

# 자동차용 첨단 고강도강 전기저항점용접의 비산(expulsion) 현상

공 종 판 · 강 정 윤

## Expulsion of Electric Resistance Spot Welding in Advanced High Strength Steels for Automobile

Jong-Pan Kong and Chung-Yun Kang

### 1. 서 언

자동차 산업에서 승객과 보행자의 안전규제 강화에 따른 차체 고강도화 및 CO<sub>2</sub> 등의 가스 배출 저감을 위한 차체 경량화가 필수적으로 요구됨에 따라 첨단 고강도강(Advanced High Strength Steel, AHSS)의 적용이 급격히 증가하고 있다. 첨단 고강도강을 차체에 적용하기 위해서는 용접이 필수적이며, 원가 측면에서 유리한 전기저항점용접(Resistance Spot Welding, RSW)이 차체 용접에서 80%이상으로 가장 많이 적용되고 있다<sup>1)</sup>. 일반적으로 비산(expulsion)은 저항열에 의해 모재가 녹은 용융금속(molten metal)이 너깃(nugget) 밖으로 빠져나가는 현상을 말하며<sup>2,3)</sup>, 전기저항용접성을 좌우하는 중요한 인자 중 하나이다. 또한 비산은 용접변수와 원소재의 기계적, 전기적, 열적 성질 등의 복합적인 인자에 의해 발생되기 때문에 비산 예측과 제어는 상당히 어렵다.

한편 첨단 고강도강은 기존의 연강(mild)과 비교하여 첨가원소의 함량이 많아 전기저항이 상당히 높고, 열전도율이 낮은 특징이 있어 너깃직경이 크고, 비산 발생이 쉽다<sup>4,6)</sup>. 지금까지 보고된 대부분의 연구는 비산에 미치는 공정변수(가압력, 용접전류, 용접시간, 전류 형태)의 영향에 대한 연구가 대부분이고, 합금원소 및 함량의 영향에 대한 체계적인 연구는 거의 없는 실정이다.

본 해설에서는 자동차용 첨단 고강도강 전기저항점용접의 비산 현상과 비산의 예측과 제어에 대한 연구결과를 소개하고자 한다. 또한 최근 자동차 산업에서 가장 이슈(issue)가 되고 있는 핫 스탬핑(hot-stamping)용 Al-Si 용융 도금된 보론강판의 전기저항점용접 시 비산 제어에 대한 최신 연구 결과를 소개하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 비산에 대한 일반적인 현상

비산이란 전기저항점용접 시 저항열에 의해 모재가 녹은 용융금속이 너깃 밖으로 빠져나가는 현상을 말한다. 비산은 주로 두 모재 사이의 접합면에서 고상접합된 코로나 본드(corona bond)사이로 용융금속이 빠져나가며 발생이 되고, 일부 전극과 모재 표면에서도 발생하기도 한다.

Fig. 1은 DP(dual phase)강의 전기저항점용접 시 비산이 발생된 용접부의 대표적인 광학현미경 단면 조직 사진을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 가장 큰 특징은 용융금속이 너깃 밖으로 빠져나감에 따라 너깃의 중심부에 기공(voids)이 발생하고, 압흔(indentation) 또는 오목한 자국의 깊이가 상당히 깊게 나타난다. 너깃의 중심부에 발생된 기공은 용접부의 결합력을 약하게 하여 계면파단(Interfacial fracture)이 잘 일어나게 하는 원인이 되며, 이로 인해 접합부 강도 및 충돌 안정성을 상당히 저하 시킨다<sup>2,3,6)</sup>. 그리고 깊은 압흔은 외부의 힘이 가해질 때 응력이 집중되기 때문에 접합강도와 피로강도 등을 저하시키며, 전극 선단부의 마모가 가속화되어 팁(tip)을 자주 교체해야 하는 문제가 있

