

천이노심 DNBR 별점 평가방법 개선

김강훈, 전병순, 박용준
한국원전연료주식회사

요 약

기존의 천이노심 DNBR 별점 평가 방법을 개선하여 불확실도를 줄이고 신뢰도를 향상시키며, 적용 범위를 확대함으로써 보다 실제적인 DNBR 별점 평가 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 영광 1 호기 JDFA-V5H 의 천이노심을 대상으로 하는 일련의 분석이 수행되었다. 먼저 균일노심과 천이노심을 모형화 한 기준 제어군에서의 상대적인 물성치의 변화와 축방향에서의 DNBR 거동을 분석하였고 이에 따른 최소 DNBR 의 상대적 차이로 부터 최대 별점 조건 및 별점이 적용되는 집합체를 선정하였다. 변수 민감도 분석 결과, 최대 별점 조건은 과출력 (120% 출력), 고압 (2420 psia) 그리고 상부노심에서 상대출력이 많은 축방향 출력 분포를 갖는 조건이 선정되었고 천이노심 별점은 V5H 에만 부과된다. 천이노심 DNBR 별점은 배열 민감도 분석을 통하여 노심내 V5H 분율의 함수로 표현됨을 알 수 있었으며, 기존의 보수적인 방법론에 비해 최소 3% 이상의 천이노심 별점이 감소되는 것으로 나타나 추가적인 여유도의 확보로 인한 설계의 탄력성을 기대할수 있다. 이 결과는 IFM 이 존재하는 원전 연료 집합체 상부에 대하여 노심의 V5H 분율이 0.02 부터 1.0 까지의 정상 및 과도상태 노심에 대하여 적용할 수 있다.

I. 서론

서로 다른 설계특성을 갖는 원전연료 집합체들이 장전되는 천이노심 (Transition Core) 에서의 유동 재분포는 불균일 입구 유속분포와 노심내 출력분포의 불균일에 의한 열수력적 유동조건차이 뿐만 아니라, 지지격자의 손실계수 및 치수 의 차이, 지지격자의 위치 차이 또는 추가적인 지지격자의 존재 그리고 연료봉과 안내관의 외부 직경차이 등 수력적 불일치 사항으로 야기되는 국부적 수력 저항차이에 의해 발생할 수 있다[1,2]. 이러한 재분포는 결과적으로 축방향과 횡방향 유동 벡터에 영향을 주며, 통상 이 횡방향 성분을 교차류 (Crossflow) 라 한다. 국부적 수력저항 차이에 기인한 교차류는 원전연료 집합체의 기계적 설계와 안전성 분석에 영향을 줄 수 있다. 안전성 분석과 관련하여 LOCA (Loss of Coolant Accident) 해석과 DNB (Departure from Nucleate Boiling) 해석에 영향을 줄수 있으며, DNB 해석에 대한 영향은 유량 재분포에 의한 질량유속과 엔탈피 분포의 변화에 기인한다.

V5H 와 JDFA 는 연료봉 외경은 같으나 안내관 외경이 다르고 지지격자의 손실계수도 조금씩 다르다[3,4]. 또한 V5H 에는 상부 3개의 혼합 지지격자 사이사이에 3개의 중간 혼합격자 (Intermediate Flow Mixer, IFM) 가 추가적으로 존재하고 있다. 이와 같은 특성으로 인해 V5H-JDFA 천이노심에서의 국부적 유동 재분포에 의한 영향은 비교적 클것으로 판단된다.

