

유한요소해석을 이용한 수소압력용기 비파괴 시험 평가 플랫폼의 안전성 기준 개발 연구

^{1*}이용우

A Study on Non-Destructive Safety Evaluation Platform of Internal Defects of the Composite Hydrogen Tank using Finite Element Analysis

^{1*}Yongwoo Lee

요 약

본 연구에서는 수소차에 사용되는 수소압력용기 비파괴 안전성 평가 플랫폼 개발을 위해 유한요소해석을 사용하여 안전성 평가 기준 개발에 대한 연구를 수행하였다. Type 4 수소 압력용기의 안전성을 평가하기 위해 복합 재료의 특성에 따른 매개변수를 바탕으로 재료의 물성을 유한요소 해석을 통해 도출하였다. 이를 통해 수소압력용기에 사용되는 CFRP 복합소재의 기계적 특성을 바탕으로, 내부 결함을 모델링하고 수소압력용기에 대한 평가기준을 사용하여 내부결함에 대한 파손가능성 여부를 도출하는 프로세스를 연구하였다. 결함은 박리, 이물질, 표면 수직균열을 모델링하고 파손 기준에 따른 손상을 분석하여 비파괴검사를 통해 검출된 결함의 안전성 여부를 판단할 수 있는 방법을 연구하였다. 연구 결과 박리 결함은 수소 압력용기의 내부에 근접할수록 파손가능성이 높아졌으며, 수직 균열을 경우 균열의 깊이가 깊어질수록 손상가능성이 높게 나타났다. 또한, 이물질 결함의 경우 압력용기의 외부 방향에 비해 내부 방향에 위치한 경우 손상가능성이 높게 나타났다. 본 연구를 통해 결함의 종류, 형상 및 크기에 따른 수소압력용기의 안전성을 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 향후 본 연구결과를 바탕으로 수소차량 압력용기의 비파괴시험 안전검사 플랫폼 개발 연구를 수행하고자 한다.

Abstract

In this study, damage resulting from internal flaws was investigated by finite element analysis for the safety evaluation of a non-destructive testing platform for hydrogen pressure vessels. A specimen was modeled and calculated using finite element analysis to determine material properties in accordance with the parameters of the composite material in order to assess the safety of the Type 4 hydrogen pressure vessel. Through this, flaws in the hydrogen pressure vessel were modeled, and test conditions were provided in accordance with rules to look into whether there was safety. Delamination, foreign object, and vertical cracks were modeled for internal flaws, and damage was examined in accordance with failure criteria. As the delamination defect approached the interior of the hydrogen pressure tank, it became more likely to cause damage. Additionally, as the crack depth grew in the case of vertical cracks, the likelihood of crack propagation rose. On the other hand, it was anticipated that the foreign item defect would suffer more damage from the outside in. A non-destructive testing platform will be used to assess the safety of fuel cell vehicles that are already in operation in future research.

Keywords: Safety evaluation Platform, Non-Destructive Testing, Hydrogen Tank, Composite Material, Defect, Failure Criteria, Finite Element Method

^{1*} 신한대학교 기계자동차융합공학과 부교수 (ywlee@shinhan.ac.kr)

