

재활용을 고려한 조립 및 분리용이성을 위한 제품 설계 방법론 개발

목학수*, 조종래*

Development of Product Design Methodology for Assemblability and Disassemblability Considering Recycling

Hak Soo Mok*, Jong Rae Cho*

ABSTRACT

This paper proposes a design methodology for customer, assembly and disassembly considering recycling. The design process starts with the identification of customer needs, which are in turn converted into functional requirements. The concepts of Design for Customer (DFC), Design for Assembly (DFA), Design for Variety (DFV) and Design for Disassembly (DFD) are considered in the product design phases in order to decrease production variety and mass customization. And, a new module generation approach is developed for rearranging and clustering parts and subassemblies for disassembly and recycling. Based on the result of the module generation, a new configuration methodology is suggested to minimize the disassembly time or number of disassembly operations for recycling.

Key Words : Recycling(재활용), DFC(고객지향적 설계), DFA(조립용이성 설계), DFD(분리용이성 설계), DFV(다양성을 위한 설계), Modular generation(모듈 생성)

1. 서론

제품의 생산성을 향상시키기 위한 조립을 위한 설계(DFA: Design for Assembly), 제조를 위한 설계(DFM: Design for Manufacturing) 등에 대한 연구^[1]와 고객 중심의 제품개발의 환경변화에 적극적으로 대응할 수 있는 다양성을 위한 설계(DFV: Design for Variety) 등 제품설계에 관한 연구^[2]는 최근 몇 십 년 동안 꾸준히 연구되어 왔다. 최근 들어, 환경에 대한 관심이 고조되면서 재활용을 위한 설계(DFR: Design for Recycling), 제품의 전과정에 걸쳐 환경 영향성을 평가하는 전과정 평가(LCA: Life Cycle Assessment), 환경을 위한 설계

(DFE: Design for Environment) 등에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다^[3].

제품 설계는 설계자의 축적된 경험이나 훈련에 의해서가 아니라 원리와 원칙을 사용한 과학적 기초 위에서 이루어진다는 이론이 공리적 설계방법(Axiomatic design theory)^[4]이다. 이러한 공리적 설계방법으로 볼 때, 설계 단계는 Fig. 1 과 같이 고객의 요구가 들어오면 그에 따라 기능적 요구가 생성되고, 이러한 기능적 요구가 설계 파라미터를 결정하여 물리적 설계로 구현되는 것으로 정의할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 일련의 제품 설계 단계에서 고객을 위한 설계(DFC: Design for Customer), 조

2000년 11월 18일 접수

* 부산대학교 산업공학과 기계기술연구소

즉, 제품의 기능적 요구(Functional requirements)가 해당 기능을 실현하는 부품들의 설계 파라미터(Design parameters)로 전환이 되고, 이러한 부품들의 설계 파라미터는 그 기능적 요구를 세분화(Decomposition) 시켜서 세부요구(Subrequirements)로 만든다. 다시 각 세부 요구는 그에 맞는 설계 파라미터를 생성시킨다. 이러한 과정이 반복되는 지그재그과정 관계가 기능적 구조와 물리적 구조에 존재한다.

다양한 고객의 제품의 기능에 대한 요구는 해당 기능을 향상시키거나 변화시키라는 의미이고, 이는 결국 해당 기능을 실현하는 부품들을 재설계하라는 의미로 해석할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 관계를 구체화하기 위한 수단으로서 고객의 요구, 제품의 기능, 기능과 관련 있는 부품들로 이루어진 PIM(Part Identification Matrix)를 제의한다. PIM은 고객의 요구를 설계에 고려하기 위하여 제안된 것으로, 고객의 구체적인 요구를 제품의 기능적인 변화에 대한 요구로 전환하고 결국 설계자로 하여금 해당 기능과 관련이 있는 부품, 즉 재설계가 필요한 부품들을 확인할 수 있도록 도와주는 매트릭스이다. 즉, PIM에서는 먼저 고객의 요구를 파악하여 고객요구를 제품기능으로 정량화 하여 전환하고 고객요구와 많은 관련이 있는 제품의 기능들을 선택한다. 그 기능들을 발휘하는 부품들을 재설계 요구 점수가 높은 부품 순으로 배열한다. 이는 곧 재설계 순서로 사용될 수 있다.

3. 기술적 설계

3.1 조립용이성을 위한 설계

앞에서 언급했듯이 고객의 요구를 제품 설계에 반영함으로써 발생하는 부품과 조립군의 다양성 증가를 낮추기 위한 방안으로 조립용이성을 위한 설계를 적용하였다. 조립용이성을 위한 설계는 80년대 들어서 Boothroyd가 이론을 정립하여 일본 Hitachi의 AEM, Lucas의 평가법, Evershein과 Baumann의 CAD와의 접목 등 많은 연구가 이루어져 오고 있다^[9, 10, 11].

3.1.1 DFA 방법론 개발

본 논문에서는 Fig. 3과 같이 제품의 조립용이성을 평가하고 설계대안을 생성하기 위한 DFA 방법론을 제시한다.

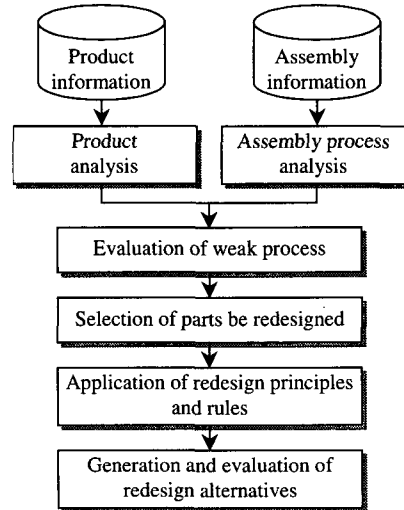


Fig. 3 Developed DFA method

부품의 형상, 크기, 대칭성, 소재 등의 제품 정보와 체결요소, 체결방법 등의 조립정보를 사용하여 제품과 조립공정을 분석하고 취약공정 평가방법을 사용하여 취약조립공정을 확인하여 그 공정에서 취약함을 발생시키는 부품들을 선정한다. 다음으로, 재설계 원리원칙을 적용하여 재설계 대안을 생성하고 평가한다. 취약공정 평가 방법은 먼저 각 조립공정을 단위공정과 요소작업으로 나누고 조립에 영향을 미치는 영향요소들을 도출한다. 다음으로 각 요소작업에 대하여 영향요소별 취약점수를 산정한다. 그리고, 각 영향요소들의 가중치와 상관점수를 구하여 보정하여 식 (1)과 같이 최종 취약점수를 구한다.

