

액체의 특성 분류를 위한 스펙트럼 분석 방법

이종길*

Spectral Analysis Method for Classification of Liquid Characteristics

Jonggil Lee*

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

요 약

액체의 특성을 분류하기 위해서는 액상 물질의 유전율의 차이 등에 따른 특징적인 현상들을 파악하여야 한다. 이러한 현상들을 원격으로 탐지하여 추출할 수 있다면 폭발 가능성이 있는 위험물질의 검색이나 액체의 종류 등을 파악하는데 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 광대역 전자파 신호를 이용하여 액체의 반사 및 투과신호를 하나의 송신 안테나와 2개의 수신 안테나에서 획득하여 분석하였다. 반사 또는 투과신호는 액체의 종류에 따라 주파수별 응답특성이 다르게 나타난다. 그러나 기존의 FFT 스펙트럼 추정방식은 주파수 해상도 문제 및 윈도우에 의한 왜곡 때문에 적용하기 어렵다. 따라서 이러한 문제들을 최소화할 수 있는 고유벡터 해석 기법을 이용한 고해상도 스펙트럼 추정 및 분석 방법을 적용하였다. 이렇게 얻어진 결과들로부터 투과 또는 반사경로 들에 따른 액체의 종류별 침투 주파수들 및 대응전력 값들을 비교함으로써 다양한 액체들의 분류가 가능함을 보였다.

ABSTRACT

It is necessary to find characteristic phenomena related with permittivity differences for classification of liquid characteristics. If these phenomena can be remotely detected and characteristics can be extracted, it will be very useful in finding flammable liquid materials and classifying substances of these liquids. Therefore, in this paper, reflection and transmitted signals were analyzed from three receiving antennas with one transmitting antenna using wideband electromagnetic wave signals. Frequency response characteristics of reflected or transmitted signals are different according to characteristics of liquid materials. However, conventional FFT methods cannot be applied due to problems of low resolution caused by data windowing distortion. To minimize these problems, eigenvector analysis method was applied for high resolution spectrum estimation of received signals. From these results, it can be shown that classification of many kinds of liquids are possible using peak frequencies and corresponding peak power values of spectrum estimates obtained from various liquid materials.

키워드 : 액체특성 분류, 주파수 응답, 전파 특성, 스펙트럼 추정

Key word : Classification of liquid characteristics, Frequency response, Propagation characteristics, Spectrum estimation

Received 12 July 2016, Revised 13 July 2016, Accepted 07 December 2016

* Corresponding Author Jonggil Lee(E-mail:jnglee@inu.ac.kr, Tel:+82-32-835-8286)

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2016.20.12.2206>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

액체 물질의 특성이나 유전율 측정을 위한 여러 가지 방법에 대한 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 이러한 기법들은 대부분 접촉형, 즉 액체의 시료에 밀착시켜 유전율에 따른 전자파의 반사 및 투과 크기의 특성을 분석함으로써 액체시료의 유전율을 추출하는 방식이다 [1-3].

그러나 이러한 접촉식의 경우 정확한 유전율 측정 등의 목적으로는 더 적합할 수 있으나 원격 탐지가 불가능하므로 위험물질의 탐지나 분류를 위한 활용에는 제한적인 수밖에 없다. 현재까지 원격탐지 목적으로 광대역 전자파 신호를 이용한 액체 특성 분류 방법에 관련된 연구들은 공개적으로 발표되거나 알려진 것이 거의 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 액체물질들을 비교적 멀리 떨어진 거리에서 원격으로 탐지하고 그 특성을 분류할 수 있는 방법을 제안하고 실질적인 사용 가능성을 확인하고자 한다.

이와 같은 목적으로 쓸 수 있는 전자파 시스템에서는 광대역 신호를 활용한 송수신 시스템이 요구된다. 따라서 변조가 필요 없는 매우 짧은 펄스형태의 초 광대역 신호를 발생시키는 것이 시스템의 구성상 간단하면서도 효율적이다. 또한 송수신 안테나는 수신 단으로의 송신 누설전력 등을 최소화하기 위하여 분리형으로 설치하였다. 아울러 액체시료들에 대한 탐지 대상 영역을 충분히 확보하기 위하여 빔 폭이 넓은 광대역 비발디 안테나를 적용하였다.

