

유한요소 해석을 통한 수소확산에 미치는 영향 평가

김낙현^{*†} · 오창식^{*} · 김윤재^{*}

* 고려대학교 기계공학과

Assessment of Effective Factor of Hydrogen Diffusion Equation Using FE Analysis

Nak Hyun Kim^{*†}, Chang Sik Oh^{*} and Yun Jae Kim^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 4, 2009 ; Revised March 17, 2010 ; Accepted March 24, 2010)

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

초록: 수소 확산과 탄-소성 거동이 결합된 모델은 이미 제시되어 있다. 본 논문에서는 수소확산에 미치는 인자들과 그 영향에 대해 연구하였다. 각 인자들의 영향을 비교하기 위해 저탄소강 재료의 균열이 있는 무한 평판 모델에 대해 수소확산과 기계적 하중이 연계된 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 결과는 Taha 와 Sofrinis 의 연구(2001) 결과와 비교하여 검증하였다.

Abstract: The coupled model with hydrogen transport and elasto-plasticity behavior was introduced. In this paper, the effective factor of the hydrogen diffusion equation has been described. To assess the effective factor, finite element (FE) analyses including hydrogen transport and mechanical loading for boundary layer specimens with low-strength steel properties are carried out. The results of the FE analyses are compared with those from previous studies conducted 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
- α : 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 ($=6.0232 \times 10^{23}$)

1. 서론

최근 대체에너지인 수소에 관심이 높아지면서 수소의 저장과 수송방법에 대한 연구가 많아지고

있다. 이에 따라 수소 취화 현상에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

수소 취화 현상은 구조물의 안전성에 매우 심각한 영향을 끼친다. 수소환경에 노출된 구조물은 매우 낮은 하중에서도 쉽게 파손이 되며 이를 예측하기 매우 어렵다. 이러한 문제를 극복하기 위해 많은 연구가 진행되었다. 수소에 의한 국부 소성(hydrogen enhanced localized plasticity, HELP),⁽¹⁻⁶⁾ 응력에 의한 수소화합물의 생성과 분열(stress induced hydride formation and cleavage),⁽⁷⁻¹⁰⁾ 수소 유발 분열(hydrogen induced decohesion)⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 등의 연구가 대표적이다. 아직 정확한 파손기구는 밝혀지지 않았다.

그러나 그 중 가장 합리적인 파손기구는 수소에 의한 국부 소성(HELP) 이론이다. 이 파손기구는 수소화합물(hydride)을 생성하지 않는 재료에 대한 파손기구이며, 수소에 의해 국부적으로 심각한 소성변형에 의해 파손이 발생된다는 이론이다. 이 파손기구에 의한 수소 취화는 포획영역(trap site), 정수압 응력, 변형률 속도에 의해 영향을 받는다. 포획영역은 전위(dislocation), 결정입자의 경계(grain boundary), 공극(void) 또는 균열(crack) 등을

† Corresponding Author, man5047@korea.ac.kr

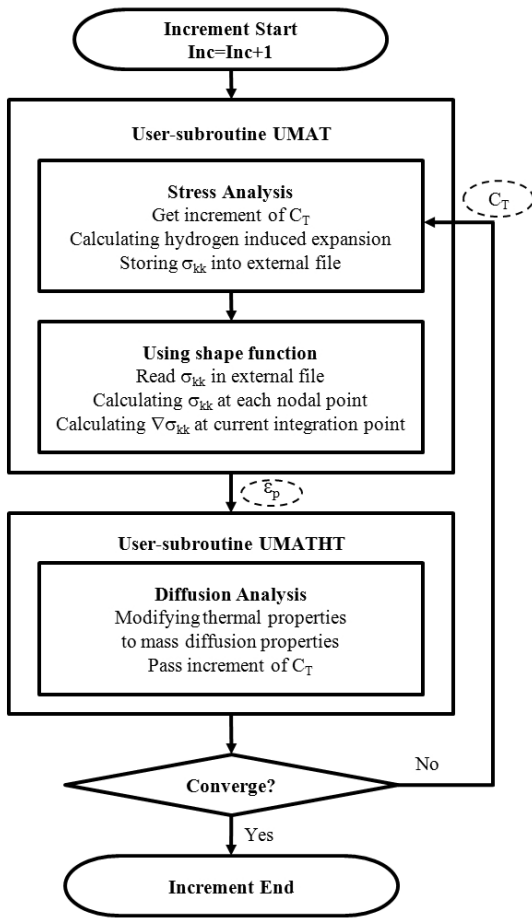


Fig. 1 Flowchart of hydrogen diffusion implemented to ABAQUS

의미한다. 포획영역에서의 수소농도는 소성변형의 정도에 따라 달라진다. 또한 정수압 응력이 최대인 곳에 수소가 집중된다. 이렇게 국부적으로 집중된 수소는 재료를 취화 시켜 재료의 연성을 낮게 만든다.

