

전자빔 용접 측정 시스템에 관한 연구

홍민성*, 김종민+

A Study of the Measurements System in Electron Beam Welding

Hong MinSung*, Kim JongMin+

Abstract

Because of its high performance and accuracy, electron beam welding has an important role in industrial applications such as semi-conductor and LCD manufactures. Since its operation has been done in a vacuum room, it is very difficult to check out their weldability as well as the correct welding area of the specimen.

In this study, a measurement system of the electron beam welding has been developed based on the 3-axis LVDT controlled table. In addition, the algorithm to tracking the welding line has been developed. Welded regions were measured by using an A-scan ultrasonic sensor only.

Weldability of the aluminum specimen has been tested by newly developed measuring system. The results are compared with those by using an C-scan ultrasonic sensor, which show good agreements with each other.

Keyword : Electron beam welding (전자빔 용접), Measurement system (측정시스템), Ultrasonic sensor (초음파 센서), Weldability (용접성)

1. 서론

전자빔 용접은 우수한 용접 특성을 가지고 있지만 장비 제작에 관한 기술의 미비, 장비 제작비용의 과다 그리고 제한적인 작업 환경으로 인하여 현재 우주 항공 산업, 군수 산업과 같은 분야에서 선호되고 있다. 그러나 산업이 다양해지고 고도화 되어감에 따라서 이러한 특수 용접에 대한 중요성이 높아지고, 응용범위가 확대되고 있다. 특히 반도체 산업과 같은 고부가가치 산업의 도약으로 전자 빔 용접과 같은 특수 용접에 대한 기능적인 요구가 증대되고 있고, 그 적용범위가 확대 되고 있다. 본 연구를 통해서 얻고자 하는 목표는 단순히장비 개발이 아닌 TFT LCD 장비에 제작되는 알루미늄 챔버의 가공을 위한 선행 연구로써 수행하는 것이다. 현재 6세대 TFT

LCD를 제작하기 위해서 사용되는 알루미늄 챔버의 크기는 3m 이상의 크기를 가지는데, 이러한 크기의 알루미늄 챔버를 가공하기 위해서는 기존의 재료 제거 가공법으로는 많은 손실을 가져온다. 또한, 베드가 3m 이상 이동 가능한 CNC가 많지 않을 뿐만 아니라 CNC로 가공할 경우 고가의 알루미늄의 많은 양이 가공으로 소멸된다. 게다가 기존의 용접법으로는 용접이 불가능 할 뿐만 아니라 불순물 및 기포 발생에 대해서도 민감한 영향을 끼치기 때문에 전자빔 용접이 좋은 대안이라고 할 수 있다. 그러나 용접 후에 용접이 완벽하게 이루어졌는지를 파악하기 위해서는 이를 검사하기 위한 장비가 필요한데, 전자빔 용접의 경우 용접 후 내부의 용접성을 평가하기가 매우 힘들다. 또한 용접부위의 판별이 힘들기 때문에 매우 정밀하게 이송이 가능한 계측장비를 개발해야 한다. 또한 정확한 이송 후에 이를 측정 할 수 있는 장비와 연계해야 할 필요가 있다.

* 홍민성 (mshong@ajou.ac.kr), 아주대학교 기계공학부
주소 : 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지
+ 아주대학교 기계공학과 대학원

본 논문에서는 전자빔 용접 후 용접 상태를 파악하고 관찰하기 위한 계측 센서와 측정 장비에 관한 기술을 개발하고자 한다.

전자빔 용접을 수행하는 경우 우선 높은 에너지로 인하여 용접 상태를 실시간으로 확인이 불가능 할 뿐만 아니라 용접이 진공 상태에서 이루어지므로 정확한 용접 부위의 위치 파악과 그 위치에서의 용접성 파악이 중요하다. 그러나 이러한 용접성 평가 작업을 제대로 수행하지 못한다면 좋은 품질의 제품을 얻을 수 없기 때문에 계측부는 전자빔 용접에서 큰 비중을 차지하게 된다. 본 논문에서는 알루미늄 두께 10~30mm 용접 깊이와 10mm 이하의 폭을 가지는 용접 시편의 용접을 시행하고, 매우 정밀한 이송 테이블을 이용하여 용접된 부위를 측정하여, 용접이 효과적으로 수행되었는가를 비접촉식 초음파 센서^[1]를 통하여 검사하고, 이러한 용접성을 평가 할 수 있는 측정 장비를 개발하고자 한다.

