

# 변압기 권선공정에서의 수주 제작품의 단위공정 일정관리 시스템 개발과 다중회귀분석을 이용한 계획 리드타임 산출 및 관리 방안

강대원\* · 강창욱\*\* · 강해운\*\*\*†

\*(주)호성 중공업PG 전력PU 초고압변압기 생산기술팀

\*\*한양대학교 정보경영공학과

\*\*\*한양대학교 산업공학과

## Unit Process Scheduling System Development and Calculation and Control Method of Planned Leadtime Using Multiple Linear Regression under Make to Order Manufacturing System in Transformer Winding Process

Dae-Wan Kang\* · Chang-Wook Kang\*\* · Hae-Woon Kang\*\*\*†

\*Power Transformer Engineering Team Power Systems Performance Unit, Hyosung Corporation

\*\*Dept of Information and Industrial Engineering, Hanyang University

\*\*\*Dept of Industrial Engineering, Hanyang University

Ultra-high voltage transformer industry has characteristic of small quantity batch production system by other order processing unlike general mass production systems. In this industry, observance of time deadline is very important in market competitive power security and company continued existence. The transformer winding is a process that rolls a coil is coated with an electric insulation material in order to generate the required voltage using the voltage fluctuation.

The winding process is very important production process in the extra-high voltage transformer manufacturing industry because winding process is core process that occupy weight about half of whole process and is process that decide current ratio of transformer. This paper proposes a statistical calculation and control method of planned leadtime on the basis of real data and informations for the A company in transformer winding process. Moreover, we develop unit process scheduling system.

Keywords : Winding Process, Scheduling System, Leadtime, Linear Regression

### 1. 서 론

초고압변압기 산업은 일반적인 대량생산체제와는 다른 방식의 입찰을 통한 수주방식인 다품종소량 주문자생산

방식이다. 초고압변압기 산업에서의 입찰은 고객이 기본적으로 제시하는 전압, 용량, 효율 등의 전기적 스펙을 기본적으로 만족하면서 표준화되지 않은 수많은 고객의 다양한 기계적 사양들을 바탕으로 이루어지며 입찰 후

논문접수일 : 2008년 08월 21일    논문수정일 : 2008년 09월 01일    게재확정일 2008년 09월 01일

† 교신저자 kang4040@hanyang.ac.kr

수주에 성공한 제품들만을 제작하게 된다.

이러한 수주방식의 다품종소량 생산방식체제에서는 생산품목의 종류와 수량이 매우 유동적이며 그 예측 또한 어렵다. 이에 따라 각각의 오더들은 개별적으로 중요한 프로젝트 형식으로 관리되어진다. 그러므로 이러한 프로젝트 형식의 수주생산 환경체제에서는 제품 납기의 준수 여부가 고객이 기업을 평가하는 매우 중요한 요소이기 때문에 엄격한 납기의 준수는 향후 시장경쟁력의 우월적 확보와 나아가 기업의 존속을 유지하는 매우 중요한 요소로 여겨지고 있다. 이러한 배경으로는 입찰을 통한 수주생산방식의 산업특성상 납기의 미준수는 향후 입찰 자체에 제한을 받게 되며 고객들 상호간 입찰업체의 평가 및 정보공유가 수시로 이루어지기 때문에 시장자체를 잃어버리는 막대한 손해를 가지고 오는 결과를 초래하기 때문이다. 이러한 현실적인 상황에서 변압기 제조 기업은 설계단계에서부터 고객의 까다로운 사양과 다양한 전기적 특성만족과 동시에 같은 전기적 사양일지라도 고객의 추가 요구사항에 따른 기계적인 설계 특성에 따라 여러 가지 형식으로 설계가 이루어진다. 즉, 각각의 오더들마다 매년 다른 설계가 이루어진다. 이 결과 매 오더마다 제품이 생산되어지며 핵심부품 대부분이 최소 6개월에서 최대 1년 이상의 긴 조달기간을 가지고 있는 외자재인 관계로 1년 전 수주한 제품이라 할지라도 거의 대부분의 오더들이 단 납기의 성격을 갖게 된다. 그리고 제작단계에서는 수주된 제품의 하나하나마다 중요한 프로젝트 성격을 가지고 있기 때문에 고객의 잦은 사양변경과 요구사항 변경이 발생하는 경우가 많으며 제작방법도 일반적인 자동설비 또는 흐름생산방식이 아닌 사람중심의 수작업 형태를 지닌 여러 소작업장 단위의 공정으로 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서, 이러한 수작업형태를 지닌 많은 작업장을 지니고 있는 작업 상황에서 여러 오더들이 동시에 진행되고 있는 실정으로 매우 복잡한 물류흐름이 이루어지는 동시에 작업장 간 각각의 오더들에 대한 정보흐름 또한 잘 이루어지지 않는 특성을 가지고 있다.

