

정기점검주기 연장에 따른 RPS/ESFAS 계측설비 드리프트 영향분석

Analysis of Drift Effect with respect to Relaxation of Surveillance Test Interval of RPS/ESFAS

김명기, 조성환

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

원자력발전소의 원자로보호계통과 공학적안전설비작동계통의 아날로그 채널은 원전의 안전성에 직접적으로 영향을 미치므로 운영기술지침서에서 안전 제한치를 점검을 1개월마다 수행할 것을 규정하고 있다. 그러나 이런 정기점검주기를 3개월로 연장했을 경우에 발전소 위험도(노심손상빈도) 증가는 미미한 것으로 나타났으며 [1] 정기점검 연장에 따른 계측기의 드리프트 영향이 없다면 점검주기연장은 타당성이 있게 된다. 본 논문에서는 정기점검주기 연장을 위하여 정기점검 기록지의 자료를 가지고 현행 1개월 점검주기시의 계측설비의 드리프트와 점검주기를 3개월과 6개월로 연장했을 때의 계측설비의 드리프트를 분석하였다. 분석 결과 아날로그 채널의 랙 드리프트는 안전제한치 이내이고 95%확률/95%신뢰도 값은 최대 0.21%로 나타났다. 또한 점검주기를 1개월에서 3개월, 6개월로 연장할 경우에 아날로그 채널의 랙 드리프트는 점검주기와는 무관한 것으로 밝혀졌다. 결론적으로 본 연구를 통하여 RPS/ESFAS 계측설비의 정기점검주기를 1개월에서 3개월 혹은 6개월로 연장하더라도 계측설비의 드리프트 영향은 없는 것으로 나타나 정기점검주기의 연장은 가능한 것으로 밝혀졌다.

Abstract

Safety limits such as trip-set-points of Reactor Protection System (RPS) and Engineered Safety Feature Actuation system (ESFAS) of nuclear power plants directly effect on safety so that surveillance tests are periodically performed to verify drift of trip-set-points. We have performed drift analysis of RPS/ESFAS with respect to relaxation of surveillance test intervals(STIs) to gain resonable basis of relaxation of STIs. We gather the data from surveillance test procedures and then analyze 95%

confidence /95% reliability of analog channel for 1 month, 3 month and 6 month STI, respectively. The result shows that the maximum drift is 0.21% and the drift does not depend on STIs. Therefore, we reach the fact that the relaxation of STIs of RPS/ESFAS is feasible from a viewpoint of analog channel drift.

1. 계 요

원자력 발전소 설계 시에 예상치 않은 사건이나 이상 상황 하에서도 계통이나 발전소의 안전성을 충분히 확보하기 위하여 원자력 발전소의 공정을 제어하고 계측하는 기기의 불확실성 및 안전 해석의 불확실성을 반영할 수 있도록 안전 여유도 및 허용치 개념을 사용하여 설계한다. 원자로보호계통(Reactor Protection System; RPS) 및 공학적안전설비작동계통(Engineered Safety Feature Actuation System; ESFAS)은 10CFR50 App. A GDC 20, "보호 계통의 기능" 요건에 따라 예상 운전 사고시의 핵연료 허용 설계 한도의 보장을 위해 반응도 제어 계통 관련 계통의 자동 동작 개시 및 사고 조건을 감지하여 안전에 중요한 계통과 부품의 동작을 개시하는 계통으로서, RPS/ESFAS와 관련된 채널과 연동은 정지 설정치 및 응답 제한 시간과 일치되게 작동 가능해야 함을 명시하고 있다. 이러한 RPS 및 ESFAS에 대한 계측 설비의 정지 설정치, 허용치 및 정기 점검 요건은 운영기술지침서에 기술되어 있다.

