

자동차 차체 제조 공정에서 용접 공정 오류 검출을 위한 지능형 모니터링 시스템 개발

김태형* · 유지영** · 이세현***† · 박영환****

*미시간대학교 기계공학과

**한양대학교 대학원 기계공학과

***한양대학교 기계공학부

****부경대학교 기계공학과

Development of Intelligent Monitoring System for Welding Process Faults Detection in Auto Body Assembly

Tae Hyung Kim*, Jiyoung Yu**, Sehun Rhee***,† and Young Whan Park****

*Dept. of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, U.S.A.

**Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

***Div. of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

****Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr

(Received April 23, 2010 ; Revised May 10, 2010 ; Accepted May 25, 2010)

Abstract

In resistance spot welding, regardless of the optimal condition, bad weld quality was still produced due to complicated manufacturing processes such as electrode wear, misalignment between the electrode and workpiece, poor part fit-up, and etc.. Therefore, the goal of this study was to measure the process signal which contains weld quality information, and to develop the process fault monitoring system. Welding force signal obtained through variety experimental conditions was analyzed and divided into three categories: good, shunt, and poor fit-up group. And then a monitoring algorithm made up of an artificial neural network that could estimate the process fault of each different category based on pattern was developed.

Key Words : Resistance spot welding, Process fault, Monitoring system, Artificial neural network

1. 서 론

저항 점 용접은 자동차 차체 제조 라인에서 가장 널리 사용되는 접합 공정으로, 차체 한 대당 요구되는 저항 점 용접 공정의 수는 약 2000~3000점 정도이다. 각 용접점의 내식성, 내구성, 강도는 차체 전체의 부식, 진동 및 강도에 영향을 끼칠 수 있기 때문에, 차체의 신뢰성 확보를 위해서는 개별 용접부 품질 또한 양호하게 유지되어야 한다. 이를 위해 로브 곡선을 바탕으로 용접 전류, 용접 시간, 용접 가압력에 대한 허용 영역

범위 내에서 최적 용접 조건이 선정된다. 그러나 최적 조건에서 용접 공정이 수행될 지라도 생산 현장에서 발생할 수 있는 공정 오류로 인해 불량한 용접부를 얻을 수 있다. 공정 오류 요인으로는 접합부 표면 상태, 전극 마모, 도금 층의 존재, 용접 전극과 접합부의 정렬 상태 등이 있다¹⁾. 특히 자동차 차체에서 최근 사용빈도가 증가하고 있는 새로운 도금강과 신고장력강의 경우, 재료적인 특성으로 인해 외부 조건에 따른 용접 품질의 변화가 더 민감한 편이다. 이를 위해 공정 오류들이 용접 품질에 끼치는 영향에 대한 다양한 연구가 시도되었는데, Zhang 등²⁾은 신고장력강의 하나인 DP 600강

에서 전극 마모가 기존 고장력강에 비해 증가함을 보였고, Zhang 등³⁾은 전극 마모가 전류 분포를 불안정하게 하거나, 전극 캡 모양을 변형시켜 용접 품질에 큰 영향을 주는 공정 오류 조건임을 밝혔다. Min⁴⁾은 접합부의 결합상태를 불안정하게 하는 조건을 고려한 실험 방법을 제시하였다. Cho 등⁵⁾, Li⁶⁾는 전극과 용접부가 어긋난 여러가지 경우에 대한 공정 오류 형태를 제시하였다. 이와 더불어 센서를 이용하여 공정 오류를 계측하기 위한 연구도 수행되었다. 저항 점 용접에서 센서를 통해 계측될 수 있는 공정신호로는 동저항, 전극변위, 음향신호 등이 있다⁷⁾. Li⁸⁾는 전극 접촉 면적과 동저항 사이의 관계를 이용하여 실시간으로 전극 마모를 예측하였고, Zhang 등³⁾은 변위(LVDT) 센서로 계측된 전극변위로 전극 마모를 모니터링하고 제어하였다. Chen 등⁹⁾은 광센서를 이용한 변위센서로 계측된 전극변위가 용접 품질을 모니터링 할 수 있는 적절한 공정 변수임을 보였다. Podr~zaj 등¹⁰⁾은 용접 중 로드셀로부터 계측된 신호를 이용하여 날림 발생을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Zhang 등¹¹⁾은 로드셀의 신호가 접합부와 전극의 정렬상태 불량과 직접적인 관련이 있음을 밝혔다. 이러한 선행 연구들은 주로 여러 가지 공정 오류 조건들 중 일부만을 선택하여 용접 품질에 대한 영향을 분석하였다. 그러나 실제 공정에서는 다양한 공정 오류가 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 개괄적인 정의가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 용접 공정 정보를 센서로 계측한 뒤, 다양한 공정 오류들을 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 본 연구에서 적용된 힘 센서는 용접 건에 부착되어 용접 공정 중 접합부에 인가되는 전극 가압력과 용융된 금속의 팽창과 수축으로 인한 너깃 힘의 평형 상태에 따라 변하는 힘을 계측한다. 그리고 힘 센서를 이용하여 다양한 공정 오류 조건에서 계측된 신호의 경향을 분석한 뒤, 공정 오류 조건을 양호한 그룹, 전류 누설 그룹, 정렬 불량 그룹으로 분류하였다. 분류된 패턴에 따라 공정 오류를 검출하고, 그 원인을 판단할 수 있는 인공지능회로망기반의 모니터링 알고리즘을 개발하였다.

