

塑性加工에 관한 몇 가지 現象 解説

崔 載 燦

(釜山大學校 工科大學 機械設計工學科)

1. 압력유도연성 (Pressure-Induced Ductility)

금속성형공정에서의 가장 중요한 인자는 가공물의 연성이다. 금속학적인 측면에서의 연성이란 실온에서 측정되는 것이며 가장 일반적인 연성 측정방법은 인장시험이다. 금속재료의 연성을 증가시키기 위한 보통의 방법은 가열이며 대부분의 경우 가열된 재료는 보다 연하게 되므로, 보통 가열은 변형한도를 증가시키고 성형력을 줄이기 위해 사용되어 왔다. 그런데 Bridgman은 금속의 연성이란 금속학적 성질 뿐 아니라 주변압력이라는 기계적 방법에 의해서도 조절될 수 있다는 것을 지적하였다.¹⁾ 그는 응력-연신률 선도에서 얻어진 금속의 연성은 정수압을 가함으로써 증가될 수 있다는 것을 보였다. 중간응력, 평균응력, 정수압 응력, 정수압 압력, 주변압력 등의 용어가 같은 의미로 사용되어진다. 재료의 금속학적 성질 뿐 아니라 공정의 압력도 변수로 작용하여 성형성을 개선시키게 되는데 이런 현상을 압력유도연성 (PID)이라 부른다.

Bridgman이 말한 것처럼 압력유도연성(PID)은 주변압력이 재료내부에서의 **空洞**발생 및 그 성장을 억제하기 때문에 얻어진다. 공동의 합체 및 성장은 연성과파괴의 전제조건이 되므로 이러한 현상이 발생되지 않도록 하면 성형성 및 연성이 증가된다.²⁾ 공동의 형성 및 예방과 인장봉의 강도와 변형에 미치는 압력효과에 수학적 해석은 참고문헌 2에 나타나 있다. 이 압력유도연성은 Bobrowsky³⁾, Pugh와 Green⁴⁾, Alexander

등에 의해 확인되었다.

정수압 압출에 대한 새로운 연구에서 압력유도연성과 가압금속성형 (Metalworking Under Pressure)이라는 금속성형방법의 연구에 쓰여질 수 있는 편리한 기구가 개발되었다. 예를 들면 양단압력 정수압 압출에서는 정수압력은 반대쪽 압력을 조절하여 압출비, 다이각, 마찰이나 온도에 관계없이 독립적으로 조절될 수 있다. Bridgman은 취성물질인 대리석을 높은 정수압 압력으로 압출시켜서 압력유도연성을 설명하였으며, 압출된 것은 양호한 상태였다. 최근의 지질학 이론에서는 지하 깊숙한 곳의 암석은 높은 주변압력을 받고 있으므로 연성물질처럼 소성변형을 할 수 있는 것이라고 되어있다.

여러가지 변형시키기 어려운 재료나 형상에 대해 가압금속성형 (MUP)이 유효하다는 것이 양단압력 압출로 증명되었고 이는 현장에서 이용되어지고 있다. 가압금속형이 초기에 간혹 사용되어지는 동안, Bridgman의 선구자적 연구는 이 현상의 유용성을 인식시켰으며 마침내 많은 공정에 광범위하게 적용되어지게 되었다.

가압금속성형의 넓은 공정범위는 다음의 다섯 종류의 범주로 나뉜다.

- i 성형
- ii 절단
- iii 접착
- iv 분말야금
- v 작은 단면에서 큰 단면으로의 가역흐름 (reversible flow)

2. 高에너지율成形 (High Energy Rate Forming)

이제까지는 그림 1의 원판 단조에서처럼 다루어진 공정들은 대부분 靜하중에 의한 것이었다. 그러면 동일한 원판 단조가 고속성형 (High Velocity Forming) 이라고도 일컫는 고에너지율 성형 (HERF) 공정에 의해서 어떻게 얻어지는지를 보자.

만약 원판이 높은 속도로 하부압판에 부딪히고 가정하면 원판의 총 운동에너지는 충격순간에 하부압판에 흡수되어질 것이다. 만약 총돌이 총알의 속도로 이루어지면 총알이 갑옷을 관통하는 것처럼 소재가 하부압판을 관통하거나 하부압판에 달라붙어 변형하거나 아니면 위 두가지 현상이 동시에 일어날 것이다.

