

입자영상유속계를 이용한 은어 (*Plecoglossus altivelis*)의 수영능력 측정

배재현 · 이경훈* · 신종근¹ · 양용수 · 이주희²
국립수산과학원 시스템공학과 · ¹동해수산연구소 · ²부경대학교

Measurement of swimming ability of silver fish (*Plecoglossus altivelis*) using a Particle Imaging Velocimetry

Jae-Hyun BAE, Kyounghoon LEE*, Jong-Keun SHIN¹, Yong-Su YANG and Ju-Hee LEE²

Fisheries System Engineering Division, National Fisheries Research & Development Institute,
Busan 619-705, Korea

¹East Sea Fisheries Research Institute, Gangneung 210-861, Korea

²Division of Marine Production System Management, Pukyong National University,
Busan 608-737, KOREA

As a fish way is a structure for fish migrating well toward upper stream due to breaking river flow by a dam or dammed pool, the specific fish's swimming ability is one of the main factors in making a plan and managing it. In addition, it also needs to understand the current field in fish road to evaluate its performance. This study is aimed to analyze the swimming patterns with current velocity changes using a Particle Imaging Velocimetry (PIV) in order to understand the swimming ability of silver fish (*Plecoglossus altivelis*) that is one of the fishes migrating through the fish way of Nakdong River, and to analyze the 2 dimensional current field near to silver fish at swimming momentum. The results showed that average values of tail beat frequencies for continuous swimming with current velocity were 2.8 Hz at 0.3 m/s, 3.2 Hz at 0.4 m/s, 3.8 Hz at 0.5 m/s, respectively. The wake would be produced by direction turning of fish's tail fin and its magnitude would be verified by the difference of pressure. The pressure turbulent flow produced by its tail beat would be made in both sides, and then, the magnitude of wake should be the source of moving direction. The swimming momentum will help to support the primary factor in making a suitable design for specific fish species migrating toward the district river.

Keywords: Silver fish, Swimming ability, Fish way, Particle Imaging Velocimetry, Pressure turbulent flow

*Corresponding author: khlee71@nfrdi.go.kr, Tel: 82-51-720-2583, Fax: 82-51-720-2586

서 론

어도는 댐이나 보 등에 설치되어 하천의 흐름의 단절로 인한 생물의 이동을 원활히 하고자 설치된 시설물로서, 대상생물의 유영 특성은 어도를 설계하고 운영하는데 있어서 가장 중요한 인자 중의 하나이다.

어도를 설계하거나 성능을 향상시키기 위해서는 어도 내 유동장의 특성을 이해하는 것이 필수적이다. 특히, 장애물과 어도의 형태에 따라 발생하는 유동장의 특성은 어류의 운동특성이나 소상능력을 결정하는 중요한 요소이며, 대상생물에게도 압력이나 속도 차에 따라 구집효과를 주는 등 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 또한, 어류에 작용하는 유체역학적 힘도 대부분 어류 표피와 경계층의 변화와 발생하는 후류의 크기 등, 유동 현상이 그 원인이 되며, 어류의 운동 반응을 일으키는 원인도 유동에서 발생하는 속도와 압력의 변화에서 발생된다 (Kim, 1996).

유영하는 어류 주변의 유동장은 대부분 난류 유동 (turbulent flow)으로 그 속도정보는 시간 (t)와 공간 (x, y, z)의 함수로 주어지는 매우 복잡한 유동구조를 가지고 있다. 이와 같은 난류유동을 정확하게 해석하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 전체유동의 순간유동장을 무수히 많이 측정하여 이들을 통계 처리하여야 한다.

유동가시화 (flow visualization)는 유동현상을 직접 관찰함으로써 유동장 전체에 걸쳐서 정성적 특성을 해석할 수 있는 가장 기본적인 실험기법이다. Dye tracer, hydrogen bubble, smoke 등을 이용한 고전적 유동가시화 방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만, 정확한 유동해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 많은 연구가 다양하게 진행되어 왔으며, 최근의 급속한 화상매체기기의 발달에 힘입어 지금까지는 원리적으로만 가능하였던 기법들이 실용화단계에 이르렀다. 컴퓨터와 디지털화상처리기술 (digital

image processing)의 발달은 유동장에 투입된 가시화용 추적입자들의 거동을 정량화 할 수 있게 하였는데 이를 근간으로 한 유동장의 속도계측법이 PIV (Particle Imaging Velocimetry)이다. 이 방법은 세 방향의 속도 성분을 동시에 전 영역에 걸쳐 연속으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 NS (Navier-Stokes)방정식에 대입하여 압력구배항을 공간 적분하면 벽면의 정압까지를 포함한 실시간 압력장을 구할 수가 있다 (Lee, 1996).

