

광센서를 이용한 레이저용접공정 모니터링 Process Monitoring in Laser Welding with Photodiodes

방 세운(동국대학교 기계공학과), 윤 충섭(한국기계연구원 용접자동화그룹)
Se Yoon Bang (Dongguk Univ.), Choong Sup Yoon (KIMM)

ABSTRACT

Process monitoring in laser welding is essential for automation and quality control of products. Various signals from laser welding, such as plasma, sound, optical signals, etc., are utilized for monitoring the process and detecting abnormal weld conditions. In this study, both UV light from plasma formed above the weld pool and IR signal from the melting pool are detected with photodiodes and PC-based A/D board, and analyzed to give a guidance about the weld quality. Experimental results show the possibility of using the signals for predicting and evaluating the weld quality and adapting into the system for on-line process monitoring.

Key words: laser welding(레이저용접), process monitoring(공정감시), photodiode(광다이오드), quality control(품질관리)

1. 서 론

최근들어 고정밀, 고품질, 고부가가치를 창출하는 용접방법으로 레이저 용접이 주목을 받고 있다. 레이저용접이 산업체의 생산 라인에서 신뢰성있는 방법으로 자리잡기 위해서는 parameter study를 통한 용접기술의 개발과, 생산중의 quality control이 가능하도록 용접변수를 자동적으로 제어하는 기술이 필요하다. 향후 자동화를 위한 공정 제어의 기반을 구축하기 위해 우선적으로 요구되는 것이 process monitoring 기술이다. 즉, 레이저 용접중 발생하는 제반 신호를 측정, 신호 처리(signal processing)를 통해 용접과정의 현상을 이해하고, 신호와 용접성, 용접품질과의 상관관계를 파악함으로써 향후 제어기술 개발의 기반을 구축할 수 있다. 또한 용접후에 sample에 대해 통계적으로 품질검사를 하는 단계에서 벗어나 전 시편을 대상으로 100% 용접성을 확인할 수 있으므로 생산성, 경제성 측면에서 절대적으로 유리하다.

Process monitoring을 위해 사용되는 신호는 레이저용접공정에서 방출되는 acoustic emission, plasma charge, plasma, optical signal 등 여러 가지가 있다^[1].

공정중의 음향신호, 특히 공기중에 방출되는 음향신호(air-borne acoustic signal)을 측정해 가공품질과 연계시키고자 하는 시도는 일찍부터 진행되어 왔

으며, 상세하고 광범위한 review는 Farson 등^[2]의 논문에서 잘 정리되어 있다. 이들은 실험을 통해 1-2kHz 주파수영역에서의 총 에너지 (total energy) 값을 근거로 한 비교적 간단하고 새로운 알고리즘을 이용하면, 평균적으로 90%이상의 용접시간에서 full-penetration(완전용입)과 partial penetration(부분용입)을 정확하게 분간할 수 있음을 보였다. 윤충섭 등^[3]은 레이저용접시 발생하는 음파와 플라즈마의 신호를 동시에 계속해 신호해석을 통해 상관관계를 밝히고자 하였다. 실험결과 음파와 플라즈마가 각각 키홀 거동 및 용접품질에 연관이 있으나, 두 신호의 상관관계는 매우 약한 것으로 결론지었다. 또한 음파가 외부환경, 특히 보호가스(shielding gas)의 유무에 매우 민감해 process monitoring을 위한 센서로는 부적합한 것으로 판단하였다.

한편 공정중의 plasma 신호 또는 optical signal을 photodiode로 측정, 판단기준을 위한 입력으로 활용하는 것은 상대적으로 저렴하고 용이하게 시스템을 구성할 수 있는 장점을 갖고 있어 많은 연구가 진행되어 오고 있으며^[4,5,6,7], 일부 제조업체에서 상용화되어 있다. 레이저용접중 시편 표면은 레이저조사에 의해 용융점 이상으로 가열되며, 일주 재질은 기화된다. 만약 기화된 재질에 추가로 레이저 빔이 흡수되거나 기체가 비등점 이상의 온도에서 생성되면 이온화되어 플라즈마를 형성하게 된다. 플라즈마에서의 빔흡수, 레이저빔 출력의 변동, 재료표면의 불

균일 등의 여러 요인이 용접품질에 영향을 미치게 된다. 이때 용접품질의 미세한 변동은 반드시 플라즈마와 용융금속의 온도에 영향을 미치는 빔흡수 mechanism의 변동에서 기인하게 된다. 따라서 부분적으로는 용융풀에서의 적외선복사와 근본적으로 플라즈마에서 방출되는 자외선복사를 관찰하면 레이저용접과정의 양호한 정도를 보여주는 데이터를 알 수 있다. 이러한 이유에서 플라즈마 신호를 계측해 용접 품질을 파악하기 위한 연구가 진행되었으며, 일부 상용화되어 있다.

