

제품의 사용 후 처리전략 수립 최적화를 위한 계층적 에코 아키텍처 분석방법론

곽민정¹ · 이현복² · 홍유석^{3*} · 조남욱⁴ · 최건영³

¹서울대학교 공학연구소 / ²SK에너지 Customer 전략 · 개발팀 / ³서울대학교 산업공학과

⁴서울산업대학교 산업정보시스템공학과

The Eco-Architecture for Optimal End-Of-Life Strategy for Complex Products : An Extension to Hierarchical Analysis

Min Jung Kwak¹ · Hyun Bok Lee² · Yoo Suk Hong³ · Nam Wook Cho⁴ · Keon Young Choi³

¹Engineering Research Institute, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Customer Strategy Development Team, SK Energy, Seoul 110-728, Korea

³Department of Industrial Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

⁴Department of Industrial & Information Systems Engineering,
Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

An end-of-life strategy is concerned with how to disassemble a product and what to do with each of the resulting disassembled parts. A sound understanding of the end-of-life strategy at the early design stage could improve the ease of disassembly and recycling in an efficient and effective manner. Therefore, the end-of-life decision making for environmental conscious design has become a great concern to product manufacturers.

We introduce a novel concept of eco-architecture which represents a scheme by which the physical components are allocated to end-of-life modules. An end-of-life module is a physical chunk of connected components or a feasible subassembly which can be simultaneously processed by the same end-of-life option without further disassembly. In this paper, a method for analyzing the eco-architecture of a product at the configuration design stage is proposed. It produces an optimal eco-architecture under the given environmental regulations. To deal with the case of a complex product, the method is extended for analyzing hierarchical eco-architecture.

Keywords: Eco-Architecture, End-Of-Life Module, Environmental Conscious Design

1. 서론

물리적 또는 기능적 측면에서 수명이 다한 폐제품은 재활용 또는 폐기를 위해 사용 후 처리단계(retirement stage)를 거치게 된다(Hundal 2002). 사용 후 처리단계에서의 재활용은 폐제품에 남아있는 자원을 기능부품, 물질, 또는 에너지의 형태로 재

순환시키는 활동으로서, 조각이나 매립으로 인한 환경오염을 줄이고 제품 생산에 필요한 자원 소모량을 줄이는 데 기여한다. 따라서 재활용은 환경적 측면에서 뿐만 아니라 경제적 측면에서도 바람직한 처리 방법이다.

생산자책임재활용제도(EPR), 친환경설계지침(EuP), 폐자동차처리지침(ELV), 유럽 폐전기 전자제품 처리지침(WEEE)을

이 논문은 2005년도 정부재원(협동연구지원)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-D00360)을 받아 연구되었음. 또한 본 논문의 연락처자 및 제4저자는 서울시 산학연 협력사업으로부터 일부 지원 받았음.

* 연락처자 : 홍유석, 151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1번지 서울대학교 산업공학과, Tel : 02-880-9070, Fax : 02-889-8560

E-mail : yhong@snu.ac.kr

2007년 05월 접수; 2007년 10월 수정본 접수; 2008년 01월 게재 확정.

비롯한 각종 환경규제는 기업의 적극적인 재활용을 촉진하기 위하여 제품의 생산자가 직접 폐제품의 사용 후 처리를 책임지고, 이 과정에서 일정 수준 이상의 제품별 재활용률을 달성할 것을 요구하고 있다. 이러한 환경규제를 준수하지 못할 경우 해당 제품의 판매가 금지되거나 과징금이 부과되기 때문에, 제품의 재활용은 전자·자동차를 비롯한 제조 기업의 주요 현안으로 떠오르고 있다. 따라서 환경규제를 만족하는 동시에 보다 경제적으로 제품을 재활용하기 위한 사용 후 처리 전략 수립(end-of-life decision making)에 대한 기업의 관심이 증대되고 있다.

사용 후 처리전략은 환경규제를 만족하면서 경제적 가치를 최대화하는 제품의 재활용 및 폐기 전략을 의미한다 이는 크게 두 가지 사항에 대한 결정을 포함한다. 하나는 제품을 어떠한 해체작업을 거쳐 부분조립품(subassembly)들로 분해할 것인가, 즉 해체수준과 해체순서에 대한 결정이고, 다른 하나는 분해되어진 각 부분조립품을 어떻게 처리할 것인가, 즉 사용 후 처리대안(end-of-life option)에 대한 결정이다(Erdos *et al.*, 2001). 제품을 어떻게 해체하여 처리하느냐에 따라 환경규제의 준수 여부와 경제적 가치가 달라지므로 기업은 환경규제를 만족하면서 경제적 가치를 최대화하는 사용 후 처리전략을 수립해야 한다.

사용 후 처리단계에 도달한 폐제품을 대상으로 사용 후 처리전략을 수립하는 것은 사용 후 처리 프로세스나 처리시설을 보다 효율적으로 설계하는데 유용한 정보를 제공한다. 그러나 이미 설계 및 생산을 마친 제품을 대상으로 하는 사용 후 처리 전략의 수립은 제품의 설계를 통해 재활용 용이성을 증대시키는 방식의 근본적 문제해결이 불가능하기 때문에 사용 후 처리의 효율성을 증대시킬 수 있는 가능성이 제한적이다 따라서 최근에는 제품의 설계단계에서 사용 후 처리전략을 수립함으로써 제품의 설계개선을 유도하는 연구의 필요성이 강조되고 있다(Lee *et al.*, 2001a; Dong and Arndt 2003). 만약 설계자가 제품의 사용 후 처리전략을 설계단계에서 미리 파악할 수 있다면, 이를 고려하여 보다 해체가 용이하고 재활용이 수월하도록 제품을 설계할 수 있을 것이다. 이는 문제의 발생을 최소화함으로써 제품의 근본적 개선을 꾀하는 사전적 접근방식으로, 더 적은 비용으로 높은 개선효과를 얻을 수 있다는 점에서 바람직하다. 특히 초기설계부터 이러한 접근이 이루어질 경우, Duverlie *et al.* (1999), Rush *et al.* (2000)이 밝힌 바와 같이 더 적은 비용과 노력으로 설계개선이 가능하다.

본 연구에서는 에코 아키텍처라는 새로운 개념을 소개하고 사용 후 처리전략 수립 및 설계 개선을 지원하는 새로운 방법론으로서 에코 아키텍처 분석방법론을 제안한다. 그리고 에코 아키텍처 분석의 계층적 적용을 통해 현실의 복잡한 제품에 대한 전략을 수립하는 계층적 에코 아키텍처 분석방법론을 제시한다. 이를 통하여 환경규제를 만족하는 동시에 경제적 가치를 최대화하는, 제품의 최적 사용 후 처리전략 도출을 지원하고자 한다.

에코 아키텍처 분석방법론은 구성설계 단계(configuration design stage)에서의 적절한 의사결정이 제품의 사용 후 처리 효율성을 효과적으로 향상시킬 수 있다는 것에 초점을 맞추고 있다. 구성설계 단계는 Fixson(2004)에서 언급된 바와 같이 제품의 아키텍처, 즉 제품의 구조와 부품 배치, 그리고 그들 간의 연결 관계가 결정되는 단계로서 제품의 해체 용이성, 재활용 용이성을 비롯한 제품 라이프사이클의 주요 특성을 크게 좌우한다. 따라서 이 단계의 사용 후 처리전략 수립을 통해 현 아키텍처 설계대안을 평가하고 향후 설계방향을 찾는 것이 무엇보다 중요하다. 에코 아키텍처 분석방법론은 구성설계단계에서의 사용 후 처리전략 수립 및 친환경 설계를 지원한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 사용 후 처리 전략 수립 방법론에 관련된 기존 연구를 고찰하고 제 3절에서는 에코 아키텍처의 정의를 다룬다. 제 4절에서는 에코 아키텍처 분석방법론을 제안하고, 제 5절에서는 부품의 수가 많은 복잡한 제품을 분석하기 위한 계층적 에코 아키텍처 분석방법론을 설명한다. 마지막 제 6절에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 사용 후 처리전략 수립 방법론

사용 후 처리전략은 하나의 제품이 어떠한 해체구조를 지니고 있는가, 즉 상위 부분조립품이 어떠한 하위 부분조립품의 조합으로 해체될 수 있는가에 따라 달라진다. 그리고 해체구조는 제품이 어떠한 물리적 구조를 지니고 있는가, 즉 부품이 어떻게 연결되어 있고 그들 간의 상대적 배치가 어떻게 이루어져 있는가에 따라 결정된다. 따라서 사용 후 처리전략의 수립은 제품의 물리적 구조를 분석하여 향후 의사결정에 적합한 해체구조로 표현하는 것으로부터 시작된다. 기존 연구에서는 크게 두 가지 방식으로 제품의 해체구조를 표현한다 트리 기반 방식(tree based approach)과 상태 기반 방식(state based approach)이 그것이다.