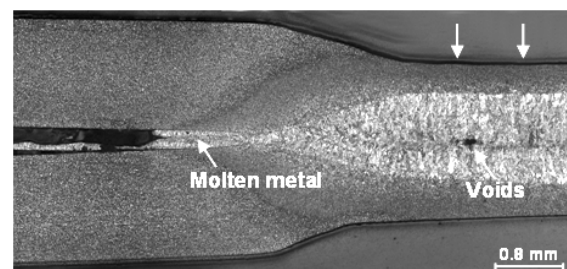


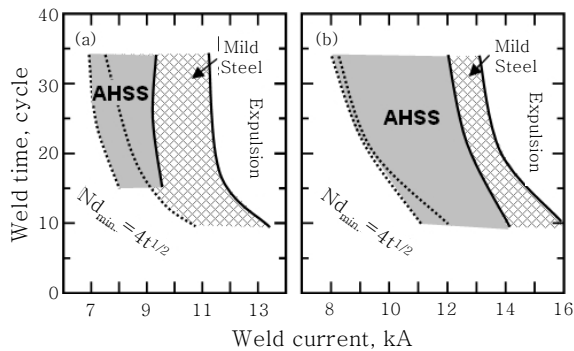
Fig. 1 Cross-section of spot welds with expulsion

다<sup>6)</sup>. 일반적으로 자동차 업체에 따라 최소 압흔 깊이 허용 범위는 조금씩 다르지만, AWS D8.7의 규정에서는 최소 압흔 깊이를 모재의 두께에 30%이하로 제한하고 있다<sup>7)</sup>.

### 2.2 철판 고강도강판 전기저항점용접의 로브 곡선(lobe curve)

로브곡선(lobe curve)은 자동차산업에서 전기저항점용접성을 평가하는 지표로 사용되고 있다. 일반적으로 로브곡선은 전극의 가압력을 고정된 상태에서 용접전류와 용접시간에 따라 최소 너깃직경 ( $4t^{1/2}$  또는  $5t^{1/2}$ ) 또는 최소 인장강도를 만족하는 하한전류와 비산이 발생하는 상한전류 (또는 비산한계전류) 사이의 폭을 이용하여 용접성을 평가한다<sup>2)</sup>.

Fig. 2는 연강(Mild steel)과 철판 고강도강(AHSS)의 로브곡선을 나타낸 것이다<sup>8)</sup>. (a)는 가압력을 2kN로, (b)는 가압력을 5.4kN로 고정했을 시 각각의 로브곡선을 나타낸다. 이 결과로부터 철판 고강도강은 연강에 비해 비산이 저 전류에서 발생이 되고, 적정용접 폭이 좁으며, 특히 가압력이 낮을 시 아주 좁다. 즉, 철판 고강도강의 전기저항점용접 시 비산 발생이 연강에 비해 상당히 쉽다는 것을 알 수 있다. Han<sup>6)</sup>의 연구 결과에 따르면 철판 고강도강판이 연강 보다 비산 발생이 쉬운 이유는 첨가된 합금원소의 함량이 많아 전기저항이 높아져, 과도한 저항열이 발생되기 때문에 비산이 잘 일어난다고 하였다. 그러나 철판 고강도강판이 연강보다 비산 발생이 쉬운 이유에 대해 체계적으로 검토한 연구 결과는 거의 없는 실정이다. 이에 따라 철판 고강도강 전기저항점용접의 비산에 대한 연구가 절실히 필요하다.



**Fig. 2** Comparison with mild steel and advance high strength steel (AHSS) lobe curve. (a) electrode force, 2.7kA, (b) electrode force, 5.4 kN<sup>8)</sup>

### 2.3 비산 예측

일반적으로 비산은 용접변수와 원소재의 기계적, 전기적, 열적 성질 등의 복합적인 인자에 의해 발생되기 때문에 비산 예측 시 고려해야 할 사항이 많다<sup>10-11)</sup>. 일반적으로 비산 예측은 크게 합금원소에 따라 변하는 물성들을 이용하여 이론적으로 예측하는 방법과 용접과정 중에 비산발생 시 특정 신호를 이용한 방법으로 나누어진다.

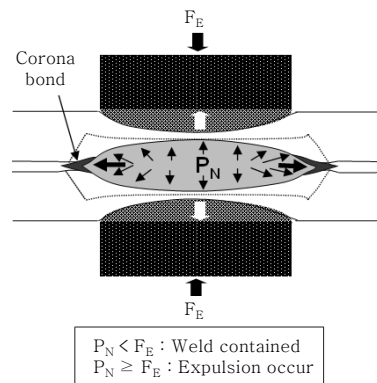
#### 2.3.1 이론적 계산을 통한 비산 예측

Senkara의 연구결과에 따르면 비산은 전극의 가압력과 너깃 내에서 발생하는 압력과 밸런스(balance)에 의해 발생한다고 제안하였다<sup>13)</sup>. Fig. 3는 Senkara가 제안한 모델의 모식도를 나타낸 것이다. 즉, 비산은 너깃 내에서 발생하는 압력( $P_N$ )이 전극의 가압력( $F_E$ )보다 클 때 발생한다. 너깃 내에서 발생하는 총 압력은 수식(1)로 표현 할 수 있다.

