

‘96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

제장전노심의 노물리시험중 제어봉제어능 측정방법들에 대한 통계적 추론

정 대욱, 구 본현

한국원자력안전기술원

요약

국내 가동중원전의 노물리 시험중 제어봉제어능 측정시 적용되는 측정방법들에 대해 실제 측정 결과를 이용해서 통계적 분석 및 추론을 수행하였다. 1988년부터 현재까지 약 8년간 모든 발전소에서 행한 측정결과에 대해 통계적 분석 및 주요 시험변수들과의 상관관계를 분석한 결과, 다음과 같은 결론이 도출되었다. 제어봉 제어능 측정결과는 전반적으로 측정치가 예측치에 비해 작은 경향을 보이고 있다. 봉산화석법은 측정오차가 가장 작았고 임의성을 가지며, 노심의 봉산농도와 상관관계가 있다. Framatome방식의 제어봉교환법은 비교적 측정오차가 크나, 시험변수들과의 상관관계는 가장 미약하다. CE 방식의 제어봉교환법은 Swap 방법 중에는 측정오차가 가장 작고 임의성이 있으나, 봉산농도 및 기준제어군 제어능 측정오차의 크기와 강한 상관관계를 갖는다. Westinghouse 방식의 제어봉교환법은 가장 측정오차가 크며 대부분의 측정결과에서 측정치가 작게 편향되어 있다. 그리고 시험제어군의 제어능이 작을수록 측정오차가 커지는 강한 상관관계가 있으며, 기준제어군 제어능 측정오차의 크기와도 상관관계가 있다.

1. 서론

국내에서 가동중인 원전에서는 핵연료 교체후 재운전에 들어가기 직전에 노심설계변수의 정확성 및 노심 안전성을 확인하기 위해 노물리시험을 수행하고 있다. 노물리시험은 크게 보아 노심의 주요 운전변수인 임계봉산농도 측정, 등온온도계수(감속제온도계수) 측정, 제어봉 제어능 측정 및 출력분포 측정의 네 가지로 나눌 수 있는데, 그 중 제어봉 제어능 측정시험은 안전성 기여도, 소요시간 및 이용성 면에서 볼 때 가장 중요한 시험항목이라 할 수 있다.

제어봉 제어능 측정에 있어서 최초에는 봉산화석법을 적용하여 오다가 그후 제어봉교환법을 도입하여 적용하고 있다. 최초에는 Framatome사가 개발한 제어봉교환법을 사용하여 왔으나, 국산핵연료 개발과 함께 한국원자력연구소에서 CE 방식의 제어봉교환법을 도입하여 적용하여 왔다. 그리고 발전사업자가 핵연료 공급선을 다시 Westinghouse로 옮기면서 Westinghouse 방식의 제어봉교환법을 일부 적용하고 있다. 각 방식은 나름대로의 장단점이 있으나, 제어봉 제어능을 기준제어군의 제어능을 통해서 간접적으로 추론한다는 점에서 공통점이 있다. 또한 그렇기 때문에 다른 시험변수들과의 상관관계가 있을 것으로 예상되어 통계적인 분석을 수행하였다.

통계적인 분석 및 추론은 다음과 같이 수행되었다. 첫째로는 평균, 표준편차 및 절대오차의 평

균 등 기본적인 통계치들을 계산하여 각 방식의 측정결과와 특성을 파악하였다. 다음으로는 각 방식에 대해서 측정오차와 시험변수 사이의 공분산(Covariance) 및 Pearson 상관계수(Correlation Coefficient)를 계산하고, 각 유의수준에 따른 t-검정을 수행하여 측정결과와 시험변수와의 상관관계를 분석, 판정하였다.

2. 본론

2.1 제어봉 제어능 측정방법

2.1.1 붕산희석법(Boron Dilution Method)

이 방법은 1차 냉각재내에 용해되어 있는 붕산을 희석하여 노심에 정반응도를 서서히 삽입시키면서 제어군을 단계적으로 삽입하여 이를 보상해 주는 방법이다. 제어군이 완전히 삽입되면 그때까지 보상해준 반응도의 합이 바로 제어군의 제어능이 된다. 이 방법은 제어군 삽입에 따른 증성자속의 변화를 반응도계산기에서 직접 읽어서 반응도를 계산하므로 가장 정확할 것으로 예상되지만, 붕산희석 및 주입을 반복하므로 시험시간이 너무 길고 폐기물 발생량이 많다는 단점이 있다.

