

## 컨덴서 돌기용접성과 공정계측 결과에 관한 고찰

### Projection Weldability and Process Monitoring in the Condenser Discharge Welding

포항산업과학연구원 김 기 철

#### 1 서언

컨덴서 돌기용접은 저항 용접의 한 방법이므로 용접을 실시하기 위하여 기본적으로 대전류를 공급할 수 있는 전원장치, 압력 인가장치 및 전극을 필요로 한다. 통상의 저항 점용접에 비하여 컨덴서 용접은 에너지 효율이 높고 용접부 품질이 우수하다. 이 용접법은 방전 초기에 매우 높은 값의 피크 전류를 용접부에 부여하는 특징이 있으므로 용접에너지의 밀도가 높아 표면처리 강재, 알루미늄 등과 같이 열 전도도가 높은 소재의 용접에 활용성이 크다. 뿐만아니라, 컨덴서 용접은 사용 에너지의 절대량이 적기 때문에 용접 변형과 용접부의 외관품질에서 다른 저항 용접법에 비하여 우수하며 제어변수가 비교적 단순하여 가전 및 정밀 부품 산업 분야 등에 적용되고 있다.

제품 생산라인에서는 블록형 전극을 이용하여 한 번에 여러 점을 동시에 용접하는 방법을 사용함으로써 용접 생산성을 높이고 있는데 용접장치의 종류에 따른 특성이 방전 에너지의 제어에 영향을 주기도하여 용접부 품질 불균일을 야기하는 경우가 있다. 또 아연도금 강재의 용접에서는 도금층의 금속학적 특성과 후처리 방법의 영향을 받아 용접 위치에서 방전조건이 바뀔 가능성이 있다. 이와같이 용접 위치에서 공정 조건의 변화가 발생하는 것은 컨덴서 돌기용접이 통상의 저항 점용접과 비교하여 압력 부가방법이 다르고 방전시간이 극히 짧은 오직 하나의 펄스 전류만을 사용한다는 점에 기인한다.

따라서 용접 품질을 안정화시키기 위하여는 용접 공정의 종합적인 감시와 가능하다면 각 설비별로 용접 공정을 능동 제어하는 편이 바람직할 것이다. 그러나 현실적인 원가 상승 문제에 당면하기 때문에 그러한 방법의 적용이 쉬운 일이 아니므로 공정감시 결과를 바탕으로 용접 현상과 품질의 연계성을 이해하고 용접 공정이 소정의 수준에 머물 수 있도록 관리하는 것이 최선의 방법임을 감안할 때 신뢰성 있는 공정의 모니터링은 그 중요성이 매우 높다. 여기에서는 이상과 같은 기술적 여건과 생산 현장의 환경을 고려하여 컨덴서 돌기 용접법의 개요와 용접성을 살펴본 다음 용접공정의 계측결과에 대한 논의 및 향후 풀어야할 과제에 관하여도 기술하고자 한다.

#### 2. 컨덴서 용접의 개요

컨덴서 용접법은 전해 컨덴서에 전기를 축적시킨 다음 소정의 용접 준비가 된 시점에서 순간적으로 대전류를 피용접재에 인가함으로써 용접을 이루는 방법이다. 따라서 용접기 입력측의 수전 용량이 다른 저항 용접기에 비하여 훨씬 작으므로 용접기 사용에 따른 입력 전력의 순간 저하를 일으키지 않는 장점이 있다. 용접기는 컨덴서, 용접변압기 및 충-방전제어장치로 구성되며 용접 에너지원인 컨덴서 충전 전압은 정전압회로에서 미조정 되도록 한다.

컨덴서에 축적되는 에너지(Q)는 컨덴서의 정전용량과 충전전압과의 관계로 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \frac{CV^2}{2} \text{ ----- (1)}$$

여기서, Q: 충전에너지(J)

C: 용량(F)

V: 충전전압(V)

위 식에서 알 수 있듯이 컨덴서 용접장치의 용량은 Q 값에 의하여 결정되며 이 값을 높이기 위하여는 충전 전압 또는 정전용량을 증가시켜야 하는데 실용적으로 컨덴서의 실용적인 내압은 최대 475V 정도이므로 전압을 높이는 것은 한계가 있다. 따라서 통상의 용접장치에는 여러 개의 컨덴서들을 병렬로 연결하여 C 값을 증가시킴으로써 용접기의 용량을 높이도록 설계되어 있다.

