

용접부의 균열발생과 방지대책

황 선 호

한국기계연구소 부설해사기술연구소 책임연구원



●1942년생
●용접부위의 야금학적 현상, 용사법을 이용한 표면처리기술, 확산접합 기술 레이저 및 전자 빔 용융재료 가공기술에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

용접부의 성질을 충분히 활용하기 위해서는, 용접시 형성되는 재료의 조직 및 응력상태가 기계적, 물리적 등의 성질에 미치는 작용을 이해하는 것이 필요하다. 특히 용접부위에서 발생하는 균열과 같은 재료 결함은 구조물의 사용을 불가능하게 하는 요인이 되므로 발생원인을 이해하고, 그 방지대책을 세우는 것이 매우 중요하다.

용접부위에서 발생하는 균열은, 그 발생원인을 취성이 큰 재료의 사용과 높은 인장응력의 작용에서 찾을 수 있다. 재료공학적으로는 용접시에 발생하는 재료의 취화에, 그리고 역학적으로는 용접시에 발생하는 응력증가에 연구를 집중하고 있다. 대부분의 연구는 재료공학적 측면에서의 연구인데, 이것은 역학적인 측면으로부터의 접근이 용접부 응력해석의 어려움 때문에 난이하다.

본 글에서는 용접부위의 각종 균열 발생원인을 주로 재료 공학적인 측면으로부터 찾아보고 그 방지대책을 생각해 보기로 한다.

2. 용접균열

용접균열은 용접 중 혹은 용접 직후에 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 용접이 끝나고 난후

그리고 사용중에도 발생할 수 있다. 용접균열은 외관과 위치에 따라 분류할 수도 있으나, 발생조건에 따라 분류하는 것이 간편하다. 재료의 고상점 온도 근처에서 발생하는 균열은 고온균열(hot crack)이라 하고, 200°C 이하의 낮은 온도에서 발생하는 균열을 저온균열(cold crack)이라 한다.

용접시 용접재료 및 모재 일부가 용해되어 용융지를 형성하고 그후 냉각하게 된다. 냉각시에는 국부적으로 가열된 곳이 수축하게 되며 높은 내부응력이 발생한다. 동시에 용융지는 응고후 주상조직으로 되고 모재의 열영향부위는 용접열에 의해 조직변화를 하게된다. 용접시 용접부위에 발생하는 2개요인 즉 내부응력과 조직변화가 용접균열 발생의 기본적 요인이 된다.

3. 용접부의 균열발생 원인

3.1 고온균열

고온균열은 용착금속내에서 발생하는 균열(solidification crack)과 모재 열영향부위에서 발생하는 균열(liquidation crack)로 분류할 수 있다.

용접부 결정 입계 지역은 불순물이 많이 모인 미세 편석지역으로써 결정지역에 비해 용융점이 낮다. 특정한 온도영역에서는 결정입은 고체, 결정입계 지역은 액체상태로 공존하게

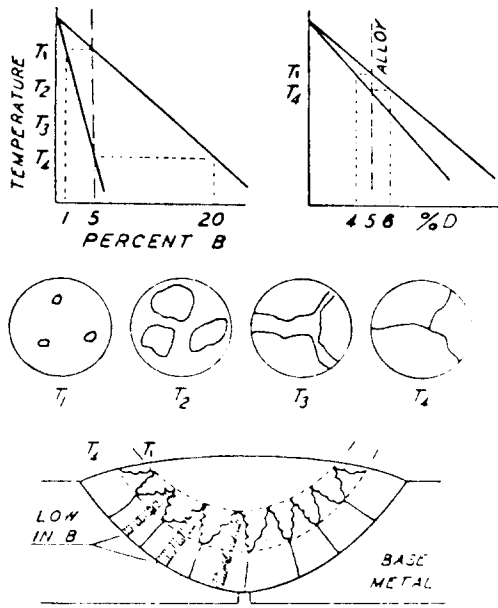


그림 1 응고 온도 폭이 크고(왼쪽), 작은(오른쪽) 합금의 상태도, 응고 중 각 온도에서의 응고 상태에 대한 개요도

되며, 응력이 작용하는 경우 쉽게 균열이 발생하게 된다.

