

## STRATEGY 21

통권41호 Vol. 20, No.1, Spring 2017

**원자력 추진 잠수함의 특성과 농축우라늄 사용**

장 준 섭\*

- 
- I. 서론
  - II. 원자력 추진 잠수함의 특성 및 능력
    - 1. 원자력 추진 잠수함의 특성
    - 2. 원자력 추진 잠수함의 능력
    - 3. 원자력 추진 잠수함의 전략적 가치
  - III. 우리나라 원자력 기술 현황
    - 1. 최초의 원자로 도입과 동력용 원자로 운용
    - 2. 일체형 소형원자로의 개발
  - IV. 핵연료의 농축
    - 1. 핵연료의 가공
    - 2. 핵연료의 농축방법
    - 3. 핵연료 농축관련 국제규정
  - V. 원자력 추진 잠수함의 핵연료 특성과 확보방안
    - 1. 원자력 추진 잠수함의 핵연료 특성
    - 2. 핵연료 확보방안
  - VI. 저농축 우라늄을 이용한 원자력 추진 잠수함 설계 개념
    - 1. 원자로 크기의 변화
    - 2. 새로운 원자로의 설계
  - VII. 결론
- 

\* 해군소령, 서울대학 원자핵공학 학사, 미 텍사스 A&amp;M대학 원자핵공학과 석사.

## I. 서론

원자력은 적은 양의 원료로 엄청난 양의 에너지를 얻을 수 있는 방법으로 우리나라 같이 천연자원이 부족한 국가에서 산업용 전력 생산을 위한 방법으로 불가피하게 사용되어 왔다. 그 결과 지난 몇십 년 동안 세계 어느 나라와도 견주어 손색이 없을 만큼의 원자력 강국으로 성장해 왔으며 상당한 수준의 원자력 기술을 보유하게 되었다.

이미 선진국에서는 이러한 원자력 기술을 해양부분에 접목시켜 상당수 원자력 추진 잠수함을 운용하고 있으나 우리나라는 디젤-전기 추진 잠수함만을 운용하고 있다. 물론 우리나라가 운용중인 장보고급이나 손원일급 잠수함이 우수한 성능을 가지고 있지만 기동성, 탑재능력 등에 있어서 원자력 추진 잠수함에 비해서 열세일 수밖에 없다.

원자력 추진 잠수함을 도입하기 위해서는 여러 가지 문제점이 있지만 그 중에서 가장 중요한 것은 잠수함 원자로에 탑재되는 핵연료 확보와 이와 관련된 국제규정들이다. 다행히 2015년 한·미 원자력 협정이 개정되면서 20%까지 저농축 우라늄을 사전승인 없이 사용할 수 있게 되었으며, 사전 동의하에 고농축 우라늄까지 사용할 수 있는 가능성이 열리게 되는 등 원자력 관련 국제규제들이 변하고 있으며 원자력 기술의 발전은 원자력 추진 잠수함 도입에 유리한 방향으로 흘러가고 있다.

아직 원자력 추진 잠수함의 도입에 대해서는 결정된 것이 없지만 수시로 변하는 북한, 중국, 일본, 러시아 등 주변국의 상황이나 국제정세의 변화를 고려해 볼 때 기술적인 가능성은 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

본 논문에서는 원자력 추진 잠수함 특성과 능력, 우리나라 원자력 기술 현황에 대해 알아보고, 원자력 추진 잠수함 도입에 가장 큰 제한점인 핵연료를 중심으로 원자력 추진 잠수함의 핵연료 특성과 확보방안, 그리고 저농축 우라늄(LEU : Low Enriched Uranium)을 이용한 잠수함의 개발의 가능성을 살펴 보도록 하겠다.

## Ⅱ. 원자력 추진 잠수함의 특성 및 능력

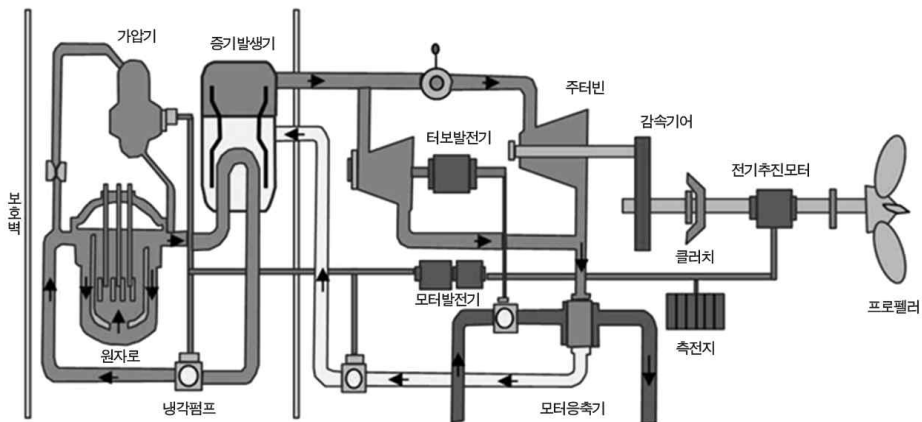
### 1. 원자력 추진 잠수함의 특성

#### 1) 기압경수로

일반적으로 원자력 추진 잠수함 원자로는 <그림 1>에서와 같이 1차 계통과 2차 계통으로 이루어진 기압경수로(PWR : Pressurized Water Reactor)이며, 1차 계통은 원자로와 원자로 내의 열을 2차 계통으로 전달해 주는 파이핑 고리, 주 냉각수 펌프로 구분된다. 1차 계통은 고온에서 기체발생을 억제시키기 위해 고압으로 작동된다. 2차 계통은 열 에너지를 운동에너지로 바꾸어 주는 터빈과 응축기, 펌프로 구성되며 1차 계통과 2차 계통은 방사능 누출 방지를 위해 열 이외에는 섞이지 않도록 완벽히 분리되어 있다.

추진을 위한 동력은 원자로에서 생산된 증기를 이용하여 기관실에 위치한 터빈을 회전시켜서 얻어지며, 주요계통은 증기 공급계통, 급수 공급계통, 터빈 발전기계통, 보조 추진계통 등으로 구성된다.

<그림 1> 원자력 추진 잠수함 원자로



### (1) 증기 공급계통

증기 공급계통은 원자로에서 열을 받아 증기를 발생시켜 터빈으로 증기를 공급하는 계통이다. 주로 증기 배관, 과압방지 계통 및 제어계통으로 구성되어 있다.

### (2) 급수 공급계통

급수 공급계통은 원자로에서 발생하는 열을 제거하기 위해 물을 공급 받아 사용된 증기를 다시 물로 환원시켜 증기발생기에 물을 공급하는 계통이다.

### (3) 터빈 발전기계통

터빈 발전기계통은 증기발생기에서 발생한 증기를 이용하여 증기 터빈을 회전시켜 잠수함에서 필요로 하는 출력을 얻는 계통이다. 터빈은 증기압력에 따라 고압터빈과 저압터빈으로 나눌 수 있으며, 증기압력이 낮을 경우에는 저압터빈만 사용하는 경우도 있다.

### (4) 보조 추진계통

원자로를 정상적으로 사용할 경우에는 문제가 없으나 원자로의 기능이 상실했을 경우 일반 선박의 추진기능을 발휘할 수 있도록 보조 추진계통을 설계해야 한다. 잠수함은 수중에서 원자로가 고장나더라도 수면까지 올라오기 위한 보조 추진계통이 반드시 필요하다.

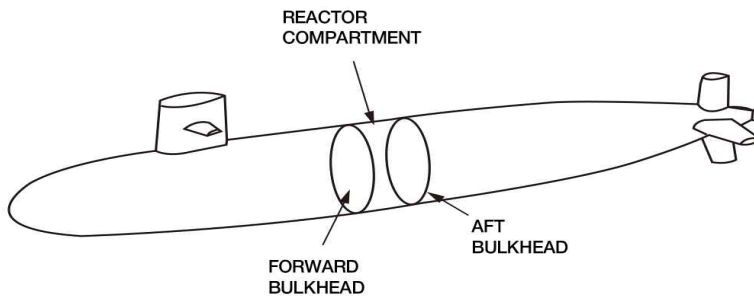
대부분의 원자력 추진 잠수함은 안전상의 이유로 축전지를 항상 일정 수준 이상 충전하게끔 되어 있으며 스노클을 위한 장치들도 가지고 있다. 이러한 장치들은 주기적으로 점검과 테스트를 하도록 규정되어 있어 언제 발생할지도 모르는 위급상황에 대비하여야 한다.

## 2) 원자로 구역의 배치

원자력 추진 잠수함 발전기는 원자로와 함께 방사능의 차폐를 위해 원자로 구역(Reactor compartment)이라는 특정한 공간에 설치되며 함 유형에 따라 다른 디자인으로 설계된다. 둥근 압력선체로 둘러싸인 잠수함의 구조적인 특성상 수평의 원통모양이며, 앞뒤로 격벽이 설치되어 있다.

원자로 위치는 사고 시 선원 승객 그리고 원자로 자체를 보호할 수 있도록 공학적으로 결정되어야 한다. 일반적으로 승객 및 선원 보호를 위해서는 사람의 활동이 적은 선박의 후미가 적당하지만 원자로 이외에도 상당수 기관장비들이 함미 쪽에 배치될 필요가 있다. 따라서 잠수함 설계 시 사람의 활동 영역을 조절할 수 있다는 점을 고려하면 원자로 위치는 선박의 중심, 특히 부력의 중심에 위치하는 것이 타당하다고 판단하고 있다.<sup>1)</sup> 또한 기관장비를 담당하는 승조원들은 승조원들의 생활공간과 전투정보실 등이 있는 함수부분과 기관장비들이 있는 함미부분을 이동할 필요가 있어, 원자로 구역 중앙에 방사선이 차폐된 이동통로가 설정되어야 하므로 원자로 구역은 도넛 모양을 하고 있다.

