

스테인레스 박강판의 레이저 점 용접 시 음향방출 실시간 모니터링

이성환[#], 최정욱^{*}, 최장은^{*}

Acoustic Emission Monitoring during Laser Spot Welding of Stainless Steel Sheets

Seoung Hwan Lee[#], Jung Uk Choi^{*}, Jang Eun Choi^{*}

ABSTRACT

Compared with conventional welding, laser spot welding offers a unique combination of high speed, precision and low heat distortion. This combination of advantages is attractive for manufacturing industries including automotive and electronics companies. In this paper, a real time monitoring scheme for a pulsed Nd:YAG laser spot welding was suggested. Acoustic emission (AE) signals were collected during welding and analyzed for given process conditions such as laser power and pulse duration. A back propagation artificial neural network, with AE frequency content inputs, was used to predict the weldability of stainless steel sheets.

Key Words : Laser spot welding (레이저 점 용접), Weld qualities (용접 품질), Acoustic emission monitoring (음향방출 감시), Artificial neural network (인공 지능 신경망)

1. 서론

레이저를 이용한 용접은 기존의 용접법에 비하여 용접부와 열 영향부가 작으며 정밀도 높은 용접 특성을 얻을 수 있는 등의 장점을 가지고 있어 최근 널리 이용되고 있다. 이중 Nd:YAG 레이저는 직경이 1mm 이내의 광섬유를 통한 빔의 전송이 가능하고 작업필요 공간이 작아서 접근이 어려운 위치로의 전송이 자유로우며, 용접 속도가 빨라서 높은 생산성을 얻을 수 있기 때문에 최근 자동차, 선박 이외에도 전자부품의 접합 등 다양한 산업 부품 생산에 이용되고 있다. 필연적으로,

용접 변수에 따른 용접 부위의 기계적 물성평가¹ 및 균열 등에 관한 연구가 널리 행하여지고 있으나, 용접 변수와 용접 시 발생하는 물리적 현상의 상관관계를 정확하게 설명하기에는 여러가지 난점이 존재한다. 이를 보완하고 공정자동화를 이루기 위해 시도되는 방법이 센서를 이용한 감시 및 제어 기법이다. 본 연구는 오스테나이트계 스테인리스강의 Nd:YAG 점 용접 시 발생하는 acoustic emission (AE)신호를 용접 및 용접 균열 발생기구와 연계 분석하여, 공정 특성에 따른 신호특성과 용접가능 여부를 규명하는데 그 목적을 둔다. 본 연구 결과는 향후 레이저 점 용접 실시간 모니터링

접수일: 2004년 9월 6일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

[#] 교신저자, 한양대학교 기계공학과

E-mail: sunglee@hanyang.ac.kr, Tel.: (031) 400-5288

^{*} 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

링 자동화 시스템 구축에 있어 유용한 자료로 활용될 것이다.

