

特輯 : 제어계측 및 모니터링

비전센서를 이용한 용접시스템의 모델링 및 제어

Modeling and Control of Welding Processes Using Vision Sensor

엄기원 · 이세현 · 김동철

Ki-Woan Um, Sehun Rhee and Dong-Cheol Kim



엄기원/한양대학교/
1933년생/용접구조물
해석 및 용융지 유동 해
석분야 연구



이세현/한양대학교/
1955년생/용접자동화를
위한 계측 및 제어분야
연구



김동철/한양대학교/
1967년생/용접시스템
모델링과 적응제어분야
연구

1. 머리말

아크 용접 공정을 자동화하고 무인화하는 것은 용접 품질 향상 및 생산성 향상에 기여할 뿐만 아니라 용접숙련공의 감소문제에도 대처할 수 있기 때문에 중요한 것이라 생각된다. 그것을 위해 아크 용접 분야에도 로봇의 도입이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 그러나 현재 현장에 도입된 로봇은 주로 off-line으로 그 기능을 수행하고 있기 때문에 생산성 향상 및 용접 품질 향상 면에서 그 기능을 충분히 발휘하고 있지 못하고 있는 실정이다.

이런 단점을 극복하기 위해서는 센서의 도입과 그것을 이용하여 용접시스템을 피드백 루프로 구성할 필요가 있고 용접선 추적(seam tracking), 용융지 형상 제어, 아크 길이 제어 등은 그 예라고 할 수 있다¹⁻⁴⁾.

본 논문에서는 그동안 국내에서는 심도있게 취급되지 않았던 용융지 형상 제어시스템과 그것을 구성하기 위해 많이 사용되고 있는 비전센서에 관하여 서술한다.

2. 본 론

2.1 용융지 형상 제어시스템

일반적인 피드백 제어시스템은 Fig.1과 같이 제어대상, 센서, 제어기로 구성된 하드웨어적인 부분과 제어대상을 모델링하고 그 모델을 근거로 원하는 응답성능을 발휘하도록 하는 제어기를 설계하는 소프트웨어적인 부분으로 구성되어 있다⁵⁾. 그리고 일반적으로 비전을 이용하여 용융지형상의 동적거동을 제어하기 위한 전체시스템의 한 예를 Fig.2에 보였다. 이 용융지폭 제어시스템은 아크 용접기 부분, 용융지형상을 관찰 및 제어하는데 필요한 센서부분, 컴퓨터부분, 스텝핑모터부분으로 구성되어 있다.

그런데 이런 시스템을 구성하여 용접품질을 결정하는 인자중 하나인 용융지 형상의 피드백 제어를 어렵게 하는 것중에서 특히 다음의 두가지가 그 주된 원인이다. 하나는 제어기를 설계하기 위해서는 용접시스템에 대한 수학적 모델이 필요한데 용접시스템의 복잡성으로 인해 그 모델을 유도하기

어렵다는 것이고, 다른 하나는 피드백 제어를 위해 필수적인 센서의 신뢰도가 낮아 충분한 제어 성능을 내기 어렵다는 것이다.

이런 두가지 문제점을 해결하기 위해 현재까지 이루어진 연구들중에서 비전센서를 이용한 내용에 대해 검토한다.

