레이저 및 광전자소자를 활용한 압전소자의 무선 가진 시스템 개발

Development of a Wireless Piezoelectric Transducer Excitation Technique using laser and optoelectronic devices

박 현 준* • 손 훈** • 정 철*** • 권 일 범**** • 윤 정 방**

Park, Hyun-Jun • Sohn, Hoon • Chung, Joseph • Kwon, Il-Bum • Yun, Chung-Bang

요 약

교량, 댐, 터널 등의 대형 구조물 및 항공기 등의 기계 구조물의 경우 그 중요성과 함께 노후화 및 손상의 발생에 의한 구조물의 사고를 미연에 방지하기 위해 효과적인 건전도 평가와 손상 검색에 대한 연구가 최근 급증하고 있으며 특히 압전소자를 활용하여 구조물의 손상을 추정하는 기법들이 많이 개발되고 있다. 또한, 최근에는 압전소자와 계측기 사이를 케이블을 이용하여 연결할 경우 실제 대형 구조물에 설치 시 비효율적인 부분이 많아 무선 기반 계측시스템이 개발되고 있다. 그러나 이러한 무선 계측 시스템의 경우 압전소자의 가진 및 계측되는 데이터의 전송을 위해 별도의 전원공급이 필요하기 때문에 배터리가 포함되도록 구성되며 이럴 경우 그 수명이 제한적이기 때문에 실제 구조물에 활용 시 문제로 제기되고 있다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 레이저를 통해 원격지의 압전소자에 무선으로 전원을 공급하여 가진시키는 시스템을 제안하였다. 압전소자를 가진시키고자 하는 임의의 파형으로 레이저를 변조(modulation)시키고 대기 중으로 전송하여, 압전소자와 연결된 광검출기(photodiode)를 통해 전기적 신호로 변환하여 최종적으로 가진시키게 된다. 이러한 시스템을 실내 실험을 통하여 구현하였으며 그 효용성을 살펴보았다.

keywords : 구조물 건전성 평가, 무선 가진 시스템, 레이저, 광전자소자, 압전소자

1. 서 론

일반적으로 교량, 대형시설물, 지하 매설물 등의 기간산업 시설물들은 사회가 발전하면서 사회 구성원들의 다양한 요구에 부응하기 위하여 점점 대형화 및 첨단화되고 있다. 이에 따라 여러 가지 신기술, 신공법, 신소재 등이 도입되고 있으며 안전성 등의 검증에 대한 필요성이 요구되고 있다. 지금까지는 구조물의 안전진단을 위하여 직접 인력의 투입이 요구되는 육안검사가 보편적으로 이용되어 왔지만, 최근 구조물에 각종 센서를 부착하고 그 센서를 이용한 계측 결과에 기초한 구조물 안전진단 시스템의 사용이 점차 보편화되고 있다. 이러한 배경에서 최근 특히 압전소자를 활용하여 임의의 원하는 고주파 진동을 구조물에 발생시키고 이로부터 유도파(guided wave)를 계측하여 구조물의 손상으로부터 생기는 유도파의 변화를 통해 구조물에 발생하는 손상을 추정하는 능동형 센싱(active sensing) 기반 손상 검색 기술이 많이 개발되고 있다.

이러한 시스템의 경우 압전소자와 계측기 사이를 케이블을 이용하여 연결할 경우 실제 대형 구조물에 설

* 학생회원 • KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 hj.park@kaist.ac.kr
** 정회원 • KAIST 건설 및 환경공학과 교수 hoonsohn, ycb@kaist.ac.kr
*** (주)싸이트로닉스 연구개발부, 기술개발팀장 utokorea@utocorp.com
**** 한국표준과학연구원 안전계측연구단, 선임연구원 ibkwon@kriss.re.kr

