

# DEVS 형식론을 이용한 공항 PAR 관제 시스템 자동화 방안 검증

성창호<sup>1†</sup> · 구 정<sup>2</sup> · 김탁곤<sup>1</sup> · 김기형<sup>3</sup>

## Verification of Automatic PAR Control System using DEVS Formalism

Changho Sung · Jung Koo · Tag Gon Kim · Ki-Hyung Kim

### ABSTRACT

This paper proposes automatic precision approach radar (PAR) control system using digital signal to increase the safety of aircraft, and discrete event systems specification (DEVS) methodology is utilized to verify the proposed system. Traditionally, a landing aircraft is controlled by the human voice of a final approach controller. However, the voice information can be missed during transmission, and pilots may also act improperly because of incorrectness of auditory signals. The proposed system enables the stable operation of the aircraft, regardless of the pilot's capability. Communicating DEVS (C-DEVS) is used to analyze and verify the behavior of the proposed system. A composed C-DEVS atomic model has overall composed discrete state sets of models, and the state sequence acquired through full state search is utilized to verify the safeness and the liveness of a system behavior. The C-DEVS model of the proposed system shows the same behavior with the traditional PAR control system.

**Key words** : DEVS (Discrete Event Systems Specification), PAR (Precision Approach Radar), Verification

### 요 약

본 논문에서는 공항 정밀접근 항공기의 안전성을 증대시키기 위한 방법으로 S/W 패키지모형을 이용한 PAR 관제 자동화 방안을 제안하고, DEVS 형식론을 이용하여 제안하는 시스템의 기능을 검증하였다. 기존의 PAR 관제는 음성으로 항공기를 통제함으로써 조종사의 정보 획득 능력이 떨어질 수 있다. 이를 해결하기 위하여 디지털 신호에 의한 자동 관제 시스템을 제안하고, 공항의 PAR이 추적하고 있는 항공기의 비행경로, 강하각, 거리를 조종사에게 실시간으로 전송해 주고 일반화함으로서 관제사의 숙련도와 관제 특성에 기인하는 요소를 배제할 수 있다. 제안된 시스템의 동작을 검증하기 위하여 확장된 DEVS 형식론인 C-DEVS 형식론을 사용하고, 하나의 모델로 합성된 원자 모델을 통해 시스템의 전체 상태 시퀀스를 검색하여 시스템의 안전성(Safeness)과 필연성(Liveness)을 검증할 수 있다. 제안하는 시스템의 C-DEVS 모델을 기존의 음성 관제 시스템과 비교하여 두 시스템이 동일한 상태 시퀀스를 가짐을 확인하였으며, 모든 상태를 검증함으로써 실제 상황에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

**주요어** : 이산사건 시스템 형식론, 공항 정밀 접근 레이더, 시스템 검증

## 1. 서 론

\* 이 논문은 2011년 한국과학기술원 BK21 전자통신기술 사업단에 의하여 지원되었습니다.  
접수일(2012년 6월 27일), 심사일(1차 : 2012년 8월 24일),  
게재 확정일(2012년 9월 11일)

<sup>1)</sup> KAIST 전기및전자공학부

<sup>2)</sup> 공군작전정보통신단

<sup>3)</sup> 아주대학교 정보컴퓨터공학부

주 저 자 : 성창호

교신저자 : 성창호

E-mail; chsung@smslab.kaist.ac.kr

현재 많은 국제공항 및 공군 비행기지의 대부분은 PAR(Precision Approach Radar)<sup>[1]</sup> 정밀접근 체계를 보유하고 있으며<sup>[2,3]</sup>, PAR의 최종 접근 관제는 음성에 의해 이루어진다. 음성에 의한 최종접근관제는 비행정보 제공의 양이 부족하고 정확도가 떨어지며, 신속성 및 적시성에 있어 일정한 시간 지연이 발생함으로써 관제 효율성이 저하될 수 있다. 이로 인한 항공기 사고 위험성을 예방하

기 위해, 본 논문은 기존의 음성 관제 시스템을 보완하여 디지털 정보에 의한 자동화된 시각 관제 시스템을 제안하고 그 동작의 정확성을 검증한다.

자동화된 PAR 관제 시스템은 관제에 필요한 정보를 모두 디지털 신호로 변환하여 조종사에게 주기적으로 제공한다. 제공하는 정보는 항공기에 장착되어 있는 UMPC 모니터에 표시되며 조종사는 시각 정보를 이용하여 항공기를 제어한다. 제안하는 PAR 관제 시스템은 음성으로 이루어지는 기존의 관제와 비교하여 동일한 관제 순서를 가질 것으로 판단되며, 관제 효율성 또한 증가할 것이라 판단된다<sup>4,5)</sup>.

각 시스템의 동작을 모델링하기 위하여 이산사건 시스템 명세(Discrete Event Systems Specifications, DEVS)<sup>6)</sup>를 이용한다. 두 시스템이 동일하게 동작함을 검증하기 위하여, 우선 각 시스템의 안전성(Safeness)과 필연성(Liveness)을 검증하여 각 시스템의 설계 오류 여부를 확인하고, 그 후 두 시스템 내부에서 발생하는 모든 상태 시퀀스가 일치하는지를 확인한다. 시스템 검증을 위해 확장된 DEVS 형식론인 C-DEVS(Communicating DEVS) 형식론을 이용한다. C-DEVS 형식론은 모델들 사이의 프로토클을 하나의 수학적 모델로 표현함으로써 시뮬레이션 없이 시스템의 기능 검증을 가능하게 한다.

