Journal of the Korean Nuclear Society
Volume 27, Number 6, December 1995

《기술보고》

경수로핵연료 하단고정체 유로판의 두께 최적화

임정식 · 손동성
한국원자력연구소
(1995. 7. 20 접수)

요 약

기존경수로 핵연료의 연소도를 크게 증가시키는 고연소도 핵연료 및 미래형 핵연료에서는 연료봉의 축방향 조사성장이 증가하게 되고 이와 같이 증가된 축방향 연료봉 성장을 수용하기 위해서는 상 · 하단 고정체 사이의 간격이 더 필요하게 된다. 이 요구되는 상 · 하단고정체 사이의 축방향 공간을 얻기 위하여 기존 국산핵연료 하단고정체 유로판 및 이물질여과 하단고정체에 대하여 응력강도를 기준으로 두께 최적화 계산을 수행하였다. 계산은 범용 유한요소 코드인 ANSYS 코드를 이용하였다. 이 두께 최적화에 의해 기존의 국산 17×17 경수로 핵연료의 하단고정체에서는 지지 Leg의 폭과 길이를 증가시킴으로써 유로판의 두께 감소를 약 5.1mm 줄일 수 있음을 알 수 있고, DRBEP용 하단고정체에서는 약 4.6mm의 두께 감소가 가능한 것으로 해석되었다.

1. 개 요

지금의 핵연료설계 연구개발 동향은 경제성 및 신뢰도 향상, 안전성 확보, 유지보수의 간편화 및 방사선 조사 피폭선량의 감소화를 위한 노력이 이루어지고 있으며 핵연료 선진국들은 각기 특유의 설계개념을 도입하여 핵연료설계의 진전을 보이고 있다. 핵연료 자원의 이용률을 향상시키고 사용후 핵연료의 양을 줄이기 위한 방편으로 핵연료의 연소도 증가 방안, 열 영역에서 핵분열이 일어나지 않는 동위원소를 핵분열성 동위원소로 전환이 많이 일어나도록 하는 고전환 개념의 핵연료 등에 대한 연구도 진행되고 있다. 이러한 연구개발 동향에는 필연적으로 기존 핵연료의 연소도보다 더욱 증가된 연소도를 목표로 하게 되며 이 연소도 증가에 따라 핵연료 집합체 각 부품의 설계변경과 이를 위한 검증시험 및 해석이 병행되고 있다.

현재 세계 여러 나라에서 핵연료의 성능향상을 목적으로 개발된 경수로용 핵연료는 독일 SIEMENS/KWU의 FOCUS(Fuel Assembly with Optimized Cladding and Upgraded Structures), Westinghouse의 VANTAGE 계열의 핵연료, 프랑스 Fragema의 AFA-2G 및 영국 BNFL의 Advanced Fuel Assembly 등의 핵연료를 들 수 있다.

기존의 17×17 국산핵연료의 최대 집합체 평균 연소도가 47.1 MWd/kgU[1]인데 비해 FOCUS 및 HTP (High Thermal Performance) 핵연료에서는 평균방출연소도 50 MWd/kgU[2], 최대집합체 연소도 60 MWd/kgU[3]이고, Westinghouse의 VANTAGE 5H 에선 평균방출연소도 47 MWd/kgU, Vantage + 에선 50 MWd/kgU를 목표로 개량되었다[4]. 이와 같이 증가된 연소도에서 집합체의 성능을 보장하기 위한 평가를 위해서는 고연소도에 따른 집합체의 노내거동과 물성자료의 확보가 필수적이며 여기에 따른 해석 및 필요한 검증시험으로 적합성을 입증할 필요가 있다.

FOCUS에서는 핵연료집합체의 중성자 효율을 증대시켜 핵연료의 이용률 향상을 위해 지지격자 재질을 Inconel에서 Zry-4로 변경하였고, 지지격자 스프링의 연료봉 지지조건을 만족시키기 위하여 지지격자의 모서리 설계최적화 및 지지격자 스프링의 형상 변경과 이물질 유입으로 인한 연료봉의 fretting 마모파손을 방지하기 위해 이물질 방지용 DRBEP-DG(Debris Resistance Bottom End Piece with Double Grids)를 채

택하였으며, 피복관 내부식성을 향상하기 위해서는 PCA(Primary Candidated Alloy) 및 Duplex 피복관의 채택과 고연소도에 따른 안내관 및 연료봉의 축방향 조사성장을 허용하기 위한 공간확보를 목적으로 상단고정체 높이의 감소 및 여기에 따른 Holddown Spring의 설계 최적화 등의 설계변경을 시도하였다.

Westinghouse사의 VANTAGE 계열의 핵연료에선 농축우라늄 대신 천연우라늄을 연료봉 양단 6인치 이내에 넣어서 중성자 누출을 감소시키도록 한 axial blanket과 연소된 연료를 노심 주위에 배치하여 적은 중성자를 발산하고 중성자의 외부누출을 방지하도록 한 radial blanket을 채택하므로서 연료의 농축도를 감소시킬 수 있도록 하여 축방향 blanket 및 radial blanket에 의한 핵연료 주기 비를 각 각 1.5% 및 3.5% 정도 감소할 수 있었고, 열수력적 성능향상을 위한 중간 혼합그리드(IFM : Intermediate Flow Mixer)를 사용하고 있다. 이 IFM은 축방향 열적 온도기울기가 큰 집합체 중간 위치에서부터 연료 최상단 지지격자 사이 사이에 냉각수 혼합유동을 증가시키기 위해 사용하며 이로 인한 DNB 여유도를 25% 증가시키는 결과를 보인다[4]. 또한 IFM의 중착에 의한 열수력적 압력강하를 보상하기 위하여 유동혼합 날개(Flow Mixing Vane)를 갖는 중간의 저압력 강하(Lower Pressure Drop : LPD) Zry-4 지지격자를 개발하여 채택하며 고연소도에 의한 연료봉 팽창공간을 확보하기 위하여 상단 및 하단고정체의 높이를 줄이고 하단고정체에는 아물질 방지를 위한 small hole 유로 구멍을 갖는 유로판(Flow plate)을 채용하고 있다. 이외에도 고연소도에 견디기 위한 내부식성을 강화한 Zirlo 피복관을 사용하여 연소도 증가에 따른 성능향상을 이루도록 하였다.