2. 저항 점 용접에서의 공정 오류

저항 점 용접에서 용접전류, 용접시간, 용접가압력은 용접 품질을 결정짓는 가장 중요한 세가지 인자이다. 이러한 입력 변수들이 불안정하게 제어될 경우 용접 품질을 불량하게 만드는 원인이 될 수 있다. 그러나 최근 전력변환기술의 향상, 고성능 마이크로 컨트롤러와 지능형 제어 알고리즘의 개발로 인해 이와 관련된 문제는

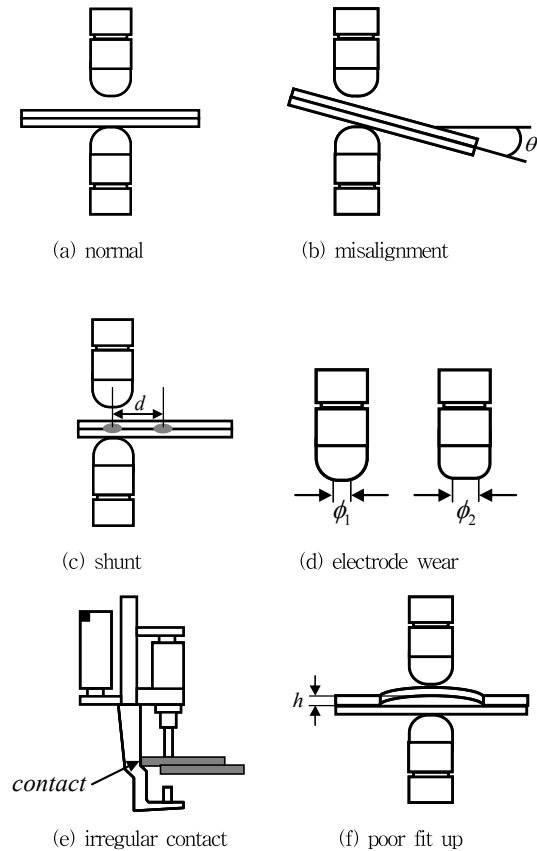








Fig. 1 Types of process faults in resistance spot welding

해결되었다고 할 수 있다. 반면 외부 조건인 전극 팁의 마모, 도금층, 용접건과 차체 용접부의 정렬 상태 등은 제어하기 어려운 변수들이다. Fig. 1은 저항 점 용접에서 발생할 수 있는 공정 오류들을 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 양호한 용접부를 나타내고, Fig. 1(b)는 용접로봇건과 용접부의 정렬이 어긋난 상태로 전류 통전 경로가 불안정한 경우, Fig. 1(c)는 선행 용접부와 가까운 지점에서 용접할 때 전류가 누설되는 경우를 보여준다. Fig. 1(d)는 전극 마모를, Fig. 1(e)는 로봇 용접건이 용접부를 제외한 차체의 프레임과 접촉된 상태를 나타낸다. Fig. 1(f)는 용접부에 간극이 존재하여 전류 통전을 위한 초기 용접 상태가 불안정한 경우이다.

