

원자력 발전연황에 대한 6시그마 고찰

고영호

한국전력공사 중앙교육원 품질교육팀

우리 나라에 제3의 에너지 원자력발전소인 고리 1호기가 '78년 4월 상업운전을 시작한 이래 우리의 원자력발전은 22년 동안 지속적인 건설과 효과적 운영으로 꾸준히 성장하여 청년기에 이르렀다.

고리 1호기 건설 당시에는 원전 건설 경험이 전무한 상태였고 국내 산업의 기반도 취약하여 어려움이 많았으나 그 동안 후속기 건설로 경험과 기술을 축적하여 현재는 기술자립도 95%에 달하는 한국표준형 원전을 건설하는 단계에 이르렀다.

이와 더불어 원자력발전소 운영의 선진화를 위한 지속적인 노력과 경험을 바탕으로 '91년 이래 국내 원자력발전소 이용률은 80% 이상을 유지하고 있으며 호기 당 고장 건수도 꾸준히 감소하여 고장 정지율도 호기 당 0.2건을 목표로 지속적인 노력을 하고 있다.

이처럼 원자력 발전소 운영에 절대적인 선진화를 앞당기며 21세기를 선도해 나가는 효율적인 운영을 추구하기 위하여 과거 21년간의 원자력 발전 현황에 대한 운전시간과 정지시간을 지수화하여 변화되는 추이를 살펴보고 이를 토대로 새로 건설되는 원자력 발전소의 발전운영 상태를 가능할 수 있는 지표를 만들고자 한다.

1. 6시그마 개념의 도입

원자력 발전소 운영에 대하여 운전시간과 정지시간을 6시그마의 개념을 도입하며 운전중 정지시간을 DPMO(100판개에 대한 결점수)로 변환한 후 이를 기준으로 단기 시그마(σ)로 나타낸다.

또한 1주기 무정지 운전(OTCF)을 달성한 경우 무정지 운전시간을 참조하며 다음과 같은 가정하에 시그마 지표를 환산하였다.

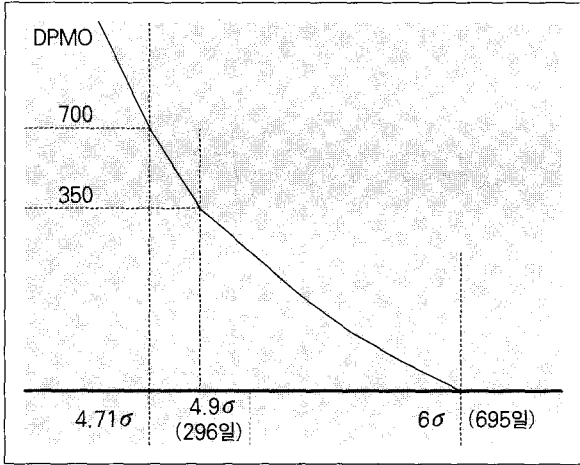
- ① 6시그마 지표를 달성하기 위한 무정지 운전시간은 695일 이상이다
- ② 현재 달성된 무정지 운전 중 가장 기간이 짧은 것은 무정지운전을 이루지 못한 운전 중 가장 시그마

지표가 큰 것을 기준으로 한 DPMO의 반을 채택하여 시그마 지표로 정한다(무정지 운전시간이 짧은 경우 300일 정도였는데 6 σ 를 달성하기 위해서는 약 400일 정도를 더 무정지 운전을 해야 하므로 이와 같이 규정함).

- ③ 이 외의 무정지 기간에 대해서는 최소 무정지 운전시간과 695일 사이를 선형적인 방법을 이용하여 시그마 지표를 산출한다.

그림 1은 무정지 운전시간에 대한 시그마 지표 계산이다.

그림1의 DPMO 700은 무정지 운전을 이루지 못한 주기 중 가장 시그마 지표가 큰 값 4.71 σ 의 DPMO이며 이 값의 반인 350 DPMO를 설정하여 4.9 σ 를 찾



〈그림 1〉

아 무정지 운전기간이 가장 짧은 296일을 기준하였으며 이외의 무정지 운전기간에 대해서는 선형적 방법을 통하여 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$\sigma = \frac{1442.8 + \text{무정지운전기간}}{356.2}$$

무정지 운전기간에 대한 시그마 지표와 표 2를 참조

로 하여 원자력발전소 운전현황에 대한 시그마지표를 나타내면 표 1과 같다.