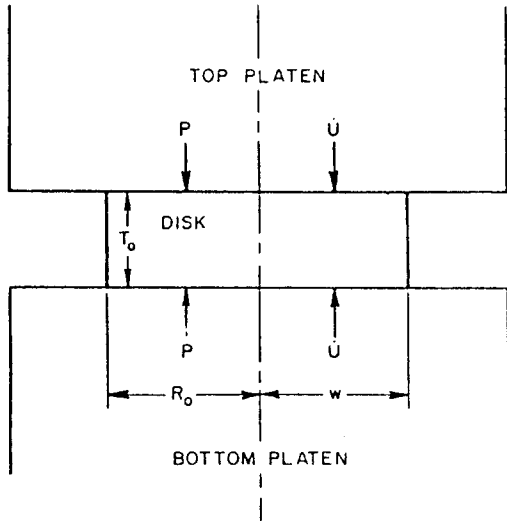


Fig. 1. Open Die Forging

그림 2는 고에너지율공정에 폭발물을 사용하는 가장 일반적인 설계를 보여준다. 판재로 만들어진 소재가 소요형상의 금형위에 놓여 있고 금형과 판재 사이의 공간은 진공상태이며 소재위의 탱크는 물로 채워져 있으며 소재 중심선상의 수면 바로 아래에 폭발물이 위치한다.

폭발이 일어나면 물은 가장 유효한 충격파 전달매체이므로 물을 통해 폭발충격이 가공물에 전해진다.

에너지 전달효율은 다른 매체에서의 관찰로부

터 알 수 있다. 예를 들면 수중에서 음파는 가장 효율적이고 민감하다. 충격파의 파괴적인 힘은 바다나 저수지에서 모든 생명체를 전멸시킬 수 있을 정도이므로 과거 몇 세기 동안 어부들에 의해 많이 사용되었다. 잠수함에서 느끼는 폭뢰의 충격파는 마치 망치로 직접 맞는 것과 같다.

소재에 충격파가 닿자마자 소재는 금형의 공간으로 밀려가 성형된다. 일단 충격파가 소재를 쳐서 성형이 시작되면 나머지 성형은 움직이는 소재의 관성에 의해 완료된다. 소재는 변형중에 평면같이 아래로 내려간다. 공정이 반정도 진행된 소재는 금형공간에 압착한 옆면을 가진 밀면이 편평한 그릇처럼 보일 것이다. 이런 현상은 폭발이 공정에 불충분했을 때도 생긴다. 보다 작은 부품에서 에너지의 급격한 변화는 다른 화학물질을 통하여나 축전지에서의 에너지의 갑작스런 전기적 과부하로 해결할 수 있다.

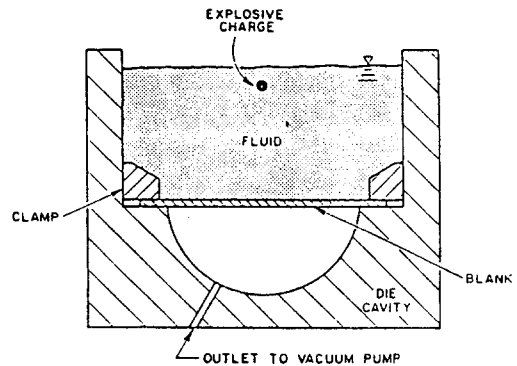


Fig. 2. Schematic of Explosive Forming

3. 마찰과 윤활 (Friction and Lubrication)

고속성형문제중 가장 미지의 것으로 남아있는 것중 하나가 공작물과 공구사이의 마찰현상이다. 아무리 공구표면을 잘 가공하더라도 공작물과 공구의 표면은 울퉁불퉁한 불규칙적 표면이다. 면의 요철은 반대면에 부딪쳐서 결국 양쪽면에 손상을 주게된다. 마찰에 의해 온도가 상승되고 양면의 아래에서는 얇은 두께의 층이 여러가지 소성 변형을 받게 된다. 그림 3에 양면사이의 미끄럼에 대한 저항력이 도시되어 있다. 하중(P)가 낮거나 적정치이면 미끄럼에 대한 저항력은 하중

