

컴플렉스 브릿지 시스템의 신뢰도 분석

- Reliability Analysis of Complex Bridge System -

최성운 *

Choi Sung Woon

Abstract

Three general algorithms for evaluating the reliability for complex bridge system are proposed. These methods, such as Keystone, Boolean, Network algorithms are powerful and effective to derive an reliability expression for many practical complex systems. The combination approach of RBD and FTA proposed in this paper provides an effective way to evaluate the functional dependency for applications of FMEA.

Keyword : Keystone, Boolean, Combination Approach

1. 서론

오늘날 고도화로 진행된 정보지식산업에서 시스템의 복잡도는 증가되고 있다. 이 경우 신뢰성 분석 및 평가는 전체 시스템의 계획, 설계 및 운영에서 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 컴플렉스 시스템의 종류로는 통신 시스템에서 다단계 상호연결 네트워크, 컴퓨터 시스템에서 다중 프로세스 시스템 및 프로세스-메모리-스위치, 상업용, 산업용 전자 시스템에서 중요 파워 시스템과, 발전에서 분산제어시스템 등이 있다 [4].

본 연구에서는 기본 모듈이 될 수 있는 컴플렉스 브리지 시스템을 대상으로 신뢰성 설계 엔지니어들이 신뢰성 분석을 효율적이고 효과적으로 실시할 수 있는 Keystone 알고리즘, Boolean 알고리즘, Network 알고리즘 등을 제시하고자 한다.

우선 Keystone 알고리즘은 시스템을 단순한 직렬 구조로 될 때까지 부품으로 분할한다. 서브시스템은 베이스 이론의 기본이 되는 조건부 확률을 시스템의 구조에 중요한 역할을 하는 Keystone 또는 Kynote 부품에 적용하여 이원 구조로 시스템 신뢰도를 계산한다 [5].

둘째 Boolean 알고리즘은 시스템에서 발생 가능한 모든 사상의 조합을 이진수로 표현하여 시스템 신뢰도를 산출한다 [3].

* 경원대학교 산업공학과 교수

마지막으로 Network 알고리즘은 시스템의 고장을 야기시키는 부품의 Cut-Set, 시스템의 기능을 작동시키는 부품의 Tie-Set 등의 최소(Minimal) Network 개념을 이용하여 시스템 신뢰도를 계산한다 [1].

2장에서 기능분석의 도구인 RBD(Reliability Block Diagram) 와 FTA(Fault Tree Analysis)의 동일기능의 연계성을 비교, 설명, 증명한다. 특히 FMFA(Failure Mode Effect Analysis) 적용시 상위, 하위 시스템의 기능 연계 관계를 시스템 작동 관점에서의 RBD, 시스템 고장 관점에서의 FTA를 동시에 적용할 경우 RPN(Risk Priority Number)의 적용이 옹게 이루어 질 수 있다는 것을 제안하였다. 3장에서는 컴플렉스 브릿지 시스템에서 효율적이고 효과적으로 적용가능한 Keystone, Boolean, Network 알고리즘의 단계 및 수차예를 제시하고 감도분석(Sensitivity Analysis)을 실시할 수 있는 신뢰도 중요 지수(Reliability Importance)를 유도한다. 마지막으로 4장에서 결론을 내린다.

기호:

RBD: Reliability Block Diagram

FTA: Fault Tree Analysis

FMEA: Failure Mode Effect Analysis

FBD: Functional Block Diagram

RPN: Risk Priority Number

RI_i : 각 부품의 신뢰도 중요지수

R_s : 시스템의 정 신뢰도(Static Reliability)

R_i : 각 부품의 정 신뢰도

n : 구성 부품의 수

$R_s(t)$: 시스템의 동 신뢰도(Dynamic Reliability)

