

고출력 LED 모듈 역률 개선 방법 연구

A Study on Methodology to Improve the Power Factor of the High Power LED Module

노영환^{*★}

Young Hwan Lho^{*★}

Abstract

Recently, LED (Light Emitting Diode) becomes to be useful to apply for the lightening sources in electric systems and the lightening equipment since the power is less consumed with high efficiency, and the size and the weight of LED are small and light, respectively. The LED is controlled with constant current and SMPS (Switching Mode Power Supply). It is necessary for the LED manufacturer to secure the fundamental technology of designing LED chip, and to study the methodology to improve the power factor (PF) and to design the operational circuit for the development of LED to reduce the power loss in the application of LED lightening. The direct AC (Alternating Current) LED driving circuit, HV9910, is widely used in the industry field. In this paper, it is to evaluate the improved methodology for the power factor and efficiency through simulations when PFC (Power Factor Correction) and Noise Filter are added to HV9910.

요약

친환경 및 에너지 효율에 대한 관심이 증대되고 있는 가운데 LED(Light Emitting Diode)는 제어방식이 정 전류 구동과 SMPS(Switching Mode Power Supply)방식으로 구동하므로 소형화 및 경량화를 이룰 수 있고 전력 소모가 적으며 효율이 높아 광원 및 조명장치에 활용하는데 유용하다. LED 생산업체는 고출력 LED 모듈의 칩 설계 원천기술의 확보가 필요하고, LED 를 조명으로 적용시키기 위해 전력손실을 줄일 수 있는 고출력 LED 모듈 개발을 위한 구동회로 설계와 역률 개선의 방안 연구가 필요하다. 산업현장에서 교류(AC) 직결 LED 구동소자인 HV9910를 일반적으로 사용하고 있다. 본 논문에서 HV9910에 PFC와 Noise Filter를 추가한 구동회로의 역률 및 효율에 대한 개선방법을 시뮬레이션을 통해 검증하는데 있다.

Key words : LED, LED lightening, Power Factor, LED SMPS, HV9910

1. 서론

LED는 가전의 백열등 및 형광등과 같은 다른 광원과 달리 필라멘트나 전극이 없기 때문에 수명이 반영구적으로 사용할 수 있고 수은이나 가스를 사용하지 않아 친환경적이다[1]. 기존의 백열전구 경우 대부분 전기에너지가 열로 변환되어 손실되는데 LED는 가시광선 영역 범위에서 빛을 발광하므로 백열등 대비 10% 전력[2,3]으로 같은 빛을 낼 수 있고 조명용 광원과 각종 현시용으로 수요가 폭발적으로 증대되고 있다.

* Dept. of Railroad Electricity System, Woosong University 042) 629-6731, yhlho@wsu.ac.kr

★ Corresponding author

※ Acknowledgment The work was supported by the IT R&D program of MKE/KEIT

Manuscript received Jul. 16, 2014; revised Sep. 2, 2014; accepted Sep. 5, 2014

LED는 제어방식이 복잡하지 않고 DC구동으로 단순하여, 광원 및 시스템의 소형화, 경량화를 이룰 수 있으며 안정적이며 일반적으로 p-n 접합으로 이루어진 대표적인 다이오드중의 하나이다. 역률은 피상전력에 대한 유효전력의 비율로 전기기기나 소자에 걸리는 전압과 전류가 유효 동작으로 미치는 영향을 의미한다. 역률이 개선됨으로써 부하전류가 감소하게 되고 열화가 지연되어 수명이 연장되며 전력손실을 줄일 수 있어 비용을 경감하기 위해 선진국의 산업체는 많은 투자를 해온 실정이다. 그러나 우리나라의 LED 업체는 LED 모듈에 사용되는 칩(chip)은 대부분 수입에 의존하고 있어 역률(Power Factor(PF)) 향상을 위해 기술개발이 필요하다.

본 논문에서는 안정적인 제어를 수행하기 위해 고효율 LED 모듈의 구동회로를 설계한 후 역률 및 효율에 대한 개선 방법을 연구하고 이론치와 시뮬레이션 결과를 비교 및 분석하는데 있다.

