

MQL 밀링가공의 가공성 및 비용 평가에 관한 연구

A Study on Machinability and Cost Evaluation of MQL Milling Process

이지형¹, ✉고태조², 백대균²
Ji Hyung Lee¹, ✉Tae Jo Ko² and Dae Gyun Baek²

1 영남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Yeungnam Univ.)

2 영남대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

✉ Corresponding author: tjko@yu.ac.kr, Tel: 053-810-2576

Manuscript received: 2008.7.4 / Revised: 2008.9.5 / Accepted: 2008.9.5

This paper is related to MQL (Minimum Quantity Lubrication) milling process, which is one of the environmentally friendly cuttings. The objective is to compare MQL milling process with conventional cutting fluid systems. To this end, machinability of MQL milling process was investigated, followed by the cost evaluation. Cutting force, surface roughness, tool wear, and cutting temperature were compared with each cutting fluid method. Consequently, total production costs were evaluated with the mathematical models in terms of machining cost and cutting fluid loss.

Key Words: MQL Machining (MQL 가공), Machinability (가공성), Cost Evaluation (가공성 평가)

1. 서론

초기의 환경 친화적 생산 기술은 경제성을 고려하지 않았으나, 최근에는 인체유해성을 포함하는 환경과 경제성을 동시에 고려한 광범위한 의미에서 환경 친화형 생산기술을 취급하는 추세에 있다.¹

일반적으로 절삭가공은 칩의 원활한 배출, 공작물과 공구의 냉각, 공구와 칩 사이의 윤활, 가공된 공작물의 표면 거칠기의 확보를 위하여 절삭유가 사용된다. 절삭유는 비산 또는 누설에 의해서 작업환경을 악화시키며, 장기간 사용 시 부패 및 세균번식에 의하여 악취가 발생하고 접촉시 작업자의 피부질환 등을 유발시킨다. 절삭유에는 윤활 성능을 높이기 위해 염소, 유황, 인 등의 극압 첨가제가 포함되어 있다. 이 극압 첨가제는 인체에 해로운 유독성 물질이며, 특히 연소화합물을 소각하면 발암성 유해물질인 다이옥신이 발생한다. 또

한 절삭유에 부착된 칩이나 폐기물 등이 소각되거나 가공 중 절삭열에 의해서도 다이옥신이 발생될 수 있기 때문에 환경에 끼치는 영향은 매우 크다.² 한편, 환경과 관련한 국제규격인 ISO 14000 에서 작업환경에 대한 규제가 강화됨에 따라 절삭유 처리비용 및 설비 유지관리 비용이 증가하고 있다. 이러한 절삭유 관리 비용은 총생산 비용의 7~17%가 되며, 공구비용에 비해 4 배 이상이 든다는 통계도 발표되었다.^{3,5}

환경친화적 관점에서 절삭가공에서 부각되고 있는 절삭유 사용기술 중의 하나는 극미량절삭유(MQL: Minimum Quantity Lubrication)가공기술이다. 이것은 기체를 반송매체로 하여 안개상 윤활액을 날 끝에 도포하는 방법의 총칭으로 1990 년 초 독일에서 개발된 기술로서, 절삭점을 냉각시키기보다는 이차적으로 발생하는 공구와 칩 사이의 마찰열을 감소시키고 표면 거칠기를 향상시킬 목적으로 개발되었다. MQL 절삭가공은 절삭유의 많은 역

할 중에서 윤활작용에 관해서는 인체에 무해한 식물성 오일미스트로 대체하며, 칩배출 및 냉각작용은 고압의 에어로 대체하는 것이다.

이러한 관점에서 보면, 환경문제만을 고려한 MQL 절삭가공의 절삭성이 기존의 절삭유 공급방식인 습식가공, 그리고 건식가공과 비교하여 어떠한지를 파악하는 것과 더불어서 절삭유의 절감과 함께 증가하는 공구마모에 따른 절삭 경제성을 조사하는 것은 매우 중요하다.^{4,6}

따라서 본 연구에서는 고속도강 공구를 사용하여 밀링가공에서 탄소강 소재인 SM45C 재료를 상기의 절삭유 공급방식들에 따라서 실험한 후, 절삭성을 평가하고자 한다. 평가된 절삭성을 바탕으로 경제성 평가모델을 적용하여 MQL 절삭가공의 경제성을 분석하고, 이를 바탕으로 본 기술의 가치를 평가하고자 한다.

