

< 解説 >

魚類의 推進과 振動

梁 保 錫

釜山水産大學校

(1990년 10월 1일 접수)

Fishes Propulsion and Vibration

Bo Suk YANG

National Fisheries University of Pusan

(Received October 1, 1990)

1. 서 론

대형 포유동물, 즉 돌고래 (porpoise, dolphin), 고래 (whale) 등은 2~30m의 길이를 갖고, 6~10 m/s의 속도로서 유명할 수 있다 (Lang & Pryor, 1966). 짚신벌레 (Paramecia), 정자 (Spermatozoa) 등과 같은 원생동물은 길이가 $50\mu\text{m}$ ~ $300\mu\text{m}$ 로 길이에 대한 직경비가 20~100이며, 80~1000 $\mu\text{m}/\text{s}$ 의 속도로 유명할 수 있다. 이들의 2종류의 극단적인 경우의 사이에는 여러 크기의 어류와 수산동물의 많은 종 (species) 이 있다.

액체의 동점도 ν , 유속 U 로 이동하는 어류의 특성길이를 l 로 하면 레이놀즈수는 $R=Ul/\nu$ 로 정의되며, 이는 점성응력에 대한 관성응력의 시간평균의 상대적인 크기를 나타내는 척도가 된다. 대부분의 빠른 고래 (cetacean)의 경우 R 은 10^8 정도의 크기이고, 철따라 회유하는 어류가 10^6 이며, 대부분의 어류는 10^5 ~ 10^3 , 올챙이의 경우가 약 10^2 이고, 짚신벌레 및 정자 등의 경우가 10^{-3} 또는 2 이하이다 (Gray, 1968). 그리고 박테리아의 경우 10^{-6} 의 극단적인 값을 갖는다.

Lighthill (1969)은 동물학 및 유체역학적인 관점에서 수산동물의 유체역학에 관해 훌륭한 해설을 하고 있다. 비록 레이놀즈수 R 이 경우에 따라 크게 변화 할지라도, 대다수의 수산동물이 채

용하고 있는 추진기구의 가장 효율적인 운동은 몸통의 머리로부터 꼬리를 따라 전파되는 횡파 (transverse wave)의 형태를 몸체의 波動운동으로부터 별차이 없이 관측할 수 있다. 몇몇 고래류 (dolphin, porpoise, whale) 등과 잘 알려진 어류들 (tuna, wahoo, marlin, swordfish 등)은 큰 縱橫比 (aspect ratio)의 강력한 꼬리를 사용하여 팔목할 만한 波狀운동의 성능을 발휘하고 있다. 미세 원생동물 (micro-organisms)의 세계에서는 추진의 기본 수단으로서 가늘고 긴 편모 (flagella)에 따라 일정하게 전파되는 횡파나 나선파 (hellical wave)를 채용하고 있음이 관측된다. 어떻게 추진을 수행하는 유체역학의 기본적인 원리가 레이놀즈수가 크거나 작은 값의 경우 매우 다르게 된다. 즉 큰 레이놀즈수의 경우, 유영 추진은 주로 관성 효과 (inertial effect)에 의존된다. 이는 물체 표면에서의 얇은 경계층을 생성시키며 後流 (wake)내에 소용돌이 방출 (vorticity shed)을 일으키는 역할을 제외하고는 그리 중요하지 않다. 그러므로 물체 표면에서 표면마찰 (skin friction)에만 영향을 미치게 된다. 또 다른 극단적인 미세 크기의 원생동물의 운동은 항상 작은 레이놀즈수가 되며 이 범주에서의 추진은 거의 완전히 점성응력 (viscous stress)에 의존된다. 이는 매우 높은 진동수로 운동을 하는

경우를 제외하고는 관성력이 극도로 작기 때문이다. 점성 유체에서의 진동운동은 1851년 Stokes에 의해 설명 되었으며, 원생동물의 유영에 대해서는 Taylor, Hancock, Gray, Raynolds 등에 의해 연구 되었다.

