를 이용하였다.

### 3.3 대표어종 선정

수리·수문학적으로 하천유지유량을 결정할 때에는 어류뿐만 아니라 먹이사슬에 연관이 되는 모든 생물의 생태적 현상을 고려하여야 한다. 그러나 그 생태계 속에 생활하고 있는 모든 생물종의 개별적 특성과 상호관련성을 조사 확인하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이에 대표어종을 선정하여 관리함으로써 해당 수계의 서식환경의 변화에 대처하고, 하천 생태계가 가능한 범위내에서 보존될 수 있도록 하여야 할 것이다. 대표어종이란 주어진 생태계에 서식하고 있는 종으로 생태학적으로 '우점종'을 의미하는 것으로서, 대부분의 하천에 분포하는 종 중에서 선정되어야만 할 것이다.

본류 구간인 여주, 목계 수위관측소 지점은 출현 어종 중 갈겨니가 우점하고, 대표어종으로 나타났으며 남한강의 1차 지류인 문막, 청미 수위관측소 지점은 피라미가 우점종으로 조사되어 있다. 그러나 본 연구에서는 두 어종의 서식조건이 유사하고 손영목(1991), 한국수자원공사(1995), 한국건설기술연구원(1998) 등의 조사 결과에서 한강 전체 유역을 대표 할 만한 어종으로 추천되고 있는 피라미를 대표 어종으로 선정하였다. 동종의 어류로 최적유량을 산정 함으로서 상·하류간 유량의 연속성을 평가하는데 도움이 될 것으로 판단되었다. 피라미는 주로 여울구간에서 산란하고 서식하는 유영성 어종으로 표 3에 서식처 요구 조건을 요약하였다.

생태학적 추전유량은 대상지역에 대한 수리모의 및 서식처모의에 의해 결정된다. 수리모의는 현장 실측자료를 이용하여 유량 변화에 대한 각 측점의 수리특성(수심, 유속) 등을 예측한다. 서식처모의는 수리모의 결과와 복합 서식처 적합도지수를 적용하여 서식처면적(WUA)-유량 관계를 산정한다. 복합 서식처 적합도지수는 수심, 유속, 하상재료에 대한 각각의 지수를 조합하여 결정된다.

### 3.4 미시서식처 조건의 모의

일반적으로 어류 서식처에 대한 수리 특성치는 대상 어종의 서식위치 즉, 수면 부근에 서식하는 유영성 어종일 경우와 하상에 부착하거나 저서성 어종일 경우로 구분하여 고려해야 하는 것으로 알려져 있다(팝심 메류

**표 3.** 대상지점의 대표 어종(한국수자원공사, 1995)

| 항 목 / 어 종 | 수심(cm) | | | 유속(cm/sec) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 산란 | 치어 | 성어 | 산란 | 치어 | 성어 |
| (피라미) | 4~5월 (10~20) | 여름~가을 (10~30) | 봄~가을 (20~50) | 10~20 | 10~20 | 30~60 |

얼). 전자의 경우 종단 흐름 방향의 흐름이 지배적이며 후자의 경우 산란, 섭식 및 은신을 위해 하상 경계면에서 점 유속이 중요한 인자로 작용하는 것으로 연구되어져 있다(Bovee 등, 1998; Leclerc 등, 1996; Milhous, 1999). 이에 본 연구에서는 하도 구간에서 선정된 대표 지점에 대하여 SMS 모형의 2차원 동수역학적 모형인 RMA2를 적용하여 그림 5와 같은 수심 및 유속 분포를 모의하였다.

### 3.5 CI(Channel Index)에 대한 고려

어류는 유속이나 수심조건이 적정하지 않거나, 포식자의 출현으로 생존에 위협을 느끼게 되면 다른 서식처로 이동하게 된다. 이러한 어류의 휴식과 피난을 위한 은신처를 제공하는 서식조건이 Cover이다. 이 휴식과 은신처는 주로 수면에 걸친 식생, 아래가 잘려나간 강둑(under-cutting), 수중식생, 수중 물체(나뭇가지, 통나무, 뿌리, 암석 등), 부유물질, 그리고 표면 난류 등에 의해 제공될 수 있다. Cover 등의 조건을 고려하기 위해 그림 6과 같은 하상재료의 분포도를 작성하여 CI의 서식처 적합도 곡선 작성에 이용하였다.

