

# 인천국제공항 여객터미널의 고조파분석에 의한 저감대책 강구

(Harmonics Analysis and Reduction of Incheon International Airport)

김용하\* · 이성준 · 김동근 · 오석현 · 김미예

(Young-Ha Kim · Sung-Jun Lee · Dong Kun Kim · Suk-Hyun Oh · Mi-Ye Kim)

## 요 약

본 논문에서는 측정·분석을 수행한 인천국제공항 여객터미널의 전력계통에 고조파 저감을 위한 고조파필터를 설계하여 이를 적용하였다. 특히 고조파를 다량 발생시키는 기기들에 대하여 향후 대표스펙트럼 선정을 위하여 고조파 측정을 수행하였다. 또한 EDSA를 사용하여 Simulation을 수행하여 수동필터의 고조파 저감효과를 분석하였으며, 또한 APF(Active Power Filter)와 ZSF(Zero Sequence Filter)의 설계를 수행하였다.

## Abstract

In this paper, we perform the harmonic filter design for Incheon international airport, especially passenger terminal based on the results of measurement and analysis. Also, we show the waveform of machines which produce harmonics as a harmonic source. For harmonic filter design, we propose the APF(Active Power Filter) and ZSF(Zero Sequence Filter) design. Also, we simulate the filter effects using EDSA package. The results show the effectiveness of the method.

Key Words : Power quality, Harmonics, Spectrum, EDSA, APF, ZSF, THD, TDD

## 1. 서 론

전기에너지는 매우 편리한 에너지이며 현대 산업의 원동력이자 인간의 생활을 유익하게 해 주는 편의상품이다. 편의를 위하여 발전한 기술에서 고조파에 대한 문제는 필연적으로 점점 커지고 있으며, 전력을 사용하는 소비자들에 의한 전력품질 향상 요구

도 날로 커져 가고 있다. 전력품질 저하는 전력전압 설비가 고조파전류의 발생원으로 작용하여 이 고조파 전류가 각 계통을 따라 전원까지 역류하는 현상이라 할 수 있다. 공항과 같은 중요 시설에서는 전력 품질을 안정적으로 유지하는 것에 관심이 커지고 있다[1].

인천국제공항에서 측정한 고조파 분석결과를 요약하면 Load Center 각각의 측정지점에서 전압 THD(Total Harmonic Distortion)는 규제치를 만족하였으나 전류TDD(Total Demand Distortion)는 규제치를 크게 초과하여 그 대책이 요구되었다. 따라서 본 논문에서는 EDSA를 이용하여 수동필터 설계

\* 주저자 : 인천대학교 전기공학과 교수  
Tel : 032-770-8434, Fax : 032-766-8434  
E-mail : yhkim@incheon.ac.kr  
접수일자 : 2004년 8월 31일  
1차심사 : 2004년 9월 2일  
2차심사 : 2004년 10월 7일  
심사완료 : 2004년 10월 12일

인천국제공항 여객터미널의 고조파분석에 의한 저감대책 강구

에 의한 저감효과를 분석하였으며, 고조파의 저감대책으로 APF(Active Power Filter)와 ZSF(Zero Sequence Filter)의 설계를 수행하였으며, 인천공항 여객터미널 계통에 적용하여 성능을 입증하였다.

## 2. 고조파를 다량으로 발생시키는 대표기기의 측정

고조파를 다량 발생시키는 기기들을 측정하여 향후 기기설치시 규제기준을 제정하기 위해서 그림 1에서부터 그림 8까지 고조파를 발생시키는 대표적인 기기들의 전류파형을 측정하였으며, 각각의 비선형 부하에 대한 스펙트럼을 표시하였다. 여기서 비선형부하란 불연속적인 부하 또는 부하의 임피던스가 전압원의 주기 동안 내내 변화하는 부하를 의미한다.