〈그림 2〉 원자력 추진 잠수함의 원자로 구역



Typical Submarine Reactor Compartment Location

### 3) 사고 대처 시스템

#### (1) 화재

물을 냉각재와 감속재로 사용하는 원자로 특성상 격납용기 내부에서의 화재위험은 무시할 수 있으므로 원자로 외부에서의 화재만이 고려된다. 특히 원자력 추진 잠수함 경우 보조동력공급을 위한 연료저장소, 기타 구조물에서의 화재가 고려되고 이외는 별도로 화재를 야기하는 충돌과 어뢰와 각종 탱크 등 폭발을 동반하는 화재가 추가로 고려된다. 화재대비 시스템은 다음과 같은 기능을 수행할 수 있도록 설계되어야 한다.

- 국지적인 화재가 전반적으로 번지는 것을 방지하여야 한다.

1) 박군철 등, 2001, 『원자력의 해양분야 응용방안에 대한 연구』, 서울: 과학기술부, p.161.

- 화재로부터 원자로 격납용기와 생물학적 차폐체<sup>2)</sup>, 방사성 액체폐기물 저장탱크를 보호하여야 한다.
- 노심 냉각이 지속할 수 있어야 한다.

첫 번째 경우는 일반적인 화재방지장치에 의해 만족될 수 있다. 특히 원자로 격납용기는 물막이댐(Cofferdam)으로 격납용기를 둘러싸는 것으로 보호받을 수 있는데 이는 폭발사고에 있어서도 상당히 유용하다. 원자로 구획으로 화재가 번지는 경우에는 원자로는 정지되어야 하고 일반적으로 노심의 냉각과 화재진압은 보조 디젤엔진을 사용하여 이루어지게 된다. 또한 원자로 주변 사고 시 원자로 감압 과정은 즉시 시작하게 된다. 이어서 원자로 정지가 이루어지고 수분 후에는 일차측 자연대류로 잔열제거가 가능하도록 하여야 한다.

## (2) 충돌

충돌에 견디기 위해 원자력 추진 잠수함에는 육상 원자력 발전소에서 사용하는 세라믹 형태 핵연료를 사용하지 않고 금속연료를 사용하여 안전성을 높이고 있다. 이는 충돌 등에 의해서 핵연료에 균열이 생기는 것을 막아준다. 또한 원자력 추진 잠수함에 충돌이 생긴 이후라도 원자로 자체 안전시스템은 계속 작동되어야 하기 때문에 잠수함 전반에 걸쳐 구조적인 신뢰도를 높이도록 제작되어야 한다.

충돌의 중요성은 충돌부위가 원자로 구획인가의 여부에 따라 달라진다. 충돌부위가 원자로 구획이 아닌 경우에는 원자로 구획 설계에 적용된 내충돌 구조에 의해 원자로에 대한 직접적인 피해는 없을 것이다. 또한 원자로 격납용기 주위로 위협한 충돌이 발생할 확률은 약 0.9%/year 정도인데 이러한 경우에 원자로 보호방벽은 원자로 격납용기의 파손을 방지해야만 한다.

## (3) 침몰

침몰 시 원자력 추진 잠수함은 위험에서 벗어나기 위해 지속적으로 원자로가 가동되어야 하며 방사능 오염을 최소화되기 위하여 이후에는 정지되어야 한다. 지속적으로 원자로가 가동되어야 하는 첫 번째 조건은 1963년 미 잠수함

---

2) 차폐의 목적이 방사선으로부터 인체를 보호할 목적이면 “생물학적 차폐체”라고 한다.

트레셔(Thresher) 침몰이후 생기게 되었으며, 원자로는 안전을 위해 긴급 정지된 경우에도 50%의 출력으로 3분간 함을 추진을 할 수 있어야 한다. 두 번째 조건으로 침몰하는 경우 원자로는 반드시 정지되어야 하고 가능한 경우 액체 독물질이 노심 내로 주입되어야 한다. 또한 이탈방지장치가 부착된 제어봉 구동장치(CRDM : Control Rod Driving Mechanism)를 사용하여 갑작스러운 선박의 위치변화 시에도 제어봉의 이탈을 방지하여야 한다. 그리고 주순환펌프(MCP : Main Coolant Pump)의 전원공급이 상실되어도 45° 경사까지는 자연순환을 통한 열제거가 가능하여야 한다. 그리고 선박의 전복이나 노심 부분 용융 시에도 원자로 용기 및 격납용기는 핵물질의 외부 유출을 막을 수 있어야 한다.

#### 4) 방사선 차폐

원자력 추진 잠수함의 방사선 차폐는 선박에 승선하고 있는 선원들의 피폭을 방지하는 목적과 주위 환경, 즉 이차계통 및 추진기관을 통한 외부로의 방사선 누출을 방지하는 목적을 가지고 있다. 원자로에서 발생하는 방사선은 중성자와 감마선으로 나눌 수 있는데, 이들의 차폐를 위해서 흔히 물, 납, 철의 세 가지 차폐물이 사용된다. 방사선 차폐체는 일차 차폐체와 이차 차폐체로 구분된다. 일차 차폐체는 격납용기의 원자로에 해당되는 부분에 설치되는 것이며 격납용기 상부와 해치에는 이차 차폐체로 구분되는 납과 폴리에틸렌으로 제작되어진 차폐체가 설치되어 있는데 폴리에틸렌은 중성자에 대한 차폐능력이 우수하기 때문에 납과 함께 사용된다. 원자로 자체에 대한 차폐는 원자로 용기가 담당하게 되는데, 통상 원자로는 두꺼운 강철로 제작되어져 있으며 내부에 열 차폐체와 Core Cage가 포함되어 있다. 하지만 중성자의 경우 강철에 대한 투과력이 높기 때문에, 이에 대한 차폐를 위해 원자로를 물로 둘러싸는 수격식 구조가 사용된다. 그리고 차폐를 위한 물의 비등을 방지하기 위해 원자로 용기 주위에 유리면단열과 추가적인 냉각장치를 통해 약 130°F를 유지시키게 된다. 그리고 차폐능력 유지를 위해 차폐수를 정화계통을 통해 여과하는 구조를 가지고 있다.

또한 원자력 추진 잠수함은 여러 항구에 정박할 수 있기 때문에 국내 방사선 제한규정뿐 아니라 국제규정에도 적합하게 설계되어야 한다.

## 5) 부하추종(원자로 출력조절의 용이성)

원자력 추진 잠수함은 수시로 속력이 변하기 때문에 이에 맞춰 추진체계가 출력을 조절해 줘야 한다. 이는 가압경수로가 출력의 조절이 쉽다는 점에서 대부분 원자력 추진 잠수함에 사용되는 이유이며 가압경수로는 속력이 증가하게 되면 증기생산량과 원자로 출력 조절이 자동으로 이루어져서 이에 대응하게 된다.

하지만 급격한 속력의 변화는 이러한 출력조절 시스템으로는 감당하기 어려운데 이를 위해서 증기덤프 시스템이 사용된다. 즉 터빈의 우회 파이프를 일정량의 증기를 사용하지 않고 해수로 냉각시켜주어 원자로 자체의 출력을 변화시키지 않고 속력을 변화할 수 있게끔 조절해 준다.

## 6) 가볍고 오래 쓰는 핵연료의 사용

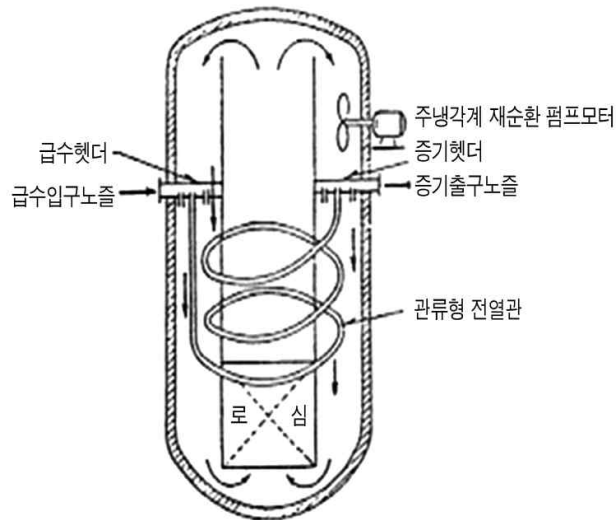
원자력 추진 잠수함은 핵연료가 가볍고 부피가 작아야 하며 경제성을 높이기 위해 오래 쓰는 핵연료를 사용해야 한다. 이는 경제성과 연관되며 잠수함은 무한정 부피를 늘릴 수도 없고 부피를 늘린다면 추진하기 위한 추진력이 더 필요하므로 출력과 부피의 문제는 최초 원자력 추진 잠수함을 만들 때부터 가장 어려운 해결과제 중에 하나였다. 또한 핵연료 교체를 위해서는 엄청난 수준의 육상 교체시설과 비용이 소요되므로 최근 이를 위해서 가능한 원자력 추진 잠수함 수명과 핵연료 교체주기를 같게 하여 핵연료 교체를 위한 비용을 줄이도록 설계되고 있다.

## 7) 선체 요동에 대응

원자력 추진 잠수함의 선체는 파도나 잠항, 부상 시에 수시로 변하게 되므로 원자로가 이에 영향을 받아서는 안 된다. 가압경수로는 1차 계통 내에 기체가 거의 발생하지 않기 때문에 선체의 요동에 영향을 크게 받지 않는 특성을 가지고 있으며 <그림 3>에서와 같이 증기 발생기 또한 나선형의 구조로 된 전열관(열을 전달하는 관)을 가지고 있어서 어느 방향으로 선체가 기울어지더라도 크게 영향을 받지 않도록 설계되었다.



