

# 전력변환장치를 포함한 전력시스템에서 동조 필터를 이용한 고조파 저감 효과의 분석에 관한 연구

(A Study on the Analysis of Harmonics Reduction Effects Using Single-tuned Filters In a Power System Included Power Converters)

최홍규\* · 김경철\* · 강태은\*\* · 전기원\*\*

(Hong-Kyoo Choi · Kyung-Chul Kim · Tae-Eun Kang · Ki-Won Chun)

## 요 약

전력변환기와 같은 비선형 부하의 사용증가는 전원 전력설비시스템에 고조파를 발생시킨다. AC/DC 변환설비는 전력시스템에서 중요한 고조파 발생원이 되고 있다. 고조파를 포함하는 전류와 전압은 전기설비에 고장과 오동작 등과 같은 나쁜 영향을 미친다. 고조파 문제를 해결하는 일반적인 방법으로는 고조파 필터를 사용한다. 본 논문에서는 EDSA 고조파 분석 프로그램을 사용하여 고조파를 제거하는 동조필터를 설치하여 그 효과를 검증하였다.

## Abstract

The increasing use of non-linear loads such as power electronics draw highly distorted currents from the utility system. Converter circuit used in AC/DC conversion are one of the major harmonics sources in power system. High harmonics currents and voltages will cause equipment damage and disturb the plant operation.

The common solution to harmonics problem is to use harmonics filters. In this paper simulation results used the EDSA harmonics analysis program verifying the effects of the single-tuned filter for harmonic elimination are presented.

## 1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발전에 따라서 전력변환기의 보급증대로 고조파로 인한 설비장해가 많이 발생하고 있다[1]. 고조파 발생원 중에서 전력변환 장치는 정현파의 일부 구간만을 통전하기 때문에 비선형 고조파 전류를 발생시켜 전원측에 전압의 왜형이 발생하여 계통내의 다른 설비까지도 소음이나 과열, 제어장치의 오동작등과 같은 나쁜 영향을 미친다.

본 논문에서는 고조파의 개념을 설명하고, 고조파

를 발생시키는 각종 설비와 고조파가 기기에 미치는 영향을 검토하고, 고조파 저감기술을 조사하였다. 사례 연구로 주요 고조파 발생원인 전력변환 장치를 포함한 전력 시스템을 구성하여 EDSA 고조파 해석 프로그램[2]을 사용하여 고조파 특성을 검토하고, 적절한 동조 필터를 설치하여 고조파 저감효과를 검증하였다.

## 2. 고조파·장해 및 저감대책

전력분야에서 상용주파수(60Hz)보다 높은 주파수를 일반적으로 고조파라고 한다. 전압이나 전류의 파

\*정회원 : 홍익대학교 전기공학과 교수  
\*\*정회원 : 홍익대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
접수일자 : 2000년 5월 18일

전력변환장치를 포함한 전력시스템에서 동조 필터를 이용한 고조파 저감 효과의 분석에 관한 연구

형은 정현파인데, 어떤 원인에 의하여 파형이 왜곡되면 왜형파가 되며 비정현 주기파라고 한다. 고조파는 상용주파수의 배수인 주파수를 포함하는 정현파 전압이나 전류를 말한다[3].

고조파를 발생하는 전기설비는 변압기, 전기로, 각종 변환장치등이 있다. 변압기 철심의 자화 특성은 직선적이 아니라 히스테리시스 현상으로 변압기에 정현파 교류 전압을 인가하면 여자전류는 많은 기수 고조파를 포함하는 왜형파가 된다.

전기로는 고철을 아크열에 의해 용해, 정련한다. 아크는 전기적으로 과도현상을 연속으로 일으키는 상태가 되므로 고조파 전류를 함유하게 된다. 고조파 함유율의 예를 표1에서 보여주고 있다.