결과적으로 이러한 수주방식의 다품종소량 주문자생산방식체제에서는 일반적인 생산체제보다 생산을 계획하고 관리하는 일이 중요하다. 따라서, 다양하게 변화하는 고객의 요구에 발 빠르게 대응하며 납기의 문제를 해결해야만 하는 상황으로 보다 효율적이며 빠른 생산 일정계획과 관리가 그 무엇보다도 선행되어야만 한다. 그러나 납기를 중심으로 한 공정계획으로 인하여 생산 계획자체가 공정관리자 주도로 이루어져 결과적으로 과거 유사오더에 대한 경험들을 바탕으로 한 리드타임을 설정하게 되고 공정관리자의 판단과 결정이 수시로 요구되는 상황에서 현재 여건에 맞는 리드타임을 설정함

에 따라 리드타임의 기준과 산출방식의 근거가 명확하지 않는 현실이다. 이러한 상황에서 기업입장에서는 현재 진행되는 오더의 전체 납기 준수에만 급급하며 모든 공정이 수작업의 형태를 지니고 있기 때문에 단위공정의 리드타임의 계획적인 관리보다 원가중심의 공수정보 산출에 더 많은 관심을 가진다. 수작업 중심의 제작현장의 여건상 현장에서 데이터를 수집하고 관리하는 일조차 어려운 것이 현실이다.

본 연구에서는 이러한 수주방식의 다품종소량 주문자생산체제의 특성을 가진 초고압 변압기 공정 중 가장 핵심적인 주요공정인 권선공정에 대한 일정관리 시스템을 설계, 개발하고 리드타임을 산출, 관리하는 방법을 제안한다. 동시에 변압기 제조업체의 실제 사례를 중심으로 한 매우 현실적인 문제를 다루고 있기 때문에 실제 현장에 곧바로 적용할 수 있는 실제적인 문제해결에 중점을 두고 있다.

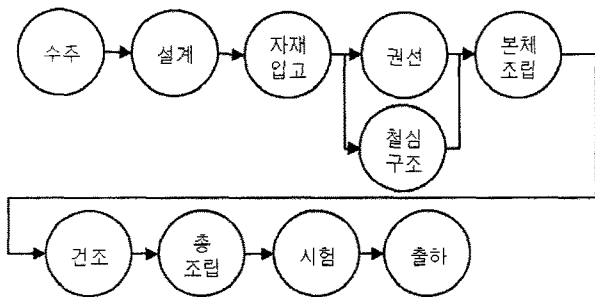
## 2. 변압기 공정 설명

### 2.1 변압기 공정 및 권선공정의 특성

#### 2.1.1 변압기 공정

변압기는 전자기유도현상을 이용하여 교류의 전압이나 전류의 값을 변화시키는 전기장치로서 철심 구조물에 감은 전선의 비에 비례하여 전압을 변화하게 하는 원리를 이용한 전기설비이다. 이러한 변압기를 구성하는 요소는 크게 탱크와 내부본체 두 가지로 구분된다. 탱크는 탱크 외함과 탱크 외함에 붙는 부싱, 냉각기, 조정판넬, 계기 등 다양한 전기, 기계적 액세서리로 구별되며 내부본체는 철심구조물과 철심구조물에 삽입되는 권선으로 구분된다. 아래의 <그림 1>은 변압기 공정을 주요 대 단위공정을 중심으로 설명한 그림이다. 변압기 공정은 수주가 확정되면 설계, 자재입고, 권선, 본체조립, 건조, 총 조립, 시험, 출하의 공정 순으로 이루어진다. 변압기 수주가 확정되면 제작을 위한 상세 제작설계가 이루어지게 되며 이 제작설계를 통해 필요한 자재의 발주가 이루어진 후 입고가 진행된다. 철심구조물 제작 공정은 얇은 철판을 층층이 쌓아 올린 구조로써 철심을 쌓는 각의 형태에 따라 대표적으로 E형, C형 등의 형태로 이루어진 구조물을 만드는 작업을 말한다. 이와 동시에 철심구조물 제작 공정과 함께 병렬 작업 또는 그 이전에 이루어지는 공정인 권선공정은 전기적 절연체로 이루어진 둥근 원기둥모양의 관 형태에 도체를 절연체로 감은 전선을 감는 공정이다. 변압기 권선 공정은 전선을 감는 횟수에 비례하여 변압기의 변류비

가 정해지는 공정이기 때문에 변압기 제조공정에 핵심 공정이며 주요공정이다. 본체조립 공정에서는 선 공정에서 제작된 권선과 철심 구조물이 결합되게 되고 건조 공정을 거쳐 총 조립 공정에서 탱크 안에 본체가 삽입되는 것을 시작으로 여러 가지 액세서리를 부착한 후 총 조립 공정이 끝나면 시험 후 합격한 제품에 한해서 변압기를 출하하게 된다. 만일 여러 작업장에서 이러한 단위 공정이 반복이 되기 때문에 이 들 공정 중 어느 한 공정이라도 일정에 변동이 발생하게 되면 전체 프로젝트들의 선, 후 공정에 큰 영향을 미치게 된다. 특히, 권선공정은 초기 제작공정이지만 전체 공정일정의 절반정도를 차지하는 공정이기 때문에 무엇보다도 중요한 공정이다.