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.⁽¹⁵⁾

기존에 수소에 의한 국부 소성 이론을 이용한 수소 확산 해석은 자체 개발한 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.⁽⁴⁾ 따라서 다른 연구자들은 수소에 의한 국부 소성이론을 이용한 유한요소 해석을 수행하는데 어려움을 겪었다. 그러나 앞선 연구에서⁽¹⁸⁾ 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁶⁾를 이용하여 소성거동해석과 수소확산 해석을 연계하여 수행하는 방법을 제공하고 검증

Table 1 Values of variables used in hydrogen diffusion analysis⁽⁴⁾

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
α	1	β	1

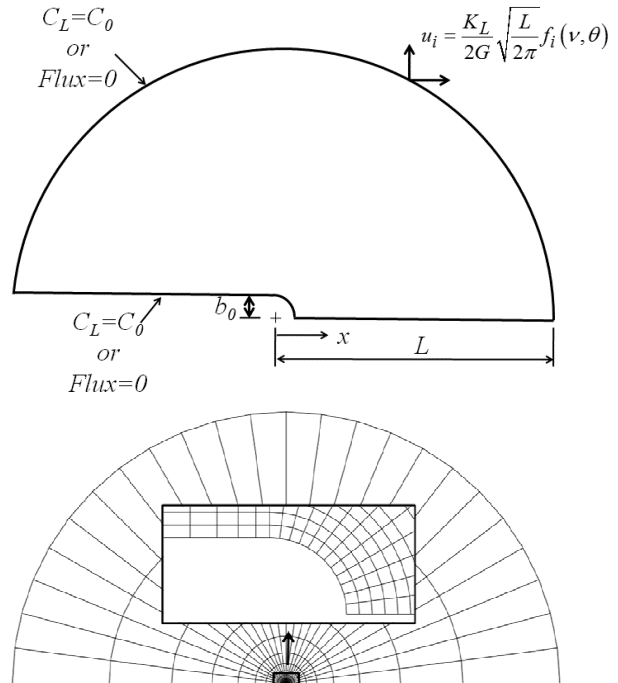


Fig. 2 Boundary layer specimen: (a) schematic illustration and (b) FE mesh

하였다. Fig. 1은 ABAQUS 상에서 구현된 수소 확산 해석의 흐름도를 보여준다.

앞선 다른 연구들에서는 완전한 수소확산 식을 사용하지 않고 몇 가지 인자들을 무시하여 해석을 수행한 경우가 많다. 본 논문에서는 앞선 연구에서⁽¹⁴⁾ 제공한 방법을 이용하여 수소확산 식에서 수소 확산에 영향을 미치는 인자에 대한 평가를 수행하였다.

2. 수소 취화 모델

2.1 수소 확산 모델

수소는 간극영역 (NILS: normal interstitial lattice

Table 2 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	I	Unit
k	Conductivity	D_L	Diffusivity

site)과 소성변형에 의한 포획영역 (trapping site)에 존재하며, Oriani⁽¹⁷⁾의 이론에 따라 steady state 뿐 아니라 transient state 에서 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 점유량 이고, θ_L 은 간극영역에서의 수소 점유량 이다. K_T 는 평형상수이며 다음과 같이 표현된다.

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

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 원자 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 몰 체적당 재료 격자의 몰 체적이다. 물질보존법칙에 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_L 은 재료에 따른 수소확산계수이고 D_{eff} 는 유효 확산 계수로서 다음과 같이 표현된다.

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

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 해석 대상

해석은 Fig. 2 과 같은 균열을 포함한 무한평판 모델(boundary layer specimen)에 대하여 수행하였다. 초기 균열 열림의 크기는 b_0 이며($b=5b_0$), 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. t_L 은 응력확대계수 K_L 에 도달하는 시간을 의미하며 K_L 은 $89.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이다. t_L 은 1.3, 13, 130 초이다. 모델의 경계조건은 참고문헌과⁽⁴⁾ 비교를 위해 수소농도가 일정한 경우와 수소농도 구배가 없는 두 가지 경우를 적용하였다.

