

# 별브를 가진 쌍동형 선박의 종동요 응답 스펙트럼 분석

서광철\* · 이창우\*\* · Mehmet Atlar\*\*\* · 이경우\*\*\*\* · † 김옥석

\* 영국뉴캐슬대학 연구원, \*\* 목포해양대학교 연구원, \*\*\*영국뉴캐슬대학, \*\*\*\* 목포해양대학교 조선해양공학과

## Analysis on the Pitch Response Spectra of a Catamaran with Bulb

Kwang-Cheol Seo\* · Chang-Woo Lee\*\* · Mehmt Atlar\*\*\* · Gyoung-Woo Lee\*\*\*\* · † Ok-Sok Gim

\* Research Associate, School of Marine Science and Technology, Newcastle University, UK

\*\* Researcher, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Korea

\*\*\* School of Marine Science and Technology, Newcastle University, UK

\*\*\*\* Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime Uni, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 18미터급 쌍동형 선형의 선수별브 유무에 따른 운동응답특성을 선형 스트립이론에 기초한 상용코드(Seakeeper)를 이용하여 추정하였다. 계산조건으로는 ITTC 파스펙트럼에 기초한 뷰포트 풍력계급 3 ( $\bar{T}=2.98s$ ,  $H_{1/3}=0.6m$ ), 4 ( $\bar{T}=3.85s$ ,  $H_{1/3}=1m$ ) 및 5 ( $\bar{T}=5.44$ ,  $H_{1/3}=2m$ )의 파스펙트럼을 산출하였고, 조우각은 선수파, 선수사파 및 횡파를 적용하여 종동요의 선체운동응답스펙트럼을 해석하였다. 선수별브가 적용된 쌍동선 선형은 선수파와 선수사파에서 최대 20%의 종동요 응답이 감소하는 효과를 나타냈다.

**핵심용어** : 쌍동선, 선형설계, 운동응답스펙트럼, 선형이론, ITTC 파스펙트럼

**Abstract** : In this study, a commercial seakeeping program Seakeeper, integrated into Maxsurf, which is based on the linear strip theory was employed to compare the effect of bulbous bow (with/without) on motion response characteristics in a 18-meter catamaran. The seakeeping analyses were conducted at several Beaufort wind conditions such as scale No. 3 ( $\bar{T}=2.98s$ ,  $H_{1/3}=0.6m$ ), No. 4 ( $\bar{T}=3.85s$ ,  $H_{1/3}=1m$ ) and No. 5 ( $\bar{T}=5.44$ ,  $H_{1/3}=2m$ ) based on ITTC wave spectrum. Pitch motion response spectrum was calculated at Head sea, Head & bow sea and Beam sea as encounter angles. Hull form of a catamaran with bulb showed the maximum 20% decrease of pitch motion response as compared to that of hull form without bulb.

**Key words** : Catamaran, Hull form design, Motion response spectrum, Strip theory, ITTC wave spectrum

### 1. 서론

쌍동형 선박은 넓은 범위의 선속과 다양한 해상상태에서 상대적인 운동과 관련하여 여객과 화물수송에서 매우 중요한 요인으로 지속적인 연구가 수행되고 있다(Fang, et al., 1996; Gim, et al., 2010). Fang et al.(2004)은 메가급 쌍동형 선박의 내항성능추정을 통해 다양한 선형을 적용하여 취약한 운동성능을 갖는 입사파에 대해 실험자료를 비교한 바 있다. 또한 Fang and Chan(2007)은 고속 쌍동형 페리선의 수직운동이 멀미에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

Sahoo et al.(2004)은 실제 사용하고 있는 쌍동형 선형을 기초로 고속영역에서 내항특성에 대해 수치와 실험을 통해 운동특성에 대해 연구하여 두 해석 결과가  $Fn=0.5$  이하의 낮은 영역에서 일치하는 경향을 제시하였다. 또한 초기 설계단계에서

제한된 시간 내에 여러 다른 선형의 평가를 위해 수치해석의 장점을 강조하였다. Holloway and Davis(2006)는 높은 프루드수에서는 점성의 영향으로 수치해석이 실험결과보다 높은 값의 운동특성을 나타낸다고 보고하였다.

Chun et al.(1999)은 쌍동형 선박의 저항과 내항시험에서 선미트림타입을 부착하여 저항 값을 크게 감소하는 영향에 대해 보고하였다. 또한 상하 및 종동요 특성과 갑판 상부의 수직가속도를 계측하여 설계선형의 우수성을 보고하였다.