2.1.2 제어봉 교환법

이 방법은 가장 제어능이 큰 제어봉을 기준제어군으로 선정하고 붕산희석법으로 제어능을 측정한다 다음 이를 토대로 제어봉을 교환하면서 기준제어군의 제어능을 이용하여 시험제어군의 제어능을 추론하는 방법이다. 현재까지 국내에서 적용된 제어봉교환법은 다음의 세 가지가 있다.

2.1.2.1 Framatome 방식의 제어봉 교환법

이 방법에서는 기준 제어군이 완전히 삽입된 상태에서 시험제어군을 삽입하면서 기준제어군을 인출한다. 시험제어군이 완전 삽입되면, 붕산을 주입하면서 기준제어군을 완전히 인출한다. 그 다음, 시험제어군을 인출하면서 기준제어군을 삽입한다. 시험제어군이 완전 인출되면, 그때까지 삽입된 기준제어군의 적분제어능을 시험제어군의 제어능으로 추론한다. 이 방법은 제어봉 교환시 기준제어군과 각 개별제어군과의 일대일 교환이 수행되므로 부분적인 붕산주입이 필요하다.

2.1.2.2 CE 방식의 제어봉교환법

국산핵연료 장전이후 노심설계자인 KAERI는 제어능 결정시 기준제어군과 시험제어군의 중첩을 허용하고 시험제어군끼리 교환하는 CE 방식의 제어봉 교환법을 도입하여, 붕산주입 없이 각 시험제어군의 제어능을 추론하고 있다. 이 방법은 기준 제어군이 완전히 삽입된 상태에서 시험제어군1을 삽입하면서 기준제어군을 인출한다. 시험제어군1이 완전 삽입되면 이 상태에서의 기준제어군의 위치를 시험제어군1에 대한 임계위치로 선정한다. 다음에는 시험제어군1을 인출하면서 시험제어군2를 삽입한다. 시험제어군1이 완전 인출되면 기준제어군을 추가로 인출하면서 시험제어군2를 완전삽입한다. 이때의 기준제어군 위치를 시험제어군2에 대한 임계위치로 선정한다.

2.1.2.3 Westinghouse 방식의 제어봉교환법

기준 제어군이 완전히 삽입된 상태에서 시험제어군을 삽입하면서 기준제어군을 인출한다.

시험제어군이 완전 삽입되면 이 상태에서의 기준제어군의 위치를 시험제어군에 대한 임계위치로 선정한다. 기준제어군에 대해 완전삽입시와 임계위치와의 차이에 해당되는 적분제어능을 기준제어군 측정결과로부터 얻고, 이 값에 중첩보상인자 α 를 곱하여 시험제어군의 개별제어능을 구한다.

2.2 통계적 분석 및 추론 방법론

2.2.1 기본 통계치

봉산회석법 및 세 가지 제어봉교환법을 이용하여 측정된 측정결과들의 경향 및 측정오차의 분석을 위해서는 기본적인 통계치들이 필요하다. 측정오차는 (측정치-설계치)/설계치로 정의하였으며, 각 방법에서의 측정오차들에 대해 평균, 표준편차 그리고 절대오차의 평균을 계산하였다. 절대오차는 시험의 정확성을 평가하는 척도라 할 수 있다.

2.2.2 상관관계 분석

제어봉 제어능의 측정오차는 측정과 관련된 시험변수들과 상관관계를 가질 수 있다. 이는 제어능이 노심의 봉산농도에 의해 좌우되고, 특히 제어봉교환법이 적용될 경우에는 측정오차는 기준제어군의 측정오차와 무관하지 않을 것이며 또 상대적으로 제어능이 작은 제어군의 경우 임계위치의 예측치와 측정치 차이가 증가할 것이라는 데서 추론할 수 있다. 따라서 제어능 측정오차와 이 변수들의 상관관계를 분석하고 판정하기 위해서 Pearson 상관계수 분석법 및 t-검정을 수행하였다. 상관관계 분석시 필요한 Pearson 상관계수는 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{(N-1) \sigma_x \sigma_y} = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

이 상관계수는 x, y 두 변수 사이의 상관의 방향 및 상관의 정도를 나타낸다. 즉 Pearson 상관계수는 항상 [-1,1] 사이에 존재하는데, 이 값이 1이면 두 변수는 완전히 비례하고, -1이면 완전히 반비례한다. 그리고 이 값이 0이면 두 변수는 아무런 상관관계가 없다.