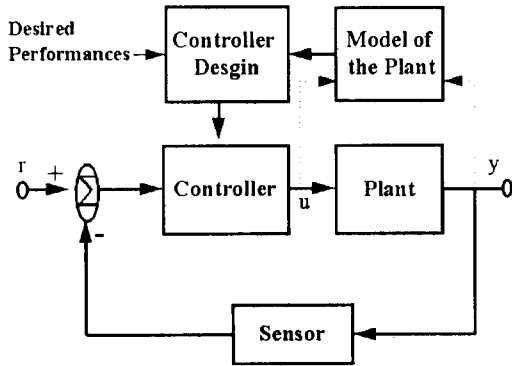


Fig. 1 Block diagram of a control system

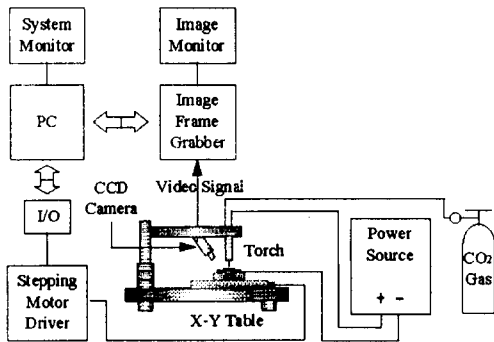


Fig. 2 The system of sensing and controlling the weld geometry

2.2 아크광 및 용융지광 스펙트럼과 비전시스템

아크용접에서 용융지 형상 제어의 난점중 하나는 아크 용접 공정이 고열, 스퍼터, 강한 아크광등을 필연적으로 수반하는 작업이기 때문에 신뢰성 있는 센서 정보를 획득하기 어렵다는 것이었다.

특히 비전센서를 이용하여 피드백 루프를 구성할 경우에는 강한 아크광이 비전센서의 성능을 현저하게 저하시키기 때문에 문제가 되어 왔다.

Fig. 3은 SMAW (shielded metal arc welding) 에서 발생하는 아크광과 용융지광의 파장분포 및 상대 강도비를 나타내고 있다⁶⁾. Fig.3에서 알 수 있듯이 아크용접과정에서 발생하는 강한 아크광은 용융지로부터 나오는 광에 비하여 월등히 크기 때문에 단순히 일반 카메라의 광량을 줄이는 방법으로는 용융지 형상 관찰 및 제어를 위한 좋은 시각정보를 얻지 못한다.

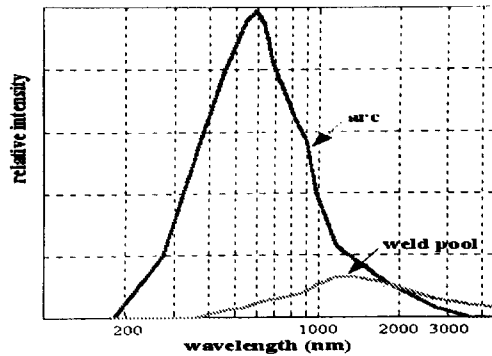


Fig. 3 Spectrum of SMAW arc and weld pool

Fig. 4는 다음 네가지 아크에 대해 측정한 아크 광 스펙트럼을 나타내고 있다⁷⁾. 그림에서 (a)는 CO₂아크, (b)는 Ar+CO₂아크, (c)는 MIG아크, (d)는 TIG아크의 스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)와 (b)로부터 가시광 단파장영역의 성분이 가시광 장파장영역에서 근적외선영역에 걸쳐있는 성분보다 상대강도가 크다는 것을 알 수 있고, Fig. 4 (c)와 (d)에서는 700-900nm의 파장영역에서도 몇 개의 강한 선스펙트럼이 존재하는데 이것은 Ar이 가지고 있는 고유의 스펙트럼때문으로 보여진다. 그리고 Fig. 5는 용융지광의 스펙트럼을 나타내고 있으며 적외선영역으로 갈수록 상대강도가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

위의 아크광과 용융지광에 대한 스펙트럼 분포로부터 비전센서를 사용하여 아크 용접 공정중 용융지 형상을 관찰하거나 피드백 제어에 필요한 양호한 시각정보를 얻기 위해서는 아크보다는 용융

