

일반 배치문제 해결을 위한 제약만족기법의 적용

APPLICATION OF THE CONSTRAINT SATISFACTION APPROACH TO GENERAL LAYOUT PROBLEMS

박성준* · 정의승**

Sungjoon Park* · Eui S, Jung

Abstract

A computerized layout system based on a constraint satisfaction problem (CSP) technique was developed to treat both facility layout and instrument panel layout problems. This layout system attempts to allocate various facilities under multiple layout criteria including qualitative design objectives. Since most of the design objectives can be understood as constraints which the layout solution must satisfy to improve the goodness of the solution, a CSP technique was employed to solve the multi-constraints layout problem. The effectiveness of the system was evaluated by the comparison with the well-known facility layout program, CORELAP. Furthermore, the proposed system can also be applied to the instrument panel layout problem successfully. Several user-centered guidelines were well reflected on the solution obtained. CONSLAY, the prototype layout system being developed in the research, greatly enhanced the interactions with the designer so as to deal with the problem-dependent nature of the layout problem and to properly reflect the domain-specific knowledge of the designer.

Keywords: facility layout, control panel layout, constraint satisfaction problem, user modification.

1. 서론

대부분의 산업현장에서 생산 설비들에 대한 배치문제는 생산성 향상 및 작업환경 개선에 큰 영향을 미치는 것으로 인식되고 있으며, 이는 전통적인 산업공학 응용분야이기도 하다. 크게는 대규모 공단의 부지 선정에서부터 생산관제실(Monitoring Room)과 같은 작업실내에서의 기기 배치까지 다양한 형태의 배치문제가 존재하며, 합리적

인 배치를 통한 효율증대를 위하여 많은 연구가 이루어져 왔고, 문제해결을 위한 기법들도 개발되어 왔다. 다양한 형태의 배치문제는 그 적용범위에 따라 다음과 같은 범주로 구분하여 분류할 수 있다 [10].

현재까지 배치문제 해결을 위하여 많은 배치 전용 프로그램들이 개발되어 왔다. 범주 1의 배치문제 해결을 위한 대표적인 프로그램으로는 ALDEP, CORELAP, 그리고 CRAFT 등이 있으며 [21], SPACE [20], LOCATE [10]

* 남서울대학교 산업공학과

** 포항공과대학교 산업공학과

표 1. 배치문제의 범주

범주 1	지역의 공단위치나 공장내에서의 부서배치등과 같은 광역배치문제
	일반적으로 설비배치(Facility Layout), 공장배치(Plant Layout)등의 용어가 사용된다
범주 2	부서내, 작업실내에서의 기기 배치문제
	작업자의 작업자, 작업자와 기기간의 상호작용(Interaction)을 고려하여 설비 및 기기들을 배치한다. 사무실 배치(Office Planning, Office Layout)등의 용어가 사용되며, 원자력 발전소의 조종실 (Control Room)과 같은 작업공간 배치(Workspace Layout) 역시 이 범주에 해당된다
범주 3	작업자의 작업공간내에서의 배치문제
	조종패널(Control Panel)등의 배치문제가 이 범주에 해당되며, 조종장치간의 연관성 및 작업자의 사용성(Usability)을 고려하여 배치한다

등의 배치 프로그램은 사무실 또는 작업공간 배치문제(범주 2)의 해결을 위한 전용 프로그램으로 발표되었다. 또한 조종패널 배치문제(범주 3)를 위해서 WOLAP [16], CAPABLE [4]등의 배치 프로그램이 개발되었다. 이러한 배치 프로그램들은 대부분 작업공간내의 배치요소들(Workspace elements)간의 거리에 대한 가중치 합의 형태로 비용함수를 정의한 뒤, 비용함수값에 따라 배열을 하는 방식(Link length model)을 따르고 있다.

그러나 배치문제는 물류의 흐름, 중요성, 안전 등 여러 가지 배치기준이 적용되어 해를 도출하는 경우가 많으며, 이러한 기준은 정량적인 기준외에 정성적 요인도 많이 포함되어 있다. 특히, 배치문제는 비정형적 성격을 가지고 있어 설계자의 주관적 배치기준이 배치안의 도출에 큰 영향을 미치는 특징을 가지고 있다 [14]. 대부분의 정성적 배치기준은 물류의 흐름(Material Flow) 형태로는 설명되어 질 수 없으며, 위에서 언급한 대부분의 Link length model들은 이러한 정성적 배치기준에 부합되는 배치안을 생성하는데는 부적절한 면을 가지고 있다. 더욱이 범주 3의 조종패널 배치문제 등에는 사용성(Usability), 시계성(Visibility)등과 같은 사용자 편의성에 대한 배치기준이 적용되어야 하는 등 다른 범주의 배치문제들과 구분되는 특징을 가지고 있다. 그러나 기존에 개발된 대부분의 배치 시스템들은 물류흐름 형태 이외의 여러가지 다른 배치기준들을 반영하기 힘든 비용함수 구조를 가지고 있으며, 서로 다른 특성을 갖는 배치범주에는 적용하기 곤란한 한계를 가지고 있다. CRAFT를 이용하여 조종패널 배치안의 도출을 시도한 예가 있으나 [2], 범주 3의 특성을

반영하였다기 보다는 범주 3의 배치문제를 물류흐름의 형태로 변형한 뒤 범주 1의 기준에 따라 해를 구한 것에 불과하며, WOLAP, CAPABLE과 같은 범주 3의 배치시스템 역시 단일 목적함수에 따라 배치안을 도출하므로 여러 사용자 편의성 설계기준들을 배치안에 반영하였다고 보기에는 무리가 있다. 따라서 복수의 배치기준을 배치안 도출과정에 충분히 반영할 수 있고, 나아가 서로 다른 특성의 배치문제에도 효과적으로 적용할 수 있는 새로운 배치기법의 개발이 필요하다.

배치안의 적합성을 향상시키기 위한 배치기준 또는 설계지침(Design Guidelines)은 배치안이 만족하여야 하는 일종의 제약식으로 인식할 수 있으며, 이 경우 배치문제는 제약만족문제(Constraint Satisfaction Problem; CSP)의 일종으로 취급하여 접근할 수 있다 [12]. 본 연구에서는 복수의 배치기준을 배치과정에 효과적으로 반영할 수 있는 배치 시스템을 제약만족 기법을 이용하여 개발하였으며, 또한 여러 범주의 배치문제에 모두 효과적으로 적용할 수 있는 일반적 배치시스템의 개발을 연구목적으로 하였다.

