

SPH 기법을 활용한 Type 4 복합재료 압력용기 낙하 충격 해석

송귀남 · 김한상[†]

가천대학교 기계공학과

Fall Impact Analysis of Type 4 Composite Pressure Vessels Using SPH Techniques

GWINAM SONG, HANSANG KIM[†]

Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 1342 Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Korea

[†]Corresponding author :

hskim70@gachon.ac.kr

Received 30 May, 2021

Revised 25 June, 2021

Accepted 25 June, 2021

Abstract >> The drop impact analysis was carried out on Type 4 pressure containers, and the degree of damage to the falling environment was predicted and determined using smoothed particle hydrodynamics (SPH) techniques. The purpose of the design and the optimization process of the winding pattern of the pressure vessel of the composite material is to verify the safety of the container in actual use. Finally, an interpretation process that can be implemented in accordance with domestic test standards can be established to reduce the cost of testing and containers through pre-test interpretation. The research on the fall analysis of pressure vessels of composite materials was conducted using Abaqus, and optimization was conducted using ISIGHT. As a result, the safety of composite pressure vessels in the falling environment was verified.

Key words : Composite pressure vessels (복합재료 압력용기), Drop test(낙하 시험), Finite element method(유한요소법), Filament winding(필라멘트 와인딩), Optimization process(최적화 프로세스)

1. 서론

최근 환경 문제로 화석 연료에 대한 규제가 세계적으로 심화되고 있으며, 대한민국 정부에서도 세계적인 환경 규제 영향에 따라 신재생 에너지 및 수소에너지의 개발 및 상용화에 대한 정책을 시행하고 있는 실정이다. 더불어 배터리 및 전기적 구동장치를 사용하는 전기 자동차의 충전시간 및 주행 가능 최

대 거리 문제, 드론의 충전시간 및 비행 가능 시간 등의 문제를 직면하여 해결 방안에 대한 관심이 증가하고 있다. 배터리를 사용하는 전기자동차 및 드론의 문제점을 해결할 방안으로 수소 연료 전지 및 드론용 연료 용기에 대한 대안이 제시되며 국내에서 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 드론 장착용 Type 4 복합재료 압력용기에 관해 자유낙하 상황을 모사하여 낙하 충격 해석과 영향에

대한 연구를 진행하였다.

수소 연료 전지 자동차용 용기와 드론 장착용 용기의 차이점은 추락 환경 노출의 차이가 있다. 드론 용기의 경우 비행 중 높은 고도에서 조작 미숙 및 기타 다양한 원인에 의한 드론 추락이 발생할 가능성이 있으며 낙하에 의한 용기의 파손을 예측하고 취약 부위 보강이 필수적이다. 낙하 및 추락 과정에서 발생하는 파손과 누출을 최소화하기 위하여 국내 고압가스용 비금속라이너 복합재료용기 제조의 시설 기술검사 기준 중 낙하 검사를 기준으로 낙하 환경을 해석적으로 구현하여 Type 4 복합재료 압력용기의 파손 정도를 예측하는 방법을 입자완화유체동역학(smoothed particle hydrodynamics, SPH) 기법을 적용하여 구현하였다.

Type 4 복합재료 압력용기의 설계 및 모델링은 상용 구조해석 소프트웨어인 Abaqus (Dassault Systems SE, Milano, France)를 사용하였으며, 복합재 부는 Abaqus의 plug-in인 wound composite modeler (WCM)를 이용하여 모델링 하였다. 상용 구조해석 소프트웨어 Abaqus를 사용하여 Type 4 복합재료 압력용기의 낙하 충격 해석을 통하여 복합재료의 낙하 상황 및 낙하 시험에 대해 영향과 안전성을 확인하였다¹⁾.

