

切削加工과 切削油劑의 效果

孫 明 換

〈高麗大 工大 教授·工博〉

1. 緒 言

金屬材料를 切削工具로 切削할 때는 生産能率 이 높고 工具壽命이 길 것을 바라는 것은 이 分野에 從事하는 모든 技術者들의 所望이다. 이와 같은 所望을 達成하기 위해서 많은 技術者들은 끈임 없는 努力을 持續하여 왔고, 또한 앞으로 도 이 노력은 繼續될 것이다. 이와 같은 問題에 대한 研究는 크게 分類하여 두가지 方向으로 展開되고 있다고 볼 수 있다. 그 하나는 보다 더 우수한 切削工具材料의 開發이고, 다른 하나는 各工具材料에 알맞는 切削條件의 適正選擇이다. 이러한 두가지의 요건은 相關關係를 가지고 있는 것으로서 따로 獨立하여 존재하는 것은 아니다. 즉 各工具材料에는 그것에 適正한 切削條件이 있기 때문이다. 어떤 切削工具材料를 막론하고 사용하건 磨滅되고 再研削을 해야 한다. 여기서는 같은 工具材料와 같은 切削條件下에서 工具가 磨滅되는 主因을 分析하고, 되도록 적게 磨滅되고 工具壽命이 길어질 수 있는 方法의 하나로서 오랫동안 사용해온 切削條件의 하나인 切削油劑의 效能과 作用에 대하여 解說하여, 實際加工에 있어서의 切削油劑의 選擇과 사용법에 參考가 되기를 바라는 마음에서 기술하기로 하였다.

2. 切削加工의 三要素

工作機械에서 切削工具를 써서 工作物로 하여금 不必要한 部分을 파괴하여 除去하고 必要한

部分만을 남겨서 所定の 모양과 치수로 成形하는 것이 切削加工이다. 따라서 切削加工은 工作機械, 切削工具 및 工作物이 그 要素가 된다. 이들 要素中에서 工作機械는 靜的精密度, 動的剛性 및 生産性이 높고 性能이 우수한 機械라야 하며 切削工具는 壽命이 길고 高速切削이 가능한 材料라야 한다. 이것은 工具材質에 따라서의 모양이 適正해야 한다. 工作物은 被切削性이 좋아야 하며, 이것은 工作物 材料의 機械的性質과 組織이 關聯되는 것으로서, 工具壽命과 加工된 製品의 質과도 關聯된다. 切削加工에 있어서는 이들 三要素가 具備됨으로써 生産製品에 要求하는 두가지 目標인 치수精密度와 表面精密度가 높은 것이 얻어지게 된다. 生産製品에 있어서의 이 두가지 目標은 아무리 높아도 過하다고는 할 수 없으며, 機械가 發展하면 할수록 이 두가지는 더욱 要求되고 向上될 것이다.

3. 칩 生成과 發熱 및 放熱媒體

切削工具로 工作物을 切削하면 칩이 發生한다. 칩이 生成하는 過程을 칩의 流動하는 상태로 분류하면 連續칩과 不連續칩으로 구분된다. 連續칩은 靱性材料를 뒷면傾斜角이 큰 工具로 高速切削할 때 生成되는 칩이며, 工具 뒷면을 連續하여 미끄러져 흘러나가고 切削된 面은 깨끗하다. 不連續칩은 脆性이 큰 材料를 切削할 때 生成되는 칩으로서 剪斷面間의 거리가 크고 剪斷面에서 完全히 두 部分으로 分離되므로 칩의 길이가 짧고 不連續칩이 된다. 어떠한 모양의 칩의 生成過程에서나 칩을 生成시키기 위해서는 工作物

