'04 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

마모를 고려한 핵연료 피복관의 응력해석 및 함몰시간 예측

Stress Analysis and Collapse Time Prediction of Nuclear Fuel Cladding Tube with Wear Scar

이진석, 김오환, 김형구, 허영호, 김재익, 김규태

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

본 논문에서는 연료봉에 발생한 마모가 핵연료봉 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 핵연료봉 응력해석 모델과 함몰시간 해석 모델을 개발하고, 이를 이용하여 한국 표준형 핵연료봉에 대한 마모 영향 평가를 수행하였다. 그 결과, 한국 표준형 핵연료의 경우, 피복관 두께의 약 60%에 해당하는 마모가 핵연료봉에 발생하더라도 핵연료봉은 허용응력 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 함몰시간 해석에서는 피복관 두께의 약 56%에 해당하는 마모에 대해서도 허용시간 기준 을 만족하는 것으로 나타났다. 본 해석 결과는 기존 해석 코드를 이용한 상대 평가 등을 살펴볼 때 합리적인 수준인 것으로 판단되나, 향후 실험을 통하여 해석 방법과 모델을 검증할 계획이다.

Abstract

In this analysis, the stress and collapse time analysis models for nuclear fuel rod with the fretting wear scar were developed in order to evaluate the effects of the wear depth on the integrity of nuclear fuel rod. The stress analysis result shows that the nuclear fuel rod with approximately 60% deep wear scar of the clad wall thickness, meets the allowable stress criteria and the collapse time analysis indicates that the fuel rod with less than roughly 56% deep wear scar of the clad wall thickness has longer collapse time than the expected fuel life-time. The both stress and collapse time results are evaluated to be very reasonable on considering the comparison with the outputs of existing design code for the simple model. However, the developed analysis models and the results will be confirmed by the tests.

1. 서론

경수로형 발전소에 장전되는 핵연료봉의 주요 손상원인 중의 하나는 연료봉과 지지격자사이의 프레팅에 의한 마모이다. 따라서, 핵연료를 설계할 때에 마모 발생이 최소화되도록 지지격자를 설계하고 있지만, 여전히, 세계 여러 발전소에서 프레팅에 의한 연료 손상이 보고되고 있다. 마모에 의한 연료봉의 손상을 방지하기 위해서는 무엇보다 마모가 연료봉 건전성에 미치는 영향이 명확히 파악되어야 하지만, 지금까지는 마모의 영향을 평가할 수 있는 방법이 매우 제한적이며, 특히, 마모의 진행에 의해 민감하게 영향을 받는 연료봉의 응력과 함몰시간 해석은 기존의 설계코드로는 마모의 영향을 정확하게 평가하는 것이 거의 불가능한 실정이다.

본 논문에서는 연료봉에 발생한 마모가 연료봉 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 연료봉 응력해석 모델과 함몰시간 해석 모델을 개발하고, 이를 이용하여 한국 표준형 핵연료봉에 대한 마모 영향 평가를 수행하였다.

그 결과, 한국 표준형 핵연료의 경우, 피복관 두께의 약 60%에 해당하는 마모가 연료봉에 발생하더라도 연료봉은 허용응력 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 함몰시간 해석에서는 피복관 두께의 약 56%에 해당하는 마모에 대해서도 허용시간 기준 을 만족하는 것으로 나타났다.

본 해석 결과는 기존 해석 코드를 이용한 상대 평가 등을 살펴볼 때 합리적인 수준인 것으로 판단되나, 향후 실험을 통하여 해석 방법과 모델을 검증할 계획이다.

2. 마모깊이에 따른 피복관의 응력 변화

핵연료봉은 장입되는 지지격자 각 Cell내의 지지격자 스프링 및 아치(Arch)와의 마찰접촉에 의하여 지지 되는데 이와 같은 피복관과 스프링/아치의 마찰접촉으로 발생한 마모가 연료봉의 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 응력해석을 수행하였다. 응력해석을 위한 유한요소모델은 스프링에 의한 마모를 고려하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 피복관에 스프링을 중첩 시켜 스프링 형상의 마모를 생성하였다. 지지격자 스프링의 3차원 모델은 솔리드모델링 프로그램인 SolidWorks[1]를 사용하여 작성하였으며 유한요소해석에는 범용프로그램인 ANSYS Ver. 7.1[2]을 사용하였다.

