

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.1.057>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 왕복동식 펌프의 점진적인 성능 저하 진단을 위한 FPGA 기반 에뮬레이터 구현에 관한 연구

임상선\* · 김우식\*\* · 김태윤\*\* · 채장범\*\*

\* 세종대학교 정보통신공학과, \*\* 아주대학교 기계공학과

### Study on FPGA-Based Emulator for the Diagnosis of Gradual Degradation in Reciprocating Pump

Sang Sun Lim\*, Wooshik Kim\*\*†, Tae Yun Kim\*\* and Jang Bom Chai\*\*

\* Dept. of Electronic Engineering, Sejoing Univ., \*\* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received February 1, 2016; Revised August 30, 2016; Accepted September 8, 2016)

**Key Words:** Nuclear Power Plant(원자력 발전), Reciprocating Pump(왕복동식 펌프), Gradual Degradation(점차적인 성능저하), Diagnose(진단), Healthy State(건강한 상태), Emulator(에뮬레이터), FPGA(FPGA)

**초록:** 이 논문의 목적은 원자력 발전소의 급수 펌프인 왕복동식 펌프의 연속적인 사용으로 인한 점진적인 성능저하의 정도를 진단하는 방법을 개발하는 것이다. 일반적으로 이러한 점진적인 성능 저하는 너무 서서히 진행되기 때문에 기존의 진단 방법으로는 그 성능 저하의 정도를 판단하기 어렵다. 하지만 정상 상태의 파라미터들을 제공하는 기계가 있다면, 현재의 상태와 비교하여 성능 저하의 정도를 파악하는 것이 가능해진다. 이 논문은 점진적인 성능 저하를 식별하는데 사용할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 건강한 상태의 펌프의 정보를 제공하는 에뮬레이터를 FPGA 사용하여 개발하는 과정을 보이고, 실제 펌프로부터 수집한 데이터와 비교하여 에뮬레이터가 동작한다는 것을 보인다.

**Abstract:** The purpose of this study is to develop a method for diagnosing the degree of gradual degradation of a reciprocating pump caused by continuous use as a water supply pump in a nuclear power plant. Normally, the progress of such degradation is too slow to be noticed. Hence, it is difficult to determine the degree of degradation using the existing diagnostic methods. In this paper, we propose a new method by which the normal state and the degraded state of the pump can be differentiated, so that the degree of degradation can be identified. First, an emulator was developed using FPGA by providing the parameters of the pump under normal state, so that the emulator generates the information of the pump in the healthy state. Then, by comparing this information with the parameters received from various output sensors of the emulator during the current state, it is possible to identify and measure the degree of gradual degradation. This paper presents some of the results obtained during the development process, and results that show how the emulator operates, by comparing the data collected from an actual pump.

- 기호설명 -

$a_{in}$  : 주입 밸브의 오리피스 면적  
 $a_{out}$  : 배출 밸브의 오리피스 면적  
 $B_{eff-compression}$  : 압축 모드의 체적 탄성률  
 $B_{eff-discharge}$  : 토출 모드의 체적 탄성률  
 $B_{eff-expansion}$  : 팽창 모드의 체적 탄성률

$B_{eff-suction}$  : 흡입 모드의 체적 탄성률  
 $C_{in}$  : 주입 밸브의 유량계수  
 $C_{out}$  : 배출 밸브의 유량계수  
 $D_p$  : 플런저 지름  
 $L$  : 커넥팅 로드 길이  
 $m_p$  : 플런저 질량  
 $P_{atm}$  : 대기압  
 $P_{compression}$  : 압축 모드의 실린더 압력  
 $P_{discharge}$  : 토출 모드의 실린더 압력

† Corresponding Author, [sslim@sju.ac.kr](mailto:sslim@sju.ac.kr)

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

$P_{expansion}$	: 팽창 모드의 실린더 압력
$P_{suction}$	: 흡입 모드의 실린더 압력
$P$	: 실린더 압력
$P_{in}$	: 펌프 전단 압력
$P_{out}$	: 펌프 후단 압력
$Q_p$	: 유체 밀도
$r$	: 크랭크 회전 반경
$V$	: 실린더 체적
$V_c$	: 실린더 내부 여유 체적
$x_p$	: 플런저 변위
$\theta$	: 크랭크 각
$\pi$	: 원주율
$\rho$	: 유체 밀도 상수

