2000 추계 논문집
한국원자력학회

흐름도와 성공수목도로 표시되는 전산화 절차서 ImPRO 의 설계특성

A Computer Based Procedure Rendered in Flowchart and Success Logic Tree.

정연섭,신영철,오응세,성찬호,강성곤

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 305-380

요약

흐름도로 절차서 윤곽을 나타내며 성공수목도로 수행하여야 할 항목을 열거하는 절산화 절차서 ImPRO 를 개발하였다. 이 표현 방식은 절차서의 숲과 나무를 동시에 보여줌으로써 절차서 이해를 향상시킨다. ImPRO 에서는 절차서를 Procedure, Step, ACheck, Instruction 이라는 구성요소로 계층적으로 분해하여 Step 과 ACheck 은 흐름도에, ACheck 과 Instruction 은 성공 수목도에 나타내었다. ImPRO 에 구현된 흐름도는 잘 정의된 심벌과 화살표로 2 차원적으로 표시되며 한 절차서 안에서의 비 순차적 이동, Step 의 펼침과 접힘이 가능하다. 성공 수목도는 참, 거짓, 모름의 3 가지 상태를 입력 받아 N out of M 의 논리연산자를 통해 출력된다. 이 계산은 자동화되어 있지만 운전원이 계산된 값을 번복할 수도 있다. 성공 수목도의 항목을 운전원이 제대로 수행하면 다음 단계로 이동할 수 있는 권한이 생긴다. ImPRO 는 자동화의 정도가 매우 높지만 동시에 운전원에게 그 논리가 투명하다. ImPRO 는 절차서 기술 언어(PML)로 쓰여진 어떤 절차서 문서도 실행시킬 수가 있다.

Abstract

A computer based procedure called ImPRO has been developed. The procedures are rendered in a flowchart and a success tree. The flowchart shows the skeleton of a procedure, whereas the success tree shows details of the procedure. Two presentations can enhance understandings of procedures. ImPRO decomposes a procedure hierarchically: Procedure, Step, ACheck, and Instruction. The higher level element Procedure and ACheck are shown in the flowchart, and the lower level Instructions are presented in the success logic tree. The flowchart of ImPRO consists of well-defined five symbols and arrows. The flowchart can be collapsed, expanded, and scrolled. The success logic tree works on the three statuses: true/false/unknown. And all the instructions of the success logic tree are combined by N out of M logic

operator. The logic can be calculated by computer, but human operators can override the result. Even though ImPRO has high level of automation, the automation logic is transparent to humans.

1. 서론.

운전원이 절차를 수행할 때 절차서의 올바른 이해와 현재의 발전소 상태의 정확한 이해가 필수적이다. 만일 둘 중의 하나라도 잘못되며 발전소를 잘못된 방향으로 동작시킬 수가 있다. 발전소 상태에 대한 이해는 일반적으로 제어 감시시스템에서 제공하고 현재 기술로도 만족할 만한 수준에 있다. 다만 시스템의 오작동에 대한 예방으로 신뢰도를 향상시키는 노력은 꾸준히 계속된다. 한편 절차의 해석과 이 절차의 적용여부는 도와줄 운전 지원시스템은 수 많은 노력에도 불구하고 상용화되지 못하고 있는 실정이다.

전통적으로 발전소 절차서는 종이에 기록되어 왔다. 컴퓨터가 발달한 현재에도 정보의 전달 매체로서 책의 가치가 줄어들지 않았듯이 종이에 기록된 절차서가 컴퓨터 화면에 나타나는 절차서보다 전적으로 열등하다고 단정하기는 어렵다. 그러나 종이의 정적인 문서는 발전소 정보와 통합되기 힘들며 읽는 부담이 많고 절차서의 관리가 힘들다는 약점이 지적되어 왔다. 그래서 웨스팅하우스[1], N4[2], 노르웨이의 HRP[3]등에서는 이미 전산화 절차서를 개발하여 왔으며 현재에도 개선 중에 있다. 국내에서도 전문가 시스템을 사용하여 비상운전 절차서를 해석하여 운전원에게 적용할 조치를 보여주는 연구가 있었다.

