

7 tonf 급 소형 액체로켓엔진 조립 체계 연구

문인상¹ · 문일윤¹ · 정은환¹ · 박순영^{1,†}

¹한국항공우주연구원 발사체엔진팀

Research on the Assembling Process of 7 tonf Class Small Liquid Rocket Engines

In Sang Moon¹, Il Yoon Moon¹, Eun Hwan Jeong¹ and Soon Young Park^{1,†}

¹Launch Vehicle Engine Team, Korea Aerospace Research Institute

Abstract

Liquid rocket engines (LREs) are very complex systems that include combustion chambers, turbopumps, gas generators, ducts and tubes, valves and etc. Most components of the LREs require higher than or equal to level 6 IT (ISO Tolerance). The components along with pipe line and/or tubing must dispose not to interfere each other. In addition, effectiveness of maintenance and service after assembling should be considered when the allocation of the components are determined. Especially at the stage of the development, tolerance accumulations or unpredictable errors may result in misalignment and/or mismatches at interfaces of the parts. Namely, it is the engine assembling process that many inherent risks are realized and crises or incidents occur. Therefore, a rapid reaction system should be prepared. In this research, 7 tonf class liquid rocket assembling process was studied and actual building steps were introduced.

초 록

액체로켓엔진은 연소기, 터보펌프, 가스발생기, 각종 밸브 및 배관, 조인트, 오리피스, 튜브, 하니스, 센서 등이 결합되어있는 매우 복잡한 시스템이다. 대부분의 액체로켓엔진 부품은 IT(ISO Tolerance) 기준으로 6등급 이상의 높은 정밀도를 요구하며 정상운용 전후 시동과 종료 등과 같은 비정상 시의 응답에도 대응해야한다. 따라서 엔진 시스템 및 부품은 넓은 영역에서 안정적으로 동작할 수 있도록 설계되어야 하며 조립은 이러한 설계철학을 충실히 반영하여야 한다. 엔진 설계 시에는 부품 간에 물리적 혹은 기능적 간섭이 없도록 공간배치를 해야 하며 조립 중 조립성과 조립 후 유지보수의 효율성까지도 고려되어야 한다. 특히 양산품이 아닌 개발 단계에서는 조립 중 부품 간 공차의 누적, 각종 구성품의 비정렬, 부품 인터페이스 간의 불일치 등이 발생할 수 있다. 즉, 엔진조립공정은 개발 중 내재되어있는 각종 위험이 현실화 되는 위기 혹은 예상치 못한 사건(incident)이 발생하기 쉬운 작업이다. 그러므로 조립 중 사건이 발생했을 경우를 대비한 신속한 대응시스템이 구비되어야한다. 이 연구에서는 위에서 언급한 사항들의 기본적 대응방법과 한국형발사체에 탑재되는 7 tonf 급 엔진의 실제 조립공정을 다루었다.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Engine Assemble(엔진조립), Engine Build(엔진조립), Allowance Control(공차관리), Assembling Process(조립공정), Acceptance Tests(수락시험)

1. 서 론

액체로켓엔진은 연소기, 터보펌프, 가스발생기, 각종 밸브 및 배관과 더불어 조인트, 오리피스, 튜브, 하니스, 센서 등이 결합되어있는 매우 복잡한 시스템이다. 한국형발사체에 사용되는 엔진은 케로신과 액체산소를 추진제로 사용하므로 3000°C 이상의 고온과 -183°C의 온도가 동시에 작용하여 열에 의한 수축과 팽창이

Received: Feb. 17, 2017 Revised: Aug. 28, 2017 Accepted: Aug. 30, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-42 860-2582, E-mail: psy@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

발생한다. 또한 시스템의 특성상 고정부와 구동부가 공존하며 엔진효율이 매우 중요하기 때문에 소재와 형상이 견딜 수 있는 극한점까지 엔진을 설계한다. 그러므로 제작과 조립 시에 많은 주의가 요구된다. 더욱이 엔진 작동 시에는 비교적 높은 레벨의 진동이 발생하므로 이에 대한 대비도 충분히 이루어져야 한다.

