

광섬유 센서를 이용한 선체 구조의 Global 하중 추정에 관한 연구

김명현^{†*}, 김영제^{*}, 강성원^{*}, 오민철^{**}

부산대학교 조선해양공학과^{*}
부산대학교 전자공학과 나노바이오광소자 연구실^{**}

A Study for the Measurement of Global Loads on Ship Structure Using Fiber Optic Sensors

Myung Hyun Kim^{†*}, Young Jae Kim^{*}, Sung Won Kang^{*} and Min Cheol Oh^{**}

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National Univ.^{*}

Dept. of Electronics Engineering, Nano-Bio Photonics Lab, Pusan National Univ.^{**}

Abstract

Ships and offshore structures are exposed to wave and engine excitation loadings during navigation and cargo/ballasting operations. These excessive loads may cause damages to hull and may result loss of life the ship. Therefore, it is important to develop a system that allow accurate measurements of global hull loads. The objective of the study is developing a fiber optic monitoring system that is capable of monitoring, recording and warning of the vessel performance. A method for measurement of global loads on a vessel, using strain measurements from a network of fiber optic strain sensors and extensive finite-element analyses(FEA) with idealistic load cases, is presented. The method has been successfully validated on the idealized ship structure model with strain sensors.

※Keywords: Hull monitoring system(선체 모니터링 시스템), Fiber optic sensor(광섬유센서), Strain measurement(변형을 측정), Measurement of global load(글로벌 하중의 측정)

1. 서론

선박 및 해양구조물은 시간에 따라 변동하는 파랑 외력과 같은 피로하중에 노출되어 있으며 이러

한 반복하중에 의하여 파손사고가 발생할 가능성이 매우 높다. 선박 및 해양구조물의 사고 발생 시 인명과 경제적인 손실은 물론 기름 유출로 인해 환경오염이 발생하여 엄청난 피해를 일으키게 된다. 1990년대 초반, 산적화물선(Bulk carrier)의 사고가 급증하여 1990년부터 1997년까지 99척이 침몰하였고 654명의 인명이 희생되었다(IMO,

접수일: 2007년 10월 1일, 승인일: 2008년 2월 12일

† 교신저자, Kimm@pusan.ac.kr, 051-510-2486

International Maritime Organization 1999). 이에 따라 IMO에서는 각종 안전법규를 채택하였고 1994년에는 20,000 DWT 이상의 산적화물선에 선체응력 감시 장치의 설치를 권고하였다(Kim 1996).

최근 조선소에서는 선주의 요구에 따라 선체의 변위를 감지하는 계측장치의 하나인 Long Based Strain Gauge(LBSG)를 적용한 선체 구조 모니터링 시스템이 설치되고 있다. 그러나, LBSG의 경우 스트레인 게이지가 장착되는 재질 및 선체 부재의 열팽창 계수 차이로 인해 온도 보정이 필요하며, 또한 센서 부착 위치마다 연결선을 일일이 연결해야 하는 단점이 있다(Shin et al. 2004).

본 연구에서 적용한 광섬유 브래그(Fiber optic Bragg Grating, FBG) 센서는 전기적인 스트레인 게이지와 비교하여 전자기파의 간섭을 받지 않으며 부식 등의 환경에서 잘 견딜 수 있다. 또한 하나의 광섬유 라인에 여러 개의 센서를 연결하여 파장분할 다분화(WDM, wavelength division multiplexing) 기법에 의해 각각의 변형률 값을 얻을 수 있다(Kersey 1996). 본 연구에서는 변형률 센서를 이용하여 측정된 변형률과 선체에 작용하는 이상화된 하중을 적용한 유한요소 해석의 변형률 계산 값을 바탕으로 하여 선체의 global 하중을 추정하는 방법을 제안하고, 실험을 수행하여 그 타당성을 검토하였다.