트리 기반 방식은 제품을 BOM(bill of material)이나 DBOM(disassembly bill of material)과 같이 트리 형태의 계층구조로 표현하고, 트리구조 상의 최하위 부품에서부터 최상위 조립품에 이르기까지 하의상달식(Bottom-up approach) 의사결정을 반복함으로써 가장 경제적인 사용 후 처리전략을 도출하는 방식이다. Johnson and Wang(1995)은 해체관점에서 작성한 제품 트리구조를 바탕으로, 제품의 최적 해체순서를 포함한 최적 사용 후 처리전략 분석방법론을 제시하였다. 이들은 물질 유사도, 폐기 대안을 지닌 부품의 연결관계, 해체작업의 동시 수행 가능성 등의 기준을 적용하여 최하위 부품의 묶음처리를 고려함으로써 전략수립의 효율성을 높이는 시도를 하였다. Veerakamolmal and Gupta(1999)는 제품의 BOM을 기반으로 제품 설계대안의 사용 후 처리전략을 예측하고, 각 사용 후 처리 전략에 대응되는 경제적 가치를 기준으로 설계대안의 효율

성을 평가하는 방법을 제안하였다. 제시된 방법은 가능한 모든 사용 후 처리대안을 나열한 후 각 대안별 사용 후 가치를 계산하고, 가장 높은 가치가 예상되는 대안을 최적 사용 후 처리 전략으로 선택하는 방식을 취하고 있다. Gonzalez and Adenso-diaz(2005)는 제품의 BOM으로부터 도출된 제품의 구조와 부품 간의 연결관계, 배치 등의 정보를 바탕으로 최대 이익이 기대되는 사용 후 처리전략을 결정하는 방법론을 제안하고, 도출된 최적 사용 후 처리전략을 해체시간이나 자원 가용량, 최대 폐기량 등의 기준에 맞추어 수정하는 방안을 제시하였다.

이러한 트리 기반 방식은 정해진 트리구조 상에서만 의사결정이 이루어진다. 즉 상위 부분조립품이 하위 부분조립품으로 해체될 수 있는 대안이 여럿 존재할 수 있음에도 한 가지 해체 구조만을 가정하고 있다. 트리 기반 방식의 이러한 특성은 복잡한 제품도 효율적으로 분석할 수 있도록 하지만 의사결정 시 사용 후 처리의 핵심 특성인 부분조립품 단위의 해체를 제대로 고려하지 못하기 때문에 다른 줄기에 위치한 부품간의 묶음처리를 다루지 못한다는 문제를 야기한다. 따라서 트리 기반 방식을 적용하기 위해서는 트리 자체가 사용 후 처리에 적합하게 그려져 있음이 전제되어야 한다. 그러나 상세설계가 확정되지 않은 상태에서 최적 의사결정을 보장하는 트리를 그리는 것은 매우 어려우며, 이를 위한 방법론이 존재하지 않는 상황이다.

트리 기반 방식의 또 다른 한계는 해체비용을 통합적으로 고려하지 못한다는 것이다. 트리 기반 방식에서는 하나의 상위 부분조립품이 해체되어 두 개 이상의 하위 부분조립품이 생성되고 이 때 기본적으로 하위 부분조립품 간의 모든 연결 관계를 끊는 완전 해체를 가정한다. 일부 하위 부분조립품의 묶음처리가 고려 대상에서 제외되는 것이다. Johnson and Wang(1995), Gonzalez and Adenso-diaz(2005) 등의 일부 연구에서는 문제를 해결하기 위해 전략을 도출한 후 인접한 하위 부분조립품의 처리대안이 같은 경우를 찾아 묶음처리하도록 하는 순차적 방식을 제시하였으나, 도출된 전략이 불필요한 해체비용을 포함해서 얻어진 결과라는 점에서 수정된 전략이 최적임을 보장하지 못한다.

이에 반해 상태 기반 방식은 제품 해체 시 등장할 수 있는 모든 부분조립품과 그들 간의 관계를 AND/OR 그래프나 페트리 넷(petri net)의 형태로 표현하고, 제품의 부분조립품들의 가능한 모든 조합 중 가장 경제적인 조합을 찾는 방식이다. Pnueli and Zussman(1997)은 AND/OR 그래프 형태로 제품의 해체 과정상 존재할 수 있는 모든 상태를 표현한 후, 각 상태의 경제적 가치와 해체 비용을 고려하여 하의상달식 의사결정을 통해 최적 상태(state)를 찾는 방법을 제시하였다. 특히 최종 결과를 분석하여 사용 후 처리의 경제성을 높일 수 있는 재설계 방안을 도출하는 연구를 수행하였다. Erdos *et al.*(2001)은 AND/OR 그래프를 기반으로 한 사용 후 처리전략 수립 방법론을 제안하면서 AND/OR 그래프를 도출하는 방법에 대한 연구가 필요함을 지적하고, 특정 제품의 AND/OR 그래프 작성을 위한 알고

리즘을 제안하였다. 한편, Kanehara *et al.*(1993)는 AND/OR 그래프를 대체하는 조립구조 표현 방법론으로 페트리 넷의 유용성을 설명하고, 생산단계의 조립계획을 수립하는 데 있어 페트리 넷이 활용될 수 있는 여러 가지 경우를 제시하였다. 특히 페트리 넷을 매트릭스 형태로 변환하여 선형계획법을 활용한 문제 모델링이 가능함을 보였다. 이 연구를 해체 분야에 응용하여, Lambert(2002)는 제품을 AND/OR 그래프와 이를 매트릭스 형태로 변환한 트랜지션 매트릭스(transition matrix)를 사용해 표현하고, 선형계획법을 이용한 해체순서 계획 방법론을 제시하였다.

상태 기반 방식은 사용 후 처리의 특성을 반영한 효과적인 처리전략 수립을 가능하게 한다. 또한 동일한 상위 부분조립품이더라도 하위 부분조립품으로 분리하는 방안이 여러 가지가 있을 수 있음을 의사결정에 반영하고 있으며, 부분조립품 단위의 처리를 지원한다는 점에서 사용 후 처리의 특성에 잘 부합한다. 그러나 이 방식은 하나의 제품이 지닐 수 있는 모든 가능한 해체상태에 대한 분석을 요구하므로 시간과 노력이 많이 든다는 단점을 지닌다. 이러한 어려움은 부품의 수가 증가하고 제품의 구조가 복잡해질수록 급격히 상승한다. 결과적으로 상태 기반 방식은 현실의 제품 특히 복잡한 제품에 대한 적용이 힘들다는 단점을 지닌다.

본 연구에서 제안하는 에코 아키텍처 분석방법론은 사용 후 처리의 특성을 의사결정 과정에 충분히 반영하기 위하여 상태 기반 방식의 접근을 취한다. 제시된 방법론은 기존 방식과 세 가지 측면에서 차별화된다.

첫째, 트랜지션 매트릭스를 사용한 수리모델을 개발하여 의사결정의 효율을 높이고자 하였다. Kanehara *et al.*(1993)는 페트리넷의 매트릭스 형태인 상태전환 매트릭스(state shift matrix)를 이용하여 비용을 최소화하는 조립순서를 구하기 위한 수리모델을 제시하였고, Lambert(1999, 2002)는 AND/OR 그래프의 매트릭스 형태인 트랜지션 매트릭스를 이용하여 경제성을 고려한 해체순서 도출을 위한 수리모델을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 트랜지션 매트릭스를 이용하여 환경규제 만족하는 동시에 경제성을 최대화하는 보다 효율적이고 빠른 사용 후 처리전략 수립 방법론을 제시한다.

둘째, 환경규제를 고려한 사용 후 처리전략 수립을 지원한다. 기존의 방법론은 사용 후 처리단계에서 제품이 갖추어야 할 가장 중요한 요소인 환경규제 만족 여부에 대한 고려가 충분히 이루어지지 않고 있다는 점에서 개선이 필요하다. 에코 아키텍처 분석방법론은 환경규제를 만족하는 범위에서 경제적 가치를 최대화하는 전략 수립을 지원한다.

