<학술논문> DOI https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.2.143 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

핵연료 지지격자체 스프링의 등가모델 연구

김희철* · 나문경** · 정혜경* · 김재용*** · 김종봉**†
* 서울과학기술대학교 자동차공학과, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과, *** 한국원자력연구원

A Study on the Equivalent Spring Model of a Nuclear Fuel Cell Spacer Grid

Hee Cheol Kim*, Mun Kyung Na**, Hye Kyung Jung*, Jae Yong Kim***
and Jong-Bong Kim**†
* Dept. of Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech,
** Dept. of Mech. and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech,
*** Nuclear fuel safety research division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received September 10, 2017 ; Revised October 15, 2017 ; Accepted October 17, 2017)

Key Words: Minimum Deformation Energy(최소 변형 에너지), Equivalent Model(등가모델), Space Grid(지지격자), Spring(스프링)

초록: 핵연료집합체는 상단고정체, 하단고정체, 지지격자체로 이루어져 있다. 그 중 지지격자체는 운송중인 핵연료봉을 지진 및 교통사고와 같은 외부 하중으로부터 보호하는 역할을 한다. 지지격자체의 보호 성능은 실험 및 계산 비용 한계로 인해 전체 지지격자체가 아닌 일부 지지격자에 대해서만 연구가 진행되었다. 또한 전체 핵연료집합체에 대한 수치해석은 매우 많은 수의 요소를 사용해야 하기 때문에 쉽지 않다. 특히 지지격자체의 스프링을 표현하는데 많은 수의 요소가 사용된다. 따라서 본 연구에서는 핵연료 전체에 대한 해석이 가능하게 하는 사전 연구로, 동일한 거동을 가지는 등가의 단순 형상의 스프링에 대해 연구하였다. 최소 변형 에너지 방법을 사용하여 동일한 거동을 갖는 단순한 형상의 등가모델을 설계하고 검증하였다. 결과적으로 동적 문제 해석 시간을 약 80% 줄일 수 있었다.

Abstract: A nuclear fuel assembly consists of a top end piece, bottom end piece, and spacer grids. The spacer grid assembly has the role of protecting the fuel rod against external loads such as earthquakes and car accidents during transportation. Thus far, the protection capability of the spacer grid has been studied for only one layer of spacer grid owing to experimental and computational cost limits. Numerical analysis for the whole fuel cell assembly is very difficult because it requires the use of a very large number of elements. In particular, a very large number of elements is required to represent the spring of the spacer grid. Therefore, a simplified equivalent model that exhibits the same behavior as the original model is designed using the minimum deformation energy method. The designed equivalent model is verified using a well-known commercial code. As a result, it is shown that the computation time can be reduced by 80% using the equivalent spring model.

- 기호설명 -

Π : 전체변형에너지
U_c : 압축에너지
U_b : 굽힘에너지
U_s : 전단에너지
W : 외부 일

† Corresponding Author, jbkim@seoultech.ac.kr
© 2018 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근 우리나라의 에너지 소비율은 지속적으로 증가세를 보이고 있다. 특히 에너지 중 전력 에

너지의 소비율이 높게 나타나고 있으며 온실가스 감축을 위한 전력 소비 절약과 친환경 에너지 발전을 확충하는 것이 시급하다. 하지만 좁은 국토 면적, 신재생 에너지 잠재력이 낮다는 점을 감안하면 원자력 발전소에 일정 부분 의존할 수밖에 없다. 현재 우리나라의 원자력 발전 비중은 31%로 전체 발전원 중 2위이다. 이러한 원자력 발전을 위해서는 원자로내의 핵연료 집합체가 필요하다. 핵연료 집합체는 핵연료봉과 핵연료 골격체로 Fig. 1과 같이 구성된다. 핵연료 골격체는 핵연료봉을 지지하고 제어봉이 노심내로 삽입되는 안내 경로를 제공하는 역할을 한다. 핵연료 골격체는 지지격자, 안내관, 하단 및 상단고정체로 구성된다.[2] 지지격자는 구조적/기계적 기능을 가지며 스프링과 딤플로 구성된다. 스프링과 딤플은 지진이나 원자로 사고와 같은 외부에서 가해지는 하중으로부터 장입된 핵연료봉을 보호하는 역할을 하며 구조물의 형상이 크게 변하지 않도록 한다. 따라서 핵연료 성능과 밀접하게 관련되어 있는 지지격자의 성능은 중요하다.[3]

Kim 등[4]은 5×5 지지격자의 진동특성을 연구하기 위해 실험과 유한요소해석을 진행하였고 Lee 등[5]은 핵연료봉 지지격자의 설계에 대해 연구하였다. Jeon 등[6]은 지지격자의 좌굴 특성에 관하여 연구를 진행하였다. Lee 등,[7] Song 등,[8~10] 그리고 Kim 등[11]은 지지격자의 충격강도에 대해 해석과 시험으로 연구하였다. 이 연구들은 Fig. 1에 보인 전체 지지격자체에 대한 것이 아닌, Fig. 2(a)에 보인 1개 층의 격자체에 대해 수행되었다.

