한국소성가공학회 '99춘계학술대회 논문집 pp.273~279

박판강대의 롤성형 및 부하 분석

서 정 현

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 sheet, 12.3㎜ thick steel sheet with ≅42.5kg/㎟ yield strength of pipe and 5.3㎜ thick steel sheet with ≅32.5kg/㎟ 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. 서 론

박판 강대의 성형과 관련 적용되는 주요 성형부하의 종류로는 유압에 의한 금형 프레스외에 전동력에 의한 구동 및 하중을 들 수 있다. 이중 후자에 의해 여러 방식의[1] 롤성형과정을 거치는 롤성형(롤포밍) 강관의 박판 가공과 관련해서 강대의 길이 방향을 따라[2] 가공롤의 단계(pass)별 외형선(roll profile)의 구성과 이때 형성되는 스트레인 경로에 대한 분석 그리고 롤 성형과정의 분석 특히 최근 성형이 취약해 왔던 강대에지부의 안정적 성형[3]을 위한 유한요소 분석법의 적용과 함께 이들의 CAD化에 대한 연구와 활용이 그간 지속되왔다. 허나 이들 대부분이 소재의 변형 특성과 조관 성형시 실제 발생되는 부하의 분석에 근거한 연구 결과의 비교

국제유압(주) 기술자문(現)/ 현대강관(주) 기술연구소(歷)

보다는 확립된 수식의 적용에 의한 실제 결과와의 근사치 여부에 대한 판단이 주류를 이루어 왔다.

여기에서는 이러한 강대의 롤성형 조관시 형성되는 성형부하에 대응해 강대내에서 발생된 응력과 스트레인에 대한 금속조직내에서의 거동을 고찰하고 이에 대한 결과를 활용 박판강대의 롤성형 조관시 안정된 소성가공에 필요한 조건을 파악했다. 또한 조관성형시 발생되는 부하의 양상들이 비슷한 유형중 대별되는 상대적으로 강도가 높고 후육인 조관후의 평균항복강도 42.5kg/㎟에 두께 12.3㎜의 강대와 강도가 낮고 박육인 조관후의 평균항복강도 32.5kg/㎟에 두께 5.3㎜의 강대를 사용해 조관성형중 발생되는 변형부하(deformation load), 구동부하(roll forming load) 그리고 구동중량부하(rolling weight load) 및 인장하중(tension load)과 이들과의 상호작용에 의해 생기는 마찰부하(friction load)에 대한 일련의 분석을 실시하였다. 이와 같은 박판 강대의 롤성형 분석과 함께 이의 적용을 통해 박판강대의 성형부하 분석에 대한 검증과 롤성형 조관기의 유지관리 및 제작시 요구되는 요소기술에 대한 연구가 이루어졌다.

2. 롤성형시 금속조직의 거동

2. 1 응력과 금속조직의 거동

롤성형시 강대가 성형롤을 통과하며 각 단에서 발생된 폭 방향의 강대변형이 강대의 양끝단을 따라 계단형으로 나타나는 것을 보게된다. 이때의 성형부하에 의해 발생된 강대면의 3차원 변형에 대한 분석이 Fig. 1에서 보여주고 있다. 이러한 성형에 의한 결과적인 강대의 스트레인 분포 뿐만 아니라 break down 및 fin pass 각 단의 롤을 통과하며 성형될 때에 상 하롤의 외형선 접촉 부분을 따라 부하가 적용되 강대의 폭두께방향을 따라 두께 단면의 중간부근에서부터 롤이 접촉되는 조관강대의 외표면까지 인장력이 작용되고 그 반대면으로는 압축력이 작용된다. 이같은 단순 폭방향 작용력에 의해 강대 내에서 발생되는 응력과 스트레인의 상태를 살펴보면 강대의 길이방향을 따라서는 폭방향과는 반대로 롤접촉 외표면부분에서 등력의 압축응력이 그리고 반대쪽 내면부분에서는 등력의 인장응력이 생성되 이 부위의 금속조직에 변형을 초래케 된

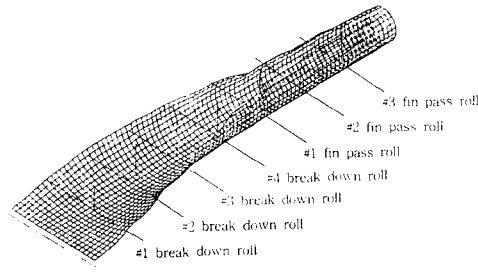


Fig. 1 Deformed mesh shape of thin steel sheet during roll forming

다. 이에따라 Fig. 2에서 보여주는 강대의 폭두께 방향을 따라 작용되는 3차원의 응력, 스트레인 형상과 함께 폭두께 단면상의 한 점인 금속조직 내의 결정립에서 일어나는 응력과 격자의 회전에 대해 Fig. 3a와 b에서 각각 보

