

# 교량 센서를 위한 콘크리트 투과 무선 전력 및 데이터 전송 방법

장유진, 한정규, 조신영, 문건우  
한국과학기술원

## Simultaneous Wireless Transfer of Power and Data through concrete structure for smart bridge sensors

Yujin Jang, Jung Kyu Han, Shin-Young Cho, Gun-Woo Moon  
KAIST

### ABSTRACT

본 논문은 통신 모듈과 전력선 없이, 교량용 센서에 전력을 송전하는 동시에 2차측 부하 변동에 의한 1차측 공진 캐패시터의 전압 변동을 이용해 데이터를 전송하는 무선전력 전송 시스템을 제안한다. 콘크리트 구조물을 투과하여 10W(3.3V, 3A)의 전력 및 데이터를 전송하는 시스템을 구현하여 제안된 시스템의 타당성을 검증 하였다.

### 1. 서론

콘크리트의 손상 여부, 진동, 온도와 같은 여러 정보는 교량의 안정성을 확보하는 데에 매우 중요한 정보이다.<sup>[1]</sup> 따라서 교량에 감지 센서를 부착하여 이들 정보를 수집하고, 유지 보수를 위한 정보로 활용 하고 있다. 그러나 기존의 교량용 센서는 교량을 따라 전력선 및 데이터 전송선을 유선으로 연결 함으로써 높은 비용이 발생하는 문제가 있다. 이를 개선 하기 위해 전력선을 대신하여 배터리를 사용하는 방법이 제안되었지만, 배터리 방전 시 교량 내부에 위치한 배터리의 교체가 어려운 문제가 여전히 존재한다. 또한, 교량 상태를 전송하기 위해 고가의 무선 통신 모듈이 요구되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 무선 전력 시스템을 이용하여, 콘크리트 구조물 속 센서에 전원을 공급하며, 동시에 무선전력시스템의 2차측에 부하변동을 일으켜 센서가 측정한 데이터를 송신하고, 1차측 캐패시터의 전압을 이용해 수신하는 회로를 제안한다. 제안한 방법은 전력선과 부가적인 통신 모듈 제거를 통해 비용을 절감 할 수 있다. 그리고 데이터 전송에 의한 전력 전송 시스템의 효율 저감이 거의 없다. 본론에서는 무선 전력 및 데이터 전송 원리에 대하여 설명하고, 300mm 거리의 콘크리트 구조물을 투과한 실험결과를 통해서 제안된 방법의 타당성을 보인다.

### 2. 본론

#### 2.1 무선 전력 및 데이터 전송 원리

교량용 센서를 위한 배터리 충전 및 데이터 전송 시나리오는 다음과 같다. 그림1에서와 같이 교량 센서에 전원을 공급 하기 위해 검사용 차량이 센서가 부착된 지점에 접근한다. 그리고, 차량과 센서의 공진기를 이용하여 무선으로 전력전송을 진행한다. 무선전력전송 회로는 그림2와 같다. 직렬-직렬 캐패시터를 이용하여 고효율 전송을 위해서 보상된 효율 관계식은 다음과 같이 정리 할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{k^2 Q_1 Q_2}} \cdot \frac{R_L}{R_2 + R_L} \quad (1)$$

여기서  $R_1$ 과  $R_2$ 는 공진기를 구성하는 코일의 AC 저항이며,  $R_L$ 은 출력 부하이다.  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 각각 1,2차 측의 성능계수(quality factor)를 뜻하며,  $k$ 는 결합 계수이다.  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $k$ 값이 클수록 높은 전송 효율을 얻을 수 있다.

데이터 전송은 배터리가 임계전압 이상이 되면 이루어 진다.

