

金屬의 流動에 대한 實驗的 研究方法

崔 載 燦

<釜山大 工大 機械設計學科 · 工博>

1. 序 論

金屬加工은 塑性加工法, 機械加工法, 熔接法 및 鑄造法에 의해서 金屬製의 部品, 機械 및 構造物을 製作하는 工學의 一分野이다.

따라서 金屬加工學에서는 金屬 또는 그 合金素材를 塑性變形에 의해서 形狀을 바꾸는 加工法과 不必要한 金屬部分을 素材로부터 除去하는 加工法에 대한 力學的 解析 및 實驗을 行한다. 따라서 第一의 加工法에서는 素材가 塑性變形을 받는데 反해서, 第二의 加工法에서는 不必要한 金屬部分, 즉 칩(chips)部分이 塑性變形을 받는다.

이들 두가지 加工法은 각각 非切削加工과 切削加工으로 分類되는데, 非切削 機械加工 또는 機械加工이라는 用語를 사용해도 좋다. 金屬加工 專門家の 役割은 金屬加工 裝置의 設計 및 製作과 製品의 品質管理를 수행하는데 必要한 情報을 設計者나 生産技術者에 供給하는 것이다. 加工力, 動力, 應力, 變形限界와 같은 加工에 영향을 미치는 因子는 연구의 목표가 된다. 따라서 金屬加工學에 있어서는 材料의 塑性變形이 重要한 역할을 담당하는 것은 明白하다. 塑性變形이 素材의 形狀變化의 主要原因이 되는 成形加工의 力學을 理解하기 위해서는 塑性理論에 관한 精確한 知識이 필요하다. 塑性理論은 金屬이나 合金과 같은 固體가 塑性的으로 變形할 때의 應力과 變形率의 關係를 數學적으로 公式化한 것

이다.

보통의 塑性加工問題 解析과 그 解를 취급함에 있어서 의미가 있는 解를 얻기 위해서는 解의 嚴密性을 희생해야 할 경우도 있다.

正解는 數學上의 困難이 있고, 이를 극복하기 위한 一般의 方法이 確立되어 있지 않기 때문에 一括해서 구하기가 극히 어렵다.

塑性變形의 過程은 非可逆的(內部摩擦過程)이므로, 他의 工學分野에서는 극히 有力한 道具인 포텐셜 理論도 適用할 수가 없다.

그렇기 때문에 塑性變形의 問題를 풀기 위해서 是 어떤 假定이 필요한데, 때때로 이 假定의 信賴性은 미리 檢討할 방도가 없는 것이 대부분 이다.

假定의 諸般影響을 確實히 評價하는 것은 어려우므로 理論解는 可能하면 實驗結果와 比較한다.

金屬의 加工變形에 대한 體系의이며 理論的인 解析은 상당히 발달되어 왔으나, 理論解析의 證明이나 開發을 위한 實驗的 技術은 輕視되어 왔다.

지금까지 사용되었고, 또 金屬工程을 공부하는 學生과 技術者들에게 도움이 될 金屬流動에 대한 實驗方法을 아래의 몇가지 例와 함께 記述하고자 한다. 表 1은 研究에 종사하는 사람들이 研究하고자 하는 金屬工程의 解析에 利用할 수 있는 몇 가지 實驗方法을 便意로 分類한 것이다. 利用可能한 각각의 研究方法는 다음 2 절에 적은 바와 같다.

表 1.

金屬의 流動	表面	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미끄럼帶(Lüders bands) ○ 伸張에 의한 異狀變形(stretcher strains) ○ 格子形狀의 變形 ○ 脆性 코우팅(brittle coatings)
	內部	<ul style="list-style-type: none"> ○ 鋼 혹은 알루미늄의 研磨와 腐蝕 미끄럼帶(slip bands)에 대한 작은 變形率 ○ 變形領域에 대한 大小變形率 ○ 格子形狀 ○ 插入物 ○ 缺陷·空洞, 龜裂 ○ 매크로그래프(macrographs) ○ 熱線(heat-line)과 相變化
金屬의 變位		<ul style="list-style-type: none"> ○ 포토그래픽스(photographics) ○ 電氣의 接觸 핀(pin) ○ 變位變換器 ○ 電氣抵抗式, 電氣容量式, 電氣傳導式 光電氣式
힘, 應力		<ul style="list-style-type: none"> ○ 로드 셀(load cell) ○ 壓力 핀 ○ 荷重-변위行程 圖表 ○ 薄膜法(membrane methods) ○ 작은 變形에 대한 스트레인 게이지의 直接接着 ○ X線(殘留應力) ○ 光彈性, 光塑性, 光應力(photo stress) ○ 脆性 락커(brittle lacquers) ○ 電氣鍍金 ○ 모아레와 格子法
溫 度		熱傳帶(thermocouples) : 페인트
模型材質		<ul style="list-style-type: none"> ○ 鉛 ○ 細工用 粘土(plasticine) ○ 왁스 ○ S.P.AL(合金)-낮은 加工硬化 및 變形率速度硬化性 ○ 光彈性, 光塑性 ○ 超塑性-높은 精度를 위한 ○ 脆性-플래스터, 퍼펙스, 파라핀 ○ P.V.C. ○ 실리콘 고무, 폴리스틸렌 폼(foam)
		<ul style="list-style-type: none"> ○ 降伏強度 ○ 脆性, 軟性

