

선박의 최적 방향타 설계를 위한 실험적 연구

민계식*, 정경남*

Experimental Study for the Optimum Rudder Design

by

Keh-Sik Min* and Kyung-Nam Chung*

요 약

선박의 조종성능 추정 및 향상을 위한 이론적, 실험적 연구의 일환으로 최적방향타 설계를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구는 크게 보아 방향타의 성능을 결정짓는 세 가지 주요특성, 즉 단면형상, 투영형상 및 가로세로비(aspect ratio)에 대한 연구와 특수단면형상에 대한 연구로 구성되어 있으며 각각의 특성에 대하여 실용적으로 유용한 설계방향 및 결론을 도출하였다. 특히 특수단면 형상중 돌고래꼬리형 단면형상(dolphin-tail type section shape)은 방향타의 단면으로 사용될 경우 방향타의 성능을 현저히 향상시킬 수 있는 가능성이 있음을 보여주고 있다.

Abstract

As a part of theoretical and experimental research works for the prediction and improvement of ship's maneuvering performance, an experimental study for the optimum rudder design has been carried out.

Largely, this study is composed of the investigations on three major characteristics which determine rudder performance, that is, the investigations on section shape, planform and aspect ratio, and the investigation on the special section shapes. Some practically useful design directions and conclusions for each characteristic have been derived through this study.

Among special section shapes, dolphin-tail type section shape has shown a possibility of significantly improving rudder performance if utilized as the section of rudders.

1. 서론

최근 잇달아 발생한 선박의 좌초 및 충돌사고로 인하여 선박의 조종성능에 대한 국제적 관심과 중요성이 점증되고 있으며 IMO**와 같은 국제기구에서도 선박의 조종성능을 국제적으로 규정하려는 움직임이 일고 있다.***

선박의 조종성능에 영향을 미치는 인자는 선형과 같은 수동적 인자와 제어장치와 같은 능동적 인자로 분류할 수 있으며 능동제어를 위한 대표적인 장치로 방향타(rudder)를 들 수 있다. 특히 대형선에 있어서는 방향타만이 유일한 능동제어 장치라 해도 과언이 아닐 것이다. 따라서 선박의 조종성능을 향상시키기 위해서는 선형자체의 설계도 중요하지만 그에 못지 않게 중요한 것이 우수한 방향타의 설계라고 할 수 있다.

방향타의 성능은 방향타의 단면형상(section shape)과 투영형상(planform) 및 가로세로비(aspect ratio)와 같은 기하학적 특성과 투영면적에 따라 결정된다. 그러나 방향타는 일반적으로 프로펠러 후방 선미에 위치하게 되므로 크기에 제한을 받게되고 어느 크기 이상으로 면적을 증가시킬 수가 없다. 또한 때로는 면적을 증가시키는 것이 오히려 해로울 때도 있다. 따라서 제한된, 또는 일정한 크기에 대하여 가장 우수한 성능을 발휘하도록 방향타의 기본특성을 설계하여야 한다.

본 연구는 선박의 조종성능 추정 및 향상을 위한 이론적, 실험적 연구를 수행하여 나가는 과정에서 우수한 방향타 설계의 필요성을 절감하게 되어 연구수행을 결정하게 되었으며 다음과 같이 방

향타의 성능을 결정짓는 기본특성과 지금까지 사용해 보지 않은 특수단면 형상에 대한 연구로 구성되어 있다.

- 일반적인 단면형상에 대한 연구(제1그룹)
- 단면의 최대두께의 위치에 대한 연구(제2그룹)
- 투영형상에 대한 연구(제3그룹)
- 가로세로비에 대한 연구(제4그룹)
- 특수 단면형상에 대한 연구(제5그룹)

본 연구에 있어서 방향타의 설계와 모형시험 등 실제연구의 대부분은 1993년에 수행되었으며 본 논문에 연구내용 및 연구결과를 요약 정리하고자 한다.

2. 기초 조사

연구의 시작으로 실제 선박에 설치된 방향타의 주요 설계특성을 조사하여 보는 것이 필요하였다. 따라서 1991년과 1992년의 2년간 당사에서 건조하여 인도한 선박 중 성능이 우수하다고 알려진 대표적인 선박을 선정하여 방향타의 특성을 살펴 보았다.

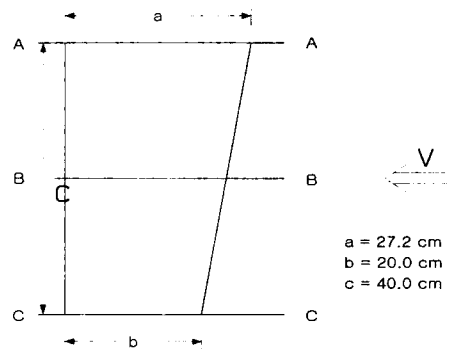


Fig. 1 Basic planform and dimensions for model manufacturing

** International Maritime Organization
 *** IMO Interim Guideline 751조 (1994년부터 5년간 잠정시행)

정리된 방향타의 설계특성에 대한 통계적 분석을 통하여 본 연구에서 채택할 방향타의 기준 투영형상을 비롯하여 몇 가지 표준 설계특성을 결정하였다. Fig.1은 채택된 기준 투영형상과 모형제작을 위한 설계치수를 보여주고 있으며 Fig.1로 표시되는 기준 투영형상은 본 연구에서 취급되는 30개의 방향타 중에서 제 3그룹(Planform Series)과 제 4그룹(Aspect Ratio Series)에 속한 14개의 방향타를 제외한 모든 방향타에 일관성 있게 적용되었다.

