

붕산 분말의 원자로 용기 직접 주입 방식에 대한 개념 연구

박천태 · 이 준 · 김영인 · 윤주현 · 지성균

A Conceptual Study on a Method of Boron Powder Direct Vessel Injection

Cheon Tae Park, Jun Lee, Young In Kim, Juhyeon Yoon and Sung-Quun Zee

요 약 일체형 원자로는 제어봉의 고장으로 인해 제어봉을 이용한 원자로 정지가 불가능한 경우 원자로에 붕산을 주입하여 정지시킨다. 일반적으로 붕산을 주입하는 방식은 붕산 분말을 물에 용해시켜 고농도의 붕산수를 만들어 저장하고 있다가 사용하는 것이다. 그러나 이와 같은 방식은 구성 기기의 수가 많고 구성이 복잡하므로 비경제적이며 운전과 계측제어 및 유지 보수 측면에서 불리하다. 본 연구에서는 이와 같은 단점을 개선하기 위해 붕산 분말을 원자로에 직접 주입하는 방식을 채택하였다. 붕산 분말을 원자로에 직접 주입하므로써 기기의 수가 줄어들고 계통의 구성, 운전 및 유지보수가 매우 단순해지고 경제적이다.

Abstract The integral reactor is tripped by the boron injection to the reactor when the CEA(Control element assembly) is not available due to its malfunction. In general, the borated water is made by dissolving the boron powder in the water and is stored in a tank. and then injected. But, this method is disadvantageous from the view point of construction cost, operation and maintenance because it has many components and is complicated. In this study, the boron powder direct vessel injection method is adopted to improve the system. Injecting the boron powder directly to the vessel and decreasing of number of components, the system configuration, operation and maintenance is simplified and the construction cost is reduced.

Key Words : Boron powder, Direct Vessel Injection, Integral Reactor, N2 gas, Pressurizer, Borated Water

1. 서 론

국내에서는 원자력 에너지의 활용 증대 및 이용 다변화를 위해 해수 담수화를 위한 에너지원, 중소규모 전력생산 등 다목적 용도에 활용하기 위해 안전성 및 운전성이 향상된 일체형 원자로를 개발중이다. 이 일체형 원자로에서 원자로 정지는 제어봉을 낙하시켜 수행하며, 모든 제어봉 구동장치의 고장으로 인해 제어봉을 사용하지 못하는 경우에는 고농도의 붕산수를 주입하여 원자로를 정지시킨다[1].

그런데 고농도의 붕산수를 주입하는 방식은 여러 가지 단점이 있다. 상용 원자로의 경우, 붕산분말을 고온의 물에 용해시켜 고농도(약 20,000 ppm)의 붕산수를 만들어 대용량의 탱크에서 다시 물과 희석하여 약 4000 ppm의 붕산수로 저장하였다가 유사시 펌프를 사용하여 원자로에 주입하는 방식이 있다[2]. 또 다른 방

식은 붕산 분말을 고온의 물에 용해시켜 고농도(약 20,000 ppm)의 붕산수를 만들어 탱크에 고온으로 유지하여 보관하고 있다가 사고시 펌프를 사용하여 원자로에 주입하는 방식이 있다.[3] 이 두 가지 모두 붕산 분말을 물에 용해시키는 장치가 필요하며 용해도를 높이기 위하여 물의 온도를 고온으로 유지하기 위한 전열기가 필요하다. 또한 원자로에 주입시 붕산수 형태의 물을 주입하므로 원자로 내부의 과압을 방지하기 위하여 반드시 원자로로부터 냉각재를 유출시켜야 한다. 이 경우, 붕산수를 고온으로 유지하기 위한 전열기 및 계측기, 보관을 위한 탱크, 탱크로 이송하기 위한 펌프 및 배관이 필요하고 냉각재 유출을 위한 계통이 필요하기 때문에 계통이 복잡하고 운전에도 매우 불리하다.

본 연구에서는 위와 같은 단점을 개선하여 붕산 분말을 직접 원자로 용기에 주입하여 용해시키는 방식을 개발하고자 한다. 먼저, 상용로의 고농도 붕산수 주입 방식의 현황을 검토하였다. 그리고 붕산 분말 주입 방식에 대하여 기술하였다.

