

박판 강대의 롤성형 및 부하 분석

서정현*

(1999년 2월 9일 접수)

Thin Steel Sheet Roll Forming and Load Analysis

J.H. Suh

Abstract

In this paper, the stress and strain behavior in near homogeneous isotropic matrix of metal like steel was studied during roll forming of thin steel sheet for cylindrical pipe. Analytical result reveals a body which is on the area of square thickness along and perpendicular to the width of thin steel sheet is in the state of plane strain during roll forming. As a result, construction of analytical method for calculating deformation load and stably deformed length along the width of strained steel sheet was established. Also, loads applied during roll forming were analyzed using two typical thin steel sheets, 12.3mm thick steel sheet with 42.5kg/mm² yield strength of pipe and 5.3mm thick steel sheet with 32.5kg/mm² yield strength of pipe. Through this analysis, applicability of the analytical method for deformation load during roll forming of cylindrical thin steel pipe was evaluated with a study of necessary production technology for roll forming and design technology for roll forming machine.

Key Words : Thin Steel Sheet, Roll Forming, Isotropic, Plane Strain, Deformation Load

1. 서론

박판 강대의 성형과 관련 적용되는 주요 성형부하의 종류로는 유압에 의한 금형 프레스 외에 전동력에 의한 구동 및 하중을 들 수 있다. 이중 후자에 의해 여러 방식의^(1,2) 롤성형 과정을 거치는 롤성형(롤포밍) 강관의 박판 가공과 관련해서 강대의 길이방향을 따라^(3,4) 가공롤의 단계(pass)별 외형선(roll profile)의 구성과 이때 형성되는 스트레인 경로에 대한 분석에 많은 노력을 기울여 왔다. 이와 함께 롤성형 과정중 특히 성형이 취약해 왔던 강대 지지부의 안정적 성형⁽⁵⁻⁷⁾을 위한 유한요소 분석법의 적용과

함께 이들의 CAD化에 대한 연구와 활용이 그간 지속돼 왔다. 허나 이들 대부분이 소재의 변형 특성과 조관성형시 실제 발생하는 부하의 분석에 근거한 연구 결과의 비교보다는 확립된 수식의 적용에 의한 실제 결과와의 근사치 여부에 대한 판단이 주류를 이루어 왔다.

여기에서는 이러한 강대의 롤성형 조관시 형성되는 성형부하에 대응해 강대 내에서 발생하는 응력과 스트레인에 대한 금속 내에서의 거동을 고찰했다. 그리고 이에 대한 결과를 활용 박판 강대의 롤성형 조관시 안정된 소성가공에 필요한 조건을 파악했다. 또한 이러한 고찰을 통해 분석이 가능해진 롤성형 조관시 발생하는 부하에 대한 해

* 경희대학교 기계공학과

석적 방법의 실험 적용결과와 이의 검증을 위해 기 측정된 성형부하의 값과 비교했다. 이를 위한 실험으로 조관성형 시 발생하는 부하의 양상들이 비슷한 유형중 대별되는 상대적으로 강도가 높고 후육인 조관후의 평균항복강도 42.5 kg/mm²에 두께 12.3 mm의 강대와 강도가 낮고 박육인 조관 후의 평균항복강도 32.5 kg/mm²에 두께 5.3 mm의 강대를 사용해 조관성형중 발생하는 부하를 분석했다. 분석한 부하는 변형부하(deformation load), 구동부하(roll forming load) 그리고 구동중량부하(rolling weight load) 및 인장하중(tension load)과 이들과의 상호작용에 의해 생기는 마찰부하(friction load)였다. 여기서 분석한 변형부하에 대한 산출을 가능하게 하는 주요 정황으로는 조관롤 갭(gap)을 통과할 때 강대의 폭방향을 따라서 단순 작용력이 발생한다는 사실이다. 따라서 이때의 변형은 응력과 스트레인의 거동에 대한 고찰을 통해 파악된 강대의 두께 제공면적에서 일어나는 2-D 스트레인의 양상이었다. 이에 따라 조관중 롤 갭을 통과하는 강대의 폭방향을 따라 변형과 관련한 단순 작용력이 발생된다는 정황을 파악하기 위해 인장하중의 분석이 필요했다. 그리고 인장하중을 분석하기 위해서는 이를 구성하는 변형부하 외 구동부하 및 구동중량부하에 대해서도 분석이 필요했다. 이와 함께 지지축에서 기 측정된 성형 부하와의 비교 및 분석한 부하에 대한 검증을 위해 이에 상응하는 분석값인 인장하중 외 마찰부하의 분석이 필요했다.

