

技術論文

단위 모듈 기반의 하드웨어 중복구조 신뢰도 분석 도구 개발

김성수*, 박상혁*, 김성환*, 최기영*, 하철근**, 박춘배*

Development of Reliability Block Diagram Analysis Tool for H/W Redundancy Structure based on Unit Module

Sung-su Kim*, Sanghyuk Park*, Sung-Hwan Kim* Keeyoung Choi*,
Cheol-Keun Ha** and Choon-Bae Park*

ABSTRACT

A flight control system for high reliability consists of complicated redundant structures. This redundancy can improve fault tolerant characteristics of system. So, a system manager is able to choose a suitable structure using analyzed quantitative data of various redundant structures. In this paper, we analyzed redundant characteristics and reliability. We defined necessary mathematical model for analysis tool. Then we compose a reliability block diagram analysis tool applying such defined analysis model using Simulink blocks. Finally we verified the analysis tool using a commercial tool.

초 록

높은 신뢰도를 요구하는 비행제어 시스템은 복잡한 중복구조로 구성된다. 이러한 중복 구조는 시스템의 내고장성(fault tolerant)을 향상시킬 수 있다. 따라서 시스템 설계자는 다양하게 구성될 수 있는 중복구조의 정량적 데이터를 바탕으로 적절한 구조를 선택할 수 있다. 본 논문에서는 중복구조의 특징을 분석하고 신뢰도 해석을 위해 필요한 수학적 모델을 정의하였다. 이렇게 정의된 해석 모델을 적용하여 Simulink 블록 기반의 Reliability Block Diagram 해석 도구를 구성하고, 상용으로 사용되고 있는 도구를 이용하여 분석도구의 타당성을 검증하였다.

Key Words : Reliability Block Diagram(RBD), Redundancy(중복구조), Reliability model (신뢰도 모델)

1. 서 론

비행제어 시스템의 설계는 성능을 만족시키기 위해 매우 복잡하게 구성되는데 이때 필요적으로 동반되는 설계 조건이 신뢰성에 대한 만족도이다. 비행제어 시스템은 높은 신뢰도를 요구하는

대표적인 시스템으로 알려져 있다. 높은 신뢰도라 함은 시스템 내부에서 결함 또는 고장이 발생하더라도 전체 시스템 관점에서 고장이 발생하지 않은 것처럼 정상 작동할 수 있음을 의미한다. 이러한 상태를 내고장성(fault tolerant) 이라고 한다.

일반적으로 내고장 설계[1]는 항공[2], 인공위성[3], 철도, 핵시설 등 시스템의 고장으로 인해 상당한 비용/인명 등의 피해를 초래하는 곳에 적용된다. 내고장 설계의 가장 일반적인 방법은 하드웨어를 중복으로 구성하여 시스템의 신뢰도

† 2008년 8월 29일 접수 ~ 2009년 5월 31일 심사완료

* 정희원, 인하대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : kss275@hanmail.net

인천시 남구 용현동 253번지

** 정희원, 울산대학교 항공우주공학부

를 높이는데 있다. 중복구조의 설계는 적용하고자 하는 시스템의 신뢰도 요구조건을 만족시킬 수 있어야 한다. 따라서 적용 가능한 중복구조의 정량적 자료를 바탕으로 비교 분석[4]하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 여러 문헌에서 제시하는 중복구조를 특징에 따라 분류하고 분석하였다. 중복구조의 특징을 분석하는 것은 시스템의 정량적 분석 이전 단계에서 정성적인 신뢰도 분포를 예측할 수 있고, 적용 가능한 시스템인지 판단할 수 있는 근거를 제시한다. 다음으로 중복구조 신뢰도의 정량적 분석을 위해 필요한 신뢰도 분석 모델을 구성하였다. 신뢰도 분석 모델은 직렬 시스템, 병렬 시스템, 대기 시스템으로 구성된다. 이러한 분석 모델을 바탕으로 신뢰도 분석(RBD:Reliability Block Diagram) 도구를 구성하였다. 신뢰도 분석 도구는 Simulink를 기반으로 구성하였으며, 상용도구인 Relx7.5를 이용하여 계산 결과에 대한 타당성을 검증하였다.

