

용접구조물의 파괴

金 裁 坤

대우중공업(주) 중앙연구소 소재기술부



● 1954년 11월 5일생
● 용접 및 재료공학을 전공하였으며, 용접품의 용력해석(구조해석), 용접구조물의 피로시험, 용접자동화장치 개발 등에 관심이 있다.

1. 머리말

용접은 부품 및 반제품을 연결함에 있어 연속성이 유지되기 때문에 기계적으로 강도의 확보가 용이하고 응력의 흐름이 비교적 균일할 뿐만 아니라 생산성에 있어서도 다른 어떠한 연결공정 보다 높기 때문에 그의 적용이 확대되어 왔다. 그 결과 현재 원자력발전소와 같은 거대한 설비를 비롯해서 해상구조물, 선박, 대형교량 등도 용접기술이 없으면 제도가 불가능한 단계에 이르렀다.

그러나 용접공정은 그 자체의 특성에 의해 용접도중 많은 결함이 도입될 수 있으며 용접부위는 용접열에 의하여 재료의 특성이 변하여 취약해지기 쉬워 예기치 않은 파괴현상을 야기하기도 한다. 그 결과 용접구조물에서 항상 용접부위가 가장 취약한 부분이 되기 때문에 설계시 요구하는 각종의 기계적 성능을 보증하기 위해서는 시공상 각별한 주의를 기울여야 하며 향후 제조된 용접구조물의 사용조건에 대해서도 신중한 고려가 있어야 한다.

여기서는 일반철강재료 구조물의 파괴 중에서 특히 용접과 관련된 파괴에 대하여 미시적 및 거시적으로 용접품의 파괴원인에 대해 설명하고, 파괴를 방지하기 위한 대책에 대해서 설명하고자 한다.

2. 용접구조물의 파괴양상

용접구조물의 파괴양상은 우선 2가지로 구분해서 고려해야 한다. 즉, 용접도중에 발생하는 현상과 사용도중에 발생하는 현상으로 구별할 수 있는데, 용접도중에 발생하는 파괴는 주로 미시적인 파괴로 부적합한 용접공정 혹은 부적절한 모재 및 용접부자재의 사용과 관계가 깊고, 사용도중에 발생하는 파괴는 용접도중에 용접부위의 성능저하나 용접으로 야기된 표면이나 내부의 결함이 성장하여 파괴로 진전된 거시적인 파괴로 구별된다.

2.1 용접도중 발생하는 파괴

(1) 고온균열(hot cracking)

고온균열은 용접부가 응고되는 도중 약 500°C 이상에서 발생하며 강재에 포함되어 있는 유황과 같은 비금속 원소가 발생을 조장한다. 현재는 강재의 청결도가 향상되어 고온균열 현상이 거의 발생하지 않으나 다층용접의 경우 일부 그의 발생예가 보고되고 있다.

그러나 오스테나이트(austenite)제열의 내식강(stainless steel)에서는 재료의 특징상 비금속원소의 고용도(solubility)가 일반강재에 비해서 대단히 낮기 때문에 여전히 고온균열 현상이 보고되고 있다.

고온균열은 용융된 용착금속이 서서히 응고됨에 따라 용해도가 낮은 비금속 원소들이 입

계에 농축되어 입계에는 응고점이 낮은 백막 형태의 저용점 화합물이 형성되고, 냉각도중 발생된 큰 수축응력에 의해 파열되면서 입계를 따라 균열이 발생하게 된다. 그와 같이 발생된 균열은 계속 성장하여 대형균열로 성장할 수도 있으며 취성파괴 혹은 피로파괴의 기점이 되기도 한다.

(2) 저온균열 (cold cracking)

저온균열의 특징은 용접이 완료된 후 상온에서 소정의 시간이 경과한 뒤 갑자기 발생하는 균열로서 지연균열 (delayed cracking) 양상을 보이며, 주로 용착금속 주위 특히 열영향부 (HAZ; heat affected zone)에서 발생한다. 저온균열은 입내균열 (transgranular cracking) 양상을 보이며 그의 발생에는 열영향부의 경화조직 및 구속도 (restraint)와 관계가 있으나 특히 내부에 용해되어 있는 수소량과 관계가 깊기 때문에 수소균열 (hydrogen induced cracking) 이라고도 한다.

