

'10 추계학술대회 우수 논문

Type3 복합재료 압력용기의 복합재층 손상에 따른 영향성 평가를 위한 해석기법에
관한 연구

이교민*, 박지상**, 이학구*, 김영섭**

A Study on Analysis Method to Evaluate Influence of Damage on Composite Layer
in Type3 Composite Cylinder

Kyo-Min Lee*, Ji-Sang Park**, Hak-gu Lee*, Yeong-Seop Kim**

ABSTRACT

Type3 cylinder is a composite pressure vessel fully over-wrapped with carbon/epoxy composite layers over an aluminum liner, which is the most ideal and safe high pressure gas container for CNG vehicles due to the lightweight and the leakage-before-burst characteristics. During service in CNG vehicle, if a fiber cut damage occurs in outer composite layers, it can degrade structural performance, reducing cycling life from the original design life. In this study, finite element modeling and analysis technique for the composite cylinder with fiber-cut crack damage is presented. Because FE analysis of type3 cylinder is path dependant due to plastic deformation of aluminum liner in autofrettage process, method to introduce a crack into FE model affect analysis result. A crack should be introduced after autofrettage in analysis step considering real circumstances where crack occurs during usage in service. For realistic simulation of this situation, FE modeling and analysis technique introducing a crack in the middle of analysis step is presented and the results are compared with usual FE analysis which has initial crack in the model from the beginning of analysis. Proposed analysis technique can be used effectively in the evaluation of influence of damage on composite layers of type3 cylinder and establish inspection criteria of composite cylinder in service.

초 록

CNG 차량에서 실사용 중 Type3 복합재료 압력용기의 외부 복합재 층에 결함이 발생된다면, 용기의 구조적 성능 즉, 원래의 설계수명보다 반복수명이 감소되는 현상을 초래할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 복합재 결함을 고려한 복합재료 압력용기의 유한요소 모델링과 해석 기법을 제시하였다. Type3 복합재료 압력용기의 유한요소해석은 자기치리 공정에서 알루미늄 라이너의 소성 변형으로 인해 경로 의존적 현상을 보이므로, 실사용 중 결함이 발생하는 실제 환경을 고려한 해석에서 결함은 자기압력 이후에 도입되어야한다. 이러한 상황의 사실적인 시뮬레이션을 위해, 해석의 중간단계에서 결함이 도입되는 유한요소 모델링과 해석 기법이 제시되었으며, 해석결과는 해석의 시작단계에서부터 모델에 초기결함을 내포하는 일반적 유한요소해석과 비교되었다. 제안된 해석 기법은 Type3 복합재료 압력용기의 복합재층 손상에 따른 영향성 평가 및 실사용 중에서의 검사 기준을 마련하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

Key Words : Type3 복합재료 압력용기(Type3 composite cylinder), 복합재 결함(Fiber cut damage), 경로 의존적 결함 모델(Path dependant crack model), 초기 결함 모델(Initial crack model)

* 한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료연구그룹

** 한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료연구그룹, 교신저자(E-mail: jspark@kims.re.kr)

** 한국가스안전공사 가스안전연구원 신뢰성연구부

1. 서론

현재 국내 CNG버스에 장착된 가스저장용기는 스틸 라이너에 실린더 부위만 유리섬유 복합재료로 보강한 Type2 용기로서, 파열시 非보강부위가 찢겨져 나갈 수 있는 취약한 구조적 문제점을 지니고 있다[1-3]. 이러한 문제점을 증명하듯 최근 몇 년 동안 국내·외적으로 Type2 용기를 장착한 차량에서 다수의 용기폭발사고가 발생되었다. 이에 따라, 현 상황에서는 보다 안전한 용기로의 교체가 요구되고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 알루미늄 라이너 전체에 강도 및 강성 등에서 유리섬유 보다 뛰어난 재료적 특성을 지닌 탄소섬유 복합재료가 보강되어 '파열 전 누출'이라는 우수한 안전성을 지니는 Type3 복합재료 압력용기로의 교체가 가장 현실적인 대안으로 제시되고 있다[4].

