



복합재 용기의 손상에 따른 ACM기법 적용 연구

장갑만 · 임상식 · 김영규 · †김정환

한국가스안전공사 한국가스안전연구원

(2019년 7월 16일 접수, 2019년 10월 22일 수정, 2019년 10월 23일 채택)

A Study on the Applications of the ACM(Area Capacity Method) for the Carbon-Fiber Composite Cylinder according to the Flaw Depth

Kap Man Jang · Sang Sik Yim · Young Gyu Kim · †Jeong Hwan Kim

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received July 16, 2019; Revised October 22, 2019; Accepted October 23, 2019)

요 약

호흡용 용기에 흠 등의 결함이 발생하였을 때 용기의 잔존강도를 파악하여 파열압력을 판단해야하지만, 복합재료 용기의 경우 흠에 따른 파열 강도의 예측이 어려우며 기법이 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 Type-I 용기의 면적용량법 적용 결과를 토대로 Type-III 용기에 결함발생시 파열을 예측하기 위해 면적용량법 모델을 개발하였으며, 그 신뢰성을 확인하기 위해 용기의 외면에 흠을 가공하여 파열시험을 실시하였다. 면적용량법 모델의 예측 결과와 실험의 경향이 매우 일치하는 경향을 보였으며, 향후 복합재 용기의 파열압력 추정 방법에 있어 중요한 자료가 될 것으로 기대한다.

Abstract - Although the rupture pressure is evaluated from remaining strength when a flaw is defected to cylinder surface, but the rupture pressure can be not easy to estimate for the composite cylinders. In this study, the area capacity method is developed for the type-3 cylinders that is based on the result applied area capacity method of type-1 cylinders. And the reliability is validated by bursting test with artificial flaw at the cylinder surface. The predicted data of area capacity method and experimental results have very similar tendency. This method and results will be a very important records in field of rupture pressure estimations.

Key words : area capacity method(ACM), SCBA, SCUBA, remaining strength

I. 서 론

고압의 압축공기는 위험하여 사고 발생시 작업자의 생명을 위협할 수 있으며 실제로 사고도 발생하고 있다. 이러한 사고는 대부분 용기충전 중에 발생하며 사용 미숙이나 안전 불량증, 제품의 불량 등으로 발생한다.[3-5]

해양경찰, 스킨스쿠버, 소방관을 위한 공기 호흡기용 용기충전시설은 고압(Type-I 용기는

20MPa, Type-III용기는 30 MPa)으로 운전되기 때문에 위험요소가 크다.1) 현재 공기호흡기에 사용되는 용기는 크게 알루미늄 이음매 없는 용기(Type-I)와 복합재료 용기(Type-III)가 있다. 복합재료 용기는 가스의 기밀성능을 유지하는 알루미늄 라이너와 용기 전체를 강화 섬유로 보강한 것을 풀 랩(full wrap)용기라고 한다. Type-I 용기는 강 또는 알루미늄으로 만들어진 금속제 용기로 복합재료에 의한 구조적 강화 없이 금속 재료만으로 압력하중을 견디도록 만든 용기이다. Type-III 용기는 강 또는

†Corresponding author: abbu2k@kgs.or.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

알루미늄으로 만들어진 얇은 금속제 라이너 위에 수지를 함침시킨 탄소섬유나 유리섬유를 원주방향과 길이방향으로 감아서 만든 용기로 금속제 라이너는 하중을 부담하지 않거나 극히 일부분만을 부담하고 복합재가 대부분의 하중을 부담하는 형태를 가진다.[6-7]

일반적으로 복합재 용기는 이방성을 가지고 있으며, 두 방향이 직각이 아닌 임의의 각도로 교차되어 결함에 따른 파열 압력의 예측이 매우 어려웠으며, 가장 보편적으로 사용되는 Tsai-wu 이론의 경우도 파열 압력 범위의 예측만을 도출한다. 결국 정확히 예측이 어려운 이방성 용기는 복잡성(complexity)이 낮은 단순한 형태와 보존성(conservatism)이 Level 1 정도의 정확도를 갖는 방법이 필요하다. 즉, 높은 정확도(high conservatism)에 대한 예측이 어려운 경우 단순한 형태의 예측 방법(low complexity)이 필요한 것이다. 단순한 형태를 띄며, 보존성이 비교적 우수한 예측 방법으로 면적 용량법(area capacity method)이 사용된다.