2. 레이저 점 용접 실험

2.1 점 용접의 원리

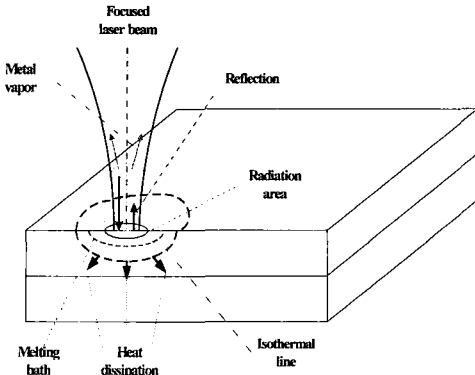


Fig. 1 Schematic diagram of laser spot welding

Fig. 1은 레이저 점용접의 개략도를 나타낸다. 레이저 점 용접시 표면온도가 금속의 용점을 거처 기화점 (2590℃ for steel) 이상으로 상승하면 Metal vapor (laser plasma)가 녹은 재료 위에 나타나고 내부적으로 vapor channel (keyhole)이 형성된다. 이때 channel 내부에 다중 반사가 일어나고 흡수율이 (90% 이상까지)증가하게 된다. 이후 증기압이 재료를 소산시킬 수 있을 때까지 계속 진행되며 녹은 재료가 굳게 되어 재료가 접합되게 된다. 한편, 용접부에서 발생하는 균열의 경우 균열발생 시기, 온도, 위치 등에 따라 여러 관점에서 분류가 가능하지만 발생온도에 따른 분류가 가장 일반적으로 통용되고 있다. 특히, 오스테나이트 스테인레스 스틸의 용접에 있어 가장 심각한 제한 요인이 되는 고온균열은 금속의 재결정 온도 이상에서 발생하는 균열로 정의되며 용접이 끝남과 동시에 발생한다.² 일반적으로 고온균열에는 응고균열, HAZ 액화균열, 용접 금속 액화균열 및 연성저하균열이 포함되어 있으며,³ 응고 균열은 용입 깊이, HAZ 액화 균열은 용접 비드에 관계 되는 것으로 알려져 있다.^{3,4} 응고 균열은 용접 직후에 현미경, 또는 비파괴 검사에 의해 확인 할 수 있지만 (Fig. 2), 금속의 용융과 HAZ액화 균열에 의한 신호는 아주 미세하기 때문에 비파괴 검사에서도 검출되지 않

는 경우가 많이 있다 (Fig. 3).³ 상기한 균열발생 시 탄성응력파가 발생하게 되어 AE신호 발생원으로 작용하게 되므로 균열거동과 AE 신호를 연계 분석하여 용접상태 감시에 사용하는 것이 가능하다. 따라서 레이저 점 용접 시 AE 신호의 주 발생원으로 용접 시에 발생하는 금속의 용해에 의한 상폭발과 용접 직후에 발생하는 고온 균열 발생 과정을 지목할 수 있다.

Solidification crack



Fig. 2 Side view of molten pool region

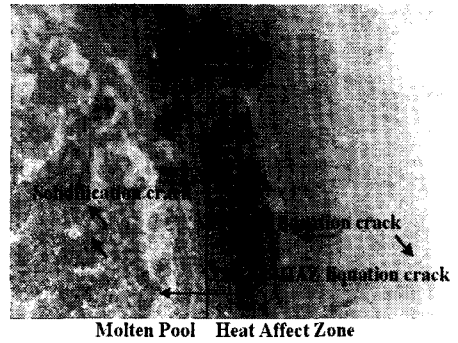


Fig. 3 Welding cracks

2.2 실험 장치 및 방법

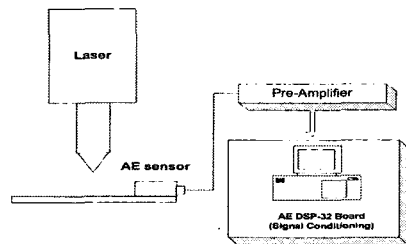


Fig. 4 Laser welding experimental setup

Fig. 4는 실험장치를 나타낸다. AE 신호는 PAC사의 광대역형 R15 AE센서와 AE신호 샘플링을 위한 고속 신호처리용 DSP보드인 AEDSP-32/16 및 컴퓨터를 이용하여 측정하였다. 사용된 AE센서가 10-500KHz에서 민감도를 가지므로 샘플링을 2MHz로 하였다. AE센서에서 검출된 신호는 전치 증폭기에서 40dB증폭하고, A/D 보드에서 디지털 신호로 변환된 후 AE전용 소프트웨어인 MISTRAS 프로그램을 사용하여 처리하였다. 본 실험에 사용된 실험 조건은 Table 1에 제시된 바와 같다. 레이저는 TRUMF 353D형이며 연속파 TEM00모드의 Pulse Beam을 이용한 Nd:YAG 레이저로 최대 출력이 350W이다. 실험에 사용된 재료 두께는 0.2mm의 SUS304로, 보조 가스는 알곤과 공기를 사용하였다. 공정 중 레이저 출력, Pulse duration을 변화 시키면서 실험을 수행 하였다. 용접 형상의 윗면과 아랫면은 광학 현미경을 이용하여 관찰하였고 (Fig. 5), 측면 형상은 SEM을 이용하여 관찰/기록하였다.