몸체가 波動운동을 수행하고 前向의 운동량을 얻으므로, 추진력은 마찰저항이 몸체주위와 함께 이동하는 유체의 일부에 의해 유체의 전향 운동량을 일으키는 동안 운동의 그것과 크기가 같고 방향이 반대인 순 총운동량으로 추진력은 유체를 뒤로 밀어낸다. 관성력에 대한 반동의 운동량은 波狀의 꼬리에서의 소용돌이의 미소두께와 진폭에 기인하는 소용돌이 後流(vortex wake)에 집중된다. 몸체로부터 밀어내는 유체의 뒷쪽으로의 분사(jet)는 점성 저항에 대한 응답의 운동량에 의해 서로 평형을 유지하게 된다. 자체 추진을 하는 몸체가 일정한 속도로 유영할 때, 전향 및 후향의 운동량은 정확하게 평형을 유지한다. 큰 레이놀즈수에서 유영 운동에 대한 이러한 메커니즘은 횡진동을 하는 강체판의 단순한 경우에 대해 1943년 Karman과 Burger에 의해 설명 되었다. 비교적 가늘고 긴 어류의 유영은 Lightill에 의해 다루어 졌으며, 2차원 유연판(flexible plate)의 파동이 Wu에 의해 계산되었다.

본 해설에서는 어류의 추진운동과 진동계의 불안정 진동시의 진동형태의 관계를 개론적으로 비교하고, 자러진동기구와 어류의 추진기구 사이에서 역관계의 에너지 변환기구를 갖고 있음을 설명하여, 자연계 특히 수산동물의 에너지 변환기구를 공학적 관점에서 계통적으로 설명될 수 있음을 보여준다.

2. 推力 發生 機構

生體工學(bioengineering)의 관점으로부터 완전한 과정은 그림 1과 같이 유영동안에 몸체의 운동을 유지하기 위한 기계적 에너지는 효율 η_1 로 변환되는 생화학적 에너지로부터 시작된다. 이어서 기계적 에너지는 효율 η_2 로 유영동안에 유체 에너지로 변환된다. 유체역학적인 에너지의 일부는 마찰저항에 의해 수행된 일과 평형이 되는 추력에 의해 행하여진 유용한 일로 소모되며, 나머지부분은 흐름의 후류(wake)에서 에너지를 잃어 버리게된다.

몸체를 따라 진행되는 횡파가 유영 추진의 경우 왜 필요한지를 이해하기 위해서 정지해 있는 유체를 시간 t 동안에 직선속도 $U(t)$ 에 도달하는 미소직폭의 임의 비정상 운동을 수행하는 두께를 무시할 수 있는 유연한 평면 물체의 특별한 경우에 대한 에너지 평형을 고려한다. 몸체의 중간 위치에 고정된 직교 좌표계 (x, y, z) 에서 x 축은 유속의 진행방향으로 한다(그림 2). 어류의 운동은 다음의 함수로 표현할 수 있다.

$$y = h(x, z, t) \quad (1)$$

이 때 어류의 추진에 필요한 에너지 P , 추진 에너지 T 와 유체에 소비되는 에너지 E 의 관계는 다음과 같다³⁾.

$$P = TU + E \quad (2)$$

여기서 U 는 어류의 유영속도이고, 유체를 비압축성 그리고 $|\partial h/\partial x|$ 및 $|\partial h/\partial z|$ 가 적다고 가정하면 선형 이론이 적용될 수 있다. 비점성 선형 이론에 의한 몸체에 작용하는 추력은 진행

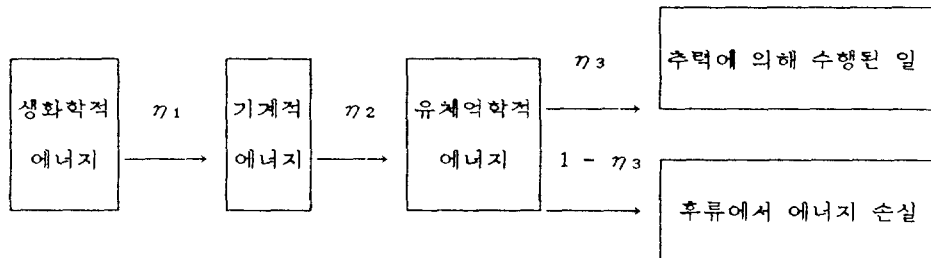


그림 1 에너지 변환 과정

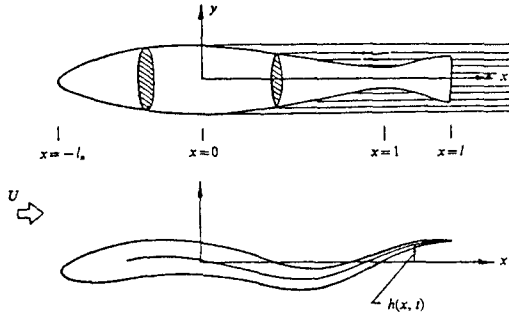


그림 2 좌표계

방향에 대한 압력 성분의 적분에 의해 구할 수 있다. x축의 반대 방향으로 작용하는 추력을 양으로 하면

$$T = T_p + T_s = \int_s (\Delta p) \partial h / \partial x ds + \int F_s(x, z, t) dz \quad (3)$$

