99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

지원시스템을 활용한 DGOMS HMI 평가기법의 적용

An Application of DGOMS HMI Evaluation Technique using a Support System

민대환, 구상회
고려대학교

정윤형, 김복렬
한국원자력안전기술원

요약

DGOMS는 원전의 주제어실에서 운전원 그룹이 업무를 수행하는 상황에 적용가능한 인간-기계 연계 평가 기법으로서 원전의 안전성을 높이기 위해 개발되었다. 하지만, DGOMS를 활용하기 위해서는 기본적인 GOMS의 개념과 방법론, 확장된 분산인지의 개념 등을 이해하고 적용할 수 있어야 하며, 세부적인 분석을 위해서는 상당히 많은 시간과 노력을 들여야 한다. 따라서, 가능한 최소한의 이론적 지식을 습득한 후 DGOMS 평가 기법을 활용할 수 있도록 평가 지원시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 평가 지원시스템을 활용하여 분산형 GOMS 평가기법을 원전의 비상 운전업무중 하나에 적용한 결과를 제시한다.

요약

The DGOMS technique has been developed in order to evaluate human-machine interface at the NPP main control room where a group of operators are working together. However, the application of DGOMS technique requires the knowledge of distributed cognition as well as GOMS concepts and procedures. In addition, it demands a large amount of time and efforts for the detailed analysis. Thus, we has developed a support system with which evaluators with the minimal theoretical knowledge can apply DGOMS. This paper presents an application of DGOMS to an emergency procedure at NPPs using the support system.

1. 서론

원자력 발전소와 같은 대규모 복합 시스템에서는 그룹이 협동으로 기술시스템을 사용하여 업무를 수행하므로 그룹의 차원에서 적용 가능한 HMI 평가 기법이 필요하다[5]. 원자력 발전소 주제어실에서의 HMI 평가 기법은 개인의 인지는 물론 인지의 사회적 분산을 고려해야 한다. 인지의 사회적 분산은 그룹 차원에서의 인지과정을 다루므로 운전원 그룹의 협동에 의해 운전 업무를 수행하는 원전에 적합하다. 분산형 GOMS(DGOMS: Distributed GOMS)는 인지의 사회적 분산을 고려하여 기존의 분석적 평가기법 중 하나인 GOMS를 원전 운영에 적합한 모형으로 확장

하여 개발한 평가 기법이다 [3].

하지만, 개발된 DGOMS 기법이 원전에서의 HMI의 평가에 적용될 수 있는 지를 검증할 필요가 있으므로 국내 원전에서 공통적으로 수행되는 한 업무를 선정하여 DGOMS 평가 기법을 적용해본다. DGOMS 평가는 분석적 평가이므로 실증적 평가에 비해서는 더 적은 시간과 비용을 필요로 하지만, 여전히 기본적인 개념들을 이해하고 평가방안을 숙지해야 하며, 세부적인 분석을 위해서는 상당히 많은 시간과 노력을 들여야 한다. 아울러, 인지 과학의 이론적 지식을 가진 인력이 많지 않은 국내 상황에서 최소한의 이론적 지식을 갖춘 평가자가 DGOMS 기법을 수월하게 적용할 수 있도록 지원시스템을 개발할 필요가 있다. .

본 논문에서는 그룹 구성원간 직무의 할당과 의견 교환 측면을 고려하여 확장한 DGOMS와 기존의 GOMS 기법들을 비교하고 분석한 후에, 개발된 DGOMS 평가 지원시스템을 활용하여 원전의 비상 운전 절차중 하나인 '고장 S/G 격리' 업무에 대해 DGOMS 기법을 적용해 본 결과를 제시한다.

2. 기존 GOMS 기법들과 분산형 GOMS 기법의 비교

기존의 GOMS 기법들과 DGOMS 기법은 모두 공통적으로 목표(Goals), 조작자(Operators), 방법(Methods), 선택 규칙(Selection Rules)의 네가지 기본 개념으로 구성되어 있다. 구체적으로 설명하면, 기술 시스템을 사용하는 인간이 업무를 수행하기 위해 습득해야 할 절차적 지식을 ① 전체 시스템이 달성해야 할 목표(Goals), ② 운전원이 해당 업무를 수행하면서 취하는 여러 육체적, 정신적 활동인 조작자(Operator), ③ 목표를 달성하기 위한 조작자의 조합 방법(Method), ④ 동일한 목표를 성취할 수 있는 복수 방법 중에서의 선택 규칙(Selection Rules) 개념으로 모형화하고 분석한다.

Card, Moran과 Newell은 GOMS의 기본 개념을 최초로 발표하고(본 논문에서는 CMN-GOMS로 부르기로 한다) 문서 작성기를 분석하였으나 모델 구축 방법을 구체적으로 제시하지는 못하였다 [4]. 그 후 Kieras 등이 인지 복잡도 이론을 근거로 한 *NGOMSL*(Natural GOMS Language)을 개발하여 모형 구축에 필요한 규칙과 용어를 단순화하고, 모형 구축을 용이하게 하였으며, HMI의 성과를 유용한 수량적인 형태로 예측 가능하게 하였다. 이에 따라 GOMS가 일반적인 HMI에 적용될 수 있게 되어, 개인의 인지 과정을 분석하는 도구로 널리 사용 가능하게 되었다[7]. 최근에 John 등은 지각, 인지, 운동 단계와 같은 개인의 세분화된 정보처리 과정이 병렬적으로 진행될 수 있다는 사실을 관찰하고 이를 모형화하고 분석할 수 있는 *CPM*-GOMS(Cognitive-Perceptual-Motor GOMS)를 발표하였다[6]. 이들 기존의 GOMS 기법을 확장하여 그룹 구성원의 개인적 인지 과정을 포함하면서 구성원간 상호 의존 관계를 고려한 DGOMS가 최근 개발되었다 [2].

