

차세대원자로 무봉산노심 개념설계 연구

김순영, 김종경
한양대학교

정선교
한국원전연료(주)

요약

기존 가압형 경수로에서 전체 반응도가의 상당부분을 제어하고 있는 봉산수를 사용하지 않고 가연성독봉 및 제어봉을 확대 사용하는 전략으로 1300MWe급 차세대원자로(KNGR)를 대상으로 무봉산 노심 개념설계를 수행하였다. 가연성독봉으로는 기존 PYREX 독봉의 독물질을 농축한 농축 PYREX 독봉을 도입하여 주기초 반응도 제어효과 및 전 주기동안 평평한 잉여반응도 유지에 매우 효과적인 결과를 도출하였다. 또한, 무봉산 노심이 필연적으로 갖게되는 축방향 출력분포의 노심 하단부 치중현상을 제어하기 위하여 부분장 제어봉(Part Length Control Rod)을 보조적으로 사용, 매우 간단한 형태의 핵연료집합체 축방향 zoning 설계를 수행하였다. 부분장 제어봉의 사용으로 모든 핵연료집합체를 축방향으로 zoning 하지 않고도 축방향 출력분포를 효과적으로 제어할 수 있었다. 제어봉으로는 큰 제어봉가를 확보하기 위하여 B₄C를 재질로 하는 Checkerboard 형태의 제어봉 설계를 수행하였고, 효과적인 제어봉 운용을 통하여 무봉산 노심의 잉여반응도 및 출력분포 제어가 가능하였으며 제어봉이 운전중에 상당부분 삽입될지라도 약 7% $\delta\rho$ 의 충분한 운전정지여유도를 확보할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

1. 서론

기존 가압형 경수로의 노심 반응도 제어에 주 기능을 담당하고 있는 봉산수를 제거함으로써, 보다 개선된 가압형 경수로 설계를 통하여 운전 및 보수를 용이하게 하려는 시도가 600MWe급 노심을 대상으로 하여 최근 국내외적으로 연구중에 있다^[1,2]. 비록 현재 가동중인 가압형 경수로에서는 봉산수가 전체 노심반응도가의 70%이상을 제어하고 있으나, 봉산수가 제거되면 1차냉각수내 봉산수 농도를 감시하고 조절하는 계통이 불필요하게 되고, 빈번한 농도조절로 발생하는 액체폐기물을 제거할 수 있을 뿐 아니라 봉산수로 인한 원자로내 부품들의 부식문제를 해결할 수가 있다. 또한 봉산수 사용은, 감속재 온도계수(Moderator Temperature Coefficient, MTC)를 보다 더 양(positive)의 값으로 만들어 안전성 측면에 불리하게 작용하므로 고도의 안전성이 요구되는 신형원자로 개발에 있어 적합하지 않은 반응도 제어 수단으로 여겨지고 있는 실정이다^[2,3].

본 연구에서는 기존 600MWe급 무봉산 노심설계와는 달리 대형 노심에서도 무봉산 운전이 가능한지에 대한 타당성 분석에 기초를 두어, 1300MWe급 차세대 원자로(Korea Next Generation Reactor, KNGR)에 대한 무봉산 노심 개념설계를 수행하였다. 노심 반응도 제어에 봉산수 대신 가연성독봉 및 제어봉을 확대 사용하는 전략에 기반을 두어, 다양한 가연성독봉들에 대한 무봉산 핵특성을 분석한 후 농축 PYREX를 가연성독봉으로 사용하였다. 무봉산 노심에서 필연적으로 수반되는 축방향 출력분포의 하단부 치우침 현상을 제어하기 위하여, 매우 간단하고 공학적으로 설계 가능한 핵연료집합체 축방향 zoning 연구가 이루어 졌을 뿐 아니라, 제어봉에 의한 노심 잉여반응도 및 출력분포 제어연구도 이루어져 임계 제어봉 위치탐색 작업을 포함한

Axial Offset 및 F_Q 계산, 그리고 운전정지여유도(Shutdown Margin) 확보여부에 대한 분석이 수행되었다. 노심계산에 사용된 전산코드는 APA(ALPHA/PHOENIX-P/ANC) 전산코드체계이고, 본 연구팀에 보유허가가 없어 한국원전연료(주) 노심설계실을 계속적으로 방문하여 사용하였다.

