

웨스팅하우스형 16X16 개량연료의 연료봉 외경 최적화
(Optimization of the Fuel Rod Outer Diameter of WH 16X16 Next Generation
Fuel Assembly)

최규환, 유상근, 김재식, 정일섭, 김선두
한전원자력연료(주), 대전광역시 유성구 덕진동 493번지

요 약

현재 고리2호기는 16X16 웨스팅하우스형 SFA(Standard Fuel Assembly)연료를 사용하고 있다. 본 연구에서는 웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료 개발과 관련하여 16X16 개량연료의 사양을 결정하기 위해 연료봉 외경을 주기비 관점 및 연료사양에 따라 최적화하였다. 이들 연료의 주기비는 연료의 성능에 따른 안전성인자와 밀접한 관계를 갖고 있다. 따라서 이들 개량연료의 기계적, 열적 성능을 고려한 안전성인자의 제한치를 가정한 최적 장전모형을 선정하여 주기비를 평가하였다. 본 연구 수행 결과 개량연료의 최적 연료봉 외경(FROD)은 일차적으로 주기비의 최적화 관점에서는 0.350 inch로 나타났으나, 최종적으로 장주기운전 전략과 현재 고리 2호기에 사용할 수 있는 농축도의 제약 등을 고려하여 0.360 inch가 제안되었다.

Abstract

SFA(Standard Fuel Assembly) of 16x16 Westinghouse fuel type has been used in Kori unit 2. But there is a difficulty in using this fuel for the low leakage loading pattern and long term fuel cycle strategy related to the fuel cycle cost because of low safety limit such as hot channel factor. In this study, the fuel cycle cost evaluation was performed according to the fuel types of 16X16 advanced fuel to be developed. The fuel cycle costs of these fuel types are closely related with the safety parameters dependent on the fuel performance. Therefore, search of the optimized fuel loading pattern was performed by assuming the revised safety limits considering the mechanical and thermal performance of these advanced fuels and the fuel cycle costs are evaluated based on these loading patterns. The result of cycle cost showed that the FROD 0.350 inch was optimized size. But due to the strategy for longer cycles and the upper limit that exists in the enrichment to be used in Kori 2, as well as Westinghouse previous experience, the 0.360 inch was proposed as optimized FROD.

1. 서론

웨스팅하우스형 16X16 연료를 사용하여 상업운전을 하는 원전은 국내의 고리 2호기, 브라질의 앙그라 발전소, 슬로베니아의 크르스코 발전소로서 전세계적으로 3기의 원자력발전소만 운전 중에 있다. 현재 사용되고 있는 16X16 연료는 70년대에 개발되어 인코넬 중간지지격자를 사용하는 SFA 연료이다. 그런데 SFA 연료는 현재 국내 발전소에 장전 중인 17X17 형 V5H 연료, 90년대 후반에 개발되어 상용공급 중인 웨스팅하우스사의 RFA(Robust Fuel Assembly) 및 프라마툼사의 AFA 3G(Advanced Fuel Assembly 3rd Generation)에 비해 연소 성능, 열적 성능 및 신뢰성이 크게 뒤져 핵연료 성능 격차를 조속히 해소하고, 더 나아가 이들 연료를 참조로 새로운 개량연료를 개발하여 국내 핵연료 기술 수준을 선진화할 필요가 대두되었다. 현재 한전원자력연료(주)에서는 웨스팅하우스사와 공동으로 기계적 및 열적 성능이 우수한 16X16 개량연료의 개발을 추진하고 있다.

본 연구의 목적은 16X16 개량연료의 사양을 결정하기에 앞서 경제성 및 안전성을 고려한 최적의 연료봉 외경을 결정하는 것이다. 제 2장에서는 개량연료의 핵적 특성, 핵연료 주요 사양 비교, 평형노심 장전모형 선정 방법 및 주기비 평가 등에 대하여 기술하였고, 제 3장에서는 16X16 개량연료에 사용될 최적의 연료봉 외경에 대한 결론을 기술하였다.

2. 본론

2.1. 개량연료의 특성

개량연료는 기존의 연료와 비교하여 다음과 같은 개선된 특성을 가진다.

