
라만 스펙트럼에서 간 질병 분류를 위한 MAP과 MLP 적용 연구

Application of MAP and MLP Classifier on Raman Spectral Data for Classification of Liver Disease

박아론, 백성준, 양병흠, 나승유
전남대학교 전자컴퓨터공학부

Aaron Park(dode@daum.net), Seong-Joon Baek(tozero@chonnam.ac.kr),
Bingxin Yang(ato_ato@163.com), Seung You Na(syna@chonnam.ac.kr)

요약

본 연구에서는 마이크로 라만 스펙트럼을 이용한 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올 간섬유증의 진단을 위해, 전처리 과정을 거친 스펙트럼으로부터 변별력 있는 피크를 추출하여 자동 분류기를 이용한 진단하는 방법을 살펴보았다. 전처리 단계에서는 기준선의 왜곡을 제거한 후 피크 보존에 유용한 Savitzky-Golay 필터를 이용하여 smoothing하였다. 전처리 후 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간섬유증을 구분할 수 있는 변별력 있는 스펙트럼 피크를 확인하고 이를 이용하여 MAP과 신경망으로 분류하였으며 실험 결과에 의하면 제안한 전처리 방법과 자동 분류기로 만성 에탄올성 간섬유증과 급성 알코올성 간 손상을 80% 이상 분류할 수 있었고, 이는 특정 벡터로 사용한 피크가 간 질병 진단에 사용될 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다.

■ **중심어** : | 급성 알코올성 간 손상 | 만성 에탄올성 간섬유증 | 간 질병 | 마이크로 라만 스펙트럼 | 패턴 인식 |

Abstract

In this paper, we evaluated the performance of the automatic classifier applied for the discrimination of acute alcoholic liver injury and chronic liver fibrosis. The classifier uses the discriminant peaks of the preprocessed Raman spectrum as a feature set. In preprocessing step, we subtract baseline and apply Savitzky-Golay smoothing filter which is known to be useful at preserving peaks. After identifying discriminant peaks from the spectra, we carried out the classification experiments using MAP and neural networks. According to the experimental results, the classifier shows the promising results to diagnosis alcoholic liver injury and chronic liver fibrosis. Classification results over 80% means that the peaks used as a feature set is useful for diagnosing liver disease.

■ **keyword** : | Acute Alcoholic Liver Injury | Ethanol-induced Chronic Liver Fibrosis | Liver Disease | Micro-Raman Spectra | Pattern Recognition |

* 본 논문(저서)은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-331-D00413).

접수번호 : #081120-004

접수일자 : 2008년 11월 20일

심사완료일 : 2009년 02월 12일

교신저자 : 박아론, e-mail : dode@daum.net

I. 서론

현재 많은 나라에서는 만성적인 에탄올 소비가 알코올성 간 질병(alcohol liver disease)을 일으키는 주요한 원인이 되고 있다. 이러한 알코올성 간 질병은 급성 알코올성 간 손상(acute alcoholic liver injury)을 일으키고 이러한 상태가 얼마간 지속되면 만성 에탄올성 간 섬유증(ethanol-induced chronic liver fibrosis)으로 진행된다[1]. 간섬유증(liver fibrosis)은 치사율과 사망률을 수반하는 오래된 의학적 문제 중 하나이다. 간섬유증의 주요한 원인은 간염(hepatitis)이 만성적으로 지속되면서 간세포가 파괴되었다가 다시 재생되는 과정이 반복되면서 간의 섬유화가 진행되는 것이다. 또한 간섬유증을 치료하지 않으면 간경변(cirrhosis)으로 진행될 수 있고 결국 간부전이나 사망에 이를 수 있다[1]. 따라서 항섬유증 임상 치료에 대한 생물학약품 연구자들의 관심이 증가하고 있다.

최근 브라시카 속(brassica family) 작물인 브로콜리, 콜리플라워, 양배추 등에 많이 포함되어 있는 화합물인 Indole-3-carbinol (I3C)을 이용한 간암(liver cancer) 등 여러 종류의 암에 대한 자연 치유와 예방에 대한 연구가 있다[2]. 이 결과에 의하면 I3C를 이용하면 간 질병의 억제에 긍정적인 효과를 나타낼 수 있다. 원칙적으로 급성 간 손상이 진행되는 과정을 생물학적으로 분석하기 위해 콜라겐(collagen)에서 분자의 변화를 식별한다[3]. 그러나 이러한 방법은 간 질병의 치료와 예방을 하는 실험에서 I3C의 효과에 의한 생체 내의 변화를 보여주지 못한다. 따라서 간 질병을 정확하게 진단하고 I3C의 생체 내에서 변화를 식별할 수 있는 기술이 필요하다. 특히 급성 알코올성 간 손상을 조기 진단할 수 있다면 I3C와 같은 화합물을 이용하여 만성 간섬유증으로 진행되는 것을 예방할 수 있고 또한 간 질병에 도움이 되는 새로운 예방과 치료법을 개발하는 데 기여할 수 있을 것이다.

