

용접물성치를 고려한 핵연료 지지격자체 횡방향 충격강도[§]

송기남^{**} · 이상훈^{*}

* 한국원자력연구원

Lateral Crush Strength of Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Weld Properties

Kee Nam Song^{**} and Sang Hoon Lee

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received May 21, 2012 ; Revised July 1, 2012 ; Accepted July 2, 2012)

Key Words: Spacer Grid(지지격자체), PWR(가압경수로), Instrumented Indentation Technique(계장형 압입시험법), Crush Strength(충격강도), Weld Zone(용접부), Heat Affected Zone(열영향부)

초록: 가압경수로 핵연료의 구조부품인 지지격자체는 홈이 있는 격자 스트랩들을 끼우고, 끼워진 교차 부위를 용접한 구조물이다. 원자로 비정상 운전중에 원자로의 긴급정지가 가능하도록 하기 위해 지지격자체는 충분한 횡방향 충격강도를 갖도록 설계되어야 한다. 지지격자체의 횡방향 충격강도 해석에 대한 예전의 연구는 모재의 물성치만을 사용하여 수행되었다. 본 연구에서는 지지격자체 용접부에 모재 물성치를 사용하는 대신 용접물성치를 사용할 경우에 지지격자체 횡방향 충격강도에 미치는 영향을 조사하였다. 계장형 압입시험법으로부터 얻은 용접물성치를 용접부에 적용한 해석을 수행하였고, 그 해석 결과를 예전 연구결과와 비교하였다.

Abstract: A spacer grid, which is one of the structural components in a PWR fuel, is an interconnected array of slotted grid straps that are welded at the intersections to form an egg-crate structure. The spacer grid is required to have sufficient lateral crush strength to enable nuclear reactor shut-down during abnormal operating environments. Previous studies on the lateral crush strength analysis of the spacer grid were performed using only the base material properties. In this study, to investigate the effect of the lateral crush strength of the spacer grid when using the mechanical properties in the weld zone instead of the base material properties, lateral crush strength analysis by considering the mechanical properties in the weld zone as obtained from the instrumented indentation technique was performed, and the results were compared with those of previous studies.

1. 서론

경수로(PWR) 핵연료집합체에서 지지격자체는 열을 생산하는 열원인 핵연료봉들을 원자로심내의 정해진 공간에 위치하도록 지지하는 기계적 기능과 사고시에 핵연료봉을 보호하며 원자로를 긴급 정지시킬 수 있게 하는 구조적 기능을 갖는 핵심 구조부품이다.⁽¹⁾

지지격자체는 구조적 기능을 만족하기 위해 충

분한 횡방향 충격강도를 갖도록 설계, 제조(용접)되는 것이 필요하다. 지지격자체 횡방향 충격강도 요구조건은 횡방향 설계하중하에서 지지격자체 변형량이 설계한도 이내로 변형되는 것으로 이를 만족할 경우 원자로 긴급정지시에 안내관속으로 제어봉의 삽입이 방해받지 않게 되어서 원자로의 안전성(사고시에 원자로 긴급정지)을 보증할 수 있다. 구조적 관점에서의 지지격자체 성능을 개선하기 위해 지지격자체의 횡방향 충격특성을 향상시키는 방향으로 지지격자체 형상 설계^(2,3) 및 제조방법 개선⁽⁴⁾ 등과 같은 많은 연구가 진행되어 왔다.

그동안 지지격자체의 충격강도는 실험에 의해

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

결정되었으나 근래에 수치해석기법의 발달과 신뢰할 수 있는 해석 프로그램의 출현으로 수치해석적 방법으로 지지격자체의 충격강도를 예측하려는 연구가 점차 시도되고 있는 추세이다. 그런데 지지격자체 용접부에 대한 기계적 물성치의 부재로 인해 용접부 기계적 물성치를 고려하지 않은 충격해석이 주로 연구되어 왔다.^(2,3,5,6)

근래에 볼 압입자(Ball Indenter)를 시편에 압입하여 얻은 압입 하중-압입 깊이 곡선으로부터 시편 재료의 물성치를 얻을 수 있는 계장형 압입 시험법을 이용하면 용접부 주변의 열영향부(Heat Affected Zone: HAZ), 용융부 등과 같은 좁은 영역에서도 용이하게 기계적 물성치를 얻을 수 있음이 알려져 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 계장형 압입 시험법으로부터 얻은 지지격자체 용접부의 기계적 물성치⁽⁸⁾를 이용하여 해석한 지지격자체 충격강도, 모재(Base Material)의 물성치만을 이용하여 해석한 충격강도 및 이전 연구에서 얻은 지지격자체 충격강도 시험값과⁽⁵⁾ 비교 분석하고자 한다.

