
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 32 卷 第 3 號 1995 年 8 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 32, No. 3, August 1995

실선 계측에 의한 수중익 강도 평가

최익홍*, 정관용*, 김외현*

Evaluation of Foil Strength by Full Scale Strain Measurement

by

I. H. Choe*, K. Y. Chung* and O. H. Kim*

요 약

장거리 고속 수중익 쌍동 여객선의 실선 시운전중에 실시한 응력 계측과 분석방법에 대하여 기술하고자 한다.

고속 쌍동선에 설치된 수중익의 중앙부 스트럿부재에 응력 게이지를 부착하여 항해중인 선체에 작용하는 양력과 파랑 변동하중에 의하여 나타나는 수중익 응력을 계측하였으며 이로부터 수중익의 부재력과 수중익에 작용하는 동적하중을 평가하였다.

계측된 수중익 응력의 크기 성분 분포로부터 선박의 예정 취항 해역에서 선박의 수명 동안 나타날 수 있는 최대 기대 응력값과 수중익 양력을 장·단기 해석을 수행하여 추정하였다. 본 계측의 분석에서 채택한 장·단기 해석에서는 서로 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 추정된 수중익의 최대 기대 응력값을 수중익 재료의 항복응력과 비교하므로써 본 쌍동선 수중익 구조의 안전성을 검증하고 최대 기대 수중익 양력을 설계에 적용된 하중변수와 비교하므로써 설계 과정에서 채택한 하중 변수의 타당성을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 계측 방법과 데이터 분석 과정은 실선 계측 자료를 효과적으로 설계에 활용할 수 있게 한다.

Abstract

The procedure and the results of the full scale strain measurement of the long-range high-speed foil catamaran are described.

The wave induced stresses at the center struts of the foils were measured during the sea trials in order to evaluate the hydrodynamic force acting on the foils and to verify the structural safety of the foil structures.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 춘계연구발표회('95. 4. 21)

접수일자 : 1995년 5월 27일, 재접수일자 : 1995년 7월 27일

* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

From the statistical properties of the measured response of the stress, the most probable maximum values of the lift force and the stresses at the foils in service life of the ship are predicted and compared with the design parameters of the foils which were applied in the design of the subject ship.

The available prediction processes of the measured stress are studied and the results of the applied processes are compared with each other.

1. 서 언

고속 쌍동선에 설치된 수중익은 선체의 내항성능 향상뿐만 아니라 저항 특성도 향상시킬 수 있는 복합적인 기능을 가지고 있다. 따라서 이러한 기능을 충분히 발휘하기 위한 수중익 구조설계를 위하여 항해중 수중익에 작용하는 유체력을 적절히 평가하고 이에 대응하는 수중익의 강도를 검증할 필요가 있다. 특히 수선면 가까이에 설치된 수중익에 작용하는 파랑 변동하중은 이론적인 방법으로 정확하게 평가하기가 어려우므로 실선 계측에 의하여 응력을 분석하고 작용 하중을 평가하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 300인승 고속 수중익 쌍동 여객선의 실선 시운전 중에 실시한 수중익에 대한 응력 계측 결과와 이로부터 수중익에 작용하는 하중을 평가하는 과정에 대해 기술하고자 한다.

본 논문에서 다루고 있는 고속 수중익 쌍동 여객선은 왕복 800해리를 항해할 수 있으며 우리 나라 동해를 운항할 목적으로 개발되었다. Table 1과 Fig. 1에서는 본 선박의 주요 특성과 일반배치도를 보여주고 있다[1, 2]. 응력 계측을 위한 실선 시운전은 취항 예정 해역인 동해안에서 실시되었으며 해상의 파고에 따라 5회의 응력 계측을 실시하였다. 수중익에 작용하는 하중과 응력은 해상의 파고에 따라 각각 통계 처리하였으며 이들의 분포 특성으로부터 장·단기 최대 기대값을 예측하였다. 선박의 수명(20년 가정) 동안 나타날 수 있는 수중익의 최대 하중과 최대 응력은 계측을 실시한 특정 해상 상태에서 나타난 응력 분포를 이용한 단기(short-term) 응답 해석과 취항 예정 해역의 파랑 장기 발현 확률 분포를 고려한 장기(long-term) 응답 해석에 의하여 각각 예측하였다. 예측된 수중익 하중과 응력의 최대 기대값을 이용하여 수중익 구조설계에 필요한 파랑 하중에 대한 동적 하중계수를 결정하였다.

