

〉研究論文〈

SECURE를 이용한 原子力地域暖房의 技術·經濟性 檢討研究

本論文은 1985年 10月26日 韓國 原子力學會 學術發表會에서 發表한 內容을 要約한 것임

李 昌 健
(韓國에너지研·原子力研修院長)

李 翼 煥
(現代建設(株) 部長)

1. 研究目的

우리나라는 현재 총 에너지소비의 75%가 열 에너지 형태이며, 이중 난방용이 40%를 차지한다. 난방의 대부분은 채래식의 온돌을 사용하여 열효율이 20~30%로 매우 낮은 실정이다. 최근에 들어 대단위 아파트단지의 건설로 석유를 이용한 중앙집중식 난방방식이 도입됐다.

그러나 에너지자원이 절대적으로 부족한 우리나라의 실정에서 전량 수입에 의존하고 있는 석유만을 난방연료로 사용하는 것은 바람직하지 않다고 본다. 현재 원유가격이 잠정적으로 대폭 하락되었지만, 매장량의 한계성을 생각하면 이미 겪었던 석유파동을 다시 예견할 수 있다.

앞으로 국민생활수준의 향상과 더불어 에너지 특히 난방열의 소비가 더욱 증가할 것이므로 값싼 대체에너지를 이용할 수 있도록 에너지수급정책에 관한 연구가 절실히 요청되고 있다.

여기에서는 스웨덴의 ASEA-ATOM사가 개발한 SECURE(Safe & Environmentally Clean Urban Reactor)를 원자력 지역난방에 이용하는 것이 매우 가능성이 있다고 판단하여, '84~'85 과학기술처의 기업·정부 공동연구과제로 채택되어 현대건설(주)이 주도하여 한국에너지연구소 및 관련기관들과 공동으로 기술, 경제성 검토를 하였다.

2. SECURE原子爐系統圖 및 設計特性

(1) SECURE原子爐系統圖

SECURE원자로중 외부사고나 공격으로부터 보호되어야 할 주요설비, 즉 원자로와 핵연료 저장시설이 들어있는 콘크리트용기, 주순환회로, 방사능 관련계통 등은 지하에 설치되어 있고 3중의 폐회로에 의해 난방열이 전달되므로 방사능 유출 가능성을 최소로 하고 있다.

원자로는 밀폐된 Pre-stressed 콘크리트로 된 풀(Pool)내부에 위치하고 있으며, 풀에는 저온의 붕산수(1,000ppm)로 채워져 있어 비상시 격

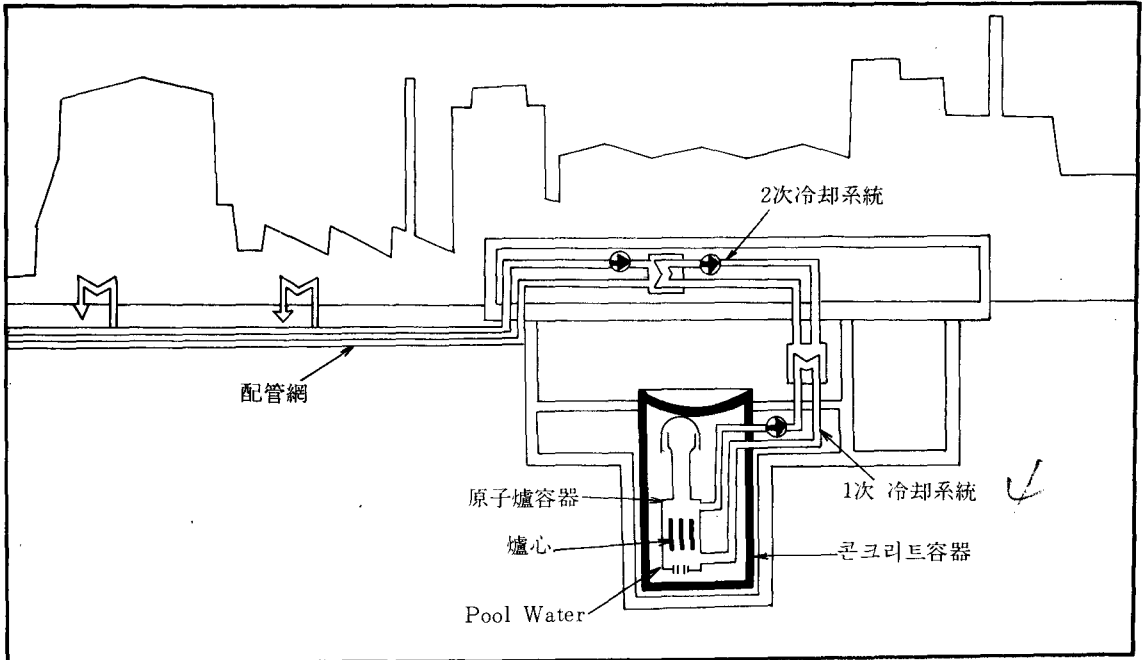
납용기에 채워진 붕산수가 원자로 내부로 흘러 들어 원자로를 가동 정지시킬 수 있다.

