

공통원인고장을 고려한 원전 터빈블레이드 비산빈도계산

오지용** · 지문구* · 황석원*

* 한국수력원자력 중앙연구원

An Investigation of Turbine Blade Ejection Frequency Considering Common Cause Failure in Nuclear Power Plants

Ji-Yong Oh** , Moon-Goo Chi* and Seok-Won Hwang*

* Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd

(Received February 21, 2011 ; Revised February 7, 2012 ; Accepted February 8, 2012)

Key Words: Turbine(터빈) Ejection(방출), Missile(비산), Fault Tree(고장수목), Uncertainty(불확실성), Staggered(순차 시험), Non-Staggered(비순차시험)

초록: 본 논문에서는 공통원인고장을 고려하여 증기터빈 비산확률을 평가하였다. 이 과정에서 저속 및 고속에서 터빈 비산물 발생 경로를 제시하고, 고장수목을 활용하여 비산물 발생빈도를 구하였다. 공통원인고장을 고려하기 위해서 Alpha Factor 방법론을 사용하였다. 순차 및 비순차 시험에 대해서 각각의 빈도를 비교분석 하였으며, 불확실성을 평가하였다. (1) 고속회전에 의한 연성파괴로 발생하는 터빈비산물 방출빈도는 8.005E-7/year로 평가되었다. (2) 만약, 공통원인고장이 고려되면, 시험방식에 따라 11% 및 33%의 방출 빈도 증가를 확인하였다. (3) 사용된 CCF 변수의 불확실성을 고려하면, 터빈방출빈도는 90%의 신뢰도 기준 9.35E-7에서 1.13E-6 사이에 존재함을 알 수 있었다.

Abstract: The objective of this research is to examine the probabilistic approach to evaluating turbine ejection frequency considering common-cause failure. This paper identifies basic turbine ejection mechanisms under high and low speeds and presents a detailed probabilistic methodology (fault tree) for assessing ejection frequency. The alpha factor methodology is applied to common-cause failure evaluations. The frequencies under different test schemes are compared and the propagation of uncertainty through the fault tree model is evaluated. The following conclusions were reached: (1) the turbine blade ejection frequency due to ductile failure under high speed is around 8.005E-7/yr; (2) if common-cause failure is considered, the frequency will be increased by 11% and 33% depending on the test scheme; and (3) if the parameter uncertainties are considered, the frequency is estimated to be in the range of 9.35E-7 to 1.13E-6, with 90% confidence.

1. 서 론

원자력발전소의 터빈계통은 증기발생기로부터 생성된 증기를 받아 발전기를 돌리고 전기를 생산한다. 이러한 터빈은 고속으로 회전하기 때문에 정격속도를 초과하여 위험속도에 도달하게 되면, 터빈날개가 비산물이 되어 발전소 내에 있는 다른 기기를 손상시킬 수 있다. 이를 방지하기 위하여 터빈과 속도보호계통이 다중적으로 설치되어 있고 주기적 점검을 수행하고 있다. 이러한 다중적 보호계통은 공통원인고장이 발생할 수 있는 가능성이 상존하고

있으나, 기존의 터빈 신뢰성 분석 방법론에서는 그 가능성이 고려되고 있지 않고 있다. 본 논문은 원전에서 사용되는 가장 일반적인 증기터빈(고압터빈 1대, 저압터빈 3대)을 기준으로 저속 및 고속에서의 비산물방출 경로에 대해 논하고, 비산물방출에 관하여 확률론적 방법(Fault Tree)을 사용하여 평가하였다. 또한, 기존의 터빈 비산물방출 확률계산에서 고려되지 않았던 공통원인고장 및 그 불확실성을 평가하였다.