### 3.6 거시서식처 조건

어류의 산란과 부화를 위한 공간은 수리학적 성분, 하상 재료의 물리적 성분 외에도 수질과 같은 화학적 성분이 중요한 요소로 작용한다. 특히 부화를 위한 수질조건에서 수온과 용존산소(DO)는 대단히 중요한 조건으로 알려져 있어 하도 단면과 흐름 방향의 평균치를 취하는 1차원 모형이 일반적으로 이용되고 있다. 그러나 어류 서식에 적합한 수질이 유지되고 있는 하천에서 최적유량은 거시 수질 조건보다는 미시 수리 조건에만 의존한다(김규호, 1999)는 연구결과에 근거하여 본 연구에서는 한강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서(건교부, 1998)에서 하도구간의 1차원 하도 수질을 예측한 자료를 이용하여 대체적으로 안정된 수질을 확인하고 별도 모의는 생략하였다.

### 3.7 서식처 적합도 곡선

남한강 지류 구간인 문막, 청미 수위관측소 지점은 어류 채집이 비교적 용이하여 봄, 여름, 가을의 성장단계를 대상으로 각 3회씩의 어류 채집결과를 반영하였으며, 서식처 적합도 지수 산정을 위한 어류의 채집은 각 하천의 조사지점에서 선정된 대상 구간 내에서 이루어졌다. 채집의 진행은 하류부에서 상류부로 이동하면서 투망(망목 5×5 mm, 투척 시 확장 최대면적 9.0 $m^2$)을

(a) 여주지점 수심 (b) 여주지점 유속

**그림 5.** RMA- 2 을 이용한 2차원 수심, 유속 분포도

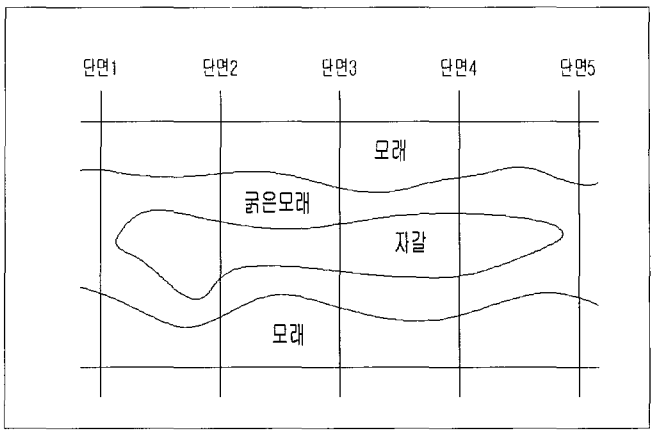


**그림 6.** 하상재료 분포도 작성

이용하여 채집하고 투망이 투척된 지점의 유속, 수심, 하상재료 등을 평가하였다. 목계, 여주 수위관측소 지점은 수량이 많아 어류 채집에 많은 어려움이 있어 문헌조사결과를 토대로 전문가의 판단을 수렴하여 서식환경의 이용도를 고려하였다. 서식처 적합도 지수 작성은 유속, 수심, 하상재료, 수온으로 나누어져 있고 어류가 특이한 최적 수온의 범위를 원하지 않을 경우는 수온 항목은 제외해도 무관한 것으로 알려져 있다(김규호, 1999,). 목계 지점의 산란기(수심, 유속, 하상재료)에 대한 작성 결과를 그림 7, 8, 9 에 나타내었다.

