

다중계통의 점검 및 보수로 인한 역효과(Adverse Effects)를 고려한 점검방법별 시스템 이용불능도(Unavailability) 분석

유영우, 정창현
서울대학교

제무성
한성대학교

정대욱, 류용호
한국원자력안전기술원

요 약

원자력 발전소 기기들에 대한 점검주기와 점검방법은 기술지침서(Tech. Spec)의 점검요건(SR)에 명시되어 있는데 가압경수로(PWR) 원전의 경우 다중계통 기기 점검은 교번시험(Staggered Test) 방법으로 점검하도록 되어 있다. 그러나 그 동안의 원전 운전경험에 의하면 기기 점검 및 보수로 인하여 기기 마모, 발전소 정지, 운전원의 부담감, 방사선 피폭 등의 역효과(Adverse Effects)가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 다중계통(Multi-redundancy System)중 2/4 시스템에 대한 점검방법별 이용불능도(Unavailability)를 해석적 방법으로 구하고 점검 및 보수로 인한 기기 마모 역효과를 모델링하여 점검방법별로 적용하고 비교 분석하였다.

1. 서론

원자력 발전소 기기들에 대한 점검주기는 기술지침서의 점검요건에 명시되어 있는데 현행 점검주기는 정성적인 공학적 판단에 의해 결정되어 그동안의 원자력 발전소 운전경험을 반영한 확률론적 안전성 평가(PSA) 방법으로 원자력 발전소의 설계 및 기기들의 배열변화 없이 점검주기를 개선하여 원전의 안전성 향상은 물론 운전의 유연성을 도모할 수 있는 것으로 밝혀졌다[1].

기존 기술지침서에서 다중계통의 점검방법으로는 한번 점검시 다중계통(Multi-redundancy System) 기기를 모두 순차적으로 점검하는 순차적 점검시험(Sequential Surveillance Test)과 다중계통 기기를 균일한 시간으로 엇갈려서 점검하는 교번 점검시험(Staggered Surveillance Test)중 하나로 점검을 수행하도록 명시하고 있다. 순차적 점검방법은 교번 점검방법 보다 시스템 이용불능도가 높게 나타나고 점검으로 인한 인적오류의 상호종속성이 있으나 한번 점검주기시 다중계통 기기 모두를 점검하기 때문에 기기 점검에 따른 운전원과 검사원의 부담감이 교번 점검방법 보다 적고 점검에 따른 비용 부담도 적다. 일반적으로 가압경수로 원전의 점검방법으로는 안전성 측면에서 이용불능도가 낮은 교번 점검방법을 대부분 점검방법으로 채택하고 있다. 기존 다중계통에 대한 이용불능도 평가 연구는 [2]에 의해 1,2,3/4 시스템으로 구성된 다중계통의 순차적 점검방법이 수행되었고 [3]에 의해 1,2/3 시스템으로 구성된 교번 점검방법이 수행되었다. 그러나, 1/4이상 다중계통 기기의 점검주기가 짧을 경우 교번 점검방법은 기존 이용불능도 평가면에서 낮더라도 운전원의 부담감을 과중시켜 점검에 따른 인적오류를 증대시켜 안전성을 저하시킬 수도 있고 원전 운영경험을 바탕으로 점검주기 개선연구 [1]에서 제시한 기기 점검 및 보수로 인한 기기별 마모, 발전소 정지,

운전원의 부담감, 방사선 피폭 등의 역효과(Adverse Effects)를 경감화하여 이용가능도를 구하는데 반영되어야 할 것이다.

본 연구에서는 원전의 안전성 확보 때문에 채택하고 있는 다중계통중 1/4 및 2/4 시스템에서 적용할 수 있는 점검방법을 교번 점검방법, 순차적 점검방법, 그리고 교번과 순차적 점검방법을 혼합한 각 Train별로는 교번 점검방법을 하고 Train내에서는 순차적 점검방법으로 하는 시스템 이용가능도를 구하고 점검 및 보수로 인한 역효과중 기기 마모(Wear)효과를 경감화하기 위해 기기 작동시 고장률(Failure Rate of Run)과 요구시 고장률(Failure of Start)에 반영하여 모델링하고 점검방법별 시스템 이용가능도를 계산 하였다. 여기서 점검방법별 시스템 이용가능도 방법을 향상 3/4회기 보조급수펌프 점검에 적용 하였다.

2. 본론

2.1 2/4 시스템 점검방법

본 논문에서 적용된 시스템 점검방법은 다음과 같다. 2/4 시스템 기기 점검시 균일한 시간전적으로 하는 교번 점검방법에 대한 점검주기와 점검 및 보수시간을 고려한 시스템 점검방법을 나타내면 그림 1과 같다. τ 는 점검주기를 나타내고 BC, DE, FG, HI 시간 τ_r 은 점검 및 보수하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 점검으로 인한 인적오류 공통원인고장은 연속적 점검이 아니므로 상호종속적이다.

