

환경시험 평가를 위한 TR 모듈 구조모델의 열/진동 해석

강동석¹, 김종필², 이유리², 박성우², 노진호^{1,†}¹항공우주공학과, 한국항공대학교²위성체계연구소, LIG넥스원Thermal and Vibration Analysis of TR Module Structural Model for
Environmental Test EvaluationDong-Seok Kang¹, Jong-Pil Kim², Yuri Lee², Sung-Woo Park² and Jin-Ho Roh^{1,†}¹Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University²Satellite MDI & PA Team, LIG NEX1

Abstract

The Synthetic Aperture Radar (SAR) is equipped with a Transmitter/Receiver (TR) module, which serves as the signal transmission and reception unit for acquiring image data. The TR module generates significant heat during signal generation and amplification, potentially degrading performance or causing mission failure. Furthermore, launch and operational environments may result in structural damage to the components. Thus, assessing the thermal and structural safety of the TR module through thermal and vibration tests is essential to guarantee its safety. Safety assessments can be verified through environmental tests prescribed in MIL-STD-883. This paper explores the thermal and structural safety characteristics of the TR module by simulating test environments using finite element analysis prior to conducting environmental tests.

초 록

SAR 영상 레이더에는 영상정보 획득을 위한 신호 송수신 모듈인 TR 모듈이 탑재된다. TR 모듈은 신호를 생성/증폭하는 과정에서 높은 발열이 발생하는 부품으로 이는 TR 모듈 내부 소자의 성능 저하 또는 임무 실패를 야기할 수 있다. 또한, 발사환경 및 운용 환경은 소자의 구조적 파손을 야기할 수 있다. 따라서 소자의 생존성을 확인하기 위해 열환경시험 그리고 진동시험 등을 통한 TR 모듈의 열적 그리고 구조적 안전성 평가 필요하다. 안정성 평가는 MIL-STD-883에 명시되어 있는 환경시험을 통해 확인이 가능하다. 본 논문에서는 TR 모듈의 시험환경을 유한요소를 통해 묘사하여 환경시험 전 TR 모듈의 열적 그리고 구조적 안전성 해석 특성을 살펴보았다.

Key Words : SAR(합성개구레이더), TR module(송수신 모듈), Thermal analysis(열해석), Vibration test(진동 시험), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서 론

위성 SAR 영상 레이더는 밤낮 날씨에 관계없이 전천후 지구관측이 가능하고 광학 영상과는 차별화된 산란특성의 영상자료를 제공할 수 있다. SAR 안테나 시스템 내부에 탑재되는 TR(Transmit/Receive)모듈은 영상정보 획득

을 위해 신호를 송신하고 목표물의 반사된 신호를 수신한다. TR 모듈은 레이더의 radio frequency(RF) 신호를 생성하는 핵심 구성품이다. 신호를 생성/증폭하는 과정에서 TR 모듈 소재에 공급된 전력의 일부가 열로 변하게 되어 높은 열을 발생시키는 부품으로, 단위 체적당 발열량이 높기 때문에 특정 부위의 온도가 상당히 높아지게 된다. 소자 및 주위의 온도가 올라가, 동작 온도 범위 보다 높아지면 신호 전송 시간이 지연되고 잘못된 신호 등 신뢰성(reliability)이 급격하게 떨어지게 된다. 따라서, SAR의 성능 전하를 방지하기 위해 TR 모듈의 방열 설계 및

Received: Mar. 28, 2024 Revised: Jun. 14, 2024 Accepted: Jun. 18, 2024

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0289, E-mail: jinhoroh@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

검증이 필수적이다[1].

위성용 TR 모듈은 우주방사능, 온도 변화 등 극심한 우주환경을 조건을 고려한 설계가 필요하다. 우주방사능 영향으로 총이온화선량(total ionizing dose, TID) 효과와 단일이벤트 오류(single event error, SEE)에 대한 방안으로 내구성이 강한 부품을 선정하거나 이중(redundancy) 설계를 적용한다. 진공 환경에서는 기관, 하우징, 부품 그리고 케이블 등에서의 가스방출(outgassing)으로 내부 부품 또는 타 장비에 영향을 줄 수 있기 때문에, 지상에서 탈기 작업을 통해 가스방출을 최소화하는 것이 중요하다[2].