최근에는 이전 연구와 같은 단품에 대한 연구와 더불어, 사용 후 연료의 이동과 관련하여 집합체 전체에 대한 해석적 연구 필요성이 증가하고 있다. 사용 후 연료를 발전소에서 보관 장소로 이동 중 차량의 진동이나 충돌, 그리고 보관 중에 발생할 수 있는 지진에 의한 핵연료 집합체의 안정성에 대한 연구가 필요하기 때문이다. 하지만, 핵연료 집합체 전체에 대한 해석은 매우 많은 요소를 필요로 하기 때문에 현재까지 해석은 거의 없는 수준이다. Morales 등[12]은 SAVAN 프로그램을 이용하여 핵연료 집합체 골격에 대한 변형 등을 단순한 모델로 해석을 수행하였다.

그러나 핵연료 집합체를 보다 상세하게 해석하기 위해서는 집합체의 지지격자를 상세히 모델링하여 해석해야 한다. Fig. 2(a)는 1개 층의 지지격자체(Spacer Grid)를 보여준다. 지지격자의 각 면에는 Fig. 2(b)와 같이 스프링과 딤플이 형성되어 핵 연료봉을 지지하고 있다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 'S'라고 표시된 부분의 상세 형상과 치수를

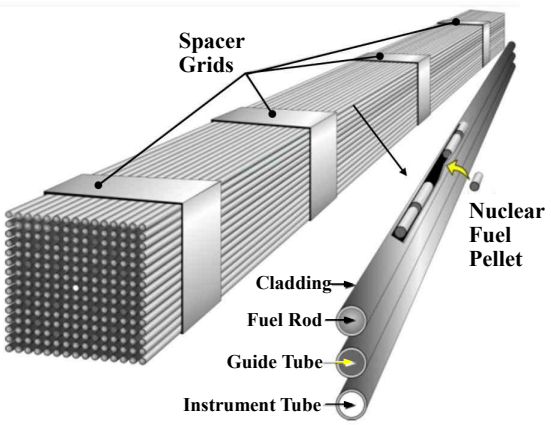
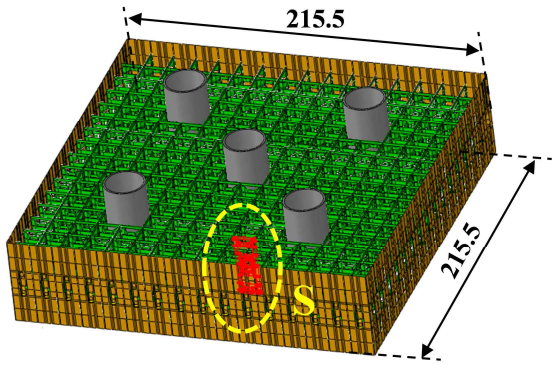
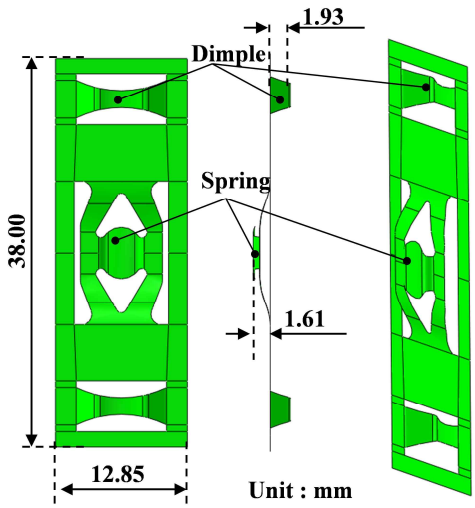


Fig. 1 An example of multi-layered spacer grid[1]



(a)



(b)

Fig. 2 (a) One layer spacer grid and (b) detailed view and dimensions of one section spring and dimple that is marked 'S' in Fig. 2(a)

보여준다. 진동과 충격의 상황에서 핵연료봉의 손상을 분석하기 위해서는 스프링과 딤플에서 연료봉에 전달되는 힘을 해석해야 한다. 하지만, 모든 스프링과 딤플을 Fig. 2(b)에 보인 형상으로 유한요소로 모델링할 경우 매우 많은 요소의 개수가 필요하여 과도한 해석 시간이 요구된다.

그렇기 때문에 실제 스프링과 같은 거동을 보이면서 보다 단순한 형상으로 결정하여 요소의 개수를 줄일 필요성이 크게 요구된다. 본 연구에서는 최소 변형 에너지 방법을 이용하여 실제 스프링과 같은 정적 거동을 보이는 단순한 형상의 등가 스프링과 딤플을 결정하였다.

범용 해석프로그램인 ABAQUS[13]를 이용하여 단순화한 스프링의 하중-변위 관계의 정적 거동과 시간-변위 관계의 동적 거동이 단순화하진 않은 원래의 스프링과 거의 같음을 확인하였고 최종적으로 요소의 개수를 약 1/4로 줄일 수 있음을 확인하였다.

2. 등가모델 구성방법

2.1 최소 변형 에너지 원리 적용

상용 프로그램을 이용한 해석 전에 최소 변형 에너지 이론을 엑셀에 적용하여 스프링의 단순한 형상을 결정하였다. 본 연구의 대상 지지격자체 형상은 Fig. 2에 나타나 있다. 1층의 지지격자체는 16 x 16개의 반복되는 그리드가 있고, 4개의 그리드가 합쳐진 큰 그리드 5개에는 안내관이 삽입되고, 나머지 236개의 그리드에는 연료봉이 삽입된다. 각각의 그리드 벽에는 Fig. 2(b)와 같이 스프링과 딤플이 형성된다. Fig. 3은 1개의 그리드에 연료봉이 삽입된 형상을 보여준다. 연료봉은 2개의 면에서 스프링과 접하고, 나머지 2개의 면에서는 딤플과 접하여 충격이 완화된다. 스프링과 딤플은 형상이 복잡하므로 해석에서 많은 개수의 요소가 필요한 부분이다.