Gim et al.(2010)은 실적선 자료를 조사하여 국내 연안해역의 해상환경에 적합한 쌍동형 파워요트 선형을 개발하여 운동응답 특성에 대한 연구를 통해 저속영역에서는 횡동요가 지배적이며 고속영역에서는 상하동요와 종동요가 지배적인 특성을 보고한 바 있다.

다른 고속선과 비교했을 때, 쌍동형 고속선은 좋은 수송효

† 교신저자 : 정희원, domingo@mmu.ac.kr 010-2614-3001

\* 정희원, kwang-cheol.seo@newcastle.ac.uk 061)240-7124

\*\* 정희원, chang328@naver.com 061)240-7124

\*\*\* 정희원, mehmet atlar@newcastle.ac.uk 061)240-7124

\*\*\*\*정희원, kwlee@mmu.ac.kr 061)240-7124

(주) 이 논문은 “60피트급 쌍동형 선박의 중운동성능 추정에 관한 연구”란 제목으로 “2013 공동학술대회 한국항해항만학회논문집(해군사관학교, 2013.6.27-28, pp. 122-124)”에 발표되었음.

을 가지고 있으며 넓은 갑판면적과 우수한 복원성 및 횡운동에 장점을 가지고 있다. 그러나 여객과 운항자의 측면에서는 상하동요 및 중동요에 대해 상대적으로 취약한 측면을 가지고 있다(Davis and Holloway, 2003).

Mehmet et al. (2013)은 Deep-V 쌍동형 선형의 선수벌브 유무가 조파저항에 미치는 영향을 연구하였으며, 선수벌브 적용시 20%의 조파저항 감소 효과에 대해 모형실험 결과를 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 저항에 대한 부분은 제외하고 운동특성에 대해 다루고자 한다.

따라서 상하동요는 주로 배수량의 차이에 따라 영향이 크게 나타내는 특성(Holloway and Davis, 2006)을 감안하여 본 연구에서는 쌍동형 선박에 선수벌브를 적용하였을 경우, 해상상태, 조우각 및 선속변화에 따라 중동요 특성을 추정 상호 비교하여 선수벌브의 영향을 알아보하고자 한다. 또한 파도와의 조우각은 선수벌브를 적용한 쌍동형 선박의 중동요 운동을 중점적으로 알아보하고자 선수파, 선수사파 및 횡파에 대해서만 해석을 수행하였다.

## 2. 선형 및 해석조건

쌍동형 선박의 주요제원은 Table 1과 같으며 최대선속 20 노트, 전장이 18미터로 고속영역에 적합한 Deep-V형 선저형상이다. 선수벌브를 적용한 선형의 선도는 Fig. 1과 같으며 실제 건조된 쌍동형 선박의 선형은 Fig. 2 같다.

운동응답특성을 위한 해석조건은 Table 2와 같다. 해상조건은 뷰포트 풍력계급을 기준으로 유의파고( $H_{1/3}$ ) 0.6~2.0에서 평균과주기( $\bar{T}$ ) 3~5.5초 영역으로 선정하였으며, 조우각은 선수파, 선수사파 및 횡파에 대한 운동에 대해 해석하였다. 또한 선속은 10knot ( $F_n=0.404$ ), 15knot ( $F_n=0.605$ ) 및 20knot ( $F_n=0.807$ )을 각각 해석조건으로 선정하였다.

Table 1 Principal particular of catamaran

Designation	Unit	Ship
LBP	m	16.45
Beam	m	7.03
Draft	m	1.798
Displacement	ton	45.9
LCG	m	7.728
VCG	m	3.17

Table 2 Seakeeping analysis conditions

Sea state (Beaufort Scale)	Description	$H_{1/3}$ (m)	$\bar{T}$ (sec)
	3. Gentle	0.6	2.98
	4. Moderate	1.0	3.85
	5. Fresh	2.0	5.44
Encounter angle	$\chi=180^\circ, \chi=135^\circ, \chi=90^\circ$		
Ship speed (knot)	10 ( $F_n=0.404$ ), 15 ( $F_n=0.605$ ), 20 ( $F_n=0.807$ )		