1977년 NRC는 웨스팅하우스사로 RPS 및 ESFAS설비에 대한 설정치 결정 방법론에 대한 질의를 하였는데 1981년 웨스팅하우스사는 WCAP-9712 보고서를 통하여 언급하기를 안전 여유도는 전체 허용오차와 통계적 오차의 차를 가지고 계산하며, 통계적 오차는 일반적으로 통계학에서 사용되는 방법인 오차 요소 별 제곱합 평방근(Square Root Sum Square; SRSS)법을 사용한다고 답변하였다. 그러면서 통계적 허용 오차 계산 시에 고려된 아날로그 채널의 렉드리프트 값은 1.0%로 고려하여 안전 여유도를 분석한다고 기술하였다.

그러나 이 값은 발전소 운전경험 자료에 비추어 보면 매우 보수적인 값으로 나타났다. 미국 제어 및 계측 기기 협회(ANSI/ISA)는 계측 설비의 드리프트 문제에 대하여 가능한 발전소 고유의 이력 자료를 바탕으로 한 95% 확률/95% 신뢰도 드리프트 값을 사용하여 안전여유도를 분석할 것을 추천하고 있다. 이에 따라 미국의 몇몇 원전에서는 발전소에서 매월 시행하는 정기점검 기록지 자료를 바탕으로 95% 확률/95% 신뢰도 값을 기준으로 렉 드리프트 영향분석을 수행하고 이 결과를 바탕으로 정기점검 주기 연장 및 안전 여유도 완화에 기본 자료로 활용하고 있다.

본 논문에서는 상기에서 언급한 드리프트분석 방법을 사용하여 정기점검주기 연장에 따른 드리프트를 분석하고자 한다. 이를 위하여 고리 3,4호기의 핵계장 및 아날로그 채널의 정기 점검 기록지에 기록된 트립 설정치에 대한 시험값(as found value)과 전 시험값(as left value)의 드리프트에 대한 평균, 표준 편차 및 특이치를 분석하고, 95% 확률/95% 신뢰도 구간 추정을 통하여 허용 오차 및 최대 오차 기대치를 구하여 아날로그 채널의 드리프트 경향과 현행 1개월로 되어있는 점검 주기를 3개월 및 6개월로 연장하였을 경우에 드리프트의 영향을 분석하였다.

2. 아날로그 채널 렉 드리프트 분석

고리 3,4 RPS 및 ESFAS 계통은 운영기술지침서 요건에 따라 출력 운전 동안에 건전성을 보장하기 위하여, 핵계장 및 아날로그 채널 기능시험, 반도체 논리 시험, 원자로 정지 차단기 시험 및 기동 계전기 시험 등을 정기적으로 실시하도록 되어 있다(그림 1). 각 발전소는 이러한 각 각의 정기 시험에 대한 절차서를 작성하여 체계적으로 시험을 수행함으로써 운영기술지침서의 제한 조건이 만족됨을 보이고 있다.

아날로그 채널에 대한 현행 정기 점검 절차서는 전송기의 후단에 시험 전압을 인가하여 경보, 연동, 정지 기능의 동작 가능성을 확인하고, 특히 바이스테이블의 정지 및 복귀 전압을 측정하여 설정치 및 복귀치와 비교하여 렉 드리프트가 허용 오차 범위 내에 있는지를 조사한다. 필요시 설정 전압을 재조정하여 요구되는 범위와 정확도를 유지할 수 있도록 하고

있으며, 점검 결과는 정기 점검 수행 기록지에 기록하도록 되어 있다.

가. 정기 점검 기록지 자료 수집 및 조사

아날로그 채널의 정지 설정치 드리프트를 분석하기 위하여 1개월 주기를 갖는 정기 점검 절차서를 조사하여 11개의 기능시험 절차서를 분석 대상으로 선정하였으며 이에 해당되는 '96년부터 '97년까지 2년 동안의 아날로그 채널의 정기점검 기록지를 수집하여 분석하였다.

나. 분석 절차

발전소의 정기 점검 기록지 자료는 아날로그 채널의 기능 시험과 관련된 모든 정보를 포함하고 있으므로, 이런 데이터를 시험값/전시험값(as found/ as left)으로 사용하면 발전소 고유의 아날로그 채널의 렉 드리프트 분석이 가능하다. 본 분석에서는 다음과 같은 절차에 따라 아날로그 채널의 렉 드리프트 영향 분석을 수행하였다.