천이노심 열수력 해석은 서로 다른 원전연료 집합체의 균일노심에 대해 각각 분석을 수행한 후 보다 제한적인 결과를 최종적으로 적용하며, 서로간의 상호작용에 의한 영향을 천이노심 별점으로 정량화하는 방법을 사용하고 있다. 기존의 보수적인 천이노심 DNBR 별점 평가 방법론에서는 가상의 조건에서 계산된 최대 별점을 천이노심 설계에 적용하였으나 지나친 보수성으로 인해 여러가지 제약이 많았다. 또한 웨스팅하우스의 확장 방법론이 올진 1,2호기 설계에 적용되었으나 분석 모형이 충분하지 않고, 3 loop 원자로의 결과가 아니므로 이에 대한 개선의 필요성이 요구되었다. 이에 따라 천이노심에서의 열수력적 조건 변화가 핵연료의 DNB 거동에 미치는 영향을 평가하는 열적 양립성 평가에 대하여, 기존의 천이노심 DNBR 별점 평가시의 보수적인 접근방법을 대신하고 자료의 신뢰도를 높일 수 있는 새로운 평가 방법론을 제시하여 실제 적용대상 발전소에 대한 검증을 시도하고자 한다.

II. 해석방법 및 절차

천이노심에 대한 DNBR 별점평가는 다음과 같은 방법 및 절차에 의해 수행되었고 영광 1호기의 V5H-JDFA 천이노심을 기준으로 하였다. 먼저 동일 집합체로 구성된 그림 1 의 1a 및 alljd 형태의 3×3 배열의 기준 제어균을 설정하여 THINC-IV 를 수행한다. THINC-IV 의 입력은 한 종류의 연료봉 및 안내관 외경 밖에는 수용하지 않으므로 이에 따른 보정이 필요하다. 보정이 필요한 변수 및 보정 방법은 참고문헌 [1,3] 에 나타나 있다. 한편 정확한 DNBR 예측을 위하여 축방향 분석간격을 1" 로 하였고 Hand Smearing 을 사용하였다. 천이노심 별점 분석에 대한 THINC-IV 의 노심 모형은 그림 3 과 같다. 식 (1) 과 같이 정의되는 천이노심 별점은 그림 2 의 절차에 의해 변수 민감도 및 배열 민감도 분석을 수행하여 배열의 크기, 형태 및 노심내 V5H 분율과의 관계를 고찰한다.

$$\text{천이노심 DNBR 별점 (\%)} = \left\{ 1 - \frac{DNBR_{\text{천이노심}}}{DNBR_{\text{균일노심}}} \right\} \times 100 \quad (1)$$

민감도 분석시 고려되는 노심 조건은 표 1 과 같으며, 배열 형태는 참고문헌 [3] 에 제시되어 있다. 민감도 분석시 사용된 배열 형태는 천이노심에서 발생할 수 있는 장전 모형을 바탕으로 하여 3×3 배열에서는 주로 장전모형에서의 국부적인 효과를 고려할 수 있는 형태를 선택하였고, 7×7 배열에서는 국부적인 효과와 노심 전반에 걸친 효과를 모두 고려할 수 있도록 형태를 선택하였다. 특히 고온 집합체의 위치가 배열 중앙부에 있는 경우와 외곽에 위치한 경우를 모두 고려하여 그 영향을 평가할 수 있도록 하였다. 정량화된 분석 결과는 통계적인 Fitting 을 통하여 DNBR 별점식으로 나타내어진다.

III. 결과

III.1 교차류 분석

영광 1호기 JDFA-V5H 천이노심의 교차류 해석은 그림 1 의 모든 배열 형태를 모델로 하여 수행하였다. 먼저 배열 alljd 및 1a 와 같이 동일 집합체로 구성된 균일 노심에서의 교차류는 천이노심의 결과에 비해 매우 작아 무시할 만 하였다. 천이노심 모형에서의 축방향 거리에 대한 집합체간의 교차류 분포는 그림 4 와 같이 원전연료 집합체 하단에서는 교차류의 발생이 미미하지만 첫번째 IFM 영역에 도달하면 교차류 속도가 급격히 변동함을 알수 있으며 JDFA 와 V5H 간의 대칭적인 경향을 볼수 있다. 여기서 + 와 - 는 각각 집합체로 유입되는 방향과 집합체로부터 방출되는 방향을 나타내며, 이때 영출력의 단열조건과 기계적 설계유량을 적용하여 보수적인 결과를 유도하였다. 분석 결과에서 노심 입구 유속은 16.24/17.19 ft/sec (JDFA/V5H) 로 교차류와 관련한 입구 유속 제한치 35 ft/sec 보다 작았다. 또한 최고 교차류 속도는 축방향 거리 82" 에서 +2.61/-2.27 ft/sec (JDFA/V5H) 로 나타났다.