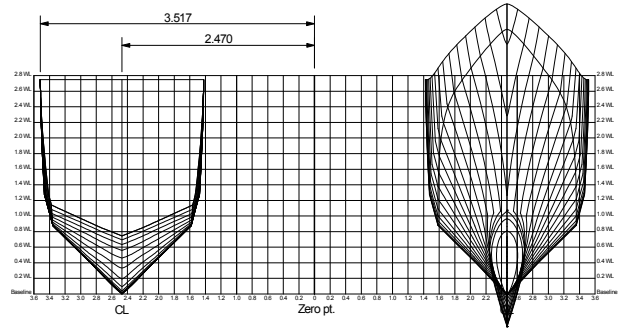
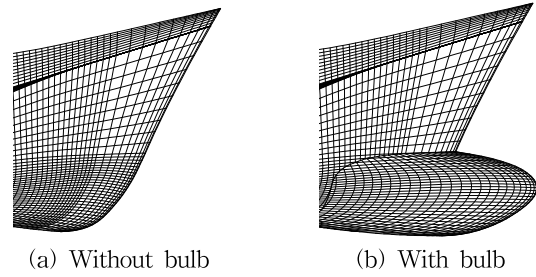


Fig. 1 Lines of a 60-foot catamaran



Fig. 2 Bulbous bow with a Deep-V Catamaran.

쌍동형 선형의 운동응답특성 추정은 선체 단면 (Strip)에 대한 유체력을 계산하고 전체의 유체력을 구하는 Salvesen et al.(1970)가 제시한 방법에 기초한 상용프로그램인 Seakeeper를 사용하였다. 중동요에 대한 방정식은 식(1)과 같다. 파랑은 Pierson-Moskowitz 스펙트럼에 기초한 식(2)의 ITTC 파 스펙트럼을 이용하였다. Fig. 3은 풍력계급별 파 스펙트럼을 도시한 결과이다.

$$(I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega t} \quad (1)$$

여기서  $I$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  및  $F$ 는 각각 관성모멘트, 부가질량계수, 감쇠계수, 복원력계수 및 파랑장제력이며 하첨자 3과 5는 각각 상하동요와 중동요를 의미한다. 좌변의 모든 계수와 우변의 파랑장제력을 알면 복소연립방정식을 풀어서 복소함수인 운동응답을 구할 수 있다.

$$S_\zeta(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right), \quad \left(A = 172.75 \frac{\bar{H}_{1/3}^2}{T^4}, B = \frac{691}{T^4}\right) \quad (2)$$

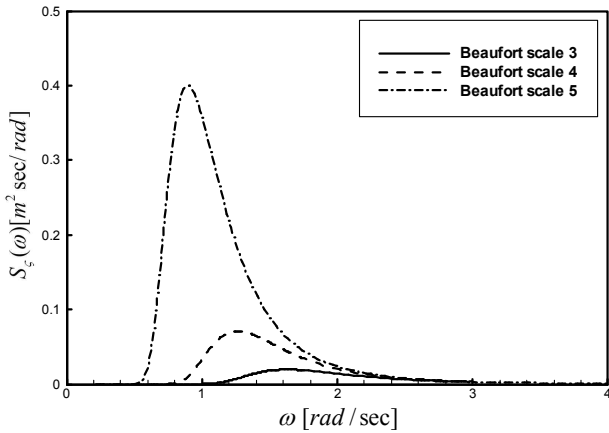


Fig. 3 ITTC wave spectrum

### 3. 결과 및 고찰

동일 상용프로그램을 이용한 단동선의 운동특성에 대한 검증은 선행연구인 Han et al.(2012)에서 실험과 수치해석 결과가 상호 일치함을 보고하였다. 또한, 쌍동선의 경우는 Bruzzone et al.(2008)의 실험과 비교한 결과를 Fig. 3에 함께 도시한 결과 동일한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4는 종동요 응답진폭비 (RAO, Response Amplitude Operator)를 선수벌브 유무에 따라 조우각과 파도의 주파수에 따라 계산한 결과를 파경사각으로 무차원하여 나타낸 것이다.

