

# 스텝이송방식을 이용한 미세구멍가공에 관한 실험적 연구

한진욱\*, 원종식\*, 이응숙\*\*, 정윤교\*\*\*

## An Experimental Study on Micro Drilling Using Step Feed

Jin-Uk Han\*, Jong-Sik Won\*, Eung-Suk Lee\*\*, Yoon-Gyo Jung\*\*\*

### ABSTRACT

Micro drilling is one of the most important machining types and its necessity becomes more and more increasing in the whole field of industry. Micro drilling, however, has few the case of practical application, because it requests high techniques ; manufacturing micro drill, treating chip, producing precise hole shape and progressing machining efficiency. Micro drilling has a technical problem ; drill breakage from the lack of drill rigidity and the interruption of chip. It is, therefore, essential to select the proper cutting conditions and the step feed for the method solving the lack of rigidity and the interruption of chip. Especially, step feed is very efficient to avoid the breakage of drill, but bring about reducing of cutting efficiency. The study on step feed must be requested more than the present in the near future. The purpose of this paper is to investigate experimentally about cutting conditions which affect on tools and round errors and to estimate about the effect of step feed as well as optimal step feed size to solve the breakage of drill.

**Key Words** : Micro drilling(미세구멍가공), Drill breakage(드릴파손), Thrust(스러스트), Round error(구멍확대오차), Step feed(스텝이송), Drilling length(가공량)

### 1. 서론

절삭가공 중에서도 높은 비중을 차지하는 구멍가공은 전자제품, 공작기계 뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 소형화, 대량생산화함에 따라 미세화, 고속화하게 되었다. 특히, 카메라, 오디오, 비디오, 컴퓨터 등의 전자제품들, 시계산업, 엔진 연료분사 노즐, 광섬유 커넥터, 우주항공용 전자부품, 로켓엔진부품, 의료용 광학기기, 정밀공구, 게이지 등의 산업기계 부품 등 미세구멍가공이 산업

전반에 미치는 영향은 대단히 크다. 그러나 미세구멍가공은 공구제작, 칩처리, 구멍형상정도, 가공능률향상 등에 고도의 기술을 요하기 때문에 실용화를 위해서는 많은 문제점을 해결하여야 한다<sup>(1-5)</sup>.

미세구멍가공이라 함은 가공에 문제가 되는 직경 1mm 이하를 지칭한다<sup>(6)</sup>. 따라서, 미세구멍가공은 직경이 미세하여 드릴이 작은 강성을 가지므로, 특히 깊은 구멍가공일 경우에는 칩막힘으로 드릴마멸 및 파손에 주의해야 하며 올바른 가공조건 선택이 무엇보다도 중요하다.

\* 창원대학교 대학원  
\*\* 한국기계연구원  
\*\*\* 창원대학교

외국에서는 직경 0.05mm 까지의 미세 드릴 가공기가 이미 실용화되어 있으며, 직경 0.1mm 드릴로 피삭재 두께 1mm 이상의 가공도 가능하다<sup>(7)</sup>고 전하지만 국내에서의 미세드릴 가공기에 대한 연구는 최소한 실정이며, 앞으로 이 분야에 대한 개발과 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 미세드릴 가공시에 발생하는 스러스트를 측정하여 이송, 절삭속도, 피삭재 두께변화 등 각 절삭조건이 드릴수명과 가공확대 오차에 미치는 문제점을 점검한 후, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 채택한 스텝이송의 효과 및 최적스텝 이송조건을 실험적으로 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 드릴링머신(TUNGALOY社製, Type SDM-01-15BF)의 사양은 Table 1과 같다. 본 연구에 사용된 드릴(TUNGALOY社製)은 내마멸성이 우수하고 고속절삭에 유리한 초경드릴을 사용하였으며 Fig. 1은 본 실험에서 사용된 드릴의 형상과 치수를 보여

