

## 船尾式 트롤船의 海洋航行中 波高와 船速에 따른 船體 動搖特性

강일권 · 박병수

(경상대학교 해양과학대학 해양산업연구소)

### 1. 서 론

항행하는 선박은 파도, 바람 및 조류 등의 외력을 받으며 이에 따라 여러가지 운동을 하게 되고, 기상이 악화되는 경우에는 파랑충격, 해수침입 혹은 과도한 선체 동요에 의해 선체, 화물 등의 손상을 입게 된다.

이들 외력에 대한 선체의 운동 성능, 즉 내항성의 연구는 주로 일반 대형 상선을 중심으로 이루어져 왔고, 상대적으로 파랑의 영향을 많이 받는 소형 어선에 대한 이들의 연구는 매우 부족한 실정이다.

어선은 일반 상선과 다른 운항 조건, 즉 각종 어구, 어업기기를 선상에 배치하여 황천 중에도 조업을 하는 일이 많으며, 조업 중 급변하는 천후에 신속히 안전대책을 강구해야 하는 경우도 있다. 그러므로 어선에는 상선의 통상적인 항행 성능에 부가하여 조업 수행에 따라 일어나는 복잡한 운동성능과 황천에 대한 충분한 감항능력도 함께 보유해야 할 것이다. 따라서 해상에 있어서 어선의 운동의 합리적인 해석 방법을 얻기 위해 내항성에 대한 보다 과학적이고 체계적인 연구가 필요하다.

어선의 해난사고의 대부분은 바람과 파도가 중요한 원인으로 되고 있지만, 현실적으로 볼 때 조선자가 어로 작업에 더 큰 비중을 두고 어선의 내항성을 무시한 무리한 조선이 그 원인이 되는 경우가 많다.

이러한 것은 어선이 파랑, 바람, 조류 등의 해양환경 아래서 조업 혹은 운항하는데 필요한 성능, 즉 어선의 내항성 파악에 소홀한 것이 그 원인의 하나로 볼 수 있다. 따라서 조업 혹은 운항 중의 안전을 위하여 어선의 내항성에 대해서 다양하고 정확하게 평가해야 할 필요가 있다.

그리고 어선이 조업 혹은 운항을 수행할 때 파고의 변화와 선속의 변화에 따른 선체 응답특성을 선박의 크기에 따라 파악해 두는 것은 안전성의 관점에서 중요한 요소의 하나가 될 것이다.

본 논문에서는 어선 중 선미식 트롤선을 대상으로 크기가 서로 다른 3척의 선박에 대하여 파랑의 크기가 서로 다를 때 항행 중의 선체 응답특성 측정실험을 실시하고 이들 실험 결과를 비교, 검토하여 파랑의 크기가 어선의 선체 응답에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 파악하였다. 또한 선속의 변화가 선체응답특성에 미치는 영향에 대해서도 고찰하였다.

## II. 선체운동의 이론

### 1. 운동방정식

선체운동의 이론적인 계산은 현재 파랑중의 선체의 내항성능을 해석할 때 많이 사용하고 있는 OSM(Ordinary Strip Method)을 사용하며 이때 6자유도의 선체 운동방정식은 다음과 같다.<sup>1), 2), 3), 4)</sup>

#### 1) 상하동요와 종동요의 연성운동방정식

$$\begin{aligned} A_{11} \ddot{\xi} + A_{12} \dot{\xi} + A_{13} \xi + A_{14} \ddot{\theta} + A_{15} \dot{\theta} + A_{16} \theta &= F_{\xi} \\ A_{21} \ddot{\xi} + A_{22} \dot{\xi} + A_{23} \xi + A_{24} \ddot{\theta} + A_{25} \dot{\theta} + A_{26} \theta &= M_{\theta} \end{aligned} \quad (2.1)$$

#### 2) 좌우요, 선수요, 횡동요의 연성운동방정식

$$\begin{aligned} a_{11} \ddot{\eta} + a_{12} \dot{\eta} + a_{13} \eta + a_{14} \ddot{\psi} + a_{15} \dot{\psi} + a_{16} \psi + a_{17} \ddot{\phi} + a_{18} \dot{\phi} + a_{19} \phi &= F_{\eta} \\ a_{21} \ddot{\eta} + a_{22} \dot{\eta} + a_{23} \eta + a_{24} \ddot{\psi} + a_{25} \dot{\psi} + a_{26} \psi + a_{27} \ddot{\phi} + a_{28} \dot{\phi} + a_{29} \phi &= M_{\psi} \\ a_{31} \ddot{\eta} + a_{32} \dot{\eta} + a_{33} \eta + a_{34} \ddot{\psi} + a_{35} \dot{\psi} + a_{36} \psi + a_{37} \ddot{\phi} + a_{38} \dot{\phi} + a_{39} \phi &= M_{\phi} \end{aligned} \quad (2.2)$$

#### 3) 전후요의 운동방정식

$$A_{31} \ddot{\xi} + A_{32} \dot{\xi} + A_{33} \xi = F_{\xi} \quad (2.3)$$

### 2. 불규칙파 중의 응답스펙트럼

횡동요응답(roll response)에 관한 에너지스펙트럼을  $S_{\phi}(\omega_e)$ 라 하면 만남파 스펙트럼과 횡동요의 응답스펙트럼 사이에는 다음의 식이 성립한다.<sup>5)</sup>

$$S_{\phi}(\omega_e) = S_{\xi}(\omega_e) \cdot |H(\omega_e)|^2 \quad (2.4)$$

여기서  $S_{\zeta}(\omega_e)$ 는 만남파 스펙트럼,  $H(\omega_e)$ 는 횡동요응답의 만남 주파수에 대한 전달함수를 나타낸다. 식(2.4)를 횡동요진폭( $\phi_a$ )과 파진폭( $\zeta_a$ )을 이용하여 고쳐 쓰면 다음과 같다.

$$S_{\phi}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) \cdot \left(\frac{\phi_a}{\zeta_a}\right)^2 \quad (2.5)$$

따라서 특정해역에서의 해상상태가 주어지면 그 해상상태를 나타내는 표준 스펙트럼과 strip방법으로부터 계산한 전달함수를 적용함으로써 특정해역에서의 횡동요응답의 에너지스펙트럼을 구할 수 있고, 이로부터 여러가지 운동의 통계치를 추정할 수 있다. 이것은 또한 종동요응답(pitch response)에도 그대로 적용된다.

