

## 소경 공구를 이용한 고경도 패턴 금형의 고속 가공

임 표\*, 장동규\*, 이희관\*\*, 양균의#

### High speed machining of cavity pattern in prehardened mold using the small size tool

Pyo Lim\*, Dong Kyu Jang\*, Hi Koan Lee\*\*, and Gyun Eui Yang#

#### ABSTRACT

High speed machining (HSM) can reduce machining time with the high metal removal rate by high speed spindle and feedrate. This paper supports HSM technology using the small size tool with the optimal tool path generation and modification of tool change. The optimum tool path is generated to reduce cutting length of cavity pattern and change the cutting tool for preventing the tool breakage by wear. The tool path is modified with the experiment data of tool wear and breakage to support tool change on reasonable time. The result can contribute to HSM technology of high hardness materials using the small size end-mill.

**Key Words** : High speed machining(고속가공), Pattern(패턴 형상), Tool wear(공구 마모), Cutting force(절삭력), Preharden steel(고경도강), Optimum tool path(최적 공구 경로), The small size end-mill(소경 엔드밀 공구)

#### 1. 서론

금형업계는 산업화에 따라 단가를 낮추기 위하여 소품종, 대량 생산 체제 아래 급속도로 발달하였다. 하지만 사회가 풍족해짐에 따라 소비자들은 세련된 디자인과 높은 기능성을 겸비한 제품을 찾고 있으며, 이러한 욕구를 충족시키기 위하여 다품종, 소량 생산 체제로 전환되고 있다. 이런 추세는 높은 정밀도와 공정의 감소 및 납기 단축으로 산업 현장에 반영되었고, 이와 같은 요구를 가장 적절하게 대응할 수 있는 기술이 고속 가공 기술이다. 이 기술은 주축의 고속 회전과 피드의 고속 이송 및 공작 기계의 고동력을 바탕으로 기존에 사용되었던

가공 기술에 비하여 크게 향상된 금속 제거율과 높은 표면 조도를 얻을 수 있는 가공 방식이므로 자동차 및 전기, 전자 부품 생산을 위하여 널리 사용되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

생산성을 향상시키기 위해선 금형의 수명이 길어야 하며, 이를 위해 고경도의 재료를 사용한다. 또한 이러한 난삭재를 재료로 사용하면 연강을 사용할 때와 비교하여 다음과 같은 장점이 있는데, 추가 공정으로 삽입되는 열처리 과정이 생략되기 때문에, 공정이 감소하며, 열처리 직후 발생하는 담금질 균열, 경도 불량, 변형 등과 같은 결함을 피할 수 있어, 향상된 정밀도를 얻을 수 있다.<sup>(3)</sup> 하지만 고경도의 합금강이나 열처리강과 같은 재료는 가공

접수일: 2003년 6월 16일; 게재승인일: 2003년 11월 14일  
\* 전북대학교 대학원 기계공학과  
\*\* (사) 전북대학교 자동차 부품·금형 기술혁신센터  
# 교신저자 : 전북대학교 기계항공시스템공학부  
E-mail : geyang@moak.chonbuk.ac.kr, Tel:(063)270-2322

상의 어려움을 가지고 있다. 고경도강을 고속 가공할 때 일반 가공에 비하여 공구 마모나 파단과 같은 문제점이 더욱 폭넓게 발생한다. 이에 공구 기술에 대한 많은 발전이 있었으며<sup>(4)</sup>, 중·대경의 초경이나 코팅 공구등을 이용한 난삭재를 가공할 때의 가공성 평가나 마모 메커니즘에 대한 연구가 많이 진행되었다.<sup>(5,6)</sup> 이것은 공구 수명을 연장하는데 많은 도움을 주었지만 소경 공구의 경우는 공구 마모와 파단이 직결되고, 정밀 가공에 주로 사용되어 제품의 성능 및 표면 조도에 큰 영향을 끼쳐 공정의 중단을 야기하는 문제점으로까지 대두된다. 그러므로, 소경 공구의 최적 공구 파단 시점을 파악하는 것은 더욱 중요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 일환으로 패턴 형상을 가진 고경도의 KP4M을 정밀 가공하는데 있어서, 소경 공구를 이용한 고속 가공을 수행하기 앞서 패턴의 효율적인 가공을 위하여 최적의 공구 경로를 생성하였다. 또한 공구 파단 실험을 통하여 공구 수명의 예측과 생산성을 고려한 최적 조건을 찾았으며, 파단 전에 공구 교환을 가능하게 하는 공구 교환 시스템을 구성하여 가공의 효율성을 높이고자 한다.