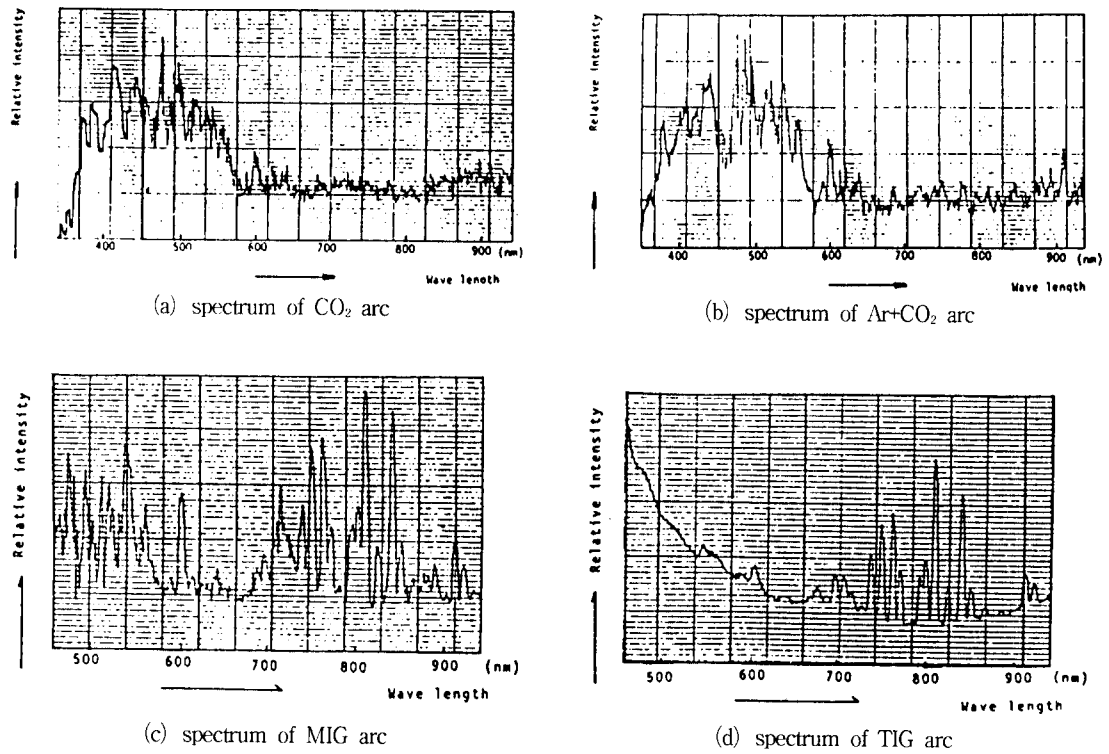


Fig. 4 Spectrum of welding arcs

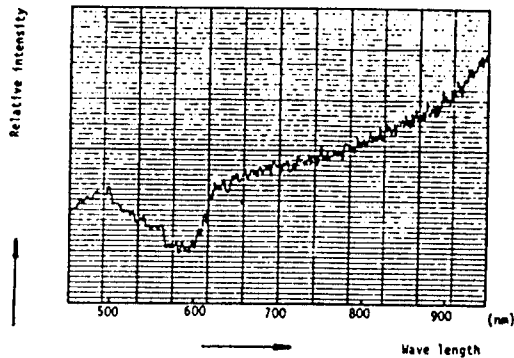


Fig. 5 Spectrum of radiation from molten pool

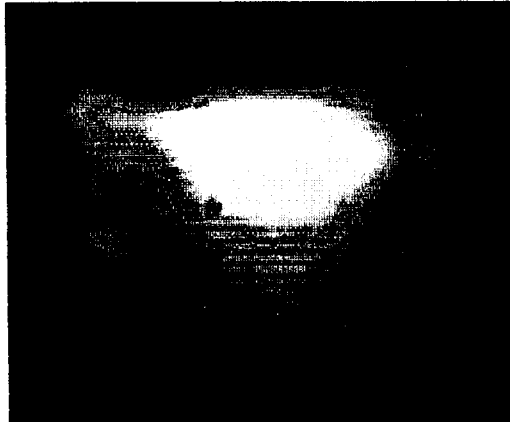
지 형상을 상대적으로 강조할 수 있도록 시스템을 구성할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 위의 아크광 및 용융지광의 스펙트럼 분포에 근거하면 가장 양호한 용융지 화상정보를 얻기 위해서는 되도록 장파장영역의 화상을 획득할 수 있는 비전

시스템이 필요하다는 것을 알 수 있고, 적외선 카메라에 의한 용접부 촬영을 생각할 수 있다. 그러나 적외선 카메라는 산업현장에 적용하기에는 너무 고가이므로, 현장 적용성을 고려하여 적절한 광학필터와 일반 CCD카메라를 병용하는 방법을 생각할 수 있다.

