2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

IPE 결과를 이용한 운전원 훈련프로그램, TRAIN 1.0 의 개발

Development of Operator Training Programs, TRAIN 1.0 Using Individual Plant Examinations

제무성
한성대학교
서울시 성북구 삼선동 2-389

하재주
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

중대사고관리는 원전에서 노심용융사고의 예방이나 약화를 위하여 대체자원이나 인적 전략을 이용하는 것이다. 본 논문은 중대사고시 효과적인 대처를 위하여 제어실 요원이나 TSC Staff 의 중대사고관리훈련을 위하여 TRAIN (Training pRogram for AMP In NPP)을 개발하였다. TRAIN 은 참조원전의 IPE 결과를 이용하여 중대사고현상 KB 와 중대사고시나리오 KB 그리고 필요정보를 이용한 사고관리 절차서로 메뉴를 구성되어 있다. 본 논문을 발표되는 TRAIN 은 제어실 요원이나 TSC Staff 에게 중대사고 현상에 관한 지식교육과 나아가서 발전소의 취약성과 높은 스트레스 하에서의 문제해결 능력을 제고시키는데 기여할 수 있을 것이다.

Abstract

Severe accident management can be define as the use of existing and alternative resources, systems, and actions to prevent or mitigate a core-melt accident in nuclear power plants. TRAIN (Training pRogram for AMP In NPP), developed for training control room staff and the technical group, is introduced in this paper. The TRAIN composes of phenomenological knowledge base (KB), accident sequence KB and accident management procedures with AM strategy control diagrams and information needs, which are produced from the IPE results of a reference plant. This TRAIN might contribute to training them by obtaining phenomenological knowledge of severe accidents, understanding plant vulnerabilities, and solving problems under high stress.

1. 서론

원전의 안전성 확보는 사고 시 누출되는 방사능의 재해로부터 국민의 건강과 재산을 보호하는 차원에서 매우 중요하다. 중대사고를 예방하고, 중대사고시 그 피해를 최소화시키기 위하여 중대사고관리가 필요하다. 원전의 중대사고관리 요소는 사고관리 전략의 분석, 중대사고관리 지침서 및 절차서 개발과 중대사고훈련으로 구성된다. SECY-89-012 에 의하면 중대사고 훈련은 발전소 비상요원이 중대사고의 진전과 방사선물질의 방출을 관리하기 위한 전략에 친숙하게 함으로서 중대사고를 예방하거나 사고 시 그 피해를 최소화하는데 기여하게 한다. 이를 위해 기존의 비상대응훈련에 최소한의 영향을 끼치면서 중대사고관리 비상요원을 대상으로 교육훈련을 수행하여야 하며, 이를 위해 중대사고훈련을 위한 지식기반의 구축이 필요하다.

최근 경수로원전의 사고관리 기술이 실용화 단계에 접어 들었고 개발된 중대사고관리 지침서를 근간으로 발전소별 사고관리 절차서가 마련되고 있는 반면 실제로 사고관리를 수행할 운전원의 사고관리 훈련프로그램에 관련된 연구는 부진하며 사고관리 담당자들을 위한 훈련 프로그램이 미개발 상태에 있다.

중대사고 훈련은 발전소 비상요원이 중대사고의 진전과 방사선물질의 방출을 관리하기 위한 전략에 친숙하게 함으로서, 중대사고를 예방하거나 사고 시 그 피해를 최소화하는데 기여하게 한다. 이를 위해 기존의 비상대응훈련에 최소한의 영향을 끼치면서 중대사고관리 비상요원을 대상으로 교육훈련을 수행하여야 한다. 그러나 사고관리를 수행할 운전원의 사고관리 훈련 프로그램에 관련된 연구는 상대적으로 부진한 상태에 있었으며 현재 개발되어 사용할 수 있는 훈련프로그램이 없는 상태이다. 본 논문에는 html 언어와 Web 상에서도 구현이 가능한 CD-ROM Title 형태로 개발된 중대사고훈련 프로그램인 TRAIN 1.0 을 소개하였다.

