

환경영향을 고려한 절삭공정의 평가 및 최적화

장윤상*

Evaluation and Optimization of Machining Process Considering Environmental Effects

Yoonsang Chang*

ABSTRACT

A method is developed to evaluate machining process and to determine the optimal machining conditions considering the environmental effects. The method is based on the evaluation attributes from the general LCA programs and the analysis technique of AHP from HHS. To assist the analysis, the mass models of cutting energy, tools, and fluids are developed. The models may be used for both quantitative prediction of the uses and disposed masses of materials and optimization of the machining conditions. The algorithm with the mass models is applied to the milling process planning. The process to survey the environmental data, calculate the used mass, and evaluate the alternatives is demonstrated. This demonstration illustrates the effect of the change of process conditions on the decision making.

Key Words : Clean Technology (청정기술), Environmental Impact (환경 영향), Optimal Machining Condition (최적 절삭 조건), Machining Process Planning (절삭공정계획)

1. 서론

산업 전반에 걸친 환경규제에 의하여 도입된 청정생산의 개념은 환경문제를 폐기물의 사후처리가 아닌 공정의 개선에 의한 물질 사용 및 폐기물 배출의 저감으로 해결하는 것이다. 가공공정 설계 분야에서의 청정기술은 비교적 새로운 것으로 주로 절삭가공을 연구 대상으로 하고있다. 청정절삭의 개념정립, 환경을 고려한 새로운 모델링, 물질수지 작성 및 환경영향 평가 기법 등에서 연구가 활발히 진행되고 있으며 대표적으로 Byrne 등은 환경친화

적 절삭공정의 개념을 소개하고 몇가지 미래의 연구 개발 항목들을 제시하였다.⁽¹⁾

모든 제품은 생산에서 폐기물이 될 때까지 어떤 형태든 환경부하를 일으키는데 이 환경부하 요소를 정량적, 종합적으로 평가함으로써 환경성을 개선시킬 수 있는 기회요인을 파악할 수 있다. 이러한 환경문제의 총체적인 분석 도구로서는 전과정평가(LCA) 방법이 제시되고 있다. ISO14040에서 제공하는 LCA의 분석방법은 목적 및 범위 설정, 목록 분석, 영향평가, 결과해석의 네 단계로 구분하고 있다.⁽²⁾ 현재 목록분석 및 영향평가의 초보단계까지

* 수원대학교 기계공학과

방법론이 개발되어 있으나 여러 가지 기법을 적용한 기존의 시스템들은 환경부하 계산 방법 및 고려하는 요소들에서 차이가 있는 등 아직 완성된 것이 아니다. 또한 다양한 제품에 대한 환경성 평가 자료가 축적되어 있으나 이 자료가 공개되지 않기 때문에 결국 공공기관에서 발표하는 환경영향 자료를 바탕으로 독립적인 데이터베이스를 구축하여야 한다.

정확한 평가를 위해서는 영향범주를 설정하고 고려하여야 할 목록항목을 지정하는 것이 중요하다. 미국의 환경청(EPA)은 영향범주를 생태계 및 인간보건에의 영향과 천연자원의 사용 등 세 가지로 분류하고 고려해야 할 목록항목물질을 제시하였다.⁽³⁾ LCA의 여러 평가기법들은 대부분 대안들의 환경영향을 계산하고 우선 순위를 결정하는 평가요소로써 이러한 영향범주 및 목록항목을 따르며 보통 항목 중에서 중요하다고 생각되는 일부분만 사용하고 있다. 참고문헌 [4]에서는 기존의 개발된 HHS, MIPS, SEP, SPI, SETAC, EPS 등 6가지의 대표적인 평가방법에서 사용하고 있는 항목 및 특징을 여러 가지 면에서 비교하였다.

평가에 있어서 문제점 중 하나는 각각의 다른 기준들에 의하여 결정된 정량적, 정성적인 평가항목들을 "trade-off"에 의하여 특정항목에 가중치를 주거나 대표물질에 대한 환경부하 지수화 등의 방법으로 단일의 점수 또는 결정으로 유도하여야 한다는 것이다. 가중치는 작업환경이나 생태계 환경부하 등 평가기법의 목표에 따라 다르며, 가중치를 주는 방법도 여러 가지 의사결정 방법을 사용하고 있다. 또한 물질의 상대적인 지수화는 대표적인 독성물질들을 중심으로 자료가 만들어져 있기 때문에 전체 투입/배출 물질에 대한 지수화는 불가능하다. 그러므로 평가 결과는 사용된 평가 항목 및 기법에 따라 다른 최적의 대안을 가질 수 있다.

Sheng 등에 의하여 시도된 기존의 절삭공정의 환경영향 평가는 Health Hazard Scoring(HHS)를 사용하고 있다. HHS는 오염을 유발할 가능성이 있는 물질의 직업적 건강과 위험성에의 영향 평가에 초점을 맞추고 있다.^(5, 6, 7, 8, 9) 또한 HHS는 분석기법으로 Analytic Hierarchy Process(AHP)를 사용하여 단일 값으로 지수화된 대안들의 환경영향 값은 최적의 대안 결정을 가능케 한다.⁽⁴⁾ 공정의 사용물질을 구강독성, 흡입독성, 발암성, 화학 반응성, 발화성, 눈 자극성, 피부자극성 등 7가지 유해 요소에

