《研究論文》

Journal of the Human Engieering Society of Korea
Vol, No. 2 Dec. 1982

人間失手를 고려한 重複시스템의 信賴度 分析

(Reliability of the Redundant System With Dependent Human Error)

金 明 基† 張 舜 興†

Abstract

There is the possibility that human error during testing and maintenance brings about the failure of the system, the reliability of which depends on mechanical failure and human error. This paper deals with the calculation of the reliability of the redundant system with the dependent human error through Karnaugh Map. Two cases are considered. One is the reliability of the system neglecting the test interval of each component and the other is that considering the test interval of each component.

1. 서 론

原子力発電所에는 많은 安全保護시스템 들이 있다. 시스템들은 正常상태에서는 동작을 하지 않고 위험상태가 발생하였을 때 동작을 하게 되어있다. 이런 시스템들은 安全性 면에서 매우 重要하므로 周期的으로 대개 한달에 한번씩 검사를 받고 있다.

시스템의 주기적 검사 시 검사자의 人間失手(Human Error)로 인하여 시스템의 상태가 故障상태로 되는 수가 있다. 따라서 시스템의 信賴度는 人間失手와 部品의 機械的 故障의 頻数로 나타내 질수 있다. [1] 또 人間失手는 같은 方法으로 検査하므로 각 部品에서 발생하는 人間失手는 서로 의존성(Dependence)을 갖고 있다. [2]

시스템의일부로써 밸브(Valve)를 고려하면 検査時 人間失手가 발생하여 시스템에 미치는 영향은 다음과 같다. 밸브가 正常狀態에서 개방(Open)상태라 했을 때 検査者가 検査 후 폐쇄(Closed) 상태로 놓았다면 오히려 검사로 인하여 시스템을 故障상태로 초래하는 결과를 낳는다. (이는 원자력 발전소의 가장 큰 사고였던 TMI 사고의 한 요인이었다.) 検査 이전에 밸브가 故障상태였을 때 検査時 検査者가 故障상태를 발견하지 못 했을때도 시스템은 故障상태가 된다. 또 人間失手는 보수수리에서 일어날 수 있는 사건도 포함하고 있다.

이 논문에서는, 시스템의 불록다이어 그램(Block-Diagram) 人間失手를 人間失手가 일어 날 수 있는 部品마다 직렬로 연결하여 経路집합(Path-Set)을 구하여 카르노 맵(Karnaugh-Map)에 적용, 의존성 人間失手를 고려 可略化(Reduction)시켜 전체시스템의 信賴度를 구하였다. [3, 4, 5, 6]

Ⅲ에서는 각 部品에 필요한 検査時間을 무시했을 경우 2중1 시스템 그리고 3중1 시스템, 3중2 시스템에 대해서 계산하였다.

† 韓国科学技術院 核工学科

Ⅳ에서는 각 部品에 필요한 檢査時間을 고려했을 경우 2중의 1 시스템, 3중 1 시스템에 대해서 계산하였다.

Ⅱ 가정 및 기호

(1) n중k 시스템 : 부품 n개 중 임의의 부품 "k"개가 作動하면 시스템은 作動한다.

(2) 檢査 方法은 각 週期에 관계 없이 일정한 순서로 檢査되며 연속적으로 수행한다.

(3) 人間失手는 檢査者에게 주어진 본연의 임무를 수행 못했을 때 발생한다고 정의한다.

(4) 人間失手가 발생했을 때 그 部品은 故障상태로 되며 檢査時 部品에 機械的 손상은 주지 않는다.

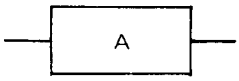
(5) 의존성 人間失手는 다음과 같이 표현한다.

r_0: 한 檢査구간 내에서 人間失手가 처음으로 발생할 확률.

