한국정밀공학회지 제16권 제10호 (1999년 10월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 16, No. 10, October 1999.

뉴로-퍼지 알고리즘을 이용한 점용접재의 강도추론 기술

김주석*, 추연준**, 이상룡***

The Quality Assurance Technique of Resistance Spot Welding Pieces using Neuro-Fuzzy Algorithm

Joo Seok Kim*, Youn Joon Choo** and Sang Ryong Lee***

ABSTRACT

The Resistance Spot Welding is widely used in the field of assembling the plates. However we don't still have any satisfactory solution, which is non-destructive quality evaluation in real-time or on-line, against it. Moreover, even though the rate of welding under the condition of expulsion has been high until now, quality control of welding against expulsion hasn't still been established. In this paper, it was proposed on the quality assurance technique of resistance spot welding pieces using Neuro-Fuzzy algorithm. Four parameters from electrode separation signal in the case of non-expulsion, and dynamic resistance patterns in the case of expulsion are selected as fuzzy input parameters. The parameters consist of Fuzzy Inference System are determined through Neuro-Learning algorithm. And then, Fuzzy Inference System is constructed. It was confirmed that the fuzzy inference values of strength have within ±4% error specimen in comparison with real strength for the total strength range, and the specimen percent having within ±1% error was 88.8%. According to KS(Korean Industrial Standard), tensile-shear strength limit for electric coated of zinc is 400kgf/mm2. Judging to the quality of welding is good or bad, according to this criterion and the results of inference, the probability of misjudgement that good quality is valuated into poor one was 0.43%, on contrary it was 2.59%. Finally, the proposed Neuro-Fuzzy Inference System can infer the tensile-shear strength of resistance spot welding pieces with high performance for all cases-non-expulsion and expulsion. And On-Line Welding Quality Inspection System will be realized sooner or later.

Key Words : Resistance Spot Welding(저항 점용접), Neuro-Fuzzy Inference System(뉴로-퍼지 추론 시스템), Tensile-Shear Strength(인장-전단강도), Electrode Separation(전극분리), Dynamic Resistance(동저항)

1. 서론

저항 점용접은 단위 시간당 작업 속도가 빠르며 열영향부가 작고 로봇 등을 이용한 공정 자동화 작업에 매우 적합한 기술이기 때문에 박판 용접에 많이 적용되고 있다.[1] 점용접기는 1886년 미국의 톰

* 경북대학교 대학원
** (주)신도리코 기술연구소
*** 경북대학교 공과대학 기계공학부

슨(E. Thomson)에 의해 처음 개발된 이래 용접 품질 향상을 위한 많은 연구들이 수행되어왔다. 어느 용접 연구소[2]에서는 용접 부위의 온도를 측정하여 용접 공정 감시 변수로 사용하였고, Gould[3]는 유한 차분법을 사용하여 용융부의 형성과정을 해석하였으며, Roklin과 Adler[4]는 초음파를 이용하여 용융부의 크기를 추정하려는 연구를 수행하였다.

한편 Gedeon 등[5]은 동저항 및 전극분리파형 등이 대표적인 용접 공정의 감시 변수가 될 수 있음을 증명하였다. 이후 전극분리 현상을 공정 감시 변수로 응용한 연구가 활발히 진행되면서 Wood 등[6]은 전극 분리 신호의 파형을 이용한 세 가지 매개변수로 비선형 최소 자승법(Nonlinear Least Square Fitting Method)을 사용하여 용융부 크기를 추정하였다. 또한 이정우[7], 박종우[8] 등은 인공신경 회로망을 이용하여 전극분리 현상과 동저항 변화에 대한 용접 품질과의 관계를 규명하는 연구를 각각 수행하였다. 최근에 퍼지추론을 이용하여 점용접 부위의 품질을 평가하기 위한 알고리즘[9]이 제안되었으나 퍼지 입력 변수와 퍼지 규칙의 수가 너무 많다는 문제점이 있으며, 극히 특정 범위의 강도에 대한 데이터만을 사용하였기 때문에 국부적인 불연속점에 빠질 우려가 있다. 현재, 산업 현장에서는 초기 입력조건(용접전류, 용접시간, 가압력)을 명시한 용접 계획법에 의해 점용접을 수행하는 개회로 제어 방식을 사용하고 있다. 그러나 같은 모델명의 용접기로 같은 용접 조건하에서 용접을 실시하더라도 용접기 자체의 오차와 용접 공정 중의 수많은 외란의 영향으로 인해 서로 다른 용접 강도가 얻어질 수 있다. 이러한 이유로 20~30%정도 더 많은 용접점들을 지정하여 용접 품질에 대한 불확실성을 보완하고 있다. 이러한 용접점 과다 지정 방법은 제품의 생산단가 증가, 생산성 저하 등의 결과를 가져오게 될 뿐만 아니라 심한 중간날림(expulsion) 현상을 유발하게 된다.

본 논문에서는 자동차 산업에서 많이 사용되는 두께 0.8mm인 전기 아연도금 강판의 점 용접에 있어서 전극의 팽창파형과 동저항을 이용하여 용접강도를 추론하는 뉴로-퍼지 추론 시스템(Neuro-Fuzzy Inference System)을 구성하였다. 레이저 변위센서를 사용하여 전극팽창파형을 측정하고 토로이드 코일을 이용하여 용접전류를 측정하였다. 용접강도를 추론하기 위하여 중간날림이 발생하지 않는 경우의 용접공정 감시 변수로는 전극 분리 신호(electrode separation signal)의 특정 파라미터들을 선정하였고 중간날림이 발생하는 경우에는 동저항(dynamic resistance)파형의 패턴을 사용하였다. 용접강도추론을 위한 퍼지 추론 시스템을 용접공정 감시 변수들과 인장-전단강도 데이터의 뉴로-학습(Neuro-Learning)을 통하여 구성하였으며 Takagi - Sugeno[10] 방식을 사용하여 강도를 추론하였다. 이렇게 추론된 강도와 실제 인장시험을 통하여 얻은 강도를 비교해봄으로써 개발된 퍼지추론시스템은 타당성을 확인하였다.