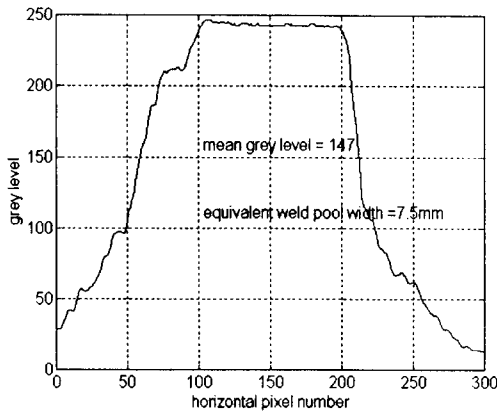
Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 GTA용접부를 세가지 조건으로 촬영한 용융지 화상과 grey level 분포를 보여주고 있다⁸⁾.

Fig. 6(a)는 광학필터(optical filter)를 사용하지 않은 상태에서 강한 아크광과 용융지광의 광량을 일률적으로 줄인 다음, CCD카메라로 촬영한 용융지화상을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 용융지화상에서 용접도치캡의 선단에서부터 40픽셀(약2mm) 떨어진 부분에서 가로방향의 화상데이터에 대하여 각 pixel number에 해당되는 grey level(0-255)의 분포를 나타내고 있다. 일반적으로 전극팁의 형상이 대칭형이고, 용융지 거동이 심하

지 않을 때 용융지 화상의 grey level 분포는 좌우 대칭형으로 나타나는데, Fig.6(b)에서 알 수 있듯이 화상의 grey level 분포가 좌우 비대칭을 이루고 있으며, 용융지폭을 검출하는 데이터로 이용하는 데는 거의 불가능하고 실시간으로 용접부를 모니터링할 수도 없다는 것을 알 수 있다.



(a) weld pool & arc image

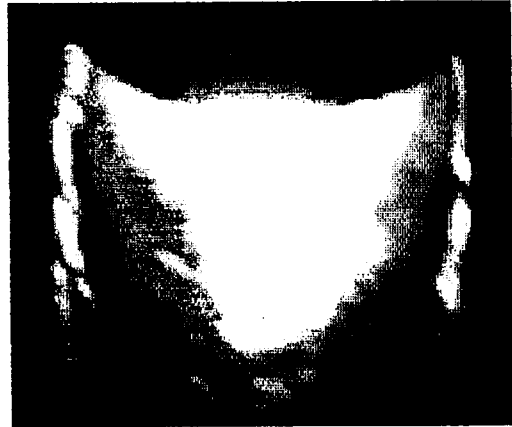


(b) distribution of brightness

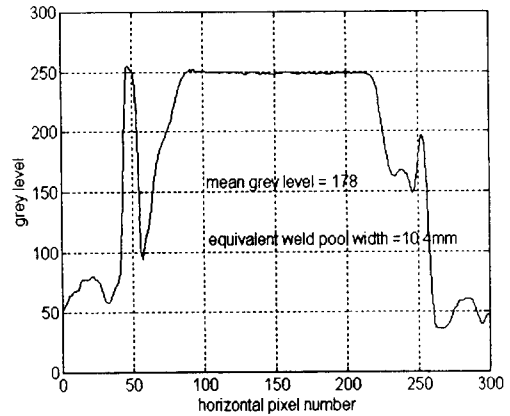
Fig. 6 Weld pool & arc image without a optical filter

Fig. 7(a) 와 (b) 는 대역통과필터 (FWHM 20nm인 632.8nm bandpass filter) 을 CCD카메라에 부착한 상태에서 용접부를 촬영하였을 때의 용융지화상과 grey level의 분포를 각각 나타내고 있다. Fig. 5(a)

에서 알 수 있듯이 용융지화상의 짙은 광학필터를 사용하지 않을 때보다 향상되었다는 것을 알 수 있다.



