

본 연구는 1997년도 서울대학교 청정기술 연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

절삭유제의 환경영향을 고려한 밀링공정의 최적화

장운상*, 김주현**

Optimization of Milling Process Considering the Environmental Impact of Cutting Fluids

Yoonsang Chang*, Joo-Hyun Kim**

ABSTRACT

Cutting fluid is a factor which has big effects on both machinability and environment in machining process. The loss of cutting fluids may be reduced by the optimization of machining parameters in process planning. In this study, the environmental impact of fluid loss is analyzed. The fluid loss models in milling process are constructed with the machining parameters. The models are utilized to obtain the optimal machining parameters to minimize the fluid loss. The factors with significant effects on the fluid loss are analyzed by ANOVA test. Finally, optimal parameters are suggested considering both machining economics and environmental impact. This study is expected to be used as a part of a framework for the environmental impact assessment of machining process.

Key Words : Cutting Fluids(절삭유제), Clean Technology(청정기술), Environmental Impact(환경 영향), Optimal Machining Condition(최적 절삭 조건), Milling Process(밀링공정)

1. 서 론

근래에 공업선진국들을 중심으로 떠오르고 있는 환경문제에 대한 관심은 산업 전반에 걸쳐서 큰 영향을 끼치고 있다. 환경과 건강에 대한 관심은 각종 입법과 규제로 나타나고 있으며 그 결과는 특별한 생산 공정의 제한이나 연관된 추가비용 요소의 발생뿐만 아니라 새로운 대체기술의 개발이라는 부담을 발생시킨다. 지금까지의 생산기술에 관한 연구는 주로 생산성과 경제성의 향상을 목표로

한 신 기술의 개발에 초점을 맞추어 왔다. 이러한 생산기술의 궁극적인 목표의 달성을 위하여 환경이라는 요소를 하나 더 고려하여야 하며 환경을 고려한 생산기술의 개발, 즉 청정 생산기술의 개발은 기계공학 분야의 공학자들에게도 새로운 도전 요소가 되고 있다. 청정 생산기술도 생산성과 경제성의 향상을 추구하고 있으며 다만 이러한 기존의 목표는 지금까지의 사후처리(end-of-pipe) 기술이 아닌 생산공정 내에서 환경부하의 감소가 이루어져야 달성될 수 있다는 개념의 차이가 있다.

* 수원대학교 기계공학과
** 국민대학교 기계자동차공학부

가공공정에 있어서 청정기술의 도입은 기존의 생산 공정 및 적용기술에 대한 환경관점에서의 완전한 이해 및 분석에서부터 시작한다. 전 공정에서의 물질/에너지 수지를 파악하여 바람직하지 못한 부산물의 원인에 대한 정확한 규명이 있어야 하며 제거 방안을 도입하여야 한다. 또한 원인 규명 후에야 사용물질 및 배출물을 최소화하는 공정설계가 가능하다. 공정분석 방법중 하나는 전과정 평가 (LCA: Life Cycle Assessment) 기법을 적용한 상용 프로그램을 이용하는 것이다.⁽¹⁾ 생산공정의 환경관련 분석에서 사용될 수 있는 전과정 평가는 ISO 14000 인증에도 포함되어 있으며 앞으로 모든 제품의 설계 및 생산에서 고려하여야 할 중요한 요소이지만 현 시점에서 적용하기에는 무리가 많다. 가장 큰 이유는 모든 물질의 원료, 운반, 가공, 및 폐기시의 환경부하를 정량화 하여 만들어진 데이터베이스 자체가 미완성 상태인 것이다. 또한 평가 기법도 다양한 방법이 시도되고 있어서 선택의 여지가 있다. 그러므로 각 산업체 현장에서 고유의 평가 시스템을 만들어야 하며 Chrysler사와 같이 자체설계한 전과정 관리(LCM)가 통합생산시스템으로 사용되는 경우도 있다.⁽²⁾ 기계 가공공정의 경우 환경에 대한 인식이 아직까지는 낮은 관계로 근본적으로 데이터를 얻는데 필요한 실험 및 분석이 부족하고 실험을 보조할 공정의 모델링도 거의 이루어지지 않고 있다. 앞으로 환경영향에 대한 많은 실험 및 자료의 보완이 필요하며, 공정을 모델링/시뮬레이션하고 잠재적인 부산물을 평가하기 위한 진보되고 믿을 만한 기술 및 컴퓨터 프로그램의 개발이 필요하다.