### 3.8 서식처 평가방법의 적용

어류의 미시 수리 조건은 대체적으로 계절이나 월과 같은 시간 변동보다는 하천 내 공간변동의 영향을 많이

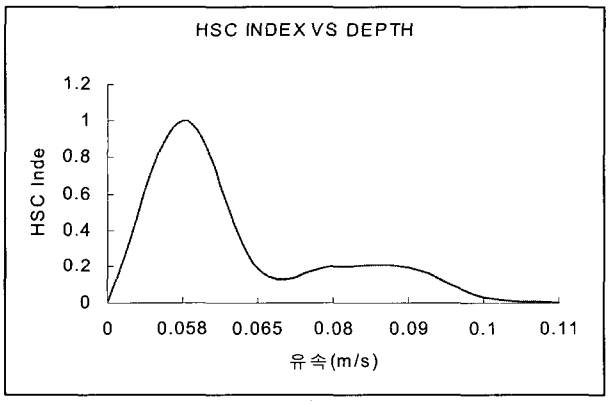


**그림 7.** 목계 서식처 적합도 지수(유속)

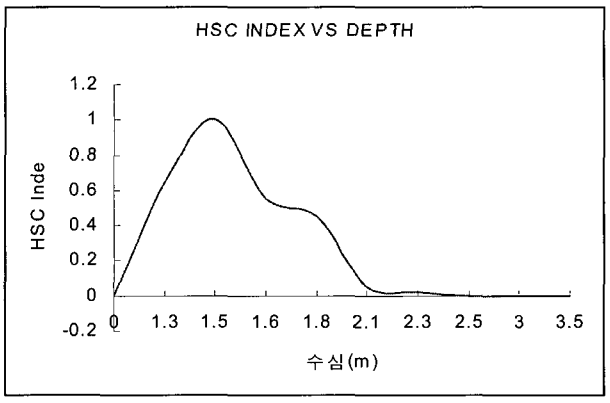


**그림 8.** 목계 서식처 적합도 지수(수심)

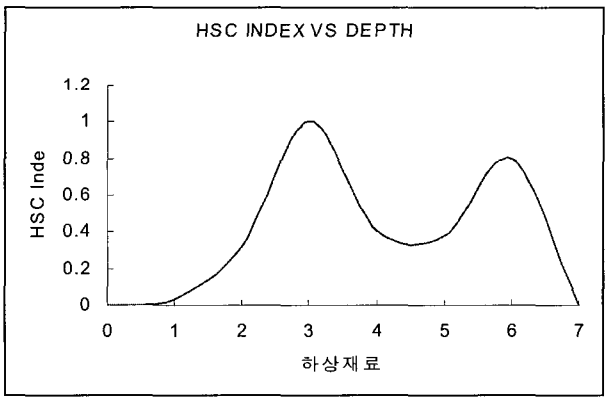


**그림 9.** 목계 서식처 적합도 지수(하상재료)

받는다. 물리적서식처모의시스템 적용을 위한 네 지점의 대상 구간 격자평면은 흐름 방향의 200m 구간을 100m씩 3개의 횡단면으로 분할하였으며, 수면폭을 25m 간격으로 모의하였다. 유량을 점차적으로 늘려가며 계산된 가중가용면적은 적은 유량에서부터 점점 증가하여 어느 정점에 이르러 다시 감소하는 곡선의 형태를 이루게 된다. 이 정점의 가중가용면적(peak weighted usable area)에서 의 유량을 해당 구간에서 어류 서식 면적을 최대로 제공하는 최적유량으로 산정한다(Rao, 1996).

목계 수위관측소 지점은 남한강 본류 구간으로서 수량이 비교적 많은 구간으로 평수량으로 모의했을 경우 피라미에 대한 수심과 유속의 서식조건이 전혀 형성되지 않아 연평균수량을 중심으로 모의하여 그림 10에 모의결과를 나타내었다. 문막 수위관측소 지점은 연평균수량을 중심으로 가중가용면적-최적유량 관계 곡선을 작성하고, 그림 11에 나타내었다. 성어기의 산정 유량이 2배 가량 크게 나타났는데, 이는 문막의 횡단면 형상이 타 지점에 비해 평면적이고, 하폭이 넓은데 기인하여, 웅덩이의 형성보다는 여울의 형성이 용이한 바, 같은 유량에 있어 산란기의 서식조건보다 성어기의 서식조건에 더 좋은 조건을 나타내기 때문이라고 사료된다.

