

한국표준형원전 인허가 출력 감시방법 개선
Improvement of Licensed Power Monitoring Methodology for KSNP

한병섭, 지성구
한국전력기술(주)

김준성, 박영호
한전원자력연료(주)

김지인, 안철수, 윤용배, 서두석
한국수력원자력(주)

요 약

본 논문의 목적은 한국표준형원전에 대하여 출력 상승 효과, 운전 효율성 및 인허가성을 고려하여 최적의 인허가 출력 감시방안을 제시하는 것이다. 제시된 방안은 정상 상태에서 측정 불확실도가 가장 작고 상대적으로 잡음신호가 작은 노심운전 제한치 감시계통 (Core Operating Limit Supervisory System: COLSS)에서 계산한 이차측 열출력 (BSCAL)을 기준으로 1시간 평균한 값을 인허가 출력과 비교하는데 사용하는 것이다. 또한, 이차측 열출력을 기준으로 순간 출력의 제한치는 사고 해석에서 가정하는 출력 준위에서 실제 측정 불확실도를 뺀 값으로 설정한다.

여기서 제시된 인허가 출력 감시 방법을 적용하면, 정격 열출력의 약 0.25% (약 2.5 MWe의 전기출력) 정도의 출력 상승 효과를 얻을 수 있으며, 안정적인 인허가 출력 감시를 통하여 인허가 출력 감시에 따른 운전원의 부담을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통하여, 한국표준형원전의 인허가 출력 감시 기준의 모호성을 배제하고, 인허가된 출력 범위 이내에서 발전소의 안전성을 훼손하지 않고 효율적인 운전이 가능할 것이다.

Abstract

This paper aims at developing an optimum monitoring method of licensed power, which is considering the power increasing effect, the operational flexibility and the licensibility for KSNP. The proposed method for the licensed power monitoring is 1) to use the one-hour averaged BSCAL (Secondary Calorimetric Power calculated in Core Operating Limit Supervisory System, COLSS) in comparing with the licensed power limit, and 2) to establish the instantaneous power limit based on BSCAL.

Applying the new methodology to COLSS software, the thermal power for each unit can be increased by approximately 0.25% (or 2.5 MWe in electrical power). In addition, this new method can reduce the burden of operators for the licensed power monitoring by providing the more stabilized power indication. It is expected through this method that an ambiguity of monitoring standards for the licensed power limit be eliminated and

that the efficient steady-state operation be achieved within the licensed power limit without affecting the safety.

1. 서 론

노심 운전 제한치 감시 계통 (Core Operating Limit Supervisory System, COLSS)을 이용하여 인허가 출력을 감시하는 한국표준형원전 (특히 영광 3, 4호기)에서는, 이차측 열출력 (BSCAL)에 의해 교정된 일차측 열출력 (CBDELTA)과 교정된 터빈출력 (CBTFSP) 중에 큰 값을 발전소 출력 (Plant Power: PP)으로 결정하고 이를 일정한 시간 (즉, 100초)에 걸쳐 평균한 출력 (Smoothed Plant Power: PPS)을 인허가 출력 제한치(100%)와 비교하여 인허가 출력 제한치를 초과할 경우에는 경보가 발생한다. 실제 원자로 운전에서는 운전원이 인허가 출력과 관련된 경보를 방지하고 인허가된 출력 범위 내에서 최대한 높게 운전하기 위한 많은 노력을 하고 있으나, 열출력값의 잡음신호로 인하여 어려움을 겪고 있는 상황이다. 이러한 운전상의 어려움은 근본적으로 일차측 열출력의 매우 큰 잡음신호 특성에서 기인한다. 일차측 열출력의 잡음신호는 고온관 온도의 열성증화 현상에 따른 고온관 온도의 섭동 (또는, 고온관 이상현상: Hot Leg Anomaly)때문인 것으로 알려져 있다. 현재 상업 운전 중인 한국표준형원전은 이와 같은 발전소 출력의 큰 잡음신호로 인하여 인허가 출력 제한치에 의한 경보를 방지하고자, 정격 열출력보다 낮은 출력준위 (99.5% ~ 99.8%)에서 운전하고 있는 상황이다.

한국표준형원전의 이러한 운전 상황은 COLSS 알고리즘에서 인허가 출력과 비교하는 노심 출력을 선택하는 과정에서 일차측 열출력과 터빈출력 중에 최대값을 선정하는 현행 방법론에 기인한다. 즉, 그림 1에 나타난 바와 같이 일차측 열출력 (CBDELTA)은 잡음신호로 인하여 매우 큰 섭동을 보이고 터빈출력 (CBTFSP)은 비교적 일정한 출력을 유지한다. 이들 출력값 중에서 최대값을 선택하는 것은 이차측 열출력 (BSCAL)과 비교할 때 노심 출력을 높게 평가하는 결과를 초래한다. 이와 같이, 인허가 출력 제한치와 비교하는 출력 선택 과정에서의 COLSS 알고리즘 및 일차측 열출력의 과도한 잡음신호는 이차측 열출력에 비해서 노심 출력을 과도하게 보수적으로 평가하게 만들고, 운전원은 잡음신호에 의한 경보발생을 방지하기 위해 노심 출력을 낮은 수준에서 유지해야 하는 운전상의 어려움을 가지고 있다.

이러한 문제를 극복하기 위해서, 울진 3,4호기 및 영광 5,6호기의 경우에는 잡음신호를 최소화하기 위하여 일차측 열출력에 필터를 적용하여 계산된 출력을 이용하고 있다. 필터를 통과한 출력을 인허가 출력 감시에 사용함으로써 울진 3,4호기에서는 약 0.1%의 출력상승 효과를 얻은 것으로 평가되었다.⁽¹⁾ 한편, COLSS를 바탕으로 운전하는 미국의 발전소에서는 대부분 이차측 열출력을 인허가 출력 감시 기준으로 사용하고 있으며 이차측 열출력을 일정한 시간 (예를 들면, 4시간 또는 8시간) 동안 평균한 출력을 이용하여 인허가 출력 제한치와 비교함으로써 출력 상승 효과를 얻을 뿐만 아니라 안정적으로 출력을 감시하고 있는 것으로 보고되고 있다.⁽⁵⁾

본 개선안에서는 국내 및 미국의 인허가 출력 감시 규제 사항을 검토하고, COLSS를 바탕으로 운전하고 있는 미국의 발전소에서의 인허가 출력 감시경험을 파악하여 한국표준형원전에 적용될 수 있는 최적의 인허가 출력 감시방안을 도출하여 제시하고자 한다.