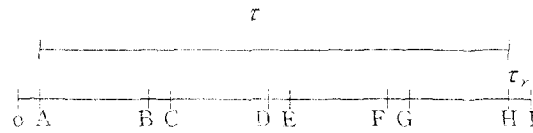


그림 1. 2/4 시스템 교번 점검방법.

Train별로는 교번점검 하고 Train 내에서는 순차적으로 점검하는 방법은 그림 2와 같다. 이는 점검주기를 나타내고 BC, CD, EF, FG 시간 τ_r 은 시험 및 보수하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 점검으로 인한 인적오류 공통원인고장은 Train 내에서는 연속적이므로 상호종속적이다.

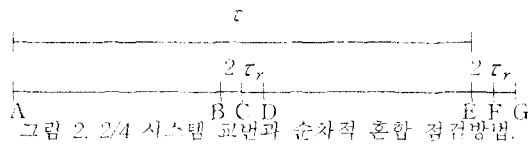


그림 2. 2/4 시스템 교번과 순차적 혼합 점검방법.

한번 점검시 기기 전부를 점검하는 순차적점검에 대한 방법은 그림 3과 같다. τ 는 점검주기를 나타내고 BC, CD, EF, FG 시간 τ_r 은 시험 및 보수하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 점검으로 인한 인적오류 공통원인고장은 상호종속적이다.

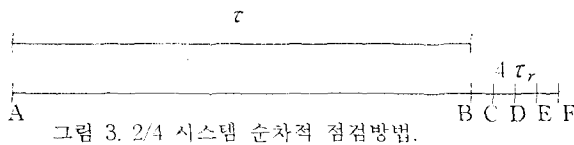


그림 3. 2/4 시스템 순차적 점검방법.

2.2 점검 및 보수로 인한 역효과 (Adverse Effects)

최근의 기술지침서 개선과 관련된 점검주기 연구에서 그 동안의 운전경험을 바탕으로 점검 및 보수로 인한 역효과를 원인별 점검기기 종류에 따라 요약 정리하면 다음 표 1과 같다[1].

표 1. 점검 기기별 역효과

점검기기	역효과 (adverse effects)	Plant Transient	Unnecessary Wear	Licenses burden	Radiation Exposure
주중기 격리밸브(MSIV)		0			
터빈 과속도 보호장치		0		0	
디젤발생기 가동시험			0		
보조급수펌프 (AFWP)			0	0	
ECCS, 격납용기 밸브시험				0	0

표 1에서 처럼 점검으로 인한 역효과중 기기 마모(Wear)를 정량화하기 위해 운전자료를 기준으로 작동시 고장률(Failure Rate of Run, λ)과 요구시 고장률(Failure of Start, D)에 적용하면 다음 두 모델과 같다.

$$\text{Model 1 : } \lambda \left\{ (1-P) + P \left(\frac{W}{T} \right) \right\} - (1), \quad D \left\{ (1-P) + P \left(\frac{W}{T} \right) \right\} - (2)$$

$$\text{Model 2 : } \lambda \left\{ 1 + P \left(\frac{W}{T} \right) \right\} - (3), \quad D \left\{ 1 + P \left(\frac{W}{T} \right) \right\} - (4)$$

T는 점검주기, W는 기기 작동시 고장률과 요구시 고장률 자료의 기준 점검주기, P는 점검기기 마모 역효과를 기준 점검주기 작동시 고장률과 요구시 고장률의 비율을 나타낸다. 기기 및 시스템 이용불능도를 구하는데 기존 방법[2],[3]으로는 점검주기 변화에 따라 작동시 고장률과 요구시 고장률을 일정한 상수(Constant)값으로 가정하고 구하였기 때문에 점검 및 보수로 인한 효과를 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. 수식 (1)-(4)는 점검 및 보수로 인한 역효과를 적용하여 점검주기에 따라 작동시 고장률과 요구시 고장률은 변화하고 있음을 나타낸다. 운전자료에 따라 모델 1과 모델 2를 적용할 수 있는데 모델 1은 기준 점검주기의 작동시 고장률과 요구시 고장률에 점검으로 인한 역효과가 포함된 경우에 적용하고 모델 2는 작동시 고장률과 요구시 고장률에 점검으로 인한 역효과가 포함되지 않는 경우에 적용한다.

