경수로 핵연료 지지격자의 동적 좌굴강도 해석(II)

송기남†·이수범*

Dynamic Crush Strength Analysis of a Spacer Grid Assembly for a LWR Nuclear Fuel Assembly(II)

Kee-nam Song and S-B Lee

Key Words: Dynamic Crush Strength(동적 좌굴강도), Nuclear Fuel Assembly(핵연료집합체), LWR(Light Water Reactor; 경수로), Spacer Grid Assembly(지지격자체)

Abstract

A spacer grid is one of the most important structural components in a LWR nuclear fuel assembly. The primary considerations are to provide a Zircaloy spacer grid with crush strength sufficient to resist design basis loads, without significantly increasing pressure drop across the reactor core. In this study, the dynamic crush strength analysis and test are carried out for the specimens of a spacer grid assembly.

1. 서 론

경수로 핵연료집합체는 보통 가로, 세로 길이가 약 200 mm, 높이 약 4,000 mm의 제원을 갖는 구조물로서 하단에는 많은 유로구멍이 뚫려있는 하단고정체 1개, 상단에는 판형 스프링이나 코일형 스프링으로 이루어진 홀다운스프링집합체 4세트, 상단고정체 1개, 상·하단고정체를 연결하면서 원자로 제어시나 긴급정지시에 제어봉 삽입경로를 제공하는 4～24개의 안내관(GT), 운전중에 원자로 상태를 계측하기 위한 계측기의 삽입경로를 제공하는 계측관 1개로 구성된 골격체와 수백 개의 연료봉 및 8～10개의 지지격자체로 구성되어 있다. 길고 유연한 연료봉을 적절한 간격으로 지지하며 고정하기 위한 구조물이 지지격자체이며 Fig. 1에서 보듯이 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판들의 교차점 혹은 교차선을 용접한 구조물이다[1].

지지격자체의 구조적 기능으로는 핵연료집합체 측면에서 가해지는 여러 하중으로부터 연료봉을 보호하는 것으로서 지진하중이나 원자로 냉각재 상실사고시에 발생할 수 있는 횡방향 설계하중으로부터 연료봉을 보호하면서 원자로 긴급정지가 가능하도록 하기 위해 지지격자체는 충분한 횡방향 충격강도를 갖추도록 요구되고 있다.

지지격자체를 구성하는 격자판들의 교차부는 통상적으로 TiG 용접, 전자빔 용접 및 레이저 빔 용접 등으로 점용접되고 있다. 그런데 용입깊이가 지지격자체의 충격강도에 영향을 주는 것이 알려지면서 Fig. 2와 같이 격자판의 교차선을 따라 선용접할 경우 용접길이를 크게 증가시킬 수 있고 또한 격자체의 구조강도를 증가시킬 수 있다는 것이 본 연구자에 의해 제안되었다[1].

본 연구에서는 한국원자력연구원에서 개발한 지지격자체 형상(B형)에 대하여 안내관이 삽입된 경우 및 삽입되지 않은 경우에 대하여 통상적으로 격자판 교차부위를 점용접법으로 제조된 시편

† 한국원자력연구원
E-mail : knsong@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2254 FAX : (042)868-4717
* University of Maryland

과 격자판 교차부위 내부를 따라 용접함으로서 용접선 길이를 증가시킨 시편에 대하여 충격시험 및 유한요소해석을 수행하고 그 결과들을 비교한 것이다.

