

特輯 : 고속촬영에 의한 용접 현상의 해석

고속 촬영에 의한 고주파 전기 저항 용접 현상의 해석

강덕일 · 최재호 · 장영섭 · 김용석

Analysis of High Frequency Electric Resistance Welding Phenomena using High Speed Cinematography

D. I. Kang, J. H. Choi, Y. S. Jang and Y. S. Kim



강덕일/홍익대학교/
1969년생/CO₂용접에
서 스파터 발생 제어



최재호/홍익대학교/
1971년생/알루미늄
합금 용접



장영섭/홍익대학교/
1957년생/HF ERW 및
GMAW 용접 결합



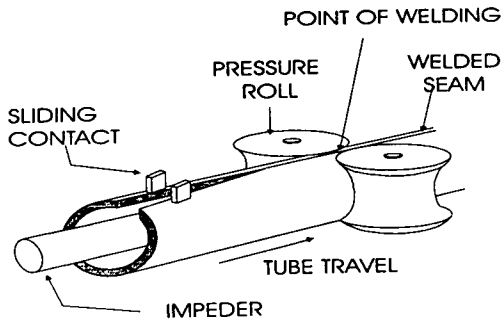
김용석/홍익대학교/
1957년생/GMAW 및
HF ERW 공정 해석

1. 서 언

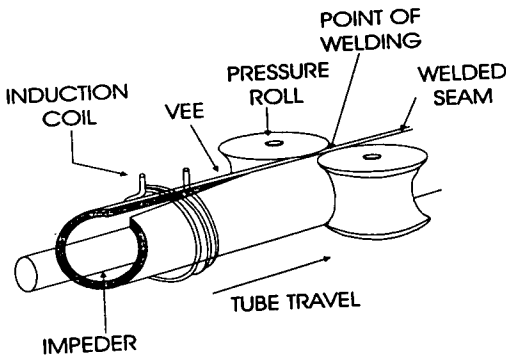
1960년대 이후 사회 간접 자본의 활발한 확충과 기계 산업의 발전에 힘입어 국내 용접 강관 업계는 눈부신 성장을 이룩하여 왔다. 용접 강관을 제조하는 공정은 크게 서브머지드 용접(SAW), roll bending 및 고주파 전기 저항 용접(이하 ERW)을 이용하는 방법이 있는데, 그 중에서도 ERW법이 가장 중요하여 전체의 70% 이상을 차지하고 있다. ERW 강관은 성형 공정의 안정화, 고청정 및 고강도 원재료의 개발, 용접기의 고급화 등 제조 공정의 개선과 함께 그 방법으로 생산된 강관의 사용 범위도 수도 배관용 강관에서 유정용 강관, 기계 구조용 강관, 가스 및 유류 수송용 강관 등 높은 용접 품질이 요구되는 분야로 넓혀지고 있다. 그러나, ERW법은 강관 제조라는 특수한 분야에

적용되고 용접 속도가 10-200m/min으로 매우 빠르기 때문에 이 용접 공정에 대한 연구는 매우 한정적으로 이루어지고 있다. 따라서, 강관 업계에서 적정 용접 조건 설정은 과학적 근거 보다는 작업자의 경험에 의존하는 경향이므로 용접 품질이 작업자의 숙련도와 작업 당시의 신체적 조건 등에 많은 영향을 받는다.

강관의 제조 공정을 살펴보면, 소정의 크기로 절단된 대강(skelp)이 성형 롤에 의하여 이동되면서 원통형으로 성형된 후, Fig 1과 같이 접합되어 야할 부분에 전력을 직접 인가(ERW 법)하거나 유도 코일을 이용하는 방법이 있다. 이 때 대강에 인가된 고주파 전류는 근접 효과와 표피 효과¹⁾의 작용에 의하여 대강 단면 표피에 집중되어 국부적인 용융을 일으키게 된다. 용융된 대강은 압착 롤(squeeze roll)에 의하여 압착되는데 이 과정에서 용융 금속의 잉여분이 용접부로부터 배출되어 고



(a) 고주파 전기 저항 용접



(b) 고주파 전기 유도 용접

Fig. 1 고주파 전기 저항 용접

상 압접 (solid state forged weld) 을 이루게 된다.