2. 제약만족문제와 배치문제

CORELAP, CRAFT와 같은 대부분의 배치시스템들은 시스템 개발시에 정의한 규칙(물류량에 따른 총 이동거리의 최소화 등)에 의하여 배치안을 도출하는 방식을 채택하고 있으며[1, 21], 몇몇 시스템들은 최적화 기법에 따라 배치안을 도출하기도 한다 [16]. 또한 여러가지의 배

치기준을 반영한 해를 도출하기 위하여 정량적 목적함수와 정성적 목적함수를 모두 고려할 수 있는 'Goal Programming' 기법을 적용한 배치방법도 발표되어 왔다 [7, 11, 18]. 그러나 이와 같은 방법으로 배치안을 도출하는 것은 모두 사전에 결정된 목적함수(배치함수)에 따라 해를 도출하는 것으로 문제의 개별적 특성을 충분히 반영하는 해를 도출하기가 어렵다. 모든 배치문제에 일률적으로 적용되는 목적함수(예; 배치대상간의 거리의 가중치 합(최소화)에 의한 배치문제 해결보다는 주어진 배치문제의 특성들을 반영한 여러 배치기준들을 모두 만족하는 해를 찾는 방법이 보다 적합할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 제약만족 개념을 배치문제 해결에 도입하였다.

제약만족문제(CSP)는 주어진 제약식을 만족하도록 관련변수에 적절한 값을 할당하는 문제로 이해할 수 있다. 즉, 전체 탐색공간내에서 제약식을 만족하는 해를 찾아나아가는 방법이다 [9]. CSP 기법들은 인공지능(AI)분야에서 발전되어 왔으며, Machine Vision [18], 일정계획 문제 [8] 등에 적용되어 왔다. 또한, 기계설 배치문제[6]와 부엌배치[3]와 같은 작업공간 배치에도 이와 같은 CSP 기법이 적용된 예가 있다. 공간배치 문제는 일반적으로 탐색공간이 넓은 특징을 가지고 있다. 특히, 범주 3의 조종패널 배치문제는 좁은 영역내에서 많은 수의 배치기기를 고려해야 하는 문제로서 사용편의성과 관련된 각종 배치기준을 반영해야 하는 등 사무실배치 혹은 공장배치 문제보다 많은 탐색량을 가지고 있는 특징이 있다. 그러므로 범주 3을 포함하는 모든 배치문제에 제약만족 기법을 적용하기 위해서는 효과적인 탐색 알고리즘을 개발하는 것이 필수적이다.

3. 제약식 표현방법

배치문제를 제약만족문제로 모델링하기 위해서는 배치기준을 제약식으로 표현하는 방법을 정의하는 것이 우선적으로 필요하다. 배치문제에는 위치결정과 관련된 많은 제약식이 존재할 수 있으나, 크게 배치대상의 절대적 위치선정에 관련된 제약식과, 배치대상간의 상대적 위치선정에 관련된 제약식으로 양분할 수 있다. 본 연구에서는 상대적 위치제약을 표현하기 위하여 S_{ij} , D_{ij} , I_{ij} 의 세 변수를 정

의하였으며, 절대적 위치제약을 표현하기 위하여 PR, 변수를 도입하였다. 한편, 배치대상간의 여유공간(Clearance) 조건을 반영하기 위하여 C, 변수를 정의하여 나타내었다.

S_{ij} 는 배치대상물 i에 대한 대상물 j의 가능위치들을 나타내는 변수로서 그림 1과 같은 8 방위(Meridian)의 위치에 대한 값을 가지며 가능한 위치들의 집합으로 표현한다. 예를 들어, $S_{ij} = \{1, 2, 8\}$ 라 할 때 j는 i의 위쪽 또는 북쪽에 위치할 수 있음을 의미한다. I_{ij} 는 i와 j사이에 위치할 수 있는 배치대상들을 명시하기 위한 변수로서 공집합은 두 대상물 사이에는 다른 배치대상이 위치할 수 없음을 의미한다. 끝으로 D_{ij} 는 i와 j사이의 최대 허용거리를 나타내기 위하여 도입되었다.

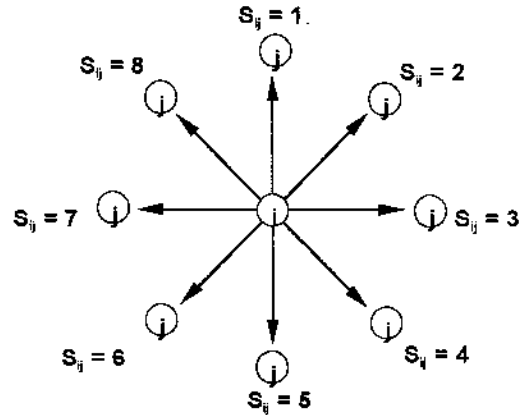


그림 1. 배치대상간의 상대적 위치 표현: S_{ij}

한편, 절대적 위치제약을 나타내기 위한 PR, 변수는 사전에 정의된 특정위치 i에 배치되어야 하는 배치대상들을 나타낸다. 이 변수는 배치과정에서 고정설비의 위치를 고려하는데 유용하게 사용될 수 있다. 특히, 조종패널 배치문제에 있어서는 조작성 등을 높이기 위하여 비상스위치 또는 사용빈도가 높은 조종장치들을 편의작업영역(Comfortable Working Area)내에 배치하고자 할 때 효과적으로 사용될 수 있다. C, 변수는 근접하는 기계설비간의 간섭을 방지하기 위한 여유공간을 확보하고자 하는 경우나 AGV등의 이동경로를 배치안에 반영하고자 할 경우 유용하다.

브라운관 가공공정을 예로 들어 위에 언급한 변수들을 이용한 배치 제약식으로 표현하면 다음과 같다. 용해공정

은 성형공정의 바로 앞에 위치하여야 한다면, 용해로(i)는 프레스플런저 설비 (j)와 근접하여 위치하여야 하며 ($D_{ij} = \text{small } d$), 원활한 공정흐름을 위해서 다른 설비가 두 설비 사이에 위치하여서는 안된다 ($I_{ij} = \text{null}$). 또한 품질검사장소(k)는 연마공정등에서 발생하는 유리먼지 등이 유입되면 안되므로 다른 공정과 격리된 영역을 PR_k으로 정의한 후 PR_k = {k}라고 표현하여 배치안을 도출하는 과정에 이와 같은 공정특성을 반영할 수 있다.

조종패널 배치문제(범주 3)의 경우에는 조종장치와 계기간의 “공간적 양립성 (Spatial Compatibility)”, “사용빈도의 원칙”, “중요성의 원칙”, “기능별 그룹핑의 원칙”, “사용순서의 원칙” 등과 같은 사용편의성 관련 배치기준이 많이 적용된다 [19]. 앞에서 언급한 설비배치문제에서와 마찬가지로 절대적 위치제약은 PR 변수를 이용하여 나타낼 수 있으며, 상대적 위치제약은 S_{ij} , I_{ij} , D_{ij} 를 이용하여 표현할 수 있다. 따라서 “기능별 그룹핑의 원칙”, “사용순서의 원칙”, “공간적 양립성” 등과 같은 제약식(배치기준)은 S_{ij} , I_{ij} , D_{ij} 를 이용하여, 그리고 “사용빈도의 원칙”, “중요성의 원칙”과 같은 제약식은 PR 변수를 이용하여 배치문제의 특성을 반영한다. 특히, 조종패널 배치문제는 조종장치(Controls)와 계기(Displays)들로 구성되어 있으므로 PR를 조종장치들에 대한 편의조종영역을 나타내는 CW(Comfortable Working Area)와 계기들에 대한 주 시계영역을 나타내는 PV(Primary Visual Area)로 구분하여 사용하였다.

