한국항해항만학회지 제34권 제6호, pp. 447~452, 2010 (ISSN-1598-5725)
Journal of Navigation and Port Research

카타마란형 파워요트의 운동응답 특성에 관한 연구

김옥석* · † 오우준 · 손창배** · 이경우***

* 목포해양대학교 연구원, † 목포해양대학교 대학원, ** 한국해양대학교 해양공학과
*** 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

Characteristics on the Motion Response of a Catamaran Power Yacht

Ok-Sok Gim · † Woo-Jun Oh · Chang-Bae Shon** · Gyoung-Woo Lee****

* *Researcher, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea*
† *Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea*
** *Division of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea*
*** *Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea*

요 약 : 내항성능이 우수한 선체는 나쁜 해상상태에서도 효과적으로 운항이 가능하고, 여객과 화물을 안정된 상태로 유지시키게 된다. 이러한 선체의 운동은 선속과 파도의 조우주파수와 밀접한 관계를 가지고 있다. 운동응답에 대한 평가는 입사파에 대하여 3자유도 운동에 대한 계산이 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 카타마란형 레저보트의 선형설계를 수행하여 이에 대한 운동성능을 고찰하고자 하였다. 조우각과 선속의 변화에 따른 카타마란의 3자유도에 대한 RAO 및 RMS 값의 반복적인 평가를 통하여 양호한 운동응답을 보였다.

핵심용어 : 쌍동선, 선체운동응답, 선체운동, 선형설계, 파랑조건

Abstract : *A very good seakeeping vessel is able to operate effectively even in high sea states and also the passengers and the cargos are ensured in good conditions. The motions of a high speed boats are highly influenced by speed and dynamic forces even in encounter frequencies so that the assessment of seakeeping ability of the design craft in an early stage needs to be calculated for all three motions and for all ralative wave headings. In this paper, it concludes that RAO and RMS values of the catamaran's 3 motion are calculated according as the variation of Beafort scales and ship's speed. The ship motion response of the catamaran based on the RAO and RMS by encounter angles and speed was calculated.*

Key words : *Catamaran, Ship Motion Response, Ship Motion, Hull form design, Wave condition*

1. 서 론

파랑 중에서 선체는 여러 가지 외력의 영향으로 끊임없는 반복적인 운동을 하게 된다. 따라서 선체의 운동에 관한 연구는 크기나 선종에 관계없이 지속적으로 이루어지고 있다(오일근, 1997; Lee et al 2007). 충분한 운동성을 확보하지 못한 선체는 운항자의 작업환경에 나쁜 영향을 줄 뿐만 아니라 구조적인 안정성에도 과도한 피로를 주게 된다. 또한, 적재화물에 하중을 가중시키는 원인으로 작용한다. 따라서 실제 해상상태에서의 불규칙한 해양파의 특성에 따른 안전한 내항성능을 확보해야 한다. 이러한 파랑 중에서 운동하는 선체는 운동에 대항하는 유체반력에 의해 병진이동과 회전운동을 하게 된다. 파랑 중에 있는 선체의 안전성을 평가하는 방법으로는 내항성능(Seakeeping performance) 평가가 일반적으로 적용된다. 내항성능이란 운항자가 예정하고 있는 목적지를 정확히 항해함에 있어서 다양한 해상조건에도 불구하고 승무원의 안전은 물론 선박에 있는 설비의 기능과 성능을 유지하고 운항하는데 요구되는 선박의 요구조건을 말한다고 할 수 있다(Edward et al, 1980).

