

## 인력 수중익선의 정적 종안정성 평가

최정규\*, 김형태†\*

충남대학교 선박해양공학과\*

Evaluation of Longitudinal Static Stability of Human Powered Hydrofoil Boat

Jung-Kyu Choi\* and Hyung-Tae Kim†\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University\*

### Abstract

In this paper, longitudinal static stability is investigated, which is an essential requirement for the safety and the performance of the human powered hydrofoil boat (HPHB). In case a disturbance changes the trim angle of the boat, the derivative of the moment about the center of gravity must be negative in order to make the boat to be stable. The equation to evaluate the longitudinal static stability of the EPISODE, a HPHB of Chungnam National University with a height controlling system(HCS) is derived. From the derivative it is confirmed that a longitudinal and vertical position of the center of gravity is important for a HPHB. The range of a trim angle while the boat is foil-born was found with a HCS under the condition of mechanical restraint. And it is confirmed that the longitudinal static stability is satisfied for EPISODE in certain range of a trim angle. It is also shown that the longitudinal static stability and a range of the trim angle can be determined from the principal dimensions of a HPHB, therefore, it can be applied from the stage of the conceptual design of HPHB.

\*Keywords: Human powered hydrofoil boat(인력 수중익선), Longitudinal static stability(정적 종안정성), Height Control System(HCS, 높이조절 장치), Center of gravity(무게중심)

### 1. 서론

1999년 이래로 개최된 인력선 축제가 지난해로 10주년을 맞이하였고, 그 동안 인력선에 대한

연구와 개발을 통해 많은 발전을 이루어 왔다. 2006년을 기점으로 인력선 축제에 참가하는 대부분의 팀들이 인력선 동력전달장치에 대한 기계적 문제를 해결하면서 속도향상과 안정된 조종에 관한 연구가 시작되었고, 경기기록도 많은 향상을 보여주고 있다(Kim and Choi 2008). 특히, 인력

접수일: 2009년 6월 24일, 승인일: 2009년 8월 5일

† 교신저자: h-tkim@cnu.ac.kr, 042-821-6629

선의 속도를 향상시키기 위한 노력으로 인력 수중익선에 대한 관심이 높아지면서 인력선 축제에 참가하는 인력수중익선 비율이 매년 높아지고 있고, 대부분이 선수와 선미에 전몰형 날개를 부착한 2점 지지 수중익선을 모델로 삼고 있다. Min et al.(2004)은 4인승 인력선의 선수·미에 각각 각도를 고정된 수중익을 부착하여 안정된 익주를 보여주었고, Ha et al.(2003)은 2인승 인력선의 선수·미에 수중익을 부착하되 선수 날개의 각도를 변화시키기 위한 높이조절장치를 부착하여 익주에 성공한 바 있다. 그러나 아직까지 인력수중익선의 구조상 날개의 위치에 비해 무게중심이 높은 것에 따른 익주 안정성 특히, 가장 첫 번째로 고려해야 할 종안정성에 대한 검토가 이루어지지 않고 있다. 또한 초기 설계 시에 무게중심 위치 및 시스템 배치 등의 주요 치수로부터 정적 종안정성을 검토하기 위한 자료가 부족하며, 이에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 본 논문에서는 인력수중익선의 정적 종안정성에 대해 논의하고 충남대학교 인력수중익선인 EPISODE를 대상으로 검토하였다.

2. 정적 종안정성 방정식

2.1 모델 및 좌표계

정적 종안정성을 검토하기 위한 대상은 자전거 형태로 동력을 전달하여 무게중심이 높고, 선·수미에 전몰형 날개를 부착한 2점지지 수중익선으로서 선수쪽 날개 각도를 변화시키기 위한 높이조절장치(Height Control System, 이하 HCS)가 있는 충남대학교 인력 수중익선인 EPISODE이며, Fig. 1에 모식도와 종안정성 방정식의 유도를 위한 힘, 모멘트 관계를 도시하였다. 여기서  $L$ 은 양력,  $D$ 는 항력,  $M$ 은 스트럿과 날개의 연결부에서의 모멘트,  $\alpha$ 는 교란에 의한 선박 트림각,  $\theta$ 는 초기 받음각,  $CG$ 는 무게중심이며, 하첨자  $m$ 은 선미쪽에 부착된 주익(main wing),  $a$ 는 선수쪽에 부착된 보조익(assistant wing),  $s$ 는 수면을 따르는 플레이트(plate)를 나타낸다. 좌표계는 우수 직교좌표계이며, 무게중심을 원점으로 선수방향을 양의  $x$ , 연직하방을 양의  $z$ 축으로 하였다. 본 인력수중익선은 주익의 경우 프레임과 고정되어 있어 받음각의 변화량이 트림 변화량과 같고, 보조익의 경우

