

## 2차원 중성자수송모델 합성법에 의한 노외계측기 교정법

하창주, 성기봉, 이해찬, 유상근, 정선교  
한국원전연료주식회사

이덕중, 김윤희, 김용배  
한국전력연구원

### 요약

운전중 노심의 출력변화를 감시하는 노외계측기(Excore Detector)는 노내계측기(Incore Detector)를 통하여 측정되어진 축방향 출력편차(Axial Offset)를 이용하여 교정되고 있다. 노외계측기의 전류와 축방향출력편차의 선형적인 관계를 가정하여 노내계측기로 최소한 4회 노심출력을 측정한후 최소자승법(Least Square Method)으로 비례상수들을 구하는 기존의 방법을 대신하여, 단순 노외계측기 교정법은 노내계측기로 1회 측정되어진 자료들을 이용하여 계측기 반응상수(Detector Response Factor)를 계산한후 비례상수를 계산한다. 계측기반응상수는 2차원 중성자수송모델로부터 계산된 weighting factor와 3차원 확산이론으로부터 구한 노심출력을 이용하여 계산된다. 중성자수송계산은 (R-Z)와 (R-θ)모델을 합성하여 3차원 weighting factor를 계산하므로 축방향 영향뿐만 아니라 집합체별 영향을 고려하였다. 또한 노심의 복잡한 구조로 인하여 근사적인 weighting factor와 노심출력분포의 사용은 노외계측기의 전류와 계측기반응율의 불일치를 초래하며, 이를 해결하는 상수를 소개하여 보다 정확한 교정결과를 얻도록하였다. 이와 같은 방법을 고리 3호기 9, 10주기 전주기와 11주기초에 적용하여 노심의 연소분포, 냉각수의 온도분포, 노심의 연소도, 노심출력준위등에 대한 단순 노외계측기 교정법의 오차를 분석하여 최적의 노외계측기 교정모델을 제시하였다. 2차원 중성자수송모델 합성법에 의한 단순노외계측기 교정법은 2차원 (R-Z) 중성자수송모델보다 개선된 결과와 평균오차 0.179% 최대 오차 0.624%를 보여주고 있다.

### 1. 서론

국내 Westinghouse형 가압경수로에 설치된 노외계측기는 노심의 급격한 출력 변화, 노심의 overpower, 비정상 축방향 출력 분포등을 감시하여 원자로 보호를 위한 경보 발생 및 비상 정지 신호를 제공한다. 이와 같이 노심을 보호하는데 사용되는 노외계측기는 정확한 출력 계측을 위해 정기적인 교정이 요구된다. 주기초 출력 상승중 75% 출력 노물리 실험중 최초로 노외 계측기를 교정하며 이후 전출력에서 정기적으로 교정된다. 현재 노외계측기 교정에 적용되는 방법은 multi-point method로써, 노외계측기를 매번 교정할때 마다 다양한 축방향의 출력 분포를 유도하여 노내계측기의 출력 편차와 노외계측기의 출력편차와의 선형적인 관계식을 최소자승법으로 구한다. 이때 다양한 축방향 출력 분포를 유도하기 위하여 요구되는 제어봉과 봉소의 사

용을 최소화하기 위해 개발된 단순노외계측기 교정법[1]은 2차원 (R-Z) 중성자수송코드로부터 계산된 weighting factor와 3차원 노달확산코드로부터 계산된 노심출력분포를 결합하여 생산된 계측기 반응상수를 이용하여 노내계측기 출력편차와 노외계측기 출력편차와의 선형관계식을 유도한다. 여기서는 2차원 (R-θ) 중성자수송모델과 2차원 (R-Z) 중성자수송모델을 결합하여 3차원의 weighting factor를 계산하고, 이를 이용하여 계산된 계측기 반응상수에 영향을 미치는 다양한 인자들을 추출하여 단순 노외계측기 교정법의 정확성을 분석하였다. 2장에서는 2차원 중성자수송모델 합성법으로 생산되는 계측기 반응상수를 간단히 설명하고, 3장에서는 계측기 반응상수에 영향을 미치는 인자들을 고려한 단순 노외계측기 교정법을 고리 3호기 9주기, 10주기와 11주기초에 적용한 결과를 설명한다. 4장에서는 결론과 실제 발전소의 적용 가능성을 설명한다.

