

研究論文

大韓熔接學會誌
第8卷第3號 1990年 9月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.8, No.3, Sep., 1990

연화부를 포함한 판재의 항복거동과 항복강도

배강열* · 김희진* · 이태열** · 엄동석***

Yielding Behavior and Yield Strength of Plate Structure Containing Softened Region

K.Y. Bae*, H.J. Kim*, T.Y. Lee**, D.S. Um***

Key Words : Softened Region(연화부), Plane Stress(평면응력), Plane Strain(평면변형도), FEM Analysis(유한요소법해석), Yielding Behavior(항복현상), Yield Strength(항복강도), Shear Stress(전단응력), Restraint Effect(구속효과), Plate Structure(판구조)

Abstract

Welded joint often contains soft or softened regions such as the HAZ of TMCP steel welded with high heat input. In this study, the equivalent yield strength of plate structure containing softened region was predicted by FEM analysis, and its incremental behavior was explained with the results of the analysis. The calculated results of yield strength indicated the followings for the plate structures.

- 1) As the softened region starts to yield, shear stress begins to build up along the boundary between base metal and softened region. This results in multi-axial stress condition which gives restraint on the softened region.
- 2) Restraint effect has a significant influence on the distribution of the shear stress, the nominal stress, and the strain.
- 3) The yielding behavior of softened region becomes the same as that of base metal when both ratios of length to width and thickness to width of softened region are larger than 30 and 13 respectively.

* 정회원, 현대중공업 종합연구소
** 정회원, 부산대학교 산업대학원
*** 정회원, 부산대학교 공과대학

1. 서 론

최근 개발된 TMCP 강재는 기존 강재에 비해 용접성과 용접 열영향부(HAZ)의 인성이 우수하나, 낮은 탄소당량으로 말미암아 대입열 용접시 HAZ에서 연화현상이 발생한다고 알려져 있다¹⁾. 또한 용접용 AI 합금으로서 AA7019는 용착금속의 강도가 낮을 뿐만아니라 열영향부도 연화되어 용접부 전체가 모재의 강도에 미치지 못하는 경우가 발생한다²⁾. 이와 같은 연화부는 용접 결합부의 강도를 저하시키기 때문에 불가피하게 구조물 전체의 허용강도를 조정해야 하는 요인이 된다고 하겠다.

지금까지 연화부를 포함한 구조물의 강도를 평가하고자 하는 시도가 몇번 있었는데, Nitoh³⁾ 등은 용접에 의하여 연화가 발생하면 연화부 자체의 강도는 낮을 수 밖에 없지만, 연화부를 포함한 용접 부재에서는 연화부보다 높은 강도를 가지게 된다는 것을 실험적으로 밝혔다. 그는 또한 이러한 강도 증가 원인으로 연화부 주위에 위치한 모재가 연화부를 구속하기 때문이라고 하였다. 그리고 Mastumoto 등⁴⁾은 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 중앙부에 저강도의 연질부를 포함한 환봉시편을 대상으로 하여 항복강도를 계산한 결과, 연질부의 상대크기에 따라 환봉전체의 강도가 영향을 받으며, 특히 연질부의 상대크기가 극히 작은 경우에는 항복강도가 거의 모재 자체 수준까지 증가한다는 사실을 밝혔다. 이러한 결과는 Nitoh 등이 정성적으로 설명하였던 모재구속효과를 정량적으로 보여 주었을 뿐만 아니라, 연화부의 상대적 크기에 따라서는 연질부를 포함하는 구조물의 실제적인 강도가 모재 강도 수준까지도 도달할 수 있다는 사실을 보여줌으로써 연화부때문에 강도가 저하되리라는 막연한 두려움을 없애는데 도움이 되었다.

그런데 대부분의 용접구조물은 대형의 판재 형태로 이루어 지고 있다는 점과 일반적으로 구조물의 제작에서는 항복강도를 설계 기준으로 한다는 점 등에서 Matsumoto와 Nitoh 등이 행한 연구내용은 실구조물의 상황과 설계기준 등에서 다소 거리가 있다고 하겠다. 즉 판재형 구조물을 설계할 때 요구되는 것은 판재형 구조물의 항복현상과 항

복강도의 정량적인 결과라고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 연화부를 포함한 판재구조물을 대상으로 연화부의 상대크기에 따른 항복강도 변화를 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 조사하고자 하였다. 유한요소해석은 구조부재의 폭과 두께를 대상으로 각각 평면응력(plane stress)과 평면변형도(plane strain) 상태로 가정하여 수행하였다. 2차원 해석에서 얻어진 각각의 결과를 통해 상당항복강도(equivalent yield strength) 변화와 그 증가효과에 대하여 고찰하였고, 이들 결과를 조합하여 두께와 폭을 동시에 고려할 수 있는 항복강도 계산식을 유추하고자 하였다.