2. 롤성형시 응력과 스트레인의 거동

2.1 응력과 스트레인의 거동

롤성형시 강대가 성형롤의 갭을 통과하며 각 단에서 발생된 폭방향의 강대변형이 강대의 양끝 단을 따라서 계단형으로 나타나는 것을 보게된다. 이때의 성형부하에 의해

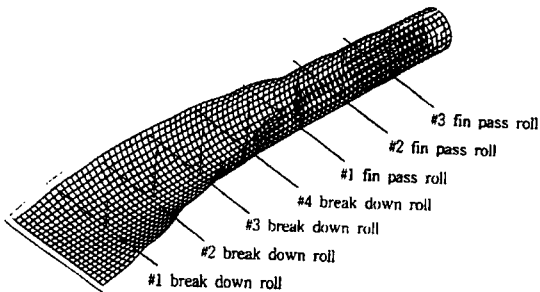


Fig. 1 Deformed mesh shape of thin steel sheet during roll forming

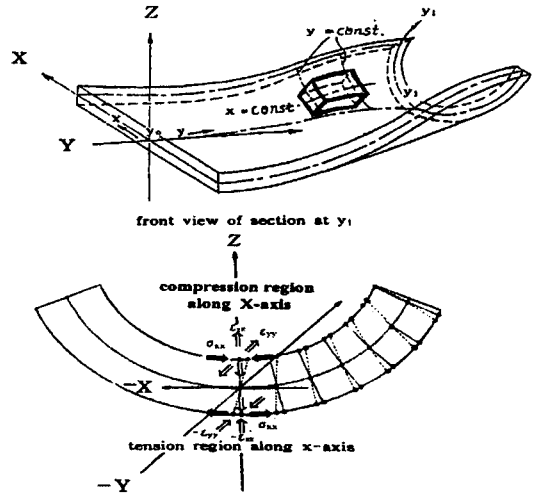


Fig. 2 Schematic drawing of stress strain state along the width of thin steel

발생된 강대면 전체에서의 일반적인 3차원 변형에 대한 분석이 Fig. 1에서 보여주고 있다. 이러한 롤 성형에 의한 결과적인 강대면 전체에서의 스트레인 분포 뿐만 아니라 break down 및 fin pass 각 단의 롤 갭을 통과하며 성형될 때에 각 단에서의 강대의 폭두께방향을 따라 작용되는 3차원의 응력, 스트레인 상태에 대해 Fig. 2에서 보여주고 있다. 강대가 접촉하는 상하롤의 외형선을 따라 부하를 받게 되 강대의 폭두께방향을 따라 두께 단면의 중립선에서부터 롤이 접촉되는 조관강대의 외표면까지 인장력이 작용되고 그 반대 면으로는 압축력이 작용된다. 이 같은 단순 폭방향 작용력에 의해 강대 내에서 발생하는 응력과 스트레인의 상태를 살펴보면 강대의 길이방향을 따라서는 폭방향의 경우와는 반대로 롤접촉 외표면부분에서 두께방향과 등력의 압축응력이 그리고 반대쪽 내면부분에서는 두께방향과 등력의 인장응력이 생성돼 이 부위에 변형을 초래케 된다. 이에 따라 Fig. 2에서 보여주는 강대의 폭두께방향을 따라 작용되는 3차원의 응력, 스트레인 형상과 함께 폭두께 단면상의 한 점인 금속 내의 결정립에서 일어나는 응력과 격자의 회전에 대해 Fig. 3(a)와 (b)에서 각각 보여 주고 있다. 여기에서 나타난 것과 같이 중립선을 사이에 두고 소성변형에 이르는 항복점에서의 인장과 압축 응력은 각각 등방성의 금속에서 두께와 길이방향에서 그 크기가 같게 된다. 따라서 강대 두께만큼의 강대 길이에서도 같은 크기의 상반된 응력에 의한 변형이 발생되는 것으로 분석된다. 이에 대한 표현등식인 등방성의 기

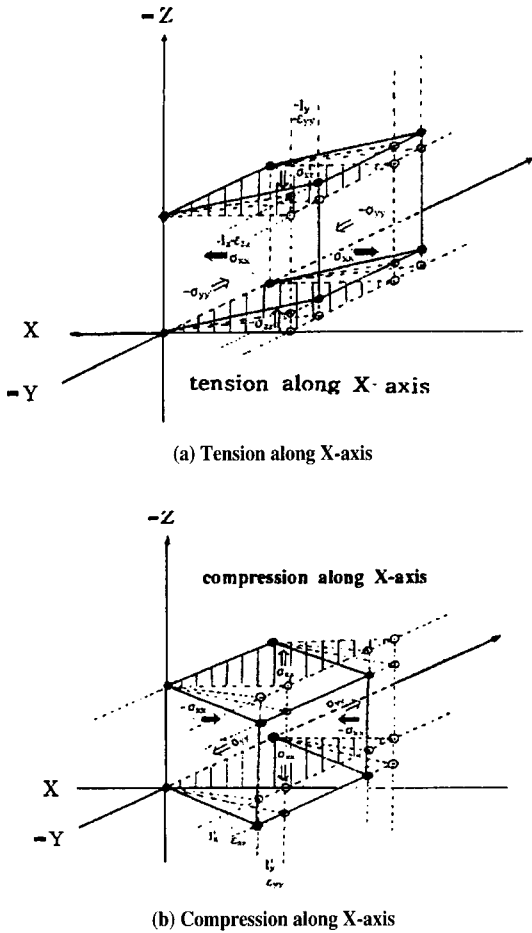


Fig. 3 3-dimensional analysis of stress strain state with lattice rotation within the near homogeneous isotropic matrix along the width of thin steel sheet during roll forming

