

LCA 분석을 통한 TBM 공법과 NATM 공법의 탄소배출량 비교 연구

장태수¹⁾, 고재순¹⁾, 송진혁²⁾, 황남순^{2)*}

Comparison of Carbon Emissions between the TBM Method and the NATM Method through LCA Analysis

Tae-Su Jang, Jae-Soon Khau, Jin-Hyuk Song, Nam-Sun Hwang

Abstract To compare the global warming impact of the TBM and NATM method, which are representative tunnel excavation methods, a life cycle assessment was performed for each method. Life cycle assessment should compare the sum of carbon emissions by considering the pre-manufacturing stage, product manufacturing stage, usage stage, and disposal stage. However, access to TBM (Tunnel Boring Machine) manufacturing and disposal data is limited, so I had no choice but to focus on the analysis for the usage stage. In general, carbon emissions during the pre-product manufacturing stage and product manufacturing stage often exceed 90% of carbon emissions throughout the entire process. Therefore, since it is difficult to achieve the analysis goal only by comparing the usage stage, the analysis scope was expanded, and carbon emissions for the process were calculated for the NATM method with access to manufacturing data. As a result of comparing the relative impact on global warming, the carbon emissions of the TBM method were found to be higher than those of the NATM method even though TBM method was only considered for the usage stage. So there it is, the NATM method can be seen as environmentally friendly in the future when considering the impact of climate change (global warming), which has recently attracted attention among environmental impact fields.

Key words life-cycle assessment, global warming, tunnel excavation method, TBM method, NATM method

초 록 터널의 대표적인 굴착방식인 TBM 공법과 NATM 공법의 지구온난화 영향도를 비교하기 위해 각 방식에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment)를 수행하였다. 전과정평가는 제품 제조 전 단계, 제품 제조 단계, 사용 단계, 폐기 단계를 고려하여 탄소배출량의 합산으로 비교해야 마땅하나, TBM (Tunnel Boring Machine)의 제조 및 폐기 데이터에 대한 접근이 제한되어 사용단계에 초점을 맞추어 분석할 수 밖에 없었다. 일반적으로 제품 제조 전 단계 및 제품 제조 단계에서 배출되는 탄소 배출량이 제품수명주기의 전과정에서 배출되는 탄소배출량의 90%를 넘는 경우가 대부분이다. 따라서 사용 단계의 비교만으로는 분석 목표를 달성하기 어렵기 때문에 분석 범위를 확장하였고, 제조 데이터에 접근이 가능한 NATM 공법에 대해서는 제품제조 전 단계 및 제품제조 단계를 포함한 과정에 대한 탄소 배출량을 산출하여 비교해 본 결과, TBM 공법은 사용 단계만 고려했음에도 불구하고 전 과정을 고려한 NATM 공법에 비해 탄소 배출량이 많게 결과값이 산출되었다. 이러한 결과는 향후 터널 시공설계 시 최근 환경영향분야 중 관심이 집중되고 있는 기후 변화(지구온난화)의 영향도를 고려할 때 NATM 공법이 상대적으로 친환경적이라 볼 수 있을 것이다.

핵심어 전과정평가, 지구온난화, 터널 굴착방식, TBM 공법, NATM 공법

1) (주)한화/글로벌 제품전략팀

2) (주)한화/글로벌 기술영업팀

* 교신저자 : namsun@hanwha.com

접 수 일 : 2023년 12월 5일

심사완료 : 2023년 12월 14일

게재승인 : 2023년 12월 20일

1. 서론

최근 각종 이상기후로 인한 수많은 재난이 발생하고 있다. 대표적으로 지구온난화로 인해 인류는 생존에 위협을 받고 있으며, 이러한 지구온난화 발생 원인으로 꼽히는 탄소배출에 대한 전 세계적인 관심이 매우 높은 상황이다. 환경부 온실가스 종합정보센터에서 공표한 국가 온실가스 인벤토리에 따르면, 2022년 국내 총탄소배출량 6.56억 톤 중 약 33.2%인 2.18억 톤이 공공전기 및 열 생산을 통해 배출되었고, 도로수송으로 인한 탄소배출은 약 14.1%인 0.93억 톤이 배출되었으며, 이는 전체 탄소배출량의 절반 수준에 이를 만큼 큰 비중을 차지하고 있다. 이와 마찬가지로 터널 굴진 시 탄소배출 주요 원인이 장비 가동과 수송에 소요되는 전력 및 연료 사용임을 고려하면, 터널 굴착방식별로 탄소배출량을 산정하고 이를 통해 환경영향도를 줄이는 방향으로 점차 개선되어야 함은 의심할 여지가 없을 것이다.