2. 방법론

2.1 증기터빈 및 터빈밸브 일반구성

원자력발전소의 터빈은 화력발전소와는 달리 포화증

† Corresponding Author, teslar@khnp.co.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

기(99.75%)를 사용하며, 1800rpm의 저속회전이 일반적이다. 고압터빈(HP)에는 4개의 고압터빈 정지밸브(SV)와 4개의 고압터빈 조절밸브(CV)가 설치되어 있다. 4개의 입구관 중 2개는 터빈 하부에 2개는 터빈 상부에 연결되어 있다. 모든 밸브는 스프링 힘에 의해서 닫혀지고, 터빈 제어유계통에서 제공해주는 유압에 의해서 열린다. 고압터빈을 돌린 증기는 2개의 습분분리재열기(MSR)에서 main steam에 의해 재가열되고 습분이 제거된 후 저압터빈으로 들어간다. MSR과 3개의 저압터빈 사이에는 각각 6개의 저압터빈 정지밸브와 조절밸브가 있다. 터빈밸브는 유압실린더에 의해 열리며 스프링에 의해 닫히는 (fail to close) 구조로 설계되었다⁽²⁾(Fig. 1).

터빈 정지 및 조절밸브는 먼저 밸브본체와 유압실린더로 구성되어 있다. 비상정지밸브의 개폐에 따라 제어유 덤프밸브가 동작하고, 이에 따라 터빈을 비상정지 시키게 된다.

터빈부하의 증감에 따라 전기적 신호를 feedback 시켜 밸브의 개도를 조절하는 밸브의 control unit은 pilot ram, pilot valve, servo valve 및 electric speed governor로 구성되어 있다. 단, control unit은 저압정지밸브에는 부착되어 있지 않다. 터빈보호신호는 터빈의 과속(110%)에 의한 원심력에 의해 동작할 수 있는 두 개의 trip 볼트/링으로 구성되어 있으며, 비상정지밸브를 동작시킨다.

2.2 증기터빈 비산물 방출확률 평가

원전 증기터빈의 리스크평가에서는 Bush⁽³⁾의 방법론이 가장 일반적으로 사용된다. 먼저 P₄는 원전의 안전관련 기기들이 터빈의 비산물에 의해 손상되는 리스크로 정의된다. P₄는 P₁, P₂, P₃의

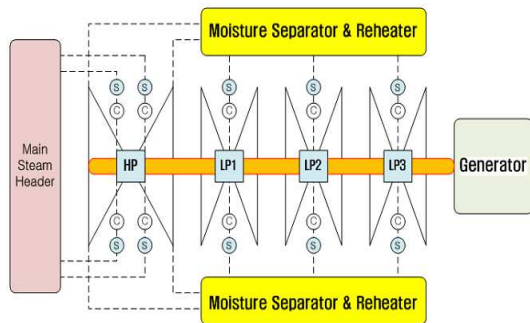


Fig. 1 Simplified system diagram for steam turbine operation⁽¹⁾

곱으로 계산된다(Fig. 2).

- P₁: 터빈으로부터 비산물이 생성되어 터빈 외부로 방출될 확률
- P₂: 방출된 터빈 비산물이 외부의 장애물을 통과 하여 안전관련 기기에 부딪힐 확률
- P₃: 부딪힌 비산물에 의해 안전관련 기기에 기능적 손상을 입힐 확률

P₁은 다시 두 가지 failure mode를 가지게 된다.

먼저, P_{1a}(brittle failure)는 터빈의 정상운전 속도(20% 과속도)에서도 발생할 수 있는 사건으로 터빈 블레이드 disk에 결함이 존재하는 과정나 균열의 성장을 가속시킬 때, 급격한 취성파괴가 발생하는 것이다. 또 하나는 P_{1b}(ductile failure)로 터빈의 부하가 탈락(load ejection)된 상황에서 터빈과 속도 보호시스템의 작동실패로 터빈이 약 180 ~ 200%로 과속되었을 경우, 원심력이 재료의 인장강도를 초과하여 연성파괴를 일으키는 경우이다.

2.3 터빈과속 고장수목 모델링^(5,6)

본 논문에서는 ductile failure가 발생할 수 있는 파괴과속도(200%) 확률을 고장수목을 이용하여 평가하였다. 파괴 과속도는 부하가 탈락되고, 4개의 고압 정지 또는 조절밸브 Set 중 하나라도 닫히지 않을 경우 발생한다(Fig. 3).

