

이종병렬기계로 구성된 변압기 권선공정의 생산일정계획

박창권* · 장길상** · 이동현***

* 울산대학교 산업정보경영공학부

** 울산대학교 경영학부

*** SAS Korea

A Heuristic Scheduling Algorithm for Transformer Winding Process with Non-identical Parallel Machines

Chang-Kwon Park* · Gil-Sang Jang** · Dong-Hyun Lee***

* School of Industrial Engineering, University of Ulsan

** Dept. of MIS, College of Business Administration, University of Ulsan

*** SAS Korea

This paper proposes a heuristic scheduling algorithm to satisfy the customer's due date in the production process under make to order environment. The goal is to achieve the machine scheduling in the transformer winding process, in which consists of parallel machines with different machine performances.

The winding is important production process in the transformer manufacturing company. The efficiency of the winding machines is different according to the voltage capacity and the winding type. This paper introduces a heuristic approach in the transformer winding process where the objective function is to minimize the total tardiness of jobs over due dates. The numerical experiment is illustrated to evaluate the performance.

Keywords : Heuristic, Scheduling, Parallel Machines, Transformer Winding Process

1. 서론

현대 기업들은 제품에 대한 고객들의 다양한 요구와 주문시기의 불규칙성 등을 수용해야 하는 많은 어려움에 처해 있다. 고객의 요구에 신속하게 대응하기 위하여 기업의 생산 형태도 많은 변화를 보이고 있다. 이러한 제조환경의 변화는 주문생산의 특성을 따르는 기업에서 더욱 절실히 느끼고 있다. 고객만족을 최고의 경영목표로 두고, 수요자의 요구사항에 대처하기 위하여 생산할 품목에 대한 신속한 생산계획 수립이 절실히 요구된다. 고객이 요구하는 납기를 지키지 못하면 계약에 따른 직접적인 손실과 함께 고객의 불만을 초래하게 되며, 장기적으로는 시장을 잃어버려 해당 기업에 막대한 손실을

발생시킨다. 따라서 고객의 요구와 작업장의 특성을 고려한 신속한 생산일정계획의 수립이 필요하다.

본 논문은 주문생산의 특성을 따르는 산업용 변압기 생산공정에서 고객이 요구하는 납기를 만족시키기 위한 생산일정계획 수립을 다룬다. 대상공정은 변압기 생산 공정 중에서 애로(Bottleneck)공정으로 관리되고 있는 권선공정으로 한다. 변압기 권선공정은 장비의 효율이 서로 상이한 병렬기계로 구성된 작업장에서 수행된다. 이와 같이 주문방식의 특성과 병렬기계 작업환경을 갖는 산업용 변압기의 권선공정을 대상으로 고객이 요구한 납기에 대한 작업 지연시간의 합을 최소화하는 생산일정계획을 수립하는 알고리즘을 제시하고자 한다.

2. 변압기 권선공정의 개요

2.1 변압기 권선공정의 특성

본 논문은 산업용 변압기 생산공정의 주요공정에 해당하는 권선공정의 생산일정계획을 수립하는 알고리즘을 다루고 있다. 산업용 변압기는 수주에 의하여 고객이 요구하는 제품의 사양이 결정되는 주문생산 방식의 특성을 따른다. <그림 1>은 산업용 변압기 생산공정의 전

반적인 생산흐름을 표현하고 있다. 고객과의 수주가 계약으로 성립되면 수주의 세부내용에 따라 생산공정에 대한 설계와 자재준비 등 일련의 공정들이 우선순위에 따라 이루어지는 전형적인 주문생산 방식을 따르고 있다. 생산공정의 순서에 따라 공정별 우선순위가 정해지게 되므로 선행공정에서의 작업지연이 후속공정에 연속적으로 영향을 미치게 되므로 공정별 목표납기의 준수가 엄격히 요구된다.



