

## 직류전동기 브러시 섬락에 따른 기계적 노이즈 신호의 주파수 분포

(Frequency Distribution of Mechanical Noise Signals for Ultrasonic Wave and AE Sensor with Brush Spark of DC Motor)

이상우\* · 김인식 · 이광식

(Sang-Woo Lee · In-Sik Kim · Kwang-Sik Lee)

### 요 약

본 연구에서는 운전중인 직류전동기의 브러시를 임의로 회전하여 브러시와 정류자편에 불꽃을 발생시켰을 때, 초음파센서와 AE센서를 이용하여 각각의 기계적 노이즈 신호를 검출하였으며, 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 또한 직류전동기의 브러시가 중성축에 정상적으로 위치하여 운전하고 있을 때, 초음파센서와 AE센서를 이용하여 각각의 자기적 노이즈 신호를 검출하였으며, 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 그리고 직류전동기의 브러시를 임의로 회전한 경우의 기계적 노이즈 신호 및 브러시가 중성축에 위치한 경우의 자기적 노이즈 신호를 비교·분석하였다. 실험 결과, 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 임의로 회전하여 검출한 초음파의 기계적 노이즈 신호는 브러시가 중성축에 정상적으로 위치하여 검출한 초음파의 자기적 노이즈 신호보다 대략 2.5~3.0배 증가되었다. 또한 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 임의로 회전하여 불꽃을 발생시켰을 때, AE의 기계적 노이즈 신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 주된 주파수 영역이 대략 1.3[MHz]~1.5[MHz]인 것으로 나타났다.

### Abstract

In this paper, the frequency spectra from respective mechanical noise signals detected using ultrasonic wave and AE(Acoustic Emission) sensor were analysed to under spark generation between brush and commutator side with arbitrarily 15° rotation for brush from the DC motor in operation. Also, the frequency spectra from respective magnetizing noise signals detected using ultrasonic wave and AE sensor were analysed to under neutral point for brush from the DC motor in normal operation. And the analyses and comparison between the mechanical noise signal and magnetizing noise signal of ultrasonic wave with brush location change from the DC motor in operation. As the experimental results, the mechanical noise signal of ultrasonic wave under spark generation between brush and commutator side with brush location change from the DC motor in operation were increased about 2.5~3.0 times than magnetizing noise signal of ultrasonic wave form the DC motor in normal operation. Also, the main frequency band for mechanical noise signals of AE under spark generation between brush and commutator side with brush location change from the DC motor in operation, appeared about 1.3[MHz]~1.5[MHz] by the fast fourier transform.

Key Words : Acoustic Emission Sensor, DC Motor, Ultrasonic Sensor, Spark, Fast Fourier Transform

\* 주저자 : 영남대 대학원 전기공학과 에너지 및 환경전자 연구실 박사  
Tel : 053-813-8230, Fax : 053-813-8230  
E-mail : lesawo77@dreamwiz.com

접수일자 : 2003년 7월 7일  
1차심사 : 2003년 7월 16일  
2차심사 : 2003년 8월 11일  
심사완료 : 2003년 10월 24일

## 1. 서 론

직류전동기는 교통기관은 물론이고 공업용과 동력용으로 그 수요가 널리 확대되고 있다. 그것은 다른 회전에 비해 직류전동기는 속도제어 뿐만 아니라 회전방향의 변환이 용이하기 때문에 여러 분야(예를 들면 금속압연기, 권상기, 공작기, 로봇 등)에서 광범위하게 사용하고 있기 때문이다.

직류직권전동기의 경우, 적은 부하에서는 전기자 권선에 최소전류가 흘러서 고속운전이 되고, 큰 부하에서는 전기자권선에 최대전류가 흘러서 저속운전이 되어 기동시에는 큰 토크(torque)를 발생한다. 이러한 특성으로 인하여 직류직권전동기는 부하의 변화에 따라 속응적으로 토크를 발생하므로 전기철도의 전차, 크레인 및 자동차의 엔진 기동기 등에 사용되고 있다[1].

직류전동기는 전기자, 계자, 정류자, 축, 베어링, 브러시, 브러시 홀더 등으로 구성되어 있다.

