

ABAQUS 를 이용한 수소확산 해석

오 창 식* · 김 윤 재 †

(2009년 1월 2일 접수, 2009년 2월 9일 수정, 2009년 2월 11일 심사완료)

Coupled Analysis of Hydrogen Transport Within ABAQUS

Chang-Sik Oh and Yun-Jae Kim

Key Words : Hydrogen Transport(수소확산), FE Analysis(유한요소해석), ABAQUS(아바쿠스)

Abstract

In this paper, the coupled model with hydrogen transport and elasto-plasticity behavior is introduced. This model is implemented to the general-purpose FE code, ABAQUS, via the user-defined subroutine UMAT and UMATHT. In UMAT, the spatial gradients of hydrostatic stress and hydrogen induced deformation are calculated, and then are passed into UMATHT. Heat transfer equation within UMATHT is substituted by hydrogen transport equation including the effects of stress states and strain hardening. To validate this model, the finite element analyses coupled with hydrogen transport and mechanical loading are performed for the boundary layer specimens with low and high strength steel properties. The FE results are compared with the previous studies by Taha and Sofronis (2001).

기호설명

- θ_L : 간극영역의 수소 점유량
- θ_T : 포획영역의 수소 점유량
- W_B : 포획영역의 수소 결속 에너지
- R : 기체상수 (=8.31J/mol/K)
- T : 절대온도 (K)
- C_T : 포획영역의 단위 체적당 수소 농도
- a : 포획영역의 개수
- N_T : 단위 체적당 포획영역 밀도
- C_L : 간극영역의 수소 농도
- β : 용매 원자당 간극영역의 개수
- N_L : 단위 격자 체적당 용매 격자 원자의 개수
- N_A : 아보가드로 수 (=6.0232×10²³)

1. 서론

수소취화 현상은 구조물의 안전성에 매우 심각한 영향을 끼친다. 수소환경에 노출된 구조물은 매우 낮은 하중에서도 쉽게 파손이 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 수십 년간 많은 연구가 진행되었지만 그 파손기구는 아직까지 명확하지 않다. 그러나 그 중 가장 합리적인 파손기구는 수소에 의한 국부 소성 (hydrogen enhanced localized plasticity, HELP) 이론이다.⁽¹⁻⁶⁾ 이 파손기구는 수소화합물 (hydride)을 생성하지 않는 재료에 대한 파손기구이며, 수소에 의해 국부적으로 심각한 소성변형에 의해 파손이 발생된다는 이론이다. 이 파손기구에 의한 수소취화는 포획영역(trap site), 정수압 응력, 변형률 속도에 의해 영향을 받는다. 포획영역은 뒤틀립(dislocation), 결정입자의 경계(grain boundary), 공극(void) 또는 균열(crack) 등을 의미한다. 포획영역에서의 수소농도는 소성변형의 정도에 따라

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 대학원 기계공학과

달라진다. 또한 정수압 응력이 최대인 곳에 수소가 집중된다. 이렇게 국부적으로 집중된 수소는 재료를 취화시켜 재료의 연성을 낮게 만든다.

이와 같은 파손기구를 고려하여 해석한 연구는 극히 드물게 전세계 몇 팀에서 이루어졌다. 그 중 Sofronis 와 McMeeking 팀이 최초로 수행하였다.⁽²⁻⁴⁾ 이러한 해석은 소성거동해석과 수소확산 해석을 동시에 연계하여 수행되어야 한다. 소성 변형률이 수소확산에 큰 영향을 미치기 때문에 소성 거동 해석과 수소확산 해석을 연계하지 않을 경우 전혀 다른 해석결과를 보여준다.⁽⁷⁾ 이러한 이유로 각 팀들은 모두 각자의 유한요소 프로그램(In-House Code)을 개발하여 수행하였으며, 비공개로 원칙으로 하고 있다. 따라서 다른 많은 연구자들이 이와 같은 수소취화를 연구하는데 어려움을 겪고 있다.

이러한 비범용성 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁸⁾를 이용하여 소성거동해석과 수소확산 해석을 연계하여 수행하는 방법을 제공하고자 한다.