용접도중 열영향부는 고속가열 및 냉각을 받아서 취약한 마르텐사이트 (martensite) 조직으로 변태되기 쉽다. 한편 용접도중 피복재 혹은 표면의 이물질로부터 분해된 수소가 원자상으로 용착금속을 통해 열영향부로 확산 (diffusion)해 들어가게 되고, 이어서 구조물의 구속에 의해 발생하는 수축응력장 속에서 수소는 비금속계재물 주위와 같은 조직의 불균일한 부위로 확산해 가서 모이게 되며 그 뒤 균열이 발생하게 된다. 균열발생 기구에 대해서는 수소가 모이면 재료의 취성이 증가한다는 설도 있고, 분자상의 수소로 변환되면서 야기되는 부피팽창에 의해 응력이 발생하여 균열이 발생한다는 설도 있으나 아직까지 확실하지는 않다. 저온균열은 주로 피복아크용접이나 잠호용접 (submerged arc welding) 등에서 충분히 수분이 제거되지 않은 피복봉 혹은 용제 (flux)의 사용과 관련이 있으며, 최근에 와서 보호가스 용접 (CO₂용접, MIG, MAG 용접 등)의 사용이 확대되면서 그의 발생이 많이 감소되고 있는 추세이다. 그러나 모재의 강도가 증가하는

추세에 의해 결과적으로 구속력도 상승하고 동시에 취성이 큰 마르텐사이트 조직의 형성도 용이하기 때문에 고장력강의 용접에서는 각별한 주의가 요망된다.

2.2 사용도중 발생하는 파괴

정적인 하중상태에서는 비록 용접구조물이 다른 구조물에 비해 결함을 함유하고 있다 하더라도 결함의 양이 전체 단면적의 약 5% 이하의 경우는 정적강도에 거의 영향을 주지 않는다. 즉, 그림 1에서 보는 바와 같이 신율은 결함의 양이 증가함에 따라 다소 감소함을 보이나 인장강도는 거의 영향을 받지 않고 있는 것을 알 수 있는데 이 같은 현상은 용접부에 형성된 여성 (reinforcement)이 강도의 저하를 보충해 주기 때문이다. 결국 정적강도해석적인 측면에서 본다면 용접부의 유효 단면적이 모재 이상으로 확보된다면 구조해석에서 용접부에 특별한 고려를 해주지 않아도 무방하다. 그러나 용접부 재질의 변화와 결함에 의해 취성파괴와 피로파괴가 발생하기 쉽다. 이 두 가지 파괴는 용접공정의 추가에 의해서 추가적인 파괴 발생 가능성이 있기 때문에 이하 이들에 대해서 검토해 보기로 한다.

(1) 취성파괴 (brittle fracture)

취성파괴는 계산상으로 재료의 정적강도가 충분한 영역에서 순간적으로 발생하는 파괴양상으로 취성이 큰 벽개 (cleavage) 파괴 양상을

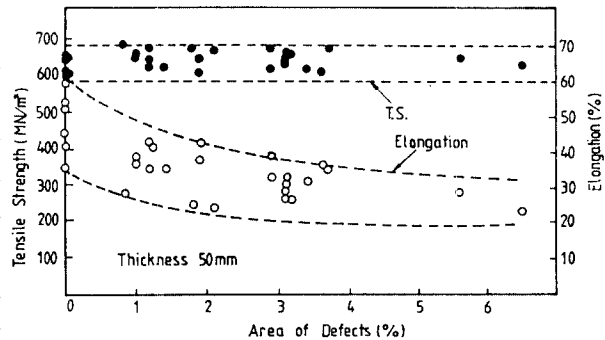


그림 1 용접결함의 양이 맞대기 용접부의 인장강도 및 연신율에 미치는 영향

보인다. 파면의 특징은 인장방향에 거의 수직으로 광택이 있는 깨끗한 결정상의관의 벽개형 파단면이 거의 변형을 수반하지 않고 관찰되며, 외곽부에는 shear lip에 형성되기도 한다. 전자현미경을 이용해서 파면을 관찰하면 결정입내파괴 양상의 매끈한 벽개면이 전면에 걸쳐 관찰된다. 또한 극단적인 경우를 제외하고는 산모양을 형성하면서 파괴의 개시점을 향하고 있는 셰브론 패턴(chvron pattern)이 특징적으로 형성되는데 이것을 추적하면 파괴의 시작점을 알아낼 수 있다. 대부분의 경우 파괴의 시작점은 주로 구조상 불연속부나 용접결합, 언더컷(undercut)과 같은 시공상의 결함 혹은 아크 시작점으로 나타나고 있다.