대부분의 액체로켓엔진 부품은 IT (ISO Tolerance) 기준으로 6등급 이상의 높은 정밀도를 요구하며 이는 자동차 엔진, 로봇 구동부 등 정밀기기에 주로 사용되는 정밀도 중에서 최상위 정밀도이다[1]. (4등급 이하는 정밀측정기 혹은 케이지 등에 소요되는 등급이다.) 그리고 정상운용 전후 시동과 종료 등과 같은 비정상 시의 응답에도 대응해야한다. 따라서 이와 같은 넓은 영역에서 엔진이 안정적으로 동작할 수 있도록 설계되어야하며 조립은 설계철학을 반영하여 수행해야한다. 또한 배관 혹은 튜브와 기타 라인들의 배치가 다른 부품과 물리적 혹은 기능적 간섭이 없도록 공간 배치가 이루어져야하며 조립성과 배치의 효율성, 유지보수의 편의성 등 역시 고려되어야 한다[2]. 따라서 엔진 조립을 실질적으로 수행하기 전에 엔진시스템 차원에서의 연구와 검토[3]가 절대적으로 필요하다.

특히 양산품이 아닌 개발 단계에서 조립 중에는 부품 간 공차의 누적, 구성품을 담당하고 있는 팀 간의 오해 등으로 인하여 비정렬이나 부품 인터페이스 간에 불일치 등이 발생할 수 있다. 즉, 엔진조립공정은 개발 중 내재되어있는 각종 위험이 현실화 되는 위기(crisis) 혹은 예상치 못했던 사건(incident)이 발생하기 쉬운 작업이다. 그러므로 조립 중 사건이 발생했을 경우 중단(disruption), 손실(loss), 비상(emergency), 위기(crisis) 등으로 발전하지 않도록 신속 대응시스템이 구비되어야한다.

구성품의 전달이 늦어지거나 어떠한 위기 혹은 사건이 발생하여 이를 해제하기 위한 물적 혹은 시간적 자원이 필요할 경우 등에는 엔진 조립 지연사유가 발생한다. 이러한 경우에 대비하여 총 조립지연기간이 최대수용가능정지시간(maximum acceptable outage, MAO)을 넘지 않도록 조립프로세스의 유연성을 확보해야한다. 이는 조립프로세스의 순서에 변화가 생기는 것을 의미하나 이로 인해 형상에 변화가 생겨서는 안된다. 만일 형상에 변화가 생기게 되면 이는 당연히

형상관리위원회의 승인절차를 거쳐야하므로 또 다른 지연요소가 되며 MAO에 중대한 영향을 미치게 된다.

엔진을 조립하면서 하나의 모듈이 완성되면 완성도 검사를 위해 요구되는 시험을 수행해야한다. 이 시험은 주로 각 부위별 기밀시험과 짐벌 엔진이라면 간단한 작동시험을 포함한다. 엔진은 저압부와 고압부가 혼재하기 때문에 시험은 복잡한 절차에 따라 수행된다[4]. 단, 엔진조립공정 내에서 짐벌 시험은 짐벌 구동시 간섭현상 배제가 목적이므로 짐벌의 특성 파악은 별도의 시험을 통해 확보한다.

액체로켓엔진조립체계는 단순한 조립공정이 아닌, 부품의 조달, 검사, 조립, 연결부위의 기밀시험, 동작부의 동작 시험, 완성품 검사, 불일치 사건이 발생했을 경우의 해소 등을 망라하는 종합프로세스이다. 이 연구에서는 엔진 조립을 단순한 부품조달과 조립과정으로 보지 않고 조립체계라는 관점에서 접근하였다. 즉, 엔진 조립의 준비과정부터 실제 엔진 조립 그리고 조립 상에서 발생할 수 있는 예상치 못한 사건을 신속하고 효과적으로 대응하는 방법에 대해 다루었다. 이러한 체계는 한국형발사체에 탑재되는 모든 엔진에 적용되었으나 이 논문에서는 7 tonf 급 엔진의 조립 과정을 그 예시로 소개하였다.

2. 엔진 조립 공정

2.1 7 tonf 액체로켓엔진

7 tonf 급 액체로켓엔진은 한국형발사체의 3단에 사용될 엔진으로 한국형발사체개발사업 1단계를 통해 초도품이 개발되었으며 현재는 2호기 시험을 마친 상태이다. 7 tonf 급 엔진의 대략적인 개발 규격은 다음 Table 2과 같다[5].