라만 분광학(Raman Spectroscopy)은 레이저의 발달로 분광학에서 순수 연구뿐 아니라 바이오, 나노, 공학 등 다양한 분야로의 응용까지 이제 일반적인 분광법으로 자리 잡고 있다. 근래 들어 라만 스펙트럼을 의학적

진단에 도입하기 시작했고 여러 종류의 질병 진단에 그 성능이 입증되었다. 최근에는 마이크로 라만 스펙트럼(micro-Raman spectroscopy)을 간 질병 진단에 이용하는 연구가 이루어지고 있다. 마이크로 라만 스펙트럼을 이용한 간 질병 진단은 실험용 쥐에서 간을 추출한 다음 오른쪽 돌출부 조직으로부터 얻은 스펙트럼에서 1450 cm^{-1} 과 666 cm^{-1} 피크의 비율이 정상, 급성 알코올성 간 손상과 섬유증을 구별하는 데 유용하고 또한 I3C가 급성 알코올성 간 손상에 효능을 보이는 과정에서의 조직 변화를 추적할 수 있다는 연구 결과가 있다[4].

하지만 위 연구는 그 결과가 정성적인 분석에 한하였으므로 본 연구에서는 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 간 조직으로부터 측정된 라만 스펙트럼에서 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간섬유증을 구별할 수 있는지 그 가능성을 정량적으로 살펴보았다. 측정된 스펙트럼은 먼저 몇 가지 전처리를 거친 다음 분류 실험에 사용되었다. 전처리는 smoothing을 적용하고 기준선 왜곡을 제거한 다음 스펙트럼의 피크를 가장 높은 크기의 피크를 기준으로 위치 정렬 하는 순서로 이루어졌다. 분류실험은 전처리를 거친 스펙트럼으로부터 얻은 중요한 열 개의 피크 크기를 특징 벡터로 이용하여 MAP (maximum a posterior probability)과 MLP (multilayer perceptron networks) 분류기를 이용하였다.

II. 실험 샘플 준비와 전처리

1. 실험 샘플 준비

급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간섬유증 모델을 위한 실험용 쥐는 두 개의 그룹으로 나누었다. 급성 알코올성 간 손상 그룹에는 50% 에탄올(0.2ml/10g)을 투입하였으며, 만성 에탄올성 간섬유증 모델 그룹에는 40% 에탄올을 3개월 동안 투입하였다. 이후 각 그룹으로부터 간의 오른쪽 돌출부 조직샘플을 추출하여 라만 스펙트럼 측정에 사용하였다. [표 1]에 실험용 쥐의 간 질병 모델 그룹의 생화학적 분석 결과를 나타내었다 [4]. 실험용 쥐의 질병 모델은 [표 1]을 근거하여 결정되었다. 조직샘플은 파라핀(paraffin)이 포함되어 있는 파

라폴알데히드(paraform-aldehyde) 혼합고정액에 고정하고, 실험용 쥐 한 마리로부터 1-2개의 조직 단면을 그리고 한 개의 조직 단면으로부터 2-3개의 위치에서 스펙트럼을 측정하였다. 이와 같은 방식으로 실험용 쥐 32마리로부터 121개의 라만 스펙트럼을 얻었다.

마이크로 라만 스펙트럼 측정에는 최대 검출 민감도와 산란 억압도가 최고가 되도록 조정된 Horiba Jobin Yvon Raman microspectrometer (system HR800, Horiba Jobin Yvon, Villeneuve d'Ascq, France)를 사용하였다. 라만 여기(excitation)에는 파장이 632.8 nm에서 13.6 mW의 출력을 제공하는 헬륨-네온 레이저를 사용하였다. 조직샘플에 노출되고 프리즘과 필터를 통과하여 감쇄(attenuation)된 레이저의 강도는 1 mW이다. 조직 단면으로부터 측정된 스펙트럼은 모두 121개이고 측정 범위는 600-1700 cm^{-1} 이다.

