

---

# IEEE 802.11 무선랜을 위한 지하철 터널 환경에서 다양한 지향성 빔의 전파측정

박노준\*, 송문규\*\*, 강영진\*\*

Propagation Measurements of Various Directional Beam  
in Subway Tunnel Environments for IEEE 802.11 Wireless LAN

Noh Joon Park\*, Moon Kyou Song\*\*, Young Jin Kang\*\*

---

이 논문은 2003년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행됨

---

## 요 약

본 논문에서는 각각 2.4GHz 대역과 5.8GHz 대역에서 팬빔 안테나, 원형편파 안테나 그리고 지향성 안테나를 사용하여 지하철 터널에서의 전파 특성을 실험하였다. 협대역 채널 측정의 결과, NLOS(Non-Line-Of-Sight) 경로에서 수신전력 레벨이 LOS(Line-Of-Sight)에 비하여 급격히 감소함을 보였다. 광대역 채널 측정은 PN sliding correlation 방법을 사용하여 수행하였다. 2.4GHz 대역과 5.8GHz 대역을 포함하는 IEEE 802.11 무선랜 대역에서 다양한 지향성 빔에 대한 평균초과지연(mean access delay)과 RMS 지연확산(RMS delay spread) 등의 채널 파라미터를 비교하였다.

## ABSTRACT

In this paper, radio propagation in a subway tunnel is investigated using fan beam antennas, circular polarization antennas and directional antennas at 2.4GHz and 5.8GHz band, respectively. The results of narrowband channel measurements show that received power level for NLOS(Non-Line-Of-Sight) path is decreased drastically as compared with LOS(Line-Of-Sight) path. Wideband channel measurements are obtained using a PN sliding correlation method. The parameters of the channel such as mean access delay and RMS delay spread are compared as to different types of directional beam at IEEE 802.11 WLAN(Wireless Local Area Network) band including 2.4GHz and 5.8GHz bands, respectively.

## 키워드

Wireless LAN, Tunnel, PN sliding correlation, Propagation Measurements

## 1. 서 론

최근 몇 년간 단말기의 이동성이 확보되는 무선 LAN에 대한 관심이 증가하고 있다. 무선

LAN은 사용하는 ISM(industrial, scientific, medical) 주파수 대역에 따라 크게 2.4GHz 대역과 5.8GHz 대역으로 구분된다.

---

\* 원광대학교 대학원 전자공학과  
접수일자 : 2004. 3. 31

\*\* 원광대학교 공과대학 전기전자 및 정보공학부

1999년에 IEEE 802.11b에서 표준이 제정된 2.400~2.483GHz 대역에 대해서는 이미 무선 LAN용 제품들이 상용화되는 중에 있고 IEEE 802.11a 및 유럽 HIPERLAN/2에서 표준이 제정된 5.725GHz~5.850GHz 대역은 현재 관련 기술이 개발되고 있는 시점이며 이들 주파수에 대한 실내환경이나 도심환경에서의 전파특성 연구도 활발히 진행되고 있다[1-3].

특히 지하철과 같은 폐쇄공간에서 LOS 및 NLOS 그리고 반사, 산란, 회절 등으로 인한 다중 경로 전파는 경로손실 및 신호지연을 일으켜 통신 품질에 많은 영향을 주게 되므로 전파특성을 정확하게 예측하는 것은 고품질의 통신 서비스를 위해 꼭 필요하다.

따라서 본 논문에서는 대전 지하철의 미개통 구간에서 세 가지 형태의 서로 다른 지향성 안테나를 이용하여 경로손실(path loss)과 지연프로파일(delay profile)을 각각 측정하고 분석하였다.

## II. 측정 시스템

지하철 터널 환경에서의 광대역 채널 측정을 위해서 PN sliding correlation 방법을 이용하였다 [1-2]. 그림1과 2는 측정에 사용한 송수신 시스템이다. 송신단의 baseband에서는 80MHz의 function generator를 이용하여 10단 길이의 PN sequence를 발생시켰고, 이것은 중심주파수 2.45GHz로 믹싱 된다. 이때 RF 신호 발생기의 출력은 지연프로파일 측정의 경우에 +4dBm으로 두고 경로손실 측정에서는 +10dBm으로 하였다.

