

CNG용 Type 4 하이브리드 섬유 복합재 용기 개발에 대한 연구

조성민*, 조민식**, 정근성***, 이선규*, 이승국*, 박기동*, 류성기****,#

*한국가스안전공사 가스안전연구원, ** (주)대흥정공, ***한국탄소융합기술원,
****경상대학교 기계항공공학부, 항공연

A Study on the Development of a Hybrid Fiber Reinforced Composite for a Type 4 CNG Vessel

Sung-min Cho*, Min-sik Cho**, Geunsung Jung***, Sun-kyu Lee*, Seung-kuk Lee*, Ki-dong Park*,
Sung-Ki Lyu****,#

*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation,
**Daeheung Precision Industrial co., LTD

***Korea Institute of Carbon Convergence Technology

****School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT, Gyeongsang National Univ.

(Received 9 July 2017; received in revised form 11 July 2017; accepted 21 July 2017)

ABSTRACT

The objective of this study is to develop and commercialize an on-board fuel storage system for CNG vehicles. A type 4 vessel is made of resin-impregnated continuous filament windings on a polyamide (PA6) liner. In particular, this study localized the PA6 liner's fabrication and development. To analyze the filament winding, a specimen test was performed, and the results were verified values obtained using finite element analysis. In this study, the filament winding and fibers were optimized for a 207 bar composite cylinder in a compressed natural gas vehicle.

Key Words : Composite Vessel(복합재 실린더), Type4(타입4), Filament Winding(필라멘트와인딩), CNG(압축천연가스)

1. 서 론

친환경 CNG 차량의 주행거리 확보를 위해서는 대용량, 경량화된 용기가 필수적으로 필요하다^[1-4].

현재 탄소섬유, 유리섬유 등의 보강섬유와 에폭시 등의 수지를 사용하여 제조되는 복합재 용기가 비강도, 비강성도, 내피로 특성 등에서 가장 뛰어난 성능을 가지고 있는 것으로 알려져 있어,^[5] 이

에 따라 차량에 탑재되는 용기는 금속제 용기를 사용하던 과거와 달리, 2000년대부터 선진국 중심으로 다양한 형태의 복합재 용기에 대한 연구개발 및 적용이 이루어지고 있다.

복합재 용기는 제조방법에 따라 Type 2, Type 3, Type 4로 총 3가지 유형의 형태로 분류된다.^[6]

Type 4의 형태는 얇은 플라스틱 재질의 라이너에 에폭시 수지를 묻힌 탄소섬유를 감아 경화시켜 제조되며, 벨브연결부만 금속형태를 가진다.^[7-8]

Type 4 복합재 압력용기를 제조하기 위해서는 플라스틱 라이너 제조공정, 필라멘트 와인딩 공정,

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

열경화공정 등 여러 복잡한 공정을 거치게 되며, 특히 와인딩 공정에서는 돔 부위의 곡률과 와인딩 각도가 연속적으로 변화하기 때문에 유한요소해석을 통한 와인딩 패턴의 최적화가 요구된다.^[9-20]

본 연구에서는 207 bar, 50L급 복합재 압력용기의 개발에 있어 안정적인 품질과 가격 경쟁력을 동시에 확보하고자, 탄소섬유와 유리섬유를 같이 적용한 하이브리드 압력용기를 개발하였다.

와인딩 패턴 설계에서는 현재 유리섬유 가격의 최대 6배에 달하는 탄소섬유의 적용을 최소화하며, 동시에 용기의 무게 및 과열압을 고려하였고, 전산해석을 통해서 탄소섬유모델, 유리섬유모델, 하이브리드섬유 모델의 와인딩 패턴 설계치를 분석하였다. 하이브리드 모델의 경우 필라멘트 와인딩 공정을 통한 제작 후 과열압 시험을 통해서 그 설계안을 검증하였다.

