



# 웨스팅하우스 AP1000

- 최종 설계 승인 획득 -

서 중 석

한국원자력산업회의 사무총장



막으로 미국 웨스팅하우스가 개발한 AP1000을 소개한다.

여기에 소개된 내용은 <Nuclear News > 2004년 11월호에 게재된 「The Westinghouse AP1000-Final design approved」이다.

AP1000은 미국 원자력규제위원회(US NRC)로부터 최종 설계 승인(FDA: final design approval)을 받은 네 번째 원자로가 되지만, 경제성 면에서 저가의 천연 가스와 석탄을 사용하는 발전소와 경쟁할 수 있도록 설계된 최초의 원전이다. 또한 AP1000은 제3세대 플러스(Generation III+) 원자로라고 부를 수 있는 최초의 원전이다

먼저 FDA 인허가 절차와 그 중요성에 관해 설명을 한 다음, 단순화 원칙의 사용으로 AP1000의 안전성, 경제성 및 시공성, 그리고 결국에는 AP 1000의 경쟁력이 어떻게 높아졌는지를 설명하겠다

## AP1000 최종 설계 승인(FDA)

AP1000은 NRC로부터 2004년 9월 13일에 FDA를 받았다. 이에 따라 AP1000은 건설/운영 인허가 신청, 또는 Combined License 신청시 표준 원전(reference design)으로 사용될 수 있게 되었다.

Combined License는 건설 및 운영 인허가의 일괄 신청을 허용하는 인허가 제도이다.

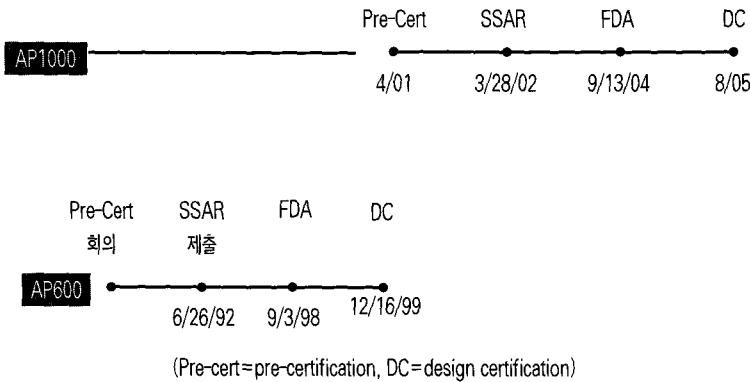
FDA 발급은 AP1000 설계의 기술적 검토가 성공적으로 완료되었다는 의미를 가진다

이 기술적 검토는 NRC 스택과 원자로 안전자문위원회(ACRS: Advisory Committee on Reactor Safeguards)의 AP1000 표준안전성분석보고서(SSAR: Standard Safety Analysis Report)와 AP1000 확률론적 위험 평가서(PRA: Probabilistic Risk Assessment)에 대한 평가를 토대

「제 20회 한국원산·원자력 학회 연차대회/ICAPP 2005」 국제 세미나가 신형원자로를 주제로 오는 5월 15~19일 기간 중 서울에서 개최된다.

이와 관련하여 한국원자력산업회의는 국내 원자력 산업계를 위하여 제3세대 신형 원전을 본지에 소개하고 있다.

이미 소개한 한국의 APR1400 및 프랑스의 EPR에 이어서 이번 2005년 1월호에서는 시리즈 마치



〈그림 1〉 AP600 및 AP1000의 FDA 발급시까지 걸린 공정 비교

로 수행되는데, SSAR과 PRA는 수 천 페이지에 달하는 기술적인 기술과 분석, 그리고 결론을 포함하고 있다

AP1000의 SSAR과 PRA는 많은 부분에서 선행 AP600의 설계에 기반을 두고 있는데, AP600은 1998년 9월 8일에 FDA를, 그리고 1999년 12월 16일에 설계 인증(DC: Design Certificate)을 받았다. NRC는 설계 인증을 위한 검토 과정에서 AP600 관련 7000, 그리고 AP1000 관련 700 여개의 추가 질문을 발행하였다.