2.3 적용 시스템 점검방법별 이용불능도

영광 3,4호기 보조급수펌프는 2개의 Train으로 되어 있고 각 Train은 디젤구동펌프와 전기구동펌프로 구성되어 있다[4]. 보조급수계통은 주급수계통이 운전 불가능한 경우 원자로 냉각계통이 정지 냉각계통과 연결될때까지 증기발생기에 적당한 수위를 유지하기 위해 펌프에 의해 보조급수를 공급한다. 영광 3,4호기 경우 각각의 펌프는 증기발생기 수위유지를 위해 공급유량 50%를 급수할 수 있으므로 2/4 시스템으로 볼 수 있고 점검주기는 1개월, 점검방법으로는 교번 점검방법으로 점검하고 있다[5].

2/4 시스템 점검방법별 이용불능도 해석하는 점검으로 인한 역효과를 적용한 작동시 고장률과 요구시 고장률. 점검 및 보수시 인적오류(Human Error), 각 고장원인별 공통원인고장(CCF)을 적용하였다. 첨자1은 디젤구동펌프를 나타내고 첨자2는 전기구동펌프를 나타내며 점검순서는 상호 순환적이기 때문에 점검방법에 상관 없이 Train 1의 디젤펌프, 전기구동펌프, Train 2 디젤펌프, 전기구동펌프 순서로 점검한다고 가정하였다. 작동시 고장과 요구시 고장의 공통원인고장은 디젤펌프와 전기구동펌프에 대해 기동방식과 동력원이 서로 다르기 때문에 펌프종류에 따라서는 상호 독립적이라고 가정하여 β 모델을 사용하였다. 각각의 고장 요소와 공통원인에 따른 관련 수식은 다음과 같다. λ_{d1} 은 디젤구동펌프 작동시 고장률을 나타내고 수식 (5)은 작동시 공통원인 고장률, (6)은 작동시 전체 고장률을 나타낸다.

$$\frac{\beta_{n1}}{(1-\beta_{n1})} \lambda_{n1} = \lambda_{c1} - (5), \lambda_{n1} + \lambda_{c1} = \lambda_1 - (6)$$

D_{n1} 은 디젤구동펌프 요구시 고장확률을 나타내고 수식 (7)은 요구시 공통원인 고장률, (8)은 작동시 전체 고장률을 나타내고 전기구동펌프 고장 요소와 공통원인도 수식 (5)-(8)과 동일하게 나타내고 첨자만 2로 표시한다.

$$\frac{\beta_{n1}}{(1-\beta_{n1})} D_{n1} = D_{c1} - (7), D_{n1} + D_{c1} = D_1 - (8)$$

점검 및 보수시 인적오류 발생 가능성은 종류에 따른 점검방법의 유사성과 보수의 유사성 때문에 다른 종류일지라도 상호 종속적으로 가정하여 조건부 확률(Conditional Probability)을 사용하였다 [6]. 또한 이런 가정은 점검방법에 따라 적용하여 순차적 점검시에는 상호종속적이고 교번 점검시에는 상호 독립적이다.

점검 및 보수시 한개의 인적오류는 γ_0 , 연속 2개의 인적오류 $\gamma_0\gamma_1$, 연속 3개의 인적오류 $\gamma_0\gamma_1\gamma_2$ 연속4개의 인적오류 $\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$ 로 조건부 확률을 적용한다. 조건부 확률의 조건은 다음과 같다.

상호종속적일 경우 : $\gamma_0 < \gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3 \dots - (9)$, 상호독립적일 경우 : $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 \dots - (10)$ 이러한 가정들을 이용하여 수식 (5)-(10)을 적용시켜서 2/4 시스템의 점검방법별 시스템 이용불능도 항목별 수식을 유도하였으며 그 내용은 Appendix A에 나타내었다. 점검 및 보수로 인한 역효과를 적용한 이용불능도는 수식 (1)-(10)을 이용하여 위와 같은 방법으로 구한다. 시스템 이용불능도 계산 적용은 발전소의 운전경험을 반영한 고유자료(Specific Data)가 없기 때문에 고장원인별 자료는 [7]의 참고자료(Reference Data)를 사용하였으며 각 자료들의 Error Factor는 10을 사용하였다. 점검 및 보수로 인한 역효과 자료는 미국 원전의 고유자료[8]를 사용하였다. 사용한 자료는 표 2와 3에 나타내었다.

표 2. [7]의 보조급수펌프 고장원인별 자료

	요구시 고장률	작동시 고장률	CCF (Beta)	Human Error
Motor Pump	1.3E-3/d (N.E.util)	8.0E-5/hr	0.0546(fail to start)	3.28E-3
	3.0E-3/d(ALWR PRA KAG)	1.5E-4/hr	0.003(fail to run)	7.98E-4
Diesel Pump	3.1E-3/d (N.E util)	8.0E-5/hr	0.0546(fail to start)	3.28E-3
	2.0E-2/d(ALWR PRA KAG)	1.0E-4/hr	0.003(fail to run)	7.98E-4

표 3. [8]의 보조급수펌프의 고장원인별 발생비율(%)

Lack of Lubrication or Cooling	Maintenace Error	Wear/end of life	Not stated	Etc
23 %	17%	15%	19%	23%

4가지 점검방법별 점검으로 인한 역효과를 고려하지 않는 계산 결과는 그림 4와 같이 나타났고 역효과를 고려한 결과는 모델 1를 적용하여 그림 5로 나타냈다. 그림 6, 7, 8, 그리고 9는 각 점검방법별 점검으로 인한 역효과를 고려하지 않는 경우와 고려한 경우에 대해 비교하여 나타내었다. 점검 주기 30일, 60일, 90일에 대한 점검방법별 이용불능도의 값을 수치로 비교 정리하면 다음 표 4와 같다.

