

# IR 및 UV센서를 이용한 레이저 용접시의 실시간 모니터링 DSP 시스템

윤 충 섭\*

\*한밭대학교, 생산가공전공

## A DSP System for On-line Monitoring in Laser Welding Using a IR and UV Sensors

Choong-Sup Yoon\*

\*Dept. of Welding and Production, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

### Abstract

We designed a weld monitoring system with UV and IR sensors using a embedded DSP controller for implementing a distribution system; running stand alone and communication with outside by industrial standard protocols. Also this system provided a USB port in order to be acquiring data in PC. The user interface program in PC visualized the IR and UV data in time, frequency and state space. A correlation of IR and UV signals showed closely related to weld quality. A rapid change of geometry can be found through a moving average filter. And the average value of IR signal at an interval represented a welding width and depth. Through these results, we proposed a monitoring algorithm for a integer type DSP.

\* Corresponding author : csoon@hanbat.ac.kr

(Received May 2, 2005)

Key Words : IR(Infrared rays), UV(Ultra violet), Embedded DSP(Digital signal processor)

### 1. 서 론

레이저 가공 기술은 절단, 천공, 마킹, 용접, 열처리 등 넓은 응용분야를 가지고 있으며, 정밀도가 매우 높고, 자동화가 용이하고, 고속 용접이 가능하여 생산성이 높으며, 고 기능 부품 가공 등 고도의 기술에 활용되고 있으며, 그 활용 범위가 계속 확장 추세에 있는 부가 가치가 높은 첨단 기술이다.

이러한 잠재적인 능력을 충분히 활용하기 위하여 공정 제어 기반 기술이 중요하다. 이를 위해 우선적으로 요구되는 것이 모니터링 기술이다. 즉, 레이저 용접 중 발생하는 제반 신호를 계측 하고 신호 처리를 통해 용접과정 현상을 이해하여 신호와 용접품질과의 상관관계를 파악함으로써 제어 기반의 기술을 구축할 수 있다. 또한 용접 후의 샘플 검사를 벗어나 전 시편을 대상으로 100% 용접 품질을 확인 할 수 있으므로 생산성 및

경제성 측면에서 절대적으로 유리하다.

용접 중 감시에 사용되는 신호는 적외선(IR), 자외선(UV), 음향(AE)<sup>1)</sup>, 및 비전<sup>2)</sup> 등이 있다. 이러한 신호들은 특히 용접 대상물과 에너지원의 상호작용으로 매우 복잡한 현상을 나타내는데, 그 복잡성 때문에 여러 신호를 동시에 획득하여 그 상관관계를 규명하여 모니터링에 적용하려는 노력을 경주해 왔다<sup>3-4)</sup>.

레이저 용접에서는 고출력 단일파장의 집속도가 높은 빔을 에너지원으로 사용하고, 이 에너지를 다시 렌즈나 거울을 통해 더 높은 에너지 밀도로 집속시켜 시편에 조사하게 된다. 이 빛 에너지가 시편에 흡수되어 열에너지로 전환되면서 용접이 이루어지게 된다. 이때 집속된 출력 밀도는 약  $10^5 \sim 10^7$  W/cm<sup>2</sup>으로, 금속 표면은 순간적으로 용융 기화시킨다. 그 용융된 금속 표면의 경계면은 시편내부로 이동하며 키홀이 만들어지게 된다. 키홀이 형성되면 입사하는 레이저빔의 흡수율은 키홀 내부의 다중반사에 의해서 더욱 증가하게 된다. 이