- 절차 1: 1개월 주기를 갖는 정기 점검 절차서 검토 및 분석 대상 정지 설정치 선정
- 절차 2: 현장 정기 점검 기록지 수집 및 검토
- 절차 3: 시험 값/전시험 값의 백분율 드리프트 계산
- 절차 4: 백분율 드리프트 분석을 통한 정지 신호 별, 시험 계열 별, 동작 바이스테이블 종류 별(온도, 압력, 유량, 수위 채널별) 1단계 평균 및 표준 편차 계산
- 절차 5: T-검정을 통한 정지 신호별 특이치 분석 및 제거
- 절차 6: 발전소 고유의 정지신호별, 시험계열별, 동작 바이스테이블 종류별 및 발전소 고유의 95%확률/95%신뢰도 렉 드리프트 값 산출 및 최대 예상드리프트 계산
- 절차 7: 평균, 표준 편차, 특이치 분석, 95%확률/95%신뢰도 렉 드리프트 계산
- 절차 8: 발전소 고유 드리프트 및 정기 점검주기에 따른 드리프트 경향 분석

다. 분석 방법

아날로그 채널의 드리프트 분석은 매달 실시된 기능 시험 값에서 조사된 각 바이스테이블 별 시험 값(as found)/전시험 값(as left) 자료를 바탕으로 아래 식과 같은 백분율 드리프트를 산출하여, 원자로에 대한 동작 신호별, 시험 계기 계열 별, 바이스테이블 종류 별, 발전소 별로 1 단계 평균 및 표준 편차를 계산하였다.

$$D_{M_i}(\%) = \frac{(AF_i - AL_{i-1})}{S} \times 100$$

- 단, D_{M_i} : i-월 백분율 드리프트
- AF_i : 시험값(as found value)
- AL_{i-1} : 전시험값(as left value)
- S : 바이스테이블 스패(10 V)

여기서, 1단계 드리프트 분석 시 가정된 사항은 다음과 같다.

- 고리 3,4 원전의 아날로그 채널의 기능 시험은 동일한 방법으로 실시되며, 아날로그 채널의 운전 조건 및 환경은 동일하다.
- 연차 보수시 아날로그 채널의 교정 정확도는 100% 이다.
- 모든 아날로그 채널의 백분율 드리프트는 다음 식과 같은 정규 분포를 따른다.

$$n(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

여기서, x : 백분율 드리프트
 μ : 평균값
 σ : 표준편차

일반적으로, RPS 및 ESFAS 계통에 사용되는 바이스테이블은 상당히 안정적이고 통계적으로는 정규분포를 따른다. 따라서, 기록자의 시험 값 기록 오류 및 기능 시험 전압 계측 오류 등으로 백분율 드리프트 값이 상대적으로 크게 나타날 수 있으므로 특이치 분석을 통한 특이치 선별이 필요하다.

따라서 동작 신호 별 표준 편차를 이용하여 아래식과 같이 정의되는 T-검정을 통한 특이치 분석을 실시하였다. T-값이 표 1에서 보여주고 있는 기준 값을 초과할 경우에는 분석 대상에서 제외시켰다.

$$T = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

여기서, x_i : i -백분율 드리프트
 \bar{x} : 평균값
 s : 표준편차

표 1 표본수에 따른 특이치 판정 기준값

표본수	상위 5% 유의수준	표본수	상위 5% 유의수준
10	2.18	75	3.10
20	2.56	100	3.21
30	2.75	125	3.28
40	2.87	~ 150	3.33
50	2.96	150 이상	4.00

특이치 분석을 통해 선별된 자료를 근거로 다음 단계로 평균 및 표준 편차를 구하고, 이를 바탕으로 95%확률/95%신뢰도 값과 최대 렉 드리프트 예상치를 계산하였다. 95%확률/95%신뢰도 값과 최대 렉 드리프트 예상치는 각각 아래와 같은 식에 의해 계산되었으며, 이 과정에서 사용된 허용 오차 인자는 표 2에 나타나 있다.

