

# 주파수 선택 구조를 응용한 콘크리트 구조물의 균열 폭 및 형상 예측

이상화\*, 홍익표\*\*

## Prediction of Crack Width and Shape of Concrete Structures Using Frequency Selective Surface Structure

Sang-Hwa Lee\*, Ic-Pyo Hong\*\*

본 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원(2017K000448)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1A2B6001680)으로 수행되었습니다.

### 요 약

본 논문에서는 건축물에 사용되는 콘크리트에 발생한 균열 탐지를 위해 X 대역의 선택적 주파수 차단 특성을 갖는 십자 패치형태의 주파수 선택 표면 구조를 설계하였다. 주파수 선택 표면 구조가 적용된 콘크리트 벽에 균열이 발생한 경우를 가정하여, 단위구조에 0.2~1mm 사이의 균열 폭을 형성하여 크기 변화에 따른 주파수 특성을 시뮬레이션 하였으며, 균열 폭이 증가함에 따라 공진 주파수의 상향과 반사 손실의 증가를 확인하였다. 종이 기판 위에 전도성 스프레이로 제안된 주파수 선택 표면 구조를 제작하고, 균열의 발생 원인에 따라 5개의 서로 다른 균열이 적용된 시료를 제작하고 적용하였다. 수직, 수평 편파에 따른 주파수 반사 특성을 측정 한 결과로부터, 교차 편파 측정을 통해 균열의 형상을 예측 할 수 있다는 것을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we designed a well-known patch type frequency selective structure with frequency blocking characteristics of X band for crack detection in concrete used in most buildings. The frequency reflections are simulated by changing the size of cracks between 0.2 and 1mm on the assumption that cracks occurred in the concrete wall with frequency selective structure. As the crack width increases, the resonance frequency is increased and the reflection loss is increased. To verify the simulation results, the proposed structure is fabricated as conductive spray on a paper substrate and applied to concrete wall with five different cracks depending on the cause of the cracks. From the measurement results of the vertical and horizontal polarizations, it is confirmed that the shape of the crack can be predicted through the cross polarization measurement.

### Keywords

structural health monitoring, frequency selective surface, cack detection

\* 국립공주대학교 정보통신공학부

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7153-7962>

\*\* 국립공주대학교 정보통신공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>

· Received: Jun. 06, 2018, Revised: Aug. 05, 2018, Accepted: Aug. 08, 2017

· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong

Dept. of Information & Communication Eng., Kongju National University  
Cheonan, Korea.

Tel.: +84-41-521-9199, Email: [iphong@kongju.ac.kr](mailto:iphong@kongju.ac.kr)

## 1. 서 론

대표적인 건축 재료인 콘크리트는 단순 시공으로 구조물 성형이 용이하고, 내수성, 내화성이 우수하여, 반영구적인 수명으로 교량, 댐, 원자로 건물 외벽 등 사회기반 중요 시설물뿐만 아니라 아파트, 고층 빌딩 등 주거 공간, 실내 생활을 위한 건축물 등 전반적인 실내 환경 구축에 사용되는 재료이다. 하지만 콘크리트는 온습도 변화에 따라 수축 또는 팽창 하며, 시간이 지남에 따라 콘크리트 내부에 위치한 철근이 부식하는 등 환경 조건 및 재료적 성질로 인해 재료의 화학적 열화가 발생하며, 지속적으로 작용하는 하중에 의한 구조적 열화로 균열 현상이 쉽게 발생하는 재료이다[1].

