Proc. of 6th Conf. of Waves & Lasers. 1991. 2. 20

코헤런트 라만 분광학을 위한 다중채널 데이타 수집과 제어장치

A Multichannel Data Acquisition and Control System for Coherent Raman Spectroscop

박 승 남, 한 재 원, 이 충 희
한국표준연구소 온도연구실

코헤런트 라만분광학 실험에 사용할 다중채널 데이타 수집과 제어장치를 제작하고 프로그램을 개발하였다. CARS 신호를 규격화하기 위해 두 레이저의 세기를 측정하기 위해 최대값 검출기를 제작하였고, 제작한 로직제어기를 프로그램으로 제어하여 측정을 동기시켰다. 또한 우라늄 음극전구의 optogalvanic 신호를 측정하여 색소레이저의 파장을 교정할 수 있었다. 프로그램은 메뉴선택방식으로 작성하여 수정과 사용이 용이하도록 하였다. 실제로 압력이 100 Torr 인 질소의 CARS 신호를 측정하여 이 장치의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

분광학 실험에 사용할 수 있는 데이타 수집장치와 프로그램은 많이 개발되어 있어 일반적으로 측정장치와 같이 제공되고 있다. 또한 간단한 측정에는 아날로그 방식으로 측정장치를 구성하여 규격화된 분광신호를 얻을 수 있어 이제 까지 여러 분광실험에서 자주 사용하였다. 그러나 최근에 데이타의 분석을 위한 편리한 응용소프트웨어들이 사용되면서 아날로그 방식의 데이타 보다는 처리와 보존이 용이한 디지탈방식의 데이타 수집장치를 더 선호하고 있는 경향이다.[1,2] 특히 펄스레이저를 사용한 실험에서 데이타를 수집할 때 박스카 평균기 (boxcar averager)를 사용하게 되는데 이 때 아날로그방식으로 평균을 취하기 위해 측정회수를 늘리게 되면 소멸오차(droop error)가 커지게 된다. 또한 분광신호와 광원들의 세기가 복잡한 함수관계를 가질 때는 아날로그 처리기(analog processor)로는 분광신호의 규격화가 어렵고, 요동이 큰 펄스 마다의 규격화는 더욱 어렵게 된다.[3] 더구나 어떤 특정한 장비만을 위해 개발된 응용 소프트웨어는 여러 장비가 모여서 한 시스템을 이룰 때는 사용이 불편하여 여러 장치를 유기적으로 통합하여 측정과 제어를 할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 CARS 분광학 실험에 적합한 디지탈 데이타 수집·제어 장치를 제작한 내용과 이 장치를 사용하여 실제로 CARS 분광선을 측정한 내용을 기술하였다.

일반적으로 펌프광의 고갈(depletion)을 무시하면 CARS 신호는 펌프광 세기의 제곱, 스톡스(Stocks)광의 세기와 매질의 제 3차 비선형감수율의 제곱에 비례한다. 레이저의 세기에 따라 분광신호를 규격화하게 되면 비선형감수율을 측정할 수 있다. 측정한 비선형감수율의 세기와 모양은 매질의 온도나 밀도에 다르게 된다. 이 원리를 이용하여 CARS 분광학은 고온기체의 온도와 밀도측정에 유용하게 사용되고 있는 기술이다.[4] 제작한 이 장치는 CARS 신호를 규격화 하기 위해서는 CARS신호 외에 두 레이저광의 세기를 측정할 수 있도록 하였고, 또한 스톡스 색소레이저의 파장을 교정하기 위해 사용한 OG 셀(optogalvanic

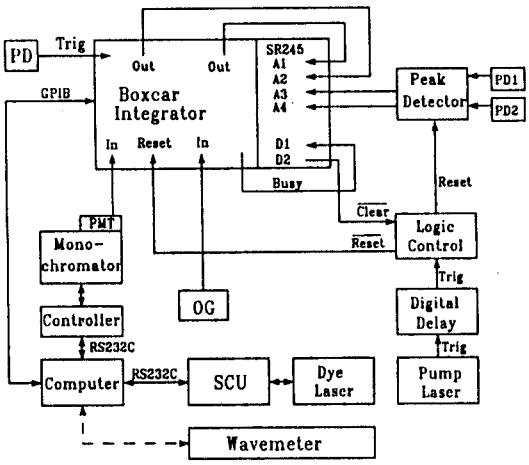

Fig. 1. Electronic configuration of a CARS system.

cell)의 신호를 측정할 수 있도록 하였다.