2.1 유한요소 모델링

유한요소 해석에 사용된 모델은 그림 2와 같이 스프링형상의 마모를 포함한 피복관으로 구성되었으며 주관심 대상인 마모부위의 응력에 영향을 주지 않는 펠렛은 고려하지 않았다. 피복관의 유한요소모델에는 10개 절점의 사면체요소(Solid92)가 사용되었으며, 마모의 깊이에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 16,900개의 절점과 8,000개의 요소가 사용되었다. 해석모델은 원주방향으로 1/4만 고려하였는데 마모에 의한 응력 집중현상은 마모부위에 국한되어있어 원주방향의 다른 부분에서는 그 영향이 매우 작으므로 모델에서는 고려하지 않았다.

2.2 재료물성치

연료봉 피복관의 재질은 웨스팅하우스사의 개량피복관인 ZIRLO™ 로서 기존 표준형 노심에 사용되었던 Low Tin Zircaloy-4 계열의 OPTIN피복관보다 부식저항성과 기하학적 안전성이 상대적으로 우수한 피복관이다. 연료봉의 응력해석은 수명기간에 발생하는 다양한 운전조건을 고려하여 보수적인 792°F온도에서 수행되었다. 응력해석에 사용된 피복관의 물성치는 표 1과 같다[3].

2.3 하중 및 경계조건

연료봉은 노내에서 수명기간 동안 Full Power운전, Zero Power운전 및 Heatup/Cooldown과 같은 다양한 조건에 노출되는데 응력해석에서는 가장 보수적인 조건을 사용하였다. 응력해석에서 적용된 1970 psi의 내압 (외압= 0 psi)은 실제 작용하는 하중보다 큰 값으로서 보수적인 값을 사용하였다.

2.4 해석결과

유한요소 해석으로부터 마모의 깊이에 따라 발생하는 응력을 검토한 결과 최대응력은 마모의 중심부분에서 발생하였으며 마모깊이에 따른 응력강도는 표 2와 같이 나타났다. 그림 3은 마모깊이가 30%로서 가장 얇은 부위의 피복관 두께가 0.0175 inch 인 경우의 응력강도(Stress Intensity) 분포를 나타낸 것인데 최대 응력강도는 33.3ksi이며, 최소응력(2.4 ksi)은 스프링과 피복관의 경계부분에서 발생하였다. 마모중심에서 최대응력강도가 발생하는 이유는 마모에 의한 국부적인 단면 변화가 응력집중을 일으켰기 때문이며 이런 응력집중효과는 원주방향의 응력 (Hoop Stress)에 크게 영향을 미친 것으로 평가된다.

그림 4는 마모의 깊이를 10%에서 70%까지 증가시켜 마모중심부위의 피복관 두께가 감소함에 (0.0225 ~ 0.0075 inch) 따른 최대응력강도 값의 추이를 보여주고 있다. 결과로부터 마모깊이가 10%일때 최대응력강도는 약 18.1 ksi로 계산되었으며 마모깊이가 70%에 도달했을 때에는 약 96.5ksi로서 항복강도 값을 훨씬 넘는 것으로 나타났다. 그림 4로부터 조사된(irradiated) 피복관의 항복강도를 응력기준으로 가정할 때 약 53%의 마모깊이까지는 항복이 일어나지 않는 것으로 평가되며 파손관점에서 응력기준을 재료의 인장강도와 재료의 비선형 물성치를 고려한다면 약 60%의 마모깊이까지도 연료봉 피복관은 파손되지 않을 것으로 평가된다.

3. 마모깊이에 따른 함몰시간 변화

표준형 ZIRLO 피복관에 프레팅 마모가 발생하였을 때 연료봉의 건전성을 평가하기 위해 함몰해석을 수행하였다. 그림 5는 SolidWorks를 이용하여 생성된 3차원 솔리드모델을 나타낸 것인데 마모가 있는 피복관의 일부분만을 도시한 것이다. 함몰해석에서는 연료봉의 펠렛간에 갭이 발생하여 피복관이 함몰되는 현상을 모사하기 위하여 마모가 있는 부분에 약 0.380 inch의 갭을 두었다. 또한 마모

를 중심으로 축 방향에 있어서 대칭인 점을 감안하여 그림 5에서 보는 바와 같이 1/2만 모델 하였다. 피복관의 크립을 고려하기 위하여 ANSYS의 서브루틴을 사용하였다. 피복관 크립은 피복관의 온도, 응력, 중성자조사의 함수로서 3.3장의 식(2)~(4)와 같이 많은 상수를 포함하고 있기 때문에 ANSYS에서 제공하는 크립식의 형태로 일반화하는데 어려움이 있다. 따라서 본 해석에서는 설계에서 사용되는 크립식을 포트란[4]으로 프로그래밍하여 ANSYS 구동시 피복관의 크립특성을 고려하는 방법[5] 을 이용하였다.