저조직 내에서 단순 작용력이 발생할 때 형성되는 응력분포는 $\sigma_{xx} = T$ (or C) = const., $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$ 그리고 이 때의 스트레인분포는 $\epsilon_{xx} = 1/E \times T$ (or C), $\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = -\nu/E \times T = -\nu\epsilon_{xx}$, $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = 0$ 로 따라서 $\nu = |\epsilon_{yy}/\epsilon_{xx}| = |\epsilon_{zz}/\epsilon_{xx}|$ 로 표현할 수 있다. 즉 물성형시 롤 갭을 통과하며 강대의 표면과 평행하게 두께 단면을 따라 균일하게 가해진 x-방향 인장력에 평행하게 형성된 금속내의 x-방향 인장응력에 의한 폭방향과 평행한 x-방향 인장스트레인으로 말미암아 발생된 길이방향과 평행한 y-방향의 압축스트레인과 두께방향과 평행한 z-방향의 압축스트레인은 등방성의 균일한 금속 내에서 같게 된다. 역시 x-방향의 인장력과 평행하며 방향이 반대인 압

축력에 의한 평행 y-방향과 평행 z-방향의 인장스트레인이 같게 되므로 강대 두께단면을 따라 최대 탄성 지점에서 강대의 폭방향으로 변형시 두께방향의 인장압축 변형거리와 동일거리 만큼의 변형이 강대의 길이방향을 따라 발생된다는 사실이다. 이에 대한 또 다른 표현식으로 $-1_y = -1_z$ 그리고 $+1_y = +1_z$ 일 때 $(-1+1)_y = (-1+1)_z$ 로 나타낼 수 있다. 이에 대해 Fig. 3(a)와 (b)에서 도시했다.

2.2 2-D스트레인 양상

성형롤의 갭을 통과할 때 강대의 성형폭 양 끝단에서 중간부분으로 갈수록 커지는 응력집중에 의해 소재의 항복 강도를 넘어서 강대의 소성변형이 발생하는 것이 Fig. 5(a)에 나타나있다. 여기서 강대의 중간부분에서 두께 방향을 따라 중립선에서 외표면까지 증가되는 최대 인장소성과 내표면까지 증가되는 최대 압축소성은 서로 상반된 응력으로 인해 Fig. 3에서와 같이 철강격자의 회전 방향이 반대로 나타난다. 그리고 롤갭을 통과하는 강대의 폭방향을 따라 중간부분에서 생기는 응력집중에 대해서는 Fig. 4의 break down에 해당하는 roll pass에서 Kiuchi에 의해 측정된 강대의 폭방향^(6,9)에서의 변형곡률을 통해 도시했다. 이러한 등방성의 균질한 매트릭스 내에서 강대 폭방향의 단순 작용력에 의해 x-방향 스트레인과 y-방향 및 z-방향 스트레인의 절대값이 비례하고 y-방향과 z-방향의 스트레인 크기가 같아진다는 관점에서 조판되는 강대 두께의 중립선에서 외측 폭방향을 따라 형성되는 인장역(域)에서 최대 인장탄성역의 2-D압축스트레인에 비례해 강대의 최외면인 즉 두께단면상의 최외지점인 최대 인장소성역에서 느는 폭방향의 연신 길이는 두께에 비례하

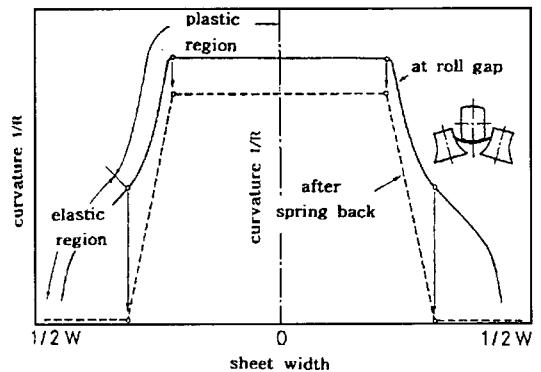


Fig. 4 Curvature distribution along the width of thin steel sheet during roll forming

는 것으로 판단된다. 마찬가지로 강대 두께 중립선에서 내측 폭방향을 따라 형성되는 압축역(域)에서 2-D인장스트레인에 비해 줄어드는 폭역시 강대의 두께 변화에 따라 비례해 늘고 줄어드는 것으로 판단된다. 반면 물성형중 길이 방향으로 가해진 작용력인 인장하중(tension load)은 Table 4(a)에서 보여지는 것처럼 #3 break down에서 15.2톤으로 최소가 되고 #1 fin pass에서 42.8톤으로 최대가 되는 것으로 분석됐다. 이에 따라 산출된 길이방향 응력인 σ_{yy} 는 단면적이 넓어 강대의 탄성변형에도 영향을 거의 미치지 못하는 $1 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ 정도로 인장하중이 최대가 되는 #1 fin pass에서도 5 kg/mm^2 정도로 나타났다. 따라서 2-D스트레인의 정황인 롤 갭을 통과시 강대 폭방향을 따라 가해지는 단순 인장 및 압축력의 작용을 뒷받침하고 있다. 이에 따라 조관롤 통과시 강대에서 발생하는 변형은 폭방향에 수직인 두께에 비해 긴 폭방향에서의 변형에 대한 영향은 적어 두께제곱 면적에서 발생하는 변형만 고려할 수 있는 2-D스트레인의 양상을 보여주는 것으로 판단된다.