표 1. 고조파 발생기기의 고조파 전류 함유율  
Table 1. Harmonic Current Contents of Typical Electric Facilities

기 기 명	차수별 고조파 함유율(pu)							
	1	3	5	7	9	11	13	17
규소강 변압기	1	0.5	0.2	0.1	0.02	0.01	-	-
6상 변환장치	1	-	0.18	0.12	-	0.06	0.02	0.01
아크로	1	-	0.07	0.02	-	-	-	-

전력변환 장치는 싸이리스터의 특성인 제어의 용이성, 빠른 응답성, 고효율성, 보수의 용이성 등으로 널리 사용하고 있다. 그림1은 6개의 싸이리스터를 이용한 전력변환 장치의 등가회로이다.

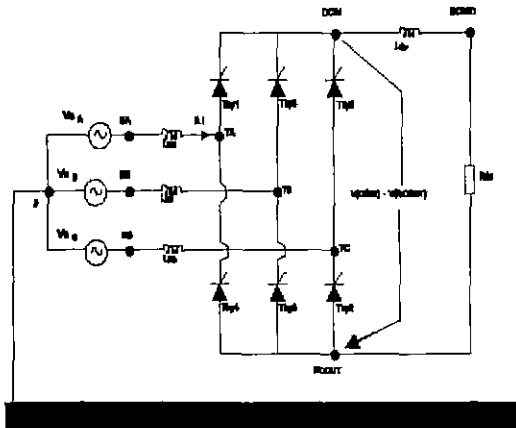


그림 1. 6펄스 싸이리스터 변환기의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent Network for Six-pulse Thyristor Converter Circuit

일본의 고조파 장해 조사의 결과를 보면 전력용 콘덴서의 영향이 가장 큰 것으로 나타나 있다. 표2는 고조파가 각종 기기에 미치는 영향을 나타내고 있다 [4].

표 2. 고조파가 기기에 미치는 영향  
Table 2. Harmonic Effects on the Machine

기기명	내 용
콘덴서	고조파 전류에 대한 회로의 임피던스가 감소하여 과도 전류가 유입하여 과열, 소손, 진동, 소음의 발생
케이블	증성선 과열
변압기	소음 발생, 철손과 동손의 증가, 용량 감소
형광등	역률 개선용 콘덴서나 쇼크 코일의 과열이나 소손
통신선	전자유도에 의한 잡음
유도 전동기	진동토크로 인한 회전수 변동, 손실 증가
음향 기기	다이오드, 트랜지스터, 콘덴서 등의 고장, 수명이나 성능 저하, 잡음
제어 장치	제어 신호의 위상 착오에 의한 오동작
계전기	고조파 전류, 전압에 의한 설정 변화로 인한 오동작
차단기	과대한 고조파 전류에 의한 오동작

전력용 콘덴서는 역률 개선용으로 널리 사용되고 있다. 고조파 전류가 있는 회로에 전력용 콘덴서가 있으면 전류 흐름의 방향을 바꿀 수가 있다. 그림2와 같은 전력 계통에서 고조파 발생원과 콘덴서 회로 사이에 공진을 일으키면 전압 왜곡은 확대되어 커지므로 문제가 발생한다.

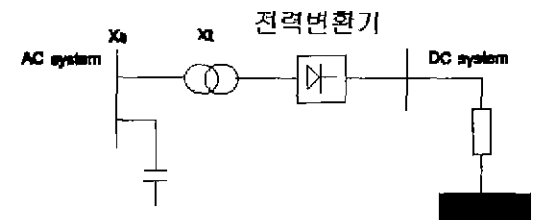
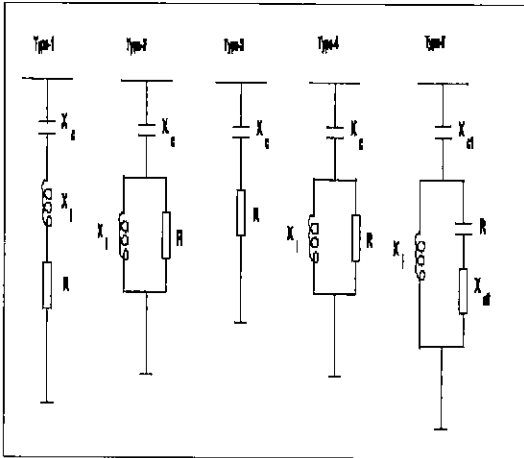


그림 2. 전력용 변환기를 포함하는 전력 시스템  
Fig. 2. A Simple Example System Including a Converter System

전력 계통에서 발생하는 고조파를 적정값 이하로 억제하기 위해서는 고조파를 발생하는 기기마다 고

조파양의 저감대책이 필요하다. 가장 많이 쓰이고 있는 고조파 저감 대책으로는 그림3과 같은 필터를 설치하는 것이다.



