

온도보상기를 갖는 선체응력 계측용 스트레인 게이지의 개발

하윤수* · 류길수* · 박석주** · 박석배***

Development of a strain gage with a temperature compensator
for hull stress measurement

Y. S. Ha · K. S. Rhyu* · S. Ch. Park** · S. B. Park****

<목 차>	
Abstract	3.2 변형량 증폭원리
1. 서론	3.3 온도 보상 원리
2. 선체응력 계측시스템의 개요	4. 선체 응력 산출 알고리즘
3. 선체변형 증폭기	5. 실험 및 고찰
3.1 증폭기의 구성 참고문헌	6. 결론

Abstract

It is very important to measure and monitor hull stress which is caused by a buoyant force and a weight of cargo for safety of ship. However, an exact measurement of hull stress, using the traditional strain gage which is made of metal or semiconductor, is very difficult, because a ship would be exposed by the severe temperature environment of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

This paper propose a new concept strain gage which can improve accuracy and compensate effectively affects due to temperature. The strain gage is consists of two parts. One is the Hull Deformation Amplifier which introduce several lever and link system, and another is a transducer converting distance into voltage signal. The HDA measure the amount of deformation and amplify it. And a lever and link system of the HDA is introduced for compensating temperature deformation by installing in perpendicular direction without stress.

This paper also reports on the results of the experiments to verify linearity of the strain gage.

* 한국해양대학교 자동차·정보공학부

** 한국해양대학교 조선·해양공학부

*** 태양기전

1. 서 론

선체에는 화물의 적재상태와 부력상태에 따라 하중의 상태가 매우 복잡하게 걸린다. 또 파랑향해중에는 부력의 변화가 심하여 더더욱 하중의 상태를 잘 알 수 없다. 이러한 하중 때문에 선체에 걸리는 응력으로인해 선박의 안전성이 위협 받게된다. 따라서 선체가 받는 응력을 상시 감시하여 항해자에게 알려줌으로써 위험에 이르기 전에 적절한 대처를 할 수 있도록 하는 선체강도 모니터링 시스템의 개발이 요구되어져 왔다. 이와 관련한 몇몇 연구결과가 보고된바 있다[1],[2]. 그러나 이들 시스템의 대다수는 선체의 응력계측방법에있어서 종래의 금속 혹은 반도체 스트레인게이지를 이용한 직접계측방법을 행하고 있다. 그러나 선박의 경우, 온도변화가 극심한 환경속에서 운전되기에때문에 선체의 응력을 종래의 스트레인게이지를 이용하여 직접계측하는 것은 온도보상의 어려움이 따른다[3],[4]. 뿐만 아니라 미세한 응력의 계측을 위해서는 고정밀도의 스트레인게이지를 요한다.

따라서 본 논문에서는 선체의 응력을 직접 측정하지않고 응력에의한 선체의변형을 지렛대의 원리로 증폭하는 동시에 온도에의한 영향을 효과적으로 보상할 수 있도록 고안된 선체변형 증폭기(Hull Deformation Amplifier)와 변위를 전압으로 변환하는 하나의 트랜스듀서로서 구성되는 새로운 개념의 스트레인게이지를 개발하고 이를 이용한 응력계측방법을 제안한다. 또한 본 논문에서는 개발된 스트레인게이지의 핵심이되는 선체변형증폭기의 동작원리 및 선형성 검증을 위한 실험을 행하고 그 결과를 제시한다.

2. 선체응력 계측시스템의 개요

화물이나 부력에의해 받는 선체의 응력은 선체를 변형시킨다. 그러나 그 변형량은 미소한 값이므로 직접 측정하기 어렵거나 측정 가능할 지라도 고가의 장비를 요하는 경우가 많다. 본 논문에서는 선체의 응력을 직접 계측하지 않고 선체의 응력에 의한 변형량을 지렛대의 원리로 증폭하는 동시에

선체의 급격한 온도변화에의한 영향을 구조적으로 완전히 보상할 수 있는 메카니즘의 선체변형량 증폭기를 이용하여 증폭한 변위를 센서로 계측하고, 그 측정 변위로부터 선체의 응력을 계산하는 방법의 소개한다. 본 논문에서 제안하는 선체응력계측 시스템의 구성을 Fig.1에 나타낸다.