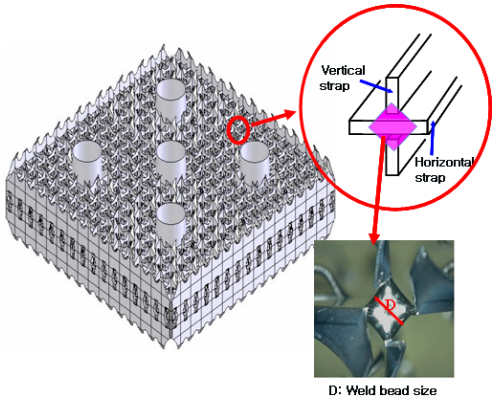

Fig. 1 Spacer grid assembly

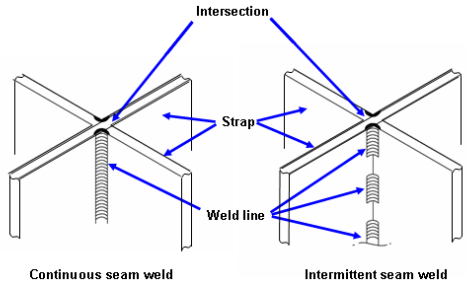

Fig. 2 Line welding along the strap intersection

2. 충격강도시험

충격강도 시험용 지지격자체 시편은 지르칼로이로 제조된 내부격자판과 외부격자판으로 이루어졌고 내·외부 격자판의 교차점 부위는 레이저빔 용접되었다. 시험에서는 해석모델에서와 같이 봉이 삽입되지 않은 상태에서 안내관이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 시험을 수행하였다[2].

3. 유한요소해석

충격강도해석에 사용한 재료의 물성치는 ASTM 시험절차[2]에 따른 단축 인장시험에서 얻은 탄소성 물성치를 사용하였으며 유한요소해석모델은 내·외부 격자판들은 4-node 쉘 요소를 사용했고 격자판들의 교차점 용접부위는 4-node tetrahedral solid 요소를 사용하였다. 또한 선용접된 부분에서는 node-merge기법을 사용하였고 격자판들의 교차선에서 용접되지 않은 부위는 간극을 모사하기 위해 접촉요소를 사용하였다[3].

4. 결과 및 토의

시험 및 해석에서 얻은 지지격자체 B형의 3가지 용입깊이에 따른 충격강도의 비가 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 보면 안내관이 없는 경우 해석에서 얻은 충격강도는 실험에서 얻은 충격강도에 비해 최대 15% 정도까지 크게 나타났으며 안내관이 있는 경우는 최대 12%정도 작게 나타났다. 이는 안내관의 유무에 따라 실험 및 해석결과에 영향을 주고 있음을 보여준다. 한편 안내관이 있는 경우는 없는 경우에 비해 해석에서 약 6.8-16.0%, 실험에서는 약 15.6-42.6% 충격강도가 증가하는 것으로 나타났다.

Table 1 Comparison of analysis and test results

		Analysis (kN)	Test (kN)	Analysis/Test
w/o GT	spot welding	16.05	13.91	1.154
	7.3 mm welding	20.94	19.35	1.082
	13.3mm welding	24.37	23.07	1.056
w/t GT	spot welding	18.61	19.84	0.938
	7.3 mm welding	21.94	24.82	0.884
	13.3mm welding	26.02	26.68	0.975

Figs. 3과 4는 각각 안내관이 없는 경우와 안내관이 있는 경우에 유효 용접선 길이에 따른 충격강도를 나타낸 것이다. Figs. 3과 4에서 보면 지지격자체의 충격강도는 용접선 유효길이가 증가함에 따라 선형적으로 증가하고 있고 있음을 알 수 있고 유한요소해석 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있어서(특히 안내관이 없는 경우에) 본 연구에서 제안한 유한요소모델은 향후 새로운 형상의 지지격자체 개발시도 충격강도를 효과적으로 예측할 수 있는 선행기법으로 사료된다. 또한 B형 지지격자체의 경우 통상적인 점용접방법으로 제조한 경우에 비해 용접선 유효길이를 최대로 확장할 경우에 충격강도는 최대 70%까지 증가하고 있음을 알 수 있어서 고충격(혹은 고지진) 하중에 견디는 지지격자체 개발에 있어서 지지격자판의 전체 높이나 두께를 증가시키지 않고 격자판 교차부의 용접선 길이를 증가시키는 것만으로도 소기의 목적을 달성할 수 있다고 본다.