Table 1 Characteristics of the foil catamaran

LBP	42.0 m	Passenger	300 Person
B	11.4 m	Main engine	현대-Paxman Valenta 18 RP 200 CM × 2 EA
B _{mono}	3.2 m	Power	4,105 PS × 1540 RPM × 2EA
D	5.1 m	Propulsor	Kamewa 80S II Water-jet × 2 EA
Draft	1.6 m		
Disp.	270 ton		

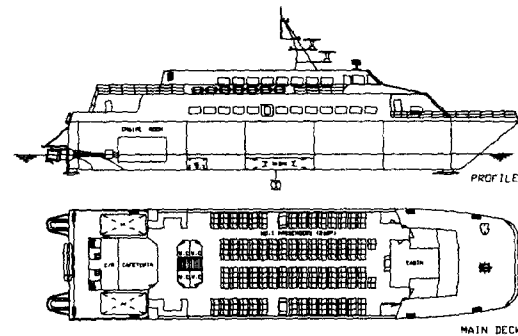


Fig. 1 General arrangement of the foil catamaran

2. 실선 계측

2.1 해상상태

계측을 수행한 해역의 해상 상태는 시간에 따라 연속적으로 변화하고 있으나 특정 해상 상태에서 실선 계측을 수행한 시간(약 1시간 30분) 동안의 해상 상태는 일정하다고 볼 수 있다. 따라서 실선 계측을 수행하는 동안의 해상 상태는 관측에 의하여 판단된 파고에 따라 분류하였으며 Table 2에 나타낸바와 같이 5개 영역의 유의 파고에 대하여 각각 계측을 수행하였다. 선체의 응력은 파도 방향의 영향을 받으나 운항하는 동안에 임의 방향의 파도를 고루 만난다고 보아 정면파로부터 선수 각도를 45° 씩 180° 까지 변화시키면서 각 방향별 3분간의 데이터를 취득하

로서 선체가 수명동안 특정 해상 상태에서 만날 수 있는 응력 분포로 가정하였다. 응력 데이터의 계측은 선체가 최대속도로 항주하는 가운데 실시하였다.

Table 2 Sea state of the measured condition

관측 유의 파고(m)	0.0~1.2	1.2~2.5	2.5~3.5	3.5~4.2	4.2~5.0
해상 상태	I, II, III	IV	V	V	V, VI

2.2 응력 계측

수중익의 응력을 직접 계측하기 위하여서는 응력 게이지(strain gage)를 수중익에 부착하여 계측을 실시하는 것이 바람직한 방법이지만 수중익에 손상을 가하지 않고 응력 게이지와 계측기의 연결선(Lead wire)을 수중익 표면에 부착하여 고속 항해중에 유지하기가 어려웠다. 그러나 수중익에 발생하는 양력은 수중익을 지지하는 스트럿(strut)에 의해 선체에 전달되고 중앙부 스트럿이 가장 큰 비율의 하중을 부담하고 있으므로 본 계측에서는 중앙부 스트럿에 나타나는 응력을 계측하고 이로부터 수중익에 작용된 변동 하중(양력의 변화)과 응력을 유추하였다.

응력 게이지 부착 위치는 Fig. 2에 나타낸바와 같이 선수미 수중익 구조의 중앙부 스트럿 부재 상부이다. 응력 게이지를 부재의 양쪽 면에 각각 3개씩 상하 방향으로 부착하므로써 부재에 작용하는 축력과 굽힘모멘트를 계산할 수 있게 하였다.

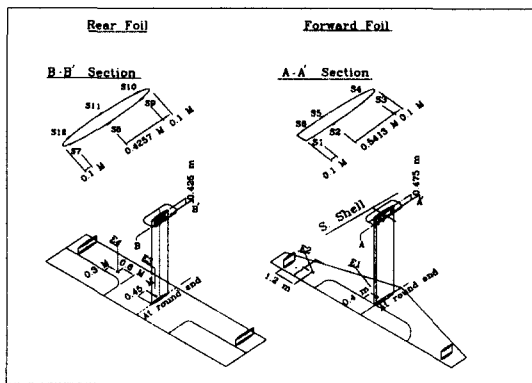


Fig. 2 Location of strain gages(Si) and higher stresses(Ei)

2.3 수중익 양력

선체와 수중익 구조를 유한요소법으로 구조해석한 결과에 의하면 수중익이 균일분포 양력을 받을 때 중앙부 스트럿과 Flap rod가 부담하는 하중의 비는 Table 3과 같다[3]. 따라서 선체가 항주할때 나타나는 양력의 변화는 중앙부 스트럿의 축력으로 부터 유추하였다.