Fig. 1과 같이 정의된 공정 오류들에 대한 용접 결과를 확인하기 위해서 각 조건(Fig. 1 (a)-(f))에서 각 10회씩 용접 실험을 수행하였다. 이 때 용접 전류, 용접 시간, 그리고 용접 가압력은 각각 8 kA, 150 msec, 250 kgf의 최적 용접 조건에서 수행되었다. 용접 품질은 너깃 사이즈로 비교하였다¹³⁾. Table 1은 실험 후 측정된 너깃 사이즈의 평균값을 나타낸다.

시편의 두께를 t mm라고 할 때 너깃 사이즈 기준은 보통 $4\sqrt{t} \sim 5\sqrt{t}$ mm 이다. 실험에 사용된 시편은

Table 1 Result of nugget size at each process fault condition

type	picture	nugget size[mm]
I (normal)		5.3
II (misalignment)		1.3
III (shunt)		2.9
IV (electrode wear)		3.2
V (irregular contact)		2.5
VI (poor fit up)		1.4

GA 강판 0.8 mm를 사용하였으므로, $5\sqrt{t}$ 기준을 적용할 경우 4.5 mm 이하의 너깃 사이즈는 용접 불량이라고 할 수 있다. Table 1에서 type I (normal)의 너깃 사이즈는 5.3 mm로 양호한 용접 결과를 얻었다. 그러나 다른 조건인 type II ~ VI에서는 모두 기준 강도 4.5 mm 이하의 너깃 사이즈 값을 얻었으므로 모두 용접 불량이라고 할 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서는 공정 오류들을 정의하고, 센서로부터 측정된 신호를 이용하여 이와같은 오류들을 예측할 수 있는 시스템을 개발하고자 하였다.

3. 압전형 힘/변위 센서를 이용한 공정 신호 계측

본 연구의 저항 점 용접 시스템은 Fig. 2와 같이 용접 로봇에 장착할 수 있는 C형 용접 건을 이용하였다. 공정 신호를 측정하기 위해 힘/변위(force/strain) 형태의 압전 센서(piezoelectric sensor, Kistler HighSens 9232A¹⁴⁾)를 용접 건 하부 전극에 Fig. 2와 같이 부착하였다. 센서의 측정 범위는 $\pm 600 \mu\epsilon$ 이고, 실제 힘 단위로 환산하여 사용하기 위해 저항 점 용접에서 사용되는 가압력 측정기를 이용하여 그 값을 보정하였다. 보정된 값은 센서 계측값 1 V 당 18 kg이다. 용접 중 너깃은 금속의 온도 증가에 따른 부피 증가 때문에 팽창하고, 용융된 이후에는 용융된 금속이 용접 전극의 가압력으로 인해 부피가 수축한다¹⁵⁾. 너깃의 팽창과 수축 과정에서 발생하는 너깃 힘은 용접부를 지지하고 있는 전극 가압력과 평형상태를 이루고 있다. 만약 너깃이 팽창하여 너깃 힘이 전극 가압력보다 커지면 전극이