웨스팅하우스의 COMPRO 는 관계형 데이터베이스에 종이 절차서 문장을 그대로 넣었다가 수행 때에 화면에 보여준다. 그러나 문장의 해석이나 문장의 수행은 전적으로 운전원에게 의존하는 자동화 정도가 낮은 시스템이다. N4 의 전산화 절차서는 절차를 흐름도로 표시하고 자동적으로 다음 단계로 이동하여 가는 자동화 수준이 높은 전산화 절차서이나 발전소 상태에 적절하지 못한 절차서가 자동적으로 적용되었다고 보고된 적이 있다. HRP 의 COPMA 절차서는 잘 정의된 문법으로 절차서를 보여주고 있지만 흐름도의 이해가 힘들고 명령들이 너무 세분되어 있다는 비판을 받는다.

전산화 절차서가 원자력발전소에 도입되는 경향에 맞추어 미국의 원자력 규제기관이 NRC 에서는 전산화 절차서에 대한 요건을 발표하였다[4]. 이 요건의 핵심은 절차서 표현의 일관성, 적절한 자동화 정도, 발전소 정보와 통합, 문맥 전환을 최소화하도록 요구한다. 이 요건의 궁극적인 목표는 사고와 같이 긴박한 상황에서도 절차를 쉽게 이해하기 위함이다.

ImPRO 는 흐름도와 성공수목도로 표시되는 일관된 사용자 인터페이스를 제공한다. 또 자동평가가 가능한 성공 수목도와 Instruction 수행을 돕는 정도의 자동화 수준을 유지한다. 뿐만 아니라 발전소 동적 정보가 성공 수목도와 같이 병렬로 표시되고 문맥전환이 덜 되도록 절차서 수행 기본 단위를 최대화 시킨 시스템이다.

2. 절차서의 계층적 구조.

동시에 처리할 수 있는 작업의 단위는 한정되어 있고 작업과 작업 사이에 인과관계가 있으므로 절차서를 단계로 나눌 필요가 있다. 이 단계의 분할은 이미 종이 절차서에서도 나누어져 있으므로 그대로 사용하여도 무방하다. 종이 절차서는 단계의 내용이 텍스트 문장으로 기술되어 있으므로 단계의 하부 계층에 대한 어떤 규정은 없다. 결국 운전원의 해석에 전적으로 의존하기 때문이다. 그렇지만 ImPRO는 컴퓨터의 지원을 받아 흐름도와 성공수목도로 나타나므로 단계의 하부 계층이 잘 정의되어야 한다. 그림 1에 최상위 노드인 Procedure에서 잎 노드인 각 Instruction까지 표시되어 있다. ImPRO의 절차서 파일은 그림 1의 구조에 기반하여 XML(Extended Markup Language)로 정의된다.

Step 하부에는 Action과 Check라는 두개의 원소가 있다. Action은 발전소 상태를 변경시킬 수 있는 Message, Caution, Set, Finish, Input, Initiate의 명령으로 구성되고 Check은 ManCheck, AutoCheck, Caution과 같이 발전소의 상태를 판단하는 명령으로 구성된다. Action과 Check는 하부구조를 묶는 바구니로 역할을 하지만 ImPRO에서는 또 다른 중요한 의미가 있다. ImPRO의 수행단위(이동단위)는 잎 노드의 명령들이 아니고 다름아닌 Action/Check이기 때문이다. 이 Action/Check는 잎 노드를 통합시킬 수 있는 능력이 있다. 잎 노드를 수행단위로 두지 않으므로 절차서 수행시 문맥의 전환 빈도를 최소화 시킬 수 있다.

절차서에서 현재의 운전원이 수행중인 부분이 그림 1에서 굵은 수직선으로 나타난다. 이 선은 운전원이 현재 처하여 있는 문맥(Context)을 나타낸다. 이 굵은 선은 잎 노드까지 연장되지 않는다. 앞에서 언급했듯이 Action/Check가 하위의 Instruction를 통합시킬 수 있는 능력이 있기 때문이다.