최근에는 레저선박에 대한 관심과 고속선박에 대한 수요 증가로 인해 내항성능 확보를 위한 연구동향을 살펴보면, Sahoo et al(2004)은 유사한 크기의 카타마란에 대한 다양한 선형을 적용하여 이론과 실험적 부분을 적용하여 운동성능을 해석하였다. 특히 Chine형 카타마란의 경우 선미보다 선수 형상변화로 운동성능 개선에 많은 효과가 있다. 또한 유속이 증가함에 따라 조우주파수 5.5에서 운동성능이 두드러지며, 운동성능이 점차 커지는 형태임을 거론하였다. Fang et al(2004)은 메가급 카타마란에 대해 파랑조건을 적용하여 선체의 내항성능을 추정하였다. 다양한 선형모델을 적용하여 취약한 운동성능을 갖는 입사파에 대한 추정성능을 실험자료와 비교하였다.

국내의 레저선박에 대한 연구로는 박 등(1997)이 고속 쌍동

† 교신저자 : 연회원, woojunoh@mmu.ac.kr 061)240-7142
* 연회원, domingo@mmu.ac.kr 016)614-3001
** 연회원, kaigan@hanmail.net 051)410-5293
*** 종신회원, kwlee@mmu.ac.kr 061)240-7307

선에 대한 설계요소를 거론함으로써 단동선체간 거리를 고려하여 선형선정 등에 효과적 방법을 제시하였다. 실제 운항중에 있는 실적선의 자료를 기반으로 설계선에 대한 선형설계, 조파저항 및 자유수면에서의 파계를 비교분석하였다. 조파저항 및 파계해석을 통하여 개선된 선형과 단동선체간 거리결정에 유효함을 알 수 있었다. 또한, Lee et al(2007)은 초기 카타마란 형상을 결정하고 심해해역과 천수해역에서 저항계수를 추정하였다. 이를 분석하여 도출된 선형과 단동선체간 거리를 자유수면상의 파계를 분석하여 결정하였다. 이러한 결과를 바탕으로 모형시험을 소형 카타마란 설계에서 단계적 선형 설계법을 제시하였다.

카타마란의 운동성능에 대한 연구로 오(1997)는 파랑조건으로 규칙파 및 ITTC 파도 스펙트럼을 적용하였으며, 이를 메가급 고속 카타마란이 항주시 조우주파수에 대해 동적응답에 대해 추정하였으며 수치해석과 실험적인 접근을 시도하였다. 하등(1999)은 쌍동선으로 분류되는 SWATH에 대하여 퍼텐셜 유동에서의 3차원 패널법을 이용한 내항성능 해석결과를 모형시험을 통한 선수파에서의 운동응답 결과와 상호 비교하였다. 이를 통해 고속영역에서 핀 부착은 운동응답이 상당한 감소함을 보여주었다.

본 논문은 우리나라 연·근해에 적합한 소형 카타마란형 파워요트에 대한 선형설계를 수행하고, 이에 대한 내항성능을 평가하였다. 여러 가지 파랑조건에서 선속과 입사파 변화에 따른 카타마란의 운동성능을 추정하였다.

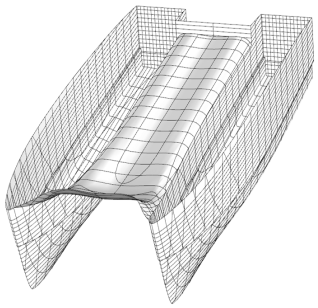
2. 카타마란 선형설계

국내 연안해역의 환경과 설계 요구조건을 만족시키기 위해 현재 운항중인 선박의 기초제원에 대한 실적선 자료를 Table 1과 같이 조사하였다. 이를 바탕으로 선형 및 선저형상을 결정하고 주요제원에 반영하였다. 조사결과에 의하면 선형은 파워요트의 기본적인 제반사항을 갖추고 있으나, 선저형상에 있어서는 라운드 타입의 일반운항용이 많이 보급되어 있다. 그러나 추진력이 우수하고 안정적인 운동성능을 확보하기 위한 설계 요구조건인 활주형 선형을 적용하였다.

