IE Interfaces
Vol. 14, No. 2, pp. 158-163, June 2001.

정보공리적 분해성 평가 방법과 적용

김영규[1] · 조규갑[2] · 차성운[3] · 정상진[1] · 권성우[1]

[1]LG전자 / [2]부산대학교산업공학과 / [3]연세대학교 기계전자공학부

Disassemblability Evaluation Method & Application using Axiomatic Approach

Young-Kyu Kim[1] · Kyu-Kab Cho[2] · Sung-Woon Cha[3] · Sang-Jin Jeong[1] · Sung-Woo Kweon[1]

This paper describes disassemblability evaluation method using axiomatic approach. In recent industry, it is necessary to develope high recyclable environmental product due to green consumer and environmental regulations. Disassembly stage is prior to recycling. Disassembly time data is determined previously in order to calculate the disassembly segments and disassembly sequence. In this paper the evaluation method of disassembly segment/sequence and disassembly time database are suggested. A case study of monitor product was showed.

1. 서 론

최근 환경의 영향에 대하여 사회적 관심이 높아지고 산업계의 개념이 바뀌고 있다. 즉, 고객은 환경 친화적인 제품을 더 선호하고 있다. 또한, 심각한 공해문제, 제한된 자원의 고갈, 매립지의 부족 등으로 환경문제에 대하여 규제와 법률이 제정되고 있고 이로 인하여 환경비용이 증가하고 있다(Spath, 1994). 이러한 환경 문제는 재활용을 높이고 환경영향의 요인을 감소시킴으로써 해결할 수 있다(Zussman, 1994). 제품의 전 생애에 발생되는 환경요인을 제품개발자가 결정하고 있다. 그런데 제품개발자는 생산성, 품질, 비용 등을 고려하여 설계해야 한다. 이러한 항목들은 신제품 개발에 있어 상호 영향을 주는 관계에 있으며 이 관계에서 좋은 설계를 하는 방법의 연구가 많이 되어 왔다. 그 방법들 중 설계를 효율적으로 평가할 수 있는 도구가 공리적 접근이다(Suh, 1990). 공리적 접근의 연구결과로 인하여 많은 제품이 평가되어지고 문제점을 개선할 수 있는 새로운 설계가 제시되어 왔다. 본 논문에서는 분해성을 향상시키는 분야에 공리적 설계의 정보공리적 접근을 이용하여 설계자로 하여금 최적의 분해성을 가지는 설계를 선정할 수 있도록 의사결정에 도움을 주는 방법을 개발하여 제시한다.

2. 이 론

공리적 설계는 '좋은' 설계를 선택하기 위하여 쓰는 도구라고 정의했다(Suh, 1990). 설계공리는 독립공리와 정보공리로 되어 있다. 독립공리는 기능적 요구에 대하여 독립성 유지로 정의한다. 정보의 공리는 설계의 복잡성과 관계가 있으며 상대적으로 단순한 설계가 더 좋은 설계라는 것을 의미한다. 정보의 공리는 기능적 요구를 만족시킬 수 있는 성공률에 의해서 설계요소를 선택한다. 즉, n개의 기능적 요구를 갖고 있을 때 "정보량"을 다음과 같이 정의한다(Wallace and Suh, 1990).

$$I = \sum_{i=0}^{n} [\log(1/Pi)] \tag{1}$$

여기서 P는 성공률이며 I는 정보량이 된다. 성공률이 100%일 때 $P=1$이 되어 가장 좋은 설계가 되므로 정보량 I가 작을수록 단순한 설계가 된다. 공리적 접근에서의 정보는 '복잡성'을 나타내는 척도로 사용된다.