NRC는 2001년 4월 인증 사전 회의를 시작으로 검토에 착수하였지만, 공식적인 검토는 2002년 3월 28일에 웨스팅하우스가 SSAR과 PRA를 첨부하여 설계 인증을 위한 신청을 제출함에 따라 시작되었다. 검토 활동은 NRC가 2004년 9월 13일에 발행한 최종안전검토보고서(FSER: Final Safety Evaluation Report)에 포함된

AP1000 설계를 검토하면서 정점에 달했다.

〈그림 1〉은 AP600과 AP1000의 FDA 발급에 이르는 공정을 비교해서 보여주고 있다

NRC는 검토 결과를 토대로 AP1000이 10CFR52의 관련 규정 요건을 충족한다고 결론을 내렸다.

다시 말해서 NRC와 ACRS는 NRC가 대중의 건강과 복지를 보호하기 위하여 제정한 법과 규정을 AP1000이 충족하고 있음을 확인한 것이다. 이것으로 AP1000의 기술 및 안전성 평가는 완료되고, 이어서 인허가 과정의 다음 단계인 법제화(rulemaking)가 진행되는 데 이 단계에서 NRC는 AP1000 설계 인증(DC) 발급을 위한 공청회 개최 일정 등을 포함하는 법적 절차에 따른 추진 계획을 수립한다

FDA의 중요성은 이를 근거로 NRC의 엄격하고 포괄적인 인허가 과정을 인정하는 세계 어느 나라에서도 AP1000 설계를 참조 설계

(reference design)로 사용하여 건설 및 운영 허가 신청을 바로 할 수 있게 되었다는 데 있다.

FDA에 이어 DC 발급을 위하여 진행되는 rulemaking은 미국 특유의 법적 절차로서 기술/안전성 검토 과정이 아니다

AP1000은 비정상 운전이나 가상 사고시 자연력에 의존하여 대중을 보호할 수 있는 아주 단순화된 설계이다. AP1000 설계는 지난 수십년 동안의 성공적인 PWR 운전 경험을 토대로 개발되었으며, 이 원자로 특유의 수동 안전 계통은 웨스팅하우스와 NRC가 철저하게 시험, 분석 및 조사하여 성능 보장을 검증하였다

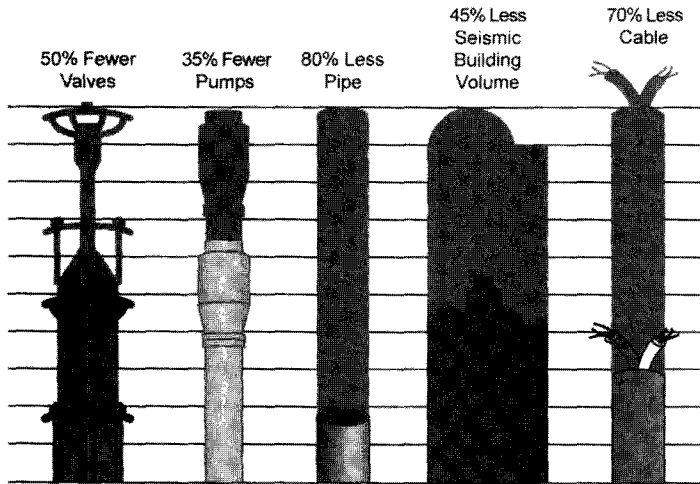
**시험, 분석 및 전산 코드**

AP600 인허가 초기에 NRC와 웨스팅하우스는 고압 시험 프로그램에 합의하였다.

AP600의 높은 안전 여유도는 사고에 대응하여 작동하는 수동 안전 계통에 기인한다.

10CFR50 요건에 따라 AP600 수동 시스템의 성능 특성을 확인하기 위하여 광범위한 시험 프로그램이 수행되었다.

이 시험 프로그램은 수동 시스템의 분리 시험(separate effects) 및 종합 시험(integral systems test)으로 구성되었으며 NUREG



〈그림 2〉 AP1000은 수동 안전 계통 채택으로 기기 및 물량을 획기적으로 감축하였다.

1512, 「AP600 표준 설계 인가에 관련된 최종안전평가보고서」에 상세히 수록되어 있다.

웨스팅하우스는 이들 시험을 토대로 설계 기준 및 설계 기준을 벗어나는 사고에 대응하여 작동하는 수동 안전 시스템의 성능을 적절한 신뢰성을 가지고 예측할 수 있는 전산 코드를 개발하였다

웨스팅하우스는 AP600 시험의 비례 축소(scaling) 연구를 수행하였으며 AP1000에의 적용 가능성을 평가하였다. 이들 연구 결과는 관련 보고서에 정리되어 있는데, NRC는 AP1000 설계 인증 검토 과정에서 이들 보고서를 검토하였다.

