한국경영과학회/대한산업공학회 2003 춘계공동학술대회
2003 년 5 월 16 일-17 일 한동대학교(포항)

재활용을 고려한 분리를 위한 설계(DFD) 지원 시스템 개발

Development of Support System of DFD (Design for Disassembly) Considering Recycling

목학수*, 조중래*, 문광섭**
*부산대학교 산업공학과, **영산대학교 정보경영학부

Abstract

This paper presents a new DFD methodology to estimate the standard disassembly time and evaluate the disassemblablity of a product. The disassembly time is estimated with some decision and influencing factors of disassembly using motion analysis. The disassemblability is evaluated using weights of the decision and influencing factors and disassembly difficulty scores, and the tables that include the time and scores of disassembly are suggested. Finally, a new DFD support system is implemented to help designers to analyze the product during the design process in concurrent engineering.

1. 서론

최근들어, 환경보존을 위한 국제 협약과 WTO, OECD 등의 국제 기구를 통한 환경 관련 무역규제, EU를 중심으로 IPP (Integrated Product Policy), WEEE (Waste Electrical & Electronic Equipment), RoHS (Restriction of Hazardous Substance) 등 환경 규제가 강화됨에 따라 수명을 다한 제품의 폐기 문제가 심각하고 대두되고 있다. 환경과 재활용에 대한 관심과 필요성이 커짐에 따라 재활용을 위해서 반드시 거쳐야 하는 분리에 대한 관심도 높아지고 있다. 재활용을 고려한 분리는 수명이 다한 제품을 재활용과 재사용을 위해서 재질별로 하나씩 해체하는 것을 말한다. <그림 1>은 수명을 다한 폐가전제품의 Life cycle을 보여주고 있다.

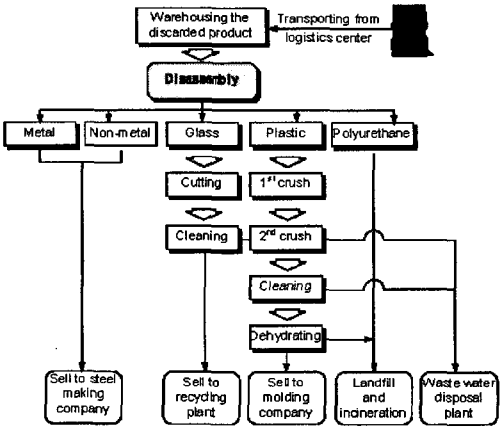

그림 1. 폐제품의 Life cycle

입고된 폐제품은 분리공정을 통하여 재질별로 해체가 된 후 목적에 따라서 재사용(Reuse) 혹은 재활용(Recycling) 된다. 따라서, 설계단계에서 분리 시간을 산정하고 분리용이성을 평가하는 새로운 방법론이 필요하게 되었다. 국내 분리 기술에 관련되어서는 삼성전자의 DFX (Design for X), LG전자의 ATROID (Assessment Tool for Recycling Oriented Design), 현대자동차의 VRAIS (Vehicle Recyclability Assessment Information System) 등 대기업을 중심으로 이루어지고 있다. 그리고, 독일, 네덜란

드, 스웨덴 등의 유럽 국가들은 학계와 연계하여 유연 자동 분리 셀(Cell) 구축, 자원 재활용을 위한 분리 구조 설계, 부품분리 중심의 기계화된 폐자동차 분리 공장을 개발 등 분리와 관련한 연구를 하고 있다.

본 연구에서는 분리시간 산정과 분리용이성 평가를 위한 새로운 방법론을 제시하고 의사결정을 지원하는 시스템을 구축한다. 설계단계에서 미리 생산하고자 하는 제품의 분리시간을 산정하고 분리용이성을 평가함으로써 취약점이 발생하는 부품을 개선할 수 있기 때문에 많은 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