3. 물성형 조관기술

3.1 안정된 접합부 이음매 성형관련 조건

원통형으로의 조관성형 시작 전 단계에서 접합부 이음매가 될 강대폭 좌우의 끝단을 따라 강대의 열간 압연 제조시 발생된 곡면부분을 기계가공으로 제거하여 단면형상의 용접 접합부를 만든다. 이때의 폭 양단을 기계 가공한 강대(스켈프)의 폭이 소성가공에 의한 박판 조관성형에 필요한 기준폭이 된다. 이 폭을 기준으로 용접 전 단계까지의 성형공정인 fin pass를 통과하며 소성가공에 의해 연신된 강관의 외주장을 측정한 후 기준폭과의 차이를 확인해 안정된 성형시의 외주장 연신 길이와의 비교를 통해 적절한 성형폭과의 차이를 조절해 줌으로써 강대 내의 탄성력이 작용하지 않는 물성형 조관이 되도록 하고 있다. 그러나 이러한 강대 폭차이에 대한 조절은 주로 경험에 의존해 왔기에 새로운 재질 특히 고강도 강대의 경우에 있어선 폭조절에서 많은 시행착오와 이에 따른 폭조절 자체에 대한 의문 제기가 있어 왔다.

3.2 안정된 성형에 필요한 폭방향 연신조건

평판의 강대를 폭방향에서 둥글게 굽혀가며 원통형으로 조관성형시 강대의 두께(t)방향에서 형성되는 탄소성역의 크기와 강도를 고려한 안정된 성형에 필요한 조건은 형성

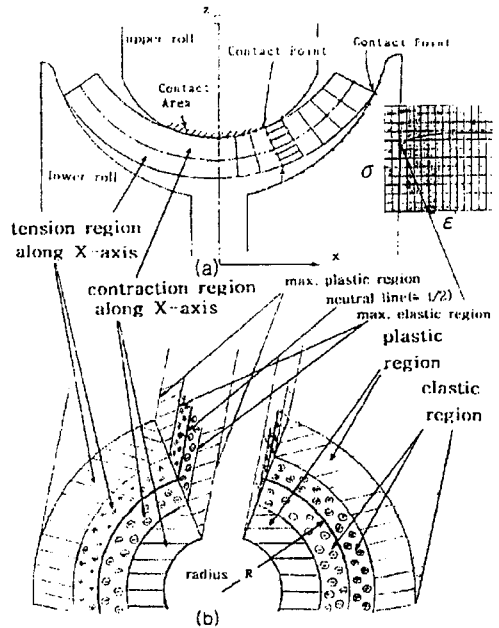


Fig. 5 Schematic drawing of elastic and plastic region formed along thickness of thin steel sheet during roll forming

되는 소성역이 탄성역의 탄성력을 안정되게 억제할 수 있을 정도로 필요한 최소의 소성 인장, 압축역이다. 이와 관련해 각 단의 성형롤을 통과한 후 용접직선에서 안정적으로 성형된 강대에 대해 Fig. 5(b)에서 보여지고 있다. 여기에서 보여지는 것 처럼 접합될 강대의 양단에서 탄성력에 의한 스프링 백(spring back)이 작용되지 않도록 강대의 폭방향을 따라 형성돼야 할 안정된 성형의 조건인 두께 방향에서의 탄소성역 분포는 다음과 같다. 즉 등방성에 가까운 강대에서 두께 방향을 따라 연신과 압축이 없는 중립선에서 위쪽으로 탄소성역의 비율과 관련해 최소값인 가시적인 면적의 차로 비교하는 경우 두께 절반인 $t/2$ 의 $2/5$ 에서부터 최대값인 강도 크기로의 비교 경우인 $t/2$ 의 $2/3$ 지점까지만 인장 탄성역이 형성돼야 한다. 그리고 중립선으로부터 아래쪽인 조관 강대의 내면으로 $t/2$ 의 $2/5$ 에서 $2/3$ 지점까지만 압축 탄성역이 형성돼야 하며 이러한 인장 및 압축 탄성역을 제외한 그 이상의 부분은 소성역이 되도록 소성가공이 일어나는 조건을 형성해야 한다고 판단된다. 이같은 강대의 폭방향을 따라 두께 단면에서 안정적인 탄소성역의 분포가 형성될 때 외부에서 측정이 용이한 강대 단면상 두께방향에서 나타나는 소성 인장역의 최외지점에서 강대의 폭방향을 따라 발생하는 연신길

