

레이저 용접물 결함 평가에 대한 화상처리의 이용

이정익*, 고병갑⁺

(논문접수일 2006. 8. 17, 심사완료일 2007. 1. 25)

Application of Image Processing on the Laser Welded Defects Estimation

Jeong-ick Lee*, Byung-kab Koh⁺

Abstract

The welded defects are usually called user's dissatisfaction for appearance and functional usage. For checking these defects effectively without time loss, setup of weldability estimation system is an important for detecting whole specimen quality. In this study, after catching a rawdata on welded specimen profiles and treating vision processing with these data, the qualitative defects are estimated from getting these information by laser vision camera at first. At the same time, the weldability estimation for whole specimen is produced. For user friendly, the weldability estimation results are shown each profiles, final reports and visual graphics method. So, user can easily determined weldability. By applying these system to welding fabrication, these technologies are contribution to on-line setup of weldability estimation system.

Key Words : Weldability estimation(용접성 평가), Laser vision sensor(레이저 비전 센서), Image processing(이미지 처리), Welded defects(용접부 결함), Segmentation processing(분할 처리), Rawdata(원 데이터), Segment splitting method(분할법), Digital curve(디지털 곡선)

1. 서론

레이저 용접부의 결함은 치수상 결함, 구조상 결함, 성질상 결함으로 나눌 수 있으며, 이들 결함 들은 용접물에 개별, 또는 복합적으로 포함되어 용접 전체 품질에 치명적인 효과를 가져다 줄 수도 있다⁽¹⁾. 시공 중 이들 용접성을 평가하

려는 노력들은 용접의 역사만큼 오래도록 이루어져 왔으나, 지금까지는 주로 용접전문가의 경험에 의해 수행되어 왔으며, 반복성과 일관성이 낮은 수동용접의 경우는 이상과 같은 평가시험법이 가능하였으나, 최근 생산성 및 비용의 개선과 고품질의 용접을 보장하기 위하여 용접의 자동화가 필수적으로 되었다⁽²⁾. 레이저 용접의 자동화에는 실시간 판단이 선행

* 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계설계과 (jilee@inhac.ac.kr)

주소: 402-752 인천광역시 남구 용현동 253번지

+ 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계과

되어야 한다⁽²⁾. 이를 위한 노력의 일환으로 각종 기계적, 전기적 도구를 사용한 용접성 판별 기술들이 제안되어 왔으나, 최근 연구는 주로 센서를 이용한 모니터링과 비전을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재 생산라인에 적용 중이다⁽²⁾.

이로 인해 지금까지 경험자의 판단이나 기계적 성형성 실험에 의해 용접성의 양부를 결정하던 수동적인 방법에서 벗어나 시각센서를 이용하여 레이저 용접물의 용접성을 평가를 자동적으로 수행하는 기초연구를 수행하였다.

2. 용접 결함 평가 기준

2.1 스트라이프 및 디지털 곡선의 표현

스트라이프 표현은 레이저 시각 센서를 통해 들어오는 디지털 곡선과 이를 통해 절점을 구하는 분할법으로 구성할 수 있다. 이 분할법은 시각 센서를 통해 들어오는 잡음이 포함된 시각 전처리 데이터를 먼저 필터링하고 얻어진 정보로 수행한다. 분할법에 의해 얻어진 절점들은 결함판단을 위한 기초 데이터로 사용되므로 이들의 처리가 중요하다. 레이저 시각 카메라를 통해 획득한 레이저 용접 비드의 형태는 Fig. 1과 같이 나타난다. 그림의 레이저 띠는 일련의 점들(256개)로 이루어져 있다. 이것으로 비드 결함을 판별하기 위해 먼저 점들의 집합을 선 또는 곡선 성분들로 표현을 해야 한다.

