

## 핵확산 저항성을 갖는 KALIMER-600 단일 농축 노심의 열유체 해석

김영균, 임현진, 송훈, 김영일  
한국원자력연구소

### Thermal Hydraulic Analysis of Proliferation Resistant KALIMER-600 Single Enrichment Core

Y. G. Kim, H. J. Lim, H. Song, Y. I. Kim  
Korea Atomic Energy Research Institute

#### 1. 서론

국내의 액체금속로 설계연구를 위하여 노심규모를 전기출력 150MWe, 열출력 392MWth 규모로 하고 20% 농축도 이하의 U-Zr의 이원합금 핵연료를 사용하는 금속연료 노심[1,2], 초기노심 연료로 U-Pu-Zr 삼원합금 핵연료를 사용하는 비균질 노심인 증식특성 노심[3] 및 breakeven 노심[4] 등을 구성하고 이에 대하여 핵 및 열유체 특성 분석 작업을 수행되었다. 그러나, 최근에는 핵확산저항성 노심의 필요성이 크게 대두됨에 따라서 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄할 수 있도록 하기 위해 블랭킷 집합체를 제거하여 순 핵분열성 물질 재생산이 거의 없으면서 임계증식비를 갖는 새로운 개념의 노심으로서 600MWe급 중형노심 개념을 개발하였다[5]. 기존의 소듐 냉각 액체금속로는 체적당 출력밀도를 최대화하는데 중점을 두었으므로 노심내부 증식비를 1.0 이상으로 유지하기가 어려웠다. 따라서, 핵연료 반경을 증가시키고 냉각재 면적을 줄임으로써 재처리 과정에서 핵분열성 물질의 유실을 고려하여도 증식비가 1.0 이상인 노심을 개발한 것이다. 이 개념의 타당성이 입증될 경우 핵확산저항성 노심개념 연구분야에서 획기적 전환점을 맞이할 것으로 예상되며, 또한 선명한 핵확산저항성을 지니므로 국내에서 지속개발이 가능하여 앞으로 액체금속로 개발의 주력 설계 노심으로 자리매김할 것이다.

한편, 나트륨을 냉각재로 사용하고 있는 액체금속로 노심의 핵연료 집합체는 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 핵연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 형태로 구성되어 있기 때문에, 덕트와 덕트 간에 열교환은 발생하지만 유량은 교환되지 않는 폐쇄회로를 형성하게 된다. 이들 각각의 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키는 것이 핵연료 집합체에서 생성되는 열량을 효과적으로 추출할 수 있는 열유체 설계의 기본 목표가 된다. 각 집합체에 필요한 유량은, 정상상태는 물론 과도상태에서도 핵연료, 피복관 및 구조재의 건전성 확보, 냉각재 비등방지 조건 등을 고려하여 분배되어야 한다. 전반적인 액체금속로 노심 열유체 개념 설계 및 분석 작업은 그림 1에 나타낸 것처럼 노심구성과 그에 따른 핵설계 데이터를 연계자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다. KALIMER 노심 열유체 개념설계 및 분석 작업에서는 전반적으로 현재 개념설계 단계에서 사용하고 있는 흐름도를 따르고 있는데, 이는 노심 유량영역 구분과 노심내 집합체별 온도분포 계산의 두 작업으로 구성되어 있다.

본 논문에서는 블랭킷이 없는 600MWe 노심의 개선된 개념설계의 전반적인 특성에 대하여 기술한 후, 노심 열유체 설계특성을 분석하고 그 계산 결과에 대하여 기술하였다.

