

원자력 발전소 주 제어반의 제어 스위치 배치에 대한 인지적 수행도 평가

변승남¹ · 이동훈²

¹경희대학교 기계 · 산업시스템공학부 / ²경희대학교 레이저공학연구소

A Cognitive Evaluation of Hand Switch Layouts in the Main Control Board of Nuclear Power Plants

Seongnam Byun¹ · Donghoon Lee²

The objective of this study is to evaluate the human performance relating to the layouts of the two different hand switch types with two and three buttons in the nuclear power plants. Using a computer simulation, the cognitive performance for the hand switch layouts was measured on the basis of response and task completion times. Comparative analyses were performed with three different layouts representing the current switch arrangements in the Yonggwang nuclear plants 5 and 6 and Ulchin 3 and 4, respectively. Statistical analyses revealed that the performance of the two-buttoned switch layouts was found to be better than those of the three-buttoned switch. Furthermore, the superiority of the two-buttoned switch type is consistent regardless of various layout types. These results imply that the difference of the cognitive performance can be attributable to the switch types rather than to the switch layouts. Therefore, from the cognitive perspective, the two-buttoned switch type is recommended for future power nuclear plants.

1. 연구 배경 및 목적

우리 나라의 원자력 발전의 규모는 현재 건설되거나 상업 운전중인 원자력 발전소(이하 원전)가 20기에 달하며 향후 2015년까지 10기를 더 건설할 것으로 알려져 있다(조선일보, 1999). 이러한 양적인 성장이외에도 설계 기술과 운전 기술을 포함한 질적인 발전 또한 선진국과 비교해 크게 뒤지지 않는 수준으로 평가받고 있다. 특히 영광 3호기의 건설에서부터 원전 주 제어실(Main Control Room)의 설계가 국내 기술에 의해 이루어지고 있으며, 한국 표준형 원전(Korea Standard Nuclear Power Plant)인 울진 3·4호기, 5·6호기 그리고 영광 5·6호기에는 주 제어실에 인간공학적 설계개념이 적용되고 있다(최성남, 1999).

원전 주 제어실은 정확한 상황인식(Situation Awareness)을 통한 처리제어(Process Control) 기능을 수행하는 데, 전통적으로 한 개의 감지기-한 개의 계기(Single-Sensor-Single-Instrument)라는 설계개념에 따라 수많은 기기가 복잡하게 구성되어 있다

(Goodstein, 1981). 이들 기기를 감시하고 조정하는 과정에서 운전원들의 인적 오류가 발생하고 이는 대형 사고로 연결될 수 있는 데 그 대표적인 예로 1979년에 발생한 Three Mile Island (TMI)의 small LOCA (Loss of Coolant Accident)를 들 수 있다. 따라서 TMI 사고 이후 운전원의 인지적 작업 수행과정에서 발생 가능한 인적 오류(Human Error)를 최소화하기 위해, 인간-기계 인터페이스(Man-Machine Interface)에 관련된 연구들이 규제기관을 중심으로 활발하게 수행되었으며 많은 개선안과 지침들이 주 제어실 설계에 반영되었다(EPRI, 1984; IEEE, 1988; NRC, 1981; NRC, 1994; Woods, Hanes, 1986).

원전 운전과 관련된 모든 정보는 주 제어실내 경보창(Annunciator), 경보기(Alarm), 지시기(Indicator) 및 디스플레이(Display)를 통하여 나타나며, 스위치 및 버튼을 통하여 이에 대응하는 적절한 조치를 취하게 된다. 여기에서 밸브 및 펌프와 관련된 정보의 표시와 제어는 주로 조작 스위치(Hand Switch)를 통하여 수행된다. 조작 스위치는 한국 표준형 원전의 경우 형태와 기능적 특성에 따라 2단과 3단 스위치로 분류된다. 2단 스위치는 울진 3·4호기, 3단 스위치는 가동중인 영광 3·4호기와 현

재 건설중인 영광 5·6호기의 주 제어반(Main Control Board) 설계에 적용되었다. 이들 두 조작 스위치의 주요 형태 및 기능적 차이는 3단 스위치의 경우, 비정상 동작 상태표시가 TROUBLE과 DISABLED로 구분되었으나 2단 스위치는 INOPERABLE로 통합되었다(변승남, 1999). 따라서 2단 스위치는 OPEN(START)/INOPERABLE, MAN/CLOSE(STOP) 등 2개 버튼으로 3단 스위치의 경우 OPEN(START), TROUBLE/DISABLED, MAN/CLOSED(STOP) 등 3개 버튼으로 설계되었다. 인지(Acknowledgement) 방법은 3단 스위치의 경우, TROUBLE/DISABLED 버튼을 누르도록 되어 있으며 2단 스위치는 스위치의 OPEN(START)/INOPERABLE 또는 CLOSE(STOP)중 어떤 버튼을 누르더라도 반응하도록 설계되었다. 여기에서 2·3단 스위치는 어느 버튼을 누르더라도 인지 신호로만 작용하며, 실제 해당 기기가 작동되지는 않는다.