송신 신호는 초 광대역 무선 시스템에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 일차 레일리(Rayleigh) 펄스를 사용하였다. 이러한 레일리 펄스는 펄스 파라미터를 조정하여 펄스의 길이를 300ps 로 하였으며 수신 단에서의 샘플링 주파수는 36GHz 로 하였다. 따라서 분석 가능한 주파수 응답영역은 18GHz 대역까지이나 안테나의 대역폭과 레일리 펄스의 길이를 감안하면 1~6GHz 주파수 영역에서의 특성 분석이 가능할 것이다.

이러한 반사 및 투과한 전자파 신호는 액체의 유전율에 따라 각각의 주파수 대역 응답 특성이 다르게 나타날 수 있다. 그러나 이러한 응답특성은 송신 안테나로부터의 직접적인 간섭이나 주변 물체 또는 벽면 등에서의 다중 전자파에 의한 간섭이 일어날 수 있으므로 이러한 현상들을 최대한 억제할 수 있도록 하여야 한다. 본

논문에서는 이렇게 구성된 송수신 시스템을 이용하여 액체 물질로부터 반사되는 신호 및 투과되는 신호의 주파수 응답 특성을 분석하고 이러한 액체들의 분류 가능성을 검토하였다.

II. 송신 및 수신 단 구조

송신 안테나와 수신 안테나 2개는 그림 1에서 보는 바와 같은 사각형 구조의 상단에 송신 안테나와 수신 안테나를 하단에 추가적인 수신 안테나를 위치시켜서 반사 및 투과신호를 수신할 수 있도록 설치되었다. 사각형 구조물의 내부 표면은 전자파 흡수체를 부착하여 다중경로 전자파 등의 지연 및 간섭에 의한 신호 왜곡을 줄일 수 있도록 하였다.

원격탐지를 위한 액체시료는 180ml 용량의 유리병 용기에 담아서 스티로폼 위에 위치시켰다. 송신 단에서 펄스 송출하면 수신 단에서는 송출 시점부터 데이터를 획득할 수 있게 된다.

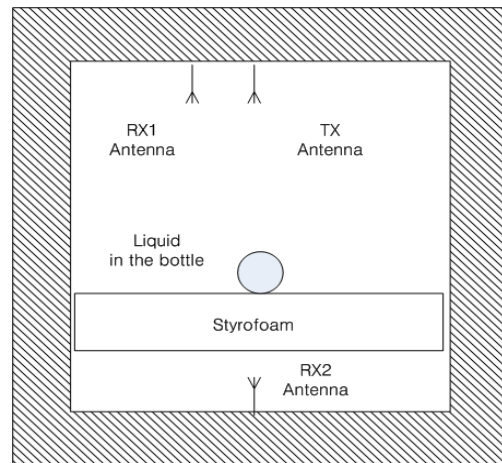


Fig. 1 The structure of transmitting and receiving system

그런데 그림 1의 구조에서 볼 수 있는 것처럼 송신 단 인근에 위치한 수신 안테나 RX 1에서는 넓은 송신 빔의 특성 때문에 직접적인 간섭신호가 나타나게 되는데 이러한 간섭 문제는 수신 시 일정한 시간 지연 후에 유효 반사 신호 데이터를 획득하는 방식으로 하면 불필요한 간섭의 영향을 최소화 할 수 있다. 그러나 액체 및 스

터콤포 판을 투과하여 신호를 수신하는 아래 수신 단에서는 상대적으로 송신 빔의 부엽 등에 의한 영향이 제한적이므로 직접적인 간섭에 의한 전력은 거의 나타나지 않는다. 따라서 초기 지연 구간, 즉 배경잡음 구간을 제외한 전체 구간을 유효한 투과신호로 간주하여 신호의 특성을 분석할 수 있을 것이다.

III. 수신 신호의 획득 및 특성

수신되는 전자파 신호는 그림 1에서 보는 것처럼 수신 단 RX1 과 RX2에서 나타나게 되는데 상단에 위치한 수신 안테나의 경우 액체시료로부터의 반사 정보를 얻을 수 있으며 하단의 RX2 에서는 스티로폼위에 놓인 액체 물질에 대한 투과 특성을 파악할 수 있다. 송신 펄스의 반사는 경계면에서 발생하게 된다. 또한 투과하는 신호는 경계면을 통과하여 진행한 후 하단의 수신 단 안테나에 도달하게 된다. 이러한 펄스의 반사 신호나 투과 신호의 크기는 경계면에서의 유전율의 차이로 인하여 반사 및 투과되는 정도가 결정된다. 따라서 기존의 접촉식 액체시료 유전율 측정 방법에서는 이러한 수신 신호들의 크기만을 고려하고 있다[4, 5].