취성파괴는 저 응력상태에서 발생하며 심지어 평균응력이 10kgf/mm^2 이하에서도 파괴가 발생하는 경우도 있다. 그리고 취성파괴는 에너지적으로 불완전한 파괴이며 구조물에 축적되어 있던 탄성변위 에너지의 해방에 의해 스스로 전파되는 파괴의 양상을 보이며 그의 전파속도는 2000m/sec 에 달하는 경우도 있다.

용접구조물에서 취성파괴가 발생하기 쉬운 것은 결함이 생성되기 쉬운뿐 아니라 용접에 의해 재료의 취성이 증가하기 쉽기 때문이다. 열영향부 중에서도 용착금속과 모재의 접착부(bond부)는 결정립의 크기가 매우 조대하게 되며 그에 따라 재료가 취성파괴를 일으킬 수 있는 천이온도가 상승하게 된다. 통계적으로 재료의 충격치가 $47.5\text{J}(4.85\text{kgf}\cdot\text{m/m}^2)$ 이하이면 취성파괴가 일어나기 쉽다고 알려져 있다. 용접변수가 취성파괴에 미치는 영향을 고려하면 다음과 같다.

첫째로 용접 입열량(heat input)의 선택에 주의를 요한다. 인장강도로 60kgf/mm^2 급 강 이하에 있어서는 보통 용접법 정도의 입열량에 의해서 연성-취성 천이온도 상승이 크지 않지만 그 이상의 고장력강에 있어서는 천이온도의 상승이 현저하다(그림 2 참조).

그러나 최근 생산성 향상을 위해 대입열 용접법으로 electroslog, electrogas용접이 널리

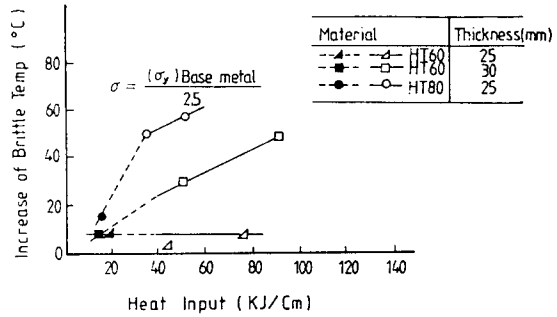


그림 2 모재에 대한 결함 부위의 취성파괴 발생 온도도의 상승 (결합의 크기 : 40mm, 인가하중 = $\sigma_y/2.5$)

사용되고 있는데 이 때는 입열량이 $100\sim 200\text{kJ/cm}$ 에 달하는 경우도 있다. 그와 같은 경우에는 용접구조용 강으로 널리 사용되는 50kgf/mm^2 급 강이라 할지라도 열영향부는 상온에서 취성을 나타내기 때문에 주의를 요한다.

둘째로 용접부는 용접후 각 변형(angular misalignment)이나 단차(axial misalignment)가 발생할 수 있는데 이 경우는 국부적인 굽힘