여기서 Δp 는 유연판 양측의 압력차이다. 즉 $\Delta p = P(x, -0, z, t) - P(x, +0, z, t)$ (4)

F_s 는 전연(前緣)의 흡인력(suction force)이다. 운동을 유지하기 위해 요구되는 동력은 횡운동 방향에 유체의 반동에 대항하는 판에 의해 수행된 일률과 같다. 즉

$$P = - \int_s (\Delta p) \partial h / \partial t ds \quad (5)$$

마지막으로 단위 시간에 유체에 전달되는 기계적 에너지는 비점성 유체의 경우 몸체표면의 압력에 의해 수행되는 일률과 같다.

$$E = - \int_s (\Delta p) V(x, z, t) ds - T_s U \quad (6)$$

여기서 V 는 y방향의 유속이다. 위의 세 에너지는 보존의 법칙 즉 입력 에너지인 어류의 추진에 필요한 에너지 P 가 추력에 의해 수행된 일률과 단위 시간당 유체에 소비되는 운동 에너지 E 의 합과 같아야 한다 (식(2)). 만약 점성효과를 고려 한다면, 추력 T 는 표면마찰(skin friction)에 기인하는 점성항력과 점성손실에 의한 에너지 소모를 포함해야 한다. 일반적으로 유체에 소비

되는 에너지 E 는 항상 양(+)이고, 또한 시간평균도 양이다. 이 때 일정한 전진 속도를 갖는 주기적인 몸체 운동은

$$h(x, z, t) = h_1(x, z) \exp(j\omega t) \quad (7)$$

으로 표현된다. 여기서 $j = \sqrt{-1}$, ω 는 진동수이다. $E \geq 0$ 조건하에서 식(2)의 경우

$$P \geq TU \quad (8)$$

으로 P 가 양일 때는 $T > 0$ 로 되면 전진 방향의 추력을 일으키게 되고, $P < 0$ 일 때는 터빈(turbine)과 같이 에너지는 유체로부터 얻게되어 식(8)에 따라 $T < 0$ 로 되며, 이 경우는 비행기 날개 등에서 발생하는 프러터 진동(flutter vibration)이나 送水管의 진동과 같은 不安定振動의 경우가 된다. 그러므로 전진유형은 추력이 $T > 0$ 의 조건일 때만이 가능하게 되어 점성항력을 이겨내기에 충분히 크게 된다. 즉 $P > 0$ 이며, 따라서 동력은 운동을 유지 하기 위해 요구된다. 식(3)으로부터 양의 추력을 내기 위한 충분조건은 Δp 와 $\partial h / \partial x$ 가 어느 곳에서나 동일 부호가 되면 전진운동에서 흡인력 F_s 는 결코 음이 될 수 없다. 부등호(8)식과 식(5)에 따라 Δp 와 $\partial h / \partial t$ 는 역시 어느 곳에서나 동일한 부호를 갖을 수 없다. $\partial h / \partial x$ 와 $\partial h / \partial t$ 가 어느 곳에서나 반대 부호라 하면, h 는 꼬리를 향하여 전파되는 횡파를 나타내게 된다.

3. 추진운동

먼저 어류(Pisces)의 지느러미의 배열을 고찰하기 위해 그림 3과 같은 연어(salmon)를 예로 든다. 고기의 수직대칭면 내의 지느러미는 후단부의 꼬리지느러미(caudal fin)가 있고, 이는 통상적으로 추진에 가장 중요한 역할을 한다. 그리고 제일 윗부분에 부착된 하나 또는 그 이상의 등지느러미(dorsal fin)는 어류의 단면을 효과적으로 확장시키는 역할을 하며, 가장 아랫 부분에 부착된 것을 뒷지느러미(anal fin)라 부른다. 명백히 등지느러미와 배지느러미(ventral fin)는 요동(yawing)에 대해 안정성을 제공하기 위해 꼬리지느러미와 함께 작용한다. 이들은 또한 추진