## 2. 2차원 중성자수송모델 합성법

참고문헌 [1]에서 설명된 단순 노외계측기 교정법은 2차원 (R-Z) 중성자수송모델로부터 계산된 축방향 weighting factor만 사용하고 있으며 이모델은 균질화된 노심을 가정하므로 노심내부의 집합체와 외곽의 집합체가 같은 값의 weighting factor를 가지게 된다. 또한 평균냉각수온도를 사용하여 상부계측기와 하부계측기는 같은 크기의 값을 가진다. 그러나 실제로 냉각수온도는 분포를 가지고 노심외곽에 위치한 집합체는 노외계측기에 보다 큰 영향을 미치므로 이를 고려한 계산이 요구된다. 이를 묘사하기 위해 DORT[2]를 사용하여 2차원 (R-Z) 중성자수송모델과 2차원 (R-θ) 중성자수송모델을 합성하여 weighting factor를 생산하였다. 2차원 (R-Z) 모델은 참고문헌 [1]과 같으며, 2차원 (R-θ) 중성자수송모델은 균질화된 노심을 가정하고, reflective boundary condition을 가진 1/4 노심을 R 방향으로 255개의 mesh로 나누고 θ 방향으로 90도의 각도를 240개의 mesh로 나누었다. Weighting factor는 분리가능하다는 가정 아래, 다음과 같이 계측기반응상수를 쓸 수 있다.

$$R_i^k = \frac{\sum_{j=1}^N P_j(r) w_j(r) \sum_{i,k \in T, B} P_k(z) w_k^i(z)}{\sum_{j=1}^N P_j(r) \sum_{k \in T, B} P_k(z)} \quad (1)$$

위식의  $w_j^{(r)}$ ,  $w_k^i(z)$ 는 노심 평면방향과 축방향의 weighting factor이고, T와 B는 각각 상부와 하부 계측기를 뜻한다. Weighting factor는 다음과 같이 정의된다.

$$w_j(r) = \frac{\int_E \chi(E) \phi^*(r_j, E) dE}{\int_V \int_E \chi(E) \phi^*(r, E) dE dV}$$

식 (1)의 노심출력은 3차원 노달코드인 ANC[3]로부터 계산된 값을 사용한다. 식 (1)에 계산된 계측기 반응상수는 제어봉인출 상태에서 계산되어 노심출력변화에 관계없이 일정한 값으로 고정되었으나, 실제로는 출력편차의 변화에 따라 변한다. 따라서 상부계측기반응은 일정하다고 가정하고, 제어봉이 삽입됨에 따른 하부계측기의 반응상수는 다음과 같은 비례관계를 보여주었다.

$$M_B \approx \frac{C_B}{C_T} \times A \quad (2)$$

여기서  $M_B$ 는 비례상수고 A는 다음과 같이 표시된다.

$$A = \frac{(w_T^T \times P_T + w_T^B \times P_B)}{(w_B^B \times P_B)}$$

$M_B$ 는 하부계측기 반응상수에 bias factor로 적용되어 노심출력변화에 따른 교정오차를 최소화하였다. 2차원합성법을 사용한 단순 노외계측기 교정법의 계산 흐름은 그림 1에서 보여주고 있다.

### 3. 단순 노외계측기 교정법의 오차 분석

단순 노외계측기 교정법의 정확성은 계측기 반응상수에 의존한다. 계측기 반응상수는 노심 출력분포와 weighting factor로 계산되며, 이에 영향을 미치는 요소들을 다음과 같이 분류하여 고리 3호기 9,10,11주기를 대상으로 단순 노외계측기 교정법의 오차를 분석하였다.

#### (1) 축방향 냉각수온도 분포

참고문헌 [1]에서는 냉각수온도를 노심의 평균온도로 가정하여 계산하였다. 그러나 adjoint flux는 냉각수의 밀도에 따라 민감한 변화를 보여주므로 DORT (R-Z) 모델에서 노심의 높이에 따른 온도변화를 고려하여 weighting factor를 계산하였다. 그림 2와 같이 하부노심에서 상대적으로 높은 냉각수밀도로 인하여 weighting factor는 감소하는 경향을 보이고, 상부노심에서는 상대적으로 증가하였다. 표 1에서 보여주는 계측기 교정상수는 온도변화를 고려한 weighting factor와 고리 3호기 10주기말(15000 MWD/MTU)에서의 노심출력분포를 사용하여 계산하였다. 고리 3호기 10주기에 적용하였을 때, 평균 교정오차는 0.227%와 0.223%로 거의 영향을 주지 못하였다.

