'02 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

웨스팅하우스형 16×16 개량핵연료 연료봉의 수력적 안정성에 대한 민감도 분석

A Sensitivity Study on the Fuel Rod Hydraulic Stability of Improved 16×16 Fuel Design

전상윤, 이규석, 전경락, 김재원
한전원자력연료주식회사

요 약

경수로 원자로 하부구조물에서 발생되는 유로의 불균일성에 기인하는 교차류와 핵연료집합체의 수력저항의 차이에 의해 발생하는 교차류, 그리고 축류 등에 의해 유발되는 연료봉의 불안정성은 핵연료손상의 원인이 될 수 있으므로 새로운 연료개발시 연료봉에 대한 진동 및 안정성 해석을 수행하여 연료봉 진동과 불안정성 발생 여부를 확인하고 있다. 본 연구에서는 현재 개발중인 고리 2호기용 16X16형 개량핵연료 집합체의 지지격자 간격에 대한 연료봉의 진동 및 안정성 해석을 수행하여 각각의 경우에 대한 진동특성과 불안정성비를 비교 평가함으로써 개량연료 집합체의 지지격자 위치를 제시하였다.

Abstract

The fuel rod instability can be occurred because of the axial and cross flow due to the flow anomaly and/or flow redistribution in the lower core plate region of the pressurized water reactor core. The fuel rod vibration due to the hydraulic instability is one of the root causes of fuel failure. The verification on the fuel rod vibration and instability is needed for the new fuel assembly design to verify the fuel rod instability. In this study, the fuel rod vibration and stability analyses were performed to investigate the sensitivity of span adjustment of improved 16X16 fuel assembly design. Based on the results, the grid axial elevation of improved 16X16 fuel assembly design was proposed by evaluating the vibration characteristic and instability ratio for each span adjustment case.

1. 서 론

경수로 핵연료집합체 연료봉의 수력적 불안정성은 원자로의 하부구조물에서 발생되는 유로의 불균일성에 기인하는 교차류와 핵연료집합체의 수력저항의 차이에 의해 발생하는 교차류, 그리고 노심에서의 축류 등에 의해 유발된다. 이러한 교차류와 축류 등에 의한 불안정현상이 존재하면

연료봉 진동에 의한 프레팅마모가 발생하여 연료손상의 원인이 된다[1]. 따라서, 해외 연료공급자들은 새로운 연료개발시 연료봉에 대한 진동 및 안정성 해석을 수행하여 이러한 교차류와 축류에 의한 연료봉 진동과 불안정성 발생 여부를 확인하고 있다. 과거 Westinghouse사의 OFA, V5H 연료 등에서 이러한 교차류와 축류에 의한 연료봉진동과 불안정성 발생을 방지하기 위하여 핵연료집합체의 하부영역의 지지격자와 지지격자 사이의 간격을 조정(Span Adjustment)한 바가 있다.

고리 2호기용 16X16 개량연료는 기존의 연료와 비교하여 열적성능 향상을 위해 3개의 혼합지지격자를 추가하였고 중성자 경제성을 향상시키기 위해 인코넬 중간지지격자의 재질을 인코넬에서 지르코늄 계열의 개선된 재질로 변경하고 연료봉 직경 최적화를 수행하여 연료봉 외경을 0.374 inch에서 0.360 inch로 변경하였다. 또한, 이물질에 의한 연료 손상을 방지하기 위하여 소구경 하단고정체와 보호지지격자 그리고 장형 봉단마개 등을 채택하였다. 이러한 개량연료의 성능 향상을 위해 개선된 집합체의 각 구성품들에 의해 개량연료의 압력강하량이 증가할 것이며 기존연료와의 천이노심시 기존연료와 개량연료 간의 교차류가 발생하게 될 것이다. 이러한 교차류는 원자로 하부구조물에 의해 발생하는 교차류와 노심에서의 축류 등과 함께 연료봉의 진동 및 불안정성의 원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 현재 개발 중인 고리2호기용 16X16형 개량연료집합체의 연료봉에 대한 진동 및 안정성 해석을 여러가지의 지지격자간 간격에 대해 수행하여 각각의 경우에 대한 진동특성과 불안정성 비를 비교 평가하여 지지격자의 축방향 위치를 제시하였다.