본 연구에서의 파랑에 관한 자료는 실선시험에서 목측으로 관측한 유의파고와 평균파주기를 이용하여 다음과 같이 표시되는 ISSC 스펙트럼을 이용한다.<sup>6)</sup>

$$S_{\zeta}(\omega) = 0.11 H_w^2 \omega_1^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^{-5} \exp\left[-0.44 \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^{-4}\right] \quad (2.6)$$

단,  $\omega$  : 파도의 원주파수(circular frequency)

$$\omega_1 : \text{평균 주파수} = \frac{2\pi}{T_{01}}$$

$T_{01}$  : 평균 파주기

$H_w$  : 유의파고(significant wave height)

### III. 실험 방법

실선실험은 3척의 실습선, 즉 Pusan-404(GT160), Kaya(GT1.737), Saebada(GT2.275)(이하 차례로 A, B, C선이라 한다)를 이용하여 항해 중 종동요와 횡동요를 계측하였으며, 계측장치는 참고문헌(7)의 TCM1 module을 사용하였다.

각 선박의 파와의 만남각에 대한 각 항목의 측정 시간은 10분간씩, sampling 간격은 A선과 B선은 0.5sec, C선은 0.25sec로 취하고, AMP와 A/D convert를 이용하여 PC에 실시간 기록하였다.

각 선박의 제원 및 body plan, 실험해역, 실험시 해상상태, 동요기록 등은 참고문헌(8)에 나타낸 것과 같다.

실험시의 각 선박의 속력은 통상의 항해속력으로 하였으며 파랑관측은 목측으로 행하였고, 이론계산으로 역추정하여 목측에 의한 관측치의 오차를 최소화하도록 하였다.

본 연구에 사용된 자료는 파고에 따른 각 선박의 동요특성을 얻기 위하여 파고가 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5m(선박에 따라 약간의 차이가 있다)일 때 각각의 선박을 선수로부터 45° 간격으로 선미파까지 5방향의 파향(선수파, 선수사파, 횡파, 추사파, 선미파)에 따라 항주시켜 선체 응답을 계측한 것이며, 또한 선속의 변화에 따른 동요특성을 구하기 위해서는 C선에 대해 선속을 전진 극미속, 미속, 반속, 전속으로 구분하여 각각의 파향에 따라 선박을 항주시켜 응답을 계측한 종동요와 횡동요의 자료를 이용하였다.

### IV. 결과 및 고찰

선체와 파의 만남각이 선수미선에 대해 대칭적인 방향일 때는 양자의 동요의 주기, 진폭 및 감쇠상황 등은 대개 비슷한 경향을 나타내므로 여기서는 한쪽의 방향, 즉 파향에 대하여 선수에서부터 시계방향으로 45도 간격으로 선미까지 5방향에 대해서만 고찰하도록 하며, 실험에서 얻어진 선체 응답스펙트럼은 Barlett의 삼각윈도우를 이용하여 평활화하여 나타내었다.