도파관 구조를 갖는 터널은 자유공간 혹은 실내환경에 비하여 적은 경로손실을 갖기 때문에 송신단에 HPA(high power amplifier) 등을 사용하지는 않았으며 같은 이유로 수신단에서는 70dB의 step attenuator를 사용하여 LNA의 선형 증폭 범위를 만족시켰다. 실험에 사용한 LNA의 이득은 43dB이었다.

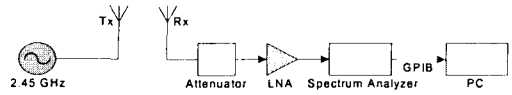


그림 1. 경로손실 측정 시스템  
Fig. 1 Measurement system for path loss

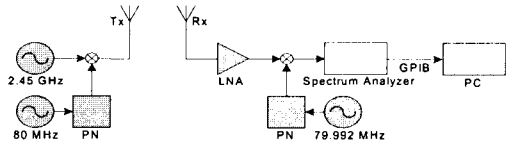


그림 2. 지연프로파일 측정 시스템  
Fig. 2 Measurement system for delay profile

수신단에서 사용된 PN sequence는 송신단의 것과 동일하며 clock 주파수는 79.992MHz로서 옵셋 주파수는 8kHz이다. 경로손실과 지연프로파일 측정은 모두 spectrum analyzer를 이용하였으며 취득된 데이터는 GPIB interface를 통하여 노트북 컴퓨터에 저장된다.

한편 산란체의 위치나 산란 중심을 확인하기 위해서는 doppler shift의 형태로써 반사파 경로의 도달각을 결정할 필요가 있다. 속도  $v$ 로 움직이는 수신기의 doppler shift는 다음과 같이 주어진다.

$$f_D = \frac{vf_c}{c} \cos \theta \tag{1}$$

여기서  $c$ 는 자유공간에서의 전파속도이고  $f_c$ 는 carrier 주파수이며  $\theta$ 는 이동방향에 대한 전파의 도달각이다. 또한 STGCC(swept time-delay cross-correlation) 방법에서 측정되는 최대 doppler shift는 다음 식으로 주어진다.

$$f_D = \frac{1}{2km\tau_0} \tag{2}$$

여기서  $k$ 는 스케일변수(scaling factor)이고  $m$ 과  $\tau_0$ 는 각각 PN sequence의 길이와 클럭 주기이다. 식(1)과 (2)를 비교하면 doppler-shift resolution을 구할 수 있다[1].

지하철의 최대 운행속도가 80km/h인 것을 감안

하면  $f_c$ 가 2.45GHz인 경우에 최대 doppler shift  $f_d$ 는 식(1)에 의하여 181.5Hz가 되며 doppler-shift resolution은 0.48m/s( $\approx 1.7$ km/h)가 된다. 측정 시스템에서 수신기의 이동속도는 doppler-shift resolution을 넘지 않아야 하므로 본 연구에서는 distance transducer 등을 이용한 실시간 측정 대신에 2.5m 혹은 10m 간격으로 수신기를 이동시켰다. 측정에 사용된 시스템 파라미터는 표1과 같다.

표 1. 시스템 파라미터  
Table 1. System Parameters

캐리어주파수	2.45GHz	5.8GHz
송신전력	4 or 10dBm	
확산코드	m-sequence	
시퀀스 길이	1023chips	
칩율	80MHz	
스케일변수	10000	
측정 가능한 최대지연시간	12.8 $\mu$ sec	
trace repetition time	128msec	
doppler-shift resolution	0.48m/s	0.20m/s

터널 환경에서 적합한 fan beam을 구현하기 위하여 마이크로스트립 선형배열 안테나를 제작하였고 다른 지향성 안테나와 그 특성을 비교하기 위하여 원형편파(circular polarization; CP)를 발생시키는 안테나와 선형편파를 발생시키는 지향성 안테나 등 세 가지 형태의 지향성 안테나를 사용하였다.

