

결합 중요도를 이용한 사후보수 우선순위 결정

구훈영¹ · 김영복² · 홍정식³ · 이창훈^{2†}

¹한국전자통신연구원 / ²서울대학교 산업공학과 / ³서울산업대학교 산업정보시스템공학과

Determination of Corrective Maintenance Priorities Using Joint Reliability Importance

Hoon Young Koo¹ · Young Bok Kim² · Jung Sik Hong³ · Chang Hoon Lie²

¹ Electronics and Telecommunications Research Institute, Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-742

² Department of Industrial Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742

³ Department of Industrial Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 151-742

In a large complex system, maintenance priorities for the failed components are important to maintain the system reliability at required level. Commonly used methods of determining maintenance priorities are based on ranking the failed components by using reliability importance measures such as Birnbaum reliability importance, risk achievement worth and F-V importance, etc. In the preceding works, maintenance priorities for the failed components are determined by using such existing measures. In this study, a new method of determining maintenance priorities, which utilizes the joint reliability importance is proposed. By investigating the sign of the joint reliability importance, maintenance priorities obtained by the existing methods are adjusted to yield new revised priorities. The revised maintenance priorities are shown to be more effective than the existing ones from the standpoint of the speed of system recovery. Effectiveness of the proposed method is illustrated by numerical examples.

Keywords: Birnbaum Reliability Importance, Reliability Achievement Worth, Joint Reliability Importance, Maintenance

1. 서론

고신뢰도를 요하는 거대 시스템(예를 들면 원자력 발전소, 화학 공장 등)의 안전성은 사회적인 관심사일 뿐 아니라 경제적인 측면에서도 지대한 영향력을 갖고 있다. 따라서 이러한 시스템의 재해도(risk)를 정량화하기 위해 확률적 안전성 분석(PSA : Probabilistic Safety Assessment)을 수행하고, 또한 시스템의 보수가 필요할 경우 신뢰성의 빠른 회복을 위해 정해진 순위와 절차에 의해 보수를 행하게 된다(Borst *et al.*, 2001; Borgonovo *et al.*, 2003) 원자력 발전소와 같은 시스템을 구성하는 기기나 부품들은 시간이 지남에 따라 노후되는 특성을 가지고 있어 지속적인 시스템 상태의 관찰 및 효과적인 보수

정책 또는 보수 조치가 필요하다. 이러한 시스템 보수 프로그램의 주목적은 시스템의 설계기능 유지, 오동작 기기들의 설계운전능력 회복 등이며, 이러한 목적에 따라 보수를 예방 보수(preventive maintenance)와 사후 보수(corrective maintenance) 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 예방 보수의 특성은 한 번에 여러 개의 기기가 선정될 수 있다는 것이고, 사후 보수의 특성은 보수시마다 시스템의 상태가 서로 다르다는 것이다.

보수업무는 각 대상 시스템의 특성 및 관습에 따라 오랫동안 안 수행되어 온 것이 사실이지만 안전성 및 경제성의 관점에서 최적화된 보수 정책에 관한 연구는 최근에 와서야 이루어지고 있는 실정이다. 특히 보수 정책 결정에 있어, 한정된 자원 및 보수설비에 따라, 어느 기기를 우선적으로 보수해야 하는

† 연락처 : 이창훈, 151-742 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1번지, 서울대학교 공과대학 산업공학과, Tel : 02-880-7176, Fax : 02-873-6486
E-mail : chl@cybernet.snu.ac.kr

2005년 11월 접수; 2006년 08월 수정본 접수; 2006년 09월 게재 확정.

가의 문제가 대두된다. 또한 최근 수행된 다수의 확률적 안전성 분석 보고서들을 보면, 원자력발전소의 경우 내부 사건으로 인한 노심 손상 빈도의 상당 부분을 공통 원인 고장이 차지하고 있는 것으로 나타났다(Vesely *et al.*, 1985). 이는 여러 개의 부품이 동시에 고장나는 상황이 상당히 발생하고 있으며, 제한된 보수자원을 활용한 사후보수에서 보수우선순위의 결정이 시스템 안정성에 있어 더욱 비중있는 문제임을 보여주는 것이라 할 수 있다.

보수 우선순위 결정을 위한 지금까지의 연구는 개별 부품의 중요도만을 고려하여 보수의 우선순위가 정해졌다(Vesely *et al.*, 1994; Boland *et al.*, 1995) 그러나 두 개 이상의 기기를 동시에 선택하여 보수를 한다거나 혹은 특정 기기가 고장났을 경우, 어느 기기가 우선적으로 선택되어 보수되어야 하는지에 대해서는 개별 부품의 중요도만으로는 충분한 분석이 이루어질 수 없게 된다. 또한 위에서 언급한 보수 형태의 특성들은 보수정책 수립시 기기의 개별 중요도만을 이용한 기존의 연구가 매우 미흡함을 나타내며, 이들 특성을 반영한 연구가 매우 필요하다라는 것을 보여준다.

시스템의 특성 및 보수정책의 특성에 의해 발생된 기존 연구의 한계를 극복하기 위해 본 연구는 기기간 결합 중요도를 보수 우선순위 결정에 응용하였다. 이러한 결합 중요도의 응용은 보수 우선순위 결정에 있어서의 효율성을 제고하고, 중복 구조에서의 보수 우선순위 결정 방법을 제시하여 현장에의 직관적 도움과 함께, 확률적 안전성 분석의 한 영역으로 기여할 수 있을 것이다.

