

소성가공 공정의 컴퓨터 응용설계를 위한 제반 과제

金 權 熙

한국기계연구소 가공기술실



● 1956년생
● 공업용 금속재료의 소성가공과 관련된 기계적 성질의 체계적 이해 및 이의 대변형 유한요소법 등의 응용에 관심이 있다.

1. 머리말

소성가공은 피가공재에 물리적 힘을 가하여 변형시킴으로써 원하는 형상과 재질을 얻는 가공방식으로서 소재의 낭비가 적고 가공속도가 매우 빠르므로 자동차, 항공기, 가전기기, 일반 산업기계 등 대부분의 기계공업 제품의 대량 생산에 널리 이용되고 있다. 가공온도에 따라 소성가공은 냉간, 온간, 열간 등으로 구분되며, 또한 피가공재의 형상에 따라서 입체가공(bulk forming)과 판재가공(sheet forming)으로 분류되기도 한다(그림 1 참조).

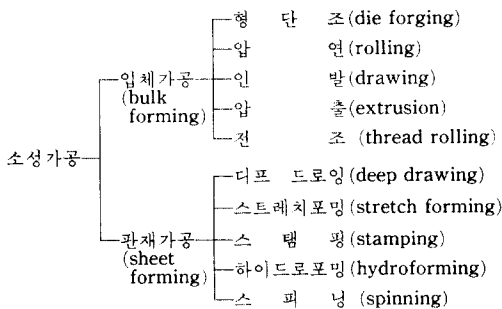
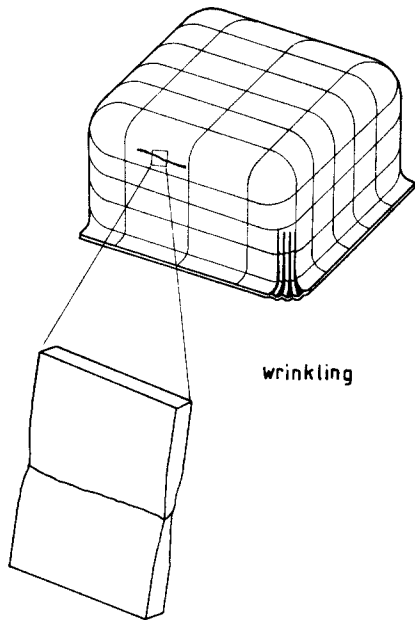


그림 1 피가공재 형상에 의한 소성가공의 분류

소성가공의 성공적 수행은 금형의 구조 및 형상, 금형-피가공재 간의 마찰조건, 피가공재의 구속상태, 피가공재의 기계적 물성, 가공속도 및 온도등에 의하여 좌우되며 이러한 공정

변수(process variables)들이 적절히 조화되지 않으면 여러가지의 가공결함이 발생하여 만족할 만한 결과를 기대하기 어렵게 된다. 소성가공시 발생하는 가공결함은 가공방식에 따라 각기 그 양태가 매우 다양한데 넥킹형(necking type), 전단형(shear type)의 국부적 변형집중(deformation localization) 및 이를 뒤따르는 연성과파(ductile fracture)와 굽힘형(bending type) 변형집중에 의한 주름발생(wrinkling), 그리고 유동의 국부적 구속에 의한 기형적 형상 발생등의 경우로 분류할 수 있으며, 판재가공의 경우에 입체가공의 경우보다 더욱 다양한 가공결함이 발생하는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾(그림 2 참조). 이러한 가공결함을 공정설계 단계에서 사전에 예측할 수 있는 능력은 최적의 공정변수들을 설정하는데 필수적이며 소성가공의 공정설계상 소요되는 시행착오의 횟수와 범위는 이러한 능력에 의하여 좌우된다. 일반적으로 만족할 만한 가공결과를 얻기 위한 최적 공정변수의 선택은 동일한 소성가공 공정을 오랫동안 수행해온 匠人들의 개인적 경험과 시행착오(trial and error)를 통하여 수행되는데 이러한 시행착오에는 막대한 시간과 비용이 소요된다. 하나의 예로서 미국의 Ford자동차사의 경우 새로운 차종을 개발하는데 통상 66개월이 소요되는데 이 중 36개월이 차체의 판재가공 공결설계 및 금형제작에 투입된다고 한다.



necking and shear fracture

그림 2 사각용기의 디프드로잉 과정에서 발생하는 주름(wrinkle), 넥(neck) 및 전단형파괴(shear fracture)의 개념적 설명도.

2. 소성가공의 최적 공정설계를 위한 기술적 과제

비록 소성가공이 대량생산 방식이기는 하지만 시행착오 과정에 따르는 시간과 경비의 소모는 최종제품의 생산가에 직접적으로 반영되며, 때로는 소성가공의 응용을 제한하는 요인이 되기도 하므로 높은 가공속도, 소재 및 에너지의 절감효과 등 소성가공 고유의 장점을 최대한도로 활용하기 위하여는 공정설계상의 시행착오의 범위와 횟수를 최소화하고 소성가공 후의 후처리가공(절삭, 연삭)의 작업량을 최소화하거나 또는 생략시킬 수 있도록 하기 위한 가공결과의 최종형상화(near net shape forming)를 이룩하여야 한다. 이를 위하여 피가공재의 가공 후 최종 형상, 가공 결함, 가공 후의 재질 등을 공정설계 과정에서 미리 예측

하기 위한 소성가공 공정의 컴퓨터 응용 시뮬레이션(computer simulation of forming processes)기법이 개발되어야 한다. 이러한 목적에 활용가능한 유한요소법 프로그램은 ABAQUS, ALPID, MARC, ADINA, NIKE 2D/3D, DYNA 2D/3D등이 있으나 이들 중 어느 것도 아직 기술적으로 완벽한 단계에 이르지 못하였으며 이는 소성가공 과정중 발생하는 제반 물리적 현상에 대한 이해의 부족에 그 1차적인 원인이 있으며 부차적으로는 소성 대변형 문제에 관한 유한요소법 상의 제반 문제점에 기인한다. 따라서 높은 신뢰도와 효율성을 지닌 소성가공 공정설계용 유한요소 프로그램의 개발과 이의 보편적 활용을 통한 소성가공 공정설계의 최적화/고속화는 다음과 같은 기술적 과제의 해결을 전제로 한다.