Table 1 Principle dimensions of reference ships

Catamaran Model	Loa (m)	Beam (m)	Draft (m)	Displacement (Ton)
Divocean 38 Venturer	11.58	5.3	1.0	-
Afri-Cat Marine 420	11.88	5.97	1.9	-
HAVANA 38	11.87	4.84	1.1	10
Double Play	12.8	5.4	1.0	11.7
Kyla Day	13.1	6.43	0.64	11.2

설계 요구조건으로 승선인원은 1~2가족(5~10명)이며, 주엔진은 350Hp(최대속도는 25knot)로 선정하였다. Fig. 1은 실적선의 선체형상을 개선하여 내항성능을 향상시키고 저항을 감소시키는데 목적을 두고 선형에 대해 반복적 계산을 수행하여 개발한 설계선의 주요제원을 나타낸 것이다. Fig. 2는 고속영역에서 적합한 파워요트의 V형 선저형상을 적용하여 나타낸 선도이다. 선내 구획배치를 고려하여 체계적으로 형상계수을 변환하였으며 운동성능을 향상시키기 위해 반복적으로 계산을 수행하였다.



Loa(m)	11.53 m
Beam(m)	5.15 m
Depth(m)	2.367 m
Draft(m)	0.77 m
Cb	0.465
KG(m)	1.441 m
KB(m)	0.529 m
Disp.(ton)	11.51 ton

Fig. 1 Geometry of design ship

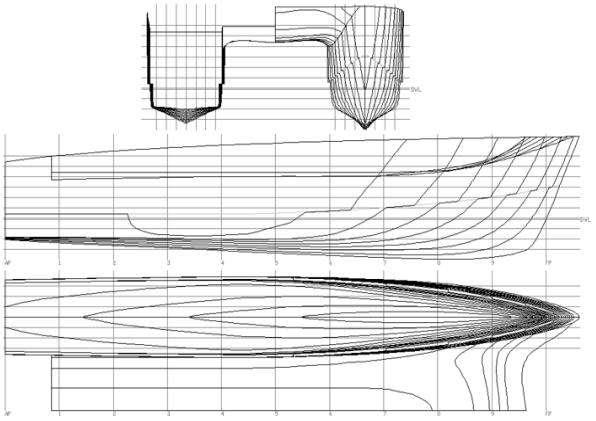


Fig. 2 Lines of a 38-feet catamaran

3. 선체 운동응답 특성

파워요트의 운동응답 특성은 파랑 중에서 요트의 거동을 나타내는 척도로 능파성을 분석하였다. 카타마란은 선수사파를 받으면 피칭이 커져서 선저가 해면에 강하게 부딪치는 팬팅 또는 슬래밍 현상이 발생한다. 또한 추사파를 받게 되면 브로칭 또는 피치폴이 발생할 수 있다. 극한의 운동특성은 선체의 형상 및 제원에 직접적 연관성을 지니며, 더 나아가 운항하는 해상조건에 따라 항해변수로 작용할 수 있다.(김순갑 등, 1994)

해석조건에 적용될 풍속에 따른 파랑정보는 우리나라 기상청 NDBC(National Data Buoy Center)에서 얻어진 2003년부터 2007년까지의 자료를 반영하였다. 완전히 발달된(Fully Developed Sea) 해상상태로 풍속만으로 결정되는 스텍트럼인 Pierson Moskowitz 방법을 선정하여 파랑 정보를 형성하였다.

이 방법은 파면 높이가 19.5m 인 조건에서 일반적인 풍속에 대해 정의한다.

$$S_{\mathrm{PM}\zeta}(\omega)=\frac{A}{\omega^5}\exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right)\quad\left[\begin{matrix}A=8.11\times10^{-3}g^2\\B=0.74\,g^4/\,U_{\mathrm{wind}}\end{matrix}\right]\qquad(1)$$

여기서, A는 *Philp* 상수이며, ω는 파도의 원주파수, g는 중력가속도, U_{wind}는 파랑조건에 적용될 해상의 풍속이다. 계산된 파랑조건은 Beaufort Scale과 비교하여 풍속에 따른 파랑의 영역을 확인하였다. 본 연구에서 카타마란 운동성능을 해석하기 위한 파랑과 선속조건은 Table 2와 같다. 파의 진행방향과 선박 항행 방향이 이루는 각을 조우각(Encounter angle)이라 하며 0도에서 180까지 달리하여 수행하였다.

