

◆특집◆ 하이브리드 프로세스

플렉서블 양각금형의 마이크로 밀링가공에서 하이브리드 윤활공정에 따른 공구마멸과 표면조도 특성

김민욱*, 류기택*, 강명창#

(* (주)파인테크, # 부산대학교 융합학부)

Characteristics of Tool Wear and Surface Roughness using for Hybrid Lubrication in Micro-Milling Process of Flexible Fine Die

Min-wook Kim*, Ki-teak Ryu*, Myung-Chang Kang#

(Received 9 December 2013; received in revised form 19 December 2013; accepted 23 December 2013)

ABSTRACT

An FFD(flexible fine die) is an embossed mold that consists of a thin plate ranging from 0.6 to 3 mm in thickness. FFDs are primarily used for cutting LCD films and F-PCB sheets. In the high-speed micro-milling process of flexible fine dies, the lubrication and cooling of the cutting edges is very important from the aspect of eco machining and cutting performance. In this paper, a comparative study of tool wear and surface roughness between cutting fluid and hybrid lubrication for eco-machining of FFD was conducted for processes of high-speed machining of highly hardened material (STC5, HRC52). Especially, the incorporated fluid method for eco machining, in which the cutting performances can be simultaneously measured, was introduced. The machining results show that hybrid lubrication, instead of conventional cutting fluid, leads to excellent tool wear and surface roughness and represents the proper conditions for eco micro-machining of flexible fine dies.

Key Words : Flexible Fine Die(양각금형), Hybrid Lubrication(하이브리드 윤활), Tool Wear(공구마멸), Surface Roughness(표면조도), High Hardened Steel(고경도 탄소공구강)

1. 서 론

최근 고속가공기가 발전함에 따라 고경도·고능

률·고품위의 고속가공 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 고경도 및 고인성의 특성을 가진 난삭재 가공에 응용되면서 가공시간의 단축과 금형의 수명 향상을 위한 가공성 평가기술 등 다양한 연구개발이 이루어지고 있다¹⁻²⁾. 플렉서블 양각금형(Flexible Fine Die, FFD)은 LCD Back Light Unit(BLU)에 들어가는 필름이나 PCB기판 등을 보다 정교하고 안정되게 절단할 때 사용하는

* FINETECH Co., LTD, Hwaseong-si, Gyeonggi-do

Corresponding Author : Pusan National Univ., Graduate School of Convergence Science

E-mail : kangmc@pusan.ac.kr.

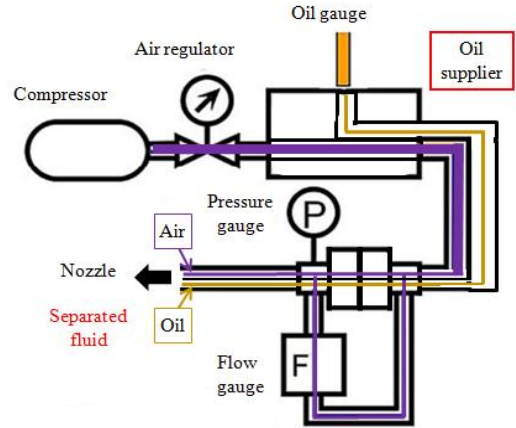
양각으로 제작된 금형으로 칼날형태의 구조를 가지고 있다. 이러한 금형은 마이크로 초경공구를 이용하여 고정도 탄소공구강을 고속가공으로 제작한다. 이때, 가장 중요한 핵심가공기술은 장수명의 공구수명을 가지면서 칼날을 매우 예리하게 만들고 양호한 표면조도를 얻어내는 것이다.

현재 ISO 14001에 의거하여 환경적인 문제에 대응하기 위한 환경 친화 가공기술이 매우 중요시되고 있다. 이에 따라 그 방안으로서 압축냉각공기법, 최소윤활법(Minimum Quantity Lubrication ; MQL), 건식법 등이 연구되고 있다. 주로 선삭, 드릴 및 연삭 가공에서 MQL방식을 적용하여 공구마멸이 감소되고 표면조도가 향상되어 진다고 보고되고 있다.^[3-5] 그러나, 플렉서블 양각금형 가공공정에 적용되는 연구는 거의 보고되지 않고 있다.