2. 중요도 척도

일반적인 확률적 안전성 분석에서는 시스템의 신뢰도 또는 안전성을 분석함과 동시에 각 구성 기기의 기여도를 분석하는 것 또한 중요한 부분이 된다. 각 구성 기기가 전체 시스템의 고장이나 안전성 또는 성능에 어떠한 영향을 주는지를 분석하여 관리의 초점을 맞추기 위해 중요도(importance measures)가 정의되고 적용된다. 이러한 중요도는 관리의 목적이 무엇인가에 따라 여러 가지 형태로 정의되어 연구에 적용되어 왔다. 본 장에서는 PSA에서 일반적으로 널리 쓰이고 있는 Birnbaum 신뢰성 중요도, 위험(Risk) 중요도와 두 기기 조합의 결합 중요도에 대해 기술한다. 또한 기술된 중요도들의 관계와 특성에 따라 비교 정리한다.

본 장에서 사용되는 기호와 기본 가정은 다음과 같다.

(1) 중요도 및 관련 기호

- x_i : 부품 i 의 상태 변수
- p_i : 부품 또는 사상 i 의 신뢰도
- $S(x)$: 시스템의 구조함수

- $R(p)$: 시스템 신뢰도
- F_o : 현재의 시스템 고장 확률
- F_i^+ : 부품 i 가 고장($p_i=0$)일 때의 시스템 고장 확률
- F_i^- : 부품 i 가 완전한 신뢰도($p_i=1$)를 가질 때의 시스템 고장 확률
- B_i^+ : 부품 i 가 완전한 신뢰도($p_i=1$)를 가질 때의 시스템 신뢰도 증가분
- B_i^- : 부품 i 가 고장($p_i=0$)일 때의 시스템 고장확률 증가분
- $MRI(i)$: 부품 i 의 Birnbaum 신뢰성 중요도
- $RRW(i)$: 부품 i 의 고장 감소 효과
- $RAW(i)$: 부품 i 의 고장 증가 효과
- $JRI(i, j)$: 부품 i, j 의 결합 중요도

(2) 기본 가정

1. 부품과 시스템은 작동과 고장의 두 가지 상태만을 갖는다.
2. 모든 시스템은 응집구조(coherent structure)를 갖는다. 응집구조는 시스템의 구조함수가 증가함수이고, 모든 구성 기기 또는 부품이 관련됨(relevant)을 의미한다.
3. 각 부품의 고장확률은 알려져 있다.

2.1 Birnbaum 신뢰성 중요도(Birnbaum Reliability Importance)

시스템의 구조와 구성 부품의 고장 확률/신뢰도가 알려져 있을 때 시스템 상태에 따라 두 가지의 신뢰성 중요도를 정의할 수 있다. 첫째는 시스템이 작동일 때의 부품 신뢰성 중요도로, 대상 부품 i 가 작동이 보장될 때, 즉 $p_i=1$ 일 때, 시스템 신뢰도의 증가분으로 다음과 같이 정의된다.

$$B_i^+ = \Pr[S(x) = 1 | x_i = 1; p] - \Pr[S(x) = 1; p]$$

또한 시스템이 고장일 때의 부품 신뢰성 중요도로, 대상 부품 i 가 고장일 때, 즉 $p_i=0$ 일 때, 시스템 고장확률의 증가분으로 다음과 같이 정의된다.

$$B_i^- = \Pr[S(x) = 0 | x_i = 0; p] - \Pr[S(x) = 0; p]$$

위 두 가지 중요도를 이용하여 신뢰성 중요도는 $MRI(i) = B_i^+ + B_i^-$ 와 같이 표현되고, 아래와 같은 식 (1)을 얻을 수 있다(Birnbaum, 1969; Barlow *et al.*, 1975).

$$MRI(i) = R(p | p_i = 1) - R(p | p_i = 0) \quad (1)$$

이는 편미분식으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$MRI(i) = \partial R(p) / \partial p_i \quad (2)$$

위의 식 (1)은 부품 i 의 시스템 작동에 대한 신뢰성 중요도와 부품 i 의 시스템 고장에 대한 신뢰성 중요도의 차이로 표현되므로, Birnbaum 신뢰성 중요도는 해당 부품의 작동과 고장으로 인한 시스템의 신뢰도 차이를 나타낸다. 이를 이용하면 식 (2)에 부품 신뢰도를 대입하여 간단하게 중요도를 계산할 수 있다.

직렬이나 병렬구조의 경우는 신뢰성 중요도를 쉽게 구할 수 있고, k-out-of-n 구조에서는 부품 i 를 제외한 $n-1$ 개의 부품 중에서 $k-1$ 개의 부품만 작동하면 $S(1_i, x) - S(0_i, x) = 1$ 이므로, 식 (2)를 이용하여 부품의 신뢰성 중요도를 어렵지 않게 계산할 수 있다(Papastravidis, 1987; Jung *et al.*, 1993).

2.2 위험 중요도(Risk Importance)

확률적 안전성 분석(PSA)의 한 부분인 신뢰도 중심 정비(RCM : Reliability Centered Maintenance)에서는 Fussel-Vesely (F-V) 중요도, 위험 증가 효과(RAW : Risk Achievement Worth), 그리고 위험 감소 효과(RRW : Risk Reduction Worth)의 3가지 중요도 분석이 활용되고 있다(Vesely *et al.*, 1994). 이러한 3가지 중요도는 모두 대상 부품이나 사상의 시스템 고장에 대한 위험 수준을 결정하는 것으로 위험 중요도(Risk Importance)라 통합하여 지칭된다. 이러한 위험 중요도는 시스템의 위험(예를 들어 노심 손상)을 통제하고 감소시키려는 설계상의 특징과 유지/보수 작업의 가치를 측정하기 위해 개발되었다.