#### (2) 축방향 노심의 연소도분포

노심의 축방향 연소도분포는 주기초(1000 MWD/MTU)와 주기말(15000 MWD/MTU)에 서로 다른 분포를 보여주고 있다. 그러나 weighting factor 분포는 동일한 형태와 크기를 보여주고 있으며, 표 2에서 보여주는 계측기 반응상수의 변화는 오로지 주기초와 주기말의 출력분포의 변화로 기인하였다. 주기초와 주기말에서 계산된 계측기 반응상수를 고리 3호기 10주기에 적용하였을 때 평균 교정오차는 0.342%와 0.227%로 주기말의 축방향 노심출력분포로 계산된 계측기 교정상수가 보다 좋은결과를 보여주었다.

#### (3) 노심출력 준위(power level)

노심출력 준위의 변화는 냉각수온도 변화뿐만 아니라 축방향 출력분포의 변화도 초래한다. 따라서 75% 출력에서 교정할 때, 100% 출력을 모델라하여 계산한 계측기 교정상수는 상당한 오차를 수반한다. 고리 3호기 11주기초 75% 출력에서 취득한 자료를 사용하여 노심출력준위의 변화에 따른 교정오차를 계산하여 보았다. 75% 출력에서 계산된 weighting factor 분포는 그림 3과 같이 하부노심에서는 100%출력에서 보다 약간 증가하고 상부노심에서는 약간 감소하는 모습을 보여주고 있고, 출력분포는 75% 출력에서 상부로 치우친 형태를 보여주고 있다. 표 3은 노심출력준위의 변화에 따른 계측기 반응상수를 보여주고 있다. 고리 3호기 11주기초 75% 출력에 적용하였을 때, 평균 교정오차는 100% 출력의 0.266%에서 0.179%로 감소하였다. 따라서 계측기 교정당시의 출력준위는 교정오차에 상당한 영향을 초래한다.

#### (4) 노심 평면방향의 출력분포

노심 외곽에 위치한 집합체는 노심 내부에 위치한 집합체보다 큰 영향을 계측기 반응에 미친다. 따라서 노심 평면방향의 weighting factor와 출력분포를 계산하여 식 (1)로부터 계측기 반응상수를 계산한다. 2차원 (R-Z) 중성자수송모델은 참고문헌 [1]과 같으며 냉각수의 온도를 고려하였고, 2차원 (R- $\theta$ ) 중성자수송모델은 2장에서 설명된 것으로 계산되었다. 그림 4는 전출력에서의 노심 평면방향의 weighting factor로 계측기에 가까울수록 큰값을 가지고 노심내부에서는 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 고리 3호기 9,10주기 1000,4000,8000,12000,15000 MWD/MTU와 11주기 75% 출력에서와 1000 MWD/MTU의 각각의 연소도에서 노심평면방향의 출력분포를 ANC로 계산하여 식 (1)로부터 계측기 반응상수를 구하였다. 노심 평면방향의 출력분포를 고려하지 않고 2차원 (R-Z) 중성자수송모델과 축방향출력분포만으로 계측기 반응상수를 계산하여 적용한 단순 노외계측기 교정법의 오차 분포는 양(+)의 방향으로 약간 치우쳤으나, 2차원 중성자수송모델 합성법을 이용하여 노심평면방향의 출력분포를 고려했을때의 단순 노외계측기 교정법의 오차를 보여준 그림 5에는 오차가 0.0을 중심으로 고르게 분포함을 볼 수 있다. 표 4에서와 같이 평균 교정오차는 0.212%와 0.179%로 평면방향의 노심출력분포를 고려한 2차원합성법이 축방향의 출력분포만을 고려한 모델보다 개선된 결과를 보여주고 있다. 표 5,6은

