

원자로용 하단고정체에 대한 구조시험 평가

Evaluation of Structural Test for Bottom End Piece Used for Nuclear Power Reactor

김재훈* · 사정우** · 김덕희** · 손동성*** · 임정식***

J.H. Kim · J.W. Sa · D.H. Kim · D.S. Sohn · J.S. Yim

(1999년 2월 20일 접수, 1999년 7월 15일 채택)

ABSTRACT

The atomic fuel rods between top and bottom end pieces of reactor need to be extended for high combustion rate of future-type fuel to increase the irradiation in the axial direction. For allowing axial extension of the fuel rods, the space between top and bottom end pieces should be expanded. Thus the thickness reduction of the flow plate is necessary.

This study was carried out the mechanical strength test by using strain gages as a function of flow plate thickness, the existence of skirt and loading condition for the KOrean Fuel Assembly(KOFA). The experimental apparatus was designed for load conditions, uniformly distributed load and displacement. Test method using whiffle tree of uniformly distributed load has been comparatively conservative. The test results were compared with those of finite element analysis and the test method on bottom end piece was established.

1. 서 론

핵연료 집합체의 하단고정체는 집합체 최하단에 위치한 부품으로써 집합체에 가해지는 외부 축방향 하중과 집합체 자중을 지지하며, 유로판

(flow plate)의 유로구멍(flow hole)을 통하여 냉각수의 유입 및 분산을 수행함으로써 열수력 성능을 증대시키고, 하부 노심판의 정렬편을 통하여 집합체의 정위치를 유지시켜 주는 중요한 부품이다. 미래형 핵연료에 사용되는 하단고정체

* 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

** 충남대학교 대학원 기계설계공학과

*** 한국원자력 연구소

유로판의 두께 감소는 핵연료의 고연소도 달성 및 기능적 요구조건을 만족하기 위하여 필요하며, 응력해석과 이의 기계강도 검증시험은 원전 구조물의 안전성 확보를 위해 대단히 중요하다¹⁻⁴⁾.

유로판 두께를 감소시키기 위한 하단고정체의 기계강도 시험 평가는 실제 상황과 동일한 조건에서 시험 및 해석이 수행되어야 한다. 시험시 하중을 부가할 때에는 실제 구조물의 하중 조건과 동일하게 하중이 분배되는 정밀한 치구 개발이 선행되어야 한다. 모든 실험 조건들이 실제 상황과 일치되고 이를 근거로 해석 결과와 비교 분석함으로써 고도의 안정성을 유지한 상태로 원전 구조물의 최적화를 달성할 수 있다. 국내에서는 현재까지 복잡한 기하학적 형상과 하중경로를 갖는 하단고정체 구조물에 대한 기초적인 평가 결과⁵⁾가 있으나 정확한 시험 평가에 대한 연구경험은 축적되어 있지 않다. 최근 핵연료의 연소도를 높이거나 미래형 핵연료를 이용하기 위한 구조물의 설계 변경으로 상·하단고정체 사이의 공간 확보의 필요성에 따라 유로판의 두께 감소를 통한 최적화가 요구되고 있다⁵⁻⁷⁾.

본 연구에서는 하단 고정체 두께 최적화를 위해 국산 핵연료 하단고정체(KOFA)를 대상으로 하중부하방법, 유로판의 두께 변화 및 다리와 유로판 사이에 보강재(skirt)의 부착 유무에 따라 스트레인 게이지(strain gage)를 이용하여 기계강도시험을 수행하였다. 하중 부하 방법은 균일분포변위(uniformly distributed displacement)와 균일분포하중(uniformly distributed load)에 의한 두가지 방법을 이용하였으며, 구조시험 결과와 유한요소해석에 의한 결과⁶⁾를 비교하여 하단 고정체 유로판의 응력 분포 및 각종 역학적 특성을 규명하였다. 이를 근거로 원전연료 하단 고정체의 두께 감소량을 제시하여 설계 및 제작에 적용하는 것을 목적으로 연구하였다.

