

드릴가공에서 강재의 피삭성에 관한 연구

김남훈*, 이용성**

A Study On the Machinability of Steels by Drilling

Nam Hoon Kim*, Yung Sung Lee**

Abstract

In order to predict analytically torque, thrust force, tool life and chip formation in drilling, cutting models for chisel edge with various tool-chip contact length were developed in this type. Also, the experimental tests are run with various pilot holes.

The following conclusions were obtained from the analysis.

- ① It's also found experimentally that thrust force(F_z) decreases as pilot hole diameter increases.
- ② Surface roughness for material(G) is larger than that for material(J). The difference over two materials in roughness value about $0.5\mu\text{m}$.
- ③ Flank wear of the drill in cutting material of G less than any other kinds of materials(F, G, H, I, J).
- ④ In drilling a deep hole on a workpiece over SM45C either twist drill. The chip was conical helix type at the first suspensely change the two segment type and than two a long pitch helix style.

Keywords : Nonmetallic inclusion(비금속 개재물), roughness(거칠기)

1. 서 론

기계 가공에 있어서 대부분 절삭 공구의 수명에 미치는 피삭재의 영향을 중심으로 하여 최적 절삭 조건을 설정

하고 있다. 각종 강에 대한 피삭성은 일정한 가공조건에 의한 절대평가가 중요하다. 기계가공의 대부분을 차지하고 있는 각종 절삭가공은 가공정보가 정확하지 못하며, 기구가 복잡하고 여러가지 요인들이 복잡하게 작용

* 단국대학교 대학원
** 단국대학교 기계공학과

하고 있다. 또한, 예기하지 않은 공구의 치핑이나 파손 등이 발생하므로, 정확한 가공 정보를 얻는 것은 생산현장은 물론 공정설계나 재료개발, 공구개발 등에도 반드시 필요하다.

이러한 요구에 따라, 공구의 마멸이나 결손의 검출 또는 예측하려는 많은 연구가 계속되어 왔으며, Inasaki⁽¹⁾는 생성되는 chip의 형태에 따라서 공구마멸을 감시하는 간접적인 방법을 사용했다. 藤井義也⁽²⁾는 절삭공구의 수명에 관한 연구에서 수명을 수식으로 표시했으며, 奥島啓武等⁽³⁾은 금속재료의 피삭에 관한 연구에서 금속의 조직과 공구수명, 표면거칠기의 상관관계에 대하여 보고하였는데, 여기서 공구수명, 표면 거칠기, 이송량, 절삭속도를 변화 시키며 측정해 본 결과, 조직에 따라서도 공구의 수명 또는 표면 거칠기에 영향을 미친다고 하였다. 각 종의 강에 대한 피삭성은 일정한 가공조건에 의한 절대평가가 중요하므로 본 연구에서는 여러가지 피삭재(주로 SCM 440, 필요시 SM45C)를 사용하여, 적당한 가공조건으로 실험후, 여러 가지 절삭인자를 측정, 분석하여 피삭성을 검토하겠다.

2. drill 가공의 피삭성

2-1. drill 가공에서의 chip 처리의 문제점

drill가공에 있어서 chip 처리에 대한 문제점들은 다음과 같다.

- 1) 길고 연속된 chip이 drill에 감기면, 작업의 장애 요인과 drill 파손의 원인이 되며, 이러한 chip을 제거하는데는 많은 시간과 인력이 소요된다.
- 2) drill 가공에서, chip 배출의 불량 원인은 가늘고 비틀린 홈을 타고 chip이 배출 되므로, drill 구멍의 홈이나 선행한 chip에 의해 방해받기 때문이다. chip의 유출이 심하게 방해받으면 절삭저항이 증가하고, 절삭점 근방의 온도가 상승하므로 drill의 수명이 단축된다. 그리고, 구멍의 정도도 저하되므로 최악의 경우에는 drill이 부러진다.
- 3) 깊은 구멍 가공 시에 chip이 구멍에 가득차 있어서, 절삭유의 공급이 방해받으면, 절삭액은 날 끝에 도달하지 못하므로 절삭날 끝의 윤활이나 냉각이 원활하지 못하다. 이 때는 냉각 홈이 있는 drill(oil hole drill)을 사용하는 것이 좋다.

2-2. drill의 칩 형상과 생성조건

트위스트 드릴에서 구멍을 가공할 때, 칩의 형상을 다음의 6 가지로 분류한다.

1) 원추나선형 칩(Conical helix type chip)

트위스트 드릴의 정상적인 칩형태이며, 외곽의 밀도가 작아 자발적으로 구멍 밖으로 유출되는 형태이다. 단지, 공구의 길이가 너무 길면 작업에 많은 장애가 된다.

드릴이 1회전 할 때, 절삭되는 길이는 그 회전 중심으로부터의 거리에 비례하므로 때문에 절삭날 위의 각점에서 같은 두께로 칩이 생성된다. 그러므로, 칩은 중심으로부터의 거리에 비례하게 된다.