4. 배치 알고리즘

계약만족문제에서 가능해 영역은 제약식들로부터 정의되며, 배치문제는 이러한 영역내에서의 임의의 한 해를 찾는 과정으로 인식할 수 있다 [6]. 일반적으로 배치문제는 많은 양의 탐색작업을 요구하므로 사전에 불필요한 탐색공간을 삭제하는 과정은 현실문제에의 적용을 위하여 필수적이라고 할 수 있다. 특히, 배치 범주 3에 해당하는 조종패널 배치문제의 경우에는 일반적으로 수십개 이상의 계기 및 조종장치들을 고려하여야 하므로 효율적인 탐색기법의 개발이 매우 중요한 연구과제라고 하겠다. 이를 위해서 본 연구에서는 ‘Preprocess’ 과정과 ‘Look_ahead’ 기능에 대한 알고리즘을 개발하였다.

‘Preprocess’ 과정은 불필요한 탐색과정을 방지하기 위하여 탐색작업을 실시하기전에 수행하는 사전 준비과정이다. 전체 배치영역을 유한개의 Block으로 구성된 뒤, 각각의 Block에 배치대상의 중앙점이 위치하도록 하여 배치작업을 수행하며, ‘Preprocess’ 단계에서는 배치대상의 중앙점이 위치할 수 없는 Block들이 전체 탐색공간에서 삭제된다. 이 과정은 배치대상에 적용되는 제약식을 검토하여 탐색공간을 축소시켜나가는 과정으로서, 배치대상의 크기, 배치대상간의 관계, 절대적 위치영역에 대한 제약 등을 고려하게 된다. 예를 들어 배치대상이 PR_k으로 지정된 영역(즉, PR_k으로 지정된 Block)에만 배치되어야 한다면 전체 Block들을 검색하면서 PR_k에 해당되는가를 체크할 필요없이 PR_k영역에 대해서만 탐색을 실시하므로써 탐색시간을 크게 줄일 수 있다. 또한, 두 배치대상간의 관계로부터 $S_{AB} = \{3\}$ 의 제약조건이 있을 경우, 배치대상 B는 A가 놓일수 있는 영역의 우측에 대해서만 탐색을 실시하면 된다. 사전에 각각의 배치대상에 대하여 Preprocess과정을 통하여 배치가능영역을 축소하여 정의하므로써 전체 탐색시간을 효과적으로 줄일 수 있다.

기존의 전통적인 배치방법은 대부분 사전에 정의된 규칙에 따라 단계적 (Step-by-step)으로 배치를 해나가는데 반하여 본 연구에서 제안하는 제약만족기법에 기초한 배치과정은 전체 탐색공간에 대하여 주어진 제약식을 만족하는 해를 찾는 과정이므로 ‘Backtracking’과정이 발생하게 된다. ‘Backtracking’과정은 제약만족문제를 풀기 위한 가장 기본적인 알고리즘으로서 주어진 제약식을 만족하는 해를 찾기 위하여 앞서 놓인 배치대상의 위치를 변경하는 과정을 의미하게 된다. 이 방법은 주어진 제약식을 모두 만족하는 배치안을 찾을 수 있는 장점이 있는 반면, 본질적으로 탐색량이 크게 증가하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 ‘Backtracking’과정을 최대한 줄이면서 탐색작업을 수행하기 위하여 ‘Look_ahead’ 개념을 도입하였다. ‘Look_ahead’ 기법은 어느 배치대상부터 탐색을 시작할 것인가를 결정하는 ‘Variable Ordering’과 각각의 배치대상이 놓일 수 있는 영역 (Preprocess로부터 결정된 영역)중 어느 위치 (Block)부터 배치를 하며 제약식 만족 여부를 검토할 것인가를 결정하는 ‘Value Ordering’으로 크게 나뉘어 진다 [5]. 효과적인 Ordering 기법은 배치대상간의 상충가능성을 제거하거나 탐색과정의 초기에 발

생시켜 'Backtracking'이 발생하는 횟수를 감소시키고, 이로부터 효율적인 탐색작업을 가능하게 한다. 'Preprocess' 과정이 탐색공간을 축소시켜 준다면, 'Look_ahead' 과정은 'Backtracking'이 발생하는 횟수를 감소시켜 배치의 효율을 높인다고 할 수 있다.

본 연구에서는 세가지의 'Variable Ordering' 전략이 채택되었다. 첫번째 전략은 'Preprocess' 과정의 결과로서 도출되는 배치가능영역이 작은 배치대상부터 배치를 실시하는 방법이며, 두번째는 많은 수의 제약조건과 관련이 되어 있는 배치대상부터 배치를 실시하는 전략이다. 이와 같은 전략은 Haralick과 Elliot (1980)이 제안한 '실패 우선의 원칙 (Fail-first principle)'의 개념을 따르는 방식으로 성공할 가능성이 없는 탐색가지는 초기에 제거하므로서 무의미한 탐색작업을 줄이기 위한 방법이다. 이에 반하여 세번째 전략은 상호 관련이 있는 배치대상들을 'Clustering'하여 함께 고려하는 방식으로 제약식간의 상충을 감소시키고 관련없는 배치대상이 개입하여 배치영역을 축소시키는 가능성을 배제하기 위한 방법이다. 배치시스템을 개발하는 과정에서 얻은 경험으로는 세번째 전략이 가장 효과적이었으나, Ordering 전략의 선택은 문제의 특성과 설계자의 경험에 의하여 결정되어 진다고 생각된다.

'Value Ordering' 전략은 일반적으로 이후에 배치될 'Variable'들의 배치가능영역을 최대화 시키는 방법을 채택하고 있다 [9, 13]. 본 연구에서는 효용함수(Utility Function)개념을 도입하여 배치가능영역내의 각 Block들에 대하여 다른 배치대상이 놓이고자 하는 가능성을 계산하여, 가장 가능성이 적은 Block에 먼저 배치하는 방법을 채택하였다. 이 방법은 다른 배치대상의 배치가능성을 최대한로 남겨둠으로서 탐색과정중의 'Backtracking' 발생을 축소시켜준다. 제약만족기법에 기초한 배치과정을 개략적으로 소개하면 그림 2와 같다.