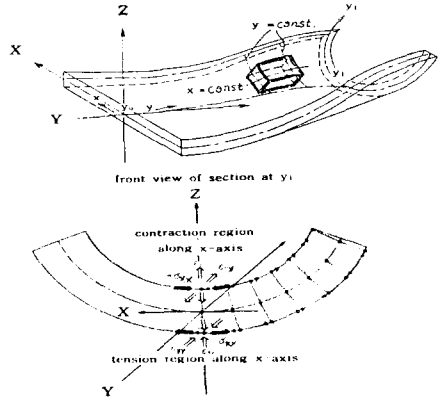
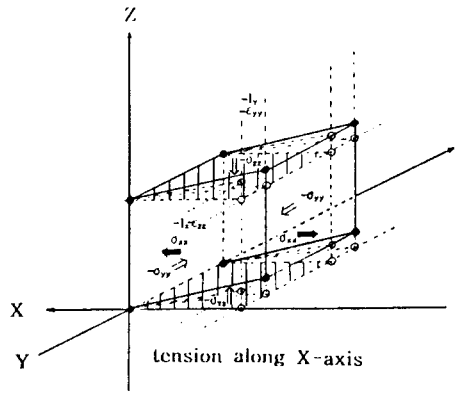
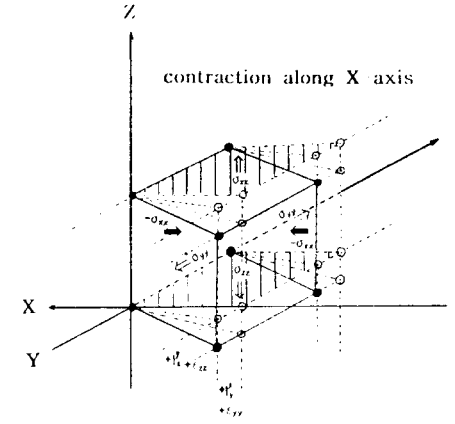


Fig. 2 Schematic drawing of stress strain state along the width of thin steel sheet during roll forming

여 주고 있다. 여기에서 나타난 것과 같이 소성변형에 이르는 항복점에서의 인장과 압축응력의 크기는 등방성의 금속조직에서 그 크기가 같게되 강대 두께 만큼의 강대 길이에서도 같은 크기의 상반된 응력에 의한 변형이 발생되는 것으로 분석된다. 즉 롤성형시 롤갭을 통과하며 강대의 표면과 평행하게 두께 단면을 따라 균일하게 가해진 x-방향 인장력에 평행하게 형성된 금속조직내의 x-방향 인



(a) Tension along X-axis



(b) Contraction along X-axis

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 [from above Fig. 3(a), (b) in the state of plain strain, $-l_y = -l_z$ and $+l'_y = +l'_z \Rightarrow (-l+l')_y = (-l+l')_z$]

장응력에 의한 폭방향과 평행한 x-방향 인장 스트레인으로 말미암아 발생된 길이방향과 평행한 y-방향의 압축스트레인과 두께방향과 평행한 z-방향의 압축스트레인은 등방성의 균일 금속조직내에서 같게된다. 역시 x-방향의 인장력과 평행하며 방향이 반대인 압축력에 의한 평행 y-방향과 평행 z-방향의 인장스트레인이 같게 되므로 강대 두께단면을 따라 최대탄성 지점에서 강대의 폭방향으로 변형시 두께방향의 인장압축 변형거리와 동일거리 만큼의 변형이 강대의 길이방향을 따라 발생 된다는 사실이다. 이에 대한 분석식이 Fig. 3 아래에서 보여진다.

2. 2 2차스트레인 양상

강대의 성형폭 양 끝단에서 곡률의 중간부분으로 갈수록 커지는 응력집중에 의해 소재의 항복강도를 넘어서 강대의 소성변형이 발생될 때 Fig. 5에 나타나있는 이부분에서 두께 방향으로 외표면에서 부터 증가되는 최대인장소성과 내표면에서 부터 증가되는 최대압축소성은 서로 상반된 응력으로 인해 철강격자의 회전 방향이 반대이나 응력크기나 격자회전에 의한 변형량이 유사하다는 것이 등방성의 기저조직(매트릭스)인 격자구조를 가지고있는 철강내에서 나타난다는 것이 Fig. 3과 분석식으로 파악되었다. 따라서 강선 인장시험시 강선의 응력집중이 중간으로 갈수록 증가되 항복강도를 넘어서 소성변형이 강선의 중간으로부터 일어날 때 강선의 두께 내면에서 증가되는 최대인장소성의 성장은 방향만 반대일 뿐 강선의 두께 단면에서의 2차압축스트레인과 롤성형시 응력집중이 최대가 되는 강대 폭방향의 중간부분 두께 단면에서의 2차압축, 인장스트레인과 결과적으로 동일한 양상을 보이는 것으로 추정된다. 롤성형시 강대 폭방향의 중간부분에서 생기는 응력집중에 대해 Fig. 4