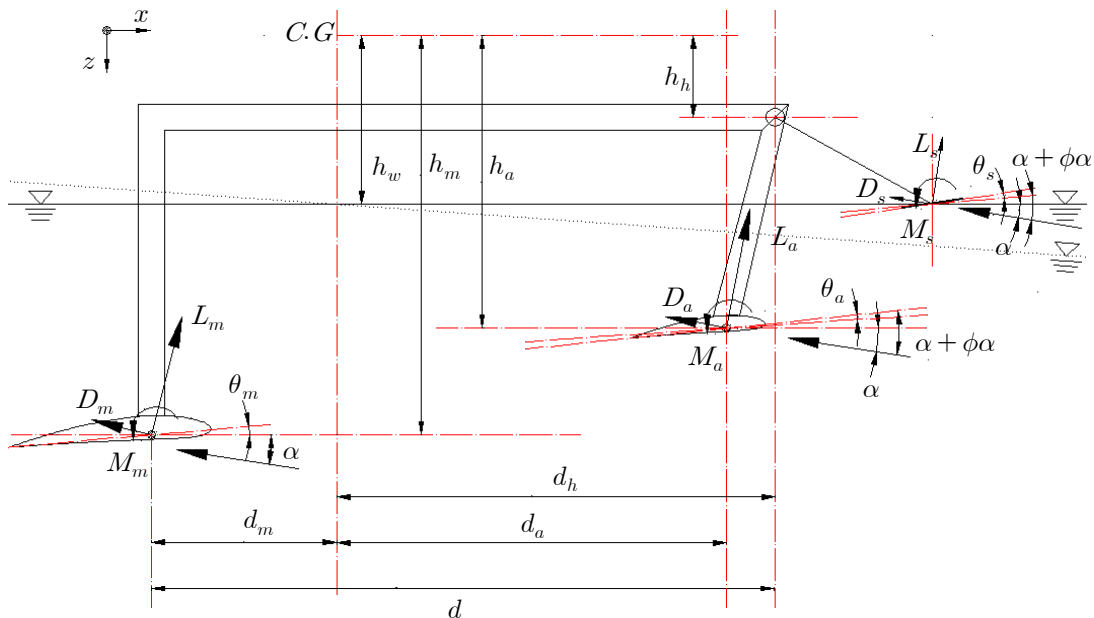


Fig. 1 Force and moment for human powered hydrofoil boat

선박 트림변화에 따라 반응각을 변화시켜 무게중심에 대해 모멘트 평형을 유지할 수 있는 HCS가 고안되어 있다. 이 HCS는 힌지를 중심으로 보조익과 직접 연결되어 항상 수면을 따르는 플레이트에 의해 선수 높이변화에 따라 자동으로 보조익 반응각이 변화하게 되며, 힌지와 보조익 사이의 수직거리가 커서 보조익의 각 변화에 따라 힌지에 대한 보조익의 모멘트 팔(arm)의 변화가 커지게 된다. 따라서 모멘트 평형을 이루기 위해서는 플레이트의 모멘트 팔이나 면적이 커져야하므로 저항측면에서 손해를 감수해야하는 단점이 있으나 기계적으로 구현하기 쉽고, 구조적으로 안정한 장점이 있다.

2.2 종안정성 일반

안정성이란, 선박이 항주 중에 어떤 교란에 의해 트림에 변화가 생겼을 경우, 트림각을 변화시켜 정상 상태로 돌아가려는 성질을 말하는데, 이것은 복원성이라고도 한다. 안정성은 정적 안정성(static stability)과 동적 안정성(dynamic stability) 두 가지로 구분되는데, 정적 안정성은 교란을 주었을 때 반응하는 초기의 경향을 뜻하고, 동적 안정성은 시간에 따른 안정성을 의미하며, 피칭(pitching)에 대한 안정성을 종안정성(longitudinal stability)이라 한다. 이것은 수중익선에서 중요한 요소인데, Fig. 2에 보인바와 같이 종안정성을 확보하지 못한 경우 과도한 선미트림이나 선수트림이 발생하여 항주자세가 불안정하거나 전복될 가능성이 많으므로 설계 시에 이를 반드시 고려해야 한다.



