

한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 이용한 빗물 감지에 관한 연구

A Study on the Detection of the Rain Using Open-Ended Coaxial Cavity Resonator

이 윤 민 · 김 진 국 · 허 정

Yun-Min Lee · Jin-Kuk Kim · Jung Hur

요 약

본 논문은 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 이용하여 빗물의 양을 선형적으로 감지하는 레인 센서에 관한 연구이다. 공진기의 열린 면에 놓이는 유전체의 양과 특성에 따라 공진 주파수와 손실이 달라지는 원리를 이용하여 공진기를 자동차 앞유리 표면에 떨어진 빗물의 양을 측정할 수 있는 센서로 활용할 수 있음을 보여준다. 공진기 양 벽면에 입력과 출력 포트를 구성하고, 입출력 커플링 프로브는 '┌'자 형으로 구성한다. 공진기 내부 도체 반지름을 2 mm, 5 mm, 10 mm로 변화시켜 빗물의 반응을 시뮬레이션으로 확인한 결과, 내부 도체 반지름이 5 mm일 때 공진 주파수가 비교적 선형적으로 민감하게 변화하여 빗방울의 양을 감지할 수 있는 공진기에 가장 적합함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작된 공진기는 빗방울의 양이 변함에 따라 공진 주파수가 3.55 GHz부터 3 GHz까지 선형적으로 변하였고, Q 값은 42.38부터 24.3까지 변화하는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 설계한 공진기의 구조가 공진 주파수를 측정 파라미터로 이용하여 빗물의 양을 선형적으로 감지하는 레인 센서로 적용할 수 있음을 보여주었다.

Abstract

This paper is a study of a rain sensor using an open-ended coaxial cavity resonator which senses the amount of rain drops linearly. It shows that it will be used as a sensor to sense the amount of rain dropped on the windshield of an automobile based on the principle of varied resonant frequency and the loss according to the amount and characteristics of a dielectric lied on the open side of a resonator. The input and output ports are built in the both sides of the resonator and the input and output coupling probes are formed like '┌' shape. The response of rain drops were simulated by the radius of inner conductor of 2 mm, 5 mm, and 10 mm respectively and it showed that the raindrop was sensed most linearly and sensitively when the radius of inner conductor is 5 mm. We have measured that the resonant frequency have varied from 3.55 GHz to 3 GHz and the Q value have varied from 42.38 to 24.3 according to the variation of rain drop amount on the fabricated resonator. Therefore, it shows that the designed resonator can be applied as a rain sensor that measures the amount of rain drops linearly by using the resonant frequency as a measurement parameter.

Key words : Rain Sensor, Coaxial Line, Open-Ended Coaxial Cavity Resonator

건국대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic, Information & Communication Engineering., Konkuk University)

· Manuscript received July 22, 2013 ; Revised August 6, 2013 ; Accepted August 13, 2013. (ID No. 20130722-070)

· Corresponding Author : Jung Hur (e-mail : jhur@konkuk.ac.kr)