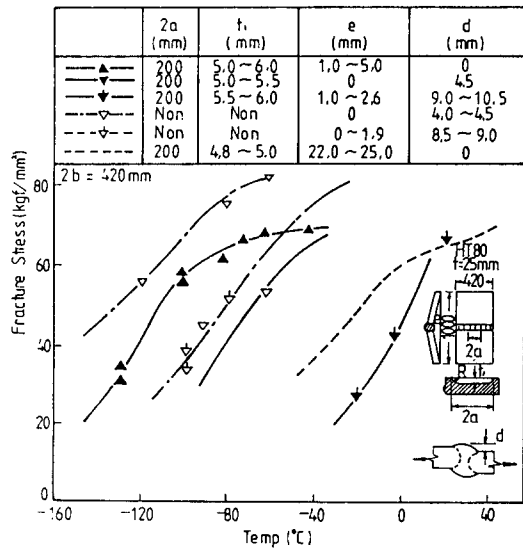


그림 3 용접부의 파괴응력에 미치는 각 변형 및 단차의 영향

응력이 증첩되어 취성파괴의 발생이 용이하게 된다. 그림 3에 각 변형 및 단차가 취성파괴 천이온도에 미치는 영향을 보였는데, 각 변형 및 단차가 취성파괴 천이온도를 상승시키고 있음을 잘 알 수 있다.

다음으로 용접잔류응력도 취성파괴에 영향을 미치고 있는데 특히 하중과 평행방향의 용접 비이드(bead)에 직각방향의 잔류응력의 영향이 크다. 후열처리에 의해 용접잔류응력을 제거하여 치수의 안정성을 높이고 취성파괴를 방지할 수 있으나 열처리 온도가 적당하지 않으면 오히려 재료의 취성이 더 증가하여 취성파괴가 조장되는 경우도 있으므로 주의해야 한다.

(2) 피로파괴 (fatigue fracture)

용접구조물의 파괴에서 가장 문제가 되고 있는 것이 피로파괴라 할 수 있다. 용접부는 수많은 결함이 존재하고 있으며 그 중에서 표면 결함인 toe, undercut, 비이드형상 자체가 노치(notch)가 되어 응력집중을 야기시키며 그에 따라 피로균열 발생, 시작점으로 작용하게 된다.

피로파괴의 특징은 균열의 시작점으로부터 균열이 원형으로 전파되며 외부 하중의 크기에 따라 상응하는 크기를 가지며 나이테와 같은 형태를 남기게 된다. 이와 같은 외형상의 특징을 셸 마아크(shell mark) 혹은 beach mark라고 부른다. 그러나 수 백회 이하의 수명을 보이는 저 되풀이 피로파괴면은 상온에서 연성을 갖는 재료의 정하중 연성 파괴파괴면과 구별하는 것이 실제적으로 매우 곤란하다.

용접부의 비이드 형상에 따라 피로강도에 미치는 영향은 지대하다.

표 1에 비이드면의 가공 유무에 따른 각종 강종의 피로강도의 변화에서 보인 바와 같이 특히 고장력강의 경우 비이드면을 평면가공한 시편의 피로강도가 294MN/m²인데 비해 가공하지 않은 시편은 단지 127MN/m²임을 알 수 있다. 특히 주의할 것은 정적강도의 차이가 피로강도의 차이에 영향을 미치지 않는다는 점이다.

표 1 고장력강 용접부 비이드 가공여부에 따른 피로강도의 변화 (단위: MN/m²)

| 강재등급 (kgf/mm ²) | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 모재 | 245 | 275 | 275 | 294 |
| 비이드면 평면가공 | 216 | 245 | -- | 294 |
| 용접상태 | 127 | 127 | 137 | 127 |

다. 그래서 용접이 까다로운 고장력강을 사용하는 것보다 50kgf/mm²급 정도의 강을 사용하는 편이 결함방지에 더욱 유리하고 경우에 따라서는 피로강도를 향상시킬 수도 있다.

플랭크 각(flank angle)을 변화시키는 경우 피로강도가 크게 달라진다. 즉, 그림 4에서 보듯이 플랭크 각을 증가시키면 노치효과의 증가에 따라 피로강도가 현저하게 저하함을 알 수 있다.

따라서 피로강도를 향상시키기 위해서는 용접부를 평면가공하거나 토우나 언더컷 등을 제거해 주어야 한다.