- Type-1: Single-tuned filter,
- Type-2: 2nd order damped filter,
- Type-3: 1st order high-pass damped filter,
- Type-4: 2nd order high-pass damped filter,
- Type-5: 3rd order high-pass damped filter

그림 3. 고조파 필터의 종류  
Fig. 3. Types of Harmonics Filters

전력계통에서 고조파 문제의 측정기준은 총합 왜형율(Total harmonics distortion, THD)으로 나타낸다. 총합 왜형율,

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

여기서  $V_1$ 은 기본파 전압,  $V_2, \dots, V_n$ 은 고조파 전압이다.

왜형율은 일정값 이하로 규정하는데, 여기서는 미국 IEEE 기준을 표3에 간추려 놓았다[5].

표 3. IEEE 추천 총합왜형율 제한값  
Table 3. IEEE Recommended THD Limits

전압	전용 계통	일반 계통
2.4 - 69 KV	8.0 %	5.0 %
154 KV 이상	1.5 %	1.5 %

### 3. 사례연구

전력계통에서 전력변환 장치가 고조파 장애를 일으키는 영향을 분석하고, 적절한 동조필터를 설치하여 고조파 저감효과를 알아 보기로 한다. 그림4는 사례연구 전력계통도이다. 모선1은 사례연구 시스템의 등가 전력원이고, 모선 5, 7, 9, 10은 역을 개선용 전력 콘덴서를 포함하는 부하이다. 모선 12는 연구하고자 하는 전력변환 장치가 있는 모선을 나타낸다.

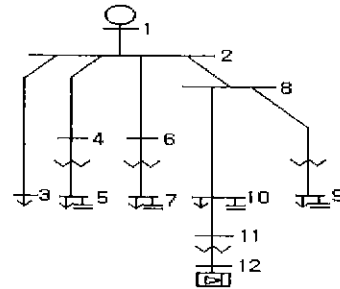


그림 4. 사례연구 전력 시스템  
Fig. 4. A Power System for the Case Study

조류계산 및 고조파 해석에 필요한 데이터는 표4 - 6에 있다.

표 4. 변압기 데이터  
Table 4. Transformer Data

BUS ID		KVA	Voltage(KV)	Phase Shift(deg)	Remarks
From	To				
11	12	7500	44Y/4 16Y	0.0	
4	5	6000	44Y/13.8Y	0.0	
6	7	4000	44Y/13.8Y	0.0	
8	9	3000	44Y/13.8Y	0.0	

모선12에 고조파 발생원으로 1000kVA 6-pulse 전력변환 장치가 설치되어 있다. 표7은 전력변환 장치

전력변환장치를 포함한 전력시스템에서 동조 필터를 이용한 고조파 저감 효과의 분석에 관한 연구

표 5. 선로 데이터  
Table 5. Line Data

Branch List		Impedance(Ohms)		Remarks
From	To	R	X	
1	2	2.253	5.182	
2	3	0.058	1.278	
2	4	3.68	8.015	
2	6	1.084	2.98	
2	8	1.084	1.704	
4	5	0.8379	16.7577	Xformer
6	7	1.2568	25.1366	Xformer
8	9	0.0	41.3013	Xformer
8	10	3.72	41.3013	
10	11	0.62	7.84	
11	12	0.593	11.8593	Xformer

표 6. 모선 데이터  
Table 6. Bus Data

BUS ID	Voltage(volts)	Capacitor(KVAR)	Remarks
1	44000	0	Swing bus
2	44000	0	
3	44000	0	
4	44000	0	
5	13800	1050	
6	44000	0	
7	13800	3600	
8	44000	0	
9	13800	750	
10	44000	3600	
11	44000	0	
12	4160	0	

의 주파수 성분을 나타내고, 그림5는 전력변환 장치

의 전류 파형과 왜형율을 나타낸다.