2. 실험 및 측정 장치

본 연구에서는 탄소강 재료인 SM45C 에 대해 무코팅 고속도공구장 2 날 평엔드밀(한국 OSG)로 머시닝센터(Daewoo, ACE-V45)에서 실험을 실시하였다. MQL 가공은 압축기에서 생성된 공기를 공기 필터를 이용하여 수분을 제거한 후 MQL 공급 장치(With Industry)에 공급하고 MQL 공급 장치에서 생성된 안개상 윤활액을 주축 외부로 절삭점에 Fig. 1 과 같이 공급하게 된다.

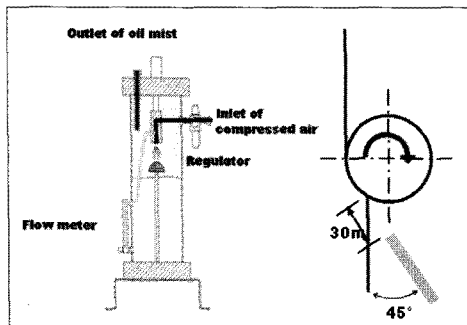


Fig. 1 Oil mist generator and injection direction

습식가공에 사용된 절삭유는 비수용성 절삭유 제 1 종(삼육화성,SUNCUT OS-100)으로 고도로 정제된 광유에 특수 첨가제가 함유되어 있다. MQL 가공방식에 사용된 절삭유는 Blaser swissube 사의 식물성 절삭유중 비수용성 절삭유를 사용하였다.

MQL 가공에서는 MQL 의 분사방향에 따라 가공 특성이 달라 질 수가 있으므로 본 실험에서는 이전의 실험을 통하여 얻어낸 최대 효과를 낼 수 있는 분사 각도와 노즐과 절삭점간의 거리 이용하여 실험을 실시하였다.⁷ MQL 미스트 분사각은 45° 로 Fig. 1 과 같이 공급하였으며 노즐과 절삭점간의 거리는 30mm 로 시험을 실시하였다. 사용하는 공기의 압력은 6bar, 노즐의 직경은 10mm 이다.

Table 1 Instruments and specification

Instruments	Company	Specification
Tool dynamometer	Kistler	9257B
Charge amplifier	Kistler	5019B
Data acquisition	Data translation	DT-9816A
Infrared thermal imager	Infrared integrated Systems	IRI 4010K
Microscope	Mitutoyo	
Surface roughness measurement	Mitutoyo	301

실험계획은 제어인자를 냉각방식, 주축속도, 이송속도로 선정을 하였으며, 냉각방식은 습식, MQL, 건식 (3 수준), 주축속도는 1,000, 1,500, 2,000rpm (3 수준), 이송속도는 100, 200, 300mm/min (3 수준)으로 선정을 하고, 직교 배열표를 이용하여 총 27 회의 실험을 실시하였다.

절삭은 엔드밀을 이용한 측면절삭이며, 측정장비는 Table 1 과 같다. 공구마모는 12m 가공지점에 대한 여유면 마멸 값의 데이터이고, 표면 거칠기는 초기 400mm 의 가공 중 4 번의 측정(중심선 평균거칠기, Ra)을 한 데이터의 평균값이다. 또한 절삭온도와 절삭력은 초기 400mm 지점과 마지막 12m 지점의 데이터를 각각 취하였으며, 절삭온도는 열화상측정기를 이용하여 절삭점의 최고온도를 측정하였다.

3. 가공성 평가

냉각방식에 따른 밀링가공의 가공성 평가에서는 절삭유를 사용하는 습식가공과 MQL 가공방식, 건식가공의 3 가지 냉각방식을 이용하여 절삭실험을 수행하였다.

냉각방식에 따른 밀링 가공의 가공성(절삭력, 표면 거칠기, 공구마모, 절삭온도)을 분석하고 그 그래프를 통해 분석을 하였다. Fig. 2, 3 은 습식가공, MQL 가공, 건식가공의 절삭조건에 따른 절삭온도를 나타낸 그래프이다. Fig. 2 는 밀링 가공의 초기 절삭의 온도를 나타낸 것이고, Fig. 3 에서는 12m 가공시의 절삭온도를 나타내었다.

Fig. 2 의 그래프를 분석해보면 냉각방식에 따른 절삭온도는 습식<MQL<건식의 순으로 나타났다. 절삭 초기점 입에도 불구하고 건식가공의 경우는 모든 실험에서 50℃이상의 온도를 나타냈다. MQL 가공에서의 냉각작용은 절삭조건에 따라 습식가공 대비 40%~70%의 효과를 나타내었다. Fig. 3 은 최종 12m 가공시의 절삭온도를 그래프로 나타내었다. 건식가공의 경우 초기 절삭온도와 비교 시 50℃~270℃의 큰 온도 변화를 보여준다. 반면, MQL 가공은 30℃정도의 온도 상승을 나타내었다. 습식가공의 경우 초기 가공지점의 절삭온도와 비교 했을 때 아주 작은(5℃~10℃) 온도 상승을 보였다.