2. ARO 상태의 차세대 원자로 개념설계

2.1 농축 PYREX 독봉

무봉산 차세대 원자로 개념설계에 앞서, 여러가지 가연성독봉들에 대한 무봉산 핵특성을 분석하였다. 차세대 원자로의 기본설계사양은 대부분 그대로 유지한 채, 가연성독봉의 종류 및 갯수의 선택에 있어 자유도(degree of freedom)를 높이려는 목적으로 전형적인 ABB-CE사의 안내관(guide thimble) 크기를 그림 1과 같이 Westinghouse사의 작은 안내관으로 대체하였다^[34]. 핵특성분석에 사용된 핵연료집합체의 농축도는 2.0, 2.5, 3.0w/o 이고, 각 핵연료집합체별로 독봉의 종류, 갯수 및 독물질 농축도를 변화시켜 민감도 분석을 수행한 결과, 기존 PYREX 독봉의 독물질을 농축한 농축 PYREX 독봉이 무봉산 노심의 반응도 제어에 있어 효과적임을 확인하였다. 제어봉 장전위치에 대한 제약을 없애기 위하여 농축 PYREX 독봉을 안내관이 아닌 핵연료봉 위치에 핵연료봉 대신 장전하였고, 그 장전위치를 그림 2에 나타내었다. 농축 PYREX 독봉은 주기초 임여반응도 제어능력 및 전 주기동안 평평한 임여반응도 유지에 있어 효과적이었고, 첨두봉출력치는 PYREX 독봉이 안내관에 장전된 경우보다 낮은 값으로 나타나는 등 본 연구에서 고려하는 무봉산 노심설계에 적합한 특성을 나타내었다.

2.2 가연성독봉에 의한 Axial Offset 제어

무봉산 노심에서는 강한 음의 감속계 온도계수로 인하여 축방향 출력분포가 노심 하단부로 심하게 편중되는 현상이 발생한다^[9]. 이에 대한 제어방안으로서는 제어봉의 효과적인 사용에 앞서 축방향으로 zoning된 핵연료집합체 설계가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 그림 3에 나타낸 형태로 핵연료집합체 축방향 zoning 설계를 수행하였다. 또한, 축방향 zoning되는 핵연료집합체 갯수를 줄여 가급적 집합체를 zoning하지 않고 노심 하부로 치우치는 출력분포를 제어하고자, 부분장 제어봉(Part Length Control Rod) 사용을 고려하였다. 부분장 제어봉은 zoning되지 않은 핵연료집합체에 삽입되어 하단부로 치우치는 축방향 출력분포 제어를 담당하도록 함으로써 가장 간단한 Axial Offset 제어방안을 수립하였다. 그림 3에 나타낸 것처럼, 상부와 하부에 장전되는 PYREX 독봉의 독물질 농축도를 다르게 하여 상부에는 반응도가 높은 PYREX 독봉을, 하부에는 반응도가 낮은 독봉을 장전하였고, 여러차례의 노심 반복계산을 통하여 상부와 하부의 축방향 장전비율이 각각 27%와 73%일 때 축방향 출력분포가 가장 안정적인 것으로 나타났다. 물론 27%와 73%라는 장전비율은, 노심에 장전된 총 241개의 핵연료집합체중에서 144개만이 같은 축방향 장전비율을 가지고 zoning된 경우일 때에 최적화된 값이다. 즉, 144개의 핵연료집합체는 모두 상부 27%, 하부 73%의 일괄적인 축방향 장전비율로 zoning되어 하부로 치우치는 출력분포를 상부로 이동시키는 역할을 담당하였다.

