

1 차 동저항 패턴의 통계적 분석에 의한 저항 점 용접의 용접 품질 예측에 관한 연구

조 용 준* · 이 세 현**

(2000년 3월 15일 접수)

Weld Quality Assurance Method using Statistical Analysis of Primary Dynamic Resistance During Resistance Spot Welding

Yongjoon Cho and Sehun Rhee

Key Words : Resistance Spot Welding (저항 점 용접), Primary Dynamic Resistance (1 차 동저항), Regression Analysis(회귀분석), Correlation (상관관계), Quality Estimation(품질 판단).

Abstract

In previous studies, the dynamic resistance, which was calculated by the process variables measured at the electrode of the welding machine, and the electrode displacement were used for quality examination. However, in-process usage of such systems is not effective in systems that include a welding gun attached to a robot. In order to overcome such problems, we obtained and used the process variables from the welding machine timer. This would allow us to estimate real time in-process weld quality. For quality estimation, the features were extracted as factors from the primary dynamic resistance patterns, which were measured in the welding machine timer. The relationship between the indexes and nugget size of the welds was observed through the regression analysis. Using the analyzed factors, a regression model that could estimate nugget diameter was developed. Two regression equations of the model were suggested depending on the factors, and it was showed that the model developed by stepwise method was effective one for weld quality estimation. The developed estimation model was in good linearity with the nugget diameter obtained through the experimentation.

1. 서론

저항 점 용접의 용접 품질의 좋고 나쁨은 육안으로 식별하기 어렵기 때문에 점 용접의 결함 및 품질을 판정하기 위해서는 X-ray나 초음파등을 사용한 비파괴 검사법이 유용하게 사용되고 있다. 하지만, 실제 생산 공정에 이러한 비파괴 검사법을 적용하기에는 비용이나 설비면에서 여러 가지 문제점이 있으며, 더구나 실시간 품질 검사는 거의 불가능하다. 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.

초기의 연구⁽¹⁾에서는 음극선 오실로스코프를 이용하여 모니터링한 저항 점 용접 공정의 전기적 변수들을 이용하여 동저항을 구하고 용접부 형성에 따른 이 패턴들의 변화를 고찰하였으며, 여기에 Johnson 등⁽²⁾은 용접부 팽창에 의한 전극의 이동을 추가하여 용접부를 모니터링할 수 있는 시스템을 제안하였다. 이후, Savage 등⁽³⁾ 및 Dickinson 등⁽⁴⁾의 연구에서는 저항 점 용접 공정에서 예측될 수 있는 가압력, 재료의 표면 상태, 용접 전류, 용접 전압, 동저항, 및 입력 에너지 등을 검출하여 너겟의 형성을 고찰하고자 하였다. 특히, 동저항의

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : srhee@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0438 FAX : (02)2299-6039

변화 양상에 따른 용접 특성과의 관계를 도식적으로 설명하여 이들 관계를 효과적으로 설명하였다. 계측기기의 발달과 더불어 모니터링 기술도 발전하였으며,⁽⁵⁾ 이를 이용한 여러 가지 용접부 품질 판단 방법이 제안되었다. Tsai 등⁽⁶⁾은 전극 팽창신호에 의한 제어 알고리즘을 이용하여 실시간으로 용접 품질을 판단하고 제어할 수 있는 시스템을 개발하였으며, Hao 등⁽⁷⁾의 알루미늄 저항 점 용접 특성 분석에서는 다중 선형 회귀 분석을 이용하여 용접부의 품질을 예측하였다. 한편, Livshits⁽⁸⁾의 연구에서는 접촉면의 전류 밀도분포를 이용하여 보다 일반적인 품질 판단 모델을 제안하기도 하였다.

한편 국내에서는 용융부 형성 및 성장에 대한 물리적 현상들을 잘 설명할 수 있는 동저항의 패턴을 인공 신경 회로망에 적용함으로써 용접부의 품질을 판단하는 연구가 진행되었으며,⁽⁹⁾ 퍼지 알고리즘을 이용하여 용접부의 품질을 실시간적으로 예측하고자 하는 연구도 진행되었다.^(10,11) 그러나 이들 연구에서는 용접 품질 판단에 사용된 인자들이 용융너겟에 미치는 영향들에 대한 설명이 부족하며, 더욱이 이들 연구들은 계측방법의 특성상 현장에서 실시간적으로 수행하기에는 많은 문제점들을 지니고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 저항 점 용접을 수행할 때 검출되는 1차 회로 공정 변수를 이용하여 용접기 타이머에서 용접부의 동저항을 모니터링하고, 이 동저항 패턴에서 용접 품질 판단에 필요한 인자들을 추출하였다. 추출한 판단 인자들을 상관분석하여 용접 품질과의 상관성을 파악하였으며, 상관성이 높은 인자들을 이용하여 회귀 분석을 실시하였다. 이에 따라 용접 품질을 효과적으로 예측할 수 있는 회귀 모델을 제시하였으며, 실시간 현장 적용이 가능한 효과적인 예측 모델을 제시하였다.