용접에 의한 인장 잔류응력은 균열 발생시에 평균응력의 효과로 영향을 미치며, 균열 진전 상태에서도 평균응력의 효과로 작용하여 ΔK_{Ih} (임계응력집중계수) 값을 낮추어 낮은 하중상태에서도 균열이 진전하며 역시 피로균열 진전속도를 높여준다. 또한 용접 잔류응력에 의해서

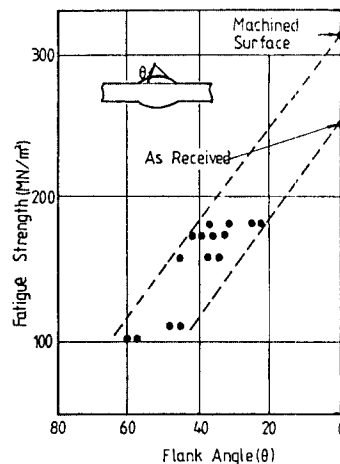


그림 4 플랭크 각이 피로강도에 미치는 영향 (N=2×10⁶, R=0)

발생하는 용접변형은 구속하중을 발생시켜 구조물의 내부에 응력을 증가시켜 예상치 못한 피로파괴를 야기시키는 경우도 있다.

한편 취성과파괴의 경우와 동일하게 각변형 혹은 단차가 있는 경우 노치효과의 발생 및 추가적인 굽힘응력의 중첩에 의해 피로강도가 저하함에 주의해야 한다.

3. 용접구조물 파괴의 방지

3.1 고온균열의 방지

고온균열은 모재 혹은 용접부자재 속에 함유되어 있는 유황(S)과 같은 비금속원소에 의해서 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 비금속원소의 함유량이 낮은 재료를 사용해야 하며 용접도중의 구속력이 낮게 되도록 해야 한다. 실제로 모재의 비금속원소 함유량을 어느 수준 이하로 유지하는 데는 경제적으로 어렵기 때문에, 비금속원소와 결합하여 안정하고 고용점의 화합물을 형성할 수 있는 원소가 함유된 부자재를 사용하는 것이 경제적이다. 이를 위해서 일반 철강재료에서는 망간(Mn)이 사용된다. Mn은 S와 결합하여 MnS를 형성하는데 그의 용융점은 1500°C 이상에 달하는 안정한 화합물이다. 그 결과 유황의 감소효과가 생기고 고온균열을 방지할 수 있다.

그러나 오스테나이트계열 내식강에서는 그 자체가 비금속원소의 용해도가 매우 낮기 때문에 미량의 S가 함유되어 있어도 쉽게 입계에 석출하여 고온균열을 일으키기 쉽다. 이를 방지하기 위해서는 비금속원소의 용해도가 큰 delta-ferrite 상을 조직내에 석출시켜 S를 그 속에 용해시켜서 고온균열을 방지하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 delta-ferrite는 취성이 크고 내복식성을 저하시키기 때문에 그의 양을 5% 이내로 유지해야 하며 따라서 사용 용접봉 선정에는 신중한 고려가 필요하다.

3.2 저온균열의 방지

용접부의 저온균열은 취약한 조직, 높은 수

소함유량과 과대한 구속응력에 의해서 발생하기 때문에 그러한 요인을 제거하는 것이 저온균열을 방지하는 방법이다.

그러나 현실적으로 주어진 설계조건이나 사용모재의 두께 등에 의해 구속력을 임의로 낮출 수가 없기 때문에 현장에서는 용접부의 취약한 조직 형성을 방지하기 위해 예열처리를 실시하거나 용접부자재의 건조 등을 실시하고 있다.

예열처리를 실시하면 용접부의 냉각속도가 저하되어 취성이 큰 조직으로의 변태가 억제된다. 그러나 예열처리 온도는 가능한 낮게 하는 것이 경제적으로 유리하므로 고려가 필요한데, 여기서 간단한 실험식을 소개하면 다음과 같다.

$$T = 556(C - 0.11) + 4t - 17$$

여기서

T : 예열온도(°C)

C : 모재의 탄소함유량(%)

t : 모재의 두께(cm)

실제로는 윗식에서 계산된 값보다 안전을 위해 약간 높게 설정하는 편이 좋다.

한편 저온균열의 일종으로 고장력강에서 종종 문제가 되고 있는 것이 층상균열(lamellar tearing)이다. 이것은 압연시에 층상으로 형성된 MnS로부터 균열이 발생하여 용접비이드 하단에 층상의 균열을 형성하는 것을 말한다(그림 5 참조).

