

레이저 절단에서 Sugeno 퍼지적분을 이용한 재료 유사성 비교에 관한 연구

최은석* · 한국찬** · 나석주**

A Study on the Comparison of Material Similarity Using Sugeno Fuzzy Integral in Laser Cutting Process

E.S. Choi*, G.C. Han** and S.J. Na**

Key Words : Sugeno Fuzzy Integral(Sugeno 퍼지적분), Material Similarity(재료 유사성),
Working Range(절단 영역)

Abstract

Laser processing workmen should select the working condition for laser cutting of new materials by the preparatory experiments for that material or from the past experiences in cutting of other similar materials. This paper proposes a criterion to determine how much a material is similar to other materials by using the Sugeno fuzzy integral. With the proposed criterion the laser processing workman can objectify the considered material for his decision. The expert system programmer can give the system a high flexibility by experimenting with some materials in a large range of similarity and can support the laser processing workman by offering the similarity between materials.

1. 서 론

레이저 가공기술은 재료가공분야에서 넓은 응용 분야를 가지고 있으며, 특히 절단, 용접, 열처리등의 가공분야에서 고정밀도와 자동화의 용이성으로 인

해 생산성이 높은, 고부가가치의 첨단 응용기술로 부각되고 있다. 그 중 레이저 절단은 산업용으로 이용되는 레이저 가공 공정중에서 50-80%를 차지하고 있다¹⁾. 매년 많은 논문, 실험 데이터, 작업 사양이 각 실험실과 작업장에서 나오지만 체계화된 데이터 베이스의 형태로 다른 사용자에게 일관

* 비회원, 대우 자동차(주)

** 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

성 있게 제공되지 않기 때문에 사장되거나 같은 실험을 반복해야하는 등 경제적 손실이 큰 상황이다. 따라서 실험결과와 체계화와 함께 지식 베이스의 구축이 절실한 상황이며 최근에 인공지능의 한 분야인 전문가 시스템 분야의 발전과 더불어 이에 관한 관심이 고조되고 있다. 기존의 레이저 절단용 전문가 시스템은 재료 종류별로 절단 실험을 하여 그 결과를 데이터베이스 형태로 저장해두고, 사용자의 질문에 따라서 절단 조건을 제시하는 형태이며 재료마다 절단 실험을 해야 하므로 제한된 재료에 대해서만 절단 조건을 제시하고 있다. 따라서 전문가 시스템을 제작하는 프로그래머의 경우는 시스템의 적용성을 높이기 위해서 방대한 실험을 해야하는 어려움이 있다. 또한 레이저 가공 기술자는 전문가 시스템에서 제시되지 않는 재료의 절단조건에 대해서 예비 실험으로부터 혹은 경험이나 전문가적인 지식에 의해서 절단 조건을 설정해야 한다. 예비 실험을 할 경우 가공 기술자는 통상 과거 절단해 본 재료중에서 현재 절단하고자 하는 재료와 가장 유사하다고 판단되는 재료의 절단 조건을 기준으로 예비 실험을 하게 된다.

인공지능에 대한 연구는 최근들어 활발히 진행되고 있으나 아직은 대부분 실험실에서의 적용 단계이며 이중 경제성과 상업성에서 타당성을 지니고 있는 일부 전문가 시스템의 실용화가 추진되고 있다. 전문가 시스템은 통상 전문가가 해결할 수 있는 영역의 문제를 해결하도록 구축된 컴퓨터 프로그램으로 일반적인 프로그램과는 달리 지식 베이스와 추론 부분이 서로 독립적으로 이루어져 있으며 내부적으로 패턴 매칭(pattern matching)과 트래킹(tracking)으로 사용자가 요구하는 상황에 맞는 최적의 결론을 도출해 내도록 설계되어 있다. 레이저 절단공정에서 절단조건 선정에 대해 전문가 시스템을 설계한다고 할때 쉽게 생각할 수 있는 것은 재료간의 유사성을 비교하여 기존의 지식 베이스에 저장된 재료의 절단조건중 가장 유사한 재료의 정보를 제시함으로써 작업자로 하여금 좋은 판단의 기준을 삼도록 하는 것이다. 그러나 실제 재료간의 유사성을 판단하는데 근거가 될 수 있는 인자로는 합금원소의 성분, 표면상태, 열처리 방법 등을 비롯해 정량적으로 규명하기가 어려운 여러 가지 요인들이 복합적으로 관련되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 요인들을 모두 고려한다는 것은 불가능할 뿐만아니라 각 정보들이 가지고 있는