따라서 본 연구에서는 등방성을 가진 Type-I 용기의 파열압력을 예측하기 위하여 면적용량법을 적용하였으며, 그 결과를 토대로 라이너와 복합재료 층으로 구성되는 Type-III 용기의 면적 용량법 모델을 개발하였다. 복합재료 용기의 결함발생시 파열압력을 예측하기 위해 개발한 면적 용량법 모델의 검증을 위해 파열시험을 실시하였으며, 시험은 Type-I 7.6리터 알루미늄 용기 및 Type-III 6.8리터 복합재 용기를 사용하였다. 흡가공은 용기 동판부 외면으로부터 폭 3mm, 길이 150~200mm, 깊이는 4~5mm를 가공하여 각 용기 형태에 따른 파열 경향을 관찰하였다.

II. Type-1 용기의 면적용량법 적용

2.1 ASME 및 DNV의 면적용량법 모델

ASME 및 DNV의 면적용량법은 탄소 강관에서 부식이 일어날 경우 강관의 잔존강도를 평가하기 위해 고안된 모델이다. 단일 직사각형 결함에 대한 단순화된 파이프 잔존강도 계산 국외 기준은 다음과 같다. (1) American Society of Mechanical Engineer (ASME) B31G[1], (2)

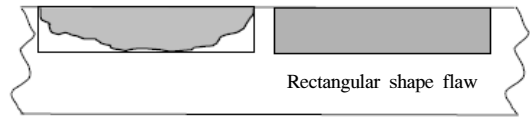


Fig. 1. Regular flaw and Rectangular shape flaw

modified ASME B31G[1] 와 (3)DNV-RP-F101 [2]

* (1)(2) ASME B31G : Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines

* (3) DNV-RP-F101 : Recommended practice, corroded pipelines

위 코드는 많은 기간 동안 해당 분야에서 일반적으로 사용되고 있으며, 계속해서 발전하고 있다. 파열압력을 계산하는 입력 변수는 용기의 동판 직경(D), 동판 두께(t), 재료의 항복응력(σ_y), 최대인장응력(σ_u), 결함 길이(L), 결함 깊이(d)이다. 결함의 폭(w)는 홈의 길이와 깊이에 비해 무시할 수 있을 정도로 적은 값이므로 모든 평가식에서 사용되지 않는다. 파열압력(P_b)을 계산하는 식은 수식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_b = 2 \times t \times \frac{S_f}{D} \quad (1)$$

ASME B31G 기준은 수식(1)에 적용하는 S_f 값을 다음과 같이 계산한다.

$$S_f = 1.1\sigma_y \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right) / M} \right] \quad (2)$$

여기서,

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \frac{L^2}{Dt}} \quad (3)$$

modified ASME B31G 기준은 $\sqrt{\frac{L^2}{Dt}} \leq 50$ 인 경우에 적용하고 S_f 값은 다음과 같이 계산한다.

$$S_f = 2.0 \frac{(\sigma_y + 68.95)t}{D} \left[\frac{1 - 0.85\left(\frac{d}{t}\right)}{1 - 0.85\left(\frac{d}{t}\right)/M} \right] \quad (4)$$

여기서,

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \left(\frac{L}{Dt}\right)^2} \quad (5)$$

DNV-RP-F101 기준은 다음과 같다.

$$S_f = 1.05 \frac{2\sigma_u t}{(D-t)} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \left(\frac{d}{t}\right)/M} \right] \quad (6)$$