BNFL에서는 고연소도를 위한 상. 하단고정체 유로판의 두께 감소를 통하여 약 10mm의 연료봉 팽창공간을 증가시켰고 연료봉의 재질을 Zircaloy 대신 Zirlo를 사용하므로 써 연료봉 조사성장을 기존 연료봉보다 60% 정도를 감소시키는 것으로 알려졌다[5].

이상 각 경수로 핵연료제조회사의 최근 연구개발 동향을 살펴본 대로 고연소도를 목표로 하여 핵연료집합체 부문에선 연료봉 재질의 개량과 상단 및 하단고정체 높이 감소를 통한 상 · 하단고정체 사이의 축방향 간격의 증가를 볼 수 있고, Holddown Spring의 설계변경과 이물질 방지 하단고정체의 사용, 열적 성능 향상을 위해 집합체 중간에 유동혼합 그리드의 사용 등의 설계 추이를 알 수 있다.

여기서는 고연소도 핵연료에서 발생되는 연료봉의 조사성장 증가를 수용하기 위해 상 · 하단고정체 사이의 간격을 증가시킬 목적으로 설계 여유도를 가지고 있는 하단고정체의 높이를 감소시키는 방안을 채택하여 실험의 결과와 범용 유한요소 코드해석을 통해 기존의 국산 핵연료 하단고정체 및 이물질여과 하단고정체(DRBEP-DG)[6] 유로판 두께 최소화에 대하여 기술하고 있다.

2. 하단고정체의 설계

2.1. 하단고정체의 형상 및 기능

하단고정체(Bottom End Piece)는 핵연료집합체의 최하단에 위치하여 위로는 안내관 (Guide Thimble)을 통하여 상단고정체(Top End Piece)와 연결되어 집합체의 골격을 형성하는 중요부품이다. 그림 1에는 하단고정체를 보여주고 있으며 냉각수의 유입을 위한 유로 구멍을 갖는 유로판(Flow Plate)의 네 모서리에 ㄱ 자

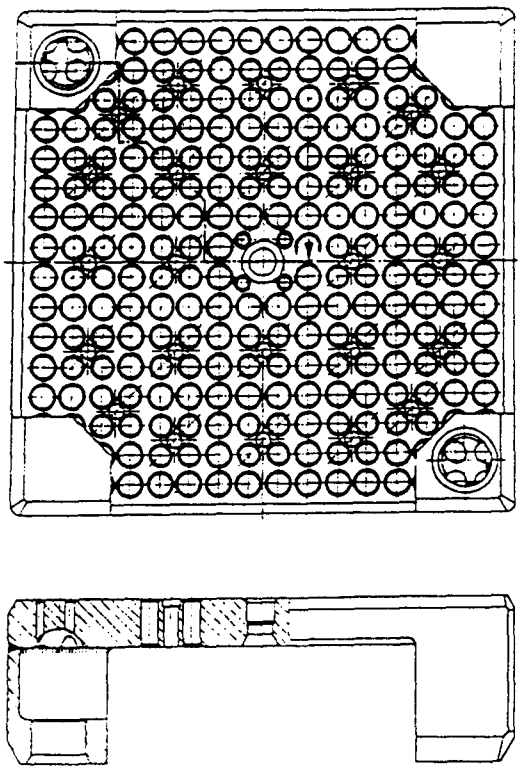

그림 1. 국산핵연료 하단고정체

형상의 지지용 다리(Leg)를 용접한 단순한 부품으로써 집합체를 지지하고 흘드다운 스프링에 의한 축방향 하중의 전달경로를 제공하며 유입되는 냉각수의 고른 분포를 실현해 주는 기능을 갖는다.

국산핵연료용 하단고정체의 재질은 Austenitic Steel 1.4541 혹은 이와 동등한 SUS 321을 사용하며 drilling 을 통한 유로 구멍 내기 후 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접으로 Leg를 용접한다.

2.2. 하단고정체의 설계

하단고정체의 과다한 변형 발생시 또는 파손 시는 하단고정체 위로 연결되어 있는 안내관의 변형 및 위치이탈을 초래하게 되고 제어봉의 삽입을 원활히 안내할 수 없게 되어 원자로 운전정지 및 연료봉의 냉각가능한 수로확보를 보장할 수 없게 되므로 설계 시는 이들을 고려하여야 한다. 하단고정체 설계시 응력강도 해석은 ASME Code Section Ⅲ에 따라 수행되고 응력 결과들은 ASME Section Ⅲ 응력강도 기준을 만족하도록 하여야 한다. ASME Code Section Ⅲ에서는 해석에 의한 설계(Design by Analysis)를 따르며 해석은 근래에 유한요소법을 이용한 전산코드로 수행되는 것이 보통이며 최종적인 검증은 시험을 통하여 확인하고 있다.

하단고정체의 설계시 ASME code Section Ⅲ의 적용은 표 1에서와 같이 각 핵연료 설계회사마다 Section Ⅲ 중에서도 취하는 분류가 다르다.

ANSI /ANS-51.1의 4.1.2절[7]에선 core components로서 핵연료집합체와 노심지지 구조물(core support structure)을 정의하고 있다. ASME Section Ⅲ에서 채택하고 있는 응력이론은 최대 전단응력 이론인 Tresca 이론을 사용하며 이것은 항복개시가 최대전단응력 즉, 최대 주응력과 최소 주응력의 차이의 절반인 전단응력상태에서 항복이 개시한다는 것이다. 비록 각 핵연료 설계회사들의 하단고정체 설계에 대한 ASME 코드분류 기준이 다르더라도 해석결과에 대한 응력강도 설계기준은 표 2에서와 같이 차이가 없다. 운전조건에 따른 응력강도 기준과 그들의 값은 표 3에 보인다.

한편 유한요소 범용코드에 의한 해석의 경우에는 출력되는 응력의 성분을 ASME 코드 적용의 응력인 막응력(Membrane Stress : P_m), 굽힘 응력(Bending Stress : P_b), 막응력과 굽힘 응력의 합(P_m+P_b) 및 총합응력(P_m+P_b+Q)으로 출력할 필요가 있고 수계산의 경우는 ASME 코드에서 기술하고 있는 방법에 따라 수행한다.

2.3. 하단고정체의 물성

이 보고서에서 취하고 있는 하단고정체의 물성은 Austenitic Steel 1.4541의 물성을 이용한다. 1.4541의 Young's Modulus는 상온 20°C 에서 Ex=200000 N/mm²이며 0.2% offset 항복응력은 205N/mm², 인장강도(tensile strength)는 500-750N/mm²이다[8]. 이로부터 구한 허용응력강도 Sm은 $1/3R_{m,\ spec}$, $2/3R_{p\ 0.2,\ spec}$, $1/3R_m(T)$, $0.9R_{p\ 0.2}(T)$중에서 최소값으로써 205 N/mm²이다.

