# A Comparison of Human Performance between Operators of a Main Control Room in the SMR


**ABSTRACT**

**Objective:** This study is objected to improve human performance by analyzing the operators' task and providing input data about the composition of future SMART operators **Background:** SMART is a nuclear reactor for export which needs operators who can satisfy both safety and economic feasibility. Therefore, this study is fundamental research on the composition of operators and this research analyzed SMART task in terms of human safety performance. **Method:** After analyzing 10 SMART EOG in hierarchical task analysis, this research classified task performance type according to task requirements of NUREG-0711(Rev.3). **Results:** This study found the task frequency of SMART EOG and 12 operating task types. **Conclusion:** This research expect that we can improve the human performance by analyzing the personal error, which has the highest task frequency among 12 operating task types. **Application:** The result can apply this study as base data when acquiring licensing.



Keywords: Task analysis, SMART, Human performance, Team performance


## 1. Introduction

원자력 산업뿐만 아니라 항공, 철도, 항만, 공항, 화학, 정유, 그리고 의료 산업 등에서는 그 동안 인적오류(human errors)로 인한 많은 사건과 사고를 경험하였으며, 인적오류 저감활동에 관심이 집중되고 있다(Campbell, 1971; Goldstein, 1980; Latham, 1988; Salas and Cannon-Bowers, 2001; Tannenbaum and Yukl, 1992; Wexley, 1984). 과거에는 인간의 오류를 개인의 문제로만 접근해왔고, 이것을 예방하기 위한 방안 또한 개인의 문제로 간주되었다. 하지만 오늘날 인적오류는 개인이 아닌 조직(organization)의 문제로 접근하고 예방 또한 조직적 차원에 초점이 맞추어지고 있다. 국내 원전 MCR에서는 안전한 발전소의 운전이라는 공통의 목표를 달성하기 위해 발전부장(Shift Supervisor; SS), 안전과장(Shift Technical Advisor; STA), 원자로운전원(Reactor Operator; RO), 터빈운전원(Turbine Operator; TO), 그리고 전력설비운전원(Electric Operator; EO)으로 구성된 5명의 팀원들이 운전업무를 수행하고 있다. 현재 운영허가를 준비하고 있는 APR-1400(신고리 3&4호기)은 한국형 첨단 디지털 제어방식의 주제어실로 설계되었으며, 운전조 구성은 기존 제어실과 동일하게 주제어실 5명과 현장제어반 5명 이상 10명으로 구성되어 있다. 하지만 중소형로(Small and Medium Sized Reactors; SMR)에 속하는 SMART(System-integrated Modular Advanced ReacTor) MCR운전원은 변화된 디지털환경에서 정상운전 시 감독운전원(Senior Reactor Operator: SRO), 보조운전원(Assistant Operator: AO)으로 구성된 2명이 운전을 전담하고, 비정상 및 비상운전 시 현장운전원(Local Operator: LO)으로 구성된 3명의 팀원들이 운전업무를 수행한다. 이는 디지털 환경이라는 새로운 기술에 대한 적응뿐 아니라 팀워크와 팀 특성(team characteristics), 팀 능력(team competencies), 팀 기술(team skills) 등에 따라 팀 수행도가 달라질 수 있음을 의미한다. 현재 국내외 원자력산업에서 운전원 개인의 수행도와 신뢰도에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다(Carter and Uhrig, 1989; Coblentz, 1988; Rasmussen, Duncan, and Lepplat, 1987; O'Hara and Hall, 1990; Byun and Lee, 2000; etc.). 디지털 기기의 도입에 따라 새로운 인적오류가 나타나면서 이러한 인적오류에 대한 기존의 접근방법으로는 한계가 있다. 디지털 기술이 적용되면서 새로운 기술에 대한 운전원의 적응을 요구하고 있기 때문이다. 디지털 기기에 대한 인적오류는 인적오류 발생매커니즘에 대한 실험적이고 분석적인 연구를 통해 사전적 예방을 위한 접근방법이 필요하다(KAERI/TR-4575, 2011). 이에 첨단 디지털 기술은 운전원 개인의 지식(knowledge)과 기술(skill) 뿐 아니라 팀 전체가 유기적인 결합을 통해 보다 높은 수행도 및 신뢰도를 발휘할 수 있는 운전원 팀워크 및 협업의 요인을 분석 및 평가하여 인적 수행도를 향상시키기 위한 기술 개발이 중요하다. 본 연구는 수출 주도형 중소형 발전소로서 유사한 타 발전소와 비교하여 충분히 경쟁력 있는 안전성과 경제성을 확보하기 위해 SMART 운전직무를 분석하여 운전원별 직무유형을 구분하고자 한다.