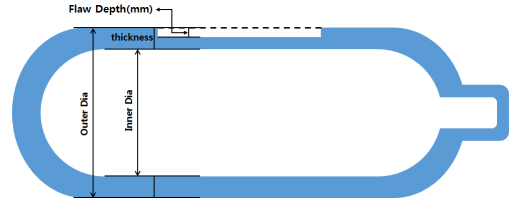
여기서,

$$M = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{L}{\sqrt{(Dt)^2}} \right)} \quad (7)$$

2.2 용기 파열 실험조건 및 실험 방법

파열시험에 사용되는 시편과 흡가공 길이 및 깊이는 다음 Table 1과 같이 가공하였다. 알루미늄 용기와 복합재료 결합은 용기 표면에 대해 균일한 깊이와 방향이 재현되도록 NC머신을 이용하여 정밀가공 하였으며, 복합재료 결합은 표면의 코팅 및 수지 Rich 층을 되도록 많이 제거하여 순수 구조 층으로부터 결합이 생성되도록 하였다. 결합의 폭은 가공 탭의 직경(3mm)과 일치하도록 하였다. 결합 가공은 용기의 외면을 기준으로 깊이를 측정할 값이며, 3개소 이상을 측정할 평균값으로 하였다. 알루미늄 용기는 동판부 수평 길이가 길어 200mm로 가공하였으며, 복합재료 용기는 양쪽 돔부를 제외하면 직선부 길이가 305mm로 200mm로 가공할 경우 돔부에서 파열될 수 있으므로 150mm로 가공하였다.

시험 용기는 수동용 핸드 수압시험기를 이용하여 가압을 실시하였으며, 용기가 파열될 때까지 가압하였다. [4]



a. Test specimen schematic



b. Aluminum cylinder specimen



c. Composite cylinder specimen

Fig. 3. Test specimen schematic & photo

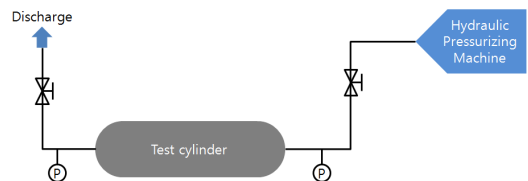


Fig. 2. Hydrostatic pressure rupture test Diagram

Table 1. Hydraulic burst test specimen

	Aluminum Cylinder	Composite cylinder
Type of cylinder	Type-I	Type-III
Diameter, mm	184.2	160
Wall thickness, mm	13.2	7.0 (liner 2, composite 5)
Length, mm	486	503
Flaw length, mm	200	150
Flaw width, mm	3	3
Flaw depth, mm	4, 5, 5.5, 6	4, 4.25, 4.5, 5
Water Volume	7.6	6.8
Tensile Yield Strength, MPa	276	-
Ultimate Tensile Strength, MPa	310	514
Burst Pressure, MPa	58.8	102.0



Fig. 4. After Rupture of cylinder specimen

2.3 Type-1 용기 파열 실험 결과

용기의 파열은 홈 가공부위에서 이루어졌으며, 파열형상은 S자 형상을 그리면서 파열되었다. 용기의 파열은 홈 가공깊이에 따라서 선형성을 보였다. 이는 알루미늄의 등방성 재료의 특성으로 홈 가공 깊이가 깊을수록(두께가 얇을수록) 낮은 압력에서 파열되었으며, 홈 가공 깊이가 낮을 경우에는 높은 압력에서 파열됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 국외기준으로 계산한 값과 홈 가공