2. 실험 장치

본 연구에서 제작된 장치의 펌프광으로 사용하는 레이저는 2 차 고조파 Nd:Yag 레이저(Quantel YG661-10)인데 이 레이저는 injection seeding 으로 단일 종모드로 발진하며 발진선폭은 250 MHz, 에너지는 300 mJ, 펄스폭은 7 - 8 ns, 10 Hz로 반복 발진한다. 이 레이저로 부터는 섬광등 점화펄스와 Q-스위칭 펄스가 제공되어 이 펄스를 이용하면 측정과 제어의 순서를 정할 수 있다. 스톡스광으로 사용하는 색소레이저(Lumonics Hyper Dye-Slim)의 발진선폭은 500 MHz, 시간선폭은 2 ns이고 SCU(Scan Control Unit)를 통하여 제어가 이루어 진다.

Fig. 1은 제작한 데이타 수집·제어 장치의 전체적인 구성을 개략적으로 보인 것이다. 박스카적분기는 Stanford Research System(SR250)에서 제작된 것을 두 대 사용하였는데 한 대는 단색화장치에 설치된 광증배을 통해서 측정되는 CARS신호를 측정하였고 다른 한 대는 OG 신호를 측정하는데 사용하였다. 박스카 적분기의 트리거 신호는 실리콘 광다이오드로 주거나 펌프레이저의 Q-스위치 신호로 줄 수 있다. 적분된 신호의 측정과 전체적인 시스템의 논리제어는 SR245(Stanford Research System)를 사용하여 해결하였는데 SR245는 GPIB로 제어할 수 있는 여덟 채널의 아날로그 포트(A/D 또는 D/A 변환기)와 두 채널의 디지탈 포트, 두 개의 8비트 포트가 제공된다. 또한 레이저의 상대적인 세기를 측정하기 위해 설치된 두 개의 실리콘 광다이오드의 신호는 최대값 검출를 통해서 최대값이 검출되어 유지되고 있다가 SR245의 두 개의 아날로그 포트를 통해서 입력된다. 최대값 검출기의 논리제어는 간단한 논리제어기로 이루어 지는데 최대값 검출기와 박스카 적분기의 초기화는 디지탈 펄스지연기를 거쳐 나오는 펌프레이저의 트리거 신호와 프로그램의 명령을 통해서 발생되는 clear신호의 논리결합으로 이루어 진다. 색소레이저의 제어는 SCU (scan control unit)로 이루어지며 SCU의 제어뿐만 아니라 색소레이저의 스캔을 측정에 동기시키는 핸드쉐이킹(handshaking)도 RS232C를 통하여 이루어진다. 단색화 장치의 제어도 필요에 따라서는 제어기 (Spectralink, Jovin Yvon)를 RS232C를 통하여 콤퓨터 제어하여 가능하다. 사용한 콤퓨터는 16 비트 IBM AT 호환기종이고 장착한 GPIB 보드는 National Instrument 사의 PC2A 형이다. 색소레이저의 파장변위측정과 단일모드의 발생 여부를 판단할 파장계는 현재 제작 중에 있으며 제작이 끝나면 전체적인 측정과 통합하여 사용할 예정이다.

