

ORIGINAL ARTICLE

기존 운행선 직하부 통과 굴착에 따른 Gripper TBM 지보패턴 합리화 방안

소학영¹, 조국환^{2*}

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정, ²서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수

Rationalization of Gripper TBM Supporting System Pass through Serviced Subway Line

Hak-Young So¹ and Kook Hwan Cho^{2*}

¹Ph.D. Student, Department of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Full Professor, Department of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science and Technology

*Corresponding author: khcho@seoultech.ac.kr

Received: August 5, 2024

Revised: August 13, 2024

Accepted: August 19, 2024

ABSTRACT

When planning gripper TBM, which is highly applicable to urban areas, the excavation characteristics are not considered. In addition the excavation stability and constructability are degraded by installing reinforcements in the adjacent construction site considering the relaxation load theory of the pre-existing NATM. In this study, a rationalization plan for the support was proposed considering the excavation characteristics of gripper TBM when planning reinforcements for adjacent pre-existing construction. The effect of excavation on the surrounding ground was analyzed by conducting three-dimensional stability analyses considering the construction stage for each excavation phase. In NATM, relaxation phenomenon is concentrated in tunnel face due to non-supporting time occurring simultaneously with excavation, but gripper TBM supports the ground around the tunnel face through the cutter head and skin plate, simultaneously causing ground relaxation behind the skin plate. Considering these excavation characteristics, problems in reinforcement planning for adjacent construction at the study site were pointed out. A performance improvement plan for a reasonable supporting system was proposed.

Keywords: Gripper TBM, Supporting system, Face reinforcement, Adjacent construction

초록

도심지 터널에 적용성이 우수한 Gripper TBM 계획시 굴착공법 특성을 반영하지 않고 기존 NATM 터널의 지반이완 개념의 보강계획을 준용하여 굴착안정성 및 시공성이 저하되는 문제를 발생시키고 있다. 본 연구에서는 도심지 근접시공에 따른 보강계획시 Gripper TBM 굴착공법 특성을 고려한 지보계획의 합리화 방안을 제안하고자 하였다. 이를 위해 굴착공법별 시공조건을 고려한 3차원 안정성 검토를 수행하여 굴착에 따른 주변지반에 미치는 영향을 분석하였다. NATM공법은 굴착과 동시에 무지보 자립시간이 발생되어 굴진면에 지반이완이 집중되었으나, Gripper TBM은 커터헤드와 스킨플레이트를 통해 굴진면 주변지반을 지지하므로 스킨플레이트 후방에 지반이완이 발생되었다. 이러한 굴착공법 특성을 고려하여 연구대상현장의 근접시공에 따른 보강계획의 문제점을 지적하고 Gripper TBM 굴진안정성 및 시공성 등을 고려한 합리적인 지보패턴 개선방안을 제안하였다.

핵심어: 그리퍼 TBM, 지보패턴, 굴착면 보강, 근접시공



1. 서론

서울특별시와 같은 대규모 인구 밀집 지역은 원활한 교통과 사용자 편의를 위해 지하철 및 도로 등의 수많은 도심지 터널이 계획되고 있다. 도심지 터널은 과거에는 심도가 얇은 지하 공간에 적용되어 왔으나, 현재에는 효과적인 노선계획과 기존 지하구조물과의 근접시공 등을 고려하여 서부간선 지하도로(도로)와 신안산선(철도) 등과 같은 대심도 터널이 계획되고 있다.

일반적으로 지표면으로부터 심도 20~30 m에서 암반이 출현하고, 심도가 깊어질수록 보다 양호한 암반이 출현한다. 이러한 대심도 특성을 고려하여 경암반구간에서 굴착속도가 빠르고 소음·진동에 따른 환경영향을 최소화하여 도심지 생활민원을 극복할 수 있는 Gripper TBM이 각광받고 있다. Gripper TBM은 원형 굴착장비를 이용하여 암반을 압쇄 및 절삭함으로써 기존 화약발파공법인 NATM공법 대비 여굴 및 지반의 소성영역을 최소화할 수 있는 굴착공법이다. 또한, NATM공법과 동일한 지보재(숏크리트 및 록볼트 등)를 통해 굴착면을 안정화시키며 첨단화 TBM 장비 도입으로 자동화 시공이 가능하다.

