

환경친화적 절삭가공방법에 관한 연구 - LCA적용

A Study on Environmentally Conscious Manufacturing Processes using LCA

김종복, 한영근

명지대학교 산업공학과

Abstract

The objective of ECMS(Environmentally Conscious Manufacturing Systems) is to consider environmental effects through the entire product life cycle from product development stage to design, manufacturing, supplying, using and disposing stage. Recently, environment-oriented recycling, reusing and manufacturing technologies have been researched actively in every engineering fields. In the field of chemical engineering, HHS(Health Hazard Scores) which classifies and analyzes hazardous materials in production processes has been presented.

Metal cutting processes also have a lot of harmful factors, and especially hazardous components in cutting fluids have been known to have a bad effect on workers and working area. However, research works such as HHS have been little accomplished in metal cutting processes.

In this research, a environmentally conscious machining process is presented by classifying hazardous components in cutting fluids, by using LCA(Life Cycle Assessments) and HHS method, and by evaluating environmental effects from cutting fluids.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

산업사회가 최근 빠른 발전을 이루면서 인류에게 좀더 진보한 문화적 혜택을 부여했지만, 한편으로는 기존의 자연환경이 날로 악화되어 가는 환경문제에 부닥치고 있다. 이러한 새로운 현실 속에서 기업들은 환경을 고려한 생산시스템을 연구, 개발하게 되었다. 그 결과 제품의 생산단계 이전인 개발 설계단계부터 환경문제를 고려하는 환경친화적 생산시스템(ECMS ; Environmentally Conscious Manufacturing System)이 새로운 분야로 정립되게 되었다.

ECMS는 제품의 개발단계에서부터, 설계, 제조, 공급, 사용, 폐기에 이르기까지의 제품의 전 생명주기(Life Cycle)에 걸쳐 환경을 고려하는 시스템을 의미한다[5]. 화학 공업과 같은 장치 산업과, 제철과 자동차등을 생산하는 기계공업, 그리고 전자산업 등 거의 모든 산업분야에서 환경을 고려한 생산기술과 재활용 기술이 활발히 연구 진행되고 있다.

Sheng[18][19]는 화학 공업과 같은 장치산업에서 하나의 제품이 생산되기까지의 공정에서 환경에 유해한 물질을 분류·분석하여, 이들을 토대로 인체 유해점수(HHS:Health Hazard Scores)라는 것을 제시한 바 있다. 하지만 이와 같은 연구는 가공공정 분야에서는 미약한 상태이다. 가공공정에서도 여러 가지 환경에 유해한 사항들이 있다. 예를 들어, 절삭 공정에서 칩의 크기와 양, 절삭 공구의 마모와 이로 인한 절삭공구의 폐기문제, 절삭유 사용에 따른 대기 오염과 이에 따른 인체의 유해문제, 그리고 폐절삭유의 회수와 폐기문제를 들 수 있다.

따라서 본 연구에서는 생산 공정, 특히 절삭 가공 공정에서의 환경영향을 고려, 이들을 전과정평가

(LCA:Life Cycle Assessment)라는 환경평가도구를 활용하여 보다 환경친화적으로 제조할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구동향

산업전반에 걸쳐 환경에 대한 인식이 중요하게 여겨지면서 환경영향을 평가하는 방법이 많이 연구되었는데, 이러한 연구는 주로 화학공업, 기계공업과 같은 거대 장치 산업에서 활발하게 추진되었다. 하나의 제품을 생산하는 전과정에 걸쳐 환경에 미치는 영향을 평가하고, 그 평가결과를 분석하여 개선사항을 제시하는 방법이 주로 연구되었다. 하지만 공정 중에서 발생하는 환경영향이 크게 부각됨으로써 여기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 가공공정에서의 환경영향은 평가하는 대상에 따라 데이터의 유형이 매우 다양하다. 따라서 환경영향을 평가하는 방법에 따라서 다른 결과를 얻을 수도 있다. 환경영향평가를 하기 위해서는 우선 평가대상을 선정하고 데이터의 유형을 파악하여, 그 데이터에 맞는 영향평가 방법을 선택하는 것이 중요하다. 환경영향평가 방법을 살펴보면 오염물질의 부하량을 정량화하는 Critical Volume Method, 지구적 차원의 환경문제에 미치는 영향을 정량화하는 방법인 환경분류방법(ETC), 제품의 환경영향부하를 평가하기 위한 환경우선전략(EP), 자원과 환경을 유한재로 보고 환경용량(Carrying Capacity)개념으로 오염부하를 평가하는 생태적 회소성 판단법 등이 있다.