Type3 복합재료 압력용기는 가스 기밀유지 및 섬유 와인딩(winding) 형틀 제공 역할을 하는 내부의 라이너(liner)와 내압의 대부분을 지탱하는 외부의 복합재층으로 구성되어있다[5-7]. 이러한 Type3 복합재료 압력용기에서 외부의 복합재층에 결함이 발생된다면, 용기의 구조적 성능 즉, 원래의 설계수명보다 반복수명이 감소될 우려가 있다. 특히, 라이너는 복합재층 대비 반복환경에 취약한 특성을 지닌 부위로서, 결함에 따른 용기의 구조적 성능을 평가하는데 있어서 중점부위로 고려된다.

본 연구에서는 복합재층 외피에 복합재 결함(fiber cut damage)을 고려한 복합재료 압력용기의 유한요소 모델링과 해석 기법을 제시하고자한다.

Type3 복합재료 압력용기의 유한요소해석은 자기처리 공정에서 알루미늄 라이너의 소성 변형으로 인해 경로 의존적 현상을 보이므로, 유한요소모델에 도입되는 결함의 해석단계는 해석결과에 중대한 영향을 미치게 된다. 이에 따라 실사용 중 결함이 발생하는 실제 환경을 고려하는 해석에서 결함은 자기압력 이후에 도입되어야한다. 이러한 상황의 사실적인 시뮬레이션을 위해, 해석의 중간단계에서 결함이 도입되는 유한요소 모델링과 해석 기법이 제시되었으며, 해석결과는 해석의 시작단계에서부터 모델에 초기결함을 내포하는 일반적인 유한요소해석과 비교되었다.

2. Type3 복합재료 압력용기의 유한요소해석

2.1 Type3 복합재료 압력용기의 제원

본 연구에 사용된 용기는 사용압력 25.0 MPa, 내용적 130 리터(liter) 급의 천연가스차량용 복합재료 압력용기로서, Fig. 1에서 보는바와 같이 Al6061-T6 소재의 이음매 없는 알루미늄 라이너에 T700급 탄소섬유/에폭시를 헬리컬(helical) 및 홑(hoop) 와인딩으로 번갈아 감아 풀랩(full wrap)된 형식이다.

Fig. 2는 단면 형상과 치수를 나타낸 것으로, 실린더부에서 라이너의 두께는 8 mm, 복합재층의 두께는 9 mm 이며 용기 외경은 414.02 mm 이다.

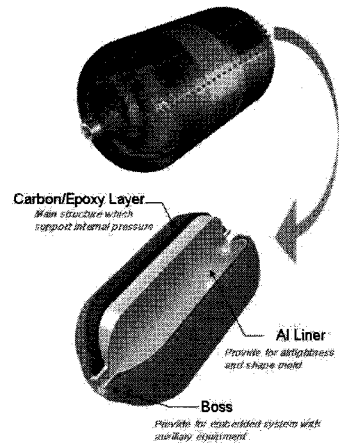


Fig. 1 Detailed structure of Type3 composite cylinder.

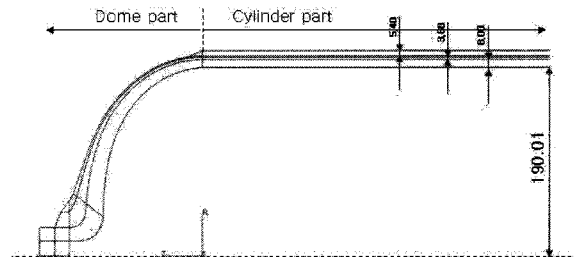


Fig. 2 Cross section and dimensions of Type3 composite cylinder.

2.2 응력 해석 기법

2.2.1 유한요소 모델링

본 압력용기의 구조 중 실린더 부위는 설계 시 최대응력 유도 부위로서 결함은 실린더 중앙부에 위치하게 된다. 이러한 실린더 부위의 중앙지점은 좌·우 대칭 및 주기적 대칭이라는 전제하에 실린더부의 일부분만 Fig. 3과 같이 3D 요소로 모델링하였다. 결함은 깊이가 다른 두 개의 크기가 적용되었다. 이는 본 기법을 적용했을 시 결함 규격 중 압력용기의 구조적 성능에 지배적인 영향을 미치는 인자인 깊이의 차이에 따라 발생하는 현상을 분석하기 위한 목적이다.