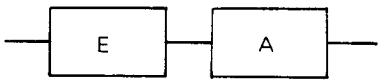
r_i : $i=1, 2, \cdots\cdots, (n-1)$ 한 檢査구간 내에서 인간 실수가 i번 발생했을 때 지금 檢査하는 部品에 人間失手가 발생할 확률.

(6) 部品의 블록 다이어그램에 인간실수를 고려했을 때 그림 1과 같다.

(7) 카르노 맵의 변수는 가로에 部品의 機械的 고장을 표시했으며 세로에는 인간 실수 사상을 표시했다.



(a) 인간실수를 고려하지 않았을 때



(b) 인간실수를 고려했을 때

그림 1 블록 다이어그램의 모델링

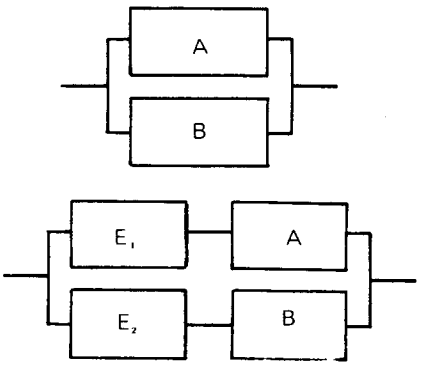
(E : 부품A에서 인간실수가 일어나지 않는 사상)

(8) 부울(Boolean) 정의역에서 부울변수는 알파벳 소문자(a, b, c, d, e_1, e_2 … …)로 표시하여 經路 집합(Path-Set) 표현했고 각 部品의 신뢰도는 R_i (i=a, b, c…)로 표시했다.

Ⅲ. 檢査時間을 무시했을 경우의 모형 및 결과

(i) 2중 1 시스템

2중 1 시스템을 그림 2와 같이 모델링 할 수 있으며 표 1에서 ①, ②, ③부분으로 카르노 맵을 간략화하면 전체 시스템의 신뢰도는 아래와 같다.



E_1 : 검사시 부품A에서 인간실수가 일어나지 않는 사상

E_2 : 검사시 부품B에서 인간실수가 일어나지 않는 사상

그림 2 2중 1 시스템의 모델링

① $= (ab+a\bar{b}) \cdot \{ (1-r_0)^2 + r_0(1-r_0) \} = a(1-r_0)$

② $= r_0(1-r_1)\ (\bar{a}\,b+ab) = b(1-r_1)r_0$

③ $= (1-r_0)^2 \bar{a}b$

$R = ① + ② + ③$

$= R_a(1-r_0) + R_b r_0(1-r_1) + (1-R_a) \cdot R_b \cdot (1-r_0)^2$ …… (식1)

e_1e_2 \ ab	00	01	11	10	인간실수 확률
00	0	0	0	0	$r_0 r_1$
01	0	② 1	1	0	$r_0(1-r_1)$
11	0	③ 1	① 1	1	$(1-r_0)^2$
10	0	0	1	1	$(1-r_0)\,r_0$

표 1 2중 1 시스템의 인간실수를 고려한 카르노 맵

(예) 人間失手가 발생하지 않을 때

$r_0 = r_1 = 0$

$$R = Ra + (1 - Ra) \cdot R_b$$
$$= Ra + R_b - Ra \cdot R_b$$

(ii) 3중 1 시스템

그림 3에서 인간실수를 고려한 시스템의 모델링을 나타냈고 부품을 A, B, C순서로 검사를 실시할 때 카르노 맵을 표 2에 표시했다.

이에 대한 경로집합은 다음과 같다.