에 대하여 工具로 힘을 가하여 일을 해야 한다. 이때 工具가 工作物에 대하여 한 切削일량의 97~99%가 熱로 變換된다고 한다. 熱이 發生하는 熱源은 3個所에서 일어난다. 그 첫째의 發熱源은 切削工具날끝에서 前上方向으로 生成되는 剪斷面이다. 工具가 工作物을 압축함으로써 工具날끝에서 前上方向으로 剪斷應力이 作用하게 되고 가한 힘이 이 剪斷面上的의 剪斷抵抗보다 클 때는 剪斷面에서는 미끄름이 일어나고 破斷함으로써 分子들의 凝集力이 熱로 轉換하는 것이며, 全體發熱량의 약 60%를 차지하고 있다. 둘째의 發熱源은 工具上面과 이 面上을 流動하고 있는 칩의 뒷면과의 사이에서 일어나는 摩擦熱이다. 剪斷面에서 生成한 칩은 工具上面으로 方向轉換을 해야 하며, 이때 칩은 工具上面에 壓着되면서 流動하게 된다. 따라서 이 接觸面 사이에서 摩擦熱이 發生하게 되며, 全體發熱량의 약 30%가 이 面上에서 일어난다. 셋째의 發熱源은 切削된 면과 切削날끝面 사이에서 일어나는 摩擦熱이다. 切削날이 工作物에 힘을 가하면 날끝과 接하는 工作物 部分은 彈性變形을 하고, 切削이 進行되어 날끝이 지나가면 곧 原狀態로 復歸하면서 날끝部分과 摩擦하게 되고 摩擦熱이 發生하게 되며, 全體發熱량의 약 10%가 된다. 이와 같이 3個所에서 發生한 熱은 大氣中の 放熱을 無視한다고 하면 칩, 切削工具 및 工作物을 放熱媒體로 하여 放熱하게 된다. 이들中 칩을 媒體로 하여 放熱되는 熱은 全體發熱량의 70~80%에 해당하며, 이 칩이 機械 위에 떨어질 때는 機械로 傳熱되어 機械의 精密度를 低下시키는 原因이 된다. 切削工具를 媒體로 하여 放熱되는 熱은 全體發熱량의 12~20%로서 工具는 이와 같은 熱을 繼續하여 受熱하기 때문에 대단히 苛酷한 狀態下에서 일을 하게 되고 工具의 溫度上昇은 크며, 따라서 硬度가 低下하고 磨滅되어 工具壽命을 短縮시키는 原因이 된다. 한편 工作物을 媒體로 하여 放熱되는 熱은 全體發熱량의 8~10%로서 工作物이 受熱함으로써 熱膨脹에 의하여 치수精密度에 영향을 주게 된다.

4. 切削工具의 磨滅原因

切削工具의 磨滅은 크게 나누어서 金屬移着에 의한 磨滅, 굵기磨滅 및 微小破壞에 의한 磨滅 등 세가지 種類로 分類할 수 있다. 金屬移着에 의한 磨滅은 칩이 工具上面을 미끄러져 흘러나가면서 순간적으로 熔着하여 일어나는 磨滅로서 高壓熔着과 高溫熔着으로 細分할 수 있다. 高壓熔着은 칩과 工具上面 사이에 異質物의 膜이 없을 경우에 再結晶溫度以下의 낮은 溫度에서 일어나는 것으로서, 工具上面에 대한 칩이 壓着하는 高壓에 의하여 양쪽 表面의 分子가 結合할 수 있는 거리까지 接近했을 때 일어나는 熔着이다. 이때 熔着部는 加工硬化에 의하여 硬度가 높아지며 熔着部가 破壞될 때는 硬化되지 않은 內部の 母材에서 破壞된다. 이것이 構成刃先을 發生하게 하는 原因으로서 構成刃先이 떨어져 나갈 때 工具가 磨滅된다. 특히 加工硬化성이 큰 材料를 切削할 때는 工具의 磨滅이 심하다.

高溫熔着은 工作物의 再結晶溫度以上에서 融着에 의하여 일어나는 것으로서, 加工硬化도 일어나지 않으며 融着部가 떨어질 때 칩에 의하여 工具의 一部가 함께 떨어져 나가고 塑性變形이 일어나서 날끝이 破滅되는 融着磨滅의 主因이 된다.

이와 같은 金屬移着을 防止하기 위해서는 칩과 工具上面과의 接觸面 사이에 流體나 固體의 膜을 介在시키든가 冷却을 充分히 할 必要가 있다.

