빌딩 내 공조 덕트의 무선망 활용을 위한 전파 특성 측정

Measurement of Propagation Characteristic of HVAC Ducts within Buildings for Wireless Networks

윤 찬 의 · 전 완 종*

Chan-Eui Yun · Wan-Jong Chun*

요 약

본 논문에서는 빌딩 내부의 공조 덕트를 이용한 무선 통신망의 전파 특성을 측정하고 분석한다. 공조 피더 구조를 분석하고 전송 모드를 여기할 수 있는 피더 장치를 제작하여 시뮬레이션을 통하여 여기 특성을 분석한다. 2.45 GHz 와이파이 대역에서 실제 건물 내부의 공조 덕트를 통해 송수신되는 전파의 세기를 측정하고, LOS 환경 및 격벽이 있는 사무실 그리고 복도 등 여러 실내 환경 조건에서 전파를 측정하여 덕트 피더 방식과 비교한다. 측정 및 분석 결과를 활용하여 덕트를 이용한 무선망 설계 방법을 제안한다.

Abstract

In this paper, we measure and analyze propagation characteristic of heating, ventilation, and air conditioning(HVAC) ducts within buildings for wireless networks. We analyze the duct structures, implement the feeders exciting propagating modes, and simulate the excitation characteristic. We measure the propagation characteristic of HVAC ducts at 2.45 GHz WiFi band and compare it with that of LOS and partitioned office environments. We propose the design method of wireless network using HVAC ducts based on our results.

Key words : HVAC Duct, Waveguide, Wireless Network, Propagation

I. 서 론

공조용 덕트는 아연 도금 강판 재질로 되어 전파를 모으는 효과가 있어서 일종의 도파관으로 작용하며, 2 GHz 대역의 전파에 대해서는 덕트의 단면이 파장에 비하여 충분히 크므로 일종의 over-sized waveguide로 작용한다. 또한, 공조 덕트는 공기의 수급을 위하여 공조기로부터 멀어지면서 여러 갈래로 분기하는 tree 구조를 가지므로 덕트 망은 일종의 waveguide network으로 볼 수 있다.

덕트는 단면의 구조에 따라 전송 모드별 차단 주

파수가 존재하는 데, 장방향 덕트의 경우, 차단 주파수는 긴 변의 길이의 두 배에 해당하는 파장의 주파수가, 원형 덕트의 경우에는 직경의 약 1.7배에 해당하는 파장의 주파수가 기본 모드(fundamental mode)의 차단 주파수이다.

그럼으로, 20 cm×20 cm 크기의 구형 덕트는 최소 750 MHz 이상의 전파만이, 직경 20 cm의 원통형 덕트에서는 880 MHz 이상의 전파만이 손실 없이 전송 가능하다.

한편, 일반 건물용 덕트 망은 2 GHz대 이상의 주파수에서 여러 개의 전송 모드를 포함하고 있는데,

KT Public 고객센터(KT Public Customer BU)

*고려대학교 공과대학 기술경영전문대학원(Graduate School of Management of Technology, College of Engineering, Korea University)

· Manuscript received June 21, 2012 ; Revised July 17, 2012 ; Accepted August 13, 2012. (ID No. 20120621-073)

· Corresponding Author : Wan-Jong Chun (e-mail : petrjane@korea.ac.kr)

각 모드마다 전송 손실, 전파 속도, 분기 특성들이 크게 다르므로, 덕트 내부에서는 거리에 따른 신호 레벨의 변화 폭이 매우 큰 특성을 보인다.

그러므로 전파를 피더하는 위치와 방식에 따라 다양한 여기되는 전송 모드가 다르고, 그것에 따라서 전송 특성 또한 크게 달라지므로, 이러한 피딩 위치와 방식을 설정하는 것이 덕트를 이용한 무선망 구축의 핵심 기술이라 할 수 있다.