#### 2. 핵확산저항성 노심 구성 및 핵설계 특성

### 평형주기 노심모형

초기에 설계된 KALIMER-600 노심은 노심설계 기준 및 요건을 이전의 KALIMER-150 breakeven 노심과 동일하게, 금속핵연료 데이터베이스를 기초로 하여 노심 설계기준과 제한 조건을 포함하는 노심 설계요건을 설정하였으나, 그 이후에 수행된 여러 가지 분석 작업을 통하여 지속적인 설계개선이 이루어지고 있다. 2004년도에 개선된 설계내용은 다음과 같다. 원자로 출력은 600MWe, 발전소 성능인자는 85%, 핵연료 재장전 기간은 22개월로 하였고, 침투선출력은 batch factor를 고려하여 최대 440W/cm로, 최대연소도는 150MWD/kg로 제한하였다. 또한 최대 고속중성자 플루언스는  $4.0 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 을 넘지 않도록 하였다. 초기 시동 노심의 핵연료 형태는 U-Pu-Zr 3원합금으로, 시동 노심은 PWR 사용후핵연료를 재처리한 TRU로 이루어진 핵연료로, 시동 노심 이후의 핵연료주기에서는 운전 중 생산되는 TRU를 재순환 공급하도록 하였다. 한편, 사용후핵연료 내 포함되어있는 마이나 액티나이드(MA)는 재순환 TRU와 함께 재순환 공급한다. 이러한 노심설계기준을 가지고 증식비는 1.0, 연소결손 반응도가는 1,000pcm 정도, 침투출력은 노심 외부에 되도록 배치하고 TRU 농축도는 30wt% 이하로 하였다.[6]

### 노심 구성 및 설계 제원

증식비 1.0을 유지하는 노심을 구성하기 위하여 내부 블랭킷, 외부 블랭킷, 구동핵연료집합체로 구성된 40개의 다양한 후보 노심을 선정하여 연소결손반응도와 구동핵연료집합체 선출력 밀도의 관점에서 계산 후 비교 및 평가를 통하여 노심을 구성한 바 있다. 점진적으로 블랭킷 집합체의 개수를 감소시킨 결과 최종적으로 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄하여 핵확산저항성이 향상된 블랭킷을 제거한 노심의 설계가 가능하게 되었다. 블랭킷 삭제로 인한 증가된 출력 peaking factor를 낮추기 위해 노심 연료 영역을 3영역으로 나누어서 각 영역에 대하여 여러 가지로 농축도를 변경하여 출력 peaking factor가 최대로 낮추어진 노심을 최종적으로 선택한 것이다[7].

개선된 노심은 출력 평탄화를 고려하여 노심 영역을 내부(inner)구동연료 영역에 114개의 구동핵연료 집합체, 중간(middle)구동연료 영역에 114개의 구동핵연료 집합체, 외부(outer)구동연료 영역에 108개의 구동핵연료 집합체, 12개의 제어봉 집합체, 1개의 USS(Ultimate Shutdown System)로 구성하였다. 노심 외곽은 77개의 반사체 집합체, 114개의 노내 핵연료 저장조(IVS: In-Vessel Storage), 그리고 168개의 차폐 집합체(72개의 B<sub>4</sub>C 차폐체 포함)로 구성되어 있다. 이와 같이 개선된 KALIMER-600 설계 노심의 배치도를 그림 2에 나타내었으며, 표 1은 주요 설계 사양과 운전조건을 보여주고 있다. 축방향 블랭킷은 없으며, 노심의 유효높이는 100 cm이다. 노심영역의 반경방향 등가직경은 511.62cm로 증가하였다. 노심구조재는 HT9로서, 이 패라이트계 스텐레스강은 낮은 조사 팽윤 특성을 가지고 있다. 구동핵연료집합체에는 271개의 핵연료핀이 장진되어있는데, 핵설계 특성을 향상시키기 위하여 내부 구동연료에는 B4C봉 12개, vacancy 봉 13개, 중간구동연료에는 vacancy봉 19개를 삽입하였다. 핵연료 재장전주기는 22개월로 하였으며, 매 재장전시 총 핵연료집합체의 1/4이 교체되고, 노심내 장진된 핵연료집합체는 전 핵연료주기 동안 위치가 바뀌지 않는다. 노심으로부터 추출된 핵연료는 붕괴열을 냉각시키기 위해서 노내핵연료저장조(IVS) 내에 1주기 동안 저장한 후 최종적으로 노용기 외부로 이동된다[6,7].