청미 수위관측소 지점에 대하여 산정된 가중가용면적-최적유량 관계 곡선을 그림 12에 나타내었다. 최대 가중가용면적은 저수량과 평수량 모두를 고려하였다. 두 자료를 비교하였을 때 산란기 가중가용면적의 차이는 미세한 차이를 보였지만, 성어기에는 저수량으로 모의한 결과가 평수량으로 모의한 결과보다 더 큰 가중가용면적을 얻을 수가 있었다.

본 연구의 대상 지점 중 가장 하류 부인 여주 수위관측소 지점은 비교적 하폭이 넓고 여울구간이 형성되지 않는 남한강의 본류 구간이다. 갈수량에서는 피라미의 서식조건이 형성되지 않아 저수량부터 유량을 점진적으로 증가시켜가며 모의하였다. 모의 결과를 그림 13에 나타내었으며, 표 4에 각지점 별 성장단계 별 모의 결과를 종합하여 나타내었다.

## 4. 필요유량 산정 결과의 고찰

수문자료의 확보가 비교적 용이한 목계, 문막, 청미, 여주 수위관측소 지점을 대상 지점으로 하여 유황변화에 어류 서식환경이 민감하게 반응하는 지류상의 여울구간과 비교적 많은 수량으로 여울이 형성되지 않는 본류 구간을 동시에 모의하여 타 연구 사례 및 월단위 최

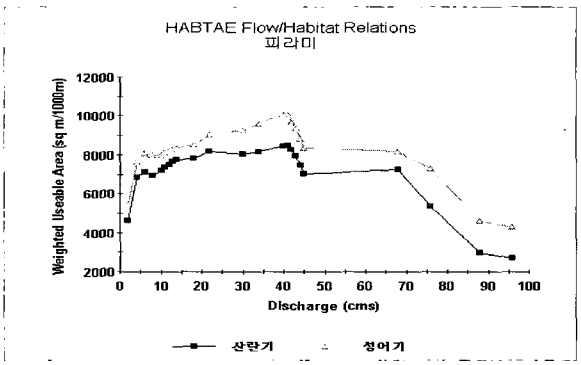


그림 10. 가중가용면적곡선 (목계-연평균수량)

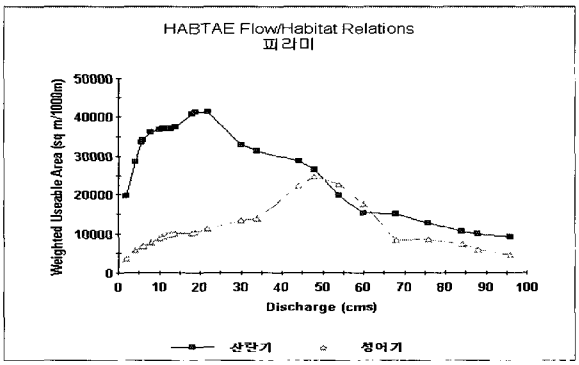


그림 11. 가중가용면적곡선 (문막-연평균수량)

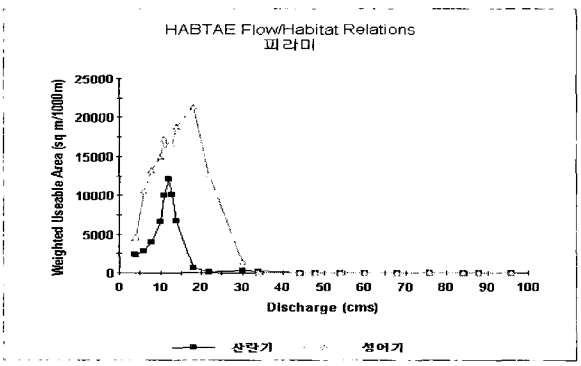


그림 12. 가중가용면적곡선 (청미-저수량)

