

압축천연가스자동차용 Type III 용기의 복합재 결함 평가

김영섭 · 김래현 · 양동주[†]

서울과학기술대학교에너지환경대학원, [†]한국가스안전공사가스안전연구원
(2011년 5월 11일 접수, 2011년 5월 31일 수정, 2011년 6월 3일 채택)

Assessment of Composite Material Flaws on the Type III Cylinders for Compressed Natural Gas Vehicles

Young-Seob Kim, Lae-Hyun Kim and Dong-Ju Yang[†]

Seoul National University of Science and Technology, [†]Korea Gas Safety Corporation

(Received 11 May 2011, Revised 31 May 2011, Accepted 3 June 2011)

요 약

이 연구는 압축천연가스자동차용 Type III 용기 복합재에 발생한 스크래치, 컷, 가우지 등의 손상을 평가하여 계속 사용여부를 판정하기 위해 수행하였다. 결함내구성 시험결과, 복합재의 손상등급에 따라 ISO 19078에서 정한 최소요구 반복회수(11,250회)는 모두 만족하였고 용기의 반복성능은 손상등급 1, 2에서는 20,000회를 상회하다가 손상등급 3에서는 18,000~21,000회의 범위를 나타내었다. 실험용기 12개 중 8개가 Type III 용기 복합재 결함의 영향을 받아 파괴되었고 나머지는 결함과 관계없이 파괴된 것으로 판단된다. 전산모사에 의한 구조해석결과는 1.25 mm × 200 mm의 결함모델에 사용압이 가해졌을 때 발생한 응력은 79.5 MPa이고 무결함 용기의 라이너 평탄부에 발생한 응력은 66.6 MPa로서 약 19.37%의 차이가 발생하였다. 이것은 라이너의 피로 수명에 영향을 미칠 수 있는 차이로 볼 수 있고 이 결함은 용기의 반복성능에 영향을 미치는 임계값으로 판단할 수 있었다.

주요어 : 압축천연가스자동차, Type III 용기, 결함내구성시험, 손상등급, 기준

Abstract— This study was conducted to judge requalification of cylinders by assessing composite flaws such as scratches, cuts, and gouges damaging on the composite of Type III cylinders for compressed natural gas vehicles. As a result of the flaw tolerance test, all specimens have satisfied with minimum requirement cycles according to damage levels based on ISO 19078 and cyclic performance for pressure showed beyond twenty thousands in damage level 1 and 2, and did eighteen thousands to twenty-one thousands in damage level 3. Eight of twelve specimens failed the test due to composite flaws and the rest of the cylinders failed regardless of flaws. The results of Finite Element Method followed by the computer simulation indicated that the stress of 79.5 MPa calculated on the flaw model of 1.25 mm × 200 mm and the stress of 66.6 MPa on the non-flaw model when the service pressure applied to inside of cylinder. The difference between the models is about 19.37%. We concluded that this difference influences fatigue life and this flaw model is a critical value affecting cyclic performance of cylinders.

Key words : compressed natural gas vehicles, Type III cylinder, flaw tolerance test, damage level, standard

1. 서 론

[†]To whom corresponding should be addressed.

Korea Gas Safety Corporation, Daeya-dong,
Siheung-si, 429-712, Gyeonggi-do
E-mail : yskim@kgs.or.kr

'02년 한·일 월드컵을 계기로 정부가 대도시 대기
환경을 개선할 목적으로 도입된 천연가스버스가 '09

년 12월 기준으로 약 23,000대에 이르고 있다 [1]. 지금까지 운행 중에 5건의 용기파열사고가 발생하였는데 이중 '05.8월 전주 덕진충전소 용기파열사고는 용기의 복합재 손상이 원인으로 확인되었다 [2]. 국외에서는 '93년 미국 미시간에서 발생한 용기파열을 비롯해 13건의 사고가 복합재 손상이 원인이 되어 발생했다고 보고하고 있다 [3].