때 용융된 금속의 기화로 키홀 내부의 압력은 증가하고 금속 증기는 압력차에 의해 키홀 외부로 분출된다. 이 금속증기는 레이저빔의 에너지를 흡수하며 이온화하여 시편의 키홀 위에 플라즈마를 형성하고, 발생한 플라즈마는 레이저 빔의 일부를 차단하게 된다. 그러므로 키홀에 입사하는 에너지는 감소하게 된다. 그리고 용융된 금속의 대류 및 열전도에 의한 온도 감소 및 금속증기 분출로 키홀 내부의 압력은 떨어지게 되어 보호 가스가 흘러들어 간다. 따라서 금속증기의 분출이 줄고 발생한 플라즈마의 크기도 감소하게 된다. 반면 이때에 전달되는 레이저의 에너지는 증가하게 되어 키홀에 의한 레이저 에너지의 흡수과정이 반복하게 된다<sup>5-7)</sup>. 이와 같이 키홀의 동적 거동은 레이저 용접에 중요한 매개 역할을 하는 것으로 알려져 있는데, 검출되는 신호 중 비교적 일정한 주기를 가지는 신호는 주로 재료의 용융 및 응고 과정에서 발생하는 신호들이고(IR), 반면 키홀 메커니즘에서 발생하는 신호는 매우 짧고 불규칙적이다(UV)<sup>1)</sup>.

IR신호는 용융풀과 같이 가열된 시편에서 방출되고, UV는 키홀의 동적거동에 의존하는 플라즈마에서 방출된다. IR 신호는 약 0.72~1,000  $\mu\text{m}$ 의 파장 대역으로 용융풀의 온도와 크기를 감지 할 수 있기 때문에 비드폭이나 용융깊이 등을 모니터링을 하는데 적용하고, UV는 0.01~0.4  $\mu\text{m}$  대역폭으로 키홀의 생성 및 용입정도를 측정하는데 사용된 예가 보고된 바 있다<sup>1)</sup>.

IR 및 UV를 이용한 모니터링 시스템은 측정 장치의 단순성과 용접품질과의 상관성이 뛰어나 많은 연구가 이루어지고 있고, 다른 센서에 비하여 비교적 간단하여 상용화가 많이 되어 있다. 기존 연구에서 사용된 시스템이나 상용화된 시스템은 PC기반<sup>8)</sup>으로 크기나 편리성에서 현장에 적용하기에 어렵다는 단점과 고가라는 문제가 있다.

본 연구에서는 임베디드 정수형 DSP로 모니터링 시스템을 구축하였으며, 신호해석을 DSP에서 실시간으로 처리할 수 있도록 하였고, 그 결과를 산업용 통신선을 통하여 데이터를 주고받을 수 있도록 분산 모니터링 시스템을 구현하였다. 또한 원활한 신호 알고리즘 개발을 위해 모니터링 시스템과 PC와의 데이터를 고속으로 주고받을 수 있는 USB 포트를 추가하였다. PC에서는 USB 포트로 받은 데이터를 실시간으로 시간영역, 주파수 영역, 그리고 상태공간으로 보여주고 저장도 할 수 있는 유저 인터페이스 프로그램도 완성하였다.

신호 해석의 목적은 신호 변환에 의해 임의의 신호로부터 관련 정보를 얻는데 있다. 이러한 변환의 대표적인 방법들로는 선형 영역에서는 푸리에(Fourier)이고,

비선형에서는 카오스(Chaos)가 있다. 반면 웨이블릿(Wavelet)은 일시적(transient), 비 안정(non-stationary), 시변(time-variant)의 작은 파를 해석하기 위한 도구를 제공한다<sup>9-10)</sup>. 그 외에 학습을 통한 신호 해석 방법으로 뉴론, 유전자 알고리즘 기법 등이 있다.

이러한 신호 해석 기법을 적용하려면, 그에 대응하는 하드웨어가 뒷받침되어야 한다. 현재 정수형 DSP에서 가능한 기법은 선형해석 방법과 DSP에서 제공하는 푸리에 및 몇 가지의 카오스 알고리즘뿐이다. 그 외의 알고리즘은 최소한의 PC 성능의 컴퓨터를 요구하고 있다. 본 논문에서는 정수형 DSP에서 적합한 모니터링 알고리즘을 제시하고자 한다.