본 논문에서는 액체시료의 특징이나 종류를 분류하는 것이 주목적이므로 경계면에서의 세부적인 반사 및 투과 신호에 의한 해석방법을 지양하고 전체적인 송수신 시스템에서의 입출력 특성 모델을 사용하고자 한다. 즉 반사 및 투과되는 수신 신호의 경우 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 송신 신호의 입력 단 입력에 의한 출력단에서의 반사 신호 및 투과 신호 모델로 표시할 수 있을 것이다. 즉, 주파수 영역에서의 반사 및 투과 전달함수(transfer function), HR(f) 및 HT(f) 를 사용하여 다음과 같은 입출력 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} SR(f) &= SI(f)HR(f) \\ ST(f) &= SI(f)HT(f) \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 SI(f)는 주파수 영역 입력 신호를 HT(f) 및 HR(f)는 액체시료의 투과 및 반사특성을 나타내는 전달함수이다. 따라서 이러한 전달함수들은 액체시료의 종류 및 특성에 따라 다르게 나타날 수 있다. 그림 2에서 표시한 바와 같이 동일한 입력, 즉 송신 신호를 기준

으로 하면 액체시료에 따른 전달함수가 달라짐에 따라 수신 안테나 RX1 과 RX2 에서의 반사파 출력신호 SR(f) 와 투과 후 출력신호 ST(f)는 액체시료에 따른 주파수 대역 특성을 나타낸다.

이러한 주파수 대역 특성을 파악하기 위해서는 송신단에서 광대역 안테나와 및 광대역 펄스 신호를 사용하여야 한다. 즉, 광대역 주파수 신호에 의한 주파수 별 전달특성의 변화를 파악함으로써 시료의 특성 분류가 가능한지 분석, 고찰하고자 하였다.

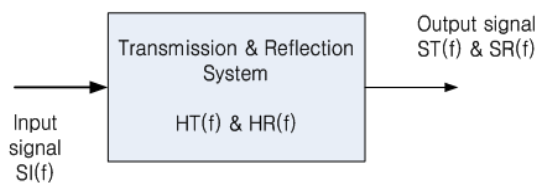


Fig. 2 Input and output in transmission and reflection systems

광대역 송신 신호 si(t) 는 일반적으로 널리 사용되는 다음과 같은 일차 레일리 펄스를 사용하였다[6].

$$si(t) = \frac{-2(t-1)}{b^2} \exp \left[-\left(\frac{(t-1)}{b} \right)^2 \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 b는 펄스 파라미터를 나타내며 펄스의 길이는 300 ps 가 되도록 조정하였다.

따라서 동일한 광대역 송신, 즉 입력신호에 대한 액체시료의 종류 및 특성에 따른 반사 및 투과 시 주파수 별 전달함수가 다르므로 수신, 즉 출력신호의 주파수대역 별 응답 특성이 다르게 나타날 것이다.

IV. 반사 및 투과 신호의 스펙트럼 추정

아래쪽과 위쪽에 위치한 수신 안테나에서 획득하는 반사 및 투과 신호들을 주파수 대역 출력 신호로 변환하여 분석하기 위해서는 스펙트럼 영역에서의 높은 주파수 해상도가 요구된다. 따라서 기존의 FFT(Fast Fourier Transform) 방법을 사용할 경우 수신 신호에 대한 데이터 획득시간이 매우 길지 않으면 윈도우

(windowing) 효과에 의한 누설 스펙트럼 전력으로 인하여 특성 왜곡이 발생하게 되어 높은 해상도가 유지될 수 없다. 그러므로 출력신호의 스펙트럼 분석을 위하여 파라미터 스펙트럼 추정방식중의 하나인 신호와 잡음 공간을 결정하는 고유벡터(eigenvector) 기법을 이용한 스펙트럼 추정 방법을 적용하였다.

