

민감도분석을 이용한 공통원인고장 모델들의 특성 연구

A Study on the Characteristics of Common Cause Failure Models with Sensitivity Analysis

김민철, 김인석

한양대학교
서울시 성동구 행당동 17

요 약

종합적 확률론적안전성분석(Probabilistic Safety Assessment: PSA)의 결과에도 나타나듯이 원자력발전소의 안전계통에 공통원인고장(Common Cause Failure: CCF)이 발생하면 유사시 발전소 안전에 심각한 영향을 야기할 수 있다. PSA나 계통분석연구에서 CCF의 계통이용불능도(system unavailability)에 대한 영향을 정량화하기 위하여 Beta Factor 모델, Multiple Greek Letter (MGL) 모델, Alpha Factor 모델 그리고 Binomial Failure Rate (BFR) 모델과 같은 다양한 기법들을 사용하고 있으며, 일반적으로 기법의 선택에 따라 상이한 결과가 얻어진다. 따라서 이들 CCF 분석 모델들에 대한 비교연구를 통해 그 특성을 확실히 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 이들 대표적 CCF 분석기법들에 대하여 계통의 다중도(redundancy)에 따른 계통이용불능도에 대한 민감도분석을 수행하였다. 민감도분석에 의하면 특히 Beta Factor 기법은 계통 다중도의 증가에 따른 계통이용불능도의 감소를 제대로 반영하지 못함을 명백히 보여주므로, 세 개 이상의 기기로 구성된 계통에 대해서는 사용을 지양해야 함을 알 수 있다. 또한 이 분석 결과는 각 기법들간의 관계와 특성을 잘 보여주고 있다.

Abstract

As the results of probabilistic safety assessment (PSA) indicate, the occurrence of common cause failure (CCF) in a safety system of a nuclear power plant can have considerable impact on the plant safety. In PSA or system analysis study, various CCF analysis techniques, such as Beta Factor, Multiple Greek Letter (MGL), Alpha Factor, or Binomial Failure Rate (BFR) models, are used. In general, these models show different impact of CCF on the system unavailability, and as a result, on the plant safety. Hence, it is necessary to clearly identify the characteristics of these CCF models through a

comparative study. In this study we carried out a sensitivity analysis of the 4 representative models mentioned above in terms of the change of system unavailability upon the redundancy of the system. The sensitivity analysis shows the characteristics and trends of the CCF models for a change in system redundancy.

1. 서론

원자력발전소의 안전계통들은 정상운전 중에는 대기 상태에 있다가 사고가 발생할 경우 안전기능을 수행하도록 설계되어 있다. 이러한 안전계통들에는 일반적으로 다중성(redundancy)과 다양성(diversity)의 개념을 도입하여 개별 기기의 고장시에도 다른 대체 기기의 가동에 의해 그 기능을 수행할 수 있겠음 되어있다. 그러나 여러 기기들의 동시 고장, 즉 다중고장(multiple failures)시에는 관련 계통의 기능상실로 인하여 원자력발전소의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

원자력발전소의 운전경험에 의해서도 알 수 있듯이 이러한 다중고장은 주로 단일 원인에 의해 여러 기기가 동시에 고장나는, 소위 공통원인고장(common cause failure: CCF)에 의해 발생한다. 따라서 CCF에 대한 많은 연구가 수행되어왔으며, WASH-1400에서 처음으로 정량화 기법이 소개된 이래 최근에는 특히 다음 기법들이 주로 사용되고 있다: 1) Beta Factor 모델, 2) Multiple Greek Letter (MGL) 모델, 3) Alpha Factor 모델, 그리고 4) Binomial Failure Rate (BFR) 모델. [1-3]

CCF를 분석하기 위한 이러한 기법들은 서로 다른 특성과 장단점을 가지고 있다.[4] 본 논문에서는 이러한 기법들 중 확률론적안전성분석(Probabilistic Safety Analysis: PSA)에서 주로 사용되고 있는 위에서 언급한 4가지 대표적 모델들의 계통 다중도(redundancy)에 대한 민감도분석(sensitivity analysis)을 수행하였다. 2장에서는 민감도분석을 위해 사용된 공식들을 기술하였고, 3장에서는 분석에 이용된 고장데이터와 계통이용불능도의 정량화 및 본 연구를 통해 얻어진 고찰을 정리하였다. 그리고 마지막 장에서는 결론과 향후연구 방향에 관해 기술한다.