## 2. 개발된 모니터링 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 시스템의 구성도를 나타내는데, 센서헤드, 백보드 그리고 DSP 보드로 구성되어 있다.

센서헤드(Fig. 2)에는 2개의 포토다이오드와 집속렌즈로 구성되어 있고, IR 센서의 대역폭은 0.8-1.8  $\mu\text{m}$ 이며 UV센서의 대역폭은 0.19-0.55  $\mu\text{m}$ 이다. 현장적용을 고려하여 센서헤드는 15핀 RS232(DSUB-15) 통신용 케이스 안에 설치하였고 센서 앞에 직경 4mm 집속렌즈를 설치할 수 있도록 하였다. 모니터링 시스템과 센서사이의 전선은 특히 외부의 노이즈에 잘 견딜 수 있도록 차폐된 전선을 사용하였다.

백보드는 센서로부터 나오는 미세한 전류를 크게 할 수 있는 증폭단과 신호 앨리어싱(alising)을 방지하기 위한 저주파 필터 회로로 구성되어 있으며, 포토다이오드를 통하여 외부 신호를 받을 수 있는 디지털 입력 포트와 용접성의 건전성 유무를 외부에 경고 할 수 있는

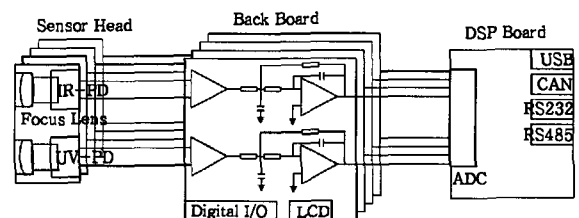


Fig. 1 Schematic diagram of designed IR/UV monitoring system



Fig. 2 IR & UV sensor head

디지털 출력 포트가 있고, IR과 UV의 상태를 나타내기 위한 2개의 LED와 2개 메뉴 버튼과 128×64 도트의 그래픽 LCD 등이 백보드를 통하여 연결된다. 또한 백보드를 최대 4개까지 병렬로 설치 가능하여 8개의 포토다이오드 또는 다른 센서를 설치할 수 있도록 하였다.

DSP보드는 TMS320LF240610<sup>11)</sup>를 사용하였다. 40MIPS의 성능을 가지고 있으며, 내부에 32K워드의 프로그램 메모리와 2.5K의 데이터 메모리를 가지고 있어, 기존 임베디드 프로세서와는 차별화된 칩이다. 각종 통신(SPI, CAN 2.0B, RS232C 등)을 제공하여 산업용으로 적용하기에 최적의 칩이다. 또한 10비트, 2MHz의 ADC 및 PWM 발생기 등이 내장되어 있어 계측과 제어 구현에 있어서도 부가적인 칩이 필요 없어도 할 수 있는 장점이 있다. 그리고 모니터링 결과를 실시간으로 PC에서 받아 볼 수 있도록 FT245BM<sup>12)</sup> USB 칩을 부가하였다. 이 보드는 4층의 기판으로 제작하여 외부노이즈에 대한 영향을 최대한 줄이도록 하였다(Fig. 3).

Fig. 4는 조립된 모니터링 시스템을 나타내는데, 왼쪽상단에 있는 두 개의 가변 저항은 IR과 UV 센서 신호들을 LCD를 보면서 신호의 크기를 외부에서 조절할 수 있도록 하였는데, 이는 현장에서 용접성 건전성에

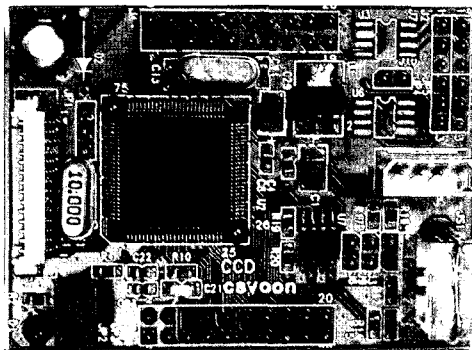


Fig. 3 DSP board (45mm×60mm)

