조립 라인의 밸런싱을 고려한 자동 조립 순서 추론

Generation of Robotic Assembly Sequences with Consideration of Line Balancing Using a Simulated Annealing

홍 대 선, 조 형 석
(Dae Sun Hong and Hyung Suck Cho)

Abstract : In designing assembly lines, it is required that the lines should not only meet the demand of the product, but also minimize the assembly cost associated with the line. For such a purpose, numerous research efforts have been made on either the assembly sequence generation or the assembly line balancing. However, the works dealing with both the research problems have been seldom reported in literature. When assembly sequences are generated without consideration of line balancing, additional cost may be incurred, because the sequences may not guarantee the minimum number of workstations. Therefore, it is essential to consider line balancing in the generation of cost-effective assembly sequences. To incorporate the two research problems into one, this paper treats a single-model and deterministic (SMD) assembly line balancing (ALB) problem, and proposes a new method for generating line balanced robotic assembly sequences by using a simulated annealing. In this method, an energy function is derived in consideration of the satisfaction of assembly constraints, and the minimization of both the assembly cost and the idle time. Then, the energy function is iteratively minimized and occasionally perturbed by the simulated annealing. When no further change in energy occurs, an assembly sequence with consideration of line balancing is finally found. To show the effectiveness of the proposed scheme, a case study for an electrical relay is presented.

Keywords : assembly sequence, assembly line balancing, simulated annealing

Ⅰ. 서론

생산 현장에서 만들어 지는 제품들의 가격 구성 중 조립 공정에 해당하는 경비가 차지하는 비율은 약 10 ~ 30% 로 알려져 있다[1]. 이 조립 경비를 절감하면서 동시에 시장의 수요에 대처할 수 있는 조립 라인을 설계하는 것이 요구되어 지는데, 이를 위하여 현재 까지 조립 순서 추론 [2]-[12]과 라인 밸런싱에 관해 많은 연구가 이루어져 왔다 [13]-[15]. 조립 순서를 추론하는 목적은 조립 구속 조건을 만족하면서 동시에 조립 경비를 최소로 하는 최적 순서를 찾는데 있으며, 조립 라인 밸런싱의 목적은 주어진 사이클 시간을 만족하면서 작업 스테이션 수를 최소화 하여 경제적인 라인을 설계하는 데 있다.

현재까지 조립 순서 추론에 관한 연구를 보면 (1) 그래프 또는 트리 탐색 [2]-[7], (2) 분해 법 [8]-[14], (3) 신경 회로망 [10]-[11] 그리고 (4) 시뮬레이티드 어닐링 [12] 등을 이용한 방법들이 알려져 있다. 탐색 방법들을 이용하면 해석적으로 최적 순서를 추론할 수 있으나, 이는 부품 수가 증가하게 되면 탐색 공간이 폭발적으로 커지게 되어 적용하는데 한계를 안고 있다. 반면에 분해 법이나 신경 회로망 응용 방법들은 부품 수의 증가에 대처할 수 있으나, 최적 순서 결과를 보장하지 못하는 단점을 안고 있다. 대신에 시뮬레이티드 어닐링을 이용하면 부품 수가 많아져도 높은 빈도로 최적 순서를 잘 찾는다고 알려져 있다 [12].

조립 순서의 추론에 관한 연구와 아울러 경제적인 조립 라인을 설계하기 위한 수단으로서, 단순 라인 밸런싱 (single-model and deterministic (SMD)) assembly line balancing (ALB)) 문제에 관하여 30 여년 이상 많은 연구가 이루어져 왔다 [13]. 이 방법들은 (1) 해석적 방법 (analytical approaches) [14] 과 (2) 경험적 방법 (heuristic approaches) [15] 으로 대별할 수가 있다. 해석적 방법은 최적 해를 찾는 방법이지만 ,문제의 크기가 큰 경우 즉 많은 조립 작업의 경우에는 적용이 어렵다는 문제점을 안고 있다. 이에 반해 경험적 방법들은 해석적인 방법에 비해 계산이 효율적이지만, 최적 해를 보장하지 못하는 단점을 안고 있다.

이와 같이 조립 순서의 추론과 라인 밸런싱에 관한 연구가 각자의 분야에서 많은 발전이 되어 왔지만, 이 두 분야의 연구를 모두 고려한 현장에 적용할 수 있는 실제적인 방법은 거의 알려져 있지 않다. 만일 라인 밸런싱을 고려하지 않고 조립 순서를 추론하면 필요 이상의 작업 스테이션을 설치하여야 하는 경우가 발생하게 되어 경비가 추가될 수가 있다. 따라서, 조립 라인을 설계할 때에는 라인 밸런싱이 고려된 조립 순서의 최적화가 요구된다.

이상의 두 가지 연구를 모두 고려한 조립 라인의 설계에 이용할 수 있는 실제적인 방법으로서, 본 논문에서는 라인 밸런싱이 고려된 조립 순서를 추론하기 위하여 시뮬레이티드 어닐링 [12], [16]-[18] 을 이용한 새로운 방법을 제안한다. 그림 1 은 제안하는 본 방법을 이용하여 라인 밸런싱을 고려한 조립순서를 찾는 순서를 나타내고 있다. 이 그림을 보면, 우선 제품 모델링으로부터 조립 구속 조건과 조립 경비를 추론한다. 그리고, 이들 조립 구속 조건과 조립 경비, 그리고 라인 밸런싱에서의 유휴 시간 (idle time) 에 관계되는 에너지 함수를 유도한다. 이후 이 에너지 함수를 반복적으로 줄여 나가는 가운데 간헐적인 에너지 증가를 통하여, 그 결과로 라인 밸런싱이 고려된 조립 순서를 얻게 된다.

제안하는 본 방법의 유용성을 살펴보기 위하여, 전기 계전기에 대해 라인 밸런싱을 고려한 조립순서를 추론하고, 그 결과로부터 본 방법의 성능을 평가한다. 사례 연구 결과는 본 방법이 라인 밸런싱된 조립 순서를 성공적으로 찾을 수 있음을 보여 준다. 본 논문은 2절에 조립 순서의 표현과 3절에 라인 밸런싱 문제에 대해 알아보고, 4절에서는 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서의 추론 방법에 대해 기술한다.