II. 본 론

2.1 중복구조의 분류

시스템의 하드웨어 중복구조는 MIL-HDBK-338B[5]의 "Reliability Engineering Design Guidelines"에서 그림 1과 같은 기능적 특징으로 분류된다.

하드웨어 중복구조는 모든 시스템이 동일하게 동작하는 Active 상태와 동작하는 시스템 이외에 동작을 대기하는 여분의 시스템으로 구성된 Standby 구조가 있다. Active 상태의 대표적인 구조는 수동적 성격이 강한 Parallel 구조가 있고, 능동적 성격이 강한 Voting 구조가 있다. 내 고장(fault tolerant) 시스템은 고장의 검출, 고장의 위치 판별, 고장의 분리 그리고 시스템 재구성이 가능해야 한다. 이러한 관점에서 살펴보면 수동적 중복구조는 고장이 발생하였을 경우 시스

템의 재구성은 불가능 하다. 능동적 시스템은 고장 검출에서부터 고장 분리 과정을 거쳐 시스템 재구성이 가능한 상태를 말한다. Standby 상태는 시스템에 전원이 인가되어 항시 정상동작 상태를 유지하는 Hot Spare와 인터페이스만 구성되어 있고 전원은 인가되어 있지 않은 Cold Spare 상태가 있다.

Active 상태의 중복구조에서 중요한 구성요소로는 스위치(switch)와 신호선택기(voter)가 있다. 스위치 구조는 Parallel 시스템의 K of N 구조 또는 2중 병렬구조 시스템에서 주로 사용된다. K of N 구조는 시스템을 구성하는 N개의 모듈 중에서 K개의 모듈이 동시에 동작하고 (N-K)개의 모듈은 동작대기 상태에 있다가 고장발생 모듈을 대신하여 시스템에 결합되는 구조를 갖고 있다. Voting 구조는 3중 구조 이상의 출수개로 구성된 병렬(parallel) 시스템에서 그 능력이 최대로 발휘되므로 2중 병렬 구조 시스템에서는 완전한 voting 구조를 구현할 수 없다.

Standby 구조와 스위치 구조에서는 여분의 시스템이 정상 동작하는데 걸리는 천이 시간이 발생한다. 비행제어 시스템과 같이 짧은 응답특성을 요구하는 시스템에 이러한 구조를 적용해야 할 경우 천이 시간에서의 시스템 반응을 매우 심각하게 고려해야 한다.

이외에 실제 시스템 구성에 가까운 대표적인 중복구조[1]는 다음과 같다. 첫 번째로 여러 검출기가 포함된 N개의 병렬 시스템으로 구성되는 standby sparing 구조가 있다. 두 번째로 고장 검출, 고장 위치 확인, 고장 모듈 회복 작업 또는 예비 모듈로의 교체가 가능한 NMR(N-Modular Redundancy)와 self-pursing redundancy가 있다. 마지막으로, 하드웨어적으로 구성이 쉽고 기계장치 또는 항공기의 조종면 작동기에 사용되는 flux-summing 구조가 있다.

2.2 중복구조의 신뢰도

시스템의 신뢰도(Reliability:R)는 정해진 시간(t) 동안 고장 없이 정상동작하는 확률로써 0과 1 사이의 값으로 표현된다. 이때 고장율(λ)은 지수 분포를 따른다고 가정한다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

시스템의 신뢰도를 분석하는데 있어서 MTBF는 고장간 평균 시간을 나타낸다. 여기서 MTBF =MTTF+MTTR의 관계가 성립하는 것으로 MTBF는 평균 수리 시간이 포함됨을 의미한다. MTTF는 고장이 발생하는 시점까지의 평균 시간을 의

