

터널 건설과 적용분야의 스테인리스강 사용

차례

터널 건설과 적용분야의 스테인리스강 사용	4
왜 터널에 스테인리스강을 사용해야 하는가?	4
도로 터널	5
도로 터널의 화재	5
사례연구	5-8
철도 터널	9
지하철 터널	9
사례연구: 런던 지하철의 안전과 미관을 위한 스테인리스강 사용	9
철도 터널	10
장거리 해저 철도 터널	10
사례연구: Channel 터널 자재 시험에서의 스테인리스강 성능	10-12
결론	13
참고자료	13
부록 A: 지침서	14
감사의 말	15

주의사항

ISSF와 Nickel Institute는 본 문서에 기술적으로 올바른 정보만 수록할 수 있도록 모든 노력을 다했습니다. 하지만 본 문서에 수록된 자료는 일반적인 참고를 위한 정보임에 유의해야 합니다. ISSF, Euro Inox, Nickel Institute 및 도움을 주신 모든 기관은 본 문서에 수록된 정보로 인해 발생하는 모든 손해, 손실, 부상에 대한 책임을 지지 않습니다.

터널 건설과 적용분야의 스테인리스강 사용

by David J. Cochrane, Consultant to the Nickel Institute; Bernard Heritier, ISSF; and Alenka Kosmac, Euro Inox

터널은 도로 및 철도 교통을 원활하게 하고 이동시간을 줄일 수 있는 매우 효과적인 수단입니다. 현재 승객 및 화물 수송에 널리 사용되고 있으며, 몇 미터의 짧은 길이부터 50km의 긴 길이에 이르기 까지 매우 다양하게 건설되고 있습니다.

용어 정의에 따른 터널은 항상 지하에 건설됩니다. 하지만 터널이 지나가는 곳의 환경은 터널마다 크게 다릅니다. 일부는 바다 밑을 지나가고, 일부는 산을 통과하기도 합니다. 이러한 환경 차이로 인해, 각 터널의 건설에 사용하는 자재 또한 달라집니다. 모든 터널은 수십 년 동안 유지보수 없이 안전하게 운영할 수 있어야 합니다. 터널의 건설에 사용하는 자재는 부식이 발생하는 환경이나 장애요인이 많은 위험한 환경에서도 이러한 요건을 만족해야 합니다.



브리즈번의 North-South Bypass는 호주에서 가장 긴 도로 터널입니다.

터널 내부에 사용하는 자재는 터널의 용도에 따라서도 달라집니다. 본 브로셔의 사례연구 자료에서 볼 수 있듯이, 터널 내부의 대기 상태는 터널이 차량용인지, 아니면 전철용인지에 따라 크게 달라질 수 있습니다.

본 문서에는 전 세계에서 현재 운영되고 있는 터널의 사례연구 자료가 제시되어 있습니다. 이 모든 사례연구 자료는 스테인리스강(특히 니켈 함유형)을 사용하여 장기적인 운영 효율성을 향상시키고 의미 있는 경제적 이득을 얻기 위한 사례입니다.

왜 터널에 스테인리스강을 사용해야 하는가?

스테인리스강은 다양한 합금 및 제품의 형태로 사용할 수 있으며 가장 험한 환경에서도 사용할 수 있습니다. 부식 방지를 위한 별도의 보호장치가 필요하지 않으며, 강도와 내화성이 높아서 수명이 길고 유지보수가 거의 필요하지 않습니다. 터널 기술자는 방화문이나 방화벽과 같은 눈에 띄는 구조물, 그리고 보강재와 같은 눈에 띄지 않는 구조물에 모두 스테인리스강을 사용합니다.

장기간에 걸친 터널 기술자들의 터널 환경 모니터링을 통해, 스테인리스강은 고정장치 등의 부품에 필수적인 자재가 되었습니다. 고정장치는 조명, 통풍장치, 소방장비 등의 주요 시설물들을 안전하게 설치하는 데 매우 중요한 부품입니다. 고정장치가 파손되면 치명적인 사고로 이어질 수 있으며 터널이 붕괴되거나 폐쇄될 수도 있습니다. 스테인리스강은 심각한 대기 오염이나 지반 균열(특히 벽이나 바위면이 맞닿아 있는 곳의)로 인한 부식에 견딜 수 있기 때문에 터널 고정장치의 주요 자재로 지정되는 경우가 많습니다.

항상 터널 내부의 상태에 따라 터널의 건설 및 터널 내부 설비에 사용할 자재를 결정해야 합니다. 터널 기술자에 의한 유지보수의 수준도 자재 선정 단계에서 정해져야 합니다. 항상 부식 현상에 대한 전문가나 스테인리스강 제조업체의 자문을 구해야 합니다. 현지의 지침서도 참조할 수 있습니다. 참조문서의 목록은 6페이지의 부록 A에 제시되어 있습니다.