극심한 온도 변화는 부품의 반복적인 수축과 팽창을 유발시키며, 부품 손상과 장치 고장을 유발할 수 있다. 따라서, 임무 수명동안 최적의 운용이 가능할 수 있도록 TR 모듈의 열 설계가 필수적이며 발사 환경에서 발생하는 진동/충격에 따른 구조 안전성도 고려되어야 한다.

본 논문에서는 TR 모듈 구조 유한요소모델을 바탕으로 열적 안전성 그리고 발사/운영 환경시험 묘사를 통한 구조적 안전성 특성을 살펴보았다. 환경시험 조건의 열해석과 등가속도(constant acceleration) 그리고 정현진동(sinusoidal vibration) 시험을 유한요소해석 프로그램으로 묘사하여, TR 모듈의 열적 및 구조적 안전성을 살펴보았다.

2. TR 모듈 구성

TR 모듈은 내부 기밀(hermetic sealing)을 유지하기 위한 하우징(housing), 리드(lid), 소자가 부착되는 PCB(printed circuit board), 내부 소자인 HPA(high power amplifier) 그리고 서클레이터(circulator)로 구성된다(Fig. 1). 고 발열 소자인 HPA의 효율적인 방열을 위해 텅스텐구리(CuW) 재질의 방열 블록이 설치되어 있다. 하우징과 리드에는 코바르(Kovar) 재질을 사용한다. PCB는 HTCC(high temperature co-fired ceramic)재질 그리고 서클레이터 와 HPA에는 고풍력 송수신 모듈에 주로 사용되는 질화갈륨(GaN)이 적용된다.

서클레이터와 HPA는 대표적인 발열소자로 발열량이 각각 0.03 W 그리고 15.61 W이다. HPA는 상대적으로 열전도성이 낮은 코바르 재질의 하우징에 부착되면 효율적인 방열이 어렵기에 열전도성이 높으면서 열팽창계수가 유사한 텅스텐구리 재질의 블록(block)을 HPA 소자 아래의 하우징에 부착하여 효율적인 방열구조를 구성한다.

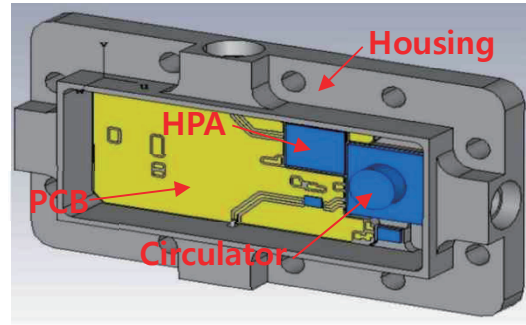


Fig. 1 Configuration of TR module

2.1 열해석

TR 모듈은 발열소자를 사용하기 때문에 소자의 온도가 상승하게 되고 시스템의 생존율은 급격하게 저하된다. 유럽우주국(European Space Agency)에서는 내부 전자장비의 구성품 레벨에서의 열적 안전성 평가를 위해, 소자 온도의 주 발열부인 내부에 있는 접합부(junction) 온도를 통해 열적 안전성을 평가하도록 권장한다. 소자의 신뢰성을 높이기 위해 소자의 부하경감 온도 요구 조건을 고려한 접합 온도의 열적 안전성 평가를 수행한다[3-5].

HPA와 서클레이터의 접합부 온도는 Eq. 1을 통해 계산할 수 있다[6].

$$T_j = T_c + R_{th}(\dot{J}) \times P \quad (1)$$

여기서, T_j 는 접합부 온도, T_c 는 케이스 온도, $R_{th}(\dot{J})$ 는 접합부와 케이스 사이의 열저항 그리고 P 는 소자 발열량을 의미한다. 전자부품 접합부에 대한 온도 예측을 목적으로 각 발열소자까지의 열저항을 계산한다. 열 진공 시험을 유한요소해석 프로그램을 통해 묘사하여 열-진공 시험에서 온도센서가 부착되는 곳부터 각 발열소자까지의 온도 변화를 산출하였고 이를 Eq. 2에 적용하여 열저항을 계산하였다.