균열 발생 원인은 시공 과정에서 발생한 균열, 외부 환경에 의한 균열, 내부에 내장된 철근 부식으로 인한 균열, 오랜 사용으로 노후화된 콘크리트 구조물에 발생한 균열 등이 있으며, 균열이 발생한 콘크리트 구조물은 내력, 내구성, 방수성 등에 취약하여 2차 손상을 야기할 수 있다. 초기 균열에 빠르게 대응하여 외관에 의한 사용자의 심리적 불안감을 해소하고, 물, 가스, 기름 등 콘크리트 내부로 흐르는 유동 물질을 효과적으로 차폐해야하며, 균열에 의한 2차 손상을 예방하여야 한다. 발생한 균열의 크기, 위치, 형태에 따라 그에 맞는 적절한 보수, 보강이 이루어져야 하며, 균열의 보수, 보강을 통해 구조물의 수명 연장 및 안정성 확보로, 경제적 이익을 추구해야한다[2][3]. 또한, 건축 구조물은 점점 더 고층화, 대형화 되어 가고 있는 상황에서, 최근 국내에서는 중·소규모의 지진들이 꾸준히 발생하고 있어 구조물의 불안전성이 증가하고 있다. 구조물에 대한 안전 상태 및 유지 관리 시스템이 철저하게 이루어져야하며, 효율적인 구조물 안전 진단 기술에 대한 연구가 필요하다[4].

전자기적 방식으로 구조물의 안전 상태를 탐지하는 기술로 저항성 스트레인 게이지(Resistive Strain Gage), 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network), 커패시티브 센서(Capacitive Sensor) 등이 있다. 저항성 스트레인 게이지는 특정 저항 값을 갖는 금속 패턴의 구조로, 구조물에 적용된 금속 패턴이 구조

물에 의해 변형될 때, 저항 값의 변화로 구조물 손상을 탐지하는 기술이다. 2017년[5], 저항성 스트레인 게이지를 이용하여 인장 강도 변화에 따라 금속 패턴의 저항 값을 측정된 연구가 있으며, 저항성 스트레인 게이지는 저렴한 비용으로 사용자가 원하는 형태로 다양하게 적용 가능하지만, 온도에 따라 센서의 저항 값이 변화하는 문제가 있고, 포인트 센서로 동작하여 구조물 전체에 대한 손상 여부를 판단하기 어렵다 .

무선 센서 네트워크 기술은 2016년[6], 가속도 센서를 이용하여 다리에서 발생하는 진동, 뒤틀림을 탐지한 연구가 있으며, 무선 센서 네트워크 방식은 무선 센서의 종류에 따라 다양한 요소에 대해 탐지할 수 있고, 실시간으로 모니터링이 가능한 장점이 있지만, 구조물 전체에 대한 손상 여부를 판단하기 위해서 다수의 무선 센서를 이용해야하며, 각 센서의 전력 소모에 따른 배터리 문제를 해결해야 한다.

커패시티브 센서 기술은 2013년[7], 유전 전자 소재의 카본 시트를 벽에 부착하여 구조물의 뒤틀림, 균열을 탐지한 연구가 있으며, 경제적으로 효율적이며 구조물의 넓은 영역에 적용이 쉽고, 외부 환경에 강하지만, 측정 데이터를 통해 손상의 정도, 크기의 예측이 어려워 구조물 손상의 유무에 대해서만 판단할 수 있는 기술이다.

본 논문에서는 콘크리트 구조물에 발생한 균열을 예측하기 위해 주파수 선택 표면 구조(FSS, Frequency Selective Surface) 기술을 적용하였다. 주파수 선택 표면 구조 기술이란 전도성을 갖는 패턴 형상의 단위구조가 유전기판 위에 주기적으로 배열되어 원하는 주파수 대역의 선택적 차단 또는 투과하는 공간 필터 역할의 구조로, 레이돔(Radome), 전파 흡수구조(Absorber), EMI 차폐 기술, 실내 공간의 주파수 제어 등 다양한 응용 분야에서 연구되고 있다[8]-[11]. 본 논문에서는 얇은 두께의 균열을 효과적으로 탐지하기 위해서 X 대역에서 주파수 반사 특성을 갖는 FSS 구조를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 균열 폭의 크기가 증가하면 공진 주파수와 반사 손실이 증가됨을 관찰하고, 서로 다른 형상의 균열이 적용된 FSS를 제작하여 교차 편파의 측정으로 각 균열의 서로 다른 주파수 특성을 확인하였으

며, 측정된 주파수 특성 변화로 균열의 형상을 예측할 수 있다는 것을 제시하였다.