운전중인 직류전동기의 시험법으로는 브러시와 정류자편의 불꽃 발생 여부, 이상 진동이나 소음, 베어링의 과열 등이 있으며, 직류전동기에 전기자 반작용(armature reaction)이 발생하면, 브러시에 큰 단락전류가 흘러서 섬락이 발생 할뿐만 아니라 정류자(commutator)는 브러시와 접촉하여 온도가 높아진다[1].

운전중인 직류전동기, 권선형유도기, 동기기 등의 절연열화상태를 비전기적으로 검출하여 진단할 경우에는 여러 가지 노이즈 신호가 중첩되어 배경 노이즈로 나타나므로 기초적으로 이들 배경 노이즈에 대한 신호를 검출하여 분석할 필요가 있다. 따라서 운전중인 직류전동기에 정격부하를 인가하여 정상 운전하고 있을 때, 노이즈(이하 자기적 노이즈라 함) 신호를 검출하여 분석하였다. 그리고 운전중인 직류전동기의 베어링 마모, 축의 비틀림, 자체 진동 및 브러시 섬락 등에 의한 노이즈(이하 기계적 노이즈라 함) 신호를 분석할 필요성이 있으나, 임의로 브러시 섬락(spark)을 발생시켜 기계 노이즈 신호를 검출하여 분석하였다.

AE법(acoustic emission method)은 구조물의 응력과 변형에 따라 전파되는 탄성파를 검출하여 이상

유무를 상시 감시하는 것으로 이용되었으나, 최근 운전중인 권선형유도기, 동기기, 수차발전기 등의 절연열화상태를 진단하기 위하여 적용되고 있다[2][3]. 이러한 AE법은 측정장치가 간단하여 현장 적용이 용이하고, 여러 개의 센서를 동시에 부착하여 절연열화상태를 검출할 수 있는 이점이 있다[4][5].

본 실험에서는 운전중인 직류전동기에 정격출력을 인가하여 정상적으로 운전하고 있을 때, 초음파 센서와 AE센서를 이용하여 각각 자기적 노이즈 신호를 검출하고 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

또한, 운전중인 직류전동기에 정격출력을 인가하여 정상적으로 운전하고 있을 때, 중성축을 회전방향으로 임의로 회전시켜 브러시와 정류자편의 마찰에 의한 섬락을 발생시킨 경우, 초음파센서와 AE센서를 이용하여 각각 기계적 노이즈 신호를 검출하고 이를 주파수 스펙트럼으로 분석하였다. 그리고 자기적 노이즈 신호와 기계적 노이즈 신호의 특성을 비교·분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 초음파 및 AE 신호의 검출 방법

표 1은 실험에 사용된 직류전동기의 규격을 나타낸 것이다. 표 1에 나타낸 바와 같이 직류전동기의 정격전압은 120[V], 정격속도는 1,800[rpm]인 것을 선정하였다. 그리고 본 실험에 사용된 직류전동기의 형태는 직권을 사용하였다.

표 1. 실험에 사용된 직류전동기의 규격  
Table 1. Specification of DC motor in test

Type of Tests	Quantity
DC motor/Generator Module	
Rating voltage	120[V]
Rating current	3[A]
Rotational frequency	1,800[rpm]
Rating output	120[W]
Horse power	1/4[hp]
Electrodynamometer Module	
Torque	0~27[lbf.in]

직류전동기에 9[lbf.in]의 부하 토크를 인가하고 그 토크를 유지한 상태에서 회전속도를 1,745[rpm]으로 가감하여 정격출력 186[W]로 설정하였다.

운전중인 직류전동기에서 초음파센서는 정류자편에 접촉되어 있는 브러시로부터 5.0[cm] 이격된 거리에서 초음파의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호를 각각 검출하였으며, AE센서의 경우에는 직류전동기의 고정자 외함 부분에 부착하여 AE의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호를 각각 검출하였다.

직류전동기의 기계적 노이즈 신호는 정상운전 중인 직류전동기에서 브러시를 임의로 회전방향으로 15° 까지 회전시켜 브러시와 정류자편의 불꽃이 과다하게 발생하게 하였을 때, 초음파 및 AE의 기계적 노이즈 신호를 각각 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석하였다.

**2.2 실험장치 및 방법**

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 검출된 초음파의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호와 AE의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호는 20[dB]의 프리앰프를 거쳐서 대역통과필터로 저역대의 노이즈 성분 제거 후, 26[dB]의 주 앰프로 다시 증폭해서 디지털 오실로스코프로 검출하였다.

