

액체금속냉각고속로에 대한 고찰

A Study on Liquid Metal-cooled Fast Breeder Reactor

황 종 선*, 한 병 성**

(*한국원자력연구소 선임기술원,

**전북대학교 공과대학 전기공학과 부교수)

1. 머릿말

현대의 기술개발능력은 인류가 필요로 하는 모든 기술을 끝없이 개발할 수 있는 것처럼 보인다. 원자력 발전분야에서도 기술의 발전은 부단없이 진행중이다.

미국의 Manhattan 계획 직후, 페르미(E. Fermi)와 진(W. H. Zinn)은 원자력의 새로운 이용에 눈을 돌려, 막대한 양의 에너지를 만들어내면서도 오히려 연료가 증식되는 원자로 즉 고속증식로(Fast Breeder Reactor)를 개발하였다. 위 두사람에 의해 만들어진 고속증식로는 Clementine와 Chicago Pile-4, EBR-I(Experimental Breeder Reactor-I), EBR-II, EFFBR(Enrico Fermi Fast Breeder Reactor)로 이어졌다. 핵연료 증식이 우선이었던 시기였고 1세대의 고속증식로라 불리었다.

이 세대의 고속증식로는 고농축고속 핵연료노심에 의해 외부 블랭킷(blanket)에서 증식이 일어나는 외부증식형이었으며, 출력과 제어에 문제점을 갖고 있었다. 따라서 저농축우라늄을 사용하며 경제성과 대출력 및 안전성이 확보된 PWR과의 경쟁을 위해서는 우라늄과 플루토늄의 산화물로 이루어진 중농축 핵연료를 사용하는 내부증식형으로의 발전이 요구되었다. 가장 효율적인 냉각제의 선택도 필요로 하여, 물과의 격렬한 반응이라는 측면에서는 문제점이 있지만, 열전도성이 양호하고 높은 비

등점을 갖는 액체금속인 나트륨을 냉각재로하는 2세대의 고속증식로인 내부증식형 고속증식로, 즉 액체금속냉각고속증식로(Liquid Metal-cooled Fast Breeder Reactor: LMFBR)가 출현하게 되었다.

고속증식로의 개발현황과 계획을 살펴보면, 1960년대의 300MWe급의 원형로(Prototype Reactor)나 실증로(Demonstration Reactor)의 시기를 거쳐, 세계최초로 상용로급 실증로인 프랑스의 슈퍼 피닉스 1호기가 1986년 전기출력 1,240MWe으로 운전 개시하였다. 1988년 미국 에너지성(DOE)에서는 차세대의 원자로로 PRISM(Power Reactor Innovative Small Module)을 선정하기에 이르렀고, 유럽과 일본에서도 경제성과 안전성을 높이기 위해 여러가지 용량 및 형태의 원자로를 개발 중에 있다. 세계적인 개발계획으로 2005년경까지 새로운 노심개념의 실증 액체금속로가 건설 완료될 예정이며 2025년경에는 상용 액체금속로가 완성될 예정이다. 그럼 이제부터는 본고의 관심사인 LMFBR란 무엇인가에 대해서 살펴본다.

2. LMR 이란?

RWR에서는 농축도를 3% 정도로 낮혀줌으로써, 물과 철을 사용함으로써 일어나는 중성자수의 불균형을 해소하고, 1회의 핵연료장전으로 일년정도를 운전할 수 있도록 되어있다. 그러나 농축도를 14~

17%까지 높이면 에너지가 높은 핵분열중성자가 감속되지 않고 우라늄 원자핵과 부딪쳐도 핵분열확률이 중성자포획확률보다 크므로 연쇄반응을 지속시킬 수 있게 된다. 즉 감속과정이 필요없게 되어 감속재가 필요없는 원자로를 만들 수 있다.