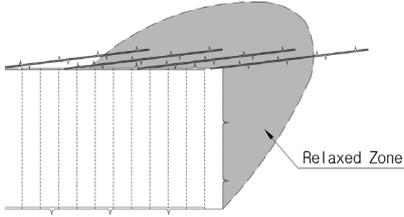
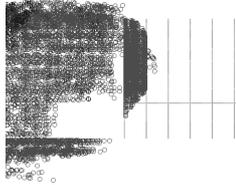
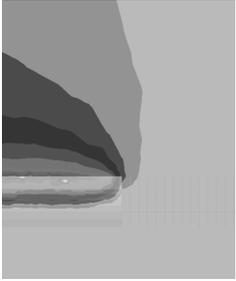
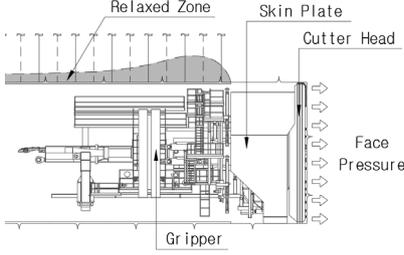
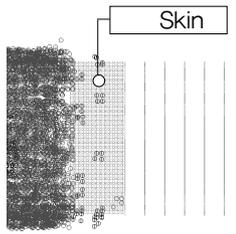
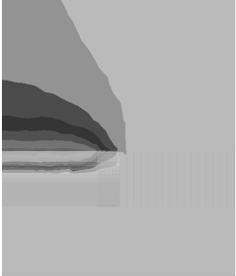
도심지 구간 터널 계획시 굴착안정성 뿐만 아니라 기존 구조물 영향을 반드시 고려하여야 한다. 특히 지하철 등의 지하구조물을 하부통과하는 경우, 대심도 터널이라 할지라도 기존 구조물과의 근접시공 조건을 검토하여 기존 구조물의 안정성과 사용성을 확보하기 위한 적절한 보강방안을 수립하여야 한다. 근접시공에 따른 시공사례가 많아지고, 관련 연구 또한 활발히 진행되고 있으나, 대다수가 NATM공법이 대상이며 Gripper TBM과 같은 기계화 시공을 고려한 터널굴착공법 차별화 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 근접시공구간 Gripper TBM의 합리적인 보강방안을 재정립하고자 연구 대상구간을 선정하고 Gripper TBM의 굴착특성을 고려한 지보패턴 합리화 방안을 제안하였다. 이를 위해 굴착공법별 시공조건을 고려한 단계별 3차원 안정성 해석을 수행하여 Gripper TBM 굴착에 따른 주변 지반의 영향을 분석하였다. 또한, Gripper TBM 장비 특성분석을 통해 안정성 증대를 위한 보강공법의 개선점을 검토하였다. 본 연구에서 제안한 지보패턴 합리화 방안을 연구대상현장에 적용하고, 3차원 안정성 해석을 통해 제안 방안에 대한 적정성을 확인하였다.

2. Gripper TBM 공법특성 분석

Gripper TBM은 커터헤드(Cutter Head)를 전진 및 회전시켜 굴착하는 공법으로 발파작업을 배제하여 주변지반의 손상을 최소화할 수 있는 공법이다. 또한 굴진면과 완벽 밀착된 커터헤드와 스킨플레이트(skin plate)를 통해 무지보 구간에 발생될 수 있는 낙반을 방지하고 굴진면에 발생하는 이완영역이 축소된다(Table 1). 이에 반해 NATM공법은 발파굴착 후 무지보 자립이 발생하게 되어 굴진면 주변지반이 이완되므로 필요시 굴진면 안정성을 위한 보조공법(휘폴링 및 강관다단 등)이 적용된다. 이와 같이 주변지반에 미치는 영향은 굴착공법 특성에 따라 상이하다. 본 연구에서는 3차원 안정성 검토를 통해 굴착공법에 따른 굴진면 주변지반의 영향을 검토하였으며, 이를 위해 유한요소법에 기반한 지반해석 범용프로그램인 MIDAS/GTS NX (MIDAS Information Technology Co., 2023)를 적용하여 굴착공법에 따른 시공단계를 모사하였다.

