

유한요소해석을 이용한 기계-화학적 열화현상 모델링 Modeling of Mechano-Chemical Degradation Using Finite Element Analysis

*김일현¹, 조용건¹, #최병호², 이정무³

*I. H. Kim¹, Y. J. Zhao¹, #B.-H. Choi(bhchoi@korea.ac.kr)², J.-M. Lee³

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과, ² 고려대학교 기계공학과, ³ LG화학 테크센터

Key words : Mechano-chemical degradation, Finite element analysis,

1. 서론

가스 배관용 파이프의 응력 부식 균열 (Stress corrosion cracking; SCC)은 기계적 응력작용 및 화학적 공격 (chemical attack) 환경하에 있는 대부분의 재료들에게 급격한 수명의 저하를 일으키는 중요한 요인 중의 하나이다. 각각의 재료들은 환경적 요인에 대한 응력 부식 균열의 형성기구가 다르지만, 연속체 역학적인 차원에서 고찰하면 매우 유사한 방법으로 묘사할 수 있다. 응력부식균열은 일반적으로 단일한 균열이나 피트로 나타나기 보다는 균열군이나 피트군으로 나타나는 경우가 많다.

응력 부식 균열은 전기-화학-열-기계 등의 복합적인 조건하에서 발생하며 재료의 성분이나 형상에 매우 민감한 영향을 받는다. 응력 부식 균열의 경우 일반적으로 개별 균열 발생, 개별 균열 성장, 균열군의 형성 및 불안정 균열진전의 세 단계로 구분할 수 있다. 특히 SCC의 초기에 발생하는 전기화학적 반응에 의한 기계적 특성 변화는 배관의 균열 발생과 밀접한 관련이 있으며, 이러한 배관재의 응력 부식 균열의 경우 대부분의 수명이 균열 발생과정에 소모되므로 이러한 특성변화를 이해하는 것이 매우 중요하다. 따라서 국부적인 부식물의 형상, 부식물의 밀도 변화 등에 따라 형성된 응력은 재료내부에 주어진 압력에 의한 설계응력에 추가적으로 작용되므로 배관은 실제 수명보다 빨리 파손에 이르게 된다.

SCC의 전기화학적 열화과정에 대해서는 여러 연구자들에 의하여 보고된 바 있지만 이러한 전기화학적 열화의 과정이 균열발생 전 재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 부식물의 형상에 따른 전기화학적 부식현상으로 인한 응력발생에 대해 고찰하고자 한다.

2. 모델링

Fig. 1에는 모델링 된 열화부의 형상을 나타내었다. 열화부의 형상은 cone, hemisphere 그리고 elliptical의 세 가지 형태로 모델링 되었다. 우선 해석 모델을 단순화하기 위해 1/4 모델로 설정하여 대칭으로 모델링 하였다. 각각의 모델은 h/r을 0.25~2.00까지 달리하여 8가지의 형태로 모델링 되었고, elliptical 형태의 L은 고정시켰다.

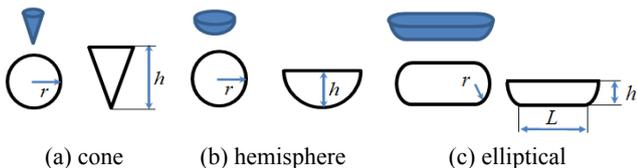


Fig. 1 Geometry of three types of corrosion product

3. 유한요소해석 및 결과

화학적 열화 현상이 발생하면 분자량 (molecular weight)이 변하고, 밀도와 결정도 (crystallinity)가 변화하여 재료의 물성이 변화한다. 특히, 재료의 변형률에 큰 영향을 주는 물성은 밀도로, 주어진 질량 하에서 밀도의 변화는 국부적인 경계조건을 변화를 가져오게 된다. 그러므로 본 연구에서는 각 형상마다 밀도를 변화시켜 해석을 수행하였다. 열화 전 재료의 밀도를 ρ_1 , 열화 후의 밀도를 ρ_2 로 놓았을 때, ρ_2/ρ_1 을 변수로 하여 0.2~0.8% 범위로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

Table 1 Mechanical tensile properties at room temperature of the API X65 Steel

Young's modulus E(MPa)	Poisson's ratio ν	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_u (MPa)	Density ρ (kg/m ³)
210.7	0.3	464.5	563.8	7850