$$P_N = P_{Melt.} + P_{Expan.} + P_{Vapor.} \quad (1)$$

여기서,  $P_{Melt.}$ 는 모재가 저항열에 의해 고상이 용융됨에 따라 발생하는 액상의 압력을 나타내고,  $P_{Expan.}$ 은 너깃 내에서 용융된 액상이 팽창함에 따라 발생하는 압력을 나타내며, 또한  $P_{Vapor.}$ 은 액상이 증발됨에 따라 발생하는 압력을 나타낸다. 그러나 너깃 내에서 액상의 증발은 거의 없기 때문에  $P_{Vapor.}$ 항은 무시해도 된다. 따라서  $P_N$ 은 수식(2)로 표현할 수 있다. 수식(2)에서 왼쪽 항은  $P_{Melt.}$ 를 나타내고, 오른쪽 항은  $P_{Expan.}$ 을 나타낸다.

$$P_N = \frac{1}{k} I n \frac{V_L}{V_S} + \frac{\alpha}{k} (T_{Ave.} - T_{Melt.}) \quad (2)$$



**Fig. 3** Schematic diagram of the balance of forces considered in the model.  $P_N$  : pressure from the nugget,  $F_E$  : electrode force<sup>13)</sup>

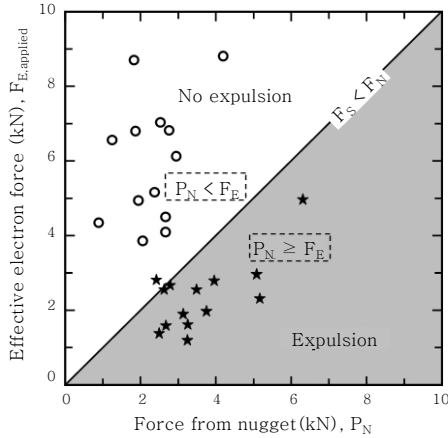


Fig. 4 Comparison of model prediction and experimental observation<sup>13)</sup>

여기서,  $k$ 는 압축계수( $m^2/N$ ),  $V_L$ 은 액상의 몰랄 부피( $cm^3$ ),  $V_S$ 는 고상의 몰랄 부피( $cm^3$ ),  $\alpha$ 는 열팽창 계수( $10^{-6}/^\circ C$ ),  $T_{Ave.}$ 는 너깃내의 평균 온도( $^\circ C$ ),  $T_{Melt.}$ 는 용점( $^\circ C$ )을 나타낸다. 그리고 용접부에 가해지는 실제 전극의 가압력( $F_{E,applied}$ )은 외부에서 가해주는 전극의 가압력( $F_E$ )보다 약 30% 정도 낮다고 하였다( $F_E \approx 0.7F_{E,applied}$ ).

Fig. 4는 실제 전극의 가압력과 이론적으로 계산한 너깃 내의 총 압력사이의 상관관계를 통해 비산을 예측한 결과를 나타낸 것이다<sup>13)</sup>. Fig. 4에서 알 수 있듯이 너깃 내의 총 압력이 실제 전극의 가압력보다 큰 영역에서 비산이 나타난다. 따라서 이론적으로 너깃 내의 총 압력을 계산 할 수 있다면, 비산을 예측 할 수 있으며, 또한 비산 발생을 제어할 수 있는 최적 전극의 가압력을 제시 할 수 있다.

2.3.2 비산에 미치는 합금원소의 영향

침단 고강도강관의 기계적, 전기적, 열적 성질 등은 합금원소에 지배적으로 영향을 받고, 이로 인해 전기저항점용점의 비산에 영향을 미치게 된다. 따라서 비산을 예측하기 위해서는 우선적으로 침단 고강도강 전기저항점용점의 비산에 미치는 합금원소의 영향에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

Fig. 5는 저항과 비산한계전류사이에 상관관계를 나타낸 것이다<sup>8)</sup>. A에서 H로 갈수록 Si함량이 증가하고, 이로 인해 저항도 증가한다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 Si함량 증가에 따라 저항이 증가하고 이로 인해 비산한계전류는 직선적으로 감소한다. 즉 저항과 비산한계전류사이에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Si, Mn, Cr 함량의 비율과 저항사이에 상관관계를 나타낸 것이다<sup>8)</sup>. Fig. 3에서 알 수 있듯이