### 3. 노심 열유체 설계 방법론

개념설계 단계에서의 열유체 설계 및 특성 분석은 먼저 노심 열유체 설계목표에 따라 노심내 전체유량을 계산한 후, 각 집합체별 열출력과 그 집합체에서의 핵연료봉 최고 선출력 밀도에 따라 집합체별 필요 유량을 계산한 후 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나눈다. 다음으

로 이렇게 분배된 유량을 바탕으로 각 집합체의 최고온도 연료봉에 대한 냉각제 온도, 피복관 중심온도, 핵연료 중심온도 등을 상세히 계산하는 방식으로 수행된다. 이 때, 각 집합체에서의 핵연료 피복관 최고 중심온도가 같은 값을 같도록 유량을 재조절하며, 이 유량에 의한 노심내 압력손실값을 비롯한 모든 계산값들이 설계조건을 만족하는지를 확인하고, 그에 따른 집합체별 필요 유량을 결정하여 유량분배 장치인 오리피스를 구성하게 된다. 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵 및 열유체 안전성 분석을 통하여 검증은 받게 된다[1,8].

#### 노심 유량영역 구분

각각의 집합체에 분배될 유량은 집합체 하단의 노심 입구 플레넘 부분에 설치된 오리피스 장치에 의하여 조절된다. 현재로서는 이러한 장치들이 일단 설계·제작되어 장전되면 운전 기간 중에는 유량을 변화시켜 가면서 조절할 수 없는 설계방식을 이용하고 있다. 또한, 기계적으로 한계가 있어 미소한 유량을 정밀하게 조절할 수도 없다. 따라서, 각 집합체에 분배되는 유량은 핵연료가 노내 장전기간 중에 생성하는 발열량의 최대값을 고려한 유량이 되어야 한다. 유량분배는 경제성과 효율성을 고려하여 각 집합체의 필요 유량을 몇 개의 그룹으로 나누고 그 유량을 각 집합체에 분배하는 방법을 이용한다. 이렇게 분배된 유량에 따라서 노심내의 온도분포를 계산하게 된다.

집합체별로 필요한 유량을 분배하고 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나누기 위해서는, 핵계산 결과로부터 구한 집합체의 출력 및 집합체별 최대 선출력 밀도에 따라 각 집합체에 필요한 유량을 계산하고, 이를 기본으로 하여 약 10% 정도 범위 내외의 유량을 갖는 집합체들을 하나의 그룹으로 묶는 방법을 사용한다. 그러나, 집합체의 종류가 달라지면 비록 유량이 같다고 할지라도 다른 그룹으로 분리한다. 이 때, 제어봉과 USS(Ultimate Shutdown System) 에서는 발생하는 출력이 없지만 thermal striping 온도 (임의의 집합체에서의 냉각제 출구 온도가 주변 6개 집합체의 냉각제 출구 온도와 갖는 차이값 중에서 최고인 값) 등을 고려하여 최소 필요 유량을 공급해 주어야 한다. 단, 현재의 개념설계 단계에서는 집합체간의 썸과 제어봉, 반경방향 차폐체 등의 저발열부에서는, 실제적인 계산을 수행하지 않으며, 일반적으로 총유량의 1.5% 정도를 할당하고 노내저장 집합체의 경우에는 발열량을 고려하여 필요한 유량을 할당하였다[1,8].

#### 노심내 집합체별 온도분포 계산

위와 같이 하여 노심내 집합체별로 분배된 유량에 따라 집합체별 피복관 중심 최고 온도를 계산하여, 그 온도가 설계제한값을 만족하는지 여부를 확인하는 반복 계산을 수행한 후 그룹별 필요 유량이 최종 결정된다. 핵연료 피복관이 손상될 확률이 모든 집합체에서 일정하도록 해주는 것이 중요하기 때문에, 일반적으로 각 집합체에서 최고 선출력을 갖는 연료봉의 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 적용한다. 각 부분에서의 온도를 계산할 때에는 각 단계마다 실제로 계산된 정규값에 설계 및 계산에 의한 불확정성 인자들을 고려하여 2 $\sigma$ 값을 구하게 된다. 개념설계 단계의 계산에서 일반적으로 사용하는 설계 제한값으로는 핵연료 피복관 중심온도를 635℃, 집합체 출구온도를 593℃, thermal striping 온도를 205℃, 핵연료 표면온도를 704℃, 그리고 연료봉 중심온도를 927℃로 사용하고 있다[8].