## 1. 서론

EPRI(Electric Power Research Institute)에서 원전의 설비 중 예측진단이 필요한 부분의 우선순위를 기 기 고장률과 경제적인 면을 기준으로 정하는 연구를 했다. 여기서 상위 우선순위에 속하는 급수 펌프를 연구 대상으로 선정하였다.<sup>(1)</sup>

펌프의 고장을 사전에 감지하고 필요한 정비를 하기 위해 펌프의 동작을 모니터링 하는 연구는 이미 활발히 이루어지는 중이고, 앞서 말한 바와 같이 보수 비용의 감소와 생산성 및 기계 효율이 증가하는데 큰 역할을 한다. 현재 적용된 방식은 진동 측정이나 윤활유 분석과 같은 방법이 있다.<sup>(2)</sup>

펌프의 결함 진단에 관한 연구는 주로 원심식 펌프에 관한 내용이 대다수이고, 왕복동식 펌프에 관한 연구는 부족한 실정이다.<sup>(3)</sup> 그 중에 Liu Shuli은 EMD 알고리즘을 적용해, 왕복동식 펌프의 밸브 결함을 진단하였지만 진동 신호의 주파수의 스펙트럼 분석을 통한 일반적인 밸브 스프링의 결함 상태의 경향만을 보여주었고,<sup>(4)</sup> Pawan J. Singh는 왕복동식 펌프의 시뮬레이션 모델과 실험 데이터를 비교하여 펌프의 상태를 파악하는 연구를 진행했지만, 에뮬레이터 구현을 위해선 하드웨어 기반 시뮬레이션을 해야 한다.<sup>(5)</sup> 이런 연구들은 성능 저하가 확인한 경우는 효과가 있지만, 점진적인 성능 저하는 인식하기 어려운 경우가 많다. 이 논문에서는 이런 점진적인 성능 저하의 감지, 진단 및 예측 진단이 가능하기 위한 연구를 하고자 한다.

일반적으로 점진적인 성능 저하는 그 변화가 너무 느려서 기존의 진단 방법으로는 그 성능 저하의 정도를 판단하기 어려운 것이 사실이다. 이런 펌프의 점진적인 성능저하를 진단하기 위해 정상 상태의 펌프의 성능 파라미터들을 제공하는 기계

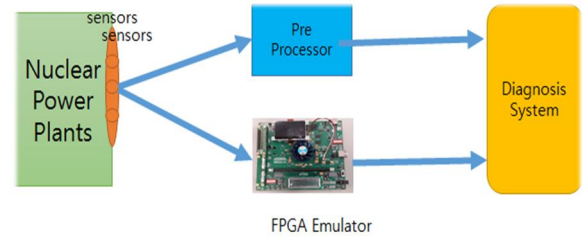


Fig. 1 Reference system's concept diagram

가 있다면, 현재의 상태와 비교하여 성능 저하의 정도를 파악할 수 있다. Fig. 1에 이런 목적의 시스템 구성을 보였다. 그림에서 제일 왼쪽은 왕복동식 펌프와 같이 원자력 발전에 들어가는 설비/장치들이며, 여기에는 많은 종류의 센서들이 붙어있으며, 이 센서들로부터 이 장치의 상태들이 나오게 된다. Pre-processor는 센서를 통해서 들어오는 데이터를 전처리하여, 현재 시스템의 상태에 대한 정보를 만들어 주게 된다. 이 정보는 현재 시스템의 건강 상태에 대한 정보가 있지만, 점진적인 성능 저하인 경우에는 건강 상태를 인식하기 어렵다는 문제를 갖는다. 아래의 FPGA 에뮬레이터는 건강한 상태 정보를 지속적으로 생산하도록 구현하고자 하며, 그래서 전처리 장치의 결과와 비교하여 현재의 건강 상태를 비교할 수 있도록 하고자 한다. 이렇게 Pre-processor의 결과와 FPGA 에뮬레이터의 결과는 모두 뒷단의 진단 시스템으로 입력되며, 여기에서 현재의 상태에 대한 진단 및 앞으로 발생할 가능성이 있는 고장에 대한 예측 진단을 하게 된다.

