

상황인식에 대한 측정 및 차세대 원자로 운전원 성능 평가에서의 활용방법에 관한 이론 연구

이동하¹ · 이현철²

¹수원대학교 산업공학과 / ²한국원자력연구소 MMIS 팀

A Review on Measurement and Applications of Situation Awareness for an Evaluation of Korea Next Generation Reactor Operator Performance

Dhong-Ha Lee¹ · Hyun-Chul Lee²

Situation awareness is defined as a person's perception of the elements of the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future. Situation awareness is important in attempting to evaluate human behavior in operating complex systems such as aircraft, air traffic control, and nuclear power plant systems. From the literatures this study reviews the relationship between situation awareness and numerous individual, system and environmental factors, and also reviews the methodologies for the empirical measurement of situation awareness applicable to Korea Next Generation Reactor (KNGR) design project. Attention, working memory, workload, stress, system complexity, and automation are presented as critical factors limiting operator's situation awareness. Mental models and goal-directed behavior are hypothesized as important mechanisms overcoming these limits. This study summarized hypothesized guidelines for interface design to improve situation awareness of reactor operators. Some of the guidelines should be tested in the KNGR evaluation experiments in the future.

1. 서론

상황인식(Situation Awareness: SA)은 단순히 상황자료를 아는 것을 포함하여 상황 이해와 운전원의 목표와 비교하여 시스템 상태가 향후 어떻게 변할 것인가를 아는 것으로 정의된다. 또는 운전환경 상태, 체계 모수(parameter)에 대해 감지, 이해 및 미래상태를 예측하는 것으로 정의된다(Endsley, 1988). SA는 체계를 운전하는 운전원의 행위를 설명하는 데 중요한 개념인데, 특히 SA에 의한 운전행위평가가 중요한 역할을 하는 분야는 항공기 조종, 항공 관제, 대형시스템 운전(정유공정, 핵발전소) 및 전술/전략체계(소방사령실, 군사작전 사령실 체계) 등이다. 특히 컴퓨터에 기반을 둔 차세대 원자로 주제어실의 주요 인간/체계 인터페이스(Human-System Interface: HSI)는 운전원의 SA를 향상시키기 위한 설계 노력을 하였고 이에 대한 평가 실험에서도 운전원 성능평가 척도의 하나로써 사용될 예정이어서 이에 대한 이론적, 경험적 고찰이 요구된다(이동하 등,

1999). 본 연구에서는 이전의 문헌을 통하여 개인, 시스템 및 환경 인자 중 어떤 요소가 SA에 중요한 영향을 미치는가를 검토하고 SA를 객관적으로 측정할 수 있는 경험적 방법 및 차세대 원자로 주제어실의 설계 및 평가과정에서의 활용 방법에 대해 토의하였다.

2. SA에 영향을 미치는 개인 인자

동적인 의사결정에서의 SA는 3단계로 이루어진다(Endsley, 1987; Endsley, 1995a). 1단계 SA에서는 현 상황 요소에 대한 감지가 이루어진다. 예를 들면 공대공전투기 조종에 있어서 고도, 진행방향, 타 비행기의 진행방향, 시스템 상태 및 장애물 위치 감지가 1단계의 SA로서 이루어진다. 2단계의 SA에서는 현 상황에 대한 이해가 이루어진다. 공대공전투기 조종의 예를 들면 임무 타이밍, 임무상태, 가용연료에 의한 비행시간, 적기 전술에 대한 이해가 2단계 SA에 속한다. 3단계 SA에서는 미래

의 사상 및 상태에 대한 예측이 이루어진다. 공대공 전투기 조종의 예를 들면 다음 순간의 전술, 공격장소, 타이밍 등에 대한 예측이 이에 해당한다.

SA에 영향을 주는 외적 인자는 능력, 경험, 훈련과 같은 개인 요소, 시스템의 정보 제공 능력, 정보제공 형태 및 조직의 팀(team) 구성으로 구분할 수 있다. 팀 SA는 팀 구성원간 구두로 정보를 교환하여 공유하고 조정하는 것을 말한다. 공유 정도가 팀 조정(team coordination)이나 인터페이스의 효율지표가 될 수 있다.

SA에 영향을 주는 인간의 인지적 속성은 사전 주의(pre-attentive processing), 주의(attention), 감지(perception), 작업기억(working memory), 장기기억(long term memory), 자동처리(automatic processing) 및 목표(goals) 등이 있다.

사전 주의는 SA의 시작단계로서 주변 사물이 공간적으로 근접하거나, 색깔, 형태, 움직임의 변화가 있을 때 이들에 대해 이전보다 좀더 깊은 관심(주의)을 갖는 과정이다.

주의는 다양한 유형의 정보를 동시에 정확하게 감지하기 위해 범위를 제한하는 작용을 한다. 따라서 주의는 SA의 주요한 계가 된다. 주의는 한정된 자원(resource)을 극복하기 위해 정보 샘플링(information sampling)과 같은 방법을 활용하기도 한다.

작업기억과 장기기억의 내용(예를 들면, 사전 지식 등)은 감지 대상을 선택한다. 사물의 특성, 형태, 장소 등에 대한 사전 지식은 정보감지 속도와 정확성에 영향을 준다. 제시된 정보가 사전지식과 일치하는 경우 감지는 매우 신속하게 이루어지나, 일치하지 않으면 상대적으로 늦고 오류발생의 소지가 있다.

작업기억은 SA의 3단계 과정 모두에 영향을 준다. 외부로부터 감지된 정보(1단계 SA)는 일단 작업기억에 보관되어 기존의 지식과 결합하여 상황에 대한 이미지를 만들고(2단계 SA), 미래에 대한 예측을 하고(3단계 SA), 의사결정을 지원한다. 특히 미래를 예측하는 과정은 현 상태, 미래 상태, 미래 상태를 예측하는 규칙 및 미래 상태에 적합한 행동을 동시에 작업기억 내에서 유지 관리해야 하므로 작업부하가 더욱 심하게 걸릴 수 있다(Wickens, 1984).

