

혼합노심 형상에 따른 지지격자 충격하중의 변화에 관한 연구

**Study on Spacer Grid Impact Load Variation
due to Mixed Core Configurations**

김정규, 성기광, 정승하, 송희갑, 최택상

한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

김규태

한전원자력연료(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

혼합노심은 기존의 노심과는 달리 서로 다른 설계 특성을 갖는 핵연료집합체들로 구성된다. 핵연료집합체의 설계 특성 변화는 작은 경우에도 심각한 충격하중을 유발할 가능성이 있으며, 이러한 하중의 크기는 노심의 건전성을 좌우하기 때문에 혼합노심에 대한 적절한 평가 방법은 매우 중요하다. 본 연구에서는 기존의 한국표준형원전 (KSNP) 노심에 지지격자 강성 및 고유진동수가 다른 핵연료집합체가 포함되는 경우를 가정하여 여러 가지 형태의 혼합노심 형상을 고려하였으며, 이에 전형적인 내진해석 방법을 적용하여 격자 충격하중을 계산하였다. 이를 통하여 설계 특성 변화에 따른 혼합노심의 하중 거동과 노심 형상에 따른 충격하중의 변화 경향을 평가하였다.

Abstract

A mixed core consists of various fuel assemblies with different design properties. Minor changes in fuel assembly properties can significantly affect the spacer grid impact loads of which magnitude may dominate the core structural integrity. Therefore, the mixed core should be appropriately evaluated with a systematic manner. This paper presents a study on sensitivities of impact loads to changes in fuel assembly design properties due to the mixed core configurations using the typical seismic analysis procedure. For this purpose, the various mixed core configurations are established by introducing fuel assemblies with different spacer grid stiffnesses and natural frequencies into the existing KSNP core.

1. 서론

노심을 구성하고 있는 핵연료집합체의 지지격자 (Spacer Grid)는 냉각수의 원활한 흐름을 위하여 일정한 간극 및 형상을 유지하도록 설계되어 있다. 그러나, 지진하중 (Seismic Loading)과 같은 가상적인 동적 하중이 작용하면 노심을 감싸고 있는 노심슈라우드나 주위에 있는 다른 핵연료집합체들과 서로 부딪치며 지지격자에는 큰 충격하중이 발생한다. 이러한 충격하중이 규정된 허용한계를 초과할 경우에는 지지격자의 변형으로 인하여 핵연료집합체는 냉각 가능한 기하학적 구조를 유지하지 못하기 때문에 노심의 냉각 성능 (Coolability)에 심각한 영향을 초래할 수 있으며, 나아가 노심의 건전성에 치명적인 손상을 야기할 수 있다.

과거에는 혼합노심 (Mixed Core)을 구성하는 핵연료집합체의 서로 다른 설계 특성이 충격하중에 미치는 영향은 무시되거나 매우 미미한 것으로 간주되었으며, 이에 대한 다양한 평가도 미흡한 형편이다. 최근 들어 혼합노심의 평가 방법에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있지만 아직까지는 체계화되어 있지 않으며, 평가 자료도 매우 부족한 상태이다. 기존의 노심 내진해석은 동일한 설계 특성을 갖는 핵연료집합체로 구성된 동종노심 (Homogeneous Core)에 대하여 수행되는 비선형 동적 해석이다. 서로 다른 설계 특성을 갖는 핵연료집합체들로 이루어진 혼합노심도 이와 동일한 내진해석 방법 및 절차를 통하여 수행되나, 노심 형상 (Core Configuration)에 따라 여러개의 입력 자료가 추가로 요구되며 보다 복잡한 후처리 과정을 거쳐야 한다.