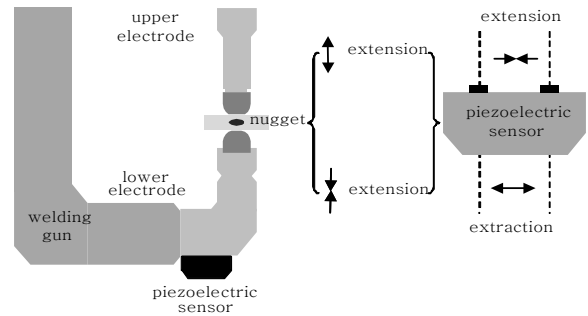


Fig. 2 Relationship between welding phenomenon and piezoelectric sensor

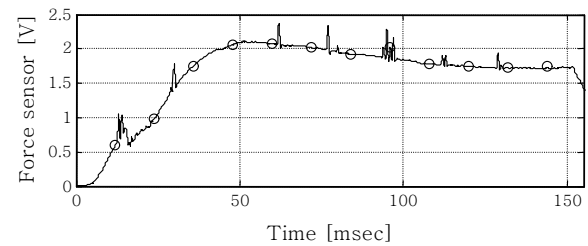


Fig. 3 The measured signal using a piezoelectric sensor

뒤로 밀리게 된다. 이 때 Fig. 2에서 센서의 측정단도 압축 방향(extraction, $\rightarrow\leftarrow$)으로 변형된다. 또 금속의 용융부가 커져 전극 가압력을 지지하는 고상 금속부가 줄어들면 너깃은 수축한다. 이 때 전극은 다시 안쪽으로 이동하고 센서의 측정단도 인장 방향(extension, $\leftarrow\rightarrow$)으로 움직인다. 그러므로 너깃의 팽창과 수축은 센서의 팽창과 수축에 대응된다.

Fig. 3은 실제 용접 공정을 수행하고 난 뒤 신호처리된 센서의 신호를 나타내고 있다. 계측 시스템은 NI사의 DAQ 보드와 LabVIEW를 이용하여 구성하였고, 100 kHz의 샘플링 속도(sampling rate)로 계속되었다. Fig. 3에서 용접 전류가 흐르기 시작해서 50 msec 정도 까지의 구간은 너깃의 생성과 성장에 따라 센서의 신호가 증가하고 있다. 그 이후에는 너깃의 성장에 따라 용융된 금속이 전극 가압력을 지지하지 못하여 센서의 신호가 감소하는 구간을 나타낸다. 이러한 결과는 식(1)과 같이 표현될 수 있다. 따라서 이 공정 신호를 이용하면 너깃의 팽창과 수축의 성장 과정 정보를 얻을 수 있다.

$$measured\ signal = \begin{cases} increase ; F_{nugget} > F_{electrode} \\ decrease ; F_{nugget} < F_{electrode} \end{cases} \quad (1)$$

4. 실험 및 결과

공정 오류에 대한 모니터링 알고리즘을 개발하기 위

Table 2 Experimental conditions for various process faults

Type	experimental condition
I (normal)	-
II (misalignment)	$\theta = 20 \sim 40^\circ$
III (shunt)	$d = 10 \sim 15 \text{ mm}$
IV (electrode wear)	$\phi = 6.5 \sim 7 \text{ mm}$
V (irregular contact)	contact to frame
VI (poor fit up)	$h = 3 \sim 5 \text{ mm}$

해 Fig. 1, Table 2처럼 각 공정 오류가 발생할 수 있도록 변화를 주면서 실험을 수행하였다. 각 조건당 20 회씩 총 120회 용접 실험을 수행하였다. 용접 전극과 접합부의 기울임(misalignment) 조건인 type II에서는 기울어진 각도 θ 를 $20 \sim 40^\circ$ 사이에서 선택하였고 (Fig. 1(b)), 전류 누설(shunt effect) 조건(Fig. 1(c))인 type III에서는 용접 타점 사이 간격 d 를 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 에서 선정하였다. 전극 마모(electrode wear) 조건 (Fig. 1(d))인 type IV는 6 mm 전극 선단경 ϕ 를 7 mm 가 되도록 마모시켰고, type V은 용접 건 프레임과 시편이 Fig. 1(e)처럼 접촉 되게 하였다. type VI (Fig. 1(f))는 접합부 사이에 간격(gap)이 존재하도록 h 를 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 조절하였다. 용접은 MFDC (medium frequency direct current)형 저항 점 용접기와 C형 용접 건을 이용하여 이미 언급한 바와 같이 GA강 0.8 mm 2장을 겹쳐 용접 전류 8 kA , 용접 시간 150 msec , 용접 가압력 250kgf 로 수행하였다.

각 공정 오류 조건에 해당하는 공정 신호를 Fig. 4에 나타내었다. 각 그래프는 양호한 용접 품질을 나타내는 기준 조건인 type I의 신호와 각 공정 오류 신호들의 비교를 보여준다. 우선 양호한 용접 품질 결과인 type I의 그래프는 너깃 생성 시 발생하는 팽창에 의한 증가와 이후 금속의 용융과 전극 가압력(electrode force)으로 인한 너깃 수축을 나타내는 감소를 가지고 있다. 따라서 공정 오류가 발생하지 않는 경우에는 type I과 같은 신호의 패턴을 가진다. 그러나 공정 오류가 발생한 type II ~ type VI (Fig. 4(a) ~ (e))에서는 type I 신호와는 상이한 패턴을 보인다. 공정 오류 신호들은 전체적으로 type I과 비교하여 너깃의 팽창에 의한 증가 속도가 느리고, 정상 점(peak point)이 늦게 형성되거나 찾을 수 없다. 그 이유는 공정 오류로 인해 너깃의 성장에 필요한 충분한 입열이 접합부에 공급되지 못하기 때문이다. 또한 Fig. 4에서 용접 전극과 접합부의 정렬 상태 불량 조건인 type II, type VI는