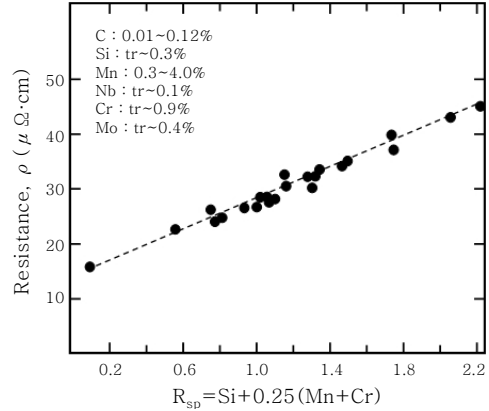


Fig. 5 Relationship between Rsp and resistance<sup>8)</sup>

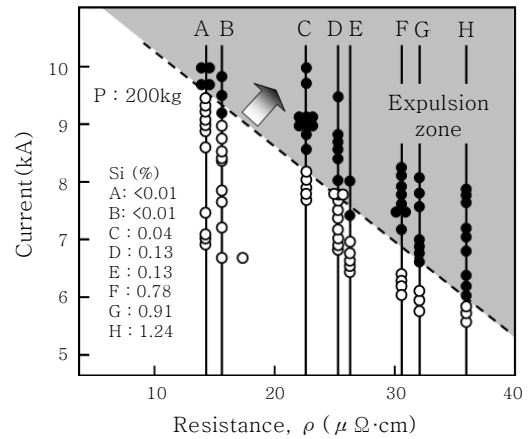


Fig. 6 Relationship between expulsion limits current and resistance<sup>8)</sup>

Si, Mn, Cr 함량의 비율이 증가함 따라 저항은 직선적으로 증가하고, Si는 가로축의  $R_{SP}$ 관계에서 Mn과 Cr 보다 저항 증가에 대한 기여도가 4배 높음을 알 수 있다.

Fig. 7는 두께가 1.2mm인 냉연 DP강에 Si와 Cr함량 변화에 따른 전기저항점용점의 로브곡선을 나타낸 것이다<sup>14)</sup>. 위의 실선은 비산한계전류를 나타내고, 아래의 점선은 최소 너깃직경 ( $4t^{1/2}$ )을 만족하는 하한전류를 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 Si와 Cr함량의 증가에 따라 비산한계전류는 감소하고, Si함량 증가에 따른 비산한계전류의 감소폭이 더 크다. 그리고 Si와 Cr함량 증가에 따라 최소 너깃직경을 만족하는 하한전류는 감소하나, 이는 비산한계전류 감소폭 보다 작다.

일반적으로 저항과 용점은 너깃내의 액상의 양에 영향을 미치며, 저항이 높고, 용점이 낮으면 액상이 되기 쉽기 때문에 너깃 내의 액상 양은 많다. 또한 액상의 점성이 낮을수록 액상의 유동성은 증가한다.

