

'99 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

동적 중요도 측정의 타당성 연구

A Feasibility Study of Dynamic Importance Measure

김태권, 김인석

한양대학교

서울특별시 성동구 행당동 17번지

요약

본 논문에서는 확률론적 안전성분석의 응용에 사용되는 중요도분석을 시간의존적인 방법을 이용하여 수행하였다. 이러한 시간의존적 방법에서는 기본사건들의 상호 중요도가 시간에 따라서 변화함을 알 수 있으며, 이러한 결과는 위험도 기반 응용분야에서 평균적인 데이터를 이용하여 위험도에 중요한 기기들을 평가해왔던 기존의 결과와 다를 수 있음을 나타내고 있다.

Abstract

This paper discusses the importance measures used in Probabilistic Safety Analysis (PSA) applications especially focussing on their time-dependent behaviors. We find that the relative importance measures of basic events change as time goes on. Our study indicates that the time dependence of importance can alter the relative ranking of the importance measures of basic events.

1. 서론

원자력발전소와 같이 복잡한 운전운행 행하는 계통에서 각각의 기기들은 위험도에 끼치는 영향정도가 다르다. 이러한 계통운전의 관점에서 기기들이 위험도에 기여하는 정도는 Fussel-Vesely(FV), Risk Achievement Worth(RAW), Risk Reduction Worth(RRW)등과 같은 중요도를 측정하여 알 수 있게 된다. 보통 확률론적 안전성분석

에서는 평균데이터를 이용하여 결과를 얻어내고 이러한 결과들을 이용하여 위험도기반 가동 중 시험이나 위험도 관점의 정비에서 중요한 기기들을 선정하는 등 그외에 활용하게 된다. 본 논문에서는 정상적으로 운전되는 간단한 계통을 예로 선정하여 시간 평균적인 중요도 측정과 시간 의존적인 중요도 측정에 대한 차이점에 대해서 기술한다.

2 본론

2.1 중요도의 정의

2.1.1 위험도에 연관된 주요 중요도

확률론적 안전성분석에서 주로 이용되는 중요도로는 FV중요도, RAW중요도, RRW중요도 등이 있으며, 각각의 중요도는 그 특성에 따라서 적용되고 있으며 그 정의는 표1과 같다[1].

표 1. 중요도의 정의

중요도	정의	위험도에 의한 공식	최소단절집합에 의한 공식
FV	전체위험도에 대한 특정 기여인자를 포함하는 위험도의 비	$\frac{R_c}{R}$	$\frac{\sum_{c \in M_i} M_i}{\sum M_i}$
RAW	전체위험도에 대한 특정 기여인자가 이용 불가능할 경우의 위험도의 비	$\frac{R(1_c)}{R}$	$\frac{\sum M_i(1_c)}{\sum M_i}$
RRW	특정 기여인자가 이용 가능할 경우에 대한 전체위험도의 비	$\frac{R}{R(0_c)}$	$\frac{\sum M_i}{\sum M_i(0_c)}$

R = 전체 위험도

R_c = 특정 기여인자 c 를 포함하는 위험도

$R(1_c)$ = 특정 기여인자 c 가 이용 불가능한 경우의 위험도

$R(0_c)$ = 특정 기여인자 c 가 이용 가능한 경우의 위험도

M_i = i 번째 최소단절집합이 기여하는 위험도

$\sum M_i$ = 모든 최소단절집합이 기여하는 위험도

$\sum_{c \in M_i} M_i$ = 특정기여인자 c 를 포함하는 모든 최소단절집합이 기여하는 위험도

$\sum M_i(1_c)$ = 특정기여인자 c 가 이용 불가능한 경우의 모든 최소단절집합이 기여하는 위험도

$\sum M_i(0_c)$ = 특정기여인자 c 가 이용 가능한 경우의 모든 최소단절집합이 기여하는 위험도

2.1.2 주요 중요도간의 관계

기본사건 i 에 대한 FV중요도는 표1에서의 정의에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$FV_i = \frac{R - R(0_i)}{R} \quad (1)$$

그러나, 여러 가지 고장모드를 가지고 있는 기기들은 하나의 기기라 하더라도 여러 개의 기본사건을 포함할 수 있다. 그러므로, 기기별로 FV중요도를 구하려는 경우에는 다음과 같은 근사식을 이용해야 한다.