2. 저항점용접 실험 및 결과

2.1 점용접의 특성

여저항 점용접이란 맞대어진 두금속간의 저항열을 이용하는 용접방법이다. 저항 점용접시 발생하는 열물리적 현상으로서 피용접물에 가해지는 전기적 에너지, 저항의 변화(동저항), 용접물이나 전극의 열적 변화, 그리고 용융부의 열팽창으로 인한 전극분리 현상 등이 있으며, 이 현상들은 용접부의 강도를 추론하는 매개변수로 사용될 수 있다. 특히, 전극 분리현상은 가장 효과적인 매개변수로서 이용될 수 있다. 전극분리 현상이란 점용접시 용접 전류가 흐르기 시작하면서 금속판이 열팽창을 일으키고, 그로 인하여 전극이 서로 힘을 받아 멀어지는 현상이다. 용접이 진행되면서 용융부가 형성되기 시작하면 주위의 조직은 열영향을 받아 연화되며, 이후 연화된 조직이 전극 가압력을 이기지 못하고 소성변형을 발생하여 멀어졌던 전극이 다시 가까워진다. 이러한 용접 공정 중에서 전극의 움직임을 검출한 것이 전극 분리 신호의 파형이다.

Fig. 1에서 일반적인 전극분리 신호와 용접진행에 따른 용융부의 형성 및 전개 과정을 도시하였다. 구간 Ⅰ은 전극 가압력에 의하여 시편과 시편 사이의 접촉부가 더욱 밀착하면서 발생하는 이동상태이고, 구간 Ⅱ는 주울 열에 의한 열팽창(thermal expansion)을 나타내며 이구간에서는 전극 분리 신호가 거의 선형적으로 증가한다. 구간 Ⅲ에서는 용융부의 확산으로 용융부 주위의 연화된 조직이 전극 가압력을 더 이상 지탱하지 못하고 함입(embeding)이 일어나 전극이 서로 가까워지는 현상을 보이며, 열입력이 과도한 경우에는 용출 현상(expulsion)이 발생하여 용접부의 용접 강도를 저하시키는 원인이 되기도 한다.

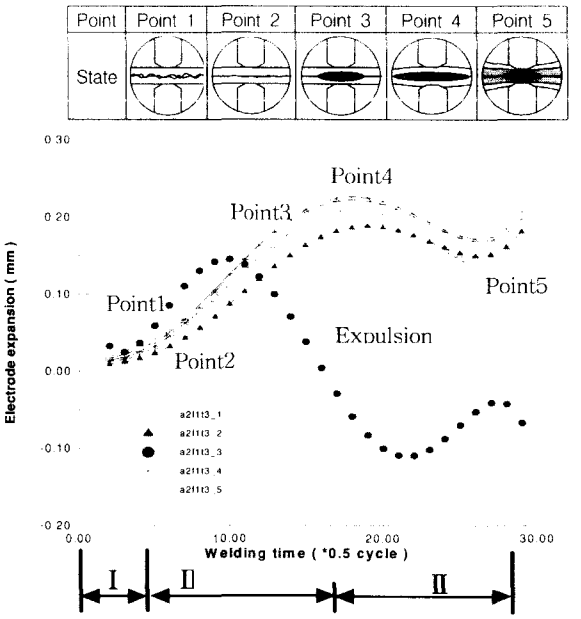


Fig. 1 Typical electrode movement pattern during spot welding process

2.2 점용접 및 인장전단강도 실험

점용접 실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험의 측정 대상은 점용접 공정 중에 통전되는 실제 용접전류 신호와 양 전극 사이의 차전압, 전극 분리 신호등의 세 가지이다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of specimen

Chemical Composition (%)							Mechanical Properties (kg/mm^2)	
C7	Si	Mn	P	S	Ni	Al	T.S.	Y.S.
0.004	0.022	0.144	0.011	0.011	0.025	0.045	32.0	17.5

용접전류는 토로이달 코일(toroidal coil)을 사용하여 측정되고, 차전압은 양 전극에 연결된 도선에 의해 측정되어 차동증폭기를 거치며 차전압으로 변환된다. 전극 분리 신호는 레이저 변위센서로 측정된다. 이 세 신호는 A/D 변환되어 PC에 저장된다. 실험에서 사용된 용접기는 (주)조흥기전사의 ASP-50으로서 정전류 방식의 족답식 점용접기이다. 센서의 출력 신호에 포함된 자기장의 영향을 제거하기 위해 차단 주파수가 5Hz인 저역통과 필터를 제작 사용하였다. 시편은 자동차 등에 많이 사용되는 두께 0.8mm인 전기 아연도금 강판을 사용하였으며 화학조성과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

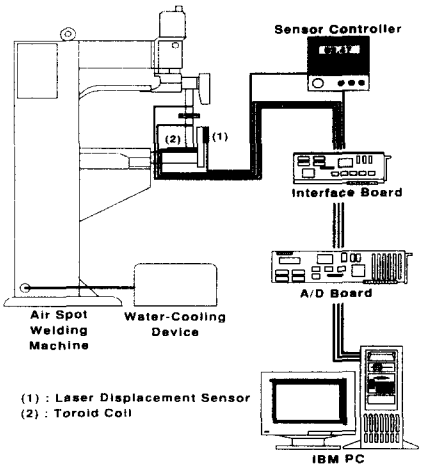


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

Table 2 Welding condition

Welding Time	Welding Current	Electrode Force (kgf)									
		235		270		305		340		375	
8 cycle	8 kA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 kA	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
	10 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○
	11 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9 cycle	8 kA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 kA	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
	10 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○
	11 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10 cycle	8 kA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 kA	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
	10 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11 kA			●	●	●	●	●	●	●	●
11 cycle	8 kA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 kA	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○
	10 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11 kA			●	●	●	●	●	●	●	●
12 cycle	8 kA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 kA	●	●	●	●	○	○	○	●	○	○
	10 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11 kA			●	●	●	●	●	●	●	●
13 cycle	8 kA	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 kA	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
	10 kA	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○
	11 kA			●	●	●	●	●	●	●	●

Table 2에서는 실험에서 사용된 용접 조건을 나타내고 있다. 검은색 원은 용접 공정 중에 중간날림이 발생한 경우를 나타내고, 음영 처리된 부분은 중간날림이 너무 심하게 발생하여 더 이상 용접을 진행할 수 없었던 조건을 나타내고 있다. 점용접 실험을 통하여 획득된 모든 시편에 대하여 인장-전단강도 시험을 실시하였다.