접수일자 : 1995. 6. 16., 수정완료 : 1995. 11. 1
홍대선 : 삼성항공산업(주)FA사업부
조형석 : 한국과학기술원 기계공학과

그리고 5절에서는 사례 연구를 행하고 이에 대한 결과를 분석하여 최종적으로 6절에서 본 연구의 결론을 맺는다.

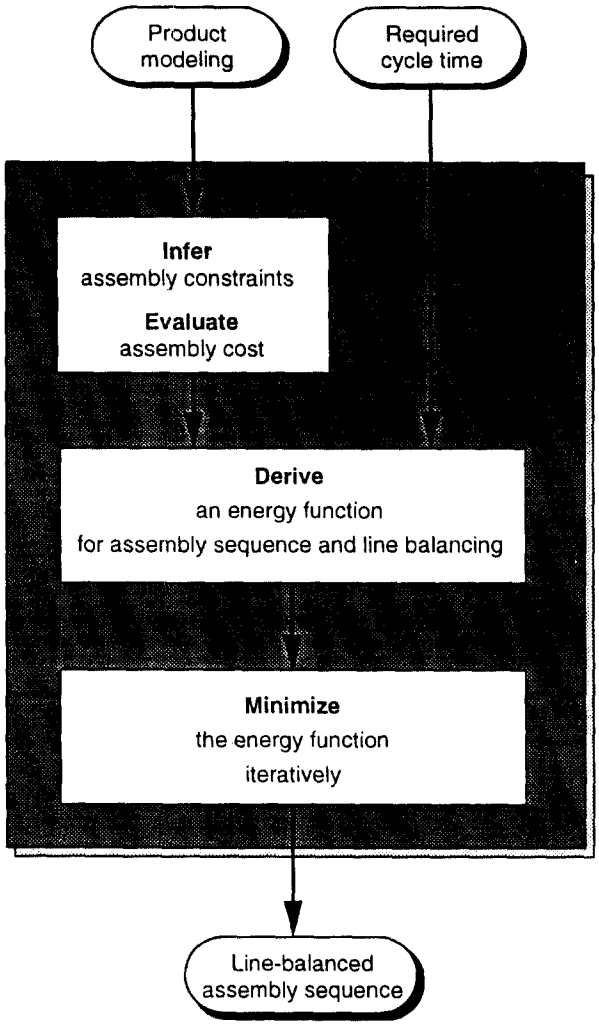

그림 1. 라인밸런싱을 고려한 조립순서 추론방법 신도.
Fig. 1. Proposed procedure for generating an assembly sequence with consideration of line balancing.

II. 조립 순서의 표현

제품의 조립 순서를 추론하기 위하여 그 제품을 구성하고 있는 부품들의 상태를 적절하게 표현하여야 하는데 이를 제품 모델링 (product modeling) 이라 한다. 제품 모델링에 대한 연구 현황을 보면 다음과 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다. <1> 부품들간의 상호 형상 관계(topological relation) 추출 방식 [2] [5], [8] [12] <2> CAD (computer aided design) 나 CSG (constructive solid geometry) 데이터에 기초를 둔 기하학적 추론 방식(geometrical reasoning) [6] -[7]. 본 연구에서는 전자에 속하는 방법인 부품들의 상태를 연결관계 (liaison) 로 표현한 Cho and Cho [5] 가 제안한 방법을 이용한다.

1. 조립 부품의 표현

대상 제품으로서는 로봇을 이용한 자동 조립에 적합한 제품으로 한다. 이러한 조건으로는 부품들이 상호 직교 방향으로 조립되어 있고, 또한 조립 시에 발생할 수 있는 외력에 의한 형상 변형이 발생하지 말아야 한다. 그리고, 부품 상호간에 직선 방향으로 조립이 가능하던지 또는 나사 체결과 같은 간단한 동작에 의해 조립이 가능해야 한다. 그림 2에 이러한 부품의 예의 하나인 전기 계전기 부품들을 나타낸다. 이 그림에서 표시되어 있는 좌표 $x, y, z, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$는 부품들의 조립 방향을 의미한다.

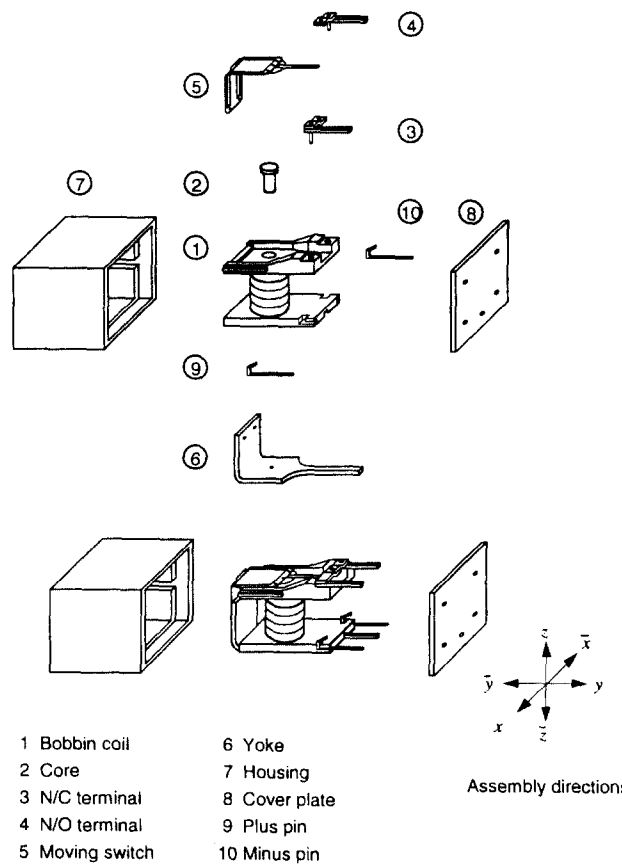

그림 2. 전기계전기의 부품도.
Fig. 2. An exploded view of an electrical relay.