## 2. Contents of Study

디지털기반 원자력 발전소의 대부분 사업자들은 경우에 따라서 다르겠지만 안전한 발전소를 운전하는데 몇 명의 운전조로 구성하는지 것이 합리적인지에 대하여 작업을 수행 중에 있는 운전조를 관찰하고 있다. 운전조에서 1명 또는 2명의 감축은 제어실 자원에서 중요한 축소를 의미한다. 팀 연구의 필요성을 지적한 Dyer(1984)는 팀에 대한 정의를 명확하게 규정할 수 없다고 기술하였다. 그러나 팀은 둘이나 그 이상의 사람, 공동의 목표, 각 개개인에게 특화되어 할당된 임무, 그리고 상호작용을 포함하고 있다고 지적하였다. 이후 팀의 요소들에 관한 연구는 1980년대에 다른 많은 연구자들에 의해 재정립되었다(i.e., Modrick, 1986; Morgan, Glickman, Woodard, Blaiwes and Salas, 1986). Salas는 팀원은 각자에게 할당된 직무(혹은 기능)를 수행하고 팀은 제한된 수명을 갖고 있다고 정의하였다. 또한 Orasanu와 Salas(1993)는 팀에 포함되어야 할 요소로서 첫째, 팀은 커다란 직무를 수행하는 과정에 의사결정을 내려야 하며, 둘째, 팀원은 해당 직무와 팀의 의사결정과 관련된 지식과 기술을 갖고 있어야 하며, 마지막으로 셋째, 그 직무는 때로는 높은 직무부하(workload)와 시간적 압박 아래에 있을 수 있다고 지적하였다. 이러한 팀만의 독특한 특성과 정의는 결국 팀 수행도(team performance)를 향상시키기 위한 목적지향적인 표현이다. 따라서 팀 수행도를 향상시키기 위한 팀 고유의 특성은 다음 세 가지로 규정된다(Salas, Burke, and Cannon-Bowers, 2000). 첫째, 팀원은 서로에게 상호 의존적이며(일반적으로 리더에 의존하여), 그들은 반드시 협업하여 다른 팀원의 요구에 맞도록 효율적으로 그들의 행동을 조절해야 한다. 둘째, 복잡한 환경에서 직무를 수행해야 하는 경우, 팀원은 정보와 자원을 의사소통과 같은 방법으로 동적으로 변환시켜야 한다. 셋째, 팀은 제한된 수명을 갖고 있으므로 팀원은 팀원들 간의 정보공유를 통해 서로에게 공동의 목표를 향해 적극적으로 일할 수 있도록 하여야 한다. 팀의 크기(team size)는 팀원이 어떻게 직무를 수행하고 팀원 간에 어떻게 행동하는가에 영향을 준다(Curral, Forrester, Dawson, and West, 2001). 팀원이 보통 8명에서 10명인 경우가 팀 수행도를 최대화할 수 있는 이상적인 팀의 크기라고 알려져 있다. 또한 Shaw(1981)은 원전 주제어실의 운전업무처럼 매우 복잡한 직무를 수행하는 경우 팀원이 5명에서 7명이 이상적임을 주장하였다. 반면에 Likert(1977)는 팀원이 10명 이상으로 너무 많으면 팀이 나뉘어져 직무를 수행하게 되는 경향이 있고 팀의 직무 수행 공정이 명확하지 않으며, 명확한 팀의 목표를 잃어버리게 된다고 하였다. 더욱이 Seaman(1981)은 팀의 크기가 커지는 것과 비례하여 직무를 수행하는데 문제가 더 많이 발생한다고 주장하였다. 반면에 팀의 크기가 작은 경우, 최적의 작은 크기에 대한 연구는 없다. Jackson(1996)은 팀이 2명이나 3명인 경우, 팀원의 다양성이 부족하여 다양한 관점을 갖고 직무를 수행하는 데는 문제가 발생할 수 있음을 지적하였다. NUREG/IA-0137은 첨단 제어실 운전원의 최소 구성을 2명(SRO, RO or BOP Operator)으로 가정하고 상황인식, 정신적 직무부하, 그리고 팀 상호작용을 비교 · 검증하였다. 그 결과는 2인으로 구성된 첨단 제어실의 상황인식과 팀 상호작용은 4명(SRO, RO, BOP Operator, CT)으로 구성된 전통적 제어실보다 높게 나타났다. Cannon-Bowers et al.(1995)는 팀 능력(competencies)은 직무 특성(task characteristics)과 팀 특성(team characteristics)에 따라 좌우된다고 주장하였다. 팀 능력에 따라 효율적인 팀원 간의 조절 및 협조가 달라질 수 있으며, 이러한 팀의 효율적인 상호작용을 팀워크(teamwork)로 정의한 바 있다. 많은 연구자들은 효율적인 팀워크를 위한 요건을 찾고자 하였다(Salas, Sims and Burke, 2004). 그들은 팀워크의 필수 요건으로 팀 리더십(team leadership), 상호 수행도 감시(mutual performance monitoring), 보조행위(backup behavior), 적응력 및 융통성(adaptability/flexibility), 그리고 소속의식(team orientation)을 제시하였다. 또한 그들은 3 가지 팀의 조정 메커니즘으로 정신모형의 공유(shared mental models), 닫힌 루프의 의사소통(closed-loop communication), 그리고 상호 신뢰(mutual trust)를 강조하였다.