$$F_y = \sum_{i=1}^n P_i W_i (R_i + 1) \quad (1)$$

여기서, F_y 는 요소작업 y 의 최종 취약점수를 나타내고 P_i 는 해당 요소작업에 대하여 영향요소 i 의 취약점수, R_i 는 영향요소 i 의 상관점수, W_i 는 영향요소들의 가중치를 나타낸다. 즉, 요소작업 y 의 최종취약점수는 그 요소작업에 대하여 각 영향요소들의 취약점수와 영향요소들의 가중치, 영향요소들의 상관점수의 곱으로 구해진다. 영향요소들이 각각 독립적이 아니라 상호 연관관계가 있고, 그 상관관계가 높다는 것은 그만큼 더 중요한 영향요소이기 때문에 0과 1사이의 상관관계 점수에

1을 더하여 곱한다. 이렇게 계산된 각 요소작업별 취약점수에서 높은 점수를 갖는 요소작업을 선별하고, 해당 요소작업에서 취약함을 발생시키는 부품들을 재설계 대상으로 선정하는 것이다.

3.1.2 재설계 원칙의 적용

각 요소작업의 최종 취약점수를 구한 후에 선택되어진 높은 취약점수를 재설계 대상 부품들은 Fig. 4의 재설계 흐름 차트를 거쳐서 재설계된다^[24]. 즉, 최종 취약점수 F_y 의 평균보다 높은 영향요소에 관련된 부품들을 선택하여 제거, 통합, 간단화의 세단계로 나누어서 부품의 기능, 생산비용, 조립비용, 체결방법 등을 고려해서 제거 단계에서 제거하고, 제거가 불가능하면 다른 부품이나 조립군, 체결요소와 통합시키고 통합되지 않으면 재설계 원칙을 적용해서 간단화 한다.

3.1.3 재설계 대안들의 평가

이러한 재설계 단계를 거쳐서 재설계 대안들이 생성되고 이러한 대안들은 AHP(Analytic Hierarchy Process) 방법을 사용하여 평가하였다. 먼저, AHP 트리를 그려서 최종 재설계 목표를 상위레벨에, 평가기준들을 중간레벨에, 대안들을 하위레벨에 두고 각 평가 기준들의 상대적 중요도와 각 평가 기준들에 대한 대안들의 선호도를 곱하여 대안들의 최종 선호점수를 구한다^[12]. 세부 평가 기준들을 행렬의 행과 열에 두고 쌍비교를 통해서 각 셀의 크기를 결정하여 각 열을 정규화(Normalization) 하였을 때의 행렬을 A 라고 했을 때 각 평가 기준의 가중치는 다음의 식 (2)를 이용하여 구한다^[13].

$$w = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{A^k e}{e^T A^k e} \tag{2}$$

여기서, $A^k e$ 는 A^k 의 행 합이고 $e^T A^k e$ 는 A^k 의 모든 엔트리의 합이며 가중치 값은 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 이고 모든 가중치의 합은 1이며 $e = (1, 1, \dots, 1)$ 는 단위 벡터이다.

3.2 다양성을 위한 설계

다양성을 위한 설계(DFV: Design for Variety)는 다 품종 소량생산 체제하에서 적절한 방법론^[2]으로써, 제품 설계 시 완전히 새로운 제품을 설계하지 않고 기존 제품을 요구에 맞게 재설계하는 개념으로, 설계비용과 시간, 노력을 최소화하면서 다수의 고객 만족을 목표로 한다. 제품 다양성 설계는 90년대 중반 설계차트, 제품 구조 그래프 등을 이용한 Ishii^[2]에 의해 제시되었으며, 다수 고객만족을 위한 제품군과 제품구성을 사용한 제품 개발, 제품의 모듈화 설계, 제품 라인 구성 등과 연계하여 연구되어 왔다.

제품 파생은 제품의 플랫폼(Product Platform)을 발전(Development), 확장(Extension), 재생(Renewal)을 통하여 새로운 제품 구조(Product architecture)를 형성시켜서 비슷한 구조를 가지는 제품군(Product Family)을 만드는 것으로 정의할 수 있다^[14].

제품 플랫폼은 제품 파생의 단계에서 공통의 구조를 형성시키려고 개발된 서브시스템(Subsystem)의 군(Set)과 그들의 상호관계로 정의된다. 제품 구조는 제품의 기능적인 요소들을 물리

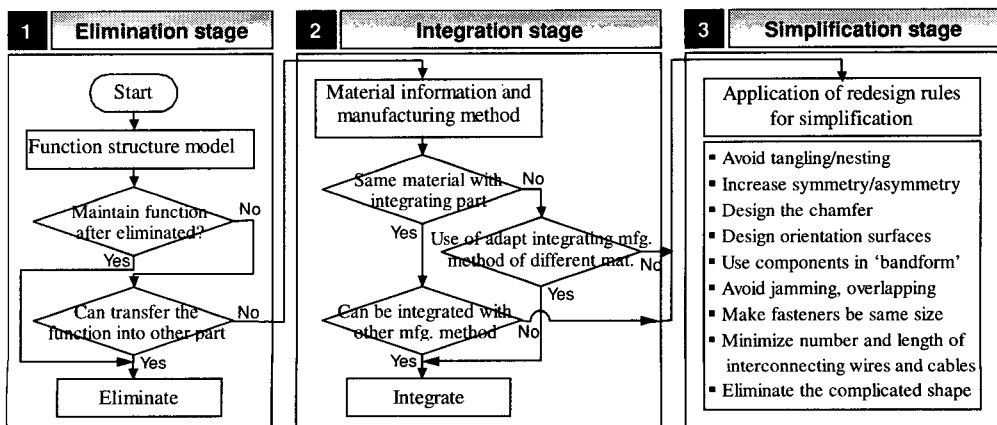


Fig. 4 Redesign flow chart for assemblability

적인 개체로 정렬하는 방법, 그리고 이러한 개체들의 상호활동을 말한다^[15]. 제품군은 같거나 유사한 기술과 시장을 공유하고 플랫폼의 변화를 통한 유사한 제품 구성을 갖는 제품들의 집합체이다.