하나의 고압정지 및 조절밸브의 닫힘실패는 크게 기계적고장과 밸브의 control 및 protection 기능고장으로 나눌 수 있다. 즉 기계적 고장이 없을 경우 control과 protection기능 중 하나만 이용 가능해도 밸브의 닫힘기능은 정상적으로 동작할

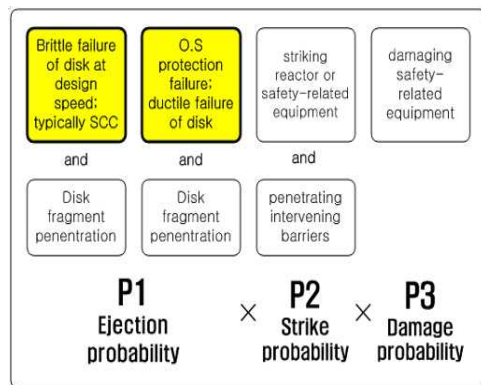


Fig. 2 Probability evaluation of steam turbine ejection⁽⁴⁾

Table 1 Stop and control valve sub-component failure data⁽⁷⁾

Top Event	Data	
	Mean	EF
HP valve body	5.0E-4	3
LP valve body	4.0E-4	3
Hydraulic cylinder	1.0E-5	3
Servo v/v	2.0E-3	3
Pilot v/v	6.0E-3	3
Pilot ram	6.0E-3	3
Speed governor	3.0E-13	3
Dump v/v	3.0E-3	3
O/S trip bolt	1.0E-2	3

Table 2 AF analysis for staggered/non-staggered test

Testing scheme	Equations
Staggered	$Q_k^{(m)} = \frac{1}{\binom{m-1}{k-1}} \alpha_k Q_t$
Non-staggered	$Q_k^{(m)} = \frac{k}{\binom{m-1}{k-1}} \frac{\alpha_k}{\alpha_t} Q_t$

- $Q_k^{(m)}$: m개의 CCCG중 k개의 CCF 확률
- Q_t : 전체 실패 확률 (독립고장+공통원인고장)
- α_k : 전체 실패 확률 중 k개 기기 CCF 비율

$$a_k = n_k / \sum_{k=1}^m n_k, \quad a_t = \sum_{k=1}^m [k \times a_k]$$

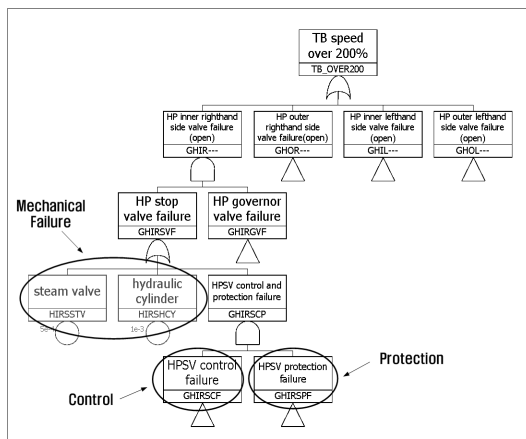


Fig. 3 Fault tree analysis for turbine gross overspeed

상기의 기기자료를 고장수목의 기본사건확률로 이용하면, 4개의 터빈밸브 set 중 하나라도 닫히지 않을 확률(계통고장)은 약 **9.606E-6**이 나온다. 또한, 각각의 정지 및 조절밸브 실패확률(기기고장)은 **1.543E-3**으로 도출되었다. 연간 부하탈락빈도(load ejection rate)를 1/12 [year]로 가정하면, 터빈이 200%로 과속되는 최종빈도는 **8.005E-7/year**로 도출된다.

2.4 공통원인고장 (Common Cause Failure)⁽⁸⁾

공통원인고장(CCF)이란 어떤 공통된 원인에 의해 다중(Redundancy)계통에서 하나 이상의 기기가 동시 또는 비슷한 시기에 발생하는 고장을 말한다. 이러한 CCF는 다중 계통에 설치된 기기들의 고장을 동시에 일으키므로 계통의 신뢰도에 큰 영향

을 줄 수 있다. 신뢰도공학에서 일반적으로 사용되는 공통원인고장(CCF)은, Basic Parameter(BP), Beta, MGL(Multiple Greek Letter), Alpha Factor(AF) 모델이 사용된다. 이들 중 가장 널리 사용되는 모델 중 하나인 Alpha factor 모델을 사용하여 CCF 확률을 구하고 기존의 고장수목 계산에 반영한다.