Table 3 Supporting force ratio of foil struts

	Center Strut	Side Struts	Flap Rod
Forward Struts	0.636	0.302	0.062
Rear Struts	0.554	0.272	0.174

2.4 수중익 응력

수중익에 작용하는 양력에 의해 수중익에 나타나는 주요 응력 성분은 수중익의 굽힘변형에 의해 발생한다고 보았다. 따라서 수중익 보의 굽힘변형과 반력을 지지하는 중앙부 스트럿의 부재력 및 수중익 응력의 관계 계수를 선체와 수중익 유한요소 모델을 이용한 구조해석으로부터 유도하였다.

유한요소 구조해석 결과에 의하면 수중익의 높은 응력은 수중익과 중앙부 스트럿 연결부위와 수중익 스팬(span)의 중앙에 나타난다[3]. 수중익에서 높은 응력이 나타나는 위치(Ei)의 응력과 중앙부 스트럿 부재의 부재력과의 관계는 유한요소 모델을 이용한 계산으로부터 구하였다. 관계 계수를 구하기 위한 유한요소 모델은 참고문헌[3]에서 사용된 모델을 이용하였으며 수중익 구조를 포함한 선체 구조 전체를 포함하고 있다. 선체 구조부재는 판 요소를 이용하여 모델이 구성되었으며 수중익 구조는 솔리드(solid)요소를 이용하여 모델이 구성되었다.

Fig. 3에 나타낸바와 같이 중앙부 스트럿에 축력과 굽힘모멘트가 나타나게 하는 하중 조건을 각각 해석 모델에 작용시킬 경우 수중익에 나타나는 응력과 중앙부 스트럿 부재력의 관계식은 다음과 같다.

$$(\sigma_a)_i = (C_a)_i \times F_a \tag{1}$$

$$(\sigma_b)_i = (C_b)_i \times M_b \tag{2}$$

여기서

- $(\sigma_a)_i$: 중앙부 스트럿의 축력에 의하여 수중익 위치 E_i 에 나타난 응력
- $(\sigma_b)_i$: 중앙부 스트럿의 굽힘모멘트에 의하여 수중익 위치 E_i 에 나타난 응력
- F_a : 중앙부 스트럿의 축력
- M_b : 중앙부 스트럿의 굽힘 모멘트

중앙부 스트럿의 부재력 F_a 와 M_b 가 계측에 의하여 구해지면 이로부터 수중익의 특정 위치에서 응력 성분 $(\sigma_a)_i$ 와 $(\sigma_b)_i$ 를 각각 계산할 수 있고 전체 응력 $(\sigma)_i$ 는 응력 성분의 중첩에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$(\sigma)_i = (\sigma_a)_i + (\sigma_b)_i \quad (3)$$

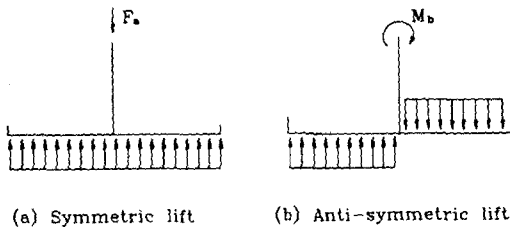


Fig. 3 Idealized lift force on foil

2.5 중앙부 스트럿의 부재력

중앙부 스트럿의 상부에 부착된 응력 게이지로부터 계측된 응력을 이용하여 게이지가 부착된 높이에서 스트럿의 부재력을 계산하였다.

계측된 응력은 게이지가 부착된 위치에서 부재 표면 응력값을 대표하고 있으므로 내부 단면응력은 서로 마주 보고 부착된 게이지 사이에 직선으로 분포한다고 가정하였으며 스트럿의 앞(nose) 뒤(tail)방향의 분포는 2차곡선으로 가정하였다. 따라서 스트럿의 앞뒤 방향으로 10등분한 위치에서의 응력값을 3점에서 계측된 응력을 이용하여 양쪽 면 각각에 대하여 구하였다(Fig. 4 참조).

