

# 소성가공과 유한요소법

황 상 무  
포항공과대학 기계공학과 교수



● 1954년생  
● 소성가공중의 재료 유동해석, 금형설계, 가공공정 최적화, 신가공기술연구 등에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

가공공정에 관한 연구 및 개발의 목적은 결합없는 부품을 경제적으로 최적의 방법으로 생산하는데 있다. 최적가공조건은 부품에 부여된 요구사항에 따라 달라지나 그 조건을 예측함은 가공공정 전반에 관한 깊은 이해를 요한다. 최적화 측면에서 볼때 소성가공이나 고분자재료, 복합재료, 금속 및 세라믹 분말 등의 신소재 성형가공 등에 있어서의 공정 설계와 제어는 주어진 가공조건하에서 가공중의 재료의 상태를 정확하게 해석하는 데서 출발한다. 유한요소법을 사용한 공정의 시뮬레이션이 현대적 성형가공 기술에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있는 이유는 바로 여기에 기인한다. 이 글에서는 소성가공 공정을 요약하고 공정 설계에 유한요소법을 적용하는 방법을 몇가지 공정의 예를 들어 설명하였다. 각각의 예에 있어서는 개발의 동기와 핵심, 그리고 최근의 연구동향을 언급하였다.

## 2. 소성 가공 공정

소성가공은 단순한 형상의 금속재료, 즉 빌렛 또는 sheet metal 등 (포괄적으로 preform 이라 칭함)을 소성변형시켜 비교적 복잡한 형상을 가진 부품으로 성형하는 과정을 의미한다.

다. 단조, 압출, 인발, 압연, sheet metal forming 등의 공정들을 그 예로 들 수 있다. 원하는 부품형상을 프리폼(preform)으로부터 직접 성형함은 절삭과정을 최소화 내지 완전제거하여 재료와 에너지를 절감할 수 있다. 이 때문에 소성가공은 동일한 부품의 대량생산에 있어서 매우 중요한 의미를 지닌다. 또한 소성가공에 의해 생산된 부품은 캐스팅이나 절삭가공으로 생산된 부품에 비해 기계적, 야금학적 성질이 뛰어나다.

생산할 부품이 주어졌을 때 공장의 엔지니어는 그 부품의 형상과 바람직한 미세조직을 성공적으로 성형할 수 있는 공정을 설계하여야 한다. 그러나 소성가공 공정의 설계는 어려운 과제이다. 그 첫번째 원인으로 소성가공중의 재료의 변형은 금형 또는 롤과 같은 하나의 강체와의 접촉에 의해서만 제어되는 점을 들 수 있다. 즉 가공중 변형을 원하는 방향으로 일어나게 제어하는 방법이 매우 제한적이다. 두번째 원인은 재료에 따라 차이는 있으나 재료의 변형능력(workability)에 한계가 있는 점이다. 따라서 성공적인 가공을 위해선 일반적으로 마지막 부품성형을 하기전 여러단계의 프리폼 성형공정(preforming operation)이 불가피하여 소성가공공정의 설계는 프리폼 성형공정의 설계를 포함하게 된다. 후판 압연의 경우 압연 스케줄의 설계가, 그리고 폐쇄금형 단조공정(closed die forging)인 경우 프리폼 설계 및

프리폼 성형을 위한 금형의 설계가 이에 해당한다.

### 3. 유한요소 시뮬레이션 기술의 발전

과거부터 슬랩 방법(slab method), 어퍼 바운드(upper bound method) 또는 슬립 라인(slip line method) 등과 같은 근사해석방법들이 개발되어 다양한 소성가공 공정에 적용되어 왔다. 이 방법들은 주로 가공하중, 가공체의 전체적인 형상의 변화, 정성적인 재료유동 등을 예측하여 근사적 최적가공조건을 제시하는데 사용되었다. 그러나 가공변수들이 재료유동에 미치는 영향을 상세히 예측할 수 있게 된 것은 유한요소법이 소성가공 공정 해석에 적용된 후 부터이다. 이중홍과 시로 고바야시<sup>(1)</sup>는 금속가공체의 변형을 강소성 유동으로 가정하는 강소성 유한요소법이 소성가공 해석에 효과적으로 적용될 수 있음을 입증하였다. 그 이후 이 유한요소법은 발전을 거듭하면서 sheet metal forming<sup>(2-4)</sup>, 단조<sup>(5)</sup>, 그리고 압연<sup>(6)</sup> 등의 공정에 적용되기 시작하였고 열-점소성 유한요소법의 개발<sup>(7-8)</sup>로 가공체의 내부온도와 변형율이 유동을 결정하는 hot metal forming 공정도 그 해석이 가능하게 되었다.

현재 유한요소법의 응용범위는 주어진 가공조건 하에서 일어나는 소성유동을 단순히 시뮬레이션을 통해 재현하는 차원을 벗어나 주어진 공정의 마찰계수를 예측하고 특정한 공정들에 있어서는 최적의 프리폼 형상을 시행오차적 시뮬레이션을 수행하지 않고 얻을 수 있는 단계<sup>(11-14)</sup>에 이르렀다. 또한 컴퓨터의 기억용량과 계산속도의 급성장으로 최근에는 삼차원 유한요소법이 제한적이거나 특정한 공정의 해석<sup>(15)</sup>에 적용되고 있으며 계산효율이 뛰어난 수치적 방법보다는 보다 정확한 유동예측을 할 수 있는 수치적 방법이 점차 유한요소 컴퓨터 프로그램에 반영되고 있다. 그 예로서 explicit time stepping scheme 이 implicit scheme 으로 바뀌는 것과 열-점소성 문제 해석에 있어서

열전달과 유동의 exact coupling을 들 수 있다. 탄성변형을 고려하고 잔유응력을 예측할 수 있는 탄소성 유한요소법<sup>(16-17)</sup>은 아직 계산효율이 낮아 소성가공해석에 실제 적용되는 사례는 드문 편이나 장래에 보편적으로 사용될 전망은 같은 이유로 밝다고 할 수 있다.

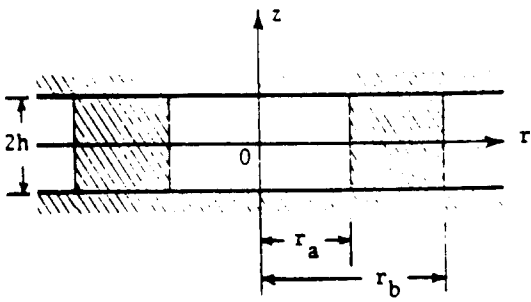
### 4. 공정 설계의 유한요소법적 접근

#### 4.1 금형과 가공체 접촉면의 마찰력

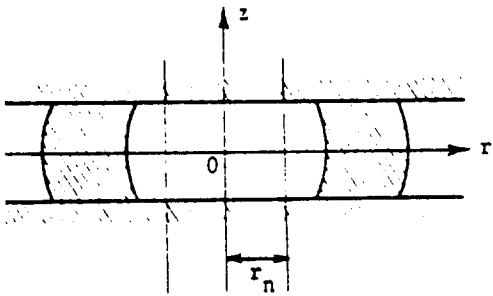
소성가공의 재료 유동해석에 있어서 어떤 해석 방법을 쓰든지 정확한 해를 구하기 위해서는 금형과 가공체의 접촉면에서의 마찰조건을 알아야 한다. 또한 마찰에 대한 이해와 제어는 성공적인 공정설계를 실현하는데 매우 중요하다. 이런 연유로 다양한 소성가공공정의 마찰조건을 예측하는데 많은 노력을 기울여 왔다<sup>(18)</sup>. 그러나 마찰의 메카니즘은 지금까지도 완전히 밝혀지지 않았으며 소성가공 해석상 난제로 남아있다.

링 모양의 시편이 아래 위 두개의 평판의 금형에 의하여 압축될 때에 내부의 직경은 금형과 시편의 접촉면의 마찰조건에 따라 감소하거나 증가한다. 그림 1에서 알 수 있는 바 이 변화는 마찰조건에 민감하므로 링 압축시험은 소성가공에 있어서 마찰조건을 평가하는데 널리 사용되어 왔다.

