

## 해더마드 트랜스폼 스펙트로미터 (Hadamard Transform Spectrometer)

朴 珍 培  
延世大學校 電氣工學科

### I. 서론

주파수 스펙트럼(frequency spectrum)을 측정하는 것은 과학과 공학의 여러분야에 공통된 관심사이다. 1 GHz 이하의 주파수에서는 시간영역에서 시그널을 샘플링한 다음에 discrete Fourier transform을 사용 주파수 영역의 값으로 바꾸어 스펙트럼을 구할 수 있다. 그러나 광학(optical) 또는 분광화학적(spectrochemical) 측정에서와 같이 1 GHz 이상의 주파수가 사용될 때는 시간영역에서의 샘플링이 어렵거나 불가능하다.

분광분석(spectroscopic analysis)실험에서는 샘플은 광주파수(light frequency)의 시그널을 방사한다. 이러한 방사는 화학반응과정에서 나오거나 또는 전자기 방사(electro-magnetic radiation)를 발생하는 외부전원(external source)을 사용. 샘플을 활성화하므로 나오게 된다. 방사된 빛은 흡수(absorption), 산란(scattering) 또는 반사(reflection)등의 과정을 통하여 출력 스펙트럼(output spectrum)을 형성한다.<sup>[1]</sup> 출력 스펙트럼으로 부터 각각의 파장(wavelength)별로 얼마나 많은 양의 빛이 출현하고 있는지를 측정하는 것을 분광측정(spectrometry)이라고 부르며, 이러한 목적으로 사용하는 계측기를 분광측정기(spectrometer)라 부른다.

이런 분광측정의 목적은 주파수 스펙트럼을 정확하게 개산(estimate)하는 것인데 이를 달성하기 위해서는 측정 잡음(noise)을 줄이거나 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 높여야 한다. 만약 잡음의 주근원(main source)이 검파기(detector)이고

잡음이 검파기에 입사되는 빛의 크기와 무관하다면 multiplexing을 사용함으로써 신호대 잡음비를 증가시킬 수 있다. 현재 널리 쓰이고 있는 대표적인 multiplexing 계측기인 Fourier transform spectrometer(FTS)는 성능이 우수하나, 가격이 비싸고 데이터 처리 속도가 느리고 미세한 진동(vibration)에도 크게 영향을 받는다는 단점을 갖고 있다. 최근에 이러한 단점을 보완하고 다른 여러가지 장점을 갖는 Hadamard transform spectrometer(HTS)가 등장하여 많은 주목과 관심을 끌고 있다.

본 고에서는 multiplexing 계측기인 HTS의 기본 원리와 시스템 모델을 소개하고 monochromator 및 FTS와 비교하여 성능을 고찰하려고 한다. 이를 위해 먼저 HTS의 기본원리를 알아보자

### II. 기본 원리

#### 1. 단순한 분광측정 시스템

그림 1은 단순한 분광측정 시스템이다. 샘플로부터 나온 빛은 프리즘(prism) 또는 회절격자(grating)에 의하여 각 파장에 따라 다르게 공간적으로 분산된다. 스펙트럼 측정은 검파기 배열(detector bank)중에 있는 각각의 검파기에 입사하는 빛의 강도(intensity)를 기록하면 되는 단순한 일이다. 이러한 검파기 배열법은 신속한 측정을 위해서는 가장 적합하다. 그러나 이러한 시스템은 몇가지 단점을 갖고 있다. 첫번째 단점은 원하는 해상도(resolution)를 얻기 위해서는 검파기 크기를 아주 작게하여 다수의 검파기를 사용해야 하나, 실제적으로 불가능하거나 엄청난 경비가 소요된다는 것이다.

두번째 단점은 각각의 검파기가 다른 감도(sensitivity)와 효율(efficiency)을 갖기 때문에 교정(calibration)이 어렵다는 것이다. 이러한 문제들을 해결하는 간단한 방법은 그림 2에서와 같이 하나의 검파기만을 사용하고 그 앞에 하나의 슬릿(slit)을 갖는 마스크(mask)를 설치하여 한순간에 단지 한 파장의 빛이 검파기에 도달할 수 있도록 마스크를 위치하는 것이다. 슬릿을 한 단씩 움직인 후 각각의 파장에서의 강도를 측정하여 스펙트럼을 측정할 수 있다. 잡음(noise)의 주 근원(source)이 시그널 강도의 동요(fluctuation)이면 이러한 싱글슬릿(single-slit) 스펙트로미터 또는 단색광측정기(monochromator)가 가장 적합하다. 그렇지만 잡음의 주 근원이 검파기 그 자체이면 더 나은 방법이 있다.

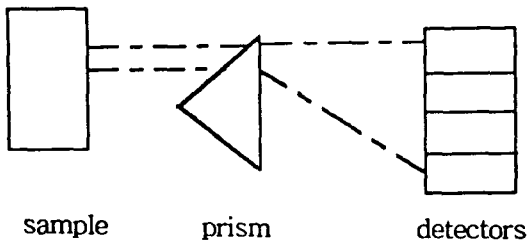


그림 1. Multidetector 스펙트로미터 개요도

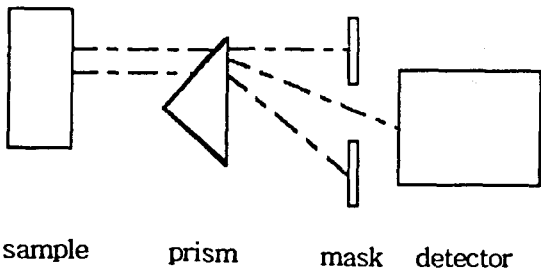


그림 2. Monochromator 개요도

2. Multiplex 이득

잡음의 주 원인이 검파기에서 발생할 때 싱글 슬릿 스펙트로미터를 고려해 보자. 한 번에 아주 작은 부분의 시그널이 검파기에 도달하므로 시그널 파워(signal power)대 검파기 잡음파워의 비율이 아주 작다. 같은 해상도로 만약 더 많은 시그널 에너지를

검파기에 도달하게 하면 스펙트럼의 신호대 잡음 비(signal-to-noise ratio)을 높일 수 있다. 그림 3 (a)에 나타난 스펙트로미터는 3개의 다른 측정을 위하여 3개의 다른 마스크를 사용한다. 그림 3 (b)는 각각의 측정시 마스크는 2개의 불투명 셀(opaque cell)과 하나의 투명 셀(clear cell)을 갖고 있음을 보여준다.