$$95\% \text{ 확률}/95\% \text{ 신뢰도 값} = s \times K$$

$$X_{MAX} = |\bar{X}| + Ks$$

여기서, X_{MAX} : 최대 렉 드리프트 예상치
 \bar{X}_i : 평균
 K : 허용오차인자
 s : 표준편차

표 2 허용오차인자

표본수	95%/95% 신뢰수준	표본수	95%/95% 신뢰수준
10	3,38	200	2,14
20	2,75	300	2,11
30	2,55	400	2,08
40	2,45	500	2,07
50	2,38	600	2,06
75	2,29	800	2,05
100	2,23	1000	2,04
150	2,18	∞	1,96

3. 분석 결과

표 3에서 보여 주는 바와 같이 조사 대상 기간 동안 고리 3,4호기 모두 기능 시험에 대한 합격율이 100%인 것으로 나타났다. 정기 시험 결과 보고서에 의하면, 시험 값 기록 오류가 1건으로 나타났으며, 기록 오류로 판명되어 해당 바이스테이블에 대한 재설정을 실시하지 않은 것으로 조사되었다.

표 3 발전소별 아날로그 채널 1개월 주기기능시험 합격율

발전소	바이스테이블 종 류	표본수	허용오차 범위의 수	합격율 (%)	기 록 오류수	기록 오류 근거
고리 3호기	출 력 중성자속	84	0	100,0	0	-
	1 - 10 V 바이스테이블	1536	0	100,0	0	-
고리 4호기	출 력 중성자속	92	0	100,0	0	-
	1 - 10 V 바이스테이블	1605	0	100,0	1	점검, 시험 및 교 정 결과 보고서

고리 3호기의 경우에 전체 아날로그 채널에 대한 렉 드리프트 95%확률/95%신뢰도 값은 0,109%으로 나타났으며, 최대 드리프트 예상치는 0,11%를 초과하지 않았으며, 동작 신호별로는 95%확률/95%신뢰도 드리프트 값이 0,054% ~ 0,193% 범위를 나타내었다. 동작 바이스테이블 종류별로는 수위 바이스테이블 관련 채널이 0,139%로 가장 크게 나타났으며, 각 동작 바이스테이블 채널별로는 그림 2에서 보는 바와 같이 최대 0,35% 내에서 변하고 있는 것으로 나타났다. 고리4호기의 경우에도 이와 유사한 경향을 보여주고 있는 데 전체 아날로그 채널에 대한 렉 드리프트의 95%확률/95%신뢰도 값은 0,887%으로 나타났다. 또한 최대 드리프트 예상치는 0,90%를 초과하지 않았고, 동작 신호별로는 95%확률/95%신뢰도 드리프트 값이 0,049% ~ 0,127% 범위를 가지고 있다. 동작 바이스테이블 종류 별로는 온도 바이스테이블 관련 채널이 0,113%로 가장 크게 나타났으며, 각 동작 바이스테이블 채널별로는 최대 0,6% 내에서 변하고 있는 것으로 나타났다.

4 종류의 바이스테이블(온도, 압력, 수위 및 유량)에 대한 95%확률/95%신뢰도 값에 점검 주기에 대한 경향을 보면, 대부분의 드리프트가 감소하고는 있는 것으로 나타났으며, 점검 주기에 따른 정지 설정치의 드리프트는 발전소 별 동작 바이스테이블 채널의 드리프트 경향과 마찬가지로 편방향으로의 증가는 없는 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 종합해 보면, 분석 대상 기간 중 RPS/ESFAS는 매월 실시한 기능 시험의