전술한 바와 같은 형태 및 기능적 차이로 인하여 2·3단 스위치의 실제 크기는 각각 다른데, 2단 스위치는 2"×3"로서 3단 스위치의 2"×4"에 비해 세로길이가 1" 작다. 스위치 크기의 차이는 동일한 한국 표준형 원전이라 할지라도 주 제어실내 제어반의 크기 및 스위치 배치(Layout)의 변화를 가져왔다. 일례로, 스위치 배치 변화에 따른 제어반 표본면적(27 inch²)당 포함된 스위치의 수를 분석한 결과, 2단 스위치의 수는 26.2개였으며 3단 스위치의 경우 24.6개였다(한국전력공사, 1997). 이에 따라 실제 3단 스위치로 설계된 영광 5·6호기의 주 제어반 전면길이는 103 ft로써 2단 스위치를 배치한 울진 3·4호기의 99 ft 보다 4 ft 정도 확장되었다. 이러한 제어반의 크기 및 스위치 배치, 스위치의 형태와 기능의 차이는 주 제어실의 사용자인 운전원의 인지적 작업 수행도에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다. 따라서 본 연구의 목적은 2단 및 3단 스위치 배치에 따른 운전원의 인지적 수행도를 인지적 측면에서 평가하여, 추후 원자력 발전소 주 제어반 설계에서 스위치 선정을 위한 근거를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 울진 3·4호기와 영광 5·6호기 주 제어반에 대한 배열(Array)특성 분석을 통하여 2단 및 3단 스위치 배치를 모형화(Modelling)하고 컴퓨터 모의 실험을 통하여 각 스위치의 인지적 작업부하를 평가하였다.

2. 배치모형

본 연구에서는 영광 5·6호기와 울진 3·4호기 주 제어반 설계도면을 이용, 배열특성을 분석하여 2·3단 스위치의 배치모형을 결정하였다(한국전력공사, 1998a; 한국전력공사, 1998b). 2단과 3단 스위치의 배열특성은 스위치 치수에 의한 차이와, 주 제어반 계통 설계 변경에 의한 차이 등 두 가지로 분류할 수 있다.

스위치의 설계 치수는 2단의 경우 2"×3", 3단의 경우 2"×4"로 3단 스위치의 세로가 1" 길다. 따라서, 2단 스위치의 경우 제어반의 수직 방향으로 5개까지 배열이 가능하지만, 3단

스위치(영광 5·6호기)의 경우 최대 4개의 스위치 배열이 가능하다. 이러한 배열특성을 가진 주 제어반으로는 PM-02(MISCELLANEOUS SECTION)와 PM-07(AUX. FW/MAIN STEAM SECTION)을 들 수 있다. <그림 1(a)>에 나타난 바와 같이 PM-02의 PX와 PR 관련 조작 스위치는 2단 스위치가 5×5 행렬 구조, 3단 스위치는 4×6 행렬구조로 배열되었다. 또한 PM-07에서 SD-HS-017, 025A, 025B, 018, 026A, 026B의 경우, 2단 스위치가 일렬로 배열되었지만, 3단 스위치는 서로 교차(Intersection)된 구조로 배열되었다(<그림 1(b)>).

계통 변경에 의한 스위치 배열특성으로는 PM-04(CVCS/RCS SECTION)를 들 수 있다. 2단 스위치의 경우, RG-HS-101, 102, 103, 104, 105는 서로 교차되어 수직으로 배열되어 있으나, 3단 스위치는 수평 구조로 배열되었다(<그림 1(c)>).

이상과 같은 배열특성으로 본 실험에 적용될 평가대상으로 세 가지 배치모형을 결정하였다. 본 실험은 컴퓨터를 이용한 배치모형 구현으로 Monitor상에 표현할 수 있는 한계를 고려, 각 배치에 배열되는 스위치의 수를 20개로 한정하였다. 배치모형 I은 전술한 PM-02(MISCELLANEOUS SECTION)의 2·3단 스위치 배열 특성을 반영한 것으로, 2단 스위치는 5×4 행렬로, 3단 스위치의 경우 4×5 행렬로 각각 배치하였다(<그림 2(a)>). 배치모형 II는 PM-07(AUX. FW/MAIN STEAM SECTION)의 배열특성을 반영하여, 3단 스위치를 교차구조로 배치하였다(<그림 2(b)>). 여기서 2단 스위치의 배치는 5×4 행렬 구조로 배치모형 I과 동일하다. 마지막으로 배치모형 III은 PM-04(CVCS/RCS SECTION)의 배열특성을 반영하여, 2단 스위치의 경우 교차된 수평 배열을 가진 5개의 스위치를 4열로, 3단 스위치의 경우 교차된 수직 배열을 가진 5개의 스위치를 2행 2열로 배치하였다(<그림 2(c)>).

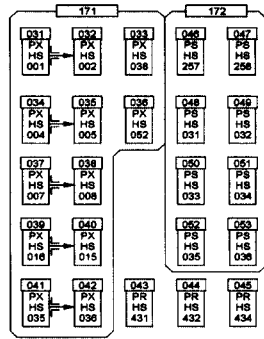
3. 실험방법

3.1 피실험자

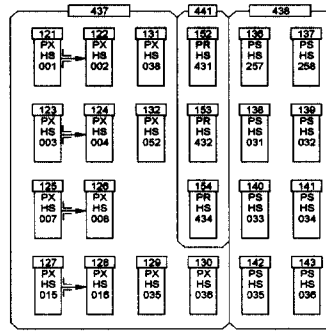
본 연구에서는 피실험자(Subject) 집단으로 150명의 대학생 및 대학원생 남학생을 선정하였다. 본 실험에서 남성만을 피실험자로 선정할 이유는 원전 주 제어실에 근무하는 운전원이 대부분 남성이라는 특수성을 반영했기 때문이다. 피실험자의 나이 구간은 19세에서 32세이며 평균 나이는 25세이다. 모든 피실험자의 교정시력(Corrected Vision)은 정상이며, 현재 상지(Upper Extremity) 및 안과에 관련된 질환이 없고 과거에도 경험한 적이 없는 사람으로 구성되었다.

