解 說
大 韓 熔 接 學 會 誌
第 9 卷 第 4 號 1991年 12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.9, No.4, Dec., 1991

熔接構造論(I)

(熔接設計應力에 対하여)

엄 기 원*

Welded Joint Strength for Design and Performance(I)

K.W. Um*

I. 概 要

熔接構造物을 그의 使用目的에 適合하게 製作하려면 그의 構造設計와 使用材料의 適切한 選擇과 使用性能을 充分히 확보하게 끔 製作過程과 品質보증을 할 수 있는 것이 必要하다. 즉 熔接性(Weldability)을 만족하게 하는 것이다.

構造物의 製作에 있어서 배려하여야 할 것은 構造의 使用性能의 확보와 安全性인 것이다. 사용성능이란 構造의 强度·機能 그리고 美觀이나 끝내기의 外觀的 性能등이다. 우리들의 生活空間에 존재하는 構造物이 한번 破損이나 破壞의 事故가 發生하면 치명적인 것이 된다.

熔接設計 生產과 製作의 技術的인 준비로써 熔接構造物을 對象으로 熔接加工에 重點을 두어 使用되는 말이다. 熔接設計는 構造物과 製品의 熔接製作過程을 完全히 指示하고 용접이음에 要求되는 사용성능이 확보되게끔 部材配置와 치수등이 選定되고 製作과 檢査등의 실제 作業性을 充分하게 고려한 製作計劃을 세우는 것을 말한다. 이와같이 된 熔接設計를 바탕으로 熔接技術者가 最適한 熔接法과 熔接材料의 熔接條件등을 결정한다. 즉 設計와 熔接施工은 서로 밀접한 관계를 갖고 있어야 한다. 특히 熔接設計의 比較的 初期段階에 속하는 것은 製品基本計劃과 强度解析 그리고 構造設計의 과정에 반드시 熔接技術者의 關與가 必要한 것이다. 그리고 設計의 最適化를 위하여는 많은 情報 특히 經驗的인 情報와 構造解析的인 情報가 잘 처리되어야 한다. 오늘날의 CAD의 導入아란 電算機의 處理技術과 graphic技術을 묘미있게 利用한 것이라 할 수 있다.

熔接構造物의 熔接性을 論述하려면 다음과 같이 區分하는 것이 바람직하다.

1. 熔接構造物의 許容强度
2. 熔接構造用의 鋼의 選擇
3. 熔接施工條件
4. 熔接設計

이중 용접제작과정을 표 1에 나타내었다.

구조물의 용접설계 요구조건으로써, 1) 損傷, 2) 彈性破損, 3) 降伏應力, 4) 機械的인 불안정성, 5) 破壞와 崩壞 등을 고려하여야 하며 構造用 鋼의 선택은 1. 强度(strength) 2. 延性(ductility) 3. 靱性(toughness) 을 고려하여 構造物의 設計에 充分히 만족해야 한다.

* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

Table 1 Welding manufactured processes

현상 / 방법	열적방법	기계적방법	화학적방법
1. 절 단	가스 및 플라즈마	기계적	
2. 성 형	선형 가열	형틀 형성	
3. 이 음	아아크 및 저항용접	볼트 및 리베트	시멘타인

2. 熔接構造物의 設計에 必要한 材料 값

荷重을 받고 있는 鋼의 熔接構造物은 그 곳에 사용되는 鋼의 材料값에 의하여 設計되어진다.

構造物의 形狀을 決定하고 設計를 하기 위해서 많은 觀點에서의 고려가 필요한데 安全性과 經濟性 외에 구조물의 최적한 제작공정이 필요하다.

그리고 설계자는 구조물의 剛性, 減衰性, 耐需性, 耐摩耗性, 耐食性, 形狀의 安定性, 耐座屈性 등을 필요에 따라서 고려하여야 한다.