터널 내벽이 높은 압력에 노출되어있는 경우를 제외하면 대개의 터널단면(cross section)은 난형이거나 마제형인 경우가 많은데 이런 경우에는 수평면내 빔폭이 수직면내 빔폭에 비해 좁게 되는 fan beam이 다른 지향성 빔이나 원형편파 안테나에 비해 좋은 전파특성을 갖을 수가 있다.

1 $\times$ 2 마이크로스트립 선형 배열을 이용하여 제작된 2.4GHz 대역 fan beam 안테나의 크기는 10 $\times$ 21.5cm이고 수직, 수평면내 3dB 빔폭은 각각 60 $^\circ$ 와 30 $^\circ$ 이며 이득은 10dBi이다. 측정된 -10dB 대역폭은 약 420MHz이다.

1 $\times$ 8 마이크로스트립 선형 배열을 이용하여 제작된 5.8GH 대역 fan beam 안테나의 크기는 10 $\times$ 21.5cm이고 측정된 -10dB 대역폭은 약 800MHz이며 이득은 13dBi이다.

직경이 14.5cm인 지향성 안테나는 수직면내 3dB 빔폭이 30 $^\circ$ 이며 수평면내 3dB 빔폭은 34 $^\circ$ 이다. 안테나의 형태는 파라볼라형이고 이득은 16dBi이다.

원편파 안테나를 위해서는 RHCP(right-hand circular polarization)를 발생시키는 2 $\times$ 2 마이크로스트립 배열 안테나를 제작하였다. 원편파를 발생시키기 위하여 90 $^\circ$ 위상차를 갖는 2중 급전방식을 사용했으며 sequential rotation 방법으로 다시 한번 전파를 회전시켜 측비 특성을 개선시켰다. 원편파 안테나는 크기가 10.2 $\times$ 10.2cm이고 이득은 11dBi이다. -10dB 대역폭은 약 900MHz로서 5.8GHz ISM 대역의 대역폭인 125MHz 보다 훨씬 넓음을 확인할 수 있다.

측정환경은 현재 건설 중에 있는 대전지하철의 미개통 구간인 4공구를 대상으로 하였다. 그림3에서 승강장을 포함한 터널의 총길이는 1163.45m이고 터널의 시작점 A는 3공구와 연결되어 있으며 터널의 종점 B는 막혀있다. 터널 바닥에는 철로가 깔려있지 않았으며 터널 단면의 우측 하단에는 선로 유지 보수용 통로가 있다. 터널의 단면도는 그림4에 나타내었다.

승강장을 벗어난 순수 터널 지역 안에 송신안테나를 고정하여 두고 수신 안테나를 터널 종점 방향으로 이동시켰으며 이때 LOS 구간은 175m가 되고 NLOS 구간은 270m가 된다. NLOS를 형성하는 곡선구간은 반경이 350m인 원의 궤적에 놓이게 된다.

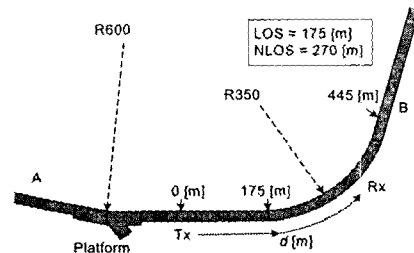


그림 3. 터널의 측정 환경  
Fig. 3 Tunnel environments

안테나의 급전점은 터널 바닥으로부터 2.5m 지점에 위치하며 이것은 승강장 바닥으로부터 0.9m가 된다. 또한 수신기가 이동할 때 안테나의 개구면이 일정한 방향을 향하도록 하기 위하여 안테나 운반용 로리를 제작하였고, 안테나가 터널의 중앙에 위치하도록 기준선을 터널 바닥에 고정하였다.

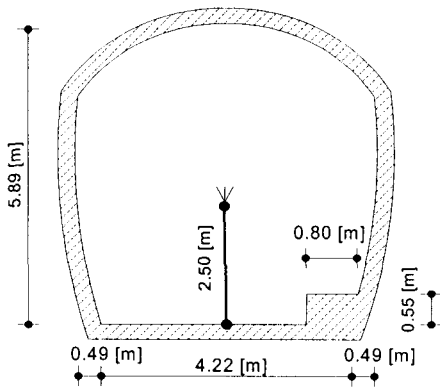


그림 4. 터널의 단면도  
Fig. 4 Cross section of the tunnel

경로손실 측정을 위해서는 수신기를 2.5m 간격으로 이동시켰고 지연프로파일 측정시에는 10m 간격으로 이동하였으며 송신기점으로부터 11m 지점에서 14m 지점까지는 1cm 간격으로 이동하며 경로손실을 측정하였다.