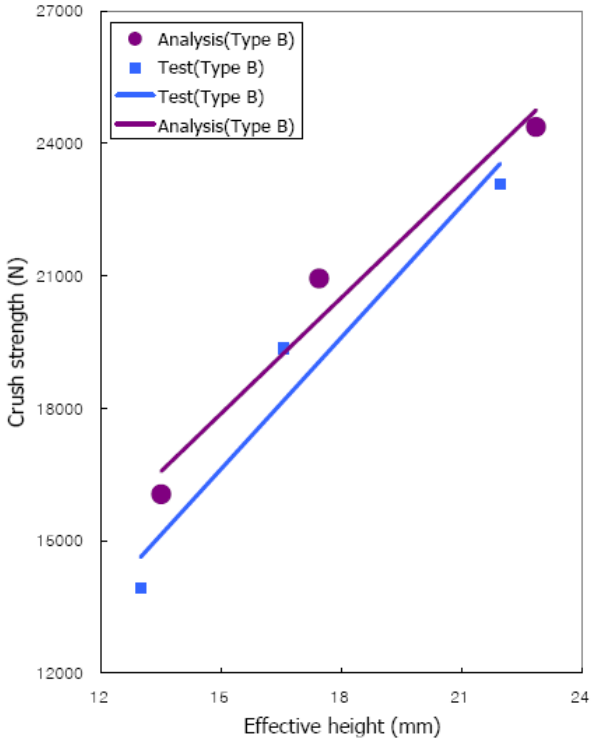

Fig. 3 Crush strength vs. Effective height for a spacer grid specimen without GT

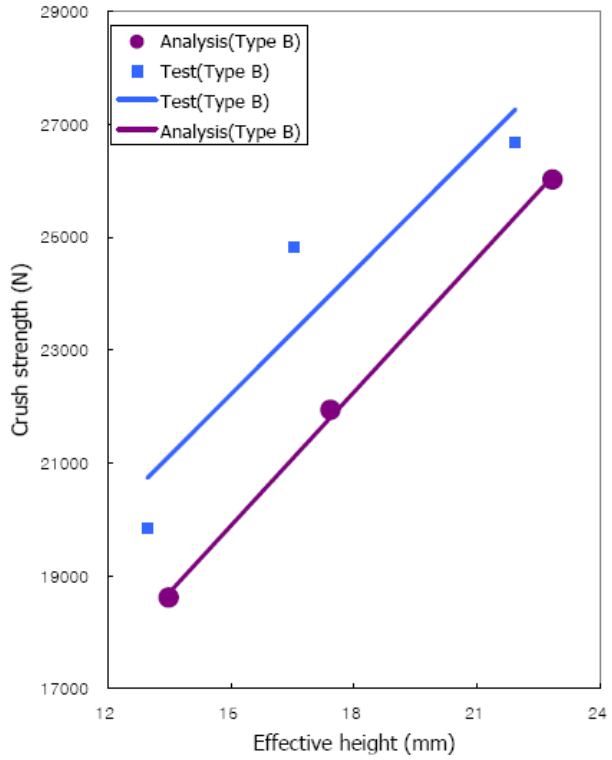

Fig. 4 Crush strength vs. Effective height for a spacer grid specimen with GT

5. 결론

한국원자력연구원에서 개발한 지지격자체 형상(B형)에 대하여 점용접 시편 및 격자판의 교차선을 따라 선용접한 시편에 대하여 수행한 충격시험결과와 유한요소해석 결과들로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 해석결과는 실험결과에 비해 88-115%정도로 예측하고 있다.
2. 충격강도는 안내관이 있는 경우가 없는 경우에 비해 크게 증가하고 있다.
3. 본 연구의 해석모델은 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있어서 향후 지지격자체 설계시에 지지격자체 충격강도 선행 예측에 유용하게 사용될 수 있다.
4. 유효 용접선 길이와 충격강도는 선형적인 관계에 있다.

참고문헌

(1) K-N Song and S-S Kim, 2007, “Analysis of Impact Strength due to the Variation of Weld Length for the Nuclear Spacer Grid Assembly,” Proceedings of KSME Fall Meetings.

(2) ASTM E8M-99, 1999: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

(3) K-N Song and S-B Lee, 2008, “Dynamic Crush Strength Analysis of a Spacer Grid Assembly for a LWR Nuclear Fuel Assembly(I),” Proceedings of KSME Spring Meetings.