Fig. 8은 Si와 Cr함량의 증가에 따른 비산한계전류

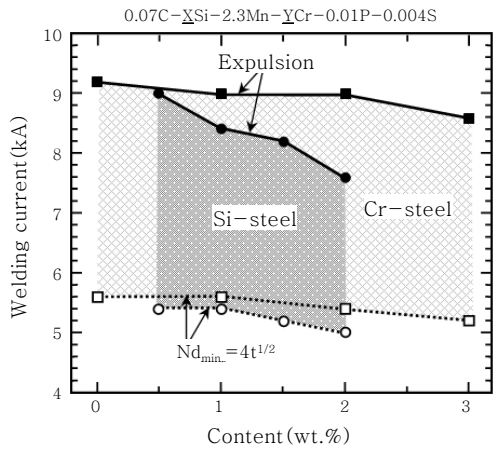


Fig. 7 Welding lobe curve with alloy content and welding current<sup>14)</sup>

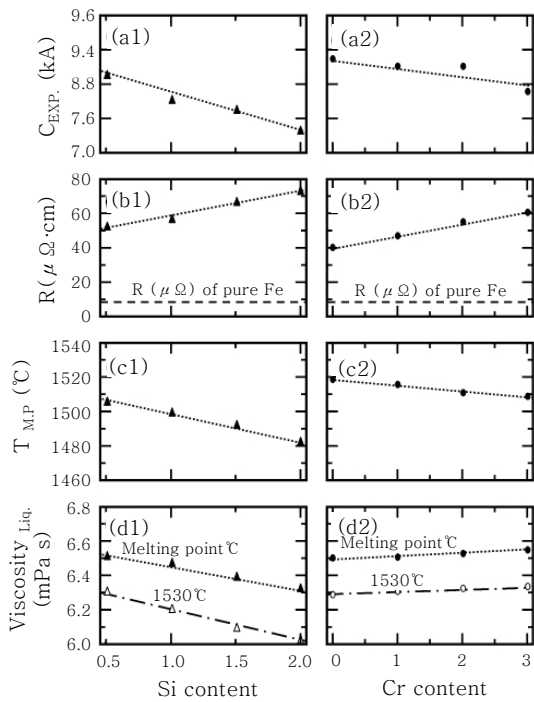


Fig. 8 Expulsion limits current (a,e), Resistivity (b,f), melting point (c,g) and viscosity of liquid(d,h) with Si and Cr content<sup>14)</sup>

(a1,a2), 저항(b1,b2), 용점(c1,c2)과 액상의 점성(d1,d2)를 나타낸 것이다<sup>14)</sup>. Fig. 8의 (b1), (b2), (c1), (c2)의 결과로부터 Cr보다 Si함량 증가에 따른 저항 증가폭과 용점 감소폭이 더 크기 때문에 너깃 내에 액상의 양은 많다. 그리고 Fig. 8의 (d1)과 (d2)의 결과로부터 액상의 점성은 Si함량의 증가에 따라 급격히 감소하는 반면, Cr함량의 증가에 따른 액상의 점성은 소폭 증가한다. 따라서 Si함량의 증가에 따른 액상의 유동성 향상은 Cr함량보다 더 크다. 결론적으로 Cr

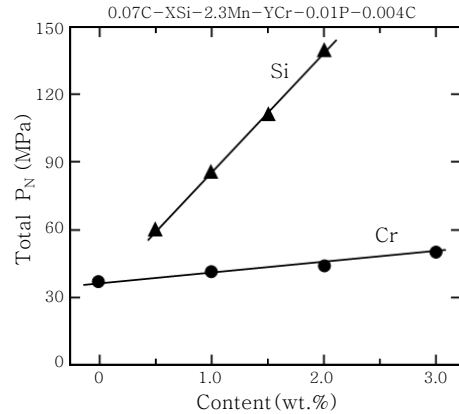


Fig. 9 Total pressure in nugget ( $P_N$ ) with Si and Cr content

보다 Si함량 증가에 따라 비산한계전류가 더 감소하는 것은 저항과 용점 변화에 따른 너깃내의 액상의 양과 액상의 유동성의 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 따라서 비산은 합금원소의 종류와 함량에 따라 변하는 저항, 용점과 액상의 점성 등과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 9은 Si와 Cr함량 변화에 따른 DP강의 전기저항점용부 너깃내의 총 압력 변화를 나타낸 것이다. 너깃내의 총 압력은 수식(2)를 이용하여 계산이 가능하며, 이때 필요한 물성들은 JMatPro<sup>TM</sup> 소프트웨어<sup>15)</sup>로부터 얻을 수 있다. JMatPro<sup>TM</sup> (acronym for “Java-based Materials Properties”)는 재료의 물리적, 열역학적 성질, 다성분 금속시스템의 거동에 대한 계산과 일반적으로 CCT 곡선을 작성하기 위한 Calphad 형의 소프트웨어 패키지이다.

한편 Fig. 9에서 알 수 있듯이 Si와 Cr함량 증가에 따라 너깃내의 총 압력은 증가하고, Cr보다 Si함량 증가에 따라 급격히 증가한다. 따라서 동일한 가압력을 가하더라도 Cr보다 Si함량이 너깃 내의 총 압력이 높기 때문에 Si가 Cr 보다 비산발생 확률 더 높다는 것을 의미한다.

이상 Fig. 5~9의 결과로부터 비산은 합금원소에 따라 변하는 저항, 용점, 액상의 점성등과 너깃내의 압력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 합금원소에 따라 변하는 철판 고강도강관의 저항, 용점, 액상의 점성등과 전기저항점용접부 너깃내의 압력을 계산 한다면, 비산을 예측 할 수 있을 것으로 생각된다.