이 논문에서는 이를 위한 기반연구로 FPGA기반 에뮬레이터를 Matlab/Simulink 기반으로 시뮬레이션 하고, LabVIEW를 이용하여 FPGA로 구현하고자 한다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장 본론에서는 왕복동식 펌프의 수학적 모델링과 이를 기반으로 한 시뮬레이션에 대하여 알아보고, 이 연구가 적용될 왕복동식 펌프와 관련 유동장 실험 장치에 대한 설명을 한 후 마지막 결론을 통해 이 논문에서 한 연구를 정리하고 앞으로 진행하게 될 연구 방향을 제시 할 것이다.

## 2. 펌프 모델링 및 시뮬레이션

### 2.1 펌프의 수학적 모델링<sup>(2)</sup>

Fig. 2에서 왕복동식 펌프의 개략적인 모델을 보였다. 그림에서 알 수 있듯이, 왕복동식 펌프는 모터가 회전함에 따라 피스톤이 왕복운동을 하며 이에 따라 실린더 내부의 부피가 변하면서 압력도 변하

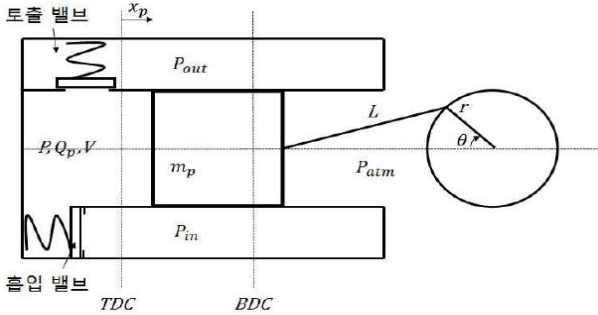


Fig. 2 Schematic diagram of a single cylinder

게 된다. 이에 대한 플러저의 변위와 실린더 내부의 체적 사이의 수학적 모델은 아래 식과 같다.

$$x_p = [r(1 - \cos \theta) + L(1 - \sqrt{1 - (r/L)^2 (\sin \theta)^2})] \quad (1)$$

$$V = V_c + \frac{1}{4} \pi D_p^2 x_p \quad (2)$$

위 식에서 알 수 있듯이 플러저의 변위는 크랭크의 각도에 따라 변화하며 실린더 내의 체적은 크랭크 각도가 제로 일 때의 실린더 내부의 부피에 플러저의 변위에 단면적이 곱해진 값이다.

또한 펌프는 흡입구와 배출구의 압력의 차이에 따라 각각의 밸브가 열리고 닫히면서 네 가지 모드(팽창-흡입-압축-토출)로 변동하며 순환한다. Table 1은 각각의 모드에 따른 밸브의 상태를 보여주며, 식 (3-6)은 각 모드에서 성립하는 미분 방정식이며, 각 식은 각 모드에 해당하는 체적 탄성계수에 따라 연산이 수행되며, 특히 흡입과 배출 모드의 경우는 실린더 내부 압력이 피드백 되어 미분 방정식 계산에 사용된다.

이 논문에서 구현한 시뮬레이션은 유동장 실험 장치로부터 크랭크의 각도, 각속도, 펌프의 흡입·배출구의 압력을 입력 받아 펌프의 플러저의 변위부터 시작하여 실린더 내부의 부피 등을 구하고 최종 목표인 실린더 내부 압력을 출력한다. 그리고 각 모드에 해당하는 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dP_{expansion}}{dt} = -\frac{B_{eff-expansion}}{V} \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dP_{suction}}{dt} = -\frac{B_{eff-suction}}{V} \left( \frac{dV}{dt} - \frac{a_{in} C_{in} \sqrt{2(P_{in}-P)}}{\sqrt{\rho}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dP_{compression}}{dt} = -\frac{B_{eff-compression}}{V} \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dP_{discharge}}{dt} = -\frac{B_{eff-discharge}}{V} \left( \frac{dV}{dt} + \frac{a_{out} C_{out} \sqrt{2(P-P_{out})}}{\sqrt{\rho}} \right) \quad (6)$$

