金屬切削熱

4-1 chip과 工具의 熱 및 溫度

진동이 없는 金屬切削 중 切削工具刃에서의 모든 energy는 熱로 변환되는데, 대부분이 摩擦熱과 剪斷面의 分子 또는 原子의 파괴에 의해 발생하는 열이다.

金屬切削에서 每分當의 發生熱 H_e는 切削速度 v와 切削力 $(A \cdot k_s)$의 積을 열의 일當量 (778 ft-lb/B.t.u.)으로 제한 것으로부터 다음과 같이 정해진다.

$$H_e = \frac{A \cdot v \cdot k_s}{778} \text{ (B.t.u./min)} \tag{80}$$

한편 每分當 chip에 의하여 제거되는 열 H_s는 chip의 溫度上昇 T_s, 單位時間 (1 min)에 생성되는 chip質量 G_m 및 가공물의 比熱 c의 積으로서 다음과 같다.

$$H_s = T_s \cdot G_m \cdot c \text{ (B.t.u./min)} \tag{81}$$

$G_m = 12\,A \cdot v \cdot \sigma$ (lb/min) 이므로 (1 ft/min = 12 in/min)

$$H_s = 12\,A \cdot v \cdot \sigma \cdot T_s \cdot c$$

發生熱에 대한 chip에 의하여 제거되는 熱의 比 η는

$$\eta = \frac{H_s}{H_e} = 12\,A \cdot v \cdot \sigma \cdot T_s \cdot c \times \frac{778}{A \cdot v \cdot k_s} = \frac{9336\,\sigma \cdot T_s \cdot c}{k_s} \tag{82}$$

식 (82)에 의하여 chip으로 인한 제거熱의 百分率을 계산할 수 있다. 출처가 서로 다른 충분한 횟수의 실험 data를 이용하여 위의 이론식을 평가하여 볼 수 있다.

오래 전인 1911년에 Brackenbury와 Meyer는 金屬切削의 발생熱에 관하여 실험을 한 적이 있다.[63]

切削速度가 약 10 ft/min일 때 총발생열은 69 B.t.u. 이었는데, 그 중에서 chip에 의하여 제거된 열은 42 B.t.u.가 되어 발생열의 62 %가 chip을 통하여 빠져나간 것이 된다. 切削速度를 76 ft/min으로 취한 다른 실험에서 발생熱은 87 B.t.u. 이었고 chip에 의하여 67 B.t.u.가 제거되어

발생열의 77%에 달하였다. 횟수가 많지 않은 실험이지만 切削熱의 대부분이 이동되는 chip에 의하여 제거된다는 것을 알 수 있다. 그러나 chip의 온도가 工具의 溫度보다 높다고 결론지어서는 안 된다. 오히려 chip의 온도는 工具의 것보다 낮은 경우가 대부분이고, 열의 개념은 식 (81)에서와 같이 온도 외에 高溫體의 質量과 그 물질의 比熱을 포함한다.

η를 계산할 수 있는 다른 일련의 실험이 Friedrich[64]에 의하여 수행되었으며, 그는 46 ft/min과 85 ft/min 사이에서 切削速度를 변화시키면서 鑄鐵 chip의 온도를 측정하였다. 이 때 切削 前의 chip斷面積은 최소 0.0014 in²에서 최대 0.0046 in²이었다. 比切削力의 最小値는 切削 前의 chip斷面積이 최대인 조건에서 절삭할 때로서 79 000 lb/in²이었고, 比切削力의 최대치는 chip斷面積이 최소인 때이며 그 값으로서 130 000 lb/in²이었다. 工具溫度는 266°F와 300°F의 범위에 있었고, 鑄鐵의 密度 σ=0.256 lb/in³, 比熱 c=0.116 B.t.u./lb°F인 조건에서 chip에 의한 열의 제거는 최소 50%로부터 최대 81%에 달하여 평균 70%이었다.