3.2 실험기기

본 실험은 21" Monitor(390 mm×292.5 mm)와 삼성 컴퓨터 Pentium II 335 MHz를 이용하여 수행되었다. 본 연구에서는 미

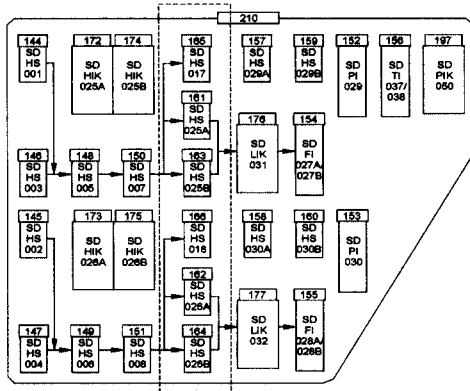


2단 스위치 배열

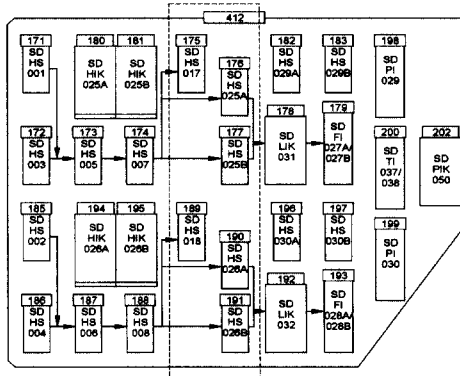


3단 스위치 배열

(a) PM-02. MISCELLANEOUS SECTION

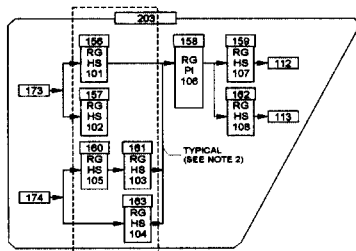


2단 스위치 배열

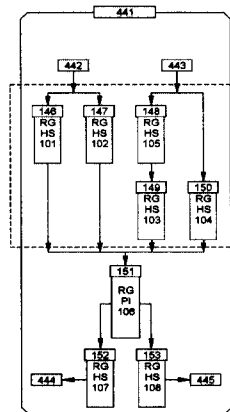


3단 스위치 배열

(b) PM-07. AUX. FW/MAIN STEAM SECTION



2단 스위치 배열



3단 스위치 배열

(c) PM-04. CVCS/RCS SECTION

그림 1. 2·3단 스위치 배열특성.

표 1. 배치모형의 크기 (단위: Pixel, 가로×세로)

배치모형	스위치 배치	크기	스위치 배치	크기
1	2단	390×715	3단	490×750
2	2단	390×715	3단	800×790
3	2단	790×570	3단	790×750

도록 프로그램하였다. 따라서 2단 스위치의 경우, 비정상은 INOPERABLE에서, 3단 스위치는 TROUBLE과 DISABLED중 한 부분에서만 신호가 발생하도록 하였다. INOPERABLE과 TROUBLE / DISABLED에서 발생하는 신호의 점멸 횟수(Flashing Rate)는 초당 4회로 결정하였다.

이 실험에서는 화면상에 나타나는 2·3단 스위치의 치수를 피실험자가 터치 스크린을 사용하여 누르는 데 불편이 없도록 하였다. 화면 해상도는 1280×1024 Pixel이며 스위치의 가로×세로의 비율이 실제와 동일하도록 설계, 2단 스위치의 경우 1 : 1.5(90×135 Pixel), 3단 스위치의 경우 1 : 2(90×135 Pixel)의 비율로 구현하였다. 또한 스위치간 이동시간을 동일하게 부여하기 위해 스위치간의 상·하 및 좌·우는 10 Pixel 간격을 두었다. 따라서 각 배치모형에 대한 크기는 <표 1>과 같다.

3.3 실험설계

각 배치모형에 대해 2·3단 스위치의 배치, 신호 간섭 수준(Signal Interruption Level)과 신호발생 수를 실험변수로 선택하였다. 신호 간섭은 완전 간섭, 반 간섭, 비 간섭 등 세 가지 수준으로 결정하였다. 완전 간섭은 신호가 발생하는 부분을 제외한 모든 스위치가 ON인 상태로 신호 반응에 대한 간섭을 최대한 한 것이다. 반 간섭은 2·3단 스위치의 OPEN을 ON하고 나머지 부분은 OFF한 상태를 말하며, 비 간섭은 신호가 발생하는 부분만 ON인 상태로 간섭 수준을 최소화 한 것이다. 모든 간섭 수준에서의 신호발생 수는 1, 3, 5 등 세 가지로 결정하였다.

본 실험에서는 반응에 필요한 신체의 이동시간(Movement Time)이 반응시간(Reaction Time)에 미치는 영향을 최소화하기 위해 신호발생 위치를 각 배치모형에 대해 동일하도록 하였다. 따라서 배치모형에 대해 신호가 발생하는 스위치에 대해 고유 번호를 지정하고(<그림 2>) 각 실험에 대해 동일한 번호에서 신호가 발생하도록 하였다. 그러나 동일한 실험조건 하에서의 실험반복에 따른 신호발생 위치는 각각 다르도록 설계하였다.

전술한 바와 같은 실험변수에 따라 총 18가지(3(배치모형) × 2(2·3단 스위치 배치) × 3(신호 간섭))경우에 대한 실험이 가능하다. 그러나 배치모형 I의 2단 스위치 배치는 배치모형 II의 배치와 동일하므로 본 연구에서는 총 15가지의 실험을 실시하였다. 각 실험에 대한 피 실험자의 구성은 무작위로(Random)로 결정하였다.