2. 수소 취화 모델

2.1 수소 확산 모델

수소는 간극영역 (NILS: normal interstitial lattice site)과 소성변형에 의한 포획영역 (trapping site)에 존재하며, Oriani⁽⁹⁾의 이론에 따라 두 영역 사이에 평형을 이룬다.

$$\frac{\theta_T}{1-\theta_T} = \frac{\theta_L}{1-\theta_L} K_T \quad (1)$$

여기서 θ_T 는 포획영역에서의 수소 점유량이고, θ_L 은 간극영역에서의 수소 점유량이다. K_T 는 평형상수이며 다음과 같이 표현된다.

$$K_T = \exp\left(\frac{W_B}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서 W_B 는 포획 결속 에너지 (trap binding energy), R 은 기체상수(=8.31J/mol/K)이며, T 는 절대온도 (absolute temperature, Kelvin)이다. 포획영역에서의 단위 체적당 수소농도는 다음과 같이 표현된다.

$$C_T = \alpha\theta_T N_T \quad (3)$$

α 는 포획영역당 수소포획 영역의 개수이며, N_T 는

포획영역의 밀도를 나타낸다.

간극영역에서의 수소농도는 다음과 같이 표현된다.

$$C_L = \beta\theta_L N_L \quad (4)$$

β 는 재료의 원자당 간극영역의 개수이며, N_L 은 단위 격자 체적당 재료의 격자 원자의 개수이다.

$$N_L = N_A / V_M \quad (5)$$

여기서 N_A 는 아보가드로 수이며, 6.0232×10^{23} atoms/mol 이다. V_M 은 격자 몰당 체적당 재료 격자의 몰 체적이다.

수소 보존법칙에 의해 수소확산의 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽²⁻⁶⁾

$$\frac{D_L}{D_{eff}} \frac{\partial C_L}{\partial t} - D_L \nabla^2 C_L + \nabla \cdot \left(\frac{D_L C_L V_H}{3RT} \nabla \sigma_{kk} \right) + \theta_T \frac{dN_T}{d\varepsilon_p} \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

여기서 D_{eff} 는 유효 확산 계수으로써 다음과 같이 표현된다.

$$D_{eff} = \frac{D_L}{1 + \frac{\partial C_T}{\partial C_L}} \quad (7)$$

2.2 탄소성 모델

재료의 유동응력 (flow stress)은 수소집중과 독립적이며, 재료의 소성은 등방성이고 von-Mises J_2 유동장 이론을 따른다고 가정하였다. 또한 재료에 집중된 수소에 의한 팽창변형이 고려되었다.

소성 변형률은 다음과 같이 탄성변형, 소성변형, 수소집중에 의한 변형으로 나눌 수 있다.

$$D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p + D_{ij}^h \quad (8)$$

여기서 D 는 변형률 속도 텐서 (deformation rate tensor)이다. 수소에 의한 변형률 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$D_{ij}^h = \frac{d}{dt} \left[\ln \left\{ 1 + \frac{(c-c_0)\Delta v}{3\Omega} \right\} \right] \delta_{ij} \quad (9)$$

여기서 c 는 재료 원자당 수소 농도를 나타내며, c_0 는 재료의 변형이 일어나기 전의 초기 수소농도이다. Ω 는 재료 원자의 평균 체적이며,

δ_{ij} 는 Kronecker delta 로써 i 와 j 가 같을 경우에 1 이 되며, i 와 j 가 다를 경우에는 0 이 된다. Δv 는 수소 원자당 체적변화를 나타내며 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$V_H = \Delta v N_A \quad (10)$$

최종적으로 다축 변형률에 대한 유효 소성 변형률은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_p = \int \sqrt{\frac{2}{3} D_{ij}^p D_{ij}^p} dt \quad (11)$$

3. 유한요소 해석모델의 구성

3.1 수소 확산 모델의 구현

수소 확산 모델을 유한요소 해석으로 구현하기 위해 ABAQUS 에서 제공하는 사용자 정의 함수 (User-subroutine)인 UMATHT 를 이용하였다. 기본적으로 UMATHT 함수는 열전달 해석을 위한 사용자 정의 함수이다. 그러나 상용 프로그램인 ABAQUS 는 열해석과 응력해석을 연계하는 툴 (Tool)을 제공하지만, 수소 확산과 응력해석을 연계하는 툴을 제공하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 열 전달 해석 툴을 수소 확산 툴로 이용하였다. 열 전달 해석의 일반적인 에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{r} \quad (12)$$