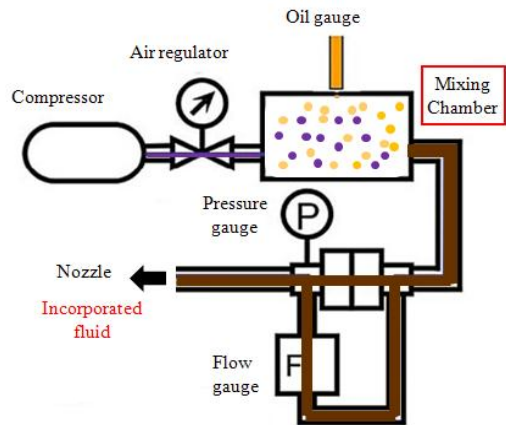
따라서 본 논문에서는 고정도 탄소공구강(STC5, HRC52) 소재인 플렉서블 양각금형의 마이크로 엔드밀 고속가공에서 기존의 수용성 절삭유 사용에 따른 습식가공을 친환경공정으로 대체하기 위해 일유체방식의 하이브리드 윤활(hybrid lubrication) 공정을 새로이 제안하였다. 이를 바탕으로 고속가공 조건하에서 절삭유제 공급방식의 변화(수용성 절삭유 및 하이브리드윤활)와 하이브리드윤활의 조건변화(토출압력, 노즐 분사수량)에 따른 공구마멸과 표면조도를 비교 분석하여, 그 공정 적용성을 알아보았다.

2. 하이브리드 윤활공정 원리

세미드라이(semi-dry)가공 기술은 1994년경 독일에서 개발된 기술로서 기체를 반송 매체로 하여 안개상의 윤활액을 공구 날붙이에 분사하는 방법으로 일명 오일미스트(oil mist)의 총칭이다. 즉 안개상의 반송 가능한 사이즈를 가진 필요 최소량의 윤활액을 기액 혼합의 상태에서 가공부 등 필요 부위에 공급하는 방법으로서 대부분 이유체 유동(Separated fluid flow) 흐름의 구조를 가지고 있다. 이러한 기존의 세미드라이장치는 Fig. 1(a)처럼 오일을 펌프로 끌어 올려서 에어에 의해서 오일과 에어가 노즐안에서 분리되어 분사하는 방법인 이유체 유동방식의 구조로 구성되어, 미스트 입자가



(a) Separated fluid method operated by oil mist process



(b) Incorporated fluid method operated by hybrid lubrication process

Fig. 1 The principal of separated fluid and incorporated fluid in semi-dry machining of environment-friendly machining

고르지 못하고 초미세립화가 되지 않아 가공성이 다소 불규칙한 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 이유체 방식의 문제점을 개선하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 미스트 기계내부(mixing chamber)에서 오일과 에어를 혼합시키는 일유체 흐름(incorporated fluid flow) 혼합구조방식의 하이브리드 윤활(hybrid lubrication)을 새로이 제안

하였다. 이를 통해 미스트의 입자 크기가 고르게 초미세립화가 되어 가공성 향상 및 공구수명 증가를 가져올 것으로 충분히 예상할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 고속머시닝센터(AEM-520, Sung Bang Won Co. Ltd)는 최대 주축 회전수 35,000 rpm, 최대 이송속도 1,000 mm/min을 가지며, 가공물 소재는 마그네틱 칩을 사용하여 평평도 (flatness)가 3 μm 이내가 되도록 고정시켰다. 이때 사용된 소재는 KS규격에서 STC5로 분류되는 고탄소강으로 HRC52의 고경도 특성을 가진다. 이러한 고경도 소재는 가공에 있어서 극심한 공구마멸을 초래하므로 절삭력증가 등의 절삭현상으로 말미암아 공구수명이 항상 문제시 되고 있다. 그래서 그 해결방안 중의 하나로 냉각, 윤활 그리고 칩 배출 효과를 가지는 절삭유제(cutting fluid)를 분사하면서 가공하고 있다. 이때 사용된 절삭유제는 에멀전형의 수용성 절삭유제(Blasocut 2000)이다. 플렉서블 양각금형의 고정도 및 고능률의 환경 친화적 가공의 유용성을 알아보기 위하여, 수용성 절삭유제와 하이브리드 윤활시스템과의 가공성을 평가하였다.