그림 5. 터널 모양과 수신 시스템  
Fig. 5 Shape of the tunnel and the receiver system

지연 프로파일의 측정을 위해서는 10단 길이의 PN 부호를 이용한 sliding correlation 방법을 이용하여 측정하였고 송신단 baseband 주파수는 80MHz로 하였다. 150m의 순수 직선구간을 포함하는 445m의 곡선터널에 대하여 경로손실을 측정하였고 평균초과지연, RMS 지연확산, 누적확률분포 등을 구하였으며 그 결과를 비교 분석하였다.

### III. 측정 및 결과분석

그림6과 그림7은 각각 445m 측정구간에서 얻은 2.4GHz 대역과 5.8GHz 대역에 대한 수신전력 레벨이다. 지향성 안테나의 수신전력 레벨이 다른 안테나에 비해 높은 이유는 안테나의 이득이 상대적으로 높기 때문이다. 빔폭이 터널에 폭과 같아지는 임계지점인 11m 지점까지는 자유공간과 같은 경로손실 특성을 보였으며 임계지점 이후 NLOS 시작점 까지 이어지는 LOS구간에서는 수신 전력의 변화가 미미한 것으로 나타났다.

한편 거리에 대한 수신레벨의 fluctuation 특성은 지향성에 비하여 fan beam의 경우에 가장 빨리 나타나는 현상을 보였고 175m 지점을 지나는 NLOS구간에서는 곡선구간으로 인한 다중경로의 급격한 증가로 인하여 모든 안테나의 수신전력이 각각의 주파수 대역에서 현저히 떨어짐을 확인할 수 있었다.

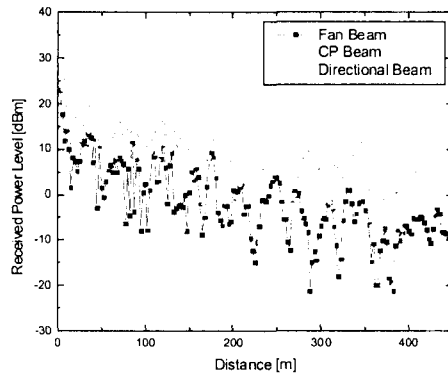


그림 6. 2.4GHz 대역 수신전력 레벨 (Linear scale)  
Fig. 6 Received power level at 2.4GHz Band (Linear scale)

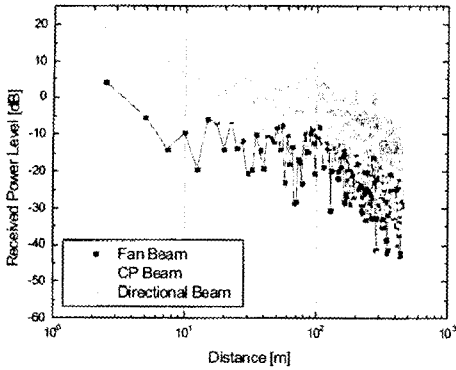


그림 7. 5.8GHz 대역 수신전력 레벨 (Log scale)  
Fig. 7 Received power level at 5.8GHz band (Log scale)

그림8은 5.8GHz 대역에 대하여 측정 기점으로 부터 11m 지점에서 14m 지점까지를 미세구간으로 정하고 1cm 간격으로 이동하면서 측정한 수신 전력 레벨인데 fan beam 안테나의 level fluctuation이 가장 컸으며 그림9에는 5.8GHz 대역에서 10m 간격으로 획득한 지연프로파일을 보였다.