과 비례하고 Coulomb 과 Amontons의 식 $\tau = \mu P$ 가 된다. 여기서 μ 는 마찰계수이다. 하중이 증가하면 저항력은 최대치 $\tau = m\sigma_0 / \sqrt{3}$ 이 된다. m 은 마찰상수이고, σ_0 은 단축인장시 항복응력이다. 위의 비례상수와 최대치는 둘다 윤활효율과 표면 거칠기의 함수이다.^{5,6,7)}

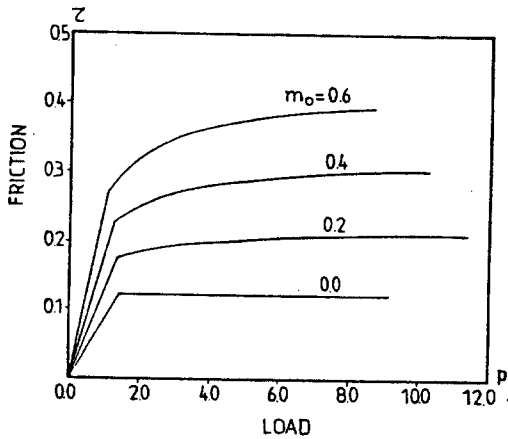


Fig. 3. (a) Friction Vs Load with m_0 as the Parameter

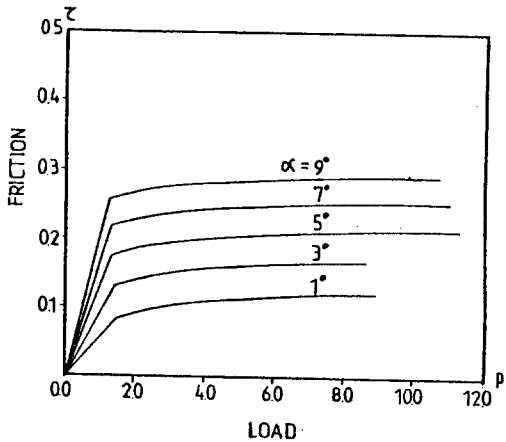


Fig. 3. (b) Friction Vs Load with α as the Parameter

그림 3에서 m_0 는 윤활효율에 반비례함을 나타내고 α 는 금형표면의 조도를 나타내고 있다. 금속성형 동안 금형과 소재사이의 접촉면에서의 압력은 높으며 그림 3의 편평부에서 나타나는 일정 마찰 저항력이 생긴다. 단, 다음에 설명되는 막윤활 (film lubrication)이 되는 경우는 예외이다.

압연이나 인발같은 공정에서는 변형되고 있는 소재가 연속적으로 성형공구를 통과하게 된다. 단조와 같은 공정과는 달리 통과공정이라 정의되는 이런 공정은 고속, 고효율로 실행된다. 연속되는 공정이므로 인간의 조작을 극소화하여 쉽게 자동화 시킬 수 있다. 압연의 마무리 단계에서는 10,000ft/min의 속도로 작업이 진행되며 인발의 경우 그 속도는 보다 높다. 고속에서는 유체가 가공물과 금형 사이에서 췌기처럼 들어가게 된다.