목적은 3번의 측정치  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ 로부터 실제(true)의 스펙트럼 성분값  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$ 를 계산(estimate)하는 것이다. 각각의 검파기 측정값  $\eta_i$ 는 마스크를 통과해 나온 시그널과 랜덤변수(random variable)  $\epsilon_i$ 로 표시할 수 있는 검파기 내부 잡음의 합이다.  $\epsilon_i$ 는 평균값이 영(zero)이고 분산(variance)이 2인 동일분포 비연관 랜덤변수(identically distributed, uncorrelated random variable)이다. 그림 3(b)의 배열에서  $\Psi_1$ 에 대한 가장 좋은 에스티메이터(estimator)는 단순히 측정값  $\eta_1$ 이며 각각의  $\Psi_i$ 에 대한 계산에서의 오차(error)는  $\epsilon_i$ 이다. 또, 이 때의 평균자승오차(mean-square-error)는  $\sigma^2$ 이다

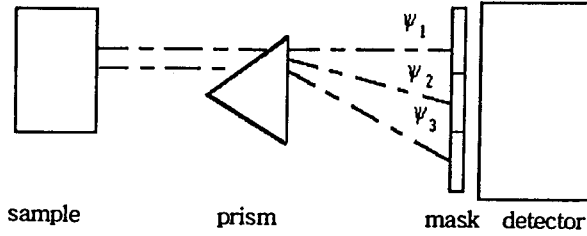
다음으로 그림 3(c)에서와 같은 multiplexing 배열을 고려해보자. 각각의 측정에 대하여 마스크는 두 개의 투명 셀과 하나의 불투명 셀을 갖고 있으므로, 결과적으로 검파기 출력은 두개의 스펙트럼 성분과 검파기 잡음의 합이 된다. 첫번째와 세번째 측정값을 더하고 두번째 측정값을 빼주면  $g_1$ 을 얻게 되는데  $g_1$ 은 단지 첫번째 스펙트럼 성분값과 각각의 측정에서의 검파기 잡음에 의존한다.  $g_1$ 을 2로 나누면 첫번째 스펙트럼 성분  $\Psi_1$ 의 계산값(estimate)을 얻는다. 이와 같은 방법으로  $\Psi_2$ 와  $\Psi_3$ 에 대한 계산값을 얻을 수 있다. 이 때의 오차는 그림 3 (c)와 같이 얻을 수 있다. 첫번째 에스티메이터  $\Psi_1$ 에 대한 오차를 자승하면 다음 식과 같다.

$$\epsilon_1^2 = \frac{1}{4}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 + 2\epsilon_1\epsilon_3 - 2\epsilon_1\epsilon_2 - 2\epsilon_2\epsilon_3)$$

위 식에서 측정오차가 서로 비연관(uncorrelated)하고 평균값은 영(zero)이 되므로 네번째, 다섯번째, 여섯번째 항이 영이 되어, 다음식과 같이 평균자승오차  $\epsilon_1^2$ 를 얻는다.

$$\bar{\epsilon}_1^2 = \frac{1}{4}(\sigma^2 + \sigma^2 + \sigma^2) = \frac{3}{4}\sigma^2$$

위 식으로부터 multiplexing 배열을 사용함으로써



(a)



$$\begin{aligned} \eta_1 &= \psi_1 + \varepsilon_1 \\ \eta_2 &= \psi_2 + \varepsilon_2 \\ \eta_3 &= \psi_3 + \varepsilon_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_1 &= \eta_1 \\ \hat{\psi}_2 &= \eta_2 \\ \hat{\psi}_3 &= \eta_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon_1^2} &= \sigma^2 \\ \overline{\varepsilon_2^2} &= \sigma^2 \\ \overline{\varepsilon_3^2} &= \sigma^2 \end{aligned}$$

(b)

Detector  
Readings

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \psi_1 + \psi_3 + \varepsilon_1 \\ \eta_2 &= \psi_2 + \psi_3 + \varepsilon_2 \\ \eta_3 &= \psi_1 + \psi_2 + \varepsilon_3 \end{aligned}$$

Spectrum  
Estimators

$$\begin{aligned} g_1 &= \eta_1 + \eta_3 - \eta_2 = 2\psi_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ g_2 &= \eta_2 + \eta_3 - \eta_1 = 2\psi_2 - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ g_3 &= \eta_1 + \eta_2 - \eta_3 = 2\psi_3 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_1 &= \frac{1}{2} g_1 \\ \hat{\psi}_2 &= \frac{1}{2} g_2 \\ \hat{\psi}_3 &= \frac{1}{2} g_3 \end{aligned}$$

Error in

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

Estimates

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

( $\varepsilon_i = \hat{\psi}_i - \psi_i$ )

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3)$$

Mean-Square

$$\overline{\varepsilon_1^2} = \frac{1}{4} (3\sigma^2)$$

Error in

$$\overline{\varepsilon_2^2} = \frac{1}{4} (3\sigma^2)$$

Estimates

$$\overline{\varepsilon_3^2} = \frac{1}{4} (3\sigma^2)$$

(c)

그림 3. 싱글 슬릿 스펙트로미터와 Multiplexing 스펙트로미터의 비교

(a) 공통된 스펙트로미터 개요도

(b) 싱글 슬릿 스펙트로미터 분석

(c) Multiplexing 스펙트로미터 분석

싱글슬릿 배열에서 보다 25% 줄어든 평균자승오차를 얻을 수 있다.

이러한 예로부터 multiplexing 기법을 사용하여 평균자승오차를 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있고 multiplexing이 어떻게 적용되는 가를 쉽게 알 수 있다. 그러나 더 많은 스펙트럼 성분과 더 많은 슬릿이 사용된다면, 최적의 multiplexing 배열을 선택하는 것이 더욱 어려워진다. 다행히도 이 문제는 simplex matrix(S-matrix)를 사용하면 해결할 수 있다.