2. 지지격자체 용접부 형상

지지격자체는 홈이 있는 격자판(Strap)을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 레이저빔 용접방법으로 용접한 egg-crate 형상의 구조물이다. Fig. 1은 지지격자체의 형상과 점용접부 형상을 나타낸 것으로 용접부의 용접비드 크기(대각선 길이)는 약 2mm 내외이고 HAZ 영역의 폭은 0.5mm 이내이다. Fig. 2는 통상적인 용접부 주변의 미세 금속조직을 나타낸 것으로⁽⁹⁾ Fig. 2에서보면 용융부(weld), HAZ 및 모재 영역에서 미세 조직이 매우 다르며 따라서 각 영역에서의 항복응력, 인장강도 등을 포함한 기계적 물성치들이 서로 상이한 것으로 알려져 있다.

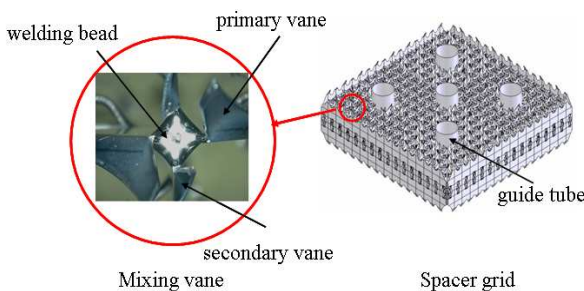


Fig. 1 Spacer grid assembly

3. 유한요소해석

3.1 시험용 지지격자체 시편

지지격자체 전체 모형은 가로, 세로 방향으로 16개의 격자(cell)가 있는 16x16형 지지격자체이다 (Fig. 1 참조). 지지격자체 전체 모형의 충격강도를 얻기 위해서는 전체 모형에 대한 시편 제작, 충격강도 해석용 유한요소 모델 구성 및 충격해석 수행 등에 상당히 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 전체 모형의 충격강도 거동을 비교적 잘 예측하는 것으로 알려진 7x7형 부모델⁽⁵⁾에 대하여 충격강도 해석을 수행하고 7x7형 시편에 대한 시험결과와 비교하고자 한다. Fig. 3은 가로, 세로 방향으로 7개의 격자가 있는, 즉 7x7형인 sub-sized 지지격자체 시편을 보여주고 있는데 outer strap A의 두께는 0.664 mm, outer strap B와 inner strap의 두께는 0.457 mm인 격자판이 사용되었고 용접은 교차부위 상/하단에 점용접(spot welding)되거나 격자판 교차부위를 따라 선용접(line welding)되어 있다. Table 1은 레이저빔 점용접 및 선용접 조건이⁽¹⁰⁾ 나타나 있다.

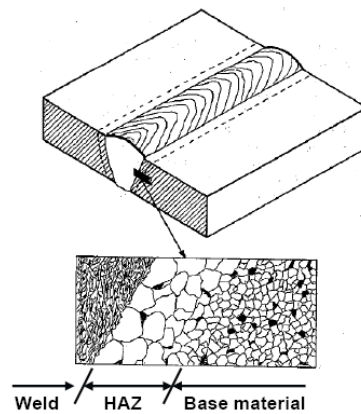


Fig. 2 Microstructure near weld⁽⁹⁾

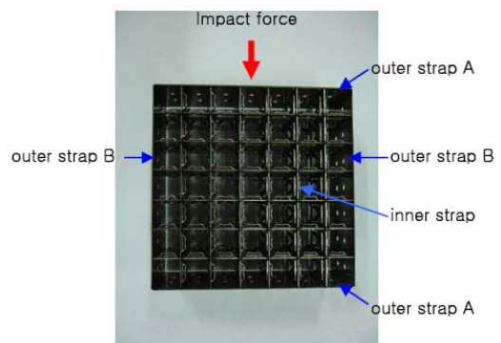


Fig. 3 Spacer grid specimen(7x7 array)