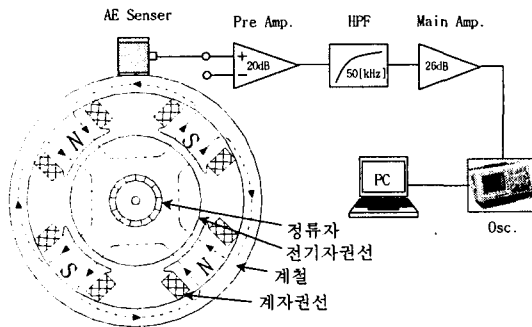


그림 1. 실험장치의 개략도  
Fig. 1. Skeleton of experimental set-up

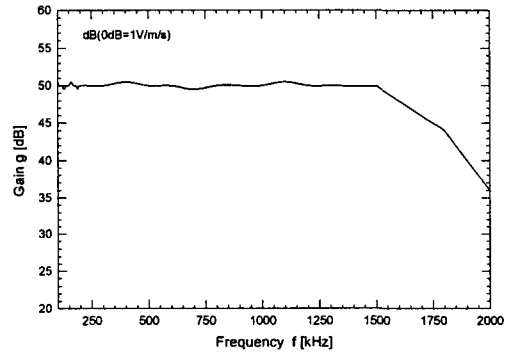
그림 2(a) 및 그림 2(b)는 AE센서(wide-band AE sensor)와 AE-912 증폭기의 이득 특성을 각각 나타

낸 것이다.

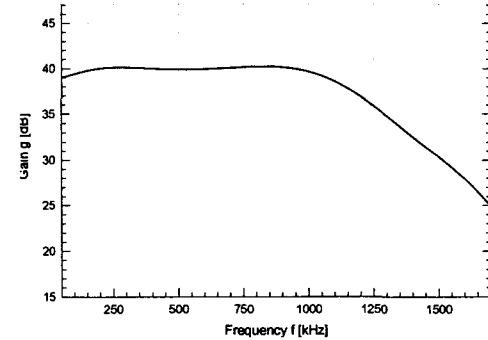
그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 AE센서의 주파수 대역은 약 100[kHz]~2.0[MHz]이며, 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 AE-912 증폭기의 주파수 대역은 약 100[kHz]~1.5[MHz]인 것을 사용하였다.

공중(空中)용 초음파센서(ultrasonic wave sensor)의 경우에는 공진 주파수가 200[kHz]±10[kHz] 및 400[kHz]±20[kHz]인 압전변환소자를 사용하였다.

운전중인 직류전동기의 각종 특성에 따라 전파되는 초음파의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호와 AE의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호는 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS3014)를 사용하여 각각 검출하였다. 그리고 각각 검출한 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호는 동일 기종의 오실로스코프로 주파수 스펙트럼하여 분석하였다.



(a) AE센서



(b) AE-912 증폭기

그림 2. AE센서 및 AE-912 증폭기의 주파수 이득  
Fig. 2. Characteristics frequency gain for AE sensor and AE-912 amplifier

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 초음파센서 200[kHz]인 경우

##### 3.1.1 브러시가 중성축에 위치한 경우 초음파의 자기적 노이즈 신호와 주파수 스펙트럼

직류전동기에 정격부하 및 정격속도를 공급하여 정상적으로 운전한 경우에도 브러시와 정류자편의 마찰에 의한 불꽃(spark)이 미소하게 발생되었다. 이는 정류자편이 운전중 항상 브러시와 접촉하여 마찰이 생길 뿐만 아니라 불꽃 발생에 의해 온도가 높아지기 때문이다. 그림 3은 정격속도 및 정격부하를 공급하여 정상적으로 운전중인 직류전동기에 대한 초음파의 자기적 노이즈 신호를 검출한 것이다. 사용된 초음파센서는 공진 주파수 200[kHz]이다.

그림 3에 나타난 바와 같이 초음파의 자기적 노이즈 신호에 대한 파형의 지속시간(event duration)은 약 130[μs]인 것으로 나타났으며, 검출된 신호의 주기간 간격이 매우 좁아 그 형태가 사인적(sinusoidal)으로 변하지 않는 것으로 관측되었다.