설계 범위(design range)는 설계 변수와 관계가 있는 설계자가 원하는 범위이고, 시스템 범위(system range)는 주어진 공차에 대하여 제조설비의 성능이다. 이 두 가지 범위가 겹치는 부분을 공통 범위(common range)라고 한다. 식 (1)을 사용하여 <그림 1>에 나타나 있는 정보량을 표현하면 다음과 같다.

$$I = \log \frac{(System_range)}{(Common_range)} \tag{2}$$

식 (2)가 나타내는 정보량은 목표하는 분해성 설계로 설계자가 원하는 바의 제품으로 만들기 위하여 만족시킬 수 있는 확률을 나타내는 것이다. 만일 설계 범위가 시스템 범위 전체를

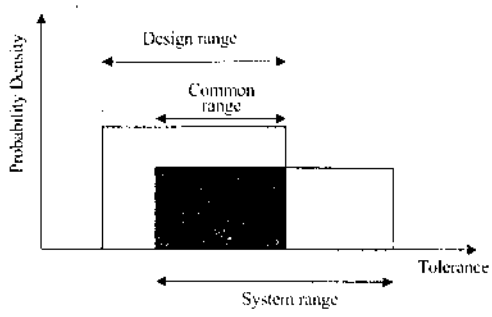


그림 1. 설계의 정보량.

포함하고 있다면, 즉 설계자가 원하는 분해성과 제품의 물리적인 분해성이 같게 되면 확률이 1이 되므로 정보량 I는 0이 된다. 이것은 추가적인 노력이나 정보가 없이도 항상 원하는 분해성을 가지는 제품을 생산해 낼 수 있다는 것이다. 반면에 설계 범위와 시스템 범위의 중복된 부분이 없다면 공통 범위는 0이 되어 정보량 I는 무한대가 된다. 이것은 설계자의 요구 분해성을 맞추기 위해서는 실제 제품의 분해성 설계에 무한대의 정보가 필요하게 된다. 따라서 이러한 경우에는 원하는 분해성을 가지는 제품을 만들 확률은 0이 된다. 분해성에 대한 평가 방법에 있어서 분해시간, 재사용과 재활용의 수익, ABC (Activity-Based Costing), 비용과 이익의 분석 등이 있다 (김영규, 정상진, 황종수, 2000). 그리고 신제품 개발시에 조립의 용이성을 조립시간으로 평가하는 것과 유사하게 분해성을 "분해시간"으로 측정할 수 있다 (Kamei, 1995). 왜냐하면 분해시간은 객관적이고 정량적으로 산출이 가능하고, Database로 경제적 관점에서 비용과 수익으로 평가할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 분해성이 좋다는 것은 분해시간이 적은 정보를 가지는 것으로 하여 전개한다.

3. 분해시간

분해시간이란 분해를 하는 데 필요한 시간이다. 분해시간이 최소화되면 분해성이 좋아졌다고 볼 수 있다. 분해시간은 여러 가지 분해 방법으로 분석되어서 빠르게 분리할 수 있도록 해야 한다. 분해시간은 부품별 단위와 제품단위로 정보를 만들어 분석할 수 있도록 되어야 하므로 분해시간 database는 부품단위로 계산되고 분해단위로 합하여 지는 방법으로 만들었다.

본 논문에서는 분해시간 Database를 만들기 위하여 <그림 2>와 같이 3단계 과정의 방법으로 수행하였다. 1단계는 MTM Ⅱ방법으로 분해의 동작을 식 (3)과 같은 분해의 단계로 요소동작의 시간을 할당하여 산출하였다.

$$\text{분해시간} = \text{접근시간}(R) + \text{분리시간}(D) + \text{이동시간}(M) + \text{놓는 시간}(P) \quad (3)$$