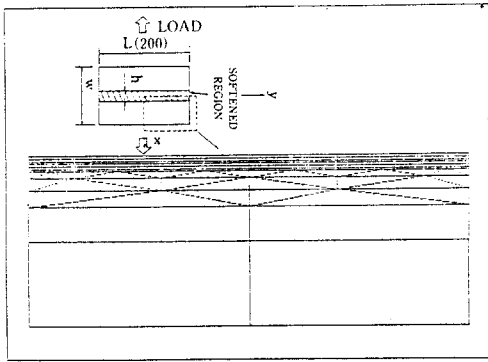
2. 해석방법

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 일반적인 용접구조물이 판재형태이기 때문에 판재형태의 모델을 해석 대상으로 삼았고, 응력과 변형도 해석은 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 이 프로그램은 소성해석이 가능하며, Von Mises의 항복조건을 이용하여 항복 판정을 하도록 되어 있다⁵⁾. 본 해석에서는 재료가 항복점 이상에서는 완전소성 거동을 한다고 가정하였고, Poisson비는 0.3을 취하였으며, 하중은 용접부에 직각인 방향으로 강제변위를 주어 얻었다. 모재 및 연화부의 항복강도는, 선급용 TMCP 고장력강재의 대입열 용접부에서 얻어진 결과를 고려하여, 각각 40kg/mm²와 30kg/mm²으로 가정하였다. 연화부의 응력과 변형도의 관계는 연화부 중앙에 근접하는 2개의 요소열에서 나타난 값들을 평균하여 얻었고, 항복강도는 0.2% offset 변형도에서의 응력(proof stress)을 취하였다. 용접부 길이와 두께에 따른 구속 효과를 분리하여 고찰하기 위해서 평면응력(plane stress)해석과 평면변형도(plane strain) 해석을 각각 행하였다.

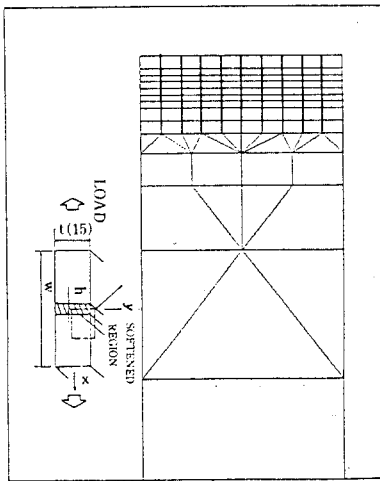
2.1. 평면응력 해석(x-y면)

알루미늄 합금인 AA7019의 용접부처럼 용접부 자체의 강도가 낮은 경우에는 연화부의 폭이 모재의 두께에 비해 상대적으로 크기 때문에 하중을 받을 때 연화부 두께 방향으로의 구속효과는 무시

할 수 있을 것이다. 즉 모재에 의한 구속 효과가 용접길이 방향에서만 작용한다고 가정하면 두께 방향의 응력은 고려할 필요가 없게 되어 평면응력 상태가 된다. 평면응력 해석에서는 폭(W)이 400, 또는 80mm이고, 길이(L)가 200mm인 평판에 폭방향의 중앙에 길이 방향으로 연화부가 위치하고 있는 모델을 대상으로 하여 일사분면만을 해석영역으로 취하였다. Fig. 1(a)에 해석에 이용된 모델, 좌표계 및 요소분할을 나타냈다. 연화부 폭(h)은 1.2, 6, 30, 그리고 150mm로 변화시켜서 용접부 길이에 대한 연화부 폭의 비(h/L)가 0.006, 0.03, 0.15, 0.75와 같이 변화토록하여, h/L 값에 따른 용접길이 방향의 구속 효과 및 강도 변화를 살펴 보고자 한다.



(a)



(b)

Fig. 1 The mesh pattern employed for FEM analysis; (a) plane stress condition (b) plane strain condition

2.2. 평면변형도 해석(x-z면)

연화부 폭에 비해 용접장이 무한히 크게 되면 용접선 방향으로의 연화부의 상대운동이 완전히 구속되어 모재와 같이 거동한다고 가정할 수 있다. 나아가 용접선 방향으로의 변위가 없다고 가정하여, 즉 길이 방향으로 평면변형도 조건을 가정하여, 두께방향으로 모재의 구속효과를 살펴 보고자 하였다. 해석은 15mm 두께(t)에 폭(W)이 240 또는 120mm인 판재를 대상으로 하였는데, 대칭성을 고려, 일사분면만을 해석영역으로 취했다. Fig. 1(b)에 해석에 이용된 모델, 좌표계 및 요소분할을 보여주었다. 해석은 연화부 폭(h)을 1.2, 6, 15, 30, 및 150mm로 변화시켜서 판재 두께에 대한 연화부 폭의 비(h/t)가 0.08, 0.4, 1.0, 2.0, 10.0등으로 변화토록 하여 h/t 값에 따른 두께 방향의 구속효과 및 강도변화를 규명하고자 하였다.

3. 해석결과 및 토론

3.1. 평면응력 해석

평면응력 상태에서는 모재의 구속효과가 연화부의 길이방향에서 나타나므로 하중이 Fig. 1과 같이 작용하게 되면 연화부에서는 전단응력이 발생한다. Fig. 2는 h/L=0.03인 경우(h=6mm인 경우) 연화부가 항복될 때 연화부 중앙(x=0)에서 1.2, 2.4, 및 3.0mm 떨어진 지점에서 길이방향

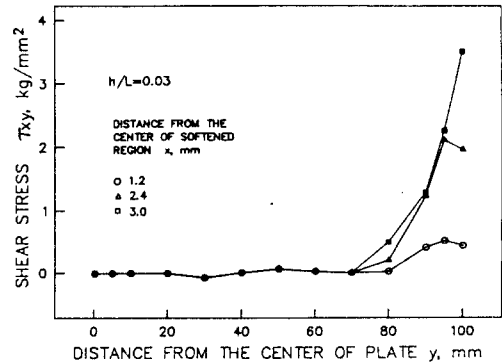


Fig. 2 Variation of shear stress distribution along the y-axis with distance from the center of softened region for h/L=0.03 in plane stress condition

