

Drill 加工에서의 切削抵抗에 관한 研究

金 潤 濟

On the Cutting Resistance in Drilling Operation

Kim Yoon-Jeh

In relation to the machinability of drilling operation, experiments were made to investigate the effect of cutting condition on static as well as dynamic cutting resistances in cutting plane carbon steel (SM 45 C) with H.S.S. twist drills.

The results were as follows.

1) The static cutting resistances on carbon steel can practically be calculated by the following equations which were derived from experimental result. The deviation from the experimental values was less than 8% and 13% for cutting torque and thrust respectively.

For cutting torque M:

$$M = 0.019 H_B f^{0.68} d^{1.68}$$

For thrust T:

$$T = 0.400406 f^{0.6} d^{0.68} + 0.1835 H_B C^2 \text{ (where } H_B : \text{ Brinell hardness)}$$

2) The static components of cutting resistance are increased exponentially with increasing drill diameter and feed rate. On the effect of drill diameter, the dynamic components of torque are decreased with increasing drill diameter because of rigidity, the dynamic components of thrust being not effected with the changes.

3) As feed rates increase, the dynamic components of torque rather decrease although its changes on thrust components are unstable.

4) The static components of cutting resistance and dynamic component of torque are slightly decreased in accordance with the increase of spindle speed although its dynamic thrust components are not effected by the spindle speed.

1. 序 論

Drill加工은 一般 機械加工에서 重要한 位置에 있는 作業의 하나이고, 要求되는 精密度를 맞추기 어려우며, 또한, 높은 生産性이 要請되는 作業이다. 따라서, Drill加工에 對해서는 지금까지 많은 研究가 進行되어 오고 있다. 그 中에서도 Galloway는 Drill性能에 있어서 그 形狀과 Relief angle, Point angle 등이 切削性에 미치는 影響을 研究하였고,¹⁾ Shaw와 Oxford는 Drill torque와 thrust에 對한 一般式을 誘導하였다.²⁾ 또한, 中山은 Cutting edge와 Chisel edge에 따른 Chip形狀에 對하여 研究한 바 있으며,³⁾ 最近에는 Drill作業의 適應 制御를 위한 分析等이 研究되고 있다.^{4,5,6)} 한편, 從來 切削 Torque와 Thrust의 靜的成分의 檢討에서 한걸음 더 나아가 切削抵抗의 動的成分을 究明함으로써, Drill作業의 安定化를 위해 實用上 有用한 情報를 얻을 수 있기 때문에 이 分野에 對한 研究도 進行되고 있다.^{7,8)}

本 研究에서는 構造用 炭素鋼(SM45C)의 Drill作業時 發生하는 切削抵抗을 靜的인 成分과 動的인 成分으로 分離하여, 이를 分析하였다. 本 實驗에서 適用한 切削條件은 常用 切削條件으로 하였으며, Drill의 直徑과 移送 및 主軸速度를 變化시켜 이들 切削條件의 變化가 切削抵抗에 미치는 影響을 考察하였다. 實驗은 Drill의 中心軸과 工具 動力計의 中心을 一致시킨 후 Drill과 工作物의 相對的 位置를 一定하게 하고, Drill作業을 行하였다. 切削抵抗은 工具 動力計로 各各測定하여, 이를 Oscillograph 및 Stress Frequency Analyzer로 分析하여 Thrust와 Torque의 靜的인 成分과 動的인 成分을 分析하여, 切削條件 變化에 對한 切削抵抗 變化를 檢討하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1. 實驗裝置

實驗加工에 쓰인 工作機械는 Drill盤 (Radial Drilling Machine, SINIL Mach. Ind. Co, Model : SR 1000)이며, 切削力 測定을 위한 工

具 動力計는 Strain Gage式 (Tokyo Testing M/C, Model TSM-BH)을 使用하였고, Strain의 測定 및 記錄에는 스트레인 增幅器 (Model 6M5Z)와 Direct Reading Oscillograph (Model 5L3L)를, 應力의 分析을 위해서는 Stress Frequency Analyzer (Ono Sokki Co, Model SD-142)와 Printer (Model RQ411)로 各各測定 分析하였다. Fig.1은 切削力의 實驗을 위한 計測系를 圖示한 것이다.

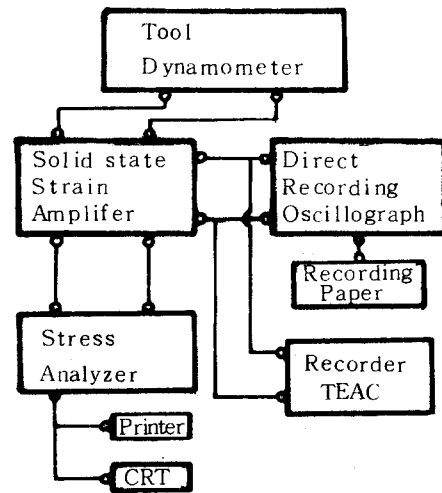


Fig. 1. Measuring system for cutting resistance

2.2. 使用工具 및 試片

本 實驗에 使用한 Drill은 SKH9 材質로 $\phi 12$ mm, $\phi 8$ mm, $\phi 5$ mm를 各各 使用하였으며, 每 實驗마다 磨耗에 對한 影響을 最小로 하기 爲하여 새 Drill로 交換하였다. 이들 工具의 標準角은 Point Angle : 118° Helix Angle : 30° Lip Relief Angle : 20° Web Angle : 135° 로 하였고, Straight Shank의 Jobber Length Drill을 使用하였다.

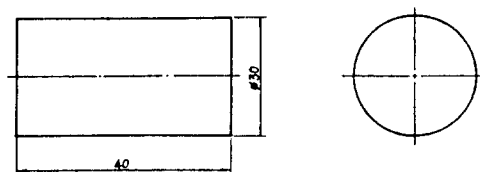


Fig. 2. Test specimen

한편, 本 實驗에서 使用한 試片은 Fig.2 와 같 은 規格의 丸棒으로써 材質은 構造用 炭素鋼(SM 45C)를 使用하였다. 試片의 化學的 成分 및 機械的 性質은 Table.1 과 같다.

Table. 1. Chemical compositions and Mechanical properties

Chemical compositions (%)					Mechanical properties		
C	Mn	Si	P	S	Hardness (HB)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
0.46	0.74	0.32	0.016	0.019	193	70	21

2. 3. 實驗方法

本 實驗에서는 構造用 炭素鋼(SM45C)에 대 하여 Drill 作業時 各各의 作業條件의 變化가 切削抵抗에 어떠한 影響이 있는가를 알아보기 爲하 여 Table.2 와 같은 常用 作業條件을 選定하여 實

驗하였다.⁹⁾ 또한 Drill 의 突出量(Overhang of Drill)은 $\phi 5\text{ mm}$, $\phi 8\text{ mm}$, $\phi 12\text{ mm}$ 일때 各各 60 mm , 80 mm , 100 mm 로 하였으며, 實驗을 始作하기전에 工具 動力計 中心과 Drill의 中心을 一致 시킨 다음 實驗을 行하였고, 이때 切削油의 影響을 無視하기 爲하여 이를 使用하지 않았다.