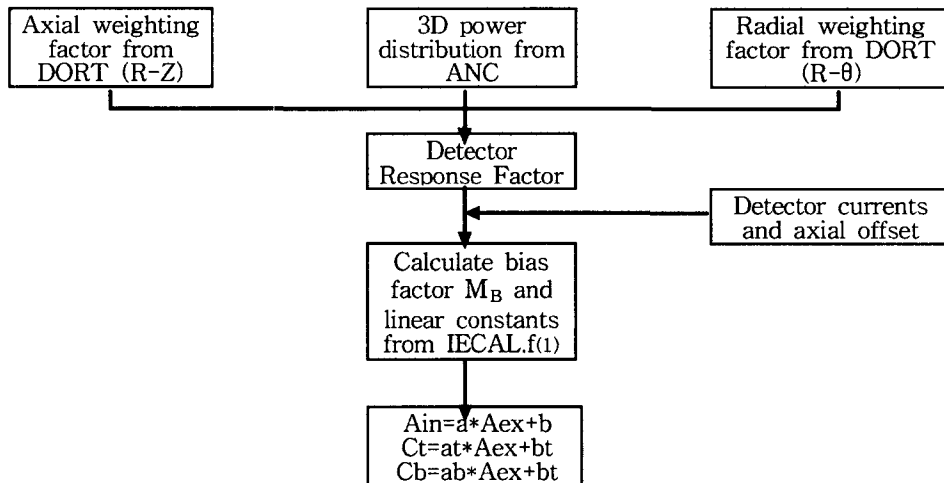
97년 5월 26일에 취득된 자료를 이용하여 계산된 multi-point method와 단순노외계측기 교정법의 교정상수들을 이용하여 예측한 결과들을 보여주고 있다. 이는 정기교정후에도 단순노외계측기 교정법이 multi-point method에 상응하는 정확성을 보여주는 것으로, 다음 정기교정때까지 재교정이 필요하지 않으며 원자료에 적용가능한 방법임을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

단순 노외계측기 교정법은 multi-point method를 대체하여 현장에서 1회 측정된 자료만을 이용하여 교정에 필요한 교정상수들을 생산할수 있도록 개발되었다. 단순 노외계측기 교정법의 정확성을 분석하기 위하여 이에 영향을 미치는 요소들을 도출하여 최적의 모델을 확립한후, 고리 3호기 9,10,11주기의 192개의 측정자료들을 이용하여 단순 노외계측기 교정법의 오차를 분석하였다. 오차에 영향을 미치는 요소들로는 냉각수의 온도분포, 노심출력준위, 축방향과 평면방향의 출력분포들로 가능한 측정당시의 연소도를 고려한 계측기반응상수를 생산해야함을 알수 있었다. 2차원합성법에 의한 단순노외계측기 교정법은 평균오차 0.179%, 최대오차 0.624%를 보여주고 있으며, 정기교정후 다음 정기교정 시점까지 기존의 방법과 상응하는 정확성을 보여주었다.

#### 참고문헌

1. 하창주 외, "단순 노외 계측기 교정법," PP. 433-439, '96 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
2. W. A. Rhoades and R. L. Childs, "An Updated Version of the DORT One-and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code", ORNL-5851, Oak Ridge National Laboratory, 1982.
3. Y. S. Liu et al., "ANC: A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code", WCAP-10965, 1985.
4. J. G. Ahn and N. Z. Cho, "Generation of Spatial Weighting Functions for Ex-Core Detectors by Adjoint Transport Calculation", Nuclear Technology, vol. 103, p.114-p.121, 1993.



(1) IECAL.f는 현재 발전소에서 사용중인 program으로 multi-point method를 채용하고 있으나, 단순 노외계측기 교정법을 적용시켜 교정상수를 생산하도록 수정하였다.

