

분산형 GOMS에 의한 원전의 Human-Machine Interface 평가

민대환, 구상희
고려대학교

정윤형, 김복렬
한국원자력안전기술원

요약

GOMS 평가는 운전원 개인의 인지과정에 초점을 두어 직무 절차의 학습시간과 직무 실행시간을 예측하고 직무 실행시 요구되는 인지부하를 분석한다. 하지만 실제 원전의 운전은 그룹에 의해 이루어지므로 운전원간 의사소통과 직무의 상호 의존관계를 고려하여 기존의 GOMS를 확장한 분산형 GOMS를 고안하였다. 본 논문에서는 분산형 GOMS 평가기법을 CE형 원전의 비상운전절차서에 시험적으로 적용해 본 결과를 제시한다.

1. 서론

인간-기계 연계(HMI: Human-Machine Interface)의 적절성을 평가하는 기법을 크게 분류하면, 운전원이 직접 평가 과정에는 참여하지 않고 직무 수행에 필요한 인지적 노력을 추정하는 분석적 평가와 운전원이 평가 과정에 참여하여 직무를 수행하고 성과를 측정하는 실증적 평가로 나눌 수 있다. 실증적 평가는 분석적 평가에 비해 훨씬 더 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 한편 현재 국내 상황은 여러 외국 업체에서 만든 HMI 계통이 혼용되고 있으며, 실증적 평가 자료가 축적되어 있지 않아서 HMI의 표준을 설정할 수 있는 기반이 형성되어 있지 않다. 이를 타개하려면, 우선 분석적 평가 기법을 활용하여 HMI 평가를 실시하고, 아울러 지속적인 실증 평가를 수행하여 실증 평가 자료를 축적하면서 분석적 평가 기법을 개선해 나가는 것이 바람직하다.

분석적 평가기법 중에서 GOMS는 인지 심리학의 이론적 기반에 근거하여 개발되었고 원전 운전 시스템의 평가 도구로서 인간-기계 연계의 설계단계에서 활용되어 보다 좋은 시스템으로 설계 변경을 하는 데 유용성이 입증된 바 있다[Endestad, 1993]. GOMS는 운전원 개인의 인지과정에 초점을 두어 직무 수행절차를 학습하는데 걸리는 시간과 직무를 수행하는데 걸리는 실행시간을 예측하고 직무 수행시 요구되는 인지부하를 분석한다. 하지만 실제 원전과 같은 대규모 시스템에서는 운전원 그룹의 협동에 의해 운전 직무를 수행하므로 개인의 인지 과정을 포함한 그룹의 인지과정을 고려하여 HMI를 평가하는 기법의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 GOMS群에 속하는 기법을 비교하고 분석한 후에, 이를 기반으로 그룹 구성원간 직무의 할당과 의견 교환 측면을 고려하여 확장한 분산형 GOMS(DGOMS: Distributed GOMS)를 CE형 원전의 비상운전절차서 '우선-01' 직무에 시험적으로 적용해 본 결과를 제시한다.

2. GOMS 평가 기법들의 비교 분석

1980년 Card, Moran과 Newell은 최초의 GOMS기법인 Keystroke-Level GOMS (KL-GOMS)를 발표하여 문서 작성기를 분석하였고[Card등, 1980], 1983년 MHP(Model Human Processor) 이론에 근거하여 보다 정형화된 GOMS (CMN-GOMS)를 발표하였다. 기계를 사용하는 인간의 인지 과정을 ① 시스템이 수행하여야 할 중요한 직무인 목표(Goals), ② 운전원이 해당 직무를 수행하면서 취하는 여러 육체적, 정신적 활동인 조작자(Operator), ③ 목표를 수행하기 위한 조작자의 조합 방법(Method), ④ 동일한 목표를 성취할 수 있는 복수 방법에서의 선택 규칙(Selection Rules) 개념으로 모형화하고 분석할 수 있는 형식을 제공하였다[Card등, 1983]. 이러한 초기의 GOMS는 적용 시스템이 한정되었고, 모델 구축 방법을 구체적으로 제시하지 못하였다.

