

점진성형의 공정평가를 위한 유한요소해석에서 묘사기법 적용에 관한 비교 연구[§]

박준수* · 변상민*†

* 동아대학교 기계공학과

Comparative Study on Description Schemes to Perform Finite Element Analysis in Incremental Forming Process

Jun Soo Park*, Sang Min Byon**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.,

(Received April 20, 2012 ; Revised August 7, 2012 ; Accepted August 8, 2012)

Key Words: Incremental Forming(점진성형), Description Scheme(묘사 기법), Finite Element Analysis(유한요소해석), Lagrangian Description(라그랑지언 묘사), ALE Description(에이엘이 묘사)

초록: 점진성형은 공구 운동으로 소재의 국부 소성변형 영역을 전체 소재에 확장시켜 목표 형상으로 변형시키는 냉간 성형공정이다. 본 논문에서는 점진성형의 유한요소해석 시 묘사기법에 관한 연구를 수행하였다. 고찰할 묘사기법으로 라그랑지언 묘사법과 ALE 묘사법을 선택하였다. 미끄럼 경계기법도 공구와 접촉표면에서 요소의 찌그러짐을 극복하기 위한 방법중의 한가지 경우로 고찰하였다. 묘사기법과 경계기법의 다양한 조합 중에 ALE 묘사법과 연계한 미끄럼 경계기법의 경우가 요소의 찌그러짐을 가장 완화 시켰다. 이 방법이 최종 단계 변형까지 점진성형 해석을 지속할 수 있도록 해주는 유일한 조합인 것으로 나타났다. 이에 반해, 라그랑지언 묘사법 및 순수 ALE 묘사법은 점진성형 해석 중에 요소의 찌그러짐이 극심하여 최종 변형 형상에 도달하기 오래 전에 해석이 중단되는 상태를 보였다.

Abstract: Incremental forming is a cold working process in which a small part of the material is being deformed and the area of local deformation is moving over the entire material. In this paper, we study description schemes to perform finite element analysis for the incremental forming. The selected description schemes to examine are the Lagrangian description and the arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) description. The sliding boundary scheme coupled with ALE is also examined to overcome the distortion problems of elements on the contact surface. Results show that the ALE description with the sliding boundary scheme is most favorable in overcoming the distortion of elements. This description leads to make the simulation continued to the final stage of the incremental forming. On the other hand, the Lagrangian description as well as the original ALE description makes the elements much distorted and the analysis is stopped long before arriving at the final shape of deformation.

- 기호설명 -

R_{MD} : 맨드릴의 반경(mm)
 R_{SR} : 지지롤의 반경(mm)
 R_{TS} : 테일스틱의 반경(mm)
 R_{WP} : 소재의 반경(mm)
 R_{WR} : 작업롤의 반경(mm)
 T_{WP} : 소재의 두께(mm)

V_{SR} : 지지롤의 진행속도(mm/min)
 V_{WR} : 작업롤의 진행속도(mm/min)
 δ_{SR} : 지지롤 중심축의 각도(°)
 δ_{WR} : 작업롤 중심축의 각도(°)
 ω_{MD} : 맨드릴의 회전속도(rpm)
 ω_{SR} : 지지롤의 회전속도(rpm)

1. 서론

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2012. 4. 5-6, 영남대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, smbyon@dau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

점진성형(Incremental forming)의 시초는 농기구 등을 생산하기 위해서 해머를 이용하여 소재를 조금씩 두들겨서 소재의 형상을 구현한 공정이라고

볼 수 있다. 소재의 형상을 전체적으로 변형시키기 위해서는 막대한 성형하중이 필요하지만 국부적으로 변형시키는 데는 작은 하중으로 충분하다. 이 공정은 큰 변형이 요구되는 제품을 작은 하중으로 가공할 수 있다는 장점이 있는 반면에 시간이 많이 걸리고 해머에 의해 타격되는 부분이 불연속적이므로 제품완성 후 큰 외력을 받았을 때 응력집중을 유발할 수 있다. 이와 같은 단점을 해결하기 위해서 최근의 점진성형은 소재의 일부분을 변형시키는 공구(Tools)를 소재 표면을 따라 고속으로 회전하면서 소재 전체의 연속적 변형을 유발하도록 하였다. 본 공정을 통해서 만든 제품은 소재의 소성 변형 흐름이 끊어지지 않고 치밀하게 연결되어 있기 때문에 소재 내부의 미세 조직간의 결합력이 타 공정 제품에 비해 우수한 특성을 가지고 있다. 그러나, 점진성형에서 사용한 공구가 소재 표면에서 주로 소성변형을 유발하기 때문에 소재 표면으로 갈수록 소성변형의 변형 정도가 더 극심한 특성을 가지고 있다^(1,2). 이러한 소성변형 형태는 이 공정을 수치적 방법으로 해석하고자 할 때 큰 어려운 점을 유발한다.