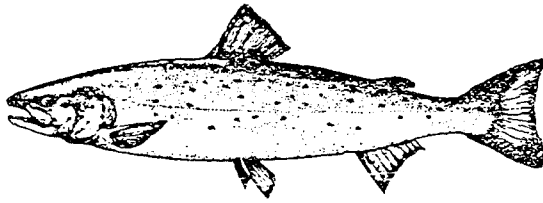


그림 3 연어

효율을 증진시키는 데도 공헌하게 된다. 대칭면 이외의 지느러미로는 연골어류 이상의 어류에서만 발달된 짝지느러미(paired fin)가 있으며, 앞쪽의 아가미 부근에 있는 지느러미는 가슴지느러미(pectoral fin)로 거의 항상 중요하다. 그리고 후부의 골반지느러미(pelvic fin)는 그리 중요하지 않다. 종방향 및 횡방향 요동에 대한 안정성과 제어가 이들 한쌍의 지느러미들의 가장 일반적인 역할이다(Harris, 1938).

유영운동의 특별한 경우인 운동의 시작 및 정지는 레이놀즈수가 작은 어류의 경우는 점성이 주가 되어, 추진이 소멸되면 곧 멈추게 되고, 추진운동이 시작되는 즉시 시간지연이 무시될 수 있을 정도로 빠른 시간에 최대 속도로 유영을 시작하게 된다. 대조적으로 레이놀즈수가 큰 어류의 경우 관성이 중요하게 되고, 정지로부터 어류가 가속하기 위해서는 큰 에너지가 필요하게 되고 역으로 정지시에는 상당한 거리를 미끄러진 후에야 멈추게 된다.

長魚形(Anguilliform)의 어류의 유영운동기구를 예를 들어 설명한다.

그림 4에 유영속도 U 로 진행하는 어류의 꼬리지느러미의 운동을 설명한다. 지느러미는 오른쪽까지 움직이고(왼쪽 그림) 다시 왼쪽으로 움직이며(오른쪽 그림), 횡파는 속도 V 에 도달한다. 이 반복하는 파동의 주기는 16τ 이고, 그림에서 1, 2, 3, ... 등의 수는 0점 이후의 시간 τ , 2τ , 3τ ...에서 지느러미의 後緣(trailing edge)과 앞부분의 위치를 나타낸다. 파는 거리가 $V\tau$ 인 앞부분에서 後緣까지 이동하기 위해 시간 τ 즉 주기의 $1/16$ 의 시간이 걸린다. 그리고 後緣 위치에서의 숫자는 앞부분의 숫자와 같고, 각각의 경우에 1씩 증가한다. 시간 5τ 에서 물을 가르고 나아가는 부분(water slice)은 시간 6τ 에서 후연에 의해 도달된

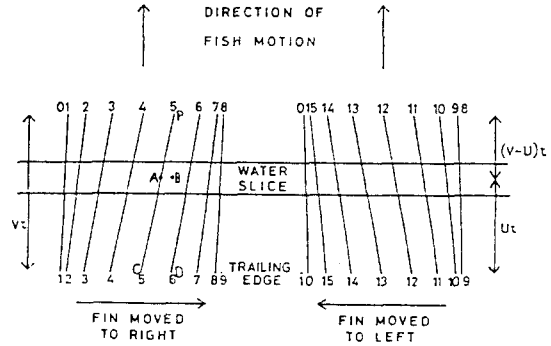


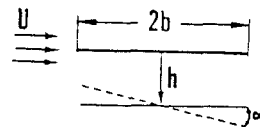
그림 4 꼬리지느러미의 운동

거리 $U\tau$ 에 의해 후연보다 앞서게 된다. 그러므로 이 시간 τ 동안 어류 포면에 의해 이동된 횡방향 거리는 AB 가 된다. 삼각형 $\triangle PCD$ 와 $\triangle PAB$ 는 닮은 꼴이므로 $AB/CD = PB/PD = (V-U)/V$ 의 관계가 성립한다. 역시 후연의 횡방향 속도가 W 일때 $CD = W\tau$ 가 된다. 그러므로 어류 포면이 물을 가르고 나아가도록 미는 속도 w 는

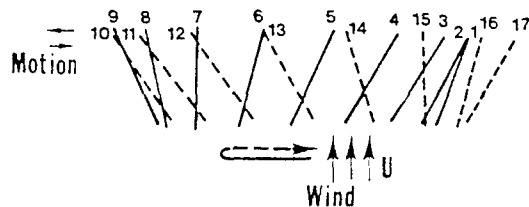
$$w = AB/\tau = (CD/2)(V-U)/V = W(V-U)/V < W$$

여기서 U 는 어류의 정미속도(net velocity)로서 長魚形魚類의 추진의 경우 약 $0.6V$ 이다.