여기서 ρ 는 밀도, C_p 는 비열, T 는 온도, k 는 열전달 계수, \dot{r} 은 단위 체적당 열 생성률을 나타낸다. 열 전달 해석의 경우 온도 구배에 따른 열 이동을 표현하지만, 수소확산의 경우 정수압에 의한 확산과 소성변형에 의한 확산이 이루어진다. 이를 위해 열 전달 해석에 사용되는 변수를 수소 확산에 사용되는 변수로의 전환이 필요하다. 각각 변수의 일대일 변환은 Table 1 에 나타내었다. 식 (6)의 세 번째 항에 포함되어 있는 정수압 응력의 구배와 마지막 항에 나타난 소성변형의 크기는 ABAQUS 사용자 정의함수 UMAT 을 통해 계산된다.

3.2 탄소성 모델의 구현

재료의 탄소성 거동은 ABAQUS 의 사용자 정의함수 UMAT 을 통해 구현하였다. 재료가 등방성이며, von-Mises J_2 유동장 이론을 따른다고

Table 1 Analogy of variables between the heat transfer analysis within ABAQUS and the hydrogen diffusion analysis

Heat transfer analysis		Hydrogen diffusion analysis	
variable	Description	variable	Description
$U(\theta)$	Thermal energy	$U(c)$	Chemical potential
T	Temperature	C_L	Interstitial hydrogen concentration
C_p	Specific heat	D_L/D_{eff}	Ratio of effective diffusion constant
ρ	Density	l	Unit
k	Conductivity	D_L	Diffusivity

가정하였으며, 식 (9)의 수소집중에 의한 팽창 변형률을 고려한 Prandtl-Reuss 식을 사용하였다.

사용자 정의함수 UMAT 은 재료의 소성거동을 표현하는데 사용될 뿐만 아니라, 수소확산에 이용되는 재료의 정수압 응력 구배 및 소성변형의 크기를 계산하여 UMATHT 에 정보를 제공한다. 이때 ABAQUS 프로그램 상에서 정수압 응력 구배를 제공하지 않기 때문에 이를 위한 알고리즘이 필요하다. 정수압 응력 구배를 계산하기 위해서는 요소의 적분점에서 계산된 응력을 각 절점에 대한 응력값으로 변환시킨 후, 요소의 형상함수를 이용하여 정수압 응력의 구배를 적분점의 값으로 계산, 변환시킨다. 변환된 적분점에서의 정수압 응력 구배는 내부 변수를 통해 UMATHT 로 전달된다.

3.3 수소 확산 모델과 탄소성 모델의 연계

ABAQUS 상에서 수소 확산 모델과 탄소성 모델이 연계되어 해석이 수행될 때에는 우선 탄소성 해석을 통한 하중 평형상태를 점검하고, 그 후에 수소 농도 평형상태를 점검한다. 둘 중 어느 하나라도 평형상태에 도달하지 않으면 하중 및 수소농도의 증분을 변화시켜 평형상태에 도달할 때까지 계속 반복 수행한다. Fig. 1 은 ABAQUS 상에서 구현된 수소 확산 해석의 흐름도를 보여준다. UMAT 에서 계산된 정수압 응력 구배와 소성 변형률은 UMATHT 에 전달되어 수소 확산 해석에 이용되며, 수소 확산 해석에서 계산된 수소 농도 분포는 다시 UMAT 으로 전달된다. 이러한 반복