### 2.1 Human performance and Team performance

국내 디지털기반 주제어실 설계에 대한 인간공학 확인 및 검증(HFE V&V)에서도 각 팀에 따라 팀 수행도(팀 상호작용) 및 인적 수행도(정신적 작업부하, 상황인식) 측정을 위해 BARS(Behaviorally Anchored Rating Scales), NASA-TLX(National Aeronautic & Space Administration-Task Load Index), SART(Situation Awareness Rating Technique)를 국내여건에 맞게 변형시킨 KSAX(Korea Situational Awareness Index)를 쓰고 있다.

인적수행도 측면에서 NASA-TLX는 정신적 부하(mental demand), 신체적 부하(physical demand), 시간적 요구(temporal demand), 수행도(performance), 노력(effort), 좌절 수준(frustration level) 등 6개 요인을 작업 부하에 영향을 미치는 요인으로 분류하였다 (Hart and Staveland, 1988). 작업부하는 이들 요인의 상대 비교(pairwise comparison)에 의한 가중치와 각 요인에 대한 평가 치의 곱에 의해 결정된다.

원전 MCR 운전원의 상황인식은 “각종 표시 및 제어설비에서 발생하는 다양한 상황정보를 감지하고, 미리 설정된 운전목표와 비교하여 제시된 상황정보의 의미를 정확히 이해한 다음, 최종적으로 발전소 상태가 향후 어떻게 변할 것인가를 예측하는 것”으로 정의할 수 있다. 상황인식은 인적 수행도와 관련성이 높아 우수한 상황인식은 높은 인적 수행도로 이어진다(Endsley, 1995). 그러나 상황인식의 수준

이 낮다고 반드시 인적 수행도가 나쁜 것은 아니다. 예를 들어 자신의 상황인식 기능이 좋지 않음을 인정하고 의사결정 및 직무행위에 신중을 기한다면, 상황인식은 인적 수행도에 크게 영향을 미치지 못한다 (Endsley, 1990; Venturino et al., 1989). 특히 제어직무를 수행하는 작업자의 행위를 설명하는 기준 중 하나로 의료분야를 비롯하여 항공기조종, 항공관제(air control), 항공기 유지 및 보수(maintenance) 등과 같은 항공산업관련분야, 화학공장 및 정유공장과 같은 대형제어시스템운전 분야에서 중요한 개념으로 널리 이용되고 있다 (Adams et al., 1995; Endsley and Robertson, 2000; Endsley and Rodgers, 1997; Gaba et al., 1995; Hallbert, 1997; Itoch and Inagaki, 1996; Kaber and Endsley, 1998; Sandom, 1999). 원자력 인간공학 분야에서도 상황인식은 제어 시스템의 안전성 평가에 중요한 기준으로 인식되고 있다 (Sebok, 2000).