모호성으로 인해 고전적인 순차 논리에 의해서는 구현하기에 매우 어려운 한계점에 부딪치게 된다. 기존의 전문가 시스템은 컴퓨터가 기본적으로 제공하는 이진논리(binary logic)에 그 기반을 두고 있으며, 이러한 이진논리의 제한성 때문에 전문가의 지식을 효과적으로 표현하지 못하는 어려움이 있다. 1965년 Zadeh에 의해 제안된 퍼지 집합론은 불확실하고 경계가 애매한 개념을 정량적으로 처리할 수 있는 기틀을 제공하였다. 이에 많은 연구자들이 퍼지 집합론을 전문가 시스템에 적용하는 연구를 수행하였고 실제적인 시스템들도 개발하였다.

여러가지 평가항목에 대한 평가치를 종합하는 방법중에 Sugeno가 정의한 Sugeno퍼지적분은 어떤 대상이 여러 항목에 대해서 평가가 되고 각 평가항목의 중요도가 차이가 있을때 이들 평가치를 종합하는데 유용하게 적용되고 있다. 특히 이 퍼지적분은 주관적인 판단이 개입되는 평가 문제와 의사결정(decision making)등에서 유용하게 사용될 수 있다.

본 논문에서는 재료의 유사성 비교를 위한 하나의 방법으로 Sugeno퍼지적분을 이용해 각 재료들이 가지고 있는 여러가지 정보들중 재료의 기계적, 조직학적 특성을 비교적 잘 반영하고 있는 합금원소의 성분을 평가한 후 재료의 유사성 비교를 위한 판단 기준이 될 정량적인 양을 도출하고, 이로부터 대상 재료와 기존 재료들간의 유사성을 비교함으로써 절단조건 선정에 대한 하나의 기준을 제시 하고자 한다. 선정된 평가항목인 합금원소의 성분이 레이저 절단공정에서 절단특성에 영향을 미치는 인자와 상관관계가 있으며, 합금원소가 재료의 유사성 비교를 위한 타당성 있는 자료로 사용될 수 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다.

2. 레이저 절단 공정에 있어서 합금원소의 영향

레이저 절단특성에 영향을 미치는 인자는 크게 레이저 광학(optics), 합금성분 그리고 기타 금속의 조직학적인 영향과 외관등으로 나눌 수가 있다. 절단특성을 결정하는 중요한 특성중 하나인 레이저 광학에 의한 영향으로는 레이저의 광 흡수율인데 이는 파장과 연관이 있다. 또한 이 흡수율은 금속의 표면상태나 표면온도 그리고 금속표면의 조직에

따라서도 변하지만²⁾ 재료의 열전도율, 산소와의 친화력, 산화물의 물리적 특성등에 의해서도 크게 영향을 받는데 이와같은 성질들은 재료가 가지고 있는 합금원소의 성분과 관련이 있다고 볼 수 있다. CO₂ 레이저의 경우, 강철이 알루미늄이나 구리에 비해 흡수율이 높아 절단이 용이하다. 열전도율에 의한 영향은 열전도율이 큰 재료는 많은 부분이 열전도로 낭비되기 때문에 효율이 좋지 않다. 열전도율이 큰 재료인 알루미늄이나 구리의 절단이 어려운 이유가 여기에 있다. 연소절단에 있어서 재료의 산소 친화력은 산화에 의한 반응열이 레이저 절단에 필요한 중요한 열원이기 때문에 한 재료의 레이저 절단 가능성을 결정하는 가장 중요한 요소이며, 또한 산소와 반응에 의해 형성된 산화물은 레이저 절단 가능 속도, 두께, 드로스(dross) 유무에 직접적인 관련이 있다³⁾. 연강은 산화물의 점성이 낮아 드로스가 없는 고속 절단이 가능하나 스테인레스강은 크롬 산화물(Cr₂O₃)이 점도가 높고 용융점 또한 높기 때문에 슬래그(slag)가 원활하게 제거되지 못하고 달라붙게 되어 재료의 연소가 잘 이루어지지 않고 절단속도가 느려지게 된다. 절단면 또한 슬래그의 점성이 커서 슬래그 사이에서 침식이 일어나지 않고 용융물에서 일어나기 때문에 좋지 않다. 알루미늄의 경우는 산화물(Al₂O₃)이 모재보다 용융점이 훨씬 높아서 역시 원활한 절단이 이루어지지 않는다⁴⁾. 이와같이 재료에 포함된 합금원소 성분과 이로인한 열전도율과 산소와의 친화력에 미치는 영향을 고려해보면 레이저 절단특성에 영향을 미치는 인자로 합금원소의 성분을 들수 있다는 가설이 타당하다고 볼 수 있다.