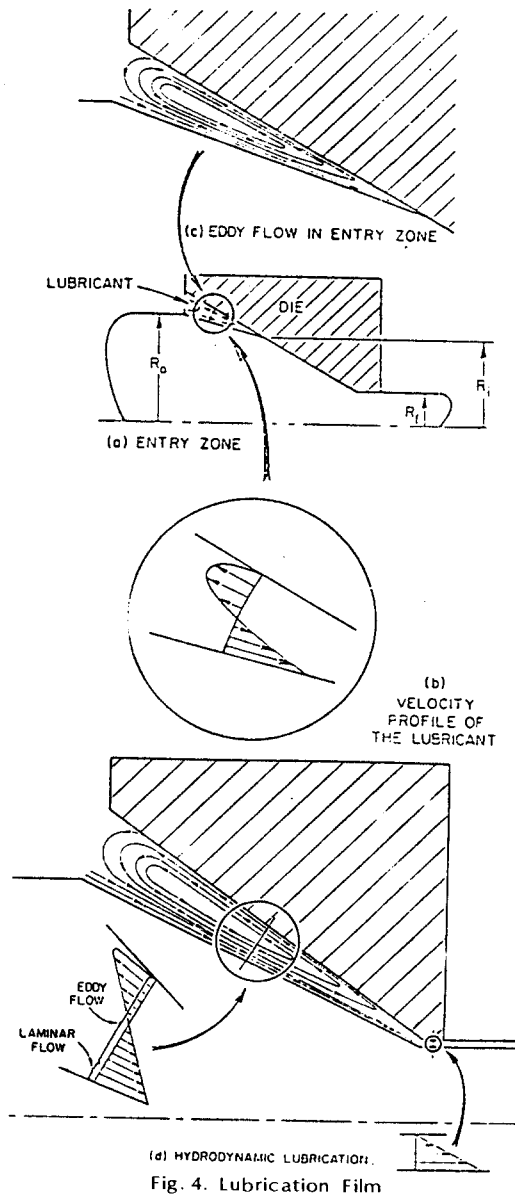


Fig. 4. Lubrication Film

인발에 대한 그림 4(a)에서 이 썩기는 $R_0 > R_i > R_f$ 의 관계인 R_i 의 점으로 확장된다. 인발속도가 빨라질수록 금형과 공작물간의 접촉부위가 작아져 R_i 가 작아진다. $R_i > R_f$ 인 동안은 썩기로 들어가는 유체는 공작물이나 압연의 경우 압연로올러에 의해 저항을 받아서 출구로 나갈 수 없어 입구로 되돌아 와야만 한다.

그림 4(b)의 윤활흐름의 임의 단면의 그림에서 공작물 표면에서의 유속은 공작물의 속도와 같고 공구 표면에서의 유속은 공구속도와 같음을 알 수 있다. 임의의 단면을 통하는 윤활유체의 총체적 속도는 0이 된다. 그러므로 금형의 표면에 접근할수록 윤활유체는 반대로 흐르게 된다. 역류가 시작되는 중간점에서는 속도가 0이 된다(그림 4(b)참조). 그 점에서는 유체의 흐름이 없다. 그림 4(c)에 그 흐름이 어떻게 되는가가 나와 있다.

그림 4(c)에서 입구에서의 유선을 볼 수 있는데 흐름의 궤적은 윤활유체가 동일한 위치로 내부에서 회전함을 보여준다. 이 회전 운동은 윤활유체내의 전단변형을 속도와 일치한다. 이때 윤활유체의 온도는 상당히 증가한다. 소재 표면에서의 윤활유체의 막은 층류이다. 이 층류의 막은 소재가 금형에서 나갈때 동시에 빠져나가게 된다. 상태가 양호할 때는 이 막은 연속되게 된다.

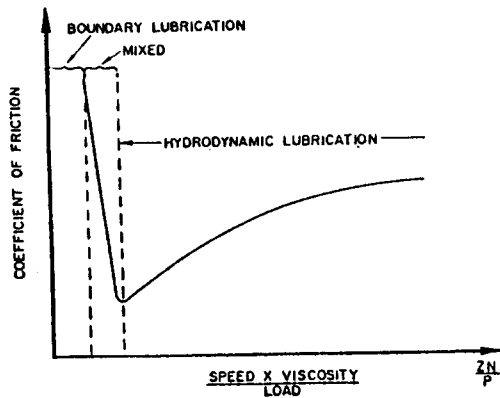


Fig. 5. Friction Values Vs. Speed

그림 5에서는 보여지는 것처럼 공작물의 속도가 증가하면, 윤활유체 썩기가 커져서 금속의 접촉부위가 감소하여 마찰이 감소하게 된다.

입구에서 고리(ring)라 불리는 금형의 마모에서 흥미있는 사실을 발견할 수 있다. 윤활유체

의 썩기안에 갇혀 유동하는 유체는 온도의 과도한 상승과 오염을 받게 된다. 동시에 역류에 의해 압력이 증가하게 되어 이것이 금형을 침식하게 된다.