기존의 GOMS 기법들과 DGOMS를 몇가지 측면에서 비교하면 <표 1>과 같다.

첫째, 분석 수준의 측면에서 기존의 GOMS 기법들은 모두 개인의 업무 수행에 관한 인지적 과정을 분석하는데 활용된다. 기존 GOMS 기법들은 개별 운전원의 인지 과정을 분석하기에는 적합

하나 원전과 같은 대규모 시스템에서 운전원 그룹이 협동에 의해 운전 직무를 수행하는 경우의 그룹 인지과정을 분석하기에는 부적합하다. 이에 비해 DGOMS는 그룹의 차원에서 그룹을 형성하는 개인 인지 과정의 상호 의존성을 표현하므로 원자력 발전소와 같은 대규모 복합 시스템에서 그룹이 협동하여 기술시스템을 사용하여 업무를 수행하는 상황에 적합하다.

<표 1: 기존 GOMS 기법들과 DGOMS 비교>

	기존 GOMS 기법들			DGOMS
	CMN-GOMS	NGOMSL	CPM-GOMS	
분석 수준	개인	개인	개인	그룹
모델 구조	순차	순차	병렬	병렬
요소조작자 분류	외부 조작자 내부 조작자	외부 조작자 내부 조작자	외부 조작자 내부 조작자	외부 조작자 내부 조작자 대화 조작자
평가변수	수행시간	수행시간 인지부하 학습시간 일관성	수행시간	수행시간 인지부하 학습시간 수행시간의 분포 업무부담의 균형성 인지부하의 균형성

둘째, 모델 구조 측면에서 기존의 GOMS 기법들중 CMN-GOMS와 NGOMSL은 조작자들이 순차적으로만 수행되는 구조를 갖고 있지만, CPM-GOMS는 조작자들이 병렬적으로 수행되는 구조를 갖고 있다. CPM-GOMS는 개인 내에서의 분산 인지를 인정하고 인지를 구성하는 세 개의 하위 시스템인 지각시스템, 인지시스템, 운동 시스템이 독자적인 기억과 처리 기능을 가지고 있어 병렬적으로 여러 세부 업무를 수행할 수 있도록 모델을 구성한다. DGOMS는 개인 내에서의 분산인지를 물론 인정하면서 인지의 사회적 분산, 즉 두 사람 이상이 각자에게 할당된 하위 업무들을 동시에 수행하는 분산인지를 나타낼 수 있도록 병렬성을 추가하였다.

셋째, 기존 GOMS 기법들은 모두 외부 조작자(external operator)와 내부 조작자(internal operator)의 두가지 종류의 요소조작자를 가지고 있다. 외부 조작자는 지각 조작자(perceptual operator)와 운동 조작자(motor operator)로 구성되며, 내부 조작자는 방법의 시작과 종료를 나타내는 흐름제어 조작자(control operator), 두뇌의 기억장치를 필요로 하는 기억 조작자(memory operator), 평가를 위해서는 더 이상 분해할 필요가 없는 복잡한 인지과정을 나타내기 위해 평가자가 정의한 조작자(analyst-defined operator)로 구성된다. DGOMS는 외부 조작자와 내부 조작자를 물론 포함하며 운전원간에 이루어지는 의사소통을 나타낼 수 있도록 대화 조작자

(communication operator)를 추가하였다. 원전과 같은 대규모 시스템에서 운전원 그룹에 의해 공동 업무를 수행하는 상황에 적용할 수 있도록 운전원간 의사소통을 포함하고 있다. 예를 들면, 발전과장은 운전 절차에 따라 운전원들에게 '증기 발생기의 압력을 확인하라'는 지시를 내리고 증기 발생기의 압력에 대한 보고를 받는 등 대화를 나누는데, 이런 대화도 업무의 일부이므로 이를 대화 조작자로 표현한다.

넷째, 기존의 GOMS 기법들중 CMN-GOMS와 CPM-GOMS는 HMI 평가시에 개인 수준에서의 수행시간을 측정 변수로 삼고 있으며, NGOMSL은 수행시간을 포함하여 인지부하, 학습시간, 일관성 정도를 측정 변수로 삼고 있다. DGOMS는 개인 수준에서 실행시간, 인지부하, 학습시간을 포함하여 개인 업무 수행 시간의 분포(의사소통 시간과 실행시간의 비율)를 추가하였으며, 그룹 수준에서 그룹의 업무 수행시간, 업무 부담의 균형성과 인지부하의 균형성을 측정 변수로 추가하였다. 그룹의 업무 수행시간은 모든 업무를 순차적으로 수행한다면 단순히 구성원의 업무 수행시간을 합하여 계산할 수 있지만, 업무가 병렬적으로 수행된다면 핵심 경로(critical path)를 찾아 수행시간을 계산해야 한다. 아울러, 적절한 업무 할당은 그룹 구성원의 업무 부담과 인지 부하를 균형화시켜 편차를 줄이고 그룹의 업무 성과를 향상시킬 수 있다.

3. DGOMS 평가 절차

DGOMS 평가 절차를 요약하면 다음과 같다.