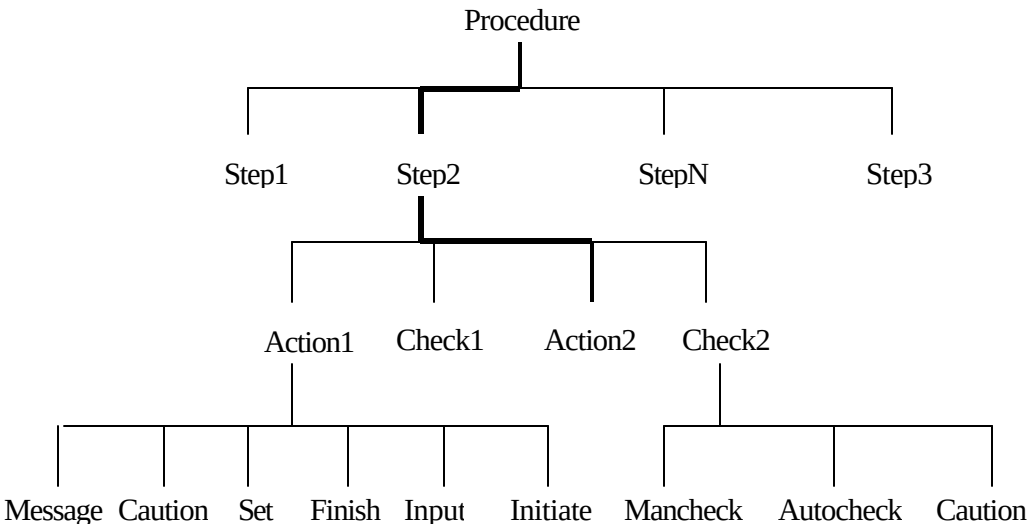

그림 1 ImPRO 절차서 구성 요소의 계층적 구조.

3. 절차서의 구성요소와 사용자 화면과 대응

운전원이 쉽게 절차서를 수행하려면 일관된 사용자 인터페이스를 제공하여야 한다. 일관된 인터페이스의 사용 규칙을 일단 습득하고 나면 다양한 어떤 절차서도 쉽게 운전할 수 있기 때문이다. 화면에 나타나는 버턴이나 시각적인 심벌은 운전원에게 그 의미를 해석해야 하는 인지적인 부담을 언제나 유발한다. 만약 심벌 사이의 배치나 시각적인 모양이 시시각각으로 변화된다면 그때마다 새로운 부담이 발생된다. 그러나 공통적인 큰 틀이 유지되는 가운데 절차서 수행의 문맥만 변화된다면 그 부담은 최소화 된다. ImPRO 는 절차서 구성 요소에 따른 사용자 화면을 대응시켜 규칙성을 주었다.

그림 2 에 ImPRO 의 사용자 인터페이스가 나타나있다. 한 스크린을 3 개의 작은 프레임으로 나누어 동시에 3 개의 정보를 보여주도록 되어있다. 이와 같은 화면의 분할은 워크스테이션 기반 주제어실의 약점인 항해의 빈도를 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다. 즉 3 개의 정보를 병렬로 보여줌으로써 항해의 빈도를 1/3 로 줄일 수 있다.

이 프레임들의 배치는 고정되어 있으며 경계선은 유동적이다. 고정된 배치는 공간 활용을 극대화 시키고 엔트로피를 감소시킨다. 가령 각 프레임의 타이틀을 제공하지 않더라도 운전원은 쉽게 그 프레임의 목적을 쉽게 이해 할 수 있는 장점이 있다. 또 유동적인 경계선으로 인하여 한 프레임에서 보여주는 정보의 노출량을 조절할 수 있다.

ImPRO 의 왼쪽 화면은 절차의 전체적인 구성을 흐름도로 보여준다. 그림 2에 나타나는 흐름도는 그림 1의 첫번째와 두번째의 수평선을 따라 발현된 그림이다. 더 하위의 절차서 구성요소는 흐름도의 복잡성을 야기시킨다. 또 굵은 수직선은 현재 운전원이 수행 중인 절차서 문맥을 보여주는데 흐름도 프레임의 중앙에 나타나도록 스크롤된다. 이 흐름도의 목적은 절차서의 숲을 보여주는데 있다.

ImPRO 의 오른쪽 상단화면은 그림 1의 세번째 수평선에 묶인 Instruction 을 성공 수목도로 보여준다. 이 성공 수목도를 통하여 실제 절차가 수행된다. 이 수목도는 왼쪽 흐름도의 현재 수행 중인 Action/Check 를 더 자세히 보여주는 화면이다. 즉 절차서의 나무를 보여주고 있다.