2. 전자빔 용접

전자빔 용접^{[2][3]}은 대량의 전자를 고전압으로 가속하고 이것을 피용접물의 매우 작은 면적으로 조사 및 용융하는 용접법이다. 고속(고에너지)의 전자빔을 얻기 위한 원리는 Fig. 1에 나타내었다.

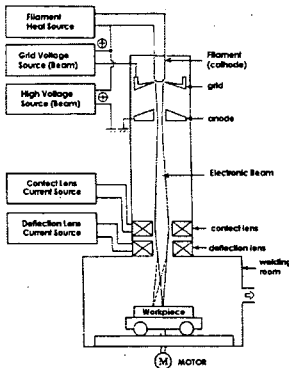


Fig. 1 Electron Beam Welding System

전자는 전기적으로 가열된 필라멘트에서 방출되는 열전자를 이용한다. 필라멘트와 양극사이에서 고전압을 인가해 전자를 가속하지만, 필라멘트 근방에서는 그리드 (Grid)전극으로 불리는 제3의 전극을 배치하고, 필라멘트와 양극간의 공간 전위 분포를 성형하면, 가속된 전자는 양극 중앙을 통해서 공간에 방출되어 전자빔이 된다. 이 제3극의 전위를 제어하면 필라멘트에서 양극으로 흐르는 전자의 양을 제어 할 수 있다. 이 시스템을 전자

총이라고도 부른다. 그러나 전자총에서 방출되는 전자빔은 확산하면서 진행되기 때문에 전자렌즈 (접속렌즈와 편향렌즈)를 통해서 조절한다. 이 빔은 용접실에 들어가서 피용접물을 용접한다. 전자빔의 밀도는 $10^8 \sim 10^9 \text{W/cm}^2$ 에 달하며, 아크용접에 비해서 높다. 또한 전력 밀도를 높이기위해서 진공상태에서 행하는 것이 바람직하다. 전자빔 용접에 관해서 관심을 가지는 이유는 다음과 같다. 두꺼운 판이라도 한 번에 용접이 가능하며, 용융 폭이 좁고 열영향부가 좁다. 용접 변형이 적으며, 정밀한 용접이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

2.1 전자빔 용접에서의 용접결함

Fig. 2는 전자빔 용접시 생기는 용접 결함의 종류를 그림으로 나타낸 것이다. 전자빔 용접시 발생하기 쉬운 결함^[4]은 기공이다.

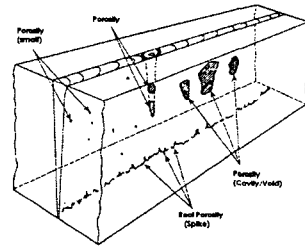


Fig. 2 Electron Beam Welding Porosity

기공 발생 위치에 따라 크기의 대소가 있다. 용해도 중앙부에 생기는 기공은 비교적 크고, 용접 경로에 생기는 것은 스파이크상의 결함과 겹치는 것이 많고, 비교적 사이즈가 적은 것이다. 용입 깊이가 큰 대출력 전자빔 용접은 특히 이 기공 발생에 주의하는 것이 중요하다. 발생 원인으로는 불순물 가스, 화학반응에 의해 생성된 CO가스 혹은 증기압이 높은 금속에 의한 것, 용융금속의 흐름에 의한 것 등이 있다.

3. 초음파 탐상 방법

금속 등의 재료 및 그 접합부의 비파괴 시험 방법의 하나로 초음파 탐상 시험이 있다. 이 방법은 방사선 투과 시험과 같이 주로 내부 결함을 검출하여 평가하는 것을 목적으로 하여 사용된다. 예를 들면 철강 재료나 그 용접부의 비파괴 시험방법으로써 압력 용기나 건축철골 등의 구조물에 잘 적용되고 있다.

초음파 탐상 시험의 목적은 주로 결함의 검출,

두께 등의 치수의 측정 및 재료열화 등의 검사로 분류된다. 이 중에서 특히 금속재료 등의 접합부 검사의 경우는 결함의 검출이 주목적이 된다. 금속재료 등의 접합부의 결함을 검출하는 것을 목적으로한 초음파 탐상 시험은 그 원리와 특징, 접합부의 결함의 검출 상황에 미치는 시험조건에 영향을, 검출한 결함의 평가 방법이 중요한 영향을 미친다.

일반적으로 PC 기반에서의 초음파 검사 시스템 구성 및 너겟의 크기 측정에 가장 신뢰성 있는 초음파 측정 기법으로 A-Scan 방식과 C-Scan 방식이 있다.

