

논문 2005-42SC-4-4

나로우주센터 발사관제시스템 실시간 발사관제 모의장치의 센서 신호간 연관성 해석을 위한 퍼지-칼만필터 공분산 분석

(A Covariance Analysis Using the Kalman Filterings for
Interrelationships Research between Sensor Signals of the Real Time
Simulator of Launch Control System in the NARO Space Center)

홍 일희*, 김 양모**

(Il-Hee Hong and Yang-Mo Kim)

요약

나로우주센터 발사관제시스템 실시간 모의장치의 데이터를 퍼지-칼만 필터의 오차 공분산으로 후처리 분석하여 센서 사이에 존재하는 연관성을 시나리오를 전혀 모르는 상태에서 유추하는 연구를 수행하였다. 유추된 연관성은 시나리오 상의 관계와 정확히 일치하였다. 퍼지-칼만 필터의 최적화 성질을 역이용하여 센서의 신호를 분석하였다. 이 연구의 결과로 다중의 센서 시스템이 존재하는 한국형 우주발사체와 탑재 유상하중 그리고 지상지원 시스템에 대한 신호분석의 가능성을 확인하였다.

Abstract

We had research to conduct interrelationships between sensors using postprocessing analysis with the Fuzzy-Kalman Filtering Auto-Correlation about Real Time Simulator data of the NaroSC LCS in case of a fully blind situation scenario. The conducted interrelations are same harmony with relations in scenario. We had analyzed signals of sensors reverse-using a optimization character of Fuzzy-Kalman Filter. As our research conclusion, We had recognized possibilities of signal processing about the KSLV-1, on-board payloads, general equipments of ground support which apply to multi sensor systems.

Keywords : 공분산(Covariance), 연관성(Interrelationship), 퍼지-칼만 필터(Fuzzy-Kalman Filtering),
나로우주센터 발사관제시스템(NARO Space Center Launch Control System), 실시간 발사관제
모의장치(Real Time Simulator)

I. 서 론

나로우주센터에서 한국형 우주발사체 1호(KSLV-1)를 발사 예정으로 하고 있으며 이를 위해서 나로우주센터에는 우주발사체의 임무준비를 위한 발사관제시스템, 발사통제시스템, 안전통제시스템 등 각종 통제소가 필요하게 된다.^[11-17]

우주발사체의 이륙 순간까지의 통제를 담당하는 곳이 발사관제시스템(LCS : Launch Control System)으로

써 연료와 산화제 충진, 점화 및 실효추력까지 고정, 유상하중 상태파악, 우주발사체 상태 파악 등 이상이 발생하면 임무 전체를 중단시켜야 할 중요한 과정을 지속적으로 원격 감시하고 필요시 시나리오나 적절한 판단에 따라서 통제를 행한다.^[1,2,11-17]

발사관제시스템은 올바른 발사관제를 위해서 수많은 센서 체계를 설치하여 상태의 판단을 돋지만 센서의 신호에 의한 판단에 있어서 제일 중요한 가정은 측정대상이 이상이 있고 센서는 오류가 없다는 것이다. 그러나 수많은 센서를 설치하는 작업은 고난이도의 수작업으로 써 여러 환경요소에 따라 언제든지 실수를 야기할 수 있다. 따라서 측정대상이 정상적으로 작동하고 있음에도 불구하고 이상이 있는 센서에서 잘못된 신호가 송출될 가능성은 상존하고 있다.^[1,3,8-10]

본 논문은 나로우주센터 발사관제시스템을 탐색개발

* 정희원, 한국항공우주연구원
(System Design & Integration Department KSLV
System Division Korea Aerospace Research Institute)

** 정희원, 충남대학교 전기공학과
(Department of Electrical Engineering Chungnam
National University)

접수일자: 2005년2월17일, 수정완료일: 2005년6월3일

하기 위하여 한국항공우주연구원이 발주한 발사관제 모의장치의 신호를 퍼지-칼만필터에 쓰이는 퍼지-칼만 오차 공분산을 사용하여 신호간의 연관성을 공분산 해석을 통하여 분석한 것이다. 비교를 위하여 통계역학적 분석기법인 단순 공분산을 이용한 분석을 참고로 실시하였다. 이에 대한 자세한 내용은 본론의 이론부분과 결론의 해석부분에서 자세히 서술하였다.^[4]

발사관제 모의장치는 발사체, 발사지원장비 실체와는 다르지만 어떠한 시스템적인 특질을 가지고 있으며 따라서 발사관제 모의장치를 구성하는 시스템 방정식상의 모든 매개변수는 서로에 대해서 강하거나 약한 상호작용을 방정식을 통하여 보여 준다. 이러한 상호작용은 다변수 함수이므로 얼마만큼의 영향을 서로 주고 있는가에 대하여 평가하기가 어려운데 여러 가지 평가 방법 가운데 본 저자가 선택한 것이 퍼지-칼만 오차공분산을 사용하여 분석하는 방법이다.^[4]

이러한 분석기법을 통해 센서간의 연관성을 해석하면 단순하게 정상신호와 이상신호로 구분하는 차원을 초월하여 수신된 신호의 내용에 대한 분석을 시작할 수 있다. 특히 정상작동중인 시스템에서 부분이상이 있는 센서가 미치는 영향을 미리 해석적 기법을 통하여 평가해 봄으로써 이후 나로우주센터의 발사관제시스템을 통합설계하는 관점에서 도움이 될 수 있는 기초 연구를 수행하고자 하였다.^[1]

본 논문과 유사한 연구는 과거 1970년대 러시아에서 시작된 바가 있으며 미국 역시 비슷한 시기에 시작되었단다고 추정되지만 두 나라 모두 군사기술을 기반으로 진행된 측면이 많아 학술적인 발표가 극히 부진한 상태이다. 또한 그 동안 신뢰성 공학에 기반한 설계방식이 대세를 이루고 있어 이 분야의 발전이 느려지기도 했다. 시스템의 완전성을 확률에 의거하여 접근하는 신뢰성 공학적 설계방식에 대하여 시스템의 내재오류를 감안하고 진단기법을 통해 시스템의 강건성을 평가하여 시스템의 이용한계를 결정하는 진단공학적 설계방식은 새로운 차원의 시스템 설계기법이라 할 수 있다.^[5-7]

II. 본 론

1. 칼만 필터: 예측-수정 기법

일반적인 시스템의 상태 추정 및 관련된 계수를 추정하는 문제를 해석하는 다양한 방법들이 있으나 공통적으로 시스템 모델링, 측정/처리과정, 측정된 데이터에 포함된 잡음에 대하여 그들의 특성 및 계수적 성격을 파악하는 것을 주된 작업으로 취급한다. 상태 추정 알

고리즘들은 대부분 예측-수정(Predictor-Corrector) 과정을 수행하는 형태로 표현되어 지는 것이 많다.