1) 완전한 그룹모형을 작성한다: 이것은 그룹의 의사소통과 조정능력이 완전하여서 (perfect communication and coordination) 모든 구성원이 동일한 지식을 갖고 있으며 서로의 생각을 항상 완전히 알 수 있다고 가정하고 그룹에 부과된 업무에 대한 분석을 수행한다. 이는 무한한 능력을 가진 한 수퍼맨이 그룹 업무를 수행한다고 가정하는 것과 마찬가지이며 NGOMSL 방법을 적용하여 GOMS 모형을 작성한다. 이 단계에서는 업무를 분해하는 과정을 너무 세분할 필요가 없으며, 최하위 단계의 업무를 한 개인이 수행할 수 있는 수준까지 분해하면 된다.
2) 업무를 할당한다: 앞에서 작성된 GOMS 모형에서 최하위 수준의 조작자에 대해 수행 주체를 할당한다. 수행 주체는 대부분 사람이지만 때로는 자동화된 설비도 수행주체가 될 수 있다.
3) 개인별 수행 모형을 작성한다: 앞에서 각 주체에게 할당된 업무들을 모아 선후관계를 고려하여 각 주체별로 수행하는 업무를 배열한다.
4) 수행 주체와 제약 조건을 고려하여 CPM-GOMS 모형을 작성한다: 이어지는 업무들의 수행 주체가 바뀌면 의사소통이 이루어져야 하고 정보의 교환이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 수행주체간(inter-agent) 대화조작자를 추가해야 한다. 수행 주체가 다르면 일반적으로 업무를 동시에 수행할 수 있음을 의미하지만, 업무의 선후 관계나 제약 조건등의 의존 관계를 고려해야 한다. 업무간에는 강제적인 선후관계나 편의상 만들어진 선후 관계가 있을 수 있으며, 전혀 서로 상관이 없을 수도 있다. 이들 업무간의 관계를 CPM-GOMS 모형을

작성하여 나타낸다.

5) 각 개인에게 할당된 최하위 업무에 대해 기존의 GOMS를 적용한다. 업무의 특성을 고려하여 NGOMSL 또는 CPM-GOMS를 적용한다.

5-1) attended process이거나 병렬성이 없는 업무인 경우에는 NGOMSL 모형을 작성한다: 이제 각 최하위 업무는 한 agent가 수행하는 업무이므로 전형적인 NGOMSL 방법을 적용하여 모형을 작성하고 분석한다.

5-2) automated process이거나 병렬성이 있는 경우에는 CPM-GOMS 모형을 작성한다.

6) 단계5에서 작성한 각 GOMS 모형에 대한 분석을 수행한다. 이 단계에서는 종래의 NGOMSL이나 CPM-GOMS 분석방법을 그대로 적용하여 학습시간을 추정한다.

7) 그룹의 수준에서 분석을 수행한다: 그룹 전체의 수준에서 실행 시간, 업무 부담의 균형성, 그룹 평균 인지부하와 인지부하의 균형성을 추정한다. 아울러, 각 개인별 실행시간 중에서 대화시간과 업무 수행시간이 차지하는 시간의 분포를 조사한다.

DGOMS를 기존의 GOMS와 비교해보면, 기존의 GOMS 기법들은 DGOMS의 단계5와 단계6만을 포함하고 있으며 나머지 단계는 DGOMS에만 존재하는데 기존의 GOMS를 최대한 활용하고 있다.

4. 운전원 직무분석 평가 지원시스템

앞에서 제시한 절차에 따라 DGOMS 기법으로 HMI평가하려면 기본적인 개념을 익힌 평가자라도 업무 구조도와 CPM도면을 작성하고 업무의 수행 시간, 학습 시간, 인지 부담 등을 계산하는데 상당히 많은 시간과 노력을 들여야 한다. 바꾸어 말하면, DGOMS 기법를 적용하여 평가자가 HMI를 평가하는 과정에서 들여야 하는 시간과 노력을 가능한 한 감소시킬 수 있도록 지원시스템을 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 Win95나 Win98를 탑재한 퍼스널 컴퓨터에서 실행시킬 수 있는 평가 지원시스템을 마이크로소프트의 비주얼 C++개발환경을 이용하여 개발하였고, 개발된 DGOMS 평가 지원시스템을 '운전원 직무분석 평가 지원시스템 (DGOMS99 version 1.0)'으로 명명하였다.

DGOMS99는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 크게 나무모델(tree model) 구축지원기, CPM (Critical Path Method)도면 구축지원기, DGOMS모델 분석기의 세가지 기능으로 구성되어 있다. 나무모델 구축지원기는 분석대상 업무의 절차를 근거로 업무의 나무 모델을 작성하여 이를 데이터베이스에 저장하는 도구이며, CPM도면 구축지원기는 나무 모델에 포함된 개별 업무 절차에 운전자간의 대화 조작자를 추가하고 이들 절차간에 시간적 선후관계를 명시하는 CPM도면을 구축하여 이를 데이터베이스에 저장하는데 사용되는 도구이고, DGOMS 모델 분석기는 나무모델과 CPM도면을 근거로 업무의 학습시간, 실행시간, 인지부하 등을 분석한다.