2. 광섬유 센서(Fiber Optic Sensor)

Fig. 1에서는 FBG 센서의 구조에 대하여 나타내었다. 일반적으로 코어(core)라는 중앙의 원통형 물질과 이를 원통형으로 둘러싸고 있는 클래딩(cladding), 코어와 클래딩을 덮고 있는 재킷(jacket) 부분으로 구성되어 있다. 코어는 광파를 전달하고 클래딩은 전반사를 통하여 광파를 코어 내로 유지시키며 코어에 강도를 제공한다. 재킷은 광섬유를 수분과 부식으로부터 보호하는 역할을 담당하고 있으며, 코어와 클래딩은 유리나 플라스틱 재질로 이루어져 있다. FBG(Fiber Bragg Grating) 센서에서 브래그 격자 반사 스펙트럼의 피크(peak) 파장은 격자 부분에 가해지는 스트레

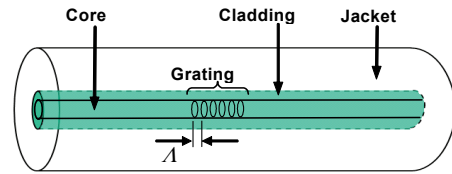


Fig. 1 Fiber bragg grating sensor

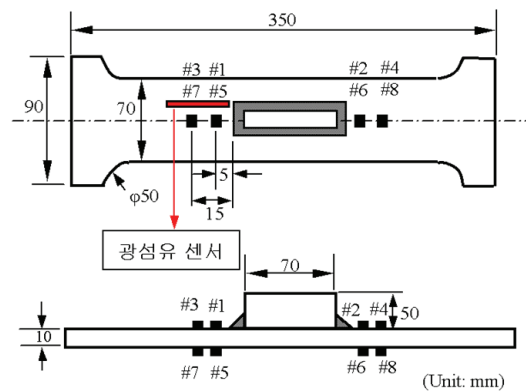


Fig. 2 Test model and strain sensor position

인의 크기에 따라 선형적으로 변화한다. 이 격자가 대역스펙트럼(broadband spectrum)의 광원을 광섬유에 입사 시킬 경우, 일정한 파장대역의 빛만을 반사하고 나머지 파장부분은 그대로 통과시키게 된다. 격자 부분에 인장 또는 압축이 걸리는 경우 반사파장이 미세하게 변화하게 되어 이를 스트레인으로 변환하게 된다(Wang et al. 2000).

광섬유 센서의 경우 변형률 측정에서 전기적인 스트레인 게이지와 비교하여 정밀도가 높은 것으로 알려져 있으며, 이를 검증하기 위해 Fig. 2와 같이 전기적인 스트레인 게이지와 광섬유 브래그 격자 변형률 센서를 부착하여 인장실험을 수행하였다. 시험편의 양단에 3000kgf의 인장하중을 가하였을 때 Fig. 3의 그래프에서 나타난 것과 같이 스트레인 게이지는 210~225 $\mu\epsilon$ 의 범위로 변형률이 다소 불규칙하게 측정되었으나 광섬유 센서는 230 $\mu\epsilon$ 의 일정한 값을 나타내었다(Kim et al. 2004).

이론적 공칭변형률 값은 204 $\mu\epsilon$ 이며, 응점 토우부 응력 집중의 영향으로 변형률 센서들의 측정값

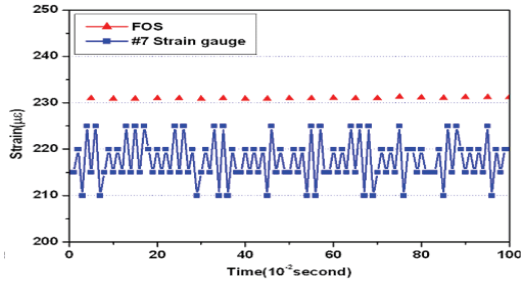


Fig. 3 Comparison of strain measurements between strain gauge and FBG(Kim et al. 2004)

이 이론값보다 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 전기적 스트레인 게이지에서 앰프 또는 게인을 조절하여 잡음의 영향을 감소시킬 수 있으나, 전계 및 자계의 작용이 변동하고 부식 환경에 노출되어 있는 선체 환경에서의 선박 모니터링 시스템에 적용 시 어려움이 있다. 반면, 빛의 신호를 이용하는 FBG 센서를 이용하게 되면 잡음의 영향 거의 없이 신뢰성 있는 측정이 가능하다.