2.2 분할법(Segment Splitting Method)

선분에 의한 윤곽선으로 근사화 시키려면 먼저 프로파일의 분할화가 필요하며, 이에 만족할 만한 다각형 선분을 얻기 위해서는 구석점 또는 절점을 추출해야 한다. 이러한 방법 중 하나로 분할법이 있다. 분할법은 상-하 분할(top-down splitting)이라고도 하며, 양쪽 끝점에서부터 절점을 찾아내는 방법이다. 먼저 첫 번째 에지점 A와 마지막 에지점 B를 선분으로 연결한다. 다음에는 이 선분에서 가장 멀리 떨어진 에지점을 찾아 그 정규화 최대 오차가 경계값(threshold) 이상이면 에지 리스트에 포함한다(에지점 C). 이 과정을 반복해서, 곡선에서 에지점 들에 대한 정규화 최대 오차가 모두

경계값 이하가 되면 알고리즘을 종료한다. 이러한 분할법은 반복 분할법(recursive subdivision)이라고도 불린다. 이 알고리즘에 대한 예시는 Fig. 2에 나타내었다. 이 반복 분할법에 의하면 분할점과 분할선의 개수가 정해지면 프로파일에 가장 근사한 값을 가질 때까지 계속해서 찾아가는 기법이다. 특히 용융지 폭이 좁고 불규칙하면서 용입 깊이가 깊은 레이저 용접의 깊이값을 찾는데 아주 유용하게 사용될 수 있다. 최종적 분할법을 써서 깊이값을 찾아내는 방법을 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 용접 결함의 분류

용접부 결함에는 용접부 자체의 결함과 모재부 결함으로 나눌 수 있으며, 여기서는 용접부 자체의 결함만을 다루기로 한다. 이러한 결함에는 언더컷(undercut), 미스매치(mismatch), 형상오차, 치수 결함 등의 형상 결함, 균열, 홀(hole), 계재물 혼입, 용융 불량 등의 불연속 결함과 강도 부족, 연성 부족, 인성 부족 등의 물성 결함으로 나눌 수 있다⁽⁴⁾.

실제 생산되는 용접물의 결함을 관측하기 위해서는 각종 용접 시험법이 수반되어야 하나 여기서는 용접 자동화를 위한 준비과정으로 지금까지 경험자의 시각에 의존하여 왔던 외관상의 품질을 레이저 시각 센서를 이용하여 실시간으로

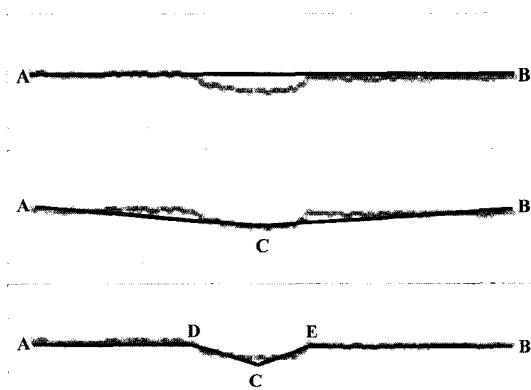


Fig. 2 Segment splitting method for a stripe representation

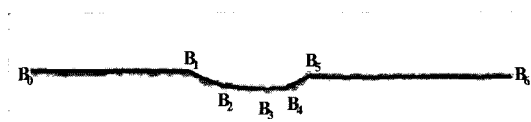


Fig. 3 Stripe representation using segment splitting method

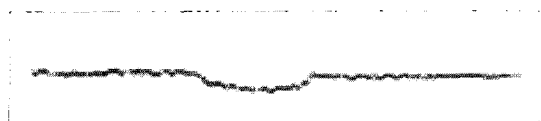

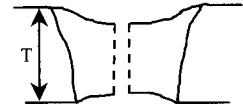
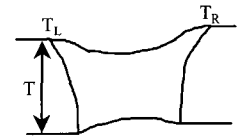