이러한 가시화기법을 이용한 유동장 해석기법은 어구어법분야에도 다양하게 적용 (Bae et al., 2006a; Bae et al., 2006b)되었으며, 어류의 유체역학적 특성에 관한 연구에서도 최근 다양한 가시화 기법과 유체역학적 해석을 통하여 많은 진척이 있었다. 국내에서는 3D PTV를 활용하여 3D PTV를 이용한 원주후류 시계열 실시간 난류 통계량 계측을 수행한 바 있으며 (Doh et al., 1998), 유영하는 어류를 대상으로 박리를 일으키지 않고 적은 에너지로 유영이 가능한 운동 메커니즘을 밝히기 위해서 돔 및 고등어를 대상으로 경계층의 유동상태를 측정하거나 후류를 계측하는 연구를 수행한 바 있다 (Anderson et al., 2001).

본 연구에서는 낙동강 하구둑에 설치된 어도를 이용하는 어류 중 은어의 유영 패턴을 이해하기 위하여 입자영상유속계 (PIV: Particle Imaging Velocimetry)를 이용하여 유속변화에 따른 운동 패턴을 분석하고, 어류의 유영 운동시 어류 주변의 2차원 유동장을 분석하였다.

재료 및 방법

실험 대상 어류

본 실험에서는 하구둑과 같은 기수영역에서 소상 및 소하를 하며 어도를 이용하는 대표적인 어류인 은어 (*Plecoglossus altivelis*)를 실험 대상 어류로 선정하였다. 은어는 우리나라, 일본, 중국, 대만 등의 동북아에 서식하는 1년생 어류로 하천에서 산란하고 부화된 자어는 연안에서 성

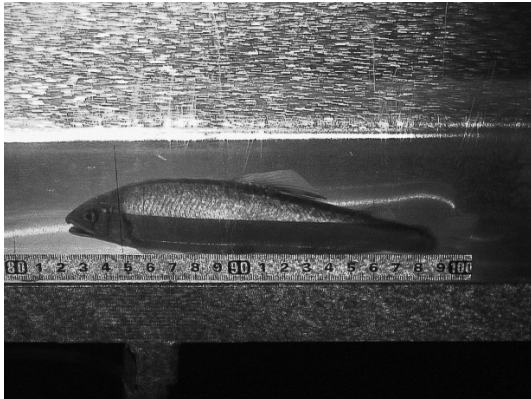


Fig. 1. Silver fish in circular channel for sea water.

장한 후 봄에 소상하는 양측 회유형 어류이다. 또한, 체장에 비하여 상대속도가 빠른 어류 중 가장 대표적인 원추형 어류중의 하나이다.

본 실험에서는 섬진강 유역에서 채집된 은어 성어를 수조에 적응하기 위하여 약 3일간 순치 하였으며, 체장범위가 17–21cm이고 평균중량이 67g인 개체어 (N=7)를 사용하였다.

실험 수조

실험에 사용된 회류수조는 수직순환식으로 관측영역 내의 Opening부의 3측면에 투명한 관측창을 설치하여 다양한 형태의 실험이 가능하도록 제작되었다. 수조 본체의 재질은 스테인레스 스틸 (SUS304L)이며, 길이 (L) 2.5m, 최대 폭 (B) 0.5m, 높이 (H) 1.2m로 구성되어 있고 수량은 0.6톤이다. 또한, 관측부 크기는 길이 1.0m, 폭

Table 1. Principal characteristics of circular water channel

Terms	Specifications
Water capacity	0.6 ton
Measuring window (L×B×H)	1.0×0.3×0.3m
Depth	0.4 m
Current velocity	1.4 m/s
Impeller	1 impellers (4 blades), AC 0.75kW×1

0.3m 높이 0.3m이며, 유속범위는 0.1–1.4m/s이다. 유속의 조절은 인버터를 이용하여 0.75kW, AC모터 회전수를 직접 조절 가능하도록 설계하였으며, 코너에는 기포제거장치가 설치되어 있다. 수조의 주요설비로는 구동 임펠러, 정류장치, 제어반, 여과장치, 기포제거장치, 초기충전장치 등이다.