도로 터널

가장 일반적인 운송용 터널은 도로 터널입니다. 이러한 터널은 바위, 강, 호수, 항구를 통과하는 경우도 있습니다. 터널 내부에서 사고가 발생하면 폭발이나 화재로 이어질 수도 있습니다. 도로 터널은 정상적인 사용 환경에서도 온도 변화 및 부식을 유발하는 화학물질에 노출됩니다(배기가스나 추운 곳에서 차량 타이어에 의해 유입되는 제설제 등).

도로 터널의 대기에는 일반적으로 배기가스로 인한 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 황화수소(H₂S)가 함유되어 있습니다(표 1 참조). 또한 벗겨진 타이어 입자, 광물성 분진 퇴적물, 매연, 수용성 염화물도 있습니다. 알프스 산맥을 관통하는 몽블랑(Mont Blanc) 터널을 측정 한 결과, 대기 중에 수용성 염화물이 3.5% 함유되어 있는 것으로 나타났습니다. 터널 먼지의 염화물 함유량은 주기적으로 청소하는 경우 0.1 ~ 0.7%, 전혀 청소하지 않는 경우 0.7 ~ 3.5%로 나타났습니다.

이러한 대기 중에 있는 화학물질의 부식으로 인해 터널 내부의 고정장치가 고장을 일으킬 수 있습니다. 벽면과 고정장치가 연결되어 있는 부분에 산성 염화물 용액의 막이 형성되어 전해질로서 작용합니다. 또한 터널에서 주기적인 수분 증발 현상이 발생함에 따라 농도가 더욱 짙어집니다. 고정장치는 접근이 매우 어려워서 세척 비용이 매우 높거나 아예 불가능한 경우도 있습니다.

이러한 현상으로 인해, 고정장치를 구성하는 자재들이 적합한 스테인리스강이 아닌 경우, 균열 부식이 발생하여 결국에는 고정장치가 파손될 수도 있습니다. 몽블랑(Mont Blanc) 터널의 기술자들은 유지보수를 최소화하고 고정장치의 내구성을 향상시키기 위해 몰리브덴 함유량이 최소 6% 이상인 스테인리스강을 반드시 사용하도록 규정하였습니다.

도로 터널의 화재

우리는 지금까지 도로 터널의 화재로 인해 수많은 생명을 잃었습니다. 화재는 사망뿐만 아니라

도로 터널의 폐쇄로 이어질 수도 있고, 이로 인해 값비싼 수리작업이 필요해질 수도 있습니다. 1999년에 발생한 몽블랑(Mont Blanc) 터널의 화재를 일반적인 예로 들 수 있습니다. 화재는 밀가루와 마가린을 운반하던 트럭에서 시작되어 53시간 동안 지속되었습니다. 터널의 온도는 1000°C 이상까지 상승하였으며 39명이 사망하였습니다. 이 화재로 인해 터널이 3년간 폐쇄되었으며 4억 5천만 파운드 이상의 수리비가 발생하였습니다.

도로 터널의 화재로 인한 치명적인 손실을 방지하거나 최소화하려면 반드시 스테인리스강을 사용해야 합니다. 탄화수소 화재로 인해 발생하는 높은 온도에서의 성능이 뛰어나기 때문입니다.



도로 터널의 화재는 인명과 터널에 치명적인 사고로 이어질 수 있습니다.

사례연구

여기서는 전 세계의 터널에서 스테인리스강을 사용하여 실질적인 문제점을 해결한 사례를 제시하고자 합니다. 일부 사례에서는 스테인리스강을 건설 단계에서부터 사용하였으며, 일부 사례에서는 터널의 안전한 사용과 관련된 문제점을 해결하기 위해 스테인리스강을 새로 추가하였습니다.

표 1: 지역별로 크게 다른 도로 터널의 습도, 온도, 대기 환경

터널	상대습도	온도범위	대기		
			SO ₂	NO ₂	H ₂ S
Gottard (스위스)	25 - 81%	3 - 27°C	81 ppm	3 ppm	27 ppm
몽블랑 터널(프랑스-이탈리아)	41 - 95%	6 - 25°C	95 ppm	6 ppm	25 ppm
San Bernadino (스위스)	평균치: 73%	-20 - 17°C	-	73 ppm	20 ppm
Seelisberg (스위스)	7 - 72%	14 - 28°C	72 ppm	14 ppm	28 ppm

사례연구: 이탈리아 도로 터널의 콘크리트 파손 및 이탈

이탈리아의 A7, A10, A12 도로 터널에서 심각한 대기 환경으로 인해 콘크리트 라이닝이 파손되었습니다. 이러한 강부식성 대기환경은 차량 배기가스의 고농도 황 화합물, 해양성 기후, 진동, 높은 습도로 인해 형성되었습니다.

