

研究論文

퍼지 알고리즘을 이용한 저항 점 용접의 실시간 품질 평가 기술 개발에 관한 연구

조용준* · 이세헌** · 엄기원**

A Study of Real-Time Weldability Estimation of Resistance Spot Welding using Fuzzy Algorithm

Yongjoon Cho*, Sehun Rhee** and Ki-Woan Um**

Key Words : Resistance spot welding(저항 점 용접), Weldability estimation(용접성 평가), Welding voltage(용접 전압), Tensile shear strength(인장 전단 강도), Indentation (오목자국), Expulsion(중간날림), Fuzzy algorithm(퍼지 알고리즘)

Abstract

The resistance spot welding process has been used for joining the sheet metal in automotive engineering. In the resistance spot welding, the weld quality is very important, because the quality of weld is one of the most important factor to the automobile quality. The size of the molten nugget has been utilized to estimate the weld quality. However, it is not easy to find the weld defects. For weldability estimation, we have to use the nondestructive method such as X-ray or ultrasonic inspection. But these kinds of approaches are not suitable for detecting the defects in real time. The purpose of this study is to develop the real time monitoring of the weld quality in the resistance spot welding. Obtained data were used to estimate weldability using fuzzy algorithm. It is found that this monitoring and estimation system can be useful to improve the weld quality in the resistance spot welding process and it is possible to estimate the weldability in real time.

* 1998년 3월 31일 접수

* 학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

1. 서 론

최근 들어 기계 공업의 총아라 할 수 있는 자동차의 생산 공정에서 저항 점 용접은 자동차의 차체 구조를 형성하는 주된 공정이며, 승용차의 경우, 일반적으로 차량 한 대가 완성되기까지 3000점 이상의 점 용접 공정이 필요하다. 저항 점 용접부의 품질은 차체의 진동이나 부식 등에 대한 내구성, 내식성, 내마모성등을 결정하는 주요 인자이며, 이러한 이유에서 저항 점 용접의 품질은 자동차의 강도 및 품질에 매우 중요한 역할을 하고 있다.

저항 점 용접의 용접 품질의 좋고 나쁨은 육안으로 식별하기 어렵기 때문에 점 용접의 결합 및 품질을 판정하기 위해서는 X-ray나 초음파등을 사용한 비파괴 검사법이 유용하다. 하지만, 실제 생산 공정에 이러한 비파괴 검사법을 적용하기에는 비용이나 설비면에서 여러 가지 문제점이 있으며, 더구나 실시간 품질 검사는 거의 불가능한 것이 현실이다. 그러나 점 용접부의 품질 판단은 품질에 이상이 발생하였을 때, 즉각적으로 이를 보완할 수 있도록 실시간적으로 이루어져야 하므로 비파괴검사법의 단점들을 효과적으로 보완할 수 있는 실시간 용접품질 판정 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다.

Dickinson¹⁾ 등의 연구에서는 저항 점 용접 공정에서 예측될 수 있는 전압, 전류, 동저항 및 입력 에너지를 검출하였으며, 특히, 동저항의 변화 양상에 따른 용접 특성과의 관계를 도식적으로 규명하였다. 그러나 동저항 변화 패턴에 따른 용접 품질과의 관계 규명이 불충분하여 좀 더 광범위한 실험이 요구되었다. Hao²⁾ 등의 알루미늄 저항 점 용접 특성 분석에서는 다중 선형 회귀 분석(multiple linear regression analysis)을 이용하여 너겟의 직경과 용접 강도를 예측하였으며, 예측된 데이터 중에서 용접 전압만을 이용하여 중간날림(expulsion) 현상을 예측할 수 있음을 밝혔다. 그러나 예측방법의 특성상 여러 가지 조건에서의 비선형적인 패턴을 일반화하여 예측할 수는 없는 단점을 지니고 있었다. Kimchi³⁾의 연구에서는 날림이 발생하기 시작하는 전류 영역에 대한 보다 자세한 실험적 검증들을 통하여 날림 현상이 용접 품질에 미치는 영향을 분석하였으며, 이러한 분석을 통하여 날림 현상과 용접 강도와의 관계를 규명하였다.

매우 짧은 시간에 발생하는 저항 점 용접의 이러한 비선형적 동특성을 보다 효과적인 방법으로 처리하고, 나아가 여러 공정 변수들과 용접품질 사이의 함수관계를 규명하기 위해서 퍼지 논리나 인공신경회로망 기법등을 저항 점 용접에 도입하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 특히, 대표적인 공정 변수인 동저항과 용접품질과의 사이에서 비선형 함수관계를 찾아내어 실시간적으로 용접 품질을 추정하고자 하는 연구가 최근들어 활발히 진행되고 있다. 최⁴⁾, 임⁵⁾ 등의 연구에서는 전류에 따른 용융부 형성 및 성장에 대한 물리적 현상들을 잘 설명할 수 있는 동저항의 패턴이 용융부의 크기와 깊은 상관관계를 가지고 있음을 규명하였고, 이를 인공 신경 회로망에 적용함으로써 동저항의 비선형성에 대한 문제를 효과적으로 해결하였으나, 점 용접부의 품질이라 할 수 있는 강도 및 외형에 대한 고찰은 이루어지지 않았다. 김⁶⁾ 등은 전극 팽창과형을 이용하여 용접부의 품질을 예측하였으나, 퍼지 입력 변수들과 강도와의 관계를 명확하게 설명하지 못하였으며, 용접 품질이 실시간적으로 예측되지 못하였다.