<그림 1> 변압기 생산공정 개요

권선공정은 전압의 변동을 이용하여 필요한 전압을 인출하기 위하여 전기절연 재료로 피복되어 있는 코일을 감는 작업으로 변압기 생산공정에서 건조공정과 함께 예로공정으로 관리되고 있다. 하나의 산업용 변압기에는 여러 개의 권선이 필요하며, 변압기의 용량에 따라 권선의 무게는 1.5톤~6톤이고 권선의 직경은 1.2미터~2.8미터가 된다. 또한 권선공정은 변압기 생산공정의 전반부 공정에 해당되고, 공정소요기간이 전체공정의 40% 이상을 차지하는 주요공정이다. 따라서, 권선공정에 대한 효율적인 운영 및 통제가 변압기 생산공정에서 중요한 문제로 대두된다. 변압기의 용량, 전압, 용도 등에 따라 사용되는 권선의 구조형태 및 형상종류가 결정된다. 일반적으로 산업용 변압기에 사용되는 권선의 구조형태는 다섯 가지(High Voltage, Low Voltage, TAP, Teaser Voltage, Reactor)로 분류되며, 권선의 형상종류는 일곱

가지(Layer, Interleaved, Helical, Disc, Fine, Pozalisky, Coares+Fine)로 분류된다.

<그림 2>는 수주정보와 필요한 권선공정의 세부작업 예를 나타내고 있다. 단상 3권선 수주에는 3가지 권선의 구조형태별로 각각 한 단위씩의 권선작업이 필요하며, 3상 3권선 수주에는 3가지 권선의 구조형태별로 각각 3단위씩 모두 9단위의 권선작업이 필요함을 의미한다. 따라서 하나의 수주에는 여러 단위의 권선작업이 요구되어 진다. 하나의 수주에 필요한 여러 단위의 권선작업들은 서로 간에 우선순위의 제약은 없으며, 마지막으로 권선작업이 완료되어야 다음 생산공정인 중신조립공정으로 인계되어 된다. 따라서 동일수주에 대한 여러 개의 권선작업은 동일한 납기를 갖는 작업으로 다루어지며, 권선공정의 완료시간은 마지막 권선작업이 끝나는 시점이 된다.

위상차에 대한분류	단상 3권선	3상 3권선
권선공정 작업	HV 1각 Winding LV 1각 Winding TV 1각 Winding	-HV 1각 Winding -LV 1각 Winding -TV 1각 Winding -HV 2각 Winding -LV 2각 Winding -TV 2각 Winding -HV 3각 Winding -LV 3각 Winding -TV 3각 Winding
단위작업 갯수	3	9

<그림 2> 변압기 수주에 대한 권선공정의 세부작업(예)

이러한 작업 특성을 갖는 권선공정을 대상으로 납기 지연 시간을 최소화하는 생산일정계획 수립이 필요하다. 다음 절에서는 변압기 권선공정 작업환경의 특성과 유사한 기존 연구들을 조사하여 생산일정계획 수립에 필요한 내용을 파악하고자 한다.

2.2 병렬기계 작업장의 생산일정계획

본 논문에서 다루는 변압기 권선공정의 일정계획은 납기 지연을 최소화하는 병렬기계 작업장의 문제로 분류된다. 병렬기계 작업장의 일정계획에 대한 기존의 연구들은 목적함수에 따라 작업의 총 처리시간(Makespan)을 최소화하는 문제, 납기를 지연 작업의 수를 최소화하는 문제, 납기에 대한 조기달성 및 납기지연(Earliness/Tardiness)을 최소화하는 문제 등으로 분류된다.

Karp[8]는 두 개의 동일한 병렬기계에서 작업의 총 처리시간을 최소화시키기 위한 일정계획 문제가 NP-hard임을 보이고 있다. Hariri and Potts[5]는 기계의 능력이 서로 다른 병렬기계에서 총 처리시간을 최소화시키는 2단계(Two-phase) 알고리즘을 제안하였다. 이들은 첫 번째 단계에서 선형계획법으로 기계에 작업을 할당하고, 두 번째 단계에서 작업순서를 결정하는 발견적 해법을 제안하였다. 작업의 총 처리시간을 최소화시키는 병렬기계 일정계획 문제에 대해서는 계속해서 많은 연구들이 수행되고 있다[6, 11].