2. 1차 동저항과 용접 품질

저항 점 용접의 용접 품질을 좌우하는 너겟 생성과 성장 현상은 용접기의 2차 회로에서 얻은 공정 변수를 이용하여 계산한 2차 회로 동저항에 의해 직접적으로 파악될 수 있다. 그러나 이러한 2차 동저항의 모니터링에 기초를 둔 시스템은 실시간 품질 판단은 가능해도, 현장 적용이 가능한 용접 품질 예측 시스템을 구성하고자 할 때에는 여러 가지 문제점들이 발생한다. 가장 큰 문제점은 2차 공정 변수 모니터링에 따른 부가적인 계측장비 설치와 측정 데이터의 전송이다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위한 방법으로 용접기 1

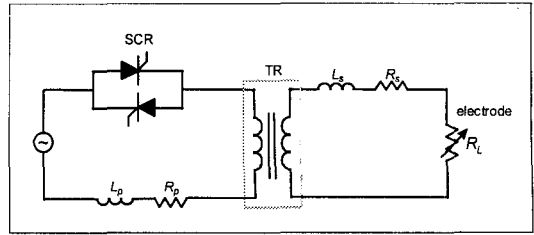


Fig. 1 Equivalent welding machine circuitry including transformer and SCR

차 회로, 즉, 용접기 타이머에서 동저항을 계측하여 용접 품질 예측에 사용하고자 하였다.

Fig. 1은 용접기의 전체 회로를 전기적 회로 요소를 이용하여 도식적으로 표현한 그림이다. 변압기를 포함한 2차 회로 성분을 1차 회로로 이동시키면 식 (1)과 같은 저항에 대한 등가식을 만들 수 있다.

$$R_{timer} = R_p + a^2(R_s + R_L) \tag{1}$$

여기서 R_{timer} 는 용접기 타이머에서 전압과 전류를 이용하여 계측한 저항이고, R_p 는 1차 회로를 구성하는 저항, R_s 는 전극을 포함한 2차 회로의 저항, R_L 은 전극 사이의 용접부의 저항 변화, 그리고 a 는 변압기 권수비를 각각 의미한다. 용접시 사용된 교류 전류의 변화율이 '0'인 순간에 동저항을 계측하면 임피던스에 포함된 불필요한 인덕티브 노이즈를 효과적으로 제거할 수 있으므로 인덕티브 리액턴스 L_p , L_s 항은 동저항 계산에 고려하지 않았다. 용접기 1차 회로에서 계측한 저항값 R_{timer} 는 변압기의 권수비와 단락 저항을 이용하여 다시 2차 회로 동저항으로 환산할 수 있다.

변환된 동저항은 일반적으로 Fig. 2와 같은 형태를 나타내며, 이러한 동저항의 패턴을 근거로 용접 강도 예측 모델에 사용될 10가지 인자를 추출하였다. 먼저, 동저항의 기하학적 추출 인자로서, 너겟의 생성 시점과 관련된 베타 피크³⁾⁴⁾ 위치 X1과 너겟의 성장 속도와 관련된 알파 피크³⁾⁴⁾ 이후의 동저항의 상승속도 X2를 선택하였다. 다음으로는 용접이 진행됨에 따른 저항값의 변화를 판단 인자화 하기 위하여 베타 피크 이후의 동저항의 최대값과 최소값의 차이 X3와 매 사이클 당 동저항 변화(delta R)의 최대값X4을 선택하였다. 또한, 동저항의 최대값 X5, 초기 저항 X6, 최종 저항 X7 및 모든 동저항의 평균 X8 등과 같이 모니터링 된 동저항의 절대적인 값을 이용하여 판단 인자를 추출하기도 하였다. 저항의 변화 양상에 따른 영향을 파악하기 위해서는 동저항의 표준편차 X9와 매 사이클 당 동저항 변화의 표준편차 X10를 이용하였다.