SAE 2115와 유사한 鋼에 대하여 온도의 연구가 Klein[65]에 의해서도 수행되었으며, 식 (82)에 의하여 그의 data를 분석하면 chip에 의한 열의 제거는 69%와 75%로 되어 평균 73%이다. 이 때 加工材의 密度 σ=0.292 lb/in³, 比熱 c=0.135 B.t.u./lb°F 였다.

chip에 의하여 제거되는 熱量이 發生熱을 초과할 수 없으므로 η값은 1보다 클 수는 없다. 따라서 식 (82)에 η=1을 대입하여 chip이 포함할 수 있는 최대온도는 다음과 같이 정할 수 있다.

$$T_{s\max}=\frac{k_s}{9336\,\sigma\cdot c} \tag{83}$$

식 (83)에서 k_s가 일정하다면 比熱 c와 密度 σ가 클수록 최대온도는 낮아짐을 알 수 있다. 比熱이 온도에 따라 다소 변하므로 Fig. 48과 같은 변화 도표를 그려 놓으면 편리하다.

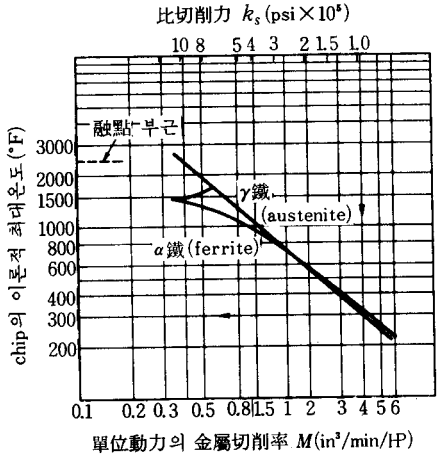

Fig. 48 chip의 이론적 최대온도

예로써 Fig. 48에서 比切削力 k_s=100 000 psi일 때 chip의 온도가 300°F를 초과할 수 없다는 것을 알 수 있다.

A. O. Schmidt[66]가 지적한 바에 의하면 chip의 실제온도는 위의 최고온도보다 낮으며 切削速度에 무관하다는 것이다. 특히 절삭속도가 200 ft/min 이상일 때에는 온도의 변화를 거의 볼 수 없었다고 한다. Fig. 49는 우리가 전에 논의한 사실을 확인시켜 준다. 즉, 全熱의 약 80%가 chip에 의하여 제거되고, 18% 정도가 공구에, 나머지가 가공물에 의하여 消散된다는 것이다.

온도와 切削速度의 관계가 Fig. 50에 나타나 있으며, 切削速度가 200 ft/min 이하일 때에는 工具의 온도가 chip의 온도보다 60% 정도 높고, 1300 ft/min에서는 140% 만큼 높다는 것을 알 수 있다.

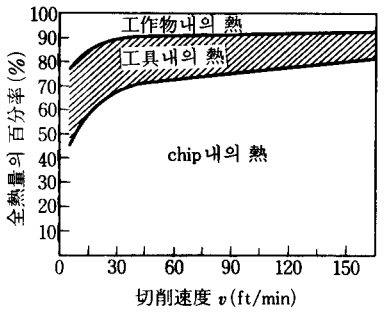

Fig. 49 drilling에서의 熱分布 (after A. O. Schmidt)

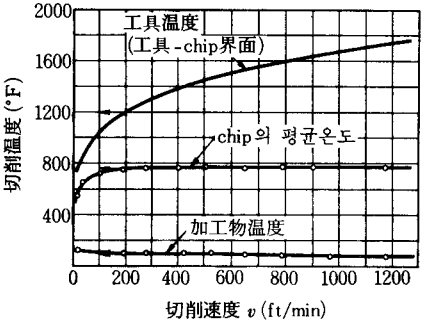

Fig. 50 鋼의 milling에서의 温度分布 (after A. O. Schmidt)

Fig. 51에서와 같이 工具温度는 대충 chip温度의 2배라고 할 수 있다. 그러나 工具의 熱은 현재의 상용 절삭속도에서는 10%, chip의 熱은 80% 정도이다.