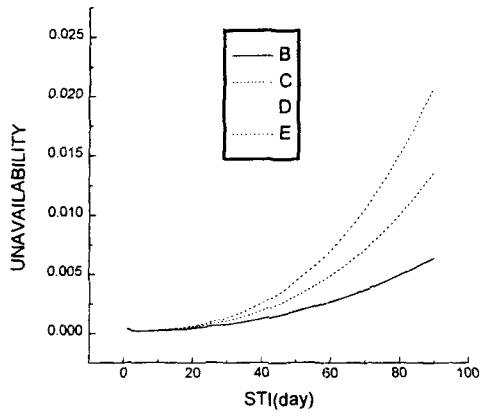


그림 4. adverse effect를 고려하지 않는
점검방법별 이용불능도

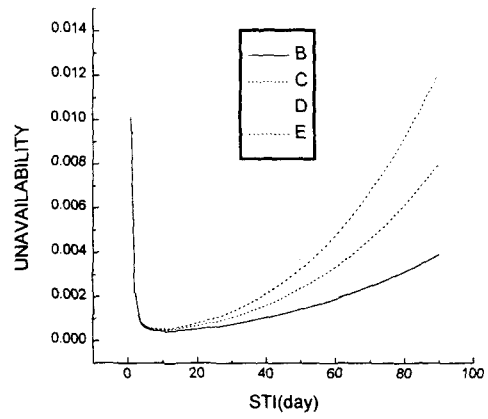


그림 5. adverse effect를 고려한
점검방법별 이용불능도

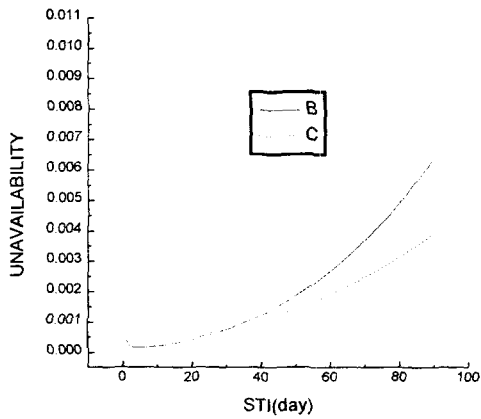


그림 6. all staggered test 시
이용률상도 비교

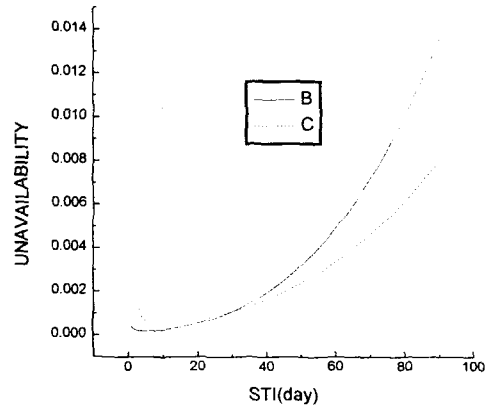


그림 7. train staggered test 시
이용률상도 비교

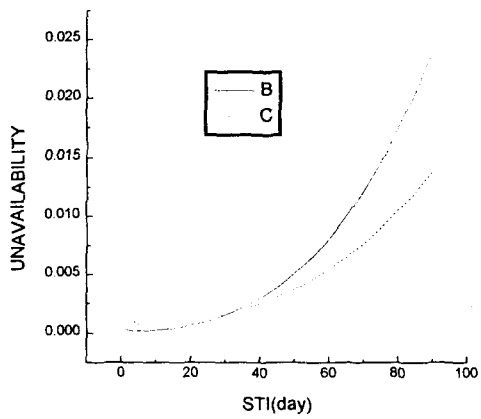


그림 8. 고정 점포를 staggered test 시
이용률상도 비교

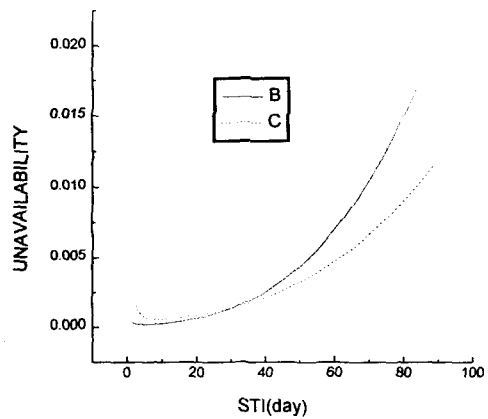


그림 9. all sequential test 시
이용률상도 비교

표 4. 점검주기별 이용불능도(Unavailability)