Alpha Factor(AF) 모델

AF 방법은 계통내에서 발생하는 고장사건의 수를 기초로 한다. MGL 방법과 마찬가지로 기기 수가 늘어남에 따라 모수의 수도 증가하고 모수 추정 및 적용이 복잡해지지만, CCF 추정에 있어 직관적인 이해가 편리한 방법론이다.

AF의 모수는 계통내에서 발생하는 고장사건의 총 빈도에 대하여 k개 다중 기기 고장 사건의 비로 정의 되며, table 2 과 같이 나타내어진다.

순차시험(staggered testing)은 각각의 기기를 일정한 주기에 따라 순차적으로 시험하는 것을 말하고, 비순차시험(non-staggered testing)은 모든기기를 일정한 주기에 따라 한번에 시험을 하는 것을 말한다. 터빈밸브에 대한 Alpha Factor 값은 미국의 Nuclear Regulatory Committee(NRC) 웹페이지에 게시되어 있는 Main Steam Isolation Valve(MSIV)의 FTC(Fail to Close) 고장모드의 평균(Mean)값⁽⁹⁾을 사용하였다.

CCF 고장수목 모델링

공통원인고장과 관련한 대표적인 coupling factor

Table 3 Alpha Factor for main steam isolation valve (CCCG=4)

Alpha Factor	5 _{th} %	Mean	Median	95 _{th} %	a	b
1	0.9144	0.9461	0.9479	0.9716	154	8.81
2	7.02E-3	2.20E-2	2.01E-2	4.35E-2	3.59	160
3	4.08E-3	1.64E-2	1.45E-2	3.54E-2	2.68	160
4	3.62E-3	1.55E-2	1.35E-2	3.39E-2	2.52	161

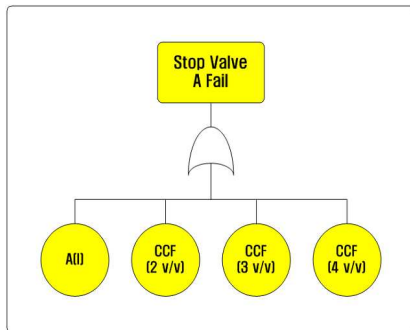


Fig. 4 Common cause failure modeling in fault tree

에는 Hardware, Operation, Environment가 있다. 즉, 기기의 설계가 유사하거나, 운전 및 정비방식이 유사하거나, 기기의 운전환경이 유사할 경우 공통원인 고장을 일으킬 수 있는 확률이 높게 나타난다. 터빈이 200%로 과속되는 고장수목에서는 4개의 정지밸브와 4개의 조절밸브를 각각 동일한 CCCG (Common Cause Component Group)으로 가정하고 공통원인 고장을 계산하였다. 한 개의 밸브에 대한 공통원인고장 모델링은 Fig. 4와 같이 나타난다.

하나의 정지밸브는 먼저, 각 하부 구성품에 의해 독립고장확률(A(I))이 계산된다. Alpha Factor 모델을 사용하면, 2개 기기, 3개 기기, 및 4개 기기의 CCF 확률을 각각 구할 수 있다. 2개 CCF와 3개 CCF는 각각 3가지의 경우의 수(AB, AC, AD ; ABC, ABD, ACD)가 있으므로 최종 확률계산시 각각 3을 곱해준다.

3. 결과

3.1 공통원인고장 확률

먼저, CCF를 고려하지 않고 구해진 정지 및 조절 밸브 고장확률을 $Q_1^{(4)}$ (독립고장)으로 가정한다면, 순차시험 및 비순차시험과 관련한 $Q_t^{(4)}$, $Q_2^{(4)}$,

Table 4 Probability results depending on number of CCF

Testing scheme	$Q_1^{(4)}$	$Q_2^{(4)}$	$Q_3^{(4)}$	$Q_4^{(4)}$	$Q_t^{(4)}$
staggered	$\alpha_1 Q_t$	$1/3\alpha_2 Q_t$	$1/3\alpha_3 Q_t$	$\alpha_4 Q_t$	-
	1.54E-3	1.19E-5	8.90E-6	2.52E-5	1.63E-3
non-staggered	$\alpha_1/\alpha_4 Q_t$	$(2/3)\alpha_2/\alpha_4 Q_t$	$\alpha_3/\alpha_4 Q_t$	$4\alpha_4/\alpha_4 Q_t$	-
	1.54E-3	2.39E-5	2.67E-5	1.01E-4	1.79E-3