Table 1 Welding conditions

Parameter	Value
Pass filter[KHz]	10-500
Sampling rate[MHz]	2
Beam mode	TEM00[Pulse laser]
Wave length[μ m]	1.064
Gas pressure[bar]	10
Material (Thickness[mm])	SUS304 (0.2)
Focal length[mm]	70
Focal diameter[mm]	0.3
Laser power[W]	50,100,150,200,250
Pulse duration[ms]	10,20,30
Shielding gas	Ar
Inert gas	Air

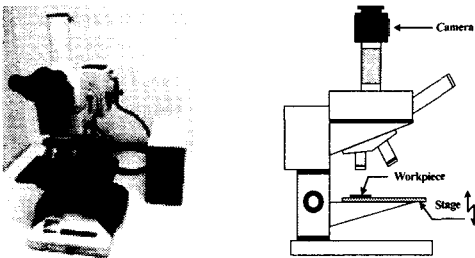


Fig. 5 Optical microscope used in the experiments

3 실험 결과

3.1 용접 결과의 분류

Table 2에서와 같이 레이저 용접 시도 후 용접이 안되었을 경우 (Type A)와 용접이 되었을 경우 (Type B, C)로 나누었다 이중 용접이 되었을 경우 용접 아래 부분에 열변형이 없으면 Type B로 하였고, 열변형이 있으면 Type C로 분류하였다.

Table 2 Classification of welding type

Power Pulse dur.	50W	100W	150W	200W	250W
	10ms	Type A	Type A	Type B	Type C
20ms	Type A	Type B	Type B	Type C	Type C
30ms	Type A	Type B	Type C	Type C	Type C

Table 3 Welding types and corresponding experimental conditions

Type Direction	X	O	
	Type A	Type B	Type C
Top			
Bottom			

3.2 AE 신호분석

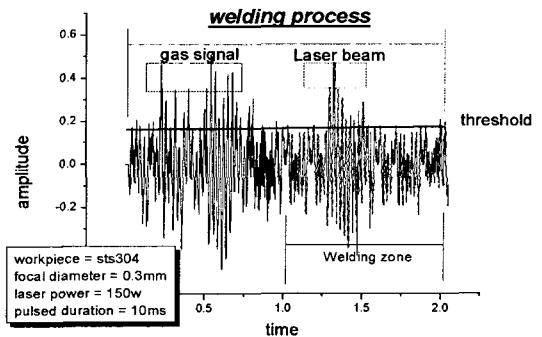
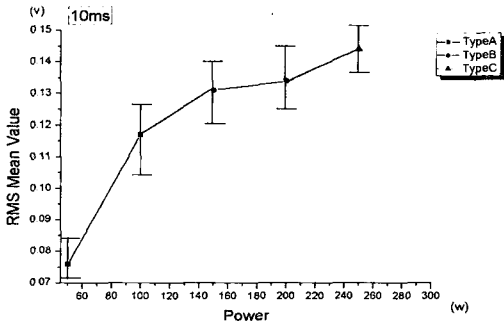


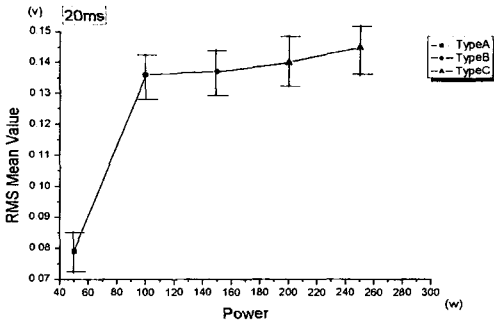
Fig. 6 Typical AE raw signal during laser welding

Fig. 6은 레이저 점용접 시 AE센서를 통해 얻어진 신호 값을 보여 주고 있다. 용접 공정 중 레이저 빔은shielding gas인 아르곤 가스, inert gas인 압축공기 투입 이후에 가동된다. 본 논문에서는 용접 공정 중 용접 영역에서의 AE원신호를 이용하여 실효전압치 (RMS)를 구하였고, 신호의 주파수 정보를 알아보기 위해서 FFT를 수행하였다.

