1999 추계학술발표회 논문집
한국원자력 학회

월성 1호기 Time Average Performance 분석

Time Average Performance Assessment for Wolsong Unit 1

이은기, 김용배, 이덕중, 최훈

한국전력 전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

CANDU 형 원전에 있어 TAP(Time Average Performance) 평가란 일정기간 동안의 핵연료 채널별 평균 출력이 목표 채널 출력(Target Channel Power)과 부합되는 정도를 평가, 궁극적으로 ROP(Regional Overpower Protection) 핵계측기 교정치를 결정하는 기술로 정의할 수 있다. 월성 1호기는 1995년 핵계측기를 전량 교체하면서 ROP 트립 설정치를 변경한 바 있는데 그 이후로 핵계측기 교정치는 매우 보수적으로 결정되었기 때문에 추가 운전여유도 확보 측면에서 핵계측기 교정에 대한 정량적 평가가 필요하게 되었다. 따라서 월성 1호기를 대상으로 현재의 핵계측기 교정 방법 하에서 추가 운전 여유도를 확보할 수 있는지를 TAP 평가를 통해 살펴보았다. 월성 1호기 TAP 평가는 1997년, 1998년 현장에서 측정된 출력분포 142건을 대상으로 수행되었으며, 평가 결과 추가 운전 여유도 확보 가능성을 뜻하는 년도별 TAP 교정치가 1997년 -0.05%, 1998년 -0.29%로 각각 계산됨에 따라 평균 약 0.15% 정도의 운전 여유도 확보가 가능한 것으로 나타났다. 그리고 출력분포 지도에 따르면 일사분면, 삼사분면 핵연료 교체 빈도수를 늘이는 것이 추가 운전여유도 확보에 유리한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The TAP (Time Average Performance) assessment for CANDU-type reactors is a good tool to determine the quantitative calibration of ROP (Regional Overpower Protection) detector signals. Since all its ROP detectors were replaced in 1995, the Wolsong Unit 1 has calibrated the ROP detector signals with very conservative method, not based on the TAP assessment results. Recently the necessity to estimate the accurate additional operational margin has been evoked prior to the re-assessment of ROP trip setpoints to accommodate the plant aging effect. To get this quantitative additional margin, the TAP assessment of Wolsong Unit 1 has been done for total 142 ripple data, which were obtained at the plant during 1997 and 1998. The TAP correction showing available additional operational margin results in -0.05% and –0.29% for 1997 and 1998, respectively. These results show that the actual ROP margin was reduced because refueling at the second- and forth-quarter core had been done more than at at the first- and third-quarter core, and that the present conservative correction method was sufficient, as a result, to cope with that reduction. And the appraisement of power maps based on the ripple data of 1997 and 1998 suggests that, to acquire more operational margin, it will be advantageous to refuel more at the top region of the first-quarter core.

1. 서 론

1995 년 월성 1 발전소는 ROP(Regional Overpower Protection) 핵계측기를 전면 교체하면서 ROP 트립 설정치를 124%로 변경[1]하였다. 트립 설정치는 광범위한 출력분포를 대상으로 통계적인 계산절차에 따라 결정되므로 가능한 다양한 형태의 핵계측기 신호를 고려하여야 하는데, 계산에서 고려하는 출력분포는 크게 반응도기기(Reactivity device)나 Xe 등의 중성자 흡수물질의 변동으로 인하여 발생할 수 있는 것과 핵연료 교체나 연소로 인한 것으로 구분한다. 첫 번째 출력분포는 case 라고 칭하고 총 926 개 case 가 고려되며, 두 번째의 경우는 통상 주 2 회 원자로에 삽입된 102 개 바나듐 핵계측기 신호를 이용하여 발전소 현장에 설치된 노심추적전산코드 RFSP(Reactor Fueling and Simulation Program)가 합성한 380 개 채널 출력분포를 말하는 것으로 "Ripple"이라 칭한다.

TAP(Time Average Performance) 평가란 기본적으로 주 2 회 측정된 현장 자료(Ripple)가 시간평균모델(Time average model)의 출력분포 - 노심출력분포의 목표값인 - 와 얼마나 일치하고 있는가를 보는 것이다. 따라서 목표출력과 많은 차이가 있는 채널에 대해 이유를 밝혀내고, 필요한 경우 문제가 있는 것으로 생각되는 위치의 핵계측기 출력을 공학적 판단에 따라 수정/보정하여 최종적으로는 현재 주기의 핵계측기 교정치(Detector calibration)에 어느 정도의 벌점(penalty factor)을 주어야 하는가를 결정한다. 벌점은 통계적 계산절차를 거쳐 정량적으로 계산되므로 이 벌점을 통해 운전 여유도를 평가할 수 있게 된다. TAP 평가와 ROP 트립 설정치 계산의 가장 큰 차이점은 ROP 트립 설정치 계산은 말 그대로 트립 설정치 자체를 찾아내기 위한 계산작업이지만 TAP 평가는 ROP 트립 설정치 계산에 사용된 각종 자료를 그대로 사용하되 현장 측정자료만 달리하여 트립 설정치의 변화를 평가하고 실제 적용중인 트립 설정치와의 차이를 핵계측기 교정치에 반영하기 위해 수행된다는 점에 있다.

현재 월성 1 호기는 발전소 노후화(aging effect) 문제가 고려되지 않은 ROP 트립 설정치를 가지고 운전되고 있어 2001 년까지 노후화 영향을 고려한 트립 설정치 재평가를 목표로 하고 있지만 보수적 핵계측기 교정치가 운전 여유도에 미치는 영향에 대해서는 정량적 평가가 이루어 지지 않았기 때문에 1997 년 및 1998 년 실측된 142 건의 출력분포를 대상으로 TAP 평가를 수행하고 현재의 보수적 핵계측기 교정방법의 타당성을 평가하였다. TAP 평가 기술은 곧 ROP 트립 설정치 평가기술과 연관되므로 관련 기술의 국산화란 의미에서 중요성을 갖는다.

본론에서는 TAP 방법론에 대하여 간단히 살펴보고 사용된 Ripple 자료의 특성을 분석한 뒤 TAP 평가를 위한 입력자료 및 평과 결과에 대해 논하고, 본 평가로 도출된 몇 가지 결론을 제 3 장에 기술하였다.

2. 본 론

2.1 TAP 방법론

TAP 평가 방법은 ROP 트립 설정치 계산 방법과 동일하다. ROP 관점에서 본다면 어느 경우든, 즉 어떤 출력분포를 갖거나 어떤 Ripple 이든지 간에, 기본적으로 각각의 안전채널은 임의의 핵연료 채널 출력이 임계채널출력(=dryout 이 발생하는 출력)에 도달하기 전에 원자로를 정지시킬 수 있어야 한다. 따라서 Ripple 출력분포가 고려된 최대 926 개 Case 의 출력분포에 대해 3 개의 각 안전 채널에 있어 최소한 하나의 핵계측기는 트립을 발생할 수 있도록 핵계측기 위치, 트립 설정치, 그리고 핵계측기 채널화가 결정되어야 한다. ROP 트립 설정치 계산 방법[2]을 간단히 기술하면 다음과 같다.