Fig. 2는 측정과 제어의 시간 흐름을 보인 그림이다. 펌프레이저의 섬광등가 트리거되면 디지탈 펄스지

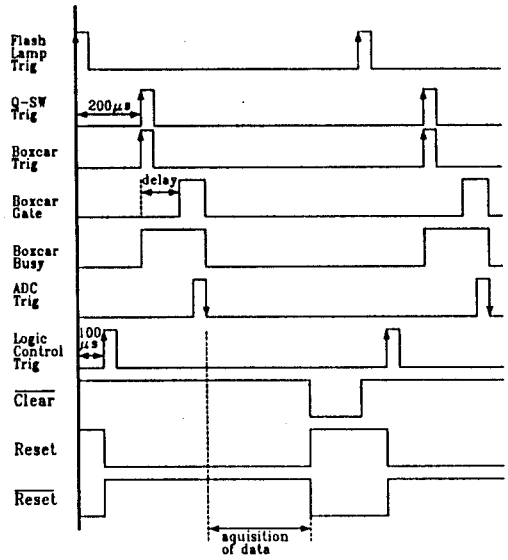

Fig. 2. Timing diagram of a data acqusition and control system.

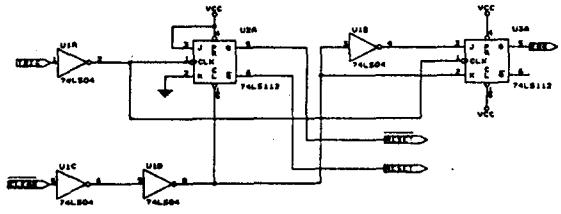

Fig. 3. Logic control circuit.

연기를 통하여 약 100 μs 후에 논리제어기가 트리거되고 약 200 μs 후에 펌프레이저의 Q-스위치가 열린다. 논리제어기가 트리거되면 최대값 검출기는 펄스를 기다렸다 최대값이 검출되면 최대값을 유지하는 상태가 된다. Q-스위치가 열린 후 바로 박스카가 트리거 되고 박스카의 지연시간과 게이트가 열린 시간 동안 박스카는 바쁜(busy) 상태가 된다. 이 바쁜 상태가 끝나는 신호에 마추어 A/D 변환기가 트리거되어 박스카 적분기의 출력 쪽에서 CARS신호와 OG 신호, 최대값 검출기의 출력 쪽에서는 레이저 세기의 최대값들을 A/D 변환하게된다. A/D 변환이 끝난 후 clear 신호를 발생시켜 최대값 검출기와 박스카를 초기화 시킨다. 펄스마다 신호를 규격화하고 원하는 수 만큼 측정한 후 평균하여 그래픽으로 출력하고 데이타 버퍼 (buffer)에 저장한 후 다음 파장으로 스캔하여 원하는 파장 까지 스캔을 계속하므로써 완전한 분광선 데이타를 얻는다.

Fig. 3은 제작한 논리제어의 회로를 보인 것이다. 간단한 게이트와 두 개의 J-K 플립-플롭를 사용하여 제작하였다. 트리거 신호는 펌프레이저의 트리거신호를 디지탈 펄스지연기를 통하여 입력하고 clear 신호는 프로그램의 명령에 의해서 SR245에서 출력된다. 초기화신호는 최대값 검출기와 박스카 적분기를 초기화시키며 ERR 신호는 스캔하는 동안 레이저 펄스가 들어와 최대값을 검출할 수 없을 때 발생한다. 이 신호가 발생할 때 측정된 신호는 측정에서 제외시킨다.

Fig. 4는 최대값 검출기 검출기의 회로이다. 입력 쪽에는 시정수가 빠른 연산증폭기(Analog Device 509)를 사용하여 이득을 1, 2, 4, 8, 16배로 조정할 수 있는 증폭기를 제작하였고 이 증폭기의 뒤 단에는 최대값 검출기(PMI PKD-01)를 설치하였다. 사용한 최대값 검출기는 양의 신호가 검출되도록, 이득은 1로 설계하였다. 유지콘덴서의 용량은 1000 pF이고 제어선의 신호가 논리 0 인 경우 최대값을 검출하는 상태이고 논리 1 일 때 초기화된다.

OG 효과은 색소레이저의 파장교정을 위해 간단히 사용할 수 있는 편리한 방법으로 널리 사용되고 있다.[5,6] Fig. 5는 OG 신호의 검출회로인데 원통음극전구는 파장의 이차표준으로 사용되는 우라늄음극전구이고 정전압으로 작동시키기 위하여 5 kΩ의 완충저항을 사용하였고 OG 신호는 고전압 차폐 콘덴사와 저항으로 이루어진 고주파 통과 필터를 통하여 박스카 적분기로 측정하였다.