2.1 피가공재의 소성가공과 관련된 기계적 변형특성의 규명

제반의 가공조건이 동일하다고 했을 경우 피가공재 자체의 기계적 물성에 따라서 가공결과가 판이하게 달라질 수 있다. 예컨대 판재가공의 경우 연강(mild steel) 판재로는 아무런 가공결함없이 최종제품이 나오는 가공조건 하에서 연강판재를 알루미늄이나 황동 판재로 대체한 후 동일한 가공을 시도하면 균열(tearing)이나 주름(wrinkle)등이 발생하여 원하는 형상의 제품이 나오지 않는 수가 있다. 또한 동일한 화학성분의 피가공재라도 열처리, 전가공 등 전처리(preprocessing)조건에 따라서 가공경화능력(work hardening capability)이나 변형조직(deformation texture)을 수반하는 이방성(anisotropy)등 피가공재의 기계적 성질에 큰 차이가 발생하여 가공결과가 달라질 수 있다. 이러한 복잡한 기계적 성질은 피가공재가 소성가공 과정을 거치는 동안 나타내는 변형특성에 직접적으로 반영되므로 공학적으로 매우 중요한 의미를 가지고 있으며 구성방정식(constitutive equations)을 통하여 정량적으로 표시되고 있다.

원칙적으로 구성방정식은 피가공재에 가해진 응력(stress) 또는 응력변화율(stress rate)과 변형도(strain) 또는 변형속도(strain rate)간의 관계를 정량적으로 표시하는 일련의 관계식으로서 피가공재의 미시적 변형구조(micromechanisms of deformation)에 따르는 연속체 수준에서의 거시적 거동(continuum level macroscopic behavior)을 표현하고 있는 것으로 이해할 수 있다. 소성가공의 경우 외부에서 가해진 응력(applied stresses)이 어느 정도의 한계에 도달하면 피가공재가 탄성변형(elastic deformation)의 한계를 넘어서서 항복(yielding)을 일으켜 영구변형(또는 소성변형, plastic deformation)을 시작 한다. 이때에 가해진 응력은 항복조건(yield condition)을 만족시키는 것으로 간주된다. 피가공재에 외력을 가하는 방식에 따라서 응력상태가 다르게 되며, 일반적으로 하나의 응력상태는 6개의 응력 성분들의 값으로써 표시된다. 항복조건을 만족하는 하나의 응력상태는 응력성분(stress components)을 좌표축으로 하는 6차원의 응력공간(stress space)내에서 일개 점의 위치로 나타낼 수 있고 항복조건을 만족하는 점들이 모여서 이루어지는 응력공간 내의 곡면은 항복곡면(yield surface)이라고 정의된다⁽²⁾. 대부분의 공업용 금속피가공재인 다결정 금속재료(poly-crystalline metallic materials)에 있어서는 항복조건을 만족하는 응력이 가해졌을 때 피가공재의 변형양식(deformation mode)은 항복곡면의 모양에 따라서 결정된다⁽²⁾. 항복곡면의 모양은 피가공재의 변형과정 중 연속적으로 진화(evolution)하게 되며, 대부분의 금속재료는 변형하는 과정에서 가공경화를 나타내는데 이로 인하여 응력공간 내에서의 항복곡면의 크기가 증가하게 된다. 이 같은 다결정 금속재료의 항복조건 및 이에 관련된 가공경화 특성은 피가공재 재료의 소성가공과 관련된 기계적 성질을 대변하는 내용으로써 대변형 중 항복곡면의 진화적 형상변화를 표현하는 진화식(evolution equation)을 포함하는 일련의 구성방정식을 통

하여 정량적으로 표현된다.

(1) 고온성형을 위한 구성방정식

공업용 금속재료의 경우 성형온도와 용융온도의 절대온도상의 비율(homologous temperature)이 일반적으로 0.5이상일 때 고온성형(hot working)이라고 하며 이런 경우 재료의 성형성(formability)이 크게 문제되지 않는 한 등방성 상태가 계속적인 정적/동적 재결정(static/dynamic recrystallization)을 통하여 유지된다고 보아 Mises항복조건에 해당하는 등방성 점소성 유동식(J_2 viscoplastic flow rule)을 사용할 수 있다*. 고온 성형의 경우 피가공재의 가장 중요한 기계적 특성은 변형저항(deformation resistance)이 가공온도 및 가공 속도에 크게 의존하는 점이며 피가공재의 변형조직 생성이나 이로 인한 이방성의 발생은 상대적 낮은 비중을 차지하고 있다. 이러한 관점에서 출발하여 내부변수 모델(internal variable model)^(3,4,5), 초과응력 모델(over-stress Model)⁽⁶⁾등이 최근 개발되어 고온 형단조의 유한요소법 해석에 활용되고 있으며 피가공재 내부의 재질유동 및 단조후 최종형상등 유한요소 해석결과들이 실험결과와 잘 일치하는 것으로 보고되고 있다^(7,8). 그러나 고온성형이라고 하더라도 전단형과괴등 재료의 성형성의 한계로 인한 가공결함이 발생하는 경우에는 다음의 경우와 같이 재료의 이방성을 정확히 표현할 수 있는 정교한 구성방정식이 필요하게 된다.

(2) 온간, 냉간성형을 위한 구성방정식

냉간 또는 온간 가공의 경우는 열간 가공의 경우와 달리 피가공재 내부에서의 연속적인 재결정 효과를 기대 할수 없으므로 설혹 피가공재를 소성가공 전에 완전 풀림 처리하여도 피가공재가 변형을 시작함과 동시에 변형조직(deformation texture)이 생성되고 등방성이

* J_2 는 응력텐서의 제2차 불변항(second invariant of stress tensor)으로써 등방성 금속재료의 Mises항복조건이 $J_2(\sigma) = \text{const.}$ 로 표시되므로 이에 해당하는 등방성 재료의 유동식(flow rule)을 J_2 flow rule이라고 부른다.

