

고주파 ERW 용접부에 미치는 입열 및 영향 분석

Analysis of Heat Input and Its Effect on High Frequency Electric Resistance Weld

서 정 현

경희대학교 기계공학과

1. 서론

1980년대 부터 고주파 저항용접이 많이 적용되는 강관업계에서 여러 제어변수의 분석을 통한 자동 용접 입열제어¹⁾의 적용 그리고 이에 따른 용접부 품질²⁾향상과 작업성 향상에 관심을 가지게 되어 이와 관련된 제어식³⁾ 및 용접현상의 관찰⁴⁾과 고찰을 통해 확립된 이론식에 의해서 문제를 해결하기 위한 접근방법이 제시돼 왔었다. 이같은 입열제어와 관련한 연구는 주로 강관제조를 위한 일관 생산라인에서 중간공정인 용접공정의 전, 후 공정과의 평형을 이루기 위한 용접제어로 주어진 속도와 강대의 두께에 적절한 용접입열량 제어와 이를 위한 관련 지수와 함수를 파악하고 이에 근거한 제어식을 수립하는데 중점을 두어왔다.

본 연구에서는 고주파 ERW이 가장 많이 적용되고있는 강관제조시의 용접부입열을 접촉 및 비접촉 저항가열방법으로 분류해 용접입열과 관련한 변수에 대해 분석했다. 분석결과는 제어식으로 표현해 강관 용접 결과와 비교했다. 식으로 표현된 입열분석 결과는 타 연구 결과에서 보여지는 제어변수와의 비례 관계수립 또는 용접부 품질과의 관계 규명 보다는 고주파 저항가열에 의해 용융된 용접부 즉 강관제조 시 용융 압착된 후 배출 제거된 용융금속을 포함한 용접부에서 저항가열에 의해 용융된 금속의 폭(mm)이었다.

2. 실험방법

저탄소강의 항복강도 30kg/mm²급과 40kg/mm²급의 열연강대(hot coil; H/C)를 사용 비접촉식 및 접촉식 ERW 강관의 접합부 용접에 각각 적용해 용융 배출된 용접조건별 금속량을 측정했는데 먼저 입열제어식 수립을 위해 파악된 변수와 관련된 용접조건들을 측정했다. 이에 따라 수립된 입열제어식에 의해 산출한 용융폭과 측정된 용융폭과의 비교 및 검증을 위해 열연강대의 모재 및 용접부에 대한 조직시험과 함께 이를 통해 용접 및 열처리후의 수축과 신장된 변형량을 측정했다. 그리고 접촉식 및 비접촉식 고주파 저항용접에서 여러 경우의 용접조건 중 뚜렷한 차이로 결과 파악이 용이한 대표적인 각각 3가지 용접조건에 대해 용접조건별로 비드를 채취해 용융배출부와 비용융가열 절삭부로 구분 이들의 평균분율을 측정했다. 이와 함께 채취한 비드의 길이별 무게를 측정함으로써 구분된 분율을 통해 용융부만의 무게측정이 가능했다. 이렇게 측정된 용융금속량을 철강의 비중과 강대의 두께 그리고 채취 비드의 길이와 용접속도를 감안한 용융폭으로 환산 산출했다. 그리고 접촉가열 용접경우에는 용접전의 외면 강대폭인 외주장길이와 용접 및 비드절삭 후의 외면 강대 폭인 외주장 길이를 측정해 비교함으로써 용접시 배출된 용융금속의 강대 폭 방향 길이에 대해 파악해 앞에서 비교한 산출식에 의한 용융폭과 무게를 측정해 환산한 용융폭에 대한 적정여부를 검증했다. 용융금속폭을 측정하기 위해 항복강도 40kg/mm²급에 외경 406.4mm에 두께 10.9mm, 외경 508mm에 두께 11.9mm 그리고 외경 609.6mm에 두께 14.3mm의 강관에 대해 제조시 거치는 일관공정인 조관성형후 용접직전, 용접후 열처리전, 열처리후 그리고 정정작업후로 단계별로 나누어 외주장 변화폭을 파악했다.

3. 실험결과

3.1 입열제어식

입열제어식은 용접시 열원 또는 피용접체의 이동에 따라 구성되는 기본적인 용접입열식인 입열=열전달율×전류×전압÷용접속도인 $H=exIxV÷v$ 를 기준으로해 이외의 변수에 대해서는 입열에 비례 또는 반비례 여부 등을 판단해 식을 구성했다.

