

# 밀리미터 전자기파를 이용한 콘크리트 내부 자가치유 캡슐의 위치 측정을 위한 3D 프린팅 자가치유 캡슐의 공진 주파수 분석

## Resonance frequency analysis of 3D printed self-healing capsules for localization of self-healing capsules inside concrete using millimeter wave length electromagnetic waves

임태욱<sup>1</sup> · 성호<sup>1</sup> · 이영준<sup>1</sup> · 호걸<sup>1</sup> · 김상유<sup>1</sup> · 정원석<sup>1\*</sup>

Lim, Tae-Uk<sup>1</sup> · Cheng, Hao<sup>1</sup> · Lee, Yeong Jun<sup>1</sup> · Hu, Jie<sup>1</sup> · Kim, Sangyou<sup>1</sup> · Jung, Wonsuk<sup>3\*</sup>

**Abstract** : In this paper, experiments were conducted on signal amplification of polymer capsules for application to Ground Penetrating Radar so as to enable real-time monitoring of polymer capsules inside concrete using the Morphology Dependent Resonance phenomenon. A TEM CELL and a vector network analyzer were used to analyze the difference in resonance frequency depending on the material of the sphere and the presence or absence of fracture. In order to manufacture a capsule of a size that can be measured using millimeter waves used in GPR, we manufactured a capsule with a 3D printer and analyzed the effects of the presence or absence of coating and the size of the capsule on the resonance frequency. Resonant frequency or signal amplification is more affected by diameter than coating. The capsule showing the highest amplification is the resin-coated 50 mm diameter capsule with a 316-fold increase and the lowest capsule is the uncoated 10 mm diameter capsule with a signal amplification of 11.9 times. These results demonstrate the potential of GPR to measure the position and state of self-healing capsules, which are small-sized polymers, in real time using millimeter waves.

**키워드** : 형상의존 공진, 지반 탐사레이다, 자가치유 콘크리트

**Keywords** : morphology dependent resonance, ground penetrating radar, self-healing concrete

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

콘크리트 구조물의 안정성을 높이기 위해 자가치유 캡슐을 시멘트를 섞어 자가치유 콘크리트를 만드는 연구가 수행되어 왔다. 캡슐 기반의 자가치유 콘크리트의 성능과 수명의 연구를 위해서는 캡슐 자체의 강도 및 기계적 특성뿐만 아니라 콘크리트 내부에서의 거동에 대한 분석 또한 필요하다. 본 연구는 콘크리트 내부의 폴리머로 제작한 자가치유 캡슐을 검출하기 위해 구형 유전체가 지름과 파장이 유사한 밀리미터파에 의해 공진을 하는 Morphology Dependent Resonance(MDR) 현상을 Ground Penetrating Radar(GPR)에 적용하여 기존의 방법으로는 검출이 불가능한 자가 치유 캡슐을 검출하기 위해 기초실험을 진행했다[1-3].

## 2. 논문의 작성 요청

### 2.1 시편준비

10,30,50mm 크기 3D 프린터로 제작한 캡슐에 물을 채운 후 레진으로 코팅한 캡슐과 코팅을 하지 않은 캡슐의 공진 주파수 분석을 통해 캡슐 모니터링 시스템에 적용 가능성을 분석했다. Agilent사의 N5242A 벡터네트워크 분석기와 TESCOM사의 TC5062A TEMCELL을 방사에 의한 공진을 분석하는데 사용했다. TEMCELL은 100MHz에서 6GHz까지 측정 가능하며 벡터네트워크 분석기를 이용하여 TEMCELL의 s-paramter 변화량을 계산하여 주파수에 따른 공진 여부를 분석했다[4].