I. 서론

수소차량의 연료저장시스템은 700bar의 압력의 수소를 저장하고 주행함에 따라 수소 저장용기의 폭발사고 등에 대비한 안전 평가 플랫폼 개발이 필요한 실정이다. 현재 양산되고 있는 수소차량의 경우 초기 제작단계에서 부품 및 안전기준을 평가하나 차량의 운행에 따른 노후화 및 외부손상에 의해 발생할 수 있는 결함이 사고로 이어지기 이전에 사전 검출을 통해 안전을 확보하여야 한다. 특히, 수소 연료시스템 중 수소를 저장하는 압력용기는 복합소재로 제작되어, 결함 발생 여부를 육안검사만으로는 확인이 불가능한 내부 결함 발생시 안전 여부의 판단을 할 수 있는 평가 플랫폼 개발에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이러한 수소압력용기의 결함에 대한 안전성 평가를 위해 다양한 실험 및 연구가 수행되었으나, 비파괴 검사기법을 통한 결함 검출에 대한 연구가 주로 수행되어왔다. 그러나 이는 결함여부의 검출에 대한 것으로 결함에 의한 파손 가능성 여부에 대한 안전성 평가 기준과 연계한 연구는 부족한 실정이다[1][2][3][4]. 관련한 안전성 검증 연구로 Roh et.al [5]는 Type 4 수소 압력 용기에 대하여 700 bar 급 용기에 안전율을 고려하여 내압 조건 해석을 수행하고, 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 그러나, 연구대상물이 특정되어 Filament Winding 기법으로 제작되는 용기의 다양한 제작방법에 대한 고려가 되지 않았다. 또한, Leh et.al의 연구[6]에서는 700 bar 압력 수준의 수소 저장용기에 대하여 파손 기구를 점진적으로 적용하여 구조물 파괴 거동에 대한 연구 수행하였다. 그러나, 대상 모델이 시편단위 모델이며, 단일 물성에 대하여 해석이 수행되어 제작 시 수반되는 적층 특성에 물성 변화에 대한 부분은 고려되지 않았다. 관련하여 김상영 등의 연구[7]와 Hu et. al의 연구[8]에서는 CFRP 적층판에 대한 하중 부여 거리에 따른 응력특성과 Tan-Cheng의 파손 기준 및 J-integral을 이용하여 파괴 강도 특성에 대한 연구를 수행하여 손상여부에 대한 방법적 특성을 제시하였다. 그러나, 단일한 재료물성을 중심으로 평가되어, 재료의 다양한 특성에 대한 연구는 제시되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 적층 및 제작 조건을 고려한 수소 내압용기의 해석 방법에 대한 연구를 수행하고, 이를 바탕으로 운행차의 수소압력용기 비파괴 안전성 시험평가 플랫폼의 결함에 따른 안전성 평가기준에 대한 연구를 수행하였다.

II. 연구절차

본 연구는 수소압력용기를 포함하는 수소연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)의 운행 중 안전검사를 위한 비파괴 시험평가 플랫폼의 안전성 평가기준에 관한 연구로 운행 차량의 수소연료장치의 분해가 수반되지 않는 장착상태에서의 평가를 목적으로 하고 있다. 이에 따라, 안전성 판단은 압력용기의 외면에 비파괴 검사를 수행하여 결함의 유형 및 크기를 검출하고, 안전기준 만족 여부를 판단하는 절차에 따라 진행된다. Type 4 수소압력용기는 복합소재로 제작되기 때문에 안전성 여부를 확인하기 위해서는 결함의 위치, 크기, 방향 등에 따른 면밀한 검토가 수반되어야 한다. 또한, 복합소재는 매우 작은 크기의 섬유를 적층하는 구조이므로, 유한요소 해석 시 다양한 재료의 기계적 성질을 고려해야 하므로 모델링시 유한요소의 크기의 제약이 수반된다. 특히, 각각의 탄소복합소재 적층 단위 별 두께는 30 μm 에서 50 μm 까지 사용되는데, 수소압력용기의 두께가 20 mm 이상인 것을 고려할 때, 적층 두께 단위로 직접 모델링은 거의 불가능하다. 이에 따라 본 연구에서는 실제 섬유 적층에 따른 특성을 microscopic scale 시편 단위해석으로 물성을 도출하고, 도출된 기계적인 물성을 바탕으로 macroscopic scale 한 압력용기 모델에 입력하여 내압용기의 결함에 따른 안전성 여부를 판단하였다. 그림 1은 기존의 결함이 없는 조건에서의 연구[9]의 방법을 바탕으로 본 연구에서 수행하고자 하는 결함을 포함한 수소압력용기의 안전성을 평가하기 위한 절차를 제시하고 있다.