원자로에서 생성된 열은 Main Coolant Circuit와 Intermediate Cooling System을 경유, 지역난방망에 전달된다(그림 1 참조).

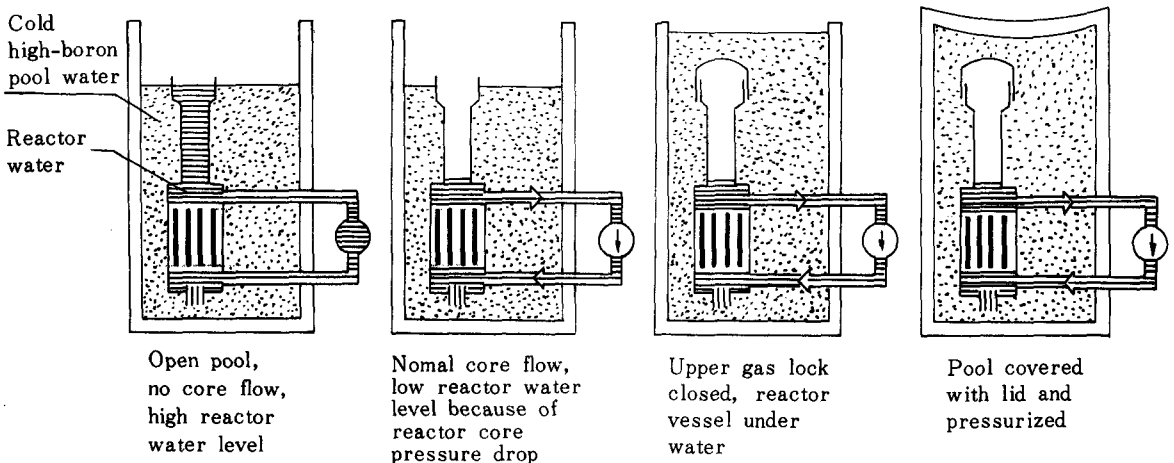
(2) SECURE-400 原子爐 設計特性

열출력은 400MW로서 고리 1호기의 1/4정도 이고, 노심평균출력밀도는 BWR의 2/3, PWR의 1/3정도이기 때문에 발전로에 비하여 핵연료 연소기간이 길고 핵연료 손상 가능성이 훨

〈그림1〉 SECURE原子爐 및 地域暖房 系統圖



〈그림2〉 SECURE原子爐 運轉原理



씬 낮다.

냉각재 온도는 노심입구에서 90℃, 출구에서 120℃이고 노심압력도 7기압으로 발전로(고리 1호기 경우: 290℃, 150기압)에 비하여 훨씬 낮으며, 냉각재 비등점까지는 25℃ 이상의 여유가 있다.

이와같이 SECURE 원자로의 출력이 작고, 온도와 압력이 낮아 안전성 문제가 완화될 뿐 아니라 건설, 운전 및 보수가 발전용 원자로에 비하여 훨씬 쉽다.

(3) SECURE 原子爐 運轉原理(그림 2 참조)

1) 첫째 그림에서는 풀이 열려있는 상태로 원자로는 붕산수에 잠겨져 있다. 원자로 내부와 외부는 수위차가 생기지 않으며, 농도의 차도 없어 모두 1,000ppm을 유지하고 있다.

2) 둘째 그림에서는 주냉각펌프를 가동시켜 원자로 내부의 수위가 Flow의 발생으로 압력강하가 생겨 낮아지는 것을 보여준다.

3) 셋째 그림에서는 붕산수를 보충하여 원자로가 완전히 잠겨 있으며,

4) 마지막 넷째 그림에서는 풀의 상부 뚜껑을 닫고 약 7기압으로 가압시킨 상태에서 원자로 내부의 붕산농도가 100~200ppm으로 희석되어 원자로가 임계상태로 유지해 가동되고 있는 모양을 나타낸다.

(4) SECURE 運轉停止方法

1) 정상가동정지

이 방법은 반응도 제어계통에서부터 고농도 붕산수를 노심내로 주입시키므로 달성된다. 이 경우는 수동 또는 자동으로 가능하며, 자동의 경우는 원자로용기의 과압 또는 냉각재 과온의 신호로 작동된다. 전출력에서 완전정지까지 10분정도 소요된다.