소성가공은 공구를 이용하여 소재의 초기 형상을 최종 형상으로 변형시키는 공정이므로 상당히 경로의존적이다. 따라서, 전통적으로 소성가공 공정을 평가하기 위해 유한요소해석을 실시할 경우에 라그랑지언(Lagrangian) 묘사기법을 채용해 왔다⁽³⁾. 그러나, 점진성형 공정과 같이 표면에 급격한 소성유동 변화가 존재하여 격자가 심하게 변형되는 경우는 더 이상 해석이 진행되지 않을 수 있다. 이것을 고려하여 우리는 또 다른 묘사기법인 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)를 본 연구에 도입하였다. 이 방법은 라그랑지언 묘사기법에 격자와 소재간의 상대 이동이 가능한 오일러언(Eulerian) 묘사기법을 결합한 방법이다^(4,6). 소성가공에 ALE 를 적용은 사례는 Ghosh 등⁽⁷⁾에서 볼 수 있다.

점진성형 공정을 이차원(2-Dimensional) 유한요소해석으로 접근하기 위한 노력이 있었다⁽⁸⁾. 그러나, 점진성형 공정은 연속적인 국부적인 변형에 의해 소재성형이 실현되므로 원칙적으로 이차원 해석이 될 수 없다. 삼차원 접근법에서는 요소격자의 찌그러짐이 해석 중단에 지배적인 영향을 끼치기 때문에 이것이 점진성형 해석 시 장애가 된다. 본 연구에서는 점진성형공정의 공정평가를 위한 삼차원 유한요소해석 시 발생하는 해석 중단 문제를 극복하기 위해 묘사기법 변경에 따른 해결

방법을 모색하고자 한다.

먼저, 점진성형 공정의 삼차원 유한요소해석을 소성변형의 전통적인 묘사법인 라그랑지언 기법으로 적용하였다. 두 번째로 ALE 묘사기법을 동일한 조건에 적용하여 라그랑지언 기법과 어떤 차이가 발생하는지 고찰하였다. 세 번째로 소재 표면에 극심한 변형 특성을 가지는 점진성형 공정의 해석상의 난점을 극복하기 위해 공구와의 접촉부에 미끄럼 경계영역을 묘사기법과 같이 도입하였다. 해석대상으로 자동변속기용 허브 클러치(Hub clutch)를 선정하였다. 묘사기법과 미끄럼 경계 선택에 따른 해석진행 상태를 고찰하여 최종 제품 형상에 도달하게 하는 기법을 도출할 것이다.

2. 묘사기법과 미끄럼 경계

2.1 묘사기법

변형하고 있는 소재내의 한점에서 응력의 평형 방정식을 가상일의 원리(Principle of virtual work)를 적용하여 적분 방정식으로 만들고 유한요소 이산화(Finite element discretization) 절차를 거치면 다음과 같은 행렬방정식 형태로 유도할 수 있다.

$$({}^t \mathbf{K}^L + {}^t \mathbf{K}^A) \Delta \mathbf{u}^{(i)} - {}^t \mathbf{K}^A \Delta \mathbf{u}^{g(i)} = \mathbf{f}^{ext} - \mathbf{f}^{(i-1)} \quad (1)$$

여기서, ${}^t \mathbf{K}^L$ 는 라그랑지언 묘사와 관련된 강성행렬(Stiffness matrix)을 나타낸다. ${}^t \mathbf{K}^A$ 는 ALE 묘사와 관련된 소재절점과 요소절점 사이의 상대운동 강성행렬(Convective stiffness matrix)을 나타낸다. $\Delta \mathbf{u}^{(i)}$ 및 $\Delta \mathbf{u}^{g(i)}$ 는 각각 시간구간 Δt 내에서 수렴 반복수 (i)에서의 소재절점 및 요소절점의 변위중분 벡터이다. \mathbf{f}^{ext} 및 $\mathbf{f}^{(i-1)}$ 는 각각 외력(External force)과 내력(Internal force)을 나타낸다.

