

선미노와 물고기 초승달형 꼬리지느러미의 왕복운동 사이의 유체역학적 상사성: 거북선의 6노트 속도의 검토

서 언

선미노는, 중국에서 일찍 현대에 출현한 후 (Deguchi, 2001) 한국과 일본에 전해져서, 동양 각 국에서 선박추진장치로 오래 사용된 민속문화재이다. 뿐만 아니라, 서양식 오어가 그에 작용하는 반작용력을 간헐적으로 이용하는 것에 반하여 선미노는 그에 작용하는 양력을 연속적으로 이용하는 장치라는 것을 생각하면, 선미노는 유체역학적 관점에서도 훌륭한 장치라고 할 수 있다.

필자는 전에 노 성능을 공학적으로 설명한 바 있지만(사쿠라이, 1999), 그때는 노 정상운동의 이론결과를 보인 것에 불과하다. 그러나 김효철 등 (1989)의 실험결과를 보면 노 왕복운동은 비정상운동임이 틀림없다.

한편 일본 세토나이가이 오시마에서 1999년 7월 10일에 개최된 제7회 고하야테이수와 오사카 가이유관 수족관에서 헤엄치는 상어를 보면서 노와 꼬리지느러미의 왕복운동들을 비교하면 둘이 서로 닮았다는 것을 알 수 있었다.

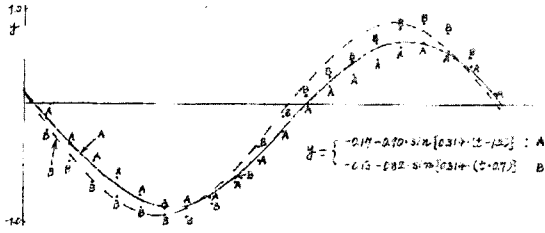
본 고에서는 위 김효철 등과 Azuma 등(1989)의 노 왕복운동 실험결과와 Chopra(1976)가 이론적으로 연구한 꼬리지느러미 대진폭 왕복운동을 비교해서, 위의 직관적인 관찰과 유체역학적 이론에 근거한 상사성을 보이고서, Chopra의 Fig. 2(a), (b), (c)를 우리 제 3, 4, 5도로 재 수록하여, 그들 도표를 노 성능을 계산할 때의 기본적 도표로 활용하고자 한다.

다음에는, 그들 도표를 이용해서, 거북선 6노트 속도(사쿠라이, 1999)를 재 검토하여, 노만을 추진장치로 쓰면 6노트 속도를 낼 수 없다는 사실을 보이고자 한다.

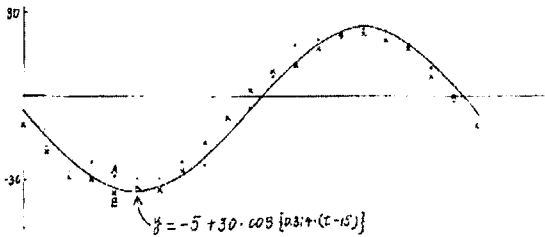
Yokota(1921)의 이론적 연구 이후의 일본 노의 연구들, Lighthill(1969)의 해설을 비롯한 물고기 초승달형 꼬리지느러미 왕복운동 연구들과 Chopra 이론을 부록에서 보이기로 한다.



사쿠라이 다케오



제1도: 수평면 투영으로 보이는 노날 궤적의 진행방향에 수직한 성분(A: case A, B: case B, y: 노날 궤적의 횡방향 성분)



제2도: 수평면 투영으로 보이는 노날 궤적에 대한 노날 받음각 (A: case A, B: case B, y: 노날 궤적에 대한 노날 받음각)

1. 노와 꼬리지느러미 왕복운동의 유체역학적 상사성

김효철 등의 실험적 연구에 의하면 노날 왕복운동 궤적의(Fig.8:case A, Fig.18:case B) 자유수면 투영은 팔자형을 이루고 이의 진행방향에 수직한 횡방향 성분은 제1도와 같이 정현함수로 근사될 수 있다.

그리고, 배 진행속도가 5~6노트 즉, 약 3m/s인 경우, 노 속도의 진행방향의 성분은 무시될 수 있다. Azuma 등(1989)도 논문의 식(59)로 노 궤적의 진행방향에 수직한 성분에 관하여 같은 사실을 밝히고 있다. 더욱이 자유수평면 투영으로 보이는 궤적에 대한 노날 받음각의 시간변화도 같이 정현함수로 근사될 수 있다.