3. S-matrix

S-matrix는 Hadamard matrix를 변형하여 얻을 수 있다. [2] 프랑스의 수학자 Hadamard(1865-1963)가 처음으로 발견한 Hadamard matrix는 단지 1과 -1로 구성되며 각각의 행(row)은 orthogonal set을 이루고 있다. [3] 다음은 한 예로 Hadamard matrix를 보여 준다.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

S-matrix로 바꾸기 위해서는 첫번째 행과 첫번째 열을 제거하고 -1을 1로 바꾸고 1을 0으로 바꾸면 되는 데, 이렇게 하여 얻어진 S-matrix는 다음과 같다. [2]

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

위와같은 cyclic S-matrix에서는 첫번째 행만 알면 다른 행들은 left-shift register를 사용하여 쉽게 얻을 수 있다. 맨 왼쪽의 수는 맨 오른쪽으로 이동하고 나머지 숫자는 한칸씩 왼쪽으로 이동하면 된다.

여기서 1은 투명한 셀을 의미하고, 0은 불투명한 셀을 의미한다. 이 S-matrix의 i번째 행은 i번째 측정을 위한 마스크 배열을 나타내고 j번째 열은 j번째 스펙트럼 성분을 나타내고 있다. 위의 경우는 측정할 스펙트럼 성분의 수 N=7 이고 7번 측정이 요구된다. 각각의 마스크 배열에서는 (N+1)/2=4개의 스펙트럼 성분이 마스크를 통과하고 나머지 (N-1)/2=3개의 스펙트럼 성분은 통과하지 못한다. 그림 4는 (2N-1)=13개의 element를 갖고 있는 이동 마스크(movable mask)을 보여준다. 매 측정후에 마스크 전체가 왼쪽으로 한칸씩 이동하므로 측정때마다 항상 4개의 투명한 셀과 3개의 불 투명한 셀을 갖게 되며 7번의 다른 마스크 배열을 얻을 수 있다

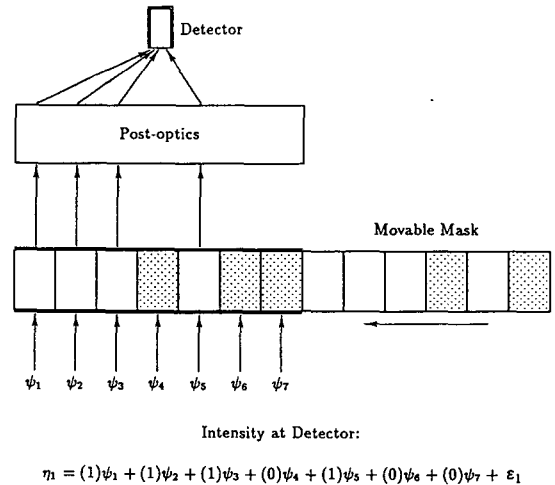


그림 4. 이동형 마스크

4. 시스템 모델 및 분석

N번 측정할 측정값의 결과는 다음과 같이 matrix를 사용하여 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix}$$

또는  $\eta = S\Psi + \epsilon$

또한 N개의 스펙트럼 계산값은 다음과 같이 S-matrix의 inverse와 검파기 측정값(detector

reading)을 곱하여 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\psi}_1 \\ \hat{\psi}_2 \\ \vdots \\ \hat{\psi}_N \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix}$$

또는  $\hat{\psi} = \mathbf{S}^{-1}\eta$

이러한 스펙트럼의 개선값은 fast Hadamard transform(FHT)을 사용하여 계산할 수 있는데, 일반적인 matrix 연산방법을 사용하면  $N(N-1)$  연산 (덧셈과 뺄셈)이 요구되나 FHT를 사용하면 단지  $(N+1)\log_2(N+1)$  연산만이 요구되므로 훨씬 빠르게 계산할 수 있다. <sup>[4,5]</sup>

이러한 HTS 시스템에서 평균자승오차는 다음과 같이 주어진다. <sup>[6]</sup>

$$\bar{\epsilon}^2 = \frac{4N\sigma^2}{(N+1)^2}$$

큰 N에 대해서는 다음과 같이 근사값을 얻을 수 있다.

$$\bar{\epsilon}^2 \approx \frac{4\sigma^2}{N}$$

위의 평균오차 방정식을 그림 3(c)를 이용 일반화시켜 증명해보자. 전에 했던 것처럼  $\psi_i$ 를 포함하고 있는  $(N+1)/2$ 개의 측정값들을 함께 더한 값에서  $\psi_i$ 를 포함하지 않는  $(N+1)/2$  개의 측정값들을 빼주면  $g_i$ 를 얻을 수 있다. 그런데 각각의  $g_i$ 에는 측정오차들의 항이 포함되어 있으므로  $g_i$ 를 평균값이  $[(N+1)/2] \psi_i$ 이고 분산이  $N\sigma^2$ 인 랜덤변수로 볼 수 있다. 여기서  $g_i$  에  $2/(N+1)$ 을 곱해서 개선값  $\hat{\psi}_i$ 를 얻을 수 있으므로,  $\hat{\psi}_i$ 는 평균값  $\psi_i$ 와 분산  $N\sigma^2 / [(N+1)/2]^2$  을 갖는 랜덤변수로 해석될 수 있다. 이렇게 하여 얻어진  $\hat{\psi}_i$ 의 분산이 잡음의 평균자승오차와 일치하므로 위의 평균자승오차 방정식의 타당성이 입증되었다.

