

소형 모터의 수 조립 공정의 자동 조립 시스템 구축 및 평가 체계

목학수 · 조종래 · 김명렬

부산대학교 산업공학과

Implementation and Evaluation of Automatic Assembly System from Manual Assembly Process of Small-sized Motor

Hak-Soo Mok · Jong-Rae Cho · Myoung-Lyoul Kim

This paper proposes an implementation procedure for an automatic assembly system from a manual assembly and an evaluation method of implemented several automatic system alternatives using an AHP(Analytic Hierarchy Process) in a small-sized motor. First, the current product is redesigned for DFA(Design For Assembly) and assembly automation of motor, and then it is decided mechanisms of moving, magazining, feeding, composing of each part using main joining equipment and auxiliary equipment. Following the decided mechanism, the necessary assembly machines are selected or designed considering objectives and assembly conditions. Finally, the layout alternatives are completed for the automatic assembly system. According to the evaluation criteria which are established in advance, the automatic system alternatives are analyzed using AHP.

1. 서 론

수 조립은 공구, 고정구, 게이지 등과 같은 기구를 사용하여 사람에게 의해 행해지고 사람이 중심점(center point)이 되는 조립을 말한다[1]. 그러나 사람에게 의한 조립이므로 작업점(work point), 작업 공간 할당, 온도, 습도, 잡음 등의 작업 환경과 회사의 철학에 따라 유동적이므로 생산성이 떨어지고 일정하지 않을 수 있다. 게다가 조립은 제품 설계, 공정 관리, 부품 가공의 후행 단계이므로 이전 단계를 거치면서 축적되어온 결함이 조립 공정에 집중된다. 따라서, 생산성을 높이고 수 조립에 의한 결함을 최소화시켜 신뢰성 있는 제품을 대량 생산하기 위해서 자동 조립 시스템의 구현은 필수적이다. 조립 자동화란, 현재의 수 조립 공정을 컴퓨터에 의해 제어 가능한 기구나 기계, 전기적인 장치를 이용하여 생산성의 향상, 유연성, 신뢰성을 높일 수 있도록 조립 공정을 무인화하는 것이다. 그러나 조립 공정을 자동화할 때 다른 공정에 비해 그 기술적, 경제적 위험

부담이 매우 높고 제품에 따라 조립 시스템이 달라지기 때문에 표준화된 자동화 절차를 설정한다는 것이 어려운 일이다. 하지만 경영자의 단순한 의지나 작업자의 경험에 의존하여 자동화를 실현한다는 것은 위험을 추가 시킬 뿐만 아니라, 무계획적인 추진으로 인해 필요 이상의 낭비를 가져 올 수 있다.

본 논문에서는 <그림 1>과 같이 이러한 위험과 낭비를 최소화시킬 수 있는 조립 공정의 자동화를 위한 전체적인 가이드 라인을 생산성 향상 측면에서 제시하고 설계된 자동 조립 시스템의 대안들을 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 응용하여 평가하여 최적의 자동 조립 시스템을 선정하고자 한다.

2. 조립 자동화 계획 단계의 수행

2.1 조립 자동화를 위한 목적 함수의 확인

수동 조립 시스템을 자동화하고자 할 때는 처음부터 의도한



그림 1. 연구의 필요성 및 배경.

목적 함수를 고려하게 되는데 이러한 목적 함수에는 일반적으로 생산성 향상, 품질 향상을 통한 불량률 감소, 유연성 증가, 이익 증가 등이 있다. 이러한 목적 함수들을 동시에 고려하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 어느 한 가지에 집중하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 생산성을 최대화 하는 것을 목적 함수로 두었고, 그에 따른 제한 조건으로 요구 fact-time, 총 투자비, 개발 기간, 요구 생산율, 자동화 레벨 등이 있다. 여기서, 자동화 레벨이란 완전 자동화, 반 자동화, 유연 자동화 등의 구축하고자 하는 조립 시스템의 자동화 정도와 전체 시스템을 동시에 자동화하는 전체적 자동화 혹은 특정 작업장만 자동화를 성취하고, 필요한 시기에 다시 업그레이드시키는 단계별(step-by-step) 자동화를 수행할 것인지의 계획이다. 이렇게 결정된 목적 함수와 제한 조건은 이후의 자동화의 모든 단계에 고려되어야 하며 각 단계별 과제를 수행하는 데 지침이 된다.

2.2 제품 및 조립 공정의 분석

현재의 제품과 조립 공정을 분석하는 이유는 자동 조립 시스템을 구축하기 전에 불필요한 투자를 피하기 위해서 반드시 제품에 대한 재설계가 선행되어야 하기 때문이다. 제품과 조립공정을 분석하여 조립 용이성을 향상시키기 위한 재설계와 자동화를 어렵게 만드는 제품의 특성을 제거함으로써 조립 자동화를 위한 재설계가 동시에 이루어져야 한다. 본 논문에서는 <그림 2>와 같은 단계로 제품과 조립 공정을 분석하여 제품을 재설계하였다. DFA를 적용하여 부품의 취급 특성, 조립 방향, 조립 절차에 따라서 제품을 분석한 결과와 공정 분석을 위해 취약 공정 평가 시스템을 적용하여 파악된 취약 유발 제품 특성으로 각 부품의 재설계 가능 여부를 검토하여[2], 재

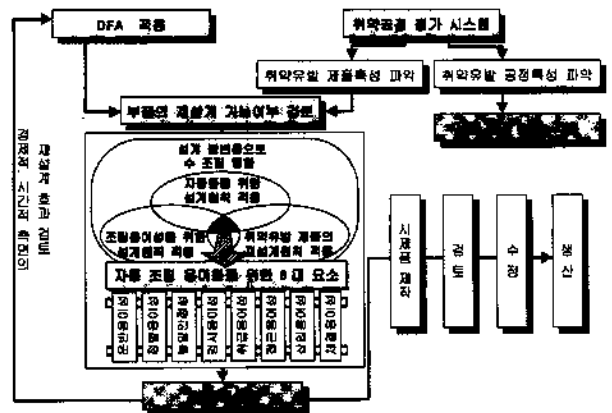


그림 2. 제품과 공정 분석을 통한 제품 재설계의 기본적 절차.