3. 방향타 설계

본 연구에서는 기준 방향타의 기본특성을 될수록 일관성 있게 공통적으로 사용하면서 방향타의 성능에 영향을 주는 기본특성 하나 하나에 대하여 체계적으로 연구하기로 하였으며 연구개념 및 연구를 위한 실제 방향타의 설계내용에 대하여 논의하고자 한다.

3.1 단면형상에 대한 연구

(제 1그룹 : Section Shape Series)

방향타 주위의 유체유동은 단면형상에 의하여 크게 영향을 받으므로 방향타의 단면형상은 방향타가 선박을 회전시킬 수 있는 측력(side force)을 발생하는데 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 오늘날 세계적으로 많이 쓰이는 두 가지 NACA 단면, 즉 NACA 00 Series 단면[1]*과 NACA 66 Series 단면[2]을 비롯하여 저자에 의하여 개발된 단면형상, 즉 HMRI NP-Series 단면을 시험하여 보기로 하였다. HMRI NP-Series 단면형상은 참고문헌 [3]과 [4]에 자세히 소개되어 있으며 국내는 물론, 일본과 독일

및 네델란드의 발명특허를 획득한 바 있다.**

단면형상에 대한 연구를 위하여 모두 6개의 방향타를 설계하였으며 앞에서 언급한 바와 같이 6개의 방향타 모두 Fig.1에 도시된 기준 투영형상을 사용하였다. 6가지 제 1 그룹 방향타 단면의 주요특성은 Table 1에 정리되어 있다.

3.2 최대두께의 위치에 대한 연구(제 2그룹 : Maximum Thickness Series)

단면형상에 대한 연구가 끝나고 최적 단면형상을 선정한 후 단면의 최대두께의 위치에 대한 연구를 수행하였다. 최대두께의 위치에 대한 연구를 위하여 모두 6개의 방향타를 설계하였으나 그 중의 하나(방향타 번호 9번, 방향타 기호 MT3)는 3번 방향타(방향타 기호 SS3)와 동일하므로 실제로는 5가지를 설계한 셈이다. 역시 앞에서 언급한 바와 같이 6개의 방향타 모두 Fig.1에 표시된 기준 투영형상을 사용하였으며 6가지 제 2그룹 방향타 단면의 주요특성은 Table 1에 정리되어 있다.

3.3 투영형상에 대한 연구(제 3그룹 : Planform Series)

투영형상이 방향타의 유체역학적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 Fig.2와 Fig.3에 보이는 바와 같이 투영형상이 서로 다른 8개의 방향타를 설계하였다.

이때에 새로운 수중익 단면개발에 대한 연구가 성공적으로 완료되어 방향타의 단면형상으로는 새로 개발 완료된 HMRI NP-Series 표준 수중익 단면을 도입하였다. 또한 제 3그룹에 속한 모든 방향타의 투영면적과 가로 세로비는 모두 동일하게 되도록 설계하였으며 가로세로비는 제 1, 제 2 그룹의 방향타와 동일하게 1.695가 되도록 하였다. 역시 Table 1에 제 3그룹에 속한 8가지 방향타의 주요특성이 정리되어 있다.

* []안의 번호는 참고문헌의 번호를 나타냄.

** 발명특허 번호

- 한 국 : 94-016334
 - 일 본 : 特開 8-20392
 - 독 일 : DE 44 43 744.7
 - Netherlands : 94.01971

Table 1 Grouping of Rudders and Summary of Characteristics

구 분 (Group)	방향타 번 호	방향타 기 호	투영형상 (Planform)	단면의 특성 (Section Type)	비 고	
Group 1 (Section Shape Series)	1	SS1	Forward Trapezoidal	NACA 00, $X_c=0.3C$		
	2	SS2		NACA 66, $X_c=0.45C$		
	3	SS3		HMRI NP (0.5/2.0/0.3)*		
	4	SS4		HMRI NP (0.4/1.67/0.3)		
	5	SS5		HMRI NP (0.43/1.67/0.3)		
	6	SS6		HMRI NP (0.465/1.67/0.3)		
Group 2 (Maximum Thickness Series)	7	MT1	Forward Trapezoidal	HMRI NP (0.5/2.0/0.1)		
	8	MT2		HMRI NP (0.5/2.0/0.2)		
	9	MT3		HMRI NP (0.5/2.0/0.3)	SS3과 동일	
	10	MT4		HMRI NP (0.5/2.0/0.4)		
	11	MT5		HMRI NP (0.5/2.0/0.5)		
	12	MT6		HMRI NP (0.5/2.0/0.6)		
Group 3 (Planform Series, AR=1.695)	13	PF1	Rectangular	HMRI NP $n = 0.5$ $P = 1.4$ $X_c = 0.4C$		
	14	PF2	Fwd Trapezoidal			
	15	PF3	Aft Trapezoidal			
	16	PF4	Both Side Trapezoidal			
	17	PF5	Fwd Quarter Elliptic			
	18	PF6	Aft Quarter Elliptic			
	19	PF7	Half Elliptic			
	20	PF8	Elliptic Rectangular			
Group 4 (Aspect Ratio Series)	21	AR1	Forward Trapezoidal	HMRI NP $n = 0.5$ $P = 1.4$ $X_c = 0.4C$	AR=0.4	시험에서 제외
	22	AR2			AR=0.6	
	23	AR3			AR=1.0	
	24	AR4			AR=1.695	PF2와 동일
	25	AR5			AR=2.0	
	26	AR6			AR=2.5	시험에서 제외
	27	AR7			AR=3.0	
	28	AR8			AR=4.0	
Group 5 (Special Section Series)	29	ES	Forward Trapezoidal	Elliptic-Straightline Section		
	30	DT		Dolphin-Tail Section		