2. 연료봉 모델 및 모드해석

고리 2호기용으로 개발중인 16X16형 개량연료는 상,하단고정체, 20개의 안내관과 1개의 계측관, 2개의 상하부지지격자, 6개의 중간지지격자, 3개의 혼합지지격자, 그리고 235개의 연료봉 등으로 구성되어 있으며, 본 해석에 사용된 연료봉 및 지지격자에 대한 주요 제원은 표 1에 나타내었다. 진동모드해석을 위하여 그림 1에서와 같이 119개의 절점과 118개의 요소를 갖는 2차원 보로 구성된 연료봉 모델을 생산하였으며 집합체 내에서의 연료봉의 지지조건을 모사하기 위하여 지지격자의 스프링과 딤플의 위치와 동일한 위치에 연료봉의 노드를 지정하였다. 연료봉 모델은 연료봉의 동특성을 모사할 수 있도록 상하부 봉단마개, 플레넘 등을 2차원 보요소를 이용하여 구성하였으며, 연료봉의 지지조건을 모사하기 위하여 지지격자의 스프링과 딤플 위치에서 연료봉과 스프링/딤플과의 관계를 1차원 선형스프링요소를 이용하여 구성하였다. 연료봉 모드해석은 웨스팅하우스사의 범용 유한요소해석 프로그램인 WECAN[2]을 이용하였으며 연료봉모델에 대한 연료봉의 고유진동수와 진동모드형태를 구하였다. 연료봉의 모드해석은 냉각재 온도가 600°F인 경우에 대하여 수행하였으며 집합체 지지격자 스프링력은 노심의 주기말 상태를 모사하기 위하여 주기말 스프링력을 이용하여 수행하였다.

지지격자간의 간격은 집합체 하부영역의 첫번째 지지격자의 위치를 올리고 두번째 지지격자의 위치를 낮추므로서 조정하였으며 해석에 사용된 여러가지 지지격자간의 간격은 표 2에 나타내었다. 각각의 경우의 연료봉모델에 대한 모드해석을 수행하여 구한 진동모드별 고유진동수를 표 3에 요약하였으며 그림 2에 여러가지 지지격자간의 간격에 대한 모드 1의 진동모드형태를 간격조정 이전의 모드 1 진동모드형태와 비교하여 나타내었다.

3. 연료봉 안정성 해석

노심내에서 존재할 수 있는 원자로 구조물에 의한 교차류와 핵연료 설계 변경에 따른 천이노심시의 교차류에 의한 연료봉의 불안정성을 평가하기 위해 앞에서 계산된 연료봉의 고유진동수와 모드형태를 이용하여 16×16형 개량연료 연료봉에 대한 진폭과 불안정성비를 계산하였다. 연료봉에 대한 안정성 해석은 웨스팅하우스의 설계해석프로그램인 VIBAMP[3]을 이용하였으며 표 1에 나타낸 각각의 지지격자간 간격에 대한 연료봉의 진폭과 불안정성비를 구하였다. 연료봉의 불안정성비(Ue/Uc)는 유효 유체속도(Ue)와 임계 유체속도(Uc)의 비를 나타내며 이 비가 1 이상이 되면 유효 유체속도가 임계 유체속도에 도달하여 연료봉의 불안정성이 발생하게 되어 연료봉의 진동 진폭이 커지게 된다. 해석에 사용된 VIBAMP 코드는 반 실험식(Semi-empirical Equation)에 근거하여 교차류와 축류에 기인하는 연료봉의 진폭을 계산한다. 해석에 사용된 교차류와 축류에 대한 속도분포는 그림 3에서 보여 주는 바와 같이 고리 2호기에서 연소중인 16×16형 기존연료와 개발중인 개량연료가 동시에 장전된 천이노심을 가정하여 계산하였으며, 특히 교차류 계산시에는 원자로 구조물에 의한 교차류와 핵연료 설계변경에 따른 수력저항 차이에 의한 교차류를 모두 고려하기 위해 두가지의 교차류를 직접 합한(Direct Summation) 값을 이용하였다. 연료봉의 각 지지격자간의 간격에 대한 진폭과 불안정성비를 표4에 나타내었으며 그림 4에 그래프로 비교하여 나타내었다.

