2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

최적설계 기법을 적용한 하부지지구조물의 용접변형 최소화에 관한 연구

Study on Minimization of Weld Deformation for Lower Support Structure by Application of Design Optimization Technique

박건우, 김정규, 문종성, 배재현, 조연호

한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로내부구조물중 하나인 하부지지구조물은 원통, 지지보 및 평판등으로 구성된 용접구조물이다. 따라서 하부지지구조물을 제작하기 위해서는 용접으로 인한 변형을 보정하면서 진행하기 때문에 긴 기간이 소요된다. 본 연구에서는 ANSYS 프로그램의 최적화 모듈을 이용하여 지지보에 대하여 최적설계를 수행하였으며 이를 통하여 용접변형을 최소화하고자 하였다. 최적설계 결과 지지보에 뚫려있는 원형구멍을 타원형으로 변경하였다. 설계변경후 구조물의 건전성을 유지하면서도 용접길이는 감소하였으며 이로 인하여 용접변형이 최소화될 것으로 기대된다.

Abstract

The lower support structure (LSS) is assembled by welding of the cylinder, grid beams and plates. So, assembling the LSS takes long period to compensate the weld deformation. In this paper, a optimal design for the LSS grid beam is performed to minimize weld deformation using the ANSYS optimization module. For this purpose, the size and type of grid beam holes are considered as design variables to demonstrate the change of weld length after optimization. The results show that the LSS weld length can be reduced so that the weld deformation is expected to be minimized.

1. 서 론

하부지지구조물은 그림 1 에 도시 되어 있는 것처럼 핵연료집합체와 노심슈라우드를 지지하고 노

내계측기 노즐들을 정렬시키는 구조물로서 계란 상자형의 지지보 집합체와 이를 둘러싸고 있는 짧은 원통으로 구성되는 용접 구조물이다.
하부지지구조물은 내부식성 및 중성자 조사에 의한 취화를 고려하여 스테인레스강으로 제작된다. 특히 지지보가 교차되는 부분은 모두 용접작업으로 이루어지기 때문에 용접변형이 많이 발생하게 되는데, 이를 보정하기 위해서는 긴 제작기간이 소요된다.
따라서 본 연구에서는 하부지지구조물 제작시 빈번히 발생하는 용접변형을 최소화하기 위하여 ANSYS[1] 프로그램을 이용한 최적설계를 수행하였다.