Table 1 Welding conditions for the specimens

Parameters	Spot welding	Line welding
Peak power (kW)	3.20	0.87
Pulse width (ms)	6	6
Repeat	17	4
No. of shot	6	84

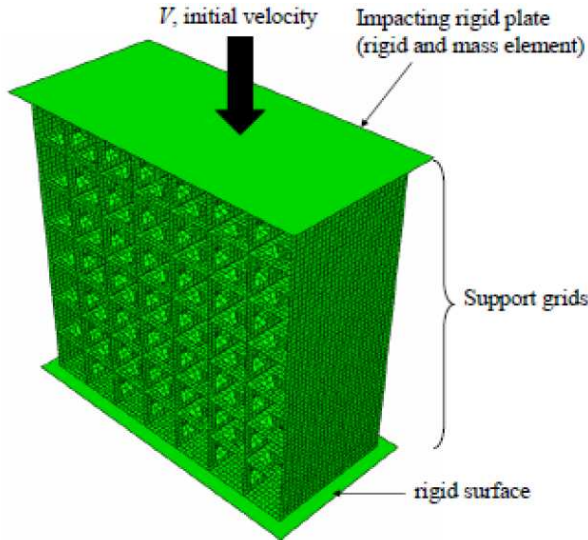


Fig. 4 Crush strength analysis model(7x7 array)

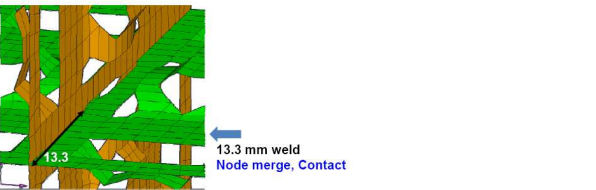
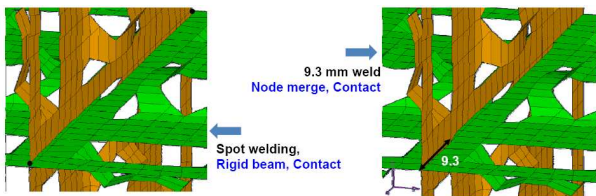


Fig. 5 FE model using base material properties

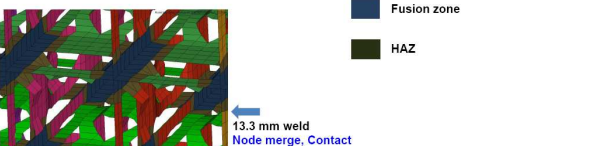
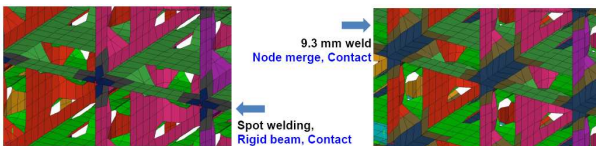


Fig. 6 FE model using weld material properties

3.2 유한요소 모델

Fig. 4는 7x7형 지지격자체 부모모델에 대한 충격해석용 유한요소모델과 경계조건 등을 나타낸 것으로 지지격자체 부모모델 상단에 초기 충격속도를 부과하여 해석을 수행한 뒤 점차적으로 충격속도를 증가시켜가면서 해석을 수행하고, 모델 하단에서의 반력을 계산하여 충격하중(Crush Load)을 계산한다.

모재의 물성치만을 사용한 경우 유한요소 모델은 Fig. 5에서 보듯이 지지격자체 격자판 교차부위가 점용접된 모델과 격자판들의 교차선을 따라 선용접한 2가지 모델 등 총 3가지 유한요소모델을 구성하였다. 한편 용접부의 기계적 물성치를 사용한 경우에는 Fig. 6에서 보듯이 Fig. 5의 모델에서 용융부, HAZ 영역을 구분하여 용접부 물성치를 적용하고자 한다. 사용한 유한요소는 LS-DYNA⁽¹¹⁾의 Belytschko-Tsay shell element를 사용했으며 4-node 유한요소가 24,448개, 3-node 유한요소가 672개이며 총노드수는 점용접 모델이 31,533개, 9,275mm 선용접 모델이 30,669개, 그리고 13.28mm 선용접모델이 30,093개이다.

