

# 닷넷 환경기반의 시장 모델링 및 가격모의 프로그램 개발

論 文

54A-2-6

## Development of Market Modeling and Price Simulator(MMPS) Under the .NET Framework

許 眞<sup>\*</sup> · 姜東周<sup>\*</sup> · 丁海聖<sup>\*\*</sup> · 文英煥<sup>\*\*\*</sup>

(Jin Hur · Dong-Joo Kang · Hae-Sung Jung · Young-Hwan Moon)

**Abstract** - At present, the Korean electricity industry is undergoing restructuring and the Cost Based-generation Pool(CBP) market is being operated preparing for Two Way Bidding Pool(TWBP) market open. As the circumstance of the traditional system is changed according to power system deregulation, the simulation tool which should reflect market code providing market operating mechanism is needed to analyze an electricity market. This paper presents the development of a unique market simulator, Market Modeling and Price Simulator(MMPS) that is designed to imitate the Korean electricity market considering uniform price. The MMPS is developed in VB.NET and is composed of two modules that consist of market modeling and price simulation interfacing access database program. To evidence the features and the performance of MMPS, a small two way bidding market with 12-bus system and one way bidding market for generator competition will be presented for the electricity market simulations using MMPS.

**Key Words** : Market Modeling, Price Simulator, MMPS, CBP Market, TWBP Market

### 1. 서 론

우리나라 전력산업 구조개편은 현재와 같은 '발전경쟁단계'를 거쳐 최종적으로 '도·소매경쟁단계'를 지향하고 있다. 현재 양방향입찰시장인 TWBP(Two Way Bidding Pool) 개설을 위해 과도기적인 변동비반영시장인 CBP(Cost Based Pool)를 운영하고 있으며, 현재 사회적, 경제적 상황에 따라 당분간 CBP 전력시장이 운영될 전망이다. 이러한 환경적 변화에 따라 기존의 전력계통을 포함한 계통운영 및 해석은 각 참여자의 이윤추구라는 경제학적인 개념을 도입하여 전력시장체제를 대상으로 다양한 시나리오에 따라 모의 분석을 수행하여야 한다. 일반적으로 시장시물레이션(Market Simulation)의 요소기술은 수요와 가격예측 기술, 기동정지 계획 및 급전운영계획을 포함한 운전계획수립 기술, 송전혼잡해석 기술 그리고 최적의 입찰전략 수립을 위한 게이밍(Gaming) 분석 기술 등으로 요약할 수 있다[7,8]. 또한, 현물전력시장 해석을 위해 시장구조의 유형에 따른 시물레이션도 필요하다[12]. 이러한 요소기술을 기반으로 시장시물레이션을 수행할 수 있는 툴(tool)을 시장시물레이터(Market simulator)라 정의할 수 있다. 이미 구조개편이 진행된 나라에서는 시장시물레이터를 도입하여 자국의 시장운영 분석

및 평가에 활용하고 있다. 대표적인 해외 시장시물레이터로는 PLEXOS(호주), GE-MAPS(미국), PROSYM(미국) 그리고 POMAX(노르웨이) 등이 있다. 하지만, 국내시장 모의를 위해 외국의 상용화된 프로그램을 도입할 경우에는 국내 시장모형 개발을 위한 맞춤작업(customization)이 필수적이며 국내 시장규칙을 반영해야 하는 한계를 가지게 된다. 이러한 한계를 극복하고 정확한 국내 전력시장 모의 분석을 위해 전력시장 시물레이션 기법의 도입은 필수적이며 또한 국내시장 규칙에 적합한 시물레이션 툴의 개발은 필수적이라 할 수 있다[1,2,3].

본 논문에서는 전력시장 시물레이터의 여러 기능 중에서 전력시장 모델링(Market modeling) 및 가격모의(Price Simulator) 모듈의 기능을 구현하여 MMPS(Market Modeling & Price Simulator) 프로그램 개발을 완료하였다. 전력시장 모델링은 시장시물레이션의 기본이 되며 입력 DB(Data Base)를 이용하여 시장을 구성하는 요소를 객체로 표현하여 시장 모델링을 구현하였고 가격결정 메카니즘에 따라 시장가격, 발전기출력, 시장참여자 수익 분석 등 다양한 결과를 도출할 수 있는 출력 DB도 개발하였다. 가격결정 메카니즘은 CBP 전력시장에서의 SMP(System Marginal Price), 양방향입찰시장을 대비한 단일가격체제 기반의 MCP(Marginal Clearing Price) 그리고 모선별 한계가격을 나타내는 LMP(Locational Marginal Price)를 산정할 수 있는 기법을 구현하였다. 가격결정 기법은 해당 문제를 목적함수와 제약조건으로 정식화 하고 선형계획법(LP, Linear Programming) 기반의 시물레이션을 이용하여 최적의 해를 산정하도록 개발하였다. MMPS 프로그램은 Visual Basic .NET을 개발언어로 사용하였고 입출력 데이터베이스는 마이크로소프트 액세스(Microsoft Access)를 활용하였다. 시장

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院, 研究員

E-mail : jinhur@keri.re.kr

\* 正會員 : 韓國電氣研究院, 研究員

\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院, 先任研究員 · 工博

\*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院, 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2004年 9月 24日

最終完了 : 2005年 1月 5日

시뮬레이션은 입력 DB로부터 시장모델링을 구성하고 다양한 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하기 때문에 빠른 연산 처리를 요구하고 있다. 그래서, MMPS의 경우 닷넷 프레임워크(.NET Framework)를 플랫폼으로 적용하여 정확하고 빠른 속도로 시장시뮬레이션을 수행할 수 있도록 구현하였다. 개발된 MMPS 프로그램을 이용하여 발전비용 기준의 변동비 반영 시장모형, 양방향입찰시장 모형이 구현된 12 모션 모형 그리고 LMP 모의 분석을 위한 5모션 모형을 대상으로 시장모델링과 가격모의분석 시뮬레이션을 수행하여 프로그램의 유용성을 검증하였다.

## 2. 닷넷 프레임워크(.NET Framework)

닷넷 프레임워크는 닷넷의 가장 핵심적인 구성요소로서 XML 웹 서비스 및 응용 프로그램을 개발, 배포 및 실행할 수 있도록 해주는 환경이다. 닷넷 플랫폼의 다양한 클라이언트 기기에 사용될 모든 운영체제에 기본적으로 포함한다. 닷넷 프레임워크의 기본 구조를 그림 1에 나타내었다.