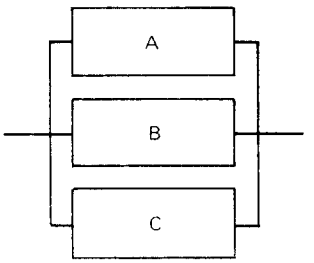
$$P = a \cdot e_1 + b \cdot e_2 + c \cdot e_3$$

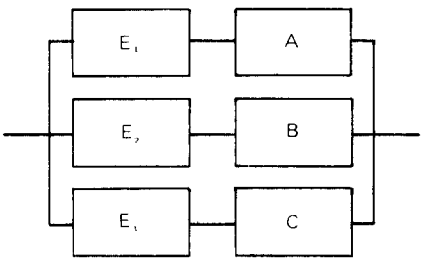
표 2의 인간실수를 고려한 카르노 맵에서 부분별 신뢰도를 부울변수로 표현하면 다음과 같다.

① $= (1 - r_0) \cdot a$
② $= r_0 (1 - r_1) \cdot b$
③ $= r_0 r_1 (1 - r_2) \cdot c$
④ $= r_0 (1 - r_1)^2 \cdot \bar{b} \cdot c$
⑤ $= (1 - r_0)^2 \cdot \bar{a} \cdot b$
⑥ $= (1 - r_0) \cdot r_0 (1 - r_1) \cdot \bar{a} \cdot c$
⑦ $= (1 - r_0)^3 \cdot \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c$

전체 시스템의 신뢰도는 다음과 같다.

$$R = (1 - r_0) \cdot R_a + r_0 (1 - r_1) \cdot R_b + r_0 r_1 (1 - r_2)$$





E_1 : 검사시 부품A에서 인간실수가 일어나지 않는 사상
E_2 : 검사시 부품B에서 인간실수가 일어나지 않는 사상
E_3 : 검사시 부품C에서 인간실수가 일어나지 않는 사상

그림 3 3중 1 시스템의 모델링

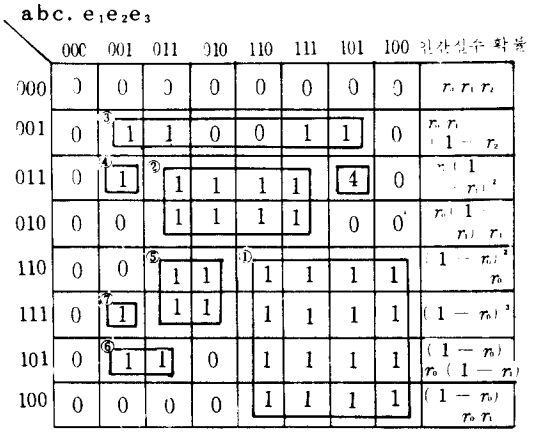


표 2 3중 1 시스템의 인간실수를 고려한 카르노 맵

$R_c + r_0 (1 - r_1)^2 R_b R_c + (1 - r_0)^2 R_a R_b + (1 - r_0) r_0 (1 - r_1) R_a R_c + (1 - r_0)^3 R_1 R_b R_c \cdots$ (식 2)
(여기서 $R = 1 - R$)

〈예〉 인간실수가 발생하지 않았을 때

$r_0 = r_1 = r_2 = 0$

$R = R_a + R_a \cdot R_b + R_a \cdot R_b \cdot R_c$
$= R_a + (1 - R_a) R_b + R_c (1 - R_a) (1 - R_b)$
$= 1 - (1 - R_a) (1 - R_b) (1 - R_c)$

(iii) 3중 2 시스템

(i) (ii)에서와 같은 방법으로 계산하면 다음과 같다.

$R = (1 - r_0)^2 \cdot r_0 R_a R_b + r_0 (1 - r_1)^2 R_b R_c + r_0 (1 - r_0) (1 - r_1) R_c R_a + (1 - r_0)^3 (R_a + R_a \cdot R_b \cdot R_c)$

Ⅳ. 檢査時間을 고려했을 경우

(i) 2중 1 시스템

검사순서를 A·B로 하고 A에 필요한 검사기간을 τ_1, B에 필요한 시간을 τ_2라 정하고 검사간격 시간을 T라 가정한다.

각 시간별로 나누어 신뢰도를 계산하면 아래와 같다.