굵기磨滅은 加工硬化된 칩의 微粒, 構成刃先의 微粒 및 工具材料나 工作物에 內在하는 Al_2O_3 , Cr_3O_2 등의 硬質酸化物 또는 Sic, Wc, Tic 등의 硬質炭化物粒子 등이 칩과 함께 工具上面을 미끄러지면서 흘러나갈 때 切削날을 긁어서 磨滅하게 하는 것이다. 이와 같은 損傷을 減少시키기 위해서는 칩과 工具와의 接觸面 사이에 潤滑作用이 잘 되도록 講究하는 것이다.

研削숫돌로 研削한 工具날끝은 銳利하고 不規則한 날로 構成되어 있으며, 이것으로 切削하면 銳利한 切削날끝에 切削抵抗이 作用하여 날끝의

□ 解 說

微細部分이 切損하게 된다. 이것이 微小破壞에 의한 磨滅로서 研削한 工具날을 기름숫돌로 호오닝하여 銳利하고 不規則한 날끝들을 미리 調整함으로써 微小破壞를 豫防할 수 있으며, 또한 高速切削을 함으로써 칩과 工具上面과의 接觸點을 날끝에서 멀리 떨어지게 하면 微小破壞를 減少시킬 수 있다.

이들 工具磨滅의 原因들 中에서도 金屬移着에 의한 磨滅이 主因이 되고 있으므로 이것을 防止할 수 있는 作用을 시키는 것이 工具磨滅을 減少시키고 工具壽命을 연장시키는 主手段이 된다

5. 切削油劑의 冷却作用

前述한 바와 같이 切削過程에서 發生한 熱이 工具를 媒體로 하여 放熱되는 量은 12~20%에 不過하나, 工具는 계속하여 이 熱을 받고 있으므로 相當한 高溫에 到達하게 된다. 工具의 效能은 高溫硬度에 있으며 切削工具로서의 有效한 硬度는 最小限 $H_B=400$ 이상 이어야 한다. 工具材料에 따라서의 常溫硬度 및 $H_B=400$ 되는 溫度는 Table 1과 같다. 切削過程에서 熱이 發生하여 工具에 傳熱되고 溫度가 上昇한다하더라도 Table 1의 $H_B=400$ 되는 溫度以上이 되지 않도록 冷却시켜주어야 切削工具로서의 有效한 性能

Table 1 工具의 常溫硬度와 $H_B=400$ 되는 溫度

工具材料	常溫硬度 (H_B)	$H_B=400$ 되는 溫度 ($^{\circ}C$)
炭素 工具鋼	700~730	300
高速度鋼	700~720	650
鑄造合金	600	750
超硬合金	1400	1300

을 유지할 수 있고 加工을 계속할 수 있다. 따라서 冷却 효과가 좋은 切削油劑를 工具와 工作物에 噴射하여 冷却시킴으로써 工具의 壽命을 延長하고 工作物의 寸數精密도를 向上시키는 結果가 된다.

6. 切削油劑의 潤滑作用

Fig. 1에서 보는 바와 같이 切削에서는 工具

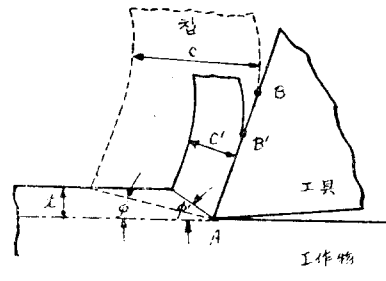


Fig. 1

의 切削날끝에서 前上向으로 形成되는 剪斷面에서의 剪斷作用에 의하여 칩이 生成된다. 이때 工具의 進行方向과 剪斷面 사이에 이루는 角 ϕ 가 剪斷角이며, 같은 切削깊이라도 ϕ 가 작을 때는 칩의 두께는 C와 같이 두껍게 되고 彎曲하기가 힘드므로 工具上面과의 接觸길이는 AB와 같이 길어진다. 그러나 剪斷角이 ϕ 와 같이 커지면 칩의 두께는 C'와 같이 얇아지고 彎曲하기 쉬우므로 工具上面과의 接觸길이는 AB'와 같이 짧아질뿐 아니라 칩이 工具上面을 壓着하는 힘도 弱해지므로 ϕ 가 작고 칩이 두꺼울 때에 비하면 摩擦에 의한 發熱量도 크게 減少된다.