팀 기술 연구에 큰 영향을 준 팀 수행도 평가 기술은 BARS와 BFRS(Behavioural Frequency Rating Scales)이다. 이 행위 기반의 팀 수행도 평가 기술은 의사소통(communication), 개방성(openness), 직무 조절(task co-ordination), 팀 정신(team spirit), 직무 집중(maintaining task focus), 그리고 적응력(adaptability), 이상 6개의 팀 기술을 강조하고 있다. Montgomery et al.(1991)은 원전 주제어실 운전원의 팀 수행도 평가 척도로서 BARS와 BFRS를 비교 연구하였으며, 그 결과로 BARS가 BFRS보다 적합한 수행도 기준을 제공하는 것으로 밝혀졌다. BARS는 명확한 평가기준, 측정의 편이성, 효율적인 수행도 피드백, 일관성 등의 측면에서 장점을 지니고 있다. 그러나 평가자의 인지적 오류와 편견으로 평가결과의 객관성에서 자유롭지 못하다는 점이 지적되고 있다(Murphy, and Pardaffy, 1989; Kingstrom and Bass, 1981). 미 육군은 컴퓨터 기반의 복잡한 환경 하에서 직무를 수행하는 군인들의 팀 수행도를 평가하기 위해 BARS를 단독으로 사용한 것이 아니라, 이를 보완하기 위한 팀 수행도 평가 방법으로 SPOTLITE(Scenario-based Performance Observation Tool for Learning in Team Environments)을 개발하여 사용하였다. 따라서 첨단화 되어가는 국내 원전 주제어실 운전원들의 팀 수행도를 평가하기 위해서는 인지적 팀 직무를 효과적으로 평가할 수 있어야 하고, 보다 객관적이고 체계적으로 팀 수행도 요인을 평가 할 수 있는 평가 방법론이 개발되어야 한다. 위에서 제시한 팀 수행도 및 인적 수행도평가는 인간공학 확인 및 검증 결과로서 인터페이스 설계에 반영하기 위한 측면이 강할 뿐 실제 운전원의 직무 양상을 관찰하기 위해서는 시뮬레이션 자료를 통한 분석이 필요하다. 하지만 SMART는 표준설계인가(SDA)만을 획득했을 뿐 시뮬레이터 분석자료가 없다. 이에 본 연구는 인적 수행도 및 팀수행도 향상을 위한 기초연구로써 SMART EOG를 활용하여 운전직무를 분석하여 운전원 직무유형을 구분하였다.

## 3. Case study

본 논문의 목적인 중소형로에 속하는 SMART의 운전원 직무유형을 구분하기 위해서는 먼저 운전직무를 분석해야 한다. 이에 분석 대상은 SMART EOG(Emergency Operating Guidance)로써 아래와 같으며 MS office EXCEL과 Task Architect Professional 2.0을 활용하여 직무분석을 수행하였다. SMART MCR 직무 요건을 세분화하는 작업은 표 1과 같이 NUREG-0711(Rev. 3)에서 제시한 직무 요건(Task Consideration) 열 가지를 기준으로 분석하였다.

- 원자로트립후표준조치 (Standard Post Trip Action : SPTA)
- 사고진단 (Diagnostic Actions : DA)
- 원자로 트립(Reactor Trip)
- 원자로냉각재 상실사고 (Loss-of-Coolant Accident: LOCA)
- 증기발생기전열관 파열 (Steam Generator Tube Rupture: SGTR)
- 증기과잉방출사고 (Excess Steam Demand Event: ESDE)
- 급수완전상실 (Loss of All Feedwater: LOAF)
- 소외전원상실 (Loss of Offsite Power: LOOP)
- 교류전원상실 (Station Blackout: SBO)
- 기능회복지침서 (Functional Recovery Guideline : FRG)

**Table 1. Task consideration(NUREG-0711 Rev. 3)**

| Topic | Example |
|---|---|
| Alerts | • alarms and warnings |
| Information | • parameters (units, precision, and accuracy)<br>• feedback needed to indicate adequacy of actions taken |
| Decision-making | • decision type (relative, absolute, probabilistic)<br>• evaluations to be performed |
| Response | • actions to be taken<br>• task frequency and required accuracy<br>• time available and temporal constraints (task ordering)<br>• physical position (stand, sit, squat, etc.)<br>• biomechanics<br>- movements (lift, push, turn, pull, crank, etc.)<br>- forces needed |
| Teamwork and Communication | • coordination needed between the team performing the work<br>• personnel communication for monitoring information or taking control actions |
| Workload | • cognitive<br>• physical<br>• overlap of task requirements (serial vs. parallel task elements) |
| Task Support | • special and protective clothing<br>• job aids, procedures or reference materials needed<br>• tools and equipment needed |
| Workplace Factors | • ingress and egress paths to the worksite<br>• workspace needed to perform the task<br>• typical environmental conditions (such as lighting, temp, noise) |
| Situational and Performance Shaping Factors | • stress<br>• time pressure<br>• extreme environmental conditions<br>• reduced staffing |
| Hazard Identification | • identification of hazards involved, e.g., potential personal injury |

표 1의 열 가지 직무요건 중 경보(Alert), 지원 도구(Task support), 안전사고(Hazard identification) 요건은 EOG를 대상으로 한 직무 수준으로는 정확한 구분이 어려워 추후 EOP를 대상으로 실제 운전 직무 수행의 관찰 및 실험이 가능

하다면 보다 정확한 구분이 가능할 것이라 판단된다. 또한

**Table 2. Result of Task Analysis**

직무 부하(Workload)의 형태는 인지적 직무 부하와 신체적 직무 부하로 구분하였으나 분석의 대상이 EOG임을 감 안하여 인지적 직무부하(Workload)는 "상(high)" 으로 가정하였다.