셋째, 복잡한 제품에 적용이 어려운 점을 보완하기 위해 계층적 에코 아키텍처 분석방법론을 제시한다. 상태 기반 방식의 가장 큰 문제는 복잡한 제품을 다루기 어렵다는 것에 있다. 본 연구에서는 상태 기반 방식의 에코 아키텍처 분석방법론에 트리 기반 방식을 접목한 계층적 에코 아키텍처 분석방법론을 통해 이러한 단점을 보완하였다. 계층적 에코 아키텍처 분석

방법론은 부품의 수가 많고 구조가 복잡한 제품의 에코 아키텍처를 계층적으로 분석함으로써 경제성과 환경성을 고려한 사용 후 처리전략의 도출을 지원한다.

3. 에코 아키텍처 정의

3.1 EOL(End-of-life) 모듈

일반적으로 폐제품은 경제적인 측면으로 인해 최하위 구성 요소 단위의 완전해체를 거치지 않는다. 가치가 높은 부품을 위주로 선택적으로 해체가 이루어지거나, 같은 처리과정을 거치는 인접 구성요소를 묶어서 해체하기도 한다. 이 경우 불필요한 해체작업이 제거되는 효과가 발생하여 해체 비용을 줄어든다. Das and Naik(2001, 2002), Murayama *et al.*(1999), Chen *et al.*(1994)에 따르면 인접한 부품을 묶어서(Grouping) 해체하는 것이 유리한 경우는 다음 일곱 가지 경우로 나눌 수 있다.

- 물질의 동질성(Homogeneity)이 높은 경우
- 독성물질의 포함 또는 기타 조건으로 인해 부분조립품 단위의 폐기가 수행되어야만 하는 경우
- 인접한 부품 간의 연결 관계가 매우 강하여 높은 해체비용이 예상되는 경우
- 부품의 물질 특성에 따라, 이들을 함께 재활용 하더라도 파쇄 및 분리과정에서의 높은 재생 효율성이 보장되는 경우
- 인접한 부품의 재자원화 가능성이 낮고, 폐기를 요하는 경우
- 인접한 부품으로 이루어진 부분조립품의 재사용 가능성이 높은 경우
- 인접한 부품을 묶음 해체한 후, 각각을 분리하는 것이 작업의 용이성 측면에서 더 나은 경우

따라서 하나의 제품은 일정한 수준의 사용 후 해체 단계를 거쳐 재사용이 가능한 기능단위나 동시 재활용이 가능한 물질 덩어리, 또는 한꺼번에 폐기되는 부품의 집합과 같은 부분조립품 단위로 분리된다(Das and Naik 2002, Hundal 2002). 본 연구에서는 이처럼 더 이상 분해되지 않고 그 단위로 사용 후 처리를 거치는 부분조립품을 EOL 모듈(End-of-life module, EOL module)로 정의한다. EOL 모듈은 사용 후 처리단계에서 해체를 통해 언고자 하는 최하위 처리단위로서 DBOM의 최하위노드(End-node)에 대응된다. EOL 모듈은 다음과 같은 세 가지 조건을 만족해야 한다.

- **일체성**: EOL 모듈은 모듈에 속한 모든 부품들이 직간접적으로 연결된 물리적 개체이다. 따라서 마치 하나의 부품처럼 독립적으로 존재할 수 있다
- **분리가능성**: EOL 모듈은 재조립(Reassembly) 없이 해체작업만으로 분리될 수 있다.
- **동시처리가능성**: EOL 모듈은 하나 이상의 처리대안에 대해 그 단위로 동시에 처리될 수 있다.

본 논문에서는 EOL 모듈이 가질 수 있는 사용 후 처리대안으로 1)재사용, 2)물질 재활용, 3)에너지 재활용, 4)특별처리, 5)폐기를 고려한다.

3.2 에코 아키텍처

Ulrich(1995)에 따르면 제품의 아키텍처는 제품의 기능요소를 물리적 구성요소에 대응시킨 결과물로서 기능과 물리적 구성요소, 물리적 구성요소 간의 관계(interaction)로 정의할 수 있다. 제품의 에코 아키텍처는 사용 후 처리 관점에서 바라본 제품의 아키텍처로서, <Figure 1>과 같이 제품의 물리적 구성요소들을 EOL 모듈에 대응시킨 결과물이다. 즉 제품을 구성하고 있는 부품을 사용 후 해체 및 처리의 관점에서 재해석하여 사용 후 처리의 단위로 묶은 것으로서, 묶여진 부품들은 마치 하나의 부품과 같이 동시에 분리되어 그 상태로서 사용 후 처리가 이루어짐을 의미한다.

제품의 사용 후 처리는 제품을 EOL 모듈로 해체하는 과정과 해체로 생성된 각 EOL 모듈을 처리대안에 맞추어 재활용 혹은 폐기하는 과정으로 이루어진다. 해체에는 비용이 소요되고, 각 EOL 모듈은 처리대안에 따라 재활용 또는 폐기하는 과정에서 처리비용 또는 이득이 발생한다. 본 논문에서는 비용과 수입의 측면에서 제품의 사용 후 가치(end-of-life value), V_p 를 다음 식과 같이 정의한다.

$$V_p = \sum_i \sum_j V_{ij} \cdot x_{ij} - \sum_k C_k \quad (1)$$

$$V_{ij} = R_{ij} - L_{ij}$$

이때 V_{ij} , R_{ij} , L_{ij} 는 각각 i 번째 EOL 모듈을 처리대안 j 로 처리했을 때 사용 후 처리가치(end-of-life processing value), 수입(revenue), 처리비용(loss)을 나타낸다. x_{ij} 가 1일 때는 i 번째 모듈이 처리대안 j 로 처리가 됨을 의미한다. C_k 는 k 번째 해체작업에 해당하는 해체 비용(disassembly cost)을 의미한다.

제품의 사용 후 가치는 제품이 최종적으로 어떠한 EOL 모듈의 조합으로 해체되는가, 즉 제품이 어떤 에코 아키텍처를

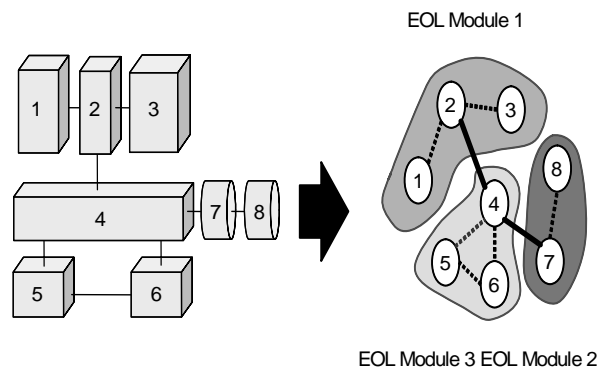


Figure 1. Concept of eco-architecture

지니는가에 의해 결정된다. 제품에 대응되는 EOL 모듈 조합에는 여러 가지가 존재할 수 있기 때문에 제품의 사용 후 가치 역시 다양한 값을 지닐 수 있다. 사용 후 가치가 높다는 것은 EOL 모듈 사이의 연결관계가 해체하기 쉽고 EOL 모듈의 처리로부터 발생한 경제적 가치의 합이 크다는 것을 의미한다. 그러므로 제품의 사용 후 가치를 최대화하는 EOL 모듈의 최적 조합을 찾아내는 것이 중요하다. 하지만 경제적 측면에서 최적 조합이라 하더라도 주어진 환경규제를 만족하지 못한다면, 이는 바람직한 조합으로 볼 수 없다. 따라서 환경규제를 만족하면서 사용 후 가치를 최대화하는 EOL 모듈의 조합을 찾아야 한다. 본 논문에서는 이러한 EOL 모듈의 최적 조합을 최적 에코 아키텍처로 정의하며, 이는 곧 제품의 최적 사용 후 처리전략이다.

4. 에코 아키텍처 분석방법론

에코 아키텍처 분석의 핵심은 환경규제의 범위 내에서 제품의 최대 사용 후 가치를 보장하는 EOL 모듈의 조합, 즉 최적 에코 아키텍처를 찾는 데 있다. 하나의 제품에 대응되는 EOL 모듈의 조합에는 여러 가지가 있을 수 있다. 따라서 에코 아키텍처 분석방법론은 EOL 모듈의 가능한 조합들을 파악하고, 그 중 최적 조합을 찾는 것을 목표로 한다. 에코 아키텍처 분석방법론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- **입력정보**: 부품 간 연결여부 및 연결강도, 부품의 배열, 부품의 질량, 부품의 재질
- **도출결과**: 최적 에코 아키텍처와 해체작업 순서를 포함한 사용 후 처리전략
- **목적함수**: 사용 후 가치를 최대화한다.
- **주요제약**: 환경규제를 준수한다
- **주요가정**:
 - 비파괴적인 해체(Nondestructive disassembly)만을 고려한다.
 - 해체순서 결정 시 연결관계의 해체작업 간 발생하는 셋업 비용은 고려하지 않는다.
 - 해체비용은 아키텍처 설계단계에서 연결관계에 대해 요구되는 연결강도에 비례한다.

