

Frequency-Time Analysis(Partition-FFT) for Tracking Detection

池昇昱[†] · 李相勳^{*} · 金忠年^{**} · 李春夏^{***} · 李廣植[§]
 (S. W. Jee · S. H. Lee · Ch. N. Kim · C. H. Lee · K. S. Lee)

Abstract - A electromagnetic waves are used for sensing in insulation diagnosis at electric machine or equipment. When it a method, waves are transformed into the FFT(Fast Fourier Transform); a kind of the process for data transformation. In a general way, a scientist use frequency band 30[MHz]~1[GHz] to applied field. If we are measured high frequency band, we will need to a high capacity hardware. Also a antenna has a fault on atmospheric phenomena, outside environment and the like.

In this paper We proposed new method for detecting electric equipment faulty state using only electric voltage which is generally measured in the electric and electronic field. It is called the Patition-FFT. The analytic method is this first divide measured voltage waves into equal parts, second each deal with give effect to the FFT, finally each results deal with a graphic method and gather graphic. We are compare Partition-FFT with discharge form by tracking tester. As the result it demonstrated that the Partition-FFT is applicable.

Key Words : FFT, Partion-FFT, Tracking Breakdown, Tracking Tester

1. 서 론

방전을 검출하기 위한 다양한 방법들이 방전 및 고전압 분야에서 오랜 동안 연구되어 왔다. 예전에는 오실로스코프(Oscilloscope)로 측정된 전압·전류 파형이나, 코로나 디텍터(corona detector)로 측정된 전하량으로 방전상태를 알 수 있었지만, 근래에 들어서는 방전 발생 시 수반되는 광, 음파나 초음파 혹은 전자파를 측정함으로써 방전을 검출할 수 있는 방법들이 많이 제시되고 있다.^{1),2)}

방전 검출에 전자파를 이용하는 경우, 각종 규정집 등에서, 권장하는 주파수 대역이 있을 정도로 보편화되어 있으며, 사용되는 센서(안테나)가 비접촉식으로 원거리 측정이 가능하고, 운전 중에도 측정이 가능한 잇점이 있어서 많이 사용되고 있다.³⁾

특히, 안테나와 함께 전자파 측정을 위해 필요한 스펙트럼 어널라이저(spectrum analyzer)의 경우, 주된 동작 알고리즘인 FFT(Fast Fourier Transform)가 널리 알려져 있고,

개인용 컴퓨터의 소프트웨어로도 이미 개발되어 있어서 몇몇 방전 연구자들 중에는 오실로스코프로 측정된 전압 파형을 직접 FFT하여 방전을 검출하려는 시도도 있다.⁴⁾

FFT 특성상 높은 주파수 대역을 관측하기 위해서는 샘플링 데이터 수를 많이 늘리거나 관측되는 전압 파형의 샘플링 간격을 줄여야만 된다. 이 때 FFT의 연산 횟수는 기하학적으로 늘게 되고, 그 만큼 고가의 장비가 요구된다.^{5),6)}

트래킹의 경우 비가 오는 등 주변이 습한 경우에 주로 발생되는데, 안테나가 비록 비접촉식이긴 하지만, 비가 오는 날 안테나를 들고 다닌다는 것이 쉬운 일은 아닐 것이다.

고전적으로 트래킹 관측에는 전류 파형이 이용되는데 전류 파형을 관측하려면 회로의 중간에 저항을 삽입해야하는 등의 번거로움이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 기상 조건에 따른 영향이나 측정의 번거로움이 적은 전압 파형의 관측만으로 트래킹을 관측해 낼 수 있는 새로운 방법으로 분할-FFT를 제시하고, 검출 능력을 시험하였다.

2. 기존 FFT에 문제 제기

2.1 가변 주파수 파형의 FFT

그림 1 (a)는 시간에 대하여 점진적으로 주파수가 변화하는 파형의 한 예를 Microsoft의 Excel 2002(이하 Excel)를 이용하여 임의로 만든 것이다. 앞 부분은 60[Hz], 중간 부분은 600[Hz], 끝 부분은 6,000[Hz]로 주파수가 점점 높아지는 정현파로서 전체 샘플링 데이터 수는 2,048개이다.

† 교신저자, 正會員 : 嶺南大 電氣工學科 博士課程
E-mail : skraken@chol.net

* 正會員 : 嶺南大 電氣工學科 博士

** 正會員 : (株)인터커넥션 責任研究員

*** 正會員 : 湖西大 環境安全工學部 教授 · 工博

§ 正會員 : 嶺南大 電子情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 7月 20日

最終完了 : 2004年 8月 16日

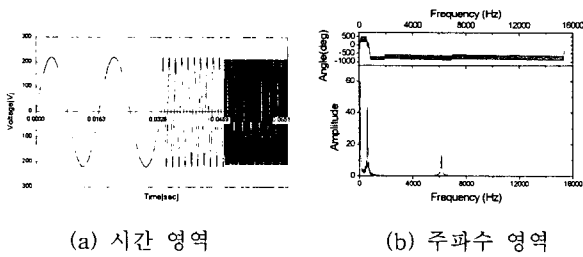


그림 1. 가변 주파수 파형과 FFT 결과
Fig. 1. Waveform of variable frequency and result

그림 1 (b)는 그림 1 (a)의 파형을 OriginLab의 Origin 7.0(이하 Origin)으로 FFT한 결과이다.

예상대로 60[Hz], 600[Hz], 6,000[Hz] 부근에서 높은 값을 보이고 있다. 그런데, 그림 1 (a)의 파형을 시간에 대하여 부분적으로 FFT한다고 가정하면, 0~0.0326[sec]에서는 주로 60[Hz], 0.0326~0.0489[sec] 범위에서는 600[Hz], 0.0489~0.0651[sec] 범위에서는 6,000[Hz] 성분이 주를 이룰 것이다.

즉, 동시에 세 주파수 성분이 모두 나타나는 것이 아니라, 시간이 지남에 따라 측정되는 주성분의 주파수가 60[Hz]에서 600[Hz], 6,000[Hz]로 점점 높아 질 것이다.