$R_i(t)$: 각 부품의 동 신뢰도

F_s : 시스템 정 고장도(Static Fault)

k : Keystone 부품

$P(k)$: Keystone 부품이 작동될 확률

$P(s|k)$: Keystone 부품이 작동되는 경우 시스템이 작동될 확률

$P(\bar{k})$: Keystone 부품이 고장날 확률

$P(s|\bar{k})$: Keystone 부품이 고장나는 경우 시스템이 작동될 확률

2. RBD 와 FTA 통합기능접근방법

RBD는 시스템의 작동기능을 중심으로 긍정적 관점에서 시스템의 기능을 직렬, 병렬 구조로 파악하는 방법이다. 이와 대조적으로 FTA는 시스템의 고장기능을 중심으로 부정적 관점에서 시스템의 기능을 OR, AND Gate로 분석하는 기법이다.

따라서 본 연구에서는 시스템의 기능종속(Functional Dependency)관계를 RBD의 직렬, 병렬기능과 FTA의 OR, AND 기능과의 통합연계관계를 사용함으로써 FMEA와 같은 시스템기능을 분해할 시 오류를 적게 하여 올바른 RPN 적용이 가능하도록 한다.

2.1 직렬시스템과 OR Gate

RBD에서 직렬구조는 모든 부품들이 작동되어야 시스템이 작동되는 기능을 가지고 있어 시스템의 신뢰도는 확률의 곱의 법칙(Multiplicative Law of Probability)에 의해 계산된다. 따라서 시스템의 신뢰도는 가장 적은 신뢰도의 부품보다 좋아질 수 없어 가장 약한 체인에 의해 끊어지는 사슬구조에 해당한다.

FTA에서 OR Gate는 부품들 중 하나만 고장나도 시스템이 고장나는 기능을 가지고 있어 시스템의 고장도는 확률의 합의 법칙(Additive Law of Probability)에 의해 산출된다.

증명 예1: 직렬시스템과 OR Gate 기능의 관계

RBD 직렬 시스템: $R_s = R_1 \cdot R_2$: 확률의 곱의 법칙

FTA OR GATE: $1 - F_s = (1 - F_1)(1 - F_2)$

$$F_s = 1 - (1 - F_1)(1 - F_2)$$

$$= F_1 + F_2 - F_1 \cdot F_2 \text{ : 확률의 합의 법칙}$$

기능관계: RBD의 직렬기능과 FTA의 OR Gate 기능은 긍정적, 부정적 측면의 해석관점은 다르나 시스템관점에서 동일한 기능이다.

2.2 병렬시스템과 AND Gate

RBD에서 병렬구조는 부품들 중 하나만 작동되어도 시스템이 작동되는 기능을 가지고 있어 시스템의 신뢰도는 확률의 합의 법칙에 의해 계산된다. 따라서 시스템의 신뢰도는 가장 큰 신뢰도의 부품보다 항상 좋게 나오나 비용, 크기와 타협점(Trade-Off)에 의해 시스템 신뢰도를 결정해야 한다. 병렬시스템의 종류로는 Active Parallel Systems, Parallel / Series System, Active Redundancy System, Standby Parallel System, Shared Load Parallel System 등이 있다.

FTA에서 AND Gate는 모든 부품들이 고장나야 시스템이 고장나는 기능을 가지고 있어 시스템의 고장도는 확률의 곱의 법칙에 의해 산출된다.