또한 경수로와 중수로에서는 물 및 중수가 감속재와 냉각재의 역할을 하였다. 좋은 냉각재, 좋은 감속재이라면 노심영역에서 액체로 있으면서 수증기로 변하는 것을 막아야 한다. 그러나 물의 임계온도가 374℃이기 때문에 그 온도 이하에서 원자로를 운전하여야 하므로 원자로 운전온도의 열효율이 33% 정도이었다. 그런데 감속재가 필요없는 원자로에서는 대기압하에서 비등점이 높은 냉각재를 택하여 원자로 운전온도를 높이고 열효율을 높일 수 있다. 현재 액체고속로에서 냉각재로 사용하고 있는 나트륨의 장점으로는 첫째, 열체거능력이 좋다. 열전도도는 물의 약 100배 이상, 강제순환 열전달계수는 물의 2배 이상이다. 둘째, 비등점이 높아서 상대적으로 운전온도가 높은 상태에서도 항상 액체상태를 유지하며 이상류(two phase flow)가 되지 않는다. 셋째, 단원자 물질이기 때문에 화학분해를 하지 않는다. 따라서 열적특성이 급변하는 일이 없다. 넷째, 단면적이 약 $4 \text{ barn}(=4 \times 10^{-24} \text{ cm}^2)$ 으로 다른 물질에 비하여 비교적 작다. 다섯째, 다른 금속 즉 원자로 구조재와의 공존성이 좋다. 여섯째, 전기전도도가 양호하다. 일곱째 가장 중요한 장점인, 자연에 많이 존재하고 있다는 점을 들 수가 있다. 나트륨은 냉각재로서 위와같은 장점을 가지고 있는 반면에 다음과 같은 단점도 가지고 있다. 첫째, 공기, 물, 수증기 등과 격렬한 화학반응이 일어나므로 불순물에 대한 특별한 고려가 필요하다. 둘째, 약한 유도방사능이 있다. 셋째, 비열이 작기 때문에 동일 출력에 대해서 펌프동력이 크게 필요하게 된다. 그러나 이것은 노심내 온도상승폭을 높힘으로써 출력당 냉각유량을 적게 만들수 있어 고속로에서의 펌프동력이 경수로에 비하여 적게되는 경우가 많다. 넷째, 물보다 표면장력이 커서 원자로 구조재나 핵연료 피복재를 충분히 적시지 못하는 약점이 있다.

다섯째, 불투명하기 때문에 물처럼 속을 들여다보며 작업을 할 수 없다. 나트륨을 냉각재로 사용하기 때문에 대기압하에서 사용할 수가 있고 원자로 용기 및 기타 에너지 전달부분의 압력이 높지 않아

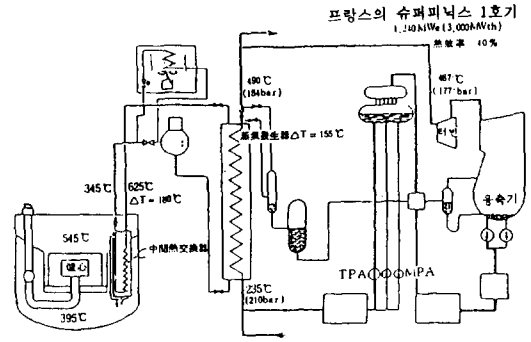


그림 1. Loop형 액체고속로의 운전온도 예

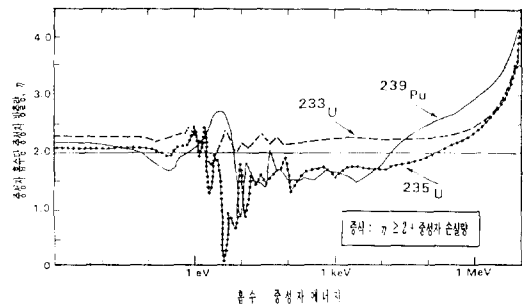


그림 2. 핵분열성핵열로에 흡수되는 중성자에너지와 핵분열시 방출되는 중성자수

도 되기 때문에 원자로구조재가 얇아도 된다. 뿐만 아니라 원자로의 운전온도를 높게 할 수가 있어 (그림1) 고온의 나트륨으로부터 열을 받아서 만들어지는 증기의 온도가 높다.

