

## 수중함의 함미타 효율추정을 위한 수학모델링에 관한 연구

신용구<sup>†\*</sup>, 임경식\*, 이승건\*\*

국방과학연구소\*  
부산대학교 조선해양공학과\*\*

### A Research on the Mathematical Modeling for the Estimation of Underwater Vehicle's Tail Plane Efficiency

Yong-Ku Shin<sup>†\*</sup>, Kyung-Sik Lim\* and Seung-Keon Lee\*\*

Agency for Defense Development\*  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University\*\*

#### Abstract

The ratio between the hydrodynamic force produced by a submarine tail appendage and that acting on an equivalent appendage in isolation is regarded as tail plane efficiency. It is an important parameter in numerical simulations because it has a significant effect on predicted stability, controllability, and maneuverability. The paper introduces some recent work to improve the reliability and general applicability of current methods of tail plane efficiency estimation.

※Keywords: Tail plane(함미타), Hull-appendage interaction(선체-부가물 간섭영향), Stability(안정성), Maneuverability(조종성), Validation(검증)

#### 1. 서론

1950년대 및 60년대에 수행된 USS Albacore에 대한 실험 이후 현대의 잠수함 함미부는 작은 aspect ratio를 갖는 제어판이 추진기 앞쪽으로 설치되는 형태를 가지며(Fig. 1 참조), 함미부에서

의 유체유동은 추진기 영향, 두꺼운 경계층, 상부에서의 보텍스 박리 및 선체-부가물의 상호작용으로 매우 복잡하다. 수중함 선체에 부가물이 부착되면 부가물이 단독으로 존재할 때와 비교해서 선체와의 상호작용에 의한 간섭힘이 발생하며, 이 간섭힘은 특히 제어판의 aspect ratio가 작은 수중함의 경우 상대적으로 더욱 크게 나타나게 되며, 수중함의 조종안정성에 지대한 영향을 미친다.

초기설계, 시스템적인 설계 및 파라미터적 안전

접수일: 2003년 11월 5일, 승인일: 2005년 3월 4일

†주저자, E-mail: ykshin@add.re.kr

Tel : 055-540-6126

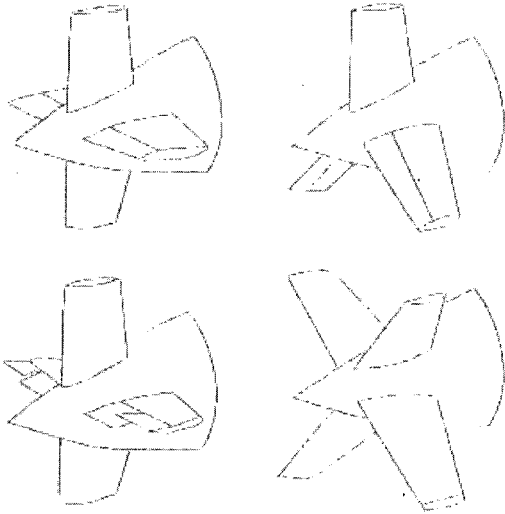


Fig. 1 Tail plane arrangements.

성 검토 등에 대한 적용에서는 빠른 수치 시뮬레이션이 필요하며 상대적으로 단순한 모델링이 요구된다. 모형시험을 통한 반경험적인 유체동역학 모델을 적용할 수 있으나 실선 데이터가 필요하므로 모델링시 일반성이 결여되고 실선확장에 어려움이 있다.

본 논문에서는 단독제어판에 작용하는 양력에 비해 함미부에 부착된 제어판에서의 양력 비율인 함미타효(tail plane efficiency)를 모델링하여 보다 신뢰성있고 일반적용이 가능한 방법을 제시하고자 한다.

수중함은 조종성을 최대화하기 위해 종종 안정성 마진에 근접하도록 설계되므로 함미타효 추정의 불확실성은 안정/불안정 판정에 큰 영향을 미친다.

잠수함의 선체-부가물 상호작용에 대한 유체역학적인 연구는 Spreiter(1950), Dempsey (1977) 및 Roddy(1990)에 의해 수행되었으며, 국내에서도 관련 이론 및 실험적인 연구가 공인영 등(1992) 및 김선영 등(2000)에 의해 수행되었다.

