<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.8.721 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

구조물의 피로파괴 예지를 위한 이중센서 개발§

백 동 천*† · 박 종 원*
* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

Development of Dual Sensor for Prognosticating Fatigue Failure of Mechanical Structures

Dong-Cheon Baek*† and Jong-Won Park*
* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received January 28, 2016 ; Revised June 13, 2016 ; Accepted June 21, 2016)

Key Words: Dual Sensor(이중센서), Fatigue Failure (피로 고장), Mechanical Structure(기계적 구조물), Prognostics and Health Management(고장예지 및 건전성 관리)

초록: 실제 사용되는 기계 구조물의 수명 예측은 공정산포, 미래의 하중조건, 손상 모델의 불완전성 등으로 인하여 실험실에서 얻은 결과와 차이를 보일 수 밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 불확실성이 내포된 기계 구조물의 피로파괴를 사전에 예지하기 위해 이중센서를 개발하고, 상온에서 단축 피로 하중을 받는 구조물에 적용하여 실증하였다. 이중 센서는 피로하중을 받는 대상 구조물보다 약간 더 큰 응력이 인가되도록 고안된 감지 구조물에 변형률 게이지를 부착한 형태이며, 균열이 센서자체에 먼저 발생함으로써 피로파괴를 예지하며, 쌍으로 제작된 감지부의 변형률 차를 이용하여 변동하중 하에서도 정상상태와 고장상태를 구분이 가능하다.

Abstract: Because of the inherent uncertainties caused by the manufacturing process variations, future loading conditions, and incomplete damage models, the lifetimes of mechanical structures under field conditions are significantly different from the results obtained in the laboratories. In this study, a dual sensor was developed to prognosticate the fatigue failure of structures under these uncertain conditions, and its effectiveness was demonstrated on a rectangular columnar structure under repeated uni-axial loading. The dual sensor is a slightly weaker structure embedded in the target structure, so that failure occurs in the sensor earlier than in the target structure. From the signal differences in the strain gauges in the embedded dual sensor, it is possible to differentiate between the normal status and warning status, even under variable loads.

1. 서 론

전통적으로 많이 연구되고 적용되어 온 모델기반의 금속 구조물의 피로수명 예측방법은 개별 제품의 실제 수명을 예측하는 데 있어서 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 양산 제조 공정 과정 및 설치 과정에서 발생하는 재료 물성 및 가공형상의 산포, 사용자 또는 설치환경에 따라 달라지는 미래 하중의 불확실성, 불완전한 모델링으로 인한 영향 인자의 누락 및 단순화 등은 실험실에서 얻은 수명 예측치와 실제환경에 놓인 구조물의 실제 수명간의 차이를 유발한다.[1]

이러한 불확실성으로 기인한 위험은 안전계수의 도입 및, 중복 구조 설계를 통하여 해결할 수 있으나, 제작비용 및 운용비용이 증가하며, 그럼에도 불구하고 여전히 대형참사가 발생하곤 한다.[2~4] 특히, 운용유지 비용이 수익구조에서 큰 비중을 차지하는 풍력발전기나 항공기와 같은 응용분야에서는 정비 및 교체 주기의 최적화를 위해 고장 예지 기술이 필요하다.

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10.-14., ICC 제주) 발표논문임.
† Corresponding Author, dcbaek@kimm.re.kr
Ⓒ 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

