기 술 논 문

Ontario Hydro社 原電에서의 휴먼·퍼포먼스

카나다의 온타리오 · 하이드로社는 휴먼 · 퍼포먼스에 대하여 항상 관심을 가져 왔다. 휴먼 · 퍼포먼스 評價方法중 하나가 SER시스템이고, 가장 最新技法이 HPES이다. 온타리오 · 하이드로社는 이 HPES를 채택함으로써 原電의 작업환경을 개선하여 왔다.

加의 온타리오·하이드로社는 運轉安全管理프로그램을 사용하여 휴먼 · 퍼포먼스에 대하여 늘 피력해왔다. 휴먼 · 퍼포먼스의 결함을 평가하는 방법중의 하나가 重大事故報告(SER)시스템이다. 이 SER 시스템은 지난 25년 이상 運轉經驗을 반영하여 개선되어 왔다.

새로운 評價技術이 SER 시스템과 함께 발전되어 왔는데, 가장 최신기법이 휴먼 · 퍼포먼스 評價시스템(HPES)이다. 이 HPES는 사고의 체계적인 분석과 작업중 실수에 대한 원인을 도출시키는 결정을 한다. 이 分析이 시정조치의 기반이 되며, 온타리오 · 하이드로社는 이 HPES를 채택함으로써 원자력발전소의 작업환경을 개선하여 왔다.

1. 序 論

本稿에서는 運轉安全管理프로그램에 포함된 휴먼·퍼포먼스評價에 대하여 논하고자 한다.

온타리오에서 運轉되고 있는 原子力發電所들은 40년 이상의 研究開發의 成果이다. 현재 온타리오·하이드로社는 稼動中인 發電炉 17基를 보유하고 있으며, 또한 1990년대 초까지 4기의 원자로를 더 系統에 併入시킬 계획이다.

온타리오·하이드로社 CANDU발전소가 왜 안전한가에 대해서는 많은 이유가 있으나, 그중 가장 중요한 이유 두가지는 다음과 같다.

- 放射線유출을 방지하기 위한 다중의 방호벽이 CANDU設計에 확립
- 運轉安全管理프로그램

2. 多重防護壁

이들 방호벽은 放射能源과 일반공중 사이의 차폐물로써 눈으로 볼 수 있다. 이러한 방호벽들로는 다음과 같은 것이 있다.

- 核燃料 : 세라믹우라늄산화물은 放射性인 核分裂生成物 대부분이 핵연료 펠리트 내부에 남아 있도록 높은 용융점을 갖고 있다.
- 核燃料피복관 : 지르칼로이 핵연료피폭관은

핵연료의 팽창, 핵분열가스의 압력, 열전달액체의 외부 수압 그리고 핵연료취급기기에 의한 기계적 부하 등으로 인해 야기되는 應力을 견뎌낼 수 있도록 설계되어 있다.

• 熱傳達系統 : 핵연료는 이 열전달계통 내부에 내장되어 있다. 따라서 핵분열생성물은 이 계통의 고장에 의해서만 격납구조물로 누출될 수 있다. 이 열전달계통의 배관은 고압유체류에 적용되는 관련규정에 맞도록 설계되어 있다.

• 格納構造物 : 原子炉와 열전달계통은 철근콘크리트의 격납구조물 내부에 설치된다.

• 비거주지역 : 발전소에서 부터 914m 내에는 거주가 금지된다.

비록 이 방호벽들이 완벽하다고는 하나, 이는 최후의 수단으로서만 그 기능을 발휘하게 되는 것이다. 이들 방호벽이 필요하게 되는 경우에는 그 이전에 많은 계통에서 고장이 나야 한다. 원자력발전소의 모든 계통은 크게 다음 두그룹으로 나뉘어진다.

• 프로세스系統 : 발전소 기기 및 프로세스의 운전과 제어에 사용되는 계통이다.

• 特別安全系統 : 발전중 사고로 인한 우발적인 방사성물질의 유출을 방지하기 위해서 한가지 또는 그 이상의 기능을 발휘하는 독립계통이다.

다음 장치들이 이 범주에 속한다.

a) 원자로 정지계통

b) 발전소격납계통

c) 긴급냉각재주입장치

이 프로세스 및 특별안전계통은 核反應을 제어하고 핵연료를 냉각하며 방사능을 격납함으로써 一般公衆과 방사능源 사이에 추가 방호벽을 형성하고 있다.