金屬의 性質 (初期와 最終)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 硬度 ○ 粒子의 크기 ○ 異方性(변형시험 : n 과 R 의 값) (殘留應力)
表面 摩擦 條 件	<ul style="list-style-type: none"> ○ 摩擦係數 ○ 摩擦制御-플라스틱 필름 ○ 表面 다듬질 ○ 表面變化(orange peel)

2. 實驗의 諸方法

(1) 에이징과 에칭法(ageing and etching)

金屬試片에 충분한 塑性變形을 일으킨 후 腐蝕(etching)시키면 그 斷面이나 端面에는 塑性變形 영역의 樣相이나 限界가 明白하게 나타날 것이다. 만약 鋼材인 경우에 이것이 灰色 바탕에 黑色 영역으로 나타나면 黑白의 明暗度는 적절한 腐蝕條件에 의해 많이 左右되는데, 이런 方法으로 塑性領域을 나타나게 하는 것은 實驗的 證明과 미끄럼線場(slip-line fields)의 形成이나 研究를 위한 假定的 探擇에 매우 有用하고 가치 있는 것이 될 것이다.

(가) 연강(軟鋼)

i) 窒素 함유량이 높고(0.021%) 풀림처리된 軟鋼이 腐蝕反應에 가장 좋다.

荷重을 除去한 후 試片을 電氣爐에서 250°C로 30분간 에이징시켜서 空冷한 다음, 새로운 斷面을 만들어서 이를 에머리 페이퍼(emery papers)로 ○○이나 ○○○의 粒度까지 잘 研磨하여 光澤을 낸다. 腐蝕은 鹽化 제 2구리 45gm, 鹽酸 180ml, 물 100ml를 混合한 Fry 試藥에 試片을 담그고 3~4분간 둠으로써 이루어진다. 腐蝕이 된 試片이 녹(綠)슬지 않도록 메칠알코올이나 진한 鹽酸으로 洗滌하고 물로 씻어 낸 다음, 알코올로 洗滌하여 말린다.

실제로 荷重이 增加함에 따라 塑性變形영역이 擴大되어 가는데, 좋은 結果를 얻기 위해서 어떤 點에서 荷重增加를 멈출 것인지를 決定하는 것은 어려우므로 經驗과 練習이 필요한 것이다.

ii) 面을 거울처럼 잘 研磨하여 變形을 加한 후

에 빛을 入射시켜 보면 빛이 反射되는 狀態를 光學的으로 관찰할 수 있다. 이 觀察에 의해 그 面에서의 變形領域의 樣相과 크기를 識別할 수 있다.

iii) 스트립(strip)에 引長을 주었을 때 軸方向과 55°의 角을 이루는 多數의 平行한 斜線이나 띠가 생기는 것이 1860年 Lüder에 의하여 처음 發表되었다. 이러한 Lüder線 혹은 띠(Lüder lines or bands)는 오늘날 매우 잘 알려져 있는데 이것은 塑性降伏이 일어나는 領域을 나타내며, 많은 경우에 있어서 彈性的인 材料에 散在되어 있다. 成形加工에서 스트레처-스트레인(stretcher-strain) 무늬는 잘 알려져 있는 것으로 요즈음 많은 放臭用 장통의 밑바닥에서 볼 수 있다.

이에 대해서는 Hartmann, Chernov, Turner 그리고 Jevons 등에 의한 實驗報告書¹⁾가 있고, 또한 Kurrein의 著書²⁾에도 있다.

(나) 알루미늄

肉眼으로 알루미늄 試片에서의 塑性領域을 알려면, 荷重을 加하기 前에, 試片을 間接加熱形 電氣爐에서 450°C로 4時間 동안 두었다가 爐冷하는 플림處理가 필요하다. 그 다음에는 荷重을 加하고 試片을 두 部分으로 나누어 에머리 페이퍼로써 〇〇〇粒度까지 機械研磨하고, 金剛砂 浸透 回轉 研磨布로써 光澤을 낸 후, 마지막으로 0.5 μ m 金剛砂 粉末로써 光澤을 낸다. 새로이 光澤을 낸 面을 HNO₃ 30%, HCl 20%, H₂O 50%, 弗化水素酸 5%의 混合溶液에 담그어서 마이크로-에칭(macro-etching)을 시킨다. 그 결과 나타나는 塑性變形面 즉 腐蝕된 面은 대부분 그 面에 있어서의 識別이 뚜렷하다. (弗化水素 HF는 취급하기에 매우 危險하므로 많은 注意를 要하며 마스크를 반드시 着用하여야 한다.