II. 회로설계

LED는 기본적으로 p-n 접합 구조를 가지며 접합면에 발광층으로 작용하는 양자 우물층이 삽입된 이중구조를 가진다. LED를 p-n 접합 다이오드[4]로서 전류와 순바이어스 전압과의 관계는 등식 (1)과 같으며 전류를 측정하기 위한 등가회로[3]는 Fig. 1과 같다.

$$I = I_s(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1) \cong I_s e^{\frac{V}{nV_T}} \quad (1)$$

여기서 V 는 인가전압, V_T 는 26 mV, n 는 실리콘에서 1, 게르마늄에서 2, 그리고 $e^{\frac{V}{nV_T}} \gg 1$ 이다. LED의 발광 임계전압이 2.45 V 일 때 전류는 1.07 mA로 측정된 I-V 특성곡선은 Fig. 2와 같다.

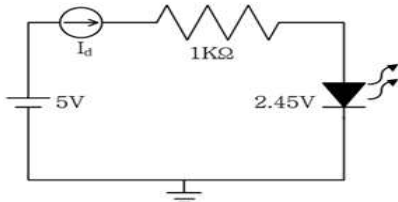


Fig. 1. A current measuring circuit for the LED with reference voltage of 2.45 V

그림 1. 기준전압이 2.45 V인 LED의 전류 측정회로

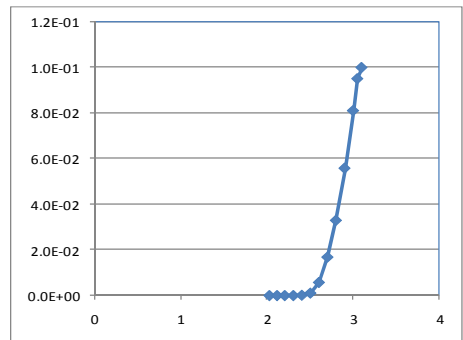


Fig. 2. I-V characteristic curve for LED with reference voltage of 2.45 V

그림 2. 2.45 V 정격전압을 가진 LED의 I-V 특성곡선

1. 검증회로 설계

LED를 구동하기 위해서는 구동회로가 필요하고 원하는 개수의 LED를 부착하여 조명을 효율적으로 해야 한다. 구동회로는 HV9910BDB2 (HV9910)[5]를 기반으로 코일 L, 스위칭소자인 FET 그리고 저항 등이 전류를 조절(current sensing)하는 기능을 갖고 있다.

시뮬레이션을 수행하기 위해 우선 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 각각의 시비율(duty ratio)을 갖는 전압 및 전류 파형을 만들어 sine 파 및 사각파 사이의 각도를 산출한다. LED 구동회로 HV9910를 활용하여 Fig. 5와 같이 검증회로를 설계한 후 시뮬레이션을 통해 역률[6]을 이론치와 비교하였다.

역률은 평균전력을 피상전력의 비율로 등식 (2)와 같이 산출된다.

$$PF = \frac{avg(I \times V)}{I_s \times V_s} = \frac{\frac{D_2}{\pi} V_o I_o \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta}{\frac{V_o}{\sqrt{2}} \sqrt{D_1 D_2} I_o} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} 2 \cos \theta_2 \quad (2)$$

여기서 $D_1 = 0.1$ 일 때 $\theta_1 = 81^\circ$ 이고 $\theta_2 = 99^\circ$ 이다. 시비율은 전류의 oscillation과 시간 축으로 결정되는데 면적이 적을 경우 역률이 적어진다. 한 예로서, Fig. 5의 하단의 $D_1 = 0.3$ 이고 주파수가 120hz인 전압파형일 때 $D_2 = 0.99$, 100khz 인 전류 펄스가 발생된다. 전압 V_2 는 등식 (3)과 같이 계산된다.

$$V_2 = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3)$$

이때 전압을 센싱(sensing)하고 전압에 비례하는 전류가 1Ω 저항에 흐른다. 저항 $0.01\mu\Omega$ 과 1 F 일 때 시정수(RC)는 $0.01\ \mu\text{sec}$ 이다. 전파브리지(full bridge) 정류회로의 입력단에서 전압파형내부에 전류파형이 중앙에 위치하도록 하기 위해서 주파수는 60hz , 위상은 63° 로 인가하였다. 그리고 저항 $1,000\text{G}\Omega$ 은 전파브리지 출력단에 일정한 전류 I_4 가 흐르도록 하기 위해 배치하였다.