2. 총 시그마 지표와 평균 시그마 지표

표1의 한 주기 총 운전시간과 총 정지시간에 대한 시그마 지표(총 시그마 지표 또는 합계)와 운전 평균시간에 대한 정지 평균시간의 시그마 지표(평균 시그마 지표 또는 평균)를 비교하면 그림 2~12와 같으며, 운전 평균시간과 정지 평균시간은 다음과 같이 정의한다.

즉, 운전 평균시간은 한 주기 총 운전시간을 정지 횟수로 나누었으며 정지 평균시간은 한 주기 중 총 정지시간을 정지횟수로 나눔.

단, 정기계획정비로 이어지는 경우는 정지횟수로 가산하지 않음.

그림 2~12에서 a와 같은 경우는 총 운전시간과 총 정지시간에 대한 시그마 지표(합계)가 운전 평균시간에

〈표 1〉 원전운전의 시그마 지표

주기/호기	고리1	고리2	월성1	고리3	고리4	영광1	영광2	울진1	울진2	영광3	영광4
1	2.75	2.4	2.35	3.15	3.11	3.47	3.72	1.88	2.12	4.18	3.87
2	3.02	3.71	3.1	2.95	3.41	3.41	3.07	3.74	4.72	4.12	3.4
3	2.98	2.32	4	4.9	3.16	3.95	4.04	3.54	4.99	5.08	5.14
4	3.23	3.72	3.03	3.52	4.12	4.08	3.6	4.92	4.9		
5	3.35	4.11	3.36	3.7	3.52	4.55	4.71	4.34	4.26		
6	3.55	3.24	3.93	2.7	3.75	4.13	4.15	5.12	4.56		
7	2.58	5.14	3.54	4.91	3.72	5.16	3.78	4.33	3.82		
8	3.31	4.62	4.06	3.73	3.71	4.63	4.15	3.92	4.68		
9	2.72	4.08	3.88	4.61	5.24	4.35	3.11	3.52			
10	3.76	3.87	3.72	3.35	5.34	4.42	4.46				
11	3.82	3.72	3.56	5.19							
12	2.72	4.51	4.23								
13	3.36	4.9									
14	3.37										
15	3.84										
16	2.7										
17	5.07										
18	5.11										
평균	3.402222	3.872308	3.563333	3.882727	3.908	4.215	3.879	3.923333	4.25625	4.46	4.136667

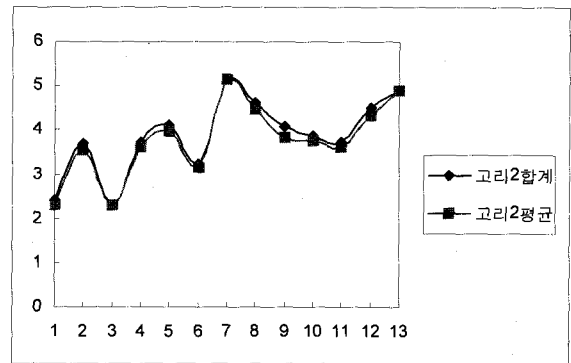
〈표 2〉 DPMO

DPMO	%	장기Sigma	단기Sigma	DPMO	%	장기Sigma	단기Sigma
500,000	50	0	<1.5	17,900	98.21	2.1	3.6
460,000	54	0.1	1.6	10,700	98.93	2.3	3.8
421,000	58	0.2	1.7	6,210	99.379	2.5	4.0
382,000	62	0.3	1.8	3,470	99.653	2.7	4.2
345,000	66	0.4	1.9	1,870	99.813	2.9	4.4
309,000	69	0.5	2.0	968	99.9032	3.1	4.6
242,000	76	0.7	2.2	483	99.9517	3.3	4.8
184,000	82	0.9	2.4	233	99.9767	3.5	5.0
136,000	86	1.1	2.6	108	99.9892	3.7	5.2
96,800	90	1.3	2.8	48	99.9952	3.9	5.4
66,800	93	1.5	3.0	21	99.9979	4.1	5.6
44,600	96	1.7	3.2	8	99.9992	4.3	5.8
28,700	97	1.9	3.4	3.4	99.9997	4.5	6.0