장기기억은 제한된 작업기억 용량을 지원하는 역할을 한다. 장기기억에 지식이 저장되는 형태는 삽화적 기억(episodic memory), 언어망(semantic networks), 스키마타(schemata), 정신모형(mental model) 등이다. 이중 SA에 중요한 영향을 주는 지식형태는 스키마타와 정신모형이다. 스키마타는 복잡한 시스템 요소, 상태, 기능을 이해하기 위한 논리 정연한 틀이다. 스크립트(script)는 스키마타의 특별한 형태로서 임무 수행에 필요한 행동순서를 말한다. 스키마타와 스크립트 사이의 유대관계는 각 단계에서의 행동 결정의 수고를 덜고 연관된 스크립트에 의해 자동적으로 다음 단계의 행동을 알게 한다. 정신모형은 시스템의 목적, 형태, 기능을 설명하고, 시스템의 관찰된 상태를 설명할 수 있고, 시스템의 미래 상태를 예측할 수 있는 기제(mechanism)로 정의된다(Rouse and Morris, 1985). 이 정의에 따르면 정신모형은 시스템 행위를 모델링하는 스키마타로 설명된

다. 즉, 특정 시스템의 스키마타가 곧 정신모형이다. 정신모형의 한 형태인 상황모형(situation model)은 체계모형의 현 상태를 기술하는 스키마타로 정의된다(VanDijk and Kintsch, 1983). 이 정의에 따르면 SA와 상황모형은 동등한 것으로 취급될 수 있다. 현 상태에 대한 상황모형(또는 SA)은 장기기억에 있는 전형적인 상황모형이나 시스템 모형을 묘사한 스키마타(정신모형)와 비교된다. 현 상태를 전형적인 상황과 비교 분류하는 일은 선정된 목표의 지시를 따른다. 목표의 지시에 의해 많은 양의 상황정보가 여과되어 효율적으로 SA를 달성하도록 한다.

잘 정리된 정신모형은 SA 3단계 과정 모두에 기여한다. 먼저 시스템의 요소에 대한 적절한 지식을 제공하여 감지과정에서 주의를 기울일 대상을 선정하고 환경 신호를 분류하는 과정에 사용된다(1단계 SA에 기여). 또한 요소들을 통합하는 수단을 제공하여 의미를 이해하게 한다(2단계 SA에 기여). 시스템의 현 상태와 동적 특성(dynamics)에 대한 이해를 바탕으로 시스템의 미래 상태를 추정하는 기제를 제공한다(3단계 SA에 기여). 스키마타와 정신모형은 훈련과 경험에 의해 개발된다. 만일 특정 모형에 대한 정보가 없거나 제한되어 있을 경우에는 스키마타와 정신모형의 기본 정보(default information)만을 활용하여 SA가 이루어진다.

자동처리(automatic processing) 또는 자동성(automaticity)은 빠르게 이루어지며, 자율적이고, 특별한 주의를 기울이지 않고, 의식적 지각도 요구되지 않는 인지적 처리를 말한다. 어떤 임무에 대한 자동처리는 주의를 기울이는 노력을 덜어줌으로써 SA에 도움을 줄 수 있다. 자동처리에 의해서 사물의 어떤 특성들은 무의식적으로 인식된다. 따라서 자동처리되어 확보된 SA의 범위는 측정하기 어렵다. 자동처리는 제한된 주의력을 극복하는 데는 도움이 되지만 새로운 자극을 놓칠 수 있으므로 SA를 저하시킬 수 있다.

목표는 의사결정 방향을 결정하고 의사결정은 SA 방향을 결정한다. 어떤 경우에는 목표나 계획에 의해 주의를 기울일 대상을 결정하고(top-down 의사결정과정)(Casson, 1983), 이 정보가 통합되고 해석되어 2단계 SA를 형성한다. 어떤 경우에는 환경 신호에 대한 SA가 새로운 계획이나 기존의 목표를 수정할 수도 있다(bottom-up 의사결정과정). 실제로는 top-down 의사결정과 bottom-up 의사결정의 과정이 복합적으로 작용하여 동적으로 변화하는 환경을 효과적으로 처리한다. 체계를 운전하는 운전원은 그 체계에 관련된 목표집합을 가지고 있다. 즉, 목표는 여러 개일 수 있다. 목표는 체계의 이상적 상태(ideal state)라 할 수 있다. 여러 개의 목표 중에서 가장 중요하다고 선정된 목표는 그 목표에 적합한 정신모형을 찾는다. 그 다음에 목표를 달성할 수 있는 계획이 작성되는데, 이때 정신모형의 예측능력을 활용한다. 예측된 상태가 목표상태와 가장 잘 일치하는 계획이 선정될 것이다. 선정된 계획을 실행하는 데 적합한 스크립트가 있다면 그 스크립트를 활용할 것이다. 가용한 스크립트가 없다면 행위 절차, 즉 스크립트를 고안해야 한다. 다음 단계로 운전원은 시스템의 현 상태를 관찰하게 되는데 이것이

바로 목표에 의해 활성화된 정신모형의 지시를 받고 주의 집중을 하여 성취한 SA이다. 활성화된 정신모형은 환경 신호에 대한 미래 상태와 발생 가능한 사상(event)에 대해 예측한다. 이 예측치가 관측치와 일치하면 문제가 없지만 발생하리라 예상했던 사건과 다른 사건이 발생되거나 일어나지 않으리라 생각했던 사건이 발생하면 운전원은 목표나 계획을 수정하고 그에 따라 정신모형을 수정하거나, 새로운 모형으로 바꾸게 된다. 다중의 목표가 서로 결합될 때는 몇 개의 목표가 동시에 활성화되기도 한다. 목표가 결합되지 않은 경우에는 우선 순위에 따라 상황군(situation class)을 확인하고 적절한 상황모형을 선정한다. 목표를 달성하지 못할 것 같거나, 새로운 목표가 세워졌으면 새로운 계획이 선택된다. 학습을 통하여 이 과정들이 반복되어 더 나은 모형을 생성하게 되고 더 나은 미래상태 예측이 가능해진다.