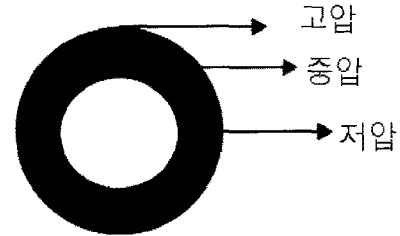


<그림 1> 변압기 제작 대단위 공정

### 2.1.2 변압기 권선공정의 특성

권선공정은 변압기의 변류비를 결정하는 핵심적인 매우 중요한 공정이다. 이러한 권선공정은 권선기라는 권선을 감는 기계를 이용하여 작업자가 일일이 수작업으로 권선관이라는 절연체에 권선을 감아주어야만 한다. 권선공정에서 권선기란 생산설비가 아닌 작업자의 권선작업을 도와주는 보조 작업기계이다. 권선관의 크기를 조절하는 특수 지그를 권선기에 삽입하여 그 위에 권선관을 다시 삽입하고 전선을 감게 된다. 권선은 크게 변압기에서 그 권선의 전기적 기능에 따라 고압, 중압, 저압, 탭, 안정권선, 리액터권선 등으로 구분된다. 각각의 전압 형태의 결정은 변압기마다의 권선이 가지는 상대적인 전압의 비로 결정된다. 권선은 감는 방법에 따라 원통권, 나선권, 연속권, 고용량권 등 다양한 방식으로 구분된다. 이러한 권선방법은 재료의 특성(전선의 굵기, 형태)과 종류 권선 작업 시 동시에 사용되는 전선의 가닥수에 따라 다시 또 다양하게 분류할 수 있다. <그림 2>와 같이 일반적인 단상 변압기 기준으로 보면 권선은 크게 저압 1개, 중압 1개, 고압 1개의 권선이 포개져서 들어가면서 제작이 이루어져 총 3개의 권선작업이 이루어져야 하며, 3상의 경우 <그림 2>의 권선이 총 3Set가

제작되어야 한다. 즉, 저압 3개, 중압 3개, 고압 3개로 총 9개의 권선작업이 최소한 이루어지게 된다. 여기에 탭, 리액터 등의 유무에 따라 추가적인 권선작업이 별도로 병행되어지거나 고압, 중압, 저압 형태의 권선관 자체가 2개 이상으로 분류됨에 따라 작업하는 전체 권선의 수가 증가한다.



<그림 2> 권선의 상부에서 본 모습(단상)

따라서, 전체 권선작업의 최소 완료시점은 가장 길게 예상되는 권선작업의 완료시점이 되며 하나의 권선작업이라도 완료되지 못했을 경우 권선작업은 종료될 수 없으며 전체 프로젝트 일정에 차질을 주게 된다. A사의 사례를 보면 일반적인 권선작업의 경우 위와 같은 특성 외에 변압기의 용량 및 전압, 권선작업의 난이도 등에 따라서 짧으면 하루 긴 경우는 한 달 이상 작업하는 등 오더의 특성에 따라 리드타임의 편차가 서로 심하며, 비슷한 전압, 용량인 경우라도 리드타임이 상이하며 설정 기준이 명확치 않기 때문에 쉽게 가늠할 수가 없는 특징을 가지고 있다.

### 3. 기존연구 고찰

그 동안 일정관리에 대한 스케줄링 연구는 많이 진행되어 왔지만 초고압변압기 공정과 에 대한 일정관리에 대한 연구들은 실제 변압기 공정에서 발생하는 다양한 제약조건과 복잡한 문제에 대한 해법이 그리 쉽지 않은 관계로 많은 연구가 진행되지 않았다. 하지만 변압기 전체공정이 아닌 부분 공정인 단위 공정에 대한 연구는 일부 시도되고 있다. 서준영 외[3]은 일반 몰드변압기의 의존적인 처리시간을 가진 장비공정의 애로공정에 대한 일정관리에 대한 연구를 진행하였으며 박창권 외[1, 2]는 변압기 제조공정 중 권선공정의 생산일정계획에 대한 연구로서 서로 다른 자원의 제약조건과 해당기업의 제작특성에 맞춰진 권선 일정관리에 관한 연구이다. 그러나 이 연구의 결과가 A사의 제약조건 및 제작특성이 상이한 관계로 그대로 적용되는 것에 한계가 있었다. 따라서 A사에 제약조건, 제작특성과 관리방법의 환

경에 맞는 새로운 시스템이 요구된다. 이와 동시에 박창권외[1, 2]의 연구는 권선기의 할당과정을 권선방법과 변압기의 용량으로 하고 있으나 실제 권선기의 작업할당을 위해서는 전기적 용량만을 고려하는 것은 한계가 있으며 실제 권선기에 로딩 가능한 권선 제약정보와 권선의 크기정보를 바탕으로 한 기계적인 특징을 고려하여 작업을 할당하고 있지 않는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고 A사의 생산현장의 실제 제약조건을 충분히 반영하여 공정관리자의 의사결정을 위한 현실적 문제들을 충분히 반영하도록 하였다.

## 4. 권선공정 일정관리 시스템 개발

### 4.1 권선공정 일정관리의 특성

권선공정의 일정계획의 주요 이슈를 살펴보면 <표 1>과 같다. 권선공정의 경우 가장 효과적인 일정관리 시스템을 개발하기 위해서는 현장 상황을 정확히 반영하는 작업 제약조건에 충분한 반영과 요구되는 수준의 해를 빠른 시간에 발견 할 수 있는 해법의 발견, 마지막으로 사용자가 원하는 형태의 정보를 입력받고 제공할 수 있는 사용자 인터페이스의 개발이 중요하다[4]. 초고압 변압기 공정의 대부분이 수작업 공정이고 적게는 수 십톤에서 많게는 500톤의 중량물을 다루는 공정이 이동과정에서 발생하는 작업현장에 불확실성이 많고 납기를 정확하게 제시할 수 없는 수주방식의 생산체제이기 때문에 공정 중 불량, 지연에 따른 공정 관리자의 의사 결정

의 비중이 매우 높다. 따라서 이러한 변동을 유연히 반영하는 신속한 일정계획이 이루어져야 하기 때문에 최적화 기법보다는 발견적 기법을 이용한 일정계획이 적합하다[4].