이에 따라 본 연구에서는 저항 점 용접을 수행할 때 검출되는 용접 변수를 이용하여, 예측된 용접 전압과 용접 품질과의 관계를 규명함과 동시에 이를 바탕으로 예측된 용접 변수를 이용하여 최종 용접부의 용접 품질, 즉, 용접부의 인장전단강도(이하 전단강도) 및 오목자국을 실시간적으로 판단, 예측하는 알고리즘을 퍼지 논리를 이용하여 개발하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 강재는 현재 자동차 생산 공정에서 많이 사용되고 있는 두께 0.7mm의 냉연 강판을 사용하였으며, 강재의 기계적 강도와 화학적 조성은 Table 1에 표시하였다. 저항 점 용접 실험은 정격 용량 75kVA, 최대 가압력 800kgf의 정치식 교류 용접기를 사용하여 실시하였으며, 전극팁

Table 1. Mechanical properties and chemical composition of workpiece

Chemical composition (wt %)						Mechanical Properties		
C	Mn	P	S	Al	Si	Y. S.	T. S.	Elog.
0.0030	0.08	0.011	0.008	0.043	-	16.2	30.9	46

은 RWMA class II에 해당하는 크롬을 포함한 구리 성분으로된 지름 16mm, 선단경 6mm의 둥형 전극을 사용하였다.

한국 공업 규격 KS0850, KS0851에 따라 용접 시편을 준비하여 용접을 실시하였다. 용접 전류는 3사이클의 업 사이클을 포함한 8사이클의 통전사이클, 가압력 250kgf를 사용하여 전류의 범위 5kA~11kA에서 용접을 수행하였다. 강도 측정을 위하여 용접된 시편은 인장시험기를 이용하여 최대 인장하중을 측정하였으며, 다이얼 게이지를 이용하여 오목자국의 크기를 검출하였다.

측정된 용접 품질을 실시간으로 예측하기 위한 용접 변수를 계측하기 위하여 Fig. 1과 같은 용접 변수 계측 시스템을 구성하였다. 용접 전류는 20kA급의 홀 센서를 사용하여 검출하였으며, 용접 전압은 전극의 선단에 픽업 장치를 부착하여 검출하였다. 각각에서 나온 출력은 3kHz의 샘플링 속도로 A/D 보드에 전송된 후, 용접품질 판단을 위한 알고리즘에 사용되었다.

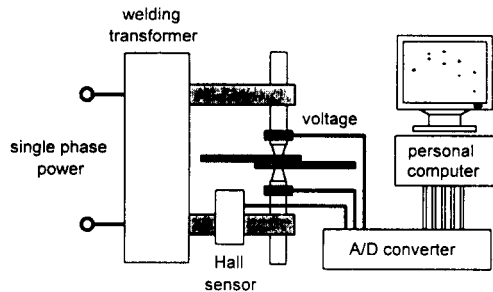
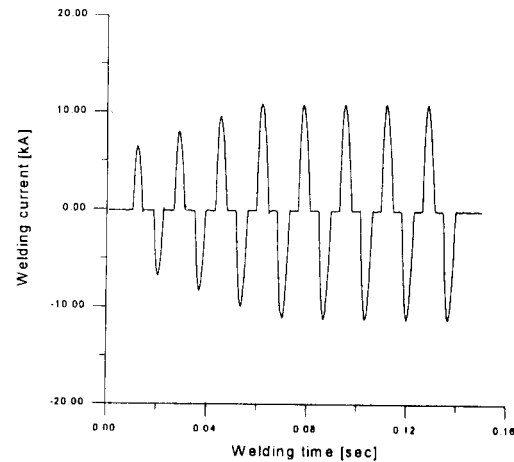


Fig. 1 Schematic diagram of welding variable measurement system

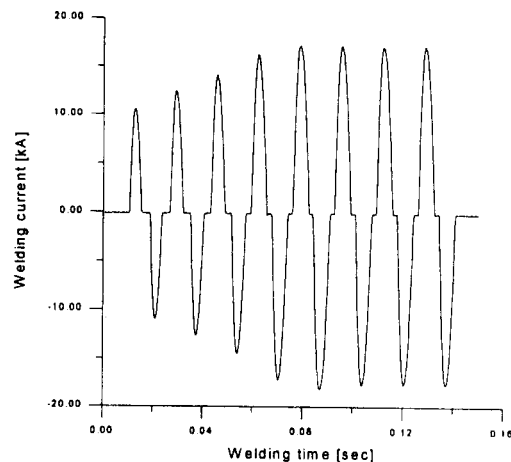
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 측정 변수와 용접 품질과의 관계 규명

실험은 본 실험에 사용된 저항 점 용접기의 제어 특성인 정전류 모드에서 수행되었으므로, 계측된 교류 용접 전류의 용접 사이클에 따른 용접 전류의 변동은 거의 없다고 할 수 있을 정도로 매우 미약한 것으로 관측되었다. 용접 변수 계측 시스템에 의해서 얻어진 용접 전류의 패턴을 Fig. 2에 나타내었다. 용접 전류 6kA, 11kA에서 얻어진 전류의 파형을 각각, (a), (b)에 나타냈으며, 그림에서 알



