

다목적 실용위성 1호 관제시스템 가용도 분석 연구

은종원 · 장대익 · 김재명

한국전자통신연구원

ANALYTICAL STUDY ON MISSION CONTROL ELEMENT SYSTEM AVAILABILITY FOR KOREA MULTIPURPOSE SATELLITE(KOMPSAT) I

J. W. Eun¹, D. I. Chang², and J. M. Kim¹

¹ Satellite Communications System Department

² Satellite Ground System Department

Radio & Broadcasting Technology Laboratory,

Electronics & telecommunications Research Institute (ETRI)

E-mail: jweun@etri.re.kr, dchang@etri.re.kr, jaekim@etri.re.kr

(Received October 26, 1998; Accepted November 15, 1998)

요 약

본 논문에서는 다목적 실용위성 관제시스템의 성능지표의 하나인 가용도를 산출하기 위한 H/W 및 S/W 시스템 가용도의 수학적 모델링을 제시하고, 직렬연결 시스템과 병렬연결 시스템 그리고 이중화 시스템에 대한 가용도 산출 방법을 제시하였다. 또한 가용도 향상을 위한 이중화 방법에서 효율적인 스위치 선택방법을 기술하였으며, 다목적 실용위성 1호 관제시스템의 가용도를 산출하였다. 가용도 분석 결과 비 이중화 시 가용도는 0.995216, 이중화 시 가용도는 0.9955165, 관제시스템 실시간 운용 가용도는 0.9963991로 분석 되었다.

ABSTRACT

To estimate the availability of the MCE for KOMPSAT I, mathematical models of H/W and S/W availability, the availability estimating methods for parallel and redundant system were presented. Furthermore, to improve and estimate the MCE system availability, we analyzed the computational procedure of redundant methods, and we also included effective switch choosing methods in this paper. The analytical results of the MCE system availability were estimated as follows: - 0.995216 not considering system redundancy, - 0.9955165 considering system redundancy, and - 0.9963991 for the time of system real time operation.

약어 목록

[-1.5ex] A	Availability	LSU	LNA Switch Unit
ACU	Antenna Control Unit	MAPS	Mission Analysis & Planning Subsystem
AFR	Annualized Failure Rate	MOD	Modulator
ALDT	Administrative Logistics Delay Time	MODEM	Modulator/Demodulator
BB	Base Band	MTBF	Mean Time Between Failure
BPSK	Binary Phase Shift Keying	MTTR	Mean Time To Repair
C&M	Control & Monitor	PM	Phase Modulation
D/C	Down-converter	RF	Radio Frequency
DEMOD	Demodulator	SIM	Satellite Simulator Subsystem
DRSU	D/C Redundancy Switch Unit	SOS	Satellite Operation Subsystem
HPA	High Power Amplifier	S/W	Software
HSU	HPA Switch Unit	T/C	Telecommand
H/W	Hardware	T/M	Telemetry
IF	Intermediate Frequency	TT	Test Translato
LAN	Local Area Network	TTC	Telemetry, Tracking and Command
LEOP	Launch & Early Orbit Phase	U/C	Up-converter
LNA	Low Noise Amplifier	URSU	U/C Redundancy Switch Unit
[0.5ex]			

1. 서 론

다목적 실용 위성 1호 시스템은 다목적 임무를 수행할 탑재체와 위성체의 임무 수행을 유지시켜주는 버스(Bus)로 이루어진 위성체 시스템과 위성을 추적 제어하기 위한 지상 관제시스템 그리고 위성으로부터 탑재체 데이터를 받아 처리하는 영상 처리시스템 및 발사체 시스템으로 구성되어 있다. 다목적 실용 위성은 1999년 7월에 발사되어 3년 동안 지도 제작용의 카메라 (Electro Optical Camera: EOC), 해상 탐사용의 카메라 (Ocean Scanning Multi-spectral Imager: OSMI), 전리층 측정 센서 (Ionosphere Measurement Sensor: IMS), 그리고 고 에너지 입자 측정기 (High Energy Particle Detector: HEPD)를 탑재하고, 고도 600-800 km의 태양 동기 저궤도를 선회하며 한반도 지도 제작, 해양 상태 감시, 우주 환경 탐사 및 감시 등의 다양한 임무를 수행한다. 지상 관제시스템은 위성의 원격 측정 데이터를 수신하여 위성체 및 탑재체의 상태를 감시하고, 필요 시에는 원격 명령을 발신하여 궤도 및 자세 조정, 탑재 장치의 제어 등을 수행한다. 관제시스템은 첫째, 위성을 추적하고 위성의 원격 명령 및 원격 측정 데이터를 송수신하기 위한 안테나-RF-MODEM/BB-System Timing H/W로 구성된 TTC 서브 시스템, 둘째, 원격 명령/측정 데이터의 실시간 처리를 위한 위성 운용 서브 시스템, 셋째, 궤도/자세의 결정, 예측, 분석과 탑재체의 작동 스케줄링, 그리고, 과학 시험 및 우주 탐사 관련 화상 데이터 처리 시스템과의 접속 등을 처리하기 위한 임무분석 서브시스템, 넷째, 위성의 자세 및 전기, 추진기 등의 상태의 동적 반응과 위성체 내부의 원격 명령 및 원격 측정 처리 과정을 시뮬레이션 하여 관제시스템의 운용자의 교육 및 위성 이상 상태(Anomaly)분석을 위한 위성 시뮬레이터 서브 시스템으로 구성되어 있다. 그림 1은 다목적 실용위성 관제시스템의 H/W 구성도 이다.