3. 運轉安全管理프로그램

이들 방호장치와 계통을 유지하기 위하여 온타리오·하이드로社의 작업프로그램에는 다음 4가지의 주요목표가 있다.

• 프로세스 系統의 신뢰성 확보

• 특별안전계통의 신뢰성 확보

• 機器와 절차상의 결함이 검출, 분석되어 신속히 교정되도록 보장

• 고도로 숙련된 운전요원의 개발

이러한 목표가 운전안전관리프로그램의 기본이 된다. 문제가 되는 분야에 이 프로그램의 초점을 맞추기 위하여 경험검토시스템이 다음 항목에 대해서 개발되었다.

• 경향분석과 예측

• 技術基準에 부합되는 등급의 수립

• 불충분한 성능의 원인규명

경험검토에 의하여 여러가지방법이 시행되었는데, 몇가지 예를 들면 다음과 같다. 가동중 보고서, 방사선량보고서, 품질보증감사보고서 등이다. 휴먼·퍼포먼스 評價를 위한 경험검토의 첫번째 방법은 중대사고 보고서이다.

중대사고란 일반공중 및 종업원의 안전, 生産品質, 환경보존 또는 생산가격에 바람직하지 않은 결과를 초래하거나 초래할 수 있는 비정상 또는 예정되지 않은 사건이다. 중대사고보고서(SER)는 보고된 사고의 상황과 그 대응조치에 대하여 기술하고 있다.

4. 重大事故 報告体制

중대사고란 일반공중 및 종업원의 안전, 生産品質, 환경보존 또는 생산가격에 바람직하지 않은 결과를 초래하거나 초래할 수 있는 비정상 또는 예정되지 않은 사건이다. 중대사고보고서(SER)는 보고된 사고의 상황과 그 대응조치에 대하여 기술하고 있다. 이 SER시스템은 신속한 보고, 검토, 엄격한 사후추적 그리고 정보자료로써 모든 사고를 목록화하고 있다. SER을

요구하는 사고의 예로는 치명적인 손상 또는 원자로 정지 등이 있다. 이 시스템은 매우 광범위하여 거의 모든 원자력발전소 운전상황에 적용된다. 이 시스템은 온타리오·하이드로社 原子力 프로그램의 초창기부터 사용되어 오고 있으며, 이 시스템의 유용성은 경험을 쌓으면서 향상되어 왔다.

5. 人的要因의 檢討

SER시스템의 목적은 에러를 초래하는 결함을 분석, 교정하기 위한 논리적인 근거를 제공하는데 있다. CANDU設計의 진보된 기술과 자동화의 수준에도 불구하고 실수와 오조작이 여전히 일어나고 있어, 에러를 줄이거나 방지하기 위해서 상당한 노력이 경주되어 왔다. 예를 들면 制御室의 계기나 번호표시기의 배열을 개선함으로써 運轉員에게 보다 쉽게 정보를 식별할 수 있게 하였다.

機資材의 구분방법도 칼라코드와 꼬리표를 사용함으로써 개선되어 왔다. 잘 記述된 절차서는 기자재와 작업원의 안전에 필수적이다. 온타리오·하이드로社는 명확한 절차서와 잘 개발된 品質保證프로그램의 사용을 더욱 강조하고 있다.

각종 절차서는 정확한가를 확인한 후에야 발행된다. 온타리오·하이드로社는 많은 原子炉가 운전에 들어감에 따라 人的要因을 改善하기 위한 방안들을 보완시켰다. 原子炉制御室에 安全系統모니터링컴퓨터를 추가하고, 운전원 훈련을 위하여 시뮬레이터를 설치하였다. 그러나 人的要因(Human Factor)의 자료축적에는 충분한 주의를 기울이지 않았음을 발견하였다. 그리고 1979년에 TMI사고가 발생하였다.

1979년 TMI사고를 계기로 세계의 원자력계는 원자력발전소 運轉에 있어서 人的要因에 주의를 집중시키게 되었고, 이에 대한 대책으로 온타리오·하이드로社는 人的要因報告様式을 개발하였다. 이 양식은 SER 시스템의 일부가 되었고, 사고를 유발시킨 운전원의 조치를 확실히 분석함으로써 재발을 방지할 수 있도록 모든 원자력발전본부에서 분석용으로 이 양식을 사용하고 있다. 기존의 정보자료에 추가하여 휴먼·퍼포먼스의 문제점을 기록하기 위하여 자료수집 방식이 수정되어야 했다.