수신 데이터에 M개의 정현파 신호가 존재한다고 하면 자기상관 함수(autocorrelation)를 부가성 백색잡음과 정현파 신호 전력으로 구분하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$r[k] = \sum_{i=1}^M P_i \exp(j2\pi f_i kT) + \rho_w(k) \quad (3)$$

식 (3)에서의 T 는 샘플링 간격을, ρ_w 는 잡음 분산(noise variance)을 각각 표시한다. 따라서 p차 Toeplitz 상관함수 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} r[0] & \dots & r^*[p] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r[p] & \dots & r[0] \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)의 행렬은 신호의 자기상관 함수와 잡음상관 함수로 분리하여 표시할 수 있다.

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{S}_p + \mathbf{W}_p \quad (5)$$

식(5)에서의 행렬 \mathbf{S}_p 및 \mathbf{W}_p 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{S}_p = \sum_{i=1}^M P_i \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H, \mathbf{W}_p = \rho_w \mathbf{I} \quad (6)$$

식(6)의 H 는 hermitian을 표시하고 I 는 단위행렬(identity matrix)이다. 식(5)의 상관행렬은 고유치(eigenvalue), λ 와 ρ_w , orthonormal eigenvector \mathbf{v} 로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{R}_p = \sum_{i=1}^M (\lambda_i + \rho_w) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H + \sum_{i=M+1}^{p+1} \rho_w \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (7)$$

식(7)에서의 두 번째 항은 잡음 부공간을 형성하는

고유치 및 고유벡터이다. 따라서 p-M+1 개의 잡음 부공간 고유벡터, \mathbf{v}_i 와 신호 벡터, \mathbf{s}_i 는 직교한다. 그러므로 다음과 같이 전력 스펙트럼을 추정할 수 있다.

$$P(f) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^{p+1} \alpha_k |\mathbf{e}^H(f) \mathbf{v}_k|^2} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{e} 는 추정 신호 벡터를 나타내며 $\mathbf{e}(f) = \mathbf{s}_i$ 인 경우 이론적으로 무한대의 값을 나타내는 전력 스펙트럼 추정방법이다. 실제적으로는 추정상의 오차로 인하여 추정 신호 주파수에서 한정된 침투치 값을 나타내게 된다. 식(8)에서 α_k 는 잡음 부공간 고유벡터에 대응하는 고유치의 역수를 가중치 값으로 하였다. 이와 같은 방식은 과도한 스펙트럼 추정 침투치들이 발생하는 오류를 줄일 수 있다[7, 8].

V. 결과분석 및 고찰

앞장에서 기술한 바와 같이 그림 1과 같은 구조에서 놓여진 액체시료에 대한 반사 및 투과된 전자파 신호를 위쪽과 아래쪽의 광대역 비발디 수신 안테나를 이용하여 신호 데이터를 획득하였다. 신호 데이터는 512개로 36GHz 샘플링 주파수를 사용하였다.

반사 신호 해석에서는 액체시료로부터의 초기 반사 신호들, 즉 1~128개의 데이터들은 송신 시 발생하는 간섭전력이 인접한 수신 단에 나타나고 있는 현상이기 때문에 처음 128개의 데이터들을 제외하고 분석하였다. 반면 투과신호 분석에서는 송신 시 강력한 간섭 등에 의한 문제는 발생하지 않으나 일정한 지연시간이 지난 후 액체시료를 투과한 전자파 신호가 수신되게 된다. 그러므로 초기지연 및 넓은 빔 폭 때문에 발생하는 누설전력에 의한 직접적인 전파 현상 등으로 초기 획득 신호들은 불필요한 배경잡음 및 간섭 신호들만이 나타난다. 따라서 처음 114개의 데이터를 제외함으로써 불필요한 간섭이나 배경잡음을 최소화하였다.

이러한 수신 신호의 주파수 대역 특성을 확인하기 위하여 앞장에서 기술한 고유벡터 방법을 사용하여 반사 수신 신호의 전력 스펙트럼을 나타내었다. 그림 3은 톨루엔과 물의 반사 신호에 대한 전력 스펙트럼을 나타낸

다. 그림 3에서 표시되는 스펙트럼 추정 값은 주파수 영역에서의 상대적인 전력의 차이를 보여준다. 그림3으로부터 알 수 있는 것처럼 대부분의 전력은 2~5GHz 사이에 분포하고 있음을 확인 할 수 있으며 침투치 주파수 및 전력크기 형태가 다소 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이제 똑같은 두 개의 액체 시료에 대하여 투과 후 나타나는, 즉 아래쪽 안테나에 수신되는 신호의 상대적인 전력 스펙트럼을 그림 4에 표시하였다. 앞부분의 일정한 지연시간 때문에 신호가 거의 나타나지 않는 초기 114개의 데이터는 제외하였다.

