2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다중 스프링형 및 바가지형 지지격자체의 충격해석

Impact Analysis of Dipper-type Fuel Rod Support Grid Assembly and Multi Spring-type Fuel Rod Support Grid Assembly

송기남, 윤경호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

최성규*, 강병수, 박경진
한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

요약

원자로의 비정상적인 운전상태에 대비하여 원자로용 지지격자체의 기계적 건전성을 검증하기 위한 수치해석용 모델을 개발하였다. 격자체가 견딜 수 있는 최대 임계하중을 실험을 통해 얻었고, 이를 토대로 모델을 개발하였으며 그 개발 과정에서 고려해야 하는 사항들에 대해 언급하였다. 개발된 모델을 이용하여 비선형해석을 수행한 결과를 나타내고 그에 대해 고찰하였다.

Abstract

In this paper, a simulation model for strength of a fuel rod support grid assembly under impact load was developed. The critical impact load that leads to a plastic deformation of a fuel rod support grid assembly was identified via field test. Based on the critical impact force from field test, an FE simulation model was developed. A few notices on developing the FE model were introduced. The results of nonlinear FE analysis using the developed model and the additional discussions are also represented.

1. 서론

경수로형 원자로(Pressurized Light Water Reactor; PWR)내의 핵연료집합체는 상단 고정체, 하단 고정체, 안내관, 지지격자체로 구성되어져 있으며 지지격자체는 핵연료봉을 고정시켜주는 중요한 기능을 하고 있다. 세장비(slenderness ratio)가 큰 핵연료봉은 상단 고정체와 하단 고정체 사이에 위치한 8-11개의 지지격자체가 지지하는 것이 전부이다. 지진이나 냉각재 상실사고와 같은 비정상 운전 시에 발생하는 충격은 대부분 지지격자체가 감당하게 된다.

* ㈜한국철도차량

이런 이유에서 지지격자체에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며, 많은 개선이 이루어졌다.[1]

1968년부터 1993년까지 미국 특허청에 공고된 지지격자체 관련 특허 총 137 종을 조사한 결과 92%는 미국, 프랑스 및 독일의 원자력 회사들이 출원한 것이며 가까운 일본의 경우도 8건 출원한 상태이다.[2] 조사한 특허는 크게 기계 구조적인 내용과 열수력적인 내용으로 나눌 수 있었다. 내용을 살펴보면 재질 관점, 제조성 향상 관점, 지지격자체의 형상 관점 등으로 개발되어 왔음을 알 수 있었다. 대표적인 재질 관점의 연구는 1979년 Walton의 연구[3]가 있으며 지지격자체의 형상 관점에 대해서는 1982년 Larson의 연구[4]와 1999년 장인권의 연구[5]가 있었다.

한편, 비정상 운전시에 원자로의 안정적인 운용을 위해서는 제어봉의 삽입경로가 반드시 확보되어야 하고, 냉각수로를 이용한 열전달 기능의 저하와 연료봉의 파손도 최소화해야 한다. 이를 위해서는 외부에서 오는 충격 하중에 대해 지지격자체의 기계적인 영구변형이 최소화되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기계/구조적인 측면에서 지지격자체의 건전성을 평가하기 위하여 현재 시제품으로 개발 중인 지지격자체의 수치해석용 모델을 개발하였다. 또한 이를 바탕으로 향후에 발생할 시제품의 설계변경으로 인한 추가적인 실험비용의 최소화와 설계경향의 파악을 도모할 수 있을 것이다. 본 연구를 위한 실험은 외부 기관에 의뢰하여 그 결과를 얻었으며, 해석을 위해서는 explicit code로 구현되어 비교적 신속한 비선형 해석이 가능한 LS-DYNA3D[6]가 사용되었다.

2. 지지격자체의 충격 실험

개발중인 시제품의 수치해석용 모델의 성취도는 대상 지지격자체의 실제 거동과 수치해석 모델의 해석상 거동과의 유사성이 그 척도가 될 것이다. 따라서 모델의 기준이 되는 시제품의 시험은 필수적이며, 특히 실험의 정확성과 실험 결과의 검증, 그리고 지지격자체의 거동을 대표할 수 있는 평가항목 선정의 합리성이 매우 중요하다. 본 논문에서의 대상 지지격자체의 시험 평가 항목은 임계하중이다. 임계하중이란 지지격자체에 가해지는 충격력을 지지격자체가 견디는 정도를 대변하는 것으로 본 논문의 시험과 해석에서 사용한 임계하중의 정의는 다음과 같으며, 그림 1 의 A 지점을 의미한다.