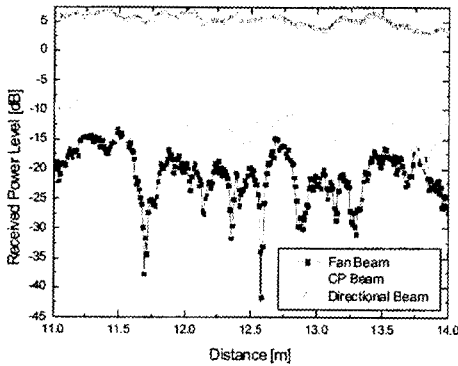


그림 8. 5.8GHz 대역 수신전력 레벨 (미세구간)  
Fig. 8 Received power level at 5.8GHz band (Detailed path)

다중경로(multipath channel)에 의한 페이딩(fading)은 서로 다른 경로를 통하여 수신된 신호의 시간지연에 의해 발생하며 일반적으로 광대역 다중경로의 시분산 특성은 평균초과지연(mean excess delay)  $\bar{\tau}$ 와 rms 지연확산(rms delay spread)  $\sigma_\tau$ 로써 표현될 수 있다[2].

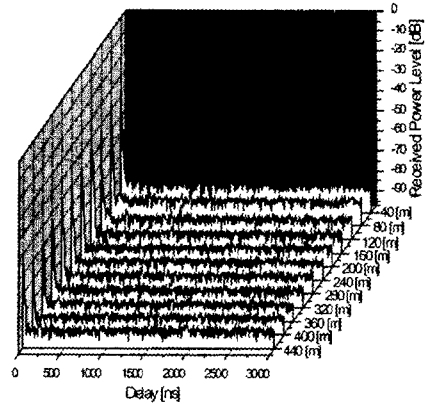


그림 9. 5.8GHz 대역 지연프로파일 (Fan beam)  
Fig. 9 Delay profile at 5.8GHz band (Fan beam)

평균초과지연은 각 측정지점에서 수신된 전력 지연 프로파일(power delay profile)의 일차 모멘트이며 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3)$$

rms지연확산은 각 측정지점에서 수신된 전력지연 프로파일의 이차 중심 모멘트의 제곱근이며 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)}$$

일반적으로 실외 다중경로에서의 rms지연확산 값은  $\mu\text{sec}$  단위이며 실내 다중경로인 경우에는  $\text{nsec}$  단위가 된다.

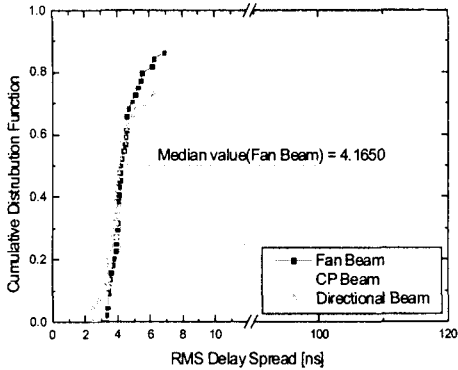


그림 10. 2.4GHz 대역 RMS 지연확산의 CDF  
Fig. 10 CDF of RMS delay spread at 2.4GHz band

2.4GHz 대역과 5.8GHz 대역에 대한 rms지연확산은 각각 그림10과 11에 누적분포함수(cumulative distribution function; CDF)로서 정리하였다. fan beam의 평균초과지연에 대한 CDF에서는 중앙값(median value)에서 경향이 반대가 되는 현상을 발견하였고 rms지연확산의 경우 fan beam의 확산량이 가장 적음을 확인하였다.

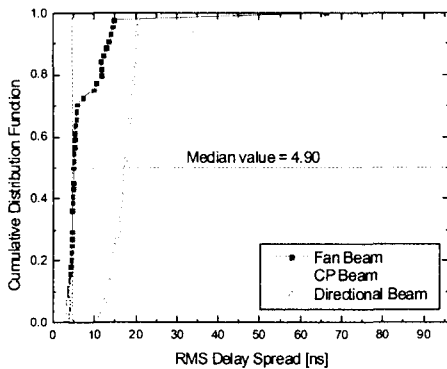


그림 11. 5.8GHz 대역 RMS 지연확산의 CDF  
Fig. 11 CDF of RMS delay spread at 5.8GHz band

표2는 각각 beam 형태에 따른 채널파라미터를 계산한 결과이다. rms지연확산을 비교해보면 2.4GHz 대역에서 fan beam 안테나의 평균값과 중앙값이 각각 11.73ns, 4.16ns이었고 5.8GHz 대역에서는 각각 7.90ns, 4.89ns로서 가장 적은 지연확산을 보였으나 표준편차는 각각의 주파수에 대하여 지향성 안테나가 가장 적은 것으로 나타났다.