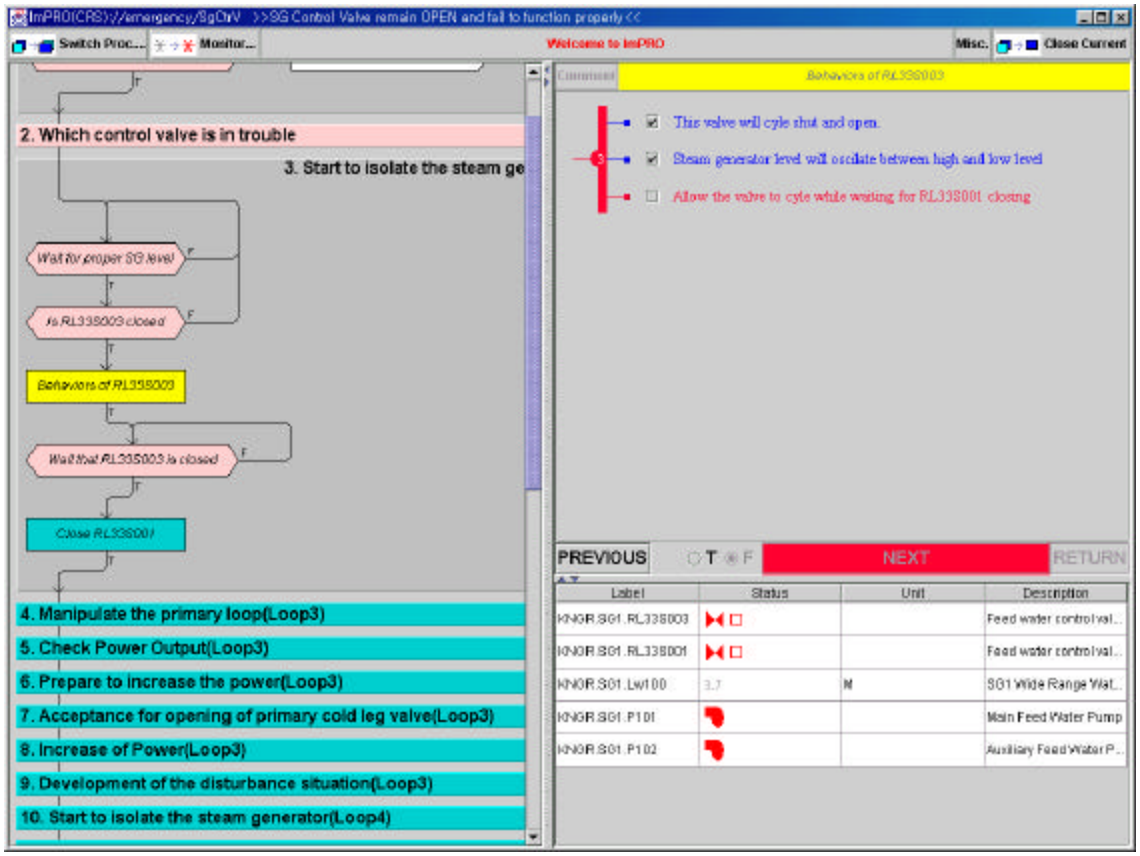

그림 2 ImPRO의 사용자 인터페이스

ImPRO의 오른쪽 하단 화면은 현재 수행 중인 Action/Check에 필요한 정보를 그래픽 심벌로 보여준다. 이 심벌은 이미 제어/감기 시스템에서 사용중인 모양과 일치시키기 위하여 심벌을 발전소에서 재작성할 수 있도록 설계되어 있다. 라벨은 발전소-시스템-계기라는 계층적 구조로 표시되고 단위, 설명까지 포함시키어 쉽게 인지되도록 설계하였다.

4. 흐름도

흐름도의 작성 원칙은 그림 1의 첫번째 수평선 따라 각 Step이 그려지고, 두 번째 수평선 따라 Action/Check이 그려진다. Step의 그림은 축소와 팽창이 가능하며 팽창되었을 경우에만 그 안에 Action/Check이 나타난다. 즉 팽창과 축소를 통하여 절차서 이해의 깊이를 조절할 수 있다. 이 흐름도는 페이지 단위로 나누어져 있기보다는 연속적인 화면에 표시되고 스크롤이 가능하다.