임계하중의 정의 : 점진적으로 증가하는 충격력에 대해, 지지격자체의 변형 중 소성 변형이 지배적인 거동이 되어 격자체의 소성 붕괴가 일어나는 시점이 있으면, 그 소성 붕괴 시점 직전에 격자체에 가해진 충격력.

이 정의에 의한 임계하중을 평가항목으로 결정하여 현재 개발 중인 바가지형과 다중 스프링형 지지격자체의 내충격력 실험을 수행하였다. 실험 장치의 대략적인 개요는 그림 2와 같다. 그림 2에서처럼 측면에서 충격하중을 받는 지지격자체의 충격시험을 위해 낙하

표 1. 격자체의 물성치

Classification	Elastic				Plastic	
	E(GPa)	$ó_v$(MPa)	ñ(kg/m³)	õ	ó(MPa)	å
Zircaloy-4	105.15	328.0	6550	0.294	328.0 443.0	0.0 0.3400
※ 해석 시 사용되는 단위: mm , msec , Kg , KN , GPa , KN-mm						

형태의 충격시험기를 설정하였다. 낙하 높이가 높아짐에 따라 충격속도가 커져 충격력이 증가하기 때문에, 일정한 높이에서 충격시험을 시작하여 낙하높이를 일정한 높이씩 증가시켜 충격력을 증가시키면서 임계하중을 얻을 때까지 이러한 시험 과정을 반복하였다. 실험대상 지지격자체의 물성치는 표 1에 나타내었다.

3. 수치해석 모델 개발

실험결과를 바탕으로 바가지형 지지격자체와 멀티 스프링형 지지격자체의 비선형해석을 위한 각각의 유한요소 모델을 개발하였다. 개발된 유한요소 모델은 그림 3과 그림 4에서 볼 수 있으며, 개발 과정에서 특기할 사항으로는 다음과 같은 것들이 있다.

3.1 용접부 처리

그림 3에서 보는 바와 같이, 격자체는 내부에서 연료봉을 직접 지지하는 격자들과 이 격자들을 둘러싸는 외판으로 구성되어 구조적으로는 비교적 단순하다. 그러나 그 구조적 단순함과는 관계없이, 격자들과 외판 사이의 용접 부위와 격자판들의 교차 지점들에서의 용접 부위를 유한요소 모델로 표현하는 것은 매우 난해한 작업이다. 이 점을 해결하기 위해서는 그 용접 부위와 관련된 실험데이터에 의존하는 특정 소프트웨어의 특정 유한요소를 사용할 수 있다. 그러나 정확한 실험데이터를 얻는 것이 현실적으로 매우 어렵고 다른 해석 소프트웨어와의 호환성을 염두에 둔다면, 이는 결코 바람직한 해결책이 아니다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 비선형 유한 요소해석에서 일반적으로 사용되는 유한요소로써 용접부를 처리하려고 하였다. 수 차례의 시행착오를 거친 결과, 그림 5에서 보는 바와 같이 격자판들의 교차 지점에서는 교차 지점의 양끝의 절점 2개를 공유하도록 하였다. 외판과 격자사이의 용접부는 모든 절점들을 공유하는 것으로 처리하였다.

3.2 접촉부 처리

접촉의 형태는 물체들간의 운동에 의한 접촉, 구조물의 붕괴 과정에서의 접촉 등이 있다. 격자체의 해석과정에는 소성 붕괴가 포함되므로 구조물의 붕괴 과정에서 일어나는 격자판들의 접촉을 고려하여야 한다. 접촉을 고려한다는 것은 구체적으로 두 가지를 염두에 두는 것이다. 첫째는 두 물체가 접촉하였다가 분리되는 과정이 반복될 수 있다는

것을 고려하여 접촉면을 탐색하는 것이고, 둘째는 어떠한 배치에서도 두 물체가 서로를 관통할 수 없다는 불침투 조건을 적용하는 것이다.

일반적으로 접촉면을 탐색하기 위해서는 Hallquist등이 제안한 주종탐색법(Master-slave method)과 Belytschko등이 제안한 Pin ball 알고리즘 등이 있다. 본 연구에서는 주종탐색법을 사용하였다. 불침투조건을 위해서는 Lagrange 승수법과 벌칙함수법이 있으며, 두 방법은 해의 정확성과 계산의 효율성의 측면에서 각각 장점을 가지고 있다. 벌칙함수법은 어느 정도 계산의 정확성을 확보하면서 효율성면에서 Lagrange승수법에 비해 더 우수한 것으로 보고되고[7] 있으므로, 본 연구에서는 벌칙함수법을 사용하였다. 불침투 조건을 적용하기 위해 지지격자체 내부에서 접촉부로서 고려하여야 하는 곳은 그림 6과같이 격자판과 격자판이 교차하는 위치이다. 여기서는 절점 대 접촉면(node to surface)로서 접촉부를 정의하였다.