2. 민감도분석을 위해 사용된 공식

본 연구에서 기기 다중성에 대한 민감도분석을 위해 사용한 다음 4가지의 CCF 기법들은 전세계적으로 많이 활용되고 있는 기법들이다.

- 1) Beta Factor 모델
- 2) Multiple Greek Letter (MGL) 모델
- 3) Alpha Factor 모델
- 4) Binomial Failure Rate (BFR) 모델

국내 PSA에서는 과거 데이터 처리가 쉽고 보수적인 결과를 도출할 수 있는 Beta Factor 기법을 사용하였으나, 최근에는 좀더 현실적인 값을 얻기 위해 주로 MGL 기법을 이용하여 공통원인고장을 분석하고 있다. 이들 4가지 기법들에서 사용되는 모수(parameter)를 추정하는 방법과 공통원인고장의 발생확률을 정량화 하는 방법은 표 1에 요약되어 있다.

표 1. 공통원인고장의 모수추정 및 발생확률 정량화 기법

기법	Beta Factor	MGL	Alpha Factor	BFR
모수 추정	$\beta = \frac{\sum_{k=1}^m n_k}{\sum_{k=1}^m n_k}$	$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^m n_k}{\sum_{k=1}^m n_k}$	$\alpha = \frac{n_k}{\sum_{k=1}^m n_k}$	$Q_1 = \frac{n_1}{\sum n_k}$ $Q_{1s} = \frac{N_1}{N_D}$ $\frac{p}{1-(1-p)^m} = \frac{\sum_{k=1}^m k n_k}{m \sum_{k=1}^m n_k}$ $Q_{SH} = \frac{\sum_{k=1}^m n_k}{N_D} \frac{1}{1-(1-p)^m}$
CCF 발생 확률	$Q_k = \begin{cases} (1-\beta)Q_T, & k=1 \\ 0, & 2 \leq k \leq m \\ \beta Q_T, & k=m \end{cases}$	$Q_k = \frac{\prod_{j=1}^k \alpha_j (1-\alpha_{j+1}) Q_T}{\binom{m-1}{k-1}}$ where $\rho_1=1, \rho_2=\beta, \rho_3=\gamma, \dots$ $\rho_{m+1}=0$	$Q_k = \frac{m}{\binom{m}{k}} \frac{\alpha_k}{\mu_\alpha} Q_T$ where $\mu_\alpha = \sum_{k=1}^m k \alpha_k$	$Q_1 = Q_1 + Q_{SH} p (1-p)^{m-1}$ $Q_k = Q_{SH} p^k (1-p)^{m-k}$ $Q_\infty = Q_{SH} p^m + Q_{1s}$

m = 공통원인기기군의 크기 (다중도)

n_k = k 개의 기기에 영향을 주는 공통원인고장 횟수

N_D = 계통시험 횟수

N_L = 치명적 충격에 의한 공통원인기기군의 모든 기기의 동시고장 횟수

Q_k = m 개의 공통원인기기군에서 k 개의 기기를 포함하는 공통원인고장이 발생할 확률 ($k = 1, 2, 3, \dots, m$)

Q_T = 개별기기의 (독립고장 및 공통원인고장을 포함하는) 총고장 확률

Q_I = 개별기기의 독립고장 확률

Q_{SH} = 비치명적 충격에 의해 공통원인고장이 발생할 확률

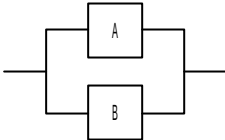
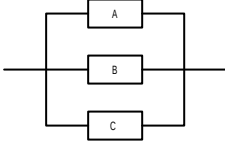
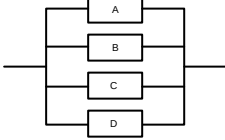
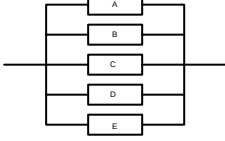
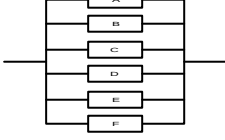
p = 비치명적 충격이 발생하였을 때 각 기기가 고장날 조건부 확률

Q_{1s} = 공통원인기기군의 기기 전체에 영향을 주는 치명적 충격이 발생할 확률

표 1에서 각 기법들에 대한 모수추정은 점추정(point estimation) 방법을 이용하였고, 동시시험(sequential test)의 경우를 가정하여 유도되었다. 표 2에서는 계통의 다중도(redundancy)를 2에서 6까지 변화시켰을 때 그 계통의 이용불능도를 정량화하