이것은 열효율과 직결되어 액체고속로의 원형로서 프랑스에 있는 Phenix의 경우 열효율이 45%나 된다. 이것은 경수로형의 33%에 비하여 큰 발전이라고 할 수가 있다. 경수형원자력발전소나 중수형원자력발전소에서의 증기건전성이 첨단화력발전소의 경우보다 나쁘기 때문에 증기터빈 브레이드의 길이가 길며, 이에따라 증기터빈을 만드는 생산단가가 비싸다. 그러나 액체고속로는 높은 온도의 수증기를 만들어 낼 수가 있게되어 현재 상용화되어 널리 쓰이고 있는 첨단 석유화력발전소의 증기터빈을 그대로 사용할 수 있다는 점에서 경제적인 이득을 가져올 수가 있으며, 또한 액체고속로의 장점이라고 말할 수 있다.

이와같은 농축도가 14~17%인 원자로는 고속중성자로 핵분열을 일으키므로 감속재가 필요없고,

나트륨을 냉각재로 사용한다. 그래서 이러한 높은 에너지의 중성자원자료를 액체금속냉각고속로라고 한다. 다음은 핵연료에 대하여 살펴보자.

그림 2는 중성자의 에너지를 변화시키면서 ^{235}U 와 ^{239}Pu 가 중성자 흡수당 방출하는 중성자 갯수를 비교한 것이다. 열중성자는 핵분열을 일으키는 경우 ^{235}U 가 유리하다. 그러나 중성자의 에너지영역이 높은 액체금속로에서는 ^{235}U 핵연료보다 ^{239}Pu 를 핵연료로 사용하는 것이 더 많은 중성자를 방출한다.

다음은 핵연료주기면에서 중수로, 경수로, 액체금속로에서 우라늄핵연료물질이 어떤 흐름으로 어떤 양이, 어떤 과정을 거쳐서 공급되고 폐기되는가를 살펴보기로 하다. 이것을 나타낸 것이 그림 3이다.

경수형로, 중수형로 또는 액체금속로에서의 핵연료주기상의 장단점을 알기 위하여 동일한 출력을 갖는, 여기서는 100만 kW급 출력의 원자력발전소를 1년간 가동하는데 필요한 핵연료를 서로 비교해 본다.

경수형로에서는 약 221톤의 천연우라늄이 일차적으로 필요하다. 이것을 농축과정에서 34톤의 3.2% 농축우라늄으로 만들어 원자력발전소에 넣는다. 이것은 1년간 태우게 되면 32톤이 사용후핵연료로서 폐기된다. 이 사용후핵연료속에는 Pu 핵분열성물질이 약 0.22톤 들어있다. 특히 주의해야 할 것은 221톤의 천연우라늄에서 34톤의 핵연료를 만들어냈으니 약 187톤 정도의 우라늄, 즉 U-235의 분량이 0.2%로 줄어버린 감손우라늄이 생겨나고 있는 점이다. 여기서는 사용후핵연료속에 있는 우라늄 또는 Pu를 재처리하지 않는다는 전제하에서의 계산이다.

이에 비해서 중수형로는 경수형로보다 핵연료가 적게 들어 170톤의 천연우라늄으로 168톤의 핵연료를 만들어 낸다. 이것을 100만 kW급 중수형로에서 1년간 태우면 166톤의 사용후핵연료로서 나오게 된다. 이 사용후핵연료속에는 Pu 핵분열성물질이 0.43톤 들어 있다. 여기서는 농축과정을 거치지 않는다. 따라서 원광 소요량면에서 볼때 경수형로보다 중수형로가 적게 드는 것을 알 수 있다. 그렇지만 중수형로에서는 166톤의 사용후 핵연료속에 Pu 핵분열성 물질이 0.43톤 들어 있다. 따라서 Pu이 들어있는 전체의 양은 중수형로가 많지만, 재처리해야 할

