

퍼지추론을 이용한 저항 점용접부위의 품질평가 알고리즘

김주석* · 이재익** · 이상룡***

(1997년 8월 11일 접수)

Quality Assurance Algorithm Using Fuzzy Reasoning for Resistance Spot Weldings

Joo Seok Kim, Jae Ik Lee and Sang Ryong Lee

Key Words : Resistance Spot Weld(저항 점용접), Welding Quality Monitoring System(용접 품질 감시시스템), Fuzzy Inference(퍼지추론), Electrode Movement(전극이동), Diagnostic Algorithms(진단 알고리즘)

Abstract

In resistance spot weld, the assurance of weld quality has been a long-standing problem. Since the weld nuggets of resistance spot welding form between the workpieces, visual detection of defects is usually impossible. Welding quality of resistance spot welding can be verified by non-destructive and destructive inspections such as X-Ray inspection and testing of weld strength. But these tests, in addition to being time-consuming and costly, can entail risks due to sampling basis. The purpose of this study is the development of the monitoring system based on fuzzy inference, aimed at diagnosis of quality in resistance spot welding. The fuzzy inference system consists of fuzzy input variables, fuzzy membership functions and fuzzy rules. For inferring the welding quality(strength), the experimental data of the spot welding were acquired in various welding conditions with the monitoring system designed. Some fuzzy input variables-maximum, slope and difference values of electrode movement signals-were extracted from the experimental data, It was confirmed that the fuzzy inference values of strength have a $\pm 5\%$ error in comparison with actual values for the selected welding conditions(9~10.5 KA, 10~14 cycle, 250~300 kg_f). This monitoring system can be useful in improving the quality assurance and reliability of the resistance spot welding process.

1. 서 론

저항 점용접 공정으로 생산되는 구조물의 용접품질은 강도, 견고성, 안전성 및 내진동성 등의 성능을 좌우하므로 용접부위에 대한 엄격한 품질관리가

요구되고 있다.

저항 점용접의 용접품질은 초음파 탐상검사 및 X-ray를 이용한 비파괴검사와 표준시편을 이용한 전단/인장강도의 확인 또는 용접 단면을 절단하여 용융부의 크기와 형상을 통한 파괴검사가 수행되어 지나, 이러한 검사방식은 시간과 경제적인 비용손실이 크며, 대량 생산로트의 품질을 보증하기에는 위험성이 높다.⁽¹⁾ 따라서 제품의 품질수준을 향상시키고 경쟁력을 높이기 위해서는 용접부위에 대한

*국방품질관리검사소

**회원, 대우중공업(주)

***회원, 경북대학교 기계공학부

실시간적인 온라인 비파괴 검사시스템의 도입이 요구된다.

일반적으로 용접부의 품질평가 기준이 되는 전단-인장강도는 용융부의 크기와 형상에 비례한다. 이러한 용융부의 형성은 용접전류, 용접전압, 전극가압력, 용접재료의 표면상태 및 전극의 마모상태, 용접재료의 두께, 용접시간 등의 각종 용접변수들에 의해 좌우된다.⁽²⁾ 용융부 형성과정에서 용접부위의 온도변화, 전극 사이의 동저항의 변화 및 용융부의 열팽창에 의한 전극분리현상 등이 수반되며, 이러한 용접 공정변수를 관찰하여 용접품질을 파악하는 것이 일반적인 경향이다. 그동안 용접부위의 온도변화,⁽³⁾ 유한차분법을 이용한 용융부 해석⁽⁴⁾ 및 초음파를 이용한 용융부 크기 추정,⁽⁵⁾ 전압을 회귀모델로 분산해석하는 방법⁽²⁾ 등을 통한 용접품질 예측에 관한 연구가 있었으나 실제 적용상의 문제와 실시간의 용접현상 모델링의 불가능 등 많은 문제점을 내포하고 있다.

동저항 및 용융부의 열팽창에 의한 전극분리현상이 용접품질의 감시변수로 이용될 수 있음을 보여준 Gedeon et al.⁽⁶⁾의 연구 이후 동저항 및 전극분리현상을 감시변수로 응용한 연구가 Waller 등에 의하여 활발히 진행되어 왔다. Wood et al.⁽⁷⁾은 전극분리 신호의 파형을 용접 초기의 전극분리 변화율(초기 경사)과 전극분리의 최대치 및 용접 후기의 전극분리 변화율(후기 경사)의 세가지 매개변수로 구분하여 용융부의 크기 추정에 비선형 최소자승법을 사용하였다. 하지만 이 방법에서는 구체적인 추정기법이나 결과 및 추정오차에 대한 언급이 없다. 또한 비선형 함수관계를 실험적으로 규명하는 분야에서 많이 응용되고 있는 인공 신경회로망을 이용하여 전극분리 신호현상과 동저항 변화에 대한 용접질과의 관계를 규명한 연구^(8~10)는 각각의 용접변수를 이용하였으므로, 여러 가지 변수에 의하여 용접품질에 영향을 주는 것을 반영하지는 못하였다. 또한 이 연구에서는 각각의 파형을 전체적으로 입력변수로 사용하여 학습하였으므로 실제로 외란이 많이 발생하는 경우에 있어서는 패턴학습이 제대로 이루어지지 않는 단점을 가지고 있다고 하겠다. 따라서 이러한 경우 고른 데이터 분포를 가지지 못하고 국부적인 불연속점에 빠질 수 있다.