#### 1. 선미식 트롤선의 파고에 따른 선체동요특성

##### 1) A선의 주파수 응답특성

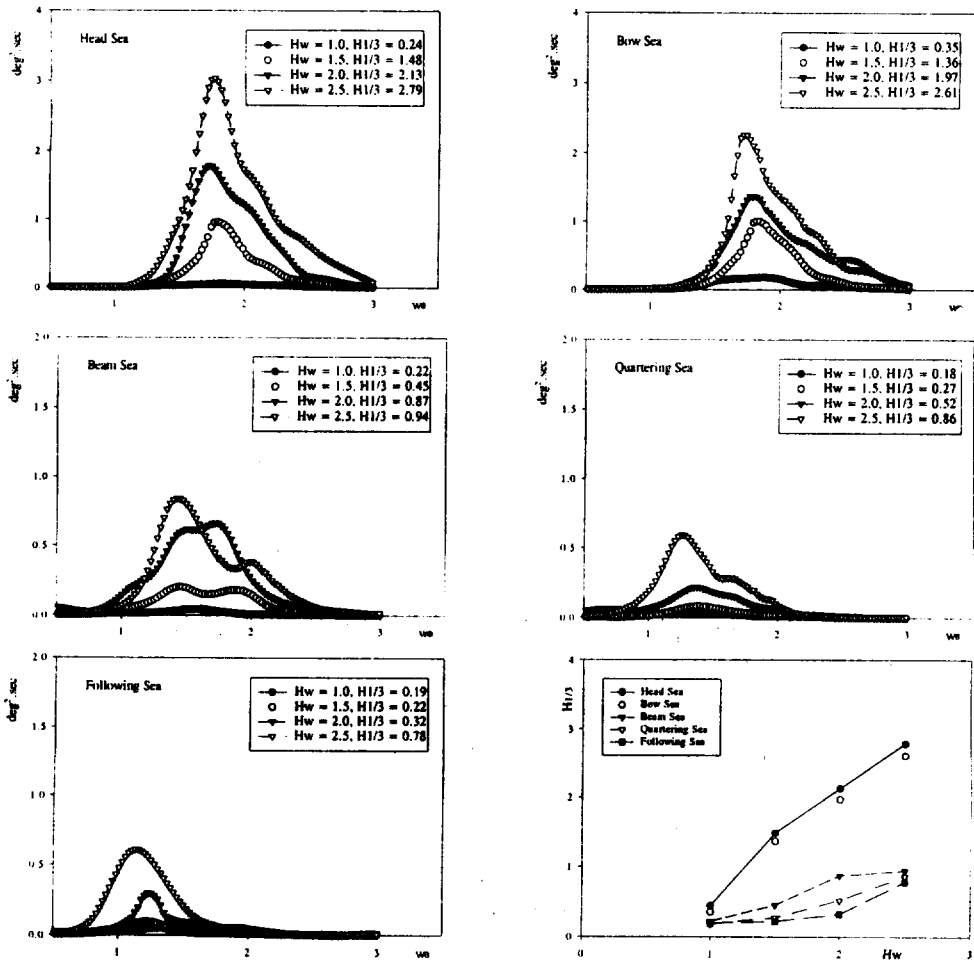


Fig. 1. The spectra of pitch motions of the stern trawler A according to the wave heights.

Fig.1은 유의파고가 1.0, 1.5, 2.0, 2.5m 일때의 A선의 종동요응답의 스펙트럼을 선수파, 선수사파, 횡파, 추사파, 선미파로 구분하여 나타낸 것이며, 그림 중 우하단의 것은 유의치만 취해 표시한 것이다.

이 그림에 나타난 바와같이 파고의 변화에 따른 종동요응답의 변화는 선수파와 선수사파에서 매우 크다. 선수파에서 파고가 2.5m일때의 응답의 유의치는 2.79로써 파고 1.5m일 때 보다 1.9배 크게 나타났다.

횡파, 추사파와 선미파에서는 파고의 변화에 따른 종동요응답의 변화는 매우 적었다.

종동요응답의 피크주기는 응답이 가장 큰 선수파에서 파고의 변화에 관계없이 3.6sec에 나타났다.

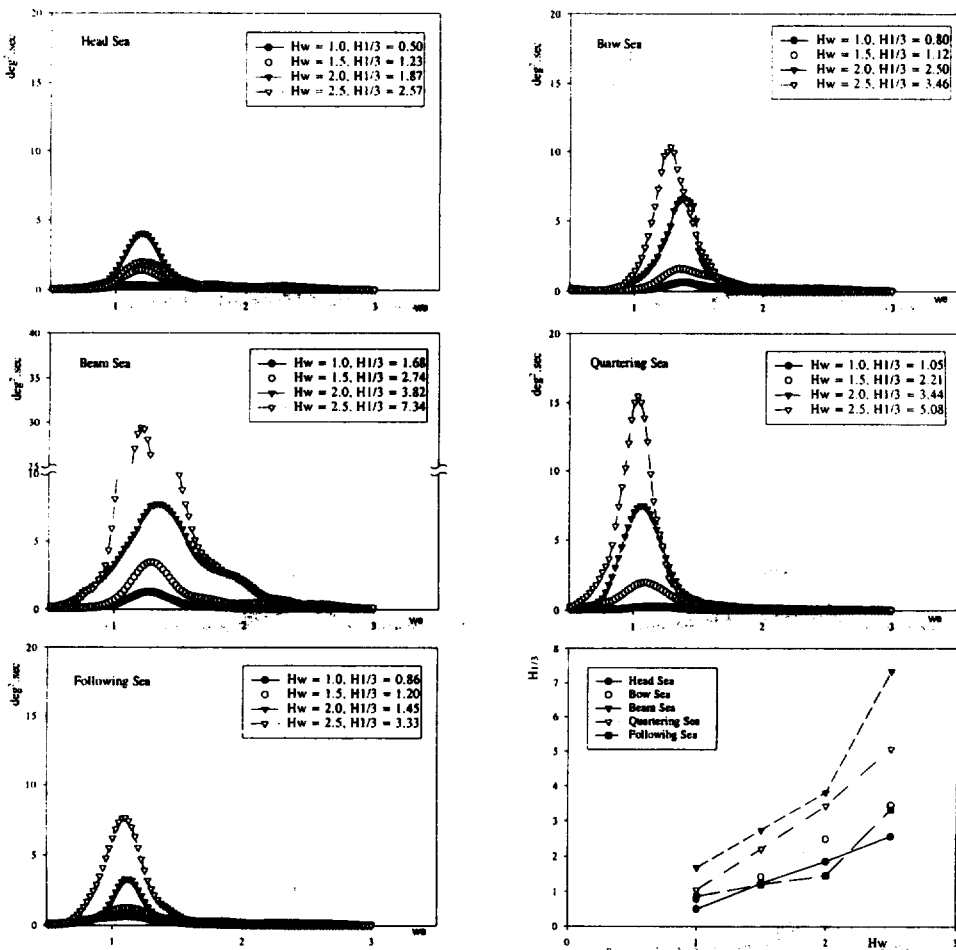


Fig. 2. The spectra of roll motions of the stern trawler A according to the wave heights.

Fig.2는 Fig.1과 같은 조건에서 A선의 횡동요응답의 스펙트럼을 나타낸 것이다.

이 그림에 나타난 바와같이 파고의 변화에 따른 횡동요응답의 변화는 횡파와 추사파에서 크며, 특히 횡파의 경우 파고 2.0m 이상에서 응답이 급격히 증대되는 현상을 보이고 있다. 횡파에서 파고 2.5m일때의 응답의 유의치는 7.34로써 파고 1.5m일 때 보다 2.7배 크게 나타났다.

선수사파와 선수파에서는 파고의 변화에 따른 횡동요응답의 변화는 상대적으로 적었으나, 선미파에서는 파고가 2.0m 이상이 되면 매우 커지는 경향을 나타 내었다.

횡동요응답의 피크주기는 응답이 가장 큰 횡파에서 파고에 따라 약간의 차이가 있지만 대략 5.0sec에 나타났다.