2.3 실험결과

점용접 실험과 인장-전단강도 시험의 결과를 용접전류와 강도, 용접시간과 강도, 가압력과 강도, 전극 분리 신호 및 동저항 파형으로 분류하여 기술하였다. Fig. 3은 가압력과 용접시간을 고정하고 전류를 변화시켰을 때 인장-전단강도에 대한 그래프이다. 이 논문에서 말하는 강도는 점용접의 너겟이 가지는 강도이다. 즉, Cu-Cr-Zr 재질의 돔형(ϕ 6 × R 6.5 × ϕ 13) 캡팁 전극을 사용하여 용접을 하였을 때 한 개의 너겟이 가지는 강도를 말한다. 용접전류가 증가하면 인장-전단강도는 증가하다가 가압력에 비해 과대한 전류가 통전되면 중간날림이 발생하면서 강도가 오히려 감소하고 동일 조건에서의 강도 편차가 심해진다. 이는 중간날림이 발생하면서 용융물의 일부가 외부로 배출되어 나타나는 결과라고 판단된다.

Fig. 4는 가압력과 용접전류를 고정하고 용접시간을 변화시켰을 경우의 인장-전단강도의 변화를 보여주고 있다. 이 조건에서는 모든 시편에 대해 중간날림이 발생하지 않았음에도 불구하고 13cycle의 용접시간에서는 인장-전단강도가 감소하고 있다. 이는 전류가 장시간 통전됨으로써 과도한 용융이 일어난 결과라고 판단된다.

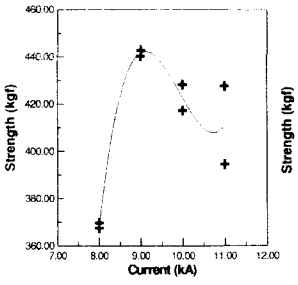


Fig. 3 Force : 305kgf, Time : 11cycle

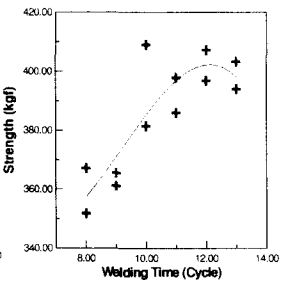


Fig. 4 Force : 375kgf, Current : 9kA

Fig. 5는 용접전류와 용접시간을 고정하고 가압력을 변화시켜 가며 인장-전단강도의 변화를 관찰한 그래프이다. 가압력이 증가할수록 인장-전단강도가 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 접촉 면적이 넓어지면서 상대적으로 전류밀도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

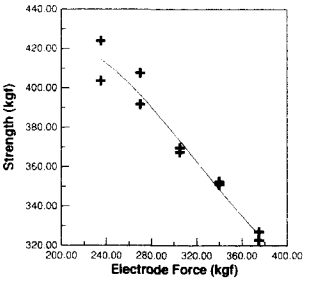
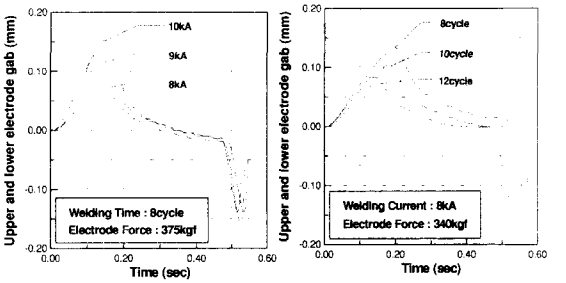
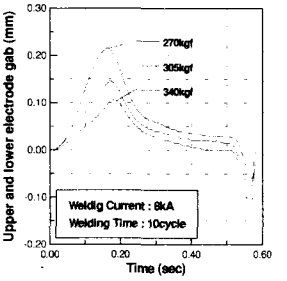


Fig. 5 Current : 8kA
Time :11cycle



(a) (b)



(c)

Fig. 6 Electrode separation patterns

지금까지의 결과들로부터 용접전류, 용접시간, 가압력만으로는 중간날림의 발생 및 강도를 예측할 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 점용접시의 열물리적 현상을 대변해 줄 수 있는 변수로서 전극분리 신호(중간날림이 발생하지 않은

경우)와 동저항 파형(중간날림이 발생한 경우)을 신경하였다. 중간날림이 발생하지 않은 경우에는 열팽창이 지속적으로 이어지면서 두 전극 사이의 거리가 멀어지다가 최대점에 이르게 된다. 그 이후는 소성변형의 영역을 지나면서 두 전극 사이의 거리가 가까워지는 경향의 신호 파형이 얻어진다.

Fig. 6.(a)는 가압력과 용접시간을 고정하고 전류를 증가시켰을 때, Fig. 6.(b)는 가압력과, 용접전류를 고정하고 용접시간을 증가시켰을 때, Fig. 6.(c)는 용접전류와, 용접시간을 고정하고 가압력을 증가시켰을 때의 전극 분리 신호 파형을 각각 나타내고 있다. 용접전류와 용접시간이 증가함에 따라 전극 분리 신호의 최대값이 증가한다. 또한 가압력이 증가할수록 전극분리신호의 최대점이 감소한다.