2. 소재 선정 및 복합재 분석

2.1 소재선정

본 연구에서는 일본 도레이(Toray)사의 T700 24K 탄소섬유가 사용되었으며, 유리섬유는 미국 오웬스 코닝(Owens Corning)사의 H-grass가 사용되었으며, 레진 및 경화제는 제품인 미국 다우케미컬(Dow Chemical)사의 필라멘트 와인딩 공법 전용 레진과 경화제인 Vorafoece 시리즈를 사용하였다.

2.2 복합재 물성분석

필라멘트 와인딩 공정을 통한 복합재의 기계적 물성치를 확인하고 전산 구조해석을 위한 물성 자료를 확보하기 위하여 시편을 제작하여 기계적 성능평가를 진행하였다.

시험시편의 제작은 압력용기에 섬유를 와인딩하는 제조공정과 동일하게 와인딩 속도, 장력 등의 공정변수를 설정하고 시편제작용 평면 지그를 회전시키며 섬유를 와인딩하고 실제 압력용기의 경화조건과 동일하게 후처리를 통하여 일방향(UD) 시험시편을 제작이 이루어졌다.

Table 1 Carbon fiber properties

Properties	Value
- Tensile Strength	4,900 MPa
- Tensile Modulus	230 GPa
- Density	1.8 g/cc
- Yield	1650 g/km

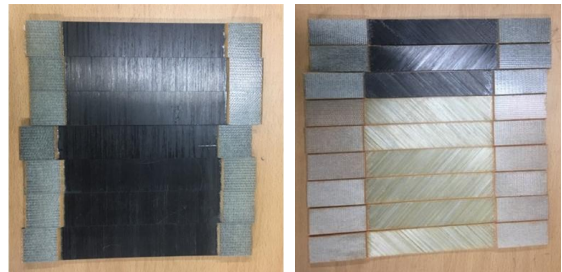
Table 2 Glass fiber properties

Properties	Value
- Tensile Strength	4,130 MPa
- Tensile Modulus	87.5 GPa
- Density	2.61 g/cc
- Yield	2448 g/km

시험시편은 탄소섬유와 유리섬유 시편을 0°, 90°인장(Tensile), 0°, 90°압축(Compression) 및 평면 전단(In-plane shear) 시험에 대하여 제작하였으며, 각 시험시편에 대한 시험 규격은 ASTM D3039, ASTM D3410, ASTM D3518에 따라서 각각 수행하였다.

유리섬유 시편의 경우 0° 시편의 인장강도 값은 평균 1188.6 MPa로 제조사에서 제공한 값은 1260 MPa에 비해서 약간 낮은 값을 보였으며, 90° 시편의 인장강도 값은 약 27.8 MPa를 나타내었다.

시편 시험을 통해서 얻은 탄소섬유 복합재에 대한 물성 값은 Table 3에 나타내었다.



(a) Carbon tensile, 90°

(b) In-plane shear

Fig. 1 Test specimen

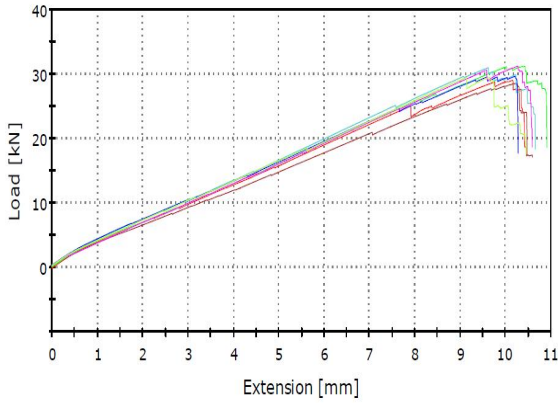


Fig. 2 Load-elongation curve(Glass tensile 0°, Specimen 1 to 7)