그림 4는 그림 3의 초음파의 자기적 노이즈 신호를 주파수 스펙트럼으로 분석한 것이다.

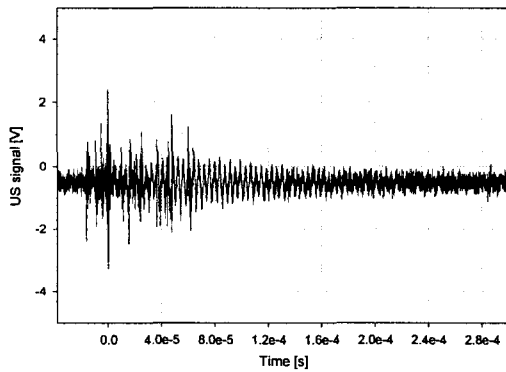


그림 3. 초음파의 자기적 노이즈 신호(200[kHz])  
Fig. 3. Magnetizing noise signal of ultrasonic wave(200[kHz])

그림 4에 나타난 바와 같이 200[kHz] 주파수 대역의 크기는 작은 반면에 260[kHz]부근의 주파수 대역

이 가장 크게 나타났으며, 120[kHz]과 1,280[kHz]의 주파수 대역도 200[kHz] 주파수 대역보다 큰 것으로 나타났다. 직류전동기의 브러시에 미소 불꽃이 일어나는 경우, 초음파의 자기적 노이즈 신호의 지속시간은 약 130[μs]이며, 주된 주파수 대역은 260[kHz]인 것으로 관측되었다.

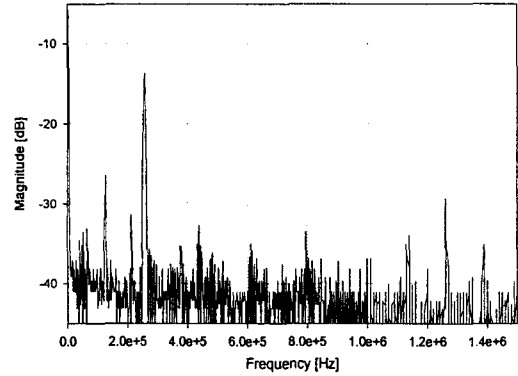


그림 4. 초음파의 자기적 노이즈 신호에 대한 주파수 스펙트럼(200[kHz])  
Fig. 4. Frequency spectra with magnetizing noise signal of ultrasonic wave(200[kHz])

##### 3.1.2 브러시를 회전방향으로 15° 회전하였을 때 초음파의 기계적 노이즈 신호와 주파수 스펙트럼

브러시(bush)는 항상 정류자편과 접촉하여 전기 자권선과 외부회로를 상호 연결하는 역할을 한다. 만약 중성축이 이동하면 브러시로 접촉된 위치에 있는 자계가 이동하기 때문에 브러시에 의해 단락(short)된 코일은 자속을 끊고 그 내부에 기전력을 발생한다. 이러한 기전력 때문에 브러시에는 큰 단락전류가 흐르며 불꽃이 발생한다.

그림 5는 정격속도 및 정격부하를 공급하여 정상적으로 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 15° 까지 회전하였을 때 초음파의 기계적 노이즈 신호를 검출한 것이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 초음파의 기계적 노이즈 신호의 지속시간은 약 160[μs]인 것으로 나타났다. 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 회전하였을 때, 초음파의 기계적 노이즈 신호는 그림 3에 나타난 초음파의 자기적 노이즈 신호에 비해 약 2.5배가 증가된 것으로 나

직류전동기 브러시 섬락에 따른 기계적 노이즈 신호의 주파수 분포

타났다. 그리고 자기적 노이즈 신호보다 초음파의 기계적 노이즈 신호의 형상은 독립적인 이벤트(event)가 관측되었으며, 문턱(threshold)값 이상의 히트(hit)도 명확하게 나타났다.

그림 6은 그림 5에 나타낸 초음파의 기계적 노이즈 신호를 주파수 스펙트럼으로 분석한 것이다.

그림 6에 나타난 바와 같이 그림 4의 정상적으로 운전중인 경우와는 달리 200[kHz] 주파수 대역의 크기가 매우 큰 것으로 나타났으며, 260[kHz]부근의 주파수 대역도 크게 나타났다.