이 보고서에 대한 평가에서 NRC는 AP1000 설계 및 운전 특성들이 AP600 안전 특성과 비슷하기 때문에 AP1000이 10CFR52.47의

NRC 요건을 만족하는지 여부를 결정하는 데 AP600 시험 자료를 대부분 그대로 사용할 수 있다고 판단하였다.

결과적으로 AP600에 유효한 웨스팅하우스 전산 분석 코드들은 약간의 추가 시험만 있으면 AP1000 설계 허가를 위한 사고 해석 수행에 충분히 사용할 수 있게 되었는데, 이들 추가 시험들은 성공적으로 수행되었다.

**AP1000의 유일한 특성**

AP1000의 유일한 세 가지 특성은 AP1000의 기술, 안전 시스템, 그리고 건설과 공정이다.

이들 특성들은 '단순화'라는 지침에 의거 추구되었으며, 결과적으로 높은 경제성의 경쟁력 있는 원자력발전소 설계를 창출하였다

**1. 기술**

역사적으로 발전소 기술은 새로운 설계와 인허가 규정에 새로운 특성이 추가되면 더욱 복잡해지기 마련이다. 웨스팅하우스는 발전소 소유주와 운영자들의 운전 경험과 개량형 원자력발전소를 설계하는 과정에서 습득한 교훈들을 결합하여 이를 바탕으로 백지 상태에서 시작을 하였다.

설계 과정의 처음부터 단순화에 우선권을 부여하고 건설성, 운전성 및 유지/정비성이 제고될 수 있도록 설계에 고려하였다.

폭 넓은 의견의 확실한 반영을 위하여 원전 회사들이 AP600 및 AP1000 설계 요건을 수립토록 하였으며, 발전소 운전자들은 발전소 배치와 기기 설치 장소/방향을 검토하여 안전 여유도를 상회하는 운전여유도를 결정하였다.

이러한 조치 결과로 AP1000은 기존의 PWR보다 단순하면서도 안전한 설계가 되었다

〈그림 2〉는 일반 PWR 발전소와 AP1000의 기기 수를 비교하여 AP1000이 달성한 단순화 정도를 나타내고 있다.

AP1000에서는 이처럼 밸브와 펌프 수, 배관과 케이블 양, 그리고 내진 건물 용적이 대폭적으로 감소된 반면에, 다음에 설명하는 바와 같이 발전소의 안전성은 높아졌다



〈표 1〉 전형적인 기존 설계 원전과 AP1000의 안전 여유도 비교

	기존 원전	AP1000
핵연료 열적 여유도	~1내지 5%	~19%
주급수 배관 파열과 냉각 여유도	>0℃	~78℃
증기 발생 기관 파열시 운전원 조치 시간	10분 이내	운전원 조치 불요
소형 LOC	3-inch LOCA cone 노출, 연료 피복재 침투 온도 ~815℃	(8-inch LOCA 노심 노출 없음)
대형 LOCA시 연료 피복재침투 온도	1100~1200℃	1165℃

## 2. 안전 계통

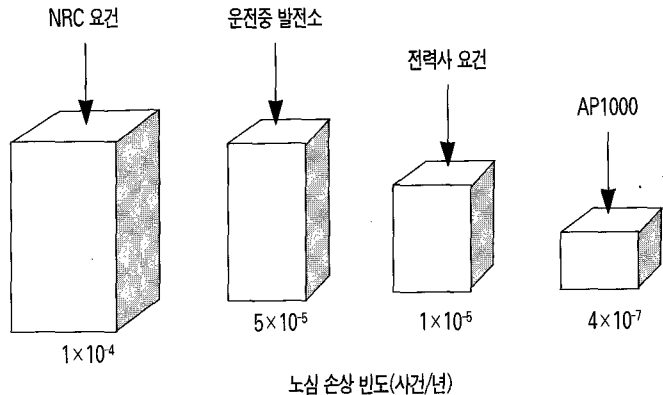
신세대 원전 설계를 단순화하기 위하여 수동 안전 계통 개념을 채택하게 되었다. 웨스팅하우스는 발전소의 궁극적인 안전 보호를 위하여 복잡한 회전기기, 디젤 발전기, 밸브, 그리고 부대 보조 계통과 건물 등에 의존하는 대신에 중력, 증발, 응축 및 자연 순환과 같은 자연력을 이용하는 시스템을 개발하였다