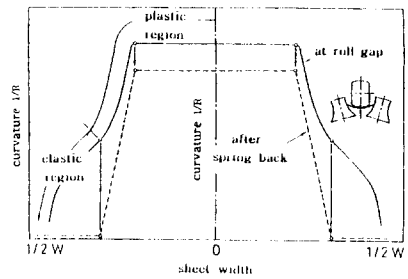


Fig. 4 Curvature distribution along the width of thin steel sheet during roll forming

에서 변형곡률을 통해 도시했다. 이러한 등방성의 균질한 매트릭스 내에서 강대 폭방향의 단순 작용력에 의해 x-방향 스트레인과 y-방

향 및 z-방향 스트레인의 절대값이 비례하고 y-방향과 z-방향의 스트레인 크기가 같아진다는 관점에서 조관되는 강대의 두께 중간부에서 외측 폭방향을 따라 형성되는 인장역(域)에서 최대인장탄성역의 2차압축스트레인에 비례해 강대의 최외면인 즉 두께단면상의 최외지점인 최대인장소성역에서 느는 폭방향의 연신길이 그리고 강대 두께 중간부에서 내측 폭방향을 따라 형성되는 압축역(域)에서 2차인장스트레인에 비례해 줄어드는 폭 역시 강대의 두께 변화에 따라 비례해 늘고 줄어드는 것으로 판단된다. 반면 롤성형중 길이 방향으로 가해진 작용력에 의해 형성된 길이 방향 응력은 가해진 인장하중(tension load)에 비해 강대의 단면적이 넓어 강대의 탄성변형에도 영향을 거의 미치지 못하는 1~5kg/㎟ 정도로 나타나 2차스트레인의 정황인 롤 통과시 강대폭 방향을 따라 가해지는 단순 인장 및 압축력의 작용을 뒷바침하고 있다. 이에 따라 조관롤 통과시 강대에서 발생되는 변형은 폭방향에 수직인 두께에 비해 긴 폭방향에서의 변형에 대한 영향은 적어 두께제곱 면적에서 발생되는 변형만 고려할 수 있는 2차스트레인의 양상을 보여주는 것으로 판단된다.

3. 롤성형 조관기술

평판의 강대를 폭 방향에서 둥글게 굽혀가며 원통형으로 조관성형시 강대의 두께(t) 방향에서 형성되는 탄소성역의 크기와 강도를 고려한 안정된 소성역 형성에 필요한 조건은 형성되는 소성역이 탄성역의 탄성을 안정되게 억제할 수있을 정도로 필요한 최소의 소성 인장, 압축역이다. 따라서 Fig. 5에서 보여지는 등방성에 가까운 강대에서 연신과 압축이 없는 두께 방향 중간부근에서 위쪽으로 최소 두께의 2/5에서 최대 두께의 2/3 지점까지는 인장 탄성역 그리고 아래쪽으로 두께의 2/5 에서 2/3 지점까지는 압축 탄성역 그리고 그 이상 부분은 소성역이 되도록 소성가공이 일어나는 조건을 형성해야 한다고 판단된다. 이에 따라 외부에서 측정이 용이한, 강대 단면상 두께 방향에서 나타나는 소성 인장역의 최외지점에서 강대의 폭 방향을 따라 발생하는 연신길이는 두께 방향을 따라 형성되는 최대탄성에서의 탄성연신과 최대소성에서의 소성연신의 합이다. 그러므로 소성연신은 두께 방향 중간에서 부터 위쪽으로 최외 지점인 최대 인장 소성까지의 길이 t/2에서 최대 인장 탄성까지의 길이인 최소 t/5(t/2 × 2/5)에서 최대 t/3(t/2 × 2/3)를 제외한 소성 인장역의 길이인 최대 3t/10(t/2 - t/2 × 2/5)에서 최소 t/6(t/2 - t/2 × 2/3)의 원주상 길이인 최대 6πt/10(3t/10 × 2π)에서 최소πt/3(6t × 2π)이다. 그리고 탄성연신은 최대인장탄성율×기준폭이다. 결과적으로 연신 압축이 없는 두께