본 연구에서는 혼합노심에 대한 기존의 평가 방법을^[1] KSNP 노심에 적용하며, 이를 위해 지지격자 강성 및 고유진동수가 다른 핵연료집합체가 포함된 총 10개의 혼합노심 형상을 고려한다. 혼합노심에 대한 해석은 KSNP의 내진해석 절차를 그대로 적용하여 수행되며, 해석 결과는 다음과 같이 크게 두 가지로 구분하여 평가한다. 우선은 서로 다른 혼합노심 형상에 대한 충격하중이 핵연료집합체의 설계 특성 변화에 따라 어떠한 영향을 받는지를 평가하고, 두 번째는 설계 특성이 다른 핵연료집합체의 수량은 동일하지만 배치 형태 (Mixing Pattern)가 서로 다른 혼합노심에 대한 충격하중의 변화를 비교한다.

2. 혼합노심에 대한 내진해석

2.1 혼합노심 형상

그림 1은 본 연구에서 이용된 KSNP의 15열 노심 모델을 나타내고 표 1은 이를 근거로 설정된 여러 가지 혼합노심의 형상들을 보여주고 있다. 여기서 Fuel A는 KSNP 노심에 사용된 기존의 표준 핵연료집합체를 나타낸 것이고 Fuel B는 지지격자 강성이나 고유진동수가 다른 핵연료집합체를 의미한다. 따라서, MC-1~MC-4까지는 기존의 KSNP 노심 (All-A)의 가운데부터 Fuel B의 수량을 차례로 증가시킨 혼합노심 형상이고, MC-2a/MC-2b, MC-3a/MC-3b, MC-4a/MC-4b 등은 MC-2~MC-4와 각각 동일한 수의 Fuel B를 포함하지만 서로 다른 배치 형태를 갖도록 고려된 혼합노심 형상을 나타낸다.