Fig. 1 A stripe of laser welded bead

Table 1 Limits for imperfections

NO.	Imperfection designation	Remarks	Limits for imperfections	Definition of Imperfections
1	Underfill		$T_0/T \leq 0.2T$ T: SPECIMEN THICKNESS T ₀ : THICKNESS AFTER FUSION	Lack of fusion and penetration between weld metal and parent metal or weld metal and weld metal
2	Hole (Blowhole or Pinhole)		$T \leq V_B$ T: SPECIMEN THICKNESS V _B : BREAK POINT MAX. VALUE	A collapse of the weld pool resulting in a hole in the weld or at the side of the weld
3	Mismatch		$ T_L - T_R \geq 0.25T$ T: SPECIMEN THICKNESS T _L : LEFT EDGE THICKNESS T _R : RIGHT EDGE THICKNESS	Misalignment between two welded pieces such that whilst their surface planes are parallel they are not at the required level.

계측 후 빠르고 정확하게 판정하는데 연구의 목적을 두었으며, 이에 따라 레이저 용접에서 두께 1.0mm이하의 시편에서 품질에 중요한 영향을 주는 3가지 결함을 문헌을 통해 구성하였으며, 이외의 결함종류 및 평가방법은 향후 연구 후 추가할 예정이다. 4가지의 분류는 양호(good), 언더필(underfill), 홀(hole), 미스매치(mismatch)이다. 본 연구에서 평가하는 결함에 대한 한계는 Table 1과 같다.

2.4 용접 결함 평가 방법

용접성 평가 방법은 다음과 같이 비전 처리된 분할점, 분할선으로 부터의 가장 깊은 위치에서 깊이의 정보로부터 정량적인 방법으로 결함을 판별해 낸다. 아래의 Fig. 4는 정량적인 기준을 설명하고자 하는 것으로 화상 처리된 스트라이프를 나타낸 것으로 모든 비전 처리된 프로파일은 11개의 분할점과 10개의 분할선으로 구성된다. 즉, 1mm남짓한 작은

비드폭 사이에 11개의 분할점이 구성되어 용접의 성형성에 가장 중요한 요인이 되는 비드최고 깊이를 찾는 것이다.

2.5 용접 결함 기준

언더필(underfill)이란 비전처리후의 분할점(1~11점)중 Fig. 3에서 비드표면과 제일 깊은 지점의 값의 최대값이 6지점의 거리가 전체시편 두께의 20%이상의 값을 나타낸다. 이 경우 이전의 참고문헌에 따르면 20%가 초과 시는 성형성에 치명적인 영향을 줄 수 있는 것으로 연구된 바 있는 결함이다. 즉, Fig. 3에 대해 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{06}{06} \leq 0.2T^{(8,10)} \quad (T: \text{specimen thickness}) \quad (1)$$

홀(hole)이란 비전처리후의 분할점(1~11점)중 1점 이상이 시편 두께 이상의 값을 보인다. 몇 개의 점이 시편 두께 이상인가, 또한 몇 개의 프로파일이 연속적으로 반복되는가에 따라 3차원적 홀의 크기가 예측된다. 즉, Fig. 3에서 3의 경우 같이 용접 모재 부분이 과열로 인해 녹아, 작게는 핀홀(pinhole)이, 크게는 키홀(keyhole) 이상의 홀이 되어 6'점과 같이 모재보다 깊게 깊이 정보가 얻어진다. 미스매치(mismatch)는 비전처리후의 분할점(1~11점)에서 1과 11점의 차이가 0.25T(T:시편두께)⁽⁶⁾를 넘는 경우이다. 과다 입열 또는 잔류응력으로 생기는 변형이며, 라인 불일치(linear misalignment)라고도 한다. 홀과 마찬가지로 몇 개의 프로파일에 걸쳐 연속적으로 반복되는 경우 미스매치의 크기를 예측할 수 있다.