여기서 감안해야 하는 것은, 노날 수중부분의 종횡비가 10 정도이고 각 수평면상의 국소적 2차원 흐름이 서로 독립적이라고 근사화될 수 있어, 프로펠러 연구에 사용되는 날개요소이론을 적용할 수 있다는 것이다. 그리고 문제를 간단히 하기 위하여 노 운동은 뒷날의 진행방향에 수직한 횡방향 이동과 뒷날을 중

심으로 하는 미소각 회전으로 구성된다고 가정한다. 그 가정으로 노 운동에 대응한 각 단면의 국소적 2차원 흐름은 다 똑같고 할 수 있다. 이 단순화로 추진력 발생기구의 최소한의 운동요소를 밝힌다. 거북선 노의 지지점 아래의 길이(김재근, 1992, p.87)가 12-14자인 것, 노 지지점의 흘수 위의 높이(사쿠라이, 1999, p.24, 제13도)가 5자 정도인 것 그리고 거북선 3면도(김재근, 1992, p.109, 제34, 35도)를 함께 감안하면 거북선 노의 수중부분이 지지점 이하 부분의 약 1/4인 것과 노 회전각이 기껏해야 ±20도인 것으로 생각된다. 그러므로 위의 가정은 좋은 근사라 할 수 있다. 그들을 종합하면, 일정속도로 진행하는 배에서 작동하는 노날 왕복운동을 날개요소이론적 관점에서 보면, 노날의 각 단면에서의 국소적 2차원 흐름은 서로 똑같아서, 노날 왕복운동은 배 진행방향에 수직한 성분만 있는 정현 진동이라고 할 수 있고, 또 그 궤적에 대한 노날 받음각의 시간변화도 같이 정현 진동이라고 할 수 있다.

한편 Chopra(1976)에서는, 꼬리지느러미 왕복운동 이른바 초승달형 꼬리의 carangiform mode가 날개요소이론과 같은 방법으로 연구되었다. 다시 말하면, 수중을 일정한 속도로 진행하는 물고기 꼬리지느러미가 진행방향에 수직하게 횡방향으로 정현 진동해서 그 궤적에 대한 받음각의 시간변화도 같이 정현함수로 표현할 수 있는 경우가 2차원 유동모델로 연구되었다. 곧 볼 수 있는 대로, 그 운동은 상기 노의 국소적 2차원 왕복운동과 일대일에 대응해서 서로 똑같다.

상기를 수학적으로 바꾸어 표현하면 양자의 왕복운동들은 서로 똑같은 경계조건을 가지고 있다. 양자의 기초방정식도, 2차원 완전유체의 기초방정식이므로 서로 똑같다. 그러므로 대응되는 유체운동들도 서로 똑같고, 상기 둘 유체운동들은 유체역학적으로 서로 닮은꼴이므로, 노 왕복운동 문제에 Chopra의 결과를 직접 응용할 수 있다.

위의 상사성에 의하여 Chopra의 결과를 직접으로 응용할 수 있도록, Chopra의 Figs.2(a), (b), (c)들을 우리 제 3, 4, 5 도로 재 수록한다.