실제로 그림 1 (a)의 파형을 0.0081[sec]마다 0.0163[sec] 간격으로 자른 파형 7개(0~0.0163, 0.0081~0.0244, 0.0163~0.0326, ..., 0.0489~0.0651)를 각각 Origin을 이용하여 FFT 변환하고, 그 결과를 SPSS의 SigmaPlot 2000(이하 Sigma-Plot)의 3차원 mesh plot으로 재합성하여 처리한 것이 그림 2 (a)이다.

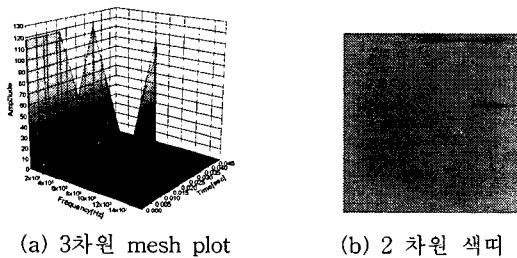


그림 2. 가변 주파수 파형의 분할-FFT
Fig. 2. Partition-FFT of variable frequency waveform

시간이 지남에 따라 각 주파수 성분들의 변화가 뚜렷이 나타나고 있다.⁷⁾

2.2 가변 진폭 파형의 FFT

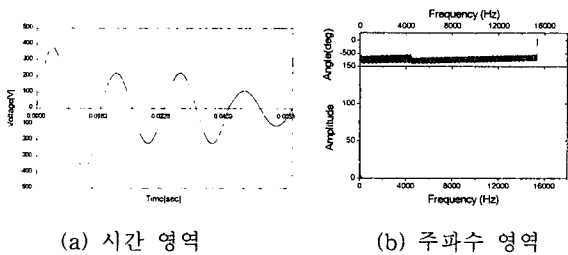


그림 3. 가변 진폭 파형과 FFT 결과
Fig. 3. Variable amplitude waveform and frequency result

그림 3 (a)의 파형은 주파수 60[Hz]의 정현파를 Excel 상에서 진폭을 달리하여 만든 정현파이다. 전체의 데이터가 2,048개로 구성되어 있으며 이를 Origin을 이용해 FFT한 결과가 그림 3 (b)이다.

예상대로 주로 60[Hz] 성분만이 보인다.

“2.1 가변 주파수 파형의 FFT”에서와 동일한 방법으로 FFT 및 3차원 mesh plot 처리를 행한 결과가 그림 4 (a)이다.

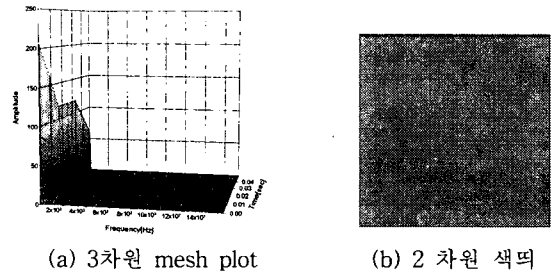


그림 4. 가변 진폭 파형의 분할-FFT
Fig. 4. Partition-FFT of variable amplitude waveform

진폭 가변의 경우 시간에 따른 주파수의 이동은 보이지 않고 진폭의 변화에 따라 Amplitude 값만이 변할 뿐이다. 이는 유한 신호의 시간 영역과 주파수 영역에서의 에너지가 동일하다는 Parseval의 정리로 설명이 가능하다.⁵⁾

3. 새로운 방법의 제시

3.1 가설

푸리에 변환은 함수 $f(x)$ 를, 일정 구간 p 에 대하여 주기적이라고 가정하고, 주기 p 에 대하여 정수 배의 주기를 가지는 고조파 성분들의 합으로 표현하는데 유용한 도구이다.⁶⁾

이를 역으로 생각하면, 그림 5와 같이, 우리가 주변에서 흔히 볼 수 있는 파형은 무수히 많은 고조파 성분들이 합쳐져서 구성된 것이라고 할 수 있다.

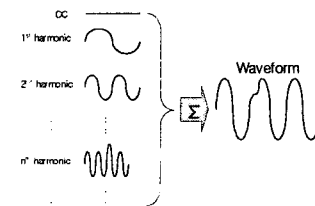


그림 5. 푸리에 변환의 기본 개념
Fig. 5. Basic concept on Fourier Transform

하나의 파형(이하, 측정 데이터)을 이루고 있는 무수히 많은 각각의 고조파성분들의 크기는 시간에 대하여 일정하거나 혹은 서서히 변화하면서 측정 데이터의 전체 모습에 영향을 미칠 것이다. 그런데, 외부의 영향 등에 의하여 특정 고조파들에게서 갑작스런 변화가 생길 수 있다. 그러나, 무수히 많은 고조파 성분들이 합쳐져서 이루어진 측정 데이터에는 그들의 변화에 대한 영향이 아주 미약하여 보통 때와 구분이 매우 힘들 것이다. 외부의 영향이 더욱 커져서 보다 많은 고조파들에게 변화가 생기게 되면 측정 데이터에도 변

화가 생기게 되고, 관측자들이 이를 감지할 수 있게 된다. 따라서, 사물의 상태를 측정 데이터만으로 판단하기보다는 측정 데이터를 이루고 있는 각 고조파 성분들의 변화로서 상태를 파악하는 것이 더 유리할 것으로 생각된다.

이러한 생각에서 만들어 낸 관측 도구가 분할-FFT이다. 분할-FFT는 측정 데이터를 이루고 있는 각 고조파들의 변화 정도를 관측할 수 있게 만든 도구이다.

3.2 분할-FFT 알고리즘

그림 2 (a)의 결과를 보다 시각적으로 나타내기 위하여, 3차원 mesh plot을 이용한 표현보다 2차원의 색 띠를 이용하여 표현한 것이 그림 2 (b)이다. Excel, Origin, SigmaPlot 등 기존의 프로그램들로 자료를 분석하는 것에는 엄청난 시간과 많은 수고를 필요로 하므로 실제 실험 결과를 분석하는 데는 Microsoft의 Visual C++ Version 6.0을 이용 직접 프로그램을 작성하였다. 알고리즘은 다음과 같다.

첫째, DSO(Digital Storage Oscilloscope)로부터 데이터를 입력받는다.