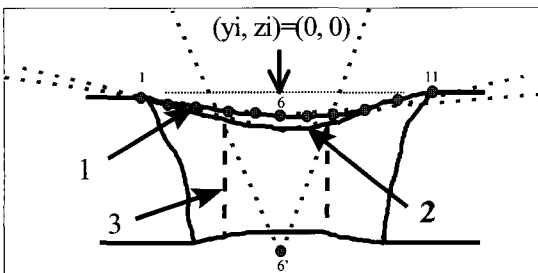


Fig. 4 Laser welded bead after postprocessing having an information of angle and depth

2.6 용접 결함 판단 시스템

연구의 시스템에 사용되는 데이터는 레이저 시각 시스템에 의해 얻어진 최초 시각 전처리 데이터를 비전 전처리 과정과 영역 분할처리 과정을 마치고 최종적으로 특징 추출과 인식을 마친 데이터를 의미한다. 이러한 과정을 마친 데이터로 레이저 용접부의 결함을 판정하며 다음 Fig. 5는 결함판단 시스템의 운영절차를 나타낸 것이다.

3. 실험 및 고찰

3.1 레이저 비전 시스템의 구성

결함 검출을 위한 비전 시스템은 캐나다 Servo Robot사의 SMART-HR 3-D 레이저 비전 카메라를 레이저 비전 시스템으로 사용하였고, XY테이블은 일본 Shibaura사의 시바우라 로봇 CM2 컨트롤러를 사용하였다. 비전 시스템은 비전 카메라 헤드(SMART-HR)와 컨트롤 장치인 SMART-BOX 시스템으로 구성되어 있다. 카메라 헤드는 깊이 측정을 위한 능동적 광학 삼각법에 기초를 두고 있으며 이는 광원과 비전센서를 기준선으로 하여 센서에 상이 맺히는 위치에 따라 삼각법에 의해 물체까지의 거리를 구하는 방식이 되어 있고 특히 본 연구에서 사용된 비전 센서는 구조화된 레이저 빔 투영방식(structured laser beam illumination)을 사용한다. 카메라에서 투사된 레이저는 물체와 교차하고 이 교점은 수광 렌즈를 통과하여 수광부에 상이 맺히며 이는 물체까지의 거리로 계산된다. 광원으로는 출력 3mW의 시각 레이저 다이오우드를 사용하며, 또한 카메라 렌즈 부에는 용접시의 잡음과 스펙터의 방해를 막기 위한 대역 통과 필터를 설치하고 있다. 레이저 카메라는 240개의 점을 샘플링하며, 초당 30 프로파일링을 행한다. XY테이블은 최대 160W 인 DC Servo Motor이며 10단계의 속도 변환을 할 수 있다.

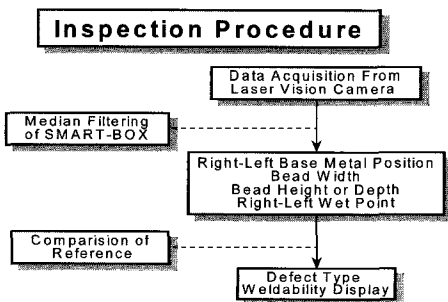


Fig. 5 Inspection Procedure configuration

아래 Photo 1은 용접성 평가 시스템으로 사용된 실험 장치를 나타낸 것이다.

3.2 실험 방법

실험에 사용된 시편은 자동차용 강판으로 많이 사용되고 있는 0.8t의 아연 도금강을 맞대기 용접한 것으로 출력 4kW의 CO₂레이저 용접기를 용접 속도 4m/min, Gap 0~0.075 mm, 헬륨 보호 가스, 초점 위치는 표면에서 0.6mm인 용접 선 길이 1000mm가량의 시편 가운데서 용접성이 양호하거나, 용접성의 양부가 섞인 시편 5개를 임의의 크기로 채취하여 실험하였다(Photo 2).

XY테이블의 합체 박판 계측 속도는 1mm/sec로 실험하였다. 그 이유는 비전시스템에서는 초당 30개의 프로파일링을 하여 SMART-BOX에서는 이미지 처리하고 있으나, 소프트웨어적으로 화상 처리 및 판단을 수행하는 PC와 시리얼하게 연결되어 있으므로 데이터의 처리 속도에는 한계가 있다. 실제로 실시간에 보다 가깝게 접근하기 위해서는 두 시스템이 ISA bus방식으로 연결되어야 한다고 생각된다. 본 연구에 사용된 시편들에는 underfill(용입부족), hole(블로홀, 핀홀), mismatch(두께 불일치)와 같이 레이저 고속 용접에서 전형적으로 나타나는 결함을 가지고 있으며 특히, 레이저 용접에서는 융합 용접의 대표적인 hole과 underfill 결함을 많이 관측할 수 있었다.

