청정 절삭 가공을 위한 절삭유제의 선택

장윤상

수원대학교 기계공학과

Selection of Cutting Fluids for Environmentally Clean Machining

Yoonsang Chang

Dept. of Mechanical Eng., The University of Suwon

요 약

절삭가공 공정에 있어서 절삭유제는 환경영향이 가장 큰 요인들 중의 하나이다. 현재의 기술수준에서 환경영향을 줄이기 위한 공정개선의 방법으로 유제의 환경부하에 대한 평가 및 저부하 유제로의 사용대체가 있다. 본 논문에서는 기존의 절삭성을 바탕으로한 절삭유제의 선택방법과 환경영향을 고려한 선택방법을 비교하여 절삭유제의 선택기준을 제시하고 환경부하의 평가방법으로 AHP 방법을 소개한다. 중절삭이며 저속가공인 드릴링가공을 통하여 절삭성과 환경영향을 함께 고려한 절삭유제의 선택과정을 예시한다. 절삭가공의 물질수지를 고려하여 다섯가지의 환경영향의 평가요소를 선정하고 한국공업규격의 다섯가지의 절삭유제를 비교한다. 비수용성 절삭유제가 성능 뿐만 아니라 환경적인 면에서도 수용성 유제에 비하여 우수한 결과를 보여주었다.

Abstract : Cutting fluids in machining process are one of the parameters which have serious effects on the environment. A simple method to accomplish the environmentally clean process is to evaluate the effects of cutting fluids and select one which has the least environmental load. In this research, a process planning to select the best cutting fluid is suggested considering both machinability and environmental effects. The selection criteria and evaluation method named AHP are introduced. The planning process is illustrated with drilling characterized as a heavy-duty and low-speed process. Five standard fluids are compared with respect to five environmental attributes. Compounded cutting oils are superior to water-soluble oils in both machinability and environmental effects.

1. 서론

절삭가공은 소성가공과 더불어 가장 널리 이용되고 있는 금속소재의 가공법이다. 현재까지의 절삭가공에 대한 연구는 주로 생산성과 경제성의 향상을 목표로한 신 기술 및 기계의 개발에 초점을 맞추어 왔으나 근래에는 공업선진국들을 중심으로 환경친화적 생산공정 문제가 떠오르고 있다. 환경과 건강에 대한 관심은 각종 입법과 규제로 나타나고 있으며 그 결과는 특별한 생산 공정의 제한이나 연관된 부가비용 요소의 발생 뿐만아니라 새로운 대체기술의 개발이라는 부담을 발생시킨다. 그러므로 환경을 고려한 생산기술의 개발, 즉 청정기술의 개발은 기계분야의 공학자들에게도 새로운 도전 요소가 되고 있다.

청정기술의 도입은 기존의 생산 공정 및 적용기술에 대한 환경관점에서의 완전한 이해 및 분석에서부터 시작한다. 즉 절삭공정에서의 물질수지를 파악

하여 바람직하지 못한 부산물에 대한 원인과 제거에 대한 정확한 규명이 있어야 사용물질 및 배출물의 최소화가 가능할 것이다. 그러나 많은 경우 절삭공정의 조건과 상황에 대한 중요한 자료는 부족한 실정이다. 그러므로 앞으로는 환경영향에 대한 많은 실험 및 자료의 보완이 필요하며, 공정을 시뮬레이션하고 잠재적인 부산물을 평가하기 위한 진보되고 믿을 만한 기술 및 컴퓨터 프로그램의 개발이 있어야 한다. LCA (Life Cycle Assessment)기법을 이용한 상용 프로그램을 이용하는 것도 하나의 방법이 될 것이다 [1]. 공정의 분석 및 이해 후에는 청정기술의 도입에 의한 공정의 개선을 이룰 수 있을 것이다. 공정의 개선은 절삭칩의 감소 및 재활용, 절삭력의 감소에 의한 사용 에너지의 저감, 절삭유의 사용 및 손실의 저감 및 재활용, 열 및 소음발생의 저감 등의 요인을 포함한다. 적용기술로는 신소재 및 코팅소재의 공구 개발, 가공조건의 개선, 절삭유제의 개선등이 있다 [2].

이러한 절삭 공정에서의 환경영향 평가 및 청정기술의 적용은 다음의 두단계로 나누어 도입할 수 있다. 첫 단계는 단일 작업 또는 가공방법에 대한 공정설계이다. 가공물 재질이나 요구되는 가공정밀도 등의 주어진 가공환경하에서 단일 작업에 대한 공구의 형상 및 재질, 절삭유의 사용유무 또는 종류 선택, 칩배출량의 감소등은 가장 간단하고 직접적으로 효과를 볼 수 있는 내용이다. 두번째 단계는 단일 부품의 생산을 위한 전체 가공공정에 대한 고려이다. 하나의 부품을 가공하는데는 보통 두가지 이상의 가공방법이 사용되며 각각의 단위 가공방법에 대한 가공조건들을 전체 절삭공정의 환경영향을 평가하여 결정하는 것이다. 또한 이 단계에는 다음과 같은 두가지 공정 선택도 포함한다. 하나는 여러가지 가공방법중 가장 환경친화적인 대안을 선택하는 방법이다. 예를 들어 연삭보다는 절삭이 환경친화적인 가공방법이므로 가능한한 절삭에 의한 가공정밀도를 높여서 연삭에 의한 다듬질을 생략하는 방법을 찾는것이 바람직하다 [2]. 또한 Waterjet 이용절삭 등 아직 기술개발이 미흡한 몇가지 특수 가공방법은 재료손실, 에너지의 사용, 폐기물처리등의 면에서 앞으로 각광받을 방법이며 범용공작기계의 대체가 가능할 것이다. 다른 하나는 가공 순서의 최적화이다. 일단 사용해야할 가공방법들이 정해지면 가능한한 절삭에너지나, 칩배출, 절삭유제사용 등 환경부하가 큰 가공은 절삭량을 최소화하는 절삭순서로 공정을 최적화하는 것이다 [3].