는 공식을 보여준다. 이 공식들은 최소단절집합을 이용하면 쉽게 유도할 수 있다.
[4]

표 2 계통의 다중도 변화에 따른 계통이용불능도

계 통	계통이용불능도 (Q_s)
	$Q_1^2 + Q_2$
	$Q_1^3 + 3Q_1Q_2 + Q_3$
	$Q_1^4 + 3Q_2^2 + 4Q_1Q_3 + Q_4$
	$Q_1^5 + 10Q_2Q_3 + 5Q_1Q_4 + Q_5$
	$Q_1^6 + 10Q_2^2 + 15Q_2Q_3 + 6Q_1Q_5 + Q_6$

※ Q_k = m개의 공통원인기기군에서 k개의 기기를 포함하는 공통원인고장이 발생할 확률
(k = 1, 2, 3, ..., m)

3. 민감도분석

3.1 주요인자 선정

일반적으로 원자력발전소의 경우 공통원인기기군(common cause component group)에는 적게는 2개, 많게는 8개의 기기(예: 고압안전주입 상부 격리밸브)가 포함되어 있다. 특히 펌프의 경우 2 또는 3의 다중도로, 그리고 밸브의 경우에는 2부터 8까지의 다중도로 계통에 따라 다양하게 적용되고 있다.

이처럼 같은 기기로 이루어진 계통이지만 다중도가 다르기 때문에 한 기기의 총고

장확률에서 공통원인고장이 차지하는 비율은 달라지게 되고 계통이용불능도 역시 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 다중도의 변화에 따라 각 CCF 기법들을 이용해서 분석한 계통이용불능도가 어떻게 변화하며 기법에 따라 어떠한 차이점을 보이는지에 대해 민감도분석을 수행하였다.

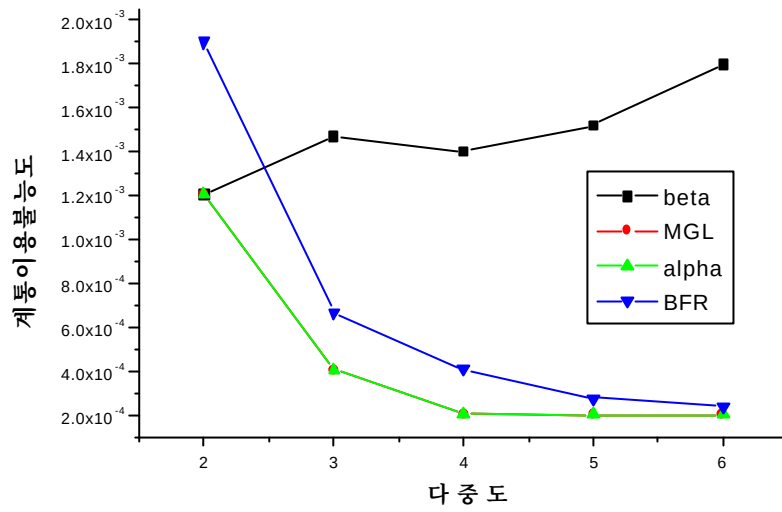
3.2 고장데이터와 분석 결과

본 논문에서 수행한 민감도분석에서는 동일한 기기가 다중도가 다른 계통에 사용되는 측면을 고려하기 위하여 다중도에 상관없이 개별기기의 총고장률을 일정하게 유지하였다. 모터구동밸브(motor operated valve)의 운전실패와 계측공기압축기(instrument air compressor)의 기동실패에 대한 일반고장데이터(generic failure data)를 사용하였는데 모터구동밸브와 계측공기압축기의 일반운전요구실패확률(generic demand failure probability)은 요구당 각각 0.003과 0.08이다.[5]