대하여 지수화로 평가하고 또한 7가지 유해요소도에 따라 중요성을 쌍선호비교에 의하여 지수화하여 분석한다. HHS의 단점은 공정에서의 영향만 고려하고 폐기시나 환경오염을 고려하지 않으므로 다른 평가기법에 비하여 범위가 좁다는 것이다. 또한 평가결과에 차례성을 나타내며 상대적인 유해성으로서 절대적인 양으로 나타내는 것이 불가능함에도 불구하고 무리하게 정량적으로 분석하였다. 그러나 HHS는 분석방법으로 사용되는 AHP가 단순하여 비전문가도 쉽게 사용할 수 있으며 평가에 필요한 비교적 자료를 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 그 간의 연구 결과를 바탕으로 주요 가공법 중 하나인 절삭공정에서의 환경영향을 평가하여 최적의 가공조건을 선택하는 방법을 제시한다. LCA의 기존 방법들은 여러 가지 제약과 복잡성으로 가공공정에 바로 사용하기에는 문제가 많으므로 가공공정의 평가에 알맞은 알고리즘을 제시한다. 평가를 위해서는 사용되는 에너지 및 물질과 배출되는 물질에 대한 자료가 필요하다. 환경 및 인체 영향에 대한 자료를 위하여 절삭공정에서 고려하여야 하는 유해성 목록을 작성한다. 또한 에너지와 사용되고 배출되는 물질의 양을 절삭조건에 대하여 모델링하여 정량적인 예측을 가능케 한다. 개발된 모델 및 평가 알고리즘을 밀링공정에 적용한다. 문헌으로부터 환경 자료를 조사하고 모델로부터 사용 및 배출량을 예상하여 공정 관리자의 판단에 따라 환경영향을 최소화하는 최적의 가공조건 결정과정을 예시한다.

2. 환경영향 평가 알고리즘

본 평가는 LCA와 같이 단일 제품의 전과정이 아니고 제조공정의 한 단계인 단일 절삭공정을 대상으로 한다. 그러므로 투입물질의 전 처리단계는 고려하지 않고 공정 내에서 사용되고 발생하는 투입물질의 환경부하 관련 요소 및 양을 주로 분석하며 후 처리단계의 환경부하는 공정에서 발생하는 부하량과 관련이 있으므로 최적 가공조건의 결정을 위하여 이차적으로 고려한다. 가공공정에서 물질수지의 정량적 분석은 각각의 절삭요소에 대한 환경부하 평가로 연결된다. 절삭가공에는 재료, 공구, 절삭 및 작동 유제 등의 물질과 가공 및 물질 취급에 필요한 에너지가 사용된다. 또한 가공제품 외에 칩, 유제, 폐공구, 열, 소음 등이 배출되며 이 중 일

부는 재사용/활용되고 나머지는 폐기물로써 환경부하의 직접적인 원인이 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 환경평가의 제일 큰 문제점은 평가항목을 위한 자료가 단일 기준에 의하여 작성되어 있지 않고 데이터 량도 절대적으로 부족하다는 것이다. 48개 금속가공유에 대한 조사결과를 보면 물질안전 보건자료(MSDS)도 기유와 첨가제에 대한 구체적인 정보가 없고 첨가제 및 방부제의 성분, 발암성 등에 대한 정보가 전혀 없었다.⁽¹⁰⁾ 따라서 화학물질의 정확한 함유물질 및 조성비에 대한 정보가 우선 필요하며 다음에는 각각의 성분들에 대한 신뢰할만한 환경자료의 획득이 필요하다. 화학물질들의 환경 Handbook들은 그 동안의 실험 연구 결과로 발표된 많은 자료들을 포함하고 있다.^(11, 12, 13) 문제는 모든 물질들에 대한 자료를 얻는다는 것이 불가능하며 실험자료가 있는 성분들도 모든 평가항목에 대한 값이 있지 않고 같은 항목에 대한 자료도 실험조건이 달라서 절대적인 비교가 불가능하다는 것이다.

자료가 불완전한 현 시점에서 절삭공정의 환경영향 평가를 위해서는 충분치 않은 정량적 자료와 평가가 어려운 정성적 자료를 함께 분석하는 방법이 필요하다. 계량분석적인 의사 결정 모델에 가능한 정성적인 요소들을 포함시키는 방법으로 다요소 의사결정 기법이 대표적인 방법이다.⁽¹⁴⁾ 다요소 의사결정 기법에서 요인 j 에 대한 대안 i 의 평가치를 S_{ij} 라 하고 요인 j 에 대한 가중치를 W_j 라고 했을 때 최종적 평가치 R_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \sum W_j S_{ij} \quad (1)$$

여기서 평가치 S_{ij} 와 가중치 W_j 를 어떻게 구하느냐에 따라 다요소 의사결정 기법이 분류된다. 가장 간단하고 대표적인 방법은 가중치법이며 가중치를 결정하는 방법 중 하나가 근래에 많이 사용하는 AHP 기법이다. AHP 기법에 따라 Fig. 1과 같이 계층적 의사 결정 구조를 구성하였다. 평가요소는 물질 사용, 에너지 사용, 대기오염, 수질오염, 인체 영향으로 한다. 일반적인 배출물 평가에서 고려하는 토양 오염은 가공공정의 경우 대기와 수질을 통하여 이차적으로 이루어지기 때문에 평가요소에서 제외하였다. 또한 공정에서의 작업자의 건강에 대한 직접적인 영향이 크기 때문에 인체영향 항목을

추가하였다. 대기 및 수질 오염도 궁극적으로는 인체에 대한 영향이 이루어지지만 작업장 환경에 비하여 간접적인 영향으로 볼 수 있다. 그러므로 광화학 산화물 생성, 지구 온난화, 오존 감소, 산성화, 부영양화 등에 영향을 끼치는 요인은 대기 및 수질 오염으로, 발암성, 흡입독성 등 인체에 직접적인 영향을 끼치는 요인은 인체영향 항목으로 분리하여 평가한다.