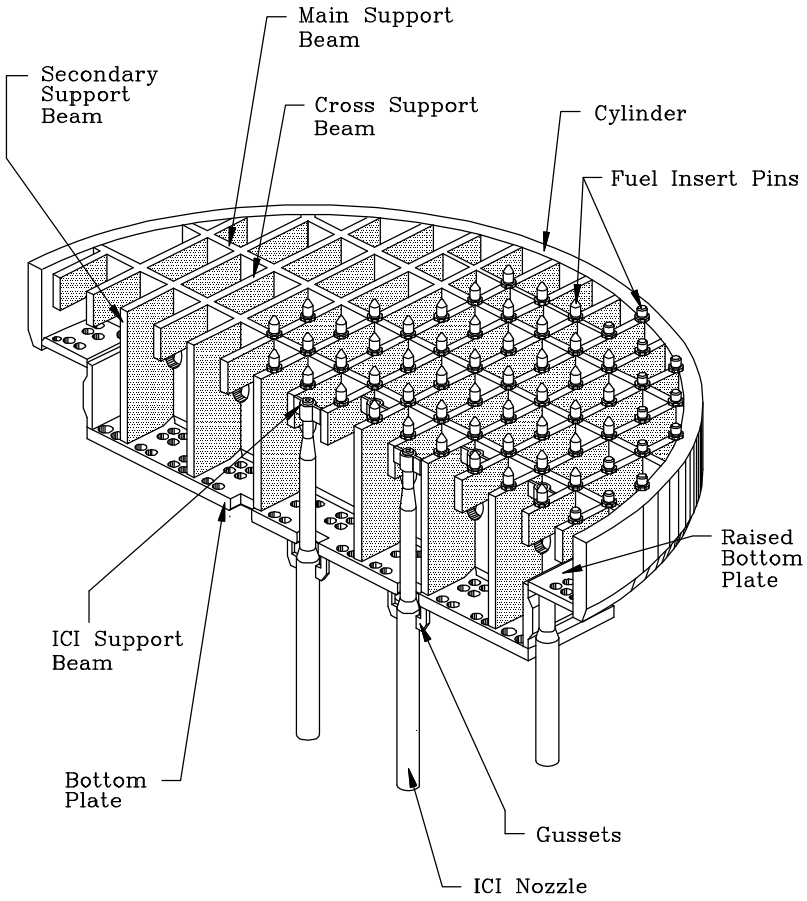


그림 1. 하부지지구조물

2. 최적설계 기법의 적용

2.1 최적설계 대상 부품 선정

최적설계 대상 부품을 선정하기 위해서는 우선 다음과 같이 대상 부품의 설계변경이 용이한지 여

부를 평가하여야 하며, 이러한 설계변경이 연계 분야 및 구조물의 건전성에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

2.1.1 핵연료집합체 삽입핀

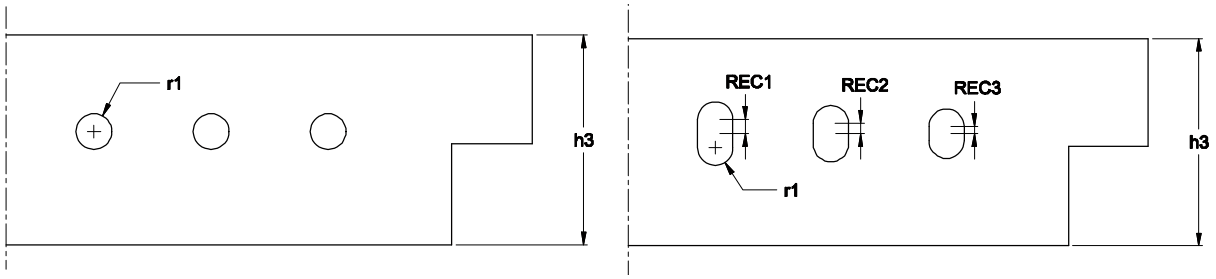
기존의 핵연료집합체 삽입핀은 하부지지구조물의 지지보 상면에 부착되어 핵연료집합체를 횡 방향과 축 방향으로 지지하도록 되어 있는데 이 삽입핀을 제거하고 하부지지구조물 상부가 직접 핵연료집합체를 안내 지지하도록 하부지지구조물 상면을 쐐기형으로 변경할 경우, 삽입핀 부착에 따른 나사구멍이 생략되며 이에 따라 지지보의 두께가 감소되기 때문에 지지보의 교차부를 용접할 때 수반되는 용접변형을 감소시킬 수 있다. 그러나 이 경우 지지보 상면의 제작상의 어려움이 예상된다.

2.1.2 원통 및 하부지지판

원통의 상부는 노심슈라우드에 용접되고 원통의 하부는 노심지지배럴과 용접결합되기 때문에 원통의 설계변경은 인접 구조물의 설계에 심각한 영향을 미치게 된다. 하부지지판은 원자로냉각재의 유로를 형성하기 위하여 일정한 형태의 유동구멍이 있으며, 또한 노내계측기를 안내하기 위한 안내관이 용접되어 있어 이를 변경하기도 어렵다. 이러한 연계사항으로 인하여 원통 및 하부지지판은 최적설계 대상부품으로는 적합하지 않다.