## 2) B선의 주파수 응답특성

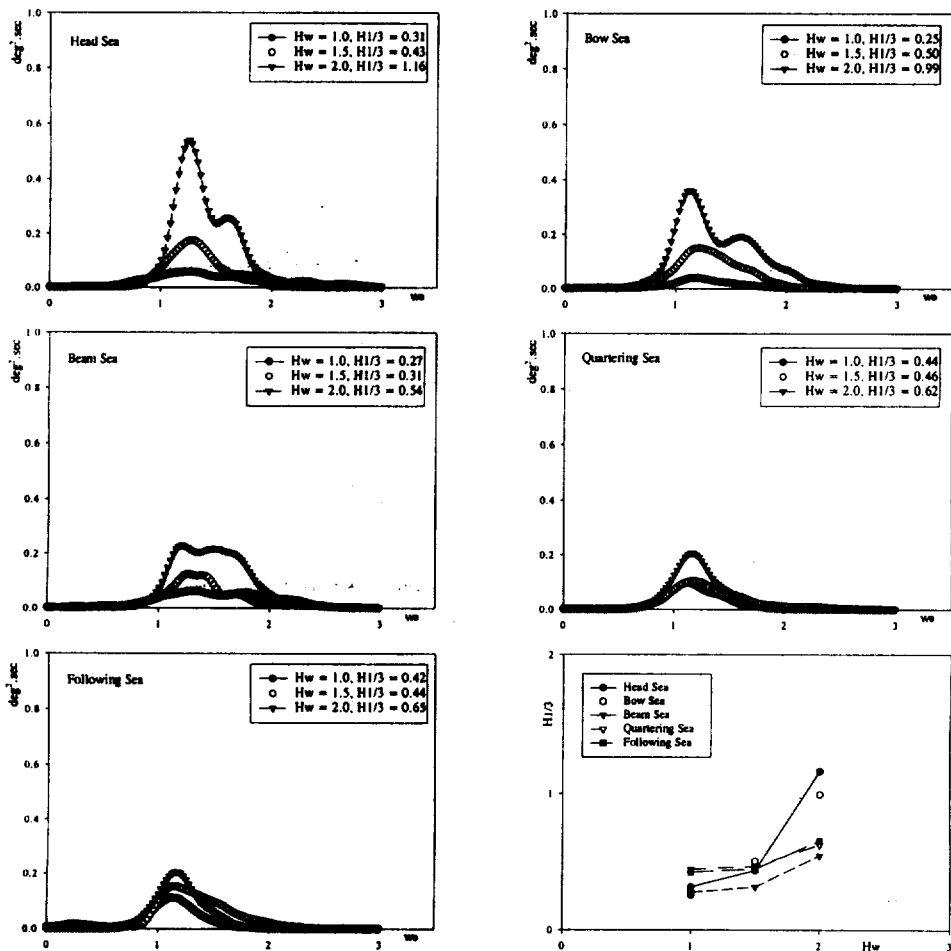


Fig. 3. The spectra of pitch motions of the stern trawler B according to the wave heights.

선미식 트롤선의 해양항행중 파고와 선속에 따른 선체 동요특성

Fig.3은 유의파고가 1.0, 1.5, 2.0m 일때의 B선의 종동요응답의 스펙트럼을 선수파, 선수사파, 횡파, 추사파, 선미파로 구분하여 나타낸 것이며, 그림 중 우하단의 것은 유의치만 취해 표시한 것이다.

이 그림에서 나타난 바와같이 파고 1.5m 이하에서는 B선의 종동요응답은 파고와 파향에 따른 큰 변화를 보이지 않으나, 파고 1.5m 이상에서는 응답의 크기는 증대하며, 특히 선수파와 선수사파에서는 증대폭이 크다.

파고의 변화에 따른 종동요응답의 변화가 가장 큰 선수파에서 파고 2.0m일 때 응답의 유의치는 1.16으로 1.0m일 때 보다 3.7배의 높은 값을 나타내었다.

횡파, 추사파와 선미파에서는 파고의 변화에 따른 종동요응답의 변화는 크지 않았다. 종동요응답의 파크 주기는 응답이 가장 큰 선수파에서 파고의 크기에 관계없이 7.9sec에 나타났다.

