

Fault Coverage 요구사항 최적할당을 위한 모델링에 관한 연구

A Study on Modeling for Optimized Allocation of Fault Coverage

황 중 규*, 정 의 진*, 이 중 우*
Jong-Gyu Hwang, Eui-Jin Joung, Jong-Woo Lee

ABSTRACT

Faults detection and containment requirements are typically allocated from a top-level specification as a percentage of total faults detection and containment, weighted by failure rate. This faults detection and containments are called as a fault coverage. The fault coverage requirements are typically allocated identically to all units in the system, without regard to complexity, cost of implementation or failure rate for each units. In this paper a simple methodology and mathematical model to support the allocation of system fault coverage rates to lower-level units by considering the inherent differences in reliability is presented. The models are formed as a form of constrained optimization. The objectives and constraints are modeled as a linear form and this problems are solved by linear programming. It is identified by simulation that the proposed solving methods for these problems are effective to such requirement allocating.

1. 서론

신호제어시스템은 높은 수준의 안전성과 신뢰성이 요구되어진다. 이에 따라 신호제어시스템은 기본적으로 결함허용(Fault-tolerant) 시스템으로 구성되어지게 된다. 이러한 결함허용 시스템의 설계 및 분석에 있어서의 중요한 척도의 하나가 FC(Fault Coverage)이다. 결함허용시스템의 설계 및 평가의 척도로서 FC는 결함 검지(Fault Detection), 결함 국한(Fault Containment), 결함 회복(Fault Recovery) 등 다양하게 적용되어질 수 있으며, 이들 각각은 시스템의 신뢰성과 안전성에 영향을 미치는 중요한 요소들이다[1]-[4].

일반적으로 결함허용 시스템은 시스템의 신뢰성, 안전성 그리고 유지보수를 지원하기 위하여 일정수준 이상의 FC가 요구되어진다. 이 FC를 시스템을 구성하는 유니트들에 할당하는 방법은 일반적으로 모든 유니트에 동일하게 할당하는 방식이 적용되어져 왔다. 하지만 이러한 방식은 각 유니트별로 구현에 있어서의 복잡성, 시스템 전체의 FC 요구사항을 만족시키기 위한 효율성, 각 유니트별 다른 고장률 등이 고려되지 않는 할당방법이다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

본 논문에서는 이러한 다양한 유니트들로 구성되어진 시스템에 있어서 시스템 전체의 FC 요구 사항을 만족하면서 각 유니트별로 효율적으로 FC를 할당하는 방안을 검토하였다. 본질적으로 신뢰도가 각기 다른 여러 유니트에 FC를 최적으로 할당하기 위한 방법으로 간단한 수학적 모델을 제시하고, 이를 통한 최적의 FC 할당 방법을 검토하였다[1][5].

2. Fault Coverage 정의

일반적으로 Fault Coverage(FC)는 결함 검지, 결함 국한, 결함 회복, 결함 위치검지 등을 수행할 수 있는 시스템의 능력으로 정의되어진다. 즉, FC는 다음과 같은 여러 가지의 의미를 복합적으로 포함하고 있고, 또한 경우에 따라 다르게 사용되어지고 있다.

- Fault Detection Coverage :
시스템에서 결함을 검지 할 수 있는 확률
- Fault Location Coverage :
검지 된 결함이 시스템의 어느 유니트에 위치하는지를 검지 하는 확률
- Fault Containment Coverage :
발생된 결함이 다른 유니트로 확산되지 않도록 결함국한시키는 확률
- Fault Recovery Coverage :
결함 발생 후 시스템의 상태를 복원하거나 정상적인 동작상태로 회복시킬 수 있는 확률

이러한 정의에 의하여 높은 FC는 높은 Fault Detection, Containment가 요구되어진다. 이 두 항목이 FC의 가장 중요한 부분이 되며, 본 논문에서는 이 두 가지를 FC 개념으로 사용하고자 한다.