2. 인허가 출력 감시 규제사항

미국에서는 1974년 이후에 전출력 정상 상태 인허가 출력 준위 (또는, 출력 제한치)에 대하여 장기간에 걸친 논의가 있어 왔다. 1980년 8월에 미국 규제기관 (USNRC)에서는 출력 제한치에 대한 내부 지침을 메모로 발행하였다.⁽²⁾ 이 메모는 규제기관의 I&C Inspector가 인허가 출력 감시를 강화하기 위하여 공통의 기준으로 사용하기 위한 지침을 제공하기 위한 것이다. 이 메모에서 제시하고 있는 인허가 출력 준위에 대한 기준을 요약하면 다음과 같다. 1) 8시간 평균출력 준위는 “전출력 정상상태 인허가 출력 준위(100%)”를 초과해서는 안된다. 2) 15분 동안에 2% 만큼의 “전출력 정상상태 인허가 출력 준위”를 초과하는 것은 허용 가능하다. 3) 어떠한 경우에도 102% 출력을 초과해서는 안되지만, 다음과 같은 순간 출력의 초과는 허용된다. 즉, 30분 동안 1% 초과, 1시간 동안 0.5% 초과하는 경우. 4) 순간 출력이 초과하는 횟수 또는 순간 출력이 초과되는 시간 간격에 대한 제한치는 없다.

그러나, 그 이후 Sequoyah 1,2호기에서 인허가 출력 제한치와 비교하는 열출력 준위에 관한 관심사항이 새로이 제기된 바가 있다. 즉, Sequoyah 1,2호기에서는 위의 NRC 메모에서 제시한 인허가 출력 제한치를 인용하여 100% 정격 열출력 이상의 출력준위에서 의도적으로 운전한 것으로 나타나서, 이를 계기로 위의 NRC 메모에 따른 일상적인 운전이 허용 가능한가에 대한 문제가 제기된 것이다. NRC에서는 1990년 11월에 인허가 출력에 대한 새로운 메모를 발행하였다.⁽³⁾ 이 메모에서는, 기존에 발행된 NRC 메모 (참고문헌 2)는 인허가된 열출력이 초과되는 정도를 감시하기 위한 I&C Inspector의 지침을 제공하기 위한 것이며 인허가 출력 제한치를 초과하는 일상적인 운전을 승인하는 것이 아님을 명백히 하였다. 또한, 기존의 NRC 메모는 운전지침을 의도하는 것이 아님을 확인한 것이다. 즉, 열출력은 운전원의 조치가 없이도 섭동하기 때문에 운전원은 100% 정격 열출력 이하로 정상상태 출력을 제어할 필요가 있으며 의도적으로 100% 정상상태 이상에서 운전해서는 안된다고 제시하고 있다.

국내 규제기관에서는 1999년 5월 제8회 노심관리기술발표회에서 “운전 중 원자로의 평균 열출력은 정격 열출력을 넘지 말아야 하며, 순간 열출력 최고값은 사고해석에서 사용한 시작 시점의 원자로 열출력 값에서 열출력의 측정 불확실도를 뺀 값을 넘지 말아야 한다”고 규제 입장을 제시하였다.⁽⁴⁾ 이러한 국내 규제기관의 입장은 미국의 규제입장보다 매우 강화된 것이지만 미국의 규제사항과 같이 구체적으로 출력의 평균시간을 어떻게 정의할 것인지와 정격 열출력 초과시간의 허용범위에 대한 구체적인 규제사항에 대한 언급은 없는 상황이다. 또한, 순간 열출력의 최고값을 매우 강화된 조건 (즉, 사고해석 시작 시점의 원자로 열출력값 (102%) - 열출력의 측정 불확실도 (1.5%) = 100.5%)에서 규제하고 있는 상황으로 미국의 규제요건보다는 매우 제한적인 것으로 평가할 수 있다. 여기서, 이러한 규제 사항을 실제 현장에 적용하기 위해서 인허가 출력 감시 및 순간 출력 감시에 어떤 출력 지지값이 사용될 것인가 하는 부분과 인허가 출력 제한치와 비교하는 출력에 대한 평균 시간에 대하여는 구체적으로 정의되어 있지 않다.

또한, 이 발표에서는 국내의 CANDU형, Westinghouse형, Framatome형, 및 표준형 원전에서 어떻게 원자로 열출력 한계를 지키며 운전하고 있는가를 소개하고 있다. 이 발표의 결론으로서, On-line 감시계통인 COLSS를 이용하여 원자로 정격 열출력을 넘지 않게 운전하고 있는 한국표준형원전이 규제 관점에서 가장 바람직하게 원자로 열출력 한계를 지키고 운전하고 있음을 지적하였다.

3. 국.내외 발전소의 인허가 출력 감시방안

가. 한국표준형원전의 인허가 출력 감시방법

영광 3,4호기에서는 COLSS를 이용하여 일차측 열출력 (BDELТ), 이차측 열출력 (BSCAL), 및 터빈출력 (BTFSP)을 계산하고 100% 출력준위에서 불확실도가 가장 작은 이차측 열출력을 기준으로 일차측 열출력 및 터빈출력을 교정한다. 이차측 열출력을 기준으로 교정된 일차측 열출력 (CBDELТ)과 교정된 터빈출력 (CBTFSP) 중에서 큰 값을 발전소 출력으로 결정하고 발전소 출력을 100초 동안 평균한 평활화된 발전소 출력을 인허가 출력 제한치와 비교한다. 100초를 평균한 발전소 출력이 인허가 출력 제한치를 초과할 경우에는 경보가 발생된다.

울진 3,4호기 및 영광 5,6호기에서는 COLSS의 인허가 출력 감시에 사용되는 발전소출력 계산에서 영광 3,4 호기와는 약간 다른 방법을 채택하고 있다. 즉, 울진 3,4호기 및 영광 5,6 호기에서는 여과된 일차측 열출력 (Filtered BDELТ 또는 BDELТF) 및 여과된 터빈출력 (Filtered BTFSP 또는 BTFSPF)을 계산하고 이차측 열출력에 교정된 일차측 열출력 (CBDELТF)과 교정된 터빈출력 (CBTFSPF)을 계산하여 이 중에서 큰 값을 인허가 출력 감시에 사용한다. 영광 5,6호기에서는 여과된 일차측 열출력과 여과된 터빈출력을 이차측 열출력에 교정 (CBDELТF, CBTFSPF)하여 큰 값 (PPF)을 평활화 (100초 평균)하여 인허가 출력을 감시하는 기준출력 (PPFS)으로 사용하고 있다. 그러나, 울진 3,4호기의 경우에는 인허가 출력 감시를 위한 발전소 출력 (PPF) 선택 시에 교정된 터빈출력을 제외하고 교정된 일차측 열출력만을 선택한다.