설계가 불가능한 부품은 수 조립을 유지하고, 재설계가 가능한 부품은 조립 자동화를 위한 설계 원칙과 조립 용이성을 위한 설계 원칙과 취약 유발 제품의 재설계 원칙의 교집합 부분에 해당하는 원칙에 따라 자동 조립 용이성을 위한 8가지 요소들을 고려하면서 제품을 재설계하게 된다[3]. 자동 조립을 위한 제품 설계 원칙의 예로는 부품 재질의 이용을 위한 특정 재질의 부여, 호느적거림 등의 유연성 있는 부품 특성의 제거, 도금 등의 표면 처리의 고려, 조립 방향 최소화를 위한 부품 특성의 고려 등이 있다. 재설계된 모터는 그 경제적, 시간적 측면의 재설계 효과를 검토하기 위해서 다시 DFA를 적용한다. 그리고 취약공정 평가 시스템에서 파악된 취약 유발 공정 특성은 라인 밸런싱 등의 생산 관리 기법을 적용함으로써 제거될 수 있다.

2.2.1 현재 제품의 분석

자동화를 위한 가장 중요한 절차 중 하나가 제품의 분석인데 그 이유는 제품의 구조나 복잡도, 부품의 수가 이송, 정렬, 공급, 체결의 메커니즘과 자동화 장비의 선택에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 각 부품이 조립되기 위해서 어떻게 저장, 정렬, 공급, 체결되는 것인지에 대한 문제는 부품의 크기, 형상, 재질, 무게와 밀접한 관계가 있으며, 부품 취급의 특성, 조립되어지는 방향, 조립 순서 등은 각 부품이 자동화가 가능한지 혹은 수 조립으로 작업을 수행하게 하는 것이 경제적인 것인지를 판단하게 해 주는 중요한 자료들이다. 본 논문에서는 자동차 난방에 사용되는 송풍 모터를 연구 대상으로 선정했는데 모터의 기능과 형상에 있어서 약간의 차이가 있지만, <그림 3>과 같이 송풍 모터는 약 45개의 부품이 약 30개의 단위

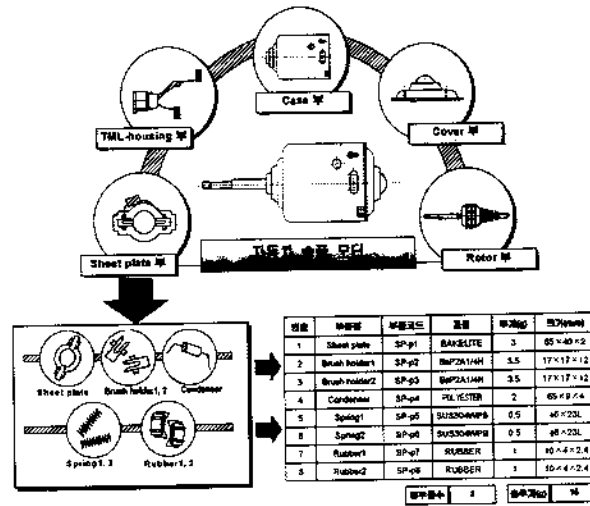


그림 3. 자동차 송풍 모터의 다섯 가지 조립군.

작업번호	작업명	시간(초)	시간당액(원)
1.2	Washer 삽입	30.00	6.78
1.4	Rubber 삽입	10.00	2.93
1.5	Sheet plate 고정	1.80	0.53
1.6	Spring 삽입	14.40	4.21
1.8	Brush 삽입	14.40	4.21
1.9	Brush 지지	7.20	2.11
1.11	Case 삽입	7.20	2.11
합계		85.00	24.88

그림 4. DFA 8.0의 제품 재설계 제안 보고서의 입력 및 출력.

공정을 거쳐서 rotor 부, sheet plate 부, TML-housing 부, case 부, cover부의 다섯 개 조립군의 최종 조립 공정으로 생산되어진다.

본 논문에서는 소형 모터의 분석을 위해서 Boothroyd Dewhurst, Inc.의 DFA 8.0을 사용하였다. <그림 4>는 소형 모터의 DFA 8.0의 입력 양식과 출력 양식의 한 종류인 재설계 제안 보고서의 제품 재설계 가이드 라인의 예이다. 이 정보와 조립 용이성 설계 원칙을 적용한 정보가 통합되어 공정 분석의 단계로 넘어가게 된다. <그림 4>와 같이 조립 시간이 많이 소요되어 개선하거나 제거해야 할 작업으로 sheet plate 반조립 공정인 Rubber 삽입, Sheet plate 고정, Spring 삽입, Brush 지지 및 삽입에 전체 절감 가능 시간인 85초 중에서 47.8초로 집중되므로 sheet plate반조립 공정에 관련된 부품들을 재설계하는 것이 좋다.

2.2.2 현재 조립 공정의 분석

조립 공정을 분석하는 가장 큰 이유는 현재의 수 조립 공정

에서 목표 tact time을 초과하는 취약(애로) 공정을 찾는 것인데, 그 이유는 발견된 취약 공정을 중점적으로 자동화 시키는 것이 자동화의 기대 효과를 극대화시킬 수 있기 때문이다. <그림 5>는 소형 모터의 생산 공정과 최종 수 조립 공정을 나타내고 있다. 현재 다섯 개의 조립군이 U자 라인에서 washer 삽입, sheet plate 반조립, rotor 및 case 삽입, cover 조립의 네 공정으로 수 조립된다.

본 논문에서는 조립 공정 분석을 위해 취약 공정 평가 시스템(4)을 사용하여 먼저 일련의 조립 공정을 단위 공정과 그에 따른 요소 작업으로 분류한다. 단위 공정은 작업 표준서로 구분되어지는 공정의 단위를 말하며, 요소 작업은 단위 공정을 작업 순서를 바탕으로 최소의 기능을 가지는 미세 동작으로 구분하여 나타낸 최소 기능 동작 단위를 말한다(5).

<그림 6>은 최종 수 조립 공정 중에서 가장 많은 조립 시간과 노력이 소요되는 sheet plate 반조립 공정과 취약 공정 평가시스템을 적용하기 위한 단위 공정과 요소 작업을 분류한 예를 보여 주고 있다.