4. 결과 평가

가. 연료봉 고유 진동수 및 모드 형태

표 3에서 나타난 바와 같이 개량연료의 지지격자간의 간격이 작을수록 연료봉의 1차 모드에 대한 고유진동수는 크게 나타났으며 2차 이상의 모드에 대해서는 거의 유사한 고유진동수를 나타내었다. 또한, 지지격자간 간격을 조정한 개량연료 연료봉의 1차 고유진동수는 간격조정 이전의 1차 고유진동수보다 크게 나타났는데 이는 지지격자간의 간격이 모두 간격조정 이전보다 작아진 것에 기인한 것으로 판단된다. 개량연료에 대한 모드형태는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 지지격자간의 간격에 따라 거의 유사한 형태를 보이고 있으나 집합체의 하부영역에 있는 두개의 간격에 대한 모드형태를 비교하면 조금씩 다른 형태를 보이고 있다.

나. 연료봉 진폭 및 불안정성 비

표 4와 그림 4에서 보여 주는 바와 같이 개량연료의 하부영역에서의 지지격자간의 간격이 작을수록 연료봉의 진폭과 불안정성비는 작아지는 것으로 나타났다. 그림 4에서 1차모드에 대해서는 불안정성비와 진폭이 간격조정 이전의 경우와 비교하여 감소하는 것으로 나타나 개량연료의 연료봉 진동 및 안정성 성능이 향상됨을 알 수 있으며 각 간격조정의 경우에 대해서는 지지격자간의 간격이 작아질수록 성능이 조금씩 더 향상됨을 알 수 있다. 2차모드 이상의 모드에 대해서는 불안정성비와 진폭이 간격조정 이전과 비교하여 모드에 따라 오히려 다소 증가하는 경향도 있으나 증가량이 미미하며 축류와 교차류에 의한 연료봉 불안정성 현상이 연료봉 진동의 고차모드보다 1차모드에서 민감하게 나타나므로 고차모드에서의 불안정성비와 진폭 증가에 의한 영향은 미미한 것으

로 평가된다.

다. 지지격자 간격 조정

연료봉에 대한 고유진동수와 모드형태를 근거로 축류와 교차류에 대한 연료봉의 진동진폭과 불안정성비를 계산한 결과, 지지격자간의 간격이 작아질수록 연료봉의 1차모드에 대한 진동진폭 및 불안정성비 성능은 향상되는 것으로 나타났다. 지지격자간의 간격조정은 첫번째 지지격자의 경우 노심에서의 인접하는 연료집합체 지지격자와의 겹침량에 의해 제한이 되며 두번째 지지격자의 경우 인접하는 연료집합체 지지격자와의 겹침량과 지지격자 슬리브와 안내관 유로구멍과의 간격에 의해 제한이 된다. 이러한 제한조건들을 고려하는 경우 지지격자간의 간격조정을 위해 두번째 지지격자의 위치는 약 0.5 in. 까지 감소시킬 수 있으며 첫번째 지지격자의 위치는 약 1.0 in. 까지 증가시킬 수 있다. 따라서, 16X16형 개량핵연료의 축류 및 교차류에 대한 연료봉 진동 및 안정성 성능을 향상시키기 위한 지지격자간 간격조정을 위해서는 두번째 지지격자의 위치를 0.5 in. 까지 감소시키고 첫번째 지지격자의 위치는 1.0 in. 까지 증가시는 것이 제안되었다.

5. 결 론

고리2호기용 16×16형 개량연료집합체의 지지격자 간격에 따른 연료봉에 대한 진동 및 안정성 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개량연료의 지지격자간의 간격이 작을수록 연료봉의 1차 모드에 대한 고유진동수는 크게 나타났으며 2차 이상의 모드에 대해서는 거의 유사한 고유진동수를 나타났다.

(2) 개량연료의 지지격자간의 간격이 작을수록 연료봉의 진폭과 불안정성비는 작게 나타나 개량연료의 연료봉 진동 및 안정성 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

따라서, 16X16형 개량핵연료의 축류 및 교차류에 대한 연료봉 진동 및 안정성 성능을 향상시키기 위한 지지격자간 간격조정을 위해서는 두번째 지지격자의 위치를 0.5 in. 까지 감소시키고 첫번째 지지격자의 위치는 1.0 in. 까지 증가시는 것이 제안되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 웨스팅하우스형 원전용 개량연료개발과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Mechanical Design Manual, Westinghouse Proprietary, 1999