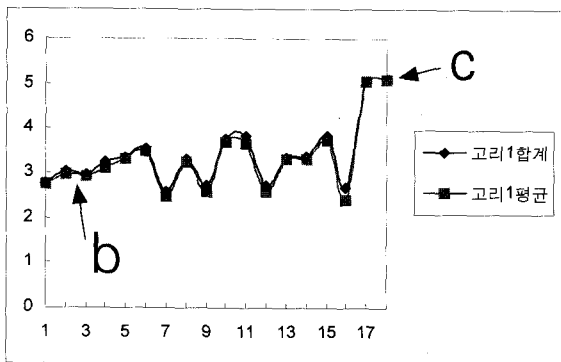
대한 정지 평균시간의 시그마 지표(평균)보다 위에 있으며 이 간격이 0.2시그마 이상을 유지하며 이것은 한 주기 내에 정지 횟수가 비교적 적은 1~2회 정도인 것을 알 수 있으며, 그림에서 b는 총 운전시간과 총 정지 시간에 대한 시그마 지표(합계)와 운전 평균시간에 대한 정지 평균시간의 시그마 지표(평균)가 거의 근접하나 일치하지는 않는 것으로 나타나 있다. 이것은 한 주기에서 4회 이상 정지된 상태를 알 수 있다.

다음은 c로서 총 운전시간과 총 정지 시간에 대한 시그마 지표(합계)와 운전 평균시간에 대한 정지 평균시간의 시그마 지표(평균)가 일치하는 것으로 이것은 한 주기 무정지 운전을 수행했다는 것을 알 수 있다.

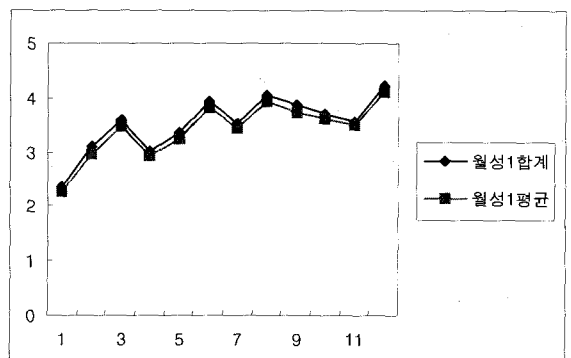
그림2부터 12까지와 a, b, c는 각각의 특성을 지니고 있으므로 원자력 발전소의 운전 형태 즉, 정지에 대