2. 반경험적인 접근방법

평판에 부착된 단독제어판에 작용하는 힘은 김선영과 Mori(1995)과 같이 난류유동 계산을 통해 도출할 수 있으나 실험식으로 여러 경우에 좋은 결과를 주는 Whicker and Fehlner(1958) 식을 이용하여 다음의 식으로 근사될 수 있다.

$$C_L = \left[ \frac{a_0 a_e}{\cos \Omega \sqrt{\frac{a_e^2}{\cos^4 \Omega} + 4} + \frac{57.3 a_0}{\pi}} \right] \alpha + \frac{C_{Dc}}{a_e} \left( \frac{\alpha}{57.3} \right)^2 \quad (1)$$

$$C_D = C_{d0} + \frac{C_L^2}{\pi a_e e} \quad (2)$$

$$C_{m_{c/4}} = \left[ 0.25 - \left( \frac{\partial C_m}{\partial C_L} \right)_{C_L=0} \right] \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{C_L=0} \alpha - \frac{1}{2} \frac{C_{Dc}}{a_e} \left( \frac{\alpha}{57.3} \right)^2 \quad (3)$$

위에서,

$$\left( \frac{\partial C_m}{\partial C_L} \right)_{C_L=0} = \frac{1}{2} - \frac{2\pi \sqrt{a_e^2 + 4} + 2}{57.3 a_0 4(a_e + 2)}$$

- $a_0 = 0.09869$
- $a_e$  : Effective Aspect Ratio
- $\Omega$  : Sweep back angle of quarter-chord line
- $C_{Dc}$  : Cross flow Drag Coefficient  
(0.8 for squared tip)
- $\alpha$  : Angle of Attack (deg)
- $C_{d0}$  : Minimum Section Drag Coefficient  
(0.065 for NACA 0015 Section)
- $C_L$  : Lift Coefficient
- $e$  : Oswald Efficiency Factor (0.90)

작은 받음각 또는 조타각에서 양력 증가량  $L_{WB}$  는 Pitts et al.(1957)와 같이 몸체로 인한 제어판의 양력증가  $L_{W(B)}$  와 제어판의 영향에 의한 몸체의 양력증가  $L_{B(W)}$  두개의 성분으로 고려한다.

$$L_{WB} = L_{W(B)} + L_{B(W)} \quad (4)$$

단독제어판의 양력  $L_W$  와 연관되어 선체-부가물의 간섭에서 선체의 경사에 의한 효율( $K_{WB}$ )과 제어판의 조타에 의한 효율( $k_{WB}$ )은 다음과 같이 표시되며, 본 논문에서는 전자에 대하여만 고려한다

$$K_{WB} = \left( \frac{dL_{WB}}{d\alpha} \right)_{\alpha=0} \cdot \left( \frac{dL_W}{d\alpha} \right)_{\alpha=0}^{-1} = \left( \frac{dL_{WB}}{dL_W} \right)_0 \quad (5)$$

$$k_{WB} = K_{W(B)} = \left( \frac{dL_{W(B)}}{d\delta} \right)_{\delta=0} \cdot \left( \frac{dL_W}{d\delta} \right)_{\delta=0}^{-1} = \left( \frac{dL_{W(B)}}{dL_W} \right)_0 \quad (6)$$

위에서  $\alpha$  는 받음각이며  $\delta$  는 조타각이다.

$K_{WB}$  는  $\alpha=0$  인 몸체에 대해 제어판이 각  $\delta$  만큼 움직였을 경우에 대한 함미타효이다.

함미에 부착된 제어판 타효 추정 관련해서는 많은 실험적인 연구가 있었지만 파라미터 변화에 따른 체계적인 데이터가 부족하며, 점성영향과 레이놀즈수에 따른 척도효과 문제는 충분히 설명되지 않았으므로 사용시 신중해야 한다.

잠수함의  $K_{WB}$  를 추정하기 위해 널리 쓰이는 반경험적인 방법은 Dempsey(1977)의 방법으로서 세장체와 함미제어판 계열에 대한 예인수조 시험결과이다. 몸체 레이놀즈수는  $1.4 \cdot 10^7$  (appendage chord 에 대한 레이놀즈수는  $0.3 \sim 1.0 \cdot 10^6$ )이며, turbulence tripping 은 적용하지 않았다. Dempsey 의 실험결과는  $b/r_M$  ( $b$  : appendage semi span,  $r_M$  : 선체 최대반경)의 함수로 curve fitting 하여 다음과 같이 표시된다.

$$K_{WB} = 1 - \frac{0.2556}{\left( \frac{b}{r_M} \right)^2} \sqrt{\left( \frac{b}{r_M} \right)^2 - 0.1612} - 0.6366 \sin^{-1} \left( \frac{0.4015}{\frac{b}{r_M}} \right) \quad (7)$$

for  $0.4015 < \frac{b}{r_M}$

그러나 Dempsey 의 실험결과는 제어판의 span 과 aspect ratio 만의 변수로만 주어지므로 함미부 형상이나 레이놀즈수의 변화들은 고려되지 않았으며,  $K_{WB}$  값은 실선의 경우보다 작은 값을

주고 있으므로 실제적인 적용에 어려움이 있다.