그림 2. 배치모형.

국 Elo사가 제작한 21" 터치 스크린(Touch Screen)을 Monitor에 부착하여 피실험자가 화면에 나타난 스위치를 누르도록 해 실제 주 제어반에서의 직무와 동일한 효과를 갖도록 하였다. 배치모형의 구현에는 Corel사의 CorelDRAW 8.0과 Adobe사의 Photoshop 5.0을 이용하였으며, Microsoft사의 Visual Basic 5.0을 이용하여 실험변수 및 조건을 제어하였다. 여기에서 스위치 및 배치배경과 관련된 색은 실제와 동일한 효과를 갖도록 구현되었다.

실험 결과의 신뢰성을 제고하기 위해 화면에 나타나는 스위치의 신호발생 및 인지방법이 현장에서 사용되는 것과 동일하

3.4 실험절차

실험에 앞서 피실험자에게 실험의 목적 및 실험방법, 유의점 등 실험과 관련된 제반 운영사항을 알려주었다. 또한 2·3단 스위치의 형태, 특성, 조작법 등을 별도로 마련된 그림을 통하여 자세히 설명하고 이를 숙지시켰다. 다음, 피실험자를 지정된 의자에 착석시키고, 자세와 위치를 조절하여 Monitor와의 시각(Visual Angle)은 15°, 수평거리는 60 cm를 유지시켰다.

본 연구에서는 실험전 2단계로 구성된 훈련과정을 실시하였다. 첫번째 단계는 본 실험과는 별도로 마련된 배치모형을 이용하여 스위치 조작 훈련을 위한 과정으로 검지 손가락을 이용, 신호에 대한 반응 훈련이다. 이 과정은 피실험자가 터치스크린의 사용에 익숙해 질 때까지 수행되었다. 두번째 단계는 본 실험과 동일한 배치모형에 대해 반응하는 과정으로 총 2회 반복하였다.

실험은 피실험자에 대해 3회 실시하였으며 각 실험에는 신호발생 수 1, 3, 5에 대해 각각 15회씩, 총 45회의 신호를 임의로 발생시켰다. 따라서 피실험자는 3회의 실험동안 총 135회의 반응을 수행하게 된다. 반응방법은 우선 Monitor 앞의 지정된 위치에 피실험자의 손을 고정시키고, 신호가 발생하면 손을 이동하여 신호가 발생한 스위치를 누르도록 하였다. 발생한 신호에 대한 반응이 완료되면 동일한 지점에 손을 위치시키고 다음 신호 발생을 기다리게 된다. 신호반응이 완료되면 3초 후 다음 신호가 발생하게 되며, 신호발생 후 10초 동안 반응하지 않을 경우 오류로 처리하였다. 이상과 같은 일련의 훈련 및 실험과정은 각 피실험자에 대해 평균 40분이 소요되었다.

3.5 스위치 변경을 가정한 배치모형에 대한 실험

본 연구에서는 배열특성에 의한 배치효과를 규명하기 위해 전술한 실험(실험 I)에 사용된 3가지 배치모형과 구조는 동일하나 2단과 3단 스위치를 서로 교체한 배치모형을 이용하여 실험(실험 II)을 수행하였다. 예를 들어 배치모형 I의 경우, 2단 스위치는 5×4 행렬로, 3단 스위치는 4×5 행렬로 각각 배열되었다. 반면 실험 II의 배치모형 I은 2단 스위치가 4×5 행렬로, 3단 스위치는 5×4 행렬로 바뀌어 배열되었다(<그림 3>). 배치모형 II 및 III의 스위치 배치 또한 이와 동일한 방법으로 구현되었다. 본 실험은 실험 I에 의한 피실험자의 학습효과(Learning Effect)를 최소화하기 위해 실험 I의 완료 시점에서 20일 후에 실시되었다. 배치변경을 제외한 모든 실험변수 및 조건, 피실험자의 구성은 실험 I과 동일하다.

4. 실험결과

본 연구에서는 반응시간(Response Time: RT)과 반응완료시간(Response Completion Time: RCT)을 스위치 배치에 대한 인지적

그림 3. 실험 II의 배치모형 I.

수행도의 평가 기준으로 선정하였다. 반응시간이란 피실험자가 신호발생 후 스위치를 처음 누르는데 소요되는 시간이며, 반응완료시간이란 발생된 모든 신호에 대해 반응을 하는 데 걸리는 시간이다. 따라서 신호발생 수가 1인 경우 완료시간은 반응시간과 동일하다. 자료의 통계분석에는 StatSoft®의 STATISTICA™ 99를 사용하였다.

4.1 실험 I

4.1.1 반응시간(RT)

배치모형 I

배치모형 I에 대한 반응시간은 <표 2(a)>와 같다. 스위치 배치에 따른 평균 반응시간을 비교하면 2단은 1,273초, 3단은 1,474초로 2단 스위치 배치의 반응시간이 3단에 비해 빨랐다. 3원 분산분석(Three-Way ANOVA) 결과, 반응시간은 스위치 배치($p < 0.01$), 신호 간섭($p < 0.01$) 그리고 신호 발생 수($p < 0.01$)에 따라 차이가 있었다(<표 3(a)>).

신호 간섭과 신호 발생 수를 고려한 스위치 배치간 반응시간을 Newman-Keuls 검정을 이용하여 분석한 결과, 모든 수준에서 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 반응시간이 빨랐다($p < 0.01$). 따라서 신호 간섭이나 신호발생 수에 관계없이 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 반응시간 측면에서 인지적 수행도가 우수하였다.