계산된 상관계수를 이용하여 두 변수 사이의 상관관계를 판정할 때 일반적으로 t-검정을 수행한다. 이 검정방법은 계산된 상관계수에 표본의 크기 및 유의수준을 고려하여 상관관계를 판정하는데 사용된다. 검정할 영가설(Null Hypothesis)을 " $H_0: \rho=0$, 즉 두변수는 아무 상관관계가 없다"로 하고, 이 가설을 신뢰계수 $(1-\alpha)$ 로 검정한다. 표본의 개수는 N이면 자유도가 $(N-2)$ 이므로, 이 가설이 맞다면 ρ 는 자유도 $(N-2)$ 인 student t-분포를 따른다. 따라서 t를 다음과 같이한다.

$$t = r \left(\frac{N-2}{1-r^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

그리고 $t^* = t(1-\alpha/2; N-2)$ 로 정의하면 t^* 는 t-분포곡선 아래의 면적이 $100(1-\alpha)\%$ 가 되는 t 값이다. 따라서 $(1-\alpha)$ 의 신뢰계수로 검정할 때, (2)식에 의해 계산된 t가 $[-t^*, t^*]$ 사이에 있다면 이 가설은 $(1-\alpha)$ 의 신뢰계수로써 채택되고 두 변수의 상관관계는 인정되지 않는다. 반대로 t가 $[-t^*, t^*]$ 밖에 있다면 이 가설은 기각되고 두 변수 사이의 상관관계는 인정된다.

표 1. 각 제어능 측정방법에 의한 측정오차의 기본 통계치

측정방법 \ 통계치	# of Data	Mean of Measurement Error	Standard Deviation	Mean of Absolute Error	비 고
봉산회석법	54	-2.18	3.91	3.73	기준제어군
Framatome Swap	64	-4.82	5.86	6.18	
CE Swap	114	-1.83	6.14	5.24	
Westinghouse Swap	42	-6.59	5.61	7.41	

상관관계 분석을 위한 상관계수는 앞에서 기술한대로 봉산농도, 기준제어능 절대오차 및 기준제어군과 시험제어군의 제어능 차이를 선정하였다.

2.3 통계적 분석 결과

봉산회석법 및 각 제어봉교환법에 의한 측정오차에 대한 기본적인 통계치들은 표 1에 나타나 있다. 그리고 각 방법에 의한 측정오차와 상관변수들과의 상관관계 분석 및 각 신뢰계수에 따른 상관성 판정결과는 표 2에 나타나 있다. 그리고 부록에 제시된 그림 중에서, 그림1에서 그림4까지에 각 방법에 의한 측정치와 예측치의 분포를 도표화하였으며, 그림 5에서 그림 14까지에는 각 상관변수에 대해 측정오차의 분포 및 Linear Fitting Line을 도시하였다. 통계분석 및 상관관계 분석 결과, 다음과 같은 추론이 가능하다.

2.3.1 각 측정방법별 추론

제어봉 제어능 측정결과는 전반적으로 측정치가 예측치에 비해 작은 경향을 보이고 있다. 봉산회석법은 측정오차가 가장 작았고 임의성을 가지며, 노심의 봉산농도와 상관관계가 있다. Framatome방식의 제어봉교환법은 비교적 측정오차가 크고 설계치가 상대적으로 과대평가되어 있으나, 시험변수들과의 상관관계는 가장 미약하다. CE 방식의 제어봉교환법은 Swap 방법 중에는 측정오차가 가장 작고 임의성이 있으나, 봉산농도 및 기준제어군 제어능 측정오차의 크기와 강한 상관관계를 갖는다. Westinghouse 방식의 제어봉교환법은 가장 측정오차가 크며 대부분의 측정결과에서 측정치가 작게 편향되어 있다. 그리고 시험제어군의 제어능이 작을수록 측정오차가 커지는 강한 상관관계가 있으며, 기준제어군 제어능 측정오차의 크기와도 상관관계가 있다.