제품의 탄소배출량을 산정하기 위해서는 전과정평가 (Life Cycle Assessment, 이하 LCA)를 수행하여 제품 제조 전 단계, 제조 단계, 사용 단계 및 폐기 단계를 고려하여 탄소배출량의 합산으로 비교해야 한다. 또한 비교 대상 터널 굴착방식은 TBM (Tunnel Boring Machine) 공법과 화약류 (폭약 및 뇌관)를 이용한 NATM (New Austrian Tunneling Method) 공

법을 대상으로 하였다. 다만 현재까지 각 공법별로 탄소배출량을 산정하여 지구온난화에 대한 영향도를 분석한 사례는 많지 않고, 다양한 현장 데이터 수집의 어려움으로 인해 국내 일부 터널 현장 사례를 중심으로 분석을 실시하였다.

2. 본론

2.1 LCA 개요

분석에 앞서 전과정평가의 개념부터 살펴보면, 제품 전 과정 동안에 발생하는 자원 투입량과 환경 배출량을 정량화하고, 이들이 환경에 미치는 잠재적 환경 영향을 체계적으로 평가하는 도구이다. 제품의 LCA를 수행하기 위해서는 앞서 말한 바와 같이 제품 제조 전 단계, 제조 단계, 사용 단계 및 폐기 단계를 고려하여 탄소배출량을 산정하여 합산하여야 하며, 환경성적표지 인증 안내서에 기술된 제품 성격별로 고려해야 할 단계는 그림 1과 같다.

TBM의 경우에는 전력을 사용하는 제품이므로 에너지 사용 내구재에 해당되며, NATM 공법의 경우에도 굴착 및 후속 공정에 필요한 장비는 에너지를 사용하므로 에너지 사용 내구재에 해당한다. 그리고 TBM 공법과 NATM 공법 모두 장비 외 콘크리트를 포함한 각종 자재의 경우에는 생산재 또는 비내구재에 해당한다. NATM 공법의 경우 화약류의 제조 전



그림 1. 제품별 LCA 대상 단계.

단계, 제조 단계 및 사용 단계를 고려하여 탄소배출량을 산정하였으나, TBM 공법의 경우 TBM의 생산 정보 획득이 제한되어 사용 단계만을 고려하여 탄소배출량을 산정하였다. NATM 공법의 제조 전 단계 및 제조 단계 탄소배출량 산정을 위해 제품의 원료와 제조 간 소요되는 유틸리티 사용량을 바탕으로 산정하였다. 제품 제조 전 단계의 탄소배출량 산정을 위해 제품당 투입된 원재료에 의한 탄소배출량을 산정하였고, 제품 제조 단계의 탄소배출량 산정은 유틸리티인 전력과 용수 사용량을 기준으로 산정하였다. 분석결과 정밀폭약은 0.00245 tCO₂/kg, 고성능 에멀전은 0.00231 tCO₂/kg으로 산출되었으며, 공사구간 내 사용량을 곱하여 총 탄소배출량을 산정하였다.

2.2 터널 굴착방식별 탄소 배출량 산정 기준

TBM 공법과 NATM 공법 모두 OO 지역 OO 공구 터널공사 설계내역서를 기준으로 분석하였으며, 해당 공사구간 중 구간마다 공법을 달리하여 시공하였기에 비교 사례로 적절하다고 판단하였다. NATM 공법의 시공 구간은 600 m, TBM 공법의 시공 구간은 13.47 km, 전단면의 직경은 구간마다 차이가 있으나 최대 12.7 m 였으며, 구간마다 풍화암, 연암, 경암 구간이 있어 해당구간마다 장비 소요량에 차이가 있어 이를 고려하여 탄소배출량을 산정하였다. 그리고 설계내역서의 시공단계 중 일위대가 산출근거에 세부장비 및 자재내역의 확인이 제한되는 공정에 대해서는 분석대상에서 제외하였고, TBM의 전력 소요량 4,900 kW는 2021년 국토교통부에서 수행한 TBM 커터헤드 설계자

동화 및 운전자제 시스템 개발 보고서의 값을 참조하였다.