3.3 충격력

실제 실험에서는 격자체에 가해지는 충격력에 변화를 주기 위해 충격 해머의 낙하 높이를 변화시켜 해머가 격자체에 닿는 순간의 속도를 변화시킨다. 따라서 그림 7과 같이 수치해석에서는 해머가 격자체에 닿기 직전의 속도를 직접 지정하여 실제 실험과 동일한 충격력을 얻을 수 있다. 이 경우 해머는 강체로 가정되어 해석에서는 강체구로 모델링되었다.

4. 해석 결과 및 고찰

완성된 유한요소 모델을 사용하여 충격해석을 수행하였으며 그 결과는 표 2와 같다. 여기서 실험값은 다수의 실험 결과의 평균값이다. 바가지형 지지격자체의 실험결과와 해석결과의 오차가 비교적 큰 것을 볼 수 있다. 이에 대해서는 대략 네 가지 정도를 고려해 볼 수 있다. 첫째, 용접부에 대해서 수치해석 모델측면에서는 용접부의 정확한 모델링이 이루어지지 않은 것으로 생각할 수 있고, 실제 모델측면에서는 용접부위의 불량을 생각해 볼 수 있다. 둘째, 실제 실험에서는 하나의 동일한 격자체를 사용하여 임계하중을 얻기까지 반복해서 충격하중을 가한다. 따라서 격자체의 소성붕괴가 일어나기 전에도 이미

표 2. 유한요소 수치해석결과와 실험결과와의 비교

타입	바가지형		멀티 스프링형	
	임계하중 (N)	임계속도 (m/sec)	임계하중 (N)	임계속도 (m/sec)
실험	3902.5	0.48	3866.3	0.48
수치해석	6308.4	0.42	4912.3	0.36
오차(%)	61.6	-12.5	27	-25.0

국부적으로 소성변형이 일어나 있으며, 반복적인 충격하중에 의한 용접부의 변형 등의 구조물의 국부적인 변형이 실제로 존재한다. 즉, 실제 실험에서는 임계하중을 얻는 시점에서 그 구조물은 이미 어느 정도 결함이 있는 상태라고 할 수 있다. 그러나 수치해석에서의 충격해석은 증가하는 매 충격하중마다 새로운 격자체를 쓰는 것과 같은 효과이기 때문에 실제 실험보다 임계하중이 다소 큰 것은 타당한 것으로 사료된다. 셋째, 실험에 사용된 격자체 제작상의 부정확성을 들 수 있다. 사용된 시험 격자체는 대량 생산을 위한 공정이 완성되지 않았고 단지 실험을 위해서 극소량을 수공 제작한 것이므로, 실제 설계 도면과 일치하지 않을 수도 있다. 넷째, 해석 모델의 탄소성 변형에 관계된 물성치의 부정확성도 해석과 실험의 불일치에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 아울러, 현장 실험 자체의 유효성 검증을 위한 활동도 실험 시 동시에 이루어져야 한다. 외부에 의뢰하여 얻은 실험 결과 중의 일부에는 운동량보존이 성립되지 않는 등의 물리적으로는 설명이 불가능한 현상들이 다소 포함되어 있었다.

격자체의 응력과 변형에 관한 시간이력의 일부를 그림 8에 나타내었다. 그림 8은 충격하중이 가해진 후 0.002초가 지난 후의 응력분포 및 변형형상과 0.01초가 지난 후의 응력분포 및 변형형상을 보여 준다. 여기서 0.002초일 때는 탄소성변형에 의해 큰 응력이 발생하다가 0.01초에는 탄성복원이 되지 않은 영역이 그대로 영구소성변형된 영역으로 남아 잔류응력을 형성하고 있음을 볼 수 있다. 변형형상도 실험결과와 같이 중앙부에서 영구변형이 크게 일어났다.