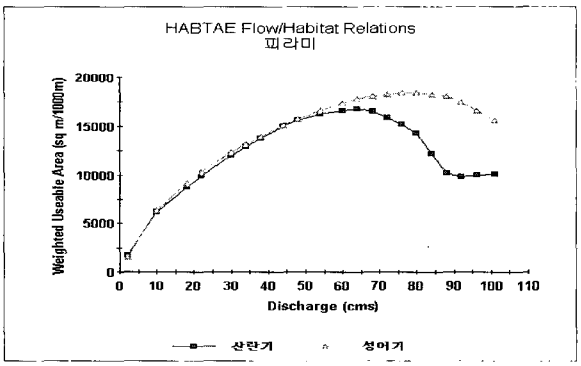


그림 13. 가중가용면적곡선 (여주-저수량)

표 4. 지점별 최적유량 및 가중가용면적

| 구분 | 검토유량 (㎥/s) | 유속범위 (m/s) | 최적유량(㎥/s) | | 가중가용면적(㎡/1000m) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 산란기 | 성어기 | 산란기 | 성어기 |
| 여주 수위관측소 지점 | | | | | | |
| 저수량 (기준) | 107.82 | 0.125~0.205 | 64 | 76 | 16500 | 18000 |
| 목계 수위관측소 지점 | | | | | | |
| 연평균수량 (기준) | 107.00 | 0.003~0.103 | 39 | 40 | 8400 | 10000 |
| 문막 수위관측소 지점 | | | | | | |
| 연평균수량 (기준) | 18.86 | 0.050~0.300 | 22 | 48 | 40500 | 24700 |
| 청미 수위관측소 지점 | | | | | | |
| 저수량 (기준) | 3.44 | 0.100~0.550 | 12 | 18 | 12000 | 21300 |

적유량을 다음에 나타내었다.

### 4.1 월별 최적유량의 산정

본 연구에서는 각 어종의 초기 성장 단계 위주로, 가중 가용면적 비율에 의한 가중치를 적용하여 월별 최적유량을 산정하였으며 그 결과 대상 지점인 목계, 문막, 청미, 여주 수위관측소 지점의 대표어종 피라미의 월별 최적유량은 표 5와 같다. 시간적으로 산란기와 성어기의 양은 많은 차이를 보이는 지점도 있으나 대부분 근소한 차이로 성어기가 많은 것으로 나타났다.

문막 지점의 최적 유량은 산란기와 성어기의 유량차이가 타 지점에 비해 큰 차이를 나타냈다. 이는 문막 지점이 전형적인 여울의 특성을 나타내는 구간으로 단면형상이 타 지점에 비해 요철이 적은 평면형태를 이루고 있어 수위가 변함에 따라 단면전체에서 수심이나 유속의 변화를 초래하는데 기인하는 것으로 사료된다.

### 4.2 중규모 하천에 대한 적용 사례

김규호(1999)는 달천 상·하류의 3개 여울 구간에서 피라미의 서식처 조건을 대상으로 수리·수문 및 수질 모의 결과를 서식 조건과 도식적인 방법, IFIM의 PHABSIM(이분법)으로 비교하여 어류 성장단계별 필요유량을 산정 하였다. 수리·수문 및 수질 모의 결과를 서식 조건과 도식적인 방법으로 우점종 피라미의 성장단계별 서식처 유지를 위한 적정유량 산정에 적용했을 때 서식처 조건은 수질조건 보다는 수리조건에 좌우되는 것으로 발표하였으며, 표 7과 같이 적정유량을 추천하였다.

본 연구에서와는 달리 이분법 형태의 서식처 적합도 곡선 형태를 이용하여 직접적인 비교는 될 수 없으나, IFIM의 PHABSIM을 대표어종 피라미에 적용한 결과는 산란기 4.1~7.1($m^3$/sec), 치어기/성장기 5.7~9.1($m^3$/sec), 그리고 성어기 13.8~15.2($m^3$/sec)이다. 서식조건과 도식적인 방법의 추천 값은 달천의 연구 결과와 마찬가지로 많은 차이를 나타냈다.