표 1. 각 핵연료 설계 회사별 하단고정체 설계기준 코드 분류

ASME	Westinghouse	Fragema	SIEMENS /KWU	ABB /CE	KAERI
SEC. Ⅲ	NB 3000	NG 3000	NG 3000	NB 3000	NB 3000

표 2. 각 핵연료 설계회사의 하단고정체 설계기준

응력강도	Westinghouse	Fragema	SIEMENS /KWU	ABB /CE	KAERI
Membrane(P_m)	1.0Sm	1.0Sm	1.0Sm	1.0Sm	1.0Sm
Bending(P_b)	1.5Sm	1.5Sm	1.5Sm	1.5Sm	1.5Sm
P_m+P_b	1.5Sm	1.5Sm	1.5Sm	1.5Sm	1.5Sm
P_m+Secondary	3.0Sm	3.0Sm	3.0Sm	3.0Sm	3.0Sm

표 3. 하단고정체의 응력강도 기준

RESAR-3S	ASME Sec. Ⅲ	Stress Category	Stress Limit	Stress Values(N/mm²)
Condition Ⅰ, Ⅱ	Level A, B	Pm	Sm	136
		Pl	1.5Sm	205
		Pm+Pb	1.5Sm	205
		Pm+Secondary	3.0Sm	410
Condition Ⅲ, Ⅳ	Level C, D	Pm	2.4 Sm or 1.07Su	328
		Pm+Pb	3.6Sm or 1.05Su	492
Non-Operational (Shipping & Handling)		Condition Ⅰ, Ⅱ와 동일	–	205

Note : P_m : Primary Membrane Stress Intensity
P_l : Local Membrane Stress Intensity
P_b : Primary Bending Stress Intensity
S_u : Ultimate Strength
Sm : Stress Intensity
=min. of the $\{1/3\,\sigma_{y,room},\ 2/3\,\sigma_{y,opt},\ 2/3\sigma_{u,T},\ 0.9\sigma_{u,0.2,T}\}$
σ_y : 0.2% offset yield stress,
σ_u : Ultimate Stress

2.4. 최적설계변수

응력강도를 기준으로하여 하단고정체 유로판의 최적 두께 산출을 위해서는 유로판의 응력해석 후 ASME code에서 규정하고 있는 각각의 응력범주(stress category)의 응력강도(stress intensity)를 산출해야 한다. ANSYS 코드의 Optimize Routine에서 상태변수(state variable)로 취할 수 있는 응력강도는 x, y, z 방향 응력 및 주응력뿐이므로 최적설계 계산에 ANSYS 코드의 Optimize Routine 을 사용할 수 없고 각 설계변수에 따른 계산을 각 각 행하여 최대응력강도 발생부위의 section list를 발췌하여 여기서의 굽힘 및 막응력강도의 최대응력 값과 응력기준을 비교하여야 한다. 이때 고려하는 하단고정체의 최적설계변수로는 유로판의 두께, Leg의 지지 길이(L), Leg의 두께(W_b) 및 안내관 Plug 수용 slot 깊이가 있으며, 유로 구멍 크기의 최적화는 열수력적 양립성 관점에서 여기에선 고려하지 않았다. 유로판의 두께는 기존의 19.5mm에서 두께를 줄여 가면서 최대 굽힘 및 막응력 강도의 합(P_m+ P_b)이 기준 응력강도 초과 때까지 계산하였다. Leg의 길이는 기존의 하단고정체가 45mm의 지지길이를 가지며 최근 Westinghouse 및 BNFL 등의 개량핵연료에서 지지 skirt를 두고 있으므로 이에 대한 고려를 위해 유로판 밑에 전체길이를 지지하는 skirt를 두었을 경우도 고려하였다. 이경우 1/8 단면의 유한요소 모델에서 지지 skirt의 길이는 107 mm 가된다. Leg의 두께는 국산핵연료에서 최소 5mm이며 유로판의 유로 구멍에 간섭을 배제할 수 있는 최대 두께는 7mm이므로 Leg 두께는 5mm와 7mm의 경우에 대하여 계산을 하였다.

2.5. 유한요소 모델

하단고정체의 응력해석에 필요한 제원은 기존 국산핵연료 및 이물질여과 하단고정체(DRBEP-DG)의 경우 표 4와 같으며 이들을 이용한 국산핵연료의 유한요소 모델은 그림 2(Bottom View)와 같고 skirt를 부착한 Leg 두께 5mm의 모델은 그림 3과 같다.

미래형 핵연료로 고려되는 핵연료는 일차로 17×17 형의 핵연료이며 이 하단고정체의 기하학적 대칭성을 고려하여 유한요소 모델은 전체 하단고정체 중 1/8을 취하여 계산한다. Leg 하단의 강성은 상대적으로 크다고 보고 alignment pin 수용부는 유한요소 모델에서 제외하였다.

표 4. 국산핵연료 및 이물질여과 하단고정체 제원

(단위 : mm)

구 분		국산핵연료	이물질여과 하단고정체	갯 수
유로판 두께		19.5	19.5	
Leg	길이	45	45	
	두께	5min.	5min	
유로구멍		9.75	10.5	156
GT hole		6.3	6.3	24
IT hole		12.3/11.5	12.3/11.5	1
GT Hole 주변 유로구멍		8.5	8.5	96
IT Hole 주변 유로구멍		5	5	4
GT Hole Slot		0	3	
BEP 두께		69.5	69.5	