여기서, 접근시간은 공구를 잡고, 체결 요소나 부품 부위에 공구를 위치시키는 데 소요되는 시간, 분리시간은 체결을 분

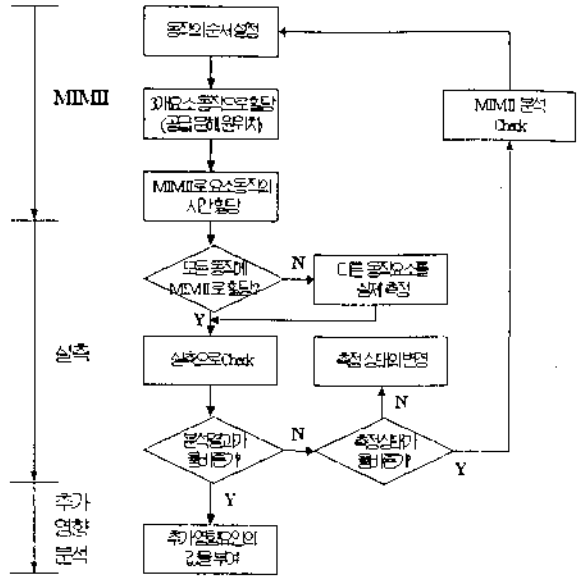


그림 2. 분해시간 Database 데이터 산출을 위한 분석.

리하는 데 필요한 동작의 소요시간, 이동시간은 한 체결요소에서 다음 체결요소로의 이동하는 데 소요되는 시간, 놓는 시간은 부품을 정해진 장소에 놓는 데 걸리는 시간이다.

2단계는 실측을 하여 MTM Ⅱ(Methods of Time Measurement Ⅱ)의 측정치와 비교하여 정한다. 즉 MTM Ⅱ방법으로 요소시간으로 설정한 것과 실제적으로 20회씩 측정한 평균값, 표준편차로부터 신뢰도 95%이상이 되는지를 확인하여 보정하여야 한다. 3단계는 추가적으로 시간에 영향을 주는 요인을 고려하였다. 추가 요인은 분해할 곳에의 접근성, 대상물의 크기와 무게에 따른 취급성이다.

위의 설명에서 만든 분해시간 Database로부터 <그림 3>과 같은 순서로 부품단위의 분해시간을 계산한다. 분해시간 Database는 체결방법, 체결요소특성, 체결개수, 체결간 거리, 분해공구, 분해동작에 따라 산출되는 Table로 공급시간, 표준분해시간, 취급성, 크기, 접근성, 공구의 원위치 및 이동시간으로 구성되어 있다. 이러한 Database는 MTM Ⅱ와 실측으로 보정한 Table이지만 표준분해시간 Table만은 체결방법에 따라 다른 분리시간을 가지므로 부품의 체결력을 설계할 때 사용하는 계산식을 활용하였다. 이러한 계산식은 독일 DIN의 계산식 자료를 참고하였다(DIN 13-1:ISO, 1996). 예를 들면 식 (4)와 같이 나사의 분리시간은 나사깊이와 나사길이에 관계한다. 여기서 t는 Metric screws의 분리시간이다.

$$t = 9 \times \left[\frac{5.65 \times \text{나사깊이}}{\text{나사길이}} \right]^{1.5} + 14 \quad (4)$$

<그림 3>과 같이 부품단위로 분해시간이 계산되므로 분해시간이 많이 소요되는 취약한 부품을 제시해 줄 수 있게 되었다. 취약부품의 취약점을 개선하기 위해서는 분해성에 관한 설계가이드를 활용하여 설계자가 개선을 할 수 있게 되었다 (<표 1>).

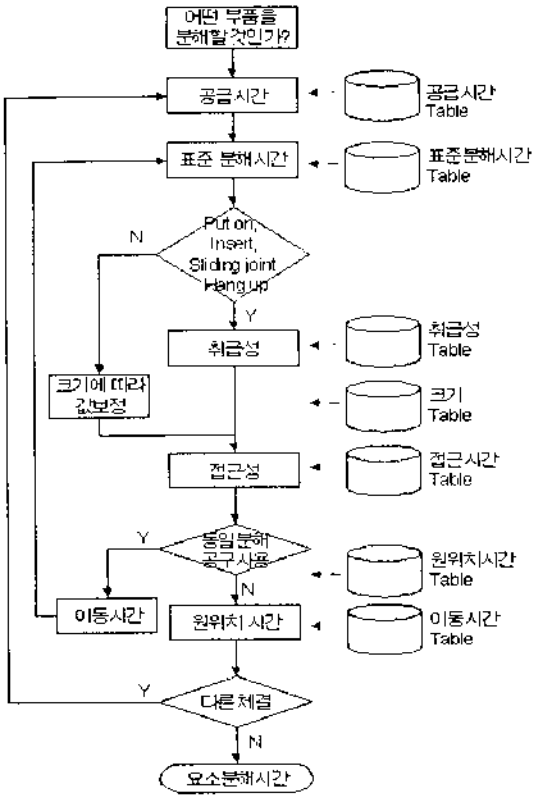


그림 3. 부품단위 분해시간의 계산방법.

