

스텝 이송을 이용한 미세구멍가공 Micro Drilling by Using Step-Feed

한진옥*, 이용숙**, 정윤교***

* 창원대학교 대학원, ** 한국기계연구원
*** 창원대학교 기계공학과

1. 서론

절삭가공 중에서도 높은 비중을 차지하는 구멍가공은 전자제품, 공작기계 뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 소형화, 다양화, 대량생산화 함에 따라 미세화, 고속화하게 되었다. 특히, 카메라, 오디오, 비디오, 컴퓨터 등의 전자제품들, 시계산업, 엔진 연료분사 노즐구멍, 광섬유 커넥터, 우주항공용 전자부품, 로켓엔진부품, 의료용 광학기기, 정밀공구, 게이지 등의 산업기계 부품 등 미세구멍가공이 산업전반에 미치는 영향은 대단히 크다. 그러나 미세구멍가공은 공구제작, 칩처리, 구멍형상정도, 가공능력향상 등에 고도의 기술을 필요하기 때문에 실용화를 위해서는 많은 난제가 산적해 있다^[1~5].

미세구멍가공이라 함은 가공에 문제가 되는 직경 1mm 이하를 지칭한다^[6]. 더구나, 미세드릴가공은 직경의 미세화로 인한 강성의 저하와 깊은 구멍가공일 경우에는 칩막힘으로 공구마멸 및 파손과 같은 공구수명에 큰 영향을 미치기 때문에 올바른 가공조건 선택이 무엇보다도 필수적이다. 외국에서는 직경 0.04mm 까지의 미세 드릴 가공기가 이미 실용화^[7]되어 있으며, 직경 0.1mm 드릴로 피삭재 두께가 1mm 이상의 가공도 가능하다. 그러나, 국내에서의 미세드릴 가공기에 대한 연구는 희소한 실정이며, 앞으로 이 분야에 대한 개발과 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 미세드릴 가공시에 발생하는 스러스트를 측정하여 이송, 절삭속도, 피삭재 두께변화 등 각 절삭조건이 공구수명과 가공확대오차에 미치는 문제점을 실험적으로 검토하고, 그것을 해결하기 위한 방안으로 스텝이송 방식을 채택하여 그 효과에 대한 평가를 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 드릴링머신의 사양은 표 1과 같다. 드릴은 내마멸성이 우수하고 고속절삭에 유리한 초경드릴을 사용하였으며 그림 1은 본 실험에서 사용된 드릴의 형상과 치수를 보여주고 있고, 그림 2는 마이크로드릴 선단의 현미경 사진이다. 구멍가공시 발생하는 스러스트(드릴 축방향의 하중)는 압전소자형 공구동력계로 측정하여 전

표 1. 본 실험에 사용된 드릴링머신의 사양

Drilling ability	φ 0.1 ~ φ 0.2(mm)
Revolution	max. 50,000(rpm)
Feed speed	30 ~ 800(mm/min)
Stepping frequency	0.01 ~ 999(mm)
Step feed rate	8(step) × 9(times)
Total stroke	75(mm)
Size of machine body	300 × 350 × 680(mm)
Weight	35(kg)

d (mm)	Type	l (mm)	θ
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°

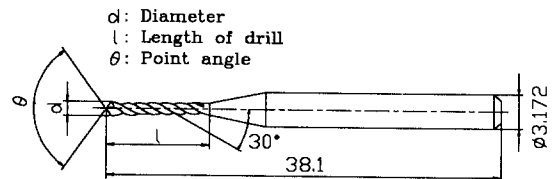


그림 1. 본 실험에서 사용된 드릴의 형상과 치수

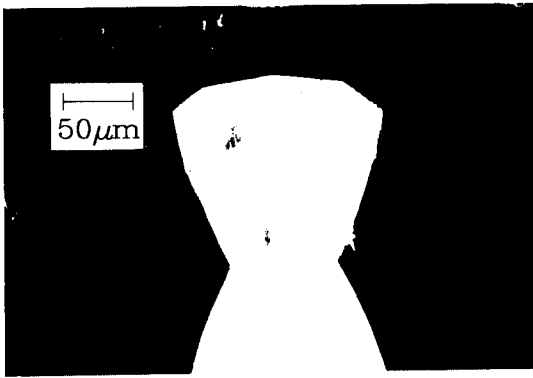


그림 2. 마이크로드릴 선단의 현미경 사진

하 증폭기(Charge amplifier)로 증폭하고 기록계(Pen recorder)로 기록하였고, 가공구멍 확대오차(Round error)는 모니터 내장현미경(VH-600, KEYENCE 사제)을 이용하여 사진을 촬영하였다. 실험장치의 개략도는 그림 3에 나타내었다. 실험에 사용된 시험편의 종류는 편의상