Table 1 Specifications of drilling machine

Drilling ability	$\phi 0.1 \sim \phi 2.0(\text{mm})$
Revolution	max. 50,000(rpm)
Feed speed	30~800(mm/rmin)
Stepping frequency	0.01~999(mm)
Step feed rate	8(step) $\times$ 9(times)
Total stroke	75(mm)
Size of machine body	300 $\times$ 350 $\times$ 680(mm)
Weight	35(kg)

d (mm)	Type	l (mm)	$\theta$
0.15	UHF-015	2.0	120°
0.2	UHF-020	2.3	120°
0.4	PH-040	5.0	120°
0.8	PH-080	8.0	130°

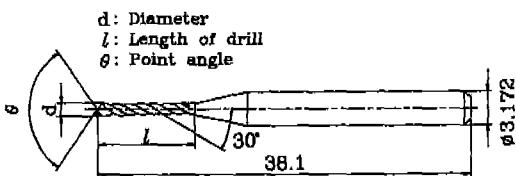


Fig. 1 Geometry and dimension of micro-drill

주고 있다. 구멍가공시 발생하는 스러스트(드릴 축방향의 하중)는 압전소자형 공구동력계(KISTLER社製, Type 9257A, SN 294245)로 측정하여 전하 증폭기(Dynamic strain amplifier, KISTLER社製)로 증폭하고 기록계(Pen recorder)로 기록하였다. 그리고 가공구멍 확대오차(Round error) 및 드릴전단은 모니터 내장 현미경(VH-600, KEYENCE社製)과 주사형 전자현미경(SEM, HITACHI社製)을 이용하여 사진을 촬영하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 실험에

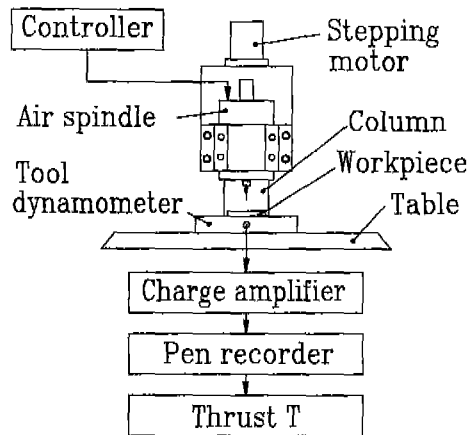


Fig. 2 Experimental apparatus of micro-drilling

사용된 시험편의 종류는 편이상 SM45C와 황동(Brass)을 채택하였으며, 미세구멍가공은 드릴직경의 미세화로 가공외적인 절삭조건에도 매우 민감하기 때문에 공작물의 표면, 구멍가공시의 드릴의 가공시작 위치, 드릴의 정확한 장착 등과 같은 가공 준비단계에도 세심한 주의를 하였다. 특히, 마이크로 드릴을 사용하는 경우에는 드릴이 공작물에 관입할 순간에 공작물의 요철과 가공경화의 영향을 많이 받기 때문에 피삭재의 표면거칠기를 개선하고 표면경화를 해결하기 위해서 공작물을 선삭하고 나서 폴리싱하여 표면거칠기를  $R_{max} : 0.7\mu\text{m}$ ,  $R_a : 0.071\mu\text{m}$  이내로 하였다.

## 3. 미세구멍의 가공특성

### 3.1. 가공시의 스러스트

구멍가공시 발생하는 스러스트는 가공능률의 평가 및

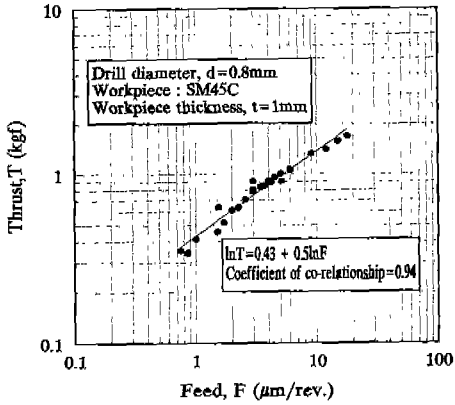


Fig. 3 The relationship between feed and thrust

공구의 마멸, 파손의 척도로서 중요하다. Fig. 3에는 이송에 따른 스러스트의 변화를 도시하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 이송이 증가함에 따라 스러스트가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이것은 이송의 증가에 따른 절삭면적의 증가에 의한 것이며, 본 실험에서는  $\ln T = 0.43 + 0.5 \ln F$ 의 실험식을 얻을 수 있었다. 여기서 F는 이송이고 T는 스러스트이다. 이때 이송은 이송속도에 비례하고 절삭속도에 반비례하므로 일정한 이송속도로 가공할 경우에 절삭속도

