

## 마그네토스트릭션 효과를 이용한 발전기축의 비접촉 이상 진단 기법

김 윤 영  
서울대학교 기계항공공학부

### Non-contacting Diagnostic Techniques for Generator Shafts Using Magnetostrictive Effects

Yoon Young Kim  
School of Mechanical and Aerospace Engineering  
Seoul National Univ.

#### Abstract

The specific goal of this research is to develop a non-contact measurement technique of stress waves propagating in a rotating shaft. This technique will enable on-line damage detection in shafts in power-generating systems. To minimize measurement errors due to shaft rotation, we have employed magnetostrictive sensors. The sensors are not only cost-effective but also insensitive to lift-off or fill factors. Several experimental results showed the effectiveness of the present technique. The damage location in a rotating shaft was accurately predicted by the wave signal measured by the present approach.

#### 1. 서론

가스 터빈, 증기 터빈 등의 발전설비에서는 많은 축이 사용되고 있는데, 이 축에는 단(step), 접합부 등과 같은 불연속적인 부분이 존재하고 있다. 장기간의 사용과 과도한 연속 부하, 수분에 의한 부식 등으로 인해 축의 불연속 부분 등에 결함이 발생하여 축계 전체가 파괴될 가능성이 상존한다. 이를 방지하기 위해서 위해 현재 사용되고 있는 검사 방식에는 육안 검사, 액체 침투 탐상 검사, 자분 탐상 검

사, 방사선 투과 검사, 와전류 탐상 검사 등이 있다. 그 중에서도 초음파 탐상 검사 방식은 축의 상태를 직접적으로 점검할 수 있고 신호의 분석이 쉽다는 점에서 널리 사용되는 방식이다<sup>1)</sup>. 그러나 초음파 탐상 방식에도 다소의 문제점이 있는 바, 숙련자가 투입되어 검사 대상의 많은 영역을 일일이 탐색하여야 하므로 상당한 시간과 경비를 필요로 한다. 또한 발전기가 가동 중일 때에는 검사를 하지 못하므로 미리 설정된 검사 주기에 따라 시스템의 가동을 멈추어야 하므로 기계의 가동중지/재가동으로 인한 시스템과 주변 배관부의 노후화를 촉진할 수 있으며<sup>2)</sup> 검사 주기 사이에 시스템에 이상이 생길 경우 조기에 대처할 수 없다는 문제를 안고 있다. 진동 신호를 이용한 검사 방식은 지속적인 신호 측정을 위해 주로 사용되고 있지만 축 자체의 신호를 측정하기에는 힘들다는 점과, 초음파 신호를 측정하기에는 많은 한계를 보이는 단점이 있다.

만일 초음파 탐상 방식과 진동 신호 측정 방식 양자의 장점을 모두 갖춘 검사 방식을 확보할 수 있다면 앞에서 언급한 문제는 어렵지 않게 해결할 수 있을 것이다.

이에 회전 중인 축에서의 초음파 신호를 비접촉으로 측정해 내어 이를 쉽게 분석함으로써 회전축의 온라인 감시(on-line monitoring)을 구축할 수 있는

방안을 마련하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 연구의 이론적 배경

1865년 빌라리(Villari)는 자성체 주변에 코일을 설치하고 자성체에 탄성파를 발생시키면 자성체 주변의 자기장이 변하게 되고 이 자기장의 변화가 코일에 전압의 변화를 야기하는 현상을 발견하였다.<sup>3)</sup> 빌라리 효과는 이에 반대되는 현상인 주울 효과와 함께 자왜 효과(Magnetostriction effect)라고 불리는데<sup>4)</sup>, 이를 이용하면 대상 물체에서의 탄성과 측정을 비접촉으로 할 수 있다는 큰 장점이 있다. 그러나 이 효과를 이용한 안전 진단에 관한 연구는 배관계 또는 평판에서의 응용 사례<sup>5)</sup> 정도가 대부분이며, 회전축에서의 진단에 사용된 사례는 찾을 수 없다.

본 연구에서는 솔레노이드 형 코일센서를 이용하여 자왜 센서를 만들었는데 이 경우의 빌라리 효과는 수식적으로 다음과 같이 표현된다.<sup>6)</sup>

$$V_0 = -N \frac{\partial}{\partial t} (4\pi\mu_r \lambda \varepsilon) dA$$

여기에서  $\mu_r$ 은 역투자율(reverse permeability),  $\lambda$ 는 자왜 상수(magnetostriction constant),  $\varepsilon$ 은 변형률(strain),  $A$ 는 코일의 단면적을 의미하며  $N$ 은 코일이 감긴 횟수를 의미한다. 이 식은 그림 1에 도시한 대로 자왜 효과에 의한 신호가 측정 물체의 변형률의 시간 미분값과 관계되어 있다는 것을 나타내는데, 이것은 사실상 자왜 효과를 이용하여 변형률을 측정할 수 있다는 것을 나타낸다.