2.1. 정적강도와 크리이프 강도

σ_P : 비례한도 ; Hooke의 법칙에 따라 변형율이 응력에 비례하는 한계응력

σ_E : 탄성한계 ; 영구변형이 일어나지 않는 한계응력

σ_S : 항복점 (내력) ; 응력-변형율 선도에서 현저한 연구변형이 나타나기전에 생긴 불연속부의 응력

σ_D : 인장강도 ; 시편의 최초 단면적으로 최대하중을 나누어 구한 최대응력

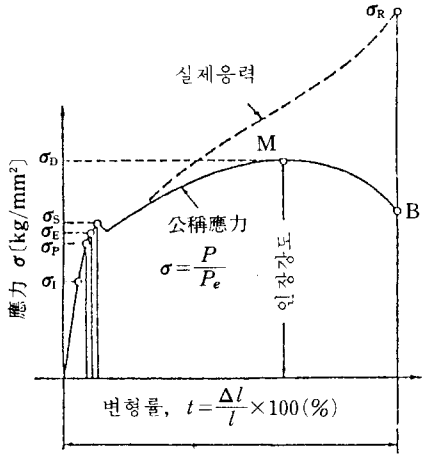


그림 1 연강의 응력 — 변형률 곡선

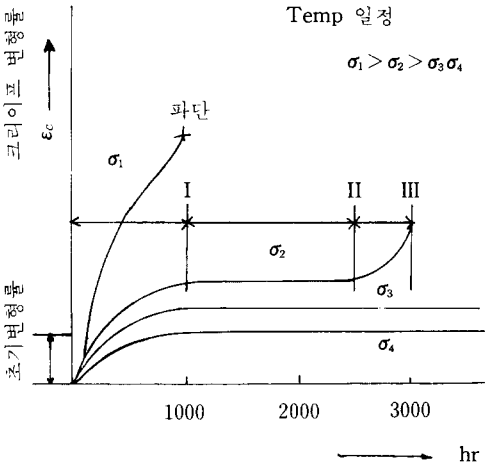


그림 2 고온하에서 변형과 시간의 관계

σ_R : 실제파단강도 ; 국부 수축한 단면적에서 파단하중을 나누어 구한 최대응력

모든 鋼에서 반드시 확실한 항복점을 나타내지 않는 것이 있다. 이때에는 영구변형이 표점거리의 0.2%에 도달하였을 때를 이에 상당하는 $\sigma_{0.2}$ 耐力 (endurance)의 값으로 사용하고 있다.

위에 서술한 정적 인장시험에 대한 강도는 모두 실온에 있어서의 값이다.

실온의 강에서는 creep는 생기지 않기 때문에 실온에 있어서 정적하중을 받는 구조물에 대해서는 위에 기술한 값을 설계의 기초로 사용할 수 있다.

여기에서, 정적하중을 받는 강구조부재의 설계에서는 다음의 재료값이 제일 중요하다.

변형에 대해서는 σ_S, 파괴에 대해서는 σ_B.

강의 강도는 온도상승과 함께 변화한다. 고온에서 단시간의 정적시험을 행하여 인장강도와 $\sigma_{0.2}$ 고온내력을 구할 수 있다. 규격화 된 시험법에서 장시간 시험을 행하면 강의 creep특성, 즉 신장 및 강도와 시간과의 관계를 구할 수가 있다. 이에 따른 고온에서 주로 정적하중을 받는 구조물을 설계하는 경우의 기초가 된다.

고온장치의 길이를 결정하는 데에는 온도에 의존하는 다음의 수치를 고려하지 않으면 안된다.

$\sigma_{0.2/t}$: t℃에서의 고온 내력 (고온 단시간 인장시험에서 0.2%신장을 표시한 응력)

$\sigma_{DVM/t}$: t℃에서의 creep한도 (독일 재료협회에 따른 45시간에서 0.2%신장을 표시한 응력)

$\sigma_{1/100000/t}$: t℃에서의 creep제한응력(100000시간에서 1%신장을 표시한 응력)

$\sigma_{B/100000/t}$: t℃에서의 creep파단강도(100000시간에서의 파단응력)

이 값을 일반화하여 그림 2에 표시하였다.