## 2.2 왕복동식 펌프 시뮬레이션의 흐름도

펌프 시뮬레이션은 Fig. 3의 흐름도와 같이 입력

Table 1 Four modes of reciprocating pumps

Event	Inlet valve	Outlet valve
Mode		
Expansion	Close	Close
Suction	Open	Close
Compression	Close	Close
Discharge	Close	Open

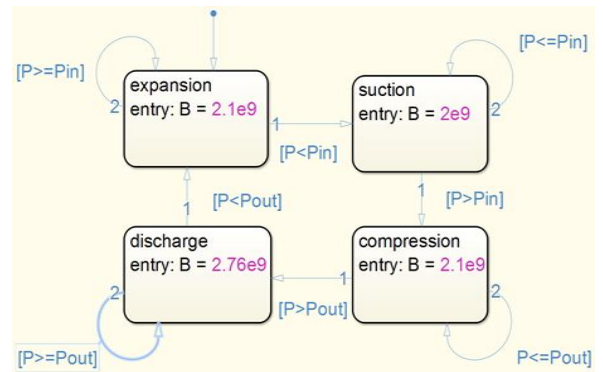


Fig. 3 Flow chart of reciprocating pump's Simulation

되는 조건에 따라 팽창, 흡입, 압축, 토출의 네 모드가 반복하면서 동작한다.

상태 머신은 흡입 밸브의 압력과 토출 밸브의 압력 그리고 실린더 내부의 압력을 입력 받아 조건에 따라 능동적으로 모드를 판별한다.

그리고 펌프의 모드에 해당하는 수식에 펌프의 Specification과 센서를 통해 데이터를 입력하여 실린더 내부의 압력을 구한다. 최종적으로 나온 압력 값은 상태머신으로 다시 피드백 되어 다음 스텝의 모드 판별에 사용된다.

## 2.3 펌프 시뮬레이션

### 2.3.1 MATLAB / SIMULINK를 통한 시뮬레이션

최종 목적인 FPGA의 기반의 시뮬레이션에 앞서 범용적이며 매 스텝 결과를 계산해 출력해 주어 실시간 시뮬레이터 구현에 적합한 툴인 MATLAB Simulink를 사용하여 펌프 모델을 구현 한다.

프로그램은 앞서 2.2장에서 설명한 프로그램의 흐름도를 따라 StateMachine 블록에서 SensorData, Math\_ODE 블록을 통해 흡입 토출 밸브의 압력과 실린더 내부의 압력 data들을 받아 모드를 판별하고 Math\_ODE 블록을 통해 해당하는 모드의 식에 SensorData와 펌프의 Spec이 입력되어 최종 결과인 실린더 내부의 압력을 계산한다.

그리고 Scope 블록을 통해 모니터링 함과 동시에 StateMachine 블록으로 피드백 한다.