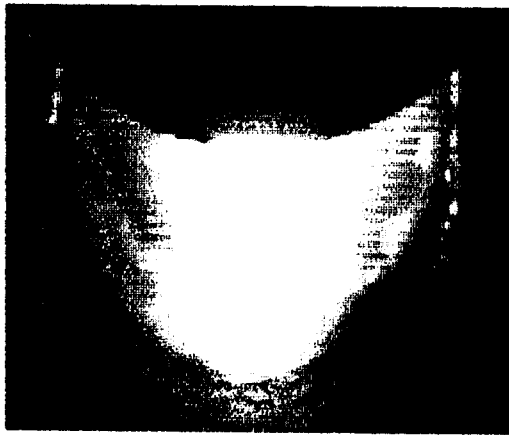
(a) weld pool & arc image



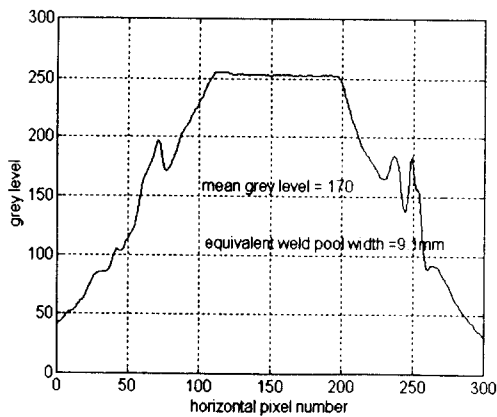
(b) distribution of brightness

Fig. 7 Weld pool & arc image with a bandpass filter

Fig. 8(a) 와 (b) 는 장파장 통과필터 (50% cut-on point가 850nm인 long wavelength pass filter) 를 CCD카메라에 부착한 상태에서 용접부를 촬영하였을 때의 용융지화상과 grey level의 분포를 각각 나타내고 있다. Fig. 8(a)로부터 용융지 화상의 짙은 광학필터를 사용하지 않을 때보다는 현저하게 향상되었으며, 대역통과필터 (bandpass filter) 를 사용



(a) weld pool & arc image



(b) distribution of brightness

Fig. 8 Weld pool & arc image with a long wavelength pass filter

했을 때보다 향상되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6~Fig. 8로부터 GTA용접부에 대한 화상정보는 광학필터를 CCD카메라와 함께 사용하면 향상된다는 것을 알 수 있다. 그리고 위에서 열거한 실험결과로부터 아크광과 용융지광의 상대강도비는 용접실험조건(아크용접 종류, 용접모재, 보호가스 등)에 따라 변하기 때문에 향상된 화상정보를 얻기 위해서는 각각의 경우에 대하여 적절한 광학필터를 선정할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

비전시스템을 이용하여 펄스 MIG용접에서의 용

접부를 촬영한 다음과 같은 방법도 있다". 펄스 MIG용접에서 수ms의 저전류 기간을 설정하고 그 기간과 카메라의 촬영시점을 동기시켜 용융지 형상을 관찰하는 것이다.

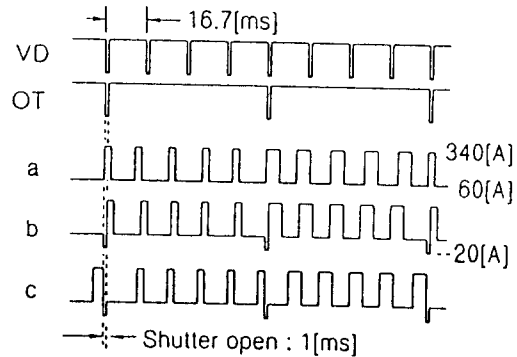
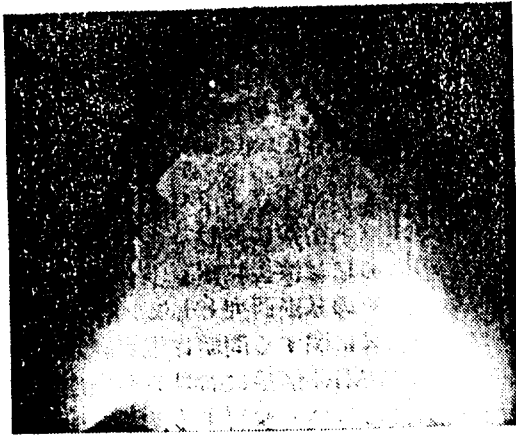