I. 서 론

레인 센서는 여러 분야에 적용될 수 있는데, 최근에 자동차들이 고급화됨에 따라서 자동차 앞 유리에 부착하여 빗물의 양을 선형적으로 감지하여 와이퍼를 자동으로 작동시키기 위해 레인 센서가 사용되어지고 있다. 기존에는 이와 같은 레인 센서에 정전용량, 광량, 광도파 특성 등의 원리를 적용하여 구현한 방식들이 사용되었다. 유리면에 떨어지는 빗방울의 양에 따라 정전용량이 변하는 것을 감지하는 정전용량 방식은^[1] 비교적 저렴한 가격으로 구현할 수 있었으나, 센서의 출력이 빗방울 양에 비례하지 않고 오동작이 자주 일어나는 단점이 있다. 광학 방식^[2]은 유리와 빗물의 경계면에서 반사되는 광량의 변화로 빗방울의 양을 감지하는 방식으로 설계가 간단하나 주변광의 영향으로 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 또한, 유리 내부 광도파 특성을 이용하여 빗물에 의해 간섭의 정도를 측정하여 감지하는 방식^[3]은 입사광을 유리판 사이로 주입할 때 광결합기를 필요로 하며, 복잡한 광학계가 적용되고, 설치가 까다로운 단점이 있다. 본 논문에서는 전파의 공진 특성으로 빗물의 양을 측정하는 새로운 개념의 레인 센서를 제안하고자 한다. 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기는 열린 면의 유전체 양에 따라 공진 주파수와 공진기 손실 및 Q 값이 달라지는데, 자동차 앞유리 표면에 떨어진 빗물을 이 공진기의 유전체로 간주하여 공진기의 공진 특성이 변하는 원리를 이용하여 레인 센서로 활용하였다. 이를 위하여 한쪽 면이 개방된 동축 공동 공진기를 기본적인 동축 선로이론을 이용하여 설계하고, 개방된 한쪽 면에 빗물이 떨어질 수 있도록 유리가 놓이게 하였다. 동축 공동 공진기는 내부 도체 반지름, 외부 도체 내경, 그리고 공진기의 길이 변화에 따라서 공진 주파수가 달라진다는 것을 우리는 경험적으로 알고 있다. 따라서, 설계된 공진기를 레인 센서로 활용할 수 있도록 빗물의 양에 따라서 선형적으로 공진 주파수와 Q 값이 변하는 공진기 구조를 찾기 위해서 공진기 내부 도체 반지름과 빗방울의 두께를 변화시켜 가면서 모의실험을 한 후, 대표적인 공진기 크기를 정하여 이를 실제로 제작하여 검증하고자 한다. 공진기를 설계하기 위해서 Ansoft사의 HFSS 프로그램을 이용하여 시뮬레이션

을 진행하였으며, 레인 센서의 빗물 반응을 측정하기 위해 HP-8753ES 네트워크 분석기를 사용하여 공진기의 공진 특성을 분석하였다. 이러한 분석과정을 통해 얻은 결과를 바탕으로 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 이용한 레인 센서를 직접 제작하고, 설계 값과 시뮬레이션 값, 실험값을 비교하여 설계된 레인 센서의 설계 방법이 타당함을 입증하려 한다.

II. 레인 센서 설계

그림 1은 동축 선로 구조를 나타낸 것이다.

기본적인 동축 선로 이론으로부터 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기 내부 도체의 반지름 a 와 외부 도체 반지름 b , 길이 ℓ 를 이용하여 공진기의 유도용량(inductive) L 값은 식 (1), 정전용량(capacitive) C 값은 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며, 이를 통해 공진기의 공진주파수 값을 구할 수 있다^{[4][5]}.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cdot \ell \quad [H] \quad (1)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \cdot \ell \quad [F] \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 구한 공진기의 공진 주파수 값은 식 (3)과 같다.

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{c}{2\pi\ell} \quad (3)$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기의 공진 주파수는 내부 도체 반경 a 와 외부도체 내경 b 사이의 관계에 의해 영향을 받지 않지만, 길이 ℓ 의 변화에 의해서 공진 주파수가 결정된다. 이때, 공진기의 재질은 구리이며, 외부 도체 지

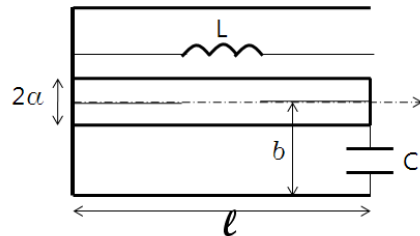


그림 1. 동축 선로 구조
Fig. 1. Geometry of the coaxial line.

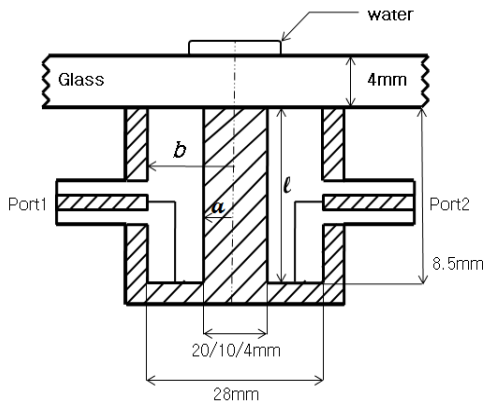


그림 2. 레인 센서 구조
Fig. 2. Geometry of the rain sensor.