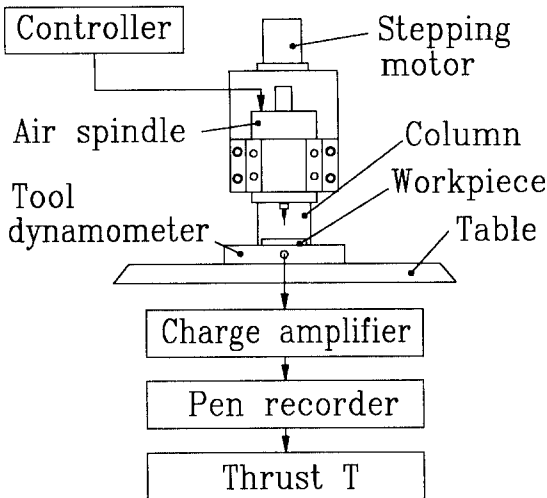


그림 3. 실험장치의 개략도

SM45C를 채택하였으며 직경 45mm 원봉을 길이 8mm, 내부를 직경 37mm로 선삭가공하여 피삭재 두께를 맞추어 가공하였다. 그리고, 피삭재의 표면상태는 드릴 가공에 크게 영향을 미치지 때문에 폴리싱하여 $R_{max} : 0.7\mu m$, $R_a : 0.071\mu m$ 이내로 하였다.

3. 미세구멍 가공시의 스러스트

구멍가공시 발생하는 축방향의 하중 스러스트는 가공능률의 평가 및 공구의 마멸, 파손의 척도로서 중요하다. 그림 4에는 이송에 따른 스러스트의 변화를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이송의 증가함에 따라 스러스트가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이것은 이송의 증가에 따른 절삭면적의 증가에 의한 것이며, 본 실험에서는 $\ln T = 0.43 + 0.5 \ln F$ 와 같은 실험식을 얻을 수 있었다. 여기서 F 는 이송, T 는 스러스트이다. 이때 $F = V_f / N$ 로 표시되고, 이것은 일정한 이송속도로 가공한 경우 절삭속도를 높이면 스러스트를 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 미세드릴가공에서는 고속주축을 사용하면 일정 스러스트에서 이송속도를 높일 수 있으므로 가공능률을 향상시키는 효과를 가져온다.

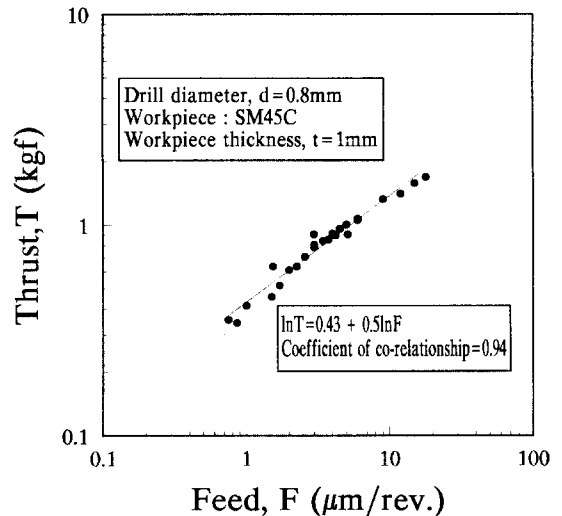


그림 4. 미세구멍가공시 이송과 스러스트와의 관계

대 구멍가공시의 스러스트의 변화를 관찰하여 비교한 것이 그림 5이다. 그림에서 보는 바와 같이 구멍의 수 $n=1$, $n=2$, $n=3$ 에서는 각 회에서 스러스트가 점진적으로 증가를 하고 있음을 알 수 있으며, 구멍의 횟수가 증가 ($n=111$, $n=112$, $n=113$)할수록 그 현상이 역전되어지고, $n=298$, $n=299$, $n=300$ 정도에 도달하면 전반적으로 스러스트가 격심한 변화를 보이며 불안정해 짐을 알 수 있다.