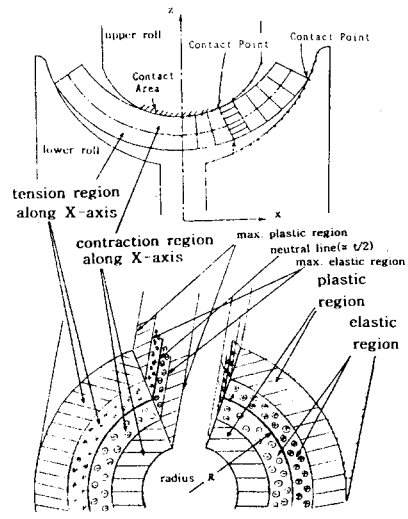


Fig. 5 Schematic drawing of elastic and plastic region formed along thickness of thin steel sheet during roll forming [outer circle length of stably roll formed pipe before welding = 2πR + Min. 0.33πt ~ Max. 0.6πt + 2πR × % of elongation at yielding point or maximum elastic limit]

방향 중간 부근의 원주상 길이, 2πR인 기준폭 즉 성형전 강대폭 양단을 기계가공한 스켈프폭에 상기의 안정된 소성역 형성에 필요한 소성 인장역의 최외지점에서의 연신길이 최대 6πt/10에서 최소πt/3와 강대내의 최대 인장탄성에 의한 연신길이인 강대의 최대 인장 탄성율 × 기준폭을 합한 길이가 강대 스켈프를 롤성형 가공에 의한 조관시 안정된 접합부 이음매 성형관련 폭방향에서 성형에 의해 최종적으로 요구되는 필요한 외주장의 길이로 판단된다. 그러므로 용접전 이에 대한 측정을

통해 기계 가공전 기준폭인 스켈프 폭에 대한 조절 또는 성형롤 갭에 대한 조절을 통해 안정된 롤성형 작업이 이루어 질 수 있을 것으로 생각된다. 이를 근거로 롤성형시 안정된 폭 방향 연신에 필요한 롤성형후 용접 직전의 외주장 길이 및 성형전 기계가공한 기준폭에 대한 산출식이 Fig. 5아래에 나타나있다. 이 식에서 제조할 강관의 외경과 두께가 정해지면 강관의 외주장과 소성 인장역의 최외지점에서 연신길이가 계산식에 따라 구해지나 최대 인장 탄성에 의한 연신길이는 강대 시편의 인장시험을 통해 나타난 소재 최대 탄성율인 항복점 부근의 연신율을 파악해 구해야 할것으로 판단된다.

4. 롤성형 조관기 부하 분석

박판 강대의 성형조관중 발생되는 부하의 분석은 실제 가동중인 최대외경 30㎝ 의 강관까지 제조가 가능한 조관기에서 재질과 두께의 차이가 커 롤성형을 위한 부하의 적용 방법에서도 차이가 뚜렸한 대표적인 박판 강대를 사용해 조관후의 평균항복강도 42.5kg/㎟, 두께 12.3㎜, 외경 21.5㎝의 강관과 조관후의 평균항복강도 32.5kg/㎟, 두께 5.3㎜, 외경 20㎝의 강관을 조관하기위해 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 보

Table 1. Mechanical properties of steel sheet

Specimen	Yield strength (kg/㎟)	Tensile strength (kg/㎟)	Elongation (%)
Steel sheet 5.3㎜ thick	25~30	32~38	42~49
Pipe 5.3㎜ thick	31~34	39~41	38~42
Steel sheet 12.3㎜ thick	33~37	43~50	33~43
Pipe 12.3㎜ thick	40~45	48~55	30~40

듯이 성형중 발생되는 강대길이 방향에서의 강도 증가는 3~8kg/㎟ 정도인데 후육소경으로 갈수록 강도변화가 커지는[4] 경향이 있다. 그리고 강대의 거시적인 길이방향 강도편차 역시 강대의 재질 및 제조과정에 따라 약간의 차이가 있으나 일반적으로 5~10kg/㎟ 정도의 편차를 보여주는 반면 한 지점에서 나타내는 미시적인 종 및 횡 방향의 강도편차는 평균 1~2kg/㎟ 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 걸리므로 45Kw를, 나머지 #2, #3, #4는 각각 30Kw였다. 그리고 fin pass roll #1, #2, #3 역시 성형 변곡점을 2군데나 가지게되 부하가 많이 걸릴뿐 아니라 성형 중 break down roll에 비해 상대적으로 박판강대의 탄성이 fin pass roll과의 사이에서 더 넓고 크게 작용할 뿐만 아니라 롤중량 역시 작아 중량에 의한 탄성력 억제가 작아지게되 성형시 롤이받는 부하가 커짐에 따라 이를 감안해 적용된 이들 fin pass roll 구동모타의 최대 출력은 각각 90Kw 였다. 그리고 break down roll #4는 구동 연결을 하지않고 조관을 했다. 상기 박판 강대의 성형조관에 필요한 성형부하의 산출값과 식이 각각 Table. 2와