3. SA 성취를 위한 시스템 설계요소

환경으로부터 개인에게 정보가 전달되어 SA가 성취되는 과정은 <그림 1>과 같다. SA 성취 과정에서의 정보손실은 크게 세 부류로 구분할 수 있다. 첫째, 체계가 실제의 환경으로부터 필요한 모든 정보를 획득하지 못할 수 있다(<그림 1>의 e1). 둘째, 체계 정보 모두가 운전원에게 전달되지 않을 수 있다(e2). 셋째, 환경 또는 인터페이스로부터 운전원에게 전달되는 과정에서 전달 누락이 있을 수 있다(e3, e4). SA 성취과정에서의 정보 손실을 최소화하고 SA 성취도를 향상시키기 위해 인터페이스는 다음과 같이 설계되어야 한다.

1. 동적이며 목표·지향적·체계설계에 있어서 목표가 일정하게 변하는 경우 통합 설계로 주의 집중(focus)을 유도하면 SA가 쉽게 확보될 수 있다. 정보의 통합 수준은 주의가 분산되거나 작업부하가 심한 부분의 정보 전달 효율성을 높일 수 있다.
2. 단순한 자료(data)를 제공하지 말고 운전원에게 필요한 정보(information)를 제공하여야 한다.
3. 시스템요소 상호작용을 설계에 반영하여야 하고 중요한 요소들은 덜 중요한 요소들에 비해 좀더 많은 주목을 받게 하여야 한다.
4. 주의집중력과 작업기억이 제한되어 있으므로 2단계, 3단계 SA 요구조건(이해 및 예측)에 적합하게 통합된 정보가 표시장치를 통해 전달되는 것이 좋다.
5. 운전원의 목표에 비추어 달성한 정도를 동시에 표현하여야 한다.

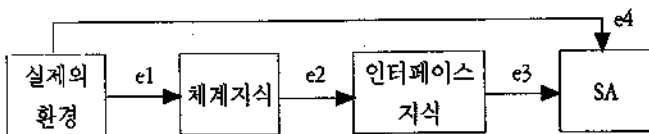


그림 1. SA 입력과정 및 입력과정에서의 정보 손실(Endsley, 1995a).

야 한다.

6. 정신모형과 스키마타가 SA를 달성하는 주요 수단임을 고려하여 이러한 기계를 인터페이스 상에서 표현하여야 한다. 여기에는 전형적인 상황(prototypical situation)이 표시되는 것이 좋다.
7. 목표로부터 나오는 의사결정(top-down)과 환경신호로부터 나오는 의사결정(bottom-up)을 동시에 처리할 수 있어야 한다. 환경 신호 중 두드러진 신호는 현재 설정된 목표로부터 주의를 돌리게 하는 경향이 있으므로 이에 대한 대비가 이루어져야 한다.
8. 인터페이스 디자인은 전반적인 SA(global SA)를 성취하도록 설계되어야 한다. 전반적인 SA는 운전원이 목표 전반에 걸쳐, 전 시간에 걸쳐 상황에 대해 개관하는 것을 의미한다. 그러면서도 순간적으로 요구되는 목표에 관련된 상세 정보도 함께 제공하여야 한다.
9. 정보의 과부하를 막기 위해서는 SA에 기여하는 정보라도 여과(filtering)하여야 한다. SA와 관련 없는 자료에 대해서는 여과와 통합처리를 통한 자료축소(data reduction)가 이루어져야 한다.
10. SA의 가장 어려운 부분인 미래 예측부분을 해결하기 위해 잘 개발된 정신모형을 사용하여야 한다. 정신모형에 따라 시스템에서 제공하는 미래 예측치는 3단계 SA에 직접적으로 도움을 준다.
11. 여러 임무를 수행하면서도 정보 원천(information source)에 주의를 배분할 수 있도록 도와주는 정보의 병렬 처리 설계는 SA에 직접적 도움이 된다.

최근에 개발되고 있는 자동화된 시스템의 경우 시스템 고장 시 시스템의 오류원인을 탐지하고 이후의 시스템을 수동 전환하여 운전하는 능력이 수동체계에 비해 현저히 떨어지는 경향이 있다(루프이탈 현상: out-of-the-loop). 이런 경향의 원인은 자동화 체계에서의 수동조작기술 부족도 있지만 낮은 SA가 주원인이라 할 수 있다. SA를 상실한 운전원은 문제의 증후를 탐지하는 속도가 늦고 문제진단과 수동조작을 위한 방향 설정에 시간이 추가로 소요된다. 자동화 시스템에서 SA가 낮아지는 이유는 다음과 같다.

1. 경계의식이 낮아지고 자동화된 감시체계에 대한 심리적 의존도가 높다.
2. 수동처리에서는 능동적 정보처리자 역할을 수행하지만 자동체계에서의 수동적 정보수용자 입장으로 바뀐다.
3. 시스템 상태에 대한 정보 교환(feedback)을 놓치거나 또는 변경된 교환 방식을 망각할 수 있다.

따라서 SA 확보 측면에서는 완전 자동화보다는 능동적인 정보처리자 입장을 유지할 수 있는 부분 자동화가 오히려 유리하다. 자동화의 방향도 불필요한 수동 조작을 줄이거나 SA를 위한 자료통합 과정을 지원하는 방향이어야 한다.