이와 같이 덕트를 이용하여 실내 무선망을 구축할 수 있을 것이라는 가정 하에 Pavel V. Nikitin과 Daniel D. Stancil이 300 mm 크기의 원통형 덕트에서 각 모드별 전파 특성을 해석하였다^[1]. 또한, Ozan K. Tonguz, Daniel D. Stancil 등이 직경 300 mm 크기의 HVAC(Heating, Ventilation & Air Conditioning)덕트 내부에서 전파의 송수신 특성을 시험하였다^[2]. 그러나 균일한 단면 크기를 대상으로 측정한 결과로서 실제 건물에 설치되어 있는 덕트 망과는 거리가 멀며, 내부의 각종 구성 부품들이 없는 상태에서 휘어짐과 분기손실만 측정한 것이어서 실 건물에 적용하기에는 미흡한 면이 있다^[1]. 이 외에도 원통형 덕트의 지연 분산에 관한 연구나^[3], 덕트를 통신 채널로 모델링하여 용량을 분석한^[4] 연구 등이 있는데, 이것들 또한 단순한 원형 도파관에서 전송이 가능한 모든 고차 모드들의 전파 특성을 분석한 것일 뿐 실제 건물용 덕트에서의 전파 특성과는 거리가 멀어서 실질적인 적용 가능성을 보여주기에 미흡하였다.

본 논문에서는 기술적 적용 가능성을 분석하기 위하여 실제 건물 내 구성된 다양한 형태의 공조 덕트에서 전파 특성을 측정하고, 실내 자유 공간, 격벽이 있는 사무실 공간 및 복도에서 전파를 측정하여 공조 덕트에 보내는 방식과 비교하였다.

II. 공조 덕트 구조 및 측정 장치 구성

공조 덕트의 구성을 살펴보면, 공조기에 가까운 쪽이 단면이 큰 메인 덕트로 구성되며, 공기가 공급되는 말단으로 갈수록 단면이 작아지는 구조로써, 메인 덕트에서 분기되는 Tree 위치마다 공기의 양을 조절하는 볼륨 댐퍼(volume damper)가 들어 있으며, 휘어지는 위치에서 진동을 흡수해 주는 turning vane, 덕트들 간을 연결할 때 소음을 줄이기 위한 canvas

그림 1. 공조 덕트 내부의 구성 요소

Fig. 1. Composition elements of HVAC.

그리고 공기를 배출하는 diffuser 등으로 구성되어 있다. 그림 1은 이러한 구성 소자들을 표시하였다. 한편, 덕트 망의 구조는 공기를 공급해야 하므로, 너무 여러 차례의 분기를 거칠 수가 없어서 대부분 메인 덕트에 분기 덕트가 연결되고, 분기 덕트마다 일정한 거리를 두고 diffuser가 연결되어 있는 구조를 갖는다. 메인 덕트는 주로 직선이지만, 공간의 구조에 따라 휘어지기도 하는데, 어떠한 경우에도 메인 덕트-분기 덕트-diffuser의 연결 구조는 변하지 않는다.

피더 안테나를 통하여 공조 덕트에 보내진 전파는 몇 개의 주요 전송 모드로 결합되어 덕트 내부에서 위에서 언급한 장치들을 거친 후 최종으로 diffuser를 거쳐서 공간으로 전파된다. 역방향 또한 마찬가지로 단말을 통해서 자유공간으로 전파되어 diffuser를 통하여 덕트 내부로 들어가서 덕트 망의 여러 장치들을 거친 후 피더 안테나에 주요 전파 모드로 결합된다.

공조 덕트에 보내진 전파가 덕트 망을 거쳐서 최종 단말로 수신될 때 겪는 순방향 감쇄와 단말로부터 역방향으로 피더에서 수신될 때 겪는 역방향 감쇄는 같다(전파의 가역정리).

2-1 공조덕트 내 전송 모드 여기

그림 2. 구형 덕트 내 전송 모드의 전계 분포
Fig. 2. E-field distribution of guided modes in rectangular duct.

공조 덕트 내부에서 전송할 모드를 여기하려면 해당 모드의 단면에서의 전계 분포에 대응하는 위치에서 전계의 크기와 위상에 맞추어서 전계를 유도시켜 주어야 한다. 그림 2에서는 구형 덕트 관내의 고차 모드의 전계 및 자계 분포를 나타내었다.