* $n=0.5, P=2.0, X_c=0.3C$

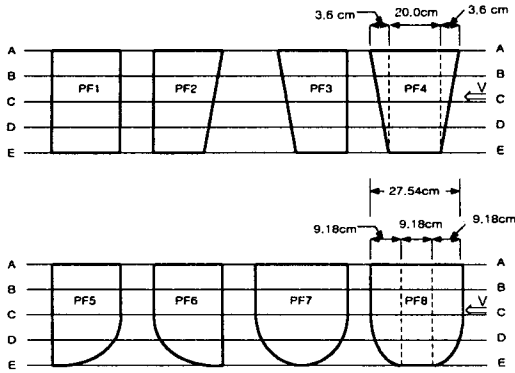
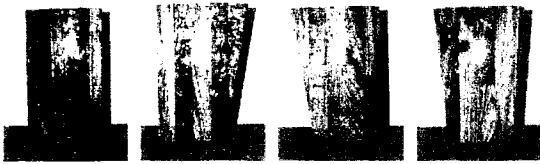
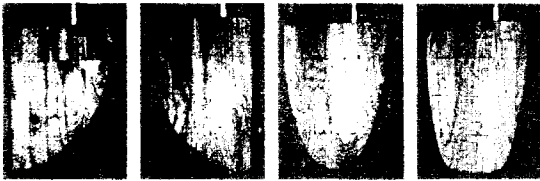


Fig. 2 Planforms of group 3 rudders



Rudder 13 (PF1) Rudder 14 (PF2) Rudder 15 (PF3) Rudder 16 (PF4)



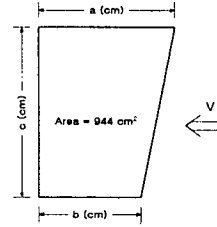
Rudder 17 (PF5) Rudder 18 (PF6) Rudder 19 (PF7) Rudder 20 (PF8)

Fig. 3 Model rudders of the planform series group

3.4 가로세로비에 대한 연구(제 4그룹 : Aspect Ratio Series)

방향타의 가로세로비(aspect ratio)가 유체역학적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가로세로비를 체계적으로 변화시켜 가면서 8개의 방향타를 설계하였다. 방향타의 단면형상으로는 역시 새로 개발 완료된 HMRI NP-Series 표준단면을 도입하였으며 제 4그룹에 속한 모든 방향타의 투영면적은 모두 동일하게 944 cm²가 되도록 하였다. 8개의 제 4그룹 방향타의 주요 특성은 Table 1과 2에 정리되어 있다.

Table 2 Main characteristics of group 4 rudders



Rudder Code	Aspect Ratio	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Maximum Thickness (cm)	
					Root	Tip
AR1	0.400	56.00	41.20	19.44	6.78	3.01
AR2	0.600	45.72	33.61	23.80	6.30	2.79
AR3	1.000	35.42	26.04	30.73	5.82	2.57
AR4	1.695	27.20	20.00	40.00	5.44	2.40
AR5	2.000	25.04	18.41	43.45	5.34	2.35
AR6	2.500	22.40	16.47	48.58	5.22	2.30
AR7	3.000	20.45	15.03	53.22	5.13	2.26
AR8	4.000	17.71	13.02	61.45	5.00	2.20

3.5 특수 단면형상에 대한 연구(제 5그룹 : Special Section Shape Series)

방향타의 성능을 조금이라도 더 향상시켜 보려는 노력의 일환으로 종래의 방향타 단면과는 전혀 다른 특수한 형상의 단면을 갖는 방향타를 시험하여 보기로 하였다. 특히 단면의 머리형상과 꼬리형상이 방향타의 유체역학적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 타원-직선형 단면(elliptic-straightline type section) 방향타와 돌고래꼬리형 단면(dolphin-tail type section) 방향타를 각각 1개씩 설계하였다. 돌고래꼬리형 단면 방향타는 저자에 의해 세계최초로 제안되었으며 발명특허를 출원한 바 있다.*