Fig. 2 Unstable human powered hydrofoil boat

Fig. 3의 그래프는 종안정성에 대한 피칭모멘트 계수( $C_{M_{cg}}$ )와 트림각( $\alpha$ )의 관계를 나타내고 있다. 여기서  $C_{M_{cg}}$ 는 인력 수중익선에서 무게중심에 대

한 모멘트의 합을 무차원화한 것으로서  $C_{M_{cg}}$ 가 0인 점을 평형점이라 하며, 안정된 익주 중의 트림각을 의미한다. 익주 중 교란에 의해 트림각이 변화하였을 때, 종안정성을 만족하기 위해서는 트림각이 증가할수록 무게중심에 대한 모멘트가 점차 감소하여야 하며, 반대로 트림각이 감소할수록 모멘트는 증가하여야 한다.

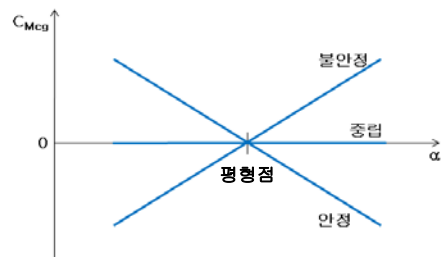


Fig. 3 Longitudinal stability

교란에 의한 트림각 변화에 따라 모멘트의 변화가 없으면 중립 상태라고하며, 이 경우에는 모멘트의 변화가 없다. 따라서 정적 종안정성을 확보하기 위한 조건은 그래프가 음(-)의 기울기를 가져야하며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dC_{M_{cg}}}{d\alpha} < 0 \tag{1}$$

2.3 정적 종안정성

Fig. 1로부터 교란에 의한 선박 트림각을  $\alpha$ 라 하면 무게중심에 대한 모멘트는 식 (2)와 같다.

$$M_{cg} = M_a + M_m + d_a L_a \cos \alpha_e + h_a L_a \sin \alpha_e + d_a D_a \sin \alpha_e - h_a D_a \cos \alpha_e - L_m \cos \alpha \cdot d_m + L_m \sin \alpha \cdot h_m - D_m \sin \alpha \cdot d_m - D_m \cos \alpha \cdot h_m \tag{2}$$

여기서  $\alpha_e$ 은 보조익의 유효반응각이다. 선박 트림각  $\alpha$ 에 따른 보조익의 반응각변화량을  $\alpha_t$ 라 하고  $\alpha$ 에 대해 선형적으로 변화한다고 가정하면  $\alpha_e$ 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_e = \alpha + (d\alpha_t/d\alpha)\alpha = \alpha + \phi\alpha, \quad \phi = d\alpha_t/d\alpha \tag{3}$$

날개의 받음각이 작다고 가정하면  $\alpha \ll 1 \Rightarrow \cos \alpha \approx 1, \sin \alpha \approx \alpha$  이 되고, 모멘트를 일으키는 성분 중 양력이 항력보다 지배적( $L \gg D$ )이며,  $M_a, M_m$ 은 스트럿과 날개가 접하는 지점에서 날개 유체력에 의해 발생하는 모멘트로서 작은 값이므로 무시하면, 식 (2)는 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$M_{cy} = L_a d_a + L_a \alpha_e h_a - L_m d_m + L_m \alpha h_m \quad (4)$$

식 (4)의 양변을 다음의 식 (5)를 이용하여 무차원화 한다.  $S_m$ 은 주익의 면적,  $S_a$ 는 보조익의 면적이며, 면적비를  $R_a = S_a/S_m$ 로 정의하면,

$$C_M = \frac{M}{1/2 \rho U^2 S_m d}, \quad \frac{L_m}{1/2 \rho U^2 S_m d} = \frac{1}{d} C_{Lm}$$

$$\frac{L_a}{1/2 \rho U^2 S_m d} = \frac{1/2 \rho U^2 S_a C_{La}}{1/2 \rho U^2 S_m d} = R_a \frac{1}{d} C_{La} \quad (5)$$

$$C_{M_{cy}} = R_a C_{La} \left( \frac{d_a}{d} + \alpha_e \frac{h_a}{d} \right) - C_{Lm} \left( \frac{d_m}{d} - \alpha \frac{h_m}{d} \right) \quad (6)$$