를 높이면 스러스트를 감소시킬 수 있다. 따라서 미세드릴가공에서 고속주축을 사용하여 가공하면 일반 드릴가공과 유사한 절삭속도로 가공할 수 있다는 측면과 일정 스러스트에서 절삭속도의 증가는 이송속도를 높이는 효과를 가져오기 때문에 가공능률을 향상시킬 수 있다. Fig. 4는 매 구멍가공시의 스러스트의 변화를 관찰하여 비교한 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 구멍가공의 수  $n=1, n=2, n=3$ 에서는 가공시작점에서부터 가공종료점으로 갈수록 스러스트가 점진적으로 증가를 하고 있음을 알 수 있으며, 구멍의 가공횟수가 증가한  $n=111, n=112, n=113$ 에서는 오히려 가공시점에서 스러스트가 크고 가공종점으로 갈수록 감소되는 양상을 보이고,  $n=298, n=299, n=300$  정도에 도달하면 전반적으로 스러스트가 격심한 변화를 보이며 불안정해 짐을 알 수 있다. 이는 가공초기에 드릴의 절연이 예리하여 피삭재에의 관입이 용이하지만, 가공량이 증가함에 따라 드릴선단이 마멸되어 스러스트가 전반적으로 증가하는 양상을 보이며, 가공시점에서 오히려 스러스트가 크고 가공종점으로 갈수록 감소되는 양상으로 반전되는 이유는 110개 이상의 구멍가공에서 보듯이 드릴선단의 마멸에 의해 드릴의 관입에서 스러스트가 증가하기 때문이다. 최종적으로 파손 직전에 이르면 드릴선단의 마멸과 칩의 막힘이 복합적으로 작용하므로 격심한 스러스트의 변화를 보여지게 된다.

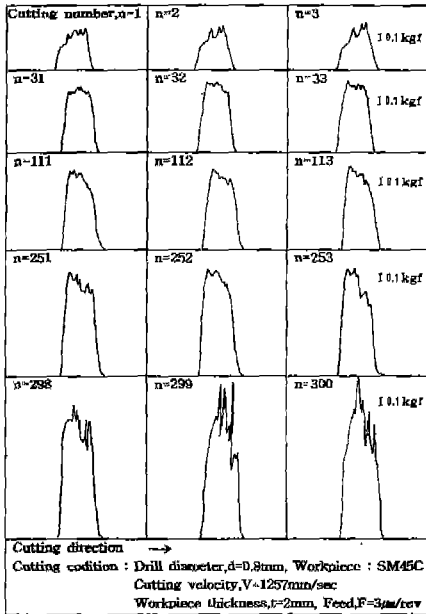


Fig. 4 Comparison of measured signals in each drilling

Fig. 5는 공작물의 두께  $t=1\text{mm}$  및  $t=2\text{mm}$ 인 경우 가공량(L)에 대한 스러스트의 변화를 상이한 이송조건에 따라 비교하고 있다. 이송이  $4.5\mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $8\mu\text{m}/\text{rev}$ 인 경우에 비해 이송이  $3\mu\text{m}/\text{rev}$ 인 경우에는 가공량이 30mm 까지의 초기 마멸 상태가 현저하게 나타나고 가공량의 증가에 따라서도 점진적인 스러스트의 증가가 확인되었다. 이러한 현상은 절삭속도가 일정한 경우 이송이 적으면 적을수록 같은양을 가공하는데 필요한 공구와 공작물의 간섭시간이 길어지기 때문이다. 피삭재의 두께를 2mm로 가공하였을 때에는 스러스트의 절대치가 피삭재의 두께 1mm일 때와 비교하여 약간 증가한 것 이외에 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 6에서는 가공량의 증가에 대한 스러스트의 증분을 나타내고 있는데 가공량이 증가함에 따라 현저한 스러스트의 변화를 확인할 수 있다. 이들 결과로부터 안정된 미세구멍을 가공하기 위해서는 마멸이 많은 적은 이송의 조건을 피해야 하고 피삭재의 두께가 커질수록 스러스트의 절대값이 커지기 때문에 이 값을 억제할 수 있는 고안이 필요하다.