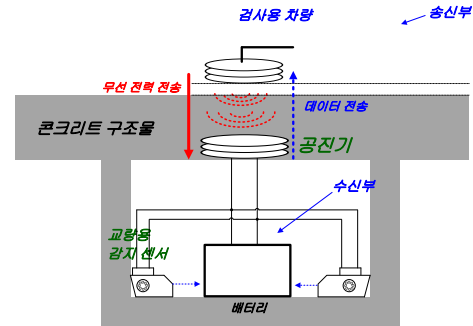


그림 1. 검사용 차량 송신기를 이용한 무선 전력 및 데이터 전송 시스템

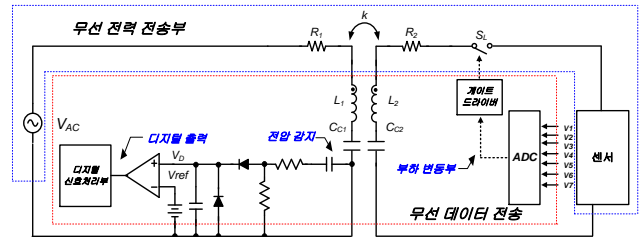


그림 2. 직렬-직렬 보상 캐패시터를 포함한 무선 전력 시스템

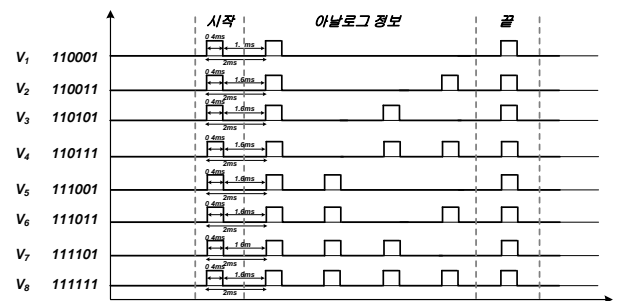


그림 3. 센서출력 아날로그 전압의 디지털 변환

센서가 모니터링 하고 있었던 정보는 DC전압 값으로 출력되며, 그림3과 같이 8단계의 디지털 신호로 패킷화되어 ADC (Analog-to Digital)블록에서 변환된다. 디지털 신호는 게이트 드라이버 블록으로 인가되어, 2차측 수신부의 출력 로드 에 위치한 부하 가변 스위치를 온-오프 제어 한다. 2차측 수신부 부하의 변동량은 1차측 공진기에 흐르는 전류량을 변화 시키며, 1차측 캐패시터에서 AC전압으로 검출된다. 캐패시터에서 검출된 AC전압의 피크값은 저항 분배기에 의하여 전압 크기를 낮추어 준 후에, 다이오드를 이용한 반파 정류 회로 및 캐패시터에 의하여, DC 전압으로 변환 된다. 이 신호는 비교기의 입력으로 인가되어, 디지털 신호로 변환 된다. 무선전력전송 회로의 캐패시터를 이용한 데이터 검출

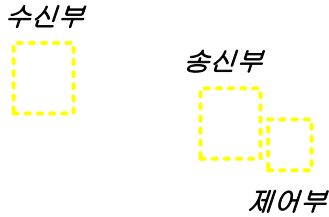


그림5. 콘크리트 투과 무선 전력 및 데이터 전송 실험구성

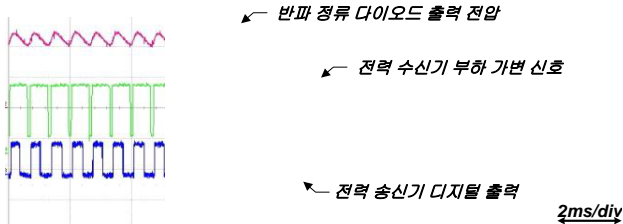


그림6. 공진기를 통한 1500bps 데이터 전송

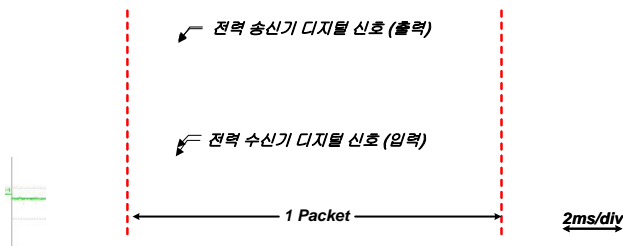


그림7. 2차측에서 1차측으로 전달된 디지털 신호 (110101)

방법은 공진기 사이의 거리가 멀어 질수록 데이터 검출의 정확도가 증가한다. 이는 입력전류의 크기가 증가함에 따라 부하 변화에 따른 전압차이가 증가 하기 때문이다. 또한 전체 배터리 충전 시간 대비 데이터 전송 시간이 매우 짧아, 전송 효율에 거의 영향을 주지 않는다.