### 3 용접성에 영향을 미치는 요인

#### 3.1 전류의 형태에 미치는 방전 조건의 영향

그림 1은 컨덴서 용접장치를 개략적으로 나타낸 것으로 에너지 공급원 C, 전력 제어기 S 및 강압 변압기 L로 구성되어 있다. 용접변압기 L에서 변환 손실이 없다면 그림 1은 등가적으로  $n^2C$ , 변압기의 인덕턴스  $L_s$  및 부하저항  $R_s$ 로 표시된다. 이와같은 직렬회로에서 다른 정수들이 항상 일정하다면 축전량 q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s \frac{d^2 q}{dt^2} + R_s \frac{dq}{dt} + \frac{q}{n^2 C} = 0 \quad \text{-----}(2)$$

여기서, n: 변압기의 감은 수 비

$L_s$ : 변압기의 인덕턴스

$R_s$ : 2차 회로의 부하저항

위 식은 부하저항이 어떤 상태에 있는가에 따라서 진동조건, 임계조건 및 감쇠조건으로 나누어지며 각각의 조건에 따른 방전 전류 파형은 다음 식 및 그림 2와 같이 표시된다.

#### (1) 완전진동조건

$$i = Q \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\beta} \epsilon^{-\alpha t} \sin \beta t \quad \text{-----}(3)$$

#### (2) 임계조건

$$i = Q \alpha^2 t \epsilon^{-\alpha t} \quad \text{-----}(4)$$

#### (3) 감쇠조건

$$i = Q \frac{\alpha^2 - \gamma^2}{\gamma} \epsilon^{\alpha t} \sinh \gamma t \quad \text{-----}(5)$$

여기서,  $Q = nCV$

$$\alpha = \frac{R_s}{2L_s}$$

$$\beta = \frac{1}{2L_s} \sqrt{\frac{4L_s}{n^2 C} - R_s^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{2L_s} \sqrt{R_s^2 - \frac{4L_s}{n^2 C}}$$

실제로는 용접의 진행에 따라 용접점에서 접촉저항과 소재의 고유저항 등 부하저항이 항상 변하는 일종의 동부하 개념 도입이 필요한 상태가 되므로 방전 전류의 모양이 위 식(그림)과 동일한 형태를 나타내지는 않는다. 즉, 용접 시작점에서는 접촉저항의 역할이 상대적으로 중요하게 작용하여 용접장치의 2차 회로 저항

과 같거나 오히려 높은 수준이 되지만 용접의 진행과 함께 급격히 감소하여 방전 전류가 최대값에 이르기 전에 재료의 고유 저항값에 근접한다.

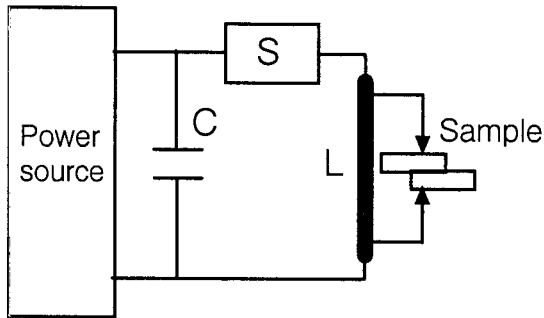


그림 1 컨덴서 방전형 용접장치

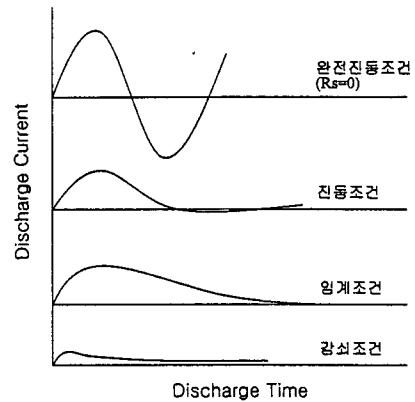


그림 2 방전전류 파형

또 2차 회로 저항( $R_s$ )은 방전 파형에 큰 영향을 미친다(그림 2). 실제의 용접장치에서는  $R_s$ 가 지나치게 클 경우 여자전류도 증가하기 때문에 1차 및 2차 회로의 전류 파형 불균형 발생으로 진동형 파형으로 나타날 가능성도 있다. 한편 용접장치의 throat length가 커지거나  $L_s$ 가 증가하면 방전 전류의 초기 상승기울기가 감소한다. 이와는 반대로  $L_s$ 가 작아지면 방전 전류의 초기 상승기울기가 증가하며 전류의 침투치도 상승한다.