표 7. 전력변환 장치의 주파수 성분  
Table 7. Harmonics Contents of the Converter

Harmonic s	Magnitude(%)	Angle(deg)
1	100.0	0
5	18.0	180
7	11.8	0
11	5.5	180
13	4.0	0
17	1.9	180
19	1.3	0
23	0.9	180
25	0.85	0
29	0.7	180
31	0.61	0
35	0.45	180
37	0.37	0

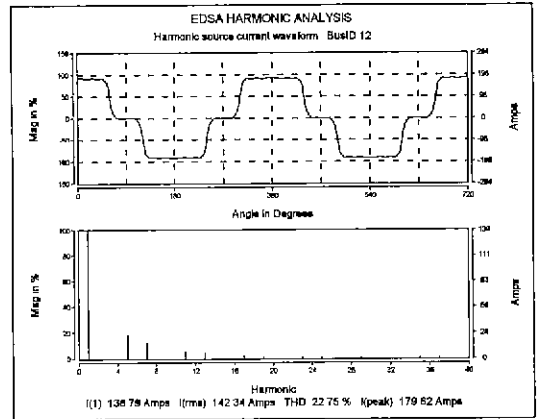


그림 5. 전력변환 장치의 전류 파형 그래프  
Fig. 5. The Current Waveform of the Converter

표7의 주파수 성분에서 알수 있듯이 제5고조파 성분이 18%나 된다. 5고조파를 제거하기 위한 필터를 모선12에 설치하여 효과를 검증하고자 한다. 그림3의 여러 동조 필터 중에서 비교적 가격이 저렴하고 설

제가 간단한 Type-1 동조 필터를 적용한다. 사용된 필터의 제원(표8)과 주파수 응답 곡선(그림6)은 아래와 같다.

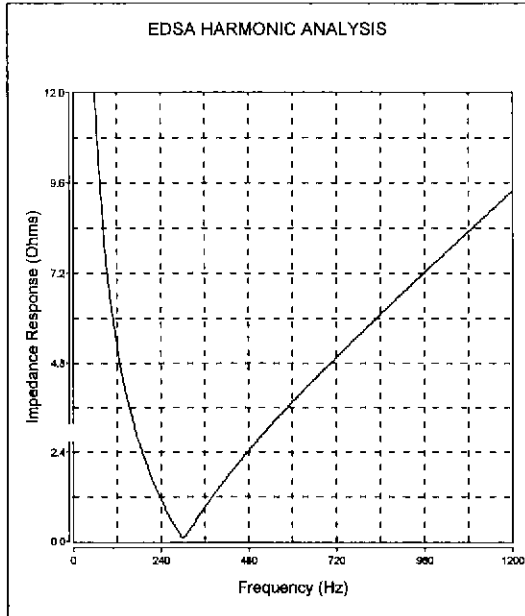


그림 6. 필터의 주파수 응답 곡선  
Fig. 6. Frequency Response of the Harmoni Filter

표 8. 필터 데이터  
Table 8. Filter Data

Type	Single-tuned
Voltage	4160 Volts
Description	5th filter
Resistor	0.1 Ohms
Capacitor	25 Ohms
Inductor	0.5 Ohms
Grounded	No

EDSA 고조파 분석 프로그램을 이용한 결과를 표와 그래프로 요약한다. 표9는 12 모선의 필터 설치 전후의 전압 왜형을 비교표이고, 표10은 11 선로의 필터 설치 전후의 전류 왜형을 비교표이다. 그림7 과 8은 모선12에 대한 필터 설치 전후의 전압 파형이다.

그림9 와 10은 선로 #11 -#12에 대한 필터 설치 전후의 전류 파형을 나타낸다. 그림11 과 12는 모선12에 대한 필터 설치 전후의 임피던스 응답 곡선이다.