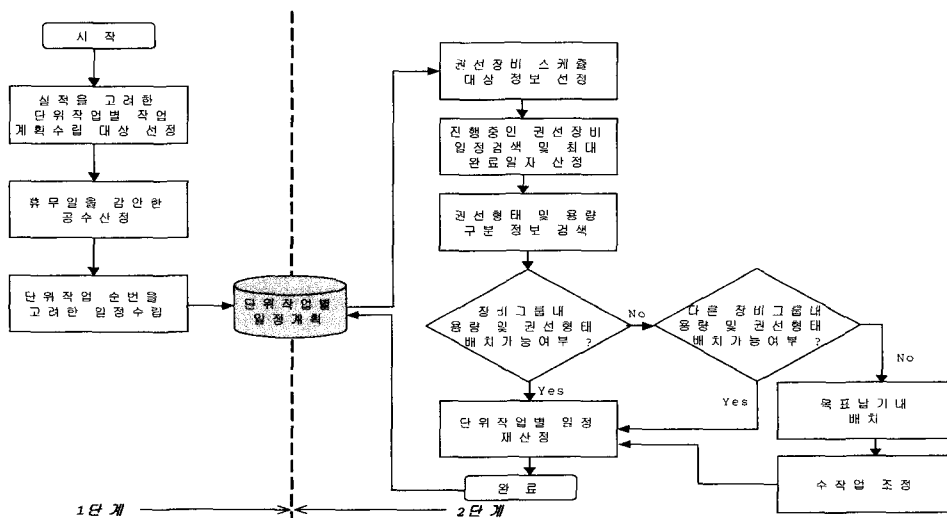
Kise et. al.[9]는 작업가용 시간의 제약이 있는 병렬기계에서 납기지연 작업의 수를 최소화하는 문제가 NP-complete임을 보였다. Dorit and Dan[3]은 배치 준비시간(batch setup time)이 있을 때 작업지연의 작업 수를 최소화 문제에 대한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다.

납기지연 시간을 최소화하는 일정계획 문제는 Wilkerson and Irwin[10]이 단일기계에서 EDD(Earliest Due-Date) 규칙을 확장하는 알고리즘을 제시하였으며, 이를 바탕으로 동일한 병렬기계 작업장에 대한 연구가 계속되어 왔다[2, 4]. 본 논문의 대상공정인 변압기 권선공정은 장비의 효율이 다른 병렬기계 작업장에 해당되며 수주에 대한 납기지연 시간을 최소화하는 문제이다. 변압기의 용량 및 용도에 따라 정해지는 권선의 구조형태 및 형상 종류에 따라 권선작업이 가능한 기계그룹이 있으며 동일한 구조형태와 형상종류를 갖는 권선작업을 동일한 기계에서 처리할 경우에는 준비시간을 절약할 수 있는 배치 준비시간의 특성이 추가적으로 고려된다.

3. 변압기 권선공정의 생산일정계획

3.1 권선공정의 일정계획 알고리즘

일반적으로 병렬기계 문제의 일정계획 수립은 두 가지 의사결정 과정을 수행하는 것이다. 첫 번째 의사결정은 작업들을 어느 기계에서 처리해야 하는 가를 결정하는 할당(allocation)이다. 두 번째 의사결정은 각 기계에 할당된 작업의 순서와 시점(sequencing and timing)을 결정하는 것이다. 변압기 권선공정의 일정계획 수립에 대해서도 2단계 방식으로 접근하고자 한다. 우선 수주정보를 바탕으로 권선공정에서 처리해야 할 단위 권선작업에 대한 기본 계획을 수립하고, 단위 공정별 요구납기와 개별 장비의 부하를 고려하여 세부 작업순서를 결정하고자 한다. <그림 3>은 권선공정의 일정계획을 수립하는 알고리즘의 기본적인 흐름을 표현하고 있다.



<그림 3> 권선공정 일정계획의 기본 흐름

첫 번째 단계는 개별 수주정보와 변압기 생산공정의 기본정보를 바탕으로 단위권선작업에 대한 세부내용을 열거한다. 수주정보와 후속공정에 대한 정보를 기준으로 단위작업별 공정소요시간과 목표납기가 구해진다. 그리고, 선행공정들의 소요시간을 고려하면 단위작업별 권선공정의 가능시점이 구해진다. 이들 정보를 바탕으로 단위공정별 기준 일정계획을 수립할 수 있다. 이 단계에서는 장비할당 최우선 순위에 배치된 일정계획이 얻어진다. <그림 4>는 장비의 효율이 다른 병렬기계 작업장의 단위작업별 처리 가능한 장비그룹의 정보를 표현하고 있는 예이다. 변압기의 용량 및 전압에 따라 권선작