증명 예2: 병렬 시스템과 AND Gate 기능의 관계

RBD 병렬 시스템: $= R_1 + R_2 - R_1R_2$: 확률의 합의 법칙

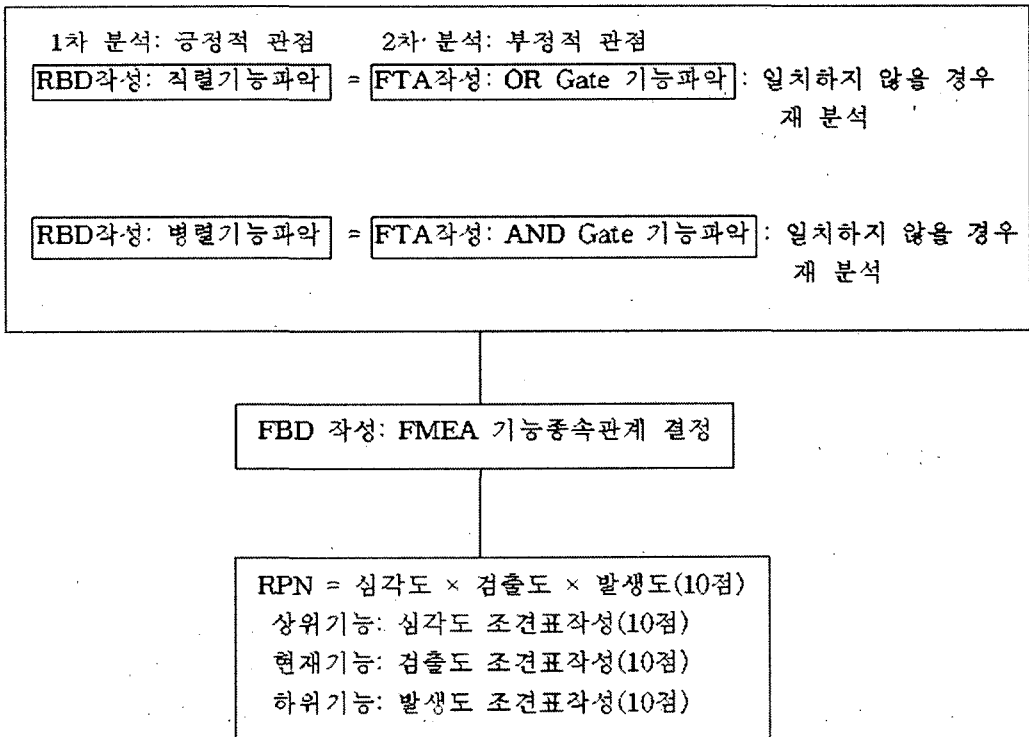
FTA AND Gate: $1 - F_s = (1 - F_1) + (1 - F_2) - (F_1)(1 - F_2)$

$F_s = F_1 \cdot F_2$: 확률의 곱의 법칙

기능관계: RBD의 병렬기능과 FTA의 AND Gate 기능은 긍정적, 부정적 측면의 해석 관점은 다르나 시스템 관점에서 동일한 기능이다.

2.3 FMEA의 적용

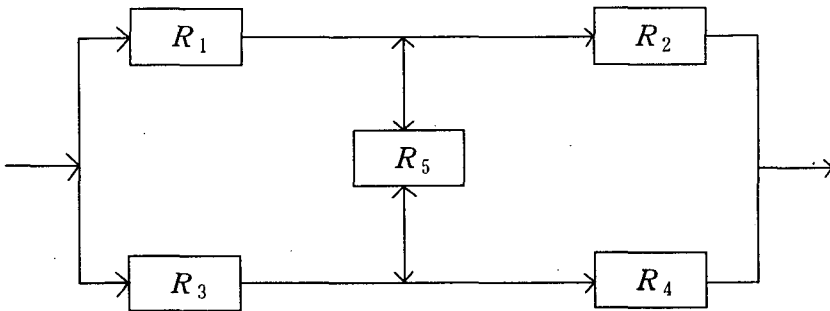
FMEA는 시스템을 분해하여 기능과의 종속성에 의해 시스템의 고장을 줄이려는 방법이다. 고장개념의 우선 순위는 RPN에 의해 결정되는 데 상위기능은 심각도(Severity), 현재기능은 검출도(Detectability), 하위기능은 발생도(Occurrence)를 고려하여 각 10점 만점으로 평가된다. 이 경우 상위, 현재, 하위기능과의 종속성을 제대로 파악하지 못할 경우 FMEA의 RPN 적용이 불가능하거나 그릇된 적용을 수행하게 된다. 따라서 기능의 종속관계를 분석할 경우 < 그림 1 >과 같은 통합기능 접근방법을 제시한다.