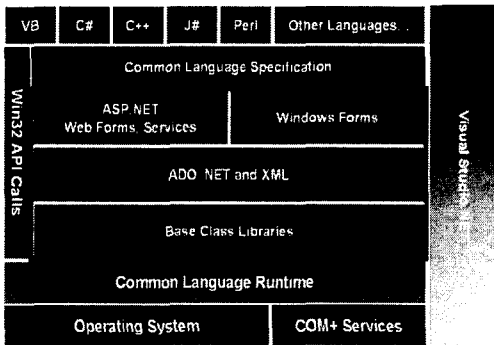


그림 1 닷넷 프레임워크(.NET Framework) 아키텍처  
Fig. 1 Architecture of .NET framework

닷넷 프레임워크의 구조는 상당히 복잡하게 구성되어 있지만 닷넷 프레임워크를 구성하는 가장 중요한 요소는 공통 언어 런타임(CLR)과 닷넷 프레임 클래스 라이브러리(.NET Framework class library)이다. 닷넷 프레임워크의 일부본인 공통 언어 런타임(CLR)을 통해서 개발자는 자신에게 익숙한 언어로 응용 프로그램을 개발 할 수 있고 동일한 실행 성능을 보장 받을 수 있다. 이러한 닷넷 프레임워크의 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 손쉬운 배포
- 개발의 생산성 증대
- 시스템의 안정성 증가
- 다중 언어 지원
- 프로그래밍 모델의 통합

닷넷 프레임워크의 클래스 라이브러리는 닷넷 프레임워크의 모든 프로그래밍 언어들에서 공통으로 사용하는 계층적 구조의 클래스 라이브러리이며 개체 모델이다. 닷넷 프레임워크 클래스 라이브러리는 개발자들이 여러 언어를 사용하여 개발하더라도 단일 개체 모델을 사용함으로써, 언어간 일관성과 통합성을 보장한다. 이 두 요소는 일관성 있는 객체

지향 프로그램 환경, 코드 실행 환경의 개선, 업계 표준을 통해 다른 코드와 닷넷 프레임워크에서 실행되는 코드와의 원활한 통신 등을 목적으로 닷넷 프레임워크에서 도입한 개념이다. 결론적으로 닷넷 환경은 빠르게 변화하는 개발환경과 모든 것이 웹으로 집중되는 인터넷시대에 부흥하기 위해서 개발된 프로그램 개발환경이다[4,5,11]. 이와 같이 닷넷 프레임워크의 장점을 활용하여 MMPS 프로그램의 플랫폼(platform)으로 닷넷 프레임워크를 도입하였고 닷넷 이전의 윈도우즈 응용프로그램(Windows Application) 운영환경 보다 빠른 속도로 시장데이터를 처리 및 계산할 수 있으며 추가적인 프로그램 모듈 확장에도 용이한 장점을 가지고 있다. 닷넷 프레임워크의 기반위에서 프로그램 개발에 사용된 VB.NET 언어는 윈도우즈 폼(Windows Form)과 웹 폼(Web Form)으로 되어 있으며, 분산 데이터 소스에 액세스할 수 있는 새로운 버전의 ADO 즉, ADO.NET과 기존의 키워드를 제거하고, Type의 안전성을 개선하고 Low-level의 구조들을 보여주는 간소화된 언어이다. MMPS의 경우 VB.NET의 윈도우 폼을 기본으로 하고 Access DB를 활용한 ADO.NET을 적용하여 신속하고 강력하게 데이터 처리를 할 수 있도록 개발되었다.

## 3. MMPS 핵심 모듈

전력시장 모의, 분석 그리고 전략수립 등을 주요 대상으로 하는 전력시장 시뮬레이션의 개념은 기본적으로 전력시장 모델링 및 데이터베이스(DB) 설계로 출발한다. 전력시장의 모델링은 입출력 데이터로 표현되며 입출력 DB를 이용하여 시장모형을 구성하고 모의해석을 위한 시나리오를 작성하여 시장시뮬레이터의 알고리즘에 따라 시뮬레이션이 수행된다. 이러한 개념에 따라 MMPS 프로그램은 시장 모델링을 담당하는 M-SIM 모듈과 가격결정 기능을 담당하는 P-SIM 모듈로 구성되어 있다. 이러한 모듈별 프로그램 구현기법은 향후 모듈만의 추가로 프로그램의 확장이 가능하기 때문에 모듈 단위로 프로그램을 개발하였다.

### 3.1 전력시장 모델링 모듈(M-SIM)

전력시장 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 우선적으로 전력시장을 모델링 하여야 한다. 시장 모델링은 입력데이터로 표현할 수 있으며 입력데이터를 구성할 때 특히 발전기, 부하, 송전선로 등 전력시장 모형을 구성하는 객체(Object) 모델링이 정확히 정의되어야 한다. 기본적으로 전력시장 모델링은 각 계통의 구성 요소를 객체와 클래스(Class)로 분류하여 나타낸다[9]. 시장 모델링 개념을 설명하기 위해 그림 2에서 간단한 전력시장 모형을 가정하여 전력시장 모형에 따른 객체와 클래스의 구조를 이해할 수 있다.

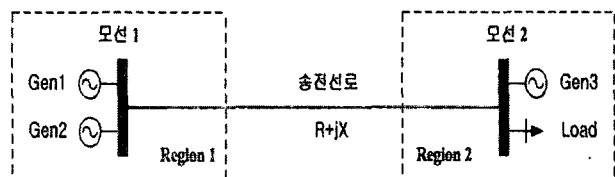


그림 2 2모션으로 구성된 전력시장 모형  
Fig. 2 Electricity market model with 2 buses system

그림 2에서 살펴보면, 지역 1(Region 1)은 모선 1에 발전기 2기(Gen1, Gen2)가 연결되어 있고 지역 2(Region 2)에는 모선 2에 발전기 1기(Gen3)와 부하(Load)가 연결된 구조이며 두 지역간 연계선로 1개의 송전선로가 구성되어 있다. M-SIM에서 시장모델링 구현방법은 해당 시장모형을 모두 객체로 분류하여 객체별 DB를 구성하고 시장모형의 구성 객체는 관계형 DB 구조에 의해 서로 간의 정보를 주고받으며 시장모형을 형성하도록 되어있다. 그림 2의 간단한 시장모형을 대상으로 객체별 DB 구성 원리를 그림 3에 나타내었다.