환경부하량을 측정하는 방법은 아니지만 작업장이나 절삭 작업에서 배출될 수 있는 여러 가지 오염물질을 Oral Toxicity(O), Inhalation Toxicity(I), Eye Irritation(E), Dermal Irritation(D), Carcinogenesis(C), Reactivity(R)의 7가지의 범주로 나누어 인체에 어느 정도 영향을 주는지를 파악하여 작업환경을 개선하고, 그에 따른 부수적인 개선

사항들을 제시할 수 있도록 한 분석적 방법이 있다. Sheng이 제시한 HHS(Health hazard Score)가 그것이다.

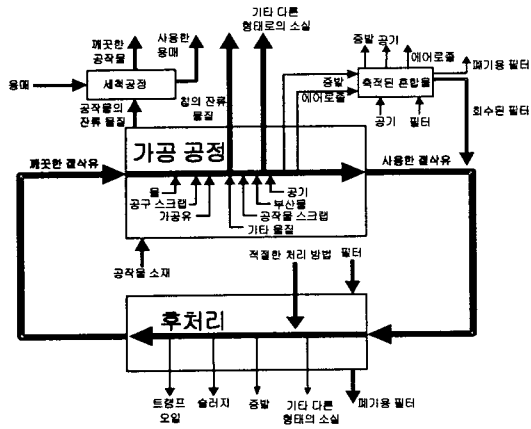
HHS는 오염물질로 인해 인체에 나타날 수 있는 증상을 정해 놓고 각 증상의 범위를 0~9까지로 하여 오염정도를 나타내고, 그것을 기준으로 환경 영향을 평가하는 방법이다.[3][6][12][13][15][16][17]

2. 환경친화적 생산 방법 연구 - LCA의 적용

2.1 LCA 대상 절삭가공공정의 설정

2.1.1 절삭유 사용 절삭가공의 모델

본 연구에서는 절삭가공이 추가되는 생산공정에서 사용되는 절삭유에 대해 전과정 평가를 실시하였다. 이를 위한 대상 공정으로서 <그림3>과 같은 절삭유를 사용하는 절삭가공 모델을 이용한다.



<그림 1> 절삭유의 흐름

절삭작업을 하는 절삭가공에서의 절삭유의 흐름은 절삭유를 투입하여 절삭가공에 사용되고 사용된 절삭유를 다시 recycling 하는 흐름으로 되어 있다. 이때 절삭유는 여러 가지 형태로 배출되게 된다. 고체(Solid), 액체(Liquid), 에어로졸(Aerosol), 증기(Vapor) 그리고 공작물을 가공하고 나서 생기는 칩과 스크랩 등과 섞여서 방출되는 형태인 solid particles 등이 있다.

2.1.2 대상 절삭유의 설정

본 연구에서 사용할 절삭유는 절삭작업에서 가장 많이 쓰이고 있는 Synthetic Cutting Fluids와 Emulsion Cutting Fluids로 한다. 각 구성요소를 <표 1>과 <표 2>에 나타냈다.