2) 긴피치형 칩(Long pitch type chip)

원추나선형의 피치가 상당히 긴 칩으로써 거의 직선에 가까우며, 톱니 모양이다. 이 칩은 공구를 휘감아 절삭저항이 커지고, 공구의 수명도 짧아지며 칩의 처리도 곤란하다.

3) 지그재그형 칩(Zigzag type chip)

원추나선형은 드릴 가공중 구멍의 홈에 구속되어 칩의 유출이 원활하지 못하고 좌굴되어 생기는 칩의 형태이며, 심한 경우는 드릴 파손의 원인이 된다.

4) 바늘형 칩(Smaller:Pin type chip)

위쪽으로 심한 컬(curl)이 발생되어 드릴 날의 전방측, 구멍의 밑면에 부딪쳐 폭에 비하여 컬 반경이 작기 때문에 바늘형 모양의 칩이 된다. 이것은 절삭날에 작은 구성인성이 생겨서 상향 컬로 발전한다.

5) 부채꼴형 칩(Segment type chip)

위쪽으로 향한 반경이 작은 컬로 중심각이 90° ~ 180° 정도의 부채꼴형 칩이며, 구멍 홈으로 부터 받는 구속에 의하여 파단된다. 이 형태는 절삭저항을 크게 증가 시키지 않으며 칩처리성도 좋다.

6) 절단형 칩(Cutting-off type chip)

연성이 부족하면 긴 피치형의 시작부분이 파단이 되고 다시 원추나선형이 되며, 날끝이 구멍 홈으로 부터 크게 구속되어, 다시 긴 피치형이 되는 과정을 반복하면서 절단형이 그 경계부분에서 생긴다. 이 칩은 두께의 차이가 크고, 절삭저항 및 발열량 증가를 가져오며, 저항의 변동에 따라 진동을 일으키기 쉽다.

아래의 Fig. 1은 칩 형상들을 나타낸 것이다.

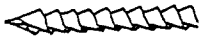





	
conical helix type chip	long pitch type chip
	
zigzag type chip	smaller type chip
	
segment type chip	cutting-off type chip

Fig. 1 Formation of chips

2-3. drill 가공의 절삭저항

drill 가공에 있어서, 절삭저항(drill에 작용하는 힘)¹⁵⁾은 주절삭 날에 걸리는 힘, chisel부에 걸리는 힘 및 drill에 대한 마찰, 절삭 chip의 배출과 함께 밑에서 걸리는 힘으로 구별할 수 있다.

아래의 Fig. 2는 drill의 주절삭날에 걸리는 힘(F_M)과 드릴의 축 방향으로 작용하는 Thrust force(F_z)의 관계를 나타낸 것이다.

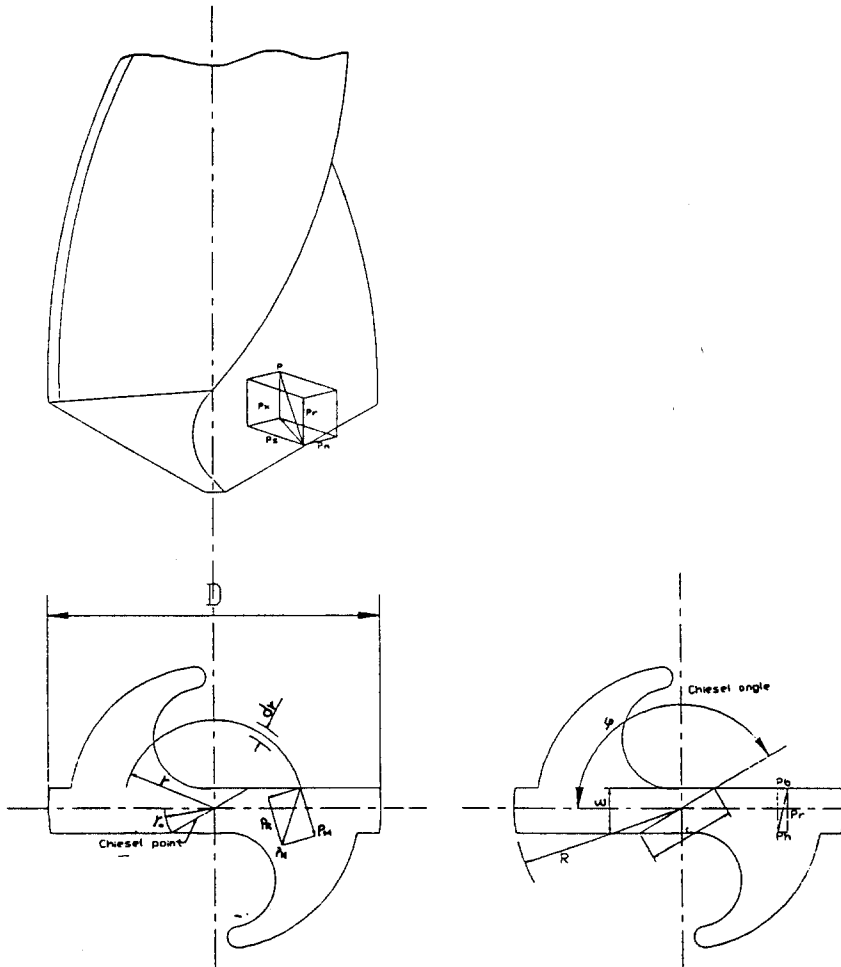


Fig. 2 Cutting component of drill

drill의 축으로부터 반경 r점에서의 미소한 절삭 날들이 dr에 절삭합력 p와 작용하였다면, 이것은 drill의 축 방향에 성분 P_T와 축직각 단면에 있어서의 성분 P_H로 나누어서 생각 할 수 있다.