제노바와 사보나를 잇는 A10 도로에서만 콘크리트 조각이 떨어지는 것을 막기 위해 엄청난 수리비를 들여야 했습니다. 12,000m²에 달하는 스테인리스강 그물망(EN 4401/AISI 316)을 라이닝에 사용하였습니다. 이 금속 그물망은 떨어지는 모든 콘크리트 조각을 받아서 도로면에 떨어지지 않도록 다른 곳으로 흘러 보냅니다.



12,000m²에 달하는 스테인리스강 그물망이 콘크리트 덩어리로부터 차량을 보호합니다.

헬싱키 Kehu 터널의 고정식 소방장비는 화재의 진압에 효과적인 미세한 물안개를 형성합니다.



사례연구: 핀란드 Kehu 터널의 고정식 소방장비

헬싱키의 Kehu 터널은 16mm 지름의 스테인리스강 배관과 스프레이 노즐 5열로 구성되어 있는 고정식 소방장비를 사용합니다. 터널에 화재가 발생하면 고압 시스템이 터널 화재의 진압에 효과적인 미세한 물안개를 형성합니다. 이 소방장비는 모두 스테인리스강(EN 1.4404/AISI 316L)으로 제작되었습니다. 강도가 높고 부식과 화재에 잘 견디기 때문입니다. 이 시스템은 터널의 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라, 화재 발생시 터널의 손상과 붕괴의 가능성을 줄여주기도 합니다.

도로 터널 사례연구

사례연구: 호주의 연기 및 열 방출 시스템에 듀플렉스 스테인리스강 사용

호주에서 가장 긴 도로 터널은 브리즈번의 North-South Bypass 터널입니다(Clem Jones 터널 또는 CLEM7이라고도 함). 2개의 4.8km 2차선 터널로 구성된 CLEM7은 브리즈번 강 아래에 건설되었습니다. 부식성이 높은 환경에서 견딜 수 있는 듀플렉스 스테인리스강(EN 1.4462/ASTM-UNS S32205/S31803)을 터널에 사용하였습니다. 또한 터널의 라이닝 지지대로서 33,000개의 라이트 게이지 스테인리스강 기둥을 사용하였습니다.

화재나 폭발이 발생하면, 최첨단 환기 시스템이 100개의 제트팬을 사용하여 연기를 도로 위에 있는 세로형 통풍관으로 내보냅니다. 스테인리스강 서스펜션 시스템에 매달려 있는 콘크리트 슬라브가 통풍을 위한 통로가 됩니다. 이 시스템은 내열성 요건을 만족하며 부식성이 높은 환경에서 유지보수 없이 장기적으로 우수한 성능을 발휘하는 EN 1.4462(ASTM-UNS S32205/S31803)를 사용하고 있습니다.



브리즈번의 North-South Bypass는 터널의 라이닝 지지대로서 33,000개의 라이트 게이지 스테인리스강 기둥을 강부식환경에서 사용하였습니다.

사례연구: 몽블랑(Mont Blanc) 터널의 스테인리스강 제트팬

몽블랑(Mont Blanc) 터널의 기술자들은 유지보수를 최소화하고 고정장치의 내구성을 향상시키기 위해 몰리브덴 함유량이 최소 6% 이상인 스테인리스강을 반드시 사용하도록 규정하였습니다.

2011년에 시행한 수리 프로그램의 일환으로서, 스테인리스강(EN 1.4404/AISI 316L) 환기 팬을 설치하였습니다. 터널의 케이블 사다리도 동일한 자재로 만들었습니다.



1999년에 발생한 치명적인 화재로 인해 몽블랑(Mont Blanc) 터널은 3년간 폐쇄되었습니다. 이제는 스테인리스강이 광범위하게 사용되고 있습니다.

사례연구: 영국의 새로운 지하 터널 데크 및 지지대에 스테인리스강 사용

크레이들웰(Cradlewell)의 Underpass 터널은 영국 북부의 주요 해안 연결선입니다. 이 터널은 건설 당시 256톤의 스테인리스강(EN 1.4401/AISI 316)을 데크 및 지지대에 사용하였습니다. 겨울철에 사용하는 제설염에 의한 부식에 견딜 수 있는 EN 1.4401/AISI 316이 선정되었습니다. 유출된 수분은 데크에 있는 관을 통해 밖으로 빠져나갑니다. 스테인리스강이 아닌 탄소강을 사용한다면, 누출이 발생하는 경우 치명적인 사고로 이어지고 엄청난 수리비가 발생하게 될 것입니다.

해변가 근처에 위치한 크레이들웰의 Underpass는 부식 방지를 위해 250톤 이상의 스테인리스강을 사용하였습니다.



SUSTAINABLE STAINLESS

사례연구: 스코틀랜드의 새로운 스테인리스강 구조물과 라이닝

글래스고의 Clyde 터널은 글래스고 북부와 남부를 잇는 주요 교통경로입니다. 2개의 762미터 평행 터널로 구성된 이 터널은 매일 65,000대 이상의 차량이 오가고 있습니다.