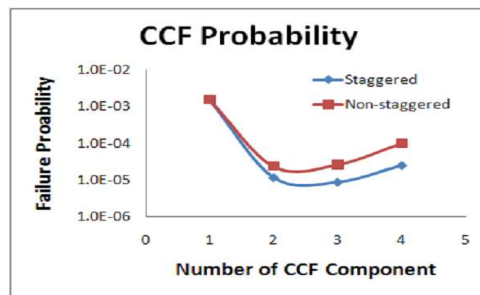


Fig. 5 CCF Prob. Comparison for staggered vs. non-staggered test

$Q_3^{(4)}$, $Q_4^{(4)}$ 가 아래 Table 4와 같이 구해진다.

Fig. 5에 의하면 터빈밸브의 경우 단일(또는 독립) 고장확률이 가장 높은 값을 보인다. 그 다음으로는 4개, 3개, 2개의 공통원인고장 사건순임을 알 수 있다. 즉, 공통원인고장 사건 중 다중의 고장사건일수록 더 높은 고장확률을 보임을 관측할 수 있다. 또한, 시험방식에 있어서 순차시험이 비순차시험에 비해서 공통원인고장 관련하여 더 낮은 고장확률을 보임을 알 수 있다. 즉, 같은 시간에 동일한 사람에 의해, 동일한 방식으로 시험이 수행된다면, 공통원인을 일으킬 수 있는 coupling factor가 더 높아질 수 있다는 점에서 직관적인 판단과도 일맥상통 한다. 실제 터빈밸브의 시험은 비순차시험으로 진행이 된다. 1개월 혹은 3개월에 한번씩 출력을 감발하고 모든 밸브의 단험시험을 수행한다. 4개의 밸브 Set중 하나라도 단험 실패를 일으키는 계통고장확률 및 그에 따른 200% 과속 빈도 계산에서 공통원인고장을 고려하게 되면 Table 5에서 보는바와 같이 나타난다.

과속빈도는 순차시험을 실시할 경우 11.3%, 비순차시험을 실시할 경우 33.1% 증가한다. 즉, 200% 과속빈도 계산시, 공통원인고장을 고려하지 않게 되면, 빈도값이 약 30% 가량 과소평가될 수 있음을 알 수 있다. 기기의 CCF가 모델링됨에 따라 최

Table 5 Overspeed frequency considering CCF

Alpha Factor		계통고장	과속빈도 [year]	계통고장 확률증가
No CCF		9.606E-6	8.005E-7	-
CCF	Staggered	1.070E-5	8.916E-7	11.3% 증가
	Non-staggered	1.279E-5	1.065E-6	33.1% 증가

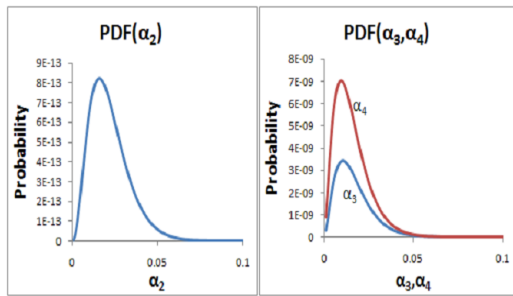


Fig. 6 Probability density function of Alpha Factor (Beta distribution)

소단절집합(MCS; Minimal CutSet) 및 기기의 중요도 (Importance) 역시 변하게 된다.

3.2 공통원인고장 불확실성 평가

공통원인고장을 평가하는 Alpha Factor는 기존의 운전 및 정비경험 자료로부터 얻어진다. NRC의 제공자료는 이러한 AF를 Beta distribution⁽¹⁰⁾으로 추정하고 자료를 제공하였다(Table 3). 본 장에서는 비순차시험(Non-staggered test)의 경우 계통고장에 대하여 AF 5%, 평균 및 95% 값에 대해 각각 평가함으로써, AF의 불확실성이 계통의 공통원인 증가분에 어떠한 영향을 주는지 평가하였다. 순수한 공통원인고장과 관련한 AF #2, #3, #4 번의 분포는 아래와 같이 그려질 수 있다.