나. 미국 발전소의 인허가 출력 감시방법

COLSS를 바탕으로 인허가 출력을 감시하고 있는 미국 내의 발전소는 SONGS-2, SONGS-3 원전, PVNGS 1,2,3호기, Waterford-3 원전, 및 ANO-2 원전 등으로 총 7기에 이른다. 이들 발전소는 NRC가 제시한 메모⁽²⁾를 바탕으로 발전소마다 각각 서로 다른 인허가 출력 감시방안을 수립하여 인허가 출력을 감시하고 있다.⁽⁵⁾ 이들 발전소에서의 인허가 출력 감시 방법을 요약하면 표 1과 같다. 인허가 출력 감시와 관련된 COLSS 알고리즘 및 실제 현장의 운전 경험을 바탕으로 미국의 COLSS 발전소의 인허가 출력 감시방법을 요약하면 다음과 같다.

SONGS 원전의 COLSS 알고리즘에서는 이차측 열출력 계산에 필요한 입력 신호를 30초 간격으로 10개를 평균 (즉, 5분 평균한 입력 신호)하여 미여과된 BSCAL을 계산한다. 한국 표준형원전에서와 같이 1단계 필터를 사용하여 여과된 BSCAL을 계산하고 BSCAL의 건전성이 “GOOD”인 경우에 계산된 BSCAL을 인허가 출력 제한치와 비교한다. 그러나, 실제적으로는 인허가 출력 제한치 감시는 NRC 메모에서 제시한 내용을 적용하여 열출력을 감시하고 있다. 열출력이 100%를 초과하는 경우에 운전원이 즉각적으로 조치를 취하여 100% 미만으로 출력을 감소시킨다. PVNGS 원전에서는 BSCAL의 12시간 평균출력이 100% 이하를 유지하도록 절차가 수립되어 있다. 또한, BSCAL의 10분 평균출력 및 1시간 평균출력이 계산되고, BSCAL의 10분 평균출력, 1시간 평균출력 또는 12시간 평균출력이 100%를 초과하는 경우에 이를 보상하기 위하여 출력을 감소시킨다. Waterford-3 원전의 COLSS 알고리

중에서는 미여과된 BSCAL을 60초 간격으로 계산하고 여과된 BSCAL은 계산하지 않는다. 발전소 출력 (PP)은 미여과된 이차측 열출력을 기준으로 교정된 일차측 열출력과 교정된 터빈출력 중에서 큰 값을 선택하고 4시간 동안 평균한 출력을 인허가 출력 제한치와 비교하는데 사용한다.

ANO-2 원전의 COLSS 알고리즘에서는 이차측 열출력 계산에 필요한 입력 신호를 10초 간격으로 30개의 입력 값을 평균한 값을 이용하여 미여과된 BSCAL을 계산한다. 미여과된 BSCAL을 이용하여 일차측 열출력 및 터빈출력을 교정하고, 인허가 출력 제한치와 비교하는데 사용되는 BSCAL 평균치 계산에서도 미여과된 BSCAL을 사용한다. 즉, ANO-2 원전에서는 12개의 미여과된 BSCAL 값을 평균한 BSCAL_{AVG}를 계산하고 이 값을 인허가출력 제한치와 비교한다. ANO-2 원전에서 BSCAL 계산은 10초 간격으로 수행되므로 12개의 평균값은 2분 평균과 동일한 의미를 갖는다. ANO-2 원전에서는 BSCAL의 4시간 평균이 100% 이하를 유지하도록 절차가 수립되어 있다. 또한, BSCAL의 2분 평균출력이 101%를 초과하는 경우에 경보가 발생되며 BSCAL 2분 평균출력이 100% 이상, 101% 이하의 출력에서 3분까지 허용된다. 3분 이상 동안 100% 이상의 출력 준위를 유지하는 경우에는 경보가 발생하고 운전원은 경보를 제거하기 위하여 즉각적으로 출력을 감소시키기 위한 조치를 취한다.

4. 최적 인허가 출력 감시방안 도출

가. 기준출력 평가 결과

COLSS 발전소에서 인허가 출력을 감시하는 기준출력은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 계산된 이차측 열출력을 기준으로 일차측 열출력 및 터빈출력을 교정하고, 교정된 두 개의 출력값 중에서 큰 값을 인허가 출력을 감시하는 기준출력으로 사용하는 것으로서 이 방법은 현재 한국표준형원전에서 사용하고 있다. 다른 하나는 계산된 이차측 열출력을 직접 인허가 출력을 감시하는 기준출력으로 사용하는 것으로서 ANO-2 원전을 포함하여 미국 내 대부분의 COLSS 발전소들이 이 방법을 채택하고 있다.

COLSS 발전소의 이차측 열출력은 이차측 주급수 유량을 측정하여 이차측 열평형 방법으로 계산된다. 이와 같이 계산된 미여과된 BSCAL은 잡음 제거 과정을 거쳐서 최종적으로 이차측 열출력 값으로 계산된다. 그러나, 이차측 열출력을 계산하는 시간 간격 및 잡음 제거를 위한 방법은 발전소마다 다소 차이를 보이고 있다. 인허가 출력을 감시하는 기준출력으로 이차측 열출력을 사용할 경우에 COLSS 발전소는 이차측 열출력 계산 시에 잡음신호를 제거하기 위해 입력인자를 미리 평균하거나 여과시키는 방법을 사용하고 있다. 또한, 이렇게 계산된 이차측 열출력을 평활화하여 인허가 출력 제한치를 초과하는지를 감시하고 있다. 예를 들어, ANO-2 발전소에서는 10초 간격으로 입력 인자들을 측정하고, 각 입력 인자들을 5분 동안 평균한 후에 평균한 입력 인자들은 10초 간격으로 이차측 열출력을 계산하는데 이용된다. 인허가 출력을 감시할 때 사용하는 이차측 열출력 값은 2분 동안 평균하여 평활화하고 이렇게 평활화된 이차측 열출력 값은 인허가 출력을 감시하는데 사용한다.