切削加工에서 切削油劑를 噴射하여 칩과 工具上面 사이에 油膜을 構成시켜서 潤滑作用을 하게 하면 剪斷角 ϕ 가 增加한다. 즉 Ernst-Merchant가 誘導한 式에 의하면 ϕ 를 剪斷角, β 를 칩과 工具上面 사이의 摩擦角, α 를 工具刃면傾斜角이라고 할때 2次元切削에서는 다음과 같다.

$$2\phi + \beta - \alpha = \text{cat}^{-1}k = C \quad (1)$$

여기서 C는 材料에 따라 實驗에 의하여 決定되는 切削定數이다. 이 式에서 切削油劑가 潤滑作用을 하면 칩과 工具上面 사이에서는 摩擦係數가 減少되고 따라서 摩擦角 β 가 減少한다. 角 α 가 一定할 때 β 가 減少하면 ϕ 는 增加하게 되며 前述한 바와 같이 칩의 두께는 얇아진다. 切削工具를 研削한 후 工具上面을 기름숫돌로 호오닝하는 것도 摩擦係數를 減少시키고 剪斷角 ϕ 를 크게 하는 한 方法이다.

또 한편으로 切削油劑를 사용함으로써 다음과 같은 理由로 剪斷角 ϕ 가 增大한다. Fig. 2에 있어서 切削油劑를 사용하면 前述한 바와 같이 칩

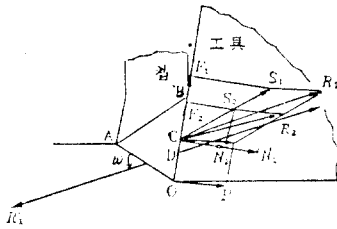


Fig. 2

의 接觸面積이 減少하고 摩擦力은 CF_1 에서 CF_2 가 되며, 法線方向의 壓着力은 CN_1 로부터 CN_2 로 減少한다. 實地는 摩擦角 β 가 減少하므로 CF_2 의 減少하는 정도는 CN_2 의 減少하는 정도보다 크고 合成벡터 CS_2 는 CS_1 보다 약간 下向하는 경향이 있다.

별도로 切削날끝에서는 切削된 면과의 사이의 摩擦力 OP 가 作用하므로 이 힘과 合成된 切削抵抗 CR_1, CR_2 가 얻어진다. 濕式切削에서는 CR_2 는 CR_1 보다 적고 切削方向에 대해서는 작은 角을 이루고 있다. 여기서 칩의 剪斷은 切削抵抗 CR_1 또는 CR_2 의 反力인 切削力 R_1 와 ω 의 角을 이루어서 일어나므로 CR_2 가 CR_1 보다 下向할 때는 剪斷角은 增加하게 된다.

剪斷面に 있어서의 剪斷降伏應力을 τ , 切削깊이를 t_1 , 切削幅을 b 라고 하면 切削抵抗 R 은 다음과 같이 計算된다.

$$R = \frac{\tau t_1 b}{\sin \phi \cos \omega} \quad (2)$$

$$\omega = \phi + \beta - \alpha \quad (3)$$

보통切削에서는 $\phi = 10 \sim 30^\circ$ 의 범위에 있으며, ω 가 一定하다고 하면 ϕ 의 增加에 따라 R 가 減少한다. 切削油劑를 사용함으로써 ϕ 가 增加하면 切削抵抗는 減少하며 ϕ 의 적은 범위에서는 ϕ 의 增加가 크게 R 의 減少에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

한편 칩이 工具上面과 접촉하는 접촉길이를 m 이라고 하면 다음과 같이 計算된다.

$$m = \frac{t_1 \sin \omega}{\sin \phi \cos \beta} \quad (4)$$

이 式에서 切削油劑를 사용하면 ϕ 가 커지고 β 가 작아지므로 m 은 減少한다는 것을 알 수 있다. 實驗에 의한 實測値는 鋼을 2次元切削했을

때 切削油劑를 사용했을 때가 乾式의 1/2 이상 減少하고 있다.