(y방향)으로 나타나는 전단응력 분포를 보여주고 있다. 본 그림에서 보여 주듯이 전단응력은 $y=70\text{mm}$ 지점에서 부터 나타나기 시작하여 가장자리로 갈수록 ($y \rightarrow 100\text{mm}$) 급격히 증가하고 있다. 또 연화부 내에서의 전단응력 분포는 모재측에 가까울수록 ($x \rightarrow 3\text{mm}$) 더 크게 나타나, 연화부와 모재의 경계 ($x=3\text{mm}$)에서 최대치를 기록하였다.

y축(하중에 직각 방향)에서의 응력분포, σ_y 는 Fig.3에 보여 주고 있는데 전단응력의 변화가 심했던 가장자리에서 증가하여, 전단응력이 발생치 않는 영역에서는 약 9.5kg/mm^2 로서 일정한 값을 유지하였다. 항복시 구조물에서 발생하는 하중 방향의 응력분포(σ_x)는 동일 그림 상에 보인 바와 같이 σ_y 에 따라 변화하는데 σ_y 가 일정한 구역에서는 σ_x 도 34.5kg/mm^2 로 일정하였다.

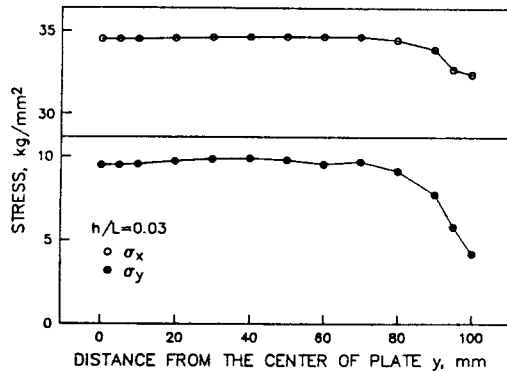


Fig. 3 Loading and y-axial stress distributions along the y-axis at the interface between base metal and softened region for $h/L=0.03$ in plane stress condition

Fig.4는 하중방향의 응력(σ_x) 분포를 보여 주는 결과로, 판의 가장자리에 위치한 연화부에서 응력이 급격히 변화하고 있음을 알 수 있고, 또한 연화부내에서도 연화부와 모재의 경계면 쪽으로 근접할 수록 응력의 구배도 심하게 나타남을 알 수 있다.

이상의 결과에 대하여 다음과 같이 고찰할 수 있다. 항복강도가 낮은 연화부가 중앙에 위치하고 강도가 높은 모재가 주위에 위치한 용접결합부에서 연화부에 수직한 방향으로 하중을 가하게 되

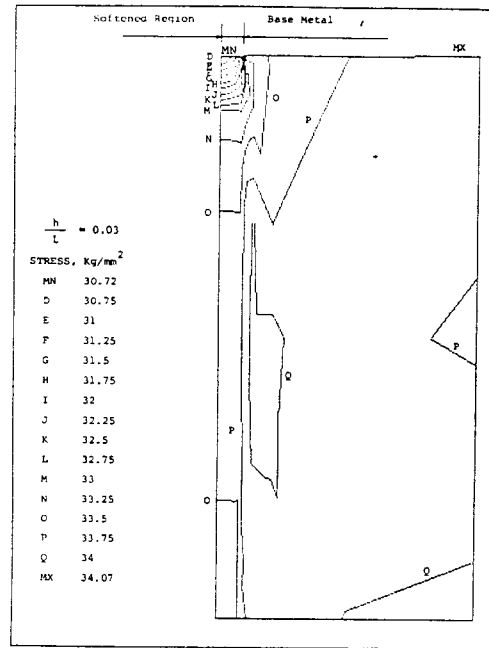


Fig. 4 Calculated stress contour just after yielding for $h/L=0.03$ in plane stress condition

면, 일차적으로 연화부의 항복응력까지는 변위와 하중과의 관계가 탄성 계수에 의해 지배되다가, 하중이 더욱 증가하여 연화부 자체의 항복점에 도달하게 되면 하중방향으로의 변형도 차이가 발생할 뿐만 아니라 하중에 직각인 방향으로도 상대운동이 유발하게 된다. 그러나 직각 방향으로의 상대운동은 모재자체의 강성에 의해 어느 정도 억제될 수 밖에 없는데, 이는 Fig.2에서 보여주는 바와 같은 전단응력 τ_{xy} , 으로 나타나고 이러한 전단응력은 동일 방향으로의 수직응력을 발생시킴으로써 평형을 이루게 되는 것이다. 즉 전단응력에 의해 하중과 직각 방향의 응력 σ_y , 을 유발하게 되어 연화부는 2축응력 상태(평면응력상태)에 놓이게 된다. 구조물이 2축 응력 상태에 있을 때의 항복은 Von Mises의 항복 판정법에 의해 지배된다고 할 수 있다⁶⁾. 외부 하중에 의한 응력이 연화부 자체의 항복 강도에 이르게 되면, 2축 상태가 아닌 가장자리부분(길이 방향 끝단부)은 그 하중에서 항복이 일어날 것이고, 중앙부를 포함한 그 이외의 부분에서는 일정크기의 제2축 응력(σ_y)이 발생함으로써 항복에 필요한 하중응력의

크기를 증대시키는 것이다. 따라서 평균적으로 구조부재의 상당항복강도는 증가하는 것이다. 결국 y축 방향으로 응력(σ_y)이 발생하게 되어 구조부재 전체의 상당항복 응력은 증가될 수 밖에 없는 것이다.