(2) 細工用 粘土(plasticine)

細工用 粘土는 模型의 材料로써 押出, 壓延, 鍛造加工 등의 實驗에 오래 전부터 部分的으로 사용되었는데, (Tresca는 이것을 사용하여 그 結果를 1868年 研究報告書에서 발표하였다) 특히 이것은 로울 孔型(roll pass) 設計에 成功的으로

사용되었다. 模型은 색깔이 相異한 2個 혹은 그 以上の 細工用 粘土의 層이 겹쳐져 이루어져 있다. 이것은 많은 時間이 所要되며 때때로 層 사이에 充分한 附着力을 確保하기가 어렵다. 즉 서로 다른 색깔은 종종 相異한 應力-變形率 關係를 나타낸다. 細工用 粘土는 溫度와 變形率에 매우 敏感하며, 室溫에서 낮은 速度이면 그것의 降伏點은 약 0.14N/mm²(20 lbf/in²)이다. 白色 細工用 粘土 試片에는 變形 後의 變形率의 分布와 流動을 細密하게 보이기 위해서 正四角形 格子線을 얇게 印刷할 수 있다. 이것은 종종 格子線 解析法(viscoplasticity)이라 불리워 지는데, 表面 金屬의 移動이 明白하게 보이도록 하기 위해서 많은 部分이 黑色으로 되어 있고 殘餘部分은 白色으로 되어 있다.³⁾ 軟質의 白色 細工用 粘土에 硬質의 黑色 細工用 粘土가 둘러 싸고 있는 이것은 熱間前方押出의 實驗⁴⁾에 利用된다. 例컨대 前方押出加工의 경우 D.M.Z.(dead metal zone)은 押出素材의 變形되지 않은 앞 部分으로 明白하게 識別될 수 있다. 플렌치초크(french chalk)는 變形된 細工用 粘土가 金屬流動 研究에 利用될 때 潤滑材로써 使用된다.

細工用 粘土 實驗을 根據로 하여 荷重을 決定하는 데는 많은 注意가 要望된다. (스트레인 게이지가 壓力 測定을 위하여 細工用 粘土內에 성공적으로 插入되었다)^{5), 6)}

Lynch는 細工用 粘土에 대한 變形率速度를 算出했다⁷⁾.

Johnson⁸⁾ 등은 多樣한 入射角에서 圓筒形 彈丸의 衝突에 의한 變形의 樣相과 超速度彈孔(hyper velocity craters)를 細工用 粘土를 使用하여 詳細히 說明했다. 一般的으로 金屬에 있어서의 超速度現象은 3000 m/sec 以上の 速度가 필요하지만 細工用 粘土의 降伏應力이 金屬보다 매우 낮으므로 750m/sec의 彈丸速度에서 어느 程度 비슷하게 實驗할 수 있다.

(3) 金屬試片上的 格子

塑性變形工程 실시 前에, 研究를 위해 採擇된 流動 평면내의 試片(즉 押出素材)에 正四角形의 格子線은 스탬핑(stamping) 또는 밀링머신인

에 의해 正確하게 그어질 수 있는데, 圓形棒材는 直徑의 徑面을 따라 두 個로 갈라진다.

變形率 계산을 위한 正確한 點變位 측정은 때 때로 可能한데, 이 方法은 Thomsen 과 그의 同僚들에 의해 「格子線解析法」이라고 命名되었고, 押出, 壓延 및 引拔加工에서 應力과 變形率의 分布測定을 위한 實驗的 方法으로 오랫동안 使用되어 왔다.

格子의 半徑과 圓의 徑, 혹은 아주 작은 圓 또는 正四角形 格子는 薄板金屬 成形을 위한 素材에 그어질 수 있고, 혹은 포토 프린팅(photo printing)으로도 可能하다⁹⁾. 특별히 壓縮試驗에서 引張變形의 領域을 알기 위해 格子線을 바깥 表面 그을 수도 있다.

(4) 펀치(punch)의 荷重—行程 圖表

荷重—行程 圖表에서 급속한 傾斜變化는 종종 變形形態가 變化한다는 表示가 된다. 즉 押出에서 定常狀態 押出의 停止, 非定常狀態의 始作, 최종적으로 파이핑(piping)의 生成, 또한 W-프레임(抵速으로 에너지를 흡수하는 構造)의 破壞 등이다. 分析을 위한 荷重 기록은 適當한 變形率速度에서 求해진 流動應力의 데이터와 이에 대응하는 變形率을 필요로 한다.

갑작스럽고 불규칙적인 힘의 變化는 薄壁으로 된 튜브의 軸方向 壓縮에서 버클링(buckling) 現象을 일으킨다.

(5) 結晶粒子的 構造

현미경檢査로써 최망치로 加工된 金屬의 상대적으로 얇어진 部分의 찌그러진 粒자를 볼 수 있다. 또한 특수한 粒子變形形狀은 piispanen¹⁰⁾의 初期壓延工程 例에서 보듯이 심한 變形의 線으로 나타난다. 押出과 壓延加工에서와 마찬가지로 結晶粒자는 한 方向으로는 纖維組織을 일으키고 다른 方向에서는 현저한 壓縮을 나타내면서 變形되어지는 것이 있다. 結晶粒자가 커진 加工體내의 層 혹은 線은 局部的으로 加工과 再結晶에 연관되어 있다²⁾.

극부적으로 偏重되고, 빠른 速度의 變形은 高速의 블랭킹(blanking)과 彈丸을 맞은 주위에서 마르텐사이트(martensite)¹¹⁾나, 혹은 다소 빠른

알루미늄 押出加工에서 보여진 크리스마스 트리 이形態와 같이 相變態로서 나타날 수 있다.⁴⁾ 큰 變形과 結晶粒자가 表面光도와 外觀에 연관된다는 것은 薄板金屬試驗의 「오렌지 피일」(orange peel) 現象에서 잘 알려져 있다.