손실된다. 공업용 금속 피가공재의 상업적 생산 과정이나 화학 성분의 다양성에 비추어 볼 때 항복곡면의 형상 및 가공경화 특성은 각 재질에 따라 매우 다양할 것으로 보이며 모든 재료에 적용가능한 구성방정식은 존재하지 않는다. 따라서 각 재질에 적합한 구성방정식은 적절한 실험 데이터에 근거하여 수립되어야 한다. 위에서 언급한 바와 같이 일반적 3차원변형에 대한 구성방정식은 6개의 독립적인 응력성분을 시편에 균일하게 가하고 시편의 변형상태를 측정할 수 있는 방안을 필요로 하고 있으나 현실적으로 시행가능한 재료시험은 다음과 같이 분류된다.

- 1축 응력시험 : 단축 인장/압축 시험
- 2축 응력시험 : 평면변형 (plane strain) 인장/압축 시험
 유압을 이용한 판재의 벌지 테스트 (bulge test)
 얇은 튜브형 시편의 비틀음-인장

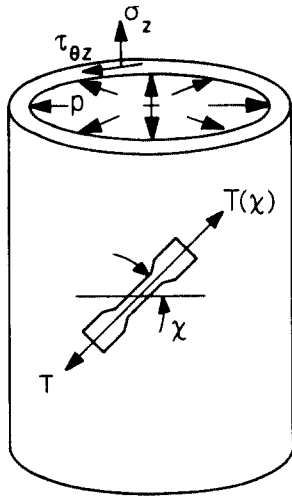


그림 3 얇은 튜브형 시편에 비틀음-인장-내압을 가함으로써 발생시킬 수 있는 조합응력 상태. 튜브 벽면에 임의의 평면응력 (plane stress) 상태와 임의의 방향으로의 단축 인장 응력상태를 만들어서 시편의 이방성에 따라 항복조건을 방향성 (orientation dependence)을 규명할 수 있는 가장 발전된 형태의 재료시험법이다.

- 장 조합응력 시험
 얇은 튜브형 시편의 비틀음-내압 조합응력 시험
 얇은 튜브형 시편의 인장-내압 조합응력 시험 .

3축 응력시험 : 얇은 튜브형 시편의 비틀음-인장-내압 조합응력 시험 (그림3)
 (torsion-tension-internal pressure on tubular specimens)

따라서 현실적으로는 4개 이상의 독립적 응력성분을 가하여 시편에 균일한 응력상태를 발생시키는 방안은 존재하지 않는다. 등방성을 제외한 이방성재료의 복합적 응력상태 하에서의 변형특성을 규정하는 구성방정식의 수립에는 이러한 실험적 한계를 보완하기 위한 공학적 모델이 필요하게 되며, 이방성 금속재료의 구성식 설정을 위한 모델은 현상학적 모델 (phenomenological models)과 결정학적 (crystallographic) 모델 등 크게 2가지로 구분된다.

(가) 현상학적 모델

현상학적 모델은 Hill^(9,10)의 이방성 이론에 바탕을 두고 있으며 압연판재 (rolled sheets) 또는 냉간 드로잉된 관재 (cold drawn tubes)의 경우 금속결정들의 최대 인장/수축 방향이 직교이방성 (orthotropic anisotropy)의 직교대칭축 (orthotropy axes) 방향과 일치한다는 전제하에 수립되었다. 여기서 금속결정들의 최대 인장/수축 방향은 금속재료의 대변형시에 발생하는 섬유조직 (fibrous deformation texture)의 방향이며 (그림 4 참조) 이는 각 단결정의 격자방향 (crystallographic lattice orientation)들이 어떤 특정한 방향을 중심으로 분포되어 형성되는 결정학적 변형조직 (crystallographic deformation texture) 방향과는 구별되는 개념이다. Hill의 이방성이론은 이와 같이 금속다결정체의 섬유조직 방향을 중요한 기본요소로 하고 있으나 섬유조직 자체의 대변형시의 거동은 최근까지 정량적으로 구명되지 않아서 Hill의 이방성이론의 본격적인 응용은 아직 본래

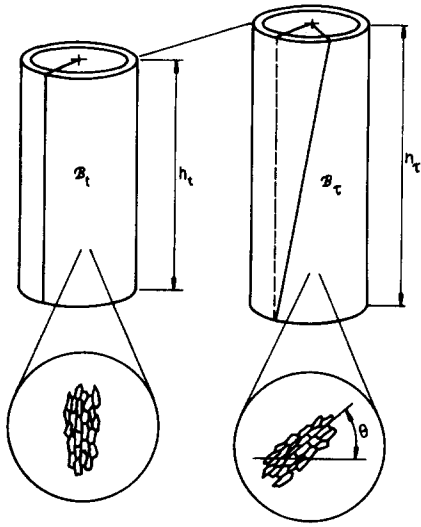
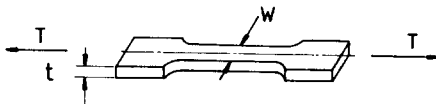


그림 4 냉간 드로잉된 판재의 추가적인 인장-비틀음 변형에 의한 섬유조직의 방향변화

도에 오르지 못하고 있다. 이러한 한계에도 불구하고 평면내에서의 이방성이 강하지 않아서 압연판재의 평면등방성(planar isotropy)을 가정할 수 있고, R-Value(그림 5참조)가 1.0보다 커서 판재가공시 두께감소가 비교적 적은 연강판재등의 경우에는 기존의 압연 섬유조직이 크게 변화하지 않으므로 Hill의 이방성이론을 이용하여 비교적 대변형의 경우에 가공경화 특성 까지도 표현할 수 있고 이런 경우에는 위에서 언급한 실험 방법들을 동원하여 주어진 피가공재의 정량적 구성방정식을 얻어낼 수 있다^(11,12). 그러나 평면내에서의 이방성이 현저하



$$R \equiv \frac{d\epsilon_w}{d\epsilon_t}$$

그림 5 압연 판재에 대한 R-value는 판재에 인장시편을 따내어서 단축인장에 의한 변형을 가하였을 때 시편의 폭 방향 스트레인 $d\epsilon_w$ 와 두께방향 스트레인 $d\epsilon_t$ 의 비로서 정의된다. R-value가 큰 재료일수록 판재가공시 두께 감소에 대한 변형저항이 크다.