Table 2 Specification for a 7 tonf liquid rocket engine [5]

항 목	값
진공추력 [tonf]	6.9
진공비추력 [sec]	7.0
연소가스 유량 [kg/sec]	
연소압 [MPa]	7
노즐 출구압 [MPa]	0.005
노즐 팽창비	94.5

이 엔진은 비교적 소형이므로 75 tonf급 엔진과는 별

도의 플랫폼을 마련하여 제작하였다.

2.2 엔진조립 업무 프로세스

액체로켓엔진은 약 1000개 이상의 부품으로 구성되는 복잡한 조립체이므로 각 부품의 조합 구성을 설계하여 이를 효과적으로 조립하고 검증할 수 있는 과정이 필요하다[6]. 이러한 일련의 과정들은 체계적인 절차를 통해서 진행하여야 여러 가지 사유로 유발되는 오류를 최소화 할 수 있다. 이를 위해서 먼저 엔진 총조립과 관련한 WBS(Work Breakdown Structure)를 수립하고 각 항목에 대한 업무활동을 정의해야한다.

엔진조립 WBS는 엔진조립의 계획과 통제의 핵심 프로세스로 이를 통해 조립에 필요한 시간, 원가, 인적 자원 등의 분배가 이루어지며 또한 위험식별 체크리스트로도 활용이 가능하다. 그리고 WBS는 엔진 조립을 위한 OPA(organizational process assets)와 업무범위, 업무 수행 계획 등을 고려하여 작성한다. WBS의 최하위 단위는 work package라하며 work package는 WBS 작업의 산출물(deliverable)이 된다. 엔진조립관련 업무활동은 다음 Table 3[7]에 명기하였다.

Table 3 Activities for Engine Assemble

업무구분	수행업무내용
1 엔진 시스템 3D 모델링 및 부품 관리	<ul style="list-style-type: none"> 부품/조립품 목록 작성 및 관리 시스템 레이아웃 작성 조립용 부품 모델링 엔진 시스템 통합 모델링
2 엔진 시스템 조립 도면 구축	<ul style="list-style-type: none"> 조립도면트리 작성 조립도면 부품목록 작성 조립/장착도면 작성
3 조립 검사/시험 수행	<ul style="list-style-type: none"> 검사/시험항목 정의 시험계획 수립 시험 절차서 작성
4 시험용 치구 개발	<ul style="list-style-type: none"> 시험용 치구 운용개념 구축 시험용 치구 설계 시험용 치구 제작
5 엔진조립 기술/공정 개발	<ul style="list-style-type: none"> 조립 작업 표준/지침 작성 조립 형상정의서 작성 조립 다이어그램 작성 조립 공정서 작성 엔진 조립
6 엔진조립 치구/설비 개발	<ul style="list-style-type: none"> 조립 치구/설비 운용개념 구축 조립 치구/설비 설계 조립 치구/설비 구조안정성 해석 조립 치구/설비 제작

7 인터페이스 관리 치구 개발	<ul style="list-style-type: none"> 인터페이스 치구 운용개념 구축 인터페이스 치구 예비설계 인터페이스 치구 제작 인터페이스 치구 종합검사
8 엔진 조립 장착/연결 부품 개발	<ul style="list-style-type: none"> 장착/연결 부품 설계 장착/연결 부품 구조해석 장착/연결 부품 제작

엔진조립을 위한 기본적인 흐름도를 Fig. 1과 같이 나타내었다. 먼저 각 엔진은 많은 부품들로 구성이 되므로 각 부품의 PBS (Product Brokdown Structure)를 만들어 관리한다. 이후 각 업무별로 개념을 설정하는 단계로 엔진의 3D CAD 모델, 총조립 프로세스, 각종 시험 방법, 조립 설비 및 치구 등에 대한 기본적인 개념을 구축한다. 다음 단계로 엔진의 3D CAD 모델, 총조립 프로세서, 각종 시험 방법, 조립 설비 및 치구 등에 대한 상세 절차 및 설계를 진행하게 된다. 이 후로 상세 설계된 각 치구 및 부품에 대한 제작이 이루어지고 각 주요 부품들의 납품이 이루어진다. 납품된 부품과 치구 등을 이용하여 엔진의 조립이 이루어지고 조립 중 혹은 조립 후 각종 검증시험을 실시한다. 이러한 일련의 과정이 성공적으로 수행된 이후 비로소 엔진조립이 완료된다.