절삭가공의 특징중 하나는 높은 압력에서 공구와 공작물 사이의 접촉으로 인한 마찰과 열을 발생시키는 것이다. 마찰은 공구의 급속한 마멸을 초래하고 열은 재료의 상변화등 조직적인 문제를 야기시킨다. 이러한 바람직하지 않은 영향을 감소시키기 위해 대부분의 절삭가공은 절삭유제를 사용하여 가공표면을 순환하며 마찰을 감소시키고 공구와 공작물을 냉각하며 금속칩을 제거한다. 절삭유제는 환경 및 인체건강에 직접적인 영향을 미치며 생산공정의 여러 가지 조건들 중에서 고려해야할 가장 중요한 요소중 하나이다. 또한 절삭유사용의 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 [2]. 절삭성능의 향상을 목적으로 여러가지 종류의 절삭유제가 개발되어 왔으며 이들은 주로 광유(Mineral Oil) 및 지방유(Fatty Oil) 성분과 절삭성의 향상을 위하여 환경부하가 큰 몇가지 첨가제를 소량 이용하고 있다 [4].

본 논문에서는 청정생산을 위한 절삭공정의 설계방법으로 단일 절삭가공에서의 절삭유제 선택 방법을 제시한다. 기존의 절삭유제의 선택방법은 절삭성을 바탕으로한 절삭경제의 최적화에 초점을 맞추고 있다. 환경영향도 일부 고려하고 있으나 선택에 있어서의 중요도는 미미하며 그나마도 인체와 작업환경의 영향 등 직접적인 영향만을 고려하고 전체적인 환경부하는 평가하지 않고 있다. 전체적인 환경영향을 고려한 절삭유제의 선택기준을 제시하고 환경부하의 평가방법으로 다요소 의사결정 기법인 AHP 방법을 이용한다. 중절삭가공인 드릴링가공을 통하여 절삭성과 환경영향을 함께 고려한 절삭유제의 선택과정을 예시한다.

2. 절삭유제의 선택

2.1 절삭유제의 종류

절삭유제의 사용목적은 크게 나누어 냉각 및 윤활의 두가지 작용에 의해 절삭성능을 향상시키는 것이

다. 공구 및 공작물의 냉각작용은 공구인선의 냉각으로 고온경도의 저하 및 공작물의 가공온도 상승에 의한 가공정밀도의 저하를 방지한다. 윤활작용은 공구윗면과 칩사이의 마찰계수를 감소시키고 공구마모를 적게하여 가공표면의 정밀도를 향상시킨다. 그밖에 절삭칩의 제거로 절삭작업을 용이토록 하며 가공면의 방청작용도 중요한 절삭유제의 역할이다. 이러한 사용목적은 절삭가공 방법, 가공물 재질, 공구 형상 및 재질, 절삭속도등 여러 가지 절삭조건들에 대한 보완 필요성에 의해 결정되며 절삭유제의 규격에서 직접 선택할 수 있다.

한국 공업 규격(KS M 2173-1985)을 보면 절삭유제의 종류는 물로 희석해서 사용하는 수용성 및 원액으로 사용하는 비수용성 절삭유제의 둘로 나누어진다. 비수용성 유제는 극압(EP) 첨가제의 유무에 따라 KS1종과 KS2종으로 대별된다. 이들은 다시 지방유분량, 염소분함유량, 극압첨가제 등의 조성에 따라 1종은 1 ~6호, 2종은 1 ~6호와 11 ~17호로 분류되어 있다. 그 이유는 절삭유제의 성상이 그 조성성분과 밀접한 관계가 있기 때문이다. KS1종은 혼합유(광유와 지방유의 혼성유)로 고속에서 화학반응이 2종에 비해 작은 특징이 있고 부식되기 쉬운 비철금속의 가공 또는 강철의 고속절삭에 많이 사용된다. 극압첨가제가 함유된 KS2종은 극압유라고도 부른다. 첨가제가 많을수록 절삭성이 좋으나 폐유소각시 공해문제가 발생한다. 1 ~6호는 불활성(Inactive) 극압유로 염소계 첨가제가 함유된 염화유와 비교적 안정된 유황 화합물이 포함된 불활성황화유가 이 범주에 든다. 11 ~17호는 활성(Active) 극압유로 반응성이 강한 유황계의 극압첨가제가 함유되어 있다. 가공 다듬질면이 좋고 고온에서는 화학작용을 일으키기 쉬우므로 난삭재의 저속가공에 많이 사용된다.

