

Al-Li 합금 가공용 MQL 초경공구의 최적 형상에 관한 연구

이인수*, 김해지#

(*,#경남과기대)

A Study on the Optimum Shape of MQL Carbide End-mill for Machining of Aluminum Lithium Alloy

In-Su Lee*, Hae-Ji Kim#

(Received 26 November 2013; received in revised form 18 December 2013; accepted 18 December 2013)

ABSTRACT

In order to develop the optimum shape of an MQL carbide end-mill suitable for high speed machining of wing ribs which are a detailed part of larger wing structures, using a new material Al-Li alloy, a new MQL carbide end-mill is created that has various quantities of holes, hole sizes, and hole locations. A theoretical machining graph is generated using the hammer test and FRF simulation, and a machining test is performed in order to verify the machining stability in the high speed machining area. The optimum configuration of the MQL carbide end-mill is also presented through comparing the chattering, machining noise and cutting conditions, including the maximum cutting depth, rpm, and feed rate per teeth, for each cutter.

Key Words : Minimum Quantity Lubrication(MQL:극미량 윤활), Tool geometry(공구형상), End-mill(엔드밀), High speed machining(고속가공), 주파수 응답 함수(Frequency response function, FRF)

1. 서 론

MQL(Minimum Quantity Lubrication) 가공기술은 환경친화성이 요구되는 생산공정인 절삭가공분야에서 기존의 습식 절삭유제를 대체하는 친환경 기술로 각광받고 있으며, 그 활용 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다^[1-5]. 일반적으로 절삭가공은

칩의 원활한 배출 및 공작물과 공구의 냉각, 칩 사이의 윤활, 가공된 공작물의 표면거칠기의 향상을 위하여 절삭유가 사용된다. 기존에 많이 사용되는 습식 절삭유제는 장시간 사용 시 부패 및 세균번식에 의한 악취 발생과 윤활성을 높이기 위해 첨가되는 염소, 유황, 인 등의 유독성 첨가제에 의한 인체 유해성 등과 같은 많은 환경적 문제를 유발하고 있다.

환경 친화적 관점에서 최근 많이 적용되는 MQL 가공 기술은 기체를 반송매체로 하여 안개상 윤활액을 절삭표면에 분사하는 방법의 총칭으로 1994년 독일에서 개발된 기술로서 최소윤활가공, 반건식(Semi dry), 니어드라이(Near dry)가공이라고도 한다. 절삭유의 역할은 윤활작용, 냉각작용, 칩 배출

* School of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

Corresponding Author :

Dept. of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

E-mail : khji@gntech.ac.kr

의 3가지로 볼 수 있는데, MQL 가공기술은 절삭점을 냉각시키기 보다는 이차적으로 발생하는 공구와 칩사이의 마찰열을 감소시키고 표면거칠기를 향상시킬 목적으로 개발되었으며, 윤활작용을 하는 식물성 오일 미스트와 칩배출 및 냉각작용을 하는 고압의 공기를 혼합하여 에어졸 형태로 분사하는 것이 일반적이다. MQL 가공기술을 분류하면 내부급유와 외부급유 방식으로 구분되는데 외부급유 방식(외부 노즐 방식)은 설치비용 및 개량이 용이한 반면, 깊은 홀 및 포켓가공, 주축의 고속회전 시 회전수의 증가로 인한 원심력의 증가에 의해 절삭표면에 직접 분사되는 면적의 감소가 문제된다. 내부급유 방식은 스핀들 내부 축심과 절삭공구 내부축심을 통하여 절삭날 끝 표면에 직접 분사함으로써 윤활유의 지속적 공급이 가능하여 깊은 홀 및 포켓형상을 높은 절삭속도로 가공할 수 있으나, 내부급유가 가능한 스핀들구조 및 전용공구 사용 등의 제약이 따른다. 내부급유 MQL 가공에서는 절삭공구 내부의 에어졸 분사 홀 위치 및 크기에 따라 가공특성이 달라질 수가 있어 가공 공정에 최적화된 MQL 전용 공구의 선정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 신소재인 Al-Li 합금 재료의 항공기용 대형날개 구조물 부품인 윙립의 고속가공에 적합한 MQL 초경공구의 최적형상 개발을 위해 MQL 분사 홀의 수량 및 크기, 위치 등 분사방식에 따른 절삭성 실험을 진행하였다. 이를 위해 직경이 $\phi 16$ 인 내부 MQL 분사방식 초경 엔드밀의 샘플 공구를 제작하였고, 해머 가진 실험을 통해 공구의 이론적 가공 안정성선도 데이터를 산출 한 후 30,000 rpm의 고속가공장비에서 Al-Li 합금재료의 피삭재 가공을 통한 안정성 절삭실험을 실시하였다. 이를 통해 공구별 최대 절입량 및 회전수, 날당 이송량 등의 절삭인자와 채터링 및 비정상 절삭소음 발생 유무 등의 비교과정을 거쳐 최적의 MQL 공구형상을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 MQL공구의 형상과 파손현상