2. Type 4 복합재료 압력용기 설계

2.1 Liner 및 Boss 설계

드론 장착용 Type 4 복합재료 압력용기는 사용압력 35 MPa, 용량 10.8 L 급으로 설계되었다. Liner 및 Boss가 결합된 assembly 형상은 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

Liner는 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 재질을 사용하여 설계하였으며 물성은 제조사에서 제공된 값을 이용하였고, Table 1에 정리하였다. Element는 continuum shell 및 저감된 적분 요소인 continuum, 3D, 8-node, reduced integration (C3D8R)으로 구성하였다.

Liner의 상부 및 하부에는 알루미늄 Boss를 사용

하여 장착하였으며, 알루미늄 Boss는 aluminum 6061을 사용하였다. 알루미늄 Boss도 liner와 동일하게 element는 continuum shell 및 저감된 적분 요소인 C3D8R로 구성하였다.

2.2 복합재료부 설계

드론 장착용 Type 4 복합재료 압력용기의 복합재부는 Toray 사(Tokyo, Japan)의 T800 탄소섬유 복합소재의 물성을 적용하였으며 그 물성은 Table 2에 정리하였다. Table 2에서 E1, E2, E3는 각각 fiber direction, transverse direction, normal direction의 Young's modulus를 의미하고, G는 각각의 방향에 따른 shear modulus를 의미한다. 또한, Xt 및 Yt는 각각 fiber direction과 transverse direction의 인장강도를 의미하고 Xc 및 Yc는 fiber direction과 transverse direction의 압축강도이며, 마지막으로 S12는 전단강도를 의미한다. 복합소재부의 두께는 고정하는 조건하에서 내압

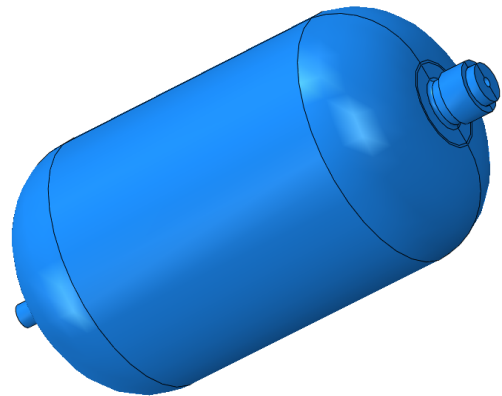


Fig. 1. Liner and Boss assembly shapes

Table 1. Material properties of PE

PE		
Property	Unit	Value
Density	kg/m ³	957
Young's modulus	MPa	1,000
Yield stress	MPa	30

성능을 향상시키기 위해, 최적화 프로그램인 ISIGHT (Dassault Systems SE)를 활용하여 helical winding angle을 300회의 최적화 과정을 수행하여 적용하였다.

복합재료 압력용기의 동적해석 소요시간 단축을 위하여 복합재 부는 shell 요소로 구성하였으며 element는 shell, 4-node, reduced integration (S4R) 저감된 적분 요소를 사용하였다. 각각의 part를 assembly한 형상과 명칭은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다^{2,3)}.

2.3 Helical winding angle 최적화

상용 구조해석 소프트웨어 Abaqus는 모델링 전 과정을 .rpy 파일에 python code를 사용하여 기록하며, .rpy 파일은 Abaqus가 실행되는 순간부터 자동적으로 기록된다. 본 논문에서는 .rpy에 기록된 python code를 추출 후 편집하여 최적화에 사용하며, 최적화 프로세스를 구축하고 복합재 부 helical 층 angle이 용기의 강도를 향상시킬 수 있도록 최적화 과정을 수행결과로 최적 적층 angle을 구성하였다. 최적화 과정 프로세스는 ISIGHT를 사용하여 편집한 python code를 input 시켜 최적화 알고리즘을 적용시키고 결

과를 도출하는 방법으로 구축하였으며, Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 구성하였다.

본 연구에서 최적화 프로세스를 수행하기 위해 일반적인 확률적 메타 알고리즘을 사용하고 해를 반복적으로 개선하여 현재의 해 근방에 있는 해를 찾는 방법인 ‘simulated annealing’ 최적 설계 이론을 이용하였으며 총 300회의 최적화 과정을 진행하여 결과를 도출하였다⁴⁾.