Table 1. Relaxed zone according to excavation method

Category	Relaxed Zone	Analysis Result	
		Plastic Status	Displacement
NATM (W=11.5 m, H=8.2 m)	 <p>Exca → Soft S/C & R/B → Hard S/C</p>		
Gripper TBM (D=11.6 m)	 <p>Exca + Face/Gripper pressure → Soft S/C & R/B → Hard S/C</p>		

본 검토에서 수행된 해석단면은 「수도권광역급행철도 A노선(GTX-A)」의 NATM 복선단면과 Gripper TBM 단면이다. Gripper TBM은 NATM 공법과 동일한 숏크리트 및 록볼트를 주 지보재로 적용하므로 수치해석에서 모사되는 시공단계는 대체로 유사하다. 그러나 굴착하는 단계에서는 Gripper TBM 장비특성을 고려하여 Gripper 지지력과 굴진면압 및 스킨플레이트를 모사하여야 한다. 이때 적용된 굴진면압은 헤드 직경 11.6 m와 연구대상구간의 지반조건 등을 고려하여 32,000 kN를 압력화하여 굴진면 전체에 적용하고, Gripper 지지력은 Gripper 규격(W 1.8 m×H 5.7 m)과 장비추진력 등을 고려하여 43,000 kN를 압력화하여 수치해석에 반영하였다.

검토 결과, NATM 공법은 굴진면 부근에서 종방향으로 소성영역이 발달하였으나, Gripper TBM은 굴진면 부근 소성영역은 미미하고 스킨플레이트 이후부터 터널 주변부에 소성영역이 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 터널 주변지반에 발생된 변위경향을 살펴볼 때, Gripper TBM은 굴진면 변형이 미소한 반면, NATM 공법은 굴진면 상부에서 터널 내부방향으로 변형이 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 단, 본 검토에서는 발파에 의한 충격이 고려되지 않았으므로 실제 NATM 공법에 대한 소성영역과 변형은 보다 크게 발생할 것으로 사료된다. 이완하중 개념 분석과 수치해석을 이용한 주변지반 영향검토를 통해 굴착공법별 상이한 이완개념을 확인할 수 있었으며, 이를 토대로 굴착공법별 적절한 굴진면부 보강방안을 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 즉, NATM 공법은 발파로 인한 굴진면 전방의 이완영역을 고려하여 필요시 휘폴링 등의 보조공법을 적용하고, Gripper TBM은 커터 헤드 및 스킨플레이트를 통해 굴진면을 지지함으로 굴진면 보강보다는 스킨플레이트 후방 주변부의 이완영역을 고려한 보강계획을 수립하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

Table 2. Reinforcement plan based on proximity evaluation

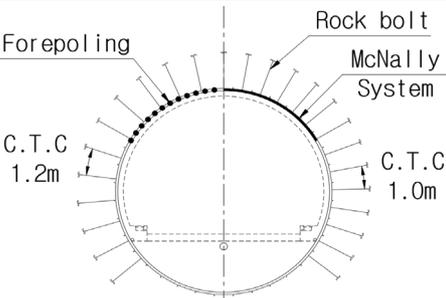
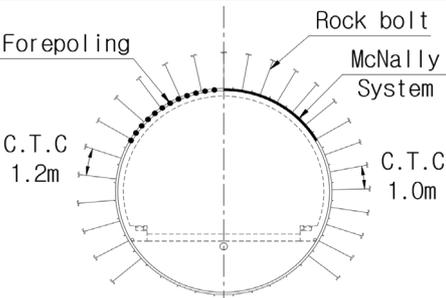
Category	Support pattern	Reinforcement
Limit range	PTD-5	Steel pipe grouting
Attention range	Rock mass grade I ~ II → upgraded by 1 pattern	Rock mass grade I ~ III → Forepoling
	Rock mass grade above III → PTD-5	Rock mass grade IV → Steel pipe grouting

근접도 평가시 보호층을 포함한 이격거리를 적용하여 관련 기준 대비 안전측 설계를 수행하였다(Fig. 2). 근접도 평가에 따라 지보패턴을 상향하여 지보량을 증가시켜 터널 안정성을 확보하는 것은 적절한 보강계획으로 판단된다. 그러나, 양호한 암반구간에 휘폴링 및 강관다단 그라우팅 등의 보조공법을 적용할 경우 Gripper TBM의 굴진이 중지되어 굴진면 주변의 지반이완을 야기시키므로 굴착안정성이 저하되고, 굴진중지와 더불어 터널 천단부 주변으로 천공작업을 순차적으로 시공해야 하기 때문에 공기 지연 및 공사비가 증가의 요인이 된다(Jeong et al., 2018).