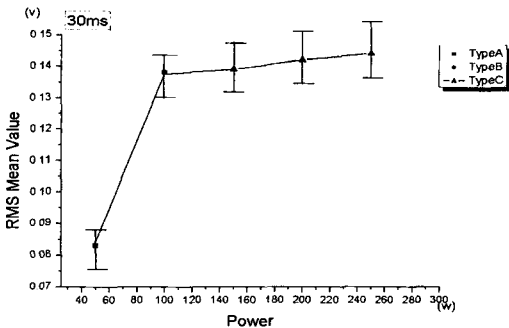
3.2.1 Power 에 의한 영향



(a) Pulse duration 10ms



(b) Pulse duration 20ms



(c) Pulse duration 30ms

Fig. 7 Power vs. RMS at each pulse duration

Fig. 7은 각 pulse duration에서 레이저 출력 증가에 따른 RMS의 평균값의 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 RMS 값은 레이저 에너지에 비해 하였고, Type A에서 Type B로 변화할 때 (용접 되었을 때) RMS 평균값의 수치가 급격히 증가 하는 것을 볼 수 있었는데, 이것은 Keyhole발생에 의한 상폭발과, 응고 균열량의 갑작스런 증가가 그 원인으로 보여진다. 또한 용접 유무 사이에서의 RMS한계치의 존재도 (본 실험 결과 0.13V 근처) 확인 할 수 있었다

3.2.2 Pulse duration 에 의한 영향

Fig. 8는 각 출력 값에서 pulse duration 이 증가함에 따른 비드 형상의 크기를 나타낸 것이다. pulse duration 및 출력이 증가함에 따라서 비드의 크기가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

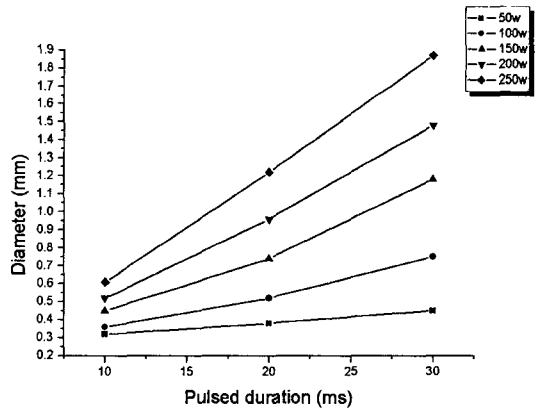


Fig. 8 Bid width vs. pulse duration with power variation

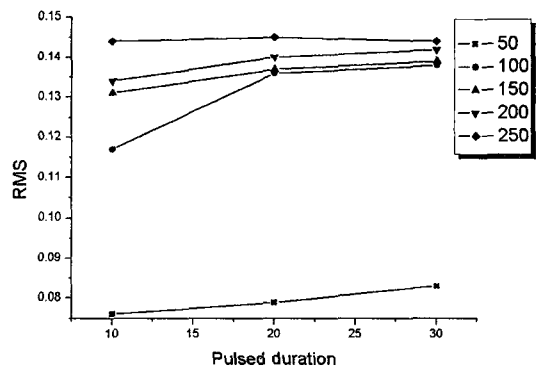


Fig. 9 Pulse duration vs. RMS with power variation

Fig. 9는 각 레이저 출력에서의 pulse duration의 증가에 따른 RMS 수치의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 pulse duration증가에 따른 RMS 수치변화가 미미함을 볼 수 있고 따라서, 용접 신호와의 직접적 상관성이 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 7-9의 결과로부터 레이저 출력 및 그와 밀접한 관계를 가지는 용입 깊이에 의한 영향이 용접 유무 여부를 결정한다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 FFT 분석

Fig 10은 용접 유무에 따른 FFT 결과 예를 나타내고 있다. (a)는 용접이 되지 않은 50W 10ms의 신호 형상을, (b)는 용접이 과도된 250W 10ms의 신호 형상을 보여주고 있다

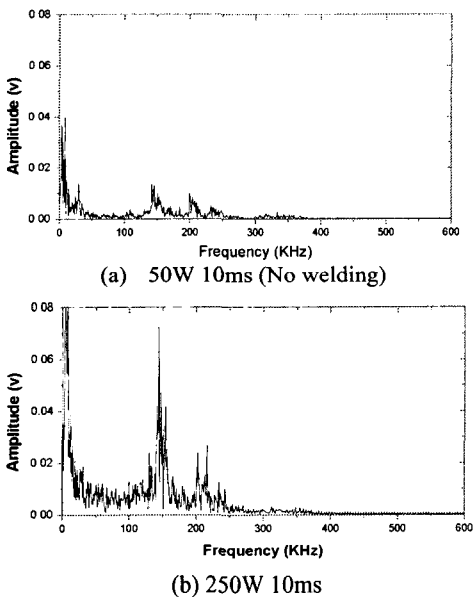


Fig. 10 Typical power spectrum

용접이 되지 않은 (a)와 용접이 된 (b)의 신호의 차이는 특정주파수대 (150KHz) 부근에서 (b)의 민감도가 증가하는 것이다. AE 신호들이 용접 유무에 어떠한 영향을 주고 있는지를 좀더 정확하게 분석하기 위하여 100 KHz를 기준으로 저주파 신호 (10-100KHz)와 고주파 신호 (100-500KHz)로 나누어 재 분석하였다.