름은 28 mm, 내부 도체 지름은 10 mm, 높이는 8.5 mm 이다. 식 (3)으로 계산한 결과, 공진 주파수는 5.6139 GHz이다. 여기에 커플링(coupling)을 위해 공진기의 양 측면에 입력 커플링 포트(port 1), 출력 커플링 포트(port 2)를 연결한다. 커플링 포트는 동축 선로 형태로 만들어져서 외부 도체는 공진기 벽에 연결되고, 내부 도체는 공진기 안쪽으로 들어가서 커플링 루프를 형성하게 된다. 포트에 연결된 동축 케이블의 내부 도체 프로브(probe)는 공진기 내부의 아래 도체 면에 ‘-’ 모양으로 연결된다. 이전에 제안된 크기의 공진기 구조로 시뮬레이션한 결과, 공진 주파수는 5.81 GHz로 나타났다. 좀 더 구체적인 결과를 얻기 위해서 내부 도체의 높이와 지름을 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 진행하였다. 내부 도체의 높이 변화와 지름을 변화시킨 결과, 높이가 커질수록 삽입 손실 및 Q 값은 좋아지고, 공진 주파수는 낮아졌다. 내부 도체의 지름이 외부 도체와 가까울수록 삽입 손실은 좋아지는 반면 Q 값은 나빠졌으며, 공진 주파수는 낮아지는 것을 알 수 있었다.

그림 2는 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 이용하여 구현한 레인 센서의 구조를 보여주고 있다. 레인 센서의 뒷면에 두께 4 mm인 유리를 얹어 놓고, 그 위에 테스트를 위해 물이 놓이게 된다.

III. 레인 센서의 빗물 변화에 따른 반응

레인 센서의 성능은 빗물의 양을 선형적으로 민감하게 감지하는 능력에 달려 있다. 유리면 위에 놓

인 빗물의 양에 따라 삽입 손실 S_{21} , 공진 주파수 f 그리고 Q 값을 측정하여 설계된 레인 센서가 빗물의 양에 따라서 민감하고, 선형적인지를 확인한다. 먼저 레인 센서 위에 유리판을 놓고, 그 위에 빗물의 두께와 지름을 변화시켜 가면서 공진 주파수와 Q 값의 변화를 살펴본다.

표 1은 레인 센서의 빗물의 반응을 파악하기 위한 파라미터 값의 범위를 보여준다. 빗물의 반지름(W_r)은 0~30 mm, 빗물의 두께(W_t)는 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 내부 도체의 반지름(C_r)은 2 mm, 5 mm, 10 mm까지 변화시키면서 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 3은 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기의 내부 도체 반지름 a 를 2 mm, 5 mm, 10 mm로 구현한 레인 센서에 빗물이 없을 때의 삽입 손실 특성과 공진 주파수를 보여준다. a 가 2 mm일 때 공진 주파수는 3.67 GHz이고, 5 mm일 때 공진 주파수는 3.42 GHz이며, 10 mm일 때 공진 주파수는 3.84 GHz로 나타났다. 삽입 손실은 내부 도체의 반경 a 가 10 mm일

표 1. 레인 센서 파라미터
Table 1. Parameter of the rain sensor.

변수	내용	단위 [mm]
W_r	빗물의 반지름	0~30
W_t	빗물의 두께	0.1, 0.5, 1, 2
C_r	내부도체 반지름	10, 5, 2

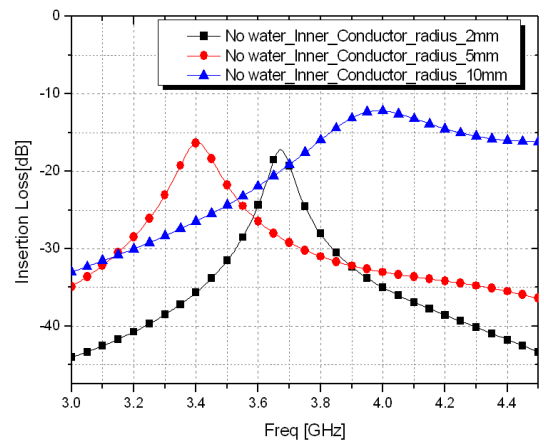
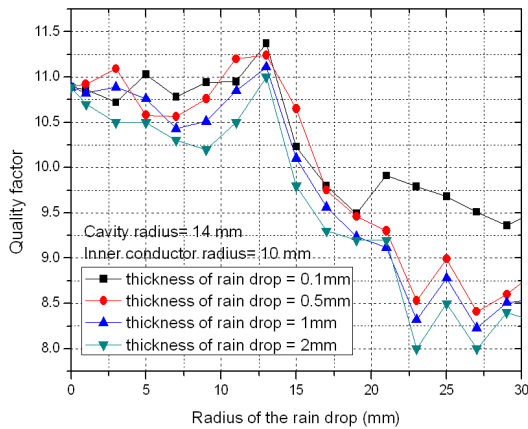