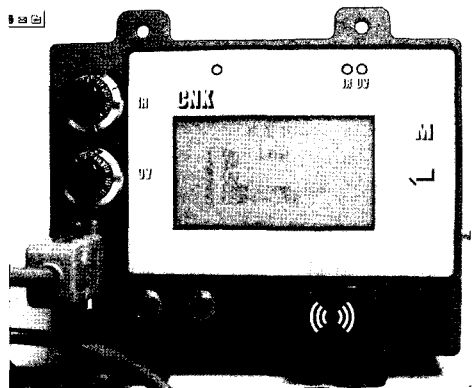


Fig. 4 Integrated monitoring system

대한 임계점을 조정할 수 있다는 장점이 있다. 여기서 임계점의 폭은 우측에 있는 2개의 메뉴 버튼을 사용하여 설정할 수 있다. 아래의 두 개의 컨택트는 분산 모니터링 시스템을 구현 할 수 있도록 산업용 RS232, RS485 그리고 CAN 2.0 포트용이다. USB포트는 시스템 오른쪽에 위치하여 있다.

Fig. 5에서는 모니터링 시스템에서 보낸 데이터를 PC에서 실시간으로 나타낼 수 있는 사용자 프로그램으로 시간, 주파수영역(FFT) 그리고 IR을 x축, UV를 y축으로 하는 상태공간을 관찰할 수 있다. 또한 필요에 따라 실시간으로 데이터를 저장할 수도 있다.

### 3. 실험 및 신호해석

본 실험에서 사용한 모니터링 시스템과 레이저 시스템은 Fig. 6에 나타낸다.

사용된 시편은 두께 1.2mm의 자동차용 강판으로 아래의 Fig. 7과 같이 겹쳐놓고 용접을 하였다. Fig. 8에서 용접조건은 CW CO<sub>2</sub> 레이저 출력( $P_0$ ) 2kW에

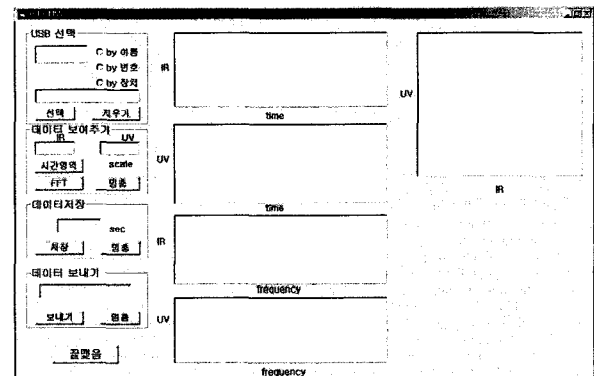


Fig. 5 User interface program in PC

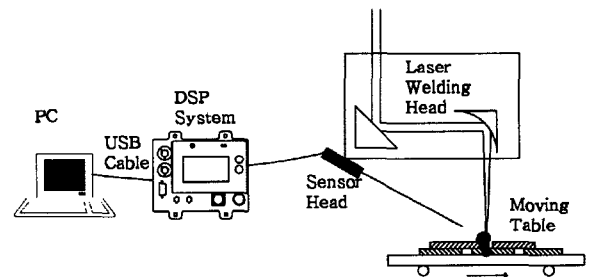


Fig. 6 Experimental setup

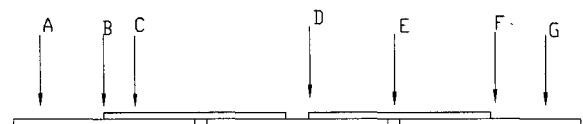


Fig. 7 Layout of the welding plate

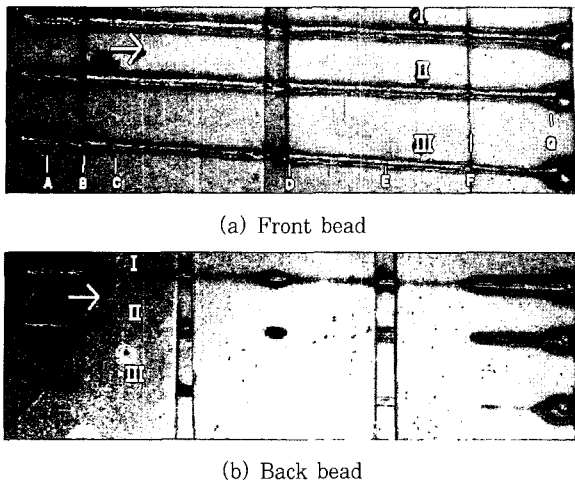


Fig. 8 Photos of the laser welding bead; welding speed ( $v$ ): I(2m/min), II(3m/min), III(4m/min)

서 용접 속도( $v$ )를 I: 2m/min, II: 3m/min 그리고 III: 4m/min로 변화 시켰다. 여기서 레이저 초점은 아래의 시편 표면에 맞추었다.