본 논문 구성은 다음과 같다. 우선 2장에서 기존 PAR 관제 시스템 및 검증과 관련된 연구에 대해 논의해본다. 3장에서는 시스템 동작 검증에 사용되는 C-DEVS 형식론에 대해서 살펴보고, 4장에서 제안하는 PAR 자동 관제 시스템과 그 모델들에 대해 설명한다. 5장에서는 제안하는 시스템을 검증하고, 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

항공기의 안전한 착륙을 위하여 정밀접근 시스템에 대한 연구가 끊임없이 진행되었으며, 현재 PAR, TLS (Transponder Landing System), ILS(Instrument Landing System), MLS(Microwave Landing System) 등, 수많은 체계가 개발되어 운용되고 있다. 정밀접근 (Precision Approach)이라 함은 “국제민간항공기구 (ICAO) 부속서 (Annex) 10 (항공통신)의 정밀기준에 부합하는 진로와 항공로 이탈정보를 제공하는 항행안전무선시설을 이용하는 계기접근절차”로 규정하고 있다<sup>1)</sup>. PAR은 비행기지에 배치된 레이더를 이용하여 항공기의 경로를 제공하는 장비로 전천후 사용이 가능한 항공기 접근 및 착륙 유도 장

비이다. 이는 레이더 포착 항적자료를 기준으로 기존의 음성통신장비를 이용하여 항공기의 접근을 유도함으로써 ILS와 유사한 공항 접근방법 구현을 통해 효율성을 증대시킬 수 있다. 즉 PAR은 항공기의 경로(Azimuth)와 강하각(Glide Slope) 정보를 음성을 이용하여 제공함으로써 ILS 계기를 장착하고 있지 못한 항공기에도 사용할 수 있으며, 공항 접근 Category I을 만족할 수 있는 능력을 지니고 있다. 그러나 이와 같은 음성 정보를 이용한 관제는 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

음성 정보와 시각 정보의 차이를 다룬 인간공학적인 연구 결과를 보면, 네트워크 중심작전 사례연구에서 Link-16 유/무에 따른 공대공 전투에서 청각기관의 사용에서 조종사들은 전송된 정보 중 약 70% 가량만을 청취하며, 나머지는 잘못 전달되는 것으로 보고되고 있다<sup>7)</sup>. 디지털 데이터 전송을 통한 시각적 시현은 수신된 데이터를 지속적으로 시현함으로써 잘못된 인지 가능성을 대폭 줄일 수 있다. 그리고 동일 정보를 중복적으로 부호화하는 것은 처리속도를 높여주며<sup>8)</sup>, 시각기관과 청각기관으로부터의 정보 입력이 상호 갈등적으로 주어질 때나 시각과 청각 과제가 동시에 수행될 때에는 시각 우세(Visual dominance) 현상이 발생한다<sup>9)</sup>.

그러므로 비행에 있어 조종사의 시각기관은 착시의 가능성을 내포하고 있다 할지라도 시각기관이 확실한 감각기관인 것은 분명하며, 항공기를 조종함에 있어 시각 참조에 의한 조종이 청각적 인지를 바탕으로 조종을 수행하는 것에 비해 더 우수하다는 것을 짐작할 수 있다. 이와 같은 관련 연구를 바탕으로 항공기의 공항 접근 경로와 강하각 정보를 디지털로 제공하여 조종사에게 시각적으로 시현하여 관제하는 시스템을 제안하고, 제안하는 시스템의 설계 및 기존 시스템과의 동작 일치성을 검증한다.

## 3. C-DEVS를 이용한 시스템 설계 검증

제안하는 시스템의 설계를 검증하는 것은 동작의 정확성을 검증하는 것으로, 기존 시스템의 동작 순서와 동일하게 작동하는지를 확인하는 것이다.

시스템 동작 검증을 위해 확장된 DEVS 형식론인 C-DEVS 형식론을 사용하였다<sup>10)</sup>. C-DEVS 는 이산 사건 시스템의 동작을 분석하기 위해 고안된 방법론으로서, 두 개 이상의 모델이 서로 결합되어 있을 때 전체 모델의 동작을 검증하기 위해 사용된다. 두 모델을 각각  $AM_i$  과  $AM_j$  라고 할 때, 두 모델은 다음과 같은 하나의 합성 원

자 모델로 표현된다<sup>[11]</sup>.

$$AM_i || AM_j = \langle E, S, T, ta, \{AM_i, AM_j\} \rangle$$

E: 이벤트 집합

S: 합성 원자 모델의 상태 집합

T: 합성 원자 모델의 상태 천이 관계

ta: 시간 전진 함수

$$E = (X_i \cup Y_i \cup \{\emptyset\}) \times (X_j \cup Y_j \cup \{\emptyset\}),$$

$X_i, Y_i$ :  $AM_i$ 의 입출력 이벤트,

$X_j, Y_j$ :  $AM_j$ 의 입출력 이벤트

$$S \subseteq S_i \times S_j$$

$$T \subseteq S \times E \times S$$

$$ta: S \rightarrow \mathbb{R}^+_{0,\infty}$$

이 때, C-DEVS 모델의 각 상태별 시간은 두 모델의 상태 시간의 최소값을 취한다. C-DEVS 형식론에 의해 합성된 하나의 원자 모델로 상태 천이 및 이벤트 순서를 확인함으로써 모델의 전체 동작을 검증한다.