.....▶ 선미노와 물고기 초승달형 꼬리지느러미의 왕복운동 사이의 유체역학적 유사성: 거북선의 6노트 속도의 검토

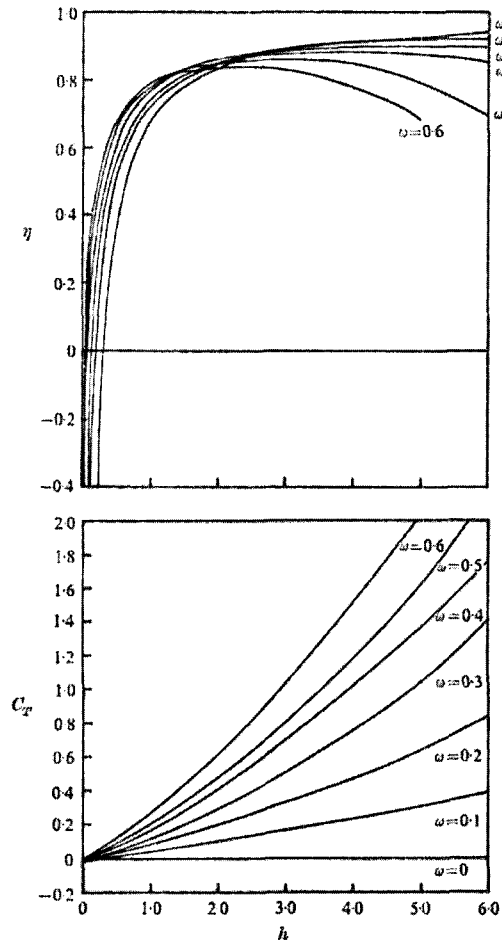
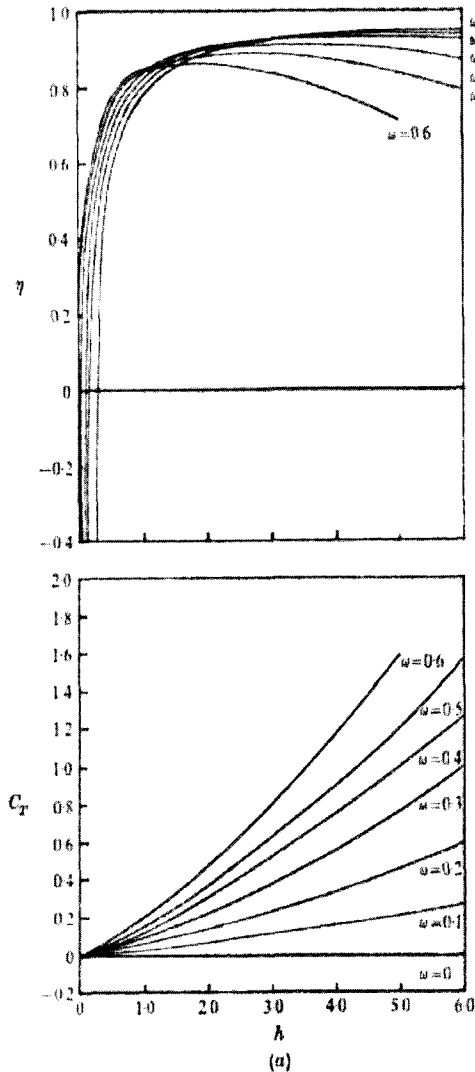


Fig. 2(b). For legend see p. 178.

제4도: Chopra(1976)의 Fig. 2(b)

Fig. 2. Thrust coefficient C_T and efficiency η predicted by two-dimensional finite amplitude aerofoil theory for values of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 and 0.6 of the reduced frequency plotted as functions of h ($=h_1/c$, i.e. the path amplitude scaled on tail's semichord length) for (a) $\alpha_0 = 0.16$ rad, (b) $\alpha_0 = 0.24$ rad, (c) $\alpha_0 = 0.32$ rad.

제3도: Chopra(1976)의 Fig. 2(a)

2. 거북선 6노트 속도의 재검토

거북선 좌우현에는 노가 10자루씩 배치되고 있기 때

문에(김재근, 1992, p.109, 제34, 35도) 그들간의 상호 작용을 고려해야 하지만 여기서는 상호작용을 무시해서 노 한 자루 경우의 결과를 응용하기로 한다. 그러면 위의 유사성으로 Chopra의 결과를 그대로 응용할 수 있다. 필자가 연구한 노 정상운동에서는(사쿠라이, 1999, p.20, 제9도) 노에 작용하는 양력에 한하면 노사이의 상호작용은 무시될 수 있다. 비정상운동에서도 같은 것이 성립한다고 가정할 수 있다.

다음에, Chopra의 결과를 노 문제에 응용할 때는, 노가 수면과 이루는 각도를 감안해서, 배 진행속도로 수

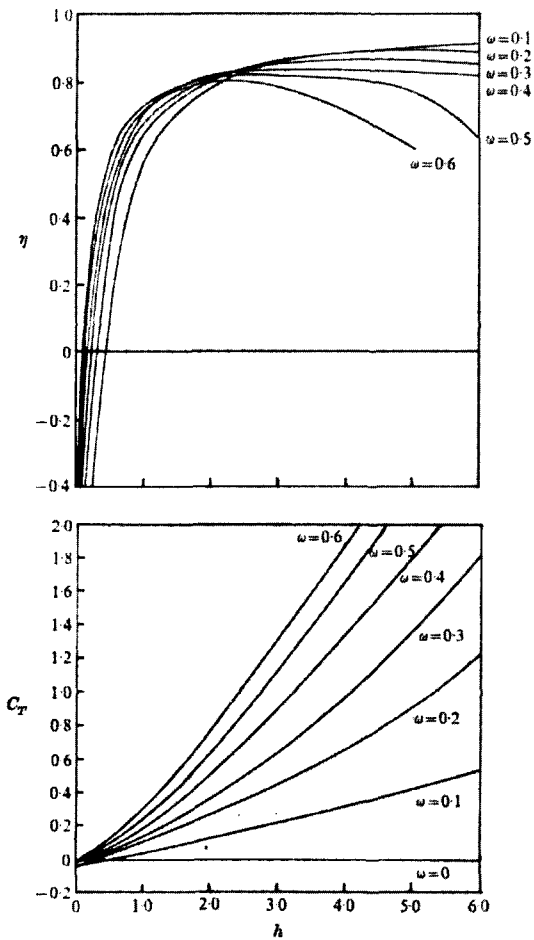


Fig. 2(c). For legend see p. 178.