한편, 용융 금속의 용융 정도 및 용접부로 부터의 배출 정도는 용접부 품질에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 용융 금속은 대기에 직접 노출되기 때문에 다량의 산화물이 포함되어 있고, 대강의 표면에 이미 존재하던 산화 스케일 등이 압착 과정에서 완전히 제거되지 않으면 용접부 결합 발생 빈도를 높이는 결과를 가져오기 때문에 중요하게 다루어지는 부분이다. 이와같은 용접 현상은 그 중요성에도 불구하고 용접 속도가 매우 빠르기 때문에 현장 작업자가 육안으로 판단하는 것이 매우 곤란하다. 따라서, 여기에서는 고속 촬영법을 이용하여 ERW 공정을 관찰하고, 몇가지 용접 조건들과 용접부 품질과의 상관성을 제시함으로써 ERW 공정의 물리적 현상을 소개하고자한다.

2. ERW 현상의 관찰

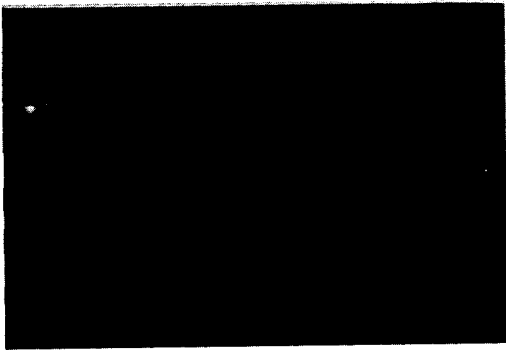
본 실험에서는 상업 생산용 ERW 강관 제조 설비에 고속 카메라를 설치하고 각종 용접 현상을 촬영하였다. 고속 카메라는 최대 10,000fps를 촬영할 수 있는 Photec사의 회전 프리즘형 촬영 장치를 이용하였는데 실제의 용접 현상을 기록하기 위한 촬영속도는 5,000 또는 10,000fps였다. 용접부를 정밀하게 기록하기 위하여 광학계에는 초점 길이 200mm의 줌 렌즈를 사용하였다. 광원으로는 외부 광원을 이용하여 사진을 촬영하거나, 또는 별도의 광원없이 가열된 용접부가 자체 발광하는 현상을 이용하였다. 외부 광원을 사용하는 경우에는 선명도가 떨어지는 단점이 있는 것으로 확인되고, 가열된 용접부에서 자체 발광되는 현상을 이용한 경우에는 양호한 품질의 사진이 얻어졌으나, 산란되는 빛에 의하여 촬영상의 분해도가 떨어지는 현상이 관찰되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 실험에서는 편광 필터와 ND 필터를 적절히 조합하여 선명하고 분해도가 우수한 영상을 얻었다. 이와같은 촬영 결과는 대강의 두께, 용접 속도, 입열량, 용접부의 용융 현상 및 용접 결합 발생과의 상관성을 조사하는데 이용하였다.