3. 재료 유사성 비교 알고리즘의 구현

3.1 퍼지척도

하나의 합금원소가 여러개의 재료에 임의의 비율만큼 포함되어 있는 경우에 대해 기술할 필요가 있는데, 이를 수학적으로 표현하기 위해서는 집합의 원소가 구간[0, 1]의 값을 갖는 퍼지집합과 이 원소가 여러개의 집합중에 임의의 집합에 소속될 가능성에 대한 개념을 도입해야 한다. 이와같이 한 원소가 어느 집합에 속하는지에 대한 가능성이 매 대한 상황일때 이 소속정도를 나타내는 척도를 퍼

지척도(fuzzy measure)라 부르며 이 개념을 도입함으로써 재료의 유사성 비교를 위한 Sugeno 퍼지적분의 전개가 이루어 진다.

경계가 모호하게 정의되어 있는 퍼지집합 A가 있을때 이 집합에 소속되는 원소들의 소속값들의 집합인 소속함수 μ_A 는 퍼지값을 가지게 되는데 이는 집합 A에 주어진 불확실성(uncertainty)을 표현한다. 한편 퍼지척도(g)는 임의의 원소 a가 주어졌을때, 이 원소가 어느 집합에 소속될수 있는가 하는 믿음의 정도(degree of evidence)를 나타낸다. 이때 a가 어느 집합에 속할 가능성이 불확실하기 때문에 퍼지 척도 g가 퍼지값을 가지게 되며 퍼지척도 g는 원소마다 정의된다. 예를 들어 어느 원소 a에 대하여 이 원소가 포함될 수 있는 모든 경우를 모은 경우를 전체 집합 X라 할때 X에서 세분하면 A₁, A₂, A₃와 같은 부분집합으로 나눌 수 있다. 이 때 원소 a가 A₁에 포함될 가능성(퍼지척도의 값)은 g(A₁), A₂에 포함될 퍼지척도는 g(A₂), A₃에 포함될 가능성은 g(A₃)등으로 나타낼 수 있다. 이때 각 집합이 반드시 상호 배타적일 필요는 없으며 각 퍼지 척도의 합이 반드시 1이 될 필요 또한 없다. 이것은 각 집합이 상호 배타적이지 않고, 이 집합의 합집합이 반드시 전체집합 X를 이루지는 않기 때문이다⁵⁾. 여기서 하나의 합금원소에 대한 퍼지척도라 함은 각 재료에 포함되어 있는 합금원소의 양에 대한 두재료간의 유사도를 평가한 평가치를 의미하고 있으며, 집합들 상호간이 배타적이지 아니라 함은 동일한 합금원소들을 임의로 포함하고 있는 재료들 사이에는 유사성이 있다는 물리적인 의미와 일치한다.

3.2 Sugeno 퍼지 적분의 정의

Sugeno 퍼지 적분은 어떤 대상이 여러 항목에 대해서 평가가 되고 각 평가 항목의 중요도에 차이가 있을 때 이들 평가치를 종합하는데 유용하게 이용될 수 있다는 것을 전술한 바 있다. 특히 이 퍼지 적분은 주관적인 판단이 개입되는 평가 문제에서 유용하게 사용될 수 있는데 이를 정의하면 다음과 같다. 임의의 보통집합 X에 대하여 퍼지척도 $g: P(X) \rightarrow [0,1]$ 이 정의되어 있고, X를 정의 구역으로 하고 구간 [0,1]을 치역으로 하는 함수 $h: X \rightarrow [0,1]$ 이 정의되어 있다고 하자. 이때 A(A \subseteq X)에서의 함수 h의 퍼지척도 g에 대한 Sugeno 퍼

지적분은 다음과 같이 정의된다⁵⁾.