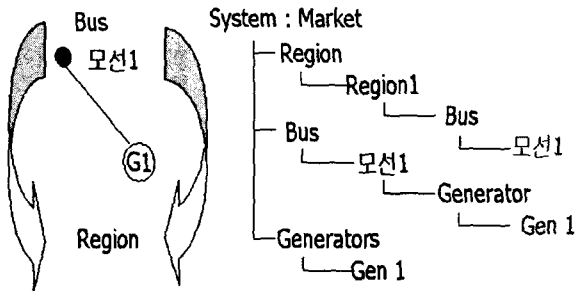


그림 3 전력시장 모형 및 객체와 클래스 구조  
Fig. 3 Market Model and structures of object and class

그림 3에서 살펴보면, 객체와 클래스 구조에 따라 지역, 모선, 발전기, 부하 그리고 송전선로가 객체로 설정되고 각각의 해당 객체는 클래스를 이용하여 표현이 된다. 즉, 지역 1의 객체에 발전기 Gen1과 Gen2 그리고 지역 2의 경우에는 발전기 Gen3과 부하 클래스가 구성되어 객체를 형성하고 구성된 객체를 이용하여 전력시장 모형을 나타낼 수 있다. 이와 같이 객체와 클래스의 정의를 통해 정확한 입력 파라미터를 정의하고 전력시장 데이터베이스(DB)를 작성할 수 있다. MMPS에서는 이러한 주요 객체를 데이터 트리 뷰(DTV(Data Tree View)) 방식으로 구성하여 사용자가 쉽게 데이터를 입력하도록 구성하였다. MMPS는 데이터-구동방식(data-driven type)으로 구현되어 있어 시장모델링은 데이터의 입력을 통해 각 객체의 요소를 구현하는 형태로 되어 있다. MMPS에 적용된 엑세스 DB는 모든 데이터들을 테이블과 같은 형태로 나타내어 저장하는 관계형 데이터베이스이다. DB의 구조가 표 형태를 갖기 때문에 전력시장을 구성하는 주요 객체인 Regions, Nodes, Companies, Generators, Purchasers, Lines, Fuels, 그리고 Reserves의 상위개념의 객체가 설정되고 각각의 객체에 하위 객체와 클래스가 존재하여 입력데이터를 구성한다.

MMPS에 구현된 DB의 연결도를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 ItemSpec은 발전기, 부하, 예비력, 송전선로 등과 같은 객체의 이름과 정렬순서를 정의하고 ItemMaster에서 각 Item들의 Entity를 정의한다. 발전기의 경우 실제 데이터 입력은 generatorData와 generatorCostData에서 처리된다. 그림 4에서 결과에 해당하는 부분은 발전기와 전력구매자의 G.StackData 부분과 시장가격을 의미하는 G.mcpData 부분이 결과 데이터가 저장되는 부분으로 구성되어 있다. 각 해당 클래스는 입력데이터를 속성(property)으로 갖는다.

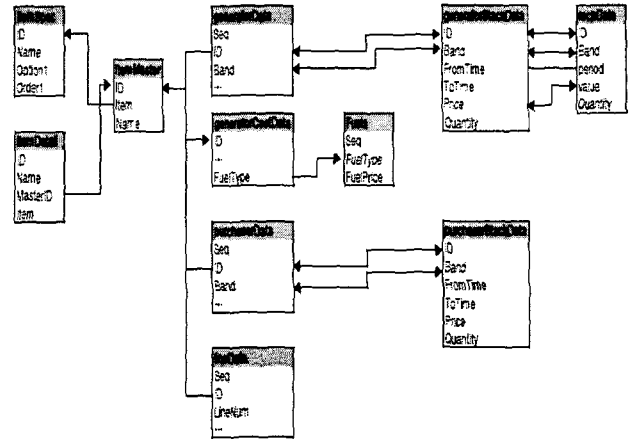


그림 4 MMPS의 DB 연결도  
Fig. 4 Database connection diagram of MMPS

발전기에 해당하는 기본적인 입력데이터는 표 1과 같이 제시된 입력데이터는 전력시장을 모의하기 위한 최소한의 데이터 집합(Dataset)을 나타낸다. 표 1에서 제시한 입력 파라미터 이외에도 시뮬레이션 대상 객체와 시나리오에 따라 다양한 입력 집합을 구성할 수 있다. 이렇듯 객체화된 DB 구조를 통해 다양한 시장시뮬레이션 모형 구현이 가능하다.

표 1 전력시장 모의를 위한 입력데이터  
Table 1 Input data for electricity market simulation

시장모델링 주요객체	속성(Property)
발전기 객체 (Object)	발전기의 Unit 수/최대 출력 용량 전력공급자의 입찰용량(MW)/입찰가격 증감발률 발전기 비용 파라미터(A, B, C 비용계수)
부하 객체 (Object)	수요예측데이터 전력구매자의 입찰용량(MW) 전력구매자의 입찰가격
송전선로 객체 (Object)	조류의 최대/최소 송전선로 임피던스

### 3.2 전력시장 가격결정 모듈(P-SIM)

전력시장 모형에서 시뮬레이션을 수행하는 시뮬레이터 엔진의 가장 핵심기능 중 한 부분은 가격결정을 담당하는 모듈이다. MMPS는 입력된 DB를 이용하여 가격을 결정하고 결정된 가격에 따라 국내 정산규칙에 따라 각 시장 참여자의 수익 등 다양한 시장시뮬레이션에 대한 모의분석이 가능하다. MMPS에 구현된 시장가격결정 모듈인 P-SIM은 CBP 시장에서의 SMP, 양방향입찰시장에서의 MCP 그리고 모선별 한계가격을 결정하는 LMP를 산정할 수 있다. 현재 운영 중인 CBP 시장과 양방향입찰시장을 고려하여 MMPS에서 계산할 수 있는 가격산정 메카니즘은 크게 3가지로 나누어 생각할 수 있고 표 2에 M1, M2 그리고 M3로 분류하여 제시하였다.

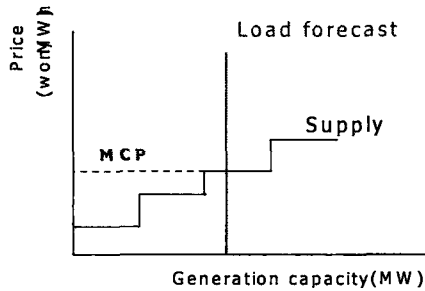
표 2 P-SIM에 구현된 가격산정 메커니즘

Table 2 Market price mechanism for implementing P-SIM

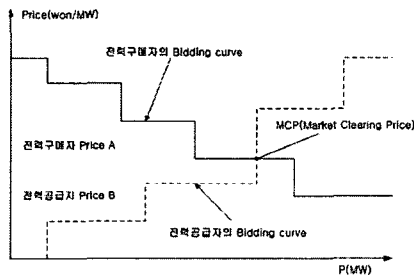
시장가격 산정기법	기본 입력데이터(Input Properties)	
	발전사업자(공급측)	전력구매자(수요측)
M1	공급입찰(Offer data)	수요예측데이터
M2	공급입찰(Offer data)	구매입찰(Bid data)
M3	발전비용 데이터	수요예측데이터