위험 증가 효과는 현재의 시스템 위험 수준에서 대상 부품 또는 사상의 고장으로 인한 시스템 위험 수준의 증가를 측정하는 것으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$RAW(i) = F_i^+ / F_o \quad (3a)$$

$$RAW(i) = F_i^+ - F_o \quad (3b)$$

식 (3a)는 현재의 위험 수준에 대한 위험 증가의 비율을 나타내며, 식 (3b)는 위험 증가분을 표현하는 것이다. 비슷한 구조와 시스템 신뢰도를 갖는 두 시스템에 대해 동일한 기능을 수행하는 부품 또는 사상에 대한 위험 증가 효과를 비교함으로써 설계상의 문제나 위험 관리상의 문제점을 파악할 수 있을 것이다. 이렇게 정의된 위험 증가 효과는 주로 신뢰도 보증 프로그램, 품질 보증 프로그램과 보수 및 검사 등의 우선순위를 결정하는데 사용된다(Meng, 1996; Vesely *et al.*, 1994; Borst *et al.*, 2001).

위험 감소 효과는 대상 부품의 신뢰도를 완벽하게 보장할 수 있을 때, 현 상태의 위험 수준이 얼마나 감소하는지를 측정하는 것으로 식 (4)와 같이 정의된다.

$$RRW(i) = F_o / F_i^- \quad (4a)$$

$$RRW(i) = F_o - F_i^- \quad (4b)$$

식 (4a)와 식 (4b)는 식 (3)에서 기술한 바와 같은 차이를 갖는다. 이렇게 정의된 위험 감소 효과는 시험(test)의 주기나 복구 능력, 설계 부분의 우선순위나 검사 주기에 대한 우선순위를 정하는데 사용된다.

F-V 중요도(임계 중요도)는 특정 사상이나 부품의 고장이 현재의 시스템 고장에 기여하는 정도를 나타내는 것으로 현재의 시스템 고장 확률에 대한 중요도 측정 대상 부품이나 사상을 포함하고 있는 최소 절단 집합에 의한 시스템 고장의 비율로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$CI(i) = \frac{\partial F}{\partial p_i} \cdot \frac{p_i}{F_o} = 1 - \frac{1}{RRW(i)} \quad (5)$$

식 (5)에서도 알 수 있듯이 F-V 중요도는 위험 감소 효과와 동일한 우선순위를 나타내므로 실질적으로 위험 중요도는 감소 효과와 증가 효과만으로 적용될 수 있다.

2.3 결합 신뢰성 중요도(Joint Reliability Importance)

결합 신뢰성 중요도(JRI : Joint Reliability Importance)는 기존 중요도와 구별되는 척도로, 기존 중요도의 초점이 단일 부품의 시스템 신뢰도에 대한 기여정도를 측정하는 것인 반면, 결합 신뢰성 중요도는 두 부품의 기여도를 측정하는 것으로 각각의 기여도가 아닌 부품 쌍의 결합적인 기여도로 정의된다. 이는 기본적으로 Birnbaum 신뢰성 중요도(MRI: Marginal Reliability Importance)를 기반으로 정의되며, 독립부품에 대해 식 (2)와 비슷하게 다음 식 (6)과 같이 정의된다(Hong *et al.*, 1993; Armstrong, 1995).

$$JRI(i, j) = \frac{\partial^2 R(p)}{\partial p_i \partial p_j} \quad (6)$$

또한 식 (1)을 이용하여 식 (7)도 얻을 수 있다.

$$JRI(i, j) = R(p | x_i = 1, x_j = 1) + R(p | x_i = 1, x_j = 0) - R(p | x_i = 0, x_j = 1) - R(p | x_i = 0, x_j = 0) \quad (7)$$

결국 결합 중요도는 두 부품 i 와 j 의 변화에 대한 시스템 신뢰도의 변화율로 정의되는 기여도를 의미한다.

부품 i 와 부품 j 의 결합 신뢰성 중요도는 다음과 같이 단일 신뢰성 중요도로써 표시할 수 있다(Hong *et al.*, 1993).

$$JRI(i, j) = MRI(j | x_i = 1) - MRI(j | x_i = 0) \\ JRI(i, j) = MRI(i | x_j = 1) - MRI(i | x_j = 0) \quad (8)$$

식 (8)에서 결합 신뢰성 중요도의 부호가 양이 되는 경우를

고려하면 이는 부품 j 가 작동할 때의 부품 i 의 신뢰성 중요도가 부품 j 가 고장일 때의 부품 i 의 신뢰성 중요도보다 크음을 의미한다. 이는 부품 j 에 대해서도 같은 의미를 가지므로 결국 부품 i 와 j 는 서로가 고장일 때보다는 작동일 때 중요하게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 결합 신뢰성 중요도의 부호가 양인 경우 두 부품은 논리적으로 직렬의 구조를 가짐도 쉽게 알 수 있다. 실제로 직렬 구조의 두 부품에 대한 결합 중요도는,

$$\begin{aligned} JRI(i, j) &= MRI(i | x_j = 1) - MRI(i | x_j = 0) \\ &= MRI(i | x_j = 1) - 0 \end{aligned}$$

이 되어, 항상 양의 부호를 가짐을 알 수 있다. 또한 논리적으로 직렬 구조를 갖는다는 것은 구조 함수의 관점에서 보면 두 부품이 동일한 경로 집합에 위치함을 알 수 있다. 따라서 이러한 경우, 두 부품에 대한 보수 조치는 가능하면 동시에 수행하여야 한다. 동시에 보수를 한다는 것은 두 부품을 동시에 작동 상태로 만드는 것인데, 이는 직렬 구조를 생각하면 합리적인 조치임을 알 수 있다. 반대로 결합 중요도의 부호가 음인 경우는 앞서 설명한, 부호가 양인 경우와 대조적인 의미를 가진다. 따라서 이 경우 두 부품은 논리적으로 병렬 구조를 따르며, 구조 함수의 관점에서는 동일한 절단 집합을 형성하므로, 두 대상 부품의 보수 조치는 개별적으로 수행해도 무방함을 알 수 있다. 이상의 결과를 정리하면 <Table 1>과 같다.