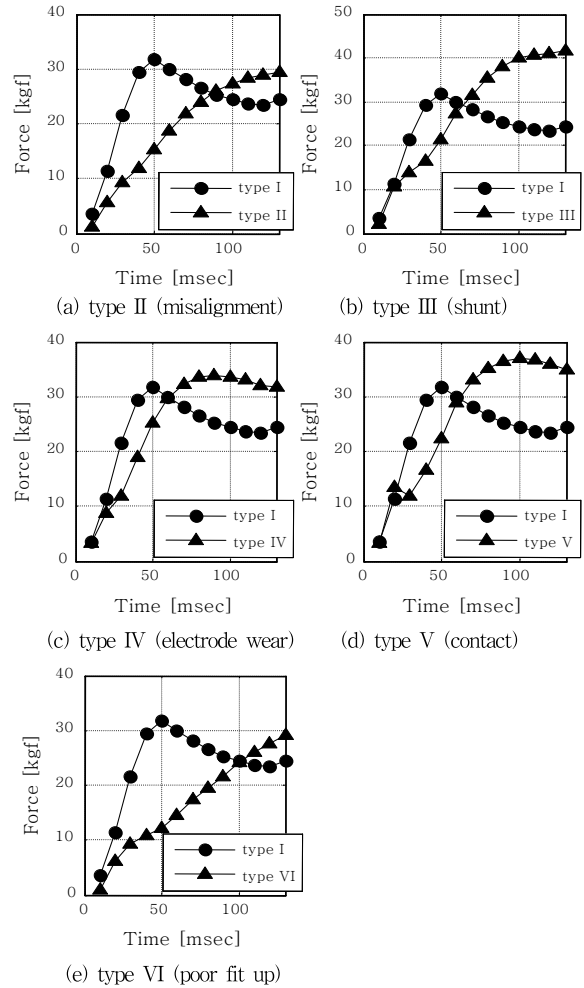


Fig. 4 The differences between good condition (type I) and process fault conditions(type II~VI)

비슷한 신호 패턴을 보이며, 용접 전류가 접합부 이외의 부분으로 누설되는 조건에 해당하는 type III (Fig. 4(b)), type IV (Fig. 4(c)), type V (Fig. 4(d))도 유사한 패턴을 가지고 있다.

그러므로 공정 오류들을 그 형태에 따라 분류해 보면, 기준 조건인 그룹 I (type I)의 패턴과 전류 누설 조건인 그룹 II (type III, type IV, type V)의 패턴, 용접 전극과 접합부 정렬 상태 불량인 그룹 III (type II, type VI)의 패턴으로 나눌 수 있다. 이 결과는 모니터링 알고리즘의 신경 회로망에서 출력값으로 사용된다.

5. 인공신경회로망을 이용한 공정 오류 모니터링 알고리즘

본 연구에서는 모니터링 알고리즘으로 인공 신경 회로망(ANN, artificial neural network)을 이용하였다.

