

용접금속 잔류수소농도의 수치해석 연구

유진선*[†] · 하윤석* · 라제쉬*

*삼성중공업 중앙연구소 생산기술연구센터 용접연구

A Numerical Study of the Residual Hydrogen Concentration in the Weld Metal

Jinsun Yoo*[†], Yunsok Ha* and Rajesh S.R.*

*Welding Research Part, Samsung Heavy Industries CO., LTD., Geoje 53261, Korea

[†]Corresponding author : js84.yoo@samsung.com

(Received May 9, 2016 ; Revised May 30, 2016 ; Accepted August 23, 2016)

Abstract

Hydrogen assisted cracking (HAC) is one of the most complicated problem in welding. Huge amount of studies have been done for decades. Based on them, various standards have been established to avoid HAC. But it is still a chronic problem in industrial field. It is well known that the main causes of the hydrogen crack are residual stress, crack susceptible micro structures and a certain critical level of hydrogen concentration¹⁾. Even though the exact generating mechanism is unclear till today, it has been reported that the hydrogen level in the weld metal should be managed less than a certain amount to prevent it. Matsuda²⁾ studied that the residual hydrogen level in the weld metal can be varied even if the initial hydrogen content is same. It is also insisted in this report that the residual hydrogen concentration is in stronger correlation with hydrogen crack than the initial hydrogen content. But, in practical point of view, the residual hydrogen is still hard to consider because measuring hydrogen level is time and cost consuming process. In this regard, numerical analysis is the only solution for considering the residual hydrogen content. Meanwhile, Takahashi³⁾ showed the possibility of predicting the residual hydrogen by a rigorous FE analysis. But, few commercial software suitable for solving the weld metal hydrogen has been reported yet.

In this study, two dimensional thermal - hydrogen coupled analysis was developed by using the commercial FE software MARC. Since the governing equation of the hydrogen diffusion is similar to the heat transfer, it is shown that the heat transfer FE analysis in association with hydrogen diffusion property can be used for hydrogen diffusion analysis. A series of simulation was performed to verify the accuracy of the model. For BOP (Bead-On-Plate) and the multi-pass butt welding simulations, remaining hydrogen contents in the weld metal is well matched with measurements which are referred from Kim⁴⁾ and Masamitsu⁵⁾.

Key Words : Residual hydrogen concentration, Hydrogen assisted crack, Delayed crack, Cold crack, FEM

1. 서 론

용접부의 각종 균열 중 주로 100℃이하의 온도에서 관찰되며 특정 임계 농도 이상의 확산성 수소, 용접 금속 내부의 잔류 응력, 균열 민감성 미세 조직의 상호 작용에 의해 형성되는 균열을 수소 균열, 지연 균열, 또는 저온 균열이라 한다(이하 수소 균열). 수소 균열은

아직 그 발생 기구가 명확히 알려져 있지 않아 최근에도 빈번히 발생하고 있다. 따라서, AWS D1.1, BS 5135 등 주요 용접 지침들에서는 용접 재료의 수소 함유량에 대한 관리 기준을 제시하고 있다.

여기서 용접 재료의 수소 함유량 관리 기준이란 AWS A4.3, JIS Z3118등의 지침에 의거한 표준 측정법(가스 크로마토 그래피법, 글리세린법, 수은법)을 이용하여 측정된 용접 직후의 용착 금속의 초기 수소 함유량

을 의미한다. 그러나, Matsuda²⁾ 등은 수소 균열에 영향을 미치는 인자는 이러한 초기 수소 함유량이 아니라 다양한 이력을 거쳐 형성된 상온의 용접 금속이 가지는 잔류 수소 농도임을 언급하였다. 이는 수소 균열의 엄밀한 검토를 위해서는 용접 재료가 갖는 고유의 초기 수소 함유량뿐만 아니라 용접 과정 중의 특성 및 이력이 모두 검토되어야 함을 의미한다. 그러나, 각종 용접 조건에 따라 달라지는 잔류 수소 농도를 실험을 통해 측정하는 데에는 기술적, 경제적 측면에서 한계가 있다.