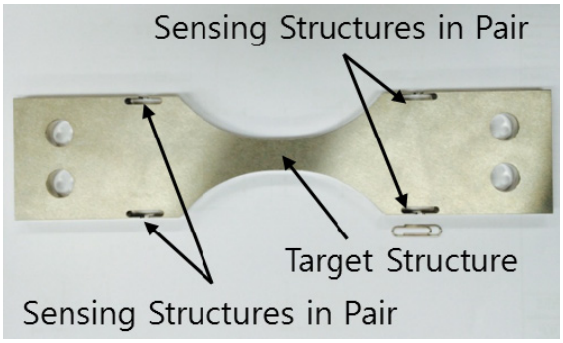

Fig. 1 The sensing structures of embedded in target structure

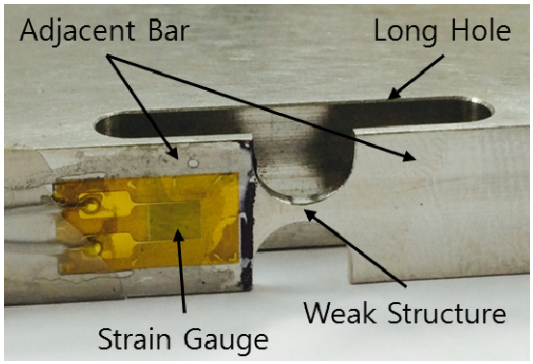

Fig. 2 The strain gauge attached to the sensing structure

기계구조물을 설계할 때에는 수명모델을 사용하여 예측된 수명이 목표수명을 만족하도록 설계하지만, 실제로 제작 또는 설치된 구조물은 앞에서 언급한 불확실성으로 인하여 상당히 보수적으로 운용되고 있어, 운용효율을 높이기 위한 노력이 필요하다. 정비주기와 교체시기를 최적화 하기 위해 최근 실시간 데이터 획득을 통한 상태감시 및 건전성 관리기술에 연구가 많이 이루어지고 있다.[5] 이는 대상물로부터 획득된 진동이나 온도와 같은 물리량에서 구조물의 건전성을 나타낼 수 있는 지표로 특성치를 추출하고 고장 및 잔존수명을 예측하는데 사용한다. 잔존수명을 정확히 예측하지 못하더라도 이상 징후를 사전에 포착하여 고장 발생 시점보다 미리 고장을 예지하는 것 만으로도 예방 정비나 대형 참사 시 골든 타임 확보로서 의미가 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 단축 피로하중을 받는 구조물의 파손을 사전에 경고하기 위한 이중 센서를 개발하고 이를 내재설계 제작하여 변동 하중 하에서도 효과적으로 구조물의 파손을 사전에 예지할 수 있는 방법을 실증하였다.

2. 실험방법

2.1 대상구조물 및 이중센서 설계

고온 및 부식환경에 많이 사용되는 316L 스테인리스 강을 재료로 하여 단축하중을 받는 대표 구조물로 Fig. 1과 같이 인장 시편과 같은 형태를 제작하였다. 이중센서는 대상구조물에 내재된 형태로 제작되어 약간 더 높은 응력을 받아 대상구조물보다 먼저 피로파괴가 발생하도록 한 일회용 소모성 장치이다. 이중센서는 감지구조물과 이에 부착된 변형률 게이지로 이루어져 있다. 감지 구조물은 대상 구조물의 취약부에 인가되는 하중경로를 따라 직렬에 해당하는 양쪽 넓은 체결부에 위치하여, 체결부에서 감지구조물에서 피로파괴가 발생하더라도 대상구조물의 건전성을 유지하기 위해 하중경로 상 병렬위치인 체결부의 양 옆에 1% 미만의 하중이 배분되도록 설계하였다. 감지구조물의 피로파괴가 적절한 시점에 먼저 발생하도록 하려면, 대상구조물에 인장하중이 인가될 때 연동되는 감지부의 응력이 대상구조물의 취약부 보다 약간 더 높게 되어야 한다. 이를 위해 ANSYS를 이용한 이전의 연구에서 여러 가지 설계안에 대하여 선형탄성해석을 수행하여 응력이 5~20%가 높도록 하였다.[6] 응력의 수준을 조절하는 방법은 여러 가지 방법이 가능하나, 본 논문에 사용된 응력조절 방법은 다음과 같다. 감지부를 대상구조물 체결부와 분리하기 위하여 밀링으로 긴 구멍을 판 다음에, 측면에서 드릴링으로 곡면 가공함으로써, 가운데는 폭이 좁고 양끝은 넓은 모양의 아령형으로 가공하였다. 가운데 목 부분의 길이와 넓은 부위의 길이의 비율과 곡률반경을 조절하여 감지부에 가해지는 응력의 수준을 결정하였다. 목 부분에 소성변형과 균열이 발생하더라도, 감지부의 넓은 부위는 여전히 탄성영역의 변형을 하므로, 감지부 넓은 곳 중 한 곳에 Fig. 2와 같이 변형률 게이지를 부착하면, 일종의 로드셀과 유사한 역할을 하여 감지부에 인가되는 하중의 변화를 간접적으로 측정할 수 있다. 본 논문에서는 변동 하중에서도 센서의 파단을 효과적으로 검출하기 위해서, 2개의 감지부를 사용하여, 각 감지부에서 획득된 변형률 신호의 차를 사용하였다. 둘 중 하나의 감지부에서 균열이 발생하면, 변형률의 차이가 균열 열림 현상으로 커져 신호의 차를 발생한다.