Fig. 49, Fig. 50 및 Fig. 51에서와 같은 이상의 결론은 drilling, milling 및 선삭 등에도 적용되며, Fig. 52는 열분포의 대표적인 예이다.

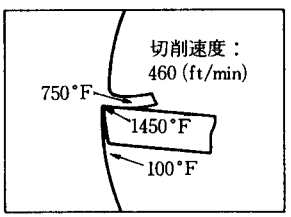

Fig. 51 切削速度 460 ft/min에서의 温度分布 (after A. O. Schmidt)

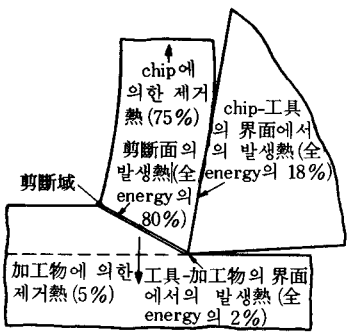

Fig. 52 常用切削速度의 金屬切削에서 energy (熱) 분포

지금까지 논의된 온도는 chip과 工具의 全斷面에서 각각의 평균값이었다. Fig. 53[67]은 温度分布를 보여 주며, 最大温度는 chip이 工具를 떠나는 부근으로서 切削刃에서 멀리 위치하는 것을 알 수 있고, crater가 이 곳에서 흔히 시작된다.

Bickel과 Widmer[68]는 工具温度가 1340°F일 때 chip温度는 645°F와 700°F의 사이에 있다는 것을 알았다. 이 温度의 比 역시 약 (2:1)이라는 것을 알 수 있다. Fig. 54에서와 같이 工具温度는 切刃에서 약 0.25in지점에서는 온도가 떨어져서 550°F로 되며, 最大温度가 보통 때보다 工具刃에 접근하는 것 같다. 그들은 또한 工具로서 Fig. 55와 같은 電解槽를 사용하는 온도 분포 계산을 위한 analog장치를 개발하였다.

Fig. 56은 Hahn의 연구 결과를 나타낸 것으로서 曲線 1은 切削速度에 따라 측정된 chip온도이며, 증가하여 어느 일정값에 달한다.[69] 曲線 2는 熱流動이 없는 상태에서 剪斷面의 온도이고, 曲線 3은 이론적 全chip온도이다. 曲線 4는 全chip온도에서 마찰온도를 감한 것이다. K.R.Blake[70]는 分子의 格子 energy와 金屬切削熱 사이의 상호 관계를 찾기 위한 시도를 하였다.

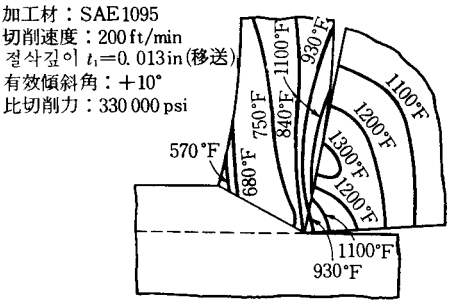

Fig. 53 温度分布 (after Vieregge)

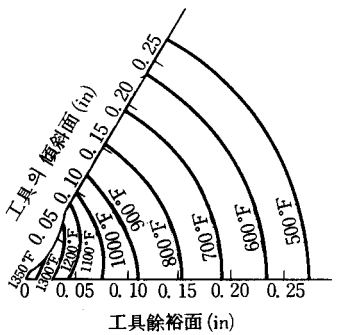

Fig. 54 18min동안 切削 후의 温度分布 (after E. Bickel)

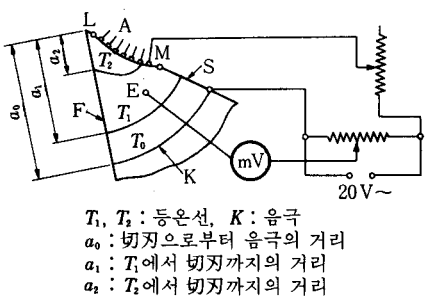

Fig. 55 切削温度의 모형 電解槽原理 (after E. Bickel)