상당항복 응력의 증가 경향을 보다 정량적으로 보여 주는 것이 Fig. 5인데, 본 그림도 h/L값에 따른 응력-변형도 곡선의 변화를 보여주는 것으로서, 구속 정도에 따른 항복 현상의 변화를 보여주고 있다. 모든 곡선에 있어서 공통된 사항은 항복에 도달하기 전까지는 하중면에 작용하는 평균 응력이 거의 선형적으로 증가하고 있지만, 항복된 순간부터는 완전소성 거동을 한다는 것이다. 연화부가 소성거동을 시작하면서 h/L값에 따른 구속 효과는 나타나기 시작하는데, h/L 값이 0.75 이상에서는 거의 구속효과가 나타나지 않아 연화부 자체의 성질이 그대로 나타나고 있는 반면, h/L 값이 감소함에 따라 구속 효과는 나타나기 시작하여 h/L이 0.03정도에 도달하면 최대치에 수렴하였다. 즉 h/L값이 0.03이하로 더욱 감소하여 구속 효과가 증가하더라도, h/L=0.03에서의 강도 이상의 강도 증가는 보여주지 않는 것이다. 이때 나타난 최대 강도는 34.5kg/mm²로서 45% 정도가 회복 증가되었음을 보여준다.

이와 같은 결과는 전단응력에 의해 y축 응력이 계속 증가되어도, 2차원 항복판정선도⁶⁾에 의할 때, 하중 증가가 일정값, 즉 34.5kg/mm², 이상은 넘을 수 없다는 사실에 기인된 것이고, 이 값은 연화부 및 모재 항복 강도의 중간 정도에 해당

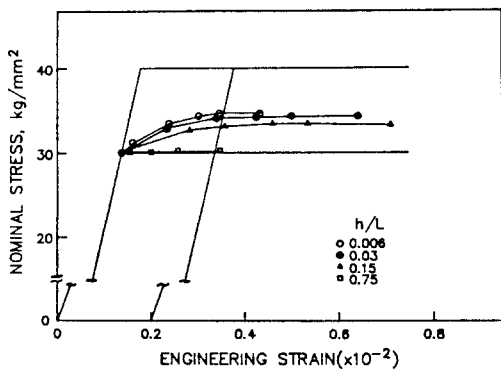


Fig. 5. FEM calculated stress-strain curves for softened region with four different ratios of h/L in plane stress condition

된다. 따라서 평면응력 조건하에서는 h/L 값이 0.03이하가 되면(즉 0에 근접하는 무한 구속까지도) h/L값에 관계없이 항복강도는 같아지게 된다는 사실을 보여주었다. 이와 같은 사실로부터, 용접선의 길이가 어느 정도 이상이 되면 연화부는 모재에 완전히 구속된다고 가정할 수 있어, 이는 곧 평면변형도 가정을 용이하게 적용할 수 있는 근거가 된다. 이상의 결과를 종합하여 h/L 값에 따른 항복응력의 변화를 독립적으로 나타내었을 때, Fig. 6과 같은 선형적인 관계를 얻을 수 있는데 길이 방향의 구속효과가 커질수록 항복 강도가 선형적으로 증가하게 된다는 것을 알 수 있었다.

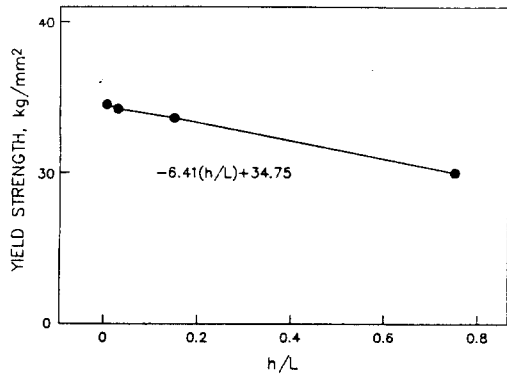


Fig. 6 Relationship between the ratio of h/L and the yield strength of the softened region in plane stress condition

Fig. 5의 응력-변형도 곡선에서 보여주고 있는 변형도는 판재 중앙부에서 나타난 변형도의 평균 값으로 주어진 것인데, 실제 변형도(ϵ_x)는 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 위치에 따라 많은 차이를 보여주었다. 이 결과로부터 실제 변형도(ϵ_x)는 가장자리 부근에서 대체적으로 작아진다는 사실과 구속정도(h/L)에 따라 크게 영향을 받고 있다는 사실을 알 수 있다.