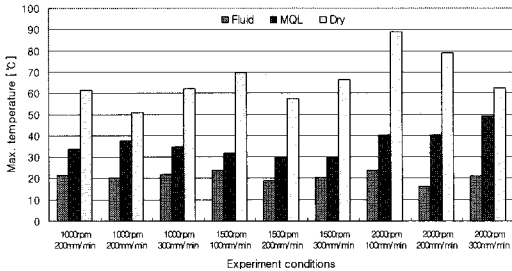


Fig. 2 Maximum temperature of milling process (entry point)

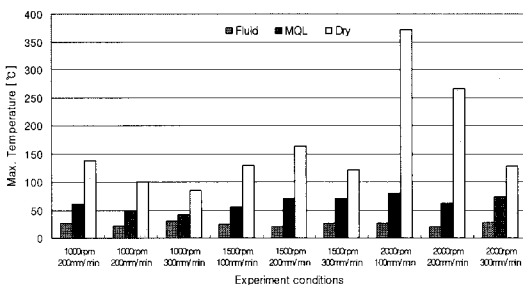


Fig. 3 Maximum temperature of milling process (exit point)

MQL 가공은 건식가공에 비해 냉각작용이 있으나, 습식가공에 비하면 효과가 떨어진다는 것을

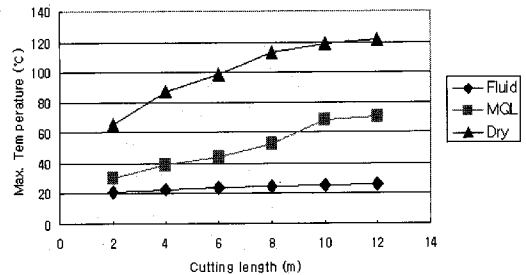


Fig. 4 Maximum temperature according to cutting length

알 수가 있다. Fig. 4 는 냉각방식에 따른 온도변화의 경향을 보기 위한 12m 가공 시 각 구간별 절삭 온도 변화에 대한 그래프이다. MQL 가공과 습식가공은 절삭 초기 절삭온도는 비슷하지만, 절삭이 계속 이루어지면서는 온도차이가 점점 커진다. 절삭이 계속 이루어지면서 냉각효과는 떨어진다는 것을 알 수가 있다.

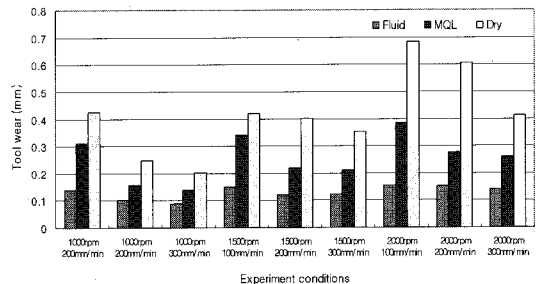


Fig. 5 Tool wear of milling process

Fig. 5 는 습식가공, MQL 가공, 건식가공의 절삭 조건에 따른 공구마모를 나타낸 그래프이다. 공구마모는 12m 가공 후의 마모량을 나타내었다.

공구마모는 주축회전수가 높아질수록, 이송속도가 낮을수록 마모의 양이 크게 나타났다. 냉각방식에 따른 공구마모는 절삭유를 사용한 습식가공이 MQL 가공과 건식가공보다 작은 공구 마모량을 보여 준다. 한편 MQL 가공은 1,000rpm, 1,500 rpm 에서는 건식가공의 공구마모보다 0.05 ~ 0.07 mm 정도 작게 나타나지만, 2,000rpm 에서 이송속도가 100 mm/min, 200 mm/min 에서는 건식가공과의 차이가 0.2 ~ 0.25mm 정도로 큰 차이를 보인다. 이는 Fig. 3 에서 나타난 절삭점의 온도와 관계있는 것으로 판단된다. Fig. 6 은 각 구간별 공구마모 경향을 나타낸 그래프로서, 절삭온도 경향의 그래프와 유사한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