### 3. 함미타효 추정을 위한 이론 모델링

함미타효의 이론적 모델링을 위해 Spreiter (1950)의 방법을 수정 적용하였다. Spreiter 는 원통형의 세장체에 부착된 삼각익(triangular wing)의 상호 간섭힘을 계산하는 이론식을 제시하고 있는데 이를 잠수함 함미타에 적용하는 방안을 본 논문에서 제시하고자 한다.

제어판의 힘은 보통 면적, aspect ratio, span 길이 등으로 특징지을 수 있으므로 사다리꼴 제어판을 면적과 aspect ratio, span 길이가 같은 등가의 삼각익으로 대체하여 Spreiter 의 방법을 잠수함 함미타에 적용하였다. 즉, 원추각  $\gamma$  에 설치된 사다리꼴 제어판을 Fig. 2(b)와 같이  $b$  와  $r_{te}$  는 동일하며 음영면적의 aspect ratio 도 동일하도록 변환하면 등가 제어판에 대한 타효의 각 성분은 식(8), (9)로 표시할 수 있다.

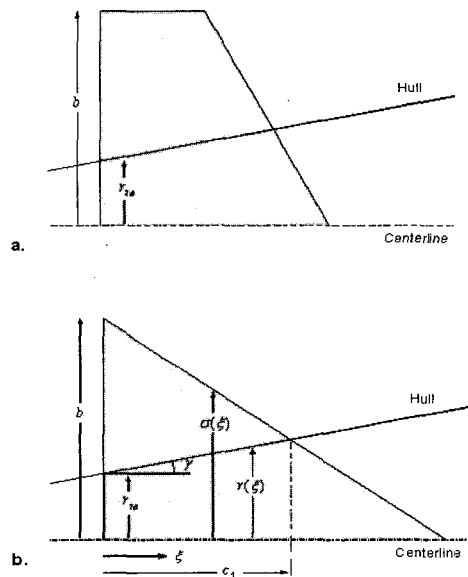


Fig. 2 Geometry for the modified Spreiter method : (a) a trapezoidal fin and (b) its triangular equivalent.

$$\frac{d}{d\xi} \left( \frac{dL_{WB}}{dL_w} \right)_0 = -2 \frac{\sigma c_1}{b^2} \left[ \frac{d\sigma}{d\xi} \left( 1 - \left( \frac{r}{\sigma} \right)^4 \right) + 2 \frac{dr}{d\xi} \left( \frac{r}{\sigma} \right)^3 + A \right] + 2 \frac{r c_1}{b^2} \frac{dr}{d\xi} \quad (8)$$

$$A = \frac{1}{\pi} \frac{dr}{d\xi} \left[ 1 - \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2 - \frac{\left( 1 + \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2 \right)}{2 \left( \frac{r}{\sigma} \right)} \sin^{-1} \left( \frac{2 \left( \frac{r}{\sigma} \right)}{1 + \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2} \right) \right]$$

$$\frac{d}{d\xi} \left( \frac{dL_{W(B)}}{dL_w} \right)_0 = -2 \frac{\sigma c_1}{b^2} \left[ \frac{d\sigma}{d\xi} \left( 1 - \left( \frac{r}{\sigma} \right)^4 \right) + 2 \frac{dr}{d\xi} \left( \frac{r}{\sigma} \right)^3 + B \right] \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{\pi} \left[ -2 \frac{dr}{d\xi} \left( 1 + \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2 \right) \left( \frac{r}{\sigma} \right) - \frac{d\sigma}{d\xi} \left( 1 - \left( \frac{r}{\sigma} \right)^4 \right) \right] \sin^{-1} \left( \frac{2 \left( \frac{r}{\sigma} \right)}{1 + \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2} \right)$$

위에서  $\xi$  는 그림의  $c_1$  에 의해 무차원화된 값이다.