〈그림 3〉 나선형 구조의 전열관



## 2. 원자력 추진 잠수함의 능력

### 1) 기동성

원자력 추진 잠수함의 가장 큰 특징은 37-47km/hr의 속력을 지속적으로 낼 수 있다는 것이다. 물론 디젤-전기 추진 잠수함도 최대속력은 원자력 잠수함의 2/3 수준으로 상당히 높은 편이지만 이러한 속력은 아주 잠시만 낼 수 있다. 만일 디젤-전기 추진 잠수함이 최대속력으로 몇 시간만 항해하게 된다면 즉시 스노클을 하거나 속력을 줄여야 할 것이다. 일반적으로 디젤-전기 추진 잠수함이 지속적으로 낼 수 있는 속력은 원자력 추진 잠수함의 1/3 수준이다.

최근 개발된 AIP(Air Independent Propulsion) 시스템은 디젤-전기 추진 잠수함의 단점을 어느 정도 극복하였지만 AIP 시스템은 위급할 때 사용할 수 있는 추진체제로 저속인 경우 몇 주, 고속으로 항해한다면 몇 주가 아니라 며칠밖에 사용하지 못한다. 또한 AIP용 연료인 산소와 수소를 전부 사용하게 된다면 다시 부두에 정박을 해서 충전을 해야 한다.

만일 원자력 추진 잠수함이 다른 세력들에게 탐지되었다고 가정한다면, 뛰어난 기동성으로 재빠르게 상대의 추적을 따돌려 안전한 지역으로 피할 수 있

을 뿐만 아니라 적이 공격을 하더라도 원자력 추진 잠수함의 뛰어난 기동성으로 인해 공격 성공확률은 현저하게 줄어들 것이다.

또한 원자력 추진 잠수함은 기동성으로 인해 기동부대와 협동작전이 용이하다. 디젤-전기 추진 잠수함은 기동성 제약으로 인해 기동부대와 협동작전이 제한되었다. 중요한 시기에 기동부대와 제한된 협동작전을 하기 위해서는 기동부대보다 훨씬 먼저 출항하여야 하였으며, 이로 인해 실제로 기동부대와 작전이 어려웠다. 하지만 원자력 추진 잠수함은 언제든지 기동부대가 원하는 작전, 즉 적의 잠수함이나 수상함을 탐색하고 공격하거나, 정찰/감시 작전 등을 수행할 수 있다.

## 2) 탑재능력

선박의 부피, 속도에 따른 전력의 관계를 나타내는 아래 식에서 원자력 추진 잠수함은 막강한 추진력(P)을 바탕으로 얼마든지 부피(V)를 크게 만들 수 있기 때문에 디젤-전기 추진 잠수함에 비해 더 많은 양의 어뢰, 기뢰, 대함/대지미사일 등을 적재할 수 있을 뿐 아니라 필요에 따라서 상당수의 특수전 요원들을 적진에 은밀히 침투시키는 작전도 수행할 수 있다.

### 〈공식 1〉 선박의 부피, 속도에 따른 전력의 관계식

$$P = 0.6977 C_d V^{2/3} v^{33}$$

$P$ =추진전력(MW)

$C_d$ =항력계수

$V$ =체적( $m^3$ )

$v$ =속력(kt)

만일 디젤-전기 추진 잠수함에 다양한 임무의 작전을 위하여 많은 양의 무장이나 부수장비들을 적재하려 한다면 함정이 커질 수밖에 없을 것이며, 이를 추진하기 위해 더 많은 추진력을 필요하게 된다. 디젤-전기 추진 잠수함은 4,100톤인 일본의 소류(Souryu)급과 3,407톤인 호주의 콜린스(Collins)급을 제외하고 2,000톤 내외이다.

3) Thomas Domic Ippolito Jr, "Effect of Variation of Uranium Enrichment on Nuclear Submarine Reactor Design," MIT, 1990, p.12.

하지만 대부분의 원자력 추진 잠수함은 엄청난 크기를 가지는데 러시아 타이푼(Typhoon)급의 경우 배수량이 26,925톤이며 81,600마력 원자로를 탑재하고 있다.

### 3) 은밀성

디젤-전기 추진 잠수함은 깊은 물속에서 디젤엔진 가동을 위한 공기를 얻을 수 없기 때문에 축전지를 이용하여 추진을 하게 된다. 문제를 축전지 에너지 효율이 그리 높지 않기 때문에 매일 일정 횟수 잠망경 심도로 상승하고 디젤엔진을 작동시켜 축전지를 충전하는 스노클을 해야 하는데 이 때 소음과 열이 많이 발생하고 수면위로 선체 일부가 노출되기 때문에 항공기나 상대함정에 의해 노출되기가 쉽다.

반면 원자력 추진 잠수함은 원자로 가동을 위해서 공기를 필요로 하지 않고 배기가스 또한 배출하지 않기 때문에 깊은 물 속에서 거의 무제한으로 항해할 수 있다. 가끔 통신을 위해 잠망경 심도로 올 수 있으나 이는 상황에 따라서 얼마든지 조절을 할 수가 있으며, 스노클에 의한 열도 발생하지 않기 때문에 대잠항공기나 수상세력에 의해 탐지되지 않고 은밀한 작전을 수행할 수 있다.

상대 함정 소나에서 듣는 음을 기준으로 하였을 때 음의 3요소는 음원(Sound Source), 매체/전달경로(Medium), 탐지기(Detector)이다. 원자력 추진 잠수함에서의 음의 3요소를 대입해 보면 다음과 같다.

〈표 1〉

농축기술	장 점
음원(Sound Source)	원자로 소음, 터빈, 추진기, 보조기기, 생활소음 등
매체/전달경로(Medium)	잠수함 선체, 바닷물
탐지기(Detector)	상대 함정 소나

이러한 음의 3요소는 세 가지 요소의 평균이 상대 함정에서 듣는 음의 준위(Level)를 결정하는 것이 아니라 3가지의 요소 중에서 하나의 요소만 아주 적은 값을 가진다면 나머지 요소는 크더라도 크게 문제가 되지 않는다. 예를 들면 음원이 아주 크더라도 매체/전달경로나 탐지기에 의한 영향이 아주 적을 경우, 즉 음의 전달경로를 차단한다든지 탐지기 성능이 아주 떨어질 경우 상대

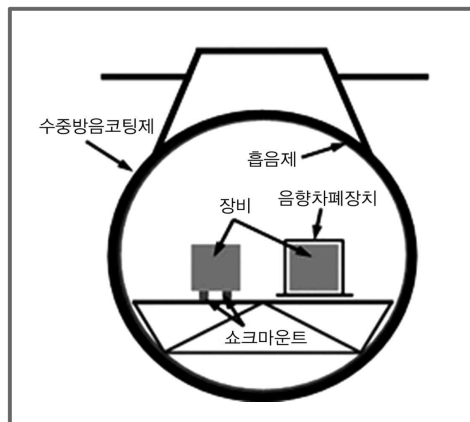
함정에서 듣는 음의 준위는 아주 작아질 수 있다.

원자력 추진 잠수함에서 음원 자체 소음은 일반적으로 디젤잠수함보다 많이 발생할 수 있다고 알려져 있다. 특히 원자력 추진과 관련된 소음, 즉 항공기나 고속 함정이 추진할 때 사용되는 터빈의 고주파 소음과 감속기어 소음은 디젤잠수함의 소음보다 크다. 또한 원자로의 시동과 정지에는 통상 1-2일의 시간이 필요하기 때문에 수중에서는 원자로는 항상 가동되어야 하며 이러한 소음은 긴급한 상황(예를 들어 상대 함정에 의해 탐지되었을 경우)이라고 해서 통제할 수가 없다.

하지만 원자력 추진 잠수함은 디젤 잠수함보다 통상 2-10배 정도의 크기를 가지기 때문에 선체 내에서 자체소음을 거의 완벽히 차단할 수 있는 여유공간을 가질 수 있다. 즉 음의 3요소 중에서 매체/전달경로에 의한 영향을 거의 줄일 수 있어서 상대 함정에서 듣는 음의 준위를 획기적으로 낮출 수 있다는 의미이다. 각 장비와 선체와의 간격을 넓히고, 장비와 선체 간에 쇼크마운트(Shock Mount)를 설치하며 부품과 부품 연결부위에는 감쇄재(Damping Material)와 함께 선체 내외부에 흡음재를 설치함으로써 외부로의 소음유출을 차단한다.

초기의 원자력 추진 잠수함은 이러한 자체소음 차단기술이 발전하지 않았기 때문에 소음이 많이 발생하였다. 하지만 위와 같은 소음 차단기술이 발전함에 따라 소음 준위는 훨씬 줄어들게 되었으며, 원자력 추진 잠수함은 이미 20-30년 전부터 디젤-전기 추진 잠수함의 소음준위보다 낮은 수준의 소음수준을 유지하게 되었다.

〈그림 4〉 잠수함의 소음방지책



### 3. 원자력 추진 잠수함의 전략적 가치

#### 1) 우수한 수중 추적 및 감시능력

“미국 잠수함 승조원들은 몇 달, 몇 년, 그리고 몇십 년 동안이나 수중에서 근무하면서 그들의 조국을 핵 공격으로부터 보호하는 최후의 보루가 되어 주었다. 잠수함은 구 소련 탄도미사일 잠수함을 끈질기게 추적하였다. 무슨 소리가 나는지 듣고 그들이 어떤 작전을 하는지 감시하며 언제 전투명령이 내려질지 감지할 수 있도록 구 소련의 전략잠수함들을 추적하였다.”

뉴욕타임즈에 연재된 잠수함 첩보전 실화를 엮어 만든 ‘Blind Man’s Bluff (장님들의 음모)’라는 책에 나온 말이다. 과거 냉전시대부터 미국은 구 소련 원자력 추진 잠수함을 지속적으로 추적하고 감시하였다.