3.3 격자판의 기계적 물성치

Fig. 7은 지지격자체에 사용된 격자판에 대해 단축 인장시험⁽¹²⁾으로부터 얻은 Data를 충격해석에 사용하기 위해 처리한 응력-변형률 선도이다. 예전의 지지격자체 충격해석에서는^(2,3,5,6) HAZ 및 용융부위에 대한 기계적 물성치가 없어서 Fig. 7의 응력-변형률 선도를 사용하였다.

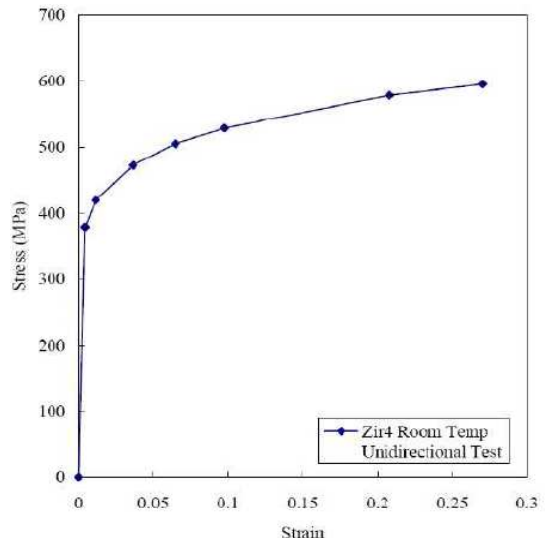


Fig. 7 Stress-strain curve for Zircaloy-4

3.4 용접부의 기계적 물성치

Fig. 8은 지지격자체 용접부에서 기계적 물성치를 얻기 위해 지지격자체 점용접부 단면에서 절단한 시편과 그 시편에 대하여 압입시험법으로 기계적 물성치를 측정할 위치를 나타낸 것이며 Fig. 9는 계장형 압입시험법으로부터 얻은 기계적 물성치(항복응력 및 인장강도)를 나타낸 것이다.⁽⁸⁾ Fig. 9에서 보면 항복강도와 인장강도가 모재, HAZ 및 용융부에서 확연히 변하고 있음을 보여 준다. 지지격자체 충격해석에서 용접부 영역에는 용접부 영역의 응력-변형률 선도를 사용하는 것이 바람직하나 Fig. 9에서 보듯이 측정값의 변동이 심하다. 따라서 본 연구에서는 대안으로 각 영역별 항복응력과 인장강도의 대표값을 구하고 Fig. 7의 모재 응력-변형률 선도를 결합하여 용접부 영역에 적용하고자 한다.

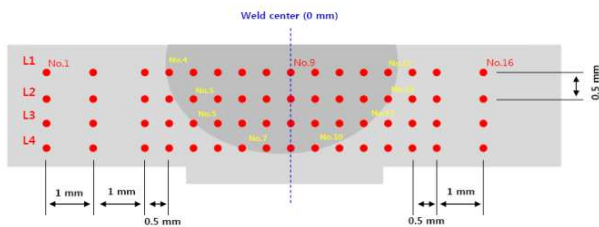


Fig. 8 Indented position in Zircaloy-4 specimen

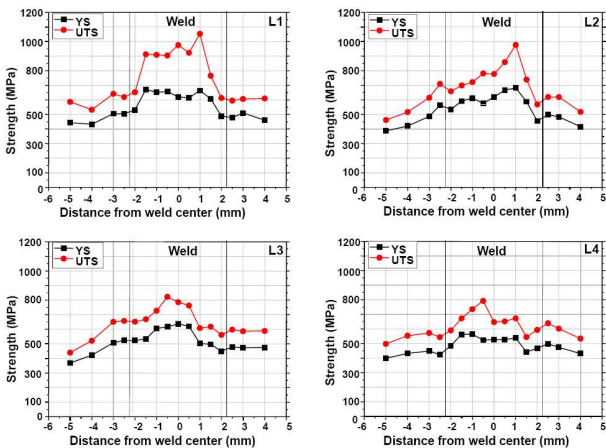


Fig. 9 Variation of mechanical properties in weld zone along lines L1 through L4, as shown in Fig. 8

Table 2는 Fig. 9의 각 영역에서 구한 기계적 물성치(항복응력 및 인장강도)들의 95% 하한 신뢰도 평균을 모재부위의 값으로 정규화한 것으로 용접부 주변의 미세조직 변화 및 잔류응력에 의한 기계적 물성치 변화가 어느 정도는 반영된 것으로 보인다.