$$\int_A h(x) \circ g(\cdot) = \text{Sup Min}_{\alpha \in [0,1]} [\alpha, g(A \cap H_\alpha)],$$

$$H_\alpha = \{x \mid h(x) \geq \alpha\} \tag{1}$$

$$= \text{Sup Min}_{E \in X} [\text{Min}_h(x), g(A \cap E)] \tag{2}$$

전체 평가 항목 X에서의 평가 함수 h의 (중요도 함수 g에 대한) Sugeno의 퍼지적분은 다음과 같이 같다.

$$\int_X h(x) \circ g(\cdot) = \text{Sup Min}_{E \in X} [\text{Min}_{\alpha \in E} h(x), g(E)] \tag{3}$$

여기서

집합 X : 어떤 대상에 대한 평가 항목

g(E) : 대상의 전체적인 평가에 대해 항목 E의 평가치가 기여하는 정도, 즉 평가항목의 부분집합 E의 중요도이다.

X의 멱집합(P(X))의 원소 E ∈ P(X)에 대해 정의된다.

h(x) : x ∈ X, 평가항목 x에 대한 평가치이다.

X가 유한 집합일 때는 Sugeno 퍼지 적분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\int_X h(x) \circ g(\cdot) = \text{Max Min}_{i=1, \dots, n} [\text{Min}_h(x_i), g(E_i)] \tag{4}$$

3.3 Sugeno 퍼지 적분과 재료 유사성 비교 알고리즘

레이저 절단품질은 재료의 특성에 많은 영향을 받는다. 각각의 재료에 대하여 실험하고 지식베이스화 하는 것은 재료의 종류가 많은 경우 방대한 실험이 요구되기 때문에 한 재료의 지식베이스를 유사한 다른 재료가 공유할 수 있도록 하는 것은 커다란 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 가능성을 판단할 척도가 필요한데, 본 논문에서는 재료의 절단 특성을 지배하는 요소로 재료의 합금 원소라 가정하고 이로부터 재료의 유사성을 비교할 수 있는 하나의 척도를 제시하였다. Sugeno 퍼지

적분은 어떤 대상이 여러 항목에 대하여 평가가 되고 각 평가항목의 중요도에 차이가 있을때 이들 평가치를 종합하는 방법이다. 본 논문의 Sugeno 퍼지 적분에서는 합금원소의 상대적인 양을 평가 항목으로 잡고 합금원소가 레이어 절단에 어떠한 영향을 미치는가를 평가 항목의 중요도로 잡았다. Table 1에 재료 집단에 있어서 중요한 합금 원소, 각각의 합금원소의 중요도 g(Ei)와 각 합금 원소의 재료군에 있어서 하한값(L)과 상한값(U) 그리고 그 재료 집단에 속하는 각각의 재료의 합금 원소량(Ai, Bi)이 표시되어 있다. h(x)는 Fig.1와 같은 사다리꼴 퍼지 함수를 취하였는데, 이 그림이 의미하는 것은 절단조건을 비롯한 필요로하는 정보가 지식베이스에 저장된 한 재료 Ai와 비교하고자 하는 임의의 재료 Bi 사이에서 동일하게 포함되고 있는 합금원소 ai의 양에 따른 평가치(h(x))를 나타내고 있다. 즉 재료 Bi가 포함하고 있는 합금원소 ai의 양이 재료 Ai에 함유되어 있는 양과 동일하다면 합금원소 ai에 의한 재료 유사도에 관한 평가치는 1로써 최대값을 나타내며, 반면 이보다 작거나 많이 함유되어 있다면 평가치가 1보다 작은 값을 나타낼 것이다. 이러한

Table 1 Alloy element specification for one material group

Alloy element	a ₁ , a ₂ , a ₃ , ..., a _n
Importance	g ₁ , g ₂ , g ₃ , ..., g _n
Lower limit	L ₁ , L ₂ , L ₃ , ..., L _n
Upper limit	U ₁ , U ₂ , U ₃ , ..., U _n
Material A	A ₁ , A ₂ , A ₃ , ..., A _n
Material B	B ₁ , B ₂ , B ₃ , ..., B _n