식(8), (9)로부터 발음각 및 조타각에 따른 함미타효는 식(10, 11)에 의해 계산될 수 있다.

$$K_{WB} = \int_0^1 \frac{d}{d\xi} \left( \frac{dL_{WB}}{dL_w} \right)_0 d\xi \quad (10)$$

$$k_{WB} = \int_0^1 \frac{d}{d\xi} \left( \frac{dL_{W(B)}}{dL_w} \right)_0 d\xi \quad (11)$$

이상에서 Spreiter 방법에 따라 원추형 함미에 부착된 사다리꼴 제어판에 대한 함미타효를 구하기 위한 수식을 전개하였다. 그러나 Spreiter 의 방법은 포텐셜이론에 근거하여 유도되었으므로 실제 함미 유동에 적용하기 위해서는 점성에 의한 영향을 고려해 주어야 한다. 이를 위해 함미 경계층 두께를 고려하여 Fig. 3 과 같이 함미형상을 수정 적용하였다. 즉, 추진기가 부착된 함미의 경우에는 배재두께(displacement thickness)  $\delta^*$  만큼 확장된 몸체에 대해 위의 전개식을 적용하였다.

잠수함 몸체의 배재두께는 계산의 편의상 같은 횡단면적을 가지는 등가의 회전체에 대한 값을 사용한다. Fig. 4 는 50m 급 잠수함과 등가인

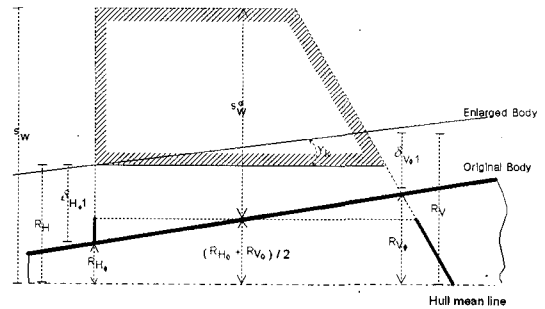


Fig. 3 Modified hull shape including viscous effect

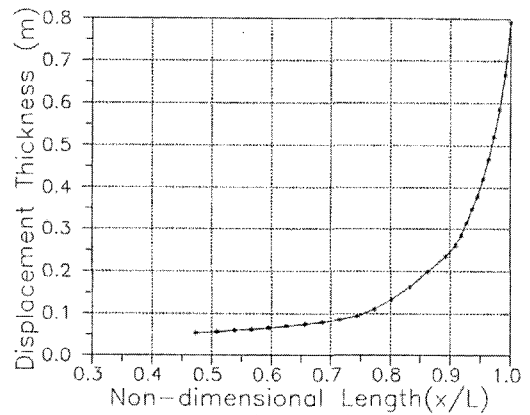


Fig. 4 Displacement thickness of the body of revolution (L=55m, L/D=9)

회전체에 대해  $\kappa - \varepsilon$  난류 모델을 사용하여 배재두께를 계산한 결과이다.

이로써 함미타를 설계할 경우 원추부 직경비  $R_H/s_w$ , 원추각  $\gamma_k$ , aspect ratio 의 파라메터로 계산될 수 있으므로 함미부 형상에 따른 영향을 고려하여 함미타효를 적절하게 추정할 수 있다.

#### 4. 결과 분석

잠수함의 수평면 조종성능을 극대화하기 위해서는 marginal stability 또는 marginal instability 가 되도록 설계 요구된다. 연직면에서는 적절한 감쇠를 가지도록 설계함으로써 원하지 않는 심도 초과를 방지해야 하므로 안전한 운항을 보장하기 위

해서는 함미타효의 정확한 예측이 매우 중요한 문제가 된다(신용구와 임경식 1999).

제어가 없는 경우의 동적 안정성은 선형 방정식의 응답해석을 통해 수평면의 안정성 지수  $G_h$  로 표현되며, 동적안정성은  $G_h > 0$  을 요구한다.

$$G_h = 1 - \frac{N'_v(Y'_r - m')}{Y'_v(N'_r - m'x'_G)} \quad (12)$$

위에서  $Y$  와  $N$  은 lateral force 및 yawing moment 를 나타내며,  $v$  와  $r$  은 sway 및 yaw 속도,  $m$  은 질량,  $x_G$  는 중심의  $x$  좌표를 나타낸다.