노심설계 전산코드인 RFSP 는 926 개 case 에 대해 채널출력분포를 계산하고, 열수력 설계코드인 NUCIRC 는 80% 및 100% 출력에서 측정된 발전소 실측자료를 기초로 열수력적 조건을 계산한 뒤 926 개 노심출력분포에 대응하는 임계열속을 채널별로 계산하여 ROP 트립 설정치 계산 코드인 ROVER-F 로 제공한다. 이때 채널별 출력분포 오차, 시스템관련 오차, 임계열속의 불확실성 등이 각 분야별로 검토되어 소위 "ROPT error"라는 항목으로 함께 제공된다. ROVER-F 는 발전소 실측 출력분포 자료인 Ripple 출력정보도 현장으로부터 입수한다. ROVER-F 는 380 개 채널출력으로 구성된 각각의 Ripple 자료를 대상으로 채널출력비(CPR: Channel Power Ratio)를 채널별로 계산한다. 결정론적인 관점에서 본 트립 신뢰도(Trip Confidence)는 최종적

으로 다음과 같은 수식으로 계산되는데

$$TSP(J_P) \le D_O \frac{\left[\frac{\phi(j,k)}{\phi_o(j)}\right]_{PROT}}{\left[\frac{CP(m,k)}{CP_o(m)}\right]_{LIM}} \left[\frac{CCP(m,k)}{CP_{REF}(m)}\right]_{LIM} \frac{R_C(k,q)\cdot F_B(a_j)\cdot F_{CH}(m)\cdot F_{TP}(k)}{CPPF(q)} \frac{C_t}{EAF(k)} \quad (1)$$

여기서 $\phi(j,k)$ 란 926 개 Case 중 k 번째 Case 의 j 번째 핵계측기 출력을 뜻하며, 하첨자 'o'는 nominal case 를, LIM 은 Limiting channel 을 각각 의미한다. 각 항목에 대한 자세한 내역은 참고문헌 2 에서 정의한 것과 동일하다. 엄밀한 의미에서 식 (1)이 타당성을 가지려면 충분한 수의 출력분포에 대해 계산을 수행해야 하고 궁극적으로는 식 (1)에 이용한 출력분포들이 노심에서 발생 가능한 모든 상태를 대표할 수 있음을 보여야 한다. 그러나 80 ~ 100 여개의 현장 ripple 자료와 926 개 출력분포 만으론 이러한 조건을 만족할 수 없다. 이 문제를 해결하는 방법으로 식 (1)에 확률론적인 방법이 적용된다. 트립 설정치 계산 변수를 Gaussian 확률밀도함수로 표현하는 것이다. 가령 임의의 Ripple 에서 채널첨두출력(CPPF; Channel Power Peaking Factor)이 1.5 로 계산되었다 하더라도 그 노심 상태에서 발생할 수 있는 수많은 노심 상태를 고려하면 채널첨두출력은 평균이 1.5 인 어떤 확률분포를 이루게 될 것이라고 가정할 수 있다는 것이다. 이렇게 확률밀도 함수를 사용하면 사실상 모든 출력분포를 고려대상에 포함시킬 수 있게 된다. 따라서 결정론적 계산과 "ROPT error"에서 정리된 오차를 이용하여 각 변수의 평균값과 표준편차가 얻어지면 각 변수를 확률밀도함수로 표현할 수 있게 된다. 이러한 조건에 따라 노심에서 단 한곳이라도 Dryout 이 발생할 수 있는 가능성을 확률적으로 따져보면 식 (2)와 같이 기술할 수 있다.

$$Q_{CH}(k,x) = \frac{d}{dx}\left\{1 - \prod_n \left[erf_c\left(\frac{x - x_n}{\sigma_{CH} x_n}\right)\right]^{RIPDEN(k,n)}\right\}. \quad (2)$$

여기서 변수 x 는 앞서 말한 채널출력비를 최저채널출력비로 나눈 값이다. 식 (2)는 Dryout 이 발생하지 않을 확률을 모두 곱하여 1 에서 제외시킴으로써 반드시 Dryout 이 일어나는 확률함수를 구하고 이를 미분하면 확률밀도함수를 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 한편 dryout 이 발생했을 때 트립 신호를 발생할 확률은 dryout 이 일어났을 때 트립신호를 내지 않을 확률을 곱하여 1 에서 빼면 된다. 즉, 식 (3) 과 같이 된다.

$$CONF(k) = 1 - \int Q_{CM}(k,x)\cdot P_{NT}(k,x)dx. \quad (3)$$

따라서 ROVER-F 전산코드는 주어진 입력자료에 근거하여 결정론적 방법으로 식 (2), (3)에 사용될 변수들의 평균값을 결정하고 각종 오차를 이용하여 식 (3)의 해를 얻음으로써 95% 혹은 98%의 신뢰도를 갖는 트립 설정치를 결정하게 되는 것이다.

TAP 평가시에는 ROP 트립 설정치 계산에 사용된 Case 들과 열수력 자료, 임계열속 자료 등은 다시 계산하지 않고 실측 Ripple 자료에 따른 트립 설정치 변화만을 살펴본다. 즉, 실제 출력 이력을 반영하는 Ripple 자료를 사용하여 운전이력에 따른 핵계측기 트립 설정치 변동사항을 파악하는 것이다. 따라서 TAP 평가는 ROP 트립 설정치 계산 방법과 동일한 계산과정을 거치지만 트립 설정치 자체를 변경하는 대신 핵계측기 교정시에 벌점을 주어 트립 설정치 변경 정도를 반영한다.

2.2 입력자료

ROVER-F 입력자료는 926 개 case 의 노심 상태에 대응하는 채널별 출력과 임계채널 출력, 핵계측기 출력정보, CPPF 영역 및 계산 옵션, ROPT error, 노심구조 정보, 58 개 백금 핵계측기에 관한 일반적인 정보, ripple 정보, orifice 설치 정보 및 교정치, size 및 task 자료 등 12 가지에 이른다. 특성상 월성 1 호기 TAP 평가는 19995 년 수행된 ROPT 트립 설정치 평가 보고서[1]에 기록된 자료를 기초로 수행하였다.

분석 대상인 Ripple 자료는 1997 년 63 개, 1998 년 79 개로 총 142 건이다. 1997 년 자료는 1997 년 1 월 3 일(4248.33 FPD)부터 1997 년 12 월 31 일(4611.01 FPD)까지 취득된 63 개 노심출력자료를 1995 년 ROP 트립 설정치 계산시 도출된 시간평균 노심출력으로 정규화한 것이고, 1998 년 자료는 1998 년 3 월 28 일(4612.92 FPD)

부터 1998 년 12 월 30 일(4890.27 FPD)까지 취득한 79 개 노심출력자료를 1997 년 자료와 같은 방법으로 처리하여 얻은 것이다. 1995 년 계산시에는 4 가지 종류의 plateau (핵계측기 마다 갖는 고유의 트립 설정치)가 사용되었지만 실제 월성 1 호기 현장에서는 제시된 4 개값 중 최소값으로 단일화하여 사용하였으므로 4 plateau 로 하는 경우와 1 plateau 로 하는 경우에 대해 TAP 평가를 수행하였다.