2. 실험 방법

기계강도 시험에 이용된 구조 시험편은 국산 핵연료 하단고정체(KOFA)로서 각 시험편의 유로구멍 치수는 9.7mm이며 유로판 두께는 19.5

mm이다⁷⁾. Fig. 1은 하단고정체의 유로판 형상 및 스트레인게이지 부착 위치를 나타낸 것으로 상면(gage 1~gage 10) 및 동일한 위치의 하면(gage 11~gage 20)에 각각 10군데씩 부착하였다. 유로판은 드릴링 가공하여 유로구멍을 형성한 후 TIG용접으로 유로판에 다리와 보강재를 부착하였다. 유로판 재질은 오스테나이트계 스테인레스강 SUS321이며, 기계적 성질은 Table 1과 같다.

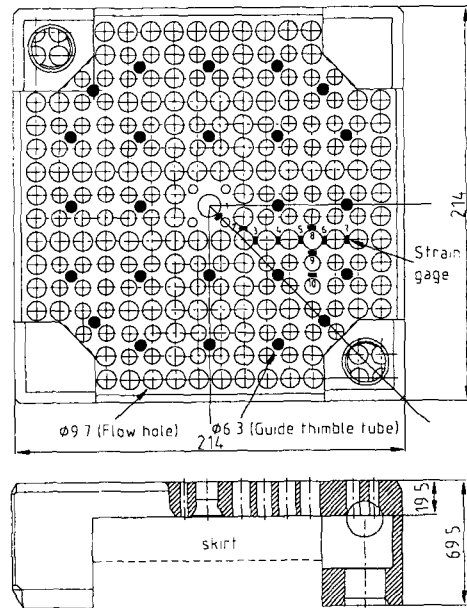


Fig. 1 Shape of bottom end piece and strain gage positions

Table 1 Mechanical properties of flow plate for SUS 321

Tensile strength(σ_u)	Yield strength(σ_s)	Young's modulus(E)	Poisson's ratio(ν)
505 MPa	205 MPa	200,000 MPa	0.3

유로판의 두께는 19.5mm 또는 18.5mm, 16.5mm, 14.5mm로 감소시키고, 하단고정체의 지지 다리를 연결하는 보강재의 부착 유무에 따라 시험하였다.

기계강도시험은 유압식 만능재료시험기(Shi-

madzu Co., Model EHF-10)을 사용하였고, 실험은 하중제어방식으로 하중속도를 10kgf/sec로 하였다. 변형률(strain) 측정은 strain indicator (Model P3500)와 switch and balance unit (Model SB10)를 2개씩 이용하여 하단고정체 유로판의 상단과 하단에 부착한 스트레인 게이지 각각 10 채널로부터 측정하였다. 사용한 스트레인 게이지는 Micro Measurement EA-09-031DE-120/LE로써 게이지 폭이 0.79mm이다. Gage factor는 2.05 ± 1.0 이며, 저항은 $120 \pm 0.4\%$ 이다.

하단고정체에 가해지는 최대하중은 핵연료 집합체(FA)와 제어봉 집합체(RCCA)의 무게를 합한 하중의 4배인 4g로 2910kgf이다⁶⁾. 이 하중은 24개 안내관을 통하여 전달된다. 실험은 500kgf 간격으로 하중을 증가시켜가며 최대하중 2910kgf까지 하중과 변형률을 측정하였다. 측정된 변형률은 Hooke's law $\sigma = E \cdot \epsilon$ 을 이용하여 응력으로 산출하였다.

하중조건은 24개의 안내관(guide thimble tube)에 의하여 하중이 고루 분산 전달되는 모델을 구현하고자 균일분포변위와 균일분포하중에 의한 두 방법을 이용하였다. Fig. 2는 균일분포변위의 시험에 대한 시험형상을 보여 주고 있다. 이 시험치구는 유로판과 정렬판 사이에 24개 안내관이 연결되고 정렬판 중앙에서 하중이 가해지면 24개의 안내관을 통하여 하중이 가해지는 구조이다. Fig. 3은 균일분포하중을 작용할 수 있도록 설계 제작된 휘플트리(whiffle tree)의 연결 구조이다. 휘플트리 형상은 링크(link)와 로드(rod)로 구성되며 연결 구조가 한점의 집중하중

