

폐자동차 부품의 최적 분리순서 생성을 위한 방법론

박홍석*, 최홍원#, 목학수**, 문광섭***, 성재현**

Method for Generating Optimal Disassembly Sequence of End-of-Life Car's Parts

Hong Seok Park*, Hung Won Choi#, Hak Soo Mok**, Kwang Sup Moon***, Jae Hyun Sung**

ABSTRACT

In order to increase competitiveness and to gain economic benefit, companies ask more and more how to recycle their products in a efficient way. So far, to answer this question, companies are not sufficiently supported by suitable methods specially in the area of disassembly process planning. For this reason, we develop in collaboration with an industrial partner a new method for generating an optimal disassembly sequence. In the presented paper this method will be described in detail by considering the exiting assembly information, disassembly method and disassembly depth. PLM (Profit-Loss Margin) curve that is used to determine disassembly depth consists of profit value, disassembly cost and disassembly effect. Using assessment parameters, generated alternative disassembly sequences are evaluated and optimal disassembly sequence is proposed. This method is applied to generate the optimal disassembly sequence of Door Trim as an example.

Key Words : Disassembly depth (분리깊이), PLM (Profit-loss margin), MRFD (Modified reverse fishbone diagram), Evaluation criteria of disassembly sequence (분리순서 평가기준)

1. 서론

20세기 후반에 들어오면서 전 세계적으로 환경과 자원에 대한 문제가 점점 크게 대두되어졌고, 그에 따라 각 국의 환경규제들은 점점 강화되고 있다¹. 그동안 자동차에 대한 규제는 주로 대기오염에 초점이 맞추어져 왔다. 하지만 급속한 자동차 보유 대수의 증가는 결국 폐자동차의 증가로 연결되었고, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 폐기과정에서 보다 많은 부품들을 재사용 또는 재활용하는 것

만이 유일한 타결책이 될 것이다.

폐자동차는 철, 비철, 플라스틱, 고무, 유리 등 다양한 재질로 구성되어 있으며, 그 부품의 수만해도 2만 여개에 이르는 대형 폐기물이다. 또한 이들 부품들은 서로 복잡하게 얽혀 있어서 분리 및 회수가 어려운 실정이다.

실제로 폐자동차의 분리가 진행되는 대부분의 폐자동차 분리업체에서는 경제적인 분리방법 및 부품의 분리 후 재사용·재활용에 대한 분석이 체계적으로 이루어져 있지 못한 실정인어서 폐자동차의

접수일: 2003년 2월 11일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

* 울산대학교 기계자동차공학부

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail: kuma2008@mail.ulsan.ac.kr, Tel: (052) 259-2830

** 부산대학교 산업공학과

*** 영산대학교 경영정보학과

정확한 재할용량과 매립 및 소각량 등을 예측하지 못하고 있다. 또한 폐자동차 분리업체들은 대체적으로 영세하여 최적의 분리깊이와 순서 생성을 위한 연구와 노력이 어려운 실정이다.

따라서 점점 강화되고 있는 법규에 적절하게 대응하고 폐자동차 분리업체들의 경쟁력 강화와 효과적인 분리수행을 위해서는 최적의 분리방법과 경제적인 분리깊이 및 분리순서를 생성시켜주는 분리시스템이 필요하게 되었다.

분리에 대한 연구는 일찍이 환경과 자원문제에 대해 관심이 높았던 유럽과 미국을 중심으로 진행되었다. 이들이 관심을 가졌던 주된 연구분야는 분리모델을 사용하여 대체 분리순서를 생성하고 그 중에서 최적의 분리순서를 결정하는 것이다.

분리순서 생성을 위해서 제안되어진 분리모델로는 K. Ishii² 등이 사용한 Reverse fishbone diagram이 있다. 조립과 분리의 개념이 서로 상반된다는 점에 착안을 둔 K. Ishii 등은 분리순서를 기존의 조립순서를 표현하는데 사용되었던 Fishbone diagram을 상하로 뒤집어 사용함으로써 분리순서를 표현하였다. Tree 구조를 가지는 Reverse fishbone diagram은 부품의 분리시점과 분리의 진행 상황을 파악하기가 용이하고 분리공정을 기술하는데 있어서도 효과적인 점을 가지고 있다. 하지만 부품들 상호간의 연결관계 및 간섭관계에 대한 정보를 표현하기가 어려울 뿐만 아니라 Reverse fishbone diagram 자체로는 하나의 분리순서만을 표현할 수 있어서 다양한 대체분리순서 생성이 불가능하게 되는 단점을 가지고 있다.

부품들간의 연결관계에 중점을 둔 분리모델로는 R. Bopp³에 의해서 제안되어진 Structure diagram이 있다. Structure diagram은 분리공정이 수행되어지는 시점들을 분리층(disassembly level)을 사용하여 구분을 하고, 이들 분리층의 상하 또는 동일 분리층 내의 좌우의 부품들간의 연결 및 간섭 관계를 나타내었다. 이를 이용하면 작업자가 목표로 하는 특정 부품을 획득하기 위한 순서를 생성할 수 있고 또한 획득되는 부품을 비교적 자세히 표현할 수가 있다. 하지만 이 Structure diagram도 다양한 대체공정의 생성이 용이하지 못하다는 점과 복잡한 폐기품의 경우에 있어서 각 부품들간의 연결 및 기하학적인 관계를 모두 표현하기가 어렵다는 단점을 가지고 있으므로 부품수가 많은 폐자동차의 분리모델로서 사용하기에는 무리가 따른다.