2) Venturi Flow Limiter에 의한 가동정지

능동적인 안전계통의 개입없이 이행되는 고유의 안전장치인 Venturi Flow Limit에 의한 방법이다.

비정상 상태시 노심에서 비등이 발생하기 전에 먼저 원자로 출구에 위치한 Venturi Limit에 비등이 발생하며, 이 비등은 Venturi를 통과하는 냉각재의 압력강하를 증가시켜 압력평형이 파괴되어 풀의 붕산수가 원자로로 유입되어 가동정지된다.

3) 원자로 긴급정지

주순환펌프의 정지에 의한 원자로 긴급정지이다.

원자로용기내의 Upper Gas Lock과 Thermal Water Barrier의 작용에 의한 저온 고농도 붕산수가 원자로로 유입되어 원자로를 가동정지시킨다.

4) 장시간 가동정지

이 경우는 주로 핵연료 재장전시에 이용되는데, 이는 각 핵연료집합체 중심에 위치한 중심관에 중성자 흡수체인 붕소봉(B,C)을 주입시키므로 유지된다.

3. 環境에 미치는 影響

(1) 原子力發電과 火力發電의 廢棄物發生 比較

원자력을 이용하여 지역난방을 할 경우 종래의 화석연료를 사용하는 지역난방보다 환경에 미치는 영향이 매우 줄어들게 된다.

표 1은 1,000MWe급 발전소를 1년 운전하는 경우 연료 소요량 및 폐기물 발생량을 비교한 것이다.

이 표에서 알 수 있는 것이 화석연료는 연소시 인체에 유독한 많은 양의 일산화탄소 및 아황산가스 등을 방출하여 대기오염 등 심각한 공해문제를 야기시키며, 또한 폐기물 발생량도 원자력의 20만배가 넘는 650만톤에 달하는 것을 알 수 있다.

반면에 원자력발전소 폐기물에는 방사성물질이 다량 포함되어 있으나, 핵연료 자체가 피복관속에 밀봉되어 있어 사용후핵연료를 정상적으로 처리하면 완전 무공해 발전소라 할 수 있다.

〈表1〉 原子力發電과 火力發電의 廢棄物發生量比較

(資料 : 2000년의 일본) (1000MWe 기준)

구분	연료 소요량(톤)	폐기물 발생량(톤)
원자력	30(우라늄)	우라늄 28
		플루토늄 0.3
		핵분열생성물 0.9
석유화력	1,400,000	CO ₂ 5,000,000
		SO ₂ 40,000
		NO _x 25,000
		분진 25,000
석탄화력	2,200,000	CO ₂ 6,000,000
		SO ₂ 120,000
		NO _x 25,000
		분진 250,000
		재 50,000
LNG 화력	1,000,000	CO ₂ 3,000,000
		SO ₂ 120
		NO _x 13,000

(2) 日常生活과 放射線量

일반대중이 자연계로 부터 받는 1년간의 평균 방사선량은 100mrem정도이고, X-선으로 가슴사진을 찍을 경우 일회에 100mrem인데, SECURE에서는 연간 0.11mrem의 방사선만이 누출되어 자연방사선량의 1/1,000이하이어서 무시할 수 있을 정도이다. 그러므로 도시 인접지역에 설치하는데 전혀 문제가 없게 된다고 볼 수 있다.

4. 熱負荷 需要分析

(1) 年度別 最大 熱負荷

년도별 최대 열부하는 실사에 의하여 산출한 1984년 기준 최대 열부하와 발전폐열을 이용한 지역난방(KAIST, 1980)사업 수행시 산출한 최대 열부하를 비교하여 년 증가율과 포화년도를 추정하고, 이에 따라 연도별 최대 열부하를 산출하였다.

(2) 月別 平均 熱負荷

월별 평균 열부하는 포화년도인 1991년의 난

방면적에 단위 평균 열부하를 곱하여, 여기에 동시 부하율을 적용하여 산출하였다. 여기서 동시 부하율이란 지역난방, 대상건물의 최대 열부하가 동시에 전부 발생하는 것이 아니라 건물의 형식, 대상지역의 범위, 생활관습 등이 서로 다르기 때문에 최대 열부하의 발생기간에 차이가 있고, 운전시간이 달라 동시 부하율 0.9를 고려하여 평균 열부하를 산정해야 한다.