첫 번째 결함은 복합재층 총 두께의 14 %인 깊이 1.25 mm, 실린더부 총 길이의 5 %인 길이 25 mm의 크기가 적용되었으며, 두 번째 결함은 복합재층 총 두께의 44 %인 깊이 4 mm, 실린더부 총 길이의 5 %인 길이 25 mm의 크기가 적용되었다. 또한, 본 결함은 실린더부의 최외곽인 홑층에 위치하게 된다.

본 해석을 위해서 기본 8절점의 3차원 적층 고체요소를 사용하였다.

2.2.2 하중 및 경계조건

헬리컬층의 존재로 인해 원주방향으로 주기적 축대칭 조건을

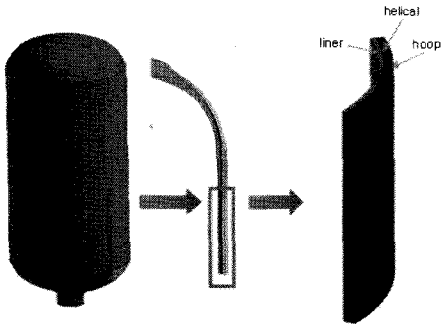


Fig. 3 Finite element modeling of crack model.

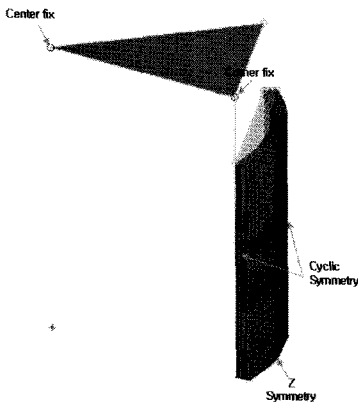


Fig. 4 Load and boundary condition of crack model.

부여하였으며, 라이너의 소성저동을 예측하기 위해 재료 비선형 해석기법을 도입하였다. 변위 경계 조건은 Fig. 4와 같다.

하중 조건은 라이너의 내면에 내압조건을 부여하였으며, 내압에 의한 축방향 하중 부가를 위해 재료 강성이 0에 가까운 삼각판(dummy plate)을 모델링하여 압력에 의한 축방향 하중과 등가의 분포 하중을 부여하였다.

2.3 결함 모델링 기법

2.3.1 경로의존적 결함모델

본 해석 기법은 자진처리 이후의 무결함 상태인 압력용기에 인공결함을 가공하여 반복시험압력(최고충진압력)을 가하는 실제 압력용기의 반복시험 환경과 동일한 경로를 따르는 해석 기법이다. 즉, Fig. 5에서 보는바와 같이 영압력 이전은 결함 부위의 등가(equivalence)되지 않은 절점(node)을 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS에서 지원되는 커넥터 요소(connector element)로 묶어 무결함 상태로 만들어 준 뒤, 영압력 이후에서는 커넥터 요소를 제거하여 결함을 발생시키게 된다.

커넥터 요소는 MPC(Multi-Point Constraint, 다점구속조건)와 달리 결함을 만들어주는 과정에서 커넥터 요소를 제거해도 본 요소와 연관된 절점의 자유도는 그대로 유지된다.

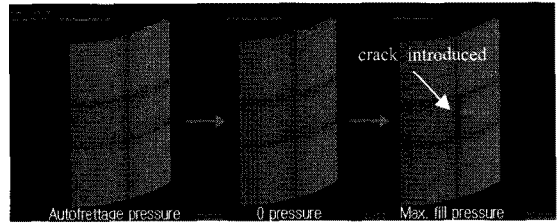


Fig. 5 Path dependant crack model: progress of crack occurrence.

2.3.2 초기 결함모델

Fig. 6에서 보는바와 같이 처음부터 압력용기 자체에 인공결함이 존재하는 상태에서 해석이 진행되는 개념으로, 결함이 위치하게 되는 부위의 절점들만 증가 시키지 않는 방법으로 결함을 구현하게 된다. 즉, 본 해석 기법은 결함을 처음부터 만들어놓은 상태에서 해석이 진행되는 개념이다.