< 그림 1 > 통합기능 접근 방법

3. 콤플렉스 브릿지 시스템

본 본문에서 대상으로 하는 콤플렉스 브릿지 시스템의 구조는 < 그림 2 > 와 같다. 시간을 고려하는 경우 동 신뢰도는 $R_s(t), R_i(t)$ 로 표현되며 지수, Weibull, 정규, Gamma, Lognormal, Beta, Rayleigh 분포등이 적용된다. 시간을 고려하지 않는 정신뢰도는 시스템 및 각 부품의 신뢰도를 R_s, R_i 로 표현하며 본 연구에서는 콤플렉스 브릿지 시스템 구조를 간략화하여 효율적이고 효과적인 시스템 신뢰도 분석이 목적이므로 이를 사용하기로 한다 [2].



< 그림 2 > 콤플렉스 브릿지 시스템

3.1 Keystone 알고리즘

3.1.1 단계

단계1: 전체 구조에서 특정 부품을 제거한다면 신뢰도 구조가 직렬, 병렬 구조로 간단해 질 수 있는 부품을 Keystone 또는 Keynote 부품(k)으로 설정한다.

단계2: Keystone 부품이 작동되는 경우와 고장나는 경우로 분해하여 직렬, 병렬RBD를 작성한다.

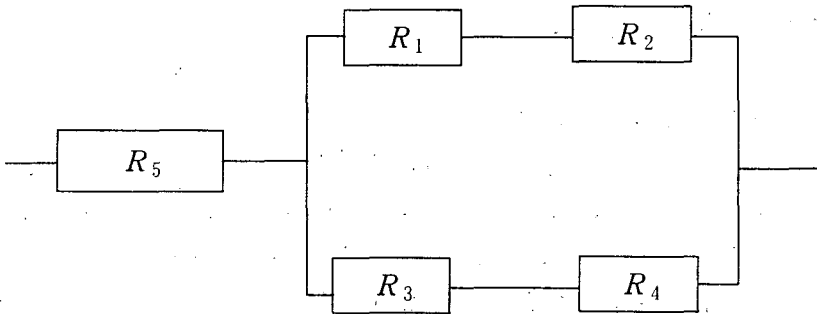
단계3: 직렬, 병렬 RBD 공식과 Bayes 정리를 이용한 조건부 확률공식을 이용하여 시스템 신뢰도 R_s 를 계산한다.

$$R_s = P(k) \cdot P(s | k) + P(\bar{k})P(s | \bar{k})$$

3.1.2 적용예

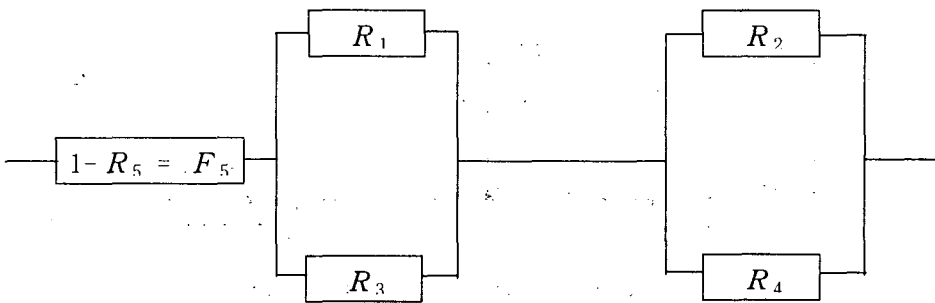
단계1: Keystone 은 부품 5가 된다.