* 발명특허 출원번호 : 89-003603

이러한 특수단면의 효과에 대하여 어느 정도 세밀히 연구를 수행하자면 머리나 꼬리의 두께, 길이, 각도 등 여러 가지 특성에 대하여 체계적인

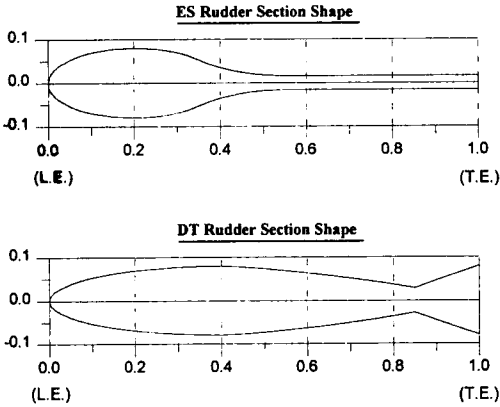
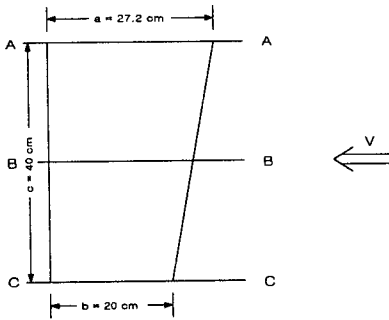


Fig. 4 Section shapes of ES rudder and DT rudder

Table 3 Main design characteristics of ES rudder and DT rudder



Rudder Code	Planform	Section A-A (Root)		Section B-B (Mid-span)		Section C-C (Tip)	
		C*	t _m **	C	t _m	C	t _m
ES	Forward	27.2	20.0	23.6	16.0	20.0	12.0
DT	Trapezoidal						

* C : Chord Length (cm)
 ** t_m : Maximum Thickness (% Chord)

조합을 수립하고 그에 따라 설계를 하여 시험을 수행한 후 정밀한 분석을 거쳐 보편타당성이 있는 결론을 도출하여야 하는데 본 연구에서는 제작, 연구비, 실용성 등의 문제로 인하여 1 가지씩만 시험하여 보기로 하였다. Fig.4는 2가지 특수단면형 방향타, 즉 타원-직선형 방향타(elliptic-straight type rudder)와 돌고래꼬리형 방향타(dolphin-tail type rudder)의 단면형상을 보여 주고 있다. 또한 2가지 특수단면형 방향타의 주요 설계특성은 Table 1과 3에 요약되어 있다.

3.6 설계 방향타의 정리

지금까지 방향타의 성능에 영향을 미치는 기본 특성에 따라 각각의 그룹으로 나누어 그룹별 방향타 설계에 대한 논의를 하였다. 이렇게 하여 30개의 그룹별 방향타가 설계되었으나 9번 방향타(MT3)는 3번 방향타(SS3)와 동일한 것이고 24번 방향타(AR4)는 14번 방향타(PF2)와 동일한 것이며 21번 방향타(AR1)와 26번 방향타(AR6)는 설계는 하였으나 실용성의 문제로 인하여 시험은 하지 않았으므로 실제로는 모두 26개의 방향타를 제작하여 시험을 수행하였다. 30개의 그룹별 방향타 전체에 대한 주요특성은 Table 1에 요약 정리되어 있다.

4. 모형시험

설계 완료된 총 30개의 방향타 중 26개에 대한 모형 방향타를 제작하여 모형시험을 수행하기로 하였다. 당 연구소의 시험시설은 사업부에서 의뢰한 각종 과제의 시험으로 인하여 이와 같은 기초연구를 위한 시험을 수행할 시간적 여유가 없기 때문에 신속함과 일관성을 위하여 외부의 시험시설을 이용하기로 결정하였다. 실제 모형시험은 HSWA*의 HYKAT**에서 수행하였다.

* Hamburgische Schiffbau Versuchs Anstalt(Hamburg Ship Model Basin)

** Hydrodynamics and Cavitation Tunnel의 독일어 약자

HYKAT의 측정부위(measuring section)의 치수 및 유체역학적 특성은 다음과 같다.

- 측정 부위의 치수 :
 - L x B x H=11.0 m x 2.8 m x 1.6 m
- 유체역학적 특성 :
 - Vmax = 12.6 m/s
 - $\sigma_{min} = 0.2$

위의 각각의 기호는 다음과 같은 측정부위에서의 특성을 나타낸다.

- L = 길이
- B = 폭
- H = 높이
- Vmax = 최대 유속
- σ_{min} = 최저 cavitation number

방향타 모형은 설계된 자료에 따라 목재로 제작하였으며 방향타를 회전시키기 위한 우력(torque)을 최소화하기 위하여 방향타의 축(rudder shaft)은 0.3-chord line과 0.5-span line의 교차점에 위치하도록 하였다. 모형시험시 방향타가 수조벽의 경계층(boundary layer) 안에 들어오는 것을 피하기 위하여 방향타의 뿌리(윗부분)가 HYKAT 측정부위의 윗벽으로부터 155mm 떨어지도록 하였으며 추가로 방향타 뿌리로부터 5mm 상방에 원형분리판(circular splitter plate)을 설치하였고 이 분리 판으로부터의 힘이 방향타나 방향타 축에 영향을 미치지 않도록 수조벽에 고정시켰다. Fig.5와 Fig.6은 이러한 배치를 보여주고 있다.