주어진 배치문제의 특성을 파악한 뒤, 이에 맞추어 배치목적과 설계지침등에 따라 제약조건을 설정한다. 배치시스템의 입력자료 형태로 제약조건을 표현한 뒤, Preprocess, Variable Ordering, Value Ordering등을 통하여 배치가능영역, 배치순서등을 결정한다. 각 Variable들의 배치가능영역에 대하여 앞서 배치된 Variable과의 S_i 제약관계를 검토하여 배치 위치를 결정한 후, 여유공간 (C_i),

최대허용거리 (D_i), 그리고 I_i 제약등을 평가한다. 모든 제약조건을 만족하면 현재의 위치를 배치위치로서 확정하고 Variable Ordering 결과로부터 다음 배치대상을 고려한다. 제약식을 만족하지 못할 경우 Value Ordering에서의 다음 위치 (Block)로 이동한 뒤, 제약조건을 다시 평가한다. 배치가능영역내의 모든 Block들에 대해서 제약조건을 만족하는 Block을 찾지 못하면 'Backtracking'을 실시한다. 즉, 이미 배치된 배치대상의 위치 변경을 시도한다.

단순한 Backtracking 기법은 바로 직전의 단계로 되돌아가는 방법으로서 가장 간단한 알고리즘이라 할 수 있으나, 대부분의 경우 반복 탐색으로 인한 비효율성의 문제점을 가지고 있다. Kumar (1992)는 단순 Backtracking의 비효율성을 다음의 예로 설명하고 있다 [13]. N 개의 변수(배치대상)에 대하여 $V_1, \dots, V_2, \dots, V_3, \dots, V_4, \dots, V_N$ 의 순서로 탐색을 한다고 가정할때, V_1 에 a 라는 값(위치)이 할당될 경우 가능한 모든 영역에 대하여 V_2 는 주어진 제약조건을 만족할 수 없다고 하면, V_1 와 V_2 사이의 모든 V_k 들은 불필요한 탐색을 계속 반복하며 V_1 까지 되돌아 갈 것이다. 이러한 비효율적 반복을 피하기 위하여 본 연구에서는 V_2 의 배치실패를 야기한 V_1 까지 한번에 되돌아가는 'Backjumping' 개념을 도입하였다. 즉, 한번에 여러 단계를 되돌아 갈 수 있도록 하므로써 탐색의 효율성을 높이고자 하였다.

위의 배치 알고리즘은 UNIX 환경하에서 C 언어를 이용하여 구현되었으며, 그래픽 라이브러리는 Motif를 이용하였다. 개발된 배치 시스템은 제약만족기법에 기초한 배치 시스템의 의미로서 "CONSLAY (CONstraint Satisfied LAYout)"라고 명명되었다.

5. 사례적용

5.1. 예제 1: 설비배치문제 (Facility Layout Problem)

설비배치 분야에서 상용화된 시스템으로서 많이 이용되고 있는 CORELAP과의 비교를 통하여 본 연구에서 제안한 제약만족기법에 기초한 배치기법의 효율성을 검증해 보고자 하였다. 7개의 공정으로 구성된 간단한 배치문제[21; p288]에 대하여 CORELAP과 CONSLAY를 이용

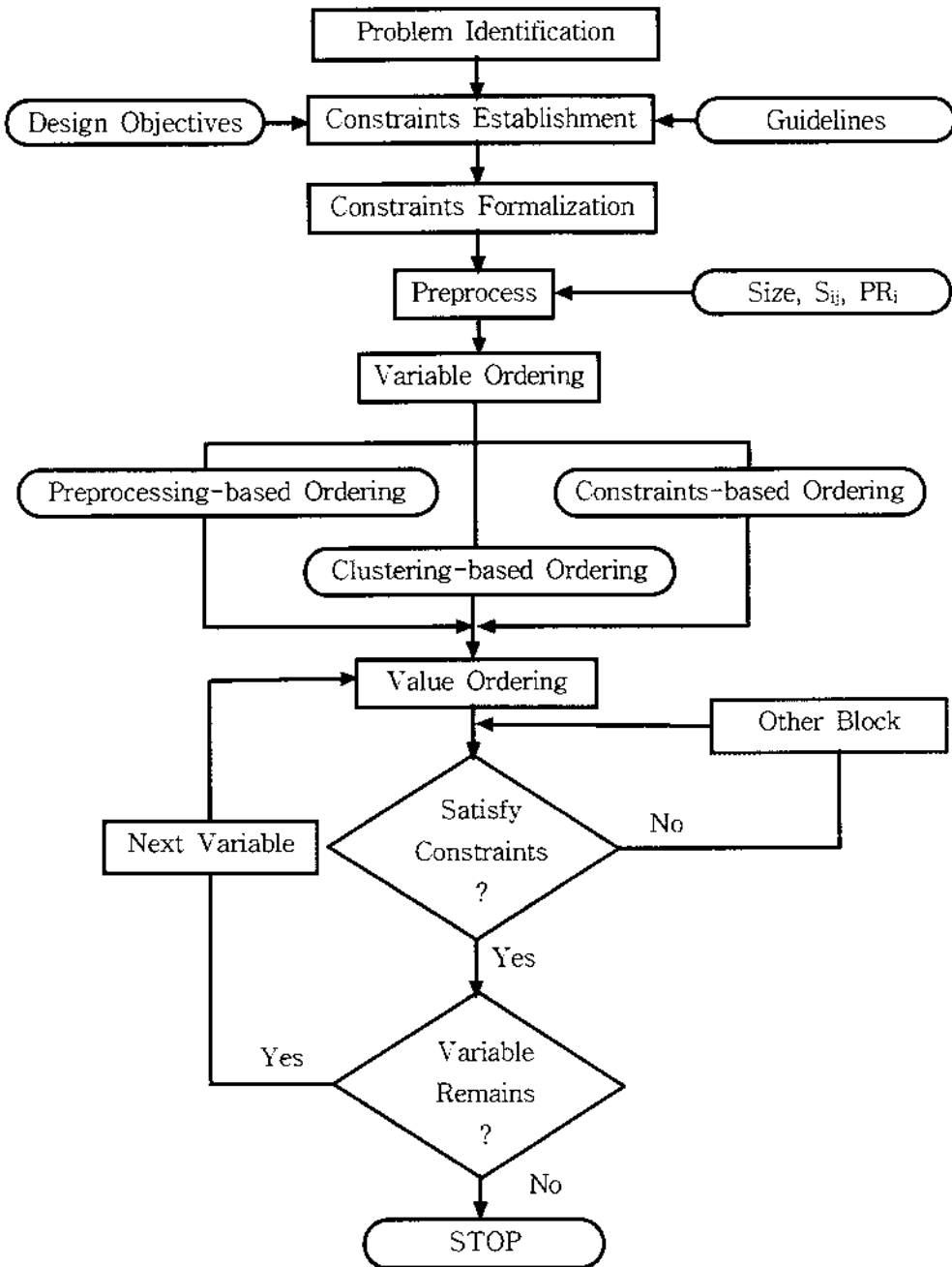


그림 2. 제약만족기법의 배치절차

하여 해를 도출하였다. CORELAP의 입력자료로서 요구되는 공정간의 관련성(Relationship)은 표 2에 정리하였다. 표 2에서 관련성 E, O, I, O, U, U의 의미는 1번 부서와

2, 3, 4, 5, 6, 7번 부서간의 관련성이 각각 E, O, I, O, U, U임을 나타낸다.