3.2.1 M1 산정기법

M1 방법은 발전사업자의 입찰데이터와 수요예측 데이터를 이용하여 시장가격을 결정한다. 우선 발전사업자의 경우, 다수의 발전사업자는 거래일 전에 10 대역(Band) 미만의 가격과 용량 세트를 입찰데이터로 작성하여 제출하게 된다. 제출된 모든 발전사업자의 입찰데이터를 정렬(ordering)하여 스택을 쌓고 전체적인 스택곡선을 만들게 된다. 그림 5(a)에서 살펴보면 공급에 해당하는 곡선이 전체 입찰데이터가 누적된 스택곡선임을 알 수 있다. 수요 측면에서는 입찰데이터가 아닌 수요예측데이터를 이용하여 교차점(Clearing Point)를 찾아 MCP를 결정하게 된다. P-SIM에서 MCP를 산정하기 위해 공급곡선과 수요예측데이터를 이용하여 발전비용 최소화 목적함수와 수급조건 및 입찰데이터 등의 제약조건으로 구성된 문제를 정식화 하여 최적화 프로그램을 이용하여 최적의 해를 찾게 된다.



(a) M1 기법의 가격결정 방법



(b) M2 기법의 가격결정 방법

그림 5 P-SIM에 구현된 M1 및 M2의 가격결정 메커니즘  
Fig. 5 Price determination mechanism of M1 and M2 in P-SIM

3.2.2 M2 산정기법

M2 방법은 발전사업자와 전력구매자의 입찰데이터를 이용하여 가격을 결정한다. 시장가격 MCP의 결정은 전력공급자와 전력구매자의 입찰데이터를 이용하여 산정할 수 있으

며 이는 양방향입찰시장의 가격결정 방법에 해당한다. 시장 가격예측을 위한 가격결정 절차는 그림 5(b)와 같다. 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 전력공급자의 입찰곡선과 전력구매자의 입찰곡선의 교차점이 시장가격 MCP로 결정된다. MCP가 결정되는 교차점에서 전력공급자와 전력구매자의 가격(cleared price)이 일치할 경우 해당 가격은 시장가격으로 결정되지만 일치하지 않은 경우도 있다. 일반적으로 일치하지 않는 경우, MCP의 결정은 전력구매자의 Price A와 전력공급자의 Price B의 평균을 계산하여 결정할 수 있다 [10]. 양방향시장에서의 MCP를 결정하기 위해 다음과 같이 목적함수와 제약조건으로 구성된 최적화 문제를 고려한다. MCP 결정을 위한 정식화에서 목적함수는 전력을 구매한 전력구매자의 이득에서 전력생산 비용을 뺀 값인 사회적 이득 또는 잉여(Social welfare)의 최대화로 구성하였고 식 1에 나타내었다. 제약조건으로는 수급균형을 나타내는 식 2, 선로용량 제약을 나타내는 식 3, 입찰 관련 제약을 식 4 그리고 모선의 주입전력을 나타내는 식 5로 구성된다. 단, 식 3과 5는 LMP 산정을 위해 송전제약을 고려한 시뮬레이션을 위해 정식화에 포함되었고 선로제약을 고려할 경우, 정의된 모선(아래 수식 p, q)에서의 주입전력과 발전기와 부하의 수급균형 제약을 이용하여 시뮬레이션을 수행하게 된다.

• 목적함수

$$\max \sum_{t \in SG(t)} \sum_{j \in ST} LQ(i,j,t) \times LP(i,j,t) - \sum_{t \in SG(t)} \sum_{j \in ST} u(i,t) \times GQ(i,j,t) \times GP(i,j,t) \text{ for all } t \quad (1)$$

• 제약조건

$$\sum_{j \in ST} u(i,t) \times GQ(i,j,t) - \sum_{t \in SL(t)} \sum_{j \in ST} LQ(i,j,t) = 0 \quad (2)$$

$$F_{min}(p,q) \leq F(p,q,t) \leq F_{max}(p,q) \quad (3)$$

$$PG_{min}(i,j,t) \leq GQ(i,j,t) \leq PG_{max}(i,j,t) \quad (4)$$

$$0 \leq LQ(i,j,t) \leq PL_{max}(i,t) \quad (4)$$

$$F(p,q,t) = \sum_{t \in SG(k,t)} \sum_{j \in ST} u(i,t) \times GQ(i,j,t) - \sum_{t \in SL(k,t)} \sum_{j \in ST} LQ(i,j,t) \quad (5)$$

단,

i=전력공급자 또는 전력구매자의 수의 지수(index)

j=공급입찰 또는 구매입찰 스택 수의 지수(index)

t=거리주기(시간)의 수의 지수(index)

k=모선 수(p, q)

ST=입찰 Stack 수(12모선의 경우, ST=3)

SG(t)=t 시간에 전력공급자의 입찰데이터 셋(set)

SL(t)=t 시간에 전력구매자의 입찰데이터 셋(set)

GQ(i,j,t)=t 시간에 전력공급자 i의 j 번째 입찰 용량

GP(i,j,t)=t 시간에 전력공급자 i의 j 번째 입찰 가격

LQ(i,j,t)=t 시간에 전력구매자 i의 j 번째 입찰 용량

LP(i,j,t)=t 시간에 전력구매자 i의 j 번째 입찰 가격

$F(p,q,t)=t$  시간에 p모선과 q모선 사이의 선로에 흐르는 조류  
 $Fmin(p,q)=p$  모선과 q모선의 사이의 열용량 최소값(일반적으로 0)  
 $Fmax(p,q)=p$  모선과 q모선의 사이의 열용량 최대값(MW)  
 $u(i,t)=t$  시간에 전력공급자 i의 기동 여부(0/1)  
 $PGmin(i,j,t)=t$  시간에 전력공급자 i의 최소 발전량(MW)  
 $PGmax(i,j,t)=t$  시간에 전력공급자 i의 최대 발전량(MW)  
 $PLmax(i,t)=t$  시간에 전력구매자 i의 최대 수요량(MW)

