

## 소성가공에서의 Tribology

오 박 균

한국과학기술원 열유체 및 항공공학연구실장

### 1. 서 론

Tribology라는 용어는 마찰, 마모, 윤활의 과학, 기술을 한마디로 나타내는 말이다. 우리들의 일상생활, 산업활동, 특히 소성가공에서 Tribology의 역할의 중요성은 새삼 강조할 필요가 없다.

소성가공에서 가공방식, 공구, 소재, 온도, 속도에는 무수한 조합이 있고, 마찰-마모-윤활의 상호연관 또한 복잡하다. 역학, 열전달, 물리학, 화학적 과정이 동시에 상호작용을 하면서 진행되는 이 시스템에서 크기는 공작기계로부터 작게는 micron 정도의 표면 凹凸과 윤활막 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 Å 정도의 정체불명체가 결정적인 역할을 한다.

본 고에서는 냉간압연, 단조, 인발 등에 Tribology를 응용하는 입장에서 Tribology system의 일부를 공구와 재료의 윤활제를 제외한 micro 접촉상황을 중심으로 분류 정리하고, 이것과 공업적 소성가공에서 공구-재료 접촉면현상과 그 연계를 가능한 한 이해하기 쉽게 서술하였다. 이를 통하여 소성가공 기술자 및 연구자가 소성가공의 목적을 달성하는 가운데, Tribology 적으로 양호한 결과를 경제적으로 얻고자 하는 시행, 개발, 연구에 대해 도움이 되고자 한다.

### 2. System의 개념

그림 1 및 그림 2에 공업적 마찰, 마모, 윤활과정(Tribo-process)의 System 개념을 나타냈다. 그림

1의 좌측에는 소성가공의 Tribo-process에 관련된다고 생각되는 하드웨어 및 그것의 조작조건을 Engineering input로 주고 있으며, 우측은 결과로 생긴 Output로서, 상기 하드웨어에 발생한 각종 물리적, 상태적 변화이다. 그리고, input와 output 사이는 단지 Tribology적 Process라는 Block box로 연결되어 있다. 공업생산에서 양호한 결과를 얻기 위한 input 계획작성, 혹은 output의 계획치로부터 input를 수정하는 시행을 효과적으로 하기 위해서 그림 1 중앙의 Block box의 계획을 명확히 할 필요가 있다.

그림 2는 Tribology적 Process를 개념적으로 정리한 것이다. 좌측은 Engineering input와 Processor에 해당하는 micro 접촉상황을 연결하는 Input interface에 상당하며, Tribology적 조건이라고 불러도 좋다. 이 조건들의 다수는 그림 1의 Engineering input에 따라 직접 정하고, 다른 것은 열전도, 탄성소성 역학적해석 및 재료과학적 법칙 등에 의해 이끌어 진다. 단, 압력과 온도의 micro 분포는 그림 2의 Tribology적 output중에 있고, 마찰계수와 접촉면의 전열저항 등에 의해 다소 영향을 받는다. 그림 2의 우측은 Tribology적 조건(input)이 micro 접촉상황을 매개로 하여 발생시킨 Tribology적 결과(output)로서, 그림 1의 우측의 Engineering output로 직접, 간접적으로 변환된다. 이 Tribology적 Process중 input와 output의 관계가 Tribo-process에 대한 Simulation 시험법에서 조사되고 있는 관계이다.