중간날림이 발생하는 시기와 정도의 차이 때문에 전극 분리 신호로부터 강도와 상관관계를 가지는 파라미터를 찾기가 어렵다. 따라서 중간날림이 발생하는 경우에는 동저항의 패턴으로부터 특성을 파악하였다. 용접공정 중의 동저항은 획득된 전류와 차전압 신호로부터 한 주기당의 RMS값 들을 이용하여 구할 수 있다.

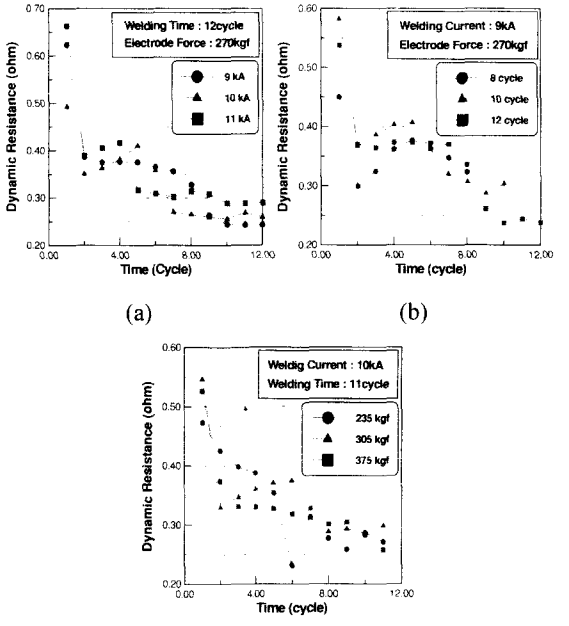


Fig. 7 Dynamic resistance patterns

Fig. 7.(a)는 용접시간과 가압력을 고정하고 전류를 증가시켰을 때의 동저항 파형의 변화를, Fig. 7.(b)는 용접전류와 가압력을 고정하고 용접시간을 변화 시켰을 때의 동저항 파형의 변화를, Fig. 7.(c)는 용접전류와 용접시간을 고정한 상태에서 가압력을 증가시켰을 때의 동저항 파형의 변화를 각각 나타내고 있다.

중간날림이 발생한 경우에는 두 번째 용접 사이클부터 마지막 용접 사이클까지의 동저항 값이 중간날림이 발생하는 정도의 차이에 따라 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 두 번째 용접 사이클 이후의 동저항이 급격히 상승하는 경향이 나타나는데 이는 중간날림이 발생하면서 순간적으로 생성된 공기층의 영향으로 인해 저항이 증가하는 것으로 보여진다. 공기층의 형성은 용접 종료 후 너겟 내부에 기공 형성의 원인이 되는데 기공의 형성은 용접강도에 큰 영향을 미친다.

2.4 감시변수 선정

용접 실험의 결과에서도 살펴보았듯이 중간날림이 발생하지 않았을 경우에는 전극 분리 신호의 파형으로부터 용접 공정 중의 용융부 생성 단계에서 발생한 총 열량과 열량발생의 속도 및 소성 변형의 정도와 용융부가 냉각되면서 발생하는 금속조직의 재생성과 관계되는 파라미터를 추출할 수 있다. 그리고, 중간날림이 발생한 경우에는 동저항 파형의 두 번째 용접 사이클 이후의 패턴으로부터 발생된 열량의 정도와 중간날림이 발생한 정도 등을 파악할 수 있다.

Table 3 Input parameters-non-expulsion

Input Parameter	Sign	Description
NEIP_1	D1	The displacement from the beginning of separation to maximum gab between two electrodes.
NEIP_2	n1	The average separating rate from the beginning of separation to maximum gab between two electrodes.
NEIP_3	D2	The displacement from maximum gab between two electrodes to minimum gab.
NEIP_4	n2	The average approach rate from maximum gab between two electrodes to minimum gab.

본 논문에서는 퍼지 추론 시스템 구성을 위한 학습 데이터와 퍼지 입력 변수의 결정을 위하여

용접강도와 상관관계가 있는 파라미터들을 선정하였다. 중간날림이 발생하지 않은 경우에는 Fig. 7과 Table 3에서 나타낸 것처럼 4가지의 파라미터를 선정하였다.

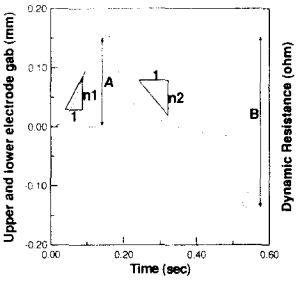


Fig. 8 Input parameter-non-expulsion

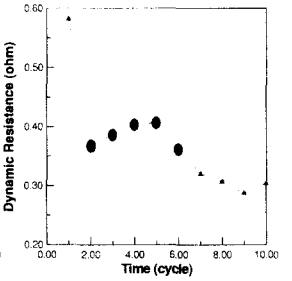


Fig. 9 Input parameter -expulsion

NEIP는 Non-Expulsion Input Parameter의 약어로 표시한 것이다. NEIP_1과 NEIP_2는 용접 공정 중에 생성된 열량과 열 생성의 속도를 각각 대변하고 있는 파라미터이고, NEIP_3과 NEIP_4는 소성변형 과정과 냉각시의 조직의 재형성에 관한 정보를 대변해 주는 파라미터이다. 중간날림이 발생한 경우에는 Fig. 9처럼 5가지의 파라미터를 선정하였다. EIP는 Expulsion Input Parameter를 약어로 나타낸 것이며, 동저항의 패턴 중 두 번째부터 여섯 번째 용접 사이클의 동저항값을 선택하였다. 이 다섯 개의 동저항값이 중간날림이 발생하는 순간 전· 후의 열물리적 현상을 가장 잘 반영하기 때문이다. 2.1.1 항의 내용을 입력하시오. 여기에 2.1.1항의 내용을 입력하시오. 여기에 2.1.1항의 내용을 입력하시오. 여기에 2.1.1항의 내용을 입력하시오. 여기에 2.1.1 항의 내용을 입력하시오.