최근에 제시된 연구 결과에 의하면 축의 단면적에 비해 단면적이 43배나 큰 솔레노이드 센서를 사용하더라도, 즉 축과 센서의 단면적비가 1에 가까운 경우에 비해 출력 신호는 23% 정도만 감소한다는 사실과, 축의 중심과 센서의 중심이 상당히 어긋나 있어도 출력 신호는 거의 변화가 없다는 사실이 밝혀졌다.<sup>7)</sup> 이것은 축 회전시 횡방향 진동이 있더라도 자왜 센서로 탄성파를 문제없이 측정할 수 있음을 제시하고 있다고 할 수 있다.

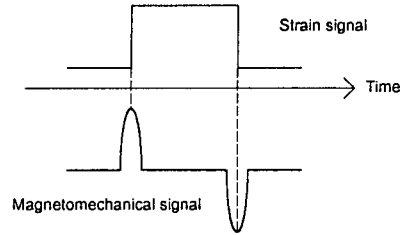


그림 1 변형률 신호와 자왜 신호의 연관성

### 2.2 실험 및 결과의 고찰

자왜 효과를 이용한 실험을 위해 그림 2,3과 같이 축-발진기를 간단하게 모사한 실험 장치를 구성하였다.

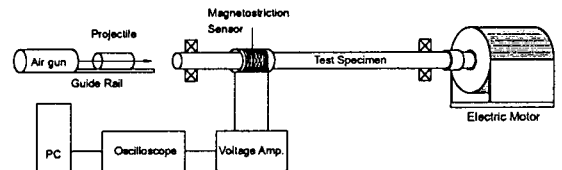


그림 2. 실험 장치의 개략도



그림 3. 자왜 센서의 확대 사진

본 연구에서는 직경 10mm의 SM 45C 재질의 원형축을 실험 대상으로 사용했는데, 이 축은 1800 rpm의 회전속도를 갖는 전기모터로 회전된다. 모터 연결부의 반대편에는 압축공기의 힘으로 발사되는 발사체(projectile)를 타격시켜 축에 사각 종탄성파를 발생시킨다. 자왜 센서는 별도의 지지대에 장착되어

축과 접촉하지 않은 상태로 축의 끝 단에서 250mm 떨어진 부분에 위치해 있다. 축에는 깊이 1mm의 원주 방향 길함을 축의 정가운데에 발생시켰다.

먼저, 회전하지 않는 상태에서, 결함이 없는 축과 결함이 있는 축에서 측정된 자왜센서 신호를 그림 4와 5에 비교하였다. 신호 양쪽의 큰 피크들은 발생한 탄성파와 이 탄성파가 축의 끝단에서 반사되어 돌아올 때 측정된 신호로서 그림 4, 5에 모두 나타나지만 결함이 있는 경우에는 큰 피크들 사이에 작은 피크가 나타나는 것을 볼 수 있다. 앞의 큰 피크와 작은 피크의 시간 간격을 계산하고, 결함과 센서 간의 거리를 고

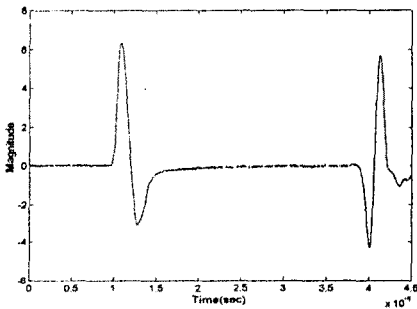


그림 4. 결함이 없는 정지 상태의 축에서의 자왜 센서 신호

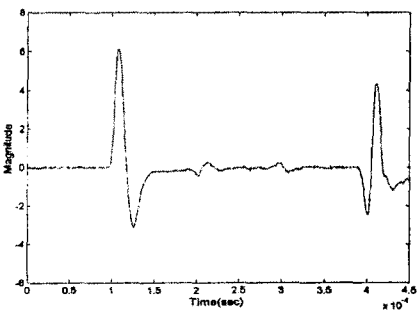


그림 5. 결함이 있는 정지 상태의 축에서의 자왜 센서 신호

려하면 이 작은 피크들은 결함에서 반사되어 돌아온 신호임을 알 수 있다. 즉 정지상태의 축의 결함을 자왜 센서를 이용하여 정확히 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

이를 확인한 후, 축을 회전시키면서 신호를 측정

하였다. 축 회전시 횡방향 떨림이 불가피하게 발생되었는데 레이저 변위계를 이용하여 측정한 결과 센서 위치에서 축 중심에 대해 약  $\pm 1\text{mm}$ 의 떨림이 있었다. 이러한 떨림 상태에서 결함이 없는 축과 결함이 있는 축에서의 자왜센서 신호를 획득하여 그림 6과 7에 실었다.