2. DFD 평가 알고리즘 개발

2.1 DFD 알고리즘의 개요

설계단계에서 분리되는 제품의 분리시간과 분리용이성을 평가하기 위해서는 분리되는 대상, 분리공정, 분리를 수행하는 수행체를 분석하여 제품의 기하학적 정보와 공정 정보를 획득해야 한다. 그 이유는 획득된 정보를 바탕으로 분리의 평가기준(Criteria) 혹은 결정요소(Decision factor)와 영향요소를 도출할 수 있기 때문이다. <그림 2>는 도출된 결정요소와 영향요소를 사용하여 분리시간을 도출하고 분리용이성을 평가하는 DFD 알고리즘의 개요를 보여주고 있다. 본 논문에서는 분리공정을 고정(Fixing), 파악(Grasping), 접근(Access), 분리(Disassembly), 취급(Handling)의 다섯 가지로 나누었다. 이는 일련의 분리공정은 먼저 분리 대상물을 고정한 후 분리점을 파악하고 분리점으로 접근한 후 분리를 하고 분리된 부품을 취급하는 다섯 요소로 나누어진다는 것을 의미한다. 다음으로 각 결정요소에 세부 영향요소(Influencing factor)를 도출한다. 결국, 총 분리시간은 이러한 결정요소들의 시간의 합으로 표현되고, 총 분리용이성은 각 부품의 결정요소별 용이성 정도의 합으로 계산된다. 평가결과 분리시간이 많거나 분리용이성이 낮은 부품의 취약특성을 파악하여 분리용이성 설계원칙을 적용하여 전체적인 제품의 분리용이성을 향상시킬 수 있다.

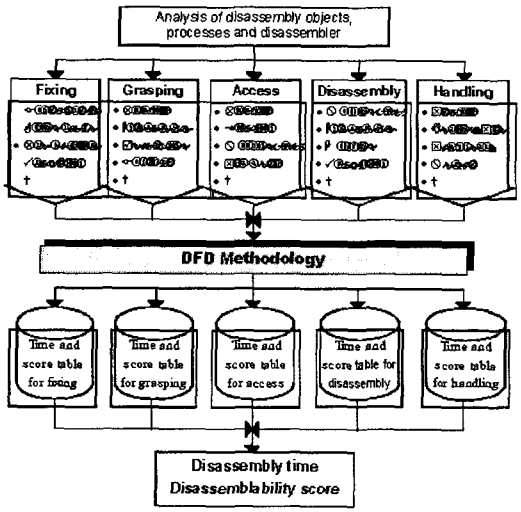

그림 2. DFD 알고리즘의 개요

2.2 분리 결정요소별 영향요소의 도출

각 결정요소별 세부 영향요소를 도출하는 이유는 이러한 영향요소들에 의해서 각 부품들의 분리시간과 분리용이성을 구할 수 있는 테이블이 만들어지기 때문이다. <표 1>은 분리의 결정요소 중에서 고정, 파악, 접근의 영향요소와 각 영향요소별 등급을 보여주고 있다. 일반적으로 영향요소는 크게 정성적(Qualitative)인 요소와 정량적(Quantitative)인 요소로 나눌 수 있다. 크기, 두께, 무게 등은 정량적인 요소이며 작업영역, 시각성 등은 정성적인 요소이다. 정량적인 요소의 경우에는 그 정의가 명확하며 등급도 정량적 값의 간격으로 쉽게 나눌 수 있지만, 정성적인 요소의 경우에는 그 정의와 등급을 정의해야만 한다. <표 1>에서 각 결정요소와 영향요소의 가중치

는 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 구하였다. 그리고, 등급별로 어려움 점수(Difficulty score)를 1 부터 9 까지 1(Good), 3(Not bad), 5(Not good), 7(Bad), 9(Absolute bad)의 다섯 단계로 부여하였다. 이 스케일이 실제값과 추정치의 상관계수 (Correlation coefficient)가 가장 큰 것으로 많은 실험에서 증명되었다.

표 1. 분리 영향요소 및 등급의 예

Criteria	Influencing factors	Level		
		1	2	3
Fixing (0.15)	State of contact (0.11)	Face contact (1)	Line contact (3)	Point contact (5)
	Shape (0.30)	Simple (1)	Complex (9)	
	Use of fixture or not (0.35)	Not use (1)	Use (7)	
	Precaution (0.20)	No (1)	Yes (5)	
	Support (0.04)	No (1)	Yes (5)	
Grasping (0.12)	Disassembly method (0.32)	Joining point=1 (1)	Joining point>2 (5)	Complex (9)
	Visibility (0.17)	Good (1)	Bad (5)	
	Interference (0.07)	No (1)	Yes (7)	
	Rehandling (0.18)	Easy (1)	Difficult (5)	
	Contrast/Boundary (0.26)	Yes (1)	No (5)	
Access (0.13)	Visibility (0.34)	Good (1)	Bad (7)	
	Assess direction (0.11)	Vertical (Gravity) (1)	Horizontal (5)	Combined (7)
	Working area (0.47)	Good (1)	Bad (7)	
	Symmetry (0.08)	β= 0, β= 90 (1)	β=180, β=360 (5)	