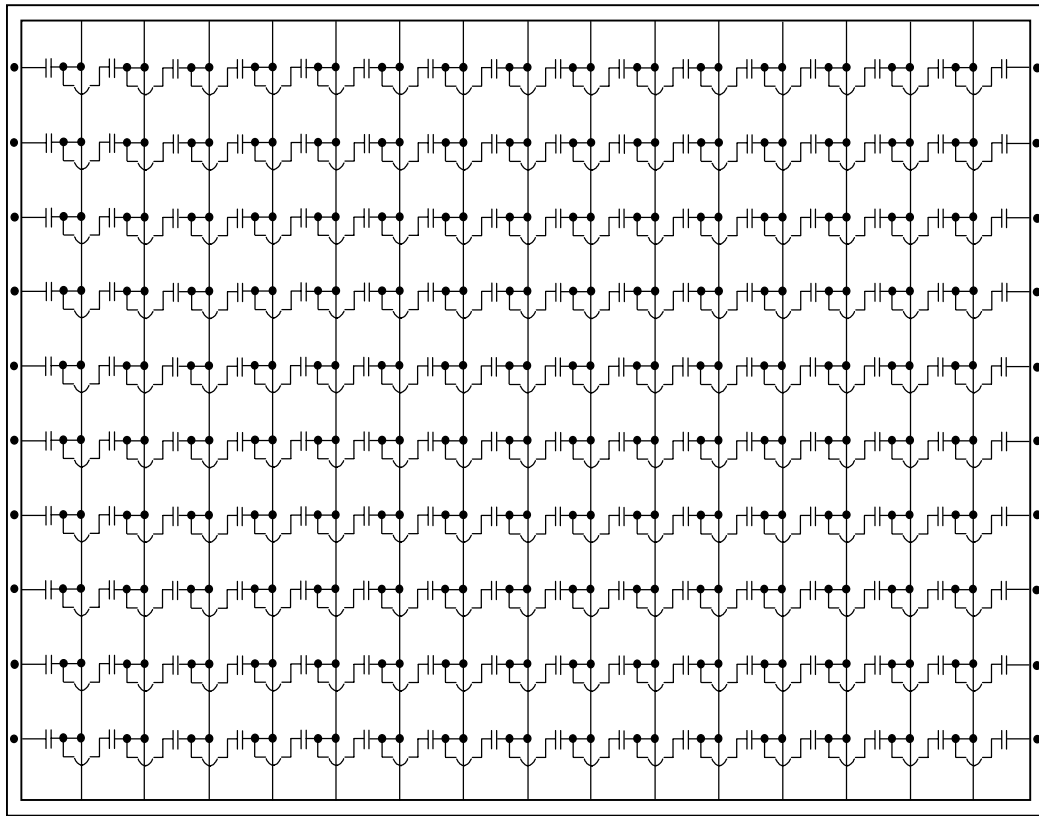


그림 1. KSNP 15열 노심 내진해석 모델

표 1. 혼합노심 형상

혼합노심 형상	15열 노심 배열															핵연료집합체 수량	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	A	B
All-A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	15	0
MC-1	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	14	1
MC-2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	12	3
MC-3	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	8	7
MC-4	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	4	11
All-B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	0	15
MC-2a	A	A	A	A	A	B	A	B	A	B	A	A	A	A	A	12	3
MC-2b	A	A	A	B	A	A	A	B	A	A	A	B	A	A	A		
MC-3a	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	8	7
MC-3b	A	B	B	A	A	A	B	B	B	A	A	A	B	B	A		
MC-4a	A	B	B	B	A	B	B	B	B	B	A	B	B	B	A	4	11
MC-4b	A	B	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B	B	B	A		

2.2 지지격자 강성 변경

기존 노심 모델의 충격은 이중의 하중 경로 (Dual Load Path)를 통하여 전달되는데, 첫 번째 형태는 단지 지지격자의 한쪽 면에만 하중이 가해지는 경우로서 노심의 최외각에 위치한 핵연료 집합체가 노심슈라우드를 칠 때, 혹은 두 개의 핵연료집합체가 서로 부딪칠 때 발생하는 하중으로 One-Sided 하중이라 한다. 두 번째 형태의 충격하중은 핵연료집합체가 노심의 한 방향으로 쏠릴 때 발생하며, 이 경우 지지격자는 압축하중을 받게되는데 이를 Thru-Grid 하중이라 한다^[2]. 핵연료집합체의 지지격자 강성은 이러한 두 가지 충격하중과 관계되는데, 이들을 각각 One-Sided 강성 (k_{one}) 및 Thru-Grid 강성 (k_{thru})이라 하며 핵연료집합체 충격시험, 지지격자 낙하시험 및 압축시험을 통해 결정된다^[3].

그림 2는 충격하중의 전달 경로를 나타내는 혼합노심의 지지격자 강성 모델이다. 여기서 k_{eff} 는 서로 다른 지지격자 강성을 갖는 Fuel A와 B가 접하고 있는 영역에 대한 유효 강성을 나타내며, G_1 및 G_2 는 각각 노심슈라우드와 핵연료집합체의 간극과 핵연료집합들간의 간극을 나타낸다. 지지격자 강성 변경과 관련된 혼합노심 해석은 크게 두 가지로 구분하여 수행되었는데, 첫 번째는 기존보다 약한 지지격자 강성을 갖는 핵연료집합체 (Fuel B₁)가 노심에 포함되는 경우이고, 두 번째는 보다 강한 지지격자 강성을 갖는 핵연료집합체 (Fuel B₂)가 노심에 포함되는 경우이다.