### 4.2 일정관리 문제의 모델링

권선공정에서 발생하는 문제들 중 가장 큰 문제로는 각각의 작업에 대한 권선기 할당의 문제이다. 그 이유는 모든 권선기의 제작능력이 동일한 것이 아니며 설계 사양에 따른 권선의 크기에 대한 제약과 권선방법에 대한 사용가능한 권선기 장비의 종류가 기계마다 상이하기 때문이다. A사의 경우 권선기의 종류는 크게 수평권선기와 수직권선기 두 가지로 나뉘며 각각의 권선기는 로딩가능한 권선의 전체 높이와 권선관의 지름의 크기에 따라 아래의 <표 2>와 같이 분류가 된다. <표 2>에서의 권선기 제약조건은 전체 권선기 중 일부 권선기만의 기본 제약사항들을 보여주고 있다. 두 번째 문제는 작업장간의 물류흐름의 반영문제이다. 실제로 공장 내에는 여러 개의 동일한 작업장이 분류가 되어 있는 관계로 후 공정인 본체조립 공정에서 여러 곳의 작업장에서 완료된 권선이 도착해야 한다. 하지만 완료된 권선작업의 이 동시에는 권선 하나의 무게가 최소 1톤에서 최대 수십톤에 달하는 무게의 중량물인 관계로 대형 크레인, 대차 등의 특수한 운반도구가 사용이 되어야만 하며 후 공정의 작업장간의 원거리는 이동에 많은 공수와 불필요한 리드타임의 증가를 가지고 온다. 하나의 권선이 이동하는 경우 최대 반나절 이상을 소비하는 경우도 있다. 그 원인으로는 사용되는 대형 크레인이나 대차의 경우 다른 작업장과의 공동 사용 및 작업으로 인한 많은 대기시간이 자주 발생하기 때문이다. 동시에 다른 작업장에서 비어있는 권선기가 있는 경우라도 후 공정의 본체조립장과 가까운 혹은 이송시간이 짧게 걸리는 작업장을 선택하는 것이 시간 및 비용을 고려했을 경우 매우 합리적이다. 세 번째 문제는 권선공정의 리드타임의 특성이다. 하나의 오더 당 최소 3개 이상의 권선작업이 수행되어야하므로 병렬로 작업하였을 경우 가장 긴 권선작업의 리드타임이 전체 권선 공정의 일정을 대표하는 것이 가장 바람직하다. 아래의 <그림 3>에서와 같이 병렬작업과 직렬작업에서의 비교 및 분석을 통해 쉽게 파악이 가능하며 동시에 하나의 권선기에 직렬로 작업 하였을 경우와 여러 대의 권선기에 병렬로 작업하였을 경우 리드타임의 차이는 쉽게 판단되어 진다. 하지만 자원 제약하의 상황에서 오더가 동시에 진행되고 있기 때문에 납기문제로 여러 개의 모든 작업을 병렬로 작업할 수 없으며, 3상의 경우에는 매 권선작업마다 셋업시간이 오래 지연

<표 1> A사의 권선공정의 일정관리 주요 이슈

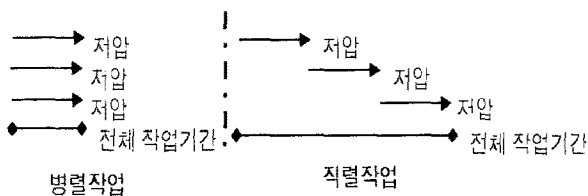
번호	주요 이슈
1	수작업으로 인한 계획수립의 어려움과 오더증가에 따른 능력한계 봉착
2	계획수립 시간의 장기화 및 계획수립 빈도의 대폭 증가
3	오더당 작업하는 권선작업의 수가 다양함에 따른 세부작업계획 불가
4	제작능력이 서로 상이한 설비가 존재함에 따른 즉흥적인 일정 대응
5	정확한 계획과 납기준수가 요구되지만 현재 정확한 계획을 반영하지 못함
6	긴급오더, 불량 등의 상황에 따른 공정관리자의 의사결정이 매우 중요
7	생산지연, 작업대기, 이동문제 등 생산현장의 불확실성이 매우 큼
8	선, 후 공정간의 정보전달이 어려워 일정에 부서 간 영향을 많이 받음
9	물류흐름을 반영하지않은 계획으로 인한 작업혼재 및 대기증가

되기 때문에 직렬로 작업하는 경우 공수가 훨씬 적게 발생하게 된다. 그 결과 납기에 여유가 있는 공정의 경우 직렬로 작업하는 것이 원가적인 측면에서 더 바람직한 경우가 생긴다. 이러한 상기의 주요 내용을 바탕으로 전체의 스케줄링의 수행과정을 살펴보면 아래의 <그림 4>와 같다.