그 후 1985년 Kieras 등이 인지적 복잡도이론을 제시하고, 이를 근거로 한 Natural GOMS Language (NGOMSL)를 개발하여 모형 구축에 필요한 규칙과 용어를 단순화하고, HMI 모형 구축을 용이하게 하였으며, HMI의 성과를 유용한 수량적인 형태로 예측 가능하게 하였다. 이에 따라 GOMS가 일반적인 HMI에 적용될 수 있게 되어, 인간의 인지 과정을 분석하는 도구로 널리 사용 가능하게 되었다[Kieras등,1985][Kieras, 1988]. 최근에 John 등은 지각, 인지, 운동 단계와 같은 인간의 세분화된 정신 과정이 병렬적으로 진행될 수 있다는 사실을 관찰하고 이를 모형화하고 분석할 수 있는 Cognitive-Perceptual-Motor GOMS(CPM-GOMS)를 발표하였다[John등, 1995].

기존의 GOMS群은 모두 운전원 개인의 직무 수행에 관한 인지적 과정을 분석하는데 활용된다. 이들 GOMS群은 개별 운전원의 인지 과정을 분석하기에는 적합하나 원전과 같은 대규모 시스템에서 운전원 그룹이 협동에 의해 운전 직무를 수행하는 경우의 그룹 인지과정을 분석하기에는 부적합하다. 예를 들면, 어떤 운전원이 현재 수행하여야 할 조작자는 다른 운전원의 직무 진행 상태에 따라 달라질 수 있으며, 또한 발전과정은 각 운전원의 하부 직무 수행 과정을 종합적으로 관찰하면서 그 다음에 수행할 직무를 결정할 수 있다. 그러나 기존의 GOMS群은 이러한 운전원 간의 상호 작용을 모델에 포함시키지 않았으며, 이들 운전원 사이의 직무 분담의 균형성이나 인지적 부담의 균형성 등에 대한 분석이 불가능하다. 따라서 운전원 개인의 하부 직무간의 상호 작용은 물론 운전원들의 직무간 관계를 종합적으로 고려한 그룹의 인지 과정을 분석하고 평가할 수 있는 방법론이 필요하다.

3. 분산형 GOMS의 적용

본 논문에서는 그룹 구성원간 직무의 할당과 의견 교환 측면을 고려하여 GOMS를 확장한 DGOMS를 CE형 원전의 비상운전절차서에 시험적으로 적용해 본 결과를 제시한다. 즉, 영광 제2 발전소에서 활용되는 비상운전 절차서에서 원자로 트립 증상이 나타나면 곧바로 수행되는 '우선-01 절차(원자로 트립후 우선 조치)'를 대상으로 DGOMS를 적용해 본다.

표 1. 수행 주체에의 업무 할당

수행주체	번호	조작자 / 방법
발전과장	A1	사건을 감지한다.
발전과장	A2	AG of 원자로 트립 증상을 확인한다.
발전과장	A3	Decide: if <원자로 트립 증상> then AG of 우선-01 절차를 수행한다.
	A4	RGA (Report Goal Accomplished)
발전과장	M(A2)	Method to AG of 원자로 트립 증상을 확인한다:
RO	A21	Decide: if <원자로 트립 정보> then RGA.
RO	A22	Decide: if <제어봉 바닥 지시등 점등> then RGA.
RO	A23	Decide: if <원자로 출력 급강하> then RGA.
RO	A24	Decide: if <원자로트립 차단기 열림> then RGA.
RO	A25	Decide: if <원자로 보호계통 설정치 초과> then RGA.
RO	A26	Decide: if <원자로 보호계통 트립 바이스테블 점등> then RGA.
	A27	RGA
	M(A3)	Method to AG of 우선-01 절차를 수행한다
발전과장	A31	AG of 반응도가 제어되는지를 확인한다.
EO	A32	발전소의 요구전원이 만족되는지를 확인한다.
RO	A33	RCS 재고량이 제어되는지를 확인한다.
RO	A34	RCS 압력이 제어되는지를 확인한다.
RO	A35	강제순환에 의한 노심 열제거가 이루어지는지를 확인한다.
발전과장	A36	RCS 열제거 상태를 확인한다.
EO	A37	격납용기 대기가 정상상태임을 확인한다.
EO	A38	격납용기 대기온도 및 압력이 정상상태임을 확인한다.
EO	A39	격납용기 가연성 가스 제어를 확인한다.
	A3X	RGA
	M(A31)	Method to AG of 반응도가 제어되는지를 확인한다.
RO & TO	A311	수동원자로 트립 누름 스위치를 누른다.
RO	A312	원자로 출력이 감소되는지를 확인한다.
RO	A313	기동율 < 0 인지를 확인한다.
RO	A314	완전히 삽입되지 않은 제어봉집합체가 1개이하인지를 확인한다.
	A315	RGA