수용성 유제는 절삭성능에 영향을 미치는 인자가 복잡하고 비수용성 유제와 같이 조성, 성분, 성상에 따라 세분하기가 곤란하기 때문에 희석액의 겉모양 및 광유와 계면활성제의 비율에 의해 W1종과 W2종으로 분류되어 있다. 각각 1 ~3호로 구분되며 각 2호는 EP첨가제가 함유된 유제이고 3호는 주로 비철금속 가공에 사용한다. W1종은 물에 용해되면 백색으로 탁해지는 에멀션으로 광유와 계면활성제가 주성분이다. 그밖에 에멀션형의 유제는 비교적 부패하기 쉬워 부패방지제와 산화 부식방지제를 필요에 따라 첨가한다. W2종은 물로 희석하면 투명 또는 반투명한 솔루블형 유제로 계면활성제가 주성분이다.

2.2 절삭유제의 선택기준

절삭유제를 선택할 때 사용목적에 잘 합치하는 필요성질의 선택이 중요하나 위와 같은 성분들의 성질들은 상호연관성이 있어 전체조건을 모두 만족시키는 완전한 절삭유제는 얻을 수 없다. 일반적으로 비교적 고속절삭이 되면 윤활작용은 거의 효과가 없어져서 주로 냉각작용이 있는 절삭유제를 선택하고, 저속의 경우와 달리 고가이고 특히 마멸을 방지할 필요가 있을 때는 윤활성이 좋은 절삭유제를 선택한다. 절삭유제의 목적과 평가성질의 관계를 보면 냉각성을 고려할 때는 유제의 열용량, 비열, 열전도도 및 증발량비를, 윤활성을 고려할 때는 유제의 점도, 마찰계수 및 표면장력을 참조한다.

절삭유제를 결정하는 가장 간단한 방법은 다른 절삭조건들과 마찬가지로 절삭 핸드북에서 사용 가능한 절삭유제를 선택하는 것이다. 절삭 핸드북에는 절삭유제를 포함한 대부분의 절삭조건을 가공방법과 피삭재질 및 공구에 따라 제시하고 있다. 그러나 이 자료는 광범위한 가공조건들을 고려한 일반적인 경우로 각각의 가공환경에 맞는 최적조건으로 응용할 필요가 있다. 최적 절삭조건을 구하는 일반적인 방법은 몇가지 가능 조건에 대한 절삭성 평가를 실험계획법(Experimental Design)에 따라 행하여 얻어진 자료를 여러 가지 방법으로 모델링한 후 최적화기법에 의하여 결과를 얻는 것이다. 지금까지 많이 사용된 절삭성의 모델링 및 최적화 방법으로는 절삭경제 문제를 이용하는 방법이 있다 [5]. 일반적인 절삭가공의 경제성은 가공비용과 생산능률을 함께 고려한 아래와 같은 형태의 목적함수와 몇가지 절삭환경 구속조건들로 구성된 절삭경제 최적화 문제에 의하여 결정된다.

$$I = \frac{K_1}{R} + \frac{K_2}{RT} \qquad (1)$$

여기서 R은 절삭율, T는 공구수명이고 K_1, K_2는 공구가격, 임금, 기계정지시간 등 절삭환경 상수에 의

해 결정되는 상수들이다.

그러나 기존의 이 방법은 절삭유제에 관한 비용이 공장의 부자재 또는 보전비로서 소모품으로 취급되어 최적화의 고려 대상이 되지 못한다. 근래에 환경문제로 인한 절삭유제의 처리비용이나 절삭유제의 발전에 의한 절삭성의 차이등은 절삭유제의 선택이 절삭성이나 경제성에 미치는 영향을 크게하고 있다. 그러므로 절삭유제의 경제성 평가를 단순한 구입가격이 아닌 관리비용이나 생산능률에의 영향을 포함한 종합적인 경제계산 및 선택의 최적화가 필요하다. 절삭유제에 대하여 전체 절삭경제성 계산을 위해 기대하는 효과와 작업상 고려해야할 항목은 다음과 같다.

(1) 일차 절삭성 (M1): 공구수명, 가공정밀도
(2) 이차 절삭성 (M2): 냉각성, 칩처리, 방청성
(3) 유제 경제성 (ME)
- 직접 유제비: 절삭유제비, 희석수 비용
- 간접 유제비: 유제관리비, 폐액 처리비, 급유계통 보전비
- 간접적 경제항목: 공구비, 인건비, 기계유지비, 품질관리비, 세정비, 칩처리비용 등
(4) 유제 관리성 (MT): 유제공급 및 관리성, 부패·노화, 폐유관리성
(5) 안전 및 작업환경 (MS): 인체영향(피부, 호흡기계통), 발연·인화성, 악취·청결성

이러한 선택기준은 최적 유제를 선택하는 판정기준으로 뿐만아니라 사용가능성을 판단하는 제한항목으로도 이용된다. 즉 정삭이나 황삭 등의 가공정밀도나 안전성이나 폐액처리 등의 작업환경에 대한 법적규제를 배려하는 제한 항목을 두어 사용 불가능한 유제는 미리 제거한후 다시 위의 기준에 따라 경제적으로 최적인 유제를 선택하는 것이 합리적인 방법이다.

3. 환경영향을 고려한 절삭유제의 선택

3.1 환경영향을 고려한 선택 기준

국제 환경협약들이 속속 체결됨에 따라 모든 생산공정은 환경부하가 가장 적은 방법으로의 전환이 필요하며 청정생산 기술의 도입에 의한 환경오염물질의 원천적 감소 및 재활용을 요구하고 있다. 또한 강화된 국제무역환경에서의 공정 및 생산방식에 대한 규제대응과 ISO 14000의 획득을 위해서는 생산공정의 환경영향 평가와 환경친화적 공정의 선택이 필요하다.