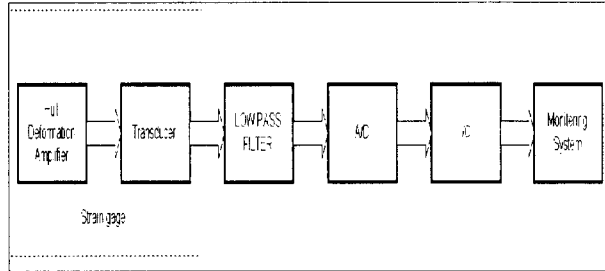


Fig.1 The proposed hull stress measurement system

증폭기를 통해 증폭된 변형량은 변위센서에의해 계측되고 그 변형정보는 선체의 진동 등에 의한 잡음성분을 제거하는 low pass filter부를 거쳐 디지털 값으로 변환된 후 응력계산 알고리즘에의해 실제 선체가 받는 응력값으로 변환된다.

3. 선체변형 증폭기

3.1 증폭기의 구성

본 논문에서 제안하는 선체응력계측용 스트레인게이지는, 종래의 다른 장치가 구조물의 변형량을 직접 재는 방법을 채택한 것과는 달리 변형량을 적당히 증폭하여 계측함으로써 계측의 오차를 줄이고, 또 온도의 변화에 기인하는 열팽창 효과를 효과적으로 보상할 수 있도록 한 것이 특징이다. 이러한 목적에 맞도록 설계된 것이 지렛대의 원리를 이용한 선체변형 증폭기이다. 본 논문에서 제안하는 선체변형 증폭기의 개략도를 Fig.2 나타낸다.

여기에서 간략하게 각 요소들의 역할을 설명하면 다음과 같다. No.1 앵커블록, No.2 앵커블록, No.3 앵커블록, No.4 앵커블록은 장치를 구조물에 고정한다. $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ 은 변형량을 증폭하

고 방향을 전환시키는 막대이다.

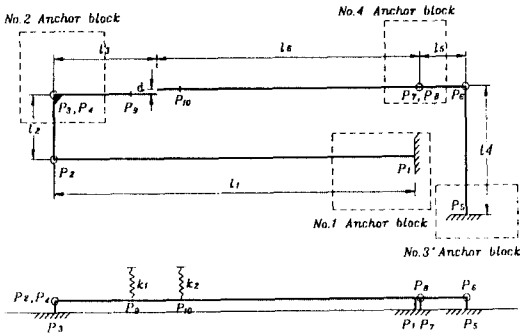


Fig. 2 A concept picture of the HDA

또 $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}$ 은 막대의 pivot 점 및 연결점을 나타내고, $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 은 변형량을 나타낸다.

(1) 변형량 측정부 : 막대기 l_1 은 구조물의 변형량을 재고자 하는 방향으로 한 쪽 끝은 앵커 블록(anchor block)으로써 구조물에 완전히 고정시키고, 다른 한 쪽은 막대기 l_2 와 p_2 에서 핀(pin) 연결한다. 막대기 l_2 와 l_3 은 직각장삼각구조로 p_3 에서 구조물에 고정된 핀의 상단 p_4 에 평면에서 회전운동이 자유롭게 일어나도록 연결한다.

(2) 온도 보상부 : 막대기 l_4 는 구조물의 변형량을 재고자 하는 방향과 직각 방향으로 한 쪽 끝은 앵커 블록에 의하여 p_5 에서 구조물에 완전히 고정시키고, 다른 한 쪽은 막대기 l_5 와 p_6 에서 핀으로 연결한다. 막대기 l_5 와 l_6 은 한 몸으로 되어 있고, p_7 에서 구조물에 고정된 핀의 상단 p_8 에서 평면상의 회전운동이 자유롭게 일어나도록 연결한다.

(3) 진동억제 스프링

구조물이 항시 외력에 노출되어 있을 경우에는 막대기가 쉽게 진동하여 측정 정도를 떨어뜨릴 수 있다. Fig.2의 p_9 와 p_{10} 에 스프링 k_1 과 k_2 를 설치하여 구조물의 진동에 의한 영향을 감소시키도록 하고 있다.