또한 TBM 공법의 경우 일부 세부 내역이 불충분하였던 슛크리트 타설, 록볼트 설치 및 구조물공에 사용되는 부수 자재 사용량은 유사하다고 가정하였으나, 해당 공정의 탄소배출량의 주요 요인인 콘크리트량 및 록볼트 수량은 설계내역서에 반영된 수치를 활용하였다. 그리고 전력 및 경유의 탄소 배출계수와 자재의 경우에는 환경부, 국토교통부, 산업통산자원부 및 건설기술연구원에서 공시한 지표를 활용하였으며, 공시되지 않은 자재에 대해서는 분석 대상에서 제외하였다. TBM 공법과 NATM 공법의 유사비교를 위하여 NATM 공법 중 굴착, 슛크리트 타설 및 록볼트 설치 세부공정에 포함되어 있는 통합기지갱과 변압기굴 공정은 전체 탄소배출량에서 제외하고 산정하였다.

2.3 터널 굴착방식별 탄소 배출량 산정 결과

굴착방식별로 시공 단계 탄소배출량을 산정한 결과, TBM 공법을 통한 탄소배출량은 총 91,641.48 tCO₂가 배출되었고, NATM 공법은 총 4,169.48 tCO₂ 배출되었다. 시공 구간에 차이가 있어 단순 비교는 의미가 없으므로, 터널 굴착 체적(m³)당 탄소배출량으로 환산하여 비교하였고, 그 결과 TBM 공법은 0.107 tCO₂/m³, NATM 공법은 0.099 tCO₂/m³으로 산정되었다. 굴착방식별로 탄소배출량 산정 시 장비의 유틸리티 사용으로 인한 탄소배출량과 자재 고유의 탄소배출량으로 나누어 산정하였으며, 이에 대한 결과는 아래 표 1, 표 2와 같으며, 해당 결과를 바탕으로 굴착방식별로 탄소배출량을 비교한 결과는 표 3과 같다.

표 1. TBM 공법 탄소배출량 분석 결과

공종명 (TBM)		수량	단위	장비 배출량	자재 배출량
TBM터널굴착	P-1	268,464	m ³	12,712.20	-
TBM터널굴착	P-2	82,893	m ³	3,934.86	-
TBM터널굴착	P-3	292,193	m ³	16,588.58	-
TBM터널굴착	P-4	184,934	m ³	14,237.34	-
TBM터널굴착	P-5	15,904	m ³	2,139.98	-
TBM터널굴착	P-6	11,515	m ³	2,160.06	-
TBM터널굴착	P-6-1	1,018	m ³	152.55	-
TBM터널갱내버력처리	P-1,벨트컨베이어	268,464	m ³	-	-
TBM터널갱내버력처리	P-2,벨트컨베이어	82,893	m ³	-	-
TBM터널갱내버력처리	P-3,벨트컨베이어	292,193	m ³	-	-
TBM터널갱내버력처리	P-4,벨트컨베이어	184,934	m ³	-	-
TBM터널갱내버력처리	P-5,벨트컨베이어	19,808	m ³	-	-
TBM터널갱내버력처리	P-6,벨트컨베이어	11,515	m ³	-	-
TBM터널갱내버력처리	P-6-1,벨트컨베이어	1,018	m ³	-	-