2.1.3 지지보

지지보는 하부지지구조물의 대부분을 차지하는 구조물로 노심을 직접 지지하며 삽입핀이 상부에 나사체결 된다. 지지보의 두께를 줄여 열응력을 줄이는 방안도 고려할 수 있지만 상부의 삽입핀으로 인한 제약 때문에 고려대상에서 제외되었다.



(a) 기존설계의 지지보 (b) 지지보의 최적설계 안

그림 2 지지보의 hole 크기 변경안

지지보에는 용접작업 및 용접부의 비파괴 검사를 고려하여 지름 5.0 inch 의 hole 이 있는데 이는 다른 구조물과의 상호연관이 적은 반면 hole 부위가 다른 지지보와 용접으로 교차되기 때문에 hole 의 크기는 용접길이와 직접적인 관계가 있다[2]. 따라서, 본 연구에서는 그림 2(a)와 같은 지지보 hole 을 최적설계를 통하여 그림 2(b)와 같은 긴 타원형 hole 로 변경하므로써 용접길이를 감소시키는 방안을 고려하였다.

2.2 최적화 모델 개발

최적설계 기법을 적용하기 위해서는 많은 반복 해석이 수행되어야 하므로 해석시간을 단축시키고 하부지지구조물 전체의 거동을 나타낼 수 있는 단순모델을 개발하였다. 이를 위하여 3 차원 shell 요소로 모델을 구성하였고 모델변경이 용이하도록 APDL (ANSYS Parametric Design Language)을 사용하였다.

2.2.1 모델생성

하부지지구조물의 지지보들은 주지지보(main beam)와 보조지지보(secondary support beam)로 구성되며 양단이 원통의 내면에 용접되어 있다. 따라서 지지보는 양단이 고정되어 있는 보로 간주하여 원통에서 1/2 까지만 모델링 하였으며 주지지보와 보조지지보는 Y 방향 높이만 다르고 전체 형상은 같다. 여러 지지보 중에 중앙의 가장 긴 보조지지보가 가장 취약한 구조이며 이 보의 거동이 하부지지구조물 전체의 거동을 대표하기 때문에 보조지지보를 선정하였다. 그림 3 은 최적설계를 위하여 개발한 보조지지보의 유한요소 모델이다. 실제 하부지지구조물에서는 상부바닥판(raised bottom plate)과 주지지보가 용접되어 있어 하부지지구조물의 처짐을 줄여 주는 효과가 있지만 영향이 미미할 것으로 판단되어 본 연구에서는 고려하지 않았다. 주지지보와 보조지지보는 hole 이 있는 부분에서 교차되어 용접되기 때문에 구조상 hole 의 크기는 서로 같아야 한다. 최적설계를 통해 보조지지보의 최적 hole 의 크기를 결정하고 이것을 주지지보에도 적용하였다.

2.2.2 하중 및 경계조건

하부지지구조물에 작용하는 하중은 노심슈라우드 및 노심의 무게, 핵연료지지스프링 하중값을 더한 것이지만 이들 중 노심슈라우드 무게는 주로 원통에만 영향을 주고 지지보로의 하중전달은 미미하기 때문에 생략하였으며 분포하중이 모델에 균일하게 작용한다고 가정하였다.
모델 한쪽 끝의 절점들은 하부지지구조물 원통에 용접되어 있기 때문에 모든 방향에 대해 변위(ux,uy,uz)와 비틀림(rotx,roty,rotz)을 구속하였다. 다른 끝은 보조지지보의 가운데 단면이기 때문에 지지보의 길이방향 변위(ux, uz)와 비틀림(rotx, roty, rotz)을 구속하였다. 그림 3 은 보조지지보 모델에 적용된 하중 및 경계조건을 나타낸다.