비선형 대수방정식인 식 (1)를 Newton-Rhapson 방법에 의해 풀면 수렴 반복수 (i)에서 해인 $\Delta \mathbf{u}^{(i)}$ 및 $\Delta \mathbf{u}^{g(i)}$ 를 계산할 수 있고 이것은 식 (2) 및 (3)에 의해서 계속 누적되어 소재절점 및 요소절점의 변형중 이동한 경로가 예측된다.

$$\mathbf{u}^{(i)} = \mathbf{u}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{u}^{(i)} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}^{g(i)} = \mathbf{u}^{g(i-1)} + \Delta \mathbf{u}^{g(i)} \quad (3)$$

라그랑지언 기법에서는 식 (1)에서 ${}^t \mathbf{K}^A$, $\Delta \mathbf{u}^{g(i)}$, $\mathbf{f}^{(i-1)}$ 가 없어지고 식 (3)은 불필요하게 된다. ALE 묘사기법에서는 식 (1)의 모든 항이 존재하고 $\mathbf{u}^{(i)}$ 및 $\mathbf{u}^{g(i)}$ 는 식(2) 및 식 (3)에 의해서 각각 소재절점 및 요소절점의 현재 진행 위치로 변경된다.

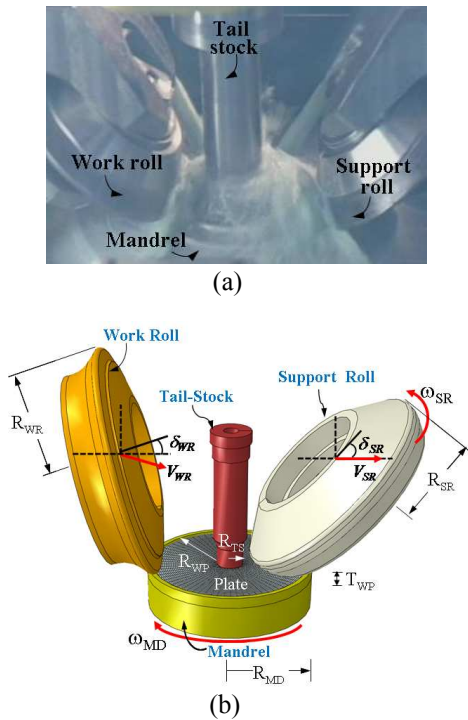


Fig. 3 Process geometry of an incremental forming and finite element meshes of material used in the analysis (a) actual working scene (b) analysis model

3. 점진성형 공정 및 유한요소모델

본 논문에서 묘사기법에 따른 점진성형 공정의 해석 과정을 고찰하기 위해서 선택한 공정은 자동 변속기용 허브 클러치 성형공정이다. 이 공정은 점진성형 중에 소재의 표면을 밀어서 두께를 육성시키는 가장 해석하기 힘든 경우에 해당되므로 묘사기법에 따른 해석 결과의 차이를 가장 현저하게 고찰할 수 있다. Fig. 3에 실제 성형장비를 이용한 성형 장면(Fig. 3(a))과 이것의 공정 기하학을 솔리드 모델링한 공구(Tools) 및 유한요소해석을 하기 위해 분할한 소재의 유한요소격자를 나타내었다(Fig. 3(b)).

원판 모양의 초기 소재를 고정 혹은 소성변형시키기 위해 4 가지 공구가 사용되었다. 첫째로 소재를 장착하는 동시에 소재의 밀면 형상을 소성 변형 할 수 있도록 금형역할을 하는 맨드릴(Mandrel)이 있다. 두번째로, 소재를 맨드릴 위 중심에서 고정하기 위해 눌러주고 맨드릴과 함께 회전하는 역할을 하는 테일스톡(Tail stock)이 있다. 세번째로, 소재 상면에서 회전하면서 소재를 눌러주는 역할을 하는 지지롤(Support roll)이 있다. 마

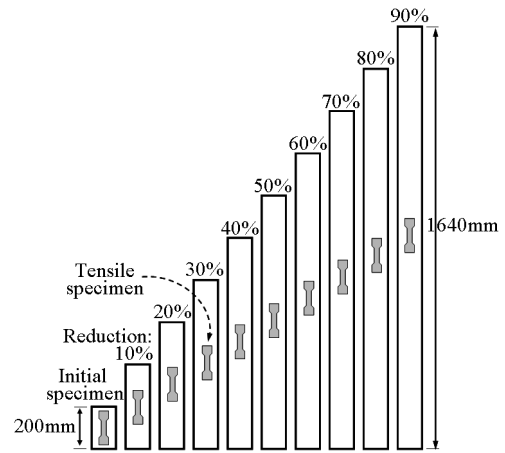


Fig. 4 Schematic geometry of tensile specimens cut from rolling strips to measure flow stress

지막으로, 원판의 상면에 있는 소재를 외부에서 내부쪽으로 밀어서 소재의 중심부에 두께가 두꺼운 원통을 생성시켜주는 역할을 하는 작업롤(Work roll)로 이루어져 있다. 작업롤은 구동 회전 속도가 없이 소재의 회전속도에 따라서 피동적으로 회전하면서 외측에서 내측으로 진행되는 것이 특징이다. Fig. 3에 표시된 공정변수 기호의 의미는 논문 첫 장의 기호설명에 기술되어 있다.

