

초음파 감쇠를 이용한 순 티타늄 판재의 용접부 특성

Characteristics of Welds of Pure Titanium Plate Using Ultrasonic Attenuation

선상원*, 이원*†, 박희동**, 황영탁***

Sang-Won Seon*, Won Yi*†, Hee-Dong Park** and Yeong-Tak Hwang***

초 록 초음파 감쇠를 이용하여 티타늄 용접부에 대해 기계적 특성, 파단면 및 초음파특성을 연구하였다. 준비된 티타늄 시험편은 아르곤 가스를 이용하여 제작하였다. 티타늄 용접 시험편이 파단 되었을 때 변화하는 초음파 신호변화를 확인하기 위해서 인장시험을 실시하였다. 주사전자현미경을 이용하여 파단면을 관찰하고, 4 MHz 수직 탐촉자를 이용하여 초음파 시계열 신호를 획득하였다. 티타늄 판재에서 용접부는 모재부와 열영향부에 비하여 기계적 특성이 떨어지며 파단면분석을 통해 용접부의 입자크기가 모재부보다 큼을 확인할 수 있었다. RMS 신호 처리한 초음파 포락선의 면적과 인장강도의 상관관계를 나타내었다. 따라서 초음파를 이용하여 티타늄 용접부의 건전성 평가 방법이 유용함을 알 수 있었다.

주요용어: 초음파, 티타늄, 감쇠, 열영향부, 용접부, 파단면

Abstract This paper studies on mechanical properties, fractures, and ultrasonic characteristics of Pure Titanium welds using ultrasonic attenuation. Ti specimen was made by using AR purge gas. When the titanium weld specimen is fractured, Tensile tests were conducted in order to observe the ultrasonic signal changes. A scanning electron microscope(SEM) was used to observe changes in failure surface and an ultrasonic normal probe with the central frequency of 4 MHz was used to obtain ultrasonic signals. As a result, the value of the mechanical properties in the weld zone was lower than that in the base zone and heat affected zone(HAZ) from Ti. Also the grain size in the weld zone was bigger than that in the weld zone and HAZ from Ti. Ultrasonic signals using a RMS method presents correlation between envelope area and the tensile strength. Consequently, the ultrasonic method could be potential tool for integrity evaluation of the Ti weld zone.

Keywords: Ultrasonic, Titanium, Attenuation, Heat Affected Zone, Weld Zone, Failure Surface

1. 서 론

최근 공업기술의 발전과 함께 기계구조물의 사용 환경이 가혹해지고 또한 대형화, 고속화, 경량화 되어 가고 있다. 이에 따라 기계부품 및 구조물의 안정성과 신뢰성의 확보가 대단히 중요하며 티타늄소재는 이를 만족할 수 있는 소재 중 하나이다.

티타늄은 비중이 탄소강에 비해 30~40% 가볍고 고온(400~480°C)에서도 유효한 강도를 유지할

수 있다. 또한 피로수명이 길며, 화학 약품과 매질에 대하여 우수한 내식성이 있으므로, 현재는 항공 기체, 제트 엔진, 가스 터빈, 병기 및 화학 공업 장치에 실제로 이용되고, 또 미사일, 선박, 자동차 철도, 석유공업 및 그 외의 내식재료로서도 매우 유망한 소재이다.

티타늄은 공기 중에서 600°C 이상 가열되면 산화 및 질화되며 용접부의 특성상 열영향부가 용착금속부와 모재부에 비하여 경도와 충격치가 높다는 점[1]과 용접 시, 산소, 질소, 수소와의 친화

[접수일: 2013. 2. 20, 수정일: 2013. 4. 12, 게재확정일: 2013. 4. 18] *숭실대학교 기계공학과, **한국건설생활환경시험연구원, ***강원대학교 메카트로닉스공학과, †Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Engineering Research Institute, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea (E-mail: yiwon@ssu.ac.kr)

력이 강하다는 점[2]을 고려할 경우 용접부에서 기포, 슬랙 혼입, 언더컷, 피트, 고온균열 등 여러 형태의 결함의 발생가능성이 크며, 이들 결함으로부터 균열이 진전되어 최종과단에 이르는 경우가 많으므로 용접부에 대한 건전성평가는 매우 중요하다고 할 수 있다[3].