이에, 용접 금속 내부의 확산성 수소를 FE 분석을 통하여 예측하려는 기존의 연구들이 있다. 이 연구들은 확산의 물리적 특성을 고찰하여 일반 열전달 상용코드를 활용할 수 있게 하거나, 컴퓨터 성능의 비약적 발전에 기반하여 수소 확산을 직접 해석이 가능하도록 한 것들이다.

대표적으로 Oh⁶⁾ 등은 열전달 지배방정식이 Fick의 법칙과 그 형태가 유사함에 착안하여 범용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS의 열전달 해석 코드를 이용하여 Sofronis⁷⁾가 제안한 응력-수소 지배방정식을 구현한 바 있으며, 응력 집중에 따른 수소 포획 현상도 모사하였다. 용접 전문 상용 프로그램인 SYSWELD에서는 기존 Fick의 법칙을 일반화한 열-수소 연계 해석 코드를 포함하고 있으며 이때 수소 포획 현상을 고려하기 위해 금속의 용해도를 변형률의 함수로 정의하였다. 그러나, 상기의 연구들은 상용 열전달 코드의 온도를 농도로 사용하는 과정에서 온도의존성이 강한 확산계수가 상수로 처리되는 한계를 갖거나, 변형률 의존성 용해도의 물성을 구하기 어려운 문제가 있다.

한편, Takahashi³⁾ 등은 In-house code로 열-수소 순차 해석을 통하여 수소확산을 모사한 연구를 수행한 바 있다. 이에 본 연구에서는 이 방법을 근간으로 하되, 이를 상용 열전달 코드에서 구현하는 방법을 일반화하는 것을 개발목표로 하여 범용성 증대 및 정도 제고도 꾀하려고 하였다. 개발에 활용된 상용코드는 MSC.Mrac2014가 활용되었으며, 수소의 방출을 상용 코드의 대류로 대체분석하는 과정을 추가함으로써 FE분석의 정확성을 증가시키려고 하였다.

검증과정에서는 Single pass 용접시 시간대 별 확산성 수소량을 예측하여 이 결과가 Kim⁴⁾ 등이 제시한 측정치와 비교하여 잘 부합하고 있음을 보였다. 다음으로 Multi pass 용접부의 해석을 통해 용접 금속 내부의 수소 농도 분포가 역시 문헌에서 제시되는 값과 잘 일치함을 보였다.

2. 해석 방법

본 연구는 서론에서 언급한 바와 같이 용접부 확산성 수소의 시간대별 잔류분의 합리적인 수치 해석을 위해 열-수소 연계 해석 방법³⁾을 개발하려는 바, 상용 열전달 코드를 활용하는 것을 기반으로 하려고 한다. 용접부의 수소 확산은 그 속도가 매우 느리며 용접선 방향으로로는 농도 구배가 거의 없어 2차원 가정을 적용할 수 있다. 또한, 금속 내부의 수소 확산이 단순히 농도 차에 의해서만 발생한다고 가정할 경우 수소 확산 거동은 Fick의 제 2법칙을 따르며 지배 방정식은 식(1)로 열전달 방정식 식(2)과 그 형태가 동일함을 알 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D(T) \cdot \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

여기서 H , $D(T)$, T , α 는 각각 수소 농도(ml/100g), 수소 확산 계수(mm²/s), 온도(°C) 및 열 확산 계수(mm²/s)를 의미한다. 여기서 수소 확산 계수는 강한 온도의존성 물성치이다. 상용 열전달 코드를 확산해석으로 적용하면서도 온도의존성 물성치를 반영하려면 열전달 해석이 누락되지 않아야 한다. 이에, 본 연구에서는 Step별로 열전달 해석과 확산해석이 순차적으로 분석되도록 연계 해석을 구현하였다. 즉, 열전달 해석시 열전도도로 적용된 입력값은 순차적 확산 해석시 열전달 해석으로부터 얻은 온도 분포로 계산된 수소 확산 계수로 대체된다. 이로써, 열전달 코드를 수소확산 해석에 온전히 사용되도록 하였으며, 각 Step별 수소확산 계수는 열전달 해석 결과를 통해 도출되게 하는 연계 해석을 수행하였다. 또한 각 패스 별 재용융 면적 및 재용융부의 잔류 수소 농도를 계산하여 수소 확산 시의 경계 조건을 부여한다. 이때, 용융 면적에 대해서는 수소 농도가 동일하다고 가정하여 식(3)과 같이 계산한다.

