

하나로 캡슐 지지용 와이어 스프링의 강성해석

강영환

한국원자력연구소

이영신 · 최명환

충남대학교

요 약

와이어 스프링은 재료 조사시험용 캡슐을 노내에 장·탈착할 때 안내역할을 하고, 조사 시험중 캡슐에 수평방향의 외력이 작용하였을 때 이를 완화해 주는 역할을 하도록 설계되었다. 와이어 스프링의 강성은 특히 내진으로 인한 캡슐의 구조건전성 확보에 중요하므로, 본 연구에서는 스프링 강성에 스프링 와이어의 직경, 길이 그리고 형상이 미치는 영향을 해석하였다. 또한 실험을 통하여 해석 결과와 비교·검토하여 설계 요구사항을 만족 하도록 하였다.

1. 서 론

다목적 연구로인 하나로(Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor : HANARO)를 이용한 계장캡슐(instrumented capsule)은 원자력 핵심 부품재의 노내 거동평가 및 예측, 새로운 원자력 재료개발이나 이들 재료의 노내 조사거동을 파악하기 위하여 개발되고 있다[1].

와이어 스프링(wire spring)은 캡슐을 하나로 노내 육각형의 조사공(test hole)에 장·탈착할 때 안내역할을 하며, 캡슐하부 rod tip이 고정판(mounting spider)에 장착되어 조사시험하는 동안에 수평방향으로 작용하는 외부하중을 완화해 주면서 캡슐을 지지해 주는 역할을 하기 위하여 캡슐본체(mainbody)와 보호관(protection tube)이 연결되는 부위에 설치되도록 설계되어 있다.

스프링의 강성은 캡슐 구조물의 내진 안전성에 중요한 인자로 작용한다. 특히, 운전정 지지진(SSE) 작용시 캡슐과 조사공이 다른 주변의 구조물과 간섭을 일으키지 않도록 설계되어야 한다. 와이어 스프링은 내진해석을 통하여 약 15 N/mm 정도의 강성을 가져야 하는 것으로 밝혀졌다[2].

본 연구에서는 와이어 스프링의 강성에 영향을 미치는 스프링 와이어의 직경, 스프링 길이 그리고 접촉점 위치에 따른 강성을 해석하여, 각 매개변수에 따른 스프링 강성에 대하여 고찰하였다. 또한 실험적으로 검증하기 위하여 접촉점, 스프링 길이 등이 다른 스프링 시편을 제작하여, 굽힘시험을 통하여 스프링 상수를 결정하고 해석 결과와 비교·검토하였다.

2. 유한요소해석

2-1. 해석 모델

와이어 스프링은 판상링(ring)에 60° 간격으로 용접되어 캡슐본체의 상부에 설치된다. 스프링의 강성해석을 위해 사용한 프로그램은 ANSYS[3]이며, 와이어 스프링 한 개에 대하여 모델하였다. Fig. 1에 접촉점에 대칭 형상인 스프링의 유한요소 해석모델과 모델 각 절점의 좌표값을 나타내었고, 사용한 요소는 37개의 2차원 보요소(BEAM3)이다. 모델에서 스프링 상·하부(절점 #38, 1)는 링에 고정되는 부위이고, 절점 #14는 설치후 조사공과 접하는 접촉점이다. 본 연구에서 고려한 스프링의 재료는 SA-240 Type 304 스테인레스강이고, 물성은 ASME Code Appendix I[4]의 값을 사용하였다.

2-2. 하중 및 경계조건

유한요소 해석에서 고려한 하중은 스프링과 조사공이 접촉하는 부위에 작용하는 단위하중(unit force)이고, 이때 하중과 변위의 관계를 이용하여 스프링의 강성을 결정한다.

경계조건은 스프링의 상부(모델에서 절점 #38)는 항상 완전고정으로 고려하였고, 스프링의 하단부(절점 #1)는 완전고정 및 단순지지인 두가지 경우에 대하여 해석하였다. 또한 실험에서는 스프링의 양단이 블록에 용접되므로 양단을 완전 고정된 상태에서 실험하였다.