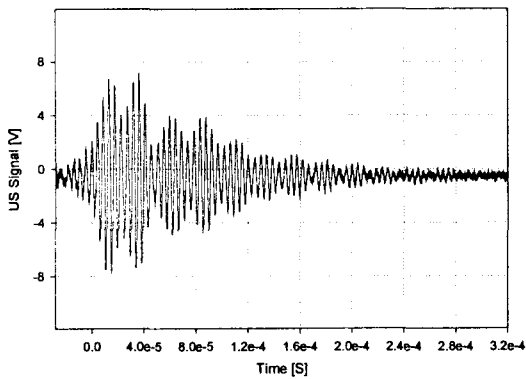


그림 5. 초음파의 기계적 노이즈 신호(200[kHz])  
Fig. 5. Mechanical noise signal of ultrasonic wave(200[kHz])

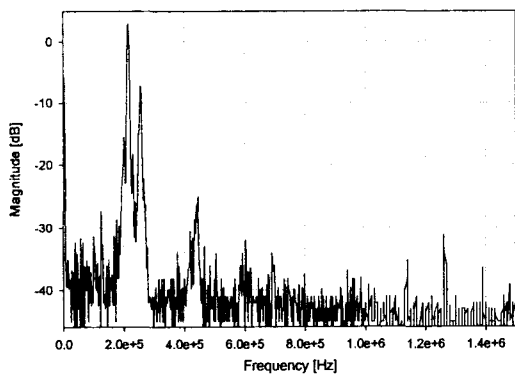


그림 6. 초음파의 기계적 노이즈 신호에 대한 주파수 스펙트럼(200[kHz])  
Fig. 6. Frequency spectra with mechanical noise signal of ultrasonic wave(200[kHz])

브러시가 회전기의 회전방향으로 회전함에 따라

정류자편과의 마찰에 의해 불꽃이 과다하게 발생하여 초음파의 기계적 노이즈 신호는 크게 분포되었으나, 공진주파수 200[kHz]인 초음파센서를 사용하였으므로 그 대역이 가장 큰 것으로 나타났다.

또한, 그림 5에 나타난 신호는 사인적으로 변하는 단일 주파수 성분을 가지고 있어서 그 주파수 대역이 매우 크게 나타난 반면, 그림 3에 나타난 신호의 형상은 사인적으로 변하지 않은 것이므로 여러 개의 주파수 대역의 성분을 가지는 것으로 나타났다.

### 3.2 초음파센서 400[kHz]인 경우

#### 3.2.1 브러시가 중성축에 위치한 경우 초음파의 자기적 노이즈 신호와 주파수 스펙트럼

그림 7은 정격속도 및 정격부하를 공급하여 정상적으로 운전중인 직류전동기에 대한 초음파의 자기적 노이즈 신호를 검출한 것이다. 초음파센서는 공진주파수 400[kHz]을 사용하였다.

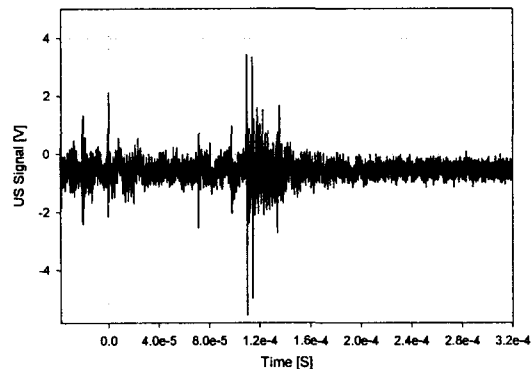


그림 7. 초음파의 자기적 노이즈 신호(400[kHz])  
Fig. 7. Magnetizing noise signal of ultrasonic wave(400[kHz])

그림 7에 나타난 초음파의 정상운전 노이즈 신호는 지속시간이 약 50[μs]인 것으로 나타났으며, 그림 3의 200[kHz]인 초음파센서에 비해 매우 빠른 것으로 관측되었다. 그림 8은 그림 7에 나타낸 초음파의 자기적 노이즈 신호를 주파수 스펙트럼으로 분석한 것이다.