FC의 확률적인 의미는 주어진 결함에 대한 시스템이 결함을 검지하고, 발생된 결함을 다른 유니트로 확산시키지 않는 확률로 정의되어질 수 있으며, 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$C = P (FD, FCo / \text{fault existence}) \quad \text{식(1)}$$

where C : Fault Coverage,

$P (FD, FCo | \text{Fault Existence})$: 임의의 결함에 대한 결함검지 및 국한 확률

FD : Fault Detection

FCo : Fault Containment

3. FC 최적할당을 위한 모델링

고장률이 서로 다른 여러 유니트들로 구성되어진 시스템을 설계함에 있어서 일반적으로 시스템의 FC 요구사항을 만족시키도록 각 유니트들에 동일하게 혹은 적당히 FC를 할당하여 시스템을 설계하여 왔다. 즉, 모든 유니트들을 모두 이중 또는 삼중으로 구성하여 결함검지 및 결함국한 하는 등의 방법으로 결함허용 시스템을 설계하여 왔다. 하지만 표 1처럼 고장률의 편차가 클 경우는 이러한 방법에 의한 시스템 설계는 효율적이지 못하고 시스템의 자원을 낭비하는 측면이 발생할 수 있다.

문제를 일반적으로 생각해보면, 평균보다 높은 고장률을 가진 유닛은 높은 FC 요구사항이 할당되어야 하고, 반대로 평균보다 낮은 고장률을 가진 유닛들은 상대적으로 낮은 FC 요구사항을 할당될 것이다.

따라서 시스템 전체의 FC 요구사항을 만족하면서 서로 고장률이 다른 하부 유닛들에 효율적으로 FC 요구사항을 할당할 수 있는 방안을 필요로 한다.

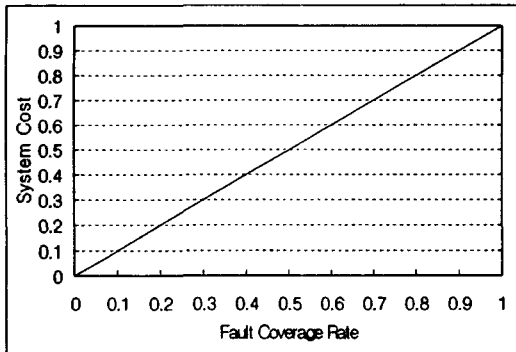
시스템 전체의 FC_{sys} 는 식 (2)처럼 각 유닛들의 상대 고장률(FR_i / FR_{sys})에 따른 각 유닛들의 할당될 FC들을 합한 것으로 정의할 수 있다. FC 요구사항은 당연히 '0 ~ 1' 사이의 값일 것이다. 즉, FC 요구사항이 '1'이면 시스템은 결함이 100 % 검지 되고 또한 다른 유닛으로 결함이 파급되지 않도록 결함국한된다는 것을 의미한다.

$$FC_{sys} = \sum_i \frac{FC_i \times FR_i}{FR_{sys}} \quad \text{식 (2)}$$

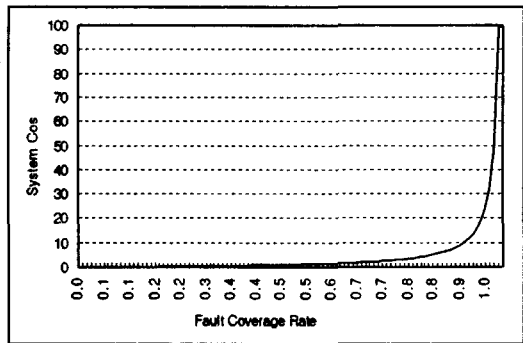
이처럼 각 유닛들에 효율적으로 FC 요구사항을 할당하기 위해서는 제약조건을 갖는 최적화 문제로 귀결된다. 즉, FC 요구사항의 할당에 있어서 시스템 비용을 최소화하는 문제로 모델링 할 수 있다.

이를 위해 직관적으로 LP(Linear Programming)로 문제를 해결할 수 있도록 선형 비용함수를 모델링 할 수 있을 것이다. 즉 LP를 풀기 위한 목적함수를 식 (3) 과 같이 FC 요구사항에 비례하는 시스템 비용으로 가정할 수 있을 것이며, 그림 1 (a)와 같다. 이에 따라 이 FC 요구사항 최적 할당 최적화 문제는 LP로 해결될 수 있다.

$$Cost_L = \sum_n Cost_n = \sum_n FC_i \quad \text{식 (3)}$$



(a) Linear 모델



(b) Non-linear 모델

그림1. 시스템 상대가격 V.S. FC 요구사항

시스템 비용은 FC 가 '1'에 가까워질수록 그림1 (b)처럼 급격하게 증가될 것으로 예상되며, 이를 수식으로 표현하면 식 (4)과 같다. 이 경우 비용함수 모델링은 비선형으로 모델링 되어야 한다. 비록 실제로 그림1 (b)와 같은 추이를 그대로 따르지는 않을 지라도 경우에 따라서는 이러한 비선형 모델이 더 적절할 수도 있을 것이다.