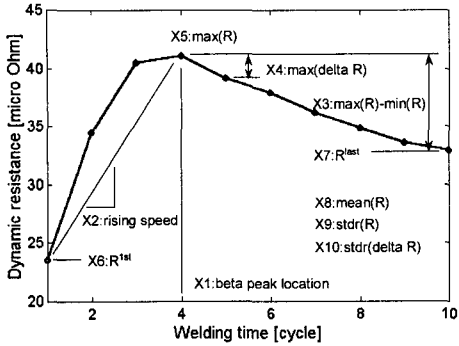


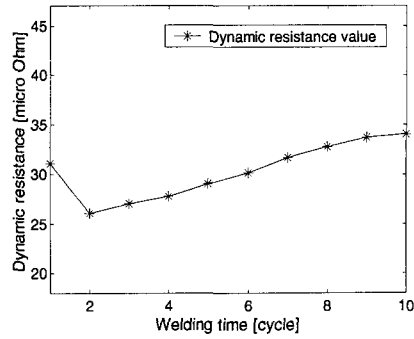
Fig. 2 Primary dynamic resistance pattern and feature extraction

Table 1 Chemical composition of base materials (wt %)

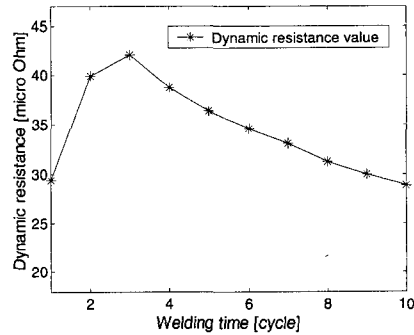
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.0032	0.002	0.065	0.009	0.008	Bal.

3. 용접실험

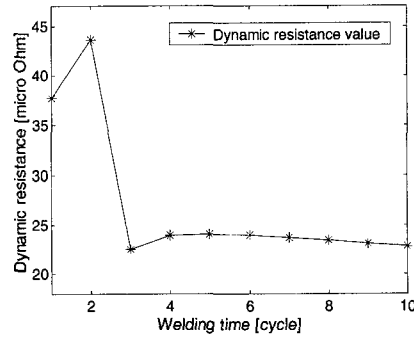
실험에 사용된 모재는 자동차용 강판으로 많이 사용되는 Table 1의 화학적 조성을 갖는 두께 0.7 mm의 저탄소강판이며, 용접에는 공압 실린더를 장착한 프레스형 저항 용접기가 사용되었다. 용접 전극은 지름 16mm, 선단 지름 6mm의 도움형 전극을 사용하였고, 전극의 재료는 RWMA class II의 크롬이 포함된 구리 합금(copper alloy)을 사용하였다. 10 사이클의 통전시간과 250kgf의 전극 가압력 조건에서 전류를 변화해 가며 용접을 수행하였다. 용접 전류는 5kA에서 1.5kA씩 증가해 가며 11kA까지 용접하였으며, 각 전류마다 10번의 용접을 반복 실시하였다. 용접부의 너겟 지름을 용접 품질의 판단 기준으로 설정하였으며, KS B 0854에 의한 단면시험을 통하여 각 시험편의 너겟 지름을 구하였다. 용접이 진행됨에 따라, 용접기 타이머 내부의 CT(current transformer)에 의해 전류를, 그리고, 계측용 변압기에 의해 전압을 모니터링하였으며, 앞 절에서 언급한 내용에 따라 전류의 변화율이 '0'인 순간의 값을 30kHz의 속도로 샘플링하여 저항을 계산하고 이를 2차 동저항으로 환산하였다. Fig. 3은 이상의 방법에 의한 용접 전류 변화에 따른 세 가지 대표적인 결과를 보이고 있다. 낮은 전류에서의 결과인 Fig. 3(a)에서만 초기 저항의 감소 현상이 관찰되고 있으며, 적정 전류에서는 전형적인 동저항 패턴이 관찰되었다. 지나친 용접 전류가 가해진 Fig. 3(c)의 경우에는 중간날림(expulsion) 현상으로 인한 저항의 급격한 감소가 두 번째와 세 번째 사이클에서 관찰되었다.



(a) I = 5kA



(b) I = 8kA



(c) I = 11kA

Fig. 3 Dynamic resistance monitoring results

4. 용접 품질 판단 모델 개발

4.1 품질 판단 인자들의 산포도

용접기 1차 회로에서 검출한 동저항 패턴을 이용하여 용접 품질을 예측하기 위하여, 먼저, 1차 동저항 패턴에서 추출한 10가지 인자들과 용접부 너겟 지름과의 관계를 Fig. 4에 나타낸 산포도를 이용하여 파악하였다. 각 그림의 가로축을 동저항 추출 인자, 세로축을 너겟 지름 YY으로 설정하였다. 먼저, 동저항 패턴의 기하학적 인자인 베타 피크 위치 X1과 동저항의 상승 속도 X2가 너겟 지