[2] WECAN User’s Manual, Westinghouse Proprietary, 1989

[3] VIBAMP User’s Manual, Westinghouse Proprietary, 1989

표 1. 연료봉 및 지지격자 주요제원

구 분			제 원	비 고
연료봉	재 질		ZIRLO™	
	외경 (in.)		0.360	
	내경 (in.)		0.315	
	두께 (in.)		0.0225	
지지격자	재 질		ZIRLO™	
	높이 (in.)	상하부	1.522	
		중간	2.25	
		혼합	0.62	

표 2. 해석에 사용된 지지격자간의 간격

구 분		첫번째 지지격자 위치 올림량 (in.)	두번째 지지격자 위치 낮춤량 (in.)	지지격자간 간격 (in.)
기존연료 (간격조정 이전)		-	-	24.43
개량연료 (간격조정 이후)	CASE 1	0.50	0.70	23.23
	CASE 2	1.00	0.70	22.73
	CASE 3	0.50	0.35	23.58
	CASE 4	1.00	0.35	23.08

표 3. 연료봉 고유진동수

진동모드	간격조정 이전	간격조정 이후				비고
		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	
1	34.105	37.273	38.645	36.375	37.775	
2	43.411	43.172	43.252	43.335	43.359	
3	45.014	44.392	44.484	44.752	44.801	
4	47.339	46.569	46.614	46.938	46.978	
5	49.942	49.319	49.336	49.575	49.597	
6	52.255	51.947	51.952	52.062	52.070	
7	53.656	53.606	53.607	53.624	53.625	
8	95.051	104.050	108.060	101.450	105.450	
9	123.340	122.090	122.340	122.990	123.060	
10	127.440	125.370	125.510	126.480	126.600	

표 4. 연료봉 불안정성비 및 진동 진폭

불안정성비 (Instability Ratio)

진동모드	간격조정 이전	간격조정 이후				비고
		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	
1	0.429	0.380	0.356	0.395	0.374	
2	0.563	0.482	0.505	0.539	0.545	
3	0.478	0.480	0.466	0.461	0.461	
4	0.546	0.578	0.574	0.561	0.557	
5	0.510	0.501	0.500	0.500	0.500	
6	0.500	0.543	0.542	0.526	0.525	
7	0.549	0.566	0.565	0.560	0.560	
8	0.169	0.148	0.139	0.154	0.147	
9	0.127	0.097	0.102	0.117	0.119	
10	0.113	0.127	0.124	0.114	0.113	

진동 진폭 (Vibration Amplitude)

진동모드	간격조정 이전	간격조정 이후				비고
		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	
1	1.020	0.774	0.684	0.847	0.759	
2	0.311	0.290	0.293	0.306	0.307	
3	0.289	0.289	0.284	0.280	0.280	
4	0.259	0.284	0.281	0.268	0.268	
5	0.222	0.241	0.241	0.234	0.233	
6	0.207	0.217	0.217	0.212	0.211	
7	0.182	0.192	0.192	0.188	0.188	
8	0.053	0.041	0.036	0.044	0.040	
9	0.016	0.017	0.016	0.015	0.015	
10	0.014	0.016	0.016	0.015	0.015	