3.2.1 다양성 지수의 결정

본 논문에서는 Fig. 5 와 같이 공통성 지수(CI: Commonality Index), 차별성 지수(DI: Differentiation Index), 모듈화정도 지수(MI: Modularity Index) 등의 제품의 다양성 지수를 사용하여 기존의 제품과 재설계된 제품사이의 다양성 설계 정도를 평가한다.

$$\bullet CI = 1 - \frac{V_i - 1}{V_f - 1} \quad \bullet DI = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n N_i}{(n-1)V_f} \quad \bullet MI = \frac{\sum_{i=1}^{M_n} P_i}{n}$$

Where,
 n : Number of components
 V_i : Number of varieties of each component
 V_f : Final number of product varieties
 N_i : Number of assembly processes
 P_i : Number of parts in module
 M_n : Number of modules

Fig. 5 Indices of product variety

공통성 지수는 전체 제품군 중에서 비슷하거나 같은 부품이나 조립군의 사용 정도를 나타내고, 차별성 지수는 조립공정 내에서 다른 종류의 부품이나 조립군의 사용 정도를 나타내어 조립순서에 따라서 조립공정의 산개 정도를 나타낸다. 모듈화정도 지수는 전체 부품 중에서 모듈화 설계가 이루어진 조립군에 포함된 부품의 수의 비율을 나타낸다. 이러한 지수들은 그 값이 높으면 높을수록 좋다.

3.2.2 다양성을 위한 설계와 공정계획 원칙

최종 제품 다양성(Number of product varieties) 만큼의 제품을 생산하기 위해 필요한 조립공정의 수는 다양성이 각기 다른 부품들을 어느 위치에서 조립하느냐에 따라 달라질 수 있기 때문에 조립순서와 많은 관련이 있다. 만약 부품과 조립군의 다양성이 줄어들 수 없으면 조립순서의 조정을 통하여 조립공정의 수를 줄일 수 있다. 따라서, 조립순서와 관련하여 DFV를 위한 설계와 공정계획의 원칙을 다음과 같이 제시하였다.

- 선조립되는 부품의 다양성을 줄여라.
- 조립순서를 조정하여 작은 다양성을 갖는 부품을 먼저 조립되도록 하라.
- 조립공정의 수를 줄여라.

4. 모듈화 설계

모듈화 설계(Modular design)는 최근 몇 년 동안 많은 고객만족을 위한 제품 개발 기간 단축과 재 활용을 위한 분리용이성 개념으로 많이 연구되어 왔다. 모듈은 Fig. 6 과 같이 공통모듈과 추가 혹은 다양한 모듈로부터 새로운 제품을 파생시킨다는 의미에서 다양성 개념과 많은 관계가 있다^[16, 17].

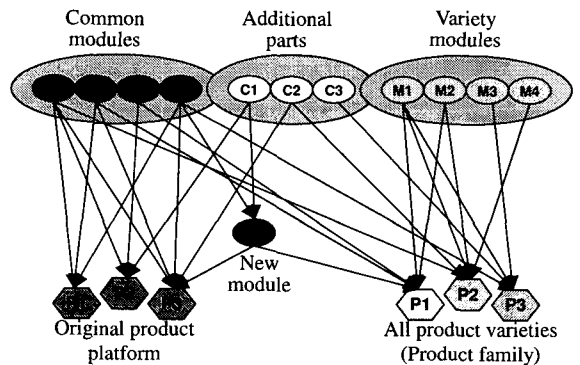


Fig. 6 Modular system for variety generation

모듈성은 부품 공통성(Commonality)을 증가시켜서 생산 다양성을 줄이며^[18], 제품 개발에서 동시작업이 가능하도록 할 뿐 아니라 생산공정을 병렬화하여 리드타임을 줄인다^[19]. 또, 표준화된 모듈은 많은 제품 모델에서 공통적으로 사용될 수 있고^[20] 모듈화된 제품은 자원 재활용 시 분리용이성을 향상시키고, 고객 서비스, 업그레이드, 유지, 보수를 용이하게 한다^[21, 22].

4.1 모듈 생성 요소들의 확인

모듈 생성을 위해서 Table 1과 같이 그 생성에 영향을 미치는 요소들을 도출하였다.

본 논문에서는 일반적인 모듈생성에 영향을 미치는 요소외에 재활용을 위한 분리를 위한 영향요소들을 모듈생성 시에 같이 고려하였다. 일반적 요소는 분리를 고려하지 않고 조립, 소재 및 부품 간 공간 할당 관계 등의 기능적 특성만을 고려하

여 모듈을 생성하는데 관련된 요소를 말한다. 분리 관련요소는 분리순서, 분리수행체, 유지, 보수 주기 등 분리 자체와 관련이 있는 요소들을 말한다. 체결(Connection)에서 'Supports'는 볼트체결 등과 같은 비영구체결을 뜻하고, 'Engages'는 스냅체결 등과 같이 약간의 분리력으로 다시 원래의 형태로 돌아올 수 있는 체결방법을 나타낸다. 또, 'Connects to'는 다시 사용할 수는 있지만 깨어져서 분리되는 고체 형태의 반영구체결을 말하고, 'Attaches to'는 깨어져서 재사용(Reuse)이 불가능한 체결방법을 말하고, 'Cover'는 체결요소 없이 두 부품이 완전히 물리적으로 붙는 완전영구체결을 말한다.

이러한 각 요소들은 6범주로 나누어서 각각 분리측면에서의 값(Value)이 주어졌다.

4.1.1 모듈 생성 매트릭스의 개발

모듈 생성을 위해서는 QFD, Lanner matrix^[7], Morphological chart^[6], MIM(Module Identification Matrix)^[21] 등 여러 가지 접근법들이 있다. 품질기능전개(QFD: Quality Function Deployment)는 고객의 요구를 파악하여 설계 파라미터를 결정하는 방법이며, Lanner matrix는 에너지, 소재, 정보, 공간에 관련한 부품들의 상호관련성을 파악하여 관련성이 높은 부품들을 한 모듈로 생성시키는 방법이다. 또, Morphological chart는 부품의 기능에 따라 대안들을 생성시켜서 조합에 의해 모듈을 구성하는 방법이며, MIM은 모듈 드라이버(Module driver)를 결정하여 각 드라이버에 대한 대안들의 점수를 구하여 높은 점수를 갖는 부품 대안들을 중심으로 모

듈을 구성하는 방법이다. 그러나 이러한 접근법은 어떤 특수한 목적에서 모듈을 구성할 필요가 있을 때는 적합하지만 부품의 기능측면을 포함한 일반적인 모듈생성과 그 외 추가적인 목적, 예를 들어 재활용을 고려한 분리 측면을 고려한 모듈생성 등을 함께 고려하기가 힘들다. 본 논문에서는 분리용이성 향상을 위한 새로운 모듈생성 방법론을 Fig. 7과 같이 모듈 생성 매트릭스를 사용하여 제시하였다. 여기서, C_i 는 부품 i 를 의미한다.