3. 뉴로-퍼지 추론 시스템

3.1 시스템 개요

인공신경회로망(Artificial Neural Network)의 학습 능력과 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Control)의 전문가 제어 능력을 결합한 것이 뉴로-퍼지논리제어시스템(Neuro-Fuzzy Logic Control System)이다. 이러한 방식의 시스템은 철저하게 입· 출력 데이터를 바탕으로 하는 퍼지논리제어 시스템을 구성하는데 논리적인 해결책을 제시해 준다. 본 논문에서는 역전파(back propagation) 알고리즘을 이용한 뉴로-학습(neuro learning)을 통하여 퍼지 추론 시스템의 파라미터들을 결정하였다.

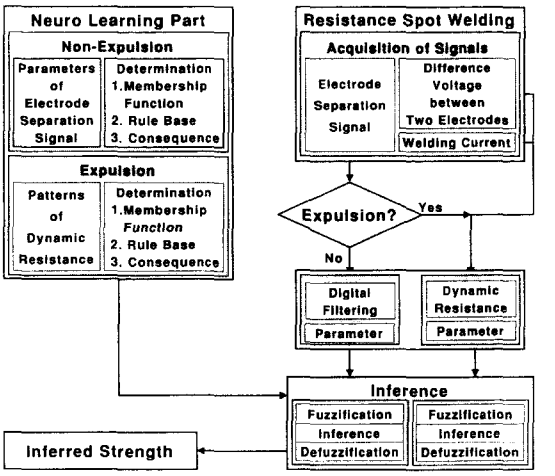


Fig. 10 Schematic diagram of system

Fig. 10에서는 뉴로-퍼지 강도 추론 시스템의 개요도를 보여주고 있다. 퍼지 추론 시스템을 구성하기에 앞서 인공신경회로망에서는 중간날림이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우에 대해 선정된 각각의 파라미터들과 인장-전단강도의 데이터를 이용하여 퍼지 추론 시스템의 구성 요소인 입력변수들의 소속 함수와 퍼지규칙, 후건부의 함수를 결정한다. 학습 및 추론에서 사용된 추론 방식은 Takagi-Sugeno 방식이다. 이렇게 결정된 파라미터들을 이용하여 인장-전단강도의 추론을 위한 퍼지 추론 시스템을 구성한다. 점용접시에 획득된 전극 분리 신호로부터 중간날림 발생의 유무를 판단하여 중간날림이 발생하지 않은 경우에는 디지털 필터를 거친 전극 분리 신호의 4가지 파라미터를 계산하고 중간날림이 발생한 경우에는 두 번째부터 여섯 번째 용접 사이클의 동저항값을 계산하여 퍼지 추론 시스템의 입력으로 보내어지게 되어 추론이 수행된다.

3.2 뉴로-학습 알고리즘

본 논문에서 사용된 뉴로-학습 알고리즘은 오차 역전파 알고리즘으로서 우선 초기 언어정보를 통한 퍼지 추론 시스템의 설계를 통하여 개략적인 추론 시스템의 파라미터 값을 정하고 입· 출력 데이터를 가지고 오차 역전파 알고리즘에 적용하여 퍼지 추

론기의 파라미터를 조율한다.

퍼지 추론방법은 Takagi- Sugeno 방법을 사용하였으며 후건부 멤버쉽 함수를 입출력 선형관계식으로 표현하여 비퍼지화를 추론기에 포함시킨 형태이다. Fig. 11에서는 본 논문에서 사용된 뉴로-학습 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다. 제시된 학습 알고리즘을 적용하기 전에 소속 함수를 구성하는 계수들, 퍼지규칙 후건부에서 정의되는 선형 함수식의 계수들과 같은 초기 파라미터를 설정한다. 초기값으로 결정된 이 파라미터들은 다음의 학습 단계를 거치면서 조율된다.

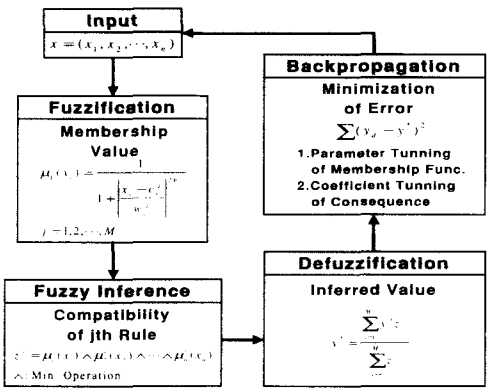


Fig. 11 Flowchart of Neuro-Learning algorithm

첫 번째 단계로서, 학습시키고자 하는 입력 데이터(선정된 각각의 파라미터) $x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$을 입력으로 하여 초기에 구성된 추론 시스템에 입력한다. 두 번째 단계로, 초기에 설정된 퍼지 규칙의 전건부를 이용하여 입력된 각각의 데이터에 대한 소속도(degree of membership)를 결정하게 된다. 본 논문에서는 일반화된 종 형상(bell shape)의 소속 함수를 사용하였으므로 i번째 입력변수의 값 x_i가 퍼지집합 A_i^j에 대응되는 소속도 $\mu_i^j(x_i)$ 값은 다음과 같이 구해진다.

$$\mu_i^j(x_i) = \frac{1}{1+\left|\frac{x_i - c_i^j}{w_i^j}\right|^{2b_i^j}} \qquad (1)$$

세 번째 단계로, j번째 퍼지규칙의 적합도 z^j를 다음과 같이 Min 연산을 사용하여 계산하여 모든 규칙들에 대한 적합도를 구한다.

$$z^j = \mu_1^j(x_1) \wedge \mu_2^j(x_2) \wedge \cdots \wedge \mu_n^j(x_n) \qquad (2)$$
$$j = 1,2,\ldots,M$$

여기서 $\wedge$는 Min 연산, M은 퍼지규칙의 수를 나타낸다. 네 번째 단계에서는, 각 퍼지 규칙에 의해 세 번째 단계에서 계산된 적합도와 후건부 값을 결정된 출력값을 이용하여 최종 추론값 y^*를 다음과 같이 계산한다.