본 연구는 압축천연가스자동차용 Type III 용기의 복합재료 결함에 따른 용기의 안전성을 평가할 목적으로 수행하였다. 안전성평가는 ISO 19078 [4] 및 CGA C6.4 [5] 등의 국제규격에서 정하고 있는 스크래치, 컷, 굽힘, 흠 등의 복합재료 결함을 손상등급에 따라 인위적으로 Type III 용기 표면에 부기한 후 KGS AC412 [6]의 복합재료 결함 내구성시험 조건에 의거 용기가 누출 또는 파열될 때까지 반복가압을 실시하였다. 또한 복합재 용기의 구조해석을 위하여 MCS/PATRAN을 이용하여 라이너, 후프 층, 헬리컬 층을 각각 3D 모델링하고 각 압력 단계별로 내압조건을 부여하였으며 원통좌표 상에서 동일(r,z)좌표의 절점끼리 변위가 같도록 하는 다점구속조건과 소성거동과 비선형거동의 예측을 위해 기하학적 비선형 해석기법을 경계조건으로 한 후 유한요소 상용프로그램인 ABAQUS로 응력 해석을 실시하였다. 이상의 실험과 전산모사결과를 토대로 Type III 용기의 복합재료 결함 크기에 따른 용기의 안전성을 평가하였다.

2. 복합재료용기 설계

복합재 압력용기의 설계는 금속라이너 설계와 복합재 설계로 구분할 수 있다. 금속라이너는 알루미늄 합금으로 납과 비소의 최대함량이 30 ppm(0.003%)를 초과하지 않도록 규정하고 있다 [7]. 용기의 파열은 몸통 부분에서 길이방향으로 파열되도록 후프 층과 헬리컬 층의 응력비를 조절하여 파열을 유도해야 하며 자간처리 시 복합재의 강성과 두께, 그리고 항복강도의 조합으로 적절한 라이너 압축잔류응력이 발생하게 유도할 필요가 있다. 금속라이너의 압축잔류응력은 통상 금속라이너 항복강도의 95% 이하가 적당하다. 금속라이너 응력이 결정되면 용기의 반복수명 또한 결정되고 섬유체적비 및 강도에 대한 감소계수를 고려하여 섬유파열강도를 구하면 망이론을 이용하여 복합재 두께를 구할 수 있다.

길이방향 및 원주방향에 걸리는 용기내압과 섬유 의 힘(Resultant Force)은 서로 평행하다고 했을 때 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{PR}{2} = \sigma_{\alpha} \cdot \cos^2 \alpha \cdot t_{\alpha}, \sum N_L = 0 \tag{1}$$

$$PR = \sigma_{\alpha} \cdot \sin^2 \alpha + \sigma_{\theta} t_{\theta}, \sum N_H = 0$$

- 여기서, P = 내압
- R = 실린더 반지름
- α = 와인딩 각도
- t_{α} = 헬리컬 층 두께
- t_{θ} = 후프 층 두께

식 (1)에서 헬리컬 및 후프 층의 두께를 계산할 수 있고 이 두 층을 더하면 복합재 층의 두께를 구할 수 있다. 또한 여기서 섬유방향 인장강도는 같으므로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\theta} = X \tag{2}$$

이상과 같은 망이론에서 산출된 복합재 두께를 고전적층판 이론에 적용하여 발생응력을 계산하였다. 다음 식 (3)에서 각 레이어에 걸리는 힘, 즉 요구되는 최소파열압 적용 시 섬유 레이어에 걸리는 힘과 두께, 그리고 와인딩 각도를 알면 각 레이어에서 발생하는 응력을 산출할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \int_{z_{k-1}}^{z_k} dz + \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \int_{z_{k-1}}^{z_k} z dz \tag{3}$$

- 여기서, N = 각 레이어에 걸리는 힘
- \bar{Q} = 변환된 축약 강성도
- k = k번째 층
- ε = 변형율
- K = 곡률
- z = 중립면에서의 거리

이렇게 산출된 응력을 바탕으로 실린더 부위의 주요치수와 중량, 내용적 등 기본적인 제원을 결정할 수 있다.