평가요소는 일차적으로 에너지 사용, 물질사용, 환경영향으로 나누고 이차적으로 환경영향을 대기오염, 수질오염, 인체영향으로 나누었다. 그 이유는 작업장의 관리 상태나 관리자가 중요하게 고려하는 요소에 따라서 평가요소간의 가중치를 다르게 줄 수 있도록 하기 위함이다. 즉, 일차적인 평가는 환경 전문가에 의하여 절삭공정에서의 input/output 물질을 고려하여 결정되고 이차적인 평가는 공정 관리자에 의하여 조정될 수 있도록 한다. Table 1은 작업장의 환경 및 공정의 관리 상태에 따른 가중치의 조정 방법이다.

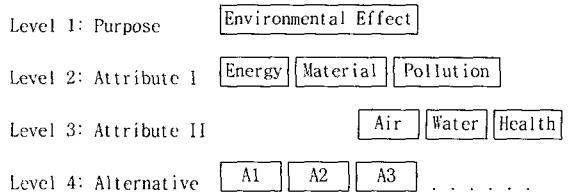


Fig. 1 Hierarchy Structure for Decision Making

Table 1 Compensation of the Weights for Attribute II

Good Management		Weight Reduction
Personal Protect Equipment		Health
Air Ventilation Equipment		Health
Hood Filtration Equipment		Air
Fluid Circulation/Chip, Floor Cleaning		Water
Machine Isolation		Air
Oil-Based Cutting Fluid	Disposal Equipment	Air
	Recycling	Air
	Residue Treatment	Air/Water
Water-Miscible Cutting Fluid	Chemical/Dilution	Water
	Recycling	Water
	Residue Treatment	Air/Water

대안간의 가중치를 결정할 때 고려하여야 하는

환경자료는 문헌에 따라 상당히 다양하게 주어진다. 모델에 의한 사용되고 배출되는 량과 기존의 LCA에서 고려하는 요인들 및 문헌에서 제공되는 자료를 기본으로 고려하여야 할 정성적 또는 정량적인 환경 및 인체 영향 자료를 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2 Evaluation Factors and Criteria

Factors	Criteria
Energy	Cutting Energy Usage Effect of Electricity Generation ⁽¹⁾
Material	Tool and Cutting Fluid Usage, Material Production Process, Resource Depletion
Air Pollution	Oil Mist, VOC Mass Pollution ⁽²⁾ Photochemical Oxidant Creation Global Warming Stratospheric Ozone Depletion Acidification O.I.(Odor Index) ⁽³⁾
Water Pollution	Cutting Fluid Usage, Heavy Metal Suspended/Hard to Degradation Material Pollution ⁽²⁾ Acidification Eutrophication BOD(Biological Oxygen Demand) COD(Chemical Oxygen Demand) FOG(fat, oil, grease) TOC(Total Organic Carbon)
Health Effect	Tool and Cutting Fluid Usage Toxicity TLV-TWA ⁽⁴⁾ LD50(Lethal Dose 50% Kill) ⁽⁵⁾ LC50(Lethal Concentration 50% Kill) ⁽⁶⁾ Carcinogenicity ⁽⁷⁾ NFPA rating ⁽⁸⁾

- (1) CO₂ 발생 정도
- (2) CO, CO₂, VOC, CH₄, NO_x, CFC 등 발생 가능성
- (3) 100% 냄새인식 한계값에 대한 vapor pressure
- (4) 1일 8시간 작업 기준으로 20년동안 질병을 일으키지 않은 시간 평균의 유해요인 측정 상한 농도
- (5) 흡입이외의 경로에 의한 동물 폭로 실험에서 50%가 사망할 최저 치사 농도값
- (6) 호흡기를 통한 동물 폭로 실험에서 50%가 사망할 최저 치사 농도값
- (7) 실험동물에 대상물질을 거의 일생동안 투여하면서 병리 조직학적 검사로 암의 유발인자를 관찰한 것
A1: 확인된 인체 발암성 물질
A2: 추정되는 인체 발암성 물질
B1: 밝혀지진 않았으나 충분한 증거를 찾은 물질
B2: 충분치는 않으나 추정되거나 불확실한 물질
C: 가능한 발암물질
D: 발암물질로 분류할 수 없는 물질
E: 비 발암 물질
- (8) 미국 national fire protection association rating으로 health, flammability, reactivity를 유해성의 크기에 따라 0부터 4까지 지수화

3. 절삭공정의 환경부하 모델

절삭공정의 환경 평가를 위해서는 공구와 절삭 유제 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.

3.1 절삭 에너지

절삭공정에서 사용되는 에너지는 기계를 운영하기 위하여 사용되는 작동 에너지와 공구에 의하여 재료를 분리하는 절삭 에너지로 나눌 수 있다. 유제펌프의 작동이나 감속기어 사이의 마찰 등으로 사용되는 작동 에너지는 절삭조건에 관계없이 거의 일정하다고 보았을 때 여러 가지 절삭조건에 의하여 변하는 절삭 에너지는 절삭조건에 의한 모델링을 통하여 최소화가 가능하다. 절삭에너지는 절삭거리 간에서 절삭력의 적분값이다.

$$E = \int FdL \quad (2)$$

여기서 E 는 절삭에너지, F 는 절삭력, L 은 절삭거리이다. 절삭력을 나타내는 방법은 여러 가지가 있는데 한가지 방법은 공구동력계를 이용한 절삭력 실험값을 회기분석에 의한 통계적 모델로 나타내는 것이다. extended Taylor model 형의 절삭력 모델은 절삭변수들에 의하여 다음과 같이 구성된다.