앞뒤 방향으로 10등분한 위치에서의 응력값에 해당하는 스트럿의 단면적(a_i)과 굽힘 단면계수(z_i)가 스트럿의 앞뒤 방향으로 연속적으로 변하기 때문에 각 요소의 부재력을 조합하여 다음과 같이 계산하였

다.

$$F_a = \sum (\sigma_{i,por} + \sigma_{i,stbd}) a_i / 2 \quad (4)$$

$$M_b = \sum (\sigma_{i,por} - \sigma_{i,stbd}) z_i / 2 \quad (5)$$

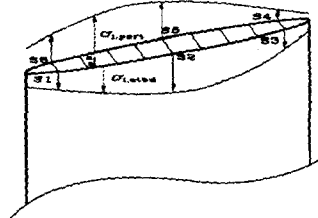


Fig. 4 Interpolation of stresses at center strut

2.6 데이터 처리

파랑하중과 선체 운동에 의해 수중익에 연속적으로 나타나는 동적 변동 응력을 취득하기 위하여 동적 응력 계측장비를 이용하여 응력 신호를 취득하고 취득된 데이터를 수치로 변환하여 PC에 저장하였다. 자료 취득율(sampling rate)은 계측기의 취득 속도를 고려하여 0.03 ~ 0.035초 간격으로 설치된 전체 응력 게이지(25 ch.)의 신호를 읽는 것으로 하였다. 본 계측에 적용된 응력 데이터 분석절차는 다음과 같다.

- (1) Raw data의 평균값과 표준 편차 계산.
- (2) 응력 신호의 여과(filtering)
1.0 Hz 이상의 고주파 성분 제거.
- (3) 스트럿 응력으로부터 스트럿의 부재력과 수중익 응력의 시간 이력 데이터 구성
- (4) 동적 변동 신호(응력, 부재력, 양력)의 크기 성분별 누적 갯수 추출.
Mean-Cross Count 방법 적용.
- (5) 동적 변동 신호의 평균값과 표준 편차 계산.
- (6) 동적 변동 신호의 최대 기대값 계산.

3. 단기 응력 분포 해석

해상 상태는 여러 가지 크기를 가지는 파고성분의 조합에 의해 결정되며 이것에 의하여 발생한 선체의 응력도 여러 가지 크기를 가지는 응력크기 성분으로 나타난다.

따라서 특정 해상 상태에서 계측된 응력크기 성분

분포도 파고 크기 성분 분포와 유사하게 나타날 것으로 기대되며 실제 계측 결과에서 변동 응력의 극치(peak value) 분포도 해양파의 성질에서 잘 알려진 바와 같이 Rayleigh 분포를 따른다는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5 참조). 이 경우 변동 응력의 확률 밀도 함수(p(x), probability density function)는 비교적 간단하게 변동 응력의 제곱 평균 E(mean square value of the dynamic amplitude)의 함수로 다음과 같이 표현된다[4].

$$p(x) = \frac{2x}{E} \exp(-x^2/E), \quad x \geq 0 \quad (6)$$

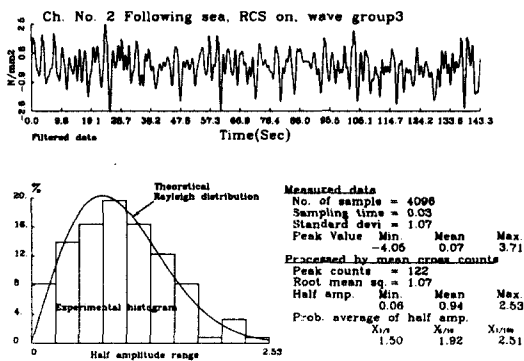


Fig. 5 Measured stress of center strut

계측된 변동 응력 N개 중에서 가장 큰 값($x_{1/N}$)이 나타날 확률은 $1/N$ 이다. 그러나 계측이 수행된 해상 상태는 선체 수명동안 여러번 나타날 수 있으므로 데이터 갯수 N이 충분히 클 경우를 생각하여 가장 큰 응력이 나타날 확률 P(x)을 확률밀도함수 p(x)를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$P(x_{1/N} \leq x < \infty) = \int_{x_{1/N}}^{\infty} p(x) dx = \exp(-x_{1/N}^2/E) = \frac{1}{N} \quad (7)$$

상기 식으로부터 확률 $1/N$ 을 갖는 변동 응력의 최대 기대값(most probable maximum value)은 다음 식과 같이 표현된다[4].

$$x_{1/N} = \sqrt{E} \sqrt{\ln N} \quad (8)$$

그러나 해상에서 파고가 나타나는 것은 독립 시행

이므로 N개의 변동 응력 중에서 한 개가 발생하였을 때 $x_{1/N}$ 보다 클 확률은 다음과 같다.