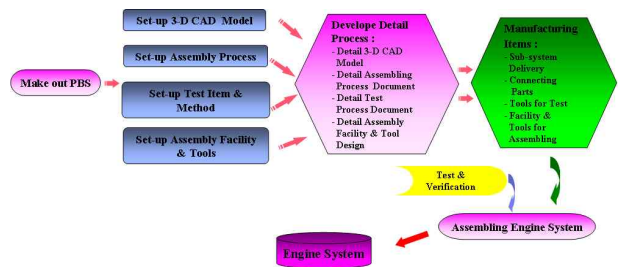


Fig. 1 A flow chart for engine assemble [7]

Table 2의 항목을 살펴보면 엔진조립 단독으로 수행한다기보다는 설계팀과의 긴밀한 협조가 있어야 한다는 것을 알 수 있다. 박순영 등[8]에 의하면 실제 7 tonf급 엔진은 구성품의 종류에 따라 14개로 나누어 조립이 이루어졌으나 엔진조립장의 상황을 고려하여 Table 3과 같이 수정되었다. Table 3의 200번 대 공정은 Table 2에서 추가된 부분인데 이는 누적공차에러가 발생하기 쉬운 길이가 긴 배관을 미리 맞춰보고 오차를 수정하여 본 조립 시에 투입하기 위함이다.

Table 4 Engine assembling process

공정 번호	공정명	상세내역
100	입고검사	<ul style="list-style-type: none"> 형상검사 슬레노이드밸브/체크밸브 기밀 검사
200	예비조립	<ul style="list-style-type: none"> 연소기, 터보펌프 예비조립 고압배관 예비조립
300	메인 프레임 조립	<ul style="list-style-type: none"> 연소기, 터보펌프 본조립 고압배관조립 가스발생기, 파이로시동기 더미조립 TVC 구동 유압라인 조립 기밀시험 Step 1, 2
400	단열재 조립	<ul style="list-style-type: none"> 극저온 단열재 조립 고온부 단열재 조립 각종 튜브라인 조립
500	튜브라인/터빈배기덕트 조립	<ul style="list-style-type: none"> 기밀시험 Step 3 터빈배기덕트 조립 RCS 조립 정압유도관 조립
600	센서장착	<ul style="list-style-type: none"> 기밀시험 Step 4 수행 온도센서 장착 압력센서 조립 가속도센서 조립 변형량 센서 조립 하네스 단열
700	하네스 조립	<ul style="list-style-type: none"> 하네스 조립 하네스 점검시험
800	수락검사	<ul style="list-style-type: none"> 기밀시험 Step 5 수행 밸브 기능시험 수행 무게, Envelope 측정
900	엔진 납품	<ul style="list-style-type: none"> 이송모드 전환 이송치구 장착

2.2 7 tonf 엔진 조립

엔진은 휴먼에러를 줄이기 위해서 사전에 준비된 조립절차서에 의거하여 조립 및 확인 절차를 거치게 된다. 또한 각 공정이 완료된 이후에는 Table 4에 명기된 바와 같이 해당 항목의 결과물이 도출되어야 한다. 예를 들어 공정 300번의 메인프레임 조립이 끝나면 각 부위 조립결과서와 기밀시험 Step 1, 2의 시험결과서가 산출되어야 한다. 다음은 추력프레임을 조립하는 절차로서 엔진 조립의 일예이다.

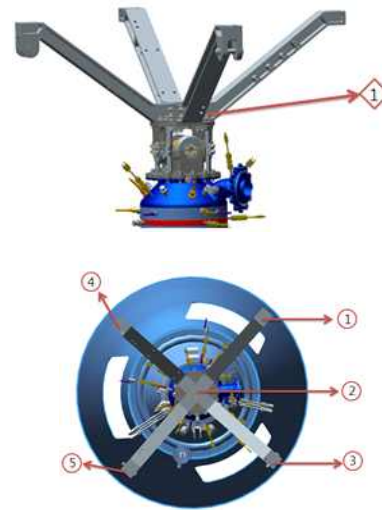


Fig. 2 Thrust frame

Table 5 Thrust frame parts

No.	품번	품명	수량
①	214270*****	추력프레임-1	1
②	214270*****	추력프레임-2	1
③	214270*****	추력프레임-3	1
④	214270*****	추력프레임-4	1
⑤	214270*****	추력프레임-5	1
◇	AS3*****	190-32UNF-2B	16