부품 n 개로 구성되어 있는 제품을 $A=(P, L)$로 표시한다. 여기서 P 는 부품들의 집합 그리고 L은 부품간에 존재하는 r 개의 부품간의 연결 관계 (liaison) 들의 집합을 나타내며, 이들은 다음과 같이 표현된다.

$$P = \{P_\alpha \mid \alpha = 1, 2, \ldots, n\} \tag{1}$$

$$L = \{l_{\alpha\beta} \mid \alpha \neq \beta\} \tag{2}$$

여기서 $r(=|L|)$ 과 n 사이에는 $(n-1) \le r \le \frac{n(n-1)}{2}$ 의 관계를 갖고 있다.

연결 관계 $l_{\alpha\beta}$ 는 두 부품 P_α 와 P_β 간의 연결 상태와 연결 방향에 대한 정보를 포함하는데, 이 연결관계들로부터 부품들간의 조립선행관계가 추론되어 진다 (상세한 내용은 Cho and Cho [5] 참조.)

2. 가능한 조립 순서와 안정한 조립순서

조립 순서의 추론 목표는 순차적으로 조립해야 할 n 개의 부품을 찾아내는 것으로 볼 수 있다. 따라서 한 조립 순서 SEQ 는 다음과 같은 n 개 부품으로 이루어진 순서 집합 (ordered list) 으로 표시된다.

$$SEQ = \{P_\beta \in P \mid \beta = \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n\} \tag{3}$$

본 연구에서는 직렬라인에 의한 조립을 가정하고, 이러한 조립 순서를 구하기 위해 고려되어야 할 조립 구속 조건들로는 조립 선행 조건 (precedence constraint) 과 연결 조건 (connectivity constraint) 으로 나뉘어 진다. 조립 선행 구속 조건은 두 부품 P_α와 P_β를 조립할때, 그 이전에 이미 조립되어 있어야 할 다른부품들의 집합 $PC(l_{\alpha\beta})$을 의미한다. 만일 이 조건을 위배하여 두부품 P_α와 P_β가 먼저 조

립되면, 다른 부품들 $PC(l_{n,p})$는 조립이 될 수 없다. 그리고, 연결 구속 조건은, 어떤 부품이 조립 진행 중인 부분 조립체에 조립되기 위해서는, 그 부분조립체에 속해 있는 하나 이상의 부품과 실제 연결 (real connection) 을 갖고 있어야 한다는 것을 의미한다. 이 조건을 위배하면, 여러개의 부분조립체가 발생하게 되어 직렬라인에 의한 조립이 불가능하게 된다.

이상의 부품들간에 존재하는 조립구속 조건들을 만족하는 조립순서가 존재하는데, 이를 가능한 조립순서 (feasible assembly sequences) 라 한다.

가능한 조립순서라 하여도, 조립 진행 중인 부분 조립체에 부품들이 완전하게 고정되지 않은 상태에서 그 부분 조립체가 움직이던지 또는 회전 운동이 일어나는 경우에는 부품 이탈이 발생할 수 있다. 이러한 움직임이 일어나지 않는, 즉 부분 조립체의 안정성이 유지되도록 하는 조립 순서를 안정한 조립 순서 (stable assembly sequences)라 한다. 만일 동작 자유도가 큰 로봇을 사용하면, 로봇의 유연성을 이용하여 부분 조립체의 움직임을 방지할 수가 있으므로, 보다 많은 수의 안정한 조립 순서가 존재하게 된다.

조립 순서의 부분 조립체들이 갖는 불안정지수 C_{ss}는, 로봇의 동작 자유도가 정해진 상태에서 다음과 같이 정의한다.

$$C_{ss} = \frac{1}{12n} \sum_{j=1}^{n} S(BA_j) \tag{4}$$

여기서 BA_j는 j번째 부분 조립체들을 나타내고, $S(BA_j)$는 부분 조립체 BA_j가 갖는 불 안정도를 의미한다. 부분 조립체의 불 안정도가 0 이라 함은 모든 부품들이 완전히 고정되어 있음을 뜻하고, 반면에 12 인 경우에는 그 부분 조립체에 있는 부품들이 모든 방향 $(x, y, z, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 으로 병진운동과 회전운동이 일어날 가능성이 있음을 뜻한다 [7]. 만일 한 조립 순서 내에서, 불 안정도가 0 이 아닌 부분 조립체가 조립 방향 변경으로 인해 움직인다면 그 조립 순서를 불안정한 조립 순서라 하고 이때의 불안정 지수 C_{ss} 는 1 로 한다. 위의 (4) 을 보면, C_{ss} 가 최대 1 의 값을 갖도록 하기 위하여, 모든 부분 조립체들에 대한 불 안정도의 합을 $12n$으로 나누었음을 알 수 있다.

다음으로는 조립순서에 관계되는 조립경비를 정의한다. 조립순서가 변경되면, 이에따라 조립 치공구들의 설계가 바뀌어 진다. 이들을 살펴보면, 조립중인 부품들을 유지하기 위한 지그, 조립불안정성을 제거하기 위한 부대설비, 그리고 조립중인 부분조립체의 조립방향이 바뀔때 필요한 회전기구들을 들 수있다. 본 연구에서는 지그의 경비변화는 무시할 수 있다고 가정하여, 위에서 정의한 조립 불안정성과 조립 방향변경을 조립경비의 인자로 한다. 한 SEQ 의 부품들을 조립할 때 발생되는 조립방향변경 지수 C_{nt}를 다음과 같이 정의한다.

$$C_{nt} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} R(BA_j) \tag{5}$$

여기서 $R(BA_j)$는 j 번째 부품의 조립작업을 할 때, 조립 진행중인 부분 조립체 BA_j 의 조립 방향이 변경되면 1 아니면 0 으로 한다. 만일 조립 순서 SEQ가 불안정하던지 또는 조립 구속 조건을 위배한다면 C_{nt} 는 최대값인 1 로 한다. 위의 식을 보면, C_{nt}의 최대값을 1 로 하기 위하여, 모든 부분 조립체들에 대한 조립 방향 변경 횟수의 합을 n 으로 나누었음을 알 수 있다

위의 두 인자들을 고려하여 한 조립 순서 SEQ가 조립 구속 조건을 만족할 때 조립 경비 J 는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \rho_s C_{ss} + \rho_t C_{nt} \tag{6}$$

여기서 ρ_s와 ρ_t는 조립 시스템의 종류와 사이클 시간 (cycle time) 에 따라 결정되는 가중치로서 $\rho_s + \rho_t = 1$ 의 관계를 가진다 [4]. 만일 SEQ 가 구속 조건을 위배한다면 J 는 1 이 된다.