환경영향 분석의 대상이 되는 절삭 요소에는 절삭유제, 절삭에너지, 절삭 칩, 공구 등 여러 가지가 있다. 그 중에서 절삭유제는 환경 및 인체건강에 영향이 가장 큰 요인으로 인식되고 있다. 절삭유제의 사용량을 저감하는 가장 큰 방법은 수명을 연장하는 것이며 절삭재료와 공구에 맞는 적절한 유제의 선택 및 관리 시스템에 의하여 달성될 수 있다. 절삭유제의 직접적인 환경부하의 요인으로는 가공 중에 필연적으로 발생하는 유제의 손실이 가장 크다. 유제의 손실은 공정설계의 관점에서 최적 절삭조건을 도입으로 최소화할 수 있다. 본 논문에서는 밀링가공에 있어서 절삭유제의 손실을 환경영향의 관점에서 분석한다. 제품 및 칩 코팅과 기화에 의한 손실을 여러 가지 절삭변수들에 의하여 수학적으로 모델링한다. 최적 절삭조건을 factorial design 기법에 의하여 유추하고 변량분석에 의하여 절삭유제의 손실에 영향이 큰 절삭변수를 알아본다.

2. 청정 절삭가공

앞에서 언급한 바와 같이 가공공정에 있어서 청정기술의 도입은 기존의 생산 공정 및 적용기술에 대한 환경관점에서의 완전한 이해 및 분석에서부터 시작한다. 단일 절삭공정에서 분석에 필요한 물질/에너지 수지는 Fig. 1 과 같다. 절삭가공에는 재료, 공구, 절삭 및 작동 유제 등의 물질과 가공 및 물질 취급에 필요한 에너지가 사용되며 가공품 외에 칩, 유제, 폐공구, 열, 소음 등이 배출된다. 이 중 일부는 재사용/활용되고 나머지는 시스템 외부로 배출된다. 이 들 배출물 중에서 환경 부하가 제일 큰 절삭유제도 환경부하를 고려하여 물질 및 에너지의 사용과 대기, 수질 및 고형배출물을 최소화하는 관점에서 관리되어야 한다.⁽³⁾ 물질 및 에너지의 소비 단계에서는 유제의 사용뿐만 아니라 관리 및 폐유처리시의 관련 물질 및 에너지를 포함하며 배출물도 유제 사용중 및 폐유처리시의 대기, 수질, 고형폐기물을 모두 고려하여야 한다. 이런 항목들은 유제사용시와 폐절삭유의 처리중 발생하는 비산과 분해에 따른 질적 관리성 및 보충, 작업자에 대한 인체영향, 유해물질 발생 등 유제와 직접적인 관련 요소들 뿐만 아니라 절삭력의 감소에 의한 사용 에너지의 저감, 사용중 칩과 공작물과 공구에 대한 환경적 영향, 열 및 소음발생 등 간접적인 영향도 포함한다.