Fig. 9는 용접결과를 시간영역으로 나타내었다. 모니터링 시스템에서는 센서 신호를 10비트의 해상도와 40kHz로 데이터를 획득하지만, PC에서 실시간 데이터 전송을 위해 상위 7비트(최대 127)만을 PC로 보낸다. 여기서 UV신호는 플라즈마의 생성 및 소멸의 주기가 펄스 형태의 동적 특성을 가지고 있기 때문에 가변저항으로 펄스 파형이 되도록 증폭을 하였다. 반면 IR은 용접 풀의 용융거동을 나타내기 때문에 PC로 전송되는 값이 127중 최대 100값을 가지도록 가변저항을 설정하였다.

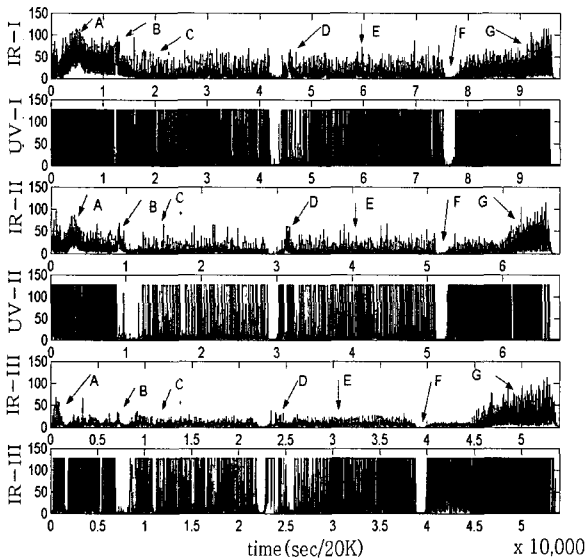
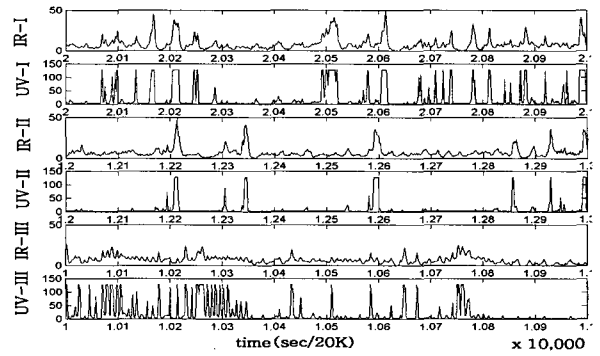
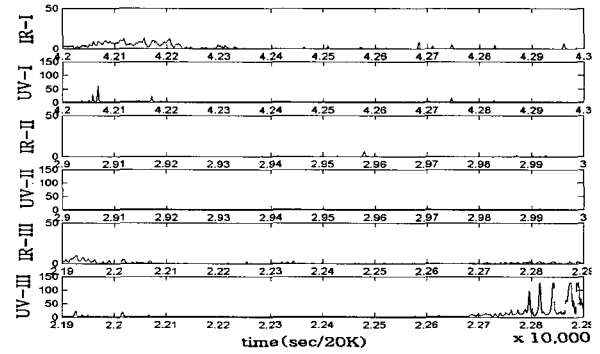


Fig. 9 Variation of IR and UV signals in Fig. 8

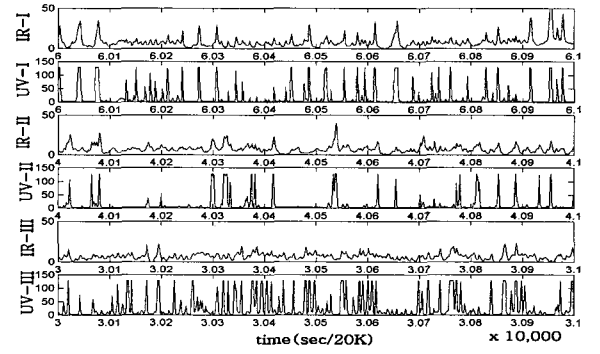
Fig. 10은 Fig. 9에서 표시한 C, D, E, G에서 1,000개의 데이터를 나타낸 그림이다. C, E 및 G점에서 공통된 점은 IR 신호가 어떤 임계값(약 25)을 넘으