본 논문은 다목적 실용위성 관제시스템의 규격을 만족하는 시스템 가용도를 산출하기 위하여 가용도 모델을 분석하고, 직렬 및 병렬연결 시스템에 대한 시스템 가용도, MTBF 그리고 MTTR을 해

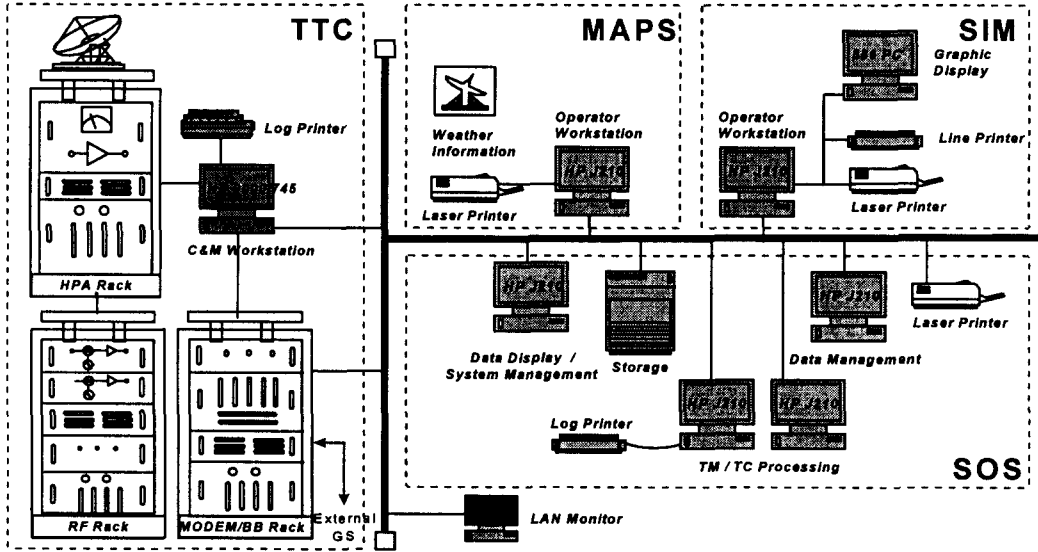


그림 1. 다목적 실용위성 1호 관제시스템 H/W 구성도

석한다. 또한 가용도 향상을 위한 이중화 (Redundancy) 방법의 가용도 계산기법을 제시하고 효율적인 스위치 선택방법 및 시스템 가용도 유지방안을 기술한다. 다목적 실용위성 1호 관제시스템 규격의 가용도 요구사항은 다음과 같다: - 시스템 가용도는 LEOP 시에 0.99, 위성이 정상궤도 진입 후 운용 시에는 0.93을 만족하여야 한다.

2. 가용도 Model 분석

본 장에서는 다목적 실용위성 1호 관제시스템의 가용도를 산출하는데 적용될 수 있는 수학적 모델을 분석하며, 시스템 가용도는 다음 사항을 고려하여 산출된다:

- 시스템은 4개의 서브시스템이 직렬로 연결되어 구성된다.
- TTC 및 SOS 서브시스템은 장비의 이중화가 추가되어 구성된다.
- 서브시스템의 고장 회수는 통계적으로 독립적이다.
- 각 서브시스템을 구성하는 장비가 병렬로 연결되어 있으므로 고장율은 동일하다.
- 안테나 장비의 기계 장치는 반 영구적 이므로 고장이 없고, 시스템 동작에 영향을 크게 미치지 않는다.
- 시스템 LAN은 시스템 동작에 영향을 미치지 않으므로 그 가용도는 100%이다.