그림 1과 같이 SENDER 와 RECEIVER 로 이루어진 핑퐁 프로토콜을 표현하는 두 개의 DEVS 모델이 있다. SENDER 는 *send* 상태에서 머무를 수 있는 시간  $ST(!m)$  이후에 메시지를 생성해서 보내고, *receive* 상태에서 *ack* 메시지가 오기를 기다린다. 이때 *timeout* 시간 이전에 *ack* 메시지가 오거나 메시지 없이 *timeout* 시간이 지나면 *send* 상태로 바뀐다. 한편, RECEIVER 는 *receive* 상태에서 *msg* 메시지를 받으면 *accept* 상태로 천이하고, 일정 시간  $ST(!a)$  이후에 *ack* 메시지를 전송하고 *receive* 상태

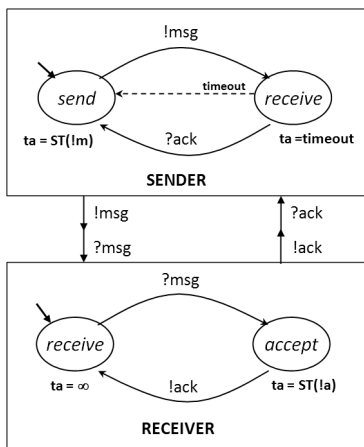


그림 1. 핑퐁 프로토콜의 DEVS 모델

로 돌아간다. 이 핑퐁 프로토콜에서 두 모델 간 전송되는 메시지 중 *msg* 는 제대로 전송된다고 가정하고, *ack*는 손실이 발생할 수도 있다고 가정한다.

시뮬레이션 없이 두 모델의 기능을 검증 및 분석하기 위해 두 모델을 합성하여 하나의 C-DEVS 모델로 표현한다. C-DEVS 모델을 이용하여 모델 간 프로토콜의 안전성(Safeness)<sup>[12]</sup>과 필연성(Liveness)<sup>[13]</sup>을 검증하고, 두 모델의 상태 시퀀스가 동일함을 검증할 수 있다. 안전성은 모델 내의 통신 프로토콜이 데드락(Deadlock) 이 없음을 의미하고, 필연성은 프로토콜이 라이브락(Livelock) 없이 언젠가는 목적을 달성하여 시뮬레이션을 종료함을 의미한다. 제안하는 시스템의 기능 검증은 기존 프로토콜의 상태 시퀀스와의 동일성을 확인하는 것이다.

핑퐁 프로토콜의 C-DEVS 모델은 그림 2와 같이 하나의 합성된 원자 모델로 표현되며, 모델의 상태 시퀀스는 다음과 같다.

- $((SD, RV), ST(!m)) \rightarrow ((RV, AP), ST(!a)) \rightarrow ((SD, RV), ST(!m))$
- $((SD, RV), ST(!m)) \rightarrow ((RV, AP), ST(!a)) \rightarrow ((RV, RV), timeout-ST(!a)) \rightarrow ((SD, RV), ST(!m))$

첫 번째 경우는 메시지 전달이 성공한 경우이고, 두 번째 경우는 메시지 전달이 실패한 경우이다. 핑퐁 프로토콜은 메시지 전달의 성공 또는 실패의 반복으로 이루어지며, 두 개의 상태 천이로 모델의 동작을 모두 표현할 수 있다. 통신 프로토콜의 안전성과 필연성을 검증하기 위한 상태 시퀀스를 살펴보면, 하나의 상태에 머무르지 않고 성공 또는 실패 시퀀스가 반복됨을 알 수 있다. 그러므로 이 통신 프로토콜은 데드락이 없으므로 안전성을 만족한다고 할 수 있다. 만약 프로토콜이 10개의 메시지를 전송하는 것이 목적이라면, 언젠가는 그 목적을 달성하게 되

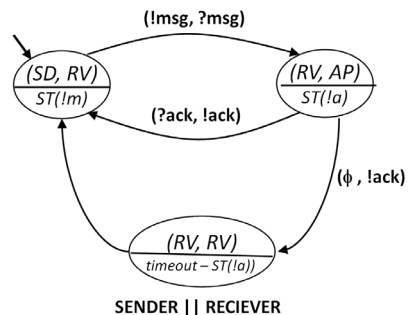


그림 2. 핑퐁 프로토콜의 C-DEVS 모델

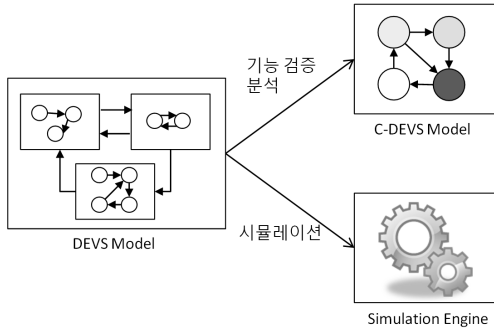


그림 3. DEVS 모델 검증/분석 및 시뮬레이션 방법론

므로, 필연성을 만족한다고 할 수 있다.

그림 3은 DEVS 모델을 사용하여 시스템의 동작을 이해하는 개념을 나타내고 있다. DEVS 모델의 기능을 검증하고 분석하기 위해서 여러 원자 모델을 하나의 합성된 C-DEVS 원자 모델로 나타낼 수 있고, 시뮬레이션 엔진을 이용하여 DEVS 모델을 실행하여 동작을 확인할 수 있다. 이 두 방법의 가장 큰 차이점은 상태의 전체 검색(Full search) 가능 여부이다. C-DEVS 모델은 각 모델들의 가능한 모든 상태들의 집합으로 이루어진 상태의 천이로 이루어져 있기 때문에 상태를 전체 검색하여 모든 상태 시퀀스를 찾아서 확인할 수 있다. 그러나 시뮬레이션을 이용한 검증은 정해진 시나리오에 의해 실행된 결과만을 확인하기 때문에 검색되지 않는 상태들도 존재하게 된다. 예를 들어 통신 두절로 인한 상태 변화는 실제 환경이 아니면 시뮬레이션을 통해 확인하기 어려운 경우이다. 물론 가능한 모든 시나리오를 이용하여 시뮬레이션하면 검증이 가능할 수도 있으나, 시나리오 선정 및 실행에 따르는 시간과 비용이 많이 든다는 문제점이 있다. 그러므로 시스템의 기능 검증 및 분석을 위하여 하나의 합성된 C-DEVS 모델을 이용하는 것이 가장 효과적이며, 제안하는 PAR 자동 관제 시스템을 검증하기 위해 C-DEVS 형식론을 사용하고자 한다.