그림 2에서는 영광 4호기 6주기 전출력 (100%) 운전 중에 16시간 동안 수집한 자료로서 인허가 출력 감시에 사용되는 출력인 PPS (CBDELT와 CBTFSP 중에 큰 값)와 이차측 열출력 (BSCAL)의 변화를 보여주고 있다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 인허가 출력 감시에

사용되는 출력인 PPS가 BSCAL보다 동일한 시간대에서는 항상 높게 지시되고 있다. 이는 PPS 계산 시에 사용되는 CBDELTA의 출력변화가 크기 때문이다. 즉, 일차측 열출력을 계산할 때 사용되는 입력 측정 인자인 고온관 온도는 고온관 섭동에서 인하여 온도 변화가 크고, 이에 따라 일차측열출력 변화가 다른 출력값에 비해 매우 크게 섭동하기 때문이다.

한편, 대부분의 미국 COLSS 발전소에서는 한국표준형원전과는 달리 인허가 출력 감시를 위한 기준출력으로 PPS 대신에 평균화된 BSCAL을 사용하고 있다. 그림 3에서는 4시간 평균한 BSCAL을 인허가 출력 감시의 기준출력으로 사용하는 ANO-2 발전소의 약 4일 동안의 전출력 운전 이력을 보여주고 있다. 그림 3에 나타난 바와 같이 인허가 출력 감시의 기준출력으로서 4시간 평균한 BSCAL을 사용하는 ANO-2 발전소에서는 안정적으로 약 99.94% 정도에서 전출력 운전을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 인허가 출력 감시의 기준출력을 PPS로 사용하는 영광 3,4호기 발전소의 경우에는 그림 2에 나타난 바와 같이 약 99.80%에서 전출력 운전을 하고 있을 뿐만 아니라 순간출력이 100%를 초과할 가능성이 높기 때문에 운전원의 운전 부담이 매우 큰 상황이다.

따라서, 한국표준형원전의 인허가 출력 감시용 기준출력을 CBDELTA (또는 CBDELTA)와 CBTFSP (또는 CBTFSP) 중에 큰 값 (PPS 또는 PPF)을 사용하는 대신에 이차측 열출력 (BSCAL)을 사용한다면 전출력 운전 중에 좀 더 높은 출력에서 운전할 수 있을 뿐만 아니라 잡음신호가 완화되기 때문에 안정적인 전출력 운전이 가능하여 운전원의 부담이 감소될 것이다.

나. 평균시간 평가 결과

ANO-2 발전소의 경우에는 계산된 이차측 열출력 중에서 건전성이 “GOOD”인 이전 12스텝 동안의 값을 평균하여 $BSCAL_{AVG}$ 를 계산한다. ANO-2 발전소의 BSCAL 계산주기는 10초이기 때문에, 이는 BSCAL의 “2분 평균”을 의미한다. BSCAL의 “2분 평균값” ($BSCAL_{AVG}$)이 “GOOD”인 경우에 이를 순간적인 인허가 출력 제한치와 비교하며, “BAD”일 경우에는 PPS를 사용한다. 또한, ANO-2 원전에서 이차측 열출력의 4시간 평균한 값을 사용하여 인허가 출력 제한치와 비교하는 데 사용하고 있다.

한국표준형원전에 인허가 출력을 감시하는 기준출력으로 BSCAL을 사용하고, 계산된 BSCAL 값을 어느 정도의 시간으로 평균하여 사용할 것인가를 판단하기 위한 분석을 수행하였다. 이를 위해, 영광 4호기 6주기 전출력 운전기간 중에 취득한 자료를 이용하여 BSCAL의 평균 시간에 따른 발전소 출력의 잡음 정도를 평가하였다. 평균하지 않은 BSCAL 값에서부터 4시간 평균한 BSCAL까지 각각 계산하여 현재 영광 3,4호기에서 사용하는 인허가 출력을 감시하는 PPS와 비교 분석하였다. 또한, 울진 3,4호기에 적용하고 있는 일차측 열출력 및 터빈출력을 여과하는 기능을 영광 4호기 6주기 자료에 적용하여 같은 조건에서 영광 3,4호기 대비 울진 3,4호기의 출력 이득의 차이를 검토하였다.

BSCAL을 평균화하는 첫 번째 방법은 발전소 출력 (PP)을 평활화된 발전소출력 (PPS)으로 만들 때 두 단계에 걸쳐 평균화하는 방법인 Recursive 평균 방법 및 Running 평균 방법을 동일하게 사용하는 것이다. 이와 같은 방법은 발전소 전산기 계통 상의 메모리를 감소시키고 COLSS FORTRAN 프로그램의 수정을 최소화할 수 있기 때문에 코드 및 기능설계요건의 효과적인 개정과 발전소 전산기 계통 상의 메모리 문제를 해결하기 위한 매우 효율적인 방법이다. 두 번째 방법은 일정한 시간 동안 취득한 이차측 열출력을 단순 평균하는

것이다. 이때, 두 단계에 걸쳐 평균하는 방법과 일정한 시간 동안 취득된 값들을 단순 평균하는 것은 평균값 및 표준편차가 거의 같은 결과를 보여 준다 (표 2 참조).

표 2 및 그림 4는 인허가 출력 감시의 기준출력으로 BSCAL을 사용한 경우 평균시간에 따른 결과를 정리한 것이다. 표 2는 영광 4호기 6주기에서 취득한 자료를 활용하여 영광 3,4호기를 포함하여 울진 3,4호기의 CBDELTF 및 CBTFSPF를 계산하는 논리를 적용하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 즉, 영광 3,4호기와 동일한 출력 조건에서 울진 3,4호기 결과를 나타낸 것이다. 표 2에 나타난 바와 같이 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 인허가 출력 감시용 출력 (PPS 및 PPFs)은 일차측 열출력의 영향으로 출력 변화가 크기 때문에 기준출력으로 BSCAL을 사용했을 때보다 출력 편차가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 울진 3,4호기의 출력 편차가 영광 3,4호기에 비해 상대적으로 큰 것은 영광 3,4호기는 CBDELTF와 CBTFSPF 중에 큰 값을 선택하는 반면, 울진 3,4호기는 CBDELTF 만을 사용하기 때문에 평균출력은 낮지만 출력 편차는 더 커지는 것으로 나타났다. 인허가 출력 감시에 사용되는 출력을 BSCAL로 선택한 경우에 BSCAL을 평균하는 시간에 따라 평균 출력은 동일하지만 평균 시간에 따라 출력 편차가 변하는 것을 알 수 있다.

