http://www.calsec.or.kr/jsebs
ISSN: 2288-3908

The Journal of Society for e-Business Studies
Vol.20, No.1, Feb. 2015, pp.183-199
http://dx.doi.org/10.7838/jsebs.2015.20.1.183

낙동강 하굿둑의 배수문 증설에 따른 통합운영시스템의 구축 사례에 대한 연구

A Case Study on the Implementation of Integrated Operation System of the Nakdong River Estuary Barrage Due to the Drainage Gate Extension

김석주(Seokju Kim)*, 임태수(Taesoo Lim)**, 김민수(Minsoo Kim)***

초 록

낙동강 하굿둑에서는 4대강 사업으로 인한 낙동강 본류의 환경 변화로 설계홍수량이 크게 늘어남에 따라 낙동강 하류의 치수안전을 확보하기 위해 을숙도 우안에 배수문을 증설하게 되었다. 하굿둑에서의 수량 확보, 홍수조절, 재해예방 등의 기능이 원활하게 수행되기 위해서는 좌안의 기존 배수문과 우안의 신설 배수문이 유기적이고 안정적으로 운영되어야 한다. 한정된 인력과 자원 하에서 이를 운영하기 위하여 기존의 수자원시설과 정보통신기술을 융합한 통합운영시스템이 구축되었다. 통합운영시스템은 홍수 등의 위급한 상황에서도 부분적 결함에 의해 전체 시스템의 동작이 중단되지 않도록 높은 가용성과 결함 감내성을 지니도록 설계되었다. 운영과 유지관리에서의 편의성이 고려되었으며, 경보시스템을 구축하여 설비의 이상을 조기에 감지할 수 있게 하였다. 통합운영시스템의 아키텍처는 향후 유역통합운영과 스마트 워터 그리드에 대비하여 시스템간의 연계가 용이한 개방형 표준을 지향하였다.

ABSTRACT

Due to the Four Major Rivers Restoration Project, Nakdong River Estuary Barrage's designed flood quantity has been largely increased, and this has caused to construct several drainage gates at the right side of Eulsukdo island to secure the safety of downstream river area. For successful functioning of Nakdong River Estuary Barrage, such as flood control, disaster prevention, and the securing of sufficient water capacity, drainage gates at the both sides of island have to operate systematically and reliably. To manage this under restricted personnel and resources, we have implemented the IOS (Integrated Operation System) by integrating previous facilities and resources via information and communication technologies. The IOS has been designed to have higher availability and fault tolerance to function continuously even with the partial system's failure under the emergency situation like flood. Operators can use the system easily and acknowledge alarms of facilities through its IWS (Integrated Warning System) earlier. Preparing for Integrated Water Resources Management and Smart Water Grid, the architecture of IOS conformed to open system standards which will be helpful to link with the other systems easily.

키워드 : 통합운영시스템, 하굿둑, 수자원운영, 배수문
Integrated Operation System, River Estuary Barrage, Water Resources Operation, Drainage Gate

* First Author, Nakdong River Integrated Operations Center, Korea Water Resources Cooperation (ksjid@kwater.or.kr)
** Co-Author, Department. of Computer Engineering, Sungkyul University(teshou@gmail.com)
*** Corresponding Author, Division of Systems Management and Engineering, Pukyong National University(minsky@pknu.ac.kr)
Received: 2015-02-04, Review completed: 2015-02-12, Accepted: 2015-02-17

1. 서 론

낙동강 하류에 위치한 하굿둑은 안동댐에서부터 하류로 355km 지점에 위치하고, 하류 바다로부터 상류 쪽으로 대략 8km 떨어져 있다. 낙동강은 하구의 수 킬로미터 상류에 있는 을숙도를 중앙에 두고 좌안과 우안으로 갈라진다. 1987년 11월에 완성된 하굿둑의 좌안에는 주배수문부 510m가 설치되었고, 우안에는 1,720m의 토언제와 상·하류에 평행한 2개의 수문(10m×5m, 상류수문은 하류 수문의 예비)이 설치되었다.

2009년 낙동강유역 종합치수계획에 의해 낙동강 본류에 8개의 보가 건설되는 등 수자원환경이 급격히 변화하여 하굿둑 지점의 홍수량을 재산정한 결과, 1981년 당시의 설계홍수량 18,300m^3/s에서 22,300m^3/s으로 크게 늘었음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 하류부의 홍수소통 개선과 상류 수위의 1.12m(200년빈도 홍수기준) 저감을 통해 제방안전성을 높이고 제내지 침수피해를 줄이기 위한 하굿둑 배수문증설사업이 낙동강 하류의 치수안전 확보대책의 일환으로 시행되어 <Figure 1>과 같은 모습으로 2013년 11월에 완공되었다[11, 15, 16].

〈Figure 1〉 Overview of Nakdong River Barrage

배수문증설사업이 완공된 이후 낙동강 하굿둑의 좌안과 우안에 설치된 주요시설을 정리하면 다음과 같다.

〈Figure 2〉 Left Side of Nakdong River Barrage

- 좌안배수문 : <Figure 2> 참조.
- 주수문 : Radial Gate, (B : 47.5m×H : 9.2m)×6문
- 조절수문 : Radial Gate, (B : 47.5m×H : 8.3m)×4문

〈Figure 3〉 Right Side of Nakdong River Barrage

- 우안배수문 : <Figure 3> 참조
- 주수문 : Lift Gate, (B : 95.0m×H : 8.5m)×1문, (B : 47.5m×H : 8.5m)×2문
- 조절수문 : 2단 Roller Gate, (B : 47.5m×H : 8.5m)×2문

하굿둑 운영은 상류 저수지로 바닷물의 염분이 침투하는 것을 차단하여 수요자가 이용할 수 있는 원수를 공급하고, 하류에 인접한 농경지에 공급되는 지하수의 염분을 제거하는데 목적이 있다. 이와 함께, 저수지 수위를 해발 0.76±0.25m로 일정하게 유지하여 바다의 조위가 변하더라도 구조물이 안전하게 유지될 수 있고, 상・하류 수압차로 배수문, 갑문 등의 구조물을 통해 염분이 침투하는 것을 차단하는 목적도 지니고 있다. 홍수 시에는 상류의 수위 저감을 위해 단계별로 좌・우안의 배수문을 조정하여 재해를 예방해야 한다[13, 14].

본 논문은 을숙도의 좌안과 우안에 설치된 하굿둑배수문에 대한 통합운영시스템(Integrated Operation System)의 구축사례를 다루고 있다. 통합운영시스템은 배수문, 어도, 전력, 조명, 기상, 수질 등의 시설과 관련 설비의 효율적이고 효과적인 감시 및 제어와 함께, 홍수 시 낙동강 유역의 상황변화에 신속하게 대응할 수 있도록 설계되었다.