이는 두께방향을 따라 형성되는 최대 탄성에서의 탄성연신과 최대 소성에서의 소성연신의 합이다. 그러므로 소성연신은 중립선에서부터 위쪽으로 최외지점인 최대 인장소성까지의 길이 $t/2$ 에서 최대 인장탄성까지의 길이인 최소 $t/5(t/2 \times 2/5)$ 또는 최대 $t/3(t/2 \times 2/3)$ 을 제외한 소성인장역의 길이인 최대 $3t/10(t/2 - t/2 \times 2/5)$ 에서 최소 $t/6(t/2 - t/2 \times 2/3)$ 의 원주상 길이인 최대 $6\pi t/10(3t/10 \times 2\pi)$ 에서 최소 $\pi t/3(t/6 \times 2\pi)$ 이다. 그리고 탄성연신은 항복강도 또는 최대 탄성한계에서의 연신율인 최대 인장탄성을 \times 기준폭이다. 결과적으로 연신 압축이 없는 두께방향 중간 부근의 원주상 길이인, $2\pi R$ 인 기준폭 즉 성형전 강대폭 양단을 기계가공한 스펀프폭에 강대 내의 최대 인장탄성에 의한 연신길이인 강대의 최대 인장탄성을 \times 기준폭을 합한 길이와 앞의 안정된 소성역 형성에 필요한 소성 인장역의 최외지점에서의 연신길이인 최대 $6\pi t/10$ 에서 최소 $\pi t/3$ 을 합한 길이가 강대 스펀프를 롤성형 가공에 의해 조관시 안정된 접합부 이음매 성형관련 폭 방향에서 성형에 의해 최종적으로 요구되는 필요한 외주장의 길이로 판단된다. 이를 식으로 표현하면 안정된 성형에 필요한 연신폭 = $2\pi R(\text{기준폭}) + 2\pi R(\text{기준폭}) \times \text{탄성한계 또는 항복강도에서의 연신율} + \text{최소 } 0.33\pi t \sim \text{최대 } 0.6\pi t$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로 용접전 이에 대한 측정을 통해 기계 가공 전 기준폭인 스펀프 폭에 대한 조절 또는 성형롤 갭에 대한 조절을 통해 안정된 롤성형 작업이 이루어질 수 있을 것으로 생각된다. 이 식에서 제조할 강관의 외경과 두께가 정해지면 강관의 외주장과 소성인장역의 최외지점에서 연신길이가 계산식에 따라 구해지나 최대 인장탄성에 의한 연신길이는 강대 시편의 인장시험을 통해 나타난 소재 최대 탄성률인 항복점 부근의 연신율을 파악해 구해야 할 것으로 판단된다.

3.3 변형부하

롤성형 조관시 강대를 굽혀가며 원통형으로 성형하는 과정은 실상 강대를 폭방향으로 늘리고 줄여 가며 성형하는 과정으로 각 롤 pass 단계마다 성형에 필요한 적정소성량을 앞의 강대 두께 대비 폭방향의 연신 또는 압축길이가 산정 롤의 곡률 및 하중을 감안해 상하롤의 횡축폭 길이가 결정되는 것으로 판단된다. 따라서 이때의 각 롤 pass에서 발생되는 변형부하는 강대단면의 두께를 제공한 면적과 폭방향을 따라 응력이 집중되는 강대의 중간부인 폭방향에 수직인 이 두께제공면적에서 형성된 탄소성역의 평균강도로 추산되는 성형된 강대의 항복강도를 곱

한 값에 롤성형 과정에서 각 롤 pass 단계에서 발생하는 응력이 집중되는 성형점의 수를 곱함으로써 구할 수 있다. 즉 변형부하 = (강대두께)² \times 성형강대(강관)의 항복강도 \times 성형점 수로 변형부하식을 나타낼 수 있다. 이에 대한 산출 배경으로는 강대가 조관롤 갭을 통과할 때 폭방향에 수직인 두께제공 면적에서 발생하는 2-D스트레인의 양상과 안정된 성형시 응력이 집중되는 강대의 중간부에서 형성되는 탄소성역의 비와 이때의 강대의 최대 탄성한계를 사이에 두고 추산되는 탄소성역의 평균강도를 추정함으로써 가능했다.

4. 롤성형 조관기 부하 분석

4.1 롤성형 조관기

Fig. 6에서 보는 서클라포밍 방식의 롤성형 공정은 roll의 외형선에 따라 Fig. 7(a)와 (b)에서와 같은 서클라포밍(circular forming)방식과 더블포밍(double forming)방식으로 구분된다.

박판 롤성형시 서클라포밍 break down roll을 통과하면서는 박판의 폭방향을 따라 응력이 집중되며 성형된 외형선의 성형점이 하나이나 더블포밍 break down roll을 통과하면서는 성형점이 둘로 형성되는 차이점을 가지고 있다. 이러한 차이가 더블포밍 방식의 롤 외형선을 나타내