III.2 천이노심 DNBR 별점평가

그림 1 의 3×3 배열 기준 제어군과 이와 유사한 5×5 및 7×7 배열에 대한 변수 민감도 분석 결과, 별점이 부과되는 집합체와 최고 별점조건은 표 2 에서와 같이 모든 배열크기에서 공통적으로 발생하였다. 먼저 별점은 V5H 에만 부과되며, 최대 별점 조건은 과출력 (120% 출력) 과 그림 5 의 출력 분포 (Shape EA, AO=+25.21%), 그리고 고압 (2420 psia) 에서 발생하였다. 따라서 배열 민감도 분석은 위에서 얻어진 최고 별점 조건에 대해서만 수행하였다.

고온 집합체의 고온 부수로에서의 축방향 거리에 따른 물성치 분포 및 이에 따른 DNBR 거동은 천이노심 DNBR 별점과 밀접한 관계가 있다. 그림 1 의 1e 형태에서의 고온 부수로 축방향 질량유속 분포는 그림 6 과 같이 입구에서부터 3번째 혼합 지지격자가 존재하는 하부위치까지는 V5H 균일노심과 V5H-JDFA 천이노심에서의 거동에 별다른 차이점은 없다. 그러나 세번째 혼합 지지격자 이후에는 IFM 존재 위치에서의 V5H 에서 JDFA 로의 유동제분포가 발생하여 고온부수로 상부위치에서의 질량유속이 감소되고 있다. 또한 입구에서 첫번째와 두번째 혼합 지지격자 사이에서도 유량의 감소가 이루어지고 있으나 이 위치는 일반적으로 최소 DNBR 위치가 아니므로 특별히 고려하지 않는다. 이러한 유동 특성에 의해 고온 집합체내 고온 부수로의 엔탈피 및 밀도 등의 국부적 물성치 분포와 기포 분포 등이 달라질 수 있으며, 결과적으로 DNBR 거동에 영향을 미친다. 그림 7 은 고온 부수로의 DNBR 분포를 나타내고 있는데, 첫번째 IFM 간격까지는 천이노심과 균일 노심을 구별할 만한 차이는 없으나 그 이후의 위치에서는 천이노심의 DNBR 값이 균일 노심의 값보다 작게 나타나고 있어 두 값간의 차이가 천이노심 별점으로 정량화 된다. 특히 각 혼합 지지격자에 의한 영향이 두드러져, 지지격자 사이에서의 DNBR 거동은 지지격자 바로 밑부분에서 최소 DNBR 이 발생하며 지지격자를 지나면서 증가했다가 다시 감소하는 경향이 주목할 만하다. 이는 혼합 지지격자에 의해 유동의 난류혼합이 촉진되

고 부수로내 Swirl Rotation 발생 및 교차류 증가가 DNBR 거동에 유리하게 작용된 결과로 판단된다.

V5H-JDFA 천이노심에 대한 배열 민감도 분석결과는 표 3 과 같으며, 천이노심 DNBR 별점의 최대 값은 12.92% 로 평가되었다. 하지만, 이 값은 정상적인 천이노심에서는 나타날 수 없는 배열형태에서 평가된 값이므로 실제로 적용되는 값은 아니다. 배열 민감도 분석 결과를 종합하여 노심내 V5H 분율의 함수로 나타내어 보면 그림 8 와 같이 나타나며, 적용범위가 V5H 의 노심내 분율 0.02 부터 1.0 까지에서 아래와 같은 식으로 Fitting 할 수 있다.