3. 소프트웨어

앞에서 기술한 하드웨어를 사용하여 데이타를 수집하고 제어할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 언어는 Microsoft 사의 Quick Basic 4.5를 사용하였는데 이 소프트웨어는 프로그램의 편집이나 디버깅(debugging)등의 여러가지의 편리한 통합환경을 제공하고 비교적 좋은 그래픽을 제공하므로 편리하게

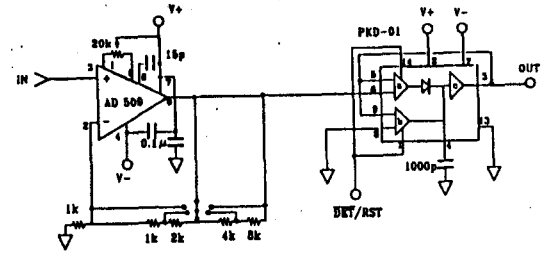

Fig. 4. Peak detector.

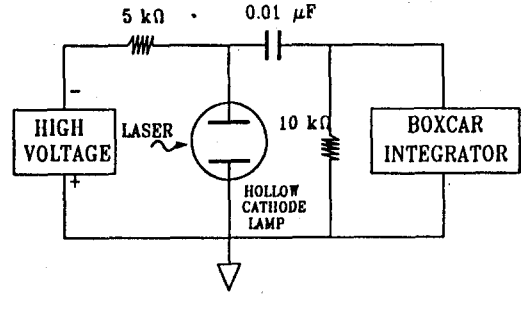

Fig. 5. Optogalvanic system for wavelength calibration.

사용할 수 있었다. 프로그램은 메뉴로 구동되게 하였으며 장치의 간단한 오동작을 찾아낼 수 있도록 하였다.

개발한 프로그램의 7 개의 주메뉴를 구성되어 있으며 각 메뉴에는 필요에 따라서 몇 개의 부 메뉴가 있다. 첫번째의 "1. setup"에서는 스캔시작 파장, 스캔종료 파장,스캔 파장의 간격, 평균을 취하기 위한 데이타의 수, 화일이름을 매기는 방법등을 선택할 수 있다. 스캔 파장 간격을 입력할 때 데이타 버퍼의 크기를 고려하여 입력될 데이타의 양이 너무 크면 오류를 경보한다. 화일 이름을 수동으로 매길 때는 화일 목록에서 같은 화일 이름을 조사하여 경보하며, 화일 이름을 자동으로 매길 때는 측정 날짜와 시간을 조합하여여 자동으로 데이타 화일 이름을 매길 수 있어 중요한 데이타가 덧씌어져 훼손되는 것을 방지하였다.

둘째번의 "2. Laser Scan and Measurement" 메뉴는 setup에서 정한 측정조건에 따라 스캔과 측정을 하여 얻어진 CARS 신호, OG신호, 두 레이저의 세기를 그래픽으로 화면에 출력하고 데이타 버퍼에 저장하는 가장 중요한 측정 부분이다.측정 중에 화면에는 데이타 화일명, 색소레이저의 파장위치와 상태가 동시에 기록된다.

세번째의 "3. Plotting" 은 측정이 끝나서 버퍼에 남아 있는 데이타나 이미 화일로 저장되어 있는 데이타화일을 불러내어 화면에 그려 볼 수 있는 메뉴이다. 이 프로그램을 실행하기 전에 화면을 그대로 프린터에 복사할 수 있는 탬상주프로그램을 실행시켜면 이 메뉴 내에서 분광 데이타의 보관본을 쉽게 얻을 수 있다.