최근의 기계가공분야는 공작기계의 전반적인 성능향상과 새로운 공구의 개발로 상호 보완적인 관계를 가지며 지속적인 발전을 거듭해 왔다. 공작기계의 경우 주축강성증가, 열변형의 억제와 동적안정성의 개선 및 응답성 개선 등을 통하여 가공정밀도를 향상시키고, 스핀들의 고속화로 이송속도와 절삭속도를 증가시켜 생산성을 증대시키고 있다. 공구의 경우 새로운 재종 및 다양한 코팅 기법의 개발에 의한 절삭속도의 고속화를 통하여 생산성의 향상을 달성하고, 공구형상의 최적화를 통하여 동적안정성을 확보하고 가공정밀도를 개선하고자 다양한 시도가 이루어지고 있다. 고속 주축회전수를 특징으로 하는 고속가공은 기존의 절삭작업에 비하여 공구의 동특성이 공구 수명과 품질, 파손에 절대적인 영향을 미치기 때문에, 공구 형상 설계 기준도 새로운 관점에서 접근이 필요하다. 특히, 내부급유방식의 MQL공구의 경우 공구 내부의 분사 홀의 크기 및 위치, 수량에 따른 윤활효과 및 공구의 강성, 채터 발생영역의 많은 차이가 있으므로, 고속 절삭환경에 최적화된 MQL 공구의 개발이 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 절삭공구의 파손 현상은 공구와 피삭재와의 심한 마찰에 의하여 공구가 점진적으로 마모되어 사용하지 못하는 경우, 공구에 순간적인 과도한 절삭부하가 작용하여 균열이 발생하여 공구의 일부가 파손되는 경우, 절삭가공 시 발생된 열로 인한 공구의 강성 감소로 소성변형이 일어나 공구의 기하학적 형태가 변하는 경우 등으로 나타낼 수 있다^[6]. 이 중 과도한 절삭부하로 인한 공구파손은 적절한 절삭조건의 산정을 통해 해결 할

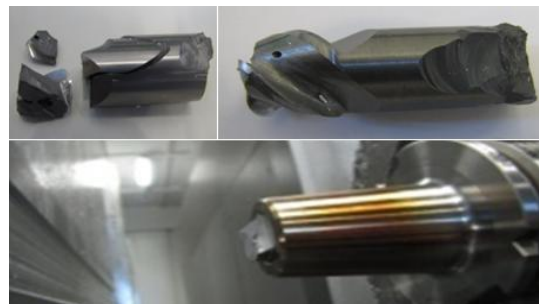


Fig. 1 Breakdown of MQL endmill

수 있다. 특히, 내부급유방식의 MQL 공구는 절삭날 내부에 분사 홀의 존재로 인해 공구의 강성이 기존의 절삭유를 사용하는 공구에 비해 떨어지며, 순간적인 절삭부하 발생 및 공구나 피삭재의 떨림에 의한 채터링 발생 시 매우 취약하고, 공구파손이 쉽게 일어난다.

Fig. 1에서는 고속가공 중 파손된 MQL 엔드밀의 사진을 나타낸 것이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험에 적용된 MQL 절삭공구

MQL 공구의 절삭성 비교실험을 위해 절삭날부 직경이 Ø16인 K20계열 초경 필렛 3날 엔드밀을 MQL 분사 구멍의 크기 및 위치, 수량이 서로 다른 6개의 시편공구로 제작하였다. Fig. 2에서는 실험에 사용된 MQL 공구를 나타내고 있다.