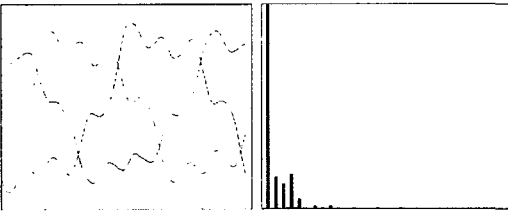


그림 1. Light 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 1. Light current-waveform and spectrum

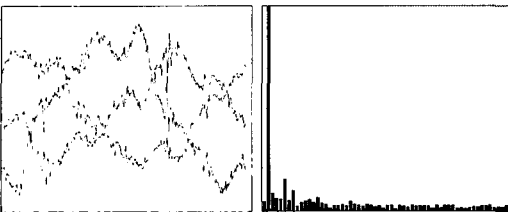


그림 2. Escalator 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 2. Escalator current-waveform and spectrum

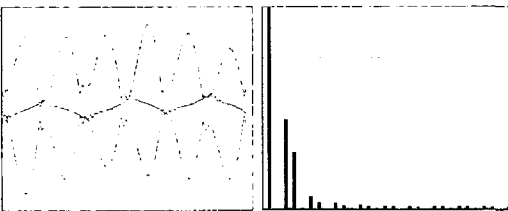


그림 3. MCC 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 3. MCC current-waveform and spectrum

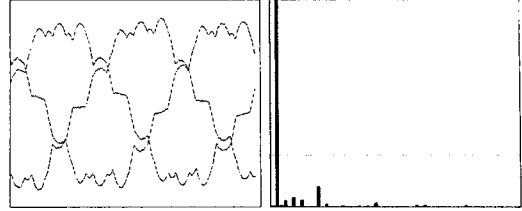


그림 4. GPS 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 4. GPS current-waveform and spectrum

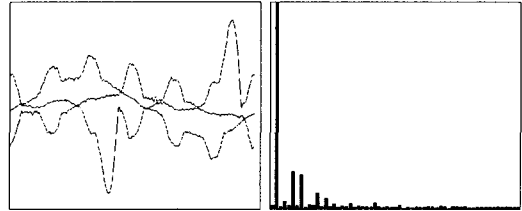


그림 5. BHS 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 5. BHS current-waveform and spectrum

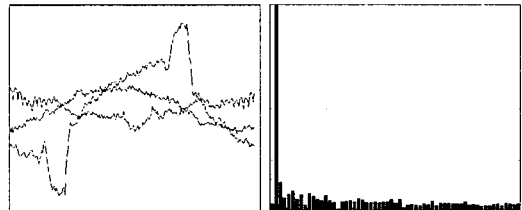


그림 6. Elevator 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 6. Elevator current-waveform and spectrum

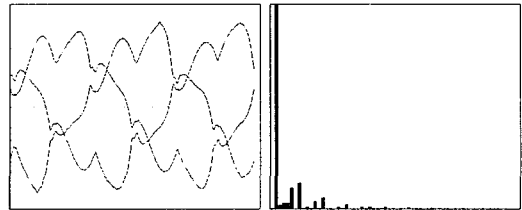


그림 7. UPS 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 7. UPS current-waveform and spectrum

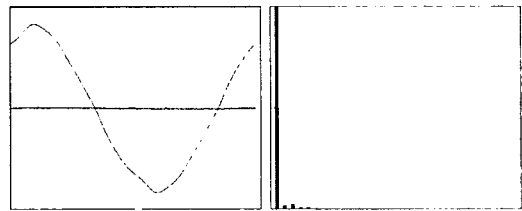


그림 8. X-ray 전류파형과 스펙트럼  
Fig. 8. X-ray current-waveform and spectrum

이 기기들의 왜형율과 개별고조파 함유율은 표 1과 같이 측정되었다.

표 1. 고조파 발생기기의 왜형률과 함유율  
Table 1. THD of harmonic source

측정 지점	왜형률		고조파 함유율(기본파 기준)									
	전압 THD [%]	전류 THD [%]	전압[%]					전류[%]				
			3 조파	5 조파	7 조파	9 조파	11 조파	3 조파	5 조파	7 조파	9 조파	11 조파
Light	3.0	28.9	1.4	2.1	1.8	0.3	0.1	17.3	13.7	18.8	5.3	1.1
Escalator	2.6	53.3	1.4	2.0	1.2	0.3	0.2	23.7	36.9	20.0	11.1	10.9
MCC	2.7	59.4	1.3	2.0	1.5	0.3	0.2	11.7	49.4	30.8	2.7	7.1
GPS	3.0	13.0	0.5	1.3	0.7	0.3	2.2	4.0	5.1	4.2	0.6	10.6
BHS	2.1	98.1	0.4	1.9	1.0	0.2	0.5	68.4	54.5	36.1	38.4	36.9
Elevator	2.6	133.7	1.5	1.2	2.1	0.3	0.4	49.1	72.3	54.2	44.6	41.3
UPS	2.9	26.2	1.6	1.5	2.3	0.3	0.4	5.4	19.2	15.8	1.3	4.5
X-ray	3.0	262.8	1.5	1.8	2.4	0.3	0.3	54.7	58.2	84.8	49.9	47.9