그림 1. 단순 노외계측기 교정법 계산 흐름도

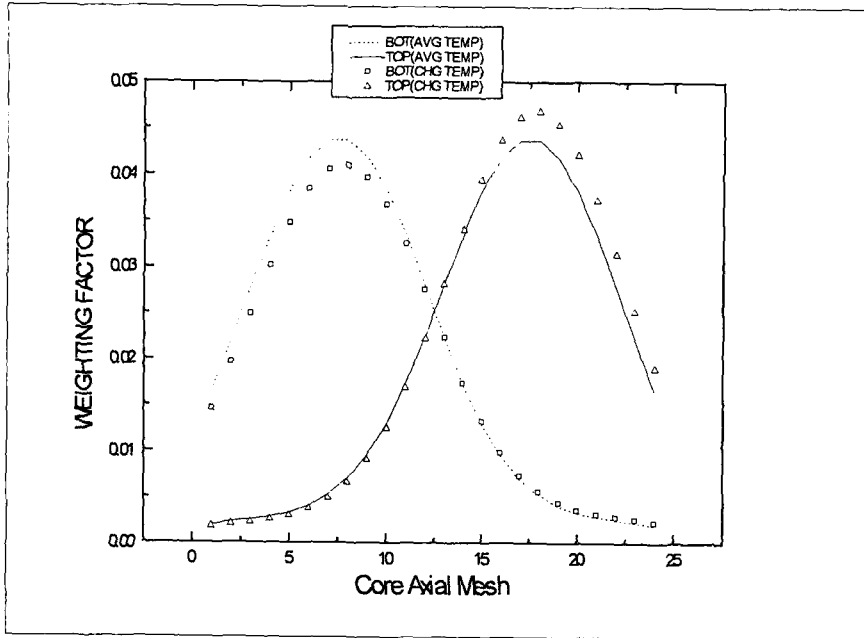


그림 2. 노심 축방향 온도분포를 고려한 weighting factor

표 1. 고리 3호기 10주기 냉각수온도에 따른 계측기반응상수

| 계측기 반응상수 | $R_T^T$ | $R_T^B$ | $R_B^T$ | $R_B^B$ |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| 평균온도     | 0.41047 | 0.09078 | 0.09191 | 0.40684 |
| 온도 변화    | 0.43910 | 0.08685 | 0.09507 | 0.37898 |

표 2. 고리 3호기 10주기 축방향 노심연소도에 따른 계측기반응상수

|     | $R_T^T$ | $R_T^B$ | $R_B^T$ | $R_B^B$ |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| BOL | 0.40280 | 0.09748 | 0.09764 | 0.40208 |
| EOL | 0.41047 | 0.09078 | 0.09191 | 0.40684 |

표 3. 고리 3호기 11주기초(1000 MWD/MTU)에서의 계측기 반응상수

|             | $R_T^T$ | $R_T^B$ | $R_B^T$ | $R_B^B$ |
|-------------|---------|---------|---------|---------|
| 75 % Power  | 0.46416 | 0.08820 | 0.10582 | 0.34182 |
| 100 % Power | 0.43879 | 0.09243 | 0.10237 | 0.36642 |

표 4. 고리 3호기 9 ~ 11주기 단순노의 계측기 교정법 오차

|           | 평균오차  | 최대오차  | Standard Dev. |
|-----------|-------|-------|---------------|
| 2차원 (R-Z) | 0.212 | 0.651 | 0.262         |
| 2차원 합성법   | 0.179 | 0.624 | 0.219         |