Fig. 9 The timing chart of shutter time of the CCD camera

펄스 MIG용접기의 펄스 용접전류파형과 촬영타이밍(OT) 시점에 따라 화질에 미치는 효과를 검토하기 위해 Fig.9에 보인 세 종류의 촬영타이밍 a, b, c에서 각각 용융지를 촬영한다. a의 펄스피크에서 셔터를 열고 촬영한 용융지화상을 Fig.10(a)에 보였다. 용융지의 밝기와 비교하여 아크광이 강하여 용융지의 전방을 관찰할 수 없다. b의 펄스피크 직전에 촬영한 용융지를 Fig.10(b)에 보였다. 이 경우는 CCD카메라셔터가 열린 동안 아크광의 영향을 경감하기 위해 전류를 저전류(20A)로 낮추었다. a의 경우보다 향상된 화상을 얻을 수 있지만 토치근방이 밝게 되어 용융지전방의 식별이 곤란하게 된다. 마지막으로 c의 펄스피크직 후에 촬영한 용융지화상을 Fig.10(c)에 보였다. 용융지는 펄스피크 직전에 촬영한 화상보다 상당히 명확하게 된다는 것을 알 수 있다.

위의 화상을 이용하여 용융지폭을 계산하는 간단한 방법은 다음과 같다. Fig.10(c)의 선분 AD상의 밝기레벨분포를 Fig.10(d)에 나타내었다. 용융지는 전극직하로부터 약 4.5mm후방에서 최대폭이 되므로, 약4.5mm후방의 선분AD를 용융지폭 샘플링라인으로 선택한다. Fig.10(d)에서 용융지경계는 B 및 C로 대응한다. 이 경계부분 B 및 C에서 밝기의 레벨이 급격하게 변한다. 이 특성을 활

용하여 용융지경계를 검출한다. 먼저 선분AD상의 화소밝기레벨의 평균값을 구하고, 화소의 밝기레벨이 평균값이상의 부분을 용융지부분으로 한다. 선분 AD상의 좌단의 화소에서 오른쪽방향으로의 화소의 밝기레벨을 조사하고, 평균값을 넘는 밝기레벨을 지닌 화소의 위치 B 을 알아낸다. 같은 방법을 우단의 화소에서 왼쪽방향으로 행하고 용융지경계에 해당하는 화소위치 C를 알아낸다. 용융지폭에 해당하는 화소수는 B에서 C의 화소수가 된다. 따라서 한 화소에 해당하는 길이를 구하여 그 길이의 화소수로부터 용융지폭을 구한다.



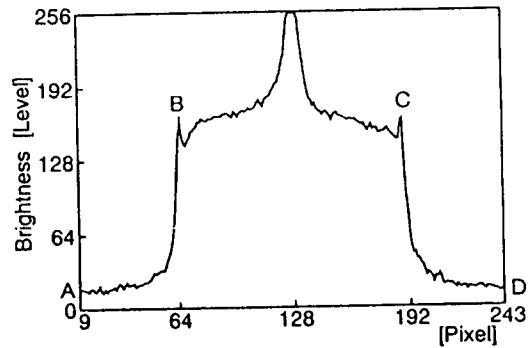
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 The weld pool images and the distribution of the brightness

위와 같은 방법을 용적이행모드로 단락이행을 주로 사용하는 CO₂ 가스 메탈 아크 용접에서 단락시점과 카메라의 촬영시점을 동기하도록 시각시스템을 구성하면 별도의 광학필터를 사용하지 않고도 양호한 화상 데이터를 획득할 수 있을 것이다.

2.3 용접시스템의 모델링 및 제어

용접시스템을 피드백제어하려는 것은 외란 (disturbances)의 존재하에서도 온라인 (on-line)으로 용접시스템의 출력력을 모니터링하고 그 변동에 대하여 입력값을 조정하여 용접후 용접부가 설계