2.1 고속카메라를 이용하여 관찰한 용접 입열량에 따른 용접부 용융 현상

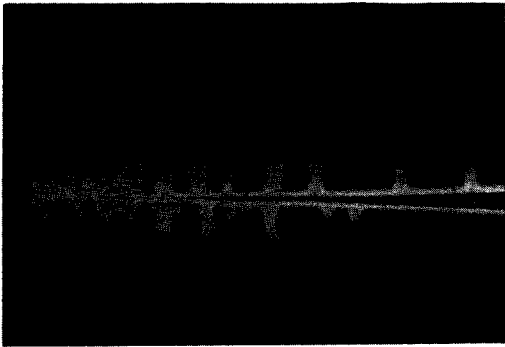
Fig. 2는 용접 입열량을 적정, 과소(적정 입열량의 95%)와 과다(적정 입열량의 105%)로 변화시킨 조건에서 용접부의 용융 현상을 5,000fps의 속도로 촬영한 결과이다. Fig. 2(a)는 적정 입열량으로 용접을 실시한 조건에서 촬영된 용접부의 용융 현상이다. 이 때 사용된 대강의 두께는 5.75mm이고 용접 속도는 24m/min이었다. 그림에서는 고주파 전류가 공급되는 급전점에서 부터 대강의 전단부 (edge)가 가열되기 시작하여, 용접점에 도달하기 이전에 대강의 단면이 용융된 것을 볼 수 있다. 또, 용융된 금속은 대강 단면으로부터 배출되어 액적을 형성하는 것도 확인 된다. 이와같이 용융된 금속이 대강 단면으로부터 배출되어 액적을 형성하는 현상은 양 대강의 표면에 흐르는 고주파 전류의 전자기적 척력¹⁾에 의한 것으로 설명되고 있



(a) 적정 입열



(b) 저 입열



(c) 과다 입열

Fig. 2 용접 입열량에 따른 용접부 형상

는데, 이 이론은 액적이 형성되는 기구에 대해서는 설명할 수 없는 한계점을 가지고 있다. 액적이 형성되는 현상은 전자기적 핀치 효과에 의하여 정성적으로 설명되고 있는데, 이 경우도 이론적인 값과 실험 결과와는 상당한 차이를 나타내고 있다²⁾. 한

편, 대강의 용융 정도는 용접점에 근접할수록 증가하고 액적의 크기도 증가한다.

이와같이 용융된 금속이 대강의 인접한 접합부 간격 밖으로 배출됨에 따라 대강의 표면과 단면에 존재하던 산화물들도 용융 금속과 함께 제거되어 압착 후의 용접부에는 결합의 발생 빈도가 낮은 압접부를 형성하게 된다. 즉, ERW법은 접합이 이루어질 대강 단면을 스스로 청결하게하는 효과를 나타내는 것으로 간주할 수 있는데, 이러한 현상은 ERW법이 보호 가스를 사용하지 않는 용접법임에도 불구하고 우수한 용접 특성을 나타내는 원인이 된다.

Fig. 2(b)는 적정 용접 입열량 대비 입열량을 약 5% 정도를 감소시킨 조건에서 용접부의 용융 현상을 촬영한 결과이다. 이 사진에서는 대강의 끝 부분이 서로 접촉되는 점(V-convergency point)에 도달할 때 까지 용융된 액적이 대강 단면 밖으로 배출되지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 용접 조건에서는 대강의 표면과 단면에 존재하는 산화물의 자체 청정 효과가 없기 때문에 압착 후에도 용접부에 산화물 등이 그대로 잔존하여 용접 결합의 발생 확률을 높이게 된다. 만일, 용접 입열량이 더욱 낮아져서 대강 단면간에 단점을 이루지 못하면 미세한 산화물이 용접선에 잔존하는 냉접 결합이 형성 된다.

Fig. 2(c)는 적정 입열량 대비 약 5% 정도로 입열량을 증가시킨 조건에서 용접부의 용융 현상을 촬영한 결과이다. 대강 단면의 용융 정도가 적정 입열량을 인가한 경우 보다 많은 것을 볼 수 있다. 또한, 이 조건에서는 용접점에 도달하기 전에 두 개의 대강이 매우 좁은 간격으로 떨어져 있는 부분(narrow gap)을 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 영역은, Haga 등^{3,4)}의 이론에 의하면 성형되는 대강 양 단면이 접근하는 속도와 대강의 단면이 용융되어서 서로 후퇴하는 속도가 동일한 용접 조건에서 형성되는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 본 실험에서는 용접 입열량을 적정량의 10% 정도 까지 증가시켜도 Haga 등이 제안하였던 narrow gap의 간격이 증가하는 현상은 관찰되지 않았다.