Table. 2. Working conditions

Spindle speed (rpm)	Feed (mm/rev)	Drill diameter (mm)
430	0.11	8
650	0.22	8
1000	0.35	8
650	0.11	5
	0.22	8
	0.35	12
430	0.22	5
		8
		12

Fig.3은 Radial Drilling Machine 에 工具 動力計를 設置하여 實驗中인 것을 보여 준 것이며, Drill의 回轉方向에 따른 Torque (kgf-cm)와 밑 으로 누르는 Thrust(kgf)로 나누어 測定된다. 本 實驗에서는 Fig.1에서 보여준 系統圖에 따라 各各의 實驗 計器를 利用하여 工具 動力計로 부터 Strain 을 檢出하였고, 이 Strain 을 增幅器를

通하여 增幅된 Strain 을 Oscillograph 에 記錄 하여 Strain 의 靜的인 成分을 檢出하였고, 한편 으로는 이 Strain 을 Data Recorder 에 記錄시 켜 이를 應力頻度 分析器(Stress Frequency Analyzer)로 分析한 후 Printer 를 通하여 data를 記錄하였다. 또한, Oscillograph 에서 檢出된 Data 와 Printer 에서 檢出된 Data 를 比較하여,

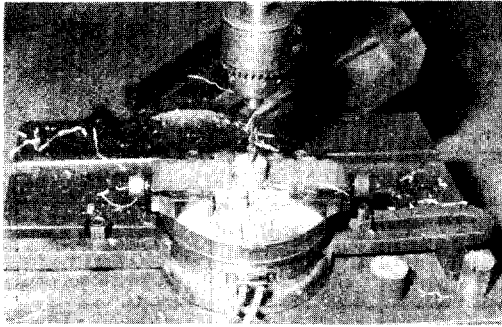


Fig. 3. Setting tool dynamometer on drilling machine

結果값을 서로 確認하였다. 그러나, Oscillograph에서 檢出한 Strain 값은 明白하게 動的 成分을 求하기 어려우므로 本 實驗에서 使用한 Data는 모두 Printer에서 檢出된 Strain 값을 採하였다. Strain 값을 Torque와 Thrust로 換算하는 式은 다음과 같다.¹⁰⁾

- 1) Torque : $\overline{W_1} = 0.668 \times S_1$
- 2) Thrust : $\overline{W_2} = 0.668 \times S_2$

여기에서 S_1 , S_2 는 各 抵抗의 Drill 動力計에서 出力된 Strain 값이며, $\overline{W_1}$, $\overline{W_2}$ 는 切削 Torque 및 Thrust이다.

3. 實驗結果 및 考察

切削抵抗에 미치는 因子로써는 切削條件, 被削材의 材質, 切削 工具의 材質 및 形狀, 工作機械-工具-工作物系의 特性等이 있는데, 本 實驗에서는 諸般 Data를 다음과 같이 分析 檢討하였다.

3.1. 切削抵抗의 一般的 挙動

Fig.4는 直徑 8mm의 Drill로 加工했을 때의 切削抵抗의 Oscillograph 상에 나타난 측정 例이다. 여기에서 보는 바와 같이 切削抵抗인 Torque와 Thrust가 加工깊이에 따라 增加하는 傾向이 있다. 이는 靜的인 成分 및 動的인 成分 다 같이 增加하고 있다. Fig.4에서 初期 段階에는 Drill이 試片에 들어가는 순간으로, 이때에는

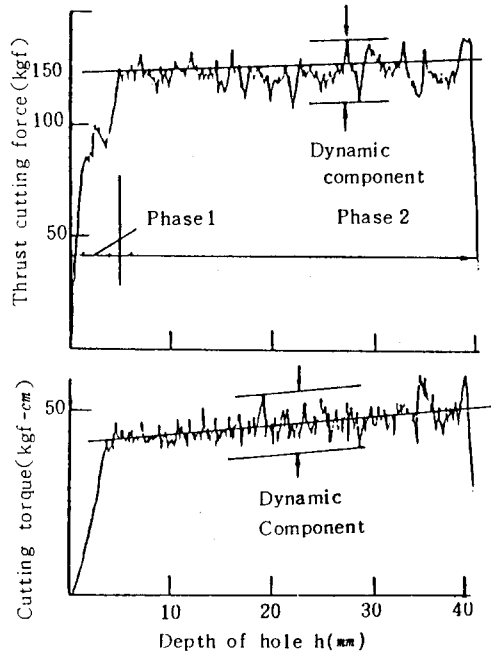


Fig. 4. Cutting force recorded on oscillograph

Drill의 절삭날이 점으로부터 커지는 現狀으로, 當然한 結果로 생각되며, 다음 安定段階로 全切削날이 切削을 하므로 어느程度 切削抵抗은 安定을 가져온다. 그러나, 切削깊이가 커짐에 따라 칩의 除去가 問題되며, 칩이 Drill과 工作物사이에서 磨擦을 일으키므로 切削抵抗은 增加한다. 그리하여, 切削깊이 增加에 따른 切削抵抗의 增加 傾向을 보면 Thrust보다 Torque가 더 크다.

本 實驗에서는 切削깊이 25mm를 잡아 모든 切削抵抗을 잡았다. 一般적으로, Drill 加工時 이러한 現狀 때문에 Drill 直徑의 3~5倍 以上の 깊이를 作業할 때에는 Twist Drill보다 다른 Gun Drill이나 Spade, Oil Hole Drill等 特殊한 Drill을 使用하는 것이 經濟的이다.¹¹⁾

動的인 切削抵抗은 칩의 斷續에 依한 切削抵抗의 變動과 工具 剛性, 移送의 多少等에 많은 影響이 있다. 이러한 動的인 成分을 檢出하기 위해서는 Fig.4와 같이 Oscillograph 상에서 나타난 成分으로는 明白하게 究明할 수 없으므로, 應力頻度 分析器에 依한 分析으로 이를 檢出하였다. Fig.

5와 Fig.6은 直径 8 mm Drill로 切削 깊이 25 mm 에서 이들 切削抵抗을 檢出한 Data 이다. 이들

Data 값을 分析하여 보면, Strain은 比較的 적은 範圍內에서 어떤 限定된 Group을 形成하고 있음

```

MACHINE NAME:
DATE:
RANGE: .31250+1 OPERATOR:
SH3: .00000+0 SH5: .00000+0 SH7: .00000+0 SH9: .00000+0
TIME(S): 7 LPF(Hz):OFF
TOTAL H: .45000+2 DAMAGE R.F: .00000+0
FU: P+- CH No:4 V/FS .10000+1 CAL .10000+1
-----
.15625+1 0 0.00 .00000+0
.46975+1 0 0.00 .00000+0
.78125+1 0 0.00 .00000+0
.10937+2 0 0.00 .00000+0
.14062+2 0 0.00 .00000+0
.17187+2 0 0.00 .00000+0
.20312+2 0 0.00 .00000+0
.23437+2 0 0.00 .00000+0
.26562+2 0 0.00 .00000+0
.29687+2 0 0.00 .00000+0
.32812+2 0 0.00 .00000+0
.35937+2 3 6.07 .15129+4
.39062+2 16 35.56 .02205+4
.42187+2 16 35.56 .02205+4
.45312+2 10 22.22 .51428+4
.48437+2 0 0.00 .00000+0
.51562+2 0 0.00 .00000+0
.54687+2 0 0.00 .00000+0
.57812+2 0 0.00 .00000+0
.60937+2 0 0.00 .00000+0
.64062+2 0 0.00 .00000+0
.67187+2 0 0.00 .00000+0
.70312+2 0 0.00 .00000+0
.73437+2 0 0.00 .00000+0
.76562+2 0 0.00 .00000+0
.79687+2 0 0.00 .00000+0
.82812+2 0 0.00 .00000+0
.85937+2 0 0.00 .00000+0
.89062+2 0 0.00 .00000+0
.92187+2 0 0.00 .00000+0
.95312+2 0 0.00 .00000+0
.98437+2 0 0.00 .00000+0
    
```