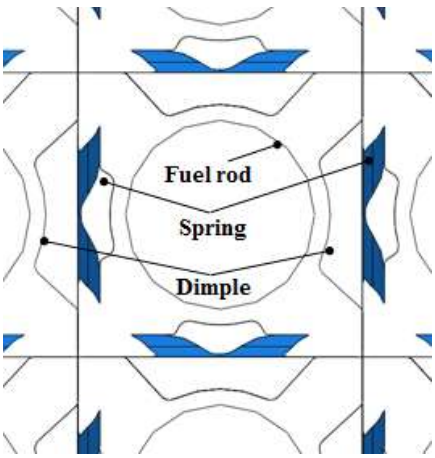


Fig. 3 Detailed view of fuel rod and spacer grid

Fig. 4는 스프링의 상세 형상을 보여준다. 스프링은 y축 방향으로 평행한 Spring A와 x축 방향으로 평행한 Spring B로 구성되어 있다. 이와 같은 스프링과 등가의 스프링 형상 설계를 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 하지만, 본 연구에서는 간단한 식으로 설계하기 위해 스프링 2개의 부분을 각각 분리하여 설계함으로서 2차원으로 해석하였다. 예를 들면 Spring A의 단순화 형상을 Fig. 5와 같이 하고자 한다. y축 방향으로 평행하고 폭만이 서로 다르게 설정되는 구조이다.

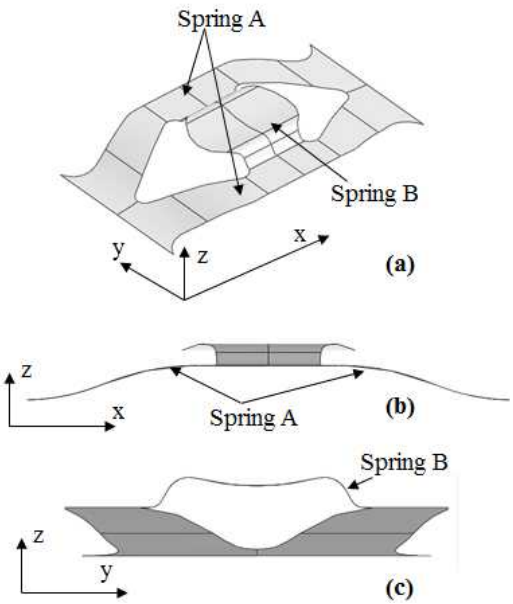


Fig. 4 Detailed view of a spring: (a) iso-view, (b) x-z plane view, and (c) y-z plane view

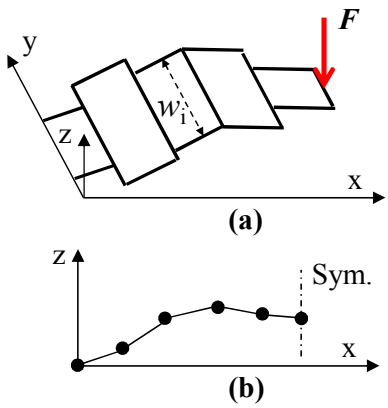


Fig. 5 Schematic illustration of a simplified spring: (a) iso-view and (b) x-z plane view

Spring A와 Spring B에 대해 각각 정적 거동 즉 스프링 상수가 같도록 Fig. 5(a)와 같은 단순한 형상을 최소 변형 에너지 방법을 이용하여 설계하였다.

Fig. 6은 초기 형상과 변형 형상에서 좌표 및 shell 요소의 수직 벡터를 보여준다. 벡터에서 위첨자 n은 절점, e는 요소를 의미하고 아래첨자의 첫 번째 숫자 0은 변형 전 상태, 1은 변형 후 상태를 의미하며 두 번째 숫자 i는 현재 절점 또는 요소이며 i-1, i+1은 각각 이전과 다음의 절점 또는 요소를 나타낸다.

절점에서의 수직벡터는 다음과 같이 전 요소와 현재 요소의 평균으로 설정하였다.

$$\vec{n}^{n}_{0,i} = \left(\vec{n}^{e}_{0,i-1} + \vec{n}^{e}_{0,i}\right)/2 \tag{1}$$

요소의 수직벡터와 길이는 요소를 이루고 있는 두 개의 절점 좌표를 이용하여 계산할 수 있다. Fig. 6과 같이 변형될 때, 변형 모드는 Fig. 7과 같이 3개로 분리할 수 있다. 스프링은 두께가 매우 얇은 판재이기 때문에 두께는 변하지 않는다고 가정하고 3가지 변형에 대한 에너지를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$U_c = \int \frac{1}{2} E\epsilon^2 dV = \sum_i \frac{1}{2} E\left(\frac{\Delta L_i}{L_i}\right)^2 t w_i L_i \tag{2}$$

$$U_b = \int \frac{M^2}{2EI} dx = \sum_i \frac{1}{2} EI_i \frac{\Delta\theta_i^2}{L_i} \tag{3}$$