용접부는 용착 금속이 응고할시 발생하는 불균일한 열적환경 때문에 일반적으로 용접구조물에서 과단은 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)에서 기계적 성질 감소 및 열간 균열현상이 나타난다.

현재 용접부 내부에 존재하는 결함을 확인하기 위해 초음파 검사(UT)와 방사선투과 검사(RT) 등을 이용하고 있다.

방사선투과에 의한 방법은 비파괴 검사 분야에서 폭 넓게 사용되고 있지만 방사선 피폭에 의한 검사자의 피폭 위험 및 실시간 결과해석의 불가능과 같은 문제점을 내포하고 있다. 반면 초음파는 검사자의 안전과, 실시간 결과해석이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 초음파를 이용하여 순 티타늄 판재의 용접부에 대한 기계적 특성을 분석하기 위하여 순 티타늄 판재를 대상으로 인장시험과 초음파시험을 병행하여 인장과 초음파 신호간의 상관관계를 확인하였고 또한 용접구조물에 널리 사용되는 용접구조용 압연강재(SM490A) 소재와 비교하여 티타늄 용접부에 대한 평가 기준을 제시하였다.

2. 이론

2.1. 초음파의 감쇠

재료에 입사하여 내부를 전파하여 나오는 초음파는 재료내의 여러 가지 정보를 가지고 있다. 파동으로서의 정보는 위상 정보와 진폭정보이지만 이것을 다각도로 해석하면 재료내부의 여러 가지 성질을 파악해 낼 수 있다. 초음파가 발생하여 재질을 통해 진행되면 반드시 에너지 손실이 발생하게 된다. 초음파 진행에 따라 감쇠는 산란(scattering), 흡수(absorption) 및 경계면에서의 서로 다른 두 재질의 음향 임피던스 차이에 의한 영향으로 발생하고, 간섭에 의한 영향은 회절(diffraction) 및 기타 요인 등으로 인해 파의 줄무

늑(wave fringe), 위상변이(phase shift), 주파수 변이(Frequency shift) 등이 나타난다.

산란과 흡수로 인한 감쇠로 인하여 음압이 감소되는 것은 식 (1)과 같이 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$P = P_0 e^{-\alpha d} \quad (1)$$

여기서 P_0 는 $d=0$ 에서의 초기음압, P 는 거리 d 에서의 음압, α 는 감쇠계수, d 는 재질 내에서 초음파의 진행거리이다.

이러한 감쇠 요인 중 산란(scattering)은 재질의 구성이 완전하게 균일하지 않기 때문에 생기는 현상으로, 개재물이나 기공과 같이 다른 음향 임피던스 값을 갖는 계면이 존재하거나 재질을 구성하고 있는 입계면(grain boundary)으로 인해 발생한다.

밀도와 탄성율이 아주 다른 철강입자와 탄소입자로 구성되어 있는 비균질 재질의 경우, 재질내 각 입자들의 음향 임피던스 차이로 인해 초음파가 재질을 통과할 때에는 산란이 일어난다. 단일 결정조직을 지닌 경우에도 재질 내의 결정배열이 이방성(Anisotropic)을 나타내는 경우에는 재질내 각각의 입자(Grain)가 갖는 임의의 방향성으로 인해 다른 결정으로 구성된 재질에서와 마찬가지로 산란을 일으키게 된다[4,5].