2.4 복합재료 압력용기 파손기준 선정

복합재료의 파손은 초기 손상이 발생한 이후 점진적으로 섬유 또는 수지의 파손이 진행되며 최종적으로 완전히 파단에 도달한다. 복합재의 손상 여부를 판단하기 위한 다양한 이론이 존재하며, 낙하 시험의 특성상 손상을 낙하의 진행정도와 같이 비교하여야 하기 때문에 Hashin 파손 이론을 적용하였다. Hashin 파손이론은 섬유 인장 파손 모드(fiber tensile failure

Table 2. Material properties of T800 (carbon fiber composite)

T800+epoxy		
Property	Unit	Value
Density	kg/m ³	1,810
E1	GPa	156.5
E2	GPa	8.25
E3	GPa	8.25
G12	GPa	4.37
G13	GPa	4.37
G23	GPa	2.81
Xt	MPa	2,986
Xc	MPa	1,508
Yt	MPa	50
Yc	MPa	220
S12	MPa	66

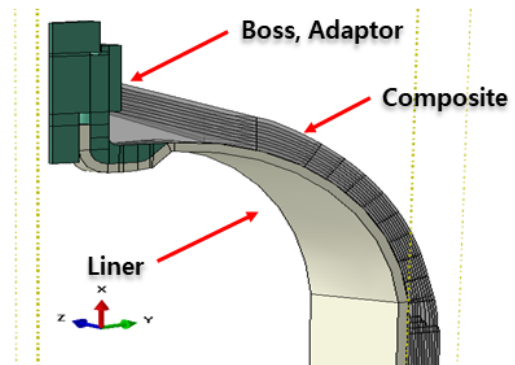


Fig. 2. Assembly of composite pressure vessel

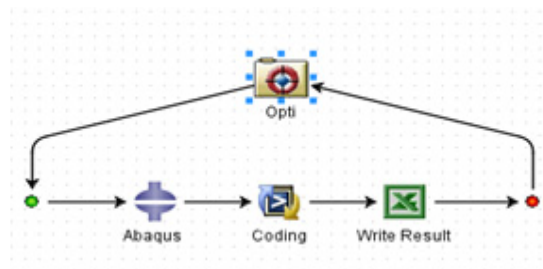


Fig. 3. Optimization process work flow

mode), 섬유 압축 파손 모드(fiber compressive failure mode), 기지재 인장 파손 모드(matrix tensile failure mode), 기지재 압축 파손 모드(matrix compressive failure mode)의 4가지 파손 모드를 가지며, 4가지 파손 모드의 관한 판정식은 식 (1)-(4)와 같이 나타낼 수 있다.

- 섬유 인장 파손 모드 ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (1)$$

- 섬유 압축 파손 모드 ($\sigma_{11} \leq 0$)

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c}\right)^2 \quad (2)$$

- 기지재 인장 파손 모드 ($\sigma_{22} \geq 0$)

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (3)$$

- 기지재 압축 파손 모드($\sigma_{22} \leq 0$)

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right) + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

여기서 σ_{ij} 는 3차원 응력성분, X^T 와 X^C 는 각각 섬유방향의 인장 및 압축강도, Y^T 와 Y^C 는 각각 섬유수직방향의 인장 및 압축강도, S^L 은 주응력방향에 대한 전단강도를 의미한다.

복합재료는 각 모드의 판정식 중 1보다 크거나 같은 값을 가지는 판정식의 결과가 발생하면 해당 모드에서 초기 손상이 시작된다. 상용 구조해석 프로그램인 Abaqus에서는 위 판정식을 바탕으로 Type 4 복합재료 압력용기의 파손 정도를 가시적 및 수치적으로 나타내며, 이를 기준으로 복합재료 압력용기의 파손정도 및 안정성을 예측 및 확인하였다⁵⁻⁷⁾.