모형시험시 수조 안의 유속은 6.0 m/sec를 원칙으로 하였으나 방향타의 스톨각(stall angle) 근처에서 진동이 심하게 발생하는 경우에는 5.0 m/sec로 낮추었다. 측정의 정확성을 향상시키고 또한 결과를 검토하기 위하여 시험은 방향타의 좌우회전 모두, 즉 양(+)과 음(-)의 각도 모두에 대하여 수행하였으며 모든 방향타의 정해진 시험 각도에 대하여 힘과 토크를 0.02초 간격으로

60초간, 즉 3,000번 측정한 후 평균값(mean value)을 구하였다. 또한, 특정 방향타에 대한 시험이 끝난 후 측정된 자료를 전체적으로 검토하여 의문점이 발견될 시 재시험을 수행하였다. Fig.3은 모형시험에 사용된 그룹 3(Planform Series) 방향타의 목재모형을 보여주고 있다.

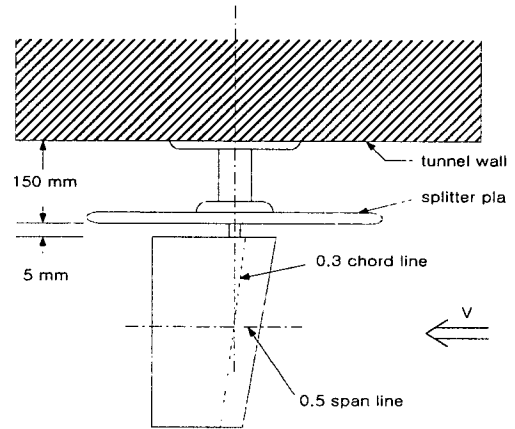


Fig. 5 Concept of rudder arrangement for model tests

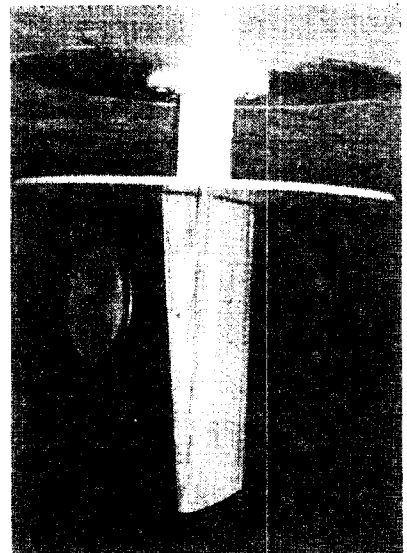


Fig. 6 Arrangements of the rudders in the test section

모형시험에서는 방향타에 미치는 힘, 즉 양력과 항력 및 회전축에 대한 토크를 측정하였으며 모든 결과는 일관성과 편의를 위하여 다음과 같이 무차원화된 계수로 나타내었다 :

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_T} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_T} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_T c} \quad (3)$$

위의 식에서 각각의 기호는 다음을 표시한다.

- L = 양력(lift)
- D = 항력(drag)
- M = 토크(torque)
- ρ = 수조 안의 물의 밀도(density of tunnel water, 1,000 kg/m³)
- V = 시험구역에서의 물의 속도(water speed in test section)
- AT = 방향타의 투영면적(projected area of the rudder)
- c = 코드 길이(chord length)

시험결과는 양이 너무 방대하여 지면 관계상 본 논문에서는 제외하였다.

5. 시험 결과의 분석

5.1 단면의 특성에 대한 고찰

단면의 특성(우수성)을 살펴보기 위해서는 같은 투영형상, 같은 가로세로비(aspect ratio)에서 초기양력계수 증가율과 최대 양력계수 및 최대 양력계수의 발생각을 분석하여 보아야 하며 더 나아가서는 큰 각도의 타각에 대한 공동특성

(cavitation characteristics)까지 살펴보아야 한다. 그러나 본 연구에서는 제한된 연구비 관계로 공동특성에 대한 연구는 수행하지 않기로 하였다. 초기양력계수증가율을 살펴보기 위해서 시험 결과에 대한 회귀분석을 수행하였다. 초기 양력계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_L = \left(\frac{dC_L}{d\delta} \right)_{\delta=0} \cdot \delta \quad (4)$$

따라서 초기양력계수 증가율 분석에 있어서

$$\sin \delta \approx \delta \quad (5)$$

로 표시할 때 오차가 약 0.4% 이하로 되는 |9°|이하의 타각에 대한 시험자료만을 사용하였다. Table 4에는 단면의 우수성을 살펴볼 수 있는 주요특성, 즉 초기양력계수 증가율, 최대 양력계수 및 최대 양력계수가 발생한 타각이 정리되어 있다.

Table 4 Main hydrodynamic characteristics of the rudders

Rudder No.	Rudder Code	$\frac{dC_L}{d\delta}$	Approx. Angle of $(C_L)_{Max}$	Approx. $(C_L)_{Max}$
1	SS1	0.0590	20.0	1.04
2	SS2	0.0569	19.5	1.01
13	PF1	0.0595	20.0	1.02
14	PF2	0.0628	20.0	1.14
15	PF3	0.0624	20.0	1.12
16	PF4	0.0594	19.0	1.09
17	PF5	0.0577	20.0	1.09
18	PF6	0.0599	20.5	1.16
19	PF7	0.0608	20.0	1.15
20	PF8	0.0579	21.5	1.15
22	AR2	0.0378	26.0	1.21
23	AR3	0.0538	24.0	1.18
24	AR4	0.0628	20.0	1.14
25	AR5	0.0672	19.0	1.04
27	AR7	0.0651	19.0	1.00
28	AR8	0.0584	21.0	0.91
29	ES	0.0529	22.0	1.02
30	DT	0.0633	26.0	1.42