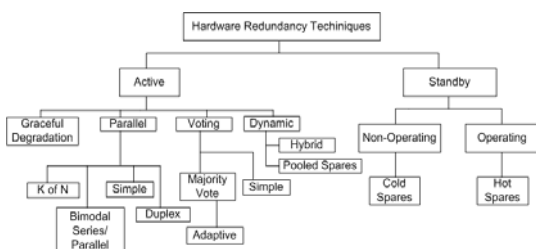


그림 1. 하드웨어 중복구조 분류

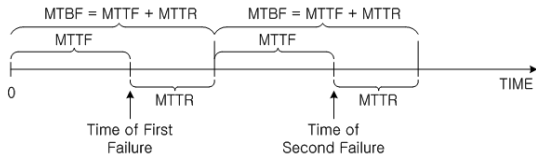


그림 2. MTBF와 MTTR의 관계

미한다. 그림 2는 MTBF와 MTTR의 관계를 나타낸다. MTBF와 MTTF는 엄밀히 구분되어 사용되지만, 첫 번째 고장 발생에 대해 고려할 경우 또는 MTTR=0일 경우 MTBF=MTTF의 조건을 만족하므로, MTBF라는 용어를 일반적으로 많이 사용하게 된다.

MTBF : Mean Time Between Failure,
고장간 평균 시간

MTTF : Mean Time to Failure,
평균 고장 시간

MTTR : Mean Time to Repair,
평균 수리 시간

중복구조의 신뢰도 분석에 필요한 기본모델은 직렬 시스템, 병렬 시스템, 대기 시스템으로 구성된다.

1) 직렬 시스템의 신뢰도

$$R_{SS} = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_N = \prod_{i=1}^N R_i$$

$$= e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_N t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i\right) t} \quad (2)$$

$$MTBF_{SS} = \int_0^{\infty} e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t} dt$$

$$= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{SS} t} dt = \frac{1}{\lambda_{SS}} \quad (3)$$

여기서 t : 시스템 동작 시간
λ : 시스템 고장율

직렬 시스템의 신뢰도 특징은 어느 하나의 부품고장이 전체 시스템의 신뢰도를 결정한다. 따라서 의도된 임무기간 중에 직렬 시스템이 성공적으로 작동하기 위해서는 모든 부품이 정상동작하여야 한다. 직렬 시스템의 구조는 그림 3과 같다. 직렬시스템의 신뢰도는 식 (2)이고, 고장간 평균시간(MTBF)은 식 (3)과 같다.

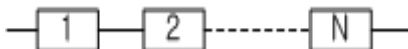


그림 3. 직렬 시스템

2) 병렬 시스템의 신뢰도

병렬 시스템의 신뢰도 특징은 시스템 내의 모든 부품에서 고장이 발생할 경우 시스템 고장으로 발전한다. 따라서 그림 4와 같은 병렬 시스템이 정상 동작하는 상태는 시스템 내에 존재하는 N개의 부품 중 적어도 한 개 이상이 동작하는 상태를 말한다. 병렬 시스템의 신뢰도 모델은 그림 1의 중복구조 분류에서 Active 상태의 중복구조에 대한 신뢰도 분석에 사용된다.

$$R_{SP} = 1 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_N = 1 - \prod_{i=1}^N Q_i$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i) \quad (4)$$

$$R_{SP} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (5)$$

$$MTBF_{SP} = \int_0^{\infty} R_{SP}(t) dt \quad (6)$$

병렬 시스템의 신뢰도 분석은 시스템의 고장 발생 확률을 나타내는 불신뢰도(Q)를 적용하여 표현한다. 불신뢰도는 부품 1에 고장이 발생하고, 부품 2에 고장이 발생하고, 계속 해서 부품 N까지 고장날 확률을 나타내는 것으로 병렬 시스템의 신뢰도는 $R_{SP} = 1 - Q_{SP}$ 와 같이 표현된다. 이때, 각 부품의 고장율이 상수로 주어진다면 병렬 시스템의 신뢰도는 식 (5)이고, 고장간 평균시간(MTBF)은 식 (6)와 같다. 예를 들어 2개의 부품이 병렬 시스템을 구성하고 있을때 고장간 평균 시간은 식 (7)과 같이 표현된다.