## II. 주파수 선택 표면 구조의 설계

### 2.1 균열 탐지 메커니즘

콘크리트 구조물의 균열은 다양한 원인으로 발생되며, 발생 위치, 형태, 폭의 크기 등 예측 불가능한 형상으로 균열이 발생되는데, 각 나라에서는 보수, 보강의 필요/불필요 여부를 결정하는 요소로 균열 폭의 크기를 규정하고 있다. 표 1과 같이 국내의 구조물 보수보강 시방서는 철근 부식, 균열 폭의 변동 크기에 따라 허용 균열 폭을 다르게 규정하고 있으며, 균열 폭의 크기에 따른 보수 방법을 규정하고 있다[2][12].

구조물 보수보강 시방서의 규정에 따라 보수를 필요로 하는 1mm 이하의 균열 폭을 감지하기 위해 X 대역을 동차 주파수로 설정하고, 다른 주파수 대

역에 영향을 최소화하기 위해 X 대역의 주파수를 선택적으로 차단하는 주파수 선택 표면 구조를 설계하였다. 콘크리트 균열 탐지 원리는 그림 1과 같이 고유의 공진 주파수 특성을 갖는 주파수 선택 표면 구조가 건물 내벽에 내장되어 있다.

표 1. 균열에 따른 보수 방법의 규정

Table 1. Regulation of repair method for crack

Purpose of repair	Variation of crack width	Crack width (W, mm)	Method of repair		
			Surface treatment	Injection method	Charging method
Water -proofing	Small	$W < 0.2$	○	△	
		$0.2 \sim 1$	△	○	○
	Large	$W < 0.2$	△	△	
$0.2 \sim 1$		△	○	○	
Durability	Small	$W < 0.2$	○	△	△
		$0.2 \sim 1$	△	○	○
		$1 < W$		△	○
	Large	$W < 0.2$	△	△	△
		$0.2 \sim 1$	△	○	○
		$1 < W$		△	○

\* ○ : Correctly method, △ : Conditional method

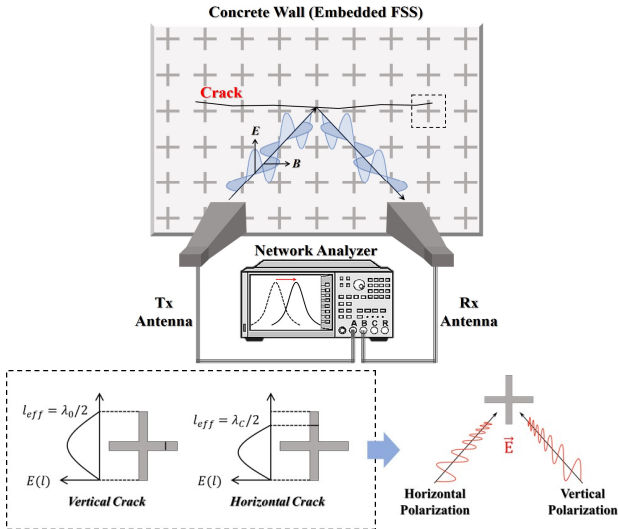


그림 1. 균열 탐지 메커니즘  
Fig. 1. Crack detection mechanism

그리고 구조물의 내력 또는 외부 영향으로 인해 건물이 손상될 때, 건물 내벽에 적용된 주파수 선택 표면 구조도 함께 손상되면서 전도성 패턴의 전기적 길이 변화로 공진 주파수 특성과 주파수 손실 성능이 변화하게 되는데, 이때의 주파수 반사 특성을 측정하고, 기존의 주파수 특성과 비교하여 구조물의 손상 유무와 균열의 크기 등을 예측할 수 있다.

FSS가 적용된 콘크리트 구조물에 송수신 안테나, 네트워크 분석기를 이용하여 탐지 할 수 있으며, 송수신안테나로 구조물의 균열을 효율적으로 탐지하기 위해서 단방향 스캐닝이 이루어져야 하므로, 주파수 반사 특성 측정을 통해 구조물의 균열을 탐지할 수 있다.