이상의 연구 결과를 종합하여 본다면, 저항 점용접은 단순한 수학적 모델링이나 실험적 경험식 등으로 파악하기에는 복잡한 열물리적 현상을 수반

하며, 비선형적으로 연관되어 있어 각각의 변수로 추정한다는 것은 그 한계성이 있다고 볼 수 있다. 또한 저항 점용접의 특성상 용접조건을 동일하게 설정하더라도 미세한 용접 공정변수의 변화에도 민감하게 반응하므로 같은 용접품질을 보장할 수 없다.

본 연구에서는 퍼지추론기법을 이용한 저항 점용접품질 감시시스템을 개발하고자 한다. 대표적인 공정 감시변수인 전극분리 신호와 용접 입력조건인 용접전류, 용접시간 및 가압력으로부터 저항 점용접의 강도를 퍼지추론하고자 하였다. 이로서 저항 점용접부위의 실시간적인 온라인 비파괴 검사시스템을 구성할 수 있도록 하였다.

2. 저항 점용접의 특성

저항 점용접시 발생하는 열물리적 현상으로서 피용접물에 가해지는 전기적 에너지, 저항의 변화(동저항), 용접물이나 전극의 열적 변화, 그리고 용융부의 열팽창으로 인한 전극분리현상 등이 있으며, 이 현상들을 용접부의 강도를 추론하는 매개변수로 사용될 수 있다. 특히, 전극분리현상은 가장 효과적인 매개변수로서 이용될 수 있다.

전극분리현상이란 저항 점용접시 용접전류가 흐르기 시작하면서 두 금속판 사이의 접촉저항으로 인해 생긴 열때문에 금속판이 열팽창을 일으키고, 그로 인하여 전극이 서로 벌어지도록 힘을 받아 벌어지는 현상이다. 용접이 진행되면서 용융부가 형성되기 시작하면 용융부 주위의 조직은 열영향을 받아 연화되며, 이후 연화된 조직이 전극 가압력을 이기지 못하고 소성변형을 발생하여 멀어졌던 전극이 다시 가까워진다. 이러한 용접 공정중에서 전극의 움직임을 검출한 것이 전극분리 신호의 파형이다. 실제 용접 공정에서 발생하는 용접 전압의 변동, 전극 가압력의 변동, 전극의 마모상태, 용접재료의 표면상태, 분류효과(shunt effect) 등의 외란의 영향에 의해 용융부로 흐르는 유효 전류의 변동을 야기시켜 용접질을 저하시키며, 전극분리 신호의 파형변화에 영향을 준다. 따라서 전극분리 신호의 파형을 측정함으로써 위와 같은 현상들을 간접적으로 모니터링할 수 있다.

Fig. 1에서 일반적인 전극분리 신호의 파형과 용접이 진행함에 따른 용융부의 형성 및 전개과정을 도시하였다. 그림에서 구간 1은 전극 가압력에 의

하여 시편과 시편 사이의 접촉부가 더욱 밀착함으로써 발생하는 이동상태를 나타낸다. 구간 II는 주울(Joule) 열에 의한 열팽창(thermal expansion)에 의한 것으로, 이 중에서 지점 2는 시편과 시편의 접촉면 및 전극과 시편의 접촉면에서의 용융된 아연도금 피막의 급속한 이동에 기인한 것이며, 또한 도금 강재에서만 볼 수 있는 구간으로 도금량이 많을수록 현저하게 나타난다. 이 구간에서는 전극분리 신호가 거의 선형적으로 증가하며, 이 증가구간에서의 용접시간에 대한 전극분리 신호의 변화율이 초기 변화율이다. 이 구간의 초기에서 용융부가 형성되기 시작하며 계속되는 열입력에 의해 용융부가 급속히 확산되면서 용융부 주위의 연화된 조직이 전극 가압력을 지탱하지 못하고 전극분리 신호의 증가율이 서서히 감소하여 이 구간의 끝에서 전극분리 신호의 최대점에 이른다. 구간 III에서는 구간 II에 이어 계속되는 용융부의 확산으로 용융부 주위의 연화된 조직이 전극 가압력을 더 이상 지탱하지 못하고 함입(embedding)이 일어나 전극이 서로 가까워지는 현상을 보이며, 이 구간에서의 용접시간에 대한 전극분리 신호의 변화율이 후기 변화율이다. 열입력이 과도한 경우에는 용출현상(expulsion)이 발생하여 용접부의 용접강도를 저하시키는 원인이 되기도 한다.

전극분리 신호의 변화는 서로 같은 두께의 시편에서도, 전극 가압력과 열입력에 따라 서로 다른 파형으로 나타나는데, 이러한 현상은 용접조건의 변화 및 여러 가지 외란에 민감하게 반응하여 용융부의 형성에 영향을 주기 때문이다.

3. 퍼지추론

본 연구의 목적은 실시간으로 점용접부의 품질을 온라인으로 감시할 수 있는 시스템을 개발하여 용접도중 발생할 수 있는 불량률을 작업 직후에 작업자가 확인하고, 불량발생에 대하여 적절한 행위를 취할 수 있도록 하는 것이다. 이를 위해 먼저 용접실험에서 얻어진 데이터와 인장강도 시험 결과를 축적한 뒤, 그 데이터들을 바탕으로 용접강도를 추론할 수 있는 퍼지알고리즘을 개발하였다.