$$FV_c = \sum_{i=1}^m FV_i \quad (2)$$

여기서, m 은 기기의 고장모드수이고, FV_i 는 기기의 기본사건 i 의 FV중요도 값이다. 위의 식(1)은 기본사건 i 에 대한 RRW의 식으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$FV_i = \frac{R - R(0_i)}{R} = 1 - \frac{1}{RRW_i} \quad (3)$$

$$RRW_i = \frac{1}{1 - FV_i} \quad (4)$$

$$RRW_c = \frac{1}{1 - FV_c} \quad (5)$$

FV와 RAW와의 관계를 표현하기 위해서는 전체 위험도를 다음과 같이 표현하는 것이 필요하다[2].

$$R = q_i R(1_i) + (1 - q_i) R(0_i) \quad (6)$$

여기서, q_i 는 기본사건 i 의 이용불능도이다.

위의 식 (6)을 표1에 의한 정의를 이용하여 전개하면 다음과 같은 관계식이 나온다.

$$1 = q_i RAW_i + (1 - q_i) \frac{1}{RRW_i} \quad (7)$$

$$1 = q_i RAW_i + (1 - q_i) (1 - FV_i) \quad (8)$$

$$RAW_i = 1 + \frac{1 - q_i}{q_i} FV_i \quad (9)$$

$$RAW_c = 1 + \frac{1 - q_c}{q_c} FV_c \quad (10)$$

여기서 q_c 는 기기의 고장모드에 연관되어있는 이용불능도의 합이다.

2.2 시간 의존적인 중요도

2.2.1 계통설명 및 고장수목

그림1에 묘사되어 있듯이 탱크는 10분 동안 펌프를 이용하여 충수되고 50분 이내에

방출된다. 그래서, 순환기간은 1시간이 된다. 스위치가 접지되어 10분동안 충수된 후 타이머는 콘택트를 열게 설정되어 있으며, 만일 이런 작동이 실패하게 되면 운전원이 물의 과충수에 의한 탱크의 손상을 막기 위하여 스위치를 강제로 열게 되어 있다. 예제 계통에 대한 고장수목은 그림2에 제시되어있으며 이용 불능도의 계산을 위한 고장율 데이터는 표2에 제시되어있다[3].

표 2. 고장율 데이터

기본사건 번호	기기	고장모드	고장율 (hr^{-1})
1	Tank	Rupture	10^{-7}
2	Contact	Fail closed	10^{-5}
3	Coil	Fail closed	2×10^{-5}
4	Operator unavailability = 0.1		
5	Switch	Fail closed	10^{-5}