2.5 시험조건

‘고압가스용 비금속라이너 복합재료용기 제조의 시설기술검사 기준’ 중 Type 4 복합재료 압력용기의 낙하검사 기준에 의해 내용적 80 L 이하 용기의 경우 용기 내용적의 50%까지 물을 채운 후 1.2 m 높

이에서 낙하 시험을 시행한다. 위 조건을 만족하기 위하여 액체를 모사할 수 있는 기법을 적용하여야 하며, 유체동역학 해석 기법 중 SPH 기법을 사용하여 낙하 검사를 모델링하였다. Moving particle simulation (MPS) 또는 SPH 기법 등 유체동역학과 관련한 해석 기법을 적용하지 않을 경우 element 및 mesh에 큰 왜곡이 발생하게 되며, 큰 왜곡은 해석의 정지를 유발한다. MPS와 SPH는 기계 시스템과 유체 간의 복합 문제들을 시뮬레이션 할 수 있도록 하는 입자법을 의미한다. 일반적인 해석인 mesh를 이용하는 경우 최적의 mesh를 생성하는 작업에 상당한 시간이 소요되며, 자유표면 문제나 이동경계 문제의 경우 계산 및 해석 진행이 어렵다. 반면, 본 논문에서 적용한 SPH 기법은 표면의 변화나 액체가 튀는 현상 등을 입자 형태로 해석하기 때문에 계산 및 해석의 효율성 측면에서 유리하며 해석의 정확성 및 신뢰성이 높은 결과를 도출한다. MPS 및 SPH 기법에 대한 개략도는 Fig. 4에 나타내었고, 본 연구에서 채택한 SPH 기법을 적용한 물(water) part의 초기 형상과 물

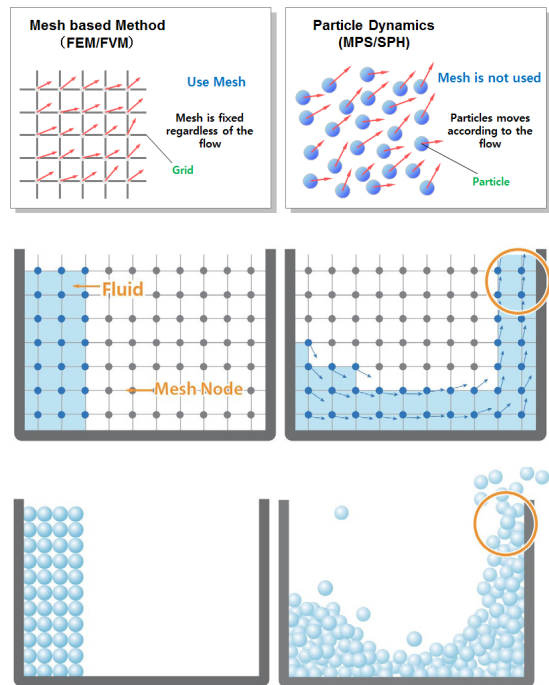


Fig. 4. Introduction to MPS/SPH

part의 입자화 된 형상은 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

2.6 낙하 시험 모델 설계

본 내용에서 적용한 이론 및 설정들을 적용 및 기반으로 낙하 시험 모델을 설정하였다. Explicit 해석의 시간적 효율성을 증대시키기 위하여 역학적 에너지를 고려하여 자유 낙하 운동 공식을 적용하였다. 충돌 면과 압력용기의 약간의 간극을 두고, 초기 위치에서 해당 위치까지의 거리를 기준으로 속도를 부여하는 방법으로 설계를 진행하였다. 자유 낙하 운동 공식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 식 (5)를 사용하여 초기 속력을 계산하였다.

땅에 떨어지는 순간의 속력계산 식

$$; 2gS = v^2 \rightarrow v = \sqrt{2gS} \quad (5)$$

본 연구에서 적용되는 낙하는 자유 낙하 운동이기 때문에 자유낙하 상황을 가정하여 낙하 속도 지정 외에 자중을 추가적으로 부여하였다. Type 4 복합재료 압력용기가 파괴가 이루어지지 않는 평판 위에 자유낙하 하는 상황을 가정하며 파열압 조건을 만족하는 압력용기가 낙하 충격 시험 조건에서도 파손이 이루어지지 않음을 확인하여 설계된 winding pattern의 적합성을 판단하는 데 초점을 두었다⁸⁻¹⁰.