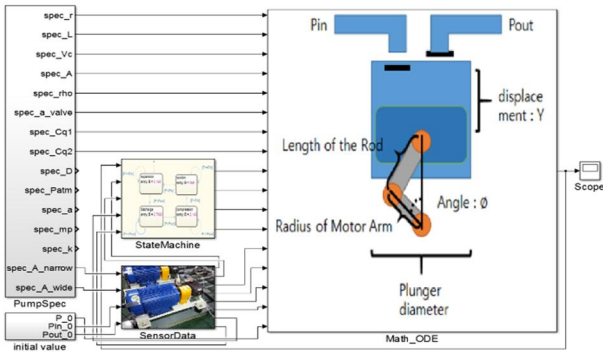


Fig. 4 Pump model implemented in Matlab Simulink

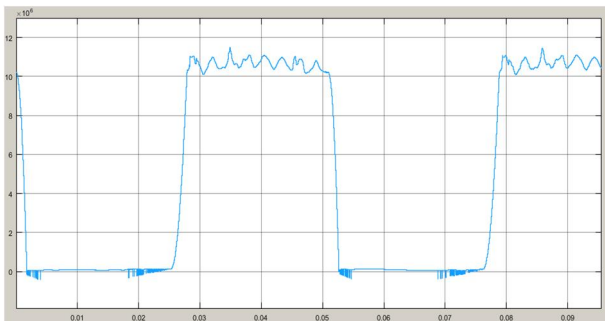


Fig. 5 Result graph is implemented through the Matlab Simulink

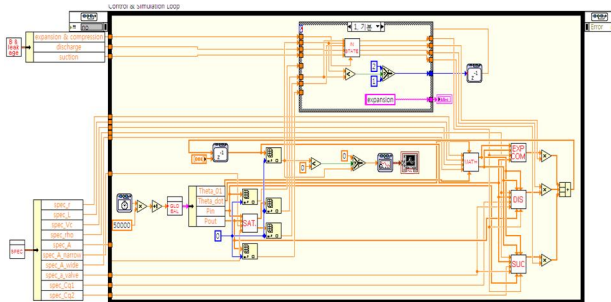


Fig. 6 Pump model implemented in Matlab Simulink

그리고 이 시뮬레이션의 결과 그래프는 Fig. 5와 같다.

### 2.3.2 LabVIEW를 통한 시뮬레이션

Simulink로 구현한 시뮬레이션을 National Instruments사의 FPGA인 CompactRIO에 다운로드 하기 위해 LabVIEW로 재구성하였다.

여기서 StateMachine은 Switch Loop를 통해 구성이 되었고, GLOBAL, SAT 블록을 통해 sensor data가 입력되어 모드를 판별하고 MATH, EXPCOM, DIS, SUC블록을 통해 각각 모드의 식에 sensor data와 펌프의 Spec이 입력되어 최종 결과인 실린더

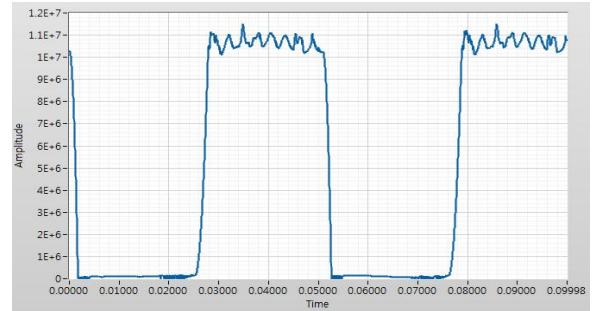


Fig. 7 Result graph is implemented through the Matlab Simulink

내부의 압력이 출력이 됨과 동시에 Switch Loop에 피드백 된다.

그리고 이 시뮬레이션의 결과 그래프는 Fig. 7과 같다.

## 2.4 FPGA를 통한 구현

### 2.4.1 FPGA – CompactRIO-9033

FPGA(Field Programmable Gate Arrays)는 연결되지 않은 다수 로직 게이트로 이루어진 실리콘 칩이며, 소프트웨어를 이용하여 프로그래밍을 함으로써 칩의 기능을 재정의 할 수 있다.

앞서 2.3.1, 2.3.2절에서 구현한 시뮬레이션에 필요한 연산은 윈도우 OS 기반의 프로그램에서 이루어 졌지만 이번 절에는 CompactRIO에 내장되어 있는 FPGA인 Xilinx사의 Kintex-7에서 이루어진다. 일반적으로는 Window OS에서 제공하는 다양하고 편리한 어플리케이션 및 솔루션을 활용하기 위해 Window 기반에서 시뮬레이션을 하지만, 보안에 취약하고, Blue Screen 발생, 시스템의 속도 저하 등의 문제가 발생하기 쉽기 때문에 장기간 안정적으로 운영되어야 하는 시스템을 구성하기 위해선 하드웨어적 구현 즉 FPGA를 통한 구현이 필요하다.

이번 연구에서는 National Instrument사에서 데이터 수집과 FPGA를 통한 연산을 가능하도록 만든 제품인 CompactRIO-9033(Fig. 8)을 사용하였다.

CompactRIO은 크게 컨트롤러, I/O 모듈, 새시(FPGA가 내장)로 구성되어 있다.

컨트롤러: Linux Real-Time의 운영체제로 구동되며 기가 비트 이더넷, USB Hi-Speed 호스트, USB 장치 및 시리얼 포트를 내장하고 있다.