2. 국내외 기술개발 현황

SECY-89-012 에 의하면 중대사고 훈련은 발전소 비상요원이 중대사고의 진전과 방사선물질의 방출을 관리하기 위한 전략에 친숙하게 함으로서 중대사고를 예방하거나 사고시 그 피해를 최소화하는데 기여하게 한다. 이를 위해 기존의 비상대응훈련에 최소한의 영향을 끼치면서 중대사고관리 비상요원을 대상으로 교육훈련을 수행하여야 한다. 그런데 경수로원전의 사고관리 기술이 현재 실용화 단계에 접어 들었고 개발된 중대사고관리 지침서를 근간으로 발전소별 사고관리 절차서가 마련되고 있는 반면 실제로 사고관리를 수행할 운전원의 사고관리 훈련프로그램에 관련된 연구는 부진하며 사고관리 담당자들을 위한 훈련 프로그램이 미개발 상태에 있다.

그러나 기존의 비상대응훈련에 최소한의 영향을 끼치면서 중대사고관리 비상요원을 대상으로 교육훈련을 수행하여야 함에도 불구하고 사고관리를 수행할 운전원의 사고관리 훈련 프로그램에 관련된 연구는 상대적으로 부진하며 현재 개발되어 사용할 수 있는 중대사고 현상에 관한 지식기반이 취약하다.

국내의 경우 1993 년 이후 중장기 과제의 일환으로 KAERI, KINS, KOPEC, KEPRI 등의 연구기관에서 사고관리 기술개발 연구가 수행되어 오고 있다[1-4]. 이 연구의 결실로 현재 한국표준 원전에 대하여 중대사고 지침서가 개발완료 단계에 있으며, 향후 몇 연내 이 중대사고 지침서를 근간으로 발전소별 사고관리 절차서가 이어서 마련될 것이다. 그러나 전술한 바와 같이 중대사고 훈련도구지식기반 연구는 매우 열악한 상태로 참고할 만한 연구결과가 발표되지 못하고 있다.

KEPCO 에서는 대부분의 개별 원전에 대하여 1 단계 PSA 와 IPE 를 수행하였으며 최근에 고리 1 호기 등 잔여 원전에 대해서도 최근 PSA 수행을 이미 시작하였다. 중대사고 현상관련 연구는 KAERI 를 중심으로 다양한 연구가 이미 완료되었거나 수행 중에 있는 것에 반하여 사고관리 훈련 프로그램에 관련된 연구는 현재 거의 수행되지 않는 취약한 상태이다.

국제적으로 중대사고문제 종결계획의 일환으로 각 발전소에서의 자체적인 사고관리계획을 수립하고 이행하는 것을 권하고 있는 실정이며 사고관리계획의 한 요소인 사고관리 훈련프로그램의 이행은 먼저 훈련프로그램의 개발이 선행되어야 한다. 프랑스에서는 Simulator 를 이용하여 EdF 훈련센타에서 1 년 주기로 운전원과 사고관리에 관련된 조직

원들이 함께 훈련하고 있으며 일본에서도 Simulator 를 이용하여 비상지원 Staff 과 운전원을 위한 교육/훈련 계획을 수립중에 있다. 캐나다에서도 노심손상을 포함하는 심각한 중대사고를 모의하지 못하는 Simulator 의 한계로 인하여 Walk-through 형식의 약식훈련을 계획중에 있다[5-8]. 스웨덴에서도 Simulator 가 노심손상이 발생하는 모든 사고를 모의하지 못하는 한계점 때문에 효과적인 훈련도구를 개발 중에 있으며 SRO 를 포함한 광범위한 사람들이 참가하여 비상운전절차서에 따라 일년주기로 훈련을 실시하고 있다. 스웨덴의 중대사고관리 Training 개념은 여러 가지 요소를 포함하고 있는데 운전원 및 원전관리자의 훈련은 중대사고 현상, 비상운전절차서의 근거 및 내용, 사고관리를 위한 기술적 사항, 계통 성능 및 원전 비상조직 등의 교육을 포함하고 있다.

본 연구를 통해서 사고관리 훈련프로그램을 위한 기반기술을 개발하고 효과적인 중대사고관리 훈련의 이행을 위한 기초자료로 중대사고 훈련도구의 지식기반기술을 구축하였다.