	C_1	C_2	C_3	...	C_n
C_1	×	$S_{1 \times 2}$	$S_{1 \times 3}$...	$S_{1 \times n}$
C_2		×	$S_{2 \times 3}$...	$S_{2 \times n}$
C_3			×	...	$S_{3 \times n}$
⋮				×	⋮
C_n					×

Fig. 7 Module generation matrix

이 매트릭스는 분리용이성 측면에서 두 부품간의 근접도 지수(Similarity index)로 구성되어 있다. 즉, $S_{i,j}$ 는 부품 i 와 j 의 분리용이성을 위해서 같은 모듈 안에 존재해야 하는 근접도 지수를 나타내며 이 매트릭스를 클러스터링(Clustering) 방법을 통해서 각 모듈들이 결정되게 된다.

두 부품이 서로 근접해서 같은 모듈내에 존재할 가능성을 나타내는 근접도 지수는 다음 식 (3)을 통해 구하였다.

Table 1 Evaluation criteria for module generation

Criteria	General factors			Disassembly factors			Value
	Connection	Material interaction	Spatial interaction	Disassembly sequence	Disassembler	Maintenance frequency	
Supports		Absolutely desired	Absolutely desired	Consecutive	Personnel	Less than 3 years	10
Engages		Very desired	Very desired	2~3	Tool	3~4	8
Connects to		Desired	Desired	4~5	Unskilled personnel, ordinary tool	5~6	6
Attaches to		Indifferent	Indifferent	6~7	Skilled personnel, ordinary tool	7~8	4
Cover		Undesired	Undesired	8~9	Unskilled personnel, special tool	8~9	2
Not connects		Detrimental	Detrimental	Above 10	Skilled personnel, special tool	Above 10 Years	0
Weights	0.30	0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	1

$$S_{ixj} = \alpha S_{F(ixj)} + (1-\alpha) \sum_{k=1}^K W_{fk} S_{f_k(ixj)} \quad (3)$$

여기서, $S_{F(ixj)}$ 는 부품 i 와 j 의 기능적 측면에서 모듈생성 근접도 점수를 나타내고, w_f 는 각 요소들의 가중치를 나타낸다. 또, $S_{f_k(ixj)}$ 모듈생성 요소 k 에 대하여, 부품 i 와 j 의 분리용이성 측면에서 모듈생성 근접도 점수를 나타내고, α 는 스케일링 요소로써 제품의 종류에 따라서 모듈을 생성할 때 기능적 요소와 그 외 부가적인 요소사이의 중요도를 나타낸다. 예를 들면, 전자제품과 같이 기능적 측면이 많이 고려되는 제품의 경우에는 이 α 이 커질 것이다. 식에서, 앞 항은 기능적인 측면에서의 각 부품의 근접도 점수를 나타내고, 후 항은 그 외 분리용이성 등의 부가적인 측면에서의 근접도 점수를 나타내는데, 결국 각 부품의 모듈생성을 위한 근접도 점수는 두 값의 합으로 나타내어진다.

각 부품들의 기능적 상호관계는 앞에서 언급한 제품의 기능적 구조와 물리적 구조의 지그재그 관계에 의해서 구해진다. 즉, 제품의 물리적 구조를 계층적으로 그린 후 같은 레벨이면서 같은 모듈 안에 있으면 10점을 부여하고, 한 레벨 차이 때마다 2씩 빼며, 다른 모듈 사이에서는 1점을 부여하였다.

앞에서 언급한 MIM과 논문에서 제시된 방법론에는 차이가 있다. MIM은 매트릭스상에서 가로축에는 부품, 세로축에는 모듈 드라이버를 두고 각 모듈 드라이버에 대해서 부품들의 관련 점수를 1점, 3점, 9점등으로 주어서 많은 점수를 갖는 부품들을 모듈 후보로 결정하고 그에 관련된 부품들을 그룹핑하는 방법이다. 그러나, 모듈 생성 매트릭스를 사용한 방법은 부품의 기능적 측면과 그 외 분리용이성 측면 등 필요한 부가적인 요소로서 각 부품들의 근접도 지수들을 구하여 클러스터링 방법을 통하여 모듈을 구성하는 방법이다.

5. 제품 배치

5.1 분리용이성을 위한 제품 배치 방법

일반적으로 제품 배치는 설계 조건(Constraints)과 요구(Requirements)를 만족하면서 부품이나 모듈을 선택(Selection), 관련화(Association), 배열

(Arrangement), 평가(Evaluation)의 과정으로 상호관련성을 확보하면서 배치하는 것이다^[23].

배치의 목적함수는 분리시간 혹은 분리 작업 수를 최소화시키는 것이며, 같은 모듈내에 들어가는 부품들은 앞의 모듈 생성 방법을 통해서 알고 있다고 가정한다. 본 논문에서는 분리용이성을 위한 새로운 제품 배치 방법론을 Fig. 8과 같이 제시하였다.

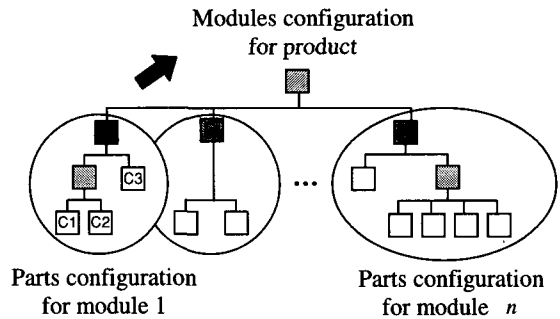


Fig. 8 Process of product configuration

먼저, 각 모듈내의 부품들을 배치 한 후 각 모듈들을 배치함으로써 전체 제품의 배치를 완료하는 것이다. 즉, 모듈내의 부품들의 배치와 다시 모듈을 배치하여 하나의 제품의 배치를 성취하는 것은 같은 개념이다. 만약, 모듈에 속하지 않는 부품이 존재하면 그 부품은 하나의 모듈로 간주하여 제품 배치를 완료할 때 모듈과 같이 취급한다.

모든 제품은 부품이나 모듈들이 직렬 형태 (Serial type), 병렬 형태 (Parallel type), 기저부품 형태 (Basepart type) 혹은 그 조합으로 이루어져 있다. 직렬형태는 부품들이 직렬로 하나씩 조립되는 것을 말한다. 병렬형태는 직렬형태의 두 조립군이 병렬로 조립되는 것을 말하며, 기저부품형태는 하나의 기저부품에 여러 개의 부품들이 붙는 형태이다. 각 형태에 대하여 배치는 다음의 과정을 따른다. 여기서 각 부품의 교체율은 고장에 의한 교체에 국한하고, 그 데이터는 축적되어 상수값으로 이미 알고 있다고 가정한다.