Oxley 나 다른 연구자들은 應力分布를 測定하고, 특히 變形硬化 미끄럼 線場을 유도하기 위해 二次元 切消加工에서 剪斷平面을 통한 金屬의 흐름에서, 結晶粒자의 變形에 대하여 계속적인 寫眞관찰을 사용하고 있다.

(6) 납(鉛)

鉛은 낮은 流動應力으로 加工時에 낮은 荷重을 필요로 하므로 實驗用으로 많이 利用된다. 純鉛은 再結晶溫度가 室內溫度 가가이 있기 때문에 편평한 上端을 가진 應力—變形率 曲線을 보여 준다. 그러므로 純鉛은 熱間加工되며, 또한 變形率速度에 敏感하다. Te-Pb 合金은 變形率速度에 덜 敏感하다.

(7) 스트레인 게이지

工具의 彈性變形分布는 抵抗스트레인 게이지로써 쉽게 測定되며, 작은 變形率에 대해서는 스트레인 게이지를 直接 試片에 부착할 수 있다. 특히, 塑性變形된 金屬에서 法線應力의 測定을 쉽게 하기 위해 핀에 부착할 수도 있다.¹²⁾¹³⁾ 傾斜된 핀은 接線應力測定을 쉽게 하기 위해 사용되며, 摩擦係數를 求할 수 있게 한다.

또한 스트레인 게이지를 平板 혹은 로드셀(load cells)에 부착시켜 應力 “hills”를 測定하는데 사용하고 있다.

薄膜方法에서는, 핀을 직접 變形될 材料에 접촉시키는 것이 아니라, 工具內에 뚫어진 구멍속으로 밀어 넣고, 그 나머지 餘은 假膜으로서 작용한다.¹²⁾

(8) 摩擦係數(μ)測定¹⁰⁾

첫째, 두 個의 探針 또는 핀을 넓은 工具表面에 끼워 넣는데, 하나는 剪斷力을 다른 하나는 壓縮力을 表示하도록 한다.¹⁴⁾

둘째, 平均摩擦係數는 錐기形 다이(die)를 통하는 引拔加工後에 荷重測定으로써 추정되어 질 수 있다.

셋째, 시가 試驗(cigar test)에서, 幅보다 약 10 배 더 긴 길이의 얇은 直六面體試片은 突出된 얇은 다이 사이에서 壓縮을 받는다. 摩擦은 展性에 영향을 미치며, 型變化와 摩擦係數와의 관계를 나타내는 데도 사용된다.

넷째, Male 과 Cockcroft¹⁰⁾에 의해 소개된 링 테스트(ring test)에서 평평하고 平行한 다이 사이에서의, 짧은 링 혹은 圓筒의 軸方向壓縮은 摩擦狀態에 따라서 內徑과 外徑을 變하게 하는 要因이 된다.

다섯째, 定常적으로 증가하는 後方引張力은 中立地點이 로울 出口와 一致하도록 로울 틸을 通하는 스트립(strip)에 작용할 수 있다. 摩擦力은 그때 同一方向에서 全表面에 作用하며 摩擦係數는 로울荷重에 대한 토오크의 比에서 求해진다.

(9) P.V.C 와 高衝擊 폴리스틸렌(high impact polystyrene)

P.V.C 管은 塑性힌지(hinges)線을 나타내기 위해 軸方向의 塑性破壞(buckling)試驗에 效果的으로 사용될 수 있다. 이 材質은 破壞없이 대단히 큰(延性) 變形率을 허용하며, 따라서 완전하게 줄을 수 있는 形狀이 얻어지며, 지금까지 많이 研究되어 왔다.¹⁵⁾

高衝擊 폴리스틸렌은 다소 類似하게 셀 座屈(shell buckling)에서 塑性破壞現象을 나타내기 위해 사용되고 있다.¹⁶⁾

(10) 缺陷: 空洞(voids or cavities), 균열, De-densification, 파이핑

塑性變形이 이루어진 樣相과 사용된 材料의 冶金組織의 결과인 缺陷은 加工된 延性的 제품을 肉眼검사를 할 때 注意해서 관찰해야 한다. 이 缺陷의 대부분은 작은 空洞이나 龜裂이다.

평평한 剛體로 된 두 個의 壓子를 접근시킬 때, 만약 두 壓子の 間격對 幅의 比가 充分히 크면 中央空洞(central voids)을 일으킨다.

Nasmyth 는 이 缺陷(실체는 결합의 위치가 쉽게 이동되지만)을 避하기 위해 세 個의 壓子를 사용한 峯기形 모루(vee-anvil)를 제작해서 소개했다.

前方押出加工에서의 파이핑現象과 厚壁 튜브

브加工에서 다이로부터의 코너 리프팅(corner lifting)現象은 殘餘素材의 길이가 아주 짧을 때 發生한다는 것은 잘 알려져 있다. 심한 内部缺陷은 前方과 後方押出의 結合에서 일어 날 수도 있다.

프로파일(profile)링 壓延加工에 있어서 表面缺陷은 變形的 특수한 最終樣相에 의해 일어나며, 어떤 간단한 理論에 의해 종종 解析될 수 있다.

接線速度不連續에 의한 龜裂은 不充分한 延性 材料에서 발생한다.