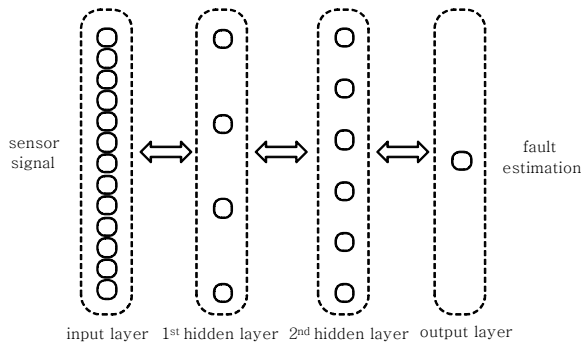


Fig. 5 Multi-layer feed-forward neural network

ANN 구성은 오류 역전파 알고리즘(back propagation algorithm)을 사용하였고, 뉴런 모델로는 수렴속도가 빠르고 안정적인 Levenberg-Marquart 모델을 적용하였다. 오류 역전파 알고리즘의 신경망 구조는 입력층으로 13개 노드(node)를 가진 신호 처리된 공정 신호이고, 은닉 층은 2층으로 각각 4개, 6개 노드를 가진다. 출력 층은 1개의 노드로 최종 모니터링 결과값을 나타낸다. 활성화 함수는 입력 층과 은닉 층, 은닉 층과 은닉 층 사이에는 바이폴라 시그모이드 함수(bipolar-sigmoid function)를, 은닉 층과 출력 층 사이에는 선형 함수(linear function)를 사용하였다¹⁶⁾.

신경회로망의 입력을 위해 150 msec 동안 100 kHz로 계측된 센서 신호를 신호처리 과정을 거쳐 13개의 데이터로 변환하였다. 그러므로 입력층의 노드는 13개이다. 그리고 출력인 모니터링 결과값은 앞서 설명한 바와 같이 분류된 공정 오류 신호의 3가지 그룹과 관련이 있다. 각 조건에서 20회씩 총 120회 실험을 통해 공정 신호를 계측하였다. 신경망 학습을 위해서 사용된 신호의 개수는 90개이고, 검사를 위해 사용된 실험의 개수는 30개이다. 즉, 6가지 실험 조건에서 각 조건당 15개는 학습, 5개는 검사를 위해 사용되었다. Fig. 6과 Table 3은 학습 및 테스트 데이터에 대한 ANN 예측 결과의 오차 평균 및 표준 편차를 나타내고 있다.

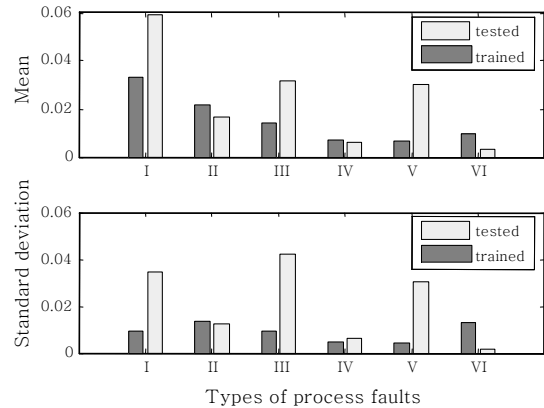


Fig. 6 The mean and the standard deviation of estimated error using ANN

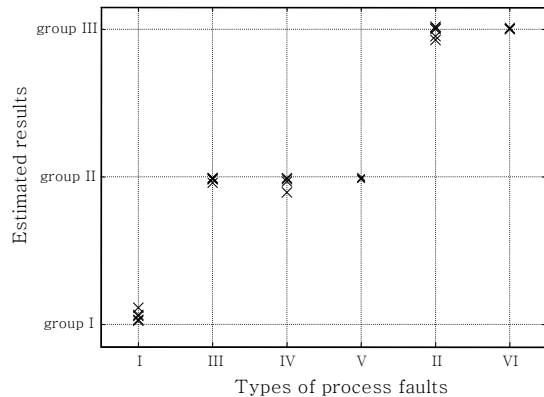


Fig. 7 The estimated results of testing data using ANN

학습 및 데이터의 예측 결과 평균은 각각 3.32%, 5.94% 이내이고, 예측 결과 분포를 나타내는 표준 편차도 최대 0.0422임으로 개발된 ANN은 우수한 예측 성능을 보임을 알 수 있다.

Fig. 7은 테스트 실험 데이터에 대한 ANN의 예측 결과를 표시하는 그래프이다. 각 공정 오류 형태에서 오류 형태에 대한 그룹 예측 결과가 우수함을 확인할 수 있다.