- 각 서브시스템을 구성하는 주변기기(Laser Printer, Log Printer, Line Printer, LAN Monitor)는 시스템 동작에 직접 영향을 미치지 않고, 쉽게 유지보수가 가능하기 때문에 그 가용도는 100%이다.
- 각 서브시스템의 소프트웨어 프로그램의 가용도는 100%이다.

2.1 H/W 시스템 가용도 수학적 모델

시스템 가용도는 동작시간에 비해 고장시간이 얼마나 짧은가를 수치로 표현하는 것 즉, 관찰 시간 동안 시스템이 성공적으로 동작한 기간의 비율이 얼마나 되는가는 시스템 성능을 측정하는 하나의 지표가 될 수 있다. H/W 시스템의 MTBF는 각 서브 시스템별로 시스템 공급자로부터 제공되고, MTTR은 H/W 시스템 설치자 혹은 H/W시스템 유지 보수자로부터 제공된다. H/W 가용도는 시스템의 임무를 지원해 줄 수 있는 시간의 비율로서 그 수학적 모델(Pratt & Bostian 1986, She & Pecht 1992)은 다음과 같다.

$$A_i = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (1)$$

여기서 첨자 i 는 서브 시스템 i 를 표시하며, $MTBF_i$ 는 i 서브 시스템의 MTBF, $MTTR_i$ 는 i 서브 시스템의 MTTR, A_i 는 i 서브 시스템의 가용도를 나타낸다.

2.1.1 신뢰도(Reliability) 모델

신뢰도(reliability)는 시스템이 동작한 순간부터 어느 시점 t 까지 고장 없이 계속 동작할 확률 즉, 주어진 시간 후에 계속 동작할 확률로서 시스템 고장률(1)에 의해 정의되며 (Zhao 1994, Maral & Bousquet 1993), 식 (2)와 같다. MTBF는 서비스가 시작된 후 처음 고장이 발생한 평균 시간 (Maral & Bousquet 1993)으로 식 (3)의 결과와 같다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

다목적 실용위성 관제시스템에서 각 서브시스템의 유닛(Unit) 고장이 전체 시스템 고장에 영향을 미치지 않으면 동작상태로 가정하며, 시스템 동작에 영향을 미치는 서브시스템과 서브시스템의 유닛을 직렬연결 시스템으로 해석한다.

2.1.2 직렬연결 시스템의 가용도

가용도는 관찰 시간에 시스템이 동작할 확률로서 시스템 성능의 지표가 된다. 일반적으로 시스템을 구성하는 부품이나 서브시스템 각각의 고장이 시스템 동작에 영향을 미치면 가용도 구조 모델을 직렬연결 시스템으로 가정하여 분석한다.

○ 직렬 시스템 가용도

그림 2와 같이 N 개의 서브 시스템이 직렬로 연결되어 한 시스템을 구성할 경우 모든 서브 시스템은 동시에 동작되어야 한다. 따라서, 직렬 시스템의 가용도(A_{SR})는 식 (4)와 같이 각 서브 시스템 가용도의 곱으로 산출된다.

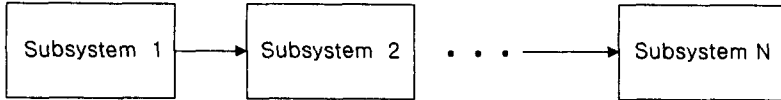


그림 2. 직렬 시스템 구성도

$$A_{SR} = \prod_{i=1}^N A_i \tag{4}$$

◦ 직렬 시스템 MTTR

$MTTR_{SR}$ 은 직렬 시스템의 고장부분에 대한 교체나 수리에 요구되는 시간으로, 시스템 전체의 MTTR은 각 서브 시스템별로 제공되는 MTTR로부터 식(5)과 같이 각 서브 시스템 MTTR의 평균이다.

$$MTTR_{SR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MTTR_i \tag{5}$$

◦ 직렬 시스템 MTBF

$MTBFSR$ 은 직렬 시스템이 정상 동작하여 고장이 발생할 때 까지 시간으로, 시스템 전체의 MTBF는 각 서브 시스템별로 제공되는 MTBF의 함수이다. 식 (3)과 (6)로부터 직렬 시스템의 MTBF는 식 (7)과 같이 유도된다.

$$R_{SR} = \prod_{i=1}^N r_i = e^{-t \sum \lambda_i} = e^{-\lambda t} \tag{6}$$

$$MTTR_{SR} = \frac{1}{\lambda} = 1 / \sum_{i=1}^N 1/MTTR_i \tag{7}$$

다른 방법으로 시스템의 MTBF는 식 (8)로부터 식 (9)가 유도된다. ASR 과 $MTTR_{SR}$ 은 식 (4) 및 (5)로 부터 산출한다.