새시: Ni CompactRIO 임베디드 시스템의 핵심으로 FPGA 칩이 내장되어 있다. FPGA 칩은 스타 토폴로지로 I/O 모듈에 연결되어 각 모듈로 직접 액

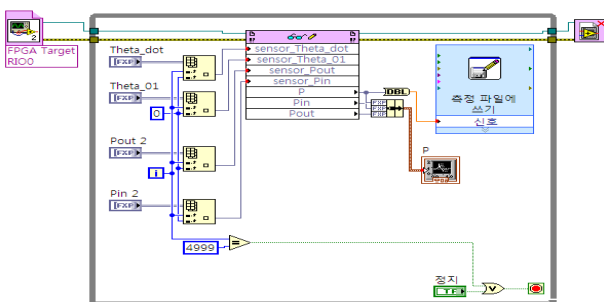


**Table 2** NI CompactRIO-9033 Specifications

Controller type	High performance
Processor type	1.33GHz Dual Core Intel Atom Processor E3825
CPU frequency	1.33 GHz
Number of cores	2
Operating system	Linux
SSD	8 GB
System memory	2 GB DDR3L
Number of Ethernet port	2
Network interface	10Base-T, 100Base-TX and 1000Base-T Ethernet
Serial Port	RS232 and RS-484/422
Reconfigurable FPGA	Xilinx Kintex-7 7K160T



**Fig. 8** CompactRIO-9033 and I/O module of National instrument



**Fig. 9** Host Vi to operating the CompactRIO

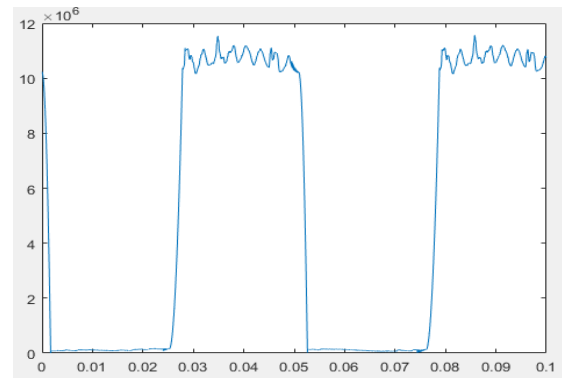
세스하면서 무제한적인 타이밍, 트리거링, 동기화 유연성을 구현한다.

I/O 모듈: CompactRIO 새시에 장착하여 다양한 I/O를 구현할 수 있다. 각 모듈은 BNC, D-Sub 등의 커넥터를 통해 센서 등으로부터 입력되는 신호를 받고 이 신호를 FPGA가 인식 가능한 신호로 변환한다.

CompactRIO-9033의 Specification은 Table 2와 같다.

#### 2.4.2 FPGA 에뮬레이터

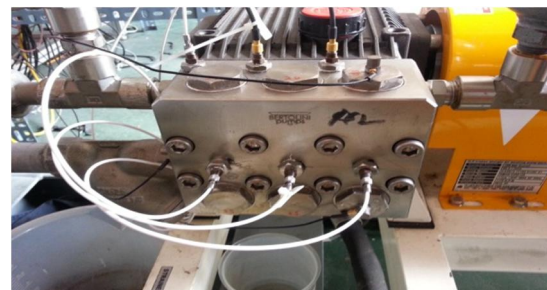
Fig. 9는 FPGA에 다운로드 된 프로그램에 sensor



**Fig. 10** Result graph is implemented through the FPGA



**Fig. 11** Experimental device of flow field



**Fig. 12** KA4815 model of Bertolini pumps

data를 입력하고 FPGA로부터 계산되어 나오는 압력을 받아 출력하는 프로그램으로 FPGA에 다운로드 된 프로그램의 시작과 정지, 모니터링 등의 제어를 한다.

이를 chart 블록으로 확인한 결과가 Fig. 10이다.

### 3. 실험

#### 3.1 유동장 실험 장치

시뮬레이션 기준이 되는 실제 데이터를 얻기 위해 실제 원자력 발전소에서 쓰이는 장비들을 사용하여 유동장 실험 장치(Fig. 11)를 구현하였고 모사할 기준이 되는 펌프를 Bertolini Pumps사의 KA4815모델(Fig. 12)로 선정하였다.