잠수함은 깊은 심도에 위치할 수 있기 때문에 수중음향학적으로 다른 대잠전 무기체계보다 상대 잠수함을 접촉하기에 유리하다. 또한 잠수함이 다른 대잠전 무기체계가 따라가지 못하는 결정적인 장점은 적진에 은밀하게 침투하여 상대 잠수함을 부상 상태에서부터 일대일로 감시할 수 있다는 점이다. 모든 잠수함의 항해는 부상에서부터 시작되며, 정박했을 때 잠항잠항 상태인 잠수함은 없다. 잠수함은 한 척으로도 상대국에 상당한 위협을 주는 무기체계이며 특히 핵미사일 같은 위협적인 무기를 탑재하고 있을 경우에는 단 한 척도 놓쳐서는 안 된다. 부상한 상태의 잠수함은 완전히 노출된 상태로 완벽히 추적할 수 있기 때문에 부상상태에서부터 추적을 해야 한다.

잠수함의 추적을 위해서는 상대 잠수함보다 2~3배(최소 1.5배 이상) 속도를 가지고 있어야 하고, 자함 소음이 상대 잠수함 소나에 의해 탐지되지 않아야 한다. 만일 디젤-전기 추진 잠수함으로 상대 잠수함을 추적한다고 가정한다면 상대 잠수함보다 높은 속력을 낼 수 있다는 보장이 없을 뿐 아니라 하루도 채 되지 않아 스노클을 해야 할 것이다. 잠수함이 스노클을 한다면 소음이 발생하므로 상대 잠수함에게 역으로 탐지되는 위험한 상황에 직면하게 될 것이다. 또한 자신의 잠수함에서 발생하는 소음으로 인하여 상대 잠수함 추적을 포기해야만 할 것이다.

이는 AIP 시스템을 운용한다고 한다면 스노클 하는 시간을 어느 정도 연장시킬 수는 있어도 AIP 자체가 일회성으로 AIP를 위한 별도의 연료가 소모되면 더 이상 AIP를 운용할 수 없으므로 디젤-전기 추진방식의 단점을 완전히 보완

한다고는 볼 수 없을 것이다.

최초 원자력 추진 잠수함인 노틸러스(Nautilus)함 이후 냉전 상대국인 구 소련에서는 경쟁적으로 원자력 추진 잠수함을 개발해왔으며 영국, 프랑스, 중국, 인도 등의 나라들도 이에 대응하여 원자력 추진 잠수함을 도입하기 시작하였다. 이는 국가적 재앙을 초래할 수 있는 SLBM(Submarine Launched Ballistic Missile : 잠수함 발사 탄도미사일)에 대응하기 위해서는 원자력 추진 잠수함을 개발할 수 밖에 없다는 논리로 해석할 수 있을 것이다.

최근 언론에서 북한이 원자력 추진 잠수함 보유를 추진하고 있다는 보도가 있었다. 구체적인 사실은 확인할 수 없지만 만일 북한이 원자력 추진 잠수함을 보유한다면 우리나라 입장에서는 엄청난 위협에 직면하게 된다는 것을 의미한다. 북한은 우리나라나 미국 등 정상적인 국가와는 무기 도입의 방식이 다르기 때문에 과거 비대칭 무기개발이나 도입처럼 전문가의 예측을 벗어나는 경우가 많았다. 즉, 북한은 상당수 무기들을 밀수 등 정상적인 절차를 거치지 않고 도입하기 때문에 빠른 기간 내에 도입할 가능성도 염두에 두어야 할 것이다.

## 2) 다목적 수중전략기지

초기 냉전시대 원자력 추진 잠수함은 전략무기, 즉 핵무기나 대지미사일의 은밀한 공격수단으로서 강력한 억제전력의 역할을 하였으나, 최근 이러한 원자력 추진 잠수함 역할이 바뀌고 있다. 현대전에서는 전장환경 변화에 따라 일부 국가에 한정된 위협뿐만 아니라 테러, 비정규전 등 다양한 위협에 대응해야 할 필요가 대두되었다.

디젤-전기 추진 잠수함은 원거리에서 작전할 경우 작전기간이 제한되어 연료와 식량 등을 재보급해야 하는 문제점이 있다. 한반도에서 전쟁을 가정해 보았을 때도 육·해·공군 전략상황에 맞추어 해상작전을 지원해야 하기 때문에 상당한 기간동안 해상에 전개해야 한다. 또한 적 잠수함과 수상함에 대응하고 기뢰부설뿐만 아니라 특수전 요원의 이송과 침투 등 다양한 임무를 수행해야 할 것이다. 물론 디젤-전기 추진 잠수함이 상당부분 역할을 할 수 있겠지만, 한 척으로 다양한 임무를 수행하는 데 한계가 있다. 앞서 언급했듯이 디젤-전기 추진 잠수함은 통상 2,000톤급이며 3,000톤을 크게 벗어나지 못한다. 하지만 원자력 추진 잠수함은 ‘다목적 수중전략기지’로서 한 척으로 충분한 무장과 장비를 적재하여 다양한 임무를 수행할 수 있다.

### 3) 분쟁지역으로 신속한 전개

현대전의 추세는 과거와는 달리 국지전 수준으로 속전속결로 끝나는 경우가 많으며 이는 미리 예측하지 못하는 경우도 많다. 이러한 전장상황에서 얼마나 빨리 전장에 전개하느냐는 전쟁의 승패에 결정적인 영향을 미친다.

디젤-전기 추진 잠수함은 낮은 속력 때문에 원하는 시간과 장소에 위치해 있지 못할 때가 많다. 디젤-전기 추진 잠수함이 원하는 시간과 장소에 위치해 있으려면 상황을 미리 예측하여 미리 출항을 해야 하는데 이는 불가능한 경우가 많기 때문이다.

과거 영국과 아르헨티나의 포클랜드 해전에서 영국에서 포클랜드 섬까지 디젤-전기 추진 잠수함은 5주가 소요되는 거리를 영국 원자력 추진 잠수함인 콘퀘러(Conqueror)함이 2주 만에 도착하였다. 이후 아르헨티나 순양함인 벨그라노(Belgrano)함을 격침시킴으로써 전장에서 우위를 달성하여 결정적인 승리를 보장했던 것은 원자력 추진 잠수함의 전략적 가치를 입증한다고 볼 수 있다.

## Ⅲ. 우리나라 원자력 기술 현황

### 1. 최초의 원자로 도입과 동력용 원자로 운용

1959년 한국원자력연구소에서 착공하여 1962년 임계에 도달한 100KW 출력의 TRIGA Mark-II 연구용 원자로가 우리나라 최초의 원자로이다. 그 후 TRIGA Mark-II는 자체 기술력으로 1967년 250KW로 출력증강을 하였으며, 1971년에는 2MW급인 TRIGA Mark-III를 도입하였다.

동력용 원자로는 1970년 착공하여 1978년 상업발전에 들어간 가압경수형 원자로인 고리 1호기가 최초이며 그 후 도입된 원자로는 가압중수형 원자로인 월성 1호기를 제외하고 가압경수로이다.

1987년에 설계와 주기기 공급계약을 체결한 영광 3, 4호기부터는 그동안 중화학공업 분야의 국내 산업기술 수준향상과 외국 업체로부터 습득한 기술능력을 바탕으로 국내업체 주도 건설을 추진함으로써 원자력 발전소 건설기술 자립을 달성할 수 있는 기반을 구축하게 되었다. 우리나라 실정에 맞게 국내기

술로 개량한 영광 3, 4호기를 기본 모델로 개량한 울진 3, 4호기가 한국형 원자로 1호로 1998년 완공됐다. 이 원자로는 1984년 정부의 원전기술 자립계획에 따라 국내 원전기술을 활용하여 국내 실정에 적합하도록 개발한 것으로 출력 100만 KW급 가압경수형 원자로다.

이로서 우리나라는 세계 어느 나라와도 견주어 손색이 없을 만큼의 원자력 강국으로 성장해 왔다. 2015년 11월 국내 23번, 24번째인 신 월성 1,2호기가 준공됨으로써 운영중인 원자력 발전소는 모두 24기이며 국내 전력 생산량의 30%를 담당하고 있다.

## 2. 일체형 소형원자로의 개발

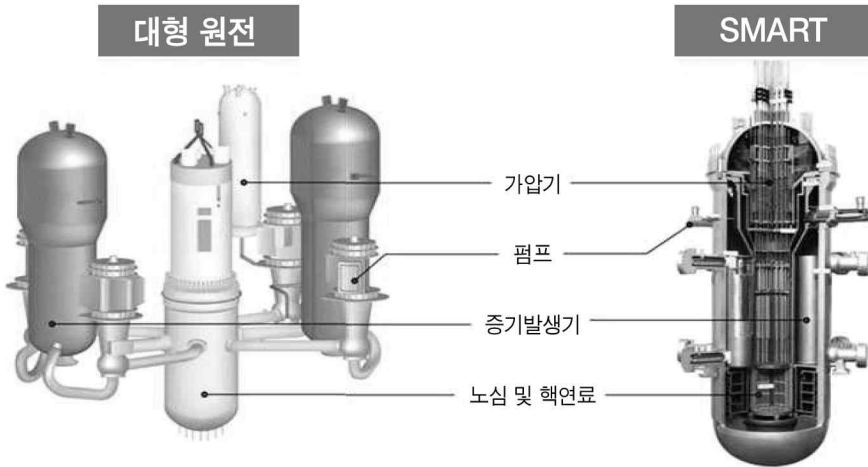
APR1400은 스마트 원자로(SMART : System integrated Modular Advanced Reactor)라고 부르며 한국이 UAE에 수출하는 제3세대 원전 모델로 1992년부터 10년간 한국수력원자력 등이 2,300억원을 들여 순수 국내개발 하였으며 세계 최고 수준으로 평가되고 있다.