2.2. 티타늄

티타늄은 고순도일 때는 연성을 띄지만, 불순물이 들어갈 경우 취성이 생긴다. 탄소, 질소, 산소는 0.1~0.2%의 소량에서도 티타늄은 열화된다. 공업용 티타늄(99.2, Ti)의 강도는 연강 고장력강 및 스테인리스 급이다[6].

티타늄의 고온산화는 600°C 부근에서 매우 심하고, 900°C 이상에서는 더욱 심해진다. CO, CO₂, NH₃가스 중에서 가열하면 산화, 탄화 질화가 일어나서 취성화가 증가하게 되어 기계적 성질이 감소한다.

티타늄의 가장 큰 장점은 표면에 생기는 보호 피막 또는 산화 막에 의한 내식성이다. 이는 백금과 비교할만한 정도로 뛰어나다. 물은 염산, 연소가스, 염화물, 크롬산, 황산, 과산화수소, 각종의 유기산류에 대하여 강한 내식성이 있으며 해

수에서도 5년 이상 사용이 가능하며 응력부식, 부식피로, 틈새부식, 침식(erosion)도 일어나지 않으므로 선박용 부품의 용도 등에 적합하지만 고가인 점과 난삭성 재료이므로 가공하기가 어려운 점이 있다.

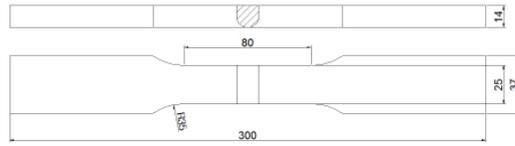


Fig. 1 A design of Ti tensile test specimen

2.3. RMS(Root Mean Square) 연산

일반적으로 RMS(root mean square) 방법은 AC 파형을 DC로 변환할 때 많이 사용한다. 이는 주파수와 관계없이 연속데이터(Data[n])를 통하여 AC파형의 크기를 식(2)와 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{Data}[n])^2} \quad (2)$$

위의 식을 초음파 시계열 신호에 적용하여 면적 및 다른 인자(Factor)를 구할 수 있다.

2.4. 열영향부

열영향부(HAZ)는 용접열 또는 절단열에 의하여 급열 및 급냉됨으로써 금속 조직이나 기계적 성질이 변화를 받는, 용융되지 않은 모재의 부분 즉, 용접열에 의하여 조직이 변한 용합부에 인접한 모재 부분을 말하며, 뚜렷한 경계는 없다.

일반적으로 열영향부(HAZ)는 용접 균열이 가장 빈번하게 발생하는 곳이고 이러한 균열은 미세조직과 직접적인 관계를 갖는다. 특히 조대한 결정립 구조로 인해 냉각시 인성에 좋지 않은 영향을 미치는 Widmanstatten ferrite, bainite 및 martensite 등이 형성될 가능성이 크기 때문에 신중하게 취급되어야 한다[8-9].

3. 실험방법

3.1. 시험편 및 용접조건

본 실험에 사용된 소재는 순 티타늄으로 일본의 GOBEY사에서 제공한 Grade 2로 두께 10 mm 판재를 맞대기하여 X면칭법으로 아르곤 용접법을 적용하여 KS B 0833 의 표준에 따라 시험편을 제작하였다. 구체적인 치수는 Fig. 1에 나타나

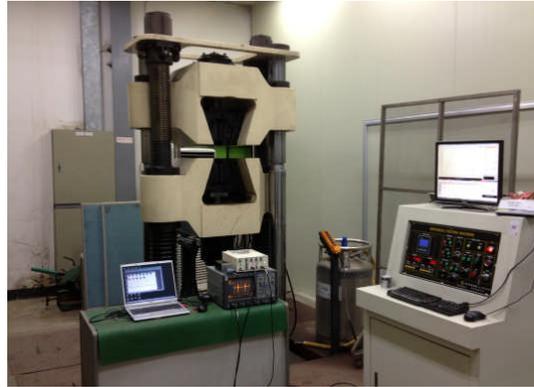


Fig. 2 A universal testing machine and ultrasonic test instruments

Table 1 Chemical composition of pure titanium (wt,%)

specimen	H	O	N	Fe	Ti
Ti	0.013	0.20	0.05	0.25	Re

Table 2 Welding condition of pure titanium

specimen	Pulse freq	Pulse Current	Base Current	Avg. Current	Avg. Voltage	Purge Gas purity	
						H ₂ O	O ₂
S-Ar	28Hz	59.1A	27.8A	36.2A	9.2V	10ppb	10ppb