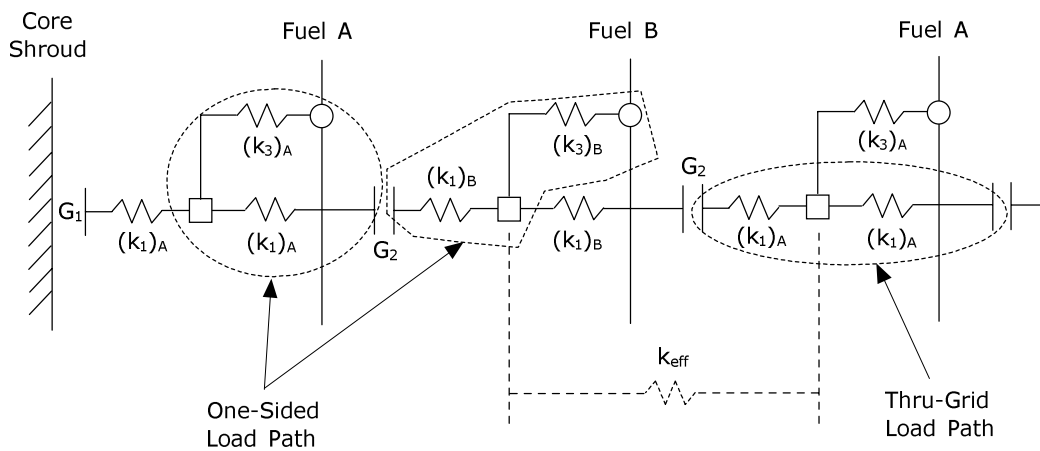


그림 2. 지지격자 강성 모델의 하중 전달 경로

2.3 핵연료집합체 고유진동수 변경

기존과 다른 고유진동수를 갖는 핵연료집합체를 포함한 혼합노심에 대한 해석 또한 두 가지로 구분하여 수행되었다. 첫 번째는 표준 핵연료집합체 (Fuel A) 보다 높은 고유진동수를 갖는 핵연료집합체 (Fuel B₃)가 포함되는 경우이고, 두 번째는 보다 낮은 고유진동수를 갖는 핵연료집합체 (Fuel B₄)가 포함되는 경우이다.

2.4 설계 특성 입력 및 내진해석

내진해석은 표 1에서 보는 바와 같이 총 10개의 혼합노심과 2개의 동종노심에 대하여 수행되었으며, 각각의 혼합노심 형상에 대하여 서로 다른 설계 특성을 갖는 네 종류의 핵연료집합체 (Fuel B₁/B₂/B₃/B₄)가 포함되도록 하였다. 표 2는 혼합노심의 평가를 위해 요구되는 모델의 입력 자료를 요약한 것으로써, 기존의 KSNP 노심 모델을 기준으로 정규화 (Normalization)한 것이다. Case #1은 기존의 지지격자 강성을 50% 감소시킨 핵연료집합체를 사용한 경우이고, Case #2는 50% 증가시킨 경우이다. 마찬가지로 Case #3 및 Case #4는 각각 표준 핵연료집합체의 고유진동수를 20% 증가시키거나 20% 감소시킨 경우로써, 이는 평가를 위해 임의로 설정하였다.

표 2. 혼합노심의 설계 특성 요약

핵연료집합체 설계 특성 항목		KSNP (Fuel A)	Case #1 (Fuel B ₁)	Case #2 (Fuel B ₂)	Case #3 (Fuel B ₃)	Case #4 (Fuel B ₄)
지지격자 강성	k _{one}	1	0.5	1.5	1	1
	k _{thru}	1	0.5	1.5	1	1
	k ₁	1	0.5	1.5	1	1
	k ₃	1	0.5	1.5	1	1
	k _{eff}	1	0.67	1.2	1	1
간극	CS/FA	G ₁	1	1	1	1
	FA/FA	G ₂	1	1	1	1
고유진동수		f ₁	1	1	1.2	0.8

* CS : 노심슈라우드, FA : 핵연료집합체, f₁ : 1차 고유진동수

3. 해석 결과 및 검토

3.1 지지격자 강성이 다른 핵연료집합체가 혼합되는 경우 : Case #1 및 Case #2

표 3은 지지격자 강성이 다른 핵연료집합체 (Fuel B₁ 및 B₂)가 기존 노심에 포함되는 경우의 내진해석 결과를 나타내며, KSNP 노심의 최대 충격하중을 기준으로 정규화된 것이다. 이 가운데 그림 3은 Fuel A 및 Fuel B를 포괄하는 전체 노심에서의 최대 충격하중을 나타내며, 그림 4는 Fuel B에 대한 충격하중 변화를 나타낸 것이다.