Table 1. Interpretations with respect to the sign of joint reliability importance

Sign	Logical structure		Maintenance
	+	Series	Path set
-	Parallel	Cut set	Separate

본 연구는 위의 다양한 중요도 척도들을 이용하여 다수의 기기가 고장난 경우에 사후 보수 우선순위를 결정하는 알고리즘을 제안한다. 신뢰성 중요도나 위험 중요도를 이용한 보수 우선순위는 실제 시스템의 구조적인 측면을 반영하지 못하기 때문에 시스템의 보수에 실제로 적용할 경우 시스템의 회복이 지연되는 경우가 발생하게 된다. 본 연구는 기존 연구의 이러한 문제점을 보완할 수 있는 보수 우선순위 결정 알고리즘을 제안하고 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

3. 사후보수 우선순위 결정 알고리즘

사후보수를 위한 우선순위를 신뢰성 중요도만을 이용하여 결정하면 시스템의 작동가능시간이 최적이지 아닌 경우가 발생하게 된다. 예를 들어 아래 <Figure 1>과 같이 5개의 부품으로 이루어진 시스템을 가정하자.

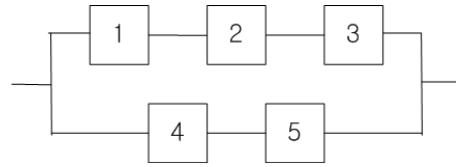


Figure 1. Example system for the proposed algorithm

위 시스템은 현재 1, 2, 4, 5번 부품이 고장이 나서 보수를 하려 한다. 고장난 부품의 신뢰성 중요도는 $1 > 4 > 2 > 5$ 의 순서로 계산되었다. 이 경우 신뢰성 중요도의 크기 순서대로 수리를 할 경우 2번 부품이 수리가 완료되어야 비로소 시스템은 작동을 시작한다. 즉, 3개의 부품이 수리가 된 후에 시스템은 작동을 시작한다. 그러나 위의 예에서 1번 부품이 수리한 후 2번 부품을 수리하게 되면 연결집합이 생성되어 시스템이 작동하게 된다. 즉, 2개의 부품을 수리하고 나면 시스템이 작동함을 의미한다. 반면에 1번 부품과 2번 부품, 그리고 1번 부품과 4번 부품의 결합 신뢰성 중요도를 계산해 보면 1번과 2번은 양수가 나오므로 직렬관계, 1번과 4번은 음수가 나오므로 병렬관계에 있음을 알 수 있고, 직렬관계에 있는 부품들을 먼저 수리할 경우 연결집합의 빨리 만들어지므로 시스템의 가동이 앞당겨질 수 있음을 알 수 있다. 이는 1번 부품 수리 후에는 4번 부품보다 2번 부품을 수리하는 것이 더 나음을 의미한다. 즉, 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 시스템의 구조를 반영하는 것이 시스템 운영에 더 효과적임을 알 수 있다.

이와 같은 사실에서 신뢰성 중요도에 기반한 보수 우선순위만으로는 최적의 시스템 운영을 보장하지 못하며, 결합 신뢰성 중요도를 이용한 우선순위 보정이 필요함을 알 수 있다.

전체 시스템을 구성하는 부품들 중 고장난 부품 집합을 고장 집합, F 라 하고, 이 집합을 대상으로 결정된 보수 우선순위를 M 이라 하자. 예를 들어,

$$F = \{1, 2, 3\}, M = \{2, 3, 1\}$$

이라 하면, 현재 고장난 부품이 1, 2와 3인데 보수는 부품 2, 3, 그리고 1의 순서로 결정된 것을 의미한다. 이런 경우, 새로운 고장 부품이 발생하지 않으면, 결정된 순서대로 보수가 수행된다. 그러나 새로운 부품이, 앞의 예에서, 부품 1의 보수가 완료되기 전에 고장나는 경우, 다시 보수의 우선순위를 결정할 필요가 생긴다. 따라서 보수 우선순위는 새로운 고장 부품 발생 시점마다 재결정되어야 하지만 현실적으로 고장이 발생할 때마다 중요도를 재계산하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 사용한다.

[가정] 사후 보수의 우선순위 결정

- 우선순위는 신뢰성 중요도(MRI), 고장 증가 효과(RAW)와 결합 신뢰성 중요도(JRI)를 이용하여 결정한다.

- (b) 각 부품은 보수 완료시 고장 전의 신뢰도로 복구된다.
- (c) 부품 수리중에는 다른 고장이 발생하지 않는다.
- (d) 모든 부품의 수리시간과 자원 소요는 고려하지 않는다.

가정 (a)는 본 절의 서두에서 언급한 우선순위 결정 중요도에 관한 것으로, 이 방법을 제외한 다른 두 가지의 방법들과의 비교를 통해 결합 신뢰성 중요도의 적용 타당성을 검증한다. 가정 (b)는 최소 수리(minimal repair)를 의미하는 것으로, 일반적인 사후 보수의 유지, 보수 기능을 강조하는 가정이다. 또한, 고장 증가 효과의 산출 과정과 그 의미가 일치하므로 우선순위 결정의 타당성 검증에도 도움이 된다고 할 수 있다. 가정 (c)는 고장으로 인한 부품 상태 변화에 따라 각 중요도의 계산을 다시 해야 할 필요가 있는데, 이러한 재계산은 계산 비용이 시스템 크기 증가에 따라 폭발적으로 증가하므로, 일반적인 확률적 안전성 분석에서는 재계산을 하지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 부품 수리 중에는 다른 고장이 발생하지 않는 것으로 한다. 가정 (d)는 수리 시간이나 자원 소요들을 포함할 경우 추계적 결정 과정이 요구되므로 확률적 접근 방법을 적용하기 위한 가정으로 생각할 수 있다.