- 중성자 흡수율이 낮은 지르코늄합금 중간지지격자를 사용하여 중성자 이용률 증가.
- 연료봉 규격 최적화를 통한 중성자 이용률 제고.
- 최적의 중간지지격자를 개발하여 열적 성능 및 기계적 성능 향상
- 중간유동혼합지지격자(IFM)를 적용하여 열적여유도 증가.
- 최적의 축방향 반사체를 적용하여 연료의 효율적인 연소를 통한 경제성 향상.¹⁾
- 개량 피복관의 적용으로 연료봉 성능 향상.
- 최적의 중성자흡수봉의 사용을 통한 안전여유도 및 경제성 향상.

2.2. 연료의 주요사양 비교

웨스팅하우스형 16X16 연료는 현재 고리 2호기에 사용 중인 SFA 연료만 개발되어 있는 상태이다. 따라서 16X16 개량연료의 사양중 피복관 지름, 소결체 지름 및 소결체 길이 등은 이미 개발되어있는 17X17 OFA 연료의 사양을 참조하였으며, 소결체 외경은 연료치수를 결정하는데 가장 일반적으로 사용되는 방법인 연료와 피복관 사이의 간격에 대한 부피비를 일정하게 유지하는 방법으로 결정하였고, 소결체 길이는 소결체 외경의 1.2 배수로 결정하였다. 이 연료들의 주요 사양을 표 1에 수록하였다.

2.3. 평형노심 장전모형 선정

2.3.1. 평형노심 장전모형 선정 조건 및 평가 방법

평형노심이란 동일한 노심의 상태(농축도, 신연료 개수, 주기 연소도, 장전모형 등)가 여러 주기 반복되어 이전 주기와 출력분포 및 연소도분포 등이 동일한 평형 상태에 이른 노심을 말한다. 평가 방법은 각 연료봉 외경에 대하여 웨스팅하우스 APA 코드체계를 통한 평형노심 장전모형을 선정하였는데 최적화 분석을 위한 연료봉 외경은 0.374(SFA), 0.364, 0.360(OFA), 0.356, 0.350, 0.345, 0.335 inch 등으로 구분하였고, 주기길이는 12개월 및 18개월의 경우를, 신연료 개수는 40다발 및 48다발의 경우로 구분하고, 주기길이별 신연료 개수별 총 4개 조합의 장전모형을 선정하였으며, 연료봉 외경이 0.364, 0.360, 0.356, 0.350, 0.345 inch는 동일한 장전모형이 적용되었다. 장전모형 선정시 적용된 주요 설계제한치 및 특성을 표 2에 정리하였으며, 각각의 경우에 대한 주기비 평가를 주기비 계산용 프로그램 FUCO를 이용하여 계산하였다.

2.3.2. 최적 평형노심 장전모형 선정 결과

앞 절의 평가방법에 따라 독립적인 최적 평형노심 장전모형이 탐색되었으며, 각 장전모형의 핵특성을 표 3에 수록하였다. 각 개량연료에 대한 장전모형은 그 성능을 고려한 상승된 반경방향 첨두출력인자의 제한치로 인해 모든 개량연료의 경우에 대해 노심 외각에 신연료를 배치하지 않는 저누출장전모형의 선정이 가능하였다. 참고로 그림 1은 48개의 신연료가 장전된 장전모형으로서 저누출장전모형의 예를 보여준다. 선정된 장전모형의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 주기초 영출력 봉산농도 제한

주기초 영출력 봉산농도는 연료봉 외경이 작은 OFA 연료보다는 SFA 연료의 제어가 노심내 우라늄 양의 차이로 인해 제어가 어려운 것으로 나타났다. 현재의 48개 신연료의 경우는 봉산농도 제한치를 만족할 것으로 보이나 만일 SFA 연료를 사용하고 신연료 개수를 줄인다면 만족하기 어려울 것으로 판단된다. 이것은 봉산농도 제한치를 올리면 해결이 가능할 것이나 고농도의 봉산수의 경우 핵연료봉에 붕소가 석출되기 쉬운 문제점 등을 고려하여 신중히 결정해야 할 것이다. 다른 해결방법은 현재 장전모형에 사용된 분리형 중성자흡수봉은 그 사용량의 한계가 있기 때문에 주기초 봉산농도 제어에 어려움이 있다. 따라서 일체형 중성자흡수봉을 사용한다면 어느 정도 해결될 것으로 판단된다. 그림 2는 연료봉 외경의 변화에 따른 영출력 임계봉산 농도 변화의 추세를 보여준다.