AP600 및 AP1000의 안전 계통은 수동 안전 주입, 수동 잔열 제거 및 수동 격납 용기 냉각을 포함하고 있다. 이들 수동 계통은 모두 TMI 사고에서 배운 교훈, 미해결 안전성 현안 및 총체적 안전성 현안을 포함하여 NRC의 단일 고장 기준과 기타 최근 기준들을 만족한다

수동 계통과 경험에 기반을 둔 기기 사용으로 발전소 안전성과 원전의 일반 수용성이 제고되고 인허가가 쉬어짐은 물론이고 이로 인하여 전체적인 발전소의 계통, 기기 및 유지 보수가 단순화되었다. 발전소 계통 단순화는 큰 운전 여유도와 결합되어 사고시 운전원이 취해야 할 조치를 크게 감소시켰다.

수동 계통은 매일 우리가 의존하고 있는 단순한 물리적인 원리인 자연력과 압축 공기만을 사용한다.

안전 계통이 펌프나 송풍기·디젤·냉수기 또는 다른 회전기기를 사용하지 않으므로 안전 등급 AC 전원도 필요 없다. 수동 안전 계통



〈그림 3〉 AP1000은 크게 낮아진 노심 손상 빈도로 안전성과 투자를 보호한다

이 자동으로 동작되면 몇 개의 단순 밸브들이 안전 계통을 정렬시키는데, 이 밸브들은 대부분이 '고장시 안전(fail-safe)' 밸브들이다.

이 밸브들이 정상 닫힘 상태에 있기 위하여는 전력을 필요로 한다.

전원이 상실되면 밸브들은 열리면서 안전 정렬 상태가 된다. 이들 밸브들은 스프링·압축 공기 및 축전지의 축적된 에너지로 동작된다

AP600 안전 관련 계통의 간단한 변경으로 설계 및 안전 여유도의 희생없이 발전소 출력을 AP1000 출력으로 높일 수 있었다.

안전 관련 펌프들이 없으므로 유량 증가는 배관 사이즈를 증가시켜

이루어졌으며, 용수 체적은 탱크 사이즈를 증가하여 추가하였다.

이러한 변경은 나머지 계통들에 영향을 주지 않아 원래 발전소 배치가 유지되도록 이루어졌다.

수동 안전 계통은 발생 가능성이 높은 사고에 대해 특별히 보다 높은 안전 여유도를 제공할 수 있는 용량을 가지도록 설계되었다.

〈표 1〉은 기존의 원자력발전소 대비 AP1000의 향상된 안전 여유도 예시이다

AP600 개발 초기부터 사고 분석뿐만 아니라 설계 과정에서도 확률론적 위험도 평가(PRA)가 사용되었다. AP600에서는 7건의 주요

PRA 정량화가 수행되었다.

AP1000에서는 이들 각각의 정량화 결과를 토대로 설계 변경을 한 결과 AP1000은 현재 운전중인 원전이나 NRC 안전 목표보다도 낮은 노심 손상 빈도를 갖게 되었다.

AP1000과 현재 운전중 발전소 및 요건들의 원자로/년 당 노심 손상 빈도 비교는 <그림 3>과 같다.

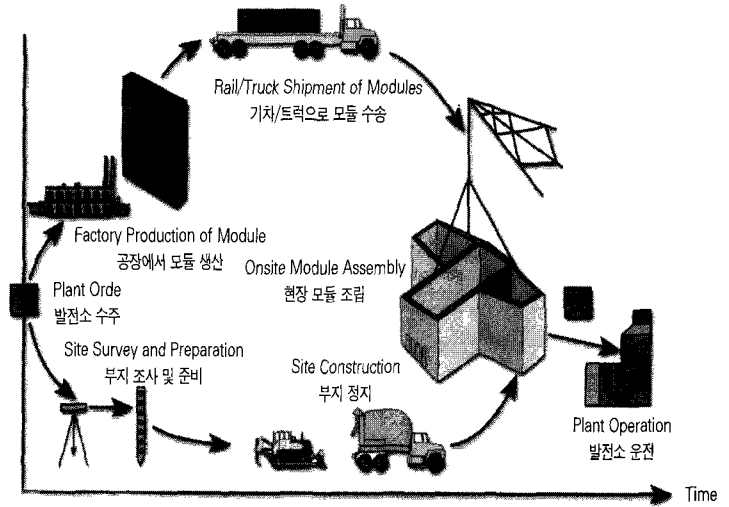
따라서 NRC가 검토한 이 자료를 근거로 AP1000은 현재 운전중인 발전소(지금도 안전하지만)보다 100배 이상 안전하다고 말할 수 있다. 이처럼 우수한 안전성은 안전 계통의 단순화를 통하여 달성되었다.