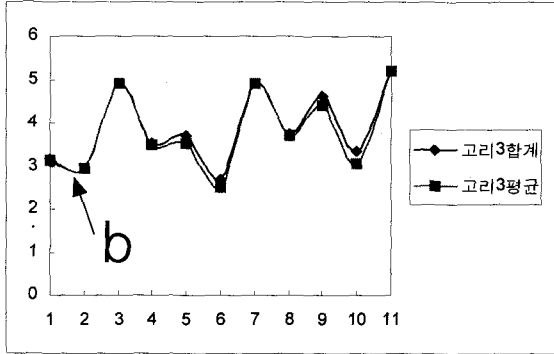
〈그림 3〉 고리 2호기



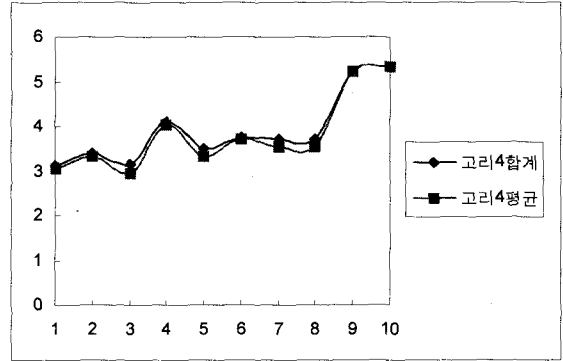
〈그림 2〉 고리 1호기



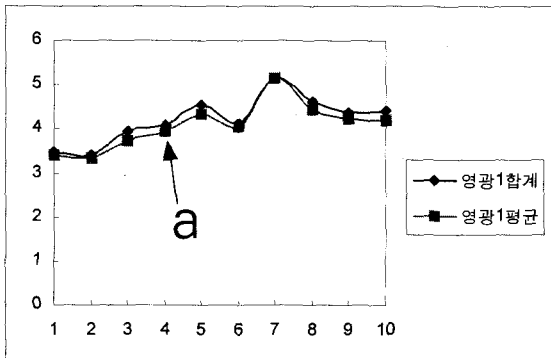
〈그림 4〉 월성 1호기



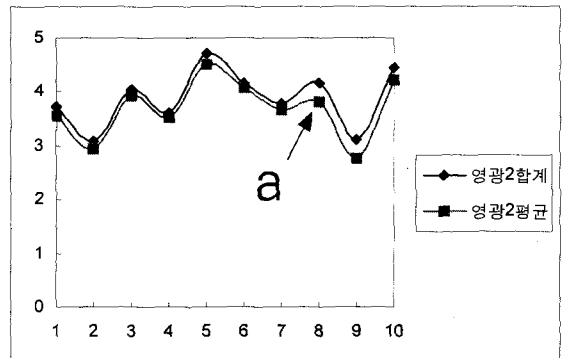
〈그림 5〉 고리 3호기



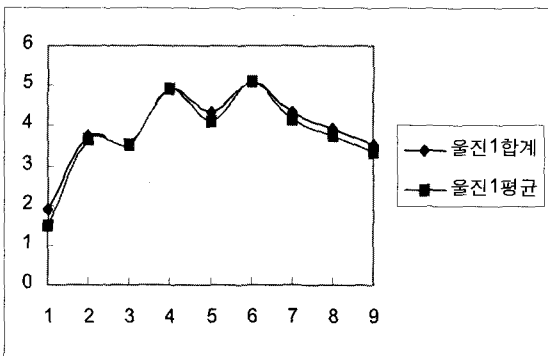
〈그림 6〉 고리 4호기



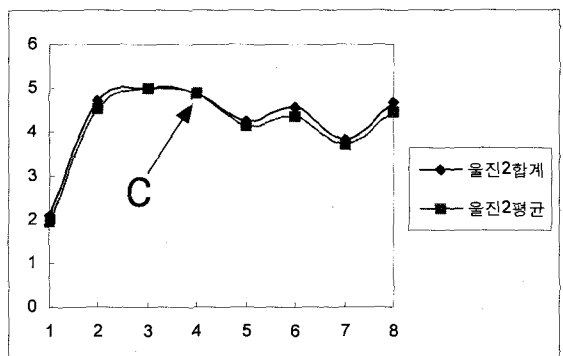
〈그림 7〉 영광 1호기



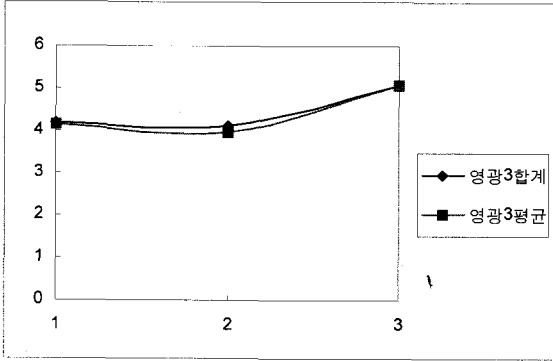
〈그림 8〉 영광 2호기



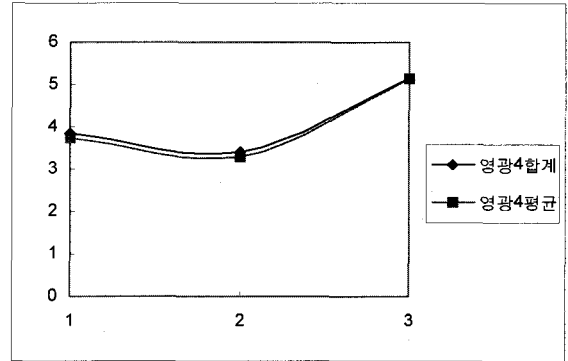
〈그림 9〉 울진 1호기



〈그림 10〉 울진 2호기



〈그림 11〉 영광 3호기



〈그림 12〉 영광 4호기

한 정보를 한눈에 알 수 있다.