30개의 방향타 중에서 특성이 우수한 방향타로 1번, 14번, 30번의 3개를 선정할 수 있다. 이 중에서 1번은 전세계적으로 방향타의 단면으로 가장 널리 쓰이는 NACA 00 Series 단면이고 14번은 당 연구소에서 개발하여 국제특허를 획득한 HMRI NP Series 단면이다. 방향타 번호 30번에 쓰인 돌고래꼬리형 단면 방향타(dolphin-tail type section rudder)는 초기시험 결과에 의하면 성능이 우수하기는 하여도 제작의 어려움 등 종합적인 면으로 보아 실용가능성은 높지 않을 것으로 판단되어 초기에는 무시하려 하였으나 Reynolds 수를 변화시켜 가면서 추가 시험을 수

행하여 본 결과 실용가능성이 높은 단면으로 판명되었다. 즉 유체역학적 특성이 제작의 어려움을 상쇄하고도 남을 정도로 우수한 단면이 될 가능성이 높다는 것이 여러 번의 반복시험에 의하여 판명되었다. 3가지 선정된 단면의 주요 유체역학적 특성을 Table 4에서 찾아볼 수 있으며 또한 Fig.7은 세 가지 방향타의 세부 유체역학적 특성, 즉 타각에 따른 양력계수와 항력계수를 보여주고 있다.

5.2 투영형상에 대한 분석

제 3장에서 언급한 바와 같이 투영형상에 따른

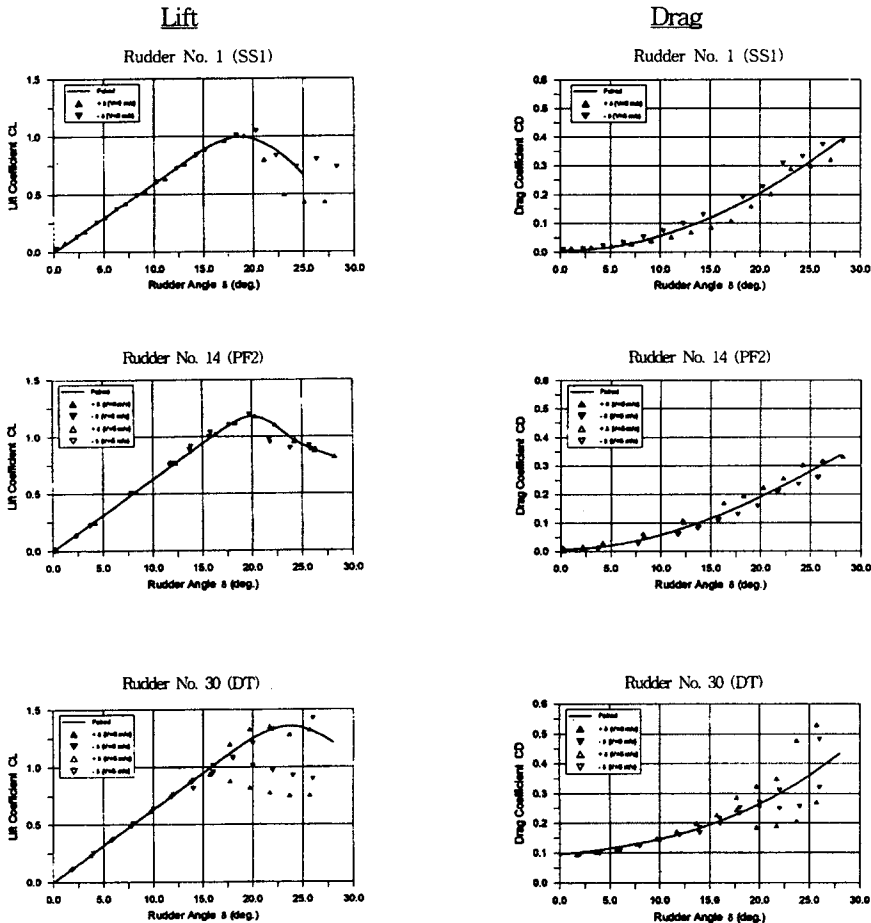


Fig. 7 Lift and drag coefficients of 3 selected rudders

성능을 살펴보기 위하여 투영형상이 서로 다른 8개의 방향타(방향타 번호 13-20)를 설계하여 모형시험을 수행하였으며 투영형상에 따른 주요 유체역학적 특성을 Table 4에 정리하여 놓았다. Table 4로부터 여러 가지 투영형상 중 유체역학적 특성으로 보나 실용적인 면으로 보나 최적 투영형상은 전면 사다리꼴 형상(forward trapezoidal form)임을 쉽게 알 수 있다.

5.3 가로세로비(Aspect Ratio)에 대한 분석

유체역학에 있어서 포텐셜 이론(potential theory)에 의하면 초기 양력계수 증가율은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dC_L}{d\delta} = \frac{2\pi}{1 + 2/AR} \quad (6)$$

그러나 실제유체에 있어서는 점성의 영향으로 인하여 포텐셜이론에 의하여 추정되는 값보다 초기 양력계수 증가율이 감소하게 되며 다음과 같이 표시되기도 한다 :

$$\frac{dC_L}{d\delta} = \frac{2\pi k}{1 + 2/AR} \quad (7)$$

위의 식에서 k는 점성의 영향으로 인한 양력감소 계수를 나타내며 1보다 적어야 한다. 즉 $k < 1.0$ 이 된다.