Clyde 터널의 보강작업(2005~2010년)을 시행할 때, 1950년대에 설치한 주물 구조물은 그대로 유지하였습니다. 대신 니켈이 함유된 스테인리스강(EN 1.4401/AISI 316)으로 2차 구조물을 새로 제작하여 원래 구조물에 부착하였습니다. 이 2차 구조물은 화재 발생시 터널의 온도를 300°C 미만으로 유지하도록 설계된 스테인리스강 터널 라이닝을 지지하고 있습니다. .

Clyde 터널(아래)은 2차 스테인리스강 구조물을 추가하여 스테인리스강 라이닝을 지지하고 있습니다.



도로 터널 사례연구

사례연구: 영국의 부식 방지를 위한 스테인리스 데크 조인트

런던 동부에 위치한 Dartford River Crossing 터널은 템즈 강 아래에 있으며 도시의 북부와 남부를 연결하는 주요 연결통로입니다. 이 터널은 M25 런던 외곽 순환 도로의 일부분이기도 합니다.

하지만 불과 20년만에 탄소강 데크의 보강재가 부식되어 수리가 필요해졌습니다. 원인은 염화물을 함유한 수분(겨울에 사용한 제설제로부터 나온)이 슬라브에 침투하여 탄소강 보강재를 부식시켰기 때문이었습니다.

슬라브가 파손되어 더 많은 수분이 침투하는 것을 방지하기 위해, 396톤의 오스테나이트 스테인리스강(EN 1.4401/AISI 316) 데크 조인트를 4.5m 간격으로 콘크리트 슬라브에 삽입하였습니다.



Dartford River Crossing 터널에는 제설제로 인한 부식을 방지하기 위해 스테인리스강 데크 조인트를 설치하였습니다.

화재 대피로 및 환기 시스템

프랑스에 있는 Lioran 터널의 경우, 화재 대피로의 비상구에 스테인리스강(EN 1.4404/AISI 316L)을 사용하였습니다. 이 등급은 내식성이 뛰어나며 열에 노출되었을 때 기계적 성질이 우수합니다.

터널에서 안전지대로 진입하는 비상구, 그리고 안전지대와 대피로를 연결하는 출입구에 스테인리스강을 사용하였습니다.

도로 터널의 환기구 커버는 부식성이 강한 대기 가스에 노출됩니다. 터널의 공기를 배출하는 환기구의 커버는 가장 극심한 영향을 받습니다. 하지만, 외기 흡입구도 역시 대기 부식에 노출됩니다. Lioran 터널은 이러한 부식 방지를 위해 스테인리스강(EN 1.4404/AISI 316L) 재질의 커버를 사용하고 있습니다.

Lioran 터널은 통풍장치 및 소방장비에 많은 양의 스테인리스강을 사용하고 있습니다(아래 및 오른쪽).



사례연구: 독일 Elb 터널의 화재 효과 감소
함부르크의 Elb 터널은 화재의 영향을 최소화하기 위해 1,500톤의 스테인리스강 강판을 라이닝에 사용하였습니다(EN 1.4571/AISI 316Ti). 이 강판은 동일한 자재로 만든 60톤의 고정 나사 및 볼트로 터널에 부착하였습니다.

SUSTAINABLE STAINLESS



철도 터널

도시 설계사들은 승객 운송 수요량을 만족시키고 교통 혼잡을 완화시키기 위해 지하철에 크게 의존하고 있습니다. 고속철도망은 또한 주요 도시들뿐만 아니라 국가와 국가를 잇는 중요한 연결통로가 되어가고 있습니다.

철도망은 이미 수많은 개발도상국에서 빠르게 성장하고 있습니다. 중국에서는 21개 도시에서 경전철 개발을 계획하고 있습니다. 이러한 철도망의 건설은 이미 7개 이상의 도시에서 시작되었습니다. 또한 중국은 이미 완공된 6,000km 길이의 고속철도에 120대의 고속열차를 2012년에 추가로 운행할 예정입니다. 인도에서도 10여 개 이상의 도시에서 도시 철도 인프라 구축을 발표하였거나 현재 고려 중에 있습니다.

여기서는 지하철, 일반 철도, 장거리 해저 철도의 터널과 관련된 다양한 고려사항과 스테인리스강이 철도 터널을 오랜 기간 동안 안전하게 운영하는 데 어떻게 도움이 되는지에 대해 살펴보고자 합니다.