3.1 A-Scan Type

Fig. 3에 보여진 것과 같이 초음파 탐상 시험 방법은 그 기본 원리에서 통상의 초음파 탐상시험에 사용되는 펄스 반사법이다.

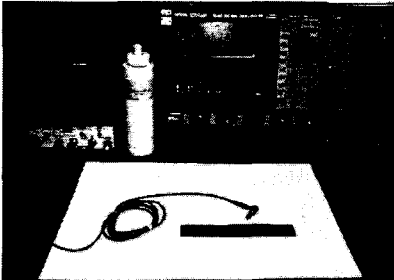


Fig. 3 Ultrasonic Test : A-Scan

이 방법은 시험체가 있는 면(탐상면)에서 초음파 펄스를 입사시키고, 반사된 초음파 펄스를 수신한다. 이 때 초음파의 전파시간에서 반사원의 위치를 수신한 초음파 펄스의 크기에서 반사원의 상황을 추정한다. 실험 방법이 간단하고 실험하기가 용이하나, 정확한 치수 등의 측정이 어렵고, 단지 용접의 유무만이 판단 가능하다.

3.2 C-Scan Type

초음파 C-scan 검사법은 검사체의 일정 면적에 대해 초음파 탐상을 하여 특정깊이에서의 초음파 신호 정보를 수집하여 용접부의 결함상태를 측정하는 기술이다. Fig. 4는 C-scan 검사법의 원리와 장치에 대한 개략도이다.

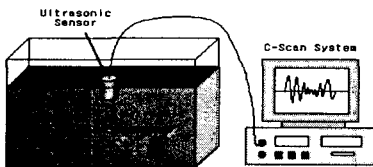


Fig. 4 Ultrasonic Test : C-Scan

수조 속에 검사시편을 침적한 후 수면으로부터 초음파 센서(transducer)가 외부 탐상 장비와 연결되어 수조 상부에 설치된 궤도를 따라 움직인다. 탐상 원리는 센서에서 발생된 초음파가 물을 매질로 이동하며 검사 대상의 표면이나 내부로 전달된 후 반사되어 돌아온 신호를 다시 초음파 센서에서 수신하여 기록장비로 기록한다. 각 지점에서 초음파 센서는 그 지점의 내부를 검사하되 센서가 한 라인씩 움직이면서 각 라인의 한 점에서 측정된 초음파 신호를 기록장비에서 종합하여 2차원 영상으로 단면에 대한 결과를 보여준다.

4. 용접 측정 장비와 알고리즘

4.1 용접 측정 장비

일반적으로 C-Scan 방식의 초음파 검사는 그 검사 결과 매우 좋고 판별하기가 쉽다. 그러나 C-Scan 방식의 특성상 수침식을 이용해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이는 우선 시편이 물에 잠겨야 하므로 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있고, 수조에 담가야 하므로 그 크기에 제약을 받는다. 일반적으로 전자빔 용접의 경우 내부 기공의 발생 여부가 매우 중요하므로 수침식 보다는 건식에서 측정하는 것을 선호한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 보다 신뢰성 있는 A-Scan 타입을 이용한 측정 장비를 개발하였다.

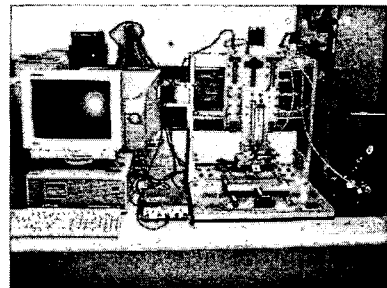


Fig. 5 Electron Beam Welding Measurement System

전자빔 용접 측정 시스템을 구축하기 위하여 3축으로 움직임이 가능한 X-Y-Z 테이블을 제작하였다. 전자빔 용접은 매우 정밀하게 용접이 되므로 이를 측정하는 테이블 또한 매우 정밀하게 움직여야 한다. 정밀하게 각축을 제어하거나 보정하는데 단순한 스위치를 이용하는 근접 방식의 저해상도용 센서가 아닌 1 μ m 까지 측정이 가능한 초정밀급의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 제어하였다. 이러한 정밀 제어를 위해 고속 데이

터 전송보드를 통하여 PC로 제어하였다. PC에서는 사용자가 사용하기 쉽게 Windows Base 프로그래밍을 채택하였다.