절삭공정에서 절삭유제는 다른 절삭조건들에 비해 환경적 영향이 가장 큰 요인으로 인식되고 있으며 절삭유 사용의 감소 및 효율적 관리는 경제성에도 영향을 미친다. 환경보호 측면에서 윤활유의 사용을 없앤 건식 절삭이 가장 바람직하다. 건식절삭은 윤활유와 연관된 직접적인 경비절감외에도 제품과 칩 세척문제등 효과가 크다. 그러나 건식절삭을 위해서는 가공정밀도, 칩제거, 열적영향 등에 대한 혁신적인 기술보완이 필요하며 아직까지는 절삭공정의 목적을 이루기 위해서는 절삭유제가 필수불가결한 요소인 실정이다. 절삭유제를 개발할 때는 절삭성의 고려뿐만 아니라 절삭유제 성분이 인체 및 환경에 부정적 영향이 없고 사용할 때 오염물질을 만들지 말아야 하며 절삭유제의 수명연장도 중요하다. 환경문제를 고려한 절삭유제의 관리 및 사용방식으로는 우선 사용할 때에 기화가 적고 유압작동유, 윤활유, 절삭유등으로 함께 사용할 수 있는 다목적용이며 사용량이 최소화될 수 있는 공급시스템설계 등이 우선적으로 바람직하다.

개별 절삭공정에서의 절삭유제의 사용은 사용량의 최소화와 환경친화적 유제의 선택이 중요하다. 위에서 제시한 기존의 절삭유제 선택방법에서도 절삭유제의 환경영향을 고려하고 있으나 그 내용은 피부 및 호흡기 계통의 인체영향과 발연성, 인화성, 악취, 청결성등 작업환경에 국한된 내용이며 고려하는 우선순위도 상당히 낮다. 또한 폐유처리 및 재활용 방법도 대기 및 수질 보전에 관한 법적 규제에 입각하여 제한조건만 지키는 수동적인 방법으로 사용경제성에 따른 전체적 판단기준으로의 역할을 전혀 하지못하고 있다.

환경친화적 절삭유제의 선택은 그림 1과 같은 절삭공정에서의 물질수지에 대한 환경관점에서의 완전한 이해 및 분석에서 시작한다. 최적 절삭유제의 선택은 사용되는 물질 및 에너지와 대기, 수질 및 고형배출물을 최소화하도록 해야 할 것이다. 즉 다음과 같은 다섯가지의 항목으로 평가할 수 있다.

(1) 물질소비 (EM): 절삭유제, 유제관리 관련부품

(2) 에너지 소비 (EE): 절삭력, 절삭유관리, 폐유처리

(3) 수질오염 (EW): 유제 사용중 및 폐유처리시

(4) 대기오염 (EA): 유제 사용중 및 폐유처리시

(5) 고형폐기물 (ES): 유제 사용중 및 폐유처리시

위의 항목들은 폐절삭유의 처리와 사용중 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 소음발생등 간접적인 영향도 포함한다.

정성적인 요소들을 포함시키는 방법으로 다요소 의사결정 기법(Multi-Attribute Decision Making)이 대표적인 방법이다 [6]. 다요소 의사결정 기법에서 요인 j 에 대한 대안 i 의 평가치를 S_{ij} 라 하고 요인 j에 대한 가중치를 W_j 라고 했을 때 최종적 평가치 R_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \sum W_j S_{ij} \qquad (2)$$

여기서 평가치 S_{ij} 와 가중치 W_j 를 어떻게 구하느냐에 따라 다요소 의사결정 기법이 분류된다.

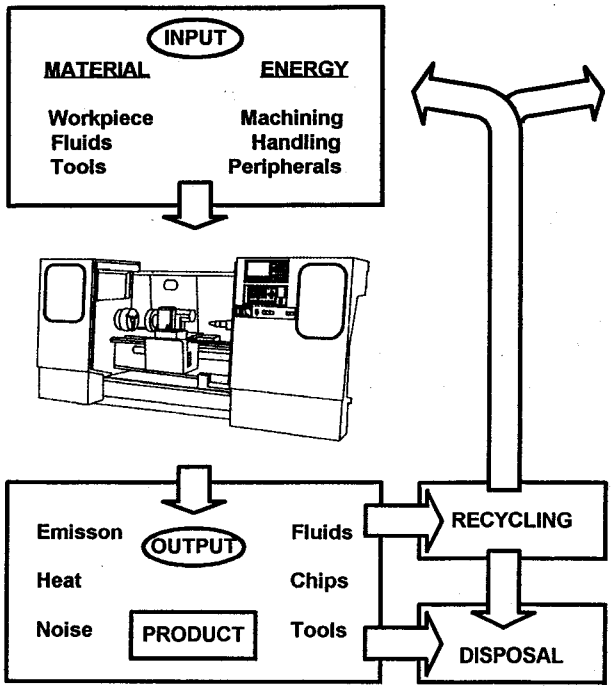

Fig. 1 Input and output in machining process.