제5도: Chopra(1976)의 Fig. 2(c)

평방향으로 노를 지나가는 유체 속도의 노에 수직한 성분을 Chopra의 주류속도로 생각해야 한다. 그러므로, 배의 저항과 노의 추진력 사이의 힘의 평형식은 아래와 같이 표현된다.

$$(1) \quad 0.5\rho V^2 S_S C_F = 20\rho (V_S \sin \alpha)^2 S_B C_T \sin \alpha$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, V_S 는 배의 속도, α 는 노가 수면과 이루는 각도, S_S 는 선체의 침수면적, S_B 는 노 수면 아래 양력면 부분의 (코드길이이 스펠을 곱한) 면적, C_F 와 C_T 는 각각 선체 저항계수와 노 추진계수, 그

리고 우변에 있는 20 이란 상수는 거북선 노 자루 수이다. 더욱이, 여기서는 추진계수에 관해서, Chopra의 식 (31)을 이용한다.

$$(2) \quad C_T = \overline{L_x} / (\rho c U^2)$$

여기서, $\overline{L_x}$ 와 c 는 각각 α 가 90도인 경우에 대응한 노 추진력과 주류속도이며, c 는 날개 코드길이이다.

식(1)을 C_T 로 풀고, 사쿠라이(1999, p.6, 제2표)를 이용해서 거북선이 6노트로 진행할 때에 대응한 V_S 와 S_S 등의 수치를 대입하고, α 를 30도, c 를 0.15m, 노수면 아래 부분의 중형비를 10, 노 왕복운동의 주기를 1초로 가정하면 힘의 평형식 (1)에 대응한 C_T 수치를 얻는다. 다음에 감소진동수(reduced frequency) $\omega = cV/(V_S \sin \alpha)$ 를 계산하여 (여기서 v 는 라디안 진동수), 제3, 4, 5 도들을 이용하면 그 C_T 에 대응하는 h 와 추진효율 η 를 얻는다. 그리고 η 정의에 관한 Chopra의 식 (22):

$$(3) \quad \eta = \overline{L_x} U / (L_x U + \overline{W_E})$$

를 감안하면 (여기서 우변 분모의 $\overline{W_E}$ 는 유체에 주는 운동에너지이므로, 분모는 노가 내야하는 총 에너지이다.) 노 1자루가 연속적으로 내야하는 마력은 아래의 식으로 얻을 수 있다.

$$(4) \quad P_W = \rho (V_S \sin \alpha)^3 S_B C_T / (735.5 \eta)$$

여기서 분모의 상수는 W(Watt)로 표현된 동력 수치를 마력으로 변환하는 상수이다. 위의 방법으로 거북선이 6노트로 향해 할 때 노 1자루가 내야 하는 마력을 계산하면 표1과 같다. 단, 여기서 $S_S = 0.225 \text{ m}^2$, $\alpha = 30^\circ$, $\omega = 0.6$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $V_S = 3.09 \text{ m/s}$ 를 계산을 하였다. $S_S C_F \times 10$ 표1로 분명한 것은 거북선의 6노트 속도에 대응한 노 1자루씩 마력이 약 0.7마력정도 있지만, 노를 짓는 노꾼 수 4로 나누면, 노꾼 1사람이 연속적으로 낼 수 있는 0.1마력보다 확실히 크다. 그러므로, 노만을 추진장치로 쓰면, 거북선은 6노트 속

표 5. 거북선 6노트 항행에 필요한 노 1자루의 마력

| | 김 호 | | 조 호 | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 목선 | 철갑선 | 목선 | 철갑선 |
| $S_S C_F \times 10$ | 5.51 | 5.86 | 5.09 | 5.30 |
| C_T | 0.492 | 0.523 | 0.454 | 0.473 |
| η | (a) | 0.86 | 0.86 | 0.86 |
| | (b) | 0.82 | 0.83 | 0.82 |
| | (c) | 0.78 | 0.78 | 0.77 |
| P_w | (a) | 0.64 | 0.68 | 0.59 |
| | (b) | 0.67 | 0.70 | 0.61 |
| | (c) | 0.70 | 0.74 | 0.65 |