Table 2 Seakeeping analysis conditions

Condition	Specification
Beaufort Scale (U_{wind} ; knot)	1 Calm (2 knot) 2 Light breeze (5 knot) 3 Gentle breeze (8.5 knot) 4 Moderate breeze (12 knot) 5 Fresh breeze (18 knot) 6 Strong breeze (22 knot)
Encounter angle (deg)	Head seas (180 deg) Bow seas (135 deg) Beam seas (90 deg) Quartering seas (45 deg) Following seas (0 deg)
Ship speed (knot)	0 knot ~ 15 knot ~ 25 knot Stop Cruising Maximum

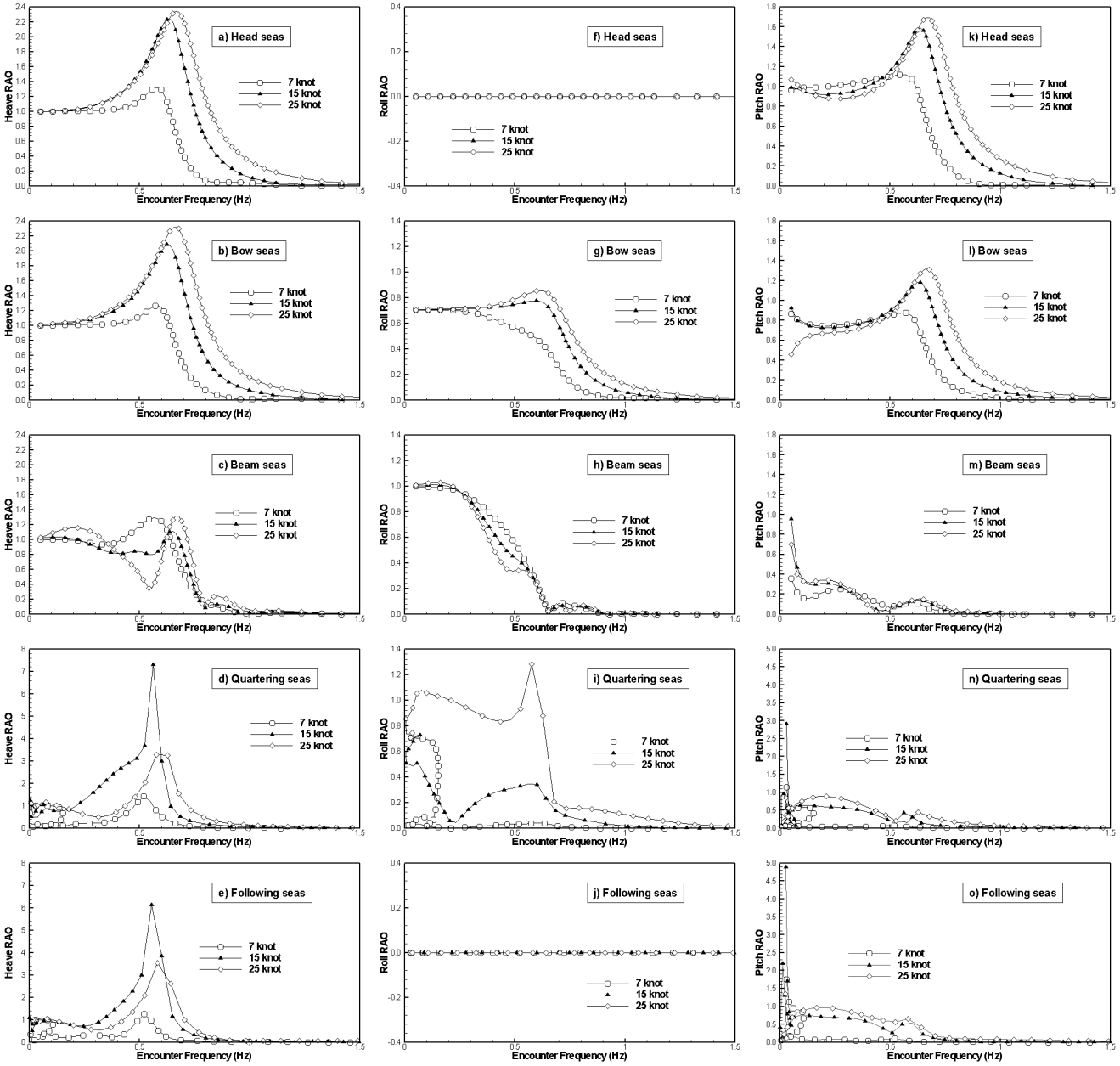


Fig. 3 RAO as a function of the encounter frequency

3.1 응답진폭비

본 논문에서는 파랑조건에서 선체의 내항성능을 수치적으로 표현되는 방법으로 응답진폭비(Response Amplitude Operator; *RAO*)로 하였으며, 이는 선체중심에서 자유상태의 주요각에 대한 계산된 선체 응답진폭비를 산출하게 된다. 파 경사에 의한 Rolling, Pitching 및 Heaving의 RAO이며, 선속 7노트, 15노트, 25노트 조건에서 조우주파수 변화에 따른 응답진폭비로 나타냈다.

Fig. 3은 선체의 진행방향과 파도의 진행방향 성분 관계에 따른 조우주파수 변화시 RAO이다. 각각의 운항속도와 조우각에 따라 수행된 선체의 응답진폭비는 해석영역에서 각자 다른 RAO를 갖는다. 향파에서 Heave RAO는 선속이 7노트이면 조우주파수 0.6에서 상승하여 낮아지는 곡선을 보인다. 