$$F = C_F v^a f^b d^c w^d \quad (3)$$

여기서 C_F 는 절삭력 상수, v 는 절삭속도, f 는 날당 이송량, d 는 커터의 반경방향 절삭깊이, w 는 커터의 축방향 절삭깊이를 나타낸다. 한편 절삭거리의 제품 하나당 절삭량 V 에 의하여 다음 식과 같다.

$$L = \frac{V}{dw} \quad (4)$$

그러므로 선삭과 같은 연속절삭의 경우 절삭에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$E = VC_F v^a f^b d^{r-1} w^{\delta-1} \quad (5)$$

밀링공정에서의 절삭력은 칩의 커터방향 단면적에 비례하여 변하며 식 (3)의 절삭력 모델은 일반적으로 커터의 일회전 당 최대 값들에 의한 모델이다. 여러 가지 절삭력 실험 논문을 분석한 결과 칩의 단면적에 의한 절삭력 예측 모델은 정상 절삭상태의 경우 삼각파와 유사한 형상을 하고 있다.⁽¹⁵⁾ 그러므로 밀링공정에서의 절삭에너지는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} VC_F v^a f^b d^{r-1} w^{\delta-1} \quad (6)$$

3.2 절삭공구

절삭공구의 사용량은 절삭가공 중 손실되는 마모량과 공구수명에 의하여 폐기되는 공구팁의 양으로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$m_{tool} = m_{wear} + m_{disp} \quad (7)$$

정확한 마모량을 계산하기 위해서는 경사각 및 여유각 등의 공구형상과 마모에 대한 측정 자료가 필요하다. 보통 마모량은 폴랭크 마모 폭과 크레이터 마모 깊이로 나타내기 때문에 길이에 대한 자료는 구하기 힘들고, 또한 공구마모량은 폐기시의 전체 팁의 질량에 비하여 상당히 미세하므로 무시하기로 한다.

폐기 공구량을 구하기 위해서는 공구수명과 절삭시간 모델이 필요하다. 제품 하나당 절삭시간은 절삭률에 대한 전체 절삭량이며, 다인공구의 날의 개수를 고려할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_m = \frac{\pi DV}{1000 n_r v f d w} \quad (8)$$

여기서 D 는 선삭의 경우 재료의 지름, 밀링의 경우 공구의 지름이며, n_r 는 다인공구의 경우 날의 개수이다. 수명이 다하였을 때 폐기되는 공구의 수 n_t 는 몸통일체형일 경우에는 1, 팁일 경우에는 n_t 가 된다. 한편 수명이 다한 공구는 재연삭하여 사용하는 경우가 많은데 재연삭시는 연삭량을 사용중의 손실 마모량으로 무시하고 재사용후 공구의 폐

기시까지의 시간을 공구수명으로 하며 팁을 사용하는 공구는 한 쪽 절삭날이 마모되었을 경우 돌려끼워서 사용할 수 있으므로 팁 당 날의 개수를 고려하여야 한다. 재연삭 사용 횟수를 n_R , 팁의 날의 수를 n_e 라고 할 때 제품하나당 공구사용량은 폐기 또는 재연삭까지의 공구팁의 수명(T)에 대하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_{tool} &= n_T m_t \left(\frac{1}{n_R n_e} \right) \frac{t_m}{T} \\ &= n_T m_t \frac{\pi DV}{1000 n_R n_e n_t v f d w T} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 m_t 는 일체형 공구 또는 공구 팁 하나의 질량이다.

3.3 절삭유제

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

$$m_{fluid} = m_{oper} + m_{cir} + m_{life} \quad (10)$$

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

$$m_{oper} = m_{work} + m_{chip} + m_{evap} \quad (11)$$

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

$$m_{work} = C_r \rho t_f A \quad (12)$$

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 혼합 비율이며 비수용성 유제의 경우는 1이 된다.

유제의 칩 코팅 손실량 모델은 밀링공정의 경우

참고문헌 [15]에서 이미 제안하였으며 다음 식과 같다.

$$m_{chip} = C_r \rho t_f V [d^{-1} + 2w^{-1} + 2Rr^{-1}d^{-1} \cos^{-1}(1 - \frac{d}{R})] \quad (13)$$

한편 선삭에서의 연속 칩은 다음과 같은 단면적을 갖고 있다.

$$A = 2(fL + dL + fd) \quad (14)$$

여기서 f 는 재료 1회전당 이송량이며 d 는 절삭 깊이이다. 칩의 길이 L 은 다음과 같이 표시된다.

$$L = \frac{V}{fd} \quad (15)$$

칩의 양쪽 끝단면적 fd 는 다른 면적에 비하여 상당히 작으므로 무시하면, 선삭시 칩 코팅 손실량은 (12)식과 같은 방법으로 다음과 같이 구성된다.

$$m_{chip} = 2C_r \rho t_f V (\frac{1}{d} + \frac{1}{f}) \quad (16)$$

기화에 의한 유제의 손실량은 에너지 평형조건으로부터 구할 수 있다.⁽⁵⁾ 전단면과 공구상면에서 발생하는 절삭 에너지는 95% 이상이 칩 또는 재료를 통한 열로 발산된다. 절삭에너지 전부가 열로 전환한다고 가정하면 이 에너지는 모두 절삭유제의 가열 및 기화에 사용되게 된다. 절삭온도는 유제를 기화시키기에 충분히 높으므로 기화에 의한 유제의 손실량은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.⁽⁵⁾

$$m_{evap} = C_r \frac{9.8E}{C_p(T_{vap} - T_{\infty}) + H} \quad (17)$$

여기서 E 는 절삭에너지, C_p 는 절삭유제의 비열, T_{vap} 는 기화온도, T_{∞} 는 주위온도, H 는 기화잠열을 나타낸다. 절삭에너지는 식 (5), (6)을 이용한다.