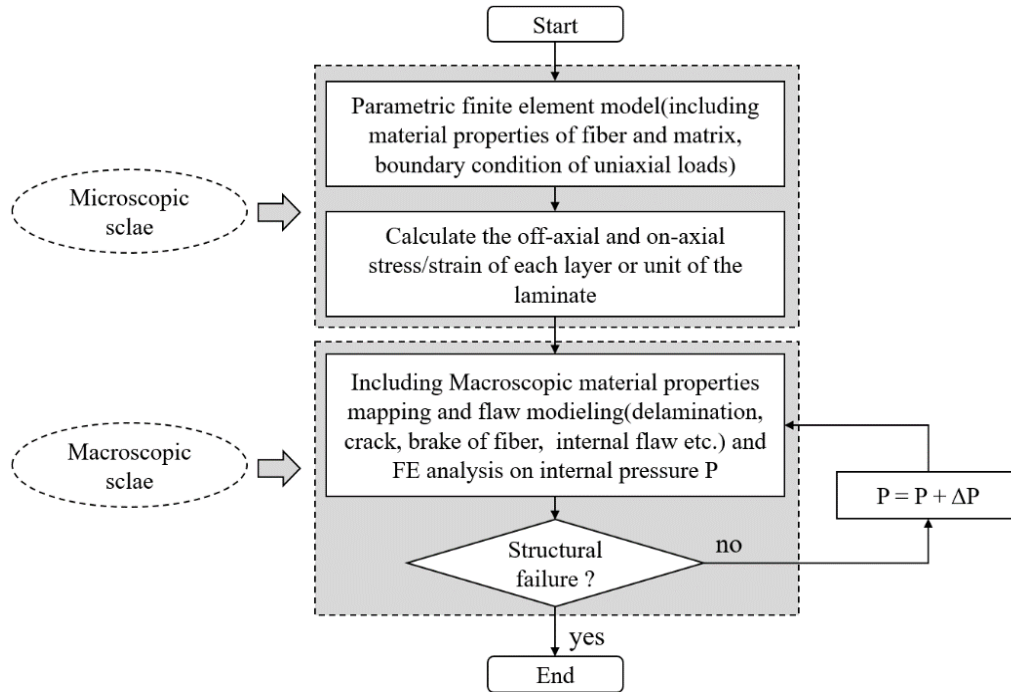


Figure 1. Flow chart of a hydrogen composite tank failure analysis
 그림 1. 수소압력용기 파손해석 절차도

III. 연구 결과

3.1 시험 규정 분석

수소버스 내압용기의 안전성 평가 표준 시험 방법에 대한 검토를 위해 ANSI HGV2-2014(미국)[10], EC Regulation 406(EU)[11], UN GTR 13[12]의 기준을 조사하였다. 시험 방법에서 실온 반복 가압시험은 EC Regulation 406에서는 설계 수명을 20년으로 규정하고 15,000 회를 요구하고 있으나, 국내 국토교통부고시에서 15년에 12,000 회를 기준으로 하고 있다. 또한, 압력용기의 평가기준의 최대사용압력은 ANSI HGV2-2014에서는 70 MPa의 125%를 EC Regulation 406에서 70 MPa를 기준으로 제시하고 있으며 결함내구성 시험의 경우 실제 사용압력의 125%를 인가하여 3,000 회 또는 설계 충전 횟수의 60%를 기준으로 하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 압력용기의 안전성을 확보하기 위해 최대사용압력 조건인 70 MPa의 125%에 안전율 1.2를 고려하여 최대사용압력조건인 150%인 105 MPa를 인가하는 시험조건을 기준으로 요구하는 수명 조건을 고려하여 평가를 수행하였다.