$$H_{in} = \frac{A}{A+B} H_0 + \frac{B}{A+B} H_{res} \tag{3}$$

여기서, H_{in} , H_0 , H_{res} 는 각각 현재 패스의 용접 금속(Weld metal)에 부여되는 경계조건, 표준 시험 법으로 측정된 용착 금속(Deposited metal)의 수소 농도 및 재 용융부에 포함되어 있는 수소 농도의 평균값을 의미하며 A 와 B 는 각각 현재 패스의 용착 금속의 면적 및 현재 패스의 용접 금속에서 A 를 제외한 면적을 의미한다. (Fig. 1)

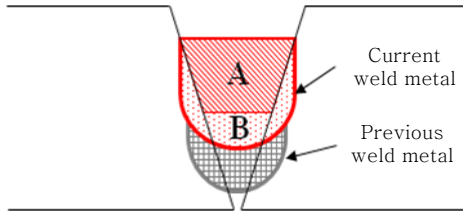


Fig. 1 Definition of a weld metal area

참고로 본 연구에서는 3.2절의 다층 용접부 해석을 제외하고는 Th. Boellinghaus⁸⁾가 제시한 수소 확산 계수를 이용하여 해석을 수행하였다.

3. 해석 결과의 검증

3.1 Single pass 용접부 해석 및 검증

해석 방법의 검증을 위해 일련의 해석이 수행되었다. 먼저 Single pass 용접 해석을 통하여 시간대 별 용접 금속 내부의 잔류 수소 농도의 거동에 대해 해석을 수행하였다. 본 해석의 검증을 위해 문헌⁴⁾에서 보고되고 있는 측정 데이터와 비교를 수행하였다. 해석 시 용접 조건으로는 전류 270 A, 전압 29V, 용접 속도 35cm/min이 적용되었고, 용착 금속의 초기 수소 농도로는 10.4ml/100g DM이 적용되었으며, 가스크로마토그래프법을 이용하여 확산성 수소량을 측정하였다.

용접 이후 각각 60초 후, 10분 후의 확산성 수소의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 용접부 표면에서의 수소 방출과 내부로의 확산이 동시에 이루어 지므로, 시간이 경과할수록 최대 수소 농도의 위치는 아래로 이동하며 그 최대값 또한 작아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 용착 금속 기준의 수소 농도에 대해 해석 및 문헌의 측정 데이터를 비교한 결과이다. 용접 직후부터 1시간까지 대기 노출 시의 해석 결과 및 측정치가 매우 잘 부합하고 있다. 이 경우 1시간 경과 시 초기치의 약 27%인 2.8 ml/100g DM의 수소만이 용접부에 잔류하여 있는 것을 확인할 수 있다.

선체블록과 같은 실제의 용접구조물은 수 m 이상의 매우 큰 구조물이므로, 시편의 크기에 따라 잔류 수소 농도가 어떻게 달라지는 지 해석을 통해 확인해 보았다. 표준 규격의 시편의 경우 그 크기가 작아 오랜 시간 동안 고온의 상태로 유지 되는 반면, 시편의 크기가 증가할 경우 주변부가 열 흡수원 (heat sink)의 역할을 하므로 열전도에 의해 빠르게 냉각되어 수소의 확산 및 방출량이 줄어들어 잔류 수소 농도는 증가하게 된다. 동일 용접 조건에서 12T×25W의 원래 크기의 시편과 50T×1000W 시편에서(Fig.4) BOP 용접 시 point A에서의 온도 이력 차이에 대한 해석 결과를

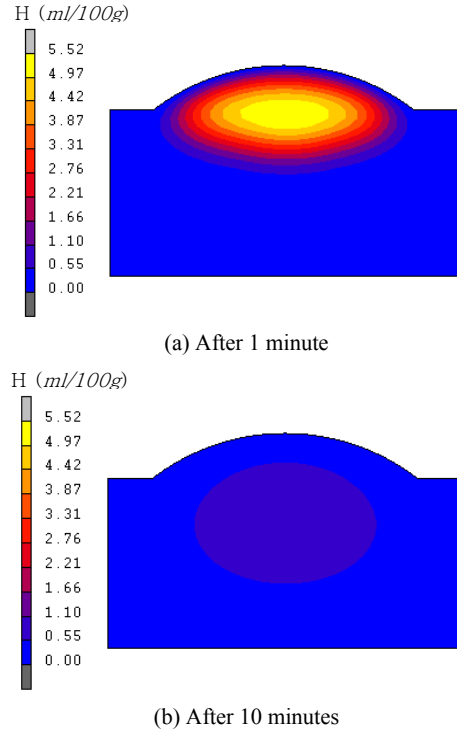


Fig. 2 Hydrogen concentration in the BOP weldment, (a) 1 minute after welding, (b) 10 minutes after welding