2.3.2 각 시험변수별 추론

1) 임계봉산농도

상관관계 분석 및 판정 결과, Westinghouse 방식의 제어봉교환법을 제외한 다른 측정방법의 경우 임계봉산농도가 증가할수록 제어능 측정오차가 감소하는 반비례 경향이 있다. 이 경향은 다른 시험변수와의 상관관계를 추론함에 있어서 통계적 분석에 의하지 않더라도 상관방향을 예측할 수 있게 한다. 즉 기준제어군 측정시(봉산회석법) 임계봉산농도의 증가는 기준제어군 측정오차의 감소를 의미하므로 각 측정방법에 의한 측정오차는 기준제어능 측정오차와는 비례하게 된다. 또한 일반적으로 임계봉산농도가 증가하면 제어봉 제어능은 상대적으로 감소한다. 따라서 (기준-시험)제어능은 상대적으로 감소하게 되므로 각 측정방법에 의한 측정오차는 (기준-시험)제어능 크기

표 2. 각 제어능 측정방법에 의한 측정오차와 시험변수와의 상관관계 판정결과

시험변수 측정방법	봉산 농도	기준제어능 오차	(기준-시험) 제어능
봉산회석법(기준제어능) n=54 t* = 2.674 (99%) 2.007 (95%) 1.675 (90%) 1.298 (80%)	Covariance = -200.135 r = -0.303 t = -2.295 (불인정) (인정) (인정) (인정)	N/A	N/A
Framatome Swap n=64 t* = 2.658 (99%) 1.999 (95%) 1.670 (90%) 1.296 (80%)	Covariance = -280.906 r = -0.217 t = -1.753 (불인정) (불인정) (인정) (인정)	Covariance = 0.895 r = 0.095 t = 0.750 (불인정) (불인정) (불인정) (불인정)	Covariance = 294.946 r = 0.214 t = 1.727 (불인정) (불인정) (인정) (인정)
CE Swap n=114 t* = 2.622 (99%) 1.981 (95%) 1.658 (90%) 1.289 (80%)	Covariance = -236.128 r = -0.316 t = -3.523 (인정) (인정) (인정) (인정)	Covariance = 4.012 r = 0.426 t = 4.988 (인정) (인정) (인정) (인정)	Covariance = -1.852 r = -0.002 t = -0.021 (불인정) (불인정) (불인정) (불인정)
Westinghouse Swap n=42 t* = 2.704 (99%) 2.021 (95%) 1.684 (90%) 1.303 (80%)	Covariance = 140.169 r = 0.239 t = 1.555 (불인정) (불인정) (불인정) (인정)	Covariance = 3.402 r = 0.319 t = 2.127 (불인정) (인정) (인정) (인정)	Covariance = 690.900 r = 0.443 t = 3.128 (인정) (인정) (인정) (인정)

와 비례한다. 이러한 추론에 의하면 Westinghouse Swap 방식의 경우 봉산농도와의 상관관계 분석 결과는 자료의 수가 적어서인지는 몰라도 이러한 일반적인 경향과 배치되고 있다. 근래에 들어서 장주기 운전이 일반화되면서 임계봉산농도가 증가하고 있는데, 이는 일반적으로 보면 제어능 측정오차 감소의 관점에서 바람직하다고 할 수 있으나, 정작 현재 적용되는 Westinghouse Swap 방식의 경우 오히려 제어능 측정오차를 증가시키는 것으로 분석되었으므로 향후 관심이 필요하다.

2) 기준제어군 제어능 측정오차

각 제어봉 교환법들에 의한 측정오차는 기준제어군의 측정오차와 비례하는 상관관계를 갖는다. 특히 기준제어군과 시험제어군의 중첩을 허용하고, 시험제어군끼리 교환하는 CE Swap 방식에서 가장 큰 상관관계를 보이고 있다. 따라서 기준제어군 제어능을 가능하면 정확히 측정하는 것이 제어봉교환법 적용시 중요한 사항이 된다.

3) (기준-시험) 제어능 크기

각 제어봉 교환법들에 의한 측정오차는 (기준-시험) 제어능의 크기와 비례하는 상관관계를 갖는다. 즉 기준제어군과 시험제어군의 제어능 차이가 클수록 측정오차가 증가한다. 특히 기준제어군과 시험제어군의 직접교환을 수행하는 Westinghouse Swap 방식에서 가장 큰 상관관계를 보이고 있다. 그러므로 제어능 크기가 클 경우 기준제어군을 두 개로 하는 방식이 의미가 있다.