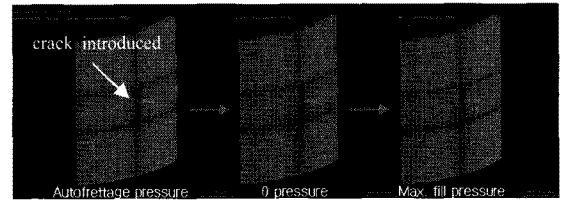


Fig. 6 Initial crack model: progress of crack occurrence.

2.4 해석 절차

Fig. 7에서와 같은 단계로 해석을 수행하여 자진처리에 의한 라이너의 압축잔류응력의 영향을 평가하고 해석에 반영한다. 이를 해석 구간별로 나누어 설명하면 다음과 같다.

- Step 1: Loading up to autofrettage pressure
- Step 2: Unloading to zero pressure
- Step 3: Loading up to cycling (test) pressure
- Step 4: Loading up to minimum burst pressure

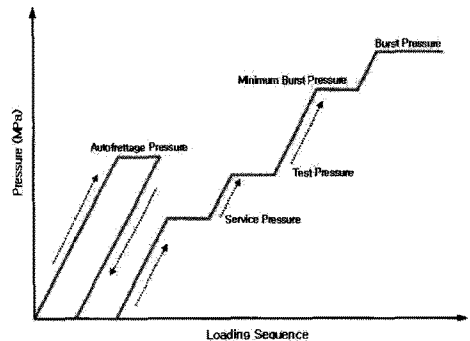


Fig. 7 Analysis sequence considering plastic deformation by autofrettage of liner material.

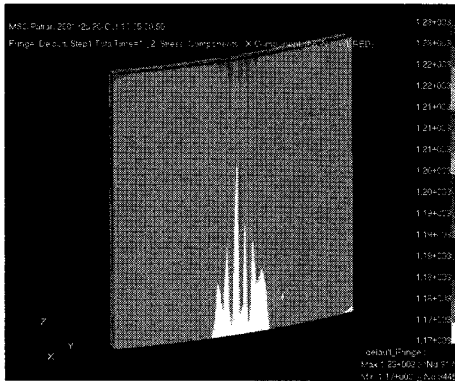


Fig. 8 Fiber directional stress distribution of hoop layer at autofrettage pressure for path dependant crack model.

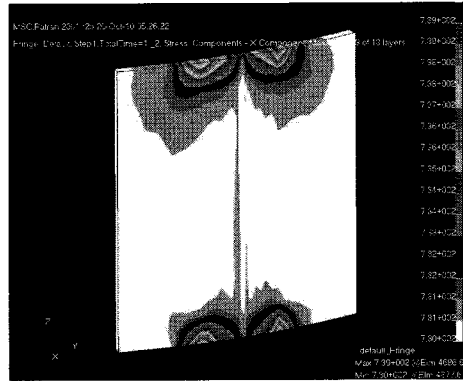


Fig. 10 Fiber directional stress distribution of helical layer at autofrettage pressure for path dependant crack model.

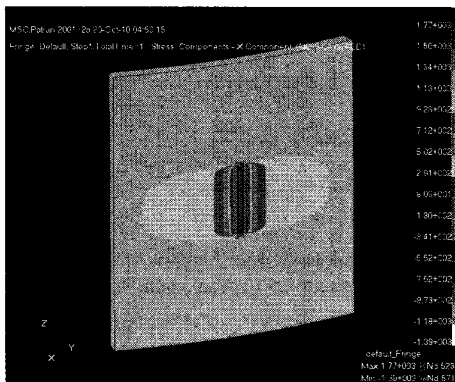


Fig. 9 Fiber directional stress distribution of hoop layer at autofrettage pressure for initial crack model.

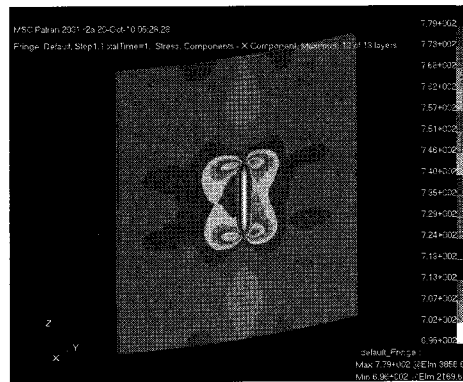


Fig. 11 Fiber directional stress distribution of helical layer at autofrettage pressure for initial crack model.