그림 2에서도 micro 접촉상황을 명확히 하지 않

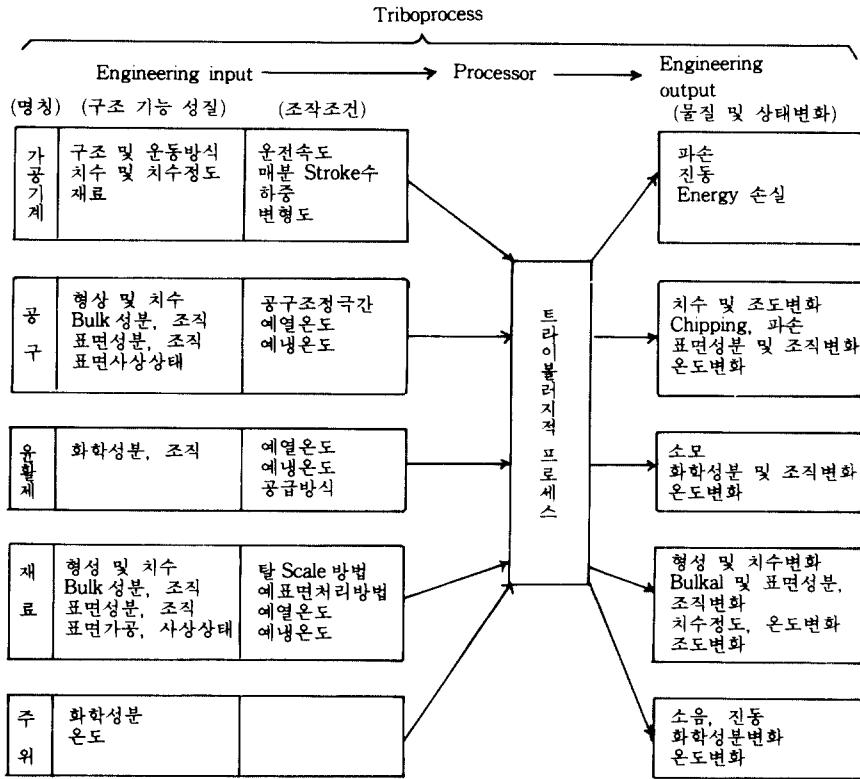


그림 1. 實機생산조건에서 Tribo-process의 체계

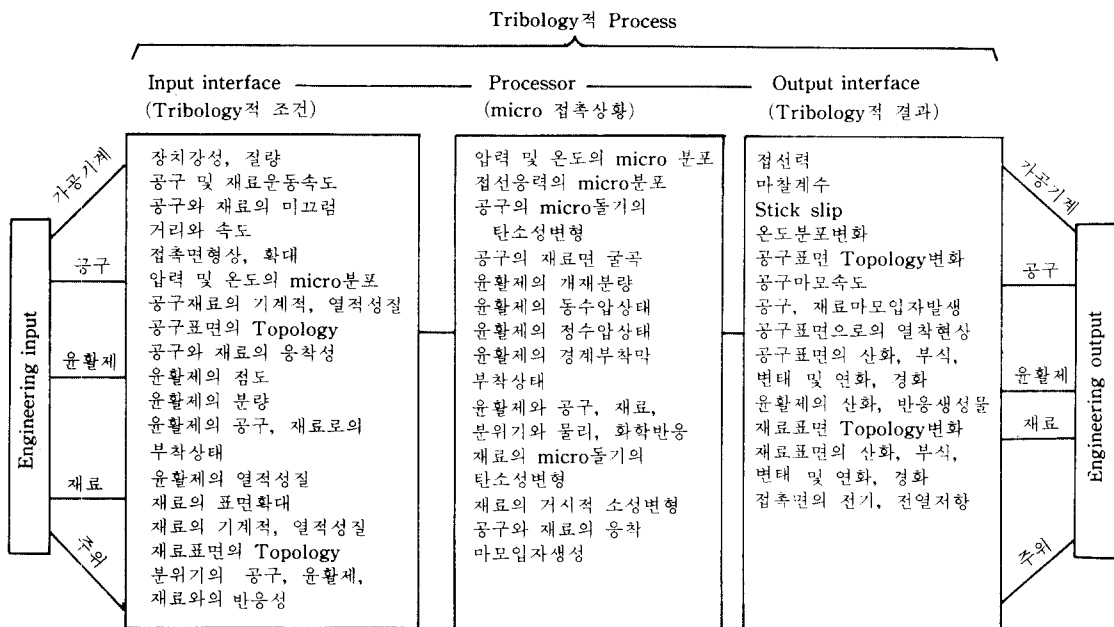


그림 2. Tribology적으로 본 조건과 결과의 관계

는 한, 무수히 많은 실험을 하여, 막대한 양의 Tribology적 결과를 제척하지 않으면 안된다. 따라서, 많은 Tribology 기초연구자가 이 micro 접촉상황에 관하여 연구하고 있다. 본 고에서도 다음에 모델화한 micro 접촉상황을 설명하기로 하겠다.

### 3. Tribology적 Process와 윤활 mechanism

윤활 mechanism의 형태를 분류하는 것으로 그림 3에 나타낸 스트라이백 선도가 있다. 이것은 탄성체끼리 2면간 접촉하는 경우에 적용된다. 이 선도는 세로축에 Tribology적 결과중 마찰계수  $\mu$ , 가로축에 Tribology적 조건중 속도  $V$ , 하중  $P$ , 윤활유의 점도  $\eta$ 를 선택하여, 그들 사이의 관계를 나타내고 있다. input인 속도의 증가, 하중의 저하, 윤활유 점도의 증가에 따라 mechanism이 경계윤활, 혼합윤활, 유체윤활로 형태변화를 하는 것을 나타내며, 이때 output의 마찰계수  $\mu$ 가 경계윤활영역에서 거의 일정치를 유지하다가 혼합윤활영역에 들어가서 급격히 감소하고, 유체윤활영역에서 완만히 증가하는 것을 나타내고 있다.

또, 탄성체끼리 접촉하는 경우에는 그림 3에 나타낸 것처럼 경계면에서의 유막두께  $h$ 와 상대운동하고 있는 탄성체의 2면의 표면조도의 합  $R$ 과의 관계로부터 추정된 micro 접촉상황과 윤활 mechanism 등을 다음과 같이 구분하고 있다.