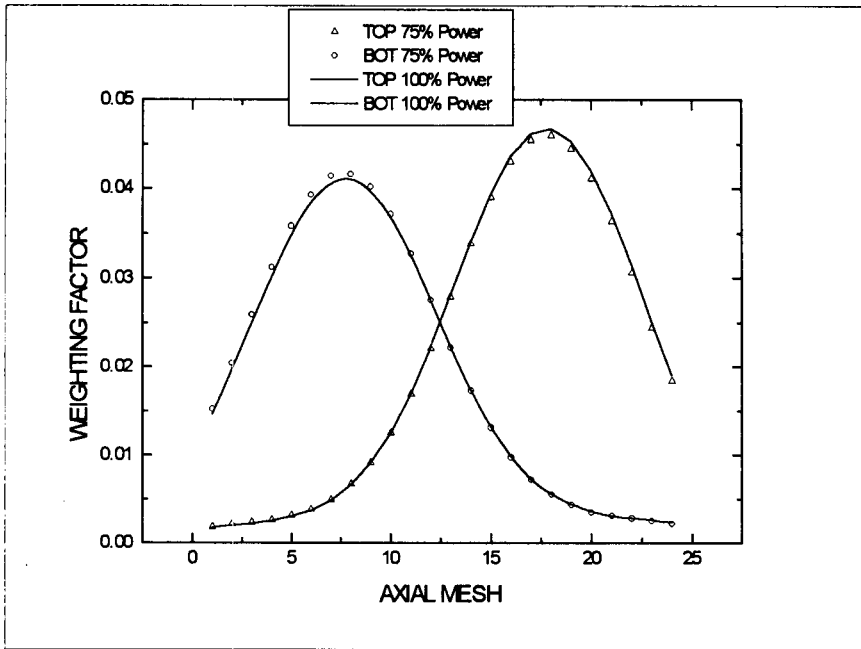


그림 3. 고리 3호기 11주기 75% 출력에서의 weighting factor 분포

|        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0003 | 0.0024 | 0.0234 |
| 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0002 | 0.0012 | 0.0088 | 0.0857 |
| 0.0    | 0.0    | 0.0001 | 0.0002 | 0.0009 | 0.0056 | 0.0390 |        |
| 0.0    | 0.0    | 0.0002 | 0.0018 | 0.0056 | 0.0195 | 0.1276 |        |
| 0.0    | 0.0002 | 0.0009 | 0.0056 | 0.0424 | 0.1574 |        |        |
| 0.0003 | 0.0012 | 0.0056 | 0.0195 | 0.1574 |        |        |        |
| 0.0024 | 0.0088 | 0.0390 | 0.1276 |        |        |        |        |
| 0.0234 | 0.0857 |        |        |        |        |        |        |

그림 4. 전출력에서의 노심 평면방향의 weighting factor

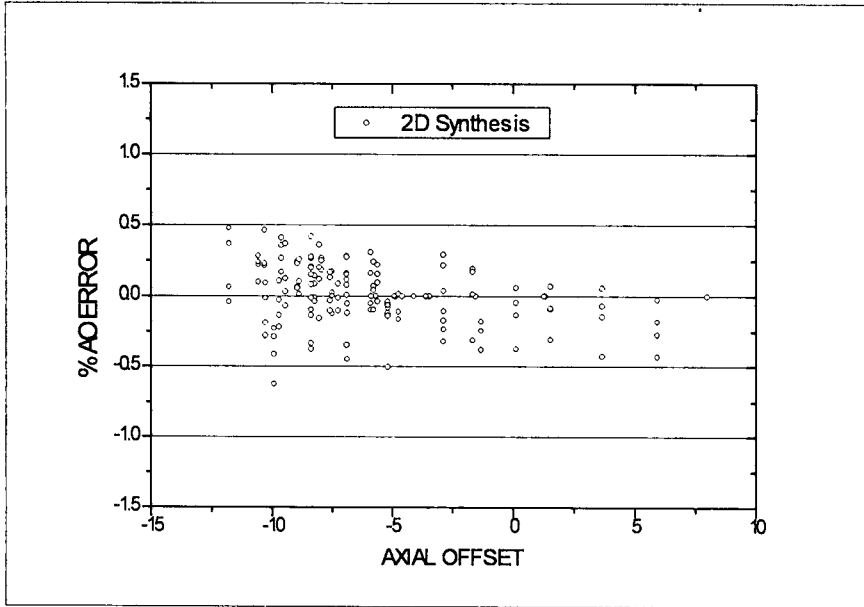


그림 5. 2차원 (R-Z)와 (R-θ) 모델 합성법에 의한 단순노의계측기 교정법의 오차

표 5. Multi-point method의 선형관계식으로 예측된 노심출력편차

| Date    | 측정 AO (%) | Ch 41  | Ch 42  | Ch 43  | Ch 44  |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 97/6/26 | -0.400    | 0.213  | 0.069  | -0.172 | -0.124 |
| 97/7/25 | -1.426    | -0.574 | -0.670 | -0.621 | -0.995 |

표 6. 단순노의계측기 교정법의 선형관계식으로 예측된 노심출력편차

| Date    | 측정 AO (%) | Ch 41  | Ch 42  | Ch 43  | Ch 44  |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 97/6/26 | -0.400    | 0.163  | 0.004  | -0.284 | -0.258 |
| 97/7/25 | -1.426    | -0.632 | -0.727 | -0.760 | -1.159 |