## 4. PAR 자동 관제 시스템

PAR 자동 관제 시스템을 모델링하기 위해서는 기존의 음성을 이용한 관제와 제안하는 디지털 정보를 이용한 관제의 절차를 살펴보는 것이 필요하다.

### 4.1 시스템 요구 사항

관제 시스템은 관제사와 조종사로 이루어지며, 기존의

관제가 관제사의 음성으로 이루어졌다면, 제안하는 관제 시스템은 디지털 전송 방법에 의한 자동화 시스템이다. 관제 상황 및 시나리오는 다음과 같다.

#### 4.1.1 관제 상황 설명<sup>[14][15]</sup>

비행기지로 PAR 접근을 수행할 경우 최초에는 Radar Approach Control 에서 관제를 유도하여 Final 진입 시 약 10NM 이전에 Final Approach Controller 에게 인계한다. 최종적으로 고도는 실고도 2000ft 를 유지시키며, 약 7 ~ 8NM 정도에서 Begin Descent 를 지시하고, 조종사는 3도의 Glide Slope으로 강하를 시작하여 결심고도(Decision Height, DH) 까지 2~3분 정도의 강하비행을 한다.

Final 관제사는 접근 항공기를 관제함에 있어 5초 이내의 끊김 없는 음성정보를 제공하여 항공기를 관제한다. 관제는 음성에 의한 관제, 혹은 데이터 전송에 의한 관제를 수행하고, 조종사는 음성에 의한 관제와 데이터 전송에 의한 관제에서 동일하게 반응하는 것으로 간주한다.

#### 4.1.2 기존의 음성에 의한 관제<sup>[16]</sup>

PAR Final 관제사는 접근 항공기를 관제함에 있어 5초 이내의 끊김 없는 관제정보를 제공하고 있다. 그러나 관제사의 음성에 의한 관제는 항공기의 거리, 경로, 강하 각 정보를 신속하게 제공할 수 없는 한계를 가진다. 관제사는 경로와 강하각 중 오차 범위나 변화율이 큰 것부터 관제정보를 제공할 것이다. 관제에서는 주어진 상황에 적합한 가장 필요한 정보 1가지만을 음성으로 제공할 수 있다. 관제에 필요한 용어를 선택하는 판단시간은 1초로 하였다. 본 정보를 제공하기 위해서는 평균 5초의 시간이 소요되는 것으로 간주하고, 다음 정보를 제공하기 위해서는 짧은 호흡에 필요한 2초의 여유시간을 가지며, 2회의 정보를 제공한 후 4초의 호흡시간을 가지는 것으로 가정한다.

#### 4.1.3 제안하는 디지털 정보에 의한 관제

관제자료를 디지털 데이터 형식으로 제공하는 것은 매우 간단하다. 관제에 필요한 자료를 지속적으로 전송할 수도 있으나 이렇게 할 경우 Radio에 무리를 주게 된다. 그러므로 관제자료를 지속적으로 전송하지 않도록 하기 위해서 변화율을 계산하여 경로와 강하각 및 이의 변화율을 동시에 전송하는 것이 필요하다. 변화율은 항공기의 관성을 고려하여 PAR에서 제공해 주어야 할 최대 시간을 결정하였으며, 본 논문에서는 이 양자를 고려하여 전송주기를 2.5초로 설정하였다. 경로는 경로 수정에 필요한 항

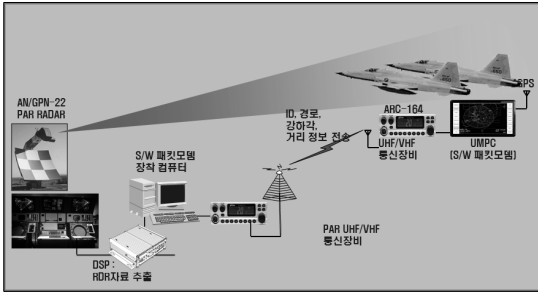


그림 4. PAR 정밀 접근 자동화 체계 구성개념

공기의 비행방향 정보를 동시에 제공해 주며, 총 18 byte의 정보를 매 2.5초마다 1회 전송하여 조종사에게 알려준다.

그림 4는 제안하는 디지털 정보에 의한 PAR 정밀 접근 자동화 체계의 구성개념을 보여주고 있다. PAR의 항적정보를 PC로 연동하고, 이를 적절한 형태로 가공하여 S/W 패킷모뎀과 U/VHF Radio를 통해 항공기에 전송한다. 항공기에서는 S/W 패킷모뎀을 통해 수신된 정보를 UMPC에 전시함으로써 경로와 강하각, 거리에 대하여 ILS 계기와 같은 형태로 표현하여 조종사에게 제공해 준다.

#### 4.1.4 조종사의 항공기 조종을 위한 반응

음성에 의한 관제이든, 디지털 정보 제공에 의한 관제이든 정보를 접할 경우 조종사는 다음과 같은 반응을 보이는 것으로 간주한다.