시편의 이동 속도(x axis)는 XY 테이블과 같은 속도인 1mm/sec로 하였고 초당 1개씩의 프로파일링을 읽어서 판단하였다. 또한, 카메라의 depth of view(투영 깊이)는 3.5mm이고, average depth resolution(평균 깊이 정밀도)은 0.002mm이다.

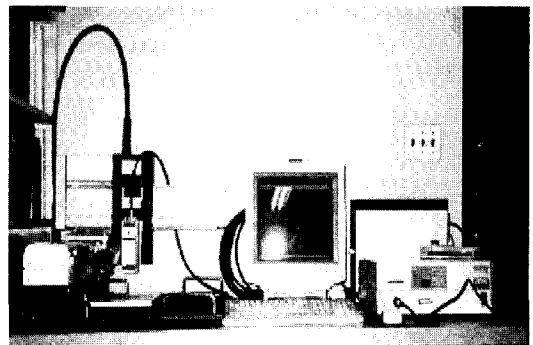


Photo 1 System configuration for weldability inspection system

3.3 실험 결과

용접성 판단을 GUI(Graphic User Interface) 환경에서 수행한 결과를 아래 그림 Fig. 6에 나타내었다. 아연 도금 강 2개를 맞대기하고, 두께는 0.8mm의 동종 두께로 선택 후 프로파일 당 결함의 종류와 용접성이 패널에 표시되면서 front view(정면도), side view(측면도)를 3차원적 모습으로 보여주고 있다. Fig. 6은 Photo 2의 5번 시편(85mm계측)의 용접성 평가 결과를 실험 결과의 한 예로 보여주고 있다.

3.4 용접성 판단을 위한 두 가지 지수(index)의 개념 도입

3.4.1 결함 절대 위치

GUI환경에 의한 용접성 시스템을 수행 시 DOS상태에서는 용접성의 양부와 프로파일 당 결함의 절대 위치가 데이터 파일에 저장된다. 본 연구는 용접성의 효율적 파악을 위해서 데이터를 5개 프로파일씩 묶어 결함을 발견하도록 구성하였는데 즉, 1mm가 1개의 프로파일의 용접성을 나타내므로,

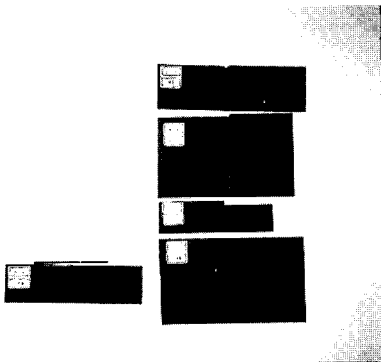


Photo 2 Laser welded specimens

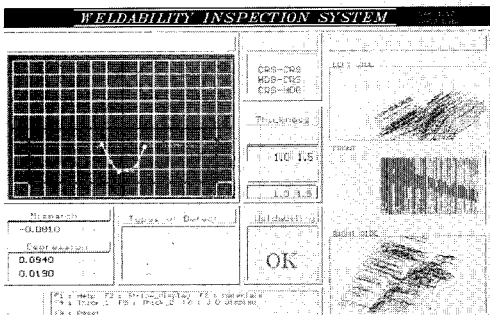


Fig. 6 An example of weldability inspection result

용접성 판단 시 1mm씩 증대시켜 중첩시키면서 5개의 프로파일의 용접성을 평가하였다. 용접성이 양호한 곳은 프로파일 당 1, 불량한 곳은 0으로 평가 결과가 저장된다.