$$\text{천이노심 DNBR 별점} = 12.90959 - 9.75376 X - 3.11352 X^2 \quad (2)$$

여기서

$$X = \text{V5H 의 노심내 분율.}$$

위의 천이노심 별점의 R² 값은 0.99139 로 1 에 매우 근접한 값을 가지며, 식 (3) 과 같이 정의 되는 표준편차는 0.34519 로 나타났다.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (y' - y)^2}{n - 2}} \quad (3)$$

여기서

- y = 계산된 값
- y' = Fitting 곡선으로 부터 예측한 값
- n = 자료수

식 (2) 에 의한 천이노심 DNBR 별점은 약 60 다발의 V5H 가 장전되는 첫번째 천이노심에 대하여 8.72%, 약 120 다발의 V5H 가 장전되는 두번째 천이노심에 대하여 3.64% 로 계산된다. 그러나 Fitting 곡선으로 부터 DNBR 별점을 평가할 경우에는 식 (3) 에 의해 결정되는 자료의 분포에 따른 불확실도를 반드시 고려하여야 한다. 이 불확실도에는 같은 V5H 분율을 갖는 배열 형태간의 상대적 편차에서 기인한 불확실도를 포함하고 있다. 한편 WH 의 확장방법론에서는 불확실도를 Fitting 곡선의 예측치 보다 크게 평가된 결과에 대해서 결정론적으로 실제 계산된 값과 Fitting 곡선으로 평가된 값과의 차이의 최대치를 고려하여 0.5% 로 설정하였다[1]. 그러나 자료의 분포가 Fitting 곡선의 예측치에 대하여 정규분포를 가지는 경우에는 95×95 기준에 의한 불확실도는 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$CFV = SD_{95/95} = k_{95/95} \times SD \quad (4)$$

여기서

$$CFV = \text{Curve Fitting Variance}$$

$$k_{95/95} = 2.133 \quad (n = 39 \text{ 에 대하여}) [5].$$

그러므로 본 분석 결과에 대한 CFV 는 $2.133 \times 0.34519 = 0.73629$ 가 되므로 0.74 로 설정하였다. 결과적으로 Fitting 곡선의 불확실도를 고려한 천이노심 DNBR 벌점은 식 (5) 로 부터 구할수 있으며, 첫번째 천이노심에서는 9.46%, 두번째 천이노심에서는 4.38% 로 계산된다.

$$\text{천이노심 DNBR 벌점 (\%)} = \text{Fitting 곡선값} + CFV \quad (5)$$

식 (5) 의 결과는 표 4 에 제시된 것과 같이 기존의 보수적인 방법론에 비해 첫번째 노심에 대하여 약 3% 의 벌점이 감소될 수 있으며, 두번째 노심에서는 약 8% 의 추가적인 여유도를 확보할 수 있다. 또한 WH 의 확장방법론과 비교할 경우에도 첫번째 천이노심에서 약 1% 의 벌점이 감소되었으며, 두번째 천이노심에 대하여는 약 0.5% 의 벌점이 감소하는 것으로 나타났다.

IV. 결론

영광 1호기를 분석대상으로 하여 수행한 천이노심 벌점 평가에서 천이노심 DNBR 벌점은 분석대상 배열의 크기나 형태보다는 노심내 새로운 연료의 분율에 의존함을 알수 있었다. 본 연구 결과를 이용할 경우, 기존의 방법에 비해 첫번째 천이노심에 대하여 약 3% 가량, 그리고 두번째 천이노심에서는 약 8% 의 벌점 감소로 인한 추가적인 여유도를 확보할 수 있는 것으로 평가되었다. 이 결과는 WH 확장 방법론과 비교하여, 첫번째 천이노심에서 약 1%, 두번째 천이노심에 대하여는 약 0.5% 의 벌점이 감소하는 것으로 나타나 본 연구 결과의 적용이 설계의 탄력성을 증대 시킬것으로 기대된다.