시편공구 A, D는 MQL 분사 홀 수량 6개로, 위치는 공구 밑날부위의 동일선상에 3개, 그 외 홀은 측면 절삭날부에 상, 중, 하 위치에 3개가 존재하며, 분사방향은 공구날 끝을 향하도록 하였다. 시편공구 B는 MQL 분사 홀 수량 3개로, 위치는 공

Table 1 Experimental specifications of MQL tool

Case	Quantity	Location	Size (mm)	Helix angle(°)
A	6	Edge(3:collinear) Side(3:crossed)	Ø1.1	30
B	3	Side(3:collinear)	Ø1.8	45
C	5	Edge(3:collinear), Side(3:crossed)	Ø1.3	30
D	6	Edge(3:collinear), Side(3:crossed)	Ø1.2	45
E	6	Edge(3:collinear), Side(3:collinear)	Ø1.3	30
F	3	Edge(3)	Ø2.0	45

구 측면 절삭날부에 상, 중, 하 위치에 3개가 존재하며, 분사방향은 공구날 끝을 향하도록 하였다. 시편공구 C는 MQL 분사 홀 수량은 5개로, 위치는 공구 밑날부위의 동일선상에 3개, 그 외 홀은 측면 절삭날부에 중, 하 위치에 2개가 존재하며, 분사방향은 공구날 끝을 향하도록 하였다. 시편공구 E는 MQL 분사 홀 수량은 6개로, 위치는 공구 밑날부위의 동일선상에 3개, 그 외 홀은 측면 절삭날부에 동일선상에 3개가 존재하며, 분사방향은 공구날 끝을 향하도록 하였다. 시편공구 F는 MQL 분사 홀 수량은 3개로, 위치는 공구 밑날부위의 동일선상에 존재하며, 분사방향은 공구날 끝을 향하도록 하였다.

Table 1은 각 시편공구의 MQL 분사 홀의 크기 및 위치, 수량, 절삭날 비틀림각 등의 실험 사양을 나타낸 것이다.

3.2 실험소재 및 실험장비

공구의 절삭성 비교실험을 위해 피삭재로 알루미늄리튬합금을 사용하였다. 알루미늄리튬합금은 기존 알루미늄합금에 금속 중 밀도가 가장 낮은 리튬(Li)을 첨가하여 높은 피로 내성과 낮은 밀도를 가진 합금으로서, Al7050합금과 거의 유사한 기계적 성질을 가지고 있다. 최근에 AIRBUS사에서 개발 진행 중인 최신형 항공기인 A350기종의 대형 날개 구조물의 중량절감에 적용되는 신소재 합금이다. Table 2는 절삭 실험가공에 사용된 AL2050-T84 알루미늄리튬합금 플레이트의 주요 원



Fig. 2 Experimental MQL tool samples

Table 2 The main chemical compositions of Al2050-T84 aluminum-lithium alloy

Component	Wt%	Component	Wt%
Si	0.08 max	Mg	0.20 ~ 0.6
Fe	0.10 max	Li	0.7 ~ 1.3
Cu	3.2 ~ 3.9	Ag	0.20 ~ 0.7
Mn	0.20 ~ 0.50	Zr	0.06 ~ 0.14

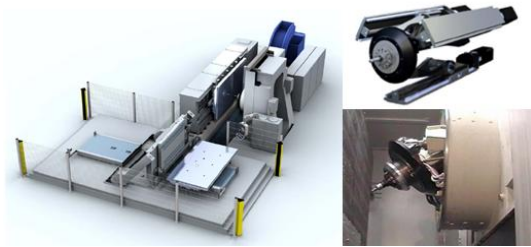


Fig. 3 High speed 5axis machine(Ecospeed2060)

Table 3 Specification of Experimental machine

Items	Details	Specification	Unit
Traverse	X-axis	6,300	mm
	Y-axis	2,500	mm
	Z-axis	670	mm
	A/B-axis	±40	degree
Axis speed	X-axis	50,000	mm/min
	Y-axis	50,000	mm/min
	Z-axis	50,000	mm/min
	A/B-axis	1sec/80	degree
Pallet size	Width	2,000	mm
	Length	6,000	mm
Machining Forces	X/Y/Z-axis	1,500	N
Spindle	Capacity(100% ED)	120	kW
	Speed, max.	30,000	rpm
CNC Control	SINUMERIK 840D		

소 함유량을 나타낸 것 이다.