용접강도에 영향을 미치는 용접변수로는 열입력의 크기를 나타내는 전극팽창 파형의 최대값(max)과 열입력속도를 나타내는 전극팽창 파형의 평균팽창률(slop), 그리고 용출(expulsion) 발생유무를

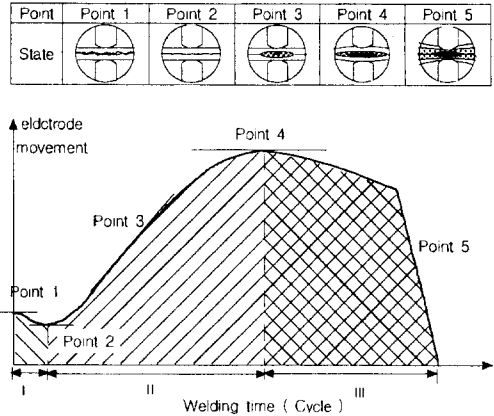


Fig. 1 Typical electrode movement pattern during spot welding process.

나타내는 최대·최소값의 차이(difference), 용접전류(current), 가압력(force), 용접시간(time)을 들 수 있다.

이러한 용접변수들의 영향을 고려하여 용접부의 강도에 영향을 미치는 전극팽창 파형의 최대값, 평균속도, 차이, 용접전류, 용접시간, 가압력을 퍼지 제어기의 입력변수로 설정하였다. 이렇게 구성된 퍼지추론 시스템은 다차원 입력공간을 가지는 복잡한 시스템이 되어 이를 바탕으로 추론하기 위한 규칙의 수가 필요이상으로 많아지므로 불필요한 규칙들의 수를 줄이기 위하여 퍼지 클러스터링(fuzzy clustering) 기법을 이용하여 입력공간을 분할하였다. 여기서는 퍼지 C means Clustering 기법을 사용하였다.

데이터 X 에 대한 입력공간을 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 라 하고, 구하고자 하는 클러스터의 개수를 c 라 하고 하자. 이 때 $c < n$ 이고, cluster의 중심은 식 (1)로 주어진다.

$$x_i^* = \frac{\sum_{k=1}^n v_{ik}^* x_k}{\sum_{k=1}^n v_{ik}^*}, \quad i = (1, c) \quad (1)$$

Cluster 중심에 대한 퍼지 부분집합의 멤버쉽 등급은 식 (2)로 구할 수 있다.

$$v_{ik}^* = 1 / \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_k - x_i^*\|^m}{\|x_k - x_j^*\|^m} \right) \right], \quad i = (1, c), \quad k = (1, n), \quad m \geq 1 \quad (2)$$

여기서, $d_{ik} = \|x_k - x_i^*\|$ 라고 정의하면, 이는 k

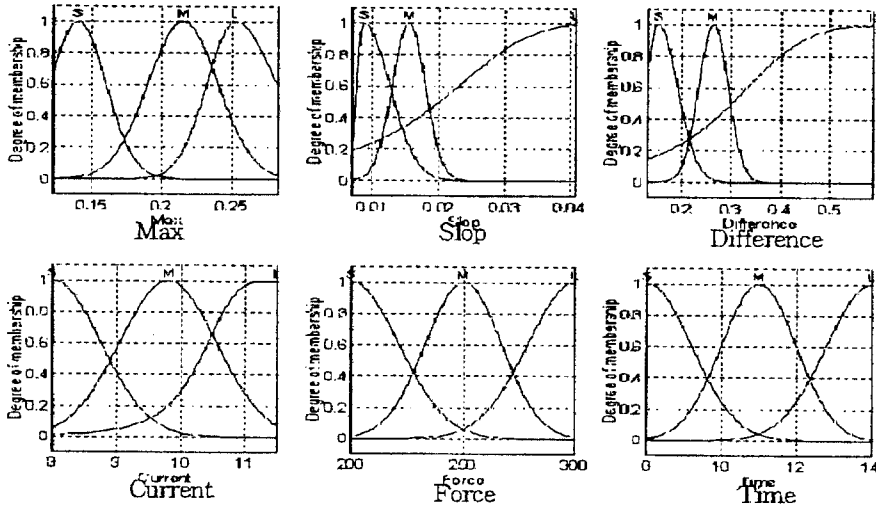


Fig. 2 Proposed membership functions of the input variables.

번째 데이터에서 i 번째 클러스터의 중심까지의 거리를 의미한다. 이때 $d_{ik}=0$ 을 만족하는 I_k 를 다음과 같이 정의한다.

$$I_k = \{ i \mid 1 \leq i \leq c ; d_{ik} = \|x_k - x_i^*\| = 0 \}$$

또한, $I_k^c = \{ 1, 2, \dots, c \} - I_k$ 를 정의한다.