3.3 Gripper TBM 지보패턴 합리화 방안 제안

근접시공 설계사례를 살펴볼 때, 주의시공 범위(Attention range)에 해당할 경우 신설터널에 보조공법을 적용하는 것으로 확인되었다(Lee, 2022). 이는 모두 NATM공법이 적용된 터널에 해당하며, 기존 구조물과의 근접현황 및 지반조건 등을 고려하여 휘폴링, 강관보강 그라우팅 등의 보강이 계획되었다. 여기서, 휘폴링은 일시적인 지보재로서 굴착 전 터널 천단부에 설치하여 국부적인 낙반을 방지하고 굴진면 전방의 지반보호 및 이완을 방지하는 공법이다(Korea National Railway, 2017). 이러한 휘폴링의 적용 목적은 앞서 검토된 Gripper TBM의 이완개념과 다소 상이하며, 특히 양호한 지반에 휘폴링 등의 보조공법 적용시 오히려 굴진안정성 및 시공성이 저하되는 문제점을 야기시키므로 합리적이지 못하다. 본 연구에서는 근접시공에 따른 Gripper TBM 추가보강 계획시 휘폴링을 대체할 보강방안으로 터널 주변부 철근보강 공법인 McNally system을 적용하고 록볼트 횡간격 축소(1.2 m→1.0 m)를 제안 하였다(Table 3). Gripper TBM의 굴착특성에 따라 스킨플레이트 후방의 지반이완을 고려하여 록볼트 추가 설치를 통

Table 3. Re-establishment of supporting pattern (PTD-5)

Category	Existing pattern	Proposed pattern
Section (PTD-5)		
Longitudinal Spacing of R/B	1.2 m	1.0 m
Reinforcement Methods	Forepoling	McNally system

해 주면부 안정성을 향상시키고, McNally system를 적용하여 주면부 안정성 향상 및 낙반방지를 통해 작업자, 장비 안전성이 향상 될 것으로 판단된다(Fig. 3).

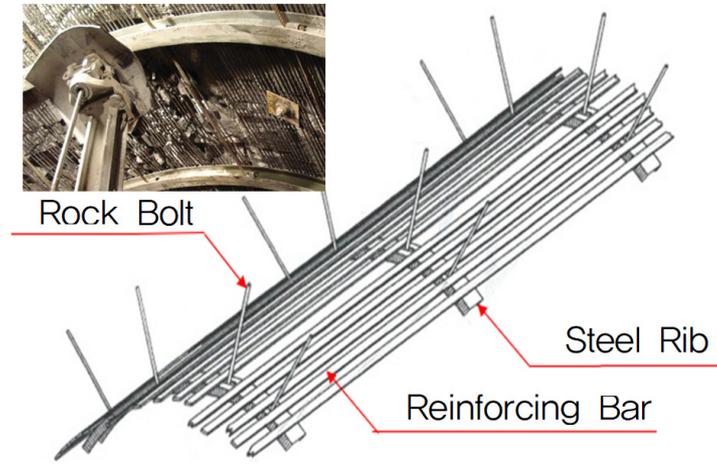


Fig. 3. McNally system

4. 지보패턴 합리화 방안의 적용성 검토

Gripper TBM의 근접시공을 고려한 지보패턴 합리화 방안 적용성을 검증하기 위해 2차원 및 3차원 안정성 검토를 수행하였다. 해석모델은 신설터널과 기존 운행선의 현황을 고려하여 Fig. 4와 같이 모사하였다.