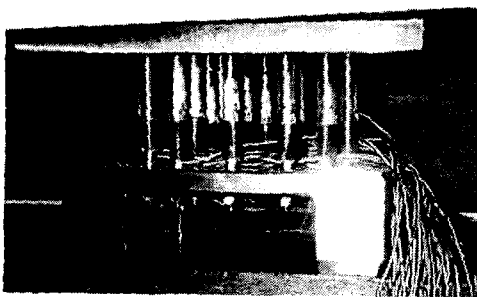


Fig. 2 Experimental apparatus to apply uniformly distributed displacement

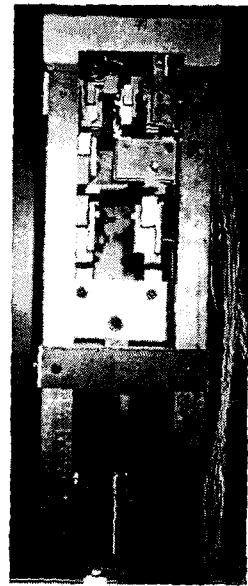


Fig. 3 Shape of whiffle tree to apply uniformly distributed load

으로 작용되어 유로판의 24개 하중점에 균일분포하중이 걸리게 된다⁷⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 하중 및 두께변화에 따른 응력 분포

Fig. 4, 5, 6, 7은 각각 균일분포변위와 균일분포하중의 보강재 부착 유무에 따라 최대하중 $P_{max} = 2910\text{kgf}$ 에서 유로판 두께 $t = 19.5\text{mm}$ (18.5mm), 16.5mm 및 14.5mm에 대한 스트레인 게이지 부착점의 응력분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4, 5의 균일분포변위인 경우 하단고정체 중앙부에서 작은 응력이 발생하고, 하단고정체 다리와 보강재에 가까운 바깥쪽에서 큰 응력이 발생하였다. 보강재가 있는 경우, 스트레인 게이지 부착점 1, 7번에서 다른 위치에 비하여 작은 응력이 발생하였다. 실험결과를 살펴보면 응력은 유로판의 두께가 감소함에 따라 증가되어야 하나 오히려 응력이 감소하는 현상이 발생했다. 이는 균일분포변위 시험조건하에서는 안내관이 유로판의 하면에 볼트체결로 하중이 부하되는데, 정렬판에 압축하중이 가해지면 유로판의 안쪽부

의 처짐이 바깥쪽에 비하여 크므로, 오히려 유로판 안쪽 안내관에서 인장력이 발생하기 때문으로 생각된다. 따라서 응력은 유로판의 안쪽부가 바깥쪽에 비하여 크게 발생하여야 하나 시험 결과는 유로판의 바깥쪽에서 더 큰 응력을 발생시키고 있다. 따라서 균일분포변위에서 이와 같은 하중이력의 보완이 필요하여, 해석에서 실제 하중조건으로 사용한 균일분포하중이 작용하도록 휘플트리 형상의 시험 치구를 개발하여 시험

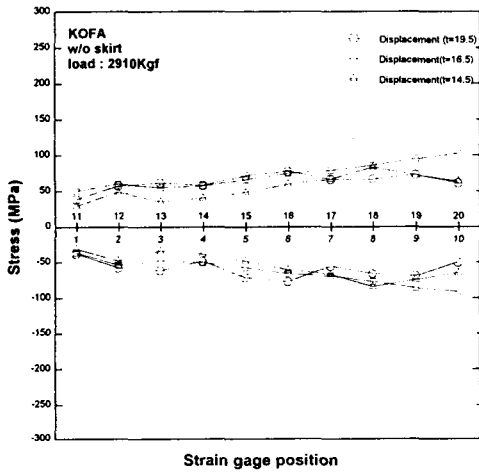


Fig. 4 Stresses of flow plate without skirt by uniformly distributed displacement