절삭성 실험가공은 DST사에서 제작한 Ecospeed F206 고속장비에서 진행하였다. 최근에 항공기 대형구조물의 고속가공에 많이 운용되는 장비로써, 병렬기구형태의 주축을 가진 수평형 타입의 대형 5축 고속가공 장비로 주축강성이 매우 높아 중절

삭 고속가공이 가능하다. 스핀들 내부 MQL 분사방식으로 스핀들 최대출력은 120 kW이며, 최대 주축회전수는 30,000 rpm, 최대 이송속도는 50,000 mm/min, 가공범위는 6000x2000x570 mm의 사양을 가지고 있다. Fig. 3에서는 실험에 사용된 가공장비를 나타낸 것 이며, 세부 사양은 Table 3과 같다.

3.3 해머 가진 실험을 통한 이론적 가공 안정성 선도 산출

기계가공에서 생산성 및 가공품의 품질향상을 위해 공구가 파손되지 않은 범위 내에서 가공조건 의 안정성 확보가 중요하다. 특히 항공기 워링 부 품과 같이 깊은 포켓 가공이나 복잡한 형상을 가 진 제품을 고속가공 하는 경우 가공장비에서 허용 된 최대 주축회전수내에서 최적의 가공 안정조건 의 산출이 중요하며, 이때 결정되는 최대 절삭 깊 이 역시 정량적으로 평가되어야 한다. 만약 불안정 한 영역의 가공조건에서의 고속가공 시에는 스핀 들의 부하발생 및 제품표면의 품질저하 등의 간접 적인 피해뿐만 아니라, 공구파손으로 인한 불량발 생 유발 등의 직접적인 문제를 야기할 수 있다.

고속가공에서 채터 특성은 구조적으로 가장 낮 은 강성을 보이는 공구-홀더-스핀들계의 동특성에 크게 영향을 받는다. 최근에는 공구-홀더-스핀들계 동특성을 절삭가공위치인 공구의 절삭날부에 대한 해머 가진 시험을 실시하여 주파수 응답함수(FRF) 로 획득한 후 공구 및 공작물의 정보와 획득된 FRF를 입력인자로 절삭공정을 시뮬레이션하여 스 핀들의 회전속도와 축방향의 절입 깊이에 대한 가 공 안정 영역을 나타내는 가공 안정성 선도를 구 하는 이론적인 절삭영역 산출에 대한 연구가 시도 되고 있다^[7-8].

MQL 공구의 경우 같은 사양의 공구에서도 내부 분사 홀의 크기 및 위치, 수량의 차이에 따라 해머 가진 시험 시 출력되는 FRF의 변화폭의 차이가 다 양하게 나타나며, 이론적인 가공 안정성 선도의 정 확도가 떨어지는 단점이 발생한다. 정확도를 향상 시키기 위해서는 진동센서 부착위치 및 해머타격 위치, 타격 강도 등의 실험조건을 표준화 하여 최 대한 동일한 조건의 반복측정을 통해 신뢰도를 확

