

용접시공과 응력집중

김 응 준*

Stress Concentration on Weldments

E.J.Kim*

1. 머릿말

구조물이 하중을 받을 때, 구조상의 불연속부나 결함이 있으면 그 부분에는 평균응력보다 높은 응력이 발생하며 형상에 따라서는 평균응력의 몇배 몇십배에 달하기도 한다. 구조물의 파괴의 대부분은 이러한 응력집중부에서 발생하며 특히 피로파괴나 취성파괴에서는 응력집중의 영향이 크다.

용접구조물의 제작에 있어서 응력집중의 방지는 우선 설계단계에서 고려되어야 하나 용접이나 관련공정의 시공에서 유해한 응력집중이 발생하는 경우도 흔히 있다. 따라서 요구되는 제품의 성능을 보장하기 위하여서는 시공중에 있어서도 적절한 응력집중방지 대책을 생각하여야 한다.

2. 용접이음부 형상과 응력집중

2.1. 조립의 정확도와 응력집중

용접이음부에 있어서 응력집중의 대상으로 특히 중요한 것은 mismatching과 각 변형이다. mismatching은 직접적으로 응력집중의 원인이 될 뿐만 아니라 후술하는 바와 같이 응력집중의 증첩을 유발하는 요인이 되기도 한다.

각 변형은 인장 또는 압축의 경우 2차적인 bending응력을 발생시켜 응력집중의 악영향을 조장한다(Fig. 1).

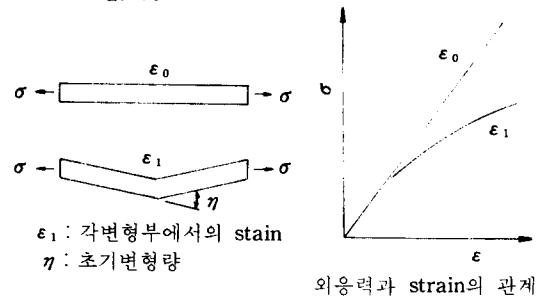


Fig.1 외응력과 strain의 관계에 미치는 각 변형의 영향

2.2. 이음의 표면형상

맞대기 이음의 표면형상에서는 Fig. 2에서 보인 바와 같이 덧살의 폭과 높이, toe형상(undercut 깊이와 저부곡률, 덧살각도)이 표면의 요철과 함께 문제되며 설계조건에 따라 bead표면의 끝처리가 필요하게 된다(Fig. 3). 통상의 사용조건에서는 얇은 undercut은 무해하며 또한 undercut의 발생을 완전히 방지하는 것은 매우 곤란하므로 품질의 요구조건에 따른 용접시공이 필요하다.

표면형상의 구분, 표면끝처리의 구분은 용접시

* 정희원, 한국기계연구소 부설 해사 기술 연구소

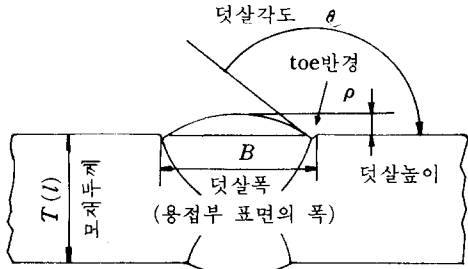


Fig. 2 용접이음부의 표면형상

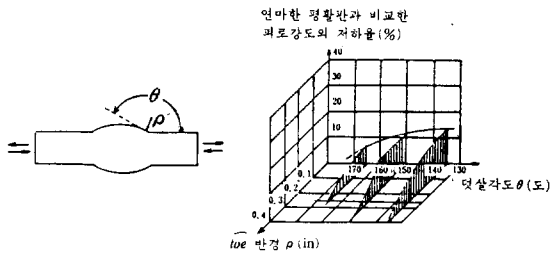


Fig. 3 맞대기 이음부의 피로강도에 미치는 덧살 형상의 영향

공요령서나 작업표준에 명기하여야 하며, 그 관리를 위하여서는 fillet 용접의 경우도 마찬가지로 외관의 등급별 sample을 만들어 두면 편리하다.

2. 3. 용접자세와 시공조건의 영향

용접시공에서 가능한 한 작업하기 쉬운 자세가 바람직한 것은 작업능률면에서 뿐만 아니라, 작업하기 어려운 자세에서는 형상불량이나 용접결함이 발생하기 쉽기 때문이다. 상향용접에서는 bead 표면이 블록해지는 것을 피하기 어렵고, 횡방향에서는 bead 윗부분의 undercut을 방지하기 어렵다. 내부결함의 발생에도 용접자세의 영향은 크다.

