



# 에너지 기반의 동 저항 커브 $\beta$ -peak 추출법에 관한 연구

구 자 훈\* · 박 영 도\*\* · 구 남 국\*†

\*동의대학교 조선해양공학과

\*\*동의대학교 신소재공학과

## Energy-based Beta Peak Extraction from Dynamic Resistance Curves

JaHun Ku\*, Youngdo Park\*\*, and Namkug Ku\*†

\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-eui University, Busan, 47340, Korea

\*\*Dept. of Materials Science and Engineering, Dong-eui University, Busan, 47340, Korea

†Corresponding author: knk80@deu.ac.kr

(Received May 10, 2022; Revised June 27, 2022; Accepted July 14, 2022)

### Abstract

Recently, the importance of welding monitoring is emerging, and in particular, many studies using characteristic values of dynamic resistance curves are being conducted. Among the characteristic values,  $\beta$ -peak, peak on the dynamic resistance curve, contains important information on the extent to which the nugget grows. A common way to extract the  $\beta$ -peak is to determine the local maximum point followed by the local minimum point in the dynamic resistance curve. However, for dynamic resistance curves where local extremum values are unclear, extracting the  $\beta$ -peak in this manner is difficult. Therefore, in this study, a method using heating energy for  $\beta$ -peak extraction was proposed. Heating energy is the energy used until the  $\beta$ -peak is reached. Typically heating energy does not significantly differ even if the welding conditions differ for the same material. Based on the results, the  $\beta$ -peak of the dynamic resistance curve without the clear peak was extracted, and 11 characteristic values were calculated. Among them, three values that had a high correlation with the nugget diameter were selected. Using these values, the nugget diameter was predicted through linear regression analysis.

Key Words: Correlation analysis, Linear regression analysis, Monitoring data, Nugget diameter, Resistance spot welding

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경

저항 점 용접은 최근 자동차 생산라인에서 차체의 조립 공정의 대부분을 차지하고 있다. 저항 점 용접의 사용이 많은 만큼 용접 품질을 모니터링 하고자 하는 요구가 많다. 용접품질을 모니터링 하는 방법은 파괴검사 혹은 초음파와 X-ray 같은 비파괴검사를 사용한다. 하지만 파괴검사법은 공정이 끝난 후 검사가 진행되므로, 공정 중에 발생하는 문제에 대응하기 힘들고 비파괴검

사법은 상대적으로 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이러한 문제점들을 효과적으로 보완하기 위해 동 저항을 이용하여 실시간으로 용접의 품질을 판단하는 연구가 진행되고 있다. 특히 동저항을 이용하는 연구에서 용접이 진행됨에 따라서 용접부의 동 저항을 시간에 따라 나타낸 것이 동 저항 커브인데, 이는 용접의 진행과정을 보여줌으로써 용접 품질을 판단할 수 있는 지표가 된다. 2장에서 상세히 설명하겠지만, 동 저항 커브에서의  $\beta$ -peak은 너겟 형성에 대한 중요한 정보를 가지고 있다.  $\beta$ -peak은 용융이 시작되는 점이며, 너겟 생성이 시작되는 점이다. 따라서 동 저항 커브를 활용하여 용접 품질을 판단할 때  $\beta$ -peak을 특성 값으로 사용하는

경우가 많다<sup>1)</sup>. 하지만 동 저항 커브의 특성상  $\beta$ -peak 이 명확히 구분되지 않을 때도 있는데, 일부 지속적으로 감소하는 동 저항 커브에서는  $\beta$ -peak의 위치를 찾는 것이 쉽지 않다.

우선 Heating Energy를  $\beta$ -peak까지의 에너지량으로 정의하였다. 그리고 극점이 명확하게 표현된 동 저항 커브에서  $\beta$ -peak까지 Heating Energy를 구한 뒤, 이를 활용하여 동일한 소재의 용접 결과 중 극점이 명확하게 표현되지 않은 동 저항 커브에서  $\beta$ -peak을 추출하였다.

1.2절에서는 본 연구와 관련된 선행연구에 대해서 기술한다. 그리고 2장은 동 저항 커브와 Heating Energy에 대해서 설명하고, 3장은 Heating Energy를 이용한  $\beta$ -peak 추출방법에 대해서 설명한다. 이어서 4장은 극점이 명확하게 표현된 동 저항 커브에서  $\beta$ -peak을 추출하여 실제  $\beta$ -peak과 비교하고, 5장에서는 극점이 명확하게 표현되지 않은 동 저항 커브에 Heating Energy를 이용한  $\beta$ -peak 추출 방법을 적용하였다.

### 1.2 선행연구

신석우<sup>2)</sup> 등의 연구에서는 용접 강도 예측 인자를 추출할 때, 너겟의 성장 속도와 관계 있는  $\beta$ -peak을 사용하였다. 박영도<sup>3)</sup> 등의 연구에 따르면 동 저항 커브에서  $\alpha$ -peak과  $\beta$ -peak이 나타나는 시간은 용접 품질 판단 기준이며, 이를 토대로 너겟 형성을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한,  $\beta$ -peak의 형성이 빠르거나 저항 값의 크기가 클 경우 너겟의 크기가 증가한다. 조용준<sup>4)</sup> 등의 연구에서는 동저항의 최대값  $\beta$ -peak은 너겟의 생성 시작을 나타내는 점이다.