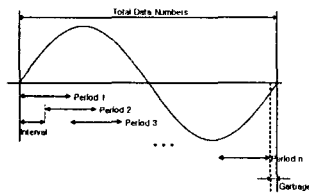


그림 6. 분할-FFT의 기본 개념

Fig. 6. Basic concept on Partition-FFT

측정 데이터를 그림 6과 같이 일정한 크기로 잘라 각각의 Period에 저장한다. Period의 크기는 FFT를 수행하기 편리하도록 2의 멱승인 512로 정하였다.(보다 자세한 이유는 2.2.3절 참조.) 또한 Period의 개수 n이 256개가 되도록 설정함으로써, Period와 Period 사이의 간격인 Interval은 식 1을 만족하는 최대값인 194로 하였다.

$$\text{Garbage} = \text{전체 데이터수} - \{ \text{Period의 크기} + (n-1) \times \text{Interval} \} \geq 0 \quad (1)$$

즉, DSO로부터 입력되는 전체 데이터 수 50002개 중, 49982(=512+(256-1)×194)개의 데이터가 분할-FFT에 사용되었고, 끝 부분의 데이터 20개(Garbage)는 버렸다.

둘째, 각 period에 대하여 FFT를 수행한다.

프로그램에 적용된 FFT 알고리즘은 일반적으로 많이 쓰이고 있는 2 radix-FFT DIF(Decimation In Frequency) 알고리즘을 사용하였다. side robe를 방지하기 위해 Hamming window를 사용하였고, 출력 옵션으로는 Origin에서 FFT를 수행할 경우 default option인 normalize amplitude와 shift results 기능을 기본으로 적용시켰다.

표 1은 220 · sin(120πt)의 정현파를 Origin에서 FFT를 수행한 경우와 자체 제작한 분할-FFT 프로그램에서 수행한 결과의 일부분을 비교한 것이다. 소수 4째 자리까지 값이 일치하고 있어, 신뢰도에 큰 문제는 없는 것으로 판단된다.

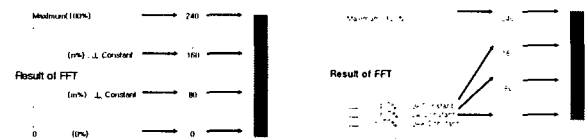
셋째, 이상의 FFT 결과를 그래픽처리하여 재조합하였다.

FFT 결과에서 가장 큰 Amplitude값과 0 사이의 값을 240 등분하고 이를 색의 차이로 나타냈다. 데이터 값을 나누는데 있어, 그림 7의 (a)와 같이 변환한 경우를 '표준 모드', (b)의 경우를 '로그 모드' 라고 정하였다. 표준 모드의 경우 실제 데이터 값의 %값(그림 7 (a)의 n, m)을, 로그 모드의 경우는 지수부분의 값(그림 7 (b)의 n, m, min)을 'J 상수'라고 하였다.

표 1. 자체 제작한 분할-FFT 프로그램의 정밀도 비교

Table 1. The detailed information of Partition-FFT

주파수 [Hz]	Amplitude	
	Origin 7.0	분할-FFT
0	0.621570	0.621504
59.999	118.536120	118.536148
119.999	50.673950	50.673945
:	:	:
5939.997	0.00001	0.00001
5999.997	0.00001	0.00001
6059.997	0.00001	0.00001
:	:	:
15299.992	0.000000	0.000019
15359.992	0.000000	0.000000



(a) 표준 모드

(b) 로그 모드

그림 7. FFT 결과의 그래픽 처리

Fig. 7. Graphic processing of FFT result

데이터를 분석할 경우, 변화가 가장 뚜렷한 모드를 선택하여 보면 된다. 본 논문 중 그림 2 (b)와 그림 4 (b)에서는 표준 모드를 사용하였으므로, 첫 번째 J 상수인 J_m은 33, 두 번째 J 상수인 J_n은 67이다.

이상의 처리 과정을 거친 데이터들은 그림 8과 같이 배치한다. 그림 8에서 FFT 1은 Period 1을 FFT 한 것이고, FFT 2는 Period 2를 FFT한 것이며, FFT n은 Period n을 FFT한 것이다.

따라서, 분할-FFT를 수행한 데이터도 측정 파형과 동일하게 가로축을 시간으로 해석할 수 있다.

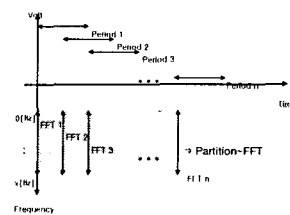
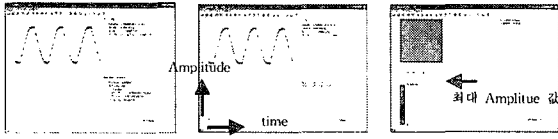


그림 8. FFT 결과의 재배치

Fig. 8. FFT result of array

그림 9는 이상의 알고리즘을 이용하여 직접 제작한 프로

그림을 실행한 모습이다.



(a) 모드 1 (b) 모드 2 (c) 모드 3

그림 9. 분할-FFT 프로그램의 실행 모습

Fig. 9. The simulation figure on the partition-FFT program

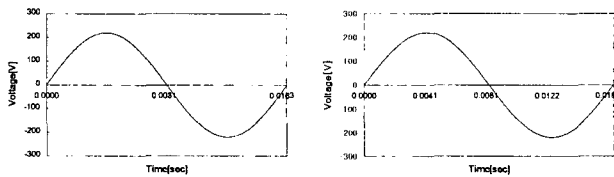
그림 9 (a)에서 상단의 파형이 DSO로 측정된 전압 파형이고, 하단이 그림 8에서 하나의 Period에 대하여 FFT를 행한 것이다. 그림 9 (b)의 상단 파형은 (a)와 동일한 측정 파형이고, 하단은 제n고조파(단, $0 < n < (\text{Period}/2 + 1)$)에 대하여 상단의 측정 파형과 동일한 시간 축으로 Amplitude 값의 변화를 나타낸 것이다.

그림 9 (c)의 상단의 그림은 그림 8과 같이 각 Period에 대한 FFT 결과를 재배치한 것이며, 하단의 긴 색띠에서 우측 상단의 숫자 값은 FFT를 수행했을 때 '최대 Amplitude 값'을 나타내게 하였다.