매월 소모되는 열부하의 변화상태는 그림3에서 보는 바와 같이 1월에 부하가 최대가 되며, 8월에는 부하가 최소로 떨어진다. 즉, 8월에는 급탕에 대한 부하만 있기 때문이며, 8월을 포함한 비난방기간인 5월-10월사이의 열부하는 매우 적다.

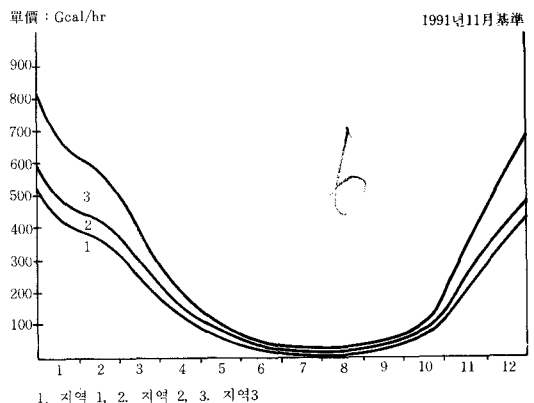
(3) 地域暖房運營方案

일정한 열용량(SECURE : 400MW)의 열원으로 부터 난방열을 공급하게 되는 본 과제의 경우 대상지역 최대 열부하의 몇 %를 주열원으로 부터 공급하는 것이 경제적인지 지역난방대상지역을 변경시켜서 검토해 보아야 한다.

본 과제의 경우 대상지역을 제1지역, 제2지역, 제3지역으로 나누어 검토하였다.

- 제1지역의 경우 : 지역 최대 열부하의 67.4%
- 제2지역의 경우 : " 58.7%
- 제3지역의 경우 : " 41.7%

〈그림3〉 月別 平均 熱負荷 曲線



상기 %만 SECURE에서 공급하고 초과분에 대하여는 보조보일러로부터 공급토록 하며, 열부하 수요가 극히 적거나 급탕부하만이 있는 간헐운전이 요구되는 기간(5월-10월)에는 보조보일러를 사용토록 한다.

5. 原子爐敷地 調査 및 分析

(1) 候補地域 選定基準

- 1) 가능한 한 자연녹지 내에서 선정
- 2) 지질구조대(단층 등 불연속대)가 있는 지역 제외
- 3) 주요 구조물의 기초가 암반에 설치될 수 있는 지역 선정
- 4) 경제성 요소 감안
 - 부지정지, 굴착량 및 성토량의 토공 균형
 - 진입도로
 - 배관망 거리, 배관망 균배
- (2) 서울 후보지역중 3개 지역에 대해 시추.
- (3) 서울의 후보지로서 대덕 신시가지를 대상으로 현장 조사후 3개 지역 추천.

6. 地域暖房 配管網

(1) 熱媒體

지역난방에 사용되는 열매체 선정에 있어서는 열매체가 고압인 경우 가압중계소가 필요하지 않는 이점이 있으나, 배관두께가 증가되고 기기 역시 고압운전에 적합한 기기를 선택해야 하므로 투자비가 많이 드는 단점이 있다.

본 프로젝트에서는 온수가 증기에 비해 수송거리가 길고 보수유지가 비교적 간단하며, 부하변동에 대한 제어가 용이하므로 열매체를 온수로 선택하였다.

(2) 熱媒體의 溫度

열매체의 온도는 열수요에 따라 결정하는 것이 보통이다. 열을 수송하는 면에서 급수의 온도는 높고 되돌아오는 환수의 온도는 낮을수록 효율이 좋게 되어 유량을 줄일 수 있고, 배관

경도 줄일 수 있어 경제적이다. SECURE를 이용한 지역난방의 경우 2차례의 열교환후 지역난방망의 급수 온도는 100℃, 회수 온도는 60℃로 설계되게 한다.

(3) 配管方式

열원에서 수용가까지 열매체를 이송하기 위해서는 장거리 배관망을 이용해야 하므로 배관건설비 등을 포함한 초기투자비가 과대하게 증가되는 단점이 있다. 따라서 초기투자비를 절감하고 효율이 높은 난방을 하기 위해서는 지역적인 조건, 향후 전망 등을 고려하여 경제적인 배관망을 선정해야 한다.

본 연구에서 배관방식은 분기배관망 방식을 채택하였으며, 대형관은 이중 강관, 소형관은 공장 보온 파이프를 선택하였고, 배관의 부설은 지하매설공법을 이용하였다.