3. 결론 및 권고

국내의 가동중 원전에서 수행한 제어봉 제어능 측정결과를 이용하여 통계적인 분석 및 추론을 수행하였다 그 결과 전반적으로 예측치가 과대평가되었음을 알 수 있었으며, 봉산회석법 및 각 제어봉교환법에 따른 측정오차의 정확성 및 임의성을 평가하였다. 또한 각종 시험변수와 측정오차와의 상관관계를 판정하였다. 이 결과는 향후 재장전 노물리시험 수행시, 제어능 예측 및 측정에 유용한 정보가 될 수 있을 것이다.

4. 참고문헌

- 1) Siegmund Brandt, "Statistical and Computational Methods in Data Analysis", NH, 1976
- 2) O. J. Dunn, et al., "Applied Statistics : Analysis of Variance and Regression", Wiley, 1974
- 3) CEN-319-A, "Control Rod Group Exchange Technique", Combustion Eng., 1986
- 4) WCAP-9863-A, "Rod Bank Worth Measurements Utilizing Bank Exchange", Westinghouse, 1982
- 5) ANSI/ANS 19.6.1-1985, "Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactors", American Nuclear Society, 1985
- 6) 정 대욱, "원자로 기동 노물리시험중 제어봉 제어능 측정방법들에 대한 비교연구", 한국원자력안전기술원, 1992
- 7) KAERI/TR-578/95, "Nuclear Design for Kori Unit 1 Cycle 15", 한국원자력연구소, 1995
- 8) 국내 원자력발전소 각 호기, 각 주기 노물리시험 보고서

<부록>

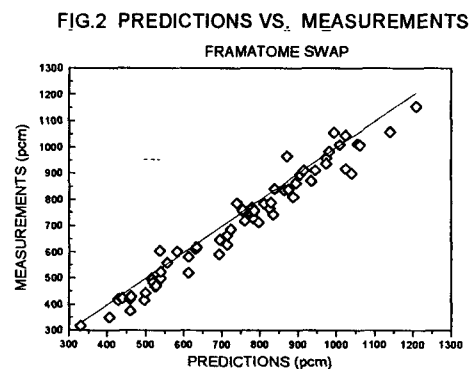
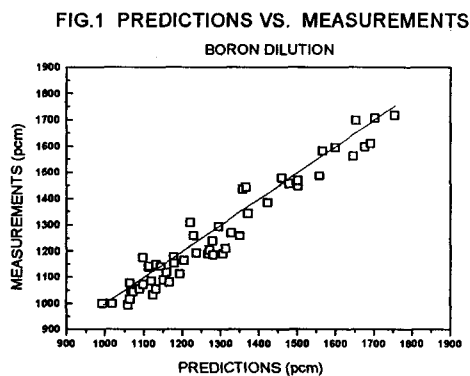