이상의 방법론으로 부터 계산된 벌점은 노심내 V5H 분율이 0.02 부터 1.0 까지의 정상 및 과도상태 노심에 대하여 적용 가능하므로, 시험 집합체의 분석에도 적용할 수 있을 것이다. 그러나 최소 DNBR 이 발생하는 상부 (3번째 혼합지지격자 이후) 혼합 지지격자와 IFM 위치에 대해서만 적용 가능하며, IFM 이 존재하지 않는 하부위치에서는 적용되지 않는다. 한편 RWFS 사고시와 같이 최소 DNBR 발생 지점이 하부 위치인 경우에는 변수 민감도 분석결과나 DNBR 여유도를 적용한다 [6].

VI. 참고문헌

- [1] " Thermal Hydraulic Engineering Service Manual, Chap. 6, " WH (1990).
- [2] " Thermal Hydraulic Design Procedure Manual, Chap 4.5, " WH (1990).
- [3] K.H. Kim, " Improved Methodology for Transition Core DNBR Penalty Evaluation, " TR-TH-95003, KNFC (1995).
- [4] S.L. Davidson & W.R. Kramer, " Reference Core Report V5 Fuel Assembly, " WCAP-10444-P-A, Addendum 2, " V5H Fuel Assembly, " WH (1988).
- [5] D.B. Owen, " Factors for One-sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans, " SCR-607 (1963).
- [6] S.L. Davidson & J.A. Iotii, " Reference Core Report 17×17 OFA, " WCAP-9500 (1982).
- [7] A. J. Friedland & S. Ray, " Improved THINC-IV Modeling for PWR Core Design, " WCAP-12330-A (1991).

표 1 변수 민감도 분석을 위한 노심조건

Case No.	Transition Pattern @	Pressure (psia)	Tin (deg F)	Power (%)	Flow (%)	Axial shape
Nominal						
1	All VSH	2270	557.1	100	100	1.55 cosine
2	1 VSH	2270	557.1	100	100	1.55 cosine
Overpower						
3	All VSH	2420	557.1	120	100	1.55 cosine
4	1 VSH	2420	557.1	120	100	1.55 cosine
LOF						
5	All VSH	2260	557.1	100	80	WCAP-9500
6	1 VSH	2260	557.1	100	80	WCAP-9500
Shape 1803						
7	All VSH	2420	557.1	120	100	1803
8	1 VSH	2420	557.1	120	100	1803
Shape EA						
9	All VSH	2420	557.1	120	100	EA
10	1 VSH	2420	557.1	120	100	EA
Shape MB						
11	All VSH	2420	557.1	120	100	MB
12	1 VSH	2420	557.1	120	100	MB
Shape EA						
13	All VSH	2420	557.1	106	100	EA
14	1 VSH	2420	557.1	106	100	EA
RWFS #						
15	All VSH	2215	557.0	56.61	100	RWFS Generic
16	1 VSH	2215	557.0	56.61	100	RWFS Generic
17	All VSH	2215	557.0	52.02	63	RWFS Generic
18	1 VSH	2215	557.0	52.02	63	RWFS Generic

@ Pattern 1e, 2e, 그리고 3e 모두에 적용.
STDPA 가 적용됨.

표 2 최대 발전 조건

배열크기	Case No.	VSH 갯수	고온집합체	발전 (%) #
3×3	10	1	VSH	11.38
	10	8	JDFA	-2.599
5×5	10	1	VSH	12.51
	10	24	JDFA	-3.754
7×7	10	13	VSH	10.03