3. TRAIN 1.0 의 구성

3.1 기본내용

기본적인 중대사고시나리오 구성은 참조원전(영광 3&4)에 대하여 기 수행된 IPE 결과를 이용하였다. 노심손상빈도를 기준으로 기여도가 큰 LOCA, Total Loss of Feedwater, 소외정전사고 등 중대사고 시나리오에 대하여 3 단계(정성적단계, CET 단계, DET 단계)로 구분하여 단계별 중대사고시나리오 KB 를 구축하였다. 즉, 원자로파손사고 시나리오 도식화, ECF(조기격납건물파손) 사고 시나리오 도식화, LCF(후기격납건물파손) 사고 시나리오 도식화 하였다. 아울러 중대사고현상 KB 구축과 관련하여 IPE 와 NUREG-1150, 여러 가지 중대사고현상실험 보고서를 검토하여 중대사고시 운전원 및 원전 Staff 의 훈련을 위하여 노심 냉각 실태 KB, 노심 노출 및 용융 KB, 원자로 용기 파손 KB 를 구축하고 TRAIN 1.0 (Training PRgram for AMP In NPP 의 약자)으로 명명된 Web 용 프로그램을 개발하였다.

중대사고 현상의 주요 특징을 사고관리를 위한 훈련의 관점에서 논리를 구성하여 KB 를 구축하였다. IPE 및 PSA 결과를 적극 활용하여 LOCA, Total Loss of Feedwater, 소외정전사고 등과 같은 초기사고로 인하여 발생할 수 있는 중대사고현상을 Hierachy 시나리오 개념으로 분석하였다. 또한 중대사고현상 실험과 한국표준원전 중대사고지침서도 활용하여 개별 전략을 수행하는 데 필요한 변수들 및 관련 정보를 정리하였고 추가의 정보들도 그 수준에 따라 체계적으로 분류하였다.

참조원전의 중대사고현상 KB 와 사고 시나리오 KB 구축내용을 TRAIN-Web Program 으로 각각 모듈화 하였고 CD-ROM 타이틀을 제작하였다. 구축된 CD-ROM 타이틀의 제작과정은 시나리오회의를 통한 자료수집과 데이터 편집, 그리고 자료변환 및 입력과 html 언어에 의한 프로그래밍 과정을 거쳤다[9-11]. 그리고 Web 상에서 구현가능한지의 실형성을 검증하기 위하여 시물레이션 테스트도 이루어졌다.

방대한 양의 중대사고현상 자료와 사고시나리오자료, 사고관리전략자료, 그리고 사고관리 절차서 자료를 컴퓨터용 자료(html)로 변환하였고, 증기폭발실험 결과를 동화상으로 편집하기 위해 비디오로 촬영하는 작업도 거쳐야 했다. 이렇게 만들어진 데이터를 멀티미디어 제작 도구에서 지원하는 데이터 형태로 변환시켰다.

3.2. TRAIN 의 사용시점

중대사고 발생시 운전원의 대처능력은 원전의 안전성확보에 필수적이다. 따라서 운전원들의 경각심과 중대사고 현상과 관련한 안전지식을 교육하기 위하여 html 언어로 개발된 TRAIN 은 사고관리전략, 중대사고조건, 그리고 사고관리전략 이행확인과 관련한 계측기 등에대하여 지속적이고 체계적인 훈련을 받아야 한다. 그림 1 은 사고시작시점기준으로 언제부터 TRAIN 이 사용되기 시작하며 EOP 와의 관계가 어떠한지를 설명하고 있다. 운전원의 관심사항은 주어진 조건 하에서 어떠한 사고전개가 가능할런지와 몇가지 정황에 의하면 어떤 물리적, 현상적 상태일는지, 그리고 사고관리전략이 이행되면 어떠한 부작용이 발생가능한지가 중요한 질문사항이 된다. 이런 상황가운데 TRAIN 은 노심노출이후의 운전원 교육에 유효한 내용으로 구성되어있다.