Fig. 5. Distribution of strains at thrust

```

MACHINE NAME:
DATE:
RANGE: .31250-1 OPERATOR:
SH3: .90030+3 SH5: .71030+3 SH7: .54090+3 SH9: .32130+2
TIME(S): 22 LPF(Hz):OFF
TOTAL H: .20900+3 DAMAGE R.F: .00000+0
FU: P+- CH No:3 V/FS .10000+0 CAL .10000+2
-----
.15623-1 1 0.40 .16363+3
.46873-1 0 0.00 .00000+0
.78123-1 0 0.00 .00000+0
.10937+0 0 0.00 .00000+0
.14062+0 0 0.00 .00000+0
.17187+0 1 0.48 .16363+3
.20312+0 0 0.00 .00000+0
.23437+0 1 0.48 .16363+3
.26562+0 0 0.00 .00000+0
.29687+0 1 0.48 .16363+3
.32812+0 0 0.00 .00000+0
.35937+0 0 0.00 .00000+0
.39062+0 0 0.00 .00000+0
.42187+0 0 0.00 .00000+0
.45312+0 0 0.00 .00000+0
.48437+0 0 0.00 .00000+0
.51562+0 0 0.00 .00000+0
.54687+0 0 0.00 .00000+0
.57812+0 10 4.01 .16363+4
.60937+0 53 25.40 .06723+4
.64062+0 81 40.38 .13745+5
.67187+0 28 13.46 .45818+4
.70312+0 17 8.17 .27818+4
.73437+0 4 1.92 .65454+3
.76562+0 1 0.48 .16363+3
.79687+0 1 0.48 .16363+3
.82812+0 0 0.00 .00000+0
.85937+0 0 0.00 .00000+0
.89062+0 0 0.00 .00000+0
.92187+0 0 0.00 .00000+0
.95312+0 0 0.00 .00000+0
.98437+0 1 0.48 .16363+3
    
```

Fig. 6. Distribution of strains of torque

MACHINE NAME:
DATE: OPERATOR:
RANGE: .31250-1 IUA: .30000+4
SN3: .90030+3 SN5: .71030+3 SN7: .54090+3 SN9: .32130+2
TIME(S): 143 LPF(Hz):OFF
TOTAL N: .37000+2 DAMAGE R.F: .00000+0
FU: P+- CH No:3 U/FS .10000+0 CAL .10000+2

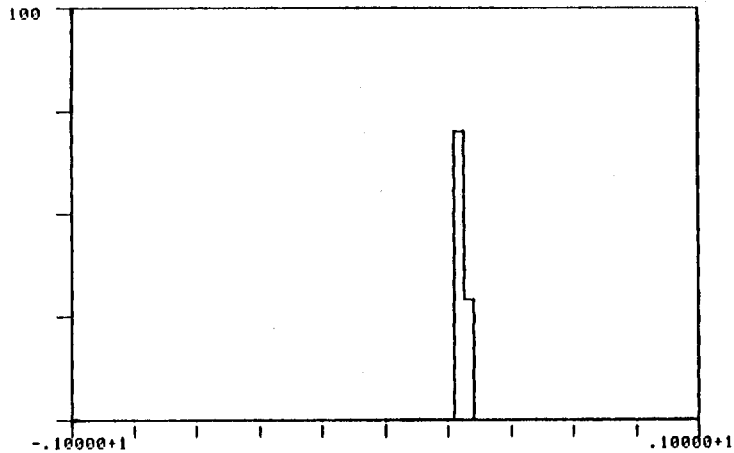


Fig. 7. Distribution data of strains(Low cutting resistance; Drill is high in rigidity)

MACHINE NAME:
DATE: OPERATOR:
RANGE: .31250-1 IUA: .30000+4
SN3: .90030+3 SN5: .71030+3 SN7: .54090+3 SN9: .32130+2
TIME(S): 169 LPF(Hz):OFF
TOTAL N: .56050+4 DAMAGE R.F: .00000+0
FU: P+- CH No:3 U/FS .10000+0 CAL .10000+2

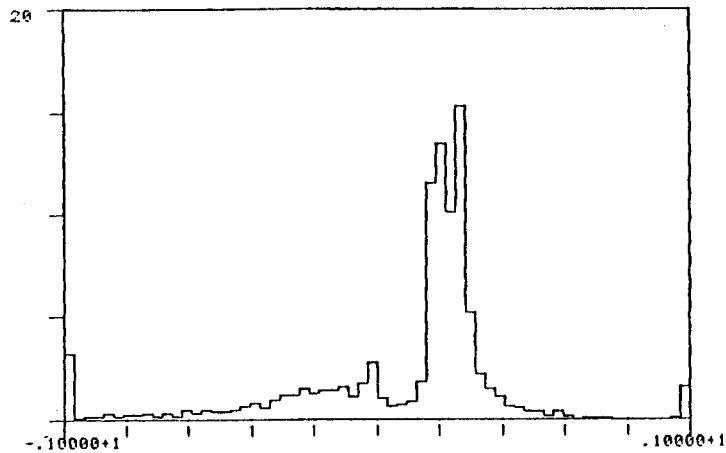


Fig. 8. Distribution data of strains (High cutting resistance; Drill is low in rigidity)

을 알 수 있다. Fig.7과 Fig.8은 이들 Strain의 分布를 圖示한 것으로 切削抵抗이 比較的 적고, Drill의 剛성이 큰 境遇에는 그 動的 成分의 分布는 작은 範圍로 限定되나 Drill의 剛성이 적고 切削抵抗이 큰 경우에는 그 分布 範圍가 커져 動的 成分도 커짐을 알 수 있다. Fig.9는 切削抵抗의 Strain 波形을 應力頻度 分析器(SD-142)의 Standard Data Mode(CRT上의 波形觀察을 위한 方式)로서 CRT 상에서 觀察한 것이다.

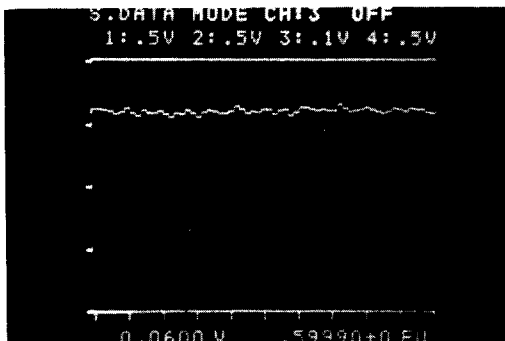


Fig. 9. Example of cutting force measurement

3.2. Drill 直徑이 切削 抵抗에 미치는 影響

Drill作業에서 切削 抵抗에 많은 影響을 주는 것의 하나가 Drill 直徑에 對한 變化이다. Fig. 10과 Fig.11은 主軸 速度를 各各 430 rpm, 1000 rpm, 切削 깊이를 25 mm, 移送를 0.22 mm/rev. 으로 一定하게 한 다음 Drill 直徑을 $\phi 5$, $\phi 8$, $\phi 12$ mm로 變化하였을 때, Drill 直徑이 切削 抵抗의 靜的 成分에 어떠한 影響이 있는가를 보여 준 것이다. 以上の 實驗結果를 回歸分析法과 最小自乘法을 利用하여 關係係數 및 指數를 算出하여 보면, Table 3과 같으며, 이것으로서 Data의 散布程度와 直線性을 알 수 있다.

切削 抵抗은 Drill直徑이 增加함에 따라 指數函數的으로 增加한다. 또한, 主軸速度가 430rpm과 1000rpm일때를 比較하면, Torque와 Thrust의 增加 傾向은 主軸 回轉 速度가 클 때, 增加 傾向이 더 크다. 한편, 動的 切削 抵抗의 變化를 보면, Torque에 있어서는 Drill直徑에 따라 큰 影響이 없음을 보여주고 있다. Fig.12와 Fig.13

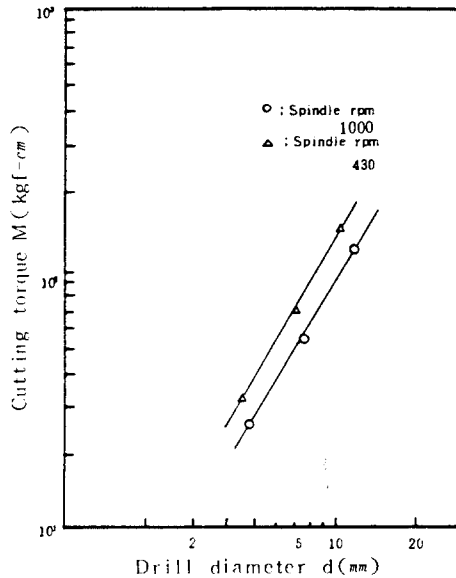


Fig. 10. Static components of Cutting torque vs. Drill diameter (Spindle speed 430 rpm, 1000rpm, Depth of cut 25mm, Feed 0.22mm/rev. Drill diameter varied)

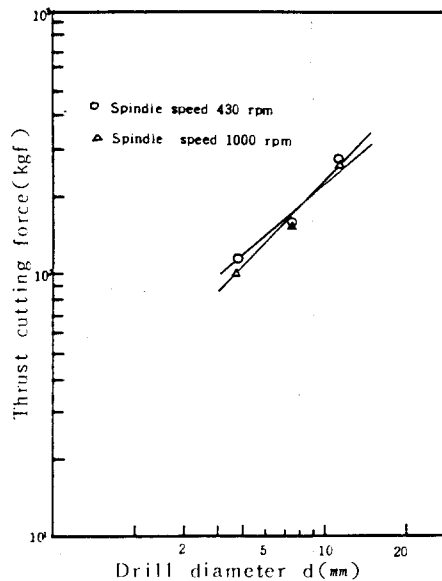


Fig. 11. Static components of Thrust cutting force vs. Drill diameter (Spindle speed 1000rpm, 430rpm. Depth of cut 25mm, Feed 0.22mm/rev. Drill diameter varied.)