위의 선행연구에서  $\beta$ -peak은 용접의 품질을 판단하는데 중요한 요소라는 것을 확인하였다. 그러나  $\beta$ -peak을 추출하는 구체적인 방법에 대해서는 명확히 기술하고 있지 않으며, 특히 극점이 불분명한 동 저항 커브의 경우에는  $\beta$ -peak이 불분명한 경우도 있다.

이에 본 연구에서는 극점이 불분명한 동 저항 커브의  $\beta$ -peak을 추출하는 방법을 제시한다.

## 2. 동 저항 커브와 Heating Energy

### 2.1 동 저항 커브와 $\beta$ -peak

Fig. 1은 저항 점 용접(Resistance Spot Welding)에 대해 설명하는 그림이다. 저항 점 용접은 2개 혹은 그 이상의 금속재를 두 전극 사이에 넣고 전류를 통하

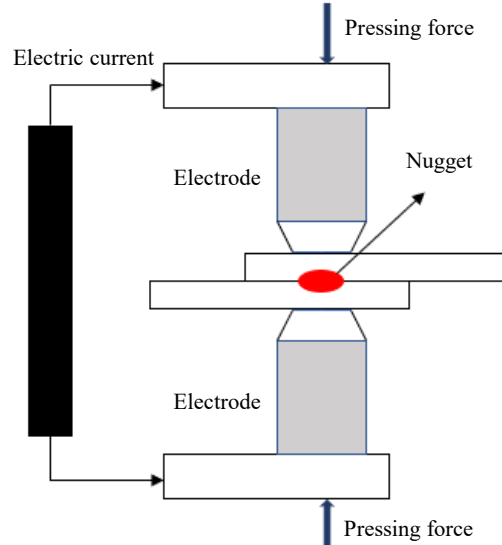


Fig. 1 Resistance spot welding

면 접촉부의 접촉저항으로 먼저 발열이 일어나 용융부의 온도가 급격히 상승하여 용융된 상태에서 가압하여 용접하는 방법이다. 이러한 용접의 결과인 용융부를 너겟이라고 한다.

저항 점용접을 할 때, 용접이 진행됨에 따라서 실시간으로 저항을 측정할 수 있는데 이를 동 저항이라 하며, 이를 통해 너겟 형성과정을 설명할 수 있고 용접 품질판단의 지표가 된다<sup>4)</sup>.

Fig. 2는 극점이 명확한 동 저항 커브에 대한 그림이다. 동 저항 커브에서 너겟 형성의 가장 중요한 정보를 가지고 있는 구간은  $\alpha$ -peak과  $\beta$ -peak이다.

점용접시에는 일반적으로 접촉면의 요철부가 사라지면서 전류가 흐르는 접촉 면적이 증가하여 저항이 감소함과 동시에 접촉부의 온도상승으로 비 저항이 증가한다. 따라서 두 저항 변화가 평형을 이루어  $\alpha$ -peak라는

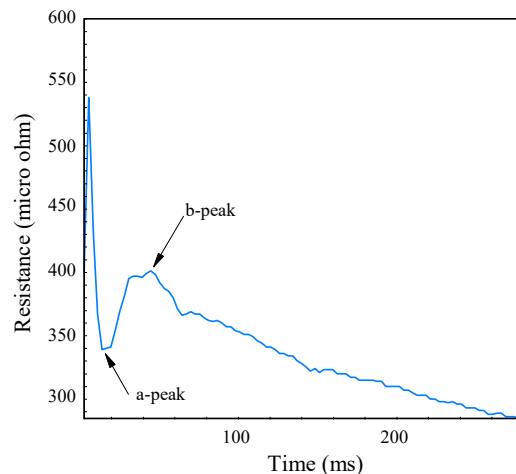


Fig. 2 Dynamic resistance curve with clear peak

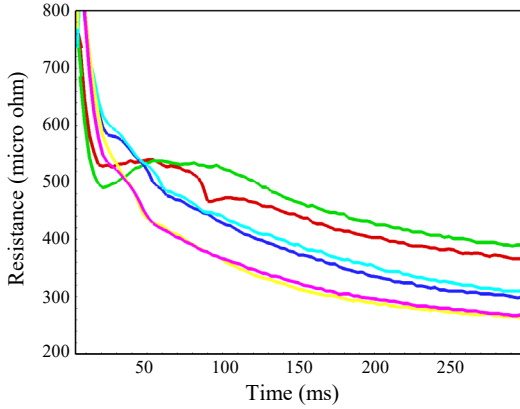


Fig. 3 Dynamic resistance curve with unclear peak

극점을 이룬 후 비 저항의 증가로 동 저항이 증가한다. 그 이후 접촉부의 용융이 시작되고 온도 증가에 의한 비 저항의 증가가 용융부의 확장에 따른 통전 영역 증가 및 소성변형에 따른 통전 거리 단축으로 인한 저항 감소와 평형을 이루어 β-peak라는 극점을 이룬다. 즉, β-peak은 용융이 시작되는 점이자 너겟 생성이 시작되는 부분을 뜻한다.