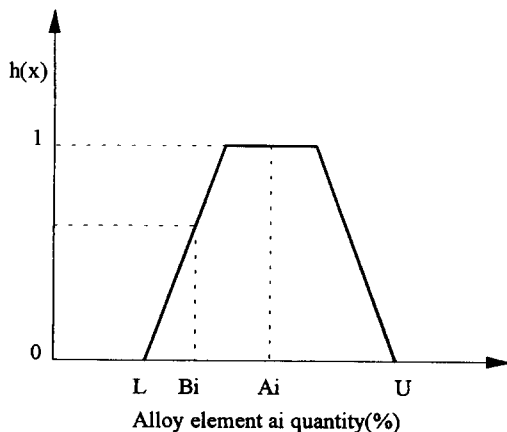


Fig.1 Trapezoidal fuzzy number

방식으로 모든 합금원소에 관한 평가치를 종합하여 그 유사도를 판단하는 것이 Sugeno 퍼지 적분의 기본 개념이다. 이와 같이 지식베이스에 재료 Ai의 절단 데이터는 있으나, 재료 Bi의 절단 데이터가 없는 경우 재료 Bi가 재료 Ai에 어느 정도 유사한가는 Sugeno 퍼지 적분을 써서 구한다. 이는 재료의 유사성 비교에서 재료 Bi가 재료 Ai에 유사한 정도가 크다면 재료 Ai의 절단 데이터를 이용해서 재료 Bi를 절단해도 신뢰성있는 절단 품질을 얻을 수 있다는 가능성을 부여한다.

4 프로그래밍 구현과 적용

본 논문에서 제시한 유사성 비교 알고리즘은 IBM PC 호환기종에서 터보 프롤로그(Turbo Prolog) 버전(version) 2.0으로 구현하였다⁶⁾. 사용자의 입력은 풀다운메뉴에 의한 대화식 사용자 인터페이스 방식이며, 절단하고자 하는 재료의 합금원소량을 입력하면 유사성 비교 알고리즘인 식(4)로 부터 재료 유사도가 사용자에게 구간[0, 1] 사이의 수치로 제시되며, 이때 수치가 1에 가까울수록 유사도가 크다는 것을 의미한다.

실제 절단에 미치는 합금원소의 중요도는 다른 합금조성을 가진 여러 재료를 절단하여 그 특성을 비교함으로써 얻어질 수 있다. 그러나 현재까지 합금원소의 정량적인 영향을 제시한 자료를 비롯해 이론적인 규명이 미흡한 상황이기 때문에 레이저 절단공정에서 각 합금원소의 중요도를 설정한다는 것은 매우 어려운 작업이라 하겠다. 본 논문에서는 레이저 절단공정에 미치는 합금원소의 영향을 고려하여 중요도를 설정하기 위해 앞절에서 기술 하였던 산소와의 친화력, 재료의 열전도율, 산화물의 물리적 특성등을 고려하였다. 레이저 절단 메카니즘중 하나인 연소절단은 산소와의 반응열을 이용해 모재를 용융시키고 고압의 가스기류로 녹은 모재를 제거하는 방법을 취하기 때문에 이러한 3가지의 특성은 레이저 절단 메카니즘과 많은 상관관계가 있음을 알 수 있다⁷⁾. 레이저 절단에서의 산화반응을 모사하기 위해 일반적인 부식현상을 도입하였는데, Table 3의 합금원소의 중요도는 Table 2의 부식데이터를 근거로 Cu, P의 중요도를 설정했으며 참고문헌⁸⁾의 부식 현상에 관한 정성적인 서술을 근거로 S, Si의 중요도를 설정했다. 레이저 절단에서 크롬 산화물(Cr₂O₃)이 산화를 막고 용융물의 원활한

Table 2 Average reduction of thickness of steel specimens after 15.5-year exposure in different atmospheres(Ref.⁷⁾)

Specimen Nu.	Composition wt					Thickness reduction			
	Cu	Ni	Cr	Ni	P	Kerney. Nj industrial		Kure Beach. Nc. 250mm(800ft) moderate marine	
						μm	mils	μm	mils
1	0.002	...	...	...	...	731	28.8	1321	52.0
2	0.04	...	...	...	...	223	8.8	363	14.3
3	0.24	...	...	...	...	155	6.1	284	11.2
4	0.008	1	...	...	...	155	6.1	244	9.6
5	0.2	1	...	...	...	112	4.4	203	8.0
6	0.01	1	...	0.61	...	1059	41.7	401	15.8
7	0.22	...	...	0.63	...	117	41.7	401	15.8
8	0.01	...	...	0.22	...	373	14.7	546	21.5
9	0.22	1	...	0.20	...	152	6.0	251	9.9
10	0.02	...	...	...	0.06	198	7.8	358	14.1
11	0.21	...	...	...	0.06	124	4.9	231	9.1
12	...	1	1.2	0.5	0.12	66	2.6	99	3.9
13	0.21	...	1.2	0.62	0.11	84	3.3	145	5.7
14	0.2	1	...	0.16	0.11	84	3.3	145	5.7
15	0.18	1	1.3	...	0.09	48	1.9	97	3.8
16	0.02	1	1.3	0.46	...	48	1.9	94	3.7
17	0.21	1	1.2	0.48	0.06	48	1.9	84	3.3
18	0.21	1	1.2	0.18	0.10	48	1.9	97	3.8