거나 R-Value가 1.0보다 작은 알루미늄 판재 같은 경우에는 변형에 따라 판재의 두께감소가 현저하고 따라서 판재가 추가적인 압연을 받는 것과 같은 상황이 발생하므로 이런 경우 추가적인 변형에 따르는 섬유조직의 변화를 무시할 수 없게 된다. 이같은 피가공재의 대변형시에는 연속적으로 변화하는 직교이방성의 축방향(orthotropy axes)을 알지 못하면 재질의 이방성의 변화와 가공경화특성을 예측할 수 없게 되며 따라서 대변형에 따르는 섬유조직 방향의 정량적 규명 없이는 실험결과와 일치하는 구성방정식의 수립이 불가능하게 된다. Woodthorpe와 Pearce⁽¹³⁾에 의하여 보고된 바 있는 알루미늄 판재의 “Anomalous Behavior”는 대변형 과정에서 발생하는 직교 이방성 축 방향(directions of orthotropy axes)의 변화와 항복곡면의 형상변화(shape evolution of yield surface)를 무시하고 Hill의 이방성이론을 적용한 결과이며 Hill의 이방성 이론이 발표된 이후 이의 응용과정에서 반복되어 온 오류이다. 항복곡면의 형상변화를 무시하는 것이 대변형 문제에는 일반적으로 타당하지 못하다는 점이 Hill⁽¹⁰⁾에 의하여 지적된 바 있으나, 필자의 의견으로는 이보다 더욱 중요한 것은 변형조직 발생에 의한 직교 이방성의 축방향 자체의 변화이다. 직교 이방성의 축방향은 피가공재 내부에 형성된 변형조직의 방향을 대변하는 내용이며 이는 일상적으로 경험 할 수 있는 목재 같은 재질의 “결방향”에 해당한다.

따라서 일단 “결”이 형성된 재질에 대하여는 이러한 “결”방향을 기준좌표계(reference coordinate system)로 하여 재질의 기계적 물성을 표현함이 타당하며 이러한 재질의 대변형소성가공시에는 재질의 변형에따르는 “결”의 방향변화를 고려해 주어야 한다. 이러한 관점에서 이방성이론의 보다 보편적 활용을 위하여 다결정 금속재료의 대변형시에 발생하는 변형 섬유조직의 방향 변화를 정량적으로 예측하고 다결정체 금속재료의 일반적 대변형시에 Hill이 예측했던 것과 같이 직교이방성이 과연 심

유조직의 방향으로 형성되는지 여부의 실험적 검증이 필자와 미국 미시간 대학(Ann Arbor)의 Samanta교수간의 국제 협력연구로서 진행되고 있다.

Hill의 이방성이론 이외에도 단축인장/압축 시험에서 관측되는 Baushinger효과를 일반화하여 등방성 재질에 소성변형이 가해짐에 따라 등방성재질의 항복곡면이 그 형상을 유지하며 응력공간 내에서 이동한다고 가정하는 동적가공경화(kinematic hardening)이론이 있다. 이 이론은 ADINA, ABAQUS, NIKE2D/3D등에 널리 사용되는 객관적 응력 변화율(objective stressrate)인 Jaumann응력변화율(Jaumann stress rate)과 조합되어 단순전단(simple shear)문제의 해석에 사용되었을 경우 매우 비현실적인 전단응력-전단스트레인 곡선상의 진동(oscillation)을 초래한다는 문제점이 있다⁽¹⁴⁾. 또한 다결정 금속재료가 어떤 특정한 응력경로(stress path)를 통하여 변형할 때 항복곡면에 예리한 정점(頂點, vertex)이 발생한다는 전제하에 Christofferson과 Hutchinson에 의하여 제안된 J2코너 이론(J2 corner theory)이 있다⁽¹⁵⁾(그림 6 참조). 이는 부드러운 곡률을 가진 등방성 항복곡면에 의하여는 넥킹(necking) 또는 挫屈(buckling) 현상이

현실적인 수준에서 예측 되지 않으므로 이러한 현상들을 이론적으로 도출해내기 위하여(예컨대, Nagtegaal과 de Jong⁽¹⁶⁾) 제안된 이론으로서 Hill⁽¹⁷⁾등의 연구에 이론적 근거를 두고 있으나, 실험적으로 항복곡면상의 정점(corner)의 존재가 확인되지 않으므로(Hecker⁽¹⁸⁾) 실험적인 근거가 불충분하여 유한요소법을 이용한 소성가공공정의 해석에는 활용되지 않고 있다.

(나) 결정학적 모델

현상학적 접근방식과 별도로 추진되어온 결정학적 접근방식은 금속 다결정체의 대변형시 발생하는 결정학적 변형조직(crystallographic deformation texture)을 통하여 피가공재의 거시적 이방성을 구명하려는 시도로서 주어진 결정학적 변형조직을 정량적으로 대변하는 방위 분포함수(orientation distribution function)로부터 재질의 항복조건과 가공경화특성을 산출해내고 또한 금속 다결정체의 유한변형(finite deformation)시의 각 단결정의 전단면(slip plane)상의 전단스트레인(shear strain)과 단결정의 회전(rotation)량을 예측함으로써 결정학적 변형조직 및 항복곡면의 형상 변화를 규명하는 것을 그 핵심으로 삼고 있다. 이러한 시도는 각 단결정의 소성변형특성에 대한 이해를 기본요소로 하고 있으므로 단결정 소성이론(single crystal plasticity)에 대한 많은 연구와 병행되어 왔고^(19,20), 단결정들의 변형특성으로부터 다결정체의 거시적 항복조건 및 변형특성을 예측하는 방법론은 Taylor에 의하여 직관적으로 제시되고 Bishop과 Hill^(21,22)에 의하여 수학적으로 정리된 최소전단변형원리(minimum shear principle) 또는 이에 상당하는 Bishop과 Hill의 최대소성일원리(maximum work principle)등에 그 근거를 두고 있다.