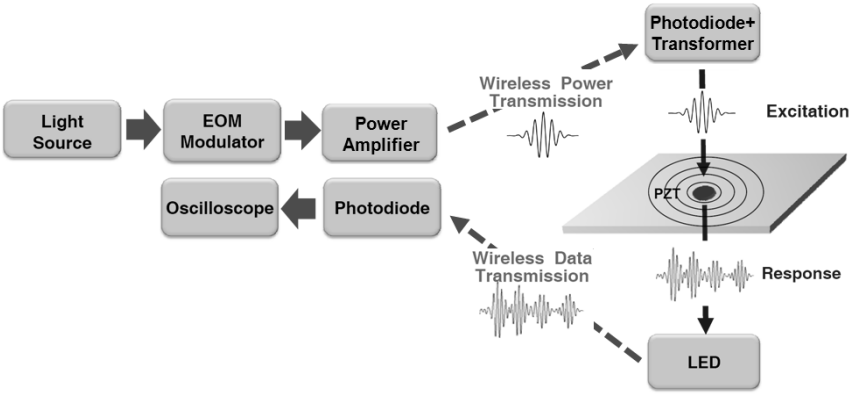


그림 1. 제안된 시스템 개략도(schematics)

치 시 비효율적인 부분이 많아 최근 무선 계측시스템이 개발되고 있으나 유도파 발생을 위한 압전소자의 가진 및 계측되는 데이터의 전송을 위해 별도의 전원공급이 필요하기 때문에 배터리가 포함되도록 구성되어 있다. 압전소자를 활용한 능동형 센싱(active sensing) 타입의 경우 구조물을 가진시키기 위해 추가적인 소자(chip)들이 요구되며 이 때문에 훨씬 많은 에너지가 소모된다.(약 600mW) 결국 압전센서를 활용한 능동형 센싱 타입의 무선 모듈(module)에서 배터리를 사용하여 필요한 에너지를 공급하는 경우 수시로 배터리를 교체해야 하는 문제가 있으며 기존의 무선 센서를 활용하는 것은 실제 구조물에서 사람이 쉽게 접근할 수 없는 부재의 모니터링 및 손상 검색 시 현실적으로 구현하기 매우 어려운 약점이 될 수 있다.

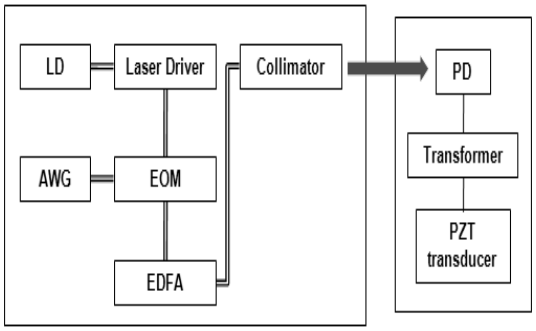
이러한 배경에서 궁극적으로 레이저를 통해 원격지의 센서노드에 무선으로 전원을 공급하여 압전소자를 가진시키고 계측된 유도파를 수집, 전송함으로서 배터리 등의 추가 전원부의 설치 없이 반영구적으로 사용할 수 있는 새로운 무선 시스템을 제안, 개발하고자 하며(그림 1) 우선적으로 본 연구에서는 레이저를 이용한 압전소자의 무선 가진(wireless excitation) 및 유도파 발생(guided wave generation) 기술에 대한 연구를 수행하였다..