또한 서로 다른 서식처 적합도 지수를 이용했던 적용결과는 달천과 비교적 유사한 규모와 지형적 조건을 가지고 있는 문막과 청미 수위관측소 지점의 산란기와 성어기 추천유량인 22~48($m^3$/sec), 12~18($m^3$/sec)를 기준으로 비교해 볼 때 기존에 발표된 김규호 등(2000)에 의한 연구에서는 갈수량을 기준으로 1차원 점변류 해석에 의해 성장단계별 서식처 유지를 위한 적정유량을 제시한 반면 본 연구에서는 좀 더 세밀하게 어류 서식처 조건의 표현이 가능한 단일변량곡선법을 이용하여 하천 어류서식처 환경에 적합한 유속, 수심 및 하상재료 등을 복합적으로 고려한 최적유량을 산정함으로써 대체적으로 김규호 등(2000)에 의한 연구결과보다 다소 크게 산정된 것으로 판단된다. 한편 달천 유역과 유사한 문막, 청미 수위관측소 지점의 특징은 표 6과 같다.

표 5. 피라미의 서식처 조건을 고려한 월별 최적유량

| 어 종 | 여울구간 | 최적유량($m^3$/sec) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 | 평균 |
| 피라미 | 목계 | - | - | - | 39 | 39 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | - | - | 39.7 |
| | 문막 | - | - | - | 22 | 22 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | - | - | 40.6 |
| | 청미 | - | - | - | 12 | 12 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | - | - | 16.3 |
| | 여주 | - | - | - | 64 | 64 | 76 | 76 | 76 | 76 | 76 | - | - | 72.6 |

표 6. 유역 및 하도 특성 비교 (수자원관리 종합정보 시스템)

| 하 천 | 구성 | 유역 면적 A($km^2$) | 유로연장 L(km) | 유역평균폭 A/L(km) | 계획 하폭 (m) | 계획홍수량 ($m^3$/sec) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 달 천 | 지방1급~국가하천 | 2875.08 | 230.8 | 12.46 | 303 | 3165 |
| 섬 강 | 지방1급~국가하천 | 2793.46 | 165.02 | 16.87 | 261 | 4828 |
| 청미천 | 지방2급~국가하천 | 994.55 | 100.32 | 9.91 | 153 | 1350 |

표 7. 중규모 하천에 대한 적용 결과

| 구 분 | | 산 란 기($m^3$/sec) | 성 어 기($m^3$/sec) | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| 달 천 | 도식적인 방법 | 2.1~3.8 | 3.8~10.1 | 김규호(2000) |
| | 유량점증론적방법론(이분법) | 4.1~7.1 | 13.8~15.2 | |
| 섬 강 | 유량점증론적방법론(단일변량곡선법) | 22 | 48 | 금회 산정 |
| 청미천 | 유량점증론적방법론(단일변량곡선법) | 12 | 18 | |

### 4.3 현 시점의 항목별 필요유량

한강수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정(건교부, 1998)에서 고시한 각 항목별 필요유량 산정값을 본 연구에서의 산정 값과 비교해 보았다. 본 연구의 대상 지점인 목계, 여주, 문막, 청미 수위관측소 지점에서의 각 항목별 필요유량 산정 결과는 표 8과 같다. 이 중 생태계를 고려한 필요유량 산정 값은 갈수시를 대상으로 수위(수심, 유속)-유량 관계를 유도하고, 대상구간에서 선정된 대표어종의 서식처 수리조건을 검토하여, 대표어종의 한계수심에 해당하는 유량을 필요유량으로 하는 '간단한 필요유량 산정법'을 이용해 산정한 결과이다.