위의 예제를 본 연구에서 개발한 프로토타입 시스템인

CONSLAY에 적용하기 위하여 D_{ij} 변수와 I_{ij} 변수를 이용하여 공정간 관련성을 제약식으로 표현하였다. 두 공정간의 관련성이 "A"와 "E"인 경우 ' $D_{ij} = 0$ ', ' $I_{ij} = null$ '로 규정하여 밀접한 관련성을 반영하고자 하였으며, 관련성이 "I"인 경우는 ' $D_{ij} = 10$ '으로 하여 공정간의 연관관계를 반영하되, "A" 또는 "E"와는 차별성을 두도록 하였다. "O"와 "U"의 경우는 특별한 제약조건을 두지 않으므로서 배치의 우선순위가 떨어지도록 하였다. 예를 들어, 위의 예제에서 부서 2와 부서 4는 "E"의 관련성을 가지고 있으므로 두 부서간의 제약조건은 ' $D_{24} = 0$ ', ' $I_{24} = null$ '로 나타낼 수 있다.

표 2. 공정간 관련성 [21]

Department	Department Number	Relationships
Receiving	1	E, O, I, O, U, U
Milling	2	E, U, E, I, I, U
Press	3	O, U, U, U, O, U
Screw Machine	4	I, E, U, I, U, U
Assembly	5	O, I, U, I, A, I
Plating	6	U, I, O, U, A, E
Shipping	7	U, U, U, U, I, E

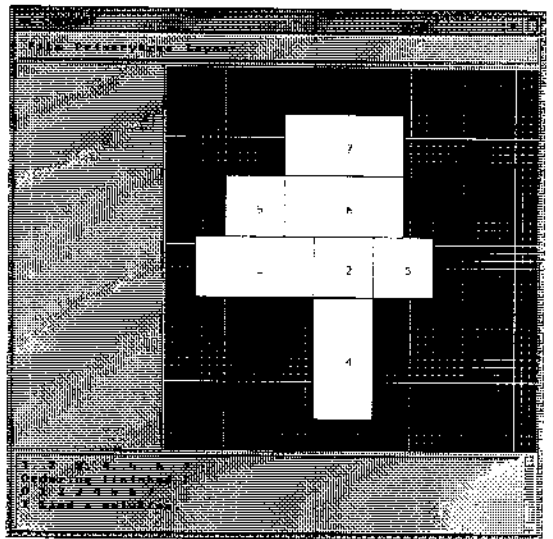
그림 3은 CORELAP에 의한 배치결과를 나타낸 것이며[21], 그림 4는 CONSLAY에 의하여 도출된 배치결과이다. 그림 3과 4(a)에서 볼 수 있듯이 두 배치 시스템에 의한 배치안은 비슷한 근접도(Closeness) 패턴을 나타내고 있다. 절대적 중요성인 "A" 관련성을 가지고 있는 부서 5와 부서 6은 두 배치안에서 모두 인접하게 배치되었으며, 관련성 "E"에 해당하는 부서 1-2, 2-4, 6-7 이 모두 다른 부서와의 간섭없이 연결되어 배치되어 있음을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 개발한 CONSLAY 시스템을 이용하여 부서간 또는 설비간의 관련성과 같은 정성적 배치조건을 잘 반영하는 배치안을 도출할 수 있음을 나타내는 것이라 하겠으며, 상용화된 프로그램인 CORELAP과 유사한 결과를 제공하는 것이라 하겠다.

CONSLAY 시스템의 특징 중의 하나는 시스템이 제공

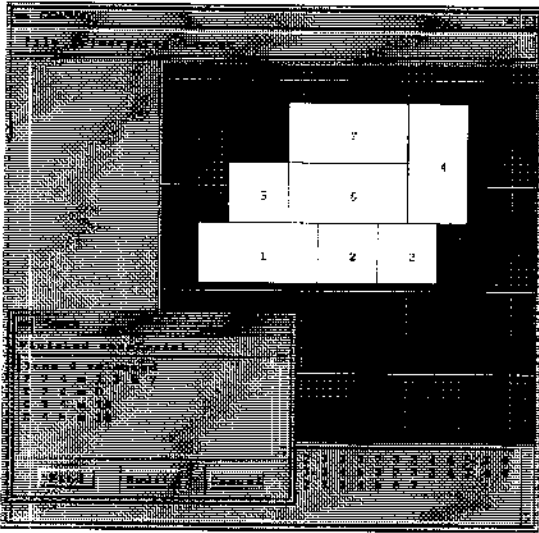
4	1	3
	2	6
	7	5

그림 3. CORELAP에 의한 배치결과 [21]

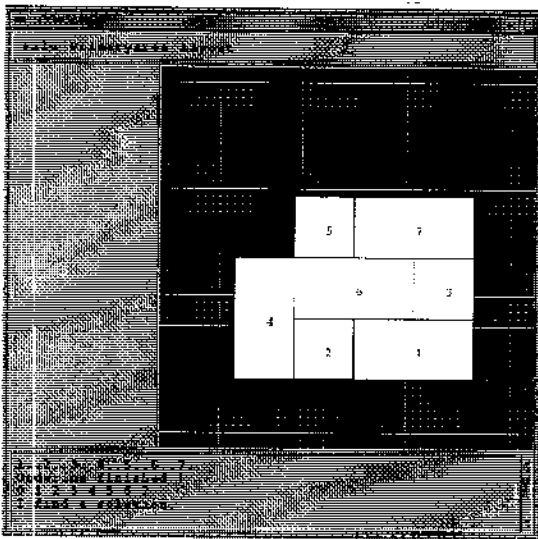
한 배치안을 설계자가 수정할 수 있도록 한 점이다. 일반적으로 배치문제에는 여러 가지 기준이 고려되며, 모든 사항을 배치 시스템의 초기 입력자료로 제시하기가 곤란하다. 더우기 배치안의 외형과 같은 미적요인등은 정량적으로 사전에 정의하기가 어려우므로 입력자료로 제시하기 보다 시스템이 제공한 초기해를 기초로 설계자의 의견을 반영하는 것이 더욱 효과적인 경우가 많다. 특히, 언급한 바와 같이 배치문제는 주관적 의사결정이 배치안 결정에 중요한 역할을 하는 특징을 가지고 있으므로 [14], 전산화된 시스템이라 할지라도 설계자로 하여금 자신의 의견을 쉽게 반영할 수 있는 기능을 제공하는 것이 중요하다[15]. 따라서, CONSLAY 시스템에서는 설계자에 의한 조정기능을 제공하였으며, 'Direct Manipulation' 개념을 채택하여 마우스 조작을 통하여 위치를 옮기고자 하는 대상을 선택한 뒤, 원하는 위치로 이동시킬 수 있도록 하였다.