3. 실험 및 수치해석

3-1. 복합재료 결함 내구성실험

복합재료 결함 내구성실험에 앞서 시험편 가공은 ISO 19078과 ISO 11439에서 규정한 컷, 굽힘, 가우지에 해당하는 결함 중에서 1~3등급 손상을 용기몸통부에 길이방향(원주방향의 직각방향)으로 가공하였다. 결함길이는 NGV2에서 제시한 25 mm와 200 mm를 따랐고 결함의 위치는 ISO 11119 [8] 및 EN12245 [9]에서 제시한 2개의 결함을 하나는 용기길이방향에 대하여, 다른 하나는 처음 결함에 대해 원주방향으로 120° 회전한 후 처음 결함과 평행하게 결함을 가공하였다. 다음 Table 1은 인공결함크기 및 관련기준을 나타낸 것이고 Fig. 1은 인위적으로 결함을 준 시험편을 나타낸 것이다. 복합재료 결함 내구성실험은 KGS AC412의 복합재료 결함 내구성시험 방법에 따라 시험용기 사용압력(20.7 MPa)의 1.25배의 10% 이하에서 사용압력의 1.25배 이하까지 설계수명(단위: 년)의

Table 1. 인공 결함크기 및 관련기준

손상 등급	결함길이 (mm)	결함길이 (mm)	결함수 (개)	결함위치
1	0.25 [ISO 19078/ CGA C6.4]	25/200 [ISO 11439/ NGV2]	2 [ISO11439 /NGV2]	첫 번째 결함을 기준 원주방향으로 120° 회전 후 평행하게 가공 [ISO11119/ EN12245]
2	0.75 [ISO 11439/ NGV2]	25/200 [ISO 11439/ NGV2]	2 [ISO11439 /NGV2]	
3	1.25 [ISO 19078/ CGA C6.4]	25/200 [ISO 11439/ NGV2]	2 [ISO11439 /NGV2]	



Fig. 1. 인공결함 시험편(Type III)

750배(최소 사이클 수 : 11,250)로 반복 가압하여 누출 또는 파열될 때까지 상온에서 반복가압실험을 실시하였다. 실험대상 용기는 물이나 기름을 사용하여 사용압력의 최소 1.25배인 25.9 MPa 또는 31.1 MPa의 압력으로 상온에서 파괴가 이루어질 때까지 정해진 압력을 주기적으로 반복하였다. 압력반복주기는 분당 4사이클을 부과하였고 용기는 압력장치와 압력 트랜스듀서(transducer) 사이에 위치시켰다. 아래 Table 2는 실험에 사용한 용기의 사양을 나타낸 것이고 다음 Fig. 1은 결함 내구성실험을 실시하는 모습을 나타낸 것이다.

3-2. 수치해석

3-2-1. 유한요소 모델링

복합재 무결함 용기의 구조해석을 위하여 상용유한요소 프로그램인 MSC/PATRAN을 이용하여 Fig. 3과 같이 라이너, 후프 층 및 헬리컬 층을 각각 3D 모델링 한 후, FEM 상용 소프트웨어인 ABAQUS로 응력해석을 실시하였다. 필라멘트 와인딩 구조의 이방성과 원통형 돔 부의 국부응력 분포를 정확히 예측하기 위하여 PATRAN에서 지원되는 solid 요소 중의 하나인 20절점의 3차원 적층 고체 요소를 사용하였다.