설계에 있어서 사용온도에서의 이값을 고려하지 않으면 안된다. 이 값을 일반적으로 K라 표시하고 결정되어진 안전율을 S라 부르면 K/S최소값이 설계에 사용되어진다. 실제에는 특별한 장치에 대하여 100000시간 이하의 creep제한응력을 사용하는 것도 있다. 사용시간에 있어서 온도가 일정하지 않은 경우에는 각 온도에 따라서 사용시간을 고려한 파손의 조건을 검토한다.

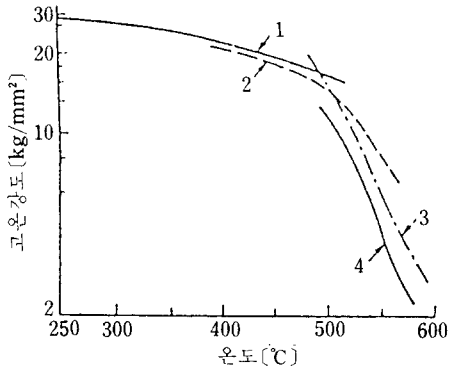


그림 3 온도에 의한 강도의 변화

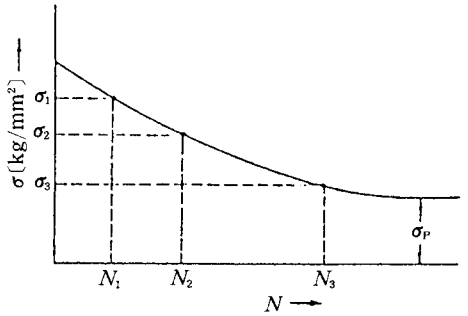


그림 4 응력과 반복회수의 실험결과

2.2. 동적하중 (피로강도)

구조물의 대부분은 항상 같은 정적하중을 받게되는 것은 아니고 현저한 변동하중을 받는 경우가 있다. 이에따른 하중의 변동에는 다음의 두 가지가 있다.

1) 진동 즉 반복횟수가 많은 하중

2) 충격 즉 하중속도가 큰 하중

모든 동적하중은 각각 영향을 주는 방식은 다르나 구조물의 강도를 저하시킨다. 하중의 반복수 혹은 cycle의 증가와 함께 강도는 저하된다.

하중의 반복수와 피로강도와의 관계는 A. Wöhler의 간단한 실험에 의해 구해진다. 즉 어떤 단면의 봉에 일정응력 σ를 작용시키고 이 負荷와 除荷의 반복수가 충분히 큰 일정값 N에 도달하면 파괴가 일어난다. 각종응력에 대하여 이 반복수를 구하고, 응력-반복회수를 그리면 그림 4의 S-N곡선이 얻어진다. 이것을 Wöhler곡선이라고 한다.

그림 4의 곡선은 어느 일정 반복회수에서 N축에 평형하게 된다. 즉 이 부분에서는, 반복회수가 증가하여도 강도는 영향을 받지 않는다. 이와같이 무한회수의 반복에 견디는 응력의 상한값을 피로한도라 말한다.

피로한도란 반복수가 임의의 크기로 증가하여도 재료가 파손되 않는 것이며 따라서 영구적으로 하중을 반복하여 얻은 응력의 강도이다.

피로한도의 값은 반복하중을 받는 많은 구조부재의 설계에서 대단히 중요하다. 이 값이 구조부재의 허용응력을 결정하는 기초가 되고, 동시에 경제성과 안정성을 결정하는 수단이 된다.

따라서 무한의 반복회수를 갖는 동적하중을 받는 강구조물부재의 설계에서는 피로파괴가 되지 않는 피로한도 σ_p가 재료값으로서 제일 중요하다.

설계자는 피로한도 외에 S-N 선도에서 각 반복수에 따른 각각의 시간강도를 알 수 있다. 이 시간강도는 피로한도의 반복회수보다 짧은 반복회수가 문제로 되므로 많은 동적하중을 받는 구조물의 설계에서 중요하다.