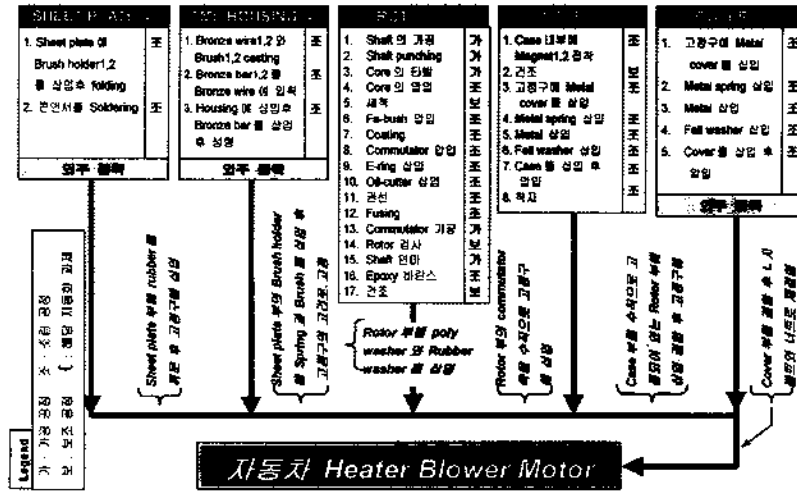


그림 5. 자동차 송풍 모터의 가공 및 최종 수 조립 공정.

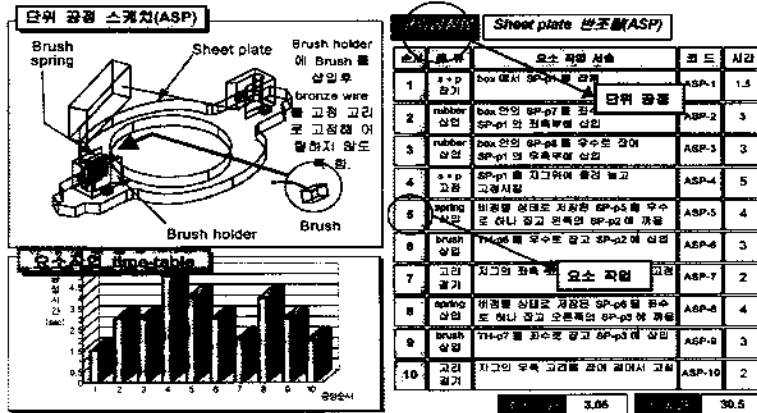


그림 6. Sheet Plate 반조립 공정에 취약 공정 평가 시스템 적용을 위한 정의.

다음으로 조립에 영향을 미치는 영향 요소를 선정한 후, 각 영향 요소별로 앞에서 정의한 요소 작업별 취약 정도를 1등급, 2등급, 3등급으로 나누어 해당 영향 요소의 취약점수를 구하게 된다.

이러한 영향 요소들은 각각이 독립적으로 시스템에 영향을 주는 것이 아니라 상호 의존적인 관계에 의해 시스템에 영향을 미치므로 요소들간의 상관 관계를 분석하여, 상관 관계가 중값과 해당 영향 요소가 다른 영향 요소들에 대한 중값의 가중값과 곱해지게 되어 영향 요소의 최종적인 취약점수를

$$F_X = \sum_{i=1}^m t_{Xi} + \left(\sum_{i=1}^m t_{Xi} \times \frac{\sum_{j=1}^n q_{Xij}}{\sum_{j=1}^n q_{Xi}} \right) + \sum_{i=1}^m t_{Xi} \times \frac{\sum_{i=1}^n I_{Xi}}{\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n I_{Xij} \right) j} = T_X + (T_X \times Q_X) + (T_X \times W_X)$$

구하게 된다.

식 (1)에서 보는 바와 같이 영향 요소별 취약 정도 F_X 는 단위 공정에 따른 각 영향 요소의 취약 총점 T_X 와 해당 시스템 영향 요소별 상관 점수 Q_X , 해당 시스템 영향 요소별 가중값 w_X 로 구한다. 여기서, t_{Xi} 는 영향 요소별 취약 등급에 따른 각 요소 작업의 취약 점수를 나타내고, q_{Xij} 는 해당 영향 요소별 상관 점수를, I_{Xi} 는 해당 영향 요소별 중요도 점수를, i 와 j 는 영향 요소에 따른 반복수를, m 은 요소 작업의 수를, n 은 영향 요소의 수를 나타낸다.

<그림 7>은 식 (1)에 의해 구해진 sheet plate 반조립 공정의 영향 요소별 취약 점수 산정의 예를 보여 주고 있는데 작업 영역, 조립 안정성, 정렬성/삽입성의 영향 요소들의 취약점수가 다른 영향 요소들의 점수보다 크므로 <그림 8>의 이러한 요소들의 취약 점수를 낮추는 방향의 제품 재설계 원칙이 앞에서 정의된 제품 분석을 통한 설계 원칙과 통합 된다.

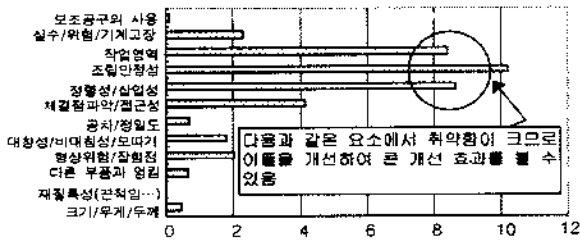


그림 7. 취약 영향 요소의 취약 점수.

설계 원칙		설계 원칙
영향 요소	공정 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 위치 결정 안내면 만들기 • 한쪽 방향의 직선 이동의 체결 • 중력을 이용한 체결 • 삽입되는 구멍의 모따기(부품의 가이드를 위한) • 이송 용이화(Overlap, Jam 피함)
	수행체 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 흔들림 없는 지그 및 고정구 설계 • 한쪽 방향의 직선 이동의 체결 • 체결 방법(공정)의 최소화 및 단순화 • 체결 방법(공정)의 생략화 • 체결 길이의 최소화 • 부품수의 최소화 • 사용 공구의 작업 영역 확보 • 제품의 모듈화 설계

그림 8. 취약 영향 요소의 향상을 위한 제품의 설계 원칙.

<그림 8>은 이렇게 분석된 취약 영향 요소인 작업 영역, 조립 안정성, 정렬성/삽입성을 향상시키기 위한 제품의 설계 원칙이다.