단계2: 1) $P(k) P(s | k)$ 공식 구조



< 그림 3 > a 분해 1의 RBD

2) $P(\bar{k}) P(s | \bar{k})$ 공식구조



< 그림 3 > b 분해 2의 RBD

단계3. $R_s = P(k)P(s | k) + P(\bar{k})P(s | \bar{k})$
 $= R_5 (R_1 + R_2 - R_1R_2)(R_2 + R_4 - R_2R_4)$
 $- (1 - R_5)(R_1R_2 + R_3R_4 - R_1R_2R_3R_4)$

3.1.3 감도분석을 위한 RI_i

신뢰도 중요지수 RI_i 는 각 부품의 신뢰도가 시스템 신뢰도에 영향을 주는 정도를 지수로 나타낸 것으로 신뢰도 감도 분석에 적용된다.

$$R_5 = (R_1R_5 + R_2R_5 - R_1R_3R_5)(R_2R_4 - R_2R_4) - (1 - R_5)(R_1R_2 + R_3R_4 - R_1R_2R_3R_4)$$

$$RI_1 = \frac{\partial R_5}{\partial R_1} = (R_5 - R_3R_5)(R_2 + R_4 - R_2R_4) - (1 - R_5)(R_2 - R_2R_3R_4)$$

$$RI_2 = \frac{\partial R_5}{\partial R_2} = R_5(R_2 + R_4 - R_2R_4) + (R_1R_5 + R_2R_5 - R_1R_3R_5)(1 - R_4) - (1 - R_5)(R_1 - R_1R_3R_4)$$

$$RI_3 = \frac{\partial R_5}{\partial R_3} = -R_1 R_5 (R_2 + R_4 - R_2 R_4) - (1 - R_5)(R_4 - R_1 R_2 R_4)$$

$$RI_4 = \frac{\partial R_5}{\partial R_4} = 1 - R_2 - (1 - R_5)(R_3 - R_1 R_2 R_3)$$

$$RI_5 = \frac{\partial R_5}{\partial R_5} = (R_2 - R_1 R_3)(R_2 - R_4 - R_2 R_4) + (R_1 R_2 + R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4)$$

3.2 Boolean 알고리즘

3.2.1 단계

단계1: 구성부품의 수 n 이 작동할 경우 1, 고장날 경우 0의 모든 경우의 수 2^n 에 대한 이진(Binary)테이블을 작성한다.

단계2: 이진 테이블에서 2^n 개의 경우의 수를 시스템이 작동될 수 있는 경우 확률값을 구하고 더하여 R_s 를 산출한다.

3.2.2 적용예

단계1: $2^5 = 32$ 개의 모든 경우의 수에 대한 이진 테이블을 작성한다.

단계2: 32개의 경우의 수 중 시스템이 작동될 수 있는 16가지의 경우에 대한 확률값을 구하고 더하여 R_5 를 다음과 같이 구한다.

$$R_5 = F_1 F_2 R_3 R_4 F_5 + F_1 F_2 R_3 R_4 R_5 + F_1 R_2 R_3 F_4 R_5 + F_1 R_2 R_3 R_4 F_5 + F_1 R_2 R_3 R_4 R_5 + R_1 F_2 F_3 R_4 R_5 + R_1 F_2 R_3 R_4 F_5 + R_1 F_2 R_3 R_4 R_5 + R_1 R_2 F_3 F_4 F_5 + R_1 R_2 F_3 F_4 R_5 + R_1 R_2 F_3 R_4 F_5 + R_1 R_2 F_3 R_4 R_5 + R_1 R_2 R_3 F_4 F_5 + R_1 R_2 R_3 R_4 F_5 + R_1 R_2 R_3 R_4 R_5$$

3.3 Network 알고리즘

3.3.1 Tie - Set 알고리즘

단계 1 : 시스템의 기능을 작동시키는 부품들의 집합 Tie - Set 을 구한다.

단계 2 : Tie - Set 에 대한 확률의 합의 법칙을 적용하여 R_s 를 구한다.