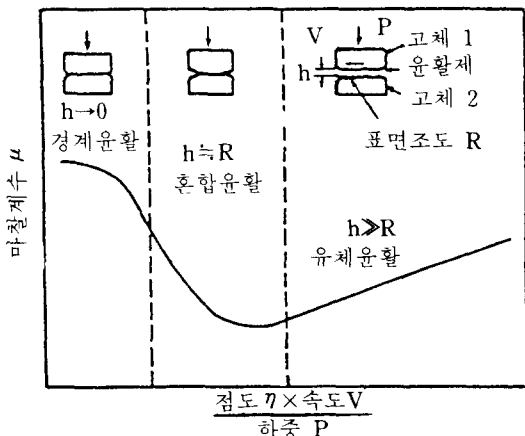


그림 3. 탄성접촉에 대한 스트라이백 선도 micro 접촉상황과 윤활 mechanism

- $h \rightarrow 0$ 일 때 경계윤활
- $h \approx R$ 일 때 혼합윤활
- $h \gg R$ 일 때 유체윤활

소성가공의 공구와 재료 경계면의 Tribology 특성이 탄성체끼리의 경계면에 비해 특징이 되는 점을 다음과 같이 설명할 수 있다.

- (1) 소성가공면의 윤활기구가 일반적으로 유체윤활보다도 경계윤활에 가깝다고 생각된다.
- (2) 가공면이 재료의 탄성 한계를 훨씬 초월한 높은 면압하에 있고, 그 면적은 매우 넓다.
- (3) 가공면의 온도가 매우 높다.
- (4) 가공면에서 미끄럼속도가 재료의 소성변형에 의해 부분적으로 변화하고, 그 방향도 변화하는 것이 있다.
- (5) 마찰면 내에서 가공중에 신생면(新生成面)을 노출한다.

동시에, 거시적 소성변형을 수반하는 소성가공면의 특징으로는 다음 3인자로 크게 집약할 수 있다.

- (1) 표면구조가 시시각각 변화하여 가는 것.
- (2) 신생면이 순차적으로 노출될 것.
- (3) 거시적인 표면변화가 발생할 것.

이처럼 재료가 소성변형하는 것에 의한 Tribology적 특징을 고려하면, 그림 2의 중앙에 있는 것처럼 micro 접촉상황 인자, 즉 재료의 탄성소성변형에 따른 조도변화, 압력 및 온도의 micro 분포, 윤활유의 개재분량, 경계부착막, 응착, 정수압상태, 동수압상태 등의 인자가 소성가공의 윤활 mechanism에 큰 영향을 준다.

소성가공에서 여러 학자들에 의해 제안되고 있는 윤활면의 micro 접촉상황 모델의 개념도를 그림 4에 나타냈다. 공구와 재료가 접촉(소성변형)을 개시하는 점에서는, 공구와 재료의 속도에 의한 윤활제의 동수압효과에 의해, 도입량(포착량)이 결정된다.

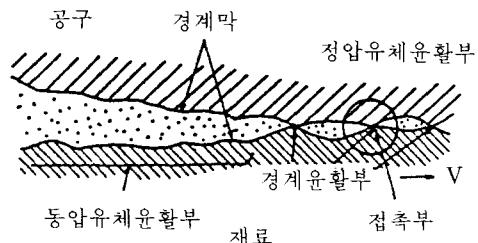


그림 4. 소성가공윤활면의 micro 접촉상황 모델

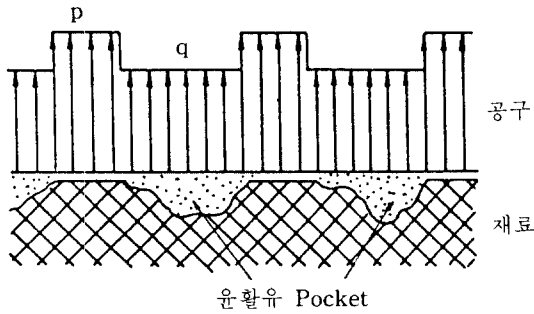


그림 5. 정수압이 작용한 유탄유 상태

또, 공구와 재료의 표면凹凸은, 그凹부에서는 유탄유를 경계면에 공급하는 효과를 발휘하고, 이凹부의 유탄유는 경계면에 있는凸부의 유탄유 부족량을 보충하기도 한다. 많은 소성가공의 경우, 소성변형영역의 경계면에는, 그림 4에 있는 것처럼 경계부착면이 작용하는 경계유탄유영역, 정수압이 발생하는 유체유탄유영역, 정수압의 발생이 없는 유체유탄유영역 등이 혼재되어 있는 혼합유탄유를 나타내고 있다. 가공조건이 엄하면, 경계유탄유영역이 증가하고, 국부적으로 금속접촉이 발생하며, 고체마찰영역이 출현한다고 생각된다.