<그림 9> 는 DFA 8.0을 통한 송풍 모터의 분석의 결과 <그림 4>의 예에서와 같이 재설계 제안이 집중된 sheet plate 반조립 공정의 부품인 sheet plate를 재설계한 예이다. Sheet plate와 brush holder를 플라스틱 사출 성형으로 가공이 되도록 통합시키고, brush holder의 방향도 바꾸어서 외부에서 spring과 brush가 삽입되어 작업 영역을 최대화시킴으로써 놓임, 운반, 정렬, 검사, 취급, 접근, 삽입, 체결 용이성을 향상시킨 한 예이다. 제품을 재설계 할 때는 제품 본래의 기능을 충분히 유지시킨다는 조건내에서 수행되어야 하며, 고려 요소로는 제품의 품질, 재설계된 제품을 생산할 때 드는 제품의 비용, 재설계 시간, 재설계시 들어가는 제반 재설계 비용 등이 있다[6].

3. 조립 자동화 전략의 설정

3.1 조립 순서의 결정

자동화 시스템을 위한 조립 용이성을 고려한 제품 및 공정

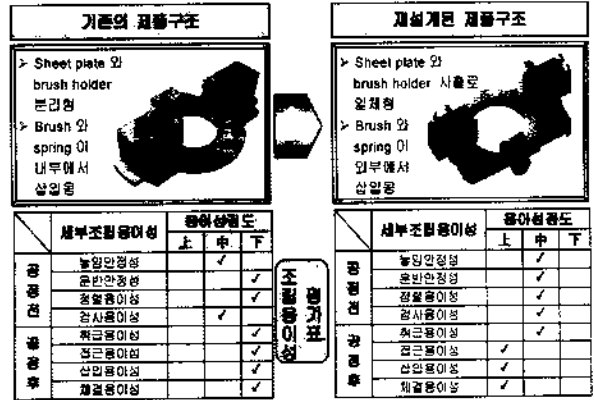


그림 9. 자동 송풍 모터의 제품 재설계 예 및 조립 용이성의 비교.

의 재설계가 이루어진 후 부품들의 조립 방향을 2차원 혹은 3차원으로 나타낸 조립 상황도를 참조하여 조립 순서가 결정된다[7].

조립 순서를 결정할 때 고려해야 할 사항은 선행 공정과 후행 공정, 조립 시점, 조립군, 조립 단계의 결정 등이다. 이러한 조립 순서는 메커니즘 결정과 배치 계획에 중요한 자료로 사용된다[8]. 주로 같은 조립 단계는 병렬로 이루어지는 효과적인 작업이므로 기계 장치를 배치할 때 전체적인 조립 시간을 줄일 수 있는 요소가 되지만 많은 기계 장치를 필요로 하므로 설정된 목표에 맞추어 자동화 정도를 결정할 수 있다.

3.2 자동화 메커니즘의 결정

자동화 메커니즘이란 적절한 동력원이 있는 기계 장치의 도움을 받아서 부품이 목적하는 상태로 되는 일련의 과정이다 [9]. 자동화 메커니즘 결정 단계의 입력 자료는 부품 및 공정의 특성이고 출력 결과는 부품 및 공정의 특성에 맞는 기계 장치를 실제 제작하거나 구입하기 위한 기계 장치의 사양이다. 부품이 조립되기까지는 이송, 정렬, 공급, 체결의 네 단계의 작업을 거치는데 실제적으로 자동화 시스템을 구축할 때, 이 네 단계의 메커니즘을 결정하는 것이 가장 중요한 과정이다[1]. <그림 10>에서 보는 바와 같이 조립 상황도의 재설계된 제품의 조립 방향과 조립 상황의 정보를 가지고 부품의 형상, 크기, 재질, 무게 중심, 부품 수 등의 부품 자체의 특성과 조립 방법, 조립 방향, 체결 요소의 종류 등의 조립공정의 특성과 조립 선후 관계인 조립 순서에 대한 특성들은 각 메커니즘에 필요한 기계 장치를 선택하는 데 중요한 요소가 된다.

자동화 메커니즘을 결정할 때에는 이송, 정렬, 공급, 체결이 동시에 일어나는 것이 가장 좋고 가능한 많은 메커니즘을 통합시키는 것이 기계 장치의 구입 비용과 공간 사용도 면에서 유리하다. <그림 11>은 본 논문에서 자동화시키고자 하는 현

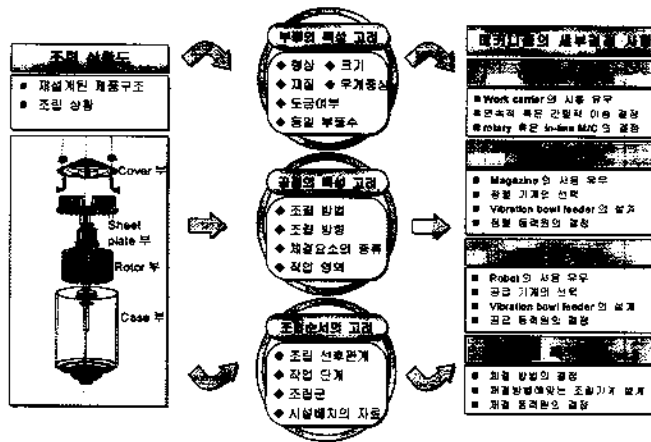


그림 10. 자동 조립 메커니즘의 결정 요소 및 절차.

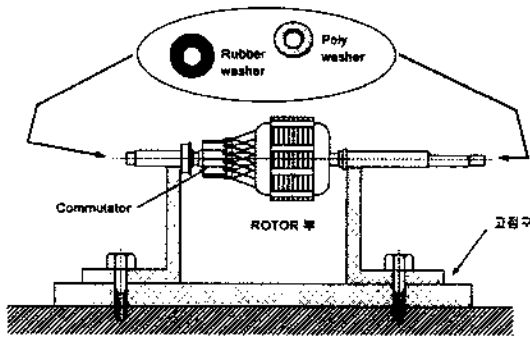


그림 11. 취약 영향 요소의 취약 점수.