이것은 가공초기에는 드릴의 절인이 예리하여 피삭재에의 관입이 용이해서 스러스트가 작으나 구멍의 횡수가 많아 질수록 공구선단의 마멸에 의해 스러스트가 증가함을 보여준다. 또, 가공구멍이 깊어질수록 초기구멍횡수에서는 칩의 막힘에 의해 점진적인 스러스트의 증가현상이 있으나, 구멍의 횡수가 많아질수록 공구선단의 마멸에 의해 드릴의 관입이 점차 어려워짐에 따라 스러스트의 점진적인 감소현상이 나타난다고 사료된다. 최종적으로 파손 직전에 이르면 칩의 막힘과 공구의 마멸이 복합적으로 작용하므로 격심한 스러스트의 변화를 보여주게 된다고 할 수 있다. 그림 6은 피삭재의 두께 $t=1\text{mm}$ 및 $t=2\text{mm}$ 인 경우 가공량 (M)에 대한 스러스트의 변화를 상이한 이송조건에 따라 비교하고 있다. 이송이 $3\mu\text{m}/\text{rev}$ 인 경우는 가공량이 30mm^3 까지의 초기 마멸 상태가 현저하게 나타나고 가공량의 증가에 따라서도 점진적인 스러스트의 증가가

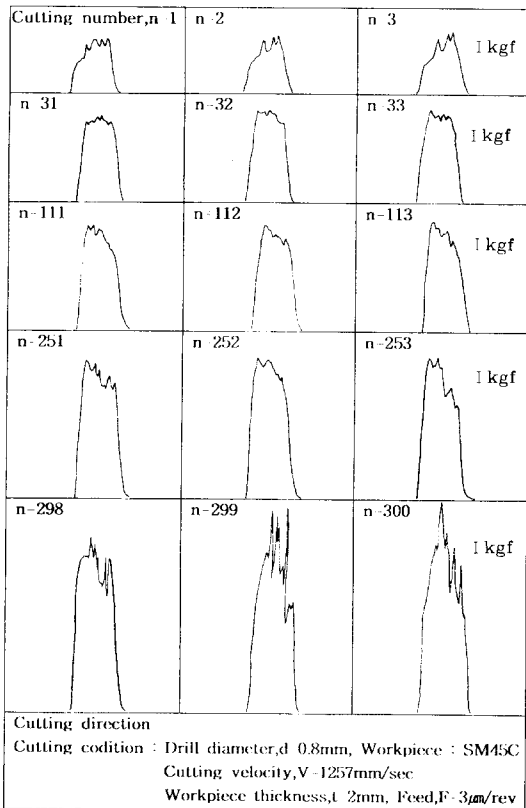


그림 5. 매회 구멍가공시 발생하는 스러스트의 비교

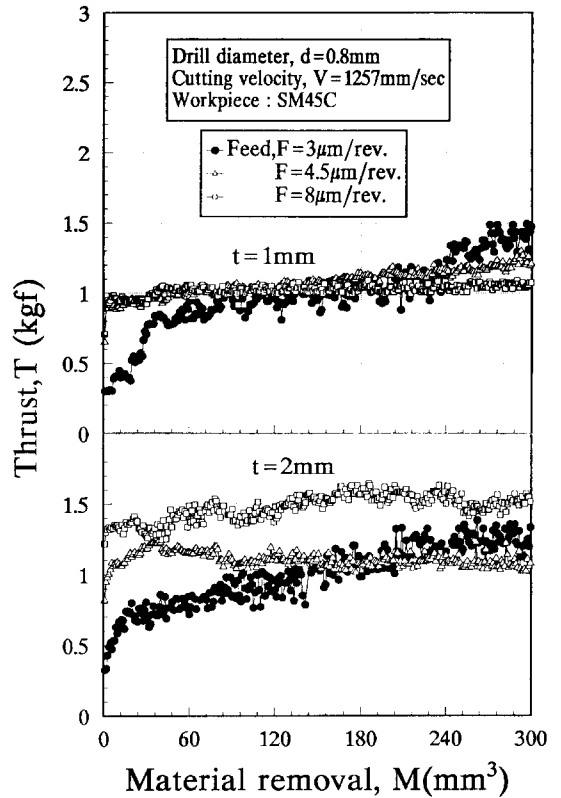


그림 6. 가공량의 변화에 의한 스러스트의 비교

확인되었으나, 이송을 증가시킴에 따라 초기 마멸 상태는 거의 나타나지 않고 가공량이 증가하여도 스러스트의 변화는 다소 안정되어짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 이송이 적으면 적응수록 같은 양을 가공하는데 필요한 공구와 공작물의 간섭시간이 길어지기 때문이다. 피삭재의 두께를 2mm로 하였을 때에는 스러스트의 절대치가 피삭재의 두께 1mm일 때와 비교하여 약간 증가한 것 이외에 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. 그림 7에서는 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 필요해진다.