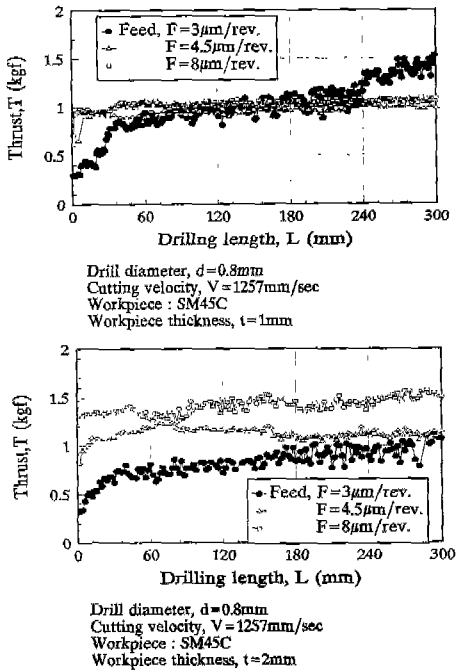


Fig. 5 Thrust for various drilling lengths in  $t=1\text{mm}$  and  $t=2\text{mm}$

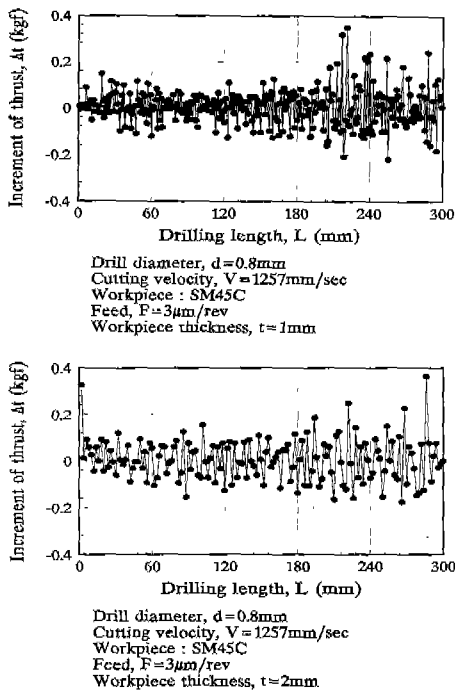


Fig. 6 Thrust increment for various drilling lengths in  $t=1\text{mm}$  and  $t=2\text{mm}$

### 3.2. 미세구멍 가공오차

미세구멍가공에서는 드릴의 직경이 작으므로 드릴을 고속회전시킬 필요가 있으며, 이에 따른 드릴의 진동 등에 기인하는 가공오차가 문제가 된다. 일반적으로 구멍가공의 경우 가공오차는 구멍확대오차로 평가하며 이것은 가공된 구멍의 직경과 드릴 직경의 차이를 의미한다. Fig. 7은 공작물의 두께  $t=1\text{mm}$ ,  $t=4\text{mm}$ 를 드릴직경  $0.8\text{mm}$ 로 가공할 때, 가공량의 증가에 따른 구멍확대오차의 변화와 스러스트의 변화를 동시에 나타낸 그림이다. 공작물의 두께  $t=1\text{mm}$ 인 경우의 구멍확대오차는 전반적으로 안정된 양상을 보이고 공작물의 두께  $t=4\text{mm}$ 인 경우가 구멍확대오차의 현저한 증가를 확인할 수 있다. 또한 구멍확대오차는 스러스트의 증가 양상과 거의 일치하는 경향을 보이며, 이것은 드릴의 마멸이 진전되면서 스러스트가 증가하고 이와 비례하여 드릴의 흔들림이 커지기 때문이라 생각된다. 이와 같은 현상을 피하기 위해 깊은 구멍가공을 위해서는 단계적인 이송을 하여 스러스트의 값을 감소시킬 필요가 있다. Fig. 8는 가공초기의 구멍과 드릴선단의 마멸에 의해 구멍이 확대된 사진이다.