재 수 조립으로 진행되고 있는 washer 삽입 단위 공정을 보여 주는데 고정구에 rotor 부를 고정시키고 shaft의 양쪽에 poly washer와 rubber washer를 교대로 삽입하는 공정이다. Washer 삽입의 수 조립 공정을 자동화하고자 할 때 결정되어야 하는 메커니즘에는 rotor 부의 이송, 정렬, 공급 메커니즘과 washer의 이송, 정렬, 공급, 체결 메커니즘이다.

즉, washer 삽입 공정에서는 washer가 원하는 개수만큼 정확하게 잡히는 지, rotor 부의 commutator에 이물질이 묻지 않도록 접촉이 일어나지 않도록 rotor 부가 이송되는 지, 권선으로 인한 불규칙하고 복잡한 rotor 부의 외부 형상 등의 부품들의 특성과 삽입되는 washer의 종류가 다르므로 한 번씩 삽입된 후 180의 회전이 필요하고 washer가 삽입될 때 정확한 위치에 삽입되어야 한다는 공정 특성을 고려해서 메커니즘들을 결정해야 한다.

Washer의 이송, 정렬, 공급 메커니즘은 이송, 정렬, 공급을 통합할 수 있도록 vibration bowl feeder에 의해서 이루어지도록 하여 기계 장비의 복잡성, 작업 공간과 작업 시간, tact time을 줄였다. <그림 12>는 washer의 체결 메커니즘의 예를 보여 주고 있는데 원하는 각도로 회전이 가능한 circular cycle

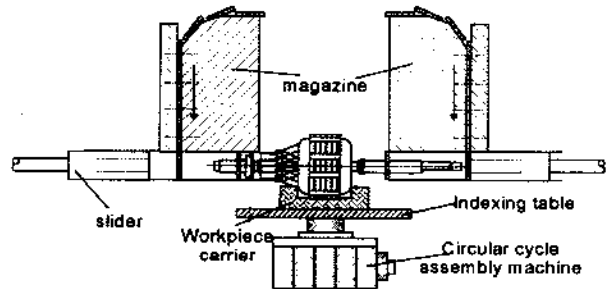


그림 12. Washer의 이송, 정렬, 공급, 체결 메커니즘의 예.

assembly machine의 indexing table 위에 설계된 workpiece carrier에 rotor 부를 고정시켜 놓고 vibration bowl feeder에 의해 공급된 washer가 매거진에서 대기하다가 shaft의 양쪽에서 slider에 의해서 poly washer와 rubber washer가 각각 삽입이 되고 다시 180 회전한 후 다른 종류의 washer를 삽입하는 메커니즘이다.

3.3 Workpiece carrier 및 보조 장비의 설계

자동화된 조립 시스템의 사용률에 크게 영향을 미치는 요소 중 하나가 workpiece carrier 및 보조 장비의 설계이다. workpiece carrier의 주기능은 크게 두 가지로 나누는데, 하나는 base part가 고정되고 조립 순서에 따라 부품들이 차례로 이송되어지는 부품의 운반이고, 다른 하나는 운반과 동시에 센터링, 클램핑 장비가 통합되어진 workpiece carrier에 조립 공정이 진행됨에 따라 부품들이 고정되어지는 부품 고정구의 역할을 하는 것이다 [9]. Workpiece carrier를 설계할 때에는 부품의 형상을 고려해야 하며 유연성 있는 workpiece carrier와 보조 장비 설계를 위해서는 부품의 잡힘은 물론 센터링과 클램핑 장비가 작업장마다 교체 가능하도록 착탈이 가능해야 한다. 이러한 workpiece

입력 자료	출력 결과	영향 요소	고려 사항
<ul style="list-style-type: none"> • 조립 순서 • 제품 설계 및 조립 상황 • 기계 장치 사양 • Workpiece carrier 설계 • 예상 사용성 	<ul style="list-style-type: none"> • 조립 시스템의 형태 • 조립 시스템의 개수 • 수 조립과 자동 조립의 할당 및 위치 • 필요 인력 	<ul style="list-style-type: none"> • 가용 공간도 • 목표 생산량 및 유연성 • 부품의 흐름 • 수 조립의 비율 	<ul style="list-style-type: none"> • 시스템의 부품 흐름이 전체적인 생산 순서에 통합 되도록 설계 • 시스템의 기구학적 구조를 결정하는 요구 사이클 타임의 결정

그림 13. 시설 배치 계획을 위한 입력 자료, 출력 결과, 영향 요소, 고려 사항.

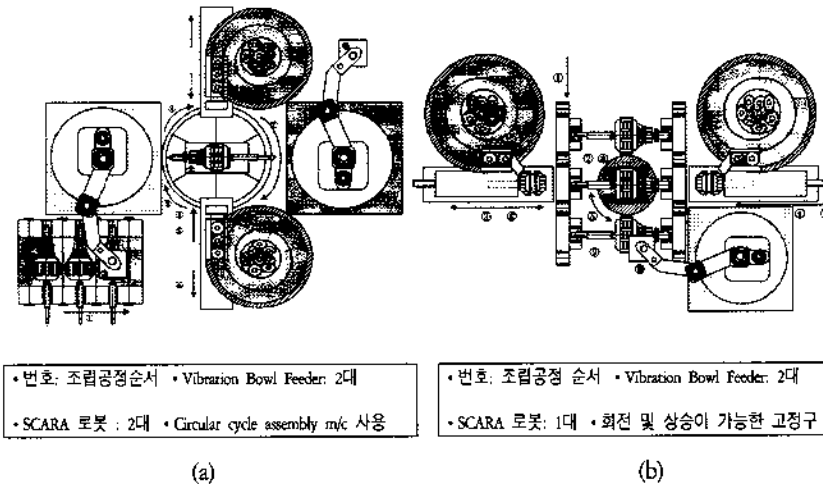


그림 14. Washer 삽입 공정의 최종 자동 조립 시스템의 예.

carrier 설계가 간단할수록 조립 절차가 간단해진다. <그림 12>에서 indexing table 위의 고정구가 rotor 부를 고정하기 위한 workpiece carrier의 한 예이다.