다양한 대체 분리순서의 생성을 위해서 고안된 모델이 Petri-net을 이용한 모델이다. Petri-net모델^{4,5}은 AND/OR 그래프를 기본 개념으로 하는 분리모델이므로 대체 분리순서를 생성하기에는 용이한 점을 가지고 있다. 하지만 Petri-net모델은 작업자가 분리의 진행과정 및 분리공정에 대한 정보를 파악하기가 어렵고, 부품의 수가 많아질수록 그래프는 기하 급수적으로 복잡해서 취급이 문제가 되므로 폐자동차와 같이 부품의 수가 많은 폐기품의 분리모델로 사용하기에는 많은 어려움이 있다.

이러한 점을 고려하여 볼 때 최적의 분리순서를 생성하기 위해서는 정확한 분리정보의 기술과 발생 가능한 대체 분리순서를 모두 생성할 수 있는 분리모델이 제안되어져야만 한다.

본 논문에서는 작업이 간편하고 분리공정의 기술과 분리진행 과정을 파악하기에 용이한 Reverse fishbone diagram에 대체 분리공정을 생성하기 위한 AND/OR 그래프의 개념을 첨가함으로써 요구에 부응하는 새로운 모델을 고안하였다. 이를 Modified reverse fishbone diagram(MRFD)이라고 하였다.

MRFD을 이용하여 생성된 대체 분리순서들은 Setup change, Tool change 등의 분리순서 평가항목

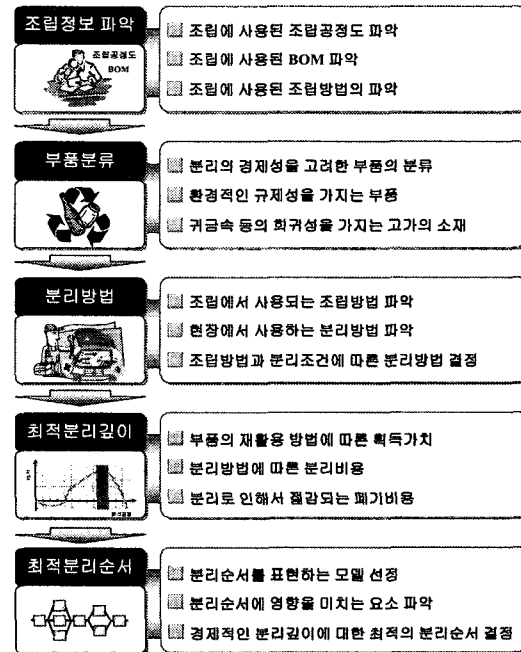


Fig. 1 Procedure for disassembly process plan

들을 적용하여 이를 정량화함으로써 최적의 분리순서를 결정하고자 하였다. 또한 전문가들의 지식이나 견해를 DB화하여 작업자가 분리계획을 수행할 때 이용하도록 하였다.

경제적인 분리깊이를 제안하여 제품 재활용에 대한 경제적인 요구사항을 충족시키고, 가능한 해의 범위를 줄이고자 하였다.

Fig. 1과 같은 체계적인 절차에 따라 본 연구를 수행하여 빠르고 정확하게 최적의 해에 도달하고자 한다.

2. 분리계획을 위한 기본요소들

2.1 분리에 영향을 미치는 요소들

폐기품을 부품으로 재사용하거나 소재로 재활용하기 위해서는 반드시 폐기품으로부터 부품을 분리해내는 공정이 필요하게 된다. 이러한 분리공정을 효과적으로 수행하기 위해서는 분리에 영향을 미치는 영향요소들을 충분히 고려한 다음에 분리공정계획을 수립하여야 한다.



Fig. 2 Disassembly influential factors

많은 분리실험과 기존의 연구자료들을 통해서 획득되어진 분리공정에 영향을 미치는 인자들을 Fig. 2에 나타내었다. 분리계획에 미치는 영향도에 따라 이들을 분리방법요소, 분리비용요소와 분리순서요소로 나누어 분리공정계획을 위한 각 계획절차에 응용하였다. 이들은 각 분야에서 결정에 미치는 중요도에 따라 우선 순위를 가지고 정성적 및 정량적인 평가기준으로서 응용된다.

2.2 부품의 분류

분리의 정보들 중에서 가장 중요한 것 중의 하나가 획득되는 부품에 대한 정보이다. 이는 분리를 수행하는 원초적인 목적이자 가장 기본이 되는 분리의 영향요소이기도 하다. 그러므로 실제로 부품을 분리하기에 앞서 부품에 대한 분류가 먼저 이루어져야 한다.

효과적인 부품의 분류를 위해서 부품에 대한 분류 기준을 크게 두 가지로 하였다. 그 중 하나는 부품이 가지고 있는 위험성이나 회귀성으로 인하여 반드시 분리가 요구되는 분리 의무성에 대한 것이고 다른 하나는 획득된 부품의 재활용 방법에 따른 분류이다.