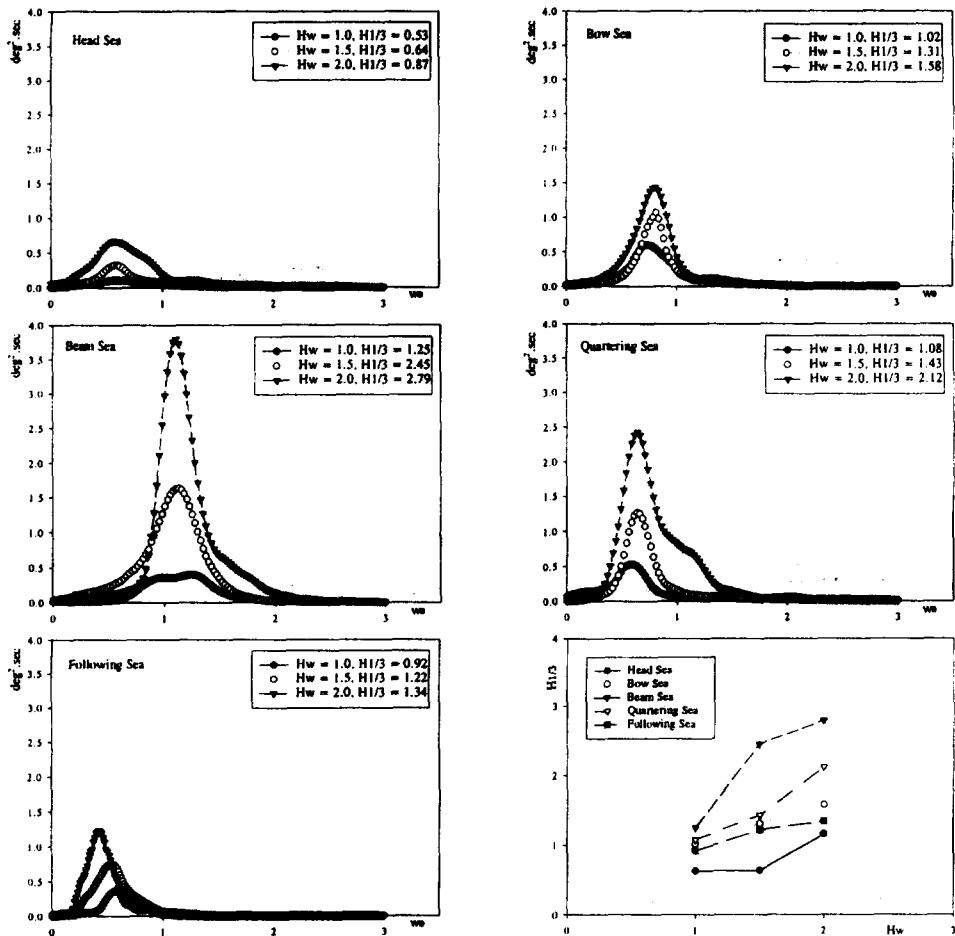


Fig. 4. The spectra of roll motions of the stern trawler B according to the wave heights.

Fig.4는 Fig.3과 같은 조건에서 B선의 횡동요응답의 스펙트럼을 나타낸 것이다.

이 그림에서 나타난 바와같이 파고의 변화에 따른 횡동요응답의 변화는 횡파에서 가장 크다. 그러나 횡파에서는 파고 1.5m를 초과하면 응답의 증대치가 둔해지는 경향이 있으나, 사추파에서는 오히려 급격히 증대되는 현상을 보이고 있다.

횡파에서 파고 2.0 m일때의 횡동요응답의 유의치는 2.79로써 파고 1.0 m일 때 보다 2.2배 크게 나타났다.

선수사파와 선미파에서는 파고에 따른 횡동요응답의 변화는 상대적으로 낮게 나타났다.

횡동요응답의 피크주기는 응답이 가장 큰 횡파에서 파고의 크기에 관계없이 5.8 sec에 나타났다.

### 3) C선의 주파수 응답특성

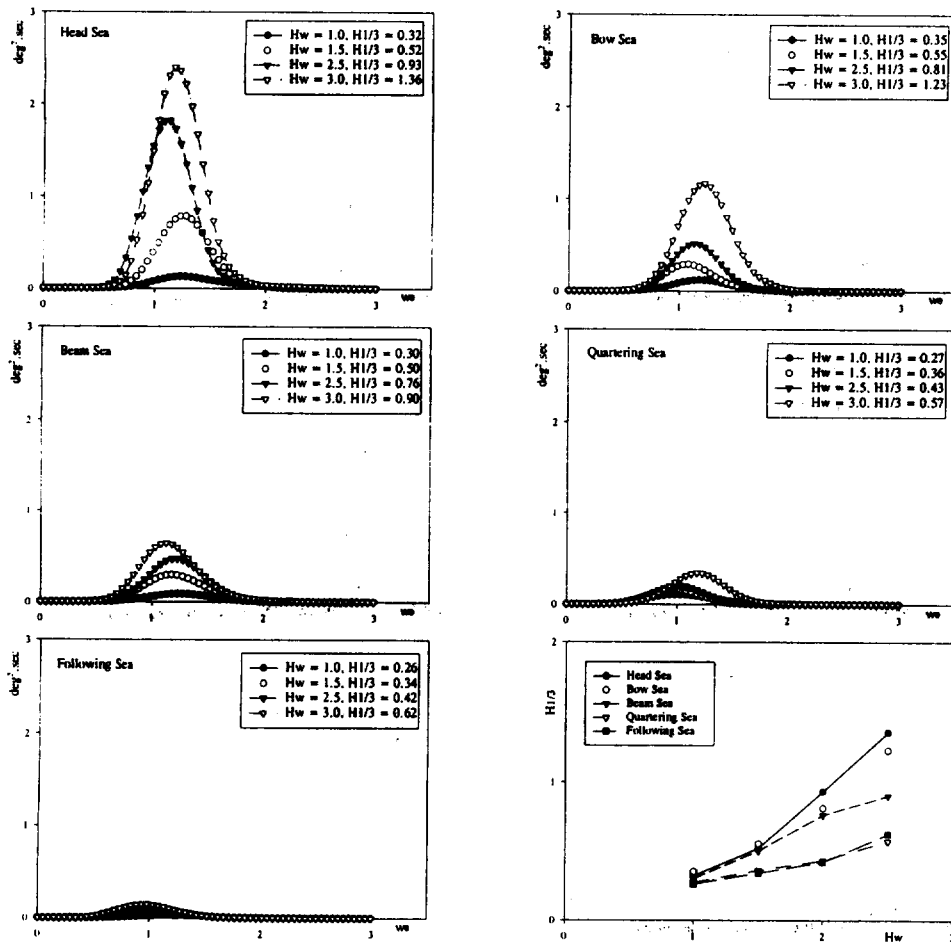


Fig. 5. The spectra of pitch motions of the stern trawler C according to the wave heights.



선미식 트롤선의 해양항행중 파고와 선속에 따른 선체 동요특성

Fig.5는 유의파고가 1.0, 1.5, 2.5, 3.0 m 일때의 C선의 종동요응답의 스펙트럼을 선수파, 선수사파, 횡파, 추사파, 선미파로 구분하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 나타난 바와 같이 종동요응답의 크기는 파고가 1.5 m이하일 때는 파향에 따른 큰 변화가 보이지 않는다. 그러나 파고가 2.0 m이상 이 되면 선수파와 선수사파에서 응답이 현저하게 커진다.