이상에서 정의한 조립 경비 식 (6) 은 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서에 관계하는 에너지 함수를 유도할때 사용된다.

Ⅲ. 라인 밸런싱 문제

본 절에서는 단순 라인 밸런싱 (single-model and deterministic (SMD) assembly line balancing (ALB)) 문제에 대하여 기술한다. 즉, 직렬 조립 라인에 한 제품만 생산이 되고, 부품들을 조립하는데 걸리는 작업 시간은 일정하다고 가정한다. 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서를 추론하기 위한 사전 단계로서 SMD-ALB 문제에 대하여 기술한다.

1. 라인 밸런싱 문제의 표현

조립 라인은 할당된 조립 작업을 수행하는 여러 개의 작업 스테이션으로 구성이 되고, 스테이션들은 일반적으로 이송 장치들에 의해 연결이 된다. 여기서, 한 조립 작업을 수행하는데 소요되는 시간을 작업 시간 (process time) 이라 하고, 각 작업 스테이션에 할당된 작업 시간들의 합을 스테이션 시간 (station time) 이라 한다. 그리고 모든 작업을 완료하는 데 소요되는 시간을 총 작업 시간 (total work content) 이라 한다.

ALB 문제는 조립 구속 조건과 요구 사이클 시간이 주어지는데, 이 사이클 시간은 일반적으로 제품의 수요에 대응할 수 있도록 미리 결정된다. 그러면, 이 문제의 목적은 "주어진 구속 조건과 사이클 시간을 만족하면서, 동시에 라인의 유휴 시간을 최소화 하는 해를 찾는 것" 으로 볼 수 있다. 이러한 유형을 타입 1 문제라 한다 [14], [15].

조립 작업의 수는 제품이 갖고 있는 부품들의 수 n 으로 볼 수 있고, 각 조립 작업을 $P_a(a = 1, , 1, \ldots, n)$로 표시한다. 그리고 작업 스테이션의 수를 m 이라 표시한다. 각 조립 작업 P_a는 t_a의 조립 시간을 가지며, 각 조립작업시간의 합을 총 조립 시간 T_{tac}로 표기된다. 그리고 각 작업 스테이션에는 T_i의 스테이션 시간이 주어지는데, 이는 각 작업 스테이션에 할당된 작업을 수행하는데 소요되는 작업시간들의 합이다.

요구되는 사이클 시간을 T_{cyc}이라고 할 때, 이론적인 최소의 스테이션 수 m^* 는 다음과 같이 표현된다.

$$m^* = \left\lceil \frac{T_{tac}}{T_{cyc}} \right\rceil \tag{7}$$

여기서 $\lceil \cdot \rceil$는 $\lceil \cdot \rceil$내의 값보다 작지않은 최소 정수를 의미한다. 한편, 각 스테이션 시간 T_i는 사이클 시간 T_{cyc}을 넘지 말도록 조립작업을 할당해야 하는데, 본 연구에서는 주어진 조립순서에 대해, 순차적으로 각 작업스테이션의 사이클 타임이 초과하지 않는 범위내에서 가능한한 많은 작업을 할당하였다.

2. 라인 효율 지표

주어진 사이클 시간을 만족하면서, 작업 스테이션 수를 최소화 한다는 것은 라인의 총 유휴 시간 (total idle time) 을 최소화 한다는 것을 의미한다. 이 유휴 시간을 최소화하기 위한 지표로서, 다음과 같이 초과 작업 시간 (extra work content) T_{ew}을 정의한다.

$$T_{ew} = \sum_{i=m^*+1}^{m} T_i \tag{8}$$

이 T_{ew}를 최소화 하면, 최소의 작업 스테이션 수가 얻어지는데, 이는 만일 T_{ew}가 0 이면 조립 라인은 m^*개의 작업 스테이션으로 구성되는 것으로부터 알 수 있다.

Ⅳ. 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서 추론

조립 순서가 조립 구속 조건을 만족하면서 동시에 조립 경비를 최소로 가질 때 이를 최적 순서라 하고, 반면에 조립 라인 밸런싱 문제에서는 주어진 사이클 시간을 만족하면서 작업 스테이션 수를 최소로 가질 때 이를 최적 해라 한다. 본 절에서는 이상의 조건들을 고려한 에너지 함수를 먼저 유도한다. 그리고, 시뮬레이티드 어닐링을 이용하여 이 에너지 함수를 반복적으로 줄여 나가고 또한 간헐적인 에너지 증가의 과정을 통하여, 그 결과로 해 (solution) 를 구하는 방법에 대하여 기술한다.

1. 라인 밸런싱과 조립 순서에 관계하는 에너지 함수

에너지 함수 E_{seq}를 다음과 같이 구성한다.

$$E_{seq} = E_P + E_S + E_J + E_L \tag{9}$$

여기서 E_P와 E_S는 각각 선행 조건과 연결 조건에 관한 항들이고, E_J와 E_L는 각기 조립 경비와 유휴 시간에 비례하는 항이다. 이 항들은 최적 해에 대해 E_P와 E_S는 0 으로 정해져야 한다. 그리고 E_J와 E_L은 최소의 조립경비와 최소의 유휴시간에 대해 각각 최소가 되도록 정해져야 한다.

(3)와 같이 n 개의 부품으로 표시되는 조립 순서 $SEQ = \{P_\beta \mid \beta = \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n\}$에 대하여, 선행 조건에 관계되는 에너지 항 E_P를 다음과 같이 정의한다.

$$E_P = \frac{C_P}{n} \sum_{i=1}^{n} \mu_i \tag{10}$$

여기서 C_P는 양의 상수이고, μ_i는 SEQ 의 i 번째 부품이 조립 선행 조건을 만족하면 0, 아니면 1이다.