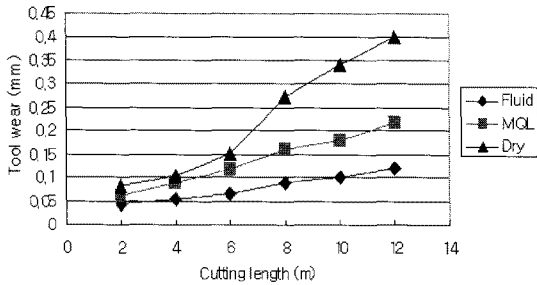


Fig. 6 Tool wear according to cooling method

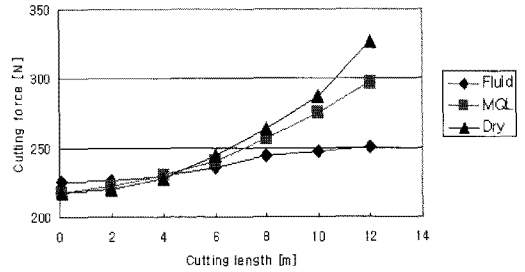


Fig. 9 Cutting force according to cooling method

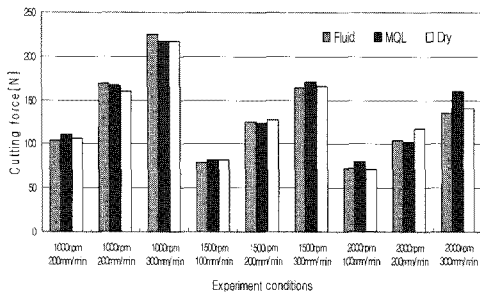


Fig. 7 Cutting force of milling process (entry point)

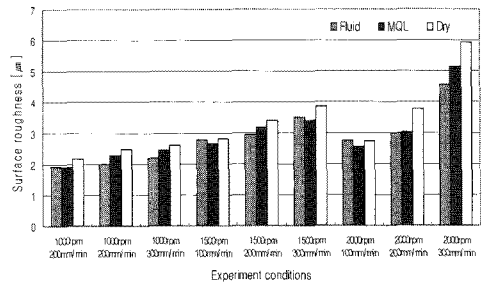


Fig. 10 Surface roughness of milling process

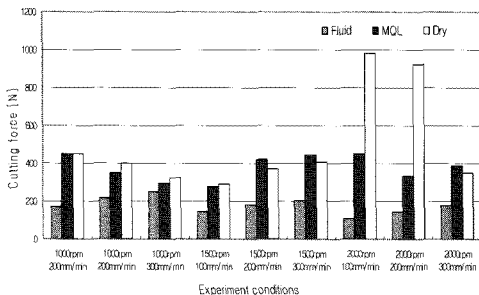


Fig. 8 Cutting force of milling process (exit point)

Fig. 7, 8은 습식가공, MQL 가공, 건식가공의 절삭조건에 따른 절삭력을 나타낸 그래프이다. Fig. 7은 밀링 가공의 초기 절삭력을 나타내었고, Fig. 8에서는 12m 가공지점의 절삭력을 나타내었다. Fig. 7에서 보이는 냉각방식에 따른 초기 절삭력은 냉각방식에 관계없이 거의 비슷한 절삭력이 나타났다.

절삭 길이 12m 지점에서 측정된 절삭력의 그래프인 Fig. 8에서 절삭력을 분석해 보면, 2000rpm에서 이송속도 100mm/min, 200mm/min을 제외한 모든 절삭조건에서 습식 < MQL = 건식의 경향이 나타났다. 이러한 성향은 공구마모의 영향이 크다고 판단되어 진다. 공구마모가 상대적으로 적은 습식

가공은 MQL 가공, 건식가공에 비해 절삭력이 작게 나타난 것으로 사료된다. Fig. 9는 냉각방식에 따른 절삭력의 경향을 보기 위한 12m 가공 시 각 구간별 절삭력 변화에 대한 그래프이다. 결국, 절삭력은 공구마모량에 지배되며, 공구마모는 절삭점의 온도에, 그리고 절삭점의 온도는 냉각방식에 의해 지배되는 전형적인 절삭현상임을 알 수 있다.

Fig. 10은 습식가공, MQL 가공, 건식가공의 절삭조건에 따른 표면 거칠기를 나타낸 그래프이다. 냉각방식에 따른 표면 거칠기는 큰 차이 없이 비슷한 값으로 나타났다.

4. 경제성 평가

경제성 평가에서는 가공시간 및 가공비용이라는 절삭공정의 생산비용모델과 더불어 수학적으로 모델링된 절삭유제의 손실량 모델 및 폐유제 처리비용을 이용하여 환경비용을 고려한 절삭공정의 생산비용을 계산한다. 이 계산은 참고문헌 5의 논문을 인용하여 계산하였으며, 요약된 내용은 부록으로 정리를 하였다.