3.4 자동 조립 작업장간의 연결

메커니즘에 따라서 설계된 각 조립 작업장 배치 계획의 목적은 공간 활용도를 고려하여 부품의 흐름과 조립 상태 감시에 관계한 조립 시스템의 최적의 배열을 성취하는 데 있다[8]. <그림 13>에서와 같이 제품 설계 및 조립 상황도, 기계 장치의 사양, workpiece carrier의 설계, 기계 장치의 예상 사용성이 배치 등의 입력 자료를 사용하여 적절한 배치 계획을 수행 함으로서 최종적인 조립 시스템의 형태 및 개수, 수 조립과 자동 조립 시스템의 원활한 할당, 필요한 인력 등의 출력 결과가 나오게 된다. 배치 계획에 영향을 미치는 요소로는 가용 공간, 목표 생산성 및 유연성, 부품의 흐름, 전체 시스템 중에서 수

조립으로 수행해야 하는 비율 등이 있으며 부품의 흐름과 요구 사이클 타임도 고려되어야 한다.

<그림 14>는 washer 삽입 수 조립 공정을 위해서 제시한 메커니즘을 조합하여 설계한 자동 조립 시스템의 예들을 보여 주고 있는데, (a)의 경우는 washer와 rotor 부의 부품과 수 조립 공정을 분석하여 설계된 conveyor에 의한 rotor 부의 이송, SCARA 로봇에 의한 rotor 부의 공급, vibration bowl feeder에 의한 washer의 이송, 정렬, 공급, slider에 의한 washer의 체결 등의 메커니즘의 조합으로 완성된 자동 조립 공정의 예이다. 화살표와 번호는 재설정된 조립 순서를 나타내고 rotor 부의 회전을 위해서 circular cycle assembly machine을 사용하여 공간 사용을 최소화하면서 조립 효율을 높일 수 있는 배치를 이루었다. (b)는 washer의 이송, 정렬, 공급은 vibration bowl feeder를 사용하고 체결에 slider를 사용한 것은 (a)와 같지만 circular cycle assembly machine 대신에 삽입 위치에서 정지 conveyor 위에 이송된 rotor 부를 slider 위치까지 밀어올려 주고 원하는 각도로 회전하는 지그를 사용하였고 washer가 삽입된 rotor 부를 탈착

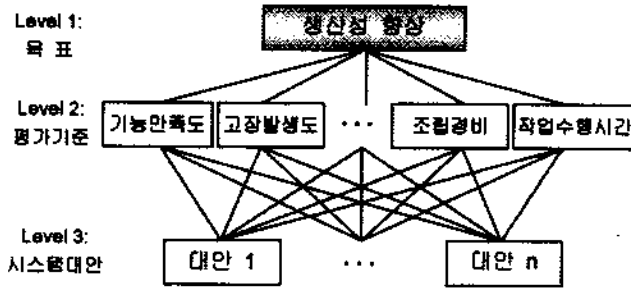


그림 15. 자동 조립 시스템 대안 평가를 위한 AHP 계층 구조

자동 조립 시스템의 평가 기준							
기술적 기준		경제적 기준		조직적 기준		작업자 기준	
• 기능 만족도	정성	• 초기	정량	• 설치 시간	정량	• 작업자 수	정량
• 고장 발생도	정량	투자 경비		• 운영기술자의 존재	정량	• 작업 환경 및 조건	정성
• 조립 효율성	정량	• 조립 경비	정량	• 환경 문제	정성	• 작업 수행 시간	정량
• 구축 조건	적어	• 교체 경비	정량				
• 소요 면적	정량						
• 기존 know-how							
이용정도	정량						
• 자동화 정도	정량						

그림 16. 자동 조립시스템의 생산성 향상 측면의 평가 기준.

하는 SCARA로봇이 한 대만 사용되었다.

4. 자동 조립 시스템 대안의 평가

일반적으로 자동 조립시스템 대안의 평가는 객관적인 분석이나 절차 없이 최고 의사 결정자의 경험과 주관적인 기준에 따라 이루어진 경우가 많은데, 이 경우 불필요한 투자 초과를 불러오고 목적하는 자동화의 요구가 모두 반영되지 못하는 결과를 초래하기 쉽다[10].

본 연구에서는 설정된 자동 조립 시스템 대안들에 대해서 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 응용하여 평가하였는데, <그림 15>와 같이 AHP tree를 구성하여 자동 조립 시스템 구축의 기본 목표를 최상위 레벨에 두고, 세부 평가 기준들을 레벨 2에, 그리고 조립 시스템 대안들을 최하위 레벨에 두어서, 각 세부 평가 기준들의 상대적 중요도와 각 평가 기준들에 대한 대안들의 선호도를 곱하여 대안들의 최종 선호 점수를 구하였다[11].

4.1 자동 조립 시스템 대안의 평가 기준 설정

목적 함수에서 정의된 바와 같이 자동화를 성취하고자 하는 목표인 생산성 향상, 품질 향상을 통한 불량률 감소, 유연성 증가, 이익 증가에 따라 설정되는 평가 기준은 약간씩 달라질 수 있다. 즉, 평가 기준은 한 가지 대안이 개발되었을 때 전체 시스템에 미치는 영향을 가장 잘 반영할 수 있도록 설정되어야 한다. 본 논문에서는 생산성 향상을 목적으로 했기 때문에 <그림 16>과 같이 그에 따른 기준들을 중심으로 대기준으로 기술적, 경제적, 조직적, 작업자 기준으로 나누어 세부 기준들을 작성했다.

4.2 세부 평가 기준의 가중값 계산

세부 평가 기준들의 상대적 중요도를 구하기 위해 AHP 행렬을 이용하였다. 세부 평가 기준들을 행렬의 행과 열에 두고 pairwise 비교를 통해서 각 셀의 scale을 결정하여 각 열을 정규화(normalization)하였을 때의 행렬을 A라고 했을 때 각 평가 기준의 가중값은 다음의 식 (2)를 이용하여 구한다[12].

$$W = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{A_k e}{e' A^k e} \quad (2)$$

$A^k e$ 는 A^k 의 행 합이고 $e' A^k e$ 는 A^k 의 모든 entry의 합이며 가중

값은 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 이고 모든 가중값의 합은 1이며 e 는 열 단위 벡터로 $(1, 1, \dots, 1)$ 이다. 일반적으로 scale이 1에서 9 사이에서 2의 등차 수열로 증가하는 것이 실제값과 추정값의 상관 계수(correlation coefficient)가 0.979로 1에 가장 가까우므로 1과 9 사이에서 균형 가중값법(balanced weighting)을 사용하는 것이 가장 좋다[13]. <그림 17>은 식 (2)를 사용하여 washer 삽입 공정의 자동 조립 시스템 대안의 평가를 위해 설정된 세부 평가 기준들의 상대적 가중값을 구하는 과정을 보여 주고 있다. scale을 1에서 9까지 2의 등차 수열로 증가 시키는 균형 가중값법을 사용하였으며 1은 중요도가 같음, 3은 약간 중요, 5는 중요, 7은 매우 중요, 9는 절대적 중요의 정도를 나타낸다.