### 3. 건설과 공정

앞에서 설명한 바와 같이 AP600과 AP1000은 건설성(constructibility)이 설계에 고려되었으며, 공사비와 건설 공정도 대폭적인 설계 단순화로부터 직접적인 혜택을 받게 되었다.

또한 구조, 기계 및 배관을 위한 세 가지 형태의 모듈러 공법이 채택되었다. 설계 초기부터 모듈 사용을 극대화하는 방향으로 설계가 추진되었다. 이들 모듈들은 철도 수송이 가능하며 공장에서 조립되어 발전소 건설 현장으로 수송된다.

건설 현장에서 이 모듈들은 <그림 4>에서 같이 더 큰 모듈로 조립되어 설치 시공된다. AP600 및



<그림 4> AP1000의 모듈러 설계는 병행 시공으로 건설 공기를 단축할 수 있도록 도와준다.

AP1000에서는 약 300개의 모듈이 사용되며, 이들 모듈 사용에 따른 이점은 다음과 같다

- 건설 공기 단축
- 현장 인력 감축
- 공장 작업 능력 향상(보다 나은 품질 관리)
- 현장 혼잡 감소

웨스팅하우스는 AP600 발전소의 광범위한 상세 3차원 전산 모델을 개발하였다.

이 모델은 수 개국의 설계 참여자들로부터 받은 입력을 사용하여 8년 여에 걸쳐 개발되었다.

이 3차원 전산 모델 개발 기간 중에 Morrison-Knudsen사(현재는 웨스팅하우스 그룹)는 웨스팅하우스 주도하에 Primavera를 이용하여 AP600 건설 공정을 개발하였다.

Morrison-Knudsen은 건설 경험과 발전소 지식을 바탕으로 논리적이고 산업계의 표준 공기를 반영

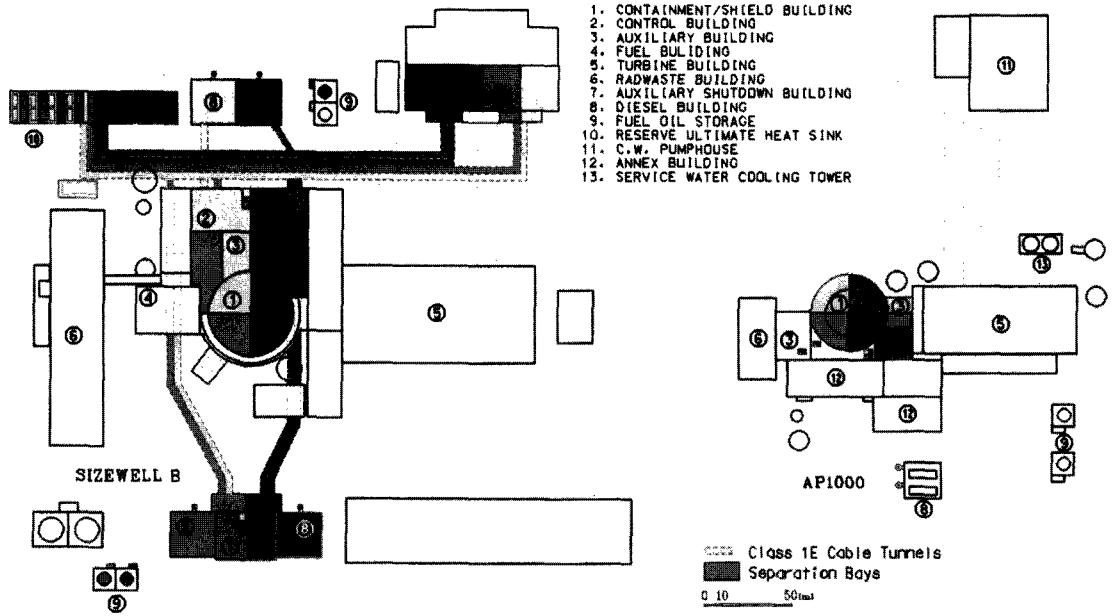
하는 상세한 전체 발전소 건설 공정을 개발하였다.