*한국원자력연구소

2. WH형 원자로 고농도 붕산수 주입 방식에 대한 검토

WH(Westing House)형 원자로에서는 원자로 냉각재 상실사고시 고농도의 붕산수를 주입하여 노심의 반응도를 제어한다.[3] CE(Combustion Engineering)형 원자로에서는 저농도(dir 4000 ppm)의 붕산수를 대용량의 재장전수 탱크에 희석하여 보관하는데 반해 WH형 원자로에서는 고농도(약 20,000 ppm)의 붕산수를 주입하는 것이 다르다[2,4]. WH형 원자로에서의 붕산수 주입 관련시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 먼저 붕산 혼합탱크에서 원자로 보충수와 붕산 분말을 섞어 용해시켜 고농도의 붕산수를 만든다. 여기서 만들어진 고농도의 붕산수는 붕산주입 밀림탱크에 보내 고온으로 유지하며 붕산 주입탱크로 순환시키다가 사고 발생시 안전주입 펌프에 의해 붕산 주입탱크의 붕산수를 원자로에 주입한다. 이 계통은 원자로 보충수 탱크, 원자로 보충수 펌프, 붕산 혼합탱크, 붕산주입 보충펌프, 붕산주입 밀림탱크, 붕산 주입탱크, 붕산주입 재순환펌프, 재장전수 탱크, 안전주입펌프와 밸브 및 배관과 계측제어기로 구성되어있다. 원자로 보충수 탱크는 원자로 냉각재 보충 및 붕산 혼합탱크에 필요한 순수를 제공한다. 원자로 보충수펌프는 원자로 보충수탱크의 물을 이송하는데 사용하며 단단 원심형 펌프이다[5,6]. 붕산 혼합탱크는 원자로 보충수를 공급받아 붕산 분말과 희석하여 고농도의 붕산수를 만든다. 탱크 외부와 배출 배관은 절연되어 있다. 이 탱크에는 시료 채취 설비와 혼합기, 온도 조절기 및 증기 주입 배관이 설치되어있다. 붕산 주입 펌프는 붕산 혼합탱크에서 고농도의 붕산수를 붕산주입 밀림탱크에 이송하는 역할을 한다. 붕산주입 밀림탱크는 붕산 주입탱크 재순환 유로에 대한 밀림 능력을 가지고 있다. 붕산주입 밀림탱크는 정상 운전시에는 붕산 주입탱크와 동일한 붕산농도를 가진다. 안전주입 신호가 발생하면 밀림탱크에서 들어오고 나가는 재순환관이 자동으로 폐쇄되고 붕산주입 재순환펌프는 정지된다. 붕산 주입탱크는 12 wt%(질량분율 : 물과 붕산의 혼합물 질량에 대한 붕산의 질량)의 농축 붕산수가 담겨있고 안전주입 펌프의 방출구에 연결되어 있다. 정상운전시 냉수층이 생기는 것을 방지하기 위하여 붕산 주입탱크 내의 붕산수는 붕산주입 재순환펌프에 의해 붕산주입 밀림탱크로 계속 재순환된다. 붕산 주입탱크에는 분출관형의 주입구가 붙어 있어서 붕산수가 탱크내로 들어올때 360° 방향으로 골고루 뿌려준다. 이것은 체널링을 방지하고 붕산수가 방사상으로 동질성을 갖게 해준다. 붕산수가 용해도 한계(21,000 ppm 붕산의 12 wt%

에서 135°C)이상의 온도를 유지하도록 하기 위해서 전열기 및 온도계측기가 설치되어 있다. 붕산주입 재순환 펌프는 붕산 주입탱크, 붕산주입 밀림탱크 및 관련 배관으로 구성된 폐회로를 따라 12 wt%의 농축 붕산수를 계속 재순환시킨다. 재장전수 탱크는 대용량의 탱크로서 사고시 사용하기 위해 다량의 저농도 붕산수를 저장한다. 안전주입 펌프는 냉각재 상실사고가 발생하면 붕산 주입탱크에 저장된 고농도의 붕산수를 원자로에 먼저 밀어넣은 후 재장전수 탱크의 붕산수를 원자로에 주입한다.