<표 1>Synthetic Cutting Fluid의 구성요소

Component	CAS #	Max, %	wts. used (w)
Triethanolamine	102-71-6	20	0.20
Polyalkylene Glycol	9038-95-3	35	0.35
Tall Oil Fatty Acid	61790-12-3	20	0.20
Boric Acid	100043-35-3	15	0.15
Benzen		10	0.10

<표 2>Emulsion Cutting Fluid의 구성요소

Component	CAS #	Max, %	wts. used (w)
Ethanolamine	141-43-5	15	0.15
n-decanoic Acid	26869-20-8	15	0.15
Aminomethylpropanol	124-68-5	15	0.15
Heptanoic Acid	111-14-8	15	0.15
water	7732-18-50	40	0.40

<표 1>과 <표 2>에서 'Component'는 절삭유를 구성하는 구성요소이고 'CAS #'는 이들의 각 고유번호이다. 'Max, %'는 절삭유를 구성하고 있는 최대 비율을 나타내고, 'wts. used(w)'는 절삭유를 구성하는데 사용된 양 즉, 가중치를 나타낸다.

2.2 절삭유 LCA의 수행

목적 및 범위 설정 단계는 LCA를 수행하기 위해서 가장 중요한 단계이다. 목적과 범위를 설정해야만 데이터 수집단계에서의 무한성을 극복하고, 비교·분석 단계에서 목적에 맞는 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

2.2.1 목적 및 범위설정

본 연구에 적용할 절삭유는 Synthetic Cutting Fluid와 Emulsion Cutting Fluid로 하고, 이를 구성하는 요소들은 <표 1>, <표 2>과 같다.

본 연구에서 사용할 LCA 분석 방법으로는 HHS(Health Hazard Score)와 가중치법을 이용한 Multi Attribute Decision Making 기법을 이용하여 환경영향을 평가한다.

2.2.2 목록분석

목록분석은 data의 흐름, 입력과 출력 등을 조사하고 목록화 하는 것이다.

입력사항으로는 <표 2>와 <표 3>에 나타난 절삭유의 구성요소로 한다. 이 구성요소들은 절삭가공을 거치면서 다섯가지 형태로 배출되는데 이들은 고체(Solid), 액체(Liquid), 에어로졸(Aerosol), 증기(Vapor), 고체미립자(Solid Particle)로 한다.

2.2.3 영향평가

영향평가는 목록 분석의 결과에 관련된 도구이다. 이 과정에서 수행되는 분류와 특성화는 각각의 파라미터들이 환경 영향에 대한 기여도를 나타낼 수 있도록 전환하는 계산 과정이다.

<표 3>은 각각의 위험(hazard)항목들에 대해 절삭유의 배출 형태에 따라서 각각에 점수를 할당한 Phase Matrix이다. 각각의 위험을 최대 1로 보고 배출 형태에 따라 점수를 할당한다.

점수들은 RTECS(Registry of Toxic Effects of Chemical Substances) data와 MSDS(Material Safety Data Sheet)의 자료들을 참조하여 할당하였다.[15][20]

<표 3> 절삭유의 배출 형태에 따른 Phase matrix

	Solid	Liquid	Aerosol	vapor	Solid Particles
Oral Toxicity	0.3	0.4	0	0	0.3
Inhaled Toxicity	0	0	0.5	0.3	0.2
Eye Irritation	0	0	0.4	0.4	0.2
Dermal Irritation	0.2	0.5	0	0	0.3
Carcinogenesis	0	0.3	0.3	0.3	0.1
Reactivity	0	0.5	0.2	0.2	0.1
Flammability	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1

각 배출형태에 의한 효과는 작업환경이 잘 조성되어 있는지 절삭유의 관리가 잘되어 있는지, 작업조건이 잘 설정되어 있는지에 따라 그 할당 점수가 달라지기 때문에 이들 요소와 관련이 있는 사용자로부터 주관적인 우선 순위를 도출한다. 도출된 우선 순위를 공식적으로 처리하기 위해서 가중치법 중의 하나인 Analytic Hierarchy Process(AHP)에 의해서 <표 4>와 같은 Matrix가 제시된다.