3.3 주파수대별 신호분석

저주파 신호의 경우 (Fig. 11) 레이저 출력의 증

가에 따른 AE counts의 변화가 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙적인 것이 관찰되었는데 이것은 AE counts가 레이저 출력에 비례한다는¹¹ 기존 연구결과에 반하며, 용접에 의한 영향이라기보다 보조 가스의 불안정성에서 오는 영향으로 추정된다. 따라서 저주파 신호에는 용접 메커니즘에 의한 상폭발 및 균열 발생 과정에서 기인된 성분이 없고, 가스압에 의한 영향만이 있음을 알 수 있다. 반면, 고주파신호의 경우 (Fig. 12) 레이저 출력에 따라 AE Counts가 선형적으로 증가함을 볼 수 있고, 특히 용접 유무 여부에 따라 그 값이 확연한 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 결국 레이저 점 용접에 의한 신호 중 고주파 성분이 용접 유무의 판단 근거를 제공한다는 것을 알 수 있다.

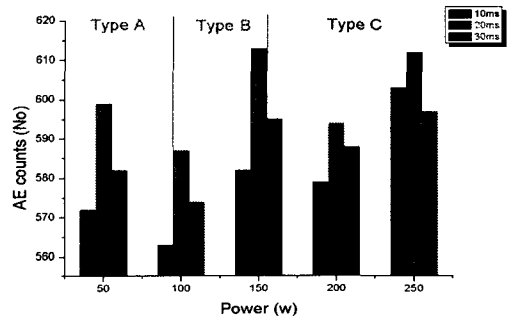


Fig. 11 AE counts at low frequency (10 ~ 100kHz)

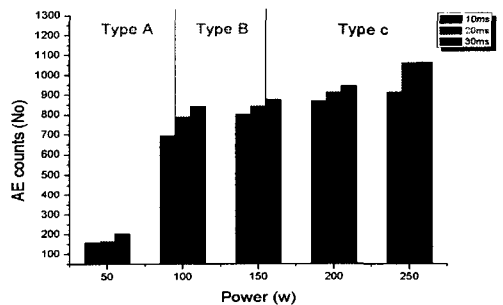


Fig. 12 AE counts at high frequency (100 ~ 500kHz)

각 주파수대의 신호가 용접 메커니즘의 상폭발 및 균열 발생과정과 어떤 상관성이 있는지 알아보기 위해서 고주파 신호를 대상으로 재 분석을 수행하였다. Fig. 13은 용접 성공 시 (250w 30ms) RMS의 한 예이다. 신호가 특징적으로 변화하는 부분을 3구간으로 나누었고 (0.05s - 0.08s, 0.08s -

0.14s, 0.14s - 0.21s) 각 구간의 RMS 수치가 각 주파수대에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 각 구간별 고주파 통과 필터 (100KHz)를 거친 원신호의 FFT값을 구해 보았다 (Fig. 14). 그림에서 알 수 있듯이 첫 구간은 300 - 500KHz의 신호가, 두번째 구간은 200 - 300KHz의 신호가, 세번째 구간은 100 - 200KHz의 신호가 각각 최대의 민감도를 나타내는 것을 알 수 있다.