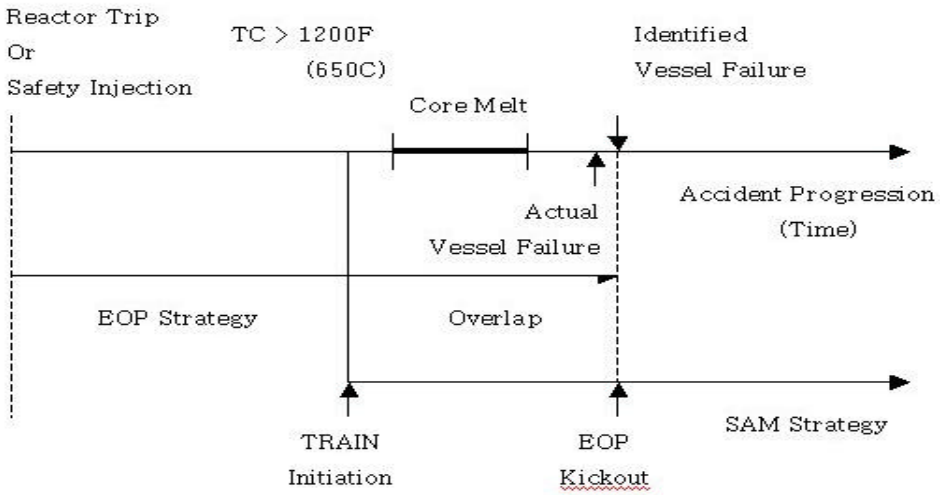


그림 1. TRAIN 이 포함하고 있는 내용의 시작시점.

3.2. TRAIN 의 구조

그림 2 에 나타낸 것과 같이 TRAIN 은 크게 3 개의 모듈과 사고관리정의 등을 설명하는 기타모듈로 구성되어있다. 중대사고현상 KB 모듈은 다시 2 부분으로 나누어지며 노내사고현상과 노외 사고현상으로 구분된다. 특히 노내와 노외사이에 경계가 애매한 경우를 별도로 분리하여 메뉴를 구성하였으며 증기폭발과 같은 현상은 실험결과를 비디오로 담은 동영상을 교육에 활용할 수 있도록 하였다. 그리고 두번째 모듈은 참조원전의 IPE 결과를 활용하여 대략적인 사고시나리오를 CET(Containment Event Tree)모델로 구현하였고 자세한 사고경위는 DET(Decomposed Event Tree)로 링크시켜 직접 CET 에서 관심있는 DET 로 Hyper-link 되게 하였다. 첫번째와 두번째 모듈이 사고시 실질적으로 사용될 사고관리지침서와 연결시킴으로서 지침서를 수행하는 가운데 중대사고현상이나 사고관리전략, 계측기 등에대하여 안전지식부족으로 불확실한 상황을 맞을 때 연계해서 사용할수 있도록 하였다. 사고관리지침서는 완화전략 1~7 까지 구성되어 있으며 개별원전의 경우 발전소고유의 사고관리절차서를 마련 해야 하고 TRAIN 도 개별원전에서는 그 상황에 맞게 개선되어야 한다.