3.1 유한요소 모델링

연료봉 피복관 함몰해석은 피복관내에서 펠렛이 부분적으로 없을 경우를 가정하여 시간에 따른 피복관의 변형을 해석한다. 그림 6은 함몰시간평가를 위한 해석모델로서 연료봉 설계코드에서 사용하는 모델을 모사한 것이다. 그림 7은 대칭성을 이용하여 전체 연료봉의 1/2만 요소생성을 한 유한요소 모델로서 피복관은 지지격자 스프링형상과 동일한 마모형상을 갖도록 하였으며, 마모가 있는 부위에는 펠렛사이에 갭이 발생하여 함몰이 발생하도록 하였다. 펠렛이 없는 공간은 축 방향으로 약 0.380inch이다. 해석모델에서 펠렛은 피복관을 지지하는 기능을 하며 모든 방향으로 구속되어 있으므로 해석모델에서는 피복관과 닿는 부분만 모델링하고 해석에 영향을 주지 않는 펠렛의 안쪽부분은 해석모델에서 고려하지 않았다. 또한 피복관과 펠렛은 접촉요소를 사용하여 실제 함몰과정에서 발생하는 피복관과 펠렛의 접촉현상을 모사할 수 있도록 하였다. 이러한 접촉을 고려하기 위하여 접촉요소(Conta174 와 Targe170)를 사용하였으며 또한 하중조건으로 인하여 피복관은 대변형을 받게 되므로 이를 고려하여 기하학적 비선형 해석을 수행하였다.

3.2 재료물성치

함몰해석에서 피복관의 물성치는 677 °F에 해당되는 값을 사용하였으며 표1 에 나타나있다. 함몰해석에서는 표1의 Young’s modulus와 Poisson’s ratio이외에 피복관의 크립을 나타내는 식이 ANSYS의 서브루틴으로 입력되었다.

3.3 연료봉 크립모델

연료봉 피복관은 수명기간동안 중성자에 조사되며 고온에 노출되어 있음으로 인해 크립거동을 하게 된다. 연료봉 설계에서는 피복관의 크립에 의한 변형이(Ovality) 피복관 반경의 1/2 보다 크게 되면 함몰되었다고 평가하며 현재 표준형 노심의 ZIRLO 피복관은 예측된 함몰시간이 수명시간보다 매우 크므로 설계기준을 만족하고 있다. 하지만 마모로 인하여 피복관의 두께가 불 균일한 피복관에 대한 함몰시간 평가는 설계코드(CEPANFL) 를 적용하는데 어려움 있다. 연료봉설계시 함몰해석에 사용되는 크립모델[6]은 식 (1)과 같은데 ANSYS의 함몰해석에 서브루틴으로 사용되었다.

ZIRLO 피복관의 크립모델은 열적크립과 중성자 조사크립 및 축 방향 조사성장의 크립으로 구성되어있다. 식 (1)은 ZIRLO 피복관의 크립모델식을 보여주고 있다.

$$\dot{\varepsilon}_{total} = ACREEP(\dot{\varepsilon}_{thermal} + \dot{\varepsilon}_{growth} + \dot{\varepsilon}_{irradiation}) \quad (1)$$

여기서,

ACREEP=크립조절상수

$$\varepsilon_{thermal} = a\sigma_{eff}\left\lfloor e^{\left(b+c\sigma_{eff}+dT\right)}\right\rfloor \times t^{eT+f} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{growth} = I \times \varepsilon^{z}_{growth} \; (\varepsilon^{z}{}_{growth} = g\left(\Phi \times k\right)^{h}) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_{irradiation} = m\phi\sigma_{eff} + n\phi\sigma_{eff}e^{\left(-\Phi/F_0\right)} + p\phi\sigma^{4}_{eff} \quad (4)$$

a, b,c,d,e,f,g,h,k,I,m,n, F_o, *P*= 상수

ε = 변형률 (%)

$\dot{\varepsilon}$ = 변형률 속도(%/hr)

σ_{eff} = 유효응력 (psi)

T = 피복관 온도 (°F)

Φ = 속중성자 fluence(E>1 Mev, n/cm^2)

ϕ = 속중성자속 (E>1 Mev, n/cm^2-sec)

t = 시간 (hr)

3.4 하중 및 경계조건

연료봉은 노내에서 수명기간 내에 다양한 조건에 노출되는데 응력해석에서는 가장 보수적인 조건을 사용하였다. 함몰시간해석에서는 1400 psi의 외압이 작용하며 온도는 677°F를 가정하였다. 그림 6의 함몰해석 유한요소 모델에서도 나타난 바와 같이 대칭성을 이용하여 전체 연료봉의 1/2만 모델링 하였으며 피복관은 강체운동을 방지하기 위하여 마모로부터 먼 쪽을 고정시켰다. 펠렛은 모든 변위를 고정시켰으며 피복관과 펠렛은 마모를 포함한 일부분만을 모델링 하였다.