Modarres⁽¹¹⁾에 따르면 불확실성은 먼저 Aleatory와 Epistemic로 나누어진다. 즉 Aleatory 불확실성은 확률모델 자체가 가지고 있는 임의시행(random trial)에 의해 발생하는 것이다. 반면, Epistemic 불확실성은 이러한 확률모델에 대한 한계지식(lack of knowledge)에 의해 발생하는 것으로 modeling uncertainty가 대표적이다.

즉 본 논문에서 AF를 추정하기 위해 Beta 분포를 사용하였는데, 이로 인하여 발생하는 불확실성이 Epistemic(또는 modeling) uncertainty에 해당한다. 반면, 각각의 AF의 variability는 Aleatory uncertainty에

Table 6 Uncertainty evaluation for CCF factor

AF	5 _{th} %	Mean	95 _{th} %
1	0.9144	0.9461	0.9716
2	7.02E-3	2.20E-2	4.35E-2
3	4.08E-3	1.64E-2	3.54E-2
4	3.62E-3	1.55E-2	3.39E-2
과속빈도 (비순차) [year]	1.1325E-6	1.065E-6	9.3492E-7
No CCF 대비증가	41.5%	33.1%	16.8%

해당한다고 할 수 있다. 각 AF의 불확실성은 고장수목(FT) 모델에서 propagation이 되어 최종적으로 신뢰구간에 따른 파괴과속빈도 추정에 활용된다.⁽¹²⁾ 결론적으로 파괴과속빈도는 90%의 신뢰도에서 9.35E-7~1.13E-6 구간 사이에 존재한다고 추정할 수 있다 (Table 6).

4. 결 론

본 연구에서는 증기터빈의 연성파괴를 일으키는 파괴과속도에 도달할 빈도를 고장수목을 이용하여 평가하였다. 이때, 기존에는 고려하지 않았던 공통원인고장을 모델링하고, 그에 따른 불확실도를 평가하였다.

(1) 터빈 블레이드의 연성파괴(ductile failure)가 발생하는 기본 확률은 8.005E-7/year 로 평가되었다. 이 평가는 부하가 탈락되고, 고압터빈 4개의 밸브 set 중 하나라도 실패하여 터빈이 파괴속도로 가속되는 경우로 가정하였으며, 공통원인고장을 고려않았다.

(2) Alpha Factor 방법론을 이용하여 순차시험 및 비순차시험에 대해 공통원인고장을 고려하면, 파괴속도 발생빈도가 각각 11% 및 33%의 증가함을 알 수 있었다.

(3) 비순차시험시 파괴과속도 발생빈도는 90% 신뢰성 기준 9.35E-7~1.13E-6 사이에 존재한다.

참고문헌

- (1) KHNP, Kori units 3&4 Turbine-Generator System P&ID.
- (2) KHNP, 2004, Kori units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment Report.
- (3) Spencer H. Bush, 1973, "Probability of Damage to

- Nuclear Components Due to Turbine Failure," Nuclear Safety.
- (4) Rosario, D., 2001, "Technical Approach to Turbine Missile Probability Assessment," EPRI TR 10006451.
- (5) PRA Procedures Guide, 1982, NUREG/CR-2300, ANS and IEEE.
- (6) Park, C.K. and Ha, J.J., 2003, "Probabilistic Safety Assessment," KAERI.
- (7) Oh, J.Y. and Kim, O.G., 2010, "Test Interval Extension of Kori 3&4 Turbine Overspeed Protection System Valve," NETEC.
- (8) Mosleh, A., 1998, "Guidelines on Modeling Common Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment," NUREG/CR-5485.
- (9) 2007, "CCF Parameter Estimations 2007," updating data for NUREG/CR-5485, NRC.
- (10) Ang, A. and Tang, W., 1975, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design," Wiley & Sons.
- (11) Modarres, M., 1999, "Reliability Engineering and Risk Analysis," Marcel Dekker.
- (12) Shooman, M., 1968, "Probabilistic Reliability of Engineering Approach," McGraw-Hill.