Table. 3. Reduced data—Static components of cutting resistance
 (Feed 0.22 mm/rev. Constant. Drill dia. varied. Depth of cut 25mm)

	Drill Dia. d (mm)	Spindle speed 430 (rpm)			Spindle speed 1000 (rpm)		
		Measuring Force M.T	Value of Factor	Calculated Value M.T	Measuring Force M.T	Value of Factor	Calculated Value M.T
Torque M (kgf-cm)	5	31.24	r=0.9948	30.06	27.65	r=0.9964	26.71
	8	58.79	a=0.3570 b=1.6038	63.88	56.10	a=0.2118 b=1.7381	60.45
	12	127.98		122.40	127.33		122.32
Thrust T (kgf)	5	122.13	r=0.9997	121.46	112.71	r=0.9723	106.64
	8	183.60	a=1.4524	185.79	150.36	a=1.3393	169.44
	12	269.79	b=0.9043	268.08	269.38	b=0.9852	252.64

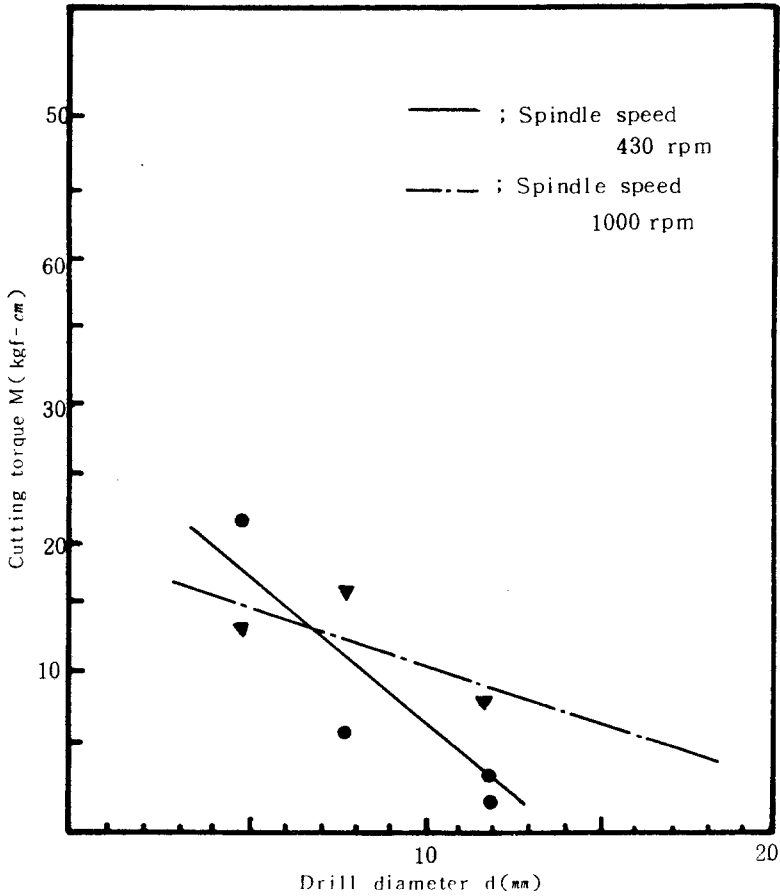


Fig. 12. Dynamic components of torque M(Kgf-cm) vs Drill diameter(Spindle speed 430rpm., 1000rpm. Depth of cut 25mm. Drill diameter varied.)

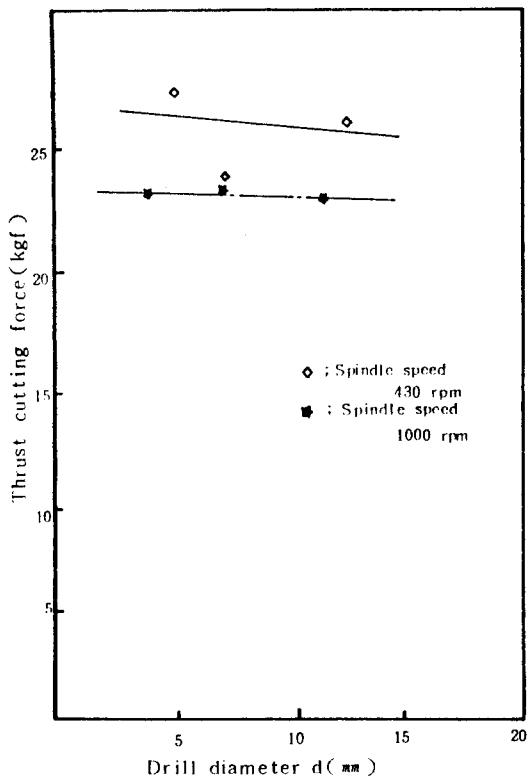


Fig. 13. Dynamic components of thrust T (kg-f) vs. Drill diameter. (Depth of cut 25mm. Drill diameter varied.)

은 이러한 傾向을 나타낸 그림이다. Torque의 減少 傾向은 Drill 直徑이 커짐에 따라 Drill의 剛性이 커짐으로 動的인 切削 抵抗은 減少하는 것으로 생각할 수 있으나 Thrust는 이러한 剛性과는 無關한 것으로 보인다.

3.3. 移送이 切削 抵抗에 미치는 影響

Drill의 移送量 f (mm/rev)는 作業面의 거칠기, 精密度 등에 影響을 주며, 普通, Drill 直徑이 크면, 剛性이 크므로 큰 移送를 捫할 수 있다. Fig.14와 Fig.15는 主軸速度 650rpm, 切削 깊이 25mm Drill 直徑을 5mm, 8mm, 12mm로 하고, 移送를 變化시켰을 때, 靜的인 Thrust와 Torque의 變化 傾向을 나타낸 것이며, 移送量의 增加와 더불어 Thrust 및 Torque는 指數函數의 으로

(exp 0.55, 0.38, 0.63 및 exp 0.62, 0.69, 0.65)로 增加하고 있다.

한편, 動的 成分을 보면, Fig. 16과 Fig. 17에서 보는 바와같이 Torque에 있어서는 移送이 커짐에 따라 動的 成分은 약간 減少하는 傾向을 보이고, Thrust의 動的 成分은 一般의 으로 커지는 現狀을 보이고 있기는 하나 一定치 않는다. 이러한 動的 成分은 移送이 커짐에 따라 工具의 떨림을 어느정도 制限시킨다고 생각되나 動的인 特性은 여러가지 다른 因子의 複合의 作用으로 나타나는 것으로 본다. 또한 이는 Drill 直徑에 따라 切削速度의 相異에 따른 Built up Edge 생성과도 關聯이 있는 것으로 생각된다.