피로시험은 일정한 리듬(rhythm)으로 같은 진폭과 진동수의 정현파형의 하중에서 행한다. 실제 동적하중이 작용한 구조물에 의해서 같은 하중이 반복되는 경우는 드물기 때문에 같지않은 것이 보통이다. 이와같은 불규칙한 실제하중, 즉 변동하중이 최종적인 피로강도에 미치는 영향은 지금까지 분명히 밝혀지지 않고 있다. 용접구조물의 변동하중에 의한 피로강도에 대해서는 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

실제의 설계에 있어서 반복회수가 많은 하중은 피로한도를 구하여 계산하는 것이 보통이다.

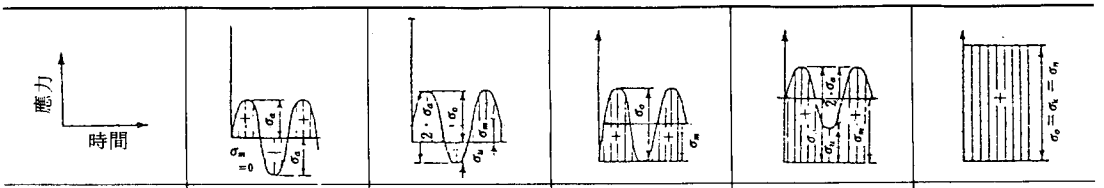


그림 5 응력·시간곡선에 의한 반복하중의 형식

하중의 종류는 다음과 같이 분류된다.

정적하중

부분편진응력 / 완전편진응력 } —편진영역

부분양진응력 / 완전양진응력 } —양진영역

그림 5는 하중 및 응력 종류의 특징을 표시하고 하중의 변화를 응력—시간 곡선에서 그림으로 표시한 것이다.

기계의 설계에서는 하중의 형식을 평균응력 σ_m과 응력진폭 σ_a로 표시한다.

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a$$

평균응력 σ_m과 최대응력 σ_o와의 비 σ_m/σ_o도 기계부품에서는 하중형식을 표시하는데 사용된다.

강구조에서 하중형식을 표시하는데 주로 쓰이는 것으로는 최소응력 σ_u와 최대응력 σ_o와의 응력비 k는 다음과 같다.

$$k=\frac{\sigma_u}{\sigma_o},\quad \sigma_m=\frac{\sigma_o+\sigma_u}{2},\quad \sigma_a=\frac{\sigma_o-\sigma_u}{2}$$

하중의 형식은 피로한도에 큰 영향을 준다. 완전양진 피로한도(σ_w)는 완전편진 피로한도 (σ_{SCH})보다도 항상 낮다. 그림 6은 이것을 S-N곡선에 따라 모형적으로 나타낸 것이다. 재료강도가 하중의 형식에 따라서 다른 값을 갖는 모양은 그림 7의 스미스 피로한도 선도에서 구할 수 있다.

기계설계에서도 Smith의 피로한도선도가 잘 이용된다. 이에 의하면 인장에서 압축의 전피로한도 범위를 용이하게 이해할 수 있다. 일반적으로 그림 7의 Smith의 피로한도 선도를 사용한다. 피로한도 선도는 일반적으로 항복점의 범위를 직선으로 끊는다. 또 각각의 선이 곡선으로 되는 것이 있어도 간략화 한 피로한도 선도에서는 직선으로 표시한다.