시스템을 구성하는 부품의 고장율이 상수일지라도 병렬 시스템인 경우 시스템의 고장율 $\lambda_{SP} \neq 1/MTBF_{SP}$ 임을 주의해야 한다.

$$MTBF_{SP} = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t})] dt$$

$$= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (7)$$

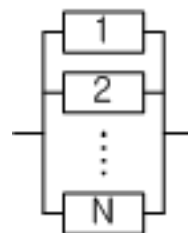


그림 4. 병렬 시스템

3) 대기 시스템의 신뢰도

대기 시스템의 신뢰도 특징은 병렬 시스템과 유사한 구조이지만, 유휴 상태로 대기하고 있는 부품이 존재하고, 고장을 감지해서 전환하는 별도의 추가 장치가 존재한다. 그림 5는 이러한 대기 시스템을 나타내며, 그림 1의 중복구조 분류에서 Standby 상태의 중복구조에 대한 신뢰도 분석에 사용된다. 한 개의 작동중인 부품과 나머지 (n-1)개의 부품이 대기 중인 총 n개의 동일부품들로 구성된 대기 시스템의 신뢰도는 식 (8)이고, 고장간 평균시간은 식 (9)와 같다. 식 (9)는 n개의 동일한 부품으로 구성되어 있어 동일한 고장율($\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$)을 갖고 있고, 고장 감지 및 전환 장치의 신뢰도는 100% 라는 가정이 존재한다.

$$R_{SB} = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!}] \quad (8)$$

$$MTBF_{SB} = \frac{n}{\lambda} \quad (9)$$

중복구조 기본모델에서 3개의 부품으로 구성된 시스템을 구성하여 각 구조에 대한 신뢰도 차이를 비교하면 다음과 같다. 이때 각 모듈의 고장율 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ 이라고 가정한다. 이때 각 중복구조에 대한 고장간 평균시간은 식 (10), 식 (11), 식 (12)과 같고 신뢰도 분포는 식 (13)에서 표현된 것처럼 단순 중복구조 모델에서 대기 시스템의 신뢰도가 가장 높음을 알 수 있다.

$$MTBF_{SS} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} = \frac{1}{3\lambda} \quad (10)$$

$$MTBF_{SP} = \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} \right) + \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \right) = \frac{11}{6\lambda} \quad (11)$$

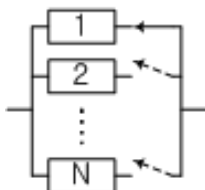


그림 5. 대기 시스템

$$MTBF_{SB} = \frac{3}{\lambda} \quad (12)$$

$$MTBF_{SS} < MTBF_{SP} < MTBF_{SB} \quad (13)$$

2.3 Reliability Block Diagram(RBD)

식 (1)에서 확인할 수 있듯이 신뢰도는 시간에 대한 함수이다. 따라서 시스템의 신뢰도가 시간의 흐름에 따라 어떻게 변하는지 확인할 수 있는 척도가 된다. 이때 Reliability Block Diagram (RBD) 해석기법을 사용한다. 이 기법은 시스템의 단위 모듈을 블록 단위로 정의하고, 시스템의 중복구조를 그래픽으로 구성하여 신뢰도를 분석하게 된다. RBD를 이용한 신뢰도 분석은 설계 초기 단계에서 신뢰도를 만족시키기 위한 시스템 중복구조의 후보를 결정하기 위한 정량적 데이터를 제시할 수 있다.

1) 분석도구 구성 요소

본 논문에서는 신뢰도 분석 도구(RBD)를 Simulink 기반으로 구성하였다. 우선적으로 항공기에 사용되는 비행제어 시스템 구성을 위한 도구로 활용하기 위해 각 모듈은 active 상태에 있다고 가정하였다. 3가지의 기본 모듈 중에서 직렬 시스템과 병렬 시스템 구성은 가능하지만 대기 시스템 구성은 구현할 수 없다. 그림 6은 다중구조 구성을 위해 필요한 6개의 기본 블록을 나타낸다.