3.5 해석결과

유한요소 모델을 이용하여 마모의 깊이에 따라 변화하는 함몰시간을 평가하였다. 그림 8은 마모깊이가 피복관 두께의 50%인 경우의 변형된 모습을 보여주고 있다. 마모가 있는 부분은 그림에서 보는 바와 같이 크립에 의해 심하게 변형되어 피복관 안쪽으로 함몰된 모습을 보여주고 있다. 반면에 피복관 단면의 다른 부위는 상대적으로 변형이 적어서 변형전과 크게 다르지 않은 모습을 보여주고 있다.

연료봉 설계에서는 피복관 단면의 장축과 단축의 길이가 피복관의 반경 만큼 차이 나게 되면 함몰되었다고 평가한다. 그림 9는 함몰평가기준을 해석결과에 적용해서 마모깊이가 50%일 때 시간에 따른 장축과 단축의 차이를 나타낸 것이다. Y축의 Collapse Ratio는 연료봉의 함몰평가기준에 따라 해석결과를 변환한 것으로서 함몰된 상태를 “1”로 표현한 것이다.

50%마모 깊이가 있는 연료봉은 약 53,000 EFPH(Effective Full Power Hour)에서 함몰되는 것으로 평가 되었다. 동일한 방법으로 마모깊이를 달리하면서 함몰시간을 평가한 결과 그림 10에서와 같이 수명시간을 약 40,000EFPH로 가정하면 함몰 깊이가 두께의 약 56%에 도달할 때까지는 수명시간 내에 함몰이 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

4. 결론

프레팅 마모를 고려한 연료봉 피복관의 유한요소모델을 개발하여 응력해석을 수행하고 크립에 따른 함몰해석을 수행하여 연료봉 건전성평가에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

마모를 고려한 응력해석을 통하여 피복관 두께의 53%에 해당하는 마모가 발생하더라도 응력관점에서는 구조적으로 건전성이 유지되며 파손관점에서는 약 60%의 마모가 발생하여도 파손되지 않는 것으로 평가되었다. 또한 함몰해석에서는 약 56% 깊이의 마모가 발생해도 수명시간(약 40,000EFPH)동안에는 함몰이 발생하지 않는 것으로 평가되었다. 본 연구에서 개발된 유한요소모델과 크립 서브루틴 및 함몰해석기법은 기존 설계코드를 대신하여 마모가 발생한 연료봉의 건전성 평가에 적용될 수 있다.

참고문헌

[1] Solidworks 2003, User’s Manual, SolidWorks Co., 2003

[2] ANSYS, User’s Manual, Version 7.1, Swanson Analysis Systems, Inc.

[3] “Material Property Manual”, Westinghouse Proprietary, 1990

[4] “Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.6”

[5] “ANSYS Programmer’s Manual Release 5.6”

[6] “한국표준형원전 연료용 ZIRLO 피복관 장전 타당성 평가”, 한전원자력연료주식회사, 2001,2

표 1. 연료봉 ZIRLO 피복관의 재료물성치

Parameter	677 °F	792 °F
Young's Modulus, psi	10.87×10^{6}	10.23×10^{6}
Poisson's Ratio	0.342	0.338
Irr. Yield Strength, psi	76.3×10^{3}	60.3×10^{3}

표2. 마모깊이에 따른 응력강도 (Stress Intensity)

Wear Depth, %	Wear Depth, inch	Rod Thickness, inch	Stress Intensity, ksi
0	0.000	0.0250	-
10	0.0250	0.0225	18.1
20	0.0050	0.0200	24.9
30	0.0075	0.0175	33.3
40	0.0100	0.0150	43.8
50	0.0125	0.0125	55.8
60	0.0150	0.0100	73.5
70	0.0175	0.0075	96.5

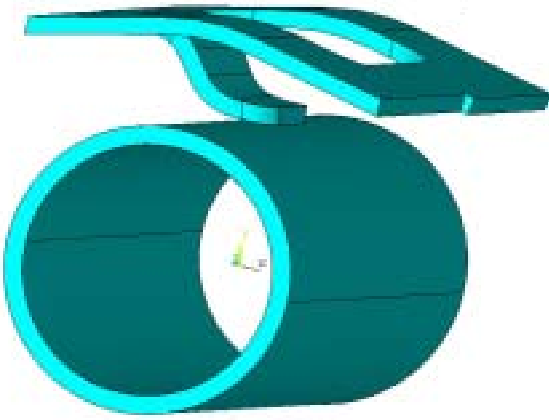

그림 1. HID-1L 지지격자 스프링과 연료봉 피복관의 접촉 (3차원 솔리드모델)