하중 방향의 변형도는 하중 방향의 응력과 여기에 직각방향의 응력성분에 Poisson비를 곱한 값의 차에 의해 지배된다. 변형도가 끝단 부근에서 낮은 경향을 보이는 것은 Fig. 3에 보였듯이 가장자리에서의 하중방향 응력(σ_x)이 낮기 때문이다. 구속효과가 커지면 전단응력의 크기가 증가되어 y축 응력의 증가를 유발함으로써 가장자리에서의 하중응력을 증가시키게 되는 것이고, 하중응력의

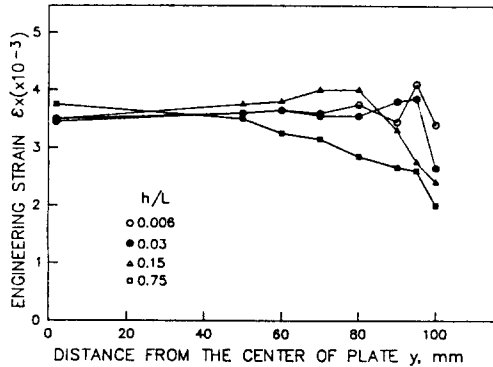


Fig. 7 Calculated distribution of the strain along the y-axis in the center of the softened region for different ratios of h/L in plane stress condition

증가에 의한 효과가 y축 응력 증가의 효과보다 변형도에 더 큰 역할을 하기 때문에 가장자리에서의 변형도 증가가 나타나는 것이다. 결국 구속효과가 더 커지면 가장자리 주위의 변형도는 더 증가하게 되는 것이다.

3.2. 평면변형도 해석

용접선 길이 방향으로의 변위가 발생하지 않는 상태 ($\epsilon_y=0$)에서 연화부를 포함하고 있는 두꺼운 판재에 인장하중을 가하게 되면, 길이 방향으로의 수축이 억제됨에 따라 2축 응력 상태에 놓이게 되고, 이에 더불어 두께 방향으로의 구속효과가 나타나게 된다. Fig. 8은 두께 방향으로의 구속효과를 Fig. 1(b)의 h/t 값이 0.08 및 0.4인 경우에 대하여 전단응력(τ_{xz})의 크기 변화로 보여주는

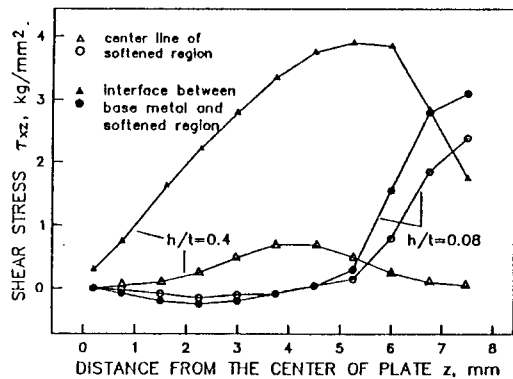
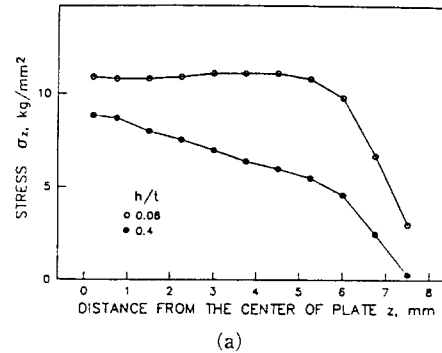


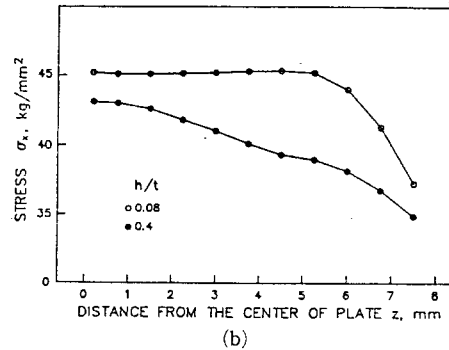
Fig. 8 Variation of shear stress distribution along the z-axis with the ratio of h/t and position at softened region in plane strain condition

것이다.

먼저 구속효과가 큰 경우 ($h/t=0.08$)를 보면, 연화부 내에서의 전단응력이 내부에서는 거의 나타나지 않고 있다가 표면으로 가까워 짐에 따라 급격히 증가되고 있다. 이러한 경향은 연화부 중앙($x=0$)이나 모재 인접부($x=h/2$)에서 모두 같이 나타났으며 그 값도 유사한 크기를 보였다. 한편 구속 효과가 작은 경우에는 ($h/t=0.4$), 전단응력 값이 위치에 따라 커다란 차이를 보여주는데, 중앙($x=0$)과 모재 인접부($x=h/2$)에서의 값을 비교해 볼 때, 중앙부에서는 1kg/mm^2 이하의 전단응력이 작용하고 있는 반면 모재인접부에서 최고 4kg/mm^2 정도의 매우 큰 전단응력이 작용하고 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 전단응력의 분포로부터 z방향의 응력(σ_z)이 결정되는데, 각 경우에 있어서의 σ_z 의 분포를 Fig. 9(a)에서 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 z-axial and loading direction stress distribution along the z-axis at the interface between base metal and softened region for 2 different ratios of h/t in plane strain condition; (a) z-axial stress (b) Loading direction stress