그림 2는 용착 금속 경계면 근처에 발생한 응력조건을 보여준다. 재료가 solidus 바로 아래 온도까지 가열되면 결정입계를 따라 퍼져 있는 저용점 편석층이 용해되고, 다시 냉각될 때 재료 수축에 의해 인장 응력이 발생하고 변형은 결정입계에만 국한된다.

기하학적 제한성 때문에 결정입계 변형(sliding)은 단단한 결정립에 의해 저지당하고, 응력집중이 결정립이 서로 만나는 곳에 일어나, 비록 전체 시스템의 변형은 적다 하더라도, 입자간 파괴가 일어난다. 그림 2에서 만약 두개의 sliding plane AB와 AC가 A에서 만나면 재료의 분리가 제3의 결정입계 AD에서 일어난다.

3.2 저온균열

용접저온 균열은 일반적으로 철강재료의 경우 200°C 이하의 온도에서 결정립을 통과하여 발생하는 transgranular 균열로써 용접후 실온에서 냉각할 때 혹은 용접직후 발생하는 것과, 실온까지 냉각한 후 상당기간(1일, 1주 혹은 1월)이 지난후에 발생하는 것으로 분류할 수 있다.

저온균열은 용착 금속 혹은 모재의 용접열영향부에서 일어날 수 있다. 저온균열의 발생 기구에 대해서는 여러가지 이론들이 제시되고 있으나, 일반적으로 재질, 응력, 그리고 수소의 3대 요소가 복합적으로 작용하여 균열이 일어나는 것으로 알려져 있다. 따라서 용접저온 균열은 일반적으로 수소유기 파괴현상의 범주에서 이해될 수 있다.

수소유기 용접균열에 대한 기구는 아직 규명되지 않은 상태이나, 재료내에 존재하는 미세 결함 주위에 고응력장이 형성되고 수소가 이곳으로 모여 수소농도가 높아지고, 금속조직이 용접시 경화되고, 동시에 높은 내부응력이 작용하여 재료의 박리 즉 균열이 발생 성장하는 것으로 이해할 수 있다.

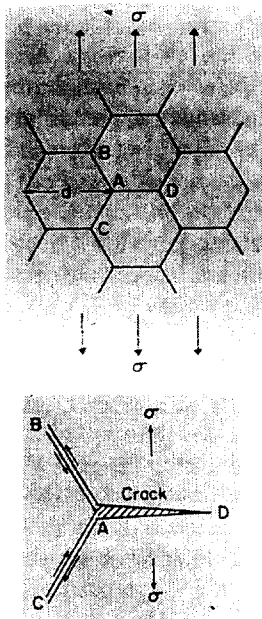


그림 2 용착 금속 경계 열영향부에 나타나는 입자간 균열의 형성 개요도

저온균열에서 재미있는 현상은 용접이 끝난 후 상당한 시간이 지난후에 발생하는 자연과괴 현상이다. 이 현상 역시 수소 확산 현상으로써 설명할 수 있다. 미세결함 주위에 최대 응력장이 생기고 수소가 모이게 되어 새로운 임계 조합이 형성되면 균열이 다시 성장하게 된다. 균열성장은 매우 빨리 진행하고 수소확산은 상당한 시간이 필요하다. 따라서 이러한 현상이 많이 반복하는 동안 상당히 긴 시간이 지나갈 수 있고 큰 균열로 성장할 수 있으며 이러한 균열을 지연균열이라 한다. 그림 3은 이러한 지연균열 성장과정의 개요를 도식적으로 보여주고 있다.

(1) 응고크랙(solidification crack)

고온균열은 용접 중 혹은 용접 직후 용융점 근처의 운동에서, 용착금속내에서 결정입계를 따라 발생할 수 있다.

그림 1은 고온균열과 편석을 설명하는 상태도이다. 그림 1의 왼쪽 상태도에서 95%A, 5%B성분을 갖는 합금을 액체상태로부터 냉각할 때 온도 T_1 에서 응고하기 시작하고, 온도 T_4 에서 응고가 완료되는 것을 보여주고 있다.

온도 T_3 에서는 고체입자가 대부분이고 액체는 고체입자를 박막형태로 둘러싸고 있다. 이러한 조건에서 긴 냉각시간 동안 발생하는 높은 수축응력의 작용하에서 고온균열이 액체 박막을 통하여 쉽게 일어난다. 오른쪽 상태도와 같이 짧은 응고영역을 가진 합금은 고온균열 발생에 덜 민감하다.