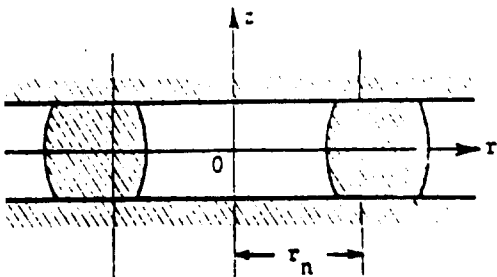
마찰조건을 정량적으로 결정하기 위해서는 링 시편의 형상변화와 마찰조건의 관계를 먼저 정립하여야 한다. 이는 유한요소법이나 어퍼 바운드 등의 이론적 해석방법을 사용하여 다양한 마찰계수(friction coefficient) 혹은 마찰상수(friction factor)에 있어서 내부 직경의 압하율에 따른 변화 곡선(특성곡선 이라 칭함)들을 구함으로써 가능하다. 그 다음 실험자료와 그 곡선들을 비교하여 실제 마찰계수를 구한다. 그러나 이 방법은 효율이나 정확도에 있어서 문제점들을 안고 있다. 재료의 온도, 변형율, 변형도에 따른 유동 특성, 그리고 시편의 형상에 따라 이 곡선들은 달라지기 때문이다.



(a) 초기 형상



(b) 경계면 마찰이 적은 경우



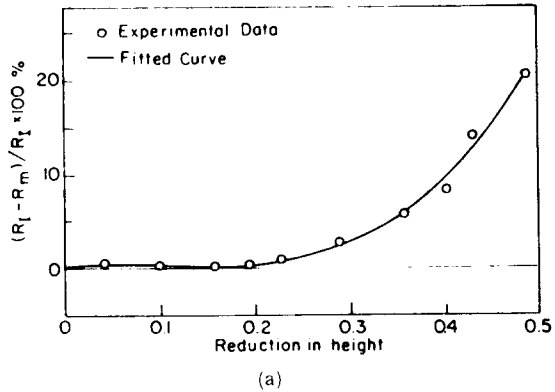
(c) 경계면 마찰이 큰 경우

그림 1 링의 압축과 변형모드들

더우기 그림 2에서 쉽게 알 수 있는 것처럼 실험자료는 하나의 마찰계수값에 호응하는 곡선을 따르지 않는다.

유한요소법은 주어진 마찰조건하에서 정확하게 유동해석을 하며 변위의 분포를 정확하게 예측한다. 이는 변위가 알려져 있을 때 역으로 마찰응력과 마찰계수 또는 마찰상수를 계산할 수 있는 가능성을 제시한다. 이 점을 이용하여 링 압축 실험자료로부터 직접 마찰조건을 구하는 방법이 제안되었다<sup>(10)</sup>. 이 방법은 유한요소법을 사용하고 실험자료의 커브 피팅과 현재의 압하율에 있어서의 마찰조건을 구하기 위한 이터레이션(iteration)을 포함한다. Depierrri 등<sup>(19)</sup>의 실험에 이 방법을 적용한 결과는 다음과 같다.

시편의 재료는 어니일링 한 알루미늄 1100이고 링의 형상은 외경, 내경, 높이의 비가 6 :



(a)

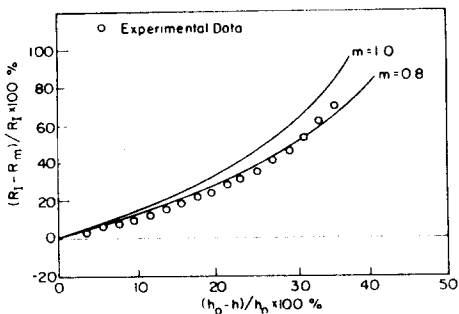
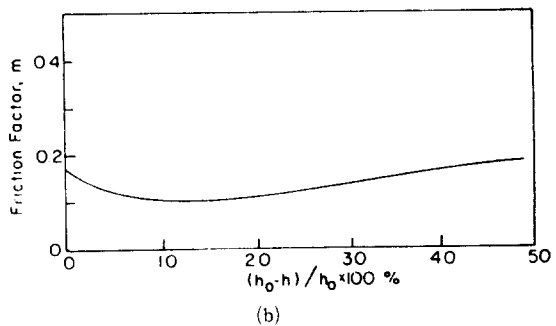


그림 2 Dry condition에서 얻은 실험치와 일정한 마찰상수에 호응하는 특성곡선들의 비교



(b)

그림 3 윤활제를 사용 했을때 얻은 실험치로부터 예측한 마찰상수의 변화

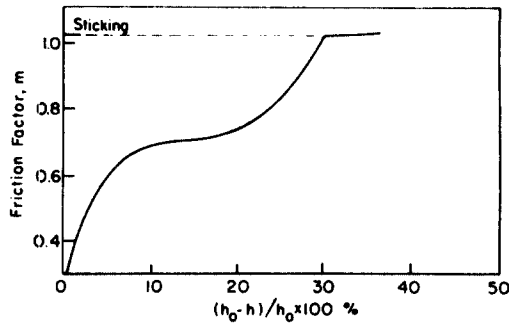
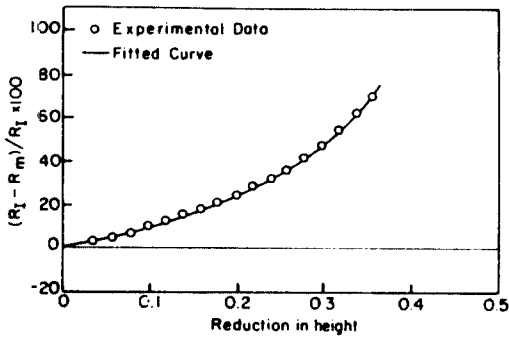


그림 4 Dry condition 에서 얻은 실험치로 부터 예측한 마찰상수의 변화

2:1이다. 원활목적으로 Johnson's Was가 사용된 경우와 원활제가 사용되지 않은 경우를 고려하였다. 원활이 되고 있는 경우의 결과는 그림 3에 나타나 있다. 그림 3(a)는 실험자료를 피팅한 곡선이며 그림 3(b)는 압하율에 따른 마찰상수  $m$ 의 변화를 보여준다. 그 변화는 그리 크지 않으며 그 값은 0.1에서 0.2 사이에 걸쳐있다. 원활이 없는 경우는 마찰상수의 변화가 상당히 큼을 그림 4에서 알 수 있다. 이 결과들은 또한 마찰상수가 일정 하다고 보고 그 값을 특성곡선으로 부터 구하려고 시도하는 것은 오차를 가져 오음을 암시하고 있다.

#### 4.2 압연 공정의 프리폼 설계

분괴(ingot)로 부터 슬랩(slab)이나 부름(bloom)을 얻는 분괴압연공정 또는 스텝으로부터 후판(thick plate)을 얻는 후판압연공정에 있어서 압연된 후의 스텝이나 후판에는 형

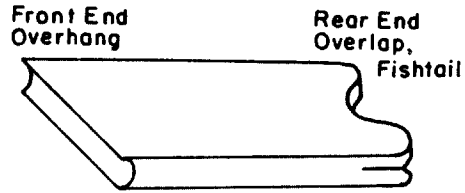


그림 5 분괴압연이나 후판압연시 나타나는 끝부분의 결함형상

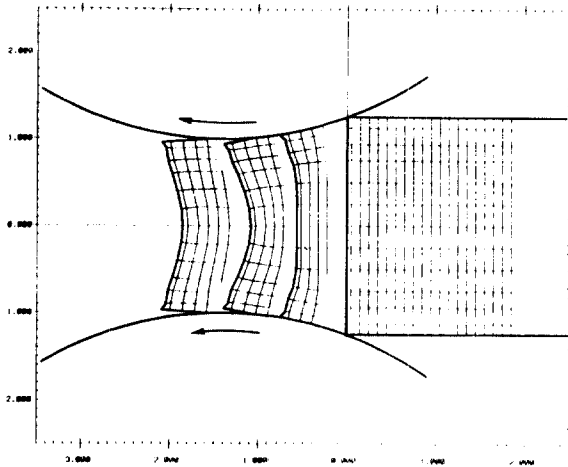


그림 6 프리폼의 앞 끝 윤곽선이 직선인 경우 압연에 따른 앞 끝 윤곽선의 변화 (plane-strain condition, non-workhardening material)

상적 결함들이 나타난다. 그 대표적인 예로 판의 앞과 뒤 끝부분에 나타나는 오버행(overhang), 피시테일(fishtail), 오버랩(overlap) 등을 들 수 있다. 그림 5에서 볼 수 있는 이러한 결함 부위는 후속공정을 밟기전 잘려져야 한다. 매년 처리되는 분괴와 스텝의 양은 막대하므로 압연공정 엔지니어들은 형상 결함들을 줄여 실수율을 높이는 데 노력하고 있다.