APR1400은 전기 출력량 100KW, 건설비용 7,000억에서 1조원 대로 대형 원자력 발전소와 비교해 건설비는 5분의 1이며 전력량은 10분의 1 수준이다. 소규모 전력 생산에 활용되는 화력발전소를 대체하기 위해 만들어진 것으로 국가 전력망 규모가 작고 인구가 흩어져 있어 소규모 여러 개 원전이 필요한 나라에 적합하다.

스마트 원자로는 사람이 사는 도시 가까이에서 지어야 효율성을 높일 수 있기 때문에 안전성 확보가 최대 관건이다. 이러한 측면에서 스마트 원자로는 아래 그림에서와 같이 노심과 핵연료 이외에도 증기발생기, 펌프, 가압기가 하나의 구조물 안에 포함된 일체형 원자로로 배관에 문제가 생기더라도 방사능 오염 물질이 새어나올 가능성을 배제시켰다. 2012년 일본 후쿠시마 원전사고는 전력 공급이 끊겨 원자로 냉각에 문제가 생겨서 발생했는데 스마트는 냉각수를 돌리는 펌프가 멈추더라도 자연대류 현상을 이용하여 20일까지 원자로 열을 제거할 수 있도록 설계했다. 또한 20일 이후에는 비상 냉각수를 수동으로 보충하면 계속 열을 제거할 수 있다. 사고 발생 시 중력의 힘으로 원자로 주위 공간을 물로 채우는 것도 가능하며 리히터 규모 7.0까지 견딜 수 있도록 내진설계를 강화하였고 10미터 쓰나미에도 견딜 수 있게 설계되었다.



〈그림 5〉 대형 원전과 일체형 소형원자로(SMART)



## IV. 핵연료의 농축

### 1. 핵연료의 가공

우라늄은 철이나 석탄처럼 땅에 묻혀 있는 광물이며 지구의 땅 표면에 있는 암석과 바닷물에도 조금씩 섞여 있다. 〈그림 6〉에서 ①번은 우라늄 원석이고 이를 사용하기 위해선 석탄처럼 캐서 흙 같은 불순물을 없애야 한다. ②번은 우라늄 원석을 정제하여 얻은 노란색의 Yellow cake이다. Yellow cake에는 약간씩 성질이 다른 동위원소들이 섞여 있다. 우라늄-234, 우라늄-235, 우라늄-238 등 3가지가 섞여 있는데 우라늄-238이 99.2%로 대부분을 차지하고 우라늄-235가 0.7%, 우라늄-234는 0.005%에 불과하다. 그 중 우라늄-235만이 중성자를 흡수하면 원자핵이 둘로 쪼개지면서 중성자를 2-3개 내놓는 핵분열을 일으키는 성질이 있기 때문에 원자력 발전에서 중요한 역할을 한다. 초기 원자력 발전소에는 천연 우라늄을 사용하기도 했지만 우리나라를 비롯해 세계 각국 원자력 발전소는 대부분 천연 우라늄이 아닌 농축 우라늄을 사용한다. 천연 우라늄에는 우라늄-235가 0.7%밖에 들어있지 않기 때문에 우라늄-235의 비율을 높여야 원자력 발전의 연료로 사용할 수 있다. 이러한

작업을 우라늄 농축이라고 하고 이렇게 만들어진 우라늄을 농축우라늄이라고 한다. 우라늄-235 농축도에 따라서 0.7% 이하는 천연 우라늄(Natural uranium), 3-20%를 저농축 우라늄(LEU), 그리고 90% 이상을 고농축 우라늄(HEU : Highly Enriched Uranium)이라고 한다. 초기 원자력 발전소에서는 3-4%의 농축우라늄이 주로 사용되었고 이를 저농축 우라늄으로 불렀으나, 최근에는 원자력 발전소에서나 선박용으로 20%의 농축 우라늄이 널리 사용되기 때문에 20%까지 농축우라늄을 저농축 우라늄의 범주에 포함시키고 있다. 또한 90% 이상 고농축 우라늄들도 선박용 원자로나 기체냉각로 같은 일부 발전소에서 널리 사용되고 있다. <그림 6>에서 ③번은 농축우라늄의 사진이다.

<그림 6> ① 우라늄 원석, ② Yellow cake, ③ 농축우라늄



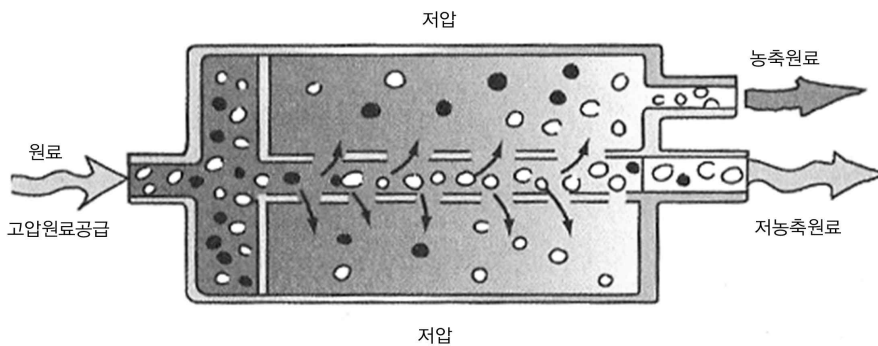
## 2. 핵연료의 농축방법

### 1) 기체 확산법

기체 분자가 스스로 운동에 의해 사방으로 퍼져나가는 것을 확산이라고 한다. 이 확산은 질량이 클수록 느려진다. 우라늄 - 235와 우라늄 - 238이 질량을 결정하는 중성자 개수만 다르다는 점을 확산의 원리에 적용한 방법이 바로 기체확산법이다. 고체상태로 존재하는 Yellow cake를 65도 이상으로 가열하여 기체상태로 만든다. 이 기체상태의 Yellow cake에 <그림 7>에서와 같이 압

력을 가하여 평균  $1\text{cm}^2$ 당 1억 6천만 개 구멍이 뚫려 있는 분리막에 통과시킨다. 이 분리막은 보통 스텐레스 판으로 만들며 그 크기는 Yellow cake 분자 평균자유거리<sup>4)</sup>와 유사한 0.01-0.02마이크론 정도이다. 그러면 확산의 원리에 따라 질량이 가벼운 우라늄-235가 먼저 분리막 뒤 저압부분으로 빠져나간다. 이 방법은 초기 농축법으로 1940년대 미국에서 사용시 설비 운용을 위해 미국에서 사용하는 전체전력 절반에 달할 정도로 비효율적이어서 현재는 거의 쓰이지 않고 있다.

〈그림 7〉 기체확산법



## 2) 원심분리법

다른 질량의 두 물체를 원통에 넣고 돌리면 상대적으로 더 큰 질량의 물체가 바깥쪽으로 쏠리게 된다. 이것은 원심력 차이로 인해 나타나는 현상으로 미세한 질량차이가 나는 우라늄-238과 우라늄-235에 이 원리를 적용한 방법이 원심분리법이다. 〈그림 8〉에서와 같이 기체상태 Yellow cake를 고속회전하는 원통에 넣으면 질량이 더 가벼운 우라늄-235가 포함된 기체가 원통 안쪽에 몰리게 되고 이 안쪽 기체만 따로 빼내어 다시 돌려서 순도를 높이게 된다. 일반적으로 회전 속도는 4만-7만rpm 정도가 된다. 하지만 이 방식의 분리방법으로 고농축 우라늄을 얻기 위해서 원통을 고속으로 회전시키는 기술과 가볍고 튼튼한 원통이 필요하게 된다. 또한 강한 회전력을 가진 소형펌프와 진동방지 기술, 분리기 유지 및 보수 기술 등이 필요하기 때문에 핵 선진국이 아니면 사용하기 어려운 방법이다. 다만 한번에 농축할 수 있는 양이 기체확산법에 비해

4) 분자가 자유운동으로 다른 분자와 충돌하지 않고 움직일 수 있는 평균거리.

비교적 커서 농축단계나 전력소모를 줄일 수 있는 장점이 있다.

### 3) 레이저 분리법

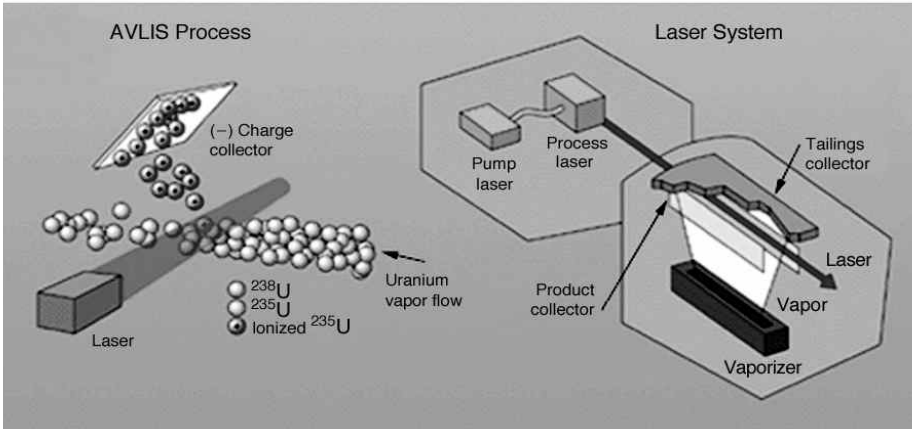
모든 원자들은 중앙의 핵이 있는 양성자와 주변에 있는 전자가 전기적 평형관계를 유지하고 있다. 하지만 만약 핵 주변의 전자가 에너지를 얻어 원래의 궤도를 벗어나 조금 더 바깥에 머물게 되면 그 원자는 +성질을 띠게 된다. 여기서 전자가 원래의 정상 궤도에 머무는 상태를 바닥상태라고 하며, 전자가 에너지를 받아 그 궤도를 벗어나 +성질을 띤 상태를 들뜬 상태라고 한다. 그런데 전자가 궤도를 벗어나기 위해 필요한 에너지는 핵의 질량이 클수록 커진다. 즉 우라늄-235보다는 우라늄-238이 들뜬상태가 되기 위한 에너지가 더 크다는 뜻이다. 결국 우라늄-235는 들뜬상태가 되면서 우라늄-238은 바닥상태를 유지하는 적절한 에너지가 공급되면 우라늄-235만 +성질을 띠게 된다. 이 상태에서 전극판을 가까이 가져가면 들뜬상태 우라늄-235만 -전극판에 붙게 된다. 이런 원리를 이용한 방법이 바로 레이저 분리법이다.