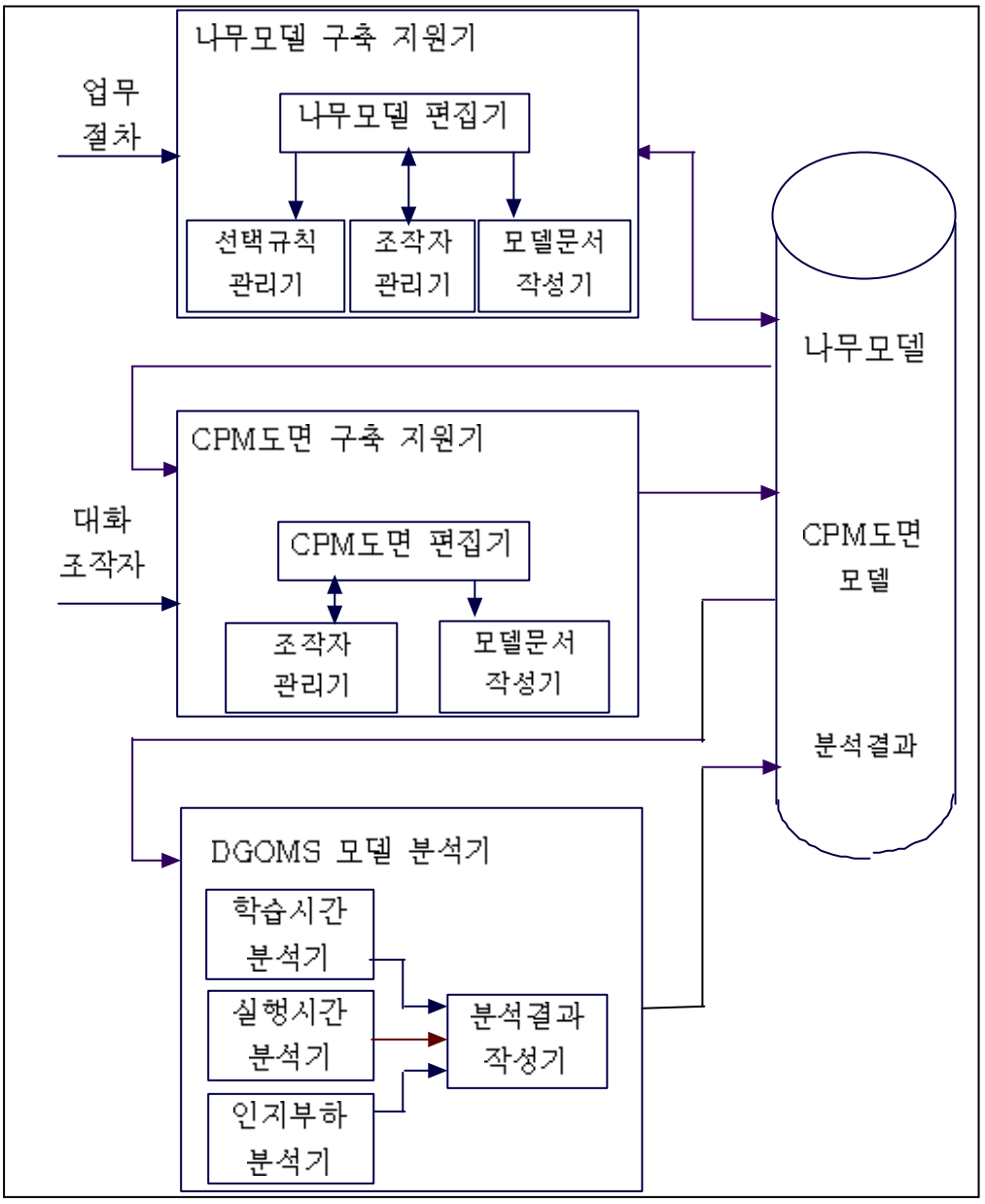
DGOMS99를 활용하여 DGOMS 평가를 실시하는 절차는 네단계로 이루어진다.

[단계 1] 나무모델 구축지원기를 사용하여 그룹 전체의 업무에 대한 나무 모델을 구축한다. 이 단계는 DGOMS 평가 절차의 1), 2), 5)를 포함한다.

[단계 2] 모델 분석기를 사용하여 나무모델에 대해 학습시간을 추정한다. 이 단계는 DGOMS 평가 절차의 6)에 해당한다.

[단계 3] CPM도면 구축 지원기를 사용하여 나무 모델을 구성하는 요소조작자들을 구성원별로 분류하여 순서적으로 연결된 모형을 생성한 다음, 구성원간에 대화 조작자를 추가하여 CPM도면을 작성한다. 이 단계는 DGOMS 평가 절차의 3), 4)를 포함한다.

[단계 4] 모델 분석기를 사용하여 CPM모델에 대해 인지부하를 분석하고 핵심 경로를 찾아 실행시간을 분석한다. 이 단계는 DGOMS 평가 절차의 7)에 해당한다.



<그림 1> 평가 지원시스템의 구조

5. DGOMS의 적용

DGOMS 평가 기법을 원전 제어실의 운영에 적용할 수 있는지 검증하기 위해 대상 원전과 대상 업무를 선정하여 적용해본다. 국내 원전의 주제어실의 운영을 담당하는 운전반의 인적 구성은 발전과장(Shift Supervisor), 안전과장(Shift Technical Advisor), RO (Reactor Operator), TO(Turbine Operator), EO(Electric Operator)로 이루어진다. 원전 제어실의 운전 업무는 정상운전, 비정상 운전, 비상운전으로 분류되는데, 본 연구의 적용 대상 업무는 상당히 많은 인지적 노력을 필요로 하는 비상 운전중에서 비상-2 운전절차서 '고장 S/G (Steam Generator) 격리'에 대해 DGOMS를 적용하여 HMI 평가를 실시한다[1]. 비상-2 운전절차는 고장 증기 발생기를 확인하여 격리하는 업무이며 이를 흐름도로 표시하면 <그림 2>와 같다.[1)]