그림 3은 단면이 300 mm×200 mm인 구형 덕트에서 반 파장 다이폴(6 cm@2.4 GHz)을 조합한 피더를 이용하여 TE11/TM11 및 TE20 모드를 여기하기 위한 피더 구조를 나타낸다. (a)는 TE11/TM11를 여기하기 위한 다이폴 조합인데, 두 다이폴에 동 위상을 준 것이고, (b)는 TE20용 피더인데, 수평 및 수직 방향으로 각각 위상차가 반 파장이 나도록 피딩 위치를 조정하는 것이다. 이와 같은 피더들을 써서 여기 모드별 전력 분포를 HFSS 시뮬레이션을 통하여 구한 결과, 피더 입력 단인 동축 케이블(port1) 대비 단면 여기 모드(port 2)의 S_{21} 이 각각 표 1과 같이 여기 되었다. 피더를 통한 전력이 덕트의 양 방향으로 나누어지므로 덕트의 한 쪽 면에서 볼 때, 타 모드로 여기 되는 손실이 없이 TE11/TM11 모드로만 여기 될 경우, TE11/TM11 피더의 TE11/TM11 모드의 S_{21} 이 각각 -6 dB가 되어야 하며, TE20 피더는 E20 모드가 -3

표 1. 피더 별 여기 모드

Table 1. Mode excitation of each feeder.

	TE11/TM11 feeder			TE20 feeder		
	TE11	TM11	TE10	TE20	TE10	TE11/TM11
S_{21} [dB]	-8	-8	<-20	-4	-25	<-40
S_{11} [dB]	<-20			<-20

(a) TE20 모드 여기 피더 구조
(a) Feeder structure of TE20 mode

(b) TE11/TM11 모드 여기 피더 구조
(b) Feeder structure of TE11/TM11 mode

그림 3. 피더의 구조 및 여기 모드
Fig. 3. Feeder structure and excitation modes.

dB가 되어야 함을 감안할 때, 표 1에서 얻은 값들은 타 모드로 여기 되는 전력이 극히 작고 원하는 모드로 대부분 여기 되었음을 알 수 있다.

2.2 측정 장치 및 덕트 시험 망 구성

공조 덕트를 통한 전파의 송수신을 측정하기 위하여 그림 4와 같은 송수신 장치를 구성하였다. 송신측 안테나는 선형 다이폴 및 COCO(Collinear Coaxial) 타입의 안테나를 사용하였고 수신 레벨의 측정은 단말의 2.45 GHz에서 WiFi 수신 레벨을 기록해주는 Net-Stumbler를 사용하였다.

한편, 전파 송수신 시험을 위해서는 실제 건물의 공조 덕트 망을 실물 그대로 그림 5(a)와 같이 재현하여 (주)삼화통신 건물의 옥상에 구축하였다. 또한, 그림 5(b)와 같은 동일 건물 지하층의 공조 덕트 및

그림 4. 덕트 피더용 전파 측정 장치 구성

Fig. 4. Equipments for field measurements of HVAC duct feeder.

그림 5(c)의 (주)KT 광화문 사옥의 사무실용 공조 덕트에서 각각 공조 덕트에 보낸 후 수신 레벨을 측정하였다.

공조 덕트 단면의 크기는 가장 큰 것은 900 mm×400 mm에서부터 가장 작은 것은 200 mm×200 mm에 이르는데, 이것은 2.45 GHz 대역에서는 매우 많은 guided mode를 포함하게 된다. 그러므로 메인 덕트에 전파를 보낼 경우, 특정한 원하는 모드로 여기하기 위해서는 그 모드의 전계 분포와 일치하는 단면상의 위치에 전원 점을 형성해 주어야 한다.

이를 위해서는 그림 6에서처럼 피더 위치를 조절할 수 있는 여러 개의 선형 피더와 위상을 조절할 수 있는 가변 위상기를 결합하여 피더를 구성해야 한다.

2.3 덕트 망에서의 전파 측정

그림 7은 덕트 망 내부에서의 수신 레벨을 나타내었다. 예상했던 바와 같이 공조용 덕트는 도파관 역할을 하므로 자유공간에 비하여 전파의 가이드 효과로 인하여 감쇠가 훨씬 적게 측정되었다. 덕트의 Tree 위치에서 분기 덕트로 가는 전파의 감쇠는 전송 모드에 따라 크게 달라진다. 단면의 Tree 분기 방향으로의 wave vector 성분이 큰 고차 모드일수록 분기 덕트 방향으로의 감쇠가 직진하는 성분의 전파에 비하여 적으며, 반대로 wave vector의 성분이 축 방향으로 클수록 분기 덕트로 진행되는 전파 성분의 감쇠가 크게 나타난다.