다시 P_H를 분해하면 원주 절삭방향의 성분 P_M과 drill 중심 축을 향한 반경방향의 성분 P_R로 나누어서 정의된다.

drill에 좌·우 2개의 절삭날이 절단된 날과의 절삭이 전혀 대칭으로 행하여진다고 가정한다면, 반경 방향에 PR은 서로 상쇄되어 평행하다.

$$M_z = 2 \int_{r_0}^R P_M r dr + 2 \int_0^{r_0} P_{M0} r dr + M_f \quad (1)$$

$$F_z = 2 \int_{r_0}^R P_t dr + 2 \int_0^{r_0} P_{T0} dr + T_f \quad (2)$$

여기에서 R : drill의 바깥지름
 r₀ : chisel의 반경
 P_{M0}, P_{T0} : chisel부에 있어서 절삭분력
 M_f, T_f : drill 외경부의 마찰저항 작용분력

drill의 가공에 있어서의 절삭동력 Torque와 Thrust force에 대한 계산은 화학적인 방법에 의한 실험식⁽²⁾⁽⁷⁾ 있으나, 본 논문에서는 절삭력에 영향을 크게 미치는 chisel point의 길이를 고려한 Shaw-Oxford⁽³⁾ 식을 참작하여 경도 Torque 및 Thrust force 등을 측정하였다. 이 때, Torque와 Thrust force의 이론적 관계식은 다음과 같다.

$$M = 0.082 H_B f^{0.8} D^{1.8} \left[\frac{1 - (C/D)^2}{(1 + C/D)^{0.2}} + 3.2 \left(\frac{C}{D} \right)^{1.8} \right] \quad (3)$$

$$T = 0.15 H_B f^{0.8} D^{0.8} \left[\frac{1 - C/D}{(1 + C/D)^{0.2}} + 2.2 \left(\frac{C}{D} \right)^{0.8} \right] + 0.068 C^2 \quad (4)$$

여기에서 M : Torque(in-lbs)
 T : Thrust(lbs)
 D : drill의 직경(in)
 C : chisel point의 길이(in)

HB : 피삭재
 의브리넬경도(lbs/in²)

3. 실험

3-1. 실험장치

3-1-1. 실험장비

본 실험에 사용된 기계가공 장비는 Table 1에 제시된 바와 같이 Upright drilling M/C을 사용하였다. 절삭 저항은 드릴링용 공구 동력계를 이용하였고, 가공면의 거칠기는 측정식 표면 거칠기계(SE-30H)를 이용하여 측정하였다.

Table 1 List of machine tool and measurement apparatus.

Article Name	Company	Model	Standard
Upright drilling machine	Kiwa	VF - 2	Max table 750 × 270 × 450 Spindle speed 68-1760 rpm
Tool dynamometer	Kyowa	tsm-zm	Main force : 500 kgf Radial force : 500kgf
Roughness tester	Kosaka	SE-30H	Rmax : 0.002~600 μ m

3-1-2. 공구 및 피삭재

실험에 사용된 절삭공구는 ϕ 12 H.S.S를 사용하였고, 피삭재(D=5~50mm, L=10~200mm)이다. 열처리는 볼림(Normalizing)한 SM45C와 SCM440이고, 경도는 중심부, 중심부에서 1/3R(R:피삭재의 직경)되는 부분, 중심에서 2/3R부분, 표면부분으로 나누어 경도를 측정했다.

또한, 실험에 사용된 피삭재는 폐쇄원소인 S, Ca의 량에 따라 F, G, H, I 및 J로 구분하였으며, 화학적 성분은 Table 2 와 같다.

Table 2 Chemical component of the steel

TEST MATERIAL	Chemical composition (Wt. %)							
	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Al	Ca
SM45C	0.44	0.23	0.69	0.002	0.07	0.02	0.032	0.0001

Table 3 Chemical component of the steel

SCM 440	Chemical composition (wt. %)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	Al	Ca
F	0.44	0.28	0.67	0.025	0.004	1.07	0.21	0.15	0.22	0.060	0.00024
G	0.40	0.30	0.65	0.016	0.005	1.10	0.22	0.21	0.42	0.017	0.00107
H	0.39	0.15	0.50	0.013	0.007	0.97	0.19	0.19	0.20	0.010	0.00113
I	0.38	0.18	0.62	0.033	0.01	1.03	0.28	0.21	0.22	0.045	0.00117
J	0.38	0.23	0.64	0.019	0.018	0.99	0.17	0.16	0.08	0.000	0.0217

3-2. 실험방법

본 실험에서는 드릴링 가공시의 피삭성을 검토하기 위해 Table 3과 같이 가공조건을 변화시켜 공구마멸, 표면 거칠기, chip처리성 및 절삭 저항을 측정하였다.