이와 같이 切削油劑를 사용하여 潤滑作用을 시킴으로써 摩擦係數를 減少시키고 剪斷角을 增加시키는 결과가 된다. 따라서 칩의 두께 減少, 切削날끝의 溫度 低下, 切削抵抗의 減少, 剪斷變形率의 減少, 切削면의 精密度 向上, 工具壽命의 延長 등의 結果를 가져오게 된다.

7. 切削油劑의 熔着防止作用

切削에 있어서의 摩擦現象은 高溫高壓下에서 일어날 뿐 아니라 淸淨한 新生面이 나타나기 때문에 이 摩擦面에서는 熔着하기 쉽고 磨滅도 甚하다. 아무리 有効한 切削油劑를 쓴다하더라도 切削날끝 근방은 完全한 金屬接觸狀態이고 그 이후는 境界潤滑狀態라고 볼 수 있다. 이와 같은 摩擦條件下에서는 油性劑의 吸着에 의한 有効한 潤滑作用은 期待할 수 없다. 따라서 高溫高壓下에서 견딜 수 있는 生成膜이 必要하다.

一般的으로 淸淨한 金屬表面이 氣體나 液體와 接觸할 때는 이것들이 그 表面에 吸着되어서 單分子層 또는 多分子層의 膜을 生成한다. 切削에서는 一般潤滑의 경우와 달라서 새로 生成된 摩擦面에 切削油劑가 浸入하면 瞬間적으로 吸着되어서 그 효과가 나타난다. 吸着이 왜 일어나는가에 대해서는 두상의 境界面에 있어서의 potential 差를 되도록 적게하기 위한 것이라고 하는 熱力學的인 생각과, 境界面의 分子는 內部の 分子와 같이 그 주위가 같은 分子로 포위되어 있지 않기 때문에 自由面 바깥의 相에 대해서는 殘餘의 結合力을 가지기 때문이라고 說明되고 있다. 여하튼 吸着에는 電氣的引力인 Van der Waals力에 의한 分子結合과 電子授受인 化學反應에 의한 原子價結合의 두가지 경우가 있다. 前者는 物理吸着이고 後者는 化學吸着으로 分類되나, 이 區別은 嚴密한 것은 아니며 양자가 동시에 일어나는 경우도 있고 化學反應物이 物理吸着되는 경우도 있다.

物理吸着은 10^{-6} 秒 정도의 거의 순간적으로 일

□ 解 說

어나나 化學吸着은 活性化에너지를 필요로 하기 때문에 다소 늦다. 그러나 切削熱에 의하여 상당한 高溫下에 있으므로 化學吸着의 速度가 빠를 뿐 아니라 物理吸着으로부터 化學吸着으로 移行하는 경우도 많다. 高速切削에 있어서는 칩이 工具上面과 接觸하는 時間은 10^{-2} 秒 정도이므로 化學吸着이 일어날수 있는 충분한 時間이다.

大氣中에서 切削할 경우에는 酸素와 같은 活性가스는 처음에는 物理的으로 吸着하여도 親和力이 큰 金屬 즉 鐵, 銅, 알루미늄 등과는 곧 反應하여 化學吸着이 되며 얇은 酸化膜을 生成한다. 이 膜은 減摩作用을 할 뿐 아니라 切削現象에서는 熔着도 상당히 防止된다.