본 논문에서 분할-FFT를 수행한 그림이란 그림 9 (c)의 상단의 그림을 캡처하여 수록한 것을 뜻한다. 즉, 그림 2 (b)와 4 (b) 그림은 각각 그림 1 (a)와 그림 3 (a) 파형에 대해 분할-FFT를 수행한 것이다.

3.3 Period 크기

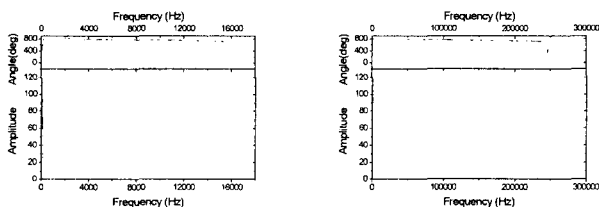
한 주기동안의 사인파에 대하여 512개의 데이터로 샘플링한 정현파와 8,192개의 데이터로 샘플링한 정현파를, Excel에서 모의하여, 각각 그림 10의 (a)와 (b)에 나타내었고, 이들 파형을 Origin을 이용하여 구한 진폭 스펙트럼을 그림 11의 (a)와 (b)에 나타내었다.



(a) 샘플링 데이터수=512 (b) 샘플링 데이터수=8,192

그림 10. 정현파

Fig. 10. The general sine wave



(a) 샘플링 데이터수=512 (b) 샘플링 데이터수=8,192

그림 11. 그림 10의 FFT 결과

Fig. 11. FFT result of fig. 10

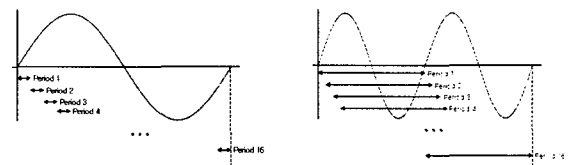
FFT 분석에서 샘플링 데이터의 수 n이 클수록 오차는

작아진다.⁶⁾ 또한, 보다 높은 주파수 대역을 관찰하기 위해서도 샘플링 데이터 수를 늘릴 필요가 있다.⁸⁾

그러나, 본 실험에서는 사용되는 주파수 대역은 낮고, Amplitude 값 보다는 Amplitude 값의 변화 추이를 통해 전기회로 상태의 이상 유무를 파악하는 것이 주목적이므로 샘플링 데이터 수는 512개면 충분하였다.

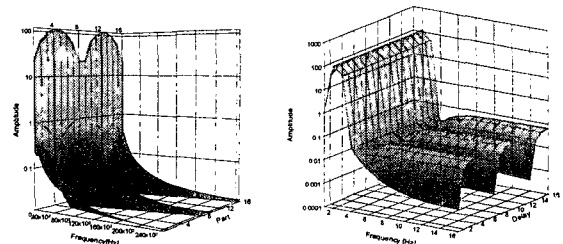
3.4 Period 범위

Excel에서 수식으로 만든 정현파($220 \cdot \sin \omega t$)를 그림 12 (a)와 같이 분할하여 FFT를 수행한 것이 그림 13의 (a)이고, 그림 12의 (b)와 같이 분할하여 FFT를 수행한 결과가 그림 13의 (b)이다.



(a) Period 크기 < 정현파 주기 (b) Period 크기 \geq 정현파 주기
그림 12. Period 범위(Period 크기=512)

Fig. 12. Example of partition(Period size=512)



(a) 그림 12 (a)의
분할-FFT 결과

(b) 그림 12 (b)의
분할-FFT 결과

그림 13. 그림 12의 분할-FFT 결과

Fig. 13. Partition-FFT of Fig. 12

그림 12 (a)는 한 Period가 정현파의 한 주기 보다 작은 경우이고, 그림 12 (b)는 한 Period가 정현파의 한 주기 보다 크거나 같은 경우이다. 두 경우 모두 Amplitude의 값들이 거의 일정하거나 혹은 일정 주기를 가지고 변화하고 있다. 이는

첫째, FFT 수행 시 side robe를 방지하기 위해 사용되는 Hamming window의 특성상 한 Period 내에서 양쪽 가장자리 값들이 중간에 위치한 값들에 비해 감소 폭이 큰 영향.

둘째, 시간영역에서의 주파수 영역에서의 에너지 값을 일치시키기 위한 Parseval의 정리

셋째, 본 논문의 "3.1 가설"에서 가정한 원인 등이 주된 원인으로 생각된다.

그림 14의 파형은 분할-FFT의 수행 시 Period 범위를 결정하기 가져온 위해 4단원에서 실험하여 구한 데이터의 일부이다.

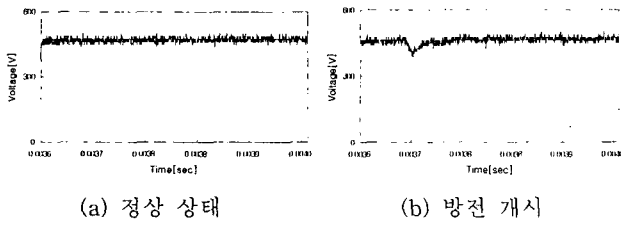


그림 14. 전압 파형의 예
Fig. 14. Example of voltage waveform

그림 20 (a)의 전류 파형에서 방전 개시를 의미하는 고조파 성분이 14001~15024번째 데이터들에서 나타났다. 따라서, 트리거를 동일하게 하고 검출한 그림 19 (a)의 정상 상태 전압 파형과 그림 20 (a)의 방전 개시 전압 파형 중에서 14001~15024번째 데이터만을 나타낸 것이 그림 14의 (a)와 (b)이고, 이들에 대해 FFT를 수행한 결과가 그림 15의 (a)와 (b)이다.

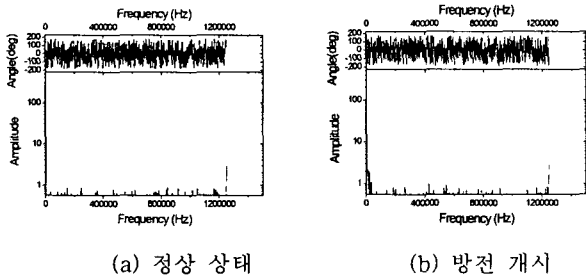


그림 15. 그림 14의 FFT 결과
Fig. 15. FFT result of fig. 14

그림 16은 각각 그림 18 (a)와 그림 20 (a)의 전압 파형에 대하여 FFT를 수행한 것이다.