주 5일 50시간에 기초를 둔 이 공정에 의하면 기초 콘크리트로부터 핵연료 장전까지는 36개월이 소요된다.

최근에는 3-D 발전소 모델을 건설 공정에 링크시켜 발전소 건설 시간의 함수(4-D)로 보는 것이 가능하게 만들었다. 이 4-D 발전소 모델을 사용하여 AP600의 전반부 건설 공정을 평가하였더니 36개월 공정을 최소한 4개월 단축할 수 있음을 보여 주었다.

이 연구는 잠재적인 투자자들의 공정의 실현 가능성과 발전소의 궁극적인 비용에 대한 우려를 해소하여 신뢰감을 높여 주었다.

AP1000에서는 용량이 증가된 터빈과 보조 계통을 수용할 수 있도록 하기 위하여 터빈 건물을 재설계하였다. 가능한 AP600 설계를 유지하였으나 건물 사이즈, 기초 매트



(그림 5) AP1000(우측) 대 British Energy사의 Sizewell B 개량형 원전 설계 비교 (AP1000은 작으면서 간단함)

(basemat), 기초, 철골 구조물 및 구조물 모듈들은 불가피하게 변경이 필요하게 되었다. 수정된 설계는 4-D 발전소 모델에 의하여 평가되었다

AP1000을 위하여 변경된 또 다른 발전소 부분은 격납 용기의 철근 콘크리트 구조물이다. 이 구조물은 격납 용기 하부에 있는 콘크리트를 보강해주는 큰 모듈이다.

원래 AP600 및 AP1000 설계에서 이 모듈은 환형 공간(annulus) 접근과 100피트 높이까지의 철근 보강을 위하여 미리 조립된 leave-in-place form(Leave-in-place form은 콘크리트 타설을 위한 거푸집 역할을 하는 도장된 철판이며 콘크리트 타설 후에도 구조물의 벽면으로서 영구히 남는다)을 사용하였다.

수정된 설계는 시공사인 일본의 오바야시(Obayashi)가 개발하였는

데, 이 수정된 설계는 leave-in-place form을 사용하지 않으며, 콘크리트 타설을 위한 접근을 보다 용이하게 해 주고 설계단순화를 추가하여 시공성을 향상시킨다.

이러한 노력의 결과로 이 부분에 대한 AP1000의 시공성이 향상됨과 동시에 상세 수준이 높아졌으며, 이로 인하여 건설 공정에 대한 신뢰성도 따라서 제고되었다

### 경제성

AP600 설계의 단순화로 얻는 이득은 현재의 개량형 경수로와 비교하여 자본비(capital cost)의 20~30% 정도로 추산된다.

이러한 이득은 AP600의 상세 설계와 25,000개 이상에 달하는 항목들에 대한 1900 Commodity Categories로부터 직접 인용한 자료를 토대로 산출되었으며, 이들 항

목들은 기기, 벌크 재료 및 자재, 노동력, 그리고 직접/소유자 경비를 포함하고 있다

PWR의 총운영비는 건설비에 의해 좌우되는데, 앞에서 설명한 바와 같이 AP1000에서는 건설비가 크게 감축되었다. 나머지는 핵연료와 운전 정비(O&M)비인데 전체 운영비의 30% 정도가 된다. 실증된 기기들을 토대로 한 발전소의 단순화로 운전 유지비가 감소되었다. 발전소 단순화는 계획/비계획 정비 및 가동중 검사 대상이 되는 기기 수를 크게 감소시켰다.