속도가 증가함에 따라 $R_i = R_f$ 인 한계치에, 즉 썩기가 금형의 전체 원추표면을 차지하게 되고, 공작물 표면에서 얇은 층류층이 생겨 금형에서 재료는 완전히 분리되게 된다. 이렇게 분리된 것은 그림 4(d)에서처럼 다이랜드(die land)에서 일어난다. 이렇게 되면 썩기내에서의 순환흐름은 금형출구에서 윤활유체가 층류를 따라 나가는 동안에는 없어질 수도 있다. 금형과 공작물 사이가 완전히 분리되면 유체동력학적인 윤활이 일어난다. 완전한 윤활이 이루어질 때의 유체내의 전단응력은 다음과 같이 표시된다.

$$\tau = \eta \cdot \Delta v / \epsilon$$

여기서 η : 윤활제 점도

Δv : 공구와 공작물사이의 미끄럼 속도

ϵ : 윤활막의 두께

Sommerfeld수는 점도, 속도, 공작물의 크기 및 강도의 함수로써 다음과 같이 정의된다.

$$S = \eta v_f / (R_f \sigma_0)$$

여기서 v_f 와 R_f 는 각각 공작물의 최종속도와 최종반경이다.

Sommerfeld수가 임계치(S_{cr}) 이상일 때 유체동력학적 윤활이 일어난다. Sommerfeld수가 임계치 보다 높을수록 공작물과 공구사이의 윤활막이 두꺼워진다.

그림 5에 Sommerfeld수의 함수로의 마찰의 성질이 나와있다. 낮은 속도에서 윤활은 불충분한 상태이며 상대적으로 정지마찰이 크다. 속도가 증가함에 따라 윤활상태는 좋아지고 마찰저항은 감소한다. 마찰저항이 최소인 경우는 유체동력학적 윤활, 즉 금형과 공작물 사이에 완전한 윤활제의 막이 생긴 경우이다. 이 경우의 저항은 정지마찰의 수백 내지 수천 분의 일에 지나지 않는다. 속도가 증가함에 따라 윤활제내의 전단응력이 증가하여 크기에 따른 마찰저항은 커지며 적어도 위에서 최소저항의 두 배이나 정지마찰에 비하면 무시할 수 있을 정도이다. 참고문헌 16의 3.7절과 13.2절에는 봉재인발과 압연에 대한 유체동력학적 윤활에 대해 논술하고 있다.

단조, 디이프드로우잉 등과 같이 속도가 작은 가공에서는 윤활제 막이 가공물과 금형사이에서 형성되려면 외부에서 압력을 가해주어야만 유체동력학적 윤활이 이루어진다.

4. 熱·冷 및 溫間加工 (Hot, Cold and Warm Forming)

2차세계대전까지는 연한 금속들만이 대규모로 압출되고 있었다. 보통의 경우 납은 실온에서, 알루미늄은 냉간이나 열간으로, 구리는 열간에서 압출되었고 강의 압출은 윤활문제로 거의 불가능했다. 금형을 따라 계속되는 마찰은 금형을 아주 빠르게 마모시켜 만족스러운 압출이 불가능했다. 마찰이 적은 경우라도 필요한 동력문제로 직접 압출은 가공물이 매우 짧은 것으로 제한되었다. 물론 금형을 프레스의 램에 위치시키는 간접압출의 경우는 설계상의 어려움 때문에 제약을 받았다. 그래서 간접압출은 마찰을 최소화해서 최적의 공정 변수들을 결정하기 위해 주로 실험적 연구에 사용되었다.

Ugine-Sejournet^{8,9)} 공정은 압출온도에서 윤활제를 사용하는 것과 콘테이너와 가공물 사이에서 윤활막에 의해 완전 분리되게 하는 두 가지에 근거를 두고 있다. 압출온도까지 가열된 강괴는 유리가루가 묻혀지고 유리가루는 녹아서 0.5~0.7mm 정도의 얇은 막을 형성하여 콘테이너벽과 가공물을 분리시키게 된다. 그래서 마찰계수는 감소하여 압출공정 동안 압출초기를 제외하고는 압출력은 일정하게 된다.

반면에 6~8mm 정도의 두꺼운 유리판을 금형 입구면과 빌레트(billet)인 강괴사이에 삽입한 뒤 압출하면 그림 6과 같이 빌레트의 어깨부분에 고체유리의 不動영역이 생김과 동시에 그 위의 유리의 얇은 층이 녹아 유동상태의 유리로 윤활되어서 금속과 함께 흘러나오게 된다. 이 유리의 용해는 압출의 전 공정에서 계속되어 금형과 가공물 사이에 계속적인 윤활을 시킨다. 이 경우 금속의 데드존(dead zone)은 없으며, 점성 윤활제에 일어나는 전단효과도 없다. 그림 6의 윤활제의 막두께는 실제보다 과장되어 있다.