상기의 내용을 따라서 3절에서 수행한 냉각방식에 따른 절삭성 평가의 공구마모데이터를 이용하여 밀링가공의 가공비용과 환경부하비용을 비교

하였다. 냉각방식에 따른 절삭성 평가의 공구마모 실험 데이터로부터 만들어진 단순화된 마모 그래프로부터 0.1mm 의 공구수명 판정에 의하여 공구 수명을 결정하였다. 가공 시 절삭유제는 비수용성 절삭유제를 사용하였고, Table 2 는 가공조건, Table 3 은 절삭유제의 물리적 성질을 나타내었다. 절삭유제가 저장용기에 충분히 희수되었다고 가정하고 유막의 두께는 3 μm , 칩의 경우 0.03 μm 로 각각 설정을 하였다. 부록의 식 (A2), (A6)을 이용하여 단위 생산시간 및 생산비용을 각각 계산하였다. 공구교환시간은 5 분, 공구가격은 7,000 원, 임금은 월 2,000,000 원 하루 8 시간씩, 30 일 기준으로 173 원/분로 계산하였다. 절삭비용은 동작기계 가동 시 전기요금(1 분/57.16 원)과 유압작동유 사용분[20 ℓ (53,000 원)/90 일]의 합과 MQL 의 경우 미스트 장치의 감가상각비(2,170,000 원/10 년)와 MQL 오일의 사용량(1.46 원/분)의 합으로 나타내었다. 습식가공에서는 절삭유 사용 시의 보충량[30 ℓ (84,000 원)/7 일]으로 계산하였으며, 건식가공은 0 원으로 계산

하였다. 식 (A7)을 이용하여 유제 손실비용 및 환경비용인 폐유제 처리비를 계산하였다. 비수용성 절삭유의 경우 유제의 혼합비율(C_p)은 1, 유제의 밀도는 0.9, 유제의 코팅 두께 3 μm , 칩의 코팅두께 0.03 μm , 가공 후 전체 표면적 51,160 mm^2 , 12m 에 대한 절삭량(V)758,000 mm^3 , 절삭깊이는 깊이 및 폭방향으로 각각 0.5, 7 mm 이다. 유제비는 20 ℓ 당 56,000 원으로 전체 유제에 의한 손실비를 나타내었다. 유제처리비 및 환경처리비에서 유제 수명 및 교환시기는 6 개월이고, 유제 탱크용량은 300 ℓ 이다.

폐수처리 전문업체의 경우 폐유 회수 시 1,000 ℓ 당 운반비와 처리비가 각각 200,000 원, 300,000 원이고, 유제 교환 시 탱크용량 300 ℓ 를 채울 경우 유제비(840,000 원)가 추가적으로 소비된다. 따라서 유제의 운반비, 처리비, 유제비의 합으로 환경비용(5.17 원/분)이 계산이 되어진다.

Table 4 에서는 실험데이터로부터 계산된 냉각 방식 및 절삭속도에 따른 밀링가공의 가공시간, 공구 사용량, 가공비용 및 환경비용을 나타냈다.

Table 2 Cooling and cutting conditions

Case No.	Cooling methods	rpm	Feed rate	DOC	
A-1	Fluid	1,000	100	Axial: 7mm	
A-2			300		
A-3		2,000	100		
A-4			300		
B-1	MQL	1,000	100		Radial: 0.5 mm
B-2			300		
B-3		2,000	100		
B-4			300		
C-1	Dry	1000	100		
C-2			300		
C-3		2,000	100		
C-4			300		

Table 3 Cutting volume and fluids Data

Workpiece Volume (mm^3)	100×100×80
Cutting Volume (mm^3)	758,000
Cutting Fluids Density(g/cm^3)	0.9

Table 4 Environmental costs by cooling conditions

Case No.	A-1	A-2	A-3	A-4
The length of tool life(m)	7.3	14	5	6.8
The number of tool exchange	1.64	0.86	2.4	1.76
Preparatory time(sec)	5	5	5	5
Cutting time(sec)	168.24	62.82	168.24	62.82
Exchange time(sec)	3.29	1.71	4.80	3.53
Manufacturing time(sec)	176.53	69.53	178.04	71.35
Equipment operation cost(W)	24537	9665	24748	9981
Cutting cost(W)	11702	4580	1396	521
Fluid loss cost(W)	5687	2224	10856	3965
Tool cost(W)	11507	6000	16800	12353
The cost of manufacturing(W)	47746	20245	53338	27020
Environmental expense(W)	913	359	920	369
The total cost of manufacturing (W)	56346	22828	65114	31354