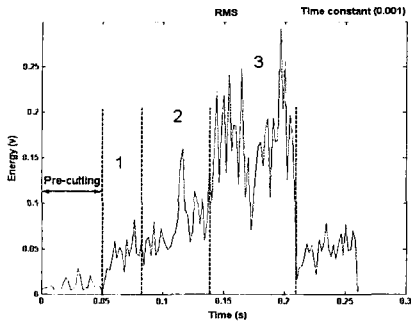
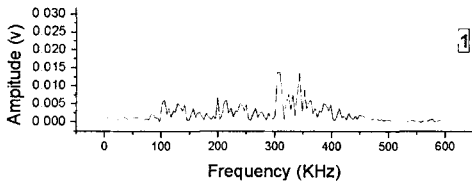
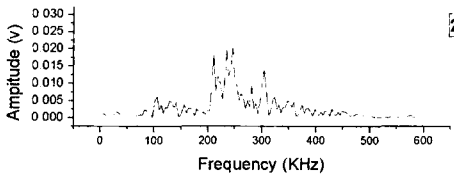


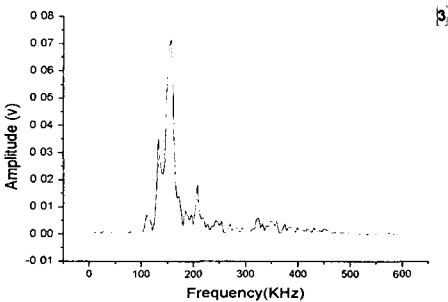
Fig. 13 High pass filtered RMS signal



(a) section 1



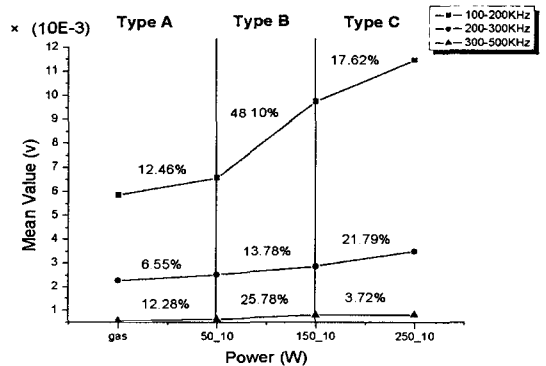
(b) section 2



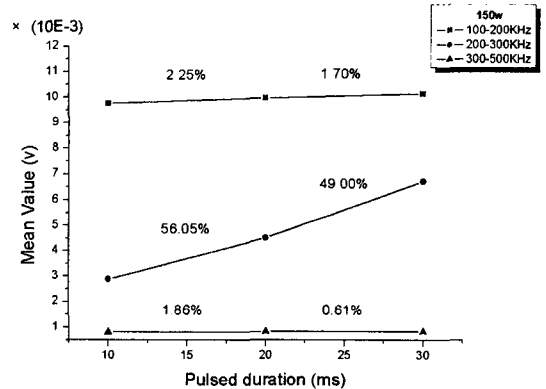
(c) section 3

Fig. 14 Power spectrum of each section

레이저 점 용접의 Pulse duration 이 0.03s 이내라는 것을 감안한다면 첫번째 구간 (300-500KHz)은 용접 시에 발생하는 용융 및 상폭발에 의한 신호라는 것을 추정해 볼 수 있고, 두번째, 세번째 구간에서의 신호는 용접 직후에 발생하는 신호로서 고온 균열 발생과정에 연관된 것이라는 것을 알 수 있다. 두번째, 세번째 구간의 신호원을 추정하기 위하여 각 주파수 대에서 진폭의 합과 평균 (Fig 15)을 레이저 출력이 증가할 때와 Pulse duration 이 증가할 때로 나누어서 분석하였다.



(a) with the increment of power



(b) with the increment of pulse duration

Fig. 15 Mean value & Increasing rate for each frequency level

Fig 15는 각 구간별 20회 반복 실험을 통해서 나온 결과이며 (a)는 레이저 출력의 증가에 따른 각 구간별 진폭의 평균값의 증가량을 나타낸 것으로 Type A에서 Type B로의 변화율을 주목하면 100-200KHz 구간의 증가율이 크며, 이것은 레이저 출

력의 증가가 용접 깊이와 많은 상관성이 있다는 사실과 관련하여 이 주파수대 신호가 용접 직후에 발생하는 신호로서 응고 균열 발생과정에 관계된다는 것을 알 수 있다. 또 (b)는 같은 레이저 출력에서 Pulse duration의 증가에 따른 각 구간별 진폭과 평균값의 증가량을 나타낸 것으로 200-300KHz의 증가율이 다른 구간의 증가량에 비해서 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이것은 Pulse duration이 용접 비드의 크기와 많은 상관성이 있다는 것을 고려한다면 이 신호대가 HAZ 액화균열 발생과정과 주로 연관된 주파수대라는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 토대로 Fig. 13의 RMS 각구간을 응용 메커니즘과 관련하여 분석하였다 (table 4).