합격율이 100%로 나타났으며, 아날로그 채널의 바이스테이블에 대한 정지 설정치를 재설정하지 않고 주기 운전 기간을 장주기(18개월)로 운전하여도 충분한 신뢰성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 고리 3,4호기에 대한 각 발전소 별 95%확률/95%신뢰도 아날로그 채널의 랙 드리프트는 각각 약 0.11%, 약 0.09%, 약 0.08%, 약 0.07%로 나타났고, 드리프트의 경향도 편향됨이 없이 상당히 안정된 모습을 보여주고 있다. 또한 점검주기별 드리프트 분석 결과, 점검 주기에 따른 종속성은 존재하지 않는 것으로 나타났으며, 분석 대상 최대 드리프트 값을 갖는 가압기 저압력 원자로 정지 관련 채널의 랙 드리프트도 약 0.21%내로 WCAP보고서에 기술된 정지 설정치 계산 시 고려된 허용치 기준 1%를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 또한 현재 데이터를 가지고 3개월과 6개월 시험시의 경우 랙 드리프트의 분석 값은 표 4에 나타나 있는 것처럼 충분히 허용기 준치를 만족하고 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

RPS/ESFAS 내의 아날로그 채널의 안전 제한치는 원전의 안전성에 직접적으로 영향을 미치므로 운영기술지침서에서 엄격히 적용하고 있다. 따라서 발전소에서는 정기 점검 절차서에 따라 아날로그 채널의 정지 설정치를 조사하여 그 값이 허용 범위 안에 있는지 점검하고 있다. 만약 정지 설정치가 허용 범위를 벗어나면 즉시 허용정비 시간 내에 해당 채널에 대한 보수를 실시하거나, 해당 바이스테이블에 대한 재설정을 실시하도록 되어 있다. 허용정비 시간 내에 정비가 안되었을 경우에는 발전소를 정지시킬 것을 요구하고 있다.

현장의 정기점검 기록지의 자료를 분석한 결과, 고리 3,4호기에 대한 각 발전소별 95%확률/95% 신뢰도 정지 설정치 드리프트 값이 각각 약 0.11%, 약 0.09%, 약 0.08%, 약 0.07%로 나타났으며, 동작 바이스테이블 채널 별 랙 드리프트의 경향도 편향된 증가 없이 상당히 안정된 모습을 보여주고 있다.

동작 바이스테이블 종류 별(온도, 압력, 수위 및 유량)로 계산한 95%확률/95%신뢰도 랙 드리프트는 0.047% ~ 0.157% 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 웨스팅하우스형 설계 시 고려된 1.0%보다도 상당히 작은 값이며, 또한 최근 ANSI/ISA에서 정지 설정치 계산 시 고려되는 0.25% 스펠(span) 랙 드리프트 값보다도 작은 것으로 나타났다. 또한 매월 실시한 기능 시험의 합격율이 100%로 나타났다. 아날로그 채널에 대한 기능 시험 없이 주기 운전 기간을 장주기로 운전하여도 충분한 신뢰성을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 또한 드리프트의 경향이 어느 한 방향으로 치우치지 않았으며 점검 주기와는 무관한 것으로 나타났다. 즉 현행 1개월마다 시행하고 있는 아날로그 채널 기능 시험 실패에 의한 바이스테이블의 재설정은 한 건도 없었으며, 재장전 기간 중 설정된 바이스테이블 설정 값을 가지고 다음번 재장전 기간까지 사용되는 것으로 나타났다. 즉 감지기 및 전송기를 제외한 아날로그 채널을 드리프트 측면에서 보면 교정주기는 15개월이고 이를 바탕으로 분석한 아날로그 채널의 랙 드리프트 95% 확률/95% 신뢰도 값은 최대 0.21%로 나타났다.

결론적으로 RPS/ESFAS 계통의 정기점검 주기를 1개월에서 3개월로 연장하더라도 아날로그 채널의 랙 드리프트는 허용치를 만족함을 알 수 있다.