하지만 모든 용접에서 peak가 명확하게 나타나는 것은 아니며, Fig. 3과 같이 극점이 명확하지 않은 동 저항 커브에서는 β-peak을 찾는 것이 쉽지 않다.

### 2.2 Energy

Fig. 3과 같이 β-peak을 찾기 어려운 경우에, 에너지를 이용하면 이를 효과적으로 찾아 낼 수 있다. 에너지는 식 (1)처럼 나타낼 수 있다.

$$E = \int V \cdot I dt \tag{1}$$

여기서 E는 에너지, V는 전압, I는 전류, T는 시간을 의미한다. 전압은 옴의 법칙을 사용하여 식(2)로 표현할 수 있으며, 식(2)를 사용하여 에너지를 나타내면 식(3)으로 표현할 수 있다. 여기서 R은 저항을 의미한다.

$$V = I \cdot R \tag{2}$$

$$E = \int I^2 \cdot R dt \tag{3}$$

### 2.3 Heating Energy

본 연구에서는 β-peak까지 소모되는 에너지량을 Heating energy로 정의하였다. β-peak 은 용융이 시작되는 점으로서, 이 시점까지 소모되는 에너지인 Heating

Table 1 Welding conditions

Name	Steel	Number of weld	Weld time (ms)	Current (kA)	Force (kgf)
Case 1	SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t	3	300ms	4-6kA	200kgf
Case 2	SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t	5	300ms	4-8kA	300kgf
Case 3	SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t	4	300ms	5-8kA	400kgf

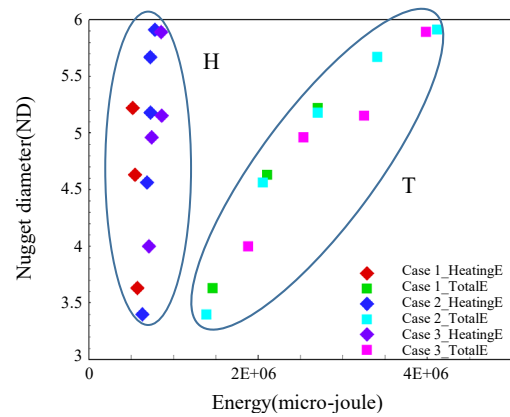


Fig. 4 Comparison of total energy and heating energy

energy의 특징을 알아보기 위하여 Table 1과 같은 조건으로 용접 실험을 수행하였다. 용접에 사용된 모재는 두께 1.4 합금화 용융 아연도금강판 SGAPH440 이며, 용접 시간은 300ms로 동일하고 전류는 1kA 단위로 변화하여 총 12건의 용접 실험을 수행하였다.

해당 용접 실험에 대하여 Fig. 4와 같이 Total Energy 와 Heating energy의 그래프를 작성하였으며, T는 Total energy, H는 Heating energy를 나타낸다. 그래프에 따르면 용접 조건이 달라짐에 따라 Total energy는 변화가 있지만 Heating energy는 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 본 실험을 통하여 용접 모재가 동일한 경우 동일한 Heating energy를 가진다는 것을 확인하였다. Heating energy는 β-peak까지의 에너지량을 뜻하므로 식(3)로부터 식(4)을 정의한다.

$$E_H = \int_0^{\beta - peak} I^2 \cdot R dt \tag{4}$$

여기서 E<sub>H</sub>는 Heating energy이다.

### 3. 에너지 기반의 $\beta$ -peak 추출법 및 품질 판단 방법

#### 3.1 $\beta$ -peak 추출법

용접 모재가 동일한 경우 동일한 Heating Energy 를 가진다는 것을 이용하여  $\beta$ -peak을 추출할 수 있다. 우선  $\beta$ -peak이 명확한 동 저항 커브의 Heating energy를 계산한다.

Heating energy가 동일하다는 것을 이용하면 식(4)을 통해  $\beta$ -peak이 명확하지 않은 동 저항 커브의 에너지를 계산할 수 있다. 이를 통해 동일한 에너지를 가지게 되는 시간  $t$ 를 구할 수 있고, 극점이 명확하지 않은 동 저항 커브의  $\beta$ -peak을 찾을 수 있다.

#### 3.2 용접 품질 판단 방법

본 연구에서 제시한  $\beta$ -peak 추출법의 유효성을 검증하기 위해서 직접 측정된 너겟 직경과 Heating energy를 이용하여 추출한  $\beta$ -peak으로 선형회귀분석을 진행하여 예측한 너겟 직경을 비교하였다. 직접 측정된 너겟 직경 측정 방법은 점 용접부의 중앙위치에서 수직 방향으로 절단하여 연마, 부식 후 광학현미경을 통해 너겟 직경을 측정하였다. Fig. 5는 측정된 너겟 직경을 보여준다.