네번째의 "4. Dye Laser Control" 메뉴는 색소레이저의 SCU(scan control unit)의 키 패드(key pad)를 사용하지 않고 색소레이저를 독립적으로 제어할 수 있는 메뉴이다. 이 메뉴는 프로그램 실행 중에 어떤 오류가 발생했을 때, 색소레이저 부분의 잘못된 동작을 검검하고 파장눈금을 교정할 때 사용된다. 다섯번째의 "Data Acquisition System Checking"은 SR245의 데이타 수집을 독립적으로 점검하는 메뉴와 논리제어기와 최대값 검출기의 잘못된 동작을 점검할 때 사용하는 부메뉴들로 구성되어 있다. 또한 "6. Utility" 는 프로그램 내에서 DOS의 여러가지 화일처리 기능을 제공하는 메뉴이다.

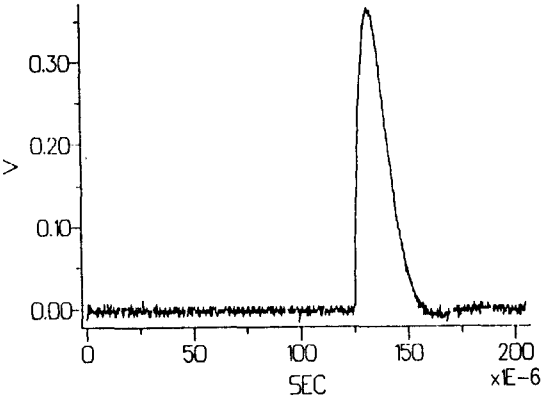

Fig. 6. Laser pulse detected on a silicon photodiode.

4. 실험결과와 논의

Fig 6은 레이저의 세기를 측정할 때 최대값 검출기에 입력되는 펄스의 모양이고, Fig. 7은 최대값 검출기에서 검출된 펄스신호를 보인 것으로 최대값이 검출되어 유지되고 있는 상태가 잘 나타나 있다. 이렇게 유지되고 있는 최대값은 A/D 변환기가 트리거될 때 박스카 적분기의 신호와 함께 수집된다. 신호발생기의 주파수를 조정하면서 측정한 이 최대값 검출기의 응답시간은 약 2 μs로 측정되었다.

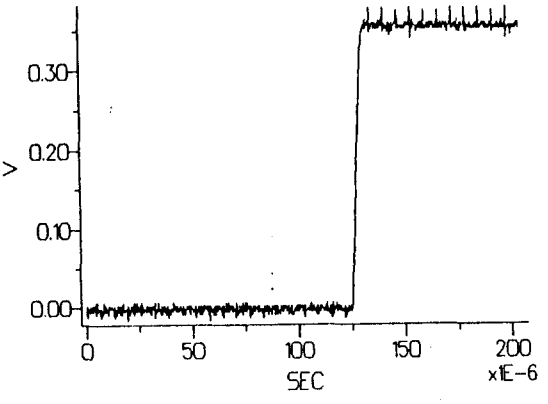

Fig. 7. A peak signal measured with the peak detector.

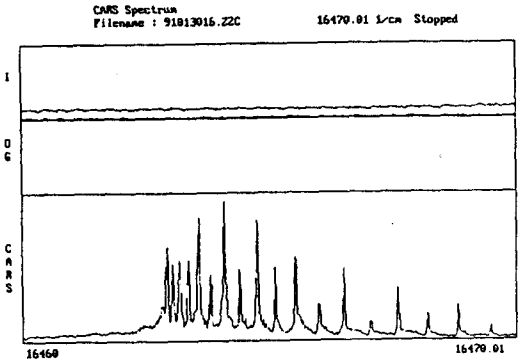

Fig. 8. Computer screen at the completion of a scan for N_2 CARS.

Fig. 8은 제작한 데이타 수집장치를 이용하여 측정한 질소가스의 CARS 분광데이타를 화면복사하여 얻은 결과이다. 이 화면은 두번째 메뉴를 수행한 후에 얻은 것으로 화면의 왼쪽 상단에는 측정 일 시를 나타내는 화일명이 기록되고, 오른쪽 상단에는 색소레이저의 파장, 파장단위, SCU의 상태가 기록되어 있다. 맨위 그림은 두 레이저의 세기변화를 나타낸 것으로 화면상에서는 레이저의 발진 색깔과 같은 색으로 구분되어 기록된다. 가운데의 부분은 OG 신호가 기록되는 곳이나 이 파장 대역에서는 우라늄이나 알곤의 OG 분광선이 없으므로 측정되지 않는다. 맨 아래 그림이 100 Torr의 질소가 담긴 진공용기에서 측정한 질소의 CARS 신호이다. 질소분자의 회전양자수에 해당하는 분광선을 분명하게 측정할 수 있었다.