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^{M} y^j z^j}{\sum_{j=1}^{M} z^j} \qquad (3)$$

식 (3)으로부터 구해진 y^*는 퍼지 추론 시스템에서 비퍼지화한 수치 값에 해당한다.

마지막 단계로, 오차를 계산하여 그 오차값이 최소화가 되도록 역전파 알고리즘을 적용한다. 다층 신경회로망에 의한 적응 퍼지 제어기의 파라미터를 미세 조정하는 과정은 입력 데이터 $x_1,x_2,\cdots,x_n$에 대한 출력 y^*를 계산하고 원하는 출력 y_d와의 오차의 제곱의 합을 최소화하도록 역방향으로 소속함수의 위치인 c_i^j와 소속 함수의 폭인 w_i^j 및 후건부의 선형결합식의 계수인 $a_1^j, a_2^j, \ldots, a_n^j$ 을 조정한다. 전체 오차값은 다음과 같이 정의된다. 여기서, L은 학습 데이터 집합의 수를 나타낸다.

$$E = \sum_{m=1}^{L} (y_d - y^*)^2 \qquad (4)$$

만일 조정해야하는 파라미터가 q라면 파라미터의 변화량은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta q = -\eta \frac{\partial E}{\partial q} \qquad (5)$$

여기서 η는 학습률(learning rate)로서 다음과 같이 정의되며 여기서, k는 step size를 나타낸다.

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_p \left(\frac{\partial E}{\partial p}\right)^2}} \qquad (6)$$

3.3 퍼지 추론 시스템

뉴로-학습을 통하여 결정된 소속 함수, 퍼지 규칙 및 후건부의 선형결합 함수를 이용하여 퍼지 강도 추론 시스템을 구성하였다. Fig. 12는 중간날림이 발생하지 않은 경우의 입력 소속 함수를 나타내

고 있고, Fig 13은 중간날림이 발생한 경우의 입력 소속 함수를 나타내고 있다. 두 경우 모두 퍼지규칙의 수를 최소화하기 위하여 각 변수에 대한 소속함수의 수를 두 개로 설정하여 학습을 시킨 결과이다. Table 4와 Table 5는 중간날림이 발생한 경우와 중간날림이 발생하지 않은 경우의 학습된 퍼지 규칙을 각각 나타내고 있다. Table 5의 각 항목이 나타내는 의미를 중간날림이 발생하지 않은 경우의 첫 번째 규칙을 예로 들어 나타내면 다음과 같다.

IF (NEIP_1 is Small) and (NEIP_2 is Small) and (NEIP_3 is Small) and (NEIP_4 is Small)

THEN $(y_1 = -1130 + 812.2NEIP_1 - 31.14NEIP_2 - 967.7NEIP_3 - 167NEIP_4)$

이 규칙은 『NEIP_1, NEIP_2, NEIP_3, NEIP_4가 모두 Small 이면 첫 번째 규칙에 대한 비퍼지화된 출력을 후건부에 주어진 식으로 하라』라는 의미이다. 전건부의 언어적인 표현으로부터 각각의 입력에 대한 소속도는 식 (1)을 이용하여 구하고 구해진 네 개의 소속도로부터 Min 연산자를 이용하여 첫 번째 퍼지규칙의 적합도를 계산한다. 후건부의 선형 결합식으로부터 각각의 입력값을 대입하여 첫 번째 퍼지규칙에 대한 출력값을 계산한다.

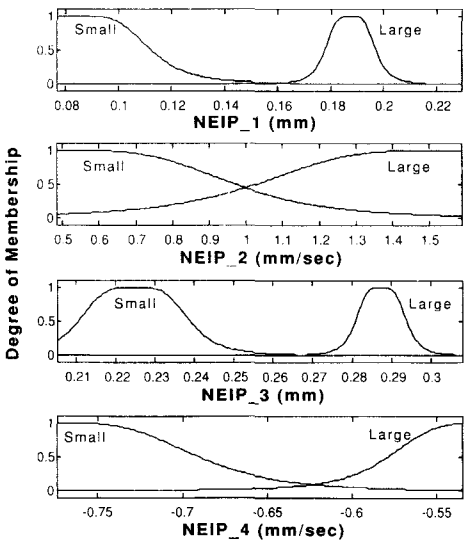


Fig. 12 Input membership function-non-expulsion

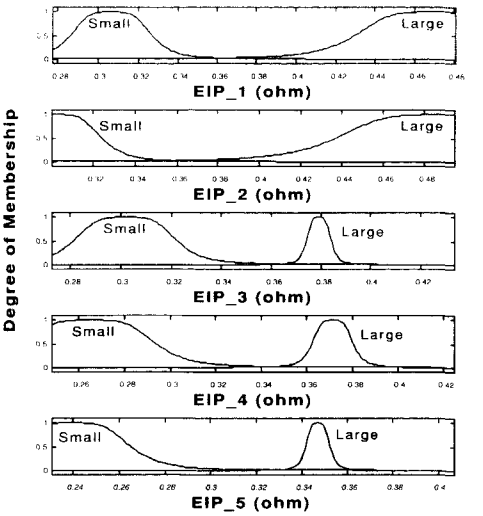


Fig. 13 Input membership function-expulsion

Table 4 Fuzzy rule base-non-expulsion

No.	NEIP 1	NEIP 2	NEIP 3	NEIP 4	Parameters of Consequence				
					C_0^j	C_1^j	C_2^j	C_3^j	C_4^j
1	S	S	S	S	-1130	812.2	-31.14	967.7	-1671
2	S	S	S	L	-59.97	630.9	-68.24	888	-295.9
3	S	S	L	S	342.4	-4491	-435.5	2048	-639
4	S	S	L	L	968.4	-354.8	-1279	214.2	-684.5
5	S	L	S	S	5071	785.3	-933	-2350	4854
6	S	L	S	L	857.5	833	-149.8	-1583	220.8
7	S	L	L	S	3273	2196	-39.96	-2602	3129
8	S	L	L	L	-1701	-526.9	-858.1	-428	831.2
9	L	S	S	S	3339	670.8	-149.1	-1790	4064
10	L	S	S	L	-1096	2082	-1061	5042	-1040
11	L	S	L	S	860.9	3066	-1110	3322	1336
12	L	S	L	L	696.6	372.5	-467.7	450.4	-701.7
13	L	L	S	S	1064	-1160	124.7	-2563	-116.7
14	L	L	S	L	615.4	-266.3	-818.8	1497	-811.7
15	L	L	L	S	-581.6	-1037	-126.1	-1109	-2400
16	L	L	L	L	94.75	794.8	683.9	358.6	-957.1