3.2 기계적 물성 도출

Type 4 수소버스 내압용기는 CFRP를 적용하여 제작하기 때문에 microscopic scale에서 물성 확보를 위한 모델의 구축이 선행되어야 한다. 이에 따라 제조상의 특징을 반영하기 위해 ASTM D 3039[13]에 근거한 유한요소 모델링을 구축하였다. 물성 도출 모델은 그림 2와 같으며 모델링은 HyperMesh[14]를 사용하였으며, 유한요소 해석은 ABAQUS[15]를 사용하였다. 그림 2에서 유한요소 모델의 각 층의 두께는 40 μm이며 50개 층으로 구성되었으며, 적층 각도에 따라 각 요소의 층별 방향성을 고려하여 각각의 방향을 설정하였다. 유한요소 모델은 396,950개 요소와 414,023개의 절점으로 구성되었다. 유한요소 모델링시 각 층별 재료 물성은 SK Chemical USN 200 Carbon/Epoxy 필름의 물성으로 표 1과 같다.

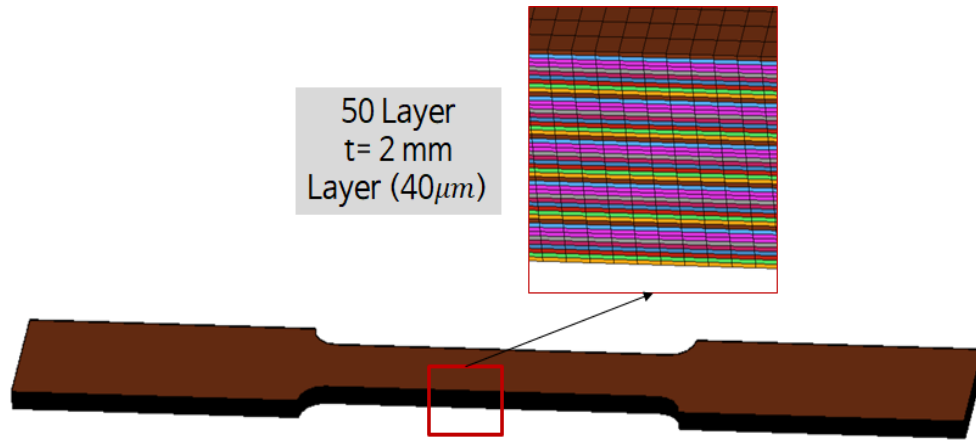


Figure 2. Finite element model of ASTM Specimen
 그림 2. ASTM 시편 유한요소 모델

Table 1. Material Properties of Carbon film
 표 1. 카본 필름의 기계적 물성

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber direction	E_1	131 GPa
Elastic modulus in transverse direction	E_2	8.2 GPa
Shear modulus in 1-2 and 1-3 plane	G_{12}, G_{13}	4.5 GPa
Shear modulus in 2-3 plane	G_{23}	3.5 GPa
Poisson's ratio	ν_{12}, ν_{13}	0.281
	ν_{23}	0.470
Tensile strength in fiber direction	X_t	2,000 MPa
Compressive strength in fiber direction	X_c	1,400 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_t	61 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y_c	130 MPa
Shear strength in 1-2 and 1-3 plane	S_{12}, S_{13}	70 MPa
Shear strength in 2-3 plane	S_{23}	40 MPa

적층 각도에 따라 25 가지 조건에 대하여 시험 기준에 따라 변위 1.0 mm 까지 강제 변위를 부여하여 해석을 수행하였으며, 각 조건에 따른 응력 분포, 탄성계수 및 거동은 서로 상이하게 나타났다. 주요 각도에 따른 응력 분포는 그림 3 에 나타나 있으며, 응력은 0° 조건에서 최대 2,797 MPa 가, 15° 조건에서 2,912 MPa 가 나타났다. 또한, 단면에 나타나는 응력분포는 각도가 증가함에 따라 층간 편차가 점차적으로 미세하게 변화하는 것을 볼 수 있었다. 도출된 탄성계수는 그림 4 와 같으며, 기존의 연구[16]와 같이 적층 각도가 0° ~ 15° 까지 인장방향의 탄성계수(E_{11})가 급격히 감소하고 이후 거의 변화가 나타나지 않는 결과를 보였으며, 적층 각도 45° 주위에서 전단탄성계수(G_{12} , G_{13} , G_{23})가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 복합소재의 섬유 배치 방향에 따른 영향으로 하층의 방향과 섬유의 길이 방향이 일치하는 0° 조건에서 인장방향 탄성계수는 가장 높게 나타나며, 각도가 증가할수록 떨어지게 된다. 이와 같은 이유로, 45° 인 경우 전단방향으로 섬유의 길이방향 배치가 늘어나게 되어 상대적으로 높은 전단 탄성계수가 나타난 것으로 판단된다.