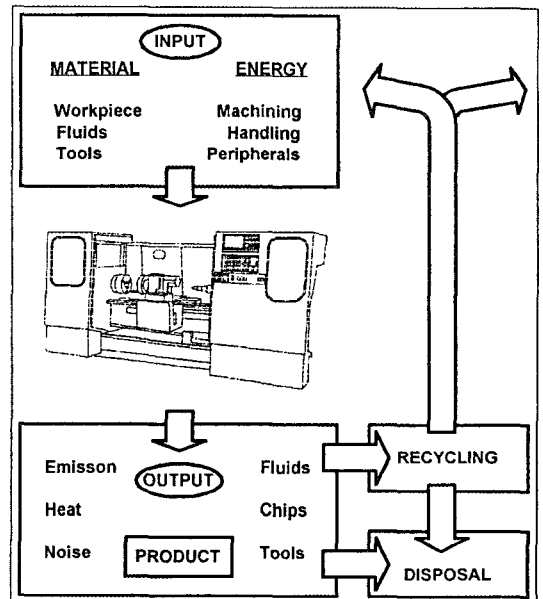


Fig. 1 Material/Energy Balance in Machining Process

공정의 이해 및 분석 후에는 청정기술의 도입에 의한 공정의 개선을 이룰 수 있을 것이다. 절삭공정의 경우 절삭 칩의 감소 및 재활용, 절삭력의 감소에 의한 사용 에너지의 저감, 절삭유 사용 및 손실의 저감과 재활용, 열 및 소음발생의 저감 등의 요인을 포함한다.⁽⁴⁾ 적용기술로는 신소재 및 코팅소재의 공구 개발, 가공조건의 개선, 절삭유제의 개선 등이 있다.⁽⁴⁾ 이러한 절삭 공정에서의 환경영향 평가 및 청정기술의 적용은 다음의 두단계로 나누어 도입할 수 있다.⁽⁵⁾ 첫 단계는 단일 작업 또는 가공방법에 대한 절삭공정이다. 가공물 재질이나 요구되는 가공정밀도 등의 주어진 가공환경하에서 단일 작업에 대한 공구의 형상 및 재질, 절삭유의 사용유무 또는 종류 선택, 칩배출량의 감소 등은 가장 간단하고 직접적으로 효과를 볼 수 있는 내용이다. 두 번째 단계는 단일 부품의 생산을 위한 전체 가공공정에 대한 고려이다. 하나의 부품을 가공하는 데는 보통 두 가지 이상의 가공방법이 사용되며 각각의 단위 가공방법에 대한 가공조건들을 전체 절삭공정의 환경영향을 고려하여 결정하는 것이다. 또한 이 단계에는 다음과 같은 두 가지 공정 선택도 포함한다. 하나는 여러 가지 가공방법중 가장 환경친화적인 대안을 선택하는 방법이다. 예를 들어 연삭보다는 절삭이 환경친화적인 가공방법이므로 가능한 한 절삭에 의한 가공정밀도를 높여서 연삭에 의한 다듬질을 생략하는 방법을 찾는 것이 바람직하다.⁽⁴⁾ 또한 waterjet이용 절삭 등 아직 기술개발이 미흡한 몇 가지 특수 가공방법은 재료손실, 에너지의 사용, 폐기물처리 등의 면에서 앞으로 각광받을 방법이며 범용 공작기계의 대체가 가능할 것이다. 다른 하나는 가공 순서의 최적화이다. 일단 사용해야 할 가공방법들이 정해지면 가능한 한 절삭에너지나, 칩배출, 절삭유제사용 등 환경부하가 큰 가공은 절삭량을 최소화하는 절삭순서로 공정을 최적화 할 수 있다.⁽⁵⁾

3. 절삭유제의 손실 모델

절삭가공의 특징중 하나는 높은 압력에서 공구와 공작물 사이의 접촉으로 인하여 마찰과 열을 발생시키는 것이다. 마찰은 공구의 급속한 마멸을 초래하고 열은 재료의 상변화등 조직적인 문제를 야기시킨다. 이러한 바람직하지 않은 영향을 감소시키기 위하여 대부분의 절삭가공은 절삭유제를 사용하여 가공표면을 순환하며 마찰을 감소시키고 공구와 공작물을 냉각하며 급속칩을 제거한다. 절삭공정에서 절삭유제는 다른 절삭조건들에 비하여 환경