배치모형 II

배치모형 II의 반응시간은 <표 2(b)>와 같다. 스위치 배치에 대한 평균 반응시간은 2단 스위치 배치가 1,273초로 3단 스위치 배치의 1,569초에 비해 빨랐다. 분산분석 결과, 반응시간은 스위치 배치($p < 0.01$), 신호 간섭($p < 0.01$) 그리고 신호 발생 수($p < 0.01$)에 따라 차이가 있었다(<표 3(b)>). 또한 스위치 배치 요인과 신호 발생 수 요인간의 교호 작용이 유의하게 나타나 스위치 배치와 신호 발생 수의 조합에 따라 반응시간이

표 2. 반응시간-실험 I

(a) 배치모형 I

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	1	3		1.205	비 간섭	1
3		5	1.165	3	5		1.406
5		평균	1.228	5	평균		1.435
반 간섭	1	3	1.244	반 간섭	1	3	1.309
	3	5	1.250		3	5	1.411
	5	평균	1.307		5	평균	1.491
완전 간섭	1	3	1.388	완전 간섭	1	3	1.587
	3	5	1.299		3	5	1.599
	5	평균	1.373		5	평균	1.700
총 평균			1.273	총 평균			1.474

(b) 배치모형 II

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	1	3		1.205	비 간섭	1
3		5	1.165	3	5		1.407
5		평균	1.228	5	평균		1.752
반 간섭	1	3	1.244	반 간섭	1	3	1.349
	3	5	1.250		3	5	1.504
	5	평균	1.307		5	평균	1.796
완전 간섭	1	3	1.388	완전 간섭	1	3	1.556
	3	5	1.299		3	5	1.612
	5	평균	1.373		5	평균	1.866
총 평균			1.273	총 평균			1.569

(c) 배치모형 III

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	1	3		1.175	비 간섭	1
3		5	1.242	3	5		1.419
5		평균	1.349	5	평균		1.745
반 간섭	1	3	1.194	반 간섭	1	3	1.346
	3	5	1.335		3	5	1.514
	5	평균	1.442		5	평균	1.793
완전 간섭	1	3	1.461	완전 간섭	1	3	1.485
	3	5	1.443		3	5	1.603
	5	평균	1.452		5	평균	1.568
총 평균			1.344	총 평균			1.536

표 3. 반응시간에 대한 분산분석 결과

(a) 배치모형 I

요 인	제공합	자유도	평균 제공	F값	유의확률
스위치 배치	163.20	1	163.20	72.31	0.0000**
신호 간섭	116.10	2	58.05	25.71	0.0000**
신호 발생 수	19.62	2	9.81	4.35	0.0146**
스위치 배치×신호 간섭	13.20	2	6.60	2.93	0.0568
스위치 배치×신호 발생 수	10.46	2	5.23	2.32	0.1018
신호 간섭×신호 발생 수	5.04	4	1.26	0.56	0.6919
스위치×신호 간섭×신호 발생 수	0.52	4	0.13	0.06	0.9936
간 차	325.44	144	2.26		
계	653.58	161			

(** : p<0.01)

(b) 배치모형 II

요 인	제공합	자유도	평균 제공	F값	유의확률
스위치 배치	355.47	1	355.47	41.03	0.0000**
신호 간섭	84.06	2	42.03	4.85	0.0091**
신호 발생 수	145.38	2	72.69	8.39	0.0004**
스위치 배치×신호 간섭	1.65	2	0.8242	0.10	0.9093
스위치 배치×신호 발생 수	101.68	2	50.84	5.87	0.0035**
신호 간섭×신호 발생 수	7.80	4	1.95	0.23	0.9240
스위치×신호 간섭×신호 발생 수	1.84	4	0.46	0.05	0.9946
간 차	1247.04	144	8.66		
계	1944.92	161			

(** : p<0.01)

(c) 배치모형 III

요 인	제공합	자유도	평균 제공	F값	유의확률
스위치 배치	150.28	1	150.28	32.90	0.0000**
신호 간섭	39.52	2	19.76	4.33	0.1498**
신호 발생 수	134.68	2	67.34	14.74	0.0000**
스위치 배치×신호 간섭	17.82	2	8.91	1.95	0.1460
스위치 배치×신호 발생 수	20.30	2	10.15	2.21	0.1121
신호 간섭×신호 발생 수	55.00	4	13.75	3.01	0.0202**
스위치×신호 간섭×신호 발생 수	8.96	4	2.24	0.49	0.7423
간 차	658.08	144	4.57		
계	1084.64	161			

(** : p<0.01)

달라지는 것($p < 0.01$)으로 나타났다.

신호 간섭을 고려한 스위치 배치간 반응시간을 Newman-Keuls 검정을 이용하여 분석한 결과, 모든 신호 간섭 수준에서 2단 스위치 배치의 반응시간이 3단에 비해 빨랐다($p < 0.01$). 또한 신호 발생 수가 3과 5인 경우, 2단 스위치 배치의 반응시간이 3단에 비해 빨랐다($p < 0.01$). 그러나 신호 발생이 1인 경우, 2단 및 3단 스위치 배치의 반응시간은 차이가 없었다.

배치모형 III

배치모형 III에 대한 반응시간은 <표 2-(c)>와 같다. 스위치 배치에 따른 평균 반응시간은 2단의 경우 1.344초, 3단의 경우 1.536초로 2단 스위치 배치의 반응시간이 빨랐다. 분산분석 결과, 반응시간은 스위치 배치($p < 0.01$), 신호 간섭($p < 0.01$) 그리고 신호 발생 수($p < 0.01$)에 따라 달라지는 것으로 밝혀졌다(<표 3-(c)>). 또한 신호 간섭 요인과 신호 발생 수 요인간의 교호 작용이 유의($p < 0.01$)하게 나타나 신호 간섭과 신호 발생 수의 수준간의 조합에 따라 반응시간이 달라지는 것으로 나타났다.