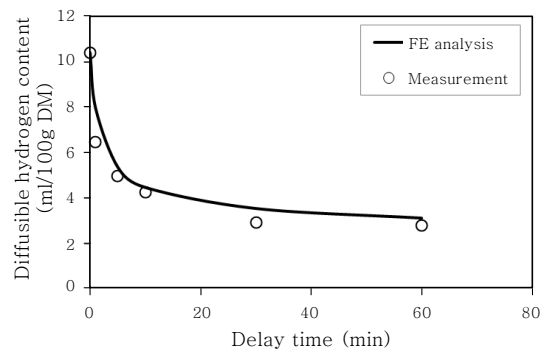


Fig. 3 Comparison between the FE analysis and measurement referred from kim⁴⁾

Fig. 5에서 확인할 수 있으며, 이에 따라 용접 금속에 잔류하는 확산성 수소의 농도 역시 차이가 발생함을 알 수 있다.

용착 금속 기준으로 계산된 잔류 수소 농도는 표면으로의 방출에 의해서만 감소하기 때문에 Fig. 6에서 보는 바와 같이 냉각 속도의 차이에 비해 전체 수소 농도의 감소량은 비교적 크지 않다. 그러나, 시편 내부에서는 확연한 농도 구배의 차이를 보이는데(Fig. 7) 이는 50T×1000W 시편의 경우 급격한 온도 감소로 인해 확산 속도 역시 감소하므로 국부적으로 높은 수소 농도가 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 즉, 초기 수소 농도가 동일하더라도 용접 조건에 따라 잔류 수소 농도 및 그 분

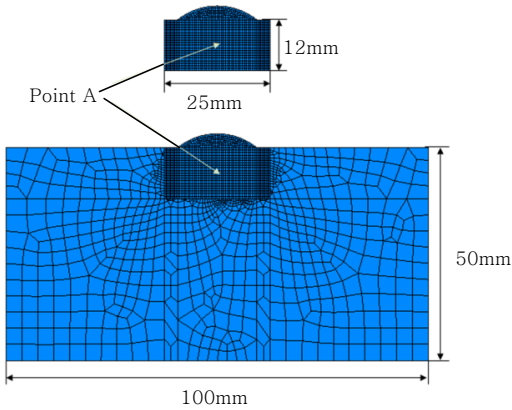


Fig. 4 Dimension of specimens for analyzing the size effect

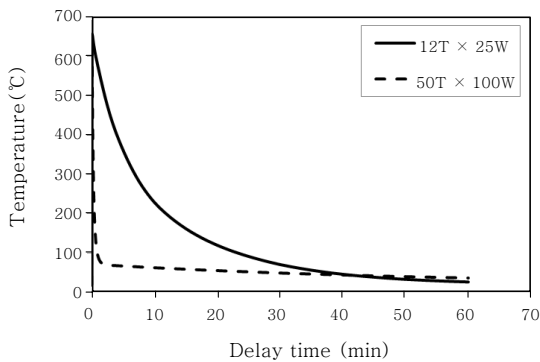


Fig. 5 Thermal history at point A according to specimen size

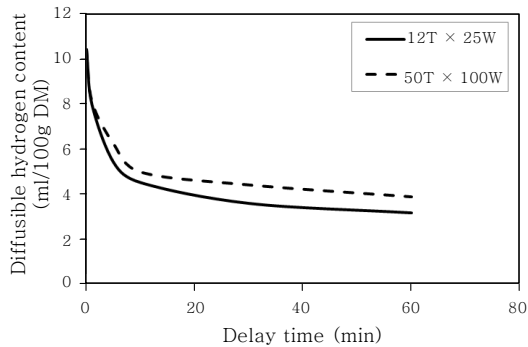


Fig. 6 Residual diffusible hydrogen history based on a deposited metal according to specimen size

포 특성이 달라지는 실험결과는 합리적인 FE Analysis 를 통하여 분석될 수 있다.