고배율 측정 현미경인 COMS 영상 현미경 (Xi-CAM, Bestec vision)을 통하여 공구마멸을 측정하였으며, 비접촉식 표면조도 측정기를 사용하여 표면 거칠기를 살펴보았다. Fig. 2는 가공성 평가를

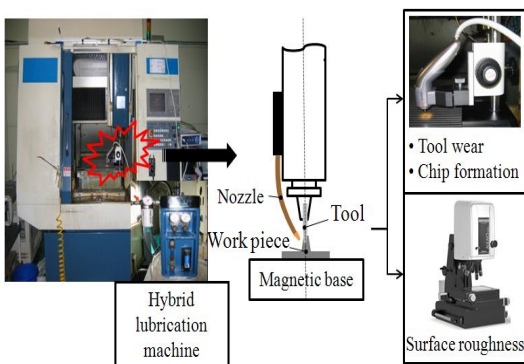


Fig. 2 Construction of experimental set-up for FFD process

Table 1 Specification of experimental instruments

Instruments & Items	Company	Model
Milling machine	SungBangWon	AEM-520
Surface roughness tester	Nanosystem	NV-E1000
Optical microscopy	Bestecvision	Xi-CAM
Cutting fluid	Blaser Swisslube	Blasocut 2000
Hybrid lubrication Oil	W&T Korea	Win Mist

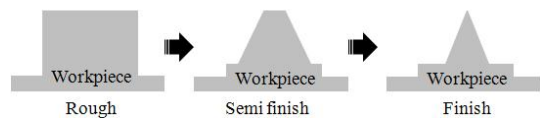


Fig. 3 A machining step of workpiece shape with each cutting process in FFD process

위한 장치의 구성도이며, 실제 사용한 장비의 사진과 함께 나타내었다. 실험에 사용된 장치 및 요소에 대한 사양은 Table 1에 나타내었다.

FFD는 황삭, 중삭, 정삭의 공정순서에 따라 가공되는데 그에 따른 소재의 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2는 실험에 사용된 절삭조건을 나타내고 있으며, 주축회전수는 생산성을 고려하여 최대회전수에 근접한 30,000 rpm으로 정하였고, 날당이송은 공구마멸을 최소화하기 위하여 0.02 mm/tooth로 선정하였으며, 축방향의 절삭깊이는 가공물 높이의 제품에 따른 제품치수에 따라 0.5 mm로 하였고, 반경방향 절삭깊이는 각 가공공정순서에 따라 0.15

Table 2 Cutting conditions of FFD machining process

Conditions	Contents
Spindle speed[rpm]	30,000
Feed per tooth[mm/tooth]	0.02
Axial depth of cut[mm]	0.5
	Rough : 0.15
Radial depth of cut[mm]	Semi Finish : 0.08
	Finish : 0.05
Workpiece	STC5 (HRC 52)

Table 3 Process conditions of hybrid lubrication

Conditions	Contents
Nozzle[ea]	1, 2
Air pressure[MPa]	0.2, 0.4, 0.6
Oil consumption[ml/h]	5
Blow angle[°]	135

mm, 0.08 mm, 0.05 mm로 하였으며 공정마다 하나의 마이크로 엔드밀공구로 테스트 하였다. 또한, 날부 직경 0.4 mm의 초경 엔드밀을 이용하여 열처리된 한 고경도 탄소공구강(STC5, HRC52)소재를 하향 밀링 가공하였다.

하이브리드 윤활의 조건은 Table 3에 나타내었으며, 공기압은 압축기의 최대압력인 0.8 MPa을 고려하여 선정하였고, 오일 분사량은 최소 양을 분사하도록 하기 위해서 5 ml/h 조건으로 공급하였다.