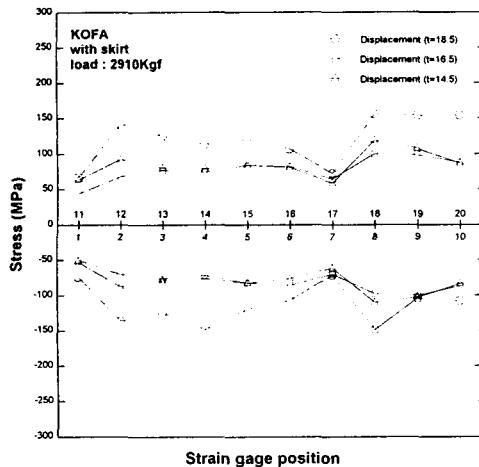


Fig. 5 Stresses of flow plate with skirt by uniformly distributed displacement

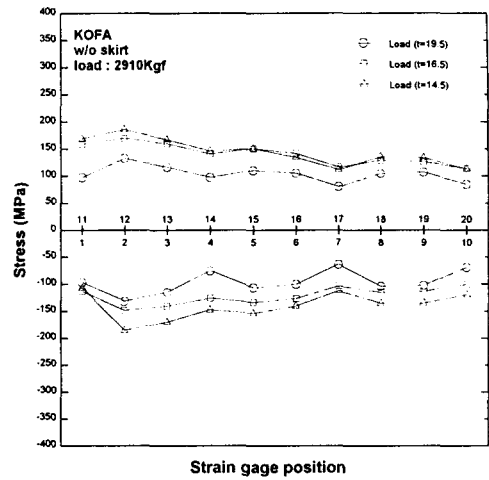


Fig. 6 Stresses of flow plate without skirt subjected to uniformly distributed load

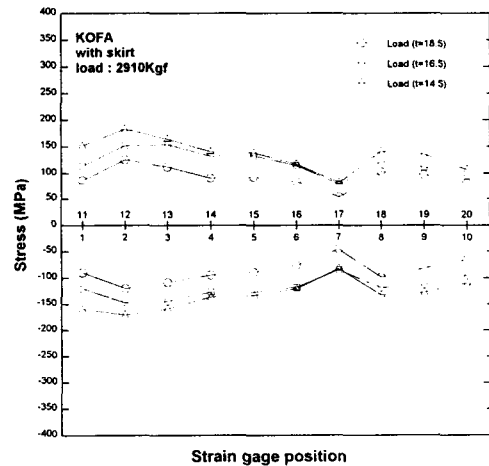


Fig. 7 Stresses of flow plate with skirt subjected to uniformly distributed load

하였다.

Fig. 6, 7은 균일분포하중하에서의 응력 분포이다. 최대 응력은 유로구멍 사이의 간격이 좁은 2, 3 및 12, 13번에서 나타났고, 최소응력은 1, 11번 위치에서 나타났다. 하단 고정체의 중앙부에서 큰 응력이 발생하고, 바깥쪽으로 갈수록 응력이 감소한다. 이는 균일분포하중에 의한 시험방법은 24개의 안내관에 하중을 고루 분산시켜 부하되는 구조이므로, 균일분포변위에 의한

시험 결과와는 상이한 경향을 나타낸다.

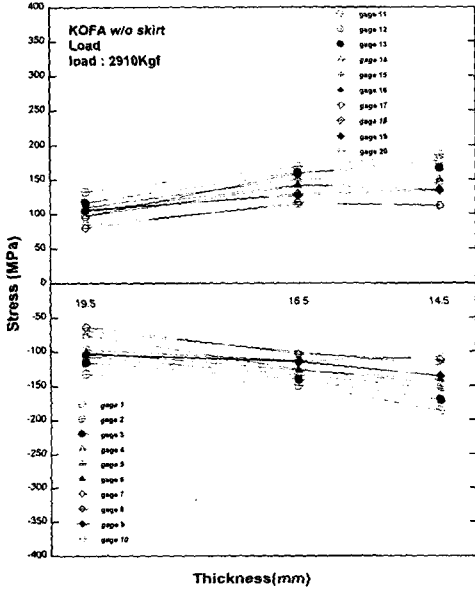


Fig. 8 Stresses according to thickness reduction of flow plate without skirt by uniformly distributed load