계기 지시나 음성을 통해 조종사가 인지하는 시간은 일반적인 남자의 경우 반응시간이 0.1~0.3초임을 감안하여 0.2 초로 설정하였다. 조종사가 상황을 판단하여 조종간의 움직임을 통해 자세계 상에서 자세를 맞추는 조작을 수행하는 시간은 1초로 설정하였고, 조종간의 움직임을 통해 항공기가 반응하는데 필요한 지연시간도 1초를 적용하여 총 2.2초의 자세 수정에 필요한 시간을 설정하였다.

#### 4.2 각 시스템의 DEVS 모델링

음성 및 디지털 관제 시스템과 조종사를 DEVS 모델로 표현하면 다음과 같다. 우선 음성에 의한 관제 시스템 모델은 그림 5와 같다. 초기의 Decide 상태에서 5초 동안 정보를 보내고(1<sup>st</sup> Info), 짧은 호흡 후(Short Breath) 결심 고도에 도달했다는 이벤트가 발생할 시 관제를 종료하고(Finish), 그렇지 않으면 다음 정보를 전송한다(2<sup>nd</sup> Info). 그리고 긴 호흡 후(Long Breath) 다음 정보를 준비한다. 5초 이상의 통신 두절로 인해 조종사가 관제를 받지 못할 시 실패 이벤트를 받게 되고 관제는 종료하게 된다(Fail).

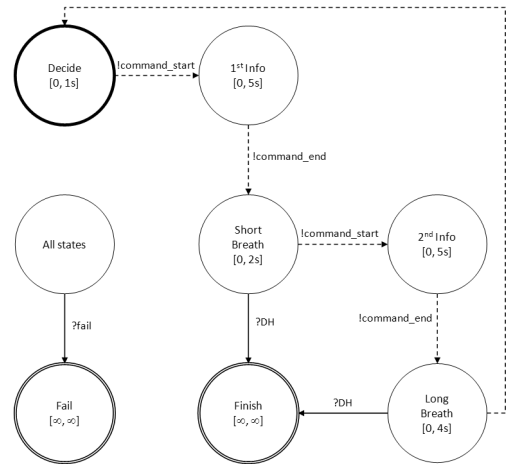


그림 5. 음성에 의한 PAR 관제 시스템 DEVS 모델

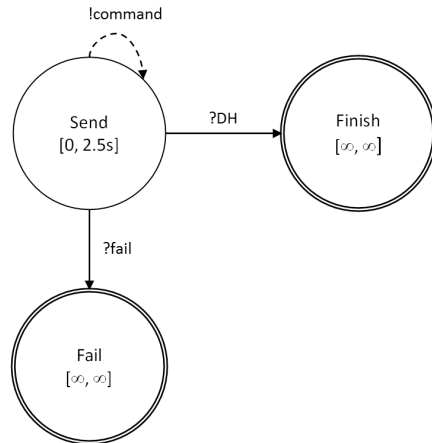


그림 6. 디지털 정보에 의한 PAR 관제 시스템 DEVS 모델

디지털 정보에 의한 PAR 관제 시스템 DEVS 모델은 그림 6과 같이 간단하게 표현된다. 매 2.5초마다 정보를 보내고(Send), 결심고도 도달(Finish) 또는 관제 실패 시(Fail) 발생하는 이벤트에 의해 관제가 종료된다.

조종사는 음성에 의한 관제와 디지털 정보에 의한 관제 모두 동일하게 반응한다. 조종사의 DEVS 모델은 그림 7과 같이 표현된다. 프로토콜의 제약 사항인 5초 이내의 끊임 없는 관제 신호를 고려해야 하므로, 초기 상태에서 5초 동안 머무르면서(Init) 어떠한 관제 신호도 들어오지 않는다면 통신 두절(Lost communication)로 판단한다(Fail). 만약 음성 신호가 들어온다면 음성 관제가 끝날 때까지 기다리고(Receive) 음성이 끝난 후 항공기를 조종하고(Operation) 다음 신호를 기다린다(Wait). 디지털 신호의

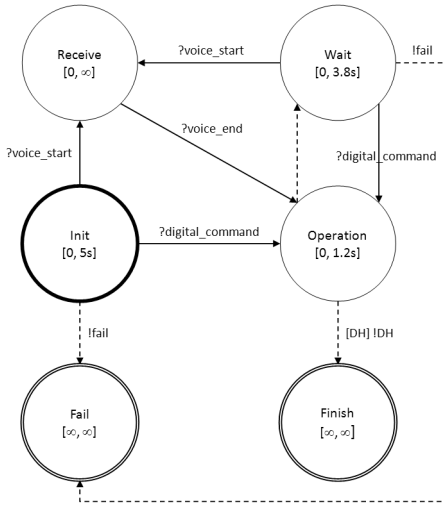


그림 7. 조종사를 묘사하는 DEVS 모델

경우 모니터 상에 정보가 바로 나타나므로 시각적으로 인지한 후 바로 항공기를 조종한다. 조종 후 결심 고도에 도달 시 PAR 관제를 종료하고 최종적으로 착륙한다(Finish). 조종 시간을 포함하여 5초 동안 관제 신호가 들어오지 않으면 통신 두절로 판단하고 PAR 관제 실패로 판주한다.

## 5. 검증 및 평가

제안된 디지털 전송에 의한 관제 시스템의 기능을 검증하기 위하여 C-DEVS 형식론을 사용하고, 전체 상태 검색을 통해 가능한 모든 상태 시퀀스를 추출하여 두 시스템을 비교한다.