<표 2> 권선기의 제약조건

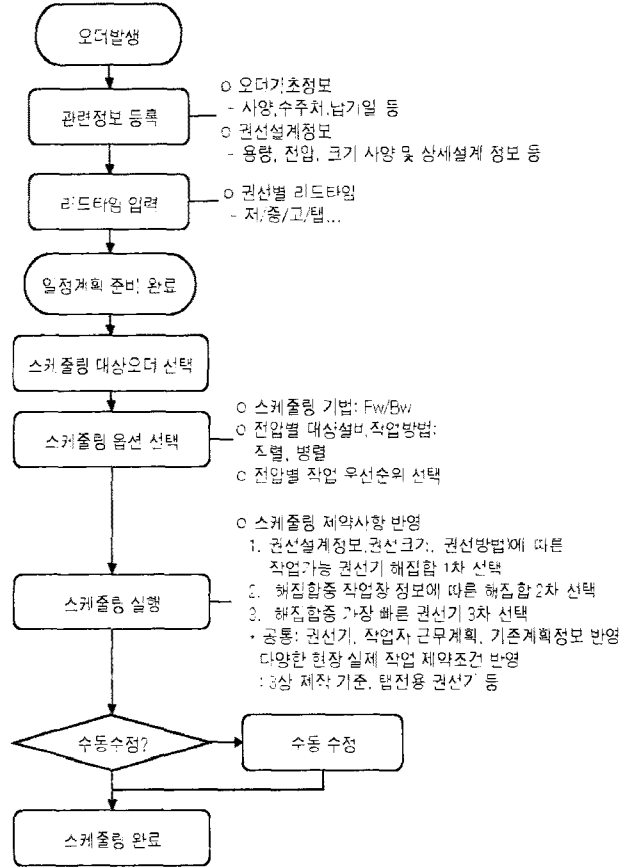
순번	타입	내경	외경	높이	적용가능 권선방법
1	수평	~2400mm	~2700mm	~3500mm	고용량권, 포자리스키, 실리헬리
2	수직	~2400mm	~2700mm	~3300mm	연속권
3	수직	~1800mm	~2200mm	~3200mm	고용량권, 포자리스키, 실리헬리
4	수평	~1400mm	~1700mm	~1100mm	탭권선 전용
5	수평	~850mm	~1100mm	~2200mm	원통권, 포자리스키, 실리헬리, 나선권, 연속권
6	수평	~1000mm	~1000mm	~1700mm	원통권
7	수직	600mm~	~1450mm	~2500mm	나선권, 연속권

1단계로 오더정보 및 관련정보를 입력한다. 2단계로 스케줄링 대상오더를 선택한다. 여기에서 외주구매품을 제외한 작업지시가 되기 전의 자료를 모든 스케줄링 대상으로 한다. 3단계로 권선기를 할당한다. 이 경우 기준은 권선관의 기계적인 제약조건에 의해 권선관 내경이 최소 기준보다 크며 권선코일의 외경이 최대 기준보다 작고 권선관의 높이 또한 최대 기준보다 작은 권선기해 집합을 1차적으로 선택한다. 여기에서 탭 전용 권선기, 수평권선기일 경우 추가적으로 영향을 받는 최대 보빈 수의 제약조건을 반영한 1차 해 집합을 선정한다. 1차 해 집합 중 다른 작업장의 같은 조건인 권선기의 경우 이송시간이 짧은 작업장 조건 우선순위에 따라 해당 작업장의 권선기를 선택하여 2차 해 집합을 선정한다. 마지막으로 가장 빨리 작업가능한 권선기를 선택하여 최종 권선기를 선택하며 중/저압 권선의 경우 권선기 셋



<그림 3> 병렬작업과 직렬작업의 기간 비교

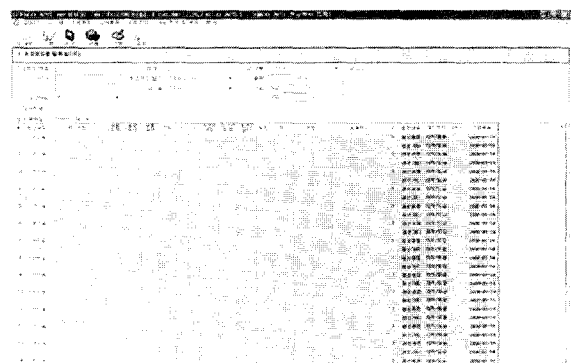
업 공수 절감을 통한 작업능률 향상을 위해서 한 권선기에 직렬로 작업하도록 설정토록 하고 이외의 경우 옵션의 선택사항에 맞게 권선기의 작업을 직렬 또는 병렬로 하여 설정한다.