	All Staggered test		Train Staggered Test		The same component Staggered Test		All Sequential Test	
		(Wear)		(Wear)		(Wear)		(Wear)
30일	7.62×10^{-4}	7.62×10^{-4}	1.07×10^{-3}	1.07×10^{-3}	1.33×10^{-3}	1.33×10^{-3}	1.54×10^{-3}	1.54×10^{-3}
60일	2.68×10^{-3}	1.91×10^{-3}	4.83×10^{-3}	3.35×10^{-3}	7.01×10^{-3}	4.78×10^{-3}	8.1×10^{-3}	5.50×10^{-3}
90일	6.38×10^{-3}	3.91×10^{-3}	1.36×10^{-2}	7.96×10^{-3}	2.08×10^{-2}	1.20×10^{-2}	2.40×10^{-2}	1.39×10^{-2}

표 4에서 처럼 이용불능도는 각각의 점검방법에 대해서는 증가하고 점검으로 인한 역효과를 적용하면 점검주기를 연장하면 할 수록 이용불능도 증가량은 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 기기 및 시스템 이용불능도를 구하는데 기존 방법 [2],[3]과 점검 및 보수로 인한 효과를 적용한 점검주기 변화에 따라 작동시 고장률과 요구시 고장률 값이 변하는 모델 1은 2/4 시스템 보조급수펌프의 점검주기 30일 이후에서 많은 차이를 보여주고 있다. 점검방법별 이용불능도 차이는 작동시 고장률과 점검 및 보수시 인적오류에 영향을 받고 요구시 고장률 값에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Appendix A).

3. 결론

1992년도에 미국에서 수행된 기술지침서 점검요건 개선 연구 [1]에서는 보조급수펌프에 대해 점검으로 인한 기기 마모의 역효과(Adverse Effect)를 고려하여 점검주기를 ASME Code 요건에 따라 3개월로 할 것을 권고하고 있다. 본 연구의 계산 결과에서 보여준 바와 같이 현행 점검주기 1개월 이후 시간에서 이용불능도는 증가하나 점검으로 인한 기기 마모의 역효과를 고려하면 증가량이 급격히 감소하고 있어 [1]의 권고요건에 부합하고 있음을 알 수 있다. 점검주기 변화에 따른 시스템 이용불능도를 구할때 작동시 고장률과 요구시 고장률 값은 기존의 방법 [2],[3] 보다는 운전경험을 바탕으로 시스템에 따라 적합한 모델링을 통해 구해야 할 것이다. 1/4이상 다중계통에 대한 점검방법으로는 작동시 고장률과 점검 및 보수시 인적오류의 영향이 적은 시스템의 경우 운전원에게 부담감을 줄일 수 있는 점검방법으로 기기들을 점검하여 안전성 향상은 물론 원전 운전의 유연성을 도모 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Lobel R. and Tjader T.R., "Improvements to Technical Specifications Surveillance Requirement", NUREG-1366, May 1992
2. G.E. Apostolakis and P.P. Bansal, "Effect of Human Error on The Availability of Periodically Inspected Redundant Systems", IEEE Trans. Reliab., R-26, 220, 1977
3. G.E. Apostolakis and T.L. Chu, "The Unavailability of Systems under Periodic Test and Maintenance", Nuclear Technology, vol. 50, 1980
4. 영광 3,4 호기 발전소계통 설명서, 한국원자력안전기술원

5. US NRC, "Standard Technical Specifications" NUREG-1432, 1992.9
6. Swain, "HRA Handbook", NUREG/CR-1278
7. 영광 3,4호기 확률론적안전성분석, 한국전력공사
8. M.L. Adams and E. Makay, "Aging and Service Wear of Auxillary Feedwater Pumps for PWR Nuclear Power Plants", NUREG/CR-4597, July 1986
9. 신 원기 외, "국내 원전 기술지침서 표준화 연구", 3차년도 보고서, KINS/GR-104, 1995.7

Appendix A.

2/4 시스템의 점검방법별 이용불능도는 다음 표 5, 6과 같다. 표 5는 이용불능도중 인적오류가 반영안된 작동시 고장률과 이용시 고장률로 유도된 이용불능도를 항목별로 분류 정리하였고 표 6은 인적오류가 적용되어 유도된 이용불능도를 항목별로 분류하여 점검방법별로 비교하였다.