(a) Current=6kA

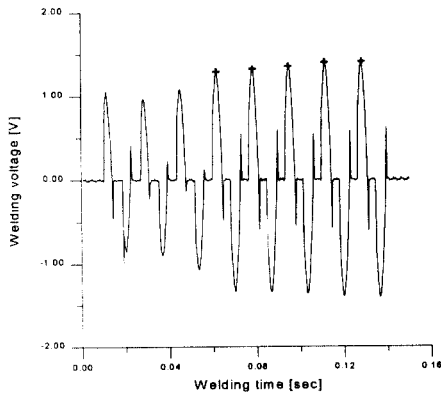


(b) Current=11kA

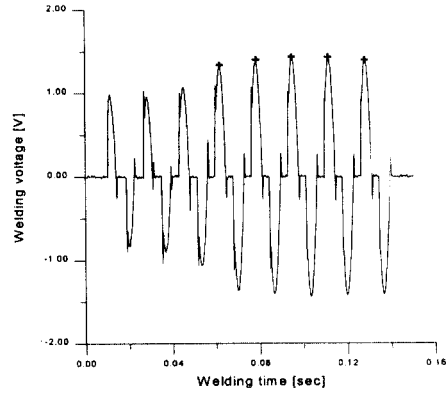
Fig. 2 Waveforms of measured welding current for non-expulsion (a) and expulsion (b) (Welding time : 8 cycle, electrode force:250kgf)

수 있듯이 저전류(6kA)는 물론, 중간날림이 발생하는 고전류(11kA)의 경우에서도 업 슬로프로 작용된 3사이클 이후의 용접 전류 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

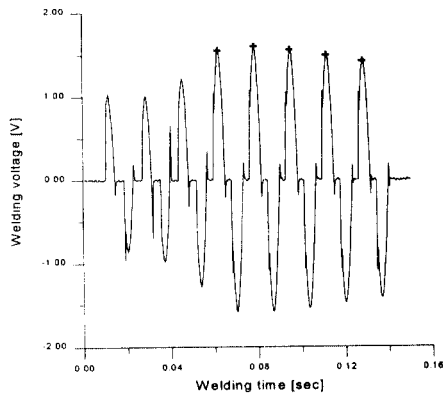
한편, 용접 전압의 변동량은 용접 전류에 따라 큰 변화 양상을 보였는데, 특히, 중간날림이 발생하는 조건의 경우에는 중간날림이 발생한 사이클에서 전압의 최고값이 현저하게 줄어들고 있음



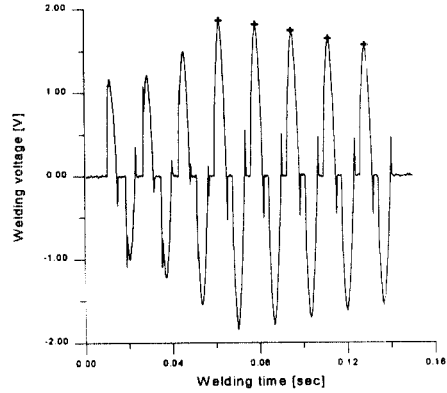
(a) current = 5kA



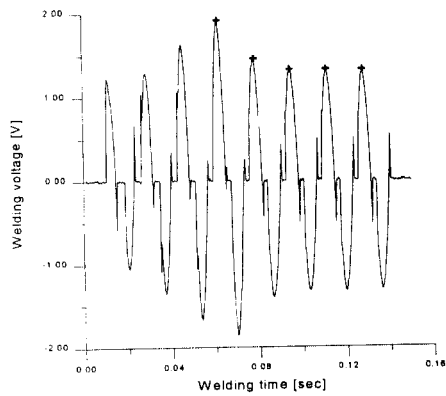
(b) current = 6kA



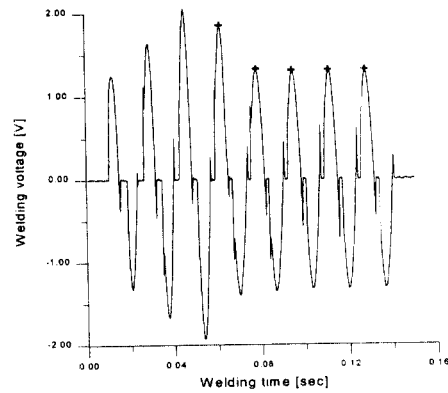
(c) current = 7kA



(d) current = 8kA



(e) current = 9kA



(f) current = 10k

Fig. 3 Waveform of measured welding voltage for various welding current
(Welding time : 8 cycle, electrode force:250kgf)

을 Fig. 3의 (e), (f)에 의해 알 수 있다. 일반적으로 용접 전류와 용접 전압의 rms값을 이용한 동저항 변화가 용접 품질과 밀접한 관계가 있다는 것은 잘 알려진 사실¹⁾이지만, 정전류 제어 방식의 경우, 용접 전압만으로도 용접 품질의 판단이 가능하다는 것이 기존 연구²⁾에서 이미 검증되었다. 그러므로, 본 연구에서는 Fig. 3에서 보여진 SCR 위상 제어 방식 용접기의 불규칙한 용접 전압을 디지털 신호 처리 기법을 사용하여 효과적으로 처리하기 위하여 사이클당 용접 전압의 최고 순시값을 용접 품질 판단에 사용하였다.