2.3 무봉산 차세대 원자로 설계 특성

앞서 언급하였던, PYREX 독봉과 핵연료 집합체의 축방향 zoning 방법을 적용하여 ARO 상태 무봉산 차세대 원자로의 개념설계가 수행되었다. 본 연구는 차세대 원자로에 대한 무봉산 노심설계의 가능성을 확인함이 목적이므로 노심 주기길이(cycle length) 선정에 있어 신형원자로에서 추구하는 18/24개월 주기길이 달성은 추후 고려하기로 하고, 우선 노심 임여반응도 및 축방향 출력분포 제어에 용이하도록 16개월 주기길이를 선정하였다. 설계 주요특성 재원은 본 연구의 기본 원자로인 봉산사용 차세대 원자로의 특성과 함께 표 1에 나타나 있고, 노심 장전모형은 그림 4와 같이 저누출 장전모형(Low Leakage Loading Pattern)으로

설계하였다. 노심에 장전되는 핵연료집합체의 종류는 9가지이고, 각 집합체의 농축도별로 3가지로 나뉘어진 다. A0 핵연료집합체는 2.5w/o 농축도에 21w/o-B₂O₃ 농축 PYREX 12개가 장전되었고, A1 집합체의 경우 에는 같은 농축도에 30w/o-B₂O₃ 농축 PYREX 12개가 장전되었다. A2 집합체는 이들 두 핵연료집합체가 축방향으로 zoning된 형태를 가지고 있으며, 앞선 그림 3에 자세하게 나타나 있다. 3.0w/o 집합체는 2.5w/o 집합체의 경우와 마찬가지로 같은 독물질 농축도에 갯수만 16개를 사용하였고, 3.5w/o 집합체는 잉여반응도 가 높기 때문에, 특히 주기초 반응도 억제를 위하여 30w/o 및 40w/o-B₂O₃ 농축 PYREX 16개로 높여 사용 하였다. 반복적인 노심 연소계산을 통하여, 제어봉이 담당해야 할 반응도가는 1.15% 이내로 유지되었고, 핵 연료집합체 축방향 zoning으로 인하여 Axial Offset 값도 ±10%이내에서 제어가 가능함을 알 수 있었다.

3. 제어봉에 의한 잉여반응도 및 출력분포 제어

3.1 제어봉 설계

무봉산 노심에서는 강한 음의 감속재 온도계수의 영향으로 기존 가압형 경수로에서 보다 많은 반응도 삼 입이 이루어진다. 따라서 이를 제어하기 위한 제어봉의 제어봉가는 기존의 것보다 월등히 커야한다. 제어 봉 배열은 Checkerboard 형태와 Fully Rodded 형태의 2가지로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 형 태의 제어봉 배열을 모두 적용할 수 있게 하기 위하여 안내관에는 어떠한 가연성독봉도 장전되지 않도록 설 계하였다. 그러나, Fully Rodded 형태는 제어봉가 증가의 측면 뿐만 아니라 충분한 정지여유도 확보에도 크 게 유리하나, 제어봉 수 증가로 인해 발생하는 하중문제가 지적될 수 있어 Checkerboard 형태의 제어봉 배열 을 우선적으로 선정하였고, 제어봉 재질로는 정지여유도를 충분히 확보하기 위하여 중성자 흡수단면적이 큰 B₄C를 사용하였다. 제어봉은 크게 잉여반응도 및 출력분포 제어용과 원자로 정지용으로 구성하였고, 그림 5 에 잘 나타나 있다. 앞절에서 언급한 바와 같이, Axial Offset 제어를 위해 부분장 제어봉을 노심 전체에 8 개를 사용한 점이 특징이고, 이 제어봉은 전 주기동안 노심하단부까지 항상 삽입되어 축방향 출력분포가 하 단부로 치우치지 않도록 제어한다. 부분장 제어봉은 축방향으로 zoning되지 않은 핵연료집합체에 삽입되어 지고, 그 형태는 그림 6에 나타나 있다. 또한, 노심 한 가운데에는 잉여반응도 제어와 축방향 출력분포 제어를 동시에 담당하는 RCB3 Bank 1개가 위치해 있고, 이것은 잉여반응도 제어를 위하여 주로 최대위치까지 삽입되어 운전되나, 축방향 출력분포 제어가 필요할 때에만 RCB1 Bank와 함께 구동되어 진다. RCB1 및 RCB2는 노심 잉여반응도 제어를 위하여 사용되고, SD1, SD2 및 SD3는 노심 정지용으로 운전중에는 삽입 되지 않는다