표 2. 채널 파라미터  
Table 2. Channel Parameters

		Mean Excess Delay [ns]		RMS Delay Spread [ns]	
		2.4 GHz	5.8 GHz	2.4 GHz	5.8 GHz
Fan Beam	mean	3.57	3.31	11.73	7.90
	median	2.96	2.93	4.16	4.89
	std	2.19	1.78	20.62	9.69
CP Beam	mean	3.48	3.44	16.63	16.37
	median	2.99	3.04	4.72	12.61
	std	1.89	2.00	29.10	15.60
Directional Beam	mean	3.65	3.00	19.40	17.15
	median	2.79	2.85	4.19	17.34
	std	2.61	0.98	27.45	2.82

#### IV. 결론

본 논문에서는 2.4GHz 대역과 5.8GHz 대역을 포함하는 IEEE 802.11 WLAN을 위한 지하철 터널 환경에서 다양한 형태의 지향성 안테나의 전파측정을 수행하였다.

협대역 채널의 측정을 위하여 150m의 순수 직선구간을 포함하는 445m의 곡선터널에서 대하여 경로손실을 측정하였다.

광대역 채널측정에서는 sliding correlation 방법을 적용한 송수신 시스템을 구현하였고 이를 이용하여 평균초과지연, rms지연확산, 누적확률분포등을 구하였다.

측정 및 분석 데이터는 도파관 구조를 갖는 터널에서의 전파 모델링에 기초자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- [1] J. D. Parsons, "The Mobile Radio Propagation Channel", John Wiley & Sons, 2/E, 2000.
- [2] T. S. Rappaport, "Wireless Communications Principles and Practice", IEEE Press. Prentice Hall, 1996.
- [3] 장한용, 구본호, 홍승억, "IEEE 802.11 무선 LAN의 기술과 경향", Telecommunication

Review, vol. 12, no.6, pp.799-809, Dec. 2002.

- [4] J. S. Lamminmaki, and J. J. A. Lempiainen, "Radio Propagation Characteristics in Curved Tunnels", IEE Porceedings. Micro-waves, Antennas and Propagation. vol. 145, pp.327-331, Aug. 1998.
- [5] D. Didascalou, J. Maurer, W. Wiesbeck, "Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 49, no. 11, pp.1590-1596, Nov. 2001.



**강영진(Young Jin Kang)**

1974년 2월 광운대학교 무선통신 공학과 공학사  
1980년 2월 전국대학교 전자공학과 공학석사

1990년 2월 전국대학교 전자공학과 공학박사  
1993년 1월 ~ 1994년 1월 일본 동경공업대학 객원 연구원  
1981년 3월 ~ 현재 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수  
※ 관심분야 : 광집적소자, 광통신시스템

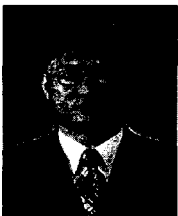
저자 소개



**박노준(Noh Joon Park)**

1993년 2월 원광대학교 전자공학과 졸업  
1995년 2월 원광대학교 전자공학과 공학석사

1995년 3월 ~ 현재 원광대학교 전자공학과 박사과정  
※ 관심분야 : 안테나 설계, 전자파 수치해석, 전파 측정 및 채널 모델링



**송문규(Moon Kyou Song)**

1988년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업  
1990년 2월 고려대학교 전자공학과 공학석사

1994년 2월 고려대학교 전자공학과 공학박사  
1994년 3월 ~ 현재 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 부교수  
1997년 10월 ~ 1998년 12월 한국전자통신연구원 초빙연구원  
1999년 9월 ~ 2000년 8월 캐나다 빅토리아 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 객원교수  
※ 관심분야 : 무선통신, 디지털 통신시스템 설계, 채널 부호화