금속다결정체의 기계적 물성이 가공속도에 크게 영향을 받지 않는 상온 소성론(rate-independent plasticity)의 경우 위의 방법론들을 사용하여 유한변형시의 금속의 결정학적 변형조직의 변화를 실험적 결과에 가깝게 예측할 수 있으나 전단면상의 전단변형량과 이를 따르

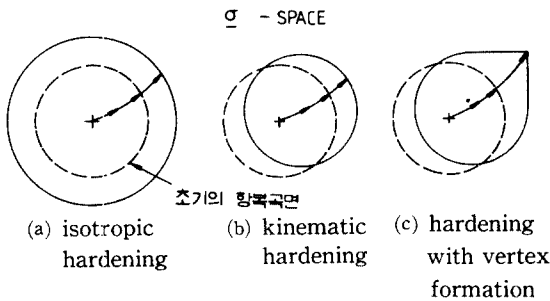


그림 6 (a) 등방성 가공경화, (b) 동적가공경화와 (c) 정점형성(vertex formation)을 수반하는 가공경화의 개념적 설명도. (a)의 경우 응력공간(stress space)에서 항복곡면이 단순히 팽창하고 (b)의 경우는 단순히 이동하며 (c)의 경우 항복곡면이 예리한 頂點(vertex)을 지니는 형상으로 변화한다.

는 결정격자의 회전량이 유일하게 정해지지 않으므로 항복곡면의 형상변화는 예측되지 않으며 이러한 비유일성(non-uniqueness)의 문제를 해결하는 방안으로써 최근에는 점소성 재료의 이방성 모델도 개발되고 있다⁽²³⁾. 이밖에도 Taylor의 모델을 개조하여 대변형시 결정간의 적합성(comptaibility)을 다소 철회함으로써 단결정간의 미시적 불균일변형의 효과를 반영시킬 수 있다고 보는 "relaxed constraints" 모델^(24,25)과 각각의 단결정이 다결정체의 변형강성(moduli)을 같은 무한연속체 내에 삽입되었다고 보아 단결정간의 상호간섭작용을 고려하는 "self consistent" 모델⁽²⁶⁻²⁹⁾ 등이 있다.

이러한 방법들은 평면 등방성을 갖는 이방성 재료의 R-Value나 항복조건(Bassani⁽³⁰⁾, 오규환⁽³¹⁾, 이동녕외⁽³²⁾)의 예측에 이용된 바 있으나 현재로서는 실험적으로 확인 가능한 연속체 수준의 이방성 구성방식(다결정체의 항복곡면이나 가공경화특성)을 제시하기에는 아직 미흡한 단계에 있으므로 유한요소법을 이용한 소성가공 공정의 해석 및 설계에의 현실적 응용에는 본격적으로 활용되지 않고 있다.

2.2 금형과 피가공재간의 접촉, 마찰 및 윤활 조건의 정량적 구명

피가공재와 금형간의 마찰조건은 소성가공 공정의 중요한 변수중의 하나이며 윤활제의 적절한 선택은 성공적인 가공결과를 얻기 위한 필수요소라고 할 수 있다. 소성가공의 유한요소법을 이용한 공정 해석 및 설계의 최적화를 위하여는 연속적으로 변화하는 피가공재-금형간의 접촉 및 마찰현상에 대한 공학적 모델이 필요하며 특히 접촉 및 마찰에 의한 경계조건(boundary conditions)이 최종 가공결과에 큰 영향을 끼치는 판재가공의 경우는 실제로 매우 가까운 마찰현상의 모델이 없이는 유한요소법에 의한 해석결과 자체의 신뢰도를 보장할 수 없게 된다. 일반적으로 마찰현상은 그 물리적 구조(physical mechanism)가 매우 복잡하여 마찰학(tribology) 자체가 유아기적 발전단계에

있어 많은 피가공재-윤활제-금형 재료의 조합에 대하여 실험결과와 잘 일치하며 높은 신뢰도를 가지고 소성가공의 유한요소 시뮬레이션(finite element simulation)에 활용될 수 있는 보편적 마찰법칙은 아직 알려지지 않고 있다. 따라서 대부분의 유한요소 프로그램에는 가장 단순한 Coulomb의 마찰법칙 만이 사용되는 바, 프로그램의 사용자가 마찰계수를 적절히 추측하여 입력하는 것이 실제의 응용에 있어서 상례로 되어 있다.

이에 대한 현실적 해결방안으로서 주어진 피가공재-윤활제-금형의 조합에 대하여 체계적이고 비교적 단순한 마찰실험을 수행하여 얻어진 실험 데이터를 직접적으로 유한요소 시뮬레이션에 활용하는 방안이 필자와 Samanta에 의하여 모색되고 있다. 연속적으로 변화하는 피가공재의 형상변화에 의한 경계조건(boundary condition)의 변화를 유한요소법 해석 과정의 각 단계(solution increments)마다 새로이 찾기 위한 반복계산(iteration)과정에서 (예컨대 penalty method^(31,32)) 실험적으로 구해진 피가공재-윤활제-금형 간의 마찰조건 데이터 베이스를 사용하려는 것을 연구의 최종목표로 삼고 있으며, 이를 위하여는 마찰계수 μ 를 피가공

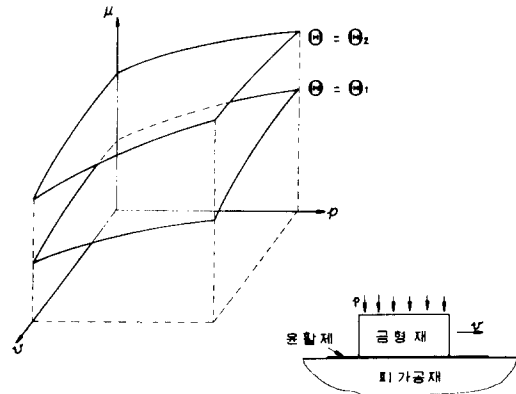
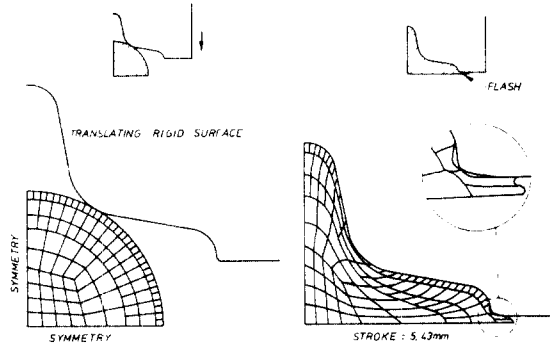


그림 7 금형재-윤활제-피공재 간의 마찰계수 μ 를 상대미끄러짐속도(relative sliding velocity) v , 접촉압력 p 와 온도 θ 의 함수로 전제하였을 경우에 실험에 의하여 구해져야 할 $\mu = \mu(v, p)$ 곡면.