### **4. KALIMER-600 단일농축 노심의 열유체 특성 분석**

#### 노심 유량영역 구분 결과 및 노심내 집합체별 온도분포 계산결과

노심입구의 냉각제 입출구 온도는 초기의 설계값이 386.2℃와 530℃이었으나 피복관 중심 온도 제한치에 대한 여유가 적은 부분을 개선하기 위하여, 노심에서의 온도 증가는 143.8℃

로 동일하도록 하고 각각 온도값만 20℃를 낮춘 366.2℃와 510℃로 재설계 하였다. 또한 breakeven 노심 설계의 최적화 과정에서 핵연료설계 및 핵계산 작업과의 설계연계 협의에 의해 결정된 핵연료봉의 외경은 7.4mm였으나, 핵확산저항성을 높이기 위해 블랭킷을 제거한 KALIMER-600 노심의 경우에는 출력 보정을 위해 핵연료봉의 외경을 7.57mm로 증가시켰으나, 이는 다시 설계개선 작업을 통하여 8.80mm로 증가되었다.

그림 3은 개선된 KALIMER-600 설계 노심에 대한 집합체별 최종 유량분배 및 그에 따른 온도분포 계산결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량그룹, 집합체 출력, 출구온도 값 등을 1/6노심에 대하여 나타낸 것이다. 그에 따른 온도계산 결과를 표 2에 나타내었다. 표에 나타낸 계산값들은 유량영역 중에서 가장 높은 출력을 갖는 연료봉의 2 $\sigma$ 값에 해당하는 온도이다. 표에서 보듯이 KALIMER-600 설계 노심의 경우에는 내부구동연료에 2개, 중간 구동연료에 3개, 외부 구동연료에 6개의 유량그룹으로 선정되었다. 이는 처음 설계에 비하여 내부와 중간 구동연료에 각각 하나씩의 그룹이 증가된 것이다. 집합체 종류별 유량은 구동 핵연료집합체 영역에 95.1%, 제어봉집합체 영역에 0.5%, IVS영역에 2.4%, 그리고 집합체간 유량과 비연료집합체 영역에 2.0%의 비율로 분배 되었다.

최고온도 집합체가 외부 핵연료 집합체인 (4, 2) 집합체에서 나타나게 되었으며, 이 집합체에서의 유량은 29.0kg/s로서 초기 설계값인 29.6kg/s과 거의 동일한 유량을 갖고 있다. 와이어랩 직경은 1.4mm로 동일한 가운데 핵연료봉 외경이 7.67mm에서 8.80mm로 크게 증가하여 집합체 내부에서의 유로면적이 확대되었기 때문에 이 집합체에서의 평균 유속은 5.0m/s에서 4.0m/s로 감소하였으며, 핵연료 변들 부분에서의 압력강하는 0.263MPa에서 0.150MPa로 감소하였다.

한편, 피복관 중심에서의 2 $\sigma$  온도는 593℃로서 제한값인 635℃를 만족하고 있다. 그러나, 이 온도값은 구동핵연료집합체에 장전된 271개의 핵연료핀 중에서 핵설계 특성을 향상시키기 위해 교체 장전한 내부구동연료의 B4C봉 12개와 vacancy 봉 13개, 중간구동연료의 vacancy봉 19개로 인하여 대략 10℃ 정도 증가한 값이다. 이는, 동일한 출력을 생산하는 구동핵연료집합체 내부에 핵설계 특성을 높이기 위하여 교체 장전한 비출력봉이 존재함으로써 인하여 그만큼 연료봉에서의 선출력이 증가하게 되었기 때문이다. 위의 설계 특성은 타분야와의 많은 설계연계와 검토 작업 및 평형노심의 최적화 작업과 함께 초기/천이 노심의 해석 작업을 통하여 적절하게 유량이 분배되도록 설계하는 작업, 즉 유량분배와 온도계산을 반복적으로 수행하여 열유체 설계를 최적화시키는 작업을 통하여 개선될 것이다.