**3.2.3 M3 산정기법**

M3의 경우, 발전사업자의 개별 발전기 비용함수와 수요 예측데이터를 이용하여 가격을 산출할 수 있다. 일반적으로 비용함수는 2차 함수의 형태로 주어지기 때문에 MMPS에 구현된 알고리즘에서는 10개의 부분 선형화(piecewise linear)를 이용해서 문제를 정식화한다. 발전비용에 필요한 입력데이터는 발전기 용량의 최대/최소, 열계수(Heat Rate), 연료단가(Fuel Price) 그리고 무부하비용 및 기동비용 등 발전비용을 제외한 변동비(SCNL)를 사용한다. 이러한 입력데이터를 이용하여 모든 발전기에 대한 선형화 구간을 계산하고 발전비용(Gen\_cost) 기준으로 정렬(낮은 순부터)하여 스택을 쌓은 후 수요예측 데이터와 비교하여 가격을 결정한다. MMPS의 경우 식 6과 같이 2차, 1차 그리고 상수항의 열계수를 입력하고 해당 발전기의 연료비용(FP) 그리고 기타 비용의 SCNL 값을 입력하여 발전비용에 따른 공급곡선을 구성하게 된다.

$$G\_Cost = HR \times FP + SCNL \quad (6)$$

단,  $G\_Cost =$  Generation Cost(원/MWh)  
 $FP =$  Fuel Price(원/GJ)  
 $HR =$  Heat Rate(GJ/MWh)  
 $SCNL(Start Cost \& No Load) Cost =$  발전비용의 변동비를 제외한 비용 (무부하비용과 기동비용)

HR의 의미는 화력 발전기 모델링의 경우 입력되는 파라미터로 MW의 전력생산을 위해 소모되는 연료량을 의미하며 식 6의 정의에 따라 FP, HR, SCNL 파라미터를 이용하여 화력/복합화력/원자력 발전기 등을 모델링 할 수 있다. 수력(Hydro) 리소스를 이용하여 발전기 모델을 구현할 경우에는 발전기(Generator), 저장소(Storage), 수로(Waterway) 객체를 이용하여 모델링 할 수 있으며, 간단한 모델로 표현할 경우에는 저장소, 수로 객체는 고려하지 않고 발전기의 Unit 수, 최대 용량의 기본적인 데이터 집합으로 표현하고 수력발전기 운영에 따른 제약조건(GWh의 용량 제약)을 추가하여 모델링을 구현할 수 있다.

**4. 전력시장 모델링 및 시장가격 시뮬레이션**

**4.1 전력시장 모델링 및 가격모의 프로그램 구현**

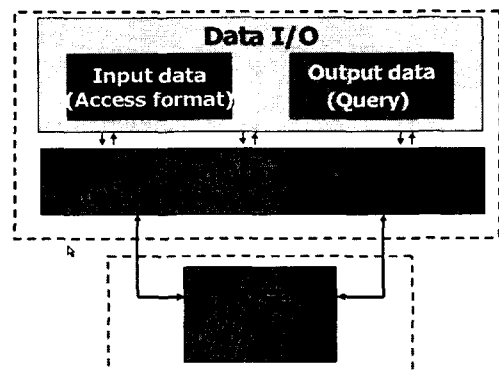
MMPS 프로그램 구성은 입력 DB, 최적화 엔진을 포함한

시뮬레이션 엔진 그리고 출력 DB의 세 부분으로 구성된다. MMPS의 동작원리는 M-SIM 모듈에서 입력받은 DB를 모델링하고 시장시뮬레이션을 위한 시나리오 작성에 따라 시뮬레이션 엔진모듈이 수행된다. 각각의 엔진모듈이 수행될 때는 최적화 과정은 최적화 툴(solver)을 통해서 상호 결과를 인터페이스 하게 된다. 시뮬레이션 결과는 다시 M-SIM을 통하여 액세스 DB형태의 데이터 포맷과 사용자 기호에 맞는 그래픽 형태로 제공되어 시장시뮬레이션 결과 해석을 수행할 수 있다. MMPS의 개발환경 및 기본사양을 표 3에 나타내었고 MMPS의 동작특성을 그림 6에 나타내었다.

**표 3 MMPS 개발환경 및 기본사양**

**Table 3 Environment and specification of developing MMPS**

MMPS	개발환경
운영환경(OS)	Window 32 bit system
입출력 DB(I/O DB)	Microsoft(MS) Access DB
최적화 프로그램 (Optimization solver)	MOSEK v3.1 (LP/MIP/DP/IP)
Operation Platform	MS .NET Framework (ver. 1.1)
개발 언어(language)	Visual Basic .NET (MS Visual Studio 7.0)



**그림 6 MMPS의 동작특성**

**Fig. 6 Operation characteristics of MMPS**

국내 전력시장모의를 위한 전력시장 모델링 및 가격모의 프로그램인 MMPS의 주요 특징은 다음과 같다.

- 객체 기준 (Object-based modeling)의 전력시장 모델링 및 데이터 구동방식(Data-driven), 모듈(Module)별 프로그램 구성
- 수학적 모델링 기준의 프로그램 기법(Linearized LP model 구현) 적용
- .NET Framework(v1.1) 적용을 통한 시장시뮬레이션의 속도 향상
- 한글 입력을 포함한 시장데이터의 액세스 기반 DB 구성, 계통해석/모의를 위한 PSS/E 데이터 호환 및 계통모형/시장모형 요약기능 제공
- 가격 모의를 위한 다양한 시뮬레이션 옵션 선택 및 데이

- 더 스택(Stack) 곡선 분석 가능
- 그래픽 툴(Chart FX .NET)을 이용한 다양한 결과 분석 용이(다중 window 적용 및 그래프 제공)
- CSV 포맷의 입력 파일 입력 가능 및 시물레이션 결과의 파일 저장 가능
- 국내시장규칙(Market Code) 기준의 입찰데이터 구성, 가격결정 및 정산 알고리즘 적용
- 전력시장 모의 해석을 위한 시각화 모형 제시(교육적 기능 제공 및 Visualization)

**4.2 MMPS를 이용한 시장시물레이션**

MMPS 프로그램을 이용하여 3가지 시장모형을 이용하여 성능 및 유용성을 검증한다. 우선 시각화 모형으로 개발된 12모선 계통을 대상으로 8개의 발전사업자와 7개의 전력구매자가 각각의 입찰데이터를 제출하는 시나리오를 적용한 MCP 산정, CBP 전력시장의 SMP 산정 그리고 송전제약을 고려한 5모선계통을 대상으로 LMP 산정 시물레이션을 MMPS 프로그램으로 모의 분석하였다.