중앙에 수직으로 COCO 피더를 넣을 경우, 고차

(a) 시험용 공조덕트(test bed)

(a) HVAC duct for test bed

(b) 삼화통신 지하실 공조덕트

(b) HVAC duct in underground room of Samwha-Communication office

(c) 광화문 KT사옥 10층 공조덕트

(c) HVAC duct in 10th floor of KT office

그림 5. 전파 측정 시험에 사용된 공조덕트

Fig. 5. HVAC duct structure of field measurements.

모드는 $TEn_0(n=[2a/\lambda], [x]=x)$ 를 넘지 않는 최대의 정수)모드까지 여기되므로, 900 mm×400 mm 덕트의 중앙에 수직으로 선형 COCO 안테나로 보낼 경우, $n=14$ 이고 좌우 대칭형인 기수 모드가 주로 여기되므로, 여기되는 성분은 $n=1, 3, 5, \dots, 13$ 에 이르는 것을 알 수 있다. 고차 모드 성분일수록 분기 덕트를 통해서 더 많은 전력이 빠져 나가므로 메인 덕트의 끝부

그림 6. 대형 공조 덕트의 특정 모드 여기 피더
Fig. 6. Excitation feeder for specified mode in large size HVAC duct.

그림 7. 덕트 망 내의 수신 레벨
Fig. 7. Received levels in duct network.

분에서는 차수가 낮은 모드들만 남게 된다. 그러므로 모든 분기 덕트로 가는 전력을 균일하게 하기 위해서는 여기되는 모드들의 개수를 조정하여 tree 분기마다 일정한 전력이 나누어지도록 피더의 위치와 위상을 조정해 주어야 하는데, 이것이 덕트를 이용한 무선망 설계의 핵심이라 할 수 있다.

표 2는 (주)삼화통신 지하실에 설치된 덕트에서 측정된 결과이다. 이 덕트는 옥상에 설치된 덕트에 비하여 단면이 $50\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ 로 작으며, 일정한 크기로 약 25 m에 걸쳐서 포설되어 있으며, 메인 덕트로부터 50 cm 내외의 짧은 연장거리를 두고, 분기 덕트와 diffuser가 연결되어 있는 구조이다.

표 2. 삼화통신 지하실 덕트 측정 결과

Table 2. Measurements results of underground room in Samwha-Communication office.

피더 위치	피더종류	측정 위치	수신 레벨 [dBm]
1 수평덕트	TE0n	5	-22 ~ -24
		1	-32
		2, 3	-34 ~ -36
		4	-34 ~ -36
	TEn0	5	-28 ~ -32
		1	-34 ~ -36
		2, 3	-44 ~ -46
		4	-46 ~ -50
3 수평덕트	TE0n	5	-32 ~ -34
		2, 3	-43 ~ -46
		4	~ -50
	TEn0	5	-28 ~ -32
		2, 3	-43 ~ -45
		4	-42 ~ -46

단면의 크기가 옥상의 test-bed 덕트보다 작으므로 원하는 모드를 여기하기가 상대적으로 용이하다. 그러므로 작은 개수의 피더 조합만으로도 각 분기 위치로 분기되는 전력을 조절할 수 있어서 피더의 조합에 따라 수신 레벨에 비교적 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

이 구조의 덕트에서는 수신 레벨의 변화 폭이 옥상의 test-bed 덕트의 5~10 dB에 비하여 2~4 dB로 작았는데, 이것은 덕트의 단면의 크기가 작아서 전송 모드의 개수가 줄어들어 따른 것으로 해석될 수 있다. 한편, 피더로부터 거리가 멀어지면서 원근 효과에 의한 감쇄가 비교적 더 크게 나타나는 모드가 있는데, 이것 또한 모드의 개수가 줄어들면서 각각의 모드별로 분기 덕트로 빠져나가는 전력이 차이가 남에 따라 메인 덕트의 종단까지 전달되는 전력이 모드별로 확연히 구분되는 특징을 보인 것으로 해석할 수 있다.