및 인체건강에 영향이 가장 큰 요인으로 인식되고 있으며 생산성 면에서도 고려해야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다. 또한 절삭유 사용의 감소 및 효율적 관리는 현대의 생산설비에서 절삭의 경제성에도 영향을 미친다. 개별공급보다 경제적이고 청정차원에서도 우수한 중앙공급식 시스템에서 절삭유제 및 관련 비용은 전체 생산비용의 15% 이상을 차지한다고 보고되고 있다.⁽⁴⁾

절삭유제의 직접적인 환경부하 요인 중 가장 큰 유제의 손실량은 유제의 순환 및 가공 시의 손실로 나누어지며 절삭유제의 수명 이전에 보충하는 유제의 양과 같다. 유제가 적절한 순환시스템에 의하여 관리되고 있다고 가정했을 때 고려 대상인 가공 시의 손실 요인은 1) 가공재료 코팅, 2) 칩 코팅, 3) 대기 중 확산 등으로 다음과 같이 구성된다.

$$m_{loss} = m_{work} + m_{chip} + m_{evap} \quad (1)$$

가공재료 코팅량 m_{work} 은 절삭 후 절삭변수와는 무관하게 재료의 표면적에 따라 일정하며 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$m_{work} = C_r \rho t_f A \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유제의 밀도, t_f 는 유제의 코팅 두께, A 는 가공후 재료의 전체 표면적을 나타낸다. 또한 C_r 은 물에 대한 유제의 혼합 비율로 수용성 유제의 경우 일반적으로 약 0.05, 비수용성 유제의 경우 1이 된다.

밀링가공에서 칩 코팅에 의한 손실은 Fig. 2의 단일 칩의 표면적에 의하여 다음과 같이 구성된다.

$$m_{chip} = C_r \rho t_f (A_1 + 2A_2 + A_3 + A_4) N_c \quad (3)$$

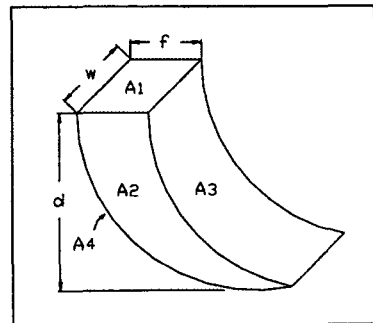


Fig. 2 Surface of Milling Chip

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

$$N_c = \frac{Vol}{fdw} \quad (4)$$

여기서 Vol 은 제품 하나당 절삭량, f 는 날당 이송량, d 는 커터의 반경방향 절삭깊이, w 는 커터의 축방향 절삭깊이를 나타낸다. Fig. 2의 칩의 각 방향 표면적 중 A_1, A_2 는 절삭 전후의 체적이 같다는 조건에서 쉽게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_1 = fw \quad (5)$$

$$A_2 = fd \quad (6)$$

칩의 표면적 A_3, A_4 는 Fig. 3으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$A_3 = wR(\theta_1 - \theta_2) \quad (7)$$

$$A_4 = wR(\theta_1 + \theta_2) \quad (8)$$

여기서 R 은 커터의 반경이며 Fig. 3의 θ_1, θ_2 의 기하적 관계에서부터 A_3, A_4 는 다음과 같이 표시된다.

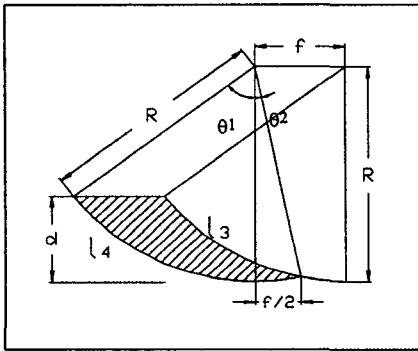


Fig. 3 Geometry of Milling Chip

$$A_3 = wR[\cos^{-1}(1 - \frac{d}{R}) - \tan^{-1}(\frac{f}{2R})] \quad (9)$$

$$A_4 = wR[\cos^{-1}(1 - \frac{d}{R}) + \tan^{-1}(\frac{f}{2R})] \quad (10)$$

그러므로 식 (4), (5), (6), (9), (10)에 의한 칩 코팅에 의한 손실량은 다음과 같다.