종동요응답의 변화가 가장 큰 선수파에서 파고 3.0 m일때의 응답의 유의치는 1.36으로써 파고 1.5 m일 때 보다 2.6배 크게 나타났다.

횡파에서도 응답의 크기가 상대적으로 크게 나타났으나, 추사파와 선미파에서의 변화는 적었다.

종동요응답의 피크주기는 선수파에서 파고에 따라 약간의 차이가 있으나 대체로 8.1 sec에 나타났다.

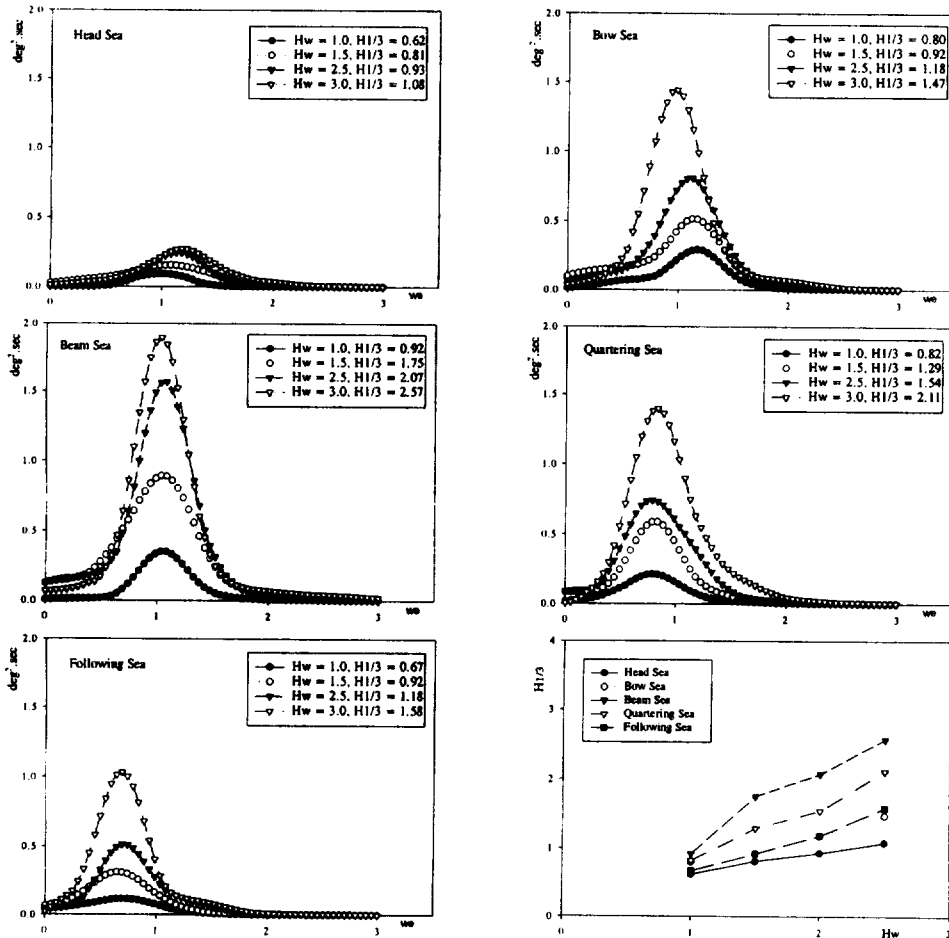


Fig. 6. The spectra of roll motions of the stern trawler C according to the wave heights.

Fig.6은 Fig.5와 같은 조건에서 C선의 횡동요응답의 스펙트럼을 나타낸 것이다.

이 그림에서 나타난 바와같이 파고의 변화에 따른 횡동요응답의 변화는 선수파를 제외 하면 각각의 파향에서 매우 크다.

횡동요응답의 변화가 가장 큰 횡파의 경우 파고 3.0 m일 때의 유의치는 2.57로써 파고 1.5 m일 때 보다 1.5배 크게 나타났다.

횡동요응답의 피크주기는 응답이 가장 큰 횡파에서 파고의 변화에 관계없이 일정하게 6.1 sec에 나타났다.

이상과 같이 세 선박에 대해 파고의 변화에 따른 종동요응답과 횡동요응답을 살펴 본 바와같이 종동요응답의 경우에는 모두 선수파와 선수사파에서 응답의 변화가 크고 그외의 파향에서는 응답의 크기 변화가 적었다.

한편 횡동요응답의 경우에는 횡파에서 응답의 변화가 가장 컸으나 파고가 일정 이상이 되면 추사파와 선미파에서도 급격히 응답이 커질 가능성이 있다.

따라서 항해시 파고가 일정 이상이 될 때 선수파를 받으면 종동요응답이 커지고, 횡파 또는 사추파를 받으면 횡동요응답이 커지므로 본선의 안전을 위하여 이점에 유의해야 할 것이다.

특히 횡파, 사추파와 선미파에서 일정 이상의 파고를 받을 경우 동조현상이 일어날 가능성이 있어 전복에 이를 수 있으므로 조선자는 선속과 파속에 유의해서 조선행야 할 것이다.

선박의 크기와 파향에 따른 위험 한계 파고에 대한 것과 추파에 의한 동조현상은 앞으로 연구할 과제로 남겨 놓는다.

## 2. 선미식 트롤선 C선의 선속에 따른 선체동요특성

선미식 트롤선의 선속의 변화에 따른 선체 종동요와 횡동요의 응답특성을 파악하기 위해 C선박을 이용하여 선속을 극미속(3k't), 미속(5k't), 반속(8k't), 전속(11k't)으로 구분하고 파향과 각각의 선속에 따른 선체 동요의 응답을 계측하였다. 이때의 유의파고는 2.5 m이다.