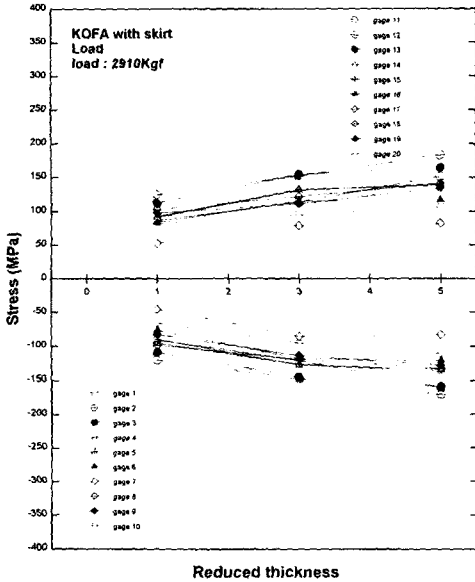


Fig. 9 Stresses according to thickness reduction of flow plate with skirt by uniformly distributed load

Fig. 8, 9는 균일분포하중에서 유로판의 각 스트레인 게이지 부착점의 응력 변화를 두께의 함수로 나타낸 것이다. 유로판 두께가 감소함에 따라 응력이 증가됨을 볼 수 있다. 유로판의 상면과 하면은 거의 동일한 경향이었고, 보강재를 부착한 경우 응력 분포는 스트레인 게이지 부착 위치에 따라 보강재를 부착하지 않은 경우보다 약간 작거나 비슷한 경향을 보였다. 이런 현상은 이물질 여과 하단고정체(DRBEP: Debris Resistance Bottom End Piece)의 시험결과에서도 동일한 경향을 보이고 있다⁷⁾.

이상의 시험결과에서, 균일분포하중을 구현할 수 있는 휘플트리법이 실제 하단고정체의 하중 상태와 유사하고, 실험데이터를 신뢰할 수 있는 유용한 실험법이라고 사료된다.

3.2 보강재 부착에 따른 영향

하단고정체 유로판의 두께 감소에 따라 약해지는 강도를 보강하기 위하여 유로판과 다리 사이에 보강재를 부착한다.

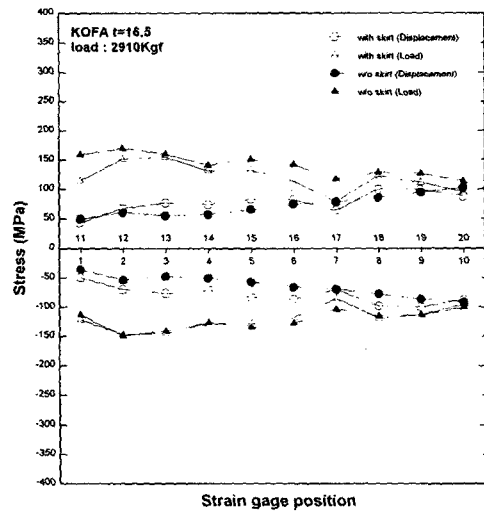


Fig. 10 Stresses of flow plate($t=16.5\text{mm}$) according to existence of the skirt

Fig. 10은 유로판 두께 $t=16.5\text{mm}$, 설계 최대 하중 $P_{\text{max}}=2910\text{kgf}$, 보강재의 부착 유무에 따른 응력분포를 비교한 것이다. 균일분포변위에서 스

트레인 게이지 부착점 1, 7, 10 및 11, 17, 20의 응력은 보강재를 부착함으로써 인해 응력이 감소 또는 거의 동일한 값을 보이고, 그 외의 응력은 증가되고 있다. 이는 3.1절에서 서술한 바와 같이 보강재가 부착됨에 따라 응력은 감소되어야 하나 균일분포하중 조건에서는 24개의 안내판에 의하여 고루 하중이 전달되지 않는 현상이 발생하기 때문으로 사료된다.

균일분포하중에서 응력분포는 보강재 부착에 따라 하면의 인장응력은 거의 동일한 값이거나 약간 작았으나 유로판 상면의 응력은 작은 값을 보이고 있어 보강재에 의한 응력의 감소 효과가 나타나고 있다.

3.3 소성 변형의 유무 평가

Fig. 11, 12는 균일분포하중에서 두께가 $t=16.5$ mm, 보강재의 부착 유무에 따른 히스테리시스 루우프로부터 구한 하중-변형률 곡선이다. 점선은 유로판 재료인 스테인레스강이 항복응력을 발생시키는 변형률의 한계값($1000 \mu\epsilon$)을 나타내며, 이 한계값을 지나면 소성변형이 발생하여 영구변형이 생긴다.