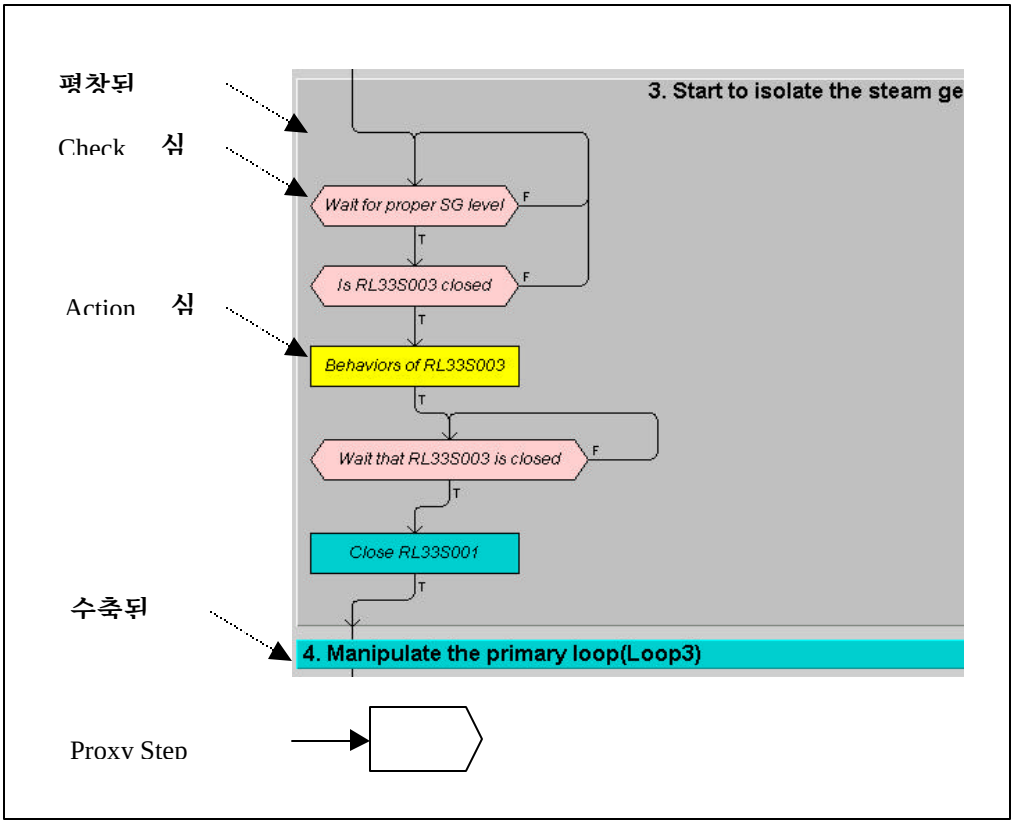

그림 3 흐름도에서 나타나는 심벌의 종류 및 모양.

이 흐름도는 그림 3과 같이 다섯 종류의 심벌로 구성되어 있다. 팽창된 Step 은 프레임을 꽉 채우는 사각형으로 나타나고, 축소된 Step 은 가로는 같지만 높이가 다른 사각형으로 나타난다. 운전원이 마우스로 클릭하면 이 팽창과 축소는 교대된다. 모든 스텝이 축소되면 약 20 여개의 Step 이 보이고 팽창되면 서너 개의 Step 이 자세히 나타난다.

팽창된 Step 심벌 안에는 Action 과 Check 가 있으며 각각 사각형과 다이아몬드형 사각형으로 표시된다. 이 심벌은 그림 1의 Action 과 Check 에 완전히 대응되므로 Action 형 내용을 가진 Check 나 Check 형 내용을 가진 Action 은 흐름도에 개입될 수 없다. 즉 내용과 심벌은 항상 일치된다. 다섯번째 심벌은 프록시 Step 으로 화살표의 목적지가 현재나 다음 Step 에 있지 않고 떨어져 있을 경우 그 목적지의 Step 을 프록시 Step 심벌로 나타낸다. 프록시 심벌은 흐름도를 단순화시켜 절차의 이해를 증진시킨다.

이들 심벌은 화살표로 서로 연결되어 있다. 화살표는 한 작업이 끝나고 다음 작업으로의 이동을 나타낸다. 화살표는 항상 참과 거짓의 명찰이 붙여 있어 현재 작업의 참 거짓여부에 따라 다음의 작업이 결정된다. 현재 작업의 상태는 참 거짓 모름의 3 가지 상태를 가질 수가 있으며 모름인 상태에서는 다음 작업으로 전이가 금지된다. 그러므로 금지된 전이는 화살표로 나타낼 필요가 없다. 또 Action 인 경우 절차서 수행을 완결 후에만 전이가 일어나도록 참인 경우에만 화살표가 표시된다.