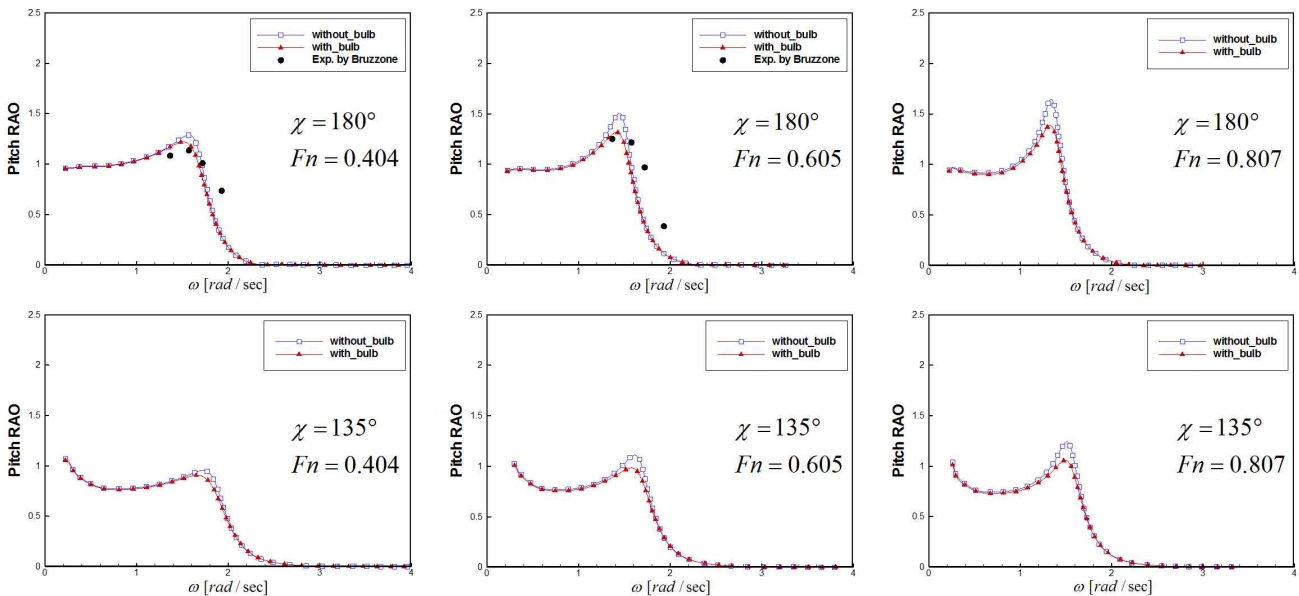


Fig. 4 RAO as a function of the wave frequency

횡파( $\chi=90^\circ$ )를 제외하고 선수파( $\chi=180^\circ$ )와 선수사파( $\chi=135^\circ$ )에서 선수벌브가 있는 선형에서 진폭비가 감소하는 특성을 보였다. 선수파의 경우를 살펴보면 선수벌브가 있는 선형에서는 프루드수가 증가함에 따라 응답진폭비도 증가하였다. 그러나

선수벌브가 없는 선형에서는 거의 차이가 나타나지 않았다. 이러한 경향은 선수사파의 경우에서도 유사한 경향이 나타났다. 그러나 횡파에서는 선수벌브 유무에 관계없이 동일한 응답진폭비가 나타났다.

$$S_\zeta(\omega_e) = S_\zeta(\omega) |RAO(\omega_e)|^2 \quad (3)$$

불규칙과중에서 선박의 운동은 규칙과의 운동특성을 해석하여 선형중첩의 원리를 적용함으로써 얻을 수 있다. Fig. 5는 불규칙한 해상상태인 뷰포트 풍력계급 3에서 종동요에 대한 선체운동응답스펙트럼을 도시한 결과로 해상해역에서의 파도의 특징을 나타내는 Fig. 3의 파 스펙트럼과 선체운동응답비의 곱으로 식(3)과 같이 계산한 결과이다.

종동요에 대한 선체운동응답스펙트럼은 선체가 선수파( $\chi=180^\circ$ )와 선수사파( $\chi=135^\circ$ )인 경우 선수벌브 유무에 관계없이 선속이 증가함에 따라 감소하는 특성을 나타냈다. 즉, 선수파에서는 저속( $Fn=0.404$ ) 영역에서 선체의 종동요가 크게 나타났고 고속( $Fn=0.807$ ) 영역에서 약 2배 이상 감소하는 특성을 보였다.

선체운동응답스펙트럼이 최대값을 보이는 조우주파수는 저속에서 약 3 rad/sec에서 고속에서는 3.5 rad/sec일 때로 나타났다. 선수사파에서도 선수벌브의 영향은 경향적으로 유사하게 나타났다. 저속영역에서는 선수파에 비해 최대값이 감소하였으나 고속영역에서는 최대값이 오히려 증가하였다. 선박운동스펙트럼이 최대가 되는 조우주파수는 선수파와 유사한 주

파수 범위에서 나타났으나 그 진폭이 증가하였다.