### 2.3.3 전극의 변위를 이용한 비산 예측

일반적으로 비산 발생 시, Fig. 1에서 알 수 있듯이 액상이 너깃 밖으로 빠져나가기 때문에 압흔이 상당히 깊고, 이로 인해 위에서 가해주는 전극의 변위는 급격

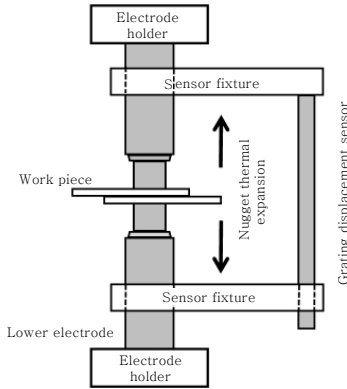


Fig. 10 The electrode displacement measuring system<sup>16)</sup>

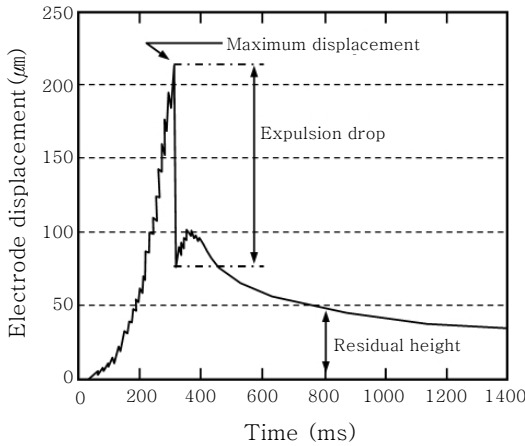


Fig. 11 The electrode displacement curve with welding expulsions<sup>16)</sup>

히 변하게 된다. 따라서, 전극 변위의 드롭(drop) 신호를 이용하여 비산을 예측하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다.

Fig. 10은 전기저항용접 시 전극의 변위를 측정하는 장비의 대표적인 모식도를 나타낸 것이다<sup>16)</sup>. 각 전극에 변위 센서를 고정하고, 용접 시 전극 변위를 측정한다. Fig. 11는 비산이 발생한 경우 용접시간에 따른 전극 변위 변화를 나타낸 것이다<sup>16)</sup>. Fig. 11에서 알 수 있듯이 비산 발생 시 전극의 변위가 급격히 감소한다. 따라서 이러한 전극 변위의 드롭을 이용하여 비산을 예측할 수 있다.

한편, Farson등은 스테인리스강의 small scale RSW에서 전압과 전극의 변위를 감지하여 비산사이와의 상관관계를 검토한 연구 결과를 보고한 바 있다<sup>17)</sup>. 또한 Meur등은 두께가 0.254mm인 AISI 302오스테나이트 스테인리스강의 small scale RSW에서 fiber optic sensor를 이용해 전극 변위를 정확히 측정할 수 있

는 모델을 제안한 바 있다<sup>18)</sup>. 그리고 Ma등은 Zn 용융 도금된 DP600의 전기저항점용접에서 용접 시의 동저항(dynamic resistance) 변화를 이용하여 비산 예측에 대한 연구 결과를 보고한 바 있다<sup>19)</sup>. 이 외에도 전극의 변위를 이용한 방법은 아니지만, Zhang<sup>2)</sup>과 Podrzaj<sup>20)</sup> 등은 통계적인 방법과 뉴럴 네트워크(neural network) 방법을 이용하여 비산 예측 모델을 제안한 바 있다.

2.4 비산 제어 방안

비산은 용접변수, 전류의 형태(AC, DC), 모재의 표면상태(도금 유·무), 합금성분 등에 따라 달라지기 때문에 제어가 상당히 어렵다. 특히, 내식성 향상을 위해 Zn 또는 Al-Si 용융 도금된 침탄 고강도강판은 첨가된 합금원소의 함량이 높고, 도금층이 용융부로 혼입됨에 따라 비산 발생 민감도가 높아, 비산 제어가 상당히 어렵다.

한편, 최근 자동차 산업에서 가장 이슈(issue)가 되고 있는 핫 스탬핑(hot-stamping)용 Al-Si 용융 도금된 보론강판의 전기저항점용접 시 비산 제어에 대한 최신 연구 결과를 소개하고자 한다.