변화된 낙동강 수자원 환경과 상황별 단계에 맞게 배수문들이 유기적이고 안정적으로 운영되어야만 수량 확보, 염분침투차단, 홍수조절, 재해예방 등의 기능이 원활하게 수행될 수 있다. 제한된 인력과 자원 속에서 이를 달성하기 위해서는 수자원시설과 ICT가 효과적으로 융합된 운영시스템의 구축이 필수적이라 하겠다. 높은 가용성과 결함 감내성(Fault Tolerance)을 지닌 제어시스템으로 구성된 통합운영시스템은 비상시에 하나 이상의 결함이 발생하더라도 전체 프로세스가 중단 없이 가동될 수 있는 향상된 신뢰도를 지닌다. 경보시스템을 통해 운영자들에게 설비의 이상을 조기에 알려주고, 인적 오류를 예방할 수 있도록 하였으며, 유역 통합운영과 SWG(Smart Water Grid) 등 여러 시스템 간의 융합을 고려하여 개방적인 구조를 지향하였다. 이러한 낙동강 하굿둑 통합운영시스템은 향후 유역 또는 지역의 통합적인 물관리를 위한 참조 모델로 활용될 수 있다는 점에서, 본 논문을 통한 사례 검토의 의미가 높다고 하겠다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장의 도입 배경에 대한 설명에 이어서, 제 2장과 제 3장에서는 통합운영시스템의 설계와 구현을 자세히 소개하였다. 제 4장에서는 구축 과정과 운영 효과를 소개하고, 제 5장에서 본 연구를 요약한 결론을 제시하였다.

2. 통합운영시스템의 설계

2.1 수자원의 통합적 관리를 위한 연구

수자원 분야의 운영시스템은 수력 발전, 용수 공급, 수처리, 오염관리 등 각 분야별로 전용 자동화시스템을 오랜 기간 동안 발전, 확장시켜왔다. 그러나 강, 운하 등 수자원은 자연적인 모습과 인공의 댐과 보 등 구조물이 결합되어 그 구성이 아주 복잡해지고 있다. 이러한 상황에서 홍수, 장기간의 가뭄 등 수자원 분야의 위험관리를 위해서는 넓은 지역에 분포한 개별적 운영 시스템을 통합・관리하여 최적의 수자원 관리를 제시할 수 있는 정교한 프로세스 모델을 필요로 한다[26, 27]. 이러한 프로세스 모델과 운영시스템의 실시간 데이터 수집 및 제어 기능이 결합된다면 상당한 시너지와 국가적 편익이 발생할 것으로 기대된다. 그러나 이러한

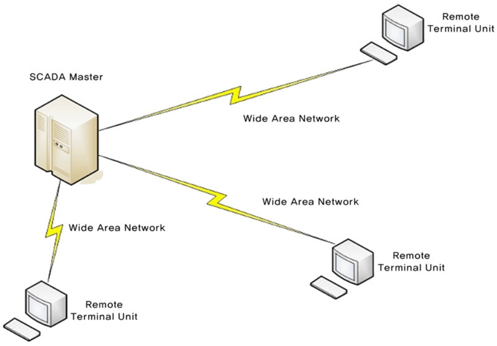
요구에 운영시스템이 부응하기 위해서는 현실적으로 극복되어야 할 위험 요소가 많다. 선진사례에서는 수자원 분야의 운영시스템과 프로세스 모델 간 결합의 잠재적인 위험을 제거하고, 안정적인 새로운 서비스를 창출하기 위한 연구가 넓은 권역을 대상으로 선제적으로 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 개별 운영시스템의 지역적 통합이 확대되는 단계로, 보다 넓은 범위의 통합과 프로세스 모델까지의 연계는 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 낙동강 하구를 중심으로, 우안의 증설된 신규설비와 좌안의 기존 시설물간의 연계를 확대하기 위한 통합시스템의 구축 사례를 다루고 있다. 보다 광역의 통합적인 수자원 관리를 위해서는, 향후 프로세스 모델과 통합운영시스템의 결합을 위한 면밀한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다[21, 25, 26, 27].

2.2 통합운영시스템의 개요

통합운영시스템은 산업 제어시스템(ICS : Industrial Control System)의 일종인 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템으로 전기·기계 설비들을 제어하는 컨트롤러들과 사용자간을 연결하여 사용자에게 감시 및 제어 기능을 제공한다. SCADA는 원격 감시제어시스템 또는 감시제어 데이터수집시스템으로도 불리며, 주요 기능으로는 ANSI/IEEE StdC37.1-1987의 권고안에 명시된 ① 원격장치의 경보상태에 따라 미리 규정된 동작을 하는 감시 시스템의 경보 기능, ② 원격 외부장치를 선택적으로 수동, 자동 또는 수·자동 복합으로 동작하는 감시제어 기능, ③ 원격장치의 상태정보를 수신, 표시, 기록하는 감시시스템의 지시(표시)기능, ④ 디지털 펄스정보를 수신, 합산하여 표시 및 기록에 사용할 수 있도록 하는 누산 기능, ⑤ 미리 규정된 사상을 인식하여 발생사상의 데이터를 제공하는 감시시스템 기능 등이 있다[22].

2.3 SCADA 아키텍처의 요구사항

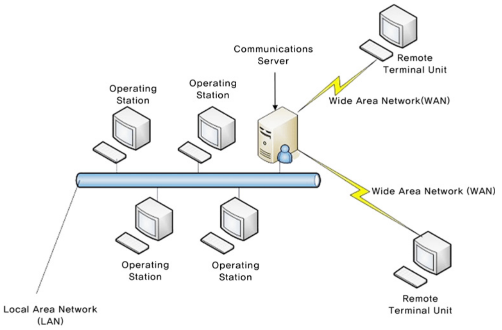
통합운영시스템에서 우선적으로 결정해야 할 요소가 운용하게 될 SCADA 시스템의 아키텍처이다. 일반적으로 SCADA 시스템은 통신 및 컴퓨팅 장비의 발전에 따라 아키텍처를 달리하는 일체식(Monolithic), 분산형(Distributed) 및 네트워크형(Networked) SCADA 시스템으로 크게 부분된다[1, 28]. 최근에는 여기에 차세대 SCADA 시스템으로 IoT(Internet of Things) 기반의 SCADA 시스템을 추가하여 구분하기도 한다[7].