$$A_{SR} = \frac{MTBFSR}{MTBFSR + MTTR_{SR}} \tag{8}$$

$$MTBFSR = \left[\frac{A_{SR}}{1 - A_{SR}} \right] \times MTTR_{SR} \tag{9}$$

◦ 직렬 시스템 고장율

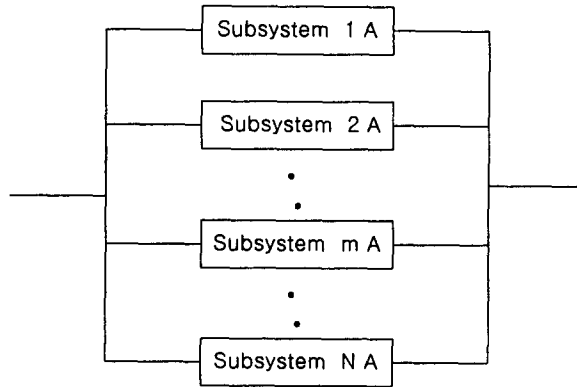


그림 3. 병렬 및 이중화 시스템 구성도

시스템 고장율(Failure Rate) λ 는 단위 시간당 고장 빈도수로서 식 (3)에 의해 식 (10)과 같이 표시된다. 이때, 고장율은 통상적으로 100만 시간당 고장 빈도수로 표시된다. 또한 직렬 시스템의 고장율은 식 (7)로부터 식 (11)이 유도된다.

$$\lambda = \frac{10^6}{MTBF_{SR}} (\text{Failure times/Mhr}) \tag{10}$$

$$\lambda_{SR} = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \sum_{i=1}^N 1/MTBF_i \tag{11}$$

2.1.3 병렬연결 및 이중화 시스템 가용도

그림 3과 같이 여러 개의 서브 시스템이 병렬로 연결되어 하나의 시스템을 구성할 때, 모든 서브 시스템이 동시에 동작해야만 동작하는 시스템이라면 가용도는 직렬시스템으로 모델화하여 해석되며, 가용도는 식 (4)와 같다. 이중화 시스템이 그림 3과 같이 연결되어 N개의 서브시스템 중 한 개의 시스템만 동작하여도 동작되는 시스템이라면, 모든 이중화 서브시스템이 모두 고장 나지 않으면 동작 시스템으로 해석할 수 있다. 이때 시스템 가용도와 신뢰도는 고장 확률로부터 식 (12)와 같다.

$$A_{RD} = 1 - (1 - A)^N \tag{12}$$

$$R_{RD} = 1 - (1 - R)^N$$

2:1 이중화 시스템의 MTBF는 신뢰도가 시간함수로 표시되어 있을 경우 식 (3)을 이용하여 적분에 의해 계산되고, 신뢰도가 특정 시간에 대해 표시되어 있을 경우, 식 (3)과 (12)를 이용하여 식

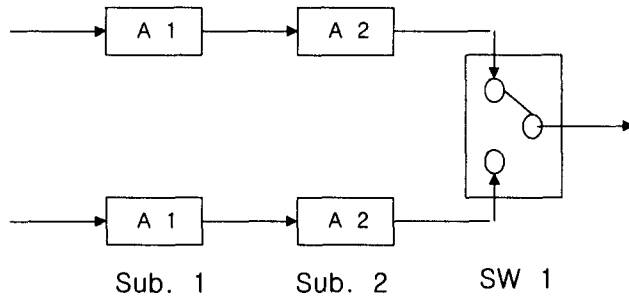


그림 4. 최종단 이중화 스위치 배치 구성도

(13)과 같이 유도된다.

$$MTBF_{RD} = \frac{-t}{\ln(R)} = \frac{t}{\frac{t}{MTBF} - \ln(2 - e^{-\frac{t}{MTBF}})} \tag{13}$$

같은 서브 시스템이라도 이중화 구성방법에 따라 시스템 전체의 가용도는 다르다. 그러므로 최대의 가용도를 얻을 수 있는 이중화 구성방법을 선택하여야 한다. 이중화 구성방법은 병렬로 서브시스템을 배치한 후 최종단에서 이중화 제어 스위치에 의해 시스템을 선택하는 방법과 이중화 서브시스템의 중간단마다 이중화 제어 스위치를 배치하는 방법이 있다.