업을 다섯 등급(a ~ e)으로 구분하고, 이 등급에 따라 34대의 권선장비가 작업가능 그룹으로 구분된다. 권선의 형상종류는 1에서 7까지의 번호로 구분하고 있다. 권선장비 구분항목의 세로축에는 장비번호가 있고 가로축에는 권선의 형상종류의 우선순위 및 작업가능 등급이 표시되어 있다. 예를 들어 장비번호 6번은 장비의 효율 측면에서 권선 형상4인 Disc작업의 우선순위가 가장 높고 다음으로 5번인 Fine작업을 하는 것이 우선한다. 변압기의 용량 및 전압 기준으로는 용량이 50 ~ 500MVA 이하의 작업이 가능하고 이를 초과하는 작업은 불가능함을 나타내고 있다.

권선 MACHINE별 형태 및 용량구분												
* 권선 방법												
1. LAYER												
2. INTERLEAVED												
3. HELICAL												
4. DISC												
5. FINE												
6. POZALISKY												
7. COARSE+FINE												
* 권선 용량, 전압 구분												
NO	a	b	c	d	e	비고						
용량 (MVA)	50 이하	50초과 ~ 120이하	120초과 ~ 240이하	240초과 ~ 500이하	500 초과	* 용량이 1φ 인 경우 (용량 × 3) 적용						
** MACHINE별 구분												
작업반 구분	장비 번호	권선 방법							용량 및 전압			
		순위 1	순위 2	순위 3	순위 4	순위 5	순위 6	순위 7				
9A3	5	3	1	4	2	5	6	7	a	b		
	15	4	5	6	7	1	3	2	a	b		
	16	4	5	6	7	1	3	2	a	b		
	17	1	3	4	5	6	7	2	a	b		
	18	2	1	3	4	5	6	7	a	b		
B10	1	7	5	4	6	1	2	3	b	c	a	
	2	5	7	6	4	1	2	3	b	c	a	
	3	2	1	3	4	6	5	7	b	c	a	
	4	1	2	3	4	6	5	7	b	c	a	
	7	4	1	5	7	6	3	2	b	c	a	d
B20	8	4	1	6	7	5	3	2	b	c	a	d
	10	3	1	2	4	6	5	7	b	c	a	
	11	4	5	7	6	1	3	2	b	c	a	d
	12	4	5	7	6	1	3	2	b	c	a	d
	13	4	5	7	6	1	3	2	b	c	a	d
B30	9	5	7	6	1	2	4	3	c	b	d	a
	14	4	3	5	7	6	1	2	c	b	d	a
	19	2	1	3	6	5	7	4	c	b	d	a
	20	4	5	6	7	3	1	2	c	b	d	a
	21	4	6	5	7	3	1	2	c	b	d	a
B40	22	4	3	5	6	7	1	2	c	b	d	a
	23	5	6	7	4	1	2	3	d	e	c	b
	30	4	5	6	7	1	3	2	d	e	c	b
	31	4	3	1	2	5	6	7	d	e	c	b
	32	4	1	3	5	6	7	2	d	e	c	b
B40	33	4	1	3	5	6	7	2	d	e	c	b
	34	3	1	2	4	5	6	7	d	e	c	b
	24	4	5	6	1	3	2	7	e	d	c	b
	25	4	3	1	2	5	6	7	e	d	c	b
	26	4	1	3	5	6	7	2	e	d	c	b
B40	27	4	1	3	5	6	7	2	e	d	c	b
	28	4	5	6	1	3	2	7	e	d	c	b
	29	5	6	7	2	1	3	4	e	d	c	b

<그림 4> 권선장비 할당규칙(예)