연직면 안정성 지수인  $G_v$  는 다음과 같으며,  $G_v > 0$  이 되어야 안정하다.

$$G_v = 1 - \frac{M'_w(Z'_q + m')}{Z'_w(M'_q - m'x'_G)} \quad (13)$$

위에서  $Z$  와  $M$  은 normal force 및 pitching moment 이며,  $w$  와  $q$  는 heave 와 pitch 속도이다.

본 논문에 의한 함미타효 추정방법의 유용성을 파악하기 위해 DARPA SUBOFF 형상 (Fig. 5)에 대한 PMM 실험결과(Roddy 1990)와 계산결과를 비교하였다.

안정성 지수를 계산하기 위해 필요한 안정성 도함수를 도출하여 실험값과 함께 Table 1 에 수록하였다. 여기서 도함수는 Barehull 과 제어판 각각에 대하여 도출하여 합하는 방식으로 구하였다.

본 논문의 목적은 제어판과 용체의 간섭힘을 예측하는데 있으므로 Barehull 에 대한 유체력은 PMM 값을 그대로 적용하고 제어판으로 인한 도함수는 단독제어판에 대한 유체력에 함미타효를 고려하여 도출된 값을 무차원화하여 최종적인 도함수를 구하였다.  $Y_v'$ 를 예로 들면  $-0.007516(=-0.013464+0.005948)$  이 이론으로 계산한 상하 2개의 제어판(rudder)에 의한 유체력( $Y_v^{WB}$ )이다. 이 값은 단독제어판에 대한 유체력에 함미타효를 고려하여 도출된 값이다.

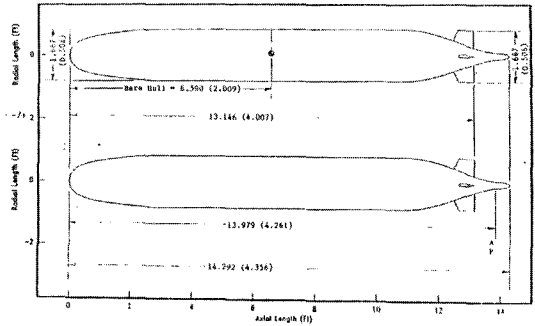


Fig. 5 Dimension of the DARPA SUBOFF model

Table 1 Comparison with DARPA SUBOFF PMM data and Calculation results

	Bare Hull		Bare Hull + 4 Planes
	PMM	PMM	Calculation
$Y_v'$	-0.005948	-0.010494	-0.013464
$N_v'$	-0.012795	-0.011254	-0.012519
$Y_r'$	0.001811	0.006324	0.006026
$N_r'$	-0.001597	-0.003064	-0.002697
$m'$	-	-0.018144	-0.018144
$G_h$	-	-3.137	-3.178

다른 도함수는 다음 관계식으로 구하였다.

$$Y_r^{WB} = Y_v^{WB} \times \frac{x_w}{L} \quad (14)$$

$$N_v^{WB} = Y_v^{WB} \times \frac{x_w}{L} - \frac{S_w}{L^3} \times C_m \quad (15)$$

$$N_r^{WB} = Y_v^{WB} \times \left( \frac{x_w}{L} \right)^2 \quad (16)$$

위에서  $x_w$  는 무게중심에서 제어판 압력중심의  $x$ -좌표이며,  $C_m$  은 제어판의 모멘트계수이다.

Table 1 의 결과로부터 안정성지수는 실험결과와 비교하여 잘 일치하는 값을 얻을 수 있었으며,

제어판 제원 설계시에 안정성을 매우 정도있게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

SUBOFF 형상은 축대칭으로 연직면과 수평면 응답이 동일하므로 수평면 안정성만 살펴보았다.

Fig. 6, 7 에는 대표적으로 원추각 18 도에 대하여 aspect ratio 가 0.5~2.0 으로 변할 때 직경-스팬비에 따른 함미타효를 본 논문에서 제시한 방법으로 구한 결과이다. 이때 제어판은 원추형 실린더에 부착된 삼각익으로 변환하였으며, 길이방향으로 절단한 각 strip 에 식(8, 9, 10, 11)을 적용하여 함미타효를 도출하였다. 그림에서 평행실린더( $\gamma_k = 0^\circ$ )에 부착된 제어판의 간섭계수(실선으로 표시됨)에 비해 원추형 선미에 부착된 경우는 모두 작은 값을 주고 있다. 이로부터 원추형에 부착된 제어판의 경우가 평행실린더에 부착된 경우보다 더 작은 양력을 주고 있음을 알 수 있다.