표 1. 분해성 설계원칙

설계항목	설 계 원 칙
체결방법	분리가 쉬운 체결방법을 사용한다
	재활용 가능성이 높은 체결방법을 사용한다
	부품 재사용이 가능한 체결방법을 사용한다
	분해단위의 재활용 가능성을 높인다
	체결수를 최소화 한다
	부품간 체결형태를 단순화 시킨다
	분리가 쉬운 체결방법을 사용한다
	파괴 분리 가능성을 최소화 한다
	분리단위의 분리가 쉽도록 한다
	분리방향을 단순화 한다
	분리동작을 단순화 한다
	사용 분리 공구수를 최소화 한다
	분해단위수를 최소화 한다
	Cabling을 단순화 한다
부품재료	재활용 가능 부품으로의 접근성을 향상한다
	재료간 호환성이 높은 재료를 사용한다
	Plastics 재료의 재활용성을 높인다
	이종재료 사용을 최소화 한다
	부품 재사용성을 높인다
	재활용 가능한 재료의 사용량을 증가 시킨다
	유해물질의 사용을 최소화 한다
부품구성	분리방향을 최소화 한다
	분리동작을 단순화 한다
	부품 체결방법을 단순화 한다
	부품 체결깊이를 최소화 한다
	부품 재료구성을 단순화 한다
	부품의 취급성을 좋게 한다
	부품으로의 접근성을 좋게 한다
	부품구성을 단순화 한다
	유해물질을 편재화 시킨다

4. 분해단위 및 순서

제품의 분해시간을 기본 정보로 하여 분해단위와 분해순서를 결정한다. 그리고 분해단위가 결정된 후에 분해순서가 결정된다. 왜냐하면 어느 단계까지 어떤 순서로 분해를 할 것인가에 따라 분해에 행하여지는 활동(activity)이 달라지기 때문이다.

4.1 분해단위

분해 없이는 재활용이 될 수 없다. 또한, 조립의 역순으로 분해될 수 없다. 여러 부품이나 중간 조립품(Sub-Assy)은 더 이상 분해할 필요 없이 재활용 될 수도 있기 때문이다. 그리고 모든 분해시간의 계산은 분해되어야 할 부품 또는 중간 조립품 단위의 결정에서 시작된다. 본 연구에서는 분해와 재활용에 적합한 단위를 분해단위(segments)라고 하였다. 분해단위는 하나 또는 여러 개의 부품으로 결합되어 있다. 이 분해단위를 결정하는 알고리듬은 <그림 4>와 같다.

여기서, 우선순위(Priority)는 우선적으로 분해되어야 할 부품으로 이 부품은 선행조건으로 계산된다. 어떤 특정의 부품을 분해하려고 하면 선행적으로 분해되어야 한 조건이 있다. 예를 들면 모니터의 회로부품인 IC Chip를 분해하기 위해서는 외관부품인 Cabinet를 선행적으로 분해하여야 한다. 다음 단계는 이익과 비용의 관계에서 경제성의 관점에서 계산된다. 즉 분

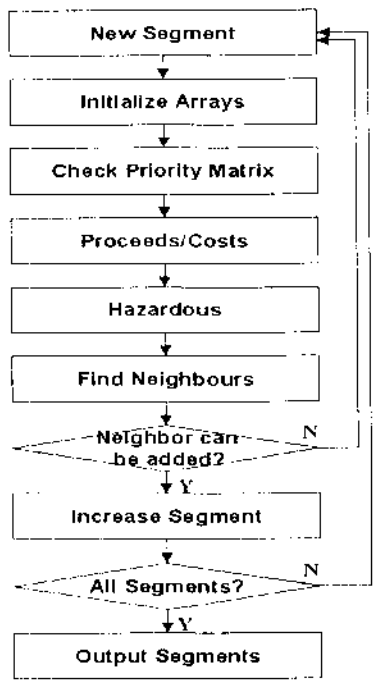


그림 4. 분해단위결정 알고리듬.