### 5.1 기존의 음성에 의한 관제

음성에 의한 관제 시스템과 조종사 사이의 프로토콜을 하나의 모델로 합성하면 그림 8과 같다. 음성 정보는 통신 상태에 따라 조종사에게 전송되지 않을 수 있음을 가정하며, 이로 인한 통신 두절을 합성된 모델에 표현한다. 이 이벤트는 (!command\_start, ∅) 형태로 표현되며, 송신 모델에서는 메시지를 보냈으나 수신 모델에서 받지 못하는 것을 의미한다. 그림 8의 합성된 모델에서 모든 상태 시퀀스를 추출하면 다음과 같다.

- 1) (Decide, Init, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Receive, [5s]) → (Short Breath, Operation, [1.2s]) → (Short Breath, Wait, [0.8s]) → (2<sup>nd</sup> Info, Receive, [5s]) → (Long Breath, Operation,

[1.2s]) → (Long Breath, Wait, [2.8s]) → (Decide, Wait, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Receive, [5s])

- 2) (Decide, Init, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Receive, [5s]) → (Short Breath, Operation, [1.2s]) → (Finish, Finish, [∞])
- 3) (Decide, Init, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Receive, [5s]) → (Short Breath, Operation, [1.2s]) → (Short Breath, Wait, [0.8s]) → (2<sup>nd</sup> Info, Receive, [5s]) → (Long Breath, Operation, [1.2s]) → (Finish, Finish, [∞])
- 4) (Decide, Init, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Init, [4s]) → (Fail, Fail, [∞])
- 5) (Decide, Init, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Receive, [5s]) → (Short Breath, Operation, [1.2s]) → (Short Breath, Wait, [0.8s]) → (2<sup>nd</sup> Info, Receive, [5s]) → (Long Breath, Operation, [1.2s]) → (Long Breath, Wait, [2.8s]) → (Decide, Wait, [1s]) → (Fail, Fail, [∞])
- 6) (Decide, Init, [1s]) → (1<sup>st</sup> Info, Receive, [5s]) → (Short Breath, Operation, [1.2s]) → (Short Breath, Wait, [0.8s]) → (2<sup>nd</sup> Info, Wait, [3s]) → (Fail, Fail, [∞])

위 시퀀스는 크게 3가지의 경우로 나타낼 수 있다. 1) 번 시퀀스는 계속적으로 음성 정보에 의해 관제가 이루어지는 경우이고, 2)번과 3)번은 결심 고도에 도달하여 PAR 관제를 종료하는 경우이고, 4)번부터 6)번까지는 5초간 지속적인 음성 정보가 제공되지 않아 통신 두절이 발생하여 PAR 관제가 실패한 경우이다. 모든 상태 시퀀스에서 시스템의 안전성과 필연성을 살펴보면, 종료 조건을 제외하고 무한대의 시간을 가지는 상태는 존재하지 않으므로 데드락이 없고, 언젠가는 성공 또는 실패 상태에 도달하게 되므로 라이브락 또한 없다. 그러므로 기존 시스템은 안전성과 필연성을 만족하는 시스템이다.

### 5.2 제안하는 디지털 정보에 의한 관제

제안하는 디지털 정보에 의한 관제 모델과 조종사 모델의 합성은 그림 9와 같이 나타난다. 초기에 (Send, Init) 상태에서 메시지를 받으며 상태가 변하며, (Send, Operation) 상태에서 결심고도에 도달하게 되면 (Finish, Finish) 상태에서 종료하거나 계속적으로 (Send, Wait) 상태를 반복하며 관제 신호를 모니터링하고 조종한다. 음성 신호에 의한 관제와 마찬가지로 통신 상태 이상으로 모니터에 관제 신호가 수신되지 않을 시 (!command, ∅)와 같은 이벤트가 발생하고, 5초 동안 문제가 발생 시 (Fail, Fail) 상태로 이동한다. 이 때 조종사의 조종으로 인해 바뀌는 항공기의 정보는 관제 시스템의 모니터로 항상 수신되며 이 정보는 누수되지 않는 것으로 가정한다. 즉,