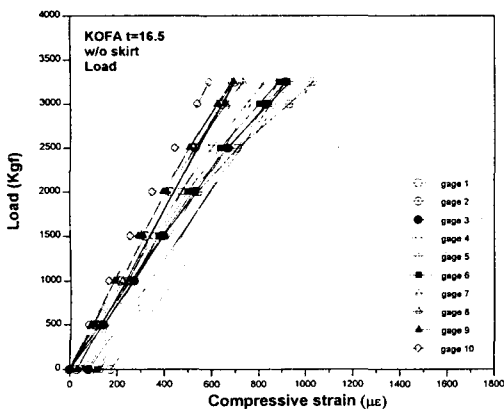


Fig. 11 Load-strain curves of flow plate without skirt by uniformly distributed load

Fig. 11을 보면 응력이 가장 크게 발생하는 유로판 중앙부의 2번 스트레인 게이지 부착점에서 미소한 영구 소성변형을 일으키고 있다. Fig. 12는 보강재를 부착한 경우 균일분포하중에서

두께가 16.5mm인 유로판의 히스테리시스 루우프이다. 어떤 스트레인 게이지 위치에서도 소성 변형이 발생되지 않았다. 이것은 보강재의 부착에 의한 보강효과 때문으로 사료된다.

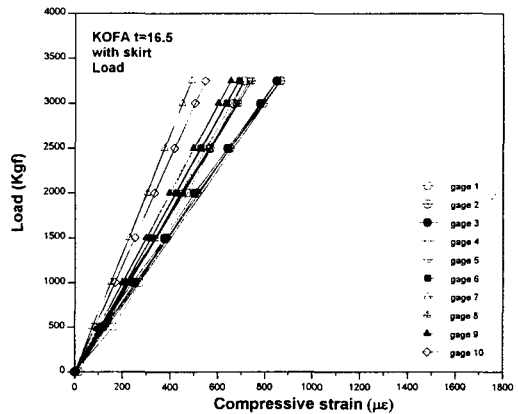


Fig. 12 Load-strain curves of flow plate with skirt by uniformly distributed load

Table 2는 모든 시편들에 대한 소성변형 발생 유무를 스트레인 게이지 위치에 따라 나타낸 것이다. 소성변형이 나타나지 않는 시편은 보강재가 없는 유로판의 두께 $t=19.5$ mm, 보강재가 있는 유로판의 두께 $t=18.5$ mm, 16.5mm이었다. 나머지 시편들은 부분적으로 소성변형을 발생시키고 있다. 따라서 소성변형을 고려하면 기존의 하단고정체의 유로판 두께는 보강재가 없는 경우, 현재의 두께 19.5mm 보다 감소시킬 수 있으며, 보강재를 부착하면 현재의 18.5mm에서 2mm까지 감소가 가능할 것으로 사료된다.

3.4 실험과 유한요소해석 결과의 비교

실험에 의한 두께 감소량을 검증하기 위한 유한요소해석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행하였다.

Fig. 13, 14는 유로판 두께 $t=14.5$ mm, 설계최대하중 $P_{max}=2910$ kgf에서 두 하중조건에 의한 실험 결과와 유한요소해석에 의한 결과⁶⁾를 비교한 것이다.

Fig. 13에서 보강재가 없는 경우 해석 결과는 균일분포하중에 의한 결과보다 작은 응력으로 평

Table 2 Occurrence of plastic deformation after test for various sizes

Specimens	Thickness of Flow plate (mm)	Gage positions																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KOFA without skirt	19.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16.5	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-
	14.5	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-
KOFA with skirt	18.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14.5	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	○	○	-

※ ○ : Plastic deformation position

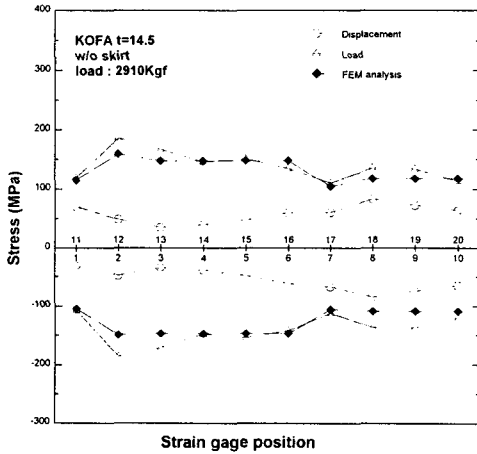


Fig. 13 Stress comparison of test results and FEM analysis in flow plate without skirt