COPMA 에서 적용된 흐름도와 비교하면 ImPRO 의 흐름도는 2 차원이다. 심벌들이 2 차원 평면에 배치되므로 COPMA 의 일 차원 배열보다 화살표끼리 서로 부딪치지 않고 일의 흐름이 잘 보인다.
각 심벌 안의 텍스트는 절차의 수행 여부에 따라 동적으로 색채가 바뀐다. 일반적으로 현재의 수행단계는 구별이 뚜렷하게 표시된다. ImPRO 는 수행된 단계, 수행 중, 수행되지 않은 단계에 따라 색채를 구별한다. 심벌 안의 텍스트는 각 Action/Check 를 가장 대표하는 말로서 나타난다.
흐름도의 또 다른 기능은 절차의 비 순차적 접근을 제공한다. 운전원은 자신이 원하는 단계를 흐름도를 통해 쉽게 접근하여 그 단계부터 수행할 수 있다.
절차가 수행되어 가면서 현재 수행중인 Step 도 바뀌게 된다. 다음 스텝은 화살표에서 지시된 Step 으로 이동하게 된다. ImPRO 는 자동으로 흐름도를 스크롤하여 운전원이 마우스를 클릭해야 되는 부담을 줄여 주었다.
화살표 옆에는 간혹 *가 붙여있다. 이 별표 표시는 그 Check 가 계속적 수행 Check 임을 나타낸다. ImPRO 는 일반적으로 현재 수행 중인 Action/Check 를 평가하지만 계속 수행 Check 로 선언되면 그 Check 는 그 절차서가 수행되는 상태에서는 계속적으로 평가된다.

5. 성공수목도

Action/Check 의 하부 Instruction 은 성공수목도로 표시된다. 운전원은 이 성공 수목도를 통하여 운전을 한다. 운전의 최소 작업단위는 하부의 Instruction 이지만 문맥의 이동 단위는 성공 수목도인 Action/Check 이다. 그러므로 하부 Instruction 을 이동 단위로 두는 다른 전산화 절차서와 비교하면 ImPRO 의 경우 문맥의 전환이 최소화되었다고 볼 수 있다.
성공 수목도는 하부 Instruction 을 N out of M 연산자로 통합하여 준다. 많은 절차서를 분석하여보면 N out of M 연산자에 의하여 묶여져 있음을 발견한다. 발전소의 계통들은 일반적으로 계기 고장을 염두에 두고 이중화 다양성의 개념으로 설계되므로 N out of M 연산자의 발견은 전혀 이상하지 않다
이 연산자는 참, 거짓, 모름의 3 가지 상태에 작용한다. 모름은 참 거짓을 판단하기에 정보가 불충분함을 의미한다. 가령 가압기의 압력이 설정치 이상인지를 판단하는 문장이 있다면 가압기의 실제값이 도착하기까지는 모름이 된다. 운전원이 판단을 입력해야 하는 모든 Instruction 은 초기에는 모름이다.
이 연산자의 연산규칙은 다음과 같이 정의된다. 만약 참인 명령이 x, 모르는 명령이 y, 거짓인 명령이 M –x –y 라고 하면

x > = N 이면 N out of M 연산자는 참이고,
x+y > = N 이면 N out of M 연산자는 모름이고,
그 외는 거짓이다.

이 성공 수목도는 Action 과 Check 로 대표되는 두 종류의 타입이 있다. 이 두 타입은 단지 잎 노드인 Instruction 모양에만 차이가 있을 뿐 다른 부분은 모두 동일하다. 이와 같은 일관성은 성공 수목도가 인지공학적으로 가치 있는 사용자 인터페이스임을 보여준다. 전통적으로는 Check 항목에는 참/거짓을 주었지만 Action 에는 참/거짓을 부여하지 않았다. 그렇지만 ImPRO 에서는 Action 마저도 참/거짓을 부여하여 통일된 사용자 인터페이스를 만들었다. 이와 같이 서로 다른 객체들 사이에서 공통의 특성을 찾아내거나 부여하여 일관된 사용자 인터페이스를 만드는 노력은 현대 설계의 특성이다.

부울 대수에 기반한 논리의 Check는 많다. 그렇지만 ImPRO 의 성공 수목도는 부울 대수를 포함시키면서 훨씬 확장된 개념을 지닌다. 앞에서도 언급했듯이 3 가지 상태와 그에 따른 대수 논리, Action 에 따른 논리의 확장이 그것이다. 이런 확장에도 불구하고 성공 수목도는 단순하다. 잎 노드에서 최상위 노드로 이동하는 추론의 흐름은 성공 수목도를 매우 이해하기 쉬운 인터페이스로 만들고 있다. 선의 교차나 순환적 관계에 있지 않다.