- ① Data Store Memory : 신뢰도 분석의 계산 결과를 저장하는 공간이다.
- ② Mux : 다중화 정도를 결정한다. 그림 7에서와 같이 Number of inputs을 3으로 입력하였을 경우 3중 병렬 시스템을 구성하는 것이다.
- ③ Node : 중복구조 해석에 필요한 모델이 구성되어 있다.

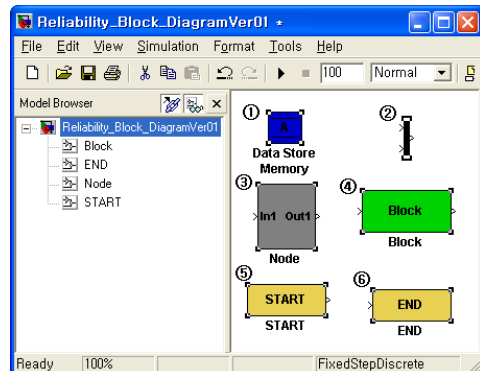


그림 6. Simulink 기본 블록

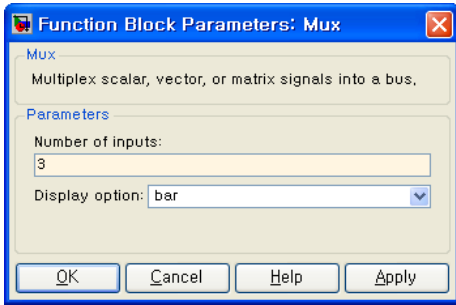


그림 7. 다중화 정보 입력창

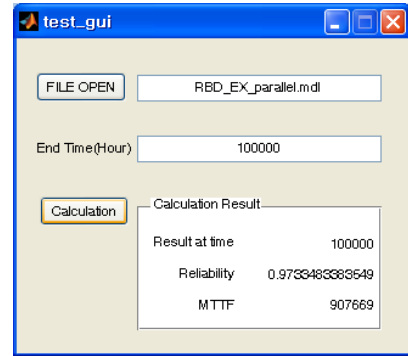


그림 10. 사용자 인터페이스

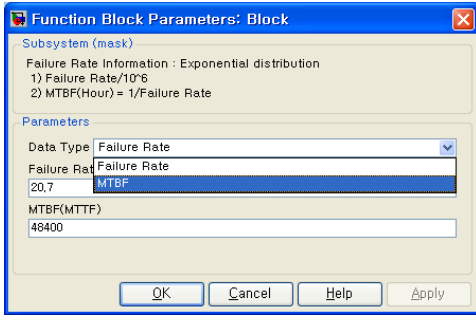


그림 8. 고장을 정보 입력창

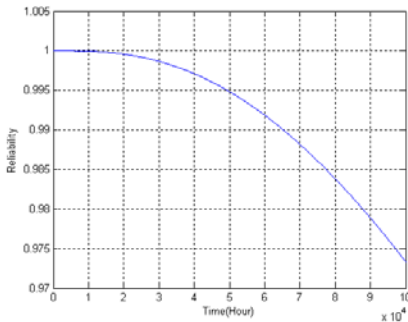


그림 9. 신뢰도 그래프

④ Block : 시스템에서 단위 모듈의 역할을 수행한다. 그림 8에서와 같이 단위 모듈의 고장율(Failure Rate:λ) 또는 고장간 평균 시간을 선택적으로 입력할 수 있다. 고장율과 고장간 평균 시간은 서로 역수 관계에 있다. 그리고 고장율은 10^6 시간이 기본 단위가 된다. 그림 8에서와 같이 고장율이 20.7이라고 입력되어 있으면 10^6 시간 동안 20.7번의 고장이 발생할 수 있음을 말한다. 고장간 평균 시간은 시간(hour)이 기본 단위이다.

- ⑤ START : 시스템의 시작을 나타낸다.
- ⑥ END : 시스템의 끝을 나타낸다.