1) 충남대학교, 기계공학과

2) 충남대학교, 교수, 교신저자(wonsuk81@cnu.ac.kr)

## 2.2 측정 결과

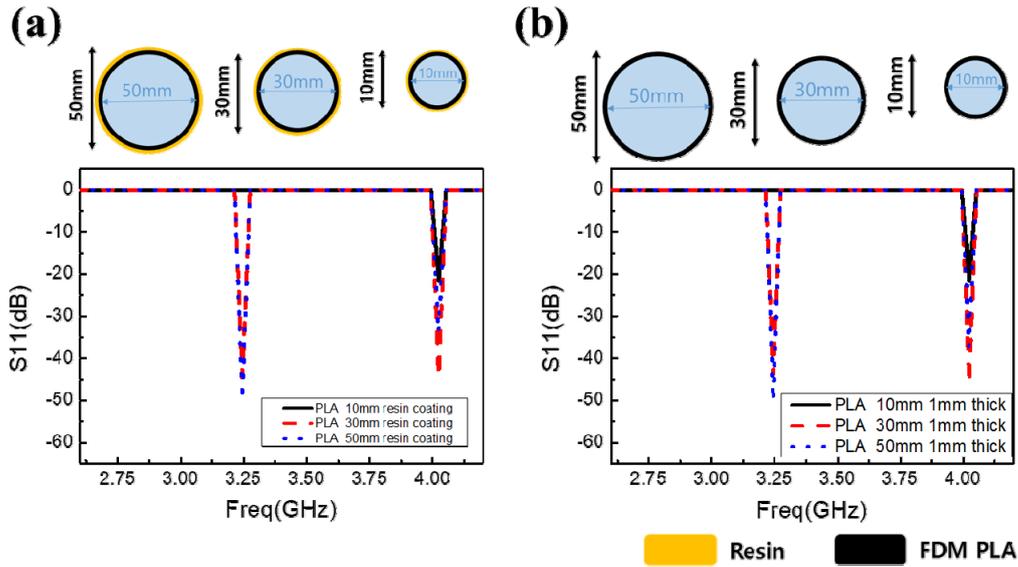


그림 1. 연도별 건설현황

그림 1에 보여지는 것처럼 코팅한 캡슐과 코팅을 하지 않은 캡슐 모두 50mm와 30mm 구 모두 3.24GHz에 공진이 관측되며, 4.02GHz의 주파수는 모든 캡슐에서 공진이 관측된다. 코팅 여부에 관계없이 50mm 지름의 캡슐은 3.24GHz에서 가장 큰 증폭을 보이고, 30mm 캡슐은 4.02GHz에서 가장 큰 증폭을 보인다. 또한 10mm 캡슐은 4.02GHz의 주파수에서만 공진현상을 보인다. 이를 통해 코팅 여부보다 캡슐의 크기가 공진 주파수에 더 큰 영향을 보이는 것을 볼 수 있다. 가장 높은 신호 증폭을 보이는 캡슐은 코팅을 하지 않은 50mm 캡슐로 3.24GHz에서 316배 증가하며, 가장 낮은 증폭을 보이는 코팅을 한 10mm 캡슐도 인가전압 대비 11.9배의 전압을 획득한다.

## 3. 결론

여러 공진의 중첩으로 인해 PLA와 Resin으로 만든 구의 경우 지름에 따라 신호가 증폭되는 공진 주파수의 변화를 확인할 수 있었다. 이는 레이더를 이용한 콘크리트 내부의 자가치유 캡슐의 위치나 상태를 실시간 모니터링 시스템에 적용할 수 있는 가능성을 보여준다. 하지만 자가치유 캡슐의 산업화나 연구에 적용하기 위해서는 캡슐의 크기나 재료가 공진 주파수에 미치는 영향을 모드에 따라 분석을 해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 2022년 한국 연구재단의 기초연구실사업(과제번호: 2020R1A4A3079595)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Adamovsky G. Morphology-dependent resonances and their applications to sensing in aerospace environments. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*. 2008. p. 409-424.
2. Nuntaplook U, Adam JA. Morphology-Dependent Resonances in Two Concentric Spheres with Variable Refractive Index in the Outer Layer: Analytic Solutions. *Appl*. 2021. p. 781-796.
3. Dey U, Hesselbarth J. Subwavelength Particle Spectroscopy by Measurements of Electromagnetic Scattering at Millimeter-Wave Frequency. in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2022. p. 699-710.
4. Wang X. Wideband transverse electromagnetic cell design and its application in frequency selective surface measurement. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2021. p. e22690.