## 2. 최적 공구 경로 생성

본 연구에서는 소경 공구를 이용하여 패턴을 지닌 금형의 고속가공을 수행하기 위한 일환으로 플라스틱 제품인 미끄럼(slip) 방지판을 생산하는 사출금형의 케비티(cavity)(370×370×45 mm)를 예로 들었으며 Fig. 1에서 이를 보여준다. 형상의 특징은 중심부를 기준으로 가로, 세로가 대칭이고, 기본 형상(Fig. 1 (b))이 일정하게 반복되는 패턴을 가진다.

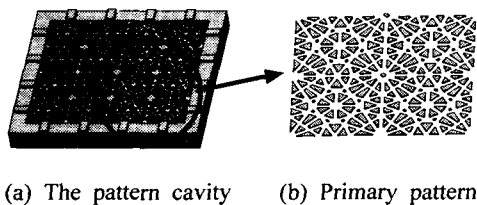


Fig. 1 The pattern cavity of injection mold

공구 경로를 생성하는 방법에는 여러 가지가 있지만 반복되는 패턴 형상의 가공에는 형상의 특징을 이해하는 것이 중요하다. 이는 비슷하게 설계되

는 패턴 형상을 이용하여 일부의 공구 경로를 생성하면 경로의 복사, 이동 및 대칭(mirror)등의 수정을 통하여 전체 공구경로를 생성할 수 있기 때문이다. 또한 전체 경로를 생성하는 것에 비하여 경로를 단순화시키고, 공구 후퇴(tool retract)의 감소와 경로 생성 및 가공에 드는 시간을 줄일 수 있게 한다.

먼저 범용 CAM software인 CATIA V5를 이용하여 가공 경로를 생성한 기존의 방식은 다음과 같다. 일정한 절삭 깊이에서 얻어지는 형상의 프로파일을 이용하여 가공이 일정 각도로 이루어지는 램핑(ramping) 방식을 적용하였다. 하지만, 이 방법은 많은 급속 이송경로(air travel)를 발생시키며, 형상 프로파일의 오프셋(offset)으로 경로가 겹쳐 사라지는 문제로 공구의 사용이 제한된다.

이에 본 장에서는 효율적인 공구 경로를 생성하기 위해 패턴 형상을 추출하여 경로를 최적화하고자 한다. 먼저 기본경로를 최대한 직선으로 단순화시켰으며, 공구 후퇴를 발생시키는 요소인 세 끝점이 만나는 삼중점에서 가장 긴 요소인 수직선 및 대각선인 T형 패턴을 분리한다. 그리고 삼중점에서 한 점이 제거된 직사각형의 대각선인 두 요소의 끝점을 연결하여 공구 후퇴가 발생하지 않는 형상 특징을 추출한 것이 별(star)형 패턴이며, 나머지 요소들을 연결하여 추출된 것이 성(castle)형 패턴이다. 이와 같이 형상 특징을 고려한 패턴들은 공구 후퇴를 최소화시켜 급속 이송경로를 크게 줄이고, 평균 가공 길이를 최대로 하며, 총 가공 길이 및 가공시간을 단축시킨다. 또한 절삭량을 일정하게 유지시켜 공구 파손의 방지 및 패턴 형상을 선명하게 가공할 수 있다는 장점이 있다. 게다가 형상 특징을 고려로 기존의 방식보다 큰 공구의 사용이 가능하다.