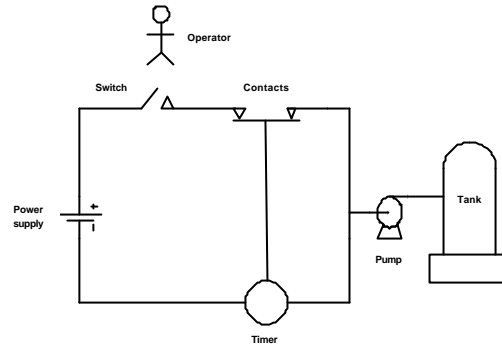


그림 1. 계통도

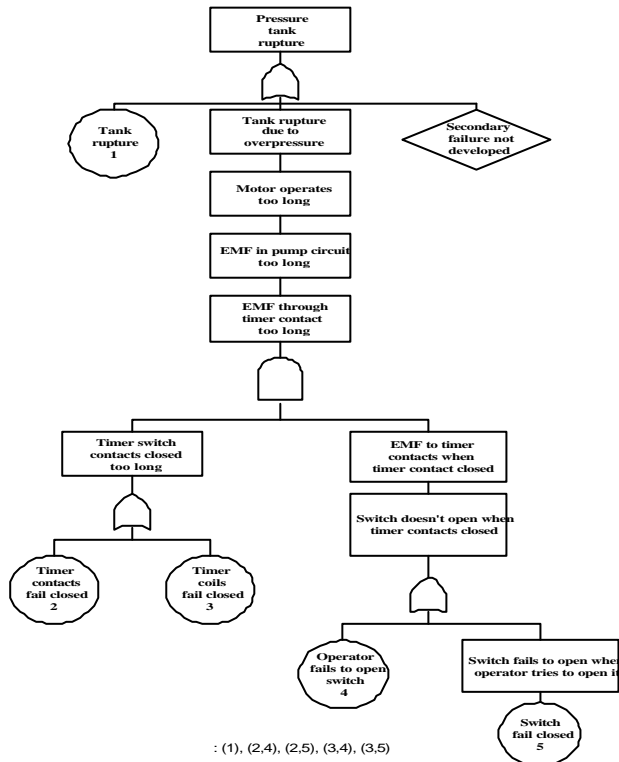


그림 2. 고장수목도

2.2.2 중요도 측정

기본사건과 최소단절집합의 이용불능도 및 계통전체의 이용불능도는 지수분포를 가정할 경우 다음식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_o = \sum M_i = \sum_{i=1}^n Q_i^* \quad (11)$$

$$Q_i^* = M_i = \prod_{j=1}^n Q_j = \prod_{j=1}^n (1 - e^{-\lambda_j t}) \quad (12)$$

여기서 Q_i 는 기본사건의 이용불능도이고, Q_i^* 는 n차의 최소단절집합의 이용불능도이다. 1달과 1년에 대한 최소단절집합의 이용불능도는 식(12)를 이용하여 표3과 그림3에 제시하였다.

표 3. 최소단절집합 이용불능도

i	Q_i	$Q_i^*(=M_i)$	i	Q_i	$Q_i^*(=M_i)$
1	$Q_1=7.20E-05$	7,20E-05	1	$Q_1=8.64E-04$	8,64E-04
2	$Q_2=7.17E-03$	7,17E-04	2	$Q_2=8.28E-02$	8,28E-03
	$Q_4=1.00E-01$			$Q_4=1.00E-01$	
3	$Q_2=7.17E-03$	5,15E-05	3	$Q_2=8.28E-02$	6,85E-03
	$Q_5=7.17E-03$			$Q_5=8.28E-02$	
4	$Q_3=1.43E-02$	1,43E-03	4	$Q_3=1.59E-01$	1,59E-02
	$Q_4=1.00E-01$			$Q_4=1.00E-01$	
5	$Q_3=1.43E-02$	1,03E-04	5	$Q_3=1.59E-01$	1,31E-02
	$Q_5=7.17E-03$			$Q_5=8.28E-02$	
$Q_o(=\sum M_i)=2.37E-03$			$Q_o(=\sum M_i)=4.50E-02$		
Time = 1mo			Time = 1yr		

위의 이용불능도를 이용하여 표1에서 제시한 중요도에 대한 공식에 따라 각각의 시간 간격에서 FV, RAW, RRW의 값을 구하여 표4~표6에 제시하고 이 값들이 시간에 따라 어떠한 경향을 가지는지 그림4~6에 표시하였다.

표 4. FV 중요도

기본 시간	Tank rupture	Timer contacts fail closed	Timer coils fail closed	Operator fails to open switch	Switch fail closed
	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5
1wk	0,0318	0,323	0,645	0,952	0,0160
2wk	0,0313	0,323	0,645	0,937	0,0314
1mo	0,0303	0,324	0,646	0,905	0,0649
3mo	0,0272	0,327	0,646	0,802	0,171
6mo	0,0237	0,330	0,646	0,686	0,290
9mo	0,0211	0,333	0,646	0,601	0,377
1yr	0,0192	0,336	0,645	0,537	0,444
average	0,023	0,326	0,652	0,680	0,298

표 5. RAW 중요도

기본 사건 시간	Tank rupture	Timer contacts fail closed	Timer coils fail closed	Operator fails to open switch	Switch fail closed
	RAW1	RAW2	RAW3	RAW4	RAW5
1wk	1893.0	193.1	192.7	9.6	10.5
2wk	933.4	97.0	96.7	9.4	10.3
1mo	422.4	45.8	45.5	9.1	10.0
3mo	126.9	16.0	15.6	8.2	8.8
6mo	55.8	8.5	8.2	7.2	7.6
9mo	33.6	6.0	5.7	6.4	6.6
1yr	23.2	4.7	4.4	5.8	5.9
average	50.7	8.1	7.8	7.1	7.5