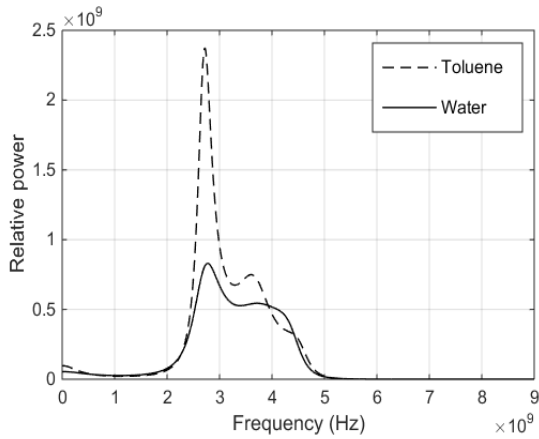


Fig. 3 Pseudo spectral estimates of reflected signals from toluene and water in the glass bottle

그림 4에서 보는 것처럼 물의 경우 투과된 신호는 톨루엔에 비하여 신호의 진폭이 다소 작게 나타난다. 그러나 신호의 진폭이 큰 영역에서 거의 동일한 크기의 신호가 수신 되는 구간도 있음을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 비발디 안테나의 빔 폭이 상대적으로 넓어서 액체 시료이외의 영역 바깥으로 빔이 누설되어 나타나는 현상인 것으로 파악된다. 상대적으로 톨루엔의 경우 특정 주파수 영역에서 더 예리한 스펙트럼 침투치 값을 형성하고 있음을 확인할 수 있다.

이제 물과 톨루엔 이외의 4개의 서로 다른 액체 시료에 대한 반사 및 투과 된 신호를 획득하였다.

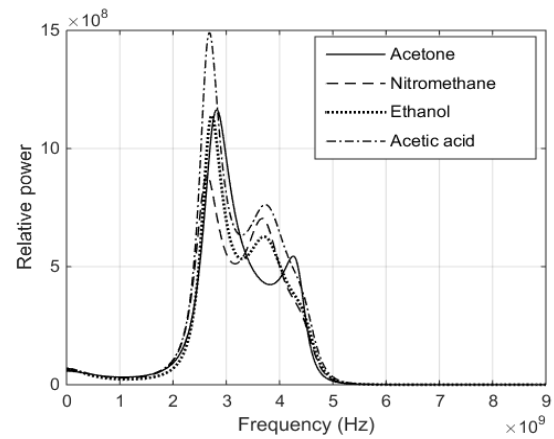


Fig. 5 Pseudo spectral estimates of reflected signals from four liquid samples in the glass bottle

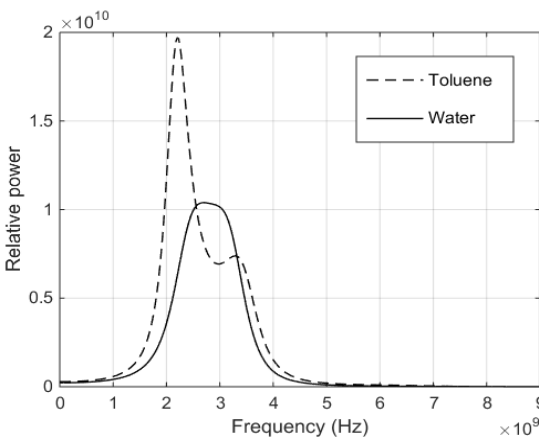


Fig. 4 Pseudo spectral estimates of transmitted signals through toluene and water in the glass bottle

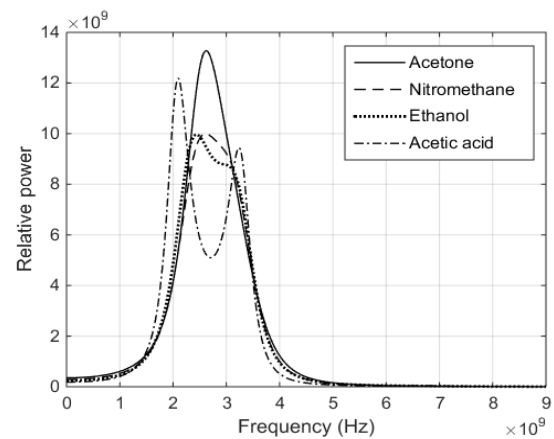


Fig. 6 Pseudo spectral estimates of transmitted signals through four liquid samples in the glass bottle