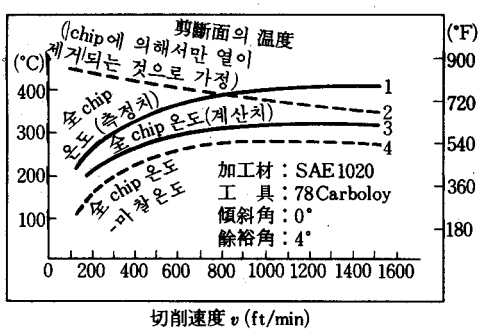

Fig. 56 切削温度 (after R. Hahn)

4-2 冷却 및 潤滑

금속에 미치는 切削液의 영향에 관한 많은 이론의 발전이 이루어져 있으나 切削液을 사용할 때 切刃에서 일어나는 현상을 이해할 정도까지는 이르지 못하였다. 切削液에 관한 많은 연구가 수년에 걸쳐 수행되어 實驗 data를 얻기는 하였으나 切削液의 작용에 대한 사실을 충분히 밝히지 못하고 있다.

실제에서 切削液이 冷却劑인가 潤滑劑인가, 또는 이들 兩者인가 하는 문제가 있으며, 兩者의 역할을 한다면 각각의 영향은 어느 정도인가 하는 문제가 제기된다. 또 다른 문제는 切削液이 chip과 工具傾斜面의 界面 또는 加工物과 工具餘裕面의 界面 중 어느 곳에 침투되는가 하는 것이다. 金屬切削에서 대단히 큰 압력이 발생한다는 사실을 생각할 때 그런 高壓力部에 切削液이 어떻게 침투할 수 있을지도 의문이다. 더구나 이들 접촉부에서는 高温에 의하여 切削液이 蒸發된다는 것이다.

chip과 工具傾斜面 사이에 미세한 凹凸에 의한 網狀의 毛細管이 형성되어 外氣와 毛細管내 진공 사이의 壓力勾配에 의한 切削液의 침투가 이루어질 수 있을 것도 같다. 切削速度 역시 Fig. 57에서 보는 바와 같이 切削液의 침투를 방해하는 방향이다. B에서 A를 향한 chip運動은 A에서의 切削液이 침투하는 것을 방해하고, 加工物이 Fig. 57에 표시된 방향으로 이동하는 것 역시 餘裕面으로 切削液이 침투하는 것을 방해하는 방향이다.

A방향으로의 chip速度 v_c는 加工物의 切削速度 v보다 훨씬 작기 때문에〔식 (4) 및 Fig. 11 (b) 참조〕 chip과 工具傾斜面의 界面에서 切削液이 재래의 생각대로 침투할 수 있을 것도 같다. 한편 餘裕面에서는 접촉 면적이 工具傾斜面에서보다 작기 때문에 切削液의 침투가 보다 용이할 것이다. 이상의 관점에서 볼 때 切削液의 효과는 切削速度에 의존하며 切削速度가 증가하면 그 효과가 감소할 것이라는 것을 알 수 있다. Pigott[7]에 의한 Fig. 57의 B 부분에 高速으로 切削液을 공급하는 高壓噴射潤滑은 위에서 설명한 내용에 근거를 둔 것이다. 切削力에 관한 11장 11-8에서 切削液의 침투에 관해 상세히 취급하겠지만 切削刃의 前方에 존재하는 間隙이 切削液의 침투에 어떤 역할을 할 것도 같다. 그러한 間隙이 존재만 한다면 切削液의 침투는 용이하게 이루어질 것이다.