식 (6)의 첫째항은 보조익에 의한 피칭모멘트이며, 무게중심이 높아서 트림변화에 따른 보조익의 무

계중심에 대한 모멘트 양의 변화와 HCS 작동에 의한 모멘트 양의 변화가 포함되어 있으며, 두 번째항의 경우 주익이 프레임에 고정되어 있으므로 트림변화에 대한 영향만 포함되어 있다. 식 (6)의 양변을  $\alpha$ 에 대해 미분을 취하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial C_{M_{cy}}}{\partial \alpha} = R_a \frac{\partial C_{La}}{\partial \alpha} \left( \frac{d_a}{d} + \alpha_e \frac{h_a}{d} \right) + R_a C_{La} \frac{h_a}{d} \frac{\partial \alpha_e}{\partial \alpha}$$

$$- \frac{\partial C_{Lm}}{\partial \alpha} \left( \frac{d_m}{d} - \alpha \frac{h_m}{d} \right) + C_{Lm} \frac{h_m}{d} \quad (7)$$

식 (7)은 인력수중익선의 정적 종안정성 방정식으로서 0보다 작아야 종안정성을 확보할 수 있게 된다. 따라서 종안정성을 만족하는 트림각 변화에 따른 보조익의 각 변화량을 찾아야 한다. 본 인력수중익선의 경우 HCS를 적용하였으므로 HCS의 작동에 따른 기계적 구속조건을 적용하였다.

- 구속조건 1

Fig. 4에 보는 바와 같이 보조익은 힌지를 통해 플레이트에 직접 연결되어 있으며, 플레이트는 항상 수면에 존재하여야 한다. 작동순서는 그림에서 ①②③의 순서를 따르는데, 트림각 변화에 따른

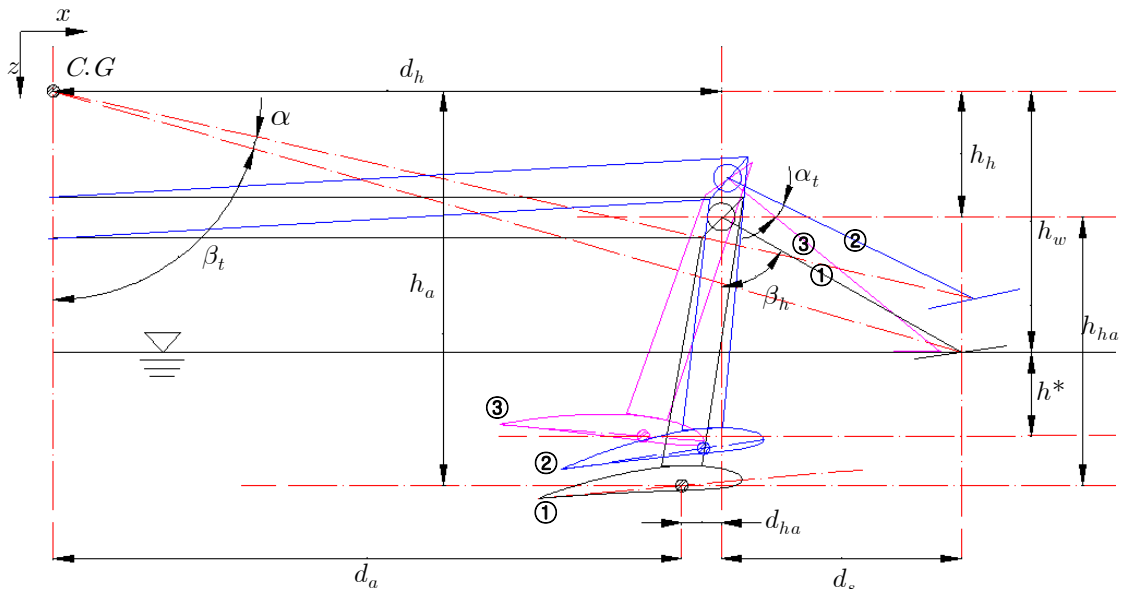


Fig. 4 The sketch of Height Controlling System(HCS)