$$Cost_{NL} = \sum_i Cost_i = \sum_i [1/(1 - FC_i) - 1] \quad \text{식 (4)}$$

하지만 FC가 거의 '1'에 근접하는 경우는 실제 제작에 어려움 등 여러 가지 여건 상 실제 구현되기 어려운 경우로 생각할 수 있어, 해석의 편의를 위해 선형으로 모델링하는 것도 크게 무리는 없을 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 식 (3)과 같은 선형 모델링에 의한 LP로 각각 유니트들에 효율적인 FC 요구사항을 할당하여 보았고 이를 기존의 방법과 비교하여 보았다.

- Cost Function

Minimize $Cost_{sys}$

$$Cost_{sys} = \sum_i Cost_i = \sum_i FC_i$$

- subject to

- 1) $FC_{sys} = \sum_i \frac{FC_i \times FR_i}{FR_{sys}} \geq 0.9$
- 2) $0 \leq FC_i \leq (0.95 \text{ or } 1.0)$

where

- FC_i : 각 유니트별 할당될 Fault Coverage Rate
- FC_{sys} : 시스템 전체의 Fault Coverage 총합
- FR_i : 각 유니트의 Failure Rate
- FR_{sys} : 시스템 전체의 Failure Rate 총합
- $Cost_{sys}$: 시스템 전체의 Cost

표1 목적함수와 제약조건

본 논문에서 사용한 목적함수와 제약조건은 표2와 같다. 즉, 선형 비용모델을 최소화하도록 목적함수를 정하였고, 제약조건은 시스템 전체의 FC 요구사항을 '0.9' 이상으로, 그리고 각각 유니트들의 FC 요구사항을 '0.95' 보다 적게 하거나 또는 '1'보다 작게 할당되도록 하였다. 실제 LP 프로그램시 각 유니트들의 고장률도 의도적으로 표2처럼 편차를 크게 하여 FC 할당 결과를 분석하였다.

표2는 각 유니트들의 고장률과 앞에서 설명한 LP에 의한 각 유니트별 할당된 FC 요구사항을 나타낸 것이다. 그리고 그림 2는 이 할당된 값을 그래프로 표시한 것이다. 이 결과에서 보듯이 고장률이 높은 7, 8, 9 유니트들에만 FC 요구사항이 할당되고 상대적으로 낮은 고장률을 가진 '1 ~ 6' 유니트들은 FC가 거의 할당되지 않음을 볼 수 있다. 즉, 고장률이 낮은 유니트들은 FC 요구사항이 할당되지 않았다는 것은 이들 유니트 자체가 고장률이 낮아 일정 이상의 신뢰도를 확보하였음을 의미하며, 7, 8, 9 유니트들은 FC를 높게 할당하여 시스템 전체의 FC요구사항을 만족하도록 하여야 함을 알 수 있다. FC 요구사항이 높게 할당되는 유니트들은 FC 요구사항을 만족하기 위한 별도의 하드웨어 또는 소프트웨어 알고리즘이 필요로 하며, 경우에 따라서는 이중 또는 3중 시스템으로 구성되어져야 하는 등 높은 FC 요구사항을 위한 방법들이 강구되어져야 한다.

표2. 각 유니트별 고장률 및 각각의 FC 할당

Unit	MTBF	FR/FR _{sys}	FR	FC_0.95	FC_1.0	FC_con
1	20,000,000	0.00039	0.05	0.00000	0.00000	0.90
2	10,000,000	0.00078	0.10	0.00000	0.00000	0.90
3	5,000,000	0.00155	0.20	0.00000	0.00000	0.90
4	3,000,000	0.00259	0.33	0.00000	0.00000	0.90
5	1,000,000	0.00777	1.00	0.00000	0.00000	0.90
6	500,000	0.01554	2.00	0.00000	0.00000	0.90
7	200,000	0.03886	5.00	0.26300	0.00000	0.90
8	50,000	0.15542	20.00	0.95000	0.79076	0.90
9	10,000	0.77710	100.00	0.95500	1.00000	0.90
system		1.00	128.68	2.16800	1.79076	8.10