그림 2. 피복관 응력해석을 위한 유한요소모델(30% 마모깊이)

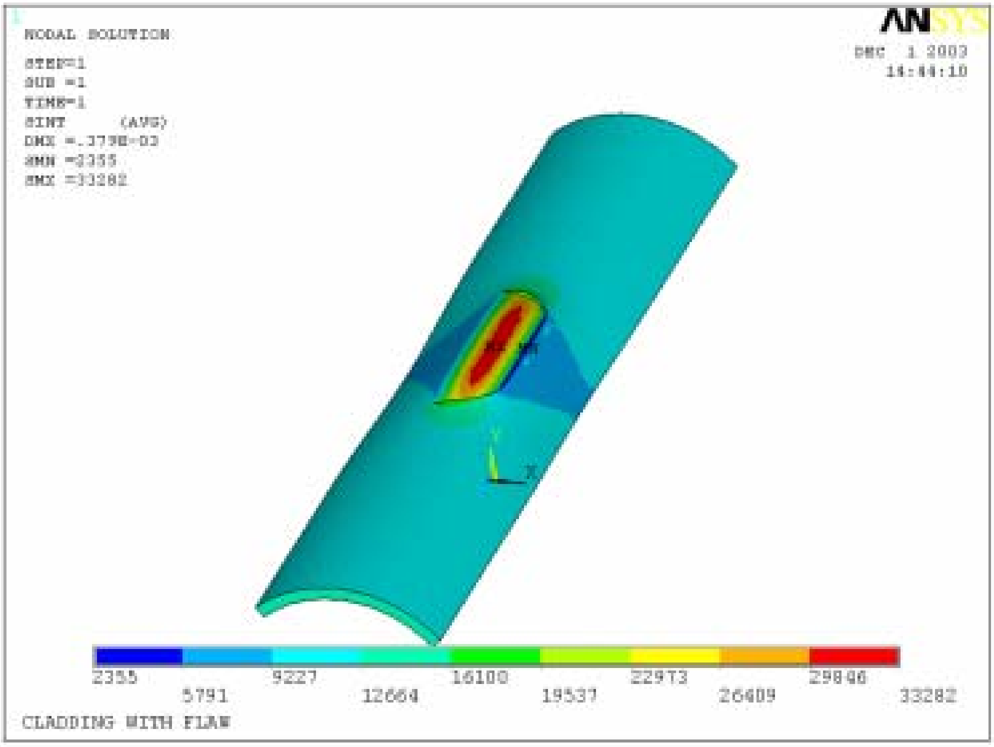

그림 3. 피복관 응력강도(Stress Intensity) 결과(30% 마모깊이)