4. 유동응력 실험

유동응력(Flow stress)은 소재가 소성변형 할 때 소재 내부의 변형저항 강도이다. 냉간 소재의 경우 가공이력 즉, 가공 경화된 정도에 따라 소성변형의 변형저항 강도는 극심하게 상승한다. 가공 경화의 정도에 따라 소재의 소성변형 개시 항복응력을 측정하여 식으로 만든 것이 유동응력식(Flow stress equation)이며 소재의 소성변형 유한요소해석 시 가장 중요한 소재 물성치이다.

소재를 가공경화시키기 위한 성형 방법은 다양하지만 소재가 판재일 경우에는 압연으로 가공경화를 효율적으로 얻을 수 있다. 압하율을 0%에서 90%까지 10%씩 점차적으로 증가하면서 압연함으로써 압연 후 소재의 두께가 감소하고 길이가 점차적으로 늘어난다. 압하율 별로 가공 경화된 소재에서 인장시편을 절단가공 하는 방법을 Fig. 4에 보여 주고 있다. 소재의 선·후단부는 압연의 가속 및 감속부이므로 시편채취에서 배제하고 정상 압연부인 소재 중심에서 인장시편을 절단하여 기계 가공하였다. 가공 경화된 각각의 판형 인장시편을 인장 테스트기에 장착하여 항복응력을 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 소재의 유동응력식 및 해석조건

본 연구에 사용된 소재는 성형성과 용접성이 우수한 고강도 자동차용 구조용 강판인 SPFH590 이다. 이것은 본 연구에서 소개한 자동변속기용 허브 클러치 성형공정(Fig. 3)의 소재로 사용된다. Fig. 5 는 본 소재를 압연으로 가공 경화한 뒤 압연 후 판재로부터 채취한(Fig. 4) 인장시편의 인장시험을 통해 얻은 유동응력 그래프를 나타낸 것이다. 원형 기호는 각 가공경화 변형률에 해당하는 항복응력 실험 결과 값을 나타내고 있고 실선은 각 항복응력의 추세선을 나타내고 있다. 이 추세선을 수식으로 나타낸 것이 본 소재의 유동응력식이다. 유동응력을 변형률의 함수로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 849.9(0.1679 + \bar{\epsilon})^{0.2433} \quad (MPa) \quad (4)$$

위의 유동응력식은 유한요소해석 모델에 소성가공되는 소재의 변형특성을 나타내는 물성치로 입력되었다.

Table 1 Process conditions used in finite element analysis

Groups	Process conditions	Values
Mandrel	R _{MD}	84.5 mm
	ω _{MD}	600 rpm
Support roll	R _{SR}	105 mm
	V _{SR}	600 mm/min
	δ _{SR}	45°
Tail Stock	ω _{MD}	120 rpm
	R _{TS}	12.5mm
Work roll	R _{WR}	110 mm
	V _{WR}	700 mm/min
	δ _{WR}	15°
Workpiece	R _{WP}	75 mm
	T _{WP}	7.5 mm

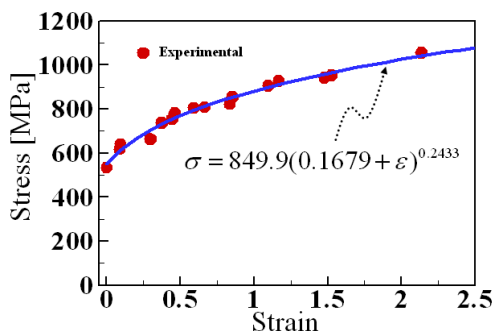


Fig. 5 Flow stress curve for automotive structural steel, SPFH590

점진성형 공정의 예로서 본 연구에서 채용한 자동변속기용 허브 클러치 가공 공정은 원판 형태의 초기 소재를 가공하기 위해서 네 개의 공구(Tool) 즉, 맨드릴, 테일스톡, 지지롤, 작업롤이 사용된다(Fig. 3). 본 해석을 수행한 소재 및 각 공구 별 기하학 및 공정조건을 표 1 에 요약하였다.