여기서도 덕트를 이용하여 보낸 경우에는 덕트가 연장된 전 영역의 수신 레벨이 양호한 레벨을 보이는 반면, 외부에 안테나를 거치한 경우에는 옆의 격실로 이동하면서 바로 수신 레벨 측정이 불가능한 레벨 이하로 떨어졌다.

그림 8. 광화문 KT사옥 10층 닥트 측정 결과
Fig. 8. Measurements results of HVAC duct in 10th floor of KT office.

그림 8은 광화문에 위치한 KT 사옥에서 공조 닥트에 전파를 보낸 후 측정한 결과이다. 이 공조 닥트는 43 m×43 m의 면적에 포설되어 있어서 테스트 베드용 닥트에 비해 2배 규모의 크기인데, 천정 공사로 인하여 일부의 닥트 구간이 훼손된 부분(㉠)을 제외하면 비교적 양호한 수신 레벨인 -60~-70 dB 이상이 수신되는 것을 볼 수 있다. 2~5 라인과는 별도로 피더에서 직선에 해당되는 1라인에서는 거리에 따른 원근 효과가 크게 나타났는데, 이것은 분기를 추가로 거치면서 다양한 전송 모드가 추가로 여겨 된 2~5 라인과는 달리 초기에 피더에서 여겨된 몇 개의 수직 편파 모드만이 진행하면서 피더에서 가까운 분기 닥트로 전력이 보다 많이 빠져나간 것이라 해석할 수 있다.

2.4 LOS 환경 및 격벽이 있는 사무실에서의 전파 측정

(주)삼화통신 건물 옥상의 테스트 베드용 공조 닥트 피더 방식과 기존의 외부 안테나 거치 방식과 비교하기 위하여, 같은 건물의 옥상에서 외부에 안테나를 거치한 경우와 그 건물 3층의 사무실에서 옥상에서 안테나를 설치한 위치와 동일한 위치에 안테나를 놓고 측정한 결과를 비교하여 그림 9에 표시하였다.

그림 9(a)는 건물의 옥상과 사무실 구조이며, 그림 9(b)의 ①에서는 테스트 베드의 메인 닥트에 전파를

(a) 삼화통신 옥상 및 3층 사무실 환경
(a) Structure of rooftop and 3rd floor in Samwha Communication office

(b) 옥상 공조 닥트 피더, 옥상 LOS 및 3층 사무실 환경에서 측정 결과 비교
(b) Comparison of results for rooftop with 3rd floor

그림 9. 측정 환경 및 결과 비교

Fig. 9. Measurement environments and comparison of results.

보낸 후, diffuser를 통해서 나온 전파를 diffuser로부터, 일반 사무실 환경에서와 같은 1.5 m 떨어진 거리에서 측정한 결과이며, 그림 9(b)의 ②는 닥트가 설치된 옥상에서 2 m 높이에 송신 안테나를 두고 LOS 환경에서 측정한 결과이다. 송신 안테나가 가까운 위치에서는 매우 높은 수신 레벨을 보이는 반면, 거리에 따라 급격히 감소하는 수신 특성을 보인다. 또한, 철제 냉각탑 뒷면이나 옥상 한 쪽의 휴게실처럼 LOS가 가려지는 곳에서는 매우 큰 감쇄를 보임을 알 수 있다.

그림 9(b)의 ③은 동일한 건물의 3층 사무실에서 측정한 결과이다. 사무실은 두께 3 cm의 석고 보드로 구획되어 있으며, 송신 안테나는 옥상에서와 동일한 위치에 두고 측정하였다. 시멘트 벽이 아닌 석고 보드도 몇 개를 통과하면서 수신 레벨이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

양호한 수신 레벨을 -60 dBm으로 볼 경우, 덕트 피딩 방식은 전 영역에 걸쳐서 양호한 수신 레벨을 보인 반면, 옥상의 LOS 환경에서는 철제 냉각탑이나 휴게실에서는 수신 최소 레벨이 -80 dBm 이하로 떨어지며, 실내의 사무실에서는 30m 떨어진 회의실 근방에서는 최소 수신 레벨 이하로 떨어짐을 볼 수 있다. 그러므로 이 건물을 기준으로 무선 랜 커버리지를 구축할 경우, 기존의 실내 무선망 구축방식은 최소 2개 이상의 안테나를 설치해야 전 영역을 양호한 수신 레벨이 보장되는 커버리지를 구축할 수 있는데 반하여, 덕트 방식은 한 개의 피더 안테나로 커버가 가능함을 알 수 있다.