2.2 ERW 공정에서 용접 결합의 발생 기구에 관하여

ERW 접합부에서의 용접 결합 발생 빈도는 용접

속도, 대강 양 단면이 이루는 각도, 원재료, 용접 입열량 등 각종 용접 변수에 의하여 영향을 받으나, 이들 변수 중에서 용접 입열량은 가장 중요한 요소로 알려져 있다^{2,3,5,6}. ERW 접합부에서 자주 발견되는 용접 결함은 냉접, 핀홀(pinhole), 침입 결함(penetrator) 및 paste weld 등이 있는데, 앞서도 언급 하였듯이 용접 입열량이 적은 경우에는 냉접이 주로 발생한다. 한편, 용접 입열량이 과다한 경우에는, 산화물을 포함하고 있는 용융 금속이 narrow gap 안으로 재유입되어 발생하는 침입 결함이 주로 나타난다. 즉, 과다한 용접 입열량은 narrow gap 내에서 대강 사이에 단락을 일으켜 단

락 지점과 용접 점 사이의 narrow gap에 전류가 흐르지 않게되면 전자기력이 소멸되고, 이에 따라 이미 배출되었던 용융 금속이 산화물과 함께 재유입되어 형성되는 용접 결함이라고 알려져 있다^{3,7}. 그러나, 본 연구에서 고속 카메라를 이용하여 촬영한 용접 현상을 분석한 결과, 기존에 제안된 용접 결함의 발생 기구와는 다른 현상이 관찰되었다. 즉, 양 대강의 단면에서 단락이 발생하는 현상은 Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이, 양 대강 사이의 스파크(spark)가 형성되는 것으로 관찰되었다. 이 때 형성된 단락(또는 스파크)는 용접 방향으로 매우 빠른 속도로 이동하고 있었다. Narrow gap 사이에