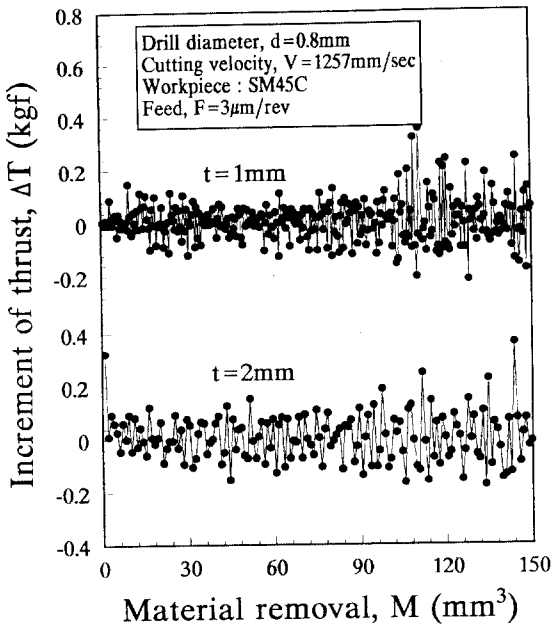


그림 7. 가공량의 변화에 의한 스러스트의 증분의 비교

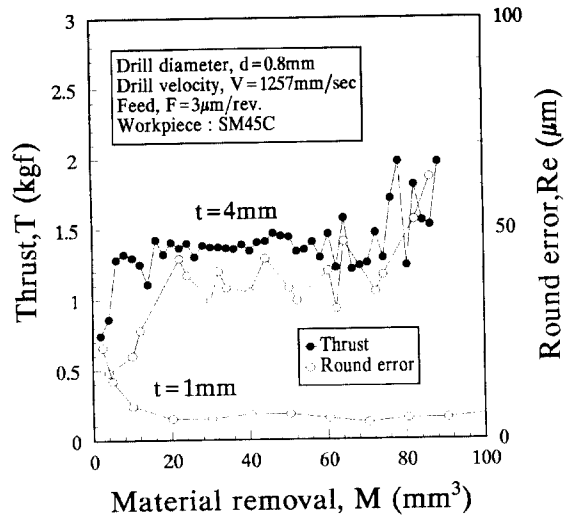


그림 8. 가공량의 변화에 의한 가공확대계수의 비교

4. 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.

그림 8은 피삭재의 두께가 드릴의 직경에 비해 비교적 큰 경우, 가공량의 증가에 따른 구멍확대오차의 변화와 스러스트의 변화를 동시에 나타낸 그림이다. 가공량의 증가에 따라 가공확대오차의 증가가 확인되어지며, $t=1\text{mm}$ 인 경우보다 $t=4\text{mm}$ 인 경우가 현저함을 알 수 있다. 또한 구멍확대오차는 스러스트의 증가 양상과 거의 일치하는 경향을 보이며, 이것은 드릴의 마멸이 진전되면서 스러스트가 증가하여 드릴의 변형이 커지기 때문이라 생각된다. 이와 같은 현상을 피하기 위해 깊은 구멍가공을 위해서는 단계적인 이송을 하여 스러스트의 값을 감소시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

5. 피삭재 두께의 영향

미세구멍가공은 작은 직경의 드릴로 가능하면 깊은 구멍을 뚫는 것이 목적이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 피삭재의 두께를 변화시켜 이것이 미세구멍 가공특성에 미치는 영향을 조사해 보았다. 그림 9는 피삭재 두께를 1mm~5mm까지 5단계로 나누어 가공량에 대한 스러스트의 변화를 조사한 것이다. $t=1\text{mm}$ 와 2mm인 경