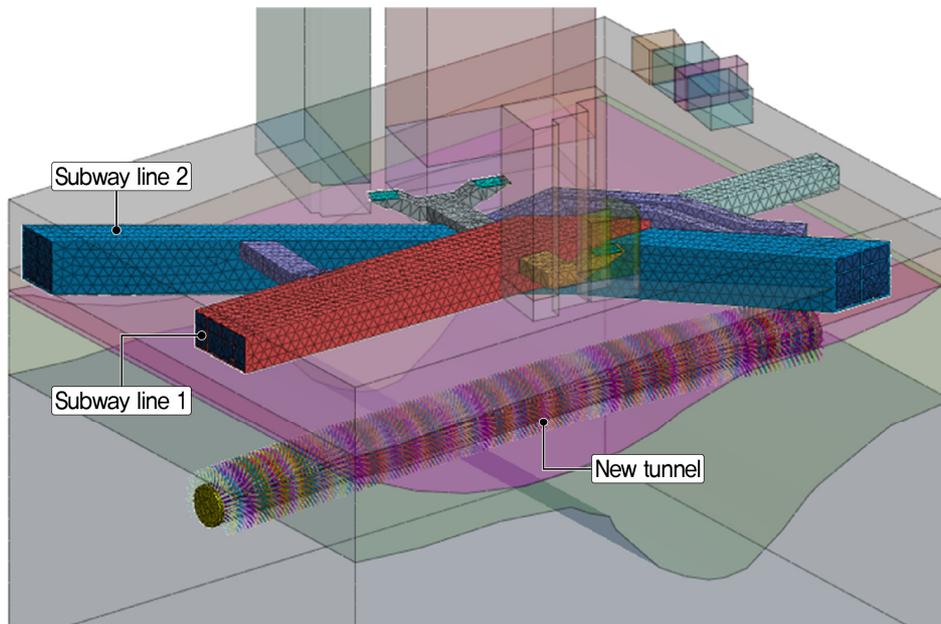


Fig. 4. Numerical modeling (3D)

4.1 검토조건

기존 운행선인 서울지하철 1호선의 경우, 서울지하철 건설자를 참고하여 구조물에 대한 설계기준 강도($f_{ck}=24$ MPa)를 적용하였다(Seoul Metro, 1999). 또한 운행 중 조건을 고려하여 국가철도공단에서 제시한 전동차 전용선 하중인 EL-18 표준열차하중을 기존 운행선의 열차하중으로 적용하였다(Korea National Railway, 2022a).

기존 운행선 안정성 평가시 구조물에 발생하는 변위 및 응력증분과 궤도에 발생하는 변위를 산출하여 안정성을 평가하였다. 구조물 응력증분은 기존 운행선에 대한 안전진단평가 결과(건전도 B등급)를 고려하여 선정하였고(Seoul Metro, 2001), 운행선 궤도 변위는 선로유지관리지침(Korea National Railway, 2023) 및 선로정비규정(Seoul Metro, 2022)에서 제시한 평가기준을 참조하여 안전측 평가기준을 선정 및 적용하였다.

4.2 안정성

지보패턴 합리화 방안 적용에 따른 정밀 안정성 검토를 수행한 결과(Table 4), 신설터널에 발생하는 최대 변위는 4.42 mm로 미소하고 숏크리트 응력과 록볼트 축력은 최대 2.16 MPa, 9.32 kN로 허용치 이내이므로 신설터널은 안정한 것으로 판단된다. 또한 기존 운행선 구조물에 발생하는 변위는 최대 0.33 mm로 미소하고 구조물 최대 응력증분은 0.075 MPa로 발생하여 허용치 이내로 기존 운행선은 안정한 것으로 판단된다. 기존 운행선 궤도에 발생한 최대 침하는 1호선 0.312 mm, 2호선 0.325 mm로 미소하게 나타났다. 또한 궤도틀림 안정성 검토결과, 최대 틀림은 0.044 mm로 발생하여 허용치 이내로 기존 운행선은 안정한 것으로 판단된다.