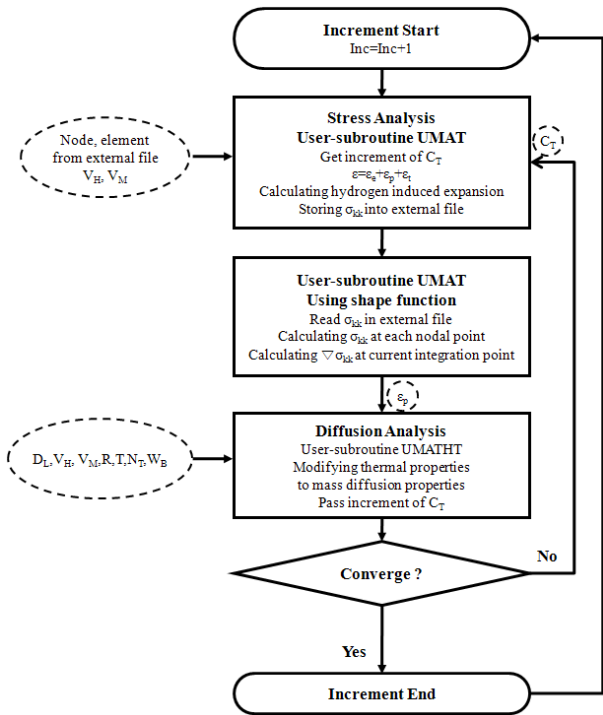


Fig. 1 Flowchart of hydrogen diffusion implemented to ABAQUS

계산은 탄소성 모델과 수소 확산 모델의 평형상태에 도달할 때까지 수행된다. 평형상태에 도달하면 다음 인크리먼트(increment)로 넘어가며, 위와 같은 작업이 반복된다.

4. 유한요소 해석 및 검증

본 논문에서는 개발된 수소 확산 모델의 검증을 위해 이미 발표된 Taha 와 Sofronis 의 논문⁽⁴⁾의 문제를 해석하고 비교하였다.

4.1 유한요소 해석

본 논문에서는 앞 장에 설명된 방법을 사용자 정의 함수인 UMAT 와 UMATH 를 통해 구현하였으며, 해석 모델은 Fig. 2 와 같은 균열을 포함한 무한 평판 모델(boundary layer specimen)에 대하여 해석을 수행하였다. 초기 균열 열림의 크기는 b_0 이며, 모델의 반경은 $L(=30,000b_0)$ 이다. 요소는 4 절점 평면 변형률 요소 CPE4T 를 사용하였으며, 요소 수는 780 개, 절점 수는 833 개이다. 하중은 t_L 시간(초) 동안 일정한 모드 I 의 응력 확대 계수의 크기 K_L 을 변위로 주었다. 저장도 탄소강의 경우 K_L 은 $89.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이며,