$$m_{chip} = C_r \rho t_f Vol [d^{-1} + 2w^{-1} + 2Rf^{-1}d^{-1} \cos^{-1}(1 - \frac{d}{R})] \quad (11)$$

기화에 의한 유체의 손실량은 에너지 평형조건으로부터 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 전단면과 공구상면(rake face)에서 발생하는 절삭 에너지는 95% 이상이 칩 또는 재료를 통한 열로 발산된다. 절삭에너지 전부가 열로 전환한다고 가정하면 이 에너지는 모두 절삭유체의 가열 및 기화에 사용되게 된다. 그러므로 기화에 의한 유체의 손실량은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$m_{evap} = C_r \frac{E}{C_p(T_{vap} - T_{\infty}) + H} \quad (12)$$

여기서 E 는 절삭에너지, C_p 는 절삭유체의 비열, T_{vap} 는 기화온도, T_{∞} 는 주위온도, H 는 기화잠열을 나타낸다. 절삭에너지는 절삭거리 간의 절삭력의 적분값이다. 절삭력을 나타내는 방법은 여러 가지가 있는데 절삭력 실험값의 회기분석에 의한 통계적 모델은 다음과 같이 절삭변수들로 구성된다.

$$F = C_F v^{\alpha} f^{\beta} d^{\gamma} w^{\delta} \quad (13)$$

여기서 C_F 는 절삭력 상수이고 v 는 절삭속도이다. 한편 절삭거리는 다음 식과 같다.

$$L = \frac{Vol}{dw} \quad (14)$$

밀링공정에서 절삭력은 칩의 커터방향 단면적에 비례하여 변하며 식 (13)의 모델은 일반적으로 커터의 일회전당 최고 절삭값들에 의한 모델이다. 칩의 단면적에 의한 절삭력 예측 모델은 정상 절삭상태의 경우 삼각파와 유사한 형상을 하고 있다.⁽⁷⁾ 그러므로 절삭에너지는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{Vol}{2} C_F v^{\alpha} f^{\beta} d^{\gamma-1} w^{\delta-1} \quad (15)$$

기화에 의한 유체의 손실량은 식 (15)를 (12)에 대입하여 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{evap} = C_r \frac{Vol C_F v^{\alpha} f^{\beta} d^{\gamma-1} w^{\delta-1}}{2[C_p(T_{vap} - T_{\infty}) + H]} \quad (16)$$

전체 유제손실량은 식 (1)에 의하여 식 (2), (11), (16)의 합과 같다. 식으로부터 유제손실량은 일차적으로 유종의 선택에 의한 유제의 물성에 따라서 조절되며 가공 계획 상의 절삭변수들인 절삭속도, 이송량, 절삭깊이에 의하여 최적화 할 수 있음을 알 수 있다.

4. 밀링공정에서의 유제 손실

제안한 모델을 사용하여 밀링공정에서의 유제손실을 평가하였다. Fig. 4의 제품을 완성하기 위한 밀링공정의 분석을 위하여 Zlaten등의 엔드밀링 실험 데이터를 사용하였다.⁽⁸⁾ 네 개의 날을 가진 12.7mm 지름의 M10 고속도강 엔드밀로 경도 217 BHN의 4340강을 Table 1과 같은 절삭조건으로 황삭하여 15개의 절삭력 실험 데이터를 얻었다. 가공시 절삭유제는 1:20으로 희석하여 사용하므로 Table 1의 절삭유제의 물리적 성질들은 물을 기준으로 설정하였다. 유막의 두께는 표면거칠기, 유제의 점도 및 하중 등에 의하여 변화하며 표면 거칠기보다 매우 크다.⁽⁹⁾ 여기서는 절삭유제가 저장용기 등에서 충분히 희석되었다고 가정하고 제품의 경우 표면거칠기를 고려하여 30 μ m, 칩의 경우 0.3 μ m로 유막의 두께를 각각 설정하였다.