- MTC 제한

MTC는 모든 경우의 계산에서 제한조건을 만족하였으며, SFA 연료가 OFA 연료보다 제어가 용이하였다. 그림 3은 연료봉 외경의 변화에 따른 영출력 MTC 변화의 추세를 보여준다.

- 반경방향 침투출력인자 제한

반경방향 침투출력인자는 모든 경우의 계산에서 제한 조건을 만족하였으며, 특히 개량 연료의 경우 제한치의 상승으로 가장 경제적인 장전모형 유형인 저누출장전모형이 가능하였다. 연료봉 외경이 줄어들수록 반경방향 침투출력인자의 제어가 어려운 것으로 나타났다. 그림 4는 연료봉 외경의 변화에 따른 전출력 최대 침투출력인자 변화의 추세를 보여준다.

- 농축도 제한

농축도 제한은 현재 신연료 및 사용후연료 저장고의 제한 농축도가 3.8w/o로 되어 있으며, 기존의 임계도해석²⁾ 결과를 보면 5.0w/o까지 문제없는 것으로 보고된 바 있다. 따라서 개량연료에 대해서 5.0w/o를 제한치로 가정하였다. 결과를 보면 연료봉 외경이 줄어들수록 요구농축도가 올라가는데 장주기를 고려할 때 연료봉 외경이 줄어들수록 농축도 제한으로 인하여 불리한 것으로 나타났다.

- 장주기 가능성

430.7 EFPD 이상으로의 장주기 가능성은 주기초 봉산농도의 제한으로 인해 분리형 중성자흡수봉을 사용할 경우 SFA 연료는 48개의 신연료 사용시 약 437EFPD가 한계인 것으로 나타났고, 신연료 개수를 늘리거나 일체형 중성자흡수봉의 사용 등으로 어느 정도 주기길이를 늘리는 것이 가능할 것으로 판단된다. OFA 연료는 48개 신연료 사용으로 약 450 EFPD까지 주기길이가 가능한 것으로 평가되었으나 더 이상의 장주기 가능성은 앞서 언급한 SFA 연료의 경우와 동일하며, 추가로 고려되어야 할 것은 주기길이가 길어지면 노심의 집합체들의 연소도 격차가 심해져서 침투출력인자의 제어가 어렵다는 점이다.

2.4. 주기비 평가

주기비 계산용 프로그램 FUCO로서 각 연료의 농축도, 주기길이 그리고 영역 평균 방출 연소도 등을 입력으로 선행 및 후행 주기비를 평가한다. FUCO 프로그램은 이미 연료의 주기비 계산을 위하여 여러 보고서에서 사용된 바 있으며 현재가(Present Worth) 개념을 이용하여 균등화 비용(Levelized Cost) 및 현재가 에너지를 계산하여 균등화 연료비(Levelized Fuel Cycle Cost)를 계산한다.

2.4.1. 주기비 계산시 사용된 경제성관련 주요 입력변수

주기비 계산에 사용된 경제성 관련 주요 입력변수를 표 4에 수록하였으며, 이 값들은 모든 계산 경우에 대해 공통으로 사용되었다. 이 값들은 최근 단가를 적용했기 때문에 미래의 값들과는 약간의 차이가 있을 수 있으나 개량연료의 상대적인 주기비를 평가하는 현 연구의 목적에는 부합된다고 판단된다.

2.4.2. 주기비 계산 결과

주기비 계산은 표 3에서 제시한 12가지 평형노심 장전모형 선정 결과에 대해서 각각 평가되었으며, 선행주기비 평가결과를 표 5에 수록하였다. 여기서 상대 주기비 및 주기비 이득은 SFA 연료를 사용한 경우를 기준으로 상대적인 비용으로 평가되었다. 주기비는 연료봉 외경이 줄어들수록 주기비 이득이 크게 나타나다가 0.350 inch 이하로 줄어들면 다시 감소하는 결과를 보여주며, 최대 48개 신연료를 사용하는 경우 0.350 inch의 개량연료가 SFA 연료보다 약 5%의 상대 이득이 있는 것으로 나타났다.