해작업으로 추가되는 비용과 분해된 재료로부터 얻는 재활용 관련 이익과의 관계에서 산출한다. 그리고 가치 있는 부품은 재사용될 수 있는 부품으로 그 부품 자체로 분해단위를 형성될 수도 있다. 또한 환경에 유해한 물질을 포함하고 있는 부품은 별도의 분해단위로 형성된다. 이후에 이웃의 분해단위와 합하여 새로운 분해단위를 형성할 수 있는 지를 체크하여 경제적인 관점에서 최적의 분해단위를 결정한다.

4.2 분해순서

제품의 형상, 구성의 정보로부터 다음과 같은 단계로 분해순서를 결정한다. 첫째는, 이론적 기준으로 가능한 모든 분해순서를 체크한다. 둘째는, 분해시간과 비용이 적은 최적의 분해순서를 찾는다. 분해비용을 최소화하기 위해서는 분해시 분해공구의 교환 횟수를 줄이도록 하는 분해공정과 분해순서를 결정해야 한다. 왜냐하면 분해공구의 교환은 결과적으로 분해시간을 증가시켜서 비용이 증가하게 하기 때문이다. <그림 5>는 재활용을 위한 분해순서의 결과이다. 분해단위 결정 후, 어떤 경로로 분해 할 것인가를 보여 준다.

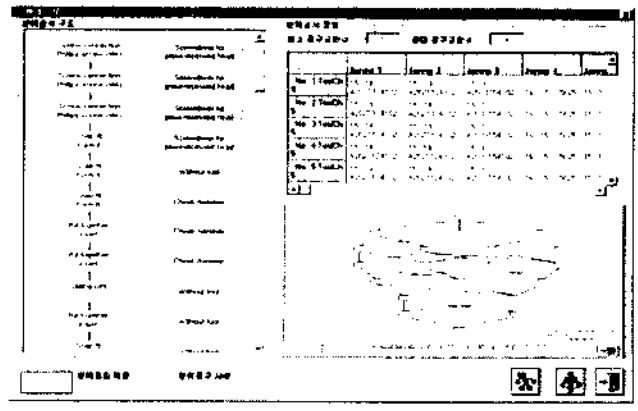


그림 5. 재활용을 위한 분해순서의 결정.

5. 사례 연구(모니터)

17" 모니터 제품을 대상으로 적용하였다(LG전자).

<그림 6>은 제품의 기능에 따라 부품을 독립적으로 전개하여 분석하였고 제품의 기능에 따른 부품의 구성도와 사용된 주요 재료, 무게 등의 정보를 보여주고 있다. 모니터는 정보 화면을 보여주는 CDT Ass'y와 주요 기능을 조정하는 PCB Ass'y, PCB Video Ass'y 그리고 외관 형성을 하는 Cabinet Ass'y, Back Cover Ass'y 등으로 구성되어 있다.

제품의 기능은 독립공리를 이룸을 알 수 있어서 본 논문에서는 재활용을 위한 분해성, 즉 분해시간에 맞추어 적용 사례를 논한다.

분석의 결과로 분해시간은 제품의 체결방법, 체결수량, 체결특성의 정보와 연계된 분해시간 Database로부터 <표 2>와 같이 부품별로 분해시간을 알 수 있었다. 예로 Cabinet Ass'y의 분해시간은 117.4초이다.

분해의 단위는 <표 2>와 같이 7개로 구성하는 것이 가장 경제적인 것으로 나타났다. 왜냐하면 예로 PCB Ass'y를 더 이상 분해하게 되면 분해를 하기 위한 비용이 이익보다 많아지게 되기 때문이다.