가공시 유제손실량은 일차적으로 유종의 선택에 의한 유제의 물성에 따라서 조절된다. 또한 손실량 모델 (11)은 절삭조건에 의하여 구성되었으므로 가공계획 상의 절삭변수들인 절삭속도, 이송량,

절삭깊이 등에 따라서 달라지며 손실량을 최소화하기 위하여 절삭변수들을 최적화 할 수 있음을 알 수 있다.

유제의 순환경로상에서 손실되는 양은 관리상태에 따라서 일정하며 절삭조건과 직접 관계는 없으나 절삭시간과는 비례관계가 있다. 또한 수명이 다하여 교환하여 주는 양은 절삭의 조건에 따라 성능의 저하정도가 관계가 있으나 실제 교환은 수용성 유제의 경우 부패, 비수용성 유제의 경우 열적 열화가 가장 큰 이유로 제품당 교환량은 역시 절삭시간과 비례한다. 그러므로 단위 제품당 순환 또는 유제 교환에 의한 소모량은 절삭시간과 관련된 가공작동률을 C_w 라고 할 때 유제의 보충 또는 교환 주기(T_{fluid}) 및 보충량 또는 교환량 (M_{fluid})에 의하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$m_{cir}, m_{life} = C_r \frac{t_m M_{fluid}}{C_w T_{fluid}} \quad (18)$$

4. 최적 절삭공정의 결정

밀링공정에서 최적의 절삭유제를 결정하기 위하여 제안된 환경영향의 평가 알고리즘 및 유제손실 모델을 적용하였다. Fig. 2의 제품을 완성하기 위하여 Table 3의 절삭조건을 적용하기로 한다. 절삭조건 및 공구수명과 절삭력은 Zlatin등의 엔드밀링 실험 데이터를 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 데이터는 네 개의 날을 가진 12.7mm 지름의 M10 고속도강 엔드밀로 경도 217 BHN의 4340강을 emulsion 형의 수용성 유제를 이용하여 황삭하였을 때 얻은 결과이다. 절삭조건은 수용성 유제를 사용할 때는 실험 조건의 중간값, 비수용성 유제를 사용할 때는 최대

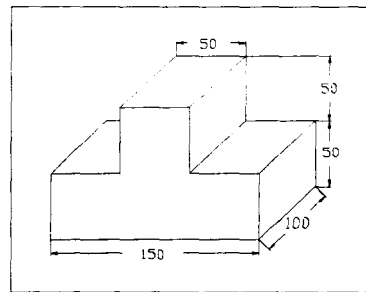


Fig. 2 Workpiece Geometry of Case Study

값을 적용하였다. 비수용성 유제를 사용하였을 경우의 공구수명 및 절삭력 데이터는 참고문헌 [16]에서 같은 절삭조건인 실험 데이터를 참고하여 수용성 유제와 비교하여 공구수명의 경우 2배, 절삭력의 경우 75%로 가정하였다. Table 4는 각 유제의 함유성분과 함유비율 및 분석에 필요한 물리적 성질을 나타낸다. 물리적 성질은 각 유제가 가장 많이 함유하고 있는 성분의 성질을 대표값으로 표시하였다. 가공시 수용성 절삭유제는 1:20으로 희석하여 사용한다.

재료와 칩표면에 잔류하는 유막의 두께를 알아보기 위하여 예비실험을 실시하였다. 재료를 유제에 담근 후 무게의 차이를 측정된 결과 비중 0.84의 비수용성 유제의 경우 0.042mm, 20:1로 희석한 수용성 절삭유 (비중 0.99)의 경우 0.034mm의 유막 두께를 나타냈다. 또한 비수용성 유제의 경우 재료 표면에 일정한 두께의 도포현상을 보였으나 수용성 유제의 경우 고르게 퍼지지 않고 뭉치는 현상을 보였다. 절삭유제가 저장용기 등에서 충분히 희석되었다고 가정하고 측정된 유막의 두께를 재료 코팅 손실량의 분석에 사용한다. 유막의 두께는 표면거칠기, 유제의 점도 및 하중 등에 의하여 변화하며 표면 거칠기보다 매우 크다.⁽¹⁷⁾ 칩의 표면거칠기는 재료와 비교하여 수 십분의 일 정도로 작으므로 칩의 유막두께는 비수용성 유제의 경우 0.0042mm, 수용성 절삭유의 경우 0.0034mm로 가정한다.

Table 5는 환경영향 모델에 의하여 구한 각 절삭요소의 사용량이다. 공구소모량을 계산하기 위한 공구의 질량은 66.35g, 기화에 의한 유제 손실량

Table 3 Machining Test Data

Workpiece Dimension(mm)	150 × 100 × 100
Cutting Volume (mm ³)	500000
Cutting Tool	High Speed Steel Fe(76%), W(18%),Cr(4%), V(1%)
Speed (m/min)	45.72 (Water-Miscible Cutting Fluid) 60.96 (Oil-Based Cutting Fluid)
Feed (mm/tooth)	.0762 (Water-Miscible Cutting Fluid) .1016 (Oil-Based Cutting Fluid)
Radial Depth (mm)	2.032 (Water-Miscible Cutting Fluid) 2.540 (Oil-Based Cutting Fluid)
Axial Depth (mm)	25.4 (Water-Miscible Cutting Fluid) 38.1 (Oil-Based Cutting Fluid)
Tool Life (min)	20 (Water-Miscible Cutting Fluid) 14 (Oil-Based Cutting Fluid)
Cutting Force (kg)	247 (Water-Miscible Cutting Fluid) 334 (Oil-Based Cutting Fluid)

을 위한 실온은 20℃이다. 또한 유제교환 손실량을 위한 유제수명은 비수용성의 경우 2년, 수용성의 경우 6개월이고 유제탱크 용량은 200l, 가공을 위한 기계작동률은 10%를 적용하였다.