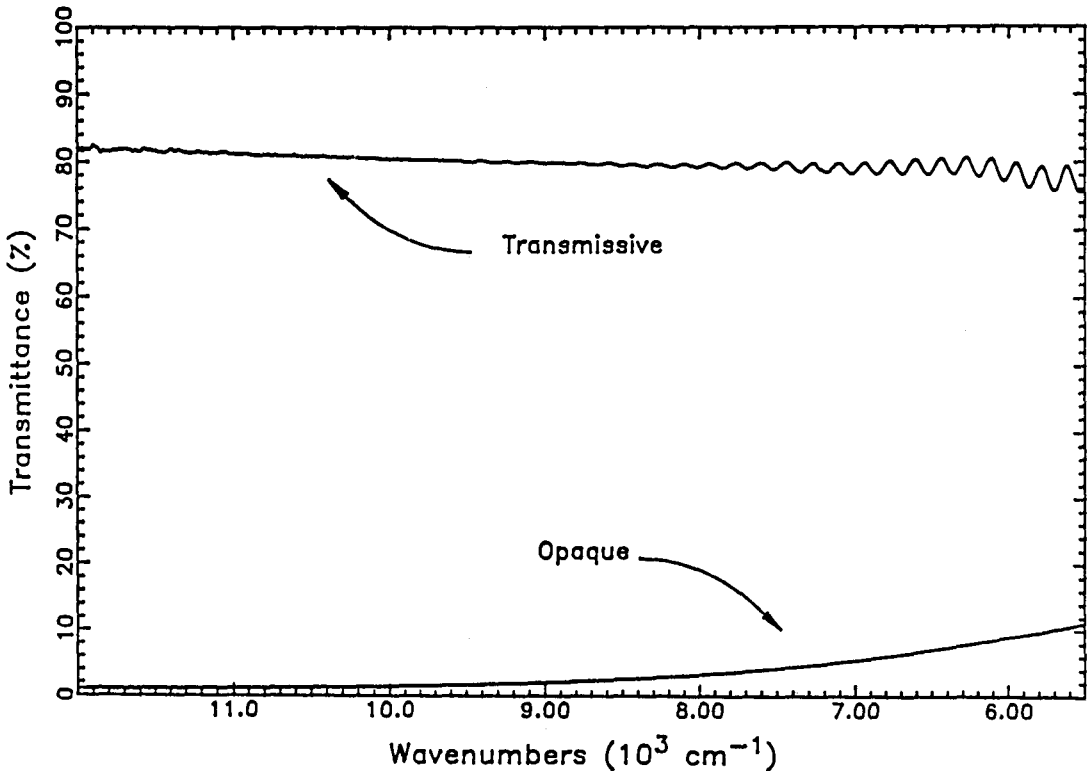


그림 5. PLDC 마스크 투과율 특성 곡선

### Ⅲ. 성능 분석 및 비교 고찰

#### 1. 고정형 마스크(stationary mask) 시스템

그림 4와 같은 이동형 마스크(moving mask)는 기계적으로 작동하므로 인하여 jamming과 misalignment 등의 문제점을 야기한다. 그러나 최근에 PDLC(polymer-dispersed liquid crystal)을 재료로 한 고정형 electro-optical 마스크가 소개되었다.<sup>[7,8]</sup> 이러한 electro-optical 마스크에서 각각의 셀은 빛을 산란(scattering)하는 "off"상태와 빛을 통과시키는 "on"상태로 전기적인 스위칭이 가능하다. 전압이 인가되지 않은 경우는 강한 빛의 산란에 의하여 불투명하게 되고, 적절한 전압(25-100 Vrms)을 가하면 투명하게 된다. 그림 5는 전형적인 PDLC 마스크의 투과율 곡선을 보여준다. 이러한 PDLC 마스크는 기계적인 문제점을 해결했지만 또 다른 문제점을 야기한다. 그러한 문제점은 PDLC 마스크의 비이상적 투과율 특성(nonideal transmittance characteristics)이다. 이상적 마스크(ideal mask)의 셀은 입사광의 파장에 관계없이 "on"상태에서 100%의 투

과율을 갖고 "off"상태에서 0% 투과율을 갖고 있으나, 그림 5에 나타난 PDLC 마스크의 셀은 파장에 따라 투과율이 변화하고 또한 "on"상태에서 76-82% 투과율과 "off"상태에서 2-12% 투과율을 갖으므로 바람직 하지 않다. 그러나 최근에 이러한 비이상적인 특성을 보상하는 기술이 개발되었다.<sup>[9,10,11,12]</sup>

#### 2. HTS와 monochromator 의 비교

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 HTS와 monochromator의 성능을 비교, 고찰해 보자. 그림 6은 시뮬레이션에 사용된 입력 스펙트럼(input spectrum)을 보여준다. 4개의 피크(peak)중 중앙에 있는 Lorentzian band 모양의 doublet는 높이가 0.8이고, 왼쪽과 오른쪽에 있는 singlet는 높이가 각각 1.0 과 0.8이다. 이번 시뮬레이션에는 HTS를 위해 그림 7의 투과율 특성을 갖는 electro-optical 마스크가 사용되었다. 마스크 셀의 수는  $N=255$  개로 정했으며, 잡음(noise)의 평균은 영(zero)이고 잡음분산(noise variance)은 0.1 이었다. 그림 8은 이상적인 monochromator(또는 싱글슬릿 스펙트로미터)에 의