### 2.2 균열 탐지를 위한 FSS 구조의 설계

주파수 선택 표면 구조를 콘크리트 균열 탐지에 적용하기 위해서 작은 균열에도 민감하게 반응하는 전도성 패턴의 설계가 요구되고, 콘크리트 재질의 표면 또는 내부에 적용 가능한 제작 방법이 구상되어야 한다. 다양한 형태로 발생하는 균열을 탐지하기 위한 패턴 설계로 기존에 알려진 패치타입의 십자(Cross) 구조를 설계하였으며, 그림 2와 같이 십자 구조는 수직, 수평 다이폴(Dipole) 구조가 직교로 구성되어 있어, 균열로 인해 다이폴의 전기적 길이가 변화 할 때, 수직, 수평 편파의 측정을 통해 수직, 수평 균열을 예측할 수 있다.

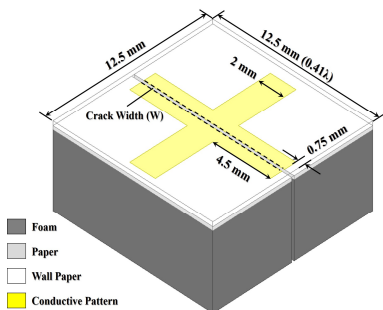


그림 2. 제안한 단위 구조  
Fig. 2. Proposed FSS unit cell

콘크리트 재질에 적용하기 위해 전도성 패턴 형성 방법으로 스프레이를 이용한 제작을 목표로 하였으며, 전자기장 해석 소프트웨어인 HFSS를 이용하여 설계 및 시뮬레이션 하였다. 콘크리트 벽체에 적용하기 이전에, 유전율로 인한 영향을 최소화 할 수 있는 재료인 스티로폼과 전도성 패턴을 형성할 수 있는 종이를 유전기관으로 가정하여 설계하였으며, 유전율( $\epsilon_r$ ) 1.03, 손실 탄젠트( $\tan\delta$ ) 0.0001, 두께 5mm인 스티로폼과 유전율 3, 손실 탄젠트 0.02, 두께 0.25mm인 종이를 가정하고, 전도성 스프레이로 구성될 패턴 부는 면 저항(Sheet Resistance)  $0.5\Omega/\text{sq}$ 로 가정하였다. 또한, 설계한 주파수 선택 구조는 콘크리트 표면에 위치하여 구조물의 내장재료 적용됨을 고려하여 주파수 선택 구조의 윗면에 유전율 3.4, 손실 탄젠트 0.02, 두께 0.3mm인 벽지의 사용을 가정하였다.

### 2.3 균열 폭에 따른 주파수 특성 변화

균열 폭에 따른 주파수 특성 변화를 확인하기 위해 설계한 주파수 선택 표면 구조의 단위구조에 0.2mm에서 1mm 사이의 크기를 갖는 균열 폭을 형성하고 0.2mm 씩 증가하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 이를 그림 3에 나타내었다.

그림 3(a)의 수직 편파인 경우, 공진 주파수는 평균 138MHz, 반사 계수는 평균 0.0142 감소하며, 그림 3(b)의 수평 편파 인 경우, 공진 주파수는 평균 32MHz, 반사 계수는 평균 0.0054 감소하는 것을 확인하였다. 균열 폭 증가에 따른 공진 주파수와 반사 계수 변화를 그림 3(c)에 나타내었으며, 균열 폭의 크기가 증가하면서 공진 주파수가 높은 대역으로 이동하고 반사 계수가 감소하는 경향을 확인 할 수 있었으며, 균열과 교차되는 편파를 이용하여 균열 폭을 예측 할 수 있다. 반사 계수가 1인 경우는 전 반사를 의미하며, 반사 계수의 감소로 균열 폭이 증가함에 따라 반사 손실이 증가함을 알 수 있다.

균열의 위치 변화에 따른 주파수 특성 변화를 관찰하기 위해 십자 구조의 바깥쪽부터 중심까지 0.2mm 폭을 갖는 균열을 서로 다른 위치에 각각 형성하여 이를 시뮬레이션 하였다.