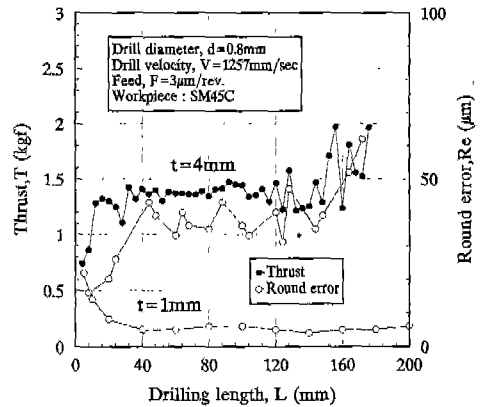


Fig. 7 Round error for various drilling lengths

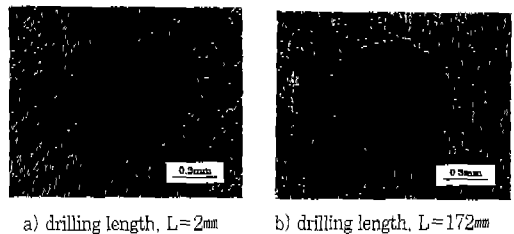


Fig. 8 Photograph of micro hole magnification

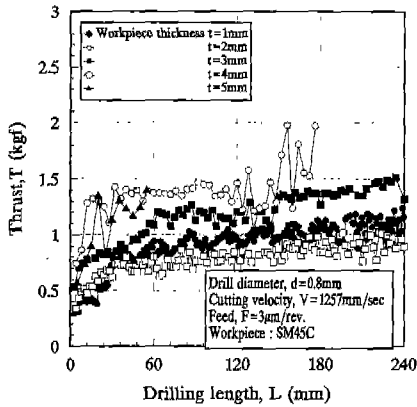


Fig. 9 Thrust in various workpiece thicknesses

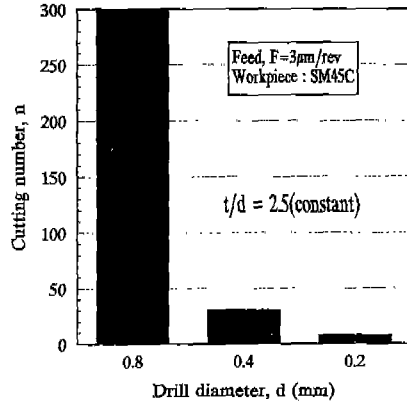


Fig. 10 Drilling number until drill failure in constant t/d

### 3.3. 공작물 두께에 따른 가공특성

미세구멍가공은 작은 직경의 드릴로 가능하면 깊은 구멍을 뚫는 것이 목적이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 공작물의 두께를 변화시켜 이것이 미세구멍 가공특성에 미치는 영향을 조사해 보았다. Fig. 9는 공작물의 두께를 1mm~5mm까지 5단계로 나누어 가공량에 대한 스터스트의 변화를 조사한 것이다. 공작물 두께 t=1mm와 2mm인 경우는 가공량이 240mm 까지 증가하여도 현저한 공구의 마멸이라고 생각되어지는 스터스트의 변화는 보이지 않고, t=3mm와 같이 구멍의 깊이가 깊어질수록 칩막힘 현상과 공구의 마멸이 현저해지면서 가공량의 증가에 따라 스터스트가 큰 폭으로 증가되고 있다. 더욱 공작물의 두께를 증가시키면, 본 실험의 조건에서 공작물 두께 t=4mm인 경우는 가공량이 180mm에서, t=5mm인 경우는 가공량이 60mm에서 파손에 이르는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 드릴의 직경에 대한 공작물의 두께비를 일정 (t/d=2.5)하게 설정하고 드릴의 직경의 변화에 따른 드릴파손까지의 가공횟수를 비교한 것이다. 드릴의 직경에 대한 공작물의 두께비가 일정하면 드릴파손까지의 가공횟수가 동일하리라 예측됨에도 불구하고 드릴의 직경이 작아지면 그 횟수가 현저하게 감소함을 알 수 있다. 따라서, 미세구멍가공에서 드릴의 직경이 작으면 작을수록 지금까지 검토한 미세구멍가공의 특성에 현저히 지배받을 것이라 예상된다. 이상의 결과에서 작은 직경의 드릴로 깊은 구멍을 가공하기 위해서는 칩막힘을 줄일 수 있는 스텝이송을 선택할 필요가 있음이 확인되었다. Fig. 11은 0.8mm 드릴로 두께 3mm의 공작물을 가공량 300mm까