판단에 사용된 용접 전압의 업 슬로프로 작용된 3 사이클을 제외한 나머지 사이클에서 두 가지 인자를 추출하여 이들 인자가 용접 강도 및 오목자국에 미치는 영향을 파악하였다. 첫 번째 인자는 용접 사이클이 진행될 때, 진행 사이클의 최고 전압(peak voltage, V_p)과 다음 사이클의 최고 전압과의 차이값들 중에서 최대값(maximum peak voltage drop, MPVD)이고, 두 번째 인자는 전체 용접 사이클에서 각 사이클 최고 전압의 낙하율(peak voltage drop rate, PVDR)로 정의하였다. 각각의 산출 방법을 식 (1), (2)에 나타내었다.

$$MPVD = \max(V_{p_i} - V_{p_{i+1}}) [V] \quad (1)$$

$$PVDR = \frac{\max(V_{p_i}) - \min(V_{p_i})}{\max(V_{p_i})} \times 100 [\%] \quad (2)$$

이러한 판단 인자들과 저항 점 용접의 너겟 생성 메카니즘과의 관계를 규명하기 위하여 용접 전압 패턴을 다음과 같이 크게 세가지로 구분하여 실험하였다.

먼저, Fig. 3(a), (b)와 같은 저전류(5-6kA)에서는 용접 사이클이 진행됨에 따라 업 슬로프를 제외한 나머지 5 사이클에서 V_p 가 계속적으로 증가하거나 미약하게 증가했다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 접촉면의 온도 상승에 기인한 것으로 (a)와 같은 형태의 용접 전압 패턴이 관찰 되었을 때, 모재의 접촉부에서는 열 영향부만 생성될 뿐, 용융부가 거의 발생하지 않음이 앞선 연구^{7,11)}에서 밝혀진 바 있다. 이 경우, MPVD는 음수 또는 0에 가까운 값이 되고, PVDR은 상대적으로 작은 값이 됨을 그림을 통해 알 수 있다.

Fig. 3(c), (d)는 적당한 용접 전류(7-8kA)가 작

용되었을 때의 용접 전압 패턴을 나타낸 것이다. V_p 가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 각각, 다섯 번째와 네 번째 사이클에서 최고값을 나타낸 후 다시 하락하는 형태를 보이고 있다. 이에 따라, 접촉면의 온도는 빠른 속도로 상승되었다가 용접 전압이 다시 하락하는 구간에서 접촉면 용융에 의한 너겟이 형성되고 있음을 짐작할 수 있다. 적정 용접 조건의 경우, MPVD는 상대적으로 작은 양수 값을 나타내고 있으며, PVDR는 10-20% 정도의 값을 보이고 있다.

Fig. 3(e), (f)는 과도한 전류(9-10kA)로 인해 중간날림 현상이 발생한 용접 조건에서 측정된 용접 전압 신호를 나타낸다. 급격한 전압의 상승 이후에, 첫 번째 사이클에서 매우 심한 전압의 변화를 관찰할 수 있다. 특히, 10kA의 경우, 업 슬로프 사이클이 종료된 직후에서부터 큰 전압강하가 이루어짐을 알 수 있다. 급격한 전압의 변화는 중간날림이나 표면날림이 발생할 경우 접촉면의 증가와 더불어 용융 모재의 날림현상과 가압력으로 인한 통전거리의 감소에 의해 발생하며^{3,7)}, 급격한 전압 변화로 인해 앞선 결과와는 달리 상대적으로 큰 MPVD 값을 나타냈으며, PVDR도 50%에 가까운 큰 값을 나타냈다.

Fig. 4와 Fig. 5는 용접 전류의 변화에 따른 MPVD와 PVDR을 나타낸 그림이다. 용접 전류를 5kA에서부터 1kA씩 증가하여가며 11kA까지의 MPVD와 PVDR를 관찰하였다. 실험의 신뢰성을 높이기 위해 같은 조건의 실험을 5회 반복하였다. MPVD와 PVDR이 용접 강도와 오목자국에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 실험 조건에 따른 전단강도와 오목자국 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. 용접강도는 전단강도 실험에서 얻은 최대하중을 기준으로 하였으며, 오목자국은 용접이 수행되기 전 모재의 두께($t_{initial}$)에 대한 오목자국 깊이($e(t_{initial} - t_{weld})$)의 비(indentation ratio)를 계산하여 용접부의 품질(외형)을 판단하는 척도로 삼았다. 이는 식 (3)에 나타내었다.