특히 Chen 등의 연구^[4]에서는 적외선 신호와 자외선 신호를 동시에 계측해 두 신호를 비교해 보고 용접 품질과 비교해 보고 있다. 그에 의하면 특히 플라즈마에서의 자외선신호의 계측을 통해 킥오프의 failure와 같은 용접결함을 용융부에서의 적외선신호보다 빨리 예측할 수 있다. 또한 대부분의 용접결함을 공정중에 계측할 수 있어 on-line으로 100%의 제품검사의 가능성을 보여주고 있다.

그러나 상용화된 시스템은 전용의 공정에 적용하기 위해 가공기에 함께 시스템화되어 있어 가격이 매우 고가이고, 범용의 레이저용접에 적용하기에는 적합하지 않다. 결국 상대적으로 저렴하고 보다 다양한 용도로 적용하기 위해서는 국내에서의 연구를 통해 관련 기술의 파악 및 적용이 바람직하다.

본 연구에서는 용접시에 발생하는 플라즈마에서 방출되는 플라즈마(plasma)로부터의 자외선(UV: ultra-violet) 영역의 신호와 용융풀(welding pool)로부터의 적외선(IR: infra-red) 영역의 신호를 동시에 계측, 신호해석을 통해 용접성, 용접품질과의 상관관계를 밝혀 보고자 한다. 관련 sensor 및 amplifier를 거쳐 나온 신호를 PC에서 A/D board를 통해 계측하고 시간 대역 및 주파수영역 해석을 수행함으로써 용접결함, 심용입, 부분용입 등의 유무에 관한 정보를 파악하는데 주안점을 두었다. 실험대상으로는 지동차용 강판으로 사용되는 아연도금강판을 사용하고 레이저용접시에 레이저출력, 이송속도 등의 변수를 변화해가며 용접결과와 공정중의 계측신호 및 해석결과와 비교해 보았다.

2. Process monitoring 장치의 구성

2.1 Photodiodes 및 Pre-amplifier

실험에 사용된 optical sensor는 photodiode를 채택하였으며 주로 플라즈마에서 나오는 자외선영역의 광신호 검출용의 UV detector로는 GaP photodiode를, 용융풀(melting pool)의 적외선영역의

광신호검출용 IR detector로는 Ge photodiode를 이용하였다. 각 photodiode에서 나오는 미세한 전류신호를 전압으로 전환/증폭하기 위해 Pre-amp를 사용하였으며 상세한 sensor 및 Pre-amp의 사양은 표 1과 같다.

Table 1. Specification of monitoring system

UV detector	Hamamatsu G1961 GaP photodiode spectral response range : 190 - 550 nm rise time : 5 μ s
IR detector	Hamamatsu Ge photodiode (Noncooled type) - model B1720-02 spectral response range : 0.8 - 1.8 μ m rise time : 3 μ s
Pre-amp (UV)	photosensor amplifier - model C2719 frequency response: 1600Hz (med-low gain)
Pre-amp (IR)	preamplifier for Ge photodiodes - model C4159 frequency response: DC - 100kHz