사용자 인터페이스는 그림 10과 같이 구성되어 있다. 그림 6에 구성된 Simulink 기본 블록을 이용하여 분석하고자 하는 다중화 구조를 구성하고 .mdl 파일로 저장한다. 신뢰도 분석은 시간에 대한 함수이므로 분석하고자 하는 최종 시간을 입력한다. 계산 결과는 최종 시간에서의 신뢰도(R), 고장간 평균 시간(MTBF 또는 MTTF)를 제시하고, 시간에 대한 신뢰도 분포는 그림 9와 같은 그래프로 표현된다.

2) 도구 검증

Simulink 기반의 신뢰도 분석 도구는 상용도구인 Relex7.5 소프트웨어[7]의 RBD 분석 모듈을 이용하여 분석도구로서의 적절성을 파악하였다.

첫 번째로 그림 11과 같이 3개의 모듈이 직렬로 연결된 시스템에 대해서 비교하였다. 두 개의 분석 도구에 의한 계산 결과는 그림 12, 그림 13에 표현된 것처럼 Reliability, MTTF 값이 동일함을 확인할 수 있다.

두 번째로 그림 14와 같이 3개의 모듈이 병렬로 연결된 시스템에 대해서 비교하였다. 두 개의 분석 도구에 의한 계산 결과는 그림 15, 그림 16에 표현된 것처럼 Reliability, MTTF 값이 동일함을 확인할 수 있다.