5. 결론

지진과 같은 예상하지 못한 외부하중에 노출된 지지격자체의 구조적인 건전성을 평가하고 나아가 향후 발생할 설계변경에 대한 신속한 설계결과를 얻기 위해, 현재 개발 중인 바가지형 지지격자체와 다중 스프링형 지지격자체의 비선형 유한요소 해석모델을 개발하였다. 실험을 통해 구조적 건전성을 대표하는 기능적 항목을 먼저 확인하고 이를 바탕으로 유한요소모델을 개발하여 실험과 그 결과를 비교하였다. 모델을 개발하는 과정에서 용접부와 접촉부를 처리하였으며 바가지형 격자체의 임계하중에서 실험결과와 해석결과가 다소 큰 차이를 보였다. 그 이유로는 용접부의 부정확한 모델링, 실험환경과 수치해석환경의 근본적인 차이에서 오는 오차, 시험된 지지격자체 자체의 제작상의 불완전성 등을 생각할 수 있다.

구조물의 수치해석용 모델링은 실제 실험 횟수를 줄여 개발비용을 절감할 수 있는 대표적인 방법이다. 본 연구를 통하여 개발된 수치해석용 모델을 이용하여 What-if study를 한다면 설계경향에 대한 정보를 적은 비용으로 신속하게 얻을 수 있을 것이다. 또한 최근 비교적 잘 개발되어 있는 최적설계 프로그램과 연결한다면 단기간에 좋은 설계 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음

참 고 문 헌

[1] **정연호**, **경수로용 신형핵연료 개발**, KAERI/RR-2015/99, **한국원자력연구소**, 1999.

[2] **김형규**, **지지격자체 관련 미국 특허 분석**, KAERI/TR-867/97, **한국원자력연구소**, 1997.

[3] L.A. Walton, "Zircaloy Spacer Grid Design," *Transactions of the American Nuclear Society*, vol.32, pp. 601-602. USA, 1979.

[4] J.G. Larson, "Optimization of The Zircaloy Spacer Grid Design," *Transactions of the American Nuclear Society*, vol 43, pp. 160-161. USA, 1982.

[5] **장인권**, "**접촉응력해석을 통한 핵연료 지지격자 구조물의 최적설계**," **한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문**, 1999

[6] Hallquist, J.O., "DYNA3D User's Manual", Livermore Software Technology Corporation, 1990

[7] Hallquist, J.O., "Theoretical Manual for DYNA3D", Livermore Software Technology Corporation, 1990