○ 최종단 이중화 스위치 배치

그림 4와 같이 직렬의 각 서브 시스템을 한 단위로 하여 이중화하기 위해 병렬로 배치하고, 이중화 스위치 SW1은 최종단에서 제어하도록 한다. 이때 이중화한 시스템의 가용도는 식 (4) 및 (12)에 의해 계산한 이중화 가용도에 이중화 스위치(SW1)의 가용도를 곱함으로써 시스템 가용도는 식 (14)와 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} A_{sys} &= [1 - (1 - A_1A_2)^2] \times A_{sys} \\ &= A_1A_2(2 - A_1A_2) \times A_{sys} \end{aligned} \tag{14}$$

○ 중간단 이중화 스위치 배치

그림 5와 같이 단일 각 서브 시스템을 한 단위로 이중화하기 위해 이중화 모듈을 이중화 스위치로 선택하고 선택된 서브 시스템을 다음 단의 이중화 모듈에 입력하여 같은 방법으로 정상동작 서브시스템을 선택해 가는 방법이다. 그림 5에서 서브 시스템 별로 가용도를 계산하고 각 경우에 대한 이중화 스위치의 가용도를 곱함으로써 시스템 가용도는 식 (15)와 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} A_{sys} &= (2A_1 - A_1^2)(2A_2 - A_2^2) \times A_{SW1}^2 \\ &= A_1A_2[A_1A_2 - 2(A_1 + A_2) + 4] \times A_{SW1}^2 \end{aligned} \tag{15}$$

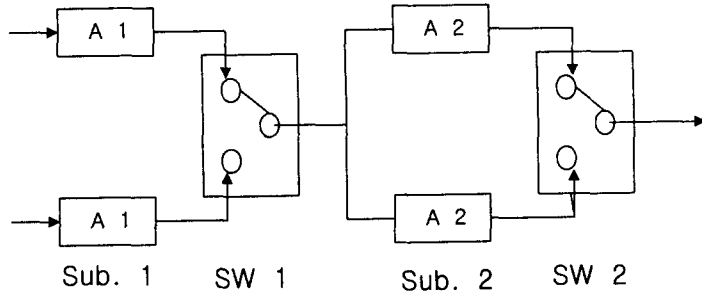


그림 5. 중간단 이중화 (Redundancy) 스위치 배치 구성도

2.2 S/W Program 가용도 수학적 모델

H/W 시스템의 구성부품은 장비설치 후 일정시간이 흐름에 따라 부품의 노후화 및 고장 등으로 가용도를 유지하기 위해서는 노후 및 고장 난 부품 등의 교체와 같은 유지보수 활동이 필수적이다. 하지만, S/W 시스템의 Program은 H/W 구성 부품과는 달리 노후되거나 고장 나지 않기 때문에 Program 자체의 교체가 요구되지 않는다 (Hughes Information Technology System 1996). 따라서 S/W Program 가용도의 수학적 모델은 다음과 같이 해석된다.

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = 100\% \tag{16}$$

여기서, MTTR = 0 이다.

3. 관제시스템 가용도 분석 결과

3.1 TTC서브시스템의 가용도 구조 분석

TTC서브시스템의 가용도 분석을 위한 기능 블록도는 그림 6과 같으며 시스템 동작에 영향을 미치지 않는 부분은 가용도 구조에서 생략하였다. 즉, RF 시스템의 test translator는 시스템 동작에 영향이 없으므로 가용도 구조에서 배제하였다. 이중화가 적용되는 RF부의 스위치 배치는 중간단 스위치 배치 방법이 최종단 스위치 배치 방법에 비해 가용도가 높기 때문에 그림 6과 같이 중간단 스위치 배치 방법을 선택하였다.

3.2 S/W 시스템 H/W 가용도 구조 분석

위성운용 서브시스템, 임무분석 서브시스템, 그리고 위성 시뮬레이터 서브시스템은 S/W시스템으로 S/W Program의 가용도가 100%라고 가정할 때, H/W장비인 워크스테