참고문헌

1. TR.95ZJ11.J1999.351, "고리3,4/영광1,2호기 원자로보호계통 및 공학적안전설비 정기점검 요건 완화연구(최종보고서)," 1999, 8
2. EPRI TR-103335, Guidelines for Instrument Calibration Extension/Reduction Programs, EPRI, March 1994.
3. "Setpoints for Nuclear Safety-Related Instrumentation", ANSI/ISA-S67.04-PART-1994, ISA, August, 1995.
4. "Westinghouse Setpoint Methodology for Protection and Control System", WCAP-9712, Westinghouse Electric Corporation, June, 1981.
5. 공정제어계통, 한국전력공사, 1995.
6. "Methodologies for the Determination of Setpoint for Nuclear Safety-Related Instrumentation", ISA-RP67.04-PART II-1994, ISA, September, 1994.

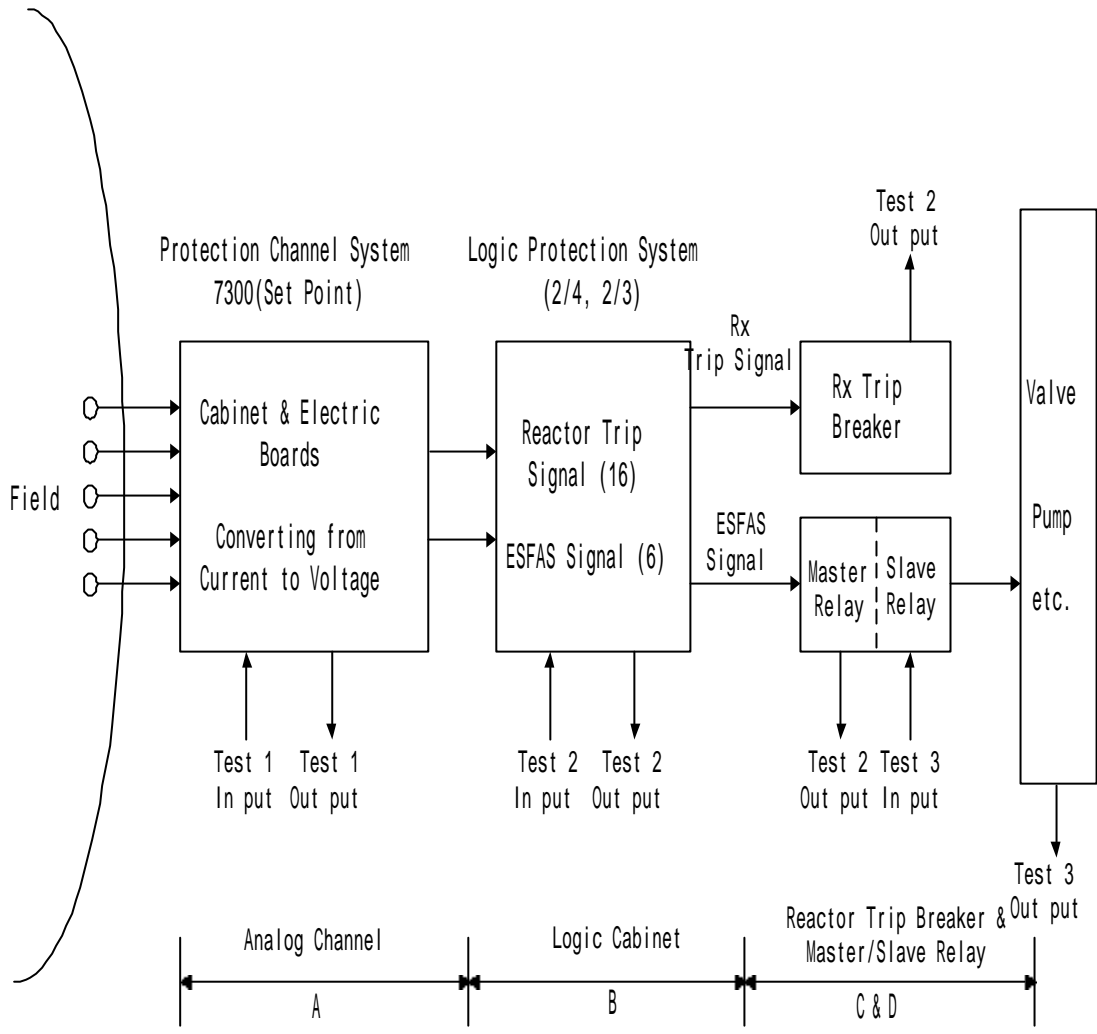


그림 1 채널 동작/기능 시험 수행도표 4 점검주기에 따른 랙 드리프트

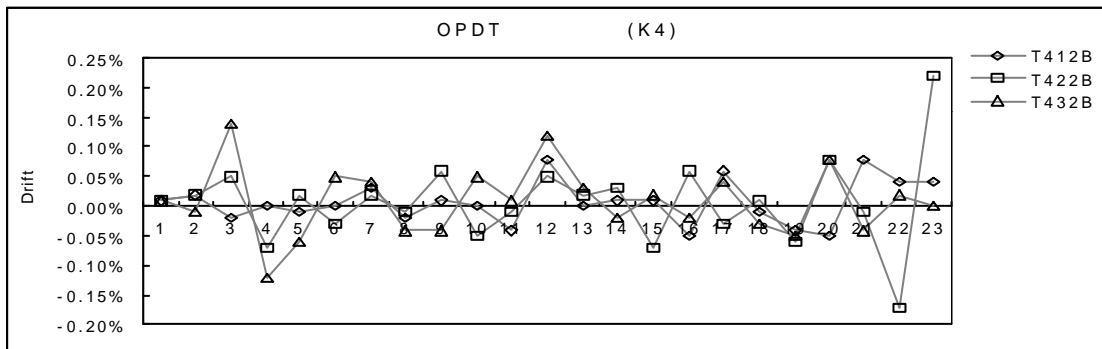
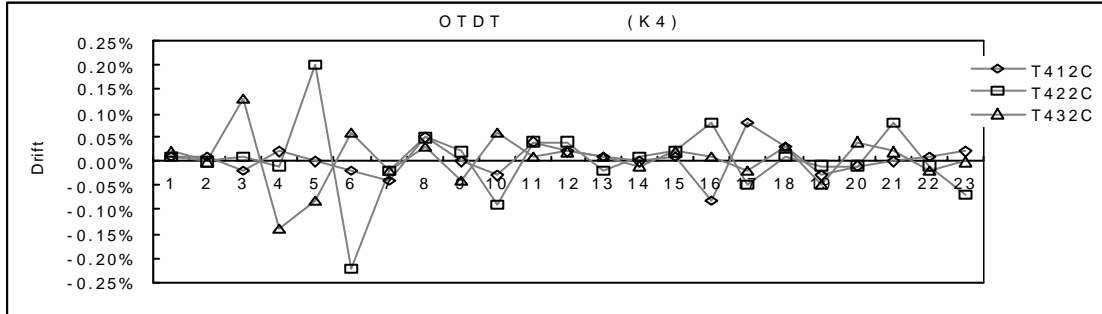
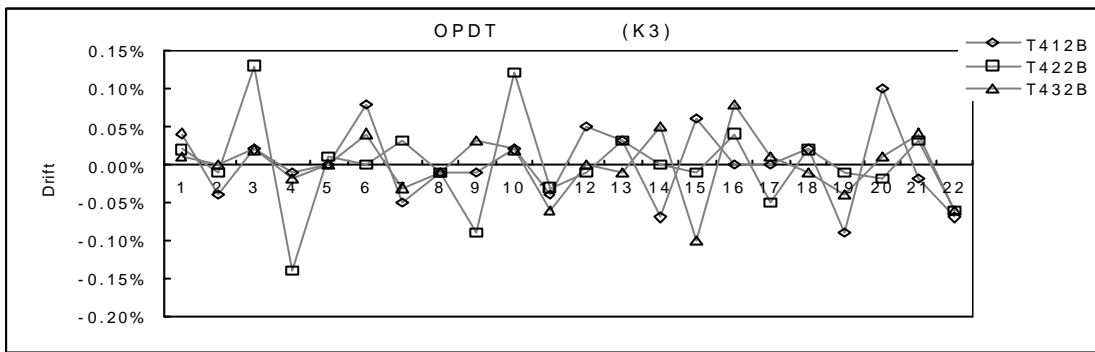
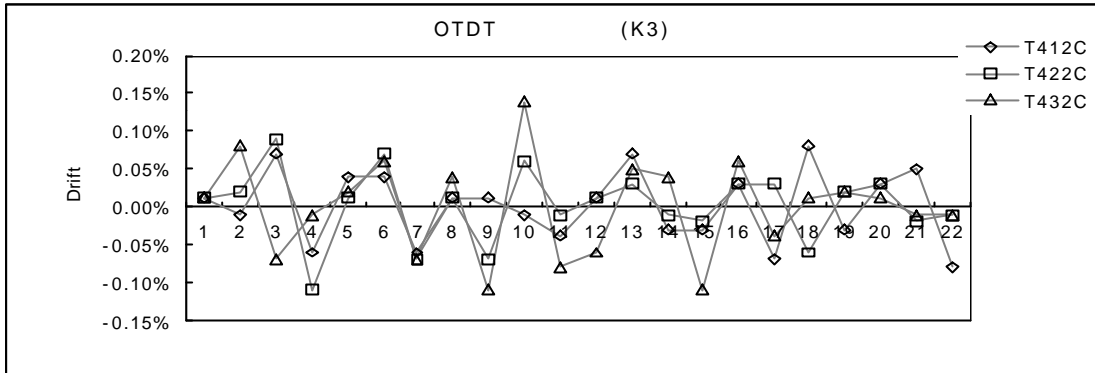