① $0 \leq t \leq T$ 일 때

(식 1)에서 구한 신뢰도에 $R_a(t)$ 대신 $R_a(t \cdot$

τ_2)를 대입하면 된다.

$R(t) = (1-r_o)R_a(t+T_2) + r_o(1-r_1)\ R_b(t) + (1-r_o)^2 Ra(t+T_2)\ R_b(t)$

② $T \leqq t \leqq T+\tau_1$ 일때

이 시간 구간에서는 부품 A가 검사를 받고 있으므로 부품 A는 고장상태가 된다. 따라서 시스템의 신뢰도는 부품 B에 의존하므로 〈표1〉에서 부품 B에서 인간실수가 안일어나는 확률은 다음과 같다.

$P_B = r_o(1-r_1) + (1-r_o)^2$

전체 시스템의 신뢰도는 아래와 같다.

$R = P_B \cdot R_b(t) = \{(1-r_1)r_o + (1-r_o)^2\} \cdot R_b(t)$

③ $T+\tau_1 \leqq t \leqq T+(\tau_1+\tau_2)$ 일 때

이 시간에서는 부품 B가 검사를 받고있으므로 시스템의 신뢰도는 부품 A에 의존한다. 부품 A는 바로 전에 검사를 끝냈으므로 전체 시스템의 신뢰도는 아래와 같다.

$R = (1-r_o)\ R_a(t-(T+\tau_1))$

④ 따라서 주기 $T+\tau_1+\tau_2$는 같고 시스템의 신뢰도는 주기함수 형태가 된다.

(ii) 3중 1 시스템

검사순서를 A, B, C순서대로 하고 각 검사시간을 τ_1, τ_2, τ_3로 가정한다.

각 구간별 신뢰도는 다음과 같다.

① $0 \leqq t \leqq T$일 때

(식2)에서 구한 신뢰도에 $R_a(t)$ 대신 $R_a(t-\tau_2+\tau_3)$를 또 $R_b(t)$ 대신 $R_b(t+\tau_3)$를 대입하면 된다.

$R(t) = r_o r_1(1-r_o)\ Ra(t+\tau_2+\tau_3) + r_o(1-r_1)r_1 R_b(t+\tau_3) + r_o r_1(1-r_2)R_c(t) + (1-r_1)^2 r_o(1-R_b(t+\tau_3)\cdot R_c(t)) + (1-R_a(t+\tau_2+\tau_3)\cdot R_c(t))\cdot(1-r_o)(1-r_1) + (1-Ra(t+\tau_2+\tau_3)\cdot R_b(t+\tau_3))\cdot r_o + (1-R_a(t+\tau_2+\tau_3)\cdot R_b(t+\tau_3)\cdot R_c(t))\cdot(1-r_o)^3$

② $T \leqq t \leqq T+\tau_1$ 일 때

이 시간에서는 부품 A를 검사하므로 A는 고장상태가 된다. (식2)에 $R_a(t)=0$, $R_b(t)=R_b(t-\tau_3)$를 대입하면 된다.

$R(t) = r_o(1-r_o)^2 + r_1(1-r_1)\}R_b(t-\tau_3) + r_o\{r_1(1-r_2) + (1-r_o)(1-r_1)\}R_c(t) + r_o(1-r_1^2 - (1-r_o)^3)\{1-R_b(t-\tau_3)R_c(t)\}$

③ $T+\tau_1 \leqq t \leqq T+\tau_1+\tau_2$

이 시간에서는 B를 검사하므로 B는 고장상태가 된다. 따라서 시스템에 영향을 주는 部品은 바로 전에 검사를 받은 A와 전 단계에서 검사를 받은 부품 C가된다. 또한 (표2)에서 부품 C에 인간실수가 안일어나는 확률 P_c는 다음과 같다.

$P_c = r_o r_1(1-r_2) + r_o(1-r_1)^2 + (1-r_o)r_o(1-r_1) + (1-r_o)^3$

부품 A와 C에서 발생하는 인간실수 사상은 서로 의존성이 없으므로 신뢰도는 다음과 같다.