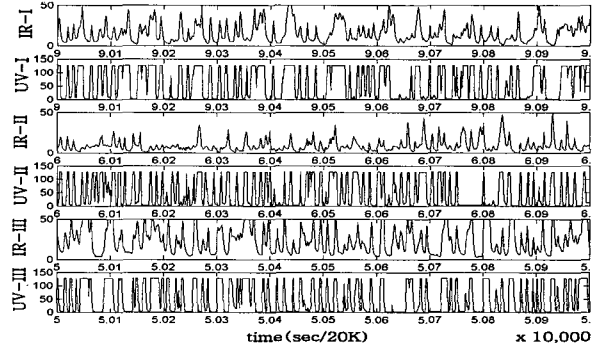
(a) at C



(b) at D



(c) at E



(d) at G

Fig. 10 IR and UV signals at C, D, E and G, in Fig. 8

면 UV 신호는 펄스 형태로 나타난다는 것이고, 반면 UV가 펄스 형태면 반드시 IR에서 그에 대응하는 크기의 값을 가져야 한다는 것은 아니다. 이는 두 신호의 상관관계는 IR이 임계값을 넘으면 UV신호는 발생하지만 그 역은 반드시 성립되는 것은 아닌 것을 보여준다. 용접속도가 2m/min인 경우(I)와 3m/min인 (II)의 경우는 IR과 UV의 신호 상관관계는 매우 양호하다. 다른 점은 용접속도가 큰 (II)보다 작은 (I)에서 발생 주기가 높다는 것이다. 반면 4m/min의 경우(III)와 같이 IR 신호가 어떤 임계값을 넘지 않으면 UV신호는 (I)와 (II)보다 많은 주기를 가지는데, 이는 깊은 용접 풀이 형성되지 못하는 플라즈마 생성과 소멸은 주로 금속 표면에서 생긴다는 것을 의미한다(부분용입).

급격히 기하학적 변화가 일어나는 곳은 Fig. 7에서와 같이 3곳(B, D, F)이 있는데, Fig. 9에서와 같이 모두 IR과 UV 신호는 다른 곳에 비하여 신호의 크기가 작다. E의 경우는 C의 경우와 비슷하지만 위판만 있는 구간이어서 C보다 활발한 동적 활동이 있는 것을 알 수가 있지만 Table 1과 같이 그 평균값은 C가 E보다 크다. 이는 C의 피크의 폭이 E보다 넓은 것을 알 수가 있다. 이는 IR이 용접풀의 깊이에 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 반면 G의 경우는 과용입의 경우인데, IR과 UV의 신호가 매우 큰 것을 알 수가 있다.

4. 제안된 실시간 모니터링 알고리즘

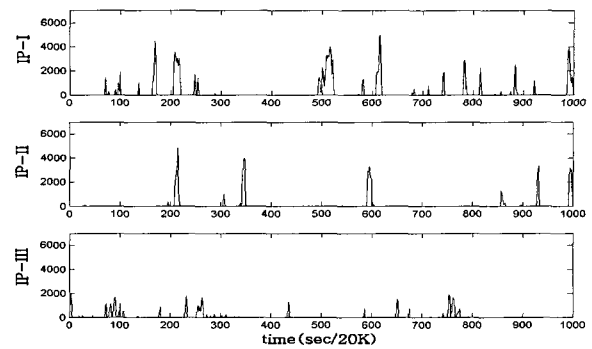
신호해석 결과 IR신호가 어떤 임계값( $IR_{threshold}$ ) 이상일 때 UV신호는 펄스 형태로 나타나는 것을 보여주었다. 이러한 상관관계의 크기를 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$IP = (IR - IR_{threshold}) \cdot UV \quad (1)$$