잠수함 함미제어판은 추진기 앞쪽으로 함미 원추부(유동박리를 방지하기 위해 주로 15~22 도 사이로 설계됨)에 작은 면적으로 설치되며 제원의 미소한 변화에 의해서도 조종안정성이 매우 민감하게 변화한다. 본 결과를 이용하면 제원을 결정하는 여러 파라미터(직경-스팬비, 원추각, aspect ratio)의 변화에 따른 영향을 잘 파악할 수 있으며, 실제 조종안정성 미계수를 비교적 정확하게 계산할 수 있다.

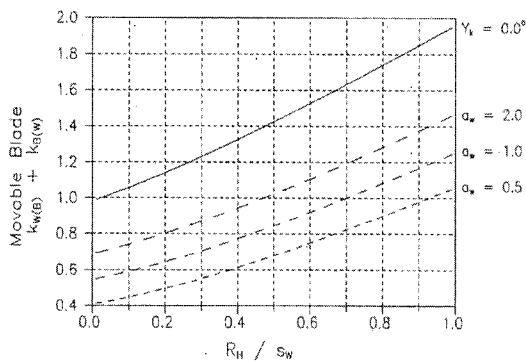


Fig. 6 Tail plane efficiency for movable blade (conical angle = 18.0 deg.)

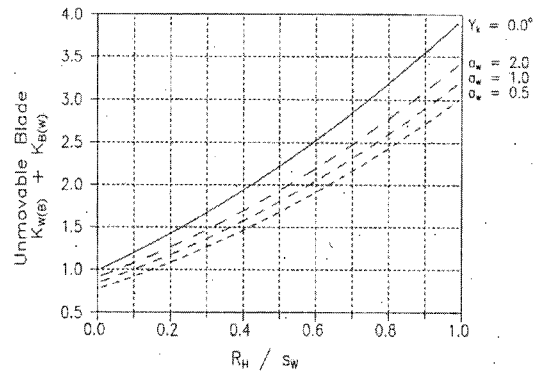


Fig. 7 Tail plane efficiency for unmovable blade (conical angle = 18.0 deg.)

### 5. 결론

잠수함의 수평면 및 안정성 판별시 함미타효 추정 신뢰성을 증대시키는 것이 요구되었으며, 해석적으로 잠수함 제어판 형상에 대한 함미타효를 도출할 수 있는 방법을 전개하였다.

이로부터 원추부에 설치된 제어판의 직경-스팬비, 원추각, aspect ratio 의 파라미터를 이용하여 함미부 형상변화에 따른 영향을 고려하여 함미타를 설계할 수 있게 되었다.

### 참 고 문 헌

- 공인영, 강창구, 이창민, 1992, "타 단독 특성의 이론적 해석," 대한조선학회 논문집, 제 29 권, 제 1 호, pp. 29-42.
- 김선영, Mori, K., 1995, "부가물-평판 접합부 주위의 난류유동 계산," 대한조선학회 논문집, 제 32 권, 제 2 호, pp. 43-55.
- 김선영, 공인영, 김찬기, 박정기, 2000, "제어판 주위의 유동 및 타 토오크 특성," 제 3 회 해상 무기체계 발전 세미나 논문집, pp. 309-317.
- 신용구, 임경식, 1999, "수중함 기동성능 해석기법," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 151-154.
- Dempsey, E.M., 1977, Static Stability Characteristics of a Systematic Series of Stern Control Surfaces on a Body of Revolution,

DTNSRDC Report 77-0085, David Taylor Naval Ship Research and Development Center.

- Pitts, W.C., Nielsen, J.N., and Kaattari, G.E., 1957, Lift and Center of Pressure of Wing-Body-Tail Combinations at Subsonic, Transonic, and Supersonic Speeds, NACA Report 1307, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Roddy, R.F., 1990, Investigation of the Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the DARPA SUBOFF Model DTRC Model 5470 from Captive-Model Experiments, DTRC/ SHD-298-08, David Taylor Research Center.
- Spreiter, J.R., 1950, The Aerodynamic Forces on Slender Plane- and Cruciform-Wing and Body Combinations, NACA Report 962, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Whicker, L.F. and Fehlner, L.F., 1958, Free stream Characteristics of a Family of Low Aspect Ratio, All-Movable Control Surfaces for Application to Ship Design, DTMB Report No. 933.



< 신용구 > < 임경식 > < 이승건 >