Table 1에 나타나 있는 LWR 분류는 주로 부품의 분리 의무성을 나타내는 것으로 전 세계적으로 문제가 되는 자원고갈과 환경적인 문제를 해결하기 위해서는 반드시 분리가 요구되는 부품 및 소재를 구별하기 위한 분류이다. 폐자동차에 남아있는 유류, 폐배터리의 납과 PCB가 포함된 콘덴서 등 인체에 유해하거나 위험한 물질들은 환경단체나 정부로부터 규제를 받는 부품(소재)들로서 반드시 정해진 절차를 거쳐 폐기하여야 하는데 이러한 부품을 L (Legal) type이라고 하였다. 그리고 자동차 배기구의 촉매로 사용되는 백금과 같은 귀금속류는 그 부존 자원이 부족할 뿐만 아니라 재활용 방법이 개발되어짐에 따라 그 획득가치가 아주 높아지는 부품들로서 이들은 W(Worth) Type으로 분류하였다. 그 외 다른 일반적인 부품들은 R(Reasonable) Type으로 구분하였다.

Table 1 LWR analysis

Type	관련 사항	분리 여부
L type	국가나 환경단체 등에 의해서 여러 가지 제약을 받는 경우	분리깊이 이내야 반드시 포함 되어야하는 부품
W type	분리공정을 통해서 획득되는 부품이 고가의 회귀 금액 같은 경우	재처리 비용을 고려한 후에 분리여부 결정
R type	그 외의 일반적인 부품	경제성 파악 후에 분리여부 결정

또 다른 하나의 분류 방식은 Table 2에서 보듯이 분리된 부품의 재활용 방법에 따라 분류하는 것으로 이를 ABCD 분류라고 하였다. 일반적으로 분리된 부품은 세척 등의 간단한 후처리 공정만으로 부품이나 조립군으로 재사용이 가능한 경우가 있는데 이러한 경우를 A Type이라 하였다. B type은 반

도체나 콘덴서 등이 붙어있는 컴퓨터 기관 같은 부품들로서 여러 가지 소재들로 구성되어 있으므로 빠른 분리를 통해 파쇄 후 선별등의 재처리 공정을 거쳐 소재로 재활용되는 경우이다. 그리고 동일한 소재로 구성되어 있어 별다른 분리과정 없이 소재로 재활용되는 부품들을 C Type이라고 하고, 재활용이 되는 않는 부품은 D Type으로 분류하였다.

Table 2 ABCD analysis

Type	관련 사항	재활용 방법
A type	분리 작업 후 간단한 사체 작업만으로 분리품을 부품으로 재활용이 가능한 경우	부품 재사용
B type	분리 작업 후 열분, 저처리 공정들을 통하여 분리품을 소재로 재활용이 가능한 경우	재생화
C type	분리 작업 후 재료로서 재활용이 가능한 경우	재생화
D type	분리 작업 후 폐기되어지는 경우	폐기, 재활용 불가

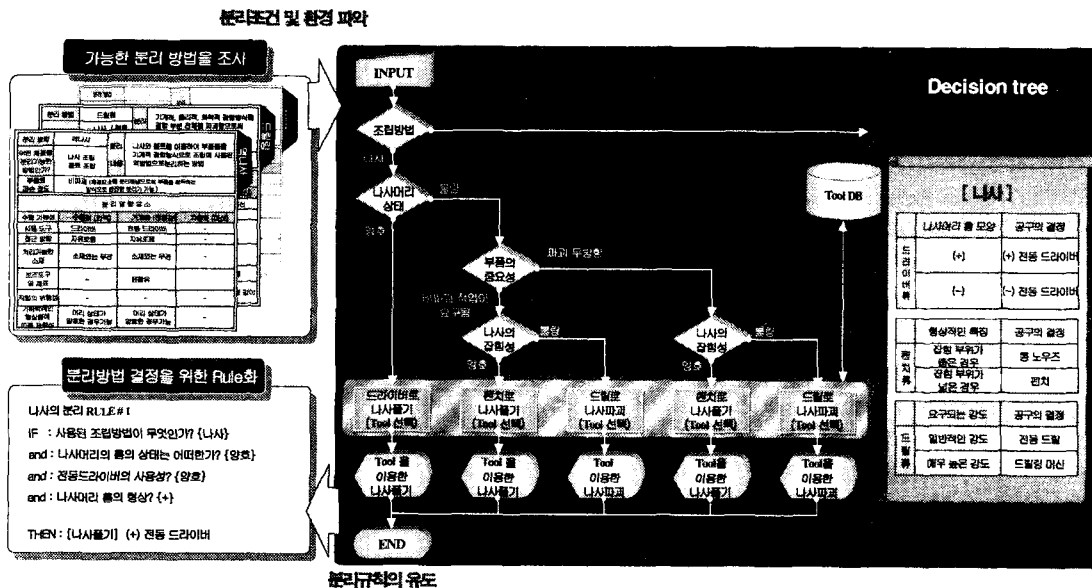
부품의 LWR 분류와 ABCD 분류는 폐기품의 분리공정계획 단계에서 분리방법, 분리깊이, 분리순서 등에 크게 영향을 미치는 분리영향요소로 고려되어진다.