Table 4 Cutting condition in drilling

Working	Valuation item	Condition		
		Number of revolution (rpm)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)
Drilling	Toolwear, Roughness Chip breakability Cutting resistance	500~1000 rpm	0.01~1 mm/rev	10~30mm

3-2-1. 절삭저항 측정

절삭저항은 3차원 Strain gauge tool dynamometer (공구동력계)를 사용하여 절삭조건에 따라 변화하는 양을 측정하였으며, 모델은 TSM-ZM형을 사용하였다.

Fig. 3 에는 Tool dynamometer의 절삭력 실험 system의 블록다이어그램을 표시하였다.

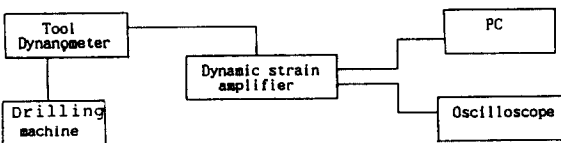


Fig. 3 Block diagram of the tool dynamometer experimental system

공구동력계에서 작용하는 절삭력은 strain gauge로 감지되어 휘스톤 브릿지 회로에서 저항 값을 변화시킨

다. 여기서 생긴 미소한 전류가 앰플를 거쳐 증폭되고 변위로 바뀌어서 Oscilloscope상에 display되거나 Recorder에 의해 감광지에 기록된다. 또한 기록 값은 다시 공구동력계의 보정표에 의해서 힘으로 환산된다.

3-2-2. 표면 거칠기 측정

Table. 3 의 절삭조건으로 drilling한 피삭재의 표면 거칠기는 측정식 표면거칠기계로 측정하였고, 이때 Cut-off(기준길이)값은 0.8mm Pitch-up의 이송속도는 0.03mm/sec Recorder chart의 이송속도는 6mm/min 증폭기의 배율은 2,000배로 하였으며, 표면 거칠기 측정값의 정확성을 유지하기 위하여 120° 씩 회전시켜 3회 측정하여 Rmax 평균값으로 표면 거칠기 값을 정리하였다.

4. 실험결과 및 검토

4-1. 경도 분석

일반적으로 피삭재의 경도는 피삭성에 영향을 크게 미치므로, 절삭 실험 전에 피삭재의 경도를 측정한다. 경도는 Brinell 경도계를 이용하였으며, 경도 측정부위는 각 시편의 중심부, 1/3R부, 2/3R부, 표면부를 선택하였다. 그러나, 본 실험 대상부인 표면부와 2/3R부의 경도차는 크지 않다. 따라서 이러한 영역에서의 드릴링 실험시 각 피삭재의 경도차가 피삭성에 영향을 미치지 않는다. Fig. 4는 SCM440의 경도 측정값으로 I재료의 2/3R부와 표면부에서 다른 SCM440소재보다 낮게 나타났으며, 일반적으로 표면부보다 중심부 쪽으로 경도값이 점차 작아진다. 특히 J재료는 제외하고 다른 소재들은 경도차가 거의 일정하다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 표면부보다 중심부 쪽의 경도값이 작은 것은 열처리효과 때문이다.

4-2. 절삭저항의 검토

Pilot hole 직경에 따른 절삭저항을 검토하였다. Fig 5는 경사면 폭(공구-칩 접촉길이:h)이 0.6mm의 chisel부에 작용하는 Torque와 Thrust force를 구해서 그림으로 표시하였다. 여기서, 공구-칩 접촉길이가 0.6mm일 때, Torque(Mz:twist angle=30°)는 Pilot hole의 직경이 10~15mm에서, 급격하게 감소하기 시작한다. 그러나, Thrust force에서는 그 직경의 변화에도 불구하고 큰 변화가 없다.