3. 운전초기 시그마 지표와 최근 운전 시그마 지표

이 지표는 원자력발전소 건설 후 초기 운전에서 발생하는 빈번한 정지 현상에 대한 고찰로 설계에 따른 완성도, 근무자의 기기 제어 숙련도 및 제반사항에 따른 영향으로 해석될 수 있으나, 우리 원전 운전현황에서 그 추이를 살펴보고 최근 3주기 운전현황과 비교한다.

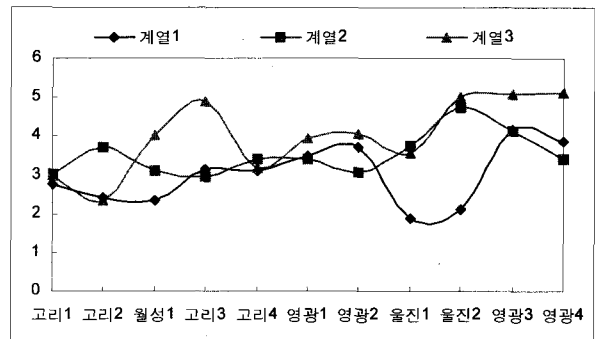
그림 13은 각 호기별 운전 최초 3주기 1, 2, 3주기에 대한 시그마 지표로서 건설 후 원자력 발전소가 설계 목표대로 운영될 수 있도록 정상화되어 가는 과정이라 할 수 있으며 그림13의 계열은 주기를 나타낸다.

계열 1 즉, 주기 1은 각 발전소의 운전 상태가 운전 1, 2호기를 제외하고는 거의 선형적인 상승 추이를 나타내며 계열 2, 3은 전체적으로 운전에 대하여 시그마 지표가 상승세로 유지하고 있다. 이는 초기의 운전 상태에 대하여 각 발전소 근무요원의 대응 능력이 향상되는 추세임을 나타내는 것이며 Knowhow도 축적되어 고리 1, 2호기 1주기 운전 시그마 지표가 약 2.5시그마이지만 영광 3, 4호기의 1주기 운전 시그마 지표는 약 4.0 시그마를 나타내는 우수한 원전 운영 능력을 나타내는

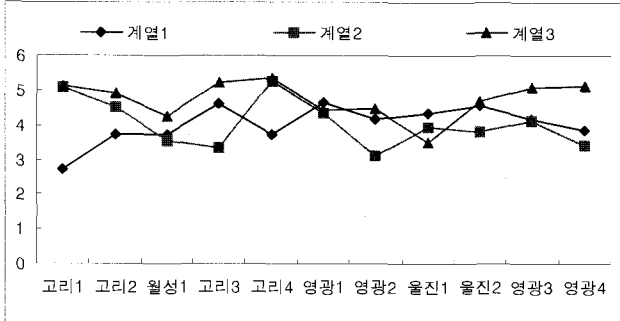
지표로 볼 수 있다.

그림 14는 각 호기별 최근 운전 3주기를 나타내는 그림으로 계열 3이 가장 최근의 원전 운영상태를 보여주고 있다. 최근 운전 3주기 형태는 최초 3주기보다는 분산 정도의 폭이 훨씬 좁아진 것을 알 수 있고 이것은 우리 나라 원전 운영수준이 선진화의 결실을 거두고 있다고 볼 수 있으며, 특히 영광 3, 4호기의 최초 3주기의 운전지표가 기존의 원전 운전의 최근 3주기 운전 시그마 지표와 비교해 볼 때 기존원전 운영에 전혀 뒤지지 않고 다소 앞서는 운전 시그마 지표를 나타내므로 우리나라의 한국표준형 원전은 상당히 우수한 원전임을 알 수 있는 객관적인 자료이다.