$$indentation \ ratio = \frac{t_{initial} - t_{weld}}{t_{initial}} \quad (3)$$

MPVD가 음수이거나 0에 가까운 경우(5kA-6kA),

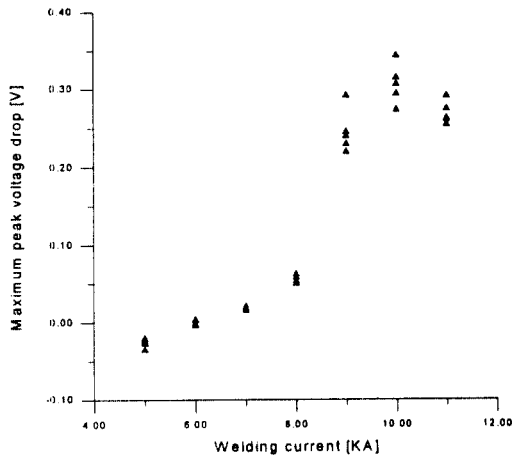


Fig. 4 Maximum peak voltage drop for various welding current

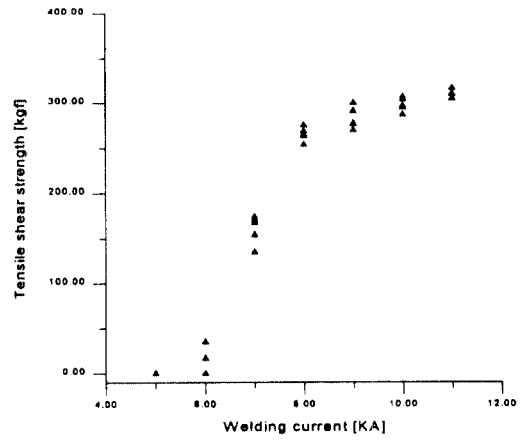


Fig. 6 Tensile shear strength for various welding current

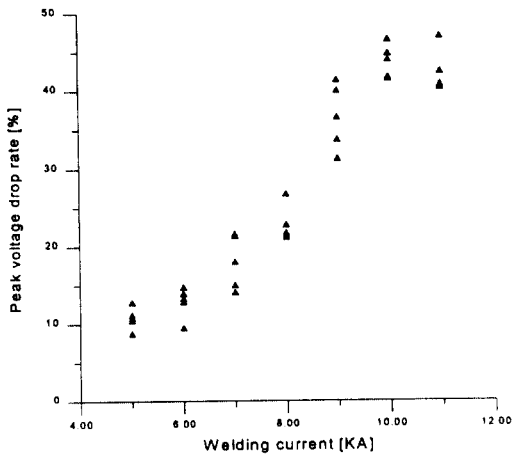


Fig. 5 Peak voltage drop rate for various welding current

용접부의 전단강도는 0-50kgf의 매우 작은 값을 나타내었으며, 오목자국은 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 용접 강도는 MPVD가 양수를 나타내기 시작하는 7kA의 용접조건에서부터 150kgf이상으로 증가하기 시작하여 8kA이상의 용접조건에서는 용접 강도의 기준⁸⁾인 225kgf를 넘는 강도를 보이고 있다. PVDR은 용접 전류가 증가함에 따라 점

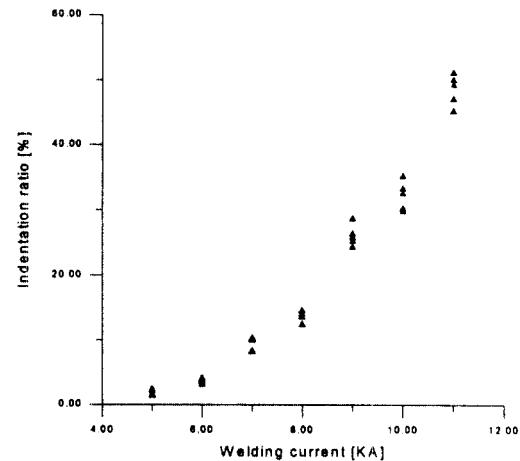


Fig. 7 Indentation ratio for various welding current

차로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 10kA이상에서는 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. PVDR이 30%이상을 나타내는 9kA-11kA의 조건에서 심한 오목자국이 관측되었으며, 이 조건에서의 오목자국의 증가율은 PVDR이 증가할수록 점점 커짐을 알 수 있다. 특히, 11kA에서는 PVDR의 증가에도 불구하고 MPVD는 감소하고 있음을 알 수 있는데 이러한 상반되는 특징은 다음 절에서 고려될 퍼지 추론법에 의한 오목자국 평가에 효과적으로 이용될 수 있다.

3.2 퍼지 알고리즘

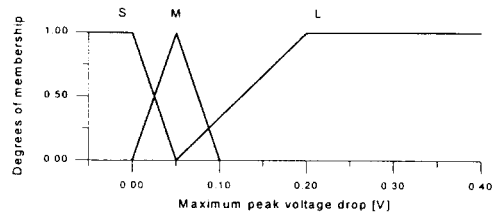
이상에서의 결과를 바탕으로 저항 점 용접의 용접 강도와 오목자국을 실시간적으로 예측하기 위하여 앞에서 언급한 두 가지 인자, 즉, MPVD와 PVDR을 퍼지 알고리즘에 사용하였다. 용접부의 전단강도와 오목자국(이하 용접품질) 판단에 사용된 두 가지 인자들은 용접품질과 일정한 관계는 갖고 있으나, 정량적인 기준값을 정하는데 있어서 실험의 반복에 따라 약간의 편차를 지니고 있으므로 본 연구에서는 기준값들을 중심으로한 적절한 퍼지 소속 함수를 사용하여 효과적인 판단이 이루어지도록 하였다.