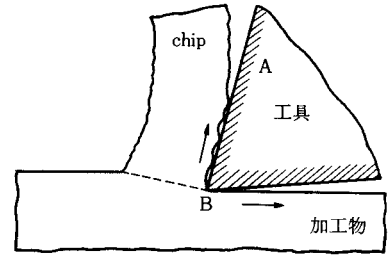

Fig. 57 切削液의 침투

切削液의 침투 문제를 보는 다른 방법은 진동을 고려하여 보는 것이다. 금속을 切削할 때 chip과 工具傾斜面간의 마찰의 변화에 의하여 振動이 항상 있게 되며, 이 때 工具는 chip과 加工物에 대한 상대적 위치가 변하여 주기적 간격을 두고 접촉과 비접촉이 이루어진다. 이와

같은 상대운동이 切削液이 침투할 수 있는 틈을 제공할 것도 같다.

또한 切削液과 加工物 및 工具 사이의 어떤 화학적 작용이 切削液의 潤滑作用에 영향을 줄 가능성도 있다.

切削液을 사용하면 이와 같은 化合物의 얇은 층이 工具와 chip의 界面에 발달하여 마찰을 감소시킬 수도 있다. chip과 工具의 凝着을 방해하는 낮은 剪斷強度의 層이 있다는 이론이 切削液으로 4염화탄소를 사용함으로써 입증되었다. 4염화탄소는 그 毒性 때문에 機械工場에서 사용할 수 없지만 摩擦問題 및 切削液의 연구에서는 널리 사용되어 왔다.[72] 낮은 切削速度에서 4염화탄소는 전단강도가 작은 염화철을 형성하나 고속에서는 이런 현상이 일어나지 않는데, 이것은 반응에 요하는 시간이 없기 때문인 것 같다. 소련의 연구 보고에 의하면 chip과 工具 사이에는 液體層이 존재하며 乾切削에서까지도 이와 같은 층이 있다는 것이다.

Table 10은 數種의 절삭액을 사용하여 數種의 加工材를 절삭속도 0.5 ft/min에서 절삭할 때 切削力의 감소율(%)를 보여 주는 실험 결과이다.

Table 10 切削液과 加工材의 化學反應에 의한 切削力의 감소(즉, 마찰의 감소를 의미)

切削液	純 aluminium (%)	구 리 (%)	SAE 1020 (%)	stainless鋼 (%)	chip 壓縮比
乾切削	0	0	0	0	3.3
4염화탄소	49	90	46	55	2.04
turpentine	60	84	35	11	
paraffin油	34	48	35	32	
석 유	11	52	17	11	
물	49	58	30	34	
benzene	6	58	20	5	4.35
	증 가		증 가		

□ : 4염화탄소를 제외한 마찰의 감소에 가장 효과적인 것

切削의 효과에 대한 화학적 원인을 나타내는 Fig. 58에 의하면 現象的 摩擦係數는 炭素原子數의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며, M.C.Shaw의 本理論은 低速切削에 의한 것이기 때문에 高速에서는 수정을 요할 것이다.

SAE 1020材를 15 ft/min~35 ft/min의 절삭속도에서 旋削할 때 chip과 工具의 界面摩擦은 주위 壓力을 낮게 할 때 감소한다는 사실도 관찰되었다. 이것은 바로 그와 같은 조건에서는 強度가 낮은 Fe_3O_4가 쉽게 형성된다는 것을 시사하여 주는 것 같다. 大氣壓에서도 Fe_2O_3가 형성은 되나 좋은 潤滑劑가 되지 못한다. 切削液을 사용한 상태에서 aluminium의 다듬질 표면은 흔히 향상되는데, 이것은 加工材와 切削液이 化學的 潤滑劑를 형성하기 때문이다. Fig. 59에서와 같이 chip壓縮比가 작을수록 表面粗度가 향상되고 있다.

앞에서 언급한 Shaw, Pigott 및 Richardson의 실험 결과로부터 이들은 切削液의 주역할이 冷却作用이고 潤滑作用과 마찰의 감소 작용이 아니라는 결론을 내렸다.