4. SA 과정의 오류

SA 오류는 불완전하거나 부정확한 SA를 성취하는 것이다. 불완전한 SA란 일부 요소에 대한 지식만을 알게 되는 경우이고 부정확한 SA는 어떤 요소에 대해 잘못된 지식을 알게 되는 경우이다. 불완전하거나 부정확한 SA 모두 바람직하지 않은 행동을 초래할 수 있다.

1단계 SA에서의 오류는 SA에 중요한 정보를 감지하지 못해서 발생된다. 자료나 신호의 탐지성(detectability), 식별성(discriminability)이 부족하거나, 감지를 방해하는 물리적 장애물(시각장애물, 청각마스크 등)이 있거나, 필요한 정보를 제공하지 못하는 설계오류에 의해서 발생될 수 있다. 2단계 SA에서의 오류는 감지된 자료의 의미를 운전원이 목표에 맞추어 제대로 통합하지 못하거나 이해하지 못하여 발생된다. 초심자의 경우 어떤 신호(cue)가 목표에 적합한지를 결정하는 정신모형을 갖지 못해서 발생할 수도 있다. 다른 원인으로는 운전원이 상황 인식 신호를 해석하는 데 잘못된 정신모형을 사용하는 경우가 있다. 모형을 잘못 선택해서 초래되는 SA 오류는 운전원이 인식하기 매우 어렵다. 새로운 자료들이 모두 잘못된 모형에 의해 해석되더라도 운전원은 이를 확신하기 때문이다. 이와 같은 현상을 확인편기(confirm bias)라 한다. 2단계 SA 오류의 또 다른 원인으로는 모형에 내재된 기본값(default value)에 너무 의존하는 것이다. 새로운 상황에서는 모형의 기본값이 적절하지 않을 수 있는데, 기본값을 수정하지 않고 그대로 적용하면 SA 오류를 일으킬 수 있다. 또한 불충분한 지식을 가지고 있거나 작업 기억이 부족한 경우에도 2단계 SA 오류를 초래한다.

3단계에서의 SA 오류는 상황은 분명히 인식하고 있지만 고도로 개발된 정신모형이 없어서 미래 상황을 정확히 예측하지 못하는 오류를 말한다. 이 외에 주의력, 작업부하 제한도 3단계 SA 오류의 원인이 된다.

이 밖에 다음과 같은 SA 오류의 원인이 있다.

1. 주의 분배력이 떨어지면 여러 목표를 동시에 유지하기 어렵다. 이 경우 환경 신호에 따라 목표를 수정해야 하는 체계에서는 심각한 SA 오류가 발생될 수 있다.
2. 습관적 스키마타(habitual schemata)는 정해진 환경 신호에 따라 자동으로 활성화되는 스키마타를 말한다. 환경이 변화되었는데도 종래의 스키마타가 습관적으로 활성화되면 SA 오류를 유발할 수 있다. 이와 같은 현상을 '무심코 저지른 오류(slip of action)' (Reason, 1984)라고 부른다.

SA 오류가 발생한 대부분의 경우에 운전원은 '모르는 것'(SA가 없는 것)에 대해 완전히 인식이 없거나, SA가 부정확함을 인식하지 못한다. 잘못된 SA에 대해 운전원이 알게 되는 시점은 새로 얻어진 환경 신호 자료가 정신모형에 의한 예측치와 맞지 않는 경우이다. 따라서 잘못된 SA에 대한 인식의 실마리를 제공하는 정신모형의 예측치 제공기능은 시스템 설계에서 아주 중요하다.

5. SA 측정방법

현재까지 개발된 SA 측정 척도들은 다양하지만 크게 생리적 기법, 성능척도, 주관적 평가 기법, 설문지 기법으로 구분할 수 있다(Endsley, 1995b). 생리적 기법은 P300, EEG와 같은 뇌전위 활동 계측을 통하여 환경으로부터의 신호가 감지, 처리되고 있는가의 여부를 결정하는 기법이다. 그러나 이 기법은 얼마나 많은 양의 정보가 들어 왔으며 또한 이들이 올바르게 수용되고 이해되었는가를 알 수 없다는 단점이 있다.

성능척도는 다시 전체 성능 척도(global measure), 외적 임무 척도(external task measure), 내재 임무 척도(imbedded task measure)로 구분된다. 전체 성능 척도에서는 행위성능에 관한 포괄적인 정보를 척도로 사용하므로 성취도가 낮은 경우 그 원인이 정보 부족에 기인한 것인지, 신호를 잘못 선택해서인지, 잘못 통합해서인지, 잘못 예측해서인지, 작업부하가 심해서인지, 의사결정이나 행위가 잘못되어서인지를 구별할 수가 없는 단점이 있다. 외적 임무 척도는 인위적으로 정보를 변경하거나 제거하고 그에 따라 변화된 운전원의 SA-소요 시간을 측정하는 방법이다. 이 방법은 타당성이 낮으며 측정을 위해 운전원의 임무를 인위적으로 변경함으로써 운전원의 주의 대상과 SA 자체가 달라질 수 있는 단점이 있다. 내재 임무 척도는 주어진 임무 성취도를 하부 임무에 이르기까지 심층적으로 분석하여 내재 임무 성취도를 조사하는 방법이다. 이 방법의 단점은 피실험자에게 임무의 불필요한 하부구조에까지 주의를 기울이게 함으로써 측정하고자 하는 SA에 영향을 주는 것이다.