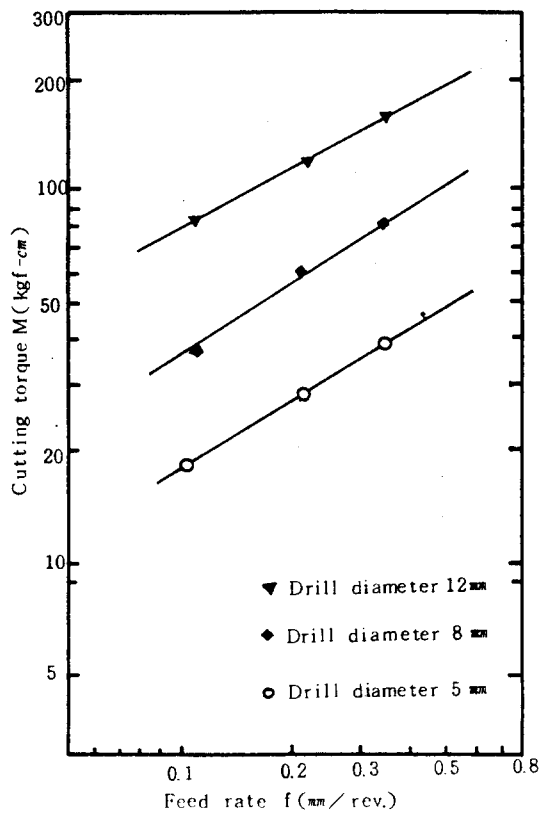


Fig. 14. Static components of Cutting torque vs. Feed rate. (Depth of cut 25mm. Spindle speed 650rpm. Feed rate varied.)

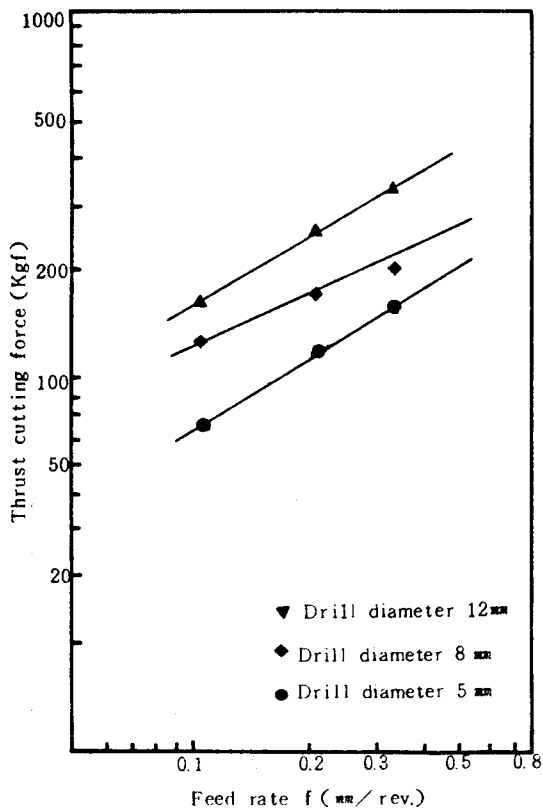


Fig. 15. Static components of Thrust cutting force vs. Feed rate. (Depth of cut 25mm. Spindle speed 650rpm. Feed rate varied.)

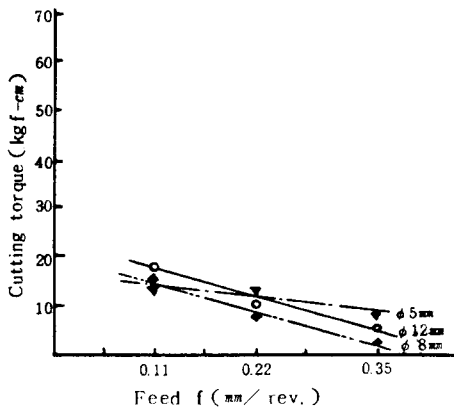


Fig. 16. Dynamic components of torque (Spindle speed 650rpm constant. Feed rate varied)

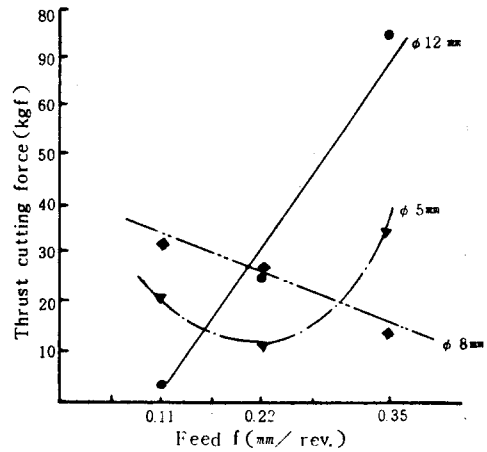


Fig. 17. Dynamic components of thrust. (Spindle speed 650 rpm constant Feed rate varied)

3. 4. 主軸의 回轉速度가 切削抵抗에 미치는 影響

Drill의 回轉速度는 通常 外周의 速度로 表示한다. 本 實驗에서는 主軸의 速度가 切削抵抗에 미치는 影響을 알아보기 위하여 常用 條件에서 Drill 直徑을 8mm, 切削 깊이를 25mm로 固定하고 移送를 Parameter로 하여 實驗하였다. Fig. 18과 Fig. 19는 實驗값의 靜的 切削抵抗의 Torque, Thrust 값이 回轉速度가 증가에 따라 어떻게 變化하는 가를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 主軸의 回轉速度가 增加하면, 移送에 關係없이 Torque와 Thrust는 약간 減少하는 傾向을 가지고 있다. 이러한 現狀은 Hölken, Shaw 등의 研究結果와도 一致하며,^{12, 13)} 切削速度의 增加는 工具의 磨擦係數를 減少시키고, 工具系의 振動, 切削力을 작게 하고 있다.

한편, 動的 成分은 主軸 回轉速度의 增加에 따라 Torque는 減少하고, Thrust의 動的 成分은 一般的으로 減少하나 一定치가 많다. Torque에서는 回轉 速度 增加에 따라 磨擦力이 적어지기 때문에 動的 成分이 減少하고 Thrust의 動的 成分은 諸切削條件에 따른 複合의 原因으로 困한 影響을 많이 받는 것으로 본다.

그리고, Drill 直徑에 따라 增加 傾向에 多少의 影響을 받고 있는데, 이것은 Drill날의 研磨, Overhang等 他條件을 一致시키지 못한 結果로 생각된다.

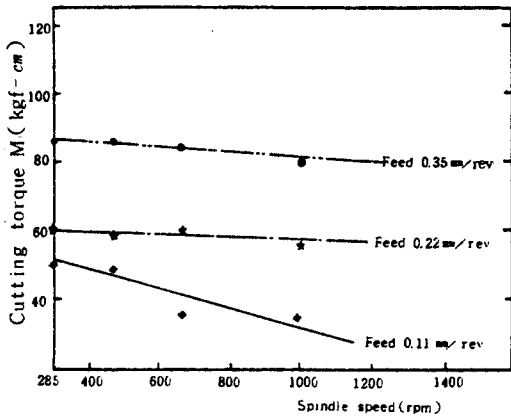


Fig. 18. Static components of Torque vs. Spindle speed. (Feed 0.11mm/rev, 0.22mm/rev, 0.35mm/rev. Depth of cut 25mm. Drill diameter 8mm, Spindle speed varied.)

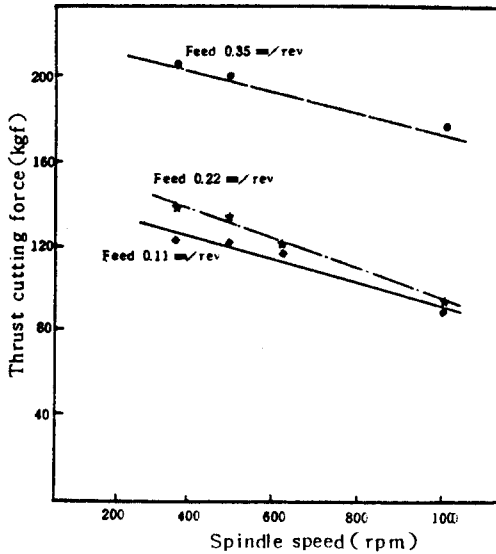


Fig. 19. Static components of Thrust cutting force vs. Spindle speed. (Feed 0.21mm/rev, 0.22mm/rev, 0.35mm/rev. Depth of cut 25mm. Drill diameter 8mm. Spindle speed varied)

送量이 크면 減少하나 Thrust는 이러한 變化와는 無關한 것으로 본다.