본 연구에서는 EOL 모듈의 최적 조합을 파악하기 위해 Lambert(1999, 2002)에서 제시된 트랜지션 매트릭스를 활용한다. 트랜지션 매트릭스는 해체단계에서 발생가능한 제품의 모든 부분조립품, 즉 실현가능 부분조립품(feasible subassembly) 간의 상하위 관계를 표현함으로써 제품의 해체구조 정보를 제시한다. 하나의 실현가능 부분조립품은 해체단계에서 발생가능한 제품의 부분조립품으로서 하나의 EOL 모듈에 대응된다. 따라서 EOL 모듈은 실현가능 부분조립품에 사용 후 처리대안을 부여한 형태를 띠게 된다. 트랜지션 매트릭스를 활용하여

실현가능 부분조립품의 모든 가능한 조합을 파악하고, 각 실현가능 부분조립품이 취할 수 있는 사용 후 처리대안과 그 경제적 가치를 고려할 경우, 실현가능 부분조립품의 최적 조합과 이에 속한 실현가능 부분조립품의 최적 사용 후 처리대안을 도출할 수 있다. 이는 곧 EOL 모듈의 최적 조합, 즉 최적 에코 아키텍처이다.

4.1 1단계 : 트랜지션 매트릭스 작성

4.1.1 실현가능 부분조립품(feasible subassembly)

Lambert(2002)에 따르면 실현가능 부분조립품은 다음의 두 조건을 만족하는 부품의 집합이다.

- **일체성(coherence)**: 부분조립품 내 모든 부품은 해당 부분조립품 내 다른 부품들과 직간접적으로 연결되어 있다.
- **분리가능성(detachable)**: 부분조립품은 조립품으로부터 재조립 작업 없이 해체작업만을 통하여 분리될 수 있다.

실현가능 부분조립품은 서로 연결되어 있어 마치 하나의 부품처럼 동시에 분리가 가능한 구성요소의 집합을 일컫는다. 해체단계에서 발생가능한 제품의 모든 부분조립품은 각각 하나의 실현가능 부분조립품에 대응된다. 완제품을 의미하는 조립품과 제품의 최하위 물리적 구성요소인 부품 역시 실현가능 부분조립품이다. 실현가능 부분조립품은 부품간의 연결관계와 상대적 배치에 따른 선행관계(precedence)를 바탕으로 도출된다.

4.1.2 실현가능 트랜지션(feasible transition)

하나의 상위 실현가능 부분조립품은 해체작업에 의해 두 개 이상의 하위 실현가능 부분조립품으로 분해된다. 이처럼 상위 실현가능 부분조립품을 하위 실현가능 부분조립품으로 변환시키는 해체작업을 실현가능 트랜지션이라 한다(Lambert 2002). 실현가능 트랜지션은 실현가능 부분조립품의 집합을 다른 실현가능 부분조립품의 집합으로 변환시킨다. 따라서 제품이 실현가능 부분조립품으로 나뉘는 과정은 어떠한 실현가능 트랜지션이 실행되는가에 따라 결정된다.

Pnueli and Zussman (1997), Erdos *et al.*(2001), Lambert(2002)를 비롯한 상태 기반 방식의 기존 연구들은 실현가능 트랜지션이 하나의 상위 부분조립품을 두 개의 하위 부분조립품으로 분해한다고 가정하고 있다. 그러나 현실세계에는 두 개 이상의 부분조립품들이 하나의 연결관계에 의해 조립되는 경우가 존재한다. 이 경우 하나의 상위 실현가능 부분조립품은 실현가능 트랜지션을 통해 두 개 이상의 실현가능 부분조립품으로 분리된다. 이는 적은 비용으로 빠른 해체가 이루어지는 가능성을 의미한다. 본 연구에서는 이러한 연결관계를 의사결정에서 고려할 수 있도록 실현가능 트랜지션은 하나의 부분조립품을 두 개 이상의 부분조립품으로 분리시킨다고 가정하였다.

4.1.3 트랜지션 매트릭스

트랜지션 매트릭스는 제품의 아키텍처를 분석하여 실현가능 부분조립품과 실현가능 트랜지션을 파악한 후 작성된다. 트랜지션 매트릭스는 AND/OR 그래프 정보를 매트릭스로 표현한 것으로, 제품의 모든 실현가능 부분조립품과 실현가능 트랜지션 간의 관계설정을 통해 제품의 해체구조를 표현한다. 이는 실현가능 부분조립품이 어떠한 해체작업, 다시 말해 어떠한 실현가능 트랜지션으로부터 생성되는지를 나타내며, 실현가능 부분조립품 간 상하위 관계를 표현함으로써 제품의 해체구조 정보를 제시한다.

가상 제품을 예로 작성한 트랜지션 매트릭스는 <Table 1>과 같다. 이해를 돕기 위해 Lambert(2002)가 사용한 것과 같은 가상제품 <Figure 2>를 예로 사용하였다. 이 가상제품은 A, B, C 세 가지의 부품으로 구성되어있으며 ABC, AB, AC, BC, A, B, C의 실현가능 부분조립품을 갖는다. 트랜지션 매트릭스의 행에는 실현가능 부분조립품이, 열에는 실현가능 트랜지션이 배치되어 있다. 각 실현가능 트랜지션은 하나의 실현가능 부분조립품이 두 개 이상의 실현가능 부분조립품으로 분리한다. -1, 0, 1의 행렬값은 실현가능 트랜지션을 통해 해체되는 상위 실현가능 부분조립품과 생성되는 하위 실현가능 부분조립품을 나타낸다. 만약 매트릭스의 (i, j)항의 값이 -1이면 트랜지션 j에 의해 실현가능 부분조립품 i가 분리됨을 의미한다. 반면에 1이면 트랜지션 j의 결과로 실현가능 부분조립품 i가 생성됨을 의미한다. 만약 <표 1>에서 점으로 표현되는 0의 값을 가질 경우에는 실현가능 부분조립품 i는 트랜지션 j와 관계없음을 의미한다. 예를 들어 ABC는 해체작업 1에 의해 AB와 C로 나뉘고 AB는 해체작업4에 의해 A와 B로 나뉠 수 있다.

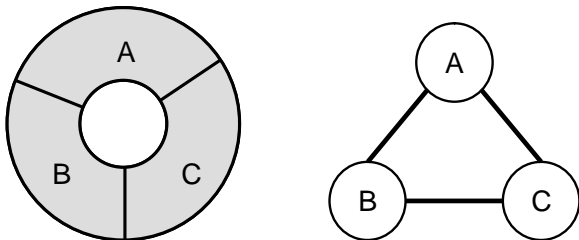


Figure 2. Sample product ABC(Lambert 2002)

Table 1. Transition matrix of product ABC(Lambert 2002)

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|---|----|----|----|----|----|----|
| ABC | 1 | -1 | -1 | -1 | . | . | . |
| AB | . | 1 | . | . | -1 | . | . |
| AC | . | . | 1 | . | . | -1 | . |
| BC | . | . | . | 1 | . | . | -1 |
| A | . | . | . | 1 | 1 | 1 | . |
| B | . | . | 1 | . | 1 | . | 1 |
| C | . | 1 | . | . | . | 1 | 1 |

4.2 2단계 : 경제적 가치 및 해체비용 예측

에코 아키텍처 분석을 위해서는 초기설계 단계에서 결정된 제품 구성요소의 설계특성 외에 제품의 실현가능 부분조립품의 처리대안별 사용 후 가치와 해체비용에 대한 정보가 필요하다. 사용 후 가치와 해체비용 정보는 구성설계 단계의 제품 사양, 물질, 기능 등의 정보를 바탕으로 예측을 통해 얻어진다. 예측의 정확성이 방법론의 성능에 큰 영향을 미침은 당연하다. 그러나 정보를 예측하는 것이나 예측의 정확성을 높이는 것은 별도의 연구가 필요한 부분이다. 따라서 본 단계에서는 입력값 예측 시 고려해야 하는 사항에 대해서만 간략히 다룬다.