이 때 사용된 오일은 식물성 에스테르계 오일(WIN MIST, Win & Tech)로서 환경에 무해하다. 공구와 공작물사이의 가공점에 노즐 분사수와 각도의 효과를 알아보기 위하여 노즐수를 1개와 2개로 구분하여 실험하였으며, 분사각도는 상향과 하향 절삭의 가공 메카니즘을 고려하여 공구 진행방향을 기준으로 135°로 분사하면서 평가하였다.^[6]

실험에 사용한 마이크로 공구는 Fig. 4과 같이, 플렉서블 양각금형의 가공형상을 고려하여 제작한 1날을 가지는 초경엔드밀을 사용하였다. 공구의 기하학적 형상은 4 mm의 환봉지름(d)을 가지고 날부

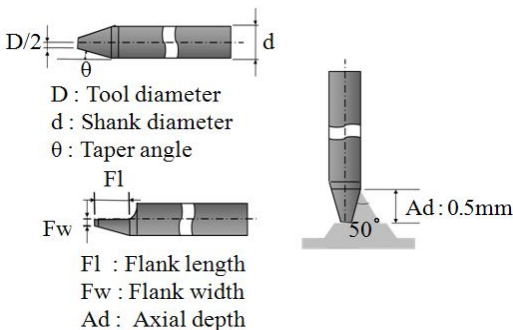


Fig. 4 Geometry shape and flank wear width of micro end-mill used in FED machining process

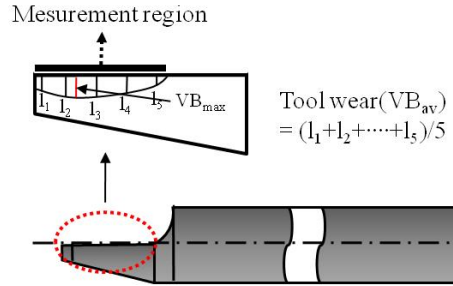


Fig. 5 Measurement method of flank tool wear

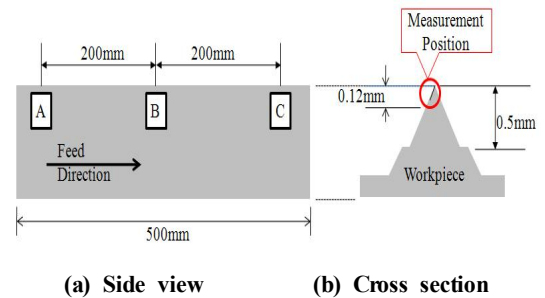


Fig. 6 Measurement position of surface roughness

직경(D)은 0.4 mm로 하였고, 제품의 각도를 50°로 하기위하여 공구의 접촉각은 25°로 선정하였다.

Fig. 5는 측면 가공용 엔드밀의 지배적인 마멸인 자인 여유면 마멸(flank wear)을 측정할 방법을 나타낸 것으로, 최대 여유면 마멸 VB_{max} 과 평균 여유면 마멸 VB_{av} 로 나타내었다. 여기서 평균 여유면 마멸은 축방향 절삭 깊이 내에서 5군데를 측정하여 평균한 값이다. 각 공정단계별 공구마멸 크기측정은 COMS 영상현미경(Xi-CAM, Bestec vision)을 사용하였다. 플렉서블 양각금형의 칼날형상은 가공 부위가 경사가 있고 선폴이 매우 작아 광위상 간섭방식의 비접촉식 표면조도 측정기(NV- E1000, Nanosystem)를 사용하여 최종공정 완료 후에 가공물의 경사면 윗부분을 가공거리에 따라 Fig. 6에서 처럼 200 mm간격으로 A, B, C로 구분하여 평균 중심선 거칠기 R_a 를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

플렉서블 양각금형의 가공공정별 공구마멸과 표

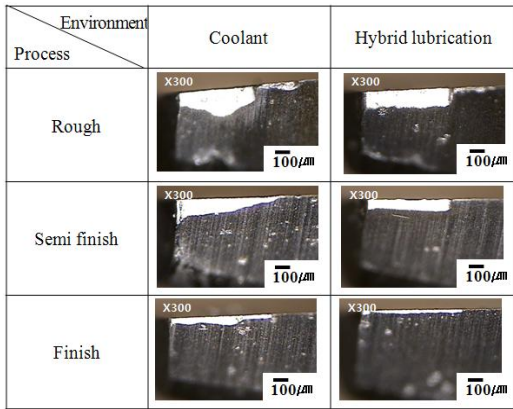
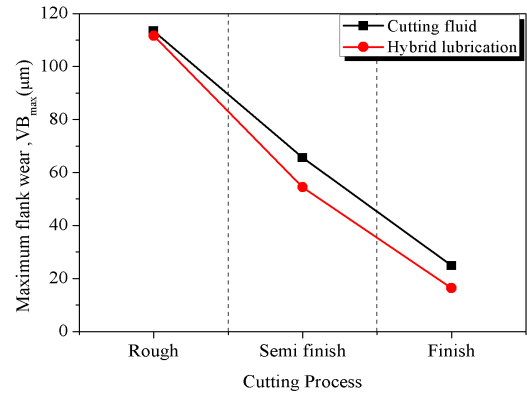