3. Global 하중의 추정 이론

선체에 작용하는 주요 global 하중은 (a)수직방향의 새김/호깅(sagging/hogging) 모멘트, (b)수평방향의 굽힘(bending) 모멘트 (c)길이방향의 비틀림(twisting) 모멘트, (d)수직 및 수평 방향의 전단하중(shear force)이 있다. 또한 고속으로 항해하는 선박이 마주치는 파도에 부딪힐 때 선체 길이방향의 압축 힘이 매우 크게 되어 (e)길이방향의 수직하중(normal force) 또한 측정되어야 한다.

Global 하중은 선체에 설치된 변형률 센서로 측정된 값과 유한요소 해석의 결과로 나오는 변형률 값을 바탕으로 추정할 수 있다. 이를 위하여 변형률 센서는 global 하중들에 의한 변형률 값을 최대로 하고 국부하중에 의한 변형률 값을 최소화하도록 위치와 방향을 취하여 선체에 부착되어야 한다.

선형 탄성적인 재료에 작용하여 그에 따른 변형률 성분이 선형적인 관계에 있다고 가정하고, 다음 식(1)의 선형 대수식이 제안되었다(Jensen et al. 2000).

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \mathbf{k}^T \mathbf{f} \quad (1)$$

여기서 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 은 변형률 센서에서 측정된 변형률 값이고 \mathbf{k} 는 유한요소 해석으로 계산된 변형률 값으로써 유한요소 모델에 이상화된 하중을 적용하여 해석하고 실제 구조물에 설치된 변형률 센서들과 동일한 위치에서 계산된 변형률 값을 선택하여 행렬식으로 구성된다. 행렬 \mathbf{k} 의 열(columns) 성분은 추정되는 하중의 수와 같으며, 행(rows) 성분은 구조물에 부착된 센서의 수와 같다. 식 (2)의 벡터 \mathbf{f} 는 작용하는 global 하중과 FE 해석에서 작용한 정하중 사이를 관계하는 비례요소(scaling factor)이다.

$$\mathbf{f} = [a, b, c, d, e] \quad (2)$$

벡터 \mathbf{f} 의 요소들을 구하기 위해 식 (3)에서와 같이 \mathbf{k} 행렬의 역행렬을 취한다. 벡터 \mathbf{E} 는 추정될 global 하중과 동일한 수의 변형률 센서를 선택하여 구성되고, 행렬 \mathbf{K} 는 일반 행렬 \mathbf{k} 의 행(rows)으로 구성된다.

$$\mathbf{E}^T = \mathbf{K}^T \mathbf{f}^T \Rightarrow \mathbf{f}^T = (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{E}^T \quad (3)$$

비례요소 \mathbf{f} 가 결정되어 지면 각각의 global 하중에 의한 변형률 값이 식 (4)에 의해 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{Meas.}^{Sagg/Hogg} &= \boldsymbol{\varepsilon}_{FEM}^{Sagg/Hogg} \cdot a, \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{Meas.}^{H.Bending} &= \boldsymbol{\varepsilon}_{FEM}^{H.Bending} \cdot b, \end{aligned} \quad (4)$$

...