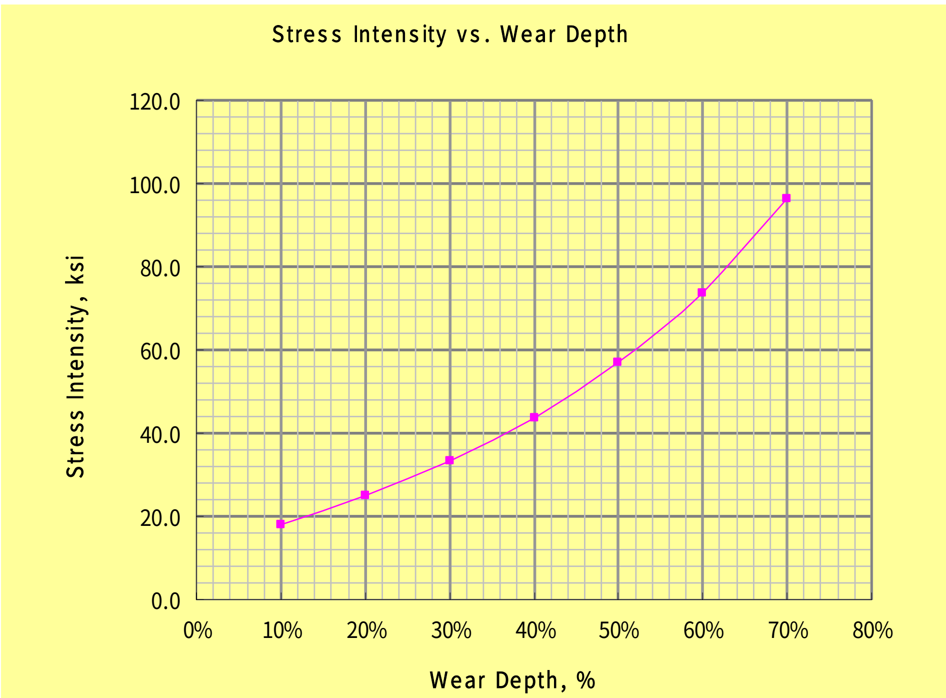

그림 4. 마모깊이에 따른 피복관 응력강도

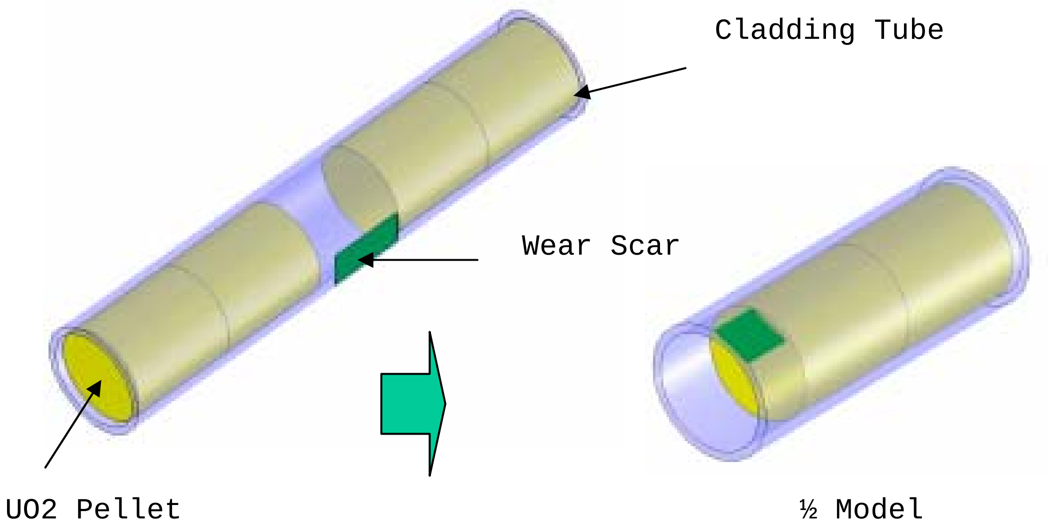

그림 5. 함몰시간해석을 위한 3차원솔리드 모델

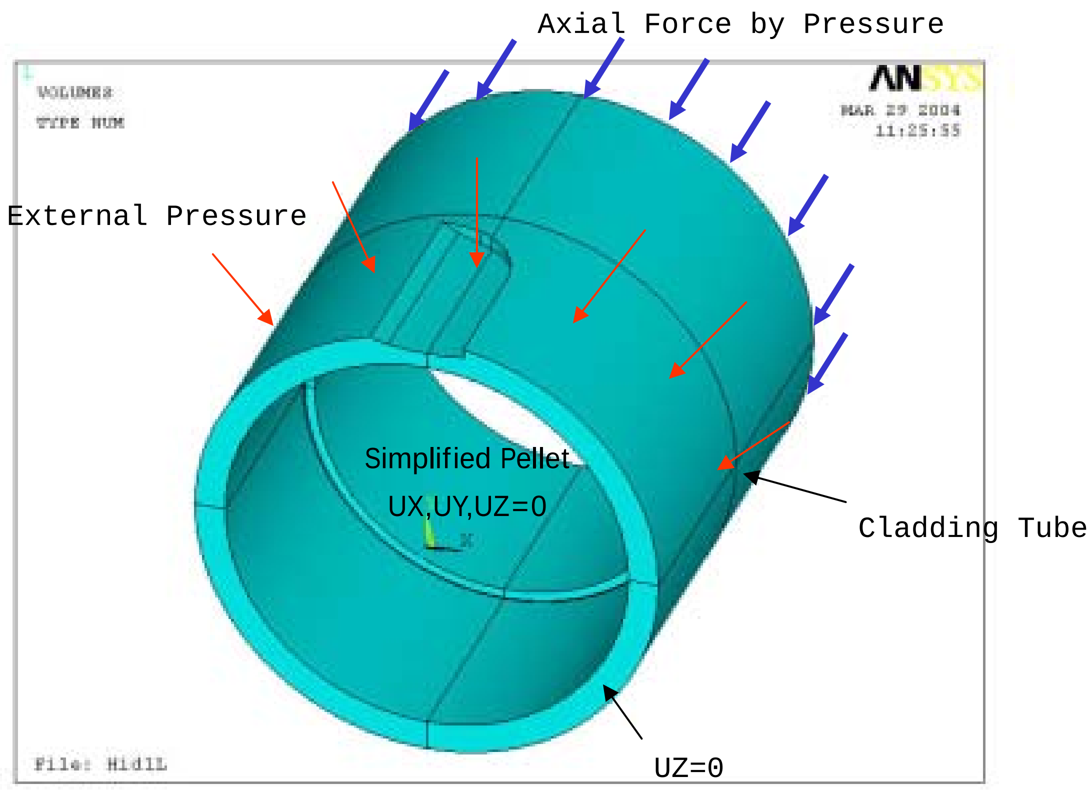