표 5. 작동시 고장률과 이용시 고장률로 유도된 점검방법별 이용불능도

All Staggered Test	Train Staggered Test	The same pump Staggered Test	All Sequential Test
$2(D_d^2 D_{d_1} + D_d D_{d_1}^2)$	$2(D_d^2 D_{d_1} + D_d D_{d_1}^2)$	$2(D_d^2 D_{d_1} + D_d D_{d_1}^2)$	$2(D_d^2 D_{d_1} + D_d D_{d_1}^2)$
$2(D_c D_{d_1} + D_c D_{d_1})$	$2(D_c D_{d_1} + D_c D_{d_1})$	$2(D_c D_{d_1} + D_c D_{d_1})$	$2(D_c D_{d_1} + D_c D_{d_1})$
$(D_{d_1}^2 \lambda_{r_2} + D_{d_1}^2 \lambda_{r_1})\tau$	$(D_{d_1}^2 \lambda_{r_2} + D_{d_1}^2 \lambda_{r_1})\tau$	$(D_{d_1}^2 \lambda_{r_2} + D_{d_1}^2 \lambda_{r_1})\tau$	$(D_{d_1}^2 \lambda_{r_2} + D_{d_1}^2 \lambda_{r_1})\tau$
$2(D_d D_{d_1} \lambda_{r_1} + D_d D_{d_1} \lambda_{r_2})\tau$	$2(D_d D_{d_1} \lambda_{r_1} + D_d D_{d_1} \lambda_{r_2})\tau$	$2(D_d D_{d_1} \lambda_{r_1} + D_d D_{d_1} \lambda_{r_2})\tau$	$2(D_d D_{d_1} \lambda_{r_1} + D_d D_{d_1} \lambda_{r_2})\tau$
$(D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2} + D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}) \frac{23\tau^2}{24}$	$(D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2} + D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}) \frac{13\tau^2}{12}$	$(D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2} + D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}) \frac{10\tau^2}{12}$	$(D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2} + D_d \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}) \frac{4\tau^2}{3}$
$(D_d \lambda_{r_1}^2 + D_d \lambda_{r_2}^2) \frac{5\tau^2}{12}$	$(D_d \lambda_{r_1}^2 + D_d \lambda_{r_2}^2) \frac{5\tau^2}{12}$	$(D_d \lambda_{r_1}^2 + D_d \lambda_{r_2}^2) \frac{2\tau^2}{3}$	$(D_d \lambda_{r_1}^2 + D_d \lambda_{r_2}^2) \frac{2\tau^2}{3}$
$(\lambda_{r_1}^2 \lambda_{r_2} + \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}^2) \frac{25\tau^3}{384}$	$(\lambda_{r_1}^2 \lambda_{r_2} + \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}^2) \frac{\tau^3}{4}$	$(\lambda_{r_1}^2 \lambda_{r_2} + \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}^2) \frac{21\tau^3}{48}$	$(\lambda_{r_1}^2 \lambda_{r_2} + \lambda_{r_1} \lambda_{r_2}^2) \frac{\tau^3}{2}$