(a) CONSLAY에 의한 초기 배치안



(b) 배치안 수정의 예 (제약식을 위반한 경우의 예)



(c) 설계자에 의하여 수정된 최종 배치안

그림 4. CONSLAY에 의한 배치결과

한편, 이와 같이 수작업에 의한 조정과정은 자칫 복잡한 제약조건을 충분히 검토하지 못하여 제약식을 위반하는 수정 배치안을 도출할 우려가 있으므로 본 시스템에서는 이동된 배치대상에 대하여 자동적으로 관련 제약식을 검토하여 제약조건 위반여부를 설계자에게 알려주도록 하였다. 그림 4(b)는 부서 4를 부서 2의 밑에서 부서

6의 옆으로 이동시키고자 설계자가 마우스 조작으로 수정한 결과이며, 이때 부서 4와 관련된 제약조건이 위반되었음을 시스템이 알려주는 예이다 (그림 4(b)의 좌측 하단의 메시지 박스 참조). 이와 같은 조정작업을 통하여 초기안(그림 4(a))의 불규칙한 배치결과를 수정한 최종 결과는 그림 4(c)와 같다.

CORELAP등과 같은 기존의 배치 시스템과 비교할 수 있는 CONSLAY의 또다른 특징은 특정 배치대상에 대하여 위치를 지정하여 고정시킬 수 있는 점이다. CORELAP의 경우 가장자리 경계선에 대해서만 위치를 고정시킬 수 있는 반면, CONSLAY의 경우 PR, 변수를 이용하여 임의의 장소를 지정할 수 있는 기능을 가지고 있다. 또한, S_i 변수를 이용하여 배치대상간의 순서, 방향성등을 지정할 수 있는 점도 다른 배치 시스템과 구별되는 특징이라 할 수 있다. 이와 같이 설계자의 의견 또는 배치 환경의 특징을 배치 시스템을 통하여 충분히 반영할 수 있는 여지를 제공하므로써 실제 배치문제에 대한 CONSLAY 시스템의 효용성을 향상시켰다.

5.2. 예제 2: 조종패널 배치문제 (Control Panel Layout Problem)

CONSLAY 개발의 또 다른 목적은 일반적인 설비배치 문제 이외의 배치문제에도 적용할 수 있는 범용 배치 시스템을 개발하는 것이다. 원자력발전소의 제어실, 비행기 조종석과 같이 많은 수의 계기와 조종장치들을 이용하여 작업을 수행할 경우, 정보를 정확히 입력받을 수 있고 조종하기 편리하도록 조종패널(Control Panel)을 배치하는 것은 작업효율 및 안전사고의 예방을 위하여 매우 중요한 과제이다. 이러한 조종패널 배치문제는 좁은 공간에 많은 수의 기기들을 배치하여야 하고, 각종 사용편의성 설계기준을 만족하여야 하는 매우 복잡한 배치문제중의 하나이다.

일반적인 설비배치문제가 설비와 설비간의 관계에 따라 배치를 실시함에 반하여 조종패널 배치문제는 기기와 사용자간의 관련성에 따라 배치를 수행하는 특징을 가지고 있다. 이러한 이유로 "중요성의 원리 (Principle of Importance)", "사용빈도의 원리 (Principle of Frequency)", "사용순서의 원리 (Principle of Sequence-of-Use)", "기능별 그룹핑의 원리 (Principle of Functional Grouping)", 그

리고 “양립성의 원리 (Principle of Compatability)” 등과 같은 사용편의성 배치기준을 준수할 것이 권장되고 있다. 본 연구에서는 이러한 지침들을 제약식화하여 CONSLAY를 이용하여 조종패널 배치안을 도출해 보고자 하였다.

17개의 계기장치와 16개의 조종장치로 이루어진 총 33개의 기기들로 구성된 조종패널에 대한 배치를 시도하였다. 4개의 CRT Screen (A, B, C, D)과 2개의 원형 Analog 계기판 (E, F), 4개의 선형 Analog 계기판 (G, H, I, J), 4개의 Digital 계기판 (K, L, M, N), 그리고 1개의 비상경고등 (O) 및 2개의 상태표시기 (P, Q) 등으로 계기장치가 구성되며, 조종장치는 Dial 1개 (1), Toggle 스위치 2개 (2, 3), Hand Wheel 2개 (4, 5), 조종 레버 4개 (6, 7, 8, 9), Knob Control 4개 (10, 11, 12, 13), 그리고 비상스위치 1개 (14)와 선택버튼 2개 (15, 16)로 이루어져 있다.

크기가 제한된 조종패널위에 33개의 기기들이 원활한 조작을 위한 적정 여유공간 (Clearance)을 유지하면서 모두 배치되어야 한다는 기본 조건외에 위에서 언급한 5개의 배치기준들을 사용성 향상을 위하여 적용하였다. 공정과의 관련성에 따른 기기들의 배치조건은 다음과 같다. 계기 A-B, K-L-M-N, P-Q, 그리고 조종장치 10-11-12-13, 15-16은 각각 유사한 기능을 수행하기 위한 기기들이므로 기능별 그룹핑 원칙에 따라 서로 인접하여 배치되어

야 하며, 계기 G→H→I→J와 조종장치 6→7→8→9는 작업의 순서에 따라 연결되어 배치되어야 한다. 이와 함께, 계기 A, C, D, P, Q와 조종장치 1, 2, 3, 6, 15, 16은 사용빈도가 높기 때문에, 그리고 계기 A, B, E, F, O와 조종장치 1, 4, 5, 14는 작업의 중요성으로 인하여 기기들은 주시계영역(Primary Visual Area)에, 조종장치들은 편의 작업영역(Comfortable Working Area)에 배치되어야 한다. 또한, 조종장치와 계기간의 연관성으로 인하여 1-A, 2-C, 3-D, 4-E, 5-F, 6-G, 7-H, 8-I, 9-J, 10-K, 11-L, 12-M, 13-N, 15-P, 16-Q는 조종장치의 위에 해당되는 기기들이 배치되도록 권장되었다(공간적 양립성의 원칙). 이와 같은 배치조건은 S_p, I_p, D_p, PV, CW 변수들을 이용하여 제약식으로 전환되었으며, 표 3에 관련 제약조건을 정리하였다.