출력 변화의 분포가 정규분포인지를 확인하기 위하여 D-Prime 시험 방법을 사용하였다. D-Prime 시험은 표본 집단이 일정 크기 이상일 때 (즉, > 50) 사용하는 것으로 D-Prime 값이 설정치 범위를 벗어나면 비정규분포로 간주한다. 이 방법은 현재 COLSS 전체 불확실도 계산에 사용하는 코드인 COLSIM에서 정규분포 확인을 위해 사용하고 있다. COLSIM에서 One-sided tolerance limit를 계산할 때 사용하는 통계적 처리 부분을 인용하여 취득한 영광 4호기 6주기 자료에서 Normal limit과 Non-parametric limit 값을 각각 계산하였다. 95/95 tolerance limit (정규분포와 비정규분포 값)은 D Prime 시험을 거쳐 시험을 통과하지 못한 출력 변화 분포는 Non-parametric limit 값을 사용하며, 시험을 통과한 출력변화 분포는 Normal limit 값을 그 출력의 95% 확률과 95% 신뢰도를 갖는 One-sided upper tolerance limit 값으로 결정했다.

영광 3,4호기의 BSCAL의 평균시간에 따른 출력변화 빈도 분포는 D-Prime 시험 결과, 대부분 비정규분포를 갖는 것으로 나타났다. 이와 같이 결정된 One-sided upper tolerance limit 값은 인허가 감시출력의 기준을 BSCAL로 사용했을 때 BSCAL의 평균시간에 따른 출력증가 효과를 확인할 때 사용되었다. 표 2에 나타난 바와 같이 영광 3,4호기를 기준으로 울진 3,4호기는 약 0.1%의 출력증가 효과가 있으며 BSCAL의 평균시간에 따라 약 0.17%~0.25%까지 출력증가 효과가 발생함을 알 수 있다. 그림 5는 인허가 출력 감시의 기준출력을 BSCAL로 사용했을 경우에 평균 시간에 따른 출력증가 효과를 나타낸 것이다. BSCAL을 인허가 출력 감시의 기준출력으로 설정했을 경우, 평균시간이 약 1시간까지는 출력증가 효과가 나타나지만, 그 이후부터는 평균 시간이 증가된다 하더라도 출력증가 효과가 크지 않음을 확인할 수 있다. 전반적으로 인허가출력 감시의 기준출력을 BSCAL로 사용하고 1시간 이상 평균된 값을 사용하면 약 0.25%의 출력증가 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

다. 순간출력 평가 결과

한국표준형원전의 경우에는 1) 평활화된 인허가 출력 제한치, 2) 평활화된 DNBR 출력 제한치, 3) 평활화된 LHR 출력 제한치, 4) 순간 DNBR 출력 제한치, 및 5) 순간 LHR 출력 제한치를 감시하고 있다. 한국표준형원전에서 순간 열출력을 감시하는 것은 DNBR 및 LHR

관점에서의 출력 제한치를 감시하기 위한 것으로서 인허가 출력 제한치에 대한 순간 열출력 감시는 적용하지 않는다. 그 이유는 정상상태 운전을 위해 100% 출력 근처에서 운전할 경우 출력 자체가 섭동하므로 순간적인 출력이 100%를 넘는 경우가 자주 발생하고, 이에 따라 인허가 출력 제한치 초과로 인하여 빈번히 인허가 출력 관련 경보가 발생하여 출력을 100% 근처에서 운전하지 못하고 출력을 낮춰야 한다.

영광 4호기 6주기에서 취득된 자료를 이용하여 순간 열출력을 분석하였다. 표 3은 영광 3,4호기를 포함하여 영광 4호기 6주기 자료로부터 올진 3,4호기 알고리즘에 맞춰 재계산한 올진 3,4호기 순간 열출력에 대한 자료이다. 영광 3,4호기의 경우 60,000개의 발전소출력 중에서 1,033개 (약 1.7%)의 순간출력이 100.5%를 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 발전소 평균출력이 99.8%로 운전 중인데도 100.5%를 초과하는 순간출력이 발생하는 이유는 순간출력의 표준편차가 크기 때문이며, 이는 일차측 열출력의 섭동에서 기인한 것으로 평가할 수 있다. 올진 3,4호기의 경우에는 인허가 출력 감시의 기준출력에 대한 표준편차가 영광 3,4호기보다 크게 나타나고 있다. 그 이유는 비록 일차측 열출력 및 터빈출력에 대한 잡음 제거를 위해 여과기능이 적용되지만 실제로는 여과된 일차측 열출력만을 인허가 출력 감시에 사용하기 때문이다. 따라서 영광 3,4호기에 비해 100.5%를 초과하는 순간 열출력이 적은 것으로 (0.08%) 나타났지만 인허가 출력 감시용 기준출력의 평균 출력을 영광 3,4호기와 같이 99.8% 정도로 유지한다면 순간 열출력이 100.5%를 초과하는 경우가 더 발생할 것이다.

인허가 출력 감시를 위한 기준출력을 BSCAL로 선택할 경우에는 먼저 순간 열출력에 대한 정의가 선행되어야 한다. 한국표준형원전에서는 열평형 방법에 의해 미여과된 BSCAL 값을 계산하고 여과를 거쳐 최종적인 BSCAL 값을 계산한다. 발전소 출력 (PP)은 BSCAL의 건전성이 “GOOD”일 때 BSCAL에 교정된 일차측 열출력 및 터빈출력 가운데 큰 값을 사용하기 때문에 DNBR 및 LHR 출력 제한치를 감시할 때 사용하는 “순간 열출력”은 여과된 BSCAL을 사용하는 것과 동일한 의미를 가진다. 즉, 순간 열출력의 개념은 기존의 COLSS 알고리즘에 “여과된 BSCAL”을 기준으로 DNBR 및 LHR 출력 제한치 계산에 이미 적용되어 있다고 할 수 있다. 또한, 표 3은 순간 열출력의 기준을 BSCAL로 사용했을 경우 BSCAL의 평균출력이 99.66%일 때 100.5%를 초과하는 순간 열출력이 없음을 보여준다. BSCAL의 평균 열출력을 100%로 가정하는 경우에도 BSCAL은 일차측 열출력에 비해 출력 편차가 현저히 작기 때문에 순간 열출력이 100.5%를 초과하는 경우는 발생하지 않았다. 따라서, 인허가 출력 감시를 위해 평균된 BSCAL을 기준출력으로 선택하면 미여과된 BSCAL이 아닌 여과된 BSCAL을 순간 열출력 감시에 사용하는 것이 타당하다.