[단계 1] 직무 할당: 현재의 '우선-01' 절차서는 그룹전체의 직무를 순차적으로 기술하고 있으며 운전원별로 분리되어 있지는 않다. 이 단계에서는 직무를 분해하는 과정을 너무 세분할 필요가 없고 한 개인이 수행할 수 있는 수준까지 분해한 후에 최하위 단계의 직무인 요소조작자를 각 운전원에게 할당한다. <표 1>은 [단계1]을 '우선-01'에 처음 적용한 결과를 보여준다. 상위조작자를 누구에게 할당할 지는 평가자의 판단에 따르는데 대개 관리자인 발전과장에게 할당한다. 수행주체가 둘 이상이 할당된 경우에는 요소 조작자를 둘 이상의 주체가 동시에 수행해야 하는 경우인지, 조작자를 다음 수준으로 분해해야 하는 경우인지를 구분한다. 예를 들면, A311은 RO와 TO가 동시에 수행해야 하지만, A36은 다음 수준의 요소 조작자로 분해되어야 하는 활동이다. A36을 분해한 결과를 <표 2>에서 보여준다.

[단계 2] 개인별 수행 모형: 각 사람이 수행하는 조작자의 선후관계와 의존관계를 고려하여 배열한다. 한 사람이 상위조작자와 하위 요소조작자의 일부를 수행하면 상위조작자를 개시와 종료로 분리하여 상위조작자(시작)-요소조작자-상위조작자(종료)의 순서로 배열한다. 연속되는 조작자의 수행주체가 바뀌면 의사소통을 위한 주체간 조작자를 추가한다. <표 3>에서 발전과장이 RO에

게 A2의 수행을 지시하고 RO는 A2의 수행 지시를 수령한후 A21을 시작한다. 연속되는 조작자의 수행주체가 동일해도 관리자의 확인이 필요하면 수행주체간 조작자를 평가자의 판단에 의해 추가할 수 있다. 수행주체가 다르고 동시에 수행가능한 요소조작자들은 병행처리가 가능하다.

표 2. 조작자 A36의 분해

수행주체	번호	조작자/방법
	M(A36)	Method to AG of RCS 열체거 상태를 확인한다.
TO	A361	증기발생기 수위를 유지한다.
RO	A362	RCS T _{avg} 를 292~299 °C로 유지한다.
TO	A363	증기발생기 압력을 77~86kg/cm ² A 범위내에서 유지한다.
	A364	RGA