그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이, Case #1에서는 보다 약한 지지격자 강성을 갖는 Fuel B₁의 수량이 증가할수록 충격하중은 점점 감소하며, Case #2에서는 이와는 반대의 경향을 나타내는데, One-Sided 하중보다는 Thru-Grid 하중에서 보다 뚜렷한 비례 관계를 나타낸다. 그림 4에서는 두 가지 경우 모두 Fuel B의 수량 증가에 따라 충격하중도 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 그림 3에 비해 상대적으로 보다 선형적인 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 3. 지지격자 강성 변경에 따른 혼합노심 내진해석 결과

Core Config.	Mixed/All-A ⁽¹⁾				Mixed/All-B ⁽²⁾			
	Case #1		Case #2		Case #1		Case #2	
	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid
All-A	1	1	1	1	-	-	-	-
MC-1	0.92	1.04	0.98	1.14	0.79	0.84	0.68	0.53
MC-2	0.97	1.08	1.06	1.10	0.79	0.83	0.77	0.73
MC-3	0.98	0.98	1.02	1.36	0.70	0.85	0.78	0.83
MC-4	0.97	0.90	0.94	1.24	0.76	0.93	0.78	0.89
All-B	-	-	-	-	1	1	1	1

주 : (1) [Max. Impact Load in MC- #]/[Max. Impact Load in All-A]
 (2) [Max. Impact Load of Fuel B in MC- #]/[Max. Impact Load in All-B]

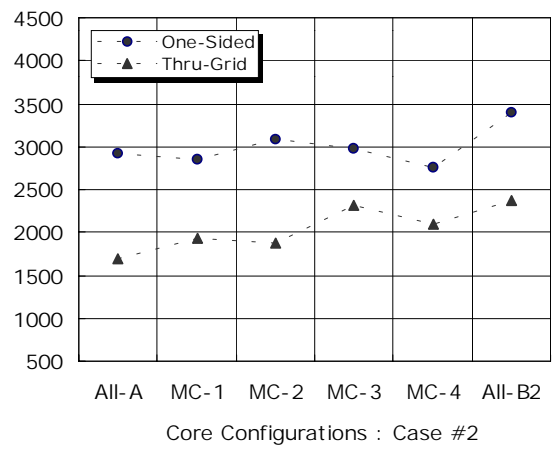
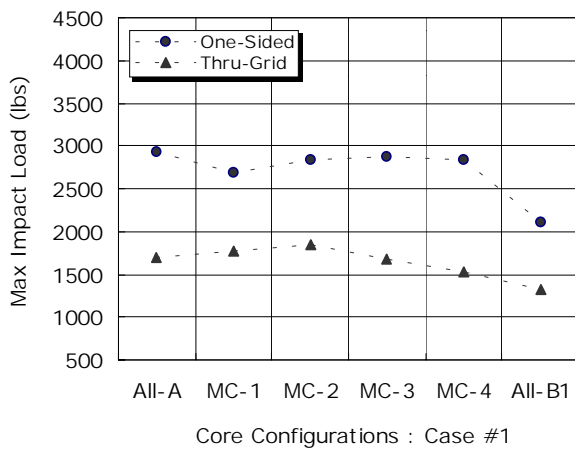


그림 3. 혼합노심의 최대 충격하중 변화 : Case #1 & Case #2

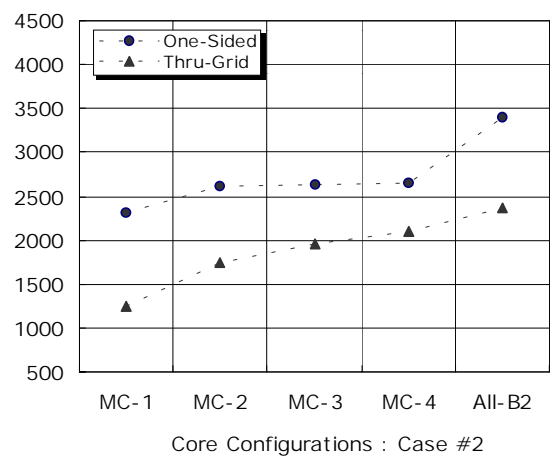
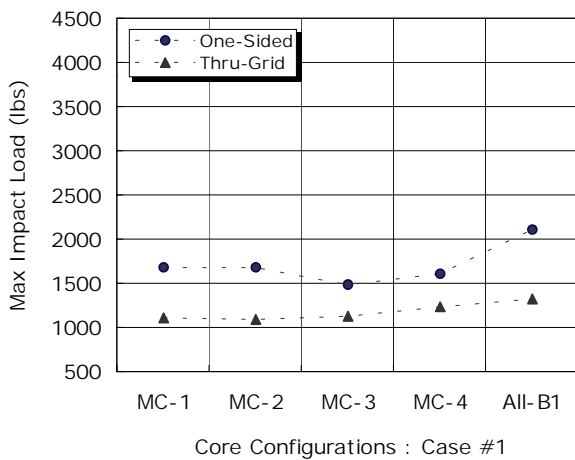