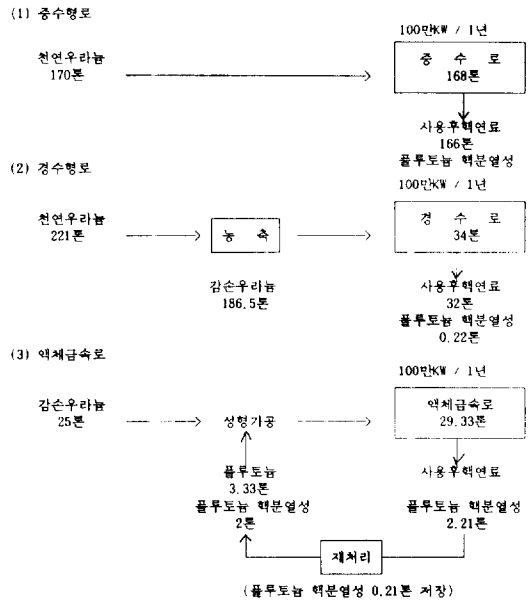


그림 3. 중수형로, 경수형로 및 액체금속로 핵연료의 질량 흐름도

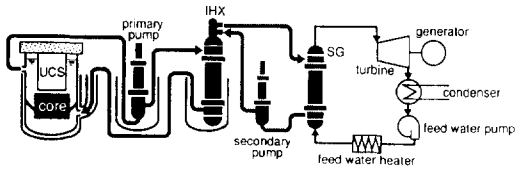
사용후 핵연료의 양이 너무 많으므로 오늘날 Pu를 재활용해서 쓰고자 하는 것은 경수형로에서 나오는 핵연료가 대상이 된다.

한편 액체금속로의 경우 천연우라늄 또는 농축과정에서 생겨났던 감손우라늄 26톤에 Pu 핵분열성 물질이 2톤 가량 들어있는 Pu 핵연료 3.33톤을 섞어서 혼합산화물 핵연료 29톤을 만들어 낸다. 이것을 100만 kW급 출력의 액체금속로에서 1년간 태우면 약 28톤의 사용후핵연료가 배출된다. 이 28톤의 사용후핵연료속에는 Pu 핵분열성물질이 2.21톤 가량 들어 있다. 이 2.21톤은 맨처음 들어갔던 2톤보다 많고 있으며 이는 증식되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이 사용후핵연료속에 들어 있는 2.21톤 가운데 2톤만을 다시 감손우라늄이나 천연우라늄 26톤과 섞어서 핵연료를 제조하면 다음 1년간 사용할 핵연료가 만들어진다. 여기서 남은 0.21톤은 저장해 두었다가 차후에 증식된 액체금속로의 핵연료로 사용하면 된다.

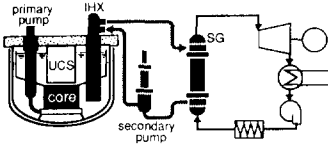
3. 노형(Reactor Type)

3.1 노형의 종류

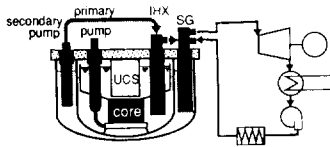
LMR의 대표적인 노형으로는 열수송계통의 형태



Loop type



Pool type



Double Pool type

그림 4. LMR Type

에 따라 루프형, 풀형, 이중탱크형의 세가지로 크게 분류 할 수 있다.(그림 4 참조)

루프형 및 풀형은 중간 열교환기 이후의 중간 열 전달계통이 동일하다. 위 두 형식의 차이, 루프형에서는 PWR과 같이 원자로 용기, 중간 열교환기, 1차계 순환펌프를 따로 배치한 뒤 이것들을 배관으로 연결하여 내부에서 1차계 나트륨이 흐르게 되나 풀형에서는 커다란 원자로 용기속에 나트륨을 담고 노심만이 아니라 중간열교환기와 1차계 순환펌프도 같이 담겨져 있는 점이다. 이것이 채택된 이유는 LMR에서는 출력밀도가 큰 반면에 나트륨의 비열이 물의 3분의 1정도로 열충격을 완화시키고 자연 순환에 의한 냉각능력으로 붕괴열을 제거토록 하는데 있다. 이중탱크형(Double Pool Type)은 그림 4에서 볼수 있듯이 한 탱크안에 또 다른 탱크가 들어 있는 형태로서 안쪽탱크에는 원자로와 1차펌프, 중간 열교환기를 수용하고 바깥쪽 탱크에는 2차펌프, 증기발생기(Steam Generator)를 수용하여, BOP계통의 터빈과 발전기를 제외한 모든 주요계통을 탱크안에 집어 넣는 방식이다. 즉 원자로용기

밖에 설치된 안전용기를 좀더 크게 만들어 원자로 용기와 안전용기 사이에 중간 열교환계를 설치하는 방식이다.