표 9. 전압 왜형율

Table 9. Total Harmonics Distortion for Bus Voltages

BUS ID	Without Filter		With Filter	
	V(rms)	THD(%)	V(rms)	THD(%)
1	44000	0.04	44000	0.03
2	44998	0.58	45180	0.44
3	44998	0.58	45180	0.44
4	45197	0.80	45380	0.71
5	14306	1.31	14364	1.28
6	45261	0.40	45444	0.37
7	14893	1.28	14952	0.27
8	45130	0.81	45370	0.57
9	14389	2.55	14466	2.56
10	45623	1.67	46134	0.75
11	45593	1.70	46150	0.68
12	4295	2.16	4386	0.42

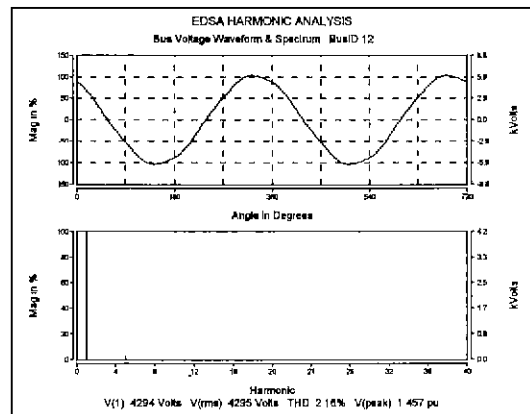


그림 7. 필터 설치전 모선12의 전압  
Fig. 7. Bus Voltage Waveform at Bus #12 without the Filter

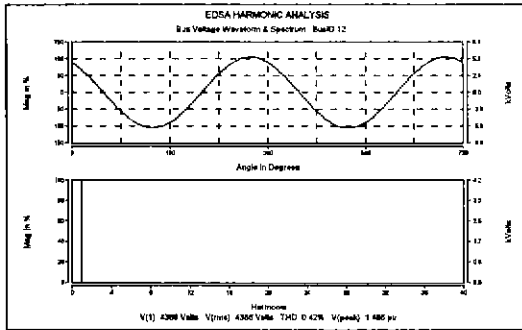


그림 8. 필터 설치후 모선12의 전압  
Fig. 8. Bus Voltage Waveform at Bus #12 with the Filter

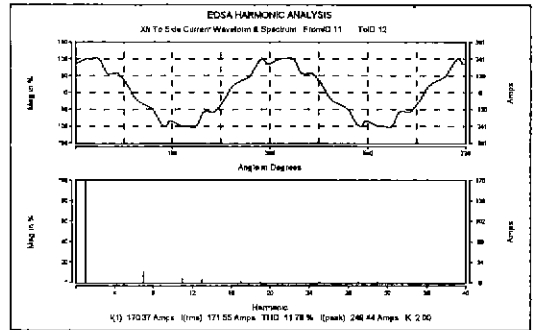


그림 10. 필터 설치후 선로#11 - #12의 전류  
Fig. 10. Branch Current Waveform from #11 to #12 with the Filter

표 10. 선로 전류의 왜형률  
Table 10. Total Harmonics Distortion for the Line Currents

BUS ID		Without Filter		With Filter	
From	To	I(rms)	THD(%)	I(rms)	THD(%)
1	2	117.07	3.97	137.75	2.15
10	11	13.46	22.74	16.22	11.79
11	12	13.46	22.74	16.22	11.79
2	3	0	0	0	0
2	4	14.34	8.73	14.40	8.95
2	6	51.08	6.49	51.19	1.90
2	8	52.80	13.34	72.68	3.69
4	5	14.34	8.73	14.40	8.95
6	7	51.08	6.49	51.19	1.90
8	9	10.41	17.14	10.48	17.90
8	10	42.79	14.38	62.48	1.55

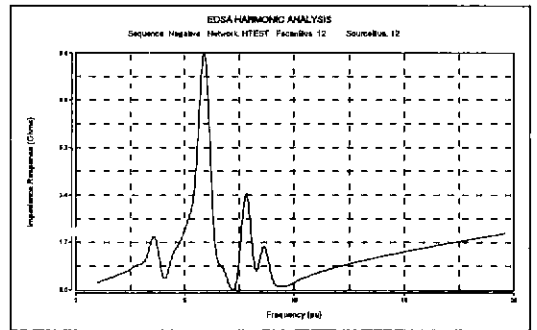


그림 11. 필터 설치전 모선12의 임피던스 응답 곡선  
Fig. 11. Impedance Response at Bus #12 without the Filter