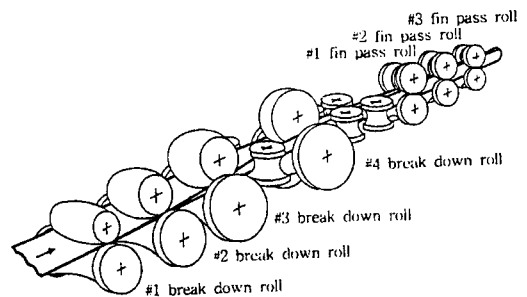


Fig. 6 Circular roll forming process

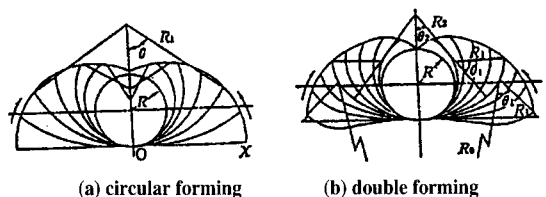


Fig. 7 Typical roll forming method

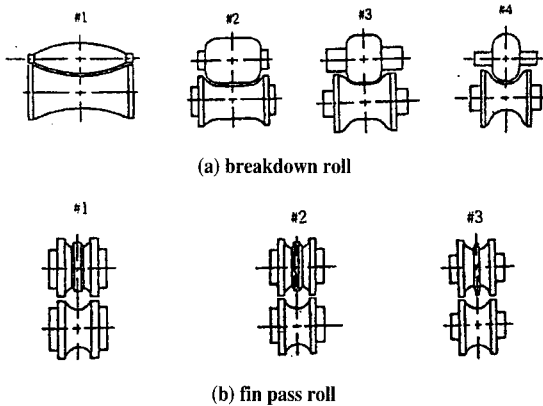


Fig. 8 Front view of forming roll

는 Fig. 7(b)의 맨 아래 외형선에서 보여진다. 그리고 포밍 방식에 관계없이 fin pass roll을 통과하면서 기형성된 강대의 폭 중간에 있는 성형점 외에 강대의 좌우 폭 중간으로 가면서 응력이 집중되며 성형점이 각각 발생하는 것으로 추정⁽⁴⁾된다. Fig. 8(a)와 (b)에서 각각 break down 및 fin pass roll에 대해 보여 주고 있다. fin pass roll을 통과한 후에는 전기저항용접을 하기 적당하게 접합부의 맞대기 형상을 guide roll로 조정해 스퀴즈롤에서 용접을 하게된다. 물성형대 이음매가 용접된 강관은 열처리 공정을 거쳐 정정작업을 한 후 적절한 길이로 절단 및 단부 기계가공을 함으로써 형상가공을 마치게 된다. 이러한 연속공정 중에서 물성형과 관련된 주요 부하의 분석은 break down roll 및 fin pass roll에서 이루어졌다.

4. 2 부하 분석

박판 강대의 성형조관중 발생되는 부하의 분석은 실제 가동중인 최대 외경 30 cm의 강관까지 제조가 가능한 조관기에서 재질과 두께의 차이가 커 물성형을 위한 부하의 적용 방법에서도 차이가 뚜렷한 대표적인 박판 강대를 사용해 조관후의 평균항복강도 42.5 kg/mm², 두께 12.3 mm, 외경 21.5 cm의 강관과 조관후의 평균항복강도 32.5kg/mm², 두께 5.3 mm, 외경 20 cm의 강관을 조관하기 위해 break down roll 및 fin pass roll에서 성형중 발생되는 부하를 분석했다. 길이방향을 따라 채취해 얻은 강대와 성형후의 강관 인장시편에 대한 강도변화가 Table 1에서 보여주고 있다. Table 1에서 보듯이 성형중 발생하는 강대 길이 방향에서의 강도 증가는 3~8 kg/mm² 정도인데 후속 소경으로 갈수록 강도변화가 커지는⁽¹⁰⁾ 경향이 있다.

Table 1 Mechanical properties of steel sheet

Specimen	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
Steel sheet 5.3mm thick	25~30	32~38	42~49
Pipe 5.3mm thick	31~34	39~41	38~42
Steel sheet 12.3mmthick	33~37	43~50	33~43
Pipe 12.3mmthick	40~45	48~55	30~40

Table 2 Analytical deformation load(ton)

Pass	#1 Break down	#2 Break down	#3 Break down	#4 Break down	#1 Fin pass	#2 Fin pass	#3 Fin pass
Steel 12.3mm thick	12.8	6.4	6.4	-	12.8	12.8	12.8
5.3mm thick	1.8	0.9	0.9	-	1.8	1.8	1.8

deformation load = t² × yield strength of deformed steel sheet (pipe) × number of forming point along the width of circular steel sheet

Table 3 Measured rolling weight(ton)

Pass	#1 Break down	#2 Break down	#3 Break down	#4 Break down	#1 Fin pass	#2 Fin pass	#3 Fin pass
Weight	6.7	7.3	7.1	2.1	3.8	4.0	3.8

그리고 강대의 거시적인 길이방향 강도편차 역시 강대의 재질 및 제조과정에 따라 약간의 차이가 있으나 일반적으로 5~10 kg/mm² 정도의 편차를 보여주는 반면 한 지점에서 나타내는 미시적인 종 및 횡 방향의 강도편차는 평균 1~2 kg/mm² 정도로 편차가 거의 없었다.

구동부하 및 구동중량부하의 분석을 위해서 성형조관중에 break down roll 및 fin pass roll의 구동모타 출력을 파악했다. 구동롤은 break down roll #1, #2, #3, #4 그리고 fin pass roll #1, #2, #3이 각각 별도로 연결된 구동모타를 가지고 있는데 이들의 최대 출력은 break down roll #1이 더블 벤딩 방식의 롤로 성형부하가 많이

Table 4 Analytical load

(a) Analytical load for 12.3 mm thick

Pass load	#1 Break down	#2 Break down	#3 Break down	#4 Break down	#1 Fin pass	#2 Fin pass	#3 Fin pass
Motor power (kw)	33.0	21.5	19.3	-	78.0	70.0	62.0
Roll forming load (ton)	12.3	8.0	7.2	-	29.2	26.2	23.2
Rolling weight load (ton)	1.5	1.6	1.6	-	0.8	0.9	0.8
Friction load(ton)	1.0	3.2	2.4	-	17.2	14.3	11.2
Deformation load(ton)	12.8	6.4	6.4	-	12.8	12.8	12.8
Tension load (ton)	26.6	16.0	15.2	-	42.8	39.9	36.8