인적요인에 대한 가일층 연구의 필요성이 대두됨에 따라 이 SER 시스템에도 한계가 있음을 인식하였다. 운전요원들은 세부분석을 수행하기 위한 시간도 없고, 훈련도 받지 못했다. 한 교대조에서 발생된 문제는 앞 교대조에서 또는 같은 교대조로 근무하고 있는 다른 부서에서 발생했을지도 모를 일이었다. 이는 교대조의 한 사람-통상 교대조장-이 그 사고의 원인을 결론을 내리는데 필요한 모든 상황의 수집을 불가능하게 하였다.

온타리오·하이드로社의 휴먼·퍼포먼스 分析經驗과 병행하여 原子力發電運轉協會(INPO)에서도 미국의 보고시스템 역시 유사한 결점이 있음을 인식하였다. 따라서 INPO는 인위적인 실수를 분석하기 위하여 휴먼·퍼포먼스評價시스템(HPES)이라고 불리우는 시스템을 개발하였으며, 한 試驗프로그램이 1981년 미국에서 시행되었는데 이 시험프로젝트가 성공을 거둠에 따라서 프랑스 國營電力會社인 EDF와 미국의 많은 전력회사에게로 확장되었다.

HPES는 다음 원리에 따라 운용된다.

- 사람은 완벽하지 않다.
- 사람은 잘 수행하길 원한다.
- 인위적인 실수를 배제할 수는 없지만, 줄일 수는 있다.

이 시스템은 또 다음과 같은 목적을 가지고 있다.

- 불충분한 휴먼·퍼포먼스의 원인을 규명
- 시정작업의 명세 및 시행
- 성공적인 교정의 모니터 및 필요에 따른 개조

정보의 공개적 교환을 장려하기 위하여 이 시

스템은 무기명이고, 처벌대상이 아니며, HPES 평가중에 습득된 모든 자료는 비밀로 한다.

온타리오·하이드로社는 1984년에 이 HPES프로그램에 가입하였으며, HPES의 시행은 온타리오·하이드로 원자력발전소 두곳에서 실시되었다. 즉, Bruce A 원자력발전소와 Rolphton에 있는 NPD 원자력발전소이다.

Bruce A 原電은 Toronto 서북쪽 약 250km 거리에 있는 Huron 호숫가에 위치한 4基의 발전소로서 네트(Net)電氣出力이 2,960MW이다. 이 발전소의 주요 작업그룹은 다음과 같다.

- 發電部 : 원자력발전소의 운전과 보수 담당
- 技術部 : 작업계획, 기술절차서와 지침서를 發電部에 제공
- 品質保證部 : 모든 법적 및 규제 요구사항 만족 여부 확인

HPES의 시행목적은 HPES가 기존 SER 시스템을 향상시킬 수 있는지를 결정하기 위한 것이었으며, 선발된 要員이 INPO에서 훈련을 받았다. 이 훈련과정에는 휴먼·퍼포먼스의 이론, 인터뷰技法, 에너지 추적과 방호벽분석 등 많은 分析技術이 포함되었다. Bruce A 原電에서 14개월에 걸친 HPES의 시도는 SER시스템과 HPES를 사용한 28건의 중대사고의 평가였다. 이들 중대사고는 원자로 및 터빈의 정지, 중수유출, 특별안전시스템의 손상과 방사선 재해 등에 관한 것이었다. HPES는 그밖에도 입수하기 어려운 인적요인에 관한 정보를 제공하였으며, SER시스템 단독의 경우보다 시정작업을 위하여 더 많은 권고를 하였다.

HPES의 사용으로 중요사고의 평가를 다음과 같이 개선할 수 있었다.

- 훈련된 HPES 要員을 활용함으로써 정보수집 절차를 개선. 이것은 문제점을 보다 용이하게 확인할 수 있게 하며, 분리독립된 견해를 유지케 한다.
- 비편파적인 분위기와 비밀보장으로 정보수집을 보다 용이하게 한다.
- 방호벽 및 에너지추적분석과 같은 분석기술이 조사중인 사고의 원인규명에 이용된다.