마지막으로 Ripple 출력 중 최대치로 정의되는 CPPF 는 핵계측기 교정에 직접 사용되는데, 현장에서는 1.0977 을 기준으로 이보다 큰 경우는 계산된 CPPF 를, 이보다 작은 경우는 CPPF 에 보수적인 벌점을 부가하여 핵계측기 교정에 사용하였다. 수식으로 표현하면

$$CPPF(q) = \begin{cases} CPPF(q) + 0.5\left(1.0977 - \overline{CPPF}_{\text{이전 6개월평균치}}\right) & ; CPPF(q) \le 1.0977 \\ CPPF(q) & ; CPPF(q) > 1.0977 \end{cases}. \quad (4)$$

ROVER-F 는 각 발전소에서 CPPF 계산방법을 달리할 때도 이를 평가할 수 있도록 식 (4)의 우변 첫번째의 두번째 항, 즉 벌점항에 대한 입력자료를 옵션으로 줄 수 있다. 이에 따라 1997 년엔 0.0125(=0.5 ×(1.0977-1.0727)), 1998 년엔 동일한 방법에 의해 0.01425 를 각각 입력하여 보수적인 CPPF 계산을 수행토록 하였다. 다른 한편으로 벌점이 없는 경우에도 TAP 평가를 수행하여 그 결과를 비교하였다.

트립 신뢰도는 98%로 하였으며, common-random error, channel-random error, detector-random error 및 시스템 바이어스는 90%신뢰도를 갖는 0.0418, 0.0149, 0.0260, 0.0014[1]를 각각 적용하였고 orifice 자료와 핵계측기별 교정 자료 역시 참고문헌 1 에 기술된 자료를 근거하였다. TAP 평가는 정상적인 운전상태에만 적용하므로 총 926 개 case 중 232 개 case 만을 사용하였다.

2.3 Ripple 출력 자료 분석

핵계측기 교정과 직접 관련되는 첨두채널출력인자(CPPF)는 목표출력과 근접하여 운전되었는지를 보여주는 중요한 지표인데, 평균 CPPF 가 낮을수록 시간평균출력과 유사하게 운전하였음을 뜻한다. Ripple 자료를 조사한 결과 1997 년의 평균 CPPF 는 1.0727, 1998 년은 1.0692 로 나타났다. 이는 1998 년 TAP 교정치가 1997 년보다 낮을 것임을 암시한다. 년도별 년간 CPPF 변동상황은 그림 1 에 나타냈다.

한편 그림 2 과 그림 3 는 1997 년, 1998 년 Ripple 출력지도(MAP)을 각기 표시한 것이다. 출력지도란 해당 년도에 취득한 모든 ripple 자료에 대한 채널별 평균출력을 나타낸 것으로 1 에 가까울수록 참고출력분포인 시간평균모델에 근접함을, 양의 값을 가질수록 핵연료교체가 자주 일어났음을 의미한다. 1998 년 Ripple MAP 에는 C12 에서 -8.2%, 1997 년 Ripple MAP 에는 O11 지역에 -14.8%, 상부영역인 E12 에서 -10.6%의 큰 편차가 발생하였음을 볼 수 있다. 원인은 이들 채널의 연료 교환기에서 냉각수가 누출되는 문제가 있어 핵연료 교체가 이루어지지 않았기 때문이다. 통상 큰 음의 편차가 발생하면 원인이 사고가 아닌 이상 대칭위치에 있거나 참고위치에 있는 출력분포로 대치하여 수정된 자료를 사용하여 TAP 평가를 수행하고 두 개의 결과를 비교 제시한다. 큰 음의 편차는 그만큼 임계채널출력과는 떨어져 있다는 것을 의미하기 때문에 보수적인 결과를 얻으려면 상대적으로 (+)에 가까운 값, 즉 대칭위치의 출력으로 보정하는 것이 타당하기 때문이다.

1997 년 및 1998 년 출력 MAP 으로부터 (1) 1998 년 Ripple 변동이 1997 년 보다 줄어들었다는 점, (2) 2%~3%의 편차를 보이는 위치가 1997 년에는 노심 중앙과 수평 좌우대칭 위치에서 뚜렷하게 발생한 반면 1998 년에는 그 경향이 줄고 노심 중앙부분에서 양의 편차를 나타냈다는 점, (3) 핵연료 교체가 있었음을 보여주는 양(+)의 편차가 주로 2/4, 4/4 분면에 나타나 이 부분에서 핵연료 교체가 많이 이루어 졌고 1/4, 3/4 분면은 상대적으로 빈약했다는 점 등을 살펴볼 수 있다.

2.4. TAP 평가 결과

설비 노후화 현상이 없고 원자로 운전이 매우 이상적으로 이루어졌다면 TAP 계산으로 얻은 트립 설정치는 현재 설정되어 있는 트립 설정치와 동일하거나 더 높아야 한다. 그러나 실제로는 그때 그때의 상황에 따라

핵연료 교체가 이루어지므로 경우에 따라 트립 관련 핵계측기 위치와 민감도가 달라져 궁극적으로 트립 설정치의 감소를 가져오게 된다. 그러나 엄밀한 의미에서 모든 변수가 현재의 상황에 맞도록 재계산된 것이 아니므로 트립 설정치 자체를 변경할 수는 없다. 따라서 TAP 평가를 통해 얻은 트립 설정치(TSP_{YEAR}) 증감분은 핵계측기 교정시 벌점으로 부과하여 트립 설정치 감소 효과를 반영한다. 트립 설정치 증감분은 이미 설정되어 사용되고 있는 트립 설정치($TSP_{INSTALLED}$)와의 차이로 나타내는데, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$TAP = 1 - \frac{TSP_{YEAR}}{TSP_{INSTALLED}}. \quad (5)$$

상기한 식 (5)에 따라 년도별 TAP 교정치를 계산하여 정리한 것이 표 1 이다. 표 1 에 따르면, 특정 부분의 Ripple 출력자료를 대칭위치의 출력으로 교정한 것과 그렇지 않은 것 사이에 아무런 차이도 없음을 볼 수 있다. 이는 비록 이 부분에서 출력편차가 심하게 났지만 임계채널출력(CCP; Critical Channel Power)과는 여전히 많은 여유가 있음을 의미한다.