이 균열은 주로 다층용접이나 후판 용접시에 발생하는 커다란 각 변형이나 수직응력이 주원인이며, 수소가 그의 발생을 촉진한다. 이

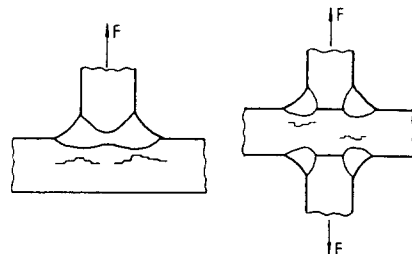


그림 5 층상균열(lamellar tearing)

균열을 방지하기 위해서는 S가 적게 함유된 압연수직방향의 신율이 좋은 강철을 사용하며, 응력발생이 적게 되도록 배려를 하여야 한다.

3.3 취성파괴의 방지

취성파괴를 방지하기 위해서는 저온에서 용접부의 인성이 감소되지 않도록 해야 하며 용접부의 결함과 불연속부 등을 제거해주어야 한다. 용접 열영향부의 인성 감소를 방지하기 위하여 현재 소량의 회토류금속 등이 첨가된 강종이 개발되고 있으며 이러한 강종은 대입열 용접에 사용해도 취성 천이온도의 상승이 비교적 적다.

용접부의 불균일(각변형, 단차 등)과 미소균열, 언더컷, 슬랙혼입 등은 모두 취성파괴의 시작점으로 작용하기 때문에 시공을 철저히 관리하여 결함방지에 주의해야 한다.

한편 균열의 전파에 대한 저항력이 큰 재료를 적절히 배치해서 균열의 진전을 정지시키거나 압축응력을 판재에 부가시켜서 균열진전을 방지하는 방법 등도 제안되고 있으나 현실적으로 실현시키는 데는 어려움이 많다.

3.4 피로파괴의 방지

용접구조물의 피로파괴가 용접결함과 비이드의 형상에 따른 노치에서 시작하고 있기 때문에 피로파괴를 방지하기 위해서는 용접부의 결함을 제거하여 노치효과가 발생하지 않도록 하는 것이 최상의 방법이다.

피로강도를 상승시키기 위해서 비이드 표면을 평면가공 해주는 것이 좋지만 모든 표면을 가공하기 어려운 경우, 특히 필렛용접의 경우에는 비이드의 토우부분을 TIG용접으로 재용해시켜 뒹태로 가공해주면 피로강도 상승의

효과가 크다. 이때 추가적인 압축응력의 도입 역시 피로강도 상승의 일익을 담당한다.

그리고 용접부는 가능한 완전용입(full penetration)되도록 용접을 실시하여 응력의 흐름이 원활하도록 유도해야 한다.

4. 맺 음 말

이상으로 용접구조물의 파괴현상과 그의 방지 대책에 대한 일반적인 사항을 고찰해 보았다.

용접구조물의 파괴는 단순 역학적인 차원을 넘어서 재료공학적 검토와 시공상의 각종 변수를 고려해야만 정확하게 이해할 수가 있으며 방지할 수 있다. 용접도중에 발생하는 미소파괴(균열)는 적절한 재료의 선정과 적당한 시공법으로 해결할 수 있으며, 사용도중 발생하는 거시적 파괴는 사용조건에 유의하고 발생된 용접결함을 제거할 수 있다면 방지할 수 있다.

결론적으로 용접구조물의 파괴는 용접도중에 결함을 발생시키지 않는 방법으로 방지하는 것이 가장 효과적이기 때문에 시공법의 선정 및 실시는 충분한 검토와 주의가 필요하다.

용접품의 파괴현상을 해석하는 데는 현재까지 잘 연구되어진 각종 파괴역학적 및 피로역학적 해석이 적용될 수 있으나 용접부의 불균일한 조직형성에 따른 기계적 성질의 불균일성과 잔류응력 등을 추가로 고려해야 하는 것이 약간 다를 뿐이다.

현재 용접부의 취성 및 피로파괴에 대한 다방면의 연구가 활발하게 이루어지고 있는 형편이며 향후에는 용접구조물의 수명예측을 포함한 가족 파괴해석 기술이 확립될 것으로 생각된다.