FIG.3 PREDICTIONS VS. MEASUREMENTS

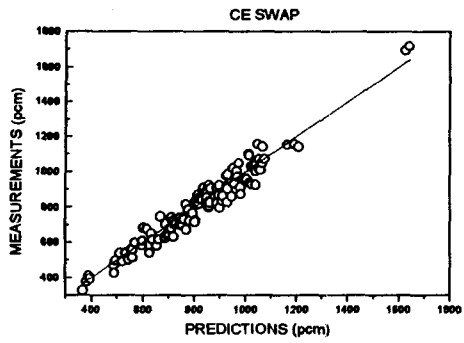


FIG.4 PREDICTIONS VS. MEASUREMENTS

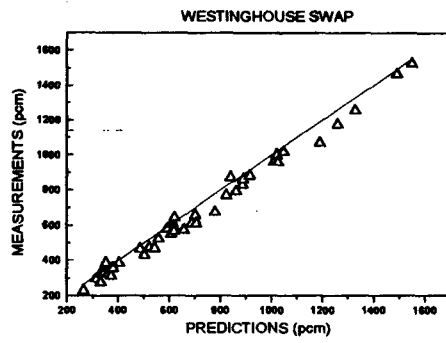


FIG.5 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS

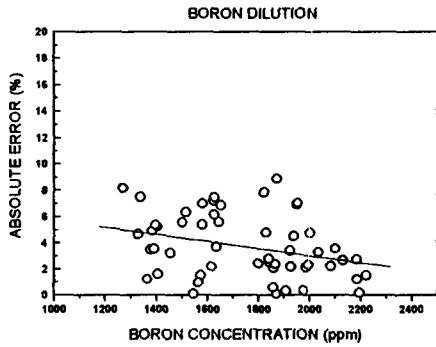


FIG.6 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS

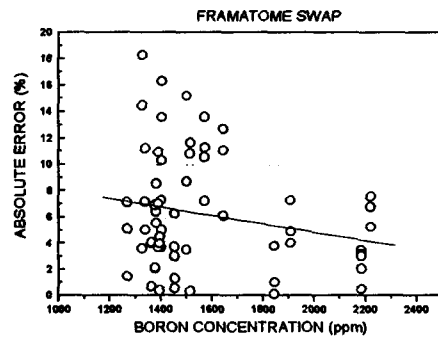


FIG.7 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS

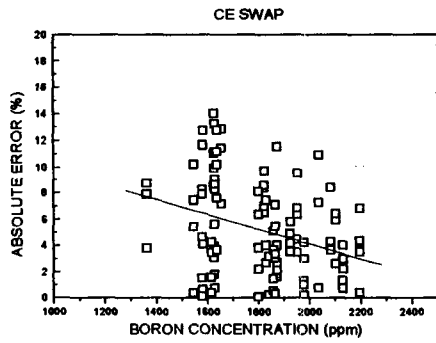


FIG.8 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS

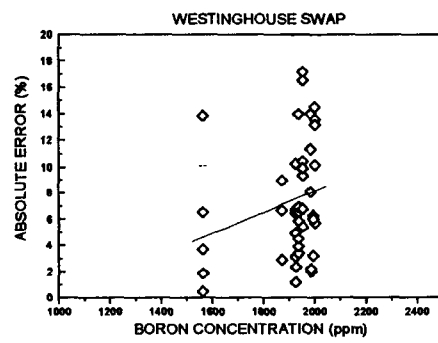


FIG. 9 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
FRAMATOME SWAP

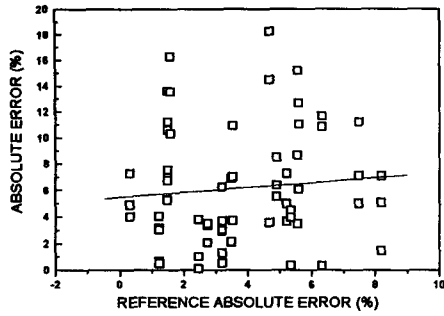


FIG. 10 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
CE SWAP

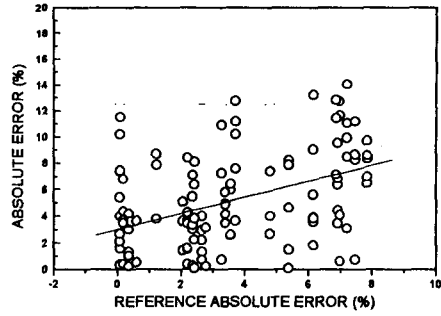


FIG. 11 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
WESTINGHOUSE SWAP

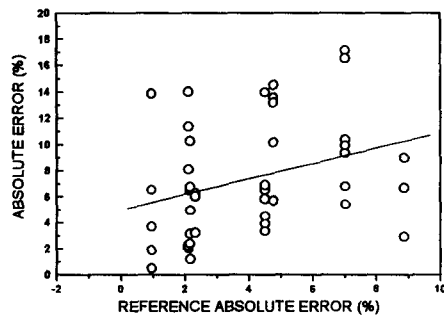


FIG. 12 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
FRAMATOME SWAP

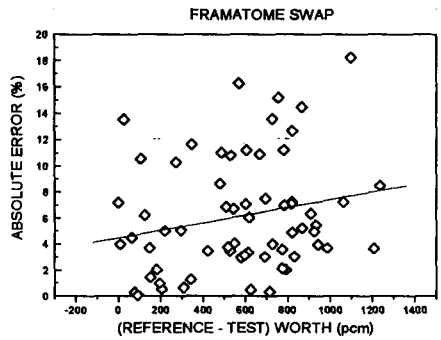


FIG. 13 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
CE SWAP

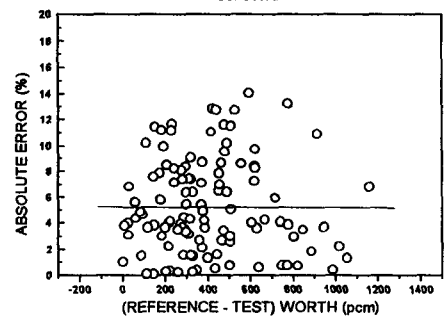


FIG. 14 DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
WESTINGHOUSE SWAP-