표 1 년도별 TAP 평가 결과

년도	CPPF 옵션	교정된 ripple 자료		교정않은 ripple 자료	
		4 plateaus (TAP correction)	1 plateaus (TAP correction)	4 plateaus (TAP correction)	1 plateaus (TAP correction)
1997	0.0125	123.13 (+0.70%)	③ 124.06 (-0.05%)	123.13 (+0.70%)	③ 124.06 (-0.05%)
	0.0	121.71 (+1.85%)	④ 122.63 (+1.11%)	121.71 (+1.85%)	④ 122.63 (+1.11%)
1998	0.01425	123.46 (+0.44%)	③ 124.36 (-0.29%)	123.46 (+0.44%)	③ 124.36 (-0.29%)
	0.0	121.83 (+1.75%)	④ 122.73 (+1.02%)	121.83 (+1.75%)	④ 122.73 (+1.02%)

현재 월성 1 호기가 모든 핵계측기의 트립 설정치를 동일하게 사용하기 때문에, 표 1 의 ③ 과 같은 조건이며 이 경우 1997 년은 -0.05%, 1998 년은 -0.29% 의 핵계측기 교정치 감소가 가능한 것으로 계산되었다. 평균 CPPF 가 년도별로 각각 1.0727, 1.0629 이므로 모든 Ripple 자료 CPPF 에 0.0125, 0.01425 를 더해 주는 것은 (식 (4) 참조) 각기 1.16%, 1.33%의 벌점(penalty factor)을 부과한 것과 같은 효과를 갖는다. 따라서 보수적인 CPPF 계산방법을 사용하지 않았다면 1997 년 1.105%, 1998 년 1.02%의 핵계측기 교정치 상승이 예상되지만 (④ 조건) 핵연료 교체 순간마다 벌점이 적용되었기 때문에 1998 년의 경우 -0.3%에 가까운 핵계측기 교정치 감소분이 발생한 것이다. 1998 년의 TAP 교정치가 더 크게 나타난 것은 1997 년 자료와 비교하여 평균 CPPF 는 감소한 반면 CPPF 계산용 벌점은 오히려 1.16%에서 1.33%로 높아졌기 때문이다. 1998 년 운전이력이 시간평균 출력분포에 좀 더 가까웠음은 년도별 ④ 번 조건을 통해서도 잘 알 수 있다. 그러나 부과된 벌점에 비해 핵계측기 교정 감소분이 10 분의 1 정도에 불과하다는 것은 최소한 벌점에 해당하는 만큼 시간평균 목표 출력과 동떨어진 상태로 운전되었다는 것을 의미한다.

다른 한편으로 식 (4) 과 같이 핵계측기 교정을 위해 CPPF 를 보정하는 경우 6 개월간 평균 CPPF 값이 작을수록, 즉 시간평균출력분포에 보다 근사하게 원자로를 운전할 수록 벌점 자체는 더욱 커지기 때문에 운전여유도 확보 측면에서 오히려 불리한 방법이라 할 수 있다. 반면 보수적인 면에서는 유리한 방법이 된다.

1.16%, 1.33%의 벌점을 주었음에도 불구하고 평균 0.15%의 추가 운전 여유도 확보에 그친 이유는 트립 가능성이 가장 큰 Case 가 무엇인지를 보면 잘 알 수 있다. 년도별로 트립 설정치에 가장 제한적인 10 개 case 를 살펴본 결과 1997 년, 1998 년 모두 7 번 liquid zone controller 영역에서 zone drain 이 발생하였을 때의 출력분포를 계산한 44 번 Case 가 가장 제한적인 것으로 나타났다. 그림 4 는 Ripple MAP 과 같은 형식으로 44 번

Case의 출력분포를 나타낸 것인데 7번 영역에서 zone drain이 발생하기 때문에 사사분면의 출력이 매우 높다. 그런데 년도별 Ripple 출력 MAP(그림 1, 2 참조)도 사사분면에서 양(+)의 편차를 갖고 있음을 알 수 있다. 물론 이사분면에서 더 큰 양의 편차를 보이지만 44번 Case는 이사분면의 출력분포가 매우 낮기 때문에 트립 설정치 관점에서 중요하지 않다. Ripple 출력은 각 Case 출력에 중첩되므로 위에서 언급한 결과는 4/4분면 핵연료교체가 상대적으로 많아 평균적으로 동 영역 출력이 높아졌고, 따라서 7번 영역에서 zone drain이 발생하는 경우는 1995년 트립 설정치 해석에서 예측한 것보다 약 1%가량 트립될 확률이 높아졌음을 의미하고 이 1%가량이 곧 트립 설정치 감소분에 해당함을 보여 주는 것이다.

만약 일사분면, 삼사분면에서 핵연료 교체가 상대적으로 빈번하였다면 이러한 현상이 줄어들 수 있었을 것이다. 그러나 삼사분면에서 핵연료 교체가 거의 이루어지지 않았던 이유도 1995년 ROP 트립 설정치 결정 당시 가장 제한적인 Case로 39번이 꼽혔기 때문이었을 것으로 판단된다.[참고문헌 1 part 3 참조] 39번 Case는 44번의 7번 영역과 수평 대칭위치에 있는 2번영역에서 ZONE DRAIN이 발생하는 것으로 44번 Case와는 대칭적인 출력분포를 갖는다. 그러므로 삼사분면 핵연료 교체는 39번 Case에 따른 트립 확률 상승으로 이어질 수 있으며 결국 핵계측기 교정치 상승은 피할 수 없었을 것으로 판단된다.

3. 결론

국내 최초로 수행된 월성 1호기 TAP 평가는 도입된 기술의 국산화를 촉진하고 이로 말미암는 독자적인 CANDU형 노심 분석 기술 보유를 선언하는 중요한 의미를 갖는다. 더욱이 TAP 평가를 통해 현재 현장에서 적용하고 있는 핵계측기 교정 방법에 대해서, 그리고 추가 운전여유도 확보 정도에 대해 정량적 근거를 마련할 수 있기에 더욱 그러하다. 월성 1호기 TAP 평가를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 142건의 현장 실측자료를 통하여 살펴본 월성 1호기 년도별 TAP 교정치는 1997년 -0.048%, 1998년 -0.29%로 각각 나타났다. 이는 1999년 핵계측기 교정치를 -0.15%정도 하향 조정할 수 있음을 의미할 뿐 아니라 핵계측기 교정시 다소 과도한 벌점을 부과하고 있음도 의미한다.

2. 추가 운전 여유도를 확보하려면 일사분면, 삼사분면쪽에 빈약하였던 핵연료 교체 빈도수를 늘리는 것이 유리하다. 다만 삼사분면보다 일사분면의 빈도수가 많을수록, 노심 상단부로 갈수록 유리할 것으로 판단된다. 이는 1997년, 1998년 Ripple Map과 Case 44, Case 36의 출력 MAP에 근거한다.

3. 현재와 같이 핵계측기 교정시 CPPF를 보수적으로 결정하려면 6개월 평균 CPPF에도 어떤 제한을 두어 CPPF 평균값이 작을 수록 벌점이 커지는 단점을 해소하는 것이 바람직하다. 그렇지 않다면 CPPF를 보수적으로 계산하는 절차를 폐지하고 연간 단위로 TAP 평가를 수행하는 것이 추가 운전 여유도 확보면에서 유리하다.