표 1. 실험용 쥐 모델 그룹의 생화학적 분석 결과

질병 그룹	정상	급성 알코올성 간 손상	만성 에탄올성 간섬유증
스펙트럼의 수	-	62	59
단백질량 (g/L)	0.995 ± 0.093	1.121 ± 0.005	-
Hydroxyproline (μg/g liver)	89.30 ± 9	-	111.6 ± 18
Glutathione S-Transferases (mmol/min mg)	296.35 ± 33	-	231.77 ± 56

2. 전처리

실험용 쥐의 간 조직샘플로부터 측정된 라만 스펙트럼은 데이터를 처리하는데 나쁜 영향을 주는 잡음을 가지고 있기 때문에 먼저 이러한 잡음을 처리하여야 한다. 본 실험에서는 각 피크의 일차 미분을 이용하여 기준 선 왜곡을 제거하는 방법을 적용하였다[5].

기준선의 왜곡을 제거한 스펙트럼에 대하여 미세한 변동을 제거하기 위해 추가로 smoothing을 적용하였다. smoothing에는 라만 스펙트럼의 모든 영역 600-1700 cm^{-1} 에 대하여 이동 평균(moving average) 방법에서 일반적으로 사용하는 Savitzky-Golay 필터

를 이용하였다. 이 필터는 값이 급격히 변하는 피크 영역에서 그 크기를 보존하는 특성을 가지고 있어 피크 크기가 중요한 스펙트럼의 smoothing에 많이 사용된다. Savitzky-Golay 필터의 계수는 주어진 차수의 다항식 모델을 이용한 비가중 선형 최소제곱 회귀(unweighted linear least square regression)로부터 결정한다. \mathbf{g}_n 을 입력 스펙트럼, \mathbf{w} 를 필터의 계수, 아래 첨자 k 를 라만 shift의 인덱스 그리고 \mathbf{y}_k 를 smoothing한 스펙트럼이라고 하면 본 실험에 사용한 smoothing 방식은 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_k = \sum_{n=-4}^4 \mathbf{w}_n \mathbf{g}_{k-n} \tag{1}$$

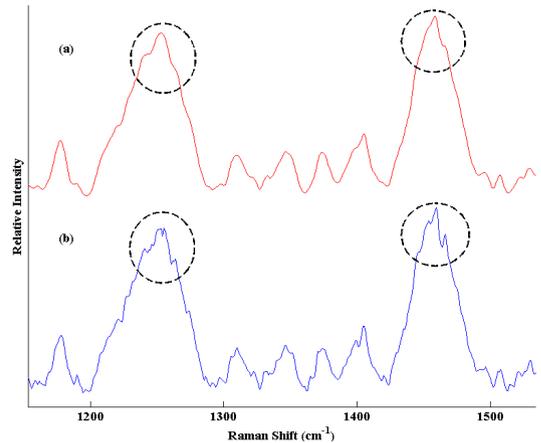


그림 1. Smoothing 적용 전후 마이크로 라만 스펙트럼 비교. (a) smoothing 과정 후 (b) smoothing 과정 전

[그림 1]의 (a)에 기준선의 왜곡을 제거한 조직샘플의 라만 스펙트럼에 smoothing을 마친 스펙트럼의 예를 나타내었다. 그림에서 (a)와 (b)의 타원 부분을 비교하여 보면 smoothing의 효과가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

Smoothing을 적용한 스펙트럼으로부터 정확하게 피크 추출하기 위해서 피크의 위치 정렬(position align)이 필요하다. 피크 위치 정렬은 스펙트럼은 급성 간 손상과 만성 간섬유증에서 모든 피크가 유사한 크기로 관찰

되는 965 cm^{-1} 부근의 피크를 기준으로 모든 스펙트럼이 동일한 위치에서 해당 영역에서 최대 피크치를 갖도록 처리하였다.