었다. 초음파 특성과 결정구조의 상관관계를 확인하기 위하여 용접구조용 압연강재(SM490A) 소재를 사용하여 동일한 조건으로 시험편을 제작하였다.

Table 1은 순 티타늄의 화학조성을 나타내었으며 시험편에 대한 용접 조건들은 Table 2에 나타내었다.

3.2. 인장 실험

인장 실험에 사용된 주요 기기로는 만능재료시험기(1960 kN)를 사용하여 KS B 0802의 표준 시

험방법에 따라 순 티타늄 시험편, 순 티타늄 용접 시험편과 용접 구조용 압연 강재의 용접시험편을 Fig. 2의 기기를 이용하여 각각 인장시험을 실시하여 초음파 데이터를 획득하였다.

3.3. 초음파 탐상 및 파단면 관찰

초음파 탐상에 사용된 주요 기기는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이 하는 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 결합 신호를 수신하는 종파 수직탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 4 MHz, 진동자 크기: ϕ 10), 접촉매질(기계유)을 사용하였다. 실험에 있어서는 순 티타늄 판재 Grade 2와 용접구조용 압연강재(SM490A)를 KS B 0833 표준에 따라 시험편을 제작하여 Fig. 3과 같이 두께 방향으로 수직 탐촉자를 이용하여 용접부와 열영향부(HAZ)의 초음파 데이터를 획득 하였다. 또한 모재 시험편도 동일한 방법을 적용하여 평행부의 초음파 데이터를 획득 하였다. 이 후 KS B 0802 표준규격에 따라 용접 시험편과 모재 시험편을 인장시험 하였다.

이후 모재부와 용접부 파단면을 관찰하기 위해 모재 시험편과 용접 시험편의 파단면을 표면처리 후 전자주사현미경을 이용하여 파단면의 특성을 확인하였다.

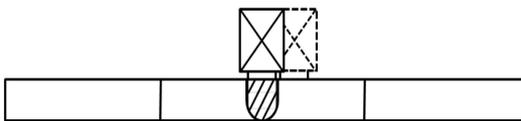


Fig. 3 A measurement of weld zone and heat affected zone

4. 실험결과

4.1. 인장 특성

인장시험 결과 순 티타늄 Grade 2의 기계적 성질과 용접 구조용 압연강재 (SM490A)의 기계적 성질은 Table. 3과 같다. Fig. 4는 순 티타늄 용접부의 파단부, Fig. 5는 용접 구조용압연강재의 파

단부이다. 인장파단은 순 티타늄 시험편인 경우 용접부에서 파단 되었으며 용접 구조용 압연강재인 경우 열영향부(HAZ)에서 파단 되었다. 순 티타늄 재는 모재 시험편 대비 용접 시험편의 경우 인장강도가 13.6% 감소하였고, 항복강도는 10.9% 감소하였다. 용접 구조용 압연강재의 경우 인장강도에서는 별다른 차이가 나타나지 않았고 항복강도에서는 7% 감소하였다. 대부분 알려진 소재는 열영향부에서 결정립이 조대해지거나, 결정립계에 응리 또는 불순물들이 석출되는 과정을 통해 기계적 성질이 저하되어 인장시험 결과 열영향부(HAZ)에서 파단이 일어난다. 반면 순 티타늄 용접부 시험편에서는 용착금속부의 위성화가 이루어져 용접부에서 파단이 일어난 것으로 확인되었다[10-11].