그런데, 시스템 또는 프로세스 방정식을 구하려 할 때 필터링 또는 관련 계수들의 튜닝값(예를 들면 초기 프로세스 추정 오차 공분산, 프로세스 잡음 공분산, 측정 잡음 공분산등)을 구하는 것은 매우 어렵다. 만약 시스템의 동력학적 특성 변화가 심하다면 필터의 튜닝은 아주 어려운 문제점으로 나타나며 특별히 프로세스 잡음 공분산을 밝혀내기는 여간 까다롭지 않다.^[3] 기본적인 상태 추정 기법에 관한 절차는 다음과 같이 이루어진다.^[3]

- 가. 시스템, 측정 및 처리 프로세스와 측정에 관련된 모든 잡음 특성의 모델링
- 나. 측정치를 출력으로서 모델링하기 위해 연관되는 요소들 및 이들을 통합하기 위한 기준 설정
- 다. 불확실성을 내포하며 지속적인 경과에 영향을 미치는 미지수 추정, 상태 추정을 위한 수치알고리즘 구현

- 라. 어떤 보정도 가해지지 않은 상태에서의 신뢰도 확보를 위한 상기 과정의 비모순성 검사

이 연구의 목적은 시스템 처리 과정의 물리적 절차 또는 시나리오상의 물리적 연계성을 센서 신호간의 관계식으로 밝히기보다 센서에서 검출된 각 처리과정에서의 물리량 변위를 기준 데이터로 취하여 센서 신호사이의 상호간 연관성을 파악하려고 하였다. 시뮬레이터의 시나리오와 내부 구성 함수, 조건 등에 대한 정보가 주어지지 않은 상태에서 오직 시뮬레이션 완료 뒤 그 결과물로 주어진 측정 데이터만을 이용하여 각 처리과정의 상호간 연관성을 파악하도록 하였다.

그러므로 정확한 수치 함수적 관계를 밝히는 것이 아닌 상호간 연관 정도를 비교 가능하도록 하는 것이 이 연구의 목적임을 다시 한 번 밝혀둔다. 따라서 정확한 수치적 계산은 본 연구의 목적이 아니므로 수리적 계산보다는 센서 사이의 연관성을 판단할 근거추정이 가능한 방법에 중점을 두고 본 연구를 수행하였다. 이에 따른 연관성 추정이 가능한 방법으로써 상태 추정을 위한 예측-수정 알고리즘의 대표적인 이론으로 널리 알려진 칼만 필터링을 적용하여 분석 실험 연구를 행하였다.

칼만 필터링을 고려한 또 다른 이유는 칼만 필터링 적용 방법의 특성상 공분산 계산과정이 포함되어 있으며 이와 같은 예측-수정 알고리즘에는 수학적 분석을 하기 어려운 잡음을 해석하는 능력이 있기 때문이다.^[4] 연구 및 실험 진행 방법에 대해서는 다음에 이어지는 III. 실험 결과 및 고찰에 설명되어 있다.

2. 퍼지-칼만 필터

퍼지-칼만 필터는 퍼지와 칼만 필터를 동시에 이용하는 필터링 기법 가운데 하나로서 수학적 도출 과정은 참고 문헌에 자세히 소개되어 있으므로 생략한다.^[4] 퍼지-칼만 필터의 특징으로는 측정 오차 공분산을 구하여 그것을 실제 칼만 게인 연산에 이용한다는 것이다. 이것은 기존의 칼만 필터 기법과 다른 특징으로 칼만 필터는 추정치의 오차를 계산한 공분산으로서 a priori 공분산과 a posteriori 공분산을 포함하고 있는데 그것은 측정치 오차 공분산과 다른 상태를 나타내는 공분산들이다. 칼만 필터와 퍼지-칼만 필터 모두 물리적 시스템의 상태를 추정하는 것에 목적을 두고 개발되었다. 본 연구에서는 상태를 추정하는 대신 이미 획득되어 있는 데이터를 이용하여 데이터들의 상호 연관성을 추정하려는 것이 목적이므로 실시간 추정치의 오차를 이용하는 칼만 필터보다 획득된 데이터에서 나타나는 측정값 오차를 이용하는 퍼지-칼만 필터를 이용 시뮬레이션을 실행하였다.

3. LCS 시뮬레이터

시뮬레이터는 일정조건에 대해서는 일정한 답을 반환 하므로 불확실성이 제거된 상태에 가깝다고 말할 수 있어 랜덤한 불확실성이 거의 제거된 상태라 할 수 있을 것이다. 본 연구에 이용한 데이터는 6개의 종류로서 데이터들의 특성을 나타내는 평균, 표준편차, 분산, 최대값, 최소값을 표 1에서 나타내었다. 공분산은 표 2에 표시하였다. 또한 6개 센서의 시퀀스 출력 그래프를 도시하였다.

표 1. 평균, 표준편차, 분산, 최대값, 최소값

Table 1. Mean, Standard Deviation, Variance, Maximum, and Minimum.

	13L-401	17P-810	17P-811	12L-401	17P-804	17P-802
평균	68.71843	0.978399	0.987194	5.428019	6.241332	6.727338
표준편차	20.06857	0.025123	0.011903	2.713717	0.113927	0.14522
분산	402.7474	0.000631	0.000142	7.36426	0.012979	0.021176
최대값	100	1	1	10	6.40235	7
최소값	0.210526	0.776036	0.975	0.003289	6	6.319179

표 2. 공분산

Table 2. Covariance.

	13L-401	17P-810	17P-811	12L-401	17P-804	17P-802
1	402.74741	0.4766806	0.2018906	53.414242	-2.121069	2.7873261
5	0.4766806	0.0006311	0.000253	0.0638153	-0.002353	0.0035077
6	0.2018906	0.000253	0.0001417	0.0288172	-0.001175	0.0015227
2	53.414242	0.0638153	0.0288172	7.3642605	-0.299621	0.3891037
4	-2.121069	-0.002353	-0.001175	-0.299621	0.0129793	-0.015466
3	2.7873261	0.0035077	0.0015227	0.3891037	-0.015466	0.0211761

표 3. 공분산(정렬)

Table 3. Covariance(sorting).

	1	2	3	4	5	6
1	402.74741	53.414242	2.7873261	-2.121069	0.4766806	0.2018906
2	53.414242	7.3642605	0.3891037	-0.299621	0.0638153	0.0288172
3	2.7873261	0.3891037	0.0211761	-0.015466	0.0035077	0.0015227
4	-2.121069	-0.299621	-0.015466	0.0129793	-0.002353	-0.001175
5	0.4766806	0.0638153	0.0035077	-0.002353	0.0006311	0.000253
6	0.2018906	0.0288172	0.0015227	-0.001175	0.000253	0.0001417

표 4. 개별 센서가 측정하는 대상

Table 4. Measuring objects of each sensor.