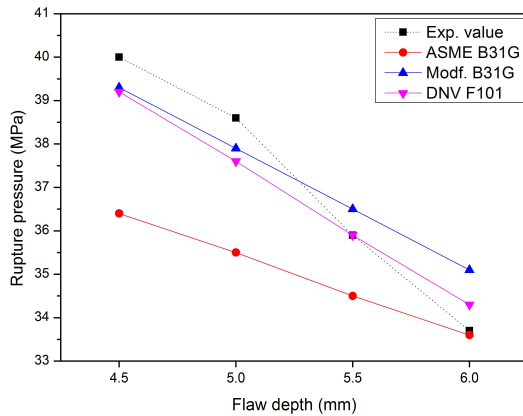


Fig. 5. Flaw depth vs Rupture pressure

을 하여 수압 파열시험을 실시한 결과를 비교한 그래프이다. ASME B31G, Modified ASME B31와 DNV RP F101의 이론값과 파열 시험값과 비교하였을 경우 수압시험 결과 결함 깊이에 따른 잔존강도의 경향은 DNV RP F101의 분석 모델과 가장 유사한 형태를 보였다.

III. Type-III 용기의 면적용량법 적용

3.1 Type-III 용기의 면적용량 모델 개발

ASME 및 DNV 코드에서 제시하고 있는 모델은 강관의 손상에 따른 잔존강도를 예측하는 모델로써, 탄소 강관용 모델을 용기에 적용하는 것은 적합하지 않다. 따라서 용기에 적합한 면적 용량법 모델이 필요하며, 이론적 접근을 위해 면적용량법의 모델을 단순화 하면 식 (8)과 같다.

$$P_f = \epsilon \left(\frac{1 - \zeta\delta}{(1 - \zeta\delta)/M} \right) \tag{8}$$

식 (8)에서 P_f 는 용기의 파열압력을 나타내며, ϵ 은 유동응력을 표현하는 것으로 이 단위에 의해 용기의 파열압력인 P_f 의 단위가 결정된다. ζ 는 등가면적, δ 손실두께를 원래두께로 나눈 손실률, M 은 손실 길이를 표현하는 bulging factor이다.

ASME B31G와 ASME Modified B31G에서는

등가면적 ξ 를 각각 2/3과 0.8로 취급하고 있으며, DNV RP F101에서는 1로 취급하고 있다. 등가면적 ξ 가 갖는 의미는 손실 깊이에 따른 파열압력의 감소 경향을 의미하는 것으로 1에 가까울수록 손실깊이가 깊어짐에 따라 파열압력이 급격하게 감소하는 추세를 보인다.

호흡용 용기가 2종류인 점을 감안하면, 본 연구에 개발이 필요한 항은 ϵ 항이 된다. ϵ 항은 유동응력을 나타내는 항으로 탄소강관에서는 유동에 의한 응력의 가중치를 의미하지만, 본 연구에서는 용기 종류에 의한 구조적 특성을 의미한다.

Type-I 용기는 경판과 동판 모두 알루미늄 강재로 이루어진 반면, Type-III 용기는 라이너와 복합재 층의 다층 구조로 이뤄지며, 등방성을 갖지 않는다.

강재의 ϵ 항은 일반적으로 식 (9)와 같은 형태를 띈다.

$$\epsilon = 2\beta \frac{(\sigma t)}{D} \quad (9)$$

식 (9)에서 σ 는 재료의 강도를 나타내며, β 는 상수, t 는 두께, D 는 직경을 나타낸다. 알루미늄 강재용기는 식 (9)의 계수 β 값을 변환하여 나타낼 수 있지만, 복합재 용기는 다층 구조로써, 식 (9)의 형태 변환이 필요하다. 즉, 복합재 용기는 라이너까지 손상이 될 경우와 그렇지 않은 경우 2가지 형태로 나뉠 수 있으므로, 그 조건을 표현해야 한다. 복합재 용기의 두께는 식 (10)과 같이 표현 될 수 있다.