2.3 분리방법의 결정

분리는 일반적으로 조립과는 상반되는 개념을 가지고 있지만 조립의 역방법을 바로 분리방법으로 적용할 수는 없다. 실제로 사용되어지는 분리방법들은 조립에 사용된 메커니즘과는 완전히 다른 방법으로 진행되어질 수도 있는데, 이는 분리공정이 수행되는 환경과 조건이 조립공정을 수행할 때와는 크게 다를 수 있기 때문이다. 조립공정이 부품의 파손 없이 정확하게 조립되어지는 것에 초점을 맞춘 것이라면 분리공정은 분리 후 발생하는 경제성에 중점을 두고 있으므로 일반적으로는 빠른 분리가 요구되는 것이 대부분이다.

분리방법을 신속하고 효과적으로 결정하기 위해서는 주어진 분리환경과 조건을 정확히 파악하여야 한다. 현장에서 부품의 상태에 따라 응용하고 있는 분리방법과 실험실에서 분리실험을 통해 얻어진 자료와 경험에 의해 각 조립방법에 적용할 수 있는 분리방법을 조사하였다. 이 지식에 근거하여 Decision tree를 이용하여 분리방법에 대한 법칙을 생성하였다.

Fig. 3은 자동차 Door trim 조립군에서 가장 많



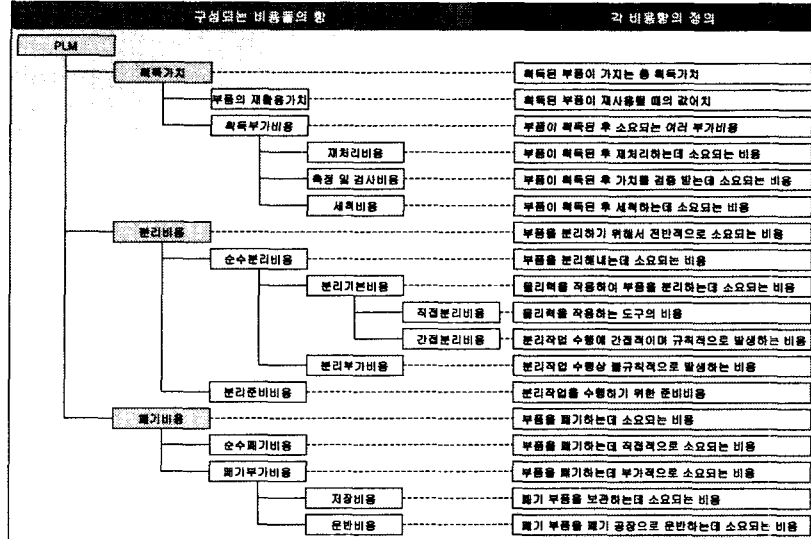


Fig. 4 Detail terms of PLM value

이 나타나는 나사체결을 이용한 조립에 대해서 가능한 분리방법들을 나타낸 것이다. 나사조립의 경우는 나사풀기, 나사파괴 등의 방법론이 있고, 세부적인 분리방법을 결정하는 조건으로는 부품의 분류를 통한 부품의 중요성과 나사머리의 상태 및 나사머리의 잡힘성 등과 같은 체결요소에 대한 정보들을 이용하였다. 그리고, 분리공정에 사용 가능한 도구들을 Tool DB에 정리하여 덤으로써 현업에서 이 시스템을 적용할 때 이용의 폭을 넓히고자 하였다.

이 결과로 하나의 조립방법에 대해 최적의 분리방법을 생성해 주는 Rule을 생성할 수 있다. 이와 같은 Rule을 바탕으로 전문가시스템을 구현하여 분리방법이 신속하고 효과적으로 결정되도록 한다.

3. 경제적인 분리깊이의 결정

3.1 PLM곡선의 구성

M. R Johnson⁶ 등은 분리경제성을 나타내는 용어로 PLM(Profit-Loss Margin)을 사용하였다. PLM 값은 분리공정을 수행함으로써 발생하는 획득가치와 손실의 차이를 나타내는 값으로 정의된다. 분리 경제성을 표현하는 PLM값의 획득을 위해 분리를 통해서 얻어지는 획득가치와 분리효과 같은 이득과 분리비용으로 표현되는 손실의 개념을 구체화시켰다(Fig. 4).

부품의 획득가치는 분리의 주된 목적이라고 볼 수 있으며, 그 값은 분리된 부품을 재사용 하거나 소재로 재활용할 때 획득되어지는 부품의 재활용 가치를 나타낸다. 이뿐만 아니라 획득가치를 결정하기 위해서는 부품을 분리한 이후의 후처리 공정에 소요되는 비용의 항에 대해서도 고려하여야 한다. 후처리비용에는 실제로 후처리 공정을 수행하는 비용과 부품으로 재사용하기에 적합한가를 측정하고 검사하기 위한 비용 등으로 구성되어진다.

분리공정을 수행함으로써 발생하는 또 다른 이득은 분리효과이다. 수명이 다한 폐기품은 폐기품 처리업체들에 의해서 소각이나 매립 등과 같은 방법으로 폐기가 이루어지게 되는데, 분리를 통해 부품(혹은 소재)으로 재활용되어짐으로써 폐기되는 양이 줄어들게 된다. 이는 분리를 수행함으로써 얻어지게되는 또 다른 획득가치로 볼 수 있는데 이를 분리효과라 한다.

이러한 분리효과를 PLM식에 사용하기 위해서는 정량적인 값이 산출될 수 있어야 한다.