4. TAP 평가로 얻은 트립 설정치가 현재 월성 1호기에 설치된 트립 설정치와 거의 동일하다는 것은 1995년 계산 당시의 조건이 현재보다 보수적이지도 않았고 4개 Plateaus를 사용하였다는 것에 비추어 볼 때 엄밀한 의미에서 트립 설정치가 감소한 것을 의미하며 이 감소분을 현장에서는 보수적인 CPPF와 flat plateau를 사용하여 대처하였음을 뜻한다. 그리고 이러한 대처는 정량적 분석결과 충분한 것으로 판단된다.

5. 그러나 이번 월성 1호기 TAP 평가에는 기본적으로 발전소 노후화 영향이 포함되지 않은 1995년 자료를 사용하였기 때문에 노후화를 반영하는 Ripple 자료를 반영한 평가 결과는 실제 적용에 다소 무리가 있다. ROP 트립 설정치 자체가 변경되어야 하기 때문이다. 그러나, ROP 트립 설정치가 재설정되더라도, 현재의 핵계측기 교정치 감소 경향은 큰 변화가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. F. A. R. L. Laratta, et. al., "Design and Assessment of the Replacement ROPT Systems for Wolsong-1," TTR-289 Part 1, 2, and 3 (W1), AECL, Aug. (1995)
2. J. Pitre, "ROVER-F Manual," TTR-605 Rev. 1, AECL, March (1999)

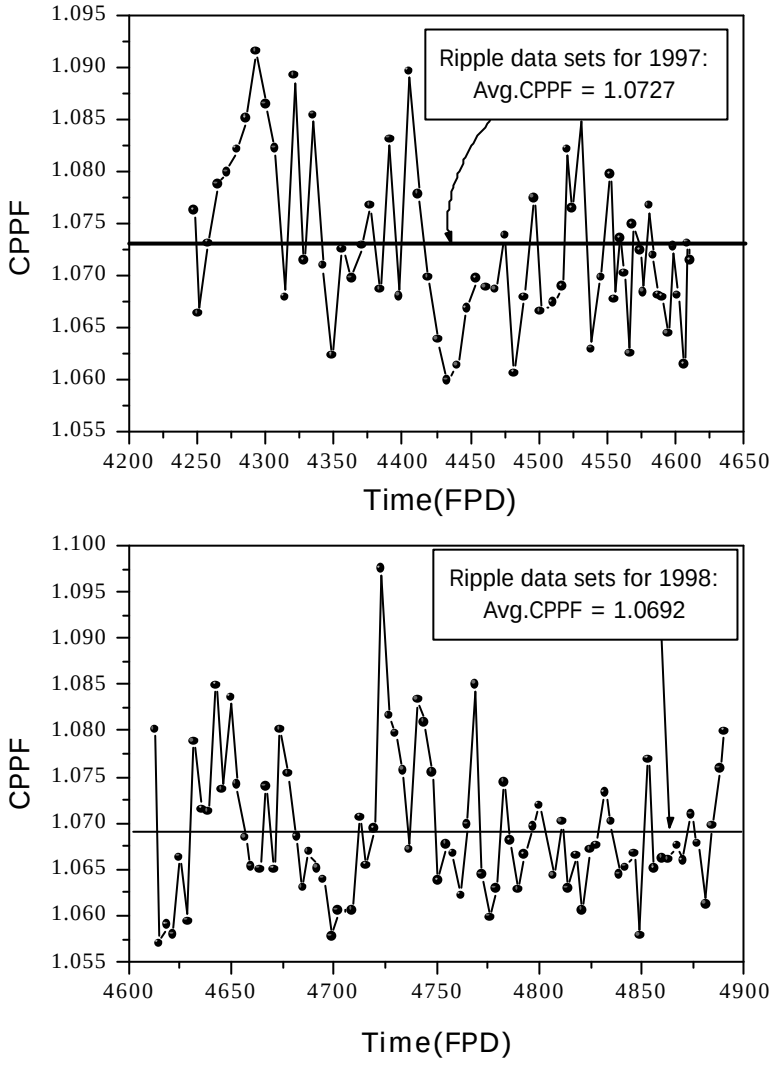
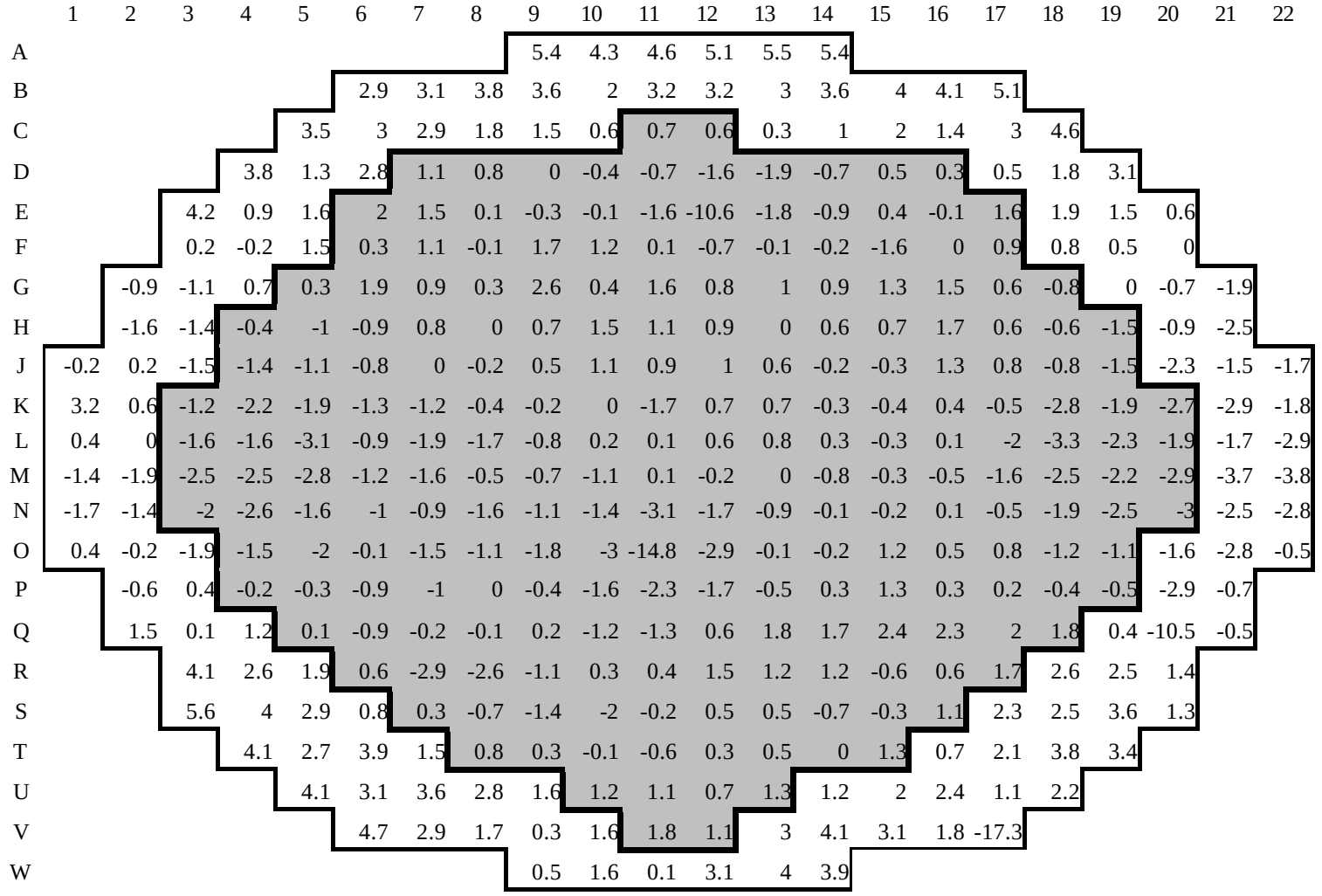
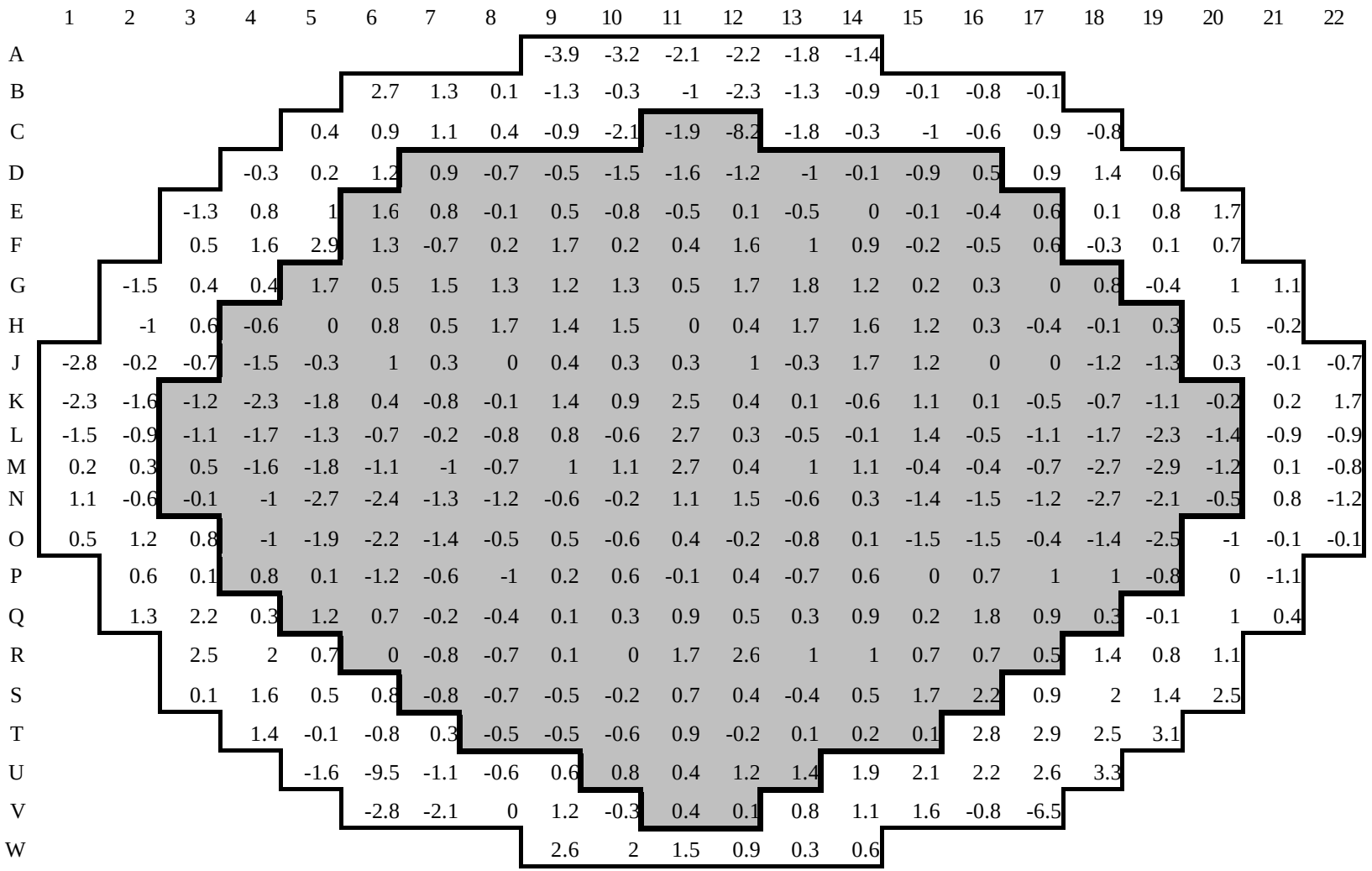