그리고 점차 운항속도의 증가로 최대 RAO가 0.7로 이동하며 증가하였다. 이는 선수사파에서도 유사하게 나타났다. 하지만, 횡파조건에서는 조우주파수가 0.6지점을 전후로 항속증가에 따라 응답진폭의 곡선이 교차되며, 상대적으로 향파, 선수파보다 낮게 나타났다. 따라서 횡파에 대한 Heaving 운동은 향파 및 선수사파에 비해 낮게 나타남을 추정할 수 있다.

파도의 진행방향과 선체의 진행방향이 같은 추파와 추사파에서는 선수에서 나타나는 응답진폭비와는 매우 상이한 결과를 얻었다. 조우주파수가 0에서 0.5 사이 영역에서 높은 값의 RAO를 보이며, 특히 0.5에서 가장 큰 운동응답을 보였으며 선수보다 매우 큰 RAO값을 나타냈다. 이는 선체의 진행방향이 파도의 진행방향과 역방향으로 진행할 때 선체의 운항 조건에 상대적으로 이상적이며 안정된 운동을 보임을 나타낸다.

선체의 Roll RAO는 향파와 추파에서는 유속변화에 따라 영향을 받지 않으며 운동응답을 나타내지 않았다. 반면, 선수파에서는 조우주파수 0.6에서 유속에 따라 변화된 곡선을 보였으며 횡파에서는 Roll RAO는 감소되어 조우주파수 0.4지점으로 이동하였다. Roll RAO는 선수사파, 횡파를 지나 추사파가 조건이 될 때는 다시 증가하는 것으로 추사파에 대한 운동성능이 조우주파수 0.5일 때 Heaving와 더불어 복합적으로 나타났다.

Pitch RAO는 향파, 선수사파로 갈수록 조우주파수 0.6과 0.7 지점에서 선속증가에 따라 높은 RAO를 보였으나, 횡파의 경우 현저히 낮아진 Pitch RAO를 보였다. 추파와 추사파의 경우, 조우주파수가 0에서 0.5지점 사이에서 1이하의 Pitch를 보였으나, 조우주파수가 0에 매우 가까운 지점에서 매우 큰 Pitch RAO를 나타냈다. 추파와 추사파는 선체에 Rolling 보다 Heaving과 Pitching이 가장 두드러진 현상을 보임을 알 수 있었다.