이상의 가정과 특성을 이용하여 결합 신뢰성 중요도를 이용한 보수 우선순위를 결정하는 절차를 기술하면 다음과 같다.

(1) 사후 보수 우선순위 결정 절차

• 기호 정의

- F : 고장 집합, $\{n_1, \dots, n_m\}$
- $RAW(n_i)$: 부품 n_i 의 고장 증가 효과
- $MRI(n_i)$: 부품 n_i 의 신뢰성 중요도
- M_{RAW} : 고장 증가 효과에 의한 우선순위 벡터, $\{n_{a1}, \dots, n_{am}\}$, 단, $RAW(n_{a1}) \geq \dots \geq RAW(n_{am})$
- M_{MRI} : 신뢰성 중요도에 의한 우선순위 벡터, $\{n_{r1}, \dots, n_{rm}\}$, 단, $MRI(n_{r1}) \geq \dots \geq MRI(n_{rm})$
- M_{JRAW} : 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정된 M_{RAW} , $\{n_{Ja1}, \dots, n_{Jam}\}$
- M_{JMRI} : 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정된 M_{MRI} , $\{n_{Jr1}, \dots, n_{Jrm}\}$
- $RAW[M_{JRAW}]$: $\{RAW(n_{a1}), \dots, RAW(n_{am})\}$
- $MRI[M_{JMRI}]$: $\{RAW(n_{r1}), \dots, RAW(n_{rm})\}$

(2) 신뢰성 중요도와 결합 신뢰성 중요도를 이용한 사후 보수 우선순위 결정 절차

- 입력: 시스템 고장 나무, 사상 발생 확률, 고장 집합 F
- 단계 1: 신뢰성 중요도에 의한 보수 우선순위의 결정
 - <1.1> 신뢰성 중요도를 이용하여 M_{MRI} 결정.
- 단계 2: 결합 신뢰성 중요도를 이용한 순위 보정(M_{JMRI})

- <2.1> 초기화: $M_{JMRI} = M_{MRI}$ & $k = 1$.
- <2.2> M_{JMRI} 중 결합 신뢰도 중요도 부호가 +인 최초의 부품 위치(x) 탐색: $JRI(n_{Jrk}, n_{Jrx}) > 0, x > k$.
- <2.3> M_{JMRI} 수정: for $k+1 < j \leq x$
 - $n_{Jr(k+1)} = n_{Jrx}$
 - $n_{Jr(j+1)} = n_{Jrj}$
- <2.4> $k = |F| - 2$ 까지 <2.2>와 <2.3> 반복.

이상의 결과로 다음과 같은 출력을 갖는다.

$$- M_{JMRI} = \{n_{Jr1}, \dots, n_{Jrm}\}.$$

(3) 고장 증가 효과와 결합 신뢰성 중요도를 이용한 사후 보수 우선순위 결정 절차

- 입력: 시스템 고장 나무, 사상 발생 확률, 고장 집합 F
- 단계 1: 고장 증가 효과에 의한 보수 우선순위의 결정
 - <1.1> 고장 증가 효과를 이용하여 M_{RAW} 결정.
- 단계 2: 결합 신뢰성 중요도를 이용한 순위 보정(M_{JRAW})
 - <2.1> 초기화: $M_{JRAW} = M_{RAW}$ & $k = 1$.
 - <2.2> M_{JRAW} 중 결합 신뢰도 중요도 부호가 +인 최초의 부품 위치(x) 탐색: $JRI(n_{Jrk}, n_{Jrx}) > 0, x > k$.
 - <2.3> M_{JRAW} 수정: for $k+1 < j \leq x$
 - $n_{Ja(k+1)} = n_{Jax}$
 - $n_{Ja(j+1)} = n_{Jaj}$
 - <2.4> $k = |F| - 2$ 까지 <2.2>와 <2.3> 반복.

이상의 결과로 다음과 같은 출력을 갖는다.

$$- M_{JRAW} = \{n_{Ja1}, \dots, n_{Jam}\}.$$

본 연구에서는 위에서 제안한 우선순위 결정 알고리즘의 타당성을 시스템의 신뢰도 회복 속도를 기준으로 검증하였다. 사후 보수의 경우 고장난 부품들을 모두 수리한 후의 신뢰도는 어떤 방법을 적용하느냐에 관계없이 동일하지만, 부품들의 수리가 진행되는 동안의 신뢰도는 적용하는 보수 우선순위에 따라 차이가 발생하게 된다. 그러므로 보수진행에 따른 신뢰도의 변화를 살펴봄으로써 보수 우선순위의 타당성 또한 검증할 수 있다.