이 시험프로그램은 1985년 12월에 종료되었으며, 1986년 이 HPES 프로그램은 모든 원자력시설로 확대되었다. 要員들이 선발되어 훈련을 받음으로써 휴먼·퍼포먼스의 분석이 가능케 되었다.

다음은 Bruce A 原電의 管理에 이 HPES를 어떻게 적용했는가를 보여주는 사례이다.

1986년 여름 原子力管理局(AECB)은 압력관 누설에 대비하여 環形가스계통의 습분감지장치를 2호기 운전개시전에 운전가능하도록 할 것을 요구한 바 있다. 그러나 2호기는 습분감지기가 작동안된 상태에서 운전이 개시되었고, 경영진은 이 사고의 분석을 명했다. 조사 결과는 원자력관리국(AECB)의 요구사항을 전달하는 과정에서의 실수로 판명되었다.

이 문제에 대한 해결책은 발전소 직원들에게 철저한 커뮤니케이션의 필요성을 인식시키는 것이었다.

그외에 HPES의 권고가 어떻게 운전환경을 개선시켜 왔는가에 대한 例는 다음과 같다.

- 비경상보수 및 보수후 검사를 위해 최소한

의 필요사항을 규정한 지침서의 작성

• 특정한 위험을 인식하도록 設備에 경고문 부착

• 작업에 적합하도록 개선된 도구의 구입

6. Bruce A 原電프로그램의 要約

1984년이래 HPES를 사용하여 36건의 중대사고가 분석되었다. 이 숫자는 같은 기간 동안에 발생된 총 중대사고보고서(SER)중 소수에 불과하다. 평균적으로 매년 128건의 SER이 발행되었는데, 그 중 44건이 人的要因에 기인하여 발생되었다. 그림 1에 휴먼·퍼포먼스의 문제점이 어디에 있는지를 나타내었다. 이 자료는 온타리오·하이드로社를 포함한 7개 전력회사로부터의 132건의 평가 내용을 수록하고 있는 INPO의 자료와 비교하여 작성된 것이다. Bruce A 原電의 경험은 세계의 경험과 비교될만한 것이었다.

빈도순서로 본 Bruce A原電의 중요 원인은 다음과 같다.

원 인	빈 도(%)
커뮤니케이션	19
인 사	17
관 리 / 감 독	17
작업 장 소	16
절 차 서	14
작 업 구 성	7
훈 련	6
작 업 계 획	2
시 행 변 경	1
제3자요 청 (예 : 원자력관리국)	1
계	100(%)

분석된 사고의 상위빈도 5개 범주에 속하는 요인이 83%를 차지하고 있으며, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

• 커뮤니케이션 : 정보전달상 오류

• 인 사 : 스트레스 같은 심리적 및 생리적 요인

• 관 리 / 감 독 : 부적절한 감독

• 작 업 장 소 : 부적절한 배열과 통제(예 : 제어실의 표시판)

• 절 차 서 : 절차누락

이러한 원인에 의해 야기된 문제들을 시정하기 위하여 온타리오·하이드로社는 産業安全哲學을 응용해왔는데, 이는 그러한 사고원인을 사전에 제거하거나 또는 제거가 불가능한 곳에서는 위해요소를 통제하여 발전소 직원들을 보호하기 위한 것이었다. 例를들면 Bruce A 原電에서는 커뮤니케이션이 가장 빈도가 높은 문제의 원인으로 대두되었으며, 보수유지 측면에서 커뮤니케이션에 대한 연구결과 4가지 분야에서 문제점이 도출되었다.

• 근무조 교대 : 근무조 교대시 전달사항 미전달

• 동일근무조 동료내에서 작업반간의 커뮤니케이션

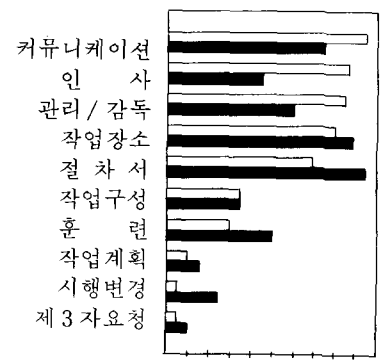
• 근무일지 : 보수원 작업일지상의 불충분한 기록

• 技術要員과 發電要員의 커뮤니케이션

커뮤니케이션 문제는 다음 두가지 방법으로 개선되었다.