레이저법은 효율이 매우 좋아서 단 몇 번만으로도 고농축 우라늄을 얻을 수 있다. 또한 다른 방법과는 상대적으로 투자규모, 전력소모, 운용경비가 적어 차세대 기술로 각광받고 있으며 우리나라에서도 과거 이 기술을 실험적으로 성공시킨 바 있다. 하지만 미세한 파장 레이저를 만드는 기술과 첨단장비가 필요하다.

〈그림 8〉 원심분리법



〈그림 9〉 레이저 분리법



### 3. 핵연료 농축관련 국제규정

#### 1) 한·미 원자력 협정

한·미 원자력 협정은 1974년 재정 및 2015년 11월 26일 개정된 한·미 정부간에 원자력 연료 이용에 관한 상호협정으로 내용 중 새로 개정된 농축 우라늄과 관련된 핵심 내용은 다음과 같다.

“한국에 공급되는 농축 우라늄은 농축도 20%까지 함유할 수 있다. 또한 본 협정에 따라 공급되는 농축 우라늄은 본 위원회가 양도의 기술적 경제적 타당성이 있다고 인정할 경우에 20% 이상을 함유하고 있는 고농축 우라늄을 제공할 수 있다.”

즉 20%의 저농축 우라늄은 얼마든지 수입하여 쓸 수 있으며, 위원회 판단에 따라서 타당성이 있을 경우에는 고농축 우라늄을 사용할 수 있다는 내용을 담고 있다. 또한 개정된 협정서에서는 지금까지 명시되었던 우라늄 농축을 명시적으로 금지하는 이른바 ‘골드 스탠더드’ 조항이 제외됨으로써 우라늄 농축 시설을 허가하고 있지는 않지만 이 부분에 있어서 차후 협의를 통해서 논의될 수 있는 가능성을 열어두었다는 점에서 의미를 부여할 수 있다.

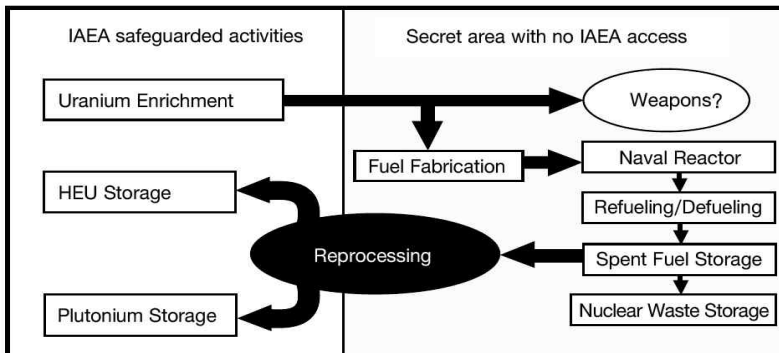
## 2) 핵확산 금지조약(NPT : Nuclear nonProliferation Treaty)

1966년 후반부터 미국과 구 소련간 핵무기 확산의 방지에 관해 타협이 진전되어 1967년 기본 합의가 이루어졌다. 이후 비핵보유국 반발로 미국, 구 소련과의 교섭을 통해 어느 정도 완안을 수정하게 되었으며, 1969년 6월 12일 국제연합 총회에서 이 조약의 지지를 결의하였다. 이후 1995년에 추가 연장여부를 결정하는 회의에서 조약 평가절차를 강화하고 핵보유국의 핵군축 노력 원칙을 채택하는 선에서 무기한 연장에 합의하였다. 한국은 1975년에 정식 비준국이 되었으며, 북한은 1985년에 가입하여 정식 비준국이 되었다.

주요 내용은 기존 핵무기 보유국은 기폭장치 또는 그에 대한 관리를 제3국에 양도하지 않을 것을 약속하고, 비 보유국은 기폭장치를 제조하거나 획득하지 않을 것을 약속하며, 비 보유국은 원자력을 핵무기나 기폭장치로 전용하는 것을 방지하기 위하여 국제원자력기구(IAEA)<sup>5)</sup>의 사찰을 비롯한 안전조치를 받아들이는 것을 골자로 한다.

NPT와 관련하여 고농축 우라늄을 원자력 추진 잠수함에 사용하는 것에 대하여서는 잠수함 자체에는 명확히 핵무기가 없으며 원자력 에너지만을 추진원으로 사용하기 때문에 <그림 10>에서 보는 바와 같이 핵무기와 재료가 유사하기 때문에 취급상의 유의를 해야 한다는 주의사항이 따르지만 NPT를 위배하는 것은 아니다.

<그림 10> IAEA safeguard <sup>6)</sup>



5) International Atomic Energy Agency : 원자력의 평화적 이용과 국제적인 공동관리를 위해 국제연합 총회 아래에 1957년 설치된 준독립기구.

6) C. Ma and F. Von Hippel, 2001, "Ending the Production of Highly Enriched Uranium For Naval Reactors," p.3.

## V. 원자력 추진 잠수함의 핵연료 특성과 확보방안

### 1. 원자력 추진 잠수함의 핵연료 특성

원자력 추진 잠수함 우라늄 농축도는 <표 2>에서 보는 바와 같이 5%에서 최고 98%의 우라늄 농축도를 보인다.

<표 2> 원자력 추진 잠수함의 우라늄 농축도

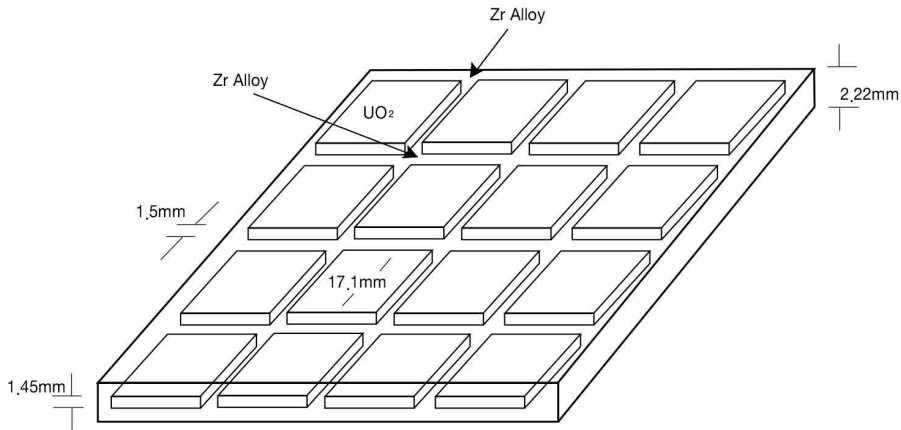
국 가	운용 척수	우라늄 농축도
미국	72	98%
러시아	46	20-45%
영국	12	97%
프랑스	10	7.5%
중국	10	5%
인도	2	40%

#### 1) 우라늄 농축도와 핵연료 교체주기

5-7.5%의 아주 낮은 수준의 농축 우라늄을 사용하는 국가는 프랑스와 중국이며 그 중 프랑스에서는 핵연료의 농축도가 7%로 낮은 대신에 네모난 카라멜 모양의 특별한 핵연료(Caramel fuel) 선택하였다. 또한 핵연료의 교체와 함께 핵연료의 재배치(Fuel Suffling)을 실시한다. 따라서 핵연료의 농축도가 낮다고 해서 핵연료 교체 주기가 획기적으로 짧아지는 것은 아니다. 7% 농축도를 가진 프랑스 잠수함의 핵연료 교체주기는 97% 농축도를 가진 미국의 핵연료 교체주기인 30년의 1/3 수준인 10년이다.

미국 7,900톤급(26MW) 잠수함인 버지니아급 잠수함의 경우는 97%의 농축도를 가진 우라늄을 사용했을 경우 33년 사용이 가능한 반면, 20% 저농축 우라늄을 사용했을 경우 이의 1/3인 11년간 사용 후 1번의 핵연료 교체, 즉 전체의 함 수명 동안 2회의 핵연료 교체를 해야 한다.

〈그림 11〉 프랑스 잠수함 카라멜 형태의 핵연료(Caramel fuel)



## 2) 핵연료 교체를 위한 비용

원자력 추진 잠수함 우라늄이 높은 수준의 우라늄 농축도를 보이는 것은 핵연료 교체를 위해 소요되는 비용을 줄이기 위해서이다. 핵연료 교체는 교체되는 핵연료 자체 비용뿐만 아니라 교체를 위한 설비비용까지 포함된다. 즉, 핵연료 교체를 위해서는 잠수함을 교체시설에 넣은 뒤 방사능에 피폭을 방지하기 위하여 사람이 들어가지 않은 상태에서 로봇시스템에 의해 조종되는 자동화된 대규모 시설이 필요하기 때문에 상당한 비용이 필요하게 된다.