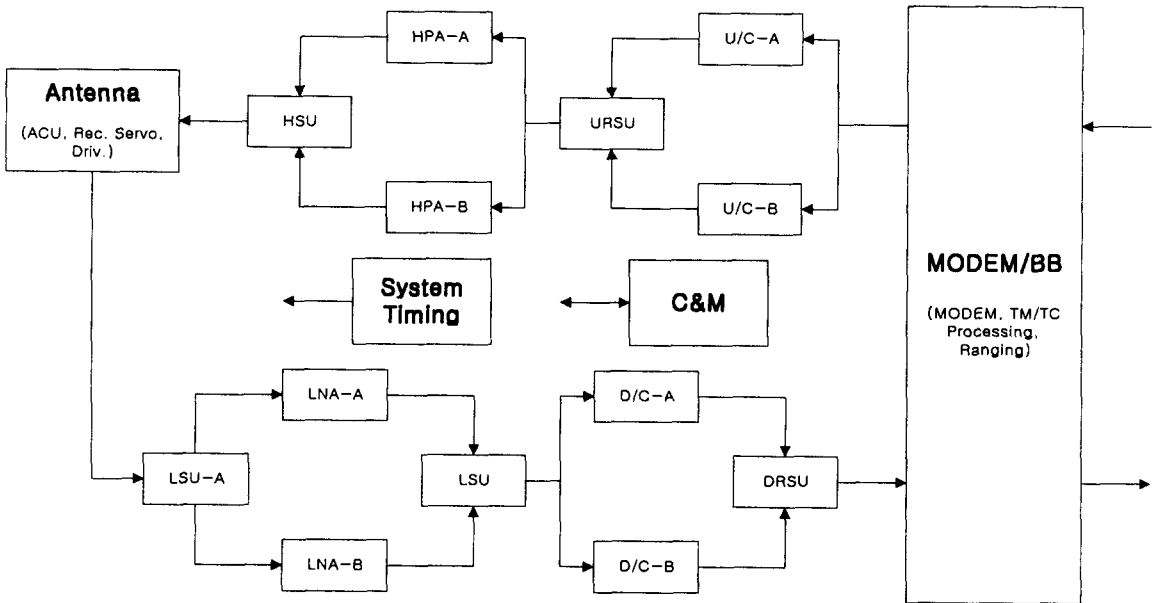


그림 6. TTC 서브시스템의 가용도 기능 블록도

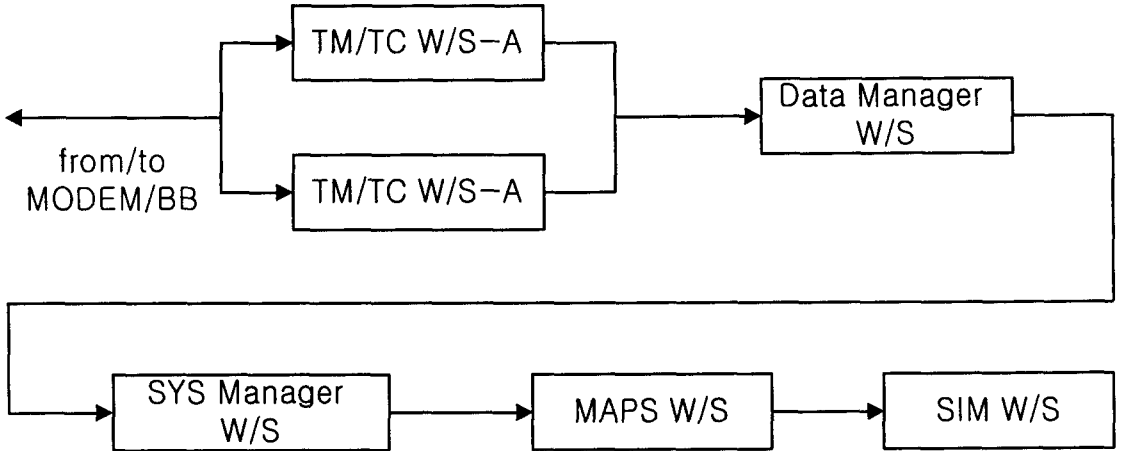


그림 7. S/W서비스시스템의 가용도 기능 블록도

이션(W/S: workstation)만 시스템 가용도에 영향을 미친다. S/W서비스시스템의 H/W 가용도 분석을 위한 기능 블록도는 그림 7과 같다.

3.3 관제시스템 가용도 산출 결과

관제시스템의 가용도 분석은 운용을 고려하여 식 (1)의 가용도를 식 (17)과 같이 대치한다. 조달시간시스템의 MTBF는 각 장비 공급자로부터 제공되고, MTTR은 시스템 설치자 또는 시스템 유지 보수자에 의해 제공된다. 또한 부품 또는 전문기술자 조달시간(LDT, Logistic Delay Time)은 장비공급자와의 거리에 의해 결정되고 장비 워밍업(Warming Up) 시간은 장비 규격이나 시험에 의해 알려진 값이다. 운용 가용도는 시스템의 임무를 지원해 줄 수 있는 정상동작 시간 대 총 장비 운용시간의 비율로서 식 (17)과 같다[5].

$$A_0 = \frac{UpTime}{UpTime + DownTime} = \frac{MTBF}{MTBF + (MTTR + ALDT + War min, gUp)} \quad (17)$$

관제시스템의 가용도는 모든 구성요소가 시스템 동작에 영향을 미치는 부분이므로 직렬연결 시스템으로 해석하였다. 각 서비스시스템별 MTBF, MTTR 및 가용도는 각각 식 (4), (5), (7), (15), (17)로부터 계산되며 결과는 그림 8과 같다. 그림 8의 가용도 결과에서 A는 이중화를 고려하지 않은 가용도이고 A₀는 이중화를 고려한 장비의 가용도이다.