Table 6은 각종 handbook에서 조사한 유제 성분 및 고속도강 성분들의 환경 및 인체 영향 자료이다. 서술적인 내용은 생략하고 정량적인 자료만 요약하였다. 일부 성분에 대한 자료는 문헌에 나와있지 않기 때문에 유사한 물질로 대체하거나 합성유의 경우는 대표적인 성분 물질을 조사하였다.

분석을 위하여 AHP방법에 따라 목표 및 요소들과 대안들을 Fig. 1과 같이 하나의 계층으로 구성하였다. 목표는 환경부하의 평가, 요소는 input의 에너지와 물질의 사용량 및 output의 환경영향으로 설정하고 이차적으로 환경영향을 대기, 수질 및 인체영향으로 분류하였다. 대안은 비수용성 유제를 사용한 공정을 A1, 수용성 유제를 사용한 공정을 각각

Table 4 Cutting Fluids Data

(a) Oil-Based Cutting Fluid

	Name	CAS #	%Comp.
Components	1,1,1 trichloroethane	71-55-6	90
	tert-butyl alcohol	75-65-0	2
	1,2-butylene oxide	106-88-7	2
	dimethoxymethane	109-87-5	2
	petroleum oil, aliphatic	68815-10-1	2
	vegetable oil, essential	104-55-2	2
Physical Properties	density(g/cm ³)	1.34	
	specific heat(KJ/KgK)	0.95	
	latent heat(KJ/Kg)	239	
	vaporization temp(°K)	347	

(b) Water-Miscible Cutting Fluid I

	Name	CAS #	%Comp
Components	naphenic oil	64742-52-5	81
	sodium petroleum sulfonate	68608-26-4	13
	tall oil fatty acids soap	61790-44-1	3
	diethylene glycol	111-46-6	2
Physical Properties	density(g/cm ³)	0.78	
	specific heat(KJ/KgK)	1.9	
	latent heat(KJ/Kg)	360	
	vaporization temp(°K)	354	

(c) Water-Miscible Cutting Fluid II

Components	Name	CAS #	%Comp.
	ethanolamine	141-43-5	10
	n-decanoic acid	26869-20-8	10
	aminomethylpropanol	124-68-5	10
	heptanoic acid	111-14-8	10
	pelargonic acid	111-05-0	10
	triethanolamine	102-71-6	10
	water	7732-18-5	40
Physical Properties	density(g/cm ³)	1	
	specific heat(KJ/KgK)	4.2	
	latent heat(KJ/Kg)	2257	
	vaporization temp(°K)	373	

Table 5 Usage of Energy and Materials

		Oil-based	Water -Miscible I	Water -Miscible II
Energy (kgf m)		863.4	1196.7	1196.7
Tool (g)		39.43	92.03	92.03
Cutting Fluid (g)	work coating	3.94	0.09	0.11
	chip coating	129.6	4.36	5.56
	evaporization	29.15	1.18	0.24
	change	21.2	7.9	10.1
	TOTAL	183.9	13.5	16.0

의 평가등급행렬은 다음과 같다.

A2, A3로 설정하였다.

평가 요소 및 대안들간의 가중치 선정을 위하여 환경 및 독성 분야 전문가 3인에게 쌍선호 비교를 의뢰하였다. Level II의 환경부하 가중치에 대한 비교 결과는 모두들 배출물의 환경영향에 큰 가중치를 주었다. 3개의 비교 결과 중에서 일관됨을 분석하여 높은 것을 채택하였으며 선택된 쌍선호 비교

$$\begin{bmatrix} E \\ M \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1/5 \\ 1/5 & 1 & 1/5 \\ 5 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 E, M, P는 각각 에너지 사용, 물질 사용, 환경영향 요소이다. 행렬 (19)의 각 열의 원소의 합을 구하면 (6.2, 11, 1.4)가 되며 행렬 (19)의 원소를 나누면 다음과 같이 정규화 된다.

Table 6 Environmental/Health Data

(a) Alternative I (Oil-Based)

component	1,1,1-trichloroethane	tert-butyl alcohol	1,2-butylene oxide	dimethoxymethane	petroleum oil, aliphatic	vegetable oil, essential	
analysis chemical					(component) n-octane	(component) oleic acid	
formula	CCl ₃ CH ₃	(CH ₃) ₃ COH	(CH ₃) ₂ CCH ₂ O	(CH ₃ O) ₂ CH ₂	CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃	CH ₃ (CH ₂) ₇ CHCH(CH ₂) ₇ COOH	
% comp	90	2	2	2	2	2	
air	mass	26.24	0.58	0.58	0.58	0.58	
	hazard	O.I 330	O.I 55900	O.I 260563		O.I 100	
water	mass	120.19	2.67	2.67	2.67	2.67	
	hazard		BOD nil COD 2.18 TOC 2.59			BOD35 2.33 TOC 10mg/l	BOD 0.17 COD 2.25
health	mass	165.50	3.68	3.68	3.68	3.68	
	carci.	C	D	A	D	D	
	hazard	rat LC50 24000ppm-1hr LD50 10.3g/kg man eye 500ppm-180min	rat LD50 3.5g/kg	rat LD50 0.5g/kg inhalation 400ppm-7hr	rat inhalation 4000ppm-6hr mouse LC50 18000ppm-7hr	mouse inhalation 6600ppm (30-90min)	golf fish LD 8mg/l fathead minnow LC50 205mg/l-96hr
	NFPA	3, 1, 1					