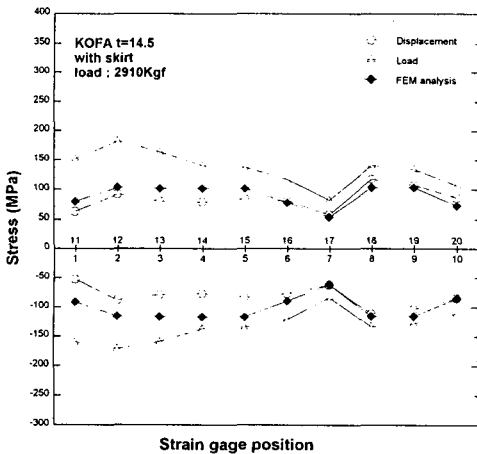


Fig. 14 Stress comparison of test results and FEM analysis in flow plate with skirt

가 되었고, 반면 균일분포변위에 의한 결과와 비교하여 큰 응력으로 과대 평가되었다. 해석과 실험 결과는 다소 차이는 있지만 균일분포하중에 의한 시험 결과가 비교적 해석 결과와 유사한 경향을 보인다.

Fig. 14에서 보강재를 부착한 경우, 해석 결과는 유로판 중앙부에서 두 하중 조건의 시험 결과 사이에 존재하나 상면의 게이지 7~10 및 하면 게이지 17~20은 균일 분포 변위의 시험결과와 비슷한 값을 보인다.

이상의 실험 및 유한요소해석 결과들을 상호 비교해보면 보강재가 없는 경우 유한 요소 해석 결과는 균일분포하중에 의한 결과와 비슷한 경향을 보이나 보강재가 있는 경우는 균일 분포변위 및 균일분포하중의 사이에 실험값 사이에 존재하고 있다.

Table 3은 유한요소해석⁶⁾과 균일분포하중에 의한 시험 결과의 응력비율을 나타낸 것이다. 보강재가 없는 경우의 유로판의 해석결과는 시험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 보강재가 없는 경우 해석 결과는 두께 변화에 따라 평균 17% 정도 과소평가 되었다. 보강재가 있는 경우, 해석 결과는 두께 변화에 따라 평균 22~42% 범위에서 과소평가 되었다.

두께 감소량을 계산하기 위한 응력기준은 ASME sec. III NB-3000 규정을 적용하였으며, 이 규정에 의한 SUS 321 스테인레스강의 경우 응력한도는 205MPa이다. ASME sec. III에서 채택하고 있는 응력기준은 최대 전단 응력설인 Tresca 이론을 사용하며, 이에 따른 응력강도 (stress intensity : SI)는 최대 주응력(σ_1)과 최소

Table 3 Stress ratio of FEM and test results

Gage NO.			Ratio of FEM / Test					
			t=19.5mm (w/o skirt)	t=18.5mm (with skirt)	t=16.5mm (w/o skirt)	t=16.5mm (with skirt)	t=14.5mm (w/o skirt)	t=14.5mm (with skirt)
Top surface	1	σ_x	0.68	0.79	0.75	0.56	0.96	0.57
	2	σ_y	0.77	0.64	0.85	0.70	0.80	0.68
	3	σ_x	0.66	0.67	0.89	0.70	0.86	0.73
	4	σ_x	1.01	0.57	0.99	0.80	0.99	0.85
	5	σ_x	0.96	0.70	0.93	0.80	0.95	0.87
	6	σ_x	0.76	0.60	0.97	0.66	1.04	0.73
	7	σ_x	1.20	0.62	0.88	0.64	0.94	0.74
	8	σ_y	0.74	0.45	0.53	0.65	0.80	0.87
	9	σ_y	0.76	0.63	0.83	0.68	0.80	0.90
	10	σ_y	1.12	0.61	0.93	0.81	0.91	0.76
	Avg.		0.866	0.628	0.855	0.70	0.905	0.77
Bottom surface	11	σ_x	0.76	0.84	0.57	0.65	0.46	0.35
	12	σ_y	0.72	0.53	0.85	0.56	0.86	0.57
	13	σ_x	0.77	0.57	0.85	0.54	0.88	0.62
	14	σ_x	0.93	0.62	0.96	0.63	1.01	0.73
	15	σ_x	0.83	0.59	0.79	0.63	0.98	0.73
	16	σ_x	0.87	0.50	0.95	0.56	0.10	0.66
	17	σ_x	0.82	0.51	0.73	0.56	0.48	0.66
	18	σ_y	0.68	0.47	0.73	0.70	0.87	0.73
	19	σ_y	0.66	0.47	0.75	0.55	0.88	0.76
	20	σ_y	0.84	0.34	0.83	0.64	1.04	0.68
	Avg.		0.788	0.544	0.801	0.602	0.756	0.649
Total avg.			0.830	0.586	0.828	0.651	0.831	0.710