표 6. 거북선 5노트 항행에 필요한 노 1자루의 마력

| | 김 호 | | 조 호 | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 목선 | 철갑선 | 목선 | 철갑선 |
| $S_S C_F \times 10$ | 5.55 | 5.86 | 5.13 | 5.34 |
| C_T | 0.496 | 0.523 | 0.458 | 0.476 |
| η | (a) | 0.86 | 0.86 | 0.86 |
| | (b) | 0.82 | 0.83 | 0.82 |
| | (c) | 0.78 | 0.78 | 0.77 |
| P_w | (a) | 0.37 | 0.39 | 0.34 |
| | (b) | 0.38 | 0.40 | 0.36 |
| | (c) | 0.40 | 0.43 | 0.38 |

도로 순항 할 수 없다고 생각된다. 여기서 조성도(1963)의 이순신장군의 당포파왜병장으로 고증한 거북선 6노트 속도를 감안하면, 그 고증에 대응한 항행에서는 노 뿐 만 아니라 돛도 썼다고 추측된다.

여기서 거북선이 노만으로 추진될 때의 최고속도를 알아보기 위하여 거북선이 5노트($V_S = 2.57$ m/s)로 진행할 때 노 1자루가 내야 하는 마력을 6노트 경우와 같이 계산한 결과를 제2표에 나타낸다.

여기에 이용한 수치들은 표3에 정리되었다.

표2는 거북선이 5노트 속도로 항행할 때 노 1자루씩 마력이 약 0.4마력정도 이고, 그를 노를 짓는 노꾼 수 4로 나누면, 노꾼 1사람이 연속적으로 낼 수 있는 0.1마력과 똑같다. 그러므로 노만 쓸 때의 거북선 최고속

표 7. 거북선 5노트 항행에 대응되는 변수값

| | 김 호 | | 조 호 | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 목선 | 철갑선 | 목선 | 철갑선 |
| $Re \cdot 10^{-7}$ | 5.04 | 5.12 | 5.17 | 5.23 |
| Fr | 0.170 | 0.169 | 0.168 | 0.168 |
| $C_F \cdot 10^3$ | 2.31 | 2.30 | 2.30 | 2.29 |
| C_P | 0.32 | 0.36 | 0.37 | 0.40 |
| $\nabla 10^3/L^3$ | 9.46 | 10.15 | 7.65 | 8.15 |
| B/d | 5.18 | 4.80 | 4.72 | 4.39 |
| $C_R \cdot 10^3$ | 0.7 | 0.73 | 0.6 | 0.63 |
| $\Delta C_{FR} \cdot 10^3$ | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| $C_F \cdot 10^3$ | 3.51 | 3.53 | 3.4 | 3.42 |
| $S_S \cdot 10^{-2}$ | 1.58 | 1.66 | 1.51 | 1.56 |

도는 5노트라고 할 수 있다.