센서	측정대상	약어	출력
12L-401	연료탱크 수위	2	수위
13L-401	산화제탱크 수위	1	수위
17P-802	산화제 펌프 출구압력	3	압력
17P-804	연료펌프출구압력	4	압력
17P-810	연료매니폴드압력	5	압력
17P-811	산화제매니폴드압력	6	압력

가. LCS 시뮬레이터 데이터 통계분석

표 안의 음영으로 처리된 부분은 자기공분산을 나타내는 수치들로서 표 2 공분산을 자기공분산이 가장 큰 데이터 항목을 기준으로 내림차순 순으로 표 3 공분산과 같이 다시 정리하였으며 각 센서들의 명칭도 편의상 번호로 바꾸어 표시하였다. 따라서 센서의 명칭은 다음과 같이 바꾸어 표시되어진다. 공분산표에서 볼 수 있는 것과 같이 각 센서들의 크기 및 변화량, 변화율의 차이가 심하다는 것을 알 수 있다. 이것은 다시 말해 데이터들의 상호간 특성 파악이 확률적 공분산 분석으로는 어렵다는 것을 표현하고 있다.

나. LCC 시뮬레이터 시퀀스 그래프

시퀀스 출력 그래프만을 비교하면 6개의 데이터 각각에 대한 상호 연관성을 찾아보기 어렵다는 것을 알 수 있다.

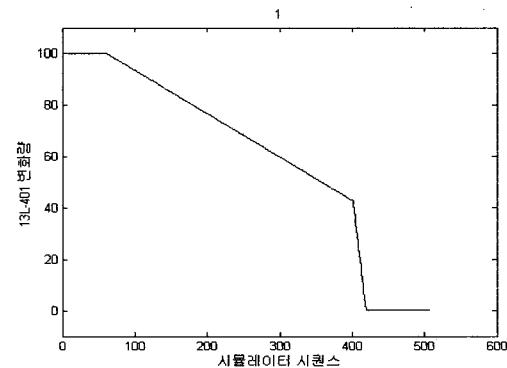


그림 1. 센서 1 (13L-401) 시퀀스

Fig. 1. Sensor 1 (13L-401) Sequence.

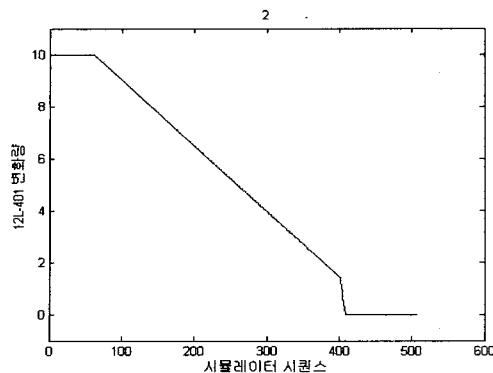


그림 2. 센서 2 (12L-401) 시퀀스
Fig. 2. Sensor 2 (12L-401) Sequence.

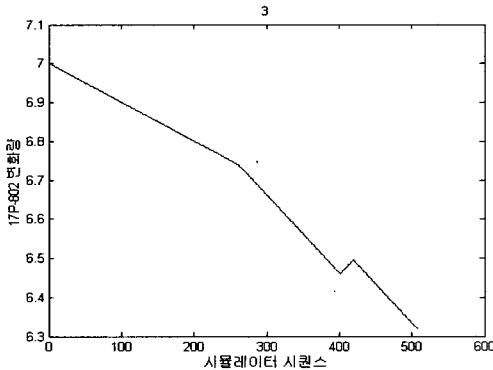


그림 3. 센서 3 (17P-802) 시퀀스
Fig. 3. Sensor 3 (17P-802) Sequence

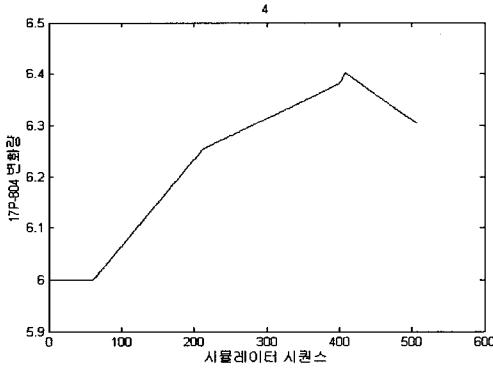


그림 4. 센서 4 (17P-804) 시퀀스
Fig. 4. Sensor 4 (17P-804) Sequence

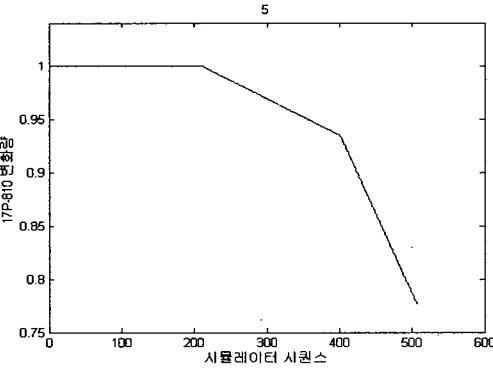


그림 5. 센서 5 (17P-810) 시퀀스
Fig. 5. Sensor 5 (17P-810) Sequence.

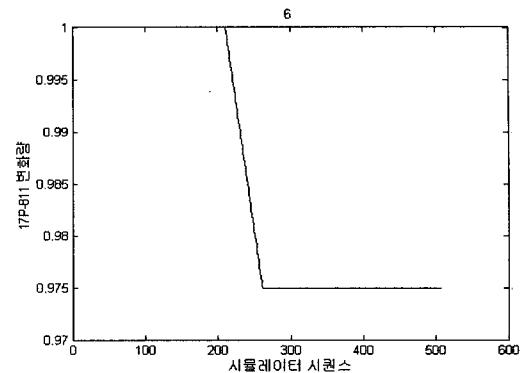


그림 6. 센서 6 (17P-811) 시퀀스
Fig. 6. Sensor 6 (17P-811) Sequence.

III. 실험 및 고찰

1. LCS RT Simulator의 구성

발사관제시스템 실시간 발사관제 모의장치 (LCS RT Simulator)는 아래와 같은 시뮬레이터-게이트웨이-서버의 구조를 가진다.