## 4. Result

SMART 주제어실 운전원의 운전직무를 도출하기 위해 계층적 직무분석(Hierarchical Task Analysis: HTA)을 수행하고 세부 직무와 각 세부 직무들 간의 연관 관계를 확인하였다. 직무요건을 기술하기 위해 계층적 직무분석 다이어그램을 기반으로 직무분석표를 작성하고 세부 직무에 필요한 요건(필요정보, 의사결정, 직무대응, 팀워크 및 의사소통)을 기술하였다. 직무에 따른 직무요건 분석 결과는 표 2와 같다.

표 2의 직무요건 분석 결과를 바탕으로 SMART EOG 전체에 대한 운전원별 직무수행 유형을 구분해보았다. SRO의 직무는 그림 1과 같이 비상상황의 높은 직무부하 상황에서 감시 및 제어정보에 대한 요청과 피드백으로 구분될 수 있다. EOG를 대상으로 직무분석을 한 결과 SRO의 의사결정 및 직무대응은 확인 할 수 없으며 이는 추후 EOP를 대상으로 실제 운전 직무 수행의 관찰 및 실험을 통해 보완이 필요하다.

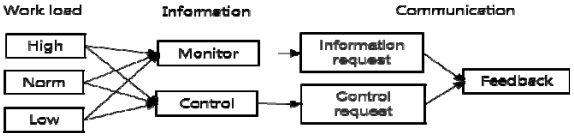


**Figure 1. Type of SRO's Task**

RO, TO(AO) 두 운전원의 직무수행유형은 그림 2와 같이 비상상황의 높은 직무부하 상황에서 의사결정(절대적, 상대적), 직무 대응(단순 확인, 지속적 확인, 단순 조치, 지속적 조치, 조건 조치), 의사소통(보고, 피드백) 등 12가지의 유형으로 구분 될 수 있다.

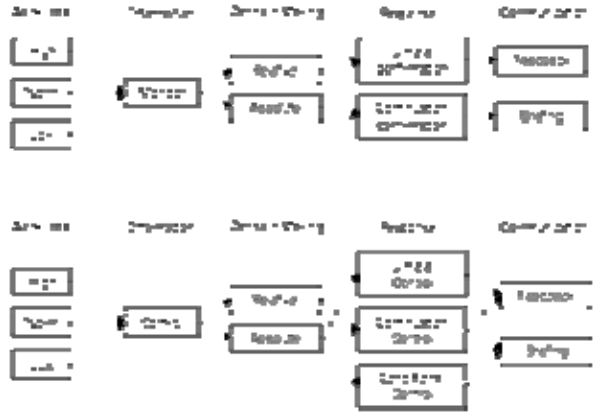

**Figure 2. Type of RO and TO(AO)'s Task**

SMART EOG 전체에 대한 운전원별 직무수행 유형의 구분 결과 그림 3과 같이 LOCA EOG가 가장 많은 직무를 가지고 있음을 알 수 있다.

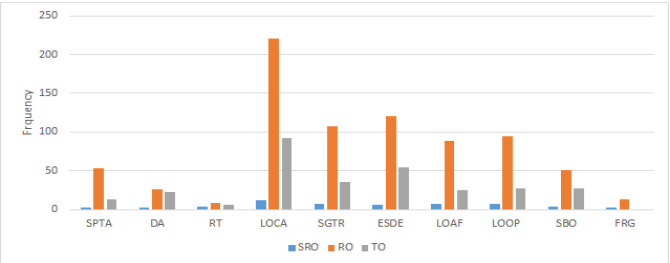


**Figure 3. Frequency of Operators's task**

또한 그림 4와 같이 EOG 열 개의 수행 시 RO의 직무가 69%로 가장 많은 직무를 수행함을 알 수 있다. 이는 안전한 발전소의 운전이라는 공통된 목표를 달성하기 위해서 팀 수행도 측면에서 특히 RO의 역할이 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 이 결과는 EOG 열 개를 기반으로 분석자가 분석한 결과이므로 실제 운전 시 결과와는 상이할 수 있으므로 추후 SMART 시뮬레이션을 통해 보완 및 수정이 필요하다. 또한 수시로 변화되는 팀에 대한 수행도 뿐 아니라 각 운전원별로 인적수행도를 평가하여, 팀 수행도를 저해

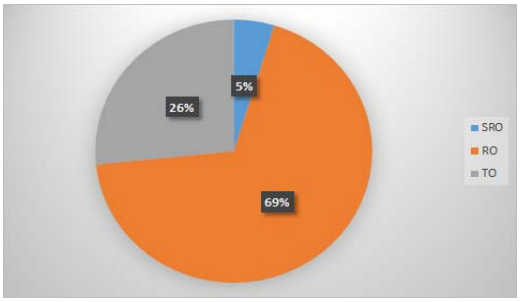


**Figure 4. Ratio of Operators's task**

시키는 요인을 제거하여 팀 수행도를 향상시킬 필요가 있다.