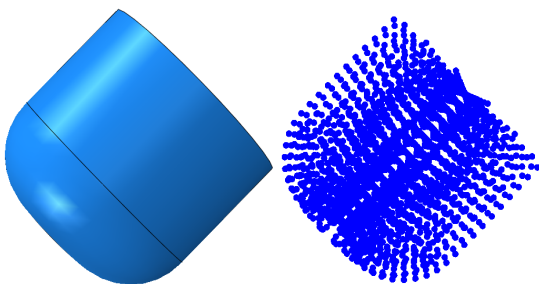


Fig. 5. Part and particle of water

3. Type 4 복합재료 압력용기 낙하 충격 해석

낙하 거리를 근접하게 하고 초기 속도를 부여하여 winding pattern 최적화를 통해 파열 압력 시험 조건을 만족하는 Type 4 복합재료 압력용기가 낙하 상황을 가정하여 안전성 및 파손 영향을 낙하 충격 해석하였다.

국내 시험 기준에 의해 1.2 m 높이로 낙하 위치를 설정해야 하지만 해석 시간 단축 및 해석 효율 증대를 위해서 초기 위치를 40 mm로 이동하고 이에 따라 동일한 조건을 설정하기 위하여 앞서 제시한 자유낙하 공식을 사용하여 초기속도를 부여하고 중력 가속도를 낙하하는 압력용기에 적용하였다. 따라서 1.2 m의 낙하 높이 조건을 40 mm로 설계하고 초기 속도 4.77 m/s의 속도를 부여하여 낙하 해석을 진행하면 liner는 Fig. 6과 같이 손상과 변형되게 된다. 이는 낙하에 의하여 Type 4 복합재료 압력용기에 손상이 발생한 것이라 판단되었고, 접촉 부위보다 용기의 자오선 방향으로 축에 가까운 부위에 손상이 되었음

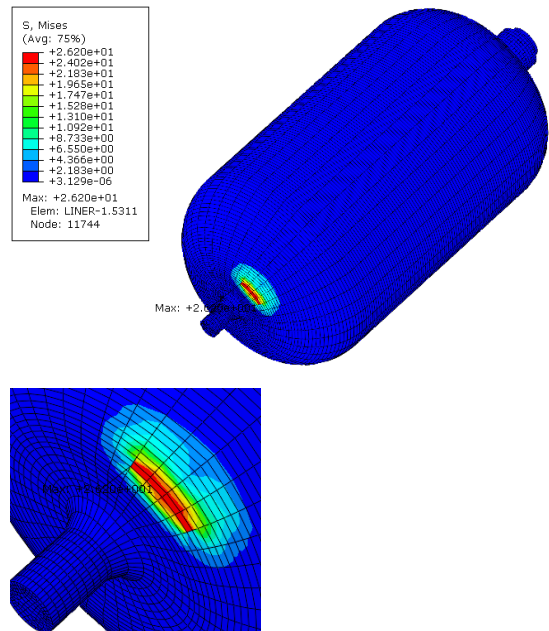


Fig. 6. PE Liner deformed shape

과 동시에 손상 부를 제외한 다른 부위의 손상은 상대적으로 미미한 수준으로 확인하였다. Type 4 복합재료 압력용기의 낙하에 의한 liner 최대 von mises stress는 26.2 MPa로 PE의 yield stress 30 MPa보다 작은 값으로 파손되지 않음을 확인하였으며 liner 외부에 위치한 복합재료가 충격에 의한 하중의 대부분을 감당하고 있음을 확인하였고 복합재의 변형에 의해 라이너의 인장 및 압축이 발생하여 국부적인 부위에 응력이 발생한 것으로 판단하였다¹¹⁾.