선형회귀분석은 둘 이상의 독립변수를 이용하여 종속변수를 예측하는 모델을 만들어주는 기법인 다중 선형회귀분석을 사용하였다. 식(5)은 다중선형회귀 모델에 대한 일반형을 보여준다.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_p X_p \quad (5)$$

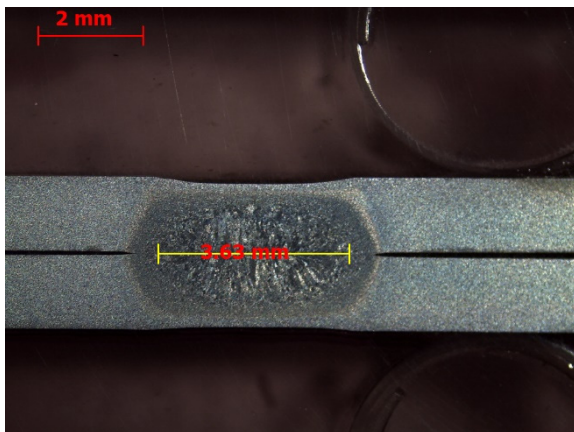


Fig. 5 Measure nugget diameter by cutting in vertical direction

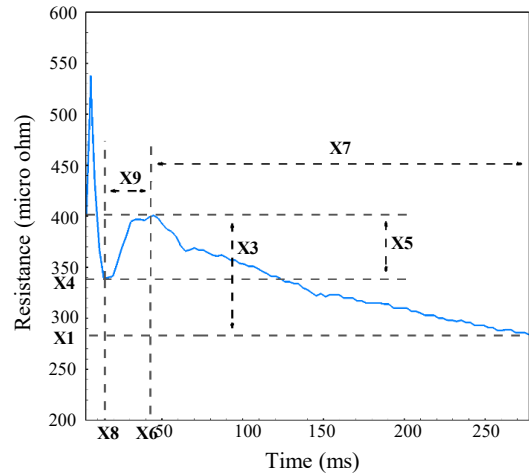


Fig. 6 Dynamic resistance pattern and feature extraction

다중 선형회귀분석을 진행하기 위해서는 저항의 특성 값이 필요하다. 여기서 저항의 특성 값이란, 동 저항 커브에서 추출하고 너겟 직경을 예측하는 중요한 독립변수로 사용한다. 본 연구에서 사용한 저항의 특성 값은 X1 ~ X11까지 총 11개이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이, X1은 최종 저항 값, X2는 저항의 최대값, X3는 저항의 최대값과 최종 값의 차, X4는  $\alpha$ -peak에서의 저항 값, X5는 저항의 최대값과  $\alpha$ -peak에서의 저항 값의 차, X6는 저항의 최대값까지의 시간, X7은 저항 값이 최대일 때부터 용접이 끝날 때까지 시간, X8은  $\alpha$ -peak까지의 시간, X9은  $\alpha$ -peak에서 저항의 최대값까지 시간이다. 그리고 X10은 X3을 X7로 나눈 값, X11은 X3과 X7을 곱한 값이다.

본 연구는 너겟 직경을 예측하기 전 종속변수인 너겟 직경과 독립변수로 사용되는 저항의 특성 값 11가지 사이의 상관관계분석을 통해 상호간의 관계를 파악하여 상관관계가 높은 특성 값을 이용해 너겟 직경을 예측하였다. 너겟 직경과 저항의 특성 값의 상관관계분석은 Table 2에서 확인할 수 있으며, 상관관계가 클수록 독립변수인 저항의 특성 값이 너겟 직경의 형성에 큰 영향을 준다고 볼 수 있다. 여기서 가장 높은 상관관계를 가지는 X3, X7, X11 3개의 저항의 특성 값을 이용하여 다중선형회귀분석을 통해 너겟 직경을 예측하였고, 모델의 정확도를 확인하기 위하여 본 연구에서는 결정계수와 평균 제곱오차(MSE, Mean Squared Error)를 사용하였다. 본 모델의 분석결과인 결정계수  $R^2$ 는 식(6)과 같이 계산하였다. 여기서  $y$ 는 실제 측정값을 의미하며  $y_i, \hat{y}_i$ 는 모델의 예측 값,  $\bar{y}$ 는 실제 측정값의 평균,  $n$ 은 총 데이터 수를 의미한다.