## 2.2 실험 결과

무선 전력 및 데이터 전송을 위한 실험구성은 그림5와 같다. 실험에 사용될 철근이 포함된 콘크리트 구조물은 가로 세로 600mm의 크기를 가지며, 깊이를 50mm부터 300mm까지 변화하여 제작하였다. 1차측 공진기와 2차측 공진기는 콘크리트 사이에 위치하며, 각각 10턴, 직경 300mm로 제작되었다. 무선전력전송용 공진기의 변수 값은 자화 인덕턴스  $42\mu\text{H}$ , AC저항  $0.3\Omega$ 이다. 300mm거리에서 공진기 사이의 결합계수 ( $k$ )는 0.04이다. 1차측 송신부의 무선전력 전송을 위한 회로는 하프 브릿지 직렬-직렬 커패시터 보상회로 형식이 이용되었고, 이차측 수신부 회로는 공진기와 풀브릿지 정류기가 연결되어 있으며, 출력에 로드가 연결된 구성으로 되어 있다. 또한 ADC의 신호에 의해서 제어 가능한 데이터 전송용 로드 가변 스위치( $S_L$ )가 연결되어 있다. 제작된 코일의 자화 인덕턴스와 직렬 보상 커패시터의 공진 주파수로 스위칭 주파수를 맞추어 동작시키면, 최대 에너지를 전송할 수 있다.

실험은 10W(3.3V, 3A) 전력 전송을 목표로 하였으며, 콘크리트 구조물의 두께를 50mm에서 300mm까지 변화시켜, 공진기, 사이의 거리를 조절하며 실험을 진행하였다. 효율결과는 표1에 정리하였다. 표1에 의하면, 제안한 데이터 전송 회로를 포함한 무선전력 전송회로와 기존 무선전력

표1. 콘크리트 구조물 두께에 따른 무선 전력 전송 효율

공진기 거리	기존 무선전력 전송 회로	데이터 전송 회로를 포함한 무선전력 전송회로	차이
50mm	65.04%	64.7%	0.34%
100mm	63.62%	63.23%	0.39%
150mm	61.74%	61.35%	0.39%
200mm	57.69%	57.27%	0.42%
250mm	50.90%	50.43%	0.47%
300mm	44.14%	43.64%	0.5%

사이에 효율의 저하가 최대 0.5%정도로 거의 차이가 없음을 확인 할 수 있다. 이는 커패시터 전압을 감지하는 데이터 전송 회로에 의한 손실이 거의 없음을 의미한다.

다음으로 2차측 전력 수신부에서 1차측 전력 송신부로 데이터를 전송 하는 실험을 진행하였다. 먼저, 공진기를 이용하여 왜곡 없이 전송되는 최대 전송률을 확인 하였다. 로드 가변 스위치( $S_L$ )에 함수 발생기의 클럭 신호를 인가하여, 1차측 커패시터에 동기화된 신호가 검출되는지를 평가 하였다. 그림 6에서 보는 것과 같이 1500bps의 속도로 데이터가 2차측 전력 수신부에서 1차측 전력 송신부로 전달 가능함을 확인하였다. 다음으로 디지털 패킷 전송 실험을 진행하였다. 그림3에서 정의한 8가지 아날로그 전압에 해당하는 8가지 디지털 신호(110001, 110011, 110101, 110111, 111001, 111011, 111101, 111111)는 모두 왜곡 없이 2차측 수신부에서 1차측 송신부로 전달됨을 확인하였다. 전달된 디지털 신호의 통신 속도는 500bps로 설정 하였다. 그림7은 8가지 신호 중에 디지털 신호 110101이 1차측으로 파형의 왜곡 없이 전달 됨을 보여준다. 따라서 무선전력전송을 진행 하면서, 2차측 전력 수신부에서 생성된 신호 데이터가 디지털로 변환되어서 1차측 전력 송신부로 공진기를 통해서 전송 될 수 있음을 확인 할 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 교량 센서용 디지털 데이터 전송회로를 포함한 무선전력 전송 회로를 제안하였다. 실험을 통해 300mm두께의 콘크리트를 투과하여 수신부에 10W의 전력이 43.64% 효율로 전달됨을 확인하였다. 수신부에서는 아날로그 전압 정보가 디지털 신호로 변환되어, 부가적인 통신회로 없이 공진기를 통해서, 1차측 송신부로 전달됨을 확인하였다. 따라서 제안한 회로 및 데이터 전송 기법은 저비용 교량용 센서 시스템에 적합하다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0028680).

## 참고 문헌

- [1] Chandrashekhara, K.,Watkins. S.E., Nanni. A., and Prakash Kumar,. "Design and technologies for a smart composite bridge" Intelligent Transportation Systems, 2004. The 7th International IEEE Conference on
- [2] S. Moon, B.-C. Kim, S.-Y. Cho, C.-H. Ahn, and G.-W. Moon, "Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 11, pp. 5861-5870, Nov 2014.