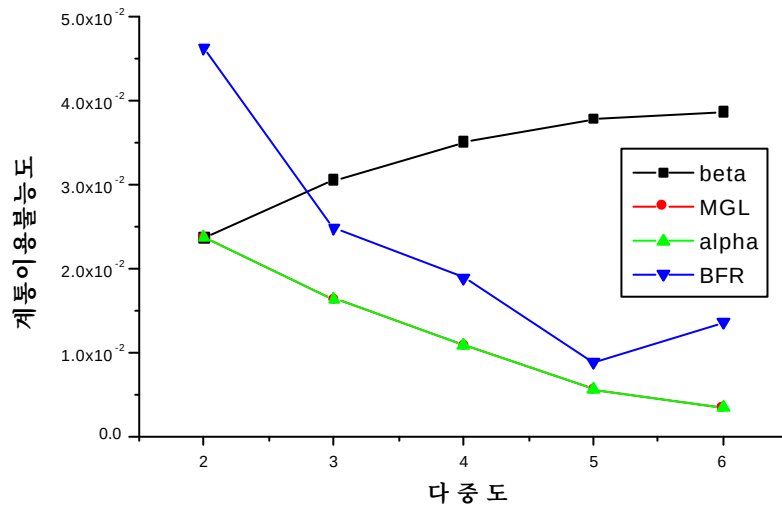
본 연구에서는 다중도가 다른 각각의 경우에 대해 여러 가지 CCF가 발생하더라도 각 기기의 총고장확률(즉, 위에서 언급한 운전요구실패 확률)을 일반운전요구실패확률과 같게 유지하였다. 또한 각 다중도에 대해 계통시험횟수는 일정하다고 가정하였다. 민감도분석에 사용한 고장데이터는 표 3에 나타난 바와 같다. 그림 1은 이 데이터를 이용하여 수행한 민감도분석 결과를 보여준다.

표 3. 민감도분석을 위해 사용된 고장데이터

기기	총고장확률 (QT)	다중도 (m)	계통시험 횟수 (Nd)	고장횟수					
				단일 고장	2중 고장	3중 고장	4중 고장	5중 고장	6중 고장
모터구동 밸브	0.003/D	2	5,000	18	6				
		3	5,000	23	8	2			
		4	5,000	30	9	2	1		
		5	5,000	35	10	3	1	1	
		6	5,000	38	13	3	2	1	1
계측 공기 압축기	0.08/D	2	1,000	120	20				
		3	1,000	150	23	15			
		4	1,000	180	26	16	10		
		5	1,000	210	29	18	13	5	
		6	1,000	250	32	20	15	6	3



(a) 모터구동밸브 ($Q_T = 0.003/D$)



(b) 계축공기압축기 ($Q_T = 0.08/D$)

그림 1. CCF 기법들의 계통 다중도 변화에 따른 민감도분석 결과

위와 같은 가정에 의하면, 일반적으로 동일한 기기들의 다중도가 증가할수록 계통 이용불능도는 감소한다. 그러나 CCF의 메카니즘이 있는 경우 CCF가 없는 경우보다는 계통이용불능도가 커진다. 본 연구에서는 CCF가 작용하는 경우이므로 CCF가 없는 경우보다는 계통이용불능도가 더 크다고 하더라도, 다중도가 많아질수록 계통 이용불능도가 감소하여야 할 것이다.

그러나 그림 1을 살펴보면 MGL, α -factor 및 BFR 모델들을 사용하여 계통이용불능도를 계산하면 감소하는 경향을 보이거나, 놀랍게도 β -factor 모델의 경우에는 이와 반대로 계통이용불능도가 증가한다. 이는 β -factor 모델에서는 만일 k 개의 다중고장이 발생할 경우, 이중고장 및 $(k-1)$ 개의 공통원인고장의 경우에도 이를 보수적으로 k 개의 기기 모두가 공통원인에 의해 고장이 났다고 가정하기 때문에 다중성에 의한 계통의 신뢰도 향상이 나타나지 않는다. 따라서 3중 이상의 다중성을 지닌 계통의 경우에는 가능한 β -factor 기법을 쓰지 않는 것이 좋을 것을 명백히 보여준다.

β -factor 기법을 제외한 MGL, α -factor 및 BFR 기법을 사용하는 경우 계통의 다중도가 증가함에 따라 예상할 수 있는 바와 같이 계통이용불능도가 CCP의 메커니즘에 관련없이 감소함을 볼 수 있다. 그리고 MGL과 α -factor 기법의 결과를 비교하면, 다른 공식임에도 불구하고 다중도에 따른 계통이용불능도의 변화가 없음을 알 수 있다.