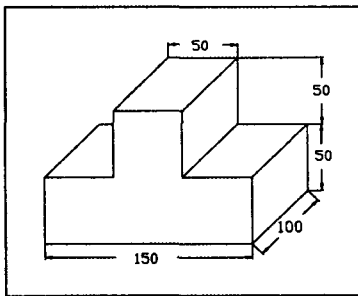


Fig. 4 Workpiece Geometry of Case Study

Table 1. Machining Test Conditions Data

Workpiece Volume (mm ³)	150 × 100 × 100				
Cutting Volume (mm ³)	500000				
Cutting Fluid	Chemical Emulsion (1:20) Density: 0.001 (g/mm ³) Specific Heat: 4.2 (KJ/KgK) Latent Heat: 2438 (KJ/Kg) Vaporization Temp: 373 (°K) Ambient Temp: 298 (°K)				
Speed (m/min)	30.48	38.10	45.72	53.34	60.96
Feed (mm/tooth)	.0381	.0508	.0635	.0762	.1016
Radial Depth (mm)	1.524	2.032	2.540		
Axial Depth (mm)	12.7	25.4	38.1		

가공재료 코팅에 의한 유제 손실(m_{work})은 식 (2)로부터 0.1008g이 되며 칩 코팅에 의한 손실은 식 (11)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$m_{chip} = 0.0072[d^{-1} + 2w^{-1} + 12.7f^{-1}d^{-1} \cos^{-1}(1 - \frac{d}{6.35})] \quad (17)$$

식 (17)은 단순 감소 함수로 최대 절삭 이송량, 최대 절삭 깊이 및 폭에서 최소 유제손실을 얻게 된다.

한편 실험에 의하여 얻어진 절삭력 데이터를 회기분석하여 다음과 같은 절삭력 모델을 얻었다.

$$F = 97.23v^{-0.1384} f^{0.4508} d^{0.6559} w^{0.6894} \quad (18)$$

식 (18)을 식 (16)에 대입하면 기화에 의한 유제손실 모델은 다음과 같다.

$$m_{evap} = 4.1534v^{-0.1384} f^{0.4508} d^{-0.3441} w^{-0.3106} \quad (19)$$

유제손실량을 최소화하는 최적 절삭변수를 구하기 위하여는 식 (1)을 목적함수로 하고 Table 1의 변수범위를 구속조건으로 하는 최적화 문제를 구성하여 풀면 된다. 풀이과정을 간단히 하기 위하여 Table 1의 변수범위의 최대값, 최소값, 중간값에 대한 81개의 유제손실량 데이터를 생성하였다. 절삭속도와 이송량의 경우 각각 5개의 조건이 실험에서 사용되었는데 데이터 생성에서는 변량 분석을 고려하여 같은 간격을 갖는 (30.48, 45.72, 60.96)과 (.058, .0762, .1016)을 최대값, 중간값, 최소값으로 사용하였다. Fig. 5는 칩 코팅에 의한 손실량 및 기화에 의한 손실량을 각각의 변수에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 변수가 아닌 나머지 절삭조건 들은 최대값으로 지정하였다. 최소 유제손실량 m_{loss} , m_{chip} , m_{evap} 은 Table 2와 같이 나타난다. 표에서와 같이 절삭속도, 이송량, 절삭깊이, 폭의 최대값에서 전체 유제손실량은 0.6291g이 되며 희석비율에 따라 12.58g의 혼합수가 사라지게 된다. 칩 코팅에 의한 손실은 절삭속도와 관계없이 최대 값들에서 최소가 되며 기화에 의한 손실은 최소 이송량에서 최소가 되는 것이 특이하다. 전체적으로 칩 코팅에 의한 손실량이 기화에 의한 손실량보다 많으나 절삭속도, 이송량, 절삭깊이가 커질수록, 그리고 절삭폭이 작아질수록 그 차이가 적어지므로 환경영향을 평가할 때 수계 및 대기 오염도의 중요성에 따라 유의할 필요가 있다.