그림 1. 연료봉 진동해석모델

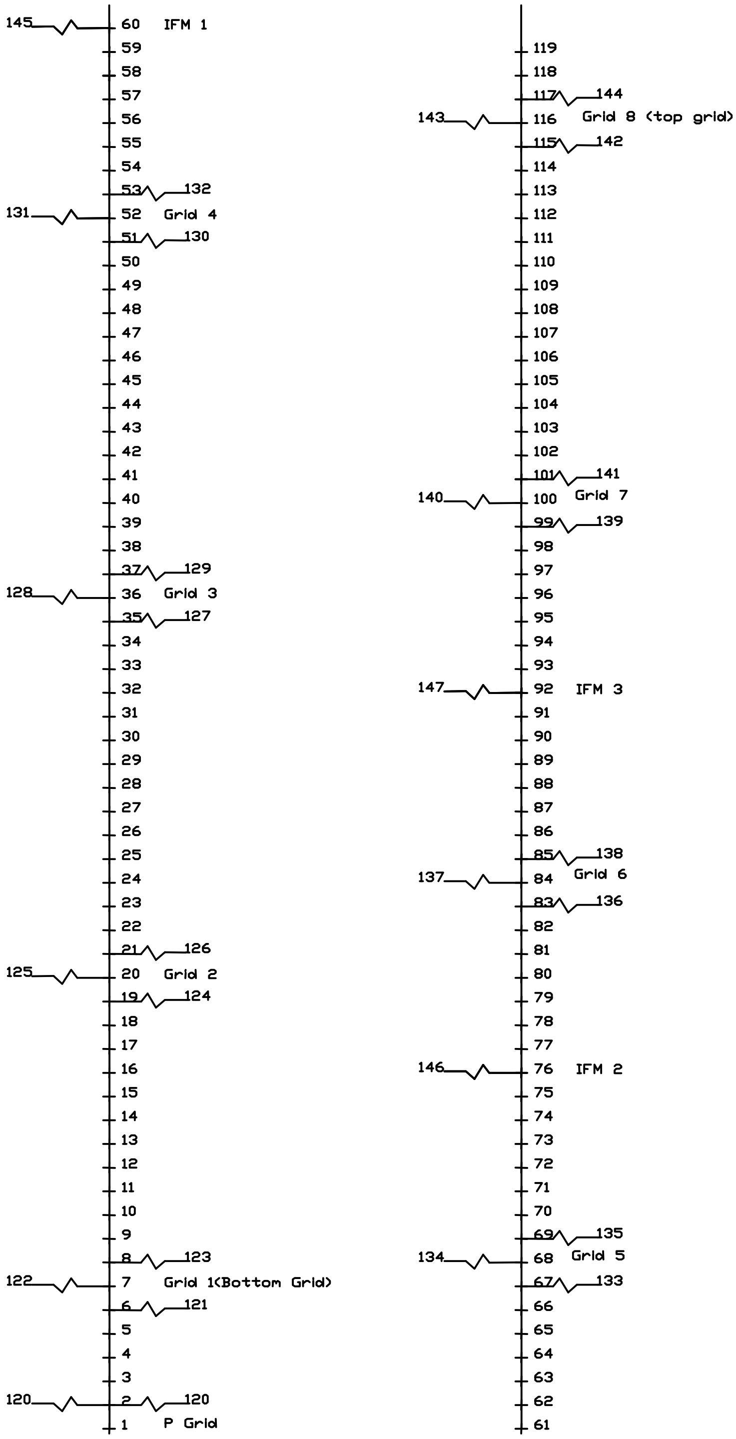


그림 2. 진동모드별 변위형태