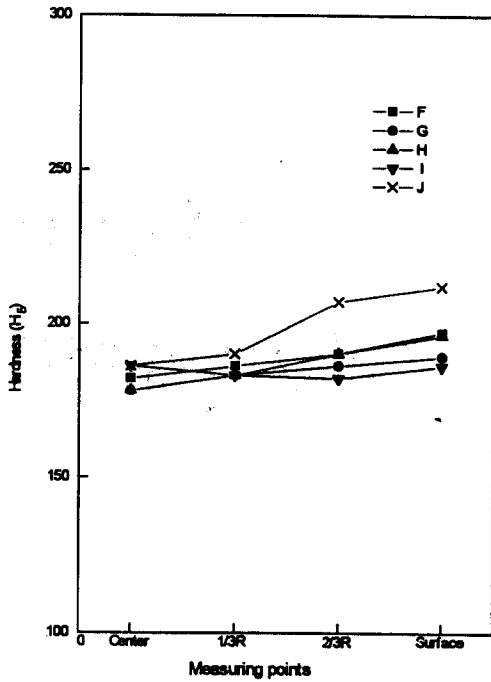
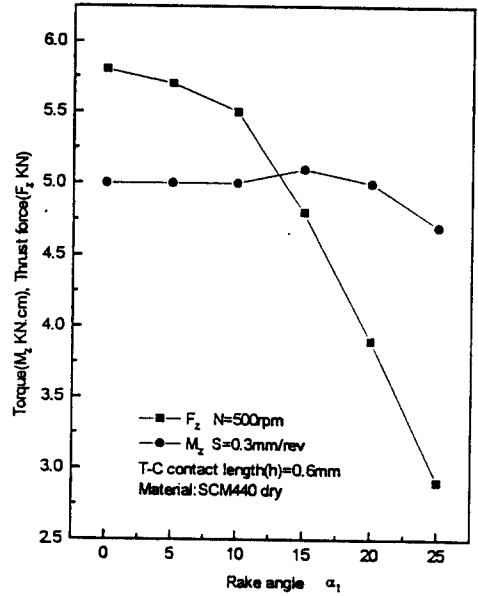
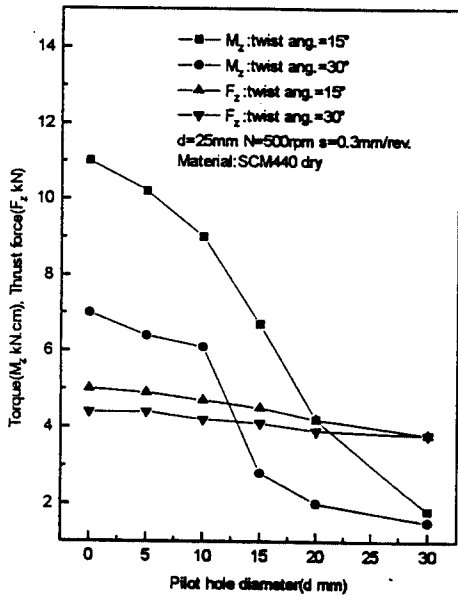


Fig.4 Brinell hardness of the steel(SCM 440)



(b) Torque and Thrust force V.S Rake angle

Fig. 5 Variation of torque and thrust force with pilot hole diameter



(a) Torque and Thrust force V.S Rake angle

Fig. 6은 SCM440의 드릴 절삭력을 표시한다. 강의 종류에 따른 절삭력 차이는 크지 않다. 그러므로, 시험한 강의 재질에 따른 절삭력은 큰 차이가 없는 것으로 생각된다.

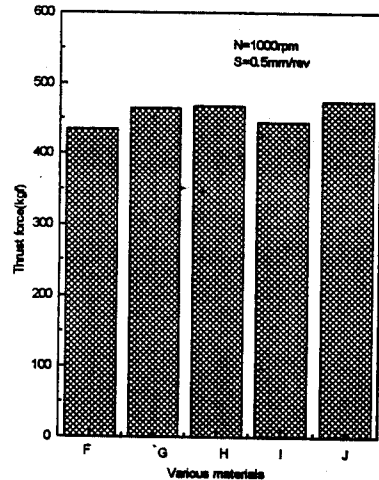


Fig. 6 Relationship between cutting force and materials

4-3. 드릴링의 표면 거칠기

드릴링의 표면 거칠기를 측정하기 위해서는 드릴가공 후 표면 거칠기계의 촉침이 접촉하기 위해 구멍의 반을 밀링으로 가공하여야 한다. 표면 거칠기계의 테이블에 소재($\phi 50 \times L200\text{mm}$)를 고정하기가 어려우므로 전자석을 이용한 V block으로 소재를 견고하게 고정하여 측정하였다. Fig. 7에는 SCM440 계열의 소재를 드릴링 할때, G재료가 표면 거칠기(R_{max}) 값이 가장 작으며, J재료의 표면거칠기(R_{max}) 값이 가장 크다.

4-4. 드릴링의 수명

보통, 저속으로 큰 이송을 주면 공구의 수명이 좋다고 알려져 왔다. 지금 SM45C의 가공에서 어느 경우에는 수명의 극치가 존재한다. 그래서 그 위치가 일반적으로