高引張應力과 變形率의 領域에서 材料의 密度는 현저하게 減少한다는 것은 板材의 드로우잉(drawing)에서 잘 알려진 사실이다.

爆發加工으로 팽창된 튜브에서와 같이 過度變形된 제품에서 발생한다. 다양한 金屬加工 工程중 발생하는 缺陷의 상세한 研究는 참고문헌(17)에 있다.

(11) 簡單한 觀察

金屬箔으로 된 우유병 가개를 손가락으로 눌렀을 때 약 12 個의 半徑방향의 주름이 생기는데, 이것은 逆다이프 드로우잉(deep drawing)作用으로 볼 수 있다. 腐蝕된 가정용 그릇과 자동차의 손상된 表面을 보면, 특징적이고 유용한 變形的 흔적과 形狀이 짐사되어지고, 研究도 可能하다. Cuppy 혹은 chevron rod 는 押出加工 軸線上에서 관찰되어질 수 있는데, 즉 橫線은 引張變形을 받기 쉽고 그 결과 破壞를 초래하는 수가 많다. 또한 튜브와 셀에 있어서 塑性破壞現象(buckling)과 鍛造加工에 있어서 材料의 겹침(lap) 발생을 고려해야 한다.

塑性힌지는 肉眼으로 쉽게 찾아낼 수 있으며, 壓込現象연구에 있어서는 파일 업(pile up) 혹은 싱킹 인(sinking-in)을 注意해야 한다.

그림 1은 단순壓縮加工中 얇은 剛體定盤上에 垂直壓力分布를 定性的으로 證明하는 方法을 나타내고 있다. 定盤에 구멍이 뚫려지고, 그 뚫어진 구멍을 통해 變形된 金屬에 의해 測定된 관통 깊이를 Gubkin¹⁸⁾은 「Friction hill」이라고 했다.

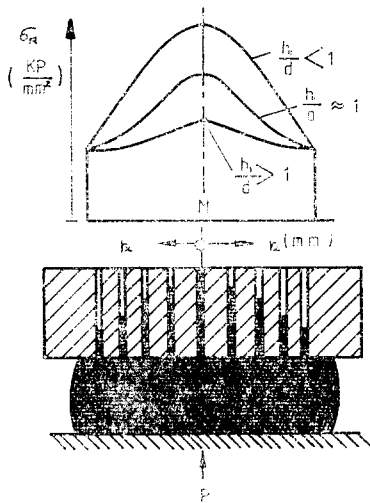


그림 1. 소성 압축시의 압력의 분포

(12) 硬度測定

冷間加工된 부분에 대한 硬化變化圖表를 作成함으로써 塑性加工度 혹은 變形을 평가할 수 있고, 硬化係數가 높을수록 加工度は 깊하다.

高溫에서 長時間加工된 部分의 硬度는 加工時의 溫度에 따라 나타낼 수도 있는데, 高溫에서 加工을 받은 경우는 더 軟化된다.

(13) 熱線(heat-line)

熱間鍛造(상대적으로 낮은 溫度이지만)에서와 같이 材料의 表面에 變形이 심한 드문드문한 領域들은 熱線으로써 立證될 수 있다. 塑性變形을 위한 에너지는 높게 주어지며, 熱에너지로 인한 外觀은 짧은 시간에 有限溫度變化에 대해서 독특하게 나타난다.¹⁹⁾

定常狀態 熱間壓延加工 工程에서, 加工領域은 高溫일수록 光彩를 많이 낸다.

(14) 시니-포토그래피(cine-photograpy)

適當한 速度에서 사진 촬영은 變形과 힘의 過程의 記錄을 가능케 하며, 低速二次元機械加工에 대한 應力解析은 低速 필름을 사용해서 研究되어지고 있다. 移動하는 塑性힌지를 포함하는

彈丸에 의해 끝에 荷重을 받는 외팔보와 水中 사진 촬영을 요하는 爆發成形과 같은 動的塑性은 특히 시니-포토그래피를 요구한다. 高速으로 움직이는 彈丸으로 板의 관통을 記錄하기 위한 超高速사진(1 초당 백만회)은 가끔 超高速 衝擊現象을 感知하는데 사용된다. 1 초당 回數는 매우 重要な 要素이다.

이에 관한 전문서적들이 많으므로 여기서는 생략한다.

(15) 光彈性(photo elasticity)

어떤 폴리메릭(polymeric) 材質의 二重屈折은 模型試驗에서 工具와 加工物 사이의 接觸 영역에서의 塑性應力分布를 測定하는데 사용된다. 이것은 Unksov와 그의 同僚들에 의해 精密과 解析 및 成形工程의 적절성을 위해 특히 조심스럽게 사용되어 왔다.

그들은 塑性的으로 變形하는 物體에 있어서의 應力分布를 表示하기 위해 加工物 혹은 工具에 대해 光彈性實驗을 빈번하게 했으며,²⁰⁾ 그 境界上에서는 摩擦舉動을 測定했다.²¹⁾

(16) 光塑性(photo plasticity)

塑性變形된 領域에서, 二重屈折이 應力分布를 나타내어 주는 材料를 개발하는데 많은 노력을 하고 있다. Javornicky²²⁾의 이에 관한 著書는 이 論題에 대한 시발점이다.