MPVD는 Fig. 4에 나타난 분포와 용접 품질과의 관계를 기준으로 퍼지 소속함수를 구성하였다. 전단강도 예측에서는 0V, 0.05V, 0.2V를 기준으로 Small, Middle, Large의 세 분류로 삼각형, 또는 사변형의 소속함수를 사용하였으나, 오목자국 예측의 경우, Very Large를 추가한 네 가지 소속함수를 사용하여 고전류에서 판단인자들이 갖는 특징을 효과적으로 이용하였다. 용접 품질과 PVDR과의 관계를 고려하여 PVDR을 Small, Middle, Large로 나누어 퍼지 소속함수를 정의하였으며, 각각, 10, 20, 40%를 기준 값으로 선택하였다. 정의된 퍼지 입력 변수의 소속함수는 Fig. 8에 나타내었으며, 이에 따라 각 인자들의 퍼지화를 수행하였다.

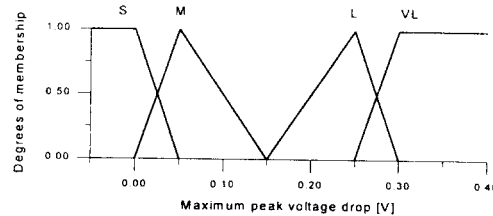
2.2절에서 고찰한 내용을 바탕으로 전단강도 및 오목자국 예측에 사용된 퍼지 룰 베이스를 각각, Table 2(a)와 (b)에 나타내었다. 입력변수(MPVD, PVDR)와 출력변수(전단강도, 오목자국)의 관계를 Very Bad, Bad, Not Bad, Good, Very Good의 5가지 분류로 나누어 식 (4)와 같은 추론 규칙에 의해 모두 21가지(3×3+4×3)의 퍼지 명제를 이용하여 퍼지 룰 베이스를 작성하였다.

If, MPVD is A1 and PVDR is A2, THEN, Shear strength is B and Indentation ratio is C. (4)

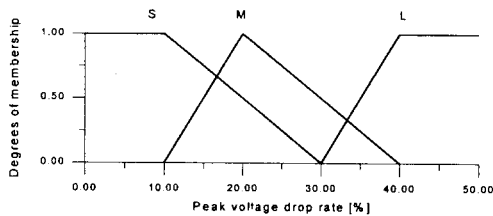
여기서, A1, A2와 B, C는 입력변수와 출력변수를 언어적 표현으로 나타낸 값이다. 룰 베이스에 의한 퍼지 추론은 식 (5)와 같이 Mamdani의 max-min 연산법¹⁰⁾을 사용하였고, 이 때 얻어진 소속함수는 Fig. 9와 같은 출력 소속함수에서 식 (6)의 무게중심법을 이용하여 전단강도와 오목자국을 추론하였다.



(a) MPVD membership function for strength estimation



(b) MPVD membership function for indentation estimation



(c) PVDR membership function for strength & indentation estimation

Fig. 8 Membership functions of the fuzzy input models

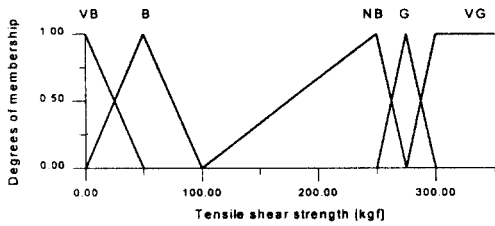
Table 2. Fuzzy rule base for weldability (strength & indentation ratio) estimation

MPVD \ PVDR	Small	Middle	Large
Small	Very Bad	Not Bad	Not Bad
Middle	Very Bad	Good	Good
Large	Bad	Good	Very Good

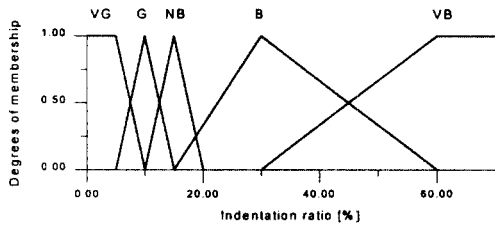
(a) Fuzzy rule base for strength estimation

MPVD \ PVDR	Small	Middle	Large	Very Large
Small	Very Good	Good	Bad	Bad
Middle	Very Good	Not Bad	Bad	Bad
Large	Good	Not Bad	Very Bad	Bad

(b) Fuzzy rule base for indentation ratio estimation



(a) Tensile shear strength membership function for strength output



(b) Indentation ratio membership function for indentation output

Fig. 9 Membership functions of the fuzzy output models

$$\mu_{B,C} = \max[\min[\mu_{A_1}(MPVD), \mu_{A_2}(PVRD)]] \quad (5)$$

$$B,C = \frac{\int \mu_{B,C}(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_{B,C}(z) \, dz} \quad (6)$$

3.3 실시간 용접품질 예측

용접 품질을 실시간으로 예측하기 위하여 12비트 A/D 컨버터를 사용하였다. 3kHz의 샘플링 속도로 용접 전압을 계측하여 버퍼에 저장한 후 각 사이클의 최대값을 구하여 0-4095의 값을 -5-5V로 환산하였다. 환산된 전압값에 의한 MPVD와 PVRD를 이용하여 퍼지 추론을 수행하였으며, 비퍼지화 과정을 통해 최종적으로 용접부의 예측 강도와 오목자국을 퍼지 알고리즘을 이용하여 예측한