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (2-1)$$

$$R_{tot} = \sum R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2-2)$$

여기서, ΔT 는 각 부품 접합부의 온도차, q 는 발열량, R 은 열저항 그리고 R_{tot} 은 총 열저항을 나타낸다.

열-진공 시험을 위해서는 TR 모듈에 시험을 위한 치구(fixture)가 추가된다(Fig. 2). 시험 모델은 치구에 해당하는 지그(jig), 지그 PCB 그리고 Pogo pin으로 다소 복잡하게 구성되어 있다. 따라서 효과적인 해석을 위하여 구조를 단순화하여 열해석 모델을 구축하였다(Fig. 3).

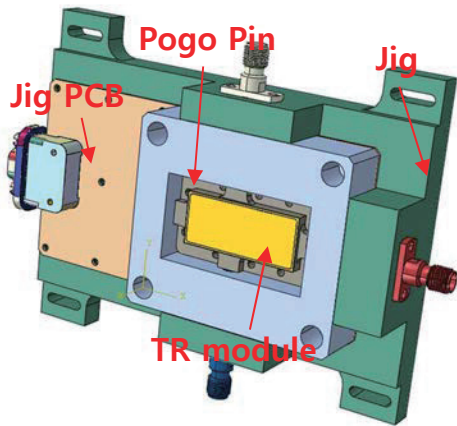


Fig. 2 Thermal vacuum experimental model

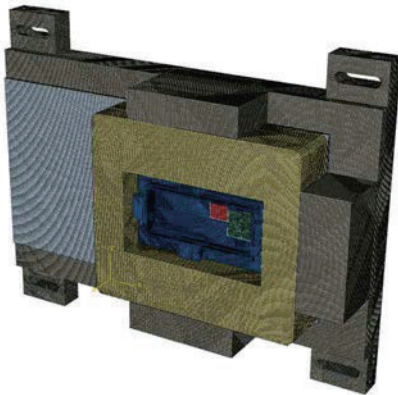


Fig. 3 Thermal analysis model of TR module

열해석 모델은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용해 구성하였다. 요소는 해의 수렴성 및 정확도가 우수한 3차원 8절점 열전달 요소(DC3D8)를 이용, 절점은 285,611개 그리고 요소는 225,673개로 모델링하였다. 각 부품의 연결은 타이(tie) 조건을 이용하였다. 해석 모델의 각 부품 별 열적 물성치는 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1 Thermal properties of the components

Component	Material	Thermal conductivity [W/mK]	Specific heat [J/kgK]	Density [kg/m ³]
Housing	KOVAR	17	439	8,360
Lid	KOVAR	17	439	8,360
CuW block	CuW	190	174	16,300
PCB	HTCC	18	850	3,600
HPA	GaN	65.6	700	6,100
Circulator	GaN	65.6	700	6,100
JIG	AL6061	167	896	2700
JIG PCB	FR-4	1	1150	1800
Pogo pin	AL6061	167	896	2700

지그가 298 K으로 유지되는 조건에서 HPA와 서큘레이터의 발열량(W/m³)을 부여하였다. Fig. 4는 정상상태 열 해석 결과로 HPA와 서큘레이터에서 각각 최고 온도 320 K 그리고 306 K으로 확인되었다. Fig. 5는 고발열 소자인 HPA에서 지그까지의 온도 분포를 보여주고 있으며, Eq. 2를 이용하여 치구부터 발열 소자까지 총열저항은 1.399 K/W로 계산되었다. Fig. 6은 서큘레이터부터 지그까지의 온도 분포를 보여주며, 서큘레이터의 열저항은 261.667 K/W로 예측되었다.