3.2 환경부하 평가 방법

절삭유제를 선택하는데 있어서 위에서 언급한 절삭성 및 경제성과 환경영향을 고려하기 위해서는 비교적 해석하기 쉬운 정량적 요인들과 모델링 및 분석평가가 어려운 정성적인 요인들을 함께 분석하여야 한다. 계량분석적인 의사 결정 모델에 가능한한 가장 간단하고 대표적인 방법으로 가중 가중치법이 있으며 본 연구에서는 근래에 많이 사용하는 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 사용하였다 [7]. AHP는 Saaty에 의해서 개발된 방법으로 단순하여 사용하기 쉽고, 복잡한 요소 및 대안의 계층적 구조에 의해 문제를 명확히 정의해 주며 판단의 일관성을 정량화해 주는 장점이 있다. 기법의 순서를 요약하

면 다음과 같다.

1) 목표를 설정하고 요소(Attribute)들과 대안(Alternative)들을 하나의 계층으로 구성한다.

2) 평가 요소들간의 비교에 의하여 중요성에 관한 고유벡터를 구한다. 그 방법은,

(1) 쌍선호비교 (Pairwise Preference Comparison)을 한다. 쌍선호비교를 용이하게 하기위하여 Table 1 과 같은 질문표를 만들어서 사용한다. 이 결과를 이용하여 평가등급행렬(Scoring Index Matrix)을 작성한다. 이 행렬의 (i,j)번째 원소는 j의 중요도를 1로 보았을 때 i의 상대적인 중요도를 의미한다.

(2) 행렬의 원소들의 우선순위 또는 가중치 벡터를 계산한다. 행렬의 각 열의 원소를 정규화 (Normalization) 하여 합이 1이 되게하고 선형대수를 사용하여 이 행렬의 고유벡터 (Eigenvector) W 를 구한다.

(3) 쌍선호비교에 대한 일관률(CR: Consistency Ratio)를 검정한다.

3) 요소 각각에 대하여 대안들 사이의 쌍선호 비교를 한다. 방법은 2)의 경우와 같다. 모든대안들의 가중치 고유벡터는 최종 평가등급행렬 S 를 구성한다.

4) 각 대안들에 대한 가중평가를 한다. 각 대안에 대한 가중평가값은 대안들의 평가등급 행렬과 가중치 벡터의 곱의 합으로 식 (2)와 같이 표시된다. 최적 대안은 대안들중 가중평가치가 가장 좋은 것으로 선택한다.

Table 1. Comparison table for pairwise preference

	9 8 7 6	5 4 3 2	1	2 3 4 5	6 7 8 9	
Alternative 1						Alternative 2

4. 드릴링가공을 위한 절삭유제의 선택

4.1 드릴링가공 공정

절삭공정 설계시의 절삭유제의 선택에서 환경영향을 고려하는 과정을 드릴링 가공으로 예시한다. 드릴링가공은 절삭유제가 칩의 흐름과 반대방향인 날의 진행방향으로 침투하여 작용을 하여야 하므로 절삭유제를 사용하기 어려운 가공이다. 보통 낮은 점도의 유제가 침투성이 좋으며 급유시의 침투깊이는 구멍지름의 3 내지 5배로, 침투성을 좋게하기 위하여 오일 구멍이 있는 드릴을 사용하거나 강제급유를 시킨다.

지름 6mm의 고속도강 드릴로 두께 20mm의 SK7 탄소공구강(HBN=270)을 드릴링가공한다. 절삭조건은 생산성을 고려하여 절삭핸드북[8]의 권고사항(절삭속도 12m/min, 이송 0.075mm/rev) 보다 약간 높은 절삭속도 20m/min (1000rpm), 이송 0.1mm/rev로 결정하였다. 절삭 핸드북에서 권고하는 절삭유제의 형태는 Medium Duty의 비수용성, Heavy Duty의 에멀션, Heavy Duty의 Chemical이다. 각각의 규격에 맞는 여러가지 종류의 절삭유제중에서 한 개씩의 에멀션형 및 솔루블형의 수용성 절삭유제와 혼합유, 염화유, 활성 황화유의 비수용성 절삭유제를 Table 2와 같이 고려대상으로 선택하였다. 여기서 수요성 절삭유제는 물과 혼합하여 사용할 때의 조성을 나타내며 수용성 및 비수용성 유제의 수명비는 1:3으로 가정한다.

기존의 절삭성을 고려한 절삭유제의 선택을 위하여 절삭성을 평가하기 위한 실험자료로써 절삭토크, 절삭온도, 그리고 공구수명(평균절삭갯수)를 Table 3과 같이 참고문헌 (4)에서 발췌하였다. 또한 물을 절삭유제로 사용하였을 경우와 건식절삭의 경우를 함께 비교하였다. 측정결과를 보면 절삭유제의 사용효과를 잘 알 수 있다. 절삭토크는 비수용성 유제가 작으며 절삭온도는 절삭유제를 사용한 경우는 모두 비슷하다. 공구수명까지 고려하였을 때 일반적인 절삭성은 극압첨가제가 함유된 비수용성 절삭유제가 좋은 결과를 보이고 있다.

절삭유제의 경제성은 2장에서 제시한 절삭유제의 직접적인 경제항목에 따라 결정하였다.