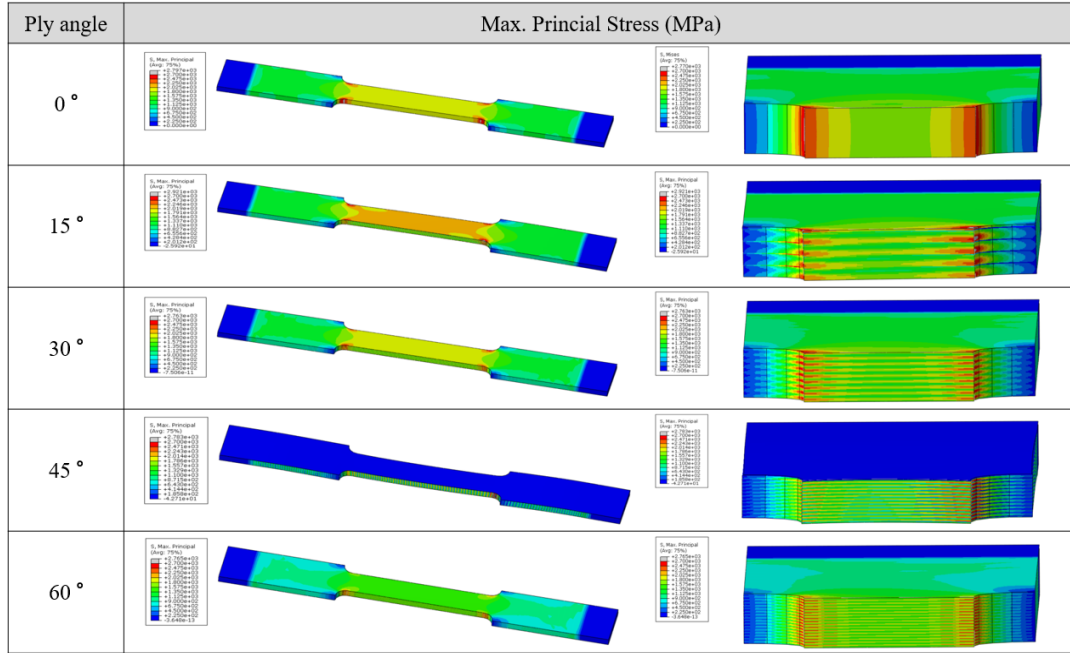


Figure 3. Stress contour of ASTM Specimen
 그림 3. ASTM 시편 응력분포

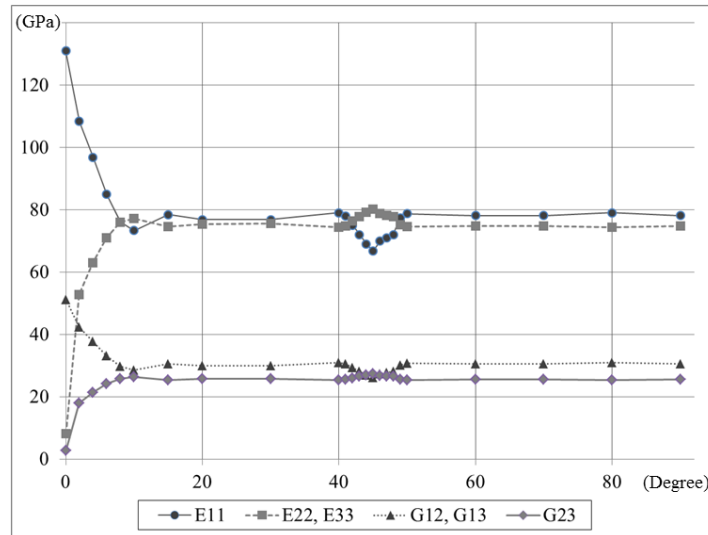


Figure 4. Elastic Modulus of ASTM Specimen
 그림 4. ASTM 시편 탄성계수

3.3 결함 연계 압력용기 안전성 평가

결함에 대한 해석을 위해 도출된 적층 각도 별 기계적 물성을 바탕으로 압력용기의 시편에 대한 모델링을 수행하고 내부에 위치, 크기 및 형태를 변경하여 결함을 추가적으로 모델링하였다. 내압용기 시편 모델은 그림 5와 같으며, 290,880 개 요소와 306,714 개의 절점으로 구성되었다. 각 단면부는 대칭조건(symmetric boundary)를 부여하였으며, 내압은 시험규정 분석 결과에 따라 105 MPa 를 부여하였다.

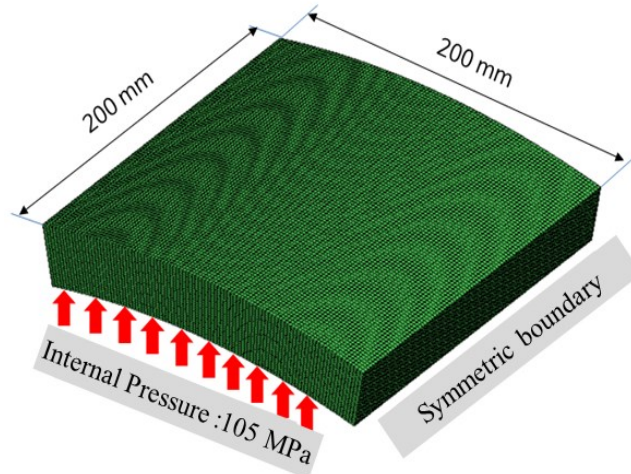


Figure 5. Part model of type-4 hydrogen tank
 그림 5. Type4 수소압력용기 시편 모델

층간 분리 결함 모델은 압력 용기 내측면 5 mm 부터 외면까지 5 mm 간격으로 부여하여 해석을 수행하였으며, 수직 균열은 외면 또는 내면으로부터 두께 방향으로 1 mm 간격으로 결함을 모델링하였으며, 이물질 결함의 경우 내부에 임의의 이물을 삽입하고 위치를 변경하여 해석을 수행하였다. 