

연속식 가열로의 Level 2 제어 시스템 설계

유보현* 이재용 임동렬 차재민 염충섭

고등기술연구원

Design of Level 2 Control System for Continuous Reheat Furnaces

BoHyun Ryu*, JaeYong Lee, DongRyul Rhim, JaeMin Cha,
ChoongSub Yeom

Institute for Advanced Engineering

Abstract : Steel in a continuous reheat furnace is heated to higher temperature to be treated in the rolling steel process. Due to this reason the continuous reheat furnace system requires an optimal control system to adjust the temperature inside the furnace. Level 2 control systems for continuous reheat furnaces generate automatic heating set points for the level 1 system of the furnace based on the mathematical thermal model which can give a good estimation of steel heating inside the furnace and is used to adjust heating requirements to optimize furnace combustion. For the current study the analytic methodology based on the design procedure from the systems engineering to develop new level 2 control system of a continuous reheat furnace was proposed. The system analysis and the requirements of the level 2 control system were derived using the unified modeling language (UML) 2.0, and the design of database and the graphic user interface (GUI) for the level 2 control system were conducted.

Key Words : Continuous Reheat Furnace, Level 2 System, PLC, Furnace Control, Systems Engineering

Received: April 4, 2016 / **Revised:** May 3, 2016 / **Accepted:** May 11, 2016

* 교신저자 : Bo Hyun Ryu, zzigee@iae.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

철강재 가열로는 슬라브(Slab), 블룸(Bloom), 빌렛(Billet) 등 강편 및 강괴를 열간압연 또는 단조하기 위하여 적정 온도까지 재가열하는 설비로써, 철강 산업에서 중요한 역할을 수행하는 설비 중 하나이다(Korea Energy Agency, 2015). 일반적으로, 철강재 가열에서는 처리 물량이 크고 효율성이 높은 연속식 가열로(Continuous Reheat Furnace)가 주로 사용되고 있으며, 연속식 가열로의 내부 온도를 높이기 위해서는 Liquefied Natural Gas(LNG)나 Liquefied Petroleum Gas(LPG) 등의 연료와 공기를 일정 비율로 혼합해서 연소시킨다.

대부분의 연속식 가열로에서는 연료와 공기의 혼합을 위해서 빠른 응답과 높은 안전성의 장점을 가지고 있는 Proportional Integral and Derivative(PID) 제어가 사용되며(BSIR Mill Mill, 1998; Zhang et al., 2010), 소재 이송과 가열로의 온도 제어를 위해서는 Programmable Logic Controller(PLC) 제어가 사용되고 있다. 소재 이송에 대한 제어는 어떤 조건에 도달했을 때 워킹빔(Woking Beam)을 움직여서 소재를 배출하는 동시에 새로운 소재를 가열로 내에 가져오며, 가열로 온도제어는 원하는 온도를 지정해서 해당 온도를 유지할 수 있도록 연료와 공기의 유량을 제어한다. 연속식 가열로의 제어에서 가장 중요한 요소 중 하나는 배출되는 소재의 실제 온도와 측정된 온도 차이를 최소화하는 것이며, 이는 가열로 전체의 효율과 직접적으로 연관되기 때문이다. 이러한 연속식 가열로의 온도 차이를 최소화하기 위해서는 열전달의 수학적 모델링을 기반으로 한 Level 2 제어 시스템이 필수적이다(Hurd et al, 2011).

이러한 Level 2 제어 시스템의 필요성에도 불구하고, 이를 개발 하는 것은 쉬운 일이 아니다. 왜냐하면 Level 2 제어 시스템을 개발하기 위해서는 1) 사용자의 복잡한 요구사항, 2) Level 1 및 Level 3 제어 시스템과의 복잡한 인터페이스, 3) 운전 효율성을 높이기 위한 편리하고 직관적인 사용자 인터

페이스 등을 고려하여 설계하여야 할 뿐 아니라, 개발에 참고할 수 있는 관련 시스템 설계 전례를 찾아 보기 쉽지 않기 때문이다.