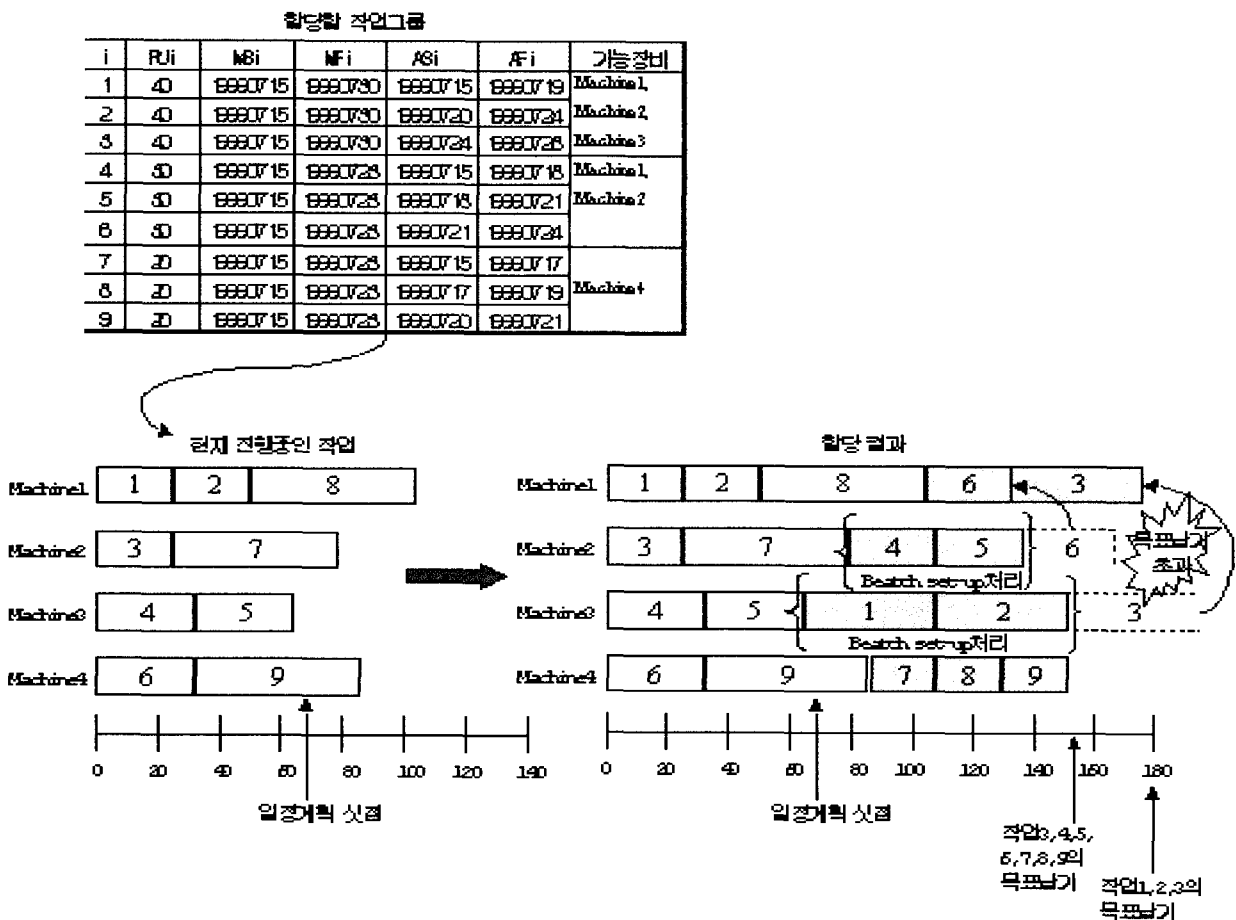
두 번째 단계는 단위 권선작업의 요구납기와 권선장비별 부하를 고려하여 실행 가능한 일정계획을 수립한다. 이 단계에서는 동일한 권선작업에 해당되는 작업이 다른 기기에 나누어져 처리되기도 하며, 이 경우에는 해당 장비에 필요한 준비시간이 추가로 소요된다. <그림 5>은 두 번째 단계에서 일정계획을 조정한 결과의 예를 보여주고 있다. 단계 1에서 단위작업별 기준 일정계획이 수립되면 이미 진행중인 장비의 일정을 고려하여 할당할 작업에 대한 장비를 배정하는 예제이다. 할당결과에서 배치 준비시간의 효과를 반영하여 동일한 권선작업의 경우 연속할당하여 준비시간을 줄여주는 일정계획이 되도록 하며, 연속할당에 따라 목표납기를 초과하는 작업은 다른 가능장비로 이동하여 할당되도록 한다. 이후에 교환가능한 작업들에 대해 서로 교환하는 과정을 거쳐 권선공정의 납기지연의 작업을 최소화하는 목적을 달성하도록 한다.