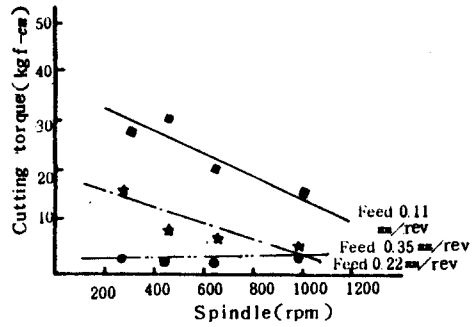


Fig. 20. Dynamic components of torque vs. Spindle speed. (Feed 0.11mm/rev, 0.22mm/rev, 0.35mm/rev. Depth of cut 25mm, Drill diameter 8mm, Spindle speed varied)

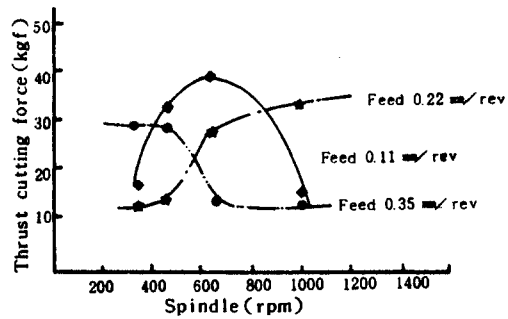


Fig. 21. Dynamic components of thrust vs. Spindle speed. (Feed 0.11mm/rev, 0.22mm/rev, 0.35mm/rev. Depth of cut 25mm, Drill diameter 8mm, Spindle speed varied)

다. Fig.20과 Fig.21은 移送量을 Parameter 로 하였을 때의 動的成分의 變化를 보여준 그림이다. 여기에서 보면, 動的成分中 Torque 는 移

3.5. Torque 와 Thrust 에 對한 實驗式

實驗結果에서 얻어진 靜的인 Torque 와 Thrust 의 값은 Table 4 와 같으며, Drill Torque 및 Thrust 에 關한 Shaw 와 Oxford 의 理論式을 引用하여 2) 實驗式을 求하면, Chisel Edge 길이 C 와 Drill 直徑 d 의 比가 一定하면(여기서는 $\frac{C}{d} = 0.146$), 주어진 材料에 對한 Torque M(kgf-cm) 를 求하는 式은 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$M = K f^{1-\bar{a}} d^{2-\bar{a}} \dots\dots\dots (1)$$

Table. 4. Reduced data—Static components of cutting resistance—Drilling operation

Feed varied					Drill diameter varied				
Feed f (mm/rev)	Drill dia d (mm)	Measuring Torque (Kgf-Cm)	Value of Factor	Calculated Value M	Drill dia (mm)	Feed f (mm/rev)	Measuring Torque (Kgf-Cm)	Value of Factor	Calculated Value
0.11	5	18.77	r=0.9720	20.74	5	0.11	18.77	r=0.9843	18.18
	8	59.10	a=0.0806	47.63		0.22	26.68	a=1.9013	28.91
	12	86.90	b=1.7687	97.57		0.35	41.39	b=0.6695	39.45
0.22	5	26.68	r=0.9994	26.32	8	0.11	41.31	r=0.9940	40.58
	8	59.10	a=0.1734	60.87		0.22	59.10	a=2.1898	61.79
	12	127.46	b=1.7839	125.46		0.35	84.10	b=0.6066	81.89
0.35	5	46.38	r=0.9986	40.54	12	0.11	86.90	r=0.9982	86.05
	8	84.10	a=0.4562	87.94		0.22	127.62	a=2.5136	130.78
	12	175.66	b=1.6477	171.52		0.35	175.66	b=0.6039	173.11

式(1)에서 Exponent \bar{a} 를 얻기 위하여, Drill Feed 와 Drill Diameter에 對한 Torque의 값은 Table.4 에서 알 수 있고, Fig.22는 Feed에 대하여, Fig.23은 Drill 直徑에 對한 切削 Torque의 關係를 圖示하였다. 여기서 얻어진 각 實驗값의 變化는 log-log 座標上에서 各各 exp. 0.63 과 exp. 1.73 임을 알았다. 그러므로 式(1)에서 \bar{a} 의 값은 各各 0.37 과 0.27이며, 이의 平均값을 취하면, \bar{a} 의 값은 0.32임을 알 수 있다. 또한, \bar{a} 가 f.d의 函數임을 보이기 위하여 式을 展開하면²⁾ 다음과 같다.

$$\bar{U} = U_L \left[1 - \left(\frac{c}{d}\right)^2 + U_c \left(\frac{c}{d}\right)^2 \right] = \frac{8 M}{f \cdot d^2} \dots\dots\dots(2)$$

여기에서 \bar{U} 는 Effective Specific Energy이다. 즉, \bar{U} 는 f.d(Feed × Drill Diameter)의 函數로 나타낼 수 있다. Fig.23에서는 \bar{U} 와 f.d에 대하여 圖表로 나타낸 것이며, Data 값은 Table.5와 같다.

여기에서, a와 b는 回歸分析法的 係數로써 各 切片과 기울기를, r은 相關係數이며, r = -0.8359, b = -0.35를 求할 수 있으므로, 앞에서

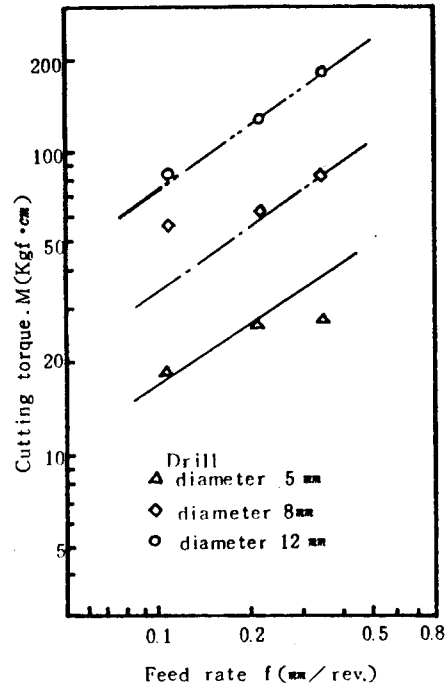


Fig. 22. Cutting torque vs. Feed rate.

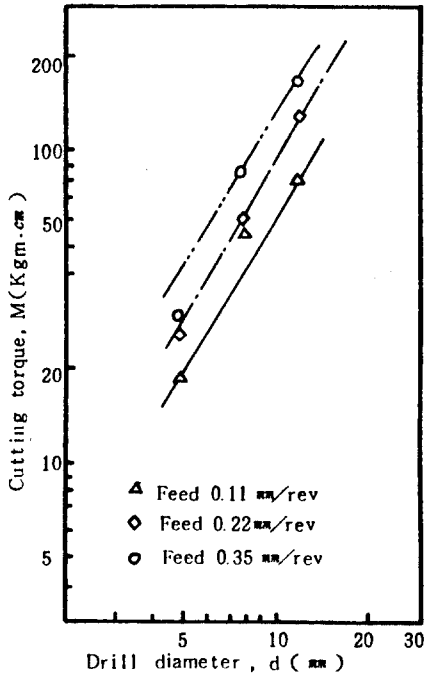


Fig. 23. Cutting Torque vs. Drill diameter.