Unksov와 Safarov²¹⁾는 光學的 影響을 받지 않는 材料 ONS(dibutyl-phthalate 11%가 함유된 有機유리)를 光學作用平板의 兩面에 接觸시킨 것을 사용함으로써 實驗적으로 接觸應力을 測定했다.

(17) 光應力(photo stress)

光彈性材質의 薄板(~1mm)을 測定對象物 表面에 接合 시킨 후 反射偏光器를 사용함으로써, 對象物의 表面變形이 接合된 樹脂板에 줄 무늬 形狀으로 나타남을 알 수 있다. 실제 要素에 대한, 應力直接測定法은 보통 光彈性方法보다 더 우수한 測定法이다.²³⁾

최근에 카이로 大學의 Bayomi 교수는 이 技法을 이용하여 큰 變形의 彈性理論으로 塑性研究가 可能하다고 주장했다.

(18) 응력코우트(stress coats), 취성락커(brittle lacquers), 산화층(oxide layers), 석회수(white wash), 수지(resin)

심하게 變形된 構造의 部材에 칠해져 있는 脆性 락커 혹은 코팅(brittle lacquers or coating)은, 表面變形分布에 따라 龜裂 또는 금이 가는데, 이 形狀은 應力分布에 따른 干涉形成을 설명해 준다. 이 技法은 彈性과 塑性의 變形率이 거의 同一한 크기일 때 有用하게 적용된다.²⁴⁾

(19) 殘留應力(residual stresses)

殘留應力은 (i) 變形된 試片으로부터 한 層을 에칭(etching)하면, 그와 同時에 일어나는 變形에 의한 彈性變化에 의해, (ii) 특수 層을 機械加工함으로써, (iii) X線 分析에 의해 발견되어진다.

(20) X線

X線 回折에 의한 應力解析은 金屬의 다양한 原子平面에서 反射된 光線에 의한 回折現象을 관찰함으로써 이루어지며 두 平面 사이의 공간은 應力에 의해 변경된다. 또한 이 方法은 殘留應力測定에도 사용된다.

X線 寫眞은 또한 高速彈丸의 衝擊에 의한 剛體의 貫通을 보기 위해서도 사용된다.

(21) 전기 도금(electro-plating)

Okubo²⁵⁾는 鋼材試片을 구리鍍金한 後 試片의 表面變形率의 決定方法을 연구해 오고 있다. 이 方法은 脆性 코팅方法과 類似하나, 더 우수하다고 한다.

(22) 파라핀 왁스(parafin wax)

可塑 왁스는 규모가 비교적 큰 變形研究용으로 사용되는데, 水中實驗을 위해서도 사용되며,²⁶⁾ 塑性變形領域의 形狀을 나타내기 위한 특수 왁스도 있다.²⁷⁾

(23) 超塑性材料(superplastic materials)

최근 몇 年 동안, 이들 材料는 대대적으로 研究되고 있다. 이들은 極小結晶 粒子材質이며, 加工은 이들의 融解溫度의 1/2 程度에서 이루어지며, 高變形率硬化指數 혹은 對數指數 $m \approx 0.5$ 를 가지고 있다.

「Prestal」이라는 Zn-Al, 78/22% 合金의 板材

는 높은 變形率 速度硬化 效果를 豫示하기 위하여 많이 사용되고 있다.

(24) 溫度에 銳敏한 페인트(temperature sensitive paints)

이들은 金屬加工分野에서 응용 부분이 限定되어 있지만, 오랫동안 이용되고 있다.

(25) 熱電對(thermocouples)

이들은 加工에 의한 溫度變化測定용으로 사용되며, 만약 塑性變形이 일어날 加工物領域에 놓이게 되면, 塑性變形이 될 것이므로 無用한 것이 된다.

(26) 비누膜과 모래 더미 類似體 (soap-film and sand-heap analogies)

角柱軸의 彈性과 塑性 비틀림의 研究에 대한 類似體는 잘 알려져 있다. 變化도가 測定되었던 비누膜을 사용해서 彈性應力分布을 찾는 方法은 研究되어졌으며,²⁴⁾ 토오코, 動力 및 應力 등을 測定하기 위한 電氣的 類似體와 같은 有用한 것들은 참고문헌 (24)의 제16장에 있다.

充分한 塑性荷重傳達能力을 減少시키는데 있어서의 龜裂의 效果는 McClintock에 의해 증명되었다. 龜裂을 「凍結」시키기 위해 모래 더미(sand heaps)에 페인트를 뿌림으로서 그들의 形狀은 保存된다.

(27) 파라핀 블록(paraffin blocks)

이것은 Nadai에 의해 사용되었으며, 심한 變形의 領域을 나타내기 위해서는 참고문헌 28의 제1권과 제2권을 참조하면 된다.

(28) 퍼스펙스(perspex)

이것은 깨지기 쉽고, 半透明하기 때문에 爆發에 의해서 발생하는 彈性應力波動研究에 특별히 사용되며, 內部的 破壞나 龜裂의 領域을 명백히 表示하지만 많은 에너지를 消費한다.