그림 1. **연소도에 따른** CPPF **변동**
(**위**: 1997 **년** Ripple **자료**, **아래**: 1998 **년** Ripple **자료**)



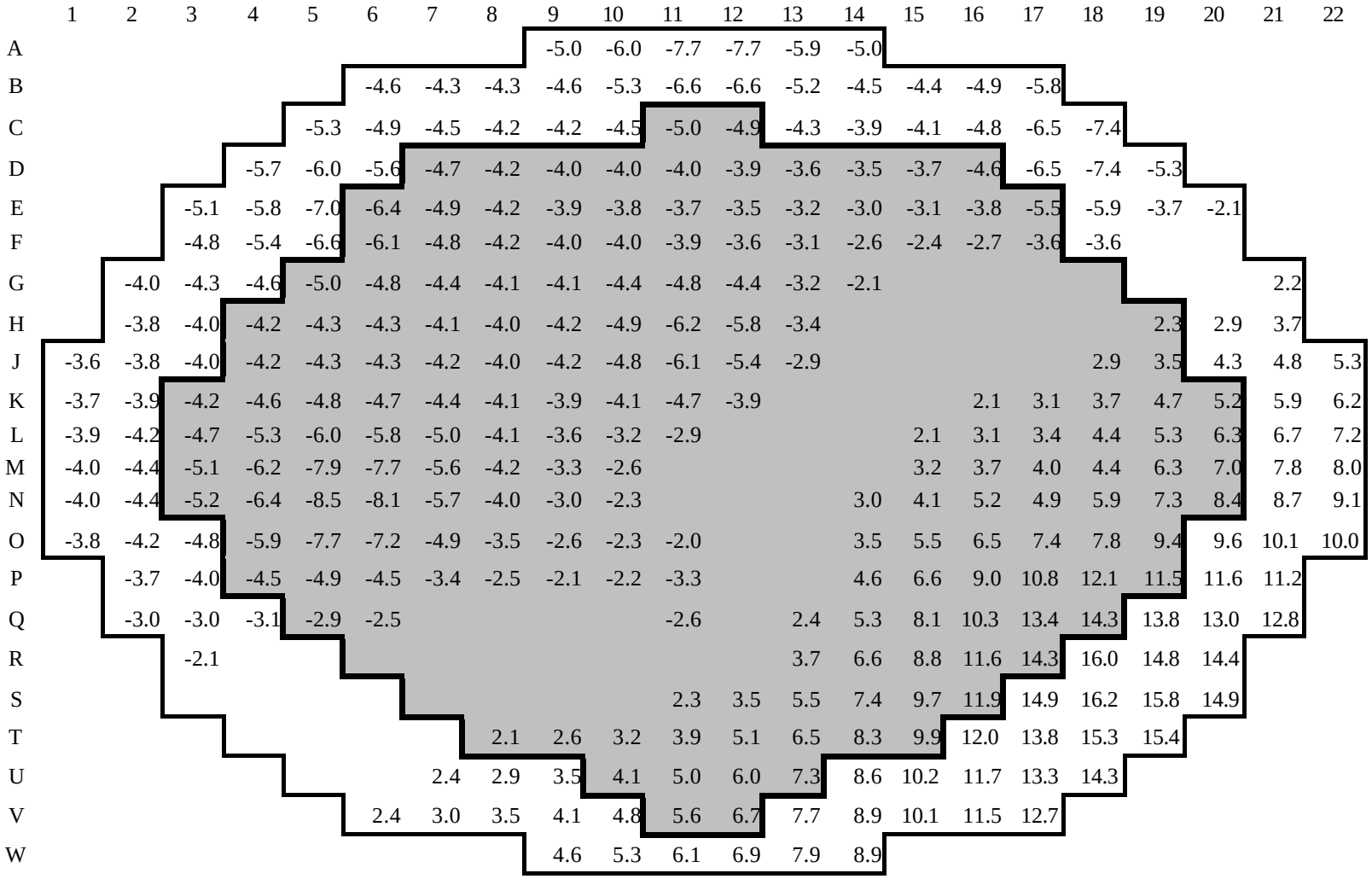
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A									5.4	4.3	4.6	5.1	5.5	5.4								
B						2.9	3.1	3.8	3.6	2	3.2	3.2	3	3.6	4	4.1	5.1					
C					3.5	3	2.9	1.8	1.5	0.6	0.7	0.6	0.3	1	2	1.4	3	4.6				
D				3.8	1.3	2.8	1.1	0.8	0	-0.4	-0.7	-1.6	-1.9	-0.7	0.5	0.3	0.5	1.8	3.1			
E			4.2	0.9	1.6	2	1.5	0.1	-0.3	-0.1	-1.6	-10.6	-1.8	-0.9	0.4	-0.1	1.6	1.9	1.5	0.6		
F			0.2	-0.2	1.5	0.3	1.1	-0.1	1.7	1.2	0.1	-0.7	-0.1	-0.2	-1.6	0	0.9	0.8	0.5	0		
G		-0.9	-1.1	0.7	0.3	1.9	0.9	0.3	2.6	0.4	1.6	0.8	1	0.9	1.3	1.5	0.6	-0.8	0	-0.7	-1.9	
H		-1.6	-1.4	-0.4	-1	-0.9	0.8	0	0.7	1.5	1.1	0.9	0	0.6	0.7	1.7	0.6	-0.6	-1.5	-0.9	-2.5	
J	-0.2	0.2	-1.5	-1.4	-1.1	-0.8	0	-0.2	0.5	1.1	0.9	1	0.6	-0.2	-0.3	1.3	0.8	-0.8	-1.5	-2.3	-1.5	-1.7
K	3.2	0.6	-1.2	-2.2	-1.9	-1.3	-1.2	-0.4	-0.2	0	-1.7	0.7	0.7	-0.3	-0.4	0.4	-0.5	-2.8	-1.9	-2.7	-2.9	-1.8
L	0.4	0	-1.6	-1.6	-3.1	-0.9	-1.9	-1.7	-0.8	0.2	0.1	0.6	0.8	0.3	-0.3	0.1	-2	-3.3	-2.3	-1.9	-1.7	-2.9
M	-1.4	-1.9	-2.5	-2.5	-2.8	-1.2	-1.6	-0.5	-0.7	-1.1	0.1	-0.2	0	-0.8	-0.3	-0.5	-1.6	-2.5	-2.2	-2.9	-3.7	-3.8
N	-1.7	-1.4	-2	-2.6	-1.6	-1	-0.9	-1.6	-1.1	-1.4	-3.1	-1.7	-0.9	-0.1	-0.2	0.1	-0.5	-1.9	-2.5	-3	-2.5	-2.8
O	0.4	-0.2	-1.9	-1.5	-2	-0.1	-1.5	-1.1	-1.8	-3	-14.8	-2.9	-0.1	-0.2	1.2	0.5	0.8	-1.2	-1.1	-1.6	-2.8	-0.5
P		-0.6	0.4	-0.2	-0.3	-0.9	-1	0	-0.4	-1.6	-2.3	-1.7	-0.5	0.3	1.3	0.3	0.2	-0.4	-0.5	-2.9	-0.7	
Q		1.5	0.1	1.2	0.1	-0.9	-0.2	-0.1	0.2	-1.2	-1.3	0.6	1.8	1.7	2.4	2.3	2	1.8	0.4	-10.5	-0.5	
R			4.1	2.6	1.9	0.6	-2.9	-2.6	-1.1	0.3	0.4	1.5	1.2	1.2	-0.6	0.6	1.7	2.6	2.5	1.4		
S			5.6	4	2.9	0.8	0.3	-0.7	-1.4	-2	-0.2	0.5	0.5	-0.7	-0.3	1.1	2.3	2.5	3.6	1.3		
T				4.1	2.7	3.9	1.5	0.8	0.3	-0.1	-0.6	0.3	0.5	0	1.3	0.7	2.1	3.8	3.4			
U					4.1	3.1	3.6	2.8	1.6	1.2	1.1	0.7	1.3	1.2	2	2.4	1.1	2.2				
V						4.7	2.9	1.7	0.3	1.6	1.8	1.1	3	4.1	3.1	1.8	-17.3					
W									0.5	1.6	0.1	3.1	4	3.9								