5.2 소재의 성형절차 및 예비성형체 해석

본 논문에서 묘사기법에 따른 점진성형 공정의 해석을 고찰하기 위해서 선택한 자동변속기용 허브 클러치의 유동성형 해석은 (i)소재 장착 및 예비 성형 단계와 (ii)작업롤을 이용한 본 성형 단계로 나누어 진다. 이것을 Fig. 6 에 상세하게 순서대로 나타내었다. 소재 장착 단계는 소재 중심에 압력을 가해서 고정시키고 또한 이때 발생하는 굽힘 변형을 펴서 이후의 본 성형 단계에 가공이 원활하게 이루어 지도록 하는 것이 주 역할이다.

소재 장착 및 예비 성형단계에서 소성해석 시 기본 묘사기법인 라그랑지언 해석을 수행했을 때 해석상에 문제가 발생하는지 고찰하였다. 소재 장착 단계는 Fig. 6 의 순서도에서 설명한 바와 같이 다시 3 단계로 구성되어 있는데, 각 세부 단계별 해석결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 유한요소해석에 사용한 원주방향, 반경방향, 두께방향의 격자 수는 각각 76 개, 39 개, 3 개이었다.

소재 장착 단계는 Fig. 7(a)에서와 같이 소재를 맨드릴 위에 장착하는 단계로부터 시작된다. 두께 방향으로 변형 양상을 보이기 위해 원판의 단면을 가상으로 절단한 상태를 보여주고 있다. 원판이 맨드릴 위에 장착되고 난 이후에 공구가 작용하는 단계를 살펴 보면, 먼저 테일스톡이 소재를 위에서 압착하게 되고(Fig. 7(b)) 이 때, 소재의 중심부

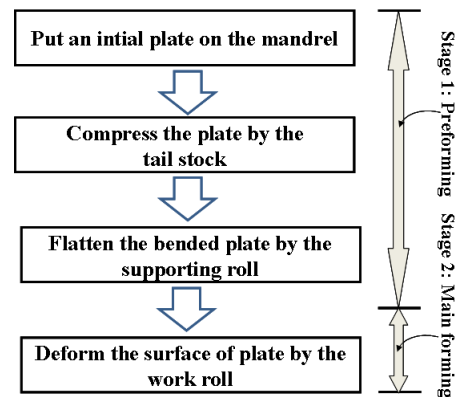


Fig. 6 Process flow chart for the plastic deformation of automotive hub clutch

는 맨드릴에 접촉하게 되지만 중심부에서 멀수록 소재가 위로 들리게 된다. 지지롤이 회전을 하면서 원판 소재 중심부에서 외측으로 압력을 가하면서 이동한다(Fig. 7(c)). 본 과정을 통해서 이전 단계에서 들렸던 소재가 맨드릴에 강하게 압착하게 된다. Fig. 7 에 라그랑지언 해석을 수행하였을 때 격자 형상과 유효변형률 분포를 동시에 보여주고 있다. 변형량이 많지 않고 변형 형태가 단순하므로 이 단계까지는 일반적인 라그랑지언 해석기법을 수행해도 큰 문제가 되지 않는 것을 알 수 있다.

5.3 묘사기법에 따른 본 성형 해석결과 비교

작업롤을 이용한 본 성형 단계는 작업롤이 소재의 표면을 외부에서 내부 쪽으로 밀어서 소재의 중심부에 증공형 원통을 만드는 공정으로 요약된다. 따라서, 표면에 극심한 전단변형이 수반되고 격자의 상태가 매우 불량하게 된다. 전통적인 라그랑지언 기법을 사용했을 경우에 작업롤을 외부에서 중심부로 약간 이동한 시점에 해석이 중단되었다. Fig. 8 에 라그랑지언 기법을 사용하여 해석이 중단된 상태에서의 작업롤의 위치를 표시하였다(작업롤의 중심부가 테일스톡의 중심부와 88mm 떨어진 위치). 이 위치에서 여러 묘사기법과 경계처리법에 따른 격자의 형상을 비교하여 어떤 특징이 있는지 고찰하였다.

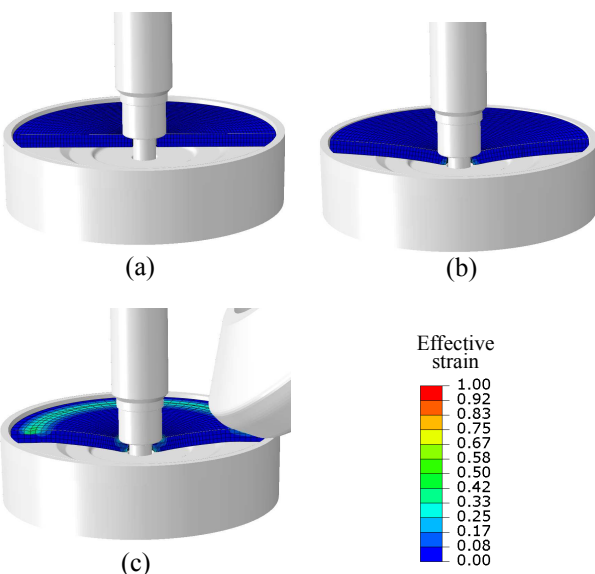


Fig. 7 Deformation steps for the performing stage (a) the step to put an initial plate on the mandrel (b) the step to compress the plate by the tail stock (c) the step to flatten the banded plate by supporting roll