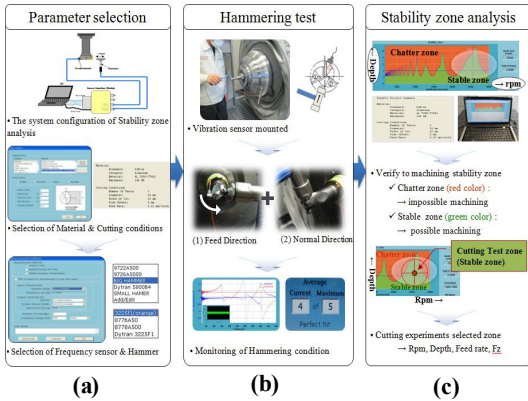


Fig. 4 Processor of hammering test/FRF simulation

보해야 한다. 본 연구에서는 실험에 사용된 시편공구의 이론적인 가공 안정성 선도를 구하기 위해 해머 가진 실험을 수행하였다. 실험과정은 Fig. 4의 (a)와 같이 이론적 가공 안정성 선도 산출 S/W에 절삭공구의 기하학적 정보(직경=Ø16, 날수=3개) 및 절삭조건($F_z=0.12$, Slot가공)과 피삭재의 재질 (Al2050-T84) 등의 파라메타값을 입력하고, 타격용 해머의 타입 및 진동센서 종류, 타격횟수(5회), 응답주파수영역 범위(200 Hz~5,000 Hz) 등을 설정하였다. (b)와 같이 홀더와 결합된 공구를 가공장비의 주축스핀들에 장착하고, 진동센서를 절삭공구의 절삭날 끝단부 위치에 표준화시켜 부착하였다. 진동센서 및 타격해머의 신호 응답상태 확인 및 입력 파라메타값에 대한 검증을 완료 후 타격용 해머를 이용하여 가진 실험을 실시하였다. 실험공구에 대한 정확한 FRF를 획득하기 위해 이송방향 및 수직 방향에 대한 타격을 교차하여 실시하였다. 우선, 진동센서가 부착된 절삭날부의 반대위치를 균일한 강도로 이송방향(X축 방향)에서 타격을 5회 실시하여 FRF를 획득하였다. 이후 주축 스피들을 90° 회전하여 수직방향(Y축 방향)에서 다시 동일 위치에 타격을 5회 반복 실시하여 수직방향의 FRF를 획득하였다. 획득된 FRF를 입력인자로 시뮬레이션을 하여 (c)와 같이 가공안정성영역을 산출하였다. 가공안정성 선도의 가로축은 주축회전수를 나타내며, 세로축은 절입량을 나타낸다. 상단부의 붉은색상 영역은 채터링이 발생하는 영역을 나타내며, 하단부 초록색상 영역은 가공 안정영역을 나타낸다.

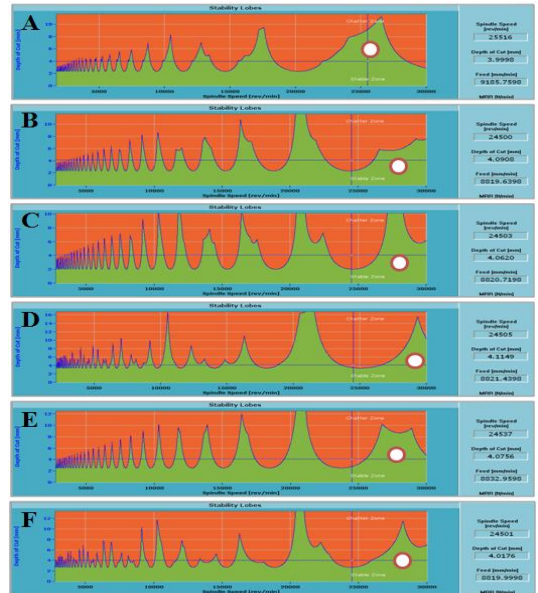


Fig. 5 Result of theoretical stability lobes

Fig. 4에서는 본 연구에서 수행한 MQL 공구의 해머 가진 실험 및 FRF 시뮬레이션 과정을 나타낸 것이다.

해머 가진 실험을 통해 나타난 공구별 이론적 가공 안정성 선도의 출력 결과는 시편공구 A가 절삭효율이 높은 영역대인 26,000 rpm~29,000 rpm에서 최대 절입깊이가 11 mm로 가장 높고, 안정성영역이 넓게 분포하였다. 그 외 공구는 6~10 mm로 많은 차이를 보이지 않으나, 안정성영역이 좁게나 가파르게 분포하였다. 이는 공구의 비틀림각 및 경사각, 전단각 등의 외부 형상적 요소와 MQL 분사홀 크기와 위치, 수량 등의 내부 형상적 요소의 변화가 고유진동수의 차이를 발생시켜 FRF 시뮬레이션 결과에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 해머가진 실험 통해 출력된 가공 안정성 선도 결과를 나타낸 것이다.

3.4 절삭성 실험가공을 통한 가공 안정성 절삭 조건 산출

해머 가진 실험을 통해 산출된 이론적인 가공 안정성 선도 결과를 바탕으로 채터가 발생하지 않는 안정성 영역대인 주축회전수 26,000~29,000 rpm