• 근무교대일지에 기재할 최소한의 내용에 관한 지침서 작정

• 감독자훈련과정에서 커뮤니케이션技法을 강조할 것



〈그림 1〉 INPO 대비 Bruce A原電의 原因

HPES 분석결과, 시정을 위한 60개 항목의 권고사항이 추가되었다. 이중 23개 사항이 시행되었으며, 5개 항목은 정당화할 수 없었다. 나머지 32개 항목은 앞으로 처리키로 하였다. 대부분의 권고사항은 소폭이며, 저렴한 비용으로 절차서나 작업방법을 개선할 수 있는 것이었다. 이것은 발전소 운전환경 개선에 많은 비용이 들지 않는다는 것을 증명하고 있다.

7. HPES와 SER시스템의 統合

HPES와 SER시스템의 통합으로 다음과 같은 프로그램의 진전을 보았다.

- 발전소요원들에게 평가대상이 될 것임에 대비, 보다 더 주의를 기울일 것을 알려줌으로써 휴먼·퍼포먼스 評價의 활용을 증진
- 효과 증대를 위한 HPES의 권고사항 모니터링
- HPES의 훈련과 사고평가를 통한 전문 기술의 개발

8. 프로그램의 獎勵

1985년에 얼마나 많은 Bruce A 原電 직원들이 HPES의 시행과 그 목표에 대하여 알고 있는지 조사하였다. 그 결과는 많은 노력에도 불구하고 이 프로그램을 인식하고 있는 직원들은 단지 15%에 불과하였다. 1986년에 세미나와 포스터 캠페인을 포함한 이 프로그램 장려운동이 적극적으로 시행되었다. 포스터 캠페인은 훈련과 커뮤니케이션을 고취시켰다.

BNPD Site News誌에 Burce A原電의 HPES프로그램에 대한 기사를 게재하였고, HPES권고사항과 그 현황을 보도한 발전소 뉴스레터도 발간되었다. 그 반응은 좋아서 200명 이상의 발전소 직원들이 세미나에 참석하여, 관리시스템에 관하여 의견을 발표했다. 예를 들면, 中央制御室에서의 진공소제기 청소는 너무 소란하여 발전소 운전원들을 짜증스럽게 하며, 주의를 산만하게 한다는 것이었다. 어떤 운전원은 제어실에서의 소음한계기준이 과도하다고 이 문제를 조사해 줄 것을 요청하였다. 정신을 집중하여야 할 사람에게 대한 소음의 심리적 영향에 관한 연구조사결과, 진공소제기는 문제가 되었으며, 따라서 중앙진공청소시스템의 설치에 대한 연구조사가 실시되었다.

1985년에 얼마나 많은 Bruce A 原電직원들이 HPES의 시행과 그 목표에 대하여 알고 있는지 조사하였다.

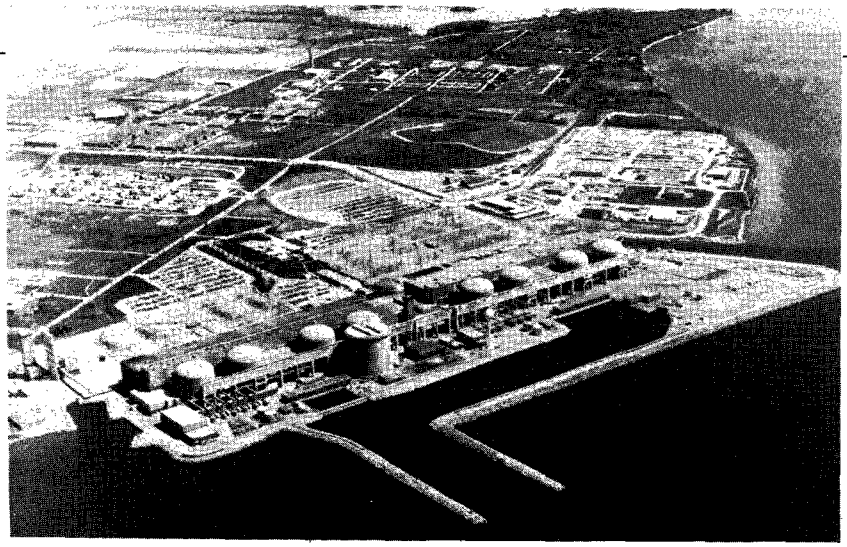
그 결과는 많은 노력에도 불구하고 이 프로그램을 인식하고 있는 직원들은 단지 15%에 불과하였다. 1986년에 세미나와 포스터 캠페인을 포함한 이 프로그램 장려운동이 적극적으로 시행되었다.