Table 3 Lower limit, upper limit and importance of alloy elements in carbon steel

Alloy element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
Lower limit(%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Upper limit(%)	0.3	1.75	0.12	0.06	0.6	1.5	1.5	0.6
Importance	1	1	0.5	0.5	0.5	2	1	1
Normalized importance	0.133	0.133	0.066	0.066	0.066	0.27	0.133	0.133

Table 4 Materials used for proof of similarity simulation

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
SHP1	0.12	0.5	0.04	0.04	0.2	0.1	0.15	0.4
SCP1	0.12	0.5	0.04	0.04	0.2	0.1	0.15	0.4
SM10C	0.1	0.45	0.04	0.05	0.08	0.04	0.07	0.1
SM45C	0.44	0.69	0.037	0.038	0.2	0.03	0.04	0.1
A242	0.15	1.0	0.04	0.05	0	0	0	0.2
A588	0.15	1.1	0.04	0.05	0.2	0.5	0.2	0.3
A607	0.22	1.35	0.04	0.05	0	0	0	0.2

유동을 막는 작용, 니켈(Ni)이 고온에서의 열전도와 용융물의 유동성을 좋게하는 작용을 고려해서 Cr, Ni의 중요도를 설정했다. 여기서 두 원소 Cr과 Ni는 서로 상반되는 효과가 있지만 실제 절단에 있어서 크롬 산화물의 매우 낮은 유동성때문에 발생하는 절단성의 저하가 Ni에 의한 유동성 향상의 효과에 비해 더 크기 때문에 중요도의 크기가 다르게 설정되었다. 이밖에도 탄소강의 분류에 있어서 강화제로서 탄소(C)와 망간(Mn)의 기능을 고려하여 C, Mn의 중요도를 설정했는데, 이는 재료의 기계적 성질에 주로 영향을 주는 원소이며 이중 Mn은 저온에서는 강도를 증가시키나 고온에서는 소성을 증가시켜 주조성을 향상시키는 효과를 가져온다⁹⁾.

이와같이 선정된 합금원소의 중요도를 사용하여 탄소강, 고장력 강판에 재료 유사성 비교 알고리즘을 적용하여 재료를 분류해 보았다. Table 4에 분류를 시도한 재료와 각각의 재료에 있어서의 합금원소를 나타내었다. Table 5에는 분류된 집합을 대표하는 재료에 대한 재료의 유사성을 나타내었는데, 각각의 집합은 명확한 경계를 갖는 집합이 아니라 상호간의 교집합을 허용하는 퍼지 집합임을

알 수 있다. 이 결과로부터 같은 집합으로 분류된 재질이 실제로 강철의 분류에서도 유사한 재질이라는 것을 확인할 수 있으며 이는 곧 레이저 절단 특성에서도 유사한 성질을 보인다는 것을 의미한다. 유사성이 큰 재료로 분류된 집단내에서는 절단 조건 또한 유사하다는 것을 검증하기 위하여 같은 집단내 속한 열연강판(SHP1)과 SM10C를 절단하여 드로스가 없는 절단 영역을 비교해 보았다. 또한 절단 데이터가 없는 재료의 절단 영역을 유추해 보기 위하여 다음과 같은 실험을 해보았다. SHP1과 SM10C는 SM45C와 유사한 합금성분을 갖는 재료이다. 유사성 비교 알고리즘을 적용한 결과 SM45C에 대한 SHP1과 SM10C에 대한 유사도가 각각 0.73, 0.68인 것과 같이 SHP1이 SM10C보다 SM45C에 더 유사하다는 것을 예측할 수 있다. 결과적인 수치로 나타난 유사도 0.73과 0.68은 정량적인 물리적 양이 아니라 정성적인 의미를 부여하고 있는 양이며, 구간 0, 1사이의 값이다. SHP1과 SM10C의 절단 영역에서 SM45C를 절단해 보고 SM45C의 절단 영역이 어느 영역에 유사한지를 실제 검증 실험을 통해 알아보았으며 본 유사성 비교 알고리즘에 의해 추론된 각 재료에 대한 유사도의 결과와 실험에 의해 나타난 절단 품질로부터 수치적으로 제시된 유사도가 갖는 물리적인 의미를 살펴 보았다.