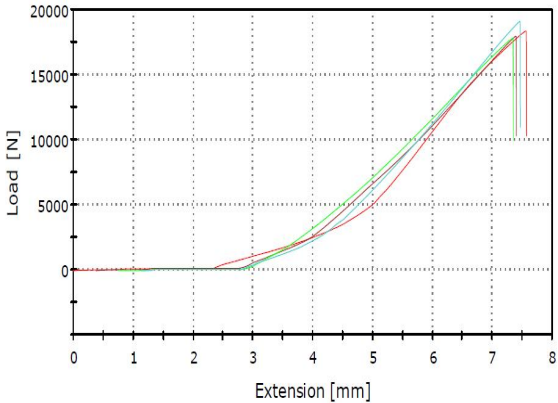


Fig. 3 Load-elongation curve(Glass comp. 0°, Specimen 1 to 4)

Table 3 Carbon fiber composite properties

Properties	Value
-Longitudinal(0°) modulus	: 82 GPa
- Transverse(90°) modulus	: 6 GPa
- In-plane shear modulus	: 3 GPa
- Major Poisson's Ratio	: 0.3
- Longitudinal(0°) tensile Strength	: 1930 MPa
- Longitudinal(0°) comp. Strength	: 404 MPa
- Transverse(90°) tensile Strength	: 25 MPa
- Transverse(90°) comp. Strength	: 78 MPa
- In-plane shear strength	: 14 MPa

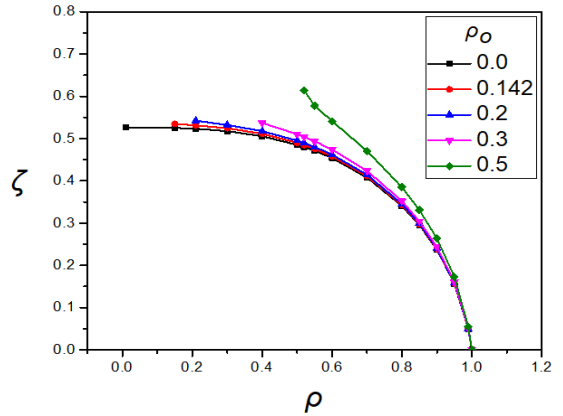


Fig. 4 Dome shape curve

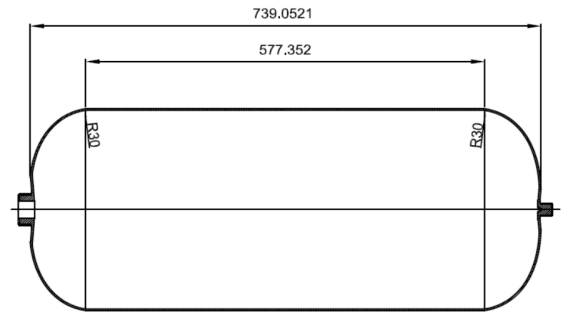


Fig. 5 Liner design

3. CNG 저장용기의 설계 및 해석

3.1 용기 라이너 형상 설계

일반적으로 복합재 압력용기에 가장 많이 적용되는 등장력 돔(Isotenoid dome)의 형상은 식은 망목이론(Netting Theory) 및 곡면상의 섬유방향 장력이 일정하다는 가정으로부터 유도되어 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\zeta}{d\rho} = -\frac{\rho^3(1-\rho_o^2)^{1/2}}{[\rho^2-\rho_o^2-(1-\rho_o^2)\rho^6]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 실린더의 반경, ζ 는 돔의 높이를 무차원화한 값이며, ρ 는 실린더의 반경, ζ 는 돔의 높이, ρ_o 는 실린더 반경과 보스(Boss)의 비율로

정의되는 오픈링 비율(Opening ratio)이다.

이 식을 적분하면 등장력 돔의 형상을 구할 수 있다. 적분된 식을 통해 오픈링 비율에 따른 돔의 형상을 표현하여 Fig. 4에 보였다.

최종적인 라이너의 형상은 등장력 돔 형상, 용기의 내용적, 실린더의 외경 및 보스의 크기 등을 고려하여 Fig. 5와 같이 확정하였다.