원자력 추진 잠수함에서의 핵연료 재장전을 위해 소요되는 비용은 7,900톤급 미국 버지니아급 잠수함의 경우 20% 농축도의 우라늄을 사용하여 전체 함수명 동안 2회 핵연료 교체를 한다고 하면 10억 달러 비용이 소요된다.<sup>7)</sup>

## 3) 원자력 기술 발전과 핵연료 교체 주기 증가

1954년에 취역한 최초의 원자력 추진 잠수함 노틸러스호는 현재와 비슷한 수준의 93%의 농축우라늄의 사용하였으나 2년마다 핵연료를 교체해야만 했고<sup>8)</sup> 현대 원자력 잠수함은 원자력 기술의 발전으로 2004년에 건조된 버지니아급 잠수함은 33년 이상 핵연료의 교체하지 않고 운항할 수 있다. 50년 기간

7) "Report on Low Enriched Uranium for Naval Reactor Cores," U.S. Office of Naval Reactor, 2014, pp.3-4.

8) USS Nautilus, <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/reid1/>(검색일자 : 2017.3.18).



동안 16.5배로 핵연료 사용기간을 늘린 것이다. 또한 특별한 형태의 원자로를 개발하여 7% 농축도만으로 20% 농축도를 가진 타국 잠수함과 대등한 수준의 핵연료 교체 주기를 달성한 프랑스 경우를 보더라도 핵연료 농축도에 따른 핵연료 교체 주기는 고정된 것이 아닌 원자력 기술 발전에 의해서 얼마든지 늘어날 수 있다는 것을 알 수 있다.

아무리 미국이 NPT 상에 명시된 핵보유국이라 할지라도 97% 농축도의 우라늄을 핵무기가 아닌 발전용으로 사용하는 데는 무리가 있다. 이에 대해서 최근에 와서야 반대의견이 나오고 있는데, 최근 워싱턴에 위치한 미국 에너지 관리국(United States Department)에서는 20% 저농축 우라늄으로 30년 이상의 함수명동안 핵연료 교체 없이 운용할 것을 요구하고 있다.<sup>9)</sup>

또한 1990년 미국 MIT에서 20% 농축 우라늄으로 30년 이상의 핵연료 교체 주기를 가진 원자로의 모델링에 성공하였으며<sup>10)</sup> 미국 원자력 잠수함의 원자로의 설계는 15-40년 전에 이루어졌다. 따라서 그 동안 원자력 기술발전을 감안하면 저농축 우라늄을 사용하여 30년 정도 핵연료 교체를 하지 않고 운항할 수 있는 원자로 개발은 가능할 것으로 판단된다.

## 2. 핵연료 확보방안

### 1) 우라늄 농축시설 확보방안

현재 농축기술은 NPT상 핵보유국(미국, 영국, 러시아, 중국, 프랑스)과 독일, 일본, 네덜란드, 남아프리카 공화국 등이 보유하고 있으며, 브라질과 아르헨티나는 보유 노력을 하다 중단한 상태이다. 한편 이라크는 걸프전 이전 농축을 추진한 적이 있었으며, 파키스탄은 원심분리시설을 가동하여 핵무기 생산용 물질을 생산한 바 있다.

우라늄 농축기술들은 다양하게 연구 개발되고 시험되었으나 상업적 규모까지 성공적으로 개발된 기술은 기체확산법과 원심분리법밖에 없다. 우라늄 농

9) "Report on Low Enriched Uranium for Naval Reactor Cores," U.S. Office of Naval Reactor, 2014, pp.7-8.

10) Thomas Domonic Ippolito Jr, "Effect of Variation of Uranium Enrichment on Nuclear Submarine Reactor Design," MIT, 1990, pp.177-178.

축법의 장단점은 <표 3>와 같다. 이를 기준으로 우라늄 농축을 위해서 적합한 방법은 비교적 전력소모량이 적고 소규모 전력으로 상당한 양의 농축 우라늄을 얻을 수 있는 원심분리법이나 대규모 농축은 제한되지만 차세대 농축법으로 여겨지는 레이저분리법이 고려될 수 있으나 레이저분리법을 사용 시 현재 기술로는 연간 생산량이 극소량이고 아직 상업적으로 성공된 적이 없는 방법 이므로 상당한 수준의 기술개발이 선행되어야 할 것이다.

하지만 우라늄 농축시설의 확보는 꾸준히 국제원자력기구(IAEA)의 핵사찰을 받는다고 하더라도 고농축 우라늄 생산을 통한 핵무기 개발이라는 국제적인 오해를 살 수 있고 기술개발에 상당한 기간이 필요할 것이다. 즉 핵무기 생산이라는 국제적인 오해 없이 우라늄 농축시설의 확보를 위해서는 과거 일본이 그랬던 것<sup>11)</sup>처럼 정치적인 협상과 관련 원자력 분야 인프라가 형성되어야 할 것이다.

<표 3> 우라늄 농축법 별 장·단점

농축기술	장 점	단 점
기체확산법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 장기간 사용되어온 방법으로 신뢰성이 있음.</li> <li>· 가동부가 작아서 운전정비가 용이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단계별로 대용량의 설비 필요</li> <li>· 전력소모량이 큼.</li> <li>· 다량 냉각수 필요</li> </ul>
원심분리법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 소규모 설비로 운용 가능</li> <li>· 전력소모량이 기체확산의 1/10 규모</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 고도의 기술이 필요</li> <li>· 원심분리기 보수가 어려움.</li> </ul>
레이저분리법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 분리성능이 우수</li> <li>· 몇 회 농축과정으로 고농축 우라늄 생산 가능</li> <li>· 에너지 소비가 낮음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대규모 농축 제한</li> <li>· 현재의 기술수준 고려시 효율 저조</li> </ul>

## 2) 핵연료 은행(Nuclear fuel bank)을 통한 확보

지금까지 핵연료 농축시설은 일부 국가들이 독점해 왔으며, 특정 국가들은 국제원자력기구(IAEA)의 관리를 받지 않고 농축시설을 운용하고 핵무기를 만드는 등 국제적으로 투명하게 관리되지 못하였다. 이러한 폐단을 막고 농축 우라늄을 발전용으로 사용하고자 하는 국가들에게 농축 우라늄을 제공하며 농축

11) 일본의 경우 1945년 일본을 점령한 연합국(미국)이 일본의 원자력 연구를 전면 금지한 이후 꾸준한 노력 끝에 미국의 적극적인 지원과 협력으로 1977년 도카이무라의 재처리시설을 가동시키는데 32년 기간이 소요되었다.

우라늄과 관련한 국제질서를 바로 잡는 등 핵확산 방지의 일환으로 국제원자력기구(IAEA)에서 2000년대 초반부터 핵연료 은행(Nuclear fuel bank) 설립을 구상해 왔다.

미국과 일본 등이 2010년 국제원자력기구(IAEA) 정례 이사회에 공동으로 설립을 공식적으로 제안하였으며, 카자흐스탄이 유치국으로 입후보를 하여 2015년 국제원자력기구(IAEA) 이사회에서 승인을 하였다. 이에 따라 2015년 8월 27일 카자흐스탄 수도 아스타나에서 국제원자력기구(IAEA)가 관리하는 저농축 우라늄을 비축, 공급하는 ‘핵연료 은행(Nuclear fuel bank)’ 합의 서명식을 열었다. 최초 핵연료 은행은 카자흐스탄 동부 우스트-카메노르스크(Ust-Kamenogorsk) 지역의 울바야금 공장에 2017년을 목표로 설치될 예정이다. 이 공장은 구 소련부터 건설되어 오랫동안 우라늄 연료를 가공해 왔으며 카자흐스탄은 세계 유수의 우라늄 매장량을 자랑하는 국가이다.

이 곳에서는 20% 이하의 저농축 우라늄(LEU)을 국제원자력기구(IAEA)가 승인하는 국가에는 얼마든지 제공할 수 있도록 되어 있다. 따라서 2017년 핵연료 은행(Nuclear fuel bank)이 설립되게 되면 원자력 추진 잠수함의 제작을 위해 20% 저농축 우라늄이 필요하다면 얼마든지 얻을 수 있을 것이다.

## Ⅵ. 저농축 우라늄을 이용한 원자력 추진 잠수함 설계 개념

한·미 원자력 협정 하 별도 규제없이 구할 수 있는 20% 저농축 우라늄으로 30년 이상 핵연료 교체없이 운행할 수 있는 원자력 추진 잠수함의 설계 개념에 대해 살펴보도록 하겠다.

### 1. 원자로 크기의 변화

우선 미 해군 원자력 추진 사무국(ONNP : the Office of Naval Nuclear Propulsion)에서 1995년 미 의회에 “미 해군 원자로는 주어진 핵연료에 대해

서 최소한의 크기를 가지도록 진화되었다.”라고 보고하였기 때문에 현재의 구조를 가진 미 해군 원자로를 사용한다면 원자로의 크기를 변화시킬 수 밖에 없다. 동일한 보고서에서는 핵연료 부분 자체의 크기는 비정상적으로 커지지만 원래 원자로와 같은 출력을 가지기 때문에 냉각계통, 터빈 등은 변함이 없다고 밝히고 있다. 또한 원자로 크기 증가는 방사능 차폐를 위한 차폐재 증가의 양도 증가시킨다. 위 모든 요인들을 종합하면 버지니아급의 경우 20% 농축우라늄을 사용했을 때는 현재 원자로 크기의 3배로 설계를 해야만 33년의 핵연료 수명을 가질 수 있다고 언급하고 있다. 이와 같이 원자로 크기의 3배 증가는 잠수함 무게를 1,000톤 증가시키는 결과를 가져오게 된다.<sup>12)</sup> 또한 다른 급의 잠수함에서도 이와 비슷한 결과를 가져올 것이다.