분리효과는 절감되는 폐기비용으로 정의함으로써 분리효과의 값을 구할 수 있다. 폐기비용은 폐기공정을 수행하기 위해서 소요되는 순수폐기비용과 폐기물의 저장이나 폐기물을 수거하기 위한 운반비용 등으로 구성되는 폐기부가비용의 합으로 이

루어진다. 이 비용은 수거업체에서 폐기하기 위해 소요되는 것이나, 일반적으로는 재활용 업소에서의 폐기비용은 폐기품을 최종적으로 수거해 가는 전문 폐기업체들의 수거비용으로 계산되어진다.

PLM을 구성하는 비용들 중에서 나머지 하나가 분리비용이다. Fig. 4에서 보면 분리비용을 구성하고 있는 각각의 항목 그에 대한 내용이 나타나 있다. 대부분의 분리비용의 항목 중에서 비교적 정확한 계산이 이루어지는 직접분리비용은 실제로 분리도구를 이용하여 부품을 떼어내는 분리공정을 수행하는데 소요되는 비용을 나타낸다.

간접분리비용은 분리도구의 교환, 분리자세 교정과 분리장소 접근 시간등으로 산정된다. 이 비용은 주로 실험에 의한 data와 MTM법에 기반을 둔 참고문헌⁷ 등에 소개된 방법론에 의존하여 계산하였다. 불확실한 것에 대한 기술적인 조사나 도면의 재분석 등에 의해 소요되는 비용들, 즉 분리부가비용은 불규칙적으로 발생하므로 정확한 계산값을 기대하기 어렵다. 그러므로 일반적으로 분리기본비용의 일정한 비로써 결정하게 된다. 이 비용은 재활용 업소의 축적된 Know-how와 조직력에 따라 크게 달라진다. 조사된 폐차장의 경우에는 분리작업상의 문제점들의 해결을 위해 체계적인 방법론보다는 경험에 의한 즉흥적인 결정이 주를 이루고 있었다. 폐차장등에서 대화에 의해 수집된 자료에 의해 분리기본비용의 5%정도를 부가비용으로 산정하는 것이 타당하였다.

분리준비비용은 주로 분리도구들의 준비나 분리작업을 위한 차공구등의 설치비용으로 이루어진다. 이 비용의 산정에는 재활용 업체의 다년간의 자료에 의해 이루어지는 표나 그래프와 축적된 경험등이 이용된다. 접촉한 폐차장들에서는 이런 자료들이 축적되어 있지 않았다. 비용의 산정에는 각 분리과제에 대해 대화와 실험에 의해 유도된 일정한 값이 이용되었다.

분리비용은 위의 각 항목들에 대한 시간으로 산정하여 이 값에 분리도구비용과 인건비를 곱하여 계산하였다. 분리도구비용은 분리도구의 사용비용이며 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{분리도구비용} &= \text{감가상각비} + \text{이자비용} \\ &+ \text{공간비용} + \text{수리비용} \\ &+ \text{에너지비용} + \text{운전보조비용} \quad (1) \end{aligned}$$

식(1)에서 운전보조비용은 윤활유와 같이 분리

도구의 운전에서 사용되는 보조재료비용이다.

이 비용과 분리인건비용을 단위 시간당 비용으로 계수화하여 총 분리시간을 가지고 분리비용을 아래의 식으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{분리비용} &= (\text{DTF} + \text{DLF}) \times T \quad (2) \\ \text{DTF} &: \text{분리도구계수} \\ \text{DLF} &: \text{분리인건계수} \\ T &: \text{총 분리시간} \end{aligned}$$

Fig. 5는 진동드라이버를 사용할 경우에 대한 분리도구계수와 분리인건계수를 나타낸 것이다. 이러한 계수들을 DB화함으로써 해당 분리작업에 대해서 분리시간만을 구함으로써 분리비용을 계산하는 것이 가능하게 된다.

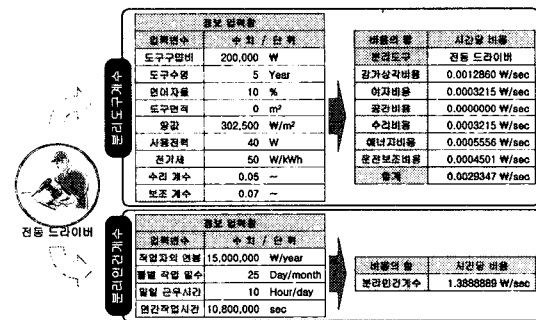


Fig. 5 Disassembly tool and labor factor

3.2 경제적인 분리깊이의 결정

기존에 존재하는 조립계획서상의 조립 역순에 따라서 분리를 진행하면서 단위 분리공정마다 획득 가치, 분리효과와 분리비용을 계산하고 이를 획득 누적중량에 대해서 누적인 값을 구하였다. 획득가치와 분리효과의 누적인 값은 공정이 진행되어 감에 따라 증가하였고, 분리비용의 누적인 값은 공정이 진행됨에 따라 점차 감소하였다. 이들 세 가지의 값을 이용하여 단위 공정마다 누적 PLM값을 계산하였다. 누적 PLM값은 분리를 통해서 얻는 수익성을 나타내므로 그래프상에서 표현되는 최대점까지만을 분리하는 것이 경제적으로 가장 유리하다. 이점을 최적의 분리깊이라고 하며 이론상 이 시점까지 분리할 것이 제안되어진다. 그러나 최적의 분리깊이 이후에 환경법규등에 따라 규제된 부품이나 물질이 분리되어지는 경우에는 경제성에 앞서 이러

한 부품들을 분리하는 것이 우선되어야 한다.