그리고, 그 값을 영향요소의 등급에 따라 그 중요도에 맞추어 부여하였다. 예를 들면 영향요소인 부품형상과 고정구 사용여부의 등급은 같지만 어려움 점수는 1, 9 와 1, 7 로 다르게 주어졌다. 이것은 부품형상의 2 등급이 고정구 사용여부의 2 등급보다 더 많이 분리에 영향을 미친다는 의미이다. 이러한 결정요소와 영향요소의 가중치와 점수를 구하는 이유는 이러한 값들에 의해서 뒤에 분리용이성이 계산되기 때문이다.

2.3 동작분석을 통한 분리시간 산정

표준 분리 시간을 산정하기 위해서 본 연구에서는 동작분석 기법을 사용하였다. 동작분석은 PTS (Predetermined Time Standard)법 중에서 MTM (Methods Time Measurement)법과 WF(Work Factor)법을 동시에 사용하였다. 즉, 본 연구에서는 MTM을 기초로 MTM으로 정의되지 않는 기본동작을 WF로 표현함으로써 더 정확한 결과를 도출할 수 있게 하였다. <그림 3>은 분리시간을 산정하는 절차를 보여주고 있다.

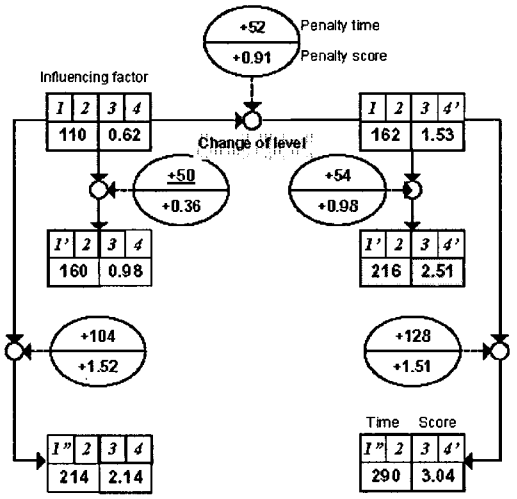

그림 3. 분리시간 산정 절차

만약 어떤 결정요소에 네 종류의 영향요소 1, 2, 3, 4 가 있고 영향요소 1 과 4 는 각각 1, 1'과 4, 4'의 두 종류의 등급이 존재한다고 가정하자. 현재 네 종류의 영향요소의 등급이 모두 1 등급인 1, 2, 3, 4 의 경우 그 시간은 110TMU 가 된다. 이 시간은 앞에서 설명한 동작분석에 의해 결정된다. 영향요소 4 의 등급이 4 에서 4'로 한 등급 떨어져서 1, 2, 3, 4'로 바뀌었을 때 52TMU 의 페널티 시간(Penalty time)이 추가되어서 총 시간이 162TMU 가 된다. 여기서 영향요소 1 의 등급이 한 단계 떨어져서 1 에서 1'로 된 1', 2, 3, 4'의 경우에는 페널티 시간 54TMU 가 추가되어서 216TMU 가 된다. 이 시간은 영향요소 1 와 4 의 등급이 각각 한 단계

떨어졌을 때의 페널티 시간 52TMU 과 50TMU 의 합 102TMU 보다 4TMU 의 시간이 더 걸린 것이다. 이것은 영향요소 4 와 5 가 동시에 떨어질 때는 하나씩 등급이 떨어졌을 때보다 시간이 α 만큼 더 걸림을 보여준다. 이러한 관계를 식 (1)에서 보여주고 있다.

$$T_{1급,3,4급} = T_{1,2,3,4} + PT_{1,2,3,4\to 4급} + PT_{1\to 1급,3,4급} = T_{1,2,3,4} + PT_{1,2,3,4\to 4급} + PT_{1\to 1급,3,4} + \alpha \quad (1)$$

여기서, $T_{1',2,3,4'}$ 는 영향요소가 1 등급인 1, 2, 3, 4 에서 1', 2, 3, 4'로 바뀌었을 때의 시간을 나타내고 $PT_{1,2,3,4\to 4'}$ 는 영향요소 4 의 등급이 4'로 한 등급 떨어졌을 때의 페널티 시간을 나타낸다.