작용된 하중과 그에 따른 변형률 성분들은 선형적이라고 가정하였기 때문에 모든 global 하중에서 식 (5)의 표현이 적용된다.

$$(\mathbf{M}/\boldsymbol{\varepsilon}_{Sensor})_{Meas.} = (\mathbf{M}/\boldsymbol{\varepsilon}_{Sensor})_{FEM} \quad (5)$$

여기에서 \mathbf{M} 은 global 하중의 한 가지 경우를 나타내고, 식 (4)의 측정변형률 성분을 식 (5)에 대입하면 실제하중 $\mathbf{M}_{Meas.}$ 와 유한요소 해석에서 적용된 식 (6)의 하중 관계가 결정되어 진다.

$$\begin{aligned} M_{Meas.}^{Sagg/Hogg} &= M_{FEM}^{Sagg/Hogg} \cdot a, \\ M_{Meas.}^{H.Bending} &= M_{FEM}^{H.Bending} \cdot b, \\ \dots \end{aligned} \quad (6)$$

결국 global 하중은 관련된 f의 요소와 각 유한요소 해석에서 작용한 하중의 곱에 의해 추정될 수 있으며, 이들 다섯 가지의 global 하중에 관한 하중 벡터 L은 식 (7)과 같이 구성된다.

$$L = [a \cdot M_{FEM}^{Sagg/Hogg}, b \cdot M_{FEM}^{H.Bending}, c \cdot T_{FEM}^{Twisting}, d \cdot V_{FEM}^{Shear}, e \cdot N_{FEM}^{Normal}] \quad (7)$$

K 행렬은 미리 계산할 수 있으므로 식 (3)과 (7)의 반복 계산을 통하여 실시간으로 global 하중 추정이 가능하게 된다.

4. Global 하중 추정 시험

4.1 시험편 형상

본 연구에 사용된 시험편은 105,000 DWT 유조선을 모델로 하여 1/315의 scale로 제작하였다. 제작된 시험모델은 Fig. 4와 같이 한 개의 중앙중격벽과 네 개의 횡격벽을 부착하고 기타 보강재 등을 이상화하였다. Table 1에서는 실제 선박과 시험 모델의 크기를 비교하여 나타내었다.

4.2 변형률 센서 부착위치

본 실험에서는 신뢰성 있는 하중 추정을 위하여 총 10개의 센서를 사용하였으며, 크게 굽힘과 전단의 두 가지 경우로 나누어 각 경우에 대하여 다섯 개의 센서를 이용해 시험을 실시하였다. 굽힘 모멘트를 추정하기 위하여 Fig. 5에서 보인 바와 같이 #1~#5번의 센서를 A, B, C, D 위치에 부착하였다. #1~#4번 센서는 구조물의 길이방향과 평행하게 배치시켰고, 다섯 번째 센서는 폭 방향으로 배치시켰다. Normal force의 경우도 동일한 센서배치에서 얻어질 수 있다. 이와 같이 (8)에서 다섯 가지의 변형률 값으로 E 벡터를 구성한다.

$$E_{normal} = [\varepsilon_{Ax}, \varepsilon_{Bx}, \varepsilon_{Cx}, \varepsilon_{Dx}, \varepsilon_{Ay}] \quad (8)$$