위와 같은 결과로서 대표적인 비선형 부하인 Light, Escalator, MCC(Motor Control Center), GPS(Global Position System), BHS(Baggage Handling System), Elevator, UPS(Uninterrupted Power Supply), X-ray 등이 다량의 고조파가 발생되고 있는 것으로 측정되었으며, 고조파를 저감시키기 위하여 개별로 부하특성에 맞는 고조파필터를 시설하는 것이 중요한 것으로 판단된다[2][3].

### 3. 저감필터의 설계 및 적용

#### 3.1 측정결과

고조파의 THD는 식 (1)과 같이 기본파 실효치에 대한 고조파 실효치의 합으로 나타낸다.

변압기 2차측에 연결된 부하는 운전시간대에 따라 변화하므로 항상 일정하지 않기 때문에 발생하는 고조파의 발생량도 부하의 운전상태에 따라 달리 표현할 필요가 있다. 따라서 부하의 운전조건에 따라 고조파의 발생량을 표현하는 방법으로 일정기간(15 또는 30분)동안 최대 부하전류의 퍼센트로서 전체 수용 왜형률과 전류  $I_{TDD}$ 로 나타내며 식 (2)로 정의된다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} \quad (2)$$

여기서  $I_L$ 은 기본파 주파수에서 최대 수용 부하 전류값을 의미한다[4][5].

한편 인천국제공항 여객터미널내의 변압기 30개소의 2차측에서 고조파를 측정된 값 및 대책장구의 필요성을 요약하면 표 2와 같다.

표 2. 측정지점의 고조파 왜형률 및 판정결과  
Table 2. Voltage THD, Current TDD and classification of results

측정 지점	전압 THD [%]	개별고조파				전류 TDD [%]	개별고조파				판정
		전압THD[3%]					전류TDD[4%]				
		3 조파	5 조파	7 조파	9 조파		3 조파	5 조파	7 조파	9 조파	
A10	2.5	1.3	1.7	1.3	0.8	3.2	27.6	7.8	10.4	6.4	가능성
A20	3.2	0.7	2.5	1.3	0.5	5.6	4.6	30.2	18.0	3.2	대책장구
A30	2.7	0.9	1.9	1.2	0.8	2.8	19.0	15.1	11.7	7.6	가능성
B10	2.3	1.0	1.4	1.5	0.5	3.7	17.7	4.8	11.5	3.6	가능성
B20	2.5	0.7	2.1	1.6	0.3	4.2	5.0	13.2	4.4	1.6	가능성
B30	2.1	1.3	1.0	1.1	0.6	4.8	17.8	17.8	15.5	3.9	가능성
C10	3.4	1.5	2.9	1.9	0.5	6.4	15.7	11.2	6.6	1.4	대책장구
C20	2.3	0.5	1.9	1.3	0.4	2.1	3.2	8.9	5.1	1.9	불필요
C30	3.1	1.2	1.7	1.0	0.5	6.4	22.6	4.7	15.7	2.1	대책장구
D10	2.8	0.7	2.2	2.2	0.5	3.2	9.6	15.5	8.5	2.7	가능성
D20	3.1	0.9	2.6	1.2	0.4	4.3	8.1	27.1	11.5	1.9	가능성
D30	3.4	1.3	2.7	1.1	0.7	5.4	14.8	15.5	8.8	5.2	대책장구
F10	4.0	0.9	3.0	1.5	0.4	5.3	8.0	10.9	9.5	1.2	대책장구
F20	3.9	0.8	3.1	2.7	0.6	4.3	5.9	9.9	3.76	2.0	불필요
F30	3.8	0.8	2.7	2.3	0.6	4.2	11.3	12.5	13.3	3.1	가능성
G10	3.6	1.0	2.6	2.8	0.5	4.8	7.9	10.9	7.4	1.2	불필요
G20	3.7	0.9	2.5	2.4	0.7	3.7	6.7	7.6	5.7	1.6	불필요
G30	3.4	0.9	2.5	2.5	0.5	3.6	9.0	7.9	8.6	2.8	불필요
H10	4.4	0.6	3.5	2.4	0.5	7.3	13.3	16.4	11.9	1.7	대책장구
H20	3.6	0.9	3.1	2.4	0.5	3.2	6.6	9.4	3.5	1.3	불필요
H30	4.4	1.5	2.9	1.9	0.7	6.0	15.3	7.4	17.1	2.9	대책장구
K10	3.1	1.0	2.5	3.4	0.6	4.8	5.8	15.5	8.5	2.6	가능성
K20	2.9	1.0	2.5	1.4	0.4	3.7	6.7	17.5	9.1	1.8	가능성
K30	3.2	1.6	2.5	0.9	0.7	6.5	17.4	10.6	8.6	5.1	대책장구
L10	4.1	1.6	2.8	1.5	0.4	6.2	13.0	7.6	17.7	1.9	대책장구
L20	3.2	0.8	2.8	2.8	0.4	3.5	6.4	16.3	9.1	2.5	가능성
L30	3.4	1.4	2.2	1.4	0.5	5.5	17.0	10.3	20.4	2.4	대책장구
M10	2.6	1.0	2.0	2.7	0.5	3.5	12.9	7.7	5.1	1.9	가능성
M20	2.8	0.6	2.4	1.2	0.4	3.9	9.3	48.0	28.1	3.9	가능성
M30	2.5	1.0	1.7	0.9	0.5	3.1	14.3	6.5	15.0	4.3	가능성

