

# 축대칭 모델을 이용한 냉간 플로우 포밍 성형공정의 근사화 해석

## Approximated analysis of cold flow forming process using axisymmetric model

\*#김상우<sup>1</sup>, 권용남<sup>1</sup>, 박은수<sup>2</sup>, 차달환<sup>2</sup>

\*#S. W. Kim(kimsw@kims.re.kr)<sup>1</sup>, Y. N. Kwon<sup>1</sup>, E. S. Park<sup>2</sup>, D. J. Cha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 재료연구소 융합공정연구부, <sup>2</sup> 경창산업(주)

Key words : Flow forming, FEM, Incremental forming

### 1. 서론

플로우 포밍(Flow forming)은 관재 또는 관재를 맨드릴에 고정하고 고속으로 회전시킴으로써 소재에 접촉된 2~3개의 롤러(Roller)의 회전 및 이동에 의해 국부적으로 성형하는 점진성형공정(Incremental forming)의 하나이다[1]. 회전롤에 의한 성형영역이 국부적이고 점진적으로 제품형상을 성형해 나감으로써 단조와 같이 1회 타발에 의해 성형되는 다 공정에 비해 성형에너지가 작고, 형상자유도가 크며, 금형 제조비용이 절감되는 이점이 있어, 최근 휠, 변속기 등 자동차 부품 제조에 적용범위가 확대되고 있는 추세이다[2]. 플로우 포밍은 제품의 형상에 따라 공정을 여러 단계로 분할하여 설계하고 각 단계별 롤러의 회전속도, 이동속도, 접촉각 등의 공정변수를 결정하여 경로를 설계해야하므로, 롤 경로에 대한 설계기술이 무엇보다 중요하다. 롤 경로에 따라 제품의 특성 및 형상이 결정되므로, 최근 FEM을 이용한 전산모사를 통한 공정변수의 영향분석 및 설계기술에 대한 연구가 진행되고 있다[3-5]. 플로우 포밍은 롤러가 회전함과 동시에 평행이동함에 따라 3차원적인 이동경로에 의해 제품이 성형되는 공정이므로 이에 대한 전산모사를 위해서는 3차원 모델을 통한 유한요소해석기술이 요구된다. 그러나, 롤의 회전이 빠르고, 경로가 매우 복잡하여 현재의 3차원 풀모델(Full model)에 의한 해석은 많은 계산시간이 요구되어 경로설계에 적절하게 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 플로우 포밍 공정을 2차원 축대칭 문제로 근사화하여 해석을 수행하고, 실험결과와의 비교분석을 통하여 근사모델의 적용 가능성을 분석하고자 하였다.

### 2. 2차원 축대칭 문제로의 근사화

본 연구에서는 Fig 1(a)의 3차원 플로우 포밍 공정을 Fig 1(b)의 축대칭 문제로 근사화하여 해석을 수행하였다. 실제 플로우 포밍 공정에서는 회전하는 성형롤에 의해 원주방향으로 소재유동이 발생하나 반경방향으로의 변형에 비해 극히 미미하다고 가정하면 2차원 축대칭 문제로 근사화 할 수 있다. 유한요소해석에서는 모든 공구는 강체(Rigid body)로 가정하였으며, 소재는 공정 전반에 걸쳐 탄성에 비해 소성변형이 지배적이므로 강소성(Rigid plastic)체로 가정하였다. 공정은 크게 3가지 단계로 구분된다. 1단계는 소재 안착후 상부 맨드릴(Mandrel)이 하강하여 소재를 고정하는 단계이고, 2단계는 하부 맨드릴에 의해 고정된 소재가 회전함과 동시에 모서리가 둥근 롤을 중심에서 외곽으로 점진성형하면서 1단계에 의해 휘어진 관재를 바르게 펴는 공정이다. 그리고 3단계는 성형롤이 설계된 경로로 이동하면서 제품의 형상을 만들어내는 공정이다. 상기 3단계의 성형공정에 대한 2차원 해석이 모두 수행되었으며, 각 단계 이후 소재내부의 변형률, 데미지(Damage) 등의 정보는 다음 단계에서 초기 조건으로 고려되었다.