3.2 부가저항 계수

운동하는 선체에서 발생하는 부가저항은 조우주파수에 대하여 무차원화된 응답법으로 Gerritsma, Beukelman이 제시한 부가저항계수(C_{aw})로 표현된다.

$$C_{aw} = \frac{R_{aw}}{\zeta_0^2},\ Added\,Resistance\,Coefficient = \frac{R_{aw}}{\zeta_0^2 \rho g B^2 / L} \tag{2}$$

여기서, R_{AW}는 규칙파 부가저항이며 ζ_0은 파진폭, ρ는 밀도, g는 중력가속도, B와 L은 각각 선체의 폭과 길이를 나타낸다. Fig. 4 (a)는 본 연구의 카타마란 부가저항을 나타낸 것으로 파랑조건은 Beaufort Scale 3이다. 선속이 20knot 일 때, 45도 추사파에서 3.16kN의 가장 높은 수치가 나타났다.

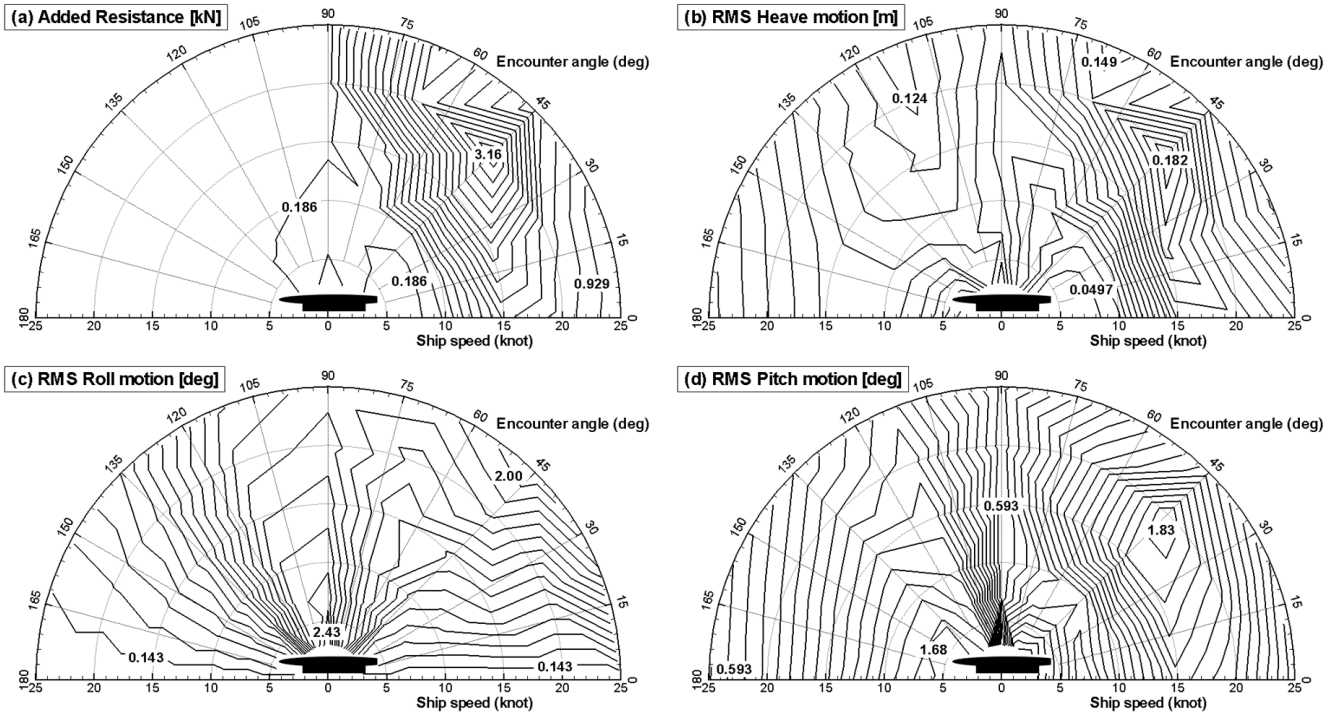


Fig. 4 Added resistance & RMS motion at the Beaufort scale 3

주어진 파랑해석 조건을 기반으로 카타마란의 운동 응답 스펙트럼을 구하였다. 운동응답 스펙트럼이 $S_{\phi}(\omega_e)$이고, 운동 응답 스펙트럼 곡선 아래면적을 m_0라 하면 운동응답의 표준편차를 다음과 같이 나타낸다.

$$RMS = \sqrt{m_0} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_{\phi}(\omega_e)\, d\omega_e} \tag{3}$$