3. 결론

개량연료의 연료봉 외경을 결정하는데 가장 영향을 미치는 두 가지 인자는 연료의 비용 최적화 관점과 연료의 주기계획 측면에서의 영향 등으로 나눌 수 있다. 그림 5의 결과에서 핵연료의 주기비 측면만을 고려하면, 연료봉 외경이 0.350 inch일 경우가 가장 최적화된 결과를 보이나, 구매자의 장주기 운전 주기계획 요구와 연료의 농축도 결정 등의 측면을 추가로 고려하여야 한다. 그림 6에서 5w/o의 농축우라늄을 사용할 경우 구매자의 장주기 운전 주기계획인 490 EFPD의 주기길이를 내기 위해서는 신연료 개수는 대략적으로 연료봉 외경이 0.350 inch 경우 52다발 정도이고 연료봉의 외경이 줄어들수록 더 많은 신연료 개수가 필요하게 된다. 고리 2호기의 전체 핵연료는 121다발로 신연료로 52다발 이상을 사용하면 주기계획 측면에서 영역 방출연소도가 감소하여 연료 이용률 측면에서 좋은 결과를 보이지 못하게 된다. 결론적으로 본 논문에서 수행한 연구 결과에 의하면 농축도 5w/o정도, 48다발의 신연료를 사용하는 것이 가장 바람직하는 것으로 결정되었으며, 경제성 및 안전성을 고려한 최적의 연료봉 외경은 0.360 inch로 제안되었다.

References

1. 권태제, "WH형 핵연료의 축방향 반사체 평가," KNF-TR-ND2-00001, 한전원자력 연료(주), 2000.
2. 조희봉, "원자력2호기 핵연료저장시설의 최대수용가능 농축도 결정연구," 84 N-S16, 한국전력공사, 1984.

표 1. 연료의 주요 사양 비교

항 목	SFA	개량 (SFA)	개량 (New)	개량 (OFA)	개량 (New)	개량 (New)	개량 (New)
Clad OD(in)	0.374	0.374	0.364	0.360	0.356	0.350	0.345
Pellet OD(in)	0.3225	0.3225	0.3127	0.3088	0.3049	0.2990	0.2941
Pellet Length(in)	0.3870	0.3870	0.3750	0.3700	0.3660	0.3590	0.3530
Effective Dish(%)	1.2074	1.2074	1.2110	1.2110	1.2110	1.2110	1.2110
Clad Material	Zirc-4	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO
Grids Material	Inc-718	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO
IFM	N/A	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO	ZIRLO
Axial Blanket	N/A	T/B 6inch	T/B 6inch	T/B 6inch	T/B 6inch	T/B 6inch	T/B 6inch

표 2. 개량연료의 성능을 고려한 주요 핵설계 인자와 현재의 설계기준치의 비교

설계인자	16X16		17X17	
	현재설계기준	NGF(목표치)	현재설계기준	NGF(목표치)
BA	PYREX	WABA, Gd, IFBA	WABA	Gd, IFBA
Axial Blanket	N/A	최적A/B적용	T/B 6in	최적A/B적용
주기길이[Month]	15	>18	18	>18
Fdh 제한치	1.55	1.70	1.65	1.81
HZP MTC[pcm/°F]	5	5	5	5
정지여유도[%△ρ]	2.0	2.0	1.77	1.77
농축도 제한[w/o]	3.8	5.0	5.0	5.0
최대 봉연소도[MWD/MTU]	60,000	75,000	60,000	75,000

표 3. 평형노심 장전모형 핵특성 비교

Cycle Length	OD [in]	Enrich [w/o]	Cycle BU [MWD/kgU]	Discharge BU [MWD/kgU]	U-Load Core [kgU]	BA # WABA	HZP MTC [pcm/F]	HZP Cb [ppm]	Max. Fdh
430.7 EFPD (48 Feed)	0.374 (SFA)	4.194	16.168	40.757	49973	592	-2.68	2316	1.464
	0.364	4.297	17.200	43.358	46976	560	-0.20	2178	1.472
	0.360 (OFA)	4.358	17.638	44.462	45809	560	+0.85	2137	1.479
	0.356	4.427	18.091	45.604	44662	560	+1.87	2096	1.497
	0.350	4.553	18.812	47.445	42950	560	+3.46	2050	1.528
	0.345	4.680	19.443	49.013	41556	560	+4.76	2022	1.554
340 EFPD (40 Feed)	0.374 (SFA)	3.849	12.764	38.611	49973	416	-4.89	1995	1.486
	0.364	3.941	13.578	41073	46976	496	-3.06	1792	1.493
	0.360 (OFA)	3.993	13.924	42.120	45809	496	-2.20	1745	1.505
	0.356	4.055	14.281	43.200	44662	496	-1.30	1707	1.517
	0.350	4.168	14.851	44.924	42950	496	+0.03	1657	1.541
	0.345	4.284	15.349	46.431	41556	496	+1.13	1635	1.571