왼쪽 상태도에서 온도 T_1 때 고체입자는 1%B를 포함하고 액체는 5%B를 포함하고 있으나, 온도 T_4 로 냉각되었을 때는 고체입자는 5%B를 포함하고 액체는 20%B를 포함한다. 확산이 일어나지 않으면 합금이 냉각된 후 지역적으로 큰 합금성분 차이를 보일것이고 이것을 편석이라고 한다. 편석의 정도는 좁은 응고 온도 영역을 갖는 경우가 적다.

용접부위의 용융지가 응고할 때는 구조현상과 같으며 따라서 모재와의 경계면과 수직방향에 주상조직이 생성되나, 일반적으로 용융지의

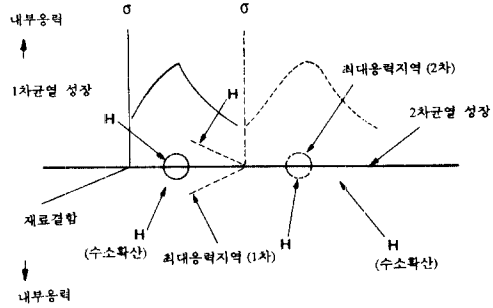


그림 3 재료 결함 주위에 발생하는 최대 응력지역에 모인 수소에 의한 균열성장의 반복과정(σ : 재료결함 주위의 응력분포)

크기가 작기 때문에 편석이나 결정(dendrite) 크기는 작다.

용융지 응고 현상을 4단계로 분류하면(그림 3).

(가) 초기 결정형성

고상 결정 입자가 액상에서 발생하고 두상의 상대적 운동이 가능하다.

(나) 결정구속

고상 결정 입자가 서로 얽혀서 움직일 수 없게 되고 액상만이 결정입자 사이를 자유롭게 움직일 수 있다.

(다) 결정 입계형성

고상 결정 입자는 점점 커지고 액상 유동도 제한되어 고상과 액상간의 상대적인 운동은 없어진다.

(라) 응고

잔류액체가 응고한다.

위의 단계 중 제3단계는 응력 수준도 높고, 아직은 고상 입자 표면에서 액상이 존재하므로 쉽게 재료의 분리 즉 균열이 발생한다.

(2) Liquidation Crack

용융지와 근접한 모재 열영향부에서는 용접열에 의해 결정입계가 용해하며, 이때 작용하는 내부응력에 의해 재료의 분리 즉 균열이 발생한다. 실제로 고장력강 용접 열영향부에서 결정 입계를 따라 발생한 미세균열이 관찰되고 있다. 이러한 균열은 몇개의 결정립을 포함할

정도로 작은것이어서 많은 경우에 별문제 없이 사용될 수 있다. 그러나 종종 입자간 미소크랙은 거시크랙으로 성장한다.

4. 용접균열의 방지 대책

4.1 고온균열

고온균열 방지대책은 응고온도 영역을 줄이는 것과, 열수축 및 외부변위를 최소화하는 것으로 대별할 수 있다. 응고온도 영역은 용착금속의 화학조성, 가열, 냉각속도 등에 의해 결정된다. 용접 입열량이 증가하고, 예열온도가 높으면 응고온도 영역은 커진다. 따라서 고온균열의 감수성을 줄이기 위해서는 입열량을 줄이고 예열온도를 낮추어야 한다. 용착금속의 화학조성 역시 응고 온도 영역에 영향을 미친다.

철강재료에서 S, P, C, Ni등의 원소는 응고온도 영역을 넓히고, Mn, Cr, Mo, V, Ti등의 원소는 줄인다. 예로써 S같은 원소는 고장력강에서 가능한 한 줄이는 것이 좋으며, C는 고온균열을 촉진시키나 강도를 유지하기 위하여 필수적이므로 필요한 양만큼은 사용하여야 하는 제한이 있다. Mn같은 원소는 S의 고온균열 발생에 미치는 영향을 감소시킴으로써 고온균열발생을 제어하는 역할을 한다.

열수축 및 외부변위를 최소화하는 것 역시 고온균열 발생을 감소시키기 때문에, 레이저 및 전자 빔 등의 고에너지 밀도용접법의 사용이 바람직하고, 큰 응력이 걸리지 않도록 용접이음부 및 구조물의 형상 등에 세심한 대책을 강구할 필요가 있다.