Table 2. 실험조건 및 용기사양

용기 제조사	사용 압력 (MPa)	실험 압력 (MPa)	외경 (mm)	길이 (mm)	내용적 (L)	수량 (개)
D사	207	259	358	1,579	120	6
S사	249	311	414	1,397	130	6



Fig. 2. 결함내구성 실험 설비

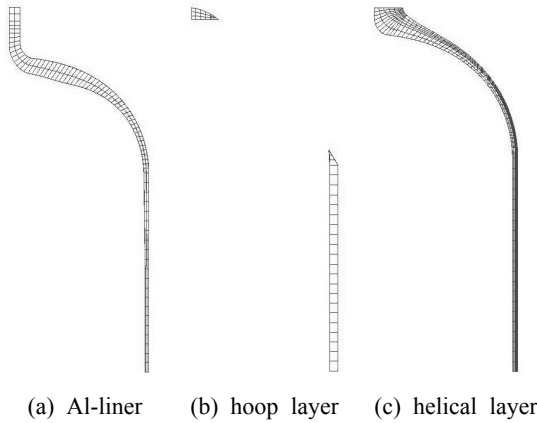


Fig. 3. 세부 유한요소(FEM) 모델

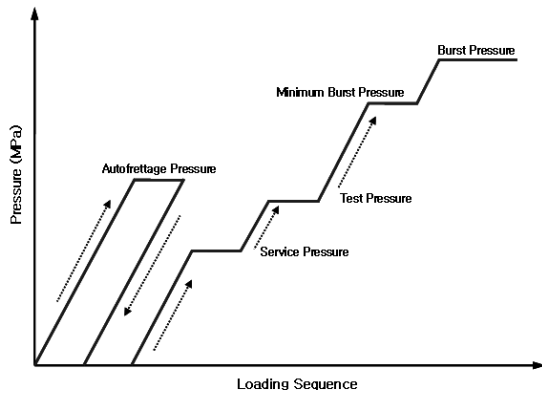


Fig. 5. 해석절차(각 압력 단계별 하중부여 순서)

3-2-2. 하중조건

Fig. 4와 같이 라이너의 내면에 균일 압력을 가하여 내압조건을 부여하였고, 자진압력의 영향을 반영하기 위하여 Fig. 5와 같이 각 압력 단계별로 하중을 부여하여 해석을 실시하였다.

3-2-3. 경계조건

헬리컬 층의 존재로 인해 엄밀하게는 주기적 축대칭 구조를 갖는 복합재 압력용기의 특성을 고려하여 Fig. 6과 같이 전체 모델의 일부 중심각만을 모델링하고 원주방향으로 주기적 축대칭 조건을 부여하였다. 이는 원통 좌표 상에서 동일(r,z) 좌표의 절점끼리 변위가 같도록 하는 다점구속조건(multi point constraint)을 부여함으로써 구현할 수 있다. 그리고 라이너의 소성거동 및 원통형 돔부(cylindrical-dome part)의 비선형 거동을 예측하기 위하여 기하학적 비선형 및 재료 비선형 해석기법을 도입하였다. 그 밖의 변위 경계 조건은 Fig. 6과 같이 중심, z-좌표, 회전축 고정을 실시

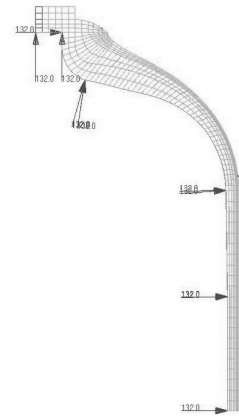


Fig. 4. 내압조건 부여: 라이너의 내면에 균일압력 가함

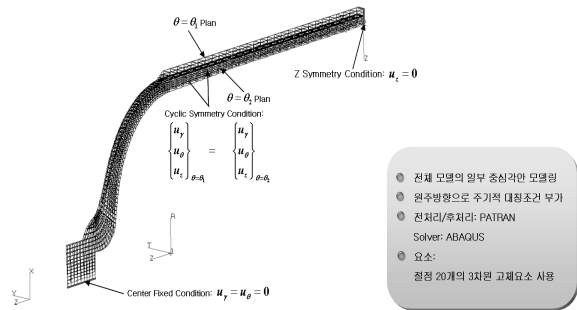


Fig. 6. 복합재 압력용기의 유한요소모델을 위한 경계조건

하였다.