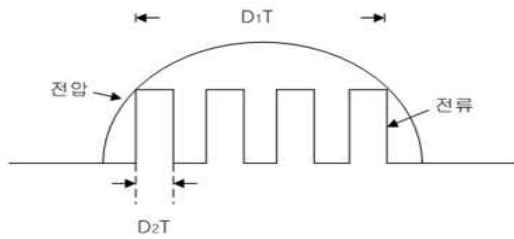


Fig. 3. Waveforms of voltage and current with each duty ratio
 그림 3. 각각의 시비율을 가진 전압 및 전류 파형

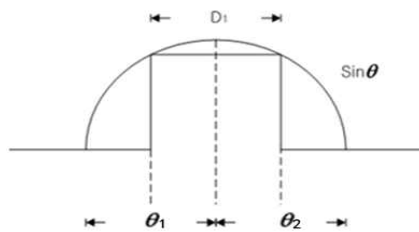


Fig. 4. Angles of sine wave and square wave
 그림 4. sine 및 사각파형의 각도

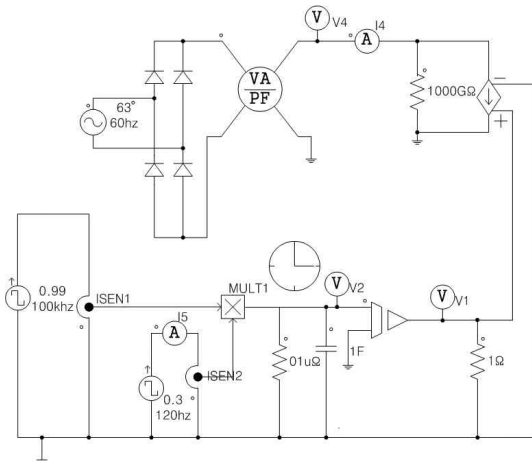


Fig. 5. Verification circuit for Power Factor
 그림 5. 역률의 검증회로

Fig. 6은 시비율 D_1 에 대한 시비율 D_2 별 역률의 시뮬레이션 결과를 도시한 것으로 D_2 는 0.1에서 1.0까지 변화시킨다. D_1 이 증가함에 따라 역률은 증가되고, 동일한 D_1 에 대해 D_2 가 증가될 때도 역률이 증가된다. $D_1 = 0.3$ 이고 $D_2 = 1$ 일 때 역률이 0.74이며 주파수가 60hz 이고 위상이 63° 일 때 입력전압이 전파브리지 정류회로를 통과한 전압 V_4 와 전류 I_4 를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 역률 0.74는 시뮬레이션 결과와 등식(2)에서 얻은 이론값과 일치하였다.

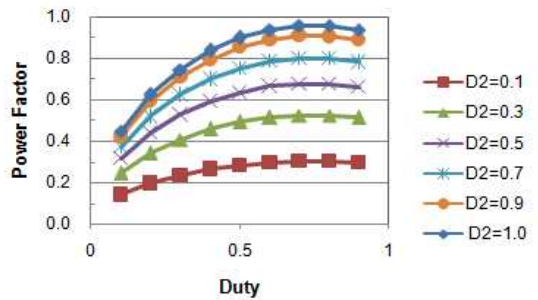


Fig. 6. Power Factors for duty ratio D_1 and D_2
 그림 6. 시비율 D_1 과 D_2 에 대한 역률

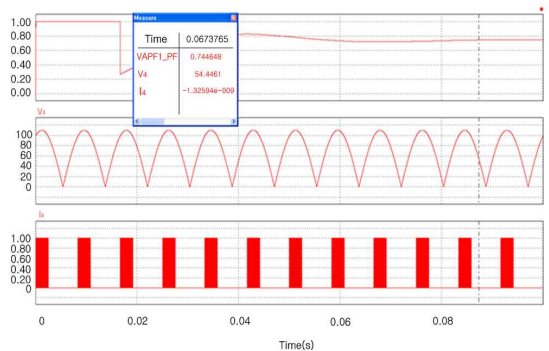


Fig. 7. Power Factor(0.74), Input Voltage(V_4), Input Current(I_4) when $D_1 = 0.3$ and $D_2 = 1$
 그림 7. $D_1 = 0.3$ 과 $D_2 = 1$ 일 때 역률(0.74), 입력전압 (V_4), 입력전류(I_4)

2. 구동회로 설계

본 논문에서 4개의 1 W 급 4개의 LED[7,8]를 동작시키기 위해 1) HV9910만을 사용한 구동회로와 2) HV9910에 PFC(Power Factor Correction)를 부착한 구동회로, 그리고 3) HV9910에 PFC와 Noise Filter를 부착한 구동회로를 설계하고 역률을 비교 및 분석하는데 있다.