라. 인허가 출력 감시 최적방안

한국표준형원전에 적용할 수 있는 인허가 출력 감시에 대한 최적방안을 도출하기 위하여 국내 및 미국의 인허가 출력 감시 규제사항을 검토하고, 미국의 인허가 출력 감시 경험을 파악하였다. 또한, 미국 및 국내의 인허가 출력 감시 규제사항을 검토하고, 한국표준형원전 및 미국 COLSS 발전소의 인허가 출력 감시방안을 검토하였다. 검토 결과, 한국표준형원전의 최적화된 인허가출력 감시방안으로 다음과 같이 제시할 수 있다.

“최적 방안으로서 정상 상태에서 측정 불확실도가 작고 상대적으로 잡음신호가 작은 이차측 열출력 (BSCAL)을 기준으로 1시간 평균한 값을 인허가 출력 제한치 (100%)와 비교하는데 사용하고, 이차측 열출력 (BSCAL)을 기준으로 순간 열출력의 제한치는 100.5% (즉, 사

고해석 시작 시점의 원자로 열출력값 (102%) - 열출력의 측정 불확실도 (1.5%))로 제한한다”

이와 더불어 1) 순간적인 출력이 100.5%를 초과하는 경우에 추가적인 경보를 발생하고, 2) 순간 출력 경보 발생 설정치인 100.5%가 타당한지를 검토하기 위하여 매주기마다 이차측 열출력의 불확실도를 평가하며, 3) 인허가출력과 관련된 경보가 발생하는 경우에 경보를 제거하기 위한 운전원의 조치가 필요하다. 여기서 제시된 BSCAL 1시간 평균은 미국 COLSS 발전소에 비해 보수적이며 1999년도의 국내 규제 입장을 감안한 최적의 방안으로 판단된다.

5. 결 론

본 개선안의 목적은 한국표준형원전에 대하여 출력 상승 효과, 운전 효율성 및 인허가성을 고려하여 최적의 인허가 출력 감시방안을 확립하는 것이다. 여기서 제안된 인허가 출력 감시 방법론을 적용하면 발전소 출력 결정 시에 출력 관련 인자 중 최대값을 선택하는 과정이 제거되고, 측정 불확실도가 가장 작은 이차측 열출력을 기준출력으로 사용하기 때문에 정격 열출력의 약 0.25% (약 2.5 MWe의 전기출력) 정도의 출력 상승 효과를 얻을 수 있는 것으로 평가되었다. 또한, 안정적인 인허가 출력감시를 통하여 인허가 출력 감시에 따른 운전원의 부담을 경감할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

본 인허가 출력 감시방안은 한국표준형원전 (영광 3,4호기, 영광 5,6호기, 울진 3,4호기 및 울진 5,6호기) 뿐만 아니라 신고리 1,2호기 및 신월성 1,2호기에도 적용할 예정이다. 이는, 인허가 출력 감시 관점에서 동일한 COLSS 기능설계요건서를 적용하기 때문에 COLSS 표준화에도 기여할 것으로 예상된다. 이를 통하여, 한국표준형원전의 인허가 출력 감시 기준의 모호성을 배제하여 인허가된 출력범위 이내에서 안전성을 훼손하지 않고 발전소의 효율적인 운전이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 안철수, “Increasing Plant Power by the Improvement of COLSS Power Selection Algorithm”, 제8회 노심기술발표회, 5/20/1999
2. NRC Internal Memo, “Discussion of Licensed Power Level”, 8/22/1980
3. NRC Internal Memo, “Enforcement of License Power Limit”, 11/9/1990
4. 어근선의 4인, “규제관점에서 본 원자로 열출력 한계”, 제8회 노심기술발표회, 5/20/1999
5. UCN 3,4 TA Memo, “Background Information on COLSS Alarms and Monitoring Licensed Power Limit During Power Operation”, UCN TA-97-178, 11/3/1997

표 1. 미국의 COLSS 발전소에서의 인허가출력 감시방법 요약

POWER PLANT	REQUIREMENTS
SONGS-2 SONGS-3	- Based on NRC requirements - If power > 100%, operator takes immediate action to reduce power below 100%. - If any of the five criteria is exceeded, it is reportable.
Waterford 3	- Maintain 4 hour average of PP at or below 100% of LPL
PVNGS 1,2,3	- Maintain 12 hour average of BSCAL at or below 100% LPL. - If the 10 minute, the one hour or the 12 hour average > 100%, reduce the power. - If the 12 hour average > 100% power, it is reportable
ANO-2	- Maintain 4 hour average of BSCAL at or below 100% of LPL. - If the 2 minute average of BSCAL > 101%, Annunciator Alarm - Operation with (100% < 2 minute average < 101%) is allowed for up to 3 minutes. - If the average BSCAL over 8 hour shift > 100% or If the 2 minute average > 102%, it is reportable.

표 2. 기준출력 및 출력 평균시간에 따른 출력증가 효과 평가

기준출력	NP 횟수	NPP 횟수	Mean	Standard Deviation	Upper Tolerance Limit		Normality Test	Margin	출력평균 시간	비고
					Normal	Non- Parametric				
Max(CBDELTA, CBTFSP)	10	10	99.813	0.0636	99.919	<u>99.934</u>	Fail	-	100초	영광 3,4
CBDELTF	10	10	99.659	0.1026	99.831	<u>99.841</u>	Fail	0.093	100초	울진 3,4
BSCAL	-	-	99.659	0.0569	99.756	<u>99.764</u>	Fail	0.170	(*1)	
	10	10	99.659	0.0503	99.744	<u>99.751</u>	Fail	0.183	100초	
	10	30	99.660	0.0335	99.716	<u>99.721</u>	Fail	0.213	5분	
	30	20	99.660	0.0263	<u>99.704</u>	99.711	Pass	0.230	10분	
	10	360	99.660	0.0192	99.692	<u>99.696</u>	Fail	0.238	1시간	
	30	480	99.660	0.0106	<u>99.678</u>	99.681	Pass	0.256	4시간	
	-	-	99.660	0.0187	<u>99.690</u>	99.696	Pass	0.244	1시간(*2)	