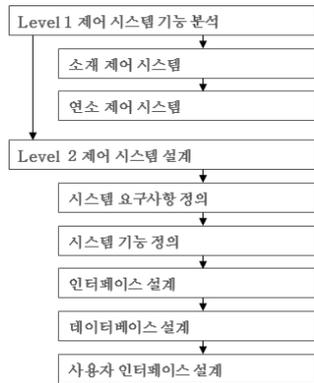
더불어 Level 2는 Level 1와 Level 3와 연동되어 운영 되는데, 여기서 Level 1은 실제 가열로를 제어하는 PLC 기반의 시스템이며 Level 3는 생산 관리 시스템으로 생산스케줄을 관리한다. 즉, Level 2는 Level 3로부터 생산스케줄에 따른 소재정보를 수신하고 그에 따라 소재정보를 트래킹하며, Level 1 으로부터 가열로 내에서 발생하는 모든 생산데이터에 저장하여 작업이 완료된 소재의 이력을 추적할 수 있다.

시스템 엔지니어링 (Systems Engineering; SE)은 복잡한 Level 2 제어 시스템을 체계적으로 개발하기 위한 하나의 대안 접근방법이 될 수 있다. SE는 비행기, 자동차, 기차 등 복잡한 시스템을 개발함에 있어 고객의 요구를 만족시키는 시스템의 솔루션을 도출하고 검증하기 위한 체계적이고 종합적인 접근 방법이다(INCOSE, 2015). 특히, SE는 이전 개발 경험이 부족한 새로운 시스템의 개발에도 적합한 특성을 가진다고 알려져 있으며, 이러한 특성은 Level 2 제어 시스템이 개발 특성에 적합하다.

본 연구에서는 Level 2 제어 시스템의 특성을 고려한 간략화된 SE 기반의 설계 절차에 근거하여 Level 2 제어 시스템을 설계하였다. 본 논문의 2장에서는 제안된 설계 절차를 보이고, 3장에서는 설계 절차에 따른 Level 2 제어 시스템의 설계 적용 결과를 보인다. 마지막으로, 4장에서는 결론으로 마무리한다.

2. 시스템 설계 절차

1장에서 전술한 바와 같이 연속식 가열로 Level 2 제어 시스템의 개발의 복잡성을 다루기 위하여 복잡한 시스템을 체계적으로 개발하는데 있어 효과적이라고 알려진 SE 접근 방법을 적용하였다. 단, Level 2 제어 시스템의 설계 비용 및 시간의 제약으로 인해, 본 연구에서는 ANSI/EIA-632 (2003),



[Figure 1] Design Process for Level 2 Control System

IEEE 1220 (2005), ISO/IEC 15288 (2015) 등과 같은 국제 표준 기반의 SE 프로세스를 모두 적용하는데 어려움이 있기 때문에, 요구사항 정의, 기능 정의 등 SE 접근 방법 중 시스템 설계에 핵심적으로 필요한 부분만을 반영하고자 하였다. 본 연구에서 적용된 설계 절차는 Figure 1과 같다.

3. 연속식 가열로 Level 2 제어 시스템 설계

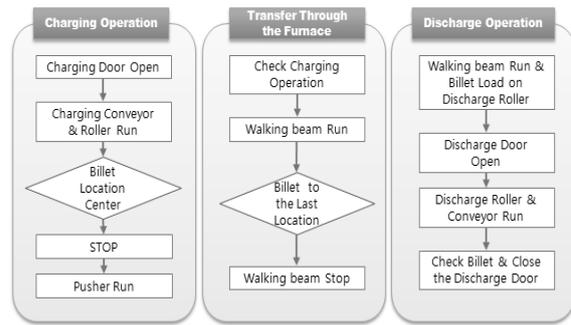
본 장에서는 2장에서 제안된 설계 절차에 따라 연속식 가열로 Level 2 제어 시스템을 설계한 결과를 예시와 함께 보인다.

3.1 Level 1 제어 시스템 기능 분석

PLC 제어를 기반으로 한 Level 1 시스템의 제어 범위 및 방법을 정의하여 상위의 Level 2 제어 시스템과 통신을 통한 데이터 전달 기능을 설계한다. Level 1 시스템에서의 기능은 크게 소재의 이송 및 추출을 위한 소재 제어와 가열로 내의 온도를 제어 및 연료 제어 등의 연소 제어로 나눌 수 있다. 소재 제어와 연료 제어에 대한 설명은 다음 하부 절에서 보인다.