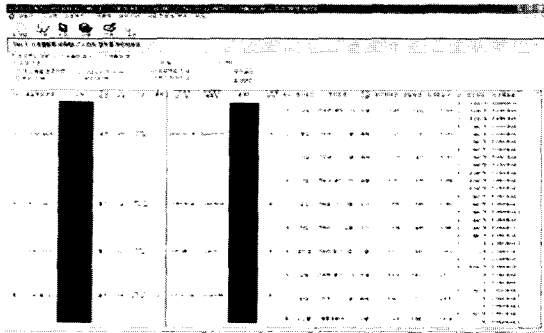
<그림 4> 스케줄링 수행과정 다이어그램

### 4.3 개발된 권선공정 일정관리 시스템

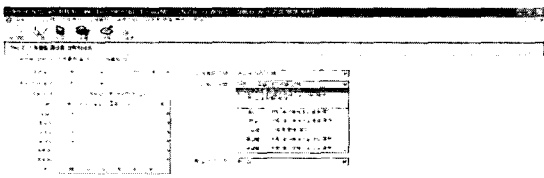
다음에 설명되는 권선공정 일정관리 시스템은 A사에서 데이터베이스로는 MS-SQL을 기반으로 하여 비주얼 베이직(VB) 6.0 언어로 개발되었다. 아래의 <그림 5>는



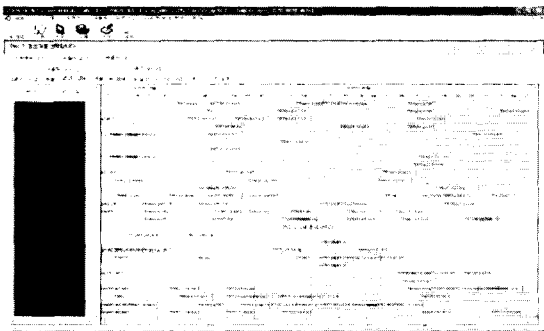
<그림 5> Project 정보 입력 화면



<그림 6> 스케줄링 1단계 화면



<그림 7> 스케줄링 2단계 옵션 선택 화면



<그림 8> 스케줄링 결과 화면

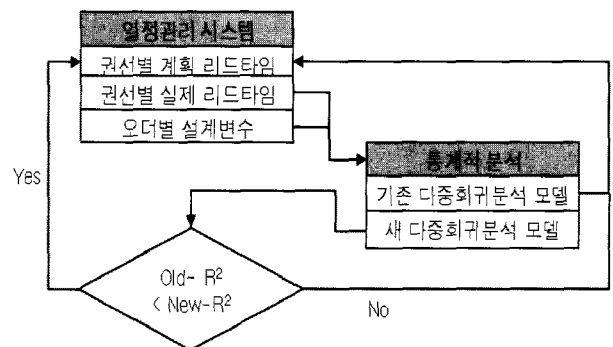
스케줄링의 대상이 되는 프로젝트 기초정보와 권선설계 정보를 입력하는 화면이다. 아래의 <그림 6>, <그림 7>, <그림 8>은 스케줄링의 대상이 되는 오더를 선택하고 스케줄링 옵션을 선택한 후 스케줄링을 실행한 후의 화면이다.

## 5. 다중회귀분석을 이용한 리드타임 분석 및 산출

### 5.1 리드타임 분석 필요성 및 산출 프로세스

권선공정은 제품의 특성상 하나의 오더가 최소 3개에서 최대 10개 이상의 권선으로 나뉘어 동시에 제작되어

진다. 따라서 여러 개의 오더가 동시에 진행되고 있는 상황에서 공정관리자는 일반적으로 가장 긴 권선작업을 기준으로 권선공정의 리드타임을 결정한다. 그러나 실제 제작현장은 자원제약의 상황에서 여러 개의 오더가 동시에 진행되고 있으며 수주 방식의 주문자 생산체제의 특성으로 매 오더마다 표준적인 작업이 이루어지지 않기 때문에 가장 긴 권선공정의 리드타임 또한 정확하게 예측하기가 힘들고 다양한 여러 가지 변수 때문에 그 기준을 마련하기가 쉽지 않다. 더욱이 권선작업의 수작업 특성으로 인하여 작업자의 공수에만 관심을 기울이고 납기에 맞추어 사양이 비슷한 오더라도 리드타임이 달라지기 때문에 개개의 권선작업의 리드타임은 정확하게 산출되지 못하고 그 변동 또한 심하다. 따라서, 각각의 여러 가지 개별권선에 대한 리드타임의 기준을 마련하는 것이 향후 제작일정의 부하산출과 올바른 부하분석을 위해서 중요하며 이를 위한 정확한 예측의 방법과 기준이 절실하다. 이를 위해서는 기존 권선작업정보에 대한 통계적 분석을 통한 리드타임의 정보에 대한 분석이 요구된다. 그 이유로는 권선공정은 매번 다른 여러 가지 설계변수를 바탕으로 제품의 특성이 결정되며 이러한 제품의 특성은 권선작업 리드타임에 영향을 미치기 때문이다. 실제로 산업현장에서는 변압기의 전압과 용량으로 제품을 구별하여 관리하기는 하지만 세부적인 설계정보가 없는 정확한 리드타임을 산출하기가 어려운 실정이다. 또한 기존에는 권선공정에 대한 일정관리 시스템이 없기 때문에 이러한 각각의 권선작업의 리드타임 정보와 오더의 설계정보를 수집할 수 있는 시스템이나 환경이 제공되지 못하였다. 하지만 본 연구에서의 권선공정을 위한 일정관리시스템 개발을 통하여 이러한 실제 오더정보와 작업정보를 쉽게 파악 및 분석이 가능하다. 본 연구에서 제안하는 리드타임 분석, 산출 및 관리 프로세스는 아래 <그림 9>와 같다. 이 프로세스를 통해 실제 발생된 개별적인 권선작업의 리드타임 데이터는 여러 가지 오더 설계정보에 영향을 받기 때문에 실적정보를 바탕으로 각각의 설계정보에 따른 리드타임을