3.4 용접품질 판단 결과 및 고찰

저항 점 용접의 대표적인 용접품질인 전단강도와 오목자국을 퍼지 알고리즘을 이용하여 예측한

결과를 그림으로 나타내었다. Fig. 10은 3.1절의 실험에서 얻은 MPVD와 PVRD 값을 예측 알고리즘에 사용하여 얻은 예측 전단강도이며, Fig. 11은 전단시험에서 얻은 결과에 대한 예측값을 비교한 그림이다. 모든 전류 범위(5-11kA)에는 예측한 전단강도가 실험에서 얻은 강도와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있으며, 예측 강도와 실제 강도 사이의 오차는 최소 0.2kgf에서 최대 22.5kgf를 넘지 않았

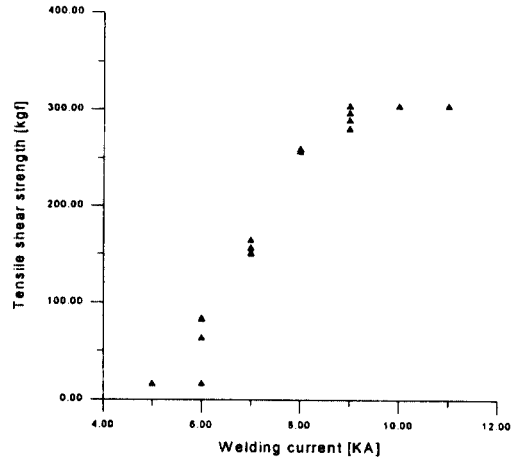


Fig. 10 Estimated tensile shear strength using proposed fuzzy algorithm

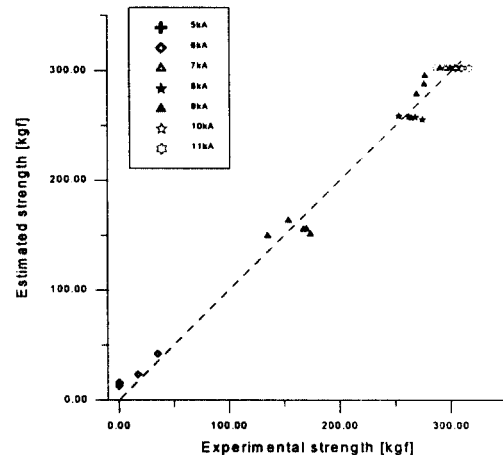


Fig. 11 Correlation of tensile shear strength between estimated and experimental result

다. 특히, 적정 용접 강도인 250kgf 이상의 강도를 얻을 수 있는 8kA 이상의 경우, 모든 조건에서 판정기준(225kgf)을 초과하는 강도를 얻었으며, 이러한 결과에 의해서 본 연구에서 제시한 판단인자를 이용하면 용접공정에서 얻어지는 용접변수만으로도 용접 불량 여부를 효과적으로 파악할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 오목자국에 대한 예측 결과이다. 전단강도의 예측 결과와는 달리 9kA와 10kA에서의 오목자국 예측 값이 실제 오목자국 보

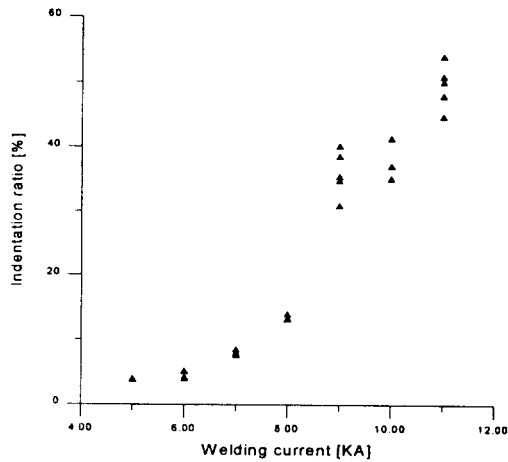


Fig. 12 Estimated indentation ratio using proposed fuzzy algorithm

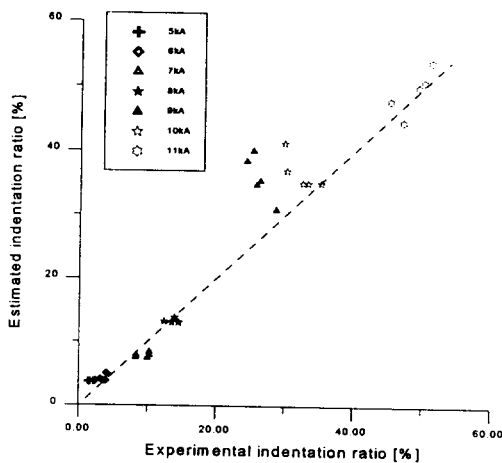


Fig. 13 Correlation of indentation ratio between estimated and experimental result

다 크게 나타남을 알 수 있는데, 이러한 결과는 9kA-11kA에서의 MPVD 값을 Large 와 Very Large 의 두 가지로 퍼지화함에 있어서 각 전류별 퍼지 입력변수가 상대적으로 큰 폭의 변화를 갖고 있기 때문인 것으로 생각된다. 9kA의 한 예측결과에서는 실제 오목자국과 예측된 오목자국의 오차가 최대 10%를 넘는 것으로 나타났지만, 그 외의 전류 영역에서는 좋은 예측 결과를 얻을 수 있었다. 오목자국의 경우에도, 오목자국이 20%이하인 것을 좋은 결과로 볼 때, 예측된 MPVD와 PVDR를 이용한 퍼지 판단 방법으로 과도한 오목자국에 의한 저항 점 용접부의 결함을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

이상의 과정에서 수행된 용접품질 판단과정은 용접 공정에서 측정된 결과를 실시간적으로 처리함은 물론, 용접 불량에 의한 강도저하나 지나친 오목자국 현상을 비교적 정확히 파악할 수 있으므로 본 연구에서 사용된 방법에 의한 저항 점 용접의 퍼지 알고리즘 용접성 판단방법은 현장 응용이 가능한 용접품질 평가방법임을 알 수 있었다.