복합재료 결합용기의 구조해석도 용기 평탄부위의 일부분에 대하여만 위와 같이 유한요소 모델링, 하중 조건, 경계조건을 부여하여 해석을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 실험결과

ISO 19078 및 CGA C6.4에 따라 인공결함을 부여한 12개의 용기에 대해 압력반복실험을 실시한 결과, 누출부위는 결합부(2개), 몸통부(6개), 돔부(4개)에서 발생하였고, 복합재료 결합위치와 라이너 누수부위가 정확히 일치한 용기는 2개였다. 위와 같은 결과는 Type III 용기 결합부위에 반복압력이 가해져서 이 부위에 응력집중 또는 피로파괴가 나타나 누수가 발생했다고 판단되기 보다는 라이너 또는 복합재료용기가 결합의 영향을 받아 압력반복에 의해 피로파괴가 발생했다고 보는 편이 타당하겠다. 따라서 본 결과만을 놓고 볼 때 손상등급 1과 2에 해당하는 결함은 용기의 성능에 영향을 거의 주지 않으며, 결함이 검출되더라도 용기

사용에는 크게 문제가 없을 것으로 판단된다. 하지만 3등급 손상은 1등급과 2등급 손상과 비교하여 확연히 반복성능이 떨어짐을 확인할 수 있었고, 따라서 3등급 손상의 결함은 복합재료 용기의 건전성에 직접 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 실험이 끝난 후 누수가 발생한 12개의 용기에 대해서 정확한 누수위치를 확인하기 위하여 용기의 복합재료를 벗겨내고 라이너에 대한 액체침투탐상시험(PT)을 실시하였다. Fig. 7은 복합재료의 결함부위와 라이너의 누수위치를 정확히 일치하고 있는 사진을 나타낸 것이고 Fig. 8은 Type III 용기의 손상등급에 따른 반복수명을 한 도표에 도시한 것이다.