Table 2. Cutting fluid alternatives

절삭유 종류	에멀션	솔루블	혼합유	염화유	활성황화유
기 호	W1	W2	KS1	KS2-1	KS2-11
조 성	물 90% 광유 6% 지방산 1% EP제 1% 계면활성제 2%	물 95% 광유 0.75% 지방산 0.4% EP제 0.3% 계면활성제 4%	광유 90% 지방유 10%	광유 80% 지방유 5% 염소 5%	황화광유 75% 지방유 10% 염소 5% 전유황분 5%

Table 3. Comparison of machinability

Cutting Fluid	W1	W2	KS2-1	KS2-11	Water	Dry
Viscosity (RW)	25.5	26.8	39.4	57.4		
Torque (kg-m)	13.2	14.0	11.2	10.4	14.0	15.2
Temp. (℃)	215	215	215	215	215	285
Tool Life (No.)	20	17	60	110	10	7

비용계산에 필요한 공작기계의 댓수, 생산갯수, 유제 탱크, 관리비용 등의 전제조건은 참고문헌 (4)를 따랐다. Table 4에서 보는 바와 같이 비수용성 유제의 사용경비는 유제의 가격 때문에 수용성에 비하여 3배 이상이다. 그러나 공구비, 인건비등 유제에 간접적인 경제항목을 함께 고려하면 액수의 차이는 유지하지만 비율은 그리 크지않다.

Table 4. Cost evaluation of alternatives

경비항목	수용성	비수용성
직접비	7.22	70.34
초기충전	4.71	20.09
보급유제	2.51	50.25
간접비	13.69	4.14
유제교환	2.39	0.75
폐액처분	9.42	1.51
계통보전	1.88	1.88
계	20.91	74.48

위에서 측정 또는 계산한 절삭성 및 경제성에는 환경영향 인자가 일부 포함되어 있으나 환경영향 평가를 한 것은 아니다. 예를 들어 절삭 토크와 절삭온도는 가공 거칠기나 공구수명 등의 절삭성의 척도이지만 물질수지에서 에너지의 사용량과 대기중 열의 발생량등 환경영향 평가에 이용할 수 있다. 또한 폐액 처분비용은 동일한 환경오염이나 규제를 통과한다는 가정하의 경제성만을 평가했기 때문에 폐액 처리의 난이도나 배출 오염의 정도 등을 환경영향에 대하여 재 평가 하여야 한다. 환경영향 평가를 위한 폐유처리 방법은 수용성유제의 경우 저장조에서 자연분리하고 약제를 첨가하여 응집처리하고 활성탄 및 활성오니에 의해 흡착처리 후 희석 방류하는 것으로 한다. 슬러지 케이크는 소각한다. 비수용성 유제는 분리조에서 수분 및 거친 슬러지를 제거하고 가열하여 수분 및 휘발성분을 제거한 뒤에 백토 혼합처리 후 연소처리한다. 연소시의 유해가스 제거 설비의 성능은 보통이며 재생유로의 사용은 없는 것으로 가정한다.

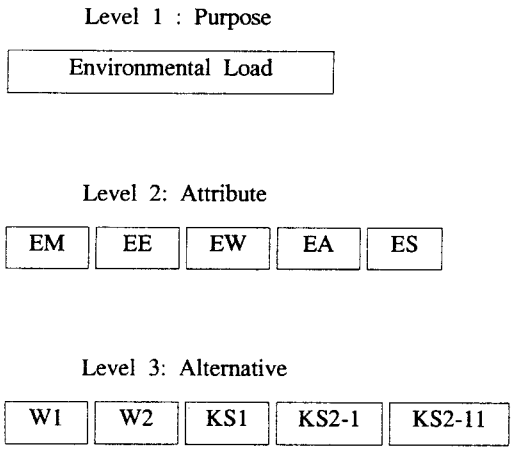

Fig. 2 Hierarchy structure for decision making.

4.2 환경영향 평가

3.2절에서 설명한 AHP방법에 따라 우선 목표 및 요소들과 대안들을 Fig. 2 와 같이 하나의 계층으로 구성하였다. 목표는 환경부하의 최소화 요소는 Fig. 1의 물질수지로 부터 물질소비 (EM), 에너지 소비 (EE), 수질오염 (EW), 대기오염 (EA), 고형폐기물 (ES), 그리고 대안은 Table 2의 W1, W2, KS1, KS2-1, KS2-11이다.

평가 요소들간의 비교를 위하여 환경분야 전문가 2인의 쌍선호비교를 행하여 일관률이 높은 것을 채택하였다. 그 결과를 이용하여 작성된 평가등급행렬은 다음과 같다.

$$\begin{matrix} & EM & EE & EW & EA & ES \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} EM \\ EE \\ EW \\ EA \\ ES \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1/9 & 1/5 & 1/3 \\ 7 & 1 & 1/3 & 1 & 3 \\ 9 & 3 & 1 & 5 & 7 \\ 5 & 1 & 1/5 & 1 & 2 \\ 3 & 1/3 & 1/7 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

행렬 (3)의 각 열의 원소의 합을 구하면 (25, 5.48, 1.79, 7.70, 13.33)이 되며 행렬(3)의 원소를 나누면 다음과 같이 정규화 된다.

$$\begin{bmatrix} EM \\ EE \\ EW \\ EA \\ ES \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .04 & .03 & .06 & .03 & .03 \\ .28 & .18 & .19 & .13 & .23 \\ .36 & .55 & .56 & .65 & .53 \\ .20 & .18 & .11 & .13 & .15 \\ .12 & .06 & .08 & .06 & .08 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 행렬에 의한 가중치 벡터 W 는 각 행의 산술평균으로 다음식과 같이 얻어진다.