Case No.	B-1	B-2	B-3	B-4
The length of tool life(m)	4.3	8.9	3	4.1
The number of tool exchange	2.79	1.35	4	2.93
Preparatory time(sec)	5	5	5	5
Cutting time(sec)	168.24	62.82	168.24	62.82
Exchange time(sec)	5.58	2.7	8	5.85
Manufacturing time(sec)	178.82	70.52	181.24	73.67
Equipment operation cost(₩)	24856	9802	25192	10241
Cutting cost(₩)	10756	4235	10897	4418
Fluid loss cost(₩)	0	0	0	0
Tool cost(₩)	19535	9438	28000	20488
The cost of manufacturing(₩)	55147	23475	64089	35147
Environmental expense(₩)	0	0	0	0
The total cost of manufacturing (₩)	55147	23475	64089	35147

Case No.	C-1	C-2	C-3	C-4
The length of tool life(m)	3.5	6.5	2.6	2.3
The number of tool exchange	3.43	1.85	4.62	5.22
Preparatory time(sec)	5	5	5	5
Cutting time(sec)	168.24	62.82	168.24	62.82
Exchange time(sec)	6.86	3.69	9.23	10.43
Manufacturing time(sec)	180.1	71.51	182.47	78.25
Equipment operation cost(₩)	25034	9940	25363	10877
Cutting cost(₩)	10514	4175	10653	4568
Fluid loss cost(₩)	0	0	0	0
Tool cost(₩)	24000	12923	32308	36522
The cost of manufacturing(₩)	59548	27038	68324	51947
Environmental expense(₩)	0	0	0	0
The total cost of manufacturing (₩)	59548	27038	68324	51967

Fig. 11 은 냉각방식에 따른 절삭비용과 유제비용의 합인 생산비용을 나타낸 그래프이다. MQL 가공, 건식가공에서는 습식가공에 비해 공구수명이

짧아 절삭비용이 많이 들지만 유제비용 (환경처리비, 유제손실비)은 거의 무시할만하다. 한편, 습식가공은 절삭유제비가 총 생산비의 약 15%가량 차지하면서 MQL 가공과의 총 생산비는 거의 같게 나타났다.

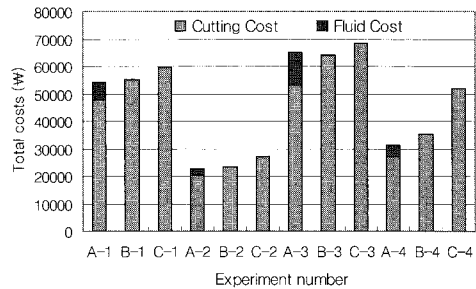


Fig. 11 Comparison of machining and cutting fluid cost

5. 결론

본 논문은 환경 친화적인 가공 방법 중의 하나인 MQL 밀링가공의 경제성에 관하여 연구를 수행하였다. 밀링가공의 절삭성 실험을 통해 얻게 된 공구마모 데이터를 이용하여 여러 가지 냉각방식을 적용한 밀링가공 공정에 대하여 생산성 및 절삭유제비용을 다음과 같이 평가 하였다.

1) 절삭온도의 경우 초기 절삭지점의 온도는 습식 = MQL < 건식의 형태로 나타났다. 그러나 MQL 가공에서 절삭가공이 진행되는 동안 냉각 효과가 적어지면서 절삭온도, 절삭력, 공구마모가 상호적으로 상승하는 것을 알 수가 있다. 건식가공 또한 절삭가공이 실행되면서 온도 분포가 크게 상승하였다. 반면에 습식가공의 경우는 절삭가공이 실행되는 동안 온도의 변화가 거의 없음을 알 수가 있다.

2) MQL 가공은 습식가공과의 경제성 평가를 실시하였을 경우 총생산비용이 거의 같은 금액으로 나타났다. 따라서 환경적인 측면과 작업자의 건강까지 고려한다면 MQL 가공의 필요성이 크게 대두되며, 앞으로도 많은 연구를 통한 MQL 가공 기술의 개발이 필요 시 된다.