공종명 (TBM)		수량	단위	장비 배출량	자재 배출량
TBM터널숏크리트타설	P-1,일반	5,233	m ³	-	2,402.70
TBM터널숏크리트타설	P-2,강섬유	1,615	m ³	-	741.52
TBM터널숏크리트타설	P-3,강섬유	9,084	m ³	-	4,170.87
TBM터널숏크리트타설	P-4,강섬유	8,587	m ³	-	3,942.68
TBM터널숏크리트타설	P-5,강섬유	739	m ³	-	339.31
TBM터널숏크리트타설	P-6,강섬유	710	m ³	-	325.99
TBM터널숏크리트타설	P-6-1,강섬유	63	m ³	-	28.93
TBM터널지보제작및설치	LG-50x20x30mm	250	조	0.39	-
TBM터널지보제작및설치	LG-70x20x30mm	246	조	0.38	-
TBM터널RockBolt설치	P-1	1,173	공	0.17	9.78
TBM터널RockBolt설치	P-2	724	공	0.11	6.04
TBM터널RockBolt설치	P-3	15,308	공	2.25	127.69
TBM터널RockBolt설치	P-4	21,803	공	3.20	196.61
TBM터널RockBolt설치	P-5	4,000	공	0.59	36.07
TBM터널RockBolt설치	P-6	4,751	공	0.70	42.84
TBM터널RockBolt설치	P-6-1	220	공	0.03	1.98
배수구(공동구)콘크리트타설	기계타설	26,940	m	108.16	-
기초콘크리트타설	무근,fck=18MPa(표준시장)	61,363	m ³	72.91	-
콘크리트양생	무근구조물(표준시장)	61,363	m ³	-	25,839.32
필터콘크리트		197	m ³	-	20.84
배수공설치	PVCPipe,D50×600mm	9,917	개소	-	8.95
배면그라우팅		1,654	m ³	-	266.08
유로폼	간단,H=0~7m(표준시장)	46,125	m ²	-	-
강재거푸집제작	L=15.0m	10	조	-	-
강재거푸집설치및이동	라이닝콘크리트타설포함,L=15.0m	886	회	319.34	185.58
중앙배수공설치	유공관,φ250mm	26,440	m	-	-
측벽배수관설치	유공관,φ150mm	26,440	m	-	-
배수뒷막돌채움	잡석,소형장비	2,905	m ³	4.95	-
부직포설치	300g/m ²	40,995	m ²	-	-
비닐슈트깔기	P.E필름,T=0.1mm	80,482	m ²	-	-
TBM조립비	지상작업장조립	1	식	120.76	-
TBM해체비	지상작업장해체	1	식	103.49	-
TBM조립장설치		1	식	-	-
버력적치장설치		1	식	-	-
TBMRepair&CutterShop		1	식	-	-
TBMLineHanger	급수,배수,전력및비상급기용	1	식	-	-
TBM배전반및배수탱크거치대설치/해체		1	식	-	2.16
작업대차제작		2	조	-	-
TBM심정개발		2	개소	-	-
공사중입시환기설비		1	식	-	0.44
공사중비상급기설비		1	식	161.86	-
공사중입시배수설비		1	식	-	-
공사중입시급수설비		1	식	120.26	-
공사중전기설비	전력요금포함	1	식	-	-
합계				52,945.10	38,696.38

표 2. NATM 공법 탄소배출량 분석 결과

공종명		수량	단위	장비 배출량	자재 배출량
전단면굴착	PIT-1,일반발파	3,483	m ³	7.14	8.14
상반굴착	PIT-2,일반발파	753	m ³	1.91	1.64
하반굴착	PIT-2,일반발파	423	m ³	0.85	0.62
상반굴착	PIT-3,기계굴착(드럼커터)	4,330	m ³	4.36	-
하반굴착	PIT-3,기계굴착(드럼커터)	2,426	m ³	2.44	-
상반굴착	PWA-2,일반	10,384	m ³	27.04	23.30
하반굴착	PWA-2,일반	6,558	m ³	11.85	8.64
전단면굴착	PWB-1,일반발파	2,442	m ³	4.57	3.52
전단면굴착	PWB-2,일반발파	6,219	m ³	13.94	8.68