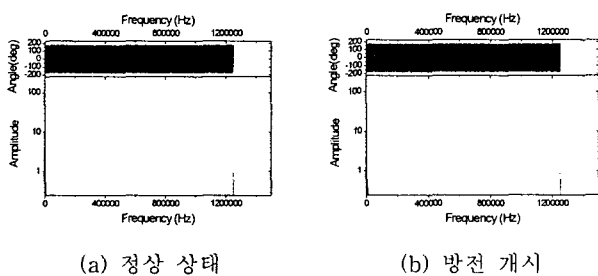


그림 16. 그림 18 (a)와 그림 20 (a)의 FFT 결과
Fig. 16. FFT result about fig. 18 (a) and 20 (a)

그림 15의 경우가 그림 16 보다 저주파 영역에서 정상 상태 때와 방전 개시 때의 차이가 더욱 뚜렷하다.

이로써, 정현파의 한 주기에 대해서 시간적으로 매우 짧게 발생하는 방전을 FFT 결과에 보다 잘 반영되게 하기 위해서는 그림 12의 (a)와 같이 Period 범위를 정하는 것이 유리하다. 그러나, 이는 보다 빠른 샘플링 타임을 요구하게 되며, 고성능의 측정장비가 요구된다. 따라서, 전체적으로는 데이터 수를 적게 유지하면서 방전 검출에 유리하도록 하기 위해 각각의 Period는 중첩시켰다.

4. Tracking 실험

4.1 트래킹

전기 설비에서 발생하는 방전 현상 역시 서서히 진전되어 가는 현상이고, 특히, 트래킹의 경우 상당한 시간에 걸쳐 서서히 발전되어 가는 현상이므로 분할-FFT를 사용하여 분석하기에 적합하다고 판단된다.

먼저, 트래킹이란 절연물 표면에 부착된 오염 물질 때문에 표면누설전류가 증가하고, 절연물이 분해하여 도전성 통로가 생기는 현상이다.

일반적으로 습윤 및 오손된 조건하에서의 트래킹 파괴에 이르는 과정은 “절연재료 표면의 습윤이나 오손→표면 누설 전류에 의한 전해액의 증발과 건조대의 형성→건조대에서의 방전 개시→탄화 도전로 형성→탄화 도전로 진전→트래킹 파괴”의 6 단계를 거치는 것으로 알려져 있으며, 각 과정은 다음에 의해서 판단된다.

1. 전해액을 매개로 해서 흐르는 누설전류는 60[Hz]의 정현파이며, 탄화도가 발생하기 이전에는 누설전류가 전해액 적하 직후에 일단 상승하여 최대치에 도달한 후 점차적으로 감소하여 최종적으로 누설전류는 거의 0으로 되고 건조대가 형성된다.
2. 건조대에서 방전이 개시되면 DSO 상의 전류 파형에 고조파성분이 중첩되어 지는 것과 시각적인 관측으로 확인할 수 있다.
3. 탄화가 개시되면 DSO 상에서 고조파 성분을 포함한 전류 값이 증가한다. 더욱이 이때는, 시료 표면에서 미소발광방전(scintillation)이 일어나는 것을 관찰할 수 있다.
4. 탄화 도전로가 진전하여 트래킹 파괴에 이르게 되면, 누설전류가 급격히 증가하게 된다.^{9)~11)}

4.2 실험 장치 및 방법

트래킹 시험은 IEC 112 “Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions”에서 규정한 시험장치를 사용하였다.¹²⁾ 인가 전압은 교류 380[V], 60[Hz]로 하였으며, 전해액은 증류수에 Sodium chloride, NaCl을 0.3 중량% 용해(식염수, 8% 염화나트륨 수용액)시켜 사용하였고 링거(ringer) 주사를 통하여 30초 간격으로 전해액이 약 20[mm]가 적하되도록 하였다.

시료는 절연 재료로 널리 쓰이고 있는 PVC(PolyVinyl Chloride)를 사용하였다. 크기는 6×6[cm], 두께는 3[mm]이다. 실험 전에 에틸알콜로 시료 표면을 세척한 후, 실리카겔(silicagel)을 넣은 건조함에서 48시간 이상 건조시킨 후 실험에 사용하였다.

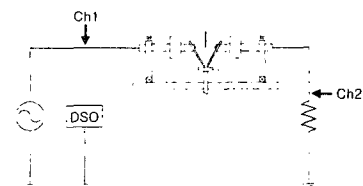


그림 17. 실험 장치도
Fig. 17. Experimental setup diagram

전체적인 실험회로는 그림 17과 같이 구성하였으며, 전압, 전류 파형 취득을 위해서 LeCroy DSO Waverunner LT372 (4GS/s)를 이용하였다. 그림 17의 전극 양단에 100:1(LeCroy, PPE 2[kV]) 프로브를 이용하여 전압을 측정하고, 이를 텍스트 파일(.txt)로 디스켓에 저장한 후, 컴퓨터 상에서 분할-FFT를 행하여 그 결과 값을 분석하였다.

4.3 실험 결과 및 분할-FFT를 이용한 트래킹 분석

전극에 전압이 인가되고 전해액이 적해되기 시작하면서부터 트래킹 파괴가 일어나는 동안, 총 6번의 DSO의 파형을 캡처하여, 그림 18에서부터 그림 23까지에 나타내었다. 각 그림의 DSO 파형에서 '1' 파형이 전압 파형, '2' 파형이 전류 파형이다. DSO 파형의 바로 아래에 있는 그림은 위쪽의 DSO 파형 중에서 전압 파형을 DSO로부터 50002개의 데이터 값으로 전달받아 분할-FFT 프로그램을 이용하여 분석한 결과를 나타내고 있다. 자체 제작한 분할-FFT 프로그램에서 2D 화면(그림 9 (c))을 캡처하여 나타낸 것이다. 그림 바로 아래의 숫자는 분할-FFT를 수행했을 때 Amplitude의 최대 값이다.