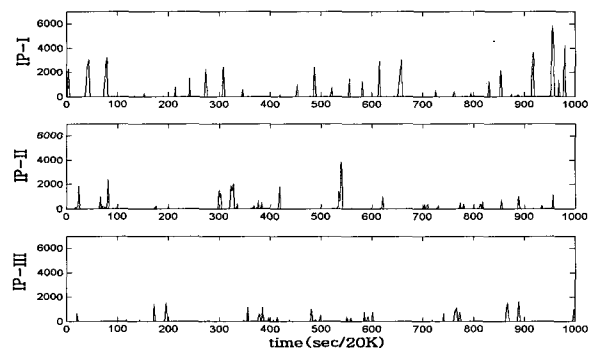
여기서  $\cdot$ 는 내적 곱이고,  $IR_{threshold}$ 는 IR의 임계값이다. C, E, 그리고 E점에서 식(1)을 나타내면 Fig. 11과 같다. Fig. 8에서와 같이 G의 경우는 과용입이고, C-I의 경우만이 완전용입이고, 그 외의 C와 E에서

Table 1 The average value of IR

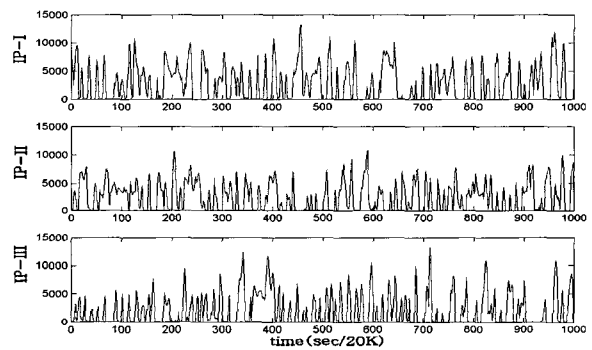
	IR-I	IR-II	IR-III
C	8694	7277	7019
E	8122	7114	6783
G	36786	33413	31778



(a) at C



(b) at E



(c) at G

Fig. 11 Inner production of IR and UV with IR threshold value 10 at C, E and G point of Fig. 9

는 부분용입을 알 수 있는데, 정해진 시간에 일정 범위를 벗어나는 폭을 가진 펄스의 개수를 개산함으로써 과용입, 완전용입, 그리고 부분용입의 구별이 가능하게 된다. 이는 UV신호는 IR신호가 어떤 임계값 이상일 때 발생하는 상관관계의 크기로 표시할 수 있어 용접 건전성 판단을 하는데 용이하다.

기하학적 변화가 일어나는 곳은 B, D, 그리고 F가 있는데, IR신호에 대하여 아래 식과 같이 50탭의 이동 평균 필터<sup>13)</sup>를 사용하면 Fig. 12과 같다.