Table 4 Frequency analysis result

단계	1	2	3
발생 현상	용해 및 상폭발	고온균열 (액화 균열)	고온균열 (응고 균열)

3.4 신경 회로망에 의한 용접 유무 예측

뉴럴 네트워크는 출력층의 오차신호를 이용하여 은닉 층과 출력 층간의 연결강도를 변경하고, 출력 층의 오차 신호를 은닉 층에 역전파하여 입력층과 은닉 층과의 연결강도를 변경하는 학습방법인 BP (back propagation) 알고리즘을 사용하였다.

계산 효율을 높이기 위해 실험에서 얻은 FFT 신호를 100-200KHz, 200 - 300KHz, 300 - 500KHz 의 3 구간으로 나누어 주파수대 별 실효전압치를 입력값으로 이용하였고, 용접 유무를 목표값 (Target) 으로 설정하였다. 총 15 개의 패턴을 학습하여 연결 강도를 구하였다. Table 5, Table 6 은 입력 조건과 입력 값을 나타내고, Fig 16 은 학습 과정의 개략도를 나타낸다.

Table 5 Input values

Pulse dur. / Power	10	20	30
50	(5.86,2.29,0.57)	(5.94,2.94,0.60)	(5.96,3.51,0.62)
100	(8.43,2.47,0.754)	(8.68,3.52,0.792)	(8.94,4.85,0.803)
150	(9.76,2.89,0.805)	(9.98,4.51,0.82)	(10.15,5.98,0.825)
200	(10.51,3.42,0.821)	(10.75,4.59,0.824)	(10.97,6.32,0.827)
250	(11.48,3.52,0.835)	(11.51,4.91,0.837)	(11.59,6.97,0.841)

Table 6 Learning conditions

Parameter	Value
Number of hidden layer	1
Desired Value	Type A(1,0,0) Type B(0,1,0) Type C(0,0,1)
Number of Learning samples	15
Learning rate	0.1
Max number of leaning	10 ⁷
Object of error energy	0.001

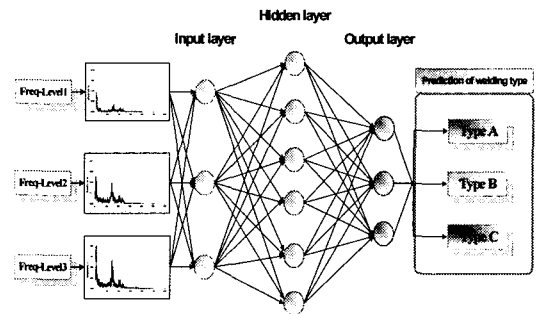


Fig. 16 Architecture of the ANN

Table 7 ANN prediction results

Power	Pulse duration	Input	Output	Desired output Type A(1,0,0) Type B(0,1,0) Type C(0,0,1)
80	10	(6.59,2.32,0.682)	(0.931,0.084,0.062)	TypeA(1,0,0)
80	20	(6.82,2.89,0.713)	(0.915,0.008,0.005)	TypeA(1,0,0)
80	30	(6.99,3.57,0.722)	(0.897,0.152,0.091)	TypeA(1,0,0)
170	10	(10.13,3.15,0.816)	0.015,0.927,0.009)	TypeB(0,1,0)
170	20	(10.49,4.35,0.825)	(0.031,0.098,0.935)	TypeC(0,0,1)
170	30	(10.73,6.15,0.827)	(0.113,0.004,0.925)	TypeC(0,0,1)
220	10	(11.19,3.49,0.829)	(0.192,0.081,0.907)	TypeC(0,0,1)
220	20	(11.43,4.85,0.835)	(0.005,0.009,0.887)	TypeC(0,0,1)
220	30	(11.48,6.59,0.839)	(0.147,0.135,0.935)	TypeC(0,0,1)

구성된 인공 신경망의 입력값으로 실험에서 얻은 데이터 중에서 연결강도를 구하는데 사용한 데이터를 제외한 나머지 데이터를 사용하였다. Table 7, Fig. 17 은 학습에서 얻어진 연결 강도를 사용하여 예측 값과 실제 측정값을 비교한 것으로 88% 이상 일치함을 보여주고 있다.