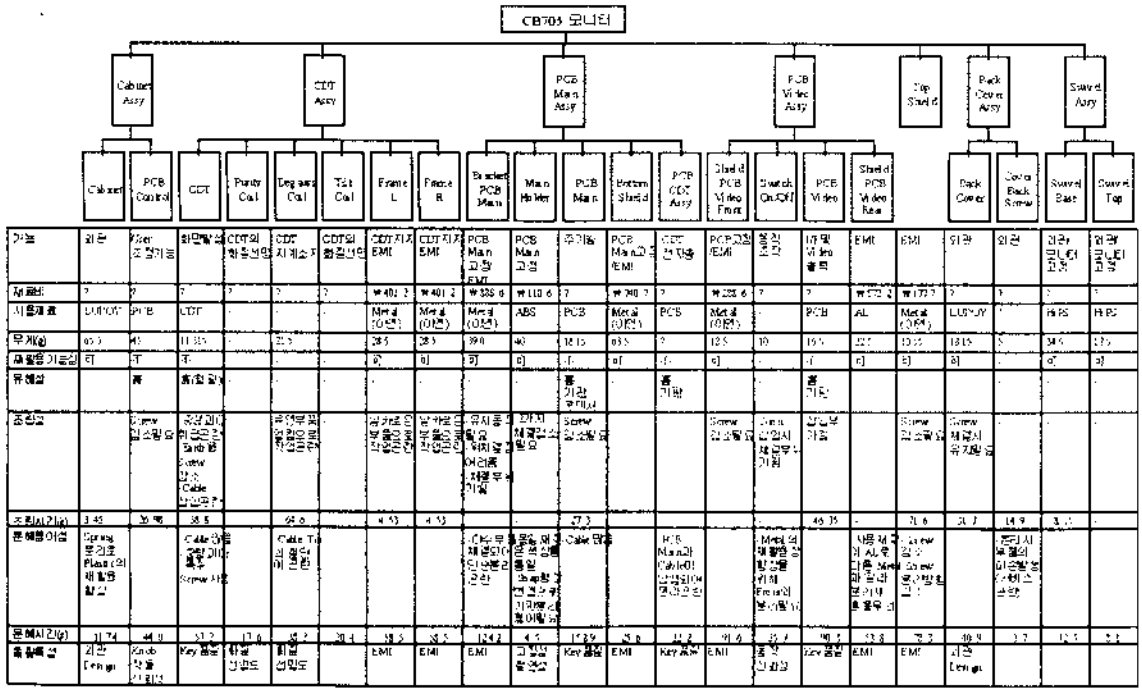


그림 6. 모니터 제품의 분석도.

표 2. 부품명과 분해시간

단위	부품명	분해시간
1	Cabinet Ass'y	117.4
	-PCB Control	44.0
2	CDT Ass'y	57.2
	Purity Coil	17.6
	Tilt Coil	20.4
	-Frame	116.9
	-Degaussing Coil	38.3
3	PCB Main Ass'y	124.2
	-Main Holder	4.5
	-PCB Main	158.9
	-Bottom Shield	25.6
	-PCB CDT	32.2
4	PCB Video Front	91.6
	-Switch on/off	25.9
	-PCB Video	90.3
	-Shield Video Rear	53.8
5	Top Shield	78.3
6	Back Cover	40.9
	-Back Cover Screw	3.7
7	Swivel Base	12.5
	-Swivel Top	8.1

분해순서는 <그림 7>과 같다. 제품의 형성과 구성 정보로부터 7가지의 분해단위의 분해 가능 순서는 16가지이다. 다음의 분해공구에 있어서 모니터의 분해는 드라이버 한 개의 분해공구로 7개 분해단위의 분해가 가능하다. 그런데 재활용의 목적에 따라 7단위 이하로 분해하게 되면 특수한 분해 공구가 필요하게 된다. 분해에 있어서 <표 2>의 분해단위 1과 분해단위 6은 모니터의 제품구조에 의하면 OR관계에 있으면서 1, 6은 최우선 분해 선행 단위의 조건에 있다. 그리고 분해단위 2, 5, 7의 세단위도 OR의 관계에 있으며 분해단위 3과 4도 OR의 관계에 있다. 여기서 분해단위 7은 3, 4의 선행관계에 있다. 여기서 분해단위 2 (CDT Ass'y)는 유리의 재활용하기 위하여 다른 부품보다 우선 재활용 대상이기 때문에 분해 우선 순위