3.2 와인딩 패턴설계 및 전산해석

와인딩 패턴의 설계는 섬유가 내압에 의한 하중을 모두 담당한다는 망목이론에서 시작하여, 이에 따라 압력용기에 필라멘트 와인딩 각도에 따른 후프 층과 헬리컬 층의 두께비의 초기 값을 가정하고 각각의 경우에 대한 면내 합 응력을 설계 압력과 함께 식(2), 식(3)으로 표현 할 수 있다.

$$\sigma_{\alpha} t_{\alpha} \cos^2 \alpha = \frac{pR}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_{\alpha} t_{\alpha} \sin^2 \alpha + \sigma_h t_h = \frac{pR}{2} \quad (3)$$

여기서, σ_{α} 는 헬리컬 파이버(Helical fiber) 인장강도, t_{α} 는 헬리컬층 두께, σ_h 는 후프파이버(Hoop fiber) 인장강도, t_h 는 후프층 두께, p 는 설계압력, R 은 실린더 반지름이다.

이에 따른 분석 값을 기초로 압력용기의 탄소섬유만 적용된 경우, 유리섬유만 적용된 경우, 유리섬유와 탄소섬유가 같이 적용된 경우 등 3가지 전산모델에 대하여 와인딩 패턴을 정립하고 전산 구조해석을 수행하였다.

특히, 각 모델에 대한 와인딩 패턴은 Fig. 6에 보인 것처럼 압력용기의 파열이 돔 부위에서 발생하지 않도록 유도하였다.

하이브리드 모델의 경우 유리섬유 층이 압력하중의 분담과 동시에 외부의 충격에서 탄소섬유를 보호할 수 있도록 유리섬유의 헬리컬 와인딩 층을 3층(Ply) 이상인 경우만을 고려하였다.

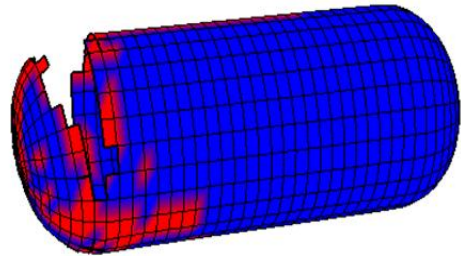
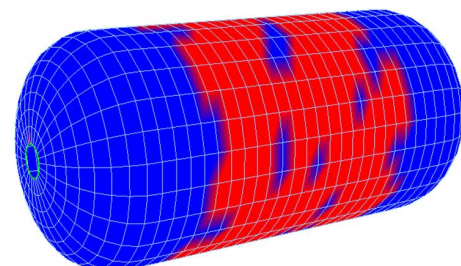
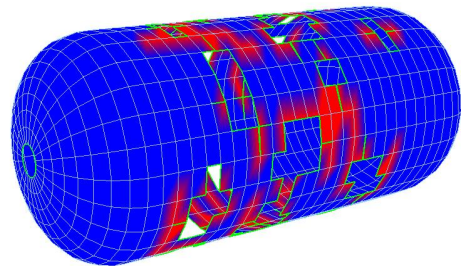


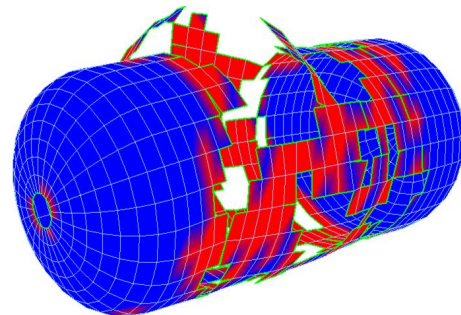
Fig. 6 Dome fracture



(a) Carbon winding model, burst pressure 55.5 MPa



(b) Glass winding model, burst pressure 55.5 MPa



(c) Hybrid winding model, burst pressure 56.2 MPa

Fig. 7 FE analysis results

Table 4 Winding properties of each model

Properties	Carbon	Hybrid	Glass
Carbon ply	14	9	0
Glass ply	0	7	22
Total	14	16	22

Table 5 Model comparison by design

Properties	Carbon	Hybrid	Glass
Weight	15.2 kg	21.5 kg	41.3 kg
Price	100%	80%	86%

3가지 압력용기 모델 모두 와인딩 패턴은 전산 구조해석에서 55 MPa에서의 파열압을 목표로 각각 최적화를 수행하였다.