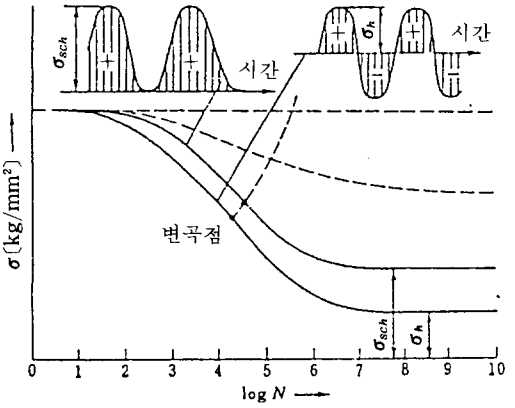


그림 6 편진과 양진응력의 S-N곡선의 비교

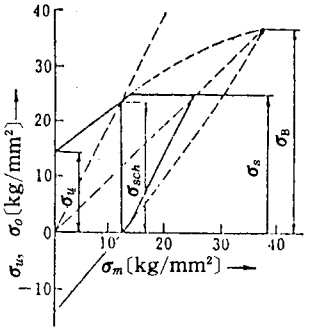


그림 7 St 38강의 Smith곡선

3. 인장, 압축 혹은 전단하중을 받는 이음의 정적 및 피로강도

3. 1. 기계적 Notch의 영향

피로강도에는 구조물의 힘의 유동이 중요한 영향을

미친다. 힘의 유동이 치우친 곳에는 응력집중이 생기고 동시에 피로강도가 저하된다. 힘의 유동이 한쪽으로 치우쳐 굴곡이 있는 것은 하나의 notch현상을 가지게 된다.

Notch작용의 영향을 자세히 살펴보면 그림 8에서 2개의 판을 인장한 경우의 단면응력분포를 나타낸다. (a)에 표시한 판은 같은 단면을 갖고 따라서 응력분포도 같다. 구멍을 갖고 있는 판(b)의 단면적은 판(a)에 비해서 구멍의 지름만큼 작다.

구멍의 테두리에서는 힘의 유동이 불균일하여 응력집중을 일으킨다. 이 힘의 유동과 치우침에 의해 구멍의 테두리에서의 응력 peak와 판의 테두리에서의 응력저하를 일으키게 된다. 단면의 평균응력은 어느 경우에도 마찬가지이다.

이 응력의 peak는 힘의 유동이 치우침이 현저하면 경화가 크게 된다. 단면에 있어서 notch작용의 크기를 α_k로 나타내고 응력집중계수(형상계수)라 말한다.

α_k=(최대응력값)/(공칭응력값)

서서히 하중을 증가시키면 이 응력집중장소가 최초로 항복점에 도달하고 연성재료라면 그 장소에 소성변형을 일으켜 이 이상 응력은 증가하지 않는다. 다시 하중을 증가시켜 단면의 응력이 똑같이 항복점에 도달하면 응력의 차 즉 응력집중은 없게 된다. 전단면적의 응력이 모두 같게 되는 것은 파단의 직전으로 생각한다. 정적강도는 notch가 있는 경우에도 없는 경우에도 대체로 같다.

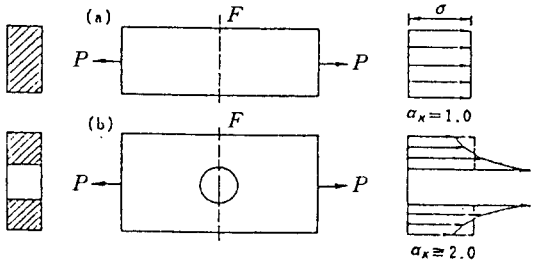


그림 8 응력 집중계수α_k

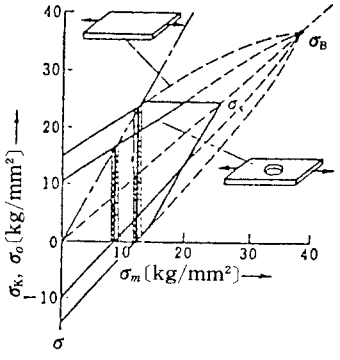


그림 9 평판과 유공판의 Smith피로선도

그래서 동적하중의 경우에는 하중의 작용의 몇회 반복되어 급속히 응력집중의 영향이 나타나는 것이 많다. 피로파괴의 본질적 현상에 대해서는 지금까지 완전히 밝혀지고 있지 않고 그 원인도 가정에 지나지 않기 때문에 반복하중의 경우에는 재료의 응력집중이 정적하중의 경우처럼 평균화되고 있는 것은 아니라고 생각하는 것이 좋다.