Johnson<sup>(20)</sup>은 끝부분의 결함 형상을 예측하기가 어려운 이유로 끝부분의 변형은 unsteady 상태하에서 일어나며 복잡한 3차원적임을 언급하였다. 그러나 평면-변형 조건(plane-strain condition)을 가정하면 유한요소법으로 결함 형상을 예측하기란 어렵지 않다. 그림

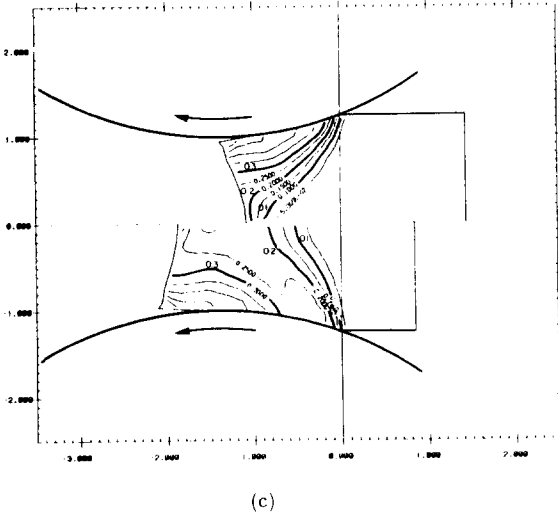
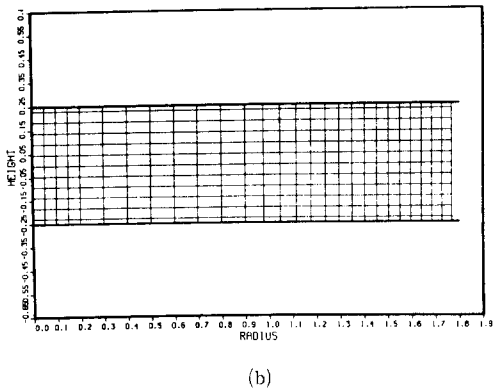
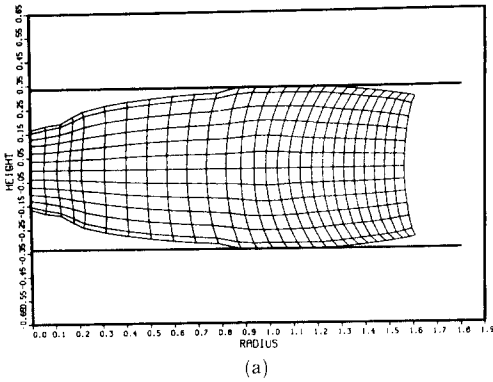


그림 7 두 변형단계들에 있어서의 변형도 분포

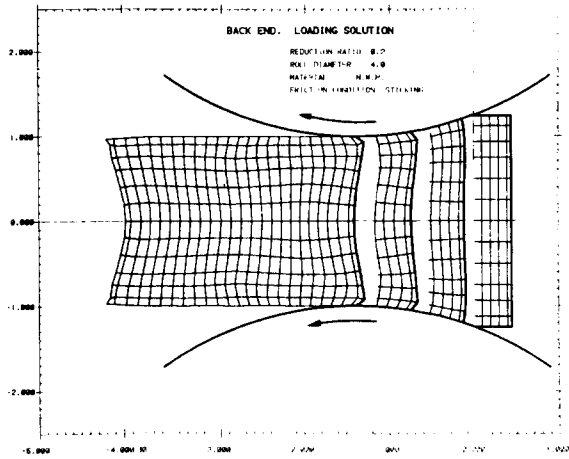


그림 8 프리폼의 뒤 끝 윤곽선이 직선인 경우 압연에 따른 뒤 끝 윤곽선의 변화

6~8은 압연공정의 평면-변형 해석으로 얻은 결과들을 보여준다. 소재는 비 변형경화성 재료(non-workhardening material)로 가정하였다. 그림 6은 압연중 여러 단계에 있어서 앞 끝의 형상 변화를 보여주고 있다. 오버행은 롤과의 접촉면의 중간정도에 앞 끝이 도달한 단계에서 최대이며 롤의 출구(roll exit)에서는 다소 감소하였다. Unsteady 변형에 대한 좀더 자세한 정보는 그림 7의 변형도 분포로부터 얻을 수 있다. 두 단계들을 비교해 보면 앞의 부위 중 롤과의 접촉면 근처의 변형도는 압연의 진행에 따른 변화가 거의 없으나 중심선 근처는 변형도가 계속 증가했고 따라서 오버행 곡선이 변화하였다. 앞 끝 만큼 심하지는 않으나 뒤 끝도 오버행을 이룬다. 뒤 끝 오버행 발생과정은 그림 8에 나타나있다.

분피나 후판압연은 고온조건에서 행하여진다. 고온하에서의 강의 유동응력은 온도의 변형율의 함수이므로 유동해석은 열전달 해석의 동시수행을 필요로한다. 또한 피시테일의 발생과정을 알아보거나 측면퍼짐(side spread)을 예측하기 위해서는 그 해석이 3차원적 이어야한다. 후판압연공정을 시뮬레이션 하기위한 목적으로 현재 유한요소 프로그램을 포함공대와

산업과학기술연구소에서 개발중이다. 그 프로그램은 압연중 일어나는 열전달과 강의 유동을 3차원적으로 동시에 해석할 능력을 갖출 예정이다.

유한요소법에 기초하여 소성변형과정을 최종 단계로 부터 역으로 추적하여 초기단계를 찾는 방법(backward tracing technique)이 개발<sup>(11)</sup>되어 소성가공의 프리폼을 찾는 데 적용되었다. 이 방법은 현재의 변형이 일어나기 조금 전 단계의 변수들을 현재에 알고있는 변수들로

표현하고 그 단계에 있어서 유한요소 방정식들을 풀어 필요한 해를 구하는 것에 기초한다. 이 과정을 반복함으로써 소성변형 초기단계까지 도달할 수 있다.

압연후에 오버행이 발생하지 않을 압연전의 끝부분 형상을 예측하는데 역추적 방법이 사용되었다. 압연후의 앞 끝이 직선인 상태에서 출발하여 역으로 변형과정을 추적한 결과가 그림 9에 나타나있다. 얻어진 프리폼의 앞 끝은 원호형의 볼록한 윤곽선을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 압연중에는 앞 끝의 곡선의 곡률이 계속 감소하여 다소 오목한 곡선으로 되었다가 완전히 직선으로 됨을 알 수 있다. 압연후 뒤 끝이 직선인 상태에서 부터 역으로 추적하여 얻어진 프리폼의 뒤 끝 모양은 그림 10에 주어 져 있다. 그 모양은 앞 끝과 비슷한 원호형이나 곡률이 앞 끝에 비해 작다.