먼저, 각 부품의 교체율을 오름차순으로 배열한다. ($P_{(1)} \leq P_{(2)} \leq P_{(3)} \leq \dots \leq P_{(n)}$) 직렬형태인 경우 교체율이 가장 낮은 부품을 먼저 임의로 배치하고 다음으로 낮은 교체율을 가지는 부품들을 이미 배치된 부품의 양쪽에 배치한다. 이러한 과정을 마지막 부품이 배치될 때까지 반복한다. 이때, 부품

간의 상호작용과 기능을 고려하여 해당 부품을 배치시킬 수 없을 때는 다음 부품으로 넘어간다.

Fig. 9는 샌드위치 직렬형태와 일반적 직렬형태의 배치 구조를 보여주고 있다. 물론, 직렬형태의 경우 가장 낮은 교체율을 갖는 부품이 가장 먼저 조립되는 것이 분리횟수를 줄이는 것은 명백하다. 그리고, 왼쪽의 샌드위치 형태보다 오른쪽의 일반적 직렬형태가 분리횟수가 적다.

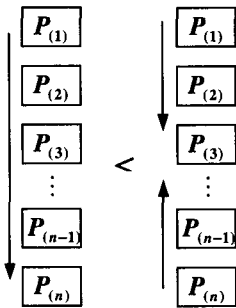


Fig. 9 Configuration structure of serial type

병렬형태의 경우 가장 낮은 고장율을 가지는 부품 두개를 병렬로 배치한다. 그 후 다음 두개의 부품을 한 부품의 양쪽에 배치하고 그 다음 두 부품을 다른 부품의 양쪽에 배치한다. 이러한 과정을 반복한다. Fig. 10은 n개의 부품을 병렬로 배치하는 것을 보여주고 있다.

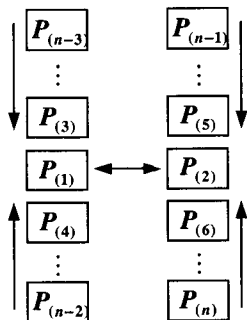


Fig. 10 Configuration structure of parallel type

기저부품 형태의 경우에는 가장 교체율이 낮은 부품이 기저부품이 될 수 있는지 검토한다. 그 부품이 기저부품이 안되면 다음으로 낮은 교체율의 부품을 검토한다. 이런 과정을 반복하여 기저부품이 선택되면 나머지 부품들은 임의의 장소에 배치를 한다. 그 이유는 기저부품외에 다른 부품의 분

리횟수는 모두 1로 같기 때문이다.

5.2 제품 배치의 분석

모든 제품은 직렬과 병렬, 기저부품 형태 혹은 그 조합으로 이루어져 있기 때문에 어떤 제품이든지 총 분리횟수를 구할 수 있다. 한 제품의 분리용이성 측면의 배치를 분석하기 위해서는 먼저 그 제품을 각 형태별로 분리한다. 그리고 각 형태의 기대 분리 회수를 구한 후 더하면 된다. 본 논문에서 정의된 기대 분리 회수란 전체 부품을 분리할 때 기대되는 분리회수를 말한다. 식 (4)는 Fig. 9의 왼쪽에 있는 샌드위치 직렬형태의 기대분리회수를 나타내고, 식 (5), (6)은 오른쪽의 일반적 직렬형태의 기대 분리회수를 나타내는데 n, 즉 부품수가 홀수인 경우와 짝수의 경우를 나누어서 보여주고 있다.

$$E(X_S) = \sum_{i=1}^{n-1} iP_i + (n-1)P_n \quad (4)$$

$$E(X_S) = \sum_{i=1}^{\lceil n/2 \rceil} iP_i + \sum_{i=\lceil n/2+1 \rceil}^n [n-(i-1)]P_i \quad n \text{은 홀수} \quad (5)$$

$$E(X_S) = \sum_{i=1}^{n/2} iP_i + \sum_{i=n/2+1}^n [n-(i-1)]P_i \quad n \text{은 짝수} \quad (6)$$

여기서, P_i 는 부품 i 의 교체율을 나타낸다. 식 (4)는 샌드위치 직렬형태로 순서대로 하나씩 부품을 분리하므로, 각 부품의 교체율과 그 분리회수의 곱과 마지막 남은 부품의 분리회수의 합으로 표현된다. 마지막 분리공정으로 부품을 분리했을 때 두 부품의 분리회수는 같기 때문에 후항과 같이 표현될 수 있다. 식 (5)와 식 (6)은 각각 총 부품의 수가 홀수와 짝수인 경우로, 상하 양쪽에서 분리가 가능하므로 좌 항과 같이 부품의 분리회수가 증가하다가 다시 우 항과 같이 그 분리회수가 감소하게 된다.

식 (7)은 Fig. 10의 병렬형태의 기대 분리회수를 나타내는데, 각 부품을 분리할 때마다 병렬로 체결되어있는 부분을 먼저 분리해야 하므로 n 만큼 더해진다.

$$E(X_P) = E(X_S) + n \quad (7)$$

식 (8)은 기저부품 형태의 기대 분리회수를 나타내는데 하나의 부품이 기저부품으로 들어가면 그 부품을 분리하기 위해서는 모든 부품을 분리해야하기 때문에 그 부품의 교체율에 n 이 곱해진다.

$$E(X_B) = \sum_{i=1}^{n-1} p_i + np_{Base} \quad (8)$$

결국, 이러한 기대 분리회수를 비교함으로써 제품들의 분리용이성을 위한 배치 정도를 서로 비교할 수 있다.

6. 사례 연구

본 논문에서는 사례연구로 자동차 송풍모터를 선정하였는데, 송풍모터는 기능과 형상에 있어서 약간의 차이가 있지만, 약 45개의 부품이 약 30개의 단위공정을 거쳐서 Rotor부, Sheet plate부, TML-housing부, Cover부의 다섯 개 조립군의 최종 수조립공정으로 생산된다. Table 2는 송풍모터의 분리가 가능한 부품과 분리가 불가능하여 부품으로 취급한 조립군을 보여주고 있다. 총 45개의 부품 중에서 TML-housing 조립군과 Rotor 조립군은 분리가 불가능하므로 부품으로 취급하여 총 20개의 부품이 존재한다.