이 접촉모델이 탄성체끼리의 접촉과 크게 다른 하나는, 혼합유탄유영역에서 그림 5에 나타난 것처럼 경계면에 들어온 재료凹부의 유탄유, 또는 재료의 소성변형에 의해 발생한 Pocket에 봉입된 유탄유에 정수압 q가 발생한다는 것이다. 이 Pocket부분이 저속, 저점도이면 보통 그림 4에 나타난 정수압이

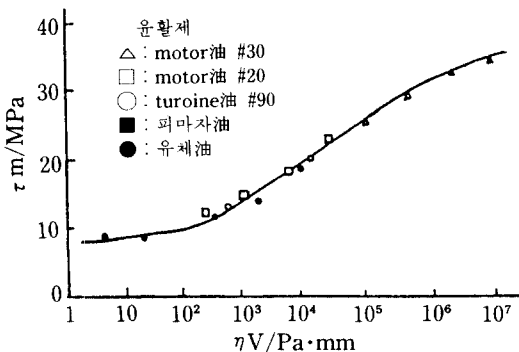


그림 6. 압축가공마찰응력  $\tau_m$ 의  $\eta V$ 의존성(재료 : 동, 접촉율  $C=0.8$ , 평균유탄유두께 :  $0.3 - 0.6 \mu m$ , 공구의 조도 :  $0.02 \mu MR_{max}$ )

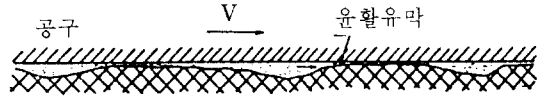


그림 7. micro소성 유체 유탄유 모델

발생하고 있는 유체유탄유영역이라 생각되고, 중간점도의 속도, 고점도 일 때는 새로 Pocket의 유탄유에 동수압이 작용할 가능성이 있다.

저 중 미끄럼속도에서 동수압의 작용을 나타낸 水野 등의 실험결과를 그림 6에 나타냈다. 이 실험결과는 금속판을 평면변형 압축후 공구를 수평방향으로 천천히 미끄러지게 할 때 얻어진 마찰응력  $\tau_m$  과  $\eta V$ 와의 관계이다. 이 실험조건에서 유막두께와 표면조도와의 관계는,  $h \approx R$ (가공중의 표면조도)이고, 탄성체끼리의 접촉모델로부터 혼합유탄유영역으로 분류되며, 스트라이백 선도에서 볼 수 있듯이  $\eta V$ 가 증가함에 따라 마찰계수는 감소할 것이다. 그러나 그림 6의 마찰계수는 증가하고 있다. 水野는 이런 유탄유상태에 관해 그림 7과 같은 micro 소성유체 유탄유 모델을 제안하고 있으며, 이런 유탄유 mechanism이 가능하게 되려면, 그림 5의 Pocket에 봉입된 유탄유에 발생하는 정수압 q에 의한 점도의 상승, q와 변형압력 p와의 차(p-q)가 작게되는 조건이 따라야 한다.

다음의 큰 차이는 공구와 재료경계면에서 일어난 거시적 소성변형에 따라 신생면의 출현, 표면적 증가 및 표면조도의 증가에 의해, 경계유탄유영역이 증가하고, 경계면온도가 상승하며, 금속접촉의 가능성이 커지는 것이다.

소성가공의 경우, 탄성체끼리 접촉하는 경우처럼, 도입(포착) 유막두께 h와 소성가공 후 공구와 재료의 표면조도의 합 R과의 관계로부터, 유탄유 mechanism을 다음과 같이 분류할 수 있다. 단, 여기서 R을 미리 알지 못하는 것이 문제이다.

$h \rightarrow 0$  일때 경계유탄유, 고체마찰

$h \approx R$  일때 혼합유탄유(유체유탄유, 경계유탄유, 고체마찰), micro 소성유체유탄유

$h \gg R$  일때 micro 소성유체유탄유

그림 8에 각 유탄유 mechanism의 micro 접촉상황의 개념도를 나타냈고, 표 1에 소성가공의 유탄유 mechanism에 큰 영향을 미치는 Tribology적 조건

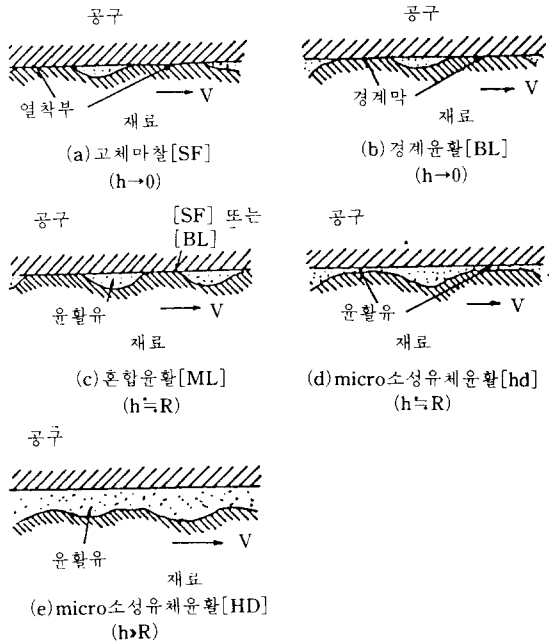


그림 8. 각 윤활mechanism의 micro 접촉상황 모델

과 Tribology적 결과를 기호로 나타냈다. 여기에서 기호적 표현으로, 중간정도일 때는  $v', l'$  등으로 하고, 어느쪽도 좋을 때에는 (-)로 한다. 이 관계의 일례를 아래에 나타냈다.