발전(%) = (1 - DNBR_{최저노심} / DNBR_{고온노심}) × 100

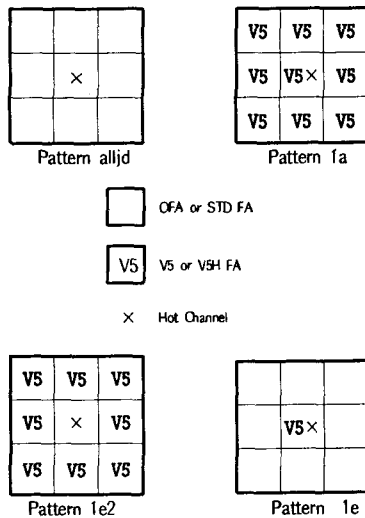


그림 1 천이노심 DNBR 발전 분석 기준제어군

표 3 배열민감도 분석결과

배열크기	배열형태	VSH 분율	발전 (%) #	발전 - Fitting
3×3	1e	1/9	11.38, 11.62	-0.410, -0.170
	1d	3/9, 3/9	9.594, 9.140	0.285, -0.169
	1c	4/9, 4/9	8.303, 8.241	0.347, 0.285
	1b	6/9, 6/9	5.428, 5.192	0.103, 0.167
		6/9	5.043	0.018
	1f	5/9, 5/9	6.027, 6.458	-0.501, -0.070
5×5	1g	8/9	1.888	0.095
	2e	5/25	10.80	-0.030
	2d	9/25	8.856	-0.135
	2c	17/25	5.043	0.203
	2b	24/25, 24/25	0.767, 1.003	0.072, 0.308
	2f	20/25	3.599	0.477
7×7	2g	21/25	2.419	-0.111
	2r	1/25, 1/25	12.51, 12.74	-0.010, 0.220
	3e	13/49	10.03	-0.070
	3d	17/49, 19/49	8.437, 8.968	-0.710, 0.312
		25/49, 24/49	6.827, 7.788	-0.158, 0.406
	3c	21/49, 25/49	8.201, 7.316	0.047, 0.196
	3b	37/49, 36/49	3.540, 3.894	-0.235, -0.174
	3f	29/49, 33/49	5.782, 4.661	-0.264, -0.270
	3g	30/49	6.195	0.424
	3h	38/49	2.301	-1.179
3r	1/49, 1/49	12.68, 12.92	-0.030, 0.210	

발전(%) = (1 - DNBR_{최저노심} / DNBR_{고온노심}) × 100

표 4 천이노심 발전 평가 방법론 결과 비교

	보수적 방법	WH 확장방법	본 연구
창조발전소	4 Loop	4 Loop	3 Loop
CFV	0 %	0.5 %	0.74 %
첫번째 천이노심	12.5 %	10.3 %	9.46 %
두번째 천이노심	12.5 %	4.94 %	4.38 %
평행노심	0 %	0 %	0 %