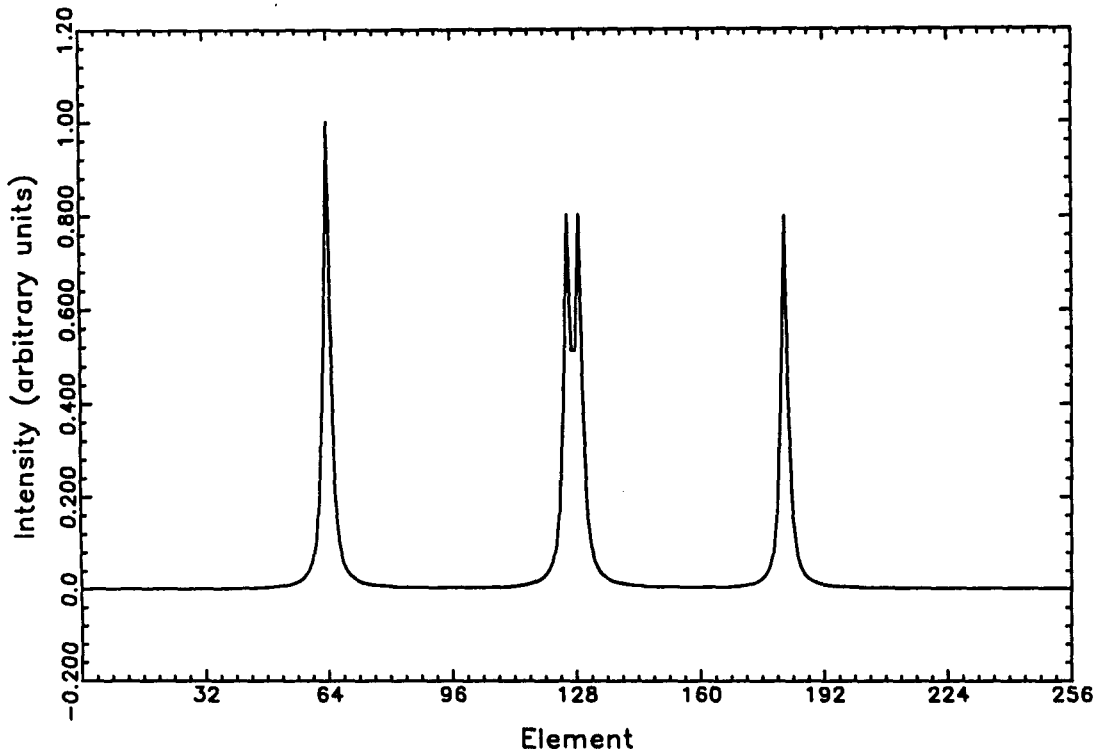


그림 6. 입력 스펙트럼

하여 얻어진 출력 스펙트럼이다. 잡음이 매우 심하고 여러개의 피크가 나타나서 그림 6의 입력 스펙트럼의 모습과는 차이가 심하다. 그림 9는 electro-optical 마스크를 사용하는 HTS 시스템으로 부터 얻어진 출력 스펙트럼이다. doublet와 singlet가 분명히 나타났을 뿐만 아니라 잡음도 monochromator의 경우 (그림 8)에 비해 현저하게 작다. 이는 HTS가 monochromator보다 훨씬 나은 성능을 갖고 있음을 보여준다. 또한 HTS는 분광 가감산(spectral co-addition or subtraction)<sup>[13]</sup>이 가능하므로 100번의 분광가산을 한 결과, 그림 10의 출력 스펙트럼을 얻으므로써 입력 스펙트럼 (그림 6)의 모양을 거의 회복했다. 그러므로 HTS가 monochromator에 비해 더욱 더 나은 성능을 갖고 있음이 입증되었다.

3. HTS 와 FTS의 비교

Fourier transform spectrometer(FTS)는 Michelson interferometer에 Fourier transform 을 적용하여 스펙트럼을 개선(estimate)하는 계측기

로 FTS는 monochromator에 비해 3가지 장점을 갖고 있다.<sup>[14,15]</sup> 첫째로 multiplex 이득을 갖고 있다.<sup>[16]</sup> 둘째로, 주파수 정밀(frequency precision) 이득을 갖는다. 광학적 지연(optical retardation) 측정과 주파수 측정에서 같은 정밀도 (precision)을 갖으므로 분광 가감산이 가능하다. 셋째로 throughput 이득을 갖는다.<sup>[15,17]</sup> monochromator와 같은 dispersive spectrometer는 슬릿을 사용하지만 FTS와 같은 interferometer는 개구(aperture)를 사용한다. 같은 해상도에서 이러한 개구를 통과하는 빛의 solid angle이 슬릿을 통과하는 빛의 solid angle보다 크다. 그런데 throughput은 solid angle에 비례하므로 FTS는 throughput 이득을 갖는다.

HTS는 FTS와 마찬가지로 multiplex 이득을 갖고 있다. 고정형 마스크 를 장착한 HTS는 움직이는 부분이 없으므로 한 마스크 셀을 통과하는 빛의 스펙트럼 특성이 그대로 유지되어 주파수 정밀 이득을 누릴 수 있다. 그러나 HTS와 같은 dispersive

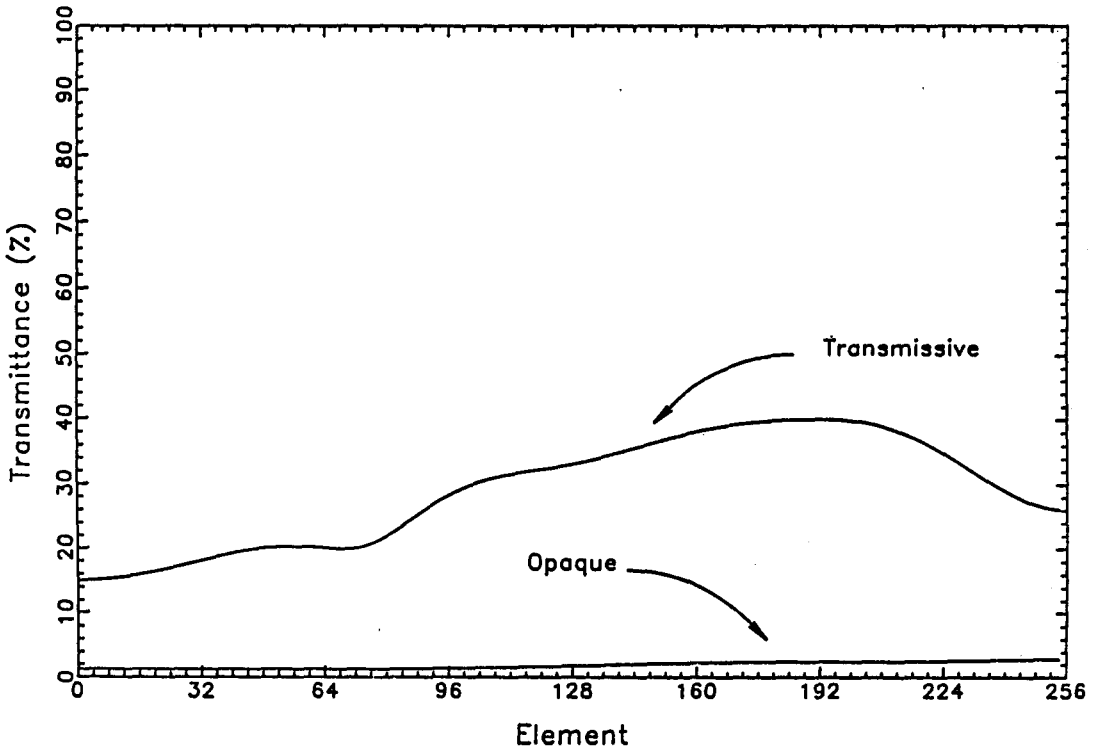


그림 7. Electro-optical 마스크 투과율 특성 곡선

spectrometer는 4이상의 f-number을 갖고 있어 FTS의 f-number(1-4)보다 크기 때문에 상대적으로 작은 throughput 이득을 갖는다.