그림 3. 내부 도체의 반지름 변화에 따른 삽입 손실 특성

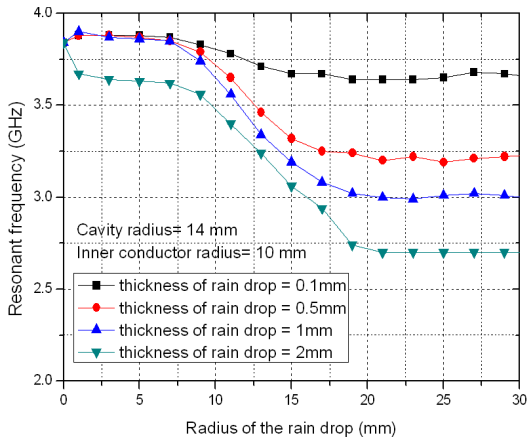
Fig. 3. Insertion loss characteristics due to changes in the radius of inner conductor.

때 -12.5 dB, 2 mm일 때 -17.5 dB, 그리고 5 mm 일 때는 -16 dB로 나타났다. 즉, 커플링 루프와 내부 도체 사이의 간격이 가까울수록 좋은 삽입 손실 값을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림과 같은 모의실험으로 공진기 내부 도체 크기에 따라 전파의 손실이 다르다는 것을 알 수 있다. 표 2는 레인 센서에 빗물이 없을 때의 f_r 와 Q 값의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 내부 도체 반지름 크기에 따라 f_r 와 Q 값이 변하는 것을 알 수 있다. 표



(a) Q 값
(a) Q value



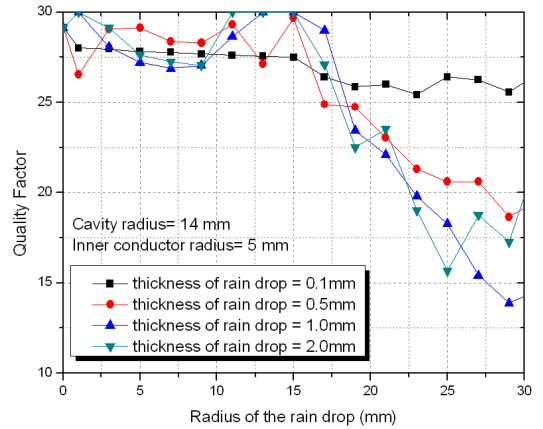
(b) 공진 주파수
(b) Resonant frequency

그림 4. 내부 도체 반지름이 10 mm일 때 빗물의 두께 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm에 대한 시뮬레이션 결과

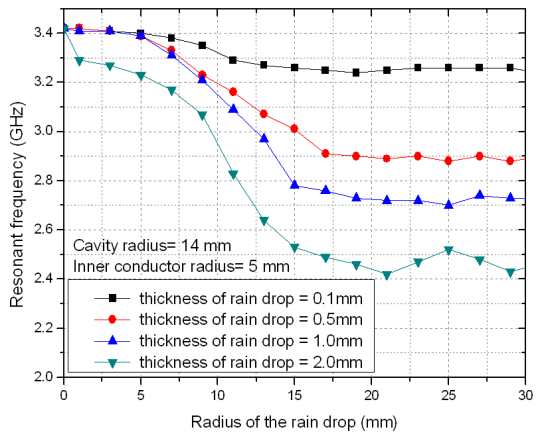
Fig. 4. Simulated results of rain water thickness 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm and 2 mm respectively, when the inner conductor radius 10 mm.

2의 공진 주파수와 Q 값을 기준으로 빗물의 양이 변화함에 따라 공진 주파수의 변화와 Q 값의 변화를 관찰하여 결과 값이 선형적으로 민감하여 레인 센서로서 적합한 공진기의 설계 값을 찾는다.