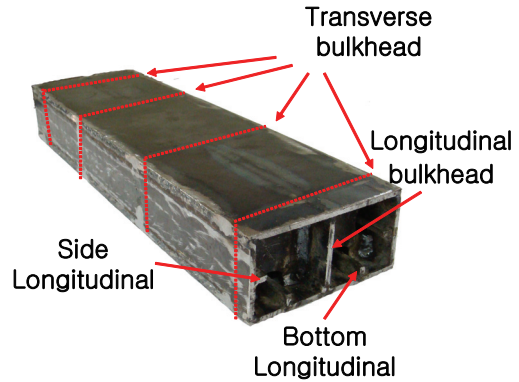


Fig. 4 Schematic of test model

Table 1 Size of actual and test model

Spec.	Actual ship	Test model
LBP	233m	510mm
Breadth	42m	145mm
Depth	21.3m	72mm

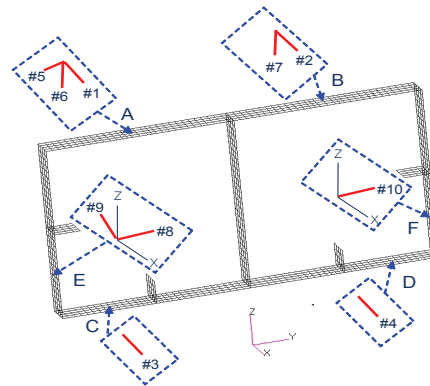


Fig. 5 Fiber optic sensor positions at a cross section near amidships

다음으로 A, B, E, F의 위치에서 구조물의 길이 방향과 45도 방향으로 #6~#10번 센서를 부착하였으며, 식 (9)을 구성하였다. 이것을 이용하여 전단하중 또는 비틀림 모멘트를 추정할 수 있다.

$$E_{shear} = [\varepsilon_{A45}, \varepsilon_{B45}, \varepsilon_{E45}, \varepsilon_{E-45}, \varepsilon_{F45}] \quad (9)$$

식 (2)에서 벡터 f 의 하중 상수 a, b, e 는 식 (10)과 같이 계산될 수 있다.

$$f = (K_{normal})^{-1} E_{normal}^T \quad (10)$$

또한 식 (2)의 나머지 하중 상수 c, d 는 식 (11)과 같이 계산될 수 있다.

$$f = (K_{shear})^{-1} E_{shear}^T \quad (11)$$

결국 식 (10)과 (11)에 의해 계산되어진 상수를 식 (7)에 대입하여 global 하중을 추정하게 된다.

4.3 시험 장치 및 방법

사용된 시험 장치는 Fig. 6에서와 같은 최대 용량 ± 20 tonf인 축 인장 압축 유압서브 피로시험기(SAGINOMIYA Japan)이고 수직 굽힘(새깅), 수평 굽힘, 전단 하중의 세 가지 global 하중에 대한 추정시험을 실시하였다. 지그는 3점 또는 4점 굽힘 시험을 하도록 제작하였고, 국부하중에 의한 시험편의 변형을 최소화하기 위해 지그의 롤러를 시험편의 횡격벽 상부 위치에 접촉하도록 하였다. 시험은 정하중과 동하중의 두 가지 경우로 하여 Table 2와 같이 실험하였다.

4.4 정하중에서의 변형을 측정

Fig. 7에서와 같이 수직 굽힘(새깅), 수평 굽힘, 전단하중의 세 가지 하중에서 #1~5 또는 #6~10의 5개의 변형률 센서를 선택하여 변형률을 측정하고 유한요소 해석으로 계산된 변형률과 비교하여 그래프로 표시하였다.

Table 2 Load conditions

	Static load	Dynamic load
Vertical bending	-1tonf ~ -10tonf (Increased in each of -1tonf)	-0.5tonf ~ -5tonf (Rate 5Hz)
Horizontal bending		
Shear force	-0.5tonf ~ -5tonf (Increased in each of -0.5tonf)	

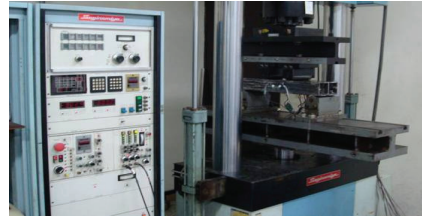
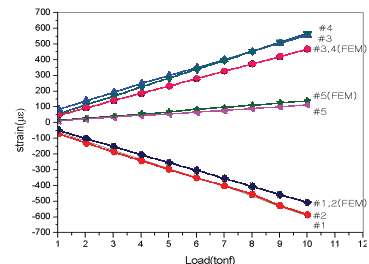
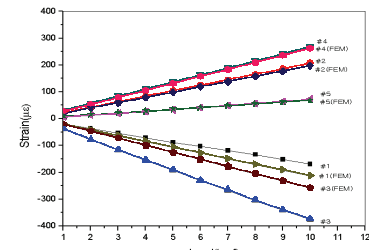