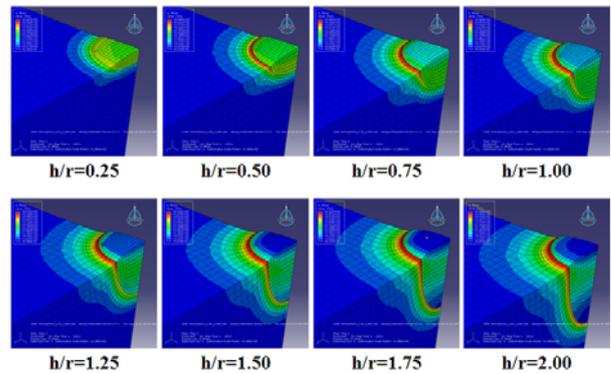


Fig. 2 Stress distribution of the cone model at $\rho_2/\rho_1=1.006$

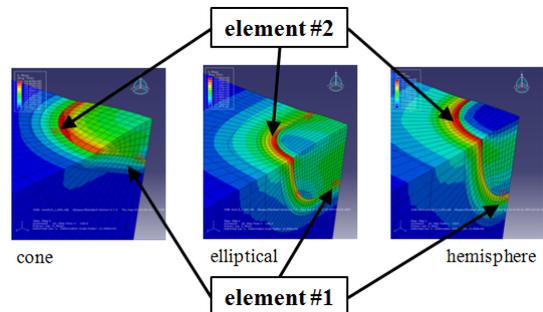
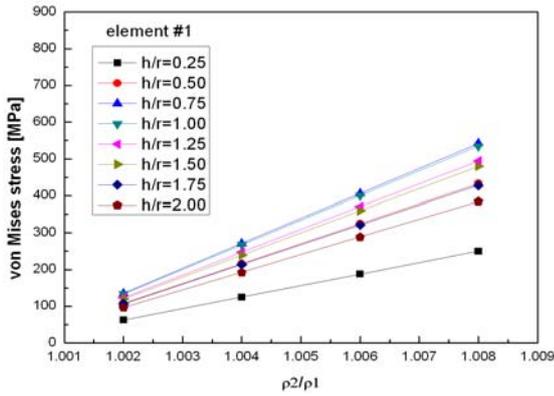


Fig. 3 Key points of interest for three types of corrosion product

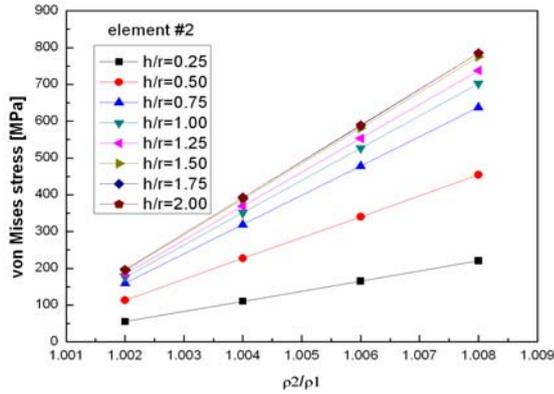
해석은 Abaqus로 수행되었으며 해석에 사용된 element type은 body 부분은 C3D8R, 부식물에는 C3D8T를 사용하였다. 해석에 사용된 재료는 배관재로 주로 사용되는 API X65 강으로 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2는 cone 형태 모델의 ρ_2/ρ_1 가 1.006 일때의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 표면의 경계선에서 최대 응력이 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 4~6은 Fig. 3에서 나타난 요소 element #1과 element #2의 열화응력을 나타낸 것이다. 모든 경우에서 element #1 보다 element #2의 응력이 높게 나타났다. Fig. 5(b)를 보면 element #2는 h/r이 0.25를 제외하고 모두 같은 값이 나왔고, Fig. 6(b)의 element #2도 hemisphere와 비슷한 양상을 가지고 있지만 응력의 증가폭은 작지만 증가하였다.

Fig. 7은 ρ_2/ρ_1 가 1.008일 때 두 요소의 응력을 나타낸 것이다. element #1에서 다른 두 형상은 h/r이 증가함에 따라 응력도 증가하지만, cone 형태인 경우 초반에 증가하다가 0.75 이후로는 감소하였다. element #2에서는 cone 형태는 h/r이 증가함에 따라 응력도 증가하였다. elliptical 형태는 h/r이 낮을 때 응력의 증가폭이 크지만 h/r이 증가함에 따라 응력의 증가폭이 낮았고, hemisphere 형태는 초반에는 증가하지만 0.50 이후부터는 항복응력 이상의 값인 약 740MPa의 값이 나오는 것을 볼 수 있다.