작업환경 및 용접시공조건도 마찬가지로 형상이나 결함에 따라 응력집중에 영향을 미친다. 작업에 대한 장애물, 좁은 공간, 불안정한 발받침, 한냉, 혹서, 폭우 등은 용접의 품질에 영향을 미친다. 너무 낮은 전류에 의한 블록한 bead나 용입의 불안정, 너무 높은 전류에 의한 거친 표면이나 undercut의 발생 등에도 주의를 기울여야 한다.

2. 4. Root부의 응력집중대책

back chipping이나 이면 용접을 하는 맞대기 용접에서는 root 부의 응력집중은 해소되지만, fillet 용접, 부분용입 맞대기 용접, 편면 맞대기

용접 등에서는 root부의 응력집중을 피할 수 없다.

backing plate를 사용하지 않는 편면 맞대기 용접에서는 TIG용접 등 back bead 용접을 채용하고, backing plate를 사용하는 경우에는 필요에 따라 backing plate를 제거한 후 끝손질을 한다.

이면의 mismatching은 응력집중을 크게 할 뿐만 아니라 root pass의 품질에 악영향을 미치게 되므로 주의하여야 한다. 벽두께가 두꺼운 pipe 등에서는 내경차에 의한 mismatching을 방지하기 위해 pipe 끝의 내면을 Fig. 4와 같이 가공하기도 한다.

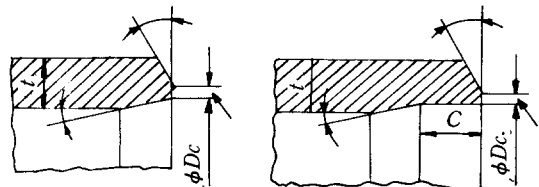


Fig. 4 pipe 용접부의 가공

2. 5. 단말처리

일반적인 평판의 맞대기 용접에서는 Fig. 5과 같이 end tab을 사용하던가 단부를 잘라내어 단말부의 결함을 방지한다.

fillet 용접의 시단·중단은 성의 있는 운봉으로 눈에 띄는 형상불연속이나 결함이 생기지 않도록 한다. T형이나 겹치기 fillet 용접이음의 단부는 Fig. 6과 같이 주위를 용접하여 단부의 현저한 응력집중을 방지한다.

주위의 용접은 주로 용접부의 연장으로 강도계산에는 들어가지 않으므로 각장이나 목두께에 구

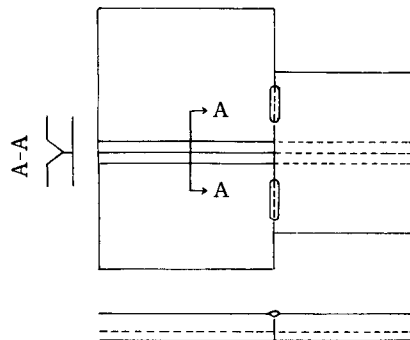


Fig. 5 end tab

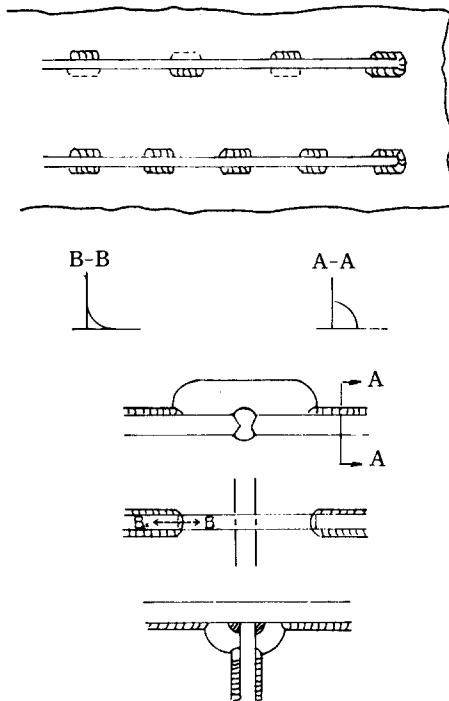


Fig. 6 fillet 용접시의 수위용접

에반지 않고 부드러운 형상으로 하여 응력집중이 현저하지 않도록 한다.