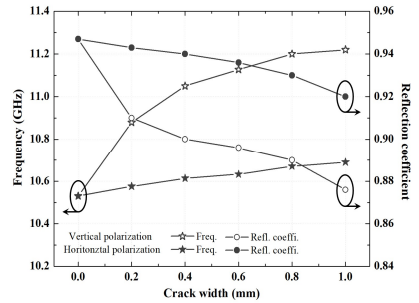
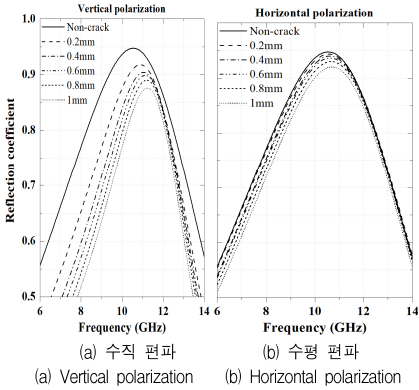


그림 3. 균열 폭(W)의 크기에 따른 주파수 특성 변화  
Fig. 3. Frequency characteristic of crack width (W) variation

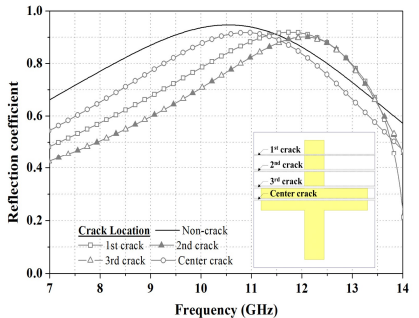


그림 4. 균열 위치에 따른 주파수 특성 변화  
Fig. 4. Frequency characteristic of crack location variation

시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었으며, 최외각에 위치한 첫 번째 균열의 경우 11.77GHz, 최외각과 중심 균열 사이에 발생한 두 번째, 세 번째 균열의 경우 12.05GHz, 패턴의 중심에 발생한 균열의 경우 10.88GHz에서 공진주파수를 확인하였다. 패턴 형상 위에 발생한 균열의 위치에 따라 주파수 특성이 다르게 나타나며, 최외각과 중심 균열 사이의 범위에서 발생한 균열의 경우 동일한 주파수 특성을 확인할 수 있었다.

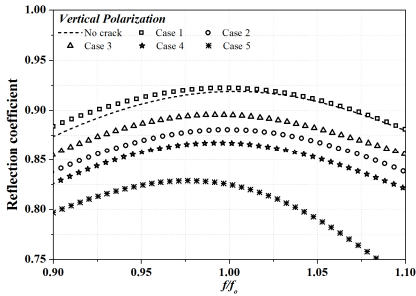
### III. 주파수 선택 표면 구조의 제작 및 측정

설계한 FSS는 구조물에 적용성 및 하중에 의한 손상 가능성과 실제 제작을 고려하여, 유전기판으로 종이가 부착된 스티로폼을 사용하고, MG Chemicals사의 전도성 은 코팅제(No. 843, 0.5Ω/sq)로 전도성 패턴을 형성하였으며, 단위구조를 10×10으로 배열하여 전체 125×125mm 크기인 FSS를 제작하였다. 측정을 통해 콘크리트에 발생한 균열의 형상을 예측하고자, 그림 5와 같이 발생 원인에 따른 서로 다른 형상의 균열이 적용된 5개의 FSS 시료를 제작하고, 이들의 주파수 반사 특성을 측정하였다[13].