Fig. 7 Photographs of tool wear with machining process

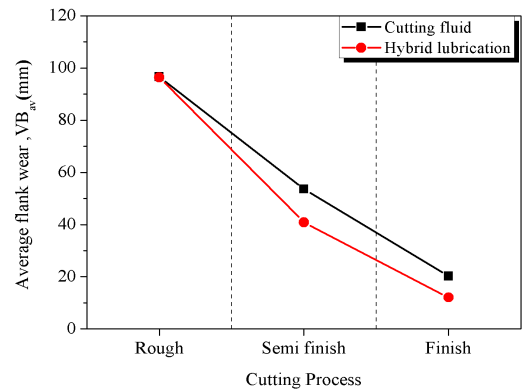
면조도와와의 관계를 규명하는 것은 고정도 및 고능률의 환경 친화적인 고속가공을 실현하는데 있어서 우선적으로 해결해야할 연구대상이다.^[7]

Fig. 7은 가공공정에 따른 여유면 마멸의 사진으로서, 일유체방식의 하이브리드 윤활공정을 적용한 경우가 기존의 습식절삭에 의한 절삭유제 사용방식에 비하여 여유면 공구마멸 발생형태가 매우 일정하고 마멸크기도 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 황삭, 중삭 및 정삭의 가공공정별 절삭유제 공급방식에 따른 최대 및 평균 공구마멸 값을 나타내고 있다. 최대 여유면 마멸은 평균 여유면 마멸에 비하여 황삭 및 중삭과정에서는 약 20% 정도 큰 값을 가짐을 알 수 있고 정삭에서는 거의 유사한 값을 가진다. 이러한 정삭과정에서의 공구마멸 패턴은 매우 안정적인 절삭이 이루어짐을 잘 반영하고 있다. 또한, 황삭인 경우에는 큰 공구마멸 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 중삭과정에서 정삭공정까지는 공구마멸 값이 서서히 감소하는 경향을 보인다. 이는 반경방향의 절삭깊이의 감소로 치수효과(size effect)에 따른 비절삭 에너지의 감소에 의한 결과로 판단된다.^[8] 한편, 절삭유제를 사용한 경우 하이브리드 윤활에 비하여 공구마멸이 중삭과 정삭과정에서 현저하게 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 마이크로 엔드밀링에서 단속절삭에 의한 큰 기계적 충격이공구날에 가해



(a) Maximum flank wear VB_{max}



(b) Average flank wear VB_{av}

Fig. 8 Variation of tool wear in cutting fluid and hybrid lubrication conditions

지기 때문이며, 절삭유제에 의한 절삭시 가열과 공전시의 냉각을 반복하기 때문에 열적 충격으로 인한 소성변형의 결과로 사료된다.

Fig. 9는 가공거리에 따른 측정부위에서 나온 대표적인 조도측정 데이터를 3차원 이미지를 나타낸 것으로서, 가공초기와 끝부분을 전체적으로 볼 때 하이브리드 윤활의 파형이 매우 작고 규칙적인 경향을 보인다.