3.2 Multi pass 용접부 해석 및 검증

다음으로 다층 용접부의 수소 확산 거동을 해석하여 그 결과를 측정치와 비교해 보았다. 다층 용접부의 해석을 위해 역시 참고 문헌⁵⁾에 제시된 수소 확산 계수와 측정 데이터 및 용접 조건을 이용하여 검증을 수행하였

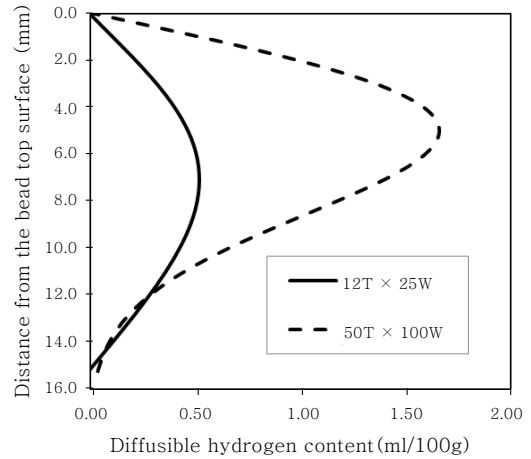


Fig. 7 Variation of hydrogen content along the depth from the bead top according to specimen size

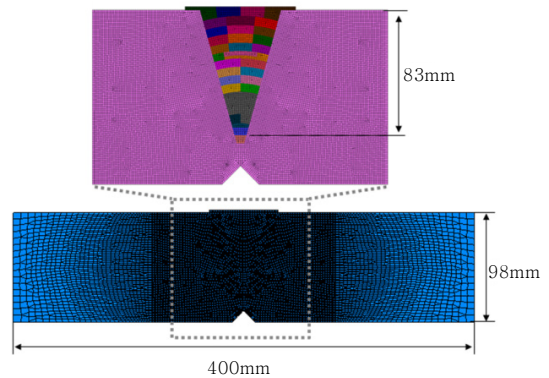


Fig. 8 FE meshes for multi pass welding simulation

다. 해석 시 용접 조건으로는 전류 560 A, 전압 31V, 용접 속도 30cm/min이 적용되었고, 용착 금속의 초기 수소 농도로는 1.3ml/ 100g DM이 적용되었으며, 가스 크로마토그래프법을 이용하여 확산성 수소량을 측정하였다. 각 패스의 용접 금속에 부여되는 수소 경계 조건은 식(3)에 의해 개별적으로 계산되었다. 해석에 사용된 유한 요소 모델을 Fig. 8에 나타내었으며 총 36 패스의 용접이 수행되었다. 모든 용접이 완료된 이후 용접부의 수소 농도 분포를 Fig. 9에 나타내었으며 측정치와의 비교 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

다층 용접부에서는 이전 패스에서 형성된 용접 금속이 부분적으로 다시 용융되면서 내재되어 있던 확산성 수소가 누적되어 용접이 진행될 수록 수소 농도가 증가하게 되며 이미 형성되어 있는 용접부의 수소 농도는 확산에 의해 농도가 점차 감소한다. 이 두 가지 원인에 의해 용접 완료 후 수소 농도의 분포는 최종적으로 형성된 용접 비드의 아래의 일정 깊이에서 최대치에 도달하게 된다. 또한 이 위치에서 용접 진행 방향 응력 또한 최대가 되어 균열 민감성이 가장 큰 것으로 알려져