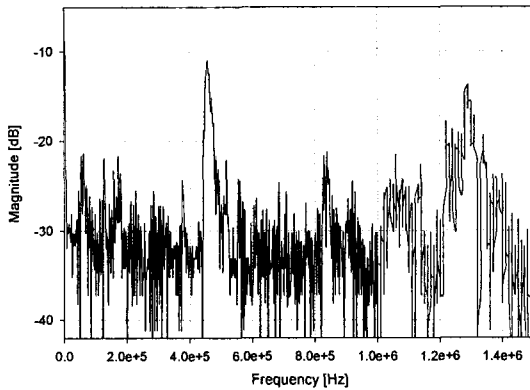


그림 8. 초음파의 자기적 노이즈 신호에 대한 주파수 스펙트럼(400[㎐])  
 Fig. 8. Frequency spectra with magnetizing noise signal of ultrasonic wave(400[㎐])

그림 8에 나타난 바와 같이 450[kHz] 주파수 대역의 크기는 가장 큰 것으로 나타났으며, 1,280[kHz]의 주파수 대역도 큰 것을 나타냈으며, 그림 7에 나타난 초음파의 자기적 노이즈 신호의 형상은 사인적으로 변하지 않아 여러 개의 주파수 대역의 성분을 가지는 것으로 나타났다.

### 3.2.2 브러시를 회전방향으로 15° 회전하였을 때 초음파의 기계적 노이즈 신호와 주파수 스펙트럼

그림 9는 정격속도 및 정격부하를 공급하여 정상적으로 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 15° 까지 회전하였을 때의 초음파의 기계적 노이즈 신호를 검출한 것이다. 그림 9에 나타난 바와 같이 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 회전하였을 때, 초음파의 기계적 노이즈 신호는 그림 7에 나타난 초음파의 자기적 노이즈 신호에 비해 약 3.0배가 증가된 것으로 나타났다. 그림 10은 그림 9에 나타난 초음파의 기계적 노이즈 신호를 주파수 스펙트럼으로 분석한 것이다.

그림 10은 그림 8에 나타난 경우와는 달리 50[kHz]과 180[kHz]의 주파수 대역의 크기가 증가하였으며, 주된 주파수 대역은 450[kHz]인 것으로 나타났다. 그리고 1.1[MHz]~1.4[MHz]의 주파수 영역도 증가된 것으로 나타났다.

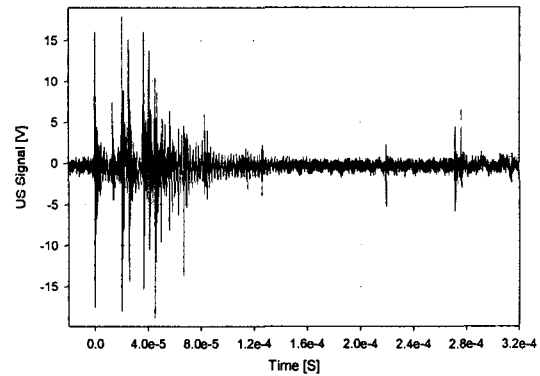


그림 9. 초음파의 기계적 노이즈 신호(400[㎐])  
 Fig. 9. Mechanical noise signal of ultrasonic wave(400[㎐])

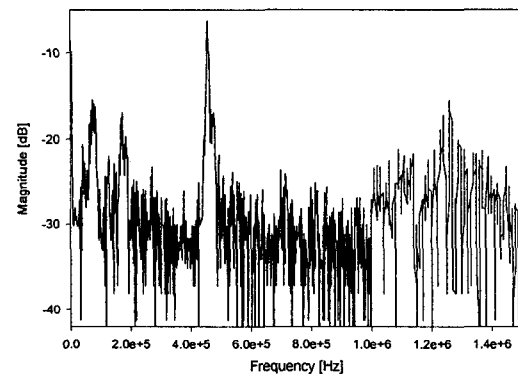


그림 10. 초음파의 기계적 노이즈 신호에 대한 주파수 스펙트럼(400[㎐])  
 Fig. 10. Frequency spectra with mechanical noise signal of ultrasonic wave(400[㎐])

## 3.3 광대역 AE센서의 경우

### 3.3.1 브러시가 증성축에 위치한 경우 AE의 자기적 노이즈 신호와 주파수 스펙트럼

그림 11은 정격속도 및 정격부하를 공급하여 정상적으로 운전중인 직류전동기에 AE의 자기적 노이즈 신호를 검출한 것이다. 사용된 광대역 AE센서는 주파수 대역이 100[kHz]~2.0[MHz]인 것을 선정하였다.