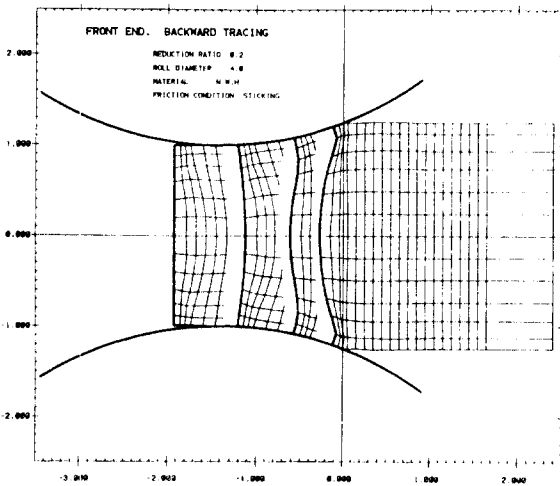


그림 9 프리폼의 앞 끝 윤곽선 설계를 위한 역 추적

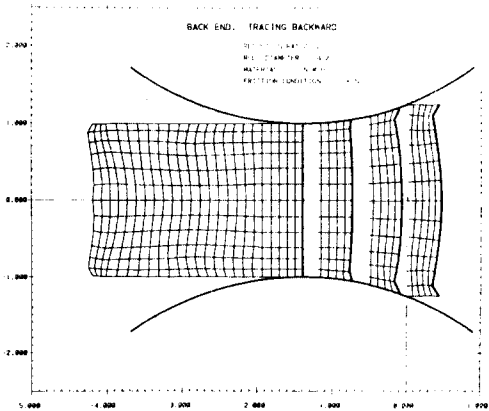


그림 10 프리폼의 뒤 끝 윤곽선 설계를 위한 역 추적

#### 4.3 셸 노우징 공정의 프리폼 설계

셸 노우징(shell nosing) 공정은 그림 11에 잘 표현되어 있는 바와 같이 셸 프리폼을 곡선 형상을 가진 금형안으로 밀어넣어 셸의 윗 부분을 오무리는 공정이다. 모든 현대적 셸 노우징 공정은 셸의 내부(cavity)를 설계된 형상의

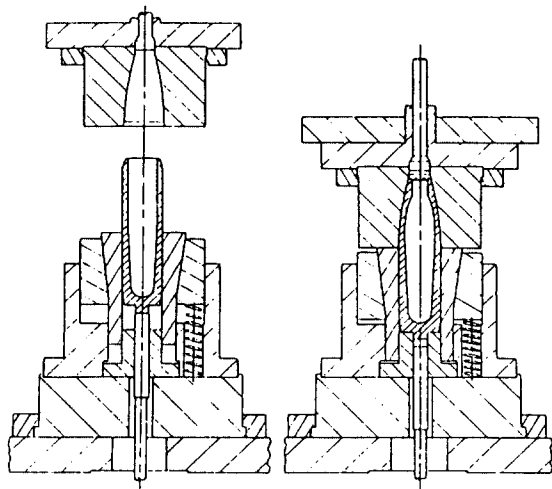


그림 11 셸 노우징 공정

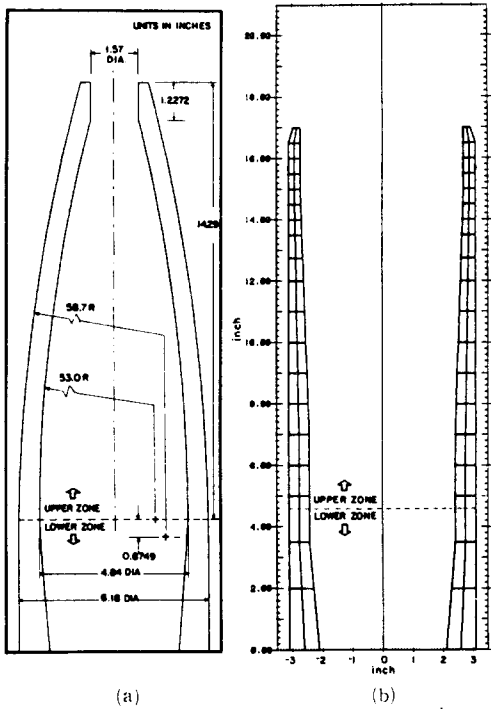


그림 12 (a) 155mm 셸의 specification  
(b) 시험적인 프리폼

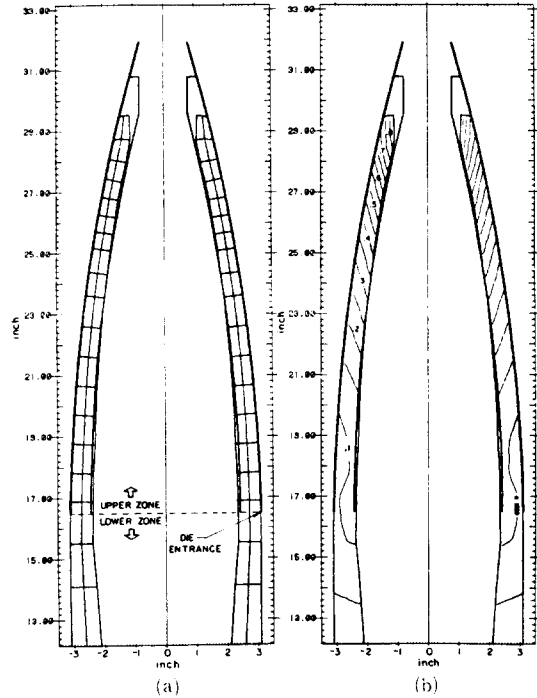


그림 13 (a) 시험적 프리폼을 노우징하여 얻은 형상과 원하는 형상과의 비교  
(b) 변형도 분포

로 바로 만들어내며 마무리 절삭 작업은 셸의 바깥표면에만 국한된다. 그러므로 원하는 셸의 형상이 정확하게 성형되도록 프리폼을 설계하는 것이 중요하다.

그림 12(a)는 요구되는 셸 형상의 한 예이다. 이 형상을 성형할 프리폼을 찾기 위해서 우선 시험적으로 하나의 프리폼을 선택하였다. 그 형상은 그림 12(b)에 유한요소 메시와 함께 나타나 있다. 이 프리폼의 노우징 후의 형상을 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 예측한 다음 요구되는 형상과 비교하였다. 금형과 소재경계면의 마찰계수는 0.1로 가정하였고 재료의 변형경화를 고려하였다. 그림 13에서 볼 수 있듯이 이 프리폼은 원하는 셸의 형상을 성형하는데 실패하였음을 알 수 있다.

앞에서 설명한 역추적 방법을 적용하면 원하는 셸의 형상을 정확히 성형하는 프리폼을 구

할 수 있다. 즉 변형의 마지막 단계에 원하는 셸의 형상이 얻어졌음을 가정하고 거기로 부터 출발하여 프리폼 형상에 도달할 수 있다. 역추적의 출발단계에 있어서의 형상 및 유한요소 메시(mesh)는 그림 14(a)에 나타내었다. 재료의 변형경화성 때문에 출발 단계의 변형도 분포도 정의해야 한다. 변형도 분포는 시뮬레이션 수행 결과(그림 13(b))를 고려하여 그림 14(b)와 같이 정하였다. 마찰계수가 0이라 가정하고 역추적한 결과를 그림 15에 요약하였다. 여러변형단계들에 있어서의 셸의 형상들이 이 그림에 순서적으로 나타나있다. 변형초기단계의 셸의 형상, 즉 프리폼은 우측끝에 나타나 있다.

큰 셸의 노우징은 고온에서 행한다. 노우징하기 전에 프리폼의 앞부분을 약 1500°F 내지 1900°F 정도로 예열한다. 이 경우 프리폼의 설

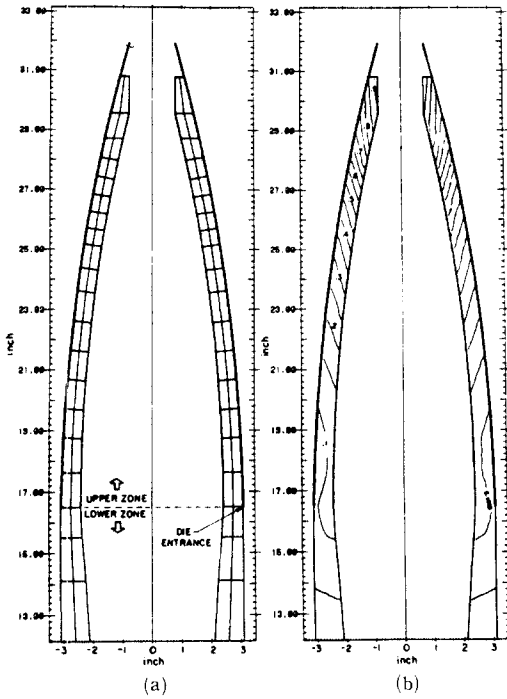


그림 14 역추적의 출발단계  
(a) 원하는 형상과 유한요소 mesh  
(b) 변형도 분포

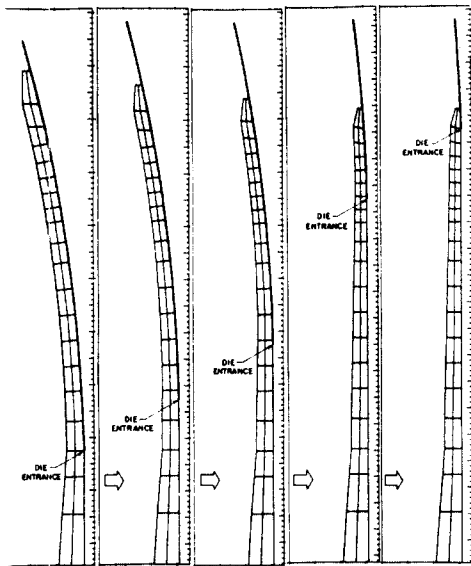


그림 15 역추적에 의해서 얻어진 여러 중간변형 단계들과 프리폼

계에 있어서는 온도와 변형율의 영향을 고려해야 한다. 그 이유는 변형이 이 변수들에 민감히 영향을 받기 때문이다. 최근에 열-점소성 변형 과정을 역추적하는 방법이 개발되어<sup>(13)</sup> 고온 셀 노우징 공정의 프리폼 설계에 적용되었다.