그림 5는 평판날개의 모델과 불안정진동이 발생할 때의 진동형태를 나타내고 있다. 길이 $2b$ 의



(a) 평판 날개의 모델



(b) 불안정진동 형태

그림 5 平板날개의 불안정진동

평판이 유속 U 의 공기중에 놓여있을 때, 평판의 변위 u 및 迎角 α 로 하면 날개의 굽힘과 비틀림 flutter의 불안진동은 계의 감쇠계수의 비대각 성분의 부호와 위상차에 의해 계의 에너지가 발산하는 경우에 발생하게 된다. 이때의 위상각은 34° 이며, 진동양식을 그림(b)에 나타낸다. 어류의 꼬리지느러미의 운동과 유사함을 알 수 있다.

그림 6은 뱀장어(common eel)의 추진운동시의 진동형태(vibration mode)를 일정시간마다 촬영한 것이다. 그림에서 \cdot 과 x 는 파의 후진운동을 나타내기 위하여 최대 곡률의 위치를 보인 것이다. 그림으로부터 머리의 진폭은 적으나 꼬리로 감에 따라 점차 크게 되고 있음을 알 수 있다. 이로부터 꼬리부분이 주로 추력을 일으키는 것을 추측할 수 있다. 그림 7은 그림 6의 뱀장어 꼬리의 1/4부분의 진동형태를 모은 것이다. 그림 8은 축방향으로 동적인 하중이 가하여질 경우에 발생하는 座屈(buckling)의 좌굴후의 진동형태(mode)를 나타내고 있다. 그림 7과 8을 비교하면 고정단 부분에서의 차이를 제외하면 진동 형태가 매우 유사하다. 그림 9(a)는 뱀장어의 머리 부분으로부터 7/8의 위치에서 측정한 변위와 각 변위의 변동을 시간에 관해 그린 것이다. 그림으로부터 각변위와 변위의 위상차는 약 70° 로서 각 변위가 앞서고 있으며, 이 위상차는 머리부분으로 갈수록 적게 되고 있다. 다음으로 그림(b)는 그림 8의 좌굴이 발생하는 경우 보의 자유단의 그림(a)에 나타낸 모드에 있어서 각변위와 변위의 변동을 나타낸다. 이 경우 뱀장어 꼬리부분의 경우와 잘 일치하고 있고 위상차가 75° 이다. 이로부터 어류의 추진운동의 진동양식은 종방향으로 동하중이 작용하는 경우의 좌굴의 불안정진동 양식과 매우 유사함을 알 수 있다.

그림 10은 어류의 추진과 자려진동계에 있어서 에너지 변환 과정을 비교한 것이다. 어류와 같이 몸체의 진동에 의해 추진에의 에너지 변환을 수행하는 계를 능동계(active system)라 할 수 있으며, 비행기 날개에서 발생하는 굽힘-비틀림 flutter와 같은 자려진동계는 유체의 에너지를 진동에너지로 변환하게 되고 이를 수동계(passive system)라 할 수 있다. 이 수동계를 하중, 유체 또는 토오르크 등에 의한 에너지가 에너지원이 되