결함이 있는 축에 대해 정지시와 회전시의 신호를 비교해 보면 (그림 5와 7), 횡방향 떨림이 있음에도 불구하고 자왜 센서에 의하면 신호를 거의 왜곡 없이 측정해 낼 수 있음을 알 수 있다. 그림 6과 7의 신호의 질(quality)을 보면 본 연구에서 제시한 자왜 센서에 의한 측정 기법은 회전하고 있는 축에서도

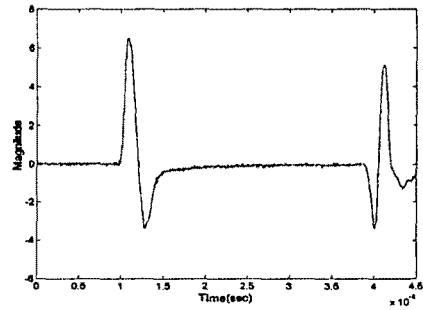


그림 6. 결함이 없는 회전중인 축에서의 자왜 센서 신호

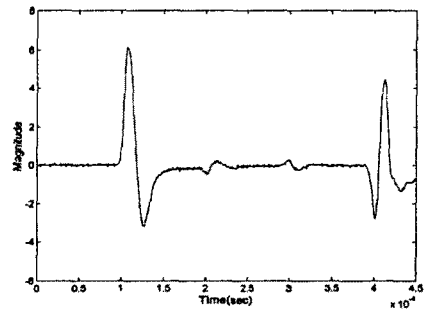


그림 7. 결함이 있는 회전중인 축에서의 자왜 센서 신호

유용하다는 것을 확인 할 수 있다.

### 2.3 신호 처리를 통한 신호의 분석

본 연구에서 제시하는 측정 결과는 시간 영역 자체에서도 결함의 유무를 판단할 수 있으나, 발생 초기 단계의 미소한 결함은 시간 영역에서의 신호처리만으로는 그 위치나 크기를 파악하기 어려운 경우가 많다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 최근 결함 진단과 관련하여 응용 범위를 넓혀 가고 있는 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform) 변환 기법을 이용한 신호 처리 기법을 확장하였다.<sup>8)</sup>

그림 8에는 결함이 존재하는 축의 회전시의 신호에 대한 웨이블릿 변환 결과를 도시하였다. 이 그림의 점선 간의 간격으로부터 결함의 위치를 계산할 수 있다. 표 1과 2에는 여러 다른 결함 위치를 가진 신호에 대한 계산 결과를 실제값과 비교하여 놓았는데 작은 오차 범위 내에서 결함의 위치를 잘 추정해 낼 수 있다.

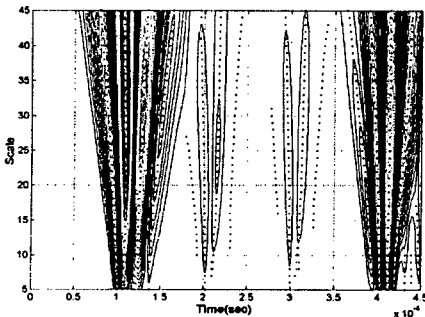


그림 8. 결함이 있는 회전중인 축의 자왜 신호의 웨이블릿 변환 결과 (가우시안 웨이블릿 사용)

표 3. 결함 위치에 대한 실제값과 계산값의 비교 [실험 A]

실제값(m)	계산값(m)	오차 (%)
0.25	0.23	8.0

표 4. 결함 위치에 대한 추정값과 실제값의 비교 [실험 B]

실제값(m)	계산값(m)	오차 (%)
0.55	0.52	8.55

### 3. 결론

발전기 축의 온라인 진단기술 확보를 목표로, 본 연구에서는 자왜 현상을 응용하여 회전축에서의 비접촉 탄성파를 검출하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 자왜센서를 이용하여 회전중인 축에서도 비접촉으로 결함의 유무를 파악할 수 있는 기법을 개발하였다. 또한 결함의 위치를 정확히 찾아낼 수 있는 연속웨이블릿 변환 기법도 개발하였으며, 본 연구에서 개발된 기법의 타당성과 유용성을 실험으로 검증하였다.

### 4. 참고문헌

- 1) Rose, J. L., 1999, Ultrasonic waves in solid media, Cambridge Univ. Press, New York
- 2) 한국전기 연구소, 1998, 발전설비 진단 및 정비기술 개발
- 3) Villari, E., 1865, Change of Magnetization by Tension and by Electric Current, Annalen der Physik und Chemie, Leipzig, Vol. 128
- 4) Kwun, H., 1991, Back in style : Magnetostrictive Sensors, Technology Today.
- 5) Kwun, H. and Bartels, K. A., 1996, Experimental observation of elastic-wave dispersion in bounded solids of various configurations, J. Acoust. Soc. Am. 99(2), pp.962-968
- 6) 조승현, 이호철, 김윤영, 2000, 마그네토스트릭션 효과를 이용한 비접촉 모달 테스트 기법, 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp, 701-707
- 7) 이호철, 2001, 빌라리 효과를 이용한 모드 선택 응력과 센서의 설계와 해석, 박사 학위 논문, 서울대학교 공과대학
- 8) Kim, Yoon Young and Kim, Eung-Hun, 2001, Effectiveness of the Continuous Wavelet Transform in the Analysis of Some Dispersive Elastic Waves, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 110 (1), pp. 86-94.