이 응력집중장소에서 균열을 일으켜 다시 생긴 균열이 notch효과를 높이고 반복하중에 의해서 다시 균열을 성장하여 단면적도 감소한다. 거기서 돌연 단면(균열이 없는 단면)전체가 파단한다. 피로파면에서는 피로파괴의 발생점 즉 응력집중 장소를 확인하는 것이 가능하다. 피로파면의 부분은 가느다란 조개형상을 보이고 강제적으로 파괴된 남은 단면에서 발견된 요철의 어떤 파면으로 구별이 된다.

Notch재의 피로강도는 notch가 없는 경우에 비해서 항상 낮다. 이 피로강도의 비를 notch계수라 말한다.

$$Notch\ 계수\ \beta=\frac{平滑材의\ 疲勞限度}{Notch材\ 의\ 疲勞限度}$$

정적 및 피로강도에 대해서 수량적으로 이해하기 위해서 다시 인장-압축재에 대해서 예를 서술한다.

그림 9는 압연한 St 38강재의 평활판 및 有孔판의 인장강도 σ_B, 항복점 σ_S 및 피로한도를 나타내고 있다. 이 그림은 강도의 대체적인 경향을 나타내고 있다. 이 그림에 의하면 정적강도는 평활판에서도 유공판에서도 거의 같은 값을 나타내고 있다. 그러나, 동적하중의 경우에는 피로강도는 크게 저하하고 있다.

3.2. 용접의 영향

용접구조물에서는 하중을 받는 구조부재의 정적 혹은 피로강도에 용접부가 영향이 있는가 없는가가 대단히 중요하다.

그림 10 및 11은 힘을 받지 않는 여러가지 용접부를 갖는 인장-압축재의 양진 피로강도 σ_w, 편진 피로강

도 σ_{SCH} 및 항복점 σ_S의 두 세가지 예이다. bead용착, 횡 rib, 종 rib 시험편의 어느 경우도 정적강도(이 경우 항복점 σ_a)에 용접 영향은 없다. 그런데, 동적하중의 경우에는, 이 영향은 대단히 크다. 판 위에 횡방향으로 bead를 용착한 경우(그림 10(b)) 압연한 黑皮付판재(그림 10(a))에 비해 피로한도가 현저히 저하하고 있다. 이것은 기묘하게 생각된다. 횡 bead가 붙은 판의 힘유동은 평활판에 비해서 그다지 변화하지 않는다. 따라서 용접구조물의 경우에는 최초로부터 판재에 비해 피로강도는 저하하는 것으로 생각하지 않으면 안된다. 용접 bead에서 모재의 지단부는 형상적인 notch를 형성하여 bead형, 특히 지단부의 반경 및 남은부분의 각도는 피로강도에 큰 영향을 미친다.

양호한 작업의 용착 bead를 육안으로 보면 용접 bead와 모재와의 지단부는 평편한 상태와 같으나 bead단면을 확대하여 보면 지단에는 작은 undercut, overlap, 기공, slag잠입 등의 notch는 용접중에 생기는 것이지만 용접시공등급에서 말하면 용접결함에서는 없다. 이 육안으로는 보이지 않는 notch가 피로강도를 현저히 저하시킨다. 판의 용접 bead를 가공하여(예를들면, 수 mm절삭), 이 지단부의 notch를 제거하면 피로강도는 현저히 상승하여 흑피의 압연재와 같은 값으로 쉽게 된다(그림 11).

fillet 용접에서 횡 rib를 갖는 경우(그림 10(c), 그림 11(c))는 root 및 fillet지단부의 notch에 의한 응력집중과 강성의 불연속때문에 횡 bead용접의 경우보다도 열등한 값을 나타내고 있다. 판에 짧은 종 rib를 용접한 것도 같은 값을 나타내고 있다(그림 10(d), 그림 11(d)). fillet종단부도 이 경우 notch로 되고 있다. 횡 bead의 경우에 비해 힘의 방향에 존재하는 crater의 예리한 notch는 피로강도를 다시 저하시킨다.