〈Figure 4〉 The 1st Generation-Monolithic SCADA System [1, 7, 28]

제1세대의 SCADA 시스템으로 언급되는 일체식 SCADA 시스템은 <Figure 4>와 같이 메인프레임 중심의 컴퓨팅 구조를 지니며, 전

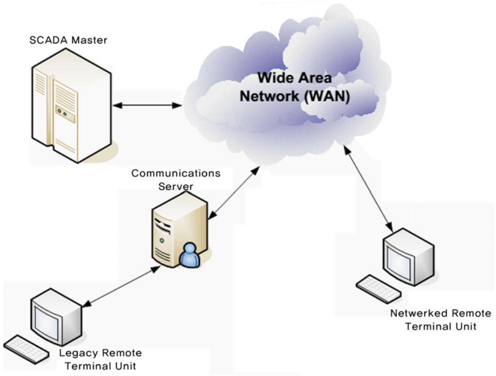
용회선으로 연결된 RTU(Remote Terminal Unit)와의 통신을 위해 오늘날에는 거의 사용되지 않는 WAN(Wide Area Networks) 프로토콜을 사용한다. 과거에는 실질적인 네트워크가 존재하지 않았기 때문에 외부 시스템과의 연결성을 지니지 않는 독자적(Standalone) 시스템으로, 메인프레임에 감시와 제어기능이 집중되어있다. 메인프레임의 다운상황을 대비한 중복구조는 정확히 동일한 시스템을 대기(Standby) 형태로 갖추어, 기본 시스템과 백업 시스템을 장비 공급사의 버스(Bus) 수준에서 연결하는 형태로 설계되었다[1, 7, 28].



〈Figure 5〉 The 2nd Generation-Distributed SCADA System[1, 7, 28]

제2세대의 SCADA 시스템은 <Figure 5>와 같이 소형화(Miniaturization)와 LAN 기술의 발전을 활용하여, 정보와 명령 처리가 LAN을 통해 연결된 다중의 스테이션에 실시간적으로 분산되어 공유될 수 있도록 진화하였다. 분산된 스테이션들은 각기 현장의 RTU들과의 통신, 시스템 운영자와 기계들과의 인터페이스(HMI : Human-Machine Interface), 계산처리 혹은 데이터베이스 서버의 역할을 나누어 담당하게 되었다. 그러나 통신 프로토콜의 표준화가 되어있지 못하여 특정 공급사의 LAN 프로토콜에 의존하고, 지역적 환경을 벗어나지 못하는 한계를 지니고 있었다. 기능에 따라 처리를 LAN을 통해 분산하였기 때문에 개별 스테이션의 다운으로 인한 백업을 메인프레임 전체의 중복설계로 대응하는 1세대의 방식보다는 훨씬 향상된 신뢰성과 비용구조를 지닐 수 있게 되었다[1, 7, 28].

제3세대의 네트워크형 SCADA 시스템은 2세대의 시스템과 밀접히 관련되어 있지만, 전체 시스템의 구성에서 특정 공급사의 독자적 기술에 의존하지 않는 개방형 구조(Open Architecture)를 추구하고, 표준화된 장비와 프로토콜을 활용함으로써, <Figure 6>과 같이 SCADA 기능을 LAN뿐만 아니라 WAN을 통해서도 분산시킬 수 있게 되었다는 점에서 가장 큰 차이를 지닌다. 이런 구조에서는 기존의 여러 2세대 시스템들이라도 단일의 관리감독 컴퓨터(Supervisor)와 실시간 기록 데이터베이스(Historian)를 통해 병렬 동작시킬 수 있다. 개방형 표준의 활용은 제3의 공급사라도 쉽게 자신들의 시스템과 장비를 시스템 내에 참여시킬 수 있게 하였다[1]. 이것은 기존의 장비 공급사가 하드웨어와 소프트웨어 공급을 모두 주도하던 환경을 서서히 분리시켜서, SCADA 공급사들이 자신들의 전문분야에서 소프트웨어적 부가가치의 고도화에 집중할 수 있는 환경으로 전환하는 계기가 되었다. 특히 WAN 환경에 IP(Internet Protocol)가 활용되면서 통신기능이 마스터 스테이션으로부터 WAN 상의 적절한 위치로 분리될 수 있어서, 지역적 재난 상황으로 인한 시스템 전체의 다운을 효과적으로 피하여 전체적인 신뢰성의 향상을 얻을 수 있게 되었다[7, 28].



〈Figure 6〉 The 3rd Generation-Networked SCADA System[1, 7, 28]

차세대의 SCADA 시스템으로 언급되는 IoT 기반의 SCADA 시스템은 클라우드 컴퓨팅과 IoT 기술을 결합하여 기반구조의 구축과 운영에 드는 비용을 절감하고, 보안성을 향상시키면서도 기존 세대의 시스템에 비해 유지보수 및 외부 시스템과의 통합을 쉽게 할 수 있는 아키텍처를 제공할 것으로 기대된다[1, 7, 28]. 그러나 아직까지 IoT 기술이 성숙하기까지는 시간이 필요하며, IoT 기반의 SCADA 시스템으로 참조할 수 있는 대표적인 구현 사례가 명확히 없다는 점에서, 본 연구에서 고려하고 있는 통합운영시스템의 기반 구조로는 무리가 있다.

통합운영시스템의 아키텍처는 기존에 구축되어 있는 좌안배수문의 제2세대 통제시스템과 쉽게 연계될 수 있으면서도, 최소 인원으로 유지관리 및 운영이 가능해야 한다. 특히 유지관리의 편리성과 설비의 확장성이 향후 지속적인 시스템 확장과 통합을 대비해 중요한 결정 요소로 인식되었다[6, 20, 23]. 이를 위해서 개방형 구조를 지니는 네트워크형 SCADA 시스템이 통합운영시스템의 기본 아키텍처로 선정되었다.

2.4 HMI 요구사항

HMI는 공정의 감시, 제어 및 분석을 효율적으로 실행하고, 변화에 쉽게 대응할 수 있도록 설계 및 구현된 통합 소프트웨어로, 설비들과 연결된 PLC(Programmable Logic Controller), DCS(Distributed Control System), RTU 등의 컨트롤러와 이를 운영하는 사람 사이를 연계하는 역할을 한다. 본 사례에서는 적합한 HMI의 선정을 위해 ① 시스템 통합성, ② 표준지원 여부와 함께, 운영 편의성과 시스템 안정성을 포함한 ③ HMI 기능의 적정성이 주요 요소로 고려되었다.

시스템 통합성은 전체 프로세스의 모든 정보를 실시간으로 공유하여 일관성 있고 유기적으로 운영될 수 있게 함으로써 시스템 전반의 운영 효율을 증진시킨다는 점에서 시스템 품질향상의 기반이 된다. 특히, 하천의 유역통합운영 및 SWG 등 통합적 물 관리로 발전해 나아가는 추세를 고려할 때 그 중요성은 더욱 커진다. 이를 위하여 HMI는 빠른 속도와 개방형 구조, 강력한 네트워킹 기능을 갖추어야 하고, GUI(Graphic User Interface) 기반의 사용자 편의성과 함께 상위 정보시스템과 SCADA 시스템간의 용이한 데이터 통합을 제공해야 한다. 또한 현장의 각종 PLC 및 계측기기와의 통신연결을 통해 우수한 성능과 안정성 및 확장성을 보장하는 지 검토해야 한다.