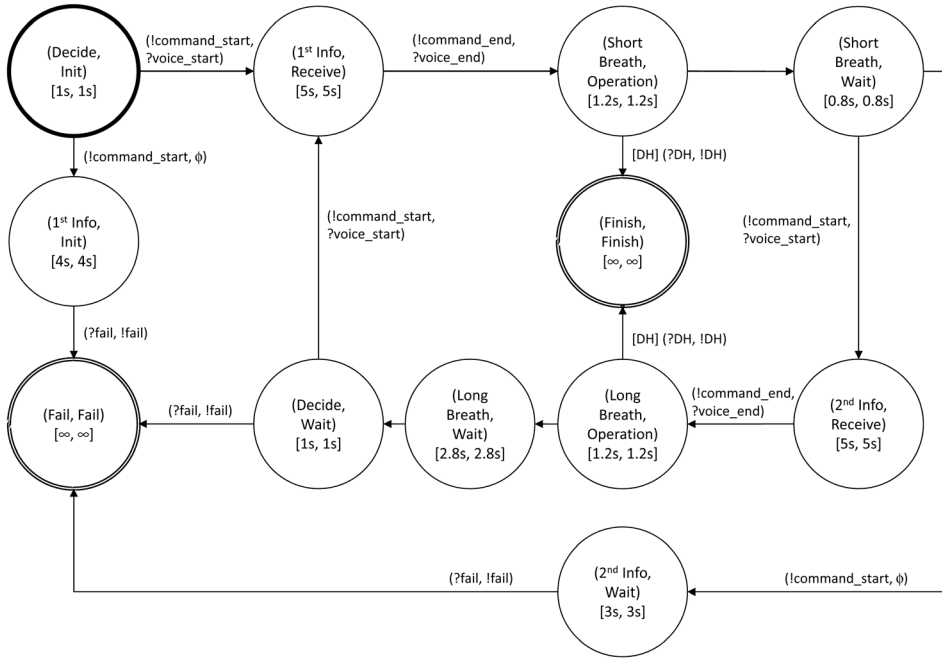


그림 8. 기존의 음성을 이용하는 관제 프로토콜의 C-DEVS 모델

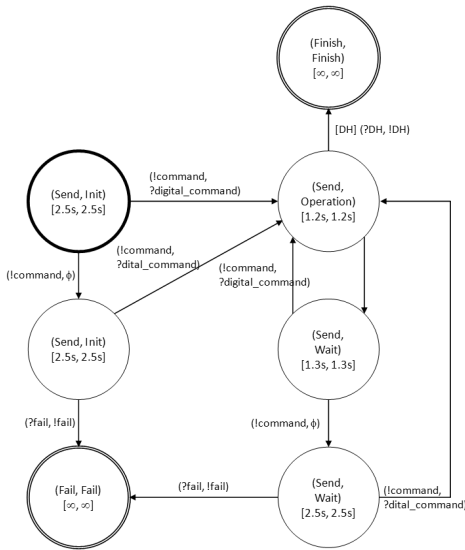


그림 9. 제안하는 프로토콜의 C-DEVS 모델: 디지털 정보에 의한 관제 모델과 조중사 모델의 합성

조중사로부터 관제 시스템으로 오는 메시지는 손실 없이 모두 전달된다. 제안하는 시스템 프로토콜의 전체 상태 시퀀스는 다음과 같다.

- 1) (Send, Init, [2.5s]) → (Send, Operation, [1.2s]) → (Send, Wait, [1.3s]) → (Send, Operation, [1.2s])
- 2) (Send, Init, [2.5s]) → (Send, Operation, [1.2s]) → (Send, Wait, [1.3s]) → (Send, Wait, [2.5s]) → (Send, Operation, [1.2s])
- 3) (Send, Init, [2.5s]) → (Send, Init, [2.5s]) → (Send, Operation, [1.2s])
- 4) (Send, Operation, [1.2s]) → (Finish, Finish, [∞])
- 5) (Send, Init, [2.5s]) → (Send, Operation, [1.2s]) → (Send, Wait, [1.3s]) → (Send, Wait, [2.5s]) → (Fail, Fail, [∞])
- 6) (Send, Init, [2.5s]) → (Send, Init, [2.5s]) → (Fail, Fail, [∞])

위 시퀀스는 다음과 같이 분류할 수 있다. 1)번은 지속적인 디지털 관제 정보 송수신으로 통신 두절 없이 PAR 관제가 반복적으로 이루어지는 경우이고, 2)번과 3)번은 한 번의 통신 두절은 일어났지만 5초 이내이기 때문에 지속적인 관제가 이루어지는 경우이다. 4)번은 결심고도에 도달하여 PAR 관제가 완료된 경우이며, 5)번과 6)번은 5초 이상의 통신 두절로 인해 PAR 관제가 실패한 경우이다.

제안하는 시스템의 안전성과 필연성을 살펴보면, 이 시스템 또한 데드락과 라이브락이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 제안하는 시스템은 안전성과 필연

표 1. 두 시스템의 상태 시퀀스 검증 결과

분류	음성 관계	디지털 관계	결과
관계 지속	1)	1) 2) 3)	동일
관계 성공	2) 3)	4)	동일
관계 실패	4) 5) 6)	5) 6)	동일

성을 만족하는 시스템이다.

### 5.3 시스템 검증

제안하는 PAR 자동화 시스템이 기존의 음성에 의한 관계와 동일한 기능을 수행하는지 검증하기 위해 앞에서 얻은 전체 상태 시퀀스를 비교한다. 우선 반복되는 시퀀스로서 음성 C-DEVS 모델의 1)번과 디지털 C-DEVS 모델의 1)번, 2)번, 3)번이 의미적으로 동일하다. 디지털 모델의 경우 통신 두절이 한 번 발생하더라도 5초 이내에 한 번 더 보낼 수 있으므로 여러 개의 시퀀스가 존재하고 지속적인 관계가 가능하다. 그리고 음성 모델의 2)번, 3)번과 디지털 모델의 4)번 시퀀스는 PAR 관계가 성공하는 시퀀스로서 동일하다. 음성 모델은 음성 정보를 두 번 나누어서 보내므로 두 개의 시퀀스가 나올 수 있다. 마지막으로 5초 이상의 통신 두절에 의해 PAR 관계가 실패하는 경우가 음성 모델의 4)번, 5)번, 6)번과 디지털 모델의 5)번, 6)번이다. 표 1은 검증 결과를 요약한 것이다.

## 6. 결 론

본 논문은 자동화된 공항 PAR 관계 시스템을 제안하고 이를 DEVS 형식론을 이용하여 검증하는 것이다. PAR 관계의 효율성을 위하여 디지털 신호를 이용한 자동화 방안을 제안하고 그 동작을 기존의 음성 신호에 의한 관계 시스템과 비교하였다. 시스템의 기능 검증을 위하여 확장된 DEVS 형식론인 C-DEVS 형식론을 이용하고, 모든 상태 시퀀스를 검증한 결과 제안하는 시스템이 기존 시스템과 동일하게 동작함을 확인하였다.

C-DEVS 형식론을 이용한 기능 검증 및 분석은 실제 시스템을 구축하기에 앞서 수학적 모델을 이용함으로써 모든 상황에 대한 검증을 가능하게 하며, 이를 통해 시스템 개발의 안전성 및 경제성을 높일 수 있다. 본 논문에서 언급되어 있는 항공기 관계 시스템의 경우처럼, 실제계에 바로 적용하여 테스트하기 어려운 경우 C-DEVS 모델 검증 방법론이 유용하게 사용될 수 있다.