이 때 I_k 가 공집합이 되지않는다면, v_{ik}^* 는 다음의 식 (3)을 만족한다.

$$v_{ik}^* = 0, \quad \forall i \in I_k^c \text{ and } \sum_{i=1}^c v_{ik}^* = 1 \quad (3)$$

이렇게 얻어진 클러스터의 중심은 식 (4)의 퍼지 클러스터링 기법의 목적함수를 최소화시킨다.

$$J_m = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c v_{ik}^m \|x_k - x_i\|^2, \quad (m > 1) \quad (4)$$

이렇게 구하여진 cluster의 중심을 다입력 퍼지 모델에서 입·출력 멤버쉽함수의 중심으로 사용하였으며, 이들에 대한 입력데이터의 소속함수는 가우스 분포형을 사용했다.

퍼지클러스터링기법에 의해 구해진 클러스터의 중심을 집합의 평균으로 하는 소속함수를 정의하기 위해서 가우스 분포함수를 사용하였다.

가우스 분포함수의 평균과 분산은 퍼지제어기의 출력에 영향을 크게 미치는 값들이며, 이 두 값은 정의함으로써 소속함수를 정의할 수 있다.

가우스 분포형태의 퍼지 소속함수는 평균(C_i)과 분산(σ^2)을 갖는

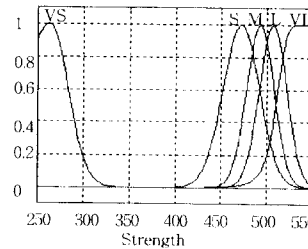


Fig. 3 Proposed membership functions of the output variables.

$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

의 함수로 주어지며, 여기서 평균값은 퍼지 클러스터링의 중심 (C_1, C_2, C_3, \dots)을 사용하였다.

이렇게 구하여진 입력변수들의 소속함수(membership function)는 Fig.2와 같이 각 입력변수마다 S(small), M(medium), L(large)의 3개로 설정하였으며, 출력변수인 용접부 강도의 소속함수는 Fig.3과 같이 VS(very small), S(small), M(medium), L(large), VL(very large)의 5개로 설정하였다.

먼저 센서 시스템에 의하여 획득된 입력변수의 값들은 퍼지화 도입부에서 적절한 퍼지집합에서 소속함수를 가지는 퍼지숫자로 나타낸다. 입력변수들의 값이 주어지면 출력변수 값인 용접강도(strength)는 전방향 추론에 의하여 주어진다. 출력변수값 용접강도(strength)의 소속 정도는 비퍼지화 작업을 통하여 정량적인 값으로 나타낸다. 이렇게 입력 퍼지변수가 결정되고 제어규칙이 결정되면 입력공

Table 1 Look-up table of the fuzzy rules.

| Rule no. | MAX | Slop | Differ-ence | Curr-ent | Force | Time | Stren-gth |
|----------|-----|------|-------------|----------|-------|------|-----------|
| 1 | L | L | L | L | L | S | S |
| 2 | M | L | L | L | L | S | S |
| 3 | M | L | M | L | L | S | S |
| 4 | M | L | L | L | L | S | VL |
| 5 | S | L | S | L | L | S | S |
| 6 | S | L | S | L | L | S | L |
| 7 | S | S | S | S | S | M | VS |
| 8 | M | M | M | M | M | S | S |
| 9 | L | M | M | M | M | S | S |
| 10 | L | L | M | M | M | S | S |
| 11 | L | L | L | M | M | S | S |
| 12 | L | M | M | M | M | M | L |
| 13 | M | M | M | M | M | M | M |
| 14 | L | M | M | M | M | M | M |
| 15 | M | M | L | M | M | M | L |
| 16 | M | S | M | M | M | M | M |
| 17 | M | M | M | M | M | L | VL |
| 18 | M | M | L | M | M | L | M |
| 19 | L | M | L | M | M | L | VL |
| 20 | L | M | L | M | M | L | L |
| 21 | M | M | S | M | M | L | L |
| 22 | L | M | M | M | S | M | M |
| 23 | M | S | M | M | S | M | L |
| 24 | M | S | M | M | S | M | L |
| 25 | L | M | M | M | S | M | L |
| 26 | M | S | S | M | S | M | VL |
| 27 | L | S | M | M | S | M | L |
| 28 | L | S | M | M | L | M | L |
| 29 | L | S | M | M | L | M | M |
| 30 | M | M | S | M | L | M | M |
| 31 | M | M | L | M | L | M | S |
| 32 | L | M | M | M | L | M | L |
| 33 | M | L | M | L | S | M | VL |
| 34 | M | L | L | L | S | M | VL |
| 35 | M | L | S | L | S | M | VL |
| 36 | L | L | L | L | S | M | M |
| 37 | L | L | M | M | M | L | VL |
| 38 | M | M | S | M | M | L | VL |

간이 정의되는데 이 입력 공간의 분할은 Table 1의 퍼지규칙에 의하여 나누어진다.

입력함수인 Max(mm)는 전극팽창 파형의 최대값을 의미하며, Slop(mm/sec)는 전극팽창 파형의 변화율을, Difference(mm)는 전극팽창 파형의 최대값과 최소값의 차이를 의미한다.

Force(kgf)는 가압력을 의미하고, Current(A)는 용접전류를 의미하며, Time(cycle)은 통전시간동안의 전류파형의 정현파의 갯수를 의미한다.