Multiplexing spectrometer가 Raman 스펙트럼 분석에 사용될때, 강한 Rayleigh 광선이 스펙트럼 전체에 분산되어 신호대 잡음비를 현저하게 감소시킨다.<sup>[18]</sup> 그러므로 Raman 스펙트럼 분석에서는 이러한 Rayleigh 광선을 줄이거나 제거할 필요가 있다. FTS에서는 광학필터(optical filter)를 사용하여 Rayleigh 광선을 제거하는데, 이런 광학 필터의 사용은 이를 통과하는 빛의 강도를 줄일 뿐만 아니라 측정가능한 주파수 범위(frequency range)를 줄인다. 반면에 HTS에서는 회절격자(grating)를 적절히 조정하여 Rayleigh 광선이 마스크에 도달하지 못하도록 하는 공간필터(spatial filter)를 이용한다.<sup>[13]</sup> 단지 Rayleigh 광선만을 선별적으로 제거하기 때문에 결과적으로 신호대 잡음비를 증가시킨다.

측정값으로부터 각각의 스펙트럼 성분을 개선하는데 FTS는 복소수 (complex number)계산이 요

구되는 fast Fourier transform(FFT)을 사용하므로 실수(real number)계산이 요구되는 fast Hadamard transform(FHT)를 사용하는 HTS에 비해 속도(speed)가 느리다.<sup>[5]</sup>

FTS에서는 분광범위(spectral range)를 줄이지 않고도 Michelson interferometer 안에서 이동거울(moving mirror)의 이동거리를 증가시킴으로 해상도(resolution)를 높일 수 있다. HTS에서도 회절격자를 크게 만들면 해상도를 높일 수 있으나 반면에 측정할 수 있는 분광범위가 줄어들 뿐만 아니라 검파기의 dynamic range도 줄어든다.<sup>[19]</sup> 또한 FTS는 3개의 interferometer로 구성되는데, 첫번째는 signal interferometer로 시그널의 interferogram을 얻는데 사용되고 두번째는 reference interferometer로 시스템을 동기화(synchronize)하고 빛의 간섭현상을 교정하는데 사용된다. 세번째는 white-light interferometer로 간섭파의 위상(phase)을 교정하기 위해 사용된다. 이런 복잡한 장비들은 FTS의 가격을 증가시키는 요인이 된다. 반면에 HTS는