Table 3 Tensile test result

Test piece	Ti(MPa)		SM490A(MPa)	
	Base	Weld	Base	Weld
Tensile stress	550	475	559	548
Yield Stress	430	383	368	352



Fig. 4 Tensile test results of Ti



Fig. 5 Tensile test results of SM490A

4.2. 파단면 관찰

순 티타늄 용접 시험편의 파단면을 전자주사현미경을 이용하여 관찰한 파단면은 Fig. 6, Fig. 7과 같이 나타났다. 파단면 분석으로 볼 경우 Fig. 6에서 티타늄 모재부의 파단부는 덩플이 보이면서 전형적인 연성파괴 모습을 보인다.

반면 Fig. 7의 용접부 파단면은 입계파괴 모습을 보이며 취성 파단이 일어난 것으로 보인다. 파단면 관찰 방법으로 용접 과정 중 일어난 티타늄의 변형으로 인해 티타늄 용접부 취성화로 기계적 성질이 저하되었음을 재확인할 수 있었다.

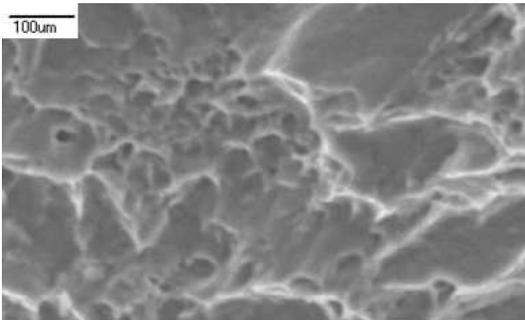


Fig. 6 SEM micrograph of the fracture zone in Ti base zone (X100)

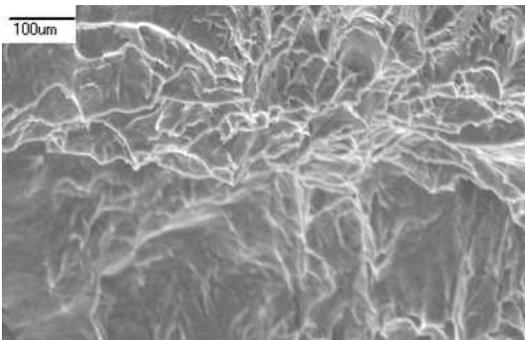


Fig. 7 SEM micrograph of the fracture zone in Ti weld metal (X100)

4.3. 초음파특성

순 티타늄 판재와 용접 구조용 압연강재의 시험편에서 모재부와 용접부의 초음파 신호를 Fig. 8과 Fig. 9과 같이 획득하였다. 획득한 신호는 여러 지점에서 측정된 값 중 대표 값을 사용하였다. 신호해석 방법은 시계열 초음파 신호의 수정된 실효값(RMS, root mean square) 방식을 사용하