연결 조건에 관한 에너지항 E_S를 다음과 같이 정의한다.

$$E_S = \frac{C_S}{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{11}$$

여기서 C_S는 양의 상수이고, λ_i는 SEQ 의 i 번째 부품이 연결 조건을 만족하면 0, 아니면 1이다. 위의 두식들을 보면 정규화를 위하여, 즉 최대값을 1 로 하기 위하여 모든 부품들에 대한 값들을 더하고, 이를 n 으로 나누었음을 알 수 있다.

조립 경비에 관한 에너지 E_J는 (6) 의 조립 경비 J에 비례하도록 다음과 같이 정의한다.

$$E_J = C_J J \tag{12}$$

여기서 C_J는 양의 상수이다.

앞 절에서 기술했듯이 조립 라인의 유휴 시간을 최소화한다는 것은 (8) 의 초과 작업 시간 T_{ow}를 최소화함을 의미한다. 이러한 목적을 이루기 위하여 마지막 항인 E_L을 다음과 같이 정의한다.

$$E_L = C_L \frac{T_{ow}}{T_{cyc}} \tag{13}$$

여기서 C_L는 양의 상수이고, T_{cyc}는 사이클 시간을 나타낸다. 위의 (9)에서 (13)로부터 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서에 관한 에너지는 다음과 같이 유도되어 진다.

$$E_{seq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (C_P \mu_i + C_S \lambda_i) + C_J J + C_L \frac{T_{ow}}{T_{cyc}} \tag{14}$$

위의 식에서 C_L와 C_J의 비율은 조립 경비에 우선하여 유휴 시간이 최소화 되어야 하는데, 다음 절의 사례 연구에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 동일한 값으로 하였다.

다음으로는 위 식을 시뮬레이티드 어닐링에 의해 반복적으로 줄여 가는 과정을 통하여 해를 구하는 방법에 대하여 기술한다.

2. 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘

시뮬레이티드 어닐링은 금속 열처리 중의 하나인 풀림 (annealing) 의 개념으로부터 나왔다 [16] [18]. 풀림에서는 금속을 높은 온도로 가열한 후에 차츰 온도를 내리게 되는데, 그 결과로 낮은 에너지 상태의 금속 격자가 형성이 된다고 알려져 있다. 이와 비슷하게, 시뮬레이티드 어닐링에서는 최적화 하고자 하는 시스템에 초기에는 높은 온도를 부여하고, 이후 온도를 천천히 내린다. 이 과정에 시스템의 상태는 볼쯔만 확률 분포를 따르면서 변화되도록 한다. 이 볼쯔만 확률 분포는 온도와 에너지의 함수로 표현된다. 이와 같이 하여, 낮은 온도에서 더 이상의 에너지 변화가 없을 때 최종적으로 원하는 해를 얻게 된다. 여기서 온도의 개념은 시스템의 상태 변수와는 관계가 없는 에너지와 같은 차원을 갖는 파라미터이다 [16].

본 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서의 추론 문제에서는 시뮬레이티드 어닐링에 의해 (14) 의 에너지 함수를 반복적으로 줄여 나아가 그 결과로 해를 얻고자 한다. 초기에는, (3) 의 n 개의 부품으로 이루어진 임의의 조립 순서와 초기 온도 Θ_0로부터 시작한다. 여기에 요구 사이클 시간이 주어지면, 작업 스테이션의 집합의 형태로 초기 해가 얻어지게 되고, 이 때의 에너지는 (14) 에 의해 계산된다.

온도 $\Theta(k)$를 갖는 k 번째 반복 스텝에서, 그때의 해와 에너지를 각각 SEQ_0와 E_0로 나타낸다. 그리고, 다음 스텝에서의 해가 될 수 있는 2 개의 후보 해를 다음과 같이 만든다.

후보 해 1

SEQ_0의 부품들 중 서로 다른 임의의 두 부품 P_α와 P_β를 정한다. P_α는 i 번째의 조립 스텝에, 그리고 P_β는 j 번째의 조립 스텝에 있다고 할 때 ($j \neq i$), 부품 P_α를 j 번째의 조립 스텝으로 이동시킨다. 이때 P_β는 $j<i$ 이면 $j+1$ 번째 조립 스텝으로, $j>i$ 이면 $j-1$ 번째 조립 스텝으로 이동된다. 이렇게 하여 얻어진 해와 에너지를 각각 SEQ_1과 E_1으로 둔다.

후보 해 2

위의 두 부품 P_α와 P_β를 서로 교환하고, 이때 얻어진 해와 에너지를 각각 SEQ_2와 E_2로 둔다. 위의 각 후보 해에 대한 에너지는 (14) 에 의해 계산한다. 위에서 얻어진 두 후보 해 SEQ_1 과 SEQ_2 그리고 현재의 해 SEQ_0를 포함한 세 후보 해들 중에서, 다음 반복 스텝에서의 해가 선정되어 지는데, 이때 각 해가 선택 될 확률 $\Pr(E_i)$ ($i=0,1,2$)은 다음과 같이 볼쯔만 확률 분포를 따른다 [16]-[18].

$$\Pr(E_i) = \frac{e^{-E_i/\Theta(k)}}{\sum_{j=0}^{2} e^{-E_j/\Theta(k)}} \tag{15}$$

위의 식을 보면, 낮은 에너지를 갖는 해가 다음 반복 스텝에서의 해가 될 수 있는 확률이 큼을 알 수 있다. 그러므로, 낮은 온도에서 현재의 에너지 E_0가 최소이면 $\Pr(E_0)$는 1 에 가깝게 되어 더 이상의 에너지 변화가 발생하지 않게 된다.

위의 3 후보 해들 중에서 새로운 해를 선정해야 하는 데, 이를 위해 다음과 같이 누적 확률 $CPr(E_i)$을 계산한다.

$$CPr(E_i) = \sum_{j=0}^{i} \Pr(E_j) \tag{16}$$

다음으로는, [0 1] 구간에서 균일 분포를 갖는 임의의 난수 N_R을 발생하고, 이를 위 식의 누적 확률들 $CPr(E_i)$ 과 각각 비교하여 다음의 조건을 만족하는 해 E_i가 새로운 해로 선정된다.

$$CPr(E_{i-1}) < N_R \leq CPr(E_i) \tag{17}$$

위의 과정에서 반복 스텝이 경과함에 따라 어닐링 온도를 낮추어 가야 하는데, 이를 온도 계획이라 한다. 이 온도 계획의 결과로서 본 알고리즘이 최적 해를 찾을 빈도는 물론 필요 반복 스텝 수가 좌우된다.