해석 결과에 대한 결함 크기, 형상 및 위치 별 안전성 평가를 위해, Son 의 연구[17]에서 제시한 Max. stress-strain, Tsai-Wu 및 Tsai-Hill 평가기준을 바탕으로 각각의 조건에 대한 평가 기준을 분석하였다. 결함모델에 대한 해석 조건은 총 150 개에 대하여 수행되었다. 해석 결과 층간 분리 모델의 경우 Max. stress(strain) 평가 조건과 Tsai 평가에서 거의 유사하게 용기 내부 5.0 mm 이하에서 조건을 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 이물질 결함의 경우 Max. stress에서는 용기 표면 8.0mm 에서 Tsai-Hill에서는 7.0mm 이하에서 파손 가능성이 있는 것으로 나타났다. 층간 분리 결함의 경우 Max. stress 평가에서 분리 계면의 선단(crack tip)의 응력 집중이 나타나 실제 위험으로 판단되었으나, Max. strain 조건에서 변형률의 영향이 상대적으로 낮게 나타나 안전 범위 이내에 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 표면 균열의 경우 Max. Strain 조건에서 균열길이 5.0 mm 에서, Tsai-Wu 에서 2.0mm 에서 손상 가능성이 높은 것으로 나타났다. 각각의 조건에 따른 해석 결과는 그림 6 에 각각의 복합소재 파손 기준에 따라 평가되었다.