이 방법은 어떤 특정 온도영역에 대해 적절한 유리분말이 발견될 수 있는 정도까지 개발되었다. 최종제품의 유리막 두께는 1/1,000 인치 정도이며

냉각후에는 쉽게 제거된다. 본래 이 방법은 강의 성형에 이용되었지만 지금은 강의 성형온도 이상의 성형온도를 가지거나 좁은 범위의 제한된 성형온도를 가지는 모든 금속 및 합금의 가공에 이용되고 있다.

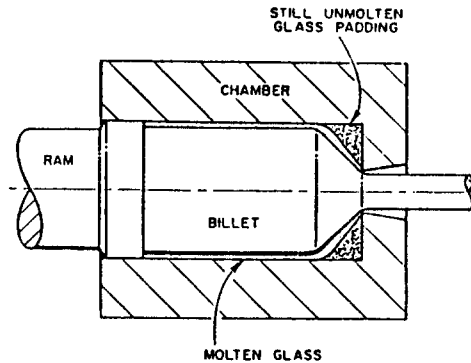


Fig. 6. Steel Extrusion by the Ugine-Sejournet Process

오늘날의 금속성형의 경향은 열간성형 대신 냉간성형에 의해서 다른 제조방법들을 대신해 나가는 것이다. 이 성형의 장점은 보다 강한 제품을 얻고, 치수의 정밀도와 표면 거칠기의 향상 및 재료의 절약 등이다. 압출 등에 의한 강의 성형에서 냉간가공은 인산염 피막처리를 도입하므로써 쉽게 되었다. 강의 표면에 피막이 입혀지면 해면질의 인산염 피막이 윤활액체를 흡수하게 되므로써 마찰과 마모를 감소시키게 된다.

어떤 사람은 Ugine-Sejournet 공정과 인산염 윤활을 마찰과 마모를 해결한 획기적인 방법이라고도 한다. 이러한 해결책이 없이는 오늘날의 강재의 성형은 불가능했기 때문이다.

성형이 실온이상, 재결정온도이하에서 이루어질 때 이를 溫間가공이라 한다. 오늘날은 가공중의 가공력, 연성 등과 최종제품의 성질사이에 보다는 균형을 유지하기 위해 많은 가공이 이 온도 범위내에서 행해진다. 대부분의 강의 온간가공중 청열취성이 생기는 어떤 특정온도범위는 피해야 한다. 오늘날은 온도조절기의 발달과 보급으로 인해 작업온도의 조절이 용이해졌고 그 대표적인 예가 정밀 형단조이다.

열간단조는 온도상승을 견딜 수 있는 고합금 공구를 사용한다. 공구수명을 고려하면, 공구와 가공물 간의 접촉시간이 최소이어야 한다. 그러므로

열간단조에서는 가공물이 행정끝에서 머무르지 않는 기계프레스가 요구된다. 유압프레스는 냉간단조나 큰 부품에 이용되나 최근에는 기계프레스로 많이 바뀌었다. 오늘날에는 유압이나 기계프레스의 사용선택은 단조온도와 부품의 크기 및 생산량 등에 의해 결정된다.

어떤 제품생산에서 한 공정을 선택하는 것은 소재의 재질, 크기, 가공정도, 수량 등과 제작자의 기호에 의해 결정된다. 이런 선택에 대한 기준들이 참고문헌 16의 4.6절에 나와 있고 표 1에 요약되었다.