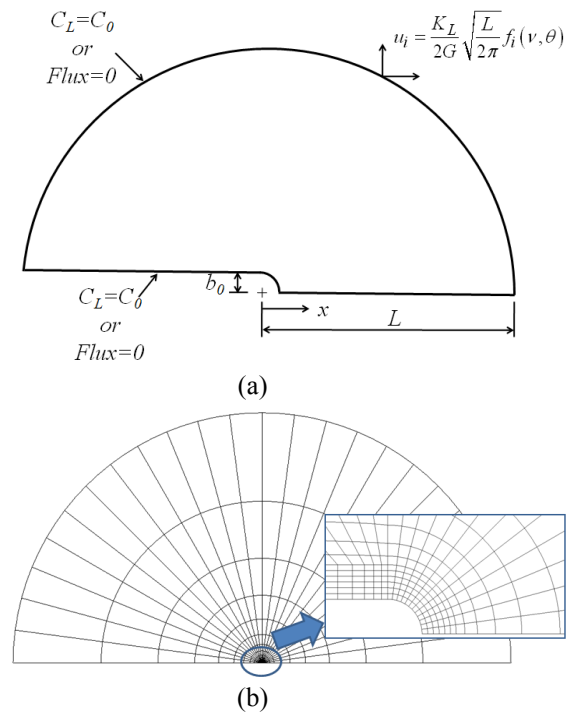


Fig. 2 Boundary layer specimen: (a) schematic illustration and (b) FE mesh

고강도 탄소강의 경우 K_L 은 $132\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이다. 하중을 작용한 후 균열 열림의 크기 b 는 저장도 탄소강의 경우 초기 균열 열림의 5 배($b=5b_0$)이며, 고강도 탄소강의 경우 3.5 배($b=3.5b_0$)이다. 하중 작용 시간은 저장도 탄소강의 경우 t_L 은 1.3, 13, 130 초이며, 고강도 탄소강의 경우 t_L 은 0.4, 4, 40 초이다. 각 t_L 의 시간 동안 변위를 가한 후에는 변위를 고정시켜 수소가 시간이 지남에 따라 확산되도록 약 3 시간 이상 유지시켰다. 저장도 탄소강과 고강도 탄소강의 해석 모델의 경계조건은 Fig. 2(a)와 같이 모델의 경계에 수소농도가 일정한 경우와 수소농도 구배가 없는 경우를 각각 적용하였다. 수소농도가 일정한 경우에는 수소농도의 구배가 발생할 수 있어 수소가 경계를 통해 이동할 수 있다. 반면 수소농도 구배가 없는 경계조건인 경우, 수소가 경계를 통해 이동하지 못하며, 수소의 전체 양은 모델 내에서 일정하게 유지된다. 모든 해석에 사용된 모든 모델에 대해 간극영역의 초기 수소농도 C_0 는 $2.048 \times 10^{21} \text{ atoms/m}^3$ 로써 모델 전체에 일정하게 분포하였다고 가정하였다. 이때 포획영역의 초기 수소농도는 식 (1)과 (3)에 의해 계산된다. 재료의 포획영역의 수 N_T 는 소성변형률의 함수로써 다음과 같이 표현된다.^(4,5)

Table 2 Values of variables used in hydrogen diffusion analysis

W_B	60 kJ/mol	N_A	6.0232×10^{23} atoms/mol
V_M	7.116×10^{-6} m ³ /mol	N_L	8.46×10^{28} atoms/mol
V_H	2.0×10^{-6} m ³ /mol	D_L	1.27×10^{-8} m ² /s

$$\log(N_T) = 23.26 - 2.33 \exp(-5.5\epsilon_p) \quad (13)$$

재료의 물성은 Taha 와 Sofronis⁽⁴⁾에 사용된 power-law 형태의 식을 사용하였다.

$$\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^{1/N} = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right) + \left(\frac{3G}{\sigma_0}\right)\epsilon_p \quad (14)$$

ABAQUS 사용자 정의함수 UMAT 에서는 식 (14)에 나타난 재료물성에서 탄성성분을 뺀 소성 변형률을 이용하여 소성거동을 예측하는데 사용하였다.⁽⁸⁾ 저강도 탄소강의 경우 항복강도 σ_0 는 250MPa, 경화지수 N 은 0.2 이며, 고강도 탄소강의 경우 항복강도 σ_0 는 1,200MPa, 경화지수 N 은 0.2 이다. 수소 확산 해석에 필요한 상수는 Table 2 에 정리되어 있다.

4.2 해석결과의 검증

4.2.1 저강도 탄소강의 해석결과

Figure 3 은 저강도 탄소강에 대한 간극영역의 수소농도 분포를 보여준다. x 축은 균열 선단으로부터의 거리를 균열 열림 크기 b 로 무차원화하였으며, y 축은 간극영역의 수소농도를 초기 수소농도로 무차원화 하였다. Fig. 3(a)는 모델의 경계조건이 수소농도가 일정한 경우이고, Fig. 3(b)는 수소농도 구배가 없는 경우이다. Fig. 3(a)에서 변형률 속도가 매우 빠른 경우($t_L=1.3s$), 균열 앞에서 수소농도가 매우 낮으며, 변형률 속도가 비교적 느린 경우 ($t_L=13s, 130s$)에는 균열 선단에서의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대 농도가 된다. 세가지 변형률 속도에 상관없이 시간이 많이 흘러 평형상태에 도달했을 때 모두 같은 농도 분포를 보였으며, 균열선단에서의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대 농도가 유지되었다. Fig. 3(b)의 경우 $t_L=1.3s, 13s$ 일 때 균열선단에서의 수소농도가 매우 낮았으며, $t_L=130s$ 일 때에는 균열선단에서부터의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대 농도가 되었다. 수소농도가

