

부품의 리사이클링을 위한 최적 해체경로 생성

이건상*

(논문접수일 2005. 10. 11, 심사완료일 2006. 1. 12)

Optimum Disassembly Sequence Generation of Parts for Recycling

Kun Sang Lee*

Abstract

This paper represents a study on disassembly sequence generation system for automobile parts. This system is practically very useful because proper disassembly sequence of end-of-life product becomes crucial as take-back obligations are imposed for environmental reasons. Therefore a disassembly sequence generation system is suggested to automatically derive all the feasible disassembly sequences from the assembly modeling files. As a result, in consideration of the all parts and subassemblies the optimum disassembly sequence is generated. And the optimum disassembly sequence for a certain part or subassembly can be also suggested.

Key Words : Disassembly Sequence(해체경로), Optimization(최적화), Recycling(리사이클링)

1. 서론

환경에 대한 관심이 증가하고 기술이 급격하게 발전하면서 환경을 고려한 제품의 개발과 생산 및 사용을 위한 기술도 함께 발전하고 있다. 이에는 친환경적인 생산방법^(1,2,3)과 친환경적인 사용 및 사용 후 폐기 방법을 들 수 있다. 특히 복잡한 구조를 가진 폐기 소비재(자동차, 백색가전, 황색가전 등)에 대한 의식적인 처리가 매우 시급한 과제로 떠오르고 있다. 이러한 제품, 특히 전자제품은 수많은 부품과 다양한 재료로 구성되어 있다. 이러한 다양한 재료들은 값이 비싸기도 하고, 그 중에는 유해한 것도 있다. 독일이나 네덜란드와 같은

유럽 여러 나라에서는 매립이 점차 금지되고 있으며, 소각도 특수한 경우에만 허락된다. 이에 따라 수명이 다한 제품을 분리하여 재 수집하는 일이 필요하게 되었다. 부피를 줄이기 위해 이루어지는 소각에 의해 만들어지는 슬래그는 건축자재로 쓰기에도 적절하지 않으며, 유해물질로 지정되어 매립할 수도 없는 실정이다. 이것을 피하기 위해 재료의 연결고리를 끊는 작업이 시작되었다. 이러한 경향을 산업생태학(industrial ecology)이라 부른다. 자원의 보존과 쓰레기의 감소를 위해 제품의 재가공, 부품의 재사용 그리고 재료의 재활용이 강조되고 있다.

해체(disassembly)⁽⁴⁾는, 완전하게 끝까지 이루어져야 하

* 국민대학교, 기계자동차공학부 (kslee@kookmin.ac.kr)
주소 : 139-702 서울시 성북구 정릉3동

는 조립과는 대조적으로, 기술적, 경제적 제약 때문에 일반적으로 완전하게 이루어지지 않는다. 이것을 ‘불완전 해체 (incomplete disassembly)’라 부른다. 기술적 제약은 해체 불가능한 결합상태에 의해 발생하고, 경제적 제약은 제품에 포함된 부품을 회수하면서 얻을 수 있는 수익(revenue)과는 비례하지 않는 해체비용에 의해 발생한다. 재료 회수 후에도 남게 되는 잔여물의 양을 최소화하기 위해서는 ‘선택적 해체 (selective disassembly)’라는 방법을 활용할 수 있는데, 이것은 부품과 모듈의 회수, 재료의 회수, 유해 부품과 재료의 제거, 분쇄 잔여물의 감소 및 분쇄 잔여물의 품질 향상과 같은 다양한 목적을 충족할 수 있는 불완전 해체 공정이다.

선택적 해체 공정은 효율적인 재사용/재활용 공정의 설계를 가능하게 할 뿐만 아니라, 제품의 완전한 재료 수명주기를 최적화할 수 있는 제품설계의 새로운 개념을 지원하기도 한다.

본 연구에서는 최적의 해체경로, 즉 주어진 제품구조, 해체비용, 재료 수익 그리고 외부 제한조건 하에서 선택적 해체를 수행하는 최선의 방법을 제시하였다. 이와 같이 모든 부품이나 부품군을 고려하여 최적 해체경로를 생성할 뿐 아니라, 특정 부품에 대한 최적 해체경로 또한 생성할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 최적 해체경로 생성시스템