2. 시스템의 구성

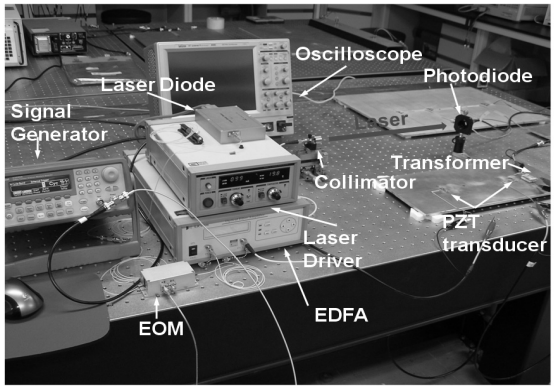
본 연구에서 개발한 압전소자의 무선 가진 시스템의 경우 그림 2(a)와 같이 구성된다. 우선 가진원으로 일정 에너지를 가지는 레이저를 사용하며 이를 통해 임의 파형(arbitrary waveform)을 생성하기 위해서 전광변조기(electro-optic modulator: EOM)를 거치게 된다. 이렇게 변조된 레이저는 광증폭기(Erbium-doped fiber amplifier: EDFA)를 거치면서 광 에너지의 증폭을 거치고 나서 대기 중으로 전달된다. 이렇게 무선으로 전송된 레이저는 원격지에 위치하고 있는 광검출기(photodiode : PD)에서 전기적인 신호로 변환하게 되며 이 후 변압기(transformer)를 통해 전압신호가 증폭되고 이를 통해 압전소자를 가진하게 된다. 다음 절을 통해 위에서 설계된 시스템의 구현 및 실내 실험 결과를 소개하고자 한다. 각 광전소자의 기본 원리에 대한 내용은 지면 관계 상 생략하며, 참고 문헌을 통해 확인해 볼 수 있다.

3. 시스템 검증을 위한 실험

3.1 시스템 구현 및 실험 설계



(a) 시스템의 layout



(b) 실험을 통한 시스템 구성

그림 2. 레이저를 활용한 무선 가진 시스템

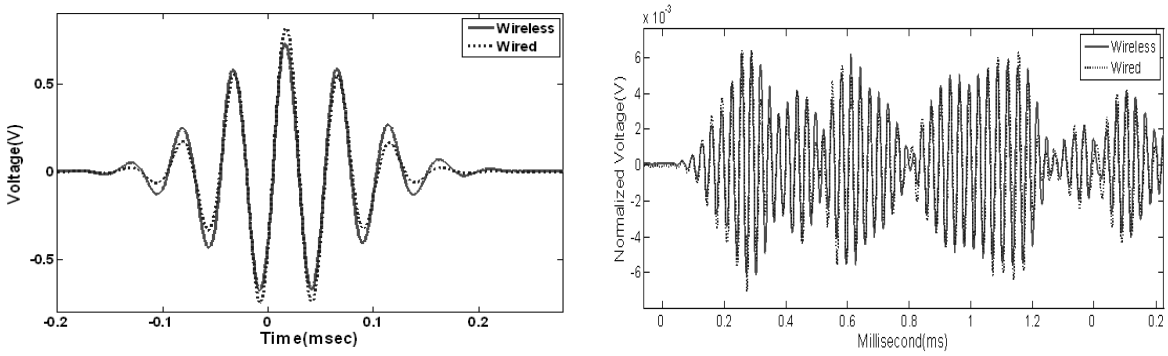
그림 2(b)에서 실제 구현된 시스템의 모습을 확인할 수 있다. 실험에서 사용된 LD의 출력은 10mW였으며 레이저 드라이버를 통해 조절되었다. 또한 AWG를 통해 +/-1.5의 peak-to-peak 전압을 갖는 toneburst 신호를 생성하였으며 중심주파수는 30kHz로 하여 EOM에 연결하였다. 이 후 EOM을 거쳐 변조된 신호는 EDFA를 거쳐 50mW로 증폭되고 최종적으로 대기 중에 전달되며 PD로 수신된다. 본 실험에 사용된 PD는 1550nm에서 최대의 반응도(responsivity)를 가지며 파장대를 맞추기 위해서 LD의 중심파장 역시 1500nm로 사용하여 시스템의 효율을 최대로 유지하였다. PD에서 광신호는 전기신호로 변환되며 변압기를 거치면서 전압이 증폭되게 된다. 본 실험에서는 1:20의 코일비를 가지는 변압기를 사용하였으며, 이를 통해 20배의 전압 증폭을 수행하였다. 이렇게 생성된 전기 신호는 마침내 알루미늄 판에 부착된 압전소자로 전달되어 유도파를 생성하게 되며 이렇게 생성된 유도파를 두 번째 압전소자를 통해 수집하여 오실로스코프를 통해 확인하였다. 신호 대 노이즈 비를 높이기 위해 50번의 계측 후 평균하였으며 이렇게 구현된 실험 결과는 압전소자를 바로 AWG를 연결하여 얻은 결과와 비교하여 본 시스템의 성능을 평가하였다.