Fig. 9은 605 에서 610 nm 까지의 파장영역에서 우라늄 음극전구의 OG 신호를 측정한 것이다. 입사시킨 색소레이저의 에너지는 20 μJ, 전구에 흘린 전류는 10 mA 였다. 관측된 분광선은 우라늄전구의 완충가스로 쓰인 알곤의 분광선이고, 우라늄의 분광선은 관측할 수 없었으나 전류를 증가시켜 스퍼터링되는 우라늄의 양을 증가시키면 관측이 가능할 것으로 기대된다. 측정된 알곤 분광선을 이용하여 색소레이저의 파장을 교정할 경우 교정정확도는 파장선폭을 고려할 때 0.05 A 이내가 될 것으로 예상된다.

제작한 데이타 수집장치의 수집 최대속도는 A/D 변환기의 속도, 컴퓨터의 속도에 의해 결정된다. 오류를 유발시키지 않는 범위에서 이 장치의 수집 속도는 300

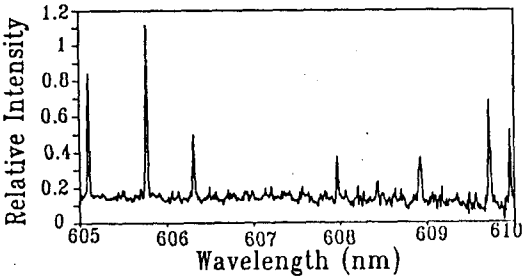

Fig. 9. Optogalvanic spectrum of a uranium-argon hollow cathode lamp.

Hz 인데 4개의 포트를 사용할 때 A/D 변환기의 수집속도가 740 Hz 이므로 그래픽등의 프로그램 수행에 많은 시간이 소요된다. 더 빠른 반복율을 가진 레이저를 사용할 경우에는 DMA (direct memory access)가 가능한 빠른 A/D 변환기를 사용하여, 레이저를 스캔하는 동안 그래픽을 처리하면 수집속도를 10 kHz 이상으로 증가시킬 수 있을 것 같다.

5. 결론

CARS 분광학 실험에 쓸모있게 사용할 수 있는 다중 채널 데이타 수집과 제어장치를 제작하고 프로그램을 개발하였다. CARS 신호를 규격화하기 위해 두 레이저의 세기를 최대값 검출기로 측정하였고, OG 신호를 이용하여 색소레이저의 파장을 교정할 수 있었다. 실제로 질소의 CARS 신호를 측정하여 이 장치의 유용성을 확인하였다. 앞으로 펄스 마다 파장측정이 가능한 레이저 파장계를 제작하여 전체 측정장치에 통합하므로써 측정의 정확도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다. 이 데이타 수집과 제어 장치는 CARS 이외에도 펄스레이저를 사용하는 다른 종류의 분광학에도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Paula L. Fisher and R. L. Cone, Rev. Sci. Instrum. 53(5), 634-636(1982).

[2] B. Wittig, F. Rohrer, and C. Zetzsch, Rev. Sci. Instrum. 55(3), 375-378(1984).

[3] L.M. Jones, G.E. Leroi, C.A. Myerholtz, and C.G. Enke, Rev. Sci. Instrum. 55(2), 204-209 (1984).

[4] B.Attal-Tretout, P. Bouchardy, P.Mare, and J.P.Taran, Appl. Phys. B 51, 17-24(1990).

[5] R.A. Keller, R. Engleman, Jr., and E. F. Zalewski J.Opt. Soc. Am., 69(5), 738-742(1979).

[6] Norman J.Dovichi, David S. Moore, and Richard A.Keller, Applied Optics, 21(8), 1468-1473(1982).