MCE System Availability

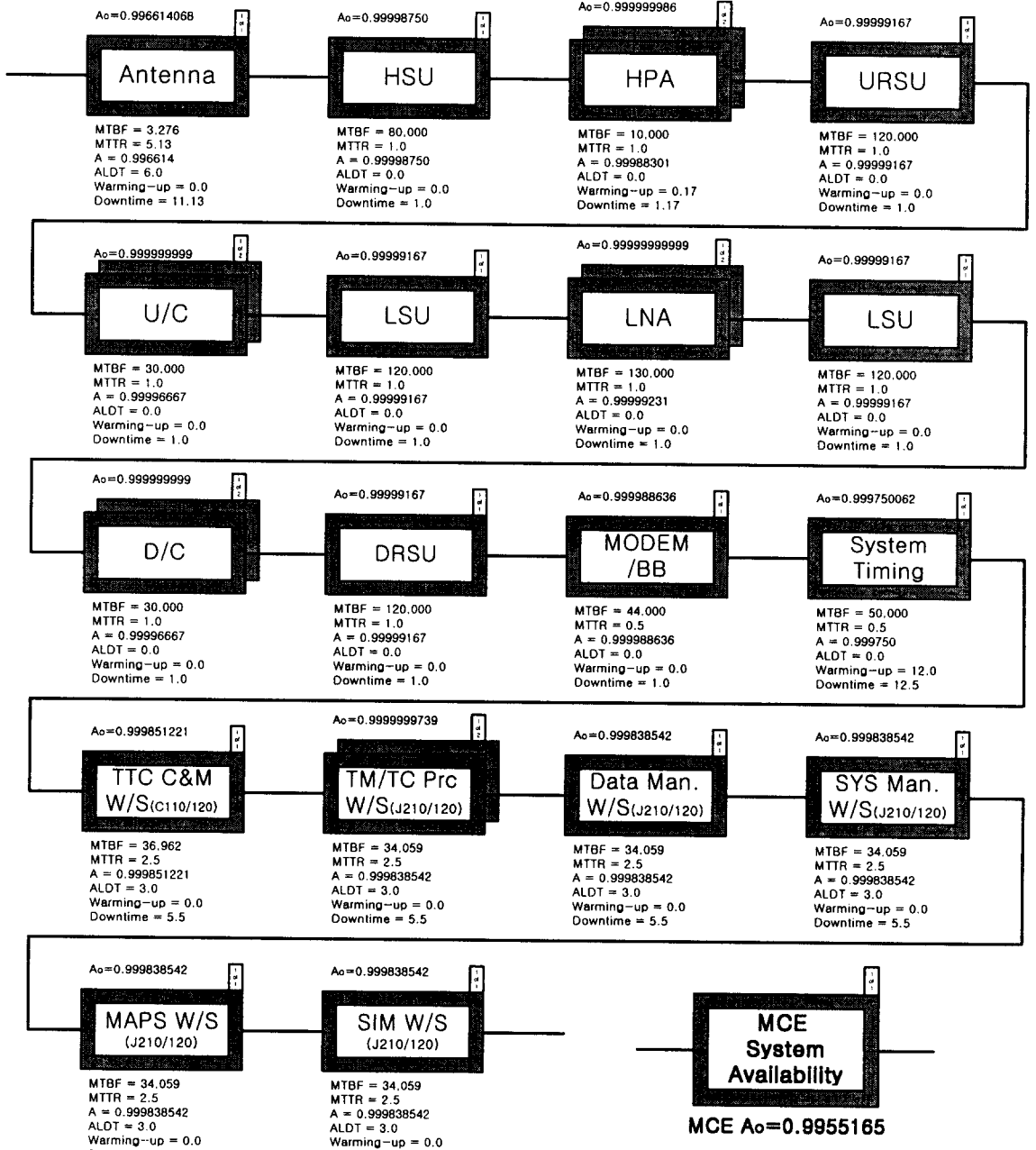


그림 8. 다목적 실용위성 관제시스템 가용도 분석 결과

3.4 관제시스템 실 시간 운용 가용도

다목적위성 관제시스템은 하루에 4번 한반도 상공을 통과하며 10분 동안 교신(on-pass)이 가능해야 한다. 또한 위성과 교신을 위해서는 교신이전(pre-pass) 20분 동안 TTC장비 setup 및 상태확인을 수행하고 교신이후(post-pass) 10분 동안 TTC장비 상태확인 및 원격측정 데이터 처리를 수행하며, 시스템의 고장이 위성과의 교신에 영향을 미치지 않기 위해서는 pre-pass이전 MTTR시간은 정상상태가 유지되어야 한다. 그러므로 위성과 교신에 필요한 TTC시스템 1일 요구 동작시간(t_{day})은 식 (18)과 같다. 위성과 교신하거나 교신을 위한 준비 시간을 제외한 시간동안의 고장은 통신에 영향을 미치지 않으며 이 기간 동안 장비 고장에 대해 MTTR 시간 내에 고장 난 장비를 수리할 수 있으므로 MTBF에서 고려하지 않고 위성과의 통신에 필요한 시간으로만 $MTBF_{actual}$ 를 식 (19)와 같이 해석할 수 있다.

$$t_{day} = 4(pre + on + post + MTTR_{sys})(hrs) \quad (18)$$

$$MTBF_{actual} = \frac{MTBF \times 24}{t_{day}} \quad (19)$$

다목적위성의 특성을 고려한 실제의 TTC시스템 가용도는 식 (18)을 이용해 MTBF를 다시 해석할 수 있으며, 시스템 실시간 가용도는 표 1과 같다.

표 1. 관제시스템 실 시간 운용 가용도.

구분	$MTBF_{actual}$	가용도
안테나부	3491.3	0.996822203
RF부	87242.5	0.99988537
MODEM/BB부	226285.7	0.999997790
System Timing부	257142.9	0.999951391
C&M부	70033.3	0.999978612
SOS TM/TC W/S	757313007.4	0.999999993
SOS Data Man. W/S	64533.0	0.999914780
MAPS W/S	64533.0	0.999914780
SIM W/S	64533.0	0.999914780
MCE System	-	0.996399068

4. 결론

본 논문에서는 시스템의 가용도 모델을 분석하고 이중화 스위치의 위치를 선택하기 위하여 가용도 모델 구성 방법인 직렬 및 병렬 시스템을 제시하였으며, 시스템 전체의 MTBF, MTTR, 그리고 가용도 계산 방법을 제시하였다. 또한 가용도를 높이기 위한 이중화 방식을 제시하고, 이때의 MTBF 및 가용도 계산식을 유도하였다. 본 논문에서 분석한 MTBF 및 가용도를 다목적 실용위성 1호 관제시스템에 적용하여 시스템 가용도를 산출하고 이중화