단 [숫자 %] : IEEE Standard-519의 규제기준

위의 표에서 IEEE Standard-519의  $I_{TDD}$  규제치인 5[%]를 넘는 경우에는 필터 설계 대상으로 분류하여 대책이 필요한 지점으로 정하였다. 또 IEEE Standard-519의  $I_{TDD}$  규제치인 5[%]를 넘지 않았지만 개별고조파(3,5,7,9조파)가 IEEE Standard-519의

인천국제공항 여객터미널의 고조파분석에 의한 저감대책 강구

개별고조파 규제를 넘는 경우로 고조파에 의한 영향이 발생할 가능성이 있는 지점으로 분류하였다 [6][7][8].

3.2 EDSA를 이용한 수동필터 설치에 따른 저감효과 Simulation

본 절에서는 EDSA의 Auto-Filter Design 기능을 사용하여 수동필터를 설치하였을 때 저감효과를 Simulation 하였다[9]. Simulation을 통한 계통에서의 고조파 영향을 저감하기 위한 B20, B211, B212, B213, B221, B222, B223의 지점에 설치 결과를 보면 필터 설치 전과 비교하여 각각의 지점에 필터를 설치한 후의 고조파 저감 결과는 PCC에서 고조파 규제치를 만족시키면서 거의 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 Simulation을 위해 공계통을 간소화하여 나타낸 것이다.