$$W = \begin{bmatrix} .04 \\ .20 \\ .53 \\ .15 \\ .08 \end{bmatrix} \quad (5)$$

쌍선호비교에 대한 일관률은 쌍비교행렬의 일관성을 나타내는 수학적인 척도이다. 일관률을 구하기 위한 방법은 다음과 같다. 우선 평가등급행렬 (3)과 가중치 벡터 (5)를 곱하여 [0.18 1.05 2.80 0.82 0.42] 를 얻은다음 각 원소를 가중치 벡터 (5)의 원소로 나누어서 새로운 벡터 [4.50 5.25 5.28 5.47 5.25] 를 얻었다. 이들 원소의 평균 λ 는 5.15이며 다음식과 같은 일관성지수 (CI: Consistency Index) 개념을 도입하면 CI 값은 0.04가 된다.

$$CI = \frac{\lambda - N}{N - 1} \quad (6)$$

여기서 N 은 행렬의 크기이다. Saaty 는 시뮬레이션을 통하여 우연지수 (RI: Random Index) 라는 것을 개발하였다 [6]. 행렬의 크기가 5일 경우 우연지수는 1.12가 된다. 일관률은 일관성지수와 우연지수의 비로써 여기서는 0.03이 된다. Saaty 는 일관률이 0.1 이하이면 일관성이 있는 것으로 판단하고 있다. 그러므로 위의 쌍비교는 매우 우수한 것으로 간주된다.

같은 방법으로 요소 각각에 대하여 대안들사이의 쌍선호 비교를 하였다. Table 5는 쌍선호 비교의 결과인 다섯가지 환경영향 요소들에 대한 최초 평가등급 행렬과 AHP 법에 의한 평가결과인 모든 대안들의 환경영향을 나타내는 고유벡터 및 일관률을 나타낸다.

Table 5. Evaluation of alternatives for each attribute

Attributes	Alternatives	Scoring Index Matrix					Eigen Vector	CR
EM	W1	1	5	1/3	1/6	1/9	.08	.10
	W2	1/5	1	1/4	1/6	1/9	.04	
	KS1	3	4	1	1/2	1/5	.13	
	KS2-1	6	6	2	1	1/2	.26	
	KS2-11	9	9	5	2	1	.49	
EE	W1	1	1	2	2	2	.29	.02
	W2	1	1	1	2	2	.26	
	KS1	1/2	1/2	1	1/2	1/2	.11	
	KS2-1	1/2	1/2	2	1	1/2	.15	
	KS2-11	1/2	1/2	2	2	1	.19	
EW	W1	1	2	6	5	5	.45	.03
	W2	1/2	1	4	5	5	.31	
	KS1	1/6	1/4	1	2	2	.10	
	KS2-1	1/5	1/5	1/2	1	1	.07	
	KS2-11	1/5	1/5	1/2	1	1	.07	
EA	W1	1	2	1/4	1/6	1/9	.05	.08
	W2	1/2	1	1/4	1/7	1/9	.03	
	KS1	4	4	1	1/3	1/6	.13	
	KS2-1	6	7	3	1	1/5	.23	
	KS2-11	9	9	6	5	1	.56	
ES	W1	1	3	1/3	1/6	1/9	.06	.12
	W2	1/3	1	1/5	1/8	1/9	.03	
	KS1	3	5	1	1/3	1/6	.12	
	KS2-1	6	8	3	1	1/8	.22	
	KS2-11	9	9	6	8	1	.57	

Table 6. Final evaluation of alternatives

	Attribute					Weighted Env. Effects
	EM	EE	EW	EA	ES	
Weights	.04	.20	.53	.15	.08	
W1	.08	.29	.45	.05	.06	.31
W2	.04	.26	.31	.03	.03	.22
KS1	.13	.11	.10	.13	.12	.11
KS2-1	.26	.15	.07	.23	.22	.13
KS2-11	.49	.19	.07	.56	.57	.22

CR 값을 보면 모든 요소들에 대한 대안들의 등급평가가 비교적 우수함을 알 수 있다. 환경부하는 물질소비, 대기오염, 고형배출물의 경우에는 비수용성 유제가, 에너지소비, 수질오염의 경우에는 수용성 유제가 큰 것으로 평가되었다. 요소들의 가중치 벡터와 각 요소에 대한 대안들의 고유벡터로 구성된 최종 평가등급행렬 S 및 식 (2)를 이용한 대안들의 가중평가값을 정리하면 Table 6과 같다. 환경부하의

최소화라는 목표하의 최적 유제는 KS1으로 평가되었다. 수용성 유제는 기존의 유제 선택방법에서 인체 및 작업환경에 대한 영향이 비수용성 유제에 비하여 작기 때문에 환경부하도 작을 것으로 예상했으나 전체적인 환경부하의 평가는 다른 결과를 보여 주었다. 이 결과는 특히 수질오염 및 에너지 소비에 대한 환경전문가의 가중치가 높은 것에 기인한다. 그러므로 현재 수준의 수용성유제의 폐처리 시설에 기술과 자본의 투입이 더 필요함을 알 수있다.

기존의 절삭성 평가에 의한 절삭유제의 선택도 같은 방법으로 실시하여 보았다. 평가요소는 2.2절로 부터 일차 절삭성 (M1), 이차 절삭성 (M2), 유제 경제성 (ME), 유제 관리성 (MT), 그리고 안전 및 작업환경 (MS) 이며 대안은 Table 2의 W1, W2, KS1, KS2-1, KS2-11 절삭유제이다. 평가요소들의 가중치 벡터와 각 요소에 대한 절삭유제들의 고유벡터로 구성된 최종 평가등급행렬 S 및 대안들의 최종 가중평가값은 Table 7과 같다. Table 7의 요소가중치를 보면 기존의 절삭유제 선택방법은 유제의 관리성이나 인체 및 환경의 영향을 거의 고려치 않음을 알 수 있다. 유제의 선택은 전적으로 고유목적인 절삭성에 의존하며 경제성이 약간 참조되고 있다. 결과는 비수용성 유제에 대한 평가가 수용성 유제에 비하여 약간 높다.