$$t = t_{liner} + t_{fiber} \quad (10)$$

또한 복합재 용기는 라이너와 탄소 섬유층으로 구성되어 있어 재료의 강도를 나타내는 σ 항도 구분되어야 하며, 각 층의 두께와 강도를 조합하면 식 (11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{(\sigma_{u,liner} \times t_{liner} + \sigma_{u,fiber} \times t_{fiber})}{t_{liner} + t_{fiber}} \quad (11)$$

외경을 표현하는 D항은 두께 감소에 따라 호흡용 용기의 파열압력이 급격하게 감소하는

것을 반영하면, 외경 D에서 감소두께 t를 빼줘야 한다. 또한 탄소섬유층의 감소에 따라 전체 파손압력이 급격하게 감소하는 것을 상수 항인 β 항에 반영하면 식 (12)와 같다.

$$\beta = \left(\frac{1+d_{fiber}}{t_{fiber}} \right) \left(\frac{1+t_{fiber}}{(t_{liner} + t_{fiber})} \right) \quad (12)$$

상기 결과를 ASME B31G, modified ASME B31G 및 DNV RP F101에 응용하면, 복합재 용기에 적용 할 수 있는 면적 용량법이 도출된다.

3.2 Type-III 용기 파열 시험 결과

파열 시험에 사용되는 용기는 소방용 복합재료용기(Type-3, 6.8리터)를 수압을 이용하여 파열시험을 실시하였으며, 4개의 용기에 흡가공 깊이를 달리하여 가공(5, 4.5, 4.25, 4.0mm)하여 파열압력에 도달 할 때까지 가압하였다.

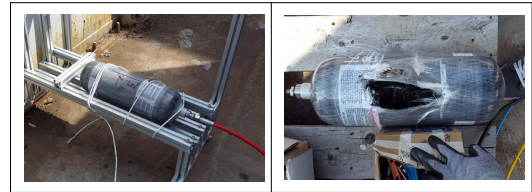


Fig. 7. Hydrostatic pressure rupture test of composite cylinder

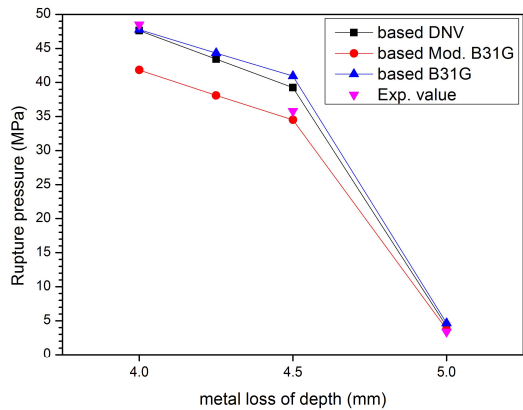


Fig. 8. Flaw depth vs rupture pressure of composite cylinder

파열시험 결과 결함가공을 용기의 외면으로부터 4.0mm(4.0mm × 3mm × 150mm) 가공하였을 경우 복합재료의 두께가 1.0mm 정도 남게 되며, 1mm의 복합재료가 약 48.5MPa의 압력을 견딜수 있음을 알 수 있다. 이는 탄소섬유가 용기전체를 감싸고 있으며, 하중의 대부분을 복합재료가 받고 있기 때문이다. 또한 복합재료를 모두 가공한 5.0mm 결함 가공일 경우에는 라이너(두께 2.0mm)가 하중을 받게 되고 복합재료가 없는 라이너는 3.4MPa의 압력에서 파열되었다.

Fig. 8의 그래프는 복합재료 용기의 파열압력을 나타낸 것이며, 실험결과를 토대로 본 연구에서 개발한 복합재료 용기의 파열압력 예측 면적용량법 모델과 비교한 그래프를 동시에 나타낸 것이다. 알루미늄 용기의 파열시험 결과와 DNV 기법 경향이 유사한 것과 마찬가지로, 복합재료 용기의 면적용량법 모델도 DNV를 기반으로 개발한 모델이 가장 유사한 것으로 나타났다.