$$\begin{Bmatrix} V \\ l' \\ Q \\ H \\ - \\ S' \\ - \end{Bmatrix} \xrightarrow{(HD)} \begin{pmatrix} \mu \\ \theta \\ \Sigma \\ \tau \end{pmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} v' \\ l' \\ Q \\ - \\ S \\ - \end{Bmatrix} \xrightarrow{(hd)} \begin{pmatrix} \mu \\ \theta \\ \sigma \\ \tau \end{pmatrix}$$

여기에서, micro 소성유체윤활[hd]는, 비교적 저속에서 윤활유가 다량으로 Pocket에 들어오고, 그 정수압이 상승함에 의해,凸부 micro 유체윤활이 발생하는 윤활 mechanism이며, 평활제품면과 저마찰 등을 양립시키는 방법으로 주목된다. 이것이 성립하려면, 윤활유의 양이 많을 것(Q)이 필요조건이며, 저속에서 많은 윤활유가 들어오기 위해서 재료 표면은 거칠어야 한다(S). 이처럼, [hd]에서는 마찰계수는 낮고( $\mu$ ), 온도상승은 낮으며( $\theta$ ), 표면조도가 Pocket을 제외하고는 낮아서, 열착현상도 일어나지 않는다( $\tau$ ).

표 1. Tribology적 조건 및 Tribology적 결과의 기호적 표현

Tribology적 조건 (input)		Tribology적 결과 (output)	
속도	$\begin{Bmatrix} \text{高 } V \\ \text{低 } v \end{Bmatrix}$	마찰계수	$\begin{Bmatrix} \text{大 } M \\ \text{小 } \mu \end{Bmatrix}$
미끄럼 거리	$\begin{Bmatrix} \text{長 } L \\ \text{短 } l \end{Bmatrix}$	온도상승	$\begin{Bmatrix} \text{大 } \theta \\ \text{小 } o \end{Bmatrix}$
윤활유의 양	$\begin{Bmatrix} \text{多 } Q \\ \text{少 } q \end{Bmatrix}$	재료표면조도	$\begin{Bmatrix} \text{粗 } \Sigma \\ \text{滑 } \sigma \end{Bmatrix}$
윤활유점도	$\begin{Bmatrix} \text{高 } H \\ \text{低 } h \end{Bmatrix}$	공구표면 변화(일착현상)	$\begin{Bmatrix} \text{大 } T \\ \text{小 } \tau \end{Bmatrix}$
윤활유 유성	$\begin{Bmatrix} \text{有 } O \\ \text{無 } o \end{Bmatrix}$		
공구, 재료 표면조도	$\begin{Bmatrix} \text{粗 } S \\ \text{滑 } s \end{Bmatrix}$		
압력 (변형저항)	$\begin{Bmatrix} \text{高 } Y \\ \text{低 } y \end{Bmatrix}$		

#### 4. Simulation 시험

micro 접촉상황이 정량적으로 체계화 되어 있지 않은 현재, Tolerance를 구하여 Engineering output를 예상하거나, Engineering input을 설계하는 것이 Simulation이다.

종래에 평가시험기로서 잘 사용되고 있는 기초적 시험기(진자식시험기, 4구식시험기, Timken시험기, 비우덴시험기)는 하중을 부하하는 접촉부가 탄성체끼리 접촉하고, 접촉면적이 작으며, 국부적으로 고하중으로 되어 있기 때문에 소성가공 경계면상황의 Simulation은 어렵다. 이 기초적인 시험기를 사용하는 경우, 하중, 미끄럼속도, 온도, 윤활유의 공급등과 같은 Tribology적 조건을 실기와 일치되도록 하는 것이 바람직하며, 결과의 해석 및 응용도 micro 접촉상황을 고려하여, 신중히 실행하여야 한다.

일반적으로, 실기의 Tribology적 특성을 Simulation하기 위한 평가시험기를 고안할 때에는 시험기의 공구-윤활제-재료의 Tribology 요소가 실기와 구조, 성능, 성질상 유사하도록 하고, Tribology 조건과 Output가 될 수 있는 한 유사하도록 유념해야 한다. 이를 위해 다음 조건을 만족시킬 필요가 있

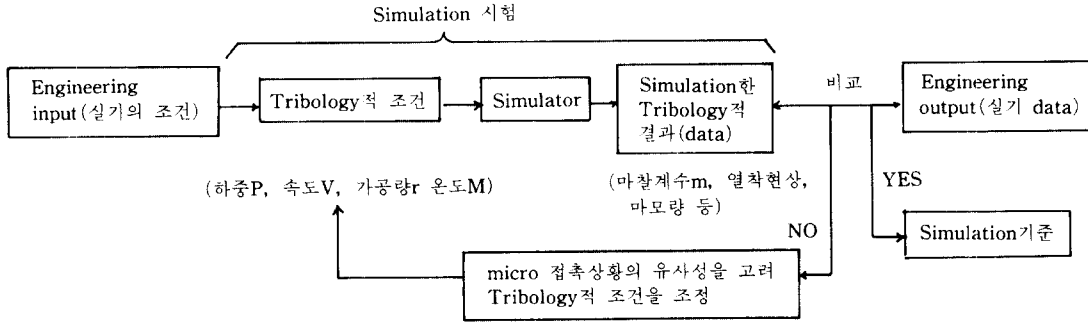


그림 9. Simulation 시험방법

다.