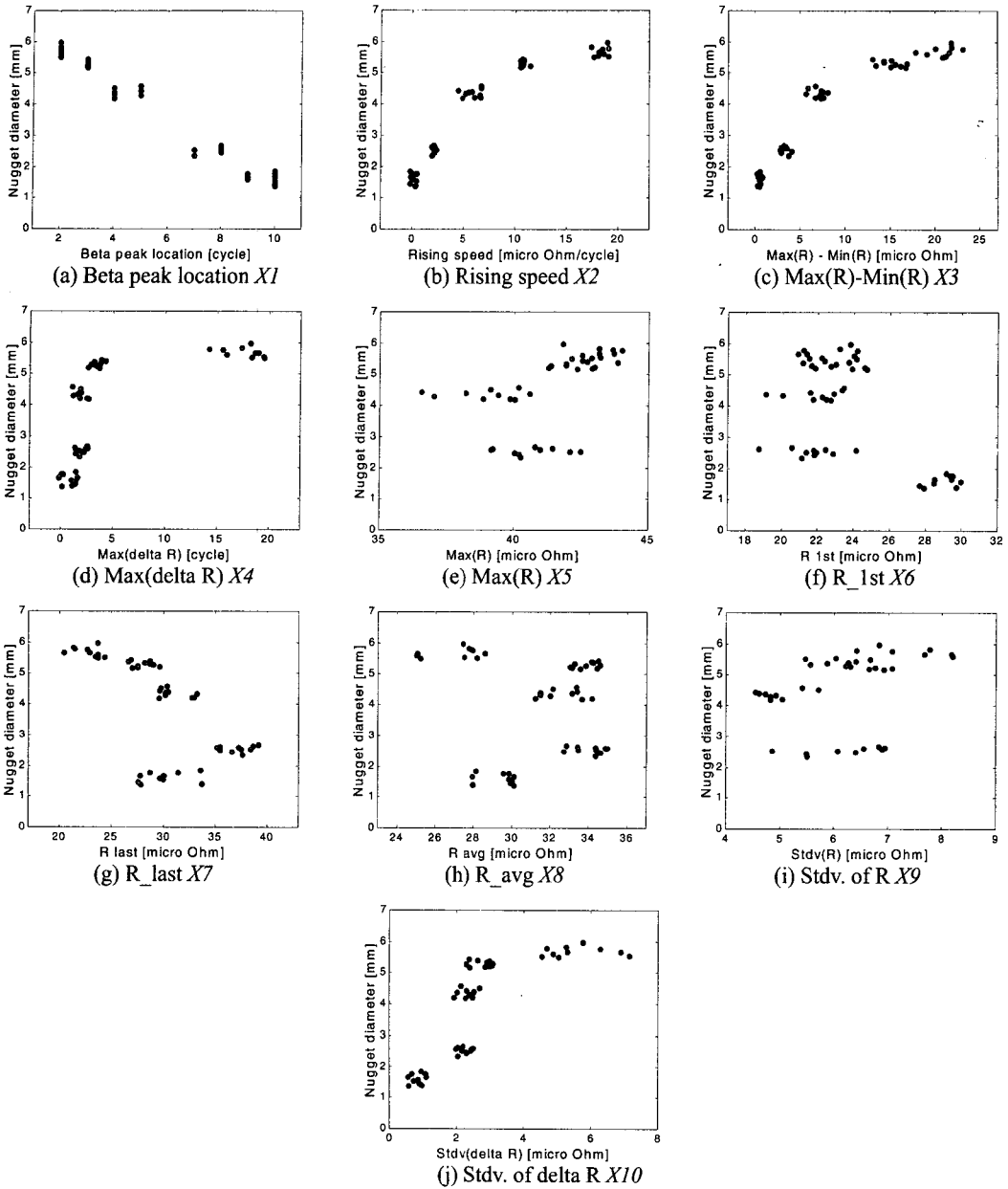


Fig. 4 Scatter diagrams of the dynamic resistance pattern index (a)-(j)

름에 미치는 영향을 Fig. 4(a)와 4(b)에 나타내었다. 베타 피크의 발생 시간이 빠를수록 너겟 지름이 증가함을 알 수 있으며, 데이터의 산포도는 좋은 선형을 이루고 있다. Fig. 4(b)는 알파 피크 이후 동저항의 상승속도 X2에 대한 결과로서 상승속도가 증가함에 따라 너겟 지름도 증가하나 점차로 포화되는 경향을 보이고 있다. 따라서 데이터의 분포는 곡선형태의 모습을 나타내고 있다. Fig. 4(c)와 4(d)는 용접이 진행됨에 따른 저항의 변화를 판단