Fig. 6은 불규칙한 해상상태인 뷰포트 풍력계급 4에서 종동요에 대한 선체운동응답스펙트럼을 도시한 결과이다. Fig. 5에 비해 해상상태가 거칠어짐에 따라 전체적으로 주파수 영역

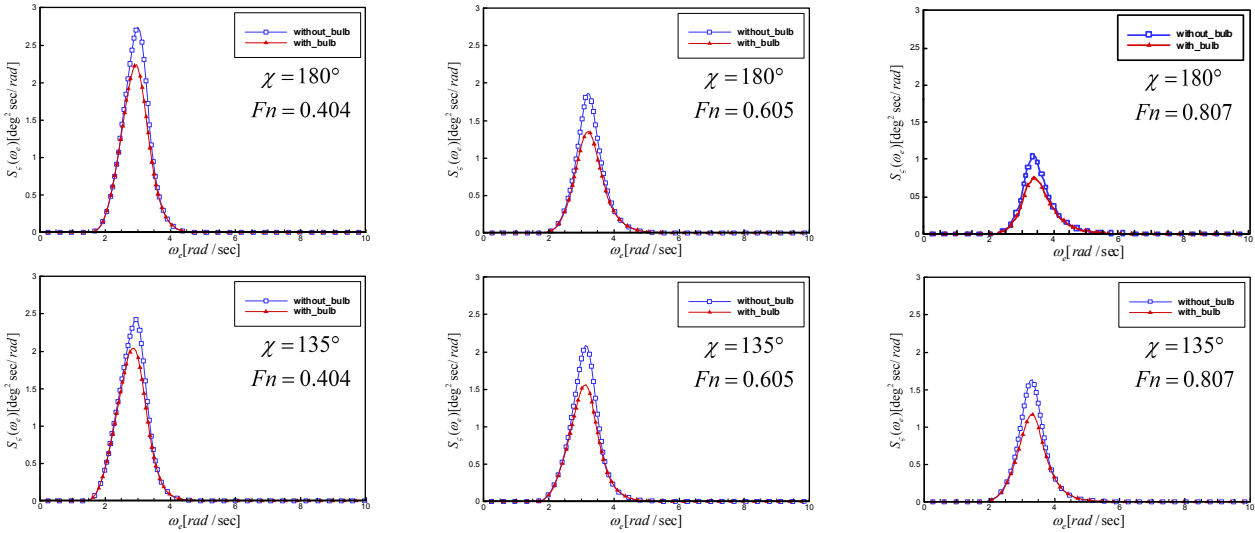


Fig. 5 Comparison of wave energy spectra (Pitch, Beaufort scale No. 3)

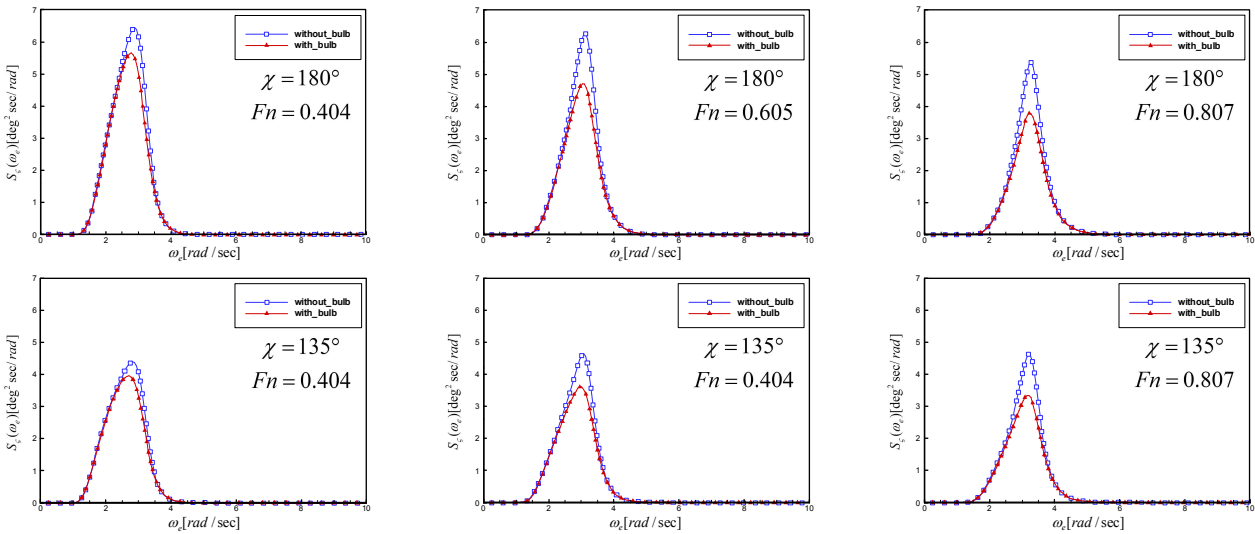


Fig. 6 Comparison of wave energy spectra (Pitch, Beaufort scale No. 4)

과 선체운동응답스펙트럼의 최대값이 증가하는 경향이 나타났다. 선수과의 저속영역에서 가장 큰 선체운동응답이 나타났다. 고속영역으로 진행함에 따라 선수별브를 가진 선형에서 중동요가 감소하는 특성이 나타났다.