한번의 용접을 통한 입력값에 대해 위의 방법으로 모든 퍼지규칙에 적용하여 중간날림이 발생하지 않은 경우에는 총 16개, 중간날림이 발생한 경우는 총 32개의 적합도와 후건부의 출력값을 계산한 다음 최종 추론 강도는 식 (3)을 이용하여 구한다.

4. 추론 결과

구성된 퍼지 추론 시스템을 이용하여 점용접재의 인장-전단강도를 추론하였다. 먼저 중간날림이

발생하지 않은 경우와 중간날림이 발생한 경우를 분리하여 추론 결과를 살펴보고 두 가지 경우를 모두 합한 결과에 대해 기술하였다.

Fig. 14는 중간날림이 발생하지 않은 경우에 대한 추론 결과를 실제 인장-전단강도와 추론된 인장-전단강도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 여기에 신형 회귀분석을 적용한 결과 0.99779988의 상관관계와 2.65749083의 표준 오차를 가지고 추론되었음을 알 수 있었다. KS 규격에 따르면 두께 0.8mm인 전기 아연도금 강판의 경우 기준강도를 400kgf로 정하고 있다. 이 400kgf를 기준으로 추론된 결과를 가지고 용접재의 용접 품질에 대한 합격· 불합격 판정을 실시하였다. 그래프의 빗금 친 영역 중 A부분은 실제 불합격인 용접재를 합격으로 오판하게 되는 부분이고 B부분은 실제 합격인 용접재를 불합격으로 오판하게 되는 부분이다. 추론 결과에 따르면 실제 합격인 용접재를 불합격으로 추론한 경우는 총 80개의 시편 중 1개의 시편으로 1.25%의 오판율을 나타내었다. 그러나 불합격인 용접재를 합격으로 추론한 경우는 하나도 없었다.

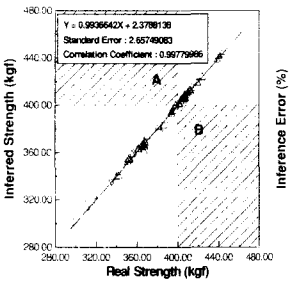


Fig. 14 Inference result -non-expulsion

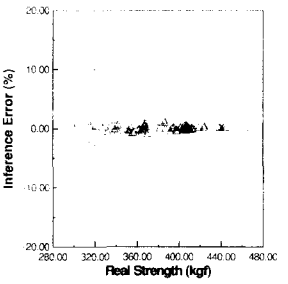


Fig. 15 Inference error -non-expulsion

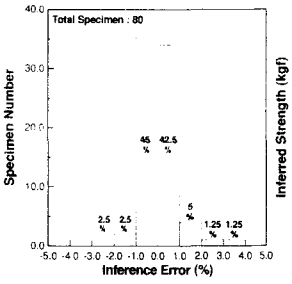


Fig. 16 Error distribution -non-expulsion

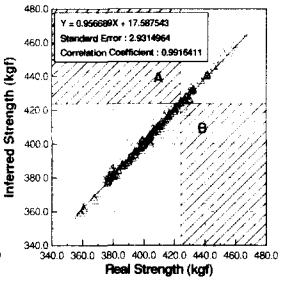


Fig. 17 Inference result -expulsion

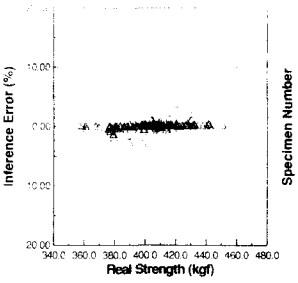


Fig. 18 Inference error -expulsion

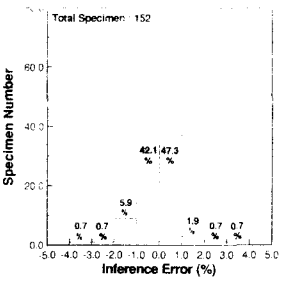


Fig. 19 Error distribution -expulsion

Fig. 15는 중간날림이 발생하지 않은 경우에 대한 추론 오차를 실제 인장-전단강도에 대해 그래프로 나타낸 것이다. 추론 오차는 다음의 식으로 정의된다.

$$\text{Inference Error}(\%) = \frac{R \cdot S - I \cdot S}{R \cdot S} \times 100 \quad (7)$$

(RS : Real Strength, IS : Inference Strength)

Fig. 16은 중간날림이 발생하지 않은 경우에 대한 추론된 강도의 오차 분포를 나타내는 그래프이다. 전체시편의 87.5%가 ±0.1%의 오차범위 이내로 추론되었으며 모든 시편에 대해 ±4% 오차범위 이내에서 추론되었다.

Fig. 17은 중간날림 발생한 경우에 대한 추론 결과를 실제 인장-전단강도와 추론된 인장-전단강도를 비교하여 나타낸 그래프이며 0.9918411의 상관관계와 2.9314964의 표준 오차를 가지고 추론되었음을 알 수 있었다. 불합격인 용접재를 합격으로 오판하게 되는 경우는 총 152개의 시편 중 5개로서 3.29%이고, 합격인 용접재를 불합격으로 오판하게 되는 경우는 총 시편 중 1개로서 0.66%이다.