3.2 임계 제어봉 위치 탐색

3.1절에서 구성된 Bank들에 대한 임계 제어봉 위치탐색 작업이 수행되었고, 그 결과를 그림 7에 나타내었 다. 그림 7을 보면, ~7,000MWD/MTU부터 ~14,000MWD/MTU까지는 RCB1, RCB2 및 RCB3 Bank 모두 가 사용되었는데, 7,000MWD/MTU 상태와 14,000MWD/MTU 상태에서는 잉여반응도 제어 외에도 축방향 출 력분포 제어를 위하여 RCB2 Bank를 RCB1 Bank와 함께 삽입하였다. 두 연소단계에서는 축방향 출력분포 가 상부로 치우치는 경향이 나타나, 7,000MWD/MTU상태에서는 RCB1 Bank 삽입량을 상대적으로 줄이고 그만큼 RCB2 Bank를 삽입시켰고, 14,000MWD/MTU상태에서는 그와 반대로 제어를 함으로써 축방향 출력 변화를 완화하였다. 그림 7과 같이 제어봉이 삽입된 상태에서의 Axial Offset 및 F₀ 계산결과를 그림 8과 9 에 각각 나타내었다. Axial Offset은 전 주기동안 +6%~-10%의 범위를 가지며 제어되었고, F₀는 11,000MWD/MTU에서 최대값인 2.275를 나타내었다. F₀값 계산에서 발생하는 오차와 원자로 운전영역의 보수성을 고려한다면 고온전출력, 평형 제논상태에서 계산된 값으로는 높다고 말할 수 있겠으나, 무봉산 노 심에 대한 가능성 연구 수준에서는 비교적 좋은 결과라고 판단되며, 아직 노심 장전모형에 대한 최적화 작업 이 이루어지지 않은 상태이므로 이는 더욱 개선될 수 있는 문제라고 여겨진다.

3.3 정지여유도 계산

제어봉은 고온전출력에서 고온영출력으로 변화시 발생하는 출력결손(power defect)을 보상하고 정지여유도 제한치를 만족시키기 위하여 충분한 제어봉가를 확보해야만 한다. 일반적으로 가장 큰 반응도 제어는 주기말에 요구되는데, 이는 주기말에 감속재 온도계수가 최대 음(negative)의 값을 나타내므로 출력결손에 미치는 영향이 크기 때문이다. 출력감소에 따른 반응도 삽입으로서 핵연료 온도결손과 감속재 온도결손을 계산하였고, void와 축방향 출력분포 변화에 의한 영향은 계산을 수행하지 않고 일반적인 상용값을 사용하였다. 무봉산 노심에서는 제어봉이 삽입된 채로 운전되기 때문에 RIA(Rod Insertion Allowance)에 의한 영향이 클 것으로 판단되어 보수적인 차원에서 계산을 수행하였다. 즉, 원자로 운전중에 삽입되는 PLR, RCB1, RCB2 및 RCB3 Bank들은 실제로 네 종류의 Bank가 동시에 모두 노심 하단부까지 삽입되지는 않으나, 잉여반응도 제어외에 원자로 정지에 기여하는 양이 매우 적을 것이므로, 네 종류의 Bank 모두 원자로 정지에는 전혀 기여하지 않는다고 가정하였다. 계산된 RIA는 약 1%로서, 봉산수를 사용하는 일반적인 원자로에서 고려하는 값에 비해 크지 않게 나타났는데 이는 노심 잉여반응도 제어 및 출력분포 제어에 사용된 제어봉군의 제어봉가를 크지 않게 설계한 때문이다. N-1 Rod 상태에서의 제어봉가를 계산하고, 10% 오차를 고려한 후 출력감소로 인한 반응도 삽입량을 상쇄시켰을 때 정지여유도는 약 7% $\delta\rho$ 를 나타냄으로써, 본 연구에서 개념설계된 무봉산 차세대 원자로는 충분한 정지여유도가 확보되어 있음을 확인하였다.

4. 결론

차세대 원자로(1300MWe)에 대한 무봉산 노심 개념설계를 수행하기 위하여 다양한 가연성독봉들에 대한 무봉산 노심 핵특성을 분석하였고, 이 중 기존 PYREX 독봉의 독물질을 농축한 농축 PYREX 독봉은 주기초 반응도 제어능력 및 전 주기동안 평평한 잉여반응도 유지에 탁월하다는 결론을 도출하였다. 다만, 잔존독작용 효과가 큰 것이 단점으로 지적되나, 이를 장주기 노심 설계에 적용한다면 오히려 장점으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 무봉산 노심이 필연적으로 갖게되는 축방향 출력분포의 노심 하단부 치중현상을 제어하기 위하여 부분장 제어봉 사용을 고려한 가장 간단한 형태의 핵연료집합체 zoning 설계가 수행되었다. ABB-CE사에서 개념설계한 핵연료집합체 zoning 방법과 비교하여 볼 때, 본 연구에서 수행된 결과는 공학적으로 설계가 충분히 가능한 형태이며 향후 모든 무봉산 노심설계에 적용될 수 있으리라 여겨진다.