Fig. 8(a)는 라그랑지언 묘사기법 및 경계를 채용한 경우에 작업롤과의 접촉부 경계형상과 격자상태를 보여주고 있다. 접촉부 경계형상은 작업롤과의 접촉 외형을 구현하지 못하고 내부의 격자도 매우 불량한 상태를 나타내고 있다. 이에 비해, ALE 묘사기법과 라그랑지언 경계를 채용한 경우(Fig. 8(b))에는 내부의 격자를 양호하게 처리하는데 치중하는 해석이 되었기 때문에 경계 부분이 실제 형상을 구현하지 못하고 있음을 알 수 있다. 내부에서는 라그랑지언 묘사기법을 채용했고 경계에서 미끄럼 경계를 채용한 경우(Fig. 8(c))에는 작업롤과의 경계 형상은 비교적 많이 개선되었지만 내부의 격자 상태는 여전히 불량한 것으로 나타났다. Fig. 8(d)는 내부에서 ALE 묘사기법, 경계에서 미끄럼경계를 채용한 경우에 접촉부 경계형상과 격자상태를 보여주고 있다. 작업롤과의 경계형상이 정확하게 나타나고 내부의 격자형상도 매우 안정적인 형태를 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 맨드릴의 깊이가 깊이짐에 따라 소재 밀 부분의 두께가 증가하여야 되는데 이러한 예측이 본 묘사기법에서 이루어 지는 것을 알 수 있다.

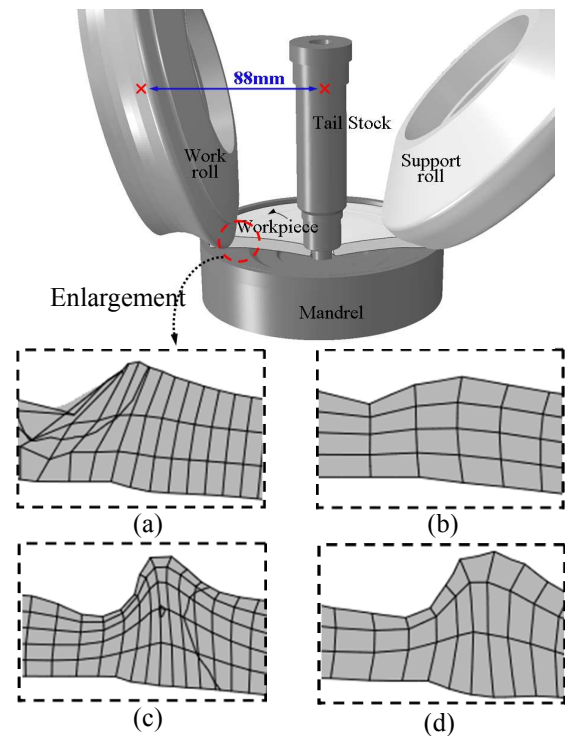


Fig. 8 Contact boundary geometries with work roll and mesh distortions for four different description schemes: (a) Lagrangian description scheme and Lagrangian boundary (b) ALE description and Lagrangian boundary (c) Lagrangian description and sliding boundary (d) ALE description and sliding boundary