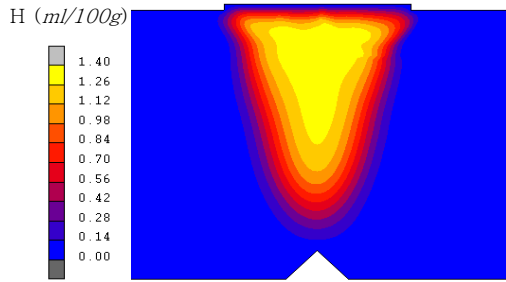


Fig. 9 Residual hydrogen distribution of the multi pass weldment

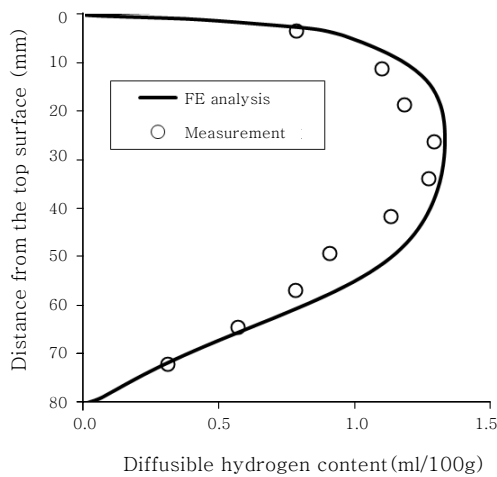


Fig. 10 Comparison between the FE result and the measurement referred from masamitsu⁵⁾

있다⁹⁾. 본 해석 결과는 이러한 현상을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

수소 균열은 현재까지 용접 구조물 제작 중 끊임없이 발생하는 매우 해결하기 어려운 결함 중 하나이다. 수소 균열의 대표적 원인 중 하나인 용접부의 수소 농도는 일반적인 관리 기준인 용착 금속의 초기 수소 농도가 아닌 용접 완료 후 실질적으로 잔류해 있는 수소 농도가 수소 균열과 직접적 관계가 있음이 여러 문헌에서 보고되고 있다. 그러나 각종 용접 조건에 따라 달라지는 잔류 수소 농도를 실험을 통해 측정하는 것은 시간 및 비용적 측면에서 한계가 있다. 한편, 최근 컴퓨터 성능의

비약적 발전을 통해 수소 농도의 예측에 대한 많은 연구가 이루어 졌다. 하지만 이러한 해석을 위해서는 대부분 자체적으로 개발된 해석 코드가 사용되고 있어 범용적으로 사용하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 수소 확산 방정식의 형태가 열전달 방정식과 유사한 점을 이용하여 범용적으로 쓰이는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 MSC사의 MARC의 열전달 코드를 이용하여 열 - 수소 연계 해석을 수행하였다. BOP용접과 다층 용접의 해석 결과와 문헌의 측정 결과와의 비교를 통해 해석 결과의 정확도를 검증하였다. 향후 다양한 용접 조건에 따른 수소 농도의 거동에 관한 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. N. Yurioka and H. Suzuki, Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments, *International Material Review*, 35 (4) (1990), 217-249
2. F. Matsuda, et al., Effect of Remaining Hydrogen Content on Cold Cracking Susceptibility in Weld Metal of High Strength Steels, *Journal of JWS*, 5 (2) (1987), 244-249 (in Japan)
3. E. Takahashi, et al., Correlation between Hydrogen Concentration and Practical Welding Conditions, *Journal of JWS*, 49 (2) (1980), 129-136(in Japan)
4. D. Y. Kim, et al., Effect of Preheat Temperature on Diffusible Hydrogen Content in Weld Metal Deposited using Flux Cored Wire, *Journal of KWJS*, 32 (2) (2014), 18-21 (in Korean)
5. A. Masamitsu, et al., Study on Hydrogen Distribution in Multi-layer Weld of Cr-Mo-V Steel, *Journal of JWS*, 29 (4) (2011), 280-285
6. C. S. Oh and Y. J. Kim, Coupled Analysis of Hydrogen Transport within ABAQUS, *Journal of KSME*, 33 (6) (2009), 600-606 (in Korean)
7. P. Sofronis and R. M. McMeeking, Numerical Analysis of Hydrogen Transport near a Blunting Crack Tip, *J. Mech. Phys. Soilds*, 37 (3) (1989), 317-350
8. Th. Boellinghaus, et al., A scatterband for hydrogen diffusion coefficients in micro- alloyed and low carbon structural steels, *Welding in the World*, 35 (2) (1995), 83-96
9. E. takahashi and K. Iwai, Relations between Occurrence of the Transverse Cracks and Parameters of Residual Stress and Diffusible Hydrogen Concentration, *Journal of JWS*, 48 (10) (1979), 865-872