플로우 포밍용 소재는 자동차용 열연강판인 SAPH400이 사용되었으며, 플로우 포밍 공정중 발생할 수 있는 표면크랙을 예측하기 위해 Cockcroft & Latham의 연성과피이론[6]이 사용되었다. 임계연성과단값(Critical damage value)을 측정하기 위해서 Fig. 2와 같이 노치형상이 다른 3종류의 인장시편을 이용한 인장시험이 수행되었다. 실험과 동일한 조건하에서 전산모사하여 실험에서 크랙이 발생한 변위에서의 데미지를 측정하여 임계연성과단

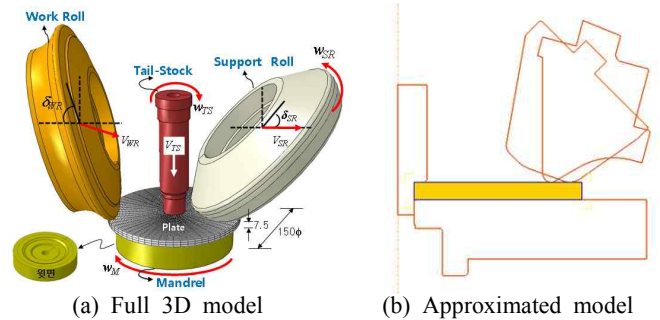


Fig. 1 Approximation of flow forming to axisymmetry problem

값으로 결정하였다. 3종류의 노치 인장시편의 실험 및 해석결과 임계연성과단값은 0.620~0.645의 값을 보였으며, 본 연구에서는 이중 최소값인 0.620을 임계연성과단값으로 간주하였다.

Fig. 3은 SAPH400(7.5t) 열연강판의 플로우 포밍 실험결과 및 축대칭 해석결과와 3차원 형상을 보여주고 있다. 축대칭 근사 해석을 통해 비교적 실험과 유사한 변형형상 보여주고 있으며, 데미지 분포는 최대 0.201 이내로 과도한 변형에도 불구하고 공정중 표면크랙 발생에는 안정적인 것으로 판단된다.

2차원 축대칭 문제의 해석 정밀도를 분석하기 위하여 공정중 특정한 형상에서의 실험 및 해석 결과를 비교분석하였다. Fig. 4(a)의 성형단계는 롤러가 3번부위에서 소재의 두께 방향으로 비스듬히 진행함으로써 3번부위의 보스(Boss) 부를 형성하기 위한 단계이다. 1,2,4번 부위는 두께를 측정하여 비교하였으며, 3번 부위는 보스부의 높이를 측정하여 비교하였다. 그 결과 Fig. 4(c)와 같이 두께는 0.5mm 이내, 높이는 1.4mm 이내의 오차를