*1 : 여과된 BSCAL값 자체

*2 : 여과된 BSCAL의 1시간 평균값

표 3. PPS 및 BSCAL에 대한 순간 열출력 비교

	Max(CBDELT,CBTFSP) (영광 3,4호기)	CBDELTF (울진 3,4호기)	BSCAL 기준	BSCAL 평균 ⇒ 100%
Mean	99.813	99.660	99.659	100
Standard Deviation	0.2313	0.2434	0.0570	0.0570
Upper Tolerance Limit	100.193	100.060	99.753	100.094
Max PP	101.270	100.741	99.885	100.226
Number (PP > 100.5%)	1,033	49	0	0
Total number	60,000	60,000	60,000	60,000
%	0.493	0.089	0	0

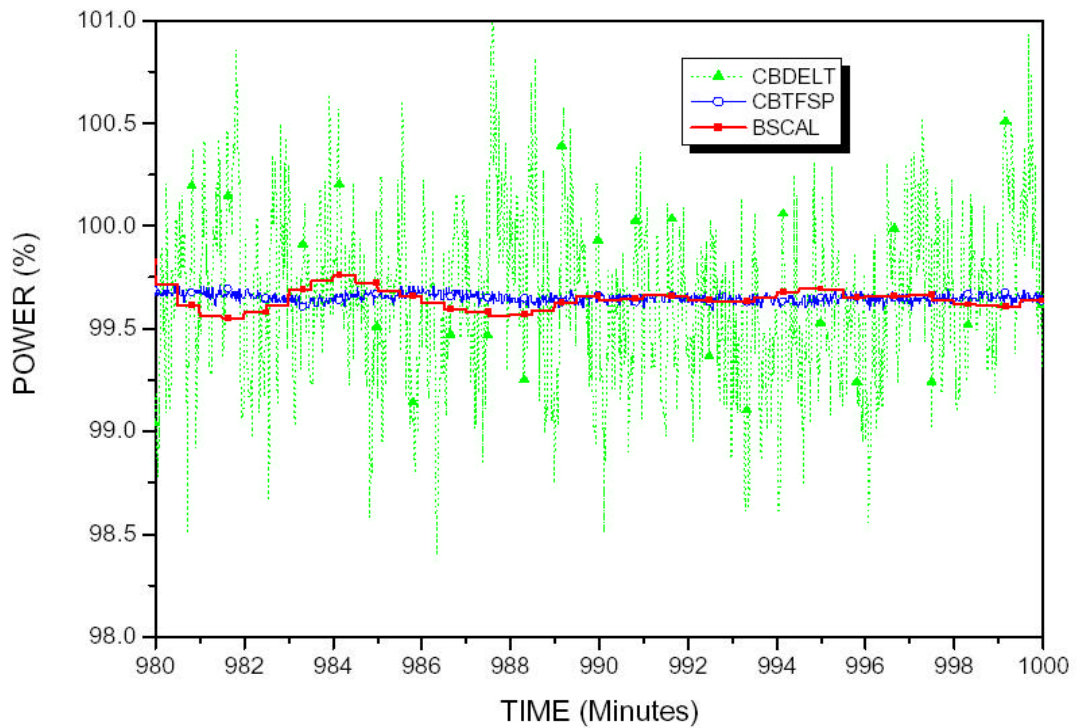


그림 1. 정상상태 운전시 출력 변화 (영광 3,4호기)

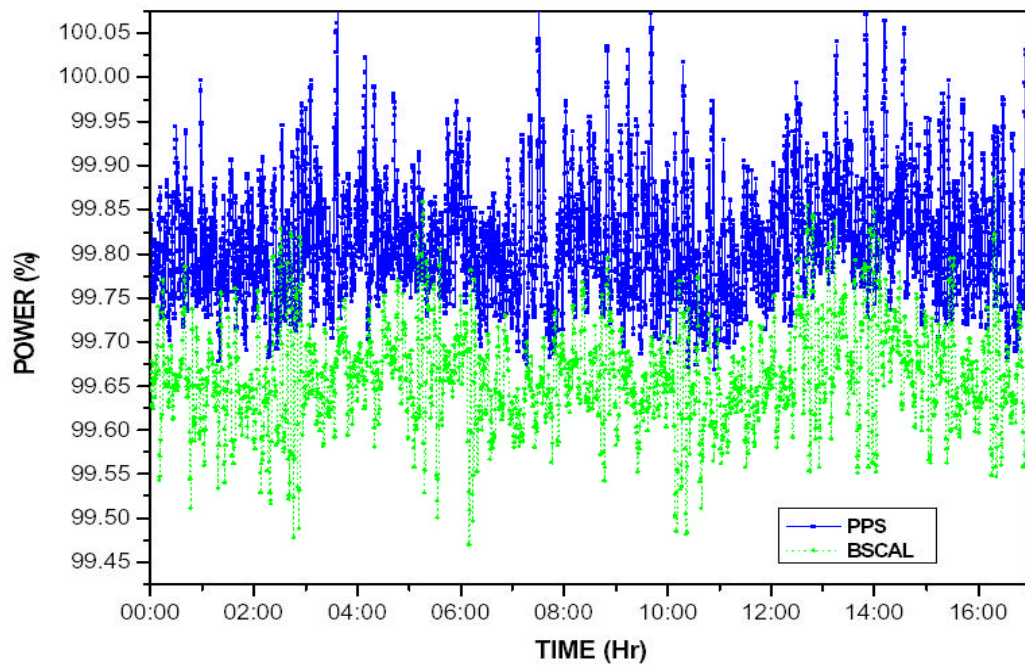


그림 2. 영광 4호기 6주기 PPS 및 BSCAL 변화 (100% 출력, 16시간)