4.2.1 사용 후 처리 가치

EOL 모듈의 정의에 따라 실현가능 부분조립품은 재사용, 물질 재활용, 에너지 재활용, 특별처리, 폐기 등의 대안을 지닐 수 있다. 각 실현가능 부분조립품은 사용 후 처리대안에 따라서 다른 사용 후 가치를 갖는다. Krikke *et al.*(1998)이 지적한 바와 같이 대안의 실현가능성을 분석하는 것은 사용 후 가치의 불필요한 예측을 생략함으로써 분석과정의 효율성과 효과성을 높일 뿐만 아니라, 사용 후 가치 정보를 바탕으로 도출될 최적 에코 아키텍처의 현실성을 보장하기 위한 역할을 담당한다. 대안의 실현가능성은 다음의 다섯 가지 측면에서 파악할 수 있다.

- **기술적 실현가능성(Technical Feasibility)** : 기술적으로, 특정 부분조립품을 특정 처리대안에 따라 처리할 수 있는가?
- **상업적 실현가능성(Commercial Feasibility)** : 특정 대안으로 처리된 특정 부분조립품에 대한 수요 또는 시장이 존재하는가?
- **법적 실현가능성(Legal Feasibility)** : 특정 부분조립품이 특정 처리대안을 따르는 것이 합법인가?
- **환경적 실현가능성(Ecological Feasibility)** : 특정 부분조립품이 특정 처리대안을 따르는 과정에서의 환경오염 에너지 사용량 등이 적합한가?
- **조직적 실현가능성(Operational Feasibility)** : 특정 부분조립품이 특정 처리대안을 따르는 것에 대한 기업의 역량이나 의지가 존재하는가?

만약 어떠한 실현가능 부분조립품이 특정 처리대안을 수행함에 있어 다섯 가지 대안 실현가능성 중 어느 하나라도 만족시키지 못할 경우, 그 처리대상은 고려대상에서 제외되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 경우 처리대안의 사용 후 가치를 -∞로 설정함으로써 향후 분석모델에서 해로 선택될 가능성을 제거한다. 그리고 해당 사용 후 가치에 대한 예측은 생략한다.

실현가능 부분조립품의 사용 후 처리가치는 각 대안을 수행함으로써 얻게 되는 경제적 수입과 그 과정에서 소모되는 처리비용의 차로 계산된다. <Table 2>는 Gonzalez and Adenso-diaz(2005), Lee *et al.*(2001b)의 연구를 참고하여 작성한 단순화한 대안별 사용 후 처리가치의 계산식이다. R_{ij} 와 L_{ij} 은 각각

Table 2. Formulae for end-of-life processing value estimation

| End-of-life option | End-of-life processing value |
|-----------------------|---|
| Reuse(U) | $V_{i,R} = R_{i,R} - L_{i,R} = d_i \cdot P_{i,R} - 0$ |
| Material recycling(M) | $V_{i,M} = R_{i,M} - L_{i,M} = p_i \cdot m_i \cdot P_{i,M} - m_i \cdot C_{i,M}$ |
| Energy recycling(E) | $V_{i,E} = R_{i,E} - L_{i,E} = e_i \cdot m_i \cdot P_{i,E} - m_i \cdot C_{i,E}$ |
| Special treatment(S) | $V_{i,S} = R_{i,S} - L_{i,S} = 0 - m_i \cdot C_{i,S}$ |
| Disposal(D) | $V_{i,D} = R_{i,D} - L_{i,D} = 0 - m_i \cdot C_{i,D}$ |

Table 3. End-of-life processing value matrix of product ABC

| | Reuse | Material recycling | Energy recycling | Special treatment | Disposal |
|-----|-------|--------------------|------------------|-------------------|----------|
| ABC | 12 | -∞ | -∞ | -300 | -∞ |
| AB | 9 | -12 | 4 | -∞ | -80 |
| AC | 3 | -∞ | -∞ | -175 | -∞ |
| BC | 3 | -∞ | -∞ | -125 | -∞ |
| A | 4 | 20 | 5 | -∞ | -50 |
| B | 3 | 6 | 3 | -∞ | -15 |
| C | 1 | -∞ | -∞ | -40 | -∞ |

실현가능 부분조립품 i 가 사용 후 처리 대안 j 를 따를 경우 발생하는 대안별 수입과 비용을 나타낸다. d_i 는 i 번째 실현가능 부분조립품의 남은 수명과 품질을 반영한 감가상각 비율이고 $P_{i,R}$ 는 i 번째 실현가능 부분조립품과 동일한 신규 부분조립품의 시장가격이다. p_i 는 i 번째 실현가능 부분조립품의 물질순도를 반영한 가치절하 비율이고, m_i 는 i 번째 실현가능 부분조립품의 중량이며, $P_{i,M}$ 은 i 번째 실현가능 부분조립품과 동일한 물질의 단위중량당 시장가격이다. e_i 는 i 번째 실현가능 부분조립품과 동일한 물질을 단위중량만큼 처리할 경우 획득할 수 있는 에너지량이고, $P_{i,E}$ 는 i 번째 실현가능 부분조립품을 통해 획득 가능한 에너지의 단위당 시장가격을 의미한다. C_{ij} 는 i 번째 실현가능 부분조립품을 사용 후 처리 대안 j 에 따라 처리할 경우 소모되는 단위중량당 처리비용으로 물질의 종류에 따라 달라진다. <Table 3>은 가상데이터를 설정하여 도출한 제품 ABC의 사용 후 처리가치 데이터이다. 부품 C가 독성 물질이고, 따라서 C를 포함한 부분조립품은 특별처리의 대상이 되며, 재사용과 특별처리 외의 처리대안이 허용되지 않는 것으로 가정하였다. 반면 부품 C를 포함하지 않는 부분조립품은 특별처리를 수행하지 않는 것으로 가정하였다.

4.2.2 사용 후 해체 비용

사용 후 해체 비용은 실현가능 트랜지션을 수행하는 데 소

모되는 비용이다. 이는 하위 실현가능 부분조립품 사이에 존재하는 연결관계를 제거하는 비용에 해당한다. 이러한 해체 비용 C_k 는 식 (2)로 표현된다. DC_i 은 하나의 실현가능 트랜지션에 속하는 연결관계 l 의 제거비용으로서 제품 사양에서 요구하는 연결강도와 연결접근성 등을 고려하여 예측할 수 있다 <Table 4>는 제품 ABC의 해체비용에 대한 가상 데이터이다.

$$C_k = \sum_l DC_l \tag{2}$$

4.3 3단계 : 에코 아키텍처 분석모델 적용

트랜지션 매트릭스와 경제적 가치 및 비용에 대한 예측치를 사용하여 에코 아키텍처를 분석하기 위한 정수계획법 모델을 제안하면 다음과 같다. 이 모델을 통해 제품의 사용 후 가치가 최대화되는 실현가능 부분조립품의 조합과 실현가능 부분조립품의 처리대안, 그리고 수행되는 실현가능 해체작업 및 순서를 결정할 수 있다.

Table 4. Disassembly cost matrix for product ABC

| Transition number(k) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Disassembly cost(C_k) | 0 | 6 | 7 | 9 | 5 | 4 | 2 |

4.3.1 목적함수

본 모델의 목적함수는 사용 후 가치의 최대화로서 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. V_{ij} 는 실현가능 부분조립품 i 가 처리대안 j 에 따라 처리된 경우의 사용 후 처리가치이다. C_k 는 실현가능 트랜지션 k 에 해당하는 해체비용이다. x_k 와 y_{ij} 는 의사결정변수로서, y_{ij} 는 실현가능 부분조립품 i 의 처리대안 j 의 수행여부를 나타내는 0-1 변수이고, x_k 는 해체작업 k 의 수행여부를 나타내는 0-1 변수이다. 첫 번째 항은 사용 후 처리의 경제적 가치를 나타내고, 두 번째 항은 해체비용을 나타낸다. x_k 와 y_{ij} 는 0-1 결정변수이다.

$$\max. \sum_i \sum_j V_{ij} y_{ij} - \sum_k C_k x_k \tag{3}$$

4.3.2 제약식

Lambert(1999, 2002)에 의해 제시된 식 (4)는 트랜지션 매트릭스 사용 시 의사결정의 실현가능성(feasibility)을 유지하기 위해 필수적인 제약식이다.

$$\sum_k T_{ik} x_k \geq 0 \tag{4}$$

하나의 상위 실현가능 부분조립품은 그 상태를 유지하거나 두 개 이상의 하위 실현가능 부분조립품으로 해체된다. 또한

해체를 거치는 경우, 하위 실현가능 부분조립품으로 해체할 수 있는 대안이 여럿이더라도 그 중 한 대안만을 선택할 수 있다. 하위 실현가능 부분조립품 측면에서 보면, 상위 실현가능 부분조립품의 해체가 선행되지 않을 경우 그 부분조립품은 생성될 수 없고, 그 부분조립품의 하위 부분조립품으로의 해체 작업을 의미하는 트랜지션 역시 실행될 수 없다. 단, 최초 트랜지션은 예외이며 식 (7)을 통해 항상 실행되는 것으로 제약된다. 제약조건 식 (4)는 이러한 상황을 막는 역할을 한다. T_{ik} 는 트랜지션 매트릭스의 (i, k)항의 행렬값을 나타낸다.