실험 유속은 0.3m/s에서 0.5m/s 구간을 0.05m/s 나누었고 운동 특성 및 어체 주변의 유동 특성을 화상처리하여 분석하였다.

입자영상유속기법 (PIV: Particle Imaging Velocimetry)

PIV는 유동 속에 추종입자의 입자영상 (Particle image)을 화상처리하여 주어진 유동의 속도장을 측정하는 측정시스템으로 크게 레이저와 광학장치, 영상기록장치, 추종입자 등으로 구성된다. PIV는 측정하고자 하는 유동단면을 레이저 평면광 (Laser light sheet)으로 조사하고 이 빛에 조명되어진 유동입자들의 반사광을 시간간격 ΔT 를 두고 이미지를 취득하고 측정영역

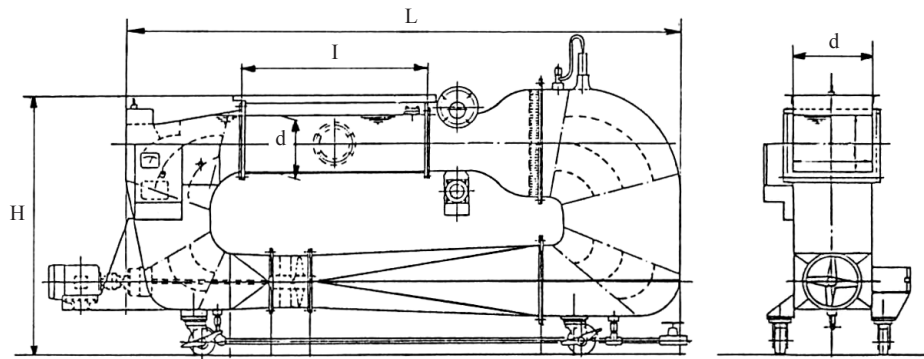


Fig. 2. Small scale circular channel for sea water.

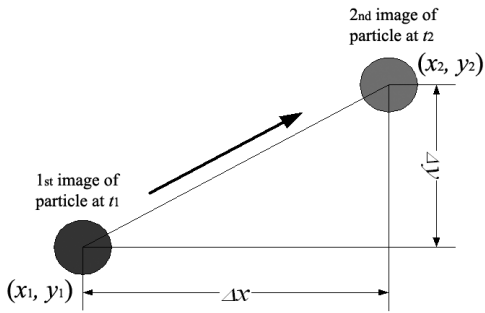


Fig. 3. Schematic diagram of PIV.

내 미소구간 또는 입자의 이동량을 화상해석으로 취득하여 유동을 정량적으로 계측하는 기법이다 (Lee, 1996).

속도장 측정을 위해서는 먼저 유동을 잘 추종하는 작은 크기의 입자를 유동 속에 주입한다. 그리고 측정하고자 하는 유동단면을 레이저 평면광으로 조사하게 되면, 이 빛에 조명되어진 유동입자들은 산란하게 된다. 레이저 평면광은 레이저 빔을 원주형 렌즈와 구형렌즈와 같은 광학 렌즈를 지나게 함으로써 만들 수 있다.

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

$$v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (2)$$

레이저 평면광에 산란된 입자영상 1장을 CCD 카메라와 같은 영상입력장치로 취득한다. 그리고, 시간간격 Δt 가 지난 $t_0 + \Delta t$ 순간에 2번째 입자영상을 취득한다. 시간간격은 유동의 속도에 따라 달리 설정한다. 이렇게 얻어진 2장의 입자영상을 2차원 화상데이터로 컴퓨터에 저장한 후, 디지털 화상처리기법으로 분석함으로써 시간간격 (Δt)동안 움직인 유동입자들의 변위 (displacement)정보 ΔS 를 계측한다. 여기서 입자들의 변위 ΔS 는 시간과 공간의 함수로 $\Delta S = \Delta S(x, y, t)$ 로 표현되어진다. 속도벡터 $u(x, y)$ 는 입자들의 변위 벡터 ΔS 를 시간간격 Δt 로 나누어줌으로써 구할 수 있다. 이때 변위 Δx 는 $\Delta x / \Delta t$ 가 속도성분 u 와

잘 일치하도록 충분히 작아야 한다. 즉, 입자의 궤적 (trajectory)이 축과 거의 일직선을 이루어야 하며, 궤적을 따른 입자의 속도도 거의 균일해야 한다.