2.4 분리 어려움 점수의 산정

분리용이성 점수는 결정요소의 가중치와 그 결정요소의 각 영향요소의 가중치, 그리고 <표 1>에서 제시된 영향요소의 등급에 따른 어려움 점수의 곱으로 미리 각 결정요소별 용이성을 구하여, 시간 테이블에 같이 결정한다. 즉, <그림 3>에서와 같이 영향요소 1, 2, 3, 4 의 용이성을 구한 후 등급이 떨어짐에 따라 페널티 점수를 부여하는 방법이다. 식 (2)는 각 부품의 분리 어려움 점수를 구하는 식이다.

$$S = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(w_i w_j)s_j \quad (2)$$

여기서, w_i는 결정요소 i의 가중치를 나타내고, w_j는 영향요소 j의 가중치를 나타낸다. S_j는 등급에 따른 영향요소 j의 어려움 점수를 나타낸다.

2.5 분리시간 및 어려움 점수 테이블 작성

본 논문에서는 분리의 결정요소별로 시간과 용이성 점수를 동시에 가진 테이블을 미리 결정하여 제시하였다. <그림 4>는 결정요소 분리중에서 분리방법이 '간단분리'와 '파괴, 뽑기, 제낌'의 테이블을 보여주고 있다. 이렇게 미리 결정된 테이블을 보면서 각 부품의 영향요소별 특성이 결정되면 그 부품의 분리시간과 분리용이성이 동시에 결정될 수 있다.

Time and score table for Simple disassembly		Gripping for disassembly: Good				Gripping for disassembly: Bad			
		Disassembly direction: Vertical, Horizontal		Disassembly direction: Antigravity, Combined		Disassembly direction: Vertical, Horizontal		Disassembly direction: Antigravity, Combined	
		Resistance: Small	Resistance: Large	Resistance: Small	Resistance: Large	Resistance: Small	Resistance: Large	Resistance: Small	Resistance: Large
		0	1	2	3	4	5	6	7
Working area: Good	0	24	40	34	52	44	62	58	82
		0.51	1.12	0.92	1.53	1.06	3.79	1.47	2.08
Working area: Bad	1	40	60	52	74	64	88	84	114
		1.16	1.77	1.57	2.18	1.71	2.33	2.12	2.73

Time and score table for destroying		Gripping parts for disassembly: Good				Gripping parts for disassembly: Bad			
		Precaution: Not needed		Precaution: Needed		Precaution: Not needed		Precaution: needed	
		Resistance: Small (Low abrasion)	Resistance: Large (High abrasion)	Resistance: Small (Low abrasion)	Resistance: Large (High abrasion)	Resistance: Small (Low abrasion)	Resistance: Large (High abrasion)	Resistance: Small (Low abrasion)	Resistance: Large (High abrasion)
		0	1	2	3	4	5	6	7
Working Area: Good	0	50	72	70	96	70	100	90	126
		0.51	1.64	0.96	2.1	1.28	2.41	1.72	2.86
Working Area: Bad	1	64	88	86	116	92	132	120	168
		1.00	2.13	1.45	2.58	1.76	2.90	2.21	3.35

그림 4. 시간 및 어려움 점수 테이블의 예

3. DFD 지원 시스템 개발

효율적인 분리시간 산정과 분리 용이성 평가를 위하여 분리를 위한 설계 지원 시스템이 필요하게 되었다. 시스템은 간단하고 쉽게 입력하여 평가가 되어야 하며 빠르게 결과를 평가자에게 보여줄 수 있어야 한다. 논문에서는 입력정보를 최소로 하며 구체적인 데이터베이스를 이용하여 쉽고 빠르고 정확하게 평가할 수 있는 사용자 중심의 시스템을 개발하였다.

3.1 DFD 지원 시스템의 개요

DFD 지원 시스템은 크게 부품 기본정보입력, 테이블의 데이터베이스화, 결정요소별 입력, 결과 출력 등의 네 개의 서브 모듈로 구성되어 진다. <그림 5>는 DFD 지원 시스템의 개요를 보여주고 있다.