(1) 실기와 시험기의 공구-윤활제-재료의 Tribology 요소의 재료가 동일하도록 한다.

(2) 시험기의 기하학적 조건, 윤활제의 도입(포착)조건 및 접촉조건을 실기에 가깝게 한다.

(3) 시험기의 micro 접촉상황이 실기에 가깝도록 Tribology적 조건을 조정한다.

(4) 시험기의 output로서 마찰계수는 독립적으로 수직력과 접촉력을 동시에 측정하여 얻는다.

(5) 열착현상, 온도상승, 마모량 등의 Tribology적 결과가 비교적 간단히 측정된다.

이와같은 시험기에 의한 Simulation 방법을 그림 9에 나타냈다. Engineering output로부터 Tribology적 조건(하중, 속도, 압하량, 온도 등)을 적당하게 선택하여 평가실험을 하고, Tribology적 결과(마찰계수, 온도상승, 열착현상, 마모량)를 수집한다.

이 data를 실기의 data와 비교하고, 다른 경우에는 경계면 micro 접촉상황을 고려하면서 Tribology적 조건을 조정하여, 실기 data에 가깝도록 한다. 양자의 data 비교에서 거의 만족할 만한 때의 Tribology적 조건이 Simulation을 위한 기준을 주게된다. 이 경우 가능한 한 실기와 시험기의 data를 많이 모아, micro 접촉상황을 고려하여, data 비교를 신중하게 해야된다.

이 Simulation 기준에 의해 output인 각 Tribology적 결과가 input의 Tribology적 조건의 계수로서 표현 가능하게 하는 것이 이 시험의 목적이다.

### 5. 강의 냉간압연가공으로의 응용

냉간압연에서 Engineering output 중에서 공업생산 큰 문제가 되는 2, 3가지 예에 대해, Tribology적 Process(Simulation 시험을 포함한)의 입장에서 그 연구방법에 대해 소개한다.

철강업의 냉간압연현장에서 대량생산을 위해 압연속도를 증가시킬 경우, 발생하는 Tribology적 문제는 압연속도가 1000m/min를 넘을 때의 마찰계수를 아는 것으로 그것은 고도의 Computer control상 필요했다. 이 경우 실기와 동일한 압연속도가 가능한 실험실용 압연기 혹은 실기를 이용하여, 압연하중으로부터 역산한 마찰계수의 속도의존성 output data를 얻는 방법이 채택되었다. 이들 실기결과를 포함한 마찰계수의 의존성의 결과를 그림 10에 나타냈다. 압연속도가 1000m/min 이상에서 마찰계수는 0.03-0.08 사이에 있고, Computer control을 위한 마찰계수치로 이용할 수 있었다. 이때 압연속도 이외의 Tribology적 조건도 가능한 한 실기에 일치하

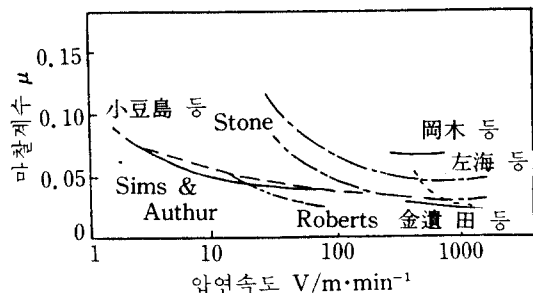


그림 10. 마찰계수와 압연속도의 관계

도록 주의했다.

마찰계수의 속도의존성에 관한 연구 이후에도, 압연속도가 증가하고, 압하율이 증가하는 경향이 계속되어, 압연가공품 표면에 열착현상(Friction pick up, Heat scratch)이 발생하는 문제가 생겼다. 이 연구를 위해 실기를 사용하면, 막대한 비용이 들기 때문에, 보다 저렴한 평가시험기를 이용한 Simulation시험법이 모색되었다. 間瀬 등은 표 2에 나타난 실기의 내 Scratch성 순위를 판명하는 압연유의 Simulation시험에 바우덴시험기를 이용하여, 그림 11과 같이 마찰계수가 0.15로 될 때까지 슬딩회수와 양호한 상관관계가 있음을 보였다. 伊東 등은 표 3에 나타난 실제조업에서 윤활유의 평가순위를 알기 위한 압연유의 Simulation시험에 특수 Timken시험기 및 특수 4구식시험기를 사용하여, 그림 12와 같이 열착현상한계가 실기의 내 Scratch성과 상관이 있음을 보였다. 이처럼, 내 열착현상의 Simulation이 기초적시험기의 접촉면온도, 윤활유의 급유방법 등을 연구함에 의해 이루어지고 있으며, 압연속도, roll지름을 Scale down한 실험실용 압연기를 이용하는 경우, 가공면온도를 관리하는 것에 의해 열착현상의 발생이 가능하게 되고, 이것이 roll 바이트출구 강판표면온도와 상관이 있다.