HMI 시스템은 기계와의 인터페이스를 초기에는 제작사들이 제공하는 폐쇄적인 프로토콜에 의존해 오다가 90년대 중반부터 마이크로소프트사의 OPC(OLE for Process Control)가 윈도우즈 기반의 표준 인터페이스 규약으

로 발표되면서 이를 업계 표준으로 활용해 나가기 시작하였다. 이후 OPC 규약은 계속 발전하여 윈도우즈에 기반을 두지 않는 유닉스와 같은 시스템과도 데이터 인터페이스가 가능해지면서, 더욱 HMI를 위한 표준 규약으로서의 입지가 강화되었다. 표준화는 상이한 인터페이스와 애플리케이션으로 인해 발생하는 혼동 가능성을 감소시키며, 여러 이기종 제품들의 사용으로 인해 각기 발생할 수 있는 지식습득과 유지보수 노력을 일관된 인터페이스를 통해 최소화해주며, 이를 통해 품질 개선, 표준 기술의 반복 습득을 통한 전문적 지식의 축적까지도 가능하게 해준다[24].

운영 편의성과 시스템 안정성뿐만 아니라 수자원시설의 통합운영에 필요한 세부 기능이 적절히 구현되었는지에 대한 검토도 필요한데, 본 사례에서는 다음 항목들이 HMI 기능의 적정성을 판단하는 주요 요구사항으로 검토되었다.

- SCADA 서버 간 프로세스 DB의 동기화
- 아날로그 데이터의 스케일링에 대한 사용자 조정 가능 여부
- 다양한 차트 툴의 지원 여부
- 사용자 유형별(관리자, 운영근무자, 손님) 계정관리의 지원
- DB 인터페이스의 이중화 지원
- 유역별 사업장의 통합운영을 위한 제어 권한 설정
- 다양한 통신 드라이버를 제공하여 연계 가능한 컨트롤러의 종류 확대
- 편리한 보고서 생성 및 추세 파악 기능
- 자가진단, 통신망 감시 및 시간 동기화
- 경보시스템 및 운영정보의 알림 서비스

2.5 RCS(Remote Control Station) 설비 구축을 위한 요구사항

SCADA 시스템에서 현장의 계측제어 기기들과 직접 연결되어서 신호를 입출력하고 제어 로직을 수행하는 RCS에는 DCS, PLC, RTU 등이 있다. DCS는 일반적으로 산업 프로세스 플랜트에 사용되는 특정한 기능의 분산제어시스템을 가리키며, 제어 감시부와 현장에서 세부적인 제어를 실행하는 다수의 하부 시스템으로 구성된다. DCS는 피드백과 피드포워드를 포함하는 연속자동제어에 주로 활용된다. PLC는 Relay Sequence를 대체하는 용도에서부터 시작되어 이진논리 외에도 시간, 비례, 미적분 제어 등의 연속제어와 네트워크 기능을 갖춘 형태로까지 진화하여 프로세스 기반 산업의 전반에서 널리 활용되고 있다. PLC와 DCS가 플랜트 및 생산라인의 로컬 제어에 적합한 반면, RTU는 유무선 통신망을 이용한 광역의 원격 계측에 적합한 구조이다. PLC가 일반적인 프로그래밍 툴을 이용하는 반면 RTU는 특정한 프로그래밍 툴을 사용한다.

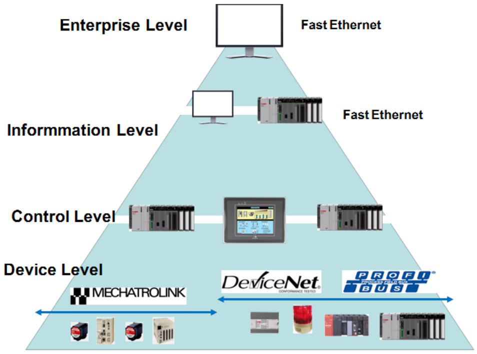
DCS를 중심으로 한 방식은 하위의 컨트롤러로부터 상위의 플랫폼까지 단일 공급사의 제품으로 구성되어 통합성이 우수하고 이중화를 기본으로 하여 가용성이 높지만, 하위레벨의 확장성이 낮고 초기 도입비용이 높은 단점이 있다. PLC와 HMI를 결합한 구성(PLC + HMI)에서는 PLC와 HMI의 제조사가 각기 다른 경우가 많고, 여러 플랫폼을 사용하여 구성요소 간의 연결이 느슨한 점은 있지만, 하위레벨의 구성이 유연하고 비용도 상대적으로 저렴한 장점이 있다. 이제는 PLC도 이중화 제품이 일반화되어 가용성이 크게 향상되었다. 이처럼

기술의 진보로 두 구성간의 기능적 차이가 크게 상쇄되어 DCS와 PLC 간의 전형적인 특성에 의해 선정하기보다는 해당 공정에 적합한 기능별 요구사항, 엔지니어링, 유지보수성, 비용 규모, 업그레이드 가능한 시스템 구성, 전체 운영비용의 최소화, 환경변화에 대한 신속한 대응성 등의 다각적인 요인들을 검토하여 선정하는 것이 바람직하다[4].

통합운영시스템은 범용성을 갖춘 신축적인 구조로 개방성과 확장성이 우수해야 한다. 특히, 이기종간의 인터페이스와 엔지니어링 및 유지보수성이 높아야 하며, 최소의 비용으로 향후의 업그레이드가 가능할 수 있어야 한다. 이러한 요소들을 고려하여, 본 연구의 통합운영시스템은 최종적으로 PLC+HMI 시스템으로 구성되었다.

2.6 우안배수문-중앙조절실 네트워크의 구성을 위한 요구사항

산업자동화에 적용되고 있는 네트워크는 일반적으로 <Figure 7>과 같은 계층으로 나누어진다. 대용량 정보 교환이 필요한 상위레벨은 이더넷(Ethernet)이 일반화되어 있고, 계측제어 장치와 컨트롤러 등으로 이루어진 하위레벨은 장비 제조업체들의 주도로 만들어진 네트워크가 확산되어 왔다. 그러나 최근에는 산업자동화시스템이 공정제어를 넘어서 정보시스템과 연계되고, 보다 광역에서 다수의 사업장과 통합운영체계를 이루어가는 등 계층간의 정보 전달이 중요한 요소가 되고 있다. 이러한 요구에 의해서 산업용 이더넷이 개발되어 하위레벨까지 그 점유율이 증대되고 있다[3].



〈Figure 7〉 Industrial Network Hierarchy[3]

산업용 이더넷은 다음과 같은 장점이 있는데, ① 이더넷이 산업용 네트워크의 최상위층을 점유하고 있어서 계층 간의 정보 전달이 용이하고, ② 기술 발전으로 신뢰성이 높아지고 넓은 대역폭으로 대량의 정보를 원활히 전송할 수 있어서 산업용 네트워크의 표준으로 자리 잡고 있으며, ③ 개방성이 높고 사용이 쉬워 경제적이며, ④ 동참하는 업체가 많아 네트워크 구축에 필요한 다양한 기자재를 쉽게 구할 수 있고 사후관리와 업그레이드가 쉽다[3, 5].