4. 결 론

1) 정전류 제어 방식의 저항 점 용접의 용접품질을 평가함에 있어서 용접강도와 오목자국에 깊은 연관성을 지닌 용접변수의 하나는 용접 전압임을 알 수 있었으며, 예측된 용접 전압의 패턴에 의해 용접부의 용융부(너겟) 생성 여부 및 중간날림 발생 여부를 판단할 수 있었다.

2) 용접 전압 패턴에서 MPVD와 PVDR를 추출하여 이들 인자들과 용접품질 사이의 상관관계를 서술하였다. 저전류(5-6kA) 용접에서는 MPVD와 PVDR값이 상대적으로 작은 값을 보였으며, 특히, MPVD가 음수이거나 0에 가까울 경우 용접강도가 현저하게 줄어드는 현상은 볼 수 있었다. 고전류(9-11kA)에서는 중간날림 현상에 의한 이 인자들의 변화가 상대적으로 크게 나타났으며, 전류가 증가함에 따라 MPVD는 다시 감소하는 반면, PVDR는 일정 값을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 특히, 이러한 경우에 오목자국이 가장 심하게 나타남을 알 수 있었다.

3) 앞에서 밝힌 상관 관계를 바탕으로 MPVD와 PVDR를 입력 변수로 하고 전단 인장 강도와 오목자국을 출력으로 하는 퍼지 추론 알고리즘을 작성

하였다. 각각을 모두 21개의 추론 규칙으로 나누어 퍼지 룰 베이스를 만들었으며, 좋고 나쁨의 5가지의 경우의 수를 만들어 용접 품질을 판단하였다.

4) 용접강도의 경우 개발된 시스템에 의해서 평가된 용접품질을 살펴보면, 최대 오차 22.5kgf로 나타나 모든 전류영역에서 실험에서 얻어진 강도 값과 비교적 일치함을 알 수 있었으나, 오목자국의 경우에는 9kA-11kA에서의 MPVD 값의 변화에 기인한 것으로 보이는 10%가 넘는 오차가 깊은 오목자국이 생성되기 시작하는 9kA와 10kA에서 발생했다. 그럼에도 불구하고, 적정전류 이하의 전류에서는 매우 효과적인 예측 결과를 얻을 수 있었으므로 지나친 오목자국은 본 연구 방법으로 충분히 예측 가능하리라 생각된다.

5) 용접변수 계측을 포함한 일련의 용접 품질 평가 과정을 A/D 컨버터를 사용한 하나의 프로그램으로 구현함으로써 온라인 상에서 용접공정이 끝남과 동시에 실시간적으로 용접 품질을 예측할 수 있는 시스템을 개발하였다.

참 고 문 헌

1. D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya : Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring, *Welding Journal*, Vol. 59, No. 6, (1980), pp. 170s-176s
2. M. Hao, K. A. Osman, D. R. Boomer, and C. J. Newton : Developments in characterization of resistance spot welding of aluminum, *Welding Journal*, Vol. 75, No. 1, (1996), pp. 1s-8s
3. M. Kimchi : Spot weld properties when welding with expulsion - A comparative study, *Welding Journal*, Vol. 63, No. 2, (1984), pp. 58s-63s
4. 최용범, 장희석, 조형석 : 저항 점 용접에서 인공신경회로망을 이용한 용융부 추정에 관한 연구, *대한기계학회 논문집*, 제 17 권, 제 2 호, (1993) pp. 393-406
5. 임태균, 조형석, 장희석 : 인공신경회로망을 이용한 저항 점 용접의 품질감시, *대한용접학회지*, 제11권, 제2호, (1993) pp. 39-53
6. 김주석, 이재익, 이상룡 : 퍼지 추론을 이용한 저항 점 용접 부위의 품질 평가 알고리즘, *대한기계학회 논문집*, A권, 제 22 권, 제 3 호, (1998), pp. 644-653
7. W. F. Savage, E. F. Nippes and F. A. Wassell : Dynamic contact resistance of series spot welds, *Welding Journal*, Vol. 57, No. 2, (1978), pp. 43s-50s
8. 김명준 : 저항용접, 도서출판 기문사 (1995)
9. T. J. Ross : Fuzzy logic with engineering applications, McGraw-Hill, Inc., (1995), pp. 232-265
10. S. A. Gedeon, C. D. Sorensen, K. T. Ulrich and T. W. Eagar : Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds, *Welding Journal*, Vol. 66, No. 12, (1987), pp. 378s-385s
11. J. G. Kaiser, G. J. Dunn and T. W. Eagar : The effect of electrical resistance of nugget formation during spot welding, *Welding Journal*, Vol. 61, No. 6, (1982), pp. 167s-174s
12. K. I. Johnson and J. C. Needham : New design of resistance spot welding machine for quality control, *Welding Journal*, Vol. 51, No. 3, (1972), pp. 1s-8s