일련의 실현가능 트랜지션을 거쳐 최종적으로 생성된 실현가능 부분조립품은 식 (5)로 표현된 제약식을 통해 하나의 사용 후 처리대안을 갖게 된다.

$$\sum_k T_{ik} x_k = \sum_j y_{ij}, \forall i \quad (5)$$

y_{ij} 는 실현가능 부분조립품 i 의 처리대안 j 수행여부를 나타낸다. 좌변은 첫 번째 제약식에 의해 0 또는 1의 값을 갖게 되는데 0일 경우에는 해당 실현가능 부분조립품이 더 해체되었음을 의미하고, 1일 경우에는 트랜지션 수행 결과 최종적으로 해당 실현가능 부분조립품이 생성되었음을 의미한다. 후자의 경우 생성된 실현가능 부분조립품에 대응되는 y_{ij} 가 1이 되고, 이는 그 부분조립품이 하나의 사용 후 처리대안을 지닐 수 있음을 의미한다.

한편 환경규제를 만족하는 전략도출을 위하여 식 (6)과 같은 제약식이 추가된다. 각종 환경 규제의 핵심제한대상은 제품의 총 중량을 기준으로 하는 재활용률이다. 보통 제품 총 중량 대비 85~90%의 재활용이 요구된다. 본 연구에서는 폐기되는 실현가능 부분조립품의 총 중량이 제품 중량의 15%를 넘지 않도록 제약함으로써 도출된 최적전략이 환경규제를 만족하도록 한다. M_0 는 첫 번째 실현가능 부분조립품의 중량으로서 제품 전체의 중량을 의미한다.

$$\frac{\sum_i M_i y_{ij}}{M_0} \leq 0.15, j=5 \quad (6)$$

앞서 언급했듯이 초기 트랜지션은 반드시 실행되어야 하기 때문에 x_0 는 1로 제약된다.

$$x_0 = 1 \quad (7)$$

마지막 제약식으로 결정변수가 0 또는 1의 정수값을 지니도록 제약하는 식 (8)이 추가된다.

$$x_k, y_{ij} = 0 \text{ or } 1, \forall i, j, k \quad (8)$$

지금까지 살펴본 에코 아키텍처 분석모델을 가상제품 ABC에 대해 적용한 결과, 최적해는 0번 트랜지션과 3번 트랜지션, 6번 트랜지션을 수행하고, 이를 통해 생성된 A와 B는 물질 재

활용, C는 재사용을 수행하는 전략이 도출되었다. 이때의 사용 후 가치는 16이다. 제품 ABC의 최적 에코 아키텍처는 <Figure 3>과 같다.

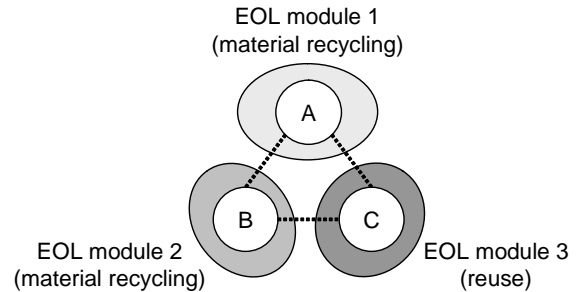


Figure 3. Eco-architecture of product ABC

도출된 최적 에코 아키텍처는 제품의 아키텍처를 사용 후 처리 관점에서 분석하여 최대 사용 후 가치를 기대할 수 있는 EOL 모듈과 그들 간의 연결관계 정보를 제공한다. 이 정보는 크게 두 가지 측면에서 제품의 친환경 설계에 기여한다. 첫째, 설계자는 사용 후 가치와 EOL 모듈별 처리대안, 환경 규제 만족여부 등의 정보를 바탕으로 현 제품 아키텍처의 경제성 및 친환경성을 사용 후 처리 관점에서 평가할 수 있다. 이러한 평가 결과는 아키텍처 수정이나 아키텍처 대안 선정에 활용할 수 있다. 둘째, EOL 모듈 간의 연결관계와 하나의 EOL 모듈에 소속된 부품 간의 내부 연결관계는 사용 후 처리단계의 재활용 용이성을 높이기 위한 상세 설계방향을 제시한다. 각 부품별 연결관계는 상세설계 단계에서 구체적인 체결요소(Fastener)로서 구현되는데 각 연결관계가 어떤 역할을 담당하는지를 고려할 경우 제품의 해체 용이성 및 재활용 용이성을 효과적으로 높일 수 있다. 우선 EOL 모듈 간의 연결은 실제 해체의 대상이 되므로, 해체가 용이함과 동시에 주변 EOL 모듈의 처리대안에 적합한 체결요소가 배치되어야 한다. 예를 들어 재사용 대안이 선정된 두 EOL 모듈 간의 연결관계는 해체 시 EOL 모듈의 성능이나 외형에의 손상을 최소화하는 체결요소로 구현되어야 한다. 또한 사용 후 모듈 내부의 연결관계는 해체의 직접적인 대상이 되지는 않지만 EOL 모듈의 처리대안 수행의 비용과 수입에 영향을 미치기 때문에 재활용 용이성 측면에서 중요하다. 예를 들어 재활용 대안이 선정된 EOL 모듈 내부의 부품 간 연결관계는 재활용 효율을 해치지 않는 물질(material)로 구체화되는 것이 바람직하다. 이처럼 설계자는 에코 아키텍처 분석을 통해 해체용이성과 재활용 용이성을 증진시키는 방향으로, 친환경 설계를 수행할 수 있다.

5. 계층적 에코 아키텍처 분석방법론

앞 절에서 제시한 에코 아키텍처 분석방법론은 상태 기반 방식의 사용 후 처리전략 수립을 수행한다. 이는 사용 후 처리의

특성에 적합한 의사결정을 가능하게 한다. 그러나 이 방법론은 트랜지션 매트릭스를 사용한 정수계획법 모델을 바탕으로 하고 있기 때문에, 가능한 트랜지션이 급증함에 따라 해를 얻기까지의 시간이 기하급수적으로 증가한다 따라서 부품의 수가 많은 복잡한 제품에는 앞서 제시한 방법론을 그대로 적용하는 것이 비효율적이다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 본 연구에서는 에코 아키텍처 분석방법론에 트리 기반 방식을 접목한, 계층적 에코 아키텍처 분석방법론을 제안한다.

5.1 계층적 해체구조 정의

자동차와 같은 복잡한 제품의 해체는 분업적으로 이루어진다. 분리된 하나의 작업 내에서는 대상 부품들에 대한 부분조립품 단위의 묶음처리가 고려되지만 타 작업에 속한 부품과의 묶음처리는 고려되지 않을 뿐 아니라 현실적으로도 무의미할 가능성이 크다. 따라서 현실세계의 분업체계를 고려할 경우, 조립품 단위에서의 문제는 별도로 처리되는 것이 가정된 하위 부분조립품 단위에서의 문제로 나누어 풀 수 있다. 이는 트랜지션 매트릭스의 작성이나 경제적 가치의 예측치 도출을 보다 용이하게 할 뿐만 아니라, 실현가능 부분조립품과 실현가능 트랜지션의 수를 줄임으로써 분석에 소요되는 시간을 줄여준다.