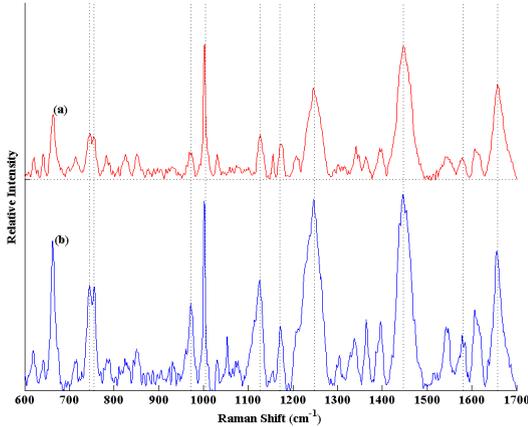


그림 2. (a) 만성 에탄올성 간 섬유증 (b) 급성 알코올성 간 손상 마이크로 라만 스펙트럼의 예

[그림 2]에 조직 샘플의 라만 스펙트럼 중에서 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간 섬유증 스펙트럼의 예를 나타내었다. 스펙트럼으로부터 특징벡터로 사용할 피크의 크기를 구할 수 있는데 본 실험에서는 모든 피크의 크기를 구하는 대신 전체 스펙트럼을 몇 개의 구간으로 나누고 해당 구간에서 최대 피크 크기를 구해 이를 특징 벡터로 사용하였다.

전체 스펙트럼의 relative intensity 중 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간 섬유증에서 차이를 보이는 피크들을 조사하고 예비 실험을 통하여 743, 754, 970, 1004, 1126, 1170, 1248, 1447, 1580, 1658 cm^{-1} 부근의 10 개의 피크를 선택하였다. 그림 2에 분류 실험에서 특징으로 사용할 수 있는 피크를 점선으로 구분하여 나타내었다. 또한 대부분의 피크들은 라만 측정과 전처리에서 발생하는 약간의 오차를 고려하면 [표 2]에서 보듯이 생체 분자의 vibrational 형태에 대응된다[4]. 따라서 본 실험에서는 smoothing 과정을 거친 스펙트럼에서 위의 열 개 피크의 relative intensity를 특징 벡터로 사용하였다.

표 2. 분류 실험에 사용된 특징 벡터의 피크 위치와 그 주파수에 상응하는 vibrational bands[4]

피크 위치 (cm^{-1})	Vibrational descriptions
1658	$\nu(C=O)$ amide I, α -helix, collagen
1580	$\delta(C=C)$ phenylalanine
1447	$\delta(CH_2)$, $\delta(CH_3)$, collagen
1248	$\nu(CN)$, $\delta(NH)$ amide III, α -helix, collagen
1170	$\delta(C-H)$, tyrosine
1126	$\nu(C-N)$, proteins
1004	$C-C$ symmetric ring breathing, phenylalanine
970	Unassigned
754	Unassigned
743	Unassigned

ν : stretching mode, δ : bending mode

III. 분류 방법과 실험 결과

1. 분류 방법

MAP는 패턴의 사후확률 $P(\omega_i|\mathbf{x})$ 을 최대로 하는 클래스 ω_i 로 패턴을 분류한다. 사전확률을 같다고 가정하면 클래스 조건부 확률 밀도를 최대로 하는 클래스를 선택하는 것과 같다. 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간 섬유증 클래스를 각각 ω_1 , ω_2 라고 할 때 MAP 결정 규칙은 다음과 같다[6].

$$\begin{cases} \omega_1, & \text{if } P(\mathbf{x}|\omega_1) \geq P(\mathbf{x}|\omega_2), \\ \omega_2, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

본 실험에서는 클래스 조건부 확률을 다변수 가우시안 확률밀도함수 (multivariate Gaussian probability function)로 모델링을 하였으며 평균벡터 $\boldsymbol{\mu}$ 와 공분산 행렬 $\boldsymbol{\Sigma}$ 을 Maximum likelihood 방법으로 추정하였다. n_i 를 클래스 ω_i 의 데이터 개수라고 하면 이 때 결정규칙은 다음과 같이 판별함수 $g_i(\mathbf{x})$ 로 표현된다.