이상의 제어규칙 추출은 용접실험을 통하여 얻은 데이터와 인장강도시험에서 얻은 데이터를 바탕으로 Table 1과 같이 작성하였다. 이들 중 규칙 1이 의미하는 바는 다음과 같다.

“If(Max is Large) and (Slop is Large) and (Difference is Large) and (Current is Large) and (Force is Large) and (Time is Small) then (Strength is Small)”을 의미한다.

이 때 전체 제어규칙을 R이라고 하면 각 규칙의 합집합으로 주어질 수 있다.

$$R = \text{rule 1} \cup \text{rule 2} \cup \text{rule 3} \dots, \cup \text{rule 38} \\ = \cup R_i$$

용접전류의 증가는 용융부 직경(nugget diameter)과 용접강도의 증가를 가져오며, 용출이 일어나면 더 이상 강도가 증가하지 않고 오히려 감소한다. 전극 가압력의 증가는 접촉저항의 감소를 가져오므로 접촉표면의 열생성이 저하하여 용접강도를 감소시킨다. 따라서 용접전류가 클 때 가압력도 크게 하지 않으면 용융부를 잘 형성하지 못하고 스패터(Spatter), 기포 등의 결함을 발생하며 용접전류가 적을 때 가압력도 함께 작게 하지 않으면 통전면적이 커져 용착불량이 발생한다. 그리고 용접시

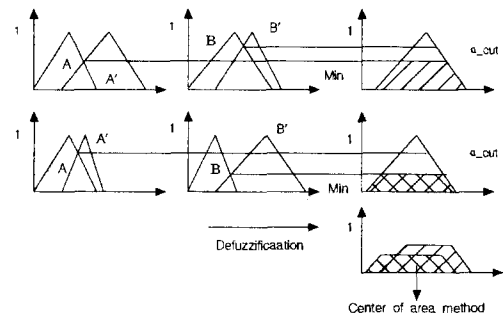


Fig. 4 Defuzzification scheme using a center of area method.

간의 증가는 입계시간이 될 때까지 용접강도의 증가를 가져오고 입계시간이 지나면 더 이상 용접강도에 영향을 미치지 않는다. 이러한 데이터들을 바탕으로 한 저항 점용접의 특성들을 제어규칙으로 나타내었다.

다음으로 해당하는 규칙에 따라 의사결정(추론) 과정, 즉 퍼지추론과정을 거치고, Min-Max 합성자 연산을 이용하여 적합도(α)를 계산하고, 비퍼지화 작업을 통해 용접강도 수치로 변환한다. 비퍼지화 방법은 면적중심법을 사용하였으며, 계산 방법은 다음과 같다.

$$\text{용접강도} = \frac{\int C'(\omega) \omega d\omega}{\int C'(\omega) d\omega}$$

Fig. 4는 이러한 퍼지규칙에 의하여 주어진 조건들로부터 용접강도를 추론하는 과정을 보여주고 있다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험장치

저항 점용접의 매개변수 측정을 위한 실험장치는 용접기, 매개변수 측정센서부, 이들 센서로부터 얻어지는 신호를 A/D 변환기를 통하여 PC로 보내주고 용접조건의 설정을 위하여 PC와 용접기의 타이머를 연결할 수 있는 인터페이스 부분, 획득한 데이터의 처리 알고리즘 및 PC 등으로 구성하였으며, 개략도는 Fig. 5와 같다.

본 실험에서 사용된 용접기는 (주)조흥전기사의 50 KVA, 정전류방식의 즉답식 저항 점용접기로서 가압시간, 용접시간, 유지시간 및 용접전류는 용접기에 부착된 타이머에 의하여 설정된다.

측정 매개변수로서는 동저항 확인을 위한 전압, 전류 변화와 전극분리 신호 및 가압력이다. 전류는 토로이드(toride) 센서를 이용하여 전극주위의 유

도기전력으로 간접 측정하였으며, 전극분리 신호는 비접촉 근접센서로 측정하였다.

전극은 산업현장에서 주로 사용되고 있는 Cu-Cr (99.2%-0.8%) 합금의 봉을 Truncade cone type (Di=6 mm, Do=16 mm, L=70 mm)으로 만들어 사용하였다. 용접 시편은 자동차 구조에 많이 사용되고 있는 두께 0.8 mm 전기 아연도금 강판으로 용접강도 확인을 위해 KS 규정에 따라 길이 10 mm, 넓이 30 mm의 크기로 제작하여 사용하였다.

또한 용접조건을 용접기의 타이머에 전송하고, 근접센서로부터 얻어지는 전극팽창 신호와 Toroid coil에서 얻어지는 데이터를 화면에 표시하여 용접현상을 체크할 수 있도록 모니터링 시스템을 개발하였으며, 이 모니터링 시스템은 작업자가 용접기와 연결된 PC상에서 용접공정의 확인이 용이하도록 윈도우즈용 프로그램 개발도구인 visual basic을 이용하여 시각화하였다.