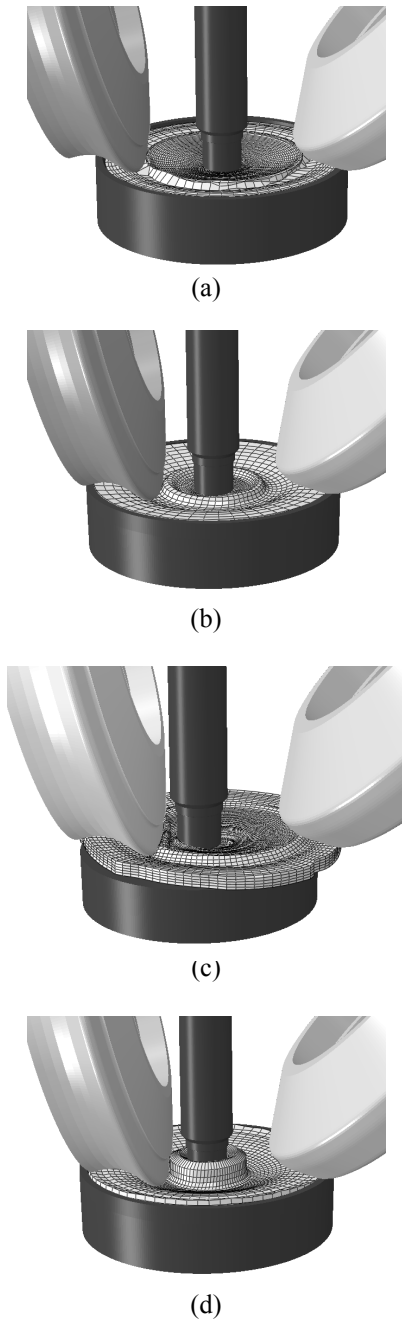


Fig. 9 Final workpiece shapes performed without analysis termination by mesh distortion for four different description schemes: (a) Lagrangian description scheme and Lagrangian boundary (b) ALE description and Lagrangian boundary (c) Lagrangian description and sliding boundary (d) ALE description and sliding boundary

선택한 묘사기법에 따라 유한요소해석이 중간에 중단 없이 최종적으로 진행하는 정도를 평가하였다. Fig 9(a)는 라그랑지언 묘사기법과 라그랑지언 경계를 채용한 경우의 해석 결과이다. 해석 초기 단계에서 소재 표면의 격자 찌그러짐이 발생하여

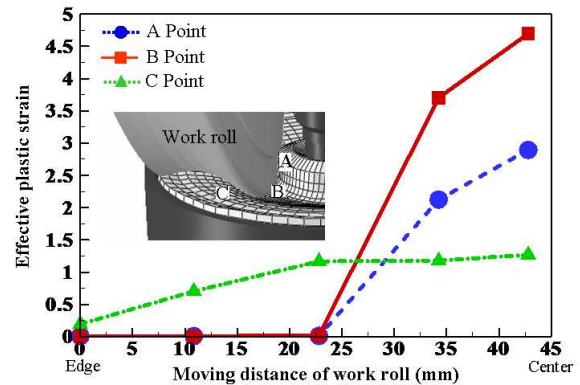


Fig. 10 Variation of effective plastic strain of material with moving distance of work roll

해석이 중단되었다. 소재 윗면에서 작업롤에 의한 전단변형이 제대로 이루어 지지 않았고 소재 밑면이 맨드릴 표면의 요철 형상에도 밀착이 잘 이루어지지 않은 것을 알 수 있다.

Fig. 9(b)는 해석영역에 ALE 묘사기법을 적용하고 경계영역은 라그랑지언 경계를 채용하고 있는 경우를 나타내고 있다. Fig. 9(a)에 비해, 상당히 해석이 진행이 되었으나 Fig. 8(b)에서 언급한 것과 같이 접촉 경계 부분의 전단 변형이 과소 계산되어 작업롤의 이송거리에 비해 표면에 생성된 전단 변형 소재 양이 매우 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 9(c)는 해석영역에 라그랑지언 묘사기법을 채용하고 경계영역은 미끄러짐 경계를 채택한 경우이다. ALE 묘사기법을 영역에 적용한 Fig. 9(b)의 경우 보다 더 해석이 진행된 것으로 보이나 표면의 변형만 주로 과대 해석 되어 소재가 이탈하는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 소재 내부의 변형해석 방법과 소재 표면의 해석방법이 서로 균형이 깨어질 경우 해석영역 전체에 문제가 발생할 수 있다.

Fig. 9(d)는 해석영역에 ALE 묘사기법을 적용하고 경계영역에서는 미끄러짐 경계를 채용해서 소성변형 유한요소해석을 수행한 경우를 나타내고 있다. 작업롤이 테일스택에 완전히 도달하여 공정이 완료될 때까지 해석이 진행된 것을 알 수 있다. 이와 같이 ALE 묘사기법 및 미끄러짐 경계가 동시에 사용될 경우, 표면에 집중적으로 발생하는 격자 찌그러짐 현상을 최소화 할 수 있고 또한 두께 방향의 수치적 변형균형도 유지할 수 있는 것을 알 수 있다. 본 방법은 표면의 유한요소 격자가 극심한 변형을 겪는 점진 성형 공정해석을 수행하는데 매우 적합한 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 가장 성공적인 해석기법(즉, 해석영역:

ALE 묘사기법, 경계영역: 미끄러짐 경계)의 경우에 대해 작업롤의 진행 위치에 따른 소재의 소성유효 변형률을 세 점에 대해 나타내었다. A 점은 작업롤에 의해 표면의 소재가 테일스틱쪽으로 밀려 올라간 최상측 위치를 나타내고, B 점은 작업롤에 의해 현재 가장 큰 압력을 받으면서 표면의 소재가 밀려 올라가는 위치를 나타내고, C 점은 초기에 작업롤에 의해 압력이 가해진 외곽부 위치를 각각 나타낸다. A 점, B 점, C 점은 각각 원형 기호, 사각형 기호, 삼각형 기호로 나타내었다.