표 6. RRW 중요도

기본 사건 시간	Tank rupture	Timer contacts fail closed	Timer coils fail closed	Operator fails to open switch	Switch fail closed
	RRW1	RRW2	RRW3	RRW4	RRW5
1wk	1.03	1.48	2.82	20.9	1.02
2wk	1.03	1.48	2.82	15.9	1.03
1mo	1.03	1.48	2.82	10.5	1.07
3mo	1.03	1.48	2.83	5.04	1.21
6mo	1.02	1.49	2.83	3.19	1.41
9mo	1.02	1.50	2.82	2.51	1.61
1yr	1.02	1.51	2.81	2.16	1.80
average	1.02	1.48	2.87	3.12	1.42

3. 결론

FV중요도에 주로 영향을 미치는 인자는 해당 기기의 고장율이므로 기본적으로 고장율이 높을수록 FV중요도는 높아지게 된다. 그러나, 그림4에서 보듯이 같은 고장율을 갖는 2번째와 5번째 기기 즉, Timer contact와 Switch가 평균적인 데이터와 비교해서 시간 의존적인 데이터에 의해서 중요도의 변화추이가 다를 수 있다. 즉 2번째 기본사건은 시간이 지나더라도 FV중요도가 평균값에 근접하는 값을 가지나 5번째 기본사건은 그 값이 지속적으로 증가하게 된다. 그 이유는 첫째, 중요도 수치는 상대적인 값이라는 것이다. 예를 들어 2차의 최소단절집합인 (2,4), (2,5)을 갖는 2번째 기본사건은 역시 2차의 최소단절집합인 (3,5), (2,5)을 갖는 5번째 기본사건과 비교할 때, 4번째 기본사건의 이용불능

도는 일정한 반면 3번째 기본사건의 이용불능도는 계속 증가하므로 2번째 기본사건에 비해 5번째 기본사건의 FV중요도는 시간에 따라 빨리 증가하게 되는 결과를 나타내고 있다.

RRW 중요도는 식(5)에서 보듯이 FV 중요도의 값에 비례해서 변화한다. 만일 FV중요도가 큰 값을 가지면서 증가 또는 감소하면 RRW중요도는 크게 증가 또는 감소하며 반대로 FV 중요도가 작은 값을 가지면서 증가 또는 감소하게 되면 RRW중요도는 적게 증가 또는 감소하게 된다. 그러므로 그림6에서 보듯이 큰 FV중요도를 가지고 그 값이 감소하는 4번째 기본사건의 RRW의 값은 큰 쪽으로 감소하고 작은 FV중요도를 가지고 그 값이 증가하는 5번째 기본사건의 RRW의 값은 적은 쪽으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

RAW 중요도는 식(8)에 의해 FV중요도와 기기의 이용불능도의 함수로 표현될 수 있다. 즉, FV중요도에는 비례하는 값이며 기기의 이용불능도에는 반비례하는 값인 것이다. 이러한 점에서 RAW와 FV중요도간의 관계는 주어진 기기의 이용불능도에 대한 관점으로 설명해야한다. FV중요도가 증가하고 기기의 이용불능도가 감소하는 경우에 기기는 높은 RAW값을 가지며, 반대로 FV중요도가 감소하고 기기의 이용불능도가 증가하는 경우에 기기는 적은 RAW값을 가진다. 그러나 위와 같지 않은 경우는 RAW값을 예측하기가 힘들어진다. 만일 기기이용불능도의 증가비가 FV중요도의 증가비에 비해 클 경우 RAW값은 작아질 것이며 그 반대의 경우 RAW값은 커질 것이다.

위와 같이 PSA응용에서 주로 사용되어지는 주요한 중요도 분석에 대해서 기존에 통용되는 평균적인 개념에서 도출되는 결과와는 다를 수 있음을 간단한 계통에서 운전시간에 따라서 분석해 보았으며 결과적으로 위험도에 기반을 둔 가동중 시험이나 정비 또는 구성상태제어의 기법을 향상시킬 수 있을 것이라고 기대한다.