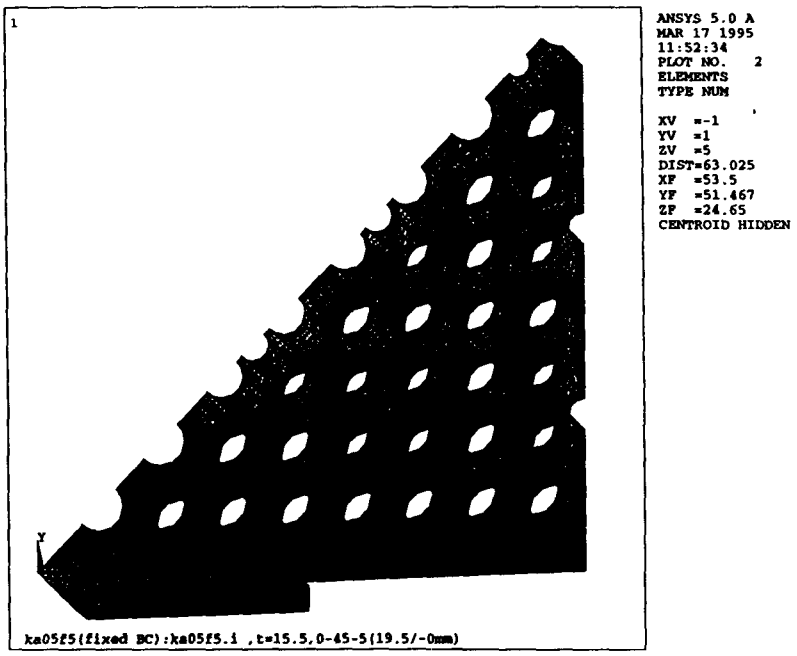

그림 2. 국산핵연료 하단고정체 유한요소 계산모델(Botom View)
(Leg 길이 45mm, Leg 두께 5mm)

2.6. 하중 및 경계조건

2.6.1. 하중

하단고정체의 설계하중으로는 Condition I 과 Condition II에서의 정상상태 운전중 하단고정체에 가해지는 RCCA scram 하중, Holddown Spring에 의한 압축하중과 집합체 자신의 중량이 있으며 이 외에도 flow에 의한 하중이 있으나 냉각수 flow에 의한 하중은 하단고정체에 주는 영향이 미미하므로 하중에서 무시한다. 또한 Pump over speed 시에 집합체 lift-off의 결과로부터 발생하는 충격하중이 있고, 운전조건 III, IV에서의 하중과 운송 및 취급시의 하중이 있다. 이들 중 운송 및

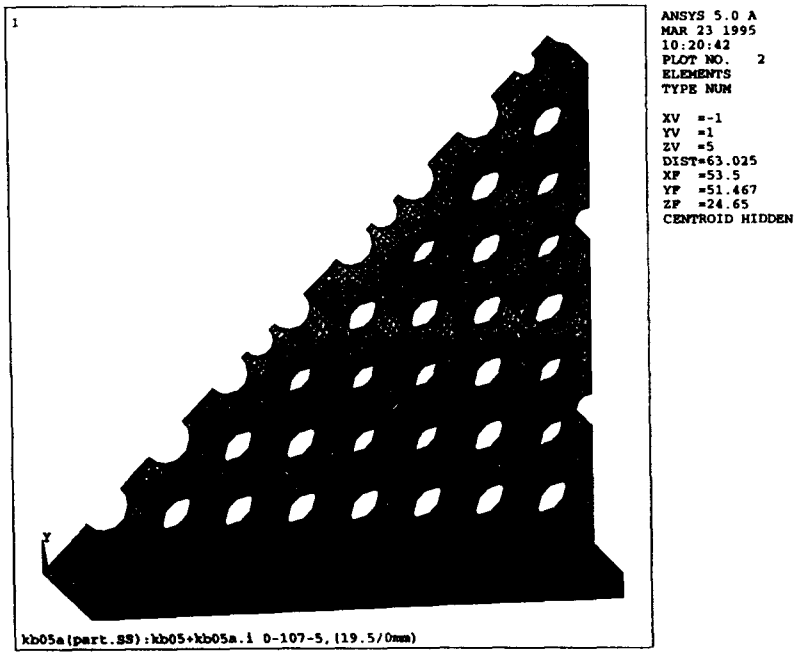

그림 3. 국산핵연료 하단고정체 유한요소 계산모델(Botom View)

표 5. 각 핵연료 회사별 운송 및 취급하중계수

	Westinghouse		Fragema	SIEMENS /KWU	ABB /CE	KAERI
운송 및 취급하중	STD(1)	VH 5(2)	6g	1.5g	6g	4g
	6g	4g				

* (1) STD : Standard Fuel Assembly
(2) VH 5 : Vantage 5H

취급하중이 가장 큰 것으로 알려져 있으므로 여기서는 운송 및 취급하중을 설계하중으로 사용한다. 이때 사용하는 운송 및 취급하중 계수는 표 5와 같이 설계회사마다 약간의 차이를 보이고 있다.

이상을 기초로 하여 계산에 적용된 설계하중은 RCCA가 삽입된 상태의 핵연료 집합체 무게의 4배에 해당하는 정적 하중을 사용한다. 하단고정체에 가해지는 전체 하중은 다음과 같다.

$$Fn=(W_{RCCA}+W_{FA})\times 4g$$
$$=(W_{Rcca}+W_{FA})\times 4\times 9.81$$

여기서 W_{RCCA}는 RCCA 무게이며, W_{FA}는 핵연료집합체 무게이고, Fn 는 운송 및 취급하중이다.

한편 절점에 작용시킬 하중은 안내관에 작용하는 하중을 안내관 주변 절점의 수만큼 나누어주며 대칭선상의 절점 하중은 절점 하중의 반을 취한다. 따라서 대칭선상의 절점 하중은

$$F_{GT}=Fn/N_{GT}$$

이다. 여기서 F_{GT}는 하나의 안내관에 작용하는 하중, N_{GT} 는 안내관의 개수이다.

2.6.2. 경계조건

경계조건은 Leg 최하단 절점에서 단순지지(simply supported : S.S) 및 고정경계조건을 고려하여 계산한 후 그 결과를 DRBEP-DG의 기계강도 시험[9]과 비교

하여 기계강도 시험에 보다 잘 일치하는 고정경계조건을 택하였으며(3.1절 참조) 이에 따라 Leg 최하단 절점에서는 고정경계조건을 주었다. 대칭선상인 x=107mm 선상의 x 방향 변위는 U_x=0이며 45° 경계선상의 절점은 45° 회전시킨 후(NROTAT, 45) y방향 변위를 U_y=0을 주어 y방향 변위를 구속하였다.

2.7. 가 정

계산의 편리성과 경제성을 위하여 사용된 가정은 다음과 같다.

1. 설계하중인 핵연료집합체 및 제어봉 집합체 자중의 4배에 해당하는 정적하중은 24개의 안내관 위치에 균등분포하며 안내관 Plug 주변의 절점에 균일하게 작용한다.
2. 치수는 공칭치수를 적용하고, 표면조도, 가공 공차등의 영향은 무시한다.
3. 유로판과 유로판의 구멍가공 chamfer는 무시한다.
4. 유로판은 대칭이며 대칭성을 고려하여 1/8을 택하여 계산한다.
5. 유로판을 지지하는 Leg의 정렬핀 수용부는 강체이며 이 부분을 무시하고 계산하더라도 계산에는 영향을 미치지 않는다.