Fig. 6은 자동차 Door 조립군으로부터 Door Trim 조립군을 떼어내어 이를 완전 분리하는 경우에 대해서 작성한 PLM 곡선이다.

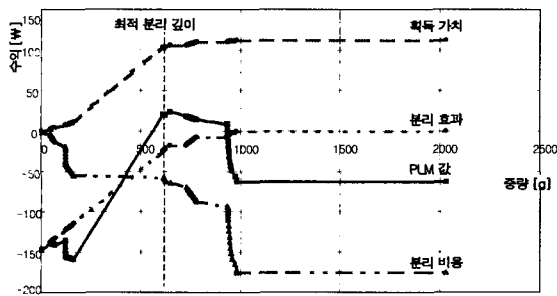


Fig. 6 PLM curve of door trim disassembly

곡선은 조립의 역순에 따른 분리에서 340번 공정에서 최대값을 가지게 되고 그때의 PLM값은 23.15원이다. 이는 최적 분리순서생성을 위해서는 340번 공정에서 획득되는 부품까지는 분리가 진행되어야 하며 그 때의 경제적 가치가 23.15원임을 나타낸다.

4. 분리순서의 결정

4.1 MRFD를 이용한 대체분리공정의 생성

분리깊이를 결정하기 위해서 사용되어진 분리순서는 분리깊이를 보다 신속하게 구하기 위해서 조립의 역순을 사용한 것이다. 그러나, 조립의 역순이 타당성 있는 하나의 분리순서이기는 하지만 최적의 분리순서라고 단정지을 수는 없다. PLM곡선으로 제안되어진 분리깊이까지에 대해서 최적의 분리순서를 제안하기 위해서는 다양한 대체 분리순서를 생성할 수 있는 분리모델이 필요하게 되었고, 고안된 Modified reverse fishbone diagram (MRFD)을 이용하여 대체 분리순서를 생성하고자 하였다.

분리순서를 모델링하기 위해서는 부품의 연결관계와 분리작업의 선행관계를 고려하여야 한다. 하지만 K.Ishii² 등에 의해서 제안되어진 RFD(Reverse Fishbone Diagram)은 AND공정만을 나타낼 수 있어서 여러 개의 대체분리순서를 생성하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 점을 개선하고자 MRFD은 기존의 RFD에 OR공정을 추가하여 부품의 연결관계와 선행관계를 기술하고자 하였다.

Fig. 7에서 보듯이 공정들간에 관계가 종속적인 경우를 AND공정이라고 하고, 수평적·독립적인 경우를 OR공정이라고 한다. 분리순서를 생성하는데 있어서 다양한 대체 해의 발생은 OR공정이 존재하기 때문에 발생하게 된다. 따라서 OR공정의 수를 줄이는 것이 대체 해의 수를 줄일 수 있는 한가지 방법이다.

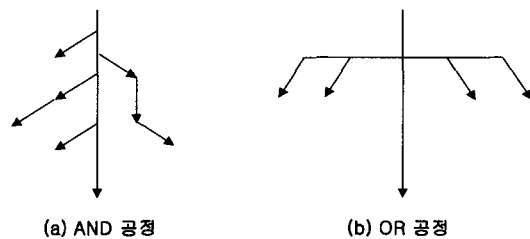


Fig. 7 AND/OR precedence

Fig. 8은 조립의 역순으로 진행되었던 Door Trim의 분리공정을 MRFD으로 표현한 것이다.

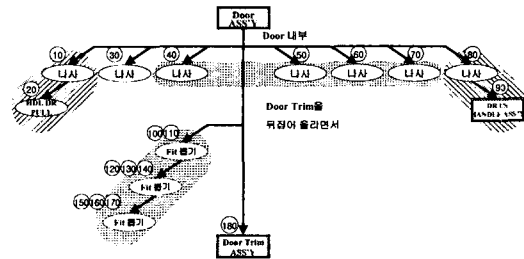


Fig. 8 Modified reverse fishbone diagram

MRFD에서 타원으로 표현된 부품은 분리공정을 수행한 후에 Part로 분리되는 것을 나타내고 사각형으로 표현된 부품은 조립군으로 분리되어 또 다른 하위 레벨의 MRFD이 필요하다는 것을 나타낸 것이다.

또한, 공정10번과 공정20번처럼 분리 부품의 관계가 상하로 연결이 되어 있는 경우가 공정의 종속성을 나타내는 AND공정이고, 대체분리순서 생성을 위한 10, 30, ..., 70, 80번의 OR 공정들은 분리되는 부품의 위상을 수평적으로 동일하게 나타내었다. 최적의 순서를 결정하기 위해서는 먼저 OR공정으로 가능한 해를 전부 도출해내는 것이 필수적이다. 해의 범위를 줄이기 위해서는 전략을 개발하여 사전에 불필요한 해를 제거하는 것이 필요하다.

축소된 해들 중에서 최적의 해는 평가를 걸쳐 선정하는 계획의 절차를 추진하였다.