재료의 물성은 다음과 같이 power-law 경화거동을 나타낸다.

$$\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_0}\right)^{1/N} = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_0}\right) + \left(\frac{3G}{\sigma_0}\right) \varepsilon_p \quad (8)$$

항복강도 σ_0 는 250MPa, 경화지수 N 은 0.2 이며, G 는 전단 탄성계수이다. 수소 확산 해석에 필요한 상수는 Table 1 에 정리되어 있다. 초기 수소농도 C_0 는 2.048×10^{21} atoms/ m^3 이며, 포획영역의 수 N_T 는 소성변형률의 함수로서 다음과 같이 표현된다.^(4,5)

$$\log_{10}(N_T) = 23.26 - 2.33 \exp(-5.5\varepsilon_p) \quad (9)$$

3.2 수소 확산 모델

앞선 논문에서⁽¹⁸⁾ ABAQUS 의 사용자 정의 함수(User sub-routine)인 UMAT 와 UMATHT 를 사용하여 수소 확산 현상을 모사하였다. 상용 프로그램인 ABAQUS 는 열해석과 응력해석을 연계하는 툴 (Tool)을 제공하지만, 수소 확산과 응력해석을 연계하는 툴을 제공하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 열 전달 해석 툴인 UMATHT 함수를 이용하여 수소 확산 툴로 이용하였다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{r} \quad (10)$$

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, 수소 확산의 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 2에 나타내었다.

3.3 탄소성 모델의 구현

재료의 탄소성 거동은 ABAQUS의 사용자 정의 함수 UMAT을 통해 구현하였다. 재료가 등방성이며, von-Mises J_2 유동장 이론을 따른다고 가정하였다. 또한 재료에 집중된 수소에 의한 팽창변형을 고려하였다.

소성 변형률은 다음과 같이 탄성변형 D_{ij}^e , 소성 변형 D_{ij}^p , 수소집중에 의한 변형 D_{ij}^h 의 합으로 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p + D_{ij}^h \quad (11)$$

여기서 D 는 변형률 속도 텐서(deformation rate tensor)이다. 수소에 의한 변형률 속도는 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$D_{ij}^h = \frac{d}{dt} \left[\ln \left\{ 1 + \frac{(c - c_0)\Delta v}{3\Omega} \right\} \right] \delta_{ij} \quad (12)$$

여기서 c 는 재료 원자당 수소 농도를 나타내며, c_0 는 재료의 변형이 일어나기 전의 초기 수소 농도이다. Ω 는 재료 원자의 평균 체적이며, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. Δv 는 수소 원자당 체적변화를 나타내며 다음과 같은 관계식을 가진다.⁽⁴⁾

$$V_H = \Delta v N_A \quad (13)$$

최종적으로 다축 변형률에 대한 유효 소성 변형률은 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$\varepsilon_p = \int \sqrt{\frac{2}{3} D_{ij}^p D_{ij}^p} dt \quad (14)$$

사용자 정의 함수 UMAT은 재료의 소성거동을 표현하는데 사용될 뿐만 아니라, 수소확산에 이용되는 재료의 정수압 응력 구배 및 소성변형의 크기를 계산하여 UMATHT에 정보를 제공한다. 이때 ABAQUS 프로그램 상에서 연계해석(Coupled analysis)시 정수압 응력 구배를 제공하지 않기 때문에 이를 위한 알고리즘이 필요하다. 정수압 응

력 구배를 계산하기 위해서는 요소의 적분점에서 계산된 응력을 각 절점에 대한 응력 값으로 변환시킨 후, 요소의 형상함수를 이용하여 정수압 응력의 구배를 적분점의 값으로 계산, 변환시킨다. 변환된 적분점에서의 정수압 응력 구배는 내부 변수를 통해 UMATHT로 전달된다.

4. 수소 확산에 영향을 주는 요인 평가

식 (6)에서 수소확산에 큰 영향을 미치는 인자는 유효 확산 계수(D_{eff}), 소성변형률(ε_p)과 정수압 응력(σ_{kk}) 세가지로 나눌 수 있다.