접촉전극에 의해 전달되는 출력은 강대 에지의 두께면을 따라 형성되는 용접부가 가열되면서 전극으로부터 용접속도 v 로 이동중인 피용접체인 강대의 이동방향에 대해 횡으로 전류를 흘리며 강대 폭의 양 끝단을 따라 저항가열이 발생할 때 적용출력 대비 전류가 흐르는 부분인 Fig. 1a에서와 같이 전극길이 L 과 강대 두께 t 를 곱한 면적을 기준으로 면적만큼의 강대용융에 필요한 출력(P)량으로 환산해 비율을 적용했다. 이와 함께 이동중인 강대표면에 접촉전극의 길이 만큼 그리고 이 전극길이 대비 접촉전극에서부터 용접점에 이르는 거리인 전극거리 D 만큼의 시간동안 가해지는 주파수(f)크기와 전열변환이 일어나는 가열시간을 감안해 제어식을 수립했다. 따라서 식에 적용된 가열용융폭을 산출하기 위한 변수로는 출력(P), 주파수(f), 용접속도(v), 강대두께(t), 전극길이(L) 및 전극거리(D)로 다음과 같이 접촉식 입열제어식($_{mw}F_c$)을 구성했다. 용융폭($_{mw}F_c$)=보정치(q_c)×(주파수×전극길이÷용접속도)×(전극거리÷전극길이)×[출력÷(전극길이×강대두께)] = $(q_c÷L)×(f÷v)×D×P÷t = q_c(mm/kw)÷L(mm)×f(kHz)×D(cm)×P(kw)÷v(cm/분)÷t(mm)$. 이를 다시 표현하면 $_{mw}F_c=q_c×f×D×P÷(L×v×t)$ 이다. 이렇게 구성된 식에 의해 산출된 용융폭(mm)과 실측한 결과치 중 대표적인 용융폭과의 비교 및 검증한 결과에 대해서는 Table 3에서 보여주고 있다.

비접촉전극인 워크코일에서 발생된 유도자장을 따라 이동중인 피용접체로 가해진 전압 V 로 말미암아 강대 폭의 양 끝단에서 생기는 저항가열에 의해 용융된 강대용융폭을 적용된 전압을 기준으로 산출했다. 그리고 Fig. 1b에서와 같이 용접속도인 이동속도 v 에 대비해 전극길이인 워크코일폭(w) 및 워크코일에서부터 용접점까지의 거리인 전극거리 D 만큼 동안 가해지는 주파수(f) 크기 및 가열시간을 감안한 식수립과 관련해 적용된 조건들은 상기의 접촉식 경우와 같으나 최종회로가 되는 워크코일 내에서 피용접체에 인가되는 회로주파수의 크기는 용접속도인 피용접체의 이동속도와 워크코일에 따라 달라지므로 이에 대한 별도의 산출식을 수립했다. 반면 접촉식과는 달리 전극길이인 워크코일폭의 변화에 따른 보정치 q_n 의 변화가 없었다. 이와 같은 조건을 고려하여 비접촉식 입열제어식($_{mw}F_n$)이 다음과 같이 구성됐다. 용융폭($_{mw}F_n$)=보정치(q_n)×(주파수×워크코일폭÷용접속도)×(전극거리÷워크코일폭)×전압(V) = $q_n×(f÷v)×D×V = q_n(mm/kv)×f(kHz)×D(cm)×V(kv)÷v(cm/분)$. 이를 다시 표현하면 $_{mw}F_n=q_n×f×D×V÷v$ 이다. 그리고 이들과 관련해 용접 전 후의 용접부에 대한 개략도가 Fig. 2에서 보여지고 있다.

3.2 용융금속량 분석 및 외주장 변화 측정

Table 1에서 보여지는 적용된 용접조건들에 의해 형성된 용접비드로 부터 측정된 용융금속량이 Table 2에 그리고 무게를 측정해 환산한 용융금속폭과 산출식에 의해 구한 용융금속폭의 비교값이 Table 3에 나타나 있다. Table 3에서 보듯 비접촉식 입열제어식에 의해 구한 용융금속의 폭과 측정된 폭과의 차이는 0.0~0.03 mm 정도였다.

외경 406.4mm에 두께 10.9mm, 외경 508mm에 두께 11.9mm 그리고 외경 609.6mm에 두께 14.3mm의 강관을 제조하기 위해 일관공정을 거치며 성형후 용접전, 용접후 열처리전, 열처리후 정정작업전 그리고 정정작업후의 외주장 길이를 측정된 결과가 Table 4에 나타나 있다. 강관의 외경별 측정된 용접 직전과 직후의 외주장 차이는 이때 발생하는 용융금속배출에 따른 외주장 축소폭과 함께 급냉수축에 의한 용접열

열항부 수축폭의 합과 같다. 따라서 측정된 용접직전 직후의 외주장 차이에서 상기 변형분석식에 의해 강관 두께에 따른 열영향부폭별로 구한 수축길이를 감하고 남은 길이인 순수 용융금속만의 배출폭과 Table 3의 무게측정 또는 산출식에 의해 구한 용융금속량과의 차이는 0.2~0.4mm 정도로 나타났다.