감사의 말

필자가 거북선을 공부하고 있는 동안 친절하신 지도와 따뜻하고 두터운 정을 주셨던 한국선생님께, 특히, 현재민선생님, 장석선생님, 이기표선생님, 고 김재근선생님, 황종홀선생님께 진심으로 감사드립니다. 일본에서의 노 연구에 관해서 가르쳐 주셨던 고노모토 겐사쿠선생님과 다카기 겐선생님, 선체저항을 계산하는 방법을 가르쳐주셨던 하나와 도모오선생님, 물고기 꼬리지느러미에 관한 논문을 가르쳐주셨던 간베 슈토무선생님, 수군 레이스 비디오를 볼 수 있도록 해주셨던 텔레비 에히메와 미야쿠보 마치야쿠바, 영상 처리로 도와주셨던 다케다 히데노리선생님 부처, 아카마 료선생님, 곤도 지에씨와 구라시나 겐고씨, 상어 해염 촬영을 허가해 주셨던 가이유관 수족관계 진심으로 감사드립니다. 애석한 일이지만 노모토 겐사쿠선생님은 2002년 7월20일에 갑작스럽게 별세하셨습니다. 여기서 노모토선생님의 명복을 충심으로 빕니다. 더욱이 필자의 서투른 한국어원고를 정정해주어 읽기 쉽게 해주신 이창섭선생님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 김재근, 1992, “거북선,” 정우사
- 김효철, 이봉구, 임창규, 1989, “선미노의 추력발생기구 규명을 위한 실험적 연구,” 대한조선학회지 26/3, 13-24
- 사쿠라이 다케오, 1999, “거북선 6노트 속도에 관한 공학적인 소고,” 대한조선학회 1999년도 추계 학술대회 논문집, 1-25, 1999.11.11-11.12
- 사쿠라이 다케오, 2001, “선미 노의 추력발생기구 규명을 위한 실험적 연구”에 관한 노트, 대한조선학회지 38/3, 88-92
- 조성도, 1963 “귀선고,” 한국해군사관학교 연구보고 2, 15-44
- Azuma, A., Furuta, T., Iuchi, M. & Watanabe, I., 1989, “Hydrodynamic Analysis of the Sweeping of a ‘Ro’ - an Oriental Scull,” J. of Ship Res., 33/1, 47-62
- Chopra, M.G., 1974, “Hydromechanics of lunate-tail swimming propulsion,” J. Fluid Mech. 64/2, 375-391
- Chopra, M.G., 1976, “Large amplitude lunate-tail theory of fish locomotion,” J. Fluid Mech. 74/1, 161-182
- Chopra, M.G. and Kambe, T., 1977, “Hydromechanics of lunate-tail swimming propulsion. Part 2,” J. Fluid Mech. 79/1, 49-69
- Deguchi Akiko, 2001, “통나무배,” Hoseidaigaku Shuppankai, p.61, (일본말)
- Eiffel, M., “La resistance de l’ air et l’ aviation,” 1911, p.232
- Hujimoto Busuke, 1934, “노의 이야기,” Kaji, 13/9, 350-352, (일본말)
- Ikehata Mitsuhsa & Takusagawa Zensuke, 1992, “노 추진성능에 관한 수조실험,” Nihon Zosengakkai Ronbunshu, 172, 287-297, (일본말)
- Ikehata Mitsuhsa, 1995, “노 추진성능에 관한 날개요소이론적 계산,” Nihon Zosengakkai Ronbunshu, 178, 93-99, (일본말)
- Karman, Th.von and Burgers, J.M., 1935, “General Aerodynamic Theory, Perfect Fluids,” p. 308, Editor in chief, Durand, W.E., “Aerodynamic Theory, Vol.II,” Julius Springer
- Karman, Th.von and Sears, W.R., 1938, “Airfoil theory for non-uniform motion,” J. Aero.Sci., 5/10, 379-390
- Lamb, H., 1932, “Hydrodynamics 6th ed.,” Cambridge
- Lighthill, M.J., 1969, “Hydromechanics of aquatic animal propulsion,” Ann. Rev. Fluid Mech. 1, 413-446
- Lighthill, M.J., 1970, “Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency,” J. Fluid Mech. 44/2, 265-301
- Nisiyama Tetsuo, 1956, “일본선 노의 유체역학적 연구,” Seibu Zosen Kyokai-kaiho, 12, 30-38, (일본말)
- Sears, W.R., 1938, “A contribution to the airfoil theory for non-uniform motion,” 5th Int. Congr. Appl. Mech., Cambridge, Mass, 483-487
- Wagner, H., 1925, “Ueber die Entstehung des dynamischer Auftrieb von Tragfluegeln,” ZAMM 5, 17-35
- Yokota Seinen, 1921, “Action of Ro,” Zosenkyokai-kaiho, 28, 49-56

부 록

1 날개 왕복운동 이론, 특히, Chopra 이론 개관

Wagner(1925)가 2차원 날개의 비정상운동을 연구해서 후류 보오텍스 유동의 중요성을 감안한 방법으로 날개에 작동하는 양력을 계산한 후, 항공공학 분야에서 많은 논문이 발표되고 있다. 특히, Karman/Sears(1938)는 2차원 날개 비정상운동을 충격량이론으로 연구한 바 있으며, 이는 수중에서 헤엄치는 물고기 꼬리지느러미 왕복운동 연구로도 확장 가능하다.

Lighthill(1969)은 수중동물 추진을 종합적으로 연구해서, 특히 상어 또는 돌고래 등 수중동물 이른바 초승달형 꼬리의 carangiform mode를 자세히 논의해서, 꼬리지느러미 왕복운동으로 배출되는 보오텍스 열 사이에 유도되는 제트 같은 유체운동의 반작용으로 추진력이 발생하는 것을 보였다. 그와 같은 작동원리는 Hujimoto(1934)가 논의했던 노 작동원리와 똑같다.

Lighthill(1970)은 위의 논문 내용을 유체역학적으로 더 자세히 논해서, 날개 미소 진동을 Prandtl 가속도 포텐셜로 연구하여, 날개에 작용하는 추진력은 날개 표면 위 압력 적분과 날개 앞날에 작용하는 흡입력의 벡터합으로 구해지는 합력의 진행방향 성분으로 이루어지는 것을 보였으며, 추진력계수와 추진효율을 결정하는 파라미터들 중에서 날개 진동수가 중요한 하나인 것을 분명히 했다.