Fig. 3에 기계적 하중이 끝난 후의 소성변형률과 포획영역에서의 수소농도(C_T)를 보였다. 균열선단에 집중된 소성 변형률로 인해 포획영역에서의 수소농도가 균열선단에서 증가하였다. 이로 인해 간극 영역의 수소농도에 비해 매우 많은 수소가 균열 선단의 포획영역에 집중됨을 알 수 있으며, 포획영역에서의 수소농도는 소성변형률과 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에 기계적 하중이 끝난 후의 삼축 응력 분포와 간극영역의 수소농도(C_I)를 보였다. 삼축 응력의 분포와 간극영역의 수소농도 분포의 경향이 매우 비슷함을 알 수 있다. 앞선 연구⁽⁴⁾에서 밝혀진 바와 같이 간극영역의 수소농도는 삼축 응력과 밀접한 관계가 있다.

4.1 완전한 수소 확산 식을 이용한 해석 결과

Fig. 5는 완전한 수소 확산 식 (6)을 이용한 간극영역의 수소농도 분포를 보여준다. Fig. 5(a)는 모

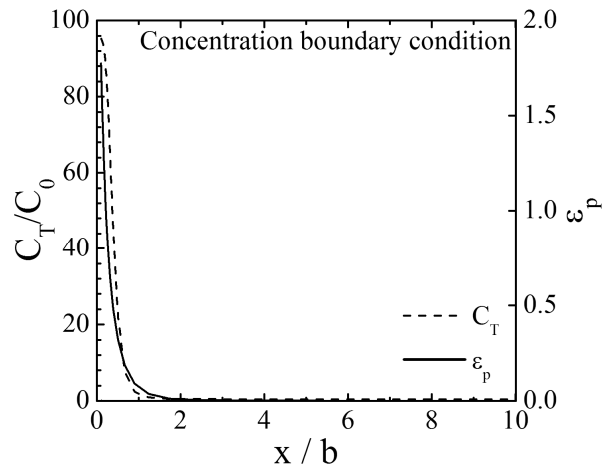


Fig. 3 FE results of the trapping site concentrations and plastic straining at the end of loading

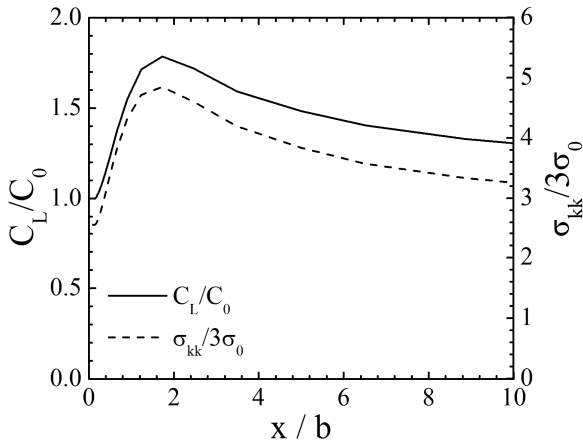


Fig. 4 FE results of hydrogen concentration in NILS and hydrostatic stress vs distance x/b