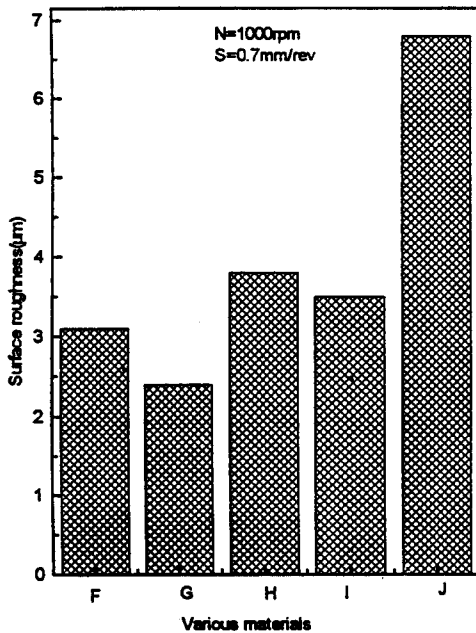


Fig. 7 The surface roughness at drilling speed of rotation, 700rpm

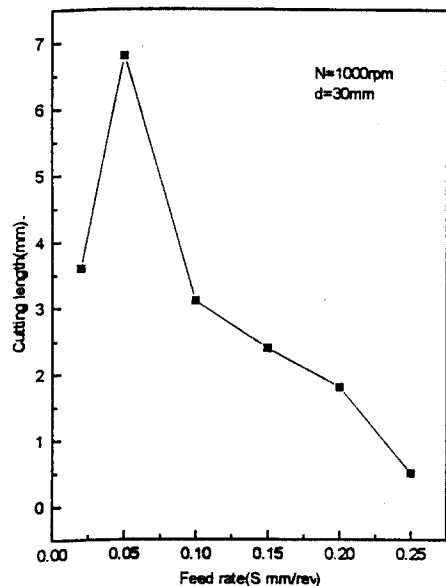
사용된 가공 조건의 범위에 있다. 그러므로 공구 수명을 연장하기 위해 그 극치 이하의 이송과 절삭속도를 얻는다면 초기의 공구 수명 연장의 목적은 달성할 수 있으나, 가공능률을 저하시키는 결과가 될 것이다. 그러므로, 가공조건의 선정에 충분히 주의를 해야 한다. 또

한, Fig.8은 마모된 드릴의 형상이고, 드릴의 외곽(마아진 어깨)부에 약간 마멸이 보이며, 날(Land)부에도 마멸이 나타난다.

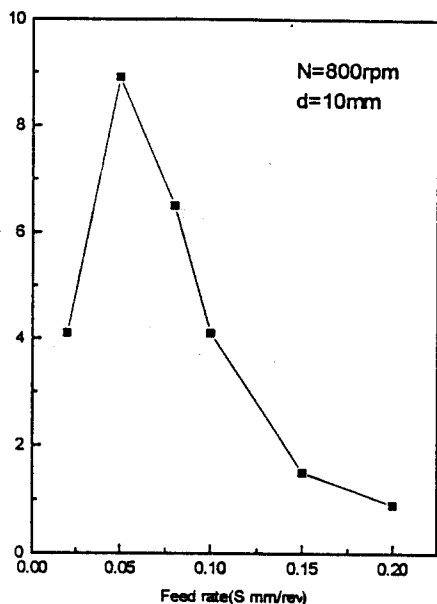


Fig. 8 The shape of worn drill (SKH9)

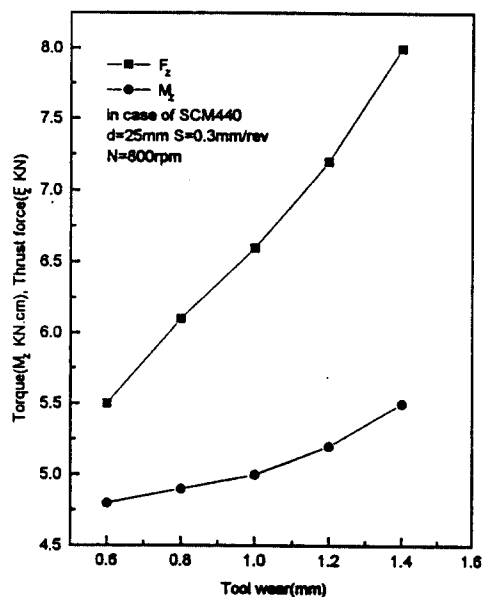
드릴링에 있어서 마멸은 선삭과 마찬가지로 경사면 마멸과 여유면 마멸이 존재한다. 그러나 대부분 여유면 마멸에 의해 공구를 교환한다. 드릴날이 비틀림 각을 가지고 있어 여유면을 측정하기 곤란하다. 본 연구에서는 특수 Jig(공구 현미경에 부착된 가경식 Jig로 여유면 마멸의 측정에 편리한 구조임)를 이용하여 드릴날의 여유면 마멸 폭을 측정하였다. Fig.9는 이송에 따른 절