신호 간섭과 신호 발생 수를 고려한 스위치 배치간 반응시간을 Newman-Keuls 검정을 이용하여 분석하였다. 신호 간섭의 경우, 비 간섭과 반 간섭 조건에서 2단 스위치 배치의 반응시간이 3단에 비해 빠른 것으로 밝혀졌다($p < 0.01$). 또한 신호 발생 수가 3과 5인 경우 2단 스위치 배치의 반응시간이 3단 스위치 배치에 비해 짧았다($p < 0.01$). 이상의 결과를 종합하면 배치모형 III은 배치모형 I, II의 결과와 동일하게 2단 스위치의 배치가 3단 스위치 배치에 비해 반응시간 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

4.1.2 반응완료시간(RCT)

배치모형 I

배치모형 I에 대한 반응완료시간은 <표 4(a)>와 같다. 분산분석 결과 신호 발생 수가 3인 경우 스위치 배치에 따라 반응완료시간(RCT_3)이 달라지는 것으로 밝혀졌다($p < 0.01$). 2단 및 3단 스위치 배치의 평균 RCT_3 는 각각 2.006초, 2.353초로 2단 스위치 배치의 RCT_3 가 빨랐다. Newman-Keuls 검정결과, 비 간섭과 완전 간섭의 경우 2단 및 3단 스위치 배치에서의 RCT_3 는 유의한 차가 있는 것($p < 0.05$)으로 분석되었다. 비 간섭일 경우, 2단과 3단 스위치 배치의 평균 RCT_3 는 각각 1.905초, 2.333초, 완전 간섭에서는 각각 2.170초, 2.549였다. 반 간섭의 경우 2단 및 3단 스위치 배치의 RCT_3 는 2단 스위치 배치에서 빨랐지만 통계적으로 유의한 차는 없었다.

신호 발생 수가 5인 경우에도 스위치 배치간 반응완료시간(RCT_5)은 차이가 있었다($p < 0.01$). 2단과 3단 스위치 배치의 평균 RCT_3 는 각각 2.722초, 3.136초로 2단 스위치 배치의 반응완료시간이 빨랐다. Newman-Keuls 검정결과, 비 간섭수준에서 2단 및 3단 스위치 배치의 RCT_3 에는 차이($p < 0.05$)가 있었다. 여기에서 평균 RCT_3 는 2단 스위치 배치가 2.571초, 3단 스위치 배치는 3.131초였다. 그러나 반 간섭과 완전 간섭에서는 2단 스위

표 4. 반응완료시간-실험 I

(a) 배치모형 I

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	3	1.905		비 간섭	3	2.333
	5	2.571	반 간섭	5	3.131		
	3	1.944	반 간섭	3	2.176		
	5	2.583	완전 간섭	5	2.895		
	3	2.170	완전 간섭	3	2.549		
	5	3.012	완전 간섭	5	3.382		

(b) 배치모형 II

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	3	1.905		비 간섭	3	2.252
	5	2.571	반 간섭	5	3.141		
	3	1.944	반 간섭	3	2.311		
	5	2.583	완전 간섭	5	3.267		
	3	2.170	완전 간섭	3	2.291		
	5	3.012	완전 간섭	5	3.709		

(c) 배치모형 III

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	3	1.918		비 간섭	3	2.269
	5	2.623	반 간섭	5	3.175		
	3	2.013	반 간섭	3	2.247		
	5	2.787	완전 간섭	5	3.095		
	3	2.380	완전 간섭	3	2.489		
	5	3.137	완전 간섭	5	3.503		

치 배치가 빨랐으나 두 배치간 유의한 차이는 없었다. 이상의 결과를 종합하면 배치모형 I에서 신호 발생 수가 3과 5인 경우 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 반응완료시간 측면에서 인지적 수행도가 우수하였다.

배치모형 II

배치모형 II에 대한 반응완료시간은 <표 4(b)>와 같다. 분산분석 결과 신호 발생 수가 3인 경우 스위치의 배치에 따라 반응완료시간에 차이($p < 0.01$)가 있었다. 평균 RCT_3 는 2단 스위치 배치가 2.006초, 3단 스위치 배치는 2.385초로 2단 스위치 배치가 빨랐다. 신호 간섭 수준을 고려한 Newman-Keuls 검정결과 반 간섭에서 2단 스위치 배치의 완료시간이 3단 스위치 배치 보다 빨랐다($p < 0.05$). 반 간섭 수준에서의 평균 RCT_3 는 2단 스위치 배치가 1.944초, 3단 스위치 배치가 2.311초로 2단 스위치 배치가 빨랐다. 그러나 비 간섭과 완전 간섭 수준에서는 반응완료시간 간에 차이가 없었다.

RCT₃의 경우에도 스위치 배치에 따라 차이가 있었다 ($p < 0.01$). 평균 RCT₃는 2단 스위치 배치가 2.722초, 3단 스위치 배치는 3.372초로 2단 스위치 배치가 빨랐다. Newman-Keuls 검정결과 모든 신호 간섭 수준에서 2단 스위치 배치의 RCT₃가 3단 스위치 배치에 비해 빨랐다($p < 0.01$).