3.3 용융금속량 대비 입열량

상기 contact 및 noncontact type의 고주파 전기저항용접시 사용된 전기출력 중 강대의 에지면을 용융하기 위해 소요된 초(sec)당 출력입열 대비 용접속도를 감안한 초당 용융된 강대의 부피만큼의 용융입열을 비교한 용융입열 효율에 대한 결과가 Table 5에 나타나있다. Table 5에서 보듯이 contact type 대비 noncontact type의 용융입열 효율의 차는 contact type의 열효율이 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 contact type의 입열효율이 상대적으로 높은 것은 적용된 출력과 관련해 용접 속도에 따른 초당 용접길이 대비 전극길이가 noncontact type에 비해 상대적으로 길고 이와 함께 전극을 통과해 용접점에 이르는 거리가 전극길이에 비해 상대적으로 김으로써 용융에 필요한 입열이 증가되어 나타난 결과로 판단된다. noncontact type 중 열효율이 Noncontact 1에서 제일 큰 반면 Noncontact 2가 제일 작은 것으로 나타난 원인은 역시 Noncontact 1이 타 경우에 비해 출력과 관련해 용접속도에 따른 초당 용접길이 대비 전극길이가 상대적으로 길고 주파수가 큼으로 급속가열에 의한 용융입열이 증가돼 효율이 커진 반면 Noncontact 2는 타 경우에 비해 주파수가 작음으로 인해 용융입열이 상대적으로 적어진 결과로 판단된다.

4. 결론

1. 접촉식 입열제어와 관련해 수립된 식인 용융폭(mm)=(비례보정치÷전극길이)×주파수(kHz)×전극거리(cm)×출력(kw)÷용접속도(cm/분)÷강대두께(mm), $m_w F_c = q_c \times f \times D \times P \div (L \times v \times t)$ 는 시험결과와 비교 및 확인한 결과 5~6%의 편차를 보였다.
2. 비접촉식 입열제어와 관련해 수립된 식인 용융폭(mm)=보정치×주파수(kHz)×전극거리(cm)×전압(kv)÷용접속도(cm/분), $m_w F_n = q_n \times f \times D \times V \div v$ 는 시험결과와 비교한 결과 3~4%의 편차를 보였다.
3. 용융에 소요된 입열효율은 시험결과를 비교 분석한 결과 접촉식 경우 ≈80% 정도로 그리고 비접촉식 경우 20~40% 정도로 나타났다.

5. 참고문헌

1. Yutaka Mihara, Koji Suzuki, Toshio Ohkawa, Naoki Harada, Isamu Komine and Saburo Ishiro : A New Automatic Heat Input Control for Production of Electric Resistance Welded Pipe, Transactions ISIJ, Vol. 26, No. 5, (1986), pp. 476-483
2. Nobuo Watanabe, Masaaki Funaki, Seietsu Sanniya, Noriyuki Kosuge, Hiroyo Haga and Nobuo Mizuhashi : An Automatic Power Heat Input Control System in High Frequency Electric Resistance Welding, Transactions ISIJ, Vol. 26, No. 5, (1986), pp. 453-460
3. 芳賀博世, 田中徳雄 他 : 自動入熱制御装置と電縫溶接條件の最適化, 鐵と鋼, 第 71卷, 第 2 號, (1985), pp. A53-A56
4. H. Haga, K. Aoki and T. Sato : Welding Phenomena and Welding Mechanism in High Frequency Electric Resistance Welding, Welding Journal, Vol. 59, No. 7, (1980), pp. 208s-212s

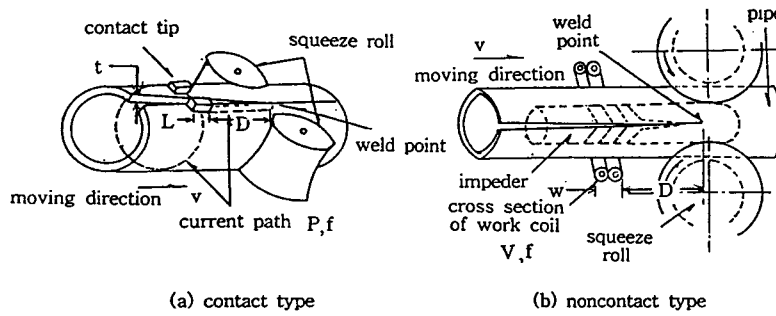


Fig. 1 High frequency electric resistance welding

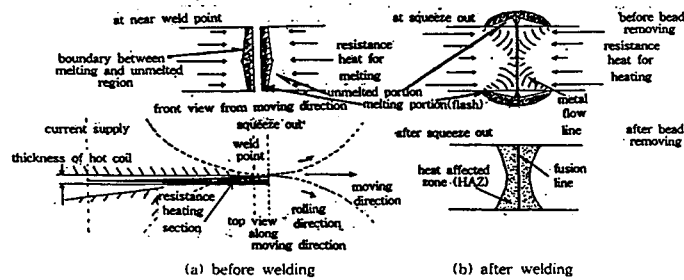


Fig. 2 Schematic view of weld section before and after high frequency electric resistance welding