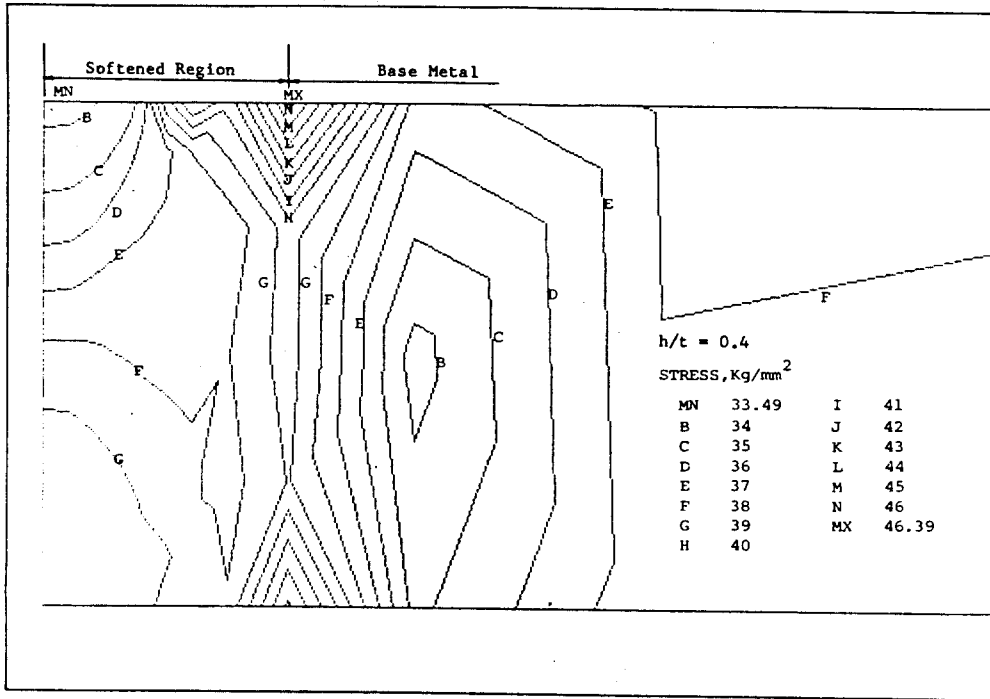


Fig. 10 Calculated stress contour just after yielding for $h/t=0.4$ in plane strain condition

이 결과에서 구속이 큰 경우($h/t=0.08$ 의 경우)는 응력증가가 판재 표면 부근에서 급격하게 이루어지는 반면, 구속이 낮은 경우($h/t=0.4$ 의 경우)에는 표면에서부터 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편 하중방향의 응력(σ_x)분포는 Fig. 9(b)에서 보여주고 있는데, σ_z 응력과 유사한 응력분포를 보여주고 있어서 구속응력에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 평면변형도 해석의 결과로부터 얻은 하중방향(x축)의 등응력선도인데, 연화부와 모재가 인접한 부근($x=h/2$)에서 그리고 판재의 표면에 가까울 수록 급격한 응력증가가 있으며, 연화부 중심($x=0$)에서는 표면에서 가장 낮은 응력상태가 나타나고 있음을 알 수 있다.

결국 모재의 구속력은 연화부 자체의 항복점에 도달한 하중 상태에서 발생하기 시작하여 연화부는 3축 응력 상태에 놓이게 된다. 따라서 더 이상의 하중증가에 의해서도 항복되지 않는 것은 이에 직각인 나머지 방향의 응력들의 크기가 동시에 증가되기 때문이다⁶⁾.

Fig. 11는 h/t 값을 0.08에서 10까지 변화시키면서 평면변형도 해석을 실시하여 얻은 응력-변형도 곡선들이다. 이 결과에서는 먼저 h/t 가 2이상이면, 즉 두께에 비해 연화부 폭이 2배 이상이면, 구조부재 전체의 항복강도는 34.5kg/mm^2 로 나타남을 보여 주고 있다.

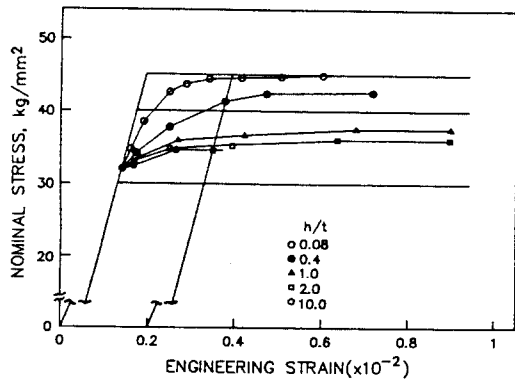


Fig. 11 FEM calculated stress-strain curves for five different ratios of h/t in plane strain condition

길이방향의 변위가 없다고 가정한 평면변형도 해석에서의 이와 같은 결과는 Fig. 5에서 나타낸 평면응력 해석에서 용접 길이가 연화부 두께에 비해 무한히 크다고 가정한 결과와 동일하게 나타났다. 이와같은 결과를 기초로 하면, 일반적인 용접 구조물에서는 용접부 길이에 비해 연화부의 폭의 비(h/L)가 0.03이하이기 때문에 평면변형도 해석만으로 구속효과의 판정이 가능함을 알 수 있다. 따라서 평면변형도 해석에서는 길이 방향으로의 변위가 고정되어 있어서 기본적으로 항복강도가 34.5kg/mm^2 인 연화부를 가진 구조물을 대상으로 한 해석이라고 할 수 있다. 그런데 모재 자체는 2축 응력 상태이기 때문에 1축 항복강도보다 높은 항복 강도를 나타나게 된다. 평면변형도를 가정하지 않은 실제 모재의 항복강도는 40kg/mm^2 이나, 평면변형도 가정에서는 45kg/mm^2 으로 나타났다. 따라서 초기의 34.5kg/mm^2 에서부터의 연화부의 항복강도 증가는 구속효과에 더하여 모재의 항복강도 증가의 비만큼 더 크게 나타난 것이다. 한편 h/t 가 0.08이하이면, 모재와 동일하게 거동함을 보여 주고 있어, 길이 방향의 구속이 무한한 상태, 즉 상대운동이 전혀 발생하지 않는 상태라고 판단되었다.

h/t 와 항복강도의 관계를 Fig. 12에서 보여 주고 있는데, 이들 간의 관계는 지수함수 형태로 나타났고, h/t 의 감소에 따라 완만한 강도 증가를 나타내다가 0.08이하에서는 모재와 같은 거동을 하고 있음을 나타냈다.