지하철 터널

도시의 지하철도망을 사용하는 열차는 보통 전기로 작동하기 때문에, 터널의 대기 부식은 도로 터널에 비해 크게 문제가 되지 않습니다. 하지만 현지의 환경적인 요인들은 터널을 건설하는 자재의 선정에 영향을 미칠 수도 있습니다. 이러한 요인에는 터널 주위의 바위나 흙에 함유되어 있는 화학물질, 도로에서 스며드는 물, 도시의 하수도 및 상수도관 등이 있습니다.

또한 지하철 터널에서도 화재가 발생할 수 있다는 점을 건설 프로젝트의 초기 단계부터 고려해야 합니다.

사례연구: 런던 지하철의 안전과 미관을 위한 스테인리스강 사용

런던 지하철 중 일부는 도시 지표면에서 67m 아래이며 해수면에서 21m 아래인 곳에 위치하고 있습니다. 터널에 스며들 수 있는 물에는 부식성이 높은 염소이온이 함유되어 있습니다.

1987년에 발생한 Kings Cross 역의 화재 이후, 런던 지하철은 건설 및 보강에 연기나 유독성 가스를 배출하지 않는 자재를 사용하기 시작했습니다. 스테인리스강이 이러한 요건을 만족함에 따라, 다음과 같은 여러 사례에서 지하철 보강 작업에 많이 사용되었습니다.

Jubilee 노선의 확장

런던의 Jubilee 노선에는 수도 동부의 부둣가 지역까지 노선이 확장될 때 여러 터널 및 역에 스테인리스강이 많이 사용되었습니다. 모든 역에서 스테인리스강 구조물을 쉽게 볼 수 있습니다. 역마다 다양한 마감 기법을 적용하여 각각 고유의



런던의 지하철에는 270개의 역이 있으며, 승객의 안전을 위해 스테인리스강을 사용하고 있습니다.



미적 감각이 드러날 뿐만 아니라 기능성도 매우 뛰어납니다. 가끔 세척만 해주면 외관을 그대로 유지할 수 있기 때문에 장기적으로 볼 때 매우 경제적이기도 합니다.

Victoria 노선의 침출 현상

Victoria 노선의 보강작업에서는 침출되는 물을 배수로로 흘러 보내기 위해 아치형 터널에 사인파형 시트재를 사용하였습니다. 이 작업에서는 560톤 이상의 1.2mm 두께 오스테나이트 스테인리스강 (EN 1.4401/AISI 316)을 사용하였습니다. 화재가 발생해도 스테인리스강은 연기나 유독성 가스를 발생시키지 않고 다른 금속에 비해 더 오랫동안 강도를 유지합니다.

Northern 노선: Old Street 역의 업그레이드

런던 지하철 Northern 노선의 Old Street 역에서는 산성 토양이 주물로 제작된 터널 라이닝을 심각하게 부식시켰습니다. 이 라이닝은 750여 톤의 특허 받은 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강을 사용하여(니켈 함유량 8%) 3,500개의 곡선 라이닝으로 교체하였습니다. 이 라이닝은 20,000개의 스테인리스강(EN 1.4501/ASTM-UNS S32760) 고정장치로 고정시켰습니다.

철도 및 하위 바다 터널에 스테인레스 스틸

철도 터널

철도 터널은 전철이나 디젤 기차 또는 2가지 모두를 동시에 수용할 수 있어야 합니다. 전철은 비교적 깨끗하지만 디젤 기차는 터널의 건축자재를 부식시킬 수 있는 이산화황 가스를 배출합니다. 배출량은 기차의 왕복 빈도, 기차의 속도, 터널의 길이, 터널의 온도 및 습도를 제어하기 위해 설치한 장비 등의 요인에 따라 달라집니다. 자재 선정을 확정 짓기 전에 현지의 공해 및 대기 관련 자료를 참조해야 합니다.

장거리 해저 철도 터널

장거리 해저 철도 터널의 환경 그리고 건설자재의 적합성 및 성능에 대한 자료는 이러한 터널이 거의 존재하지 않기 때문에 크게 한정되어 있습니다. 가장 오래된 해저 철도 터널은 일본의 혼슈 섬과 홋카이도 섬을 연결하는 53.9km(해저 길이 23.3km)의 세이칸 터널입니다. 이 터널은 현재 신칸센 고속철을 수용할 수 있도록 보강 공사를 진행하고 있습니다.