CONSLAY에 의한 배치결과는 그림 5와 같다. 그림 5에 제시된 배치결과는 5.1 절에서 설명한 “User Modification”기능에 의하여 시스템이 도출한 초기안을 조정하여 기기들을 정렬시킨 결과이다. 이와 같은 조정기능을 통하여 실제 설계에 사용할 배치안을 추가 작업없이 얻을 수 있으며, 작업자의 사용성 향상도 기대할 수 있다. 컴퓨터 시스템에 의하여 그림 5와 같은 결과를 얻기 위해서는 기기의 정렬과 관련하여 더욱 많은 제약조건을 입력시켜야하고 탐색작업도 훨씬 많은 시간이 소요되므로

표 3. 사용편의성 배치기준의 제약식화

사용편의성 배치기준	변수	제약식
기능별 그룹핑 원리	S_i	$S_{AB}, S_{PQ}, S_{1516} = \{1, 3, 5, 7\}$ $S_{KL}, S_{MN}, S_{1011}, S_{1213} = \{3\}, S_{KM}, S_{1012} = \{5\}$
	D_i	$D_{AB}, D_{KL}, D_{KM}, D_{MN}, D_{PQ}, D_{1011}, D_{1012}, D_{1213}, D_{1516} = 2$
	I_j	$I_{AB}, I_{KL}, I_{KM}, I_{MN}, I_{PQ}, I_{1011}, I_{1012}, I_{1213}, I_{1516} = null$
사용순서의 원리	S_j	$S_{GH}, S_{HI}, S_U, S_{67}, S_{78}, S_{89} = \{7\}$
	D_k	$D_{GH}, D_{HI}, D_U, D_{67}, D_{78}, D_{89} = 2$
	I_l	$I_{GH}, I_{HI}, I_U, I_{67}, I_{78}, I_{89} = null$
공간적 양립성의 원리	S_k	$S_{1A}, S_{2C}, S_{3D}, S_{4E}, S_{5F}, S_{6G}, S_{7H}, S_{8I}, S_{9J}, S_{10K}, S_{11L}, S_{12M}, S_{13N}, S_{15P}, S_{16Q} = \{1\}$
사용빈도의 원리 중요성의 원리	PV	$PV = \{A, C, D, E, F, O, P, Q\}$
	CW	$CW = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 16\}$

현실적인 효율성이 떨어진다고 할 수 있다. 설계자가 기기들을 정렬하면서 자신의 경험, 주어진 배치문제의 고유 특성 등을 반영할 수 있으므로 보다 적합성이 향상된 배치안을 기대할 수 있다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 계기 A, B, C, D, E, F, O, P와 조종장치 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15는 사용빈도와 중요성의 원칙에 따라 각각 주시계영역(그림 5 중앙의 원 부분)과 편의 작업영역(그림 5 하단의 반원 부분)에 배치되어 있음을 알 수 있다. 주시계영역과 편의 작업영역은 PV와 CW 변수의 영역을 사전에 시스템에 정의하므로써 반영할 수 있으며, 크기 조정이 가능하다. 계기 G, H, I, J와 조종장치 6, 7, 8, 9는 사용순서에 따라 왼쪽에서 오른쪽으로 일렬로 배치되도록 함으로써 원활한 판독 및 조작이 이루어 질 수 있도록 하였으며, 계기 (A, B), (K, L, M, N), (P, Q) 및 조종장치 (10, 11, 12, 13)과 (15, 16)은 기능별 그룹핑의 원칙에 따라 서로 인접하게 배치되었다. 또한, 공간적 양립성 원칙에 따라 계기들이 판독되는 조종장치의 상단에 배치되어 조종장치 조작에 따른 상태변화를 인식하기 쉽도록 하였다. 이와 같은 결과는 각종 사용편의성 배치기준이 CONSLAY 시스템에 의하여 효과적으로 반영될 수 있음을 의미한다고 하겠다. 33개의 기기 배치에 소요된 시간은 SG Indigo2 시스템에서

'Preprocess'와 'Variable, Value Ordering'시간을 포함하여 5분이 초과되지 않으므로 실제 산업현장에서의 배치 문제에 적용하는데 문제가 없을 것으로 기대된다.

6. 논의 및 결론

CONSLAY는 설비배치, 조종패널 배치 등과 같은 여러 범주의 배치문제에 적용하기 위하여 개발된 일반 범용 배치시스템이다. 과거에 비행기 조종석의 계기판(Cockpit) 설계에 설비배치 프로그램인 CRAFT가 사용된 예가 있으나 [2], CRAFT는 물류흐름에 따른 배치를 목적으로 개발된 프로그램으로서 조종사의 임무 수행도 향상을 위한 비행기 계기판 설계에는 적합하지 않다고 여겨진다. 이는 CRAFT가 설비와 설비간의 물류흐름이라는 정량적 배치기준에 따라 배치를 시도함에 반하여, 비행기 계기판 설계에는 CRAFT를 통하여 적용 가능한 사용빈도 기준 이외에도 조종사의 계기판 판독능력을 높이기 위하여 여러 가지 사용편의성에 관한 설계지침이 요구되며, 이와 같은 설계지침은 대부분 정성적 특성을 가지고 있기 때문이다. 서론에서 밝힌 바와 같이 정성적 설계지침들은 배치안이 만족하여야 할 제약조건으로 인식할 수 있으므로 정량적 목적함수에 의한 최적화 기법보다 제약만족기법에 의한 배치안 도출이 더욱 적합할 수 있다. 앞의 두 예제를 통하여 문제의 특성에 맞추어 적합하게 설정된 제약조건에 따른 배치방법은 설비배치 문제와 조종패널 배치문제에 모두 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

일반적으로 정성적 배치문제에 적합한 배치 시스템으로는 CORELAP이 많이 응용되고 있다 [1, 21]. 본 연구를 통하여 개발된 CONSLAY 역시 정성적 배치문제에 적합한 시스템이라 할 수 있으므로, CORELAP과의 비교를 통하여 장단점을 분석해 보았다. 첫째, CORELAP은 제공되는 근접도 평가치 (Closeness Rating)에 의하여 배치안을 도출하나, 이는 두 설비간의 관계만을 고려할 뿐, 여러 설비간의 관계를 동시에 반영하기가 곤란하다. 예를 들어, "설비 A, B, C사이에는 다른 설비가 위치해서는 안 된다" 또는 "세 설비가 일렬로 배치되어야 한다" 등의 조건을 배치안에 반영하기가 곤란하다. CONSLAY의 경우는 I, S_i 변수를 통하여 여러 설비간의 관계를 효과적