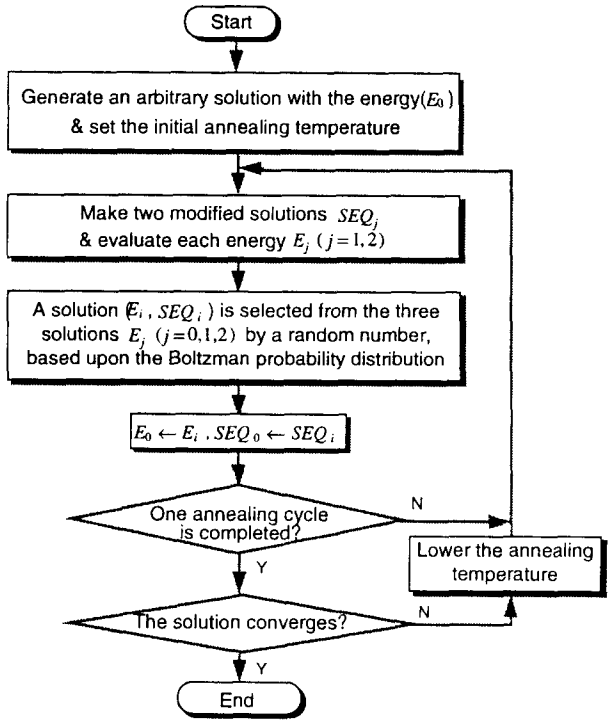

그림 3. 라인밸런싱을 고려한 조립순서추론을 위한 시뮬레이티드 어닐링방법의 순서도.

Fig. 3. Flow chart of the simulated annealing method for generating a line balanced assembly sequence.

기존의 연구에 의하면, 이 온도는 천천히 내려야 될 뿐만 아니라 한 어닐링 사이클 동안, 즉 어느 반복 스텝 구간 동안 일정하게 유지시켜야 되는데, 최적 해를 높은 빈도로 찾기 위하여 k 번째 반복 스텝에서의 온도 $\Theta(k)$는 다음 식을 따르도록 알려져 있다 [17], [18].

$$\Theta(k) = \frac{\Theta_0}{1 + l_n(q(k))} \tag{18}$$

여기서 Θ_0는 초기 온도를 의미하고, $q(k)$는 q 번째 어닐링 사이클을 나타낸다. 본 연구에서는 한 어닐링 사이클 동안 거의 모든 n 개의 부품이 선택되도록 다음과 같이 n 으로 하였다.

$$\Theta_{cw} = n \tag{19}$$

따라서 $q(k)$는 다음과 같이 표현된다.

$$q(k) = \left\lceil \frac{k}{\Theta_{cw}} \right\rceil = \left\lceil \frac{k}{n} \right\rceil \tag{20}$$

여기서 $\lceil \cdot \rceil$는 $\lfloor \cdot \rfloor$ 내의 값보다 크거나 또는 같은 가장 작은 정수이다.

이상과 같은 순서에 의해 상대적으로 낮은 에너지를 갖는 해 E_i를 반복적으로 찾아내게 되는데, 낮은 온도에서 더 이상의 에너지 변화가 없을 때 해 SEQ_{SA}를 찾게 된다. 그림 3 에 이상과 같이 제안하는 본 방법의 순서도를 표시한다.

V. 사례 연구 및 결과 고찰

본 방법의 유용성을 살펴보기 위하여, 사례연구로서 그림 2에 나타낸 전기 계전기에 대하여 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서추론 행한다. 또한, 조립 순서를 추론할 때 라인 밸런싱이 고려되어야 하는 필요성을 보이기 위하여, 라인 밸런싱을 고려하지 않고 전문가 시스템 [4] 에서 얻어진 최적 순서들에 대하여 작업 스테이션 수를 구하고 이 결과를 본 방법에서 얻은 결과와 비교 한다. 그리고, 본 방법의 성능 평가를 위하여, 사례 연구에서 얻어진 결과로부터 최소 에너지로 수렴하는 빈도와 필요한 반복 스텝 수의 측면에서 분석을 행한다.

1. 시뮬레이션 과정

그림 1 에 나타나 있는 바와 같이, 본 방법은 제품의 모델링 데이터와 요구되는 사이클 시간이 주어지면, 그림 3 의 순서도에 나타나 있듯이 에너지 함수를 반복적으로 줄여 나아가 그 결과로 해를 찾게 된다. 한편, 본 알고리즘의 수렴성을 확인하기 위한 구간은 어닐링 사이클의 20 배로 하였다.

2. 시뮬레이션 조건

본 방법을 이용하여 그림 2 에 나타나 있는 전기 계전기에 대하여 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서를 추론한다. 이 계전기는 부품 10 개로 구성되어 있다. 한편, 각 부품을 조립하는데 소요되는 작업 시간은 Carter [19] 가 제안했던 방법의 결과를 이용하였는데, 이 방법은 로봇을 이용한 조립 작업에서의 작업 시간을 실험을 통하여 구하였다. 표 1 에 이 계전기 부품들을 조립하기 위한 작업 시간을 나타낸다.

표 1. 계전기 부품들의 조립작업시간 (초).

Table 1. Estimated processing time required to assemble parts for the relay.

Part number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Time	4.8	4.3	4.8	4.8	3.5	4.3	3.5	4.3	3.7	3.5	**41.5**

본 시뮬레이션에 사용된 조건들은 표 2 에 나타나 있다. 여기서 ρ_s 와 ρ_t 그리고 초기 온도 Θ_0가 주어졌을 때, 각 에너지 상수들 C_P, C_S, C_J, C_L은 시뮬레이션시의 수렴 경향을 보아 결정하였다. 그 경향을 보면, 에너지 상수들과 초기 온도와의 비가 최소 에너지로 수렴하는 빈도와 요구되는 반복 스텝 수에 영향을 끼침을 알 수 있었다. 그렇지만, 이 상수들의 절대적인 또는 상대적인 크기는 성능에 그다지 큰 영향을 주지 않음을 볼 수 있었다.