Decide ω_1 if $g_1(x) \geq g_2(x)$, where

$$g_i(\mathbf{x}) = -\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \Sigma_i^{-1} \mathbf{x} + \Sigma_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i^T \mathbf{x} + r_i, \quad (3)$$

$$r_i = -\frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_i^T \Sigma_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i^{-1}|, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\mu}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \mathbf{x}_k, \quad (5)$$

$$\Sigma_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} (\mathbf{x}_k - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x}_k - \boldsymbol{\mu})^T. \quad (6)$$

MLP는 임의의 복잡한 사후 확률함수를 모델링할 수 있는 강력하고 유연성이 있는 분류 방법이다[7]. MLP의 각 층은 노드 또는 뉴런이라고 불리는 몇 개의 처리 유닛으로 구성되어 있다. 이 유닛들은 입력 유닛을 제외하고 일반적으로 비선형 유닛이다. 은닉층의 활성화 함수를 $f()$ 라고 할 때 MLP의 은닉층에 대한 입력 net_j 는 입력들과 은닉 유닛의 가중치들의 내적이다. 노드를 활성화하기 위한 최소 한계치인 입력층 bias에 해당하는 x_0 를 식을 최소화하기 위해 1로 설정하면 은닉층에 대한 입력 net_j 와 은닉층의 출력 $y_j = f(net_j)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$net_j = \sum_{i=1}^d x_i w_{ji} + w_{j0} = \sum_{i=0}^d x_i w_{ji} \equiv \mathbf{w}_j^T \mathbf{x}, \quad (7)$$

$$f(net_j) = \frac{2}{1 + \exp(-2net_j)} - 1. \quad (8)$$

여기서 아래 첨자 i 와 j 는 각각 입력층과 은닉층의 유닛들의 인덱스이고 w_{ji} 는 은닉 유닛 j 의 입력-to-은닉 층 가중치들을 표시한다.

MLP는 한 개의 출력 유닛을 사용하여 두 개의 클래스를 구분할 수 있다. 이 실험에서는 10개의 유닛으로 은닉층을 구성하고 하나의 유닛으로 출력을 구성하였다. 급성 알코올성 간 손상 클래스에 대해 -1, 만성 에탄올성 간섭유증 클래스에 대해 +1이 출력되도록 오류 역전파(Error Back Propagation) 알고리즘을 이용하여 훈련하였다. MLP의 초기값에 따라 그 성능이 달라지므로 본 연구에서는 실험을 20회 수행하고 그 결과를 평

균하여 제시하였다. [그림 3]에 실험에 이용한 MLP 분류기의 구조 다이어그램을 나타내었다.

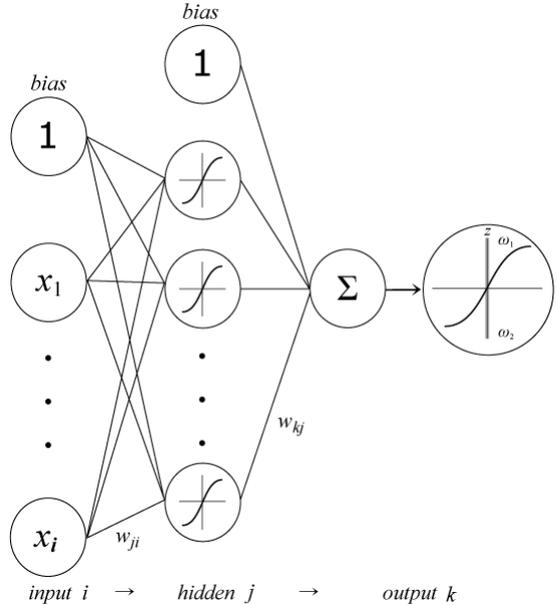


그림 3. MLP 분류기의 구조 다이어그램

2. 실험 결과

본 실험에서는 먼저 총 121개의 데이터를 테스트 그룹과 훈련 그룹으로 나누었다. 115개의 데이터는 훈련 그룹으로 나머지 6개의 데이터는 테스트 그룹으로 나누어 실험했는데 한 번 테스트를 마친 데이터는 다시 훈련 데이터로 사용하여 모든 데이터가 테스트 데이터로 사용될 수 있도록 하였다.

[표 3]에 기준선을 제거한 다음 smoothing 과정을 거친 라만 스펙트럼에서 변별력을 보일 것으로 판단되는 10개 피크의 크기를 특징 벡터로 사용하여 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간섭유증 클래스 분류 결과를 요약하였다. 표에서 보듯이 급성 알코올성 간 손상의 분류의 경우 MAP에서 83.0%의 분류율로 MLP보다 더 나은 결과를 보였고 만성 에탄올성 간섭유증의 경우 MLP에서 81.9%의 분류율을 보였다. 또한 MAP의 평균 분류율은 81.5%이고 MLP는 81.6%의 평균 분류율을 보였다.