인자화한 것으로 베타 피크 이후 동저항의 최대값과 최소값의 차이 X3와 각 사이클 당 동저항 변화의 최대값X4과 너겟 지름과의 관계를 나타낸 것이다. X3의 경우, Fig. 4(b)에 나타난 X2와 매우 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며, X4의 경우에는 5-6mm사이의 너겟지름에서 중간날림의 영향으로 보이는 큰 변화를 관찰 할 수 있다. Fig. 4(e)-(h)는 모니터링 된 동저항의 절대적인 값을 이용한 판단 인자로서 Fig. 4(e), 4(f)에서 동저항의

최대값 X5와 초기 저항X6은 너겟 지름과 별다른 상관 관계를 찾기 어려움을 알 수 있다. 있다. Fig. 4(g), (h)는 최종 저항값 X7과 동저항 값의 평균 X8을 각각 나타낸 것으로서 2mm이하의 작은 지름을 나타내는 몇몇 데이터들을 제외하면 Fig. 4(g)의 X7은 너겟 지름과 반비례관계를 보이고 있으나 Fig. 4(h)의 X8은 매우 랜덤한 분포를 보이고 있다. Fig. 4(i)-(j)는 매회 실험에서 얻은 동저항과 각 사이클 당 동저항 변화 delta R의 표준 편차를 나타낸 것으로 동저항의 표준편차X9는 임의의 분포를 보이고 있으나, delta R의 표준편차X10 분포는 이 값이 증가함에 따라 너겟 지름이 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다.

4.2 상관행렬과 상관관계

회귀 분석을 수행하기에 앞서 먼저, Table 2와 같이 종속 변수인 너겟 지름YY와 독립 변수인 판단 인자 X1-X10 사이의 상관 행렬을 구하여 상호간의 관계를 파악하였다. 일반적으로 판단 인자와 너겟 지름 사이의 상관 관계가 클수록 그 인자가 강도에 미치는 영향이 크다고 볼 수는 있으나, 상관 계수는 단지 인자들 사이의 선형적인 관계에만 의존하므로, 경우에 따라서는 큰 상관 계수를 갖는 인자들이라 할지라도 회귀모델에 부적합할 수 있다. 반면에 낮은 상관 계수를 지닌 변수임에도 불구하고 회귀모델의 오차 값을 줄이는데 기여할 수 있는 변수들도 존재할 것이다. 또한 독립변수들 상호간의 상관관계도 반드시 고려되어야 할 사항으로 이 값이 높다는 것은 이 변수들이 용접 강도에 미치는 영향이 흡사하다는 것을 의미하며, 이는 곧, 다중공선성(multicollinearity) 효과를 일으켜 이들 변수가 모두 포함된 회귀모델에 오차항을 증가시키는 결과를 일으킬 수 있다.

이에 본 절에서는 상관 분석을 실시하여 종속 변수들과 독립변수들, 또는 독립변수들 사이의 선형성을 고찰하고자 한다. Table 2는 변수들 상호간의 관계를 상관행렬로 나타낸 것으로 베타 피크 위치 X1과 동저항의 상승 속도 X2및 동저항의 최대값과 최소값의 차이 X3이 0.9이상의 상관 계수를 나타내고 있으나, X2와 X3사이의 상관계수 0.980의 매우 큰 상관성을 나타내고 있으므로 이들 변수들이 회귀모델에 사용될 경우 주의를 필요로 한다.

4.3 다중 선형 회귀모델 개발

앞에서 살펴본 인자들의 산포도와 상관행렬을 바탕으로, 1차 동저항에서 추출한 10개의 동저항 패턴 특성 인자 중에서 상관 계수의 값이 0.980으로 나타나X2와 다중공선성이 매우 큰, X3를 제외한 9개의 인자 들을 이용하여 선형 회귀 분석을 실시하였다. 회귀 모델은 식 (2)와 같이 다중선형 회귀모델(multiple linear regression model)을 사용하였다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \beta_9 X_9 \quad (2)$$

먼저 9개의 독립변수들을 동시에 투입하여 분석한 모델I의 결과를 살펴보면, 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 0.987, 추정값의 표준 오차(standard error of the estimate)는 0.2028로 너겟 지름의 변동 중98.69% 이상이 본 회귀모델로 설명 가능함을 알 수 있다. 또한 회귀식이 통계적으로 유의한지를 검증하기 위한 분산분석에 의하여, F검정 통계량이 334.215이고, 이에 따른 유의 확률은 9.207E-35을 나타내어 판단 인자 9가지를 사용하여 추정된 회귀식은 매우 유의하다고 판단 할 수 있었으며, 이 회귀식을 식 (3)에 나타