2.2 시험조건

하중은 대상구조물에 3Hz 정현파로 최대 10,580 kgf, 최소 1058kgf로 상온에서 파손할 때까지 인가하며, 이중센서에서 변형률 값을 측정하였다.

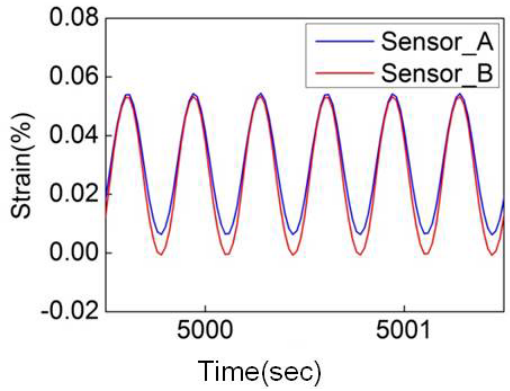

Fig. 3 Strain gauge signals of dual sensors at normal condition

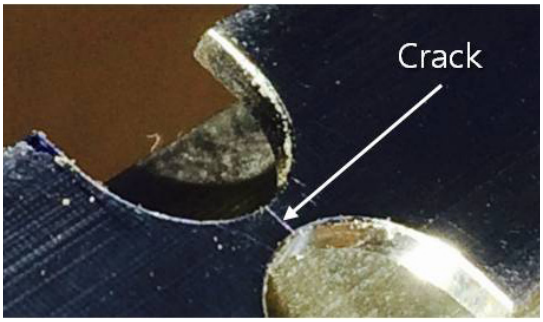

Fig. 4 A crack propagated through the sensor B

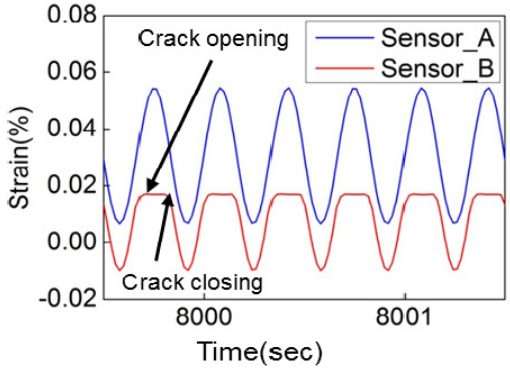

Fig. 5 The strain gauge signals of sensors at abnormal condition, i.e. cracked at sensor B

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 같이 피로하중 초기에는 하중이 변하더라도 두 감지부에서 측정된 변형률의 차이 거의 같다. 약간의 변형률 진폭과 평균의 차이는 대상구조물 체결 시 축 정렬 오차로 인한 굽힘 하중이 원인으로 보인다. 지속적으로 피로하중을 가하면 Fig. 4와 같이 균열이 이중센서 둘 중 하나(센서B)에서 먼저 발생하게 되는데, 특히 변형률 게이지 신호가 Fig. 5와 같이 균열 열림 시점에서 분명한

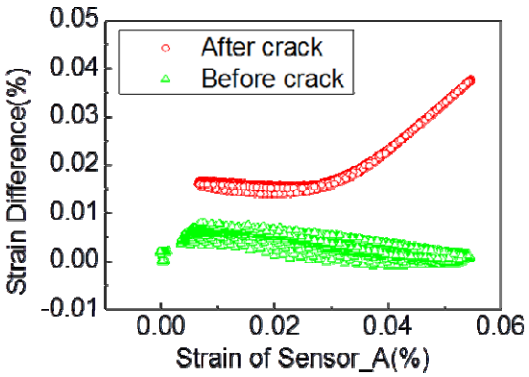

Fig. 6 The strain difference in variable loads

차이를 보이게 된다. 균열이 닫힌 동안에도 차이를 보이는 이유는 누적된 피로손상으로 인한 소성변형과 이중센서를 둘러싸고 있는 모 대상구조물의 탄성구속에 의한 것으로 분석된다.