3. 유한요소해석 결과 및 분석

3.1 1.25X25 mm 결함 모델

3.1.1 자기압력

Fig. 8, 9는 복합재층 중 용기의 흡 방향 하중 대부분을 지탱하는 흡층에서의 응력결과로서, 두 기법 모두 섬유 방향의 설계인장 강도인 2548 MPa 이하의 수준이 발생되었다. 이는 내부의 알루미늄 라이너에 소성(plasticity)을 유발시키는 자기압력에서 복합재층은 아직 탄성구간 내에 머무르고 있다는 것을 나타내는 것으로, 자기압력을 제거하는 영압력에서 발생하는 복합재층의 탄성복원력에 의해 이후의 해석결과에서 자기압력의 영향이 반영된 해석결과가 도출됨을 의미한다.

Fig. 10, 11은 복합재층 중 용기의 길이방향 하중 대부분을 지탱하는 헬리컬층에서의 응력 결과로서, 두 기법 모두 섬유 방향의 설계인장강도 이하의 수준에서 응력이 발생하였다.

Fig. 12, 13은 복합재료 압력용기의 피로수명을 결정하는 부위인 알루미늄 라이너에서의 응력결과로서, 두 기법 모두 항복응력 290 MPa를 넘어 완전히 항복되었음을 알 수 있다.



Fig. 12 von Mises stress distribution of aluminum liner at autofrettage pressure for path dependant crack model.

3.1.2 영압력

Fig. 14, 15는 복합재층의 탄성복원력이 라이너를 누름에 따라 라이너에 압축잔류응력이 유발되는 영압력에서의 응력 결과이다.

먼저 경로의존적 결함모델인 Fig. 14는 라이너 전체에 걸쳐

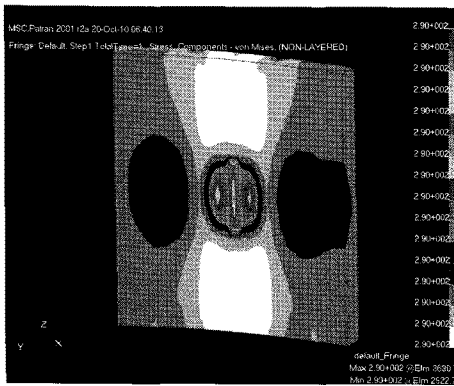


Fig. 13 von Mises stress distribution of aluminum liner at autofrettage pressure for initial crack model.

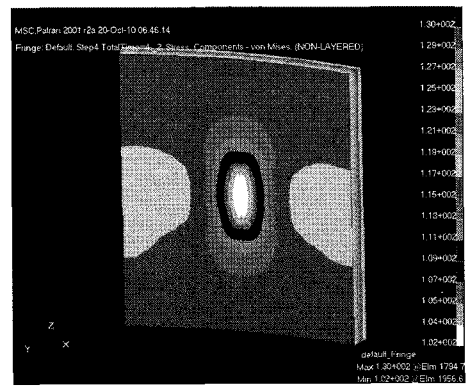


Fig. 16 von Mises stress distribution of aluminum liner at maximum fill pressure for path dependant crack model.

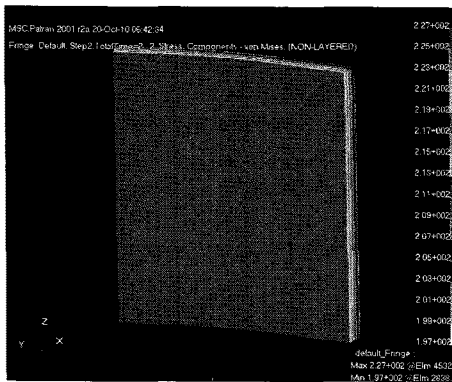


Fig. 14 von Mises stress distribution of aluminum liner at zero pressure for path dependant crack model.