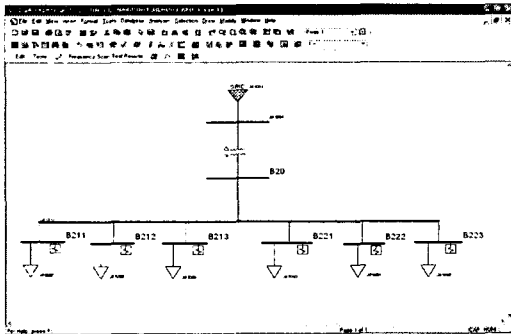


그림 9. Simulation 계통도  
Fig. 9. Single-line diagram for Simulation

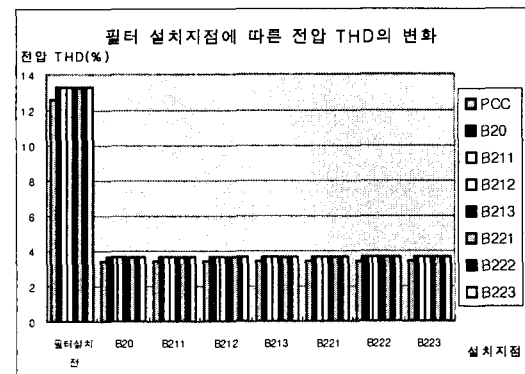


그림 10. 필터 설치지점에 따른 전압 THD의 변화  
Fig. 10. Variation of voltage THD

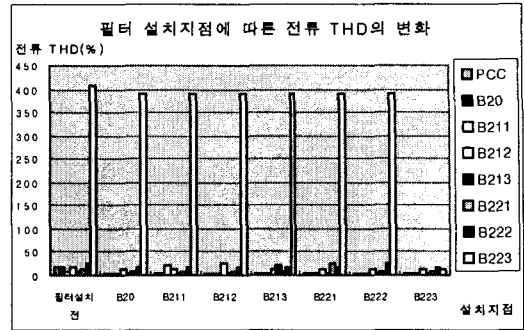


그림 11. 필터 설치지점에 따른 전류THD의 변화  
Fig. 11. Variation of current THD

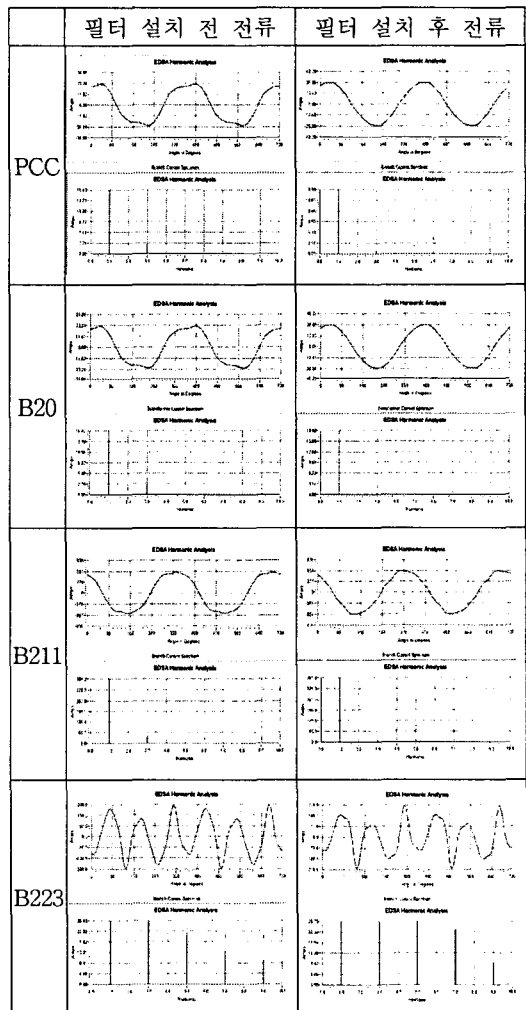


그림 12. 필터 설치 전·후의 전류파형  
Fig. 12. Variation of current-waveform

각 지점에 필터가 설치될 때 전압·전류 THD의 변화추이를 보면 그림 10, 11과 같다.

그림 11은 필터설치 지점에 따른 전류THD의 변화를 나타내고 있다.

그림에서와 같이 각 지점에 필터를 설치하였을 때 감소되는 효과를 보이나 Passive Filter는 하나의 고조파(보통 저차의 특정 고조파)와 동조되는 특성을 갖는다. 그래서 다수 차의 고조파를 발생시키는 부하에 모두 적용시키기에는 대량의 콘덴서를 요구하기 때문에 부하의 특성이 충분히 고려되지 않은 것이라 경제적인 측면에서 각 부하의 특성을 충분히 고려할 수 있는 ZSF와 APF의 설치가 요구된다. 참고적으로 EDSA에서의 Passvie Filter 설치 Simulation 전후의 전류의 파형은 그림 12와 같다.

### 3.3 APF와 ZSF의 용량선정 및 저감효과

ZSF는 영상분 고조파가 많이 발생하고 중성선의 고조파 전류성분이 많이 발생하는 곳에 설치하여 Triplen 고조파의 제거를 목적으로 사용된다.

우선 설치위치는 중성선의 고조파 전류가 발생하는 곳의 중성선에 연결되어 영상분 전류를 흡수하는 개념으로 동작하게 된다.

또 APF의 경우 전체고조파의 THD가 규정에 만족되었을 지라도 개별고조파가 제한치를 위반한 경우 개별고조파들의 저감에 유리하며 APF는 고조파가 발생될 때 역위상의 파형을 발생시켜 고조파를 개선시키는 개념으로 동작하게 된다[10].