4.2 실험방법

PC에서는 비주얼 베이직으로 작성된 모니터링 프로그램을 통하여 용접기의 타이머에 신호를 보내주어 원하는 용접조건을 설정하였으며, 용접중 발생하는 각종 용접 특성신호는 인터페이스 부분에서 펄스신호로 바꾸어 A/D 변환기를 통하여 PC로 보내어지고 PC상에서는 비주얼 베이직으로 작성된

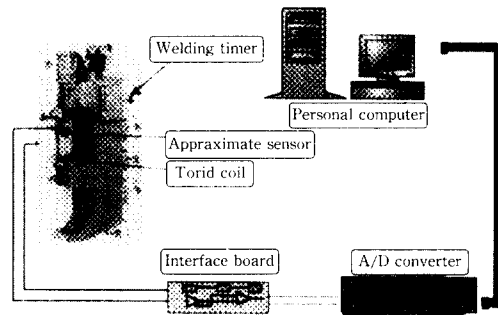


Fig. 5 Schematic diagram of the welding.

Table 2 Welding conditions used in the experiment.

| Welding condition | Welding time T1 | | | Welding time T2 | | | Welding time T3 | | |
|-------------------|-----------------|----|----|-----------------|----|----|-----------------|----|----|
| | F1 | F2 | F3 | F1 | F2 | F3 | F1 | F2 | F3 |
| Current A1 | | | | | ○ | | | | |
| Current A2 | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| Current A3 | | | | | ○ | | | | |

윈도우즈 모니터링 화면에 표시된다.

각 용접조건에 대하여 10회씩 반복실험을 수행하였다. 실험조건은 0.8 mm 전기 아연도금 강판의 일반적인 용접조건을 고려하여 Table 2와 같이 계획하였다. 통전시간을 의미하는 싸이클(cycle)은 교류전류의 사인파가 11주기 지나는 시간을 의미한다. 용접질의 최종 평가를 위하여 용접강도 측정만능 시험기를 이용하여 인장실험을 수행하였다.

4.3 실험결과

이들 실험중 Fig. 6에서는 같은 용접조건에서의 전극팽창 파형을 보여준다. 이 파형에서 보는 바와 같이 같은 용접조건이라도 다른 형상의 파형을 보임을 알 수 있다. 이러한 경우에는 고려하지 않은 외란이 발생하였다고 생각할 수 있다. 이들 외란은 용접 시편의 표면상태, 전극마모, 시편의 밀착정도 등 여러 요인이 있을 수 있다.

이와 같은 전극팽창 파형에서 세 가지 퍼지입력 변수를 추출하였다. 먼저 최대값을 들 수 있다. 최대값(Max)은 열입력의 크기를 나타내 주는 변수라 할 수 있다. 다음으로 최대값에 이르는 평균 팽창률(Slope=max/max에 이르는 시간)을 선택하였다. 이는 열입력속도를 표현할 수 있다. 마지막으로 최대값과 최소값의 차이를 선택하였다. 이 차이(difference)는 용출이 발생함을 나타내 준다고 할 수 있다.

Fig. 7에서는 두 용접조건을 고정하고 다른 한 용접조건을 변화시켰을 때 용접조건에 따라 용접강도의 변화를 보여준다. Fig. 7(a)에서는 용접시간과 가압력을 일정하게 하였을 때 용접전류와 용

접강도와의 관계를 도시하였다. 용접 전류가 증가할수록 용접강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 용접전류가 더욱 큰 경우에는 용접강도가 저하하는 것을 실험으로 알 수 있었다. Fig. 7b에서는 용접전류와 가압력을 일정하게 하였을 때 용접시간과 용접강도와의 관계를 도시하였다. 용접시간이 증가할수록 용접강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(c)에서는 용접전류와 용접시간을 일정하게 하였을 때 가압력과 용접강도와의 관계를 도

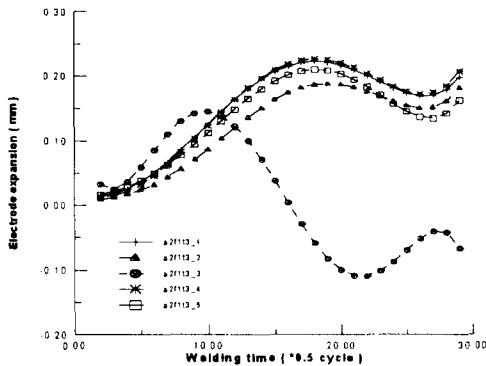
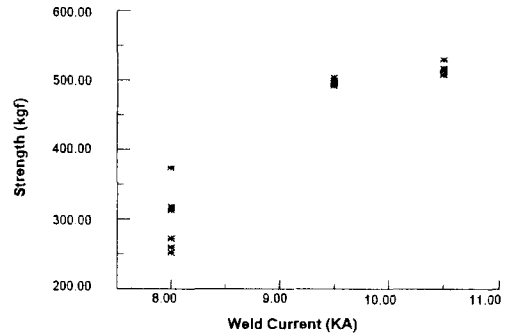
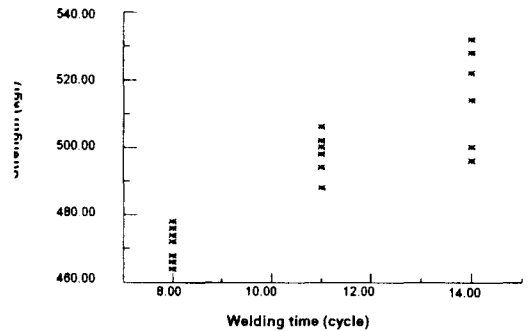


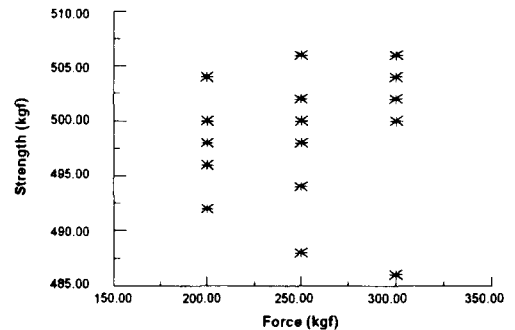
Fig. 6 Electrode expansion pattern for welding conditions (Current : 9.5 KA, Force : 250 kg, Welding time : 14 cycle).