Table 2. Analyzed deformation load(ton)

Pass / Steel	#1 Break down	#2 Break down	#3 Break down	#4 Break down	#1 Fin pass	#2 Fin pass	#3 Fin pass
12.3㎜ thick, 42.5kg/㎟ Y.S	12.6	6.4	6.4	-	12.8	12.8	12.8
5.3㎜ thick, 32.5kg/㎟ Y.S	1.8	0.9	0.9	-	1.8	1.8	1.8

deformation load = t^2 × yield strength of deformed steel sheet (pipe) × number of forming point along the width of circular steel sheet

그 아래에 나타나있다. 그리고 구동모타와 연결된 기어 및 축, spline을 포함한 각롤들의 중량이 Table 3에서 보여지고있다.

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	6.5	7.3	7.1	2.1	3.5	4.0	3.8

분석 비교한 부하는 변형부하, 구동부하, 구동중량부하, 마찰부하 그리고 인장하중 이었다. 상기 두 강관의 성형조관중 발생된 부하의 종류별 분석값이 Table 4a와 b에 각각 나

타나있고 이들 부하에 대한 식이 Table 4b의 아래에서 보여진다. 여기서 구동부하 및 구동 중량부하는 박판강대의 조관중 각개 롤 pass 시 마다 적용된 구동출력과 조관속도로 그리고 변형부하는 산출식에 의해 마찰부하는 Table 4b 아래에서 보여지는 관계식에 따라

Table 4 Analyzed load

(a) Analyzed load for 12.3㎜ 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) Analyzed load for 5.3㎜ 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㎜ thick steel sheet = 16m/min.
   Roll Forming Speed for 5.3㎜ thick steel sheet = 34m/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

구하여 이들 구한 값들에 대한 타당성 여부를 판단했다. 변형부하 산출식에서 나타난 것과 같이 강대 조관시 변형부하는 강대의 두께에 비례해 커지며 또한 성형방식 그리고 성형롤 종류에 따른 성형 외형선의 변곡점 수에 비례하는 것으로 보여진다. 그리고 상대적으로 후육, 고강도 강관의 성형에서는 fin pass roll을 통과할시 구동모타의 출력이 높아지는 것으로 나타났고 이에따라 마찰부하도 Table 4에서 보이는 것처럼 커지는 것으로 앞의 조관기 모타출력 설명시 언급된 내용과 일치된 분석을 보여줬다. 이와 함께 #1 fin pass top roll의 지지축에서 측정된 성형중의 부하[2]와 분석 산출한 Table 4a #1 fin pass에서 성형중에 발생된 tension 및 friction load의 합과 일치되는 양상을 보여주고 있다. 반면 상대적으로 박육의 일반강관 경우는 성형중 fin pass roll을 통과 할 때 보다도 break down roll을 통과할 때 구동부하가 커지며 이에따라 마찰부하도 break down roll 통과시에 커지는 경향을 나타냈다. 그리고 이들 사이에 오는 중간 두께의 중급 강도의 강관 성형시에 발생되는 구동부하의 경향은 break down roll 또는 fin pass roll 어느 한쪽으로 부하가 편중되지 않는 경향을 보여주는 것으로 나타났다.

5. 결 론

롤성형 조관시 박판강대 내에서 응력과 스트레인의 거동을 분석 고찰해 롤성형 기술 및 부하 분석에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 박판 롤성형시의 강대내 응력과 스트레인의 거동은 강대 폭방향을 따라 가해진 압축 인장응력에 대한 강대 두께제곱 면적에서 발생되는 2차스트레인의 양상을 보여준다.

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

(3) Yokoyama 등에 의해 성형중 측정된 #1 fin pass에서의 부하와 강대의 $\sigma_t \cdot t$의 비례치에 따른 산출값이 #1 fin pass에서의 부하 분석값과 일치되는 양상을 보이는 것으로 나타났다.

참고문헌

(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, pp749~755.

(2) 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, pp72~83.

(3) 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, pp56~60.

(4) 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, pp93~105.