**Table 2** Correlation analysis result between the characteristic value of dynamic resistance and the diameter of the nugget

	Nugget Diameter(ND)
X1	0.924
X2	0.263
X3	-0.100
X4	-0.724
X5	0.807
X6	-0.543
X7	-0.7
X8	0.332
X9	0.860
X10	1.000
X11	0.924
ND	0.263

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (6)$$

MSE는 식 (7)과 같이 계산하였으며,  $y$ 는 실제 측정값,  $y_i$ 는 모델의 예측값,  $n$ 은 총 데이터 수를 의미한다.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 \quad (7)$$

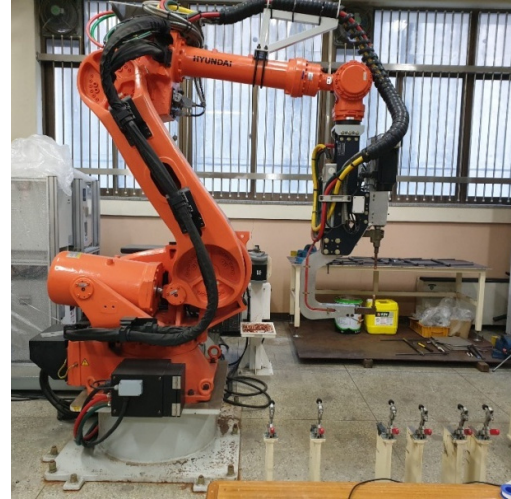
여기서 결정계수  $R^2$ 은 1에 가까울수록 회귀식의 적합도는 높으며, 평균 제곱오차 MSE는 0에 가까울수록 오차가 적음을 뜻한다.

#### 4. $\beta$ -peak 추출시험

본 연구에서는 극점이 불분명한 동 저항 커브의  $\beta$ -peak를 Heating energy를 이용하여 추출하는 방법을 제시하였다. 4.1장에서는 용접시험에 대해 설명하였고, 4.2장에서는 우선 극점이 명확한 동 저항 커브가 출력되는 용접 조건들만 사용하여 너겟 직경을 예측하였다. 4.3장에서는 한가지 용접 조건만 극점이 명확한 동 저항 커브를 출력하고, 나머지 용접조건은 극점이 불분명할 때 Heating energy를 이용해  $\beta$ -peak 추출을 하였다. 그리고  $\beta$ -peak이 유효한지 확인하기 위해 선형회귀분석을 통해 너겟 직경을 예측하여 실제 측정된 너겟 직경과 비교하였다.

##### 4.1 용접 시험

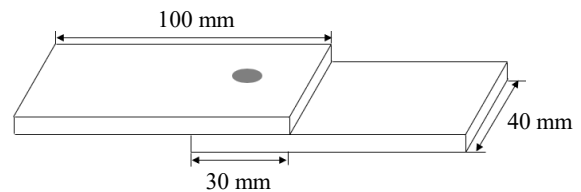
본 연구에서 사용된 용접기는 Fig. 7과 같이 인버터



**Fig. 7** MFDC resistance spot welding machine

**Table 3** Welding conditions

Name	Steel	Number of weld	Weld time (ms)	Current (kA)	Force (kgf)
Case 1	SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t	3	300ms	4-6kA	200kgf
Case 2	SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t	5	300ms	4-8kA	300kgf
Case 3	SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t	4	300ms	5-8kA	400kgf
SABC	SABC 1470 1.0t + SABC 1470 1.0t	6	300ms	3-5kA	200kgf



**Fig. 8** Dimensions of specimen for spot welding

DC 저항 점 용접기를 사용하였다. 총 18번의 용접을 진행하였다. Table 3은 용접 조건을 나타낸다. 본 실험의 재료는 합금화 용융 아연도금강판 SGAPH440과 도금재 핫스탬핑 재인 SABC1470과 같은 강재들을 사용하였으며, 용접 시편은 가로 100mm, 세로 40mm이며, 겹침 길이는 30mm이며, Fig. 8에 나타내었다. 용접전류는 1 KA 단위로 변화하여 실험을 수행하였다.

본 실험은 각 용접조건에 따른 동 저항 그래프를 얻기 위하여 진행되었다.

### 4.2 β-peak 추출법 검증

β-peak 추출법 검증에 사용한 데이터는 앞서 2.3장에서 사용한 용접 데이터와 동일하다. 본 실험의 재료는 SGAPH440을 사용하였고 같은 용접 시편에 가압력과 Current를 다르게 하여 용접을 시행하였다. 용접 조건은 Table 1과 동일하며 모든 용접 조건에서 극점이 명확한 동 저항 커브를 가진다. 검증 방법은 기준이 되는 용접조건 Case 1에서 Heating energy를 계산하여 다른 용접 조건의 β-peak를 추출하여 비교하고, 추출한 β-peak으로 너겟 직경을 예측하여 실제 측정된 너겟 직경과 비교를 통해 β-peak 추출법을 검증하였다.

우선 기준이 되는 용접조건은 Case 1의 4kA이다. β-peak은 44.8 ms, 저항 값은 401(μΩ)이다. Fig. 9은 Case1의 4kA 동 저항 커브다.