#### 4.4 균일변형 디스크의 단조 공정 설계

##### (1) 머리말

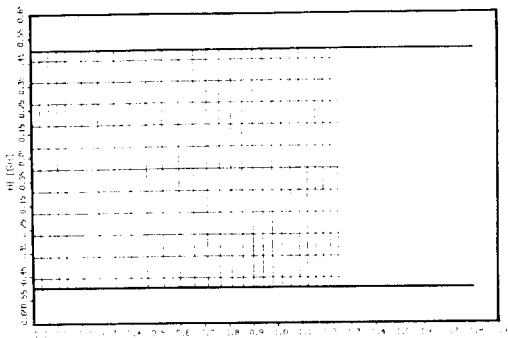
원통형의 소재를 평행으로 놓인 두개의 평평한 금형사이에 두고 압축하면 납작한 모양의 디스크가 된다. 만일 금형과 소재의 경계면에 작용하는 마찰이 무시할 정도로 작다면 단조된 디스크 내부의 변형도 분포는 균일할 것이다. 그러나 마찰이 있는 경우는 엄격한 의미에서 볼때 균일변형을 얻을 수 없다. 다시말해서 변형도가 디스크 내부의 어느 지점에서나 같아야 한다는 조건은 어떻게 단조하든지 실현하기가 불가능하다. 여기서는 마찰이 존재하는 경우에 가능한한 최대 변형의 균일성을 성취하는 단조공정을 설계하는 방법을 소개한다.

마찰의 크기, 재료의 성질 등 가공조건에 따라 단조공정의 설계는 물론 달라진다. 그러나 실제 공정의 측면에서 볼때에 마찰조건, 재료의 성질, 단조된 디스크의 형상은 고정된 가공변수들이고 원하는 평균 변형도는 크게 제약되지 않고 다만 설계의 참고자료로 주어진다. 이 점들을 고려하면 결국 마찰조건, 디스크의 형상, 재료의 성질이 주어졌을때에 적절한 크기의 변형도가 균일하게 디스크 내부에 분포할 수 있도록 프리폼 성형공정(preforming operation)들을 설계하는 문제, 즉 최후성형전 몇개의 프리폼을 성형할 것인가와 각 성형단계에 있어서의 프리폼 형상과 금형의 형상을 정하는 문제로 귀착된다. 고정된 가공변수들은 다음과 같이 가정하였다. 마찰상수:  $m=1.0$ ; 소재: 비변형경화성재료; 디스크의 형상: 직경/높이=7.0, 원하는 평균 변형도는 약 1.0 정도로 가정하였다.

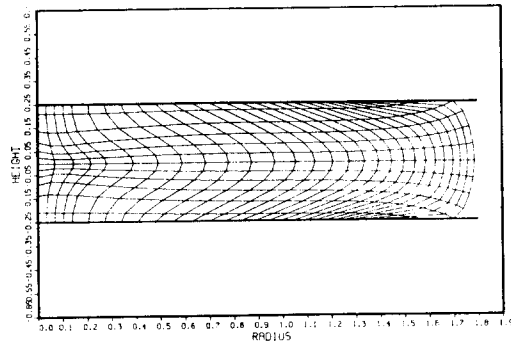
##### (2) 예비적 고찰

디스크 단조시 재료의 유동에대한 이해는 프

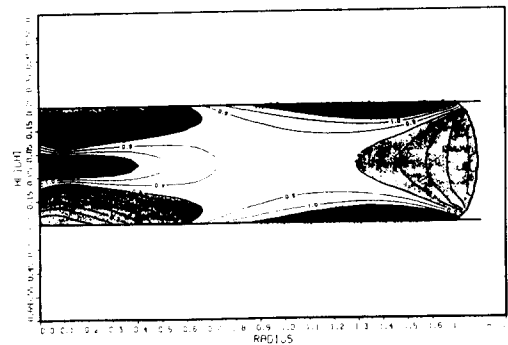




(a)



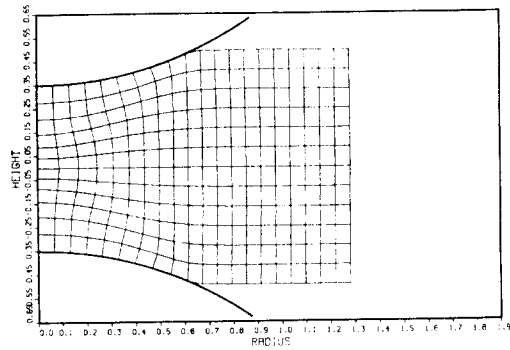
(b)



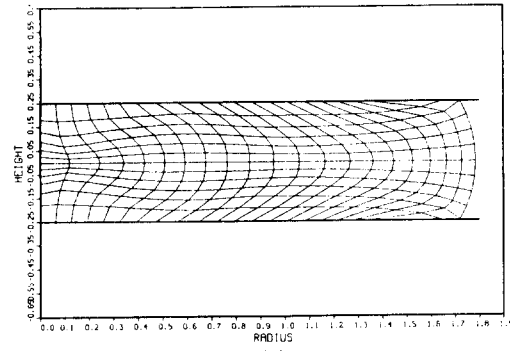
(c)

그림 16 50% 압하할때 변형전과 변형후의 격자와 변형도 분포  
(흑색 부분  $\epsilon > 1.1$ , 백색 부분  $0.8 < \epsilon < 1.1$ , 회색 부분  $\epsilon < 0.8$ )

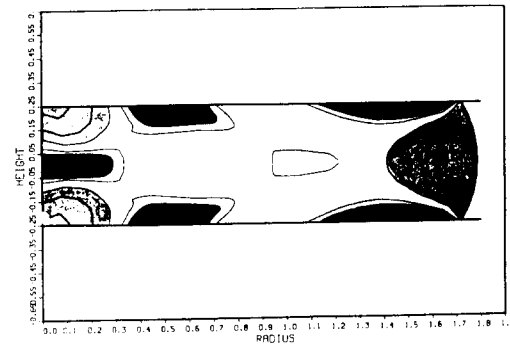
리폼 성형공정설계과정을 개발하는데 많은 도움을 준다. 예비적 고찰을 하기 위하여 두가지 다른 공정의 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 16은 평 금형으로 원통형 프리폼을 50% 압축



(a)



(b)



(c)

그림 17 Indentation 후와 최종성형후의 격자, 그리고 변형도 분포  
(흑색 부분  $\epsilon > 1.1$ , 백색 부분  $0.8 < \epsilon < 1.1$ , 회색 부분  $\epsilon < 0.8$ )

하여 얻은 결과를 보여준다. 디스크의 중심 영역(core region)을 관찰하면 금형 바로 밑은 거의 dead zone인 상태로 남아 있으나 두께 방향으로 변형도의 gradient가 크다. 주위 영

역(peripheral region)을 보면 중심선 근처의 변형도는 평균치에 비해 작으며 금형과의 접촉면 근처에서는 마찰에 의한 distortion으로 변형도가 매우 크다. 허용할 수 있는 변형도의 범위를 0.8에서 1.1 사이로 취하면 변형도가 이 범위안에 있는 부위의 부피는 디스크 부피의 약 0.5배 정도이다. 중심영역의 dead zone의 크기를 줄이면 이 영역의 변형도 불균일성을 어느정도 감소시킬 수 있을 것이다. 잘 알려진 방법은 중심영역을 먼저 indent 한 다음 평 금형으로 압축하는 것이다. 반경 1.5의 반구형의 펀치로 먼저 프리폼을 0.35의 깊이 만큼 대칭으로 indent 한 후 평 금형으로 압축하는 공정을 시뮬레이션 하였다. 그 결과는 그림 17에 나타나있다. 중심 영역의 변형도 분포가 indentation에 의해 바뀌었음을 명백히 알 수 있다. 또한 주위 영역에 있어서도 변형도가 허용치 보다 작은 부위의 부피가 평 금형만 사용한 경우보다 작다. 그림 16과 비교할 때 일반적으로 indentation과 압축의 과정에 의해 변형의 균일성이 향상되었다. 이러한 예비적인 해석의 결과들은 주위 영역과 중심 영역에 나타나는 변형도의 기울기를 완전히 제거할 수는 없을지라도 적절한 preforming operation에 의해 이를 줄일 수 있음을 제시하고 있다.