본 연구는 무봉산 노심설계의 가능성을 검토하고자 수행되었기 때문에 신형원자로에서 기본을 두고 있는 18/24개월의 주기길이를 만족시키지는 못하였으나, 가연성 독봉 및 제어봉을 확대 사용함으로써 무봉산 노심의 잉여반응도 및 출력분포 제어가 가능하였으며 기존 노심에 비하여 제어봉이 운전중에 상당부분 삽입될지라도 충분한 운전정지여유도를 확보할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 계산된 몇 가지 안전변수들은 실제 원자로 운전에서 적용되어 그 제한치를 만족시키기에는 아직 미흡하나, 최적화된 설계가 이루어지면 크게 개선될 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국과학기술원 신형원자로연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] 기초전력공학공동연구소, "무봉산운전을 위한 운전방식의 개선연구," KAERI/CM -148/94, July 1
- [2] ABB-CE, "Soluble Boron Free Passive PWR Study Phase II Summary Report," November 29, 1989.
- [3] 신형원자로연구센터, "제5차 신형원자로연구센터 연구발표회 논문집", CARR/RCA-9701, March 1997.

[4] 김순영, 김종경, “가연성독봉에 의한 차세대원자로 무봉산노심의 잉여반응도 제어”, '97 춘계학술발표논문집, 한국원자력학회, 1997.

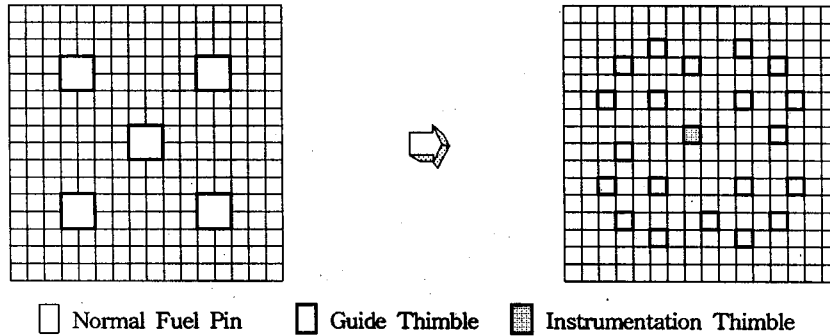


그림 1. 차세대원자로 핵연료집합체 설계변형

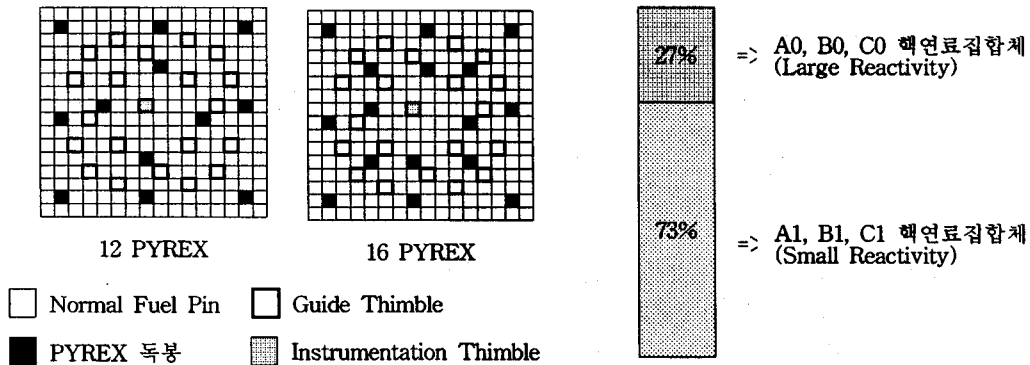


그림 2. 농축 PYREX 장전모형

그림 3. 무봉산 차세대원자로 가연성독봉 축방향 Zoning

표 1. 무봉산 차세대 원자로의 노심설계 주요 특성(1주기)