3.2 각국의 개발방향

LMR의 개발에 관한 세계적인 판도를 볼때, 미국, 일본, 러시아, 유럽의 4극체제를 이루고 있으므로 이들 개발현황과 전략을 살펴본다.

가) 미국

미 에너지성(DOE)은 모듈화 개념이 적용된 GE사의 PRISM(Power Reactor Innovative Small Module)을 선정하여 차세대의 LMR로 개발하고 있다.

이 PRISM은 원형실증로(Full-Scale Prototype Reactor Testing for Design Certification)의 성격을 갖게되며 금속핵연료를 사용하여 소형노심을 갖는 모듈형 액체금속로이다. 이 PRISM개발은 한편으로 알콘국립연구소(ANL)가 개발중인 IFR(Integral Fast Reactor)과 연계하여 개발되고 있다.

나) 일본

루프형의 JOYO에서 NONJU, DFBR로 이어져 왔던 일본의 LMR들은 일본전력중앙연구소가 중심이 되어 고유안정성, 핵확산저항성, 모듈화 등의 혁신개념이 가미된 2중탱크형(Double Pool Type)의 LMR개발에 열중하고 있다. Na-H₂O의 격렬한 반응을 완화시키기 위한 설계와 금속핵연료를 사용하는 소형노심의 모듈화개념이 개발의 방향이다.

다) 러시아

고속중식로 개발에 관련한 프랑스와 함께 선도적 역할을 담당하고 있는 러시아는 유럽과 같은 노형인 풀형을 견지하면서 증식비를 높이고, 원자로용적당 출력을 높게하려고 하는 개발전략을 갖고 있으며 경제성 제고의 방편으로 표준설계에 의한 많은 수의 LMR을 동시 건설해야 한다는 계획도 갖고 있다. 우라늄자원의 유효활용을 위한 높은 증식비(1.3~1.4)와 RWR과 경쟁할 수 있을 정도의 경제성을 이루기 위한 러시아의 LMR개발계획은 에너지 공급능력을 극대화시킬 수 있을지 모른다.

라) 유럽

상용로에 가까운 실증로인 Super Phenix를 갖고 있는 프랑스를 비롯하여, 미국의 기술 독주를 견

제할 수 있는 기술력을 가진 영국, 독일등의 국가들이 포함된 유럽은 자체의 개발력을 결집시킬 수 있는 유럽고속증식로전력그룹(European Fast Reactor Utilities Group :EFRUG)의 결성에 난항을 겪어 왔고, 경제성 및 안정성에 관한 제고, 각국이 정책 방향이 LMR의 쾌속항진에 걸림돌로 작용해 왔다. Super-Phenix형의 풀형을 기본으로하여 좀더 경제적인 LMR, 즉 RWR과의 경쟁을 위한 LMR개발을 전략으로 하고 그동안 프랑스, 영국, 독일 3개국의 개별적으로 LMR을 개발하여 왔다. 그러나 이들 3개국은 Super-Phenix형의 풀형을 기본으로 하고 유럽통합단일로형으로서 보다 경제적인 LMR, 즉 PWR과 경쟁을 위한 LMR을 개발하고자 대형실증로 EFR(European Fast Reactor)의 설계를 진행중에 있다.

4. LMR의 시대적 발달배경

LMR이 개발되어온 과정과 동기는 다음과 같이 요약할 수 있다.

• LMR의 시대적 발달배경

가) 1960, 70년대

우라늄의 수요가 급속히 증가할것이라는 예측과 LWR 및 농축기술의 대미의존탈피 목적으로 경제성을 고려치 않고 LMR을 개발한 시기이다.

나) 1980년 초반

LMR 개발국들이 각기 농축기술 보유하게 되었고 LMR의 경제성 확보가 최우선으로 고려되었으며 우라늄 가격은 안정세를 유지하였다.