주관적 평가 기법으로는 자기평정(self-rating), SART(Situation Awareness Rating Technique), 관찰자 평정(observer rating)이 있다. 자기평정(self-rating)은 운전원에게 주관적으로 자신의 SA에 대해 평정하도록 하는 방법으로서 10 point scale이 많이 사용된다(예를 들면 AMRAAM OUE, McDonnell Douglas Aircraft Corporation, 1982). 운전원이 체계의 진정한 상태를 알지 못하므로 정확한 평정이 될 수 없고, 상황에 대한 감지 정도를 평정하는 방법에 지나지 않는다. 실험 후 디브리핑(debriefing) 기간에 SA에 대한 주관적인 평정을 요구하는 경우에는 평정 자료가 시행 결과에 크게 영향을 받을 수 있다는 단점이 있다. SART(Situation Awareness Rating Technique)(Taylor, 1990)는 시스템 설계에 대한 주의 요구 정도, 주의 배분 정도 및 상황 이해도에 따라 평가를 하게 된다. 따라서 상황에 대한 이해도와 작업부하가 함께 고려된다. SART는 SA 성취도가 작업부하 때문인지, 환경요소에 대한 이해도 때문인지가 분명히 구분되지 않는 단점이 있다. 관찰자 평정은 독립적이고 지식이 있는 관찰자가 피실험자의 SA를 평정하는 방법이다. 관찰자는 시뮬레이션 과정에서 실제 발생하고 있는 사건에 대해 참여 운전원보다 더 많은 것을 알고 있어야 한다. 따라서 체계에 대해 잘 아는 사람만이 관찰자로 참여할 수 있다는 제약이 있다. 관찰자 평정법의 한 변형 방법으로서 관찰자를 운전원의 조수 등으로 참여시켜 운전 중 대화를 유도하는 방법도 있다. 하지만 대화가 운전을 방해하

지 않도록 고도로 절제된 대화법을 사용해야 하는 단점이 있다. 설문지를 사용해서 체계상태에 대해 요소별로 질문하여 운전원의 SA를 수집하는 방법은 감지 상태가 운전원의 지식으로 측정되기 때문에 타당성이 있다(Herrmann, 1984). 설문지를 이용하여 SA를 측정하는 방법으로는 측정시기에 따라 사후시험(post test), 온라인(on-line), 정지기법(freeze technique)으로 구분된다.

설문지 기법 중 사후시험은 시뮬레이션 후 SA에 관한 상세한 목록의 질의응답을 시행하므로 많은 시간이 소요된다. 일반적으로 피실험자는 시행 후 많은 정보를 보고하는 데 익숙하지 않고 응답을 과장되게 일반화하거나 합리화하는 경향이 있다. 또한 기억은 시행 후 시험 보기까지의 시간크기와 중간에 개재된 사상의 수에 따라 왜곡될 수 있다(Nisbett and Wilson, 1977). 시행초기에 잘못 감지한 것을 시행 도중 알게 됨으로써 초기의 SA 상태를 정확히 측정할 수 없는 단점도 있다.

온라인 방법은 시간경과에 따른 망각의 문제를 해결하기 위해 시뮬레이션 도중에 시험을 실시하는 방법이다. 이 방법은 운전원의 작업부하를 증가시켜 운전 외에 부가되는 질의응답을 어렵게 할 수 있다. 질의응답은 제2임무(secondary task)로서 체계 운전의 성능을 저하시킬 수도 있다.

설문지 기법 중 정지기법은 시뮬레이션을 무작위로 선정된 시점에 정지시키고 피실험자로부터 상황에 대한 감지상태를 설문지를 통해 질의 응답 받는다. 이때 체계의 표시장치는 피실험자가 참조할 수 없도록 하기 위해서 공백으로 표시한다. 시뮬레이션은 정지되며, 피실험자는 SA에 관한 빠른 응답을 하여야 한다. 이 방법은 온라인과 사후시험의 결점을 보완한 방법으로 항공 분야와 원자력 분야에서 채택되고 있다.

체계적으로 정라된 정지기법으로 항공분야에서의 활용을 목적으로 고안된 SAGAT(Situation Awareness Global Assessment Technique)(Endsley, 1990)가 있다. 운전원은 포괄적인(1, 2, 3단계의 SA를 포함) SA 요구사항, 체계 기능, 외부 환경 특성에 관한 질의를 정지기법으로 받는다. SAGAT는 피실험자에게 상황을 파악하는 데 필요한 변수를 질문하고 응답하게 하여 이를 분석하는 방법이다. SAGAT는 2차례의 실험을 통해 타당성이 인정되었다. 첫번째 실험에서는 임의로 선정된 질의시점이 SA 정확도에 영향을 주지 않는다는 사실을 확인하였고, 두 번째 실험에서는 피실험자의 수행도가 질의시간이나 질의빈도에 영향을 받지 않는다는 것을 밝혀내었다. 이로써 SAGAT는 피실험자의 수행도에 비침투적(non intrusive)인 방식으로 SA를 측정할 수 있음을 보였다. 컴퓨터를 이용한 SAGAT 버전은 질의 응답 과정이 신속하고 편리하게 이루어지도록 도와준다. SAGAT에서 사용하는 포괄적인 질의는 피실험자의 주의를 특정 분야로 편중되는 것을 막아줌으로써 피실험자가 질의에 미리 대비하지 못하게 한다. 또한 무작위 시점에서 질의를 실시함으로써 측정되는 SA 점수가 통계적으로 신뢰성을 갖게 한다.

SA는 항공분야에서 많은 응용력을 발휘하였으나 원자력분야에서는 운전원 성능 평가척도로 활용하지 못하고 있었다.

1990년대 초에 OECD HRP(Halden Reactor Project)에서는 Endsley (1988)의 모형과 항공분야의 SA 측정평가시스템인 SAGAT를 원자력분야에서 활용하는 방안을 모색하였다. 그 결과 SACRI (Situation Awareness Control Room Inventory)라는 원자력분야에서 유일한 SA 측정평가시스템이 개발되었다. SACRI는 SAGAT의 측정 방식에다 점수 기록 방법으로 신호감지이론(signal detection theory)을 접목시켰다. SACRI 역시 SAGAT에서의 유사하게 실험시나리오 중간에 시뮬레이션 정지를 요구하는 중단형 질의방식(interruptive questionnaire technique)이다.