2.1 최적 해체경로 생성에 대한 연구현황

최적해체경로 생성은 여러 논문에서 다뤘으며, 주로 조립 도면으로 나타난 기계적 조립품에 초점을 맞춘 연구가 대부분이었다. Lambert⁽⁴⁾는 환경적 제한조건에 대한 비용의 최소화를 최적화 기준으로 설정하여 기계적 조립품에 적용하였다. 자동화된 해체경로생성에 대한 다양한 방법 중 linear programming(LP)이 가장 신뢰성 있는 것이었으며, 다양한 문제에 적용할 수 있는 유연성도 갖추고 있었다. 이 방법은 Kanehara, et al.⁽⁵⁾에 의하여 처음 시작되었으며, Lambert⁽⁶⁾에 의해 문제에 적용할 정도로 발전하였다. Lambert⁽⁷⁾는 최적 해체경로 생성에 필요한 기본 개념들, 즉 인접 가능한 부품, 분리 가능한 부품, 해체그래프, 변환매트릭스 등을 정립하고, 비용과 이익을 고려한 최적 해체경로 생성을 위한 선행프로그램을 작성하였다. 모든 부품이나 부품군에 대한 해체경로에 따른 해체 비용과 이익을 계산한 후 최대이익을 찾아 최적 해체경로를 결정하였다.

그러나 실질적으로 제품의 수리나 최종 폐기된 후 특정 부품의 분리를 위해서는 특정 부품에 대한 최적 해체경로의

생성과 그를 위한 모듈의 생성이 더욱 절실히 요구된다.

본 연구에서는 Lambert⁽⁷⁾의 최적 해체경로 생성에 대한 기본적인 개념과 이론을 기초로, 제품의 사용 중 수리나 사용 후 리사이클링을 위하여 특정 부품의 해체를 위한 최적 해체경로 생성과 그 생성을 위한 시스템 개발에 대하여 소개한다.

2.2 최적 해체경로 생성 순서

부품의 해체경로를 생성하기 위해서는 우선 제품의 조립도, CAD/CAM 파일, 그리고 BOM (Bill of Materials) 등의 데이터를 이용하여 해체공정의 모델로 사용될 수 있는 공식적 표현을 만들어낸다. 이 모델은 해체경로 생성 및 최적화의 시작점에 해당한다.

해체경로의 생성은 대략 다음과 같은 순서⁽⁷⁾로 진행된다:

- (1) 조립도로부터 부품 사이의 연결관계를 추출하여 연결 다이어그램을 만든다.
- (2) 각각의 부품의 분리를 직접적으로 방해하는 부품들의 조합을 찾아 선행작업관계(precedence relation)를 작성한다.
- (3) 인접한(coherent) 부품으로 구성된 부분조립품(subassembly)의 목록을 작성한다.
- (4) 분리 가능한 (detachable) 부분조립품 (subassembly)의 목록을 작성한다.
- (5) 인접한 부분조립품(subassembly)과 분리 가능한 부분조립품(subassembly)의 교집합을 구하여, 실현가능한(feasible) 부분조립품 (subassembly)의 목록을 작성한다.
- (6) 실현가능한 하나의 parent 부분조립품(subassembly)과 실현가능한 두 개의 child 부분조립품(subassembly) 사이의 변환을 만들어내는 실현가능한(feasible) 해체작업(action)의 목록을 작성한다.
- (7) 실현가능한 부분조립품(subassembly)과 해체작업(action)을 사용하여, 해체 그래프(disassembly graph)와 변환 매트릭스(transition matrix)를 작성한다.
- (8) 각 부분조립품(subassembly)에 해당하는 수익(revenue) 목록을 작성한다.
- (9) 각 해체작업에 해당하는 해체비용(action cost) 목록을 작성한다.
- (10) 최적 해체경로를 찾는 작업을 진행하고, 해체경로도를 완성한다.