Fig. 4 (b)부터 (d)까지는 Beaufort Scale 3 상태의 파랑조건에서 각각의 내항성능을 나타낸 것이다. 선수향파에서 횡파, 추파까지 변화된 조우각에서 선속 증가에 따라 주된 동요지점을 형성하였으며, 이렇게 강하게 나타난 RMS값은 선체 운동에 주된 요인이 된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각의 파랑조건에서 수행된 부가저항과 RMS운동의 최대치를 선속과 조우각에 따른 결과를 나타낸 것이다. 부가저항은 선속 10노트일 때, 파랑조건이 Beaufort Scale 1이고 조우각이 67.5도 지점에서 수치가 최대인 영역을 보였다. Beaufort Scale 값이 증가함에 따라 선속이 20노트 지점에서 최대 부가저항값을 나타냈으며, Beaufort Scale 3 이후에서는 조우각이 45도이며 선속 20노트에서 최대 부가저항이 나타남을 알 수 있다.

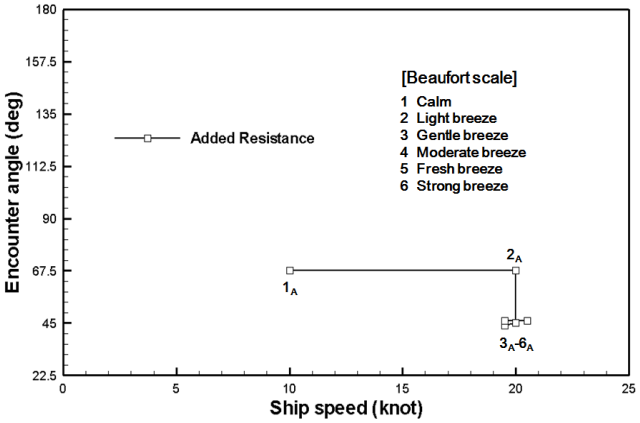


Fig. 5 Maximum added resistance values by sea state

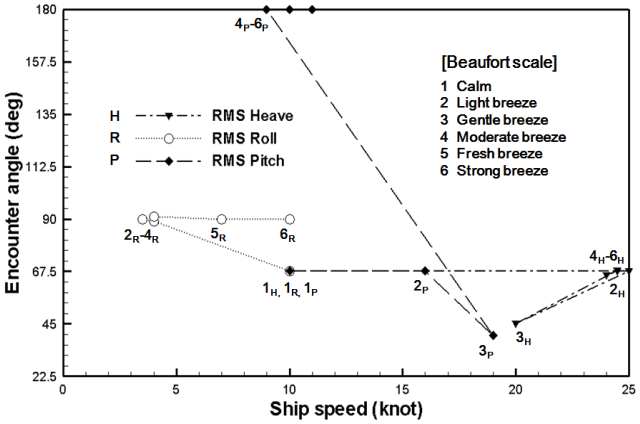


Fig. 6 Maximum RMS values by sea state

RMS Heave, RMS Roll, RMS Pitch는 선속 10노트에서 Beaufort Scale 1에서 조우각이 67.5도 지점에서 동일하게 최대 RMS값을 보였다. RMS Heave운동은 10노트에서 25노트까지 Beaufort Scale 값이 증가함에 따라 동일한 조우각인 67.5도 부근에서 최대값을 보였다. 그러나 Beaufort Scale 3에서는 20노트에서 조우각 45도에서 최대값은 나타났다.