본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 보수 우선순위의 타당성을 검증한다. 시스템의 신뢰도 회복 속도가 빠르다는 것은 각 보수단계별 신뢰도를 비교할 경우 회복 속도가 빠른 보수 순위의 신뢰도가 더 클 것이고, 따라서 각 보수단계별 신뢰도의 합 역시 회복 속도가 빠른 우선순위가 가장 크게 나올 것이다. 그러므로 기존의 보수 우선순위와 본 연구에서 제안한 우선순위들의 보수 단계에 따른 신뢰도 합을 계산하여 본 연구에서 제안한 방법이 회복속도가 빠르다는 것을 보였다. 예를

들면 본 연구에서 제안한 보수 우선순위에 대한 신뢰도는 다음과 같이 계산된다.

$$R_T = \sum_{i \in M_{JRAW}} R_i \quad (9)$$

단, R_T 는 전체 신뢰도의 합을 나타내고, R_i 는 보수 우선순위에 따라 보수를 진행할 경우의 각 단계별 신뢰도를 나타낸다. 기존의 보수 우선순위 방법들과 새로운 방법에 대하여 식 (9)의 값을 계산하여 비교함으로써 본 연구의 타당성을 검증하였다.

4. 보수 우선순위 결정 예제

4.1 직·병렬 구조

아래 <Figure 2>과 같이 직·병렬 구조로 이루어진 시스템을 고장 나무로 표현한 예제를 분석하였다.

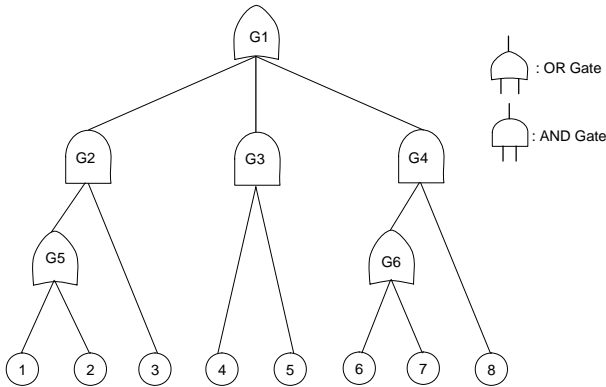


Figure 2. Example system of maintenance priority determination (series-parallel structure)

기본 사상의 사상 발생 확률은 0에서 0.2사이의 값을 난수 발생하였으며 그 결과는 아래 <Table 2>와 같다. 입력 요소인 고장 집합이 $F = \{1, 4, 5, 7, 8\}$ 라고 하면 각 고장난 부품의 신뢰성 중요도와 고장 증가 효과는 아래 <Table 3>과 같다.

Table 2. Failure probability of components

Component	Failure probability of component
1	0.053755303
2	0.186962493
3	0.044428846
4	0.040711692
5	0.025995666
6	0.007208472
7	0.173949400
8	0.077852718

Table 3. Reliability importance and risk growth achievement worth of the failed components

Component	Reliability importance	Risk achievement worth
1	0.035579	0.033666
4	0.025369	0.024336
5	0.039730	0.038697
7	0.076418	0.063126
8	0.177872	0.164024

<Table 3>의 결과를 이용하여 신뢰성 중요도와 고장 증가 효과, 그리고 결합 신뢰성 중요도를 이용한 보수 우선순위 결정은 3장의 단계를 따른다.

• 단계 1 : 신뢰성 중요도에 의한 보수 우선순위의 결정

<1.1> $M_{MRI} = \{8, 7, 5, 1, 4\}$

• 단계 2 : 결합 신뢰성 중요도를 이용한 순위 보정 (M_{JMRI})

<2.1> $M_{JMRI} = \{8, 7, 5, 1, 4\}$ & $k = 1$.

<2.2> ~ <2.4>

($k = 1$)

$n_{f-1} = 8$, $JRI(8, 7) < 0$ 이고 $JRI(8, 5) > 0$ 이므로, $x = 3$ 이고, $n_{f-2} = 5$ 이다.

$$M_{JMRI} = \{8, 5, 7, 1, 4\}.$$

($k = 2$)

$n_{f-2} = 5$, $JRI(5, 7) > 0$ 이므로, $x = 3$ 이고, $n_{f-3} = 7$ 이다.

$$M_{JMRI} = \{8, 5, 7, 1, 4\}.$$

($k = 3$)

$n_{f-3} = 7$, $JRI(7, 1) > 0$ 이므로, $x = 4$ 이다.

$$M_{JMRI} = \{8, 5, 7, 1, 4\}.$$

이상의 결과로 다음과 같은 출력을 갖는다.

$$M_{MRI} = \{8, 7, 5, 1, 4\}$$

$$M_{JMRI} = \{8, 5, 7, 1, 4\}$$

위험 증가 효과를 이용한 보수 우선순위도 신뢰성 중요도를 이용한 우선순위와 같기 때문에 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$M_{RAW} = \{8, 7, 5, 1, 4\}$$

$$M_{JRAW} = \{8, 5, 7, 1, 4\}$$

이상의 결과를 정리하면 아래 <Table 4>와 <Figure 3>과 같다. <Table 4>에서 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정한 방법의 R_T 값이 기존의 방법보다 더 크다는 것을 알 수 있고, <Figure 3>에서 역시 본 연구에서 제안한 방법에 따른 신뢰도 회복 속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 즉 신뢰성 중요도나 위험 증가 효과만을 이용하여 보수 우선순위를 결정하는 것보

다 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보수 우선순위를 보정해 주는 것이 시스템의 신뢰도 회복 속도 측면에서 더 우월함을 알 수 있다.