<그림 9> 리드타임 산출 및 관리 프로세스

예측할 수 있다. 그러나 매년 여러 가지 다른 종류의 오더가 발생하고 영향변수 또한 설계기술이 변화함에 따라 달라지기 때문에 각각의 권선작업에 대한 회귀모형은 계속 변화하게 된다. 따라서, 이러한 이유 때문에 기존의 회귀분석모델에서 산출된 리드타임이 타당성을 가지기 위해서는 지속적으로 수집되는 데이터에 의하여 반드시 지속적으로 검토되어야 한다.

### 5.2 리드타임 산출을 위한 설계요인의 구분

권선공정에서 리드타임에 가장 많은 영향을 미치는 경험적 변수는 권선방법이다. 아래의 <표 3>은 그 중 대표적인 권선방법과 일반적인 설계요인을 나타내고 있다. 위 <표 3>의 내용을 바탕으로 권선공정 일정관리 시스템으로부터 수집된 A사의 실제 데이터를 활용하여 통계적 분석기법 중 다중회귀분석을 이용하여 설계변수와 리드타임의 관계를 밝히고자 한다. 다중회귀분석은 입력변수들과 이에 의해 영향을 받는 출력 변수들 간의 문제를 분석하고 모델링하는데 유용한 방법이다[5].

<표 3> 권선방법의 종류와 설계 변수

권선방법					
변수명	설명	변수명	설명	변수명	설명
Y1	고용량권	Y2	원통권	Y3	나선권
Y4	연속권	Y5	철드연속권		

설계일반변수					
변수명	설명	변수명	설명	변수명	설명
X1	변압기용량	X2	변압기전압	X3	보빈수
X4	전턴수	X5	권선높이	X6	권선전압

### 5.3 설계변수와 리드타임의 영향도 분석

아래의 <표 4>는 설계변수에 따른 각각의 권선방법에 대한 리드타임의 다중회귀식을 보여주고 있다. 먼저 각각의 설계변수를 살펴보면 변압기 용량과 변압기 전압은 가장 대표적인 설계사양의 변수로써 이 값들이 커질수록 고용량 고전압의 까다로운 작업이며 값의 크기가 점점 커지게 됨에 따라 일반적으로 리드타임이 오래 걸리게 된다. 보빈은 변압기 권선과정에서 사용하는 전선을 감아놓은 다발로써 보빈수가 증가할 경우 권선과정에서 다루어야 하는 전선의 수가 증가하게 됨으로 권선방법의 종류에 따라 난이도에 차이가 있지만 대개는 보빈수가 증가할수록 리드타임이 오래 걸리는 특징을 가

지고 있다. 전턴수는 전체 권선 작업에서 권선관에 감기는 턴수를 나타내며 권선높이는 그 높이가 커질수록 많은 수의 전선을 감아야 하기 때문에 리드타임이 오래 걸리게 된다. 이와 같은 설계변수들은 각각의 권선방법에 따라 리드타임에 다양한 영향을 미치고 있다. <표 5>를 보면 일반적으로 변압기 용량과 권선높이가 리드타임에 영향을 주는 대표적인 변수임을 쉽게 알 수 있다. 권선방법의 종류에 따라 영향을 미치는 설계변수들이 각기 다른 특성을 보이고 있으나 일반적으로 용량과 권선높이가 리드타임에 영향을 주는 변수임을 알 수 있다.

<표 4> 권선방법의 종류와 설계 변수

	X1	X2	X3	X4	X5
Y1	○			○	○
	$Y1 = 5.39 + 0.00801 * X1 - 0.0109 * X4 - 0.00264 * X5, R^2 = 86.6\%$				
Y2	○	○			○
	$Y2 = 1.46 - 0.00746 * X1 - 0.0163 * X2 + 0.00180 * X5, R^2 = 82.7\%$				
Y3	○			○	
	$Y3 = -0.200 - 0.0174 * X1 + 0.0822 * X4, R^2 = 77.0\%$				
Y4	○			○	○
	$Y4 = 4.82 - 0.0403 * X1 - 0.00259 * X4 + 0.00420 * X5, R^2 = 87.0\%$				
Y5		○	○		○
	$Y5 = -15.4 - 0.00618 * X2 + 3.36 * X3 + 0.0102 * X5, R^2 = 80.5\%$				