의사결정자가 조립품 레벨의 의사결정 문제를 부분조립품 레벨의 의사결정 문제로 변환하기 위해서는 먼저 현실의 분업체계를 반영한 계층적 해체구조가 정의되어야 한다. 제품의 계층적 해체구조는 상위 부분조립품을 구성하는 최하위 부품들 중 묶음처리 가능성이 있는 부품들은 하나의 부분조립품으로 묶고 묶음처리 가능성이 제외된 부품들은 다른 부분조립품으로 분리함으로써 정의된다. 이때 하나의 상위 부분 조립품은 별도로 처리가 가정된 하위 부분조립품들의 결합으로 재정의되며, 계층구조 상의 하위 레벨에 표현된다. <Figure 4>는 계층

적 해체구조의 예이다. 그림에서 레벨 0은 조립품 상태를 의미하고, 레벨 1은 조립품을 묶음처리 가능성을 고려하여 재정의한 결과를 나타낸다. 레벨 2는 레벨 1에 속한 부분조립품을 다시 동일한 방식에 의해 재정의한 결과이다 이러한 계층화 작업은 부분조립품이 곧 최하위 부품이거나, 특정 부분조립품을 구성하는 하위 부분조립품 간의 별도처리 가정을 수립할 수 없을 때까지 수행된다. 만약 부분조립품이 곧 최하위 부품인 경우에는 그림에서 원형 노드로 표시된다. 이 부품은 더 이상 하위 레벨로의 전개되지 않는다. 반면 부분조립품이 두 개 이상의 부품으로 결합된 경우, 이 부분조립품은 그 하위 레벨에서 하위 부분조립품들의 결합으로 표현된다. 이러한 부분조립품은 사각형 노드로 그려진다.

앞서 제시한 가상제품 ABC가 <Figure 4>의 계층적 해체구조를 지닌다고 가정하자. 레벨 0의 조립품 ABC는 레벨 1에서 원형노드 A와 B와 C의 결합으로 표현된다. 상태 기반 방식의 에코 아키텍처 분석방법론은 레벨 1을 대상으로 적용되며, 의사결정시 제품 ABC의 모든 실현가능 부분조립품이 고려된다. 하지만 계층적 에코 아키텍처 분석방법론은 앞서 언급한 묶음처리 가능성을 고려함으로써 이와는 다른 해체구조를 대상으로 분석을 수행한다. 특정 상위 부분조립품이 하위 부분조립품들로 나누어지는 대안이 고정되기 때문이다. 조립품 ABC의 해체 시 AB에 대한 작업과 C에 대한 작업이 분리되어 수행된다고 가정하자. 부품 A와 C, B와 C, 또는 AB와 C 사이의 묶음처리가 발생할 가능성이 제외되기 때문에, ABC는 그림에서와 같이 AB와 C가 결합된 구조의 레벨 1 상태로 전개된다. 조립품 ABC가 BC와 A, AC와 B 등으로 해체되어 처리될 가능성이 제거된 것이다. 한편 AB는 다시 원형노드 A와 B가 결합된 레벨 2 상태로 전개된다.

5.2 에코 아키텍처 분석모델의 계층적 적용

계층적 에코 아키텍처 분석은 계층적 해체구조 상에서 에코 아키텍처 분석모델을 반복 적용함으로써 수행된다. 계층적 해체구조의 최하위 레벨에서 시작한 의사결정 과정은 상향식 방식으로 레벨 1의 에코 아키텍처 분석이 완료될 때까지 반복 수행된다. 그림 상의 사각형노드, 즉 상위 부분조립품은 재사용·물질 재활용·에너지 재활용·특별처리·폐기의 다섯 가지 처리대안 외에 해체의 대안을 지니게 된다. 해체대안의 사용 후 처리가치는 하위 레벨의 그래프를 대상으로 수행한 에코 아키텍처 분석으로부터 도출된다. 이 값은 초기에는 -∞로 입력되지만, 하위 레벨에서의 에코 아키텍처 분석이 완료되면 그로부터 도출된 목적함수 값을 해체대안의 사용 후 가치로 입력한다. 한편 최하위 부품과 하위 부분조립품이 없는 부분조립품들은 해체가 불가능하다. 따라서 이들의 해체대안 가치는 -∞로 설정한다.

이같은 계층적 에코 아키텍처 분석을 제품 ABC의 사례에 맞추어 적용해 볼 수 있다. 먼저 레벨 2의 그래프 2-1에서 부품

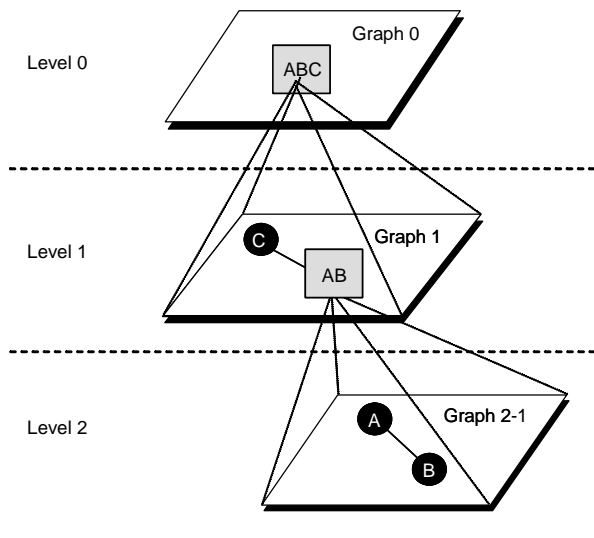


Figure 4. Hierarchical disassembly structure of product ABC

Table 5. Transition matrix of graph 2-1

| | 0 | 1 |
|----|---|----|
| AB | 1 | -1 |
| A | . | 1 |
| B | . | 1 |

Table 6. Disassembly cost matrix of graph 2-1

| Transition number(k) | 0 | 1 |
|---------------------------|---|---|
| Disassembly cost(C_k) | 0 | 5 |

A와 B의 결합관계로 표시된 부분조립품 AB에 대한 에코 아키텍처 분석을 수행한다. AB의 트랜지션 매트릭스와 트랜지션별 해체비용은 각각 <Table 5>, <Table 6>과 같다. 그리고 사용 후 처리가치는 <Table 7>과 같다. 여기서 괄호 안에 표기된 해체대안의 사용 후 처리가치는 앞으로의 의사결정 과정에서 결정될 값이다. 부분조립품 AB의 에코 아키텍처를 분석한 결과, 목적함수 값은 21이다. 이때 트랜지션 0과 트랜지션 1이 수행되며, 생성된 A와 B는 각각 물질 재활용을 최적대안으로 갖는다. 이는 AB가 해체를 통해 생성될 경우, 가장 경제적인 해체 계획을 의미한다. 목적함수 값 21은 AB의 해체대안의 사용 후 처리가치로 입력된다.

다음으로 레벨 1로 올라와 그래프 1-1에 대한 분석을 수행한다. 이는 제품 ABC에 대한 에코 아키텍처 분석을 의미한다. 그래프 1-1에 해당하는 트랜지션 매트릭스와 해체비용은 각각 <Table 8>와 <Table 9>에 해당한다. 에코 아키텍처 분석 결과, 목적함수 값은 16으로 나타났다. 트랜지션 0과 1이 수행되고, 해체로 생성된 AB는 해체대안을, C는 재사용 대안을 따르는 것이 최적 전략으로 도출되었다. AB가 해체대안을 따른다는 것은 AB가 앞 단계에서 도출된 에코 아키텍처 분석 결과를 따른다는 것을 의미한다. 즉 AB는 A와 B로 나누어지며, 각 부품은 별도의 물질 재활용 대안을 거치게 된다. 이는 앞서 에코 아키텍처 분석방법론에서 제시한 <Figure 3>의 결과와 일치하는 전략이다. 한편 레벨 1에서 조립품 ABC에 대한 분석이 완료되었으므로 계층적 에코 아키텍처 분석은 완료된다.

계층적 에코 아키텍처 분석방법론은 상태 기반 방식에 트리 기반 방식을 접목한 사용 후 처리전략 수립 방법론으로서 기존의 두 방식과 차별화된다. 제품을 구성하고 있는 부분조립품간의 수평적인 관계만을 고려하는 상태 기반 방식은 부품의 수가 증가하고 제품의 구조가 복잡해질수록 적용이 힘든 단점

이 있다. 계층적 에코 아키텍처 분석방법론은 제품의 해체구조 정의의 시 상태 기반 방식에서 사용하는 각 부분조립품 간의 수평관계 구조를 기반으로 트리 기반 방식에서 사용하는 수직적 계층구조를 부분적으로 도입함으로써, 복잡한 상위 부분조립품의 해체구조를 보다 단순한 하위 부분조립품 레벨의 해체구조로 나누어 분석하도록 지원한다. 이러한 특징은 상태 기반 방식과 차별화되는 특징일 뿐 아니라, 조립품에서 최하위 부품에 이르기까지 부분조립품 간의 관계를 상하관계만으로 사전에 지정하는 트리 기반 방식과도 차별화되는 것이다. 이러한 차이는 계층적 에코 아키텍처 분석방법론의 두 방식의 단점을 극복하여, 해체 비용을 통합적으로 고려하고 부분 조립품 단위의 묶음처리를 포함하는 의사결정을 가능하게 한다.