여기서 변압기 권선공정의 일정계획 수립을 위한 2단계 알고리즘의 설명에 필요한 기호를 정의하면, 다음

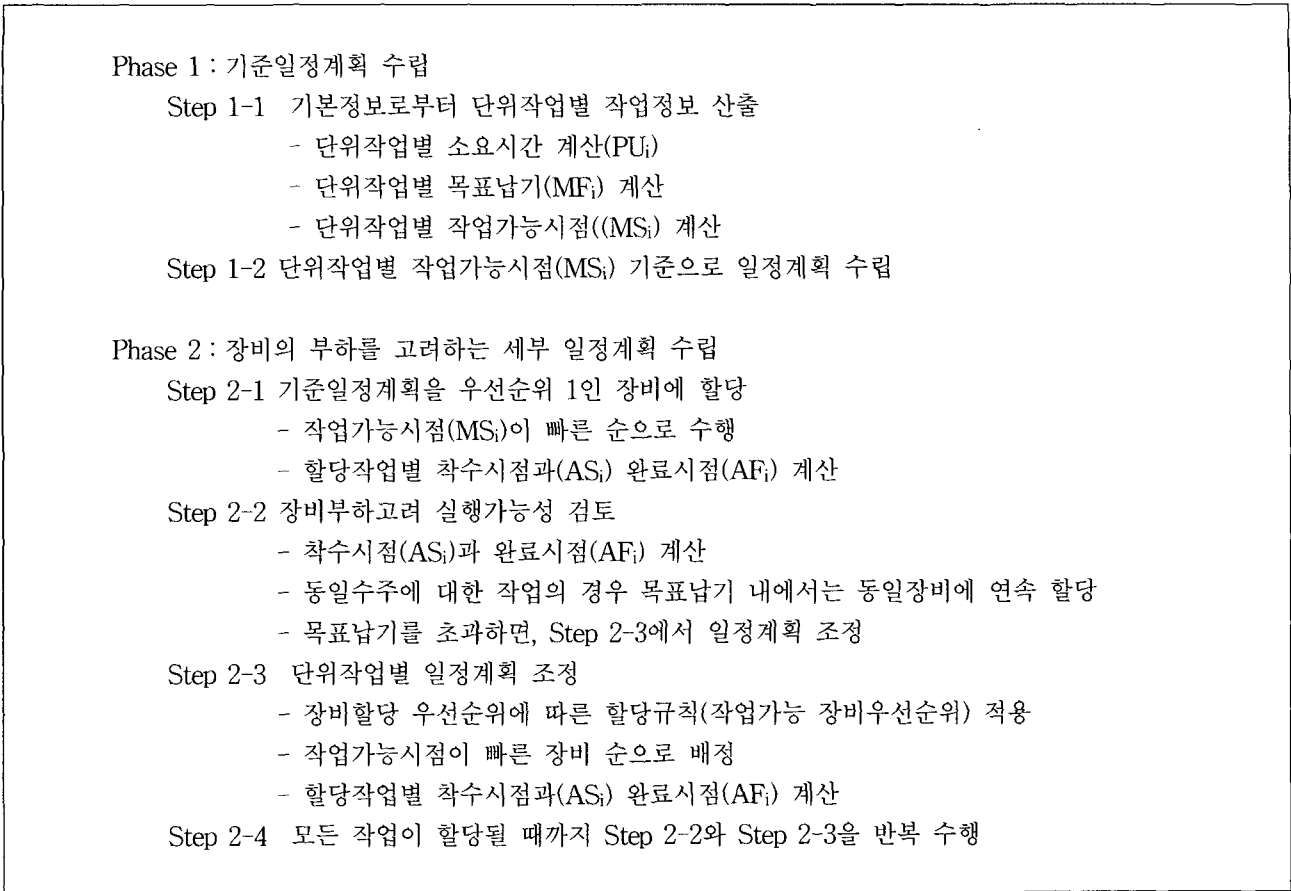
과 같다.

- i : 단위 권선작업의 번호 ($i = 1, 2, \dots, n$)
- j : 권선장비의 번호 ($j = 1, 2, \dots, m$)
- T_i : 납기지연시간 (tardiness)
- PU_i : 권선작업 i 의 작업소요시간
- MS_i : 작업 i 의 처리가능시점
- MF_i : 작업 i 의 목표납기
- AS_i : 작업 i 의 시작시점
- AF_i : 작업 i 의 완료시점
- G_k : 작업등급 k 를 할 수 있는 장비그룹 ($k = a, b, c, d, e$)

다음은 권선공정의 생산일정계획 수립을 위한 2단계 알고리즘을 설명하고 있는데, 단계1에서는 단위공정별 기준일정계획을 수립하며, 단계2에서는 단계1의 기준 일정계획 정보를 이용하여 장비부하를 고려한 세부 일정계획을 수립한다. 구체적인 2단계 알고리즘의 내용을 정리하면 <그림 6>과 같다.