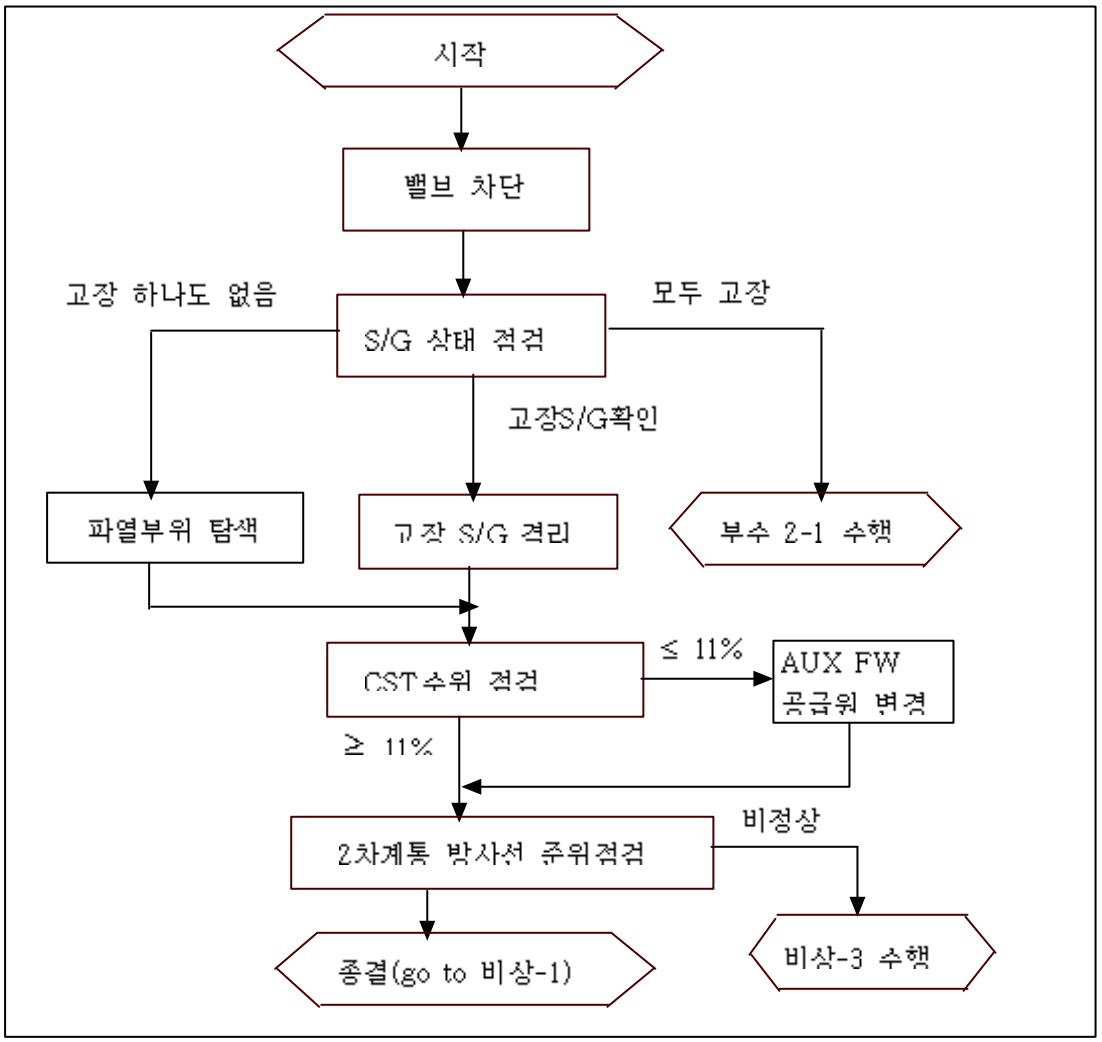


그림 2: '고장 S/G 격리' 업무절차 흐름도

이제 DGOMS99를 활용하여 '고장 S/G (Steam Generator) 격리'에 대해 평가를 실시한다.

1) 이 흐름도는 비상-2 절차서에는 포함되어 있지 않으며, 본 연구 수행을 위해 작성된 것이다.

[단계 1] 나무모델 구축

나무모델을 구축하는 과정은 하향식 넓이 우선 방식(top-down breadth-first)으로 진행한다. '비상-2' 절차를 구성하는 업무들을 1차로 분해하여 생성된 나무 모델을 <그림 3>에서 보여준다. 업무들을 상세히 분해한 나무 모델을 <그림 4>에서 보여준다.[2)]