조우주파수 범위도 Fig. 5에 비해 저속영역에서 다소 넓어졌다. 선수사과의 경우는 선수별브가 없는 선형에서는 선체운동응답스펙트럼의 최대값은 저속과 고속영역에서 약 4로 비슷하였으나, 선수별브가 있는 선형에서는 저속영역에서 고속영역으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 조우주파수에 따른 특성을 보면 중동요가 나타나는 범위가 저속영역에서 1~4로 넓은 주파수대를 형성하고 있으며, 선수과에 비해서도 저주파영역에서 부터 중동요가 시작되었다.

Fig. 7은 불규칙한 해상상태인 뷰포트 풍력계급 5에서 중동요에 대한 선체운동응답스펙트럼을 도시한 결과이다. 큰 선체

운동응답이 저속영역에서 넓게 형성되었다. 선수과의 경우, 저속영역에서는 선수별브가 있는 선형과 없는 선형 간의 차가 미소하게 나타났다. 그러나 중·고속영역에서는 선수별브가 적용된 선형에서 중동요를 감소시키는 영향이 나타났다. 중동요가 시작하는 조우주파수도 저주파대역에서부터 시작되며 주파수 폭이 1~4로 증가하였다. 선수사과의 경우에 있어서도 저속영역에서는 선수별브 유무에 따른 영향이 크게 나타나지는 않았다. 넓은 영역의 조우주파수 대역에서 높은 선체운동응답이 나타났으며, 선수별브 선형에서 최대값의 감소는 크게 나타나지 않았다. 그러나 고속영역에서 선수별브가 없는 선형에 비해서는 감소율이 증가하였다.

Fig. 8은 중동요를 뷰포트 풍력계급 별로 조우각과 선속영역별로 비교해 도시한 결과이다. Fig. 8(a)(d)는 뷰포트 풍력계급 3인 경우이다. 선수별브가 없는 선형은 가장 큰 중동요

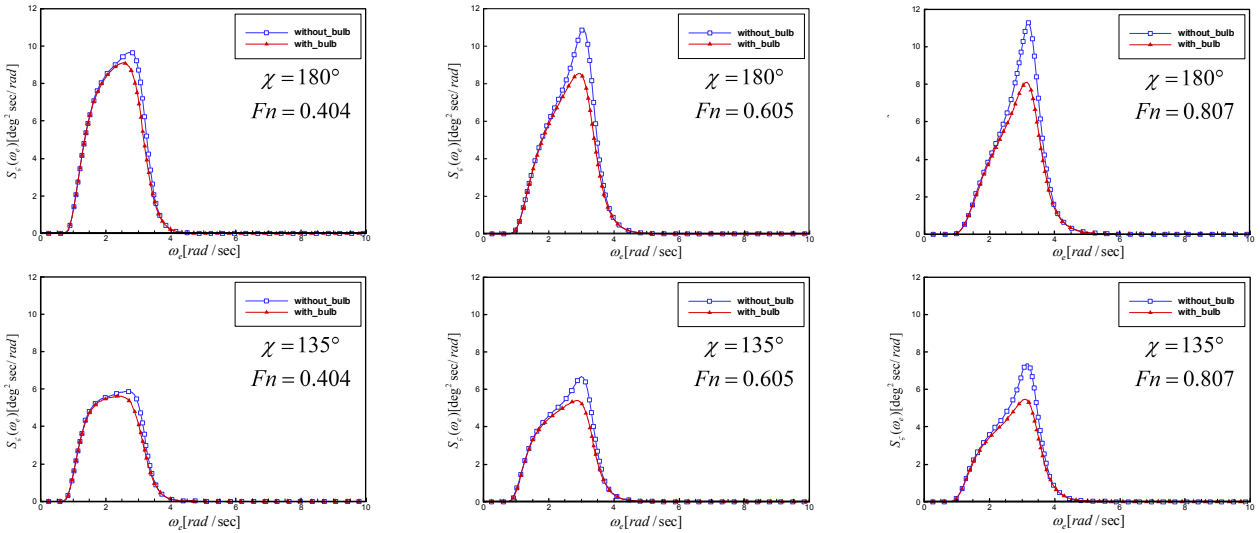


Fig. 7 Comparison of wave energy spectra (Pitch, Beaufort scale No. 5)