<그림 5> 장비의 부하를 고려한 일정계획의 조정(예)



<그림 6> 권선공정의 2단계 생산계획 알고리즘

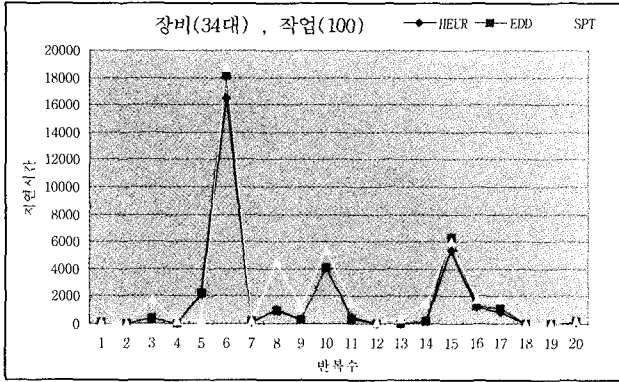
3.2 수치 실험

이 절에서는 앞에서 제안하는 권선공정의 일정계획 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 수치예제에 의한 실험을 수행하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 2단계의 일정계획 알고리즘과 비교하기 위하여 일반적인 일정계획의 규칙으로 사용하는 공정별 소요시간 기준의 SPT (shortest processing time) 규칙과 공정별 납기기준의 EDD 규칙을 각각 두 번째 단계의 반복 수행규칙(Step 2-2)으로 적용하여 비교하고자 한다. 수치 실험에서 사용한 작업장 정보와 수주정보의 대표 값들은 'H'사의 과거 데이터를 반영하여 작성하였다. 수치 실험은 성능이 서로 다른 34대의 권선장비를 갖는 작업장을 대상으로 작성하였으며, 변압기의 용량 및 권선작업의 내용(구조, 형상)의 분류와 해당 권선작업에 대한 장비할당 규칙은 모두 <그림 4>의 정보를 사용하였다. 변압기의 수주정보도 최근 2년간 'H'사의 데이터를 기준으로 실험 데이터를 발생하여 작성하였다. 예를 들어, 단위 권선작업의 소요시간은 [20, 100]시간 구간의 일양분포(Uniform Distribu-

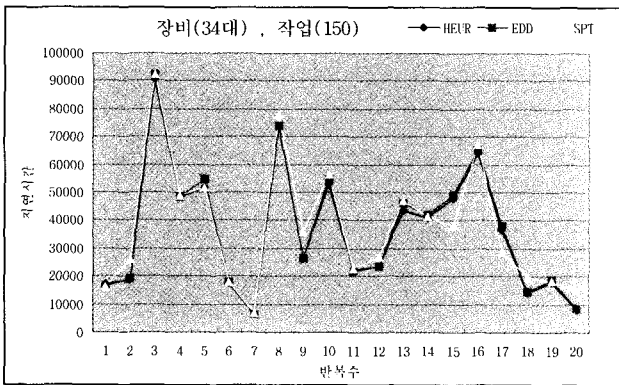
tion) 가정으로 수치 값을 발생하였으며, 권선작업의 준비시간은 1시간~6시간의 범위에서 변압기의 용량을 산출하였다.

수치 실험은 권선작업 단위의 수를 100, 120, 150개 문제로 분류하고, 각각 20문항씩에 대한 실험을 수행하였다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘에서 얻어진 일정계획과 SPT 규칙과 EDD 규칙으로 얻어진 각각의 일정계획의 결과를 납기지연 시간을 평가기준으로 정리한 결과를 <그림 7> ~ <그림 9>과 같이 얻어졌다.