그림 4는 내부 도체의 반지름 10 mm인 경우, 빗물의 두께가 각각 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm일 때, 빗물의 반지름의 크기를 30 mm까지 변화시켰을 때 Q 값과 공진 주파수의 변화를 보여주고 있다. 공진 주파수는 빗물의 두께가 두꺼워질수록 점점 낮아



(a) Q 값
(a) Q value



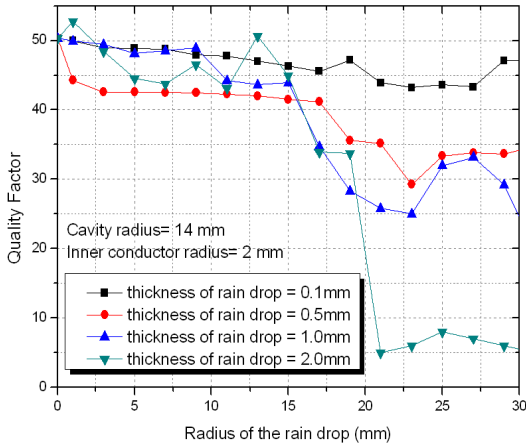
(b) 공진 주파수
(b) Resonant frequency

그림 5. 내부 도체 반지름이 5 mm일 때 빗물의 두께 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm에 대한 시뮬레이션 결과

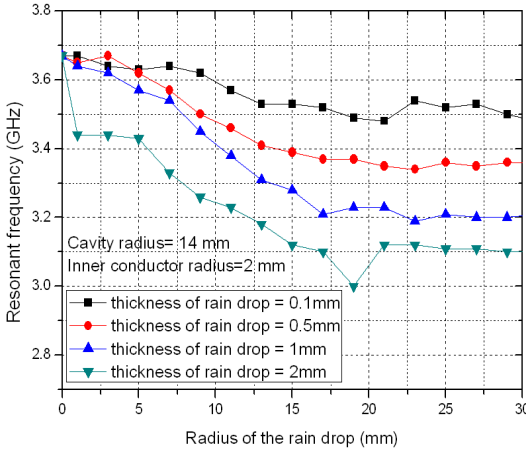
Fig. 5. Simulated results of rain water thickness 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm and 2 mm respectively, when the inner conductor radius 5 mm.

표 2. 빗물이 없을 때의 f_r 와 Q 값
Table 2. f_r and Q of the no rain.

내부 도체 반경 a [mm]	f_r [GHz]	Q
2	3.67	50.31
5	3.42	29.14
10	3.84	10.89



(a) Q 값
(a) Q value



(b) 공진 주파수
(b) Resonant frequency

그림 6. 내부 도체 반지름이 2 mm일 때 빗물의 두께 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm에 대한 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulated results of rain water thickness 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm and 2 mm respectively, when the inner conductor radius 2 mm.

지며, 빗물의 반지름 값이 10 mm 이상이 되면 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다. 이때, Q 값은 비선형적

으로 변하는 반면 공진 주파수는 비교적 선형적으로 3.9 GHz부터 3 GHz까지 변하는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 내부 도체의 반지름 5 mm인 경우, 빗물의 두께가 각각 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm일 때, 빗물의 반지름의 크기를 30 mm까지 변화시켰을 때, Q 값과 공진 주파수 변화를 보여주고 있다. 그림 4에서와 같이 공진 주파수는 빗물의 두께가 두꺼워질수록 점점 낮아지며, 빗물의 반지름의 크기가 5 mm 이상이 되면 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다. Q 값의 변화는 역시 그림 4와 같이 비선형적으로 나타난 반면, 공진 주파수의 변화는 비교적 선형적으로 3.42 GHz부터 2.54 GHz까지 변화되는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 내부 도체의 반지름 2 mm인 경우, 빗물의 두께와 빗물의 반지름의 크기를 앞에서와 같이 변화시켰을 때 Q 값과 공진 주파수 변화를 보여주고 있다. 공진 주파수와 Q 값의 특성은 그림 4와 그림 5에서와 같이 동일한 특성을 보여주고 있다. 이때, 공진 주파수는 3.67 GHz부터 3.35 GHz까지 비교적 완만하게 변화였다.

위의 결과를 종합해 보면 내부 도체의 반지름이 5 mm인 경우 빗물의 양이 변할 때, 공진 주파수가 가장 민감하게 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 이는 공진기의 내부 도체와 외부 도체 사이에 더욱 민감하게 물의 양을 감지하는 것을 알 수 있다. 따라서 레인 센서의 내부 도체 반지름을 5 mm로 결정하여 제작하였다.