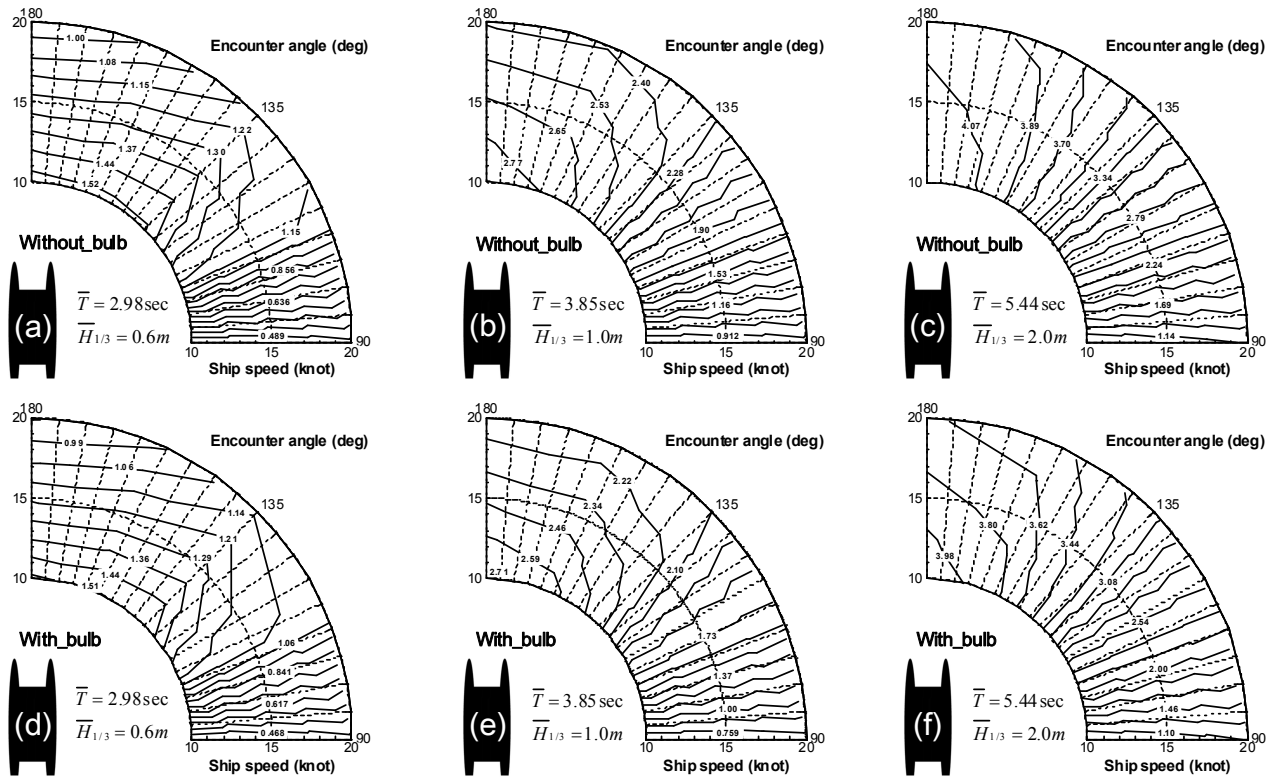


Fig. 8 Comparison of RMS Pitch motion between with and without bulb at Beaufort scale 3[(a)(d)], 4[(b)(e)] and 5[(c)(f)]

값은 저속영역에서  $\chi=180^\circ \sim 135^\circ$  사이에서 나타났다. 선수벌브가 있는 선형에서는  $\chi=180^\circ$  부근에서만 Fig 8(a)와 유사한 중동요 값이 나타났다.  $\chi=110^\circ \sim 90^\circ$  영역에서는 선속에 관계없이 동일한 중동요 특성을 보였다. Fig. 8(b)(e)는 뷰포트 풍력계급 4인 경우이다. 선수파에서 선수벌브가 없는 선형에서는 15knot에서 가장 큰 중동요가 나타나며  $\chi=180^\circ \sim 150^\circ$  영역에서 동일한 크기의 중동요가 나타났다. 선수벌브 선형에서는 10knot 부근에서 높은 값이 나타났다.  $\chi=90^\circ \sim 135^\circ$  영역

에서 선속에 관계없이 각각 일정한 중동요 값을 나타냈다. Fig. 8(c)(f)은 뷰포트 풍력계급 5인 경우로 선수파영역에서 선수벌브를 부착한 Fig. 8(f)의 저속영역에서 낮은 중동요 특성이 나타났다. 약 5° 정도의 차는 있으나  $\chi=90^\circ \sim 140^\circ$  영역에서 선속에 관계없이 각각 일정한 중동요 특성을 보이거나 역시 그 값은 선수벌브 선형에서 낮게 나타났다. Table 3은 해상상태, 선속 및 조우주파수별 선수벌브형 쌍동선의 중동요 응답스펙트럼을 선수벌브가 없는 선형에 대한

감소율을 나타낸 것이다. 결과적으로 중동요는 선수과에서 선수벌브 선형이 최대 20% 감소하는 특성을 나타냈다.