$$IR_{MA} = \sum_{i=1}^{50} w_i \cdot IR_i \quad (2)$$

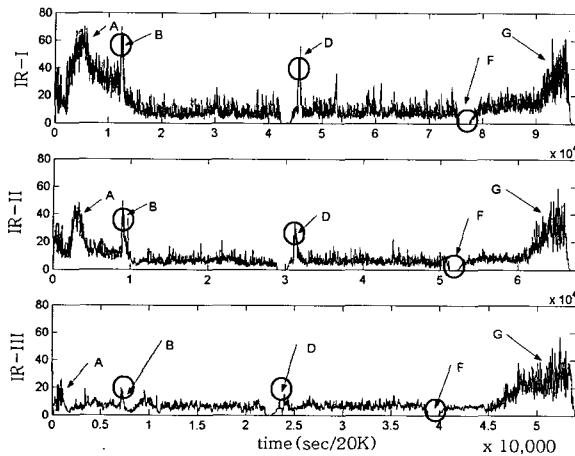


Fig. 12 Moving averaging filtered values of IR

여기서  $w_i (=1/50 \quad n=1, \dots, 50)$ 은 가중치이다. B와 D 위치는 센서에 대하여 시편의 기하학적 변화가 상승(leading edge)하는 곳인 반면 F는 하강(falling edge)하는 곳이다. B와 D에서는  $IR_{MA}$ 값들이 피크로 나타내기 때문에 Fig. 9에서와 달리 쉽게 찾을 수 있다. F에서는 구별되어 지지 않기 때문에, 센서의 위치를 변경하든지 또 다른 센서 헤드를 아래에 설치하는 것을 고려하여 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 실시간, 분산 계측 시스템을 구현하고자 임베디드 DSP를 이용하여 전용 모니터링 시스템을 제작하였다. 최대 8개의 센서를 장착할 수 있어 여러 위치에서 센서를 설치할 수 있도록 하였고, USB 포트로 모니터링 시스템에서 보내준 실시간 데이터는 PC에서 그래프로 나타낼 수도 있고 저장할 수도 있다. 획득한 신호에 대한 결과는 아래와 같다.

1) 용접시 발생하는 플라즈마는 생성과 소멸이라는 동적 특성 때문에 UV 신호 증폭시 펄스 형태로 만들면, IR과 UV신호의 상관관계가 양호한 신호를 얻을 수 있다. 즉 IR신호가 임계값을 넘으면 UV신호가 펄스 형태로 나타내는데, 임계값을 넘은 IR신호와 UV신호의 내적의 곱으로 나타내면 용접 건전성 판정이 보다 용이해짐을 알 수 있었다.

2) IR신호의 평균값은 용접선 폭의 상대적인 값으로 기술할 수 있다.

3) IR신호에 평균이동필터를 적용하면 기하학적 변화가 급격히 일어나는 곳을 찾을 수 있었다.

본 논문에서 적용된 신호해석 기법은 선형 해석 방법이고, 계산 시간이 짧아 정수형 DSP에서 몇 개의 알고리즘을 동시에 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 방법을 한 개의 알고리즘에서 있을 수 있는 잘못된 판정을 여러 알고리즘을 적용하면 상호보완적으로 용접 건전성을 판단하는 것이 보다 효과적이다. 더불어 임베디드 DSP는 분산 계측 시스템 구현이 매우 쉽게 되어 있어 산업현장 적용에 적합하다고 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. K.-D. Lee: Quality Monitoring System for Tailored Blank Welding, J. of KWS, 18-1(2000), 293-301(in Korean)
2. J.-I. Lee, S.-H. Rhee: A Study of Inspection of Weld Bead Defects using Laser Vision, J. of KWS, 17-2 (1999), 115-122 (in Korean)
3. J.-D. Kim: Fundamental Study on the Weld Defects and Its Real-time Monitoring Method, J of KWS, 20-1(2000), 26-33(in Korean)
4. S. Y. Bang: Process Monitoring in Laser Welding with Photodiodes, Proceeding of Korea Society of Precision Engineering, (1996), 474-478(in Korean)
5. E. Beyer, and etc. : Plasma Fluctuation during Laser Machining with CW CO<sub>2</sub>-Laser, SPIE, 801, High Power Laser, (1987)178-184
6. W. Gatzweiler and etc. : On-line Plasma Diagnostics for Process Control in Welding with CO<sub>2</sub> Laser, SPIE, 1020, High Power CO<sub>2</sub> Laser Systems and Applications, (1988), 142-148
7. W. Gatzweiler and etc. : Model of Dynamic Behaviour in Laser Beam Welding, SPIE, 1132, High Power Laser and Laser Machining Technology, (1989), 157-167.
8. J. Suh and etc. : Weld Quality Monitoring and Seam Tracking in Making of Welded Tube using CO<sub>2</sub> Laser, J. of KWS, 21-7(2003), 740-747(in Korean)
9. S.-H. Lee, D.-H. Yoon : Introduction to the Wavelet Transform, Jinhan Book Inc., (2002) (in Korean)
10. Yves Meyer : Wavelets Algorithms & Application, SIAM(1993)
11. User Manual of TMS320LF2406, TI Co.
12. FT25BM USB FIFO(USB-Parallel) I.C, FTDICHP Co.
13. S. W. Smith : The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 2nd Edition, California Technical Publishing, 1997