시뮬레이터 부분은 한국형 우주발사체(KSLV-1)의 각종 신호를 모사 재현한다. 그 이외에도 기능을 정리하면 연속-이산 신호생성, PCM 데이터 생성, 명령 및 데이터 처리의 역할을 하고 있다. 게이트웨이 부분은 시뮬레이터에서 전송되는 데이터를 형식화하여 서버로 보내주고 서버가 내린 명령을 시뮬레이터로 전송하는 역할을 한다. 그 이외에도 수행되는 기능은 PCM 데이터 해석, 명령 및 데이터 처리의 역할을 한다. 서버는 데이터 분배와 명령제어의 두 기능으로 구분되며 데이터 분배 서버는 입출력되는 데이터를 분석하고 배분하는 기능을 주로 하고 있으며 이상 데이터 감시와 데이

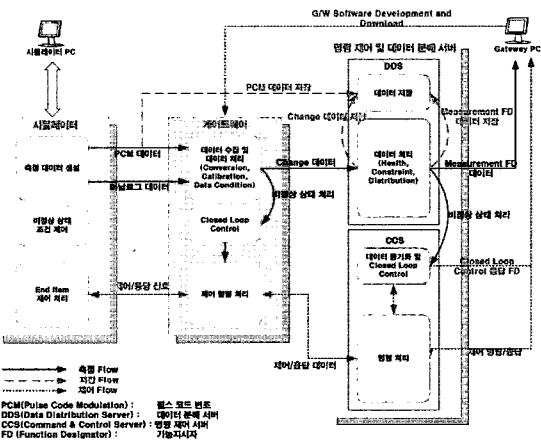


그림 7. LCS 발사관제 모의장치 기능도
Fig. 7. Functional diagram of the LCS Simulator.

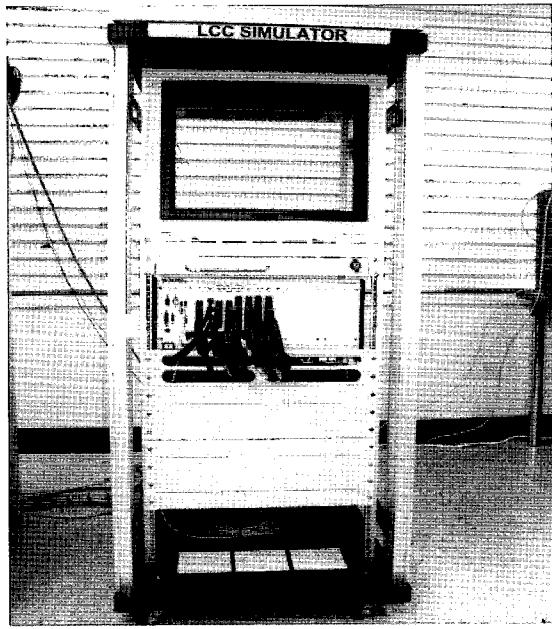


그림 8. LCS 발사관제 모의장치

Fig. 8. A photograph of the LCS Simulator.

터 저장기능을 추가로 수행한다. 명령제어서버는 모사된 지상시험 및 발사과정을 제어하는 기능과 시간동기화 신호를 제공하는 기능을 가진다.

실제 구성은 선 마이크로시스템스의 워크스테이션급으로 서버를 구성하고 시뮬레이터와 게이트웨이는 내셔널 인스트루먼트의 실시간 컴퓨터 내장형 PXI 측정장비 모듈을 조합하여 구성되었으며 사용편의를 위하여 시뮬레이터와 게이트웨이를 각각 개인용 컴퓨터로 제어하는 방식을 취하도록 구성되었다. 시뮬레이터는 사전에 정의된 시나리오에 따라 동작되며 전원연결, 추진제충전, 공압용 가스충전, 공급관로 분리, 점화, 정상연소, 추진제공급 차단, 연소종료의 순서로 실제와 유사한 조건을 따라 수행한다.

2. 공분산 분석기법의 선택

표 3에 대하여 계산되어진 수학적 통계학적 방법을 이용한 공분산으로 6개 데이터 상호간의 관계를 분석하려 하였으나 이것으로는 각 데이터 상호간 연관성을 구할 수 없고 단지 변화의 크기만을 알 수 있었다. 예를 들어 1번 센서에 대해 가장 큰 공분산이 구해진 센서들을 그 크기별로 나열해 보면 1:1-2-3-4-5-6으로 표기하는데,

1: 1-2-3-4-5-6

2: 1-2-3-4-5-6

3: 1-2-3-4-5-6

4: 1-2-3-4-5-6

5: 1-2-3-4-5-6

6: 1-2-3-4-5-6

따라서 각 센서에 대해 관계없이 공분산이 큰 순서대로 나열되어 연관성 판단을 할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 칼만 필터와 퍼지-칼만 필터를 적용하였다.

가. 칼만 필터

6개의 데이터를 각각 독립된 입력치로 간주하여 칼만 필터에 대입하였으며 절대값의 크기가 $|0.001|$ 인 프로세스 잡음을 더하였다. 연구의 목적이 주어진 데이터만으로 각 데이터간의 상호 연관성을 찾는 것이므로 6개의 출력 데이터에 대한 잡음의 크기와 성질에 대해서는 알려진 정보가 없다 가정했으므로 프로세스 잡음은 가우스 분포를 따른다고 간주하였으며 잡음의 절대크기도 모두 같게 하였다.

$$X_k = U_k + w_k \quad (1)$$

$$z_k = H_k \times X_k \quad (2)$$

식 (1)에서 X_k 는 아래 첨자 'k'로 표시되는 각 센서 데이터 추출 단계에서 추출된 6개의 데이터 U_k 를 입력치로 하여 w_k 로 표시되는 각 센서별 프로세스 잡음이 포함된 상태치이며 칼만 필터를 이용한 추정을 위해 식 (2)와 같이 나타내어 잡음이 포함된 상태치를 이용 센서 데이터들간 상호 연관성 관계를 파악하기 위한 관계식을 식 (3)과 같이 만들었다. 식(2)에서 출력 함수 H 는 센서 데이터 상호간 연관 관계 없이 독립적으로 해석하기 위하여 6차 단위행렬로서 구성하였다.

$$\widehat{X}_k = \widehat{X}_k^- + K_k \times (z_k - H \times \widehat{X}_k^-) \quad (3)$$

식 (3)에서 \widehat{X}_k^- 는 프로세스 잡음이 포함되지 않은 순수한 센서 출력 데이터 상태치이며 이 상태치를 프로세스 잡음이 포함된 z_k 와 비교하여 그 차이를 보정할 칼만 개인 K_k 를 구하기 위한 오차공분산을 식 (4)에서와 같이 구한다.

$$P_k = (I - K_k \times H) \times P_k^- \quad (4)$$

P_k 는 X_k 와 \widehat{X}_k 사이의 오차 공분산이며 P_k^- 는 X_k 와 \widehat{X}_k^- 사이의 오차 공분산이다.