즉, 결함의 연속(flaws' continuity)이 발견된 부분 5개 프로파일의 시작과 끝 부분의 지수를 각각 T_n, T_{n+4} 라 하면, 결함 절대 위치(flaws' absolute position)는 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$A_p = \frac{|T_n + T_{n+4}|}{2} \quad (2)$$

이 지수는 프로파일의 절대 위치 숫자만으로 결함이 존재하는 중간 위치를 파악 할 수 있다.

3.4.2 결함 집중 지수

GUI환경에서 용접성 시스템을 수행 시 결함이 부분 또는 집중적으로 몰려 있는 부분에 앞서 언급한 결함 절대 위치와 함께 결함의 집중 정도를 나타내는 인자의 개념을 도입할 필요성이 있다. 즉, 결함의 산포(散布: flaws' distribution)가 정말 결함이 있는지 혹은 계산상의 오차로 인하여 결함이라고 판단하여 발생한 것인지를 구분할 필요성이 있다는 것이다. 여기에서 결함 집중 지수(flaws' intensity index)라는 개념을 도입하여 결함이 집중적으로 발생한 곳을 수치적으로 표현하고, 검출해 보고자 하였다. 이를 식으로 나타내면 다음 식 (3)으로 정의 할 수 있다.

$$F_i = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (D_{i+1} - D_i)}{n-1} \quad (3)$$

여기에서 D_i 는 결함의 연속에서 i 번째 결함을 나타내고,

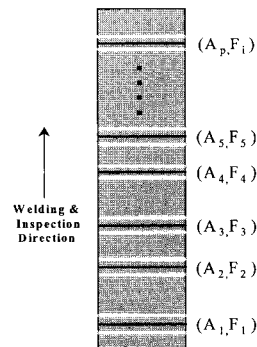


Fig. 7 An example of defects absolute position and defects intensity index

$D_{i+1} - D_i$ 는 두 결함이 발생한 사이의 거리를 나타낸다. 이 결함 집중 지수의 값이 일정한 경계값 이상이면 결함이 아니고, 그 이하면 결함으로 간주하게 된다. 본 연구에서는 결함의 집중도를 고려하기 위한 결함 집중 지수의 경계 값을 2로 두었다. 아래 Fig. 7은 결함 집중 지수의 예를 들어 나타낸 것이며, 그림의 우측 편의 (A_p, F)는 결함의 절대 위치와 결함의 집중 지수를 표시한 것이다.

3.5 실험의 고찰

본 연구는 GUI 용접성 시스템에서 레이저 용접에서 시편의 종류와 두께를 선택하여 측정시키면 매 프로 파일 당의 결함 및 용접성 평가와 용접의 형상이 3차원적 입체를 이루면서 계속되어 감을 한 눈에 확인할 수 있으며, 이와 동시에 DOS상태의 데이터 파일에는 매 프로파일당의 용접성이 2진수 형태로 표시되며, 거기에 결함이 발생 시 결함의 절대 위치와 결함의 집중 지수가 기록됨으로서 시각적으로는 용접 시편의 용접성을 실시간으로 관측하면서 최종적으로 용접성에 대한 구체적인 데이터 파일을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 결함이 부분 또는 집중적으로 분포된 부분의 절대적 위치를 나타내었고, 집중 정도의 신빙성을 증대시키기 위해 5개(본 연구에서는 1개가 1mm)의 프로 파일을 묶고, 1씩 증분 시켜 평가함으로써 경계치에 걸쳐 분포되어 있는 결함도 정확하게 검출해낼 수 있다.

본 시스템의 효과적인 용접성 평가의 시간 확보를 위해서는 현재 1씩 증분 시키면서 측정시켜 구한 결함의 절대 위치 및 집중 지수를 구하는 평가 방법은 향후 고려되어야 할 과제로 생각된다. 평가 시편의 크기 및 전체 측정 길이는 Table 2에 나타내었으며, 각 시편에 대한 용접성 여부 및 결함 집중 지수의 결과는 Fig. 8~Fig. 12에 나타나 있다.