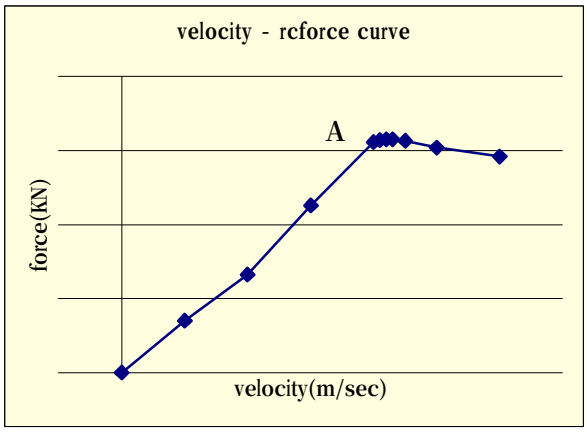


그림 1. 임계하중의 결정

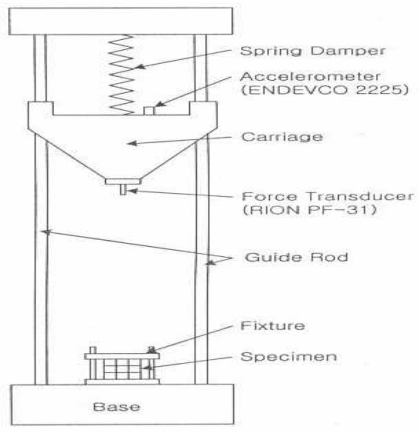


그림 2. 자유낙하 시험 장치

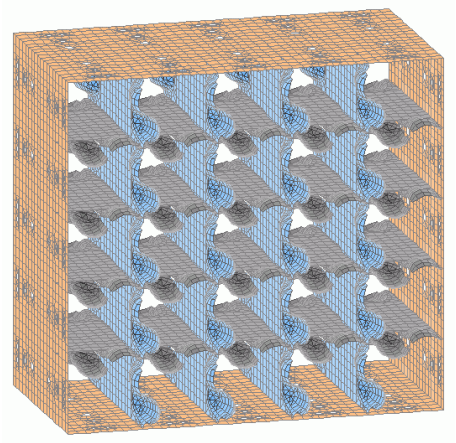


그림 3. 바가지형 지지격자체의 유한요소 모델

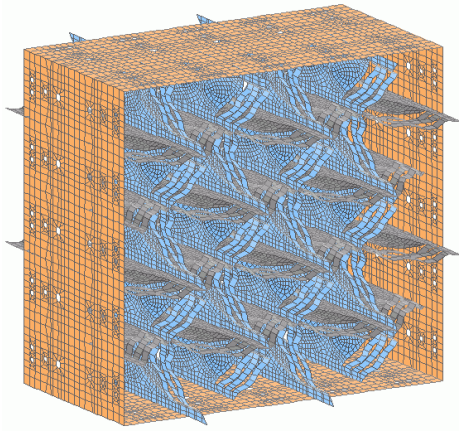


그림 4. 다중스프링형 지지격자체의 유한요소 모델

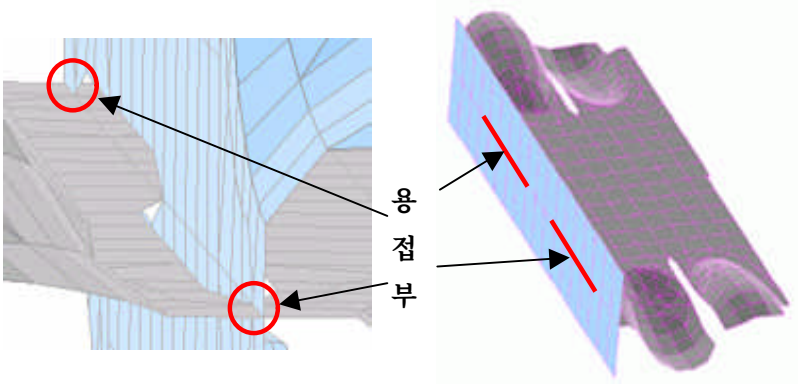


그림 5. 용접부의 처리

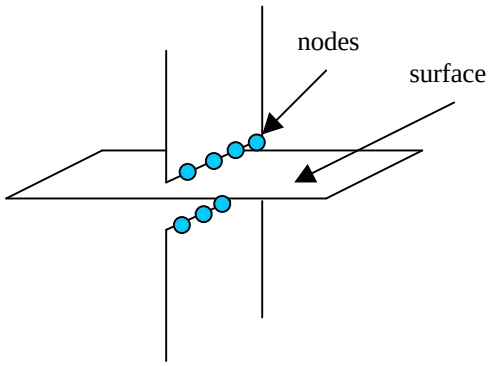


그림 6. 접촉부의 처리
–node to surface contact

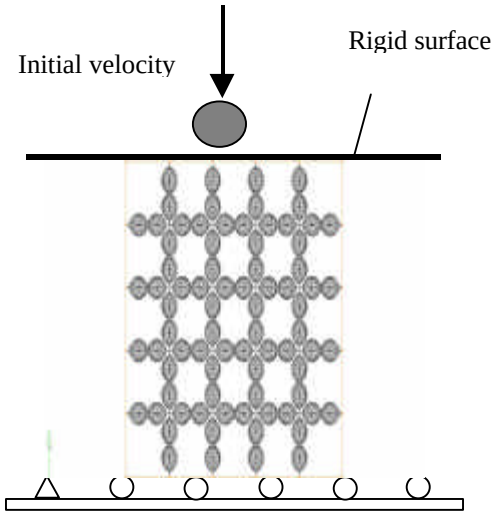
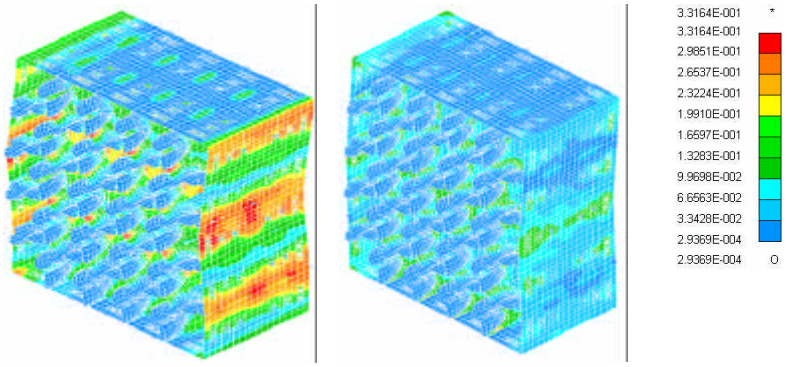


그림 7. 외부 충격하중의 처리



(a) at 2 msec (b) at 10 msec

그림 8. 바가지형 격차제의 Von Mises Stress