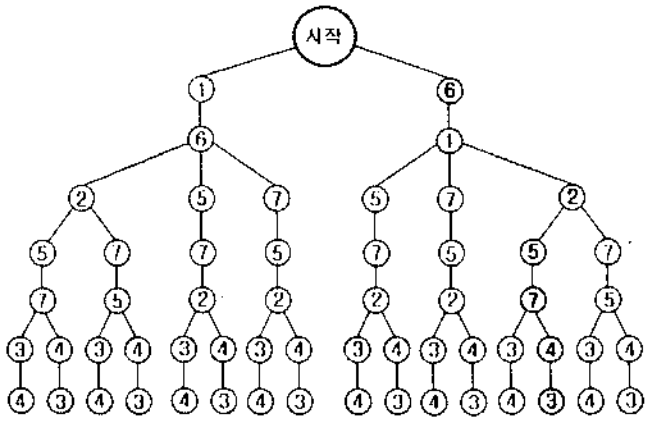
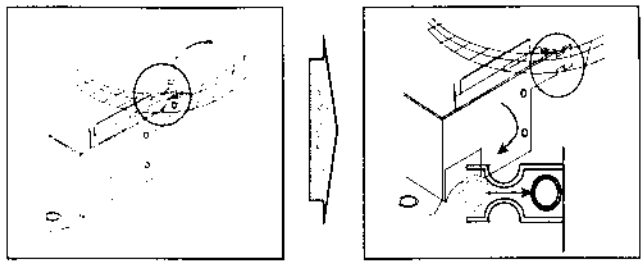


그림 7. 모니터 분해순서도.



개선 전 개선 후

그림 8. 부품의 분해 용이성 개선안.

(Priority)로 입력되어 있으므로 우선 분해하는 것이 좋다. 제품의 취급성을 고려하여 분해단위 5 이후에 7을 분해하는 것이 더 좋다. 그리고 분리의 방향성을 고려하면 분해단위 6 이후에 1이 분해하는 것이 좋고, 분해단위 4는 3위에 안착되어 조립되어 있으므로 분해단위 4는 3보다 먼저 분해되는 것이 좋다. 따라서 최적의 분해순서는 분해단위 6, 1, 2, 5, 7, 4, 3의 순서임을 알 수 있다.

분석 결과로부터 분해시간을 줄여서 분해성을 좋게 하고, 재활용성을 높이는 개선의 방향은 분해가 어려운 체결 Cable의 변경, 부품 구조의 변경이다. 따라서 한 예로 모니터 부품에서 Frame의 구조 변경에 의해 분해를 용이하게 한 사례이다. 기존 설계는 재활용성이 높은 부품에 대해 체결된 Cable의 분리가 어렵게 되어 있어 이에 대한 개선이 필요하였다.

<그림 8>의 개선안은 설계가이드에서 '분리가 쉬운 체결방법의 사용' 원칙을 적용하여 Snap-fit 형상으로서 직접 부품에 Cable을 고정시킨 경우이다. 개선안의 효과로써는 Cable Tie 4개 감소의 부품 수 절감과 부품 분해시 분해공구의 사용이 필요하지 않게 되어 분해 용이성이 향상되었다. 기존 Cable tie 절단으로 분해시간이 12.8초에서 Snap 제거의 방법으로 분해시간 4.2초가 되었다.

이와 같이 방법들을 신제품에 적용하여 분해시간을 좋게 하여, 결과적으로 제품폐기 때에 20.2%의 재활용 가능성을 높일 수 있게 되었다. 이와 같이 분해성, 재활용성, 환경성을 고려한 제품 설계로 17" 모니터 플래트론 대상으로 세계최초로 유럽환경 마크(EU Eco-label)를 취득할 수 있게 되었다.