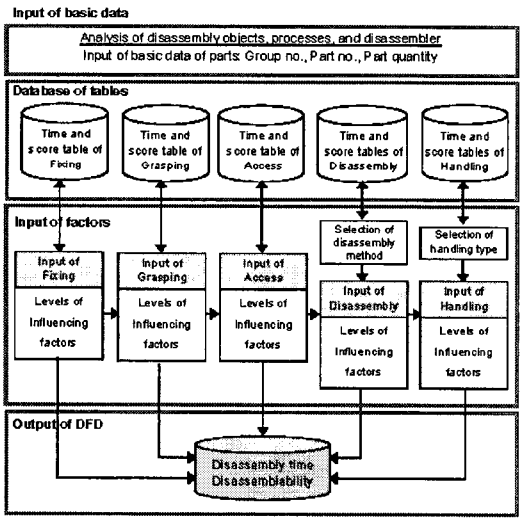

그림 5. DFD 지원 시스템의 개요

DFD 지원 시스템에서는 먼저 부품의 기본적인 정보를 입력하고 작성되어져 있는 테이블의 시간과 점수를 데이터베이스화하게 된다. 그런 다음, 해당 부품마다의 고정, 파악, 접근 평가 결과를 입력하고 분리방법을 선택한 후 결과를 입력하고, 취급 형태를 선택한 후 입력하면 부품의 해당 입력정보에 맞는 분리시간과 분리어려움 점수가 데이터베이스와 연결되어 결정되고, 부품의 총 분리 시간 및 점수가 출력되어 진다.

3.2 데이터 입력

데이터 입력은 크게 기본정보 입력과 분리용이성 평가입력 두 가지로 분류된다. 기본정보 입력창이 뜨면 그룹번호, 부품번호, 부품이름, 부품 수를 기입하게 되어있다. 분리용이성 평가 입력창은 크게 고정, 파악, 접근, 분리, 취급의 다섯 가지로 구성되어져 있고, 분리와 취급 입력창은 해당 형태에 따라서 새로운 프레임이 생성되어지게 되어 있다. 결정요소 분리용이성의 세부영향요소는 분리방법마다 각기 다른 영향요소를 가지므로 분리방법을 선택하면 해당 프레임이 나타나게 된다. 본 시스템에서는 4 가지의 분리방법으로 구성되어져 있다. 취급의 입력화면에는 세 가지의 취급타입 (Handling type)이 있는데, 취급 1 은 한 손으로 취급이 가능한 부품을 나타내고, 2는 엉킴성, 유연성 등 부품의 특성 때문에 두 손으로 취급하는 부품을 나타내며, 취급 3 는 크기, 무게 때문에 두 손으로 취급하는 부품을 나타낸다.

<그림 6>의 결정요소 분리에서 분리방법 파괴의 입력화면과 취급 3의 입력화면을 보여주고 있다. 파괴의 세부영향요소에는 작업영역, 대상물의 잡기의 정도, 간섭에 의한 주의 여부, 분리력 정도 등이 있으며 취급 3의 영향요소에는 크기, 무게, 재질, 엉킴성, 부가적 어려움, 대칭성 등이 있으며 평가하고자 하는 부품에 맞는 등급을 선택하게 된다.

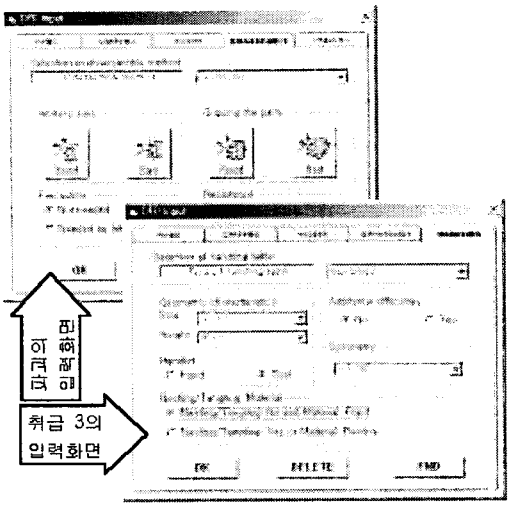

그림 6. 분리 결정요소별 입력화면의 예

취급까지 모든 결정요소의 영향요소와 그 등급을 입력하고 'End' 버튼을 클릭하면 해당 부품의 결정요소별 시간과 총 분리시간, 해당 부품의 분리용이성 점수와 총 분리용이성 점수가 데이터 베이스와 연결되어서 자동으로 계산되어 결과화면에 나타나게 된다.