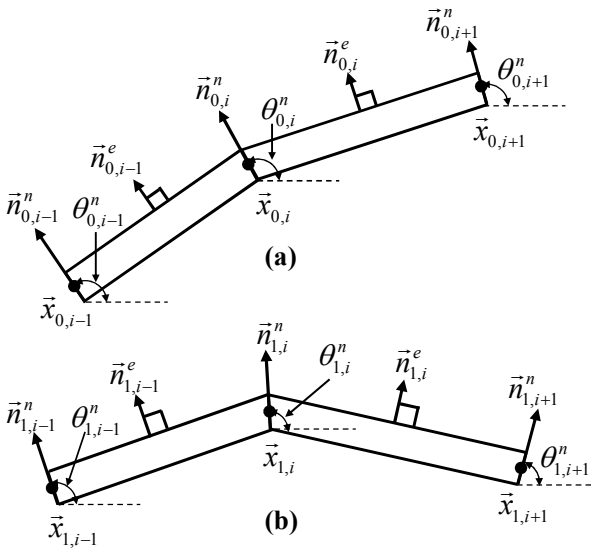


Fig. 6 Schematic illustration shell deformation and normal notation at (a) undeformed and (b) deformed configuration

$$U_s = k\int \frac{\tau^2}{2G} dV = k\sum_i \frac{1}{2} G\left(\frac{\Delta\theta_i}{2}\right)^2 t w_i L_i \tag{4}$$

식 (2)~(4)는 각각 압축, 굽힘, 전단변형 에너지를 구하는 식이다. E는 탄성계수, G는 전단계수, L_i는 i번째 요소의 길이, ΔL_i는 i번째 요소의 길이 변화, w_i는 폭, t는 두께, I는 단면 2차 모멘트, M은 모멘트, τ는 전단응력이다. 전단변형 에너지는 변형을 안정화시키기 위한 목적으로 이용이 된다. 그래서 전단에너지 보정 계수 k를 이용하여 실제 변형에너지 보다 작은 값을 이용하였다. 본 연구에서는 k값으로 0.1을 사용하였다. $\Delta\theta_i$는 요소를 이루고 있는 두 절점의 각도 변화로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\theta_i = (\theta^n_{1,i} - \theta^n_{0,i}) - (\theta^n_{1,i-1} - \theta^n_{0,i-1}) \tag{5}$$

어떠한 물체가 변형이 일어날 때 변형에너지가 최소화되는 방향으로 변형이 발생한다는 원리이며 전체변형에너지 Π는 다음과 같이 정의된다.

$$\Pi = U + W \tag{6}$$

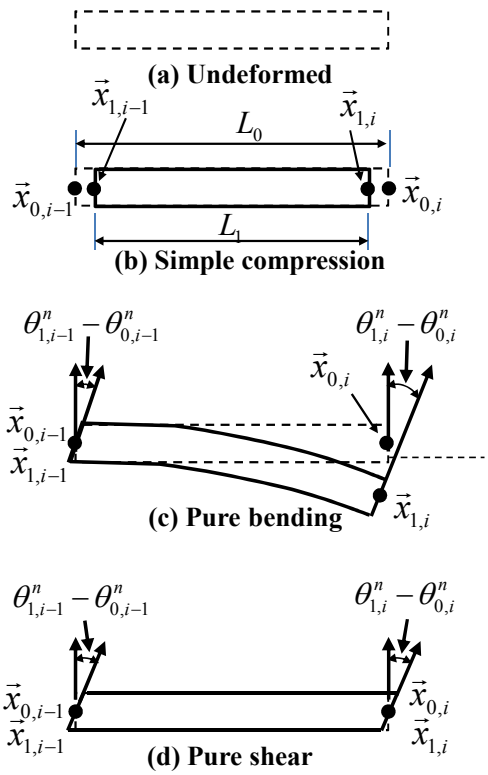


Fig. 7 (a) Undeformed shape and (b) simple compression, (c) pure bending, and (d) pure shear deformation configuration

Table 1 Mechanical properties of Zircaloy-4

	Zircaloy-4
Young's modulus	113.7 GPa
Poisson's ratio	0.29
Stress-strain relation	$\sigma = 157 + 543\varepsilon^{0.163}$