<표 4> Mass Flow Prioritization Matrix

	O	I	E	D	C	R	F
O	1	1/5	1/10	1/30	1/2	1/20	1/20
I	5	1	1	1/10	2	1/5	1/5
E	10	10	1	1/6	2	1/4	1/3
D	30	1/2	6	1	15	2	3
C	2	1/2	1/2	1/15	1	1/5	1/8
R	20	5	4	1/2	5	1	1
F	20	5	3	1/3	8	1	1

이 Matrix를 기초로 Transport Column Vector F 를 계산 할 수 있다. F 의 요소들은 식 (1)와 같은 간단한 정규화에 의해서 결정되어 진다.

$$F_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^k R_i}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (1)$$

여기서 R_i 는 i 번째 행의 rank value이다.

또한 $R_i = \left(\prod_{j=1}^k X_{ij} \right)^{\frac{1}{k}}$ 과 같은 관계를 가지고 있다. 위 식에서 X_{ij} 는 $k \times k$ Prioritization Matrix X 의 요소들이다. 따라서 $k=7$ 이 된다.

따라서 위 관계를 이용해서 transport column vector F 를 구하면,

$$F = [0.01 \ 0.05 \ 0.07 \ 0.43 \ 0.03 \ 0.21 \ 0.20]^T$$

가 된다.

위와 같은 관계를 구하고 나면, 각 배출 형태에 따라 절삭유 각각에 대한 HHS를 구할 수 있다.

HHS를 구하는 식은 다음과 같다.

$$HHS_{ij} = H_i \cdot P_{ij} \cdot F \quad (2)$$

식 (2)에서, H_i 는 절삭유 구성요소들의 i 번째 HHS subscore, P_{ij} 는 절삭유의 배출 형태에 따른 Phase subscore, F 는 transport column vector이다.

위와 같은 HHS의 관계를 이용하여 대상 절삭유의 각 배출형태에 따른 HHS를 구해보았다. 오염증상에 따른 각 구성요소들의 노출량과 효과에 관한 데이터는 RTECS(Registry of Toxic Effects of Chemical Substances)의 데이터를 기본으로 하여 작성하였다.

먼저 각 절삭유의 오염증상에 따른 HHS의 Subscore를 구한다.

이는 각 오염증상정도를 구하는 공식에 <표 1>와 <표 2>에 나타난 가중치를 곱하여 두 절삭유의 subscore H 를 <표 5>와 <표 6>에 나타내었다.

<표 5> Synthetic Cutting Fluid의 Subscore

Effect(E)	H 값
Oral Toxicity(O)	3.6
Inhalation Toxicity(I)	1.85
Eye Irritation(E)	3.45
Dermal Irritation(D)	2.7
Carcinogenicity(C)	2.45
Reactivity(R)	4.8
Flammability(F)	2.2

<표 6> Emulsion Cutting Fluid의 Subscore

Effect(E)	H 값
Oral Toxicity(O)	2.50
Inhalation Toxicity(I)	2.05
Eye Irritation(E)	3.50
Dermal Irritation(D)	1.90
Carcinogenicity(C)	2.35
Reactivity(R)	4.25
Flammability(F)	3.00

식 (2)를 이용하여 HHS를 구하면 <표 7>과 같다. 여기서 P_{ij} 는 Phase Matrix의 구성요소로서 <표 4>에 나타나 있고,

$$F = [0.01 \ 0.05 \ 0.07 \ 0.43 \ 0.03 \ 0.21 \ 0.20]^T$$

이다. H_i 는 위에서 구한 Subscore이다.

<표 7> 절삭유의 배출형태에 따른 HHS

	Sythetic Cutting Fluid	Emulsion Cutting Fluid
HHS_{solid}	0.25	0.19
HHS_{liquid}	1.39	0.49
$HHS_{aerosol}$	0.41	0.19
HHS_{vapor}	0.40	0.39
$HHS_{solid \ particles}$	0.58	0.28

위의 결과를 바탕으로 두 종류의 절삭유를 절삭가공에 사용하였을 때, 어느 것이 환경에 영향을 더 많이 미치는지를 알아보았다. 이를 위해서 우선, 절삭가공의 환경영향을 평가하기 위해서 불완전한 정량적 자료와 평가가 어려운 정성적 자료를 함께 분석하는 방법이 필요했다. 그러한 방법 중의 하나가 Multi Attribute Decision Making이다. 이 방법은 정성적인 의사결정 모델에 정량적인 요소들을 포함시킬 수 있고, 그 반대로 정량적인 의사결정에 정

성적인 요소들을 포함시킬 수 있는 방법이다.