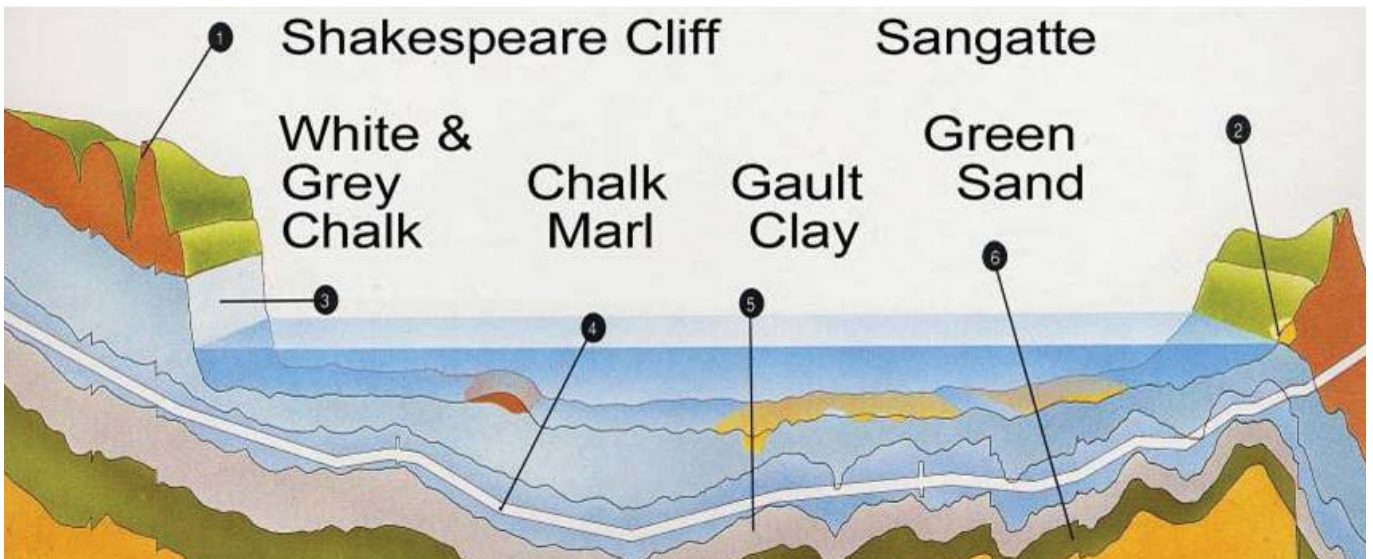
사례연구: Channel 터널 자재 시험에서의 스테인리스강 성능

세이칸 터널과 관련된 자재 성능 자료는 없지만, 영국과 프랑스를 연결하는 Channel 터널(총 49.2km, 해저 37.5km)에서 약간의 자료를 얻을 수 있었습니다. 해저 터널이라는 특이한 환경에서의 성능을 확인하기 위해 터널의 여러 지점에서 스테인리스강 및 기타 자재의 시험을 진행하였습니다.

첫번째 시험은 1994년에 Nickel Development Institute(현재 Nickel Institute)에서 Channel 터널의 자재 성능 심사를 위해 시작되었습니다. 프랑스 및 영국의 스테인리스강 제조업체들이 다양한 등급의 스테인리스강으로 시험재를 제작하였습니다. 이 시험재는 운영기관인 Eurotunnel과 함께 현재 운영 중인 터널 및 수리 중인 터널의 다양한 지점에 설치되었습니다.

요구 등급을 만족하는 니켈성분

1994년에는 기존의 경험에 따라 니켈이 함유된 오스테나이트 스테인리스강 EN 1.4401/AISI 316 이 터널 내부의 여러 설비에 적합한 것으로 나타났습니다. 이 금속은 여러 주요 터널에서 필요로 하는 내부식성과 내화성 요건을 모두



Channel 터널은 영국(왼쪽)에서 프랑스(오른쪽)까지 가는 동안 다양한 종류의 토양과 바위를 통과합니다.

철도 및 하위 바다 터널에 스테인레스 스틸



사용 중인 터널 중 하나의 내부

만족하며 유지보수가 많이 필요하지 않습니다. 예를 들어 터널 전체에 걸쳐 17,000여 개가 있는 전기 스플리터 박스는 1,000°C의 온도에서도 정상 작동해야 합니다. EN 1.4401/AISI 316 등급의 스테인리스강으로 제작된 전기 스플리터 박스는 내화성 시험에서 이러한 요건을 충분히 만족함을 확인할 수 있었습니다.

광범위한 재질 테스트

다양한 등급의 스테인리스강을 시험하고자 했던 초기의 시험은 Eurotunnel에 의해 다양한 종류의 자재가 포함되어 그 범위가 매우 넓어졌습니다. 터널은 장소에 따라 환경이 다르기 때문에, 터널의 여러 곳에 거치대를 설치하고 시험재를 놓았습니다.

이 터널에서는 터널의 전체 길이에 걸쳐 연결되어 있는 한 쌍의 400mm 지름 냉각수관에 의해 20~25°C의 온도가 지속적으로 유지되고 있습니다. 하지만 습도는 위치 및 대기의 염분 함량에 따라 45~76%로 큰 차이를 보이고 있습니다.