Table 3 Percentage of pitch motion spectra between W/ and W/O bulb (Unit : %)

Encounter angle	Speed (knot)	Beaufort scale		
		No. 3	No. 4	No. 5
$\chi=90^\circ$	10	0.66	0.54	0.52
	15	0.89	0.78	0.65
	20	1.01	1.02	0.87
$\chi=135^\circ$	10	10.59	7.95	6.07
	15	16.04	13.44	10.55
	20	19.17	17.35	14.00
$\chi=180^\circ$	10	12.70	8.95	6.01
	15	18.68	16.02	12.40
	20	20.02	20.09	15.97

#### 4. 결 론

본 연구는 선수벌브 유무에 따른 쌍동형 선형의 중운동특성을 상용코드(Seakeeper)를 이용하여 추정하였다. 해상상태, 선속 및 조우각에 따른 운동성능을 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

선수과와 선수사과에서는 최대 20%의 운동을 감소시키는 특성을 보였다. 쌍동형 선형에서 조파저항 성능과 중운동특성을 향상시키는데 선수벌브를 적용함이 적절하였다.

향후 선수벌브가 적용된 쌍동형 선형에 선미트림탭의 적용에 따른 중운동의 감소영향이나 횡동요에 대한 부가물에 부착에 따른 단계적 접근이 필요하다.

#### 참 고 문 헌

[1] Atlar, M., Seo, K. C., Sampson, R. and Danisman, D. B.(2013), "Anti-slamming bulbous bow and tunnel stern applications on a novel Deep-V catamaran for improved performance", Int. J. Naval Archit. Ocean Eng, Vol. 5, No. 2. pp. 302-312.

[2] Bruzzone, D., Grasso, A., and Zotti, I.(2008), "Nonlinear Seakeeping Analysis of Catamaran with Central Bulb", International Conference on High Performance Marine Vehicles, pp. 47-61.

[3] Chun, H. H., Chung, Y. K., Chung, S. S., Chang, R. H., Ha, S. W. and Kim, J. M.(1999), "Resistance and Seakeeping Tests of a LOA 47.4m Class Catamaran", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 4, pp. 56-63.

[4] Davis, M. R. and Holloway, D.S.(2003), "The influence of hull form on the motions of high speed vessels in head seas", Ocean Engineering, Vol. 30, pp. 2091-2115.

[5] Fang, C. C., Chan, H. S. and Incecik, A.(1996), "Investigation of Motions of Catamarans in Regular Waves-1", Ocean Engineering, Vol. 23, No 1, pp. 89-105.

[6] Fang, C. C. and Chan, H.S.(2007), "An investigation on the vertical motion sickness characteristics of a high-speed catamaran ferry", Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 1909-1917.

[7] Fang, C. C. and Chan, H.S.(2007), "Investigation of seakeeping characteristics of high-speed catamaran in waves", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 12, No. 1, pp. 1909-1917.

[8] Gim, O.S., Oh, W.J., Shon, C.B. and Lee, G.W.(2010), "Characteristics on the Motion Response of a Catamaran Power Yacht", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 6, pp. 447-452.

[9] Han, S. J., Kim, I. C., Oh, D. K., Lee, G. W. and Gim, O. S.(2012), "Longitudinal Motion Analysis in Multi-Directional Irregular Waves for a Training Ship using Commercial Code", Journal of the Korean Society of Marine Engineering & Safety, Vol. 18, No. 2, pp. 153-159.

[10] Holloway, D. S. and Davis, M. R.(2006), "Ship motion computations using a high Froude number time domain strip theory", Journal of Ship Research, Vol. 50, No. 1, pp. 15-30.

[11] Sahoo, P. K. and Doctors, L. J.(2004), "Theoretical and Experimental Study of Motion Characteristics of High-Speed Catamaran Hull Forms", Practical design of ships and other floating structures, Vol. 9, No. 2, pp. 665-671.

[12] Salvesen, N., Tuck, O.E., and Faltinsen, O.(1970), "Ship Motions and Sea Loads", Trans. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 78, pp. 250-287.

원고접수일 : 2013년 6월 20일  
 심사완료일 : 2013년 10월 10일  
 원고채택일 : 2013년 10월 16일