컴퓨터 상에서 이와 같은 계산을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심 입자군 속도 (속도 벡터의 시점)에 대하여 이동벡터의 종점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임간의 상관계수는 다음 식 (3)에 의해 구할 수 있다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (3)$$

여기서 f_i, g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조값을 의미하며 \bar{f}_i, \bar{g}_i 는 연속화상에 대한 시간평균을 의미한다.

가시화용 레이저는 연속광레이저인 파장 532nm, 3W DPSS 레이저(AIXIZ Inc., USA)를 사용하였으며, 카메라는 고속카메라를 사용하여 1024(h)×992(v)로 500 frame/sec으로 실험어가 레이저 광에 들어오는 순간 2초간 촬영하였다. 따라서, 카메라가 연속적으로 2장의 이미지 시간차 (Δt)는 2000μsec가 되도록 설정하였다. 추종입자는 100μm Nylon입자를 사용하였다. 이

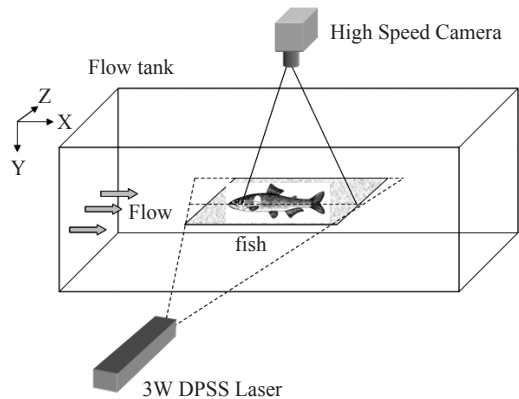


Fig. 4. Measurement of swimming ability of silver fish by PIV.

때, 저장된 화상의 분석에 사용된 PIV소프트웨어는 2 Frame Cross-Correlation 알고리즘을 이용하는 Thinks 2D PIV 프로그램 (T&Teck Co., Korea)이었다.

또한, 어류 주변의 유동 특성을 파악하기 위하여 어류 유영 패턴에 따른 속도장 및 압력장, 난류강도를 측정하였다. 난류강도는 유동 평균값 \bar{U} 을 얻은 후, 2차원 공간상의 임의의 점의 속도 벡터 $U(x, y)$ 에서 유동평균값 \bar{U} 을 뺀 섭동값 u, v 을 구한다. 이들 섭동값에서 섭동 제곱승의 평균값을 각각 구하여 최종적으로 난류강도를 구하였다.

$$\text{Kinetic energy } k = \frac{(u'^2 + v'^2)}{2} \quad (4)$$

$$\text{Turbulent Intensity } I = \frac{\sqrt{2k}}{\bar{U}} \quad (5)$$

결과 및 고찰

PIV에 의한 은어의 유영행동 분석

고속카메라를 이용하여 어류의 유영패턴을 분석하기 위해서, 순간영상을 보여주는 것으로

초당 1056프레임을 촬영하여 각 행동 패턴의 특이점을 라인 분석하였고 이를 1사이클로 하여 주기성을 분석한 결과, 은어는 유속에 따라 지속 유영을 위한 꼬리지느러미의 진동주기는 0.3m/s에서 평균 2.8Hz, 0.4m/s에서 3.2Hz, 0.5m/s에서 3.8Hz로 나타났다 (Fig. 5).