특히, 12가지의 직무유형 중 RO, TO(AO)는 그림 5와 같이 "절대적 의사결정-단순조치-제어요청 및 피드백-보고 및 피드백", "절대적 의사결정-단순 확인-정보요청 및 피드백-보고 및 피드백" 이 가장 많이 나타났다.

절대적 의사결정은 정량적인 값에 대한 참, 거짓을 판별하는 행위로 해당 정보만으로 판단 및 의사결정이 가능한 직무이다. 그에 반해 상대적 의사결정은 해당 정보에 대한 판단을 하기 위해 다른 정보와 비교/분석하여 판단을 하는 행위로 정보 변화의 추이를 판별하거나 비교우위를 구별하기 위해 수행 된다. 또한 단순 조치나 단순 확인은 특정 기기나 계통을 조작 또는 확인을 위해 일회적 확인 및 조치를 하는 직무이다. 지속적 조치 및 지속적 확인은 지속적인 확인 및 감시 또는 조치로 해당정보의 변화나 특이사항을 발견하는 것이다. 조건조치는 특정 조건에 맞추어 기기나 계통을 조작하는 직무이다.

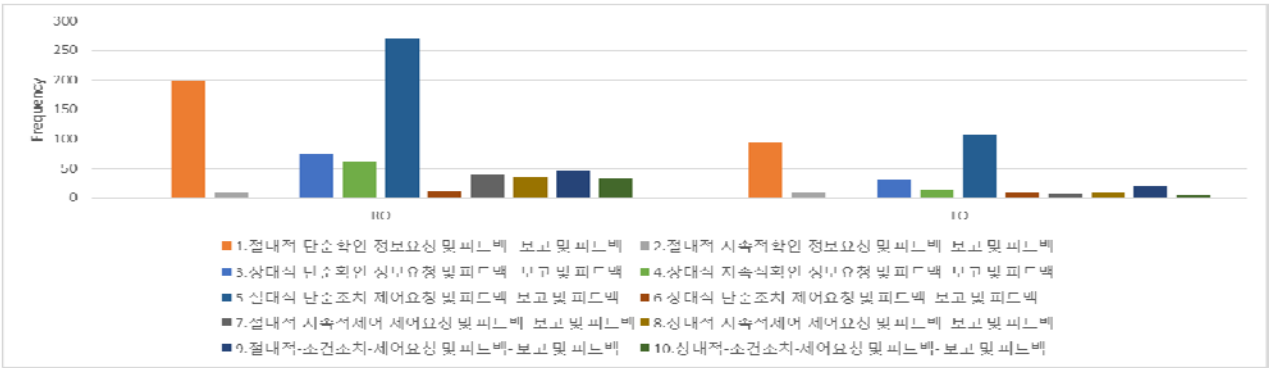


**Figure 5. Type of Operators's task**

## 5. Discussion/Conclusion

본 연구는 인적수행도 및 팀 수행도 향상을 위한 적절한 SMART 운전조 구성에 대한 평가를 하기 위해 SMART EOG를 대상으로 운전원별 직무빈도 및 직무유형을 분석하였다. 이는 NUREG/IA-0137이 첨단 제어실 운전원의 최소 구성을 2명으로 가정하고 상황인식, 정신적 직무부하, 그리고 팀 상호작용을 비교•검증한 결과처럼 추후 연구를 필요로 한다. NUREG/IA-0137은 상황인식과 팀 상호작용은 4명으로 구성된 전통적 제어실보다 높게 나타나고, 첨단 제어실에서 2인 운전조로 운전업무를 수행하는 경우, 감독자 전원의 정신적 직무부하가 높게 나타난 것이 문제로 제기되었다. 이는 단순히 운전조 구성만을 대상으로 한 결과로서 본 연구의 결과인 12가지 직무유형에 따라 각 운전원별 인간신뢰도분석(Human Reliability Assessment: 이하 HRA)을 하고 각 직무유형별 인적오류를 도출하여 운전원별 HRA를 통해 각 직무유형별 인적오류를 저감시키기 위한 노력을 한다면 인적수행도 및 팀 수행도는 더욱 향상될 것으로 판단된다. 특히, 12가지 직무유형 중 특히 RO, TO(AO)가 많이 하는 직무유형인 "절대적 의사결정-단순조치-제어요청 및 피드백-보고 및 피드백", "절대적의사결정-단순 확인-정보요청 및 피드백-보고 및 피드백" 은 우선적으로 인적오류 유형 분류 및 메커니즘을 도출하여 이를 저감시킨다면 RO, TO(AO)의 운전 안정성 보장은 물론 2인 운전조 구성의 효율성을 증명하는 것이다. 본 연구는 운전원의 인적오류 및 SMART HRA를 도출하지 못한 한계점을 가지고 있다. 이는 기존 설계에 대하여 인적오류 가능성을 평가하던 HRA 기법들을 개선된 설계에 그대로 적용하였을 경우, 한계가 있기 때문이다. 이러한 점을 고려하여 인적오류를 분석할 수

있는 새로운 기법이 필요하며 특히, 전혀 다른 상호작용 방식에 의한 새로운 형태의 수행오류의 발생 가능성을 고려할 수 있는 기법이 요구된다. 또한 과거 아날로그 방식의 주제어실과는 달리 첨단 주제어실의 경우, 시스템과 조직문화의 특성상 SRO의 역할과 비중이 상대적으로 증가하게 된다. 이것은 각 SRO의 리더십, 팀 상황인식, 팀원들 간의 의사소통 방식 등 SRO의 운전방식과, 지식에 따라 각 운전원들의 수행도와 직무부하에서 차이가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 하지만 본 연구에서는 EOG를 대상으로 직무분석을 한 결과 SRO의 직무의 비중이 5%로 상당히 낮게 나타나고 있다. 이는 SMART 인간공학 확인 및 검증과 시뮬레이션을 통해 추후 보완되어야 할 필요가 있다. 여러 한계점에도 불구하고 본 연구의 의의는 운전원 업무를 조절하기 위한 운전원수를 정하는 기초연구로써 RO, TO(AO)의 직무유형을 구분하였다는 것이다. 이를 바탕으로 향후 EOP 적용시켜 SRO의 역할과 비중, 각 운전원별 직무유형을 재평가한다면 SMR의 적정 운전원수를 결정하는 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. 2012M2A8A4025979)