Table 5 Similarity to 3 prominent materials

	SHP1	SM45C	ASTM-A242
SM10C	0.73	0.68	0.7
SM45C	0.67	1	0.7
ASTM-A242	0.75	0.73	1
ASTM-A588	0.75	0.64	0.7
ASTM-A607	0.4	0.6	0.87

5 알고리즘 검증 실험결과 및 고찰

탄소강에 유사성 비교 알고리즘을 적용한 결과는

다음과 같다. Fig.2에 표시된 구역은 SM45C와 유사성이 큰 재료인 SHP1과 SM10C에서 드로스가 없는 절단조건 영역인데 두 재료에 대해서 그 영역이 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 유사한 재료간에 절단 데이터를 공유할 수 있다는 유사성 비교 알고리즘의 합리성을 보여주는 결과이다. Table 6은 700W급 CO₂레이저 가공 시스템을 이용하여 절단시 사용한 절단 조건을 나타낸다.

SM45C의 절단 영역과 기준으로 삼은 두 재료의 절단 영역을 비교하기 위하여 SHP1과 SM10C의

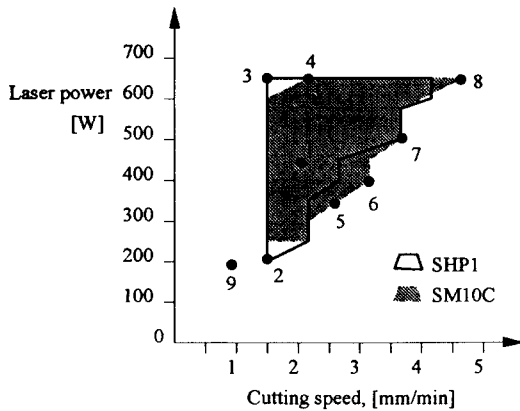


Fig.2 Working range of materials suggested to be similar by similarity simulation

Table 6 Cutting conditions used for experiment(Fig.2)

Focal length of lens	2.5"
Assist gas	O ₂
Nozzle-workpiece gap	1mm
Gas pressure	1.5kg/cm ²
Nozzle diameter	1mm
Workpiece thickness	1.6mm

절단 영역과 그 경계에서 몇개의 특정 지점을 선택하여 그 조건으로 SM45C를 절단하는 실험을 수행하였다. Fig.3은 각 절단에서 얻어진 절단부의 사진을 보여주고 있다. 기준 재료의 적절한 절단영역내에 있는 ①조건에서는 SM45C에서도 드로스가 없는 좋은 절단을 얻을 수 있었다. 그러나 적절 절단조건 경계에서 수행한 실험에서는 SHP1의 경계구역인 ②,③조건에서의 절단 품질이 SM10C의 경계구역인 ⑤,⑥,⑦조건에서의 절단 품질보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. SHP1, SM10C가 모두 유사한 재료일지라도 최적 절단 공유영역 이외에서는 유사도의 크기에 따라 절단 영역 경계에서의 절단 품질이 차이가 남을 보여준다. 그러나 ⑨의 절단 품질에서는 의외로 상당히 양호한 절단 품질이 얻어졌는데 이는 실제 SM45C의 절단 영역은 SHP1에 보다 유사하면서 ⑨의 절단 영역까지 어느 정도 확장되어 있다는 것을 짐작케 해준다. 본 실험 결과는 SM45C에 대한 SHP1과 SM10C 각각의 재료