대기 혼합물질

터널을 통과하는 여객용 및 화물용 열차는 전력으로 작동하지만, 터널 관리용 열차는 디젤로 작동합니다. 따라서 대기 중에는 배기가스에 의한 소량의 이산화황이 함유되어 있습니다. 시험 결과 대기 중에 터널 라이닝의 시멘트 분진과 바퀴 및 철로의 마찰에 의한 철 입자도 함유되어 있는 것으로 나타났습니다. 해저 환경이라는 특성으로 인해 염소이온도 존재합니다.

지속사용 가능한 스테인리스강: 터널용

이러한 화학물질들은 높은 습도로 인해 부식성이 매우 높아질 수 있습니다. 또한 시속 140km에 달하는 속도로 달리는 열차가 일으키는 바람으로 인해 이러한 부식성이 가속화됩니다. 이것은 다음과 같은 2가지 현상을 유발합니다.

1. 습한 분진 입자가 벽면이나 바닥 표면에 달라붙을 수 있습니다(특히 열차의 이동방향을 바라보고 있거나 이동하는 힘과 직각이 되는 부분).
2. 빠른 속도의 바람, 콘크리트 분진, 철 입자에 의해 보호재가 침식될 수 있습니다. 지속적으로 마모성 물질이 강하게 충돌하기 때문입니다.

이러한 현상으로 인해 분진이 축적되는 과정을 차단할 필요가 있었습니다. 이를 위해 Eurotunnel은 정기적인 세척 일정을 수립하였습니다.

스테인리스강은 또한 표면이 부드럽기 때문에

표 2: Channel 터널의 각 시험 지점별 염소 농도 및 습도

설치기준	염소(1일 mg/m ²)	습도*
PK1511	74	< 10 H/A
PK2102	400	2500 < 5500 H/A
PK3574	142	< 10 H/A
PK3575	80	< 10 H/A
PK5052	228	3 < 30 H/A
PK5877	75	3 < 30 H/A

*시간/년(응축물 측정치)

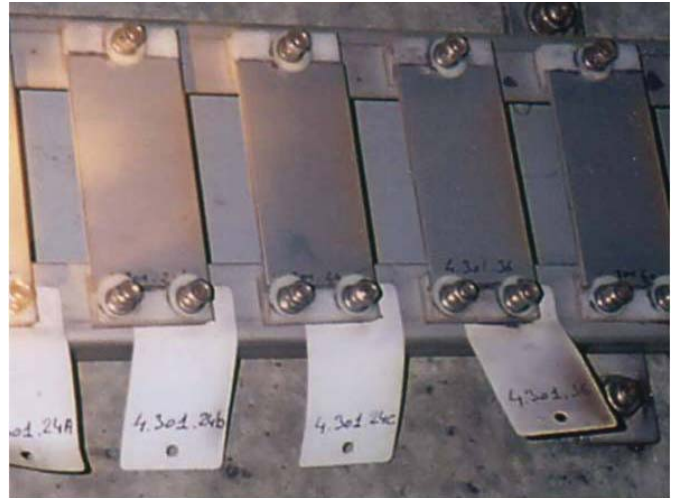
장거리 해저 철도 터널

표면에 부식성 분진이 잘 달라붙지 않고 세척이 간편합니다.

Channel 터널의 대부분은 적절하게 건조한 상태이지만, 시험재를 통한 시험 결과 각 지점별로 환경이 크게 다르다는 사실이 확인되었습니다. 비교를 위해 탄소강 시험재도 사용되었습니다.

각 지점의 염소 농도 및 습도는 표 2에 제시되어 있습니다. 모든 지점에서 이산화황 농도는 별다른 의미가 없는 수준인 1일 10mg/m² 미만이었습니다.

강철 시험재의 중량 손실은 40개월간의 노출기간 후에 측정되었습니다. 그 결과는 표 3에 제시되어 있습니다.



Channel 터널 내부에 설치한 시험재

표 3: 중량 손실(연간 g/m²)

설치 기준	EN 1.4306/AISI 304L 등급	EN 1.4318/AISI 301LN 등급	EN 1.4404/AISI 316L 등급	탄소강
PK1511	0.01	0.04	0.00	10.39
PK2102	2.00	8.49	7.34	276.26
PK3574	0.01	0.06	0.00	10.10
PK3575	0.03	0.02	0.02	7.94
PK5052	0.07	0.15	0.05	27.79
PK5877	0.03	0.07	0.01	40.16

참고: PK 2102에서의 EN 1.4404/AISI 316L 등급 스테인리스강의 높은 중량 손실률은 이 지점의 일부 (전부가 아님) 시험재에 직접 영향을 미친 누수에 의한 것입니다. 탄소강 시험재는 영향을 받지 않았습니다.

SUSTAINABLE
STAINLESS

Channel 터널은 통풍장치(왼쪽) 및 전기 스플리터 박스(아래) 등의 장비에 많은 양의 스테인리스강을 사용하고 있습니다.