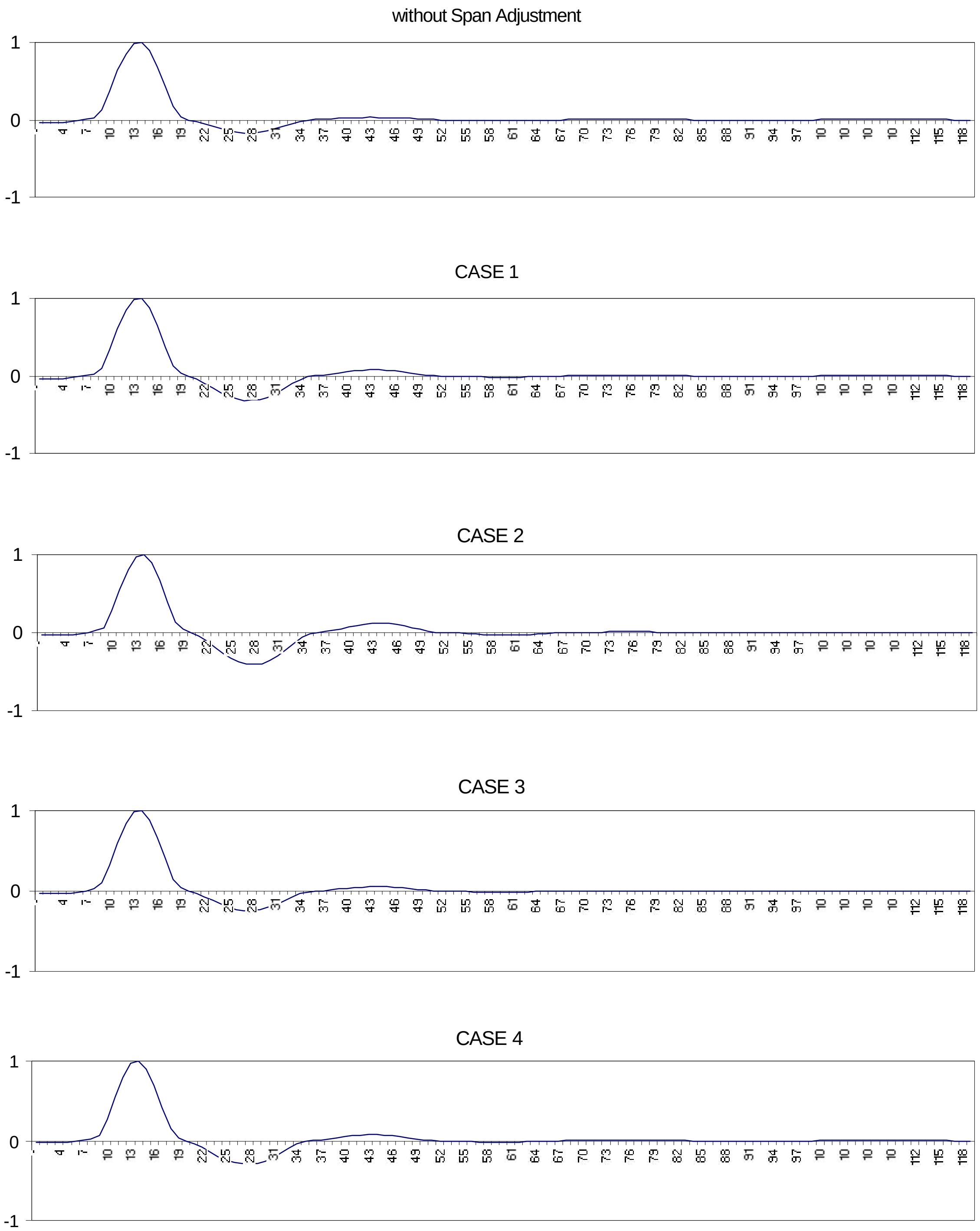
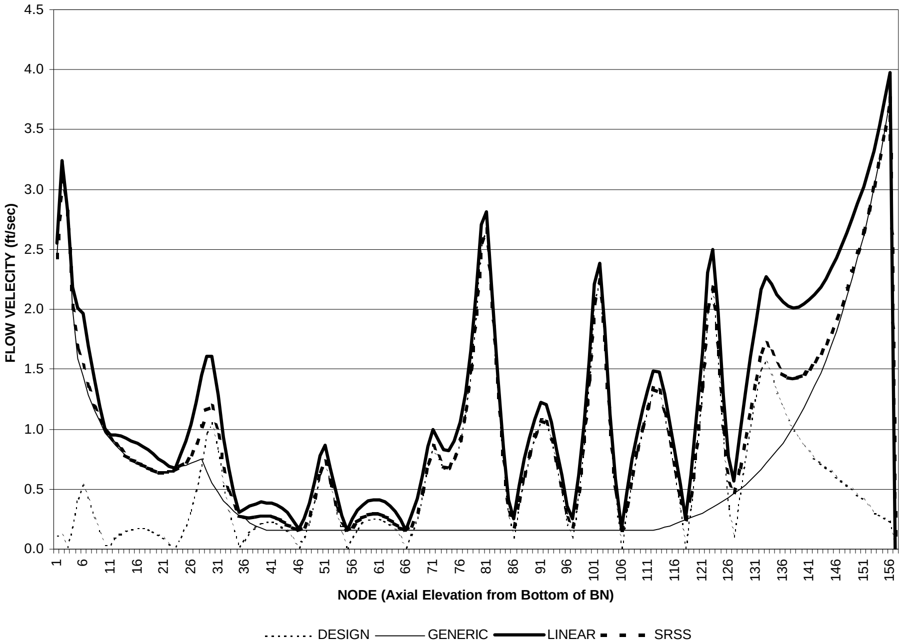