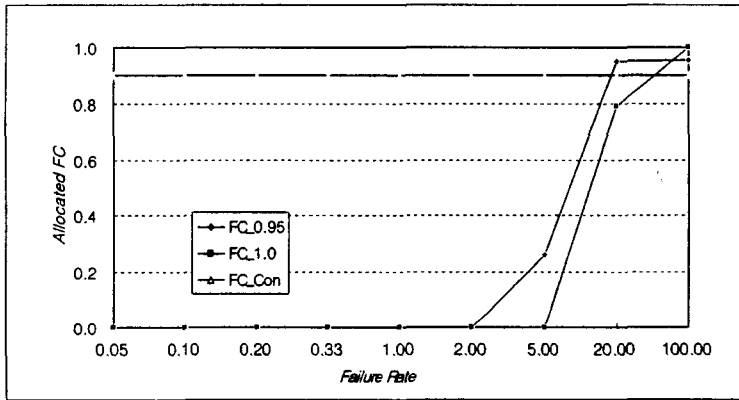


그림2. FC 요구사항 할당

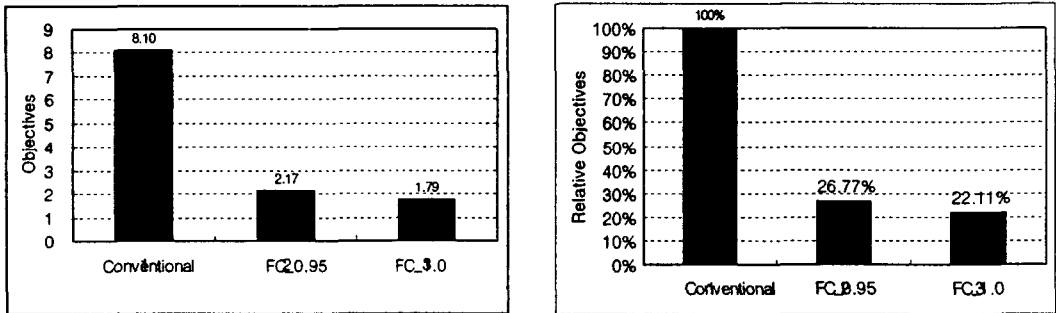


그림3. 각 방법별 시스템 비용의 비교

그림3은 FC 요구사항을 할당하는 방법을 모든 유니트들에 균등하게 할당하는 방법과 LP에 의한 효율적으로 할당하는 방법을 비교하기 위해 시스템 비용을 비교한 것이다. 이 결과로 보듯이 LP에 의한 각 유니트별 최적할당이 균등하게 할당하는 방법에 비해 비용이 약 70 ~ 80 % 줄어들 수 있다. 표 1처럼 각 유니트별 고장률이 매우 널리 분포하는 경우는 최적화 함으로서 시

시스템 비용이 많이 줄어들지만, 고장률이 비슷한 경우를 해석하여 본 결과 약 20% 정도 줄어듦을 확인할 수 있었다.

4. 결론

시스템의 FC를 만족하면서 고장률이 서로 다른 유니트들에 효율적으로 FC 요구사항을 할당하기 위해 시스템 비용과 제약조건을 모델링 하였다. 이러한 방법을 사용함으로써 20 ~ 80 % 정도 시스템 비용이 줄어드는 것으로 분석되었다. 물론 이러한 수치가 바로 시스템 설계에 적용되어지는 않겠지만 서로 고장률이 틀린 유니트들로 구성되어진 시스템의 설계에 있어서 이처럼 제약조건을 갖는 최적화 문제로 해결하는 것이 적절한 해결책이 될 수 있을 것이다.

또한 이러한 방법이 비록 FC 요구사항 할당문제뿐만 아니라 이와 유사한 다른 요구사항을 할당하는 문제에도 적용되어질 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 시스템의 신뢰도가 FC 요구사항 할당을 위한 입력으로 주어졌지만, 비슷한 방법으로 주어진 시스템에 대한 신뢰도 할당을 최적화 하는 문제에도 적용되어질 수 있을 것으로 예상된다.

<참고문헌>

- [1] R. S. Carson, 'An Optimization Strategy for Allocating Fault Detection and Fault Isolation Requirements', 1998.
- [2] B. W. Johnson, 'Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems', Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [3] 김학배, and etc., '디지털 포용 시스템의 개념 및 특성', 대한전기학회지, 제46권 9호, pp. 15-22, 1997.
- [4] A. Ismaeel and R. Bhatnager, 'Test for Detection & Location of Intermittent Faults in Combinational Circuits', IEEE Trans. on Reliability, Vol. 46, No. 2, pp. 269-274, June 1997
- [5] Saul L. Gass, 'Linear Programming Methods and Applications', An International Thomson Publishing Company, 1985.