표 4. 경제성 관련 주요 입력 변수

항 목	입력자료
원광(U3O8 비)	31.40 \$/kgU
변환비	5.80 \$/kgU
농축비	99.20 \$/SWU
가공비	233 \$/kgU
이자율	9.4 %/yr
사용후연료 저장비	260 \$/kgU
사용후연료 처리비	400 \$/kgU
사용후연료 처리기간	10 year
WABA 봉단가	1431 \$/rod

표 5. 선행 주기비 계산 결과

Cycle Length	OD [in]	Enrich [w/o]	Cycle BU [MWD/kgU]	Discharge BU [MWD/kgU]	U-Load Core [kgU]	BA # WABA	Cost/Reload [10 ³ \$]	Relative Cost [%]	Cost Gain [10 ³ \$]
430.7 EFPD (48Feed)	0.374 (SFA)	4.194	16.168	40.757	49973	592	17648	100	-
	0.364	4.297	17.200	43.358	46976	560	17092	96.9	556
	0.360 (OFA)	4.358	17.638	44.462	45809	560	16964	96.1	684
	0.356	4.427	18.091	45.604	44662	560	16850	95.5	798
	0.350	4.553	18.812	47.445	42950	560	16774	95.0	875
	0.345	4.680	19.443	49.013	41556	560	16781	95.1	867
340 EFPD (40Feed)	0.374 (SFA)	3.849	12.764	38.611	49973	416	13227	100	-
	0.364	3.941	13.578	41073	46976	496	12817	96.9	410
	0.360 (OFA)	3.993	13.924	42.120	45809	496	12687	95.9	540
	0.356	4.055	14.281	43.200	44662	496	12604	95.3	623
	0.350	4.168	14.851	44.924	42950	496	12529	94.7	698
	0.345	4.284	15.349	46.431	41556	496	12521	94.7	706

	1	2	3	4	5	6	7
1	2X	1X	1X	F20	1X	F8	2X
2	1X	1X	F20	1X	F20	F	2X
3	1X	F20	1X	F16	1X	1X	
4	F20	1X	F16	1X	F	2X	
5	1X	F20	1X	F	2X		
6	F8	F	1X	2X			
7	2X	2X					