공종명		수량	단위	장비 배출량	자재 배출량
전단면굴착	RM-1,일반	1,953	m ²	5.13	5.94
전단면굴착	RM-2,일반	2,760	m ²	7.38	7.89
전단면굴착	RM-3,일반	315	m ²	1.14	0.61
전단면굴착	TCA-1,일반	596	m ²	1.29	1.36
갱내버력처리	경암,모암상태,L=0.400km	9,036	m ³	19.64	-
갱내버력처리	보통암,덤프15톤,L=0.400km	29,036	m ³	55.21	-
갱내버력처리	연암,덤프15톤,L=0.400km	369	m ³	0.59	-
갱내버력처리	풍화암,덤프15톤,L=0.400km	6,911	m ³	10.44	-
숏크리트반발캐처리	갱내, L=0.400km	429	m ³	0.88	-
강섬유숏크리트	PIT-1,전단면	170	m ³	3.48	78.05
강섬유숏크리트	PIT-2,상반	59	m ³	0.97	27.09
강섬유숏크리트	PIT-2,하반	26	m ³	0.44	11.94
고강도강섬유숏크리트	PIT-3,상반,기계	352	m ³	5.78	161.62
고강도강섬유숏크리트	PIT-3,하반,기계	147	m ³	2.42	67.49
강섬유숏크리트	PWA-2,상반	807	m ³	13.25	370.53
강섬유숏크리트	PWA-2,하반	386	m ³	6.33	177.23
강섬유숏크리트	PWB-1,전단면	276	m ³	4.78	126.72
강섬유숏크리트	PWB-2,전단면	1,002	m ³	16.45	460.06
강섬유숏크리트	RM-1,전단면	166	m ³	3.42	76.22
강섬유숏크리트	RM-2,전단면	362	m ³	6.66	166.21
강섬유숏크리트	RM-3,전단면	58	m ³	1.00	26.63
강섬유숏크리트	TCA-1,전단면	51	m ³	0.89	23.42
격자지보제작설치	PIT-2,LG-50×20×30mm	8	조	0.02	-
격자지보제작설치	PIT-3,H-100X100X6X8mm	85	조	0.22	-
격자지보제작설치	PWA-2,LG-50×20×30mm	100	조	0.26	-
격자지보제작설치	PWB-2,LG-50×20×30mm	89	조	0.24	-
격자지보제작설치	RM-3,LG-50×20×30mm	12	조	0.07	-
강지보연결부		587	조	-	-
본선락볼트설치	PIT-1,전단면,D25×3.0m	82	개	0.40	0.68
본선락볼트설치	PIT-2,상반,D25×3.0m	86	개	0.40	0.78
본선락볼트설치	PIT-2,하반,D25×3.0m	38	개	0.22	0.34
본선락볼트설치	PIT-3,상반,D25×3.0m	648	개	3.53	5.86
본선락볼트설치	PIT-3,하반,D25×3.0m	425	개	2.59	3.84
본선락볼트설치	PWA-2,상반,D25×4.0m	1,164	개	5.30	10.52
본선락볼트설치	PWA-2,하반,D25×4.0m	389	개	2.46	3.52
본선락볼트설치	PWB-1,전단면,D25×3.0m	180	개	0.83	1.50
본선락볼트설치	PWB-2,전단면,D25×4.0m	1,469	개	6.32	13.28
본선락볼트설치	RM-1,전단면,D25×3.0m	325	개	1.59	2.70
본선락볼트설치	RM-2,전단면,D25×3.0m	918	개	4.09	7.63
본선락볼트설치	RM-3,전단면,D25×3.0m	182	개	0.99	1.51
본선락볼트설치	TCA-1,전단면,D25×3.0m	66	개	0.31	0.55
몰탈홀러내림방지캡	D25	2,698	개	-	-
휘폴링설치	D38×3.0m	9,135	개	39.58	32.40
휘폴링설치	D38×4.0m	4,164	개	22.06	19.55
휘폴링설치	D38×5.0m	420	개	2.63	2.50
락볼트시공검측봉		5,972	개	-	-
라이닝콘크리트타설	철근,fck=27MPa(표준시장)	603	m ³	0.72	-
배수구(공동구)콘크리트타설	기계타설	1,190	m	4.78	-
기초콘크리트타설	무근,fck=18MPa(표준시장)	4,096	m ³	4.87	-
바닥여굴채움콘크리트타설	무근,fck=18MPa(표준시장)	674	m ³	0.80	-
콘크리트양생	철근구조물(표준시장)	603	m ³	-	253.92
콘크리트양생	무근구조물(표준시장)	4,096	m ³	-	1,724.78
필터콘크리트		8	m ³	-	0.85
배수공설치	PVCPipe,D50×600mm	249	개소	-	0.22
배면그라우팅		126	m ³	-	18.07
유로폼	보통,H=0~7m(표준시장)	52	m ²	-	-
유로폼	간단,H=0~7m(표준시장)	1,274	m ²	-	-
원형목재거푸집	복잡,H=0~7m이하	315	m ²	-	13.09
목재거푸집	복잡,H=0~7m이하	761	m ²	-	19.15