Case 1 4kA의 Heating energy는 1722756 (mJ)이며, 이를 기준으로 β-peak을 추정하였다. 그 결과를 Case 1,2,3 용접조건에 대해 Table 4에서 확인할 수 있으며, 추정된 β-peak 과 실제 β-peak을 비교한 결과도 확인할 수 있다. Case 1 5kA, Case 2 5kA, 7kA에서 2.8 ms의 오차를 확인할 수 있는데, 단위 측정시간이 2.8ms이므로, 오차가 크지 않다고 판단하였다.

추정된 β-peak을 활용하여 X3, X7, X11 3가지 저항 특성 값을 추출하였고, 이는 Table 5에서 확인할 수 있다. 이렇게 추출한 저항 특성 값을 이용하여 선형 회귀분석을 실시하였다. 3가지 저항 특성 값을 독립변수로 사용하여 추정된 회귀식은 식(8)에 나타났다.

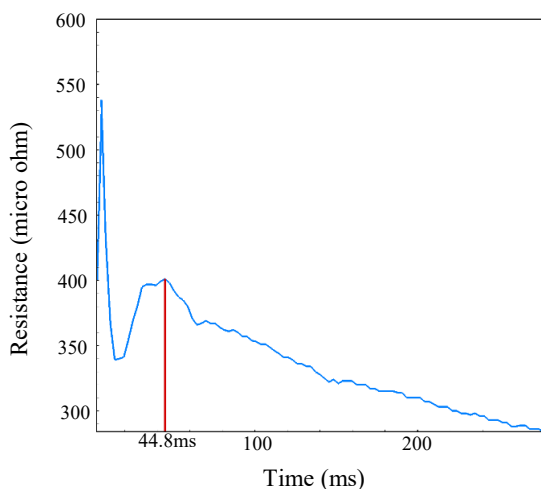


Fig. 9 Dynamic resistance curve at 4kA of SGAPH440 1.4t + SGAPH440 1.4t

$$\hat{Y} = 2.7482 - 7.823 \times X3 + 4.288 \times X7 - 8.7163 \times X11 \quad (8)$$

Table 6와 Fig. 10은 선형회귀 모델을 이용하여 예측된 너겟 직경과 실제 너겟 직경을 비교하여 나타낸 표와 그래프이다. 이렇게 예측한 너겟 직경에 대하여 계산한 결정계수와 평균제곱오차는 각각 0.95, 0.03임을 확인할 수 있었다.

본 장에서는 β-peak이 명확한 동 저항 커브에 대하여 Heating energy를 활용하여 β-peak을 추출하고 너겟 직경을 예측하였으며, 그 결과 β-peak추출 방법이 유효함을 알 수 있었다.

Table 4 Comparison of actual β-peak and extracted β-peak using heating energy

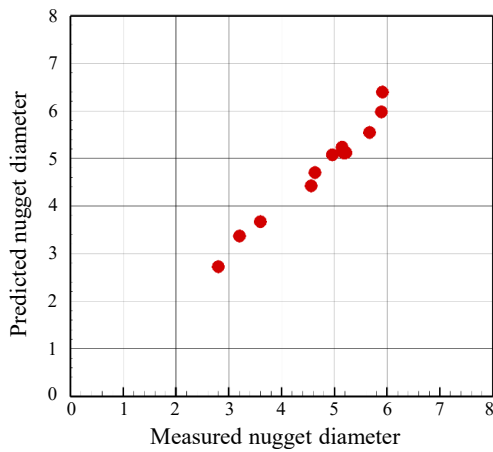
	Current (kA)	Actual β-peak (ms)	Extracted β-peak (ms)	Error (ms)
Case 1	4	44.8	44.8(Measured)	-
	5	36.4	33.6	2.8
	6	30.8	30.8	-
Case 2	4	47.6	47.6	-
	5	39.2	36.4	2.8
	6	33.6	33.6	-
	7	30.8	28	2.8
Case 3	8	25.2	25.2	-
	5	42	42	-
	6	33.6	33.6	-
	7	30.8	30.8	-
	8	28	28	-

Table 5 Characteristic values of cases 1,2,3

	Current	X3	X7	X11
Case 1	4	117	232.4	27190.8
	5	131	240.8	31544.8
	6	124	243.6	30206.4
Case 2	4	72	229.6	16531.2
	5	110	238	26180
	6	120	243.6	29232
	7	124	246.4	30553.6
Case 3	8	140	252	35280
	5	76	235.2	17875.2
	6	90	243.6	21924
	7	99	246.4	24393.6
	8	115	249.2	28658

**Table 6** Comparison of measured nugget diameter with predicted nugget diameter through linear regression analysis

	Current (kA)	Measured nugget diameter(mm)	Predicted nugget diameter(mm)
Case 1	4	3.2	3.228058
	5	4.63	4.621149
	6	5.22	5.069814
Case 2	4	2.8	2.62632
	5	4.56	4.480768
	6	5.18	5.223873
	7	5.67	5.706046
Case 3	5	3.6	3.857512
	6	4.96	4.827304
	7	5.15	5.415602
	8	5.89	6.08325