Fig. 11 Photograph of micro drill wear(d=0.8mm)

지 가공하여 드릴선단을 찍은 사진이다. 드릴선단의 마멸은 칩출부가 특히 심하게 나타나고 주절인과 절인의 외주 코너부가 현저하다. 칩출부의 마멸은 스터스트의 증가에 직접적으로 영향을 미친다.

## 4. 스텝이송방식을 이용한 가공특성

### 4.1. 스텝이송 효과

깊은 구멍을 가공할 경우에는 칩막힘으로 인해 발생하는 많은 문제점때문에 가공이 더욱 어렵게 되고 특히 마이크로 드릴의 경우에는 드릴을 쉽게 파손시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 스텝이송방식을 많이 채택한다. 그러나, 지나친 스텝이송 횟수는 가공 능률적인 면에서는 불리한 점을 간과할 수는 없다. Fig. 12는 스텝이송의 개

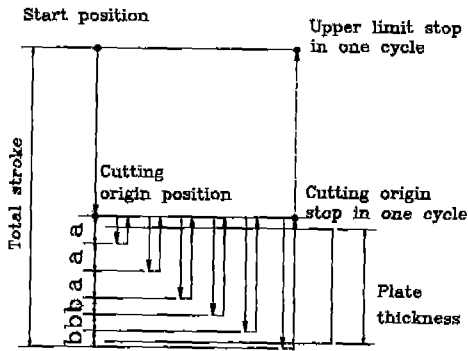


Fig. 12 The conception of step feed

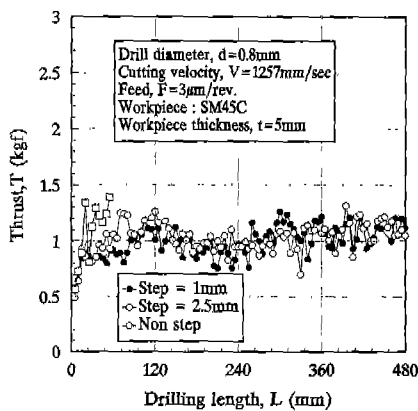


Fig. 13 Effect of step feed

념도를 나타낸 그림이다. Fig. 12에서 각 스텝이송시 마다 드릴을 초기 절삭위치까지 스텝백(step back)시켜 칩을 배출시키는 것이 스텝이송의 목적이다.

Fig. 13은 공작물의 두께  $t=5\text{mm}$ 인 조건에서 스텝이송을 준 경우와 주지 않은 경우에 대하여 가공량의 증가에 따른 스러스트의 변화를 나타내고 있다. 스텝이송은 1회 구멍가공의 종료를 매회 이송 1mm씩 5번 실시하는 경우와 매회 이송 2.5mm씩 2번 실시하는 경우로 나누어 실험을 행하였다. 스텝이송을 실시한 양자간에서 스러스트의 양상에 큰 차이는 보이지 않았으며, 스텝이송을 주지 않았을 때에는 가공량 55mm 부근에서 드릴이 파손에 이르게 되는 것에 비해 스텝이송을 실시한 경우에는 가공량 480mm 까지도 구멍가공을 할 수 있는 것으로 보아 스텝이송이 미세구멍가공에서는 효과적임을 확인할 수 있었다.