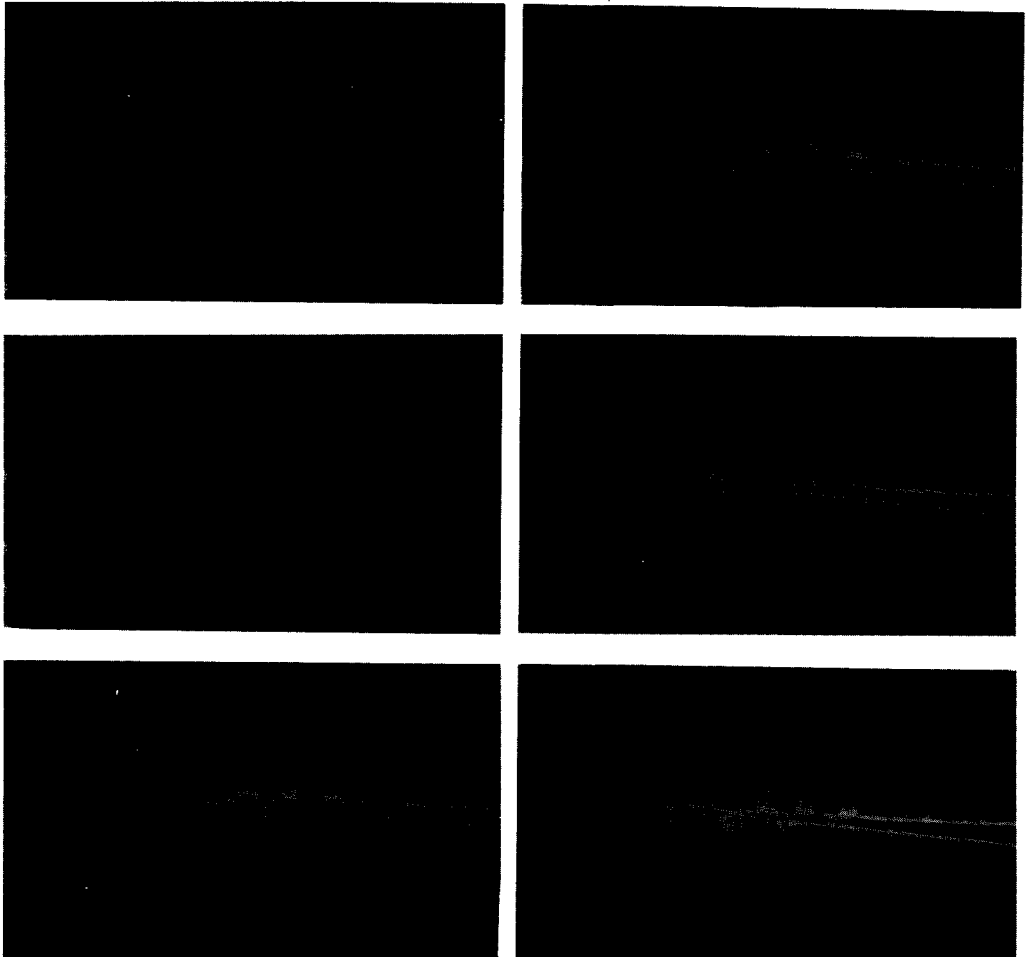


Fig. 3 고속 카메라를 이용하여 촬영한 단락의 이동 현상

서 형성된 단락이 한점에 고정되어 전류 이동 경로를 형성하며 용융 금속이 narrow gap 사이로 재유입되기 보다는 재유입되기 이전에 용접점까지 빠르게 이동하는 현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 3은 단락이 형성되어 용접점으로 이동하는 현상을 시간별로 나타낸 그림이다. 이 때 단락점의 이동 속도를 고속 카메라 화상을 분석하여 측정한 결과 100-400m/sec정도로 매우 빠름을 알 수 있었는데, 이 이동 속도는 용접 입열량이 증가함에 따라서 증가하는 것으로 관찰되었다(Fig. 4).

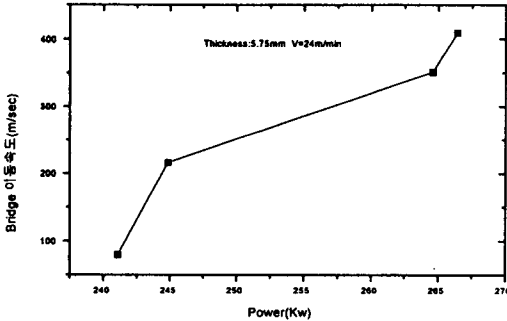


Fig. 4 용접 입열량에 따른 단락의 이동속도

이렇게 단락점이 이동하는 원인에 대해서는 현재까지 보고된 바가 없는데, 이것은 대강 단면에 작용하는 전자기력의 비평형에 의하는 것으로 생각되며, 그것을 모식적으로 나타낸 것이 Fig. 5이다. 즉, 단락을 형성하는 부분(스파크 발생부)을 통하여 전류가 흐르게 되면 이 전류와 대강 단면을 통하여 흐르는 전류 사이에 상호 척력이 작용하며, 그 결과는 용융 금속을 배출하려는 힘으로 작용하게 될 것이다. 그러나, narrow gap 부분에서는 단락을 통하여 흐르는 전류와 용접점에 흐르는 전류에 의하여 발생하는 전자기력이 서로 상쇄되는 효과가 발생하게 된다. 따라서 단락의 표면에 작용하는 전자기력은 단락의 narrow gap 쪽 표면에 작용하는 전자기력 보다 크게 된다. 결국 이러한 전자기력의 비평형에 의하여 단락 즉, 스파크 발생부는 용접점 방향으로 작용하는 힘을 받게 되고 이에 따라 항상 용접점 방향으로 이동하는 것으로 생각된다.