이 계통은 다음과 같이 운전된다. 원자로 보충수 펌프를 사용하여 원자로 보충수 탱크의 물을 붕산 혼합탱크의 설정 수위까지 채운다. 이 물은 탱크 내부에 증기를 주입하여 붕산 석출점 이상의 온도로 가열된다. 그 후 혼합기로 고온의 물을 혼합하면서 붕산 분말을 투입한다. 혼합이 끝난 후 액체시료 채취를 통해 붕산수 농도(약 20,000 ppm)를 확인한다. 그리고 붕산 혼합탱크에 연결된 붕산주입 보충펌프를 사용하여 농축된 붕산수를 붕산주입 밀림탱크와 붕산 주입탱크를 보충한다. 그 후 정상 운전중에는 붕산 주입탱크내에서의 열성층화 현상을 방지하기 위해 붕산 주입탱크와 붕산주입 밀림탱크 및 붕산주입 재순환펌프로 구성된 폐회로를 통해 붕산 주입탱크의 붕산수를 계속 재순환시킨다. 그리고 냉각재 상실사고가 발생하면 재순환관의 격리밸브를 닫고 붕산주입 재순환펌프를 정지시키며 안전주입 펌프를 작동시켜 붕산수를 원자로에 주입한다.

이와 같은 설계에서는 많은 수의 탱크 및 펌프와 전열기 또는 증기주입계통과 재순환계통의 기기와 계측 제어계통이 필요하므로 비경제적이고 운전이 복잡하고 유지보수 측면에서도 매우 불리하다.

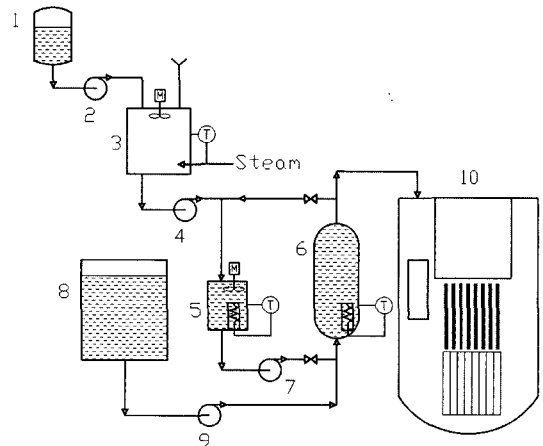


Fig. 1. WH형 원자로의 붕산수 주입방식

3. 일체형 원자로의 붕산 분말 직접 주입방식에 대한 검토

일체형 원자로에서는 정상 운전중 붕산수를 사용하지 않으며, 제어봉의 고장으로 인해 원자로를 정지시키지 못하는 경우에 붕산을 주입하여 원자로를 정지시킨다. 그러므로 원자로가 정상 운전 상태인 300°C, 15 MPa의 온도, 압력의 조건에서 붕산을 주입하여야 한다. 따라서 붕산을 주입하는 펌프로는 일정한 용량의 물을 고압으로 공급하는 데 적합한 용적식 펌프가 사용된다. 그런데 일체형 원자로의 충전계통은 정상 운전중 원자로에서 냉각재가 누설될 경우 원자로 보충수 탱크의 물을 충전 펌프를 통해 원자로에 보충하는 계통이다[1]. 따라서 붕산 주입에 이 충전 펌프를 사용하고자 한다. 붕산 분말은 물에 매우 잘 용해된다. 또한 붕산 분말은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 물의 온도가 증가함에 따라 용해도는 급격히 증가한다.