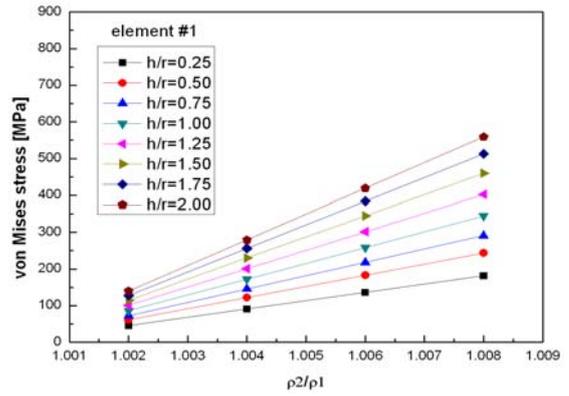


(a) Cone element #1

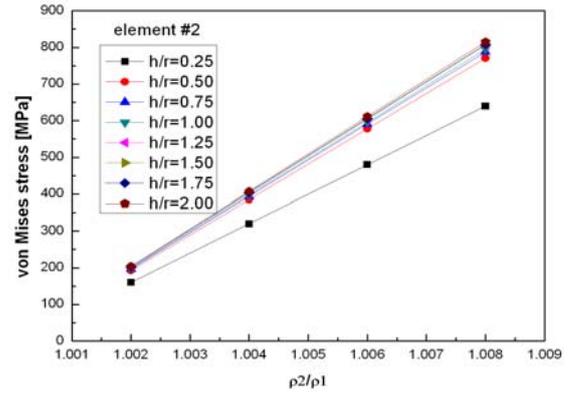


(b) Cone element #2

Fig. 4 Von Mises stress vs. density (cone model)

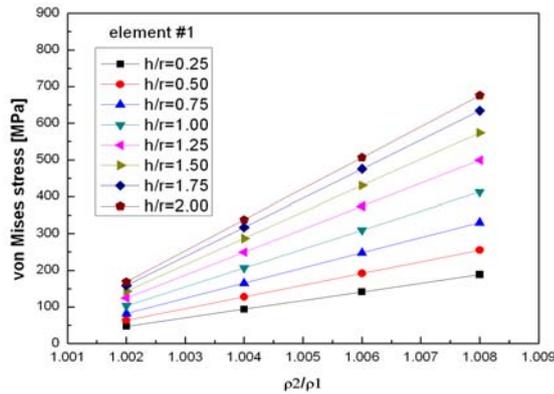


(a) Elliptical element #1

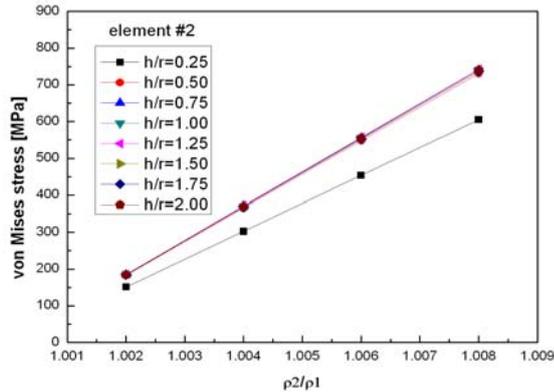


(b) Elliptical element #2

Fig. 6 Von Mises stress vs. density (elliptical model)



(a) Hemisphere element #1



(b) Hemisphere element #2

Fig.5 Von Mises stress vs. density (hemisphere model)

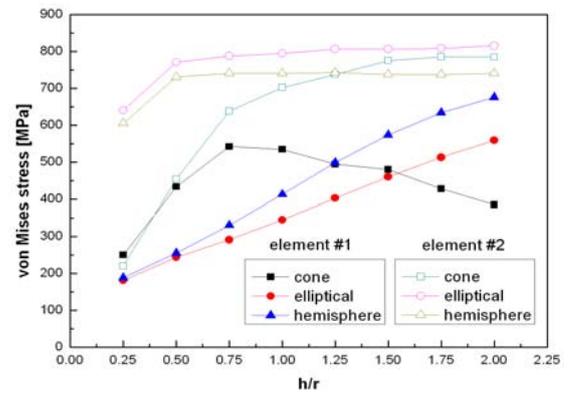


Fig. 7 Variation of von Mises stress at $\rho_2/\rho_1=1.008$

4. 결론

본 연구에서는 화학적 열화 과정이 재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대하여 수행하였다. 표면의 경계에서 응력이 최대로 나타났고, 0.2~0.8%의 아주 낮은 밀도의 변화임에도 불구하고 열화 현상으로 인하여 발생한 응력은 항복강도 및 인장강도에 비하여 경우에 따라 크게 발생함을 관찰할 수 있었다. 그러므로 전기화학적 열화로 인하여 부식물에서 발생하는 기계적 응력의 형성은 재료의 SCC 발생의 원인으로 생각할 수 있으므로 배관의 설계 시 반드시 고려되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

<생략>