Table 2 Part list of blower motor

Part	Name	Part	Name
A	Sheet plate	K	Metal 1
B	Brush holder	L	Felt washer 1
C	Condenser	M	Metal spring 1
D	Rubber	N	Metal cover 1
E	Spring	O	Cover
F	TML-housing subassembly	P	Metal 2
G	Rotor subassembly	Q	Felt washer 2
H	Washer	R	Metal spring 2
I	Case	S	Metal cover 2
J	Magnet	T	L-bolt

6.1 송풍모터의 기능적 설계

일반적으로 송풍모터의 고객은 자동차 회사이므로 그들의 요구는 모터의 품질과 관련이 많다. 본 연구에서는 모터의 소음 제거, 진동 제거, 회전력 균일화, 뒤틀림 방지, 자연 분리 방지 등을 고객의 요구로 선정하였으며 이는 Table 3의 PIM에서 1번

에서 5번으로 표시되었다. 또, 송풍모터의 부품들의 주요 기능을 진동 흡수, 먼지와 기름 방지, 벨런싱, 전류 발생, 자력 발생, 기름 흡수, 회전력 발생, 전류 이송 등 8가지로 분류하였다. 또, 주요 부품을 Table 2중에서 중복되는 부품과 체결요소, 조립군을 제외하고 10가지를 선정하였다. 여기서, 관련이 없으면 0, 약간의 관련이 있으면, 2, 많은 관련이 있으면 4점을 부여하였다.

Table 3 PIM of blower motor

Customer requirements	1	4	2	4	0	0	0	2	0	
	2	4	2	4	2	0	0	2	0	
3	2	2	2	2	2	2	4	2		
4	4	0	4	0	0	2	4	0		
5	4	0	2	0	0	2	4	0		
	Sum	18	6	16	4	2	6	16	2	
Critical components	Product functions									
		1	2	3	4	5	6	7	8	
	A	8	2	-	4	-	-	-	2	-
	B	6	2	-	2	-	-	-	2	-
	D	6	4	-	2	-	-	-	0	-
	E	6	4	-	0	-	-	-	2	-
	I	2	2	-	0	-	-	-	0	-
	O	2	2	-	0	-	-	-	0	-
	J	2	0	-	0	-	-	-	2	-
	K	2	2	-	0	-	-	-	0	-
M	2	2	-	0	-	-	-	0	-	
L	2	2	-	0	-	-	-	0	-	

PIM의 결과 5가지의 고객 요구는 점수가 높은 기능 1, 3, 7을 변환시키라는 의미로 해석되고, 이들 기능들은 부품 A, B, D, E를 재설계하라는 의미로 해석된다. 즉, 모터의 기능인 진동 흡수, 벨런싱, 회전력 발생에 관련한 부품 Sheet plate, Brush holder, Rubber, Spring를 재설계하라는 의미이다. 따라서, 조립용이성과 다양성을 위한 설계 단계에서 이러한 부품을 중점으로 재설계하게 될 것이다.

6.2 송풍모터의 조립용이성을 위한 설계

자동차 송풍모터는 Washer 삽입, Sheet plate 반조립, Rotor부 삽입, Case부 조립의 네가지 최종 수조립공정으로 생산된다. 본 논문에서는 가장 조립시간이 많이 걸리는 Sheet plate 반조립 공정을 단위공정으로 선택하여 Table 4와 같이 10개의 요소작업으로 나누어서 각 요소작업에 대해서 최종 취약 점수를 구하였다.

Table 4 Final weak point of sheet plate assembly

No.	Element task	F_y
1	Grasp the sheet plate at box	0.14
2	Insert rubber 1 to sheet plate at the left side using left hand	1.68
3	Insert rubber 2 to sheet plate at the right side using right hand	2.32
4	Support sheet plate on the jig	3.6
5	Insert spring 1 to brush holder 1 of the left side using right hand	5.46
6	Insert brush 1 to the brush holder 1 using right hand	6.84
7	Hang the left link which is on the jig	3.58
8	Insert spring 2 to brush holder 2 of the right side using left hand	5.34
9	Insert brush 2 to the brush holder 2 using left hand	6.84
10	Hang the right link which is on the jig	2.94

평균취약점수 3.88보다 높은 취약점수를 갖는 요소작업 5, 6, 7, 8, 9이 선정되었으며 이들 요소작업과 관련된 부품인 Condenser, Sheet plate, Brush holder, Spring 등을 조립용이성을 위해 재설계하기 위해서 재설계 흐름 차트에 적용하였다.

그 결과 Condenser는 제거 되었으며 Sheet plate는 Brush holder와 통합되었으며 Brush holder의 형상이 Spring과 Brush를 잘 삽입할 수 있도록 바뀌었다. Fig. 11은 이러한 과정으로 재설계된 Sheet plate부의 기존 형상과 재설계 대안들을 보여주고 있다.

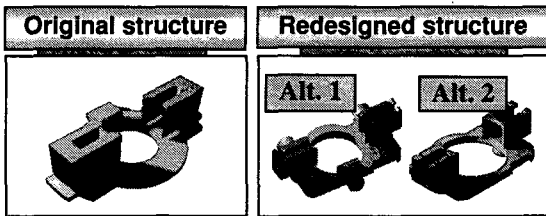


Fig. 11 Redesign alternatives for assemblability

AHP를 이용하여 이러한 재설계 대안들을 평가하였는데, 이를 위해서는 먼저 평가기준들을 도출해야한다. 본 논문에서는 크게 기술적, 경제적, 조직적 측면에서 세부 평가기준들을 도출하였다. 기술적 기준으로는 자동화 가능성, 기존설비의 이용성, 대안 수용 정도 등, 그리고 경제적 기준으로는 생산 비용, 조립비용, 설비비용, 소재비용 등으로

도출했으며 마지막 조직적 기준으로는 협력업체 선정, 협력업체의 수용여부 등으로 도출하였다.

이러한 평가기준을 AHP 트리의 중간에 그리고 재설계 대안들을 마지막 레벨에 두고 정규화를 통하여 각 영향요소별 대안에 대한 선호점수를 구하고 그 값들과 영향요소들의 가중치를 곱하여 평가한 결과 대안 1과 대안 2의 최종 선호점수가 각각 0.564와 0.436이므로 의사 결정자는 대안 1을 선택하게 된다.

6.3 송풍모터의 다양성을 위한 설계

현재 송풍모터는 Fig. 12와 같이 199개의 조립공정을 통하여 최종적으로 18 종류의 제품이 생산되고 있다. 현재 각 부품의 다양성은 최소 1에서 최대 4까지이며 최종 제품들은 이러한 부품들의 다양성의 조합으로 이루어져 있다.