또한, 은어의 유영행동 중 방향 전환시 행동 패턴에 따른 2차원 와류에 대한 메커니즘을 나타내었다 (Fig. 6). 여기서, L은 은어의 지느러미 방향이 바뀔 때마다 wake가 발생하고 이러한 wake의 크기는 압력차로 나타나는 것으로 확인

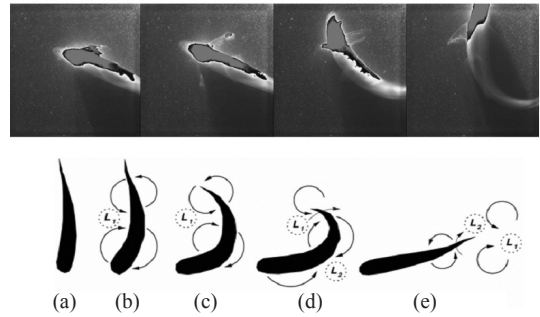


Fig. 6. Direction turning momentum of silver fish.

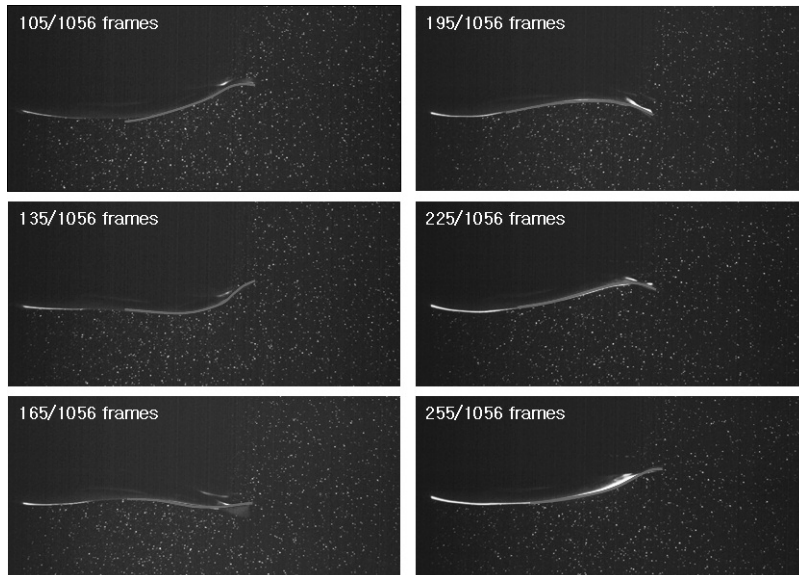


Fig. 5. Analysis of silver fish's swimming pattern at 0.4m/s.

할 수 있다 (Wolfgang et al., 1999). 이 때 어류체 형이 일직선인 상태 (a)에서 어류의 중심부의 굴절에 의해 머리부와 꼬리부의 와류가 발달 (b, c) 하기 시작하여 물결형 운동의 몸체 교정은 꼬리지느러미에 의해 시계반대 방향인 와도를 wake 로 방출 (d)한다. 마지막으로 어류 몸체가 일직선으로 배열하게 되면서 꼬리부의 반시계방향의 와도와 시계방향의 와도가 쌍으로 형성되는 웨이크가 형성되면서 떨어져 나가게 되는 것을 알 수 있다 (e). 따라서, 어류의 몸체로부터 형성되는 와도와 꼬리지느러미에 의한 후류 형성에 의해 어류의 신속한 선회동작을 유체역학적으로 제시할 수 있었다.

이러한 현상은 Fig. 7과 같이 단순 유영시 더욱 확연히 나타났으며, 유속 0.4m/s에서 순간 난류운동에너지분포, 압력분포, 속도분포, 와도분포를 PIV기법을 이용하여 분석한 결과, 은어가 유

영시 꼬리지느러미 끝으로 발생한 압력와도가 좌우 쌍으로 발생하며 이러한 wake의 크기가 어류 진행방향의 원인이 되는 것을 확인하였다.

특히, 난류운동에너지를 보면 꼬리지느러미의 진행방향이 바뀔 때 좌우로 난류운동에너지가 크게 나타나는 것이 분석결과 나타났으며, 이러한 결과는 압력분포와 와도분포에서 더욱 분명하게 확인할 수 있었다. 이러한 분석결과는 어도에서의 어류의 유영능력을 분석한 최근 연구자료 (Kim, 1996; Yang et al, 2010)와 유사한 결과로 볼 수 있는데, 강 상류로 이동하는 어류가 장애물이 없는 직선형 하천에서는 좌우운동이 거의 없는 운동을 하지만, 장애물로 인하여 와류가 발생된 흐름에서는 좌우운동을 하면서도 오히려 에너지 소모량이 적은 형태로 운동하기 때문에, 소용돌이에서 발생하는 역류를 이용하여 강 상류로 이동하는 것이 어류의 에너지 소모를 최