판의 종단까지 위치한 종 bead 또는 종이음(그림 10(e), 그림 11(e))은 상당히 양호한 피로강도를 나타내고 있다. 이것은 한 곳에 집중한 현저한 notch가 없는 것에 의한 것이다.

fillet지단부의 가공은 어떤 fillet의 경우에서도 피로강도를 그다지 개선하지 않는다. 이것은 root부의 가공이 불가능하기 때문이다. 이것의 예는 대단히 중요한 다음의 사실을 나타내고 있다. 즉 횡 bead와 종 bead의 종단부는 전부 예상에서 벗어나 힘에 관계가

		피로한도〔kg/mm²〕		
		양진 σ_w	편진 σ_{sch}	항복점 σ_s
(a)		14.0	24.0	24.0
(b)		9.5	16.0	24.0
(c)		8.0	14.0	24.0
(d)		8.0	14.0	24.0
(e)		11.5	19.0	24.0

그림 10 St 38강의 강용접이음의 피로한도

		피로한도〔kg/mm²〕		
		양진 σ_w	편진 σ_{sch}	항복점 σ_s
(a)		14.0	24.0	24.0
(b)		14.0	24.0	24.0
(c)		9.5	16.0	24.0
(d)		9.5	16.0	24.0
(e)		13.0	22.0	24.0

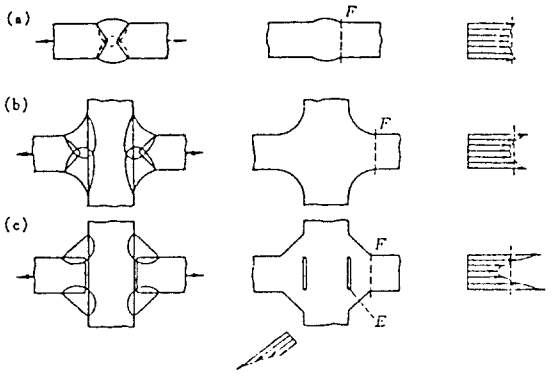
그림 11 St 38강용접이음(끝내기 가공 후)피로한도

없는 것처럼 보여도 피로강도를 현저히 저하시킨다. 그러나 정작강도를 저하시키는 것은 없다.

3.3. 용접이음 형상의 영향

구조물의 형상은 피로강도의 저하에 큰 영향을 준다. 용접이음 혹은 용접 bead의 영향도 현저하다.

보통의 몇몇의 용접이음에서도 힘의 유동 및 응력분포는 상당히 다르다. 그림 12에서 보는 것은 맞대기 K이음(완전 용입 fillet이음, 그림 12(b))의 분포는 비교적 일정하지만 보통의 fillet이음(십자 fillet, T fillet 등, 그림 12(c))의 응력분포는 불균일 하기 때문에 극단에 높은 응력집중이 존재한다. 그림 12에서 피로강도에는 용접이음의 종류와 형상이 효과를 미친다는 것을 쉽게 추측할 수 있다.



應力集中係數
(a) 맞대기 이음 $\alpha_K \fallingdotseq 1.2 \sim 1.5$
(b) K이음 $\alpha_K \fallingdotseq 1.3 \sim 1.7$
(c) Fillet이음 $\alpha_K > 2$

그림 12 축 하중을 받는 용접이음의 응력분포

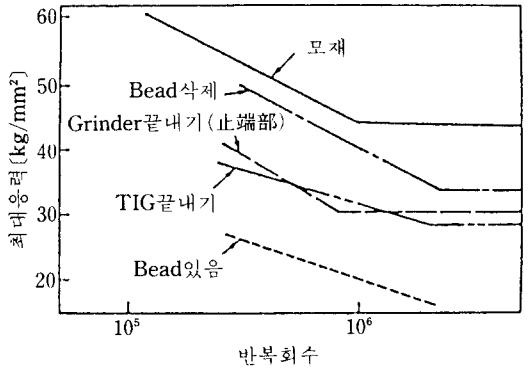


그림 13 Grinde와 TIG끝내기를 한 피로강도 개선

		피로한도(kg/mm²)		
		양진 σ_w	편진 σ_{sch}	항복점 σ_s
(a)		9.5	16.0	24.0
(b)		9.0	15.0	24.0
(c)		모재횡단면의 응력 σ		
(d)		5.5	9.0	24.0
(e)		bead와 목단면의 전단응력 τ 3.5	6.0	>14.0