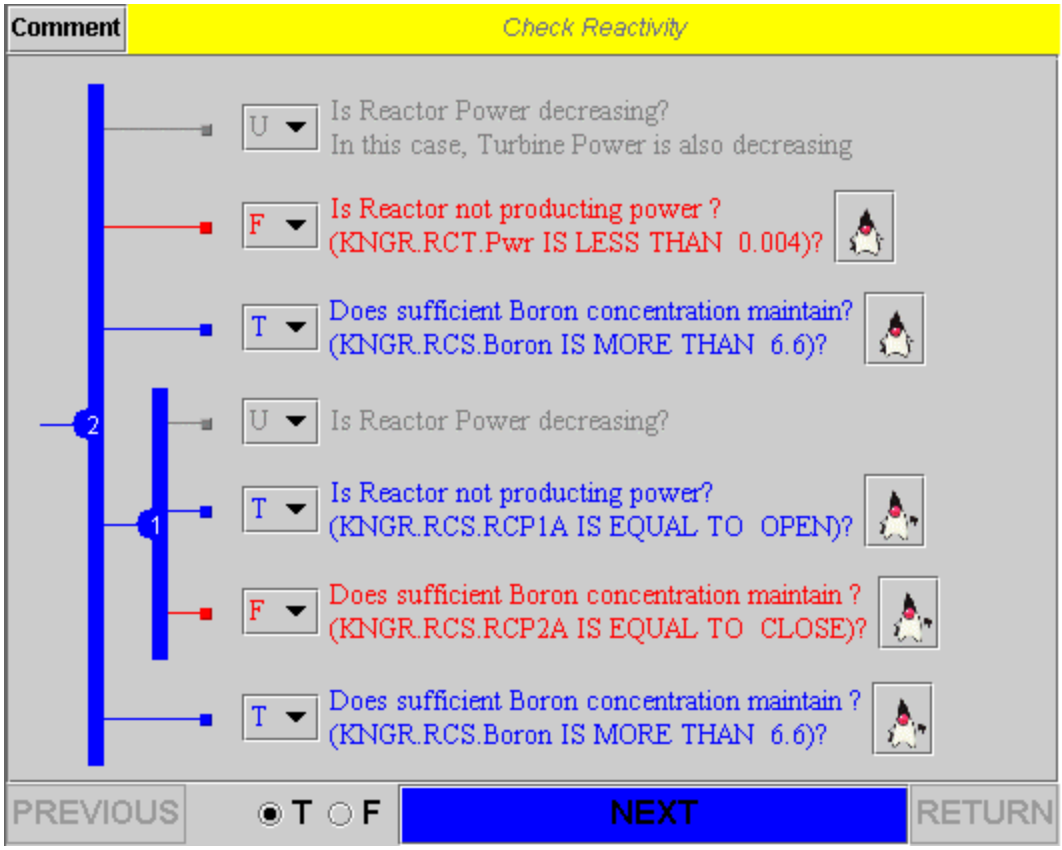

그림 4 Check 형 성공 수목도

그림 4는 Check 형 성공 수목도를 보여준다. 그림 1에 의하면 Check는 세 종류의 명령만

있으므로 세 종류의 잎 노드가 가능하다. 운전원 입력을 받을 수 있는 3상태 토글 버튼과 일반 텍스트 문장 그리고 애니메이션 심벌의 조합으로 구성된다. 애니메이션 심벌은 그 명령이 컴퓨터에 의하여 판단되고 있음을 보여준다. 운전원은 이 심벌을 비 활성화 시킨 후에 자신의 판단을 내릴 수가 있다.

ImPRO는 문장을 판단할 수 있는 강력한 수치 논리 연산 엔진을 가지고 있다. 발전소의 아날로그 값을 가공 비교하는 사칙연산자와 밸브의 OPEN/CLOSE, ON/OFF 상태를 판단할 수 있는 엔진이다. 절차서 파일에 기록된 연산식을 읽어 수행 중에 평가하여 준다.

문장을 판단하는 능력이 있음에도 불구하고 ImPRO는 결코 그 논리가 숨겨져 있지 않다. 운전원은 판단 결과뿐만 아니라 그 식까지도 성공 수목도를 통하여 볼 수 있으므로 자동화가 운전원은 결코 제어 루프에서 소외되지 않는다.

이와 같은 자동 판단은 인적 오류가 많은 사칙 연산과 같은 부분은 컴퓨터에 맡기고 운전원은 확인과 검증의 역할자로의 변화를 의미한다. 또 이미 성취되어 있는 절차라면 운전원은 더 이상 읽지 않고도 다음 단계로 넘어 갈수 있는 여건을 준다. 사고와 같이 인적부담이 가중된 상태에서 자동화를 통한 혜택은 운전원에게 더 상위의 목표를 생각할 시간적 여유를 준다.