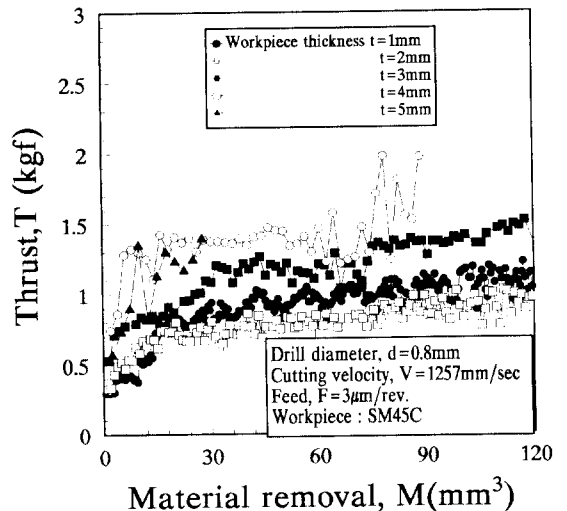


그림 9. 상이한 피삭재두께에 대한 스러스트변화의 비교

우는 가공량이 120mm^3 까지 증가하여도 현저한 공구의 마멸이라고 생각되어지는 스러스트의 변화는 보이지 않고, $t=3\text{mm}$ 로 구멍의 깊이가 깊어질수록 칩막힘 현상과 공구의 마멸이 현저해지면서 가공량의 증가에 따라 스러스트가 큰 폭으로 증가되고 있다. 더욱 피삭재의 두께를 증가시키면, 본 실험의 조건에서 $t=4\text{mm}$ 인 경우는 가공량이 90mm^3 에서, $t=5\text{mm}$ 인 경우는 가공량이 30mm^3 에서 파손에 이르는 것을 확인할 수 있었다.

세장비, 즉 드릴의 직경과 피삭재의 두께와의 비를 일정 ($t/d=2.5$)하게 설정하고 드릴의 직경의 변화에 따른 드릴 파손까지의 가공횟수를 비교한 것이 그림 10이다. 세장비

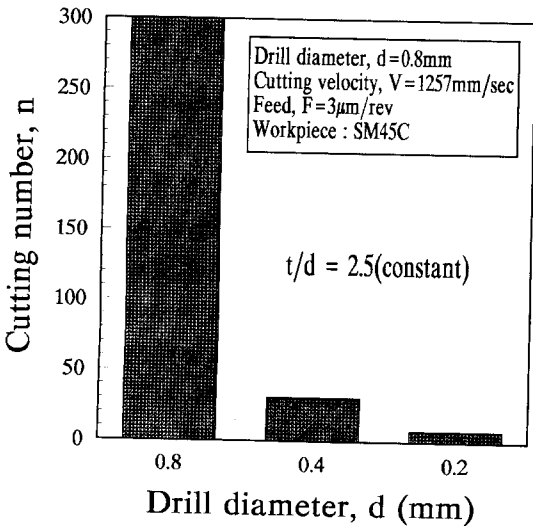


그림 10. 드릴직경의 변화에 의한 드릴파손까지의 가공횟수의 비교

가 일정하면 드릴파손까지의 가공횟수가 동일해져야 함에도 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 결과로부터, 작은 직경의 드릴로 깊은 구멍을 가공하기 위해서는 칩막힘을 배제하고 공구의 마멸을 줄일 수 있는 스텝이송을 선택할 필요성이 있다는 것을 알 수 있다.