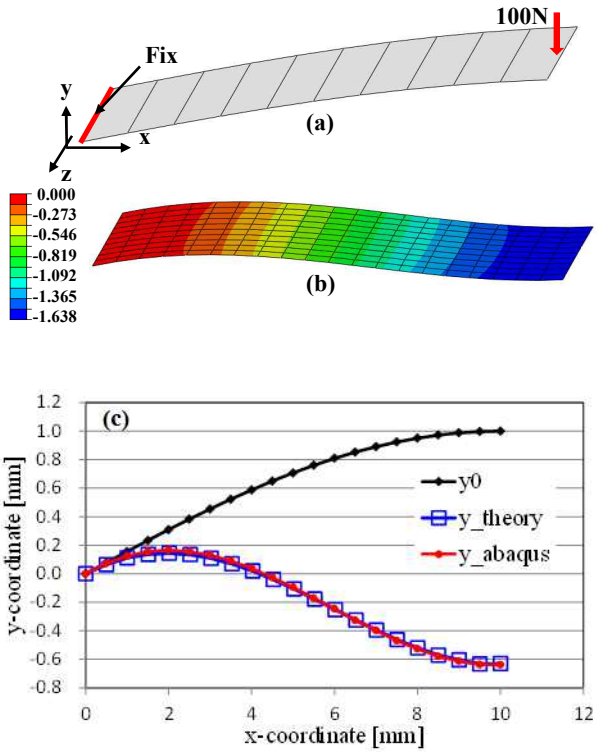
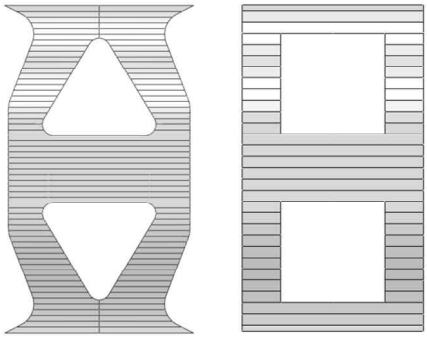


Fig. 8 Model and analysis results for verification: (a) analysis model, (b) analysis result, (c) undeformed and deformed profiles

여기서 U는 물체의 변형으로 인해 물체에 저장되는 변형에너지이며 $W(=-Fu)$는 외력에 의해 물체에 가해진 에너지이다. 초기 형상은 주어지고 Fig. 4(a)에서 F의 힘이 가해졌을 때, 변형된 형상을 Microsoft 엑셀에서 해찾기 기능을 이용하여 계산하였다. 스프링의 소재는 Zircaloy-4이고 물성은 Table 1과 같다.[9]

2.2 검증

Fig. 8은 검증 모델과 결과를 보여준다. Fig. 8(a)는 검증을 위한 초기 형상이다. z방향으로 폭은 5.0mm, x축 방향 길이는 10.0mm, 두께는 0.5mm, 형상은 y=sin(πx/20)이다. 왼쪽 변은 고정하였고, 오른쪽 변은 대칭 조건을 적용하였다. Fig. 8(b)는 검증을 위해 ABAQUS[13]를 이용하여 해석한 결과를 보여준다. Fig. 8(c)는 초기 형상, 이론으로 계산한 형상, 그리고 ABAQUS를 이용해 계산한 x-y 형상을 보여준다. 100N의 힘이 가해진 오른쪽 끝 점의 변위는 이론과 ABAQUS를 이용해 계산한 값이 각각 1.630, 1.638mm로 약 0.5%의 오차로 잘 맞는 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 작성한 이론식을 등가 모델 설계에 적용할 수 있음을 확인하였다.



(a) Original (b) Equivalent

Fig. 9 Original and equivalent shape of "Spring A" region

3. 등가모델 설계

본 연구에서는 Fig. 2(b)에 보인 내부 그리드의 스프링과 딤플의 등가 형상을 설계하는 것이다. 해석에 필요한 유한요소의 개수를 줄이기 위해 기존 형상과 같은 정적 및 동적 거동을 가지면서 형상이 단순한 등가 형상을 설계하는 것이다. 기존 형상에 대해 ABAQUS[13]를 이용하여 스프링 상수를 구하고, 엑셀로 작성한 이론식으로 같은 스프링 상수가 되도록 단순한 형상의 폭을 결정하는 방법으로 진행하였다.

3.1 스프링 다리부(Spring A) 등가 형상 설계

다리부는 형상과 측면의 곡률이 복잡하여 형상을 먼저 결정하고 선형화를 하였다. 엑셀을 통해 다리부 등가모델의 형상을 구한 결과는 Fig. 9(b)와 같다. 기존 형상과 등가 형상에 대해 ABAQUS[13]를 이용해 검증 해석한 변위-반력의 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 기존 모델과 등가 모델이 같은 거동을 보임을 알 수 있다.

3.2 스프링의 중앙부(Spring B) 설계

3.1절과 같은 방법으로 스프링 중앙부(Fig. 4(a)의 Spring B)에 대해 등가 형상을 설계하였다.

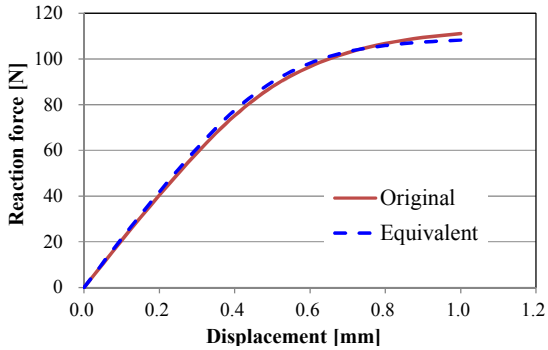


Fig. 10 Comparison of force-displacement

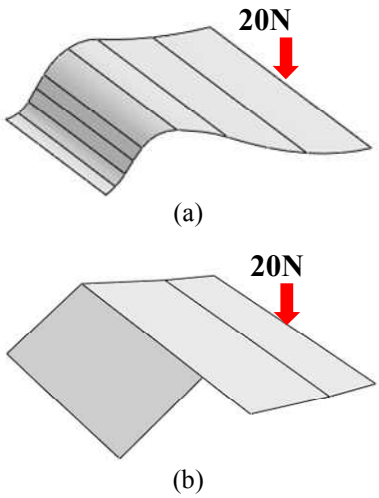
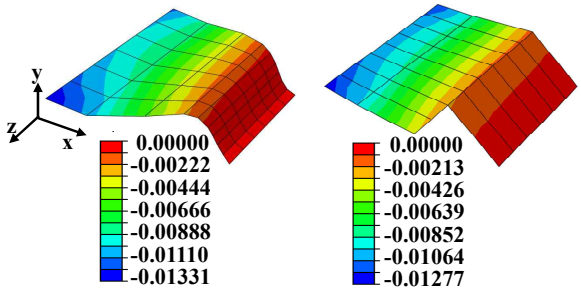