## References

Byun, S.N., Lee, D.H.(2001), *Preliminary Safety Review on the Design of Korea Next Generation Reactor: A Human Factors Evaluation of Advanced Control Facilities in Korea Next Generation Reactor*, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-404.

Coblentz, A. and Mollard, R.(1989), Human efficiency variability in monotonous conditions effects on safety, *Human decision making and manual control*, 76-86.

Endsley, M.R.(1995b), *Measurement of situational awareness in dynamic systems*, Human Factors, 37, 65-84.

Fowlkes, J.E., Lane, N.E., Dwyer, D.J., Willis, R.P., and Oser, R. (1995), Team performance measurement issues in DIS-based training environments. *In Proceedings of the 14th Interservice/Industry Training Systems and Education Conference* (pp. 272-280). Arlington, VA: American Defense Preparedness Association.

Ha, J.S., Seong, P.H, Lee, M.S., and Hong, J.H. (2007), Development of human performance measure for human factors validation in the advanced MCR of APR-1400, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol.54, No.6, pp.2687-2700.

Hackman, J.R.(ed.)(1990), *Groups that work(and those that Don't): Creating Conditions for Effective Teamwork*, San Fransisco, CA: Jossey Bass.

Hackman, J.R.(1968), Effects of task characteristics on group products, *Journal of Experimental Social Psychology*, Vol.4, pp.162-187.

Hackman, J.R.(1983), *A normative model of work team effectiveness*(Tech. Rep. No.2), New Haven, CT: Yale University.

Hackman, J.R.(2002), Leading teams: Setting the stage for great performances, Boston: HBS Press.

Hackman, J.R. and Morris, C.G.(1975), Group tasks, group interaction process, and group performance effectiveness: A review and proposed integration, In L. Berkowitz(Ed.), *Advances in experimental social psychology*, Vol.8, pp.45-99, New York: Academic Press.

Helmreich, R.L., Butler ,R. E. ,Taggart, W. R. ,and Wilhelm, J. A.(1995), *Behavioral markers in accidents and incidents*: Reference list. NASA/UT/FAA Technical Report 95-1. Austin, TX : The University of Texas.