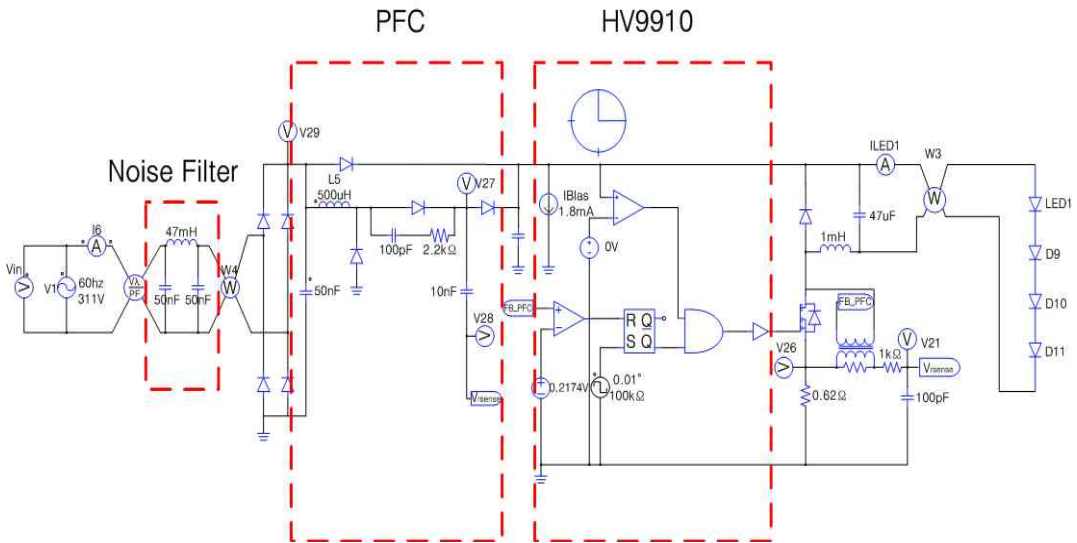


Fig. 8. Driving Circuit with HV9910, PFC and Noise Filter for lightening 4 LED's
 그림 8. 4개의 LED를 조명하기 위해 HV9910, PFC와 노이즈 필터를 가진 구동회로

Fig. 8에서 입력전압이 220 V, 60hz 를 인가하여 4 개의 1 W 급 LED를 출력단에 부착시켜 전류가 350 mA 흐르도록 한다. 이때 HV9910는 동작전압이 12 V 이상에서 동작되도록 설정하고 비교기의 기준전압을 250 mV로 설정할 때 전류는 등식 (4)와 같이 계산된다.

$$I = \frac{0.25}{1.15 \times R_{sense}} = \frac{0.25}{1.15 \times 0.62} = 0.35 \text{ [A]} \quad (4)$$

III. 시뮬레이션 및 분석

펄스에서 고주파 노이즈를 제거하기 위해 Fig. 8의 우측하단의 저항 1 KΩ과 콘덴서 100 pF를 이용하는데 이때 저항과 콘덴서는 저 대역 필터(Low Pass Filter) 역할을 수행한다. FET[9]가 동작(turn-on)되면 드레인 전압(V_{drain})값이 떨어지고 코일의 인덕터(inductor)에 전압이 증가되는데 이때 전류가 증가하여 V_{sense} 전압이 증가된다. 이때 최대 입력 전압이 311 V일 경우 LED전압이 12.8 V(3.2V / 개 × 4)가 떨어져 298.2V가 인덕터 우측단에 걸린다. 이때 비교기 입력으로 전압이 들어가 0.2174 V보다 크면 R/S F/F를 reset시켜 AND gate가 off되어 FET가 off된다. 이때 코일에 흐르는 전류는 free wheel diode를 통해서 일정한 전류를 유지하며 다이오드에 전류가 흐른다.