6. 차세대 원자로 운전원의 성능 평가에서의 SA 활용

국내에서 개발되는 차세대 원자로의 주 제어실에서는 대형 개관 표시장치, 워크스테이션 및 경보 패널 등을 통하여 운전원이 발전소 상태에 대한 최상의 SA를 유지하도록 하는 방향으로 설계가 진행중이다. 또한 차세대 원전 HSI 설계 확인(verification) 및 검증(validation) 과정에서도 개관표시장치의 수동적 감시 성능 평가, 운전원 조직간의 발전소 상태 인지도 공유 여부 평가 등 시스템의 SA 성취도를 평가하는 활동이 이루어지고 있다. SA 성취도를 측정하는 척도로는 현재의 기술 수준에서는 SACRI가 유일한 벤치마킹 대상으로 보이나 SACRI는 HRP에 있는 NOBS 시뮬레이터에서 활용하기 위해서 개발되었으므로 한국에서 운전중인 발전소나 차세대 원자로의 개발 환경과는 맞지 않는다. 따라서 국내의 PWR 원전 및 차세대 원전에 활용될 수 있는 SA 측정시스템 개발이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 PWR 관련 발전 변수 집합(parameter set)을 정의하고 이를 토대로 한 측정방법, 운용방법 및 점수기록방법을 정의하였다.

6.1 발전 변수 집합의 정의

발전 변수 집합은 발전소 상태에 대한 운전원의 SA 대상을 정의해 놓은 일종의 데이터베이스이다. 발전소 운전원이 운전 중 항상 인식하고 있어야 하는 발전 변수는 원자력 발전소의 전반적 상황을 가장 잘 대표할 수 있는 것으로 선정되어야 한다. 이런 특성을 가지는 발전 변수로는 대형 개관표시 장치에 표시되는 변수 및 안전성 관련 변수 등 RG-1.47에 나열된 변수들을 포함할 수 있다.

6.2 측정방법

국내에서 개발한 차세대 원전 시뮬레이터 환경에도 적합하게 하기 위해서는 SACRI 방식과 같이 시나리오 수행중 시뮬레이터를 정지하고 피실험자에게 설문에 응답하게 하는 방법이 용이하다. Endsley 모형에서 제시된 3단계 수준의 SA를 모두 측정하기 위해서는 선정된 발전변수 각각에 대해 모수(parameter)

값이 과거의 값과 비교했을 때 현재 어떻게 변했는지(1단계 SA), 정상상태와 비교했을 때 현재 모수 값이 어떻게 변화하였는지(2단계 SA), 현재의 모수 값을 기준으로 했을 때 향후 어떻게 변화할지(3단계 SA) 등 3가지 유형으로 질문을 구성하였다. 각 질문 유형에 대해서는 질의 시간 및 자료 처리 편의성을 고려하여 6개 모수에 대한 질의가 포함되게 하였다. 따라서 한 정지 시점에 한 피실험자는 총 18개의 질의에 응답하도록 하였다. <표 1>은 차세대 원자로의 대형 개관표시 장치의 수동적 감시 성능 평가 실험에서 사용된 SA 설문서의 예를 보인다. 질의에 대한 응답시간에는 제한을 두지 않으며 응답시간 중 시스템으로부터 모수 값을 볼 수 없게 환경 설정을 하는 것이 필요하다. 피실험자는 자신이 직접 확인한 모수에 대해서만 응답을 하는 것이 아니고 확인하지 못한 모수에 대해서도 운전원이 가지고 있는 지식을 활용하여 추론하도록 한다. 시나리오 운용중 시뮬레이션의 정지 시점은 시나리오의 특성에 따라 정해지는데, 이 시점은 피실험자에게 미리 알려주지 않도록 하며 하나의 실험 시나리오는 대부분 3개 정도의 정지시점이 포함되도록 구성한다.

표 1. 대형 개관표시 장치의 수동적 감시 성능 평가 실험에서 사용된 SA 설문서

1단계 SA: 과거의 발전소 parameter 값을 기준으로 현재의 parameter 값이 어떻게 변화하였는지 대답하여 주십시오.
[1] 가압기의 압력은 어떻게 변화하였는가? (1) 증가하였다 (2) 동일하다 (3) 감소하였다
[2] 복수기의 압력은 어떻게 변화하였는가? (1) 증가하였다 (2) 동일하다 (3) 감소하였다
이하 생략
2단계 SA: 정상상태의 발전소 parameter 값을 기준으로 현재의 parameter 값이 어떻게 변화하였는지 대답하여 주십시오.
[1] 2차축의 저압급수 예열기 후단의 온도는 어떻게 변화하였는가? (1) 증가하였다 (2) 동일하다 (3) 감소하였다
[2] 증기발생기로 들어가는 주급수 유량은 어떻게 변화하였는가? (1) 증가하였다 (2) 동일하다 (3) 감소하였다
이하 생략
3단계 SA: 현재의 발전소 parameter 값을 기준으로 향후의 parameter 값이 어떻게 변화할지 예측하여 주십시오.
[1] 증기발생기의 수위는 어떻게 변화하겠는가? (1) 증가할 것이다 (2) 동일할 것이다 (3) 감소할 것이다
[2] 복수저장 탱크의 수위는 어떻게 변화하겠는가? (1) 증가할 것이다 (2) 동일할 것이다 (3) 감소할 것이다
이하 생략