V. 레인 센서 제작 및 실험

그림 7은 제작된 레인 센서의 사진이다. 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기의 열린 면에 두께가 2.8 mm인 유리를 얹어 놓고, 유리면 위에 스포이드를 이용하여 물방울을 떨어뜨려 물에 대한 특성 반응을 측정하였다.

이때, 유리의 두께가 두꺼워질수록 공진 주파수가 낮아지는 것을 확인하였다. 물의 양을 시뮬레이션과 같이 선형적으로 변화시키기가 불가능하여 1 mm×1 mm 모눈종이를 이용하여 지름 0 mm, 6 mm, 10 mm, 13 mm, 16 mm, 17 mm, 18 mm, 20 mm로 물의 양을 변화시켰다. 측정해 본 결과, 그림 8 및 그림 9와 같은 삽입 손실과 공진 주파수를 보여주었다.

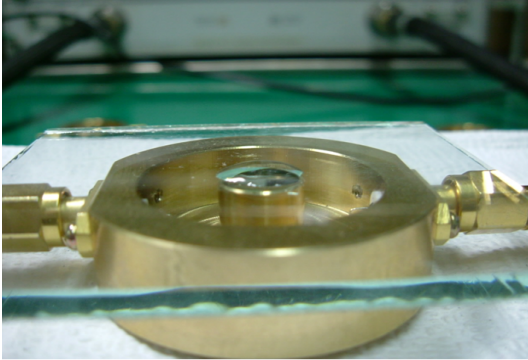


그림 7. 레인 센서의 실물 사진
Fig. 7. Photograph of rain sensor.

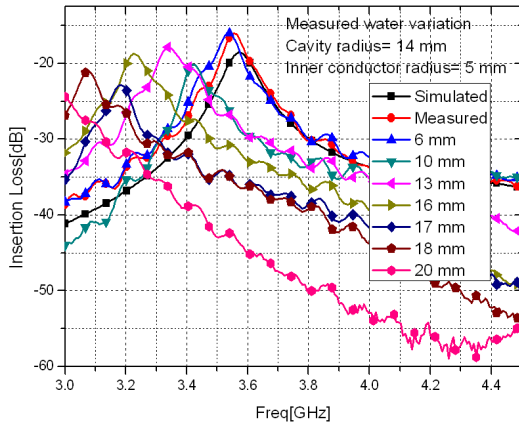


그림 8. 내부 도체 반지름 5 mm일 때, 물의 양을 변화시켰을 때 측정된 삽입 손실
Fig. 8. Measured insertion loss for the change of water, when the inner conductor radius is 5 mm.

그림 8은 레인 센서의 내부 도체 반지름이 5 mm 일 때, 빗물의 양을 0 mm부터 20 mm까지 변화시켰을 때의 변화되는 삽입 손실을 보여주고 있다. 물이 없을 때의 공진 주파수는 3.55 GHz이며, 물의 양이 증가함에 따라 공진 주파수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한, 삽입 손실도 -16 dB부터 -25 dB까지 변하는 것을 알 수 있다.

그림 9는 제작된 레인 센서에서 물의 양을 0 mm 부터 20 mm까지 변화시켰을 때 측정된 공진 주파수와 Q 값의 변화를 비교하기 위해 나타낸 것이다. 공진 주파수는 빗물의 양의 변화에 따라 비교적 선형적으로 3.55 GHz에서 3 GHz로 550 MHz의 변화폭을 가지며, 쉬프트 되는 것을 보였고, Q 값은 42.38에서

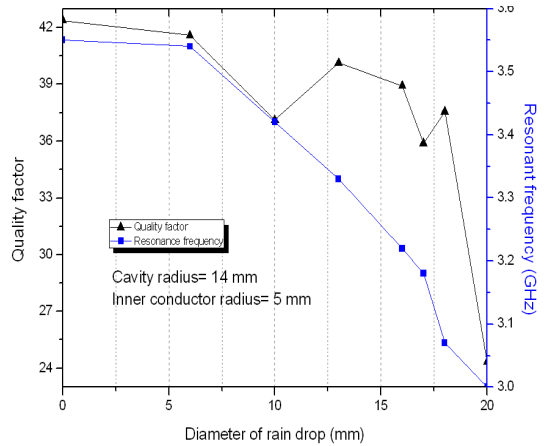


그림 9. 내부 도체 반지름이 5 mm인 경우, 물의 변화에 따른 공진 주파수와 Q 값
Fig. 9. Inner conductor radius is 5 mm, the Q value and resonant frequency for the change of water.