식 (4)의 오차 공분산은 다시 프로세스 잡음 공분산 Q_k 와 함께 식 (5)에 의해 전파되고

$$P_k^- = P_k + Q_k \quad (5)$$

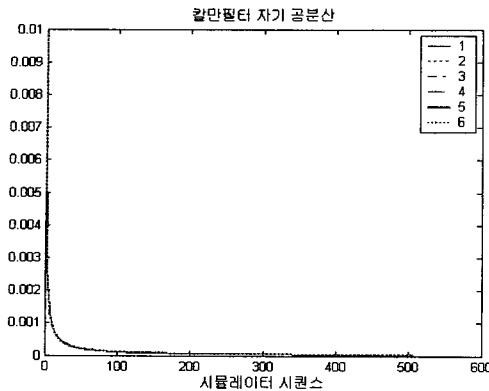


그림 9. 전체 데이터의 칼만필터 자기공분산
Fig. 9. Auto-Covariance of Kalman filter over total data.

식 (5)에 의해 구해진 오차 공분산은 오차 값을 보정하기 위한 칼만 게인 값을 구하기 위해 식 (6)에서와 같이 적용되어진다.

$$K_k = \frac{P_k^- \times H}{H \times P_k^- \times H^T + R_k} \quad (6)$$

여기에서 R_k 는 측정 잡음 공분산이다. 칼만필터에서 Q_k 와 R_k 는 그 값을 정확히 알 수 없는 값들이다.

프로세스 잡음 w_k 는 절대값의 크기가 $|0.001|$ 인 가우스 분포를 따르는 랜덤한 잡음으로 가정하였고 각각의 데이터는 독립적으로 추출한 것으로 가정하였으므로 Q_k 는 식 (7)에서와 같이 가정하여 적용하였다.

$$Q_k = 0.001^2 \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

측정 잡음은 이 연구에서는 적용하지 않아 측정 잡음 공분산 R_k 는 '0'으로 처리하였다.

칼만 필터에서 오차 공분산 P_k 와 P_k^- 는 자기 오차 공분산으로 처리하며 이에 따라 각 단계에서 변하는 P_k 와 P_k^- 의 변화 추이를 이용하여 각 센서 데이터별 연관성을 파악하려 하였다. 그러나 그 결과는 칼만 필터 오차 공분산으로는 데이터별 상호 연관성을 찾을 수 없었다.

나. 퍼지-칼만 필터

상태 추정치가 아닌 측정치를 직접 이용할 수 있는 퍼지-칼만 필터 오차 공분산을 구하여 각 센서별 연관

성을 구해보기로 한다.

퍼지 칼만 필터에서 식 (1) ~ 식 (3)번은 같은 방법을 적용하였고 퍼지칼만 오차 공분산은 식 (8)에서와 같이 구했다.^[4]

$$P_{k+1} = (A - K_k \times H) \times P_k \times A^T + \Omega_k \quad (8)$$

Ω_k 는 프로세스 잡음 공분산으로서 측정 오차 공분산 \hat{P}_k 와 측정 잡음 분포 함수 Φ_k 를 이용하여 식 (9)와 식 (10)에서와 같이 구한다.^[4]

$$\hat{P}_k = H \times P_k \times H^T + \Phi_k \quad (9)$$

$$\Omega_k = K_k \times \hat{P}_k \times K_k^T \quad (10)$$

$$\Phi_k = EXP\left\{ - (z_k - H \times \hat{X}_k) \times (z_k - H \times \hat{X}_k)^T \right\}$$

퍼지-칼만 필터는 예측-수정 알고리즘이라기 보다는 최적화 기법이라고 할 수 있으므로 이에 따라 최적화를 유지하지 않기 위한 방법으로서 식 (8)에서 Ω_k 대신 식 (11)과 같이 프로세스 잡음 공분산 과정을 처리하였다.

$$P_{k+1} = (A - K_k \times H) \times P_k \times A^T + K_k \times \Omega_k \times K_k^T \quad (11)$$

위 그림들과 표에서 볼 수 있는 것과 같이 각 데이터들 상호간 연관성을 찾기 어려우므로 필터의 최적화가 유지되면 상호간 연관성을 파악하기가 어려워지므로 의도적으로 최적화를 유지하지 않으려고 하였다. 그에 따른 결과는 아래 그림에서 보인다.

다. 퍼지-칼만 오차 공분산(Fuzzy-Kalman : FK)

퍼지-칼만 오차 공분산에서 행렬의 대각선 부분은 자기공분산을 뜻하고 그 외의 다른 항들은 상호 공분산을 뜻하므로 먼저 1번 센서에 대한 자기 공분산 그래프를 그림 10과 같이 구해 보았다. 1번 센서를 제외한 센서간의 상호 공분산 그래프는 그림 11과 같다. 마찬가지로 퍼지 칼만 오차 공분산을 이용하여 2번 센서에 대한 자기 공분산 그래프를 그림 12에서 나타내었다. 그림 12에서와 같이 2번 센서 자기공분산의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 그에 따른 2번 센서와 각각 다른 5개의 센서에 대한 상호 공분산 그래프를 그림 13에서 나타내었다. 그림 13에서 보는 바와 같이 변화의 정도가 가장 심한 것은 3번과 6번 센서 그래프이다. 그림 12에서 2번 센서 자기공분산의 변화는 크지 않으므로 이에 따라 3번과 6번 센서는 2번 센서와 가장 상관관계가 적다고 판단하였다. 그림 13은 그림 12를 감안한다면

다른 센서들과의 연관성 파악이 어려워 보이므로 여기에서 다른 센서 데이터들과의 상호공분산 해석은 유보하고 다른 공분산 정보를 이용하여 상호 관계를 분석하기로 한다. 그림 14에서 보는 바와 같이 센서 3의 자기공분산 변화가 일어남을 볼 수 있다. 센서 3에 대한 다른 센서들 간의 상호 공분산을 그림 15에서 나타내었다. 그림 15에서 볼 수 있는 것과 같이 1번과 6번 센서 상호공분산 그래프에서 변화가 가장 크게 일어남을 알 수 있다. 센서 3의 변화가 그림 14에서와 같이 일어나는 가운데 가장 크게 변화가 일어나는 2개의 센서 그래

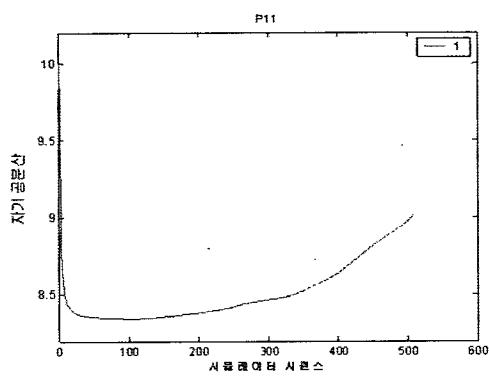


그림 10. 센서 1 (13L-401) 퍼지 칼만 자기 공분산
Fig. 10. Sensor 1 (13L-401) FK Auto-covariance.