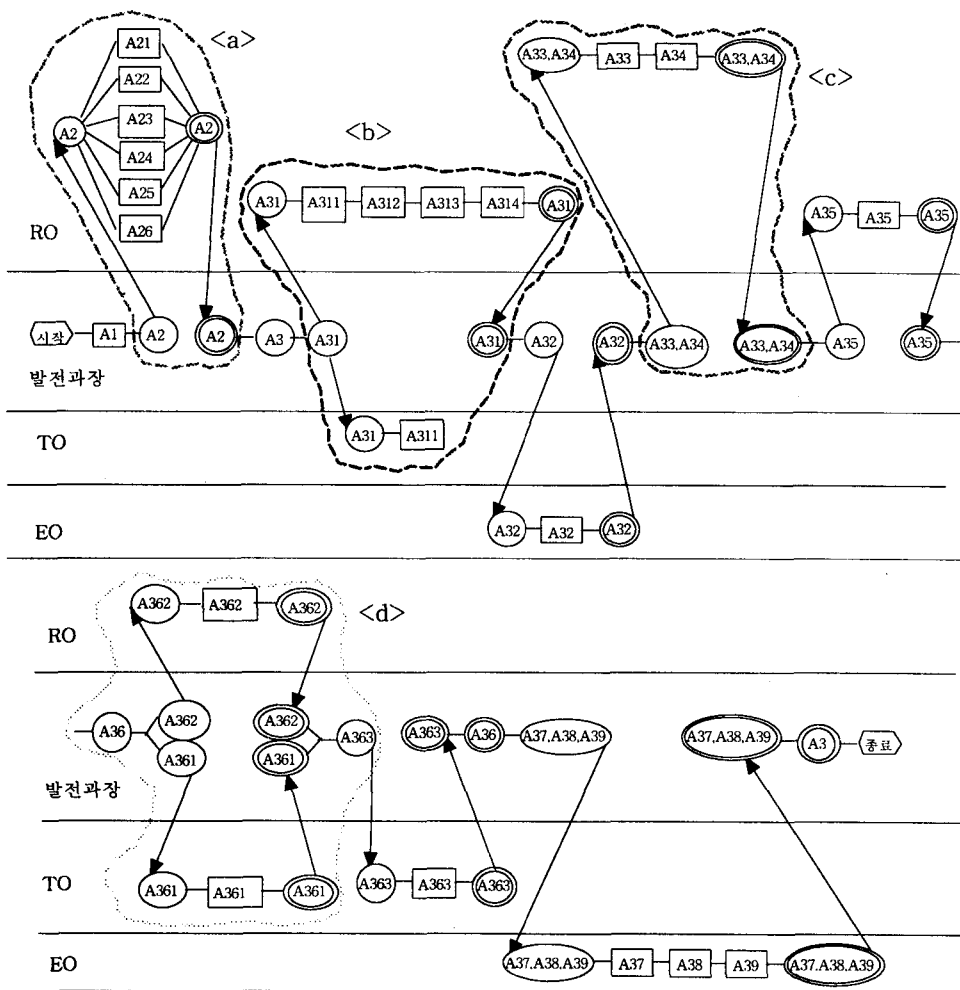
표 3. 수행주체간 조작자 추가후 수행주체별 활동 순서

수행주체	활동 순서
발전과장	A1-A2(RO지시)-A2(완료접수)-A3(개시)-A31(RO, TO지시)-A31(완료접수)-A32(EO지시)-A32(완료접수)-A33, A34(RO지시)-A33, A34(완료접수)-A35(RO지시)-A35(완료접수)-A36(개시)-A361(TO지시), A362(RO지시)-A361(완료접수), A362(완료접수)-A363(TO지시)-A363(완료접수)-A36(종료)-A37, A38, A39(EO지시)-A37, A38, A39(완료접수)-A3(종료)
RO	A2(지시수령)-A21-A22-A23-A24-A25-A26-A2(완료보고)-A31(지시수령)-A311-A312-A313-A314-A31(완료보고)-A33, A34(지시수령)-A33-A34-A33, A34(완료보고)-A35(지시수령)-A35-A35(완료보고)-A362(지시수령)-A362-A362(완료보고)
TO	A31(지시수령)-A311-A361(지시수령)-A361-A361(완료보고)-A363(지시수령)-A363-A363(완료보고)
EO	A32(지시수령)-A32-A32(완료보고)-A37, A38, A39(지시수령)-A37-A38-A39-A37, A38, A39(완료보고)

[단계 3] 그룹 수행 모형: 수행주체간의 연결고리를 찾아 연결하여 CPM-GOMS 모형을 만든다. <그림 1>에서 원 또는 타원은 수행주체간 조작자를 나타내며, 사각형은 종래의 GOMS 모형의 방법 또는 조작자를 나타낸다.

<그림1>에서 <a>는 조작자 A21~A26은 모두 수행되어야 할 필요는 없으며, 하나 이상의 조작자가 실행될 수 있음을 의미한다. 는 RO와 TO가 발전과장의 지시에 의해 A311 조작자를 동시에 수행해야 하고 A311 조작자의 완료후에 RO는 A312 조작자를 수행할 수 있는 상황을 나타낸다. <c>는 발전과장이 A33과 A34 조작자에 대한 지시를 내려 RO가 수행하는 상황인데 A33과 A34의 수행 순서는 발전과장의 입장에서는 상관하지 않음을 의미한다. <d>은 발전과장이 조작자 A361은 RO에게, A362는 TO에게 동시에 지시하여 RO와 TO가 병행적으로 수행할 수 있으며, 조작자 A363은 A361과 A362가 모두 완료된 후 시작될 수 있음을 나타낸다.