(a) In case of N=800rpm, d=10mm



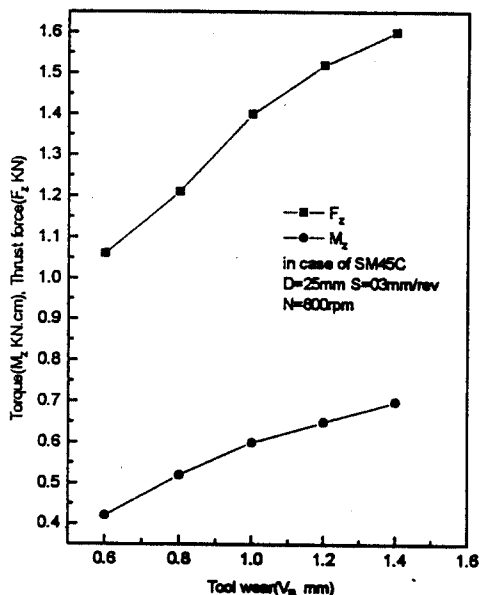
(b) In case of N=1000rpm, d=30mm



(b) Torque and Thrust force V.S Wear
(V_B : SCM440)

Fig. 9 Relationship between tool life and feedrate

Fig. 10 Variations of tool wear in drilling



(a) Torque and Thrust force V.S Tool Wear
(V_B : SM45C)

삭한 길이(수명에 도달될 때 까지)를 나타낸 것으로 각각의 회전수에서 수명이 긴(절삭길이가 긴곳) 극치값이 존재한다. 가장 많이 사용되는 이송범위(약 0.05~0.1mm/rev)에서 주축의 회전수가 작을수록 절삭길이가 길어진다. Fig. 10에 드릴의 여유면 마멸에 따른 Torque와 Thrust force를 표시한다. 단지, SCM440은 SM45C에 비해, Torque와 Thrust force가 크게 나타나고 있다. 이때, 1st cutter, 2nd cutter는 드릴 날이 양쪽에 붙어 있어서 두 날을 명백하게 구분하기 어렵기때문에 편의상, 마멸이 큰 쪽을 1st cutter, 작은 쪽을 2nd cutter로 규정하였다.

4-5. 드릴의 chip 처리성

SCM440을 심공 드릴링할 때, Conical helix 타입 칩은 연속적으로 Segment 타입으로 바뀌고, 또한 Long-pitch helix타입 칩이 된다. 이 순서는 SM45C의 경우도 거의 같은 경향을 가진다. Long-pitch helix타입 칩의 피치는 Flute와 같다. 그러므로, 아무

리 가공 깊이가 깊어도 칩은 드릴 구멍에서 유연하게 배출된다.

하다. 그러나 F재료나 G재료는 회전수 700rpm, 이송 25mm/min이하가 되어야 비로소 그 모양이 짧게 유출되기 시작한다.

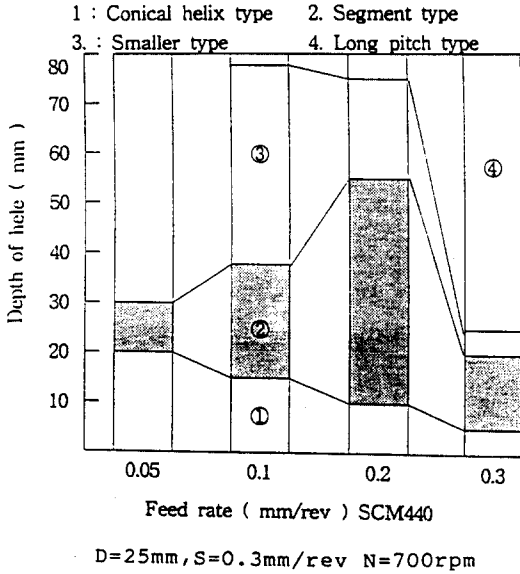
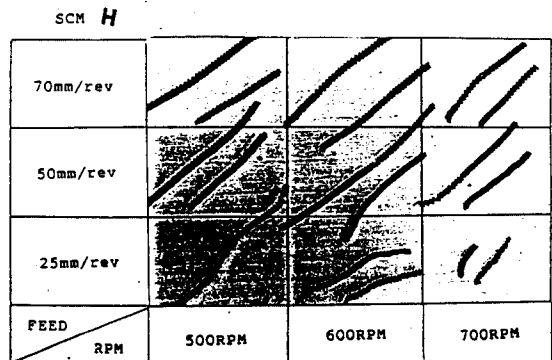
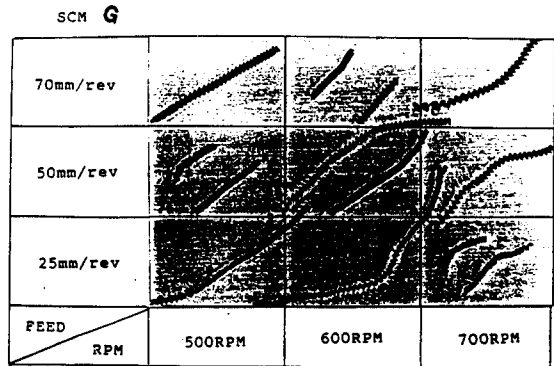
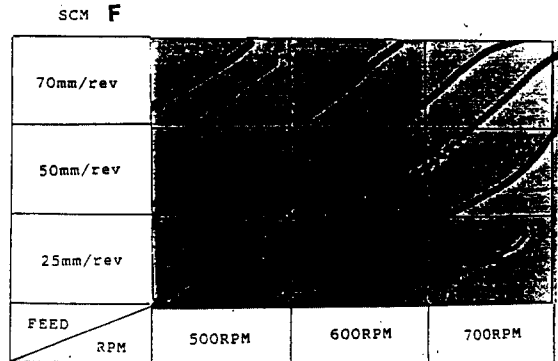