6.3 SA 성취도에 대한 점수 기록 방법

설문서에 대한 피실험자 응답 정확도는 채택된 발전 변수의 실제 값에 따라 결정되므로 발전 변수 집합 내에 있는 모든 모수 값들은 실험중 지속적으로 자료 기록 장치에 저장되도록 한다. 이 기록은 피실험자의 응답과 비교되고 비교 결과는 신호감지이론(Wickens, 1984)에서 제시하는 4가지 결과(Hit, False Alarm, Miss, Correct Rejection) 중 하나로 판정한다. 피실험자 SA 성취도는 판정된 Hit, False Alarm, Miss 및 Correct Rejection의 수를 신호감지이론의 민감도(d') 공식에 대입하여 점수화한다. SA 성취도는 각 정지시점 및 피실험자별로 점수화한다. 이와 같이 신호감지이론에 근거하여 구해진 SA 성취도 점수는 모수의 수가 바뀌거나 질의의 수가 달라져도 영향을 받지 않는 특성이 있으며 무엇보다 SA 성취도를 정량화할 수 있다는 장점이 있다(Hogg *et al.*, 1995).

6.4 차세대 원자로 운전원 성능 평가 실험에서 확인해야 할 SA에 관한 가설

SA에 관한 많은 이론들이 아직도 실험 검증되지 않은 상태로 남아 있다. 앞으로 진행될 차세대 원자로 운전원 성능 평가 실험에서 확인해 보아야 할 SA에 관련된 가설은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 주의 대상이 많아지는 경우 환경 신호에 대한 주의배분 방법이 SA에 영향을 미치는가.
2. 주의 배분력이나 작업기의 용량이 SA에 영향을 미치는가.
3. 스키마타와 정신모형은 (a) 감지과정에서 주의의 방향을 지정하고, (b) 감지된 정보의 통합과 이해의 수단을 제공하며, (c) 환경의 미래상태를 예측하는 기제로 작용한다. 이러한 기체가 원자로 운전에는 어떻게 작용하여 운전원의 SA 성취를 도와주는가.
4. 미래 상태에 대한 예측이나 짐작(3단계 SA)은 감지과정(1단계 SA)과 해석과정(2단계 SA)에 영향을 주는가.
5. SA는 목표에 의해 방향이 정해지기도 하고(top-down), 성취된 SA에 의해 목표의 방향이 정해지기도(bottom-up) 한다. 현재의 목표와 환경 신호 중에서 현저한 특징을 갖는 것에 의해 SA가 영향을 받는다.
6. 운전원이 가지고 있는 목표에 따라 어떤 정신모형이 선택되는가.
7. 환경 신호(cue)에 대한 사전 지식은 환경 신호와 비교할 전형적인 상황 모형을 선택하는 데 중요하다. 환경 신호에 대해 운전원은 어떤 형태의 전형적인 상황모형을 가지고 있다.
8. 인지과정의 자동 처리는 주의력과 작업기억 제한을 극복하는 기체로서 작용한다. 운전중 자동 처리 상태에 있을 때 자동처리 대상 밖의 요소들에 대한 SA가 감소하는가. 그 결과 더 많은 오류가 일어나는가.

SA 성취도를 향상시킬 수 있다고 생각되는 다음과 같은 인터페이스 설계 지침에 대해서도 차세대 원자로 HSI 평가 실험에서 확인해 보아야 한다.

1. 환경 신호가 운전원에게 직접적으로 전달되는 경우와 체계의 표시장치로부터 가공 처리되어 전달되는 경우 SA 성취도가 달라지는가.
2. 인터페이스를 통해 SA를 성취하는 방식이 개인의 능력에 따라 달라지는가.
3. SA 성취도를 향상시킬 수 있을 것으로 여겨지는 인터페이스 표현 방식은 통합, 목적 지향적 표현, 주요신호(cue)의 부각(salience), 정보의 병렬처리 지원, 불필요한 정보의 제거, 중요하지 않은 정보를 무시하는 표현, 목표 전반에 대한 정보(global information) 제공, 현 목표에 관한 상세 정보 표시 및 미래사상에 대한 예측치 제공 등이다. 이런 표현 방법이 실제로 SA를 향상시키는가.
4. 적절한 스트레스는 각성과 주의력을 향상시켜서 SA를 개선시키는가. 반면 과도한 스트레스는 작업기억을 제한하여 SA 성취도를 저해하는가.
5. 경보의 눈사태(alarm avalanche)와 같이 감지 작업부하가 심한 경우 SA가 저하되는가.
6. 시스템에서 복잡한 운전 상황을 처리할 정신모형을 별도로 마련하지 않으면 SA가 저하되는가.
7. 자동화된 시스템에서 루프이탈(out-of-the-loop) 현상이 일어났을 때 SA가 저하되는가. 자료 통합이나 주변 임무의 자동화와 같이 부분적 자동화를 도입하면 SA 성취도가 향상되는가.

7. 결론

SA 성취도는 운전원이 시스템의 운용 상태를 충분히 감지 이해하고 미래에 발생될 사상을 예견할 수 있는 정도를 말하며, SA 성취도를 향상시키는 것은 복잡한 시스템의 운전오류를 줄이는 데 핵심적인 역할을 하는 중요한 설계 목표이다. 본 연구에서는 SA에 관한 문헌 검토를 통해 SA에 영향을 미치는 개인 및 시스템 요소, SA 과정에서의 오류, SA 측정방법에 대해 검토하였고, 기존에 개발된 SA 측정방법 중 차세대 원자로 운전원 성능 평가에 적합한 SA 측정 방법을 제시하였다. SA를 향상시킬 수 있을 것으로 여겨지는 시스템 설계 지침 중 대부분은 아직까지 확실히 검증되지 않은 상태이다. 이 지침 중 일부는 차세대 원자로 HSI 설계에도 도입되었는데, 본 연구에서는 차세대 원자로 운전원 성능 평가 실험과정에서 함께 검증해 볼 필요가 있는 설계 지침 및 SA 관련 이론들을 제시하였다. 이외에도 SA에 관한 추후의 연구과제로는 다음의 분야들을 생각할 수 있다.