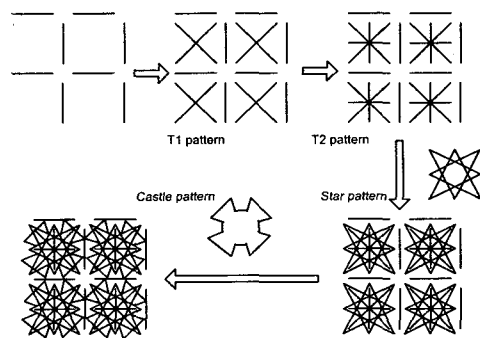


Fig. 2 The optimized tool path

마지막으로 기본 패턴의 경로를 복사, 이동 등의 수정을 거쳐 전체 형상의 최적 경로의 생성을 완성하였다. Fig. 2는 이러한 기본 패턴의 공구 경로를 생성하기 위한 최적화 단계를 보여주고 있다. Fig. 3은 예시된 패턴 형상을 가공하기 위한 연속된 UMO(Unit Machining Operation)이다. 최적 경로는 황삭과 중삭, 그리고 정삭에 적용되었다.

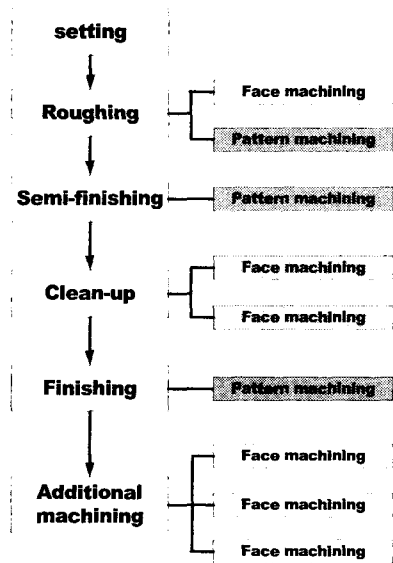


Fig. 3 Sequence of Unit Machining Operation

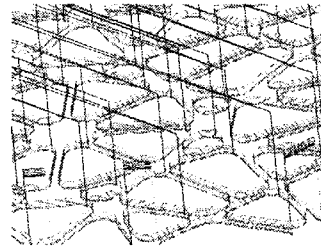
Table 1은 같은 조건에서 기존 방식과 최적화 방법을 이용하여 기본 패턴의 황삭 가공시 최종 결과를 보여준다. 최적화 방식이 공구 후퇴의 감소로 급속 이송경로 시간이 줄고, 최적 공구의 사용으로 급속 제거율을 증가시켜, 총 가공 시간의 감소 및 공구 파단의 위험성이 줄었음을 보여주고 있다.

Table 1 Cutting results of primary pattern

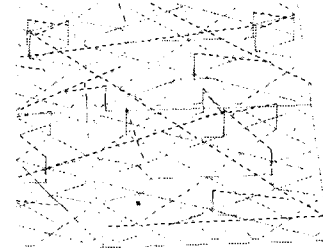
Method	Tool size	Tool retract (number)	Actual cutting time (min)	Total cutting time (min)
Conventional	B $\phi$ 3	303	108	173
Optimum	B $\phi$ 4	160	63	105

Fig. 4는 두 가공 방식의 차이점을 보여주고 있는데, 기존의 방식이 훨씬 복잡한 가공 경로와 많은 공구 후퇴를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig 5는 황삭과 중삭을 거쳐 발생하는 미가공 영역을 나타

내고 있는데, 이는 최적화 방식이 적은 미가공 영역으로 인하여 잔삭의 필요성 및 가공 시간이 줄어든다는 것을 보여준다.