가로축은 DSO와 동일한 시간이며, 세로축은 주파수이다. 가장 위에 줄이 DC이며 아래로 내려가면서 주파수가 증가한다. 각 그림들에서 (a)의 경우, 분할-FFT의 기본주파수가 4,883[Hz], 주파수 대역은 DC~1.25[MHz], 가로축인 시간은 0.019866[sec/dot]이며, 총 dot수는 256개이다. 각 그림들에서 (b)의 경우는 기본주파수가 1,953[Hz], 주파수 대역은 DC~500[kHz], 시간은 0.049664[sec/dot], 총 dot수는 256개이다.

이번 실험에서 사용된 분할-FFT는 표준 모드($J_m=0.33$, $J_n=0.67$)이다.

그림 18은 정상상태 때의 모습이고, 그림 19는 전해액이 시료 표면에서 양 전극을 연결하여 전류가 흐름으로써 순간적으로 단락 상태를 이룰 때의 모습이다. 이 두 가지의 경

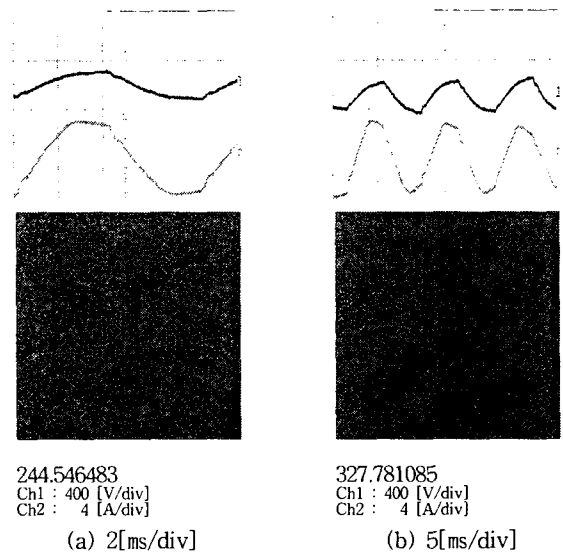


그림 19. 단락 상태
Fig. 19. Droplet bridges between electrodes

우 분할-FFT에서 구분이 어려워 보이지만, Amplitude 값을 비교해 보면 쉽게 구분할 수 있다. 또한, 고주파 부분의 색갈이 점점 짙어지고 있는 것으로도 구분이 가능하다.

그림 20은 건조대가 생기고 이 곳에서 방전이 개시될 때의 모습이며, 그림 21은 방전이 제법 진전된 모습을 나타내고 있다. 전압 측정만으로는 정상상태와 구분이 어렵지만, 분할-FFT를 수행하게 되면 충분히 구분되는 것을 볼 수 있다. 그러므로, 분할-FFT를 사용할 경우, 노후 된 설비의 콘센트 양단의 전압 측정만으로도 설비 중에 존재할 트래킹 가능성 여부 등을 측정할 수 있다고 판단된다.

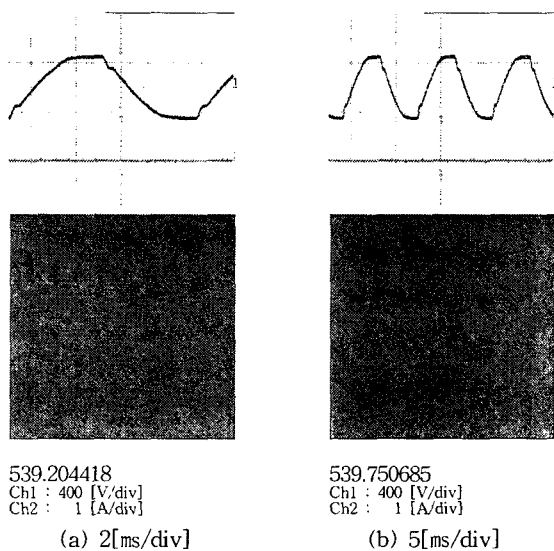


그림 18. 정상 상태
Fig. 18. Static states

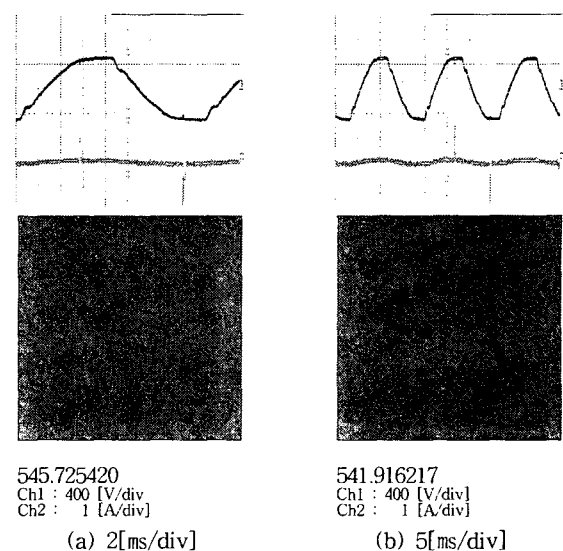


그림 20. 방전 개시
Fig. 20. Discharge inception

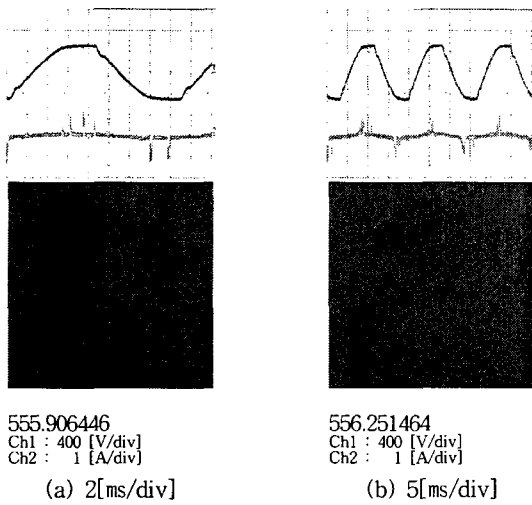


그림 21. 방전 진전
Fig. 21. Discharge in progress

그림 22는 시료 표면에 탄화 흔적이 나타날 때, 즉 탄화가 시작될 때이며, 그림 23은 탄화 도전로가 완성되어 트래킹으로 진전되었을 때의 모습이다.