표 2. 使用壓延油

壓延油	實機 耐 heat	scratch 성
鑛油系 A	3	
鑛油系 C	4	
混合系 A	2	
牛脂系 A	1	

표 3. 使用壓延油

壓延油	基 油	實操業에서 윤활유 평가 순위
壓延油 A	牛脂 + EP劑 (90%) (2%)	1 (極薄材)
壓延油 B	牛脂 + 鑛油 (60%) (30%)	2 (시트 게이지材 薄物, 中番手)
壓延油 C	鑛油 + 에스텔 (80%) (10%)	3 (시트 게이지材 厚物)

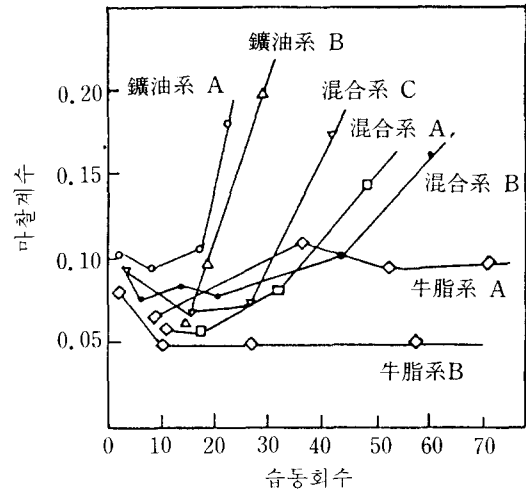
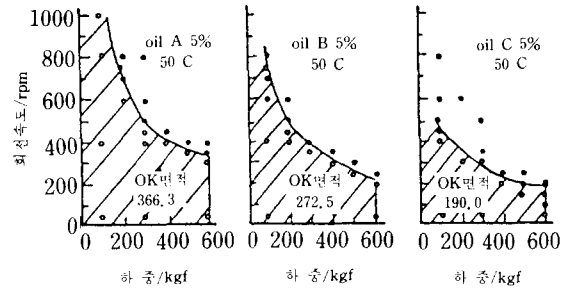
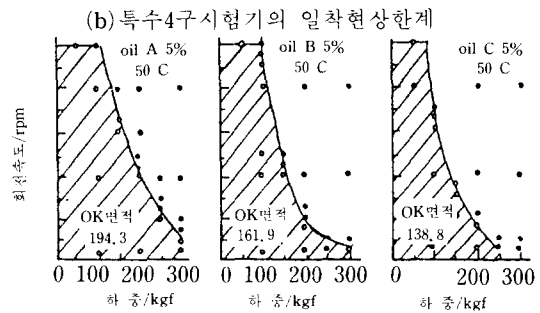


그림 11. 실용압연유의 바우덴시험결과



(a)복수 Timken시험기의 열착현상한계



(b)특수4구시험기의 열착현상한계

그림 12. 실용압연유의 시험기에 의한 열착현상시험

최근 roll 마모의 연구도 활발히 진행되고 있으며, 마모량의 Simulation 평가시험기를 이용하여 시행하는 방법이 주로 이용된다. 실기에서 압연거리는 100km 이상이기 때문에, Tribology process의 관계를 고려하여 짧은 압연거리로 평가할 수 있는 가속시험기 또는 압연과는 다른 접촉조건을 한 시험기를 이용하지 않을 수 없다.

최근 문제가 되고 있는 Engineering output로는 압연품 표면의 Tribology적 관리가 있다. 표면광택이 우수한 압연관을 가공하는 것은  $h \rightarrow 0$ 으로 되는 윤활 mechanism을 필요로 하고, 금속접촉을 발생시키지 않는 micro 접촉상황을 필요로 하며, 이 상황을 만족하기 위해서는 Tribology적 조건중 압연 속도에 제한이 따른다.

### 6. 강의 냉간단조의 Tribology-체계적 고찰

강의 냉간단조가 인산염 피막처리의 응용으로부터 공업화된 역사가 보여주듯이 Tribology는 본 기술의 Key Technology이다. 그리고 요즘 이런 종류의 피막부착이 어려운 고합금강의 가공, 봉 선재공 급형 자동 press단조에서 전단면의 윤활, 재료표면의 확대가 국부적인 동시에 극도의 확대를 수반하는 이형품가공, 제품치수의 고정도 요구 등 종래의 윤활방법만으로 충족하지 못하는 여러 조건들이 나타나고 있으며, 이를 Tribology적으로 충족시키려는 노력이 한창이다.

이 문제의 해결에 위에서 서술한 Tribology의 체계적 사고를 적용할 때 발생하는 어려움은 냉간단조의 비정상성에 의해 압연과는 달리 Engineering input로부터 Tribology적 조건을 찾아내는 것이 어렵다는 점이다.