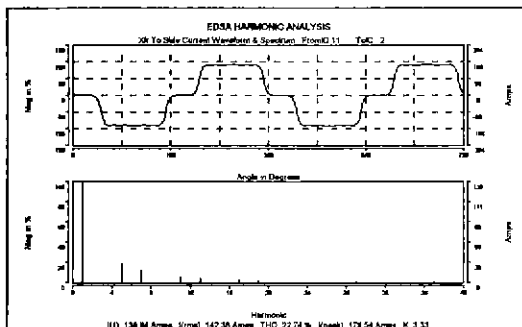


그림 9. 필터 설치전 선로#11 - #12의 전류  
Fig. 9. Branch Current Waveform from #11 to #12 without the Filter

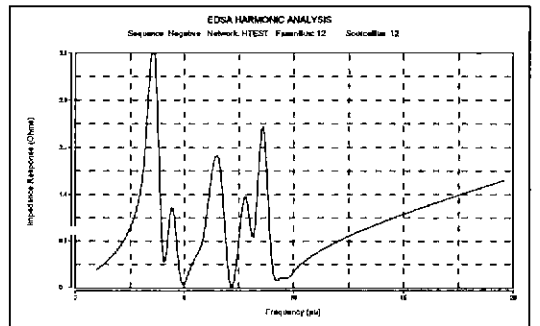


그림 12. 필터 설치후 모선12의 임피던스 응답 곡선  
Fig. 12. Impedance Response at Bus #12 with the Filter

모선12에 고조파 발생원으로 전력변환 장치가 있

기 때문에 사례연구 전력계통 전반에 고조파가 존재한다. 모선12에 고조파를 제거하기 위한 필터를 설치하면 고조파 성분이 감소됨을 알수 있다. 특히 모선 12의 전압 왜형율은 필터 설치 전후를 비교하면 2.16%에서 0.42%로 감소 하였고, 선로#11 - #12의 전류 왜형율은 필터 설치 전후를 비교할 때 22.74%에서 11.79%로 약 11% 정도 감소되어 필터의 효과를 검증할 수 있었다.

#### 4. 결 론

최근에는 사이리스터를 이용한 전력변환기의 확산으로 전력계통으로 유입되는 고조파가 증대되어 많은 장애를 일으키고 있다. 전력계통의 전압 고조파의 왜형율에 제한치를 설정하고 고조파 발생원에 필터를 설치하여 고조파 전류 성분을 제거하기 위한 저감대책을 세워야 한다.

본 논문에서는 고조파에 대한 기본이론과 사례연구를 통해 고조파 장애대책으로 널리 쓰이고 있는 동조 필터의 설치 효과를 컴퓨터 시뮬레이션으로 검증하였다. 최근 전력변환기를 사용하는 전기설비의 보급 증대로 고조파 장애 발생이 심각한 문제로 대두되고 있으므로 비교적 가격이 저렴하고 설치하기가 쉬운 동조 필터를 현장에 적용하면 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] "전력계통의 고조파 장애분석", 한국전기안전공사, 1994.
- [2] EDSA User Guide, "Electrical Power Systems Harmonics Analysis", EDSA Micro Corporation, 1997.
- [3] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, and H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [4] "고조파 저감기술 현황과 전망", 대한전기학회, 기술조사보고 제7호, 1993.
- [5] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems", IEEE Std 519-1992.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 최 홍 규 (崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 1975 홍익대학교 (공학사) 1977년 연세대학교 (공학석사). 1992년 홍익대학교 (공학박사) 현재 홍익대학교 전기공학과 교수, 전기 설비 연구소 소장

##### 김 경 철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1984년 New Mexico State University 전기공학과 졸업(석사) 1988년 University of Texas at Arlington 전기공학과 졸업(박사). 현재 홍익대학교 전기공학과 교수

##### 강 태 은

1960년 1월 18일생. 1993 대전산업대 전기공학과 졸업. 1995년 건축 전기 설비 기술사. 1996년 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 박사 과정 수료

##### 전 기 원 (田基元)

1940년 2월 26일생. 1966년 명지대학교 전기공학과 졸업 1978년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 박사 과정 수료