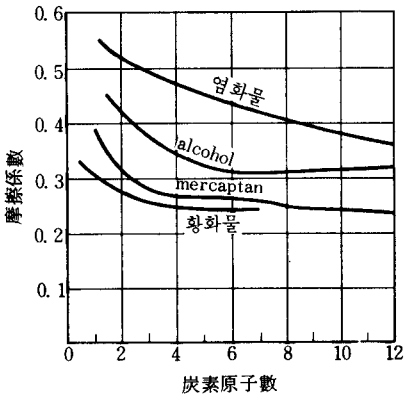

Fig. 58 炭素原子數와 現象的 摩擦係數
(after M.C. Shaw)

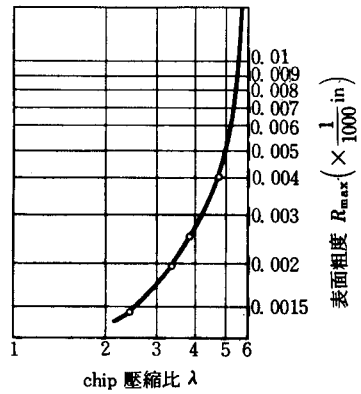

Fig. 59 chip壓縮比와 表面粗度

이와 같은 실험에서 온도 측정을 위한 熱電帶를 사용할 때 液을 통한 短絡의 위험이 있을 것으로 생각되었으나 切削液膜의 電氣抵抗은 3000~5000 Ohm인데 반하여 內部抵抗은 2.2 Ohm 정도이기 때문에 短絡의 가능성은 무시할 수 있었다.

이와 같은 실험 결과를 놓고 論文의 토의에서 數種의 乳劑와 다른 切削液에 대해 논란이 있었다.

이들 실험 data를 著者가 정리하여 다음과 같은 Table 11을 얻었다.

Table 11

切削速度 (ft/min)	절삭깊이 (in)	温 度 (°F) (乾)	(물)	温度降下 (%)
100	0.0025	720	428	41
100	0.005	800	550	31
100	0.010	940	675	28.5
400	0.0025	1320	950	28
400	0.005	1280	1220	4.7
400	0.010	1280	1220	4.7

高速切削에서 切削液의 효과가 적은 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 切削液이 침투하려 할 때 高速運動을 하는 chip에서 切削液이 飛散되어 나간다.

(2) 化學反應에 의한 化學物質의 생성 시간이 너무 짧다.

(3) 高熱의 對流時間이 너무 짧다.

切削液의 작용을 충분히 이해하여 그 이론이 실용화되기까지에는 보다 많은 연구가 필요하다. 수년 전에 여기에서 내린 결과와 일치하는 論文을 Cosgrove와 Greenlee[73]가 1958년 A.S.T.E. 定期年次會議에서 발표한 바 있다.

O.W. Boston과 그의 공동 연구자인 W.W. Gilbert 및 R.E. McKee[74]에 의한 실험은 앞에서

설명한 것만큼은 이론적이 되지 못하고, 또한 이 실험은 本書의 理論篇에 속하는 것은 아니지만 비교를 위하여 여기에 포함시킨다.

기계에 부착된 tank에 잠긴 coil을 가열하여 切削液을 소정 온도로 유지했다. 절삭속도에 대한 工具壽命은 통상적인 방법으로 정하였으며, 兩對數方眼紙에서 實驗座標點들은 직선상에 있었고, 그들의 실험값을 정리하여 Table 12를 얻었다.

Table 12 切削液의 효과

A. 工具壽命 (절삭속도 : 135 ft/min)					B. 切削速度 (공구수명 : 30 min)			
切 削 液	切削液의 온도(°F)	工 具 壽 命 (min)	(%)	비 고	切削液의 온도(°F)	切 削 速 度 (ft/min)	(%)	비 고
아래 성분을 포함한 鑛物性油	dry	4.0	35.7	공구수명이 180% 증가	dry	100	82	절삭속도가 20% 증가
0.6%S	55	7.8	70		55	114	95	
0.5%Cl	75	11.2	100		75	120	100	
	150	4.5	40		150	102	84.5	
emulsion 1 : 20	dry	4.0	38	공구수명이 164% 증가	dry	100	81.5	절삭속도가 21% 증가
	40	9.8	93		40	117	96	
	60	10.5	100		60	121	100	
	150	6.8	65		150	110	91.4	

SAE 3140材를 물림깊이 0.1 in, 移送 $\frac{5}{16}$ in/rev, 有效傾斜角 $15\frac{1}{2}^{\circ}$, 기울임角(angle of inclination) 4°, 切削液의 공급은 5 gal/min의 조건에서 절삭하였다.