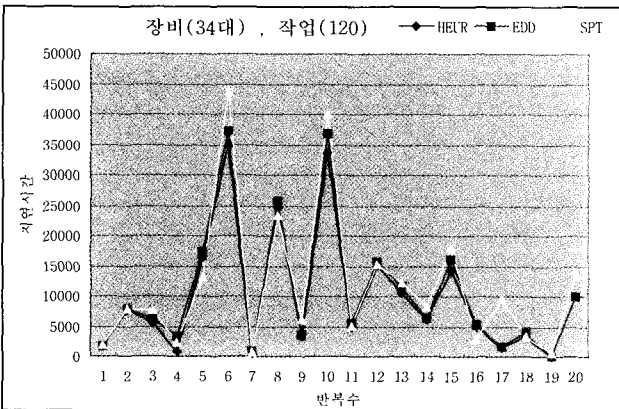
<그림 7>은 성능과 효율이 다른 34대의 병렬장비에 대하여 100개의 권선작업을 갖는 일정계획 문제를 20회 반복 실험을 실시한 결과이다. 그림에서 가로축은 반복 실험을 나타내며, 세로축은 납기지연 시간의 값으로 해법의 상대적인 성능을 표현하고 있다. <그림 8>과 <그림 9>는 권선작업의 수가 각각 120개와 150개인 경우의 실험결과를 보여주고 있다. 이러한 실험결과는 문제의 규모가 클수록 논문에서 제안하는 해법이 납기지연의 평가기준에 보다 효과적인 일정계획(effectiveness schedule)을 제공하고 있음을 보여준다.



<그림 7> 작업 수 100개의 실험결과



<그림 8> 작업 수 120개의 실험결과



<그림 9> 작업 수 150개의 실험결과

4. 결론

본 논문은 주문생산의 특성을 갖는 산업용 변압기 생산공정에 대한 문제를 다루었다. 변압기 생산공정에서 주요 애로공정으로 관리되고 있는 권선공정에 대하여 장비의 효율의 고려한 생산일정계획 알고리즘을 제시하

였다. 변압기 권선공정은 하나의 수주에 대하여 여러 개의 독립적인 권선작업이 필요하며, 변압기의 용량 및 전압에 따라 작업 가능한 장비그룹이 결정되는 복잡한 환경의 문제이다. 본 논문에서 제시한 생산일정계획 알고리즘은 권선공정에 대한 목표납기의 납기지연을 최소화하는 평가기준을 적용하였기에 변압기 생산공정 전체를 효율적으로 관리하는 효과를 거둘 수 있다.

참고문헌

- [1] Chen, Z-L., "Scheduling with batch setup times and earliness-tardiness penalties", *European Journal of Operational Research*, 96 : 518-537, 1997.
- [2] Dagramici, A. and Surkis, J., "Scheduling Independent Jobs on Parallel Identical Processor", *Management Science*, 25(12) : 846-857, 1979.
- [3] Dorit, S. H and Dan. L., "Scheduling with batching : minimizing the weight number of tardy jobs", *Operations Research Letters*, 16(2) : 79-86, 1994.
- [4] Guinet, A., "Textile Production Systems, A Succession of Non-identical Parallel Processor Systems", *Journal of the Operational Research Society*, 13 : 330-348, 1988
- [5] Hariri, A. M. and Potts, C. N., "Heuristics for Scheduling Unrelated Parallel Machine", *Computers and Operations Research*, 18(3) : 323-331, 1991.
- [6] Ibarra, O. H, and Kim, C. E., "Heuristic Algorithms for Scheduling Independent Tasks on Nonidentical Processors", *Journal of ACM*, 24(2), 280-289, 1977.
- [7] Kanet, J. J. and Balakrishnan, N., "Early/Tardy scheduling with sequence dependent setups on uniform parallel machines", *Computer and Operations Research*, 26 : 127-141, 1999.
- [8] Karp, R. M., "Reducibility among Combinatorial Problems", *Complexity of Computations*(Edited by R. E. Miller and J. W. Thatcher), Plenum Press, New York, pp. 85-103, 1972.
- [9] Kise, H., Ibaraki, T. and Mine, H., "A Solvable Case of the One-Machine Scheduling Problem with Ready and Due Times", *Operations Research*, 26(1) : 121-126, 1978.
- [10] Wilkerson, J. L. and Irwin, J. D., "An Improved Method for Scheduling Independent Tasks", *AIIE Transactions*, 3(3) : 239-245, 1971.
- [11] Zdrzalka, S., "Preemptive scheduling with release dates, delivery times and sequence independent setup times", *European Journal of Operational Research*, 76 : 60-71, 1994.