24.33으로 18.05 값의 차이를 보이며 변화였으나, 선형적인 결과 값을 얻지는 못하였다.

위의 측정 결과에서 알 수 있는 바와 같이 제작된 레인 센서는 시뮬레이션과 같이 비교적 일치하는 실험 데이터를 얻을 수 있었다. 그림 8에서 측정된 데이터를 보면 빗물의 양과 위치에 따라 삽입 손실은 비선형적으로 변하지만, 공진 주파수는 비교적 선형적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 빗물의 양에 따라서 내부 도체와 외부 도체 사이의 커플링에 비선형적으로 영향을 미치면서 삽입 손실이 비선형적으로 변하기 때문이다. 이 결과를 바탕으로 구한 Q 값도 그림 9에서와 같이 비선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 빗물의 양이 변함에 따라 공진 주파수가 선형적으로 변하는 현상을 이용하여 본 논문에서 제안한 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 빗물을 감지하는 레인 센서로 활용할 수 있음을 위의 측정 결과로부터 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 이용하여 빗물의 양을 감지할 수 있는 레인 센서를 설계하고, 제작하는 방법에 관하여 기술하였다. 한쪽 끝이 개방된 동축 공동 공진기를 기본 센서로 하고, 그 개방된 한 쪽 끝에 유리를 올려놓고, 그 위

에 빗물이 떨어지면 감지하는 구조이다. 동축 공동 공진기의 내부 도체 반지름을 각각 2 mm, 5 mm, 10 mm로 변화시켜가면서 모의실험을 진행하여 하였다. 이때, 커플링 도체의 직경은 0.3 mm인 단선을 사용하였고, ‘ㄱ’ 자 형태로 아랫면과 닿게 하였다.

빗물의 반지름을 0 mm부터 30 mm까지 변화시켜가면서 모의실험을 진행한 결과, 내부 도체 반지름이 5 mm일 때 공진 주파수 변화가 가장 민감하게 선형적으로 변하는 것을 확인하였다. 이 결과로부터 제안된 공진기 구조에서 내부 도체의 반지름을 5 mm로 정하여 레인 센서를 제작하였다.

제작된 레인 센서에서 빗물의 지름을 0 mm부터 20 mm까지 변화시켜가면서 측정한 결과, 삽입 손실은 -16 dB이고, 빗물의 양이 늘어남에 따라 공진주파수는 3.55 GHz에서 3 GHz로 비교적 선형적으로 민감하게 변화되는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 한쪽 면이 열린 동축 공동 공진기를 이용한 센서를 빗물의 양이 늘어남에 따라서 공

진 주파수가 선형적으로 민감하게 변하는 현상을 이용하여 레인 센서로 활용할 수 있음을 알 수 있었다. 향후 제안된 구조에서 공진 주파수의 변화 외에 Q 값, 손실 등을 좀 더 정량화하여 다양한 분야에 활용할 수 있도록 지속적인 연구 개발을 진행할 예정이다.

References

- [1] Y. Netzer "Sealed capacitive rain sensor" United States Patent, US2008/0265913 A1, Oct. 2008.
- [2] N. Bendicks, "Moisture sensor" United States Patent, 5323637, Jun. 1994.
- [3] G. Muller, "Windshield wiper system with rain detector" United States Patent, 5015931, May 1991.
- [4] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, Addison Wesley, 1961.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley and Sons, 3rd Edition, New York, 1998.

이 윤 민



이크로파 회로 등

2006년 2월: 한국산업기술대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 8월: 건국대학교 전자 및 정보통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 건국대학교 전자 및 정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] RF, 안테나 설계, 마이크로

허 정



공학과 교수
 [주 관심분야] 안테나, RF 및 마이크로파 회로, 무선전력 전송 등

1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1991년 4월~현재: 건국대학교 전자

김 진 국



마이크로파 필터, 안테나, 이동통신시스템 등

1997년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 8월: 건국대학교 전자 및 정보통신공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 건국대학교 전자 및 정보통신공학과 박사수료
 [주 관심분야] RF, 유전체 공진기,