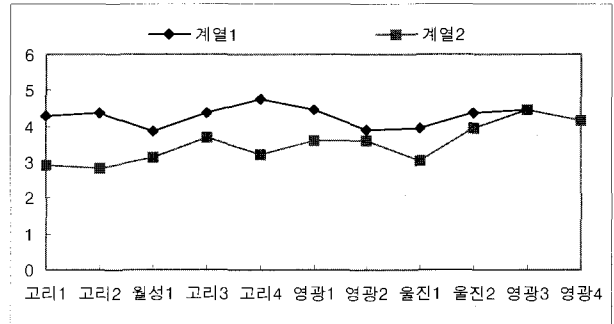
그림 15는 각 호기별 최초 3주기 운전 시그마 지표의 평균과 최근 3주기 운전 시그마 지표의 평균을 나타냈



〈그림 13〉 각 호기별 운전 최초 3주기



〈그림 14〉 각 호기별 최근 운전 3주기

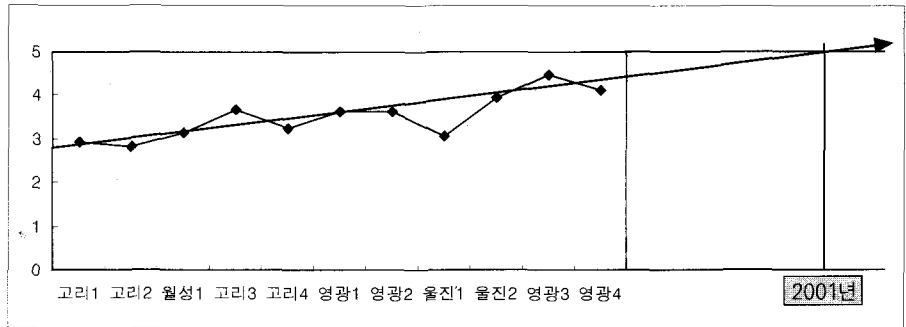


〈그림 15〉 각 호기별 평균 지표

으며, 계열 1은 최근 운전 지표이고 계열 2는 최초 운전 지표이다.

이 그림에서는 계열 1과 계열 2의 지표의 차이가 영광 3, 4호기 쪽으로 올수록 작아지는 것을 알 수 있으며, 또한 약간의 상승세를 유지하여 운전 시그마 지표가 4.0 이상을 보여주고 있다.

이것은 우리 나라의 원전운영 능력이 그림15와 같이 지속적인 상승을 유지하고 있으며 이와 더불어 원전설계능력, 기기제작기술, 건설기술 및 제반 산업의 능력이 총체적으로 진일보했다는 것을 알 수 있다.



〈그림 16〉 21세기형 원전 초기 운전 시그마 지표

그림 16은 원전의 초기운전 시그마 지표가 상승 추이를 나타내므로 화살표와 같은 형태로 지속되어 2010년을 전후하여 원자력발전소는 초기운전이 무정지 운전 즉, 5시그마 지표 300일 이상 무정지 운전을 달성해야 한다.

이를 이룩하기 위하여 우리 나라 원자력발전소의 운영과 건설, 설계와 제작에 종사하는 모든 종사자가 동일한 목표를 갖고 혼신의 힘을 쏟아 21세기에는 원자력 운영, 설계, 제작 및 건설 모든 분야에서 선진국이 되어야 한다. ❏

4. 21세기를 대비한 원전의 운전 시그마 지표

우리 나라는 원전을 21년 동안 운영하고 14기를 건설했으며 4기를 건설중에 있는 원기 왕성한 청년의 나이이다. 이제 21세기를 맞이하여 보다 성숙하고 결실 있는 원자력 운영과 건설을 추진하여 보람찬 청년기를 맞이하도록 하기 위하여 21세기를 대비한 원전의 운전 시그마 지표를 제시한다.

참고자료

- (1) 원자력발전연보 (2) 1998년 원자력발전백서
- (3) Six Sigma Guide(GE) (4) 6시그마경영(21세기북스)