**Fig. 10** Relationship between measured and predicted nugget diameter

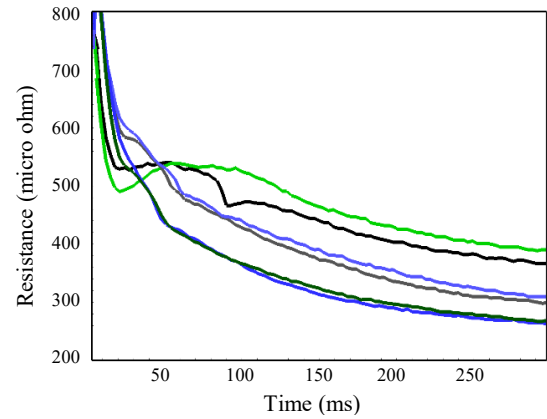
### 4.3 $\beta$ -peak 추출법 적용

앞서 4.1장에서 동 저항 커브에서 Heating energy를 이용한  $\beta$ -peak추출 방법은 유효한 방법이라는 것을 알 수 있었다. 이에 근거하여  $\beta$ -peak이 명확하지 않은 용접에 대해 4.1의 방법을 적용하였다.

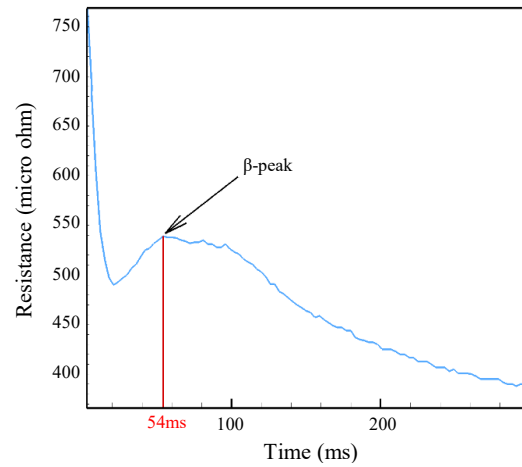
4.2장의 실험 재료는 차체 제작에 많이 사용되는 도금재 핫스탬핑 재인 SABC1470을 사용하였다. SABC 용접은 같은 용접 시편 (SABC1470 1.4t)에 가압력은 200kgf로 동일하며 Current를 1kA 단위로 변화하여 두번씩 용접을 시행하였다. Table 7은 SABC 용접조건을 나타낸 표이며, Fig. 11은  $\beta$ -peak이 명확하지 않은 SABC 용접의 동 저항 커브를 보여주는 그림이다.

**Table 7** SABC welding conditions

Name	Steel	Number of weld	Weld time (ms)	Current (kA)	Force (kgf)
SABC	SABC 1470 1.0t + SABC 1470 1.0t	6	300ms	3-5kA	200kgf



**Fig. 11** Dynamic resistance curves for SABC 1470 welding



**Fig. 12** Dynamic resistance curve at 3kA of SABC 1470 1.0t + SABC 1470 1.0t

우선 기준이 되는 동 저항 커브는 SABC용접의 3kA-b일 때 동 저항 커브다. 3kA-b일 때를 기준을 선정할 이유는 SABC용접에서 유일하게 명확한  $\beta$ -peak이 출력되기 때문이다.  $\beta$ -peak시간은 54ms, 저항 값은 539( $\mu\Omega$ )이다. Fig. 12는 SABC용접의 3kA-b 동 저항 커브다.

SABC 용접조건 3kA-b의 Heating energy는 2417769(mJ)이며 이를 통해  $\beta$ -peak추정을 하였다. Table 8은 SABC용접 3kA-b 기준으x로  $\beta$ -peak추정을 나타낸 표다.

**Table 8** SABC welding  $\beta$ -peak estimation

SABC welding	Estimation $\beta$ -peak(ms)
3kA-a	54
3kA-b	54(Measured)
4kA-a	36
4kA-b	36
5kA-a	33
5kA-b	33

**Table 9** SABC welding characteristics values

	Current	X3	X7	X11
SABC welding	3-a	174	243	42282
	3-b	149	243	36207
	4-a	268	261	69948
	4-b	262	260	68120
	5-a	256	264	67584
	5-b	245	264	64680

**Table 10** Comparison of measured nugget diameter with predicted nugget diameter through linear regression analysis

	Current (kA)	Measured nugget diameter(mm)	Predicted nugget diameter(mm)
SABC welding	3-a	1.47	1.471505
	3-b	1.47	1.470195
	4-a	3.55	3.62179
	4-b	3.55	3.487234
	5-a	4.32	4.278309
	5-b	4.32	4.350967

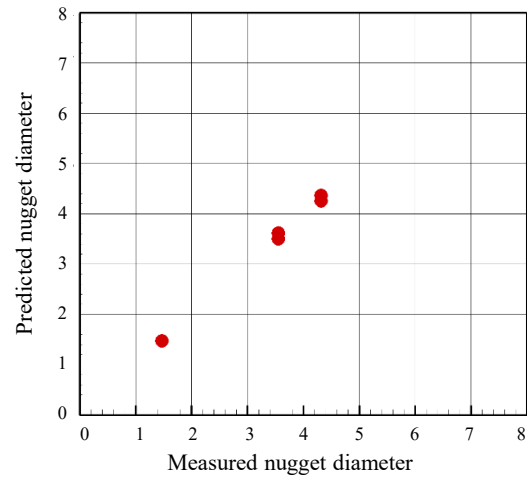
추정된  $\beta$ -peak으로 너겟 직경을 예측하기 위해 선형 회귀분석을 진행하였으며, 이 때의 특성 값은 추정된  $\beta$ -peak을 이용하여 추출하였다.