(29) 소(燒) 석고(plaster of paris)

衝擊 혹은 爆發荷重을 받을 때 脆性材料로 만들어진 部分의 破壞面이나 깨어진 조각을 研究하기 위해서는 抵抗張破壞強度가 요구되기 때문에, 이것은 有用하며 이때 硬化時間(curing time)은 重要한 要素가 된다.²⁴⁾

(30) 실리콘 고무(silicone rubber)

실리콘 고무는 模型製作에 있어서 簡便성과 迅速성이 有用한 試驗材料이다. 이 方法은 連結部의 細密함을 구하기 쉽고 經濟的이면서 어떤 作業場에서도 作業이 可能하다. 또한 이 材料는 큰 彈性처짐(또한 큰 塑性처짐)을 가져온다.^{29), 30)}

ICI 製品「silcoset」No.105 고무가 模型製作을 위해 사용된다. 이것은 쉽게 부을 수 있는 白色 液體인데, 여기에「silcoset」硬化劑(curing agent) A 를 添加해서, 보통 室內溫度에서 약 4時間동안 乾後, 약 24時間동안 硬化시킨다. 이들 時間은 硬化用 약품의 比率에 따른다. 이렇게 해서 된 고무는 硬化에 의해서 조금 收縮할 뿐이며(약 0.5%), 어떠한 熱處理도 요구하지 않는다. 이것은 완전히 스스로 粘着되며, 실코셀 초벌칠(silcoset primer)이 사용되는 金屬에는 좋다. 硬化된 고무는 약 80%의 破壞變形率을 가지며, 引張 스트립(strip)試驗에 있어서 탄성계수(Young's modulus)는 약 1.4N/mm² (200 lbf/in²)이다. 그 應力-變形率 曲線은 약 20%의 變形率까지는 線形的으로 增加한다. 比重은 1.18이고 프와송 比는 약 0.5이다. 模型製作을 위해서는 形狀에 따라서 3가지 可能한 方法이 사용될 수 있다. 즉, 스피닝(spinning), 鑄造, 그리고 이 둘의 複合方法에 의한 것이다.

또한 變形率을 測定하기 위해 模型上에 格子線을 精確하게 그을 수 있다.

模型材料로서의 短點은 크립(creep)이 일어나고 時間에 따라 強度를 잃는 것이다.

폴리스틸렌 폼(polystyrene foam)도 같은 목적으로 사용되어지고 있다.

(31) 插入物(inserts)

金屬이나 와이어(wire)같은 試片은 링壓延加工이나³¹⁾ 彈丸衝擊加工 같은 塑性加工에서 總變形을 測定하기 위해 塑性變形中인 剛體內에 빈번히 插入된다.

(32) 특수한 加工工程의 金屬試驗法

(i) 2軸 벌징試驗

이 試驗은 광범위하게 사용되며, 그리고 應力, σ/ϵ , 2軸應力을 받은 薄板의 ϵ 特性을 구하기 위해 대대적으로 研究되고 있다. 즉, 이 試驗은

薄板引拔과 成形過程을 研究하기 위한 기본 資料이며 큰 變形이 가능하고 方程式 $\sigma = A\epsilon^n$ 에 있어서 變形指數 n 을 쉽게 구할 수 있다. (n 은 stretch-forming 능력의 尺度이다.)³²⁾

(ii) 1軸方向 壓縮試驗(unidirectional compression tests)

室內溫度로부터 熱間加工溫度까지의 범위에서 圓筒試片上에서의 低速(10^{-3} /sec)과 高速(10^3 /sec)壓縮試驗(즉, 一定變形速度 cam plastometer 壓縮試驗)은 鍛造加工과 壓延加工의 解析에 필요하다. 이 試驗結果의 대부분은 다른 곳에도 적용된다. (참고문헌 (10)의 p.30 참조)

(iii) 큰 變形 비틀림 試驗

비틀림 試驗의 結果는 熱間加工性試驗을 위한 적용 外에도, 厚壁의 壓力容器에 대한 應力/直徑팽창 曲線을 예견하기 위해 直接 적용된다.

(iv) 平面變形率壓縮試驗

Ford 와 Watts¹⁰⁾ 에 의해 개발된 이 試驗은 많은 관심을 끌고 있다.

(33) 異方性(anisotropy)

이것은 어떤 金屬의 점이 디이프 드로우잉이 되었을 때, 귀(ears)가 발생함으로써 特徵이 나타난다. 모아레(moirè) 技法은 薄板金屬에 대해 R 값(定常異方性, 單軸引張試驗에서의 $R = \text{幅변형율} / \text{두께변형율}$)을 구하기 위해 사용되어졌다. 이는 板材의 成形性測定에 사용되며, 상대적인 極限 디이프드로우잉 比를 나타낸다.

金屬成形에 관한 異方性的의 견해는 참고문헌 (34)에 있다.

(34) 서모그래피(thermography)

시네마토그래픽(cinematographic) 寫眞으로써 全表面에 걸친 表面溫度差를 測定하는 手段으로 이용하고 있지만, 아직도 金屬成形에 대한 적용은 하지 못한 것으로 보인다.