4. 해석결과 및 고찰

Fig. 10은 모재 물성치를 사용한 점용접모델의 충격해석에서 충격속도와 충격하중간의 관계를 대표적으로 나타낸 것이다. 해석에서는 Fig. 10에서 보듯이 충격속도가 증가함에 따라 충격하중은 증가하고 있으며 최대하중에 접근하고 있다. 실험에서는 충격하중이 증가함에 따라 어떤 값에 이르면 좌굴이 발생하여 충격하중이 급격히 떨어지는 현상이 있으나 본 해석 모델에서는 이러한 현상을 구현하지는 못하였다.

Figs. 11, 12 및 13은 세 가지 유한요소모델(점용접 모델, 선용접 모델 2개)에 대하여 모재 물성치만을 사용한 경우와 용접부 물성치를 고려한 경우에서 충격속도 대비 충격하중을 나타낸 것이다. Figs. 11, 12 및 13에서 보면 용접부 물성치를 고려한 경우의 충격하중이 모재의 물성치만을 사용하여 얻은 결과에 비해 20-30% 정도 줄어들고 있다. 이것으로부터 지지격자체 충격해석에서 용

Table 2 Normalized material properties

	Yield stress	Tensile strength
Base material	1.000	1.000
HAZ	1.162	1.154
Weld	1.372	1.446

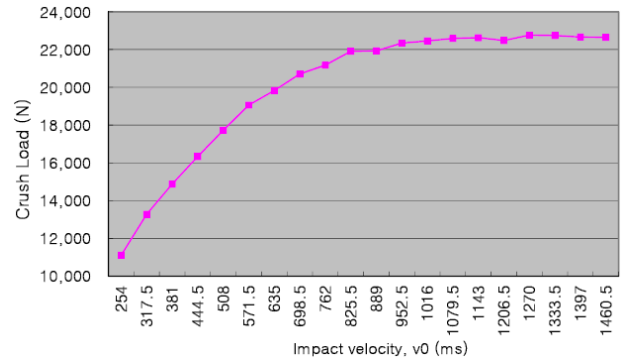


Fig. 10 Crush load vs. impact velocity for spot welding model using base material properties