다만, 결함 가공 깊이 4.25mm인 용기는 50.0MPa 이상으로 가압하였지만 파열되지 않았다. 이는 가공 과정에서 복합재료가 정확히 가공되지 않은 것으로 판단되며, 예측 모델의 결과를 토대로 0.25mm 오차는 3.5MPa의 파열압력 차이를 보여 0.5mm 이상의 가공 오차가 발생한 것으로 보인다.

IV. 결론

본 연구에서는 등방성을 가진 Type-I 용기와 이방성을 가진 Type-III 용기에 결함발생시 파열을 예측하기 위한 모델을 개발하고, 용기의 외면에 흠을 가공하여 수압 및 기압 파열시험을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

① Type-I 7.6리터 알루미늄 용기의 흠깊이에 따른 파열시험 결과 DNV RP F101 based 모델에 가장 유사한 경향을 보였다. 이는 실제 용기의 파열이 발생하는 것은 파손(failure)이 아닌 파괴(fracture)에 의한 것이므로, ASME는 재료의 항복응력 값을 사용하며, DNV에서

는 최대인장응력(σ_u)을 사용하므로 DNV에서 사용되는 극한강도 값을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

② Type-III 6.8리터 복합재 용기의 면적용량법 모델은 실험결과와 경향이 매우 유사하며 가장 우수한 경향 일치도를 보이는 것은 DNV RP F101을 기반으로 개발된 것이었다. 흠깊이에 따른 파열시험은 복합재료를 전부 가공한 5.0mm 가공에서는 최대파열압력 102MPa의 약 3.4%의 압력(3.4MPa)에서 파열되었으며, 이는 복합재료가 하중의 95% 이상을 담당하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시하는 결과는 용기외피 손상에 따른 파열압력을 추정할 수 있으며, Type-I 알루미늄 용기는 국외기준인 DNV RP F101 모델을 통해서 잔존 파열압력을 예측할 수가 있음을 알 수 있었다. 또한 Type-III 복합재 용기의 경우 개발된 면적용량법 모델과 경향이 유사하였으며, 알루미늄 용기와 같이 DNV RP F101을 기초로한 모델이 가장 유사한 경향을 보였다. 본 연구의 결과는 향후 파열압력 예측을 통한 용기의 설계 및 용기 폭발로 인한 사고 완화에 크게 기여할 것으로 기대한다.

REFERENCES

1. American Society of Mechanical Engineers, *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines : Supplement to ASME N31 Code for Pressure Piping, 2012 ed.*, ASME, New York, (2012)
2. DET NORSKE VERITAS, *Recommended practice : DNB-RP-F101 : Corroded Pipelines*, DNV, October, (2010)
3. Jang, K. M., Kim, J. H., Jang, Y. R., Lee, J. H., and Jo, Y.D., "Development of the Safety Cabinet for Respiratory High-Pressure cylinder according to Consequence Analysis of Physical Explosion Damage ", *KIGAS*, 20(6), 80-88, (2016)

4. Yim, S. S., Kim, J. S., Ryu, Y. D., and Lee, J. H., "A Study on the Residual Strength of the Carbon Steel pipe using in Fuel Gas ", *KIGAS*, 20(5), 112-117, (2016)
5. Yang, D. J., Kim, Y. S., Jang, K. M., and Kwan, J. R., "A Study of Type 2 Cylinder's Safety Evaluation and Cases of CNG Vehicle Fuel Cylinder with External Damaged Composite " Proc. of Spring Conf., *KIGAS*, 176-180, (2010)
6. Yang, D. J., Kim, Y. S., and Kim, L. H., "Assessments of Composite Flaw on the Type III Cylinders for Compressed Natural Gas Vehicles", *KSEE*, 20(2), 90-95, (2011)
7. Kim, Y. S., "The Effect of Composite Material Flaws on Fatigue Life of the Type-3 Cylinders for Compressed Natural Gas Vehicles", *Seoul National University of Science and Technology*, (2018)