Note. Fxx --> F : Feed Fuel, xx : # of WABA rods

1X --> Once Burnt Fuel

2X --> Twice Burnt Fuel

그림 1. 개량 OFA연료 48개 신연료 사용 1/4노심 장전모형

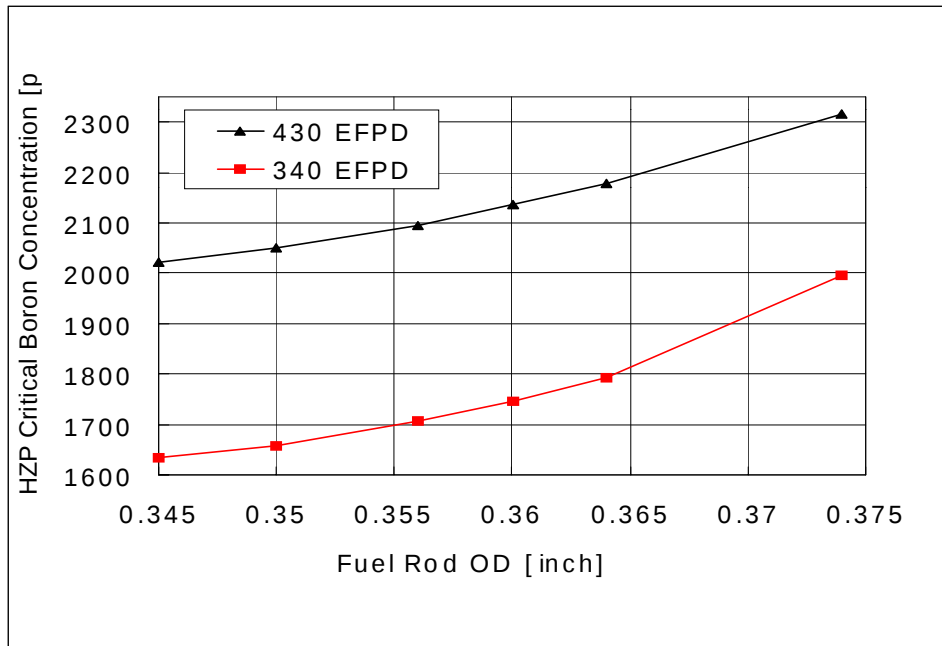


그림 2. 연료봉 외경의 변화에 따른 영출력 임계농도 변화의 추세

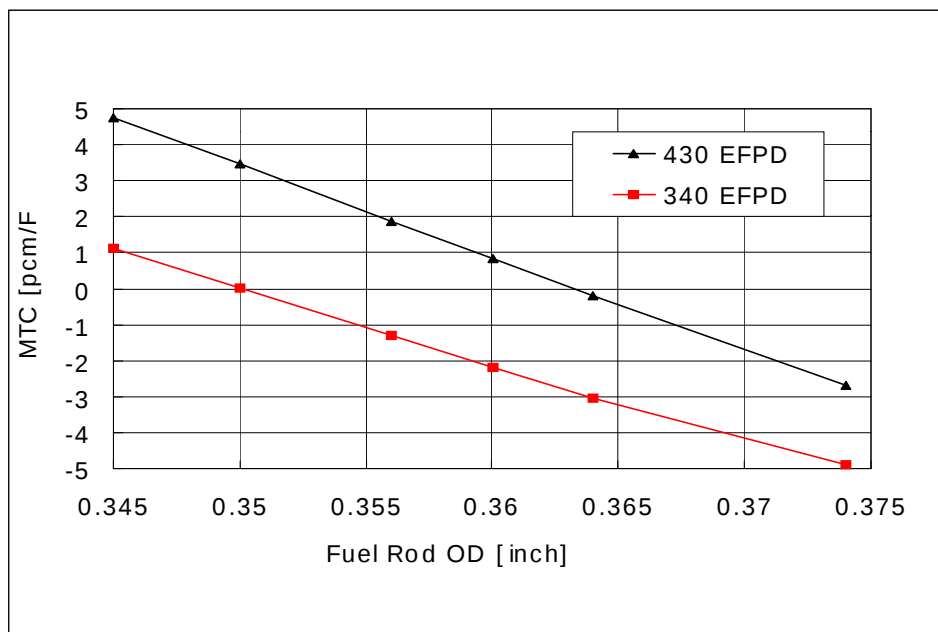