$$P(x > x_{1/N}) = 1 - (1 - \frac{1}{N})^N \quad (9)$$

N이 충분히 클 경우 상기 확률은 0.632에 수렴한다. 따라서 Ochi[5]는 risk parameter(α)를 도입하여 설계용 최대 기대값을 다음과 같이 추정할 것을 제안하였다.

$$x_{1/N} = \sqrt{E} \sqrt{\ln \frac{N}{\alpha}} \quad (10)$$

실선 계측에서는 일정시간 동안 각 해상 상태의 응력분포와 응력 발현 갯수를 계측하고 계측된 해상 상태가 선체 수명동안 발현할 확률로부터 수명동안 각 해상 조건하에서 나타날 응력 발현 횟수 N을 추정한다. 따라서 각 해상 상태별 최대 기대값 중에서 가장 큰 값이 설계에 이용되는 최대 기대값이다. 본 계측에서는 $\alpha=0.01$ 을 도입하여 식(10)에 따른 최대 기대값을 추정하였다.

4. 장기 응력 분포 해석

우리 나라 동해안의 파고 높이별 장기 발현 확률 분포는 Fig. 6 같다[6]. 동일 해역에서 실선 시운진시에 관측된 Table 2의 유의 파고는 Fig. 6에서 해당하는 파고 영역의 발현 확률을 갖는다. 따라서 각 해상 계측 조건에서 나타난 응력 크기 성분의 발현 확률도 파고 영역의 발현 확률과 같다.

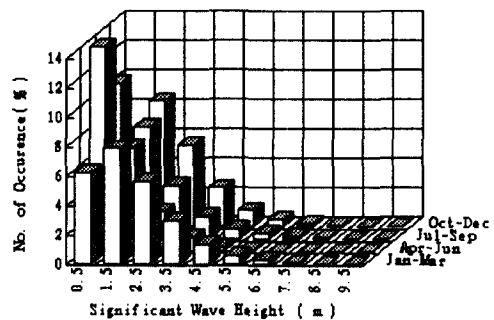


Fig. 6 Probability of wave height occurrence at East Sea

해역의 해상 상태가 임의로 나타날 수 있는 충분히 긴기간 동안에 발생하는 응력 크기 성분 갯수(n_i)

는 각 해상 파고 조건(j=1 to 5)에서 나타난 응력 크기 성분의 단위 시간당 발현 갯수(n_{ij})에 발현 확률(p_j)을 곱하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$n_i = \sum_{j=1}^k (n_{ij} p_j T) \quad (11)$$

여기서 T는 하루 14시간 운항하는 경우 선체의 수명에 해당하는 전체 운항시간이다.

해상의 파고 상태에 따라 각각 다른 날짜에 취득된 전체 계측 데이터는 1시간 36분에 해당하는 분량이며 Point E1에서 나타난 응력 크기 성분의 발현 빈도 분포는 Fig. 7과 같다.

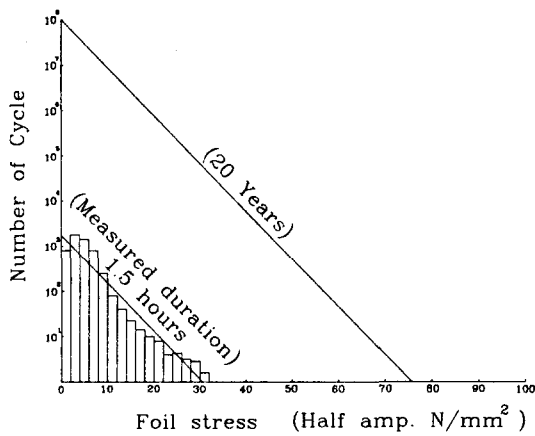


Fig. 7 Long-term distribution of foil stress(E1)

응력 크기 성분의 발현 분포는 대수 축에 표현된 각 응력 성분의 발현 갯수 정점들을 지나는 일정한 기울기를 가지는 직선으로 근사할 수 있음을 발견할 수 있다.

따라서 선박의 수명동안에 해당하는 응력 성분의 발현 갯수도 같은 빈도 분포(기울기)를 가지므로 전체 운항시간의 계측시간에 대한 배수만큼 절편을 이동하여 발생 빈도를 표현할 수 있다. 이때 나타나는 응력 크기 성분의 최대값이 전체 수명동안 발생할 최대 기대값이 된다.