Fig. 12은 인버터 DC점용접 시의 일반적인 용접전류파형(a)과 새롭게 설계된 펄스(pulse) 전류파형(b)에 대한 모식도를 나타낸 것이다<sup>21)</sup>. 펄스 용접전류파형은 동일한 가압력에서 1펄스 당 heating time과 cooling time이 다르다.

Fig. 13은 핫 스탬핑 열처리된 두께가 1.2mm인 Al-Si 용융 도금된 보론강판(NHPA-1500)의 인버터 DC 점용접시 일반적인 용접전류파형을 이용했을 때의 로브곡선(a)과 펄스 용접전류파형을 이용했을 때의 로브곡선(b)을 나타낸 것이다<sup>21)</sup>. 펄스 용접전류파형 조건에서는 1펄스 당 heating time은 20초, cooling time은 4초로 하여 총 15펄스로 용접을 실시하였다. Fig. 13에서 오른쪽의 실선은 비산한계전류를 나타내고, 왼쪽의 점선은 최소 인장강도를 만족하는 하한전류 나타

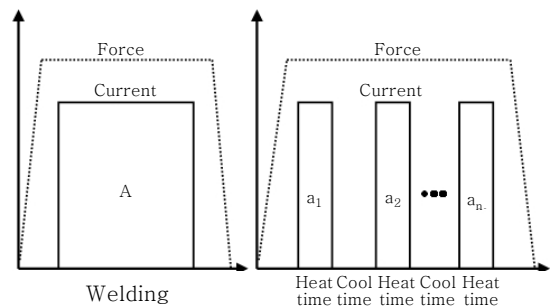


Fig. 12 Schematic diagram of inverter DC spot welding current waveform<sup>21)</sup>

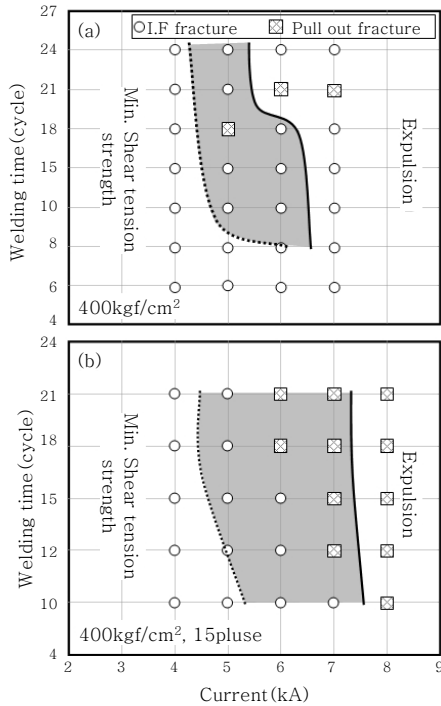


Fig. 13 Welding lobe for NHPA-1500 using conventional welding current form (a) and pulse welding current waveform (b)<sup>21)</sup>.

낸다. Fig. 13의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 최소 인장강도를 만족하는 하한전류는 거의 비슷하지만, 비산 한계전류는 펄스용접전류파형을 사용 했을 경우 오른쪽으로 이동한다. 즉 펄스 용접전류파형을 사용 시 적정 용접구간이 넓어진다는 것을 의미한다. 따라서 펄스 용접전류파형을 잘 이용한다면 Al-Si 용융 도금된 보론강판의 전기저항점용접 시 쉽게 발생하는 비산을 충분히 제어 가 가능할 것으로 생각된다.

이상 Fig. 5~9와 Fig. 13의 결과로부터 비산은 용접변수와 합금원소와 함량 조절에 따라 첨단 고강도강 전기저항점용접의 비산을 제어 할 수 있을 것으로 생각 된다.

### 3. 결 언

자동차 산업에서는 승객과 보행자의 안전규제 강화에 따른 차체 고강도화와 경량화를 통한 연비 향상을 위해 Mn, Si, Al 등 함량이 높은 TWIP, TRIP 등의 X-AHSS, U-AHSS 개발이 활발히 진행되고 있다. 최근에는 자동차 차체의 성형성을 획기적으로 향상시키기 위해 핫 스템핑 공정이 개발되고 있으며, 소입성이 우수한 Al-Si 용융 도금된 보론강판의 적용이 급격히 확대 되고 있다. 이러한 새로운 강종들은 첨가된 합금원소와 도금층에 의해 기존의 AHSS보다 전기적, 열적,

기계적 성질 등의 변화가 클 것으로 예상되며, 전기저항점용접 시 비산발생 확률이 높아져 용접성이 상당히 떨어질 것으로 예상된다. 따라서 전기저항용접성이 우수한 새로운 강을 개발하기 위해서는 우선적으로 비산에 미치는 합금원소의 영향에 대한 데이터베이스 구축이 절실히 요구 된다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합분야(NCRC)로부터 지원받아 수행되고 있는 연구결과입니다 (2007-0161-004).