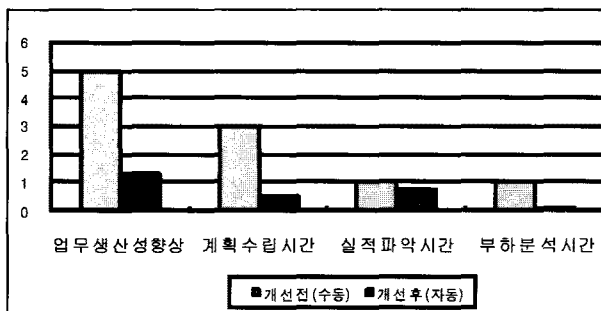
위 <표 5>는 신규 권선작업의 설계정보를 바탕으로 <표 4>에서 추정된 식을 이용하여 리드타임을 추정한 값과 평균 실적시간을 비교한 표이다. Y3과 Y5의 권선방법을 제외하고 나머지 권선방법에 대한 다중회귀 추정식은 실제 리드타임과 거의 일치함을 알 수 있다. Y3과 Y5의 회귀식의 경우는 약 이틀 정도의 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 공정이 작업대기, 야근 등의 이유로 불안정하였거나 만약 공정이 안정 상태였다면 현재의 회귀식의 설계변수가 완벽하게 리드타임을 설명하지 못하고 있다는 뜻이다. 결과적으로 두 가지의 권선방법에는 아직까지 설명되지 않은 요인이 추가적으로 있다는 뜻이며 이러한 요인은 추가적인 작업의 분석을 통하여 다중회귀식에 반영하여야 할 필요성이 있다. 이러한 방식의 리드타임의 설정과 관리기준은 기존의 공정관리자의 경험적인 판단에 의한 주먹구구식의 관리 형태를 벗어날 수 있는 환경을 제공해주며, 수주 생산방식체제에서 다양한 오더에 대한 리드타임 설정에 객관적인 기준을 제시하여 줄 수 있다. 이러한 데이터의 분석을 통해 추후 공정을 개선하는 객관적인 평가지표로 사용될 수 있다.

<표 5> 추정된 리드타임과 실적의 비교

	X1	X2	X3	X4	X5	계산	평균실적
Y1	121	138	4	64	575	4.14	4.00
$Y1 = 5.39 + 0.00801 * X1 - 0.0109 * X4 - 0.00264 * X5, R^2 = 86.6\%$							
Y2	125	154	4	62	1919	1.47	1.50
$Y2 = 1.46 - 0.00746 * X1 - 0.0163 * X2 + 0.00180 * X5, R^2 = 82.7\%$							
Y3	90	22	48	70	1885	3.99	5.50
$Y3 = -0.200 - 0.0174 * X1 + 0.0822 * X4, R^2 = 77.0\%$							
Y4	45	138	3	1637	1242	3.98	4.00
$Y4 = 4.82 - 0.0403 * X1 - 0.00259 * X4 + 0.00420 * X5, R^2 = 87.0\%$							
Y5	550	345	1	500	2413	10.44	13.50
$Y5 = -15.4 - 0.00618 * X2 + 3.36 * X3 + 0.0102 * X5, R^2 = 80.5\%$							

### 6. 결론 및 향후 연구

본 연구는 초고압변압기 산업에서의 변압기 공정 중 변압기의 변류비를 결정하며 전체 공정중 절반정도의 비중을 차지하는 핵심공정인 권선공정을 위한 일정관리 시스템을 개발하고 다중회귀분석을 통한 리드타임 산출 및 관리 방안에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 A사에서의 권선공정에 대한 실제 일정관리의 문제에서 발생되는 현실적인 제약조건을 해결하는데 연구의 중점을 두었다. 권선공정을 위한 일정관리시스템의 개발을 통해 실제 스케줄링 시간이 수동적 산출 방식에서 자동 산출 방식으로 변하게 됨에 따라 공정관리자의 의사결정을 위한 신속한 정보를 제공할 수 있게 됨과 동시에 이를 통해 많은 지원을 받을 수 있게 되었다. 실제로 본 연구에서 개발된 일정관리시스템을 통한 A사의 업무생산성 및 일정계획 수립시간 등 많은 부분에서 상당한 개선이 이루어졌으며 그 비교 결과는 아래의 <그림 10>과 같다.



<그림 10> 스케줄링 자동화에 따른 개선 전·후 비교 결과

그러나 현재의 일정관리 알고리즘은 현장의 제약조건들을 최대한 반영하였음에도 불구하고 여전히 많은 제약조건들이 존재하고 있으며 따라서, 자원의 부하 평준화 방법에 대한 연구도 추가적으로 요구된다. 이와 병행하여 권선공정 뿐만 아니라 다른 공정으로의 확대를 통한 전체 공정의 최적화 된 일정관리 시스템으로의 확대 개발 또한 필요하다.

### 참고문헌

- [1] 박창권, 장길상, 이동현; “이종 병렬기계로 구성된 변압기 권선공정의 생산일정 계획”, 한국산업경영시스템학회지, 26(2) : 35-42, 2003.
- [2] 박창권, 장길상, 이동현; “수주생산환경에서 생산일정 계획 알고리즘 설계 및 정보시스템 구현 : 변압기 제조공정의 권선공정 적용사례”, IE Interfaces, 16(2) : 185-194, 2003.
- [3] 서준영, 고재문; “장비능력에 의존적인 처리시간을 가진 애로공정의 일정계획 수립(월드 변압기 공장을 중심으로)”, IE Interfaces, 14(4) : 385-393, 2001.
- [4] 정한일, 정대영, 김기동, 박찬권, 박진우; “ILog를 활용한 금형 생산시스템의 일정계획 시스템 개발에 관한 연구”, IE Interfaces, 13(4) : 564-571, 2000.
- [5] Ronald, E., Walpole., and Raymond H. Myers.; Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 5th Edition, Prentice Hall, Inc., 413, 1993.