표 2. 시뮬레이션 조건.

Table 2. The simulation conditions.

Product	Energy constants C_P	C_S	C_J	C_L	Initial annealing temperature	Cost constants ρ_s	ρ_t	Assembly direction of robot
Relay	10	10	10	10	0.2	0.5	0.5	z only

3. 결과 및 고찰

표 3 에 전기 계전기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 결과는 각 사이클 시간에서 20 회의 시뮬레이션을 통하여 얻었다. 각 시뮬레이션에서 각각 다른 해가 나올 수 있도록 초기에는 난수로서 임의의 해를 만들어 시작을 하였고, 또한 매 반복 스텝에서 선택하는 두개의 부품 역시 난수에 의해 임의로 선정을 하였다.

본 방법의 필요성을 알아보기 위하여, 여기서 얻은 결과와 전문가 시스템 [4] 에서 얻은 결과와 비교를 하였다. 전문가 시스템에서는 라인 밸런싱을 고려하지 않고 단지 조립 장비만을 고려하여 최적 조립 순서를 얻었는데, 이 최적 순서들을 대상으로 하여 주어진 사이클 시간을 만족하도록 작업 스테이션을 구성하였다. 이 결과가 표 3 의 우측 세 열에 걸쳐 나타나 있다.

표 3. 전기 계전기의 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서 추론결과.

Table 3. Line-balanced sequences for the relay.

Required cycle time (sec)	Solution found		Optimal sequences [4][a]		
	No. of ws	Energy	No. of ws	Rate[c]	Energy
8	7	13.375	8[b]		17.667
9	6	12.292	7[b]		15.847
10	5	3.292	5		3.292
11	5	7.201	5		7.201
12	4	3.292	4	6/12	3.292
14	4	6.363	4		6.363
15	3	3.875	4[b]		6.158
16	3	3.875	3	8/12	3.875
20	3	3.292	3		3.292
21	2	3.625	3[b]		5.340

[a] The energy given is chosen as the minimum one evaluated for the sequences in that are obtained from the expert system[4].

[b] The number of workstations is larger than that of the solution found.

[c] The rate represents the number of sequences that yield the number of workstations given in its left column among 12 optimal seguences[4] Unless specified, all 12 sequences have the identical number of workstations.

표 3 을 보면, 사이클 시간 8, 9, 15, 21 초에서 전문가 시스템에 의한 결과가 본 방법에 의한 결과에 비해 작업 스테이션 수가 하나 더 많음을 알 수 있다. 이 경우에는, 본 방법에서 얻은 조립 순서는 전문가 시스템에서의 최적 조립 순서와 다름을 볼 수 있었다. 예를 들어 사이클 시간 8 초에서 본 방법에서는 {{2},{1},{6,10},{3},{5,9}{4},{7,8}} 의 결과이었고, 사이클 시간 21 초에서는 {{2,1,6,9,10}, {3,5,4,7,8}} 의 결과를 볼 수 있었다. 사이클 타임 8 초의 경우 각 에너지항을 보면, 본 방법의 경우 최종적으로 $E_P = E_S = 0$, $E_I = 3.625, E_L = 9.75$이였고, 전문가 시스템에서의 최적순서에 대해서는 $E_P = E_S = 0$, $E_I = 3.292$, $E_L = 14.375$임을 볼 수 있었다. 이 결과들을 비교하여 보면, 본 방법의 경우 비록 조립 경비에 관한 에너지는 높지만, 라인의 유휴시간에 관한 에너지가 더 낮음으로 인해, 전체 에너지가 낮아짐을 알 수 있다. 이 결과로 부터, E_I와 E_L은 상호 상쇄관계(trade off) 를 가짐을 볼 수 있다. 한편, 사이클 시간 12 와 16 초에서는, 전문가 시스템에서 얻은 12 개의 최적 순서들이 모두 최소의 작업 스테이션을 내지 않음을 볼 수 있다. 즉, 사이클 시간 12 초에서는 12 개의 최적 순서 중 6 순서들만이 작업 스테이션 수 가 4 개로 최소이지만, 다른 6 순서들은 작업 스테이션 수를 하나 더 많이 갖고 있음을 볼 수 있었다.

본 방법의 성능을 살펴보기 위하여, 초기 온도의 설정에 따라 본 방법에서 얻은 최저의 에너지를 갖는 해 SEQ_{SA}*로 수렴하는 빈도와 이때의 요구 반복 스텝 수에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 4 에 사이클 시간 14 초 인 경우에, 여러 가지의 초기 온도에 대한 결과를 나타낸다. 이 결과들은 각 온도에서 20 회의 시뮬레이션을 통하여 얻었다. 이 그림을 보면, 초기 온도가 0.2 이상에서 80% 이상의 시뮬레이션 결과가 최소 에너지로 수렴하였다. 반면에, 초기 온도가 높을수록 필요 반복 스텝 수는 지수 함수적으로 증가됨을 보였다. 이상의 결과로부터 초기 온도가 높을수록, 최소 에너지로 수렴하는 빈도는 올라가는 반면에 필요 반복 스텝 수는 증가함을 알 수 있다.

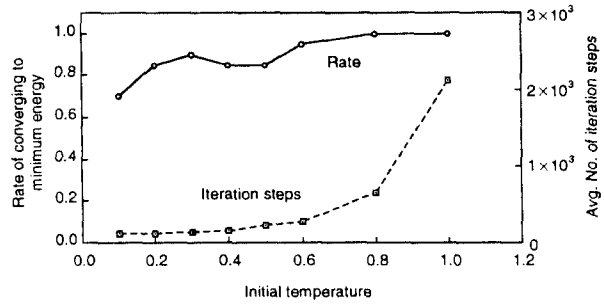

그림 4. 초기온도 변화에 따른 최소에너지로의 수렴비율과 평균 반복스텝수. 각 결과는 한 온도에서 20회의 시뮬레이션으로부터 얻은 결과임 (사이클시간 14초의 경우).