앞장에서 설명한 바와 같이 효율적인 분석을 위하여 일부 불필요한 획득 데이터들을 제거한 후 고유벡터 스펙트럼 추정 방법을 적용하여 그 결과들을 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5와 그림 6의 결과 그림들에서 보는 바와 같이 반사 또는 투과하여 수신되는 신호의 스펙트럼 추정 값은 액체시료의 종류에 따라 다소 다르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 반사 및 투과 스펙트럼 추정치의 특징들을 이용한다면 다양한 액체시료들의 분류가 가능할 것이다. 이와 같은 분류를 위한 방법으로 각 액체시료 물질들의 스펙트럼 첨두치 및 첨두치 주파수를 이차원 평면상에 도시하였다. 그림 7은 반사 신호, 그림 8은 투과 신호의 스펙트럼 첨두치 및 첨두치 주파수를 각각 표시하였다.

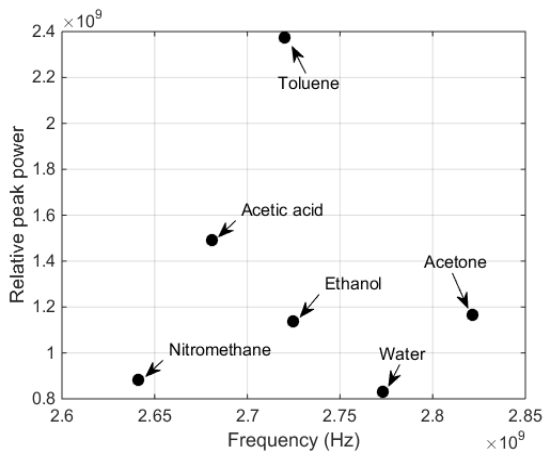


Fig. 7 Relative peak power and frequency estimates of reflected signals from six liquid samples in the glass bottle

그림 7의 경우는 액체시료의 반사 신호에 대한 전체 스펙트럼 추정치의 특징 중에서 상대적인 첨두치 전력과 이에 상응하는 주파수 추정치를 이차원 평면상에 표시한 것이다. 그림 8로부터 확인할 수 있 바와 같이 액체시료의 종류에 따라 첨두치 전력 또는 첨두치 주파수가 다르게 나타남을 알 수 있다. 그러므로 전체 스펙트럼의 특징을 분석하지 않아도 수신 신호의 첨두치 전력과 이에 상응하는 주파수 추정치만을 활용하여도 액체시료의 분류가 가능할 것으로 판단된다.

그러나 더 세부적인 분석을 위하여 같은 액체시료들

에 대한 투과신호들을 같은 방법으로 이차원 평면상에서 상대적인 첨두치 전력과 이에 상응하는 주파수 추정치로 그림 8과 같이 표시하였다.

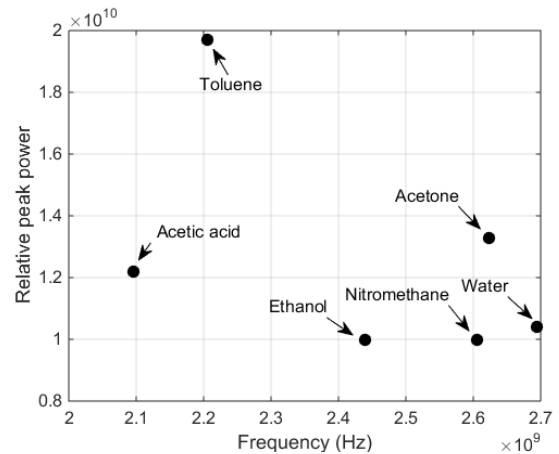


Fig. 8 Relative peak power and frequency estimates of transmitted signals through six liquid samples in the glass bottle

그림 8에서 보는 것처럼 액체 시료를 투과한 신호의 첨두치 추정 값 및 추정 주파수는 반사 신호의 경우를 표시하는 그림 7과는 다르게 나타난다. 즉 그림 5와 그림 6에서 확인할 수 있는 것처럼 식 (1)에서의 액체시료별 전달 함수 $HT(f)$ 는 $HR(f)$ 와는 다르게 나타나므로 이에 상응하는 $ST(f)$ 와 $SR(f)$ 의 스펙트럼 추정 값들도 다르게 나타난다.