결함의 절대 위치는 결함이 연속되지 않는 경우에 특히, 효율적으로 사용될 수 있으며, 레이저 용접시 빔의 과열 또는 초점위치 잘못으로 모재가 연속적인 hole(블로홀, 핀홀)

Table 2 Thickness, size, inspection

No.	Thickness (mm)	Size (mm)	Inspection (mm)
1.	0.8t	40 X 70 X 2(EA)	40
2.	0.8t	50 X 75 X 2(EA)	32
3.	0.8t	90 X 75 X 2(EA)	75
4.	0.8t	30 X 62 X 2(EA)	27
5.	0.8t	90 X 78 X 2(EA)	85

(blowhole(구멍))등의 결함을 발생시킬 경우는 연속적으로 기록됨으로 결함의 절대위치의 의미는 두드러지지 않는다. 결함의 절대 위치는 결함의 집중 지수가 관측된 5개 프로

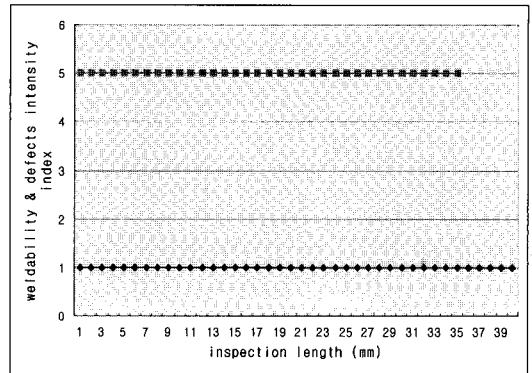


Fig. 8 Weldability & defects intensity index(specimen 1)

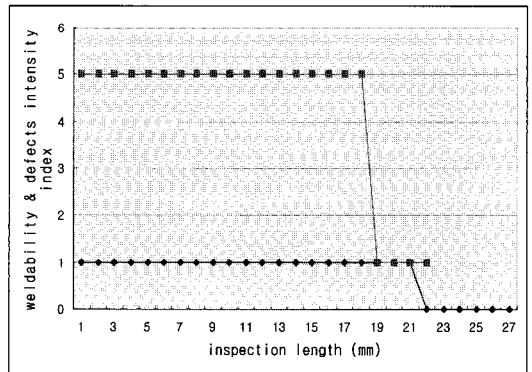


Fig. 9 Weldability & defects intensity index(specimen 2)

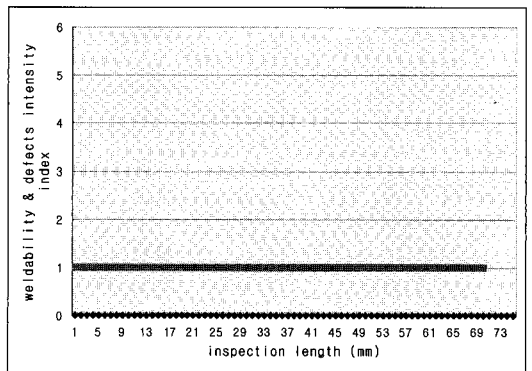


Fig. 10 Weldability & defects intensity index(specimen 3)

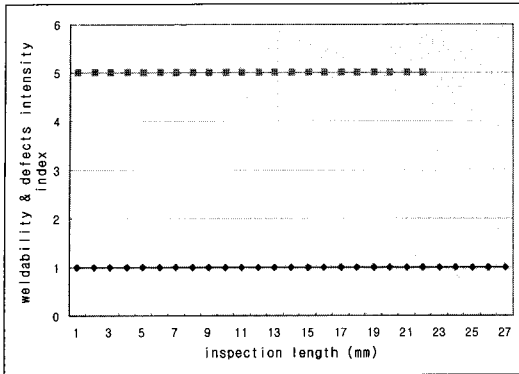


Fig. 11 Weldability & defects intensity index(specimen 4)