그러나 선박의 프로펠러 후방에서 작동하는 방향타에 있어서는 초기 양력계수 증가율이 위의 두 식에 의하여 추정되는 값과 차이가 크게 나므로 6개의 제 4그룹(Aspect Ratio Series) 방향타에 대한 시험결과를 가지고 회귀분석을 수행하여 보기로 하였다. 여기서 27번 방향타와 28번 방향타는 시험도중 진동이 심하게 일어나고 시험결과 정확성에 의문이 가므로 분석에서 제외하였다. 분석방법으로는 저자가 오래 전부터 사용하여 온 두 가지 다차원(n-차원) 최적화방법, 즉 Hooke-

Jeeves의 직접탐색법(5)과 Nelder-Mead의 Simplex 방법(6)을 채택하였다. 가로세로비(aspect ratio)가 서로 다른 방향타의 초기양력 계수 증가율을 추정하기 위한 회귀분석 내용을 요약하면 다음과 같다 :

- 회귀 방정식 :

$$\frac{dC_L}{d\delta} = \frac{a_1 \cdot AR}{\sqrt{AR^2 + a_2 + a_3}} \quad (8)$$

- 분석 방법 :

Hooke-Jeeves 직접 탐색법(5)
Nelder-Mead Simplex 방법(6)

회귀방정식 (8)에서 a_1, a_2, a_3 는 회귀분석을 통하여 구하여야 할 미지상수이며 두 가지 다차원 최적화 방법에 의한 분석결과는 Table 5에 정리되어 있다. 식 (8)은 방향타의 초기양력계수에 대한 이론적 배경과 저자의 경험을 기반으로 준비한 5 가지의 방정식에 대해서 수행한 회귀분석 결과로부터 가장 우수한 식, 즉 간단하면서도 표준편차가 가장 적은 식을 선정한 것이다.

Table 5에 정리되어 있는 분석결과에 의하면 두 가지 방법 모두 전체적으로 동일한 표준편차를 보여주고 있으므로 어느 방법에 의한 결과를 사용하던지 전체적인 면에서는 차이가 없을 것이다. 그러나 좀 더 물리적으로 타당성 있는 방법을 선

Table 5 Results of regression analysis by two different multi-dimensional optimization method

Coefficients	Hooke-Jeeves Method	Nelder-Mead Method
a_1	0.06652998	0.06992920
a_2	1.62818673	1.31328741
a_3	-0.36500946	-0.19797178
Standard Deviation	0.00095	0.00095

정하기 위하여 두 가지 회귀분석결과 각각에 의한 초기 양력계수 증가율의 값을 계산한 후 시험을 통하여 구한 값과 비교하여 보기로 하였으며 그 결과를 Table 6에 정리하여 놓았다.

Table 6 Estimation of initial slopes of lift coefficient by two different regression analyses and comparison with those by experiment

Rudder Code	Aspect Ratio	Initial Slope ($-\frac{dC_L}{d\delta}$)		
		Exp.	Estimation by R.A.	
			H-J	N-M
AR2	0.6	0.0378	0.0382	0.0383
AR3	1.0	0.0538	0.0530	0.0529
AR4	1.695	0.0628	0.0642	0.0641
AR5	2.0	0.0672	0.0663	0.0664

Table 6에 정리되어 있는 두 가지 분석결과에 의한 추정값과 시험값의 비교로부터 가장 타당성이 있는 한 가지 최적방법을 선정할 수 있으며 그에 따른 회귀분석 내용을 정리하면 다음과 같다 :

- 최적 방법 : Hooke-Jeeves 방법
- 계수 :
 - a1 = 0.06653
 - a2 = 1.62819
 - a3 = -0.36501
- 표준편차 : 0.00095

이렇게 하여 도출된 추정식, 즉 HMRI NP-Series 단면을 갖는 전면 사다리꼴 투영형상 방향타의 가로세로비(aspect ratio)에 따른 초기 양력계수 증가율에 대한 추정식은 다음과 같이 된다

$$-\frac{dC_L}{d\delta} = \frac{0.06653 \cdot AR}{\sqrt{AR^2 + 1.62819 - 0.36501}} \quad (9)$$

Table 6에서 볼 수 있는 바와 같이 추정식에 의한 값과 시험을 통하여 구한 값과의 최대차이는 2.3%를 넘지 않으며 시험이 정확히만 이루어진다면 회귀분석에 의하여 상당히 정확한 추정공식을 도출할 수 있음을 알 수 있다.

5.4 특수단면에 대한 분석

본 연구에서는 경비절약을 위하여 여러 가지 특수단면을 시험하여 보지 못하고 가장 가능성이 높다고 평가되는 두 가지 특수단면 방향타, 즉 타원-직선형(elliptic-straightline type)단면 방향타와 돌고래꼬리형(dolphin-tail type)단면 방향타를 시험하여 보았다.