Table 2 Correlation matrix of independent variables

	YY	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
YY	1.000	-0.987	0.914	0.929	0.648	0.784	-0.554	-0.652	-0.115	0.726	0.781
X1	-0.987	1.000	-0.905	-0.917	-0.653	-0.804	0.585	0.625	0.111	-0.727	-0.786
X2	0.914	-0.905	1.000	0.980	0.880	0.721	-0.397	-0.780	-0.422	0.678	0.909
X3	0.929	-0.917	0.980	1.000	0.822	0.743	-0.410	-0.753	-0.328	0.696	0.869
X4	0.648	-0.653	0.880	0.822	1.000	0.522	-0.236	-0.721	-0.679	0.524	0.914
X5	0.784	-0.804	0.721	0.743	0.522	1.000	-0.780	-0.251	0.185	0.910	0.717
X6	-0.554	0.585	-0.397	-0.410	-0.236	-0.780	1.000	-0.103	-0.376	-0.758	-0.465
X7	-0.652	0.625	-0.780	-0.753	-0.721	-0.251	-0.103	1.000	0.617	-0.186	-0.632
X8	-0.115	0.111	-0.422	-0.328	-0.679	0.185	-0.376	0.617	1.000	0.142	-0.424
X9	0.726	-0.727	0.678	0.696	0.524	0.910	-0.758	-0.186	0.142	1.000	0.708
X10	0.781	-0.786	0.909	0.869	0.914	0.717	-0.465	-0.632	-0.424	0.708	1.000

내었다.

$$Y = 7.018 - 0.352 \cdot X1 + 0.127 \cdot X2 - 0.06096 \cdot X4 - 0.06166 \cdot X5 - 0.02147 \cdot X6 - 0.01774 \cdot X7 + 0.03514 \cdot X8 + 0.07364 \cdot X9 + 0.03716 \cdot X10 \quad (3)$$

한편, 이 때 얻은 추정된 회귀 방정식의 회귀계수의 유의성을 검증하기 위하여 회귀계수들의 t-검증에 의한 통계적 유의확률을 Table 3에 나타내었다. 그런데, Table 3에서 귀무가설에 대한 유의수준을 0.05로 설정하였을 경우, 유의확률이 5%가 넘는 회귀계수 $\beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ 및 β_9 는 통계적으로 유의하다고 볼 수 없으므로 귀무가설을 채택할 수 있다. 이 경우, X5, X6, X7, X8, X9, 및 X10은 추정된 회귀 방정식의 오차항을 증가시킬 가능성이 있으므로 회귀식 사용에 주의를 요한다.

선형 다중회귀분석의 두 번째 방법으로 독립변수들 중에서 너겟 지름의 설명력이 높고 회귀계수의 통계적 유의도가 가장 높은 변수부터 단계적으로 투입하여 가며 회귀 모델을 결정하는 단계적 투입법에 의한 회귀 분석(모델 II)을 실시하였다. 본 연구에서는 부분상관계수와 회귀계수의 유의확률에 따라 회귀 모델에 적용될 변수들을 단계적으로 투입하다가 회귀계수의 유의 확률이 0.10이상 이 되면 다시 탈락시키는 방법으로 회귀 모델을 결정하였다. Table 4는 단계별 참여 인자와 그들 계수의 유의확률 그리고 각 단계별 모델에 따르는 결정계수 및 추정값에 의한 표준오차를 나타낸 것이다.

모델 II-1은 너겟 지름과 상관성이 가장 큰 X1만을 회귀식에 적용하여 개발된 예측 모델로서, 모든 회귀 계수는 유의수준 이하의 유의확률을 보이고 있지만, 한가지 인자만을 사용하였기 때문에 본 연구의 목적상 보다 많은 인자들의 추가가 요구된다. 모델 II-2는 부분 상관계수가 상대적으로