3. 계산결과 및 분석

3.1. 응력계산 결과 및 기계강도 시험과의 비교

ANSYS 코드에 의한 계산의 적합성을 검토하기 위하여 DRBEP-DG용 하단고정체에 대한 기계강도 시험의 결과[9]와 계산 값을 비교하였다. 기계강도 시험에 의한 응력값은 하단고정체 표면에 부착된 strain gauge로부터 구하며 단방향 strain gauge를 이용하여 응력값을 구하였으므로 이 때의 응력은 일축응력을 나타낸다. 표 6에는 동일 하중조건에서 구한 기계강도 시험의 응력과 계산결과의 응력의 비교를 보인다.

표 6에서 알 수 있는 것과 같이 ANSYS 코드에 의한 계산의 결과는 Leg의 경계조건이 단순지지 보다는 고정지지(Fixed Boundary Condition)일 경우 시험 값에 더 잘 일치함을 보이고 고정 지지경계조건을 갖는 계산의 결과는 시험의 결과와 일치 또는 평균적으로 22%의 보수성을 가지고 응력 값을 예측함을 보인다. 따라서 하단고정체 두께 최적화 계산에 사용된 Leg의 경계조건은 Leg 최하단 부위에서 고정지지조건을 이용하였다.

표 6. DRBEP-DG용 하단고정체 기계강도 시험과 계산결과의 응력비교 (단위 : N/mm²)

Gauge No.		Test	Calculated		Ratio		Remarks
			S.S(1)	Fixed(2)	S.S/Test	Fixed/Test	
top side	1	48.43	55.83	53.03	1.15279	1.09506	σ_x
	2	85.85	130.71	124.67	1.52249	1.452184	σ_y
	3	87.26	92.33	91.97	1.058	1.05397	σ_x
	4	78.01	124.85	119.18	1.600	1.52768	σ_x
	5	89.38	116.7	112.07	1.30566	1.25859	σ_x
Bottom side	1	58.65	66.77	58.85	1.13845	1.0034	σ_x
	2	86.17	137.7	123.88	1.598	1.43762	σ_y
	3	90.70	113.65	98.88	1.25303	1.090187	σ_x
	4	86.00	122.97	107.00	1.429918	1.24418	σ_x
	5	93.69	116.01	98.60	1.23823	1.052406	σ_x
Average					1.32965	1.221055	

(1) S.S ; Simply supported Boundary Condition

(2) Fixed ; Fixed Boundary Condition

3.2. 설계변수에 따른 계산결과 및 분석

여기에서 구하고자 하는 하단고정체 유로판의 최대 두께감소량을 얻기 위하여 국산핵연료 및 DRBEP-DG용 Leg 두께를 5mm 및 7mm의 경우로 나누어 계산을 하였다. 유로판 지자길이는 기존의 45mm와 skirt를 두른 지지길이 107mm의 두 가지를 Leg 두께와 조합하여 각 각 45−5, 45−7 및 107−5, 107−7로 구분하여 국산핵연료 하단고정체에 대해 먼저 계산을 하였다. 국산핵연료 하단고정체의 유로판 계산결과 설계변수 변화에 따른 최대응력강도(P_m+P_b) 변화는 표 7 및 그림 4와 같으며 그림 4로부터 최대 허용응력강도인 205 N/mm^2 이 될 때까지의 유로판 두께 감소량을 구하면 기존 국산핵연료의 Leg 길이 45−5에서는 3.15mm, 45−7에서 3.88mm, 107−5에서 3.75mm, 107−7에서 5.15mm임을 알 수 있다.

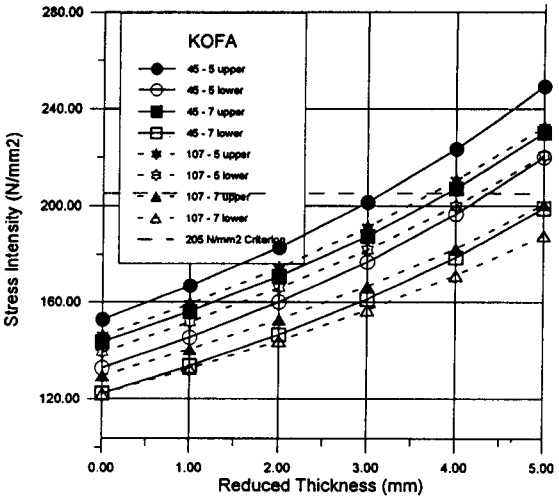

그림 4. 국산핵연료 하단고정체의 설계변수에 따른 최대 응력강도 변화

표 7. 국산핵연료 하단고정체 유로판의 최대 응력강도(P_m+P_b) (단위 : N/mm^2)

Leg Length		45				107	
Thickness		5		7		5	7
Boundary Condition		S.S[1] Top/Bottom	Fixed Top/Bottom	S.S Top/Bottom	Fixed Top/Bottom	P.F[2] Top/Bottom	P.F Top/Bottom
RT[3]	0	159.1/150.3	152.7/132.7	150.2/141.2	143.4/122.2	146.0/139.1	129.5/122.2
	−1	−	166.7/145.3	−	156.1/133.4	159.2/141.7	140.4/132.4
	−2	−	182.8/159.9	−	170.7/146.3	174.2/165.9	152.7/143.8
	−3	209.3/199.2	201.5/176.8	195.0/185.5	187.5/161.2	191.1/181.8	166.6/156.6
	−4	−	223.3/196.6	216.3/205.2	207.1/178.6	210.4/200.0	182.4/171.2
	−5	−	249.0/220.0	−	230.1/199.1	232.5/220.7	200.6/187.8
	−6	−	−	−	−	258.1/244.5	221.8/207.2

(1) S.S : Simply Supported
(2) P.F : Partially Fixed
(3) RT : Reduced Thickness of the Flow Plate

표 8. 국산핵연료 유로판 두께 최대 감소가능량 (단위 : mm)

Leg Length	45		107	
Leg Thickness	5	7	5	7
두께 감소량	3.15	3.88	3.75	5.15

이들을 표로 정리하면 표 8과 같다.