INPO(1993), *Control Room Teamwork Development Training: Course Administration and Facilitation Guide*, National Academy for Nuclear Training, Atlanta, GA.

INSAG; International Nuclear Safety Advisory Group(1986), *Summary report on the Post-Accident Review Meeting on Chernobyl Accident*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.

Kim, S.K.(2008), *Development and Evaluation of Crew Resource Management Training for Improving Team Performance of Operators in the APR-1400 Nuclear Power Plant*, Graduate School of Kyung Hee University, Dissertation of Industrial Engineering.

KOPEC(2007), *Engineering Report: 2th HFE V&V Report*, SNK 3&4, Korea Power Engineering Company.

Lee, D.H., Byun, S.N., and Lee, Y.H.(2007), Short-Term Human Factors Engineering Measures for Minimizing Human Error in Nuclear Power Facilities, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 26(4), 121-125.

Montgomery, J. Gaddy C. and Toquam, J.(1991), Team interaction skills evaluation criteria for nuclear power plant control room operators, *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting*, 2-6September, 918-22, Santa Monica, CA: HFS.

Mumaw, R., Swatzler, D., Roth, E., and Thomas, W.(1994), *Cognitive skill training for nuclear power plant operational decision making(NUREG/CR-6126)*, Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Norman, D.A., and Bobrow, D.G. (1975), *On data-limited and resource-limited processes. Cognitive Psychology*, 7, 44-64.

O'Donnell, R.D., and Eggemeier, F.T. (1986), Workload assessment methodology. In K. R. Boff, L. Kaufman, and J. Thomas, Eds., *Handbook of Perception and Human Performance; volume Ⅱ, cognitive Processes and Performance*. New York, NY: J. Wiley and Sons.

O'Hara, J.M. and Hall, R.E.(1990), Advanced control rooms and crew performance issues: implications for human reliability, Brookhaven National Laboratory, NewYork 11973, 1405-1409.

Rasmussen, J.(1986), *Information processing and human-machine interaction, Amsterdam*: North Holland.

Reason, J.(1987), *The Chernobyl errors*. Bulletin of the British Psychological Society, 40, .201-206.

Rogovin, M., Grampton, G.T., and the Nuclear Regulatory Commission(NRC) Special Inquiry Group(1980), *Three Mile Island: A report to the Commission and the public (NUREG/CR-1250, Vol. 1)*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Roth, E.M. et al.(1994), *An empirical investigation of operator performance in cognitively demanding simulated emergencies, NUREG/CR-6208*. Washington, DC: USNRC.

Salas, E., and Cannon-Bowers, J.A. (2001), The science of training: A decade of progress, *Annual Review of Psychology*, 52, 471-499.

Seamster, T.L. et al(1998), *Developing Advanced Crew Resource Management(ACRM) Training : A Taining Manual*

Sebok, A.(2000), Team performance in process control: influences of interface design and staffing levels, *Ergonomics*, 43(8), 1210-1236.

Stout, R.J., Cannon-Bowers, J.A., and Salas, E. (1996), The role of shared mental models in developing team situational awareness: Implications for training. *Training Research Journal*, 2, 85-1 16.

Stout, R.J., Salas, E., and Fowlkes, J. (1997), Enhancing teamwork in complex environments through team training. Group Dynamics: Theory, *Research, & Practice*, I , 169-182.

Tannenbaum, S.I., and Yukl, G.(1992), Training and development in work organization, *Annual Review of Psychology*, 43-, 339-441.

United States Congress(1982), Section 306 of the Nuclear Waste Policy Act of 1982(Public Law 97-425).

USNRC(1980), *NRC action plan developed as a result of the TMI-2 Accident (NUREG-0660)*, Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission.

USNRC(1989), *Operator licensing examiner standards(NUREG-1021)*, Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission.

USNRC(?), *A Study of Control Room Staffing Levels for Advanced Reactors(NUREG/IA-0137)* Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission.

Wigdor, A.K., and Green, B.F., Jr. (1991), *Performance assessment for the workplace*. Washington, DC: National Academy Press.

Wickens, C.D. (1992), *Engineering Psychology and Human Performance*. New York, NY; Harper Collins.

Wickens, C.D., Gordon, S. E., and Liu, Y. (1998). *An Introduction to Human Factors Engineering*. New York, NY: Longman.

Williges, R., and Wierwille, W.W.(1979), *Behavioral measures of aircrew mental workload*. Human Factors, 21, 549-574.

KINS(2008), *Development of Evaluation Techniques for Emerging Digital Application's Safety and MCR Operator's Team Performance*, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/RR-555,