4. 참고문헌

1. W.E. Vesely, The Use of Risk Importance for Risk Based Application and Risk Based Regulation, PSAM96, Park City, Utha, Sep. 1996
2. S. Martorell, V. Serradell & G. Verdu, Safety-related equipment prioritization for reliability centered maintenance purposes based on a plant specific level 1 PSA, RESS Vol52, 1996
3. Ernest J.Henley & Hiromitsu Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment, Prantice-Hall, Inc., 1981

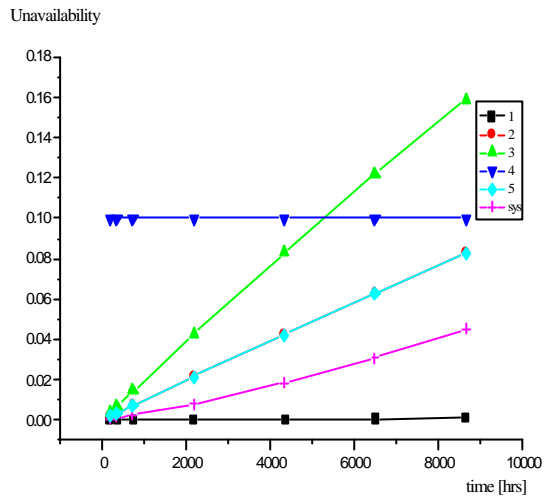


그림3. Unavailability versus Time

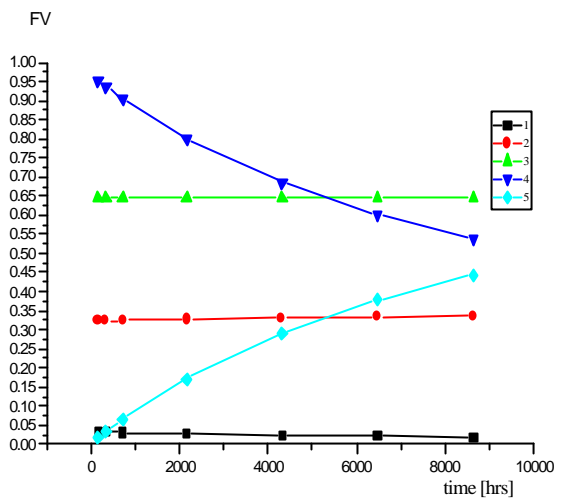


그림4. FV versus Time

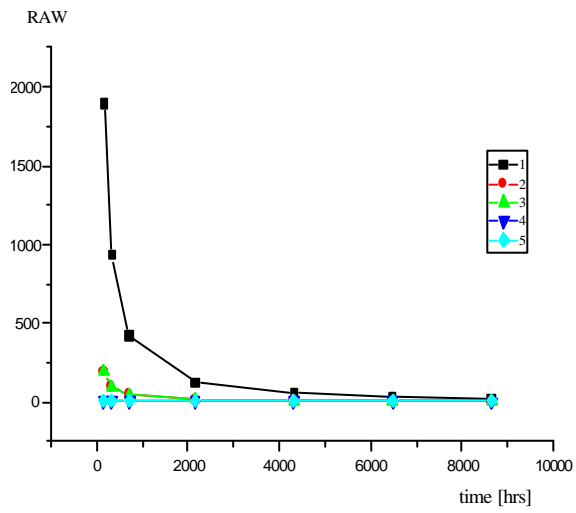


그림 5. RAW versus Time

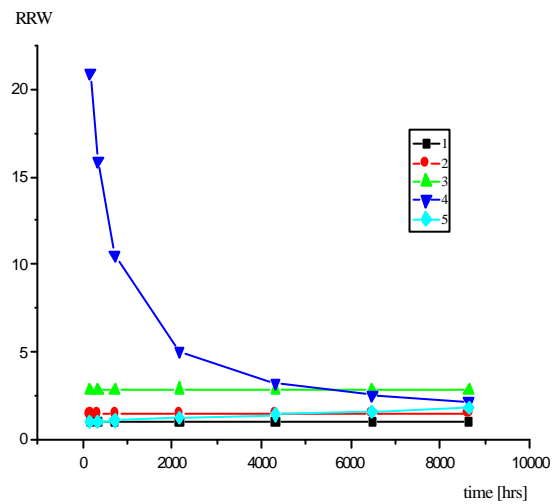


그림 6. RRW versus Time