그림 6. 함몰시간해석 유한요소모델의 경계 및 하중조건

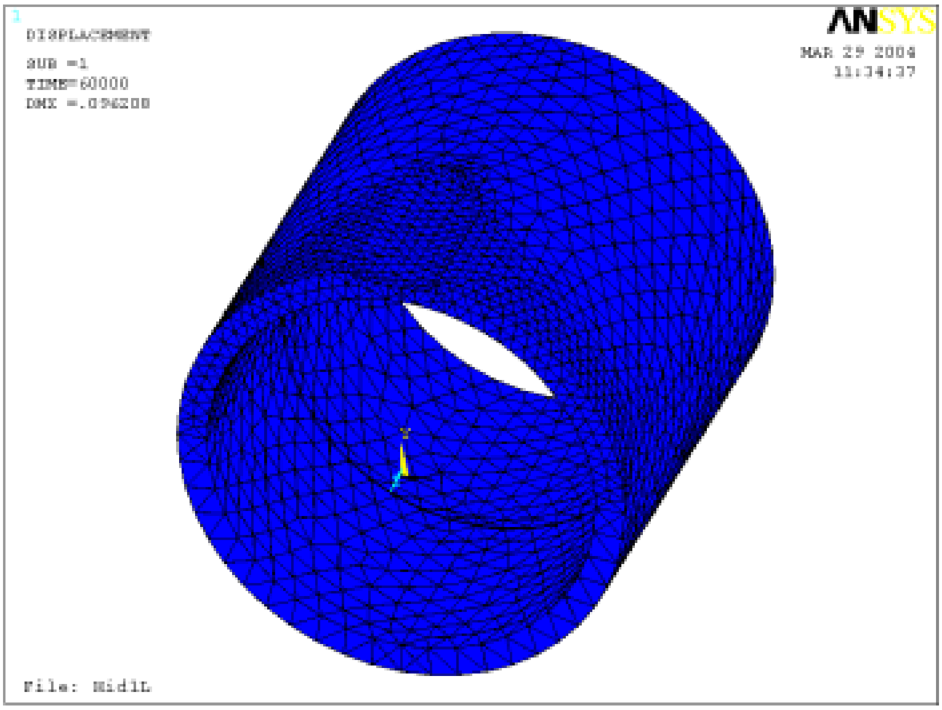

그림 7. 함몰시간해석 유한요소모델 (마모깊이 50%)

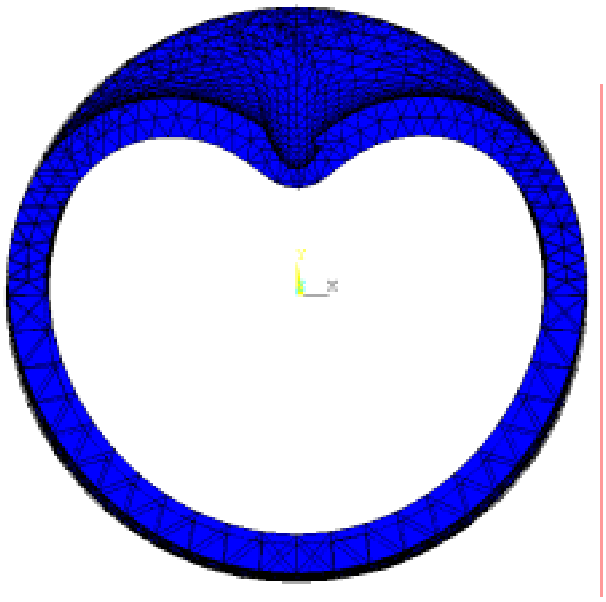

그림 8. 함몰시간(53,000EFPH)에서 변형된모습 (마모깊이 50%)