재-금형간의 상대 미끄러짐 속도(relative sliding velocity) v 와 국부적 압력(pressure) p , 그리고 온도 Θ 의 함수라고 보아 주어진 가공온도에 Θ 대한 마찰조건을 $\mu-v-p$ 공간에서 $\mu = \mu(v, p)$ 의 곡면으로써 표시하고 이 곡면의 형상을 실험적으로 구명하는 것이 필요하게 된다(그림 7참조). 현재로서는 NIKE 또는 DYNA프로그램과 적합한 데이터 베이스의 구조를 연구하고 있는 단계이며 아직 본격적인 실험과 수치적 실현(numerical implementation)은 이루어지지 않고 있다.

2.3 적응적 요소망 재구성법(adaptive remeshing)의 확립

피가공재 재료의 구성방정식과 피가공재-윤활유-금형 간의 마찰 및 윤활조건에 대한 데이터 베이스가 확보되었으면 일단 유한요소법에 의한 소성가공 공정의 시뮬레이션이 가능하게 된다. 이러한 목적에 사용되는 유한요소법 프로그램들의 대부분(ADINA, ABAQUS, MARC, NIKE2D/3D, DYNA2D/3D 등)은 변위법에 의한 Lagrange 기법(displacement based Lagrangian formulation)에 근거하여 만들어졌으므로 피가공재의 소성가공에 의한 형상변화를 시뮬레이션 하는 경우, 초기에 설정한 유한요소들이 매우 심하게 변형되어 각 유한요소의 보간함수(interpolation function)의 효율이 저하되며 시뮬레이션의 신뢰도가 저하되고 심지어는 유한요소 보간함수의 Jacobian이 음수(negative number)가 되어 시뮬레이션이 중지되는 수가 있다. 하나의 예로써 고온 재료시험에 근거하여 만들어진 Anand의 내부함수모델(internal variable model) 점소성 구성방정식(Brown, 김권희 와 Anand⁽⁶¹⁾)을 상업용 유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용하고 Coulomb의 마찰법칙을 사용하여 순수 알루미늄의 고온 평면스트레인 형단조 공정을 시뮬레이션한 결과 초기의 유한요소망이 단조 완료시에 변형된 상태를 그림 8에 나타내 보았다(Lush, Weber와 Anand⁽⁶¹⁾). 이 경우 피



(a) 변형 전의 유한 요소망 (b) 변형후의 유한요소망

그림 8 상업용 순수 알루미늄 1100-0의 평면변형(plane strain) 고온단조에 대한 유한요소 시뮬레이션 과정에서 발생한 요소망의 변형상태. 피가공재 표면의 일부와 Flash부분에서 유한요소(8node : CPE8R)들이 극심하게 변형되었으며 flash부분의 일부 유한 요소는 금형 표면에 대한 박리(separation) 또는 침투 (penetration) 등 비현실적인 거동을 보이고 있다. 시뮬레이션은 ABAQUS에 의한 것임⁽⁶⁾.

가공재의 표면층에 있는 유한요소들의 극심한 형상변화를 볼 수 있으며 특히 플래시(flash) 부분의 유한 요소들의 극심한 형상변화로 인하여 단조의 최종 마무리 행정(stroke)단계에서는 시뮬레이션 결과의 정확도가 감소되는 경향이 관측된다(그림 9). 이러한 문제를 해결하는 현재의 방법은 유한요소 프로그램 사용자의 개인적 경험과 숙련도, 그리고 직관력에 의거하여 시뮬레이션 초기의 유한요소망(finite element mesh)을 최적 조건으로 구성하는 것인데 이는 보편적인 해결책이라고 보기 어렵다. 또 다른 방법은 유한요소 시뮬레이션의 각 단계에서 각 유한요소의 변형상태를 점검하여 적절한 시기가 되었다고 판단되면 일단 계산을 중지한다음, 요소망 변형의 중간결과에 근거하여 프리프로세서(preprocessor, 예컨대 PATRAN 등)와 적절한 보간법(interpolation method)을 사용하여 유한요소망의 재구성(remeshing)을 실시한 이후에 중지된 수치계산을 재개(restart)하는 방법이 있으나⁽³³⁾, 역시 시뮬레이션 담당

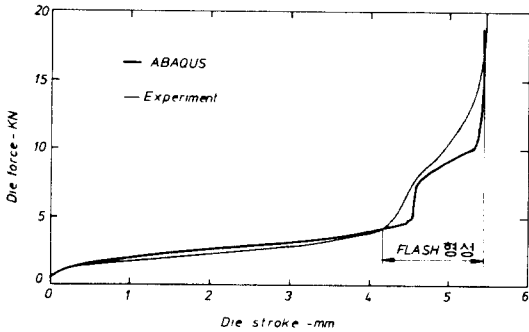


그림 9 상업용 순수 알루미늄 1100-0의 평면변형 (plane strain) 고온단조에 대한 유한요소 시뮬레이션 결과와 실험결과의 비교. 단조온도 : 450°C, 윤활제 : 흑연첨가유성윤활제 (oil based graphite lubricant) DAG41 (Acheson Colloids Co., U.S.A.). 시뮬레이션에 사용된 마찰계수 $\mu=0.0$, 구성식 : Anand의 내부계수 점소성 모델⁽⁵⁾ 유한요소형식 : CPE8R (ABAQUS), 시뮬레이션 시간 : 19시간, (485 increments). 극심한 유한요소들의 변형으로 flash형성 과정에서의 유한요소 시뮬레이션 결과의 정확도가 저하되는 경향을 볼 수 있다.