2.6. 용접결합의 방지

용접결합은 응력집중원으로 이음의 강도에 영향을 크게 미치므로 응력집중의 면에서도 용접결합의 방지는 중요하다. 이 경우 특히 표면결합의 방지가 가장 중요하고 형상과 아울러 undercut, 편면용접의 용입불량, 표면 및 이면 부근의 용입불량 등에 충분한 주의를 기울여야 한다.

Fig. 7은 용융용접에 있어서의 일반적인 용접결합을 나타낸것으로 그 발생 원인 및 방지에 대하여 간단히 설명키로 한다.

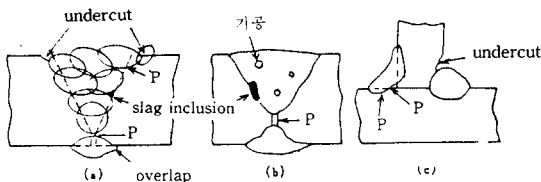


Fig. 7 용융 용접부의 일반적인 용접결합(P는 용입불량)

1) 기공

기공은 용접금속의 기포가 부상할 여유가 없이 용접금속내에 남은 상태로 응고한 것으로 대개 작은 구형의 형태를 갖는다.

기공을 유발하는 가스는 대부분의 경우 수소가스이며 산소, 질소인 경우도 있다. 이러한 가스를 방지하는데는 용접봉의 건조가 중요하며 또한 용접전의 모재의 cleaning, 특히 수분과 기름성분의 제거가 필요하다.

2) slag inclusion

slag inclusion은 전층의 slag를 완전히 제거하지 않고 차층의 용접을 한 경우나 용접조건이나 운봉조작이 나쁠때 slag가 arc보다도 선행하는 경우에 발생하기 쉽다. 방지방법으로서는 작업성이 좋은 용접봉의 선택, 전층의 slag의 완전한 제거, 운봉법의 개량등을 들 수 있다.

또한 inert gas arc용접에서는 slag inclusion은 없으나, TIG 용접의 경우는 tungsten전극의 spatter로 비드부근이 더러워지거나, tungsten 입자가 비드에 혼입되는 경우가 있다.

3) undercut

under cut는 용접결합중 crack 다음으로 큰 응력집중원으로서 파괴의 원인이 될 위험성이 크다. 특히 반복하중을 받는 구조물의 경우는 그 방지에 각별한 주의가 필요하다. under cut는 용접속도나 용접전류의 과다에 의해서 발생하며 fillet용접에서의 용접봉의 각도가 부적당한 경우에도 발생한다.

4) overlap

overlap은 용착금속이 용융되지 않은 상태에서 모재 toe부의 위에 올라앉은 상태를 말한다.

under cut과 마찬가지로 응력집중의 요인이 될 뿐만 아니라 내부식성이 요구되는 구조물의 경우에 있어서는 극간 부식의 요인이 되기도 한다.

overlap는 용접전류가 너무 작거나 용접속도가 너무 늦은 경우에 발생한다.

5) 용입불량

용입불량은 용착금속이 충분히 깊이 녹아들지 않으므로써 발생하는 것으로 이음의 강도부족을 유발시킨다. 용입불량은 이음의 root간격의 과소, root면의 과대, 용접전류의 부족, 너무긴 arc, 운

봉분량 등의 원인으로 발생한다.

3. 용접결함에 의한 응력집중

용접결함은 용접이음의 유효단면적을 감소시킬 뿐만 아니라 응력집중에 의하여 이음부의 강도를 저하시킨다. 특히 피로나 취성 등에의 영향이 큰 점을 주의하여야 한다.

3.1. 결함의 형상과 응력집중

응력집중의 정도는 결함의 크기와 형상에 의해 달라지며(Fig. 8참조) 크랙과 같이 선단이 날카로운 결함의 영향에 대한 평가에는 파괴역학에서의 응력확대계수가 이용된다.

여기서 주의할 점은 용접금속 중의 커다란 기공이나 slag와 같은 3차원 결함이 종종 크랙을 동반하고 있다는 것이다. 이러한 결함은 비파괴 검사에 의해 크랙의 검출이 불가능한 경우가 있으며, 이 경우 결함만의 길이는 짧아도 크랙을 포함한 유효길이는 크므로 가볍게 간과하여서는 안된다. 따라서 용접시공 중에 이러한 3차원 결함이 발생되지 않도록 주의할 기울여야 한다.