본 연구에서는 일체형 원자로에서 붕산을 사용하여 원자로를 정지시키는 방식으로 고농도의 붕산수를 주입하는 방식과 붕산 분말을 직접 주입하는 방식을 검토하였다. Fig. 3는 WH형 원자로의 방식과 같이 고농도의 붕산수를 주입하는 계통을 나타냈다. 이 계통은 원자로 보충수 탱크, 원자로 보충수 펌프, 붕산 혼합탱크, 붕산 주입펌프, 붕산주입 밀림탱크, 붕산 주입펌프, 붕산주입 재순환펌프, 충전 펌프, 수용 탱크로 구성되며 각 탱크에는 수위계 및 온도계가 설치된다. 붕산 혼합탱크에는 물을 가열하기 위한 증기 주입관이 설치되고 온도계와 연동되어 작동하도록 되어있다. 붕산주입 밀림탱크와 붕산 주입탱크에는 붕산수를 고온으로 유지하기 위하여 탱크 내부에 전열기가 설치되어 있고 온도를 측정하여 자동으로 붕산수의 온도를 제어한다. 붕산주입 밀림탱크와 붕산 주입탱크를 재순환시키는 재순환관의 유량을 계측하여 재순환 유량을 제어한다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 고농도의 붕산수를 만들어 보관하다가 필요시 주입하는 방식은 먼저 붕산 혼합탱크에서 순수와 붕산

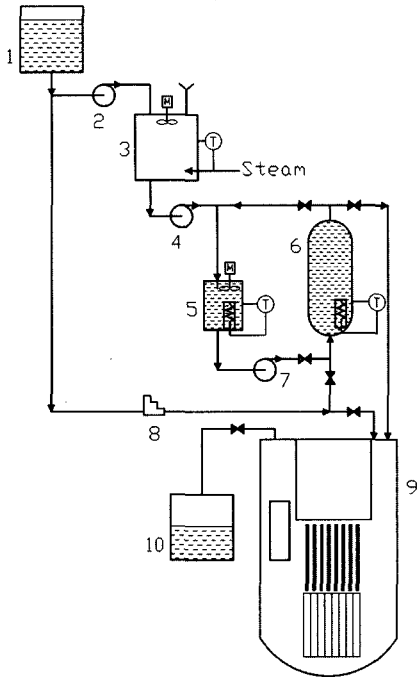


Fig. 3. 일체형 원자로 붕산수 주입계통

분말을 혼합 용해시켜서 붕산주입 밀림탱크 및 붕산 주입탱크에 보낸다. 그리고 정상 운전시 고농도의 붕산수가 붕산 주입탱크 내에서 성층화 현상 및 석출을 방지하기 위하여 전열기를 작동시키고 지속적으로 붕산주입 밀림탱크로 재순환시켜야 한다. 또한 붕산수를 주입하면 원자로 내부의 냉각재의 부피 증가로 인해 원자로의 압력이 증가한다. 이를 방지하기 위하여 붕산수를 주입할 때 수용 탱크로 냉각재를 유출시키는 계통을 추가로 갖추어야 한다.

이를 위하여 많은 탱크와 펌프 및 밸브 등의 기기 및 계측 제어계통이 필요하므로 운전이 복잡하고 유지 및 보수 측면에서도 매우 불리하다.

붕산 분말 직접 주입방식에 대해서 살펴보자. Fig. 4는 일체형 원자로의 붕산분말 직접 주입방식을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 붕산 분말 직접 주입 방식은 붕산수 주입방식보다 계통이 매우 단순하다.

이 계통은 원자로 보충수 탱크, 충전 펌프, 붕산분말 주입탱크로 구성되어 있다. 원자로 보충수 탱크는 정상 운전중 원자로의 누설을 보충하기 위하여 순수를 저장한다. 토출압이 약 20 MPa인 용적식 충전 펌프는 원자로의 수위가 설정치 이하로 저하되면 원자로 보충수 탱크의 물을 원자로에 보충한다. 그리고 붕산을 사용하여 원자로를 정지시켜야 할 때 붕산분말 주입탱크에 원자로 보충수 탱크의 물을 고압으로 밀어넣어 그 압력에