(a) Welding current-tensile strength



(b) Welding time tensile strength



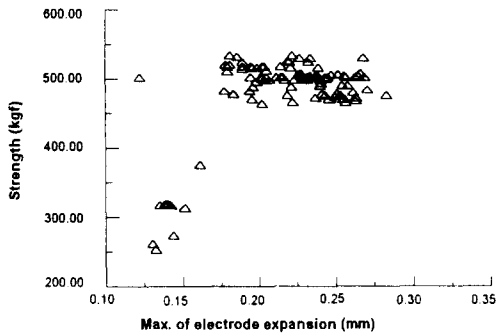
(c) Welding force-tensile strength

Fig. 7 Tensile strength for the various welding conditions.

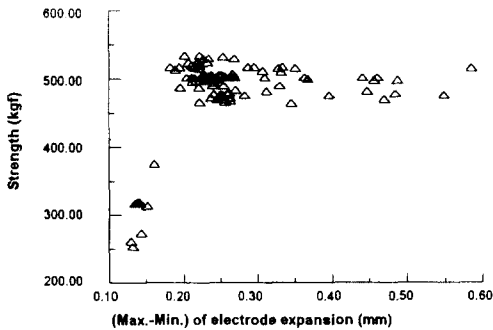
시하였다. 여기서 용접전류, 용접시간, 가압력을 또다른 퍼지입력변수로 설정하였다. Fig. 8에서는 전극팽창 파형에서 추출한 입력변수와 용접강도와의 관계를 나타낸다.

5. 용융부의 인장강도 추론 결과

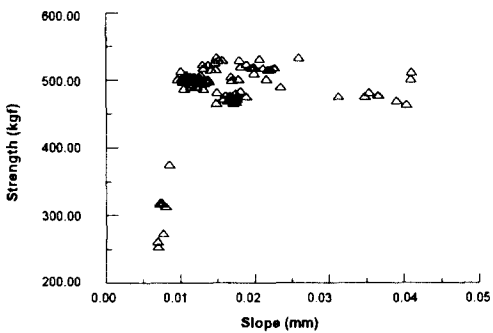
앞에서 기술한 퍼지추론방식을 이용하여 추론한 용접강도의 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에서 나타내었



(a) Strength maximum electrode expansion



(b) Strength-electrode expansion change



(c) Strength-slope of the electrode curve

Fig. 8 Tensile strength for the electrode expansion modes.

다. 실제 용접을 하는 경우 용접결과는 정상적인 용접강도를 가지는 경우와 용접불량의 두가지 형태로 나타나게 된다. 본 논문에서는 산업현장에서 아연도금을 하는 용접조건 범위(용접 시편의 두께를 0.8 mm라고 할 때 전류는 9~10 KA, 용접시간은 10~12 cycle)에 대하여 추론한 결과를 보면 정상

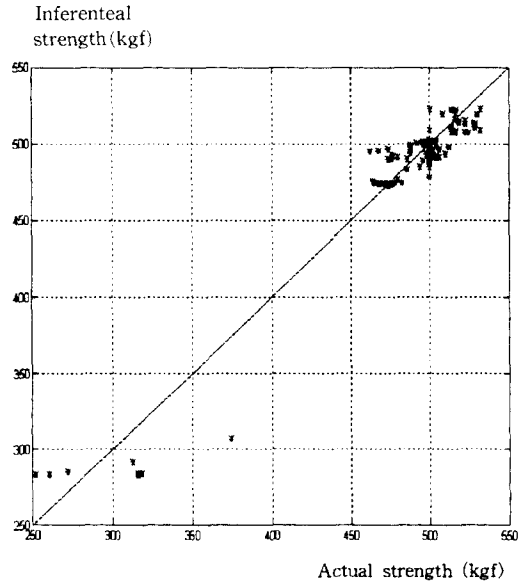


Fig. 9 Comparison of actual strength with inferential strength.

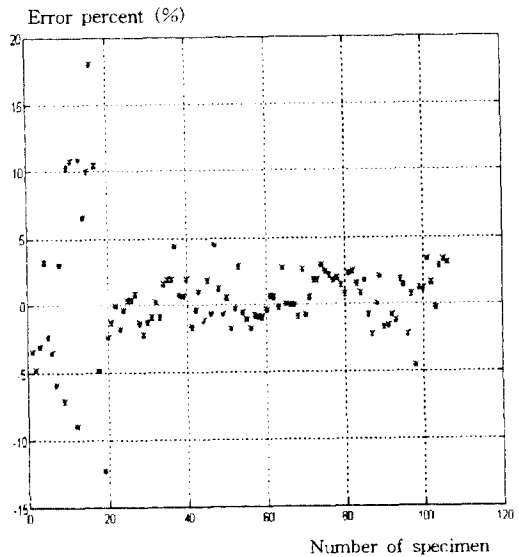


Fig. 10 Error percent (%) = (AS-IS)/ASAS : Actual strength, IS : Inferential strength.