Fig. 18은 중간날림이 발생한 경우에 대한 추론 오차를 실제 인장-전단강도에 대해 그래프로 나타낸 것이고, Fig. 19는 추론된 강도의 오차 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난 것처럼 모든 시편에 대해 ±4% 이내의 추론오차를 가지고 있으며 총 152개의 시편 중 89.4%인 136개의 시편이 ±1%의 오차범위 이내로 추론되었다.

중간날림이라는 현상이 예측하기 어렵고 정상적인 상태보다 더 복잡한 열물리적 현상을 유발한

나는 것을 감안해볼 때 비교적 높은 신뢰도를 가지는 추론 결과라 판단된다. Fig. 20은 중간날림이 발생하지 않은 경우와 발생한 경우 모두를 합한 결과를 나타내고 있다. 불합격인 용접재를 합격으로 오판하게 되는 경우는 총 232개의 시편 중 6개로서 2.59%이고, 합격인 용접재를 불합격으로 오판하게 되는 경우는 1개로서 0.43%이다.

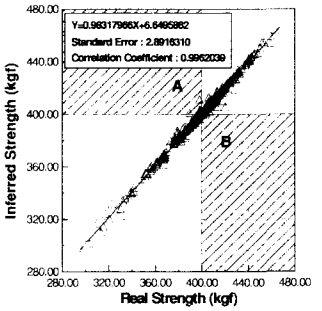


Fig. 20 Inference result-total

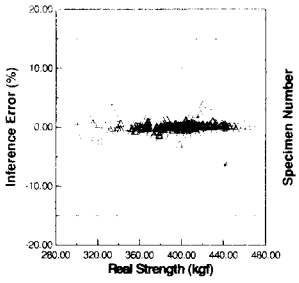


Fig. 21 Inference error -total

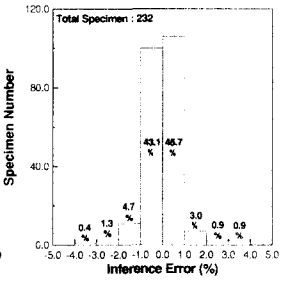


Fig. 22 Error distribution -total

Fig. 21은 전체의 시편에 대하여 추론 오차를 실제 인장-전단강도에 대해 그래프로 나타낸 것이고. Fig. 22는 추론된 강도의 오차 분포를 나타낸 그래프이다. 총 232개의 시편 중 88.8%인 206개의 시편이 ±1% 이내의 추론 오차를 나타내고, 앞에서도 살펴보았듯이 모든 시편에 대해 ±4%이내의 오차를 가지고 추론되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 점용접 공정의 품질 감시 변수를 중간날림이 발생한 경우에는 전극 분리 신호로, 발생하지 않은 경우는 동저항 파형으로 선정하여 뉴로-퍼지 강도 추론 시스템을 구성하였다. 그 결과 중간날림이 발생하지 않은 경우와 발생한 경우 모두에 대하여 ± 4%의 추론오차 이내로 추론 가능하였고 전체 시편의 88.8%가 ± 1%의 오차범위 이내로 추론되었다. 그러나 중간날림이 아주 심한 경우에는 그 품질을 추론하는 방법이 일반화되기에는 무척 어렵다.

점용접 공정 중의 열물리적 현상이 매우 복잡하고 예측하기 어렵다는 사실과 실제 산업 현장에서 사용되는 점용접 조건의 대부분이 중간날림이 발생하는 경우임을 고려해볼 때 본 논문에서 제안된 추론 시스템을 이용하여 온라인 점용접 품질 평가 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. "Welding Handbook," American Welding Society Publication, Volume 3., New York, N.Y., 1996.
2. The Welding Institute, "Resistance Welding Control and Monitoring," Cambridge, 1977.
3. Gould S. A., Sorensen C. D., Ulrish K. T., and Eaga T. W., "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds," Welding Journal, Dec., pp. 378-385, 1987.
4. Rokhlin S. I., and Adler L., "Ultrasonic Evaluation of Spot Welding Quality," Welding Journal, Jul., pp. 191-200, 1985.
5. Gedeon S. A., Sorensen C. D., Ulrish K. T., and Eagar T. W., "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds," Welding Journal, Dec., pp. 378-385, 1987.
6. Wood R. T., Bauer L. W., Bedard J. F., Bernstein B. M., Czechowski J., D'Andrea M. M., and Hogle R. A., "A Closed Loop Control System for Three-Phase Resistance Spot Welding," Welding Journal, Dec., pp. 26-30, 1985.
7. 이정우, "저항 점용접에서 전극팽창파형과 인공신경회로망을 이용한 용접질 감시 시스템," 명지대학교 석사 논문, 1993.
8. 박종우, "저항 점용접에서 동저항 파형과 인공신경회로망을 이용한 용융부의 크기 추정," 명지대학교 석사 논문, 1993.

9. 김주석, 이재익, 이상룡, "퍼지 추론을 이용한 저항 점용접 부위의 품질 평가 알고리즘," 대한기계학회 논문집, A권, 제22권, 제3호, pp. 644-653, 1998.
10. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control," IEEE Trans. on SMC, 15-1, pp. 116-132, 1985.
11. T. J, Procyk and E. H. Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller," Automatics, Vol. 8, pp. 687-697, 1976.
12. Jyh-Shing Roger Jang, "Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol.23, No3, pp. 665-684, May/Jun, 1993.
13. 권영섭, "뉴로-퍼지 제어 시스템과 그 응용," The Institute of Control, automation and Systems Engineers, Korea, pp. 109-117, 1995.
14. Ronald R. Yager and Dimitar P Filev, "Approximate Clustering Via the Mountain Method," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 24, No. 8, August, 1994.
15. Kenji ARAKI, Xingqiao CHEN, "On-line Control of a Spot Welding Machine by Using a Fuzzy Adaptive Controller," Transactions of the IEE of Japan C, Vol. 117-C No. 9, September, 1997.
16. Xingqiao Chen , Kenji Araki, "Fuzzy Adative process control of Resistance Spot Welding with a Current Reference Model," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, 1997.