6. 결 론

본 논문에서는 공리 설계적 접근 방법으로 분해시간 평가 방법을 제안하고, 모니터 제품에 적용하여 실용성을 검증하였다. 본문에서 제시된 알고리듬과 분해시간 Database 구성방법은 다음과 같은 특징이 있다. 첫째 분해시간 Database 구성에 있어서는 MTM Ⅱ, 실측 그리고 계산식을 이용하여 공급시간, 표준분해시간, 취급성, 접근성, 공구이동시간 등의 Table을 만드는 방법을 제안하였다. 둘째 분해단위의 결정 알고리듬은 선행관계, 이익과 비용의 관계 그리고 환경성을 고려하여 결정하는

방법이다. 셋째 분해순서의 결정 알고리듬은 이론적 가능 순서에서 분해시간이 적은 순서를 찾는 방법을 제안하였다. 그리고 모니터 제품에 분해시간을 분석하여 취약점을 파악한 후에 개선가이드를 이용하여 설계 개선함으로서 실용성을 보였다. 따라서 설계자가 신제품 개발시 분해성 향상의 평가 도구로 유용하게 사용할 수 있겠다.

후기

본 논문과 관련된 연구에 있어서 DIN의 자료 제공 등 분해시간 Database 구축에 도움을 준 Braunschweig대학 IFH연구소에 감사드립니다. 또한, 방법 개발과 적용에 도움을 준 LG전자 관계자에게도 감사드립니다. 특히, 본 연구에 기여하고 먼 나라로 간 권성우씨의 명복을 빕니다.

참고문헌

김영규, 정상진, 황종수 (2000), 가전에 있어서 친 환경 제품 개발의 평가 기술 연구현황, *한국정밀공학회지*, 17(8), 21.

DIN 13-1:ISO general purpose metric screw threads-Part 1:Coarse pitch threads in the diameter range 1mm to 68mm, Nominal size, Entwurf, January 1996.

Kanei, T. (1995)., Product Life Cycle of Electrical Appliances, *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 4(1), 43-62.

LG전자, Service Monitor Manual: *Model CB705*

Spath, D. (1994), The Utilization of Hypermedia Based Information Systems for Developing Recyclable Products and for Disassembly Planning, *Annals of the CIRP*, 43(1) 153-156.

Suh, N. P. (1990), *The Principles of Design*, Oxford University Press, 46-69, 149-158.

Wallace, D. R., Suh, N. P. (1993), Information-Based Design for Environmental Problem Solving, *CIRP Annals*, 42(1), 175-180.

Zussman, E. (1994), krwet, A., and seliger, G., Disassembly-Oriented Assessment Methodology to Support Design for Recycling, *CIRP Annals*, 43(1), 9-14.

김 영 규
부산대학교 기계설계 학사
부산대학교 산업공학 석사
부산대학교 산업공학 박사수료
현재: LG전자 책임연구원(부장)
관심분야: 생산시스템 공학,제품설계 및 평가, 전략기획 등

조 규 갑
부산대학교 기계공학과 학사
부산대학교 기계공학과 석사
Alabama 대학교 산업공학과 석사
Pennsylvania 주립대학교 산업공학과 박사
현재: 부산대학교 산업공학과 교수
관심분야: 생산시스템 공학,전문가시스템의 응용, CAPP, CIM 등

차 성 운
부산대학교 기계공학 학사
Jogia 공과 대학 기계공학 석사
M.I.T. 기계공학 (manufacturing) 박사
현재: 연세대학교 기계공학 부교수
관심분야 : 제조공정, 공학설계, 제품개발 및 설계 등

정 상 진
부산대학교 산업공학 학사
부산대학교 산업공학 석사
현재: LG전자 영상제품연구소 선임연구원
관심분야: 공정설계, 제품개발 및 설계 평가 등

권 성 우
LG전자 주임연구원