정확한 용접선의 위치를 파악하고 있는 이송 Table을 이용하여 A-Scan 형식의 초음파 측정기를 통하여 크랙 여부를 판단하였고, 실험결과를 C-Scan 방식의 초음파 측정기를 이용하여 데이터를 검증하였다.

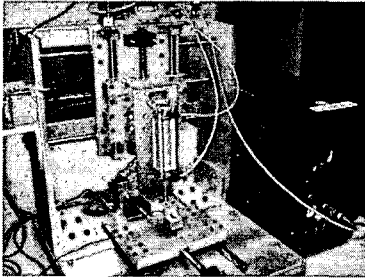


Fig. 6 Welding Measurement System (X-Y-Z Table)

위의 Fig 6은 3축 움직임이 가능한 X-Y-Z 테이블이다. 펄스로 이동하는 스테핑 모터를 이용하여 각 축을 이동시킨다. 스테핑 모터는 일반 DC 모터와 달리 펄스를 이용해서 움직인다. 이러한 특징 때문에 제어에 많이 쓰인다. 이러한 특징에 의해서 별다른 Feedback 없이도 원하는 만큼을 이동할 수 있다. 그러나 DC 모터에 비해서 빠른 가속이 어렵고, 쉽게 고속에서 탈조를 일으킨다. 또한 카운터 회로가 없다는 것이 제어에 큰 문제점이 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 각 축의 시작에 고정밀 LVDT센서를 달았다. LVDT는 기존의 접촉센서는 Photo 센서와는 정밀도에 있어서 많은 차이를 보인다. Photo 센서의 경우는 빛의 검출 여부에 따라서 On/Off 신호를 내보내기 때문에 정확한 위치제어가 힘들지만, LVDT 경우 1 μ m의 움직임도 잡아 낼 수 있기 때문에 모터가 중간에 탈조를 하지 않는다면 정확한 위치 이동이 가능하다.

또한 스테핑 모터와 LVDT를 제어하는 전용 컨트롤러를 사용하였기 때문에 가속에 탁월한 성능을 보이며 탈조할 가능성이 적다. 컨트롤러의 경우 전용 스테핑 모터 컨트롤러를 이용하여 빠른 제어능력을 보여준다.

제작된 측정 장비는 측정기로도 사용이 가능하지만 마운트 부분만을 바꾼다면 여러 가공이나 이송 시스템의 확장이 가능하다.

추가적으로 PLC 제어도 가능하도록 설계되어 있어서, 초음파 센서를 시편위로 이동시킬 경우 PC I/O 제어를 통해서 공압이 제어되도록 할 수 있다.

4.2 측정 제어 프로그램

Fig. 7은 3축 움직임이 가능한 X-Y-Z 테이블의 제어프로그램이다. 기본적으로 PC에는 I/O제어를 위하여 PLX9050 I/O카드를 이용하였다. 기존의 ISA버스를 이용해서 하는 것은 버스 속도의 한계가 나타난다.(ISA 방식은 8Mz, PCI 방식은 33Mhz) PLX9050의 제어를 위해서 기본적으로 Microsoft Visual C++에서 제어를 하고, 프로그램은 이 파일들을 이용하여 Microsoft Visual Basic으로 제어 프로그램을 작성하였다. 제어를 용이하게 하기위해 일반적으로 CNC 사용되는 G-code를 이용하여 제어가 가능하다.

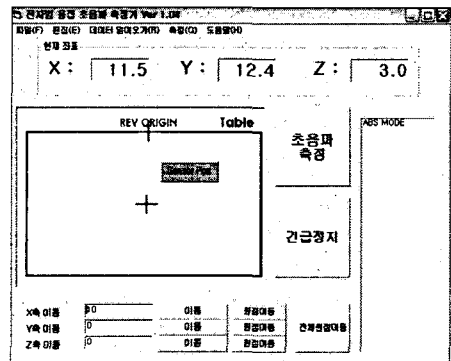
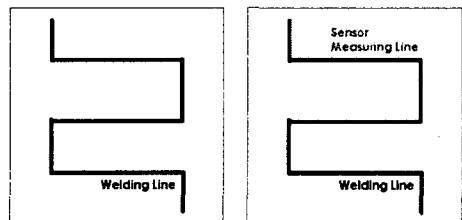


Fig. 7 Control Program

제어 프로그램은 기본적으로 모터/LVDT 제어기로 신호가 나가서 각각의 값을 읽어온다. 모터 쪽은 PPMC 펄스를 발생하여 스테핑 모터를 제어하며, 센서쪽은 A/D 신호를 읽어 들어서 LVDT의 값을 읽어서 이 데이터를 변위 데이터로 전환한다.