6. 스텝이송의 효과

미세구멍가공에 있어서 스텝이송의 장점은 깊은 구멍을

몇 단계로 나누어 이송하기 때문에 칩의 막힘에 의한 스러스트의 급격한 변화를 배제할 수 있고, 드릴이 깊은 곳까지 이송되었을 때의 스러스트의 절대값의 증가에 따른 드릴의 변형 및 파손을 사전에 방지할 수 있다는 것이다. 그러나, 단계별로 이송을 하기 때문에 가공 능률적인 면에서는 불리한 점을 간과할 수는 없다. 그림 11은 피삭재의 두께 $t=5\text{mm}$ 인 경우에 대하여 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 30mm^3 부근에서 드릴이 파손에 이르게 되는 것에 비해 스텝이송을 실시한 경우에는 가공량 240mm^3 까지도 구멍가공을 할 수 있는 것으로 보아 스텝이송이 미세구멍가공에서는 효과적임을 확인할 수 있었다. 미세구멍 가공시에 사용되는 마이크로 드릴은 강성이 작아 변형하기 쉬우므로 작은 외력의 변화에도 쉽게 파손에 도달할 수 있다. 그림 12는 $160\mu\text{m}$ 의 드릴로 피삭재의 두께 5mm를 1mm씩 스텝이송 하였을 때, 초기가공횟수($n=5, M=13\text{mm}^3$ 부근)의 스트러스트의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 2번째스텝에서 5번째스텝까지의 스러스트의 변화가 초기의 가공

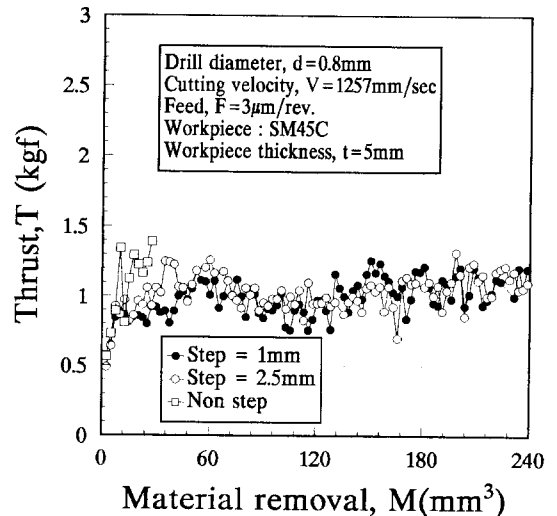


그림 11. 스텝이송의 효과

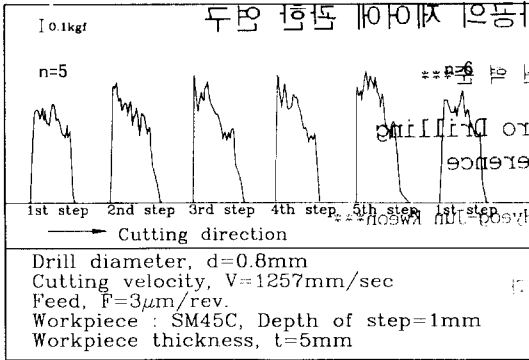


그림 12. 매회 스텝이송시 발생하는 트러스트 변화

횡수입에도 불구하고 그림 5의 초기가공횟수($n=31$, $M=15 \text{ mm}^3$)와 비교하여 반대의 양상을 나타내고 있다. 즉, 스러스트의 변화가 가공초기에 큰 값을 나타내다가 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 전 스텝 가공에 의한 피삭재의 가공경화 현상에서 기인되는 것으로 사료되며 향후 스텝이송으로 능률적인 가공을 달성하기 위해서는 최적의 스텝가공조건 선택에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

7. 결론

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) 미세구멍가공에 있어서 이송과 스러스트 사이에는 선형적 관계가 있음을 알 수 있었다.
- (2) 가공량의 증가에 따라 스러스트는 점진적인 증가를 나타내며, 이송이 적을수록 드릴의 초기마멸이 현저함을 알 수 있었다.
- (3) 드릴의 직경이 작으면 작을수록 가공능률은 기하급수적으로 저하한다.
- (4) 스텝이송을 실시한 결과 그 효과를 확인할 수 있었다.

8. 참고문헌

1. 畑村洋太郎 외 4인, “微小徑ドリル加工の研究(第1報)”, 1994年度 精密工學會春季大會學術講演會論文集, pp.135~136, 1994.
2. 菊瀬 廣 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. König, “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関する研究”, 日本精密工學會誌, 59卷 1號, pp.119~125, 1993.
5. 이병열 외 4인, “미세구멍 가공의 최적절삭성을 위한 절삭조건에 관한 연구”, 한국정밀공학학회, '95년도 추계 학술대회 논문집, pp.131~135, 1995.
6. “微細・小徑・深穴加工技術最前線”, 機械技術, 34卷 6號, pp.33~38, 1986.
7. 小野元久 외 2인, “微小徑ドリル加工に関する研究(第1報)”, 日本精密工學會誌, 58卷 8號, pp.1345~1350, 1992.