4.3 최종적 자동 조립 시스템의 선정 방법

자동 조립 시스템 대안들의 평가를 통한 최종적인 선정 방법은 <그림 17>에서 구한 세부 평가 기준들의 가중값과 각 평가 기준에 대한 대안들의 가중값을 곱해서 구하게 된다. 이때 AHP를 적용시켜서 세부 평가 기준들에 대한 대안들의 선호도를 구하기 위한 pairwise 비교 행렬에 기입되는 각 셀의 scale을 결정할 때 분석가의 주관이 개입되는 기존의 scaling 방법을 사용하지 않고, 기준 단위라는 새로운 개념을 도입하였다. 여기서 기준 단위란 정량적 기준인 경우에는 자동 조립 시스템의 대안이 의도하는 기능을 충분히 수행하기 위한 해당 기준의 필요값을 나타내고, 정성적 기준은 분석가나 최고 의사 결정자가 목표로 하는 목표값을 나타낸다. 본 논문에서는 이 기준단위를 사용하여, 각각의 세부 평가 기준들에 대한 대안들의 선호도를 구하기 위한 AHP 행렬에서의 scaling 방법을

위해서 다음 4단계의 새로운 방법을 적용하였다. 대안 A는 <그림 14>의 자동 washer 삽입 시스템의 (a)를 말하고, 대안 B는 (b)를 나타낸다.

<단계 1> 정량적 기준과 정성적 평가 기준의 기준 단위를 정의한다. 예를 들면, 정량적 기준인 조립 효율성의 경우 취급 시간을 포함한 전체 조립 시간에 대하여 실제 체결에 필요한 시간의 비를 나타내는데 두 종류의 washer가 공급되어 취급 시간이 다소 크므로 80%를 기준 단위로 정의하였다.

<단계 2> 기준 단위에 대한 대안들의 평가값을 1을 기준으로 변환시킨다. <그림 18>에서 대안 A의 조립 효율성이 0.9라는 의미는 80%를 1로 했을 때 72%라는 의미이다.

<단계 3> 평가값이 작은 것부터 순서대로 정렬하여 그 누적값을 구한 후 최소값을 1로 두고 나머지 값들의 1에 대한 비율을 구한다. 누적값의 비율을 이용하는 이유는 기준 단위에 대한 평가값이 작은 것과 큰 것의 차이를 더욱 크게 하여 scale로 사용함으로써 각 평가 기준에 대해서 선호도의 차이를 크게 하기 위해서이다. 조립 효율성의 경우 대안 A와 대안 B의 평가값이 0.9와 1.2이므로 누적값은 0.9와 2.1이 된다. 0.9를 1로 한 2.1의 비율을 구하면 2.33이 된다.

<단계 4> 정해진 scale을 <그림 17>의 AHP의 행렬에 적용하여 각 평가 기준의 대안들에 대한 가중값을 결정한다. 조립 효율성에 대한 대안들의 가중값을 대안 A에 비해 대안 B가 2.33배 중요하므로 이러한 값을 AHP 행렬의 scale에 대입하면 대안 A는 0.3, 대안 B는 0.7의 가중값을 얻게 된다.

<그림 18>에서는 이러한 단계를 거쳐서 각각의 세부 평가 기준에 대한 <그림 14>의 자동 washer 삽입 시스템 대안 A와 B의 가중값을 구하는 과정을 보여 준다. 평가값은 각 세부 평

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
a	1	7	3	5	3	7	3	1	3	7	7	9	7	7	5	1
b	1/7	1	1/5	1	1/3	1/5	1/7	1/7	1/5	1	3	1/3	3	1/5	1/7	1/9
c	1/3	5	1	5	5	1	3	1/3	3	7	5	5	9	5	3	1/5
d	1/5	1	1/5	1	1/3	1/3	1	1/5	1/5	5	5	7	7	5	3	1/3
e	1/3	3	1/5	3	1	1	1/3	1/5	1/3	7	5	3	7	1	5	1/3
f	1/7	5	1	3	1	1	1/3	1/7	1/3	5	3	1	5	1/3	1/3	1/7
g	1/3	7	1/3	1	3	3	1	1/5	1/3	5	7	5	7	3	5	1/3
h	1	7	3	5	5	7	5	1	5	7	7	9	5	5	5	1
i	1/3	5	1/3	5	3	3	3	1/5	1	7	7	5	7	3	7	1
j	1/7	1	1/7	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7	1/7	1	3	1/3	5	1/3	1/5	1/7
k	1/7	1/3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/7	1/7	1/7	1/3	1	1/5	3	1/5	5	1/7
l	1/9	3	1/5	1/7	1/3	1	1/5	1/7	1/5	3	5	1	5	3	1/3	1/7
m	1/7	1/3	1/9	1/7	1/7	1/5	1/7	1/9	1/7	1/5	1/3	1/5	1	1/5	1/3	1/7
n	1/7	5	1/5	1/5	1	3	1/3	1/5	1/3	3	5	1/3	5	1	3	1/5
o	1/5	7	1/3	1/3	1/5	3	1/5	1/5	1/7	5	1/5	3	3	1/3	1	1/5
p	1	9	5	3	3	7	3	1	1	7	7	7	7	5	5	1

W_a	0.146
W_b	0.017
W_c	0.097
W_d	0.05
W_e	0.05
W_f	0.034
W_g	0.093
W_h	0.151
W_i	0.094
W_j	0.017
W_k	0.018
W_l	0.029
W_m	0.01
W_n	0.038
W_o	0.034
W_p	0.128

그림 17. AHP 행렬을 이용한 세부 평가 기준들의 가중값 산정 과정.