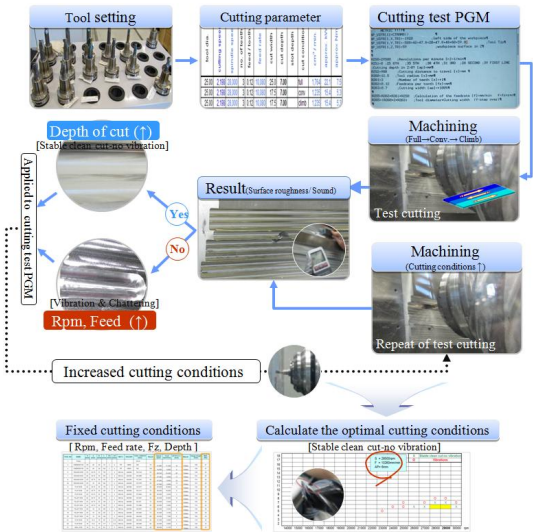


Fig. 6 Processor of stability testing machining

에서 Al2050-T84 재료의 시편에 대한 가공 안정성 절삭실험을 실시하였다. 실험 방법은 저속 회전수 영역에서부터 슬롯가공→하향가공→상향가공 순으로 진행하였으며, 가공표면에 chatter현상 및 비정상적인 절삭소음이 발생할 때까지 절입깊이를 단계적으로 증가시켜 가공하였다. 가공 중 chatter나 비정상적 절삭소음이 나타나면 날당 이송량 및 절입량을 고정하고, 주축회전수만 단계를 높여서 가공을 다시 실행하고, 그 결과가 양호할 경우 절입깊이를 다시 단계적으로 증가시켜 가공 하였다. 이러한 과정을 통해 시편 공구의 각 회전수 영역별로 chatter가 발생되지 않는 최대 절입량을 산출하였다. Fig. 6은 실험에서 수행한 가공 안정성 절삭 실험가공 과정을 나타낸 것이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭성 실험가공 결과

가공 안정성 절삭조건 산출을 위한 절삭 실험가공 결과 주축회전수 27,000 rpm영역에서 모든 공구가 전반적으로 높은 가공 안정성을 보였으며, 시편공구 A가 최대 절입량 10 mm로 가장 높게 나타났고, 시편공구 C가 공구 최대 절입량 6 mm로 가장 낮게 나타났다. 아래 Fig. 7은 절삭 실험가공 결과

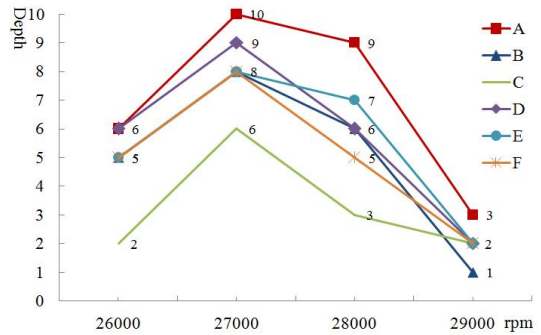


Fig. 7 Result of machining

산출된 시편공구 별 가공 안정성 절삭 조건을 나타낸 것이다.

절삭 실험가공 중 일부공구에서 MQL 분사 홀의 위치 및 분사각도의 문제로 인해 공구의 파손현상 및 칩의 용착현상 등이 발견되었으며, 절입깊이의 변화 및 주축 회전수의 증감에 따라 공구의 chatter 현상이 민감하게 반응함을 알 수 있었다. Fig. 8은 절삭 실험가공 과정에 발생한 공구파손 및 MQL 분사 및 윤활 불량으로 인한 칩 용착 현상, 가공 표면의 chatter 발생 등을 나타낸 것이다.

Fig. 8의 (a)는 시편공구 B가 29,000 rpm, 절입량 2 mm 절삭조건에서 공구파손현상이 발생된 모습이다. 이는 밀날부위에 분사 홀이 없어 절삭부에 윤활효과가 미비하며, 측면날에 동일선상으로 분사

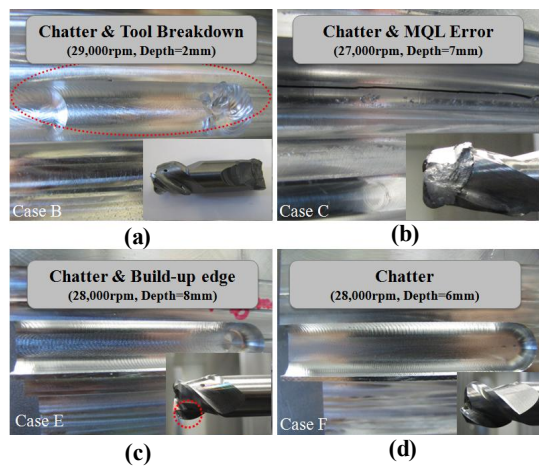


Fig. 8 Result of test cutting (chatter, breakdown, MQL error, build-up edge)