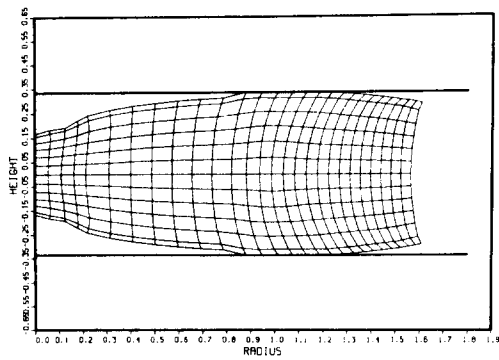
### (3) 역추적중 경계조건의 제어

이미 아는 바와 같이 주어진 최종변형단계에서 출발하여 소재가 금형에서 완전히 분리할때까지 증분변형단계(incremental deformation step)들을 연속적으로 역추적하면 프리폼을 얻을 수 있다. 시뮬레이션의 경우 현재의 증분변형단계에 있어서 구한 해의 결과로부터 다음번 증분변형단계에 적용할 경계조건이 자동적으로 결정된다. 다시말해 현재 변형단계에 있어서 금형과 접촉하고 있는 절점(nodal point)들중에 다음 변형단계에서 금형으로부터 분리되는 절점들 또는 반대로 자유표면상에 있다가 다음 단계에서 금형과 접촉하는 절점들이 속도해에 의해서 유일한 방식으로 구해진다. 그러나 역추적의 경우 현재의 증분변형단계를 역추적하

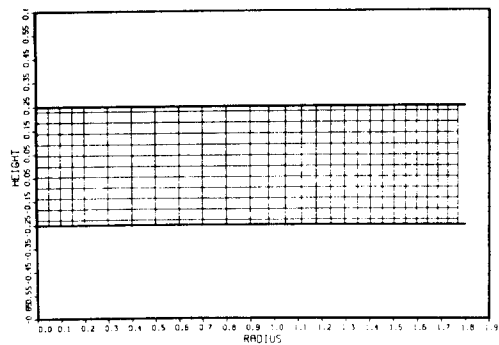
여 해를 얻었어도, 즉 현재 역추적단계(backward tracting step)의 해를 알고 있어도 다음 역추적 단계에 적용할 경계조건은 유일하지 않다 왜냐하면 현재의 역추적 단계에 있어서 금형과 접촉해 있는 절점들중 다음 역추적 단계에서 금형으로부터 분리될 점들을 임의로 정할 수 있기 때문이다. 다음 역추적 단계에 적용할 수 있는 경계조건들의 수는 현재 금형과 접촉하고있는 절점 들중 분리될 절점들을 다르게 고를 수 있는 조합의 수와 같다. 경계조건을 달리하면 다른 증분변형단계를 역추적하게되며 한 변형과정의 역추적은 많은 역추적 단계들을 포함하므로 따라서 이론상 수없이 많은 프리폼이 존재한다. 4.2와 4.3에서 행한 역추적의 경우는 모든 역추적 단계들에 있어서 취해야할 경계조건을 명백하게 정의할 수 있었다. 그러나 일반적으로 원하는 프리폼을 찾기 위해선 그러한 프리폼을 얻을 수 있도록 역추적 중 경계조건을 설정(제어)해야 한다.

### (4) 첫번째 프리폼의 설계(첫번째 역추적)

최종성형에 사용하는 금형의 모양은 평 금형이고 성형할 디스크의 형상은 이미 알고있다. 디스크 내부에는 0.9의 변형도가 균일하게 분포하고 있다고 가정한다. 첫번째(첫번째의 역추적이란 의미) 프리폼을 찾기 위해서 역추적도중 다음과 같은 방법으로 경계조건을 제어하였다. 두께방향 격자선 상에 놓인 절점 들에 있어서의 변형도를 살펴보고 그들간의 변형도의 차이가 0.1을 초과하면 같은 격자선과 금형이 만나는 곳에 위치한 절점을 분리하였다. 또한 부드러운 형상의 프리폼을 얻기 위하여 일단 분리가 시작되면 분리 된 절점 바로 옆에 있는 절점을 역추적의 다음 단계에서 한점씩 분리하였다. Step size는 0.005로 취하였다. 첫번째의 분리는 디스크의 중앙에서 이루어졌다. 이는 시뮬레이션을 통해 얻은 결과로부터 예상되었던 바이다. 그 후 몇 역추적 단계들을 지나서 디스크의 주위점(periphery)이 분리하였다. 그림 18은 역추적 출발단계와 소재가 완전히 금형으로부터 분리할 때까지 역추적한 결



(a)



(b)

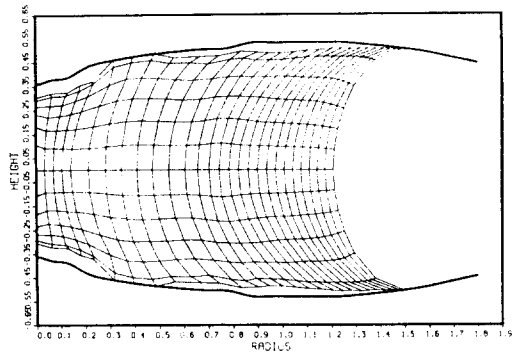
그림 18 첫번째 역추적 출발단계(아래 그림)와 역추적으로 얻은 프리폼

과로 얻은 프리폼의 형상을 보여주고 있다.

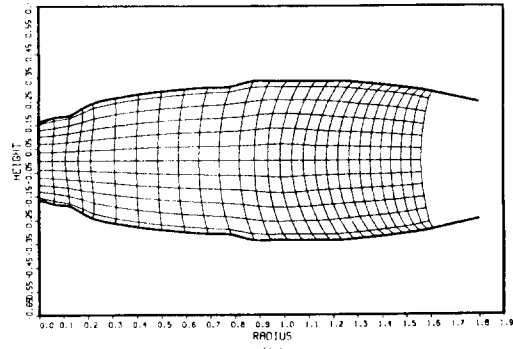
(5) 두번째 프리폼의 설계

첫번째 중간 프리폼을 찾기 위한 역추적 중에는 변형도와 프리폼의 형상에 관한 고찰에 기초하여 경계조건을 제어하였다. 그러나 두번째 프리폼을 찾는 역추적에 있어서는 자유변형도의 분포만을 고려하였다. 이 단계에서 사용할 금형의 윤곽선은 첫번째 프리폼의 윗면의 윤곽선과 정확하게 일치하도록 하였다. 그 이유는 전체적인 자유변형도 분포를 제어하는데는 프리폼의 윗면 전체가 금형과 접촉해 있는 상태에서 역추적을 행하는 것이 유리하다고 보았기 때문이다.