플레이트의 높이가 변화하면, 보조익의 힌지에 대한 모멘트에 의해 플레이트가 수면위로 돌아오게 된다. 이것은 항상 동시에 이루어지나 편의상 트림변화와 힌지에 대한 변화를 각각 분해하여 도시하였다. 트림각에 의한 플레이트의 높이변화와 힌지를 중심으로 회전한 각도에 의한 높이변화가 항상 같아야하므로 식 (3)을 이용하여 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$-(d_h + d_s)\alpha = d_s \phi \alpha, \quad \frac{d\alpha_t}{d\alpha} = -\frac{d_h + d_s}{d_s}$$

$$\alpha_e = \alpha - \frac{d_h + d_s}{d_s} \alpha = -\frac{d_h}{d_s} \alpha \quad (8)$$

두께가 얇은 날개단면의 양력계수는 일반적으로  $C_L(\alpha) = C_L(0) + 2\pi\alpha$ 를 적용할 수 있으므로(Lee 1999) 주익, 보조익의 양력계수는 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$C_{La}(\alpha_e) = C_{La}(0) + 2\pi\alpha_e$$

$$C_{Lm}(\alpha) = C_{Lm}(0) + 2\pi\alpha \quad (9)$$

식 (8), (9)를 (7)에 대입하여 식 (10)을 얻는다.

$$\frac{\partial C_{M_{ca}}}{\partial \alpha} = \left\{ R_a \left( 2\pi\alpha \frac{d_h}{d_s} - C_{La} \right) \frac{d_h}{d_s} \frac{h_a}{d} + (2\pi\alpha + C_{Lm}) \frac{h_m}{d} \right\}$$

$$-2\pi \left( R_a \frac{d_h}{d_s} \frac{d_a}{d} + \frac{d_m}{d} \right) < 0 \quad (10)$$

식 (10)에서 좌변의 첫째항은 보조익 및 주익과 무게중심간의 수직거리에 따른 모멘트 변화율이며, 둘째항은 수평거리에 따른 변화율이다. 수평방향 거리는 양력분포에 따른 것이며, 좌변은 동력 전달 등의 구조적 문제에 의해 결정된다. 좌변이 0보다 작아야하므로 무게중심의 높이가 낮을수록 정적 종안정성을 만족하는데 유리하다.

**- 구속조건 2**

힌지에서는 항상 모멘트 평형을 이루는데 만약 Fig. 5에 도시한 바와 같이 힌지축보다 보조익이 선수쪽으로 넘어가게 되면( $L_a'$ ) 모멘트 평형이 깨

져 불안정하게 된다. 따라서 보조익은 힌지축보다 항상 선미쪽에 있어야 하며( $L_a$ ), 식 (8)을 이용하고, Fig. 4로부터 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$d_{ha} - \alpha_e h_{ha} > 0, \quad \frac{d_{ha}}{h_{ha}} > \alpha_e = -\frac{d_h}{d_s} \alpha$$

$$-\frac{d_{ha}}{h_{ha}} \frac{d_s}{d_h} < \alpha_{\min} \quad (11)$$

식 (11)의 좌변은 HCS의 작동을 위한 최소 트림 각이고, 힌지와 보조익의 수평거리와 수직거리가 중요한 요소인데,  $d_{ha}$ 는 항상 양(+)의 수이어야 하며,  $h_{ha}$ 는 작을수록,  $d_{ha}$ 는 클수록 더 넓은 음(-)의 트림범위에서 안정성을 만족할 수 있다. 그러나  $d_{ha}$ 가 커지게 되면 힌지에 대한 보조익의 모멘트가 커져서 모멘트 평형을 유지하기 위해  $d_s$ 나 플레이트의 면적을 크게 해야 하는데 전자는 구조적으로 문제가 있을 수 있으며, 후자는 저항이 커질 수 있으므로 운항조건에 맞게 설계해야 한다.