[단계 4] 세부 GOMS 모형: 각 구성원 개인이 수행하는 조작자에 대해 세부적인 GOMS 모형을 작성한다. 이때, 각 조작자에 대해 NGOMSL을 적용할지 CPM-GOMS를 적용할지를 선택하는데, 각 최하위 직무의 반복성을 기준으로 attended process 경우에는 NGOMSL 기법을 따르고 automated process 경우에는 CPM-GOMS 모형을 작성한다. 이 예제에서는 NGOMSL을 적용하였고, A311 조작자를 예로 보면 <표 4>와 같다.



<그림 1> 그룹 수행 모형

표 4. A311 조작자의 분해

수행주체	번호	조작자 / 방법
	M(A311)	Method to AG of 수동원자로 트립 누름 스위치를 누른다.
RO & TO	A3111	수동원자로 트립 누름 스위치의 위치를 기억해낸다.
RO & TO	A3112	수동원자로 트립 누름 스위치로 이동한다.
RO & TO	A3113	수동원자로 트립 누름 스위치에 손가락을 올려 놓는다.
RO & TO	A3114	동시에 스위치를 누를 수 있도록 동기화한다.
RO & TO	A3115	동시에 스위치를 누른다.
	A3116	RGA

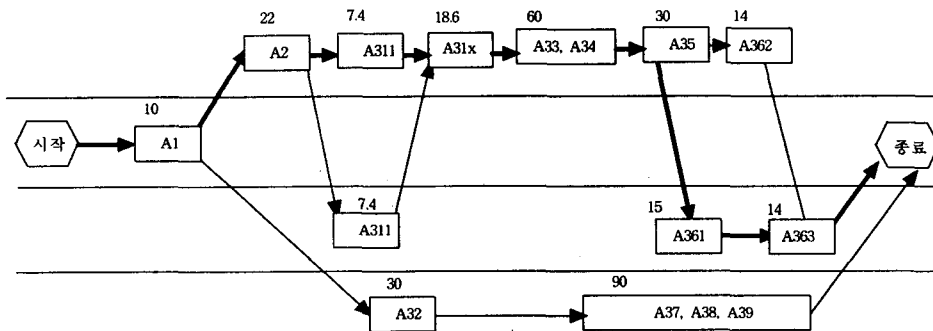
[단계5] 개인별 분석: GOMS의 정량적 분석은 실행시간, 학습시간, 인지 부하에 대해 이루어졌는데, 먼저 단계 4의 세부 GOMS 모형에 대해서는 이를 그대로 적용한다. <표 4>의 A311에 대한 실행 시간 추정은 <표 5>에서 보여준다. 외부 조작자의 추정시간은 기존 연구의 결과[Kieras, 1988]를 사용하였고 기억조작자와 내부 요소조작자는 임의의 추정시간을 사용하였다. 현실적인 추정치를 구하려

면 실증적인 조사 결과가 축적되어야 한다.

표 5. A311 수행시간

번호	Statement Time	조작자 수행시간	조작자 유형	인지부하
M(A311)	0.6초 (0.1x6)	6.8 초		M(A31)
A3111	0.1	0.2	기억 조작자	M(A31), M(A311)
A3112	0.1	3 (1초x3m)	외부 요소조작자	M(A31), M(A311)
A3113	0.1	0.4	외부 요소조작자	M(A31), M(A311)
A3114	0.1	3	내부 요소조작자	M(A31), M(A311)
A3115	0.1	0.2	외부 요소조작자	M(A31), M(A311)
A3116	0.1			M(A31)

[단계 6] 그룹 분석: 이와 같이 세부 GOMS의 모든 방법에 대해 정량적 분석을 행한 후에 분석 결과를 CPM-GOMS에서 활용하여 그룹 수행에 대한 정량적 분석을 수행한다. 앞에서 작성한 <그림 1>을 수정할 필요가 있는지 평가자가 판단을 내린다. 예를 들어, 발전과장이 항상 직무를 지시한 후에 각 운전원이 자신의 직무를 시작하는 것으로 나타냈으나, 실제 상황에서는 각 운전원이 숙달되어 전체 직무의 흐름을 알고 있으면 발전과장으로부터 지시를 받기 전에 이미 자신의 수행하고 지시를 받자마자 완료 보고를 하는 것도 가능하다. 실행시간을 예측하기 위해 <그림 1>을 수정하고 세부 조작자를 생략하여 CPM/PERT 도면의 형식으로 작성하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> PERT 도면

A2 조작자의 순수 실행시간은 하위조작자 실행시간의 평균값, 즉 $(7+8+10+11+9+15)/6$ 으로 계산하여 10초로 보고 의사소통 시간 12초를 합하면 22초가 된다. A31 조작자의 실행시간은 순차적인 요소조작자의 수행에 걸리는 시간의 합에 지시와 완료보고에 걸리는 의사소통 시간을 더한 것과 같다. 의사소통 시간을 6.6초로 가정하면 A31의 실행시간은 $26(7.4+5+4+3+6.6)$ 초 이다.