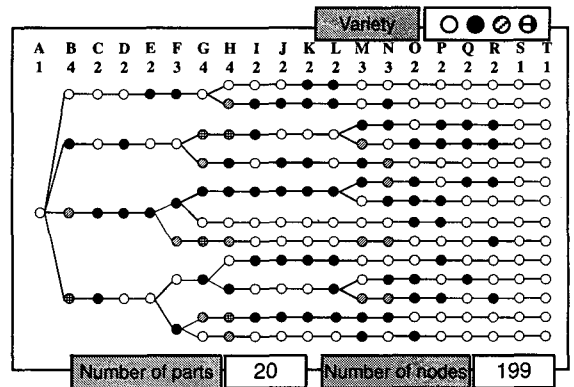


Fig. 12 Varieties generation of original motor

부품들이 조립순서에 따라 최종 제품화되는 과정을 이렇게 네트워크로 표시했을 때 각 노드는 두 부품의 조립공정으로 표현되고 아크는 부품간의 조립 선후관계를 나타낸다. 즉, 부품 A부터 T까지 20가지의 부품이 조립되어 18종류의 모터가 생산된다. 가령, 부품 B는 네 가지 종류의 다양성이 존재하며, 부품 C는 두 가지 부품의 다양성이 존재하는데, 네 종류의 부품 B에 두 종류의 부품 C가 각각 조립되어 네 종류의 중간 조립군을 생성하게 되는 것이다.

현재 모터의 다양성 지수 CI , DI , MI 는 각각 0.899 즉, 89%, 0.252, 0.85 즉, 85%이다. 이는 최종 제품 18가지 중 같은 부품을 사용한 것이 89%정도이며, 18가지의 제품을 생산하기 위해서 공통으

로 사용된 조립공정(노드)의 비율이 25.2%정도이며, 모듈안에 들어가 부품의 비율이 89%라는 의미이다.

Fig. 13은 새로운 모터의 형성 과정을 보여주고 있다. 앞의 조립용이성 설계단계에서 Condenser가 제거되고 Sheet plate와 Brush holder, Metal spring과 Metal cover가 통합되어서 전체 부품의 수가 줄어들었으며, 다양성 설계 원칙을 적용하여 각 부품의 다양성을 최대한 줄였다.

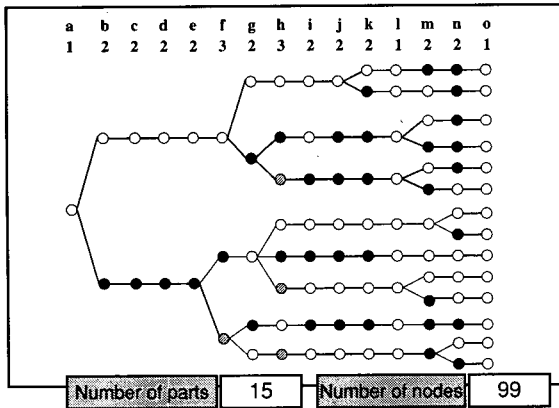


Fig. 13 Varieties generation of new motor

부품의 수와 다양성이 줄었지만, 최종 제품의 다양성은 18로 같다. 이는 많은 생산 비용을 줄이면서 같은 제품생산의 효과를 볼 수 있다는 의미이다. 즉, 다양성 지수 CI, DI, MI는 각각 0.927, 0.456,

0.93으로 기존의 제품 형성 과정보다 좋아졌음을 알 수 있다.

6.4 송풍모터의 모듈화 설계

조립용이성과 다양성을 위한 설계 단계를 거친 후 부품리스트는 Table 5와 같다. Fig. 13의 부품에서 체결요소인 bolt는 부품이 아니므로 모듈 구성에서 제외하였다.

Table 5 New part list of motor

Part	Name	Part	Name
a	Case	h	Metal 2
b	Cover	i	Felt washer 1
c	Sheet plate	j	Felt washer 2
d	Magnet	k	Spring
e	Metal cover 1	l	Rubber
f	Metal cover 2	m	TML-housing subassembly
g	Metal 1	n	Rotor subassembly

앞에서 언급했듯이, 부품별 기능근접도 점수 $S_{F(i,j)}$ 는 기능적 구조와 물리적 구조의 지그재그 관계에 의해 구할 수 있다. 다음으로 Table 1의 다른 추가적인 기준의 점수를 구한 후 식 (3)과 같이 기능근접도 지수와 더하여 최종적인 부품별 근접도 지수를 구하게 된다. Table 6은 근접도 지수를 클러스터링하여 각 모듈을 생성한 결과를 보여주고 있다.

부품 a, d, e, g, i 즉, Case, Magnet, Metal cover 1,

Table 6 Result of clustering of motor

	a	d	e	g	i	f	h	j	b	k	l	c	m	n
a		6.0	8.2	8.6	8.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	2.7	1.8	1.4	2.6
d	6.0		4.6	4.7	4.5	1.1	0.8	0.7	1.0	0.8	2.1	1.0	1.2	2.2
e	8.2	4.6		9.6	9.7	1.2	1.1	0.9	1.3	1.3	0.7	1.1	0.7	2.6
g	8.6	4.7	9.6		9.6	1.1	1.2	1.1	2.1	1.2	0.7	1.4	0.8	2.0
i	8.0	4.5	9.7	9.6		0.9	1.2	1.5	1.6	0.7	0.7	2.4	0.7	2.2
f	1.1	1.1	1.2	1.1	0.9		10.0	9.3	8.4	0.9	0.7	1.5	0.8	2.0
h	1.1	0.8	1.1	1.2	1.2	10.0		9.5	8.1	0.9	0.7	0.8	1.2	2.6
j	1.2	0.7	0.9	1.1	1.5	9.3	9.5		7.8	0.7	1.0	0.7	1.0	2.6
b	1.3	1.0	1.3	2.1	1.6	8.4	8.1	7.8		1.6	1.6	2.7	3.4	2.0
k	1.3	0.8	1.3	1.2	0.7	0.9	0.9	0.7	1.6		9.6	9.3	2.2	1.7
l	2.7	2.1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	1.6	9.6		9.8	2.2	1.7
c	1.8	1.0	1.1	1.4	2.4	1.5	0.8	0.7	2.7	9.3	9.8		1.2	1.2
m	1.4	1.2	0.7	0.8	0.7	0.8	1.2	1.0	3.4	2.2	2.2	1.2		1.4
n	2.6	2.2	2.6	2.0	2.2	2.0	2.6	2.6	2.0	1.7	1.7	1.2	1.4	

Metal 1, Felt washer 2는 한 모듈이고, 부품 f, h, j, b 즉 Metal cover 2, Metal 2, Felt washer 2도 같은 모듈이다. 또, Spring, Rubber, Sheet plate도 한 모듈이며 TML-housing부와 Rotor부는 분리가 불가능한 조립군이므로 각각 한 모듈로 정의하였다.