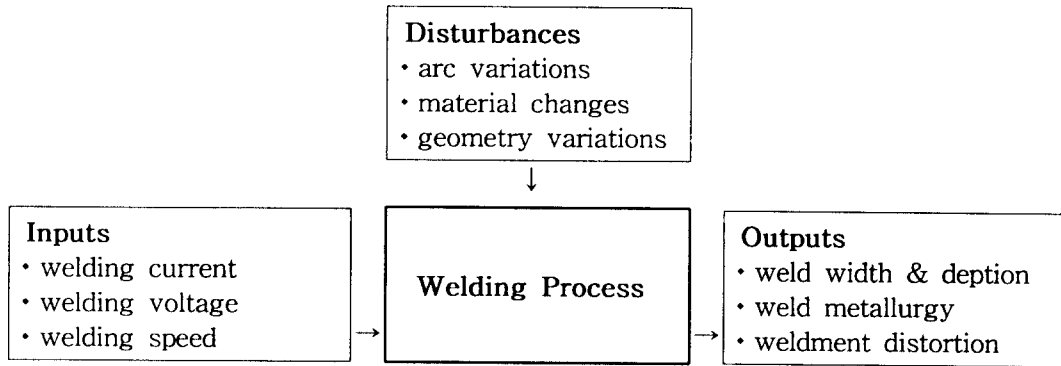


Fig. 11 The block diagram of welding process

기준 조건에 합당하도록 하는 것이다.

용접시스템을 구성하는 중요한 인자들을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11과 같이 용접시스템은 여러가지 인자들이 복합적으로 구성된 복잡한 시스템이기 때문에 이 모든 인자들을 고려하여 용접시스템의 정확한 모델을 구한다는 것은 거의 불가능하다.

용접시스템을 모델링하는 방법은 물리적 법칙에 근거하여 해석적으로 용접시스템의 모델을 유도하는 방법, 수치해석적인 방법, 그리고 실험을 통하여 얻어진 입력력 데이터를 이용하여 모델을 유도

하는 방법 등이 있다. 첫번째와 두번째 방법은 이상화된 가정을 기초로 하여 유도된 모델이기 때문에 실제 시스템을 정확하게 표현하기 어려운 단점이 있다. 그래서 최근에는 용접시스템뿐만 아니라 다른 시스템에도 세번째 방법인 시스템 식별(system identification) 이론을 이용하여 모델을 유도하고 있다⁵⁾. 시스템 식별 이론을 이용하여 모델을 유도하는 과정을 Fig. 12에 나타내었다. 이 방법은 제어대상인 용접시스템에 입력(용접속도, 용접전류 등)과 그 입력에 대한 출력(용융지폭, 용융지 넓이, 온도 등)의 데이터를 획득한 다음, 적당한 모델(ARX, ARMAX 모델 등)을 선택하고, 그 모델에 알맞은 파라미터 예측 알고리즘을 이용하여 모델의 파라미터를 구한 다음 그 모델에 대하여 타당성 검사를 이용하여 선택된 모델의 가부(可否)를 결정하는 순서로 시스템의 모델을 유도하는 것이다.

이런 방식으로 구해진 용접시스템에 대한 모델을 바탕으로 용접부 형상을 원하는 목표값에 이르게 하는 목표값 추종(reference tracking)과 외란에 대해서도 균일한 형상을 유지하도록 하는 disturbance rejection 기능을 만족시키기 위한 제어기(controller)를 설계할 수 있다. 그리고 용접시스템은 비선형시스템이기 때문에 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 용접시스템의 파라미터 변화에 대처할 수 있는 적응 제어기(adaptive controller)가 필요한 시스템이다. Fig. 12는 제어입력이 와이어 송급속도이고 출력이 용융지폭인 용접시스템에 대해서 시스템 식별 이론을 이용하여 구한 모델을 토