Table. 1. Process Comparisons

Criteria \ Mode	Hot	Cold	Warm	Isothermal
Ductility	Good	Poor to good	Moderate	Ideal
Forming loads	Moderate	High	Moderate	Low
Forming rate	Fast	Fast	Fast	Low
Dimensional precision	Poor	Good	Moderate to good	Good
Surface finish	Poor	Good	Moderate	Good
Material conservation	Poor	Moderate	Good	Good
Die cost	Moderate	Moderate	High	Higher
Die life	Poor	Good	Moderate	Poor

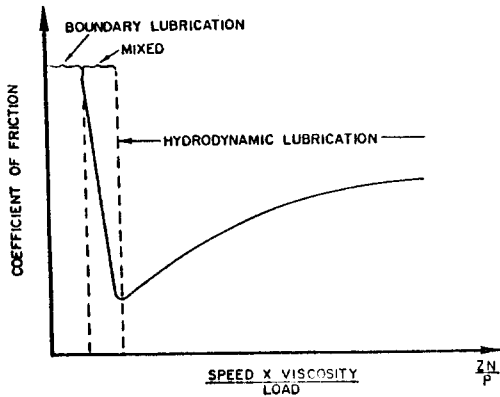


Fig. 7. Strength Characteristic in the Mashy State

금속을 고상과 액상의 혼합물상태에서 성형하기 위한 기술이 대두되고 있다. 그림 7에서 보면 금속이나 합금의 인장특성에서 온도증가에 의한 강도의 감소는 실선에서 기울기가 불연속임을 알 수 있다. 이것은 고체인 재료가 액체상태로 변함을 나타낸다. 이러한 변화는 재료가 녹을 때까지 온도가 증가함에 따라 조금씩 액체상태로 변하여 가며 합금의 경우도 동일하다. 처음에는 금속의 입체에서 액체방울이 생기고 온도가 실선의 온도 이상이 되면 모든 금속의 입체면이 녹아서 개개의 입자가 액체속에 떠있는 상태가 된다. 이런 조건

이 그 온도에서의 강도변화를 가져오며 혼합물상태에서 성형하는 경우 금속의 서로 다른 거동을 설명한다.^{10,11)}

혼합물 상태에서의 소성변형은 주로 액체인 입체를 따라 고체인 입자가 미끄러지는 것이다. 응결시 입자들은 모래나 분말처럼 쉽게 재배열된다. 액체금속의 점도와 유체막의 두께는 가공물의 강도를 결정한다. 참고문헌 12에 의하면 [(4.11) 식을 보면] 유체막내의 전단속도가 흐름에 대한 저항력을 결정함을 알 수 있다. 즉, 속도가 빠를수록 저항이 크다. 그림 7에서 점선은 높은 속도에서의 높은 강도를 표시한다. 실제 가공에서 이런 높은 전단속도는 몇가지 인자에 의해 발생한다. 예를 들면 성형속도가 빠를 때이다. 성형속도가 일정할 때는 가공물이 두꺼울수록 빨라지며 저항도 커진다.

혼합물상태에서 성형시 주의할 점은 용해된 액체가 외부로 흘러나오지 않도록 하는 것이다. 예를 들어 압출에서 소재는 혼합물의 상태까지 가열되어 예열된 콘테이너에 들어간다. 압출이 시작되면 재료는 마찰과 변형에 의한 열을 받게 되어 입체의 더 두꺼운 층까지도 용해된다. 입체의 용해물질이 흘러나오는 것을 방지하는 것은 매우 중요하며 이런 현상은 출구에서 제품을 냉각시킴으로써 방지될 수 있다.

형단조는 단조금형 때문에 용해액이 흘러나오지 않으므로 혼합물 상태의 가공에 유용하다. 일반적으로 고온에서의 혼합물 상태의 가공은 가공 압력은 낮아지나 제품의 성질은 떨어진다.

용해금속의 단조는 혼합물 상태에서의 단조와 비슷하다. 용해금속단조는 금형역할을 하는 형들

에 용융금속을 붓고 응결되는 동안 압력을 가하는 것이다.¹⁾ 용융금속이 굳으면 그 체적이 줄어들고 가해지는 힘도 계속적으로 작용하여야 한다. 소재의 표면이 먼저 굳어지고 급속한 체적감소는 액상에서 고상으로 생각되는 상태변화와 연관이 있다.

Table. 2. Comparison Between Forging From the Melt and Forging in the Mashy State

Forging from the Melt	Forging in the Mashy State
1. On solidification, the Workpiece conforms to the die cavity.	Upsetting to any degree can be incorporated. The billet's shape differs from the cavity's.
2. Solidification starts at the interface with the die while the interior is still liquid. When the interior freezes, the volume is reduced, the punch(or top die) goes deeper, and the previously frozen skin wrinkles.	The liquid phase is uniformly spread through the workpiece on the grain boundaries, permitting easy shifts of grains throughout the workpiece.