3.1.1 소재 제어 시스템

소재를 이송하고 추출하기 위한 제어는 Level 1 시스템에서 담당한다. 소재의 이송을 위해서는 가열



[Figure 2] Sequence of Level 1 Material Handling

로의 장입구, 컨베이어 및 롤러, 워킹 빔, 배출구의 시퀀스 제어가 필요하며 각각에 대한 시퀀스 다이어그램은 Figure 2와 같다. 연속식 가열로 내부에서 소재의 이송을 위한 시퀀스는 소재가 연속식 가열로에서 배출되었는지 체크하고 가열로 안으로 새로운 소재를 이송하며 이송된 소재가 추출 되는 신호를 체크하여 연속식 가열로에서 배출하는 하나의 루프를 형성하면서 동작한다.

3.1.2 연소 제어 시스템

Level 1 시스템에서 담당하는 다른 기능은 연소 제어에 관련된 부분으로 주로 연속식 가열로 내의 온도 제어에 관련된 기능을 수행한다. Table 1은 연소 제어의 주요 기능을 보여준다.

<Table 1> Main Functions of Level 1 Combustion Control System

기능	설명
Temperature Control	각 존에 2개의 열전대가 설치됨. 제어 모드 선택 기능
Air/Fuel Ratio Control	공연비 제어는 Cross Limited Lead-Lag Algorithm 사용. 제어모드 선택 가능
Regenerative Burner Control	Cycling Control, Flame Control
Combustion Air Control	1차 공기 제어(5~30% 사용), 2차 공기제어(70~95% 사용)
Exhaust Gas Control	배출가스 온도를 약 150°C 유지
Furnace Pressure Control	장입구/배출구 개방 및 배기 가스량에 따른 가열로 압력 손실 제어

3.2 Level 2 제어 시스템 설계

3.2.1 시스템 요구사항 정의

Level 2 제어 시스템의 요구사항을 정의하기 위해 국내 철강회사 중에서 한국철강과 세아베스틸을 방문하여 직접 운전원들과의 인터뷰를 통해 현재 사용하고 있는 제어 시스템의 문제점을 분석한 후, Level 2 제어 시스템의 요구사항을 도출하였고, 최종 Level 2 제어 시스템의 요구사항은 다음과 같다.

- 제어기 통신 연계: Ole for Process Control (OPC)를 활용한 인터페이스 지원 필요
- Level 1 소재 이송 이벤트 (장입, 이송, 추출 등)에 대응하는 데이터 갱신/추가/삭제
- 소재 레코드 관리: Level 1 ID, Level 2 ID, 가열로 내 위치, 계획/실측 폭, 높이, 길이, 무게, 공정상 위치
- 가열로 내 소재 수량: 최대 200개
- 장입 롤의 소재: 최대 50개
- ERP(Enterprise Resource Planning) 시스템에서 생산 스케줄 수신 및 장입 순서별 소재 레코드 정렬
- 생산 스케줄 관리: 조회, 수신, 삭제, 추가, 순서변경
- 장입 롤 테이블 관리: 소재별 장입 순서 생성, 순서 변경, 추가, 삭제, 소재 레코드 편집
- 가열로 내 장입 관리: 순서변경, 소재교체(장입 테이블상의 소재와 교체)
- 추출실적 관리: 조회, 삭제, 교체 (가열로 내 소재와 교체), 레코드 편집
- 시스템, 이벤트 로그 조회 화면
- 소재별 온도 프로파일을 생성 및 출력
- 각 존의 설정온도가 강종/수량, 이송속도/지연, 화염특성, 현재 온도 등을 기반으로 계산/출력
- 강종 및 설정온도 범위: DB (Database)로 관리, 소재 종류 (Slab, Bloom, Billet 등) 별 대응, 소재 혼입 시 설정 값 처리
- 사용자 인터페이스: 강종 별 가열구간 설정 온도 관리화면, 온도 프로파일 화면, 생산 스케줄