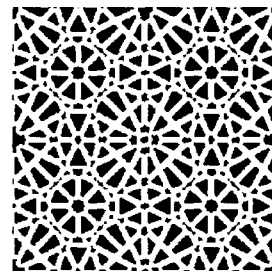


(a) Conventional method

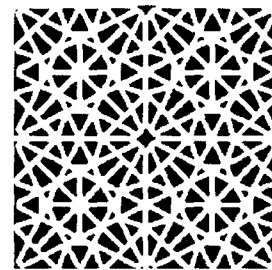


(b) Optimum method

Fig. 4 Tool path of pattern



(a) Conventional method



(b) Optimum method

Fig. 5 Area to clean-up

### 3. 공구 파단 실험 및 공구 교환

#### 3.1 실험 장치

공구 파단 실험은 공구 마모 및 파단으로 인한 표면 조도의 저하와 이로 인한 재작업과 작업 중단이 발생하는 것을 방지하기 위하여 수행하였다. 절삭력 실험은 공구 동력계를 이용하여 두 방식에서 절삭력의 변동이 파단에 어떠한 영향을 끼치는지를 알아보기 위하여 수행하였다. Fig. 6와 Table 2는 각각 실험 장치의 개략도와 규격을 나타내고 있다.

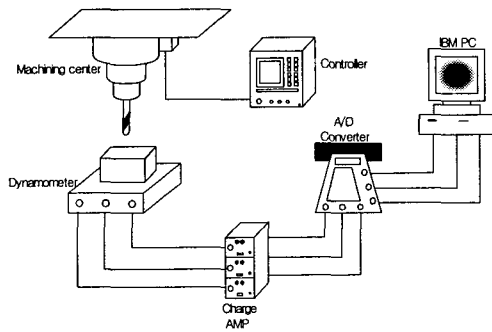


Fig. 6 Schematic diagram for experimental apparatus

Table 2 Specifications of experimental apparatus

Machining Center	Vertical type Spindle speed(max) : 8000rpm
Tool dynamometer	Kistler 9257A Range : ±5kN Resolution : 0.01N
Charge amplifier	Kistler 5001 Resolution : 12 bit
Tool	KORLOY SSBE Ø1

실험재료는 플라스틱 제품의 표면에 광택을 내기 위하여 사용되는 경면 가공용 특수 금형 재질인 KP 계열의 합금강인 KP4M이다. 이 재료는 적절한 열처리로 내부 잔류 응력이 제거되어 균일하고 높은 경도와 양호한 가공성을 가지고 있으며 진공 탈가스 처리(Vacuum degassing process)로 높은 청정도와 성분의 편석 및 기타 유해한 결함이 없다. Table 3은 이러한 KP4M에 대한 기계적 성질을 보여준다.

Table 3 The mechanical properties of KP4M

Specification	Value
Yield Point (kgf/mm <sup>2</sup> )	65.80
Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	75.90
Elongation (%)	> 15
Reduction of Area (%)	> 40
Impact Abso. Energy (Joule)	> 60
Surface Hardness (HRC)	28 ~ 34

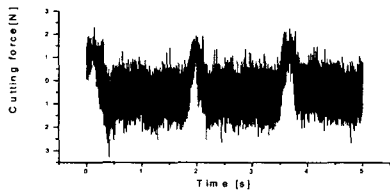
#### 3.2 절삭력 실험

공구 파단의 원인은 크게 마모와 충격으로 인한 것으로 나눌 수 있는데, 전자에 의하여 공구 파단이 발생하기 위해서는 안정적이고 균일한 절삭력이 작용하여야 한다. Table 4는 기존의 가공 방식과 패턴의 특징을 고려한 최적화 방식의 절삭력을 비교할 때 가공 조건 및 평균·최고 절삭력을 나타내는데, 최적화 방식이 기존의 방식보다 작은 절삭력이 작용한다는 것을 보여준다.

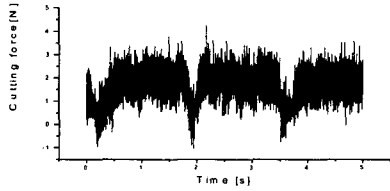
Table 4 Machining conditions and cutting forces

Method	Max cutting force (N)	Mean cutting force (N)	Depth of cut (mm)	Feed (mm/tooth)
Conventional	X -3.26	X 0.704	0.1	0.03
	Y 4.25	Y 1.564		
	Z 19.78	Z 8.088		
Optimum	X 2.14	X 0.603	0.1	0.03
	Y 3.63	Y 1.130		
	Z 17.21	Z 7.643		