인이 단 두 개이므로 단순한 가중치 평가방법으로 가능하다. α를 환경영향의 고려에 대한 가중치라고 했을 때 최적 절삭유제는 다음식에 의해서 대안들중 가중값이 가장 큰 대안이 선택된다.

$$F_{opt.} = \max [(1-\alpha) F_{Mi} - \alpha F_{Ei}] \quad (7)$$

절삭유제의 선택은 환경영향에 대한 가중치 α에 따라 변화할 수 있으며 α 값의 변화에 따른 최적 절삭유제는 Table 8과 같다. 평가결과는 가중치에 상관없이 비수용성유제가 선택되었다. 이는 Table 6 및 7에서 예상할 수 있는 결과이다. 환경영향에 대한 가중치가 커짐에 따라 첨가제가 많은 KS2-11에서 첨가제가 없는 KS1으로 최적유제가 바뀌는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

절삭가공은 장기적으로 환경부하가 적은 청정가공 방식으로 개량되거나 또는 새로운 방법이 개발될 것이며 환경부하가 큰 절삭유제는 가능한한 사용량을 줄이고 궁극적으로 절삭유제를 안쓰는 방향으로 발전할 것이다.

Table 7. Evaluation for machinability

	Attribute					Weighted Machinability
	M1	M2	ME	MT	MS	
Weights	.45	.27	.14	.09	.05	
W1	.16	.23	.26	.09	.29	.19
W2	.06	.25	.32	.13	.32	.17
KS1	.14	.20	.19	.31	.19	.18
KS2-1	.28	.17	.13	.25	.11	.22
KS2-11	.36	.14	.10	.22	.08	.24

Table 8. Final selection of optimal cutting fluid

α	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Fluid	KS2-11	KS2-1	KS2-1	KS2-1	KS1	KS1

절삭유제를 최종적으로 선택하기 위해서는 Table 6 및 7의 환경부하(F_E)와 절삭성(F_M) 요인에 대한 각 대안의 가중 평가값을 함께 고려하여야 한다. 고려요

단기적인 청정기술로는 가공조건들의 환경영향을 평가하고 환경부하가 적은 대안들로의 대체가 필요하다. 본 논문에서는 청정생산을 위한 절삭공정의

설계로써 단일 절삭가공에서 절삭유제의 선택방법을 제시하였다. 기존의 절삭성을 바탕으로한 절삭유제의 선택방법과 환경영향을 고려한 선택방법을 비교하여 절삭유제의 선택기준을 제시하고 환경부하의 평가방법으로 AHP 방법을 소개하였다. 중절삭가공이며 저속가공인 드릴링가공을 통하여 절삭성과 환경영향을 함께 고려한 절삭유제의 선택과정을 예시하였다. 물질 및 에너지 사용량과 수질, 대기 및 고형 배출물의 다섯가지 환경영향 평가요소에 대하여 다섯가지의 절삭유제를 비교한 결과 KS1 계열의 혼성유가 가장 환경부하가 적은 것으로 판명되었다. 절삭성은 KS2호의 활성극압유가 가장 우수하였으며 환경영향의 가중치에 의한 최적 유제의 선택에 있어서도 비수용성 유제가 수용성 유제에 비하여 모든 경우에 우수하였다. 이 결과는 가공방법이나 가공조건들에 따라 변할 수 있는 것이나 예시한 경우에 있어서는 수용성 유제가 성능 뿐만 아니라 환경적인 면에서도 전혀 우수성을 보여주지 못한 점에 주목할 만 하다. 다른 경우와 마찬가지로 최적 유제의 결정에는 대안들의 평가등급을 어떻게 결정하느냐 하는 것이 가장 중요하다. 가능한한 많은 양의 정량화된 자료와 많은 수의 전문가의 의견에 의한 종합적인 평가가 결정에 대한 신뢰성을 높여줄 것이다.

참고문헌

1. 허탁, 안중우, 정재춘, 전과정 평가의 기본원리, 한국경영자총협회 (1995)

2. Byrne, G. and Scholta, E., "Environmentally Clean Machining Processes - A Strategic Approach," Annals of the CIRP, Vol.41 (1993)

3. Sheng, P. and Srinivasan, M., "Multi-Objective Process Planning in Environmentally Concious Manufacturing: A Feature-Based Approach," Annals of the CIRP, Vol.44 (1995)

4. 절삭유제와 연삭유제, 한국유화시험검사소 (1988)

5. 人見勝人, 生産 시스템 工學, 喜重堂 (1989)

6. 오근태, 경제적 설비투자 계획 수립을 위한 분석 연구, 과학기술처 특정연구개발사업 연구보고서 (1990)

7. Saaty, T., The Analytic Hierachy Process, McGraw-Hill, New York (1980)

8. Machining Data Handbook, Institute of Advanced Manufacturing Sciences, 3rd Ed. (1980)

9. Higgins, T., Pollution Prevention Handbook, Lewis Publishers (1995)