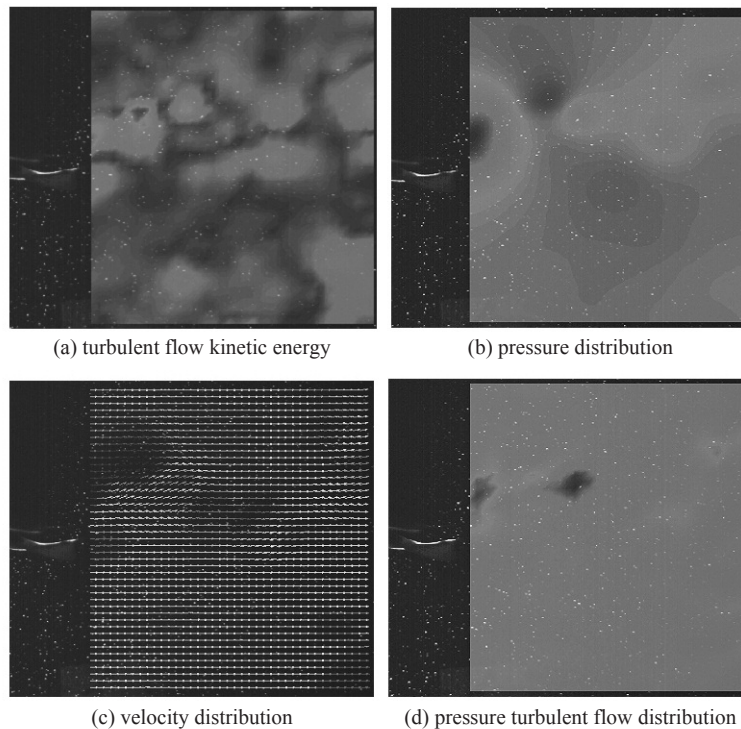


Fig. 7. Current field analysis of silver fish's tail fin.

소화하여 전진하는 메커니즘으로 확인되었다.

한편, 어류의 가슴지느러미에서도 발생하는 추진력에 대해 발생한 wake ring을 단면적으로 분석한 결과, 어류가 생존하는 환경에서는 부력이 존재하고 몸체 길이에 비해 지느러미 길이가 상대적으로 작기 때문에, 어류는 지느러미의 움직임에 따른 특징적인 wake ring을 발생하고 회전방향은 ring의 중심으로 향하고 있다는 것을 알 수 있다 (Eliot et al., 1999). 따라서, 짧은 지느러미에 의해 wake ring은 회전을 동반하며 몸체 반대방향으로의 발산은 순간적인 추진력과 몸체의 안전성에 영향을 주는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 2차원 입자 추적 결과를 나타낸 것과 달리, 현재 3차원 입자 추적 기법 (Nishino et al., 1989)이 많이 적용되고 있는데, Hwang and Doh (2004)이 제시한 2차원 PIV와 3차원 PTV의 검토에 의해 3차원 공간벡터를 분석할 필요가 있다. 기존 3차원 위치 결정시, 두 대의 카메라로부터 입력된 영상을 기준으로 하여 입자에 대한 공선의 조건식에서 오차가 제일 작은 입자들을 같은 입자라고 인식하게 되며, 입자의 수가 비교적 적을 때 잘 들어맞음을 알 수 있다. 그러나, 실질적으로 입자가 많아질 경우 입자에 대한 카메라 중심으로부터의 직선은 다른 카메라에서 하나의 직선으로 나타나게 되고, 이 직선과 만나는 입자들의 개수도 증가 하게 되면서 작은 입자 중심의 오차에도 완전히 다른 결과를 얻게 된다. 이 때, 이런 잘못된 결과를 수정하기 위해 같은 입자를 인식하는 과정에 유전알고리즘을 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

향후, 이러한 3차원 PIV 분석을 통하여 복잡한 난류가 있는 흐름에서 어떻게 어류가 효율적으로 유영하는지를 분석하면 지속유영능력이 떨어지고 어도 내 유속장이 빠르더라도 적절한 형태의 장애물 또는 와류 발생 시설물을 설치하여 더욱 효과적인 어도개발이 가능할 것으로 판단된다.