결론

터널은 각각 길이, 위치, 사용목적이 크게 다릅니다. 이동시간과 교통혼잡을 줄이기 위해 건설하기 때문에, 유지보수와 수리를 최소화하기 위한 건설자재의 선정이 매우 까다롭게 이루어집니다. 터널은 정부 및 운영업체가 매우 큰 비용을 들이는 시설이며, 이러한 투자의 회수를 위해 수십 년 동안 아무런 문제 없이 운영될 수 있어야 합니다.

따라서 스테인리스강은 터널의 건설 및 터널 내부의 운영장비 제작에 매우 이상적인 자재입니다. 스테인리스강은

- 온도가 상승해도 유독성 가스를 배출하지 않습니다.
- 900°C가 넘는 온도에서도 강도의 대부분이 유지됩니다.
- 부식을 막기 위한 별도의 표면처리가 필요하지 않습니다.
- 다양한 등급과 형태로 사용할 수 있으며 수명이 길고 유지보수가 거의 필요하지 않습니다.

스테인리스강은 이미 전 세계에서 터널 건설과 주요 운영장비의 제작에 널리 사용되고 있습니다. 터널 설계사와 운영업체에게 스테인리스강은 터널 및 운영장비의 안전, 낮은 유지보수 비용, 장기적인 운영을 위한 주요 자재입니다.

참고자료

- Gumpel, P: Localised corrosion and pitting in tunnel construction. Fisher Connect It; Issue 6, 2005년.
- CFA Guidance Note: Fixings and Corrosion; 2002년.
- Products in Application: Tunnel Construction. Halfen Deha. (www.halfen.co.uk)
- Design Fires in Road Tunnels. NCHRP Synthesis 415, 2011년
- Haselmair, H; Morach, R; and Boehni, H: Field and laboratory testing of high alloy steels and nickel alloys used in fasteners in road tunnels. Corrosion Engineering; pp 160-168, 1994년 2월
- Cochrane, D.J.; Grattepanche, E; Baltenneck, S; Baxter, C: The Channel Tunnel: Interim results of materials undergoing performance tests at different tunnel locations. Proceedings of Stainless Steel World Conference 2001, The Hague, the Netherlands: 2001년 11월 13일-15일

부록 A: 지침서

터널 건설자재에 대한 지침은 현지의 법정 기관이나 건설 및 설비장치 협회에서 구할 수 있습니다. 몇몇 예를 들면 다음과 같습니다.

독일

ZTV-ING Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (추가적인 토목공학 기술규격 및 지침, 최종개정: 2010년 4월).

이 문서는 폐쇄형 및 개방형 굴착공법으로 건설하는 도로 터널에 대한 지침을 제공합니다. 용도에 따라 특정한 등급의 스테인리스강이 요구됩니다.

이탈리아

이탈리아의 국가교통국인 ANAS에서 터널 안전에 대한 지침을 정합니다. 이 기관의 지침에 따르면 도시용 터널은 대기에 노출되는 모든 자재가 무독성이고 불연성이어야 하며 연기를 배출하지 않아야 한다고 규정하고 있습니다.

팬, 조명장비 등의 여러 장비는 적어도 90분 이상 최고 400°C에 달하는 온도에서 견딜 수 있어야 합니다. 알루미늄의 한계온도를 뛰어넘는 900°C이상의 온도에서 강도를 유지할 수 있는 스테인리스강의 능력은 이미 실제 화재 시험을 통해 입증되었습니다.

스위스

Swiss Society of Engineers and Architects(SIA)에서 터널 건설업체 및 운영업체를 위한 조언과 정보를 제공합니다. 이 기관의 웹사이트는 www.sia.ch입니다(일부는 영어로 되어있음).

영국

UK Department of Main Roads에서 Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) 라는 온라인 설명서를 관리하고 있습니다. 터널에 대한 정보는 Volume 2: Highway Structures: Design (Substructures & Special Substructures), Materials 에 제시되어 있습니다. 보다 자세한 내용은 www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrbs/를 참조하십시오.

감사의 말

본 문서의 작성에 많은 도움을 주신 다음의 기관에 감사 드립니다.

Annabelle Wilson, Ancon Ltd., United Kingdom

Vittorio Boneschi, Centro Inox, Italy

또한 본 문서에 수록된 여러 이미지의 사용을 허가해 주신 다음의 기관에게도 감사 드립니다.

- Ancon Ltd (영국)
- Cedinox (스페인)
- Centre d'Etude des Tunnels (프랑스)
- Centro Inox (이탈리아)
- D.J. Cochrane, Nickel Institute
- Euro Inox (벨기에)
- Eurotunnel
- Japan Stainless Steel Association
- Marrioff Corp. (핀란드)





International Stainless Steel Forum (ISSF)

Rue Colonel Bourg 120
B-1140 Brussels, Belgium

T: +32 2 702 8915

F: +32 2 702 8912

www.worldstainless.org

SUSTAINABLE
STAINLESS