참고문헌

1. Kang, J. H., Lee, C. H., Song, J. Y. and Lee, J. K., "Environmentally conscious machining technology

- considered economic view,” Proc. of KSPE Fall Conference, pp. 972-975, 2000.
2. Born, M. and Wolf, E., “Principles of Optics 7th Edition,” Cambridge University Press, pp. 517-521, 1990.
 3. NIOSH, “Criteria for a recommended standard occupational exposure to metalworking fluids,” US. Dep. of Health and Human Services, CDC. NIOSH Publication, 1998.
 4. Cselle, T., “New direction in drilling,” Manufacturing Engineering, Vol. 115, No. 2, pp. 70-90, 1995.
 5. Chang, Y. S., Kim, Y. S., “Optimization of milling process considering the environmental impact of cutting fluids,” J. of the KSPE, Vol. 15, No. 12, pp. 14-20, 1998.
 6. Dhar, N. R., Ahmed, M. T. and Islam, S., “An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, No. 5, pp. 748-753, 2007.
 7. Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F. and Simoncini, M., “Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1547-1554, 2006.
 8. Changwon University Machine Tool Research Center “Development of Cutting Technology Using Minimum Quantity Lubrication,” pp. 62-70, 2005.

부 록

A1. 생산비용모델 ^{A1}

통합생산시스템 최적화의 기본이 되는 단일 생산 공정에서 단위생산시간, 단위생산비용은 다음과 같이 모델링된다.

단위생산시간은 제품 한 개를 생산하는데 필요한 시간으로, 준비시간, 절삭시간, 공구교환시간으로 구성된다고 가정한다. 준비시간 t_p (분/개)는 가공을 준비하는 데 필요한 시간으로 실제의 절삭작업에 관계없는 시간이다. 절삭시간 t_m (분/개)은 실제의 절삭가공에 필요한 시간이고 공구교환시간

t_r (분/개)는 마모된 절삭공구를 새 절삭날이나, 새 공구로 바꾸는 데 필요한 시간이다.

마모된 절삭날을 새 절삭날로 한 번 교환하는데 필요한 시간을 t_c 라고 하고, 새로운 절삭날을 사용하기 시작해서 교환할 때까지의 시간을 공구수명 T 라 하면, 제품 한 개에 대한 공구교환시간은

$$t_r = t_c t_m / T \tag{A1}$$

이다. 그러므로 단위생산시간 t (분/개)는 다음과 같이 주어진다.

$$t = t_p + t_m + t_r = t_p + t_m + t_c t_m / T \tag{A2}$$

단위생산비용은 제품 한 개를 생산하는 데 필요한 비용으로서 설비가동비용, 절삭비용, 공구비용으로 구성된다. 설비가동비용 u_o (원/개)는 한 개의 제품을 생산하기 위해 생산설비를 사용하는 비용으로서 동작기계의 운전비, 감가상각비, 노무비와 간접경비를 포함한다. 절삭비용 u_m (원/개)는 전기세와 절삭유 비용 등을 포함한 절삭에 필요한 비용이며, 공구비용 u_r (원/개)는 제품 한 개를 절삭하는 데 필요한 절삭공구를 구입하는 비용이다.

설비가동비용은 간접경비 k_o (원/분)과 단위생산시간의 곱으로 다음과 같이 얻어진다.

$$u_o = k_o t = k_o(t_p + t_m + t_c t_m / T) \tag{A3}$$

절삭비용은 기계의 가동시간 동안의 단위시간당 절삭 간접경비 k_m (원/분)에 의하여, 공구비용은 절삭날의 비용 k_r (원/edge)에 의하여 각각 다음 식으로 표시된다.

$$u_m = k_m t_m \tag{A4}$$

$$u_r = k_r t_m / T \tag{A5}$$

따라서, 단위생산비용 u (원/개)는 다음과 같이 주어진다.

$$u = u_o + u_m + u_r = k_o t_p + (k_o + k_m) t_m + (k_o t_c + k_r) t_m / T \tag{A6}$$

A2. 절삭유제의 손실량 모델 ^{A2}

물질 및 에너지의 소비 단계에서는 유제의 사용뿐만 아니라 관리 및 폐유처리시의 관련 물질 및 에너지를 포함하며 배출물도 유제 사용 중 및 폐유처리시의 대기, 수질, 고형폐기물을 모두 고려하여야 한다. 이런 항목들은 유제 사용시와 폐절삭유의 처리 중 발생하는 비산과 분해에 따른 질적 관리성 및 보충, 작업자에 대한 인체영향, 유해물질 발생 등 유제와 직접적인 관련 요소들뿐만 아니라 절삭력의 감소에 의한 사용 에너지의 저감, 사용 중 칩과 공작물과 공구에 대한 환경적 영향, 열 및 소음발생 등 간접적인 영향도 포함한다.