Table 4. System reliability with respect to each maintenance priority

	MRI	RAW	JMRI	JRAW
1	0	0	0	0
2	0	0	0.858271	0.858275
3	0.917695	0.917695	0.917695	0.917695
4	0.950520	0.950520	0.950520	0.950520
5	0.974856	0.974856	0.974856	0.974856
R_T	2.843071	2.843071	3.701342	3.701346

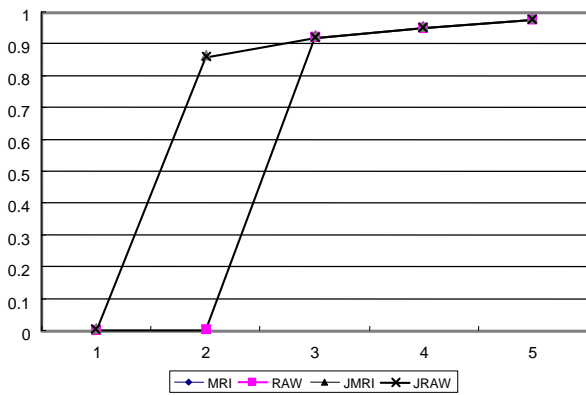


Figure 3. System reliability change with respect to each maintenance priority

4.2 직 · 병렬 구조 및 k-out-of-n 구조

4.1절의 예제보다 복잡한 경우인 <Figure 4>와 같이 k-out-of-n 구조와 병렬 및 직렬 구조로 이루어진 시스템을 고장 나무로 표현한 예제를 분석하였다. 기본 사상의 사상 발생 확률은 0에서 0.1사이의 값을 난수 발생하여 분석하였으며, 입력 요소인 고장 집합이 $F = \{1, 3, 5, 9, 15, 18, 20, 21\}$ 인 경우의

보수 우선순위를 결정하였다.

• 단계 1 : 고장 증가 효과에 의한 보수 우선순위의 결정

<1.1> $M_{RAW} = \{15, 9, 20, 21, 18, 1, 3, 5\}$

• 단계 2 : 결합 신뢰성 중요도를 이용한 순위 보정(M_{JRAW})

<2.1> $M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 21, 18, 1, 3, 5\}$ & $k = 1$

<2.2> ~ <2.4>

($k = 1$)

$n_{Jk1} = 15, JRI(15, 9) > 0$ 이므로, $x = 2$ 이고, $n_{Jk2} = 9$ 이다.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 21, 18, 1, 3, 5\}$.

($k = 2$)

$n_{Jk2} = 9, JRI(9, 20) > 0$ 이므로, $x = 3$ 이고, $n_{Jk3} = 20$ 이다.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 21, 18, 1, 3, 5\}$.

($k = 3$)

$n_{Jk3} = 20, JRI(20, 21) < 0, JRI(20, 18) < 0, JRI(20, 1) > 0$ 이므로, $x = 6$ 이고, $n_{Jk4} = 1, n_{Jk5} = 21, n_{Jk6} = 18$ 이다.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 1, 21, 18, 3, 5\}$.

($k = 4$)

$n_{Jk4} = 1, JRI(1, 21) > 0$ 이므로, $x = 5$ 이고, $n_{Jk5} = 21$ 이다.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 1, 21, 18, 3, 5\}$.

($k = 5$)

$n_{Jk5} = 21, JRI(21, 18) < 0, JRI(21, 3) > 0$ 이므로, $x = 7$ 이고, $n_{Jk6} = 3, n_{Jk7} = 18$ 이다.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 1, 21, 3, 18, 5\}$.

($k = 6$)

$n_{Jk6} = 3, JRI(3, 18) > 0$ 이므로, $x = 7$ 이고, $n_{Jk7} = 18$ 이다.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 1, 21, 3, 18, 5\}$.

이상의 결과로 다음과 같은 출력을 갖는다.

$M_{RAW} = \{15, 9, 20, 21, 18, 1, 3, 5\}$.

$M_{JRAW} = \{15, 9, 20, 1, 21, 3, 18, 5\}$.

신뢰성 중요도를 이용한 우선순위(M_{MRI})와 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정한 우선순위(M_{JMRI})도 비슷한 방법으로

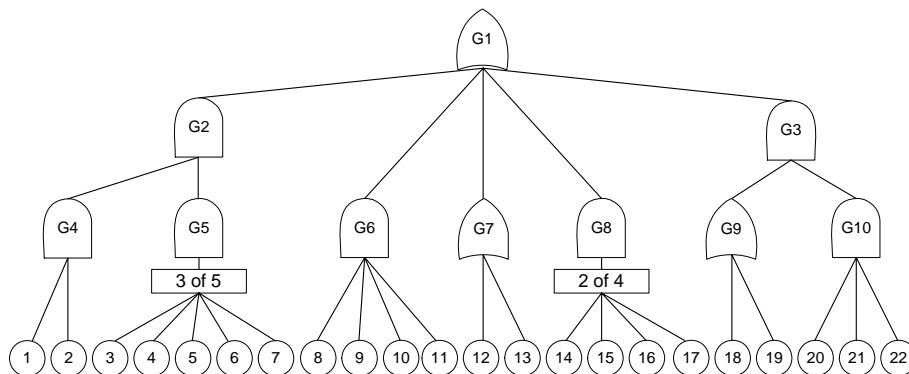


Figure 4. Example system of maintenance priority determination (k-out-of-n structure included)

구할 수 있고 그 결과를 정리하면 아래 <Table 5>와 <Figure 5>와 같다. 앞의 결과와 마찬가지로 신뢰성 중요도나 위험 증가 효과만을 이용하여 보수 우선순위를 결정하는 것보다 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보수 우선순위를 보정해 주는 것이 시스템의 신뢰도 회복 속도 측면에서 더 우월함을 알 수 있다.