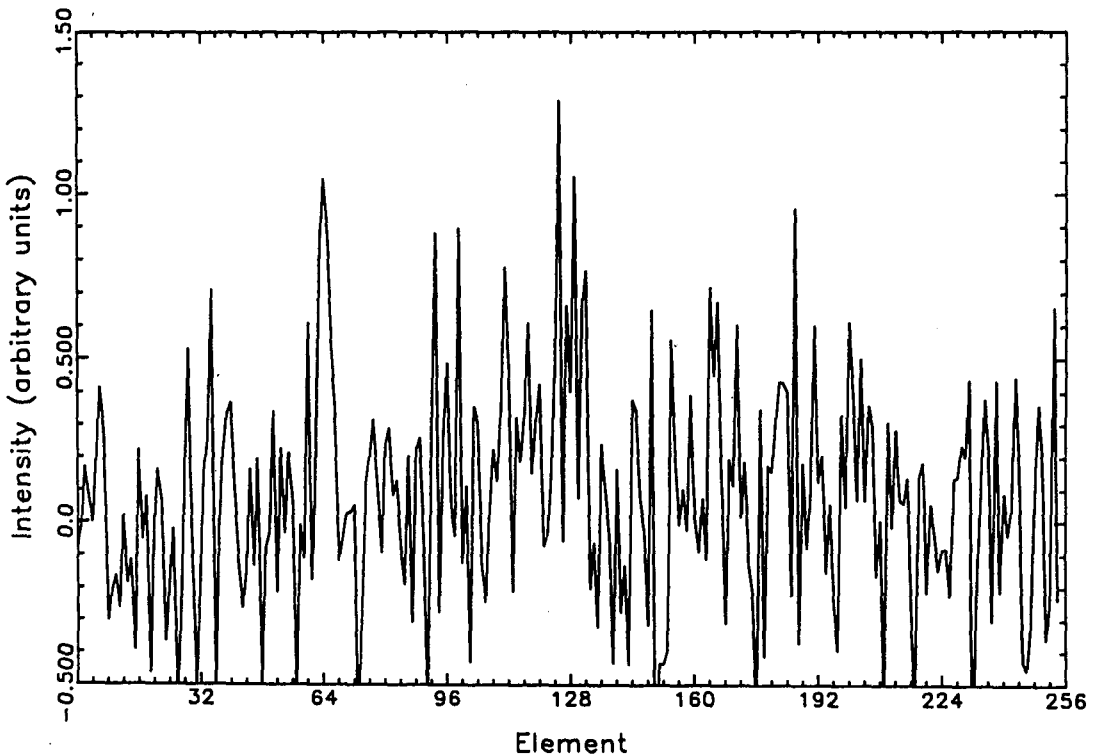


그림 8. Monochromator 출력 스펙트럼



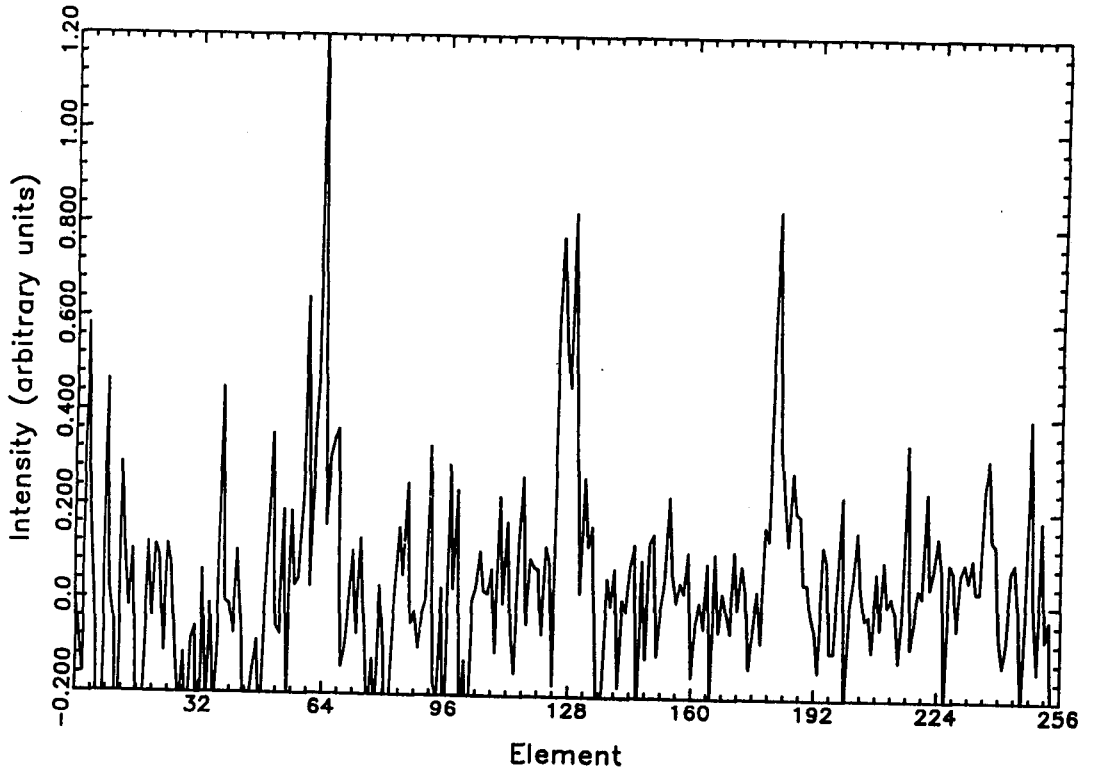


그림 9. HTS 출력 스펙트럼

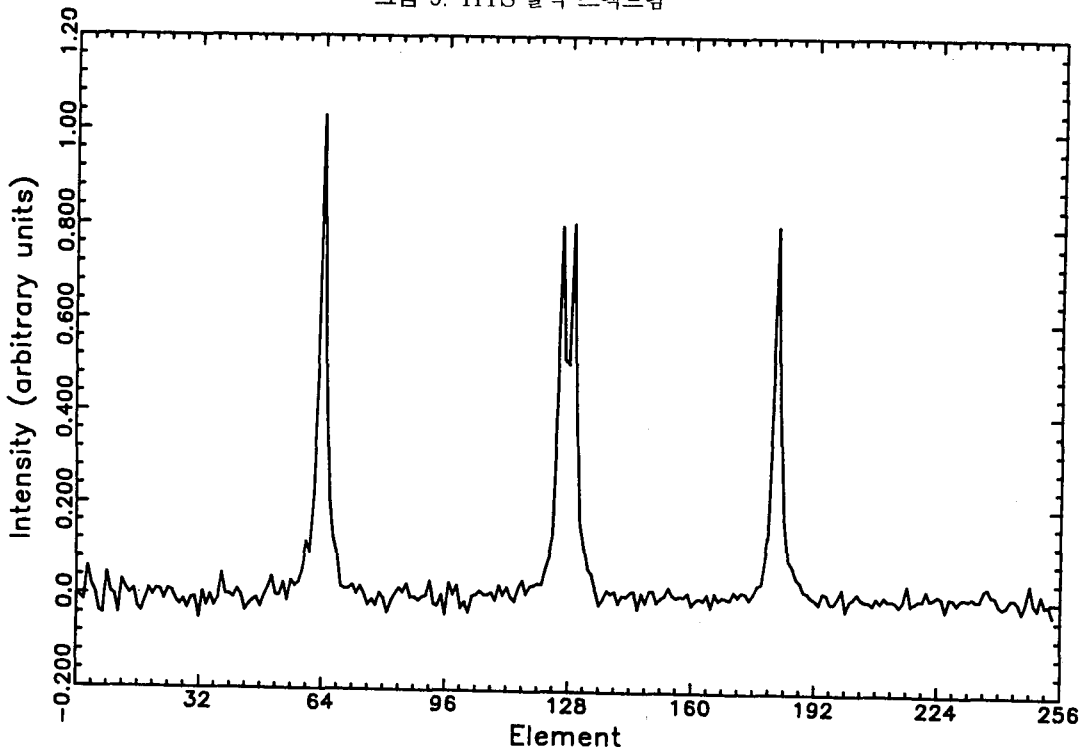


그림 10. 분광가산을 사용하여 얻은 HTS 출력 스펙트럼

Hadamard 마스크를 monochromator에 장착하여 싼 가격으로 제작 할 수 있다.

FTS에서는 이동 광분리기(movable beamsplitter)를 사용하기 때문에 정확한 기계적 조정(mechanical alignment)이 요구 될 뿐만 아니라 아주 약한 진동(vibration)도 실험에 크게 영향을 미친다. 반면에 고정 마스크를 장착한 HTS에서는 기계적인 조정이 필요없어 진동에 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 정비(maintenance)가 간단하고 미숙련자도 쉽게 장비를 사용할 수 있다. 표 1은 HTS와 FTS의 일반적인 장단점을 비교한 것을 요약한 것이다.