그림 10은 가산 가산동 벽산디지털밸리 V 건물에서 측정한 결과를 나타내었다. 건물의 크기는 $60\text{ m} \times 30\text{ m}$ 정도로 테스트 베드용 덕트가 놓인 삼화통신 사무실의 약 두 배에 해당되는 면적이다. 이 건물의 10층 사무실에서 표시한 위치에 송신 안테나를 놓고 전파를 측정한 결과, 피더가 놓인 사무실에서 나가면서 크게 감쇄가 일어나고, 복도를 돌아서 두 번 코너를 돌면 수신 레벨이 측정할 수 없는 레벨 이하로 떨어졌다.

그러므로 이러한 구조의 건물에서 한 층을 모두 커버하려면 복도에서만 최소한 4개의 안테나가 필요하며, 사무실 내부까지 커버하려면 두 사무실 당 한 개씩 9개, 총 13개 이상의 안테나가 필요함을 알 수 있다. 그러나 덕트 피더 방식을 쓸 경우에는 내부의 구획에 영향을 받지 않고 면적에만 비례하여 안테나 개수가 증가하므로 2개의 안테나로 전체 무선망을 커버할 수 있음을 알 수 있다.

2-5 덕트 망을 이용한 무선망 설계

실내에 기존의 방식대로 안테나를 외부에 거치한 경우의 전파 특성과 덕트로 보낸 경우의 전파 특성을 비교해 보면 예상했던 대로 원근 효과가 많이 개선됨을 알 수 있다. 덕트 피더 방식은 기존의 외부에

(a) 가산동 벽산 디지털밸리 10층 구조

(a) Structure of 10'th floor in Byucksan Digital Valley office

(b) 전파 측정 결과

(b) Measurement results

그림 10. 가산동 벽산 디지털밸리 사무실 구조 및 전파 측정 결과

Fig. 10. Structure of Byucksan Digital Valley office and measurement results.

안테나를 거치하는 방식에 비하여 보다 균일하게 전파를 보내며, 실내의 구획에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

덕트는 전파를 전달하는 전송로 역할을 할 뿐 전력을 생산하지는 않으므로, 동일한 전력을 어떻게 커버리지 내의 분기 덕트에 고르게 분배하는가 하는 것이 무선망의 품질을 좌우한다. 덕트의 단면 크기가 작을수록 모드의 전파 특성에 의한 분기 덕트 전력 분배 특성이 확연하게 나타나는 반면, 덕트의 크기가 커지면, 보다 많은 다이폴이나 COCO 안테나를 조합하여 피더를 구현해야 원하는 특정 모드를 여기할 수 있음을 알 수 있었다.

또한 피딩 점에서 분기가 거듭될수록 다양한 고차 모드가 분기점에서 여기되므로, 전송 모드가 많

그림 11. 공조 덕트 망을 이용한 무선망 설계 절차
Fig. 11. Procedure of wireless network design using HVAC duct.