특수단면 형상은 이외에도 여러 가지가 있으며 각각의 특수단면에 대하여 어느 정도 세밀히 연구를 수행하자면 머리나 꼬리의 두께, 길이, 각도 등 주요 기하학적 특성에 대한 체계적인 조합을 구성하고 그에 따라 설계를 하여 시험을 수행한 후 정밀한 분석을 거쳐 보편 타당성이 있는 결론을 도출하여야 할 것이다. 그러나 본 연구에서는 두 가지 특수단면 각각에 대하여 단 한 가지 조합, 즉 한가지 기하학적 형상에 대해서만 시험을 수행하였기 때문에 이러한 제한된 시험 결과로부터 보편적인 결론을 유도한다는 것은 대단히 어렵고도 위험한 일이다.

그러나 본 연구에서 수행한 제한된 시험결과에 입각하여 두 가지 단면의 실용가능성을 살펴보면 우선 타원-직선형 단면 방향타에 대해서는 크게 주목할만한 성능의 향상을 찾아 볼 수 없다. 그러나 돌고래꼬리형 단면 방향타에 있어서는 방향타로서의 역할수행을 위하여 가장 중요한 모든 유체 역학적 특성에 있어서 현저한 향상을 볼 수 있으므로 제작의 어려움을 상쇄하고도 남을 만큼 효율의 향상을 가져올지도 모른다. 따라서 실선 적용을 심각히 고려하여 보아야 할 것이며 그러기 위하여 돌고래꼬리형 단면 방향타에 대한 추가 연구를 수행 중에 있다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 선박용 방향타에 사용되는 일반적인 단면형상으로는 NACA 00-Series 단면과 당 연구소에서 개발하여 국제특허를 획득한 HMRI NP-Series 단면이 가장 우수하며 특수단면 형상으로는 돌고래꼬리형 단면의 성능이 우수하다. 그러나 돌고래꼬리형 단면의 실용화를 위해서는 더욱 정확한 추가 연구가 요망된다.

- 선박용 방향타의 투영형상으로는 유체역학적 특성으로 보나 실용적인 면으로 보나 전면 사다리꼴 형상(forward trapezoidal planform)이 가장 적절하다.

- HMRI NP-Series 단면을 갖는 전면 사다리꼴 투영형상 방향타에 대하여 가로세로비(aspect ratio)에 따른 초기양력계수 증가율을 추정하기 위한 추정식 (9)를 준비하여 놓았다. 그러나 추정식 (9)는 제한된 자료에 대한 회귀분석을 통하여 도출된 실험식(experimental formula)이므로 Table 6에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에서 시험을 수행한 방향타에 대해서는 최대오차 2.3% 이내로 시험값과 잘 일치하고 있으나 일반적인 사용을 위해서는 좀 더 폭넓은 검증이 필요하리라 사료된다.

- 선박의 선회성능을 향상시키기 위해서는 우수한 선형설계와 함께 우수한 방향타를 설계하여야 한다. 다시 말하면 같은 조건에서 뒤틀수록 큰 측력(side force)을 발생하도록 방향타를 설계하여야 한다. 따라서 최적 방향타 설계를 위해서는 같은 조건에서 방향타가 발생하는 측력이 최대가 되도록 방향타의 투영면적과 기하학적 특성과를 적절히 연계하여 방향타의 특성을 결정하여야 한다.

본 연구에서 시험결과와의 정리, 분석 도중 어렵고 아쉬웠던 일 중의 하나는 시험결과와의 일관성이 다소 결여되어 있고 특히 Reynolds 수에 따라 측정결과에, 즉 유체역학적 특성에 큰 차이가 난

다는 것이다. 본 연구에서 수행한 시험은 사실 생각만큼 쉽지가 않다는 것을 전문가들은 잘 알고 있을 것이다. Reynolds 수의 영향은 특히 방향타 번호 30번 돌고래꼬리형 단면 방향타에서 심하게 일어난다. 따라서 가장 성능이 우수한 단면의 방향타를 3개 선정하여 Reynolds 수를 뒤틀수록 실선 방향타에 접근시키면서 포항공과대학 첨단유체역학연구소의 풍동(wind tunnel)에서 정밀시험을 수행하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Abbot, I. A. and Doenhoff, A. E., "Theory of Wing Sections", Dover Publications, Inc., New York, 1959.
- [2] Brockett, T., "Minimum Pressure Envelopes for Modified NACA-66 Sections with NACA a=0.8 Camber and Buships Type I and Type II Sections", NSRDC Report 1780, February 1966.
- [3] 민계식, 이흥기, "자유수면하 이동하는 새로운 수중익 단면의 개발 및 유체역학적 특성추정에 대한 체계적 연구", 현대중공업주식회사, 선박해양연구소 연구보고서 HMRI-95-06-S100, 1995년 6월.
- [4] Min, K-S. Kang, S-H. and Streckwall, H., "Numerical and Experimental Studies for the Prediction of Hydrodynamic Characteristics of 2-Dimensional Hydrofoils Operating under the Free Surface", the Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., U.S.A., August 9-14, 1998.
- [5] Hooke, R. and Jeeves, T. A., "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 8, No. 4, 1961.
- [6] Nelder, J. A. and Mead, R., "A Simplex Method for Function Minimization", Computer Journal, Vol. 7, No. 4, 1965.