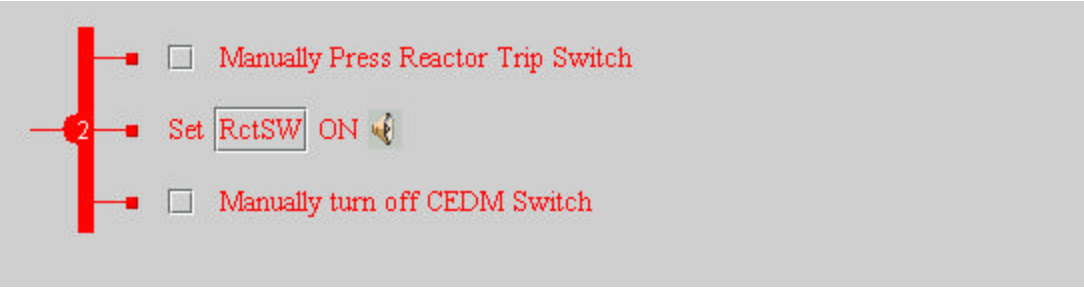

그림 5 Action 형 성공수목도

그림 5는 Action 형 성공 수목도를 보여준다. 그림 1에 의하면 Action 은 여섯 종류의 잎 노드 명령을 가지고 있으며 토글 버튼, 일반 텍스트, 입력 창들의 조합으로 구성된다. 이 잎 노드의 초기 값은 거짓이나 운전원이 적절히 수행하고 나며 참이 된다. 수행 중에는 컴퓨터가 제어 신호를 보내거나 절차서를 불려 주는 등의 도움을 준다. 예를 들면 Initiate 명령을 수행하면 새로운 절차서가 나타나고 Set 명령을 수행하면 제어 시스템에 제어 명령을 보낼 수가 있다.

성공 수목도의 잎 노드는 하위의 명령에 따라 다른 형태를 가지나 상위노드는 연산자 N out of M 논리에 따라 동일한 특성을 가진다. 3가지 상태에 따른 색채의 변화, 선과 사각형의 기학학적 모양, 재귀적인 구조 등 완전히 동일하다.

유일한 Action 과 Check의 차이라면 최상위 노드의 값에 따라 다음 상태로 전이 조건이 다른 점이다. Action 에서는 최상위 노드 값이 거짓이면 다음 전이가 불허된다. 그러므로 흐름

도에서 Action 심벌은 오직 하나의 출구를 갖는다. 그러나 Check는 참/거짓에 따라 두개의 출구를 가질 수 있다.
이 성공 수목도는 완전히 동적이다. 발전소의 상태나 운전원의 입력에 따라 동적으로 바뀐다. 운전원 입력 후에는 즉시 바뀌고 발전소 상태에 따라서는 약 2초의 시간 간격을 두고 바뀐다.

6. 결론

자동화 정도를 높이면서 운전원의 인지능력이 저하되지 않는 전산화 절차서 ImPRO를 개발하였다. 절차의 전체적인 골격은 흐름도로 표시되고 상세 수행 내용은 성공 수목도로 나타난다. 흐름도는 팽창과 수축이 가능한 2차원 공간에 나타난다. 성공 수목도는 N out of M의 연산자에 의해 통합되어 있으며 10여개의 Instruction 명령이 있다. 명령에 따라 각각 다른 사용자 인터페이스를 가지고 참/거짓/모름의 3가지 상태를 가진다. ImPRO의 데이터 파일은 XML로 기록되고 ImPRO의 수행 엔진과 분리되어 있다. ImPRO를 평가하기 위하여 발전소 트립 후 우선 절차를 작성하여 ImPRO의 사용성을 평가하였다. 홈페이지(http://www.kepri.re.kr/~impro)를 통하여 ImPRO를 다운 받아 평가할 수 있으며 약 8개월간 60건의 다운로드를 국내외적으로 기록하고 있다.

7. 참조 문헌

1. Lipner M.H. and Kerch S. P., Operational Benefits of an Advanced Computerized Procedures System. IEEE, 1995.
2. Reynes L. and Beltranda G., A Computerized Control Room to Improve Nuclear Power Plant Operation and Safety, NUCLEAR SAFETY, 1990, 31(4), 1990.
3. Handelsby F., Ness E., and Teigen J., OECD HALDEN REACTOR PROJECT: COPMA-II On-Line Functional Specification, HWR-319,1992.
4. O'Hara J.M., Higgins J.C., Stubler W.F., and Kramer J., Compurt-Based Procerdures:Technical Basis and Human Factors Review Guidance, NUREG/CR-6634(BNL-NUREG-52564), 2000.