국산핵연료 하단고정체 이외에 DRBEP-DG의 장착을 고려하여 한국원자력연구소에서 개발 완료한 DRBEP-DG 유로판[6]에 대해서도 최대 응력강도를 기준하여 두께 감소량을 구하였다. 이 경우 DRBEP-DG 유로판에는 안내관 plug을 삽입하는 slot을 상단에서 3mm 깊이로 깎아 내므로 이 slot의 깊이변화도 하나의 변수로 하여 slot 깊이를 3mm, 2mm, 0mm로 한 세 경우를 계산에 포함시켰다. 각 각의 slot 깊이에서 설계변수에 따른 최대 응력강도 계산결과를 표 9에 표시하였고 설계변수에 따른 최대응력강도 변화는 그림 5−그림 7에 나타내었다.

표 9. 설계변수에 따른 DRBEP-DG 유로판의 최대응력강도 (P_m+P_b) (단위 : mm)

Slot Depth		S=3					
Leg Length		45				107	
Thicknsee		5		7		5	7
Boundary Condition		S.S[1] up/down	Fixed up/down	S.S up/down	Fixed up/down	P.F[2] up/down	P.F up/down
RT[3]	0	175.7/196.5	166.9/181.7	163.6/184.2	152.2/166.4	167.1/188.2	148.4/155.2
	−1	194.1/218.8	183.8/201.9	179.7/204.0	166.8/184.0	181.4/205.0	161.0/169.3
	−2	−	203.3/225.3	−	183.5/204.3	197.3/223.9	175.2/185.3
	−3	−	225.7/252.8	−	202.7/228.0	215.1/245.1	191.2/203.5
	−4	−	(255/288)[4]	−	(225/257)[4]	234.9/269.0	209.5/224.7

Slot Depth		S=2					
Leg Length		45				107	
Thicknsee		5		7		5	7
Boundary Condition		S.S[1] up/down	Fixed up/down	S.S up/down	Fixed up/down	P.F[2] up/down	P.F up/down
RT[3]	0	175.1/186.3	166.0/172.2	163.3/174.9	151.6/157.9	169.2/180.9	148.2/147.9
	−1	193.7/207.0	183.1/190.8	179.7/193.5	166.4/174.2	184.0/196.8	161.0/161.0
	−2	−	202.8/212.5	198.5/214.6	183.3/193.0	200.6/214.6	175.4/175.8
	−3	−	225.6/237.9	−	202.9/214.9	226.6/232.4	191.7/192.8
	−4	−	252.3/267.3	−	(230/241)[4]	250.6/258.1	210.6/212.4

Slot Depth		S=0					
Leg Length		45				107	
Thicknsee		5		7		5	7
Boundary Condition		S.S[1] up/down	Fixed up/down	S.S up/down	Fixed up/down	P.F[2] up/down	P.F up/down
RT[3]	0	165.8/157.1	159.3/140.1	156.5/147.6	149.6/129.1	157.1/150.9	136.1/128.8
	−1	−	174.1/153.5	−	163.1/141.0	171.5/164.7	147.5/139.4
	−2	196.5/197.8	191.1/169.0	−	178.4/154.8	187.8/180.3	160.3/151.2
	−3		210.9/187.1	205.1/194.6	196.2/170.7	206.3/198.0	174.8/164.6
	−4	−	233.9/208.1	−	216.9/189.2	227.3/218.1	191.3/179.7
	−5	−	261.1/232.9	−	241.2/211.0	251.4/241.0	210.3/197.1

(1) S.S : Simply Supported
(2) P.F. : Partially Fixed
(3) RT : Reduced Thickness of the Flow Plate
(4) ( )는 외삽한 값임

그림 5−그림 7을 기초로 막응력 및 굽힘 응력의 합 (P_m+P_b)이 응력강도 기준 205 N/mm^{2}이 되는 유로판 최소두께를 구하면 표 10과 같다. 표 10에서 보면 slot 깊이 3mm의 경우 최대 유로판 두께 감소량은 지지길이 45mm에서 Leg 두께 5mm(3−45−5) 및 7mm (3−45−7)일때 각 각 1.3mm, 2.2mm이고 skirt를 두

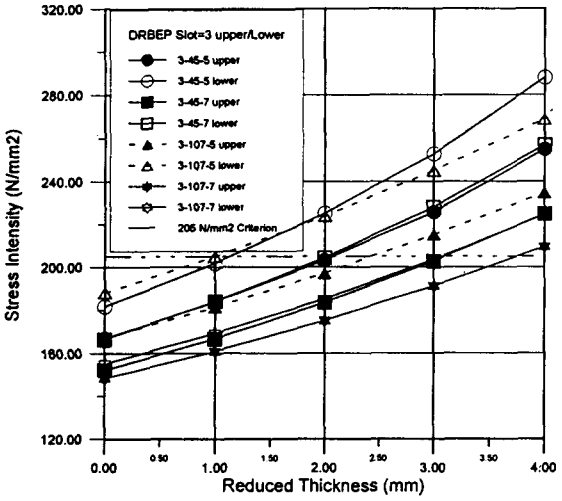

그림 5. DRBEP 유로판의 설계변수에 따른 최대응력강도 변화 (안내관 주변 Slot 깊이 3mm)

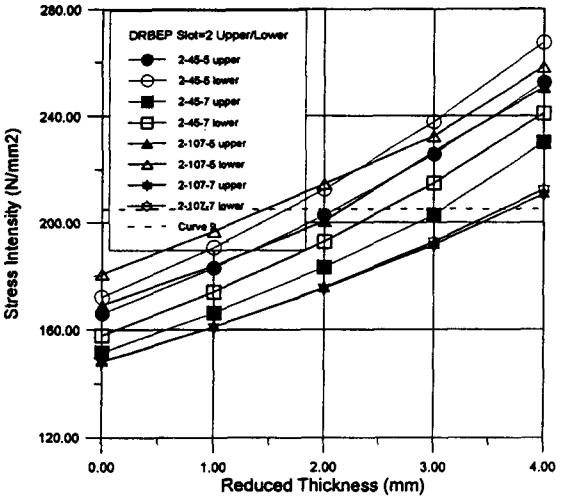

그림 6. DRBEP 유로판의 설계변수에 따른 최대응력강도 변화 (안내관 주변 Slot 깊이 3mm)