적인 용접과 용접불량을 정확하게 판별해 내었으며, 이는 제품의 불량성을 판정하기에 충분한 오차 범위이다. 정상적인 용접의 경우 $\pm 5\%$ 이내의 오차를 가지고 실제 용접강도에 접근함을 볼 수 있다. 용접불량이 발생한 경우 용접강도가 350 kg이하인 경우 동일한 나쁜 용접조건인 실험에서도 인장 테스트 결과 용접강도는 일정하지 않게 나타나지만 이 경우 용접강도가 너무 낮아서 쓸모없는 용접이 되므로 용접불량으로 판정된다.

용접강도를 추론하기 위하여 사용한 퍼지추론기의 입력변수를 선정하는데 있어서, 실제 실험에서 측정된 전극팽창 파형의 최대값(Max), 평균속도(Slop), 차이(Difference)와 용접기 컨트롤러에서 설정한 전류의 RMS값과 가압력을 입력변수로 사용하였다. 퍼지제어기의 입력의 개수가 많아지므로 시스템의 특성을 나타내어 줄 수 있는 퍼지규칙을 선정하는데 있어서 많은 어려움을 준다. 따라서 실험에 행하여진 전압전류의 변동을 매개변수로 사용하여 입력변수들과 출력변수 사이의 언어적 상관관계를 찾는 것은 더욱 힘이 든다. 그러나, 본 연구에서 구성된 퍼지추론기는 실제 저항 점용접을 사용하는 용접조건에서는 $\pm 5\%$ 오차의 현실적 타당성을 가지고 용접부의 강도를 추정하였다. 복잡한 열물리적 현상을 수반하는 저항 점용접의 용접 특성을 감안할 때, 본 연구는 보다 정확하게 용접강도를 추정한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 저항 점용접품질을 추정하기 위한 감시시스템을 구성하고 실제 현장에서 용접 조건으로 사용하는 구간(9~10.5 KA, 10~14 cycle, 250~300 kg)에서 수행한 실험 결과치에 대하여 퍼지추론기를 이용한 추론 결과가 $\pm 5\%$ 오차의 정밀도를 가지고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 모니터링 시스템과 퍼지추론기로 구성된 품질 감시시스템으로 작업자가 모니터링 화면으로 작업도중 발생하는 불량을 판별하고 적절한 조치를 취함으로써 샘플링 파괴검사에 따른 경제적·시간적 비용의 절감과 품질의 향상을 기대할 수 있다.

향후 본 연구의 결과로 저항 점용접의 품질확보를 위하여 실시간적으로 용접품질을 추정하고 제어할 수 있는 온라인(on-line) 용접품질 제어시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 : ME96-D-01)에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) *Welding Handbook*-Section 2, 1963. American Welding Society Publication, Fifth ed., pp. 26.1~26.55, New York, N.Y.
- (2) Tweeddale, J. G., 1969, *Welding Fabrication Vol. 2 Preocess*, London Iliffe Books LTD American Elasevier Publishing Company, Inc., New York, pp. 75~116.
- (3) The Welding Institute, 1977. *Resistance Welding Control and Monitoring*, Cambridge,
- (4) Gould, S. A., Sorensen, C. D., Ulrish, K. T. and Eaga T. W., 1987, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds," *Welding Journal*, pp. 378~385.
- (5) Rokhlin, S. I. and Adler, L., 1985, "Ultrasonic Evaluation of Spot Welding Quality," *Welding Journal*, pp. 191~200.
- (6) Gedeon, S. A., Sorensen, C. D., Ulrish, K. T. and Eagar, T. W., 1987, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds," *Welding Journal*, pp. 378~385.
- (7) Wood, R. T., Bauer, L. W., Bedard, J. F., Bernstein, B. M., Czechowski, J., D'Andrea, M. M. and Hogle, R. A., 1985, "A Closed Loop Control System for Three-Phase Resistance Spot Welding," *Welding Journal*, pp. 26~30.
- (8) 이정우, 1993, "저항 점용접에서 전극팽창 파형과 인공 신경회로망을 이용한 용접질 감시시스템," 석사학위논문, 명지대학교.
- (9) 박종우, 1993, "저항 점용접에서 동저항 파형과 인공 신경회로망을 이용한 용융부의 크기 추정," 석사학위논문, 명지대학교.
- (10) 임태균, 조형석, 장희석, 1990, "저항 점용접에서 신경회로망을 이용한 용융부의 크기 예측에 관한 연구," 한국자동제어학술회의 논문집, 제1권.

- (11) Ronald, R. Yager and Dimitar, P. Filev, 1994, "Approximate Clustering Via the Mountain Method," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 24, No. 8.
- (12) 김교형, 1986, "마이크로 컴퓨터를 이용한 온라인 점용접품질 감시체제에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제10권, 제2호, pp. 214~246.