사용자의 입장에서 볼 때 방전 전류의 형태에 영향을 주는 요소는 변압기의 감은 수 비  $n$ 이라고 할 수 있다. 왜냐하면 실제의 용접 장치에서는  $n$ 을 변화시켜 피용접 재료에 적합한 방전 파형을 부여하는 것이 일반적이기 때문이다.  $n$ 이 바뀐다는 것은 등가적으로  $C$ 를 변화시킨 것과 같으나 실제로는  $L_s$  및  $R_s$ 를 변화시킨 것과도 같기 때문에 방전 파형은 그들의 영향을 종합한 모양이 된다. 즉,  $n$ 이 커지면 전류의 초기상승 기울기가 낮아지고 침투치도 작아져 감쇠형이 된다. 그러나  $n$ 이 작아지면 초기 전류의 상승 기울기와 침투치가 동시에 증가하며 진동형 방전 모양을 보이는데 그림 3에는 이러한 현상을 개념적으로 표시하였다.

### 3.2 방전특성과 용접 조건

그림 4는 용접 과정에서 컨덴서 충전 전압과 변압기의 권수비  $n$  및 방전 전류의 침투치 상호간에 어떤 관계가 있는지를 나타낸 것이다. 이 그림에서는 용접 전극 사이에 시험편을 장착하지 않은 상태 즉, 이론적으로 부하저항이 "0"인 상태에서 용접 전력을 인가한 것이다. 충전 전압이 상승됨에 따라 최대 방전 전류도 증가하고 있다. 그러나,  $n$ 이 증가함에 따라 충전 전압에 관계없이 최대 방전 전류값이 저하되고 있는데 이러한 현상은 방전 회로상의 인덕턴스 영향을 받은 것이다. 한편, 그림 5는 전극 사이에 실제 시험편을 장착한 다음 전류를 인가한 결과로 충전 전압과 최대 전류 사이에 직선성이 다소 불분명해지고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 실제 시험편의 고유저항 차이 뿐만 아니라 용접 위치에서의 저항 거동과 접촉 계면의 저항에 큰 영향을 주는 오염 물질 또는 판의 평탄도 차이 등 요인이 존재하고 가열 및 용융 과정에서 모재의 금속학적 거동과도 관계가 있기 때문이다. 또 최대 전류값의 직선성이 변화하는 것 이외에도 이 실험 결과에서는 변압기의 권수비에 따라 기울기의 변화가 관찰된다. 한편 충전 용량  $C$ 가 증가하면 방전 소요 시간이 길어지고 방전 파형도 바뀌며 침투 전류치의 상승을 초래하지만 초기 방전 전류의 기울기는 관계가 없다.

한편 충전전압  $V$ 의 증가는 침투치의 상승을 유발하지만 방전시간과 방전 파형에는 영향이 없다. 실용적으로 용접 장치에서는  $n$ 을 변화시켜서 방전 파형의 변화를 만들어내는데  $n$ 은 변압기의 중간 탭을 이용하고 방전 전류의 크기는  $V$ 를 변화시켜 얻는다.