### 참 고 문 헌

1. T.K. Han., K.Y. Lee. and J.S. Kim : Recent Developments and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, Journal of KWJS, **27** (2009), 131-132 (in Korean)
2. H. Zhang, S. Jack H and J. Senkara : A statistical Analysis of Expulsion Limits in Resistance Spot Welding, Journal of Manufacturing Science and Engineering, **122** (2000), 501
3. J. Senkara, H. Zhang and S.J. Hu : Expulsion prediction in resistance spot welding, Weld J, **83** (2004), 123s
4. D.Y. Choi and Y.G. Kim : Trend of Joining Technology for Automotive Sheet Steels, Journal of KWJS, **27** (2009), 125-126 (in Korean)
5. H. OIKAWA, G. MURAYAMA, T. SAKIYAMA, Y. TAKAHASHI and T. ISHIKAWA : Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobiles, Nippon Steel Technical Report, **95** (2007), 40-45 (in Japanese)
6. Z. Han and J.E. Indacochea : Effects of Expulsion in Spot Welding of Cold Rolled Sheet Steels, Journal of Materials Engineering and Performance, **2** (1993), 437
7. AWS D8.7 Recommended Practices for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding (SAE J 1188) R(1994)
8. 山内, 高:高張力鋼板のスポット溶接性,溶接學會抵抗溶接研究委員資料, RW-166-79 (1979) (in Japanese)
9. C. S. Chien and E. Kannatey-Asibu, Jr : Investigation of monitoring systems for resistance spot, Weld. J., **9** (2002), 195s - 199s
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 J., **12** (1987), 378s-385s
11. M. Hao, K. A. Osman, D. R. Boomer and C. J. Newton: Newton, Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum, Welding

- J., **1** (1996), 1s-8s
12. Y. Cho and S. Rhee : Primary circuit dynamic resistance monitoring and its application on quality estimation during resistance spot welding, *Welding Researcher*, **6** (2002), 104s - 111s
  13. J. Senkara, H. Zhang and S.J. Hu, Expulsion prediction in resistance spot welding, *Weld J*, **83** (2004), 123s-132s
  14. J.P Kong, G.M. Kang, T.K. Han and C.Y. Kang : Effects of Si and Cr content on Expulsion in Electric Resistance Spot Welding of Dual Phase Steel, *Proceedings of ECO-MATES 2011* (November 2011), Osaka, Japan, 285-286
  15. N.Saunders, Z. Guo, X. Li, A. P. Miodownik and L. P. Schille : Using JMatPro to Model Materials Properties and Behavior, *JOM*, **55** (2003), 60
  16. L. Gong, and C.L. Liu : Electrode Displacement Patterns Inferred as the Optimal Control Criteria during the Resistance Spot Welding Process, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center (May 2011), Shanghai, China, 149-150
  17. D.F. Farson, J. Z. Chen, K. Ely and T. Frech : Monitoring of expulsion in small scale resistance spot welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, **6** (2003), 431 - 436
  18. G.L. Meur, B. Bourouga, T. Dupuy : Measurement of contact parameters at electrode/sheet interface during resistance spot welding process, *Science and Technology of Welding and Joining*, **6** (2003), 415 - 420
  19. C. Ma, S. D. Bhole, D. L. Chen, A. Lee, E. Biro and G. Boudreau : Expulsion monitoring in spot welded advanced high strength Automotive steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, **11** (2006), 480-487
  20. P. Podrzaj, I. Polajnar, J. Diaci and Z. Kariz : Meas. Expulsion detection system for resistance spot welding based on a neural network, *Sci. Technol.*, **15** (2004), 592 - 98
  21. I.S. Hwang, M.J. Kang and D.C. Kima : Expulsion Reduction in Resistance Spot Welding by Controlling of welding Current Waveform, *Procedia Engineering*, **10** (2011). 2775-2781



- 공중판
- 1982년생
- 부산대학교 대학원생(박사과정)
- 용접야금
- e-mail : kjp1848@hanmail.net



- 강정윤
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학과 정교수
- 용접야금
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr