

Journal of the  
Military Operations Research  
Society of Korea, Vol. 6, No. 1  
June, 1980

## Fault Tree를 이용한 신뢰성 분석\*\* (Reliability Analysis Using Fault Tree)

李 昶 勲\*  
朴 淳 達\*

### ABSTRACT

An efficient algorithm which can be employed in obtaining the minimal cut sets of a fault tree containing repeated events is introduced. A sample fault tree illustrates this algorithm. Efficiency of an algorithm is defined as the ratio of the number of minimal cut sets to the number of cut sets determined by the algorithm. An efficiency of the proposed algorithm is compared with those of two existing algorithms: Fussell and Vesely's algorithm and Bengiamin et al.'s algorithm. The proposed algorithm is shown to be more efficient than the existing two algorithms.

### I. 서 론

#### I-1. Fault tree 분석기법의 개요

Fault tree 분석기법은 복잡한 시스템의 신뢰성과 안전성 분석을 위하여 매우 유효한 기법으로 등장하고 있다. 1961년 Bell Telephone Lab.의 H. A. Watson에 의하여 이 개념이 소개된 이후, 1974년 미국 Atomic Energy Commission(AEC)의 원자력 발전소에 대한 안전성 연구[6]에 이 기법이 적용된 바 있다. 이후 원자력 공학, 항공학등 여러 분야에서 이 기법은 신뢰성과 안전성 분석을 위한 필요불가결한 기법으로 등장하였고, 이에 대한 연구가 활발히 진행되었다[1-7].

일반적으로 Fault tree를 이용한 시스템의

신뢰성 분석단계는 다음과 같다.

- (1) 분석하려는 시스템을 정의하고
- (2) 시스템에 대한 Fault tree를 작성하여,
- (3) cut set을 결정한 후 minimal cut set을 구하고,
- (4) 기초고장에 대한 정보를 이용하여,
- (5) cut set에 대한 정보를 얻고,
- (6) 최종고장에 대한 정보를 얻는다.

여기서 기초고장(primary failure)은 시스템을 구성하는 기본단위부품의 고장을 의미하고, 최종고장은 시스템의 고장을 의미한다. 시스템에 대한 Fault tree는 이들 고장 사이의 관계를 Boolean algebra logic gate를 이용하여 도해적으로 표현하여 작성된다. 일반적으로 Fault tree 작성에 사용되는 기호는 표-

\* 서울대학교 産業工学科

\*\* 이 논문은 1979년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구된 것임.

1과 같이 작성된 Fault tree의 예는 그림-1과 같다.

Cut set은 최종고장을 유발시키는 기초공정들의 조합으로 구성되는 집합으로, 각 cut set은 기초사상(primary event)들의 intersection으로 표시된다. Cut set중 중복되는 집합

을 제거한 후 남은 cut set을 minimal cut set이라 한다.

Minimal cut set은 최종고장을 유발시키는 필요불가결한 기초고장들의 집합이 되며, 최종고장은 이들 minimal cut set의 union으로 표시된다.

표-1. Fault tree작성에 사용되는 기호

종 류	명 칭	기 호	의 미
Logic 기호	AND logic gate		모든 input이 참일때만 output이 참이 된다.
	OR logic gate		한개 또는 한개 이상의 input이 참이면 output이 참이 된다.
Event 기호	Fault event		기초고장들의 결합으로 이루어진 고장의 상태
	Primary failure		주어진 시스템의 기초고장
	Diamond		아직 분석되지 않은 고장의 상태
	Transfer		전개되는 logic gate에서 다른 gate로 나가는 사상
다른 logic gate로 진출되었다가 계속되는 logic gate로 투입되는 사상			

I-2. 문제점

본 연구에서는 Fault tree의 분석단계중 특히 주어진 Fault tree로 부터 minimal cut set을 구하는 문제를 다루고자 한다.

Minimal cut set을 구하는 통상적인 방법으로 Fussell과 Vesely의 algorithm [2]이 있다. 여기서는 tree의 top gate로 부터 시작하여 차례로 내려가면서 각 gate를 그 gate에 대한 input gate 또는 input 기초사상으로 대체해나가 cut set들이 기초사상으로만 표시될 때까지 계속한다. minimal cut set은 결정된 cut set들을 차례로 비교하여 중복되는 set을 제거시켜 구한다. 이 방법에서는 중복되는 cut set들이 대량 구해진 후 minimal cut set을 구하기 위하여 상당수의 set가 제거되어야 하므로 불필요한 노력의 낭비가 따르게 된다.

Bengiamin et al. [1]은 반복사상(repeated

event)을 처리해 주는 algorithm을 소개한 바 있다. 여기서 반복사상이란 Fault tree에 두 번 이상 나타나는 기초사상을 의미하고, 반복사상과 함께 OR gate에 input인 기초사상이 반복사상의 짝사상이라 한다. Bengiamin et al.의 방법 [1]에서는 OR gate에 input인 반복사상을 tree에서 일단 제거한 후 Fussell과 Vesely의 algorithm을 적용하여 minimal cut set의 일부를 구한다. minimal cut set의 나머지는 제거되었던 반복사상을 대응되는 짝사상에 대입하여 구하게 된다.

이 algorithm에 의하여 결정되는 cut set의 수는 Fussell과 Vesely의 algorithm을 적용할 때보다 상당히 줄어들게 되어, computation 관점에서 이 algorithm이 Fussell과 Vesely의 방법보다 효율적이다.

본 연구에서는 algorithm에 의하여 결정되는 cut set의 수의 관점에서 Fussell과 Vesely의 방법이 보다 효율적이다.

본 연구에서는 algorithm에 의하여 결정되는 cut set의 수의 관점에서 Fussell과 Vesely의 방법이나 Bengiamin et al.의 방법보다 더 효율적인 algorithm을 제안하고자 한다.

## II. ALGORITHM

1. Top gate에서 순서대로 내려가면서 기초사상을 input으로 갖는 OR gate만 남겨두고, input으로 gate를 갖는 OR gate와 input으로 gate 또는 기초사상을 갖는 모든 AND gate를 대체해 나간다. 여기서 AND gate에 대한 input은 한 set으로 나열하고, OR gate에 대한 input은 별개의 set으로 나열한다.

2. 중복되는 set을 제거한다.

3. 각 반복사상에 대하여 step 2에서 얻어진 set에 반복사상을 input으로 갖는 OR gate를 반복사상으로 대체하여, 중복되는 set은 제거하고 나머지 set은 step 2에서 얻어진 set에 추가시킨다.

4. 대체된 반복사상은 고려대상에서 제외시키고 나머지 반복사상에 대하여 차례로 step 3을 적용시킨다.

5. 누적된 set에 남아있는 OR gate를 각 gate가 갖는 반복사상의 짝사상으로 대체한다.

6. 중복되는 set을 제거시키면 나머지 set가 minimal cut set이 된다.

## III. ALGORITHM의 적용

그림-1의 Fault tree에 algorithm을 적용

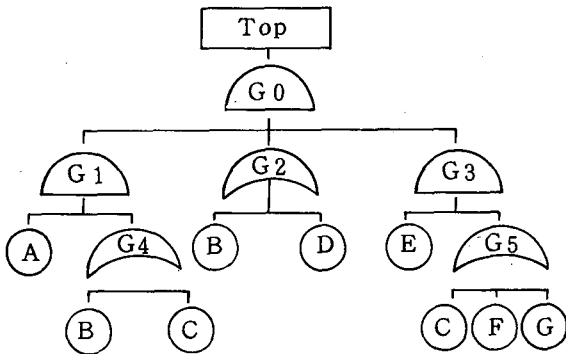


그림-1. Sample fault tree

해 보면 다음과 같다. 여기서 반복사상은 B와 C이고, B의 짝사상은 C와 D, C의 짝사상은 F와 G가 된다. 이 경우 반복사상 B의 짝사상 C는 다른 반복사상이 됨을 알 수 있다

(1) Top gate G0가 AND gate이므로 G0에 대한 input gate를 한 set으로 나열하면

$$(G1, G2, G3)$$

를 얻는다.

(2) G2는 기초사상을 input으로 갖는 OR gate이고 G1과 G3는 AND gate이므로, step 1에 의하여 우선 G1과 G3를 각각의 input으로 대체하면

$$(A, G4, G2, E, G5)$$

를 얻는다.

(3) G2, G4, G5는 기초사상을 input으로 갖는 OR gate이고 (2)에서 중복되는 set가 없으므로, step 3에 의하여 반복사상을 처리한다.

(3-a). 우선 반복사상 B를 고려한다.

B는 G2, G4의 input이므로 G2, G4를 각각 B로 대체하면

$$(A, B, B, E, G5)$$

를 얻고 여기서 중복되는 B를 제거하면

$$(A, B, E, G5)$$

를 얻는다. 이 set을 (2)에서 얻어진 set에 추가시키면

$$\left( \begin{array}{l} (A, G4, G2, E, G5) \\ (A, B, E, G5) \end{array} \right)$$

를 얻게된다.

(3-b). 다음에 반복사상 C를 고려한다. C는 G5의 input이므로 (3-a)에서 얻어진 set에 G5를 C로 대체하면

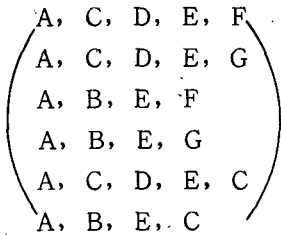
$$\left( \begin{array}{l} (A, G4, G2, E, C) \\ (A, B, E, C) \end{array} \right)$$

를 얻는다. 이 set를 (3-a)에서 얻어진 set에 추가시키면

$$\left( \begin{array}{l} (A, G4, G2, E, G5) \\ (A, B, E, G5) \\ (A, G4, G2, E, C) \\ (A, B, E, C) \end{array} \right)$$

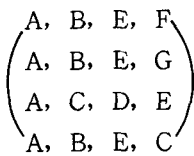
를 얻게된다.

(4) 반복사상이 전부 처리되었으므로 step 5에 의하여 (3-b)에서 얻어진 set에서 각 OR gate를 각 gate가 갖는 반복사상의 짝사상으로 대체시켜 준다. 즉 G2는 D로, G4는 C로, G5는 F와 G로 대체시켜 주면



를 얻게된다.

(5) 여기서 다섯번째 cut set (A, C, D, E, C)에서 중복되는 C를 제거하면 (A, C, D, E)가 된다. step 6에 의하여 첫번째와 두번째 cut set (A, C, D, E, F)와 (A, C, D, E, G)는 (A, C, D, E)에 포함되므로, 첫번째와 두번째 cut set은 제거시킨다. 따라서 minimal cut set은



로 구해진다.

#### IV. 기존 ALGORITHM과의 비교

그림-1의 Fault tree에 대한 minimal cut set을 구하는 데 본 algorithm을 적용하면 6개의 cut set이 구해진 후 이로부터 4개의 minimal cut set이 구해졌다. Fussell

과 Vesely의 algorithm과 Bengiamin et al.의 algorithm을 그림-1의 Fault tree에 적용하여 cut set을 구해본 결과 각각 12개와 8개의 cut set이 구해졌다.

각 algorithm의 효율을

효율 =  $\frac{\text{minimal cut set의 수}}{\text{algorithm에 의하여 결정되는 cut set의 수}}$ 로 정의하여 본 algorithm과 기존 두 algorithm의 효율을 비교해 보면 표-2에 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안되는 algorithm의 효율이 기존 두 algorithm의 효율보다 좋은 것으로 나타났다.

특히 본 algorithm을 기존 두 algorithm과 다음과 같은 세가지 경우에 대하여 비교해 보았다. 즉

Case 1 : 모든 반복사상이 OR gate에 input이고 짝사상이 반복사상이 아닌 경우

Case 2 : 반복사상이 AND gate의 input인 경우

Case 3 : 모든 반복사상이 OR gate의 input이고 짝사상이 반복사상이 되는 경우

각 경우를 반영시켜 주는 Fault tree에 대하여 cut set의 수에 의한 각 algorithm의 효율분석을 해본 결과는 표-3과 같다. 이 분석에 의하면 세가지 경우 모두 Fussell과 Vesely의 algorithm의 효율이 가장 낮게 나왔다. Case 1의 경우 본 algorithm과 Bengiamin et al.의 algorithm의 효율은 동일하게 나타나고 case 2와 case 3의 경우에는 본 algorithm이 Bengiamin et al.의 algorithm보다 더 효율적인 것으로 나타났다.

표-2. 그림-1의 fault tree에 대한 세 algorithm의 효율비교

Algorithm	결정되는 cut set의 수	minimal cut set의 수	효 율
Fussell and Vesely	12	4	4/12
Bengiamin et al.	8	4	4/8
Proposed	6	4	4/6

표-3. 세가지 경우에 대한 세 algorithm의 효율비교

case	gate 수	기초사상수	반복사상수	minimal cut set의 수	Algorithm	결정된 cut set의 수	효 율
1	4	5	1	2	Fussell and Vesely	4	2 / 4
					Bengiamin et al.	2	2 / 2
					Proposed	2	2 / 2
2	5	8	2	2	Fussell and Vesely	6	2 / 6
					Bengiamin et al.	5	2 / 5
					Proposed	3	2 / 3
3	6	9	2	4	Fussell and Vesely	12	4 / 12
					Bengiamin et al.	5	4 / 5
					Proposed	4	4 / 4

### V. 결 론

본 연구에서는 주어진 Fault tree에 대한 minimal cut set을 효율적으로 구하는 algorithm을 소개하였다. 반복사상을 처리하여 algorithm에 의하여 결정되는 cut set의 수를 줄여 주는 착상은 Bengiamin et al.의 algorithm과 유사하다. 그러나 반복사상이 AND gate의 input인 경우나 반복사상의 짝사상이 다른 반복사상이 되는 경우에는 algorithm에 의하여 결정되는 cut set의 수의 관점에서 본 algorithm이 Bengiamin et al.의 algorithm보다 효율적인 것으로 나타났다.

### 참고문헌

[1] Bengiamin, N. N., Bowen, B.A., and Schenk, K.F., "An Efficient Algorithm for Reducing the Complexity of Computation in Fault Tree Analysis", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-23, No. 5, pp 1442-

1446, Oct. 1976.  
 [2] Fussell, J.B. and Vesely, W.E., "A New Methodology for Obtaining Cut -Sets for Fault Trees", Trans, American Nuclear Society, Vol. 15, No. 1 pp. 262 - 263, June 1972 .  
 [3] Garribba, S., Mussio, P., Naldi, F., Reina, G., and Volta, G., "Efficient Construction of Minimal Cut Sets from Fault Trees", IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-26, pp. 88 - 94, June 1977 .  
 [4] Semanderes, S.N., "ELRAFT' A Computer Program for the Efficient Logic Reduction Analysis of Fault Trees", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-18, No. 1, pp. 481 - 487, Feb. 1971 .  
 [5] Vesely, W.E., "A Time-Dependent Methodology for Fault Tree Evaluation", Nuclear Engineering and Design, Vol. 13, No. 2, pp. 337-360, 1970.

- [6] WASH-1400, "Reactor Safety Study-  
An Assessment of Accident Risks  
in U.S. Commercial Nuclear Power  
Plants", USAEC, Aug. 1974 .
- [7] Worrell, R.B. and Burdick, G.R.,

"Qualitative Analysis in Reliability  
and Safety Studies", IEEE Trans .  
on Reliability, Vol. R-25, No. 3,  
pp. 164 - 170, Aug. 1976 .