3.3.2 Tie - Set 적용 예

단계 1 : ie - Set = { $R_1R_2, R_3R_4, R_1R_4R_5, R_2R_3R_5$ }

$$\begin{aligned} R_s &= P \{ R_1R_2 \cup R_3R_4 \cup R_1R_4R_5 \cup R_2R_3R_5 \} \\ &= R_1R_2 + R_3R_4 + R_1R_4R_5 + R_2R_3R_5 - R_1R_2R_3R_4 - R_1R_2R_4R_5 - R_1R_2R_3R_5 \\ &\quad - R_1R_3R_4R_5 - R_2R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_4R_5 + R_1R_2R_3R_4R_5 + R_1R_2R_3R_4R_5 \\ &\quad + R_1R_2R_3R_4R_5 + R_1R_2R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_4R_5 \end{aligned}$$

단계 2 :

3.3.3. Cut - Set 알고리즘

단계 1 : 시스템의 기능을 고장시키는 부품들의 집합 Cut - Set 을 구한다.

단계 2 : Cut - Set에 대한 확률의 합의 법칙을 적용하여 F_s 를 구한다.

단계 3 : $R_s = 1 - F_s$ 를 구한다.

3.3.4 Cut - Set 적용 예

단계 1 : Cut - Set = { $F_1F_3, F_2F_4, F_1F_4F_5, F_2F_3F_5$ }

$$\begin{aligned} F_s &= P \{ F_1F_3 \cup F_2F_4 \cup F_1F_4F_5 \cup F_2F_3F_5 \} \\ \text{단계 2 : } &= F_1F_3 + F_2F_4 + F_1F_4F_5 + F_2F_3F_5 - F_1F_2F_3F_4 - F_1F_3F_4F_5 - F_1F_2F_3F_5 \\ &\quad - F_1F_2F_4F_5 - F_2F_3F_4F_5 - F_1F_2F_3F_4F_5 + F_1F_2F_3F_4F_5 + F_1F_2F_3F_4F_5 \\ &\quad + F_1F_2F_3F_4F_5 + F_1F_2F_3F_4F_5 + F_1F_2F_3F_4F_5 \end{aligned}$$

단계 3 : $R_s = 1 - F_s$

4. 결론

본 연구에서는 통신, 컴퓨터, 전력시스템의 기본 모듈이 되는 컴플렉스 브릿지 시스템에 대한 Keystone, Boolean, Network Tie-Set, Cut-Set 등의 효율적이고 효과적인 알고리즘을 제시하였다. 또한 시스템 신뢰도 설계시 각 부품의 영향도를 조사하는 감도 분석을 위한 신뢰성 향상지수를 유도하였으며 FMEA 기능 종속 관계를 긍정적, 부정적인 양면을 고려하여 검토할 수 있는 RBD 와 FTA 통합기능 접근방법을 제안하였다.

향후 연구로는 MIN(Multistage Interconnection Networks), MPS(Multi-Process System), PMS(Process-Memory-Switch),DCS(Distributed Control System)등 대규모 복잡한 시스템 신뢰도를 분석하기 위한 알고리즘을 개발하기로 한다.

5. 참 고 문 헌

- [1] M.Fotuhi-Firuzabad, " A Novel Approach to Determine Minimal Tie-Sets of Complex Network," IEEE Transactions On Reliability, 53(2004) 61-70.
- [2] P.D.T. O'Conner, Practical Reliability Engineering, John Wiley, NY, 1996.
- [3] J.Tang, "Mechanical System Reliability Analysis Using a Combination of Graph Theory and Boolean Function," Reliability Engineering and System Safety, 72 (2001) 21-30.
- [4] T. Unluyurt, "Sequential Testing of Complex Systems : A Review," Discrete Applied Statistics, 142 (2004) 189-205.
- [5] W. Wang, M.Jiang, "Generalized Decomposition Method for Complex Systems," IEEE, RAMS (2004) 12-17.

저 자 소 개

최 성 운 : 현 경원대학교 산업공학과 교수 재직 중, 한양 대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행하였으며, 2002년부터 1년 반 동안 University of Washington에서 Visiting Professor를 역임 하였음. 주요 관심분야는 자동화 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 컴퓨터·정보통신시스템의 신뢰성 설계 및 분석, RFID시스템에도 관심을 가지고 있음.