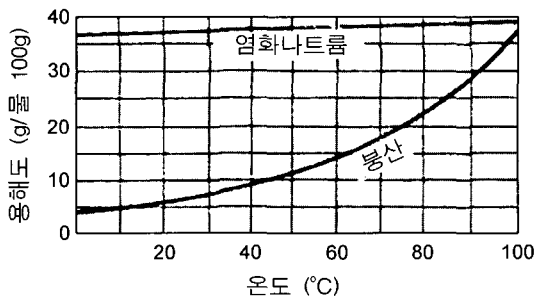


Fig. 2. 물에서의 붕산의 용해도

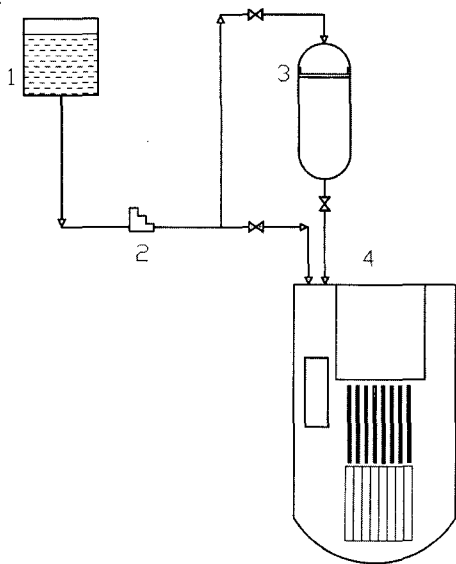


Fig. 4. 일체형 원자로 봉산분말 주입계통

의하여 봉산 분말을 원자로에 주입한다. 봉산분말 주입 탱크는 고압에 견딜 수 있는 압력용기이며 하부에는 봉산 분말이 저장되어 있고 상부는 물로 채워져 있으며 그 사이는 피스톤 형태를 이루고 있다.

원자로 용기 내의 냉각재의 부피가 약 10 m^3 이므로 반응도 제어에 충분한 농도인 약 4000 ppm을 고려하면 봉산 분말의 용량은 약 0.25 m^3 으로 정할 수 있다. 고압의 물이 상부에 연결된 배관으로 들어오면 피스톤에 압력이 가해져서 봉산 분말이 하부의 배관을 통해 원자로에 주입된다. 주입된 봉산 분말은 고온의 냉각재에 용해되고 희석된다. 봉산 분말이 고온의 냉각재에 용해되기 때문에 부피 팽창에 의한 압력 상승은 일어나지 않는다. 그러므로 봉산 분말 주입시 냉각재를 유출시키지 않아도 되므로 유출계통이 필요없다. 이와 같이 봉산 분말을 직접 주입하는 방식을 채택하면 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 봉산 분말과 물을 희석하는 봉산 혼합 탱크, 이 봉산수를 이송하는 펌프, 고농도의 봉산수를 저장하고 고온으로 유지하는 탱크, 냉각재 유출을 위한

탱크 및 관련 배관 등 많은 기기가 필요없으므로 계통이 매우 단순해진다. 따라서 설계 및 기기 제작과 설치 등 총 건설 경비를 약 70~80% 정도 절약할 수 있다. 둘째, 계통이 단순하므로 계측제어계통 및 운전도 단순해지므로 주입시간도 기존의 약 20%로 줄일 수 있다. 셋째, 계통의 유지, 관리 및 보수도 간단해지므로 신뢰도 및 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 반면에 봉산 분말과 물의 경계에서 물의 누설을 방지하는 설비를 갖추어야 한다.

4. 결 론

본 연구는 기존의 봉산수 주입계통이 가지고 있던 단점을 개선하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구성 기기의 수를 줄이고 계통의 구성을 단순화하였다.
2. 운전 절차가 단순화되어 봉산 주입 시간을 단축하였다.
3. 설계 및 건설 측면에서 시간과 비용을 절감하였다.
4. 원자로 운영시 계통의 신뢰도와 성능을 향상시켰다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 일체형원자로 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] "일체형원자로 설계기술개발 : 일체형원자로 계통설계 기술개발", KAERI/RR-2204/2001, 2002.
- [2] "한국형 표준원전 계통 실무", 한국원자력연구소, 1996.
- [3] "고리 3&4호기 최종안전성분석보고서, 9장", 한국전력공사, 1982.
- [4] Chapter 9, Yonggwang 3&4 Final Safety Analysis Report. Korea Electric Power Corporation, 1982.
- [5] A. J. Stepanoff, "Central and Axial Flow Pumps", John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- [6] "효성펌프편람", 효성EBARA주식회사, pp. 50-54, 1996.