Table 3 The mean and the standard deviation of estimated error using ANN

type	estimated error of trained results		estimated error of tested results	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation
I(normal)	0.0332	0.0095	0.0594	0.0345
II(misalignment)	0.0220	0.0134	0.0168	0.0127
III(shunt)	0.0144	0.0096	0.0316	0.0422
IV(electrode wear)	0.0072	0.0050	0.0063	0.0063
V(irregular contact)	0.0065	0.0044	0.0300	0.0307
VI(poor fit up)	0.0099	0.0130	0.0031	0.0016

5. 결 론

저항 점 용접을 이용한 자동차 차체 조립 라인에서 생산 중 여러 가지 공정 오류로 인해 불량한 용접 품질을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 양호한 용접 조건인 type I (good condition)과 용접 품질에 영향을 끼칠 수 있는 5가지 공정 오류 type II (misalignment condition), type III (shunt condition), type IV (electrode wear condition), type V (irregular contact condition), type VI (poor fitup condition)를 제시하였다. 제시된 공정 오류의 특징 분석을 위해 용접부 정보를 가지고 있는 공정 신호를 용접 건에 부착된 센서를 이용하여 계측하였다. 이 신호는 용접 중 너깃의 팽창과 수축에 따른 공정 정보를 나타낸다. 각 오류 조건에서 계측된 신호는 양호한 용접 품질을 얻을 수 있는 그룹 I, 전류 누설 조건의 그룹 II, 용접 전극과 접합부 정렬 상태 불량의 그룹 III로 분류하였다. 이러한 결과를 이용하여 공정 오류 모니터링 알고리즘을 인공지능 회로망으로 구현하였다. 오류 역전과 알고리즘으로 각 조건의 신호를 학습시키고 테스트 하였다. 그 결과 개발된 알고리즘은 학습 결과와 테스트 결과가 모두 공정 오류 모니터링 시스템에 적합함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-357-D00017).

참 고 문 헌

- R. L. O'Brien: Welding Handbook Volume 2 Welding Process, Eighth ed., AWS, 1991, 574
- X. Q. Zhang, G. L. Chen, and Y. S. Zhang: Characteristics of Electrode Wear in Resistance Spot Welding Dual-Phase Steels, *Material & Design*, 29 (2007), 279-283
- Y. S. Zhang, H. Wang, G. L. Chen, and X. Q. Zhang: Monitoring and Intelligent Control of Electrode Wear Based on a Measured Electrode Displacement Curve in Resistance Spot Welding, *Measurement and Science Technology*, 18 (2007), 867-876
- J. Min: Real Time Monitoring Weld Quality of Resistance Spot Welding for the Fabrication of Sheet Metal Assemblies, *Journal of Materials Processing Technology*, 132 (2003), 102-113
- Y. Cho, W. Li, and S. J. Hu: Design of Experiment Analysis and Weld Lobe Estimation for Aluminum Resistance Spot Welding, *Welding Journal*, 85 (2006), 45s-51s
- W. Li: Manufacturing Process Diagnosis using Functional Regression, *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (2007), 323-330
- C. S. Chen and E. Kannatey-Asibu Jr.: Investigation of Monitoring Systems for Resistance Spot Welding, *Welding Journal*, 81 (2002), 195s-199s
- W. Li: Modeling and On-line Estimation of Electrode Wear in Resistance Spot Welding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127 (2005), 709-717
- J. Z. Chen and D. F. Farson: Electrode Displacement Measurement Dynamics in Monitoring of Small Scale Resistance Spot Welding, *Measurement and Science Technology*, 15 (2004), 2419-2425
- P. Podr̃zaj, I. Polajnar, J. Diaci, and Z. Kariž: Expulsion Detection System for Resistance Spot Welding Based on a Neural Network, *Measurement and Science Technology*, 15 (2004), 592-598
- H. Zhang and J. Senkara: Resistance Welding-Fundamentals and Applications, Taylor & Francis, 2004
- Yongjoon Cho and Sehun Rhee: New Technology for Measuring Dynamic Resistance and Estimating Strength in Resistance Spot Welding, *Measurement and Science Technology*, 11 (2000), 1173-1178
- AWS/SAE Joint Committee: Recommended Practices for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding, AWS D8.7-78, 1987
- Surface Strain Sensor Type 9232A, Kistler Instrumente AG, 2007
- J. Senkara, H. Zhang, and S. J. Hu: Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding, *Welding Journal*, 83 (2004), 123s-132s
- C. T. Lin and C. S. Lee: Neural Fuzzy Systems-a Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems, Prentice Hall, 1996