이중센서의 균열 열림 현상과 소성변형으로 발생하는 변형률의 차는 이중센서의 파손여부를 변동하중 하에서도 알 수 있게 해준다. Fig. 6은 센서 A에서 측정되는 신호에 따른 센서 A와 B간의 변형률 값의 차이를 그래프로 나타낸다. 균열이 없는 경우 하중이 변화하더라도 변형률 차이가 거의 없으나, 둘 중 하나(센서 B)에서 균열이 발생하면, 균열 열림시 감지부에서 하중전달이 되지 않기 때문에 센서 B에서는 하중이 걸리기 않게 된다.

정상상태, 즉 구조물 및 이중센서에 파손이 없을 때에는 하중 크기와 무관하게 변형률의 차이가 거의 나타나지 않는 반면 균열이 발생하게 되면 균열열림 현상에 의해서, 특정 하중 구간에서 하중에 비례한 차이가 발생하게 되어 이중 센서 자체의 파손 여부 및 정도의 차이를 알 수 있게 되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 단축 피로하중을 받는 구조물을 사례연구대상으로 선정하고, 개발된 고장 예지 센서를 이중으로 적용하여 변동 하중에서도 고장예지를 할 수 있음을 실증하였다. 이중센서는 대상구조물보다 약간 더 높은 응력이 연동되어 인가 되도록 대상구조물에 추가로 가공하여 내재구조물형태로 제작된 감지부와 이에 부착된 변형률 센서로 이루어 진다. 단축 피로 하중이 걸리는 구조물에 적용한 결과, 대상구조물 보다 이중센서 중 1개에서 먼저 피로파괴가 발생하였고 균열 열림 현상으로 인하여 변형률의 차이가 발생하여 변동 하중 하에서도 감지구조물의 파손을 예측하여 궁극적으로는 대

상구조물의 변동하중에 의한 피로파괴가 발생하기 전에 고장을 예지를 할 수 있음을 보였다. 균열이 발생하기 이전에도 하중에 따라 변형률 차의 패턴을 이용하면, 구조물이 정상상태일 때, 즉 이중센서가 정상 변형률을 보이고 있을 때 학습을 통하여 군집화하고, 비정상, 즉 이중센서에 파단이 발생하는 상태를 식별함으로써 구조물의 건전성을 효과적으로 감시하는 데 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 기존의 단일 센서로 획득한 데이터는 노이즈를 줄이고 임계치를 설정하는 추가 노력이 필요하지만, 본 연구에서 제안한 방법은 신호처리 및 특성치 추출 측면에서 유리할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2015년도 과학기술연구회의 재원으로 한국기계연구원의 지원을 받은 ‘신뢰성평가기술 고도화를 통한 중소기업 기술지원(NK193E)’의 과제로 수행된 연구임을 밝힙니다.

참고문헌

(References)

(1) Sankaraman, S., Teubert, C. and Goebel, K., 2014, “Uncertainty in Steady-State Diagnostics of a Current-Pressure Transducer: How Confident are we in Diagnosing Faults?,” *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, pp. 356~366.

(2) Lim, J. B., 2011, “Fatigue Life Estimation of a Aircraft Lug Considering Model Uncertainty,” *The conference of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, pp. 792~796.

(3) Seo, J. W., Goo, B. C., Kim, N. P., You, W. H. and Chung., H. C., 2001, “Probabilistic Estimation of the Fatigue Strength of an Electric Car Bogie Frame,” *The Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 261~266.

(4) Kim, B. S., 2014, “Multi-MW Class Wind Turbine Blade Design Part II: Structural Integrity Evaluation,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 4, pp. 311~320.

(5) Seo, B. S., Jang, B. C. and Youn B. D., 2015, “Success Cases and Vision on PHM technology in Engineering System,” *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 25, No.1, pp. 7~15.

(6) Baek, D. C., Bae, K. H. and Park, J. W., 2015, “Prediction of Fatigue Failure of Mechanical Structure using Embedded Design,” *The Conference of Korean Society of Mechanical Engineering: Materials and Fracture*, pp. 95~96.