자의 개인적 경험과 판단에 의존하는 방법이므로 궁극적 해결책이 될 수는 없다. 따라서 유한요소 시뮬레이션 과정에서 기존의 유한요소망에 의한 시뮬레이션 결과의 정확도를 기대할 수 없게 되는 시점을 자동적으로 판단하여 최적의 유한요소망을 재구성하는 적응적 요소망 재구성 (adaptive remeshing) 방안이 마련되어야 하는데, 대변형 소성변형 문제에 보편적으로 활용될 수 있는 요소망 재구성 조건은 아직 알려져 있지 않다.

3. 맺 음 말

지금까지 소성가공 공정설계의 컴퓨터를 이용한 최적설계를 위하여 선결되어야 기술적 과제를 (i) 구성방정식, (ii) 윤활 및 마찰조건, 그리고 (iii) 적응적 유한요소망 재구성법 등 3가지 분야로 대별하여 논의하였다. 구성방정식의 경우 현상학적 또는 결정학적 구성식

모델은 모두 기술적으로 완전한 단계에 이르지 못한 상태에 있으며 현재 많은 연구가 진행중에 있다. 현상학적 구성식 모델은 제한된 실험 데이터에 의존하여야 하므로 본질적으로 결정학적 구성식 모델로 부터의 보완을 필요로 한다. 따라서 이 두가지 연구방법론을 수용하여 유한요소법에 현실적으로 응용가능한 구성방정식을 최소한의 실험을 통하여 도출할 수 있는 체계적 방법의 확립이 동 분야의 과제로 남아 있다. 윤활 및 마찰 현상의 매우 복잡한 물리적 구조는 가까운 장래에 규명될 가능성이 희박하므로 체계적인 실험 데이터를 직접적으로 유한요소법에 응용하는 방안이 현재 연구되고 있으며, 소성 대변형에 대한 적응적 유한요소망 재구성법은 아직 확립되지 않아서 현재로서는 개인적인 경험과 판단에 의존할 수 밖에 없는 실정이다.

이같이 아직 해결되지 않은 기술적 과제가 산재함에도 불구하고 현재의 탄성해석과 등방성 재료의 대변형 해석능력을 활용하여 기존의 소성가공 공정설계상의 난제들이 훌륭히 해결되는 경우도 종종 볼 수 있다. 고온 형단조의 경우 계속적인 재결정 (recrystallization)에 의하여 피가공재의 변형과정에서 이방성의 발달이 많이 억제되고, 또한 금형에 의하여 피가공재에 가해지는 구속조건이 강력하게 피가공재의 변형조건을 결정하므로 구성방정식의 정확도가 어느정도 떨어져도 유한요소법에 의한 해석결과가 크게 나빠지지는 않는다고 볼 수 있다. 따라서 이런 경우에 적절히 선택된 마찰/구속조건 등 경계조건 (boundary condition)과 적절한 유한요소망의 구성을 통하여 최종제품의 형상을 만들어내기 위한 금형의 형상등을 유한요소법으로 해석하여 공정설계상의 시행착오의 범위와 횟수를 줄일 수 있다^(7,8). 또 하나의 예로서 자동차의 차체등 비교적 대형의 판재가공에서 원치에 의한 본격적인 가공행정이 이루어지기 전에 판재 자체가 중력에 의하여 처지게 되는데 이러한 중력에 의한 피가공재의 초기 치점은 최종제품의 형상에 직접적인 영향

을 주게 된다. 이 경우 기존의 유한요소 해석 기법을 사용하여 초기치짐을 제어하기 위한 판재의 가공전 고정용 금형(binder wrap)의 최적설계를 훌륭히 수행할 수 있다. 이같이 현재의 유한요소 해석법은 많은 기술적 과제를 지니고 있으나 동시에 소성가공의 컴퓨터 응용설계를 실현하기 위한 궁극적 도구로서 매우 큰 활용 잠재력을 지니고 있다.

참 고 문 헌

- (1) Johnson, W. and Mamalis, A.G., 1976, "A Survey of Some Physical Defects Arising in Metal Working Processes", Proceedings of the 7th International Machine Tool Design and Research Conference, p. 607.
- (2) Hill, R., 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press.
- (3) Anand, L., 1982, "Constitutive Equations for Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures", J. Engng. Mat. Tech., Vol. 104, p. 12.
- (4) Anand, L., 1985, "Constitutive Equations for Hot-Working of Metals", International Journal of Plasticity, Vol. 1, p. 213.
- (5) Brown, S.B., Kim, K.H. and Anand, L., "An Internal Variable Constitutive Model for Hot-Working of Metals", Reports of Research in Mechanics of Materials, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1987.
- (6) Krempl, E. K., 1983, "Viscoplasticity Based on Overstress. Experiment and Theory", Ch. 19, pp. 369~384 in Mechanics of Engng. Materials, C.S. Desai and R.H. Gallagher(eds.), J. Wiley and Sons
- (7) Kim, K.H., Lush, A.M. and Anand, L., 1986, "Constitutive Equations and Computational Procedures for Hot Working of Metals", in Manufacturing Processes, Machines and Systems, 13th Conference on Production Research and Techology, Conference Proceeding, Nov. 18~21, Florida, Gainesville, U.S.A., Sponsored by the National Science Foundation Manufacturing Systems Program, pp. 231~241.
- (8) Lush, A.M., Weber, G.M. and Anand, L., 1987 "An Implicit Time-Integration Procedure For A Set Of Internal Variable Constitutive Equations For Isotropic Elasto-Viscoplasticity", Reports of Reserach in Mechanics of Materials, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- (9) Hill, R., 1948, "A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 193, pp. 281~297.
- (10) Hill, R., 1979, "Theoretical Plasticity of Textured Aggregates", Math. Proceedings of Cambridge Philosophical Society, Vol. 85, pp. 179~191.
- (11) Bramley, A.N. and Mellor, P.B., 1966, "Plastic Flow in Stabilized Sheet Steel", Int. J. Mech. Sci., vol. 8, pp. 101~114.
- (12) Bramley, A.N. and Mellor, P.B., 1968, "Plastic Anisotropy of Titanium and Zinc Sheet - I. Macroscopic Approach", Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, pp. 211~219.
- (13) Woodthorpe, J. and Pearce, R., 1970, "The Anomalous Behavior of Aluminium Sheet Under Balanced Biaxial Tension", Int. J. Mech. Sci., Vol. 12, pp. 341~347.
- (14) Lee, E.H., Mallett, R.L. and Wertheimer, T.B., 1983, "Stress Analysis for Anisotropic Hardening in Finite-Deformation Plasticity", J. Appl. Mech., Vol. 50, p. 554.
- (15) Christoffersen, J. and Hutchinson, J.W., 1979, "A Class of Phenomenological Corner Theories of Plasticity", J. Mech. Phys.