C 점은 작업롤의 초기 위치에서부터 압력을 받아 변형이 이루어 지고 이 점을 지난 이후부터는 변형이 더 이상 변화가 없는 것을 알 수 있다. A 점과 B 점은 작업롤의 초기 위치에서는 외곽부의 소재 밀림에 의해 강체 이동만 하다가 작업롤의 위치가 어느 이상(약 22.5mm)에서 급격하게 이 점들에서 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 작업롤의 압력이 직접적으로 작용하는 B 점의 변형이 A 점보다 더 급격하게 증가하고 비선형성이 더 큰 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 산업적으로 중요한 점진성형의 공정분석을 위해서 묘사기법과 경계처리법에 따른 해석수행 능력을 평가하였다. 이를 위해서 묘사기법으로 소성변형의 전통적인 묘사법인 라그랑지언 묘사기법과, 라그랑지언 묘사기법과 오일러언 묘사기법의 중간적인 묘사법인 ALE 묘사기법을 도입하였다. 그리고 소재 표면의 극심한 변형 특성을 고려하여 미끄럼 경계처리법을 또한 도입하였다. 라그랑지언 묘사기법, ALE 묘사기법, 라그랑지언 경계처리법, 미끄럼 경계처리법의 몇 가지 조합으로 자동차용 허브 클러치 공정에 적용하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

라그랑지언 묘사기법으로는 점진성형 공정을 유한요소해석으로 끝까지 수행하기 어렵다. 그 이유는 해석 초기 단계에서부터 소재 표면의 격자 찌그러짐이 발생하여 더 이상 해석을 진행할 수 없기 때문이다. 해석 영역 내에 ALE 묘사기법을 적용하고 해석 경계에서 라그랑지언 경계처리법을 채용하는 경우는 접촉 경계 부분의 전단 변형을 과소 계산하여 실질적인 성형 형상을 얻기 힘들다. 해석영역 내에서는 기존의 라그랑지언 묘사기법을 채용하고 해석 경계에서 미끄럼 경계를 채용하는 경우는 소재 표면의 변형만 주로 과대 해석이 되

어 소재의 전체적인 소성변형 균형이 깨지는 문제가 발생한다.

해석영역 내에 ALE 기법을 적용하고 해석 경계에서 미끄럼 경계영역을 채용했을 때 점진 성형공정의 실제 종료 부분까지 해석을 수행할 수 있었다. 이것은 해석영역 내에서 ALE 묘사기법이 격자 찌그러짐을 전체적으로 조정해 주고 해석경계에서 미끄러짐 경계처리법이 요소절점이 변형이 극심한 경계부분으로 쏠림 현상을 막아 주는 역할을 하기 때문인 것으로 파악되었다.

후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Emmens, W. C., Sebastiani, G. and Boogaard, A. H., 2010, "The Technology of Incremental Sheet Forming – A Brief Review of the History," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 981~997.
- (2) Wong, C. C., Dean, T. A. and Lin, J., 2003, "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1419~1435.
- (3) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, New York, Oxford.
- (4) Hirt, C. W., Amsden, A. A. and Cook, J. L., 1974, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds," *Journal of Computational Physics*, Vol. 14, pp. 227~253.
- (5) Hughes, T. J. R., Liu, W. K. and Zimmermann, T. K., 1981, "Lagrangian - Eulerian Finite Element Formulation for Incompressible Viscous Flows," *Comput. Meths. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 29, pp. 329~349.
- (6) Haber, R. B., 1984, "A Mixed Eulerian-Lagrangian Displacement Model for Large Deformation Analysis in Solid Mechanics," *Comput. Meths. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 43, pp. 277~292.
- (7) Ghosh, S., 1990, "Finite Element Simulation of Some Extrusion Process Using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Description," *Journal of Material Shaping Technology*, Vol. 8, pp. 53~64.
- (8) Hong, S. I., Rhee, S. H. and Yun, S. J., 1998, "A Study on the Neck-in Process by Flow-forming", *Metals and Materials*, Vol. 4, pp. 895~898.