Table 12에서 切削液(鑛物性油)의 온도가 75°F까지는 온도 증가와 더불어 工具壽命이 증가(emulsion을 사용할 때에는 60°F까지)하였으나 이 온도 이상에서는 工具壽命이 급감하였다는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 어떤 중첩되는 조건에서 기인할 수 있다.

切削液의 粘性은 온도의 영향을 받고, 冷却效果는 粘性이 크면 작게 된다. 熱傳導度 역시 영향을 받고 單位時間에 分散熱도 영향을 받는다. 粘性은 55°F에서 530 Seybolt, 150°F에서 66 Seybolt로 되는 바와 같이 그 변화가 크다. Table 12에서 切削液(鑛物性油)의 온도가 75°F에서 150°F로 상승할 때 工具壽命은 감소하여 最適값의 40%로 된 것을 볼 수 있다.

emulsion의 경우에도 유사한 변화가 있는 것을 알 수 있다. 工具壽命을 30 min으로 고정할 때 工具壽命과 切削速度의 관계에서 추정되는 바와 같이 절삭도는 최대 20%의 증가에 그쳤다. 工具壽命과 切削速度의 관계는 앞으로 다른 章에서 상세히 취급된다.

G. Pahlitzsch의 深冷方法[75]에서는 冷却劑가 40°F까지 냉각되어 工具溫度를 감소시키고 加工材의 衝擊強度를 감소시키나 工具壽命은 크게 향상된다. 이와 같은 발견은 切削液의 낮은 온도에서 工具壽命이 증가하지 않는 Boston의 것과는 다르다. 이러한 차이는 상이한 切削液, 특히 粘性이 다른 것을 사용한 것에서 기인하는지도 모른다.

Ernst와 Merchant[76]는 切削液의 효능은 절삭속도의 증가와 더불어 감소한다는 결론을 내

렸다. Fig. 60은 공기(乾切削)를 포함한 4種의 切削劑를 사용하여 SAE 52100材를 切削하였을 경우의 해석이다. chip壓縮比를 切削速度의 변화에 따라 나타내고 비교하여 본다. 壓縮比가 작을수록 切削液의 효과는 크다고 할 수 있다. Fig. 60에서 보는 바와 같이 低速(약 15ft/min)에서만이 chip壓縮比가 切削液의 종류에 따라 아주 상이하게 나타나고 오늘날 기계공장에서 채택하고 있는 절삭속도(100 ft/min 이상)에서는 거의 차이가 없다.

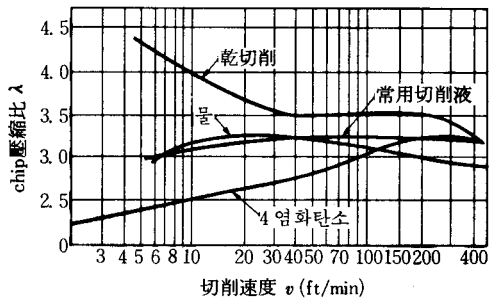

Fig. 60 切削速度에 따른 切削液의 chip壓縮比에 미치는 영향

이상과 같은 사실로부터 실용 절삭속도에서의 성능을 판정하거나 예측하는 데에 低速에서의 실험 결과를 이용하여서는 안 된다는 중요한 결론을 내릴 수 있다.

低速切削을 할 수밖에 없는 부득이한 경우에는 실제적 결론을 얻기 전에 次元解析을 하여 보는 것이 좋다. 그렇지 않을 때에는 아주 큰 誤差를 내포할 수 있다.

切削液에 대한 관계 서적 목록은 Broedner의 책[77]을 참고하면 된다.