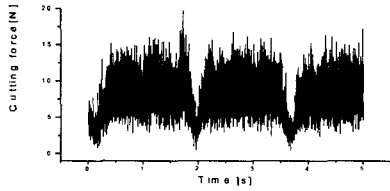
Fig. 7과 Fig. 8은 각각 x,y,z 방향으로 작용하는 절삭력의 변화를 보여주고 있다. 절삭력의 변동을 살펴보면, 기존의 방식이 높게 나타나는데, 이러한 특징은 프로파일을 따라 가공이 수행되기 때문이며, 고경도의 재질을 가공하는데 있어 가공 방향의 급속한 변화는 기계와 정밀도에 좋지 못한 영향을 끼친다. 또한 빈번한 z축 가공이 이루어지는데, 이는 충격에 의한 파단의 위험성을 내포하여, 공구 수명에 커다란 영향을 끼친다. 특히 초경 공구가 내마모성이 강한 대신 충격이 약하다는 특징을 가지고 있으므로 더욱 그러하다. 이에 비하여 최적화 방식은 일정한 방향의 균일한 절삭력을 유지하였으며, z축 가공이 덜 발생하였다.



(a) x-direction

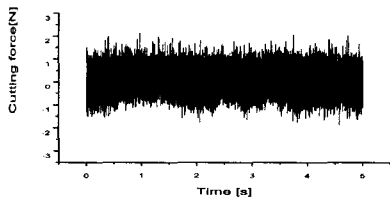


(b) y-direction

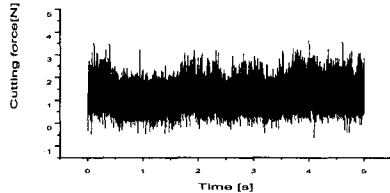


(c) z-direction

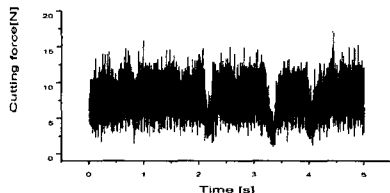
Fig. 7 Conventional machining



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction

Fig. 8 Optimum machining

### 3.3 공구 파단 실험

일반적으로 중,대경의 공구를 이용하여 가공이 수행되면 마모에 의하여 공구 형상의 변화로 표면의 치수 정밀도와 조도에 영향을 끼치지만 가공이 중단되지는 않는다. 하지만 소경 공구를 이용한 가공에서 마모는 공구 파단과 직결되기 때문에 공구 파단 시점을 예측하는 것은 중요하다. 공구 마모에 영향을 끼치는 요소는 여러 가지가 있지만 크게 절삭 깊이와 이송 속도 그리고 주축 회전 속도로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 절삭 깊이를 고정한 상태에서 주축 회전 속도와 이송 속도의 변화만을 고려하였다. 예시된 사출 금형의 패턴을 정삭 가공하는데 사용된 실험 조건은 Table 5와 같다.

Table 5 Experimental condition

Cemented carbide tool	Ball end mill Ø1
Spindle speed (rpm)	5000, 6000, 7000, 8000
Feed rate (mm/min)	100,200,300,400,500,600,700
Depth of cut (mm)	0.1

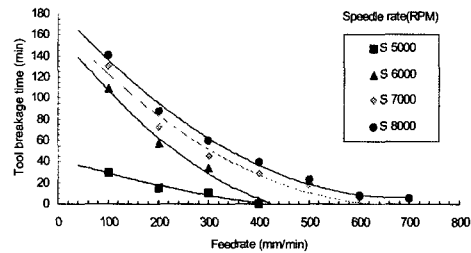


Fig. 9 Tool breakage time of Ø1 tool in the finishing

Fig. 9는 기본 패턴을 가공할 때의 공구 파단 시간을 보여주고 있다. 실험되지 않은 조건의 공구 파단 시점은 최소 자승법을 이용하는 식 (1)으로 근사화할 수 있다.

$$T = \sum_{i=0}^n [T_i - T(f_i)]^2 \quad (1)$$

여기서,  $T_i$  :  $i$ 번째 공구 파단 시간

$f_i$  :  $i$ 번째 이송속도

$T(f_i)$  :  $i$ 번째 근사화 함수

### 3.4 공구 교환

공구 파단 실험으로 얻어진 데이터를 분석하여 Fig. 10처럼 실제 가공 길이를 예상할 수 있다. 하지만, 이렇게 구해진 공구 수명은 근사화된 값이므로 안정적인 가공을 수행하기 위해 식 (2)처럼 안전 계수를 주는 방법으로 실제 사용하는 공구 수명을 결정한다.