Multi Attribute Decision Making기법에서 요인 j에 대한 대안 I의 평가치를 S_{ij} 라 하고 요인 j에 대한 가중치를 W_j 라고 했을 때 최종적인 평가치 R_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[4]

$$R_i = \sum W_j S_{ij} \quad (3)$$

이 방법은 평가치 S_{ij} 와 가중치 W_j 를 어떻게 구하느냐가 가장 중요한 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 가중치법을 적용하였다.

먼저, 평가요소는 절삭유의 5가지 배출형태로 한다. 목표는 환경부하의 평가이고 요소이고, 환경부하를 평가하는 대안으로는 Synthetic Cutting Fluid를 사용하는 공정을 S, Emulsion Cutting Fluid를 사용하는 공정을 E로 설정하였다.

평가 요소 및 대안들간의 가중치 선정을 위하여 RTECS(Registry of Toxic Effects of Chemical Substances)의 데이터와 MSDS (Material Safety Data Sheet)를 참조하여 다음과 같이 각 배출형태에 따라 상대적으로 얼마만큼의 영향을 미치는지를 나타내는 우선순위 Matrix를 구성해보았다.<표 8>

<표 8> 절삭유의 배출형태에 따른 우선순위 Matrix

	Solid	Liquid	Aerosol	Vapor	Solid Particle
Solid	1	1/5	1/5	1/8	1/6
Liquid	5	1	1/2	1/3	5
Aerosol	5	2	1	1/2	2
Vapor	8	3	2	1	1/10
Solid Particle	6	1/5	1/2	10	1

각 항목이 각각의 배출형태에 대하여 어느 정도의 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 각 열의 합을 구하고 그 합으로 각 원소를 나누는 방법을 사용하였다.

행렬의 각 열의 원소의 합을 구하면 (25, 6.4, 4.2, 11.95, 8.3)이 된다.

이 값으로 각 원소를 나누어 <표 9>과 같은 값을 얻었다.

<표 9> 절삭유의 배출형태에 따른 가중치 Matrix

	Solid	Liquid	Aerosol	Vapor	Solid Particle
Solid	0.04	0.031	0.048	0.010	0.020
Liquid	0.2	0.156	0.119	0.028	0.60
Aerosol	0.2	0.313	0.238	0.042	0.25
Vapor	0.32	0.469	0.476	0.084	0.01
Solid Particle	0.24	0.031	0.119	0.836	0.12

또한 이 행렬에 의한 가중치 벡터는 각 행의 산술 평균으로 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$\begin{bmatrix} S \\ L \\ A \\ V \\ S \cdot P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0298 \\ 0.2206 \\ 0.2086 \\ 0.2718 \\ 0.2692 \end{bmatrix}$$

이렇게 해서 얻은 가중치 벡터를 앞에서 구한 배출형태에 따른 HHS에 적용함으로써 각기 다른 절삭유를 사용하는 공정 중에서 환경영향이 적은 것을 선택할 수 있다.

먼저 각각의 절삭유를 사용하는 공정과 배출 형태에 따른 HHS값을 나타내면 <표 10>와 같이 나타난다.

<표 10> 대안들과 배출형태에 따른 HHS

배출형태	Cutting Fluid	HHS 값
Solid	Synthetic(S)	0.25
	Emulsion(E)	0.19
Liquid	Synthetic(S)	1.39
	Emulsion(E)	0.49
Aerosol	Synthetic(S)	0.41
	Emulsion(E)	0.19
Vapor	Synthetic(S)	0.40
	Emulsion(E)	0.39
Solid Particles	Synthetic(S)	0.58
	Emulsion(E)	0.28

그런 다음, 각 배출형태에 따른 가중벡터와 HHS 값을 적용하여, 각 요소와 가중치 벡터의 곱을 합함으로써 <표 11>과 같은 최종 환경영향을 얻을 수 있었다.