Figs. 7-10에 나타난 바와 같이 복합재료 압력용기의 낙하 충격 시험조건에서 복합재료는 평면과의 접촉부를 중심으로 변형과 손상이 발생함을 확인하였다. 복합재료 압력용기는 섬유가 모든 하중을 감당한다는 전제조건을 가지며 용기의 파손을 판단하는 기준은 섬유의 파손을 기준으로 한다. 앞서 기술한 바와 같이 본 연구의 복합재 파손 기준은 4가지 Hashin

파손 이론을 기준으로 하며 섬유가 압축 및 인장에 의한 파손 기준 도달 여부를 확인하여 Type 4 복합재료 압력용기의 파손 여부를 판단하였다. 2.4절에서 제시한 Hashin 파손 기준식을 기준으로 계산된 섬유와 수지의 인장 및 압축 파손 모드의 계산 결과값이 1이 넘지 않는다면 파손되지 않음으로 판단하였다.

앞선 가정과 같이 복합재료 압력용기는 섬유가 파손되지 않는다면 용기는 파손되지 않으며, 본 연구 결과에서 matrix (기지재)는 파손 기준 1을 초과하였지만 fiber (섬유)는 파손 기준 1을 초과하지 않음을 확인하여 용기가 파손되지 않음을 확인하였다.

최소 파열 압력 조건을 만족하는 복합재료 압력용기는 낙하 상황에 있어서도 안전함을 확인하였으며, 복합재료부 섬유와 라이너의 파손이 이루어지지 않았기 때문에 낙하에 의한 용기의 파손 및 누출은 이루어지지 않음을 확인하였다. Hashin 파손 기준에 의