(b) Alternative II (Water-Miscible I)

component		Napthenic Oil	Sodium Petroleum Sulfonate	Tall Oil Fatty Acids Soap	Diethylene Glycol
analysis chemical		(component) cyclohexane	(substitution) laurylsulfate, sodium		
formula		C ₆ H ₁₂	CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OSO ₃ Na		O(CH ₂ CH ₂ OH) ₂
% comp		81	13	3	2
air	mass	0.96	0.15	0.04	0.02
	hazard	O.I 203000			
water	mass	3.60	0.58	0.13	0.09
	hazard	BOD35 2.39 TOC .02 mg/l			BOD 0.12-0.15 COD 1.06-1.49
health	mass	10.96	1.76	0.41	0.27
	carci.	D	D	D	D
	hazard	mouse LC50 18000ppm-1hr man eye 300ppm	fish(trout) LC50 2.85mg/l-10day		rat LD50 14.8 g/kg man lethal dose 0.5-2 g/kg
	NFPA	1, 3, 0			

(c) Alternative III (Water-Miscible II)

component		ethanol amine	n-decanoic acid	aminome thylpropanol	heptanoic acid	pelargonic acid	triethanol amine
analysis chemical			(substitution) n-decoic acid	(substitution) isopropanolamine			
formula		NH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH	CH ₃ CHOHCH ₂ NH ₂	CH ₃ (CH ₂) ₅ CO OH	CH ₃ (CH ₂) ₇ CO OH	N(CH ₂ CH ₂ OH) ₃
% comp		10	10	10	10	10	10
air	mass	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
	hazard	O.I 130			O.I 900	O.I 164000	
water	mass	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
	hazard	BOD 0.83 COD 1.27	BOD 9% ThOD COD 85% ThOD	BOD 5% ThOD		BOD 0.59	BOD 0.01-0.17 COD 1.5
health	mass	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
	carci.	D	D	D	D	D	D
	hazard	rat LD50 2.74g/kg inhalation 104ppm-5d*7hr	fish (notoxic)	rat LD50 4.26g/kg	mouse LD50 1.2g/kg	rat oral limit 3.2g/kg	rat LD50 9.11g/kg
	NFPA	2, 2, 0					

(d) Cutting Tools (HSS 18-4-1)

Component	CAS #	Health Data
Cr Compound	7740-47-3	Rat LC50 87mg/m3 TWA .05mg/m3 inhalation carci. A1
Fe-V Compound		TWA 1mg/m3 eye/inhalation impetus

$$\begin{bmatrix} E \\ M \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.161 & 0.455 & 0.143 \\ 0.032 & 0.090 & 0.143 \\ 0.806 & 0.455 & 0.714 \end{bmatrix} \quad (20)$$

이 행렬에 의한 가중치 벡터는 각 행의 산술 평균으로 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} E \\ M \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.09 \\ 0.66 \end{bmatrix} \quad (21)$$

같은 방법으로 에너지, 물질, 대기, 수질, 인체의 5 요소 각각에 대하여 대안들 사이의 쌍선호 비교를 하였다. 에너지 사용량은 각 대안의 사용량에 의한 산술 가중치이다. 사용 물질 중 공구는 수명이 다하였을 때 재활용되고 마모량은 미세하므로 유제 사용량만 에너지와 마찬가지로 산술 가중치를 구하였다.

대기, 수질, 인체에 대한 영향은 Table 6의 환경 및 인체 영향 자료를 갖고 3인의 전문가가 실시한 쌍선호 비교자료 중에서 하나를 택하였다. 대기 및 인체 영향은 3인의 자료가 거의 비슷하고 수질 오염은 조금 다른데 분석 방법의 영향을 잘 보여줄 수 있는 것으로 선택하였다. Table 7은 다섯 가지 환경 영향요소들에 대한 최초 평가등급 행렬과 모든 대안들의 환경영향을 나타내는 가중치 고유벡터를 나타낸다.

최종 평가등급행렬을 구하기 위하여 대기, 수질, 건강의 영향에 대한 가중치를 두 가지 경우에 대하여 적용하여 보았다. 첫째는 가공공정에서 유제관리가 잘되어 있고 작업자에 대한 보호시설이 잘되어 있는 경우이다. 흡입 및 접촉에 의한 인체 영향 경로가 차단되어 있어서 대기, 수질, 인체에 대한 가중치를 2 : 6 : 2로 보았다. Level II의 분석에서 환경영향의 가중치가 0.66이므로 Table 8과 같은 다섯 가지 환경 요소들에 대한 가중치 벡터와 각 요소에 대한 대안들의 고유벡터로 구성된 최종 가중평가값을 갖게 된다. 한편 작업장 및 유제관리가 영성하여 작업자에 대한 노출이 크고 건강에 대한 위험이 크다면 건강에 대한 환경영향 가중치를 크게 잡아야 한다. 대기, 수질, 인체에 대한 가중치를 0.07:0.14:0.8로 보았을 때 환경영향의 가중치 0.66을 곱한 가중치벡터와 각 요소에 대한 대안들의 고유벡터로 구성된 최종 가중평가값은 Table 9에 나타나 있다.