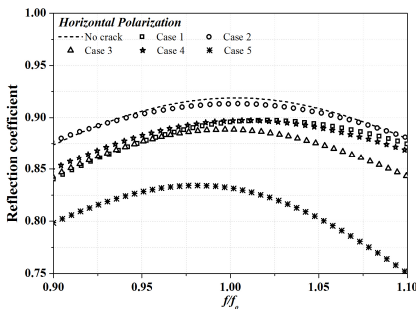
Fabricated FSS	1 Vertical Crack	2 Horizontal Crack
Non-crack	Drying shrinkage, Changing temperature	Increasing the load of the upper slab
3 Diagonal Crack	4 Cross Crack 1	5 Cross Crack 2
Discontinuities (corners, windows)	Rebar corrosion	Increasing the load of the upper slab

그림 5. 발생 원인에 따른 균열 형상  
Fig. 5. Crack shape for cause of occurrence

제작한 주파수 선택 구조는 송수신 안테나, 네트워크 분석기, 흡수체로 구성된 자유공간측정환경에서 실험하였으며, 균열의 형상 예측을 위해 수직, 수평 편파에 대해 X대역의 주파수 반사 특성을 측정하였으며, 수직 편파의 측정 결과를 그림 6(a)와 표 2에, 수평 편파 측정 결과를 그림 6(b)와 표 3에 나타내었다. 제작된 FSS 시료의 고유한 주파수 특성 측정 결과를 바탕으로 균열이 발생한 FSS 시료의 주파수 특성과 비교하여 공진 주파수와 반사 계수 편차를 계산하여 표 2와 표 3에 나타내었다. 수직 편파의 경우 편파와 직교로 형성된 수평 균열의 반사 손실이 크게 증가하여 수평 균열을 탐지할 수 있었으며, 수평 편파의 경우 같은 원리로 수직 균열을 탐지할 수 있다.



(a) 수직 편파  
(a) Vertical polarization



(b) 수평 편파  
(b) Horizontal polarization

그림 6. 균열 형상에 따른 주파수 반사 특성의 측정  
Fig. 6. Measurement of reflection coefficient for crack shape

표 2. 제작된 FSS의 수직 편파 측정  
Table 2. Measurement vertical polarization of FSS

Case	Frequency (GHz)	Reflection coefficient	Deviation (Freq., Refl.coeff.)
No crack	10.70	0.920	-
1	10.67	0.922	-30MHz, +0.002
2	10.70	0.880	-30MHz, -0.04
3	10.92	0.895	-50MHz, -0.025
4	10.92	0.867	+80MHz, -0.053
5	10.82	0.828	+220MHz, -0.092

표 3. 제작된 FSS의 수평 편파 측정  
Table 3. Measurement horizontal polarization of FSS

Case	Frequency (GHz)	Reflection coefficient	Deviation (Freq., Refl.coeff.)
No crack	10.70	0.920	-
1	10.92	0.897	+230MHz, -0.023
2	10.76	0.913	+30MHz, -0.007
3	10.95	0.888	-23MHz, -0.032
4	11.13	0.897	+130MHz, -0.023
5	10.84	0.834	+200MHz, -0.086

수직, 수평 균열이 동시에 형성된 십자 균열의 경우, 수직, 수평 편파 모두 반사 손실이 크게 증가함을 확인하였으며, 교차 편파 측정 시, 동시에 탐지 되는 균열을 십자 균열로 예측할 수 있다. 대각선과 X 형상의 균열에서도 동일한 현상을 확인할 수 있었으며, X 형상의 균열은 손상되는 단위구조의 개수 증가로 십자구조에 비해 반사 손실이 더 크게 증가한 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 구조물 안전 탐지 기술로 주파수 선택 표면 구조를 설계하고, 콘크리트 구조물에 발생한 균열의 탐지 및 형상 예측을 목표로 하였다. 얇은 균열을 효과적으로 탐지하고, 균열의 형상을 예측하기 위해 X 대역의 주파수 차단 특성을 갖는 FSS를 설계하였으며, FSS의 단위구조에 균열 폭을 형성하여 주파수 특성 시뮬레이션을 통해 균열 폭이 증가함에 따라 공진 주파수의 상향과 반사 손실의 증가를 확인하였다. 설계한 FSS의 제작 및 구조물에 적용성을 고려하여 종이 부착된 스티로폼을 유전기판으로 가정하고, 전도성 스프레이를 사용하

여 서로 다른 형상의 균열이 적용된 5개의 FSS 시료를 제작하였으며, 수직, 수평 편파 측정을 통해 균열의 형상을 예측할 수 있다. 본 논문에서 제안한 주파수 선택 표면 구조는 구조물에 대면적 적용이 가능하고, 얇은 두께의 균열을 잘 탐지할 수 있으며, 균열의 형상을 예측할 수 있어, 향후 효과적인 콘크리트 균열 탐지 기술로 응용이 기대된다.