Fig. 11 (a) Original and (b) equivalent shape of 'Spring B' region



(a) Original shape (b) Equivalent shape

Fig. 12 Y-displacement of original and equivalent model for 'Spring B' region

Fig. 11(a)는 기존의 형상이며 형상 대칭을 고려해 1/4 형상만 해석하였다. 엑셀을 이용해 등가모델을 구한 결과는 Fig. 11(b)와 같다. 등가모델에 대해 ABAQUS[13]를 통해 수직 변위를 검증한 결과, 기존모델과 등가모델의 y축 변위는 각각 0.01331과 0.01277mm로 약 4%정도의 오차를 가짐을 확인하였다. Fig. 12는 기존 형상과 등가 형상에 대해 해석한 결과를 보여준다.

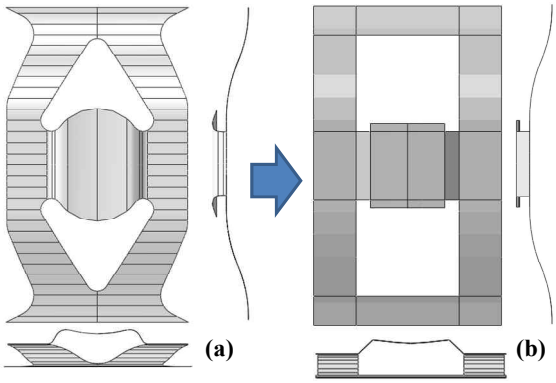


Fig. 13 (a) Original and (b) equivalent spring

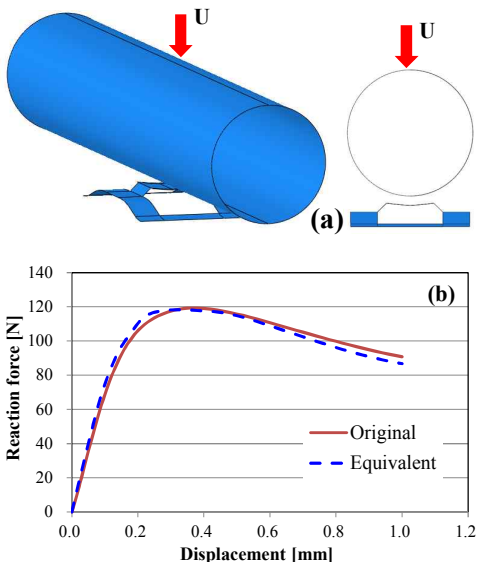


Fig. 14 (a) Analysis model and (b) comparison of reaction force

3.3 스프링 등가모델 결정

3.1부터 3.2까지의 해석 결과를 통합하여 스프링의 등가모델을 Fig. 13과 같이 결정하였다. 결정한 등가모델에 대해 Fig. 14(a)와 같이 연료봉과 조립된 모델에 대해 해석을 진행하였다. 연료봉은 강체로 모델링하였고 연료봉에 스프링 방향으로 변위를 가하면서 스프링 끝에서 반력을 계산하여 비교하였다. 기존 모델과 등가모델에서 계산된 반력은 Fig. 14(b)와 같다. 기존 모델과 등가모델의 최대 반력은 각각 118.3과 119.5N으로 약 1%의 오차를 보였다.

3.4 요소 개수 효과 분석

기존 스프링의 경우 형상이 복잡하고 곡선이

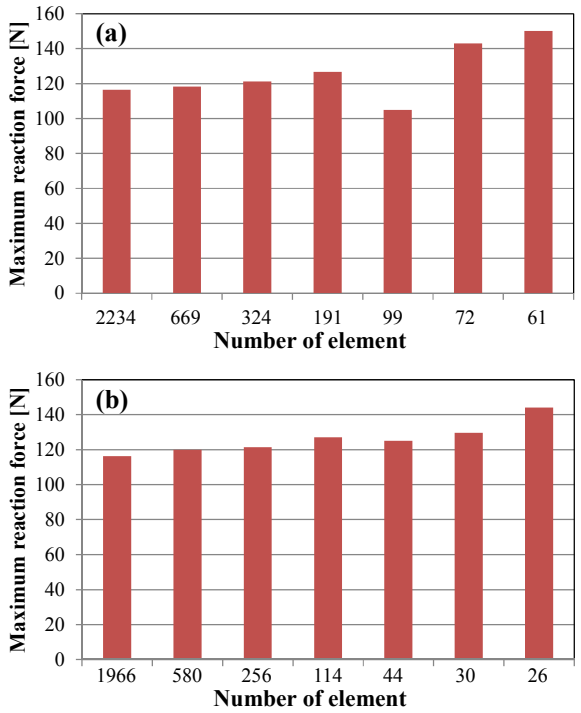


Fig. 15 Maximum reaction force for number of element: (a) original (b) equivalent model