5. 계측 결과의 응용

실선 계측에 의하여 취득된 데이터의 응답 크기 분포는 선체의 수명동안 발생할 수 있는 동적 응답의 최대 기대값을 결정한다. 따라서 제한된 일정시간 동안 계측된 자료를 이용하여 수중익 설계과정에서 요구되는 설계하중의 안전성을 검증할 수 있다.

Table 4에서는 장·단기 응답해석을 수행하여 추정된 수중익의 동적 변동 응력의 최대 기대값을 수중익 재료의 항복응력과 비교하여 보여주고 있다. Table 5에서는 수중익 양력의 동적 하중계수(Dynamic lift / Design static lift)를 실선 계측으로부터 얻어진 값과 초기설계 단계에서 가정한 값을 각각 비교하였다.

Table 4 Most probable maximum dynamic stress of foil

Location	Measured (N/mm ²)		Expected amp. by S.-term (N/mm ²)	Expected amp. by L.-term (N/mm ²)	Yield stress (N/mm ²)
	static	max. amp.			
Fwd foil E1	-15.	38.	78.	76.	620.
foil E2	12.	35.	68.	66.	
Rear foil E3	-22.	39.	59.	58.	
foil E4	10.	43.	77.	84.	

Table 5 Dynamic factor of foil lift

Location	Measured			Designed	
	Static (kN)	Dyn. factor		Static (kN)	Dyn. factor
		S.-term	L.-term		
Fwd. foil	131.	1.05	1.04	650.	0.5
Rear foil	380.	0.59	0.58	1000.	0.5

6. 결 론

(1) 항해 중에 수중익에 발생하는 응력과 양력을 평가하기 위한 본 계측에서는 수면하부의 수중익에 응력 게이지를 부착하는 방법보다 수면 상부의 중앙부 스트럿에 응력 게이지를 부착하므로써 계측을 수행하는 동안 응력 게이지로부터 안정된 응력 신호를 취득할 수 있었다.

(2) 실선 계측에서 계측된 중앙부 스트럿 응력의 시간이력 데이터(time history data)를 스트럿의 부재력으로 변환하고 유한요소 계산에서 얻어진 스트

릿의 부재력과 수중익 응력의 관계를 이용하여 수중익 양력과 응력의 시간이력 데이터로 변환하므로서 이들의 통계적 데이터를 간접적으로 구할 수 있었다.

(3) 수중익의 동적 변동 하중과 응력의 최대 기대 값은 단기 분포 해석(short-term analysis)에서 구해진 값과 장기분포 해석(long-term analysis)에서 구해진 값이 비교적 일치하는 현상을 확인할 수 있었다.

(4) 본 연구에서 제안된 계측 데이터 분석 과정은 비교적 제한된 계측 환경에서 취득된 자료를 이용하여 효과적으로 설계에 필요한 하중 변수를 확인할 수 있게 한다.

참 고 문 헌

[1] Min, K-S., "Long-Range High-Speed Catamaran Passenger Ship Design", Proceedings from the First International Conference on Fast Sea Transportation, Trondheim, Norway, Jun. 1991, pp. 591-606.

[2] 민계식, 김외현, "장거리 고속 수중익 쌍동 여객선의 설계와 건조", 대한조선학회 논문집, 제 30권 3호, 1993년 8월, pp. 1-15.

[3] Park, J-S. and Kim, O-H, "A Structural Analysis of Long-Range High-Speed Catamaran Passenger Ship - 2nd Report", Research Report HMRI-92-02-S015, Hyundai Maritime Research Institute, Feb. 1992.

[4] Jasper N. H., "Statistical Distribution Patterns of Ocean Waves and of Wave-Induced Ship Stresses and Motions, with Engineering Applications", *SNAME*, 1956, pp. 375-432

[5] Ochi, M.K., "On Prediction of Extreme Values", *Journal of Ship Research*, Mar. 1973, pp. 29-37.

[6] BMT., "Global Wave Statistics V2.10", 1992.

[7] Ochi, M.K., "Wave Statistics for the Design of Ships and Ocean Structures", *SNAME Transactions*, Vol.86, 1978, pp. 47-76

[8] Lewis, E.V., "Principles of Naval Architecture- Volume III", The Society of Naval Architects and Engineers, 1989, pp. 28.

[9] Chen Y-K., etc. "Validation of Fatigue Life Prediction Using Containership Hach-Corner Strain Measurements", *SNAME Transactions*, Vol.94, 1986, pp. 255-282.

[10] 박진수, 김외현, 정재구, "자동차 운반선에 대한 실선 계측", 대한조선학회지, 제26권 제1호, 1989년 3월, pp. 46-62.