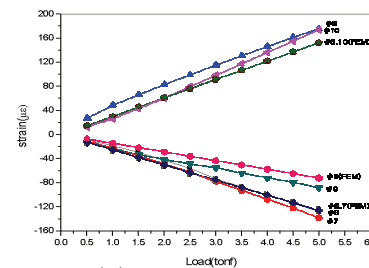
Fig. 6 Test machine



(a) Sagging



(b) H.bending



(c) Shear force

Fig. 7 Strain of sensing and FEA calculation

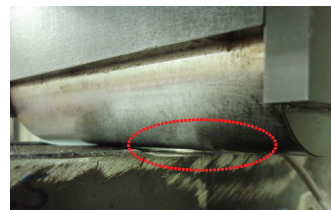


Fig. 8 Weld distortion of test model

시험에서 측정값은 유한요소 해석에서 계산된 변형률과 비교하여 어느 정도 일치하는 결과를 나타내었으나, 수평 굽힘 시험 시 #3 센서의 변형률 측정값은 다소 큰 차이를 나타내었다. 이는 Fig. 8에서와 같이 시험편 제작 시 용접 변형 등으로 인한 비틀림 발생으로 인해 시험기의 하중이 #3 센서가 부착된 방향으로 편중 작용하여 발생한 것으로 판단된다.

5. Global 하중 추정 시험 결과

제시한 이론식을 바탕으로 Fig. 9~11과 같이 global 하중을 추정하여, 실험 결과를 이론값과 비교하여 표시하였다.

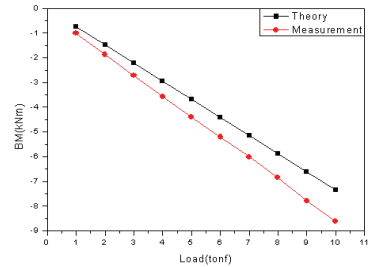
Global 하중의 추정결과는 변형률 측정값이 상대적으로 큰 sagging의 경우 이론값과 비교하여 최대 20% 및 전단하중의 경우 최대 12%의 오차를 나타내었으며, 모두 12% ~ 20% 내에서 오차 범위를 나타내었다.

시험편의 잔류응력에 의한 영향과 시험편의 제작 시 용접 변형으로 인한 비틀림 발생의 원인으로 실제 실험 시 하중이 편중하게 작용하여 변형률 측정값과 유한요소 해석시의 변형률 계산 값의 차이가 발생하였으며, 이로 인해 하중 추정의 오차가 발생 한 것으로 사료 된다.

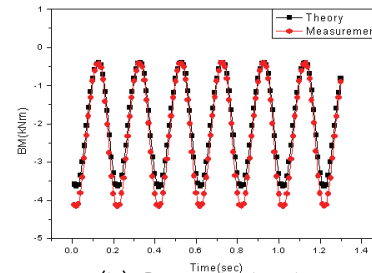
5. 결론

본 연구에서는 광섬유 센서를 이용한 선체 구조 모니터링 시스템에 적용하는 것과 수치해석 기법을 이용한 global 하중의 추정 이론을 제시하였으며 타당성 검증을 위해 실제 선체 구조와 유사한 시험 모델을 제작하여 실험을 실시하였다.

- 광섬유 센서를 적용하여 선체와 같은 대형 용접 구조물에 작용하는 global 하중을 추정할 수 있는 기법을 제안하였다.
- 시험에서 구한 global 하중 추정 결과는 이론값과 최대 오차 20%의 범위에서 신뢰성 있는 결과를 나타내었다.