공종명		수량	단위	장비 배출량	자재 배출량
강재거푸집설치및해체	(라이닝콘크리트타설포함)	85	회	30.64	15.52
시스템강관동바리	손울3개월,H=5m이하,간격0.6m이하	111	m'	-	-
중앙배수공설치	유공관,φ250mm	993	m	-	-
중앙배수공설치	유공관,D100mm	21	m	-	-
배수윗막돌채움	잡석,소형장비	114	m'	0.19	-
부직포설치	300g/m ²	830	m ²	-	-
공동구뚜껑	갱내,470×350×70mm	3,306	개	0.03	-
보조도상콘크리트와이어메쉬	#8-150×150	2,678	m ²	-	-
콘크리트거칠기시공		3,046	m ²	-	-
철근가공및조립	복잡(표준시장)	567	Ton	-	201.25
비닐쉬트깔기	P.E필름,T=0.1mm	5,850	m ²	-	-
소구경강관보강(연압)	Φ60.5mm,L=12.0m,시멘트제외	634	공	-	-
대구경강관보강(연압)	Φ114.0mm,L=12.0m,시멘트제외	338	공	-	-
TSP탐사		14	회	-	-
갱내차수그라우팅	연암,시멘트제외	200	공	-	-
그라우팅지반보강	본선부,시멘트제외	870	공	-	-
비산먼지억제장치		1	개소	-	-
합계				343.90	3,876.86

표 3. 굴착방식별 탄소배출량 비교분석 결과

굴착방식	시공구간 총 탄소배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)			굴착부피 당 탄소배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)			굴착 체적 (m ³)
	장비	자재	총 배출량	장비	자재	총 배출량	
TBM 공법	52,945.10	38,696.38	91,641.48	0.062	0.045	0.107	856,921
NATM 공법	343.90	3,876.86	4,220.76	0.008	0.091	0.099	42,642

다음은 공중에 따른 탄소배출량 분석을 통해 굴착 방식별로 해당 공종에서 발생하는 탄소배출량을 산출

하고, 탄소배출량이 많게 산정되는 공종의 주요 발생 요인을 분석하고자 한다.

표 4. 공종별 탄소배출량 분석 결과

공종	TBM 공법		NATM 공법			
	장비 배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)	자재 배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)	장비 배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)	비전기뇌관 사용 시 자재 배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)	전자뇌관 사용 시 자재 배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)	
1. 굴착	0.060596 (98.07%)	-	0.001738 (21.55%)	0.001279 (1.41%)	0.001279 (2.55%)	
2. 후공정	버력처리	-	0.002035 (25.23%)	-	-	
	숏크리트 타설	0.000001 (0.00%)	0.013948 (30.88%)	0.001264 (15.67%)	0.034725 (38.19%)	0.017362 (34.73%)
	지보제작 설치	-	-	0.000019 (0.24%)	-	-
	록볼트 설치	0.000008 (0.01%)	0.000491 (1.09%)	0.002024 (25.09%)	0.002222 (2.44%)	0.002222 (4.43%)
	구조물공	0.000590 (0.95%)	0.030716 (68.02%)	0.000986 (12.22%)	0.052691 (57.96%)	0.029268 (58.30%)
	부대시설공	0.000591 (0.96%)	0.000003 (0.01%)	-	-	-
	합계	0.001290 (1.93%)	0.045158 (100%)	0.006328 (78.45%)	0.089638 (98.59%)	0.048852 (97.45%)
총계	0.061786 (100%)	0.045158 (100%)	0.008066 (100%)	0.090917 (100%)	0.050131 (100%)	