많이 포함되어 있어 곡선을 표현하기 위해서는 많은 요소가 필요하다. 따라서 요소 개수에 따른 최대 반력을 계산하였다. 해석은 Fig. 14(a)와 같이 연료봉을 추가하여 해석하였다. Fig. 15는 기존 스프링과 등가스프링의 요소수에 따른 최대 반력을 보여준다. 기존 모델의 경우 요소 191개까지는 요소 개수가 작아지면 최대 반력이 조금씩 증가하다가 요소 개수가 99개 이하가 되면 불안정한 결과를 보여준다. 등가 모델의 경우 요소 30개까지는 요소 개수가 작아지면 반력이 조금씩 증가하지만 안정적인 결과를 보인다. 요소 개수가 26개가 되면 최대 반력이 다소 크게 커져서 오차가 커지며 결과적으로 스프링 묘사에 필요한 요소의 수를 약 64% 줄일 수 있었다.

4. 지지격자체를 이용한 검증

3장에서 설계한 등가모델을 이용하여 3×3 지지격자체를 모델링하여 효용성을 확인하였다. 해석은 Fig. 16 왼쪽과 같이 3×3 그리드 모델로 진행하였다. 정적해석의 경계조건은 Fig. 16 오른쪽과 같이 중앙의 연료봉을 완전구속하고 그리드를 수직방향으로 1.0mm 이동시키면서 연료봉에 가해지는 반력을 분석하였다. Fig. 17은 원래 형상과

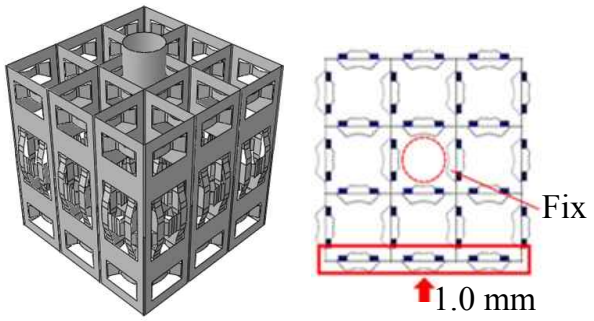
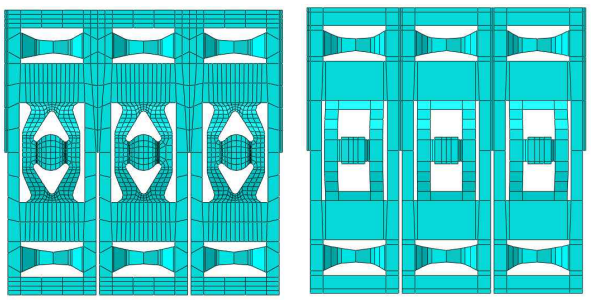


Fig. 16 3×3 analysis model (left) and boundary conditions (right)



(a) original (b) equivalent

Fig. 17 Mesh structure of the 3×3 analysis model

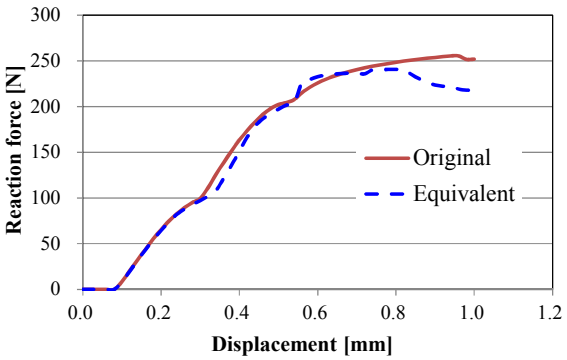


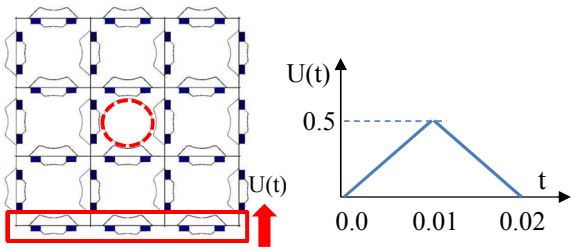
Fig. 18 Reaction force-displacement curve of static analysis

등가 형상의 유한요소 구조를 보여준다. 요소 생성은 Fig. 15의 결과를 기초로 하여 선정하였다. 원래 형상은 10,832개의 요소로, 등가형상은 2,712개의 요소로 구성하여 요소비가 약 4.0이다. Fig 18은 해석한 변위-반력 결과를 보여준다. 변위 0.8mm까지는 반력이 거의 같아서 정적 거동은 같음을 알 수 있다. 스프링의 높이가 1.4 mm임을 감안하면 스프링 변위 약 60%까지 동일함 거동을 보인다고 볼 수 있다.