Fig. 10은 Fig. 9의 이미지를 정량화하여 절삭유제 공급방식과 가공거리에 따른 평균 거칠기(R_a)의 변화를 나타내고 있다. 본 논문의 절삭유제 공급방식에서 가공거리가 증가함에 따라 표면조도는 불

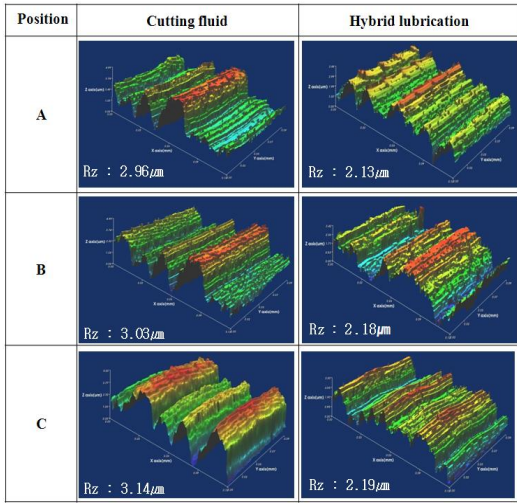


Fig. 9 Variation image of surface roughness according to cutting fluid and hybrid lubrication

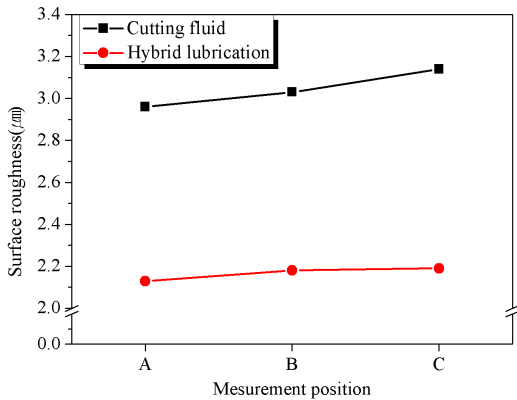


Fig. 10 Effect of surface roughness according to cutting fluid and hybrid lubrication process

랑하게 되는데 이것은 가공거리의 증가에 따른 공구마멸의 영향으로 인한 결과로 사료된다. 또한, 새로운 하이브리드 윤활방식이 절삭유제방식에 비하여 양호한 표면조도 값을 보이는 것은 가공접점에 집중적 분사로 인해 윤활 효과를 극대화시키고, 칩의 배출을 원활하게 해주기 때문이다.^[9]

Fig. 11은 동일한 미스트 분사량을 가지고 노즐

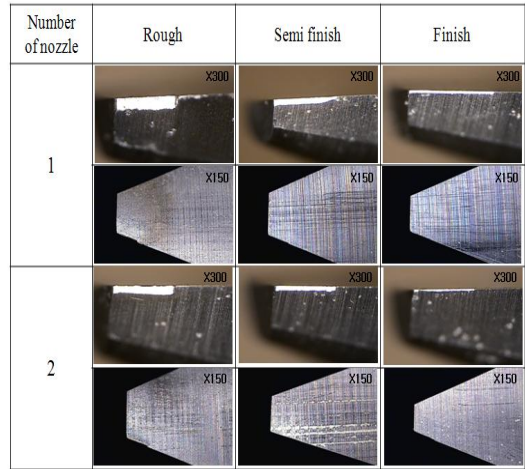


Fig. 11 Photograph of tool wear with each cutting step of FFD machining process

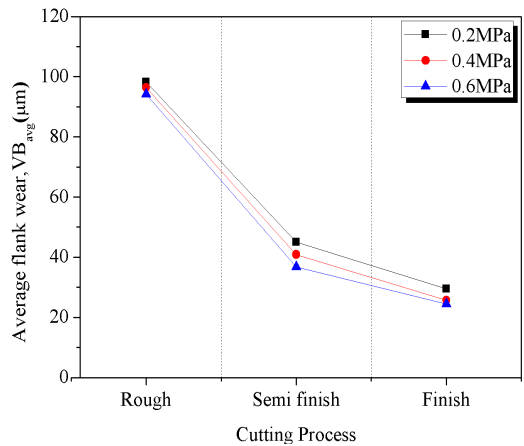


Fig. 12 Average flank wear variation according to air pressure change in hybrid lubrication