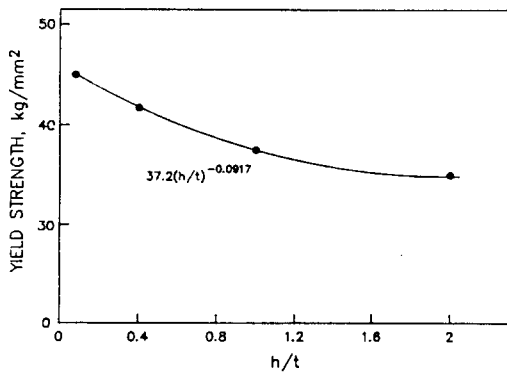


Fig. 12 Relationship between the ratio of h/t and the yield strength of the softened region in plane strain condition

구속효과에 따른 변형도를 하중면을 따라 나타내면 Fig. 13과 같다. 구속효과가 아주 낮은 경우는 표면과 중심부의 변형도가 거의 동일하나, 구속효과가 증가하게 되면 표면부위에서 변형도가 작아지는 경향을 보였다. 그러나 구속효과가 매우 큰 경우는 표면부위에서 변형도가 최대 값을 나타냈다. 즉 동일한 하중상태에서 변위가 큰 경우이며, 파단이 용이한 부분으로 간주된다. 이와 같은 분포를 나타내는 것은 평면응력의 경우에서 언급한 바와 같이 하중방향의 변위가 하중응력과 그 직각 방향의 응력들에 의해 지배되기 때문이다.

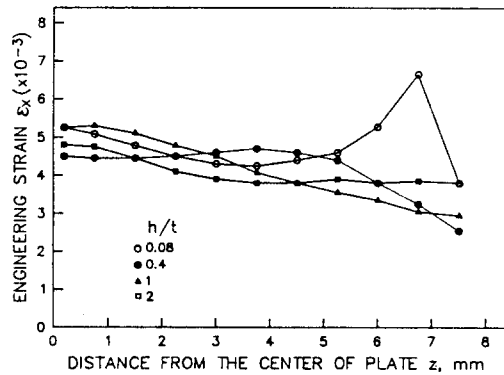


Fig. 13 Calculated strain distribution along the z-axis in the center of softened region for different ratios of h/t in plane strain condition

3.3. 항복강도 계산식

구조부재의 두께에 비해 연화부 폭이 매우 넓다고 가정한 평면응력 해석에서 Fig. 6의 결과에 의하여, 판재의 길이와 연화부 폭의 비에 따라 항복강도는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 &h/L \leq 0.03 \text{인 경우, } \sigma_y = 34.5 (\text{kg/mm}^2) \\
 &0.03 < h/L < 0.75 \text{인 경우,} \\
 &\quad \sigma_y = -6.41(h/L) + 34.75 (\text{kg/mm}^2) \quad (1) \\
 &h/L \geq 0.75 \text{인 경우, } \sigma_y = 30 (\text{kg/mm}^2)
 \end{aligned}$$

연화부 폭에 비해 부재길이가 매우 크고, 길이 방향의 변형도가 없다고 가정한 평면 변형도 해석에서는 Fig. 12의 결과에 의하여, 판재의 두께와 연화부폭의 비에 따라 항복강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &h/t \leq 0.08 \text{인 경우, } \sigma_y = 45 \text{ (kg/mm}^2\text{)} \\
 &0.08 < h/t < 2 \text{인 경우,} \\
 &\sigma_y = 37.20(h/t)^{-0.0917} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (2) \\
 &h/t \geq 2 \text{인 경우, } \sigma_y = 34.5 \text{ (kg/mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

판재의 길이가 일정이상에서는 모재 자체의 구속력에 의해 연화부에서 기본적으로 34.5kg/mm²의 항복강도를 갖는다. 이때 연화부의 항복강도는 Fig. 14의 A위치에 나타낼 수 있다.