그림 7과 그림 8의 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 반사 및 투과된 신호의 전체 스펙트럼 추정 결과로부터 첨두치와 이에 상응하는 주파수 값들을 이용하면 이차원 공간상에서 액체시료들을 상세하게 분류할 수 있을 것이다.

여기에서 시험하지 못한 일부 액체시료들의 경우에는 투과 또는 반사 신호 정보만을 이용할 경우 스펙트럼 첨두치 및 대응 주파수가 유사하게 나타나는 경우가 있을 수 있다. 그러므로 두 개의 수신 안테나로부터 획득한 반사 및 투과 신호 정보들을 동시에 활용한다면 원격탐지에서의 정확도를 더욱 높일 수 있을 것이다. 또한 더 세부적인 특성 분류나 위험 물질들의 판정등이 가능할 수 있으므로 다양한 목적으로 응용될 수 있을 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는 폭발 위험물질로 분류될 수 있는 액체의 원격 탐지 및 종류의 식별등을 위한 목적으로 활용될 수 있는지 효용성을 확인하기 위하여 광대역 전자파 송수신 안테나를 이용하여 다양한 액체시료들에 대한 반사 신호 및 투과 신호들을 획득하였다. 이러한 반사 신호 및 투과 신호들의 주파수 영역에서의 분석을 위하여 다양한 액체시료의 특성에 따른 신호의 스펙트럼 추정을 통하여 특징을 추출하고자 하였다. 특히 스펙트럼 추정에서의 짧은 데이터 획득시간으로 인한 문제점을 극복하기 위하여 고해상도 주파수 추정이 가능한 고유펙터 방법을 적용하여 신호들을 분석하였다.

결과 그림들로부터 알 수 있는 것처럼 액체시료 별로 반사 및 투과함수의 주파수 전달특성이 다소 다르게 나타나며 이와 같은 특성 차이로 인하여 수신 안테나에서의 신호의 주파수 영역 스펙트럼 추정치는 서로 다르게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 서로 다른 스펙트럼 형태들을 보이는 액체시료들의 주파수 영역 특징을 추출하고자 이차원 공간, 즉 X, Y 평면에서 침두치 전력과 이에 상응하는 주파수를 표시함으로써 액체시료들의 분류가 가능한지를 확인하였다.

이러한 다양한 액체 시료들에 대한 반사파 신호와 투과 신호들에 대하여 분석한 결과들을 종합하여 보면 액체시료의 특성이나 특징에 따라 이차원 공간상에서의 침두치 전력 값 및 침두치 주파수 정보를 활용하여 액체시료의 구별이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 반사 및 투과 신호의 스펙트럼 추정치의 특징을 모두 활용한다면 다양한 액체시료의 구별 및 분류에 적절하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] J. Munoz et al., "Automatic measurement of permittivity and permeability at microwave frequencies using normal and oblique free-wave incidence with focused beam," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 4, pp. 886-892, Aug. 1998.
- [2] S. N. Kharkovsky et al., "Measurement and monitoring of microwave reflection and transmission properties of cement-based specimens," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1210-1218, Dec. 2002.
- [3] U. C. Hasar, C. R. Westgate and M. Ertugrul, "Permittivity determination of liquid materials using waveguide measurements for industrial applications," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 4, no. 1, pp. 141-152, Jan. 2010.
- [4] Z. Ma and S. Okamura, "Permittivity determination using amplitudes of transmission and reflection coefficients at microwave frequency," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 5, pp. 546-550, May 1999.
- [5] U. C. Hasar, "A fast and accurate amplitude-only transmission-reflection method for complex permittivity determination of lossy materials," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 9, pp. 2129-2135, Sept. 2008.
- [6] B. Allen et al., *Ultra-Wideband antennas and propagation for communications, radar and imaging*, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- [7] D. H. Johnson and S. R. DeGraff, "Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays by eigenvalue analysis," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 30, no. 4, pp. 638-647, Aug. 1982.
- [8] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas. Propag.*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.



이종길(Jonggil Lee)

1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)
1991년 1월 ~ 1993년 2월 삼성전자 특수연구소
1993년 3월 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야: 무선통신, 레이더 신호처리, 레이더 시스템