절삭공정의 환경 평가를 위해서는 공구와 절삭유제 등 사용되는 절삭요소의 환경부하에 대한 자료 외에도 사용되고 배출되는 물질 및 에너지의 양을 알아야 한다. 이러한 절삭요소들은 여러 가지 절삭환경 및 조건들에 결정되며 수학적인 모델링이 가능하다.

절삭유제는 절삭공정에서 환경부하가 가장 큰 절삭요소이다. 절삭유제의 사용량은 가공 시 발생하는 손실량, 순환 시 발생하는 손실량 및 유제의 수명이 다하여 교환하여주는 양으로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$m_{fluid} = m_{oper} + m_{cir} + m_{life} \tag{A7}$$

가공 시의 유제 손실 요인은 1)가공재료 코팅, 2)칩 코팅, 3)기화에 의한 대기 중 확산 등으로 손실량은 다음과 같이 구성된다.

$$m_{oper} = m_{work} + m_{chip} \tag{A8}$$

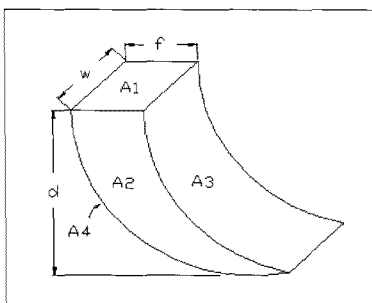


Fig. A1 Surface of milling chip

는 무관하게 재료의 표면적에 따라 일정하며 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$m_{work} = C_r \rho t_f A \tag{A9}$$

여기서 ρ 는 유제의 밀도, t_f 는 유제의 코팅 두께, A 는 가공 후 재료의 전체 표면적을 나타낸다. 또한 C_r 은 수용성 유제의 경우 물에 대한 유제의 혼합비율이며 비수용성 유제의 경우는 1 이 된다.

밀링가공에서 칩 코팅에 의한 손실은 Fig. A1 의 단일 칩의 표면적에 의하여 다음과 같이 구성된다.

$$m_{chip} = C_r \rho t_f (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) N_c \tag{A10}$$

여기서 N_c 는 하나의 제품을 가공하는데 발생하는 칩의 수량으로 다음과 같이 절삭변수들로 나타낼 수 있다.

$$N_c = \frac{Vol}{fdw} \tag{A11}$$

여기서 Vol 은 제품 하나당 절삭량, f 는 날당 이송량, d 는 커터의 반경방향 절삭깊이, w 는 커터의 축방향 절삭깊이를 나타낸다. Fig. A1 의 칩의 각 방향 표면적 중 A_1, A_2 는 절삭 전후의 체적이 같다는 조건에서 쉽게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_1 = fw \tag{A12}$$

$$A_2 = fd \tag{A13}$$

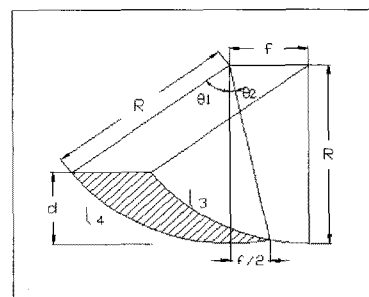


Fig. A2 Geometry of milling chip

가공재료 코팅량 m_{work} 은 절삭 후 절삭변수와

칩의 표면적 A_3, A_4 는 Fig. A2 으로부터 다음

과 같이 표시된다.

$$A_3 = wR(\theta_1 - \theta_2) \quad (A14)$$

$$A_4 = wR(\theta_1 + \theta_2) \quad (A15)$$

여기서 R 은 커터의 반경이며 Fig. A2 의 θ_1, θ_2 의 기하적 관계에서부터 A_3, A_4 는 다음과 같이 표시된다.

$$A_3 = wR[\cos^{-1}(1 - \frac{d}{R}) - \tan^{-1}(\frac{f}{2R})] \quad (A16)$$

$$A_4 = wR[\cos^{-1}(1 - \frac{d}{R}) + \tan^{-1}(\frac{f}{2R})] \quad (A17)$$

그러므로 칩 코팅에 의한 손실량은 다음과 같다.

$$m_{chip} = C_{tf}V[d^{-1} + 2w^{-1} + 2Rf^{-1}d^{-1}\cos^{-1}(1 - \frac{d}{R})] \quad (A18)$$

부록참고문헌

- A1. Chang, Y. S. and Kim, S. T., "Evaluation of the economics of high speed machining considering environmental effects," Clean Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 182-189, 2006.
- A2. Chang, Y. S. and Kim, Y. S., "Optimization of milling process considering the environmental impact of cutting fluids," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 12, pp. 14-20, 1998.