求한 \bar{a} 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 相關係數 r 이 -1 에 近接한다는 것은 Drill 에 對한 單位 體積當 에너지는 2次元 切削機構에서 단지 Feed만이 아닌 直徑에 對한 積의 函數라는 事實을 意味한다. 만약 \bar{U} 를 Feed 만의 函數로 圖示하면, 回歸曲線이 얻어지는데 Feed 및 直徑 變化에 對한 指數값은 各 $f^{0.68} d^{1.32}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 式(1)에 依한 Torque 의 實驗式은 다음과 같다.

$$M/d^3 H_B = K \cdot f^{0.68} / d^{1.32} \dots\dots\dots(3)$$

K 常數를 求하기 위하여 $f^{0.68} / d^{1.32}$ 에 對한 $M/d^3 H_B$ 를 圖示하면 Fig.23과 같고, Data 는 Table 6 과 같다. Fig. 24 에서 相關係數 $r = 0.9324$ 로 一直線에 가까우며 기울기 $b = 0.019$ 임을 알 수 있다. 그러므로, $K = 0.019$ 이다.

한편, Thrust 에 對한 實驗式을 구하기 爲한 式은

$$T/d^3 H_B = K_1 f^{1-\bar{a}} / d^{1+\bar{a}} + K_2 \left(\frac{C}{d}\right)^2 \dots\dots(4)$$

로 쓸 수 있다. 여기에서, $\bar{a} = 0.32$ 이므로 K_1 ,

Table 5. Reduced data-Static components of cutting resistance -Drilling operation (\bar{U} vs f, d)

Feed, f (mm/rev)	Drill dia. d (mm)	f x d	Torque M (Kgf-Cm)	Effective Specific Energy \bar{U} (8M/fd ²)	Value of Factor	Calculated Value \bar{U}
0.11	5	0.55	18.77	54.60	r=-0.8359	51.94
0.22		1.10	26.68	38.80		40.76
0.35		1.75	26.58	24.30		34.65
0.11	8	0.88	41.31	46.94	a=1.6247	44.07
0.22		1.76	59.10	33.58		34.58
0.35		2.80	84.10	30.04		29.39
0.11	12	1.32	86.90	43.89	b=-0.3498	38.24
0.22		2.64	127.62	32.23		30.00
0.35		4.20	175.66	27.88		25.51

Table. 6. Reduced data-Drilling operation (M/d^3H_B Vs. $f^{0.68}/d^{1.32}$)

Drill dia d (mm)	Feed. f (mm/rev)	Torque M (kgf·cm)	$M/d^3 H_B$	$f^{0.68}/d^{1.32}$	Value of Factor	Calculated Value ($M/d^3 H_B$)
5	0.11	18.77	0.0008	0.0266	r=0.9325 a=0.0002 b=0.0187	0.0007
	0.22	26.68	0.0012	0.0427		0.0010
	0.35	26.58	0.0011	0.0585		0.0013
8	0.11	41.31	0.0004	0.0143		0.0004
	0.22	59.10	0.0006	0.0295		0.0007
	0.35	84.10	0.0009	0.0315		0.0008
12	0.11	86.90	0.0003	0.0084		0.0003
	0.22	127.62	0.0004	0.0134		0.0004
	0.35	175.66	0.0005	0.0184		0.0005

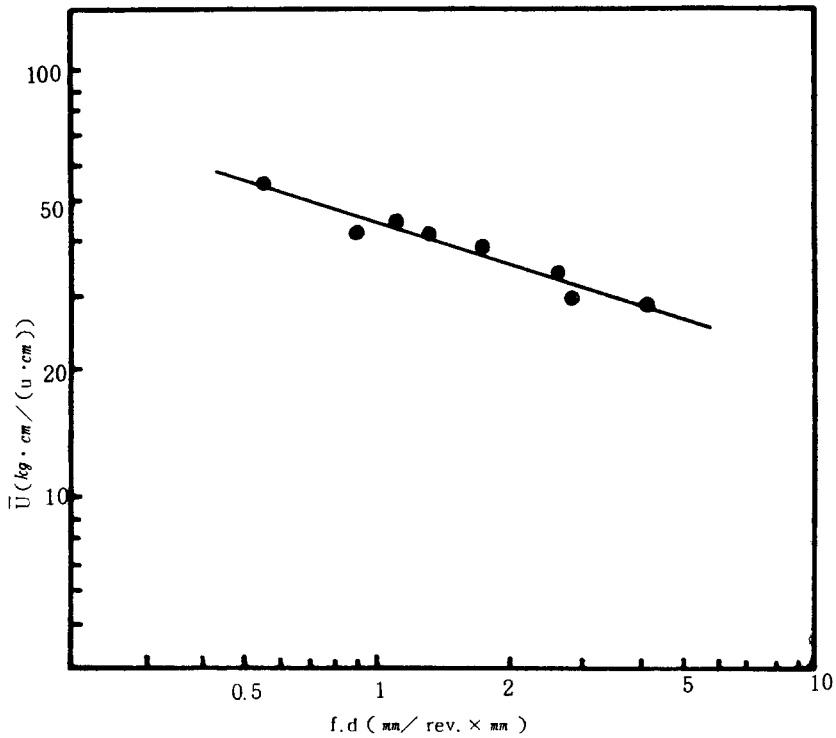


Fig. 24. Plot of Effective Specific energy vs. Feed x Drill diameter

K_2 의 常數를 구하여 주면 된다. Fig. 25에 $f^{0.68} / d^{1.32}$ 에 대한 $T / d^2 H_B$ 를 도시하였으며, Data 는 Table 7 과 같으며, Fig. 26 에서 相 係數 $r = 0.977$ 로 一 直 線에 잘 一 致하고 있음 을 보여 주고 있다. 또한, $T / d^2 H_B$ 가 $f^{0.68} / d^{1.32}$ 에 關한 圖表에서 一 直 線이 됨을 알 수 있다. Thrust 에 對한 實 驗式은 다음과 같다.

$$T / d^2 H_B = 3.911995 \times 10^{-3} + 0.400406 f^{0.68} / d^{1.32} \dots \dots \dots (5)$$

式(4)와 式(5)를 比較하여 보면 $K_1 = 0.400406$, $K_2 (\frac{C}{d})^2 = 3.911995 \times 10^{-3}$ 이므로 $K_1 = 0.400406$, $K = 0.1835$ 를 얻을 수 있다.

$$T / d^2 H_B = 0.400406 f^{0.68} / d^{1.32} + 0.1835 (\frac{C}{d})^2 \dots \dots \dots (6)$$

結果의 由로 本 實 驗에서 行한 構 造用 炭 素 鋼 SM 45 C의 切 削 Torque 및 Thrust 를 求하는 實 驗式은 다음과 같다.

$$M = 0.019 H_B f^{0.68} d^{1.32}$$

$$T / d^2 H_B = 0.400406 f^{0.68} / d^{1.32} + 0.1835 (\frac{C}{d})^2$$

위 實 驗式의 誤 差는 Torque 의 경우 8%, Thrust 의 경우에는 13%이내에 모든 測 定 값이 있다는 點을 알았다.