시의 가용도를 계산하였으며, 이중화 스위치는 중간단 위치의 가용도가 높음을 알 수 있었다. 그리고 위성 접속 시간만을 고려한 실 시간 운용 가용도 계산방법 및 그 결과를 제시하였다. MCE 시스템의 가용도 분석 결과 비 이중화 시 0.995216이고, 이중화 시 0.9955165로 0.0003055 개선되었다. 이중화에서 가용도가 크게 개선되지 않은 이유는 안테나시스템이 이중화 가용도에 크게 영향을 미치지 때문이다. 위성 접속만을 고려한 시스템 실 시간 운용 가용도는 0.9963991로 분석되었다. 관제시스템 가용도를 유지하기 위해서는 다음과 같은 대책이 강구 대여야 할 것으로 판단된다:

- 시스템의 사용기간 중 발견될 수 있는 문제점(Errors)을 분석하여 수정하는 Corrective 유지보수
- 주위 환경(H/W, Operating System등) 개선(Upgrade) 변화에 대응하여 적절하게 S/W Program을 수정 하는 Adaptive 유지보수
- 소프트웨어가 운용되면서 사용자로부터 요청되는 새로운 기능에 대한 요구와 기존 기능에 대한 수정 사항, 그리고 전반적인 기능향상에 대한 요구 사항들을 만족시키기 위한 Perfective 유지보수
- 향후 프로그램 개선 및 신뢰도를 향상시키기 위하여 S/W가 변경되어야 할 경우 역 공학 (Reverse Engineering) 및 역 공학 기술(Reverse Engineering Technology)을 이용하여 S/W 고도화를 구축하기 위한 Preventive 유지보수

참고문헌

- Hughes Information Technology System, 1996, Availability Models/Predictions for ECS Project (Hughes Information Technology System: Maryland)
- Maral, G. & Bousquet, M. 1993, Satellite Communications Systems (John Wiley & Sons: New York)
- Pratt, T. & Boston, C. W. 1986, Satellite Communications (John Wiley & Sons: New York)
- She, J. & Pecht, M. G. 1992, IEEE Trans. on Reliability, 41, 72
- Zhao, M. 1994, IEEE Trans. on Reliability, 43, 329