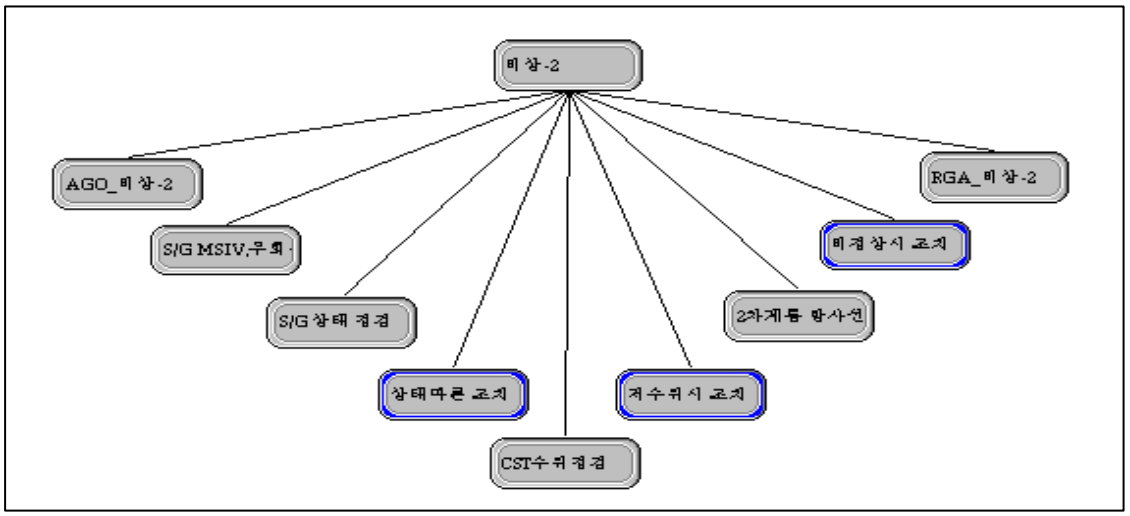


그림 3: '비상-2' 업무의 1차 나무 모델

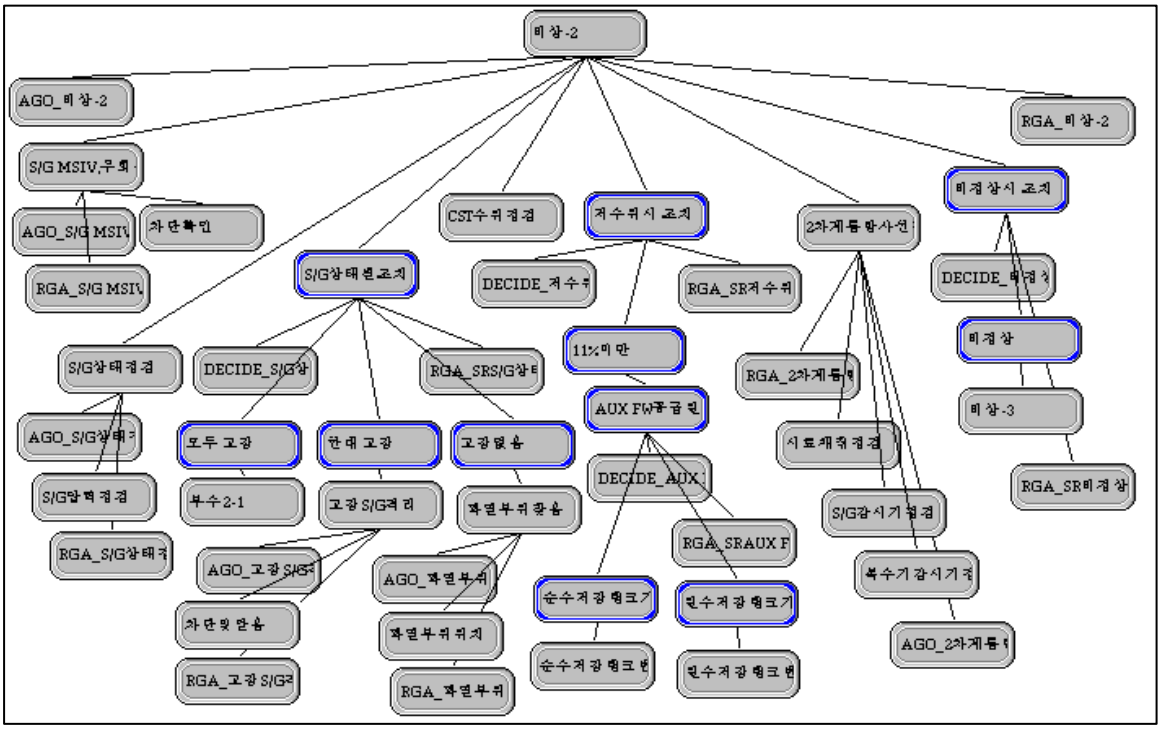


그림 4: '비상-2' 업무의 나무 모델

2) 완성된 나무모델은 이보다 두단계 더 분해된 모델이다.

[단계 2] 학습시간 분석

단계 1에서 작성한 나무모델 파일을 open한 상태에서 메뉴의 Analysis Algorithm-Learning Time Analysis 항목을 선택하면 자동으로 <그림 5>와 같은 학습시간을 계산해준다.

Learning time analysis

User	Basic learning time	Pure learning time	Learning time
Total learning time	30 ~ 60 min	596.5 min	626.5 ~ 656.5 min
발전과장	30 ~ 60 min	33 min	63 ~ 93 min
TO	30 ~ 60 min	534 min	574 ~ 594 min
EO	30 ~ 60 min	127.5 min	157.5 ~ 187.5 min

그림 5: 학습시간 분석 결과

[단계 3] CPM 모델 작성

단계 1에서 작성한 나무모델 파일을 open한 상태에서 메뉴의 Tool-CPM Model을 선택하면 각 운전원에게 할당된 업무들을 순서적으로 연결한 모델을 <그림 6>과 같이 생성해준다.