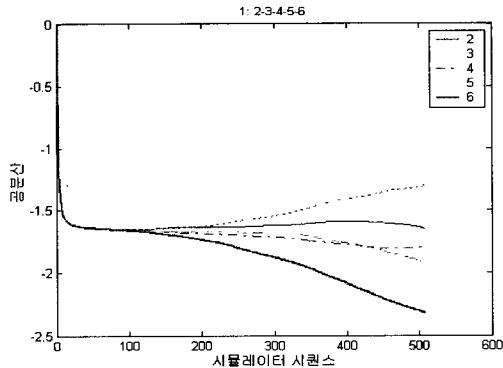


그림 11. 센서 1 (13L-401) 퍼지 칼만 상호 공분산
Fig. 11. Sensor 1 (13L-401) FK Cross-covariance.

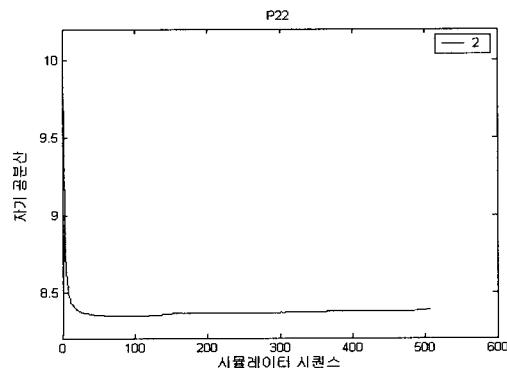


그림 12. 센서 2 (12L-401) 퍼지 칼만 자기 공분산
Fig. 12. Sensor 2 (12L-401) FK Auto-covariance.

프가 1번과 6번이므로 센서 3에 대해 1번과 6번 센서가 가장 민감하게 반응한다고 판단하였다. 그림 16에서 보는 것처럼 센서 4의 자기 공분산 변화가 크지 않음을 볼 수 있다. 그림 17에서 보는 바와 같이 변화의 정도가 가장 심한 것은 1번과 6번 센서 그래프이다. 그림 16에서 4번 센서 자기공분산의 변화는 크지 않으므로 이에 따라 1번과 6번 센서는 4번 센서와 가장 상관관계가 적다고 판단하였다. 그림 17은 그림 16을 감안한다면 다른 센서들과의 연관성 파악이 어려워 보이므로 여기에서 다른 센서 데이터들과의 상호공분산 해석은 유보하

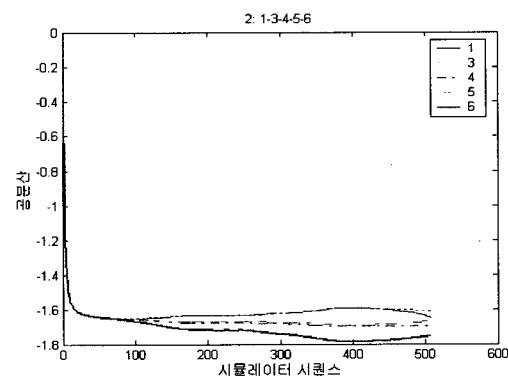


그림 13. 센서 2 (12L-401) 퍼지 칼만 상호 공분산
Fig. 13. Sensor 2 (12L-401) FK Cross-covariance.

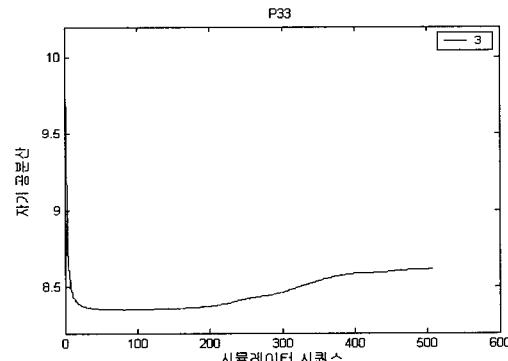


그림 14. 센서 3 (17P-802) 퍼지 칼만 자기 공분산
Fig. 14. Sensor 3 (17P-802) FK Auto-covariance.

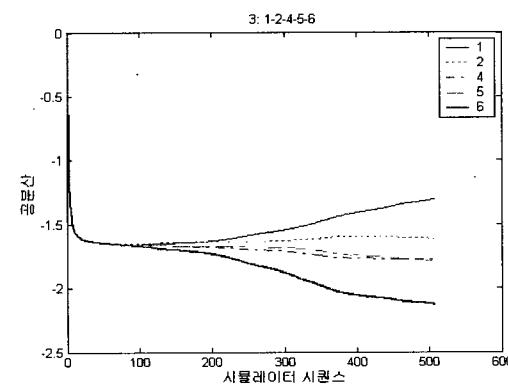


그림 15. 센서 3 (17P-802) 퍼지 칼만 상호 공분산
Fig. 15. Sensor 3 (17P-802) FK Cross-covariance.

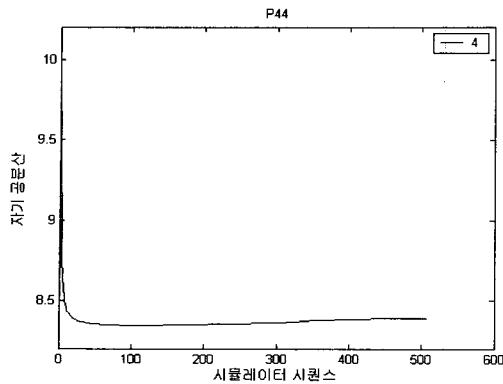


그림 16. 센서 4 (17P-804) 퍼지 칼만 자기 공분산
Fig. 16. Sensor 4 (17P-804) FK Auto-covariance.

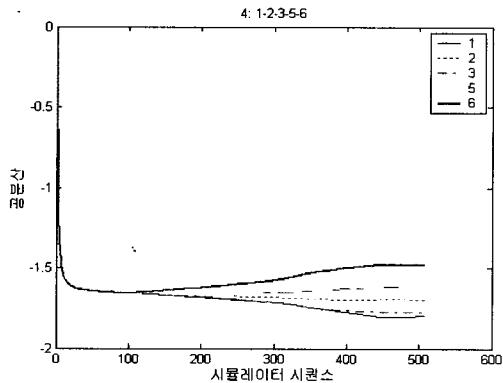


그림 17. 센서 4 (17P-804) 퍼지 칼만 상호 공분산
Fig. 17. Sensor 4 (17P-804) FK Cross-covariance.

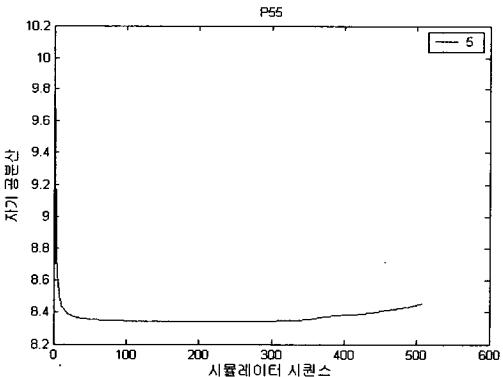


그림 18. 센서 5 (17P-810) 퍼지 칼만 자기 공분산
Fig. 18. Sensor 5 (17P-810) FK Auto-covariance.