표 3. 마이크로 라만 스펙트럼에서 간 질병 분류 결과

질병 그룹	급성 알코올성 간 손상		만성 에탄올성 간염유증	
	급성 알코올성 간 손상	만성 에탄올성 간염유증	급성 알코올성 간 손상	만성 에탄올성 간염유증
진단 분류기				
MAP	83.0 %	17.0 %	20.0 %	80.0 %
MLP	81.3 %	18.7 %	18.1 %	81.9 %

이 결과는 간 조직 샘플의 라만 스펙트럼에서 743, 754, 970, 1004, 1126, 1170, 1248, 1447, 1580, 1658 cm⁻¹ 부근 피크의 relative intensity가 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간염유증을 분류하는 기준, 즉 간 질병을 분류할 수 있는 분광학적인 지표가 될 수 있음을 나타내며, 또한 라만 스펙트럼이 간 질병의 분류에 사용될 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 마이크로 라만 스펙트럼을 이용한 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올 간염유증의 진단을 위해, 전처리 과정을 거친 스펙트럼으로부터 변별력 있는 피크를 추출하여 자동 분류기를 이용한 진단하는 방법을 살펴보았다. 전처리 단계에서는 기준선의 왜곡을 제거한 후 피크 보존에 유용한 Savitzky-Golay 필터를 이용하여 smoothing하였다. 전처리 후 급성 알코올성 간 손상과 만성 에탄올성 간염유증을 구분할 수 있는 변별력 있는 스펙트럼 피크를 확인하고 이를 이용하여 분류하였으며 그 실험 결과에 의하면 제안한 전처리 방법과 MAP 분류기로 만성 에탄올성 간염유증을 완벽하게 분류할 수 있었고 특징 벡터로 사용한 743, 754, 970, 1004, 1126, 1170, 1248, 1447, 1580, 1658 cm⁻¹ 부근의 피크를 간 질병 진단에 사용될 수 있는 가능성을 확인하였다. 이후에는 이 연구 결과를 토대로 간 질병 연구에 기여할 수 있는 지속적인 연구가 진행 중이다.

참고 문헌

- [1] R. Bataller and D. A. Brenner, "Liver fibrosis," J. of Clinical Investigation, Vol.115, pp.209-218, 2005.
- [2] Y. S. Kim and J. A. Milner, "Targets for indole-3-carbinol in cancer prevention," J. of Nutritional Biochemistry, Vol.16, pp.65-73, 2005.
- [3] S. L. Friedman, "Molecular Regulation of Hepatic Fibrosis, an Integrated Cellular Response to Tissue Injury," J. of Biological Chemistry, Vol.275, pp.2247-2250, 2000.
- [4] A. Shen, J. Ping, P. Donfack, S.-J Baek, X. Zhoh, H. Wang, and J. Hu, "In vivo study on the protection of indole-3-carbinol (I3C) against the mouse acute alcoholic liver injury by micro-Raman spectroscopy," Journal of Raman Spectroscopy, Published online in Wiley Interscience, 2008.
- [5] S-J Baek, A. Park, J. Kim, A. Shen, and J. Hu, "A simple background elimination method for Raman spectra," Submitted to Chemometric and Intelligent Laboratory Systems, 2008.
- [6] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*, Jone Wiley & Son, Inc. 2001.
- [7] M. Gniadecka, H. Wulf, N. Mortensen, O. Nielsen, and D. Christensen, "Diagnosis of Basal Cell Carcinoma by Raman Spectra," Journal of Raman Spectroscopy, Vol.28, pp.125-129, 1997.

저 자 소 개

박 아 론(Aaron Park)

정회원



- 2006년 2월 : 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부(공학사)
- 2008년 2월 : 전남대학교 전자공학과(공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과(박사과정)

<관심분야> : 디지털 신호처리, 패턴인식

백 성 준(Seong-Joon Baek)

정회원



- 1989년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학석사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학박사)

▪ 2002년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수

<관심분야> : 의료, 통신, 음성 관련 디지털 신호처리

양 병 흠(Bingxin Yang)

준회원



- 2006년 7월 : 중국 칭다오과기대학 컴퓨터과학기술전공(공학사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과(석사과정)

<관심분야> : 디지털 신호처리

나 승 유(Seung You Na)

정회원



- 1977년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1984년 2월 : University of Iowa 전자및컴퓨터공학(공학석사)
- 1996년 2월 : University of Iowa 전자및컴퓨터공학(공학박사)

▪ 1987년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수

<관심분야> : 지능제어 및 계측, 신호처리