	SBF	Borated
Power Rating(MWe)	1300	1300
Cycle Length(Months)	16	18
Fuel Assembly Enrichment	2.5, 3.0, 3.5w/o	1.7, 2.5, 3.0, 3.5w/o
Number of Fuel Rods	56635	56876
Burnable Poison Rod	enriched PYREX	Gadolinia
Number of BP Rods	3536	1344
BP Concentration	21, 30, 40w/o B ₂ O ₃	6w/o Gd ₂ O ₃

C0	A1	B2	A2	C1	C2	B0	C2	B0
	B1	A2	B2	A2	B2	C2	B0	A0
		C1	A2	B2	C2	A2	C2	B0
			C2	A2	B2	C0	B2	A0
				B2	C1	B2	A1	
					B2	A0	B0	
						B2		

A0 : 2.5w/o F/A, 21w/o-B₂O₃ 농축 PYREX #12
 B0 : 3.0w/o F/A, 21w/o-B₂O₃ 농축 PYREX #16
 C0 : 3.5w/o F/A, 30w/o-B₂O₃ 농축 PYREX #16
 A1 : 2.5w/o F/A, 30w/o-B₂O₃ 농축 PYREX #12
 B1 : 3.0w/o F/A, 30w/o-B₂O₃ 농축 PYREX #16
 C1 : 3.5w/o F/A, 40w/o-B₂O₃ 농축 PYREX #16
 A2 : 농축 PYREX #12, Axially Zoned(A1+A0)
 B2 : 농축 PYREX #16, Axially Zoned(B1+B0)
 C2 : 농축 PYREX #16, Axially Zoned(C1+C0)

그림 4. 무봉산 차세대원자로 1주기 노심 장전모형

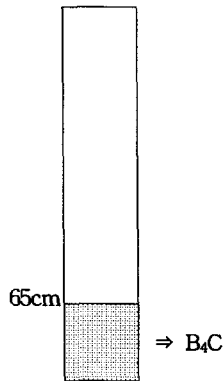


그림 6. Part Length 제어봉 형태

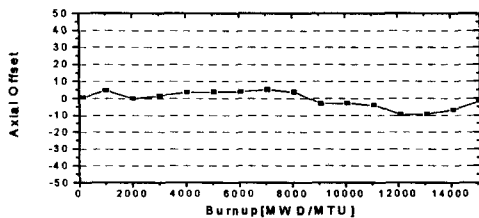


그림 8. 연소도에 따른 Axial Offset 변화

4		2		1		3	
	7		6		5		7
		1		7		6	
			6		7		5
				5		6	
					7		

1 : Part Length Control Bank (PLR)
 2 : Reactivity Control Bank 1 (RCB1)
 3 : Reactivity Control Bank 2 (RCB2)
 4 : Reactivity Control Bank 3 (RCB3)
 5 : Shutdown Bank 1 (SD1)
 6 : Shutdown Bank 2 (SD2)
 7 : Shutdown Bank 3 (SD3)

그림 5. 무봉산 차세대원자로 제어봉 배열

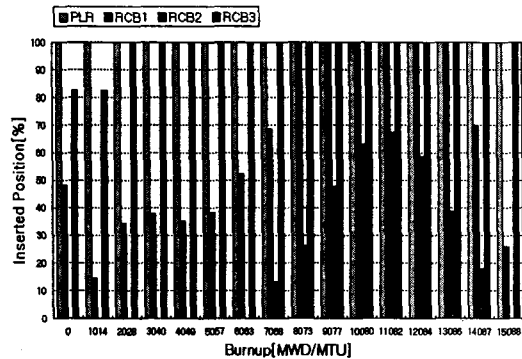


그림 7. 무봉산 차세대 원자로 임계 제어봉위치 탐색결과

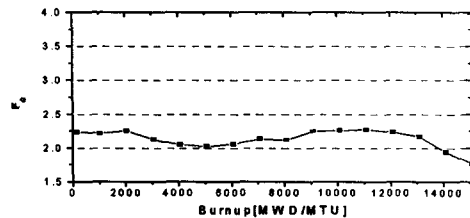


그림 9. 연소도에 따른 F₀ 변화