Table 5. System reliability with respect to each maintenance priority

	MRI	RAW	JMRI	JRAW
1	0.914030	0.907467	0.914030	0.907467
2	0.914296	0.907636	0.917733	0.907636
3	0.914304	0.916529	0.918000	0.916529
4	0.918008	0.916796	0.918073	0.920242
5	0.918080	0.916804	0.918080	0.920510
6	0.918083	0.920517	0.918083	0.920582
7	0.920422	0.920590	0.920422	0.920590
8	0.920593	0.920593	0.920593	0.920593
R_T	7.337816	7.326932	7.345014	7.334149

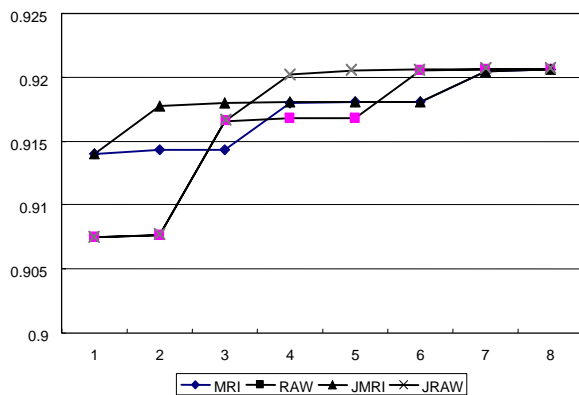


Figure 5. System reliability change with respect to each maintenance priority

앞의 2가지 적용사례를 분석하면서 각 부품의 고장확률을 서로 다르게 100번 생성하여 실험을 진행한 결과, 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정하기 전·후의 결과가 동일한 경우도 각각 26회, 12회 발생하였다. 그러나 이러한 결과 역시 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정하는 것이 기존의 방법에 비해 신뢰도 회복속도를 늦추지는 않기 때문에 보수 우선순위 결정 시 결합 신뢰성 중요도를 이용하는 것이 타당하다 할 수 있을 것이다.

이상의 모의실험 결과들을 정리하면 신뢰성 중요도와 고장 증가 효과만을 사용한 우선순위보다는 결합 신뢰성 중요도를 이용하여 보정한 우선순위가 시스템의 신뢰도 회복 속도가 더 빠름을 알 수 있다. 임의의 두 부품들간의 결합 신뢰성 중요도의 경우 중요도 값의 크기보다는 부호가 의미를 가지고, 부호는 부품들간의 구조에 의해 결정되게 된다. 또한, 시스템 고장

나무에서 그 부호를 알 수 있기 때문에 복잡도(complexity)의 증가없이 시스템의 보수 우선순위 결정에 결합 신뢰성 중요도를 이용할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 결합 신뢰성 중요도를 이용한 보수 우선순위 결정 방법은 기존의 방법들과 같은 시스템 신뢰도의 회복속도를 보이거나, 대부분의 경우에는 더 빠른 신뢰도 회복을 가져올 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 고도의 안전성과 신뢰성을 요구하는 거대 시스템에서, 구성 부품의 상대적 중요도를 평가하여, 시스템의 확률적 안전성을 효율적으로 제고하는 사후보수 우선순위 결정 방법에 대해 제안하였다. 부품간의 상호 관계를 고려한 중요도인 결합 신뢰성 중요도의 부호를 이용하여 보수 우선순위를 수정하는 알고리즘을 3장에서 기술하였고, 제안된 방법이 기존의 단일 중요도를 적용한 방법보다 효율적임을 4장의 예제들을 통해 검증하였다. 이상의 결과는, 사후보수 절차에서의 보수 우선순위 결정 문제와 부품 수준의 중요도 결정 문제 등의 확률적 안전성 분석의 모델로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 중요도 분석의 특성 상, 보수 우선순위 결정 방법이 최적을 보장하지 못하므로, 보다 다양한 상황에 대한 추가적 연구를 통해 상황에 맞는 수정된 순위 결정 방법을 개발하는 것이 필요하겠다. 또한 부품 신뢰도가 확정적이지 않은 경우에 대한 연구도 현실적인 요구에 부합하기 위해서 추후 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- Armstrong, M. J. (1995), Joint reliability importance of components, *IEEE Transactions on Reliability*, **44**, 408-412.
- Armstrong, M. J. (1997), Reliability-Importance and Dual Failure-Mode Components, *IEEE Transactions on Reliability*, **46**, 212-221.
- Barlow, R. E. and Proschan, F. (1975), *Importance of system components and fault tree events, Stochastic Processes and their Applications*, **3**, 153-173.
- Birnbaum, Z. W. (1969), *On the importance of different components in a multicomponents system, Multivariate Analysis-II*, Academic Press, New York, 581-592.
- Boland, P. J. and El-Newehi, E. (1995), Measures of component, 455-463.
- Borgonovo, E., Apostolakis, G. E., Tarantola, S. and Saltelli, A. (2003), Comparison of global sensitivity analysis techniques and importance measures in PSA, *Reliability Engineering & System Safety*, **79**, 175-185.
- Borst, M. V. D. and Schoonakker, H. (2001), An overview of PSA importance measures, *Reliability Engineering and System Safety*, **72**, 241-245.
- Hong, J. S. and Lie, C. H. (1993), Joint reliability-importance of two

- edges in an undirected network, *IEEE Transactions on Reliability*, **42**, 17-23.
- Jung, K. H., H. Kim and Ko, Y. (1993), Reliability of a k-out-of-n : G system with common mode outages, *Reliability Engineering and System Safety*, **41**, 5-11.
- Meng, F. C. (1996), Comparing the importance of system components by some structural characteristics, *IEEE Transactions on Reliability*, **45**, 59-65.
- Papastravridis, S. (1987), The most important component in a consecutive-k-out-of-n : G(: F) system, *IEEE Transactions on Reliability*, **36**, 266-267.
- Vesely, W. E. and Davis, T. C. (1985), Two measures of risk importance and their application, *Nuclear Safety*, **68**, 226-234.
- Vesely, W. E., Belhadj, M. and Rezos, J. T. (1994), PRA importance measures for maintenance prioritization applications, *Reliability Engineering and System Safety*, **43**, 307-318.