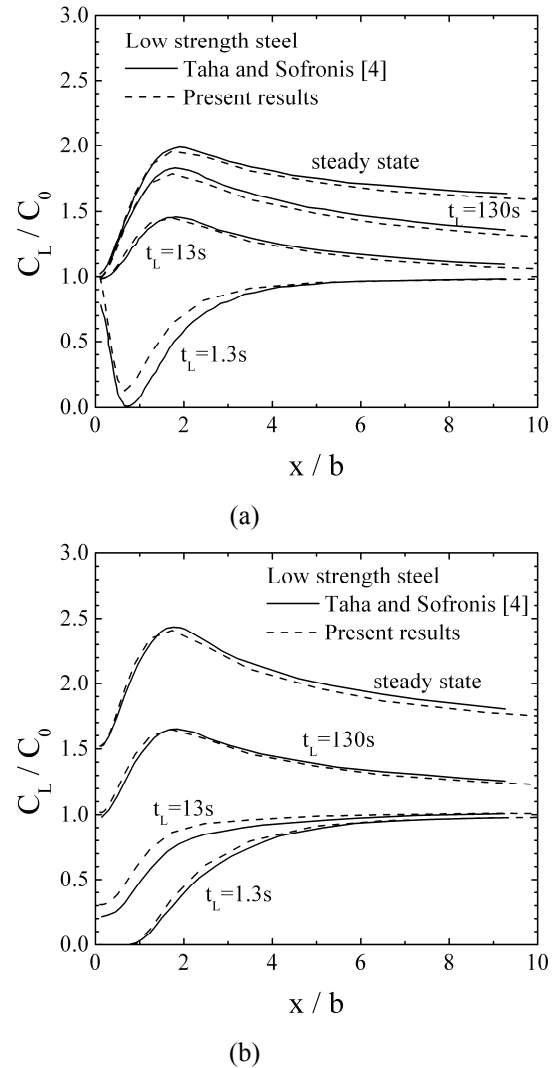


Fig. 3 Present FE results of the boundary layer specimen with low strength steel properties: (a) constant and (b) zero flux hydrogen concentration boundary conditions

일정한 경계조건인 경우와 동일하게 평형상태에서의 수소농도는 변형률 속도와 무관하게 일정하였으며, 균열선단으로부터의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대 농도가 되었다. 그러나 수소농도 구배가 없는 경계조건 모델이 수소농도가 일정한 경계조건 모델보다 더 높은 수소농도를 나타내었다. Fig. 3 에 나타난 해석결과로부터 본 논문에서 수행한 유한요소 해석결과와 기존 논문의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4 는 기계적 하중의 작용이 끝났을 때의 포획영역에서의 수소농도를 보여준다. 균열선단에 집중된 소성 변형률로 인해 포획영역이 균열선단에서 증가하였다. 이로 인해 간극영역의

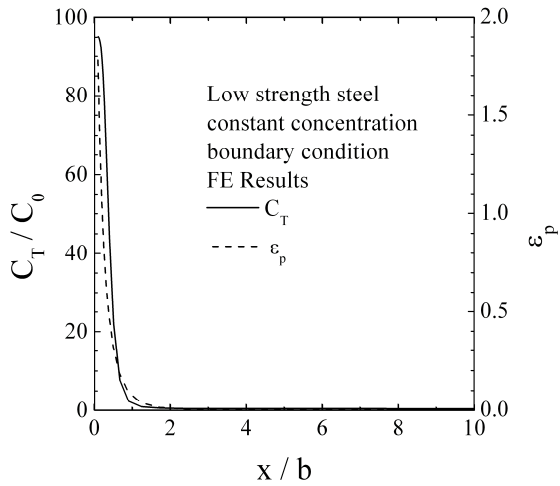


Fig. 4 FE results of the trapping site concentrations and plastic straining at the end of loading