1. 대부분의 시스템 설계에서 설계자는 운전원의 목표를 지원하기 위해 어떤 정보가 통합되어야 하는 것을 결정하지 않은 상태로 정보요구사항을 결정하는 일이 많다. 따

라서 각 설계분야에 대해 SA 요구사항을 결정하는 도구를 개발할 필요가 있다.

2. 공간능력, 주의분배, 작업기억 용량, 학습내용, 감지속도, 이해 속도, 경계, 패턴비교 능력, 의사결정능력 등의 운전원 개인 능력 차이에 따라 SA가 어떻게 달라지는가에 대한 연구와 이에 대비한 시스템 설계방안을 연구할 필요가 있다.
3. SA 능력을 향상시키기 위해서 운전원 각자는 미래행동 예측을 위한 정신모형을 개발하여야 한다. 또한 목표에 맞추어 환경 신호를 해석할 수 있도록 이를 지원하는 상황모형을 학습하여야 한다. 운전에 필요한 정신모형과 전형적인 상황모형 형성을 도와주는 훈련프로그램이 개발되어 운전원의 학습을 지원하여야 한다.
4. 시스템 설계시 중요신호를 결정하고 이를 효과적으로 전달하는 방법, 미래사상/상태에 대해 정확히 예측하는 방법, 효과적인 주의 배분 방법, 운전원이 설정한 목표를 시스템 상에서 유지하는 방법이 실제 설계로 구현되어야 한다.
5. 3단계 SA 구조에 있어서 각 단계에서의 상대적인 중요성이 아직 밝혀져 있지 않다. 예를 들면 제3단계에서의 미래 예측의 역할은 얼마나 중요한가, 낮은 수준의 SA에서 높은 수준의 SA로의 전이가 어떻게 일어나는가 등을 설명할 이론 개발이 필요하다. 개인과 팀이 SA를 달성하는 과정에 대한 연구 역시 요구된다.
6. 기존 방법의 단점을 보완한 객관적 SA 측정기법의 개발은 설계기술의 효율성 평가, 훈련방법 평가에 있어서 중요하다.

참고문헌

- 이동하, 오인석, 이현철, 박재창, 이정운, 김종인 (1999), 차세대 원자로 대형정보표시장치의 인간공학설계 타당성 시험 방법 연구, *대한인간공학회 '99 추계 학술대회 논문집*.
- 이현철, 오인석, 박재창, 이정운, 이기영 (1999), 가압경수로형 발전소에서의 상황인식도 측정방법, *대한인간공학회 '99 추계 학술대회 논문집*.
- Casson, R. W. (1983), Schema in cognitive anthropology. *Annual Review of Anthropology*, 12, 429-462.
- Endsley, M. R. (1987), SAGAT: A methodology for the measurement of situation awareness (NOR DOC 87-83), Hawthorne, CA, Northrop Corp.
- Endsley, M. R. (1988), Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON), 789-795.
- Endsley, M. R. (1990), A methodology for the objective measurement of situation awareness. In Situational awareness in aerospace operations (AGARD-CP-478; pp. 1/1-1/9), Neuilly-Sur-Seine, France, NATO-Advisory group For Aerospace Research and Development.
- Endsley, M. R. (1995a), Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Endsley, M. R. (1995b), Measurement of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37(1), 65-84.

- Herrmann, D. J. (1984), Questionnaires about memory. In J. E. Harris and P. E. Morris(Eds.), *Everyday Memory, Action and Absent-mindedness*(133-151), London, Academic.
- Hogg, D., Folleso, K., and Volden, F. S. (1995), Development of a situation awareness measure to evaluate advanced alarm systems in nuclear power plant control rooms, *Ergonomics*, 38(11), 2394-2413.
- McDonnell Douglas Aircraft Corporation (1982), *Advanced medium-range air-to-air missile operational utility evaluation(AMRAAM OUE) test final report*, St. Louis, MO, Author.
- Nisbett, R. E., and Wilson, T. D. (1977), Telling more than we can know: Verbal reports on mental processes, *Psychological Review*, 84, 231-295.
- Reason, J. (1984), Absent-mindedness and cognitive control. In J. E. Harris and P. E. Morris (Eds.), *Everyday Memory, Action and Absent-mindedness* (111-132). London, Academic.
- Rouse, W. B., and Morris, N. M. (1985), On looking into the black box: Prospects and limits in the search for mental models(DTIC AD-A159080), Atlanta, GA, Georgia Institute of Technology, Center for Man-Machine System Research.
- Taylor, R. M. (1990), Situational awareness rating technique(SART); The development of a tool for aircrew systems design. In *Situational awareness in aerospace operations(AGARD-CP-478; pp. 3/1-3/17)*, Neuilly-Sur-Seine, France, NATO- Advisory Group for Aerospace Research and Development.
- VanDijk T. A., and Kintsch, W. (1983), *Strategies of Discourse Comprehension*, New York, Academic.
- Wickens, C. D. (1984), *Engineering Psychology and Human Performance*(1st ed.) Columbus, OH, Merrill.

이동하

서울대학교 산업공학과 학사
 한국과학기술원 산업공학과 석사
 한국과학기술원 산업공학과 박사
 현재: 수원대학교 산업공학과 부교수
 관심분야: 인간공학, HCI, 산업안전

이현철

한양대학교 산업공학과 학사
 한국과학기술원 산업공학과 석사
 현재: 한국원자력연구소 MMIS팀 선임연구원
 관심분야: Human Machine Interface System 설계
 평가