$R = (1-r_o)\ R_a(t-(T+\tau_1)) + R_c(t)\{r_o r_1(1-r_2) + r_o(1-r_1)^2 + (1-r_o)r_o(1-r_1) + (1-r_o)^3\} - R_a(t-(T+\tau_1))\cdot R_c(t)(1-r_o)(r_o r_1)(1-r_2) + r_o(1-r_1)^2 + (1-r_o)r_o(1-r_1) + (1-r_o)^3\}$

④ $T+\tau_1+\tau_2 \leqq t \leqq T+\tau_1+\tau_2+\tau_3$

이 때 부품 C가 검사를 받고있으므로 시스템에 영향을 주는 것은 부품 A와 B가 된다.

(식1)에서 구한 신뢰도에 $R_a(t)$ 대신 $R_a(t-(T+\tau_1))$, $R_b(t)$ 대신 $R_b(t-(T+\tau_1+\tau_2))$를 대입하면 신뢰도는 다음과 같다.

$R = (1-r_o)\ R_a(t-(T+\tau_1)) + r_o(1-r_1)\ R_b(t-(T+\tau_1+\tau_2)) + (1-r_o)^2 R_a(t-(T+\tau_1))\cdot R_a(t-(T+\tau_1+\tau_2))$

V. 결 론

이상에서와 같이 인간실수 확률을 적용 하여 시스템의 신뢰도를 구하였다. 여기서 문제시되는 것은 얼만큼 인간실수 사상이 의존성을 갖느냐에 있고 복잡한 시스템을 보다 간략화하여 분석하느냐에 있다. 전자의 경우는 美 NRC Human Reliability Hand Book[2]에서 다섯 가지로 아래와 같이 구분하였다.

① 零 의존성(Zero Dependence)

어떤 인간실수 사상이 다른 인간실수 사상에 영향을 안 미치는 경우

$r_N = r_o$ (r_N : N번째 인간실수가 발생 할 확률 값)

② 低 의존성(Low Dependence)

의존성이 분명히 零보다 크나 그렇게 크지 않을 경우

$$r_N = \frac{(1+19r_o)}{20}$$

③ 中間 의존성(Moderate Dependence)
低 의존성과 高 의존성 사이에 있는 경우

$$r_{\backslash} = \frac{1+6r_0}{7}$$

④ 高 의존성 (High Dependence)
完全 의존성은 아니나 상당히 크게 의존하고 있는 경우

$$r_{\backslash} = \frac{1+r_0}{2}$$

⑤ 完全 의존성(Complete Dependence)
어떤 인간 실수가 발생했을 때 다음번 수행시 반드시 인간실수가 발생하는 경우

$$r_{\backslash} = 1$$

이상 다섯 가지의 의존성을 각 시스템에 적용 인간실수가 중대한 결과를 끼침을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] G.E. Apostolakis, P.P. Bansal, "Effect of Human Error on the Availability of periodically inspected redundant systems," ***IEEE Trans. Reliability***, Vol. R.26, PP. 220-231, Aug. 1977.

[2] G.E. Apostolakis, "Data Analysis in Risk Assessments," ***Nuclear Engineering and Design***, Vol. 71 1982.

[3] 박 경수, 신뢰도 공학 및 정비 이론, 탑출판사, 1978.

[4] S.C. Chay, W.D. Loftus, M. Mazumdar, "A Probabilistic Approach to Safety Testing and Maintenance," ***Trans of ASME, Journal of Engineering for Power, Vol, 96, July 1974,***

[5] R.G. Benetts, "Analysis of Reliability Block Diagrams By Boolean Techniques," ***IEEE Trans. Reaiability*** Vol. R-31, No. 2, June 1982.

[6] M. Morris Mano, ***Digital logic and Computer Design***, Prentice-Hall, 1979.