최종 최적화된 3가지 모델의 와인딩 수는 Table 4에 보였으며, 이때 모델별 파열압은 탄소섬유 모델, 유리섬유모델, 하이브리드 모델이 각각, 55.5 MPa, 55.5 MPa, 56.2 MPa를 나타내었다.

설계상으로 최적화된 각 모델은 섬유 및 레진의 예상 소요량과 실제 라이너 및 기타 부품의 무게를 고려하여 그 무게와 생산 원가를 예상 할 수 있다. 각 모델별 예상무게와 탄소섬유 모델을 기준으로 한 모델별 예상가격의 비교를 아래의 Table 5에 보였다.

4. 시제품 제작 및 시험

하이브리드 모델의 파열압 분석을 위하여 필라멘트 와인딩 공법을 통한 시제품 제작을 수행하였다.

등장력 돔 형태의 라이너는 PA6 소재를 적용하고, 블로우 몰딩(Blow molding) 공법을 활용하여 일체형 라이너를 구현하였다.

최적화된 하이브리드 모델은 총 5개의 시제품을 제작하여 그 특성을 분석 하였으며 하이브리드 모델 시제품은 제품중량의 경우 평균 20.6 kg으로 설계를 통한 예상치 보다 4% 정도 가볍게 나타났다.

파열압의 경우 평균 59.2 MPa를 나타내어 약 5% 정도의 오차를 보였다.



Fig. 8 Liner and boss assembling



(a) Carbon fiber winding



(b) Glass fiber winding

Fig. 9 Filament winding



Fig. 10 Hybrid model after burst test

5. 결 론

본 연구는 CNG용 type 4 복합재 압력용기의 개발에서 제품의 성능과 시장에서의 가격 경쟁력을 동시에 확보하고자 탄소섬유와 유리섬유를 혼합 사용한 하이브리드 압력용기를 개발하였다.

전산설계 및 구조해석을 통하여 탄소섬유 모델, 유리섬유 모델, 및 하이브리드 섬유모델 각각을 설정된 과열압에서 과열이 발생하도록 최적화를 수행한 후, 각 모델에 대한 소요섬유 및 경화제의 양을 분석하여 제조원가를 비교하였다.

특히 하이브리드 모델은 시제품의 제작을 통해서 제품의 설계안을 검증하였으며, 이때 하이브리드 제품은 순수 탄소섬유 모델을 기준으로 140% 정도의 중량을 보이며, 80% 정도 소재비용이 소요됨을 확인하였다.