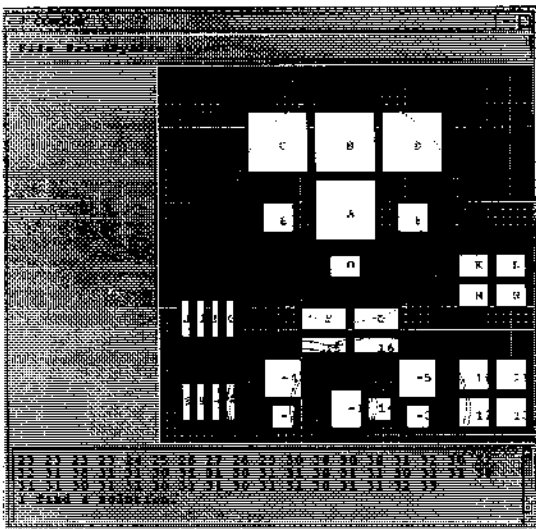


그림 5. CONSLAY에 의한 조종패널 배치결과

으로 반영할 수 있다. 둘째, CORELAP은 배치안을 도출해 나감에 있어 배치가 결정된 대상의 위치 수정없이 배치를 시도함(One-pass Heuristic Method)에 반하여, CONSLAY는 기존에 배치된 설비의 위치 변경(Backtracking)도 허용하면서 배치를 해나감으로서 배치안의 적합성 향상을 더욱 기할 수 있다고 여겨진다. 셋째, CORELAP은 배치영역의 가장자리에 대해서만 고정 설비의 배치를 고려할 수 있으나, 이는 배치문제에의 적용시 현실성을 감소시키는 요인이라고 할 수 있다. CONSLAY의 경우 PR, 변수를 통하여 설계자가 임의의 위치를 특정 설비를 위한 영역으로 정의할 수 있게 하므로서 이러한 문제를 극복할 수 있도록 하였다. 끝으로, CORELAP은 배치안이 정렬되지 못한 형태 (Irregular Shaped Output)로 제시되므로 실제 적용을 위해서는 추가 작업이 필수적이며 [1], 이러한 추가작업 과정에서 시스템이 제시한 배치안의 적합성이 상실될 우려가 있다. 그러나 CONSLAY의 경우, 설계자가 시스템상에서 직접 배치안을 수정할 수 있고, 조정작업중의 제약식 위배여부를 평가받으므로 배치안의 적합성 손실 없이 최종 배치안을 도출할 수 있다. 이와 같은 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 CONSLAY가 기존의 상용 프로그램인 CORELAP보다 우월한 배치결과를 도출해 낼 수 있다고 여겨지며, 최소한 CORELAP 수준의 배치안은 도출해 낼 수 있다고 판단된다. 더우기, CONSLAY는 설비배치 문제 뿐만아니라 조종패널 배치문제에도 효과적으로 적용될 수 있으며, 이는 다른 설비배치 프로그램들과 차별화될 수 있는 강점이라고 할 수 있다.

본 연구에서 제안한 제약식 표현방법의 높은 유연성 (Flexibility)은 CONSLAY 시스템을 여러 범주의 배치문제에 적용할 수 있도록 하였으며, 특히 사용편의성 설계 지침을 배치안에 반영하는데 매우 효과적이었다. 또한, 대부분의 시스템이 '설비간 거리의 가중치 합에 대한 최소화'와 같은 단일 목적함수에 기초하여 배치안을 도출하는데 반하여 복수의 배치기준을 배치안 도출 과정에서 고려할 수 있도록 하므로서 주어진 문제의 고유 특성에 보다 적합한 배치안을 도출할 수 있도록 하였다. 제약만족기법의 효율적인 탐색기법을 응용한 본 배치 시스템을 통하여 보다 만족스러운 배치안을 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Apple, J.M., *Plant layout and Material Handling*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.
- [2] Bartlett, M.W. and Smith, L.A., "Design of Control and Display Panels Using Computer algorithm", *Human Factors*, Vol. 15, pp. 1-7, 1973.
- [3] Baykan, C.A. and Fox, M.S., "Constraint Satisfaction Techniques for Spatial Planning", In *Intelligent CAD System III. Practical Experience and Evaluation* (Ed. ten Hagen, P.J.W. and Veerkamp, P.J.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 187-204, 1991.
- [4] Bonney, M.C. and Williams, R.W., "CAPABLE. A Computer Program to Layout Controls and Panels", *Ergonomics*, Vol. 20, pp. 297-316, 1977.
- [5] Dechter, R. and Pearl, J., "Network-Based Heuristics for Constraint-Satisfaction Problems", *Artificial Intelligence*, Vol. 34, pp. 1-38, 1988.
- [6] Eastman, C.M., "Automated Space Planning", *Artificial Intelligence*, Vol. 4, pp. 41-64, 1973.
- [7] Fortenberry, J.C. and Mitra, A., "A Multiple Criteria Approach to the Location-Allocation Problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 10, pp. 77-87, 1986.
- [8] Fox, M.S., "Constraint Directed Search: A Case Study of Job-Shop Scheduling", *Unpublished Ph. Dissertation*, Carnegie Mellon University, Pittsburg, PA, 1983.
- [9] Haralick, R.M. and Elliot, G.L., "Increasing Tree Search Efficiency for Constraint Satisfaction Problems", *Artificial Intelligence*, Vol. 14, pp. 263-313, 1980.
- [10] Hendy, K.C., "A Model for Human-Machine-Human Interaction in Workspace Layout Problems", *Human Factors*, Vol. 31, pp. 593-610, 1989.
- [11] Houshyar, A., "Computer Aided Facility Layout: An Interactive Multi-goal Approach", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 20, pp.177-186, 1991.
- [12] Jung, E.S., Park, S. and Chang, S.Y., "A CSP Technique-Based Interactive Control Panel Layout", *Ergonomics*, Vol. 38, pp. 1884-1893, 1995.

- [13] Kumar, V., "Algorithms for Constraint-Satisfaction Problems: A Survey", *AI Magazine*, Spring, pp. 32-44, 1992.
- [14] Kumara, S.R.T., Kashyap, R.L. and Moodie, C.L., "Expert System for Industrial Facilities Layout Planning and Analysis", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 12, pp. 143-152, 1987.
- [15] Masud, A.S.M. and Sathya. V. "A CAD-based Layout Planning Procedure", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 23, pp.385-388, 1992.
- [16] Rabideau, G.F. and Luk, R.H., "A Monte Carlo Algorithm for Workplace Optimization and Layout Planning-WOLAP", *In Proceedings of Human Factors Society 19th Annual Meeting*, Human Factors Society, Dallas, pp. 187-192, 1975.
- [17] Rosenblatt, M.J., "The Facilities Layout Problem: Multi-Goal Approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 17, pp. 323-332, 1979.
- [18] Rosenfeld, A., Hummel, R and Zucker, S., "Scene Labeling by Relaxation Operations", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-6, pp. 420-433, 1976.
- [19] Sanders, M.S. and McCormick, E.J., *Human Factors in Engineering and Design*. McGraw-Hill, Inc., New York, 1987.
- [20] Siegel, A.I., Wolf, J.J. and Pilitsis, J., "A New Method for the Scientific Layout of Workspaces", *Applied Ergonomics*, Vol. 13, pp. 87-90, 1982.
- [21] Tompkins, J.A. and White, J.A., *Facilities Planning*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984.

98년 5월 최초 접수, 98년 9월 최종 수정