여기서는 본문에서 말한 바와 같이, 추진효율 결과를 직접적으로 이용할 목적으로, Chopra(1976)의 연구를 더 자세히 소개하기로 한다. Chopra는 정지된 무한히 넓은 수중에서 일정속도로 진행하면서 진행 방향에 수직하고 날개 코드길이의 수배에 이르는 진폭으로 단진동하는 2차원 평판익이 그 정현파 궤적에 대한 받음각도 미소한 범위로 같은 주기로 단진동하는 경우를 연구했다. 그리고 그 날개로 유기되는 추력을, Karman

and Sears 방법과 같이, 충격량이론으로 계산했고 추력계수와 추진효율을 표시했다. 이 때 받음각이 미소하기 때문에 날개가 유기하는 변동은 미소하다고 가정할 수 있다.

상기 계산에서는 유동을 구성하는 보오텍스 시스템의 보존법칙으로 적분방정식을 이끌어야 하지만, 그 목적을 위하여 먼저 물리면에 있는 평판날개를 등각사상으로 원으로 사상해서 그 원에 관한 경상원리를 이용해서 반류 보오텍스에 의해 날개면에 유기되는 유동을 구해야한다. 그렇게 얻는 적분방정식의 커널이 날개 뒷날에서 평방근 특이성을 갖기 때문에, 그 적분방정식을 풀 때는 그 특이성을 제거해야 한다. 이와 같이 Chopra의 계산은 복잡한 수식으로 구성되고 있지만 거기서 응용된 충격량이론의 기본적 생각과 Lighthill이 밝힌 흡입력은 간단히 설명할 수 있기 때문에 여기서 해설한다.

첫째로 Lamb(1932, 10-11)은 충격량으로 유기되는 유체운동을 다음과 같은 기초 방정식으로 근사적으로 표현할 수 있다고 했다.

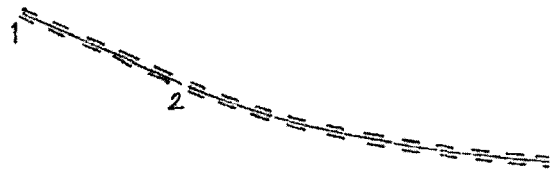
$$(A1) \quad \rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x}$$

여기서는 x-방향은 배의 진행방향을 가리키며, x, t, ρ, p, u는 각각 보통의 의미를 가진다. Chopra의 경우 같은 연속적 왕복운동을 미소한 충격량의 변화로 구성된다고 생각하면 식 (A1)은 Chopra 문제에도 응용할 수 있다. 위의 식을 전공간으로 적분하고 부분적분하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$(A2) \quad \frac{\partial u}{\partial t} \iint \rho u dx dy = - \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) n_x ds$$

여기서 우변 적분은 앞날(LE)에서 뒷날(TE)까지 날개면을 따라 수행된다. 그리고 하첨자 u, l, 그리고 n_x, ds는 각각 날개 윗면과 아랫면 그리고 날개 법선벡터의 x-성분과 날개를 따르는 요소길이다.

이 식은 날개에 작용하는 압력 적분이 유체 충격량의 시간미분으로 표현된다는 것을 나타낸다. 이 것은 상기 충격량이론의 원리이다.



제A1도: 식 (A3)을 이룰 때의 적분공간 (쇄선외부의 공간, 날개면과 반류는 제외) (1: 날개 앞날, 2: 날개 뒷날)

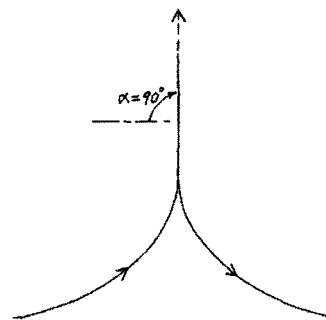
둘째로 Lamb(1932, 214-215)에 있는 식을 참고해서 $y(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)$ 를 날개와 반류를 제외하는 전공간에서 적분하고 (제A1도) 적분공간에서 도처에서 와동이 제로인 것을 감안하면,

$$(A3) \quad \iint u dx = - \int \gamma y ds, \quad \gamma = q_u - q_l$$

를 얻는다. 여기서 적분은 제 A1도의 날개 앞날에서 반류의 하류 끝까지 날개면과 반류면을 따라 실행한다. 그리고 γ 와 q 는 각각 날개와 반류에서의 보오텍스와 속도벡터의 날개면과 반류면방향의 성분이다. 이는 보오텍스 유동 시스템 충격량을 나타내며, 상기 식 (A2)와 함께 충격량이론의 기본적 관계식이 된다.