그 중 목계와 여주의 생태계를 고려한 필요유량은 그 지점에 대한 직접적인 산정 값이라기 보다는 충주댐 하류부 여울구간에서 산정된 값을 연장하여 고시한 값으로서 금회 산정값과의 직접적인 비교는 될 수 없을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 피라미의 서식처 조건이 거의 형성되지 않았던 갈수량보다도 적은 유량 값이다. 또한 문막 및 청미 지점도 갈수시를 대상으로 수위(수심, 유속)-유량 관계를 유도한 연유로 갈수량 수준에서 필요유량이 산정되어 본 연구 결과와 차이를 나타내는 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 하천 고유의 환경 요소로서 하천 어류 서식환경에 대한 서식 조건을 모의 평가하고, 이를 유지하기 위한 최적유량의 산정 방법을 남한강수계에 적용하여 그 과정을 확립하였으며 이로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 어류 서식처 평가에 필요한 수리조건의 모의를 위해 2차원 동수역학적 모형을 적용하여 대상구간의 수심 및 유속 분포도를 작성하였으며 작성된 결과를 토대로 어류의 서식처 요구 조건이 형성되는 유량을 찾아낼 수 있었다. 특히 본 연구에 의한 결과로서 제시된 최적유량은 어류의 미시 서식 조건을 과거 1차원 점변류 상태에서의 모의했던 것보다 다소 크게 산정되었으며 이는 단일변량곡선법에 의해서 수심, 유속 및 하상재료를 복합적으로 고려하여 어류의 최적환경을 고려한 결과이므로 갈수량을 기준으로 산정한 과거의 결과에 비하여 다소 크게 산정된 것으로 판단되며 향후 어류의 미시서식조건을 고려한 최적유량의 산정에 효과적

표 8. 항목별 필요유량

| 구 간 | 대표 지점 | 갈수량 ($m^3$/sec) | 생태계 ($m^3$/sec) | 경 관 ($m^3$/sec) | 수질 보전($m^3$/sec) | | 수상이용 ($m^3$/sec) | 금회산정 유량 ($m^3$/sec) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 관개 | 비관개 | | |
| 남한강 | 목 계 | 23.1(11.8) | 12.7 | - | 22.2 | 22.8 | 41.1 | 39.7 |
| | 여 주 | 30.0(15.2) | 12.7 | 364.9 | 24.9 | 29.7 | 40.7 | 72.6 |
| 섬 강 | 문 막 | 4.1(2.2) | 4.2 | - | 1.4 | 2.5 | 18.9 | 40.6 |
| 청미천 | 청 미 | 1.7(0.9) | 2.5 | - | 1.0 | 1.3 | - | 16.3 |

[주]평균갈수량, ()는 기준갈수량, 한강수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정(건교부,1998)

으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

2) 어류 서식환경에 대한 현장조사를 실시하여 대표 어종으로 선정된 피라미의 단일변량곡선법(univariate curve)을 적용한 서식처 적합도 기준(HSC)을 작성하였으며 이를 근거로 어류서식처 환경평가방법 중 가장 광범위하게 이용되고 있는 IFIM의 미시서식처 조건을 모의하는 PHABSIM을 한강 수계에 적용하여 피라미의 성장단계(산란기, 성어기)별 최적 유량을 산정 할 수 있었다.

3) 어류 서식처 평가를 위한 하도 구간으로서 유황변화에 어류 서식환경이 가장 민감하여 어류 서식처 평가를 위한 전형적인 공간으로 알려져 있는 여울구간과 비교적 수량이 많아 여울이 형성되지 않음으로서 어류의 서식처 평가의 고려대상에서 제외되었던 본류 구간을 동시에 모의하였다. 또한 본류구간과 이에 유입되는 지류를 연속적으로 모의하여 대체적으로 상·하류간의 물질균형이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

4) 각 지점에 대하여 한강 홍수통제소의 유황분석 자료(갈수량, 저수량, 평수량, 연평균수량)를 기준으로 2차원 해석을 통한 서식처의 수리조건 모의결과, 대체적으로 갈수량은 피라미의 서식처 요구 조건에 부합하는 유량을 만족시킬 수 없는 것으로 모의되었다.

## 참 고 문 헌


건설교통부 (1998). **한강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서**, 건설교통부.

김규호, 이진원, 홍일표, 우효섭 (1996). "하천유지유량 결정방법의 개발 및 적용 : 산정방법," **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제29권 제5호, pp. 185-202.

김규호, 조원철, 전병호 (2000). "수량·수질 모의치를 이용한 어류 서식 조건유지에 필요한 적정 유량 산정," **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권 제1호, pp. 3-14.