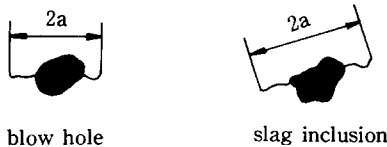


Fig.8 크랙의 유효길이

3.2. 표면결함과 내부 결함

notch가 작은 때는 Fig. 9의 A와 B의 경우의 응력집중계수는 같다. 즉 표면결함은 2배길이의 내부결함과 같은 응력집중을 유발한다.

일례로서 방사선투과시험(RT)이나 초음파탐상시험(UT)에서 내부결함을 엄밀하게 조사하여 그 결함을 제거하여도 표면이 용접 그대로의 상태에

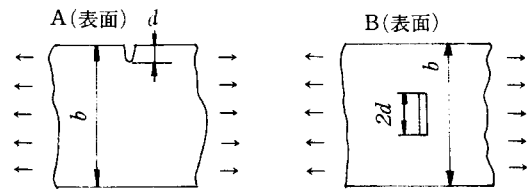
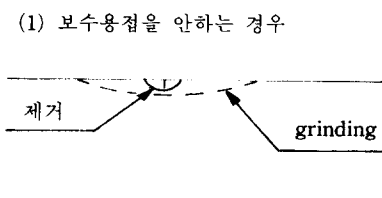


Fig.9 표면결함과 내부결함

서는 피로크랙이 표면으로부터 발생하여 피로강도가 향상되지 않는 것을 들 수 있다.

더욱이, 응력부식크랙 등에서는 표면결함의 영향이 현저하므로 파괴방지의 면으로부터 표면결함의 중요성은 매우 크다.

3.3. 표면결함의 제거와 보수

표면결함을 grinder 등으로 제거한 후 용접보수를 하지 않는 경우는 주위의 표면도 평편하게 갈아내어 응력집중의 발생을 피하도록 한다. 결함은 완전히 제거하지 않으면 안되지만 필요 이상으로 깊이 갈라내지 않도록 주의하여야 한다(Fig. 10).

표면결함을 제거한 후 용접보수를 하는 경우에는 내부결함의 경우도 마찬가지이지만, 결함을 완전히 제거한 후 적절한 방법으로 용접하고 그후 용접부의 덧살을 제거한다. 이 덧살의 제거는 응력집중을 완화시킬 뿐만 아니라 보수부의 비파괴 검사의 신뢰성을 높이는 역할도 한다.

표면형상, undercut, pit 등 표면결함의 허용한도는 용접부에 대한 품질요구에 의하여 크게 달라지므로, 일률적인 취급은 곤란하나 필요 이상으로 엄하게 하거나 그 반대로 가볍게 생각하는 일이 있어서는 안된다.

4. 응력집중의 중첩 및 기타 요인과의 중첩

응력집중이 관련된 사고예를 조사해 보면 단순한 응력집중에 의한 것도 있으나, 몇개의 원인에

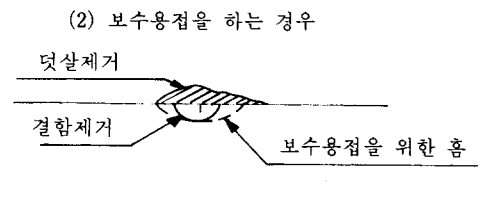


Fig.10 표면결함의 제거와 보수

의한 응력집중이 복합적으로 작용한 예나 응력집중과 기타의 요인이 중첩되어 사고의 원인이 된 예가 많다.

따라서 응력집중의 악영향을 막고, 응력집중에 의한 사고를 방지하는 데는 이들 요인 각각에 대한 대책과 함께 요인의 중첩을 막는 배려가 필요하다.

4. 1. 형상과 용접결함

형상에 의한 응력집중부에 결함이 있으면, 이 결함이 파괴의 기점이 되는 경우가 많다.

4. 2. 구조설계와 용접형상

우선 설계단계에서 과대한 응력집중은 피하는 것이 중요하나, 그러더라도 응력집중이나 2차응력이 발생하는 경우가 있으므로, 이러한 부분의 용접이음의 형상이 나쁘면 응력집중의 악영향이 중첩된다.

즉, 두께나 곡률의 이행부, 곡관부의 용접부 등은 통상의 용접부보다 형상에 주의를 기울여야 한다.

4. 3. 각변형, 부정변형, 용접형상, 결함

각변형이나 부정변형은 그 형상에 따라 2차응력을 발생시킬 뿐만 아니라, 하중조건에 따라서는 spring back에 의한 급격한 변형을 일으키는 경우가 있다. 이런 부분에 현저한 형상변화나 크랙 등의 결함이 있으면 이곳으로부터 파괴가 발생하는 경우가 많다.