큰 X3인자를 추가한 회귀식에 대한 결과로서 결정계수는 거의 변하지 않았으나 표준오차의 감소로 모델 II-1에 비해 좋은 성능의 회귀식임을 알 수 있다. 모델 II-3과 모델 II-4는 부분 상관계수에 따라 변수 X4와 X2가 차례대로 추가된 모델로 이에 따라 결정계수는 각각 0.981, 0.984로 증가되고, 표준오차는 0.2253, 0.2115로 감소되어 회귀식에 따른 예측 성능이 향상되고 있음을 알 수 있다. 그러나 모델 II-4의 경우 변수 X3에 대한 유의확률이 유의수준(0.10)을 넘는 0.32599를 나타내고 있으므로 다음 단계의 회귀식, 모델II-5에서는 변수 X3을 제외한 회귀 모델을 구성하였다. 모델 II-5에서는 회귀 모델에 사용하는 변수의 개수가 4개에서 3개로 줄어들었음에도 불구하고 결정계수는 변하지 않았으며, 표준오차도 0.0002의 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 모델 II-5를 단계적 투입법의 선형 다중회귀분석의 최종적인 회귀식으로 제시하였다. 식 (4)는 모델 II-5의 회귀식을 나타내고 있다.

$$Y = 5.246 - 0.368 \cdot X1 + 0.126 \cdot X2 - 0.064 \cdot X4 \quad (4)$$

4.4 회귀모델들에 의한 용접부 품질 판단

이상에서 살펴 본 회귀 모델을 이용하여 용접부의 품질 판단 성능을 Fig. 5에 나타내었다. 회귀 모델 결정에 사용되었던 50개의 데이터를 회귀식에 적용시켜 얻은 예측 너겟 지름과 단면시험을 통하여 얻은 결과와 비교하여 그래프로 나타내었다. Fig. 5(a)와 같이 동저항에서 추출한 9개의 인자를 모두 이용한 모델의 경우, 실제 강도와 예측된 강도는 강도가 낮은 영역에서 높은 영역까지 고무 좋은 선형성을 나타내고 있음을 알 수 있으나, 몇몇 회귀 계수들의 유의 확률이 신뢰수준 이상의 값을 나타내고 있으므로 너겟 예측에는 적절하지

Table 3 Significant probabilities of regression coefficient for model I

	Constant	X1	X2	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Sig. T	1.646E-06	1.670E-10	1.333E-4	0.0112	0.0649	0.3060	0.2521	0.2096	0.0686	0.5689

Table 4 Entered variables and significant probabilities of regression coefficient for the stepwise regression analysis for model II

	Entered factors					R ²	Std. Error of the estimate
	Constant	X1	X2	X3	X4		
Model II-1	1.01E-54	1.06E-39	-	-	-	0.974	0.2606
Model II-2	1.81E-27	3.66E-20	-	0.00652	-	0.978	0.2432
Model II-3	5.28E-25	6.99E-18	-	9.47E05	0.00455	0.981	0.2253
Model II-4	2.19E-21	7.02E-14	0.01066	0.32559	0.00019	0.984	0.2115
Model II-5	7.67E-22	4.09E-14	4.78E-06	-	4.16E-05	0.984	0.2113

않은 모델로 사료된다. 판단 인자의 단계적 도입법에 의하여 회귀 모델을 결정된 모델 II중에서 최종적으로 얻은 모델 II-5에 대한 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 세 가지 인자만을 사용하였음에도 불구하고 모델I과 흡사한 좋은 결과를 보이고 있으며, 결정계수에 의한 변동의 설명도도 3%의 감소만을 나타내고 있으므로, 너겟 지름 예측에 매우 효과적인 모델로 판단된다. 이 모델에 사용된 세 가지 인자들의 표준화된 회귀 계수를 Table 5에 나타내었다. 이 결과에 따르면, 너겟 지름 예측에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 베타 피크의 위치 X1이며, 동저항의 상승 속도 X2가 다음으로 중요한 인자로 판명 되었다. 각 사이클 당 동저항 변화의 최대값 X4는 X1나 X2에 비해 상대적으로 작은 기여도를 나타내고 있지만, 너겟 지름 예측에 꼭 필요한 인자로서 예측 모델을 구성하고 있음을 알 수 있다.

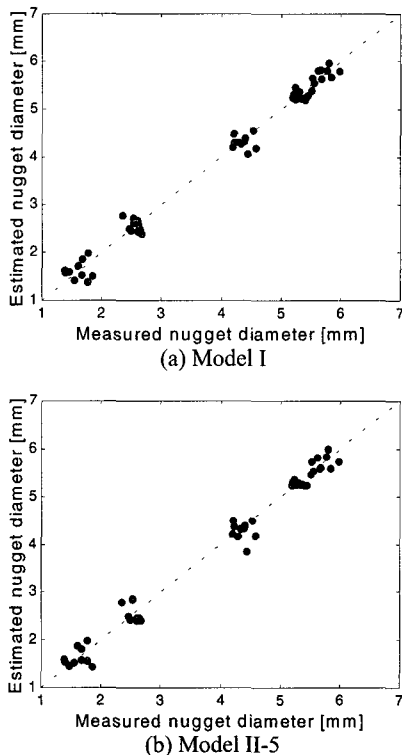


Fig. 5 Relationship between measured and estimated nugget diameter by regression models