예로서, D₂ = 0.01, 주파수가 47khz 일 때 역률은 약 0.28임[10]을 시뮬레이션으로 확인하였다. 역률을 향상시키기 위해 HV9910에 다이오드, 저항, 인덕터, 커패시터로 구성된 PFC를 추가한 결과 FET의 드레인(drain) 단자의 전압이 최대 298.2 V와 최소 0 V의 사각파 전압이 걸리고 이 전압은 트랜스포머를 거쳐 FB_PFC(Feedback PFC)로 전달되는데 전압이 298.2 V에서 0 V로 떨어지면 V27이 0 V가 되어 좌측 2개의 다이오드가 동작된다. 이때 전파브리지 출력단에 311 V의 전압이 인가되어 코일 500 μH에서 전류는 등식 (5)와 같이 유도되고 다이오드를 거쳐 커패시터 쪽으로 흘러 커패시터를 충전시켜 역률 값이 0.5[10]로 증가된다.

$$i(t) = L \int v(t) dt \quad (5)$$

그러나 PFC가 없으면 한 주기 중 입력전압이 침두 값을 가질 때 입력단에 공급되어 전류의 THD(total harmonic distortion)가 높아져서 역률이 낮아진다. 그러나 PFC 부착 시 FET의 드레인 전압이 0 V로 유지될 때 전류가 흐르기 시작하고 코일 및 FET의 드레인 전류가 증가되어 센스(sense) 저항양단의 전압이 250 mV를 넘게 되면 비교기의 펄스가 출력되어 R/S flip flop을 reset 시킨다. 그래서 게이트가 꺼져(off) 전

류가 흐르지 않으면 드레인 전압은 312 V까지 올라가 인덕터에 흐르는 전류가 상단에 있는 다이오드로 흐르게 된다. 이때 드레인 전압이 트랜스포머를 통해서 PFC 회로의 커패시터에 전달이 된다. FET가 동작되어 전압이 낮아지면 V28의 전압이 낮아지고 순간적으로 V27의 전압도 낮아진다. 이때 다이오드가 동작되어 V27은 0 V로 고정이 되고 V29의 전압에 의하여 인덕터 L5에 전류가 증가하기 시작한다. PFC 회로가 없는 경우는 브리지를 거친 전압이 커패시터에 충전된 전압보다 높은 기간 동안만 전류가 흐르게 되어 한 주기 중에서 일부 시간만 전류를 흐르게 되어 역률을 낮추게 하는 단점을 갖는다.

역률을 높이기 위해 Fig. 8과 같이 입력 전원쪽에 인덕터와 커패시터로 구성된 Noise Filter 부착하였다. Noise Filter의 공진 주파수는 등식 (6)과 같이 결정된다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3.28 \text{ Khz} \quad (6)$$

여기서 인덕터의 인덕턴스(L)는 47 mH이고 커패시터의 커패시턴스(C)는 50 nF이다. 공진주파수 이상의 주파수 성분은 입력단과 PFC 회로쪽에 전달되지 않아 양방향에서 발생하는 노이즈 성분을 제거하는 기능이 있다. 이때 역률은 0.77로 개선됨을 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

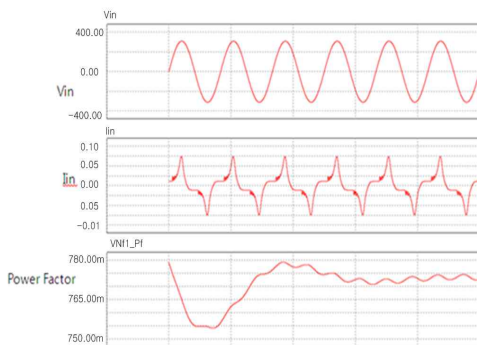


Fig. 9. Simulations of Input voltage V_{in} , Input current I_{in} , and Power Factor(0.77) for Driving Circuit with HV9910, PFC and Noise Filter

그림 9. HV9910, PFC 와 노이즈 필터를 가지는 구동회로에 대한 입력전압 V_{in} , 입력전류 I_{in} (I_G), 그리고 역률(0.77) 시뮬레이션

입력 교류전압의 변화에 따른 HV9910만을 사용한 구동회로, HV9910에 PFC를 부착한 구동회로, 그리고 HV9910에 PFC와 Noise Filter를 부착한 구동회로를 이용한 경우 역률에 관한 시뮬레이션[11]을 수행한 후 비교한 결과 HV9910에 PFC와 Noise Filter를 부착한 경우가 가장 우수한 역률을 보여 주었고, HV9910만을 사용한 구동회로가 역률이 떨어짐을 Fig. 10에서 보여 주고 있다.