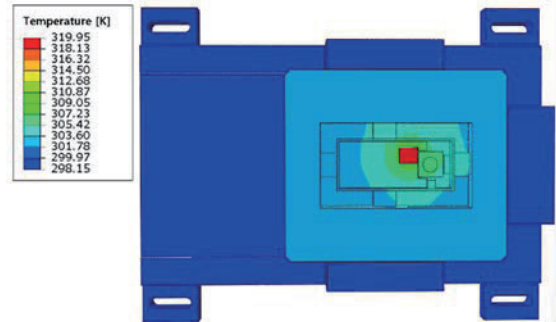


Fig. 4 Steady-state thermal analysis result

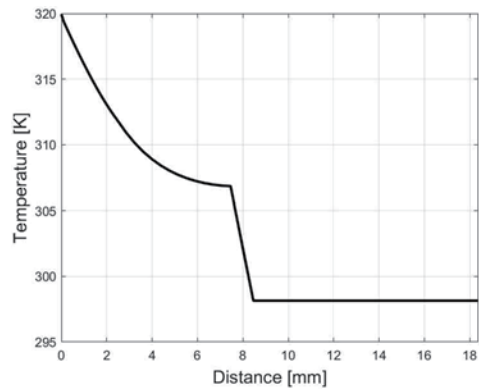


Fig. 5 Temperature profile from HPA to jig

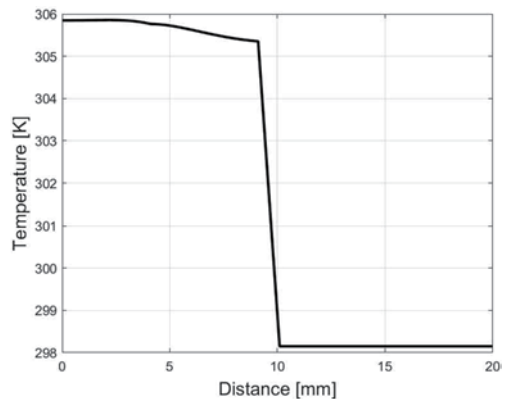


Fig. 6 Temperature profile from circulator to jig

계산된 열저항을 이용하여 표준 테스트 MIL-STD-883(Method 1010)[7]의 고온(398 K) 정상상태 (steady-state) 열해석을 수행하였다 (Fig. 7). HPA에서는 411.4 K 그리고 서클레이터에서는 398.18 K의 최대 온도가 발생하였다. HPA와 서클레이터의 접합부 온도는 Eq.1을 통해 각각 433.25 K 그리고 406.03 K으로 예측되었다.



Fig. 7 Steady-state thermal analysis for TR module with high temperature case (398 K)

MIL-STD-883 (Method 1010) 열주기 해석은 해석 대상이 고온(398 K)과 저온(218 K) 환경을 겪는 시험으로 온도지속시간 10 mins, 온도 조정시간이 2 mins인 시험이다. 해석은 상온에서 저온과 고온 그리고 다시 상온으로 오는 주기를 1 cycle로 하여 100 cycle을 수행하였다.

Figure 8은 100 cycle중 마지막 cycle에 대한 과도 열해석 결과이다. 해석은 열주기 시험 장비의 내부 공기가 고온과 저온으로 주기적으로 변하는 대류 조건을 고려하여 HPA와 서클레이터에서는 각각 407 K 그리고 398 K의 최대온도가 확인되었다. 고온조건에서의 정상상태해석과 유사한 소자 온도가 확인되었다.

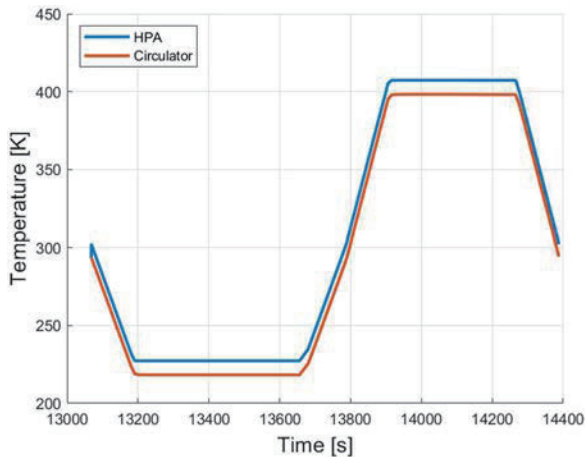


Fig. 8 Transient thermal analysis for TR module with thermal cycle

극한의 상황을 고려한 정상상태 열해석과 과도 열해석 간의 소자의 최대온도 차이가 크지 않은 것으로 보아 정상상태 열해석을 통하여 소자의 온도 예측을

효율적으로 수행할 수 있을 것으로 예측된다. 해석결과 소자에 상대적인 고온이 유지됨을 알 수 있고, 생존성을 보장받기 위해서는 추가적인 방열구조가 필요할 것으로 사료된다.