만일 동일한 전력(Power)를 가진 3,000톤 함정을 고농축 우라늄 대신 20% 저농축 우라늄으로 핵연료가 대체되어 4,000톤 함정으로 재설계를 하게 된다면, <공식 1>에서  $P$ ,  $C_d$ 를 동일하므로 속도는 약 0.9381배가 됨을 알 수 있다. 따라서 원자력 추진 잠수함 최대속력을 30kts로 가정한다면 이를 28kts로만 낮추어도 동일한 전력(Power)을 가진 함정을 설계할 수 있다.

## 2. 새로운 원자로의 설계

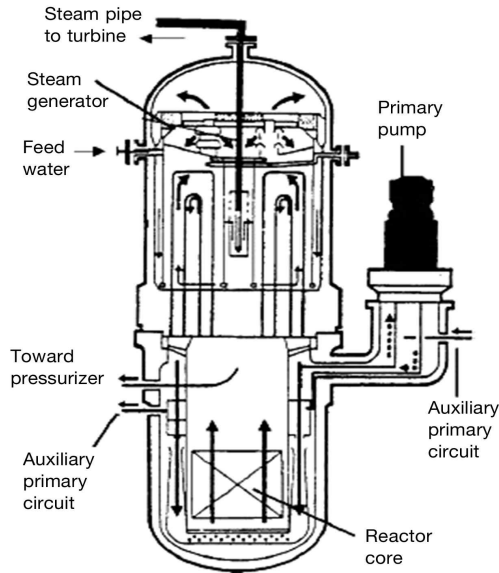
미 원자력 추진 잠수함의 원자로는 <그림 1>에서와 같이 1차계통(원자로, 열교환기, 냉각수 펌프 등)과 2차계통(스팀발생기, 터빈, 콘덴서 등)이 따로 분리된 ‘분리형 원자로(Separate Reactor)’이다. 하지만 미 해군 원자력 추진 사무국(ONNP)의 보고서에서 이를 <그림 12>과 같은 프랑스의 루비스(Rubis)급에 사용하는 ‘일체형 원자로(Integrated Reactor)’, 즉 터빈을 제외한 증기발전기, 콘덴서 등을 코어 내부로 삽입하는 형태 원자로로 교체하면 해결된다고 밝히고 있다.<sup>13)</sup> 이는 원자로 자체 크기뿐만 아니라 외부 증기발전기 주위에 있는 거대한 차폐재를 제거할 수 있게 해주어 일체형 원자로로 20% 농축도의 핵추진 함정을 설계하면 비슷한 크기 함정으로 33년간 핵연료의 교체없이 사용할 수 있다.

12) C. Ma and F. Von Hippel, 2001, “Ending the Production of Highly Enriched Uranium For Naval Reactors,” pp.7-9.

13) C. Ma and F. Von Hippel, 2001, “Ending the Production of Highly Enriched Uranium For Naval Reactors,” p.9.

다만 ONNP의 보고서에는 일체형 원자로로 설계하였을 경우에 원자로 크기에 관해 매우 조심스럽게 밝히고 있는데, 이를 다만 원자로의 크기가 “현저하게 작아질 것이다.”라고 밝히고 있다. 이를 위해서 두 가지의 근거를 들고 있는데, 첫 번째는 1990년에 MIT에서 이루어져서 프랑스 루비스급 개념설계에 사용되었던 논문이고,<sup>14)</sup> 두 번째는 최근 공개된 러시아 핵추진 쇄빙기 원자로의 소형화이다.<sup>15)</sup>

〈그림 12〉 프랑스의 Rubis급 잠수함 일체형 원자로



## Ⅶ. 결론

원자력 산업의 발전은 원자력 추진 잠수함이 주도해 왔다. 현재 가장 널리 쓰이고 있는 가압경수로(PWR)는 최초 원자력 추진 잠수함인 미국 노틸러스호에서 사용하기 위해 개발된 원자로의 형태이며, 비교적 높은 농축도의 우라늄

14) Thomas Domonic Ippolito Jr, “Effect of Variation of Uranium Enrichment on Nuclear Submarine Reactor Design,” MIT, 1990, p.12.

15) C. Ma and F. Von Hippel, 2001, “Ending the Production of Highly Enriched Uranium For Naval Reactors,” p.10.

을 사용하게 된 것도 원자력 추진 잠수함에 사용하기 위해서이다.

다행히 우리나라가 운용하고 있는 원자력 발전소와 소형원자로(SMART)가 가압경수로(PWR)여서 선박용으로 전환(재설계)은 그리 어려운 것이 아닐 것이며, 2015년의 한·미 원자력 협정과 2017년의 핵연료 은행(Nuclear fuel bank) 개설은 20% 농축도를 가진 우라늄 사용을 더욱 쉽게 되었다.

핵연료 농축과 재처리, 핵무기 개발에 대한 오해의 불식은 그 국가에 국제적인 신뢰도에 달려 있다. 지금까지 이러한 기술들을 가지고 있는 선진국들보다, 북한이나 파키스탄 같은 나라들의 핵기술이 문제가 되는 것은 그 국가의 폐쇄성과 국가의 신뢰도가 낮기 때문인 것이다.

하지만 우리나라는 원자력 강국이며 20% 저농축 우라늄을 사용할 수 있는 방법이 열렸기 때문에 이를 원자력 발전소뿐만 아니라 해양분야에 접목시키고 국제원자력기구(IAEA) 사찰을 받는다면 이를 문제 삼을 나라는 없을 것이다. 20% 저농축 우라늄으로 원자력 추진 잠수함을 개발하려는 시도가 선진국에서 먼저 일어나고 있기 때문에 먼 미래에는 이러한 원자력 추진 잠수함이 지금보다 일반화될지도 모른다.

## 참고문헌

- 문근식, 2016, 『왜 핵추진 잠수함인가』, 서울: 플랫폼미디어.
- 박지영, 2014, 『한미원자력협력협정 개정의 쟁점과 목표』, 서울: 글로벌 거버넌스센터.
- 박군철 등, 2001, 『원자력의 해양분야 응용방안에 대한 연구』, 서울: 과학기술부.
- 손호재·박찬수, 2001, 『잠수함공학 개론』, 서울: 대영사.
- Anil Anand, 2016, “Submarine Propulsion Muscle Power to Nuclear,” Frontier India.
- C. Ma and F. Von Hippel, 2001, “Ending the Production of Highly Enriched Uranium For Naval Reactors”
- Greg Thielmann and Serena Kelleher, 2013, “The Naval Nuclear Reactor Threat to the NPT”
- Norman Frieman, 1994, “US Submarine since 1945,” Naval Institute Press.
- “Nuclear-Powered Ship,” World Nuclear Association, 2016.
- Stephen Saunders, 2015, “Jane’s Fighting Ships,” IHS UK.
- Ole Reistard, 2006, “Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications,” NKS.
- “Report on Low Enriched Uranium for Naval Reactor Cores,” U.S. Office of Naval Reactor, 2014.
- “Report on Use of Low Enriched Uranium in Naval Nuclear Propulsion,” U.S. Office of Naval Nuclear Propulsion, 1995.
- Sherry Sontag, 1998, “Blind man’s bluff,” Public Affairs.
- Thomas Domonic Ippolito Jr, “Effect of Variation of Uranium Enrichment on Nuclear Submarine Reactor Design,” MIT, 1990.
- USS Nautilus, <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/reid1/>(검색일자 : 2017.3.18).

Abstract

## The characteristics of nuclear powered submarine and the use of enriched uranium

Jang Jun-Seop\*

Nuclear power is a way of attaining an enormous amount of energy with relatively small amount of resources and after it has been introduced to the submarine since 1954, there are approximately 150 of nuclear powered submarine currently on a mission around the world. This is due to the maneuverability, mountability and covertness of nuclear submarines. However, there are other tasks, not only the high level of nuclear technology that are needed to be dealt with in order to construct nuclear powered submarine. The biggest task of all is to secure the enriched uranium. Accordingly, this research is about the way of enriching and securing the nuclear fuel that are used in the nuclear submarine with the characteristics, merits and demerits of the nuclear submarine.

Due to the fact that the pressurized water reactor in South Korea is the reactor that was originally built for the development of nuclear powered submarine, many parts is designed to be suitable for the submarine propulsion. However, in order to apply this to submarine it is needed to consider additional requests such as the position of reactor, accident-coping system, radioactive covering, reactor output adjustment and ship's pitch and roll in order to apply this to submarine.

Nuclear submarines have much higher speed based on the powerful propulsion in comparison with diesel-electric submarine and also have bigger loading area. Besides, there is no need to snorkel and they also have advantages

---

16) Active ROK Navy Lieutenant Commander currently serving at the ROK Navy Submarine Command.



in covertness with the multi-noise proof system.

The nuclear technology in South Korea has seen the dramatic development since 1962 and in 1998 reached to the level that we have succeeded in the localization of nuclear plant and exported the world-class one-piece small-sized reactor (SMART) to UAE. To operate these reactors, we import the whole quantity of low-enriched uranium and having our own uranium enrich facility is not probable because of the budget and international regulations.

With the ROK/US nuclear agreement revised on 2015 November, the enrichment of uranium that are available without special permission has changed up to 20%. According to the assumption that we use the 20% enrichment of Uranium on U.S. virginia class submarine, it is necessary to change the fuel after 11 years and it will cause additional cost of 1 billion dollars. But the replace period by the uranium's enrichment rate is not fixed so that it is possible to change according to the design of reactor. Therefore, I would like to make a suggestion on two types of design concepts of nuclear submarine that can be operated for 30 years without nuclear fuel change by using the 20% enriched uranium from ONNp. First of all, it is possible by increasing the size of reactor by 3 times and it results in the 1,000t increase of the weight. And secondly, it is by designing the one piece reactor to insert devices such as steam turbine, condenser into the inside of nuclear core like the Rubis class submarines of France.

**Key Words : Nuclear Power, Submarine, Reactor, Enriched Uranium,  
Nuclear Submarine**