2.2 A/D Board 및 구동 software

측정된 신호를 PC로 받아들이기 위해 사용된 A/D Board는 Strawberry사의 Workmate model로 12-14 bit의 resolution으로 최대 conversion speed는 200kHz이다. 실제 A/D board를 통해 PC에서 데이터를 측정할 때에는 두 센서로부터의 신호를 pre-amp에서 증폭해 board에 입력하고 정해진 시간 동안 일정한 sampling speed로 받아 memory buffer 또는 Hard disk drive에 저장한 후 이를 적정한 해석 software를 이용해 화면에 출력하고 해석을 수행하게 된다. 일반적으로는 buffer에 저장된 데이터를 MATLAB 과 같은 software로 읽어들이 plot 및 FFT 해석을 수행하지만, 이는 매우 시간이 걸리고 운용에 많은 사전지식이 요구되므로 쉽게 시스템에 적용하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 실제 실험에서 용이하게 구성할 수 있고 실시간대로 결과를 display 및 해석가능하도록 하는데 주안점을 두고, 전용의 software (Workbench PC for Windows)를 같이 사용하였다. 이는 PC Windows 상에서 구동되며 쉽게 각 기능을 icon형태로 구성해 편리하게 각자의 실험을 set-up할 수 있으며, data를 받는 즉시 화면에 보여주고, FFT 해석을 통해 power spectrum 및 correlation을 구할 수 있으며 필요할 경우 적절한 action을 취할 수 있다^[8]. 한 가지 제약은 PC Windows상에서 구동하는 관계로 2개의

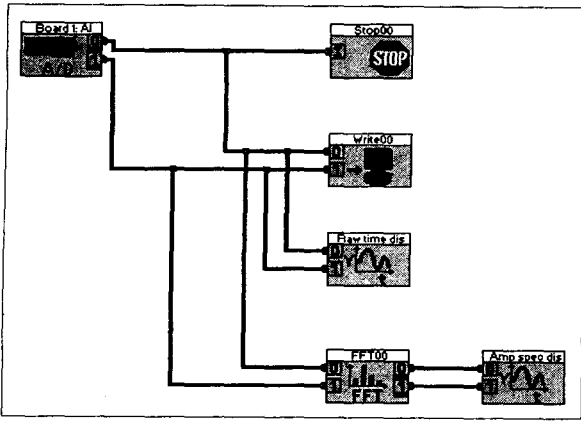


Fig. 1 Data logging module setup

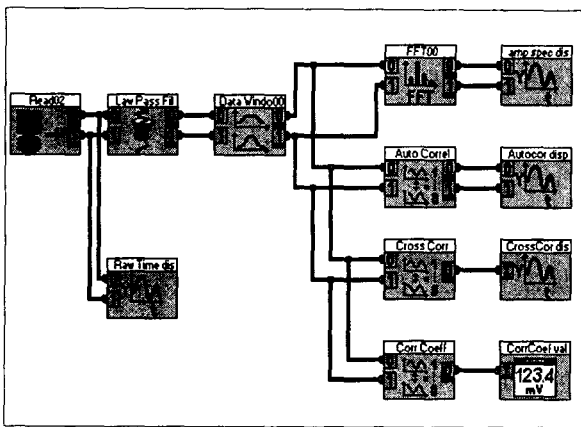


Fig. 2 Data processing module setup

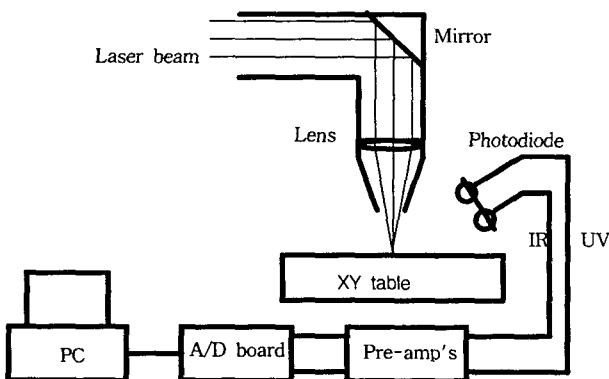


Fig. 3 Experimental setup for process monitoring in laser welding

analog input을 받을 때 최대 변환속도는 사용한 PC (Pentium 100MHz, 16MB RAM)에서 5kHz/Channel 에 그치게 된 점이였다. 기진행된 연구^[3] 를 통해 주로 중요한 정보를 갖는 주파수는 2.5kHz 이하인 것으로 파악하고 본 실험을 진행하였으나, 향후에는 보다 빠른 변환속도의 Board를 이용해 검증하여야 할 것으로 보인다.

현장에서 실험시에는 일단 5kHz/Ch. 의 sampling frequency로 두 channel에서 신호를 읽어 들였으며, 일정크기의 data가 수집되면 file에 저장하였다. 이때 사용된 실험 module의 구성을 참고로 그림 1에 보인다. 수집된 data는 연구실에서 다시 읽어 들여 신호해석을 수행하였으며, FFT 해석을 통해 spectrum analysis, correlation 등을 구할 수 있도록 구성하였다. 그림 3에 신호해석에 사용된 module 구성도를 보인다.