셋째로 Lighthill의 흡입력을 필자가 처음 이해한 것은, 1952년에 도쿄대학 4학년 유체역학 강의에서 이마 이 이사오선생님이 2차원 평판의 양력의 받음각이 90도 경우에 관해서 주셨던 때이었다. 잘 알려진 바와 같이 뒷날에서 Kutta-Joukowski 조건을 충족시키는 평판

$$(A5) \quad L_{\alpha=90^\circ} = \pi \rho U^2 c$$



제A2도: 받음각 90도인 Kutta-Joukowski 조건을 충족시키는 평판의

익에 작용하는 양력은 하기와 같다.

$$(A4) \quad L = \pi \rho U^2 c \sin \alpha$$

여기서 ρ , U , c , α 는 각각 물의 밀도, 날개를 지나가는 주류 속도, 날개 코드길이와 받음각이다. 이 식에서 받음각을 90도로 하면 하기와 같다.

제 A2도로 분명한 바와 같이 $L_{\alpha=90^\circ}$ 는 압력 적분이 아니라 날개 앞날에 작용하는 흡입력으로만 설명될 수 있다. 더욱이 평판익에 관한 아래 관계식

$$(A6) \quad u_{z-\frac{c}{2}} \sim -U\sqrt{c}\left(x+\frac{c}{2}\right)^{-1/2}$$

에서 (여기서 z 는 물리면을 표현하는 복소수.)

$$(A7) \quad K = U\sqrt{c}$$

라고 하면 상기 관계들은 흡입력에 관한 Chopra의 설명에 직접적으로 대응된다.

2. 일본에서의 노 연구

오사카대학의 고노모토겐사쿠 선생님과 다카기겐 선생님은 친절하시게 일본에서의 노 연구에 관해서 가르쳐 주셨다. 여기서는 그들 연구를 연대순으로 개설한다.

Yokota(1921)는 노 작동을 이론적으로 연구해서 Eiffel(1911)실험결과를 응용해서 노 추진효율을 0.6이라고 평가했다.

Hujimoto(1934)는 노가 왕복운동 방향을 바꾸는 좌우현쪽 극한점들에서 각각 보오텍스가 배출되는 것을 지적했다. 그와 같은 것은 날개 비정상운동에 관해서 Karman/Burgers(1935)와 물고기 꼬리지느러미 왕복운동에 관해서 Lighthill(1969)도 지적했다. 뿐만 아니라 그 보오텍스들이 Karman 보오텍스열과 같은 보오

텍스열을 형성하는 것, 보오텍스 회전방향이 Karman 보오텍스열과 정반대인 것, 그리고 보오텍스열 사이의 유체는 하류방향으로 밀리고 그 반작용으로 노 추진력이 발생하는 것을 논의했다. 또 Voith-Schneider 프로펠러가 노와 똑같은 원리로 작용한다는 것도 보였다.

Nisiyama(1956)는 Hujimoto가 보인 노와 Voith-Schneider 프로펠러의 역학적 유사성을 재확인해서, 날개요소이론으로 Voith-Schneider 프로펠러를 연구하는 방법에 따라서 노 성능을 연구해서 노 추진효율을 0.7 이하라고 추산한 바 있다.

Azuma 등(1989)은 헬리콥터 회전익을 연구했던 날개요소이론적 방법인 단순 운동량이론 그리고 국소순환법을 이용해서 노 성능 특히 추진효율을 구해서 약 0.4 이라는 값을 얻었다. 그 결과는 Azuma등이 실선 자항시험으로 실험적으로 얻었던 값과 좋은 일치를 나타냈다.

Ikehata/Takusagawa(1992)는 선미노 성능을 모형선 자항시험으로 실험적으로 연구해서, 여러 가지 케이스에 대응한 추진효율을, 노가 수중에 들어가는 각도, 노 날 받음각, 진폭 그리고 왕복운동 주기의 조합에 따라서 0.16부터 0.75까지 변화하는 것을 분명히 했다.

Ikehata(1995)는 날개요소이론을 사용해서 상기 논문에서 취급된 케이스에 대응하는 추진효율을 이론적으로 계산하여, 효율을 기껏해야 0.4 정도밖에 얻을 수 없어, 위의 실험결과를 입증할 수 없음을 보였다. 그 차이의 원인을 검토하여, 계산에 사용된 날개요소이론에서는 Hujimoto가 지적했던 보오텍스열 효과가 포함되지 않았으므로 원래 비정상운동인 노 왕복운동을 그대로 취급해야 한다고 지적하였다. ♪