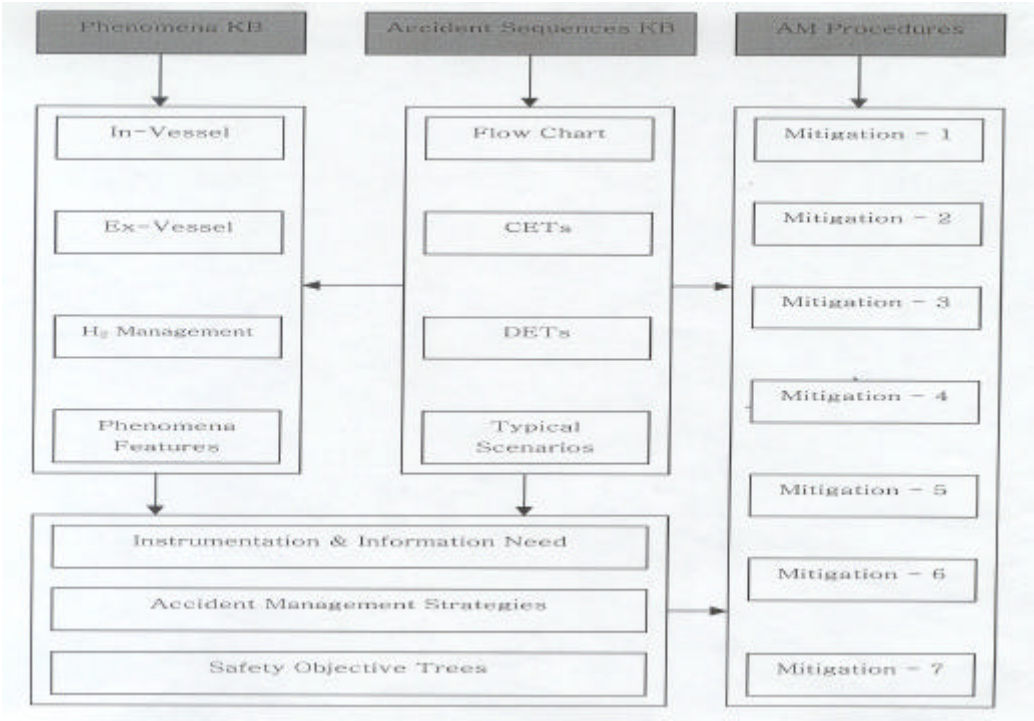


그림 2. TRAIN **의 구조.**

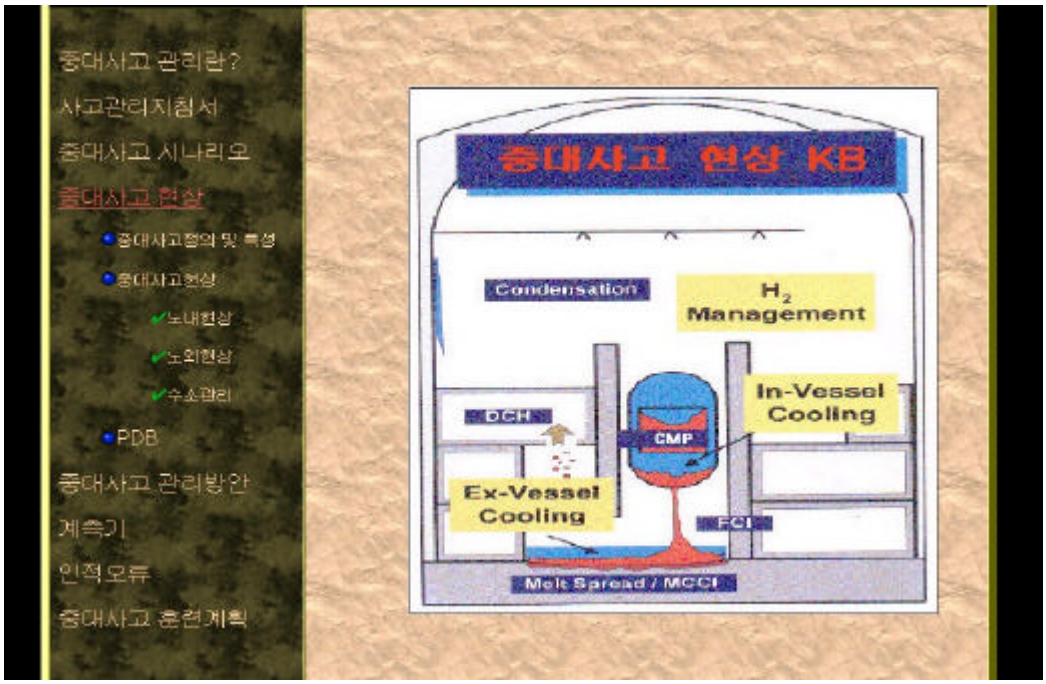


그림 3. **중대사고현상** KB (**최상위 메뉴**).