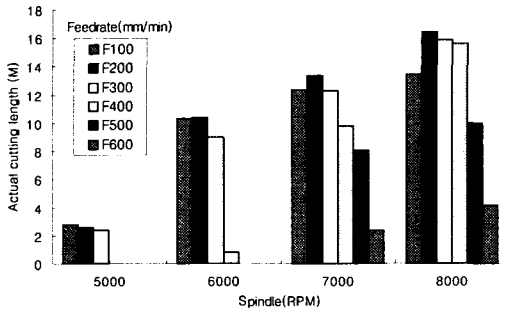


Fig. 10 Tool breakage time of Ø1 tool in the finishing

$$T_{life} = \rho \cdot t_{exp} \quad (2)$$

여기서,  $T_{life}$  : 실제 공구 수명

$\rho$  : 안전 계수

$t_{exp}$  : 근사화된 공구 수명

이렇게 얻어진 실제 가공 길이를 이용하여 앞서 생성되어진 NC 코드에 공구 후퇴와 접근이 포함된 새로운 NC 코드를 생성한다.(Fig. 11)

```

.....
..... Cutting length of breakage time
.....
G91 G28 Z0.
G28 X0. Y0.

  (Tool Change. 0 0 th tool used)
T0 0
M06
G55 G90 G0
G0 X0. Y0. Z100.
S 0 0      M03 F 0 0
    
```

Fig. 11 NC code for the optimum tool path

이처럼 공구 파단 실험을 통하여 UMO에 사용되는 공구 수와 가공 시간을 효율적으로 예상할 수 있으며 식 (3)과 같이 생산성과 제품의 품질을 고려하여 최적의 이송속도와 주축 회전속도를 결정할 수 있다.

$$P(c, t) = Q(F_{opt}, S_{opt}) \quad (3)$$

여기서,  $P(c, t)$  : 생산성 연관 함수

$Q(F, S)$  : 품질 연관 함수

$F_{opt}$  :  $Q(F, S)$ 의 의존 변수인

최적 이송속도

$S_{opt}$  :  $Q(F, S)$ 의 의존 변수인

최적 주축 회전속도

## 4. PROCEDURE 및 결과

Table 6와 7은 기존 가공 방식과 패턴의 특징을 고려한 최적화 방식의 가공 조건과 시간을 나타낸 것이다.

Table 6 Cutting condition in the conventional tool path

Operation	Machining method	Tool	Depth of cut(mm)	Feed (mm/min)	Spindle (rpm)	Cutting time (hour)
Roughing	Z-level	B Ø3	0.3	250	5000	16
Semi-finishing	Z-level	F Ø3	0.3	300	5000	12
Clean up	Flat machining	B Ø5	0.2	200	4000	3
	Flat machining	F Ø5	0.2	200	4000	3
Finishing	Z-level	B Ø1	0.1	100	5000	8

Table 7 Cutting condition in the optimum tool path

Operation	Machining method	Tool	Depth of cut(mm)	Feed (mm/min)	Spindle (rpm)	Cutting time (hour)
Roughing	Z-level	B Ø4	0.4	300	5000	11.5
Semi-finishing	Z-level	F Ø4	0.4	400	5000	8
Clean up	Flat machining	F Ø5	0.2	200	4000	2.5
	Flat machining	F Ø5	0.2	200	4000	2.5
Finishing	Z-level	B Ø1	0.1	300	8000	4.5

기존 방식에 비하여 최적화 방식이 가공 시간이 크게 단축되었는데, 황삭과 중삭에서는 최적 공구의 사용과 공구 경로를 최적화시킨 영향이 크며, 정삭에서는 생산성을 고려한 최적 가공 조건을 선택하였기 때문이다. 또한 미 가공 영역의 감소로 인하여 잔삭 공정의 시간 또한 감소하였다.