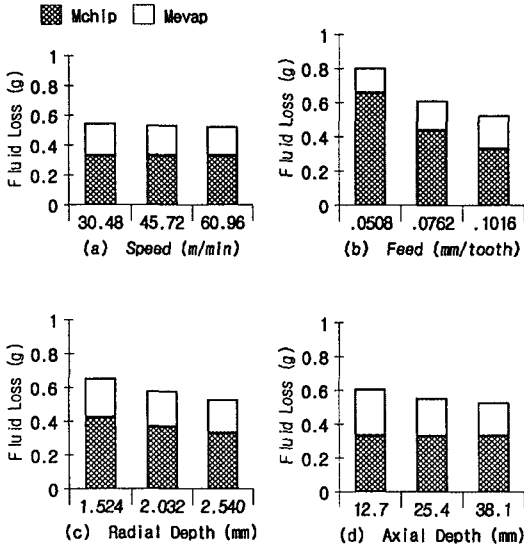


Fig. 5 Plot of Fluid Loss to Cutting Variables (Setting other variables maximum)

Table 2. Machining Parameters for Minimum Fluid Loss

	m_{chip}	m_{evap}	m_{loss}
Speed (m/min)	-	60.96	60.96
Feed (mm/tooth)	0.1016	0.0508	0.1016
Radial Depth (mm)	2.540	2.540	2.540
Axial Depth (mm)	38.1	38.1	38.1
Mass (g)	0.3318	0.1438	0.6291

절삭변수들의 유제손실에 대한 기여도를 평가하기 위하여 SAS를 이용하여 변량분석(ANOVA)을 실시하였다. 또한 최소 손실을 위한 변수의 최적값을 위하여 95% 유의수준에서 Duncan mean test를 실시하였다. Table 3에 그 결과를 보여준다. 칩 코팅에 의한 손실량은 이송량과 절삭깊이의 영향이 크고 그 중에서 이송량의 영향이 절대적이다. mean test에서 보듯이 손실량은 절삭속도와 절삭폭과는 관계없이 이송량과 절삭깊이가 커질수록 작아진다. 기화에 의한 손실은 모든 절삭변수가 영향이 큰 요소이고 그 중에서도 절삭폭의 영향이 제일 크다. 기화에 의한 손실량은 이송량이 작을수록 그리고 다른 변수들은 커질수록 작아진다. 전체 손실량은 모든 절삭변수가 영향이 큰 요소이고 이송량의 영향이 제일 크다. 이것은 기화에 의한 손실보다 칩 코팅에 의한 손실량이 크기 때문인 것으로 생각된다. 한편 전체 손실량은 모든 변수들

Table 3. Results of ANOVA and Mean Test

(a) m_{chip}

	F value	Pr > F	mean test
Speed	0	1.0000	
Feed	3673.46	0.0001	max
Radial Depth	447.45	0.0001	max
Axial Depth	0.02	0.9841	

(b) m_{evap}

	F value	Pr > F	mean test
Speed	96.05	0.0001	max
Feed	979.12	0.0001	min
Radial Depth	321.58	0.0001	max
Axial Depth	1265.03	0.0001	max

(c) m_{loss}

	F value	Pr > F	mean test
Speed	14.92	0.0001	max
Feed	2823.99	0.0001	max
Radial Depth	892.11	0.0001	max
Axial Depth	200.30	0.0001	max

이 커질수록 작아진다. 변량분석 결과는 위의 최적화 결과와 모두 일치함을 알 수 있다.