3.2 변형량 증폭원리

구조물이 어떠한 원인에 의하여 늘어나거나 줄어들면, p_3 이 p_1 에 대하여 좌우로 움직이게 되고, 또 이 운동을 p_2 에 대하여 관찰하여 보면 막대기 l_2 의 p_2 에 대한 회전 운동이다. 반대로 p_1 이 p_3 에 대하여 좌우로 움직인다고 보면 막대기 l_2 는 p_3 에 대하여 회전 운동을 하게 된다. 따라서 이 회전 운동에 의하여 q_1 이 상하로 움직이게 된다. 좌우 방향으로의 신축이 상하 방향의 운동으로 바뀌게 되어 이 변화량을 측정하면 된다. 예를 들어 Fig.3에 나타낸바와 같이 구조물이 외력에 의하여 좌우 방향으로 늘어나서 p_3 이 p'_3 으로 δ_1 만큼 이동하였다. 즉 길이 l_1 에 대하여 δ_1 만큼의 변형이 생겼다고 한다. 이 늘어남에 의하여 p_3 는 p_1 에 대하여 δ_1 만큼 p'_3 로 이동하게 되고 따라서 막대 l_2 는 p_2 를 중심으로 회전하게 되고, 따라서 l_3 도 p'_4 를 중심으로 같은 각도만큼 회전하게 된다. 이로 인하여 q_1 은 $\frac{l_3}{l_2} \delta_1$ 만큼 위로 이동하게 된다. 즉 $\frac{l_3}{l_2}$ 배만큼 증폭되어 q_1 이 상하로 움직이게 되는 것이다.

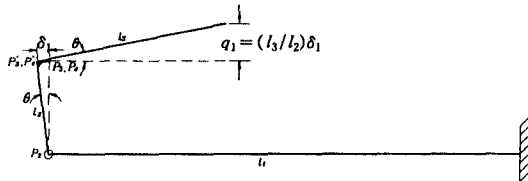


Fig. 3 An amplification principle of the HDA

3.3 온도 보상 원리

외력은 구조물의 좌우 방향으로만 작용한다고 하고, 온도에 의해서만 좌우 상하 양방향으로 변형이 생긴다고 가정하기로 한다. 따라서 외력에 의해서서는 상하 방향의 변형이 일어나지 않는다. 온도 변화에 의하여 구조물이 늘어나거나 줄어들면, 이 구조물에 설치된 막대 l_1 은 반대로 p_2 를 당기거나 밀게된다. 따라서 이 운동은 p_4 에서 회전운동으로 바뀌게 되고 q_1 이 상하로 움직이게 된다. 또 이 구조물에 설치된 막대 l_4 도 p_6 을 당기거나 밀게된다. 따라서 이 운동은 p_8 에서 회전운동으로 바뀌게 되

어 q_2 가 상하로 움직이게 된다. 구조물이 단순히 열에 의하여 팽창하면 q_1 은 위로 회전하고, q_2 도 위로 회전하게 되는데 이 크기를 같도록 하면 온도에 의한 영향을 제거할 수 있다. 따라서 l_1 를 l_1 과 직각 방향으로 설치하고, l_1 과 l_4 의 길이를 같게 하고, l_2 와 l_3 의 비와 l_5 와 l_6 의 비를 같게 하면 된다. 그러나 실제의 구조물에서는 한 쪽 방향으로의 공간적인 제약이 있는 경우가 허다하다. 따라서 같은 길이를 사용하지 못할 경우가 많다. 여기에서는 변형량을 재고자하는 직각 방향으로 온도에 의한 신축만 일어나는 경우에 한정하여 생각한다. Fig.4에 온도 보상 원리에 대하여 나타낸다.