Fig.7은 선속에 따른 C선의 종동요응답을 나타낸 것이고, 우단의 것은 유의치만 취해서 표시한 것이다.

이 그림에서 나타난 바와같이 C선의 종동요응답은 선수파, 선수사파와 횡파에서는 선속이 빨라지면 동요응답도 완만하게 증가하는 경향을 보였으나, 추사파와 선미파에서는 선속이 빨라지면 오히려 동요응답이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 추사파와 선미파에서의 동요응답은 단순하지 않아 더 많은 연구가 이루어져야 일반적인 현상을 찾을 수 있으리라 보아진다.

선미식 트롤선의 해양항행중 파고와 선속에 따른 선체 동요특성

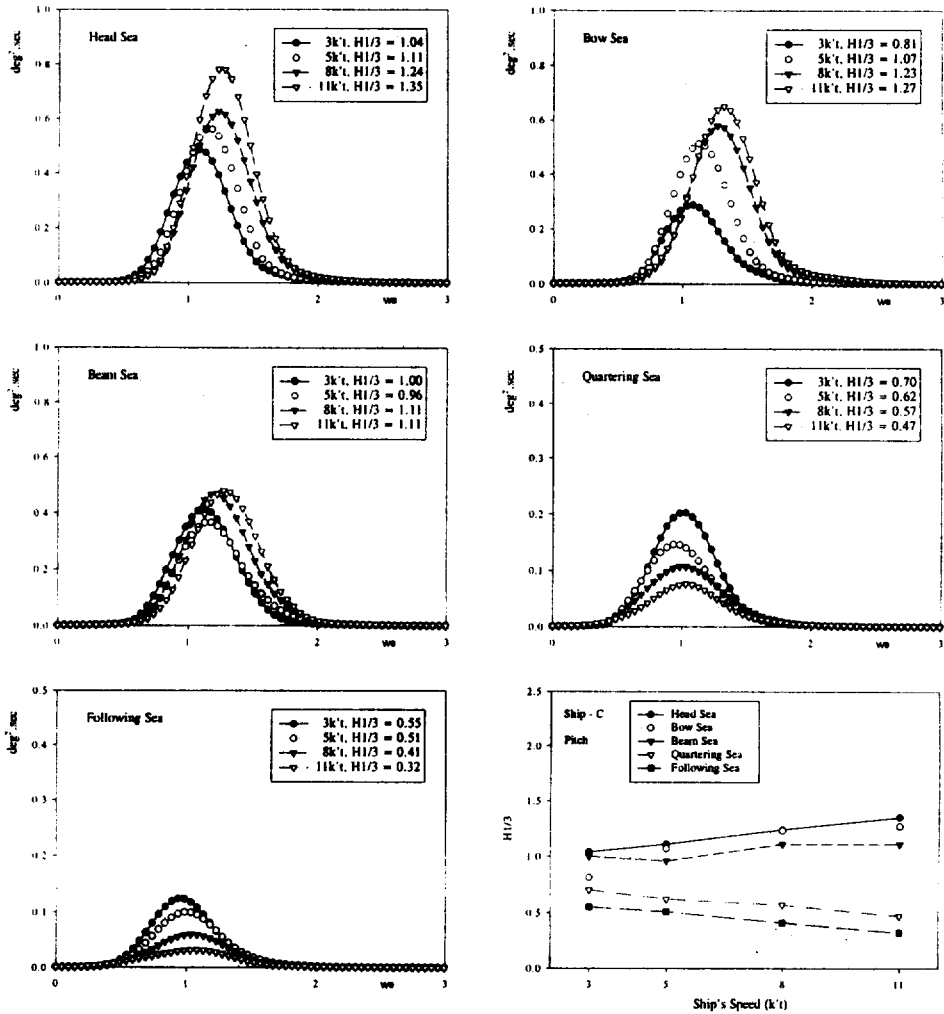


Fig. 7. The spectra of pitch motions of the stern trawler C according to the ship's speed.

Fig.8은 선속에 따른 C선의 횡동요응답을 나타낸 것이고, 우단의 것은 유의치만 취해서 표시한 것이다.

이 그림에서 나타난 바와같이 C선의 횡동요응답은 횡파, 추사파 그리고 선미파에서는 선속 5 k't~8 k't에서는 선속이 빨라지면 동요응답도 매우 증가하는 경향을 보이고 있으나, 8 k't 이상이 되면 선속에 관계없이 일정한 값을 나타내는 경향을 보였다.

선수파와 선수사파에서의 횡동요응답의 변화는 선속과는 거의 관계없는 것으로 나타났다.