화면, 장입테이블 관리 화면, 가열로 내 장입관리 화면, 추출실적 화면 필요

- 출력 데이터: 가열구간 별 설정온도, 소재 별 심부 온도, 소재 추출 온도

3.2.2 시스템 기능 정의

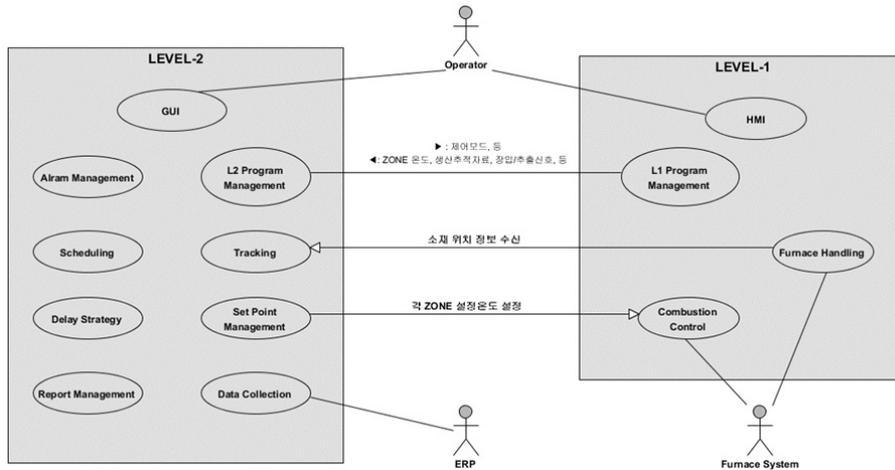
앞서 도출된 Level 2 제어 시스템의 요구사항을 바탕으로 Level 2 제어 시스템의 주요 기능을 도출하였다. 도출된 주요 기능은 Set Point Management, Delay Strategy, 소재 이동 추적(Tracking), Scheduling, 데이터 수집(Data Collection), Communication Management, 알람 관리(Alarm Management), 프로그램 관리(Program Management), 운전원 사용자 인터페이스(Operator Interface Screens)의 8개 주요 기능으로 구성된다. Table 2는 도출된 Level 2 제어 시스템의 주요 기능과 설명을 보이며, Figure 3는 도출된 Level 1 및 Level 2 제어 시스템의 주요 기능을 표현한 유스케이스 다이어그램이다.

3.2.3 인터페이스 설계

Level 2 제어 시스템이 기능을 수행하기 위해서 Level 1 시스템으로부터 관련 데이터를 넘겨받아야 하며, 마찬가지로 Level 2 제어 시스템에서 계산된 결과 및 데이터는 Level 1 시스템으로 넘겨줘야 한다. 이와 같은 입출력 데이터를 정리하면 다음의 Table 3과 같다.

3.2.4 데이터베이스 설계

Level 2 제어 시스템에서 입력되는 데이터 및 계산되어 내보내어지는 데이터 등 다양한 데이터를 관리하기 위해서 데이터베이스를 설계하였다. 개념 데이터 모델을 통해 구성된 데이터베이스 레이아웃을 바탕으로 요구사항 분석과정에서 도출한 키워드를 이용해 각 테이블에 포함될 필드를 정의하였다(OMG, 2003). Figure 4는 Level 2 제어 시스템의 논리적 데이터베이스 설계의 일부로 데이터베이스 스키마와 Entity Relationship Diagram(ERD)이다(Chen, 1976).



[Figure 3] Use Case Diagram

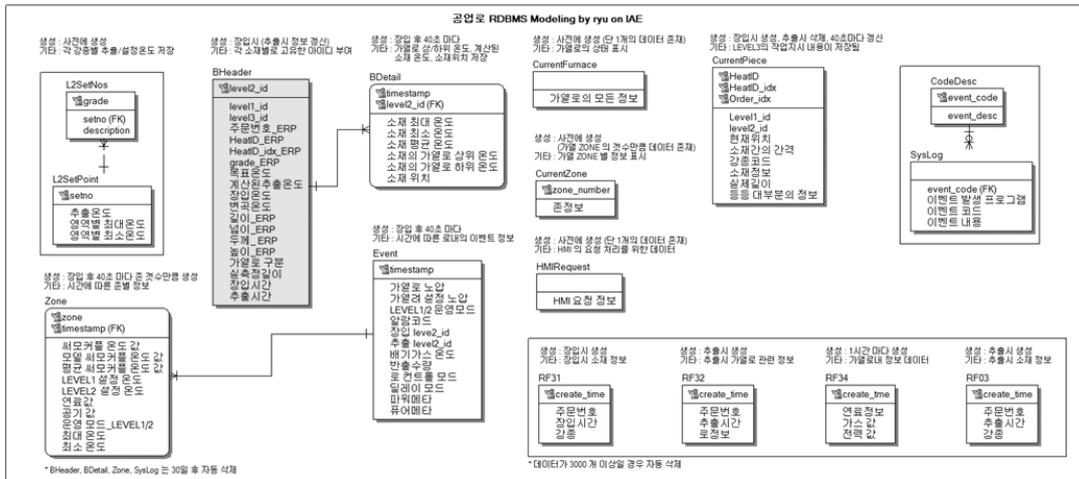
<Table 2> Main Functions of Level 2 Control System