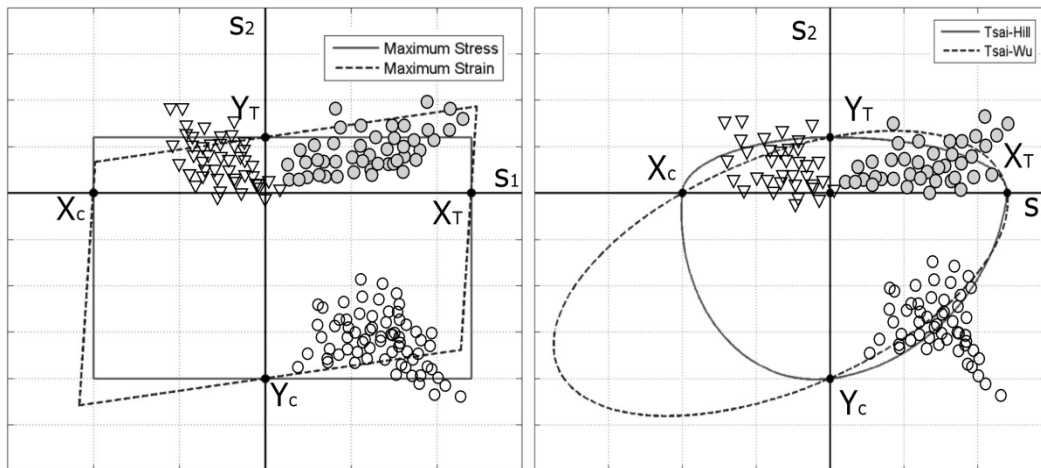


Figure 6. Failure criteria of analysis result
 그림 6. 파손 기준 분석 결과

IV. 결론

본 연구에서 수소차의 압력용기 비파괴 시험 평가 플랫폼에 사용되는 안전성 평가기준의 개발을 목적으로 유한요소해석을 활용하여 다양한 결함 사례에 대한 파손 기준에 대한 연구를 수행하였다. Type 4 내압용기 제작에 사용되는 복합소재의 적층 특성을 고려하여 유한요소 모델을 활용하여 유효한 기계적 물성을 도출하고, 도출된 물성을 바탕으로 결함 연계 해석을 수행한 결과를 복합소재 파손 기준을 통한 분석을 수행하였다. 결함에 대한 안전성 평가 결과 균열 선단부가 나타나는 층간 분리와 수직균열은 Max. stress 판단기준이 Max. strain 에 비하여 보수적으로 나타났다. Tsai-Hill 과 Tasi-Wu 의 기준은 거의 유사하게 나타났으며, 판단기준을 고려할 때 Max. stress 및 Max. strain 에 비하여 Tsai-Hill 조건이 제시된 4 가지 기준에서 가장 보수적인 것으로 평가되었다. 이를 바탕으로 각각의 결함에 대한 종류, 크기 및 위치에 따른 안전 기준에 대한 평가를 수행하였으며, 해석을 통한 수소압력용기의 평가 방법을 제시하였다. 향후 본 연구결과를 바탕으로 운행차량에 대한 비파괴 시험 평가 플랫폼 개발과 연계하여 평가 방법 및 기준에 대한 추가적인 연구를 수행하고자 한다.

V. 감사의 글

본 연구는 국토교통부 수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발 사업의 연구비지원 (과제번호 #22HBST-C160329-03)에 의해 수행되었습니다.