그림 4. Fuel B의 최대 충격하중 변화 : Case #1 & Case #2

표 4는 지지격자 강성이 다른 핵연료집합체 (Fuel B₁ 및 B₂)의 수량은 동일한 반면에 서로 다른 배열 형상을 갖는 혼합노심들에 대한 충격하중 변화를 나타내고 있으며, 각각 혼합노심 MC-2, MC-3 및 MC-4의 최대 충격하중을 기준으로 정규화된 것이다.

표 4에 따르면, 기존 보다 큰 지지격자 강성을 갖는 핵연료집합체가 포함되는 경우 (Case #2)에는 혼합노심의 배치 형태에 따른 충격하중 변화는 대체적으로 ±10% 이내로 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나, 보다 약한 지지격자 강성을 갖는 핵연료집합체가 포함되는 경우 (Case #1)에는 전체 노심에 대한 (Fuel A&B₁) 충격하중은 큰 변화가 없는 반면에, Fuel B에 대한 충격하중 변화는 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있다.

표 4. 혼합노심 배치 형태에 따른 충격하중 변화 : Case 1 & Case #2

Core Config.	Case #1				Case #2			
	Fuel A&B ₁		Fuel B ₁		Fuel A&B ₂		Fuel B ₂	
	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid
MC-2	1	1	1	1	1	1	1	1
MC-2a	0.99	0.92	1.04	1.09	0.97	1.02	0.90	0.96
Mc-2b	0.94	0.92	1.00	1.35	0.91	1.00	0.84	1.01
MC-3	1	1	1	1	1	1	1	1
MC-3a	0.98	0.88	1.14	1.20	1.01	0.89	0.95	1.05
Mc-3b	1.05	0.94	1.27	1.29	0.98	0.94	1.11	1.10
MC-4	1	1	1	1	1	1	1	1
MC-4a	1.01	0.92	1.21	1.15	1.06	1.05	1.04	1.05
Mc-4b	1.03	0.88	1.16	1.09	1.04	1.08	1.08	1.08

3.2 고유진동수가 다른 핵연료집합체가 혼합되는 경우 : Case #3 및 Case #4

표 5는 고유진동수가 다른 핵연료집합체 (Fuel B₃ 및 B₄)가 기존 노심에 포함되는 경우에 대한 내진해석 결과를 나타내며, KSNP 노심의 최대 충격하중을 기준으로 정규화된 것이다. 이 가운데 그림 5는 Fuel A 및 Fuel B를 포괄하는 전체 노심에서의 최대 충격하중을 나타내며, 그림 6은 Fuel B에 대한 충격하중 변화를 나타낸 것이다.

그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이, Case #3에서는 표준 핵연료집합체 보다 높은 고유진동수를 갖는 Fuel B₃의 수량이 증가할수록 충격하중은 점점 감소하며, Case #4에서는 보다 낮은 고유진동수를 갖는 Fuel B₄의 수량이 증가할수록 충격하중이 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나, 앞서 수행된 해석 결과와 비교해 볼 때, 핵연료집합체 고유진동수 변화에 따른 충격하중의 변화량은 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 6에서는 Case #1 및 Case #2에서와 마찬가지로, 두 가지 경우 모두 Fuel B의 수량 증가와 더불어 충격하중이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