그러므로 작업장 관리가 잘된 공정에서는 대안 A2가, 작업 환경이 좋지 않은 작업장에서는 대안 A3가 최적의 선택이다. 현재 공정 관리자가 유제를 선택할 때는 2차적인 환경오염 문제보다는 작업장 환경 문제가 우선 고려 대상이므로 대안 A3가 현실적이다. 그러나 작업장 관리가 잘되고 작업자

Table 7 Evaluation of Alternatives for Each Attribute

Attributes	Alternatives	Scoring Index Matrix			Eigen Vector
Energy	A1				.26
	A2				.37
	A3				.37
Material	A1				.86
	A2				.06
	A3				.08
Air	A1	1	9	9	.77
	A2	1/9	1	5	.17
	A3	1/9	1/5	1	.06
Water	A1	1	5	1/5	.28
	A2	1/5	1	1/3	.12
	A3	5	3	1	.60
Health	A1	1	6	8	.70
	A2	1/3	1	3	.20
	A3	1/4	1/2	1	.10

Table 8 Final Evaluation of Alternatives (Case I)

	Attribute					Weighted Env. Effects
	E	M	A	W	H	
Weights	.25	.09	.13	.40	.13	
A1	.26	.86	.77	.28	.70	.45
A2	.37	.06	.17	.12	.20	.19
A3	.37	.08	.06	.60	.10	.36

Table 9 Final Evaluation of Alternatives (Case II)

	Attribute					Weighted Env. Effects
	E	M	A	W	H	
Weights	.25	.09	.05	.08	.53	
A1	.26	.86	.77	.28	.70	.57
A2	.37	.06	.17	.12	.20	.23
A3	.37	.08	.06	.60	.10	.20

보호시설을 충분히 갖춘다면 환경오염이 적은 대안 A2로 선택을 바꾸어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 절삭공정의 환경영향을 평가하고 최적 가공조건의 선택을 위하여 일반적인 LCA에서 사용되고 데이터 획득이 비교적 용이한 평가요소들을 선정하고 분석방법이 단순한 AHP 기법을 수용하여 가공공정의 평가에 알맞은 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 환경자료가 제한적이라는 현 여건을 반영하여 정성적인 분석을 하며 작

업장 여건을 고려한 공정 관리자에 의하여 환경 및 인체에 대한 분석 가중치를 자유로이 선정하여 사용할 수 있는 특징이 있다. 절삭 에너지와 공구 및 절삭유제의 사용량 모델들은 물질과 에너지의 정량적인 예측뿐만 아니라 절삭경제성을 함께 고려한 절삭조건 최적화를 가능케 한다. 제안된 모델들은 확장되고 정련된 환경 데이터를 가진 공정의 분석 시스템에서 더욱 유용하게 사용될 것이다.

개발된 모델 및 평가 알고리즘을 밀링공정에 적용하였다. 문헌으로부터 환경 자료를 조사하고 모델로부터 사용 및 배출량을 예상하여 공정 관리자의 판단에 따라 환경영향을 최소화하는 최적의 가공조건 결정과정을 예시하였다. 작업자의 건강에 영향을 미치는 작업환경에 따라 절삭유제 등 가공조건의 최적값이 달라질 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서 제시된 절삭공정의 환경영향에 대한 기초적인 자료 및 평가 방법은 소성가공, 주조, 용접, 열처리 등 다른 생산 공정에서도 유사하게 적용될 수 있을 것이다. 또한 환경자료들을 이용한 환경 전문가들의 가중치 선정 기준을 knowledge base화하여 일반 공정 관리자도 사용할 수 있는 전문가 시스템의 개발이 가능하다고 사료된다.

후기

본 연구는 1998년도 한국과학재단 핵심전문과제(981-1015-083-1)로 수행되었음.

참고문헌

1. Byrne, G. and Scholta, E., Environmentally Clean Machining Processes - A Strategic Approach, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, pp. 471-474, 1993.
2. 정연하 외 3인, 전과정평가용 국내 정규화값 결정, *대한환경공학회지*, Vol. 19, No. 2, 1997.
3. 허탁, 전과정영향평가, *Life Cycle Assessment, 에코경영건설링 세미나 자료*, 1996.
4. Hertwich, E. G. et al., "Evaluating the Environmental Impact of Products and Production Processes - A Comparison of Six Methods," *ESRC 96-07, UC Berkeley*, 1996.
5. Munoz, A. and Sheng, P., "An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Process," *J. of Materials Processing Technology*, Nov., 1995.
6. Sheng, P. and Srinivasan, M., Multi-Objective Process Planning in Environmentally Conscious Manufacturing: A Feature-Based Approach, *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 433-437, 1995.
7. Srinivasan, M. et al., "Development of a Scoring Index for the Evaluation of Environmental Factors in Machining Processes: Part 1 - Health Hazard Score Formula- tion," *Transactions of NAMRI*, Vol. 23, 1995.
8. Srinivasan, M. et al., "Development of a Scoring Index for the Evaluation of Environmental Factors in Machining Processes: Part 2 - Applications," *Transactions of NAMRI*, Vol. 23, 1995.
9. Sheng, P. and Hertwich, E., "Indices for Comparative Waste Assessment in Environmentally-Conscious Manufacturing," *ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 129-140, 1988.
10. 백남원 외 5인, 우리나라에서 사용하는 광물유의 유해특성과 관리대책에 관한 연구, *한국산업위생학회지*, 제8권, 제1호, pp. 67-75, 1998.
11. Verschueren, K., *Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals*, Van Nostrand Reinhold, Co., 1983.
12. Beim, H. J. et al., *Hazardous Air Pollutants*, Van Nostrand Reinhold, Co., 1998.
13. 유해물질연구회, *유해화학물질편람*, 1991.
14. 장윤상, 청정 절삭 가공을 위한 절삭유제의 선택, *한국정밀기술학회지*, 제2권, 제2호, 1996.
15. 장윤상, 김주현, 절삭유제의 환경영향을 고려한 밀링공정의 최적화, *한국정밀공학회지*, 제15권, 제12호, pp. 14-20, 1998.
16. Zlatin, N. et al., *Establishment of Production Machinability Data*, Air Force Materials Laboratory Report, AFML-TR-75-120, 1975.
17. 한국기기유화시험연구원, *절삭유제와 연삭유제*, 정문출판, 1996.