그림 3. 연료봉 외경의 변화에 따른 영출력 MTC 변화의 추세

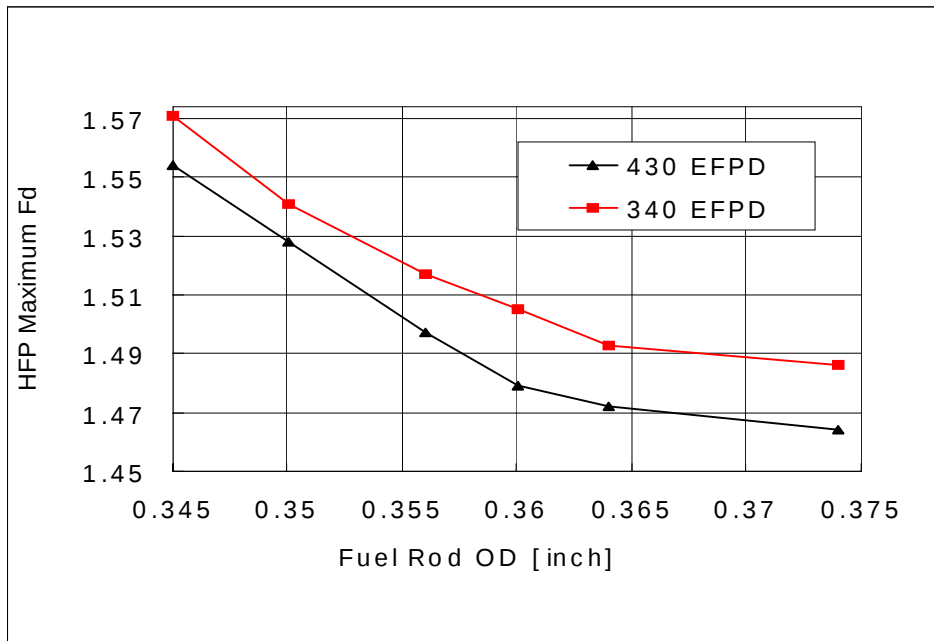


그림 4. 연료봉 외경의 변화에 따른 최대 침투출력인자 변화의 추세

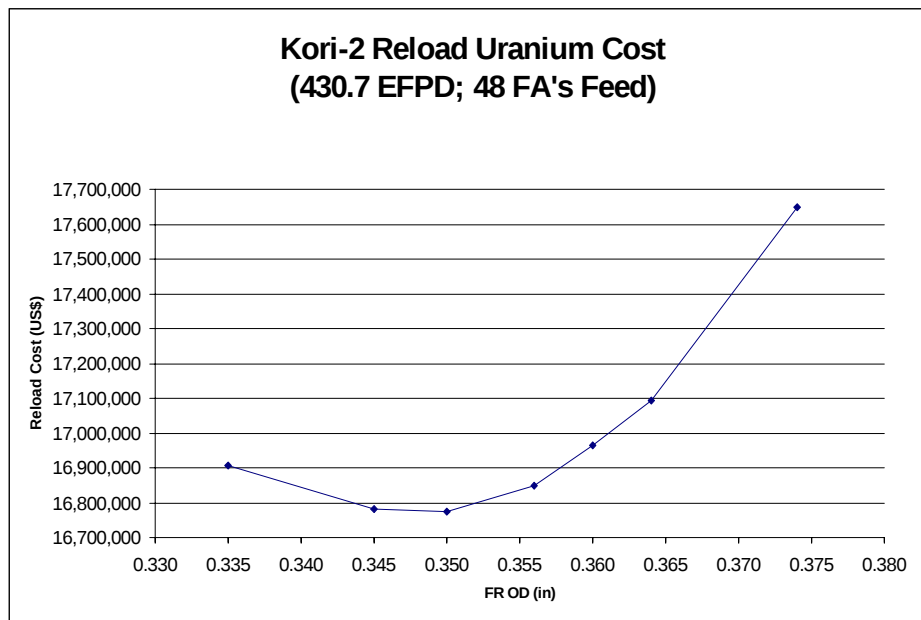


그림 5. 연료봉 외경의 변화에 따른 주기비의 변화

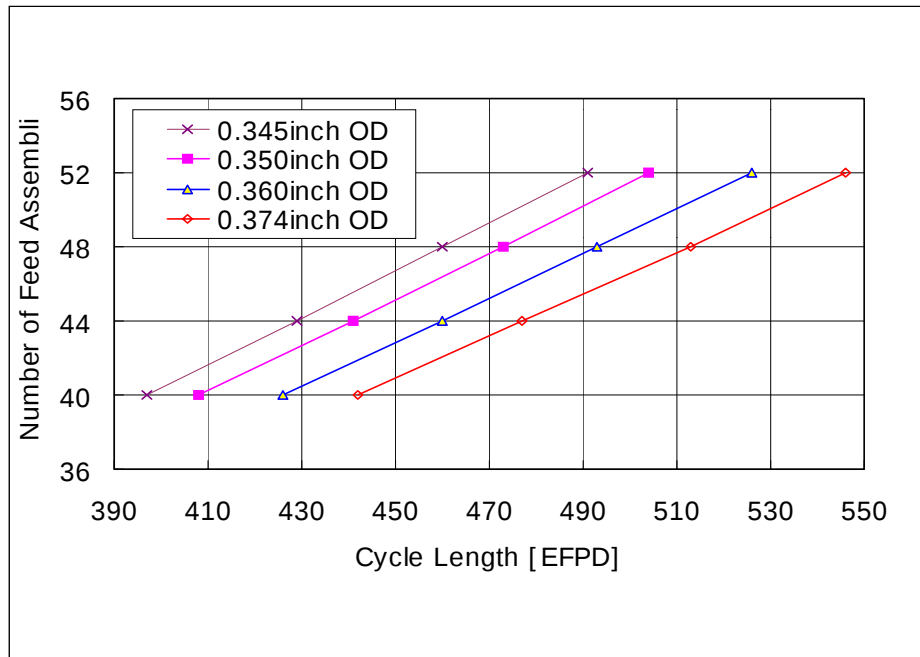


그림 6. Cycle Lengths for different FROD with 5 w/o enrichment