4.3 용접 분석 알고리즘



(a) (b)

Fig. 8 Path-tracing algorithm (1)

Fig. 8 (a)는 전자빔 용접을 한 시편의 한 부분을 나타낸 것이다. 보편적으로 전자빔 용접의 경우 일반 용접보다 용접선이 복잡하고, 용접 후 동일 모재를 사용했을 경우는 구별하기가 힘들다.(용접 후 밀링 등으로 후가공을 했을 경우는 구분이 불가능하다) 이러한 용접의 경우 정확한 용접 경로를 찾아서 검사를 해야 한다.

4.3.1. Path 분석 알고리즘 (직진 추적)

Fig. 8 (b)는 일반적으로 용접선을 따라서 측정하는 방식이다. 가장 간단하고 시간이 적게 걸리는 측정 방식이다. 그러나 측정시 많은 문제점이 발생한다. 우선 꺾이는 부분을 잘못 맞추면 그 이후 모든 데이터들이 쓸모가 없어진다.

4.3.2 Path 분석 알고리즘 (지그재그 추적)

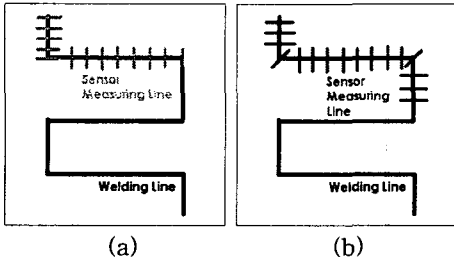


Fig. 9 Path Trace Algorithm (2)

Fig. 9 (a)는 직진 추적을 보완하기 위해서 만들어진 방법이다. 직진추적에 비해서 시간이 많이 걸리고 데이터가 많아지는 단점이 있으나 이 방식을 사용했을 경우 용접선을 놓치는 일이 없다. 그러나 역시 꺾이는 부분에서 데이터가 나빠지는 경향이 발생 하는 수가 있다.

4.3.3. Path 분석 알고리즘 (변형된 지그재그 추적)

Fig. 9 (b)는 지그재그 추적을 보완하기 위해서 만들어진 변형된 방법이다. 이러한 방법을 사용했을 시 꺾여지는 부분에서도 안정된 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있다. 그 반면 더 많은 시간과 데이터를 요구한다.

5. 실험 결과 및 분석

Fig. 10, 11 그리고 12는 전자빔 용접을 한 시편의 사진이다. 상판과 하판으로 나누어진 알루미늄 시편(두께 20mm)을 전자빔으로 용접하였다. 그림 11의 모아래 현상(Moir Effect)은 용접 후 밀링으로 후가공으로 나타난 현상이다. 눈으로는 용접이 되었다는 것을 확인 할 수 없다. 또한 용접이 되

었다 할지라도 내부에 어떤 문제점이 발생했는지를 확인 할 수가 없다. 내부가 완벽하게 용접 되었는지를 초음파 검사를 통해서 확인해야 한다.

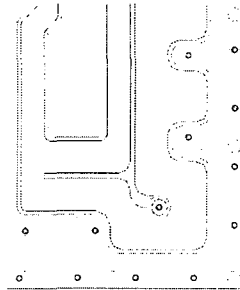


Fig. 10 Eletron Beam Welding Path

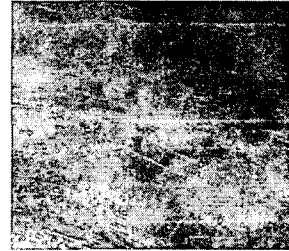


Fig. 11 Eletron Beam Welded Workpiece

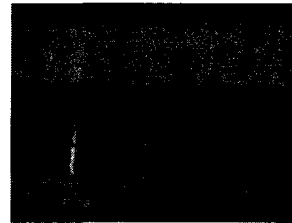


Fig. 12 EBW Workpiece (Internal)

우선 본 연구에서 제작한 측정 시스템으로 변형된 지그재그 알고리즘을 이용하여 측정을 하였다. 용접된 부위는 반사파가 20mm 내외에서 발생하고, 용접이 되지 않거나 비어 있는 부위는 그 이하에서 반사파가 발생하는데, 실험을 통해서 확인한 결과 용접부 위에서는 동일한 반사파가 발생했고, 비어 있는 부위에서는 그보다 짧은 반사파가 발생하였다. 또한 용접 부에서 짧은 반사파는 나오지 않음을 알 수 있었다.