**4.2.1 12 모선 시각화 모형을 이용한 시물레이션**

그림 7에 12모선의 전력시장이 구현된 시각화 모형과 MMPS 프로그램의 전체적인 구성도 나타내었다. 그림 7의 왼쪽 화면은 입력 DB를 트리 뷰 형태로 입력하고 시장모형을 구성하게 된다. 또한, 오른쪽 화면은 입력데이터의 세부 내용을 Data Grid 형태로 보여주고 시물레이션 결과를 그림으로 보여주는 영역이다. 12모선의 경우 시각화 모형으로 구현하여 사용자의 교육, 훈련기능을 담당하도록 하였다. 시각적 모형에서 사용자가 해당 객체(발전기/부하/선로)의 데이터 변경을 통해 다양한 시물레이션이 가능하다. 그림 7의 아래 창은 최적화 및 시장시물레이션 과정을 사용자에게 전달하는 기능을 담당한다.

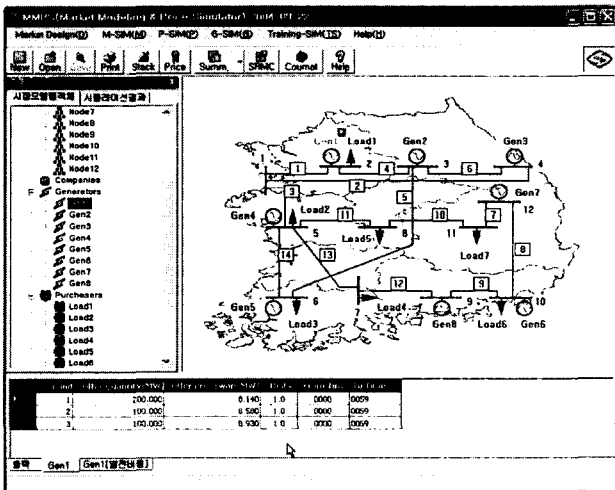


그림 7 12모선 전력시장이 구현된 시각화 모형  
Fig. 7 Visual electricity market model with 12 buses

본 시장모형은 양방향입찰시장을 대상으로 표 4와 같이 발전사업자와 전력구매자의 입찰데이터[10]를 이용하여 MCP를 결정하도록 되어있다. MMPS 프로그램에서는 MCP

를 결정하기 위해 사회적 이득의 최대화를 목적함수로 하여 제약조건을 포함한 정식화를 구성하고 최적화(LP) 틀에 해당하는 모세를 호출하여 최적화 시물레이션을 수행한다.

표 4 발전사업자 및 전력구매자의 입찰데이터

Table 4 Offer and Bid data for generators and purchasers  
(a) 발전사업자의 입찰데이터

Gen	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
GP1	8.14	8.08	8.34	11.35	11.38	8.36	13.41	5.39
GP2	8.58	8.46	8.81	11.66	11.71	8.88	13.78	5.65
GP3	8.93	8.81	9.25	11.97	12.02	9.32	14.09	5.87
GQ1	200	200	200	100	100	200	40	300
GQ2	300	300	300	150	150	300	80	450
GQ3	400	400	1200	400	600	400	200	500
RU	20	20	20	10	10	20	10	30
RD	20	20	20	10	10	20	10	30

(b) 전력구매자의 입찰데이터

Load	Pur1	Pur2	Pur3	Pur4	Pur5	Pur6	Pur7
LP1	50	50	50	50	50	50	15.5
LP2	50	50	50	9.01	8.57	50	13
LP3	8.45	50	8.37	8.64	8.44	8.8	8.5
LQ1	200	100	200	120	130	150	50
LQ2	230	100	230	160	150	180	80
LQ3	260	100	270	280	160	220	100

P-SIM의 최적화 과정을 통해서 결정된 MCP는 8.81 원/MW이고 각 발전기별 출력(급전) 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 살펴보면 한계가격이 높은 G4, G5 그리고 G7은 가격결정에 참여하지 않기 때문에 발전기 급전에서 제외되었다.

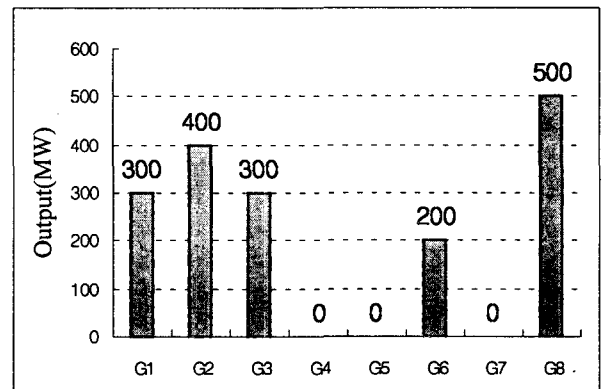


그림 8 MCP 결정을 통한 각 발전기별 출력(Dispatch) 결과  
Fig. 8 Generation dispatch output with determined MCP

4.2.2 CBP 전력시장 모형

현재 국내 전력시장은 CBP 전력시장이 운영중이며 당분간 국내 여건상 CBP 전력시장이 유지될 전망이다. 이에 따라 CBP 전력시장의 효율적이고 경제적인 운영을 위해 CBP 시장에 대한 분석이 시급히 요구되고 있으며 MMPS의 경우, LP 문제로 정식화하기 위해 입력된 발전비용데이터를 10개의 구간으로 선형화하여 수요예측데이터를 입력받아 SMP를 산정하고 있다. 그림 9에 2002년 CBP 전력시장에서의 입찰발전기의 비용곡선을 선형화 한 후 스택을 쌓은 결과를 나타내고 있다.

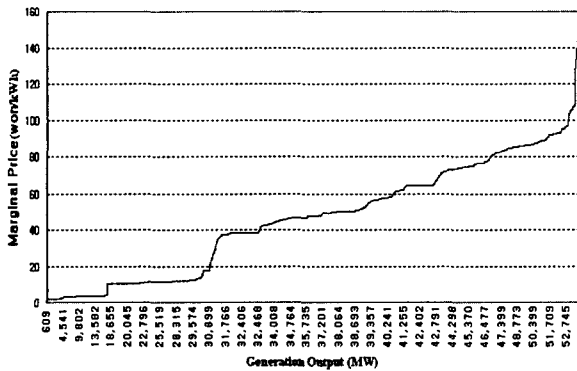
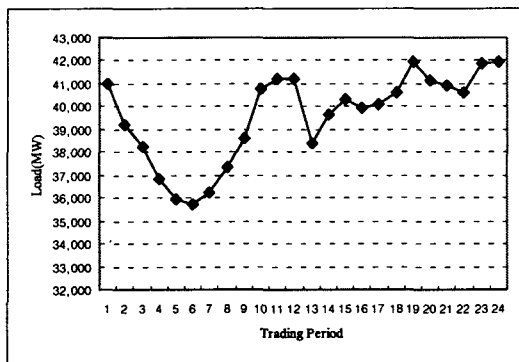
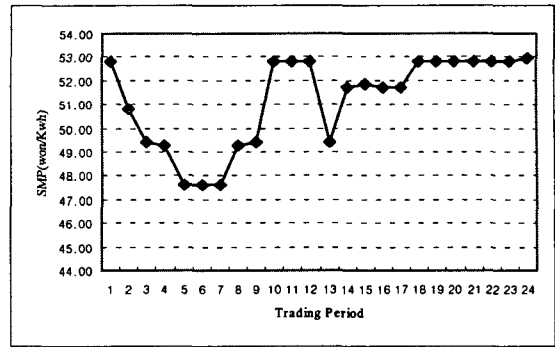