산업자동화시스템의 네트워크에서는 신뢰성(무고장성)과 데이터 실시간성이 가장 중요하다. 통합운영시스템은 홍수 등의 위급 상황에서도 24×7로 정지 없이 가동되어야 하므로 신뢰성 확보가 매우 중요한데, 이를 위해 다음과 같이 여러 계층에서 다중화 설계를 도입하여 활용하고 있다[5].

- OSI Layer 1 계층(물리 계층)
  - 전원 공급 계통, 스위치(혹은 라우터) 및 네트워크 카드(NIC)의 이중화
- OSI Layer 2 계층(데이터링크 계층)

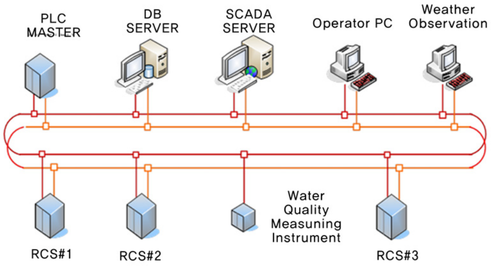
- 데이터 링크 및 경로의 이중화
- 이중화된 방사형 혹은 링 네트워크의 구성
- • OSI Layer 3 계층(네트워크 계층)
- 한 장치에 고장이 발생하는 경우에도 목적지 IP주소에 데이터 패킷이 안전하게 전송되도록 라우팅을 설계

본 사례에서는 이중화된 링형 산업용 이더넷을 적용하여 신뢰성 있고 경제적이며, 유지보수와 계층 및 지역간 연계가 편리한 네트워크가 구축될 수 있도록 하였다.

3. 통합운영시스템의 구현

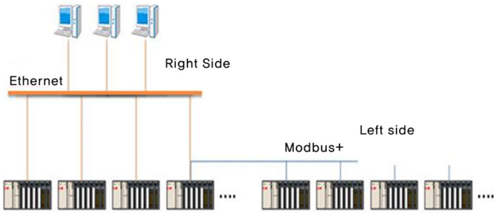
3.1 전체 시스템의 구성

통합운영시스템은 <Figure 8>과 같이 실시간 감시제어기능을 맡는 SCADA 서버, 데이터 관리를 위한 데이터베이스 서버, 운영자 컴퓨터(COS: Central Operator Station) 및 유지관리 컴퓨터(EWS : Engineering Workstation), 스크린보드 및 화상감시설비(CCTV, 영상표출설비 등), PLC, 감시제어용 통신망 등으로 구성되었다.



〈Figure 8〉 Integrated Operation System

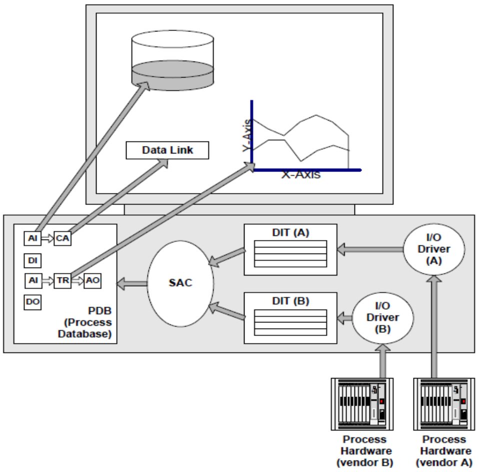
증설된 우안배수문은 이더넷으로 신설 PLC와 통신망을 구축하였으나, 기존 좌안 배수문의 PLC는 SCADA 서버와 시리얼 통신(Modbus)으로 연결되었다. 따라서 좌안 배수문의 시리얼 통신을 이더넷에 연결하기 위하여 <Figure 9>와 같이 게이트웨이 역할을 하는 PLC를 설치하였다. 기존의 SCADA 서버와 HMI를 신설 서버와 HMI에 통합하여 단일 SCADA 시스템을 구현하였다.



〈Figure 9〉 Network Connection of 2 River Barrages via PLC

3.2 표준 수운영시스템(iWater) HMI

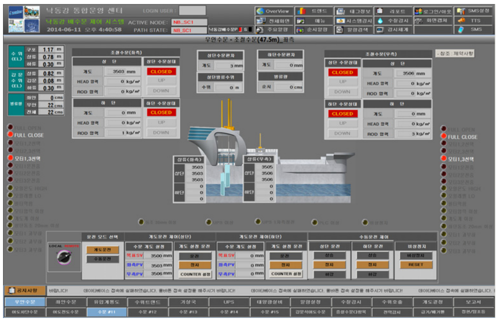
본 사업의 HMI로는 수자원분야에 특화된 iWater를 적용하였다. iWater는 수처리 설비와 각 플랜트의 제어 및 운전상태를 효율적으로 감시・제어하기 위해 그래픽 화면구성과 제어로직 등의 제반사항을 표준화한 HMI이다. 기본적으로 iWater는 DCS와 PLC 등의 프로세스 하드웨어 장치에서 획득된 데이터를 처리・조작하며 감시제어, 알람, 리포트, 데이터 저장 등의 기능을 수행한다. iWater는 앞서 설계단계에서 검토한 여러 기준을 만족시킬 뿐만 아니라, 통합감시가 효율적으로 이루어질 수 있도록 SMS(Short Message Service), TTS(Text To Speech), 알람검색, 데이터 점검 등의 추가기능을 제공한다. <Figure 10>은 iWater 시스템의 기본 구조를 간략히 나타낸 것이다.



〈Figure 10〉 Basic Structure of iWater System[17]

센서와 제어기기는 프로세서 하드웨어에 데이터를 보내고, iWater는 프로세서 하드웨어로부터 해당 기기의 I/O Driver를 이용하여 원시데이터를 입출력한다. DIT(Driver Image Table)는 I/O Driver를 통해 입출력되는 데이터가 업데이트되는 SCADA 서버상의 메모리 영역이다. SAC(Scan, Alarm and Control)에서는 지정된 스캔 주기(Scan Time)마다 DIT로부터 데이터를 읽어서, 입력 데이터가 사용자가 지정한 한계를 초과할 경우 알람을 발생시킨다. 설정에 따라 입력값을 검증하거나 조정하며, 자동화 프로세스를 컨트롤하게 된다. PDB(Process Database)에는 기기와의 송수신을 통해 전달된 모든 프로세스 데이터가 저장된다[12, 17].