3. 실험

3.1 실험장치

그림 3에 실험장치의 개략도를 보인다. 사용된 레이저는 (주)한광의 최대출력 2.8kW의 CO₂ 레이저를 사용하였다.

3.2 용접실험

실험에 사용된 시편은 자동차 구조용 냉연 강판(SPCE)을 사용하였으며, 가로 10cm, 세로 5cm, 두께 1.2mm이다. 현단계의 1차실험에서는 bead-on-plate 용접으로 실험하였으며, 일단 테이블의 이송속도는 고정시킨 상태에서 레이저출력을 변화시켜 가며 UV와 IR 신호를 측정하였다. 1차실험에서의 용접조건은 Table 2 에 정리하였다.

Table 2. Laser welding parameters

기본조건	재료: SPCE(자동차용 냉연강판) 보조가스: Ar (유량=90 litre/min) 초점: -1.5mm(시편내부에 위치) bead-on-plate 용접
변수	레이저출력 Lp: 1.5kW - 2.4kW (CW) 이송속도 u: 1.2m/min, 1.8m/min

4. 실험결과 및 고찰

실험결과를 검증하기 위해서는 광학현미경에 의한

용접부 단면의 확대관측이 필요하지만, 일단 육안으로 back bead가 형성되었는지의 여부로 완전용입과 부분용입을 판단하였다.

4.1 시간 대역 해석

시간대역에서의 측정신호는 전체적으로 같은 용접 속도일 경우에는 레이저의 출력이 증가할 수록 강도가 증가하였다. 그림 5 에 $u=1.8\text{m/min}$ 의 용접속도에서 출력 $L_p=2.0, 2.2, 2.4\text{kW}$ 로 시편용접시의 UV 및 IR 신호를 비교해 보인다. 출력이 증가할 수록 두 신호 다 강도가 커짐을 볼 수 있으며, 특히 UV 신호는 간헐적인 형태에서 점차 발생빈도가 증가하고 있으며, 2.2kW 이상에서는 대부분의 시간대에서 강한 플라즈마신호를 관찰할 수 있다. 용접비드는 2.2kW 이상에서 완전용입형태를 보이며 양호한 품질을 확인할 수 있다. $L_p=2.0\text{kW}$ 에서의 UV 신호는 거의 검출되지 않으나 세 곳에서 급격한 피크형상을 보이고 있으며, IR 신호의 피크부위와 일치하고 있다. 시편의 용접형태도 전반적으로 부분용입형태를 보이다가 이 세 부위에서 바닥부분까지 이르는 용입

이 일어났으며, 이는 급격한 플라즈마의 활동과 이로 인한 용융풀의 증가에 의한 것으로 보인다. 그러나, 이 출력에서는 곧 플라즈마의 활동을 잃고 키홀상태를 상실해 부분용입형태를 보인다.

그림 6에 보이듯이 속도 $u=1.2\text{m/min}$ 로 용접할 경우에도 유사한 형태를 관찰할 수 있다. 역시 2.2kW 이상의 경우에 완전용입(full penetration)을 관찰할 수 있으며 그림 5의 경우에 비해 보다 강하고 연속적인 신호를 볼 수 있다. 출력이 2.0kW 이하로 되면 용입이 완전하지 않으며, UV의 피크값은 두 부분에서만 관찰된다. 이 부분 역시 IR 신호의 피크와 일치하고 있으며 시편에서 일부 back bead가 형성된 위치와 대응된다. 이로 미루어 적절한 신호의 강도값(threshold)을 정해서 용접상태의 불량정도를 유추할 수 있을 것으로 생각되며, 특히 UV 신호가 보다 민감하게 반응을 보이는 것으로 보인다. 신호 중 UV 신호가 가장 활발한 부위를 중심으로 자세히 관찰해 보면 UV가 급격히 사라지는 반응을 보이면 IR 신호는 다소 늦게 감소양상을 보이는 것을 관찰할 수 있다. Chen 등^[4]의 연구에서는 UV 신호가 IR신호를 앞서는 형태로 나타나 키홀의 거동을 미리