표 1. HTS와 FTS의 특성 비교

Characteristic	HTS	FTS
Spectrometer	dispersive	interferometric
Spectral collection	optical encodement via grating and mask	moving mirror
Rayleigh-line rejection	spatial filtering	optical filtering
Transformation	FHT	FFT
Speed	fast	slow
Multiplexing	yes	yes
Throughput Advantage	no	yes
Co-addition/subtraction	yes	yes
Resolution	low	high
Spectral range	narrow	wide
Dynamic range	small	large
Simple electronics	yes	no
Cost	low	high
Continuous moving parts	no	yes

#### IV. 결론

분광측정 시스템에서 잡음이 주로 검파기에 의해 발생할때는 Hadamard multiplexing을 통하여 평균자승오차를 줄일수 있다. 과거에는 이러한 multiplexing을 행할때 기계적으로 작동되는 이동 마스크를 사용함으로써 jamming과 misalignment 등의 문제점을 야기하였으나, 최근에 등장한 전기적으로 제어되는 고정형 마스크인 PLDC 마스크를 사용함으로써 이동 마스크의 단점을 해결할 수 있게 되었다.

그러나 PLDC 마스크도 비이상적인 투과율 특성을 갖고 있어 다시 새로운 문제를 야기 시켰지만, 적절한 보상방법이 개발되어 가치를 발휘하게 되었다. 이러한 PLDC 마스크를 장착한 Hadamard Transform Spectrometer(HTS)는 현재 널리 쓰이고 있는 Fourier Transform Spectrometer(FTS)를 대체하기에 충분한 장점들을 갖고 있다. 특별히 데이터 처리 속도가 빠르고, 가격이 저렴하며, 진동에 안정되고, 유지비가 적게 든다는 장점을 갖고 있으므로 HTS는 분광 측정기로 적합하며, 환경감시(environmental monitoring), 생산과정감시(production-process monitoring), 의료진단기기 및 영상처리기기 등에 효과적으로 응용될 수 있다.

#### 參考文獻

- [1] J. D. Ingle, Jr. and S. R. Crouch, *Spectrochemical Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., pp. 4-5, 1988.
- [2] M. Harwit and N. J. A. Sloane, *Hadamard Transform Optics*, Academic Press, New York, pp. 1-19, 1979.
- [3] L. D. Baumert, Codes with Special Correlation, in *Digital Communications with Space Applications*(S. W. Golomb ed.), Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., p. 54, 1964.
- [4] E. D. Nelson and M. L. Fredman, "Hadamard Spectroscopy", *J. Opt. Soc Amer.*, vol. 60, pp. 1664-1669, 1970.
- [5] B. K. Harms, J. B. Park, and S. A. Dyer, "On the use of Fast Hadamard Transforms for Spectrum Recovery in Hadamard Transform Spectroscopy", *Applied Spectroscopy*, vol. 46, no. 9, pp. 1358-1361, 1992.
- [6] M. Harwit and N. J. A. Sloane, *Hadamard Transform Optics*, Academic Press, New York, p. 59, 1979.
- [7] N. A. Vaz, G. W. Smith, and G. P.

- Montgomery, Jr., "A Light Control Film Composed in an Epoxy Matrix", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, vol. 146, pp. 17-34, 1987.
- [8] D. C. Tilotta, R. M. Hammaker, and W. G. Fateley, "A Visible Near Infrared Hadamard Transform Spectrometer Based on a Liquid Crystal Spatial Light Modulator Array : A New Approach in Spectrometry", *Applied Spectroscopy*, vol. 41, pp. 727-734, 1987.
- [9] J. B. Park, et. al., "On the Mean-Square Error of Various Spectrum Recovery Techniques in Hadamard Transform Spectrometry", *Applied Spectroscopy*, vol. 44, pp. 219-228, 1990.
- [10] R. A. Dyer, J. B. Park, et. al., "Implementation Problems in Hadamard Spectrometry", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. IM-39, pp. 163-167, 1990
- [11] S. A. Dyer, J. B. Park, et. al., "A Fast Spectrum-Recovery Method for Hadamard Transform Spectrometers Having Nonideal Masks", *Applied Spectroscopy*, vol. 43, pp 435-440, 1989.
- [12] T. W. Johnson, J. B. Park, et. al., "An Efficient Method for Recovering the Optimal Unbiased Linear Spectrum- Estimate from Hadamard Transform Spectrometers Having Nonideal Masks", *Applied Spectroscopy*, vol. 43, pp. 746-750, 1989.
- [13] D. C. Tilotta, et. al., "Hadamard Transform Visible Raman Spectrometry", *Applied Spectroscopy*, vol. 41, pp. 1280-1287, 1987.
- [14] P. R. Griffiths, *Chemical Infrared Fourier Transform Spectroscopy*, John Wiley and Sons, New York, pp. 3-6, 1975.
- [15] P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, *Italic Infrared Spectrometry*, John Wiley and Sons, New York, pp. 274-282, 1986.
- [16] J. A. Decker, Jr. "Experimental Realization of the Multiplex Advantage with a Hadamard Transform Spectrometer", *Italic.*, vol. 10, pp. 510-514, 1971.
- [17] P. Jacquinot, "The Luminosity of Spectrometers with Prisms, Gratings or Fabry-Perot Etalons", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 44, pp. 761-765, 1954.
- [18] D. B. Chase, "Fourier Transform Raman Spectroscopy", *J. Am. Chem Soc.*, vol. 108, pp. 7485-7488, 1986.
- [19] A. P. Bohlke, et. al., "Near-Infrared Hadamard Transform Raman Spectrometry, *J. Molec. Struct.*, vol. 200, pp. 471-481, 1989.

## 筆者紹介



朴 珍 培

1954年 8月 7日生

1977年 연세대학교 전기공학과 (학사)

1985年 미국 Kansas State University 전기공학과 (석사)

1990年 미국 Kansas State University 전기공학과 (박사)

1979年 10月 ~ 1981年 7月 대우자동차 주식회사 연구원

1990年 8月 ~ 1991年 12月 미국 Kansas State University 전기공학과 조교수

1992年 3月 ~ 현재 연세대학교 전기공학과 조교수