Fig. 8에서 검은색 원형기호는 외산 S사, 빨강색 삼각형 기호는 국산 D사 용기의 시험결과이다. D사

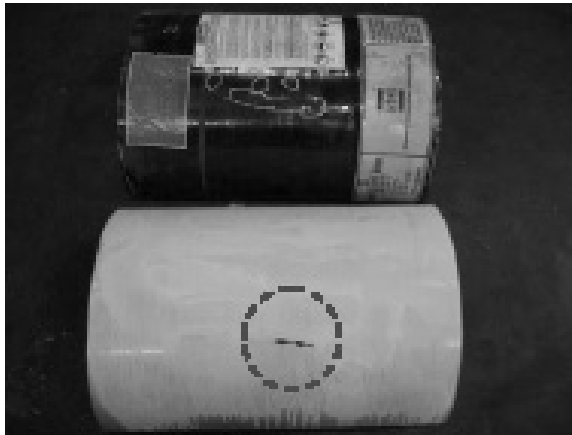


Fig. 7. 복합재료 결함위치와 라이너의 누수부위

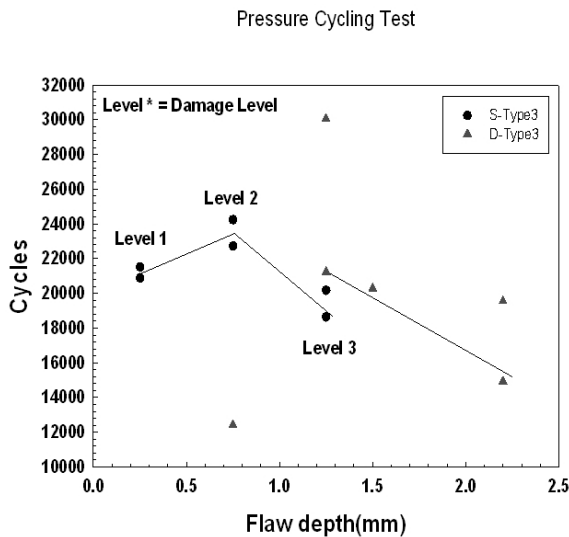


Fig. 8. Type III 용기의 손상등급에 따른 반복수명

용기의 손상등급 2, 3에서 2개의 시험결과를 제외하면 두 제조사의 설계 및 제조 방법이 상이함에도 3등급 손상부터는 반복횟수가 저하됨을 알 수 있다. 또한 당초 의도와 달리 결함을 내는 과정에서 손상등급 3을 초과(1.5 mm, 2.2 mm)하여 가공된 용기의 경우에도 결함깊이가 클수록 반복횟수가 줄고 있어서 용기 제조사마다 복합재료 두께가 각각 상이함에도 불구하고 손상등급 3부터는 복합재료용기의 건전성에 영향을 주는 시점이 되고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 용기제조사가 각각의 설계 및 제조방법에 의해 다르게 용기를 제조하더라도 용기의 건전성을 판단하는 기준은 결함내구성 시험이고 고압용기의 수명은 결함깊이와 밀접하게 관련되며 임계점은 ISO 19078 손상등급 3이 됨을 의미한다.

4.2. 수치해석 결과

유한요소해석은 무결함용기를 풀 모델링과 부분 모델링하여 변형/변위와 응력해석을 하고 결함용기도 결함크기(깊이 × 길이) 6가지(0.25 mm × 25, 0.25 mm × 200 mm, 0.75 mm × 25, 0.75 mm × 200 mm, 1.25 mm × 25, 1.25 mm × 200 mm)에 대해 부분 모델링을 실시한 후 그 값을 각각 비교하였다. Table 3은 1.25 × 200 mm 결함해석모델의 각 압력별 변위결과를 나타내었고 Fig. 9는 동일모델의 사용압 적용 시 변형형상을 도시한 것이다. 각 압력별 무결함/결함 용

Table 3. 1.25 mm × 200 mm 결함해석모델의 각 압력별 변위 결과

	영압	사용압	최고충전압
결함모델 (반경방향)	0.54mm	1.17mm	1.32mm
무결함모델 (반경방향)	0.51mm	1.14mm	1.29mm

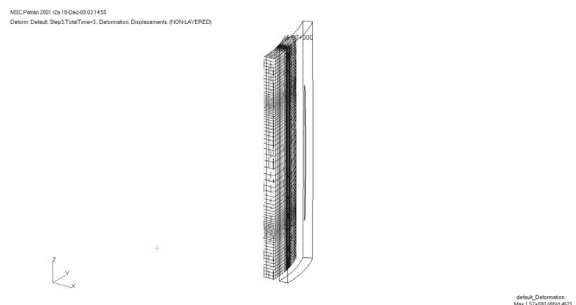


Fig. 9. 1.25 mm × 200 mm 결함해석모델의 사용압 적용 시 변형 형상

Table 4. 1.25 mm × 200 mm 결함해석모델의 사용압 적용 시 응력해석결과

결과(Von Mises Stress)	
사용압 (Service pressure)	결함 모델 : Max. 79.5 MPa 무결함 모델 : Max. 66.6 MPa

기의 반경방향 변위를 정량적으로 분석한 결과는 반복시험압력인 최고충전압에서 두 해석 모델의 차이가 2.33% 발생한다. 이는 해당 결함에 의해 압력용기에 미세한 변위 차이가 발생하는 것으로 볼 수 있다.