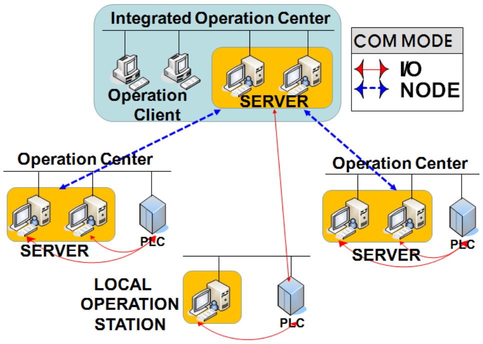
<Figure 11>은 iWater의 배수문 감시제어 화면의 일부이다. 배수문의 방류주기 동안 방류해야 할 수량을 계산하여 이를 토대로 하굿둑 좌안과 우안의 주수문과 조절수문의 개도를 결정한다. 운영자는 관련 데이터를 통해 수문의 정상상태를 확인한 후, 수위와 유입량 데이터를 수집한다. 방류시간, 방류 시작시 예상되는 상・하류의 수위, 방류 종료 시의 상류 유지수위와 예상하류수위, 방류 중 예상되는 하류간조수위, 상류 평균 수위와 하류 평균 수위를 수집하여 총 필요 방류량을 계산한다. 이 방류량을 좌안과 우안에 분배하여 각 수문의 높이를 결정하고 조작한다. iWater를 통해 각 수문별 설정 개도를 입력하고 명령을 내리면 수문이 제어된다[14].



〈Figure 11〉 Monitoring Screen for Operators

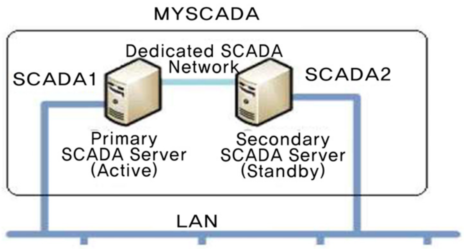
실시간으로 운영되는 iWater 시스템은 여러 지역에 산재된 시설을 원격지의 통합센터에서 감시・제어할 수 있도록 해주는데, <Figure 12>는 iWater 시스템의 통신 방식을 나타낸다. iWater 소프트웨어가 구동되는 모든 컴퓨터를 노드라고 부르는데, SCADA 서버는 DCS, PLC, RTU 등의 프로세스 하드웨어로부터 데이터를 취득하는 노드가 되며, COS와 EWS 등의 클라이언트는 네트워크를 통해서 SCADA 서버와 데이터를 송수신하는 노드가 된다. SCADA 서버와 클라이언트 간에는 iWater 전용통신방식인 노드 통신을 하게 되며, SCADA 서버와 현장 계측기나 PLC 등의 하드웨어 프

로세서 간에는 이더넷 TCP/IP 기반의 범용 통신방식인 Modbus, OPC 등으로 구성된 I/O Driver 통신을 한다. iWater는 MBO, MBE 및 LSE 드라이버를 기본으로 제공하고 있는데, 이들은 프로세스 제어 분야의 표준으로 자리 잡고 있는 마이크로소프트사의 OPC 인터페이스 규약을 채택하고 있다[2].



〈Figure 12〉 iWater System's Communication Methods

주(Primary) 및 보조(Secondary) SCADA 서버 간에는 PDB 정보(태그 이름, 주소, 스케일, 알람 등)가 동기화되며, 하드웨어 프로세서와의 I/O 통신 및 클라이언트와의 노드 통신은 주 서버만을 통하여 이루어진다. HMI 이중화는 <Figure 13>과 같이 활성화-대기(Active-Standby) 방식을 사용한다. 같은 네트워크에 있는 iWater 클라이언트들은 활성화 모드의 SCADA 서버에 자동 연결된다. 서버는 항상 동작 상태를 체크하며, 에러상황(Active Error)이 발생하면 대기 중인 보조 SCADA 서버를 활성화 상태로 전환시켜 운용하게 된다. 장애극복 기능을 통해 두 SCADA 서버의 PDB 정보와 실제 데이터 값이 동기화 된다[17].



〈Figure 13〉 SCADA System's Failover Configuration

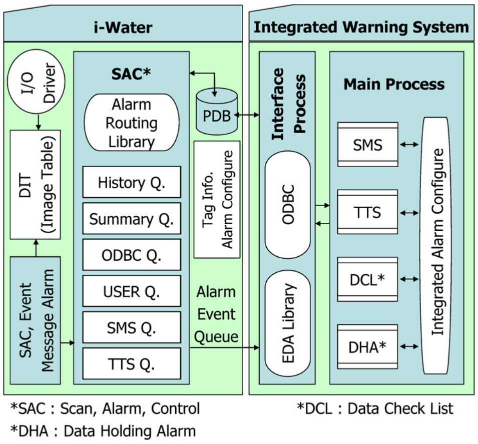
3.3 통합경보시스템(IWS : Integrated Warning System)

IWS는 시스템이 알람 및 이벤트 상황 하에서 기설정된 등급에 따라 통합센터 내에 음성경보를 발하거나, 관련자의 휴대전화로 상황을 통보할 수 있도록 구현되었는데, IAC (Integrated Alarm Config) 기능을 통해서는 상황대응을 위한 알람 태그, 사용자 등록, 수정 및 삭제와 같이 사전 설정내용을 실행할 수 있는 프로그램이 지원된다.

IWS는 경보등급을 사고, 설비, 운영으로 분류하여, 실시간으로 상황을 SMS와 TTS의 형태로 대상자에게 발령하는데, 사고등급에는 제약수위(취수장), 정전, 수문 중대결함, 화재 등이 해당되며, 설비등급에는 제약수위(어도, 양수장, 고수부지), 통신망, 시스템 등 주요 설비의 고장이 해당된다. 마지막으로 운영등급에는 설비 운용(operation)에 필요한 항목과 경고장 등이 포함된다.

<Figure 14>와 같이 IWS는 메인과 인터페이스 프로세스로 구성되는데, 메인 프로세스는 IAC로부터 저장한 데이터를 SMS, TTS, DCL 프로그램에서 사용할 수 있도록 동작하는 프로세스이며, 인터페이스 프로세스는 메

인 프로세스를 운용하기 위한 태그 등록, 메시지 형식 등을 설정하는 프로그램으로, iWater의 System ODBC 연결을 통해 PDB로부터 태그를 호출하게 된다[2].



〈Figure 14〉 Architecture of the Integrated Warning System〔2〕

3.4 DB, RCS 및 감시제어용 네트워크의 이중화 구현

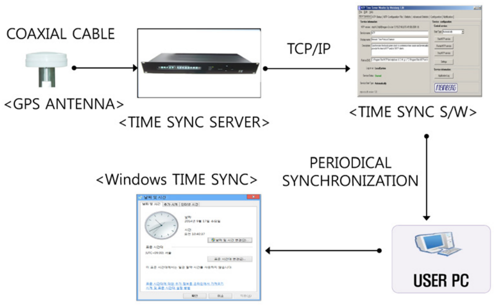
DB는 Oracle 11g의 RAC(Real Application Cluster)를 통해 이중화하였다. RAC는 물리적인 하나의 DB를 여러 대의 서버가 공유하여 논리적으로 하나의 시스템을 이용하게 하는 것으로, 동일 저장 공간을 여러 인스턴스에서 동시에 접근할 수 있고 시스템 확장이 가능하여 결함 감내성, 부하 분산 및 향상된 성능을 제공한다. 단일 서버의 장애시 복구시간까지 발생되는 서비스 중단을 RAC를 통해 극복하여 시스템의 지속적인 운영이 가능하게 되었다[10, 18].