주응력(σ_3)의 차이의 반과 같다. 즉

$$SI = \sigma_1 - \sigma_3 = 2 \tau_{max} \dots\dots\dots (1)$$

로써, 계산된 응력강도가 허용응력 이하이어야 한다^{8,9)}. ASME sec. III NB-3000 규정을 근거로 하여 유한요소해석에 의한 두께 감소 가능량은 보강재가 부착되지 않았을 경우 3.15mm이고, 이 두께를 갖는 하단 고정체의 최대 응력강도는 유로판 상부에서 203.5MPa이고 하부에서 178.6 MPa로써 ASME sec. III NB-3000 규정에 의한 응력 강도 기준인 205MPa를 만족하고 있다. 또한 보강재를 부착하면 두께 감소량은 3.75mm이고, 이때 최대 응력은 204.4MPa이다^{6,7)}. 따라서 해석 결과에 의한 하단고정체의 유로판의 두께 감소량은 3.3절의 소성 변형을 근거로 한 두께 감소량보다 약간 크게 계산되었다.

4. 결 론

하단고정체 유로판 두께 감소를 위한 구조시험이 스트레인 게이지를 이용하여 수행되었다. 시험은 균일분포변위와 균일분포하중의 두 가지 조건으로 수행되었고, 시험결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하단고정체에 균일분포하중이 작용되도록 개발한 휘플트리에 의한 시험결과는 균일분포변위에 의한 결과보다 실제 하중상태를 구현할 수 있는 유용한 시험방법이다.
- 2) 균일분포하중에 의한 시험 결과에서 보강재 부착으로 인한 보강효과를 확인할 수 있었다.
- 3) 유로판의 소성변형유무 및 유한요소해석 결과로부터 하단 고정체의 두께 최적화를 위한

유로판 두께 감소량을 제시하였다. 해석에 의한 두께 감소 가능량은 실험에 의한 결과보다 크게 평가되었다.

참 고 문 헌

- 1) European Patent Application No. 8810600.8, Nuclear Fuel Assembly with a Debris Filter Bottom Nozzle, Westinghouse Electric Corp., 1988.
- 2) R.D. Grimoldby, BNFL's Advanced PWR Fuel Assembly, Seminar, 1995.
- 3) Westinghouse, Nuclear Manufacturing Divisions-Westinghouse Proprietary Class 2, Introduction to Fuel Assembly Mechanical Design, Westinghouse, 1993.
- 4) Na, Kunz, Design of the Fuel Assembly Structure with Zircaloy Spacer Grids, B112/87/e268a, Work Report KNU 5-10, 1987.
- 5) 이재경, 임정식, 손동성, 이물질 여과 하단 고정체 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1264/93, 1993.
- 6) 임정식, 이재경, 하단고정체 유로판의 두께 최적화, 한국원자력연구소, KAERI/TR-518/95, 1995.
- 7) 김재훈, 사정우, 김덕희, 두께 최적화 하단고정체의 기계강도 시험 및 평가기술 개발, 한국원자력연구소 위탁연구 결과보고서, KAERI/CM-137/96, 1997.
- 8) ANSI/ANS 5.4-1983, American National Standard Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants, ANSI, 1983.
- 9) 임재수, ASME B & PV code 해석집-Section III와 XI을 중심으로, 한국전력공사 전력연구원, 96전력연-단47, 1996.