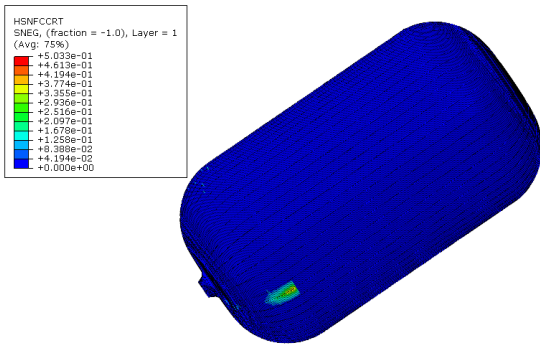


Fig. 7. Hashin's fiber compressive damage

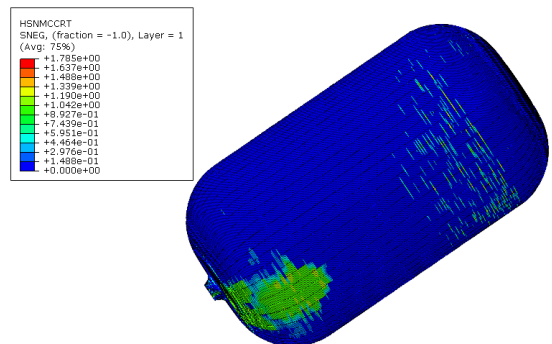


Fig. 9. Hashin's Matrix compressive damage

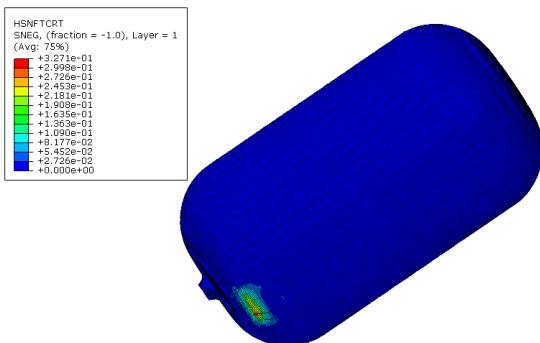


Fig. 8. Hashin's fiber tensile damage

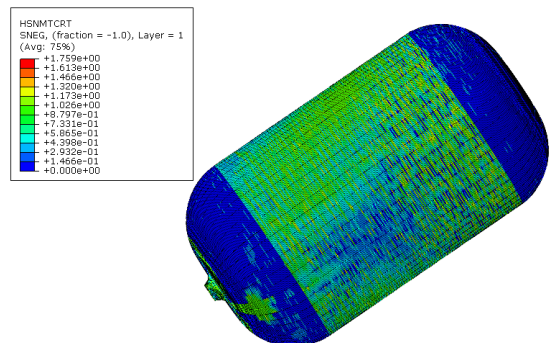


Fig. 10. Hashin's matrix tensile damage

한 파손 정도는 Figs. 11-14에서 확인할 수 있다¹²⁻¹³⁾.

4. 결론

최소 파열압력 기준을 만족하는 Type 4 복합재료 압력용기의 모델에 관한 낙하 충격 시험 상황을 모사하여 동적해석을 진행하였으며 다음과 같은 사실을 확인하였다.

- 1) Type 4 복합재료 압력용기의 파열압력 기준을 만족하는 복합재료 적층 pattern을 적용하여 국내 낙하시험 기준에 부합하는 낙하 해석을 진행하였다.
- 2) 복합재료 압력용기의 복합재료부와 라이너 부는 낙하 시 접촉부에서 가장 큰 변형, 파손 및 응력이 발생하였으며 접촉부를 제외한 다른 부위의 파손은 상대적으로 적음을 확인하였다.
- 3) Type 4 복합재료 압력용기의 낙하시험 시물레이션 결과 PE 라이너 및 알루미늄 보스 부는 모두 탄

성 및 소성 영역에 있어 파손되지 않음을 확인하였다.

4) 국내 내용적 80 L 이하 용기의 시험 조건인 용기 내용적의 절반을 물로 채우는 조건을 적용하기 위하여 SPH 기법을 도입하여 물 part를 입자화 하여 해석을 진행하였고 이를 통해 실제 시험 상황과 유사하게 모사 및 결과 도출이 가능함을 확인하였다.

5) 본 연구에서 도출한 복합재료 winding pattern은 낙하 조건에서 파손되지 않아 용용기의 파손과 파손에 의한 누출이 없음을 확인하여 적절한 winding pattern으로 설계되었음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업 통상 자원부(MOTIE)와 한국 에너지 기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 연구한 과제이다(NO. 20194030202440), (NO. 20203010040010).