기능	설명
Set Point Management	소재의 강중, 크기 및 우선순위를 고려한 각 가열구간의 설정 온도를 계산
Delay Strategy	가열로의 생산이 중지될 경우 소재의 파열 및 냉각으로 인한 품질 문제를 해결하면서 연료 소비를 최소화 하는 각 가열구간의 설정 온도 계산
Tracking	가열로 내에서 소재의 위치를 추적하는 것으로, 소재에서 발생하는 이벤트로는 도착/장입/이송/추출이 있음
Scheduling	생산계획 데이터를 저장 및 관리하는 것으로 운전원에 의해 입력된 데이터를 통해 운영됨
Data Collection	열모델에 의해 계산된 각 소재의 온도 및 Level 1에서 보내오는 데이터를 보관
Report Management	각 소재에 대한 보고서를 일/주/월 단위로 출력하며, 운전자는 GUI를 통해 출력하고자 하는 데이터를 선별 가능
Communication Management	가열로 내의 모든 시스템과 통신을 관리
Alarm Management	시스템에서 발생하는 알람을 GUI를 통해 운전원에게 보여줌
Program Management	Level 2 제어 시스템의 상태를 모니터링 하며, 이상 발생 시 알람을 통해 알림
Operator Interface Screens	운전원에게 각 소재별 위치, 온도 생산데이터, 가열구간 별 설정온도 등을 보여줌으로써 가열로의 관리를 가능하게 하는 GUI