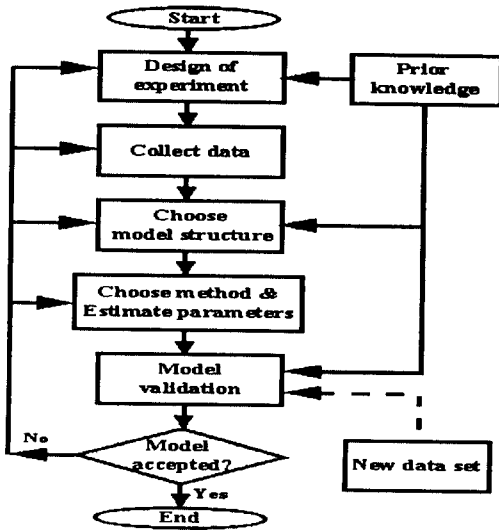


Fig. 12 Flowchart of system identification

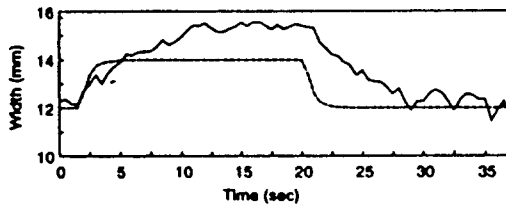
대로 설계한 (a) adaptive one-step ahead controller, (b) PI controller, (c) nonadaptive one-step ahead controller의 목표값 추종 성능을 나타내고 있다¹⁰⁾. 그림을 통해 알 수 있듯이 적응제어기의 성능이 가장 뛰어난 것을 알 수 있다.



(a) adaptive one-step ahead controller



(b) PI controller



(c) nonadaptive one-step ahead controller

Fig. 13 Comparison of adaptive controller to nonadaptive controllers

3. 맺음 말

본 논문에서는 용접공정자동화 및 무인화를 위해 용접시스템에 센서로써 비전센서를 이용할 경우에 용접부의 화상의 질을 향상시킬 수 있는 방법과 용접시스템의 모델링 및 제어에 대해 알아 보았다. 용접공정에 비전센서의 적용은 용접공정을 모니터링함과 동시에 용접변수들을 제어하여 용접품질을 향상시킬 수 있는 필요조건이고, 비전센서의 신뢰성 향상은 용접부에서 획득된 화상에 대한 화

상처리(image processing)시간을 단축시킬 수 있고, 충분한 제어 결과를 얻을 수 있다. 그리고 입출력 데이터를 이용하여 시스템 모델을 유도할 경우 신뢰성 있는 센서의 출력은 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 결국 용접시스템에 피드백 제어 이론을 적용시켜 만족할 만한 결과를 얻기 위해서 가장 중요하고 선행되어야 할 것은 센서 출력의 신뢰도를 높이는 것이다.

참고 문헌

1. S. Nakata, H. Jie, Y. Tsuruha, N. Noguchi : Fundamental Investigation on Detecting the Information on Weld Line and Molten Pool by Combination of Laser and Interference Filter with Narrow Half Width, 일본용접학회논문집, Vol. 6, No. 1, (1988), pp. 123-127
2. K. Ohshima, M. Morita, K. Fujii : Observation and Digital Control of Weld Pool in Pulsed MIG Welding, 일본용접학회 논문집, Vol. 5, No. 3, (1987), pp. 18-25
3. R. W. Richardson, D. A. Gutow, R. A. Anderson : Coaxial Arc Weld Pool Viewing for Process Monitoring and Control, Welding Journal, Vol. 63, No. 3, (1984), pp. 43-50
4. E. Kannatey-Asibu Jr. : Analysis of the GMAW Process for Microprocessor Control of Arc Length, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, No. 1, (1987), pp. 172-176
5. I. D. Landau : System Identification and Control Design, Prentice Hall, (1990)
6. H. E. Pattee, L. B. Myers, R. M. Evans : Effects of Arc Radiation and Heat on Welders, Welding Journal, Vol. 52, No. 5, (1973), pp. 297-308
7. K. Inoue : Image Process for On-Line Detection of Welding Process, 일본용접학회지, Vol. 50, No. 11, (1981), pp. 94-100
8. 김동철, 이세현, 엄기원 : 화상처리에 의한

- GTA용접에서의 용융지폭 제어에 관한 연구, 대한기계학회논문집(A), 제 20 권, 제 9 호, (1996)
9. S. Yamane, K. Ohshima, Y. Koashi : Sensing and Fuzzy Control of Weld Pool in Pulsed MIG Welding, 일본용접학회논문집, Vol. 10, No. 4, (1992), pp. 46-51
10. D. E. Hardt, J. B. Song : Dynamic Modeling and Adaptive Control of the Gas Metal Arc Welding Process, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 116, (1994), pp. 405-413