4.2 저온균열

저온균열의 발생 원인은 수소, 재질, 응력의 3대 요인에서 찾을 수 있음은 이미 언급한 바 있으므로 저온균열을 방지할 수 있는 대책도 기본적으로 이 3대 요인에서 찾는 것이 타당하다.

수소에 관한한 우선 수소의 재료내 침투를

방지하는 것이 중요하다. 수소의 재료침투는 공기, 용접재료, 모재표면에 있는 수분, 수화물 등이 용접시 분해하여 수소원자가 되고 이것이 재료에 흡착 확산되는 것으로 이해될 수 있다. 따라서 수소화합물이 용접중에 혼입되는 것이 방지되어야 한다. 예로써 저수소계 용접봉을 사용한다든지, 용접봉을 건조한 후에 사용한다든지, 습한 대기중에서의 용접을 피한다든지, 모재표면을 세척한 후 용접하는 등의 대책이 필요하다.

또한 모재에 이미 침투된 수소는 냉각속도를 감소한다든지 적당한 열처리를 함으로써 제거할 수 있고 저온균열의 발생을 미연에 방지할 수 있다.

재질에 관한한 용접후 경한 조직을 피하는 것이 중요하다. 우선 경한 재료와 사용을 피하는 것이 좋고, 용접시에 경한 조직의 형성을 억제하는 대책에 필요하다. 철강재료에서 용접부의 경한 조직은 마르텐사이트 변태로 집약될 수 있으며, 마르텐사이트 변태는 재료의 탄소당량과 냉각속도에 크게 영향을 받는다.

재료의 탄소당량이 크면 냉각시에 마르텐사이트 변태가 쉽게 일어나 재료가 경화되어 저온균열이 잘 발생한다. 탄소 당량은 재료의 합금성분에 의존하며 일반적으로 $CE=C-Mn/\sigma + Ni/20+Cr/10+Cu/40-Mo/50-V/10$ 으로 표시된다. CE값이 40을 넘으면 저온균열이 일어난다. 따라서 저온균열을 방지하기 위해서는 CE값을 40이하로 줄이는 합금설계를 할 필요가 있다.

냉각시에 마르텐사이트 변태와 재료의 경화를 줄일 수 있는 방법 중에 한가지는 냉각속도를 줄이는 것이다. 냉각속도를 줄일 수 있는 방법 중 현장시공상 가장 중요한 것은 예열이다. 예열을 하게 되면 용접시 열영향부의 최대 냉각속도를 감소시키고 열영향부의 조직을 연하게 만든다. 예열은 또한 열영향부위를 보다 오랜시간 동안 높은 온도에서 유지하게 함으로써, 수소를 보다 많이 제거하게 되어 저온균열 발생을 제어하는 효과도 줄 수 있다. 적정한

예열온도의 산정은 여러가지 복합적인 요인들을 모두 고려하여 결정하여야 할 것이나 현실적으로 매우 어려운 일이기 때문에, 일반적으로 가장 중요한 탄소당량의 크기에 따라 정한다. 많은 학자들이 탄소당량과 적정 예열온도와 관계를 연구하였으나, 이 결과들이 특정한 주변조건하에서 만들어진 것이므로 사용시에는 면밀한 검토가 필요하다.

5. 맺음말

지금까지 용접시에 발생하는 균열의 발생원인과 그 방지대책에 대해서 간단하게 기술하였

다. 대부분의 구조물이 용접에 의해서 제작되고, 용접부위가 파괴발생에 가장 취약하기 때문에 구조물의 파괴 사고는 대부분 용접부위에서 발생하고 있다. 현재 국내에서는 용접구조물이 많이 제작되고 있으며 앞으로도 증가할 것이다. 그러나 용접부에서 발생하는 파괴 사고에 의한 인명피해, 막대한 경제적 손실등에 대해서 인식이 부족하여 충분한 대책을 세우지 못하고 있다. 선진국에서는 이미 이 분야에 많은 연구가 되어 많은 기술정보가 공급될 수 있으므로, 국내에서도 이를 적극 활용 용접구조물의 파괴사고를 최소화하는데 필요한 연구와 대책을 적극적으로 추진해야 할 것이다.