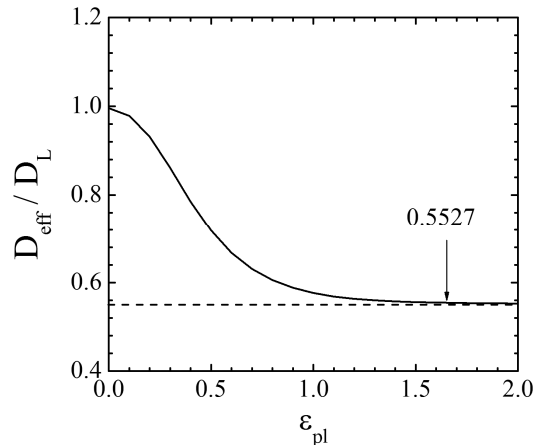


Fig. 6 Variation of effective diffusion constant caused by plastic strain

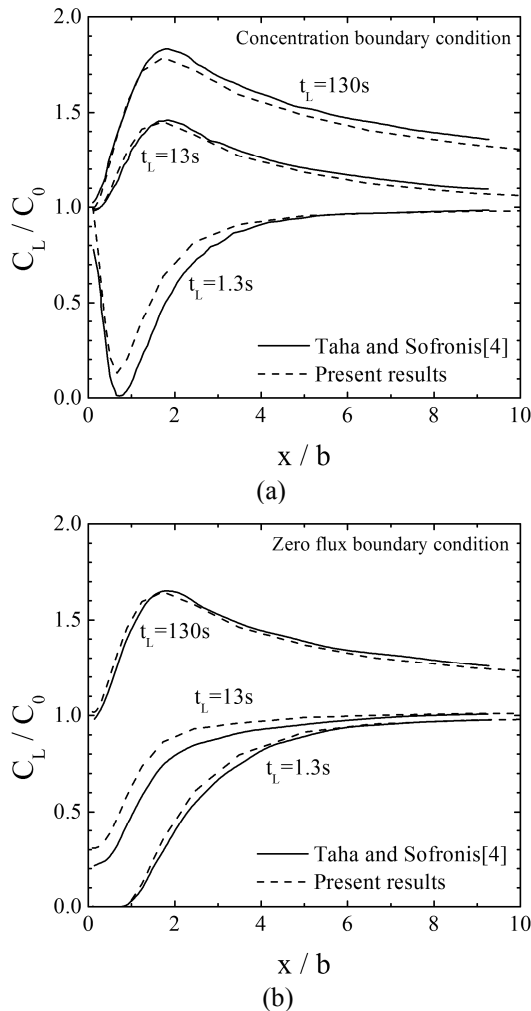


Fig. 5 Present FE results of the boundary layer specimen with full equation (a) constant and (b) zero flux hydrogen concentration boundary conditions

델의 경계조건이 수소농도가 일정한 경우이고, Fig. 5(b)는 수소농도 구배가 없는 경우이다. Fig. 5(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 균열선단에서의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대 농도가 된다. Fig. 5(b)의 경우 $t_L=1.3s, 13s$ 일 때 균열선단에서의 수소 농도가 매우 낮았으며, $t_L=130s$ 일 때에는 균열선단에서부터의 거리가 약 $x/b=2$ 근처에서 최대 농도가 되었다. Fig. 5에 나타난 해석 결과로부터 본 논문에서 수행한 유한요소 해석결과와 기존 논문⁽⁴⁾의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.2 소성변형률에 따른 D_{eff} 변화를 무시한 결과

Fig. 6에 소성변형률의 변화에 따른 유효 확산 계수의 변화를 나타내었다. 소성변형률이 증가함에 따라 유효 확산 계수가 특정 값으로($D_{eff} / D_L=0.5527$) 수렴함을 알 수 있다.⁽²⁾ 따라서 소성 변형률의 변화에 따른 유효 확산 계수의 변화를 무시했을 경우 수소확산 모사가 가능한지를 확인하기 위해 식 (6)의 유효 확산 계수를 수렴했을 때의 유효 확산 계수로 고정하고($D_{eff} / D_L=0.5527$) 해석을 수행하여 Fig. 7에 정리하였다.

Fig. 7(a)는 모델의 경계조건이 수소농도가 일정한 경우이고, Fig. 7(b)는 수소농도 구배가 없는 경우이다. 수소 농도가 일정한 경우 유효확산 계수의 변화를 고려한 경우와 무시한 경우의 경향은 비슷하나 정확한 모사는 불가능함을 알 수 있다. 수소 농도 구배가 없는 경우 변형률 속도가 매우 느린 경우($t_L=130s$)를 제외하면 정확한 수소확산의 모사가 불가능함을 알 수 있다.

4.3 소성변형률에 따른 수소확산을 무시한 결과

소성변형률에 따른 수소확산을 무시하면 식 (6)은 다음과 같이 간단해 진다.

$$\frac{D_L}{D_{eff}} \frac{\partial C_L}{\partial t} = D_L \nabla^2 C_L - \nabla \cdot \left(\frac{D_L C_L V_H}{3RT} \nabla \sigma_{kk} \right) \quad (15)$$