표 5. 굴착방식별 탄소 배출량 (전자뇌관 적용 포함)

굴착방식	굴착체적 당 탄소배출량			
	장비 (tCO ₂ -eq/m ³)	자재 (tCO ₂ -eq/m ³)	총 배출량 (tCO ₂ -eq/m ³)	탄소배출량 배수
TBM 공법	0.062	0.045	0.107	1.95
NATM 공법 (비전기뇌관)	0.008	0.091	0.099	1.80
NATM 공법 (전자뇌관)	0.008	0.047	0.055	1

공종별 탄소배출량을 분석한 결과 표 4와 같이 TBM 공법 중 굴착단계에서의 탄소 배출량은 TBM을 가동하여 굴착하는 과정에서 소모된 전력량에 따른 탄소배출량인 반면, NATM 공법의 경우 굴착단계에서의 탄소배출량은 점보드릴, 차징카 등의 장비 가동으로 소모된 유류 및 전력량에 따른 탄소배출량과 발파를 위해 사용되는 정밀폭약 및 고성능 에멀전의 제품 제조 전 및 제조 단계에서의 탄소배출량을 합산하여 산출된다. 그 결과 TBM 공법의 경우 0.060596 tCO₂/m³, NATM 공법의 경우 0.003017 tCO₂/m³으로 산출되어 굴착단계에서의 탄소배출량의 경우 TBM 공법이 NATM 공법에 비해 약 20배 높다는 것을 알 수 있다. 참고로 뇌관의 탄소배출량의 경우 비전기뇌관은 직접 산출한 근거가 없어 3차 검증을 실시한 전자뇌관 6 m 제품 기준으로 간접 비교하였으며, 전자뇌관 6 m 제품의 탄소배출량은 0.000021 tCO₂/m³이며, 이 중 각선의 탄소 배출량이 66.7%, 관체의 탄소 배출량이 25.7%를 차지하고, 뇌관 내 화약의 탄소배출량의 비중은 2% 미만에 불과하므로 비전기뇌관과 전자뇌관 사용 시 편차는 유효자리 숫자에서 무시해도 될 수준이다.

후공정 단계에서의 탄소배출량의 경우 TBM 공법은 콘크리트 타설에 소요되는 장비 가동으로 소모된 유류 및 전력량에 따른 탄소배출량과 숏크리트 타설 및 구조물공 시공에 소요되는 시멘트 및 콘크리트 등을 포함한 자재의 생산공정에서 발생하는 탄소배출이 주를 차지한다. 분석 결과 TBM 공법의 경우 후공정에서 발생하는 총 탄소배출량이 0.046448 tCO₂/m³이며, NATM 공법의 경우 총 탄소배출량이 0.095966 tCO₂/m³으로 산출되어 후공정 단계에서의 탄소배출량의 경우에는 NATM 공법이 TBM 공법에 비해 약 2배 높다는 것을 알 수 있다. 특히 후공정에서의 탄소

배출량 중 자재에 의한 발생량이 높는데, 이는 숏크리트 타설과 라이닝콘크리트 타설 과정에서 필요한 시멘트량에 비례하여 탄소배출량에 큰 영향을 주었으며, 시멘트의 경우 탄소배출계수가 0.952 kgCO₂/kg으로 타 자재에 비해 탄소배출계수가 높는데, 이는 석회석을 고온으로 가열하기 위해 화석연료가 다량 투입되고, 석회석을 가열해 산화칼슘만 남기는 과정에서 많은 이산화탄소가 발생하기 때문이다.