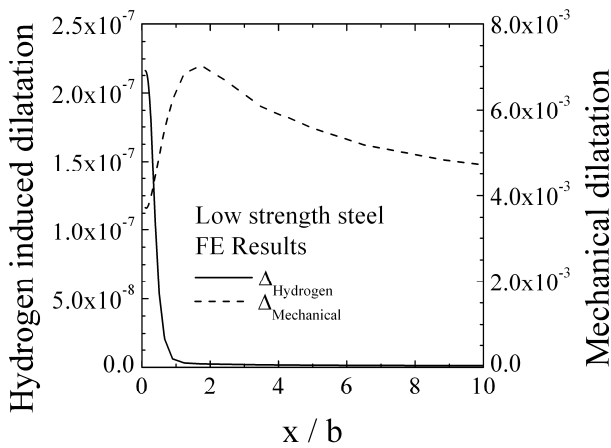
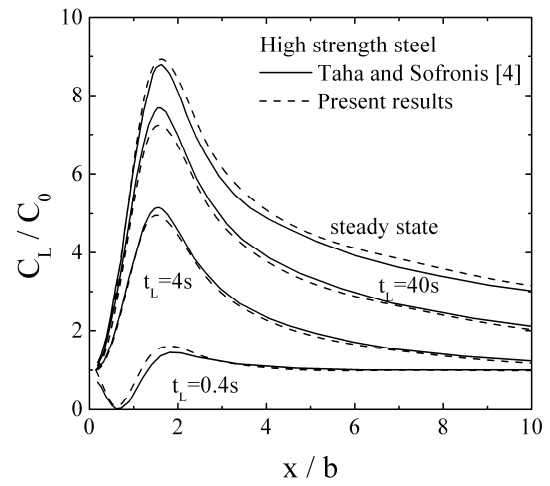


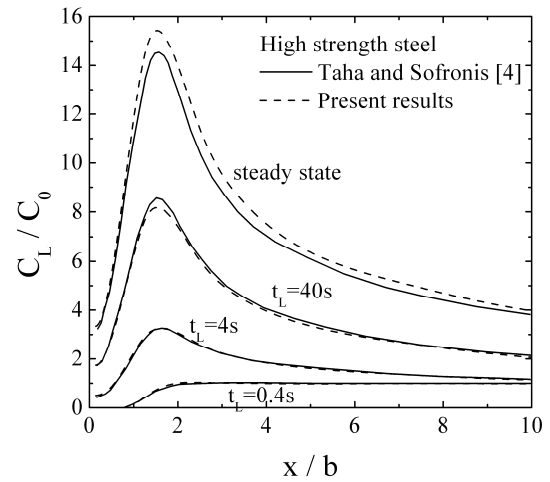
Fig. 5 FE results of hydrogen induced dilatation strain and mechanical dilatation strain at steady state

수소농도에 비해 매우 많은 수소가 균열선단의 포화영역에 집중됨을 알 수 있으며, 소성 변형률과 매우 밀접하게 증가함을 알 수 있다. 또한 포화영역에서의 수소농도 집중으로 인해 수소화산 시간이 짧을 때에는 간극영역의 수소농도가 매우 낮으며, 시간이 지날수록 다시 증가함을 Fig. 3 에서 확인할 수 있다. 이러한 유효요소 해석결과와 기존 논문의 결과와 잘 일치하였다.

Fig. 5 는 수소집중으로 인한 체적 변형률을 보여준다. 포화영역의 수소농도가 간극영역의 수소농도보다 크게 높으며, 포화영역의 수소농도가 큰 균열 선단에서 체적 변형률이 크게 발생하였다. 본 논문에 사용된 모델에서 수소집중에 의한 체적 변형률의 크기는 기계적 하중에 의한 체적 변형률보다 매우 작아 수소집중에 의한 영향은



(a)



(b)

Fig. 6 Present FE results of the boundary layer specimen with high strength steel properties: (a) constant and (b) zero flux hydrogen concentration boundary conditions

미미하다. 비록 수소화산모델의 검증을 위해 선택된 재료에서는 수소의 영향을 확인할 수 없었지만, 수소집중에 의한 체적 변형률의 영향은 재료에 따라 달라진다는 연구가 알려져 있다.⁽¹⁻⁶⁾