$(D_c \lambda_{r_2} + D_c \lambda_{r_1})\tau$	$(D_c \lambda_{r_2} + D_c \lambda_{r_1})\tau$	$(D_c \lambda_{r_2} + D_c \lambda_{r_1})\tau$	$(D_c \lambda_{r_2} + D_c \lambda_{r_1})\tau$
$(D_d \lambda_{c_1} + D_d \lambda_{c_1}) \frac{3\tau}{2}$	$(D_d \lambda_{c_1} + D_d \lambda_{c_1}) \frac{3\tau}{2}$	$(D_d \lambda_{c_1} + D_d \lambda_{c_1})\tau$	$(D_d \lambda_{c_1} + D_d \lambda_{c_1})\tau$
$(\lambda_{c_1} \lambda_{r_2} + \lambda_{c_1} \lambda_{r_1}) \frac{35\tau^2}{48}$	$(\lambda_{c_1} \lambda_{r_2} + \lambda_{c_1} \lambda_{r_1}) \frac{19\tau^2}{24}$	$(\lambda_{c_1} \lambda_{r_2} + \lambda_{c_1} \lambda_{r_1}) \frac{10\tau^2}{12}$	$(\lambda_{c_1} \lambda_{r_2} + \lambda_{c_1} \lambda_{r_1}) \frac{2\tau^2}{3}$
$2\{(D_{d_1}^2 + D_{c_1} + D_{d_1}^2 + D_{c_1} + 2(D_2 D_{d_1} + D_1 D_{d_1})) \frac{\tau_r}{\tau}\}$	$2\{(D_{d_1}^2 + D_{c_1} + D_{d_1}^2 + D_{c_1} + 2(D_2 D_{d_1} + D_1 D_{d_1})) \frac{\tau_r}{\tau}\}$	$2\{(D_{d_1}^2 + D_{c_1} + D_{d_1}^2 + D_{c_1} + 2(D_2 D_{d_1} + D_1 D_{d_1})) \frac{\tau_r}{\tau}\}$	$2\{(D_{d_1}^2 + D_{c_1} + D_{d_1}^2 + D_{c_1} + 2(D_2 D_{d_1} + D_1 D_{d_1})) \frac{\tau_r}{\tau}\}$
$2(D_d \lambda_{r_2} + D_1 \lambda_{r_2} + D_d \lambda_{r_1} + D_d \lambda_{r_1} + D_2 \lambda_{r_1} + D_d \lambda_{r_2})\tau_r$	$(3D_d \lambda_{r_2} + 3D_1 \lambda_{r_2} + 2D_d \lambda_{r_1} + D_d \lambda_{r_1} + D_2 \lambda_{r_1} + 2D_d \lambda_{r_2})\tau_r$	$2(D_d \lambda_{r_2} + D_1 \lambda_{r_2} + D_d \lambda_{r_1} + D_d \lambda_{r_1} + D_2 \lambda_{r_1} + D_d \lambda_{r_2})\tau_r$	$(3D_d \lambda_{r_2} + 3D_1 \lambda_{r_2} + 2D_d \lambda_{r_1} + D_d \lambda_{r_1} + D_2 \lambda_{r_1} + 2D_d \lambda_{r_2})\tau_r$
$(\lambda_{c_1} + \lambda_{c_2}) \frac{3}{2} \tau_r + (\lambda_1 \lambda_{r_2} + \lambda_2 \lambda_{r_1}) \tau_r$	$(\lambda_{c_1} + 2\lambda_{c_2})\tau_r + (3\lambda_1 \lambda_{r_2} + \lambda_2 \lambda_{r_1}) \frac{\tau_r}{2}$	$(\lambda_{c_1} + \lambda_{c_2})\tau_r + (\lambda_1 \lambda_{r_2} + \lambda_2 \lambda_{r_1}) \tau_r$	$(\lambda_{c_1} + 2\lambda_{c_2})\tau_r + (\lambda_{r_2}^2 + 2\lambda_1 \lambda_{r_2} + \lambda_2 \lambda_{r_1} + \lambda_{r_1}^2) \frac{\tau_r}{2}$
	$\lambda_{r_2}^2 \tau_r + \lambda_{r_1}^2 \frac{\tau_r}{2}$		