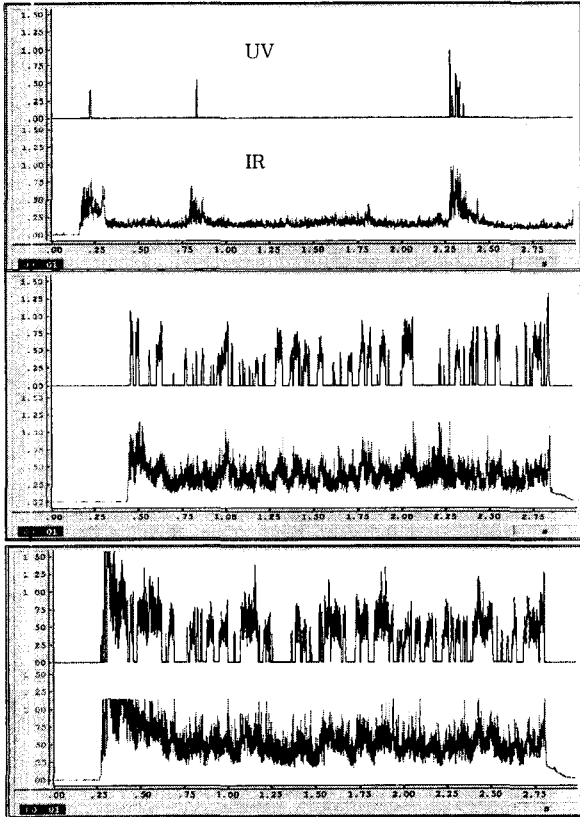


Fig. 5 UV and IR signal in time domain ($u=1.8\text{m/min}$; from top $L_p=2, 2.2, 2.4\text{kW}$)

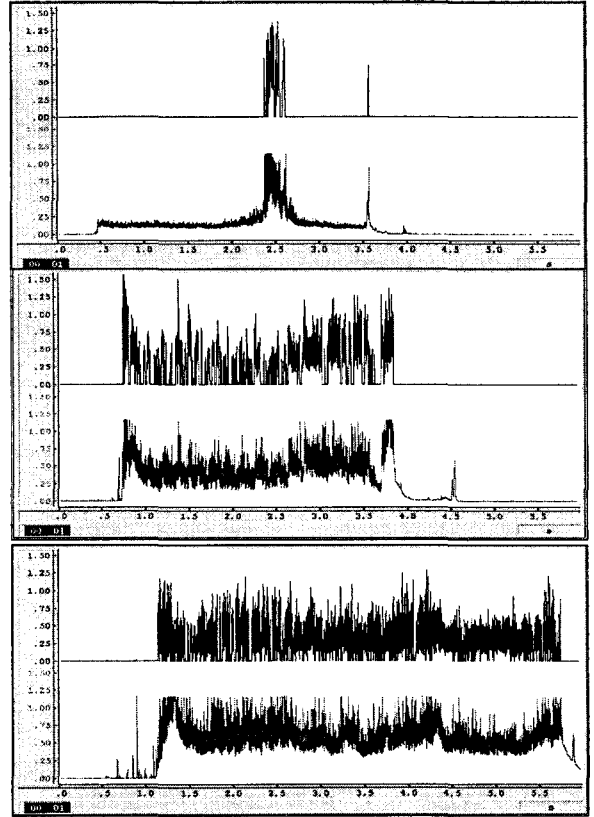


Fig. 6 UV and IR signal in time domain ($u=1.2\text{m/min}$; from top $L_p=2, 2.2, 2.4\text{kW}$)

예측할 수 있을 가능성을 제시하는 것으로 주장하였다. 다만 신호는 연속적으로, 본 실험과 같이 단속적인 형태를 보이진 않았으며 이에 대해서는 추후 확인이 필요할 것이다.

4.2 주파수 대역 해석

그림 7 에 $u=1.8\text{m/min}$, $L_p=2.0, 2.2, 2.4\text{kW}$ 에서의 신호를 가장 전형적인 위치에서의 1024 point 를 기준으로 주파수해석(FFT analysis)한 결과를 보인다. 2kW 에서는 특정 주파수가 명확하지 않으나, 2.2kW 에서는 UV는 약 300Hz 까지 다소 활발한 양상을 보인다. 2.4kW 에서는 UV가 약 500Hz 까지 비교적 활발한 움직임을 볼 수 있다. 그러나 절대값은 다른 연구결과와는 달리 최대값에 비해 매우 작은 양상을 보이고 있으며 그 이유는 확실하지 않다. 같은 레이저출력 2.4kW 에서 속도가 $u=1.2\text{m/min}$ 로 감소하면 UV가 IR보다 값이 커지며 $1\text{-}2\text{kW}$ 영역의 신호도 활발해진다.