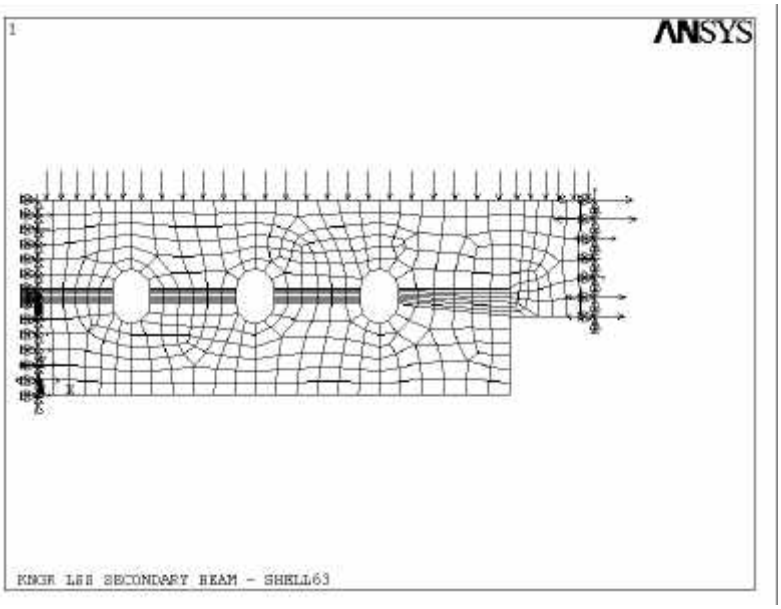


그림 3. 모델의 하중 및 경계조건

2.3 최적설계 수행

2.3.1 변수 설정

최적설계를 수행하기 위해서는 우선 설계변수, 상태변수 및 목적함수 등 최적설계 변수를 지정해야 한다.
설계변수는 설계 최적화를 달성하기 위한 독립변수이며 본 연구에서는 지지보 hole 크기를 설계변수로 설정하였다.
상태변수는 설계변수의 함수로 표현할 수 있는 종속변수로서, 지지보는 최대응력 보다 처짐량이 중요한 변수이다. 핵연료집합체 상단의 핵연료정렬판에 있는 튜브들이 모든 핵연료집합체를 고정시킬 수 있는 범위내에 있도록 하는 하부지지구조물의 최대 허용처짐량은 0.015 inch 이며, 최적설계후 지지보가 결합된 상태에서는 처짐량이 줄어들기 때문에 최적설계시 상태변수로 이 값을 그대로 사용하였다.
목적함수는, 용접길이를 적절하게 도출할 수 있도록 지지보의 높이에서 hole 의 길이를 뺀 값을 지정하였다. 용접길이는 그림 2(b)처럼 지지보의 1/2 중에서도 3 개의 hole 이 있는 위치에서 용접길이의 합이다.

본 연구에서 사용된 각 변수들은 아래와 같이 설정하였다.

丶설계변수 : 각 타원형 hole 길이의 1/2 값

$1 \text{ inch} \le \text{REC1} \le 10 \text{ inch}$

$1 \text{ inch} \le \text{REC2} \le 10 \text{ inch}$

1 inch ≤ REC3 ≤ 10 inch

ㆍ**상태변수** : **지지보의 최대 허용처짐량**, dmax

dmax ≤ 0.015 inch

ㆍ**목적함수** : **지지보의 총 용접길이**, RECT

RECT = 3 ×h3 – 2 ×(REC1＋REC2＋REC3) – 2 ×(3 ×r1)

여기서, h3 = **지지보의 높이이며** 25.375 inch **임**.

r1 = hole **의 반지름으로** 2.5 inch **임**.

3. 결과분석

보조지지보에 대해 최적화를 수행한 결과는 표 1 **에 제시되어 있으며**, hole **의 위치에 따라 조금씩 다른 크기가 제시되었지만 설계 및 제작차원에서 미소한 차이는 무시하고 대표되는 값을 취하였다**.