윤활유를 사용하는 경우 Tribology적 조건의 중요인자인 윤활유의 포착분량은, 그림 13에서 보듯이 평면끼리 접촉하는 경우(그림 13(a))를 제외하고는 아주 어렵다. 인산염피막 press 금속비누와 같은 고형윤활제의 경우에도, 공구와 재료의 최초 충돌이 점 또는 선에서 시작될 때는(그림 13(b), (c)) 윤활제가 상당히 얇게 퍼진다. 따라서 이를 방

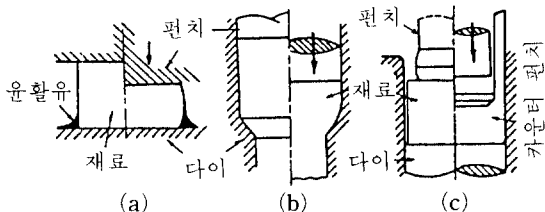


그림 13. 냉간단조에서 윤활유의 접촉면 捕捉모델圖

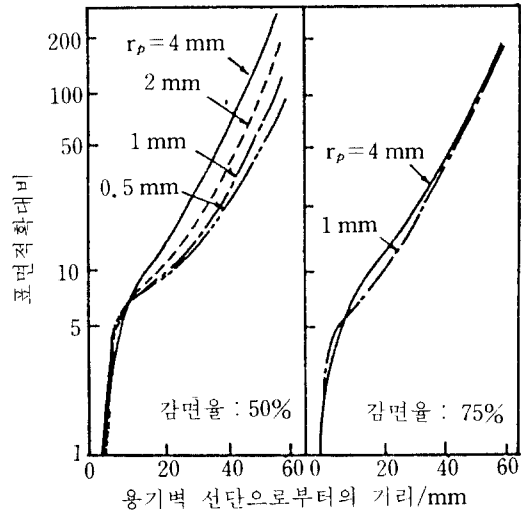


그림 14. S10C billet 후방용기압출품의 내면에서 표면적확대비 측정예:  $r_p$ 는 펀치의 round

지하기 위해 재료를 미리 변형하는 공정을 삽입하여 면과 면에서 충돌하도록 하고 있다.

변형이 개시되면, 표면확대와 온도분포가 상당히 고르지 못하다(그림 14 및 15). 축대칭 변형에서는 이 분포를 FEM 등의 해석법을 이용하여 예측이 가능하게 되었으나, 재료흐름에 급격한 변화가 있는 좁은 국부의 온도상승계산은 아직 방법이 알려지지 않고 있다. 더구나, 이형품인 경우의 계산은 금후의 문제로 되고 있다. 그러나 사용이 끝난 공

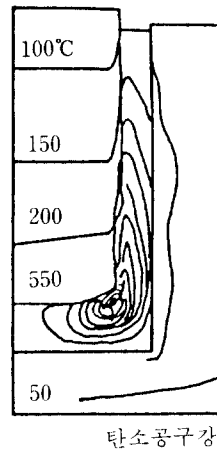


그림 15. 직경 20mm, 높이 12mm의 SWRCH 15A billet을 감면율 40%로 기계프레스에 의해 연속 50회 후방압출한 경우 온도분포 계산 예



구표면의 경도저하로부터 온도는 국부적으로 600-700°C에 이른다는 것이 알려져 있다. 이 온도는 압연과는 달리 공구가 회전하지 않고, 게다가 재료와의 미끄럼거리가 길며, 변형이 크기 때문에 일어난다. 이 때문에 냉간단조의 윤활제는 몇백배의 표면확대가 가능하고, 몇백도의 온도상승에 견디지 않으면 안된다. 탄소강의 경우, 위에서 서술한 고품 윤활제를 두껍게 도포하여 이 문제를 어느정도 해결하는 것이 가능하지만, 한편으로는 실제작업중 다 이 사이에 찌꺼기가 축적되어, 형과 일치하는 제품을 얻을 수 없게 되는 문제가 발생하기도 한다. 이런 이유 때문에 현재 냉간단조 공구에 대하여, 강과 열착현상이 일어나지 않는 TiC와 VC의 피막을 부착하는 방법에 관심이 집중되고 있다. 그러나, 여기에도 피막내 과대응력 발생이란 불명이 있다.

냉간단조가 압연과 다른 Tribolog적 조건의 하나

로, 장치(공구)강성 및 재료의 Spring back에 기인하는 것이 있다. 단조후 Knock-out시 재료와 공구의 Spring back 때문에 양자가 서로 스치게 되어, 이것이 열착현상을 일으킨다고 알려져 있고, 공구설계상 대책이 필요하다.

## 7. 결 론

본 고에서 소성가공 Tribology체계의 기초를 제시하여, 그것을 Simulation시험, 냉간압연 및 단조의 Tribo-process에 응용할 경우 얻을 수 있는 advantage의 예를 보였다. 비록 본 고의 내용이 다소 미비하더라도, micro 접촉상황을 이해하기 위해, 공구-재료-분위기의 물리 화학적 상호작용 등, 더욱 연구가 진행되어야 한다는 것을 알리는 것만으로도 큰 수확이라 하겠다.