Table 6 Truss frame assembling procedure

절차	조립 내용
1	추력프레임 조립을 위해 해당 부품과 체결부품을 준비
2	추력프레임을 짐벌마운트 상단에 조립
3	TVC 구동기 지지대와 조립되는 방향을 맞춘 뒤 볼트 16개를 체결 추력프레임 조립 전 자체 높이 4개소를 측정 및 기록하고, 조립 후에는 연소기 바닥 면에서 추력프레임의 상면까지 높이를 3차원 측정기 또는 하이트 마스터를 이용하여 측정/기록
4	추력프레임 조립 후 TVC 구동기 더미가 조립되는 Hole간의 거리를 측정/기록

Table 5는 각 프로세스를 조립하기 위한 절차를 나

타내었으며 이외에 조립되는 부품의 성격에 따라서 나사조임토크, 간격게이지 사용여부, 방향성확인 등의 절차가 추가된다. 볼트를 사용하는 체결부위는 다음 Table 6와 같이 단계적으로 토크를 적용하고 제작서에 표기한다. 보다 자세한 내용은 박순영 등[8]에 소개되었다. Fig. 3은 트러스를 예비조립하고 각 인터페이스의 위치측정을 위해 정반에 올려놓은 상태이다.

Table 7 Torque applied

기준	기준 값
기준토크 33%	
기준토크 66%	
기준토크 100%	
적용 토크	
SAFETY WIRING	<input type="checkbox"/> 확인

해당 공정의 조립이 끝나면 Table 7과 같이 조립완료 확인표를 작성한다. 모든 조립절차는 이와 유사한 로직으로 수행된다.



Fig. 3 Engine truss

Table 8 A confirmation table

*** 공정 특이사항 및 완료 확인 ***
해당 공정이 적합하게 완료되었음을 확인합니다.

클라이언트	o o o	o o o
클라이언트	o o o	o o o
항공우주연구원	o o o	o o o
특이사항		

추진제라인과 각종 유공압 라인이 조립되면 위의 조

립절차와는 별도로 부위별 기밀검사를 수행한다. 엔진에 조립된 부품은 이미 개발된 물품이므로 각 단품에 대한 기밀보다는 연결부위의 기밀을 확인하는 것이 목적이다. 또한 엔진에는 저압부와 고압부가 혼재하므로 이에 따라 기밀시험은 저압 헬륨을 사용한다. 기밀시험의 자세한 내용은 김상호 등[4]를 참고하기 바란다.

엔진 조립 중 기밀시험을 제외한 출고 전 납품검사 항목은 다음과 같다.

Table 9 Check lists before engine release

번호	항목
1	<ul style="list-style-type: none"> • 하니스 관련 확인검사 • 착화기 검사 • 각종 솔레노이드 밸브 작동 검사 • 유량제어밸브 구동 검사
2	<ul style="list-style-type: none"> • 각종 센서 검사 • 터보펌프 회전수 센서 검사 • LVDT 움직임 확인 • 스트레인 게이지 저항값 확인
3	<ul style="list-style-type: none"> • 공압밸브 검사 • 각종 밸브 작동 시험
4	<ul style="list-style-type: none"> • 조립 후 기밀시험 • LOx, Fuel 배관부위와 연소기 터보펌프 부위 등을 나누어 시험
5	<ul style="list-style-type: none"> • 엔진 및 고정/이송치구 무게 측정

모든 검사항목을 마치면 다음 그림과 같이 비로소 엔진이 완성된다. 엔진이 완성된 이후에는 시험을 위하여 포장하고 이송 준비를 마친다. 다음 Fig. 4와 Fig. 5은 각각 엔진 3D 다이어그램과 컨테이너 덮개를 덮기 전 이송치구에 올려놓은 엔진 모습이다.