그림 9 입찰에 참여한 발전기의 공급곡선  
Fig. 9 Supply curve of generators

그림 10(a)에 하루 동안의 수요예측데이터를 나타내고 있다. 하루 동안의 수요데이터의 변동은 35,689 MW에서 41,992 MW 범위 내에서 변동 특성을 나타내고 있다. 수요예측데이터는 MMPS 프로그램이 M-SIM 모듈에 CSV 파일 형태로 입력된다. 입력된 데이터를 이용하여 P-SIM에서 공급곡선과 수요예측데이터를 이용하여 발전비용 최소화를 정식화로 구성한 목적함수와 계통 제약조건을 구성하여 최적의 해를 찾게 된다. 그림 10(b)에 SMP 산정결과를 나타내었다. 수요예측데이터가 1시간 단위로 24개의 변동을 갖기 때문에 SMP 역시 24개의 가격이 결정되었다. 그림에서 SMP 결과를 살펴보면, 부하의 변동특성에 따라 SMP는 47.6 원/kWh에서 53.0 원/kWh의 변동 특성을 갖고 있으며 하루 동안의 SMP 평균가격은 51.2 원/kWh로 산정되었다. SMP 산정결과를 기준으로 다양한 시나리오를 적용하여 시장지배력 등 시장분석이 가능하다.



(a)수요예측데이터(Load Forecast Data)



(b) SMP 산정 결과(SMP results)

그림 10 수요예측데이터 및 SMP 산정 결과  
Fig. 10 Load forecast data and SMP results

4.2.3 LMP 분석을 위한 5모선 전력시장 모형

CBP 시장에서의 SMP 산정과 양방향입찰시장에서의 MCP 산정은 선로제약을 고려하지 않은 비계약에서 가격결정 메커니즘을 가지고 있고 또한 국내 전력시장 규칙에 따라 단일가격체계에 의해 가격이 결정되었다. 하지만 해외 전력시장의 경우, 모선별 한계가격인 LMP를 도입하여 운영중이며 국내 전력시장의 경우에도 향후 환경적 변화에 따라 송전제약을 고려한 모선별 한계가격에 대한 분석이 필요하다. LMP에 대한 기술적인 정의는 자발적이고 입찰을 기준으로 안전도 제약을 고려한 경제급전(security-constrained economic dispatch) 시장이며 한계발전가격(marginal generation costs)을 중심으로 한 특정지역에서의 에너지 자원 및 송전선로 혼잡비용 등을 결정한다. LMP는 최적발전기의 급전 이외에도 지역에서의 에너지 자원 및 송전선로 혼잡비용을 결정하는 수학적 계산 모델이다. 모선별 한계비용과 선로의 잠재가격(Shadow Price) 분석을 위해 P-SIM 모듈에 LMP 기능을 추가하여 개발하였다. MMPS 프로그램에서 LMP의 기능을 분석하기 위해 그림 11과 같은 5모선 전력시장 모형을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였고 표 5에 전력시장을 구성하는 발전기, 부하, 선로제약에 대한 객체의 입력데이터를 나타내었다.

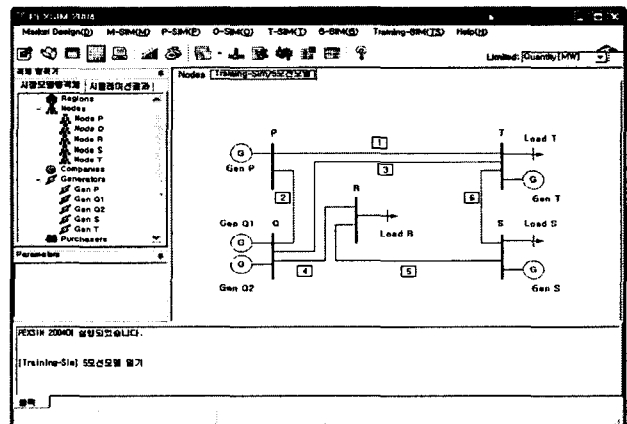


그림 11 송전제약을 고려한 5모선 전력시장 모형  
Fig. 11 Five Buses system considering network constraints

표 5 5모선 전력시장 모형의 입력데이터(발전기/부하/선로)

Table 5 Input data for generators, loads and lines of electricity market model

발전사업자 /부하	Offer Price (원/MW)	Offer Quantity (MW)	선로	선로계약 (MW)
Gen P	10	600	Line 1	150
Gen Q1	15	100	Line 2	425
Gen Q2	14	110	Line 3	300
Gen S	30	520	Line 4	200
Gen T	30	200	Line 5	300
Load R/S/T	233		Line 6	200

LMP 시뮬레이션을 수행하기 위해 모선 P를 기준모선(Reference Node)으로 설정하였고 MMPS 프로그램의 P-SIM 모듈에서 산정한 모선별 가격을 표 6에 나타내었다. 표 6에서 볼 수 있듯이 모선 P가 가장 낮은 한계가격을 나타내고 있고 모선 R과 S는 가장 높은 한계가격을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 송전계약에 따른 LMP 정보를 이용하여 설비투자자에 대한 평가 및 분석을 할 수 있을 것으로 사료된다.