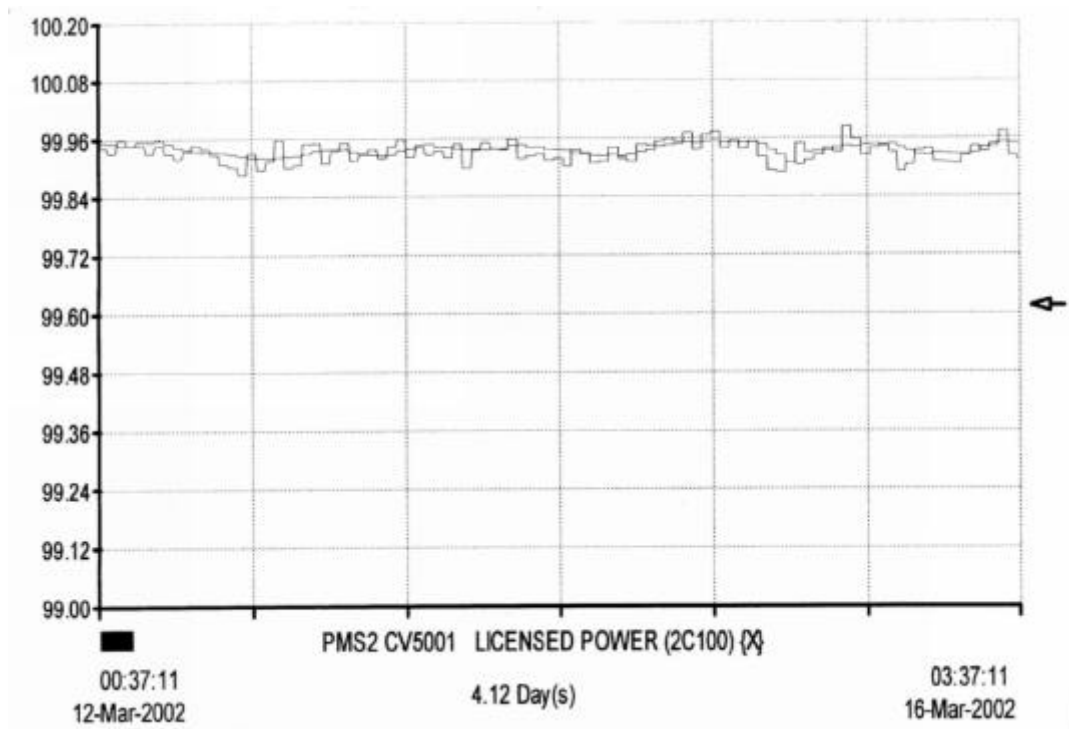


그림 3. ANO-2 발전소 전출력 운전이력

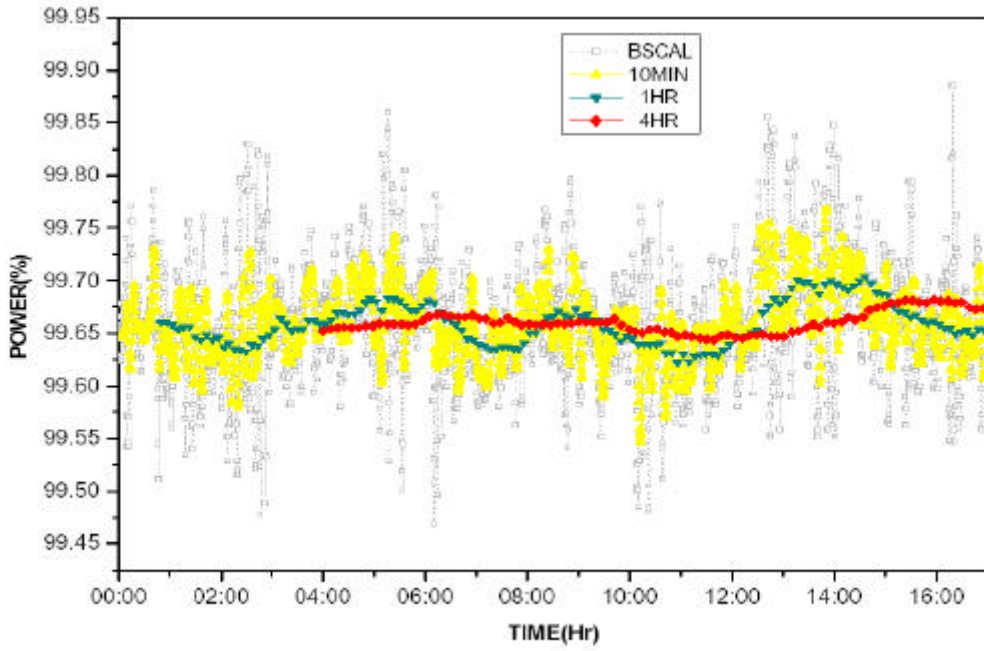


그림 4. BSCAL 평균시간에 따른 출력변화 평가 결과
(BSCAL의 10분, 1시간, 4시간 평균)

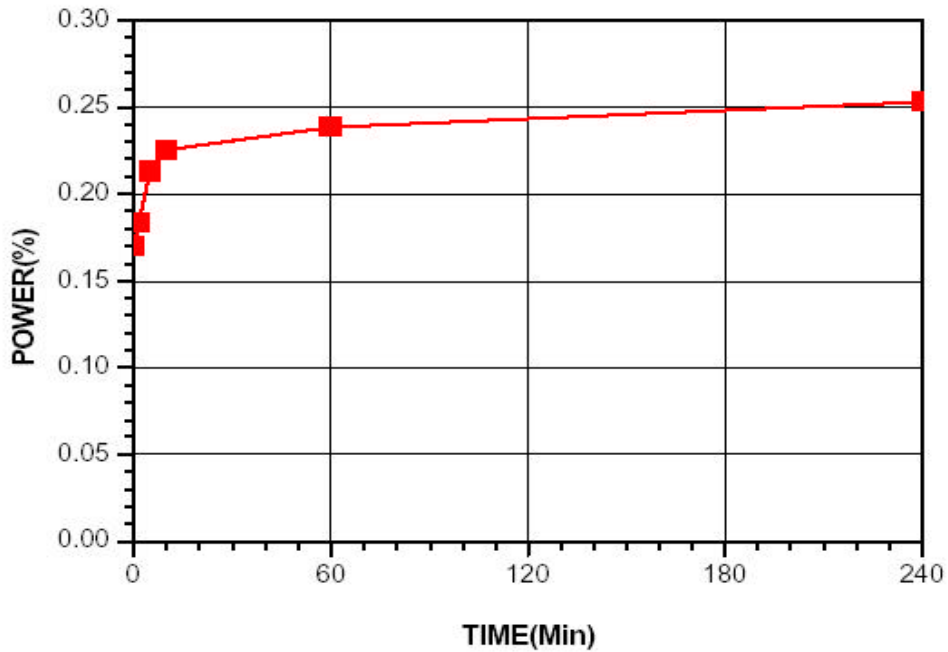


그림 5. BSCAL 평균시간에 따른 출력증가 효과