검토 결과, **최대 허용처짐량** 0.015 inch **범위내에서**, **최적 설계변수**(REC1, REC2, REC3)**값인** hole **길이는 최대** 2.946 inch **이고**, **최소** 2.777 inch **로 제작시 고려할만한 차이는 보이지 않았다**. **각각의 지지보들이 용접으로 결합된 뒤에는 구조물이 강화되기 때문에 세개의** hole **을 같은 크기로 하여 대표값은** 3.0 inch **로 하였다**.

표 1. **보조지지보의 최적** hole **길이**

REC1 (inch)	REC2 (inch)	REC3 (inch)	Max. Stress (psi)	Max. Deflection (inch)	RECT*
2.918	2.946	2.771	7666	0.01494	43.856

* **기존설계의 지지보 용접길이**(RECT)**는** 61.125 inch

이것은 기존설계의 hole **길이 보다 약** 6 inch **를 증가시켜도 최대응력 이나 처짐량이 허용설계한도를 벗어나지 않는 것을 의미한다**. **최적설계 결과 표** 1 **과 같이 각각의 크기를 갖는** hole **을 찾은 후 보조지지보에 같은 크기의** 3.0 inch hole **로 수정한 지지보의 최대응력 및 최대 처짐량에 대한 해석결과는 표** 2 **와 같다**.

표 2. **최적결과 수정 후 보조지지보의 최대응력 및 처짐량**

REC1, REC2 REC3 (inch)	Max. Stress (psi)	Max. Deflection (inch)	RECT
3.0	7777	0.01504	43.125

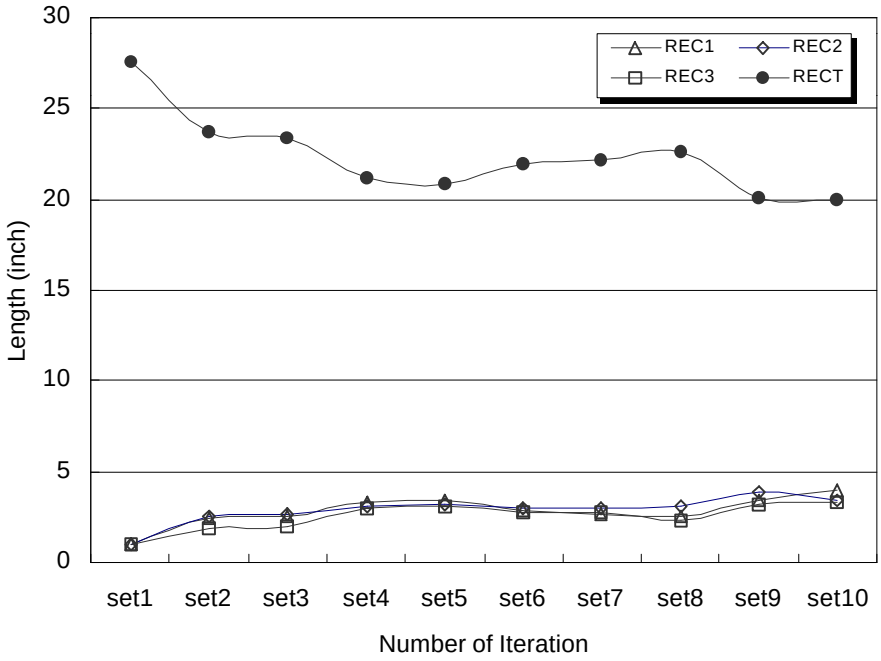


그림 4. 보조지지보의 반복계산에 따른 길이 변화량

그림 4 는 보조지지보의 최적화를 위한 반복계산 결과 10 개의 조합이며, 각각의 설계변수가 적절한 값을 찾는 것을 나타내며 타원형 hole(REC1, REC2, REC3)의 길이가 길어질수록 용접길이(RECT)가 줄어드는 것을 알 수 있다. 4, 5, 9, 10 번 조합은 상태변수인 최대 허용처짐값을 초과했으며, 최적설계로는 6 번 조합을 선택했다. 이때의 최적 hole 의 길이, 최대응력, 처짐량이 표 1 에 제시되어 있다.