Table 5 Standardized regression coefficients for the Model II-5

	X1	X2	X4
Standardized regression coefficients	-0.680	0.524	-0.257

5. 결론

현장에 응용 가능하면서 저항 점 용접의 품질을 효과적으로 판단할 수 있는 시스템을 개발하기 위하여 용접기 1차 회로, 즉 타이머에서 용접부의 동저항을 모니터링 하였다. 또한, 1차 동저항에서 10가지 판단 인자들을 추출하여 용접부 너겟 지름과 직접적으로 관련 있는 인자들을 상관분석과 회귀분석에 의해 찾아내었다. 동저항의 상승 속도 X2와 동저항의 최대값과 최소값의 차이 X3 사이에는 매우 큰 다중공성성이 존재하므로 X3를 제외한 9가지 판단 인자를 사용하여 회귀분석을 수행하였다. 이상의 독립변수들을 동시에 투입하여 계산한 선형 다중회귀 분석결과에 의하면, 이 모델로서 총변량의 98.7%를 설명할 수 있고 표준오차도 0.2028에 불과했으나, 모든 회귀계수들이 통계적으로 유의하다고 볼 수 없으므로, 너겟 예측에는 적절하지 않은 모델로 사료된다. 반면에 단계적 투입법에 의한 회귀 분석 결과에 의하면 베타 피크의 위치 X1, 동저항의 상승 속도 X2 및 각 사이클 당 동저항 변화의 최대값 X4가 너겟 지름을 예측할 수 있는 지배적 인자임이 밝혀졌으며, 세 가지 인자만을 사용했음에도 불구하고 결정계수 0.984, 표준 오차 0.2113의 뛰어난 예측 성능을 보였다. 더욱이 각 인자의 회귀계수 또한 통계적으로 유의함이 밝혀졌으므로 용접부 너겟 지름의 예측에 매우 적합함을 알 수 있었다. 이상의 회귀식을 용접기 타이머에서 적절히 사용하면, 용접이 완료됨과 동시에 용접부의 너겟 크기를 예측할 수 있으며 이에 따른 품질 판단이 가능하리라 생각된다.

후 기

본 논문은 2000년도 두뇌한국21 사업과 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Roberts, W. L., 1951, "Resistance Variations During Spot Welding," *Welding Journal*, Vol. 30, No. 11, pp. 1004-1019.
- (2) Johnson, K. I. and Needham, J. C., 1972, "New Design of Resistance Spot Welding Machine for Quality Control," *Welding Journal*, Vol. 51, No. 3, pp.

- 1s~8s.
- (3) Savage, W. F., Nippes, E. F. Nippes, and Wassell, F. A. Wassell, 1978, "Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds," *Welding Journal*, Vol. 57, No. 2, pp. 43s~50s.
- (4) Dickinson, D. W., Franklin, J. E. Franklin, and Stanya, A. Stanya, 1980, "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring," *Welding Journal*, Vol. 59, No. 6, pp. 170s~176s.
- (5) Gedeon, S. A., Sorensen, C. D., Ulrich, K. T. and Eagar, T. W., "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds," *Welding Journal*, Vol. 66, No. 12, (1987), pp. 378s~385s.
- (6) Tsai, C. L., Dai, W. L., Dickinson, D. W., and Papritan, J. C., 1991, "Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding," *Welding Journal*, Vol. 70, No. 12, pp. 339s~351s.
- (7) Hao, M., Osman, K. A., Boomer, D. R., and Newton, C. J., 1996, "Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum," *Welding Journal*, Vol. 75, No. 1, pp. 1s~8s.
- (8) Livshits, A. G., 1997, "Universal Quality Assurance Method for Resistance Spot Welding Based on Dynamic Resistance," *Welding Journal*, Vol. 76, No. 9, pp. 383s~390s.
- (9) 최용범, 장희석, 조형석, 1993, "저항 점 용접에서 인공신경회로망을 이용한 용융부 추정에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 393~406.
- (10) 조용준, 이세현, 엄기원, 1998, "퍼지 알고리즘을 이용한 저항 점 용접의 실시간 품질 평가 기술 개발에 관한 연구," 대한용접학회지, Vol. 16, No. 5, pp. 76~85.
- (11) 김주석, 이재익, 이상룡, 1998, "퍼지 추론을 이용한 저항 점 용접 부위의 품질 평가 알고리즘," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, No. 3, pp. 644~653.