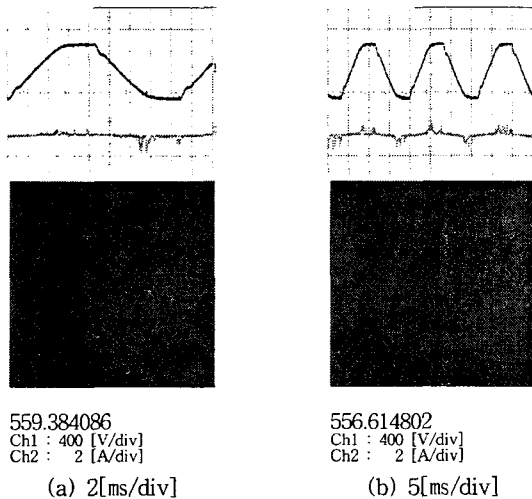


그림 22. 탄화 개시
Fig. 22. Carbon was formed

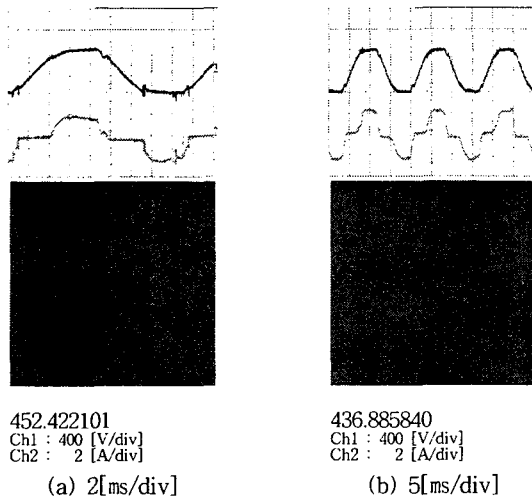


그림 23. 트래킹 개시
Fig. 23 Tracking breakdown

그림 24는 그림 18에서 제2고조파와 제3고조파의 시간에 대한 변화량(그림 9 (b))을 나타낸 것이고, 그림 25는 그림 20에서 제2고조파와 제3고조파의 시간에 대한 변화량을 나타낸 것이다.

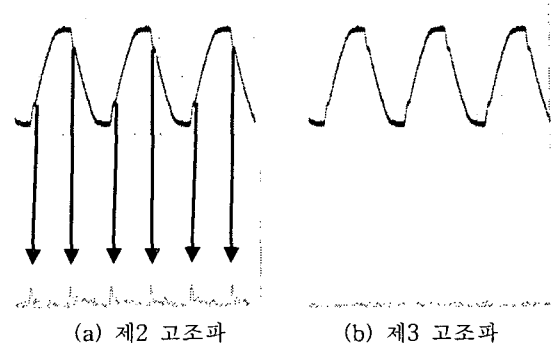


그림 24. 정상 상태(그림 18 (b))
Fig. 24. Static states(fig. 18(b))

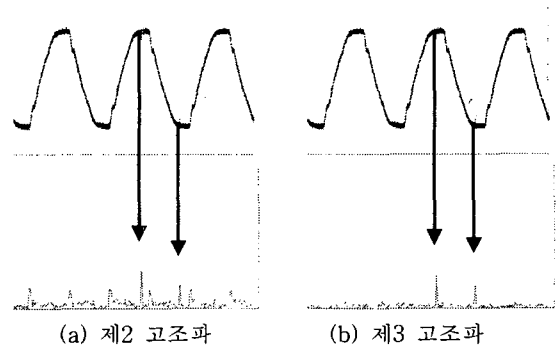


그림 25. 방전 개시(그림 19 (b))
Fig. 25. Discharge inception(fig. 19)

이번 트래킹 실험에서 제2고조파는 전압 파형 자체가 일그러지는 것과 방전에 대해서 동시에 변화를 보이고 있고, 제3고조파는 방전에 대해서만 변화를 보이고 있다. 2고조파의 경우 그림 24 (a)와 같이 전압 파형에서 수직선을 그리면 아래쪽에 Amplitude가 큰 곳과 만나고 있다. 이는 전압 파형에서 왜형이 생기는 곳 6군데와 시간에 대한 2고조파의 변화량을 표현한 그림에서 Amplitude가 큰 6곳과 일치하는 것으로 알 수 있다. 단지, Amplitude가 큰 지점이 전압 파형에서 왜형이 생기는 곳보다 시간적으로 앞서는 이유는 그림 8과 같이 Period의 시작점을 기준으로 하여 색띠를 그리기 때문이다.

제3고조파와 같이 방전의 발생에 대해서 변화를 보이는 고조파는 방전과 관련해서는 대략 2고조파에서 10~30 고조파까지, 트래킹과 관련해서는 30고조파 이상, 경우에 따라서는 거의 전 영역에까지 관련되는 것으로 보여지고 있다.

그림 25의 고조파 성분들의 크기는 최대값에 대해서 거의 1/100~1/1,000의 크기를 가지므로 단순히 FFT를 수행하게 되면 그 크기의 변화를 알기가 매우 어렵다. 즉, 분할-FFT는 기존의 FFT 분석에서 사용되지 않던 매우 작은 값을 가지는 주파수 영역의 값들에 대해서도 시간에 대한 Amplitude의 변화량을 측정함으로써 기기의 이상유무를 감지할

수 있는 새로운 도구이다.

그림 26은 특정 파형에 대하여 로그 모드($J_n=-1, J_m=-3, J_{min}=-4$)로 분할-FFT를 수행한 결과이다. (a)는 그림 10 (b)와 같은 이상적인 사인파($50 \cdot \sin\omega t$)에 대하여 수행한 결과이며, (b)는 평선제너레이터로부터 얻은 사인파형($5 \cdot 10 \cdot \sin\omega t$)에 대하여 분할-FFT를 수행한 결과이다. (c)는 그림 18 (b)의 정상 상태, (d)는 그림 19 (b)의 단락 상태의 전압 파형에 대해 샘플링 수를 10002로 하고 전압은 10:1로 감하여 측정된 전압 파형을 분할-FFT한 것이다.