또한 1.25×200 mm 결함해석모델의 각 압력별 응력해석 결과 중 사용압 적용 시 응력해석 결과를 Table 4에 나타내었고 이 때의 응력분포를 Fig. 10에 도시하였다. 무결함 용기의 경우 라이너에 내압이 가해질 때 그에 따른 발생 응력을 복합재 층이 억제하게 되어 있으나 결함 용기는 복합재 층(후프 층)의 손상으로 인해 라이너의 발생 응력을 후프 층에서 잡아주지 못해 복합재 층의 결함부위 바로 밑에 위치한 영역에 응력이 집중하게 되어 결과적으로 라이너에 더 많은 응력이 발생하게 된다. 결과적으로 사용압 적용 시 라이너의 평탄부에서 발생하는 응력(79.5 MPa)은 무결함 용기에서의 응력(66.6 MPa) 대비 19.37%의 차이를 보이게 된다.

5. 결 론

지금까지 압축천연가스자동차용 복합재료용기의 표면결함을 ISO 19078의 손상등급을 적용하여 실험 및 수치해석을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 복합재료 결함부위와 라이너 누수위치가 일치한 경우는 총 12개 시험용기 중 2개이고 몸통부 누수는 6개로서, 이는 결함부위에 응력집중이 발생하여 용기가 파괴되기 보다는 라이너 또는 복합재료용기가 결함의 영향을 받아 압력반복에 의해 피로파괴된 것으로 판단된다.
- (2) 손상등급 1, 2에 해당하는 결함은 용기의 성능에 영향을 거의 주지 않으며, 결함이 검출되더라도 용기사용에는 크게 문제가 없을 것으로 판단되고 3등급 손상부터는 용기의 반복성능과 관련이 있고 복합재료 용기의 건전성에 직접 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

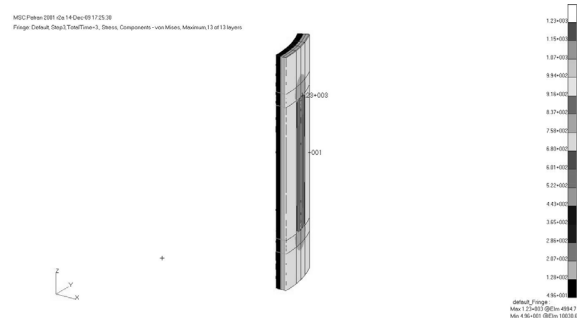


Fig. 10. 1.25 mm × 200 mm 결함해석모델의 사용압 적용 시 응력분포

- (3) 결함용기 중 1.25 × 200 mm 결함해석모델에 사용압을 적용 시 라이너 평탄부에 발생하는 응력은 79.5 MPa이고 무결함 용기의 라이너 평탄부에 발생하는 응력은 66.6 MPa로서 약 12.9 MPa의 응력차가 발생하였고 이는 복합재료용기 라이너의 피로수명에 영향을 미칠 수 있는 임계값으로 판단할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부, 환경부의 정책연구용역인 “압축천연가스자동차 안전성향상 연구”를 통해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국천연가스차량협회 통계자료, “천연가스자동차 보급 현황”, (2010).
2. 한국가스안전공사, “2005 가스사고연감”, (2006).
3. Powertech, “Known In-Service Failures of NGV Cylinders(Since 1976)”, (2006).
4. ISO 19078 : 2006(E), “Gas cylinders-Inspection of the cylinder installation, and requalification of high pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles”, (2006).
5. CGA C-6.4_2003, “Methods for External Visual Inspection of Natural Gas Vehicle(NGV) Fuel Containers and their Installations” (2003).
6. KGS AC412, “압축천연가스자동차용 용기 제조의 시설·기술·검사 기준”, (2008).
7. KS B ISO 11439 : 2007, “자동차용 고압 천연가스 용기”, (2007).
8. KS B ISO 11119-2 : 2008, “복합재료가스용기-규격 및 시험방법-제2부 : 폴립용기”, (2008).
9. BS EN 12245 : 2009, “Transportable gas cylinders. Fully wrapped composite cylinders”, (2009).