각각의 측정 장소에 대하여 영상분 고조파의 발생이 심했던 C10, C30, H30, K30, L10 지점에 ZSF를 설치하고, 제5차와 7차 고조파의 발생이 심했던 A20, D30, F10, H10, L30지점에는 APF를 적용하는 것으로 하였다.

#### 3.3.1 APF의 용량선정

개별고조파가 제한치를 위반한 경우에 1개소에서 집중 보상하는 방식을 취하는 지점에 설치하는 것이 유리하며, 이와 같은 지점은 A20, D30, F10, H10, L30에 적용된다.

$$APF = \frac{THD_{rms} - THD'_{rms}}{H} \quad (3)$$

단,  $THD_{rms}$  : 개선전의  $THD_{rms}$   
 $THD'_{rms}$  : 개선목표치의  $THD_{rms}$   
 $H$  : 보상효율

이 식을 A20지점에 적용하여 용량을 계산하면 현재의  $THD_{rms}$ 와 개선목표치의  $THD'_{rms}$ 와 보상효율  $H$ 에 의하여 APF의 전류보상 용량이 100[A]로 계산된다.

#### 3.3.2 ZSF의 용량선정

영상분 고조파의 발생이 현저하게 나타나는 지점에 적용하기 유리하며 이와 같은 지점은 C10, C30, H30, K30, L10에 적용된다.

$$ZSF = \frac{(\frac{n}{r} \times V \times \sqrt{3})}{1000} \quad (4)$$

단  $n$  : 중성선 전류 용량,  
 $v$  : 전압  
 $r$  : 경험적 요소에 의한 지수

이 식을 영상분 고조파의 발생이 규제치를 위반한 C10에 적용하여 계산하면 ZSF의 고조파전류 보상 용량이 600[A]로 계산된다.

위의 과정들을 각 측정지점에 반복하여 적용시킨 결과를 요약하면 표 3과 같다.

표 3. 저감필터의 용량  
 Table 3. Capacity of power filter

$I_{TDD}$ 초과개소	저감필터 용량[A]
A20	100
C10	600
C30	600
D30	100
F10	100
H10	150
H30	600
K30	600
L10	600
L30	100

## 인천국제공항 여객터미널의 고조파분석에 의한 저감대책 강구

또한 계산된 필터의 용량을 적용하여 개선된 고조파 저감효과의 결과를 요약하면 표 4와 같다.

표 4. 고조파 저감 효과  
Table 4. Reducing effect of harmonics

$I_{TDD}$ 초과 개소		$V_{THD}$		$I_{TDD}$		개선 장치명
		개선전	개선후	개선전	개선후	
여객터미널	A20	3.2[%]	<5.0[%]	5.6[%]	3.0[%]	APF
	C10	3.4[%]	2.4[%]	6.4[%]	3.7[%]	ZSF
	C30	3.1[%]	2.1[%]	6.4[%]	3.5[%]	ZSF
	D30	3.4[%]	<5.0[%]	5.4[%]	2.7[%]	APF
	F10	4.0[%]	<5.0[%]	5.3[%]	0.9[%]	APF
	H10	4.4[%]	<5.0[%]	7.3[%]	0.9[%]	APF
	H30	4.4[%]	3.3[%]	6.0[%]	3.9[%]	ZSF
	K30	3.2[%]	2.2[%]	6.5[%]	3.7[%]	ZSF
	L10	4.1[%]	3.1[%]	6.2[%]	4.3[%]	ZSF
	L30	3.4[%]	<5.0[%]	5.5[%]	2.9[%]	APF

전압의 경우 개선후의 값이 다소 증가하였으나 전압 규제치를 만족하고 있기 때문에 앞의 표 3과 같이 계산된 고조파 저감필터의 용량을 선정하였다.

그림 13은 필터 설치 전·후를 비교하여 그 저감효과를 나타내고 있으며, 고조파 저감필터의 설치시 각 부하의 특성에 맞게 설치하여야 함을 알 수 있다.