구형 tank모형의 내압피로시험의 경우, 극단적인 각변형부에서는 용접결함이 없이도 크랙이 발생하며, 또한 급격히 성장하므로 결함 등이 중첩된 경우의 위험성은 쉽게 상상할 수 있다.

4. 4. mismatching, 용접형상, 결함

용접이음에 mismatching이나 편심이 심하면, 그것만으로도 이음의 피로강도가 크게 저하하지만, 이 부분에 깊은 undercut이나 용입불량 등의 결함이나 용접표면에 심한 형상불량이 있으면 더욱 더 파손의 위험성이 커진다.

가능하다면 중심이 맞지 않는 부재라도 이를 움직여서 Fig. 11과 같이 용접부의 편심이 직접 영향을 미치지 않도록 배려하여야 한다.

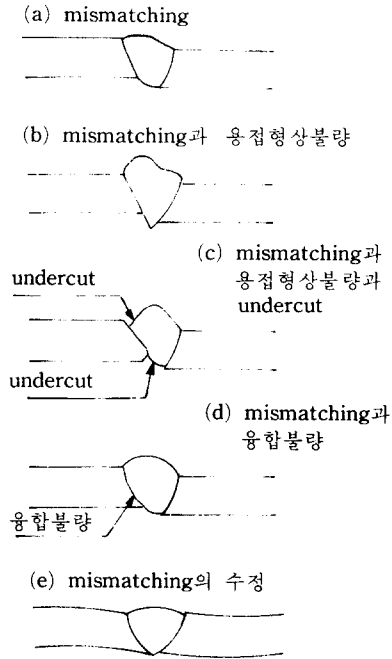


Fig.11 mismatching과 결함의 중첩

4. 5. 용접잔류응력과 응력집중

파괴역학에서는 외력에, 용접잔류응력 및 응력집중에 의한 strain을 가산하고 있다. 따라서 응력집중부가 높은 용접잔류응력을 갖는 영역에 있는 것은 바람직하지 못하다. 이러한 사실은 관두께가 두꺼운 압력용기 등에서 노즐용접부에 대해서 용접후열처리(PWHT)를 하는 것으로도 알 수 있다.

응력부식크랙의 방지에 용접잔류응력과 응력집중의 중첩이 유해한 것은 말할 나위도 없는 일이다.

4. 6. 구속과 응력집중

구속은 잔류응력과 잔류 strain을 크게 한다. 특히 응력집중이 큰 곳에는 구속도 한층 커지게 되므로 용접크랙의 발생 등 용접시공상에 관련된 용접결함의 문제가 생긴다.

4. 7. 가공에 의한 strain과 응력집중

bending 가공된 부재는 사용조건에 따라 2차응력을 발생시켜 응력이 높아지는 경우가 많다. 여기에 두께의 차, 용접이음형상, 부속물의 부착 등

에 의한 응력집중이 가해지면 응력의 진폭은 더욱 커진다.

또한 가공에 의한 strain에 의해 재료의 연성이나 인성이 저하하기도 하여 파괴에 대한 안전성은 더욱 저하하게 된다. 소성가공부에 대해서 용접시 응력집중에 주의가 필요한 것은 이 때문이다.

5. 맺음말

이상 언급한 바와 같이 응력집중의 원인은 여러 가지 있으며 각각의 방지대책 또한 이론적으로는 밝혀져 있다. 그러나 실제 용접구조물에 있어서는 여러가지 제약조건 때문에 유효한 방지대책을 적용할 수 없는 경우도 있어 이러한 경우에는 설계와 시공등을 통하여 최적의 조건을 도출하는 것이

중요하다.

또한, 응력집중의 악영향은 사용조건이나 환경에 의하여 크게 변화하므로, 어떤 조건에서는 문제되지 않는 응력집중이 다른 조건에서는 손상의 원인이 되기도 한다. 빈약한 경험에 근거한 독단이나 지식부족에 의한 무분별은 극히 위험한 것이다.

응력집중의 악영향을 방지하는데는 설계기술자는 물론 용접시공을 담당하는 용접기술자, 용접지도자 등 넓은 범위의 관련기술자가 응력집중의 악영향과 그 방지대책의 기본에 대하여 바른 지식을 가지고 용접시공에 관련된 모든 공정 및 작업에 주의를 기울이고 적절한 조치를 취하는 것이 중요하다.