<표 11 > HHS와 가중치 벡터를 이용한 절삭유 대안의 최종환경평가

	S	L	A	V	S · P	
가중치 벡터	0.0298	0.2206	0.2086	0.2718	0.2692	환경영향
Synthetic(S)	0.25	1.39	0.41	0.40	0.58	0.665
Emulsion(E)	0.19	0.49	0.19	0.39	0.28	0.335

2.2.4 개선평가

2.2.3의 영향평가 단계의 결과로 알 수 있듯이 Synthetic Cutting Fluid를 사용하는 절삭가공 보다는 Emulsion Cutting Fluid를 사용하는 절삭가공에서 환경영향이 적게 나타났다. 두 절삭유에 대해서 배출형태에 따른 HHS를 구하고, 각 배출형태에 가중치를 부여하여 절삭가공에 사용하였을 경우에는 두 대안 중 Emulsion Cutting Fluid를 사용하는 절삭가공이 최적의 선택이 된다.

본 연구에서는 환경친화적인 생산방법을 선택하기 위해 HHS와 Multi Attribute Decision Making이라는 가중치 방법을 사용하였다. 먼저 HHS라는 방법론을 이용하여 절삭가공공정에서 절삭유의 배출형태에 따라 어느 정도의 환경영향을 미치는지를 산출하였다. 이 결과를 바탕으로 Synthetic Cutting Fluid를 사용하는 절삭가공과 Emulsion Cutting Fluid를 사용하는 절삭가공으로 두 가지 대안을 제시한 다음, Multi Attribute Decision Making기법을 이용하여 각 대안들에 가중치를 부여하고 대안들을 비교함으로써 최적대안을 채택하였다.

이상의 결과를 정리하여 다음과 같이 가공공정에 있어서의 환경친화적 생산방법을 제안한다.

(1) 가공방법과 절삭유를 선택한다.

(2) LCA의 4단계를 수행한다.

1) 목적과 범위설정

- LCA를 수행하는 목적과 범위를 설정한다.

- LCA에서 사용할 평가방법론을 선택한다.

2) 목록분석

- 선택한 절삭유 의 구성성분을 분류하고 목록화한다.
- 3) 영향평가
 - 목록분석에서 분석한 데이터를 기초로 영향평가를 한다.
 - HHS기법을 이용하여 각 항목에 대하여 환경영향정도를 산출한다.
 - HHS의 결과를 기초로하여 대안들을 제시하고 Multi Attribute Decision Making 기법을 이용하여 가장 좋은 대안을 선택한다.
- 4) 개선평가
 - 영향평가결과를 분석하여 개선사항을 제시한다.

제 3 장 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 절삭가공에서 사용하는 절삭유에 대해서 5가지 배출형태에 따라 각각의 HHS(Health Hazard Score)를 구하고, 배출형태에 따른 HHS에 가중치를 부여하여 절삭가공에 사용하였을 때의 최적대안을 선택하여 개선방향을 제시하였다. 여러 가지 환경영향을 평가하는데 사용되는 HHS는 모든 성분에 대한 공통의 기초자료가 제공되지 못했다는 문제점이 있다. 따라서 가중치법을 이용한 Muti Attribute Decision Making 기법을 이용하여 가공공정의 평가를 할 수 있는 방법을 제안하였다.

생산공정에서 환경에 영향을 미치는 요인들에는 절삭유 뿐만 아니라 여러 가지가 있다. 절삭가공 중에 발생할 수 있는 칩과 스크랩 등도 절삭가공에 있어 환경에 적지 않은 영향을 미친다. 이들은 생성되는 기하학적 형상과 반출량 등을 정량화하여 환경영향을 평가하는 여러 기법을 사용하여 환경영향정도를 평가할 수 있을 것이다. 또한 올바른 절삭조건, 작업조건, 작업장의 조건 등을 고려하는 것도 환경영향을 최소화하는 방법이 될 것이다.