Fig. 19는 동적해석의 경계조건을 보여준다. 초기에 정지해 있는 상태에서 Fig. 19(a) 아랫면에

Table 2 Summary of analysis results

Model	No. of elements	Analysis time (min.)	
		Static	Dynamic
Original (A)	10,832	12.5	159.3
Equivalent (B)	2,712	3.5	29.2
Ratio (B/A)	0.25	0.28	0.18



(a) boundary condition (b) displacement-time

Fig. 19 Boundary conditions for dynamic analysis

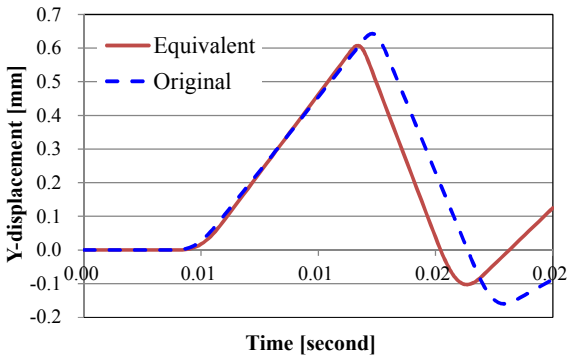


Fig. 20 Displacement-time curve of fuel rod in dynamic analysis

Fig 19(b)와 같은 시간에 따른 변위를 가하면서 연료봉의 거동을 관찰하였다. Fig. 20에 보인 연료봉의 거동을 보면 초기 가속하는 거동은 같지만, 최대 변위는 약 5% 오차가 있음을 알 수 있다.

Fig. 18과 Fig. 20의 결과로 볼 때, 등가 모델이 정적 거동 및 동적 거동이 기존 모델과 약 5% 오차로 같음을 알 수 있다.

Table 2에 해석 시간을 정리하였다. 스프링 등가모델을 설계하여 요소의 개수는 최대 25%까지 줄였고, 해석 시간은 정적해석과 동적해석에서 각각 28%와 18%로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지지격자체의 구성요소인 스프링에 대한 등가모델을 최소 변형 에너지 원리를 통해 설계하였고 기존 모델과 비교하여 효율성을 검증하였다. 최소변형에너지 이론으로 설계한 등가 스프링 형상과 기존 형상에 대해 정적해석을 수행하여 정확성을 보증하기 위해 해석에 필요한 최소의 요소수를 결정하였다. 그리고 결정된 형상과 요소 개수를 이용하여 조립된 형상에 대한 정적 및 동적 해석을 수행하였다. 정적해석은 스프링 변위 0.8mm까지 동일함을 알 수 있었다. 동적 해석의 경우 최대 변위가 약 5% 오차가 있음을 확인하였다. 해석 시간은 정적 해석과 동적해석에서 각각 72%와 82% 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 2015년도 미래창조과학부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(NRF-2016M2A8A5904254)

참고문헌
(References)

(1) https://sanonofresafety.org/nuclear-waste
(2) Kim, D. W., Lee, H. A., Song, K. N., Kim, Y. I. and Park, G. J., 2007, "Nonlinear Response Structural Optimization of a Spacer Grid Spring for a Nuclear Fuel Rod Using the Equivalent Loads," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 12, pp. 1165~1172.
(3) Song, K. N., Heo, S. P., Yoon, K. H., Kang, H. S. and Jung, Y. H., 2002, "Elastic-plastic Characteristic Analysis and Test on the Spacer Grid Springs for PWR," *Proc. Korean Soc. Mech. Eng., Materials and Fracture*, pp. 157~162.
(4) Kim, K. H., Park, N. G., Kim, K. J. and Suh, J. M., 2012, "The Grid Strap Vibration Characteristics of the 5×5 Nuclear Fuel Mock-up," *Trans. Korean Soc. Noise and Vibration Engineering,* Vol. 22, No. 7, pp. 619~625.
(5) Lee, H. A., Kim, C. K., Song, K. N. and Park, G. J., 2007, "Design of a Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Impact and Wear," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A,* Vol. 31, No. 10, pp. 999~1008.
(6) Jeon, S. Y. and Lee, Y. S., 2005, "A Study on the Buckling Characteristics of Spacer Grids in Pressurized Water Reactor Fuel Assembly," *J. Computational Structural Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 405~416.

(7) Lee, S. B., Kim, Y. W. and Song, K. N., 2008, "Parameter Study for a Dimple Location in a Space Grid under the Critical Impact Load," *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 22, pp. 2024~2029.
(8) 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. Koren Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, pp. 1175~1183.
(9) Song, K. N. and Lee, S. H., 2012, "Lateral Crush Strength of Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Weld Properties," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, pp.1663~1668.
(10) Song, K. N., Lee, S. B., Shin, M. K., Lee, J. J. and Park, K. J., 2010, "New Spacer Grid to Enhance Mechanical/Structural Performance," *J. Nuclear Sci. Tech.*, Vol. 47, No. 3, pp. 295~303.
(11) Kim, J. Y., Yoon, K. H. and Song, K. N., 2006, "Effect Evaluation of Geometrical Non-uniformity of the Guide Tube Cell for Local Buckling," *Proc. Korean Soc. Mech. Eng., Spring,* pp.1322~1326.
(12) Morales, M., Cerracin, A., Aleshinm, Y. and Kim, J. H., 2012, "SAVAN3D: Improving Simulation Capabilities of the SAVAN Technology," *Proc. 2012 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Machester, UK, Sept. 2~6*, pp.1~8.
(13) ABAQUS, ABAQUS Manual, Version 6.12, Dassault Systems, USA, 2012.