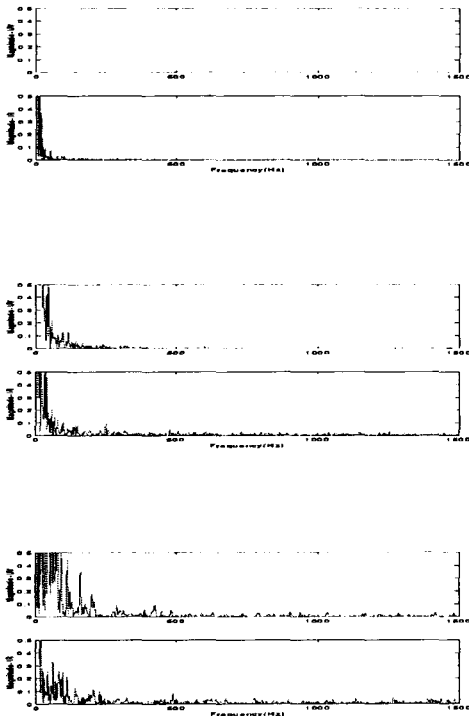


Fig. 7 Results of FFT analysis
($u=1.8\text{m/min}$; from top $L_p=2, 2.2, 2.4\text{kW}$)

5. 결 론

레이저 용접시 플라즈마와 용융풀에서 발생하는

UV 및 IR 신호를 동시에 측정해 용접성과의 상관관계를 해석할 수 있는 실험장치를 구성하였다. 측정된 신호의 시간 대역 및 주파수영역에서의 신호해석을 통해 용접성에 영향을 미치는 인자를 규명하였다. 결과를 종합해 보면;

- (1) 같은 용접속도에서는 레이저출력이 증가함에 따라 신호의 강도가 증가하며 특히 UV 신호의 세기가 민감하게 나타났다.
- (2) UV신호의 경우 용접결과가 좋으면, 즉 완전용입이 일어나는 경우에는 신호가 거의 연속적인 형태를 보이며, FFT 해석결과 2kHz 까지의 영역까지도 비교적 활발한 움직임을 볼 수 있다.
- (3) UV 및 IR 신호에서 급격한 변화를 나타내는 위치는 시편의 용접상태가 급변하는 부위와 일치한다. 따라서 측정된 두 신호의 해석을 통해 용접성을 파악할 수 있는 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. 윤충섭, "레이저를 이용한 TB 용접 생산자동화 시스템", 한국자동차공학회 1996년도 안전, 전기 및 전자, 생산기술 및 관리부문 학술강연초록집, pp46-57, 1996.
2. D. Farson, K. Hillsley, J. Sames and R. Young, "Frequency-time characteristics of air-borne signals from laser welds", *Journal of Laser Applications*, 8(1), pp33-42, 1996.
3. 윤충섭, 박정수, 김인웅, "레이저 용접에서의 on-line process monitoring 방법과 플라즈마와 음파의 관계", 제 6회 레이저 가공기술 심포지움 논문집, 대전, pp252-262, 1995.
4. H. B. Chen, L. Li, D. J. Brookfield, K. Williams and W. M. steen, "Laser process monitoring with dual wavelength optical sensors", *Proceedings of ICALEO'91*, pp113-122, 1991.
5. I. Miyamoto, K. Kamimuki, H. Maruo, K. Mori and M. Sakamoto, "In-process monitoring in laser welding of automotive parts", *Proceedings of ICALEO'93*, pp413-424, 1993.
6. I. Miyamoyo and K. Mori, "Development of in-process monitoring system for laser welding", *Proceedings of ICALEO'95*, pp759-767, 1995.
7. E. Beyer and P. Abels, "Process monitoring in laser materials processing", *Proceedings of LAMP'92*, pp433-438, 1992.
8. Data Acquisition Systems User Manual, Strawberry Tree Co.