추가로 본 사례의 NATM 공법에는 비전기뇌관이 사용되었는데, NATM 공법이 TBM 공법에 비해 상대적으로 자재에 의한 탄소배출량이 높게 산출되므로, 이에 대한 개선안으로써 전자뇌관으로 발파설계를 가정하여 탄소배출량의 영향도를 분석해 보았다. 국외 논문 사례에 의하면 비전기뇌관과 전자뇌관의 굴착손상영역(EDZ)에 대해 분석한 사례가 있는데 비전기뇌관은 평균 1.9 m, 전자뇌관은 평균 0.85 m로 분석되어 전자뇌관의 굴착손상영역이 약 45%수준으로 적게 분석된 바 있으므로, 이와 연계하여 전자뇌관을 활용한 터널 굴착 시 내공단면과 여굴단면 사이의 간격을 조정할 수 있다. 일반적으로 비전기뇌관의 터널 굴착 시 내공단면과 여굴단면 사이의 간격을 0.3 m로 설계하게 되는데, 전자뇌관을 사용할 경우 0.135 m로 설계하여도 비전기뇌관과 동일한 수준의 결과를 얻을 수 있을 것이라 추정해볼 수 있다. 이를 활용하면 숏크리트 타설과 구조물공의 라이닝콘크리트 타설에 소요되는 자재량을 45% 수준으로 줄일 수 있으므로, 이를 반영하여 산정할 경우 표 5와 같이 자재 배출량이 0.091 tCO₂/m³에서 0.047 tCO₂/m³까지 줄어들어 약 48.4% 탄소배출량 감축 효과를 기대할 수 있다.

결론적으로 TBM 공법의 총 탄소배출량이 전자뇌관을 사용한 NATM 공법의 탄소배출량에 비해 1.95배 높은 수준으로 배출될 것으로 보인다. 이는 전자뇌

관을 사용할 경우 정밀발파로 여굴이 적어 이에 따른 자재 사용량이 줄어들게 되므로, 자재에 의한 탄소배출량이 TBM 공법과 큰 차이가 나지 않게 되지만 TBM 공법의 경우 상대적으로 장비에 의한 탄소배출량은 많기 때문에 사용 단계에서의 TBM 공법의 탄소배출량이 NATM 공법 대비 차이가 벌어지게 된다.

3. 결론

위 분석결과와 같이 굴착부피당 총 탄소배출량은 NATM 공법이 TBM 공법에 비해 상대적으로 적게 산정되었다. 세부적으로 장비사용에 따른 탄소배출량은 TBM 가동 시 소요되는 높은 전력사용량으로 인해 NATM 공법에 비해 높게 산정되었으며, 자재의 경우에는 NATM 공법이 여굴량 증가로 인해 버력처리량과 콘크리트 사용량이 증가되므로 상대적으로 탄소배출량이 높게 산정되었다. 특히 분석결과로 도출된 굴착부피당 탄소배출량의 항목 중 장비부분의 경우 NATM 공법은 화약류 생산 시 발생하는 탄소배출량을 포함하여 폐기단계를 제외한 전과정에 대해 고려하였으나, TBM 공법의 경우 TBM 제조 전 단계 및 제조 단계에서 발생하는 탄소배출량을 제외하고 사용 단계만을 고려하여 산정하였음에도 탄소배출량이 오히려 높게 산정되었음을 알 수 있다. 또한 전자뇌관을 사용할 경우 터널의 여굴을 줄일 수 있고, 이러한 부

분을 고려하면 탄소배출량의 감축 수준을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 이를 통해 NATM 공법이 TBM 공법에 비해 상대적으로 친환경적이라 볼 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 국토교통부, 2021, TBM 커터헤드 설계자동화 및 운전제어 시스템 개발 최종보고서, pp. 370.
2. 한국환경산업기술원, 2022, 환경성적표지 인증 안내서, pp. 26.
3. Hongxian Fu et al, 2014, Comparison of excavation damage zones resulting from blasting with Nonel detonators and blasting with electronic detonators, Chin J Rock Mech Eng, 47, pp. 813-815.
4. ISO 14067 Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification, 2018.



장 태 수

(주)한화/글로벌 제품전략팀

Tel: 02-729-1805

E-mail: redshine@hanwha.com



고 재 순

(주)한화/글로벌 제품전략팀

Tel: 02-729-1805

E-mail: khaujs@hanwha.com



송 진 혁

(주)한화/글로벌 기술영업팀

Tel: 02-729-1805

E-mail: sjinhyuk@hanwha.com



황 남 순

(주)한화/글로벌 기술영업팀

Tel: 02-729-1805

E-mail: namsun@hanwha.com