이러한 단락의 이동 현상은 용접 결합의 발생과 직접적인 관련이 있는 것으로 생각된다. 용융 금속에 존재하는 산화물이 단락의 이동으로 인하여 용

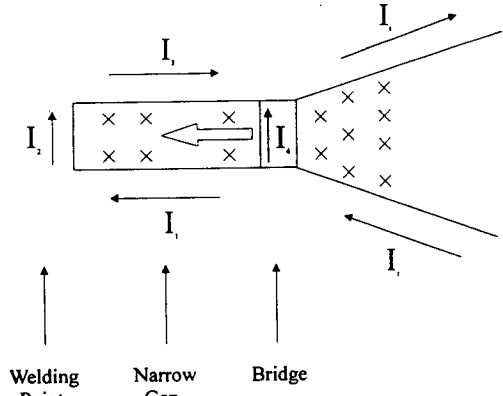


Fig. 5 단락 형성부위의 전자기력 비평형 모식도

접점에 축적되고 이 산화물이 압접 과정의 압력에 의하여 배출되지 않고 용접 위치에 잔류하면 용접 결함으로 남게될 것이다. 특히, 단락의 이동 거리가 크면 산화시간이 증가하고 단락의 크기 또한 증가하게 되므로 용접부에 잔존하는 산화물의 양도 증가하게 될 것으로 추정할 수 있다.

2.3. 고속 촬영법을 이용하여 관찰한 용접 입열과 단락 발생의 관계

고속 카메라에 의하여 촬영된 용접부를 관찰한 결과 용융된 대강의 양 단면에서 단락점이 거의 일정한 주기로 발생하는 것이 관찰되었다. 이러한 단락은 대강 단면 사이에서 발생할 때 작은 통전로를 따라서 많은 전류가 흐르기 때문에 단락된 부분이 주변에 비하여 많이 가열되어 밝은 빛을 내므로 쉽게 관찰할 수가 있다. Fig. 6은 고속 카메라를 이용하여 촬영한 전형적인 단락 형상이다. 그림에서 보면, 용접점 이전에 narrow gap의 양 대강 단면이 단락을 형성하는 부분에서 스파크가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 단락의 발생 원인은 여러 가지를 들 수 있다. 첫번째로는 대강 단면이 용접할 강관의 크기에 맞추어 절단(side trimming)되고, 운반 및 저장 과정을 거칠 때 미세 돌출부가 형성되어 용접점 이전에서 단락이 발생할 가능성이 있다. 그러나, 이러한 요인만으로는 용접시 규칙적으로 발생하는 스파크 현상을 설명하기가 곤란하다. 다른 하나의 가능성은 전자기적 펀치 효과에 의한 단락 현상이다. 앞에서 언급한 바와같이 용융



Fig. 6 고속카메라를 이용하여 촬영한 전형적인 스파크 현상

된 금속은 Rayleigh instability⁸⁾와 유사한 현상으로 대강 단면의 표면에서 요동이 발생하는데, 요동이 발생하는 면들이 서로 접촉하면 스파크가 발생될 수 있을 것이다. 고속 카메라를 통해 대강 단면 용융 금속의 요동을 직접 관찰하기는 어려우나, 형성된 액적 내에서 용액의 격렬한 유동은 관찰할 수 있었는데 이를 통하여 액상 금속이 전자기력에 의해 매우 심하게 유동하고 대강 단면간의 거리가 가까워짐에 따라서 이들이 서로 접촉하여 스파크를 일으킬 수 있으리라는 추측이 가능 하였다.

이러한 전자기적 핀치 효과는 용접 전류의 제곱에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다¹⁾. 그러한 현상을 알아보기 위하여 본 실험에서는 용접 입열량을 증가시킴에 따라서 단락의 발생 빈도가 변화하는 것을 조사하였다(Fig. 7). 그 결과에 의하면 용접 전류가 증가함에 따라 초기에는 단락의 발생 빈도가 증가하는 현상을 볼 수 있다. 그러나,