AP1000은 지금까지 사용되어온 발전 기기들을 사용한다. 따라서 이들 기기들의 신뢰성에 대한 실적이 있기 때문에 AP1000의 가동률은 추정 대신에 실제 운전 경험을 기초로 예측이 가능하다. 실증된 기기 사용, 설계 단순화, 높은 성능 여유도, 그리고 운전중 습득한 교훈들의

〈표 2〉 AP1000의 주요 설계 특성

설계 인자	AP1000
순전기 출력	1117 MWe
열출력	3400 MWt
고온관 온도	321°C (610°F)
핵연료 다발 수	157
핵연료 다발 형태	17×17
핵연료 길이	4.3m (14ft)
핵연료 선출력 밀도	5.71 kW/ft
제어봉 수/gray rod	53/16
원자로 용기 내경	399 cm (157 in.)
노심 냉각수 유량	68.1×103 m <sup>3</sup> /h
증기발생기 표면적	11,600 m <sup>2</sup>
가압기 용적	59.5 m <sup>3</sup>

설계 반영 덕분에 AP600/AP1000의 가동률은 현재 운전중인 원전들의 가동률인 93%를 상회할 것으로 기대된다

AP600의 총운영비(자본금, 운전 및 정비, 핵연료 포함)는 4.1~4.6¢/kWh로 산정된다.

AP1000의 2기 발전소(twin-unit) 경우, 자본비는 약간 증가한 반면 출력 증가가 크므로 총운영비가 약 3.0~3.5¢/kWh로 산정된다.

AP1000과 운전중인 PWR 크기를 비교해 보면, AP1000 단순화가 발전소 설계와 이로부터 발생하는 우수한 경제성에 미치는 영향을 충분히 이해 할 수가 있다.

〈그림 5〉는 British Energy사의 Sizewell B (1188 Mwe PWR)와 AP1000의 족적(footprint) 크기의 비교를 보여주고 있다.

Sizewell B는 AP1000보다 전기 출력은 약간 크지만 발전소 규모가 엄청나게 크기 때문에 필연적으로 발전소 운영 정비에 많은 경비가 소요된다.

Sizewell B는 PWR이나 BWR 노형에 관계없이 사이즈 면에서 오늘날 운전중인 원전의 전형적인 타입이다.

AP1000에서는 megawatt당 기기 수가 현저하게 적으며 자재 및 건물도 작다. 또한 발전소 단순화로 기기 수가 적어졌기 때문에 운전 및 정비를 보다 용이하고 경제적으로

할 수 있게 되었다.

결국에는 이러한 특성 덕분에 AP1000은 획기적인 설계로 경제성과 높은 발전소 안전성을 달성하여 NRC로부터 최종 설계 허가를 취득하였다

**간단하면서 성숙한 설계**

AP600은 1999년에 NRC로부터 설계 인증을 취득하면서 AP600은 서방 세계와 아시아 지역에서 인증을 받은 원전 중에서 수동형 안전 기술을 사용하는 유일한 원전이 되었다.

AP600은 발전 단가 등에 대한 미국 발전 회사들의 요건을 만족한다. 그러나 웨스팅하우스는 천연 가스 가격이 낮은 시장 (\$3.5/100만 Btu)에서는 AP600이 경쟁력을 잃게 될 것이라는 사실을 인지하고, 스케일 경제성을 적용하여 3.0~3.5¢/kWh 범위의 발전 단가를 달성할 수 있는 AP1000 개발에 착수하였다.

이 정도의 발전 단가는 천연 가스

가격이 \$3.5/100만 Btu가 되더라도 경쟁력이 있다(주: 현재 천연 가스 가격은 \$4~\$6/100만 Btu입).

AP1000은 현재 산업계에서 사용되고 있는 실증된 기기들을 사용하며, AP1000의 주요 설계 특성은 〈표 2〉와 같다. AP1000의 단순화된 안전 계통은 모델링 및 시험을 통하여 건전성을 입증받았으며, 실제로 NRC로부터 AP600/AP1000의 테스트 프로그램은 NRC가 인증한 것 중에서 가장 완벽한 테스트 프로그램이라는 칭찬을 받았다.

AP1000은 실증된 기기들을 혁신적이고 격조 높은 방법으로 사용하여 자연력으로 발전소를 보호할 수 있도록 개발된 단순하면서 성숙된 설계이다.

설계 단순화를 통하여 AP1000은 미국의 비규제 전력 시장에서 경제적으로 경쟁력 있는 전원이 되었으며 NRC가 최종 설계 허가(FDA)를 발급함에 따라 가까운 장래에 배치될 수 있는 준비를 갖추게 되었다. ☞