(b) Analytical load for 5.3 mm thick

Pass load	#1 Break down	#2 Break down	#3 Break down	#4 Break down	#1 Fin pass	#2 Fin pass	#3 Fin pass
Motor power (kw)	25.3	8.6	6.4	-	3.9	7.8	11.7
Roll forming load (ton)	4.4	1.5	1.1	-	0.6	1.3	2.0
Rolling weight load (ton)	3.2	3.5	3.4	-	1.8	1.9	1.8
Friction load(ton)	5.8	4.1	3.6	-	0.6	1.4	2.0
Deformation load(ton)	1.8	0.9	0.9	-	1.8	1.8	1.8
Tension load (ton)	9.4	5.9	5.4	-	4.2	5.0	5.6

1. Roll Forming Speed for 12.3 mm thick steel sheet = 16 m/min.
Roll Forming Speed for 5.3 mm thick steel sheet = 34 m/min.
2. Roll Forming Load = $\frac{0.1 \times \text{Motor Power(kw)} \times 60}{\text{Roll Forming Speed(m/min.)}}$
3. Rolling Weight Load = $\frac{\text{Roll Forming Speed(m/min.)}}{60(\text{m/min.})} \times \text{Rolling Weight} \times 0.85$
4. Friction Load = Roll Forming Load + Rolling Weight Load - Deformation Load
5. Tension Load = Roll Forming Load + Rolling Weight Load + Deformation Load

걸리므로 45Kw를, 나머지 #2, #3, #4는 각각 30Kw였다. 그리고 fin pass roll #1, #2, #3 역시 성형점을 2군데나 가지게 되어 부하가 많이 걸릴 뿐 아니라 성형중 break down roll에 비해 상대적으로 강대의 탄성이 fin pass roll과의 사이에서 더 넓고 크게 작용할 뿐만 아니라 롤중량 역시 작아 중량에 의한 탄성력 역제가 작아지게 되어 성형시 롤이 받는 부하가 커짐에 따라 이를 감안해 적용된 이들 fin pass roll 구동모타의 최대 출력은 각각 90Kw였다. 그리고 break down roll #4는 구동 연결을 하지 않고 조관을 했다. 상기 박판 강대의 성형조관에 필요한 변형부하의 산출값과 식이 각각 Table. 2와 그 아래에 나타나있다. 그리고 구동모타와 연결된 기어 및 축, spline을 포함한 각 롤들의 중량이 Table 3에서 보여지고 있다.

분석 비교한 부하는 변형부하, 구동부하, 구동중량부하,

마찰부하 그리고 인장하중 이었다. 상기 두 강관의 성형조관중 발생된 부하의 종류별 분석값이 Table 4(a)와 (b)에 각각 나타나있다. 그리고 이들 부하에 대한 식은 Fig. 9에서 보여지는 것과 같이 조관 성형중의 강대가 정상적인 속도를 유지하며 평형부하 상태에 도달했을 때 강대의 진행방향과 평행인 구동부하와 구동중량부하의 합은 이에 수직한 변형부하와 마찰부하의 합과 같게 즉 변형부하+마찰부하=구동부하+구동중량부하로 구성했다. 그리고 각 성형롤 스탠드의 롤 잭을 통과하는 강대에 작용되는 인장하중은 강대의 변형부하와 구동부하 및 구동중량부하의 합으로 인장하중=구동부하+구동중량부하+변형부하로 식을 구성했다. 구동부하식은 구동부하(톤)= $0.1 \times \text{구동 출력(kw)} \times 60 \div \text{조관속도(m/min.)}$ 이고 구동중량부하식은 구동중량부하(톤)= $\text{조관속도(m/min.)} \times \text{롤중량} \times 0.85 \div 60(\text{m/min.})$ 이다. 여기서 박판 강대의 조관중에