분사수량 1개와 2개인 경우에, 공구의 여유면과 경사면의 마멸 사진을 나타낸 것으로서, 노즐의 수량이 2개인 경우가 1개에 비하여 각 가공공정에서 여유면의 공구마멸이 약간 작아짐을 알 수 있다. 이는 칩의 배출 흐름을 일방적으로 유도하기 때문이라고 보고되고 있다.^[6] 또한, 경사면의 마멸은 칩과의 접촉이 없이 배출되므로 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12는 일유체의 분사압력에 따른 가공공정별 평균 여유면 공구마멸을 나타낸 그래프이다. 분사압력이 증가함에 따라 평균 여유면 공구마멸이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 분사압력이 증가함에 따라 칩의 배출효과로 인하여 절삭온도가 낮아져서 냉각 효과를 얻음으로 나타나는 현상이라고 설명될 수 있다.^[10]

5. 결 론

고경도 탄소공구강 소재를 사용한 플렉서블 양각금형의 고경도 및 고능률의 친환경고속가공으로의 적용가능성을 알아보기 위하여, 일유체방식의 새로운 하이브리드 윤활공정을 제안하였다. 그로부터 절삭유제와 하이브리드윤활방식에 따른 가공성을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 미스트 기계내부에서 오일과 에어를 혼합시키는 일유체 혼합구조방식의 하이브리드 윤활을 새로이 제안하여 그 윤활시스템을 플렉서블 양각금형 가공공정에 적용하였다.
2. 하이브리드 윤활을 사용한 경우에 절삭유제방식에 비하여 여유면의 공구마멸은 중삭과 정삭과정에서 40%정도 감소하는 것을 알 수 있고, 표면조도는 전 가공공정에서 거의 30%정도 낮은 양호한 값을 얻을 수 있었다.
3. 하이브리드 윤활공정에서 각 단계별 가공공정에 따른 여유면 공구마멸의 크기는 노즐수량이 2개인 경우가 1개에 비하여 모든 가공공정에서 작아짐을 알 수 있었고, 일유체의 분사압력이 증가함에 따라 여유면 공구마멸이 감소하는 것을 알 수 있었다.

이상의 연구결과는 고경도강의 플렉서블 양각금형가공시 고경도 및 고능률 그리고 친환경공정 기술로의 적용이 매우 용이할 것이다.

Acknowledgements

This work was supported by the Technology Innovation Program (10040433, Development of

rotary flexible die with 3 μm accuracy of the flatness and life of over 1,500,000 strokes) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy.

REFERENCES

1. G. Byrne, D. Donfeld, B. Denkena, "Advancing cutting technology," *CIRP Ann-Manuf. Technol.*, Vol. 52, No. 2, pp 483-507, 2003.
2. T. Thepsonthi, M. Hamdi, K. Mitsui, "Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills," *Int. J. of Mach. Tools Manuf.*, Vol. 49, pp. 156-162, 2009.
3. V. N. Gaitonde, S. R. Kamik, J. Paulo Davim, "Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass," *J. of Mater. Process. Technol.*, Vol. 204, No. 1-3, pp. 459-464, 2008.
4. A. K. Nandi, J. P. Davim, "A study of drilling performances with minimum quantity of lubricant using fuzzy logic rules," *Mechatronics*, Vol. 19, No. 2, pp 218-232, 2009.
5. S. Malkin, J. Lee, S. Masurkar, E. Hickok "Environmentally-conscious lubrication for superfinishing," *J. of KSMPE*, Vol. 2, pp. 5-14, 2003.
6. L. N. López de Lacalle, C. Angulo, A. Lamikiz, J.A. Sánchez, "Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling," *J. of Mater. Process. Technol.*, Vol. 172, No. 1, pp 11-15, 2006.
7. T. J. Je, D. S. Choi, Y. E. Yoo, S. M. Hong, E. S. Lee, K. H. Whang, J. C. Lee, "Study of flexible cutting die manufacturing process for SUS420," *Proceeding of the KSMPE Spring Conference*, pp 88-94, 2006.
8. B. Geoffery, *Fundamentals of metal machining and machine tools*, McGraw-Hill Book Co., Vol. 1, pp. 70-72, 1975.
9. T. Aoyama, Y. Kakinuma, M. Yamashita, and M. Aoki, "Development of a new lean lubrication system for near dry machining process," *CIRP Ann-Manuf. Technol.*, Vol. 57, pp. 125-128, 2008.
10. T. Obikawa, Y. Kamata, and J. Shinoauka, "High-speed grooving with applying MQL," *Int. J. of Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 1854- 1861, 2006.