이때 순수 유리섬유 모델은 탄소섬유 모델에 비해서 271%의 중량을 보이면서 소재비용 또한 유리섬유의 과다사용에 따른 레진 량의 증가로, 오히려 하이브리드 모델보다 비싼 86%의 소재비용이 소요됨을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업(20143030040840 & 20162220100080) 및 소재부품 기술개발사업(10049636)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Cho, S. M., Kim, K. S., Kim, C. J., Lyu, G. J., Lee, Y. J., Jo, Y. S., Lyu, S. K., "Temperature Variations of Air Pocket in Type-3 Composite Vessel during Ambient Hydraulic Cycling Test", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 120-125, 2015.
2. Choi, K. S., Park, J. H., Park, J. H., "A Structural Analysis by Finite Element Method under the Dropping Condition of Standardized IP-2 Metal Container for Decommissioning Radwaste Transportation", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 35-40, 2015.
3. Jang, J. H., Ha, C. K., Chu, B. S. Park, J. Y., "Development of Fault Diagnosis Technology Based on Spectrum Analysis of Acceleration Signal for Paper Cup Forming Machine", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 1-8, 2016.
4. Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. H., Kim, H. Y., "Design of a Cylinder Valve Solenoid for a CNG Vehicle using Electromagnetic Field Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 89-96, 2016.
5. Park, J. S., Cheung S. S., Chung, J. H., Cho, S. M and Kim, T. W., "Development of Type 3 Composit Cylinder for Fuel Cell Vehicle" Journal of the Koran Society for New and Renewable Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 51-57, 2008.
6. Kim, C. J., Cho, S. M., Kim, E. J. and Yoon. K. B., "The Study on the Internal Temperature Change of Type 3 and Type 4 Composite Cylinder During Filling", Proceedings of the 5th International Conference on Hydrogen Safety, 2013.
7. Akansu, S. O., Dulger, Z., Kaharman, N. and Veziroglu, T. N., "Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas-Hydrogen Mixtures," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, No. 14, pp. 1527-1539, 2004.
8. Kim, E. S., Kim, J. H., Park, Y. S., Kim. C. and Choi, J. C, "Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel using Steel Liner Manufactured by DDI", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 205-213, 2003.
9. Sun, X. K., Du, S. Y. and Wang, G. D., "Bursting Problem of Filament wound Composite

- Pressure Vessels”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, No. 1, pp. 55-59, 1999.
10. Kabir, M. Z., “Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner,” Composite Structure, Vol. 49, No. 3, pp. 247-255, 2000.
 11. Park J. S., Jeung S. S. and Chung, J. H., “Cycling Life Prediction Method Considering Compressive Residual Stress on Liner for the Filament-wound Composite Cylinders with Metal Liner”, The Korean Society for Composite Materials, Vol. 19, No. 1, pp. 22-28, 2006.
 12. Cho, S. M., Kim, K. S., Kim, C. J., Lyu G. J., Lee, Y. J., Jo, Y. S., Lyu, S. K., "Temperature Variations of Air Pocket in Type-3 Composite Vessel during Ambient Hydraulic Cycling Test", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 120-125, 2015.
 13. Choi, K. S., Park, J. H., Park, J. H., "A Structural Analysis by Finite Element Method under the Dropping Condition of Standardized IP-2 Metal Container for Decommissioning Radwaste Transportation", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 35-40, 2015.
 14. Jang, J. H., Ha, C. K., Chu, B. S., Park, J. Y., "Development of Fault Diagnosis Technology Based on Spectrum Analysis of Acceleration Signal for Paper Cup Forming Machine", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 1-8, 2016.
 15. Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. H., Kim, H. Y., "Design of a Cylinder Valve Solenoid for a CNG Vehicle using Electromagnetic Field Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 89-96, 2016.
 16. Yang, Y. S., Kim, D. Y., Bae, K. Y., "Analysis of Welding Distortion during the Production of Fuel Tanks for Excavators", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 24~34, 2016.
 17. Park, J. H., Park, H. S., Kim, S. T., Kang, G. M., "A Study on the Temperature Uniformity for the Anti-Corrosion Coating Process of Large-Sized Water Pipes", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 35-40, 2016.
 18. Kang, T. Y., Ahn, H. S., Shin, D. M., Hong, S. W., Kim, K. J., Lee, D. H., "Characteristic Analysis of Nano-hole Array Optical Filter having Psychological Protection for Color Recognition", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 95-100, 2016.
 19. Kim, D. H., Zhang, Y., Jung, D. W., "A Study of Spring-back Effect According to the Number of Roll Passes in the Roll Forming Process", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 42-49, 2016.
 20. Hur, J. W., Shin, B. C., "Effect on the Stress and Displacement of Aluminum Profiles Fastening Methods", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 99-104, 2015.