2.2 구조해석 및 진동해석

TR 모듈의 진동해석에 필요한 재료 물성은 Table 2에 정리되었다. 구조해석 모델은 3차원 8절점 솔리드 요소 (C3D8)요소를 이용, 절점은 285,410개 그리고 요소는 225,583개로 구성되어 있다 (Fig. 9). TR 모듈의 하우징 바닥면을 고정, 부품 간의 연결은 ABAQUS 프로그램 상의 타이(tie) 조건을 적용하였다. Fig. 10은 TR 모듈에 대한 고유진동수 해석 결과를 보여주고 있다. 1차 고유진동수는 3,567.4 Hz, 2차 그리고 3차 진동수는 각각 4,000.5 Hz 그리고 5,024.9 Hz로 확인되었다.

Table 2 Materials applied to the components

Component	Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m ³]
Housing	KOVAR	140	0.3	8,360
Lid	KOVAR	140	0.3	8,360
CuW block	CuW	300	0.3	16,300
PCB	HTCC	310	0.23	3,600
Circulator	GaN	295	0.19	6,100
HPA	GaN	295	0.19	6,100

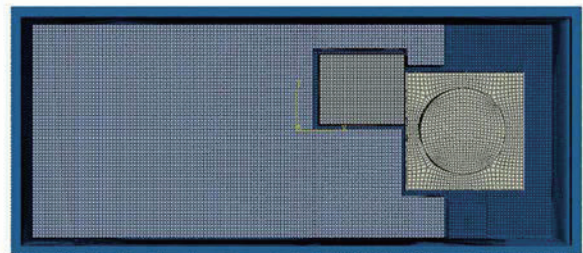
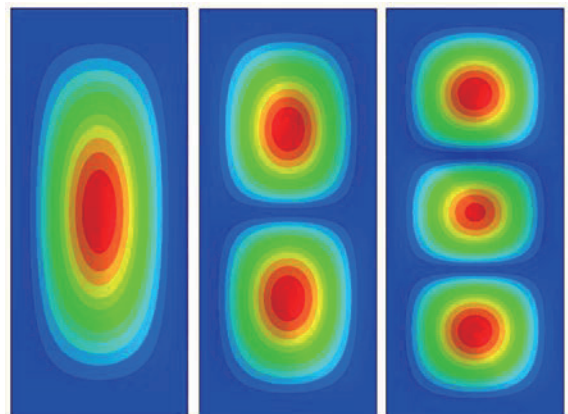


Fig. 9 Structural and modal analysis model of TR module



$f_1 = 3567.4 \text{ Hz}$ $f_2 = 4000.5 \text{ Hz}$ $f_3 = 5024.9 \text{ Hz}$

Fig. 10 Modal analysis of TR module

진동해석은 표준 테스트 MIL-STD-883의 등가속도(method 2001) 그리고 정현진동(method 2007) 시험을 이용한다. 등가속도 시험은 충격 및 진동시험에서 발견되지 않는 구조적, 기계적 취약성을 확인하기 위해 진행되며, 해석 조건은 시험조건 A에 해당하는 가속도 5,000 g를 X, Y 그리고 Z 방향에 각각 적용하여 정적(static) 해석을 수행한다[3, 5]. 정현진동 시험은 특정 진동환경에서 내부소자에 끼치는 영향을 확인하기 위해 진행되며 시험조건 A의 최대가속도 20 g로 20~2,000 Hz로 변화하는 진동수의 정현과 하중조건을 적용하여 정상상태 동해석을 수행한다[7, 8].