표 5. 고유진동수 변경에 따른 혼합노심 내진해석 결과

Core Config.	Mixed/All-A ⁽¹⁾				Mixed/All-B ⁽²⁾			
	Case #3		Case #4		Case #3		Case #4	
	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid
All-A	1	1	1	1	-	-	-	-
MC-1	0.98	0.98	1.00	0.97	0.74	0.70	0.64	0.68
MC-2	0.96	1.07	0.96	1.01	0.76	0.77	0.66	0.73
MC-3	0.94	0.99	1.02	1.08	0.76	0.87	0.67	0.87
MC-4	0.82	1.04	1.00	1.12	0.79	1.08	0.72	0.99
All-B	-	-	-	-	1	1	1	1

주 : (1) [Max. Impact Load in MC- #]/[Max. Impact Load in All-A]
 (2) [Max. Impact Load of Fuel B in MC- #]/[Max. Impact Load in All-B]

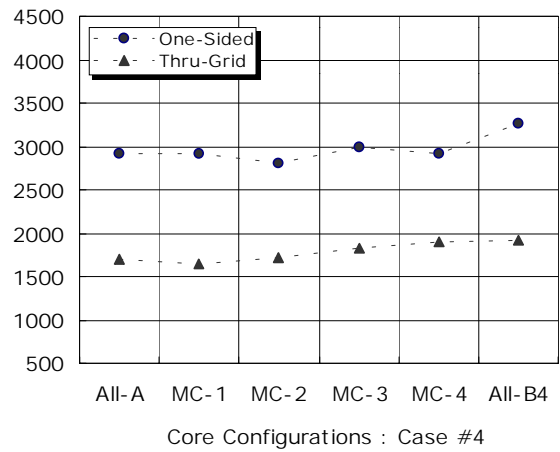
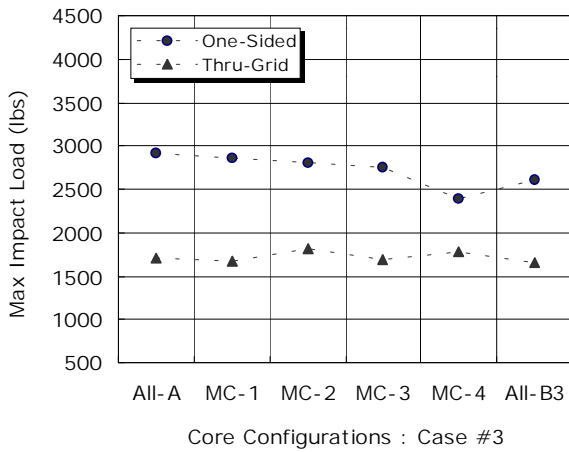


그림 5. 혼합노심의 최대 충격하중 변화 : Case #3 & Case #4

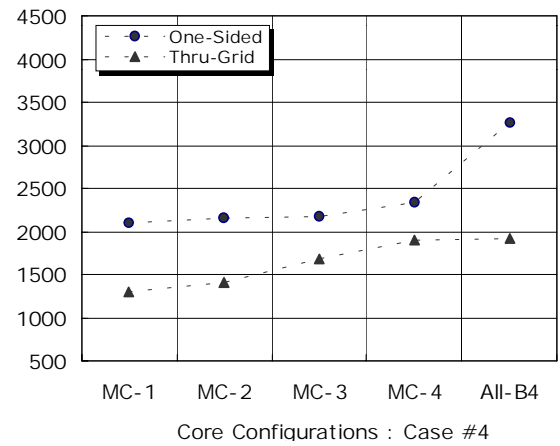
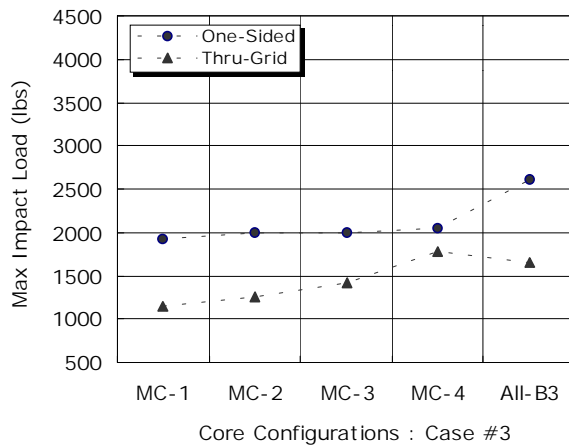