통합운영시스템에서는 PLC를 이용하여 RCS를 구성하였는데, 우안배수문이 낙동강 하류의 홍수조절을 위한 중요 설비이므로 PLC의 결함은 심각한 재해를 유발할 수 있다. 따라서 PLC의 주요 모듈인 프로세서, 전원, 통신 모듈을 이중화하여 가용성과 결함 감내성을 높임으로써 전체 시스템의 운용 신뢰도를 향상시켰다. 프로세서는 두 개의 독립된 프로세서 모듈을 사용하여, 하나의 대기 프로세서가 고장이나 결함에 대비할 수 있게 하였으며, 통신시스템은 각각의 프로세서 모듈에 2개의 통신모듈을 구성하여 고장이나 결함에 대비할 수 있도록 하였다. 전원 모듈도 이중화하여 하나의 전원모듈에 고장이 발생하면 대기 전원 모듈로 전원을 공급하여 전체 시스템의 운용에 지장을 주지 않도록 하였다[8, 15].

SCADA 시스템과 COS, PLC 등을 연결하는 감시제어용 LAN을 위해 우안배수문-통합운영센터 사이에 광케이블을 포설하여 물리적으로 이중화된 이더넷 링 네트워크를 구성하였다. 네트워크의 안정적인 운용을 위하여 링 스위치를 적용하였고 단선시 버스 형태로 자동 전환되도록 하였다. 이중화된 스위치와 네트워크 카드로 구성된 두 개의 물리적인 LAN 백본을 통해, 하나의 경로에 결함이 생기면 다른 경로를 따라 데이터가 송수신 될 수 있도록 구성하였다.

3.5 시간 동기화

통합운영시스템은 다양한 설비들로 구성되어있으므로, 설비간의 시간차로 인한 예상치 못한 오류를 방지하기 위해 전체 시스템의 시간이 동기화되어야 한다[19]. 개별 장치들은 <Figure 15>와 같이 LAN에 연결된 GPS 수신기의 시간을 기준으로 자동으로 동기화되도록 구성되어 있다.



〈Figure 15〉 Configuration of Time Synchronization

4. 구축 과정 및 운영 효과

낙동강 하굿둑 통합운영시스템은 넓은 지역에 걸쳐 데이터를 취득・제어해야 하며, 수문 운영, 수위변화(강, 댐, 보 등), 기상상황 및 사회적・환경적인 제약사항 등 복잡한 여러 여건을 통합적으로 고려한 운영 프로세스를 기초로 설계 및 구현되어야 했다. 이를 위해서 토목, 기계, 전기, 계측제어, 정보통신 등 다양한 분야의 엔지니어들 간의 협력과 의사소통이 매우 중요하였다. 이 과정을 통해 수립된 운영 프로세스를 기반으로 시스템에 대한 상세 요구사항이 정의되었다. 상세 요구사항을 기초로 센서, 제어반, RTU, PLC 등 하부설비에 대한 구조가 설계되었고, 여기에 대응하는 중앙조정실 서버, 운영 컴퓨터 등 상부설비와 통신망 등에 대한 규격을 장래 확장성을 고려하여 선정하게 되었다[27].

통합운영시스템의 구축으로 인해 기대되는 경제적 효과를 K-water에서 2010년 시행한 '수운영시스템 적용효과 분석연구'를 준용하여 살펴보면 <Table 1>에 정리된 바와 같이 대략 61억여 원에 이르는 것으로 예상된다. 여기에서 인건비, 생산성, 품질, 서비스 향상 환산지수는 본 연구와 유사 사례인 수도통합운영시스템 구축사업의 설문 조사결과를 참조하여 적용한 것이다[9].

〈Table 1〉 Benefit and Cost Analysis of IOS(Measures are in Million Won)

		Factors	Result	
			Annual	7 Years
Benefit	Direct	Labor Saving	520	3,640
		8 Person(2 Person/Team, 4 Teams, 3 Shift) × 65 Million Won for a Person (Yearly Average)		
		Time Saving	130	910
		Time Saving by Improved Efficiency (Apply 5%, System's Functional Improvement : 5~10% Saving) × Hourly Labor Cost		
		Task Cost Saving	80	560
		Additional Saving of 10 Million Won per Person		
	Indirect	Productivity Improve	142	994
		Conversion Coefficient (27.3%) × Labor Saving		
		Quality Improve	197	1,379
		Conversion Coefficient (37.9%) × Labor Saving		
		Service Improve	157	1,099
		Conversion Coefficient (30.2%) × Labor Saving		
		Total	1,226	8,582
Cost		Initial Investment	2,000	
		Operational Cost	60	420
		Total Sum		2,420
B - C = 6,162 (Assume 7 Years of Usage)				

경제적 측면에서 살펴본 효과의 많은 부분이 2인 1조의 4개 팀이 3교대 근무를 통해 작업하게 될 때 발생되는 인건비의 절감과 업무 효율성 및 생산성 향상으로 인한 부가적인 절감효과로부터 발생하고 있으나, 이 외에도 과학적

관리를 통한 운영관리 기술의 선진화로 수자원 사업의 대외 경쟁력을 확보함으로써 향후 해외 사업 수주의 기반을 마련할 수 있다는 점도 추가로 고려될 필요가 있겠다. 상기의 정량적 분석을 통해 살펴본 경제적 효과는 표면적인 부분에 불과하며 더욱 중요한 점은 분석을 통해 계량하지 못한 국민의 안전 도모 및 재산 피해의 최소화 등과 같은 정성적인 효과라고 할 수 있겠다. 이러한 정성적인 효과에는 경제적 측면 외에도 운영적 측면 및 사회적 측면의 효과가 고려될 수 있겠다.

운영적 측면의 효과로는 ① 운영의 효율성 : 평시 운영과 홍수 등 재난 상황에 체계적으로 적시에 대응할 수 있는 기반을 제공하고, ② 운영관리의 과학화: 통합센터에서 일관된 데이터를 수집, 모니터링 함으로써 업무 처리의 표준화가 용이하고 자료분석 및 통계 등에 활용하여 의사결정의 신뢰도를 높일 수 있다는 점이 기대되며, 사회적 측면의 효과로는 ① 재해 예방 : 낙동강 하류 유역에 홍수 발생시, 보다 신속하고 유기적인 배수문 운영으로 국민의 재산 피해와 인명사고를 최소화하고, ② 대국민 만족도와 대외 이미지: 통합운영체계 구축으로 수자원관리에 대한 대국민 만족도와 대외 이미지 향상 효과 등을 기대할 수 있겠다[9].