그림 11에 나타난 바와 같이 정상적으로 운전중인 직류전동기에서 AE의 자기적 노이즈 신호는 공진주파수 초음파센서를 이용한 초음파의 자기적 노이즈 신호에 비해 여러 개의 이벤트 영역이 분포된 것으로

직류전동기 브러시 섬락에 따른 기계적 노이즈 신호의 주파수 분포

로 나타났다. 또한 AE의 자기적 노이즈 신호는 매우 날카로운 것으로 관측되었다.

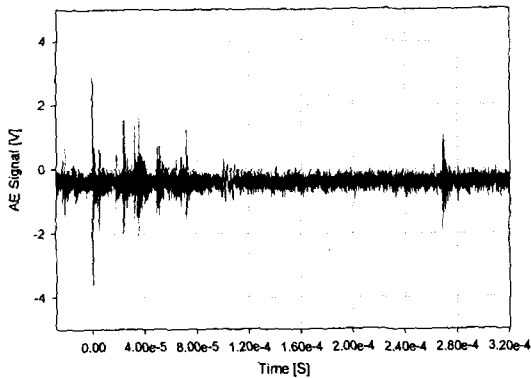


그림 11. AE의 자기적 노이즈 신호(2.0MHz)  
Fig. 11. Magnetizing noise signal of AE method(2.0MHz)

그림 12는 그림 11의 AE의 자기적 노이즈 신호를 주파수 스펙트럼으로 분석한 것이다.

그림 12에 나타난 바와 같이 전 주파수 대역의 크기가 거의 균일하였으나, 그 중 350kHz 부근의 주파수 영역들이 타 대역에 비해 조금 큰 것으로 나타났다.

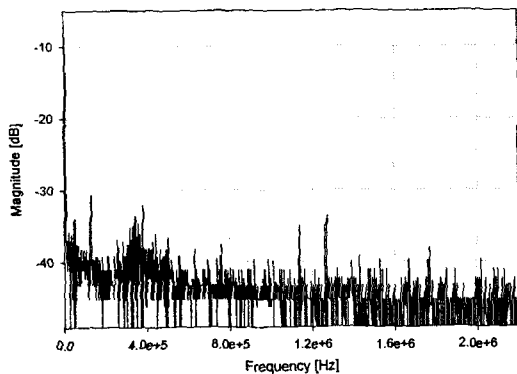


그림 12. AE의 자기적 노이즈 신호에 대한 주파수 스펙트럼(2.0MHz)  
Fig. 12. Frequency spectra with magnetizing noise signal of AE method(2.0MHz)

3.3.2 브러시를 회전방향으로 15° 회전하였을 때 AE의 기계적 노이즈 신호와 주파수 스펙트럼

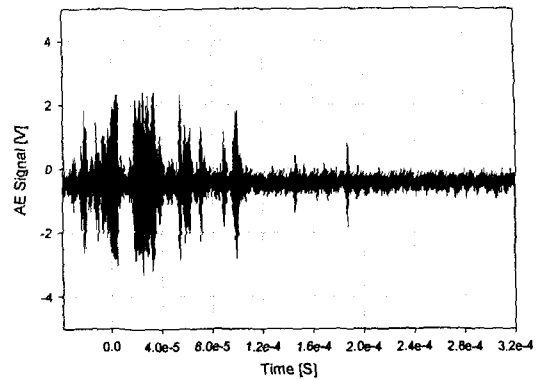


그림 13. AE의 기계적 노이즈 신호(2.0MHz)  
Fig. 13. Mechanical noise signal of AE method(2.0MHz)

그림 13은 정격속도 및 정격부하를 공급하여 정상 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 15° 회전하였을 때 AE의 기계적 노이즈 신호를 검출한 것이다. 그림 13에서 나타난 바와 같이 AE의 기계적 노이즈 신호는 그림 11에 나타난 AE의 자기적 노이즈 신호에 비해서 독립적인 여러 개의 이벤트가 나타났으며, 문턱값 이상의 히트들도 매우 많이 분포되는 것으로 관측되었다.