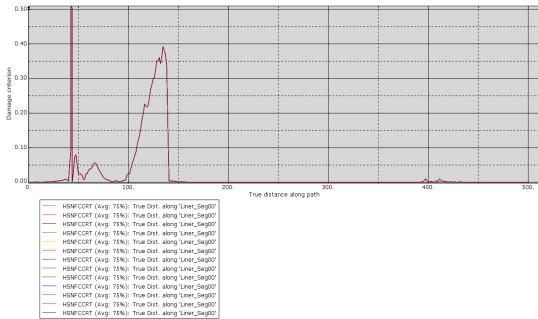


Fig. 11. Hashin's fiber compressive criterion

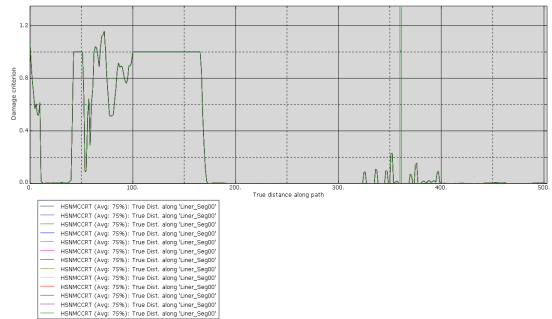


Fig. 13. Hashin's matrix compressive damage criterion

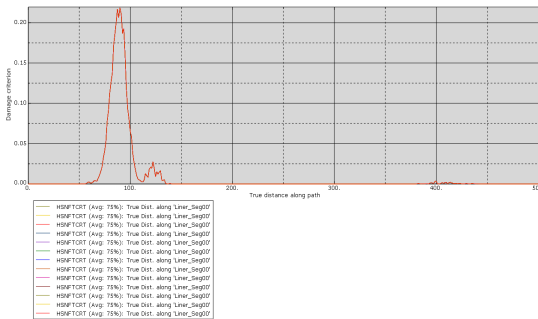


Fig. 12. Hashin's fiber tensile damage criterion

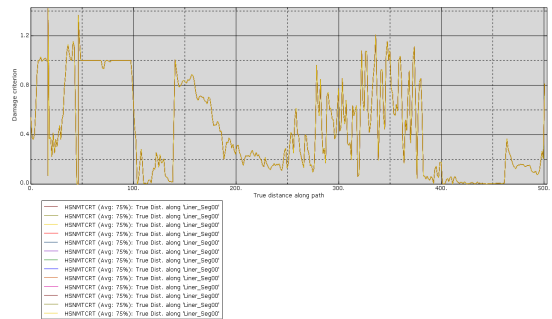


Fig. 14. Hashin's matrix tensile damage criterion

References

1. Composite Materials Handbook-17 (CMH-17), "Composite materials handbook volume 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis", SAE International on behalf of CMH-17, a Division of Wichita State University, USA, 2012.
2. S. Koussios, "Filament winding: a unified approach", DUP Science, Netherlands, 2004.
3. T. H. Lim, J. I. Byun, M. S. Cho, and H. S. KIM, "Design and structural analysis of Type 4 composite pressure vessel fitted in spare tire well", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 5, 2018, pp.570-577, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.570>.
4. V. Alcántar, S. M. Aceves, E. Ledesma, S. Ledesma, and E. Aguilera, "Optimization of Type 4 composite pressure vessels using genetic algorithms and simulated annealing", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 24, 2017, pp. 15770-15781, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.032>.
5. I. M. Daniel and O. Ishai, "Engineering mechanics of composite materials", Oxford University Press, United Kingdom, 1994.
6. A. Onder, O. Sayman, T. Dogan, and N. Tarakcioglu, "Burst failure load of composite pressure vessels", *Composite Structures*, Vol. 89, No. 1, 2009, pp. 159-166, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.06.021>.
7. C. S. Lee and J. M. Lee, "A study on the evaluation of fiber and matrix failures for laminated composites using hashin-puck failure criteria", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 52, No. 2, 2015, pp. 143-152, doi: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.2.143>.
8. J. Byun, J. Kim, S. Heo, and H. Kim, "Study on simulation characteristics of low velocity impact test of carbon/epoxy composite plates manufactured by filament winding method", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 2, 2018, pp. 190-196, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.190>.
9. Dassault System, "Abaqus WCM user manual", 2013. Retrieved from <https://dl-manual.com/doc/user-manual-2o29pxq51nv0>.
10. Dassault System, "Abaqus documentation 2016", 2016. Retrieved from <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html>.
11. Korea Gas Safety Corporation, "Facility/technical/inspection code for manufacture of nonmetal liner composite cylinders for high-pressure gases", Korea Gas Safety Corporation, AC418, 2017, pp. 1-37. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgsgcode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pubFldCd=&pubMid=&pubCd=AC418_170210&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2018&etDayM=06.
12. Z. Hashin, "Failure criteria for unidirectional fiber composites", *J. Appl. Mech.*, Vol. 47, No. 2, 1980, pp. 329-334, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3153664>.
13. J. S. Park, "Progressive failure analysis and design of filament wound pressure vessels", *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, Vol. 55, No. 1, 2011, pp. 63-71. Retrieved from <http://kdrm.kaist.ac.kr/ezpdfwebviewer/ezpdf/customLayout.jsp?encdata=8294B3E2AB70419565661182A5F4FE169917C3E772A0285E2FB786DC5D35D0EBC1C53DF5B42EB322E9BB9D4F29B39B9528E3EC8C378337ACA6BC9B9DE42EE43BBD3F095182F210DBBD3F095182F210DB5B00F5FD41B0997C&lang=ko>.