- Solids, Vol. 27, pp. 465~487.
- (16) Nagtegaal, J.C. and de Jong, J.E., 1982, "Some Aspects of Nonisotropic Work Hardening in Finite Strain Plasticity" in Plasticity of Metals at Finite Strain: Theory, Experiment and Computation, E.H. Lee and R.L. Mallett eds., Div. Appl. Mech., Stanford University and Detp. of Mech. Eng., R.P.I., pp. 65~102.
- (17) Hill, R., 1967, "The Essential Structure of Constitutive Laws for Metal Composites and Polycrystals", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 15, pp. 79~85.
- (18) Hecker, S.S., 1976, Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects, AMD vol. 20 (edited by J.A. Stricklin and K.J. Saczalski), p. 1, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- (19) Asaro, R.J., 1983, "Crystal Plasticity", J. Appl. Mech., Vol. 50, pp. 921~934.
- (20) Peirce, D., Asaro, R.J. and Needleman, A., 1983, "Material Rate Dependence and Localized Deformation in Crystalline Solids", Acta Metallurgica, vol. 31, p. 1951
- (21) Bishop, J.F.W. and Hill, R., 1951, "A Theory of the Plastic Deformation of a Polycrystalline Aggregate under Combined Stresses", Philosophical Magazine, 7th Series, Vol. 42, pp. 414~427.
- (22) Bishop, J.F.W. and Hill, R., 1951, "A Theoretical Derivation of the Plastic Properties of a Polycrystalline Face-Centered Metal", Philosophical Magazine, 7th Series, vol. 42, pp. 414~427.
- (23) Asaro, R.J. and Needleman, A., 1985, "Texture Development and Strain Hardening in Rate Dependent Polycrystals", Acta Metallurgica, Vol. 33, pp. 923~953.
- (24) Honneff, H. and Mecking, H., 1978, Proc. 5th Int. Conf. on Textures of Materials (ICOTOM) (edited by G. Gottstein and K. Lucke). Vol. 1, p. 265.
- (25) Canova, G.R., Kocks, U.F. and Jonas, J.J., 1984, Acta Metallurgica, Vol. 32, p. 211.
- (26) Kroner, E., 1961, Acta Metallurgica, Vol. 9, p. 155.
- (27) Budiansky, B. and Wu, T.T., 1962, Proc. 4th Nat. Cong. Appl. Mech., p. 1175.
- (28) Hill, R., 1965, "Continuum Micro-Mechanics of Elastoplastic Polycrystals", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 13, pp. 89~101.
- (29) Hill, R., 1967, "The Essential Structure of Constitutive Laws for Metal Composites and Polycrystals", J. Mech. Phys. Solids., Vol. 15, pp. 79~95.
- (30) Bassani, J.L., 1977, "Yield Characterization of Metals with Transversely Isotropic Plastic Properties", Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651~660.
- (31) 오규환, 1988, Taylor "최소에너지 변형 이론에 의한 항복조건계산", 塑性變形 및 加工, 대한금속학회-대한기계학회 주최 소성변형 및 가공 심포지엄, 서울대학교, 1988년 10월 22, 23일, 강연 및 논문집, 김동원-이동녕 편, 반도출판사, p. 1.
- (32) 이동녕, 김이수, 오규환, 1988, "FCC, BCC 금속판재의 집합조직과 소성변형비", 塑性變形 및 加工, 대한금속학회-대한기계학회 주최 소성변형 및 가공 심포지엄, 서울대학교, 1988년 10월 22, 23일, 강연 및 논문집, 김동원-이동녕 편, 반도출판사, p. 23.
- (33) Hallquist, J.O., 1986, "NIKE2D-A Vectorized Implicit, Finite Deformation, Finite Element Code for Analyzing the Static and Dynamic Response of 2-D Solids with Interactive Rezoning and Graphics," NIKE2D Users Manual, Lawrence Liver-

- more National Laboratory, December.
- (34) Goudreau, G.L., 1984, "Large Scale Computations" in Theoretical foundation for Large-Scale Computations for Nonlinear Material Behavior, Edited by S. Nemat-Nasser, R.J. Asaro and G.A. Hegemier, Proceedings of the Workshop on the Theoretical Foundation for Large-Scale Computations of Nonlinear Material behavior, Evanston, Illinois, U.S.A., October 24, 25, and 26, 1983, Sponsored by National Science Foundation Defense Advance Research Projects Agency, Martinus Nijhoff Publishers, Chapter III, p. 65.
- (35) Badawy, A., Oh, S.I. and Altan, T., 1983, "A Remeshing Technique for the FEM Simulation for Metal Forming Processes", Proceedings of the 1983 ASME International Computer Engineering Conference, Chicago, Illinois, August 5-11.



국제 학술대회 참가 안내

—Mechanics and Physics of Advanced Materials and Structure—

일 시 : 1990년 8월 1일~4일 (4일간)

장 소 : Singapore

분 야 : ● Modelling of material microstructure and behavior, ● Characterization and interaction of mechanical, thermal, magnetic, optical and chemical effects, ● Translation of laboratory specimen data to structure operating under service condition, ● Prediction of damage, life expectancy and reliability, ● Optimization of material behavior with structure performance, ● Processing, quality control and inspection.

일 정 : 1990년 2월 15일 : 영문초록마감

1990년 5월 15일 : 영문논문원고마감

제출처 : Professor George C. Sih

Institute of Fracture and Solid Mechanics

Packard Laboratory, Building No. 19

Lehigh University

Bethlehem, Pennsylvania 18015, USA

※ 기타 자세한 내용은 한양대학교 기계설계학과 김정규 교수께 문의바람.

전화 (02)292-3111, 2111(교환 2264, 4501)