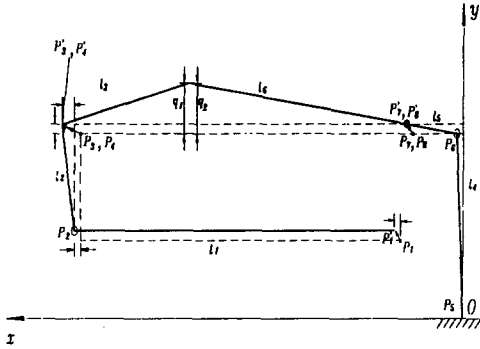


Fig.4 A concept picture of temperature compensation of the HDA

p_5 를 원점으로 하는 좌표계를 생각하기로 한다. 막대는 신축성이 없다고 하면, 온도 변화로 앵커 블록에 의하여 구조물의 바닥에 고정된 p_1, p_3, p_7 가 각각 p'_1, p'_3, p'_7 로 이동하게 된다.

Fig.3에서 x축 방향의 거리 l_1 에 대한 온도 변화에 따른 변형량만을 생각하면 δ_2 가 되고(δ_4 는 p_1 이 p'_1 로 이동하여 생긴 x축 방향의 변형량이기 때문에 이 길이는 제외하여야함), y축 방향의 온도 변화에 따른 변형량은 거리 l_4 에 대한 변형량이기 때문에 $\delta_3 = \frac{l_4}{l_1} \delta_2$ 가 된다. 여기서 온도 보상을 하기 위하여 q_1 과 q_2 의 변위가 같도록 막대의 길이를 조정하면 된다. q_1 은 $\frac{l_3}{l_2} \delta_2$ 이고, q_2 는 $\frac{l_6}{l_5} \delta_3 =$

$\frac{l_4}{l_1} \frac{l_6}{l_5} \delta_2$ 이다. 따라서 $\frac{l_3}{l_2} = \frac{l_4}{l_1} \frac{l_6}{l_5}$ 이 되도록 이 길이들을 조정하면 된다. q_1 과 q_2 의 초기거리를 δ_0 라 하고 외력에 의하여 늘어난 길이를 δ_1 , 온도 변화에 의하여 l_1 이 늘어난 길이를 δ_2 , l_4 가 늘어난 길이를 δ_3 라 하면, 순수한 외력에 의하여 생긴 두 점 사이의 거리의 차 δ 는

$$\begin{aligned} \delta &= q_1 - q_2 - \delta_0 \\ &= \frac{l_3}{l_2} (\delta_1 + \delta_2) - \frac{l_6}{l_5} \delta_3 \\ &= \frac{l_3}{l_2} (\delta_1 + \delta_2) - \frac{l_3}{l_2} \delta_2 \dots\dots\dots (1) \\ &= \frac{l_3}{l_2} \delta_1 \end{aligned}$$

이 된다. 즉, 구조물의 길이 l_1 이 순수한 외력에 의하여 늘어난 길이가 $\frac{l_3}{l_2}$ 배 증폭하여 나타나게 되는 것이다.

막대의 온도의 변화에 따른 변형량도 같은 원리에 의하여 완전히 보상되어 순수한 외력에 기인하는 변형량을 잴 수 있다. 실제로는 막대 l_3 과 l_6 를 약간 겹쳐서 설치하여 센서의 설치 장소를 확보하고, 막대의 회전운동에 따른 q_1 과 q_2 점의 이탈을 방지한다.

4. 선체 응력 산출 알고리즘

본 논문에서 제안한 시스템에서는 증폭된 변형량 정보를 실제의 선체에 걸리는 응력으로 환산하는 과정이 필요하다. 탄성체의 응력과 변형률의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma = E \epsilon \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 σ 는 응력을, E 는 탄성 계수를 ϵ 은 변형률을 나타낸다.

따라서 변형률 ϵ 만 알면 응력 σ 는 자연스럽게 알 수 있게 된다. 한편 제안한 시스템에서는 길이 l_1 에 대하여 늘어난 길이를 잴 것이 아니고, 이 늘어

난 길이를 $\frac{l_3}{l_2}$ 배 확대하여 잴기 때문에 실제의 변형률은 다음과 같이 나타난다.

$$\epsilon = \frac{\delta}{l_1} \cdot \frac{l_2}{l_3} \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 δ 는 Fig.2에 표시된 바와 같고, 구체적으로는 식(1)이 이에 해당한다.

5. 실험 및 고찰

본 논문에서는 개발된 스트레인게이지에 대한 유효성을 입증하기 위하여 선형성 검증실험을 행하고 그 결과를 제시한다.