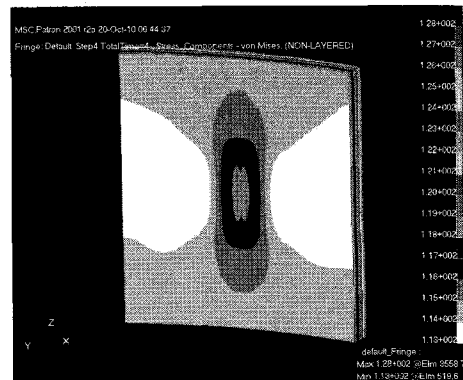


Fig. 17 von Mises stress distribution of aluminum liner at maximum fill pressure for initial crack model.

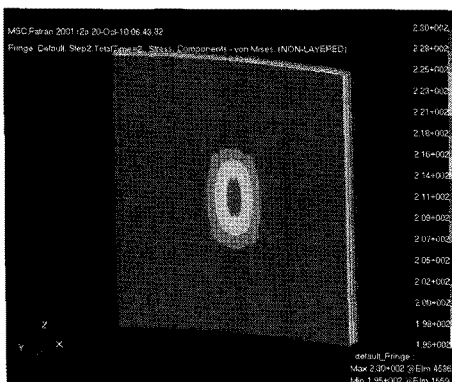


Fig. 15 von Mises stress distribution of aluminum liner at zero pressure for initial crack model.

동일한 압축응력이 발생된 반면, 초기 결함모델인 Fig. 15는 라이너 결함부위의 압축응력이 타부위보다 낮게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 결함부위의 복합재 손실로 인해, 상대적으로 복합재층이 라이너를 적게 누름에 따라 발생한 결과이다.

3.1.3 최고충전압력

Fig. 16, 17은 사용압력의 1.25배 압력을 가했을 때 압력용기의 내피로 특성을 검증하는 인증시험압력인 최고충전압력에서의 응력결과이다.

먼저 경로의존적 결함모델인 Fig. 16은 라이너 결함부위에서 최저응력이 발생하였음을 볼 수 있다. 이는 결함부위의 복합재 손실로 인해 라이너가 하중을 더 많이 지탱하게 되면서 발생된 휨 효과(bending effect)에 따른 결과로, 실제 역학적 현상을 제대로 구현하고 있음을 알 수 있다.

반면, 초기 결함모델인 Fig. 17은 라이너 결함부위에서 높은 응력이 발생하였음을 볼 수 있다. 이는 영압력에서 결함부위의 낮은 압축응력에 따라 타부위 대비 빠르게 응력이 상승하여 발생한 결과로, 실제 역학적 현상을 반영하지 못한 결과가 산출된 것이다.

3.2 4X25 mm 결함 모델

먼저 경로의존적 결함모델인 Fig. 18은 홑층에서의 최대응력이 섬유유리 설계인장강도인 2548 MPa 이하 값이 발생되어,

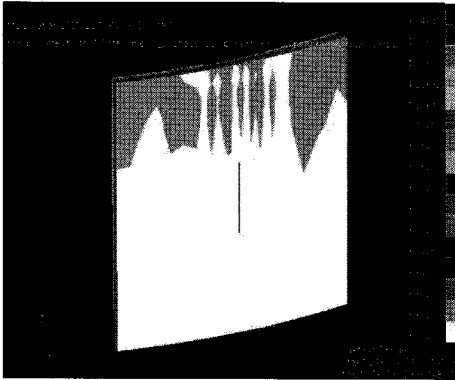


Fig. 18 Fiber directional stress distribution of hoop layer at autofrettage pressure for path dependant crack model.

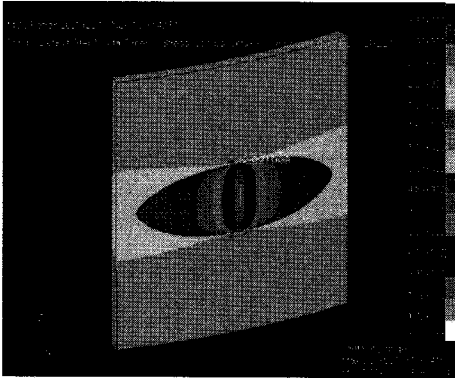


Fig. 19 Fiber directional stress distribution of hoop layer at autofrettage pressure for initial crack model.

이후의 해석에서 자기압력의 영향이 반영된 해석 결과가 도출됨을 알 수 있다.