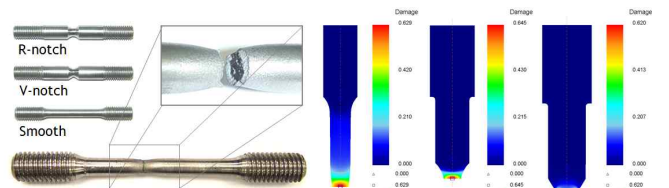


Fig. 2 Determination of critical damage value

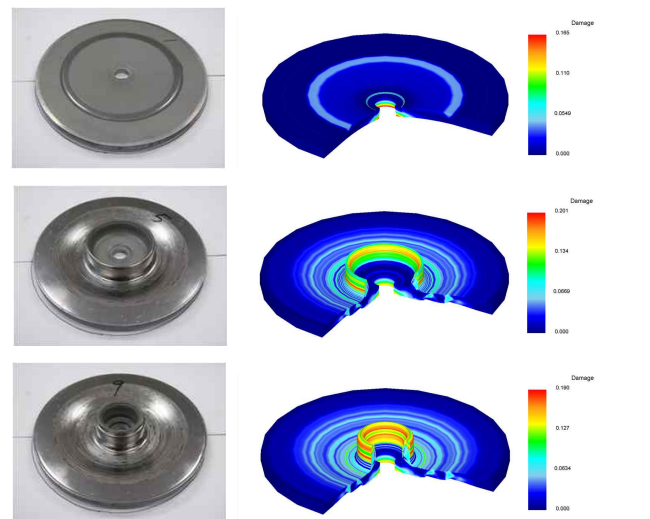


Fig. 3 Experimental and FE analysis results

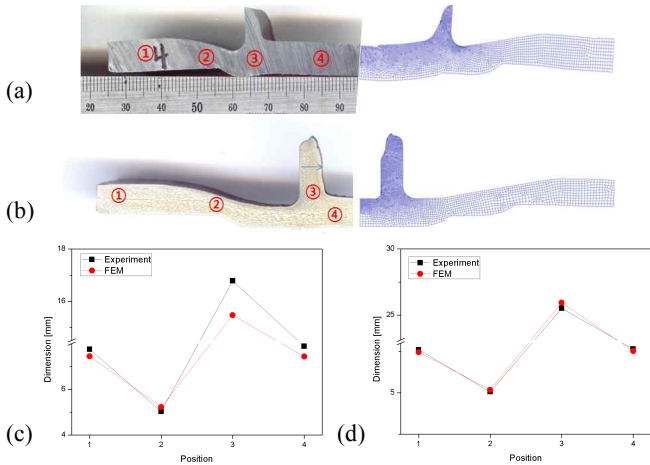


Fig. 4 Comparison of experiments and FEA

보였다. Fig.4(b)는 보스부의 최종 성형 직전 단계에서의 실험 및 결과를 보여주고 있다. 앞선 경우와 마찬가지로 1,2,4번 부위는 두께를 측정하였으며, 3번 부위는 높이를 측정하였다. 실험과 해석이 거의 유사한 형상을 보였으며, 특히 중심 및 보스부의 끝단에서는 롤러와 접촉되지 않음에도 불구하고, 자유성형된 모습이 거의 유사하게 나타났다. 또한 Fig. 4(d)에서와 같이 각 부위에서의 두께 및 높이 역시 실험과 해석이 매우 유사한 값을 보였다. 따라서, 2차원 축대칭 모델로 근사화된 해석이 성형공정 중 소재의 유동을 비교적 잘 예측하는 경향을 보이는 것으로 보여진다.

### 3. 롤러 하강 깊이의 영향

플로우 포밍 공정에서는 롤러의 하강 및 평행이동에 의해 소재가 중심으로 밀려남으로써 보스부가 형성된다. 주어진 두께의 소재에서 보스부의 높이를 크게 하기 위해서는 롤러의 하강 깊이가 클수록 유리하다. 본 연구에서는 롤러의 하강 깊이에 따라 보스부를 형성함에 있어 소재에 가해지는 영향을 분석하기 위해 Fig. 5와 같이 Case 1~4까지 롤러의 하강 깊이를 달리하여 해석을 수행하였다. 롤러가 소재의 두께방향으로 진입하는 각도는 10°로 고정하였으며, Case 4의 경우 7.5t 두께의 소재를 기준으로 50%인 4.25mm까지 하강하였으며, Case 3,2,1의 경우는 이보다 1,2,3mm씩 하강 깊이를 줄여나갔다.

해석은 모든 경우에 있어서, 보스부의 직경 및 두께가 동일할 때까지 수행되었으며, 해석 결과 각 Case별 최대인장변형률 및 데미지 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 하강 깊이는 보스부를 형성하기 위한 체적과 연관되어 있으므로, 하강 깊이가 가장 큰 Case 4의 경우가 보스부의 높이가 가장 큰 것으로 나타났으며, 하강 깊이가 가장 작은 Case 1에서 최대인장변형률이 가장 크게 나타났다. Fig. 6(a)는 각 경우에 대해 최대인장변형률을 보여주고 있는데 하강 깊이가 작아짐에 따라 오히려 최대인장변형률은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 롤러 하강 깊이가 작을수록 변형할 수 있는 소재의 체적이 작음에 따라 변형부위의 변형이 크게 작용함에 기인한 것으로 판단되며, 따라서, 보스부를 높게 성형하기 위해서는 롤러의 반경방향으로의 행정 거리를 줄이고 하강 깊이를 크게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