## References

- [1] W. C. Choi, "Concrete Engineering", Donghwa Technology, pp. 12-18, Mar. 2014.
- [2] K. B. Park, "A Study on Confirming and Protecting the Crack in Reinforced Concrete Structure", Master Thesis, Kyungil University, pp. 1-3, Jun. 2002.
- [3] S. Y. Hwang, "A Study on the Improvement of Safety Diagnosis in Reinforced Concrete Structures", Master Thesis, Dongguk University, pp. 3-4, Jun. 2009.
- [4] S. J. Kim, "Examples of Earthquake Damage to Reinforced Concrete Structures", Review of Architecture and Building Science, Vol. 63, No. 3, pp. 11-14, Feb. 2017.
- [5] Y. Zhang, N. Anderson, S. Bland, S. Nutt, G. Jursich, and S. Joshi, "All-printed strain sensors: Building blocks of the aircraft structural health monitoring system", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 253, pp. 165-172, Jan. 2017.
- [6] M. Elsersy, K. Abualsaud, T. Elfouly, M. Mahgoub, M. Ahmed, and M. Ibrahim, "Performance Evaluation of Experimental Damage Detection in Structure Health Monitoring using Acceleration", 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Paphos, Cyprus, pp. 529-534, Sep. 2016.
- [7] S. Laflamme, M. Kollosche, J. Connor, and G. Kofod, "Robust Flexible Capacitive Surface Sensor for Structural Health Monitoring Applications", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 139, No. 7, pp. 879-885, Jul. 2013.
- [8] N. Liu, X. Sheng, C. Zhang, and D. Guo, "Design of Frequency Selective Surface Structure With High Angular Stability for Radome Application", Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 17, No. 1, pp. 138-141, Jan. 2018.
- [9] K. Zhang, W. Jiang, J. Ren, and S. Gong, "Design of Frequency Selective Absorber Based on Parallel LC Resonators", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 65, pp. 91-100, Feb. 2018.
- [10] S. Ghosh and K. V. Srivastava, "Broadband Polarization-Insensitive Tunable Frequency Selective Surface for Wideband Shielding", Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE, Vol. 60, No. 1, pp. 166-172, Feb. 2018.
- [11] S. S. Cho, J. W. Park, and I. P. Hong, "Design of Wireless LAN Controlled Indoor System using Active Frequency Selective Surface", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 3, pp. 19-24, Mar. 2016.
- [12] METRO T&C, "Structure repair and reinforcement specifications", Jul. 2011.
- [13] D. Y. Ahn and H. J. Cho, "Causes and Cases of Crack in Structures", Technical information, Construction Technology Ssangyoung, Vol. 68, pp. 25-31, Sep. 2013.

## 저자소개

이 상 화 (Sang-Hwa Lee)



2018년 2월 : 국립 공주대학교  
정보통신공학부(공학사)  
2018년 3월 ~ 현재 : 국립  
공주대학교 정보통신공학과  
대학원 석사과정  
관심분야 : 주파수 선택구조

홍 익 표 (Ic-Pyo Hong)



2000년 2월 : 연세대학교  
전기컴퓨터공학과 대학원  
공학박사

2000년 3월 ~ 2003년 2월 :  
삼성전자 무선사업부 책임연구원

2006년 2월 ~ 2007년 2월 : Texas  
A&M 대학교 방문연구원

2012년 2월 ~ 2013년 2월 : Syracuse 대학교 방문연구원

2003년 3월 ~ 현재 : 국립 공주대학교 정보통신공학부  
교수

관심분야 : 전자기 수치해석, 주파수 선택구조,

EMI/EMC