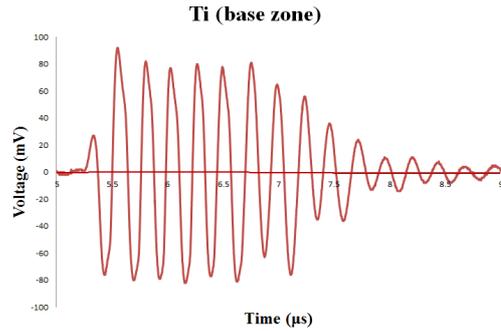


Fig. 8 Ultrasonic signal of titanium base zone

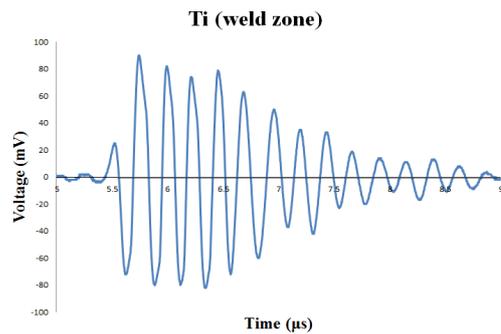


Fig. 9 Ultrasonic signal of titanium weld zone

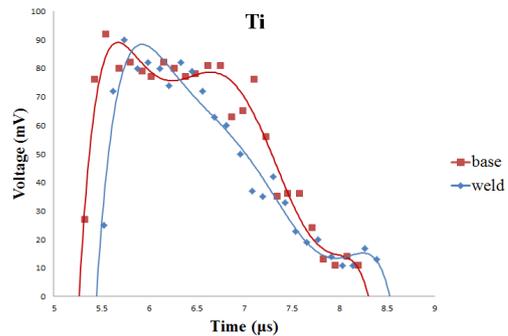


Fig. 10 RMS of the ultrasonic signals from Ti

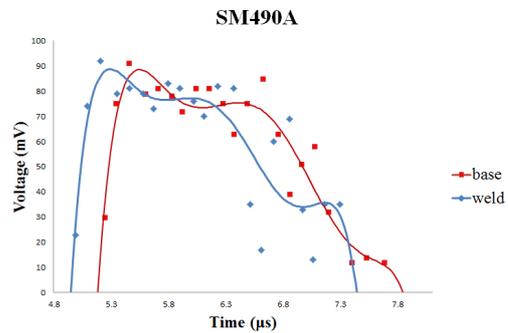


Fig. 11 RMS of the ultrasonic signals from SM490A

여 2차원적으로 분석하였다.

Fig. 10는 순 티타늄 판재의 모재부와 용접부의 시계열 신호 값을 제공 후 루트 하여 모든 신호 값을 양수로 만들었고 그 후 주기의 최대 진폭 값을 이용하여 최대 전압을 기준으로 포락선을 작도하여 모재부와 용접부의 면적을 비교하였다. Fig. 11은 위와 동일한 방법을 적용하여 용접 구조용 압연강재의 모재부와 용접부의 면적을 비교하였다.

결과적으로 티타늄 시험편에서 획득한 초음파 신호를 RMS처리하였을 때 모재부 포락선의 면적을 기준으로 용접부 포락선의 면적이 16.5% 감소된 것을 확인하였다.

대비용으로 준비한 시험편 구조용 용접압연강재에 동일한 방식으로 RMS처리하였을 때에는 Fig. 10에서 보는 것과 같이 모재부의 포락선의 넓이를 기준으로 용접부의 포락선의 넓이에서 1.9% 감소한 수준이었다.

순 티타늄 소재의 경우 초음파 면적이 재료강도의 에너지에 비례하여 가감되는 것으로 확인되었다. 선도 면적의 감소는 초음파의 관점에서 미소 슬립에 의한 감쇠로 인해 수직 탐촉자에 수신되는 초음파의 강도가 약해지는 것에 따라 면적이 감소하는 것으로 생각할 수 있다[12,13]. 결과적으로 신호처리한 선도의 면적이 클 경우 인장강도가 높음을 확인함으로써 동일 금속으로 구성된 구조물에서 여러 부분을 초음파 탐상하여 가장 선도면적이 적은 부분이 파단 될 우려가 높은 것으로 평가할 수 있고, 기계적 열화가 진행된 부분의 선도면적의 감소로 파단 부위를 예측할 수 있다.