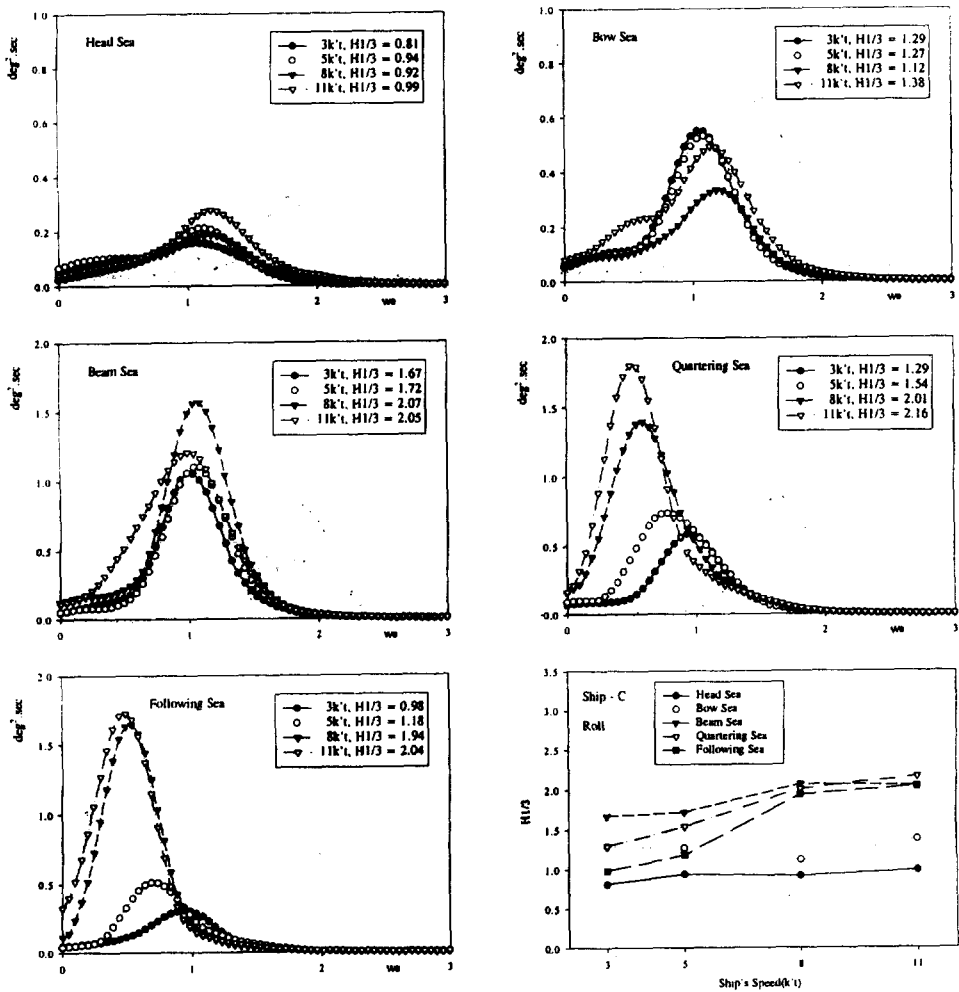


Fig. 8. The spectra of roll motions of the stern trawler C according to the ship's speed.

## V. 결론

선미식 트롤선의 해양 항행 중 파고와 선속에 따른 선체 동요특성을 파악하기 위하여 3척의 선미식 트롤선에 대해 실선실험을 수행하고 이것을 통계적 방법과 이론적인 방법으로 분석하였다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 파고에 따른 선체 종동요의 응답특성 중 선박의 크기와는 관계없이 선수파와 선수사파에서 크며, 횡동요응답 특성은 횡파와 추사파에서 컸다.

- (2) 선체 종동요의 응답특성과 횡동요의 응답특성 중 피크주기는 파고의 크기에 관계 없이 대체로 일정한 값을 가졌다.
- (3) 선체 종동요에서 선속이 증대되면 선수파, 선수사파의 응답은 증대된다. 그러나 추사파와 선미파에서의 응답은 선속에 따라 다양한 형태로 반응한다.
- (4) 선체 횡동요에서 선속이 5 k't~8 k't일 경우에는 횡파, 추사파 그리고 선미파에서 응답이 크게 증대되나 그 이상의 선속이 되면 속력의 영향은 거의 없으며, 선수파와 선수사파에서의 응답은 선속의 변화에 영향을 거의 받지 않는다.

### 참고 문헌

- 1) 高石敬史, 黒井昌明 : “波浪中船體運動の實用計算法 ‘耐航性に関するシンポジウム(第2回)’”, 日本造船學會, 1977, pp. 109~133.
- 2) KORVIN-KROUKOVSKY, B. V., “Theory of Seakeeping”, SNAME, New York, 1961, pp. 152~178.
- 3) 福田淳一 : 耐航性に関するシンポジウムテキスト, 日本造船學會, 1969, pp. 99~119.
- 4) 武田 誠一 外 : 實船を利用いた船體應答計測について-I, 日本航海學會論集, 83, 1993, pp. 139~148.
- 5) 高石敬史, 黒井昌明 : “波浪中船體運動の實用計算法 ‘耐航性に関するシンポジウム(第2回)’”, 日本造船學會, 1977, pp. 109~133.
- 6) 元良誠三, “船舶と海洋構造物の運動學”, 成山堂書店, pp. 55~65.
- 7) 姜日權·尹点東 : 實船試驗에 의한 小型漁船의 動搖特性, 韓國航海學會誌, 第19號, 1995, pp. 1~8.
- 8) 姜日權·尹点東·趙孝濟 : 漁船의 크기변화에 따른 實船 應答特性에 관한 考察, 韓國航海學會誌, 第20號, 1996, pp. 31~42.

# The Characteristics of Motion Response of Stern Trawlers according to the Wave Height and the Ship's Speed in the Sea

Il-Kwon KANG · Byung-Soo PARK

(Kyongsang National University)

## Abstract

It is very important to investigate the hull response of a fishing vessel in the sea to ensure the safe navigation and fishing operation in rough sea by preserving excellent sea keeping qualities.

For this purpose, the author measured various responses of three stern trawlers in waves using real sea experimental measuring system.

The author analyzed the experimental data using the statistical and spectral analyzing method to get the characteristics of the motion responses of the vessels according to the wave height and the ship's speed.

The results obtained can be summarized as follows ;

- (1) Rather higher response of the pitch motion due to the wave height appeared in the head sea and the bow sea than any other wave direction without relevance to ship's size. In case of the roll motion, the beam sea and the quartering sea have a high response value.

The period of peak of the pitch motion and the roll motion according to the wave height in each vessel has almost same value respectively.

- (2) The change of response of the pitch motions deeply depend on the ship's speed in the head sea and the bow sea, but not in the other wave direction.
- (3) The change of response of the roll motions in the beam sea, the quartering sea and the following sea are affected by the influence of the ship's speed in 5k't to 8k't, but not related to the ship's speed in out of that range.