VI. 참고문헌

- [1] J. B. Kim, K.W. Jung, D.C. Choi, C. H. Kim, Y. Kim, "Study on Phased Array Ultrasonic Testing Technique During Repair of Carbon Steel Plate using CFRP Materials", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 2, pp.126-132, Apr. 2021.
- [2] J. R. Lee, H. Jeong, T. T. Chung, H. Shin, J. Park, "Damage Visualization of Filament Wound Composite Hydrogen Fuel Tank Using Ultrasonic Propagation Imager", Composites Research, Vol. 28, No. 4, pp.143-147, Apr. 2015.
- [3] D. Wang, B. Liao, C. Hao, A. Wen, J. Zheng, P. Jiang, C. Gu, P. Xu, Q. Huang, "Acoustic emission characteristics of used 70 MPa type IV hydrogen storage tanks during hydrostatic burst tests", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 23, pp. 12605-12614, Mar. 2021.
- [4] R. Gutkin, C. J. Green, S.Vangrattanachai, S. T. Pinho, P. Robinson, P. T. Curtis, "On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, No. 4, pp. 1393-1407, May. 2011.
- [5] H.S. Roh, T.Q. Hua, R.K. Ahluwalia, "Optimization of carbon fiber usage in Type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles", International journal of Hydrogen Energy , Vol.38, No. 29, pp.12795-12802 , Sep. 2013.
- [6] D. Leh, P. Saffre, P. Francescato, R. Arrieux and S. Villalonga, "A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel", International Journal of Hydrogen energy, Vol. 40, No. 38, pp 13206-13214, Oct. 2015.
- [7] S. Y. Kim, H. S. Park, M. S. Kang, W. H. Lee, J. H. Choi, J. M. Koo, C. S. Seok, "Evaluation of Failure Strength of Woven CFRP Composite Plate Subject to Axial Load by Tan-Cheng Failure Criterion", Transactions of the KSME A, Vol. 33, No. 4, pp.360-365, Apr. 2009.
- [8] J. Hu, F. Liu, Q. Duan, G. Cheng, Z. Zhang, "Failure analysis based on J-integral values: A case study of hydrogen blistering defect", Engineering Failure Analysis, Vol. 18, pp.924-932, Apr. 2011.
- [9] Ming Zhang, Hong Lv, Huairong Kang, Wei Zhou, Cunman Zhang, "A literature review of failure prediction and analysis methods for composite high-pressure hydrogen storage tanks", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 47, pp. 25777-25799, Oct. 2019.
- [10] American National Standards Institute and CSA Group, "ANSI HGV 2-2014 Compressed Hydrogen Gas Vehicle Fuel Containers", American National Standards Institute and CSA Group, Washington, DC, USA, 2014.

- [11] The European Union, “Commission Regulation (EU) No 406/2010 of 26 April 2010 Implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on Type-Approval of Hydrogen Powered Motor Vehicles”, The European Union, Brussels, Belgium, 2010.
- [12] United Nations, “ECE/TRANS/180/Add.13 Global Technical Regulation on Hydrogen and Fuel Cell Vehicles”, United Nations, New York, NY, USA, 2013.
- [13] ASTM International, “ASTM D3039/D3039M-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, West Conshohocken, PA, 2014.
- [14] Altair Inc., "HyperWorks Manual", Version 2017, 2017.
- [15] Dassault System Inc., “ABAQUS Manual”, Version 2018, 2018.
- [16] Kim J. H., C. J. Kim, C. S. Cha, Kim J. H., "Recalculation Research of Material properties for CFRP FEM Non-linear Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 4, pp.608-612, Aug. 2012.
- [17] Son B., “Failure Criteria of Composite Materials”, Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 2, No. 3, pp. 17–52, May. 2011.

저자소개



이용우 (Yongwoo Lee)

2003 년 8 월 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 학사
2005 년 8 월 연세대학교 기계공학과 석사
2017 년 9 월~현재 신한대학교 기계자동차융합공학과 부교수

관심분야 : 인공지능, 스마트 모니터링 시스템, 차량 사물통신(V2X)