배치모형 III

배치모형 III의 반응완료시간은 <표 4(c)>와 같다. 분산분석 결과 RCT₃와 RCT₅는 스위치 배치에 따라 반응완료시간이 달라지는 것으로 나타났다($p < 0.01$). 여기에서 평균 RCT₃는 2단 스위치 배치가 2.104초, 3단 스위치 배치는 2.335초, 평균 RCT₅는 2단 스위치 배치가 2.849초, 3단 스위치 배치는 3.258초로 2단 스위치 배치가 빨랐다. 그러나 신호 간섭과 스위치 배치에 따른 반응완료 시간간의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다.

4.2 실험 II

본 연구에서는 배열특성에 의한 스위치 배치 효과를 보다 심도 있게 규명하기 위하여 실험 I의 모형과 동일한 구조에서 2단 스위치를 3단 스위치로, 3단 스위치는 2단 스위치로 교체한 배치모형에 대해 인지적 수행도를 평가하였다. 실험 II의 배치모형 I을 실험 I과 비교하면, 2단 스위치 배치(390×715)는 배치의 가로길이는 커졌지만 세로길이는 작아졌으며, 3단 스위치 배치(490×750)는 가로길이가 작아지고 세로길이는 커졌다. 배치모형 II는 배치모형 I과 동일한 변화를 보였다. 그러나 배치모형 III은 실험 I의 크기와 같았다.

실험결과 각 배치모형에 대한 반응시간과 반응완료시간은 실험 I의 결과와 유사한 것으로 나타났다(<표 5>, <표 6>). 즉 스위치 배치의 변경과 관계없이 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 반응시간 및 반응완료시간 측면에서 인지적 수행도가 우수하였다. 특히 통계적 검정결과 배치모형 I의 경우 반응완료시간이, 배치모형 II의 경우 반응시간이 스위치 변경 전(실험 I)에 비해 스위치 배치간 차이가 더욱 뚜렷하였다.

5. 결론

본 연구에서는 2단 및 3단 스위치 배열특성을 배치모형으로 구현하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 인지적 측면에서의 인지적 수행도를 비교·평가하였다(실험 I). 또한 배열특성에 의한 배치효과를 분석하기 위해 배열은 유지하면서 2·3단 스위치를 서로 교환한 배치모형에 대해 평가하였다(실험 II). 인지적 수행도의 평가척도로는 각 배치모형의 반응시간, 반응완료시간 등을 이용하였다.

배치모형 I에 대한 실험결과, 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 인지적 수행도가 우수한 것으로 평가되었다. 반응

표 5. 반응시간-실험 II

(a) 배치모형 I

	2단 스위치				3단 스위치		
	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간		신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
2단 스위치	비 간섭	1	1.167	3단 스위치	비 간섭	1	1.415
		3	1.199			3	1.420
		5	1.328			5	1.525
	평균	1.230	평균		1.453		
	반 간섭	1	1.188		반 간섭	1	1.412
3		1.227	3	1.397			
완전 간섭	5	1.319	완전 간섭	5	1.638		
	평균	1.245		평균	1.482		
	1	1.296		1	1.594		
3	1.306	3	1.512				
	5		1.392	5	1.652		
평균	1.331	평균	1.586				
총 평균	1.269		총 평균	1.507			

(b) 배치모형 II

	2단 스위치				3단 스위치		
	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간		신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
2단 스위치	비 간섭	1	1.157	3단 스위치	비 간섭	1	1.415
		3	1.207			3	1.420
		5	1.281			5	1.525
	평균	1.215	평균		1.453		
	반 간섭	1	1.244		반 간섭	1	1.412
3		1.322	3	1.397			
완전 간섭	5	1.391	완전 간섭	5	1.638		
	평균	1.319		평균	1.482		
	1	1.324		1	1.594		
3	1.371	3	1.512				
	5		1.420	5	1.652		
평균	1.372	평균	1.586				
총 평균	1.302		총 평균	1.507			

(c) 배치모형 III

	2단 스위치				3단 스위치		
	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간		신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
2단 스위치	비 간섭	1	1.248	3단 스위치	비 간섭	1	1.443
		3	1.275			3	1.570
		5	1.334			5	1.591
	평균	1.286	평균		1.535		
	반 간섭	1	1.265		반 간섭	1	1.298
3		1.278	3	1.447			
완전 간섭	5	1.341	완전 간섭	5	1.620		
	평균	1.295		평균	1.455		
	1	1.377		1	1.425		
3	1.369	3	1.604				
	5		1.499	5	1.578		
평균	1.415	평균	1.513				
총 평균	1.332		총 평균	1.501			

표 6. 반응완료시간-실험 II

(a) 배치모형 I

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	3	1.827		비 간섭	3	2.448
	간섭	5	2.435	간섭	5	3.348	3.348
	반 간섭	3	1.832	반 간섭	3	2.281	2.281
	간섭	5	2.425	간섭	5	3.052	3.052
	완전 간섭	3	1.965	완전 간섭	3	2.558	2.558
	간섭	5	2.587	간섭	5	3.466	3.466

(b) 배치모형 II

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	3	1.924		비 간섭	3	2.448
	간섭	5	2.635	간섭	5	3.348	3.348
	반 간섭	3	2.016	반 간섭	3	2.281	2.281
	간섭	5	2.725	간섭	5	3.052	3.052
	완전 간섭	3	2.238	완전 간섭	3	2.558	2.558
	간섭	5	3.109	간섭	5	3.446	3.446

(c) 배치모형 III

2단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간	3단 스위치	신호 간섭	신호 발생수	평균 반응 시간
	비 간섭	3	2.081		비 간섭	3	2.477
	간섭	5	2.852	간섭	5	3.389	3.389
	반 간섭	3	2.121	반 간섭	3	2.206	2.206
	간섭	5	2.960	간섭	5	3.018	3.018
	완전 간섭	3	2.161	완전 간섭	3	2.397	2.397
	간섭	5	2.991	간섭	5	3.282	3.282

시간과 반응완료시간은 신호 간섭이나 신호 발생 수에 관계없이 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치보다 빨랐다. 스위치 변경의 경우에 대한 실험결과, 변경 전과 유사한 결론이 도출되었다. 특히 반응완료시간은 스위치 변경 전에 비해 스위치 배치간 차이가 더욱 뚜렷하였다.