그리고 그림 1에서 보여주는 본 연구의 민감도분석 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) BFR 기법은 다중도가 2인 계통의 경우 보수적인 결과가 도출된다. 그리고 치명적 충격(lethal shock)에 의한 고장이 많이 관측될 경우 다른 기법들에 비해 더 보수적인 결과가 도출된다. BFR 기법은 다른 세가지 기법과는 다르게 충격모델(shock model)로서 공통원인기기군의 모든 기기가 동시에 고장나는 치명적 고장 횟수에 크게 의존하는 경향이 있다.
- 2) 총 다중도 m 중 k 개의 기기에 영향을 주는 공통원인고장의 횟수, 즉 r_k 중, 어느 하나라도 0일 경우 MGL과 α -factor 기법을 사용하면 k 개의 기기가 동시에 고장날 확률은 0이 된다. 그러나 BFR 기법을 사용하면 0이 아닌 다른 확률값을 갖게 된다. 예를 들어, 공통원인기기군의 크기가 6이라 하더라도 관측된 고장이 독립고장과 여섯 개 모두 고장나는 경우뿐이라면 β -factor, MGL 그리고 α -factor로 계산된 Q_k 와 계통이용불능도는 모두 다 같은 값을 갖게 된다.
- 3) BFR 기법의 경우 다중도가 커지면 커질수록 모수추정, 특히 비치명적충격이 발생하였을 때 각 기기가 고장날 조건부 확률인 p 에 대한 추정이 점점 어려워진다.

4. 결론과 향후연구 방향

공통원인고장은 복잡한 계통일수록 그 중요성은 더욱 커지고 분석 또한 매우 어려워지는 특성을 지니고 있다. 그래서 과거 확률론적안전성분석 수행시 데이터 처리가 쉽고 보수적인 결과를 도출할 수 있는 β -factor 기법을 선호하는 경향이 있었

다. 그러나 공통원인고장 메카니즘에 대한 연구와 고장데이터의 확보로 공통원인고장을 더 잘 이해함에 따라 너무 보수적인 결과를 도출하는 기법들의 사용은 지양되어져 왔다.

본 논문에서 수행한 민감도분석은 계통 다중도의 변화에 대한 각 CCF 분석 기법들의 특성을 잘 보여주고 있다. 이러한 특성에 대한 이해는 특히 PSA나 계통연구를 위해 공통원인고장을 분석하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구에서는 동시시험(sequential test)의 경우만 다루었으나, 기술지침서(technical specification) 최적화 연구에서 공통원인고장에 대한 방어(defense)의 관점에서 단계시험(staggered test)이 제안되어지고 있다.[6] 이러한 단계시험의 경우에는 단계시험의 전략 설정에 대한 정의가 우선적으로 수행되어야 하고, 그러한 전략이 세워진 후에는 모수추정 방법을 정의해야한다. 이전의 연구결과를 살펴보면[1] 두 개의 기기로 구성된 계통의 경우 단계시험을 실시하면 β 모수의 값이 약 두배 작아지며, 이에 따라 공통원인고장의 발생확률 역시 비슷하게 감소함을 알 수 있다.

따라서 단계시험시 각 CCF 기법들의 특성 비교를 위해, 본 연구와 같이 계통 다중도의 변화에 대한 계통이용불능도의 민감도분석 수행이 필요하다. 그리고 더 나아가 공통원인고장을 실제적으로 방어하기 위한 전략 및 PSA 등의 연구에서 이 전략의 유무를 반영할 수 있는 모델에 대한 연구도 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] A. Mosleh, K. N. Fleming, G. W. Parry, H. M. Paula, D. H. Worledge and D. M. Rasmuson, Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies, Vol 1: Procedural Framework and Examples, NUREG/CR-4780, EPRI NP-5613, February 1988.
- [2] A. Mosleh, K. N. Fleming, G. W. Parry, H. M. Paula, D. H. Worledge and D. M. Rasmuson, Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies, Vol 2: Analytical Background and Techniques, NUREG/CR-4780, EPRI NP-5613, December 1989.
- [3] H. M. Paula, D. J. Campbell and D. M. Rasmuson, Qualitative Cause-Defense Matrices: Engineering Tools to Support the Analysis and Prevention of Common Cause Failures, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 34, pp. 389-415, 1991.
- [4] 임태진외, 계통의 상태변화에 따른 공통원인고장 모델링 및 분석방법 개발, KAERI/CM-287/98, 1999.

- [5] M. Modarres, *What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis*, Marcel Dekker, Inc, New York, New York, 1993.
- [6] E. Lofgren, S. Uryasev, and P. K. Samanta, *Technical Specification Defenses Against Common-Cause Failures*, NUREG/CR-6140, BNL-NUREG-52379, 1995.