장려운동은 HPES평가를 더욱 용이하게 하였으며, 보다 많은 직원들이 이 시스템과 그 취지를 알고 더욱 협조하였다. 이 운동으로 HPES가 근무자에 대한 관리제도로 이용된다는 인식도 불식되었다. 근무자들은 물론 그 업무를 잘 아는 사람들에게 자문을 요청하여 휴먼·퍼포먼스 평가에 대한 발전소직원들의 호응을 얻게 되었다.

9. 모니터링

발전소운전환경을 개선함으로써 이 프로그램의 이점을 실제로 보여주는 것이 HPES 프로그램의 성공비결이었다. 그러나 그 일이 수행되어야 한다는데 동의를 얻는 것보다 실제로 시행하는 것이 더 어려웠다. 이것은 현재 발전소에서 수행하여야 할 과중한 보수작업 때문이었다.

확실한 개선을 위하여 HPES要員들은 사고를 조사하여 권고함은 물론 그 권고사항을 시행해야 했다. 예를 들면, 하나의 평가에 대한 후속조치로 새로운 절차가 운전원에게 권고되었



다. 그러나 그러한 권고가 받아들여져도 아무도 그것을 작성할 시간이 없었으므로 HPES 연구를 책임맡고 있는 사람이 그것을 수행해야 했다.

다른 例로는 시간측정장치에 대한 권고가 받아들여졌지만, HPES 要員에 의해 그 장치가 구매되었다.

10. 휴먼·퍼포먼스 專門技術의 開發

앞으로 휴먼·퍼포먼스를 평가하는데 필요한 전문기술을 제공하기 위하여 2단계 훈련계획이 개발되었다. 교대조장에게 실시될 1단계 훈련은 기존의 안전과정에 포함될 것이며, 휴먼·퍼포먼스의 이론과 사례연구로 구성될 예정이다. 훈련과 함께 교대조장은 중대사고를 조사할 때 人的要因(Human Factor)도 분석할 수 있게 될 것이다.

2단계 훈련은 發電부서와 技術부서에서 선발된 요원을 대상으로 INPO에 의한 HPES 評價者訓練이 될 것이다. 이렇게 함으로써 문제를 도출하여 해결할 수 있게 되고, 더욱 복잡한 문제도 분석할 수 있는 방법을 확보하게 될 것이다.

11. Bruce A 原電의 課題

현재까지 Bruce A 原電에서의 휴먼·퍼포먼스 평가는 반사적으로 추진되었다. 즉, 예기치 않던 일이 발생하면 긴급방편으로 그 이유를 발견하여, 재발되지 않도록 하는 것이었다.

HPES가 더욱 유익한 것이 되기 위해서는 결함들을 사전에 확인하여 시정함으로써 운전이나 보수상의 오류를 범하지 않도록 하는 것이다. 포스터 캠페인을 통한 적극적인 어프로치로 얼마간의 성공을 거두었다. 근무자들이 잠재적인 문제가 발생되기 전에 시정을 하였다.

Bruce A 原電에서는 적극적인 시스템을 채택할 것을 고려하고 있다. 이 시스템은 장려캠페인 휴먼·퍼포먼스결함보고 방식 및 피드백시스템으로 구성될 것이다.

12. 結　論

휴먼·퍼포먼스평가는 운전안전관리프로그램의 중요한 부분이다. 本稿에서는 SER시스템이 온타리오·하이드로社에서 휴먼·퍼포먼스 문제를 평가하는데 어떻게 활용됐는지 記述했다.

HPES는 SER 시스템에 있어서 귀중한 발전이다. 체계적이고 엄격한 評價는 원자력 운전의 확고한 특징이 되어왔다. 주요 이점은 결함을 식별할 수 있는 능력과 관리시스템을 보강시키는데 있으며, 또한 여러 작업유니트의 노력을 하나로 통합시키는 것이다.