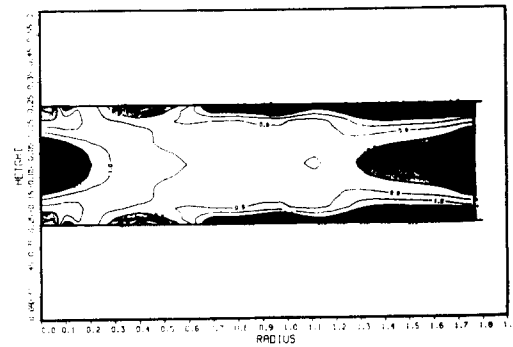
역추적 중 경계조건을 제어는 다음과 같이 행하였다. 두께방향 격자선 상에 놓인 절점들 중 표면에 인접한 두점을 제외한 나머지 절점



(a)



(b)



(c)

그림 19 두번째 역추적 출발단계(중간)와 역추적으로 얻은 프리폼(위), 설계된 단조공정으로 성형된 디스크의 내부 변형도 분포(아래) (흑색 부분  $\epsilon > 1.1$ , 백색 부분  $0.8 < \epsilon < 1.1$ , 회색 부분  $\epsilon < 0.8$ )

들의 자유변형도 값을 계산하고 최대값이 +0.1 이하이면 그 격자선과 금형이 만나는 곳에 위치한 절점을 금형으로부터 분리시켰다. 주위 영역에 있어서는 자유변형도가 +0.1 이하로

감소하기전 접촉조건, 즉 금형과 접촉하고 있을려면 nodal point force가 압축력이어야 한다는 물리적인 이유에 의하여 대부분의 절점이 분리되었다. 그림 19는 두번째 역추적의 출발

단계와 역추적에 의하여 얻는 두번째 프리폼의 형상을 보여준다. 이렇게 설계된 공정으로 얻어진 디스크 내부 변형도 분포, 즉 두번째 프리폼이 첫번째 프리폼으로 성형되고 다시 디스크로 최종성형되었을 때의 변형도 분포도 같은 그림에 주어져 있다. 그림 16 또는 17과 비교해 볼때 변형도의 균일성이 중심영역에서는 뚜렷하게 향상 되었으나 주위영역에서는 만족할 정도의 변화를 볼 수 없다.

(6) 세번째 프리폼 설계

이미 언급된 바와 같이 위에서 설계된 단조공정에 의해 얻어지는 디스크와 (1)에 소개된 간단한 단조공정으로 얻어지는 디스크의 내부 변형도 분포를 비교해 볼때 중심영역 변형도 분포는 새 공정에 의해서 개선될 수 있지만 주위영역은 그렇지 못하다. 이 영역의 변형도 분

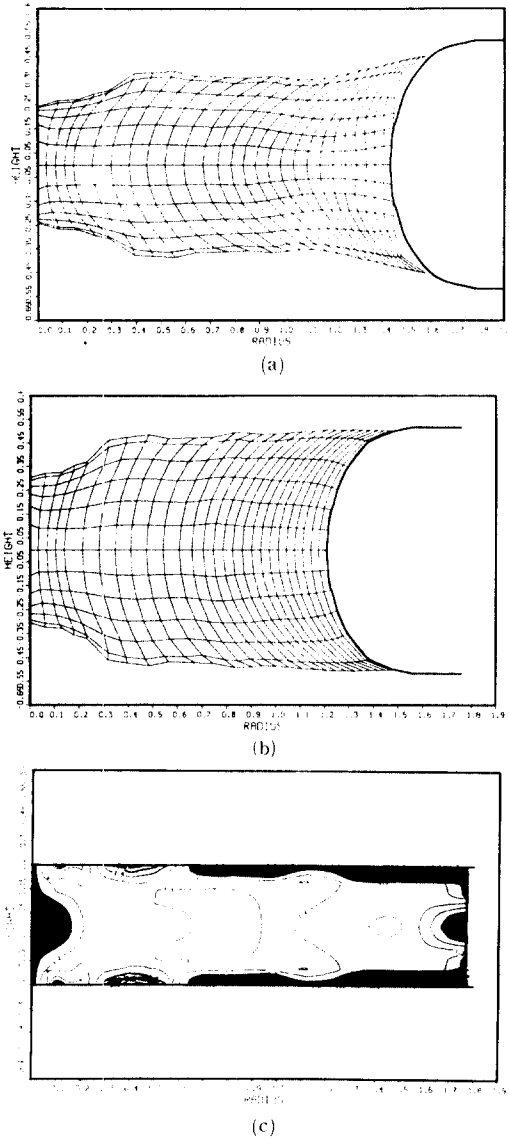


그림 20 세번째 역추적 출발단계(중간)와 역추적으로 얻은 프리폼(위), 설계된 단조공정으로 성형된 디스크의 내부 변형도 분포(아래) (흑색 부분  $\epsilon > 1.3$ , 백색 부분  $1.0 < \epsilon < 1.3$ , 회색 부분  $\epsilon < 1.0$ )

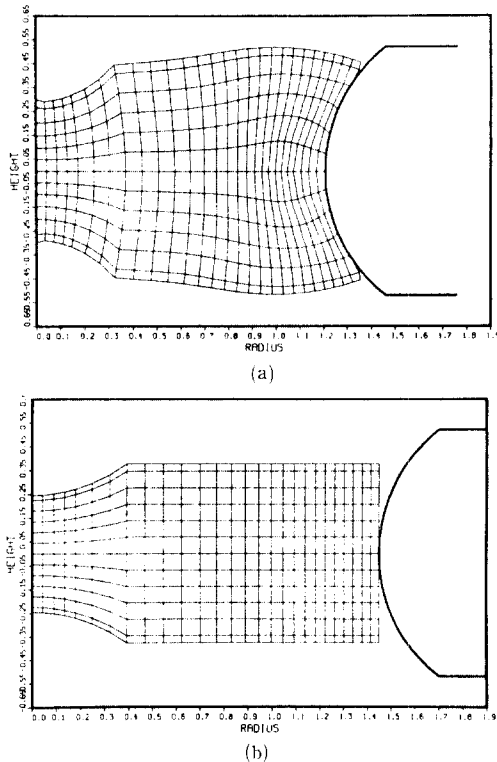
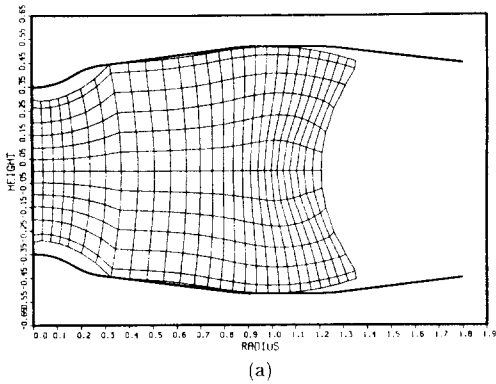
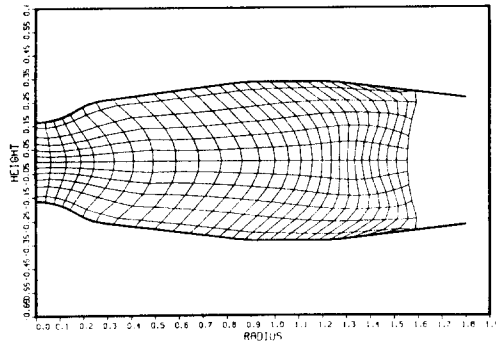


그림 21 첫번째 프리폼 성형공정-반경단조의 시물레이션



(a)

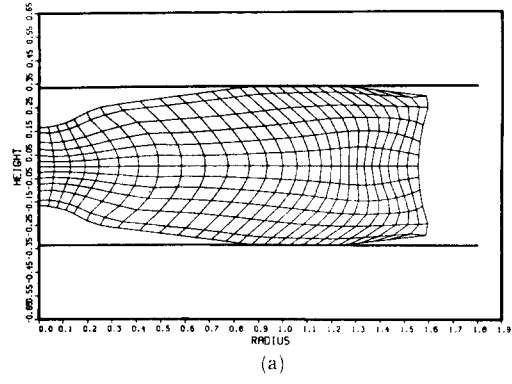


(b)

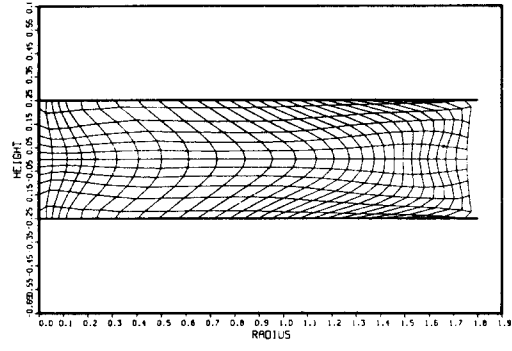
그림 22 두번째 프리폼 성형공정-단조의 시물레이션

포를 개선하는데는 추가적인 프리폼 성형공정으로 주위영역의 변형도를 증가시키는 것외 다른 방법이 없어 보인다. 원형의 윤곽선을 가진 금형으로 반경방향으로 단조(radial forging)하는 공정을 이 목적의 공정으로 고려하였다. 두번째 프리폼에 반경단조용 금형이 접촉하고있는 상태에서 출발하여 이 공정을 역추적하였다. 역추적 또는 시물레이션을 할 때에 반경단조공정을 링 모양의 금형이 직경을 줄여가거나 늘여가는 가상적인 공정으로 대체하였다.