MRFD는 그래프 구조를 가지고 있어서 분리공정의 진행상태를 파악하기가 쉽고 Tree구조라서 부품들간의 우선순위를 나타내는 기하학적 위상을 파악하기가 용이하다. MRFD가 가지는 이러한 장점들을 이용하면 작업의 방향, 분리도구, 고정상태 등 분리에 영향을 미치는 인자들과 분리메커니즘이 같은 공정들을 하나로 통합하는 것이 가능하다. 이는 MRFD에 표현되는 단위 분리공정의 수를 줄여 결국은 생성되는 대체분리순서의 수를 크게 줄일 수 있다.

Door trim을 분리하는 과정을 표현한 Fig. 8을 보면 제일 상위의 레벨에 존재하는 OR공정의 수는 7가지이다. 7가지의 OR공정으로 인해서 생성되는 분리순서는 7!이고 전체 5040가지의 순서가 생성된다. 10번, 20번과 80번, 90번은 AND공정으로 선행관계가 정해진 공정들이므로 각각 하나의 공정으로 보고 분리과제 분석을 통해 분리작업 방법, 도구 및 방향이 동일한 것으로 판명된 40번, 50번, 60번, 70번 공정을 하나로 묶고, 30번 공정은 이들과 분리공정 속성이 다르므로 독립적으로 존재하여 제일 상위 레벨에는 결국 4개의 OR공정이 존재하게 된다. 이러한 유사공정의 통합과정을 거침으로써 생성되는 대체 분리순서의 수는 Fig. 9에서 보듯이 4!(=24)가지로 줄어들게 된다.

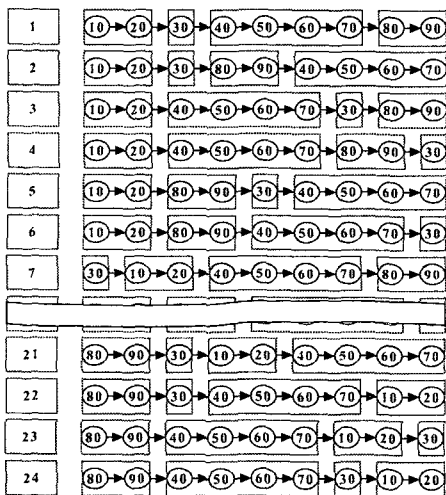


Fig. 9 Generation of alternative disassembly sequences

4.2 최적분리순서의 결정

분리모델을 이용하여 생성된 대체 분리순서들 중에서 최적의 분리순서를 결정하기 위해서는 각각의 순서들을 평가할 수 있는 기준이 필요하다^{8,9}. 일반적으로 분리공정은 Setup의 변경이나 공구의 교환 및 분리작업의 방향 전환 횟수는 적을수록 경제적이다. 또한 공구의 접근성이나 작업의 시각성을 넓히는 부품과 취급성이 요구되는 부품을 우선적으로 분리하는 것이 효과적이고, Basepart 성격을 가지는 부품은 많은 부품과 연결관계를 가지므로 가능한 나중에 분리되는 것이 바람직하다.

Fig. 10은 이러한 분리순서평가에 사용된 평가요소를 나타내었다.

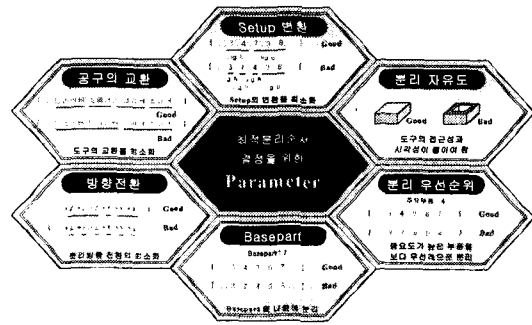


Fig. 10 Criteria for the selection of disassembly sequence

위에서 주어진 평가요소들을 이용하여 대체분리순서를 평가하기 위해서는 각 평가요소의 세부점수를 산정하는 정량화가 필요하다. Fig. 11은 각 평가요소의 정량화 방안과 평가요소들 간의 상대적인 가중치를 파악하여 나타낸 것이다.

Parameter	평가 기준	세부점수 (P _i)	가중치	공정당점수	세부점수 산정
Setup 변경	Setup의 변경 횟수	Setup 변경 (회) Setup 전환 (회)	1 0	W _A	$\sum_{i=1}^n (P_i)$ $S_A = \sum_{i=1}^n (P_i) \cdot W_A$
분리공구교환	분리 도구 교환 횟수	분리 도구 교환 (회) 분리 도구 교환 (회)	1 0	W _B	$\sum_{i=1}^n (P_i)$ $S_B = \sum_{i=1}^n (P_i) \cdot W_B$
분리방향전환	분리 방향 전환 횟수	분리 방향 전환 (회) 분리 방향 전환 (회)	1 0	W _C	$\sum_{i=1}^n (P_i)$ $S_C = \sum_{i=1}^n (P_i) \cdot W_C$
분리우선순위	부품의 특성	1.8 1.5 1.2 0.9 0.6	1 0.5 0.5 0.5 0.5	W _D	$\sum_{i=1}^n (P_i \times \frac{1}{n})$ $S_D = \sum_{i=1}^n (P_i \times \frac{1}{n}) \cdot W_D$
분리자유도	공구의 접근성 작업의 시각성	불편 양호	1 0	W _E	$\sum_{i=1}^n (P_i \times (1 - \frac{1}{n}))$ $S_E = \sum_{i=1}^n (P_i \times (1 - \frac{1}{n})) \cdot W_E$
Basepart	Basepart 특성 가중 Basepart 특성 합산	1 0	W _F	$\sum_{i=1}^n (P_i \times (1 - \frac{1}{n}))$	$S_F = \sum_{i=1}^n (P_i \times (1 - \frac{1}{n})) \cdot W_F$
-----	Totalcore = S _A + S _B + S _C + S _D + S _E + S _F				1 : 최대 가중치 0 : 최소 가중치