Fig. 11 Distribution of various types of chip by new type drill

Fig.11은 80mm의 두께인 피삭재를 드릴링할 경우의 여러 가지 칩의 분포이다. 드릴 깊이에 의한 칩의 변동은 절삭조건이나 피삭재의 특성에 따라 다르다. Smaller 타입 칩은 작은 단편의 칩과 2번 절삭날로 깎여진 Long-pitch helix타입 칩도 일부 포함된다. 이 실험에서 Long-pitch helix타입을 포함한 모든 칩은 드릴 구멍에서 배출된다. 이송이 0.05와 0.1mm/rev일 경우에 Smaller size 칩은 약간의 방해 를 받으면서 배출되지만 이송이 0.2와 0.3mm/rev인 경우는 그러한 칩도 잘 형성된다. 특히, SCM440재료인 경우에, 이송이 0.3mm/rev라도 초기 단계에서 Smaller size 칩이 형성되고 있다.

Fig. 12에 드릴링에서 chip의 모양을 절삭조건에 따라 분류한 것이다. 회전수가 700rpm이 되면 F재료, G재료 이외에는 대체적으로 chip의 길이가 짧게 배출되는 경향이 있다. 그리고, 전반적인 절삭조건에서 보면 J재료의 chip이 가장 짧고 가늘게 배출되므로 칩처리성이 우수



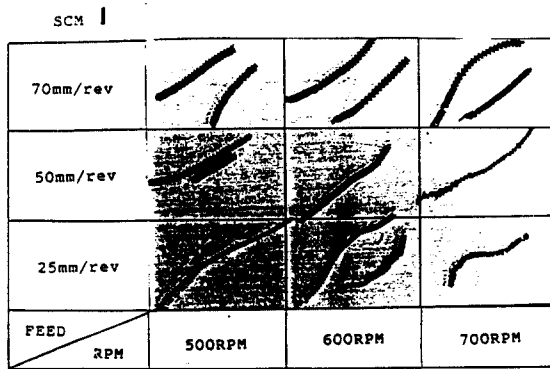
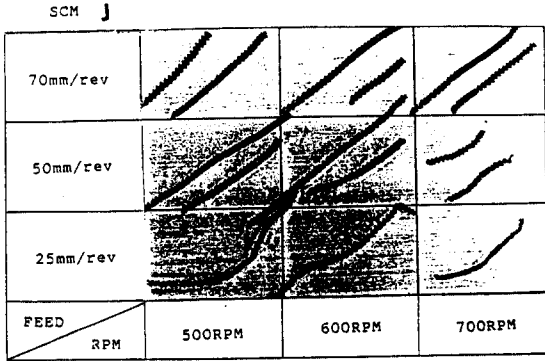


Fig. 12 Chip thickness at drilling(SCM440)

5. 결 론

이상과 같이, SCM440(주 재료)과 SM45C의 각종 소재에 대한 피삭성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 칩 접촉길이가 0.6mm일 때, Thrust force(F_z)는 Pilot hole의 직경이 클수록 감소 한다.
2. 표면 거칠기의 크기는 G재료가 J재료에 비해 약 5 μm 이상 작다.
3. 여유면 마멸도 F, G, H, I 및 J재료 중에서 G재료가 가장 작다.
4. SCM440이나 SM45C 재료를 심공 드릴링할 때, 처음에 Conical helix 타입이 생겨서 Segment타입이 되고, 다시 Long-pitch helix타입으로 바뀐다.

참 고 서 적

1. K.Kojima, I.Innasaki, R.Miyake : Prediction of Twist Drill Breakage with Acoustic Emission Signals, 日本機械學會 論文集C卷467號, pp.1838-1843, 1984.
2. 藤井義也, "切削工具의 壽命に 關する 研究", JSME, Vol. 70, No.592, pp.53~60, 1968.
3. 奥島啓式, 岩田一明, 中谷征司, "金屬材料의 被削性に 關する 研究", JSME論文集(B), Vol. 31, No.225, pp.847 -854, 1965.
4. Kadamura Kouchin, "トリル損耗檢出の關する研究", 精밀기계, 50권6호, pp.939-943, 1984.
5. Subramanian, K. G Cook, N.H., "Sensing of Drill Wear and Prediction of Drill Life", Trans. ASME J. Eng. Ind., Vol. 99, 295-301, 1977.
6. 廉永夏, "最新機械工作法", 東明社, pp. 377-386, 1985.
7. 白神哲夫, 大鈴弘忠, "小降鋼深穴可工に吸す介在物の影響", 鐵と鋼, Vol. 71, No5, pp.248, 1985