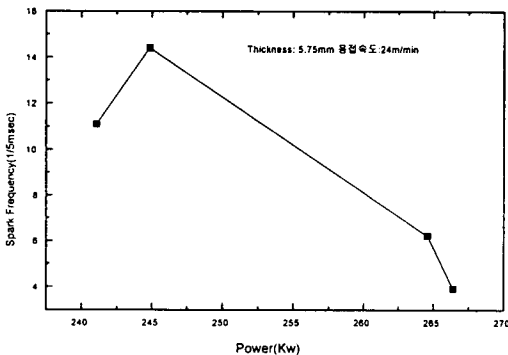


Fig. 7 용접 입열량에 따른 스파크 발생 주기

용접 전류를 더욱 증가시켰을 때 단락의 발생 빈도는 오히려 감소하였다. 이러한 현상은 용접 전류가 증가함에 따라서 용접 입열이 증가하고, 결국 대강 단면의 용융량을 증가시켜 대강 사이의 narrow gap 내에서 상호 간격을 증가시키기 때문으로 생각 된다.

한편, 이 때 형성된 단락의 이동 거리를 측정하여 본 것이 Fig. 8이며, 이러한 이동 거리는 단락부 용융 금속의 산화 정도에 영향을 미치게 된다. 그리고 용접 입열량이 증가함에 따라 단락의 이동 거리가 최대 14mm 정도 까지 증가하는 것을 고속 카메라로 관찰할 수 있었다.

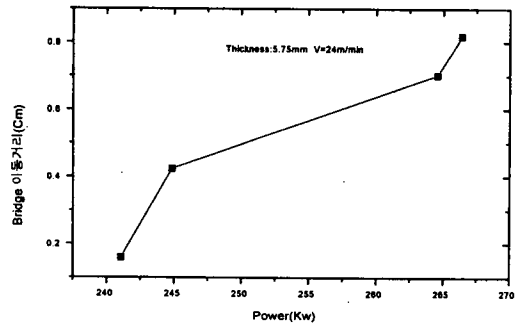


Fig. 8 용접 입열량에 따른 단락의 이동거리

Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 조합하면, 용접 입열량이 적은 경우 단락의 발생 빈도는 높으나 그 이동 거리가 짧고, 용접 입열량이 많을 경우에는 단락의 발생 빈도는 감소하나 그 이동 거리가 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig. 9). 즉, 용접 입열량이 적은 경우에는 용접점이 거의 기하학적인 접합점(V-convergency point)에 근접하므로, 단락의 이동 거리가 짧고 이로 인하여 단락시 전류 이동 경로의 변화가 적게 되어 단락 즉, 스파크의 빈도와 강도가 낮다. 그러나, 용접 입열량이 클 경우에는 narrow gap의 길이가 증가하고 이 부분에서 단락이 발생하면 전류 이동 경로의 변화를 크게 하며, 단락을 통하여 흐르는 전류의 크기도 상대적으로 크게 되어 스파크의 강도를 증가시키게 될 것이다. 이 때 형성된 용접부의 결함 발생 빈도를 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 용접 결함의 발생 빈도는 용접 입열이 증가함에 따라서 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉,

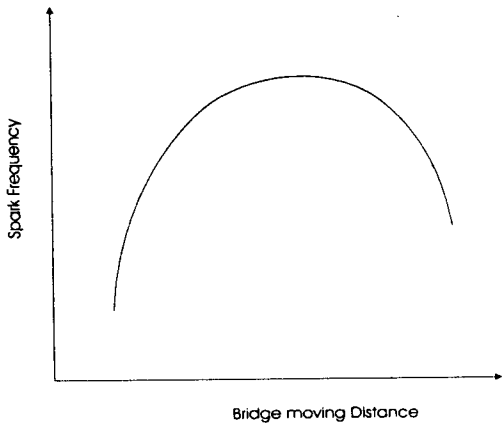


Fig. 9 스파크 발생 빈도와 단락 이동 거리의 관계곡선의 모식도

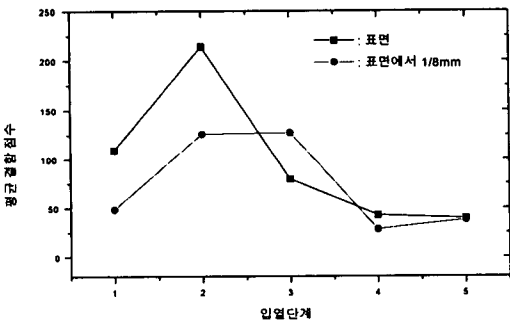


Fig. 10. 용접 입열량에 따른 결함 발생 빈도

스파크의 발생 빈도가 높을 경우에는 용접 결함의 발생 빈도가 높았고, 스파크의 발생 빈도가 감소함에 따라서 용접 결함의 발생 빈도도 감소하는 것을 알 수 있어서, 스파크의 형성 및 이동이 용접 결함의 발생과 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 추정할 수 있었다.