그림 6. Fuel B의 최대 충격하중 변화 : Case #3 & Case #4

표 6은 고유진동수가 다른 핵연료집합체 (Fuel B₃ 및 B₄)의 수량은 동일한 반면에 서로 다른 배치 형태를 갖는 혼합노심들에 대한 충격하중 변화를 나타내고 있으며, 각각 노심 MC-2, MC-3 및 MC-4의 최대 충격하중을 기준으로 정규화된 것이다. 표 6에 따르면, 기존 보다 고유진동수가 높거나 낮은 핵연료집합체가 포함되는 노심 배치 형태와 상관없이 전체 노심에 대한 (Fuel A&B) 충격하중은 대체적으로 ±10% 이내로 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 반면에, 보다 높은 고유진동수를 갖는 핵연료집합체가 포함되는 경우 (Case #3), Fuel B에 대한 충격하중은 상대적으로 크게 변한다는 것을 확인할 수 있다.

표 6. 혼합노심 배치 형태에 따른 충격하중 변화 : Case #3 & Case #4

Core Config.	Case #3				Case #4			
	Fuel A&B ₃		Fuel B ₃		Fuel A&B ₄		Fuel B ₄	
	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid	One-Sided	Thru-Grid
MC-2	1	1	1	1	1	1	1	1
MC-2a	1.02	0.97	1.09	1.18	1.01	1.01	1.01	1.12
Mc-2b	1.05	1.04	1.07	1.25	1.01	1.04	0.97	1.26
MC-3	1	1	1	1	1	1	1	1
MC-3a	1.00	1.12	1.24	1.32	1.00	0.98	1.12	1.07
Mc-3b	0.86	1.16	1.19	1.31	1.02	1.00	1.05	1.09
MC-4	1	1	1	1	1	1	1	1
MC-4a	1.03	1.10	1.10	1.10	1.00	0.98	1.02	0.98
Mc-4b	0.99	1.05	1.03	0.97	1.03	1.00	1.03	1.00

4. 결론

이상과 같이 여러 가지 혼합노심 형상에 따른 내진해석 결과를 비교, 검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다 ;

- 표준 핵연료집합체 보다 약한 지지격자 강성을 갖거나 높은 고유진동수를 갖는 핵연료집합체가 기존 노심에 포함되는 경우에는, Fuel B의 수량 증가에 따라 노심 전체의 충격하중은 감소하며, 기존 보다 강한 지지격자 강성을 갖거나 낮은 고유진동수를 갖는 핵연료집합체가 포함되는 경우에는 이와 반대의 경향을 나타낸다.
- 기존 노심에 포함되는 핵연료집합체의 충격하중은 설계 특성의 증감 변화와는 무관하게 Fuel B의 수량 증가에 따라 대부분 증가하는 경향을 나타낸다.
- 지지격자 강성 또는 고유진동수가 다른 핵연료집합체의 수량이 동일한 경우, 배치 형태의 차이는 혼합노심의 전체 충격하중에는 큰 영향을 미치지 않는 반면에, Fuel B의 충격하중은 배치 형태의 차이에 따라 상대적으로 큰 변화를 나타낸다.

5. 참고문헌

- [1] D.F. Baisley & M.A. Johnson, "Reload Fuel Mixed Core Seismic and Pipe Break Analyses", Transactions of SMiRT-15, Seoul, Korea, Aug. 1999.
- [2] 영광 5,6호기 예비안전성분석보고서 (PSAR), 3.7.3.14.1절, 한국전력공사, 1997. 11.
- [3] M.A. Johnson, "Impacting of Fuel Assemblies in a Horizontal seismic Analysis of a Reactor Core", ASME Paper 83-NE-8, 1983.

Acknowledgment

본 연구 과제는 과기부 원자력연구 중장기 개발사업의 일환으로 한전원자력연료(주)가 추진하고 있는 한국표준형원전용 개량 핵연료 개발 사업의 위탁과제로 수행하였음.