Table 8. Transition matrix of substructure 1-1

| | 0 | 1 |
|-----|---|----|
| ABC | 1 | -1 |
| AB | . | 1 |
| C | . | 1 |

Table 9. Disassembly cost matrix for product ABC

| Transition number(k) | 0 | 1 |
|---------------------------|---|---|
| Disassembly cost(C_k) | 0 | 6 |

6. 결론

본 연구는 에코 아키텍처라는 새로운 개념을 제안하고, 구성 설계 단계에서의 사용 후 처리전략 수립 및 친환경 설계 수행을 지원하기 위한 방법론으로서 계층적 에코 아키텍처 분석방법론을 제시하였다. 계층적 에코 아키텍처 분석방법론은 제품의 해체구조를 표현함에 있어 기존의 상태 기반 방식에 트리 기반 방식을 접목시켜서 부품의 수가 많고 구조가 복잡한 제품에도 에코 아키텍처 분석을 가능하게 하였다. 구성설계 단계의 제품 아키텍처에 대해 본 방법론을 적용할 경우, 의사결정자는 환경규제를 만족하는 범위에서 얻을 수 있는 현 아키텍처의 최대 사용 후 가치를 평가할 수 있고 이때 요구되는 제품의 최적 사용 후 처리전략을 파악할 수 있다. 이에 따라 설계자는 향후 설계에서 이루어지는 의사결정이 최적 사용 후 처리 전략을 수행하는 데 있어 어떠한 영향을 주는지 사전에 파

Table 7. End-of-life processing value matrix of product ABC

| | Reuse | Material recycling | Energy recycling | Special treatment | Disposal | Disassembly |
|-----|-------|--------------------|------------------|-------------------|----------|-------------|
| ABC | 12 | -∞ | -∞ | -300 | -∞ | -∞ (16) |
| AB | 9 | -12 | 4 | -∞ | -80 | -∞ (21) |
| A | 4 | 20 | 5 | -∞ | -50 | -∞ |
| B | 3 | 6 | 3 | -∞ | -15 | -∞ |
| C | 1 | -∞ | -∞ | -40 | -∞ | -∞ |

약할 수 있고, 나아가 재활용 용이성을 높이는 방향으로 친환경 설계를 수행할 수 있다.

그러나 현재의 에코 아키텍처 분석방법론은 몇 가지 한계를 내포하고 있다. 제안된 에코 아키텍처 분석은 초기설계 단계에서의 제품 설계 대안을 분석하여, 제품을 표현할 수 있는 여러 개의 실현가능 부분조립품의 조합을 파악하고, 이 중 최대 사용 후 가치가 예상되는 최적 조합을 찾아 에코 아키텍처로 정의하는 과정으로 수행된다. 이러한 방식은 제품을 구성하는 최하위 부품을 대상으로 가능한 실현가능 부분조립품과 그들의 조합을 모두 고려해야 하기 때문에 많은 입력값을 필요로 한다는 점에서 개선이 필요하다. 따라서 아키텍처 분석을 바탕으로 제품의 실현가능 부분조립품 및 트랜지션 매트릭스를 자동적으로 도출하는 방법이 개발되어야 한다.

계층적 아키텍처 분석 역시 추가적인 연구가 필요하다. 제시된 방법론은 제품의 계층적 해체구조가 외부로부터 입력되었다고 가정하고 논의를 진행하였지만 제품의 계층적 해체구조를 어떻게 정의하느냐에 따라 의사결정이 달라지므로 바람직한 계층적 해체구조를 도출하는 방법의 개발이 필요하다. 또한 계층적 에코 아키텍처 분석은 환경규제 만족함에 있어 보수적이라는 특성을 지니고 있다. 현재의 계층적 에코 아키텍처 분석은 개별 그래프 단위로 에코 아키텍처 분석을 수행하기 때문에, 제품 전체 입장에서 재활용률을 초과달성할 가능성이 높아진다. 재활용률의 초과달성은 기업 입장에서 불필요한 비용이 될 가능성이 있다. 따라서 제품을 총체적 시각에서 분석하여 환경규제 만족과 경제적 이익의 최대화를 조율하는 방법론의 개발이 필요하다.

마지막으로 본 연구는, 도출된 에코 아키텍처가 EOL 모듈 간의 결합을 설계하는 과정에서 보조적인 정보를 제공하지만, 구체적인 설계개선 방안을 도출하는 방법에 대해서는 제시하지 않고 있다. 에코 아키텍처 분석 결과에 대한 추가적 분석을 통하여 설계자에게 보다 위한 구체적이고 심층적인 정보를 제공함으로써 친환경 설계를 지원할 수 있는 방안이 보완되어야 할 것이다.

참고문헌

- Chen, R. W., Navin-Chandra, D., and Prinz, F. B. (1994), A Cost-Benefit analysis Model of Product Design for Recyclability and its Application, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, **17**(4), 502-507.
- Das, S. and Naik, S. (2001), The DBOM standard : a specification for efficient product data transfer between manufacturers and demanufacturers, *Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Denver, CO, USA.
- Das, S. and Naik, S. (2002), Process planning for product disassembly, *International Journal of Production Research*, **40**(6), 1335-1355.
- Dong, J. and Arndt, G. (2003), A review of current research on disassembly sequence generation and computer-aided design for disassembly, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of engineering manufacture*, **217**(3), 299-312.
- Duverlie, P. and Castelain, J. M. (1999), Cost Estimation During Design Step : Parametric Method versus Case Based Reasoning Method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **15**(12), 895-906.
- Eggert, R. J. (2005), *Engineering Design*, Pearson Prentice Hall.
- Erdos, G., Kis, T. and Xirouchakis, P. (2001), Modelling and evaluating product end-of-life options, *International Journal of Production Research*, **39**(6), 1203-1220.
- Fixson, S. K. (2004), Assessing product architecture costing : Product life cycles, allocation rules, and cost models, *Proceedings of ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences Salt Lake City, Utah, USA*.
- Gonzalez, B. and Adenso-diaz, B. (2005), A bill of materials-based approach for end-of-life decision making in design for the environment, *International Journal of Production Research*, **43**(10), 2071-2099.
- Hundal, M. S. (2002), *Mechanical Life Cycle Handbook* : Marcel Dekker.
- Johnson, M. R. and Wang, M. H. (1995), Planning product disassembly for material recovery opportunities, *International Journal of Production Research*, **33**(11), 119-3142.
- Kanehara, T., Suzuki, T., Inaba, A. and Okuma, S. (1993), On algebraic and graph structural properties of assembly petri net, *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Yokohama, Japan, 507-514.
- Krikke, H. R., van Harten, A. and Schuur, P. C. (1998), On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products, *International Journal of Production Research*, **36**(1), 111-140.
- Lambert, A. J. D. (1999), Linear programming in disassembly/clustering sequence generation, *Computers & Industrial Engineering*, **36**(4), 723-738.
- Lambert, A. J. D. (2002), Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment, *Computers & Industrial Engineering*, **43**(3), 553-575.
- Lee, D.-H., Kang, J.-G. and Xirouchakis, P. (2001a), Disassembly planning and scheduling : review and further research, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of engineering manufacture* **215**(5), 695-710.
- Lee, S. G., Lye, S. W. and Khoo, M. K. (2001b), A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **18**(2), 148-156.
- Murayama, T., Kagawa, K. and Oba, F. (1999), Computer-Aided Redesign for Improving Recyclability, *Proceedings of 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan.
- Pnueli, Y. and Zussman, E. (1997), Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign, *International Journal of Production Research*, **35**(4), 921-942.
- Rush, C. and Roy, R. (2000), Analysis of cost estimating Processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle, *Proceedings of CE2000 Conference*, Lyon, France.
- Ulrich, K. (1995), The role of product architecture in the manufacturing firm, *Research Policy*, **24**(3), 419-440.
- Veerakamolmal, P. and Gupta, S. M. (1999), A combinational cost-benefit analysis methodology for designing modular electronic products for the environment, *Proceedings of 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Danvers, MA, USA.