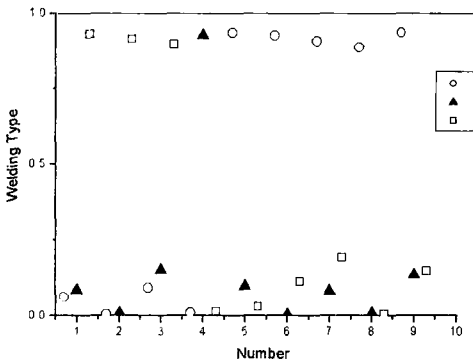


Fig. 17 Prediction results of welding type using neural network

4. 결론

레이저 점용접시의 발생 AE 신호를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) AE 신호를 이용한 결과로 용접 유무를 확인할 수 있었으며, 용접 유무에 크게 영향을 미치는 인자조건을 알 수 있었다.
- (2) AE 주파수 성분의 신호 분석결과 고주파 신호 성분이 용접 유무에 주로 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다. 또, 용접 구간을 시간별로 나누어 분석한 결과 각 구간별로 발생하는 물리적현상과 관련 주파수대의 관계를 유추할 수 있었다.
- (3) AE 신호와 인공 신경회로망을 통한 용접 유무의 예측은 실제 측정에서 얻어진 실험 결과와 상당히 일치함을 알 수 있었다. 향후 좀더 다양한 가공 파라미터로 세밀한 실험을 수행한다면 더욱 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ghoo, B. Y. and Keum, Y. T., "Evaluation of Mechanical Properties of Welded Metal in Tailored Steel Sheet Welded by Co2 Laser," J. of KSPE, Vol.18, No. 4, pp.142-150, 2001.
2. Na, E. G., Yu, H. S. and Kim, H., "Study on Characteristics of SCC and AE Signals for Weld HAZ of HT-60 Steel," Journal of KSNT, Vol.21,

- No.1, pp.62-68, 2001.
3. Lee, J. S. and Hong, J. W., "Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds," Journal of KWS, Vol.17, No.5, pp.10-19, 1999.
4. Bransch, H. N., Weckman, D. C. and Kerr, H. W., "Effects of Pulse Shaping on Nd:YAG Spot Welds in Austenitic Stainless Steel," Welding Journal, Vol. 73, No.6, pp. 141-151, 1994.
5. Ko, S. H., Lee, J. Y. and Yoo, C. D., "Analysis of Keyhole Formation and Stability in Laser Spot Welding," J. of DWS, Vol. 20, No. 4, pp. 484-490, 2002.
6. Furuta, H., "Neural Network and Its Application to Structural Engineering," Computational Structural Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 7-22, 1996.
7. Kang, H. A., Hong, S. J., Jun, T. O., Jang, W. S. and Na, S. J., "A Study on the Prediction of Laser Spot Weld Shapes of Thin Stainless Steel Sheet," Journal of KSPE, Vol. 15, No. 8, pp. 102-108, 1998.
8. Zhang, H., Senkara, J. and Wu, X., "Suppressing Cracking in Resistance Welding AA5754 by Mechanical Means," J. of Manf. Sci. and Eng., Vol. 124, No. 1, pp. 79-84, February, 2002.
9. Brooks, J. A., Robino, C. V., Headley, T. J. and Michael, J. R., "Weld Solidification and Cracking Behavior of Free-machining Stainless Steel," Supplement to the welding journal, pp. 51-64, 2003.
10. Liu, J. T., Weckman, D. C. and Kerr, H. W., "The Effects of Process Variables on Pulsed Nd:YAG Laser Spot Welds," part I, AISI 409 Stainless Steel, Metal. Trans. B, 24B (6), pp. 1065-1076, 1993.
11. Jon, M. C., "Monitoring Laser Welds using Stress Wave Emission Techniques," International advances on nondestructive testing, Vol. 7, pp. 351-369, 1984.
12. von Almen., M. and Blatter., A., Laser -Beam Interactions with Materials - Physical principles and applications, Springer, 1995.
13. Lim, T. G., Cho, H. S., "The use of Artificial Neural Network in the Monitoring of Spot Weld Quality," J. of KWS, Vol.11, No.2, pp. 27-41, 1993.