이상적인 사인파의 경우 저주파 성분에 비하여 고주파 성분의 크기가 극히 미약하지만, 파형의 찌그러짐이 커질수록 저주파 성분의 크기에 대한 고주파 성분의 영향이 점점 커짐을 알 수 있다. 가시적으로 저주파 부분에 생기는 '도깨비뿔' 모양이 점점 사라지고 있다. 즉, 분할-FFT를 수행함으로써 파형의 찌그러짐 정도도 분석이 가능하다고 판단된다.

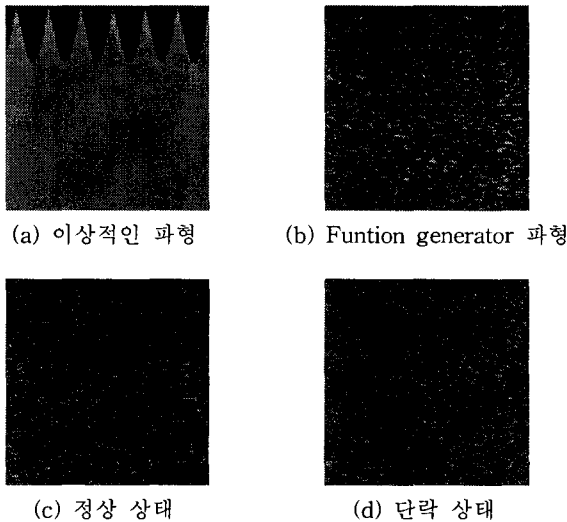


그림 26 분할-FFT의 결과
Fig. 26. Result of Partition-FFT

5. 결 론

1. 전압 파형이나 그에 대한 FFT 결과만으로는 방전 개시 때와 정상 상태 때를 구별할 수 없었지만(그림 16 참조), 분할-FFT를 이용할 경우 그 구분이 명확했고, 방전이 일어나는 시점까지 정확히 알 수 있었다. 즉, 측정 데이터로는 구분이 어려웠던 것이 각 고조파 성분들의 변화를 관찰할 경우 구분이 뚜렷하므로 "3.1 가설"이 옳음이 입증되었다.

2. 일반적으로 전기 측정에서 전압 값 측정은 전류 값 측정에 비해 상당히 간단하고 정확하지만 전기 기기의 이상, 특히 방전현상의 경우 전류 값으로 판별한다. 따라서, 이번 연구된 분할-FFT를 이용한다면 측정이 용이한 전압 값만으로도 방전 유무를 충분히 알 수 있다. 특히, DSO를 이용한 전압 측정과 컴퓨터 소프트웨어에만 의존함으로써 기존의 설비에 적용하더라도 추가 비용이나 측정장치의 설치 문제를 고민하지 않아도 되는 장점이 있다. 또한, 컴퓨터를 이용하여 판별하므로, 무선 랜 등을 이용한 네트워크화도 용이하여 원격 감시 설비 구축도 가능할 것으로 사료된다.

3. 사인파의 경우 저주파 영역에서 생기는 '도깨비뿔' 문

양을 통해, 현재 전압 파형의 왜형 정도를 파악할 수 있다.

4. 분할-FFT의 경우 이상발생을 색뿔을 이용하여 시각적으로 표현해 주는 시스템이므로 비전문가들도 쉽게 판별할 수 있다.

5. 비가 오는 날, 콘센트의 전압 측정만으로도 노후 된 건물의 전기설비에 대한 트래킹 진전 정도를 판별할 수 있는 측정장치 개발에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 윤진열 외, "GIS 부분방전 검출기술 연구", 한국전력공사, TR.98PJ04.J2002.407, 2002.
- [2] Changchang Wang, Xianhe Jin, et al, "Analysis and Suppression of Continuous Periodic Interference for On-line PD Monitoring of Power Transformers", 1999. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 5, pp.212-215, 1999.
- [3] KS C0262, "전기·전자기기의 전자파 장애", 1992.
- [4] 이현동, "신호 계측과 웨이브렛 변환을 이용한 해석 및 응용", 박사학위 논문, 영남대학교, 2001.
- [5] 이양원 외, "신호와 시스템", 북두출판사, pp. 464-543, 1998.
- [6] Erwin Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics Sixth Edition", John Wiley & Sons, pp. 582-643. 1988.
- [7] F. Hlawatsch and G.F. Boudreaux-Bartels, "Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representation", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 9, No. 2, pp. 21-67, 1992.
- [8] 이문호, "디지털 필터설계", 대영사, pp. 51-76, 1997.
- [9] 西田眞,吉村昇,能登文敏, "有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程", 전기학회논문지, A pp. 593-600, 昭58-A72.
- [10] 吉村昇,西田眞,能登文敏, "有機絶縁材料表面のトラッキング 破壊における炭火開始過程(IEC 112 方法の場合)", 전기학회논문지, A pp. 429-436, 昭56-A54.
- [11] 최병화, "有機絶縁材料의 Tracking 破壊에 관한 연구", 석사학위논문, 영남대학교, 1985.
- [12] IEC 112, "Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions", 1979.

저 자 소 개



지 승 욱 (池昇勳)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학
학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사).
현재 동 대학원 박사과정

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4629

E-mail : skraken@chol.net



이 춘 하 (李春夏)

1953년 10월 20일생. 1979년 영남대 전기공
학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(박사).
1985~1994년 한국기계연구원 실장. 현재
호서대 환경안전공학부 소방학과 교수

Tel : 041-540-5732, Fax : 041-540-5728

E-mail : leecha@office.hoseo.ac.kr



이 상 훈 (李相勳)

1973년 1월 16일생. 1998년 영남대 전기공
학과 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(박사).

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4629

E-mail : h2mlove@orgio.net



이 광 식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공
학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사).
1988~1989년 Nagoya Institute of Tech-
nology 초빙교수, 당학회 방전고전압연구회
간사장 역임, 한국조명·전기설비학회 부회
장 역임, 현재 당학회 C부분회 감사, 영남
대 공대 전자정보공학부 교수

Tel : 053-810-2486, Fax : 053-810-4629

E-mail : kslee@yu.ac.kr



김 충 년 (金忠年)

1966년 6월 16일생. 1992년 영남대 전기공
학과 졸업. 2002년 동 대학원 졸업(박사).
1995~1998년 (주)대우중공업 우주항공연구
소 주임연구원, 현재 (주)인터커넥션 책임연
구원

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4629

E-mail : kchn0512@hanmail.net