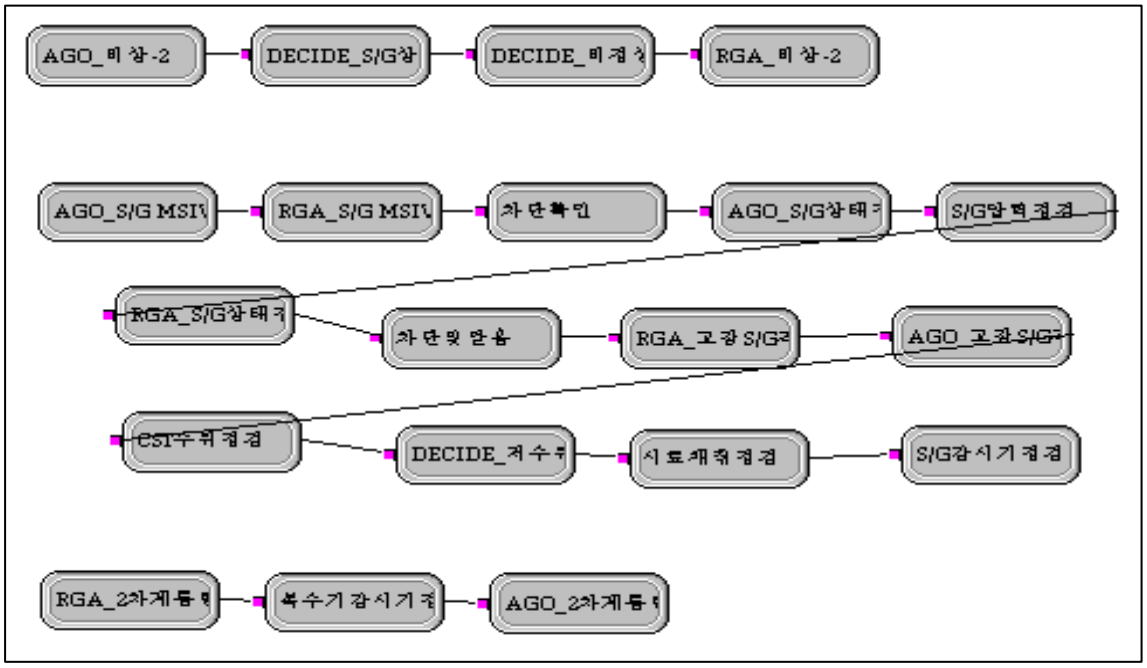


그림 6: 대화조작자를 추가하기전 모델

운전원간 의사소통이 이루어지는 경우에 <그림 6>에 대화조작자를 추가하여 <그림 7>과 같은 CPM 모델을 작성한다. 작성된 CPM 모델을 open한 상태에서 메뉴의 Analysis algorithm-Execution time analysis 항목을 선택하면 핵심경로를 찾아 전체 업무 수행시간을 <

그림8>과 같이 계산해준다.

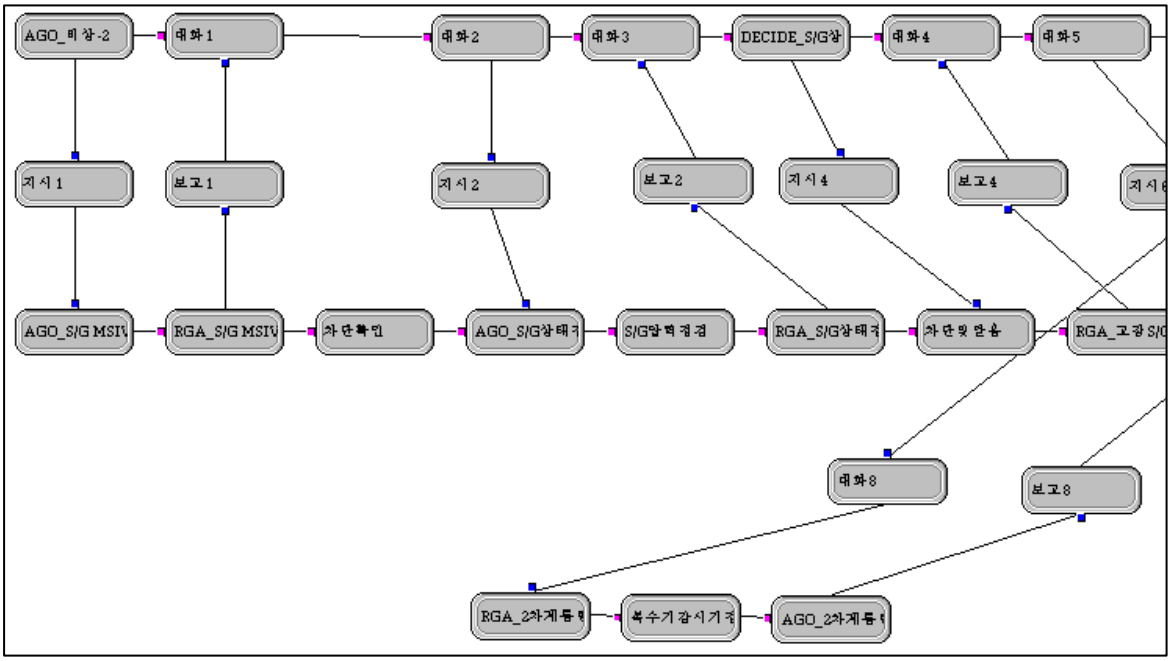


그림7: 대화조작자를 추가한 후의 CPM 모델

Total Execution Time

Node	Node time	Execute time
AGO_비상-2	0.1	0.0
AGO_S/G상태점검	0.1	0.0
S/G압력점검	0.1	161.1
RGA_S/G상태점검	0.1	0.0
DECIDE_S/G상태별조치	0.1	0.0
지시4	0.1	30.0
차단및닫음	0.1	76.6
RGA_고장S/G격리	0.1	0.0
보고4	0.1	30.0
AGO_고장S/G격리	0.1	0.0
CST수위점검	0.1	6.8
.....		
RGA_비상-2	0.1	0.0
Sum	3.3(Sec)	362.0(Sec)
Total	365.3(Sec)	