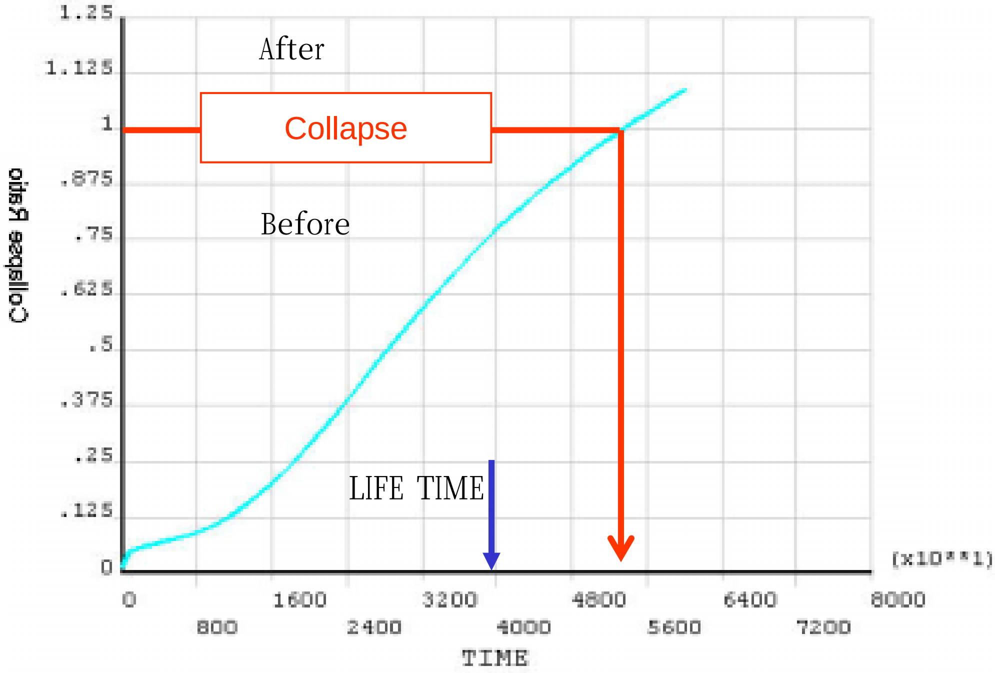

그림 9. 시간에 따른 함몰비율(Collapse Ratio)

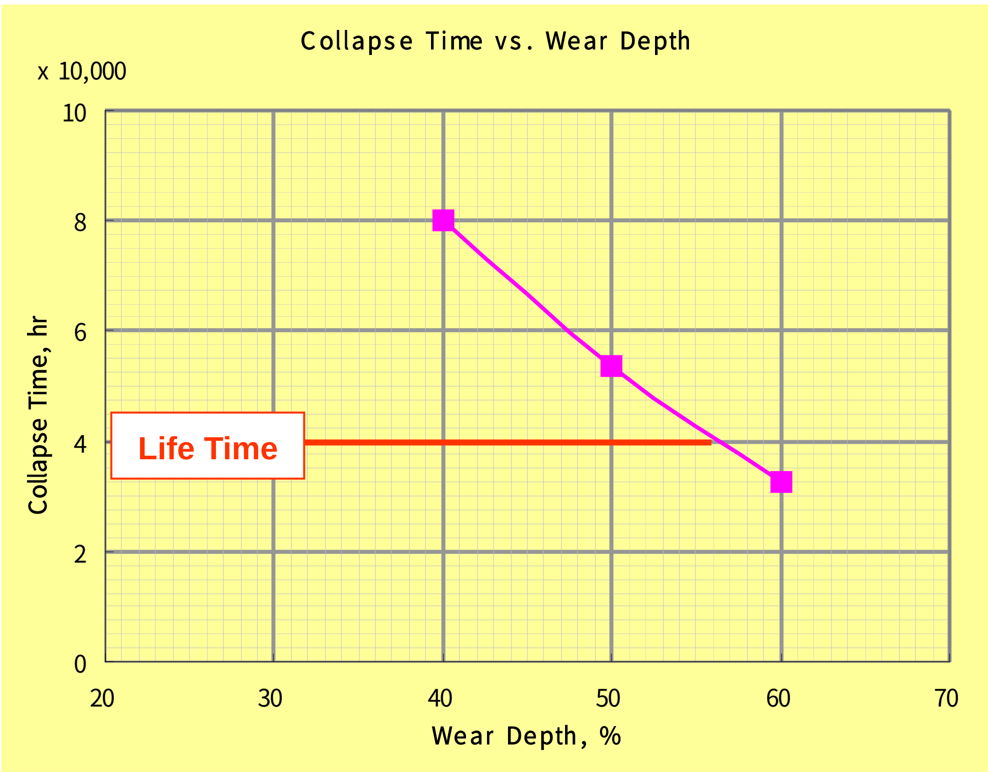

그림 10. 마모깊이에 따른 함몰시간변화