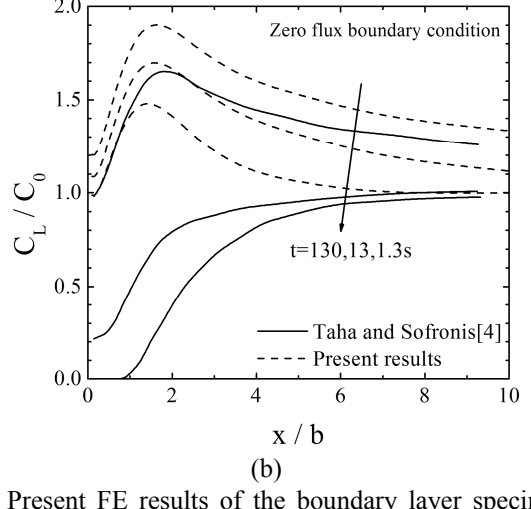
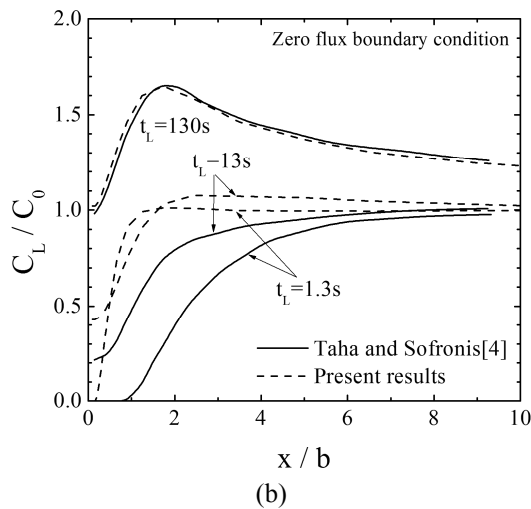
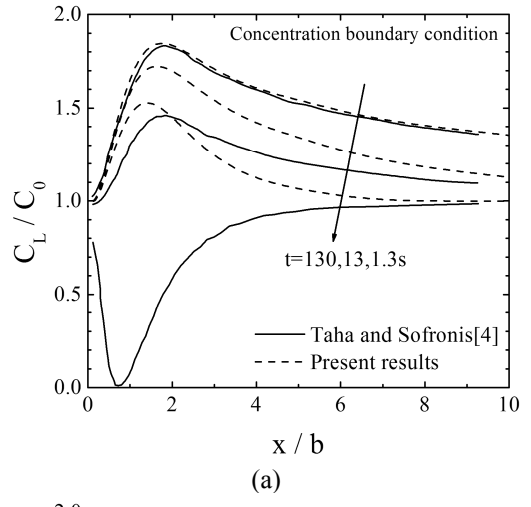
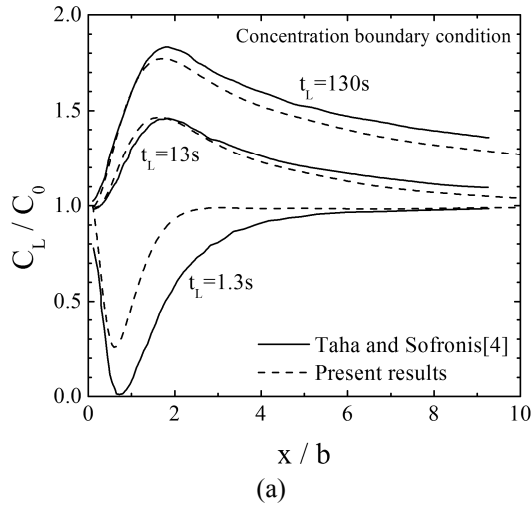


Fig. 7 Present FE results of the boundary layer specimen with ignore variation of effective diffusion constant (a) constant and (b) zero flux hydrogen concentration boundary conditions

Fig. 8 Present FE results of the boundary layer specimen with ignore plastic strain term (a) constant and (b) zero flux hydrogen concentration boundary conditions

소성 변형률에 따른 수소확산을 무시한 결과를 Fig. 8에 정리하였다. 수소농도가 일정하고 변형률 속도가 매우 느린 경우($t_L=130s$)를 제외하고 대부분의 경우에서 수소 확산 모사가 불가능 하였다. 소성변형률에 따른 수소확산의 영향이 매우 크을 알 수 있다.

4.4 정수압응력에 따른 수소확산을 무시한 결과 정수압응력에 따른 수소확산을 무시하면 식 (6)은 다음과 같이 간단해 진다.

$$\frac{D_L}{D_{eff}} \frac{\partial C_L}{\partial t} = D_L \nabla^2 C_L - \theta_T \frac{dN_T}{d\varepsilon_p} \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} \quad (16)$$

정수압응력에 따른 수소확산을 무시한 결과를 Fig. 9에 정리하였다. 수소 구배가 없는 경우는 해석이 불가능하였다. 정수압 응력에 따른 수소확산을