결 론

현재까지 시설된 어도는 대부분 강원도에 집중되어 있고 노후화 되어 생태환경을 고려하지 않은 시설로 회유성 어류의 이동 통로로서 제 기능을 발휘하지 못하고 있으나, 최근에는 생태계 복원을 위한 어도의 중요도가 많이 제기되고 있다. 수산자원보호령이 개정된 이후인 2000년도 이후 보에 어도설치가 의무화되어, 각 지역별로 어도설치가 증가되고 있으나, 대부분의 어도는 어종을 고려하지 않아 외국 사례를 중심으로 시설되기 때문에, 우리나라 수리·수문학적 특성과 주요 어류의 유영특성을 고려한 어도시설에 관한 연구사례는 많지 않다.

또한, 시설된 어도의 대부분이 하천의 특성 및 어도시설의 수리학적 특성을 파악치 못하고 건설됨으로써, 여러 가지 문제를 발생시키고 있는데 그 대표적인 것은 어도가 시설된 대부분의 지역은 수문학적으로 계절적인 변화가 심하고, 지형학적으로 하상계수가 대단히 크기 때문에 어류가 소상하기에 유리한 조건은 아닌 것으로 판단된다. 이와 함께 어도 설치 후 운영관리 체계가 확립되지 않아 시설 후 관리 미흡으로 어도의 기능 유지가 곤란한 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구의 목적은 우리나라 주요하천에 회유하는 은어의 유영능력을 구명하여 효과적인 어도설계의 기초자료로 활용하기 위한 것이며, 유영능력의 구명방법으로 PIV를 이용하기 위하여, 유영능력을 분석하여 주요 하천에 회유하는 대상 어종에 맞는 맞춤형 어도를 설계하는데 주요 인자를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산물품질관리원수산시험연구사업 (RP-2011-FE-001)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님과 편집위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- Anderson, E.J., W.R. McGillis and M.A. Grosenbaugh, 2001. The boundary layer of swimming fish. *J. of Experimental Biology*, 204, 81 – 102.
- Bae, B.S., H.C. An, J.H. Bae, C.D. Park and I.O. Kim, 2006. The characteristics of the flow field around canvas kite using the PIV. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 42 (2), 86 – 96.
- Bae, B.S., J.H. Bae, H.C. An, S.W. Park, C.D. Park and E.C. Jeong, 2006. The characteristics of the flow field around canvas kite using the CFD. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 42 (3), 169 – 178.
- Doh, D.H. and Y.H. Lee, 1998. A study on estimation of spatio-current field and boundary pressure distribution using 3D velocimetry of PIV. *The mechanic society of Korea*, 22 (4), 468 – 479.
- Hwang, T.G. and D.H. Doh, 2004. Performance test on 2-Dimensional PIV and 3 3-Dimensional PIV using standard images. *The mechanic society of Korea*, 28, 1315 – 1321.
- Eliot, G.D. and G.V. Lauder, 1999. Locomotor on forces on a swimming fish: Three-dimensional vortex wake dynamics quantified using digital particle image velocimetry. *J. of Experimental Biology*, 202, 2393 – 2412.
- Kim, J.H., 1996. Hydrography characteristic relatives to boundary shape of stage type and fish' s upstream migration. *The water resources society of Korea*, 29 (6), 102 – 114.
- Lee, Y.H., 1996. Classification and principle of PIV. *Korean mechanic society*, 36 (12), 1146 – 1162.
- Nishino K., N. Kasagi and M. Hirata, 1989. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing. *ASME J. Fluids Eng.* 111 (4), 384 – 391.
- Wolfgang, M.J., J.M. Anderson, M.A. Grosenbaugh, D.K.P. Yue and M.S. Triantafyllou, 1999. Near-Body flow dynamics in swimming fish. *J. of Experimental Biology*, 202, 2303 – 2327.
- Yang, Y.S., J.H. Bae, K. Lee, J.S. Park and B.K. Sohn, 2010. Fish monitoring through a fish run on the Nakdong River using an acoustic camera system. *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43 (6), 735 – 739.
-
- 2011년 9월 14일 접수
 2011년 10월 7일 1차 수정
 2011년 10월 24일 2차 수정
 2011년 10월 28일 수리