고 다른 공분산 정보를 이용 상호 관계를 분석하기로 한다. 그림 18에서 보는 것처럼 센서 5의 자기 공분산 변화가 크지 않음을 볼 수 있다. 5번 센서의 자기 공분산 변화는 시퀀스 마지막 부분에서 일어나고 있다. 이에 관련하여 5번 센서에 대한 상호 공분산 그래프를 그림 20에서 보인다.

그림 19에서와 같이 1번과 6번 그래프의 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 5번 센서의 자기공분산 변화가 크지 않은 가운데 상호공분산 변화가 가장 큰 센서 1번과 6

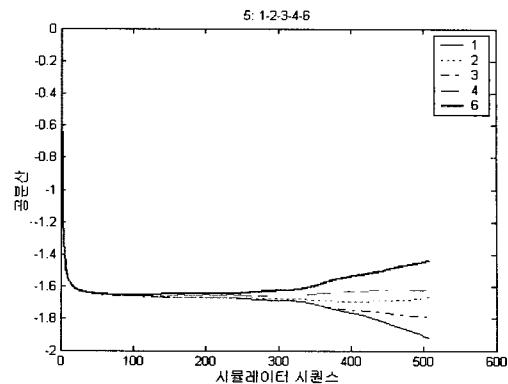


그림 19. 센서 5 (17P-810) 퍼지 칼만 상호 공분산
Fig. 19. Sensor 5 (17P-810) FK Cross-covariance.

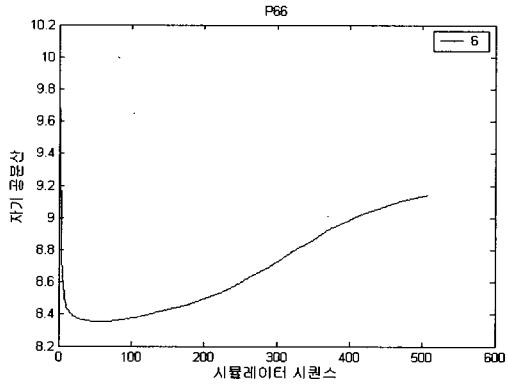


그림 20. 센서 6 (17P-811) 퍼지 칼만 자기 공분산
Fig. 20. Sensor 6 (17P-811) FK Auto-covariance.

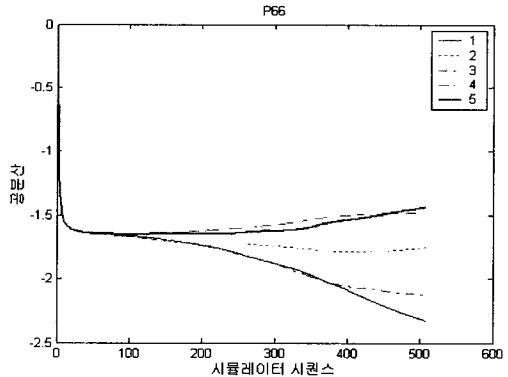


그림 21. 센서 6 (17P-811) 퍼지 칼만 상호 공분산
Fig. 21. Sensor 6 (17P-811) FK Cross-covariance.

번을 5번 센서와 가장 관련성이 적다고 해석하였다.

그림 20에서 보는 것처럼 센서 6번의 자기 공분산 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 센서 6번에 대한 상호 공분산 그래프를 그림 21에서 보였다. 6번 센서의 자기 공분산 변화가 큰 가운데 6번 센서에 대한 상호 공분산 변화가 큰 것은 1번과 3번 센서 상호 공분산이므로 이에 따라 6번 센서와 연관성이 깊은 것은 1번과 3번 센서로 판단하였다.

퍼지-칼만 필터 오차공분산에서 자기 오차 공분산과

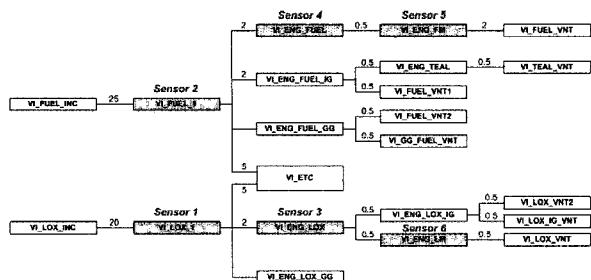


그림 22. 연관성-시나리오 대조그림

Fig. 22. Interrelationship-Scenario Comparative Diagram.

표 5. 분석된 센서 사이의 연관성

Table 5. Resolved Interrelationship between Sensors.

연관 시스템	연관성	정보원
센서시스템 1	센서 2 - 센서 4 - 센서 5	시나리오
	센서 2 : VI_FUEL_1	퍼지-칼만필터
	센서 4 : VI_ENG_FUEL	오차공분산
	센서 5 : VI_FUEL_FM	
센서시스템 2	센서 1 - 센서 3 - 센서 6	시나리오
	센서 1 : VI_LOX_1	퍼지-칼만필터
	센서 3 : VI_ENG_LOX	
	센서 6 : VI_LOX_FM	오차공분산

상호 오차 공분산 분석을 통해 얻어진 연관 관계 추정 결과를 그림22에서 LCS 발사관제 모의장치 시나리오의 시퀀스와 대조 작업을 하였다. 그 결과 연관성 (센서 2 - 센서 4 - 센서 5 / 센서 1 - 센서 3 - 센서 6)은 후 처리분석에서 미리 정보를 주지 않았던 LCS 발사관제 모의장치 시나리오 관계 (VI_FUEL_1 - VI_ENG_FUEL - VI_FUEL_FM / VI_LOX_1 - VI_ENG_LOX - VI_LOX_FM)와 정확히 일치하였으며 확률통계 오차 공분산 및 칼만필터 오차 공분산과 달리 퍼지-칼만 필터 오차 공분산을 이용하면 데이터간의 상호 연관성 분석이 가능함을 알 수 있었다.

실험-고찰을 정리하면 실험 데이터 후처리분석을 위하여 센서 데이터 순서를 표 3에서와 같이 사전 정의된 순서를 구성하여 칼만 필터와 퍼지-칼만 필터를 이용하여 실험데이터를 분석하였다. 그 이유로써 칼만필터에서 식 (6)에서와 같이 개인을 구할 때 역행렬 과정이 포함되어 있으므로 데이터가 행렬에서 각각 독립적으로 구성되어졌다 하더라도 순서의 선택이 역행렬 계산에서는 영향을 미칠 수 있기 때문이었다.