Table 4. Analysis results

		New Tunnel	
Category		2D	3D
	Crown disp. (mm)	1.89	1.36
	Convergence disp. (mm)	4.84	4.42
	Compressive stress (MPa)	3.41 < 14.0	2.16 < 14.0
	Axial force (kN)	10.87 < 88.7	9.32 < 88.7
		Existing Structure	
Category		2D	3D
Disp.	Max. subsidence (mm)	0.67 < 25.0	0.33 < 25.0
	Diff. settlement (mm)	0.04 < 30.0	0.23 < 30.0
	Angular displacement	$1/1.51 \times 10^4 < 1/500$	$1/4.31 \times 10^4 < 1/500$
	Horizontal strain	$1/7.06 \times 10^5 < 1/2,000$	$1/3.34 \times 10^5 < 1/2,000$
Stress	Tensile Δ (MPa)	0.033 < 1.0	0.075 < 1.0
	Compressive Δ (MPa)	0.095 < 5.0	0.005 < 5.0
Irregularity	Longitudinal level(mm)	-	0.044 < 4.0
	Alignment (mm)	-	0.044 < 4.0
	Cross level (mm)	0.027 < 3.0	0.006 < 3.0
	Gauge (mm)	-0.004 > -3.0	-0.004 > -3, 0.005 < 6
	Twist (mm)	-	0.003 < 3.0

5. 결론

본 연구는 Gripper TBM을 활용한 도심지 터널계획시 기존 지하구조물과의 근접시공에 따른 합리적인 보강계획을 수립하는데 목적이 있다. 이를 위해 굴착공법별 시공단계를 고려한 3차원 안정성 검토를 수행하여 Gripper TBM 굴착이 주변지반에 미치는 영향을 파악하였다. 검토 결과, 기존 발파를 통해 굴착하는 NATM공법과 달리 굴진면 보다 스킨플레이트 후방부에 지반이완과 변위가 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 연구대상구간에서는 당초 주의시공구간으로 평가된 구간에 대하여 휘폴링 추가보강을 계획하였으나, 휘폴링 설치시 굴착중지로 인한 굴진안정성 저하와 공기 지연 등이 문제될 것으로 예상된다. 이는 NATM과 Gripper TBM의 상이한 지반이완 개념을 고려하지 않은데 기인하며, 현재까지 근접시공에 따른 다양한 설계방안과 연구가 진행되고 있으나 굴착공법 특성을 고려한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Gripper TBM 굴착특성에 따른 지반이완 개념을 고려하여 기존의 근접시공 보강계획의 문제점을 지적하고 Gripper TBM 지보패턴 합리화를 위한 대체방안을 제시하고자 하였다. 근접시공 추가보강으로 휘폴링을 계획하여 발생하는 굴진안정성 및 시공성 저하 등의 문제점을 해소하기 위하여 터널 주면부를 철근보강하는 McNally System 설치 및 록볼트 횡간격 축소를 대체방안으로 제안하였다. 이를 통해 터널 주면부 안정성을 향상시키고 낙방방지를 통한 작업자 및 장비의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 도심지 터널의 수요가 급증됨에 따라 TBM과 같은 기계화 시공을 활용한 터널계획이 활발해지고 있는 시점에서 본 연구를 통해 굴착공법 특성이 반영된 합리적인 근접시공 보강방안이 정립되기를 기대한다.

REFERENCES

- Jeong, H.Y., Zhang, N., and Jeon, S.W., 2018, Review of Technical Issues for Shield TBM Tunneling in Difficult Grounds, *Tunnel & Underground Space*, 28(1), 1-24.
- Korea National Railway, 2017, Excavation (KR C-12070), p. 87, p. 58.
- Korea National Railway, 2022a, Load (KR C-08020), p. 38.
- Korea National Railway, 2022b, Tunnel Planning (KR C-12010), p. 35.
- Korea National Railway, 2023, Guidelines for Track Maintenance, p. 121.
- Lee, S.H., 2022, An Analytical Study on Determining of Optimum Separated Distance Considering Rock Characteristics in Adjacent Construction between Urban Tunnels, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 20-26.
- MIDAS Information Technology Co., 2023, MIDAS GTS NX on-line manual.
- Seoul Metro, 1999, Seoul Subway Construction Journal, 464, p. 1155.
- Seoul Metro, 2001, Working-level Management of Excavation Works in Adjacent to Urban Railroad, p.171, p. 222.
- Seoul Metro, 2022, Line maintenance regulations, p. 39.