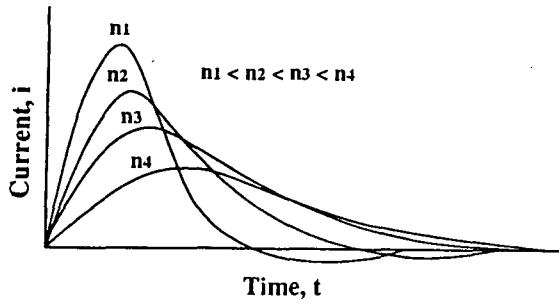


그림 3 변압기의 권수비와 방전전류 파형

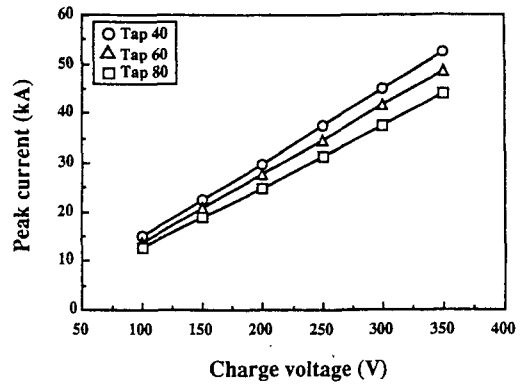


그림 4 권수비와 침두 전류와의 관계

### 3.3 용접성과 용접 조건

#### 3.3.1 방전에너지

용접부 전단인장강도에 미치는 방전에너지의 영향은 그림 6에 나타내었다. 그림에서 방전에너지가 낮은 경우 용접부 전단인장 강도는 방전에너지 증가에 따라 급격히 증가하였으나 어떤 값 이상에서는 방전에너지가 증가하여도 용접부 강도는 큰 변화가 없다. 그러나, 방전에너지가 더욱 높은 조건에서는 용접부 강도가 급격히 감소한다. 이것은 용융 금속의 비산에 의한 실질적인 용접 에너지의 손실 때문이다. 높은 충전전압에서는 침두 전류치가 매우 높고 방전 시간도 길기 때문에 통전 초기에 스패터가 발생하여도 용접부를 형성하기에 충분한 에너지가 남아있으므로 용접부 강도가 상승한다.

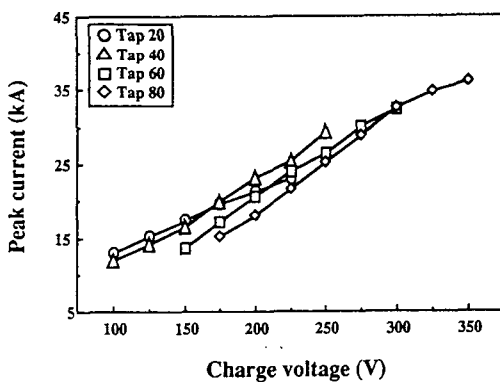


그림 5 실제 용접에서 권수비와 침두 전류

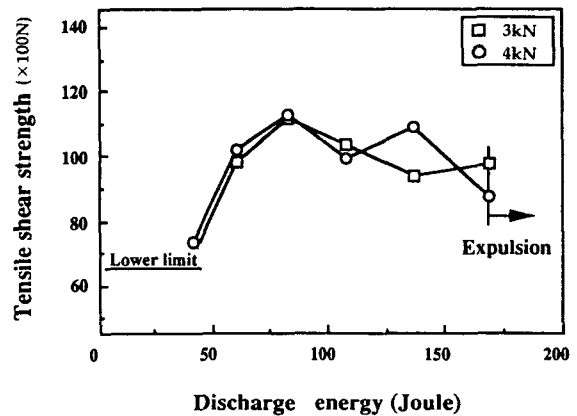


그림 6 용접부 강도와 충전에너지

#### 3.3.2 가압력 및 가압력의 응답속도

용접 초기의 압력이 증가하면 접합부의 접촉 면적이 증가하고 이것은 결과적으로 용접중의 전류밀도 감소를 초래한다. 용접 압력을 증가하면 적정 용접조건의 범위가 넓어지지만 그 압력이 지나치게 높으면 통전 초기의 접촉 면적 증가에 따라 전류 밀도가 감소하므로 컨덴서 용접의 본래 장점인 고전류밀도 용접을 저해할 수도 있다.

또, 전극의 가압 특성은 전류 파형의 변화와 함께 에너지 전달에 큰 영향을 미친다. 매우 높은 초기 방전 전류를 나타내는 컨덴서 방전에서는 이 전류에 의한 전극 반발력도 무시할 수 없을 정도로 크기 때문이다. 따라서 충분히 높은 전극 가압력, 전극 가동부 질량 감소, 운동부의 마찰저항 감소 및 가압력의 응답 속도가 높아야 한다.

#### 4 용접공정의 계측 및 활용

그림 7은 용접현상 계측장치를 써서 얻어낸 용접공정 변수들의 거동을 나타낸 것이다. 용접특성 해석에는 용접시작 후 대략 950ms-1,100ms의 시간대가 중요하다. 실제 용접에서 용접전류는 충전 에너지의 방전과 동시에 매우 빠른 속도로 최대값에 도달한다. 또, 피용접재에 전류가 흐르면 소재가 최초로 접촉하는 돌기 선단부는 발열에 의하여 가열 및 팽창되며 일정 시간이 경과된 다음 성형부의 끝이 가열에 의한 내력 저하와 용접 전극의 압력에 의하여 붕괴되면서 용융-압착된다.