5. 결 론

낙동강 본류에 8개의 보가 완공되는 등 주변 환경의 변화로 낙동강 하류의 치수안전을 확보하기 위해 낙동강 하굿둑의 배수문이 증설되었다. 우안 및 좌안배수문을 유기적으로 운영하여, 변화된 환경에 더욱 효율적이고 효과적으로 대응할 수 있도록 낙동강 하굿둑 통합운영시스템이 구현되었다.

좌안 및 우안배수문의 원격감시제어설비는 이종 통신망을 연계하고, 단일 SCADA 서버로 통합하여 수문 운영의 편의성과 효율을 제고하였다. 또한 경보체계를 구축하여 체계적인 조기대응과 인적오류의 예방이 가능하도록 하였다. 운전원의 최소화 및 유지관리의 편리성, 설비의 확장성 등을 고려하여 집중감시 분산제어 방식을 선정하여 시스템을 구축하였다. 범용성, 확장성, 개방성 및 조작성이 우수한 PLC 방식으로 현장제어설비를 설치하였고, 감시제어용 통신망, PLC 주요 모듈, 서버 등은 이중화하여 시스템의 가용성을 높였다.

통합운영시스템의 구축으로 최소의 인원으로 증설된 배수문을 효율적으로 운영・관리할 수 있는 기반이 조성되었다. 양측 배수문의 연계운영은 평시 수문운영의 편의성을 제고하고, 낙동강 본류 홍수 시 수위 조절에 중요한 역할을 한다는 점에서 본 시스템 구축의 효과가 크다고 하겠다. 실시간으로 설비의 상황을 감시하고, 운영과 점검에 편의성을 높여 설비 수명연장과 관리의 효율성이 높아질 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 기존 물공급체계에 정보통신기술을 접목함으로써, 지능형 물공급망을 구축하는 SWG와 유역통합운영의 기반으로 활용될 수 있는 참조 모델이 될 수 있을 것이다.

References

[1] Anshul Thakur, SCADA systems, engineersGarage [Internet]. Available : http://

www.engineersgarage.com/articles/scada-systems.
[2] Han, G. J., Kim, J. M., Jeon, H. S., and Lee, K. W., "Development of Integrated Water Operation System through Engineering Standarization," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2011.
[3] Hong, S. J., "Industrial network technologies and applications," C&I, special issue, May, 2010.
[4] Jeong, S. M., "DCS or PLC-7 questions for implementation of optimal automation system," C&I, special issue, September, 2008.
[5] Kim, J. A., "Industrial ethernet technologies and present situation," C&I, special issue, May, 2012.
[6] Kim, Y. G., Moon, C. J., Joo, Y. T., Park, T. S., and Chang, Y. H., "A Study of Integrated SCADA system for Wind Farm to Support Interoperability," Journal of the Korean Solar Energy Society, 2013.
[7] Know all about SCADA Systems Architecture and Types with Applications, Tarun Agarwal, http://www.edgefxkits.com/blog/scada-system-architecture-types-applications/.
[8] Ko, J. H., "A Study on Dual System for Fault Tolerance of PLC," JKIECS, 2011.
[9] K-water, Analytical research about the effect of water operation system(Water-K) application, K-water, 2010.
[10] K-water, Database technology standard, K-water, 2013.
[11] K-water, ICT facilities engineering instructions, K-water, 2011.
[12] K-water, i-Water application standard, K-water, 2013.
[13] K-water, Nakdong River estuary barrage drainage gates extension project basic planning documents, K-water, 2009.
[14] K-water, Nakdong River estuary barrage opration and management guidelines, K-water, 2008.
[15] K-water, Samsung C&T, Nakdong River estuary barrage drainage gates extension project operation and maintenance manual, K-water, Samsung C&T, 2010.
[16] K-water, Samsung C&T, Nakdong River estuary barrage drainage gates extension project working design reports, K-water, Samsung C&T, 2010.
[17] K-water, Water operation system HMI technology standard, K-water, 2013.
[18] Lee, B. Y., "Fail Over Analysis and Management for the Databse Implement of High Availability Solution," JKCA, 2010.
[19] Lee, J. H. and Lee, S. J., "An Accuracy Improvement on Acquisition Time of SCADA RTU Status Event," The transaction of Korean Institute of Electrical Engineers, 2013.
[20] Lee, J. J., Kim, S. J., and Kang, D. J., "A SCADA Testbed Implementation Architecture for Security Assessment," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2010.

[21] Lee, S. H., Lee, J. H., and Jeon, H. J., "Critical Success Factors for BPM Implementation : A Multiple Case Study," The Journal of Society for e-Business Studies, Vol. 17, No. 1, 2012.

[22] maekyung.com, Dictionary of terms SCADA [Internet], Available: http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=903&cid=43659&categoryId=43659.

[23] Nam, E. S., Woo, C. H., and Kim, H. B., "Development of Water Management system for Optimal Operation and Control in Wide-area Waterworks," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, 2003.

[24] Park, J. H., "HMI technical trend and move direction," C&I, special contribution, May, 2010.

[25] Park, M. M., Park, J. H., Shin, K. T., and Park, J. W., "RosettaNet based Business Integration Model for Enhancing Manufacturing Firm's Responsiveness," The Journal of Society for e-Business Studies, Vol. 15, No. 1, 2010.

[26] Stoian, I., Capatina, D., Ignat, S. and Ghiran, O., "SCADA and Modeling in water Management," 978-1-4799-3732-5/14 IEEE, 2014.

[27] Sukamal Goswami, "Effective Management In Computerized SCADA system," Journal of Management in Engineering, Vol. 9, No. 1, January, 1993.

[28] Three generations of SCADA system architectures, Edvard Csanyi, http://electrical-engineering-portal.com/three-generations-of-scada-system-architectures.

저 자 소 개

김석주 (E-mail : ksjid@kwater.or.kr)
1991년 부산대학교 공과대학 전자공학과 (학사)
2009년 아주대학교 경영대학원 석사(e-Business MBA)
2015년 부경대학교 대학원 기술경영 (박사수료)
1992년~현재 한국수자원공사 재직 중
관심분야 수자원 정보통신, 계측제어, 기술사업화

임태수 (E-mail : teshou@gmail.com)
1999년 서울대학교 산업공학과 (공학석사)
2004년 서울대학교 산업공학과 (공학박사)
2004년~2005년 LG전자 생산기술원 선임연구원
2005년~현재 성결대학교 컴퓨터공학부 전임 교수
관심분야 BPM, 정보검색, 기업정보시스템

김민수 (E-mail : minsky@pknu.ac.kr)
1996년 서울대학교 산업공학과 (공학석사)
2002년 서울대학교 산업공학과 (공학박사)
2004년~현재 부경대학교 시스템경영공학부 부교수
관심분야 BPM, 기술경영, Big Data 등