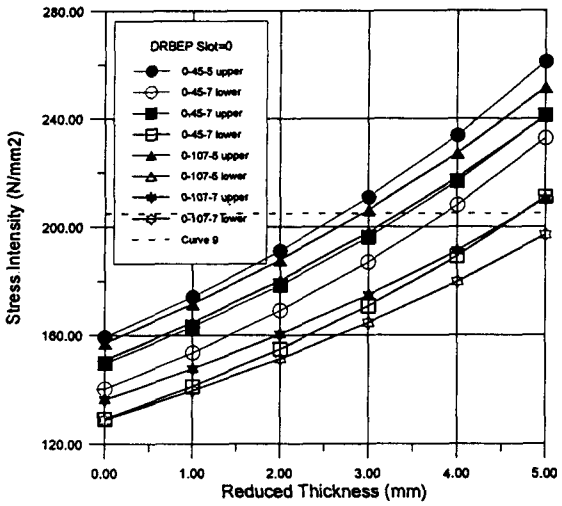

그림 7. DRBEP 유로판의 설계변수에 따른 최대응력강도 변화 (안내관 주변 Slot 깊이 0mm)

었을 경우 Leg 두께 5mm(3-107-5) 및 7mm (3-107-7)에서 각 각 1.3mm, 2.8mm이다. 또 skirt를 두고 slot 깊이를 2mm로 하였을 경우는 설계변수의 조정에 의해 약 3.6mm 정도의 두께감소가 가능함을 알 수 있으며 slot을 내지 않았을 경우 최대 유로판 두께 감소량은 약 4.3mm이다. 그림 5-그림 7에서 알 수 있듯이 slot이 있을 경우의 최대 응력강도는 단면중심에서 거리에 비례하는 굽힘 응력의 깊이효과로 인해 유로판 하단에서 발생하고 slot이 없을 경우는 국산핵연료에서와 같이 유로판 상단에서 발생한다.

한편 Leg 두께를 5mm에서 7mm로 하면 Leg 길이 45mm 에선 slot 깊이에 따라 25%~75%의 두께 감소 효과를 볼 수 있으며 이 효과는 slot의 깊이가 깊을수록 크다. 이 Leg 두께의 증가시 Leg 길이 107mm인 경우는 두께 감소효과가 Leg 길이 45mm에서 보다 더 크게 나타나서 적게는 45% 많게는 130%의 두께 감소를 가

표 10. 설계변수에 따른 DRBEP-DG 유로판의 두께감소 가능량

(단위 : mm)

Leg Length	45		107		ratio			
Slot 깊이	5	7	5	7	45-7/45-5	107-5/45-5	107/45-7	107-7/107-5
3	1.3	2.28	1.36	2.84	1.754	1.046	1.246	2.088
2	1.64	2.52	1.46	3.36	1.536	0.890	1.333	2.301
0	2.64	3.32	3.0	4.36	1.258	1.136	1.313	1.453
평 균					1.515	1.024	1.297	1.947

능하게 한다. 또 Leg 길이 45mm에서 107mm로 변경했을 경우 Leg 두께 5mm에선 두께 감소효과가 크게 나타나지 않으며(4.6%) 두께 7mm에서는 약 25%의 감소효과를 가능하게 한다. slot이 깊을수록 Leg두께 증가에 따른 응력감소 효과가 크게 나타난다. Leg 지지 길이를 45mm에서 107mm로 변경했을 때보다는 Leg 두께 7mm로 변경했을 때 더 큰 두께감소 효과를 얻을 수 있다. 이들을 종합해 보면 같은 slot 깊이에서 Leg 두께를 증가시키는 것이 skirt를 두는 경우보다 더 큰 유로판 두께 감소 효과를 주는 것을 알 수 있다.

3.3. 두께 최적화 모델의 응력강도

3.3.1. 국산핵연료 하단고정체

최적화 설계변수에 따라 여러 가지로 계산된 유로판의 최소두께 감소 가능 량을 이용하여 응력강도 기준 만족여부를 검토하기 위한 응력계산을 수행하였다. 표 8로부터 각 설계변수에 따른 최소유로판의 두께를 이용하여 계산한 국산핵연료 최대응력강도 발생부위의 응력상태를 나타내면 표 11과 같고 두께에 따른 응력변화는 그림 8과 같다.

기존 국산핵연료 하단고정체(KOFA)의 경우 두께감소 가능 량은 3.1mm 이고 이 두께를 갖는 하단고정체의 최대응력강도는 유로판 상부에서 203.5 N/mm²이고

표 11. 두께 최적화 국산핵연료 유로판의 최대응력강도

	국산핵연료			
지지부의 길이(mm)	45		107	
지지다리 폭(mm)	5	7	5	7
유로판 두께감소(mm)	3.1	3.8	3.7	5.1
최대응력강도(N/mm²)	203.5/178.6	202.9/174.9	204.4/194.3	196.3/181.6

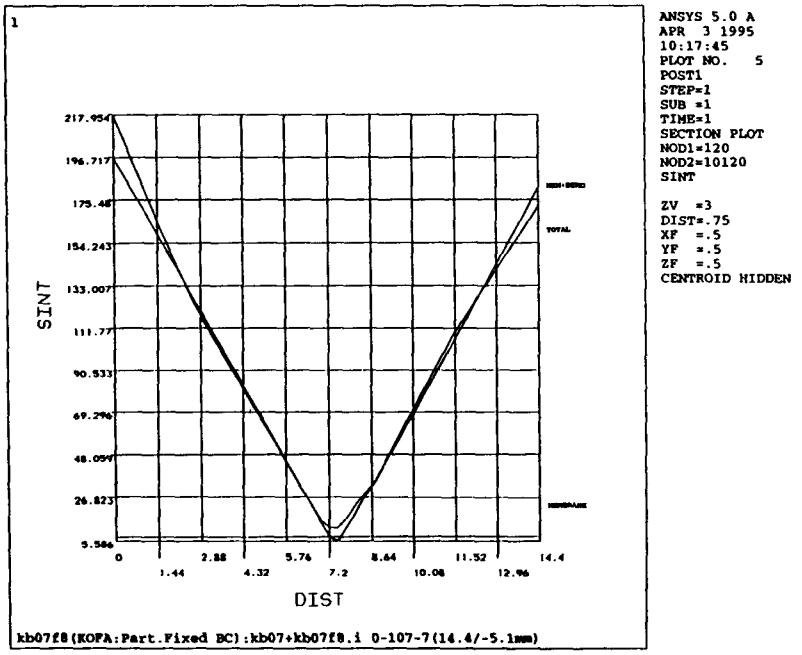

그림 8. 국산핵연료 두께 최적화 유로판의 두께에 걸친 응력강도 분포
(Leg 길이 107mm, Leg 두께 7mm)

하부에서는 178.6 N/mm²로 응력강도기준 205 N/mm²을 만족한다. 한편 국산핵연료에서 Leg 두께를 7 mm로 했을 경우는 3.8mm 두께 감소시 최대응력강도는 202.9 N/mm², skirt를 두었을 경우 Leg 두께 5mm일 때 두께감소 3.7mm에서 최대 응력강도 204.4 N/mm², Leg 두께 7mm일 때 5.1mm 두께감소에서 최대응력강도 196.3 N/mm²을 나타낸다.