7. 經濟性 分析

(1) 스웨덴資料(1982年初 價格)

원자력 이용 지역난방방식의 경제성을 종래의 화석연료, 특히 석유보일러 난방방식과 비교하는 것은 두 난방방식의 운전조건 등이 다르므로 직접 비교하기는 쉽지 않으나, 지역난방용 원자로인 SECURE를 개발한 ASEA-ATOM사 자료를 인용하면 400MW급 SECURE PLANT의 열생산 단가는 25년 사용, 4% 실질이자율, 가동율 50%, 1982년 가격으로 비교하였을 때 석유보일러의 약 1/3로 나타나고 있다.

즉, 석유보일러의 열생산 단가는 26mills/K-WH인데 비하여 SECURE PLANT의 열생산 단가는 8.8mills/KWH로 석유보일러의 34% 수준이다.

스웨덴 자료에서의 가동율 50%는 우리나라의 지역적 실정에 비추어 보면 위도가 스웨덴보다 낮으므로 가동율은 40%정도가 적당하다.

(2) 國產化에 依한 建設費 節減 內容

SECURE-400을 국내에 도입할 경우 시설투

자비 전체 금액의 55%에 해당되는 토목공사, 기자재 공급 및 기기설치는 국내 기술로 대체 가능하며, 이때의 금액은 51.12백만불이다.

이 금액은 SECURE-400의 초기투자비 112.79백만불의 45%와 합할 경우 국산화된 초기투자비는 101.88백만불로 Scandinavia 초기투자비의 10%를 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

SECURE-400 국내 운전시 운전유지비에 영향을 주는 인건비는 A-A 자료에 의하면 근무인원 40명에 대하여 140만불인데, 국내 수준으로 대체할 경우 연간 인건비는 47.50만불로 국내 총 운전유지비는 1.29백만불이 된다(표 2 참조).

(3) SECURE-400과 化石燃料의 熱發生 單價 比較

SECURE-400의 열발생 단가는 표 2의 한국 여건을 반영하여 구하였으며, 석유열병합발전소의 열발생 단가는 현재 국내에서 건설중인 Bunker-C유 이용 열병합난방계획의 자료를 이용하여 산출하였다.

난방시설의 용량은 SECURE-400과 같은 400 MWt로 하였으며, 연료비 단가는 1984년 국내 고시가인 159.13원/ℓ, 발열량 9,870Kcal/ℓ, Plant열효율 85%를 기준으로 하였으며, 석탄열병합발전소의 열발생 단가는 미국의 석탄열병합발전소(난방용량 346MWt)의 자료를 이용하여 산출하였다. 이 경우 연료비 단가는 1984년 기준 수입가격 57\$/Ton, 발열량 6,300Kcal/Kg, 난방전용 열효율 100%를 사용하여 구하였다.

기준안으로 택한 가동율 4,000EFPH, 연 이자율 10%, 수명기간 25년일때의 열발생 단가는 SECURE-400, 석유열병합, 석탄열병합이 각각 12.48, 21.73, 15.91mills/KWht로서 원자력지역난방이 열병합화력보다 경제성이 좋은 것으로 나타났다.

가동율 변화에 따른 열발생 단가를 보면 이자율이 10%보다 높고, 가동율이 1,000EFPH보다 작을 경우를 제외한 정상적인 경우에는 원

〈表2〉 國産化에 依한 建設費 節減 內容

항 목	Scandinavia	한 국	비 고
건설기간(년)	5	4	1년 단축
투자비(백만불)	112.79	101.88	10% 절감
년간운전유지비(백만불)	2.33	1.29	45% 절감

자력 지역난방이 항상 유리한 것으로 나타났다.

8. 結 論

첫째, SECURE원자로의 특성은 고유안전성이 우수하여 방사선 누출 가능성이 거의 없으며,

둘째, 지역난방의 경제성과 원자로의 용량을 고려하여 최대열부하의 60%를 SECURE에서 공급하고 첨두부하 및 비수요기 부하는 기존의 보일러로 보완해야 한다.

셋째, 배관망 설계에 있어서 열매체는 운수로 하고 대구경관은 이중강관을, 소구경관은 공장 보온 파이프를 사용하였으며, 순환수 처리는 이온교환수지법으로 처리하였다.

넷째, 경제성 분석에서는 Levelized Cost 방법을 이용하여 기준안에 대한 열생산단가는 원자력지역난방이 석탄 및 석유 열병합보다 경제성이 좋은 것으로 나타났다. 원자력지역난방을 도입함으로써 기존의 난방방식을 계속 사용하는 것보다 약 10-15%의 난방비를 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

끝으로 본 연구사업은 에너지 절약 및 외화 절감이 중요하다는 관점에서 정부, 기업 공동 연구로 추진되었고 사업의 실용화를 위해 현대건설(주)은 단계적인 개발계획을 수립하여 추진해 나갈 계획임을 밝혀둔다.