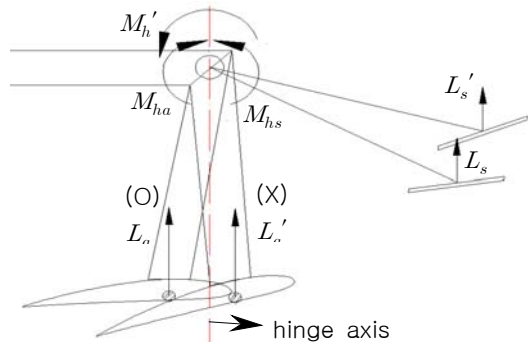


Fig. 5 Force and moment at the hinge point

**- 구속조건 3**

일반 항공기의 경우 주익에서 무게를 지지하며 종안정성을 위한 피칭모멘트 발생을 위해 꼬리부근에 날개를 두고 있는데, 본 인력수중익선에서는 주익과 보조익 모두 피칭모멘트 및 무게를 지지하기 위한 양력을 발생하며, 양력분포가 선미쪽에 많이 분포되어 선미에 주익과 선수에 보조익이 있는 카나드(canard)형과 유사하다. 전통형 날개를 사용하기 때문에 양력을 발생하기 위해서는 날개가 수중에 존재해야한다. 따라서 날개가 양력을 내기 위한 최소한의 몰수 깊이( $h^*$ )가 존재하며,

그 높이 이상 수면 가까이 위치할 수 없으므로 트림각에 따른 보조익의 높이에 대해 다음의 식 (12)와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $h_w$ 는 무게중심과 수면 사이의 수직거리이다(Fig. 1).

$$h_a - h_w - d_a \alpha > h^*, \quad \frac{h_a - h_w - h^*}{d_a} > \alpha_{\max} \quad (12)$$

결국 구속조건 2, 3으로부터 식 (13)과 같은 인력 수중익선의 기계적 유효트림각 범위를 정할 수 있다. 이것은 인력수중익선의 익주 시 HCS의 작동에 의한 기계적인 조건으로부터 도출되었으므로 최소한 이 범위 안에서는 종안정성을 만족해야 한다. 또한, 실제 작동이 가능하도록 기계적으로 구현이 전제되어야 한다.

$$-\frac{d_{ha}}{h_{ha}} \frac{d_s}{d_h} < \alpha_{te} < \frac{h_a - h_w - h^*}{d_a} \quad (13)$$

식 (10)과 식 (13)으로부터 인력수중익선의 정적 종안정성을 만족하기 위해서는 무게중심의 수평방향 위치( $d_a, d_m, d_h$ )와 높이( $h_a, h_m, h_w$ ), 그리고 HCS에서 힌지에 대한 보조익과 플레이트 사이의 거리가 중요한 요소이며, 기계적 구속조건으로부터 작동 가능한 트림각 범위가 존재함을 살펴보았다. 이러한 내용을 토대로 본 충남대학교 인력수중익선인 EPISODE를 대상으로 검토하였다.

### 3. 인력수중익선에의 적용

#### 3.1 대상선박

Table 1 Variables for longi. stability investigation

중량(kg)	160	$\theta_m, \theta_s$ (deg)	3°	V(m/s)	6
$S_m$ (m <sup>2</sup> )	0.21	$\theta_a$ (deg)	0	$h_w$ (m)	0.7
$S_a$ (m <sup>2</sup> )	0.04	$d_m$ (m)	0.2	$h_m$ (m)	1.306
$R_a$	0.19	$d_a$ (m)	1.6	$h_a$ (m)	1.006
$C_{Lm0}$	0.4	$d_s$ (m)	0.8	$h_h$ (m)	0.6
$C_{La0}$	0.25	$d_h$ (m)	1.65	$h^*$ (m)	0.1

본 연구의 대상인 EPISODE의 종안정성 검토를 위해 Fig. 1에서의 주요 치수들을 Table 1에 나타내었다. 날개면적은 양력분포와 설계속도로부터 얻었고, 보조익은 NACA2412, 주익은 NACA4412 날개단면이며, 양력계수는 2차원 날개단면의 실험 결과(Abbott and Doenhoff 1959)를 참고하였다.