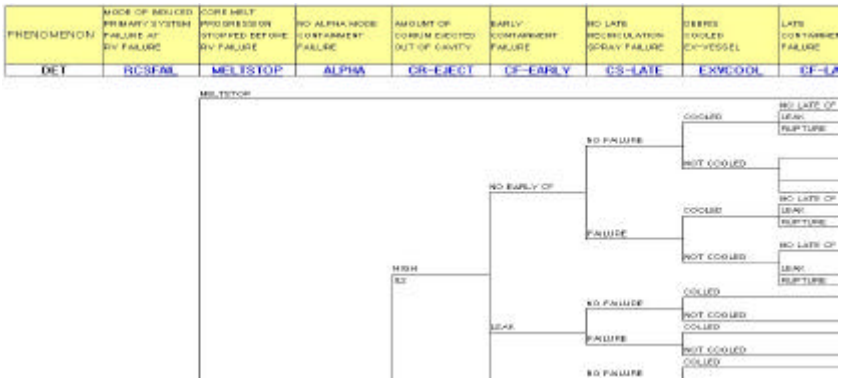
4. TRAIN 1.0 의 모듈

4.1 중대사고현상

영광 3, 4 호기를 참조원전으로 하여 사고 시나리오를 정의하고 이와 관련된 중대사고현상의 KB 를 Complete Set 을 이루도록 빠짐없이 구성하였다. TRAIN 에 구현된 대표적인 중대사고현상은 노심용융, 노내외 증기폭발, 수소폭발, 격납건물직접가열, 알파사고, 용융노심과 콘크리트반응(MCCI) 등이다. 노내현상은 시간의 진행에 따라 피폭관 파손부터 노내 증기폭발까지 일어날 수 있는 모든 현상의 Knowledge Base 를 구축하였으며 노외현상도 압력용기 파손부터 DCH(격납건물직접가열)에 이르는 다양한 사고현상의 DB 를 구축하였다.

4.2 중대사고 시나리오

참조원전인 영광 3, 4 호기의 IPE 결과를 TRAIN 에 구현하여 발생가능성이 큰 사고경위에 대해서는 CET 와 DET 를 합친 Full Event Tree 로 사고경위를 추적할 수 있게 하였으며 전형적인 원전사고인 TMI 사고와 체르노빌사고에 대해서는 사고원인과 사고진행과정을 상세히 기술하였다. 사고경위설명은 상황이 비슷한 초기사건이 발생되었을 때 미연에 사고를 예방할 수 있으며 사고가 시작되었더라도 그 피해를 최소화 시키도록 초점을 맞추었다. 9 개의 머리사건과 90 여개의 끝점을 가지는 CET 에 전술한 바와 같이 헤딩에 DET 를 하이퍼 링크시켜서 비교적 쉽게 일어날 수 있는 사고경위를 예측하게 하였다. 그림 4 는 참조원전의 IPE 결과에 근거한 CETs / DETs 를 이용한 사고경위의 한 예제를 보여주고 있다.



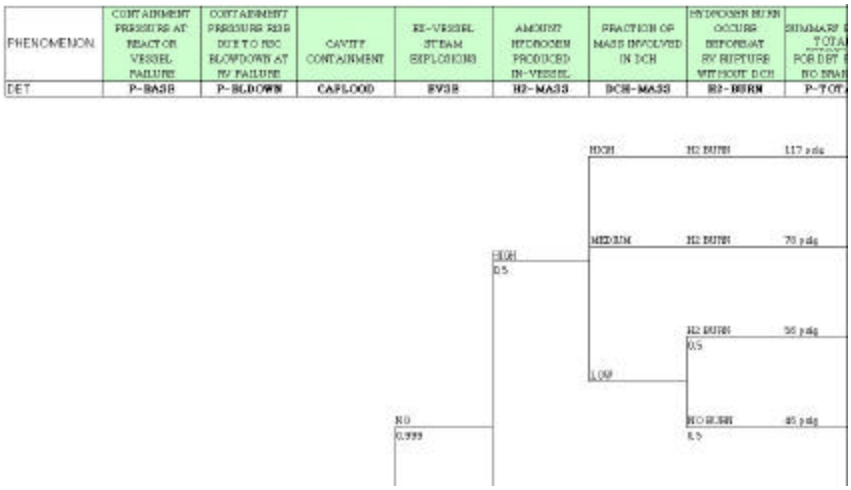


그림 4. IPE 의 CETs / DETs 를 이용한 사고경위.