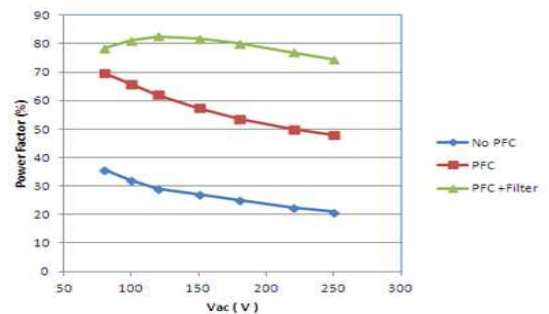


Fig. 10. Power Factors with/without PFC/Noise Filter vs. Input Voltages

그림 10. PFC와 노이즈 필터 존재 여부에 따른 입력전압별 역률

IV. 결론

안정적인 제어를 수행하기 위해 고출력 LED 모듈의 검증회로와 구동회로를 설계한 후 역률을 향상시키기 위한 방안을 연구하고 역률에 대한 이론치와 시뮬레이션 결과를 비교 및 분석하였다. LED 구동회로를 설계하기 위해 HV9910 만을 사용한 경우와 HV9910에 PFC와 Noise Filter를 부착하여 역률 및 효율을 개선한 경우를 연구하였다. 이를 통해 제품의 신뢰성을 높이고 전력소모를 낮추며 효율적인 제어 방법을 연구함으로써 구동회로 설계의 원천기술 확보에 기여하리라 본다.

References

[1] M. H. Sin and P.J. Kim, "LED Packaging Technology Introduction," Books Hill, pp. 183, 2008 (in Korean)
 [2] M. J. Round, "Outlook for LED Industry, MERITZ, Home Appliances Electronic Components /Display," pp. 4-18, 2012 (in Korean)
 [3] M. H. Sin, "LED Phosphor Technology, Korea

- Research Institute of Chemical Technology,” Fine Chemical Policy Research Center, 2008 (in Korean)
- [4] Jacob Millman and Arvin Grabel, “Microelectronics,” McGRAW-HILL International Editions, pp. 57-61, 2007
- [5] “Data Sheet of HV9910BDB Universal, Off-Line, High Brightness, 350 mA LED Driver,” Supertex Inc., pp. 1-2, 2012
- [6] Y. C. Roh, K. B. Jung, and N. S. Choi, “Power Electronics,” Moon Un Dang, pp. 59, 2011 (in Korean)
- [7] Y. H. Lho, “LED Wavelength Comparator and Method Thereof,” PCT 2013-168, 2013
- [8] “Data Sheet of SMD LED RL-T11PWSC-A0FT-60,” Raytron Ltd, pp. 1- 5, 2012
- [9] Young Hwan Lho, “Structure Modeling of 100 V Class Super-junction Trench MOSFET with Specific Low On-resistance,” Journal of IKEEE, Vol. 17, No. 2, 129-134, June 2013
- [10] “A Study on Thermal Characteristics of High Power LED Module,” The Report of LINC, Woosong University, pp. 16, 2014 (in Korean)
- [11] K. M. Kim, “Power Electronic Engineering Analyzed by PSIM Simulation,” Tae Young Publication, Inc., 2006 (in Korean)

BIOGRAPHY

Young Hwan Lho (Member)



1982 : BS degree in Electronics,
KyungPook National University.

1988 : MS degree in Electrical
Engineering, University of New
Mexico, U.S.A..

1993 : PhD degree in Electrical
Engineering, Texas A&M

University.

1982~1985 : Engineer, LG Information Communication
Co., Ltd.

1994~1995 : Senior Researcher, Korea Aerospace
Research Institute