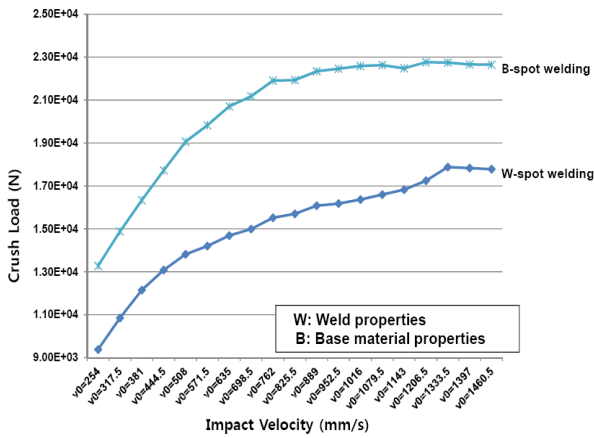


Fig. 11 Crush load vs. impact velocity for spot welding model

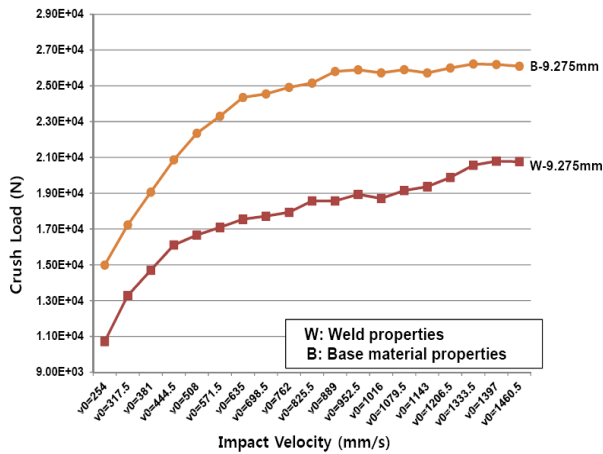


Fig. 12 Crush load vs. impact velocity for 9.3 mm line weld model

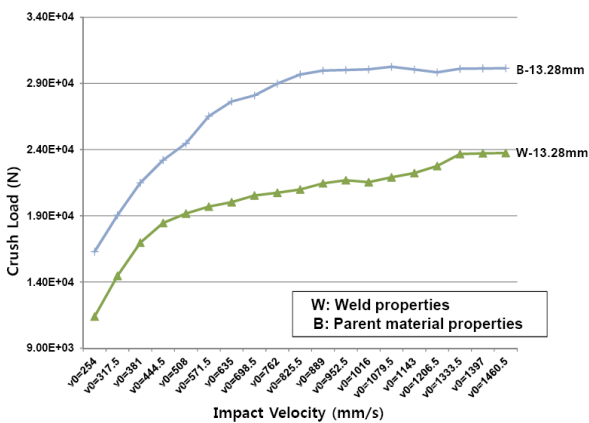


Fig. 13 Crush load vs. impact velocity for 13.3 mm line weld model

접부의 물성치를 사용할 경우의 충격강도는 모재 물성치만을 사용한 경우의 값보다 크게 줄어들고

Table 3 Comparison of crush strength ratio

Weld line (mm)	Analysis/Test	
	with base material properties	with weld properties
Spot welding (2.0 mm)	1.909	1.409
Line welding (9.3 mm)	1.980	1.528
Line welding (13.3 mm)	1.900	1.511

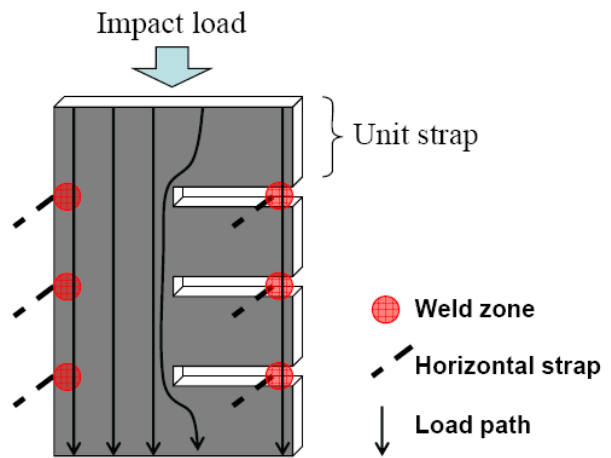


Fig. 14 Load path in a strap

있음에 유의해야 할 것으로 보인다.

Table 3은 Figs. 11, 12 및 13의 해석결과로부터 얻은 충격강도와 이전 연구에서⁽⁵⁾ 얻은 7x7형 격자체 시편에 대한 충격강도 시험결과를 비교한 것이다. 해석에서의 충격강도는 충격하중의 기울기가 초기 평균 기울기에서 벗어나는 곳으로 정하였다.⁽¹³⁾ Table 3에서 보면 모재의 물성치만을 사용하여 얻은 충격강도는 충격강도 시험치를 약 90-98% 정도 과대 평가하고 있는 반면에 용접부 물성치를 사용하여 얻은 충격강도는 충격강도 시험치를 약 40-53% 정도 과대 평가하고 있다. 따라서 용접부 물성치를 사용할 경우 모재 물성치만을 사용한 경우에 비해 시험치에 약 50% 정도 더 근접하고 있음을 보여주고 있다.