소재의 내부가 굳어지고 수축되면 금형은 더욱 더 소재를 누르게 되고 이때 이미 굳어진 소재표면의 온도와의 차이 때문에 표면에 주름이나 균열이 생길 수도 있다.

표면결합은 용해금속단조의 가장 큰 결점이다. 그러나 알루미늄재 자동차 휠은 혼합물 상태에서의 단조나 이 방법으로 대량생산되고 있다. 현장에서는 압착단조 또는 용융단조 등으로 불리는 용해금속단조보다 혼합물 상태의 단조를 많이 이용하고 있다. 실제로 혼합물 상태의 소성가공의 발달은 섬유상의 경화물질이 포함된 복합소재의 압출 등을 용이하게 한다.

參 考 文 獻

1. Bridgman, P. W., "Physics of High Pressure", Int. Text Books of Exact Sciences, G. Bell and Sons, London, 1949.
2. Talbert, S.H. and Avitzur, B., "The Strength of Composite Materials

Loaded in Uniaxial Tension under Pressure", J. Franklin Inst., Vol. 303, No. 6, pp. 563-581 (June 1977).

3. Bobrowsky, A., Stack, E. A., and Austen, A., "Extrusion and Drawing Using High Pressure Hydraulics", Paper SP65-33, Am. Soc. Tool Manufacturing Engrs., 1964.
4. Pugh, H. L. D. and Green, D., "The Behavior of Metals under High Hydraulic Pressure, Part II. Tensile and Torsion Tests", NERL Plasticity Report 128, October 1956.
5. Bowden, F.P. and Tabor, D., "The Friction and Lubrication of Solids", Parts I, II, Oxford University Press, London, 1954, 1964.
6. Wanheim, T., "Friction at High Normal Pressures", Wear, 25 (1973), 225-244.

7. Avitzur, B., Huang, C. K., and Zhu, Y. D., "A Friction Model Based on the Upper-Bound Approach to the Ridge and Sublayer Deformations", *Wear*, Vol. 95, No. 1, Published by Elsevier Oxford UK, 1984, pp. 59-77.
8. Sejournet, J., and Delcrois, J., "Lubric. Eng", Vol. II, pp. 382-398 (1955).
9. Sejournet, "Friction and Lubrication in Metal Processing", ASME, New York, 1966, pp. 163-184.
10. Kiuchi, M., Sugiyama, M., and Arai, K., "Study of Metal Forming in the Mashy State-1st Report-Flow Stress and Deformation Behavior of Alloys", Proc. of the 20th Int. MTDR Conf., 1979, p. 71.
11. Kuuchi, M., Sugiyama, M., and Arai, K., "Study of Metal Forming in the Mashy State-2nd Report-Extrusion of Tube, Bar, and Wire of Alloys", Proc. of the 20th Int. MTDR Conf., 1979, p. 79.
12. Avitzur, B., "Metal Forming: Processes and Analysis", Original Edition, McGraw-Hill Book Co., 1968, 500 pp. Reprint with revisions and corrections, Robert Krieger Pub. Co., Inc. NY, 1979, 498pp.
13. Ramati, S.D.E., Abbaschian, G.J., Backman, D.G., and Mehrabian, R., "Forging of Liquid and Partially Solid Sn-15 Pct Pb and Aluminum Alloys", *Met. Trans. B.*, Vol. 9B, pp. 279-286 (June 1978).
14. Talbert, S.H., "Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming: General Solutions for a Class of Ductile Materials", Proc. of the 1st Int. Conf. on Tech. of Plasticity (ICTP), Tokyo, Aug. 1984, Vol. 11, pp. 961-966. Published by the Japan Society for Technology of Plasticity (JSTP), Torikatsu Bldg. 5-2-5, Roppongi, Minato-Ku, Tokyo 106, Japan.
15. Avitzur, B., "Friction Aided Metal Forming Processes with Unlimited Reductions", Proc., Mech. Design and Prod. Conf., Cairo, Egypt, Dec. 27-29, 1982, pp. 881-893.
16. Avitzur, B., "Handbook of Metal Forming Processes", John Wiley & Sons, Inc., March 1983. 1020 pp.