실험 데이터 후처리 분석 결과에서도 칼만 필터와 페지-칼만 필터를 적용하자 연관성 분석과정에서 차이가 있음이 나타났다. 이러한 실험 데이터 후처리분석을 수행하는데 있어서 페지-칼만 필터를 선택하여 통해 성공적인 실험 결과는 얻었지만 이론적 측면에서 적용 잡음의 선택, 행렬 구성에 있어서 충분히 유의하여 구성하

여야 하며 그렇지 않다면 후처리 데이터 분석에서 신뢰하기 어려운 결과를 얻을 수 있다.

향후 수행하여야 하는 연구는 연관성이 있는 센서집합의 신호를 완전하지 않게 즉, 일부 센서가 오류신호를 발생시키도록 하는 가운데 퍼지-칼만 필터를 사용하여 오류신호를 발생하는 센서를 인식하고 그 신호를 재처리하여 오류신호를 무력화 시키고 잔존 센서의 신호를 보상하는 연구가 필요하다.

IV. 결 론

한국형 우주발사체를 지원하는 나로우주센터 발사관 제시스템의 실시간 발사관제 모의장치의 운용실험을 통해 얻어진 각종 자료를 확률통계 오차 공분산 분석방법과 칼만 필터의 오차 공분산 분석과 페지-칼만 필터의 오차 공분산 분석을 통한 후처리 분석에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 발사관제 모의장치 내부의 임의로 선정한 가상 센서들 사이에는 어떠한 연관성이 존재하고 있다.
 2. 이러한 연관성을 통하여 발사관제 모의장치를 구성하는 시스템 방정식이 물리적으로 어느 정도 까지는 의미 있게 구성되었다는 것을 확인하였다.
 3. 확률통계와 칼만필터의 오차 공분산 분석에서 연관성이 없어보이던 각각의 변수가 페지-칼만필터의 오차 공분산 분석을 통하여 연관성을 확인하였다. 이것은 페지-칼만필터의 최적화 성질을 역이용한 것이다.
 4. 페지-칼만필터의 오차 공분산 분석을 통하여 유도된 연관성은 발사관제 모의장치의 시나리오에서의 시퀀스 관계와 정확히 일치하였다.
 5. 다중의 센서 시스템이 존재하는 한국형 우주발사체와 탑재 유상하중 그리고 지상지원 시스템에 대한 신호분석의 가능성을 확인하였다.
 6. 신호분석을 통하여 다수 센서가 장착된 복잡한 시스템에서 시스템 자체의 이상과 센서의 이상을 구분할 수 있으므로 임무수행 중단의 판단을 기준의 단순 센서 경보해석에 대비하여 비율을 낮추는 것이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] A. S. Aljabri, D. E. Bernard, D. L. Dvorak, G. K. Man, B. Pell, T. W. Starbird, "Infusion of Autonomy Technology into Space Missions - Deep Space 1 Lessons Learned", *Proceeding of the IEEE Aerospace Conference*, pp.1-45, Snowmass, CO, USA, 1998.

- [2] K. Longheed, W. Prince, "Kennedy Space Center System Design Document Checkout and Launch Control System", *84K00210-Rev.B, Volume 1~5*, NASA, 2002.
- [3] M. R. Ananthasayanam, "Fascinating Perspectives of State and Parameter Estimation Techniques", AIAA-2000-4319, pp.1-9, 2000.
- [4] L. Han, "A Fuzzy-Kalman Filtering Strategy for State Estimation", Univ. of Saskatchewan, Canada, 2004.
- [5] N. Muscettola, P. P. Nayak, B. Pell, B. C. Williams, "Remote Agent : To Boldly Go Where No AI Systems Has Gone Before", *Artificial Intelligence*, Vol. 103, No. 1-2, pp.5-48, 1998.
- [6] J. J. Burken, F. W. Burchem Jr., "Flight Test Results of Propulsion-only Emergency Control System on MD-11 Airplane", *J. of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 20, No. 5, pp.980-987, 1997.
- [7] R. Davis, "Diagnostic Reasoning Based on Structure and Behavior", *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.347-410, 1984.
- [8] V. Klein, "Estimation of Aircraft Parameter from Flight Data, "Progress in Aerospace Science", Vol.26, pp.1-77, Pergamon(UK), 1989.
- [9] P. Eykhoff, "System Identification : Parameter and State Estimation", John Wiley & Sons, 1974
- [10] R. G. Brown, P.Y.C. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises. & solutions", John Wiley & Sons, 1997.
- [11] 홍일희, 김광수, 박정주, 서진호, 신명호, 조광래, "액체추진 과학로켓을 위한 발사통제시스템 개발", 2002 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집 (II), 882-885쪽, 2002년 11월
- [12] 홍일희, 서진호, "우주발사체 발사시험을 위한 실시간 원격제어 시스템 개념설계", 제4회 우주발사체 기술 심포지움 발표논문집, 344-347쪽, 2003년 5월
- [13] 홍일희, 서진호, 정의승, 정해욱, "발사관제시스템 프로토타입 개발", 2004 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집 (II), 1019-1023쪽, 2004년 11월
- [14] 홍일희, 서진호, 진승보, 이영호, 조광래, "KSLV-1 소형위성발사체 발사장 시스템설계(1)", 2004 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집 (II), 1032-1037쪽, 2004년 11월
- [15] 홍일희, 서진호, 정해욱, "KSLV-1 발사관제센터 시뮬레이션 시스템 실시간 데이터 처리능력 테스트", 제5회 우주발사체 기술 심포지움 논문집, 187-193쪽, 2004년 5월
- [16] 홍일희, 서진호, 정해욱, "KSLV-1 발사관제센터 시뮬레이션 시스템 실시간 데이터 처리를 위한 프로토타입 시험평가", 2004 한국항공우주학회 춘계 학술발표회 논문집(II), 603-608쪽, 2004년 4월
- [17] 홍일희, 서진호, 신명호, 이영호, "KSLV-1 발사관제 시스템 개발 개념설계", 2003 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집(II), 1187-1190쪽, 2003년 11월

저자 소개



홍 일 희(정회원)
1985년 조선대학교 전기공학과
학사 졸업.
1987년 조선대학교 항공우주
공학과 석사 졸업.
2003년 충남대학교 전기공학과
박사과정 수료.

1987년 ~ 현재 한국항공우주연구원 책임연구원.
<주관심분야 : 발사체 시스템, 신호처리>



김 양 모(정회원)
1973년 서울대학교 공업교육학과
(전자)학과 학사 졸업.
1975년 서울대학교 공업교육학과
(전자) 석사 졸업.
1986년 일본 동경대학 전자공학과
박사 졸업.
1990년 미국 베지니아테크 방문교수.
1979년 ~ 현재 충남대학교 전기공학과 교수.
<주관심분야 : 전기철도, 전력전자, 신호처리>