6.5 송풍모터의 분리용이성을 위한 배치

모듈화 설계를 통해서 각 모듈들이 결정된 후 모듈내의 부품의 배치와 모듈들의 배치를 통한 제품 배치가 이루어진다. 제품 배치 시에는 항상 제품의 기능 측면에서 설계 제한조건과 요구가 고려되어야 한다. 물론, 낮은 교체율을 갖는 부품이 모듈의 안쪽에 배치되고 높은 교체율의 부품이 외부에 배치되어서 분리 시 취급회수를 줄이는 것이 좋지만 기능적 제한조건과 요구 때문에 많은 부품의 배치가 미리 결정되는 경우가 많다.

본 논문에서는 송풍모터의 Cover 모듈에 대한 배치를 다루고자 한다. Cover 모듈은 그 기능적 특성으로 인해 직렬로만 배치될수 밖에 없으며 간단한 구조이기 때문에 배치의 효율을 잘 설명할 수 있기 때문이다.

Fig. 14는 기존의 Cover 모듈과 새로 재배치된 Cover 모듈을 보여주고 있다. 조립용이성과 다양성을 위한 설계 단계에서 Metal spring과 Metal cover가 하나로 통합되어서 부품이 하나 줄어들었으며 각 부품의 교체율은 현장에서의 각 부품의 고장율을 사용하였다.

기존 형태는 샌드위치 직렬 형태이며, 재배치된 형태는 일반적인 형태이며 앞에서 증명됐듯이 후

자의 경우가 기대 분리회수가 낮다. 기능적 제한 조건 때문에 위치가 고정되어 있는 부품들은 제외하고 최대한 낮은 교체율을 가지는 부품을 안쪽에 배치해서 기대 분리회수를 줄였다. 기존의 배치의 기대 분리회수, 즉 임의의 부품을 교체하기 위한 분리회수는 2.8회이고, 재배치된 경우에는 1.6회로 개선되었음을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 재활용을 고려한 조립 및 분리용이성을 위한 제품 구성 방법론을 제시하였다. PIM을 사용하여 고객의 요구를 제품 설계 단계에 적용하였으며 이때 커질 수 있는 생산 다양성을 줄이기 위한 방편으로 조립용이성과 다양성을 위한 설계 개념을 도입하였다.

모듈 생성 매트릭스를 사용하여 재설계된 부품들과 조립군의 새로운 모듈 생성 접근법을 제시하였으며, 마지막으로 분리용이성을 향상시키기 위해서 기대 분리회수를 최소화시키는 방향에서 제품을 배치하는 방법을 제시함으로써 재활용 혹은 유지, 보수 시 노력과 경비를 절감할 수 있게 하였다.

후 기

이 논문은 청정생산기술 개발사업(가전제품의 환경친화설계기술(DFE) 및 시스템 개발:EL-00-01-1)과 2000년도 두뇌한국 21 사업 핵심분야에서 지

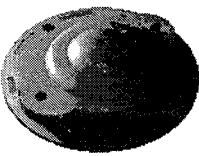

Original configuration			New configuration		
Sketch		P_x	Sketch		P_x
	Cover module	0.10		Cover	0.10
		↑		Metal	0.15
		↑		Felt washer	0.40
		↑		Metal spring	0.25
		↑		Metal cover	0.10
	$E(X_S) = 2.8$				$E(X_S) = 1.6$

Fig. 14 Original and new configuration of cover module

원받아 수행된 연구임

참고문헌

1. Andreasen, M., "Design for Assembly," IFS Publications, UK, pp.9 - 148, 1988.
2. Ishii, K., Juengel, C., "Design for product variety: key to product line structuring," Design Engineering Technology Management, Vol. 40, No. 2, pp. 17 - 282, 1997.
3. Salhih, S., "Macro Level Product Development using Design for Modularity," Robotics and Computer Integrated-Manufacturing, Vol. 15, pp. 319 - 329, 1999.
4. Suh, N., "The Principles of Design," Oxford University, New York, 1990.
5. Ulrich, K., Eppinger, S., "Product Design and Development," Marcel Dekker, Inc., pp. 181 - 208, 1991.
6. Cross, N., "Engineering Design Methods," John Wiley & Sons, pp. 19 - 76, 1994.
7. Lanner, P., Malmqvist, J., "An Approach Towards Considering Technical and Economic Aspects in Product Architecture Design," 2nd WDK-workshop on Product Structuring, Delft, The Netherlands, June 3 - 4, 1996.
8. Smith, P., "Fast-Cycle Product Development," Eng. Manuf. Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 11 - 16, 1990.
9. Boothroyd, G., "Assembly Automation and Product Design," Marcel Dekker, Inc., pp.181 - 208, 1992.
10. Redford, A., Chal, J., "Design for Assembly," McGraw-Hill, Inc., pp. 75 - 134, 1994.
11. Lotter, B., "Manufacturing Assembly Handbook," Butterworths, pp. 303 - 383, 1989.
12. Saaty, T., "Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process," Management Science, Vol. 32, No. 7, pp. 841 - 855, 1986.
13. Harker, P., "The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process," Management Science, Vol. 33, No. 11, pp. 1383 - 1402, 1987.
14. Tseng, M., "Design for Mass Customization," Annals of the CIRP, Vol. 45, No. 1, pp. 153 - 156, 1996.
15. Wortman, H., Erens, F., "Control of Variety By Generic Product Modeling," 1st World Cong. On Intelligent Manuf. Processes and Systems., San Juan, Puerto Rico, 1995.
16. David, W., "Designing an Assembly Line for Modular Products," Computers ind. Engng, Vol. 34, No. 1, pp. 37 - 52, 1998.
17. Freek, E., "Architectures for Product Families," Computers in Industry, Vol 33, pp. 165 - 178, 1997.
18. Baldwin, C., Clark, K., "Managing in an Age of Modularity," Harvard Business Review, September, 1997.
19. Erixon, G., "Modularity - the Basis for Product and Factory Reengineering," Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 1 - 6, 1996.
20. Erens, F., Verhulst, K., "Architectures for Product Families," 2nd WDK-workshop on Product Structuring, TU Delft, The Netherlands, June 3 - 4, 1996.
21. Sanchez, R., "Towards a Science of Strategic Product Design," 2nd Int. Prod. Dev. Man. Conf. On New Approaches to Development and Engineering, Gothenburg, 1994.
22. Kusiak, A., Huang, C., "Development of modular products," IEEE Trans. On Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part-A, Vol. 19, 1996.
23. Marcel, T., "Designer Support for Product Structuring-Development of a DFX Tool within the Design Coordination Framework," Computer in Industry, Vol. 33, pp. 155 - 163, 1997.
24. 목학수, 조종래, "자동차 송풍모터의 조립용이성과 자동화를 위한 재설계," 한국정밀공학회지, 16 권, 11 호, pp. 36-46, 1999.