그림 3. 해석에 사용된 교차류와 축류 속도분포

교차류 속도 분포



축류 속도 분포

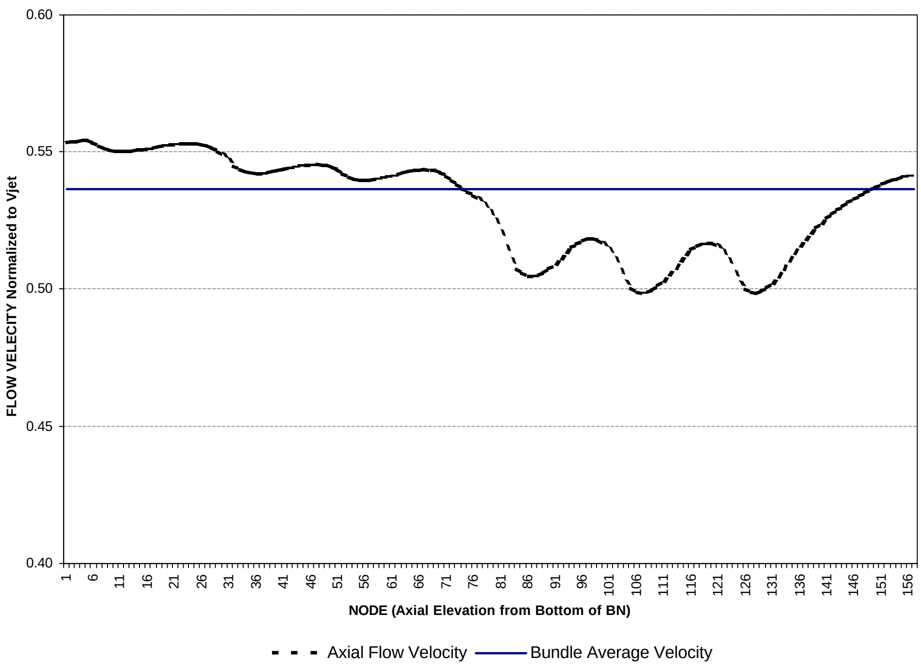
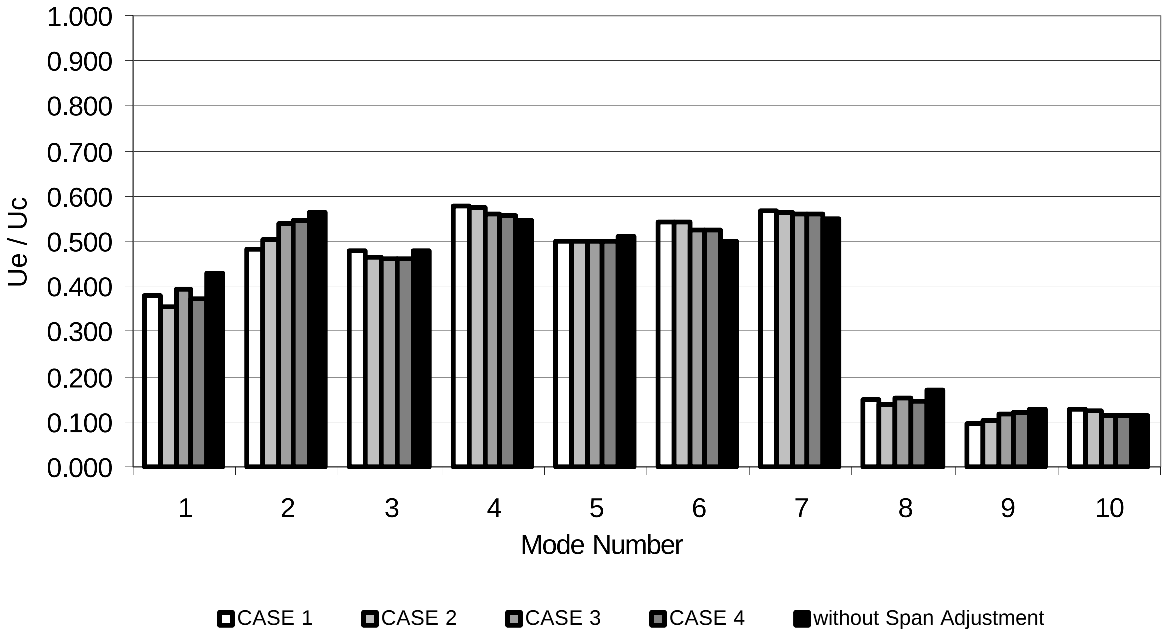


그림 4. 연료봉의 불안정성비와 진동 진폭

불안정성비 (Instability Ratio)



진동 진폭 (Vibration Amplitude)