Fig. 12는 본 연구에서 미끄럼 방지판을 생산하기 위하여 사용된 패턴 형상을 가지는 사출금형을 가공하기 위하여 수행된 과정을 도식화한 것이며, Fig. 13은 다음의 과정을 거쳐 가공이 끝난 최종 형상을 보여주고 있다.

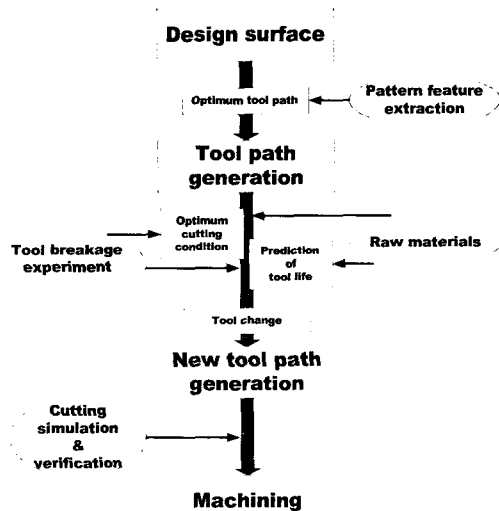


Fig. 12 The machining process of pattern

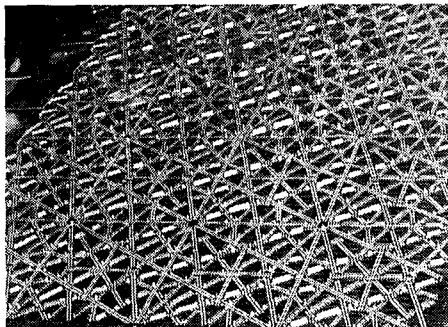


Fig. 13 Machining results

## 5. 결론

본 연구에서는 소경 공구를 이용하여 고경도를 지닌 재료를 고속 가공하는데 있어 패턴 형상의 특징을 고려한 최적 공구 경로를 생성하였다. 절삭력 실험을 통하여 최적화 방식이 기존 방식보다 균일한 절삭력을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 더 큰 공구를 사용할 수 있어 파단의 위험성을 줄였고 공구 수명을 연장하였다. 또한 공구 파단 실험을 통하여 얻어진 최적의 조건을 바탕으로 공구 마모에 따른 공구 수명을 예측하여 파단 전에 공구가 교환되는 새로운 NC 코드를 생성하였다.

결과적으로 총가공 시간을 비교하여 보면, 기존의 방식에 비하여 본 연구에서 제안된 방식이 원래 가공 시간의 70% 정도로 감소하였으며, 이에 소경 공구를 이용한 패턴 금형을 가공하는데 있어서 효율적인 고속 가공을 가능하게 하였다.

## 참고문헌

1. H. Schut, "High Speed Milling of Dies and Mould-Cutting Conditions and Technology", CIRP, Vol.44, 1995.
2. D.W. Lee, Y.H. Jeong, M.C. Kang, K.Y. Lee, J.S. Kim, K.G. Kim, S.W. Kim, "Advanced Machining Technology for Die Manufacturing I" Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.17, No4, pp48-68, 2000.
3. R.C. Dewes and D.K. AspinWall "A review of ultra high speed milling of hardened steels", Materials Processing Technology, Vol.69, pp1-17, 1997
4. C.H. Choi, "High-Speed Machining & Technology of Tooling for Die and Mold Making", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.18, No8, pp18-23, 2001.
5. K.K. Kim, M.C. Kang, D.W. Lee, J.S. Kim, "Machinability Evaluation with Cutting Direction in High Speed Machining of Free Form Surface through Ball End Milling", Journal of Korean Society of Precision Engineering", Vol.18, No2, pp84-89, 2001.
6. J.S. Kim, M.C.Kang, D.W. Lee, D.G. Ha, K. H. Kim, "Machinability evaluation according to variation of tool shape in high speed machining", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.19, No5, pp133-138, 2002.