Table 1. Welding condition

| Type/Number | Current (A) | Voltage (kv) | Frequency (kHz) | Speed (cm/min) | Distance (cm) | Length/Width(mm) | Thickness H/C (mm) |
|-------------|-------------|--------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|--------------------|
| Contact1 | 11 | 12.5 | 400 | 1500 | 20 | 2.8 | 10.9 |
| Contact2 | 15 | 14 | 400 | 1600 | 22 | 2.8 | 11.9 |
| Contact3 | 12.5 | 13 | 400 | 1300 | 24 | 2.8 | 14.3 |
| Noncontact1 | 18 | 12.5 | 421 | 4800 | 9.5 | 5.2 | 2.9 |
| Noncontact2 | 24.5 | 12 | 246 | 4400 | 10 | 3.5 | 3.6 |
| Noncontact3 | 24.8 | 15.5 | 356 | 8700 | 11 | 5.0 | 3.3 |

Distance : length between contact tip or work coil and welding point
 Length : contact tip length / Width : work coil width
 Frequency of noncontact1=5.2×1/2×80×1/2×3×60=144kHz

Table 3. Melting width comparison between measured, calculated and checked value

| Type/Number | Measured value(mm) | Calculated value(mm) | Checked value(mm) |
|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| Contact 1 | 3.4 | 3.2 | 3.3 |
| Contact 2 | 4.8 | 4.6 | 4.6 |
| Contact 3 | 3.8 | 4.0 | 3.7 |
| Noncontact 1 | .841 | .843 | - |
| Noncontact 2 | .702 | .679 | - |
| Noncontact 3 | .714 | .685 | - |

Transfer equation of measured melting portion weight to melting width(mm) = 1,000×ave. melting portion×bead weight(g)÷(thickness of coil(mm)×bead length(mm)×7.85g/cm³)
 Checked value= 2-1 Contraction - Thermal contraction(refer Table 4)

Table 2. Measured weight of melting portion

| Type/Number | Outer bead | | Inner bead | | Ave. portion of melting | |
|--------------|------------|-----------|------------|-----------|-------------------------|------------|
| | length(mm) | weight(g) | length(mm) | weight(g) | outer bead | inner bead |
| Contact 1 | 308 | 256 | 292 | 212 | .21 | .16 |
| Contact 2 | 276 | 320 | 368 | 304 | .24 | .21 |
| Contact 3 | 252 | 350 | 316 | 324 | .2 | .15 |
| Noncontact 1 | 72 | 4.14 | 194 | 4.65 | .25 | .2 |
| Noncontact 2 | 120 | 4.11 | 130 | 4.89 | .25 | .3 |
| Noncontact 3 | 154 | 4.29 | 159 | 7.35 | .25 | .25 |

Table 4. Measured outer circle length and difference between pipe mfg. processes(mm)

| process No. | 1.Before welding | 2.Before heat-treat | 2-1 Cont-raction | Thermal contraction | 3.Before sizing | 3-2Expan-sion(cal.) | 4.After sizing | 4-3Reduc-tion |
|-------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|-----------------|---------------------|----------------|---------------|
| Contact 1 | 1283 | 1278.5 | 5 | 1.7 | 1279.5 | 1.5(1.3) | 1278 | 1.5 |
| Contact 2 | 1605 | 1598.5 | 6.5 | 1.9 | 1600 | 1.5(1.4) | 1598 | 2.0 |
| Contact 3 | 1924 | 1918 | 6 | 2.3 | 1919.5 | 1.5(1.7) | 1919 | 0.5 |

Table 5. Heat input efficiency of electric power for melting

| Type/Number | Heat input of electric power for melting (kJ) | Equivalent heat for melting portion (kJ) | Heat input efficiency (%) |
|--------------|---|--|---------------------------|
| Contact 1 | 61.3 | 59.8 | 97.8 |
| Contact 2 | 103.1 | 83.5 | 80.9 |
| Contact 3 | 87.0 | 64.5 | 74.1 |
| Noncontact 1 | 25.6 | 10.6 | 41.4 |
| Noncontact 2 | 52.5 | 10.1 | 19.2 |
| Noncontact 3 | 52.8 | 18.7 | 35.4 |