3.3.2. DRBEP-DG

이물질여과 하단고정체의 경우에는 표 10의 두께감소 가능 량을 갖는 유로판 두께에서 응력강도 기준 만족여부를 확인하기 위한 계산을 하였다. 표 12에는 DRBEP-DG의 안내관 Plug 수용 slot 깊이 3mm (3−45−5)에서 두께 감소 1.1mm 일 때 최대응력강도 185.6/204.0 N/mm², Leg 두께 7mm일 때 183.5/204.3 N/mm², skirt를 두었을 경우 Leg 두께 5mm 및 7mm에서 각각 161.4/205 N/mm², 185.5/195.2 N/mm²를 보이고 모두 응력강도 기준을 만족하고 있다.

표 12에는 DRBEP-DG의 경우 기존 안내관 slot 수용 slot 두께를 1mm 줄인 2mm 및 slot 깊이를 두지 않았을 경우의 계산 결과도 함께 수록하였다. 표 12에 따르면 slot 깊이 2mm일 때는 Leg 두께 5mm에서 유로판 두께 감소 1.6mm, Leg 두께 7mm에서 2.5mm 감소 가능함을 알 수 있고, skirt의 경우 Leg 두께 5mm 및 7 mm에서 각각 1.4mm 및 3.6mm 두께감소 가능함을 알 수 있다. 끝으로 안내관 slot 깊이를 두지 않을 경우 지지부의 길이 45 mm에서 Leg 두께 5mm 및 7mm 일 때 각각 2.6mm, 3.4mm를 가능하게 하고, skirt의 경우 Leg 두께 5mm 및 7mm에서 각각 2.9mm, 4.6mm까지 유로판 두께 감소를 가능하게 함을 알 수 있다.

4. 결 론

고연소도 핵연료의 연소도 증가에 따른 연료봉 축방향 조사성장의 증가로 인해 상 · 하단고정체 사이의 간격이 기존의 핵연료보다 더 필요하게 되며 이 간격을 증가시킬 목적으로 기존의 경수로용 핵연료 집합체의 하단고정체 유로판의 두께를 줄이는 방안을 검토하였다.

표 12. 두께 최적화 DRBEP−DG 유로판의 최대 응력강도

	DRBEP			
Slot 깊이(mm)	3			
지지부의 길이(mm)	45		107	
지지다리 폭(mm)	5	7	5	7
유로판 두께감소(mm)	1.1	2.0	1.0	3.0
최대응력강도(N/mm²)	185.6/204.0	183.5/204.3	161.4/205.0	185.5/195.2

	DRBEP			
Slot 깊이(mm)	2			
지지부의 길이(mm)	45		107	
지지다리 폭(mm)	5	7	5	7
유로판 두께감소(mm)	1.6	2.5	1.4	3.6
최대응력강도(N/mm²)	194.6/203.4	192.7/203.5	186.9/195.7	202.7/204.2

	DRBEP			
Slot 깊이(mm)	0			
지지부의 길이(mm)	45		107	
지지다리 폭(mm)	5	7	5	7
유로판 두께감소(mm)	2.6	3.4	2.9	4.6
최대응력강도(N/mm²)	202.6/179.5	204.1/177.7	198.7/194.1	196.1/181.7

이를 위해 기존의 국산핵연료 하단고정체 및 DRBEP-DG용 하단고정체에 대한 응력계산을 수행하여 ASME Code Section Ⅲ의 응력강도 기준을 근거로 유로판 최대응력 강도로부터 유로판 두께 허용감소량을 구하였다. 이 결과 기존의 국산핵연료 하단고정체에서는 최대 두께 감소량 약 3.1mm를 얻을 수 있고, 하단고정체의 Leg(Support leg)를 skirt 로 대체하고 이 skirt 두께를 7mm로 하였을 경우 유로판 두께감소 허용량은 약 5.1mm를 얻을 수 있다.

또한 DRBEP-DG용 유로판의 두께 감소는 기존의 DRBEP-DG에서 약 1.1mm이며, 안내관 plug 수용 slot 깊이를 2 mm로 하고 skirt를 두른 경우는 최대 약 3.6mm까지를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났으며 slot을 두지 않으면 Leg의 변화에 따라 최대 약 4.6mm의 두께 감소가 가능한 것으로 밝혀졌다.

한편 Leg 두께를 5mm에서 7mm로 증가시키는 것이 skirt를 두르는 것에 비하여 유로판 두께 감소에 더 큰 효과를 주는 것으로 나타났다.

후 기

이 기술보고는 과학기술처 원자력연구개발 사업과 관련한 '94과제년도 미래형핵연료설계기술개발의 결과이며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

References

1. Na, Kunz, "Design of the Fuel Assembly Structure with Zircaloy Spacer Grids", B112/87/e268a, Work Report KNU 5~10 (1987)
2. Aisch, Fuchs, Lettau, "Focus Type Fuel Assembly for PWR", Nucl. Eng. & Design 147 (1993), pp 105~110 (1993)
3. FOCUS and HTP Fuel Assemblies for Pressurized Water Reactors, SIEMENS AG,
4. Westinghouse PWR Fuel, Vantage 5, Vantage 5H, Vantage+, 소개자료
5. R.D. Grimoldby, "BNFL's Advanced PWR Fuel Assembly", 1995. 3, Seminar
6. 이재경, 임정식, 손동성, "이물질여과 하단고정체 개발", KAERI/RR-1266/93 (1993)
7. ANSI/ANS-51.1-1983, "American National Standard Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants"
8. Yim, Kunz, "Design of the Fuel Assembly Structure with Inconel Spacer Grids", U6 312/87/e280, Work Report KNU 2
9. 김성수, 오종명, 강영환, "Strain Gage를 이용한 이물질여과 하단고정체 구조적 강도시험", KAERI/TR-308/93 (1993)