이 때 만약 과도한 입열 에너지 또는 전류 밀도가 돌기를 통과하게 되면 가열된 금속이 과열 상태를 나타내게 되고 돌기 내부에 갇혀있던 공기나 오염물질의 급속한 팽창에 따라서 스패터를 형성하면서 비산해버린다. 이러한 현상은 용접기 측면에서 볼 때 순간적 부하 변동으로 나타나기 때문에 용접현상 계측장치를 이용하여 기록이 가능하다. 용접 전극 사이에 시험편을 장착하지 않은 상태에서 용접 전력을 인가할 때 압력 부가 장치에는 압력의 변화가 나타난다. 방전 전류가 낮은 경우에는 약간의 하중 변화가, 그리고 높은 전류를 인가하면 시간축의 방전 위치에서 높은 반발 압력이 계측된다.

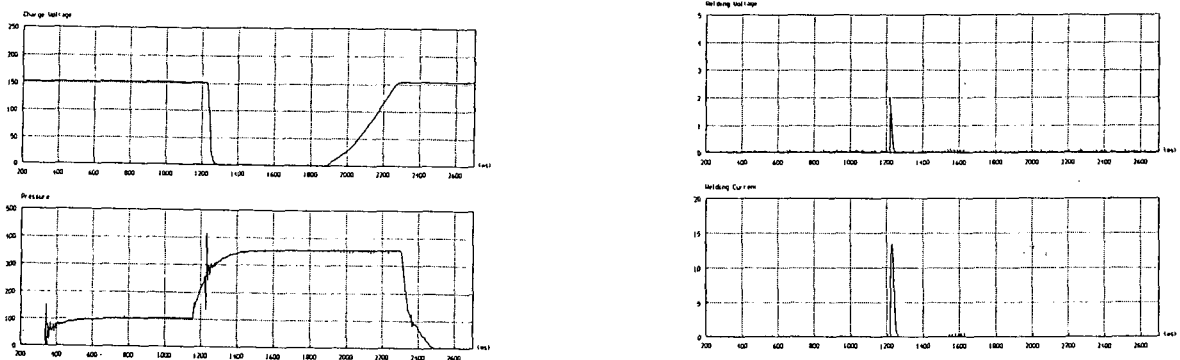


그림 7 용접 현상 계측 결과의 예

한편 실제로 시험재를 삽입하고 용접을 실시하는 공정에서 용접 전류를 인가하면 전술한 것 보다 큰 하중의 변화가 매우 짧은 시간에 일어난다. 이것은 방전시 접촉부가 급속히 가열되면서 부피 팽창을 수반하였기 때문이다. 방전 전류의 상승 속도는 시간축에 거의 수직으로 매우 급격히 증가하고 있기 때문에 열팽창 속도 또한 가열 속도에 따라 매우 빠르게 증가한다. 이러한 압력의 변화는 용접부 품질 정보의 하나로서 매우 의미있는 사실을 말해주는 것이며 파형의 크기와 지속시간도 실제 용접 조건과 매우 밀접한 관계가 있어서 용접성의 예측은 물론 공정관리의 지표로 활용될 가능성이 매우 높다.

#### 7. 결론

컨덴서 용접은 에너지효율이 높고 용접부 품질이 우수하므로 산업에서는 매우 유용하게 사용되는 특수 저항 용접법의 하나이다. 특히 이 용접법은 용접시의 에너지의 밀도가 높기 때문에 아연도금 강재나 알루미늄 등 열전도도가 높은 소재의 접합에 활용도가 크다.

그러나 용접에 필요한 전류의 인가 시간이 극히 짧고 침투깊이 높기 때문에 용접 설비의 고급화와 함께

용접 현장에서는 공정 조건의 영향 요소들을 잘 선택하지 않으면 목적하였던 용접 품질을 얻기 곤란하다. 따라서 용접 현상의 정확한 이해는 물론 정밀한 계측과 적절한 해석을 통하여 용접 공정을 최적화하는 것이 용접 품질의 신뢰도를 확보하는 핵심 요소일 것이다.

향후에는 용접 공정의 계측 결과를 단순히 용접 품질 안정화를 위한 감시 자료로 사용하는 차원을 넘어 용접 설비를 효율적으로 제어하여 용접 자동화 수준을 높여야 할 것이다.

(참고문헌 생략)