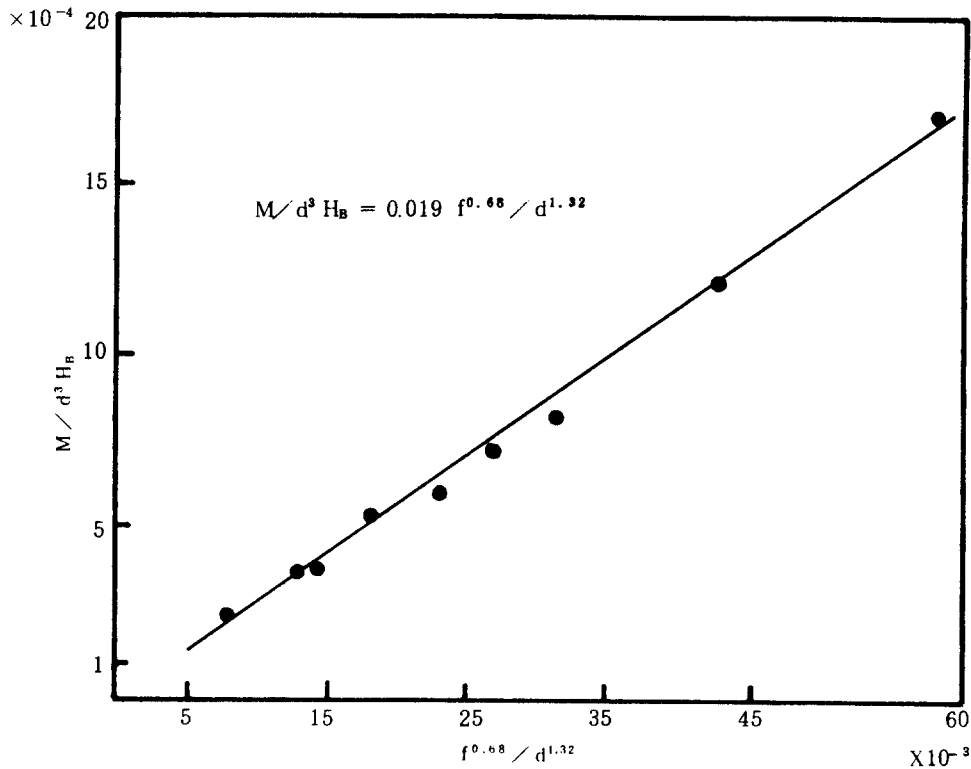


Fig. 25. Plot of $M / d^3 H_B$ vs $f^{0.68} / d^{1.32}$

Table. 7. Reduced data-Drilling operation ($T/d^3 H_B$ v.s. $f^{0.68}/d^{1.32}$)

Drill dia. d (mm)	Thrust. T (kgf)	$T/d^2 H_B$	$f^{0.68}/d^{1.32}$	Feed	Value of Factor	Calculated Value ($T/d^2 H_B$)
5	72.69	0.0147	0.0266	0.11	r=0.9862	0.0146
	110.53	0.0233	0.0427	0.22		0.0210
	128.79	0.0260	0.0585	0.35		0.0273
8	120.78	0.0095	0.0143	0.11	a=0.0039	0.0096
	173.42	0.0137	0.0229	0.22		0.0131
	196.81	0.0155	0.0315	0.35		0.0165
12	172.94	0.0066	0.0084	0.11	b=0.4004	0.0072
	269.46	0.0095	0.0134	0.22		0.0093
	340.82	0.0195	0.0184	0.35		0.0113

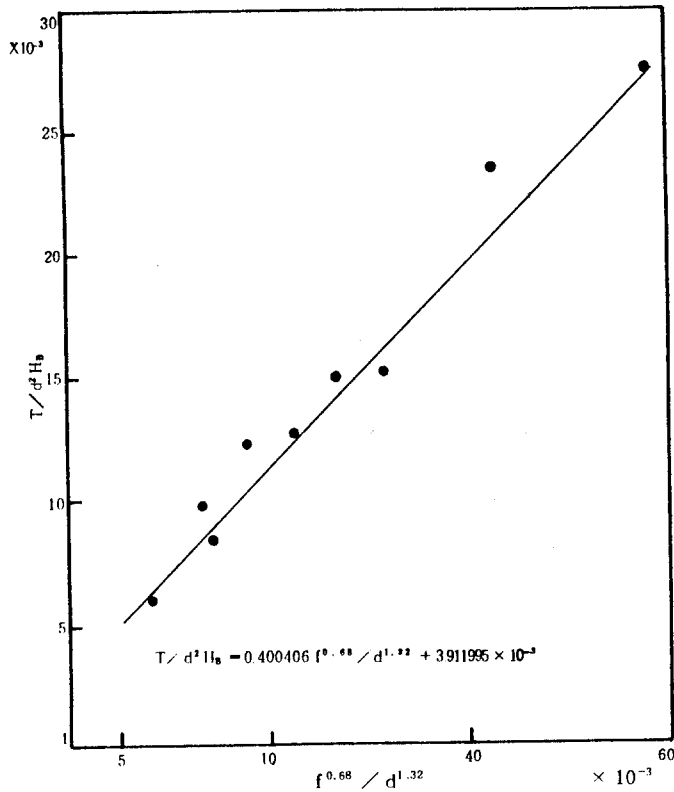


Fig. 26. Plot of $T/d^2 H_B$ vs. $f^{0.68}/d^{1.32}$

5. 結 論

從來의 drill 作業에 있어 切削抵抗에 대한 研究는 Oscillograph 上의 切削抵抗 Curve 를 分析하여, 靜的인 成分과 動的인 成分을 檢討하였으나, 本 研究는 Stress Frequency Analyzer 를 利用하여, 모든 切削抵抗을 計數化하고, 이 Data를 分析하였다. 本 實驗的 研究는 構造用 炭素鋼(SM 45C)에 對한 Drill 作業時 切削抵抗의 靜的 및 動的 成分의 變化 傾向을 分析한 것으로써 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 本 實驗에서 구한 切削抵抗 靜的인 Torque 와 Thrust 의 實驗式은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M = 0.019 H_B f^{0.68} d^{1.68}$$

$$T = 0.400406 f^{0.68} d^{0.68} + 0.1835 H_B C^2$$

2) Drill 直徑의 增加는 靜的 切削抵抗을 指數函數的으로 增加시키나, 動的 切削抵抗은 剛性的 增加로 Torque 에서는 減少하나 Thrust 는 一定하다.

3) 移送를 增加시키면, 靜的인 切削抵抗은 指數函數的으로 增加하는 傾向이 있으나, 動的인 切削抵抗은 Torque 에 있어서는 크게 減少하는 傾向을 보이고 있으며, Thrust 의 動的 成分은 그 變化가 一定하지 않다.

4) 主軸의 速度가 Torque 및 Thrust 에 미치는 影響은 靜的 成分은 靜的 成分은 速度의 增加에 따라 약간 減少하고 있으며, 動的 成分도 一般的으로 減少하는 傾向을 보인다.

參 考 文 獻

1. D. F. Galloway: Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance, Trans, ASME (Feb, 1957) P.191-231
2. M. C. Shaw, C. J. Oxford: On the drilling of Metal 2 - The Torque & Thrust in Drilling, Trans. ASME (JAN. 1957) P.139-148
3. 中山一雄: 切りくず形状から見たね刃ドリルの切削性能 精密機械 43卷4號(1977.4), p.39~43.
4. W. D. Tsai, S.M. Wu: Computer Analysis of Drill Point Geometry. Int. J. Mech. Tool. Des. Res. Vol. 19 (1979) P.95-108
5. M. A. Fugelso, S. M. Wu: An Analysis and categorization of Twist Drill Grinding Machines, Int. J. Mech. Tool. Des. Res. Vol. 20 (1980) P.223-234
6. R. BEDINI, P. C. PINOTTI and G. PRES-CIUTTINI: Adaptive Control in Drilling proc, 18th M. T. D. R. conf. P.92-102 Macmiuan Press (1978)
7. Opitz, H. et al: Forschungs berichte des Landes Nordrhein Westfalen, Westdeutscher Verlag (Köln), 2144 (1970) P.1
8. 全彦燦, 南宮垢: 切削抵抗의 動的 成分에 미치는 切削條件의 影響에 관한 研究(II) J. K. S. P. E. 第2號(1984.9), p.58~68.
9. Metcut Research Associates Inc. "Machining Data Handbook" (1966) P.221-240
10. 佐藤マシンリ(株): TSM-B Series Tool Dynamometer Instruction Manual AST 式 切削動力計 較正表 p. 1~3.
11. Eary and Johnson: Process Engineering for Manufacturing (1970) Prentice Hall P.220
12. W. HÖLKEN: Unter suchugen Von Ratterschwingungen an Drehhänken, Diss. TH. Aachen 1957 Und Forschungsbericht 7. Verlag W, Girasdet. Essen (1957)
13. M. C. Shaw. and W. HÖLKEN: "Selb sterregte schwingungen beider Spananden Bearbeitung" Industrie - Anzeiger 79 (1957) No.63 p.18
14. Ono Sokki : 應力頻度アナライザ SD-142 解設資料 p. 6~16.