최근에 赤外線寫眞이 熱間鍛造를 하는 동안에 變形된 材料에 있어서의 溫度分布를 얻는데 사용되었다.³⁵⁾

참 고 문 헌

1. Johnson, W., Sowerby, R. and Haddow,

1. J.B., Plane Strain Slip-Line Fields, Ed. Arnold, 1970.
2. Kurrein Max, Plasticity of Metals, Griffen, London, 1964.
3. Aku, S.Y., Slater, R.A.C. and Johnson, W., The use of plasticine to simulate the dynamic compression of prismatic blocks of hot metal, Int. J. Mech. Sci., 9, 495, 1967.
4. Johnson, W. and Kudo, H., The Mechanics of Metal Extrusion, Manchester Univ Press, 1962.
5. Nakazima, K., Naoi, H. and Watanabe, K., Study of the rolling load and deformation in calibre rolling, Proc. CSTIS, Suppl. Trans. I SIJ, 11, 640, 1971.
6. Yagishita, K., Trukamoto, H., Egawa, T., Oomori, S. and Ibushi, J., A study of simulative model tests for metal forming using plasticine, Mitsubishi Technical Bulletin, No. 91, 1, July 1974.
7. Lynch, J., Hawkyard, J.B. and Johnson, W., Laboratory scale experiments into cavity and crater formation by high explosive charges, J. Mech. Eng. Sci., 12, 339, 1970.
8. Johnson, W., Travis, F.W. and Loh, S. Y., High-speed cratering in wax and Plasticine, Int. J. Mech. Sci., 10, 593, 1968.
9. Zaat, J.H., T.N.O. June 1958, Publication 55, (Dutch).
10. Johnson, W. and Mellor, P.B., Engineering Plasticity, Van Nostrand Reinhold, 1973.
11. Johnson, W., Impact Strength of Materials, Ed. Arnold, 1972.
12. Mamalis, A.G. Johnson, W. and Hawkyard, J.B., On the pressure distribution between stock and rolls in ring rolling, J. Mech. Eng. Sci., 18, 184, 1976.
13. Mamalis, A.G., Johnson, W. and Hawkyard, J.B., Pressure distribution, roll force and torque in cold ring rolling, J. Mech. Eng. Sci., 18, 196, 1976.
14. Cole, I.M. and Sandsome, D.H., A review of the application of pin load cell pressure measurement techniques to metal deformation processes, 9th Int. MTDR Conf., Birmingham, 1968.
15. Soden, P. D., Al-Hassani, S. T. S. and Johnson, W., The crumpling of polyvinylchloride tubes under static and dynamic axial loads, Institute of Physics Conf., Ser. No.21, 327, 1974.
16. Kitching, R., Houlston, R. and Johnson, W., A theoretical and experimental study of hemispherical shells subjected to axial loads between flat plates, Int. J. Mech Sci., 17, 693, 1975.
17. Johnson, W. and Mamalis, A.G., A survey of some physical defects arising in metal working processes, 17th Int. MTDR Conf., Birmingham, 1976.
18. Gubkin, S.I. and Mickevici, N.T., Die Verteilung der Normalspannungen beim freien Stauchen von Metallen, Sbornick Nauch Trudov Fiz. AN Belorusskoi SSR, 2, 37, 1955.
19. Johnson, W., Baraya, C.L. and Slater, R.A.C., On heat lines or lines of thermal discontinuity, Int. J. Mech. Sci., 6, 409, 1964.
20. Unkssov, E. P., Engineering Plasticity, Butterworths, London, 1962.
21. Unkssov, E.P. and Safarov, Yu. S., Experimental investigation of contact stresses in extrusion processes, Arch. Bud. Maszyn, Tom XX, 55, 1973.
22. Javornicky, J., Photoplasticity, Elsevier, 1974.

23. Kawata, K., Elasto-plastic stress analysis and determination of flow limit by means of photoelastic coating method, Proc. Int. Symposium on photoelasticity, Pergamon Press, 1963, 219~230.
24. Hetenyi, M. (Ed), Handbook of Experimental Stress Analysis, J. Wiley and Sons, 1950.
25. Okubo, H., Electroplating method of stress analysis, Memoirs, Fac. of Eng. Nagoya Univ., 20, No.1, May 1968.
26. Bodsworth, C., Halling, J. and Barton, J.W., The use of paraffin wax as a model material to simulate the plastic deformation of metals, J. Iron Steel Inst., 185, 375, 1957.
27. Danckert, J. and Wanheim, T., Slip-line wax, Experimental Mechanics, 16, 318, 1976.
28. Nadai, A., Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol. I and II, 1950 and 1963 resp., McGraw Hill Book Co.
29. Fessler, H. and Foreman, J.J., Large strains of drum heads studied with silicone rubber models, J. Mech. Eng. Sci., 3, 42, 1961.
30. Pitman, F.S., The behaviour of intersections in cylindrical pressure vessels, Ph. D. Dissertation, Cambridge Univ. 1971.
31. Mamalis, A. G. Hawkyard, J. B. and Johnson, W. Spread and flow patterns in ring rolling, Int. J. Mech. Sci., 18, 11, 1976.
32. Mellor, P.B., Stretch forming under fluid pressure, J. Mech. Ph. Solids, 5, 41, 1956.
33. Kato, K., Murota, T. and Jimma, T., Improvement of Moiré and grid methods of plastic strain analysis and their application to extrusion, Bulletin JMSE, 12, (49), 32, 1969.
34. Sowerby, R. and Johnson, W., A review of texture and anisotropy in relation to metal forming, Materials Sci. and Eng., 20, 101, 1975
35. Klafs, O., Ermittlung der Temperaturverteilung im Werkstück beim Warmumformen, Industrie Anzeiger, 91, 1117, 1969.