Fig. 4. The rate of converging to the minimum energy and the average number of iteration steps for various initial temperature. The other constants are the same as those in Table 2. The results are obtained from 20 simulation runs at each temperature.

이상의 결과들로부터 라인 밸런싱을 고려하지 않고 조립 순서를 추론하면, 최소의 작업 스테이션 수를 보장하지 못함을 알 수 있었는데, 반면에 본 방법을 사용하여 조립 순서의 조립 경비와 조립 라인의 유휴 시간을 모두 고려한 결과 이러한 문제점을 극복할 수 있었다. 결론적으로, 본 사례 연구의 결과는 본 제안한 방법이 라인 밸런싱된 조립 순서를 성공적으로 찾을 수 있었다.

VI. 결론

조립 라인의 설계 시 생산성을 높이고 조립 경비를 절감하기 위하여 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서의 추론이 필수적이다. 자동 조립 라인에서 이러한 조립순서를 찾기 위하여, 본 논문에서는 시뮬레이티드 어닐링을 이용하여 단순 라인 밸런싱을 고려한 조립 순서를 추론하는 방법을 제안하였다.

제품 모델링 데이터와 요구되는 사이클 시간이 주어지면, 본 방법에서는 에너지 함수를 반복적으로 줄여 나아가 그 결과로 해를 구하였다. 여기서 이 에너지 함수는 조립 구속조건들의 만족, 조립 경비의 최소화, 그리고 라인 유휴 시간의 최소화를 고려하여 유도되었다.

본 방법의 유용성과 필요성을 살펴 보기 위하여 현장에서 생산되고 있는 전기 계전기에 대한 사례 연구를 행하였고, 또한 최소 에너지로 수렴하는 빈도와 필요 반복 스텝 수의 측면에서 본 방법의 성능을 조사하였다. 사례 연구의 결과로부터, 라인 밸런싱을 고려하지 않고 조립 순서를 추론하면 최소의 작업 스테이션 수를 얻지 못함을 알 수 있었다. 반면에, 본 제안한 방법에서는 조립 라인의 유휴 시간과 조립 순서의 조립 경비를 모두 고려한 결과 작업스테이션 수와 조립 경비를 절감할 수 있는 조립순서를 얻을 수 있었다.

결론적으로, 본 사례 연구의 결과는 제안한 방법이 라인 밸런싱된 조립 순서를 성공적으로 찾을 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

[1] J. L. Nevins and D. E. Whitney, "Assembly research," *Automatica*, vol. 16, pp. 595-613, 1980.

[2] T. L. D. Fazio and D. E. Whitney, "Simplified generation of all assembly sequences," *IEEE J. Rob.*

Auto., vol. 3, no. 6, pp. 640-658, 1987.

[3] L. S. H. Mello and A. C. Sanderson, "AND/OR representation of assembly plans," *IEEE Tran. Rob. Auto.*, vol. 6, no. 2, pp. 188-199, 1990.

[4] 조덕영, "전문가 시스템을 이용한 자동 조립 순서 추론에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1992.

[5] D. Y. Cho and H. S. Cho, "Inference on robotic assembly precedence constraints using part contact level graph," *Robotica*, vol. 11, pp. 173-183, 1993.

[6] Y. Liu and R. J. Popplestone, "Planning for assembly from solid models," *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Auto.*, pp. 222-227, 1989.

[7] R. Hoffman, "Automated assembly in a CSG domain," *Proc. Int. Conf. Rob. Auto.*, pp. 210-215, 1989.

[8] S. H. Lee, "Disassembly planning by subassembly extraction," *Proc. 3rd ORSA/TIMS Conf. Flex. Manuf. Sys.*, pp. 383-388, 1989.

[9] C. K. Shin and H. S. Cho, "On the generation of robotic assembly sequences based upon separability and assembly motion instability," *Robotica*, vol. 12, pp. 7-15, 1994.

[10] C. L. P. Chen, "Neural computations for planning AND/OR precedence-constraint robot assembly sequences," *Proc. Int. Conf. Neural Net.*, vol. 1, pp. 127-142, 1990.

[11] D. S. Hong and H. S. Cho, "A neural network-based computational scheme for generating optimized robotic assembly sequence," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 8, no. 2, pp.129-145, 1995.

[12] D. S. Hong and H. S Cho, "Generation of optimized robotic assembly sequences using simulated annealing," submitted to *Robotics and CIM.*

[13] S. Ghosh and R. J. Gagnon, "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 27, no. 4, pp. 637-670, 1989.

[14] I. Baybars, "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem," *Management Science*, vol. 32, no. 8, pp. 909-932, 1986.

[15] F. B. Talbot and J. H. Gehrlein, "A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques," *Management Science*, vol. 32, no. 4, pp.430-454, 1986.

[16] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr. and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, 1983.

[17] J. A. Freeman and D. M. Skapura, *Neural networks - algorithms, applications and programming techniques.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1991.

[18] S. Geman, and D. Geman, "Stochastic relaxation, Gibbs distribution, and the Baysian restoration of images," *IEEE Tran. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 6, pp. 721-741, 1984.

[19] P. W. Carter, "Estimating cycle time in design for robotic assembly," *J. of Manuf. Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, 1990.

홍 대 선

1959년생. 1982년 서울대학교 기계공학과 (학사). 1986년 한국과학기술원 생산공학과 (석사). 1995년 한국과학기술원 기계공학과(박사). 1982년 ~ 현재 삼성항공산업(주) FA 사업부 차장. 주관심분야는조립순서추론, 자동조립 시스템 설계및 신경회로망 응용.

조 형 석

1944년생. 1971년 서울대학교 공업교육학과 (학사). 1973년 Northwestern Univ. 기계공학과 (석사). Univ. of California at Berkely (박사). 1978년 ~ 현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 1990 ~ 93년 IFAC Manufacturing Committee 의 부회장. 현재 국제 Journal 인 Robotica, Control Engineering Practice 와 Advanced Robotics 의 편집위원. 주 관심분야는 인공지능 응용, 비젼시스템, 공정제어, 로보틱스, 그리고 조립자동화임.