또한, 절삭공정이 아닌 소성가공, 주조, 용접, 열처리 등 다른 생산공정에서도 환경에 영향을 미치는 요인들이 있다. 이러한 공정들에서 발생할 수 있는 환경영향요소를 정량화하여 본 논문에서 제시한 방법뿐만 아니라 환경영향을 평가하는 여러 방법을 적용하여 작업자나 작업장에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 방법을 제시할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 구자공, "전과정 평가와 그 응용:Life Cycle Assessment and Its Applications", 대한기계학회지, 제36권, 제2호, pp137-174, 1996.
 [2] 심현보, 이상친, 이재원, "환경친화적 기술과 역 제조 기술", 대한기계학회지, 제36권 제2호, pp175-181, 1996.
 [3] 오승영, "환경 경영 도구인 전과정 평가(LCA)의 소프트웨어 개발을 위한 객체 지향 분석 및 설계", 한국과학기술원(KAIST), 산업경영학과, 석사학위논문, 1996.
 [4] 장운상, "청정 절삭 가공을 위한 절삭유제의 선택", 한국청정기술학회지, 제2권, 제2호, pp.165-175. 1996.
 [5] 한대희, 김현수, "환경친화적 제조시스템의 산업 공학적 고찰 : A Review of Environmentally

Conscious Manufacturing System from Industrial Engineering's Point of View", 대한산업공학회 '98 춘계 학술대회 논문집, pp.695-705, 1998.

[6] A. A. Mundaz and P. S. Sheng, "An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Processes", *Journal of Material processing Technology*, November, pp.736-758, 1995.

[7] J. V. Owen, "Environmentally Conscious Manufacturing", *Manufacturing Engineering*, pp44-55, October 1993.

[9] L Reijnders, "Environmentally Improved Production Process and Products : An Introduction.", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1996.

[10] M. A. El. Baradie, " Cutting Fluids: PART I. Characterisation.", *Journal of Materials Processing Technology*, vol 56, pp786-797, 1996.

[11] M. A. El. Baradie, " Cutting Fluids: PART II. Recycling and Clean Machining.", *Journal of Materials Processing Technology*, vol 56, pp798-806, 1996.

[12] M. P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing : Materials, Processes, and Systems", Prentice Hall, 1996.

[13] M. Srinivan, T. S. Wu, P. S. Sheng, "Development of A Scoring Index for The Evaluation of Environmental Factors in Machining Processes: PART I - Health Hazard Score Formulation", *Transaction of NAMRI/SME*, Volume 113, pp115-121, 1995.

[14] M. Srinivan, T. S. Wu, P. S. Sheng, "Development of A Scoring Index for The Evaluation of Environmental Factors in Machining Processes: PART II - Applications", *Transaction of NAMRI/SME*, Volume 113, pp123-129, 1995.

[15] National Institute of Occupational Safety and Health(NOISH), <http://www.cdc.gov/noish/hompage.html>.

[16] P. Sheng, S. Oberwalleney, "Life-Cycle Planning of Cutting Fluids-A Review", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.119, pp791-800, November 1997.

[17] P. S. Sheng, E. Hertwich, "Indices for Comparative Waste Assessment in Environmentally Conscious Manufacturing", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.120, pp 129-140, February 1998.

[18] P. S. Sheng, M. Srinivasan, "Hierarchical Part Planning Strategy for Environmentally Conscious Machining", *Annals of the CIRP* Vol.45, pp455-460, 1/1996.

[19] SETAC Press, " Evolution and Development of The Conceptual Framework and Methodology of Life Cycle Impact Assessment", *SETAC(North American)Workgroup on Life Cycle Assessment*, January 1998.

[20] Shirley Ayers , "Understanding MSDS: Material Safety Data Sheets", Detrick Lawrence, January 1995.