그러나 초기 결함모델인 Fig. 19는 홀층에 위치한 결함 선단부에서의 최대응력이 섬유에 설계인장강도 이상의 값으로 발생하였다. 이는 선단부에 위치한 섬유의 파단을 의미하는 것으로, 초기 부여한 크기 이상으로 결함이 진전하게 됨을 의미하는 것이다. 따라서 자기압력 이후의 해석에서는 자기압력의 영향이 반영되지 못한 결과가 도출된다.

4. 결론

본 연구에서는 Type3 복합재료 압력용기의 복합재층 손상에 따른 영향성을 평가하기 위해 영압력 이후에 인공결함을 가공하여 반복시험압력(최고충전압력)을 가하는 경로의존적 결함 모델을 제시하였으며, 처음부터 압력용기 자체에 인공결함이 존재하는 상태에서 해석이 진행되는 초기 결함 모델과의 비교를 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 결함 크기 1.25, 길이 25 mm: 경로의존적 결함모델은

최고충전압력에서 결함부위의 복합재 손실로 인해 라이너가 하중을 더 많이 지탱하게 되면서 발생한 휨 효과로 상대적으로 응력이 낮게 발생하여 실제 역학적인 현상이 구현되는 반면, 초기 결함모델은 영압력에서 결함부위의 복합재 손실로 인해 상대적으로 복합재층이 라이너를 적게 누름에 따라 결함부위의 압축응력이 타 부위 대비 낮게 발생하게 되며, 최고충전압력을 가했을 시 결함부위의 응력이 타부위보다 높게 발생하여 실제역학적인 현상이 구현되지 못하게 된다.

2) 결함 크기 길이 4, 길이 25 mm: 경로의존적 결함모델은 자기압력에서 홀층의 응력이 적용된 섬유의 설계인장강도 이하로 발생하여, 자기처리 이후의 해석은 자기압력의 영향을 반영한 해석 결과가 도출되지만, 초기 결함모델은 자기압력에서 홀층의 응력이 적용된 섬유의 설계인장강도 이상으로 발생하여, 자기처리 이후의 해석은 자기압력의 영향이 반영되지 못한 결과가 도출된다.

결론적으로, Type3 복합재료 압력용기는 자기처리 공정 중 발생하는 내부 라이너의 소성변형에 의해 경로 의존적 해석 절차를 따르므로, 실사용 중 발생하는 결함에 따른 영향이 제대로 반영되기 위해서는 자기처리 공정 이후에 결함이 도입되는 경로의존적 결함모델의 적용이 타당하다는 것을 알 수 있다. 그리고 제안된 해석 기법은 Type3 복합재료 압력용기의 복합재층 손상에 따른 영향성 평가 및 실사용 중에서 검사기준을 마련하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. A-09-024)

참고문헌

- 1) X. K. Sun, S. Y. Du and G. D. Wang, "Bursting Problem of Filament Wound Composite Pressure Vessels," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, 1999, pp. 55-59.
- 2) Mohammad Z. Kabir, "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner," Composite Structure, Vol. 49, 2000, pp. 247-255.
- 3) Y. D. Doh, C. S. Hong, "Progressive Failure Analysis for Filament Wound Pressure Vessel," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 14, 1995, pp. 1278-1306.
- 4) T. K. Kwang, S. K. Jung, Y. D. Doh, W. M. Cho and

- B. Jung, "The Performance Improvement of Filament Wound Composite Pressure Vessels," SAMPE 2000, May 21-25, 2000, pp. 1427-1438.
- 5) 박지상, 김태욱, 정재한, "대체연료 차량용 Type3 복합재 압력용기 개발 및 인증," 한국수소 및 신에너지 학회, 2004, 추계학술대회, 2004. 10.
- 6) 박지상, 정상수, 정재한, "금속재 라이너를 갖는 복합재료 압력용기의 라이너 압축잔류응력을 고려한 반복수명 예측 방법에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 2006. Vol. 22, pp. 22-28.
- 7) J. P. Jeusette, G. Laschet. P. Chapentier and Ph. Delco, "Finite Element Analysis of Composite Revolution Structure Wound by Wide plies," Composite structure, Vol. 8, 1987, pp. 221-237.