3. 결 언

고속 촬영법은 용접 속도가 빠르고 고주파 전력을 사용하므로 통상의 계측 방법으로는 용접 현상의 관측이 곤란한 ERW 공정 해석에 매우 유용하게 쓰일 수 있는 기법임을 알 수 있었다. 이러한 고속 촬영 기술을 이용하여 실제의 ERW 조판 용접 현상을 관찰하고 그 결과를 전자기적 및 용접 공학적

측면에서 도출한 결론은 다음과 같다.

먼저, 고주파 전기 저항 용접시 대강 단면은 용접점에 도달하기 이전에 상당량이 용융되어 대강 단면 밖으로 배출되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 단순한 전자기적 척력 뿐만이 아니라 전자기적 핀치 효과를 고려하여야 설명될 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 용접 입열량의 변화에 따라 양 대강 단면 사이에서는 단락이 발생하였고 이 영역에서의 큰 전류 밀도는 용융 금속의 온도를 매우 높임과 함께 강한 발광 현상 즉, 스파크를 일으키므로 촬영에 의하여 쉽게 관찰할 수 있었다. 이러한 스파크의 발생 빈도는 용접 입열량에 영향을 받는 것으로 관찰되었으며, 스파크 발생이 입열량과 상관성을 가지는 원인으로서는 전자기적 핀치 효과가 중요하게 작용하기 때문으로 추정되었다.

고속 촬영 결과와 용접 결함 발생 기구를 비교 분석한 실험에 의하면 narrow gap 부분에서 형성된 단락은 고속으로 용접점 방향으로 이동하는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 단락 부위에 작용하는 전자기력의 비평형 현상과 관계가 깊은 것으로 추정되었으며, 단락의 이동은 용융 금속과 산화물이 동시에 용접점으로 재유입 하게하는 역할을 하기 때문에 용접 후 용접선에는 산화물이 다량 개재되는 용접 결함의 발생 기구가 되는 것으로 추정되었다.

후 기

본 연구는 1996년도 포항종합제철주식회사와 (주)세아제강의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. K. Haga, K. Aoki, T. Sato: Welding Phenomena and Welding Mechanisms in High Frequency Electric Resistance Welding - 1st Report, Welding Journal, Vol. 59 (1980), 208s-216s
2. 장 영섭, 高周波 電氣 誘導 熔接法에 의한 강관 제조시 熔接 入熱에 대한 熔接 現象과 熔接 品質에 관한 연구, 홍익대학교 대학원 (1995)

3. K. Haga, K. Aoki, T. Sato: The Mechanisms of Formation of Weld Defects in High Frequency Electric Resistance Welding, *Welding Journal*, Vol. 60 (1981), 104s - 109s
4. G. Hisashi et al.: Welding Mechanisms in High Frequency Electric Resistance Welding, *Nippon Steel Technical Report*, No. 14 (1979), 79-89
5. American Welding Society: *Welding Handbook*, 8th Edition, Vol. 2 (1991), 652-669
6. S. Sugimura, K. Okuyama, T. Fukuda, H. Nakasugi, Japan boosts Welded Boiler Tubes Attractions, *Welding and Metal Fabrication*, Vol 11 (1980), 613s-620s
7. 高橋勸次郎: 高周波の基礎と應用, 東京電機大學出版局 (1990), 94-96
8. J. F. Lacaster: *The Pysics of Welding*, 2nd Edition (1986)