3.2 실험 결과

시스템의 성능을 평가하기 위한 실험 결과 분석은 총 2가지 부분에 있어서 수행하였다. 첫 번째는 실제로 EOM을 통해 변조된 레이저를 PD를 통해 전기적 신호로 변환시켰을 때, 즉 최종적으로 압전소자에 가진 소스로 사용되는 전기 신호와 AWG를 통해 생성한 toneburst 신호를 비교함으로서 입력 신호에 대한 비교를 수행하였으며, 두 번째로 레이저를 사용하여 압전소자를 무선 가진 시켜 생성한 유도파와 AWG를 통해 생성한 유도파를 비교하였다.

그림 3(a)는 레이저 및 AWG를 사용하여 생성한 toneburst 신호를 비교하였다. 파란색의 점선이 AWG를 통해 생성하고 EOM에 변조 신호로 사용된 toneburst 신호이고 빨간색의 실선이 레이저를 통해 PD 및 변압기를 거쳐 계측된 toneburst 신호이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 상당히 유사한 결과를 얻은 것을 확인할 수 있다. 즉, 레이저의 파형 변조 및 PD, 변압기를 통해 임의신호가 제대로 생성되었음을 볼 수 있다. 수치적으로 살펴보면 레이저를 통해 생성된 toneburst 신호의 경우 peak-to-peak 전압이 1.72V였으며, 주파수의 경우 29.84kHz 임이 확인되었다. 이는 PD를 거치면서 광전변환 시 외부에서 광자가 들어왔을 때 n side와 p side를 활성화시키면서 발생하는 현상이지만 그럼에도 결과에서 확인할 수 있듯이 생성된 신호의 전체적인 형상은 상당히 원래 신호를 잘 모사하고 있음을 볼 수 있다.

그림 3(b)는 그림 3(a)에서 얻은 가진 신호를 가지고 압전소자를 가진시켜 얻은 유도파를 비교하여 나타내고



(a) 생성된 toneburst 신호 (b) 계측된 유도파 신호

그림 3. 실험 결과

있다. 결과 그래프에서 확인할 수 있듯이 매우 유사한 유도파가 계측되었음을 볼 수 있다. 앞서 가진 소스로서 만들어진 toneburst 신호가 약간의 시간 지연 및 위상 차이를 보였지만 두 가지의 toneburst 신호를 가지고 생성시킨 유도파의 결과는 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 이는 본 연구에서 제안한 압전소자의 무선 가진 시스템이 기존 시스템과 비교하여 그 성능을 충분히 발휘하는 것으로 결론지을 수 있으며, 기존의 무선 센서 노드에 비해 추가적인 전원공급이 필요 없고, 반영구적으로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 이 후에 충분한 활용가능성이 있다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전소자의 무선 가진을 위한 시스템을 제안하고 실제 시스템을 구현, 실내 실험을 수행하여 그 성능을 기존 시스템과 비교함으로서 평가하였다. 이를 통해 합리적인 성능을 보임을 확인하였으며 이후 다양한 활용가능성이 있음을 확인하였다. 현재 압전소자를 통해 계측된 데이터의 전송 시스템을 개발 중에 있으며 향후 두 시스템을 결합함으로서 추가 전원공급이 필요 없는 새로운 센서 시스템을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2006건설기술혁신사업(06건설핵심B05)과 한국과학재단(우수연구센터(ERC): 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC))의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

윤재선 (2002) 기초광학, 다성출판사

Lee, S. and Sohn, H. (2006) “Active Self-Sensing Scheme Development for SHM Structural Health Monitoring,” Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 1734-1746

Smith, S. D. (1995) Optoelectronic Devices, New Jersey: Prentice Hall

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Czarnecki, J. J., Shunk, D. D., Stinemates, D. W. and Nadler, B. R. (2004) "A Review of SHM Literature: 1996-2001,"Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS

Wilson, J. and Hawkes, J. (1998) Optoelectronics: An introduction, New Jersey: Prentice Hall