다) TMI(1979) 및 체르노빌(1986)사고 이후:

LMR의 설계에 고유안정성이 요구되었으며, LMR 고유안전성은 금속핵연료를 사용하고 있는 실험로 EBR-II에서 실험으로 입증되었다.

라) 1980년대 중반:

플루토늄과 우라늄을 분리하지 않는 건식재처리법의 기술개발에 성공하였고 금속핵연료 사용의 액체고속로 실증연구가 수행되었다.

마) 현재

농축우라늄의 안정적인 공급과 플루토늄의 공급과잉으로 인하여 기존의 고속증식로는 플루토늄과 초장수명핵종인 Actinide의 연소로의 활용을 검토 중이다. 또한 안전성과 경제적인 측면이 LMR의

설계 및 건설에 중요 관건이 되고 있다.

5. 맺음말

무한 동력을 얻고자 하는 생각은 “기술”이나 “과학”이라는 단어가 사용된 이래 수많은 두뇌들에 의해 얼핏 한번은 떠올려진 이상이었을 것이다.

지금과 같이 자원의 고갈과 위기를 설세없이 부르짖는 시기에 “무한동력”이란 존재는 인류의 모든 어려움을 해결할만한 방법이고, 특히 과소비성 현대의 생활에는 절대적인 수단일 것이다.

무한 동력과는 비교조차도 할 수 없는 한참아래 쪽에서 서성거리고 있는 에너지 발생원인 액체고속냉각고속증식로의 존재에 대하여, 언제, 어떻게 접근해야 할까? 하는 고민을 우리는 계속해야 할 필요가 있겠는가의 관한 의문에 대한 대답은 항상 긍정적이어야 하겠다.

이제는 국가적 규모의 연구개발사업이 요구되며 자원빈국이면서 공업선진국을 지향하고 있는 우리나라의 현 상황으로는 아직 실용화되고 있지 않은 LMR 개발기술에 접근할 수 있는 시간적 여지가 남아있다. 따라서 우리특유의 기술소화내지는 토착화의 의지를 결집하여 독자적인 개발계획을 수립하여 적극추진한다면 선두주자들과 어깨를 나란히 하여 우리도 꿈의 원자인 LMR의 혜택을 누릴 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 조만 외 17인. “고속증식로 기본기술개발연구 (한·불 공동연구),” KAERI/RR-1010/90 (1991.7).
- [2] 남호윤 외 23인, “고속증식로 기술개발,” KAERI/RR-1130/92(1992.7).
- [3] R.C. Berglund and J.E. Quinn, “A Seminar on the ALMR(PRISM) for KEPCO”ge Nuclear Energy(April 1989).
- [4] Brandstetter, A.M. Broomfield, and B. Saitcevsy, “Development, operational experience and implications for future design of fast reactors in western Europe,” Phil, Trans. R. Soc. Lond A331(1990).

- [5] L.J. Saunder, "Reviewing progress on the European Fast Reactor(EFR)" Nucl. Eng. Int. (Aug. 1990).
- [6] IAEA, "Status of Notional Programmes on Fast Breeder Reactors," 22nd Annual Meeting. Vienna(April 1989).
- [7] "European Fast Breeder Reactor Project" European Fast Reactor Design Construction Companies(Feb. 1989).
- [8] JP. Serpantie et al., "Progress in LMFBR Design: The European Fast Reactor Compact Primary System"(1989).
- [9] Proceedings International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR '91 October 28-November 1, 1991 Kyoto, Japan.
- [10] IAEA Bulletin 18, No. 516. 8 OECD: Feb '78(1976).



황종선(黃宗善)

1953년 12월 13일생, 1977년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1979년 한양대학교 산업대학원 졸업(석사). 1991년~현재 전북대학교 대학원 전기공학과 박사과정 1987년~현재 한국원자력연구소 선임기술원.



한병성(韓秉誠)

1951년 12월 22일생, 1975년 전북대학교 공대 전기공학과 졸업. 1981년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1988년 프랑스 루이파스퇴르 대학 박사학위 취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소)연구원 1991년 미국 IBM Watson 연구소 연구원. 1989~현재 전북대 공대 전기공학과 부교수.