#### 4.2. 최적 스텝이송 조건의 설정

전 절에서 서술한 바와 같이 미세구멍가공시 스텝이송 방식이 효과적이었다고 할지라도 어떠한 스텝이송 조건으로 가공할 것이냐에 따라 그 효과가 달라질 것으로 사료된다. 우선 Fig. 14에서는 공작물 두께를 1mm, 스텝이송 횟수를 4번으로 동일하게 한 후, 스텝이송 방식을 A, B, C 세가지 방식으로 나누어 스텝이송 효과를 비교하였다. A 방식은 구멍의 깊이가 깊어짐에 따라 스텝이송량이 감소되어지는 경우, B 방식은 스텝이송량이 일정한 경우, C 방식은 스텝이송량이 점차 많아지는 경우이다. 그림에

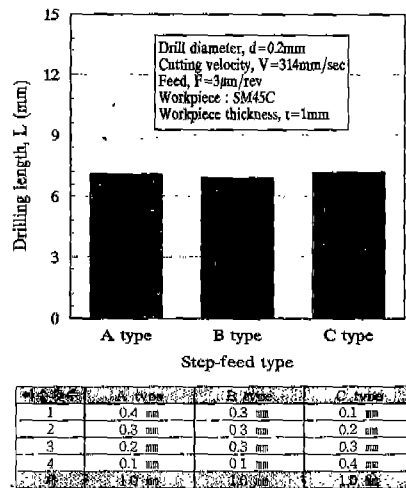


Fig. 14 The drilling length for three changing step feed pattern

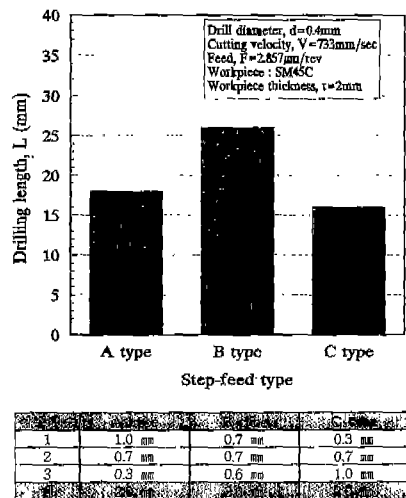


Fig. 15 The drilling length for three changing step feed pattern

서 보는 바와 같이 이 세가지 방식내에서는 별다른 차이점을 발견할 수 없었다. 그러나, Fig. 15에서 보는 바와 같은 스텝이송방식이라 할지라도 최대 스텝이송량의 차이를 크게하여 가공량을 비교한 경우에, 최대 스텝이송량이 가장 적게 되는 B 방식이 효과적임을 알 수 있다. 이것은 A와 C 방식과 같이 최대 스텝이송량이 크게 되면 칩의 배출이 어려워질뿐만 아니라 구멍의 깊이가 깊어질수록 드릴에 걸리는 부하가 커져 드릴의 조기 파손을 초래하기 때문으로 사료된다.