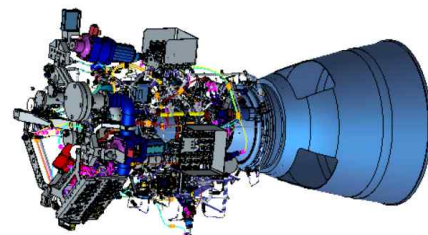


Fig. 4 7 tonf engine 3D model

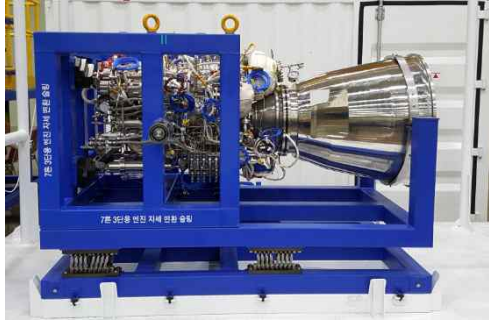


Fig. 5 An engine on the transfer table

3. 결 론

지금까지 7 tonf 2G 엔진을 통해 액체로켓엔진의 조립 프로세스를 살펴보았다. 엔진 조립은 단순히 부품의 배열이 아닌 일종의 종합 프로세스이다. 특히 개발단계에서의 엔진 조립은 설계나 구성품 제작 시 발견하지 못했던 문제점들이 나타나는 공정이기 때문에 예상치 못한 원인으로 인하여 지연사유가 발생한다. 그러므로 이런 지연사유로 인하여 MAO를 초과하지 않도록 조립공정을 수립해야하며 설계팀과의 꾸준한 피드백이 이루어져야한다. 이러한 관점에서 1G에서 사용하였던 조립공정을 개선하였으며 이를 통해 조립지연기간을 줄일 수 있었다.

아직까지 액체로켓엔진 제작은 개발 초기단계이므로 대부분의 부품공차를 매우 엄격하게 관리하고 있다. 그러나 제작의 노하우가 쌓이게 되면 특별히 공차를 관리해야할 부분과 그렇지 않은 부분이 구별될 것이고 향후 이를 구분하여 적절한 관리를 한다면 개발자원이 절약될 것이다. 현재 상대적으로 많은 자원이 소모되는 풀림방지 장치나 조립 중 시험 역시 개선과 보완을 통해 보다 접근하기 쉬운 방법을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2016 추계한국항공우주시스템공학회 발표 논문을 수정, 보완한 것임

References

- [1] [http://dasan.sejong.ac.kr/~cad/files/CAD%201/10\(draft\)Dim%20tolerance-up.pdf](http://dasan.sejong.ac.kr/~cad/files/CAD%201/10(draft)Dim%20tolerance-up.pdf)
- [2] Yong-Hyun Chung, Eun-Seok Lee, Cheul-Woong Kim and Insang Moon, "Assembly for an Engineering Model of a Liquid Rocket Engine," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 5. No.1, pp. 132-139, 2006.
- [3] Yong-Hyun Chung and Eun-Seok Lee, "Study of Lay-out Design Concept for Liquid Rocket Engine System," *J. of Aerospace System Engineering*, Vol. 1. No. 4. pp. 42-45, 2007.
- [4] Sang-ho Kim, Soon-Young Park, Ok-koo Kim, Won-kook Cho, "A Study on the Leak Testing Method during the Assembling Process of a Liquid Rocket Engine," *44th 2015 KSPE Spring Conference*, pp. 792-795, 2015.
- [5] Seung-Han Kim, Yong-Gap Chung, Seung-Won Wang, Yoon Seok So and Yeung-Min Han, "Development of 3rd Stage Engine Test Facility for KSLV-II Propulsion System," *40th 2013 KSPE Spring Conference*, pp. 451-455, 2013.
- [6] Fastrac 60K Engine Operations and Maintenance Manual Vol. V: Servicing Procedures, Mission Operations Lab., 1999.
- [7] Lee, Soo Yong and 37 people, "Research on the Performance Enhancement of a Turbopump Fed Liquid Rocket Engine," Report of Fundamental Research of 2008, 2008.
- [8] Soon-young Park, Jong-Han Kim, Eun-Hwan Jung, "Introduction on the Assembly Process of KSLV-II 7 tonf Thrust Level Engine," *46th 2015 Spring Conference*, pp. 773-780, 2015.