3.3 DFD 지원 시스템의 평가 결과

데이터 입력 결과 분리시간과 분리용이성 점수 결과가 결정된다. <그림 7>은 부품별 분리시간 결과와 분리 어려움 점수 결과를 그래프와 시트(Worksheet)의 형태로 보여주고 있다. 그래프를 막대그래프와 꺾은선그래프 원분포도로 나타낼 수 있다. 그래프의 세로축은 분리시간(단위:초)과 분리 어려움 점수를 나타내고 가로축은 부품 번호를 나타낸다. 그래프는 고정, 파악, 접근, 분리, 취급 시간과 총 분리시간으로 구분하여 나타나 있다. 그래프 밑의 시트에는 부품 기본정보와 부품의 결정요소별 시간과 어려움 점수, 결정요소들의 시간의 합인 총 분리시간과 총 분리 어려움 점수가 나타나 있다.

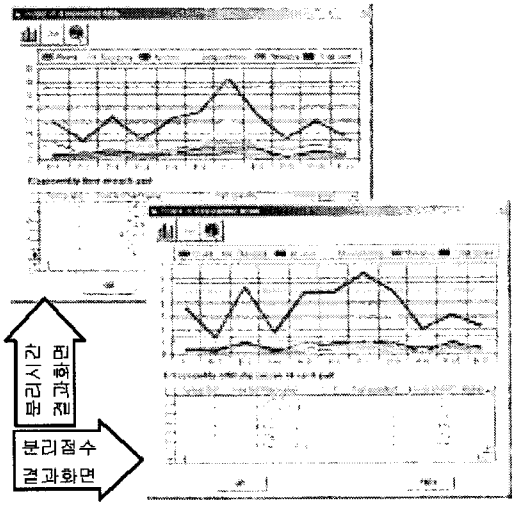

그림 7. DFD 지원 시스템 평가 결과

<그림 8>은 부품별 분리시간 결과에서 특정 부품을 찾기, 삭제 할 수 있는 데이터 관리 화면을 나타내고 있다.

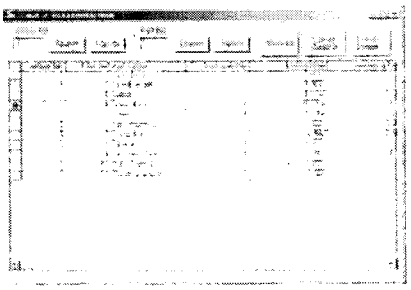

그림 8. 데이터 관리 화면

관리 화면에는 결정요소별 분리시간과 총 분리시간 있으며, 데이터의 삭제, 검색 등의 데이터 관리를 할 수 있도록 되어 있다.

4. 결론

본 연구에서는 설계단계에서 제품의

분리시간을 산정하고 분리용이성을 평가하기 위한 새로운 방법론을 제시하고, 사용자 중심의 지원 시스템을 개발하였다. 동작분석 기법을 사용하여 분리시간을 추정하였으며, AHP 로 구한 결정요소와 영향요소의 가중치와 영향요소의 등급별 어려움 점수를 사용하여 분리용이성을 평가하였다. 그리고, 구체적이고 많은 결정요소 및 영향요소를 사용하되 입력정보를 최소화하고 간편화한 DFD 지원 시스템을 개발하였다. 향후 분석된 분리 취약특성을 제거하기 위하여 재설계 원칙을 적용하여 재설계 대안을 생성할 것이다.

5. 참고문헌

[1] Andreasen, M., *Design for Assembly*, IFS Publications, UK, 1988.

[2] Boothroyd, G., *Assembly Automation and Product Design*, Marcel Dekker, Inc., 1992.

[3] Cross, N., *Engineering Design Methods*, John Wiley & Sons, 1994.

[4] Redford, A. and Chal, J., *Design for Assembly*, McGraw-Hill, Inc., 1994.

[5] 목학수, 조종래, 강영훈, "조립시간 산정과 조립용이성 평가방법론," [한국정밀공학회지], 19 권, 5 호 (2002), pp. 72-80..

[6] Saaty, T., "Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process," *Management Science*, Vol. 32, No. 7, (1986), pp. 841-855.

[7] Harker, P., "The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process," *Management Science*, Vol. 33, No. 11, (1987), pp. 1383-1402.

[8] 황학, [작업관리론], 영지 문화사, 1992.

[9] Marcel, T., "Designer Support for Product Structuring-Development of a DFX Tool within the Design Coordination Framework," *Computer in Industry*, Vol. 33, (1997), pp. 155-163.

[10] Spicer, J. and Wang, M., "A Software Tool of End-of-Life-Cycle Consideration within A DSS Approach to Environmentally Conscious Design and Manufacturing," *Computers & Engineering*, Vol. 29, (1995), pp. 501-505.