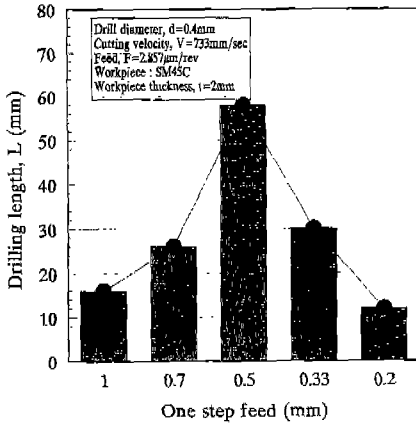


Fig. 16 The drilling length for one step feed

Fig. 16은 직경이 0.4mm의 드릴로 두께 2mm의 공작물을 가공하는 경우 스텝이송량의 차이가 가공량에 미치는 영향을 조사해 보았다. 스텝이송량(one step size)이 적은 경우는 스텝이송 횟수가 많은 것을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 최적 스텝이송량이 존재(스텝이송량 0.5mm)하며, 스텝이송량이 큰 경우는 전술한 바와 같이, 칩 배출의 불량으로 조기 드릴파손으로 인하여 가공량의 저하를 가져오며, 스텝이송량이 작은 경우는 스텝횟수가 많기 때문에 매 스텝이송시 형성되는 가공경화층에 의해 격심한 드릴전단의 마멸이 발생하여 가공 능력을 저하시킨다고 사료된다. 가공경화층 형성의 영향을 확인하기 위하여 Fig. 16과 같은 조건으로 황동을 가공하였을 때의 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 황동은 SM45C에 비교하여 가공경화능이 현저하게 작은 재료이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 황동은 가공경화능이 작기 때문에, 스텝이송량이 작은 경우(0.2mm)라 하더라도 SM45C와 같은 현저한 가공량의 저하는 없었다.

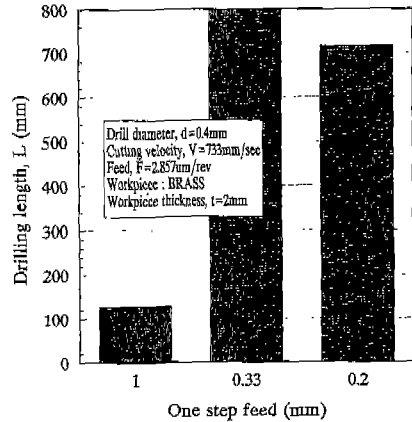


Fig. 17 The drilling length for one step feed

### 5. 결 론

본 연구에서는 미세구멍 가공시에 발생하는 문제점을 실험적으로 검토하고, 그 문제점을 해결하기 위하여 스텝이송을 채택하여 그 효율성을 조사해 본 결과, 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- (1) 미세구멍 가공에서 이송과 스러스트 사이에는 선형적 관계가 있으며, 가공량의 증가에 따라 점진적인 드릴의 마멸현상이 나타나며 이는 구멍확대오차에도 영향을 미친다.
- (2) 드릴의 직경이 작을수록, 가공물의 두께가 클수록 가공능률은 기하급수적으로 저하한다.
- (3) 미세구멍 가공에서 스텝이송은 유효하며, 가공능률은 스텝이송방식에는 영향을 받지 않고 스텝이송량에 지배된다.
- (4) 미세구멍 가공에서 스텝이송을 하였을 경우 최적스텝 이송량이 존재함을 알 수 있었다. 최적 스텝 이송량은 칩배출이 양호함과 동시에 가공경화층의 영향을 적게 받는 조건이다.

### 참 고 문 헌

1. 細村洋太郎 외 4인, "微小徑ドリル加工の研究(第1報)", 1994년도 精密工學會 春季大會學術講演會 論文集, pp.135~136, 1994.
2. 猪瀬 滿 외 2인, "小徑ドリル加工", 1993年度 精

- 密工學會 春季大會 學術講演會論文集, pp.17~18, 1993.
3. W. K nig. "Tool monitoring of small drills with acoustic emission", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 32, No. 4, pp. 487~493, 1992.
  4. 平中 誠, "プリント基板の小徑穴あけにおける曲がりに關する研究", JSPE-59-01, pp. 119~125, 1993.
  5. 이병열 외 4인, "미세구멍 가공의 최적절삭성을 위한 절삭조건에 관한 연구", 한국정밀공학회, '95년도 추계학술대회 논문집, pp. 131~135.
  6. "微細 小徑 深穴加工技術最前線", 機械技術, 34卷 6號, pp.131~135, 1995.
  7. 小野元久 외 2인, "微小徑ドリル加工に關する研究(第1報)", JSPE-58-08, pp. 1345~1350, 1992.