대 평가 기준	세부 평가 기준	평가값		중요도	
		대안 A	대안 B	W_A	W_B
기술적 기준	기능 만족도	1.2	1.0	0.69	0.31
	고장 발생도	1.3	1.2	0.67	0.33
	조립 효율성	0.9	1.2	0.30	0.7
	구축 조건	0.8	1.1	0.30	0.70
	소요 면적	0.8	1.2	0.29	0.71
	기존 노하우 이용 정도	0.7	1.1	0.28	0.72
	자동화 정도	1.2	1	0.69	0.31
경제적 기준	초기 투자 경비	0.8	1.1	0.30	0.70
	조립 경비	0.7	0.9	0.30	0.70
	교체 경비	0.6	0.8	0.30	0.70
조직적 기준	설치시간	0.8	0.9	0.32	0.68
	운영 기술자 존재 여부	0.9	1.2	0.30	0.70
	환경 문제	1.2	1.2	0.50	0.50
작업자 측면기준	작업자 수	1	1	0.50	0.50
	작업 환경 및 조건	1.2	1.3	0.32	0.68
	작업 수행 시간	1.2	1.4	0.32	0.68

그림 18. 각 세부 평가 기준에 대한 대안들의 가중값 산정 과정.

가 기준의 기준 단위에 대한 값을 1을 기준으로 변환한 값으로 <단계 2>에 해당된다. Scale을 주관적으로 주지 않고 기준 단위라는 새로운 개념을 도입하는 이유는 특히 정성적 기준의 경우에는 대안들에 대한 값이 객관적인 수치로 주어지기 때문에 이 값을 이용하는 것이 대안들에 대한 기준들의 기여도를 정확히 평가 가능하기 때문이다.

식 (3)은 세부 평가 기준들의 상대적 가중값과 평가 기준에 대한 대안들의 가중값을 곱하여 최종적인 자동 조립 시스템의 선호 점수를 구하는 식이다. 식에서 보는 바와 같이 대안 A의 선호 점수 0.41보다 대안 B의 선호 점수 0.59가 상대적으로 크므로 의사 결정자는 대안 B를 선택하게 된다.

$$\begin{matrix} a & b & \dots & p \\ A & \begin{bmatrix} W_{aA} & W_{bA} & \dots & W_{pA} \\ W_{aB} & W_{bB} & \dots & W_{pB} \end{bmatrix} \\ B & \end{matrix} \begin{bmatrix} W_a \\ W_b \\ \vdots \\ W_p \end{bmatrix} = [p_A, p_B] \quad (3)$$

$$= [0.41, 0.59]$$

여기서,

A, B : 자동 조립 시스템의 대안

a, b, \dots, p : 자동 조립 시스템의 생산성 측면의 세부 평가 기준

W_{aA} : 세부 평가 기준 a의 대안 A에 대한 가중값

W_a : 세부 평가 기준 a의 평가 기준에 대한 상대적 가중값

p_A : 대안 A의 최종 선호 점수

6. 결론

본 논문에서는 지금까지 수 조립으로 진행되고 있는 조립 공정을 자동 조립 시스템으로 구축하는 절차와 구축된 자동 조립 시스템 대안들을 AHP를 응용하여 평가하여 최적의 시스템 대안을 결정하는 방법이 제시되었다. 먼저, 수 작업으로 조립되고 있는 제품을 분석하여 자동화와 DFA를 위한 설계 원칙과 취약 공정 평가 시스템을 적용하여 조립 공정을 분석하여 취약 유발 공정 특성을 제거하기 위한 설계 원칙을 통합하여 제품을 재설계한다. 다음으로, 새로운 조립 순서를 결정하여, 이송, 정렬, 공급, 체결의 자동화 메커니즘을 결정하고 원활한 조립의 흐름이 이루어지도록 조합하여 구축된 자동 조립 시스템 대안들을 기준 단위란 개념을 이용한 AHP를 응용하여 평가한다. 그리고 사례 연구로 자동차 송풍 모터 중 washer 삽입

공정을 예로 들어 조립 자동화 시스템을 설계하였다.

참고문헌

1. Lotter, B., *Manufacturing Assembly Handbook*, Butterworths, pp. 303-383, 1989.
2. Andreasen, M. M., Kahler, S. and Lund, T., *Design for Assembly*, IFS, pp. 9-148, 1988.
3. 목학수, 김형주, 문광섭, 양태일, *자동차 부품의 조립 용이성과 분리용이성* 한국학술진흥재단 보고서, 1996. 5.
4. 목학수, 황건용, 조종래, "소형 제품에 있어 조립 생산성 향상을 위한 취약 공정 평가 시스템," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제6호, pp. 64-78, 1998. 6.
5. 황학, *작업관리론*, 영지문화사, pp. 129-156, 1992
6. Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, McGraw-Hill Inc., pp. 13-32, 1995.
7. Schmidt, L. C. and Jackman, J., "Evaluating assembly sequences for automatic assembly systems," *IIE Transactions*, Vol. 27. pp. 23-31, 1995.
8. Francis, R. L., McGinnis, L. F. and White, J. A., *Facility Layout and Location: an Analytical Approach*, Prentice-Hall, pp. 27-184, 1992.
9. Boothroyd, G., *Assembly Automation and Product Design*, Marcel Dekker Inc., pp. 181-208, 1991.
10. Chow, W. W. C., *Cost Reduction in Project Design*, Van Nostrand Reinhold Co., pp. 266-324, 1978.
11. Saaty, T. L., "Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process," *Management Science*, Vol. 32, No. 7, July, 1986.
12. Saaty, T. L., "Concepts, theory, and techniques rank generation, preservation, and reversal in the analytic hierarchy decision process," *Decision Science*, Vol. 18, 1987.
13. Harker, P. T. and Vargas, L. G., "The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process," *Management Science*, Vol. 33, No. 11, 1987.



목학수

1979년 부산대학교 기계설계학과 학사
 1981년 한국과학기술원
 1986년 독일 RWTH Aachen대 공학박사
 현재: 부산대학교 산업공학과 교수
 관심분야: 조립자동화, 조립 및 분리를 위한 설계 등



조종래

1997년 부산대학교 산업공학과 학사
 1999년 부산대학교 산업공학과 석사
 현재: 부산대학교 산업공학과 석사과정
 관심분야: 조립자동화, 제품설계 등



김명렬

1998년 동아대학교 산업공학과 학사
 현재: 부산대학교 산업공학과 석사과정
 관심분야: 조립자동화, CAPP 등