2-3. 해석결과

와이어 스프링의 강성에 영향을 미치는 여러 매개변수, 즉 스프링의 형상, 와이어 직경 및 경계조건, 길이 그리고 재질 등의 변화에 따른 스프링의 강성변화를 해석을 통하여 고찰하였다. 유한요소 해석 결과를 이용하여 스프링의 강성을 구하기 위해 다음과 같은 하중과 변위의 관계식을 이용하였다[5].

$$F = k \delta \quad (1)$$

여기서 k 는 선형 스프링상수, F 는 작용하중이고 δ 는 변위이다.

스프링의 접촉점이 변함에 따라 스프링의 형상도 변화하게 되며, 형상이 변화할 때 스프링의 강성변화를 살펴보았다. 해석모델은 와이어 직경 2.6 mm, 스프링 길이 180 mm 이고, 접촉점의 변화에 따라 Case I ~ V로 구분하였다. 각 Case에 따른 접촉점에 대한 유한요소 모델에서의 절점번호와 해석 결과를 Table 1에 나타내었다. 스프링 강성은 대칭 형상인 Case 3가 $k_3 = 43.84$ N/mm로 가장 작았으며, 접촉점이 아래에 있을 때 즉,

Case 1, Case 2의 경우에 스프링 상수가 크게 증가하였다. 또한 Case 4, Case 5도 강성이 증가하였으나, 접촉점이 아래에 있는 경우보다는 증가의 폭이 작았다. 접촉점이 조사공의 상부로 갈수록 구조진전성 면에서 조사공과 유동관(flow tube) 사이의 거리가 짧기 때문에 불리하며, 스프링의 가이드 역할과 지지하는 기능면에서 대칭 형상인 Case 3가 적합한 것으로 판단된다.

스프링의 길이가 180 mm인 경우의 와이어 직경과 경계조건의 변화에 따른 해석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서 고려된 스프링 와이어의 직경은 2.0, 2.6, 3.2 mm이며, 절점 #1의 경계조건이 고정과 단순지지인 경우에 대하여 이들 크기와 경계조건이 스프링 강성에 미치는 영향을 고찰하였다. 와이어의 직경이 커질수록 스프링 강성은 크게 증가하며, 절점 #1의 경계조건이 단순지지인 경우 완전고정에 비해 변화의 폭이 상당히 작았다. 실제로 Fig. 1의 해석모델에서 절점 #1은 완전고정과 y 방향의 변위를 허용하는 단순지지 중간 정도의 구속을 갖고 있으므로, 완전고정시의 결과보다는 약간 낮은 스프링 상수가 얻어질 것이다. 완전고정 경계조건을 기준으로 볼 때 스프링의 직경은 2.0과 2.6 mm 사이의 값이 설계에 적합한 것으로 보인다.

Fig. 3에 스프링의 길이가 160, 180 그리고 200 mm로 변화할 때의 강성변화를 나타내었다. 스프링의 길이가 작아짐에 따라 스프링 상수값은 커지고, 고려한 모든 길이에 대하여 직경 3.2 mm인 스프링은 80 N/mm 이상의 큰 강성을 보였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 실험시편

유한요소 해석 결과와 비교하기 위하여 스테인레스강 재질의 7 가지 스프링 시편을 제작하였고, 유한요소 해석에서 검토한 모델을 근거로 하였다. 스프링의 양단을 고정하기 위하여 약 20~25 mm 정도의 블록 중앙에 스프링 양단을 용접함으로써 고정하였고, 양쪽 블록 또한 두께 10 mm의 블록으로 볼트 체결하였다.

3-2. 실험결과

제작 시편의 스프링 상수 결정을 위한 실험은 만능시험기를 이용하여 수행하였다. 굽힘 시험을 통하여 하중과 변위의 관계를 그래프로 얻고, 이들의 관계에서 스프링의 강성을 결정하였다. 실험에 사용한 로드셀은 5 kgf이며, cross head 속도는 0.5 mm/mim.의 속도로 실험하였다. Fig. 4에 와이어 직경 2.0 mm, 스프링 길이 180 mm 그리고 스프링 중앙에서 접촉하는 경우의 굽힘시험 결과를 하중과 변위의 관계로 나타내었다. 이 경우 하중이 0.45 kgf일 때 변위는 0.25 mm이므로, 스프링 상수는 하중을 변위로 나누어주면, $\kappa = (0.45 \times 9.8) / 0.25 = 17.64$ N/mm이다. 실험결과는 하중과 변위의 관계가 탄성영역내에서 선형성을 보였으며, 이를 통한 스프링 강성의 결정은 믿을만한 것이다.