표 6. 인적오류를 적용하여 유도된 점검방법별 이용률능력

$2(\gamma_1 \gamma_2^2 + \gamma_1^2 \gamma_2)$	$2(\gamma_1 \gamma_2^2 + \gamma_1^2 \gamma_2)$	$2(\gamma_1 \gamma_2^2 + \gamma_1^2 \gamma_2)$	$2(\gamma_1 \gamma_2^2 + \gamma_1^2 \gamma_2)$
$4\gamma_1\gamma_2\left(D_1 + \frac{\tau}{2}(\lambda_1 + \lambda_2)\right)$	$4\gamma_1\gamma_2\left(D_1 + \lambda_1\frac{\tau}{2}\right)$	$4\gamma_1\gamma_2\left(D_1 + \lambda_1\frac{\tau}{2}\right)$	$4\gamma_1\gamma_2\left(D_1 + \lambda_1\frac{\tau}{2}\right)$
$\gamma_2^2\left(D_1 + D_d\right) + \frac{\tau}{2}(\lambda_1 + \lambda_2)$	$\gamma_2^2\left(D_1 + D_d + \frac{3\tau}{4}\lambda_1 + \frac{\tau}{4}\lambda_2\right)$	$\gamma_2^2\left(D_1 + D_d + \frac{\tau}{2}(\lambda_1 + \lambda_2)\right)$	$\gamma_2^2\left(D_1 + D_d + \frac{\tau}{2}(\lambda_1 + \lambda_2)\right)$
$\gamma_1^2\left(D_2 + D_d\right) + \frac{\tau}{2}(\lambda_2 + \lambda_1)$	$\gamma_1^2\left(D_2 + D_d + \frac{3\tau}{4}\lambda_2 + \frac{\tau}{4}\lambda_1\right)$	$\gamma_1^2\left(D_2 + D_d + \frac{\tau}{2}(\lambda_2 + \lambda_1)\right)$	$\gamma_1^2\left(D_2 + D_d + \frac{\tau}{2}(\lambda_2 + \lambda_1)\right)$
$2\gamma_1\left\{\left(D_d^2 + D_{c_1} + 2D_1D_d\right) + \left(D_d\lambda_r + D_d\lambda_1 + D_1\lambda_r\right)\tau + \lambda_{c_1}\frac{3\tau}{4} + \lambda_r\frac{5\tau^2}{24} + \lambda_1\lambda_r\frac{31\tau^2}{24}\right\}$	$2\gamma_1\left\{\left(D_d^2 + 2D_dD_1 + D_{c_1} + \left(D_d\lambda_r + D_1\lambda_r + D_d\lambda_1\right)\tau + \lambda_r\frac{5\tau^2}{24} + \lambda_{c_1}\frac{3\tau}{4} + \lambda_r\lambda_1\frac{13\tau^2}{24}\right\}$	$2\gamma_1\left\{\left(D_d^2 + 2D_dD_1 + D_{c_1} + \left(D_d\lambda_r + D_1\lambda_r + D_d\lambda_1\right)\tau + \lambda_r\frac{\tau^2}{3} + \lambda_{c_1}\frac{\tau}{2} + \lambda_r\lambda_1\frac{5\tau^2}{12}\right\}$	$2\gamma_1\left\{\left(D_d^2 + 2D_dD_1 + D_{c_1} + \left(D_d\lambda_r + D_1\lambda_r + D_d\lambda_1\right)\tau + \lambda_r\frac{\tau^2}{3} + \lambda_{c_1}\frac{\tau}{2} + \lambda_r\lambda_1\frac{2\tau^2}{3}\right\}$
$2\gamma_2\left\{\left(D_d^2 + D_{c_1} + 2D_2D_d\right) + \left(D_d\lambda_r + D_d\lambda_2 + D_2\lambda_r\right)\tau + \lambda_{c_1}\frac{3\tau}{4} + \lambda_r\frac{5\tau^2}{24} + \lambda_2\lambda_r\frac{31\tau^2}{24}\right\}$	$2\gamma_2\left\{\left(D_d^2 + 2D_dD_2 + D_{c_1} + \left(D_d\lambda_r + D_2\lambda_r + D_d\lambda_2\right)\tau + \lambda_r\frac{5\tau^2}{24} + \lambda_{c_1}\frac{3\tau}{4} + \lambda_r\lambda_2\frac{13\tau^2}{24}\right\}$	$2\gamma_2\left\{\left(D_d^2 + 2D_dD_2 + D_{c_1} + \left(D_d\lambda_r + D_2\lambda_r + D_d\lambda_2\right)\tau + \lambda_r\frac{\tau^2}{3} + \lambda_{c_1}\frac{\tau}{2} + \lambda_r\lambda_2\frac{5\tau^2}{12}\right\}$	$2\gamma_2\left\{\left(D_d^2 + 2D_dD_2 + D_{c_1} + \left(D_d\lambda_r + D_2\lambda_r + D_d\lambda_2\right)\tau + \lambda_r\frac{\tau^2}{3} + \lambda_{c_1}\frac{\tau}{2} + \lambda_r\lambda_2\frac{2\tau^2}{3}\right\}$
$2(4\gamma_1\gamma_2 + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)\frac{\tau_r}{\tau}$	$2(4\gamma_1\gamma_2 + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)\frac{\tau_r}{\tau}$	$2(4\gamma_1\gamma_2 + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)\frac{\tau_r}{\tau}$	$2(4\gamma_1\gamma_2 + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)\frac{\tau_r}{\tau}$
$2\gamma_1\left\{\left(D_2 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_2\frac{3}{4}\tau_r + \lambda_r\frac{1}{4}\tau_r + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\tau_r\right\}$	$2\gamma_1\left\{\left(D_2 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_2\frac{5}{2}\tau_r + \lambda_r\frac{1}{2}\tau_r + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\frac{\tau_r}{2}\right\}$	$2\gamma_1\left\{\left(D_2 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + (\lambda_2 + \lambda_r)\frac{1}{2}\tau_r + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\tau_r\right\}$	$2\gamma_1\left\{\left(D_2 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_2\frac{3}{2}\tau_r + \lambda_r\frac{1}{2}\tau_r + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\frac{\tau_r}{2}\right\}$
$2\gamma_2\left\{\left(D_1 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\frac{3}{4}\tau_r + \lambda_r\frac{1}{4}\tau_r + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\tau_r\right\}$	$2\gamma_2\left\{\left(D_1 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_r\frac{1}{2}\frac{\tau_r}{\tau} + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\frac{3}{2}\tau_r\right\}$	$2\gamma_2\left\{\left(D_1 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + (\lambda_1 + \lambda_r)\frac{1}{2}\tau_r + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\tau_r\right\}$	$2\gamma_2\left\{\left(D_1 + D_d\right)\frac{\tau_r}{\tau} + 2D_1\frac{\tau_r}{\tau} + \lambda_1\frac{3}{2}\tau_r\right\}$