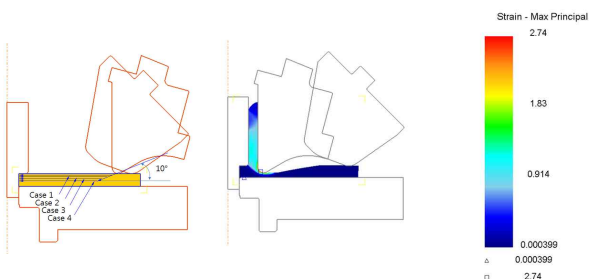
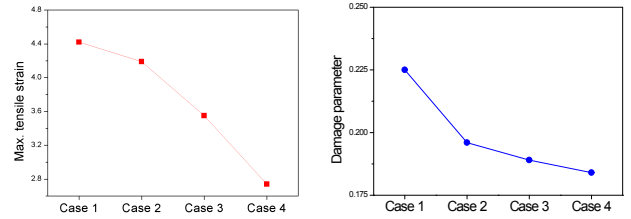


Fig. 5 Maximum tensile strain distribution of Case 4



(a) Max. tensile strain (b) Damage value  
Fig. 6 Effect of roller path on max. strain and damage of material

하강 깊이가 큰 경우가 보스부의 형성을 유리하게 하더라도, 성형중 표면크랙 등의 결함을 유발할 수 있으므로, 각 경우에 대한 데미지를 계산하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. 앞서 측정된 결과 임계연성파단값은 0.62 인데 반해 Case 1~4까지 모든 경우에 있어서 데미지 값이 최대 0.225이하로 나타남에 따라 크랙이 발생할 가능성은 극히 미미한 것으로 나타났다. 또한, 롤러의 하강 깊이가 클수록 오히려 소재가 받는 데미지는 작은 것으로 나타났다. 이는 앞의 최대인장변형률의 결과와 유사하며, 따라서, 플로우 포밍 공정시 롤러의 하강 깊이가 클수록 소재의 변형량은 작아지며, 데미지도 작아지는 것으로 판단된다. 또한, 롤러의 하강 깊이가 커질수록 변형이 가해지는 소재의 체적이 커짐에 따라 롤러가 받는 하중이 증대될 것으로 판단되나, 2차원 축대칭 근사화 해석에서는 회전하는 롤러의 하중을 계산할 수 없으므로 이에 대한 영향은 3차원 해석을 통해 분석 가능하다.

### 4. 결론

플로우 포밍 성형공정은 성형물의 회전속도가 빠르고 경로가 매우 복잡하여 3차원 해석은 많은 계산시간을 요구함에 따라 즉각적인 설계변경에 대응하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 축대칭 모델로의 근사화 해석을 수행하여 실험결과와 비교분석함으로써 적용 가능성을 검토한 결과, 보스부를 형성하기 위한 모델에 대해서는 변형형상을 비교적 잘 예측하는 경향을 보였다. 그러나, 플로우 포밍 공정에서 가장 중요한 설계인자인 고속 회전에 의한 롤러의 마모 및 성형하중 예측을 위해서는 해석시간 단축을 위한 3차원 해석기법의 개발이 요구된다.

### 후기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Wong, C.C., Dean, T.A. and Lin, J., "A review of spinning, shear forming and flow forming processes", Int. J. of machine tools and manufacture, 43, 1419-1435, 2003.
2. Nagele, H., Worner, H. and Hirschvogel, M., "Automotive parts produced by optimizing the process flow forming-machining", J. of materials processing technology, 98, 171-175, 2000.
3. Wong, C.C., Dean, T.A. and Lin, J., "Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles", J. of materials processing technology, 153-154, 60-66, 2004.
4. Roy, M.J., Klassen, R.J. and Wood, J.T., "Evolution of plastic strain during a flow forming process", J. of materials processing technology, 209, 1018-1025, 2009.
5. Wong, C.C., Dean, T.A. and Lin, J., "Effects of roller path and geometry on the flow forming of solid cylindrical components", J. of materials processing technology, 167, 344-353, 2005.
6. Cockcroft, M.G. and Latham, D.J., "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals, 96, 33-39, 1968.