## 5. 결론 및 연구방향

핵확산저항성을 갖춘 액체금속로 노심 개념의 필요성이 대두됨에 따라서 액체금속로 노심 설계기술개발과제에서는 중장기 원자력연구개발사업이 일환으로 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄하기 위하여 블랭킷 집합체를 전혀 사용하지 않고도 임계중식비를 갖는 새로운 개념의 노심으로서 600 MWe급 노심 개념을 개발하고 이에 대한 개선 작업을 진행되었다. 본 논문에서는 열출력 1,539.3MWth, 전기출력 600MWe인 U-Pu-10%Zr 삼원합금 핵연료 사용 노심인 액체금속로 KALIMER-600에 대하여 당해연도에 개선된 설계 특성을 기술하고 평형노심에 대한 정상상태 열유체 설계 해석 작업에 대하여 기술하였다.

유량분배 계산 결과 유량그룹은 내부(inner)구동연료 영역에 2개, 중간(middle)구동연료 영역에 3개, 외부(outer) 구동연료 영역에 6개로 구분되었는데 이것은 추후 최적화 작업과 초기/천이 노심 해석을 거쳐 미세한 조정의 설계 개선이 이루어질 것이다.

또한, 최대유량집합체의 연료봉 다발부분에서의 평균 유속은 4.0m/s, 노심 전체에서의 압력강하는 20%의 불확실도를 고려하여 0.270MPa이고, 피복관 중심에서의 2 $\sigma$  온도값이 593℃로 제한값인 635℃를 만족하고 있는데, 이 값은 구동핵연료집합체에 장전된 271개의 핵

연료핀 중에서 핵설계 특성을 향상키기 위해 교체 장전한 내부구동연료의 B4C봉 12개와 vacancy 봉 13개, 중간구동연료의 vacancy봉 19개로 인하여 대략 10℃ 정도 증가한 값이다. 본 논문에서 계산 및 분석을 위해서 사용된 코드는, 현재 KALIMER 노심설계 기술개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 냉각재 유량분배 계산 모듈 ORFCE와 그에 따른 노심 집합체내 온도분포 계산 코드 SLTHEN[9]이다. 개념설계 초기 단계에서 계산된 집합체의 유량분포나 온도분포는, 현재 개발하고 있는 상세 부수로 해석코드인 MATRA-LMR[10]을 사용하여 더욱 자세한 계산을 수행할 것이다. 추후, 일본의 JSFR과 필적할 만한 노심 개발을 위하여 노심의 입출구 온도를 각각 370.4℃와 545℃로 높은 설계 개선에 따른 분석 작업이 수행될 것이며, 이에 대한 노심 핵특성 및 열유체 특성 분석 작업을 수행하게 될 것이다. 한편, 소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로 노심해석에서는 집합체간 유량이 노심 상부구조물에 의하여 재분배되는 현상이 발생할 수가 있기 때문에 이를 해석하기 위하여 부수로 해석코드와 다공성 매질 해석코드를 연계하여 해석하는 방법을 이용한 분석코드 개발이 수행 중에 있다[11].

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] 박창규 외, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97 (1997)
- [2] 김영인 외, KALIMER Uranium Metallic Fueled Equilibrium Core Design and Analysis, LMR/CD100-ER-01 Rev. 0/98, Internal Document, KAERI (1998)
- [3] 김영인 외, KALIMER Breeder Equilibrium Core Conceptual Design and Analysis, LMR/CD120-ER-01 Rev. 0/99, Internal Document, KAERI (1999)
- [4] 김영인 외, "Nuclear and Thermal-hydraulic Characteristics for KALIMER Breakeven Equilibrium Core," LMR/CD112-ER-01 Rev. 0/2000, Internal Document, KAERI (2000)
- [5] 김영균 외, "액체금속로 KALIMER-600 노심 개념설계 열유체 특성 분석", KNS 춘계학술발표회, 경주 (2003)
- [6] Song H., "Nuclear Design of a Na Cooled KALIMER-600 Core of a Single Enrichment", KNS Autumn Meeting, Yongpyong (2004)
- [7] 송훈, "KALIMER-600 노심의 핵특성 분석보고서", 내부 작업 보고서 (2003)
- [8] Hahn D. H. et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995)
- [9] Yang W. S., "An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model", Journal of KNS, Vol. 29, No. 5, pp. 406-416, (1997)
- [10] Kim W. S. et al., "A Subchannel Analysis Code MATRA-LMR for Wire-Wrapped Liquid Metal Cooled Reactor Subassembly", Annals of Nuclear Energy, No.2, Vol. 29 (2002)
- [11] Lim H. J. et al., "A Combined Method of Subchannel and Porous Media Approach for LMR Core Thermal Hydraulic Analysis", KNS Autumn Meeting, Yongpyong (2004)