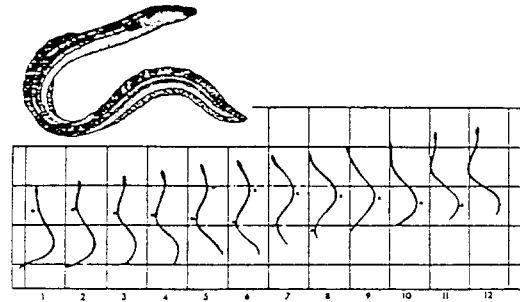


그림 6 뱀장어의 추진운동시의 진동형태

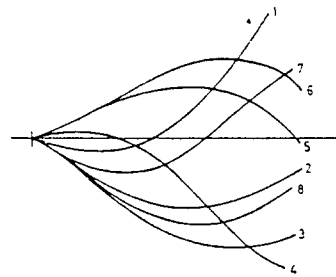


그림 7 뱀장어의 꼬리 부분의 진동형태

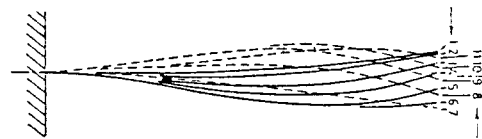
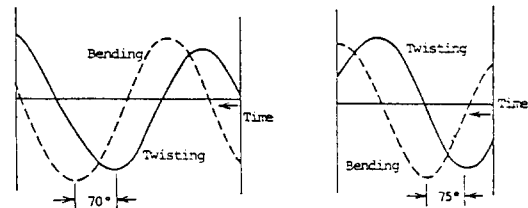


그림 8 보의 좌굴시의 불안정 진동형태



(a) 뱀장어의 경우 (b) 보의 좌굴의 경우

그림 9 뱀장어와 보의 진동변위와 각변위의 관계

며, 그 일부가 진동에너지로 변환하여 진동계에 작용하게 되어 자려진동을 일으키게 된다. 즉 에너지 변환은 계의 여진력(exciting force)이 진동체의 진동변위, 속도 또는 가속도의 관계로 되고 계를 진동시키는 것에 의해 이루어진다.

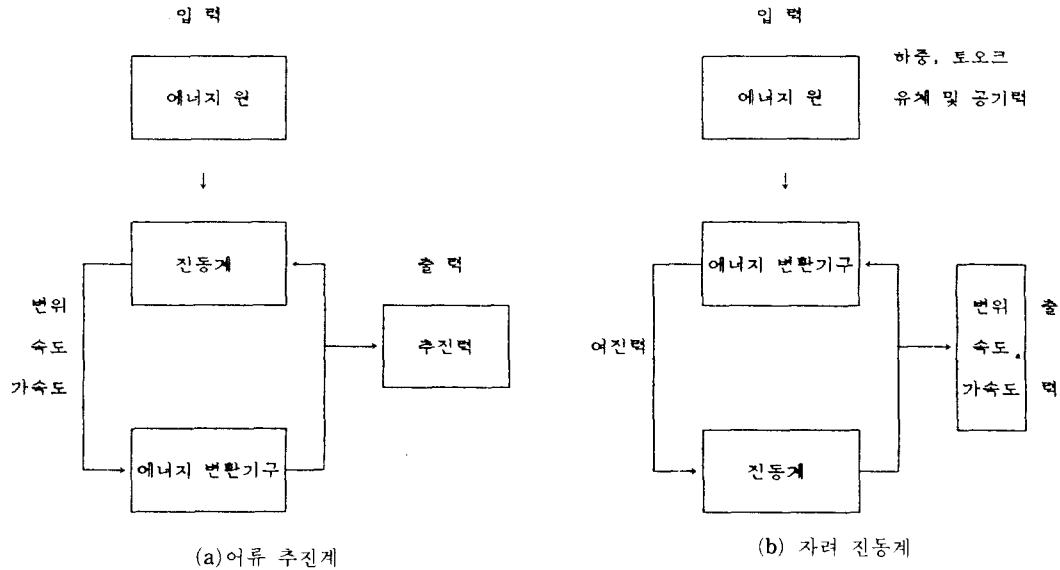


그림 10 에너지 변환 형식

4. 결 언

위에서와 같이 추진계와 자러진동계는 서로 역의 에너지 변화 기구를 갖고 있으며, 이들 에너지 변환기구가 어떠한 원리에 의해 수행되는가를 아는 것은 공학과 생물의 운동과의 관계를 명확히 할 수 있게 되며, 또한 운동기구, 원리 및 구조강도 등의 관점에서 공학적으로 응용이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) G. Taylor(1952): Proc. R. Soc, Ser. A, 214.
- 2) M.J. Lighthill(1969): Ann. Rev. Fluid Mech. 1.
- 3) T.Y. Wu, J(1971): Fluid Mech. 46(2).
- 4) T.Y. Wu(1972): J. Fluid Mech. 46(3).
- 5) 김용억 (1978) : 어류학 총론. 태화출판사.
- 6) T. Iwatsubo(1982): Trans. JSME. 48(430).