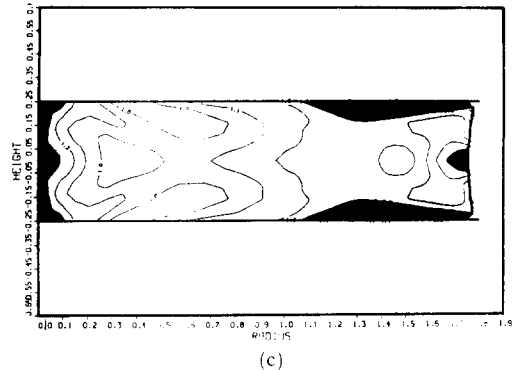
역추적시 경계조건은 소재의 측면 윤곽선이 점차 직선으로 되어가도록 제어하였다. 금형에 접촉하고있는 한 절점의  $r$ -방향 좌표가 이미 분리되어 있는 바로 옆의 절점을  $r$ -방향 좌표와 같을 때에 그 절점을 분리하는 scheme을



(a)



(b)



(c)

그림 23 최종성형공정-평금형 압축의 시물레이션 (흑색 부분  $\epsilon > 1.3$ , 백색 부분  $1.0 < \epsilon < 1.3$ , 회색 부분  $\epsilon < 1.0$ )

사용하였다. 역추적 결과 얻어진 프리폼의 형상 및 최종성형된 디스크의 내부 변형도 분포가 그림 20에 나타나 있다. 이 부가적 성형공정에 의해서 전체적인 변형도의 크기가 약 0.2 정도 증가하였다. 그림 19와 비교해 볼때 주위

영역의 변형도 분포가 향상하였음을 알 수 있다.

#### (7) 최종 설계

위에서 언급된 설계 과정에 있어서는 프리폼 형상의 복잡함에 대해 특별히 주의를 기울이지 않았다. 그 이유는 불규칙한 형상을 항상 smoothing 하거나 수정하여 현실적인 형상 또는 간단한 형상으로 만들 수 있기 때문이다. 따라서 이미 설계된 스톡(stock) 즉 세번째 역추적으로 얻은 프리폼(그림 20)의 형상과 설계된 프리폼 성형용 금형들(그림 19와 그림 20)의 윤곽선을 적절히 수정하는 작업을 하였다. 그 후 수정된 공정을 시뮬레이션을 수행하여 평가하였다.

수정된 스톡 및 반경단조형 금형의 형상과 첫번째 프리폼(여기서부터는 첫번째 가중에 의해서 얻어지는 프리폼의 의미) 성형공정의 시뮬레이션을 그림 21에 나타내었다. 이 스톡은 중앙이 반구형으로 패인 원통형 형상을 가지며 반경단조용 금형은 원호의 윤곽선을 가지고 있고 반경방향으로 움직인다. 이 공정에 의해서 성형된 프리폼의 형상을 같은 그림에서 볼 수 있다. 두번째 프리폼성형용 금형의 윤곽선도 또한 부드러운 곡선으로 수정하였다. 그림 22는 그 금형의 윤곽선과 두번째 프리폼 성형공정의 시뮬레이션을 보여준다. 최초성형공정의 시뮬레이션과 그 결과는 그림 23에서 볼 수 있다. 그림 20과 비교할 때 최종설계시 행한 스톡의 형상 수정 및 금형들의 윤곽선 수정이 변형도 분포를 별로 변화시키지 않았음을 알 수 있다. 그림 23에서 알 수 있듯이 이 최종설계는 예비적 고찰과정에서 소개된 단순한 공정들에 비하여 월등히 좋은 변형도의 분포를 실현하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) C. H. Lee, S. Kobayashi, 1973, "New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", Trans. ASME, J. of Engr. for Ind., Vol. 95, p. 865.
- (2) J. H. Kim, S. I. Oh, S. Kobayashi, 1978, "Analysis of Stretching of Sheet Metals with Hemispherical Punch", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 18, p. 209.
- (3) E. Onate, O. C. Zienkiewicz, 1983, "A Viscous Shell Formulation for the Analysis of Thin Sheet Metal Forming", Int. J. Mech. Sci., Vol. 25, p. 305.
- (4) C.H. Toh, S. Kobayashi, 1983, "Finite-Element Process Modeling of Sheet Metal Forming of General Shapes", Grundlagen der Umformtechnik I Symposium, Stuttgart, p. 3p.
- (5) S. I. Oh, 1982, "Finite-Element Analysis of Metal-Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies", Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, p. 479.
- (6) Guo-Ji Li, S. Kobayashi, 1982, "Rigid-Plastic Finite-Element Analysis of Plane-Strain Rolling", Trans. ASME, J. Engr. for Ind., Vol. 104, p. 55.
- (7) N. Rebelo, S. Kobayashi, 1980, "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer, I Theoretical Considerations", Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, p. 699.
- (8) N. Rebelo, S. Kobayashi, 1980, "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer, II Applications", Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, p. 707.
- (9) S. I. Oh, E. G. Thomson, S. Kobayashi, 1975, "Calculation of Frictional Stress Distributions at the Die-Workpiece Interface in Simple Upsetting", Proc. 3rd NAMRC, p. 159.
- (10) S. M. Hwang, S. Kobayashi, 1983, "A Note on Evaluation of Interface Friction in

- Ring Tests", Proc. 11th NAMRC, p. 193.
- (11) S. M. Hwang, 1985, "Preform Design and Friction Evaluation in Metal Forming by the Finite Element Method", Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- (12) S. M. Hwang, S. Kobayashi, 1984, "Preform Design in Plane-Strain Rolling by the Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 24, p. 253.
- (13) S. M. Hwang, S. Kobayashi, 1986, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, p. 231.
- (14) S. M. Hwang, S. Kobayashi, 1987, "Preform Design in Shell Nosing at Elevated Temperatures", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 27, p. 1.
- (15) J. J. Park, S. Kobayashi, 1984, "Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Block Compression", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, p. 165.
- (16) R. M. McMeeking, J. R. Rice, 1975, "Finite-Element Formulations for Problems of Large Elastic-Plastic Deformation", Int. J. Solids Structures, Vol. 11, p. 601.
- (17) E. H. Lee, R. L. Mallett, 1977, "Stress and Deformation Analysis of the Metal Extrusion Process", Comp. Meth. App. Mech. Eng., Vol. 10, p. 339.
- (18) J. A. Schey(ed.), 1970, "Metal Deformation Processes-Friction and Lubrication", Marcel Dekker Inc., New York.
- (19) V. Depierre, F. Gurney, 1972, "A Method for Determination of Constant and Varying Friction Factors During Ring Compression Tests", Air Force Materials Laboratory, Report AFML-TR-72-37.
- (20) W. Johnson, 1982, Mechanics of Solids, Edited by H.G. Hopkins and M. J. Sewell, Pergamon Press, Oxford, p. 303.

■ 국제 학술대회 참가 안내 ■

제 1 회 내부유동의 실험 및 전산 공기열역학 국제 심포지움  
—1st International Symposium on Experimental  
and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows—

주 관 : Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences

- 분 야 : —Flow in fans, compressors, turbines and pumps.  
—Flow in channels, pipes, intakes and nozzles.  
—Transonic flow, shock boundary layer interaction.  
—Viscous flow, turbulent flow, engineering turbulence models.  
—Unsteady flow, aerodynamic elasticity, aerodynamic acoustics.  
—Multi-phase flow, non-equilibrium reacting flow.  
—Flow measurement and experimental techniques.

일 시 : 1990년 7월 7일~11일(5일간)

장 소 : 중국 북경(Beijing, China)

일 정 : 1989년 7월 1일 : 3페이지 이내의 초록 제출 마감

1989년 10월 1일 : 초록채택여부 통보

1990년 1월 15일 : 논문제출마감

※ 기타 자세한 내용은 한국과학기술원 기계공학연구부 김광호 박사께 문의바람.

연락전화번호 : (02)967-8801 교환 4679번