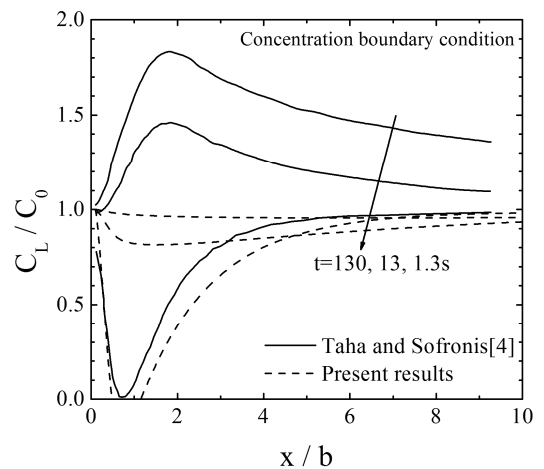


Fig. 9 Present FE results of the boundary layer specimen with ignore hydrostatic stress term under constant flux hydrogen concentration boundary conditions

무시하면 변형률 속도가 매우 빠른 경우($t_L=1.3s$) 참고문헌의 결과와⁽⁴⁾ 비슷하였으나 변형률 속도가 느려질수록 수소 농도가 초기 조건 상태로 수렴함을 알 수 있다. 따라서 정수압 응력에 의한 수소 확산을 무시할 경우 정확한 수소 확산의 모사가 불가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 기존에 자체 개발된 프로그램이 아닌 상용 유한요소 프로그램 ABAQUS 를 이용한 수소확산 해석을 통하여 수소확산에 영향을 미치는 인자들에 대한 평가를 수행하였다. 영향 파악을 위해 균열을 포함한 무한 평판 모델에 적용하였으며, 기존 연구 결과와 비교하였다.

소성 변형률에 따른 유효 확산 계수의 변화를 무시한 경우에는 완전한 식을 사용한 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 소성 변형률에 따른 수소확산이나 정수압응력에 따른 수소확산을 무시한 경우는 수소확산 모사가 불가능 하다. 따라서 정확한 수소 확산을 모사하기 위해서는 완전한 수소 확산 식 (6)을 사용해야 한다.

후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (원자력연구개발사업 고유강점기술육성분야, M2080608000208M060800210)

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) Krom, A. H. M., Maier, H. J., Koers, R. W. J. and Bakker, A., 1999, "The Effect of Strain Rate on Hydrogen Distribution in Round Tensile Specimens," *Material Science and Engineering A*, Vol. 271, pp. 22~30.
- (7) Westlake, D.G., 1969, A Generalized Model for Hydrogen Embrittlement, *Trans ASM*, 62:1000-6
- (8) Birnbaum, H.K., Grossbeck, M.L. and Amano, M., 1976, Hydride Precipitation in Nb and Some Properties of NbH, *J Less Comm Met*, 49:357-70
- (9) Gahr, S., Grossbeck, M.L. and Birnbaum, H.K., 1977, Hydrogen Embrittlement of Nb I – Macroscopic Behavior at Low Temperatures, *Acta Metall*, 25:125-34
- (10) Grossbeck, M.L. and Birnbaum, H.K., 1977, Low Temperature Hydrogen Embrittlement of Niobium II – Microscopic Observations, *Acta Metall*, 25:135-47
- (11) Troiano, A.R., 1960, The Role of Hydrogen and Other Interstitials in the Mechanical Behavior of Metal, *Trans ASM*, 52:54-80
- (12) Johnson, H.H., Morlet, J.G. and Troiano, A.R., 1958, Hydrogen Crack Initiation and Delayed Failure in Steel, *Trans Metall Soc AIME*, 212:528-36
- (13) Oriani, R.A. and Josephic, P.H., Equilibrium Aspects of Hydrogen-Induced Cracking of Steels, *Acta Metall*, 22:1065-74
- (14) Lessar, J.F. and Gerberich, W.W., Grain Size Effect in Hydrogen-Assisted Cracking, *Metall Trans*, 7A:953-60
- (15) Kim, Y., Chao, Y. J., Morgan, M. J. and Lam, P. S., "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.
- (16) ABAQUS Version 6.7, 2007, "User's Manual," Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc, RI.
- (17) Oriani, R. A., 1970 "The Diffusion and Trapping of Hydrogen in Steel," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 18, pp. 147~157.
- (18) Oh Chang-Sik and Kim Yun-Jae, 2009, "Coupled Analysis of Hydrogen Transport Within ABAQUS," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 6, pp. 600~606.