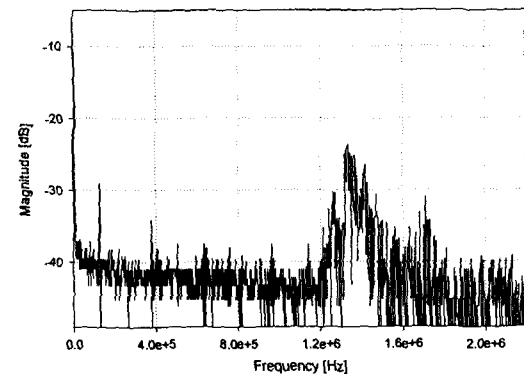


그림 14. AE의 기계적 노이즈 신호에 대한 주파수 스펙트럼(2.0MHz)  
Fig. 14. Frequency spectra by mechanical noise signal of AE method(2.0MHz)

그림 14는 그림 13에 나타난 AE의 기계적 노이즈 신호를 주파수 스펙트럼으로 분석한 것이다.

그림 14에 나타난 바와 같이 1.3MHz~1.5MHz의 주

파수 영역이 타 영역에 비해 크게 증가되었으며, 타 주파수 대역은 거의 일정한 것으로 나타났다.

따라서 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 이동하여 AE의 기계적 노이즈 신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 주된 주파수 대역이 1.35[MHz]인 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구는 운전중인 직류전동기에서 초음파와 AE의 자기적 노이즈 신호를 각각 검출하였으며, 운전중인 직류전동기의 브러시를 회전방향으로 임의로 회전하여 불꽃을 발생시켰을 때, 초음파와 AE의 기계적 노이즈 신호를 각각 검출하였다. 그리고 초음파와 AE의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호를 각각 주파수 스펙트럼으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파센서의 공진주파수가 200[kHz]인 경우, 초음파의 기계적 노이즈 신호는 초음파의 자기적 노이즈 신호보다 대략 2.5배 증가되었으며, 지속시간도 약 30[ $\mu$ s]정도가 지연되는 것으로 나타났다.
- 2) 초음파와 AE의 자기적 노이즈 및 기계적 노이즈 신호의 형상이 사인적일 때는 단일 주파수 영역이 매우 크게 분포되었으나, 비사인적일 때는 여러 개의 독립 주파수 영역이 분포된 것으로 나타났다.
- 3) 초음파센서의 공진주파수가 400[kHz]인 경우, 초음파의 기계적 노이즈 신호는 초음파의 자기적 노이즈 신호보다 대략 3.0배 증가된 것으로 나타났다.
- 4) 광대역 AE센서의 경우, AE의 기계적 노이즈 신호는 문턱값 이상의 히트들도 매우 많이 분포되는 것으로 나타났다. 그리고 AE의 기계적 노이즈 신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 주된 주파수 영역이 대략 1.3[MHz]~1.5[MHz]인 것으로 관측되었다.

이상의 결과로부터 직류전동기 및 동기기발전기 등을 비전기적으로 절연열화를 진단할 경우, 기초적으로 중첩되는 배경 노이즈 성분을 검출하여 분석함으로써 최적 조건의 센서 선정은 물론이고 비전기적인 절연열화의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로

사료된다.

#### References

- [1] Theodore Wildi, Michael J. De Vito, "Investigations in Electric Power Technology", Instructor's Edition, 1992.
- [2] 成烈文 외 7名, "AE센사를 이용한 수車發電機運轉中部分放電測定", 電學論B, 112卷 4号, 平成 14年.
- [3] 電氣書院編輯部 編, "設備診斷テクニック", 電氣書院, pp. 157-215.
- [4] L. E. Lundgaard, "Acoustic Partial Discharge Detection Practical Application", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, pp. 34-43, 1992.
- [5] P. M. Elefthriou, "Acoustic Emission-Based PD Source Location in Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 6, pp. 22-26, 1995.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 이상우 (李相雨)

1967년 4월 11일생. 1992년 경일대학교 전기공학과 졸업. 2000년 영남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남이공대학 강사.

##### 김인식 (金寅湜)

1953년 10월 3일생. 1974년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1991년 미국 University of Southern California대 초빙 교수. 현재 경일대학교 전기공학과 교수.

##### 이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology대 초빙 교수. 현재 영남대 공대 전자정보공학부 교수.