김규호 (1999). 하천 어류 서식 환경의 평가와 최적유량 산정, 박사학위논문, 연세대학교.

손영목 (1991). "충청북도산 담수어류", **서원대학교 기초과학연구논총**, 제 5권, pp. 1-38.

우효섭, 이진원, 김규호 (1998). "물고기 서식처를 고려한 하천유지유량 결정방법의 개발 금강 본류에의 적용", **대학토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제18권 제 II-4호, pp. 339-350.

한국건설기술연구원 (1998). **한강 유역 하천생태계(어류) 및 서식환경 조사보고서.**

한국수자원공사 (1995). **하천유지유량 결정방법의 개발 및 적용.** IPD-95-2. 연구보고서, pp. 249-264.

Bovee, K. D. and R. T. Milhous (1978). *Hydraulic Simulation in Instream Flow Studies : Theory and Techniques*, Instream Flow Information Paper No. 5, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-78/33, Fort Collins, Colorado.

Bovee, K. D. (1986). *Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for USe in the Instream Flow Incremental Methodology*, Instream Flow Information pp No. 21 U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-86/07, Fort Collins, Colorado.

Bovee, K. D., B. L. Lamb, J. M. Bartholow, C. B. Stalnaker, J. Taylor, and J. Henikson (1998). *"Stream Habitat Analysis using the Istream Flow Incremental Methodology, U.S. Geological Survey,"* Biological Rewources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, Fort Collins, Colorado.

Brusven, M. A. (1977). "Effects of sediments on insect," D. L. Kibbee(ed), *Transport of Granitic Sediments in Streams and Its Effects on Insects and Fish*, USDA Forest Service, Forest, Wildlife and Range Expt., Sta. Bull. 17, Unversity of Idaho, Moscow, Idaho, pp. 43.

Gordon, N. D., T. A. McMahon, and B. L. Finlayson (1993). Stream Hydrology : *An Introduction for Ecologists*, John Wiley & Sons, New York, NY.

Khalid Karim, Maureen E. Gubbels, and Ian C. Goulter, (1995). Review of Determination of Instream Flow Requirements With Speclal Applicationv to australla, *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Assoclation, Vol. 31, No. 6, pp. 1063-1077.

Leclerc, M., A. Boudreault, J. A. Bechara, and L. Belzile (1996). "Numerical method for modelling spawning habitat dynamics of landlocked salmon, *salmon, Salmo Salar." Regulated Rivers: Research & Management*, Vol. 12, pp. 273-285.

Loar, James M, and Michael J. Sale. (1981). *Analysis of Environmental Issues Related to Small-Scale Hydroelectric Development*: V. Insrteam Flow

Needs for Fishery Resources. Publication No. 1829, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, pp. 123.

Milhous, R. T., M. A. Updike, and D. M. Schneider (1989). *Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version II*, Information Paper No. 26. U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services Program, FWS/OBS-89/16, Fort Collins, Colorado.

Milhous, R. T. (1999). "Let me a question-Reply" by-E-mail: robert_milhous@usgs.gov, Mon, 25 Oct 1999(Personal communication).

Palmer, R. N. and R. M. Snyder (1985). "Effects of instream flow requirements on water supply reliability," *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 4, pp. 439-446.

Rao, S. S. (1996). *Engineering Optimization : Theory and Practice*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

U.S. Fish and Wildlife Service (1999). *Fisheries*, http://www.fws.gov/fishery.html , U.S. Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado.

Thomas, J. A. and K. D. Bovee (1993). "Application and testing of a procedure to evaluate trensferability of habitat suitability criteria," *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol 8, pp. 285-294.

USGS. (2001). PHABSIM for windows, User's Manual and Exercises, Midcontinent Ecological Science Center.

Waddle, T. (1992). *A Method for Instream Flow Water Management*, Ph. D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins Colorado.

Water, B. F (1976). "A methodology for evaluating the effects of different stream flows on salmonid habitat," J. F. Orsborn and C. H. Allman(eds), *Insream Flow Need*, Special Publication of the American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pp. 254-266.

(논문번호:04-38/접수:2004.04.16/심사완료:2004.09.30)