Figure 11은 Z 방향 등가속도(5,000 g) 해석 결과를 보여주고 있다. 두께가 얇은 리드 부분에서 최대 0.13 mm의 변형이 발생하였고, 모듈 내 PCB 그리고 소자에는 미소한 변형이 관측되었다. 각 부품 별 접합부에서 발생하는 최대전단응력을 통해 접착제가 사용되는 부분의 안전성을 확인하였다(Figure 12). 최대 전단응력은 56.15 MPa로 확인되었으며, TR모듈에 사용될 접착제(CT2700R7S)의 경우, 전단 강도(strength)가 20 MPa로 안전성을 고려하여 접착성능을 위한 추가적인 물성이 확보가 필요하다.

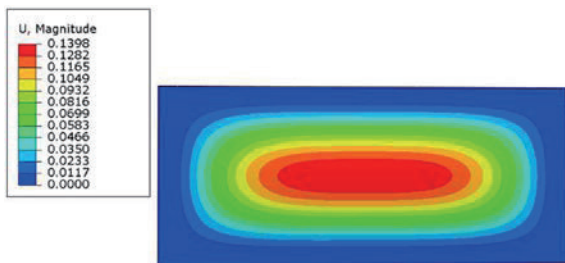


Fig. 11 Constant acceleration result



Fig. 12 Maximum shear stress contour

3. 결 론

본 논문에서는 TR 모듈 구조의 유한요소 모델을 개발하고 열 그리고 구조적 안전성 확보를 위해 표준 테스트 MIL-STD-883의 시험 기법 기반의 열 그리고 구조진동

해석을 수행하였다. TR 모듈의 열 진공 시험을 위해 열저항을 산출하였으며, 소자의 부하 경감 온도 조건을 고려한 소자의 열적 안전성을 확인하고, 발열소자의 열적 안전성 확보를 위해 추가적인 방열구조 설계가 필요하다. 소자의 구조적 안전성 확인을 위해 등가속도 그리고 정현진동 해석 수행하였다. TR모듈의 고유진동수 해석을 통해 TR 모듈의 고유진동수를 확인하였으며, 이는 TR모듈의 크기 및 제약조건에 의한 영향으로 확인된다. 정현진동해석결과 2,000 Hz까지의 외부가진에 대하여 구조물은 안전한 것을 확인할 수 있었다. 높은 등가속도 환경에서는 접합부에 대한 안전성을 확보가 필요하다. 본논문에서는 표준 테스트 MIL-STD-883의 시험 조건을 바탕으로 시험 전 유한요소 해석 모델 구축을 통해 사전 안전성을 검토하고 수행 문제점을 발견 수정을 통한 시험 비용 절감을 기대할 수 있다.

후 기

본 논문은 2021년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-21-029).

References

- [1] J.H. Park and J.H. Lee, "Fan Unit Design Technology for Electronic Equipment Cooling," *Journal of the KSME*, vol. 36, no. 4, pp. 324-337, 1996.
- [2] H.J. Yang, Y.R. Lee, S.M. Cho, K.D. Yu and J.P. Kim, "The Design Method of TR Module Based GaN for Satellite," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 50, no. 1, pp 31-38, 2022.
- [3] ECSS-Q-ST-30-11, Derating - EEE components, ESA Requirements and Standards Division
- [4] T.W. Kang, Y.J. Song, M.J. Lee, Y.H. Ham, Y.W. Seong, T.C. Cho, K.M. Back, S.H. Park, H.W. Suh, Y.S. Nam and J.H. Kim, "A Study of the Development of Defense Space Standardization and Qualification System," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 2023, no. 4, pp 776-777, 2023.
- [5] J. H. Park, H.S. Kim, H.S. Ko, B.C. Jin and H.K. Seo, "Experimental Verification of Heat Sink for FPGA Thermal Control," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 42, no. 9, pp. 789-794, 2014.
- [6] B.G. Chae, Y.K. Lee, S.J. Kang, S. Y. Jang and H.U. Oh "Evaluation of Thermal Stability of Electro-Optical

Camera Controller Box for Compact Advanced Satellite,”
Journal of Advanced Engineering and Technology, vol. 10,
no. 2, pp. 185-190, 2017.

[7] MIL-STD-883, Test method standard for microcircuits
(Revision H), United States Department of Defense, USA

[8] P. S. Speicher, “VLSI Package Reliability,”
Microelectronics International, vol. 8, no. 3, pp. 11-17,
Sept 1991.