2.2.1 제품의 표현방법

최적 해체경로 생성 프로그램은 C++을 이용하여 작성하

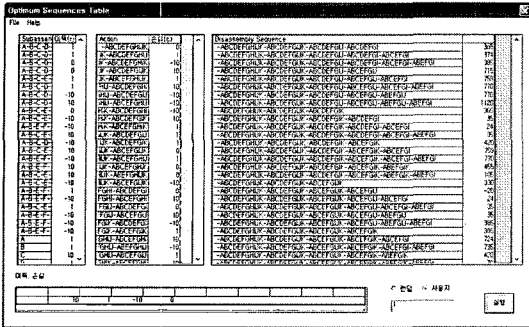


Fig. 3 Optimum disassembly sequence of all subassemblies and parts

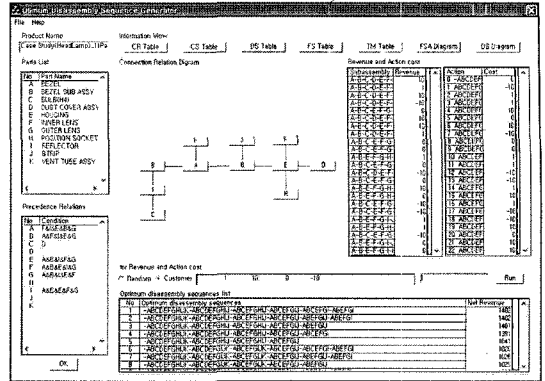


Fig. 5 Main window of optimum disassembly sequence generation system

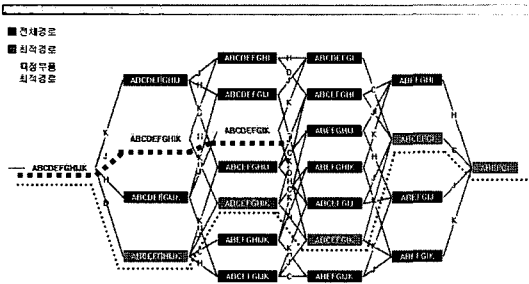


Fig. 4 Optimum disassembly sequence of all subassemblies and parts including the specific subassemblies and parts

여기서 x_j 는 특정 해체작업이 수행되는가를 점검하는 변수로서 해체작업 j 가 수행될 경우에는 '1', 수행되지 않을 경우에는 '0'의 값을 갖는다.

이것의 프로그래밍은 Matlab을 이용하여 검증하고, Visual C++를 이용하여 작성하였다^(8,9).

2.3 특정 부품의 해체경로 최적화

해체경로 최적화 단계에서 얻은 결과를 활용하여 해체하고자 하는 특정부품에 대한 해체경로를 생성할 수 있다. 앞의 절에서는 모든 부품이나 부품군을 대상으로 최적의 해체 상태, 즉 가장 많은 순이익을 창출할 수 있는 해체 경로를 생성하였다. 본 절에서는 특정 부품군이나 부품의 재사용 또는 유해물질이 포함된 부품군이나 부품의 분리를 목적으로 할 때 가장 유리한 조건의 해체경로를 생성하는 데에 목적이 있다. 이것은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 가는 점선으로 표시된 경로는 전체 부품이나 전체 부품군에 대한 해체 최적경로이고, 굵은 점선으로 표시된 경로는 특정 부품이나 특정 부품군에 대한 해체 최적경로이다.

2.4 최적 해체경로 생성을 위한 시스템 개발

제품의 리사이클링을 위한 최적 해체경로 생성을 위한 시스템을 개발하였다. 그 시스템의 주 메뉴를 Fig. 5에 표시하였다. 앞서 설명한 각 단계의 진행 상황을 한 화면에서 볼 수 있으며, 각 부분을 선택하여 상세한 내용을 볼 수 있도록 하였다.

3. 결론

전체 부품이나 부품군에 대해서 뿐만 아니라 특정 부품이나 부품군에 대해서도 순이익이 가장 큰 해체경로를 생성할 수 있는 이론적 근거를 제시하고, 최적 해체경로 생성시스템을 개발하였다. 실제적인 각 부품(군)이 갖는 가치와 해체비용을 이용하면 최적의 해체단계를 생성할 수 있으므로, 제품의 리사이클링을 고려한 설계의 리사이클링률을 향상시키는 데 활용할 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 청정생산기술사업의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

- (1) Hwang, I. O., Kang, I. S., Kang, M. C. and Kim, J. S., 2003, "Environmentally Conscious High Speed Machining Characteristics of Aluminium Alloys(AC4C.I)."

- Spring Conference Proceeding of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, pp. 95~99.
- (2) Chung, Y. W. and Kim, J. H., 2003, "Comparison of Lubrication Methods during Milling by Endmill Tool." *Spring Conference Proceeding of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, pp. 66~70.
- (3) Kang, J. H., 2000, "Environmentally Conscious Machining Technology and Machine-tool." *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 9~19.
- (4) Lambert, A. J. D., 1997, "Optimal disassembly of complex products." *International Journal of Production Research*, 35, pp. 2509~2523.
- (5) Kanehara, T., Suzuki, T., Inaba, A. and Okuma, S., 1993, "On algebraic and graph structural properties of assembly Petri net." *Searching by linear programming. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2286~2293.
- (6) Lambert, A. J. D., 1999, "Linear programming in disassembly/clustering sequence generation." *Computers and Industrial Engineering*, 36, pp. 723~738.
- (7) Lambert, A. J. D., 2002, "Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment." *Computers and Industrial Engineering*, 43, pp. 553~575.
- (8) The MathWorks, *Optimization Toolbox for Use with MATLAB®*, User's Guide, Version 2.
- (9) Lee, K. S., 2004, *Report of Cleaner Production Technology Development Project*.