각 수행주체에 대해 실행시간, 의사소통시간, 최대 인지부하를 계산하여 정리한 결과를 <표 6>에서 보여준다. 최대 인지부하를 계산하려면 모든 요소조작자의 분석이 완전히 이루어진 후에 각 요소조작자를 수행하는 시점에서 단기기억장치에 저장해야 하는 목표들과 장기기억장치로부터 기억해내야 하는 정보들을 세어 값을 구해야 한다. 본 예제에서는 가상적인 값들을 사용하여 구한다. 가상적인 예제이지만 발전과장의 실행시간중 의사소통시간이 차지하는 비중이 매우 높고,

'우선-01' 절차를 수행하는 동안 RO가 가장 바쁘며 인지부하도 높으며, 상대적으로 TO는 한가함을 알 수 있다. 따라서 RO는 발전과장을 제외한 운전원 중에서 가장 직무량이 많고 인지부하가 높으므로 가장 숙달되고 지식을 많이 보유한 사람을 할당하는 것이 바람직하다.

표 6. 운전원의 업무 분장과 인지부하

수행주체	실행시간	의사소통시간	최대 인지부하
발전과장	103.6	93.6	3
RO	167	78.6	4
TO	36.4	14	3
EO	120	25	3

4. 결론

원전 HMI 평가 연구의 대부분이 운전원 개인의 인지적 차원에서 이루어졌는데, 이에 비해 본 논문에서는 운전원 그룹의 인지적 차원에서 인간-기계 연계를 평가할 수 있는 DGOMS를 개발하여 적용하였다. DGOMS는 분석적 평가 기법 중의 하나인 기존의 GOMS를 확장한 것으로, GOMS 평가를 그 기반으로 하고 있는데, GOMS 평가시 각 요소 조작자에 대한 추정치가 필요하다. 하지만, 아직은 추정치로 사용할 수 있는 실증 자료가 없으므로 문헌에서 제공하는 이론적 추정치와 평가자가 주관적으로 판단한 추정치를 사용하였으므로 본 논문에서 제시하는 수치는 정량적인 의미보다는 정성적인 의미로 해석하는 것이 바람직하다.

향후에는 다양한 HMI 계통이 혼용되는 국내 원전에 적용하여 DGOMS 평가기법의 적절성을 검증할 예정이며, DGOMS의 장단점을 파악하여 이를 개선하려고 한다. 아울러 평가 결과를 축적하여 장치 HMI 표준을 설정하는데 활용되도록 하며, 장기적으로 운전원들의 인지적, 물리적 특성을 고려한 HMI체계를 갖추어 원전의 안전성을 높이고 성과를 향상시키는 데 이바지하고자 한다.

참고문헌

- [1] Card, S. K., Moran, T. P., and Newell, A., (1980), The Keystroke-Level Model for User Performance Time with Interactive Systems. Communications of ACM, 23(7), pp. 396-410.
- [2] Card, S. K., Moran, T. P., and Newell, A., (1983), The Psychology of Human-Computer Interaction. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- [3] Endestad, T. and Meyer, P., (1993), GOMS Analysis as an Evaluation Tool in Process Control: An Evaluation of the ISACS-1 Prototype and the COPMA System, Technical Report HWR-349, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- [4] John, B. E. and Gray, W. D., (1995), GOMS Analysis for Parallel Activities, Tutorial Notes, CHI, 1995 (Denver, Colorado), ACM.
- [5] Kieras, D. E., (1988), Towards a Practical GOMS Model Methodology for User Interface Design, Handbook of Human Computer Interaction. M. Helander, (ed.). Elsevier.
- [6] Kieras, D. E. and Polson, P. G., (1985), An Approach to the Formal Analysis of User Complexity, International Journal of Man-Machine Studies, vol. 22., pp. 365-394