아지게 됨에 따라 모드의 전송 특성이 흐려진다. 그러므로 메인 덕트에서 일차로 분기되는 분기 덕트들로 가는 전력의 크기를 조절하는 것이 전체 망으로 전력을 고르게 보낼 수 있는 첩경이 된다. 따라서 메인 덕트의 어느 위치에서 어떤 모드로 보내는가가 무선망 설계의 핵심이라 할 수 있다. 이를 위해서는 메인 덕트와 분기 덕트의 단면 크기별로 각 모드가 얼마만큼 전력을 분배하는가를 분석해야 하는데, 이것은 측정하기가 매우 어렵다. 그러므로 이것을 시뮬레이션으로 구하여 DB로 확보한 후 덕트 무선망을 설계해야 한다. 이러한 설계 과정을 그림 11에 나타내었다. 우선 덕트 망을 구성하고 있는 모든 요소에 대하여 각 모드별로 손실을 해석한 다음, 피더로부터 diffuser에 이르기까지 과정의 링크 손실을 계산하여 최적의 위치에서 최적의 모드들을 선정하여 여기시킨다. 이때 분기 횟수가 증가할수록 모드 개수가 증가하게 되어 모드에 의한 전파 특성이 흐려지므로 3차 이상 분기하는 경우에는 모드별 전력 분배 대신 덕트 내부에서 다이폴 안테나 수신 전력을 측정하여 이것을 tree 분기점의 손실 데이터로 활용하는 것이 적합하다.

III. 결 론

빌딩 내 구축된 공조 덕트를 통하여 전파를 주고

받음으로써 통신망을 구축할 수 있다는 개념을 기본으로 하여 공조 덕트망의 구조를 분석하고, 전송 모드를 여기할 수 있는 피더 장치를 제작하고 시뮬레이션을 통하여 여기 특성을 분석하였다. 실제 건물에 설치된 공조 덕트를 실물 그대로 제작하여 덕트 내부 및 외부에서 전파의 특성을 측정하였으며, 다양한 실제 건물 공조 덕트에서 전파 특성을 측정하였다. 또한, LOS 환경 및 격벽이 있는 사무실 그리고 복도 등 여러 실내 환경 조건에서 전파를 측정하여 덕트 피더 방식과 비교하였다. 결과적으로 덕트는 도파로의 역할을 충분히 하므로 이것을 이용하여 무선망을 구축하면 기존의 외부 안테나 거치 방식에 비하여, 실내 공간 구획에 영향을 받지 않고, 보다 넓고 균일한 수신 레벨을 갖는 커버리지를 구축할 수 있게 됨으로써 실내 통신망의 품질을 향상과 비용 절감이 가능함을 볼 수 있었다. 향후 덕트 망 내 구성품 및 다양한 크기의 분기 tree에서 보다 정확한 전파 특성을 파악하기 위하여, 구성 요소들을 무 반사실에 넣고 피더를 조합하여 보다 정밀한 전송특성을 측정하고, 이 자료를 기반으로 덕트 망을 이용하여 무선망을 설계하는데 활용해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Pavel V. Nikitin, Daniel D. Stancil, Ahmet G. Cepni, Ozan K. Tonguz, and Ariton E. Xhafa, "Propagation model for the HVAC duct as a communication channel", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 5, pp. 945-951, May 2003.
- [2] Ozan K. Tonguz, Daniel D. Stancil, Ariton E. Xhafa, Ahmet G. Cepni, and Pavel V. Nikitan, "An empirical path loss model for hvac duct systems", In *Proc. IEEE Globcom 2002*, pp. 1850-1854, Nov. 2002.
- [3] Pavel V. Nikitin, Daniel D. Stancil, Ozan K. Tonguz, Ariton E. Xhafa, Ahmet G. Cepni, and Dagfin Brodtkorb, "Impulse response of the HVAC duct as a communication channel", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 10, pp. 1736-1742, Oct. 2003.
- [4] Ariton E. Xhafa, Ozan K. Tonguz, Ahmet G. Cepni, Daniel D. Stancil, Pavel V. Nikitin, and Dagfin Brodtkorb,

kor, "On the capacity limits of HVAC duct channel for high-speed internet access", *IEEE Trans. Co-*

mmun., vol. 53, no. 2, pp. 335-341, Feb. 2005.

윤 찬 의

1983년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1985년 2월: KT 연구원 기술 컨설

팅

[주 관심분야] RF 회로설계, 안테나, 전파해석, EMP

전 완 중

1980년 9월: 고려대학교 전기공학과 (공학사)

1988년 5월: 일리노이 주립대학 전기공학과 (공학석사)

1992년 5월: 일리노이주립대학 전기공학과 (공학박사)

1992년~2008년: KT 상무

2009년~현재: 고려대학교 공과대학 기술경영전문대학원 전문교수

[주 관심분야] 무선통신, 전자파해석, 안테나