이와 같은 초음파 선도 면적 감소는 초음파 탐촉자의 주파수 응답특성에 따라 차이가 있으나, 이에 대하여 보정한다면 초음파의 선도 면적 감소율을 이용하여 용접부의 건전성을 평가하는 기준을 마련하고 이를 용접부 평가에 적용함으로써 선도 면적 감소율이 일정수준 이하일 경우 용접이 건전하지 않다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 티타늄 용접부에 대한 인장특성을 용접구조용 압연강재와 비교하여 전자주사현미경을 이용한 파단면 관찰과 초음파특성을 이용

하여 모재부와 파단면에 따라 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 실험 결과를 통해 순 티타늄은 용접부에서 파단이 일어나며 용접 구조용 압연강재에서는 열영향부(HAZ)에서 파단이 일어나는 것을 확인하였다. 또한 연구에서 제시한 RMS신호처리를 이용한 포락선의 면적과 인장강도의 상관관계를 살펴보았다. 결과적으로 순 티타늄 용접 시험편은 모재 대비 인장강도가 13.6%, 항복강도는 10.9% 감소하였고 신호 처리된 초음파 선도의 면적 또한 16.5% 감소하였다. 그러나 비교 시험편으로 제작된 용접 구조용 압연강재 용접시험편은 모재 대비 인장강도가 3.7%, 항복강도는 4.3% 감소하였다. 결과적으로 재료의 기계적 특성과 초음파 포락선의 면적이 선형적인 비례관계가 있음을 확인하였다.

본 결과를 통하여 순 티타늄 판재와 용접 구조용 압연강재에서 획득한 초음파 선도의 면적감소율을 이용하여 용접부에 대한 건전성을 평가하는 방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2012-H0401-12-1004)

참고문헌

- [1] M. F. ARENAS and V. L. ACOFF, "Analysis of gamma titanium aluminide welds produced by gas tungsten arc welding," *J. of KOSOS*, Vol. 23, No. 4, pp. 7-8 (2008)
- [2] W. Yi, H. D. Park and I. S. Yun, "A study on the ultrasonic distance amplitude characteristics curve for weld defects evaluation of titanium weld Zone," *J. of KOSOS*, Vol. 23, No. 4, pp. 7-8 (2008)
- [3] B. S. Sung, I. S. Kim, I. J. KIM and Y. H. Cha, "The residual stresses evaluation of butt welded zone on the joint shape in the titanium plate," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 290-294 (2001)
- [4] P. DANIELSON, R. WILSON and A. David. "Microstructure of titanium welds," *Advanced*

- materials & processes*, pp. 2-39 (2003)
- [5] A. Kumar, T. Jaykumar, B. Raj and K. K. Ray, "Characterization of solutionizing behavior in VT14 titanium alloy using ultrasonic velocity and attenuation measurements," *Materials Science and Engineering*, A360, pp. 58-64 (2003)
- [6] KS D 6026, "Titanium and Titanium alloy castings," (2003)
- [7] C. J. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error(MAE) over the root mean square error(RMSE) in assessing average model performance.," *Climate Research*, Vol. 30, pp. 79-82 (2005)
- [8] G. BUSSU and P. E. IRVING, "The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-88 (2003)
- [9] H. Mabuchi, R. Uemori and M. Fujioka, "The role of Mn depletion in intra-granular ferrite transformation in the heat affected zone of welded joints with large heat input in structural steels," *ISIJ international*, Vol. 36 No. 11, pp. 1406-1412 (1996)
- [10] S. W. Seon, H. D. Park, Y. T. Hwang, and W. Yi, "Tensile Properties Evaluation of Pure Titanium Plate using ultrasonic," *Proc. of KSPE Spring Conference*, Vol. 2012, No. 5, pp. 1021-1022 (2012)
- [11] H. D. Park, I. S. Yun and W. Yi, "Porosity defect evaluation of Titanium weld zone using ultrasonic distance amplitude characteristics curve," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, Vol. 2009, No. 10 pp. 529-530 (2009)
- [12] H. Fukuhara, N. Shinya and J. Kyono, "Detection of creep damage by ultrasonic wave," *Hihakai Kensa(Journal of NDI)(Japan)*, Vol. 40, No. 7, pp. 450-455 (1991)
- [13] S. Matsubara, Y. Yokono, and T. Imanaka. "Diagnosis of material degradation by ultrasonic wave," *Journal of JSNDI* 46, pp. 185-190 (1997)