Table 9는 추정  $\beta$ -peak을 기준으로 계산한 특성 값 X3, X7, X11이며, 이 값들을 이용하여 선형회귀분석을 실시하였다.

3가지 저항 특성 값을 독립변수로 사용하여 추정된 회귀식은 식(9)에 나타냈다.

$$\hat{Y} = 1.470 - 2.009 \times X3 + 3.507 \times X7 + 1.149 \times X11 \quad (9)$$

Table 10과 Fig. 13은 선형회귀 모델을 이용하여 예측된 너겟 직경과 실제 너겟 직경을 비교하여 나타낸 표와 그래프이다. 이렇게 예측한 너겟 직경에 대하여 계산한 결정계수와 평균제곱오차는 각각 0.99, 0.002



**Fig. 13** Relationship between measured and predicted nugget diameter

이며, 높은 정확도를 확인할 수 있다.

본 장에서는  $\beta$ -peak이 불분명할 경우 너겟 직경을 예측한 결과와 비교해 보았을 때, Heating energy를 활용하여  $\beta$ -peak을 계산하고 너겟 직경을 예측한 결과가 높은 정확도를 가지고 있다. 이에 근거하여 불분명한 Heating energy를 활용하여 불분명한  $\beta$ -peak을 추출하는 방법이 유효하다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 본 연구에서는 불분명한  $\beta$ -peak을 검출하기 위해 Heating energy를 활용하는 방법을 제안하였다.

동일한 모재에서 Heating energy의 차이가 크지 않다는 것을 이용하여 명확한  $\beta$ -peak을가지는 동 저항 커브의 Heating energy를 토대로  $\beta$ -peak을 추출하였다. 추출한  $\beta$ -peak을 검증하기 위해 저항 특성 값 11가지와 너겟 직경 간의 상관관계 분석을 통해 너겟 직경과 가장 큰 상관성을 가지는 3가지 인자를 독립변수로 사용하여, 다중선형회귀분석을 실시하고 너겟 직경을 예측하였다. 4.2장  $\beta$ -peak추출법 검증에서 극점이 명확한 동 저항 커브들만 사용하여 결정계수 0.96, MSE 0.03의 정확도를 가지며  $\beta$ -peak을 Heating energy를 이용하여 추출하는 방법을 검증하였다. 4.3장  $\beta$ -peak추출법 적용에서는 극점이 명확하지 않은 동 저항 커브에 적용하여 결정계수 0.99, MSE 0.002의 정확도를 가지며 정확하게 예측하는 것을 확인하였다. 이에 근거하여 극점이 불분명한 동 저항 커브의  $\beta$ -peak을 Heating energy를 이용하여 추출하는 방법을 제시하였다.

그러나 앞서 4.3장  $\beta$ -peak 추출법 적용에서 한가지 모재를 사용하였고, 용접 조건도 Current만 변경하여



실험을 수행하여서 실제 다양한 모재와 용접조건을 사용하는 현장에서 사용하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 보다 많고 다양한 모재와 용접조건을 사용한 용접 데이터의 확보를 하여 추가적인  $\beta$ -peak추출법 적용이 진행되어야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 “교육부의 한국연구재단 기초연구사업(No. NRF-2020R1G1A1014243)”과 “과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성 (GrandICT 연구센터)사업 (IITP-2022-2020-0-01791)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

ORCID: JaHun Ku: <https://orcid.org/0000-0001-6272-6622>

ORCID: Namkug Ku: <https://orcid.org/0000-0003-0364-1279>

### References

1. Y. J. Cho and S. H. Rhee, Characterization of Primary Dynamic Resistance in Resistance Spot Welding, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 17(2) (1999) 97-103.
2. S. W. Shin, J. H. Lee, and S. H. Park, Strength Estimation Model of Resistance Spot Welding of 1.2 Grade Ultra High Strength TRIP Steel for CarBody Applications, *J. Weld. Join.* 36(1) (2018) 82-89.  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.1.10>
3. S. S. Park and Y. D. Park, A Comparison of Spot Weldability with Electrode Force Changes in Surface Roughness Textured Steel, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 26(2) (2008) 75-84.  
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2008.26.2.075>
4. H. S. Cho, Welding Quality Supervision and Control in Resistance Welding Processes, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 18(4) (2000) 11-19.