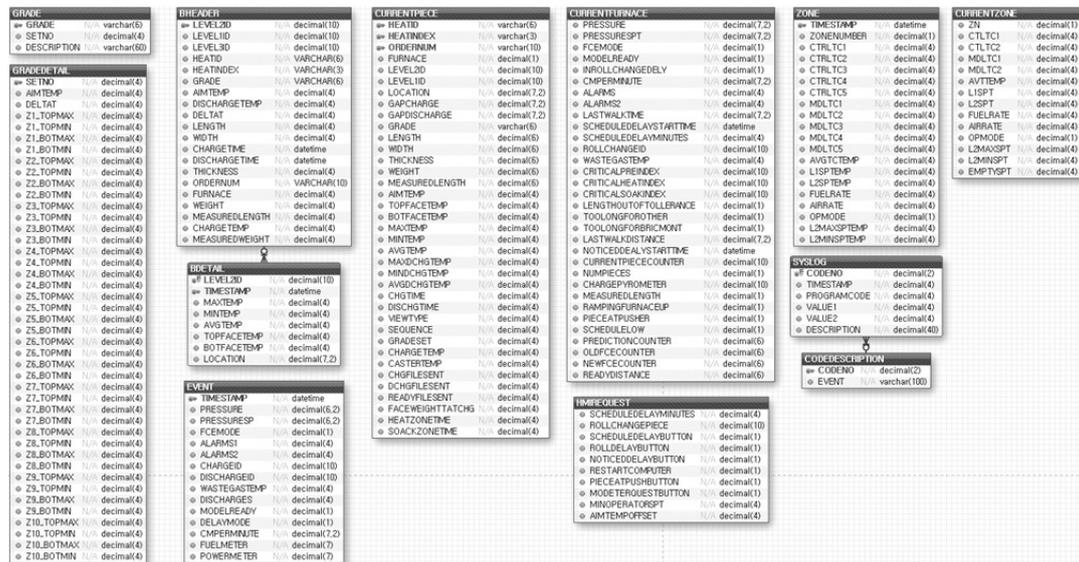
<Table 3> Level 2 Input / Output Data

Level 1 → Level 2	Level 2 → Level 1
<ul style="list-style-type: none"> • 각 가열구간의 현재 설정온도 • 각 가열구간의 현재 가열 요구사항 • 각 가열구간의 현재 온도 • 각 가열구간 현재 연료유량 • 온도의 한계 수치 • 유량의 한계 수치 • 시스템 상태와 모드 • 통신상태(Watch Dog) • 생산 추적 자료 데이터 • 소재 수치 제공 (길이, 폭 등) • 소재 추출 신호 • 제어모드 상태 	<ul style="list-style-type: none"> • 각 가열구간의 설정온도 • 제어모드 설정 • Level 2 시스템 상태와 모드 • 통신상태(Watch Dog)

물리적 데이터베이스 설계는 시스템을 고려한 논리적 설계를 구현이 가능한 물리적 데이터베이스 구조로 전환하고 Database Management System (DBMS)의 조건에 맞게 성능을 최적화 하는 과정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 상용 데이터베이스 모델링 소프트웨어인 exERD(2016)를 사용하여, Level 2 제어 시스템의 물리적 데이터베이스를 모델링 하였다. Figure 5는 모델링 된 물리적 데이터베이스 설계 결과를 보인다.



[Figure 4] Level 2 Logical Database Design



[Figure 5] Level 2 Physical Database Design

3.2.5 사용자 인터페이스 설계

다음으로 Level 2 제어 시스템의 사용자 인터페이스(User Interface; UI)를 설계하였다. UI에는 도출된 시스템 요구사항이 모두 보여 질 수 있고 직관적이어야 좋은 UI라 할 수 있다. Table 4에는 앞서 도출된 Level 2 제어 시스템의 요구사항 및 기능들을 토대로 GUI에 표현될 화면 리스트와 그 기능들을 대해 나타내었다.

메인화면은 연속식 가열로의 전체적인 정보를 볼 수 있게 하였고, 가장 중요한 소재의 정보와 가열로 내 각 가열구간의 온도와 소재의 온도를 그래프 형

<Table 4> Display Items in the GUI of Level 2 System

분류	기능
메인 화면	<ul style="list-style-type: none"> 가열로 내 각 열구간의 온도 소재에 대한 추적 (Tracking) 정보 장입/추출 전 소재에 대한 정보 표시 Schedule Delay/Roll Change After/Noticed Delay 기능
스케줄 화면	<ul style="list-style-type: none"> ERP로부터 받은 소재의 정보 관리 (추가/수정/삭제) 기능 최근 장입된 소재의 정보 표시
Furnace 화면	<ul style="list-style-type: none"> Furnace 내의 소재 정보 표시
Level 2 화면	<ul style="list-style-type: none"> Level 1에서 제공하는 가열로 내 온도/가스/공기 및 Tracking 정보 표시
LOG 화면	<ul style="list-style-type: none"> 날짜별로 Level 2 내부의 Event 기록

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 결과이다(No. 20142010102710).

References

1. ANSI/EIA-632, Processes for Engineering a System, American National Standard Institute (ANSI)/Electronic Industries Alliance (EIA), 2003.
2. BSIR Mill, Reheating Furnace-Function Specification, 1998.
3. Chen, P., The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data, ACM Transaction on Database System, 1976, 1(1): 9-36.
4. exERD, Retrieved Sept. 1, 2015, from <http://ko.exerd.com/>
5. Hurd, G. R., Kaufman, J., Wu, J. C., Ward, J., and Rodriguez, E., Process Control and Automation Systems Advancements for Reheat Furnaces, The Iron & Steel Technology, 2011.
6. IEEE 1220, IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, IEEE Computer Society, 2005.
7. INCOSE, What is systems engineering, Retrieved Sept. 1, 2015, from <http://incose.org/practice/whatisystemseng.aspx/>
8. ISO/IEC 15288, Systems and Software Engineering - System Life Cycle Processes, International Organization for Standardization, 2015.
9. Korea Energy Agency, Reheat Furnace System Overview, Energy GHG Technology Information Platform Service (EG-TIPS), 2015.
10. OMG, UML 2.0 Superstructure Specification, Adopted Specification, 2003.
11. Zhang, Y. N. and Park, S., A study on the Combustion Control System and Thermal Efficiency, The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, 2010, 5(6): 645-649.