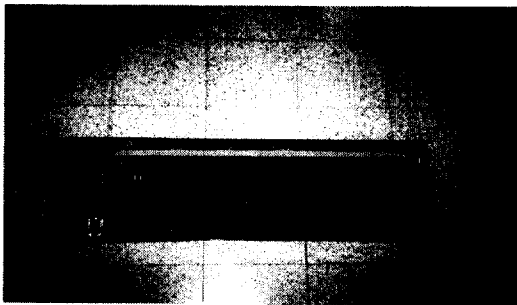


Fig.5 Picture of the proposed strain gage

Fig.5는 선형성 검증실험을 위해 제작된 스트레인게이지의 사진이다. 스트레인게이지의 선체변형 증폭기부분은 길이 159cm, 폭 59cm의 철판 상에 제작되었으며 설계상의 증폭률은 12이다. 선체의 변형량은 ㉠의 좌측에 있는 볼트를 이용하여 가변할 수 있도록 되어있는데 ㉠지점의 볼트를 조이면 ㉡지점 막대 상단은 오른쪽으로 밀리게 되고 하단은 왼쪽으로 밀리게 된다. 그리하여 ㉢지점막대의 왼쪽이 위로 움직임을 유도하고 ㉣지점막대의 왼쪽을 아래로 움직여 미세한 입력변위를 지렛대의 원리로 증폭하게 된다. 또한 트랜스듀서로서는 EMI 사의 SE374/25 을 이용하고 있다. 종래의 금속 혹은 반도체 스트레인게이지를 이용한 응력계측 뿐만 아니라 모든 계측에 있어서 센서의 선형성은 매우 중요하다. 이와 같이 본 연구에서 개발된

스트레인게이지에서는 선형성과 더불어 정확한 증폭률이 중요한 의미를 갖는다.

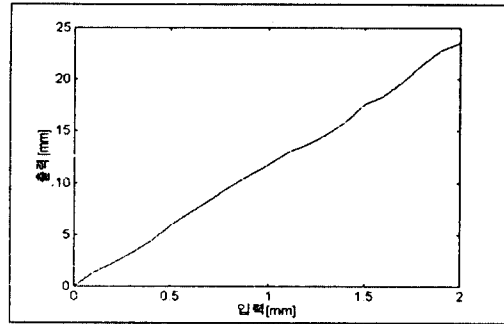


Fig.6 Linearity of the proposed strain gage

Fig.6은 개발된 스트레인게이지의 선형성을 시험한 결과로서 증폭장치의 입력(선체변형량)을 0에서부터 step 당 0.1mm간격으로 20 step 까지 늘려가면서 증폭된 변위를 계측한 값을 기록한 것이다. 이 결과로부터 입력에 대해 출력이 거의 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. Fig.6의 기울기는 이 장치의 증폭률을 의미하는 것으로 거의 설계치인 12에 근사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 구조물의 변형량을 지렛대의 원리로 적당히 증폭하여 계측함으로써 계측의 오차를 줄이고, 또 온도의 변화에 기인하는 열팽창 효과를 효과적으로 보상할 수 있도록 고안된 선체변형증폭기와 변위를 전압으로 변환하는 트랜스듀서로 구성된 새로운 개념의 스트레인게이지의 개발과 이를 이용한 응력 계측방법을 소개했다. 또한 본 논문에서는 개발된 스트레인게이지에 대한 선형성 검증실험을 행하였으며, 그 결과 정확한 증폭률과 양호한 선형성을 가짐을 알 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 스트레인게이지는 선체강도 모니터링 시스템의 구축에 뿐만 아니라 교량등 기타 대형 구조물의 안전진단 분야에도 응용될 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] P. A. Thomson, "Development in Hull Strength Monitoring", 해양안전학회지, 2권 1호, pp. 143-150 (1997)
- [2] ABS. Guide for Hull Condition Monitoring System (1995)
- [3] 清野, 近藤, センサ工学入門, 森北出版社, pp. 137-138 (1988)
- [4] 임병국, 홍병호, 센서일렉트로닉스, 대광서림, pp. 236-240 (1995)