한편 지지격자체의 충격강도는 격자판의 좌굴 특성과 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 있고⁽¹³⁾ Table 2에서 보듯이 용접부의 기계적 물성치가 모재의 그것에 비해 크기 때문에 본 연구자는 용접부 물성치를 고려한 충격해석에서 충격강도 및 충격하중은 모재의 물성치만을 사용한 경우에 비해 커질 것으로 예상하였다. 그런데 충격해석 결

과는 예상과 다르게 나타났다. 이것은 다음과 같이 설명될 수 있을 것으로 보인다. 즉, Fig. 14는 격자판(Strap)이 하중을 받을 때 하중의 전달경로를 나타낸 것인데 격자판이 항복이 일어날 정도의 하중이 가해지면 모재보다 항복응력 및 가공경화(Strain Hardening)가 큰 영역인 용접부(Weld Zone: 용융부 및 HAZ를 포함)에서는 모재보다 항복이 더디게 일어나는 반면, 모재에서는 항복 발생, 소성변형이 용이하게 먼저 일어나고 궁극적으로 항복 및 소성발생이 모재쪽으로 집중되기 때문인 것으로 보인다. 따라서 용접부의 기계적 물성치를 고려한 지지격자체 충격해석에서 얻은 충격강도 및 충격하중이 모재의 물성치만을 고려한 경우에서 얻은 값들보다 작아지는 것으로 보인다.

5. 결론

계장형 압입시험법으로부터 얻은 지지격자체 용접부의 기계적 물성치를 이용하여 지지격자체 충격해석을 수행하였고, 용접부 기계적 물성치를 고려하여 예측한 지지격자체 충격강도와 이를 고려하지 않은 경우, 그리고 실험에서 얻은 값들과 비교/분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 용접부 기계적 물성치를 사용한 경우의 충격하중은 모재 물성치만을 사용한 경우의 그것에 비해 크게 감소하였고 충격강도는 실험에서 얻은 값에 더 근접하는 것으로 나타났다.

(2) 수치해석적으로 지지격자체의 충격강도를 신뢰성있게 예측하기 위해서는 용접부 기계적 물성치를 사용한 해석이 필요하다.

참고문헌

- (1) Kunz, H. J. and Song, K. N., 1987, *Fuel Assembly Mechanical Design*, Siemens/KWU Work-Report U6 312/87/e326.
- (2) Lee, S. H., Kim J. Y. and Song, K. N., 2007, "Design Improvement of OPT-H Type Nuclear Fuel Rod Support Grid by Using an Axiomatic Design and an Optimization," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 1191~1195.
- (3) Lee, S. B., Kim Y. W. and Song, K. N., 2008, "Parameter Study for a Dimple Location in a Space Grid Under Critical Impact Load," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2024~2029.
- (4) Song, K. N. and Kim, S. S., 2007, "Determination of Optimum Welding Parameters for a Laser Welded Spacer Grid Assembly for PWRs," *J. of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 95~99.
- (5) Song, K. N., Lee, S. H., Lee, S. B., Lee, J. J., and Park, G. J., 2010, "Study on the Lateral Dynamic Crush Strength of a Spacer Grid Assembly for a LWR Nuclear Fuel Assembly," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 34, No. 9, pp. 1175~1183.
- (6) Lee, S. B. and Song, K. N., 2007, "The Evaluation of Impact Strength of IFM Support Grid and Its Experimental Verification," *Proc. of KNS Fall Meeting*, PyeongChang, Korea.
- (7) ISO TR29381, 2008, "Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties."
- (8) Song, K. N. and Ro, D. S., 2011, "Measurement of Mechanical Properties in Weld Zone of Nuclear Material by Instrumented Indentation Technique," *Proc. of KWJC Fall Meeting*, Gwangju, Korea.
- (9) George E. Linnert, 1965, "Welding Metallurgy," Vol. 1, American Welding Society, NY.
- (10) Song, K. N. and Kim, S. S., Lee, S. H., and Lee, S. B., 2009, "Laser Welding Unit for Intersection Line Welding of Spacer Grid Inner Straps and Its Application," *J. of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 11~17.
- (11) LS-DYNA Keyword User's Manual, Ver.971, 2006, Livermore Software Technology Corporation.
- (12) ASTM E8M-99, 1999, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials."
- (13) Song, K. N., Lee, S. B., Shin, M. K., Lee, J. J., and Park, G. J., 2010, "New Spacer Grid to Enhance Mechanical/Structural Performance," *J. of Nuclear Science and Technology*, Vol. 47, pp. 295~303.