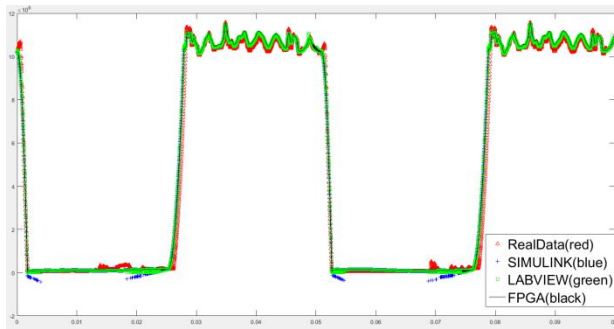


Fig. 13 Result graph of all simulation

데이터 수집을 위해 펌프를 흡입구의 압력을 1 bar, 배출구의 100 bar, 크랭크의 회전속도 1170 rpm, 유량  $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 으로 조정하고 시스템의 안정화가 된 1분 정도 후의 data를 시뮬레이션에 사용하였다.

### 3.2 실제 데이터와 시뮬레이션 결과 비교

지금까지 유동장 실험장치로부터 나온 실린더 내부의 압력의 실험값을 에플레이터로 구현하기 위해 Matlab Simulink, LabVIEW, LabVIEW FPGA Module 세 단계를 거쳐 시뮬레이션을 하고 결과를 확인했다.

각 시뮬레이션의 결과를 개별적으로 보면 시뮬레이션의 정확도를 파악하기 어려우므로 MATLAB 플롯 함수를 통해 각각의 결과값을 모았다. Fig. 13의 시뮬레이션 결과를 보면 빨간, 파랑, 초록, 검정색 순서로 실제 실린더 내부의 압력, Matlab Simulink와 LabVIEW를 통한 시뮬레이션 결과, 그리고 FPGA기반 에플레이터를 통한 결과를 보여준다.

각각의 그래프를 보면 펌프의 모드가 비슷한 시점에 변경이 되어 순환함을 볼 수 있었고, 팽창, 압축 모드의 기울기가 등이 잘 맞음을 볼 수 있다.

## 4. 결론

지금까지 유동장 실험장치를 통해 수집했던 센서 데이터를 기반으로 실린더 내부의 압력을 구현했고, 실험값과 비교를 하고 검증하였다.

향후 최종 목표인 CompactRIO를 유동장 실험 장치의 펌프에 직접 연결해 센서로부터 입력되는 데이터를 실시간으로 계산하여 건강한 데이터를 출력하는 에플레이터를 완성하고, 이 정보를 기반으로 펌프의 상태를 진단하는 알고리즘을 확립하여 왕복동식 펌프의 진단과 잔여 수명 등을 예측 진단 할 수 있도록 연구를 진행할 예정이다. 이러한 연구 결과가 현장에 적용된다면, 왕복동식 펌프의 작동 상태를 정확하게 파악하고 필요한 정비를 수행하는데 사용되어 원자력발전소의 안정성을 높이는 동시에 경제적 이득 또한 가져올 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 2012854001002 0)

## 참고문헌

(References)

- (1) Shankar, R., 2006, "Fleetwide Monitoring for Equipment Condition Assessment," EPRI, California USA.
- (2) Jeong, J. K., 2015 "Study on the Diagnosis of a Reciprocating Pump Using Simulation Model," Master's Thesis, Ajou Univ. Suwon Korea.
- (3) Kim, K. Y., 2015 "Study on the Diagnosis of a Reciprocating Pump Using Pattern Analysis," Master's Thesis, Ajou Univ. Suwon Korea.
- (4) Shulin, L., Haifeng, Z., Hui, W. and Rui, M., 2007, "Application of Improved EMD Algorithm for the Fault Diagnosis of Reciprocating Pump Valves with Spring Failure.," In: Signal Processing and its Applications (ISSPA) 2007, 9th International Symposium on, pp. 1~4.
- (5) Singh, P. J. and Mandavan, N. K., 1987, "Complete Analysis and Simulation of Reciprocating Pumps Including System Piping," Ingersoll-Rand Company Phillipsburg, New Jersey.