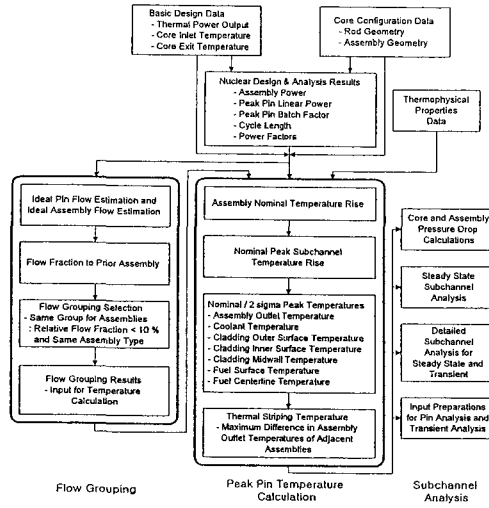


그림 1. 액체금속로 노심 열유체 개념설계 및 특성분석 작업 흐름도

표 1. KALIMER-600 단일농축 노심 설계사양

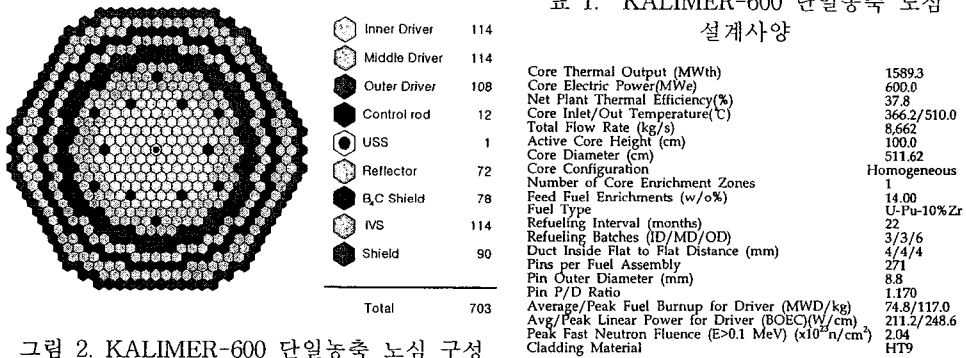


그림 2. KALIMER-600 단일농축 노심 구성

표 2. KALIMER-600 단일농축 노심 유량영역 및 온도(2σ)

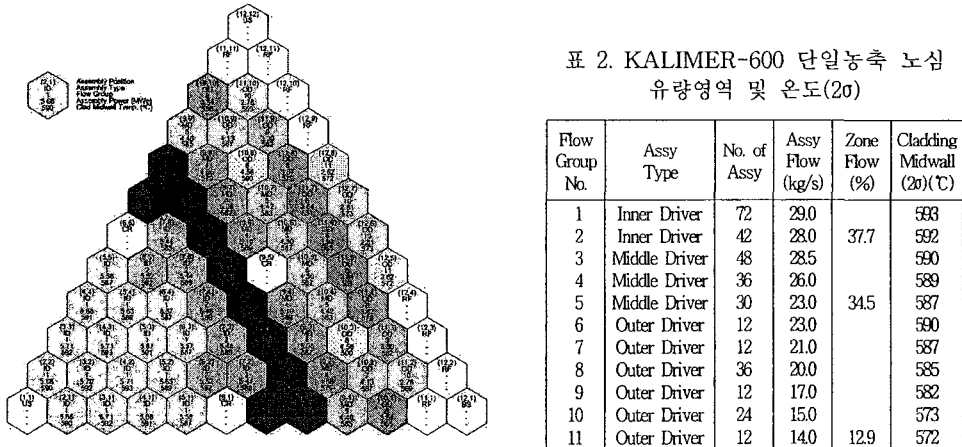


그림 3. KALIMER-600 단일농축 노심 유량영역 구분 (1/6 노심)

Total primary loop flow : 8,662kg/s  
Total bypass flow : 4.4 %