세 번째로 그림 17과 같이 직렬-병렬 복합 시스템에 대해서 비교하였다. 두 개의 분석 도구에

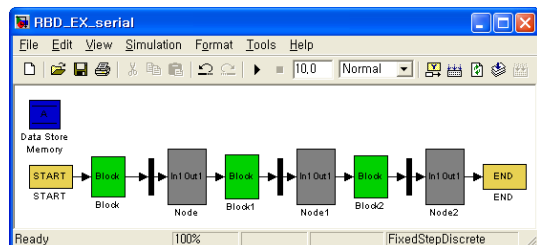


그림 11. 직렬 시스템 구성

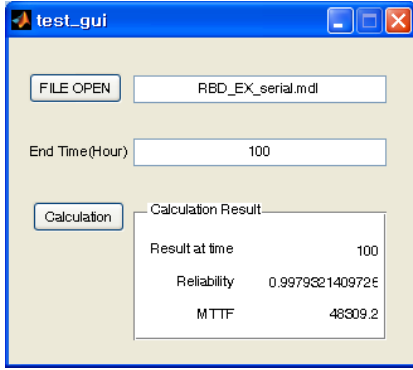


그림 12. Simulink 계산 결과

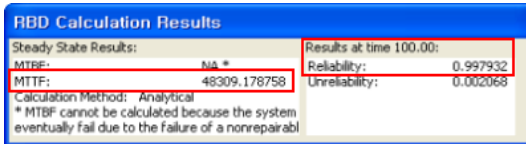


그림 13. Relex7.5 계산 결과

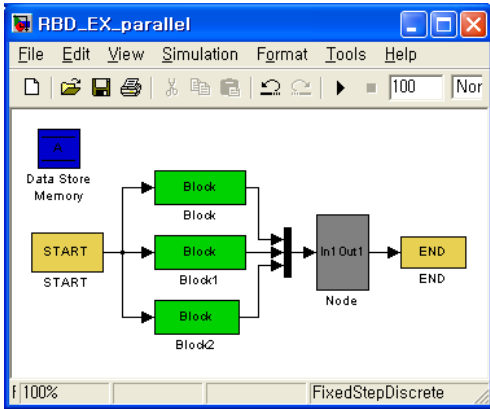


그림 14. 병렬 시스템 구성

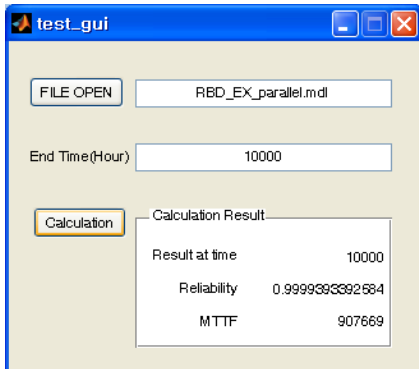


그림 15. Simulink 계산 결과

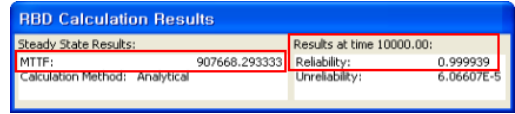


그림 16. Relex7.5 계산 결과

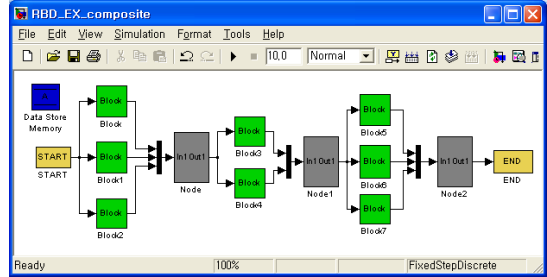


그림 17. 직렬-병렬 복합 시스템 구성

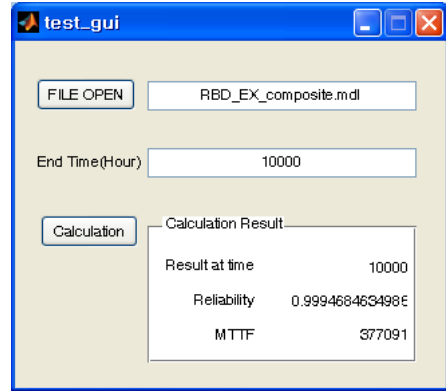


그림 18. Simulink 계산 결과

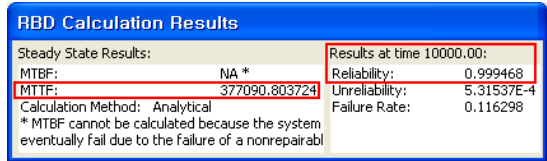


그림 19. Relex7.5 계산 결과

의한 계산 결과는 그림 18, 그림 19에 표현된 것처럼 Reliability, MTTF 값이 동일함을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 크게 active, standby 상태로 분류된 중복구조의 특징을 분석하였다. 중복구조의 분석은 적용하고자 하는 시스템에 실제 구성이

가능한지에 대한 판단을 제공한다. 이를 바탕으로 신뢰도 분석에 필요한 기본 모듈의 해석 모델을 구성하였다. 기본 모듈로는 직렬 시스템, 병렬 시스템, 대기 시스템이 있다. 해석 모델이 포함되어 있는 신뢰도 분석 도구는 Simulink 기반으로 구성하였으며, 상용 도구를 이용하여 결과의 타당성을 검증하였다. 결과 비교에 사용된 구조는 직렬 3중 시스템, 병렬 3중 시스템, 직렬-병렬 복합 시스템이다. Simulink 기반의 신뢰도 분석 도구는 active 상태에 있는 다양한 중복구조 시스템의 신뢰도 분석 도구로서 활용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD070041AD).

참고문헌

- 1) Barry W.Johnson, "Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems", Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 2) 김대직, "비행제어시스템 비행안전성과 다중화관리-3중 다중센서 동시고장 검출 및 분리", 경상대학교 석사학위논문, 2005. 8.
- 3) 김영석, 장영근, 정철오, "통신방송위성 중계기의 신뢰도 분석 및 최적 설계", 한국항공우주학회지, 제30권 제8호, pp. 94-102.
- 4) 남윤수, 홍성경, 유창선, "2중으로 다중화된 FBW/FCS의 다중화 관리", 한국항공우주학회지, 제32권 제10호, pp. 46-52.
- 5) MIL-HDBK-338B, "Electronic Reliability Design Handbook", 1998. 10.
- 6) 김원경 "신뢰도 공학의 이론과 실제", 교우사, 2005. 02
- 7) www.relex.com