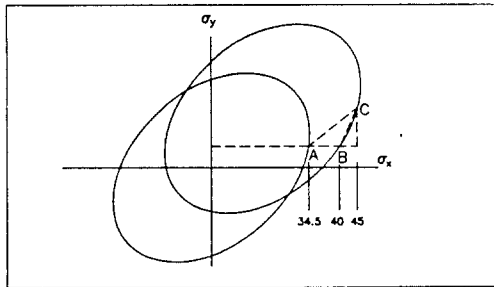


Fig. 14 Movement of yield surface with the change of z-axis stress

이와 같은 상태에서 평면변형도 가정을 하고 하중을 가하게 되면, 먼저 모재와 연화부는 공히 y축 방향으로 변형도가 발생하지 않게 하는 부가적인 응력을 받게 되어 2축 응력 상태가 된다. 이와 같은 상태에서 연화부 두께 방향(z축)으로의 변형이 모재의 두께에 의해 구속을 받게 되면 연화부는 3축 응력 상태에 놓이게 된다. 따라서 연화부의 항복을 판정하기 위해서는 3차원적인 항복응력 판정법을 이용하여야 한다. 연화부에 대한 3차원 항복면을 2차원 면에 투영하면 Fig. 14와 같이 1사분면으로 항복곡선이 이동하게 된다. 따라서 항복에 필요한 하중방향 응력은 이동된 정도(z축 응력과 관계)에 비례하여 증가한다. 결국 3축 응력 상태에서 z축 응력에 의해 A는 B의 위치로 이동하게 된다. 또한 하중응력에 비례하는 y축 방향의 응력 증가에 의해, 연화부의 항복에 필요한 응력상태는 C의 위치(항복면의 이동과 평행이동)가 된다. 결국 두께 방향으로의 구속 응력으로 항복 응력은 A에서 B로 증가하고 평면변형도 가정으로 인하여 항복응력은 B에서 C로 증가된 것이다. 그러나 실제적인 조건은 평면변형도 상태가 아니기 때문에 이 가정에 의한 응력 증가분(B→C)은

계산 결과에서 분리되어야 한다. 즉 B위치가 실제적으로 항복응력 상태가 된다. 그런데 h/t가 0.08이하이면, 연화부는 거의 모재와 같은 거동을 하고 있기 때문에 C의 위치가 45kg/mm²이고, B의 위치는 40kg/mm²가 된다.

이와 같은 결과를 토대로 하고, 또 선분 BC의 이동이 항복곡선의 이동에 따라 평행이동을 한다고 가정하면, 모재의 두께 방향 구속정도(h/t)에 따른 연화부의 실제 항복강도와 평면변형도 가정에 의한 계산결과와 사이에는 비례관계가 성립한다. 따라서 0.08 ≤ h/t ≤ 2식에서 식(2)은 다음과 같이 수정이 가능하여, 구속 정도와 항복 강도는

$$\sigma_y = 35.80(h/t)^{-0.04} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

의 관계가 성립된다. 이 관계식은 h/L이 0.03이하, 즉 길이방향의 구속효과가 큰 경우일 때 얻어진 것이다. 식(3)의 결과는 h/L이 0.03보다 큰 경우에는, 즉 길이방향의 구속효과가 작아지면 평면 응력해석에 의해 구해진 식(1)의 절편으로 될 수 있다. 따라서 구조물의 크기, 즉 구속효과와 항복길이는 3차원적으로 표현이 가능하다. 0.03 ≤ h/L ≤ 0.75, 0.08 ≤ h/t ≤ 2의 범위에서 연화부를 포함하는 용접부재의 항복강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_y = -6.41(h/L) + 35.80(h/t)^{-0.04} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (4)$$

예를 들어, 연화부 폭에 비하여 구조물의 두께가 같고, 길이가 30배 이상이라고 할 때 항복 강도는 35.7kg/mm²가 된다.

4. 결 론

연화부를 포함한 판재형 구조의 응력해석을 통해 구속효과에 따른 상당항복강도를 계산하였으며, 이에 따른 연화부의 항복현상을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연화부가 항복을 개시하고자 할 때 연화부와 모재 간의 항복강도 차에 의해 두께와 길이 방향에서 모재에 의한 전단응력이 발생하며, 이에 따라 다축응력 상태를 얻게 되어 상당항복 강도의 증가가 이루어 진다.
- 2) 구속효과가 클때 전단 응력의 분포는 가장자

리에서 급격히 변화하였다.

3) 하중방향 응력과 변형도는 가장자리에서 낮게 나타났으나, 구속효과가 일정 크기 이상에서는 가장자리 부근에서 최대의 변형도를 나타내었다.

4) 연화부폭에 대한 구조물길이의 비가 30배 이상에서는 더 이상의 항복강도 증가가 나타나지 않았고, 이에 더하여 연화부폭에 대한 구조물두께의 비가 13배 이상에서는 모재와 같은 항복거동을 나타내었다.

5) 평면응력 해석과 평면변형도 해석을 통해 두께와 길이를 동시에 고려할 수 있는 계산식을 제안하였고, 이 계산식에 의하면 보편적인 크기의 판재구조물에서 연화부의 항복강도 증가크기는 모재와 연화부강도 차이의 약 60%정도이었다.

참고문헌

- 1) 김 희진 : TMCP강의 개발및 적용, 대한용접학회지, 제4권, 제2호, (1986), pp.1-11.
- 2) 김 희진, 윤 중근 : AA7019 알루미늄 합금 용접부의 기계적 성질 및 응력부식균열 저항성에 관한 연구, 기술 현대, Vol.8, No.3, (1988), pp.28-34.
- 3) H. Nitoh et al : Tensile strength of welded joints for TMCP type 50kg/mm²-class high tensile steel plate, J. of JNAS, No.157,(1986), pp.319-326.
- 4) T.Matsumoto, H.Satoh and Y.Wadayama : Investigations on evaluation method for yield strength of round bar undermatched joint, JWS, Vol.6, No.2, (1988), pp.288-295.
- 5) Engineering Analysis System User's Manual : Swanson Analysis Systems Inc.
- 6) Crandall, Dahl and Lardner : An Introduction to the Mechanics of Solids, 2nd ed., McGRAW-HILL, pp.312-318.

1) 김 희진 : TMCP강의 개발및 적용, 대한용접