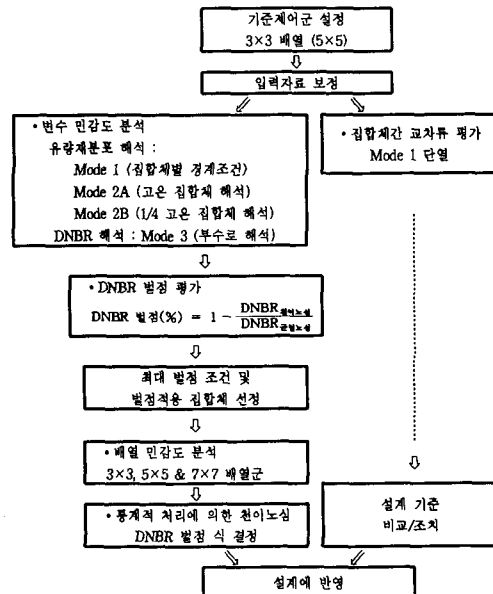


그림 2 천이노심 DNBR 발전 평가 순서도

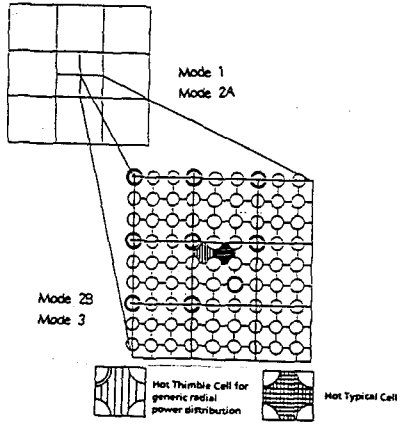


그림 3 천연노심 배열 평가서의 THINC-IV 모형

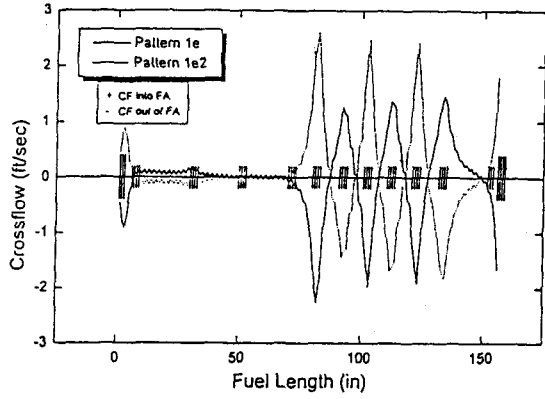


그림 4 고온집합체 교차류 분포

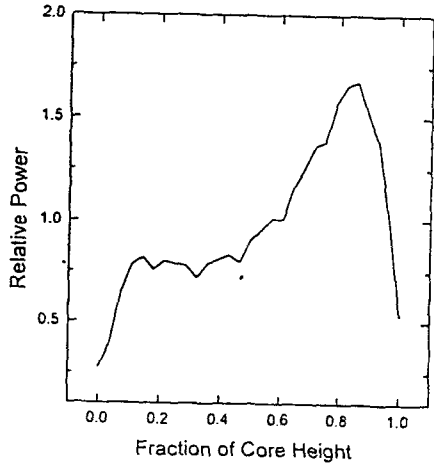


그림 5 EA 축방향 출력분포 (AO=+25.21%)

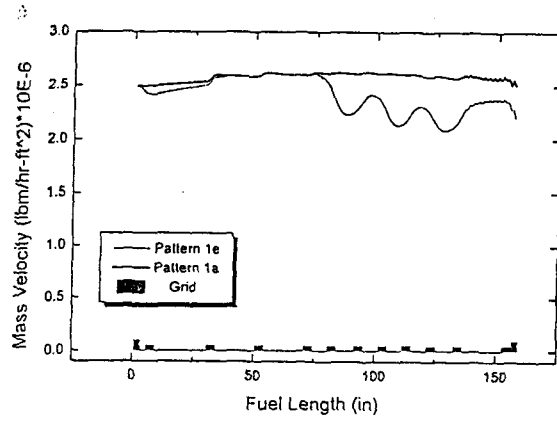


그림 6 고온부수로 유동 분포 (V5H)

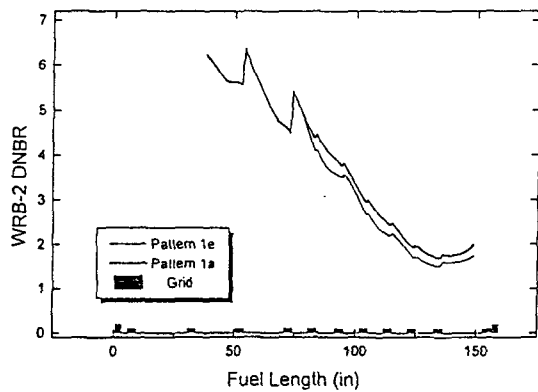


그림 7 고온부수로 DNBR 분포

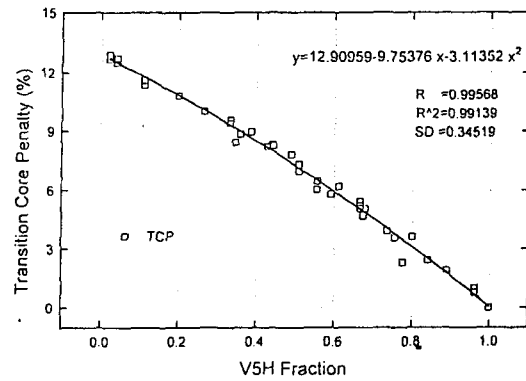


그림 8 천연노심 DNBR 배열