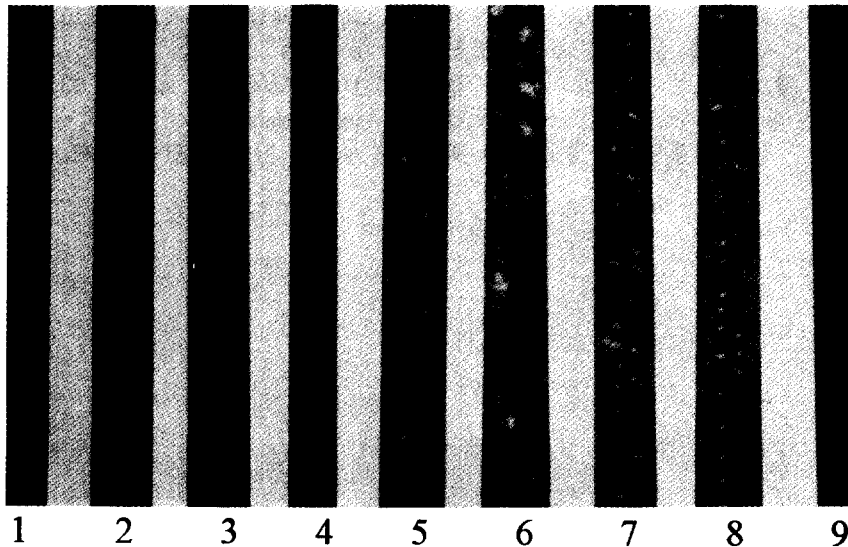


Fig.3 Examples of dross free condition of materials suggested to be similar by similarity simulation($\times 20$)

유사도 0.73, 0.68에 물리적인 의미를 부여하고 있으며 재료의 절단 특성이 재료의 합금원소와 밀접한 연관성이 있다는 처음의 가정에 합리성이 있음을 보여주고 있다. 또한 재료 유사도의 수치가 1에 보다 가까울수록 그 재료의 절단영역에서 임의로 취하는 절단 데이터에 대한 믿음의 확신도가 더욱 크다고 할 수 있다.

6 결 론

레이저 가공 기술자는 전문가 시스템에서 절단 조건을 제시하지 않는 재료의 경우 예비 실험을 통해서나 이미 절단해본 다른 재료의 절단조건에 근거하여 절단 조건을 설정한다. 본 논문에서는 가공 기술자가 유사한 재료의 절단 데이터를 이용하여 새로운 재료의 절단공정에서 신뢰성 있는 절단변수를 실험에 의존하지 않고 컴퓨터 프로그램에 의해 손쉽게 선정할 수 있는 하나의 방법을 제시하였다. 제시한 재료의 유사성 비교 알고리즘을 활용한다면 레이저 가공 기술자는 유사한 재료의 절단 조건을 참조하여 새로운 재료의 절단 조건을 쉽게 도출할 수 있을 것이다. 또한 전문가 시스템 프로그래머는 데이터 베이스를 구축하는 경우에 있어서 재료 집단에서 대표적인 재료만들에 대해서 절단 실험하고 다른 재료들에 대해서는 재료의 유사성을 제시함으로써 전문가 시스템에 유연성을 줄 수 있을 것이다. 제시된 재료 유사성 비교 알고리즘을 검증하기 위해서는 더 많은 재료에 대한 레이저 절단 실험이 요구되나, 현재 시점에서 구할수 있는 재

료가 한정되어 있고 실제 레이저 절단에 이용되는 재료도 매우 제한적이기 때문에 충분한 데이터를 제시하지 못함에 아쉬움이 있다. 그러나 알고리즘 자체의 확장성과 응용성으로 인해 차후로 다른 재료들에 대한 연구가 계속된다면 그 적용 영역이 더 넓어질 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) J. S. Ian : Multikilowatt laser application, The Industrial Laser Annual Handbook, Pennwell Books, (1990), pp.49-55
- 2) D. M. Roessler : An introduction to the laser processing of materials, The Industrial Laser Annual Handbook, Pennwell Books, (1986), pp. 16-30
- 3) 石井 明, 八木重典, CO₂ レーザ 加工技術, 日刊工業新聞社, (1985), pp.52-53
- 4) 한 유희 : 레이저 가공 기술, 대한 용접학회지, 제 8권 3호, (1990), pp.23
- 5) 이 광형, 오 길록 : 퍼지 이론 및 응용 1권, 홍릉과학출판사, (1991)
- 6) N.N : Artificial intelligence programming with Turbo Prolog, (1986)
- 7) 박준홍, 한국찬, 나석주 : FDM을 이용한 레이저 절단 공정에서의 절단 메카니즘 및 절단폭 해석, 대한기계학회지, 제17권 제10호, (1993), pp.2418-1993
- 8) Metal handbook, 9th ed., 13, Corrosion, ASM international
- 9) 양훈영, 김수영 : 금속재료학, 문운당, (1990)