그림 2. 1997 **년 리플 출력** MAP (**전체**)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A									-3.9	-3.2	-2.1	-2.2	-1.8	-1.4								
B						2.7	1.3	0.1	-1.3	-0.3	-1	-2.3	-1.3	-0.9	-0.1	-0.8	-0.1					
C					0.4	0.9	1.1	0.4	-0.9	-2.1	-1.9	-8.2	-1.8	-0.3	-1	-0.6	0.9	-0.8				
D				-0.3	0.2	1.2	0.9	-0.7	-0.5	-1.5	-1.6	-1.2	-1	-0.1	-0.9	0.5	0.9	1.4	0.6			
E			-1.3	0.8	1	1.6	0.8	-0.1	0.5	-0.8	-0.5	0.1	-0.5	0	-0.1	-0.4	0.6	0.1	0.8	1.7		
F			0.5	1.6	2.9	1.3	-0.7	0.2	1.7	0.2	0.4	1.6	1	0.9	-0.2	-0.5	0.6	-0.3	0.1	0.7		
G		-1.5	0.4	0.4	1.7	0.5	1.5	1.3	1.2	1.3	0.5	1.7	1.8	1.2	0.2	0.3	0	0.8	-0.4	1	1.1	
H		-1	0.6	-0.6	0	0.8	0.5	1.7	1.4	1.5	0	0.4	1.7	1.6	1.2	0.3	-0.4	-0.1	0.3	0.5	-0.2	
J	-2.8	-0.2	-0.7	-1.5	-0.3	1	0.3	0	0.4	0.3	0.3	1	-0.3	1.7	1.2	0	0	-1.2	-1.3	0.3	-0.1	-0.7
K	-2.3	-1.6	-1.2	-2.3	-1.8	0.4	-0.8	-0.1	1.4	0.9	2.5	0.4	0.1	-0.6	1.1	0.1	-0.5	-0.7	-1.1	-0.2	0.2	1.7
L	-1.5	-0.9	-1.1	-1.7	-1.3	-0.7	-0.2	-0.8	0.8	-0.6	2.7	0.3	-0.5	-0.1	1.4	-0.5	-1.1	-1.7	-2.3	-1.4	-0.9	-0.9
M	0.2	0.3	0.5	-1.6	-1.8	-1.1	-1	-0.7	1	1.1	2.7	0.4	1	1.1	-0.4	-0.4	-0.7	-2.7	-2.9	-1.2	0.1	-0.8
N	1.1	-0.6	-0.1	-1	-2.7	-2.4	-1.3	-1.2	-0.6	-0.2	1.1	1.5	-0.6	0.3	-1.4	-1.5	-1.2	-2.7	-2.1	-0.5	0.8	-1.2
O	0.5	1.2	0.8	-1	-1.9	-2.2	-1.4	-0.5	0.5	-0.6	0.4	-0.2	-0.8	0.1	-1.5	-1.5	-0.4	-1.4	-2.5	-1	-0.1	-0.1
P		0.6	0.1	0.8	0.1	-1.2	-0.6	-1	0.2	0.6	-0.1	0.4	-0.7	0.6	0	0.7	1	1	-0.8	0	-1.1	
Q		1.3	2.2	0.3	1.2	0.7	-0.2	-0.4	0.1	0.3	0.9	0.5	0.3	0.9	0.2	1.8	0.9	0.3	-0.1	1	0.4	
R			2.5	2	0.7	0	-0.8	-0.7	0.1	0	1.7	2.6	1	1	0.7	0.7	0.5	1.4	0.8	1.1		
S			0.1	1.6	0.5	0.8	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.7	0.4	-0.4	0.5	1.7	2.2	0.9	2	1.4	2.5		
T				1.4	-0.1	-0.8	0.3	-0.5	-0.5	-0.6	0.9	-0.2	0.1	0.2	0.1	2.8	2.9	2.5	3.1			
U					-1.6	-9.5	-1.1	-0.6	0.6	0.8	0.4	1.2	1.4	1.9	2.1	2.2	2.6	3.3				
V						-2.8	-2.1	0	1.2	-0.3	0.4	0.1	0.8	1.1	1.6	-0.8	-6.5					
W									2.6	2	1.5	0.9	0.3	0.6								

그림 3. 1998 **년 리플 출력** MAP (**전체**)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A									-5.0	-6.0	-7.7	-7.7	-5.9	-5.0								
B						-4.6	-4.3	-4.3	-4.6	-5.3	-6.6	-6.6	-5.2	-4.5	-4.4	-4.9	-5.8					
C					-5.3	-4.9	-4.5	-4.2	-4.2	-4.5	-5.0	-4.9	-4.3	-3.9	-4.1	-4.8	-6.5	-7.4				
D				-5.7	-6.0	-5.6	-4.7	-4.2	-4.0	-4.0	-4.0	-3.9	-3.6	-3.5	-3.7	-4.6	-6.5	-7.4	-5.3			
E			-5.1	-5.8	-7.0	-6.4	-4.9	-4.2	-3.9	-3.8	-3.7	-3.5	-3.2	-3.0	-3.1	-3.8	-5.5	-5.9	-3.7	-2.1		
F			-4.8	-5.4	-6.6	-6.1	-4.8	-4.2	-4.0	-4.0	-3.9	-3.6	-3.1	-2.6	-2.4	-2.7	-3.6	-3.6				
G		-4.0	-4.3	-4.6	-5.0	-4.8	-4.4	-4.1	-4.1	-4.4	-4.8	-4.4	-3.2	-2.1							2.2	
H		-3.8	-4.0	-4.2	-4.3	-4.3	-4.1	-4.0	-4.2	-4.9	-6.2	-5.8	-3.4						2.3	2.9	3.7	
J	-3.6	-3.8	-4.0	-4.2	-4.3	-4.3	-4.2	-4.0	-4.2	-4.8	-6.1	-5.4	-2.9					2.9	3.5	4.3	4.8	5.3
K	-3.7	-3.9	-4.2	-4.6	-4.8	-4.7	-4.4	-4.1	-3.9	-4.1	-4.7	-3.9				2.1	3.1	3.7	4.7	5.2	5.9	6.2
L	-3.9	-4.2	-4.7	-5.3	-6.0	-5.8	-5.0	-4.1	-3.6	-3.2	-2.9				2.1	3.1	3.4	4.4	5.3	6.3	6.7	7.2
M	-4.0	-4.4	-5.1	-6.2	-7.9	-7.7	-5.6	-4.2	-3.3	-2.6					3.2	3.7	4.0	4.4	6.3	7.0	7.8	8.0
N	-4.0	-4.4	-5.2	-6.4	-8.5	-8.1	-5.7	-4.0	-3.0	-2.3				3.0	4.1	5.2	4.9	5.9	7.3	8.4	8.7	9.1
O	-3.8	-4.2	-4.8	-5.9	-7.7	-7.2	-4.9	-3.5	-2.6	-2.3	-2.0			3.5	5.5	6.5	7.4	7.8	9.4	9.6	10.1	10.0
P		-3.7	-4.0	-4.5	-4.9	-4.5	-3.4	-2.5	-2.1	-2.2	-3.3			4.6	6.6	9.0	10.8	12.1	11.5	11.6	11.2	
Q		-3.0	-3.0	-3.1	-2.9	-2.5					-2.6		2.4	5.3	8.1	10.3	13.4	14.3	13.8	13.0	12.8	
R			-2.1										3.7	6.6	8.8	11.6	14.3	16.0	14.8	14.4		
S											2.3	3.5	5.5	7.4	9.7	11.9	14.9	16.2	15.8	14.9		
T								2.1	2.6	3.2	3.9	5.1	6.5	8.3	9.9	12.0	13.8	15.3	15.4			
U							2.4	2.9	3.5	4.1	5.0	6.0	7.3	8.6	10.2	11.7	13.3	14.3				
V						2.4	3.0	3.5	4.1	4.8	5.6	6.7	7.7	8.9	10.1	11.5	12.7					
W									4.6	5.3	6.1	6.9	7.9	8.9								

그림 4. CASE 44 **의 출력** MAP (|2|% **이상 변동 위치**. **참고출력은 시간평균출력)**