그림 14 St 38의 강용접이음의 피로한도

		피로한도(kg/mm²)		
		양진 σ_w	편진 σ_{sch}	항복점 σ_s
(a)		13.0	22.0	24.0
(b)		11.5	19.0	24.0
(c)		모재횡단면의 응력 σ		
(d)		7.0	12.0	24.0
(e)		bead와 목단면의 전단응력 τ 3.5	6.0	>14.0

그림 15 St 38 강용접이음(끝내기 가공 후)의 피로한도

이하, 다시 St 38 강용접이음에 인장-압축하중이 걸리는 경우의 정적강도와 피로한도를 비교한다. 비교를 위한 전제조건을 같게하기 위해 용접은 전부 피복아크 용접봉에 의한 수동용접으로 행한다.

그림 14 및 15는 그림에 표시한 각각의 이음의 정적 인장 또는 전단강도 및 각각에 대응한 편진과 양진의 피로한도이다. 이 값은 그림 12에 표시한 제일 중요한 용접이음에 대하여 구한 것이다. 용접부의 가공은 피로한도에 큰 영향을 미치기때문에 용접의 경우와 용접이음으로 가공한 경우와 분류하여 그림 15에 표시하였다.

용접이음을 검토하는 기준이 되는 그림 14(a)의 값은 St 38 강의 하향 맞대기 이음 용접의 경우이다. 이 경우의 시공등급은 IB인데, 이면용접을 행하고 100% X선 검사에서 무결함(X선 등급 2)을 갖는 것이다. 이와같은 맞대기 용접은 제일 중요한 용접이음으로서 이 과정의 시공등급의 것은 공장에서 별 어려움 없이 얻어진다.

이 맞대기 이음의 정적강도는, 실온의 강일 경우, 용접하지 않은 모재의 값과 동일한 것으로 보는 것이 좋다. 따라서, 시공등급 IB의 맞대기 이음에 대해서는 정적하중에 대하여 모재에 비하여 설계상 어느 정도 낮은 값을 고려할 필요가 있다.

이와같은 맞대기 이음의 편진 피로강도는 공장용접의 조건에서 16-18 kg/mm²이다. 16 kg/mm² 은 시공등급 IB의 맞대기 이음의 최소 피로강도이다.

물론, 특별히 다시 완전한 시행을 하면 편진 피로강도는 18 kg/mm²이상으로 된다. 맞대기 이음에서는 힘의 유동이 양호하여도 지단부에 존재하는 notch 때문에 피로강도가 저하하는 것을 강조한다.

용접이음의 형상이 피로한도에 미치는 영향을 총괄하면 다음과 같다. 시공등급 IB의 맞대기 이음의 피로한도는 설계값으로 사용하는 것이 가능하다. 동적하중 구조물의 가장 중요한 용접 개소는 이 값이 사용되기 좋은 이음으로 행한다. 이 값은 용접 bead를 모재판 표면까지 가공함으로써 향상될 수 있지만, 이와같은 가공은 특별한 경우 밖에 행하지 않는다. 용접 bead 지단부의 grinder끝내기 혹은 TIG용접, 피복 아크 용접봉에 의한 化粧 bead는 용접결함을 제거하고 피로강도를 향상한다(그림 13). K이음은 인장-압축을 받는 부가물의 경우에는 일반적으로 유리하다. fillet 이음(앞면 또는 측면 fillet이음)은 특히 용접단면에 있어서 현저히 피로강도를 저하시킨다. 다시 앞면 fillet경우에는 용접지단부가 측면 fillet용접 경우에는 crater부가 판단면의 피로한도를 현저히 저하시킨다.

<다음호에 계속>