#### 3.2 종안정성 검토

Table 2에 주어진 데이터를 토대로 본 인력수중익선의 익주 중 유효 트림각은 식 (13)에 치수를 대입하면 식 (14)와 같다.

$$-3.4^\circ < \alpha_{te} < 7.4^\circ \quad (14)$$

식 (6)과 (10)로부터 무게중심에 대한 모멘트 계수와 그 기울기를 Fig. 6에 나타내었다. 최대 9.7°까지 트림각에 따른 모멘트의 기울기가 음(-)의 값을 가지고 있고, 유효 트림각 범위 내에서 정적 종안정성을 만족하고 있음을 볼 수 있다. 최소 유효트림각 이상에서도 정적 종안정성을 만족하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 트림각이 음(-)일 때 플레이트에 의한 보조익의 받음각이 계속 증가함을 뜻한다. 그러나 Fig. 5에 보였듯이 보조익이 힌지축보다 선수에 위치하는 트림각 즉, 최소 유효트림각보다 작아지게 되면 힌지에서의 모멘트 평형이 깨져 안정성을 만족한다고 볼 수 없다. 식 (4)의 유효받음각 범위가 비교적 좁은 범

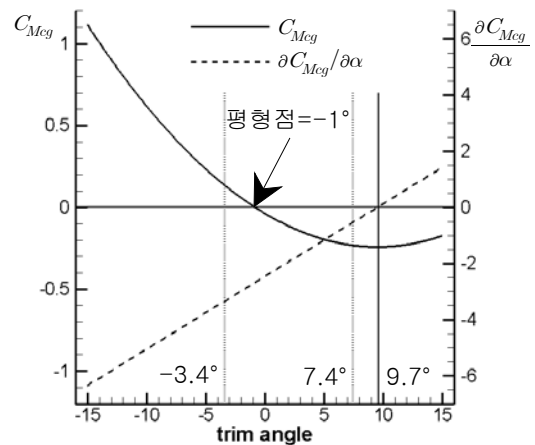


Fig. 6 Moment coefficient according to trim angle

위라 할 수 있는데, 이는 본 인력수중익선이 대부분 내수면 등의 교란이 적은 상황에서 익주하므로 종안정성을 확보하면서도 저항을 고려하기 위해 한지와 보조익간의 수평거리( $d_{ha}$ )를 작게 하였기 때문이며, 바다와 같이 파도에 의한 교란이 심한 곳에서는 보다 넓은 범위에서 만족할 수 있도록 주요 치수를 정해 주어야 한다.

$C_{My}$ 가 0인 점은 모멘트 평형점으로서 평형상태에서 익주함을 의미하고 그때의 트림각이  $-1^\circ$ 로서 안정된 익주시 선수트림의 자세가 됨을 알 수 있으며, 실제 익주 상태를 Fig. 7에 나타내었다.



Fig. 7 Trial test

#### 4. 결론

본 논문에서는 인력수중익선의 설계에 있어서 중요한 요소인 정적 종안정성에 대해 논의하고 본 인력수중익선 EPISODE를 대상으로 검토하였다. 인력수중익선의 경우 무게중심 위치가 수중익으로부터 높기 때문에 정적 종안정성에 영향을 주므로 이를 고려하여 정적 종안정성 방정식을 유도하였으며, HCS를 도입하고 HCS의 기계적 구속조건으로부터 정적 종안정성을 만족할 수 있는 트림각 범위에 대해 살펴보았다. 정적 종안정성의 경우, 인력 수중익선의 중량과 설계속도로부터 결정 가능한 양력분포, 무게중심의 수평방향 위치와 부양 높이, 동력전달 등을 고려한 무게중심의 수직방향 높이 등 초기 설계단계에서 결정할 수 있는 주요 치수로부터 추정 가능하며, 본 연구 대상인 인력 수중익선 EPISODE에 적용하여 인력 수중익선의 주요치수로부터 정적 종안정성의 만족여부를 확인

할 수 있었다. 따라서 인력 수중익선의 초기 설계 단계에서 주요치수의 결정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 조종성과도 연관이 깊고, 인력 수중익선의 길이방향으로 2점지지되는 것에 따른 횡방향 불안정성에 대한 논의도 필요할 것이다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A.E., 1959, "THEORY OF WING SECTION," Dover Publications, INC. New York.
- Ha, S.H., Kim, J.S., Kim, H.C., 2003, "Design for Human Powered Vessel "Poseria 2003" and Optimization of its Hydrofoil," Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp. 386-391.
- Lee, S.J., 1999, "Fluid Mechanics Learning As History," Inter Vision, Seoul, Korea.
- Kim, H.T., and Choi, J.K., 2008, "Human and Solar Powered Vessel Festival 2008 - 10th Anniversary," Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 2, pp. 64-75.
- Min, K.S., Kang, S.H. and Lee, K.B., 2004, "Design of 4-Person Human Powered Vessel," Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp. 702-708.



< 최 정 규 > < 김 형 태 >