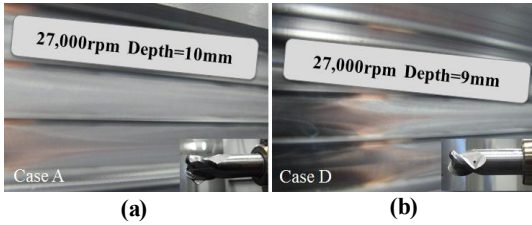


Fig. 9 Result of test cutting

홀이 위치하여 공구강성이 취약해져 고속 회전으로 가공 시 쉽게 파손이 발생한 것이다. (b)는 시편공구 C가 27,000 rpm, 절입량 7 mm 절삭조건에서 절삭날부에 칩의 용착이 심하게 진행된 모습이다. 이는 분사 홀 각도와 위치 등의 분사조건이 맞지 않아 절삭표면에 대한 MQL 유훈공급부족으로 인해 발생한 것으로 판단된다. (c)는 시편공구 E가 28,000 rpm, 절입량 8 mm 절삭조건에서 가공표면의 채터 발생 및 공구 필렛 R 부위에 구성인선이 발생한 모습이며, (d)는 시편공구 F가 28,000 rpm, 절입량 6 mm 절삭조건에서 가공표면에 채터 발생 모습이다.

Fig. 9는 절삭실험에서 높은 가공 안정성을 나타낸 실험공구인 A와 D의 가공표면 상태 및 주축회전수와 절입깊이를 나타낸 것이다.

시편공구 A가 주축회전수 27,000 rpm, 절입깊이 10 mm의 절삭조건(a)에서 채터 발생 없이 우수한 가공표면 결과를 나타냈고, 분당 칩발생량인 Q값이 1,555 cm³/min로 절삭성 및 가공 안정성이 가장 높게 나타났다. 시편공구 D는 27,000 rpm, 절입량 9 mm의 절삭조건(b)에서 양호한 가공한 표면 상태를 얻었으며, Q값이 1,400 cm³/min으로 나타났다.

4.2 안정성 선도 결과 비교

Fig. 10은 가장 높은 가공 안정성 결과를 보인 시편공구 A에 대한 해머 가진 실험을 통해 산출된 이론적 안정성 선도과 절삭성 실험가공을 통해 증명된 실제 가공 안정성 영역을 비교한 것이다.

이론적 안정성 선도(A)와 절삭성 실험가공 결과(B)가 유사한 패턴을 나타내며, 특히 주축회전수 2,700 rpm영역에서 두 개의 선도가 절입깊이가 최대로 증가됨 알 수 있다.

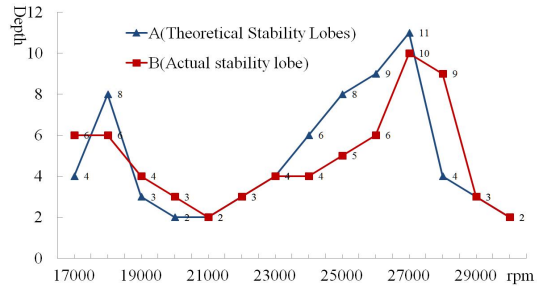


Fig. 10 Result of stability lobe(Case A)

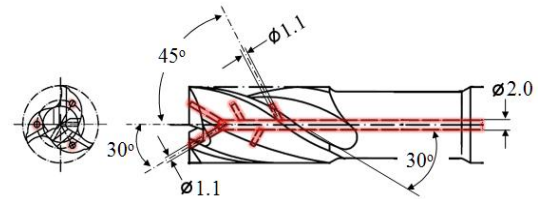


Fig. 11 Optimum internal shape of the MQL tool

4.3 최적 MQL 분사 홀 위치

실험결과 증명된 직경 Ø16 mm MQL 초경 3날 엔드밀의 분사 홀 최적 위치는 공구의 밀날부위에 3개를 분사각 30°로 동일선상에 배치하고, 측면날에는 각 날당 분사각 45°로 1개씩 교차하여 3개를 배치하는 것이 적합하다. 분사 홀의 크기는 입구 방향 중심 홀 직경은 공구 직경의 1/8 비율인 Ø2.0 mm가 적합하며, 출구 방향 최종 분사 홀 직경은 Ø1.1 mm(홀 수량 6개 기준)가 적합하다. 아래 Fig. 11은 실험결과 가장 높은 가공 안정성을 보인 시편공구 A의 MQL 분사 홀 수량 및 크기, 위치, 분사각 등의 내부형상을 나타낸 것이다.