그림 2 호기별 채널별 렉 드리프트

표 4 정기점검주기에 따른 드리프트 변화 값

점 검 주 기	바이스테인블 종 류	특이치 포함여부	표본 수	평 균 (%)	표준편차 (%)	허용오차 인 자	95%/95% 신뢰도(%)	
1개월	온 도	W	342	0.00091	0.05046	2.10	0.10598	
		W/O	342	0.00091	0.05046	2.10	0.10598	
	압 력	W	1575	0.00069	0.04258	1.96	0.08346	
		W/O	1575	0.00069	0.04258	1.96	0.08346	
	수 위	W	1581	-0.00049	0.09479	1.96	0.18579	
		W/O	1579	-0.00051	0.06993	1.96	0.13705	
	유 량	W	495	0.00024	0.04189	2.07	0.08672	
		W/O	495	0.00024	0.04189	2.07	0.08672	
	총 계	W	3993	0.00018	0.06860	1.96	0.13446	
		W/O	3391	0.00018	0.05554	1.96	0.10885	
	3개월	온 도	W	66	0.00318	0.04361	2.32	0.10118
			W/O	65	0.00046	0.03789	2.32	0.08791
압 력		W	317	0.00025	0.04280	2.11	0.09030	
		W/O	313	0.00314	0.03845	2.11	0.08113	
수 위		W	308	-0.00019	0.06930	2.11	0.14621	
		W/O	301	0.00010	0.05926	2.11	0.12505	
유 량		W	99	0.00242	0.03021	2.23	0.06736	
		W/O	98	0.00122	0.02789	2.23	0.06220	
총 계		W	790	0.00059	0.05360	2.05	0.10989	
		W/O	777	0.00077	0.04656	2.05	0.09546	
6개월		온 도	W	54	-0.00352	0.03896	2.38	0.09272
			W/O	52	0.00327	0.02840	2.37	0.06732
	압 력	W	252	0.00060	0.03813	2.12	0.08084	
		W/O	249	-0.00028	0.03058	2.12	0.06482	
	수 위	W	252	0.00905	0.08037	2.12	0.17038	
		W/O	247	0.00534	0.04378	2.12	0.09282	
	유 량	W	81	0.00333	0.02775	2.27	0.06354	
		W/O	80	0.00200	0.02518	2.29	0.05766	
	총 계	W	639	0.00452	0.05788	2.06	0.11923	
		W/O	628	0.00252	0.03569	2.06	0.09546	