이와 같이 切削油劑에 어떤 添加劑를 加하면 이것이 어떤 溫度에서 分解함과 동시에 金屬面과 反應하여 그 金屬보다 融點이 낮고 剪斷強度가 낮으며, 熱的으로 安全한 生成膜을 構成할 수 있다. 이러한 目的에 사용되는 極壓添加劑로서는 鹽素와 黃 등이 있다. 이들의 元素는 鐵의 表面에서 反應하여 鹽化鐵, 黃化鐵을 만든다. 이 두가지 物質은 銅을 切削하는데 있어서 큰 減摩作用을 하는 重要한 것이며, 실제로는 切削油에 鹽化物, 黃化物을 添加함으로써 얻어지고 그 性質은 Table 2와 같다. 이 Table에서 보는 바와 같이 鹽化鐵의 融點은 $FeCl_3$ 에서 $302^{\circ}C$, $FeCl_2$

Table 2 Fe에 대한 固體潤滑膜의 性質

金屬 및 合金	融點 ($^{\circ}C$)	剪斷強度 (%)
Fe	1525	100
FeS	1193	50
Fe(15)+FeS(85)合金	985	
$FeCl_2$	672	20
$FeCl_3$	302	

에서 $670^{\circ}C$ 이며, 黃化鐵은 FeS 에서는 $1193^{\circ}C$ 이다. 鹽化鐵의 경우는 生成膜은 $FeCl_3$ 으로부터 $FeCl_2$ 로의 移行狀態로 작용하며, 黃化鐵은 FeS 의 상태로 作用하고 있는 것으로 생각된다. 黃化鐵은 鹽化鐵보다도 溫度上으로 安定하고 融點도 높으므로 상당한 高溫까지 效果를 나타내고 있으나, 剪斷強度가 크므로 摩擦係數는 높다.

黃化合物과 鹽素化合物을 混合하면 連鎖反應

에 의하여 각각의 單獨의 경우보다도 더 效果的이라고 한다.

切削油劑에 있어서의 極壓添加劑로서는 黃化合物, 鹽素化合物이 주로 쓰이나, 때로는 磷化合物도 쓰인다. 역시 金屬과 高溫下에서 反應하여 摩擦하는 凹凸先端에 金屬과 磷化合物의 共晶을 만들고, 이 融點이 비교적 낮기 때문에 미끄름에 따라 接觸點에 高溫이 發生하면 곧 軟化하여 凹部に 흘러 들어가든가 面上에 分布되어서 表面이 미끄럽게 된다. 이 때문에 摩擦係數와 磨滅量이 적어진다고 생각된다. 또 黃化合物과 脂肪酸이 共存하면 潤滑效果는 더 높아진다. 脂肪酸은 優先的으로 黃化膜에 吸着反應하여 그 表面에서 金屬비누를 만든다. 따라서 金屬비누의 轉移溫度까지 摩擦係數는 대단히 낮아진다. 이 溫度에 達하면 摩擦係數는 높아지나 黃化膜이 潤滑作用을 하게 된다.

이상에서 보는 바와 같이 極壓添加劑를 切削油에 添加함으로써 固體潤滑膜이 生成되고 이것이 칩과 工具上面 사이에 介在하여 熔着防止作用을 함을 알 수 있다.

8. 結 言

以上에서 論述한 바와 같이 金屬切削에 있어서는 切削工具는 熱의 渦中の 激烈한 狀態하에서 作動이 이루어져야 하기 때문에 切削油劑를 噴射함으로써 冷却作用으로 硬度低下를 防止하고, 潤滑作用을 시킴으로써 熱의 發生을 적게하며, 動力 消費를 減少함과 同時에 切削面의 精密度를 向上시킨다. 또한 切削油劑에 極壓添加劑를 添加함으로써 固體潤滑膜을 生成케하여 熔着을 防止하는 效果를 얻고 있다. 이 외에도 切削油劑는 칩의 洗滌作用, 工作物과 機械의 防鏽作用 등의 效果를 얻고 있다. 要는 切削加工에서 切削油劑의 사용은 切削工具의 壽命을 延長하고 生産能率을 올리는 效果를 期待하는 것이라고 要約할 수 있다. 여기서 副次的으로 考慮해야 할 것은 切削油劑의 噴射方法도 重要하다. 同一한 條件下에서는 噴射方法에 따라 效果가 다르