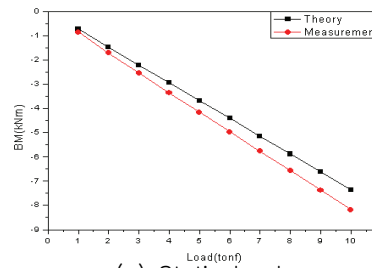


(a) Static load

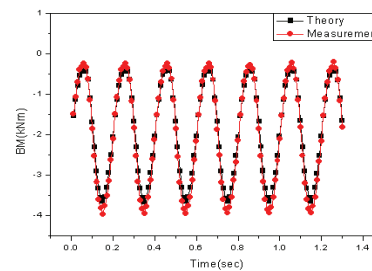


(b) Dynamic load

Fig. 9 Global load measurement of sagging



(a) Static load



(b) Dynamic load

Fig. 10 Global load measurement of H. bending

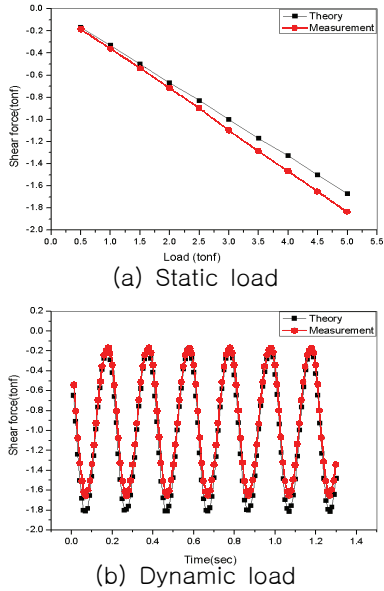


Fig. 11 Global load measurement of shear force

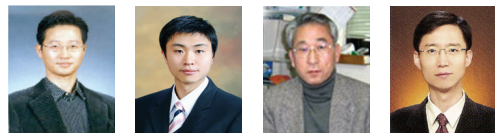
- 결과의 오차는 시험편의 작은 크기에 의한 용접 변형 및 잔류응력의 영향으로 사료되고, 변형을 센서의 접착 방법에 의한 영향도 고려된다.
- 향후 과제로는 하중 추정의 향후 정밀도를 향상시키기 위하여 접착 방법들에 대한 보다 상세한 연구를 수행할 예정이다. 또한 하중 추정을 바탕으로 하여 구조물의 피로수명을 계산하고 실제 피로시험을 통하여 결과를 비교해보는 것과 하중추정 및 피로해석에 대한 프로그램을 개발하는 것 등이 있다.
- 본 연구에서 제안된 시스템을 이용하면 선박 구조물의 변형 및 파손 등을 실시간으로 감지하고 불의의 사고를 미연에 방지 할 수 있는 구조 안전 진단 시스템으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2006년 해양수산부 Sea Grant 연구 개발사업 및 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Kersey. A.D., 1996, "Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology, Optical/Fiber Technology, Vol. 2, pp. 291-317
- Kim, D.H., Park. S.S., Kim. M.H. and Kang. S.W., 2004, "Development of Ship Structure Health Monitoring System Using Fiber Optic Sensors," Proceeding of the Annual Autumn Meeting SNAK, pp. 230-235.
- Kim. J.D., 1996, "Structural Response Monitoring System of Large Floating Structures," Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 4, pp. 67-75.
- Shin, C.H, Ha, T.B. and Choi, S.J., 2004, "A Comparison Study of Measured Hull Girder Stresses Using a Hull Monitoring System on Board and Theoretically Calculated Ones," The 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS,1, pp. 93-97
- International Maritime Organization, 1999, IMO and the safety of bulk carrier, www.imo.org
- Jensen, A.E., Taby, J. Pran, K., Sagvolden, G. and Wang, G. 2001, "Measurement of Global Loads on a Full Scale SES Vessel Based on Strain Measurements Using Networks of Fibre Optic Bragg Sensors and Extensive Finite Element Analyses," Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 3, pp. 205-215.
- Wang, G., Pran, K., Sagvolden, G., Havs gard, G.B., Jensen, A.E., Johnson, G.A. and Vohra, S.T., 2000, "Ship Hull Structure Monitoring Using Fibre Optic Sensors," Smart Materials and Structures, pp. 472-478.



< 김 명 현 > < 김 영 제 > < 강 성 원 > < 오 민 철 >