4.2.2 고강도 탄소강의 해석결과

Figure 6 은 고강도 탄소강에 대한 간극영역의 수소농도 분포를 보여준다. Fig. 6(a)는 수소농도가 일정한 경계조건 모델의 결과이며, Fig. 6(b)는 수소 농도가 없는 경계조건 모델의 결과이다. 저강도 탄소강의 결과와 비슷하게 균열선단으로부터의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 수소농도가 최대가 됨을

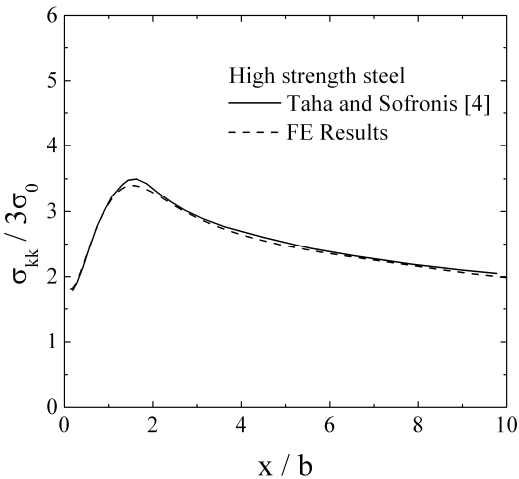


Fig. 7 Comparison of reference and present results for hydrostatic stress distribution of the boundary layer specimen with high strength steel properties

알 수 있다. Fig. 7 은 고강도 탄소강 모델의 정수압 응력 분포를 보여준다. 정수압 응력이 균열 선단으로부터의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대가 됨을 알 수 있으며, 이것은 수소농도가 최대가 되는 거리와 일치한다. 따라서 간극영역의 수소농도 분포는 정수압 응력의 분포와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 수소 확산 해석과 탄소성 해석을 연계하여 동시에 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 수소 확산 모델은 ABAQUS 상의 열전달 해석 모델을 이용하였으며, 사용자 정의 함수 UMATHT 를 통해 구현되었다. 탄소성 모델은 사용자 정의 함수 UMAT 을 이용하여 구현하였다. UMAT 에서 계산된 소성 변형률은 UMATHT 으로 전달되어 수소 확산 계산에 이용된다. 또한 UMATHT 에서 계산된 수소농도는 UMAT 으로 전달되어 수소에 의한 팽창 변형률을 계산하는데 이용된다.

개발된 해석모델은 균열을 포함한 무한 평판 모델에 적용하였으며, 기존 연구결과와 비교하였다.

해석결과와 기존 연구결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-313-D00017)

참고문헌

- (1) Birnbaum, H. K. and Sofronis, P., 1994, "Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity – A Mechanism for Hydrogen Related Fracture," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 176, pp. 191~202.
- (2) Sofronis, P. and McMeeking, R. M., 1989, "Numerical Analysis of Hydrogen Transport Near a Blunting Crack Tip," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 37, No. 3, pp. 317~350.
- (3) Lufrano, J. and Sofronis, P., 1998, "Enhanced Hydrogen Concentrations Ahead of Rounded Notches and Cracks – Competition Between Plastic Strain and Hydrostatic Stress," *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 5, pp. 1519~1526.
- (4) Taha, A. and Sofronis, P., 2001, "A Micromechanics Approach to the Study of Hydrogen Transport and Embrittlement," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 68, pp. 803~837.
- (5) Krom, A. H. M., Koers, R. W. J. and Bakker, A., 1999, "Hydrogen Transport near a Blunting Crack Tip," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 47, pp. 971~992.
- (6) A. H. M. Krom, H. J. Maier, R. W. J. Koers, and A. Bakker, 1999, "The Effect of Strain Rate on Hydrogen Distribution in Round Tensile Specimens," *Material Science and Engineering A*, Vol. 271, pp. 22~30.
- (7) Y. Kim, Y. J. Chao, M. J. Morgan, and P. S. Lam, "Comparison of Decoupled and Coupled Analyses for Hydrogen Transport in Fracture Specimens," 2007 *ASME conference on Pressure Vessels and Piping*, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas.
- (8) ABAQUS Version 6.7, 2007, "User's Manual," Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc, RI.
- (9) R. A. Oriani, 1970 "The Diffusion and Trapping of Hydrogen in Steel," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 18, pp. 147~157.