Fig. 11 Evaluation form of criteria

Fig. 11에 소개된 평가식을 이용하여 MRFD로 생성된 24개의 대체분리순서들을 평가하여 그 점수를 다음과 같이 산정하였다(Fig. 12).

분리 순서	Setup 비용	공구 유무	장착 비용	분리 작업시간	분리 자양도	Reaspart	Total
W	23.5	11.8	11.8	11.8	17.6	23.5	100.0
1	23.5	47.2	47.2	0	0.0	0	117.9
2	23.5	59.0	35.4	0	7.8	0	125.7
3	23.5	47.2	47.2	0	0.0	0	117.9
4	23.5	59.0	35.4	0	2.0	0	119.9
5	23.5	59.0	47.2	0	9.8	0	139.5
6	23.5	59.0	35.4	0	9.8	0	127.7
7	23.5	47.2	35.4	0	0.0	0	106.1
8	23.5	59.0	35.4	0	7.8	0	125.7
20	23.5	59.0	47.2	0	13.7	0	143.4
21	23.5	59.0	47.2	0	13.7	0	143.4
22	23.5	47.2	47.2	0	13.7	0	131.6
23	23.5	59.0	35.4	0	13.7	0	131.6
24	23.5	47.2	35.4	0	13.7	0	119.8

Fig. 12 Determination of optimal disassembly sequence

평가 후 가장 낮은 점수를 받은 대체 분리순서가 최적의 분리순서로 결정되게 된다. Fig. 12에서 보듯이 조립의 역순을 사용한 1번의 분리순서도 비교적 우수한 분리순서로 평가되었지만 7번의 분리순서가 최소의 값을 가짐으로써 생성된 24개의 대체 분리순서 중에서 가장 최적의 것으로 결정되어 졌다.

5. 결론

최적의 분리순서를 결정하기 위하여 요구되는 부품과 분리공정에 대한 정보가 조립에 사용된 BOM과 조립순서도의 분석을 통해서 획득되어졌다. 이들을 이용하여 획득가치, 분리효과 및 분리비용을 계산하였고 PLM곡선을 생성하여 경제적인 분리깊이를 결정하였다. 결정된 최적 분리깊이 까지에 대해서 MRFD를 작성하여 대체분리순서를 생성하였고, 평가요소를 이용하여 최적의 분리순서를 결정하였다. 이러한 진행과정에서 현장의 정보로부터 분리에 관련된 많은 법칙을 유도하여 해의 결정에 이용하였다.

개발된 방법론을 Door trim을 분리하는데 적용하여 Door trim의 최대 분리깊이와 분리순서를 생

성함으로써 방법론의 성능을 검증하였다.

향후 소개된 방법론을 이용하여 분리시스템을 구축함으로써 보다 신속하고 효율적인 분리공정계획이 수행될 것이다.

참고문헌

1. Park, H. S., "Environment Agreeableness in Design Process," Jr. of the KSPE, Vol. 17, No. 8, pp. 15-18, 2000.
2. Ishii, K. and Lee, B., "Reverse Fishbone Diagram: A Tool in Aid of Design for Product Retirement," 1996 ASME Design Technical Conference, 1996.
3. Boop, R. and Bullinger, H. J., "Methoden und Hilfsmittel zur Recyclinggerechten Produktentwicklung," VDI berichte 1171, ISBN : 3-18-091171-9, pp. 145-185, 1996.
4. Moore, K. E., et. al., "Disassembly Petri Net Generation in the Pesence of XOL Precedence Relations", IEEE, 1998.
5. Yi, H. C., Joo, H. H. and Kyung, K. H., "A Study on Disassembly Path Generation using Petr. Net," Jr. of the KSPE, Vol. 17, No. 02, pp 176-184, 2000.
6. Johnson, M. R., and Wang, M. H., "Planning Product Disassembly for Material Recovery Opportunity," Int. Jr. of Production Research, Vol. 33, No. 11, pp. 3119-3142, 1995.
7. Mok, H. S., Moon, K. S., Kim, S. H. and Moon. D. S., "The Complexity Evaluation System of Automobile Subassembly for Recycling," Jr. of the KSPE, Vol. 16, No. 5, pp. 132-144, 1999.
8. Park, H. S. and Son S. B., "A Knowledge-based System for Assembly Process Planning," Jr. of the KSPE, Vol. 16, No. 5, pp. 29-39, 1999.
9. Park, H. S., "A Knowledge-based System for Assembly Sequence Planning," Int. Jr. of the KSPE, Vol. 1, No. 2, 2000.