표 6 5모선 계통에 대한 LMP 산정결과

Table 6 LMP results for five buses system

모선	LMP(원/MW) (모선별 한계가격)	선로	잠재가격(원/MW) (Shadow Price)
모선 P	10	Line 1	4
모선 Q	14	Line 2	4
모선 R	30	Line 3	0
모선 S	30	Line 4	16
모선 T	14	Line 5	0
		Line 6	16

### 5. 결 론

본 논문에서는 국내시장 규칙을 반영하고 가격모의 중심의 시장 시뮬레이터인 MMPS의 주요 모듈 중에서 시장모델링을 수행하는 M-SIM 그리고 가격결정 메카니즘이 구현된 P-SIM을 중심으로 구현된 알고리즘과 동작특성을 중심으로 기술하였다. MMPS 프로그램의 가장 큰 장점은 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 일반적으로 기존의 해외전력시장에서의 사용되는 상용 시뮬레이터는 사용하기가 어렵고 기본적으로 모든 시장구조에 맞도록 개발되었지만 세부적으로 살펴보면 시장 모델링(입력 DB 구성)과 정산부분에 수정이 불가피하다. 하지만 MMPS의 경우, 데이터 구동방식으로 시장모델링을 하고 시뮬레이션을 수행하는 과정을 사용자 편의를 고려하여 설계를 하였고 시각적 모형 개념을 도입하여

시장참여자들이 쉽게 시장시뮬레이션에 접근하도록 설계하였다. 또한, 국내시장규칙을 기반으로 작성되었기 때문에 국내 시장분석에 용이하고 시장규칙의 변경 등에 능동적으로 대응할 수 있다. 둘째로 P-SIM에 구현된 메카니즘은 모두 선형계획법(LP) 기반의 최적화 문제를 구성하여 정확한 해를 도출하도록 개발하였고 시뮬레이션 결과는 결과 트리뷰 기법을 도입하여 다양한 시장시뮬레이션 분석이 가능하도록 하였다. 또한, 방대한 양의 시장데이터, 다양한 시나리오 적용에 따른 계산속도 그리고 향후 프로그램의 확장성을 고려하여 닷넷 프레임워크를 기본 플랫폼으로 설정하여 개발하였다.

MMPS 프로그램을 기본으로 한국형 시장시뮬레이터를 개발하는 연구를 추가적으로 시행하고 있다. 현재 MMPS의 핵심 기능인 M-SIM과 P-SIM을 포함하여 송전혼잡을 해석하는 T-SIM, 운전계획과 관련된 O-SIM 그리고 입찰전략 수립을 위한 G-SIM 모듈을 추가하여 한국형 시장시뮬레이터인 PEXSIM(Power Exchange Simulator) 시제품 개발이 완료되어 각 모듈별 기능을 검증하고 있다. 전력시장 시뮬레이터인 PEXSIM을 이용하여 추가적인 기능 구현 및 한국 시장 모형을 대상으로 DB 구축작업을 진행하고 있다. MMPS의 개발은 기본적으로 시뮬레이터 개발에 큰 목적이 있지만 시뮬레이터 개발과 더불어 시장시뮬레이션 기술의 확보와 시장데이터베이스를 구축하는 것이 매우 중요하다. 한국형 시뮬레이터의 개발로 다양한 시장시나리오에 대한 시장모의 및 분석을 통하여 정책개발 및 시장규칙 개선에 활용할 수 있으며 시장참여자에게 입찰전략에 따른 이익증대와 교육수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참 고 문 헌

- [1] 허진, 강동주, 국경수, 김태현, 이정호, 문영환, "한국형 Market simulator 개발(I)", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, Vol. 1, pp. 108-110, 2002
- [2] 허진, 강동주, 국경수, 김태현, 이정호, 문영환, "한국형 Market simulator 개발(II)", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp. 665-657, 2003
- [3] J. Hur, D. J. Kang and Y. H. Moon, "The framework design of an electricity market simulator", IFAC Symposium on Power Plants & Power systems Control, vol.3, pp. 1227-1231, 2003.
- [4] 광봉수, "VB.NET 데이터베이스 프로그래밍", GM 출판사, G-123, 2003
- [5] 김재우, 강호원, 정재선, 육창근, 오준석, "Visual Basic.NET Programming Bible 2nd Edition", 영진출판사, 2003
- [6] A. Debs, C. Hansen, and Y. Wu, "Effective electricity market Simulators", IEEE Computer Applications in Power Vol. 14, pp. 29-34, Jan 2001
- [7] G. J. Anders, "Competitive market simulator-Example development for Ontario Market", in Proc. IEEE Power Eng. Society Summer Meeting, pp. 919-928, July 2000
- [8] Hongjin Liu, Bin Yuan, Hongwei Dai, and Jiken Lin,



“Framework Design of a general-purpose power market simulator based on Multi-agent technology”, in Proc. IEEE Power Eng. Society Summer Meeting, pp. 1478-1482, July 2001

[9] DraytonAnalytics, “PLEXOS for power system”, Knowledge Base Manual, 2004

[10] G. B. Shrestha, Song Kai and L. K. Goel, “An efficient power pool simulator for the study of competitive power market,” Proceedings of the IEEE Power Engineering society winter meeting, vol.2, pp.1365-1370, 2000.

[11] 양광민, 이기송, 박종배, 신중린, “교육용 전력조류계산 프로그램의 웹서비스를 위한 시스템 구성 및 재가공 방법론 개발”, 전기학회논문지 A, 제6권, pp. 324-333, 2004

[12] M. Madrigal, M. Flores, “Intergrated software platform to teach different electricity spot market architectures”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 19, No. 1, pp. 88-95, Feb. 2004

저 자 소 개



**허진(許眞)**  
 1973년 4월 27일생. 1997년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 한국전기연구소 입사. 현재, 전기시험연구소 전력시장기술연구그룹 근무. 주요 관심분야: EMTDC 모델링 및 RTDS를 이용한 실시간 시뮬레이션, 전력계통 안전도 해석, 전력시장에서의 Market simulation 분석 및 시뮬레이터 개발  
 Tel : 031-420-6133, Fax : 031-420-6139  
 E-mail : jinhur@keri.re.kr



**정해성(丁海聖)**  
 1969년 12월 22일생. 1993년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사. 2004년 동 대학원 전기공학과 박사. 2003년~현재 한국전기연구원 전력시장기술연구그룹 선임연구원. 관심분야: 전력시장 설계기법 및 모의  
 Tel : 031-420-6134, Fax : 031-420-6139  
 E-mail : junghs@keri.re.kr



**강동주(姜東周)**  
 1975년 9월 9일생. 1995년 홍익대학교 전자전기제어공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학석사). 2001년~현재 한국전기연구원 전력시장기술연구그룹 연구원. 관심분야: 전력시장에서의 전력거래 분석 및 시장참여자의 전략적 행위 모델 구현  
 Tel : 031-420-6138, Fax : 031-420-6139  
 E-mail : dj kang@keri.re.kr



**문영환(文英煥)**  
 1956년 5월 13일생. 1979년 서울대학교 전기공학 학사. 1981년 동대학원 전기공학 석사. 1990년 University of Texas at Arlington 전기공학 박사. 1981년 전기연구원 입사. 선임연구원, 전력계통연구실장, 시스템제어연구그룹장. 현재 전력시장기술연구그룹 그룹장. 관심분야: 전력계통해석, 전력시장 설계 및 전력시장 모의 분석  
 Tel : 031-420-6130, Fax : 031-420-6139  
 E-mail : yhmoon@keri.re.kr