그림8: 전체 업무수행시간

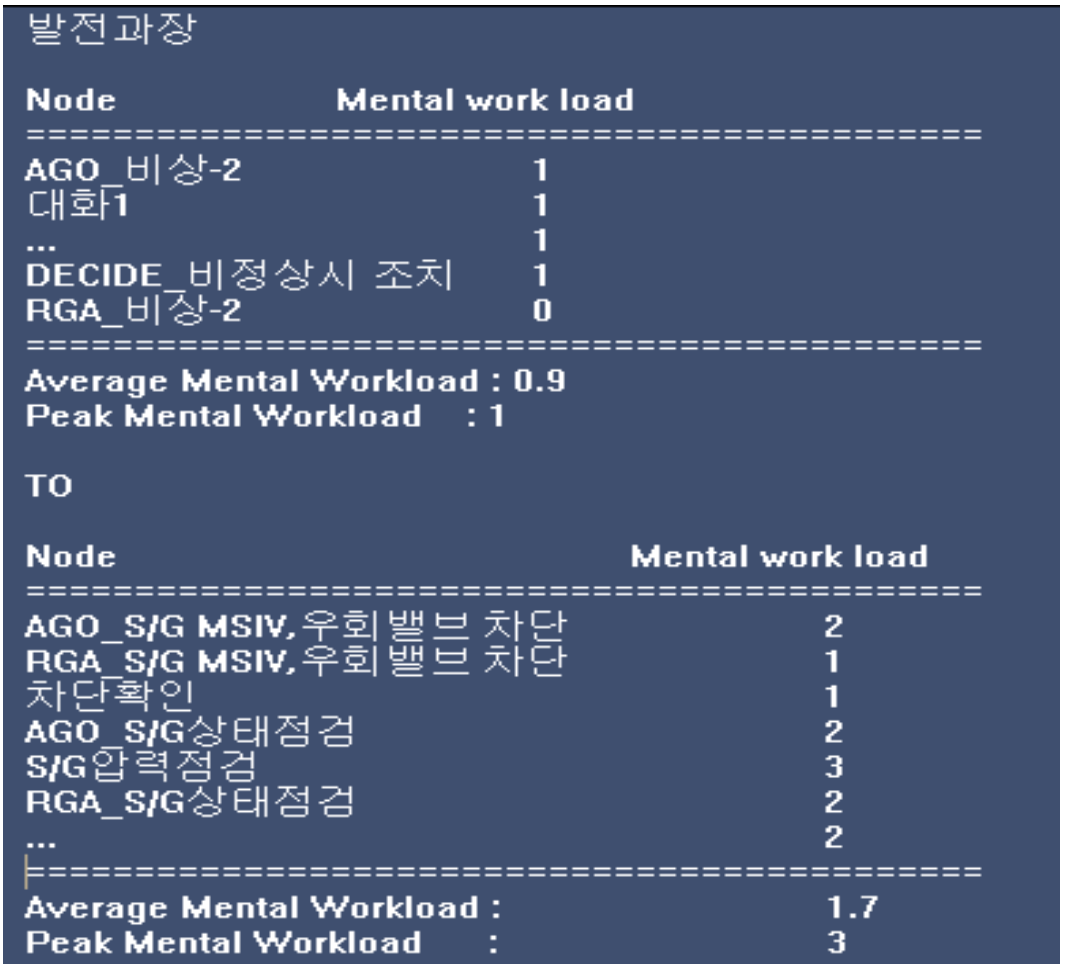


그림 9: 인지부하 분석

다시 메뉴의 Analysis algorithm-Mental work load 항목을 선택하면 <그림 9>와 같은 분석 결과를 제시한다.

6. 결론

DGOMS 기법은 아직 보완할 점이 있기는 하지만 선정된 운전 업무에 대해 큰 문제 없이 적용할 수 있었다. 기존의 GOMS에서 분류한 요소조작자들을 확인하였으며, DGOMS에서 추가한 대화 조작자들의 유형을 분류할 수 있었다. 하지만 평가자들이 DGOMS를 적용하려면 많은 시간과 노력을 들여야 한다. 본 연구에서 개발한 지원시스템인 DGOMS99를 활용하면 모델을 현장에서 구축하고 이를 토대로 분석을 수행하여 결과를 확인할 수 있으며, 모델 구축과 분석에 소요되는 시간과 노력을 현저히 절감할 수 있다. 또한 한번 작성된 모델은 디지털 파일 형태로 저장되어 재사용과 변경이 용이하기 때문에 설계의 변경에 따른 반복적인 모델 구축과 분석이 효율적으로 이루어지도록 되어 있다.

향후에는 다양한 HMI 계통이 혼용되는 국내 원전에 적용하여 DGOMS 평가기법을 보완하여 개

선할 예정이며, 차세대 원전에서 도입할 것으로 예상되는 CPS(Computerized Procedure System)의 안전성을 평가하는 데 DGOMS 기법이 활용될 수 있으리라 예상된다.

참고문헌

[1] 고리 원자력발전소 3,4호기 비상운전 절차서, (1998), 비상-2, 개정번호 3, 고장 S/G 격리

[2] 민대환, 구상회, 정윤형, 김복렬, (1998), 분산형 GOMS에 의한 원전의 Human-Machine Interface 평가, 98 춘계학술발표회 논문집, 한국 원자력학회

[3] 민대환, 구상회, 안재민, 유영신, (1998), 인간-기계 계통 평가기술 개발(II), 한국원자력안전기술원

[4] Card, S. K., Moran, T. P., and Newell, A., (1983), The Psychology of Human -Computer Interaction. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

[5] Hutchins, E., (1995a), Cognition in the Wild, MIT Press, Cambridge, Massachusetts

[6] John, B. E. and Gray, W. D., (1995), GOMS Anlaysis for Parallel Activities, Tutorial Notes, CHI, 1995 (Denver, Colorado), ACM.

[7] Kieras, D. E., (1988), Towards a Practical GOMS Model Methodology for User Interface Design, Handbook of Human Computer Interaction. M. Helander, (ed.). Elsevier.