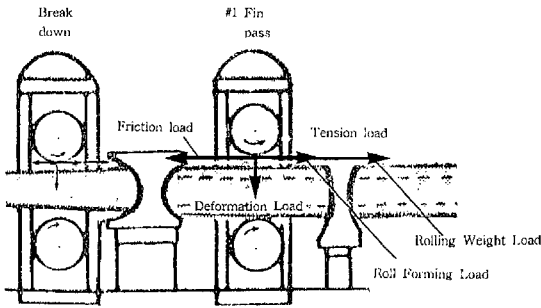


Fig. 9 Schematic drawing of load analysis

측정된 조관속도는 두께 12.3 mm 경우 16 m/min. 그리고 두께 5.3 mm 경우 34 m/min. 이었다. 이와 함께 측정된 롤중량 및 구동출력이 Table 2와 4에 각각 나타나있다. 변형부하는 Table 2 아래에 있는 산출식에 의해 마찰부하는 앞에서 설명한 관계식에 따라 구하여 이들 구한 값들에 대한 타당성 여부를 측정값과 비교해 판단했다. 변형부하 산출식에서 나타난 것과 같이 강대 조관시 변형부하는 강대의 두께에 비례해 커지며 또한 성형방식 그리고 성형롤 종류에 따른 성형 외형선의 성형점 수에 비례하는 것으로 보여진다. 그리고 상대적으로 후속, 고강도 강관의 성형에서는 fin pass roll을 통과할 때 구동모터의 출력이 높아지는 것으로 나타났고 이에 따라 마찰부하도 Table 4(a)에서 보이는 것처럼 커지는 것으로 나타나 앞의 조관기 모터출력 설명서 언급된 내용과 일치된 분석을 보여줬다. 이와 함께 분석 산출한 성형부하인 Table 4(a) #1 fin pass에서 발생하는 tension 및 friction load의 합인 60톤과 #1 fin pass top roll의 지지축에서 측정된 성형중의 부하⁽⁴⁾인 55~60톤과 일치되는 양상을 보여주고 있다. 반면 상대적으로 박육의 일반강관 경우는 성형중 fin pass roll을 통과할 때보다도 break down roll을 통과할 때 구동부하가 커지며 이에 따라 마찰부하도 break down roll을 통과할 때에 커지는 경향을 나타냈다. 그리고 이들 사이에 오는 중간 두께의 중급 강도의 강관을 성형할 때에 발생하는 구동부하의 경향은 break down roll 또는 fin pass roll 어느 한쪽으로 부하가 편중되지 않는 경향을 보여주는 것으로 나타났다.

5. 결론

물성형 조관시 박판강대 내에서 응력과 스트레인의 거동을 분석 고찰해 물성형 기술 및 부하 분석에 적용한 결

과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 박판 물성형시의 롤 갭을 통과하는 강대 내 응력과 스트레인의 거동은 강대의 폭방향을 따라 가해진 압축인 장응력에 대한 강대 두께제곱 면적에서 발생되는 2-D 스트레인의 양상을 보여준다.

(2) 조관 물성형시의 부하분석과 관련 변형부하 산출에 적용된 변형부하식은 강대의 물성형시 적용 가능한 산출식으로 판단된다.

(3) Yokoyama 등에 의해 강대의 $\sigma \cdot t$ 의 비례치에 따라 성형중 측정된 #1 fin pass에서의 성형부하와 산출된 #1 fin pass에서의 성형부하 분석값과는 일치되는 양상을 보이는 것으로 나타났다.

(4) 조관 물성형시 부하분석을 통해 나타난 마찰부하의 양상은 상대적으로 후속 고강도의 강대를 성형할 경우 fin pass roll을 통과할 때 구동부하와 함께 마찰부하가 커지는 반면 상대적으로 박육 저강도의 강대를 성형할 경우에는 break down roll을 통과할 때 구동부하와 마찰부하가 커지는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) Wataru Mizutani, 1982, "Development of a new Roll forming Process with Vertical Rolls for Electric Resistance Welded Pipe", Journal of the JSTP, Vol.23, No.259, pp. 749~755.
- (2) Eiichi Yokoyama, Takaaki Toyooka and Akio Ejima, 1982, "Application and Technics of Cage Forming Method", Journal of the JSTP, Vol.23, No.259, pp. 739~748.
- (3) Hiromu Suzuki, Manabu Kiuchi, Satoshi Nakazima and Masaaki Ichidayama, 1970, "Fundamental Patterns of Strain Path in Roll Forming of Sheet Metal through Tandem Mills with Rolls of Circular Arc Groove", Journal of the JSTP, Vol.11, No.112, pp. 315~324.
- (4) Eiichi Yokoyama, Takaaki Toyooka, Akio Ejima, Yuzo Yoshimoto, Takao Kawate and Kazuyoshi Kuwata, 1981, "Steel Sheet Deformation Behavior and Forming Load Determination in the 26-inch Cage Forming ERW Pipe Mill", Kawasaki steel technical report, No.4, pp. 72~83.
- (5) Manabu Kiuchi and Feizhou Wang, 1997,

- "Numerical Analysis of Deformation Behaviour of Edge Portion of Sheet Metal at Breakdown Pass in Roll Forming Process", Journal of the JSTP, Vol.38, No.443, pp. 56~60.
- (6) M. Kiuchi and Feizhou Wang, 1997, "Numerical Analysis of Edge Bending of Sheet Metal by Involute Forming Method", Journal of the JSTP, Vol.38, No.443, pp. 66~70.
- (7) Masayuki Yamada and Tateo Yamada, 1997, "Proposal of Flexible Edge Forming for ERW Tube I", Journal of the JSTP, Vol.38, No.443, pp. 61~65.
- (8) M. Kiuchi, Ken Shintani, Fumio Eto and Toshio Koudabashi, 1986, "Characteristics of Cross-Sectional Profiles Formed by Fin-Rolls", Journal of the JSTP, Vol.27, No.301, pp. 280~287.
- (9) Hiromu Suzuki, Manabu Kiuchi, Satoshi Nakajima and Akio Akahori, 1969, "Investigation into Roll Forming of Sheet Metal with Calibre Rolls Having Circular Arc Groove", Journal of the JSTP, Vol.10, No.97, pp. 102~115.
- (10) Shuzo Watanabe, Norihiko Kano, Yutaka Hirano, Fumiaki Ode and Eiichi Yokoyama, 1981, "Development of Manufacturing Techniques of Small Diameter ERW Pipe", Kawasaki Steel Giho, Vol.13, No.1, pp. 93~105.