5. 결론

본 연구는 신소재인 Al-Li 합금 재료의 항공기용 대형날개 구조물 부품인 윙립의 고속가공에 적합한 MQL 초경공구의 최적형상 개발을 위해 6개의 내부형상요소가 다른 MQL 초경 엔드밀을 설계/제작하였고, MQL 분사 홀의 수량 및 크기, 위치 등 분사방식에 따른 해머 가진 실험 및 FRF 시뮬레이

선, 가공 안정성 검증을 위한 절삭성 실험가공을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 해머 가진 실험 및 FRF 시뮬레이션 결과 이론적 가공 안정성과 절삭효율이 가장 높은 절삭조건은 26,000 rpm~29,000 rpm영역이며, 시편공구 A가 최대 절입 깊이가 11 mm로 가장 높게 나타났다.
2. 이론적 가공안정성 선도를 바탕으로 주축 회전수 26,000~29,000 rpm영역에서 Al2050-T84 재질 시편에 대한 가공 안정성 절삭실험을 실시한 결과, 시편공구 A가 27,000 rpm영역에서 최대 절입 깊이가 10 mm로 가장 높게 나타났으며, 시편공구 C가 6 mm로 가장 낮게 나타났다.
3. 실험결과 이론적 가공안정성 선도 결과와 절삭성 실험가공 결과가 시편공구 A가 가장 높은 것으로 일치하였으며, 이는 이론적 가공안정성 선도를 이용한 공구의 강성평가 및 예측이 가능함을 알 수 있다.
4. 실험결과 공구직경 $\varnothing 16$ mm MQL 초경엔드밀의 고속가공에 적합한 최적의 내부형상요소는 분사홀 수량은 6개, 분사직경은 $\varnothing 1.1$ mm, 분사각도는 밑날부 30° (동일선상 배열), 측면 절삭날부 45° (교차배열)가 적합하며, 외부형상요소인 절삭날의 비틀림각은 30° 가 가장 적합한 결과를 도출하였다.
5. 고속가공에서 절삭공구의 외부형상요소에 따라 다소 차이가 있지만, MQL 공구의 경우는 분사홀의 위치 및 수량, 크기, 분사각도 등의 내부형상 요소가 공구의 강성 및 윤활성능에 많은 영향을 미치는 중요한 인자라고 할 수 있다.

REFERENCES

1. J. H. Lee, T. J. Ko, D. G. Baek, "A Study on Machinability and Cost Evaluation of MQL Milling Process," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 26-34, 2009.
2. Y. K. Hwang, W. J. Chung, J. Y. Jung, C.M. Lee, "A Study on the Improvement of Cutting Force and Surface Roughness in MQL Turning," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 83-91, 2006.
3. S. H. Park, J. Y. Jung, C. M. Lee, "A Study on the Improvement of Surface Roughness and Analysis of Cutting Force in MQL End-milling," Proc. of KSPE Fall Conference, pp. 395-396, 2006.
4. M. Rahman, A. Senthil Kumar, M.U. Salam, "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 539-547, 2002.
5. Anselmo Eduardo Diniz, Ricard Micaroni, "Cutting conditions for finish turing process aiming: the use of dry cutting," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 899-904, 2002.
6. M. Y. Yan, "Optimization of Cutting Tool for High Speed Machining," The Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 1290-1295, 1988.
7. T. L. Schmitz, M. A. Davies, K. Medicus, J. Snyder, "Improving High-speed Machining Material Removal Rates by Rapid Dynamic Analysis," Annals CIRP, Vol. 50, Issue. 1, pp. 263-268, 2001.
8. K. J. Lee, M. A. Donmez, M. Y. Yang, H. K. Jang "Study on Improvement of Accuracy for Evaluation of Chatter Stability in High-Seep Machining," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 99-100, 2009.