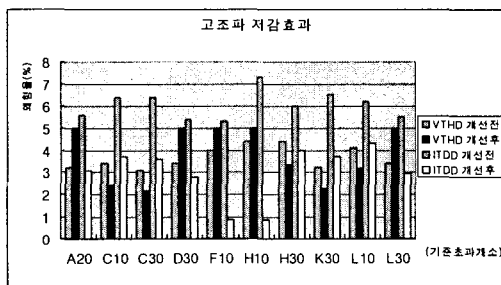


그림 13. 필터 설치 전·후의 감소 효과  
Fig 13. Reducing effect of THD

이와 같이 고조파 저감필터의 설계에서부터 계통의 적용에까지 저감효과를 확인 할 수 있었다.

## 4. 결 론

인천공항의 여객터미널계통을 측정하고 분석하여

각 측정지점에서 발생한 고조파를 저감시키기 위한 고조파 저감필터 설계에 관하여 설명하였다. 또 설계된 저감필터 용량을 동일계통에 적용하여 저감효과를 나타냄을 확인하였다. 또 저감필터의 설치시 부하의 특성과 발생고조파의 특성에 맞는 필터의 선정이 중요함을 알 수 있었다.

향후 인천국제공항의 전체적인 전력설비에 대하여 전력품질을 안정적이고 지속적으로 관리할 수 있는 제도적절차가 수립되어야 할 것으로 판단된다. 또 전력품질에 관한 전반적인 Simulation 검토를 사전에 수행함으로써 경제적인 측면이나 신뢰적인 측면에 있어서 최적을 도모할 수 있도록 해야 할 것으로 판단된다.

아울러 본 논문에서 수행한 고조파의 관리 이외에도 전력품질에 영향을 미치는 Sag, Swell, Notch, Flicker 등에 대한 전반적이며 종합적인 검토 및 대책 수립이 이뤄져야 할 것으로 판단된다[11].

"본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아전자물류연구센터의 지원에 의한 것임"

## References

- (1) Yongha Kim, Jongkook Kim, "A Study on harmonic analysis and reduction of power system", University of Incheon, 2000, 06.
- (2) Enrique Acha, Manule Madrigal, "Power Systems Harmonics" Johan Wiley & Sons, Inc 2001.
- (3) Theodore Wildi, "Electrical Machines, drivers, and power system" Prentice Hall, 2002.
- (4) Roger C. Dungan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty "Electrical Power Systems Quality" McGraw-hill 1996.
- (5) Jonggyeum Kim, Eunwoong Lee, "Analysis on the Harmonics Characteristics Due to Increase & Decrease of Nonlinear Load" KIEE Vol52P No3 pp100~106 2003. 09.
- (6) IEEE Std 519-1992, "Recommended Practices & Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems" IEEE-519-1992.
- (7) International Standard IEC 61000-3-6, 2000.
- (8) International Standard IEC-61000-3-4, 2000.
- (9) EDSA Technical 2000 User's Guide, 2001. 8.
- (10) Yongha Kim, Bongsu Hwang, "A study on application of ANP for making final solution of harmonic reduction in distribution system", University of Incheon, 2003.05.
- (11) Yongha Kim, Joonhee Yeon, "Harmonic analysis

considering Bus harmonic voltage constraints at IIA passenger terminal", University of Incheon, 2003. 06.  
※ ZSF and APF were developed by PQ Tech. Inc.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김용하 (金龍河)

1959년 5월 16일생. 1982년 고려대학교 전기공학과 졸업.  
1987년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.  
Tel : (032) 770-8434  
E-mail : yhkim@incheon.ac.kr

### 이성준 (李晟準)

1971년 5월 20일생. 2003년 인천대학교 전기공학과 석사졸업. 2004년~현재 동대학원 박사과정.  
Tel : (032) 770-4323  
E-mail : ezze@incheon.ac.kr

### 김동근 (金東謹)

1976년 12월 24일생. 2003년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 동대학원 석사과정.  
Tel : (032) 770-4323  
E-mail : duncun@hanmail.net

### 오석현 (吳錫賢)

1976년 4월 18일생. 2003년 인천대학교 전기공학과 졸업.  
2003년~현재 동대학원 석사과정 한국전력공사 근무.  
Tel : (032) 770-4323  
E-mail : ohsh2000@hanmail.net

### 김미예 (金美禮)

1980년 7월 2일생 2004년 인천대학교 전기공학과 졸업.  
2004년~현재 동대학원 석사과정.  
Tel : (032) 770-4323  
E-mail : gimmeeye@hotmail.com