와이어 직경 2.6 mm의 스프링 길이 변화에 따른 실험 결과를 Fig. 3에 해석 결과와 함

계 나타내었다. 스프링의 길이가 길어짐에 따라 스프링 상수는 감소하고, 실험결과는 해석치 보다 약간 큰 값을 보였으나, 해석결과와 비교적 잘 일치하였다.

4. 결 론

내진으로 인한 캡슐구조물의 구조건전성 확보 차원에서 하나로 계장캡슐용 와이어 스프링에 대한 강성해석이 수행되었다. 내진해석을 통한 와이어 스프링의 강성은 약 15 N/mm 정도의 강성을 가져야 함으로 이를 만족하는 스프링 와이어의 직경, 길이 그리고 형상에 대한 분석결과 스프링 형상은 조사공과의 접촉점을 기준으로 위·아래 대칭형상이 적합하다. 또한 실험결과를 근거로 할 때 스프링 와이어의 직경은 2.0 mm가 적당하고, 스프링의 길이는 180 mm가 적당한 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

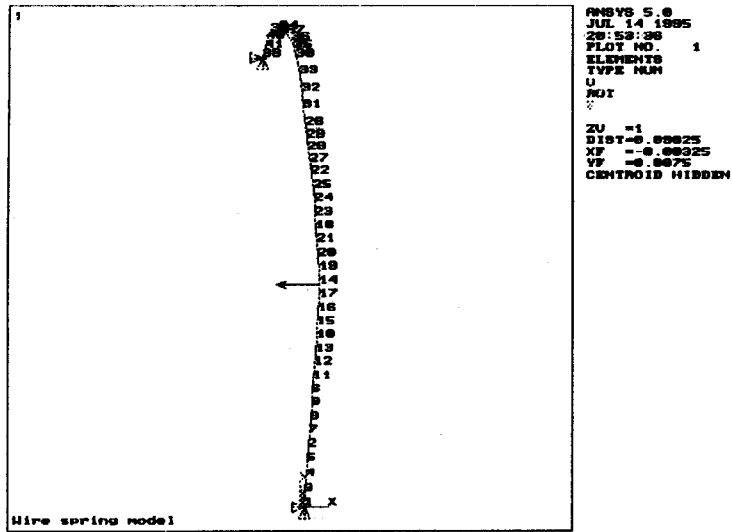
- [1] 강영환 외, 1994, "KMRR을 이용한 노내검증실험 평가기술 개발", KAERI/RR-1398/93
- [2] 강영환 외, 1996, "하나로에 설치될 계장캡슐 및 고정장치의 구조건전성 평가 보고서", KAERI/TR-601/96
- [3] ANSYS Engineering Analysis System User's Manual for Revision 5.0, Swanson Analysis System, Inc., 1992.
- [4] ASME Bolier and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Appendix I, Table I-10.2, 1989 Edition.
- [5] S.H. Crandall, N.C. Dahl and T.J. Lardner, 1978, "An Introduction to the Mechanics of Solids", 2nd Ed., Mcgraw-Hill, Inc.

Table 1. Spring Constants with Various Wire Spring Shapes

| Case | Contact Point | Applied Force F*(N) | Displacement δ (mm) | Spring Constant k**(N/mm) |
|--------|---------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Case 1 | Node #6 | 12.8 | 0.140 | k ₁ =90.78 |
| Case 2 | Node #10 | 12.8 | 0.260 | k ₂ =49.23 |
| Case 3 | Node #14 | 12.8 | 0.292 | k ₃ =43.84 |
| Case 4 | Node #18 | 12.8 | 0.290 | k ₄ =44.14 |
| Case 5 | Node #22 | 12.8 | 0.210 | k ₅ =60.95 |

* : 계산의 일관성을 위해 선형 탄성영역 내에서의 임의의 하중선택

** : $k = F/\delta$



질점 번호 : 1 2 6 10 14 18 22 26 30 34 38
 Y 좌표값(mm) : 0 25 45 65 85 105 125 145 170 180 170