유제손실을 고려한 절삭조건 결정 결과를 기존의 절삭경계성에 의한 절삭조건 최적화와 비교하여 보았다. 참고문헌 [8]의 공구수명 데이터로부터 공구수명 모델은 다음과 같이 얻어진다.

$$T = 42.91v^{-1.1253} f^{-1.3160} d^{-0.7360} w^{0.1406} \quad (20)$$

작업자 임금을 80원/min, 공구비 2000원, 공구교환시간 2분으로 보았을 때 주어진 부품을 가공하는데 환경영향을 고려한 최적조건에서 가공을 행하였을 경우 절삭비용은 적용 대상 부품당 약 3000원이 소요된다. 한편 유제 한 드럼당 40만원으로 추산하였을 때 유제손실과 관련된 유제비, 세척비 등의 비용은 2원 이하로 실제 절삭비용과 비교하여 상당히 작다. 유제보충 주기의 연장 등에 의한 생산성 향상이나 관심이 증대되고 있는 작업환경 개선의 관점에서 생각하였을 때 전체 가공비용에 대한 그 비중은 점점 커질 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 가공공정의 전과정 평가를 위한 물질/에

너지 수치 분석 및 환경을 고려한 가공 공정설계의 첫 단계로서 절삭가공 중에 필연적으로 발생하는 절삭유제의 손실을 환경영향의 관점에서 분석하였다. 밀링가공에 있어서 제품 및 칩 코팅과 기화에 의한 손실을 여러 가지 절삭변수들에 의하여 모델링하고 최적 절삭조건을 구하였다. 최적 절삭조건을 구하는 기존의 절삭경제성 면에서 보았을 때 유제손실과 관련되는 유제비, 세척비 등의 비용은 실제 절삭비용과 비교하여 상당히 작다. 그러므로 경제성 측면 만에서는 제한한 모델을 사용하여 현 상황에서 실제 현장에 적용할 수 있는 최적조건을 제시하기에는 무리가 있다. 그러나 앞으로 환경영향에 대한 부담은 정책상 또는 관리적인 측면에서 고려하지 않을 수 없을 것이며 비용적인 면에서도 상당히 증가할 것으로 예상된다. 그런 의미에서 제안된 모델은 일반적인 밀링공정의 환경평가를 위한 정형화된 분석 기법으로 사용될 수 있을 것이다.

ANOVA test 결과를 보면 칩 코팅에 의한 손실은 이송량에 의한 영향이 절대적이며 절삭깊이의 영향도 커서 둘 다 가능한 한 큰 값을 적용하는 것이 바람직하다. 기화에 의한 손실은 절삭력 모델에 따라 달라지겠지만 현 적용 대상에서는 절삭폭의 영향이 가장 크고 이송량을 줄이는 것이 바람직하다. 양적인 면에서 코팅 손실량은 기화량에 비교하여 수배에 이르고 있으나 직접적인 비교에 의하여 최적화 하기는 어렵다. 코팅손실의 세척 및 기화시 발생하는 대기 및 수계 오염도를 분석하고 또한 대기 및 수계 오염도의 상대적인 중요성을 검토하여 가중치를 부여하여야 한다.

참 고 문 헌

1. 허탁, 안중우, 정재춘, 전과정 평가의 기본원리, 한국경영자총협회, 1995.
2. Kainz, R., et al., "Life Cycle Management at Chrysler," Pollution Prevention Review, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
3. 장윤상, "청정 절삭 가공을 위한 절삭유제의 선택," 청정기술학회지, 제2권, 제2호, pp. 165-175, 1996.
4. Byrne, G. and Scholta, E., "Environmentally Clean Machining Processes - A Strategic Approach," Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 471-474, 1993.
5. Sheng, P. and Srinivasan, M., "Multi-Objective Process Planning in Environmentally Concious Manufacturing: A Feature-Based Approach," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 433-437, 1995.
6. Munoz, A. and Sheng, P., "An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Processes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 53, No. 3-4, pp. 736-758, 1995.
7. Fu, H., et al., "A Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 81-88, 1984.
8. Zlatin, N., Field, M., Tipnis, V. A., Buescher, S., Garrison, R. C., and Kohis, J. B., Establishment of Production Machinability Data, Air Force Materials Laboratory Report, AFML-TR-75-120, 1975.
9. 윤활공학, 정문출판, 1991.
10. 절삭유제와 연삭유제, 한국유화시험검사소, 1988.
11. SAS User's Guide: Statistics, SAS Institute Inc., Cary, NC, 1985.