4. 모델의 검증

수정설계한 3.0 inch hole 을 갖는 지지보들이 결합되었을 경우의 거동을 알아보기 위해 1/4 모델(그림 5)을 만들어 응력해석을 수행하였으며, 이 모델을 통해 얻어진 수정설계의 최대응력과 처짐량을 비교하였다(표 3).

수정설계 후 결합된 지지보의 최대응력은 표 3 에 나타난 것처럼 hole 크기가 증가함에 따라 오히려 2% 감소하였으며, 최대처짐량은 0.0109inch 에서 0.0121 inch 로 0.0012 inch (11%) 증가하였다. 이는 최대허용 처짐량이 0.015 inch 임을 감안할 때 19%의 여유가 있으므로 구조적 건전성에는 문제가 없음을 알 수 있다.

1/4 모델에서 기존설계의 지지보 용접길이는 290 inch 이며 최적설계값을 이용하여 수정설계한 후의 용접길이는 242 inch 로 수정설계 후 용접길이는 48 inch (17%) 가 감소되었다.

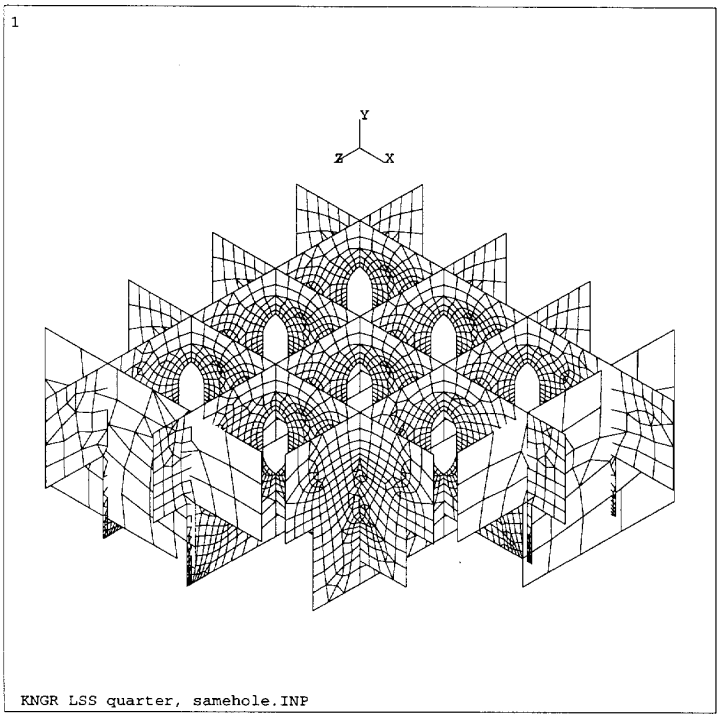


그림 5. 결합된 1/4 모델

표 3. 1/4 모델에 대한 기존설계와 수정설계의 응력해석 결과비교

	Max. Stress (psi)	Max. Deflection (inch)	Weld Length (inch)
기존설계	7195	0.0109	290
수정설계	7016	0.0121	242
변화율	-2%	+11%	-17%

5. 결론

하부지지구조물 최적설계를 이용한 결과 지지보의 hole 크기를 변경하므로써 용접길이를 줄일 수 있었으며, 이를 통하여 제작시 발생되는 용접변형의 최소화를 기대할 수 있다. 또한 hole 길이가 증가하여 용접길이가 줄어도 최대응력은 거의 변화가 없음을 알 수 있다.
따라서 초기설계 단계에서 최적설계기법의 적용은 유용하다고 할 수 있다.

6. 참고문헌

(1) “ANSYS User's Manual - Rev. 5.1”, Swanson Analysis Corporation, 1994.

(2) D-NG-12131-C01, Rev.00, Lower Support Structure Assembly Drawing, Hanjung, 98.12.21.