부가저항과 RMS Heave값의 최대값을 나타낼 경우는 추사파인 경우로서 조우각 45도와 67.5도 지점에서 두드러지게 나타났다.

RMS Roll의 결과를 살펴보면 Beaufort Scale값이 증가함에도 불구하고 10노트 이하의 낮은 선속에서 횡파에서 높은 동요를 나타내고 있다.

RMS Pitch의 경우, Beaufort Scale 4 이후가 되면 향파에 대한 저속의 선속조건이 Pitching의 주된 운동응답으로 나타났으며, 이는 슬래밍현상과 결부시켜 설명이 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 연안 해양환경에 대한 기초자료를 토대로 카타마란 설계에 따른 선체의 운동응답 특성을 연구하였다. 선체의 운항속도, 파랑조건, 입사파에 따라 운동성능을 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Heave RAO는 향파와 선수사파 조건에 비해 횡파에서 운동응답이 낮게 나타나며, 카타마란의 진행방향이 파도의 진행방향과 역방향으로 진행할 때 선체의 운동성능이 상대적으로 이상적으로 나타났다. Roll RAO는 향파와 추파에서는 영향이 없으며, 추사파에 대해 조우주파수 0.5이면 Heave motion과 Roll motion이 복합적으로 일어났다.

카타마란의 운동성능은 추사파에 대해 전체 유속조건에서 복합적인 RMS를 보이며, 운동성능과 더불어 높은 부가저항을 보인다. 파랑조건이 Beaufort Scale 3을 전후하여 저속영역에서는 Roll motion이 강하며, 고속영역에서는 Pitch와 Heave motion이 두드러지게 나타났다.

선체의 부가물. 즉, 특히 Roll motion 감쇠에 가장 큰 영향을 미치는 조파 및 부가물에 대한 단계적 접근이 필요하다. 또한, 향후 본 연구와 연계하여 카타마란에 대한 실험적 비교연구를 수행하여 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

[1] 김순갑, 박문수, 공길영(1994), “선박종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구”, 한국항해학회지 제18권 제2호, pp.19-40.

[2] 박명규, 신영균(1997), “고속 쌍동선(Fast Catamaran)의 선형설계와 고찰”, 한국항해학회지 제21권 제2호, pp.41-46.
[3] 손경호(1998), 해양파역학, 효성출판사.
[4] 오일근(1997), “고속쌍동선의 운동특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지 제11권 제3호, pp.116-123.
[5] 하동대, 전호환, 김문성(1999), “SWATH선의 내항성능에 관한 연구”, 부산대학교 생산기술연구소논문집 제56집, pp.369-377.
[6] Edward N, Comstock · Robert G, Keane; Seakeeping by Design, Naval Engineers Journal, April 1980, p.157.
[7] Fang Chinh-Chung, Chan Hoi-Sang (2004), “Investigation of seakeeping characteristics of high-speed catamaran in wave”, Journal of Marine Science and Technology Vol.12 No.1, pp.7-15.
[8] Lee, S. H., Lee, Y. G., and Kim, S. H.(2007), “On the development of a small catamaran boat”, Ocean Engineering Vol.34, pp.2061 - 2073.
[9] Sahoo, P. K., 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.
[10] Seakeeper v.14, Formation Design Systems Pty Ltd 1998 - 2009, User Manual.

원고접수일 : 2010년 6월 21일
심사완료일 : 2010년 8월 25일
원고채택일 : 2010년 8월 26일