배치모형 II에 대한 실험결과 신호에 대한 반응시간과 반응완료시간은 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 빨랐다. 반응시간의 경우 모든 신호 간섭 수준에서 2단 스위치 배치가 우수하였으며, 신호 발생 수에 따라라도 두 배치간 차이는 뚜렷하였다. 또한 반응완료시간에서도 2단 스위치 배치의 인지적 수행도가 우수하였다. 스위치 변경 후에 대한 실험결과 변경전과 동일하게 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 인지적 수행도가 우수한 것으로 평가되었다.

배치모형 III에서도 배치모형 I, II와 유사한 결과가 도출되었다. 신호 간섭 수준에 따른 반응시간은 비 간섭과 반 간섭에서 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 우수하였으며, 신

호 발생 수에 따라라도 두 배치간 차이가 뚜렷하였다. 그러나 반응완료시간의 경우 2단 스위치 배치가 3단 스위치 배치에 비해 빨랐으나 신호 간섭 수준에서는 두 배치간 차이가 없었다. 스위치 변경 후에 대한 실험결과, 반응시간과 반응완료시간에 대한 결과는 변경 전과 동일하였다.

이상의 결과를 종합하면 본 실험의 결과는 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 주 제어반의 현재 배치특성을 고려할 때 2단 스위치 배치(울진 3·4호기)가 3단 스위치 배치(영광 5·6호기)에 비해 인지적 수행도가 우수하다고 판단된다. 배치특성을 반영한 배치모형에 대한 실험결과(실험 I), 2단 스위치 배치가 우수하게 나타난 결과는 이러한 판단을 뒷받침한다. 둘째, 2단 스위치 배치의 인지적 수행도가 우수한 근본적인 이유는 배치의 차이라기보다 인지적 측면과 스위치 설계치수 차이 때문인 것으로 판단된다. 왜냐하면 3단 스위치의 경우, 비정상 신호 발생 후 TROUBLE / DISABLED 부분만을 눌러야 되지만, 2단 스위치에서는 OPEN(START) / INOPERABLE 뿐만 아니라 MAN/ CLOSE (STOP) 부분을 누르더라도 신호가 인지되기 때문이다. 또한 2단 스위치의 경우 세로길이가 짧아 스위치를 배열할 경우 3단 스위치 배치에 비해 소요공간이 줄어들기 때문이다. 이에 따라 2단 스위치는 3단 스위치에 비해 빠른 시간에 스위치를 조작할 수 있으며, 이는 결국 인지적 수행도의 향상 효과를 가져온다. 스위치의 변경을 통한 실험결과(실험 II)는 이러한 차이들이 스위치 사용자의 인지적 수행도에 영향을 미칠 수 있다는 사실을 입증하였다.

본 연구는 스위치 배치를 모형화하고 이를 컴퓨터 시뮬레이션이라는 한정된 실험을 통하여 원전 운전원의 인지적 수행도를 예측한 것으로 주 제어반 설계 적용에는 신중한 접근이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 기초로 주 제어반에서 수행되는 직무를 배치모형에 반영하고, 이를 실제 운전원이 평가하는 보다 현실적이고 분석적인 연구를 통하여 원전 주 제어반에 대한 설계 방안이 마련되어야 할 것이다.

참고문헌

변승남(1999), 영광 5·6호기 주제어반 제어스위치 형태변경 관련 인지적수행도 평가 보고서, 한국전력공사.
 조선일보(1999), 2015년까지 발전소 106기 새로 짓는다, 12월 10일자.
 최성남(1999), 개방형 경보계통 검토를 위한 인간공학 평가지침 및 검증, KINS/AR-606, 한국원자력 안전기술원.
 한국전력공사(1997), 영광 5·6호기 주 제어반 조작 스위치 형태변경 기술검토 원자력 건설처.
 한국전력공사(1998a), 울진 3·4호기 설계도, 한국전력기술(주).
 한국전력공사(1998b), 영광 3·4호기 설계도, 한국전력기술(주).
 Goodstein, L. (1981), Discriminative display support for process operators, In J. Rasmussen and W. B. Rouse, Eds., *Human Detection and Diagnosis of System Failures*, New York: Plenum Press.
 U.S. Electric Power Research Institute (1984), *Human factors guide for nuclear power plant control room development*, NP-3659.

- U.S. Institute of Electrical Electronics Engineers (1988), *IEEE guide to evaluation of man-machine performance in nuclear power generating station control rooms and other peripheries*, IEEE Std 845-1988, Nuclear Power Engineering Committee.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981), Guidelines for control room design review, NUREG-0700, revision 0., *Division of Reactor Controls and Human Factors*, Washington, D.C.,.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1994), Human factors engineering review model, NUREG-0711, *Division of Reactor Controls and Human Factors*, Washington, D.C.,.
- Woods, D. D., and Hanes, L. (1986), Human factors challenges in process control: The case of nuclear power plants. In G. Salvendy, Ed., *Handbook of Human Factors*, New York: John Wiley.