Fig. 1 Finite Element Model of the Wire Spring

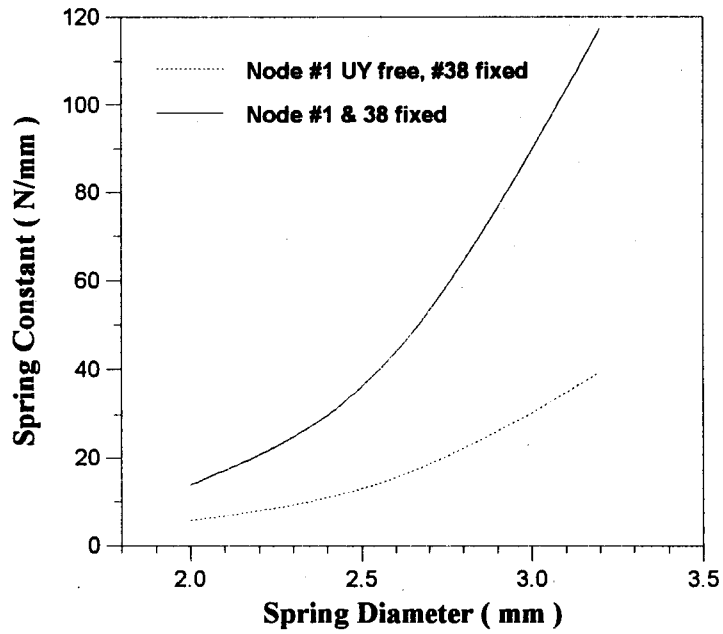


Fig. 2 Analytical Spring Constants with Various Spring Diameters.

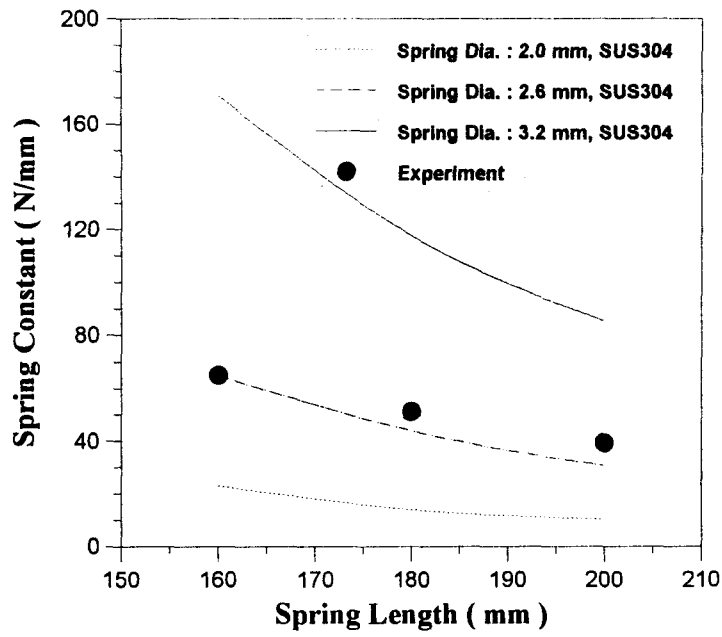


Fig. 3 Analytical and Experimental Spring Constants with Various Spring Lengths

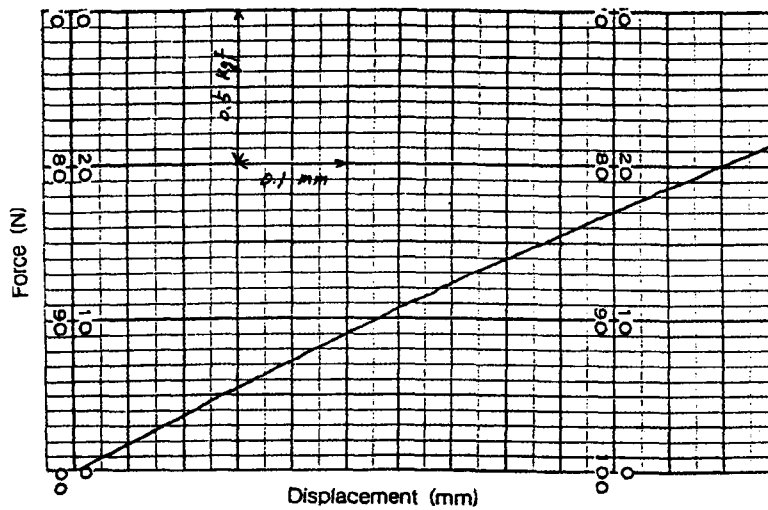


Fig. 4 Applied Force vs. Displacement Curve for the Wire Spring of 2.0 mm in Diameter and 180 mm in Length.