4.3 사고관리절차서

원전의 중대사고관리 절차서는 TSC 에서 사용하는 비상지침서, 전략관리도, 완화지침서, 그리고 TSC 요원이 이미 누출된 방사능을 조절하기위해서 다음단계로 이행하는 기준이 되는 출구지침서(exit guidance)로 구성되어있다. 아울러 사고관리절차서는 의사결정을 위한 여러가지 정보를 이용하여야 하므로 정보관련 안전목적가지와 정보지침서도 필요하다. 계측기를 통하여 얻을 수 있는 정보도 있고 제한된 계측장비로 인하여 에너지보존식이나 물리적계산을 해 둔 계산보조도구의 도움을 받아야 할 상황도 생긴다. TRAIN1.0 은 그림에 나타낸 것과 같이 7 가지의 세부절차서를 포함하고 있으며 절차서내의 중대사고 현상과 링크되어 운전원의 이해를 돕도록 하였다. 그 외에도 계측기와 중요한 사고관리 전략의 효과와 부작용을 알기쉽게 표로 정리하여 TRAIN 의 메뉴 속에 구현하였다.

5. 결론

원전의 중대사고 시 대처를 위한 훈련프로그램은 먼저 훈련의 목적이 설정되어야 하고, 그 목적을 성공적으로 달성하기 위하여 적절한 훈련 방법이 개발되어야 한다. 그리고 훈련의 성공여부를 파악하기 위한 평가기준이 마련되어야 하고 효과적인 훈련이행계획이 개발되어야 한다. 본 연구를 통하여 개발한 TRAIN 1.0 은 위에서 나열한 요소들의 기본 훈련내용이 될 것이고, 아울러 앞으로 개발될 사고관리 훈련용 Simulator 개발에 입력자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 실제 발전소에서 이 도구의 효용성이 인정되면 그 파급효과는 매우 클 것으로 기대되며 다양한 중대사고현상 지식기반 자료를 바탕으로 원자력발전소의 운영효율 향상을 위한 다른 운전지원시스템(Decision Support System)의 개발에도 초석이 될 것이다.

참고문헌

1. C. K. Park, etc., A Study on Individual Plant Examination of Nuclear Power Plants, KEPCO, 1994

2. Final Probabilistic Safety Assessment Report for Ulchin Units 3&4, Korea Electric Power Corporation, Seoul, Korea, 1997

3. **전력연구원**, **가압 중수로 원전 2 단계 확률론적 안전성 평가**, 1997

4. KEPCO, Final Safety Analysis Report for Younggwang Units 3&4, 1993

5. WOG, Severe accident management guidance, Vol. 1, Executive Volume MUHP-2310, 1994

6. USNRC, Accident Management Strategies for Consideration in the Individual Plant Examination Process- Generic Letter 88-20, Supplement No. 2, 1990

7. R. J. Breeding and L. N. Smith, Evaluation of Severe Accident Risk: Surry Unit 1 Appendices, NUREG/CR-4551, Vol. 3, 1990

8. Severe Accident Management Guidance, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, PA, USA, Vol. 1&3, June 1994

9. Visual Basic 6.0 Programming Manual, 1998.

10. Andy Rathbone, Multimedia & CD-ROMs For Dummies, 2nd Edition, IDG Books Worldwide, Inc. 1995

11. Tony Bov and Chery1 Rhodes, Official Macromedia Director Studio, Random House, Inc. 1994

12.MAAP 4 Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants, Vols. 1, 2, 3 & 4, Prepared by Fauske & Associates, Inc., Burr Ridge, IL, USA for the Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, May 1994

13.WOG, Severe accident management guidance, Vol. 3, Background Document, MUHP-2310, 1994

14. J. Ha, etc., Development of Accident Management Guidance for Korean Standard Nuclear Power Plant, KAERI/RR-1939, 1998

15. AECL, 86-03600-SAB-001, Rev.1, Probabilistic Safety Assessment (PSA) Methodology and Plan, 1992