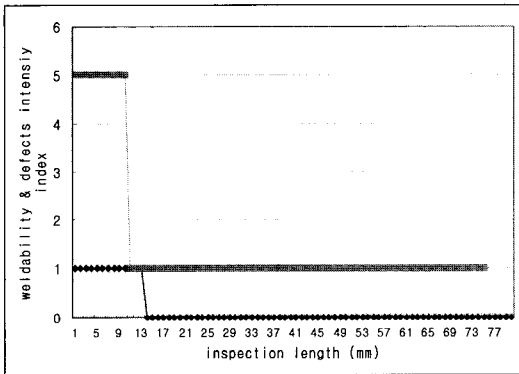


Fig. 12 Weldability & defects intensity index(specimen 5)

파일에서 중간 프로 파일의 절대 위치를 표시하는 것이며, 결함의 집중 지수는 2이하를 결함이 집중되어 있는 곳으로 간주하였다.

실험 결과 시편 1과 시편 4는 결함이 없고 용접성도 양호 하였으나, 시편 2에서는 후반부에 mismatch(깊이 불일치)가 시편 3과 시편 5에서는 hole(blowhole 포함)과 underfill(용입부족)이 부분 또는 집중적으로 관측되었다. Fig. 8 ~ Fig. 12에서 용접성이 좋은 경우는 1 불량일 경우는 0을 나타내었으며, 이에 따른 결함 집중지수의 값도 5일 경우는 결함이 없는 경우를 보여주고, 그 이하일 경우는 결함이 일부 발생 또는 연속일 경우를 보여주고 있음을 고찰을 통해 알 수 있었다. Table 2의 각 시편의 측정 길이가 다른 이유는 앞서 언급한 바와 같이 전체 용접 길이 약 1000mm 가운데서 용접성을 판별하고자 관심이 있는 일부분을 채취하여 평가하였기 때문이다.

4. 결론

- (1) 레이저 용접한 자동차 강판용 합체박판의 용접성 품질을 레이저 시각 센서 데이터의 화상처리를 이용하여 실시간으로 평가하였다.
- (2) 본 연구결과로 경험자에 의한 결함관측 및 성형성에 의한 용접성 판단에 의존하지 않고 시각 센서의 계측 데이터에 의한 판단으로 자동화가 가능하게 되었다.
- (3) 본 연구결과 레이저 용접 시에 박판에서 자주 발생하는 언더필, 홀, 미스매치 등의 결함을 레이저 시각센서를 이용하여 쉽게 계측할 수 있었다.
- (4) 본 연구는 전체 시편 계측 길이에 대한 결함을 나타낸 것으로 이들 결함이 전체 시편의 용접성에 미치는 영향 등은 추후 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) Um, K. W., 1995, *New Version of Welding Engineering*, Press Dong Myung Sa, pp. 205~248.
- (2) Kiyokazu, M., 1992, "Laser Process Automation," *Transactions of Japanese Welding Society*, Vol. 10, No. 1, pp. 76~181.
- (3) Jang, Y. G., Ryu, B. G. and Lee, K. D., 1996, "The Development of Monitoring and Control for Tailored Blank Welding," *Transactions of Precision Mechanical Engineering*, pp. 323~327.
- (4) Lee, B. Y., 1997, "Defects, examples and prevention of welded structures," *Welding Summer School Textbook*, pp. 249~295.
- (5) Korean Welding Society, 1992, *The Handbook of Welding Terminology*, Press Won-Chang, pp. 312~350.
- (6) Vanderwert, 1986, *Industrial Laser Annual Handbook*.
- (7) Yoo, Y. T., Kim, J. Y., Ro, K. B., Yang, D. J., Oh, Y. S., Im, K. G. and Kim, J. H., 2003, "Estimation of Laser Welding Behavior of SM 45C Steels by Plume Monitoring," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 14~21.
- (8) Yoon, S. U., Kim, J. Y., Song, K. S. and Cha, Y. H., 2006, "The Development of Automatic Inspection System for Flaw Detection in Welding Pipe," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 87~92.