본 논문에서 제안하는 디지털 신호에 의한 관계는 청

각 정보가 아닌 시각 정보를 사용함으로써 정보 전달의 정확성을 높여줄 것으로 기대되며, 향후 실제 항공기의 파라미터를 이용하여 제안하는 시스템의 성능을 측정하기 위한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 공군본부, 공교 3-143 국지계기절차 수립기준, 2007.1.1.공
2. 공군작전사령부, 비행정보 간행물, 2010.4.16.
3. FAA, Aeronautical Information Manual, February, 9. 2012.
4. 구정, 표상호, 강경성, 김기형, “재래식 주파수 도약 통신장비용 S/W 패킷모뎀 개발 및 적용에 관한 연구,” *한국군사과학기술학회지*(통권 51호), pp. 222-231, 2011. 4.
5. 구정, 표상호, 강경성, 김기형, “비행기지 PAR을 이용한 DGPS 공항접근 및 착륙 정확도 분석,” *한국군사과학기술학회지*(통권 54호), pp. 788-797, 2011.10.
6. B. P. Zeigler, T. G. Kim, and H. Praehofer, *Theory of Modeling and Simulation*, Orlando, FL: Academic, 2000.
7. 공군본부, 네트워크 중심작전 사례 연구( Link-16 유/무 시의 공대공 전투), 2010. 8.
8. J. Miller, “Channel interaction and the redundant-targets effect in bimodal divided attention,” *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 17, pp. 160-169, Feb. 1991.
9. D. W. Massaro and D. S. Warner, “Dividing attention between auditory and visual perception”, *Perception & Psychophysics* 21, pp. 569-574, 1977.
10. W. B. Lee and T. G. Kim, “Ordering Method for Reducing State Space in Compositional Verification”, in *1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC '99)*, Tokyo, Japan, pp. I-806 - I-811, Oct. 1999.
11. T. G. Kim, “DEVS Formalism for Modeling of Discrete-Event Systems”, *Handbook of Dynamic System Modeling* (ED. P. A. Fishwick), Chapman & Hall/CRC, Ch. 6, pp. 6-1 - 6-13, May 2007.
12. L. Lamport, “Proving the Correctness of Multiprocess Programs”, *IEEE Trans. Softw. Eng.* Vol. 3, No. 2, pp. 125-143, Mar. 1977.
13. B. Alpern, F. B. Schneider, “Defining liveness”, *Information Processing Letters*, Vol. 21, Issue 4, pp. 181-185, Oct. 1985.
14. 공군본부, 공교 3-9-2/표준 계기비행, 2012.1.2.
15. FAA, FAA-H-8380-15A Instrument Flying Handbook, 2008.
16. 공군본부, 공교 3-2-8/작전 항공교통관제절차, 2012.1.1.





**성 창 호** (chsung@smslab.kaist.ac.kr)

2003 부산대학교 전자전기통신공학부 학사  
 2011 KAIST 전기및전자공학과 박사  
 2011~현재 KAIST 정보전자연구소 연수연구원

관심분야 : 모델링/시뮬레이션 이론, 분산 및 하이브리드 시뮬레이션



**구 정** (hanair9@hanmail.net)

1982 공군사관학교 항공공학 학사  
 1993 인하대학교 항공공학 석사  
 2011 NCW협동공학 박사과정 수료  
 2002~2003 공군 전투발전단 모의체계과장  
 2004~2005 공군 전투발전단 모의분석과장  
 2007~2008 합동참모본부 위계임운영과장  
 2009~2010 공군본부 정보화기획실 체계관리처장  
 2010~ 공군 작전정보통신단장

관심분야 : NCW, 항공전자, Data Link, M&S, 전투실험



**김 탁 곤** (tkim@ee.kaist.ac.kr)

1975 부산대학교 전자공학과 학사  
 1980 경북대학교 전자공학과 석사  
 1988 Univ. of Arizona, 전기및컴퓨터공학과 박사  
 1980~1983 부경대학교, 통신공학과, 전임강사  
 1987~1989 (미)아리조나 환경연구소, 연구엔지니어  
 1989~1991 Univ. of Kansas, 전기및컴퓨터공학과, 조교수  
 1991~현재 KAIST 전기및전자공학과, 교수  
 - 한국시뮬레이션 학회 회장 역임  
 - 국제시뮬레이션학회(SCS) 논문지(Simulation) Editor-In-Chief 역임  
 - SCS Fellow  
 - 모델링 시뮬레이션 기술사(미국)  
 - Who's Who in the World(Marguis 16thEdition, 1999) 등재  
 - 연합사, 국방부/합참, 기품원 자문위원 역임  
 - KIDA Fellow 역임  
 - ADD 자문위원(현)

관심분야 : 모델링/시뮬레이션 이론, 방법론 및 환경개발, 시뮬레이터 연동



**김 기 형** (kkim86@gmail.com)

1990 한양대학교 전자통신공학과 학사  
 1992 한국과학기술원 전자공학과 석사  
 1996 한국과학기술원 전자공학과 박사  
 1997. 3~2005. 2 영남대학교 컴퓨터공학과, 부교수  
 2000.12~2001. 8 AdForce, Inc (California Cupertino), Senior Engineer  
 2005. 3~현재 아주대학교, 교수  
 2011. 9~2012. 8 Stony Brook University (State University of New York), Visiting Professor

관심분야: M2M, ISA100, wirelessHART, 6LoWPAN, wireless sensor networks, mobile embedded systems, 전술네트워크