그러나 원형의 꺾이는 부위의 용접에서는 직선의 용접과는 약간 다른 크기의 반사파가 나왔다. 이는 용접 부위가 완벽하게 용접이 되지 않았거나 내부에 크랙이 발생 할 수 있다는 결론이 나온다. 좀 더 정확한 측정을 위해서 gain 값을 조정하여 반사파를 얻은 그림을 Fig. 13 ~ 15에 나타내었다.

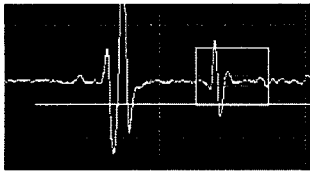


Fig. 13 A-Scan Result (1)

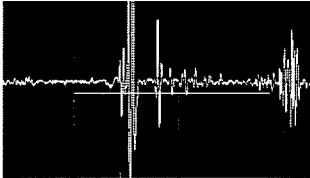


Fig. 14 A-Scan Result (2)

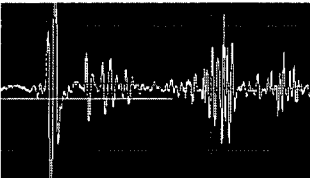


Fig. 15 A-Scan Result (3)

Fig. 13의 경우 아주 용접이 잘된 상태이다. 초기 펄스와 그 펄스가 다시 Echo 되어 되돌아온 파를 깨끗하게 읽어 들였다. 이 경우는 용접 상태도 좋고 측정도 잘된 경우이다. Fig. 14의 경우는 반사파가 Fig. 13와 같이 선명하지는 않지만 그 경향이 비슷하며 잔파는 외부 노이즈로 볼 수 있다. 크랙이라 보기에는 힘들다. 그러나 Fig. 15의 경우는 초기 펄스와 반사파 이외에도 2번의 다른 펄스가 있는데 이것은 내부 크랙이나 기공의 현상으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 꺾이는 부분에서 볼 수 있는데 내부에 크랙이 있음을 예측 할 수 있다.

Fig. 16과 17은 실험을 검증하기 위한 C-Scan 검사이다. C-Scan 초음파 검사 결과 전체적으로 직선 부위의 용접이 매우 훌륭하게 되었으나 꺾이는 부분(붉은 색 원 부분)에서 용접이 문제가 있음을 발견 할 수 있다. C-scan 장비를 통해 검사한 결과 본 논문에서 제작한 측정 시스템과 동일한 결과를 얻음을 실험을 통해서 알 수 있었다.



Fig. 16 C-Scan Result (1)

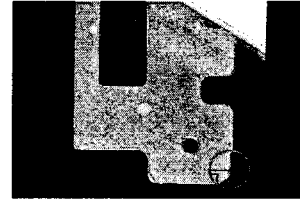


Fig. 17 C-Scan Result (2) - Gain Adjust

6. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 알루미늄 두께 10~30mm 용접 깊이와 20mm 이하의 폭을 가지는 용접 시편의 용접을 시행하고, 용접된 부위를 측정하여, 평가 할 수 있는 장비를 개발하였다.
2. 제작한 측정 시스템을 이용하여 정확한 전자빔 용접 결과를 측정을 할 수 있었다.
3. 일반적인 C-Scan의 경우 시편을 측정하기 쉬운 크기로 절단하여 측정해야 하며, 대부분이 수침식이기에 측정 후 시편에 물이 들어가는 문제점이 발생하였지만 본 장비는 크기만 확대한다면 그런 문제점을 해결 할 수 있다.

참고문헌

- [1] T. Arakawa, S. Hirose, and T. Senda, 1985, "The detection of weld cracks using ultrasonic testing", NDT International, Vol. 18, No. 1, pp. 9-16.
- [2] Y. K. Lee, 1996, "Welding Coalescence engineering of Dictionary", Science Technology Press
- [3] S. Wójcicki and G. Mladenov, 2000, "A new method of experimental investigation of high-power electron beam", Vacuum, Vol. 58, Issues 2-3, pp. 523-530.
- [4] H. Zhang, Y. Zhang, L. Li and X. Ma., 2002, "Influence of weld mis-matching on fatigue crack growth behaviors of electron beam welded joints", Materials Science and Engineering, Vol. 334, Issues 1-2, pp. 141-146