

더 가볍고 튼튼한 터널 보강 솔루션



안동욱

포스코 철강솔루션연구소
구조연구그룹 책임연구원

1. 머리말

강재(Steel)는 건설, 자동차, 에너지, 조선, 산업기계 등 다양한 분야에 사용되는 소재이다. 강재는 지속적으로 고강도 및 고성능화 중심으로 발전하고 있으며, 강재가 적용되는 제품의 품질향상에 많은 부분을 기여한다.

우리에게 매우 친숙한 자동차 산업을 보면 2000년대 이후, 연비 향상에 대한 기술이 화두가 되었고, 높은 연비는 차체의 중량을 줄이는 것이 가장 확실한 방법이었다. 이러한 시장의 요구에 의해 탄생한 강재의 대표적 산물이 GIGA Steel이라고 할 수 있다.

자동차의 몸체에 사용하는 강재 뿐만 아니라 Stabilizer Bar, Camshaft, Drive shaft 등의 자동차 부품에도 봉강(속이 짝 찬 원형관) 형태의 강재가 사용되고 있었으나, 최근 이러한 봉강을 고강도의 소재를 사용한 강관(속이 빈 원형관)으로 대체하는 사례가 증가하고 있다. 고강도의 강재를 사용할 경우, 동등 이상의 부재 성능을 확보하면서 단면적을 줄여 경량화가 가능하기 때문이다.

대부분의 건설 시공 현장에도 구조보강을 위해 다양한 형태의 강재가 사용되고 있으며, 터널시공 현장도 예외는 아니다. NATM 터널의 시공중 붕괴를 막기위해 설치하는 록볼트, 격자지보재는 강재를 사용하여 구조보강을 하는 대표적 사례이다. 본 기사에서는 록볼트, 격자지보재에 고강도 강재를 적용한 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 지반보강용 강관(KS D 3872)

자동차 산업과는 달리 건설현장에 고강도 강관을 적용하기 위해서는 KS규격화 하는 것이 무엇보다 선행되어야 한다. 이를 위해 2015년부터 강관의 품질 향상 및 안정화를 위해 지속적으로 연구를 수행하였고, 2018년 12월 14일 ‘KS D 3872 지반보강용 강관’ 규격을 신규 제정하게 되었다.

KS D 3872 지반보강용 강관에는 STG800, STG1100H 2가지 종류가 있으며, 각각의 화학 성분 및 기계적 성질은 아래의 표 1, 표 2와 같다.

〈표 1〉 화학 성분

(단위: %)

종류의 기호	C	Si	Mn	P	S
STG800	0.18 이하	0.40 이하	2.00 이하	0.030 이하	0.030 이하
STG1100H	0.30 이하	0.40 이하	2.00 이하	0.030 이하	0.030 이하

필요에 따라 표에 기재한 것 이외의 합금 원소를 첨가할 수 있다.

주문자, 제조사 사이의 협의에 따라 레이들 분석 대신 제품 분석으로 하여도 좋다.

주문자가 제품 분석을 요구한 경우, 표에 기재한 값에 대한 허용 변동값은 KS D 0228의 표 1에 따른다.

〈표 2〉 기계적 성질

종류의 기호	항복점 또는 항복강도 N/mm ²	인장 강도 N/mm ²	연신율 %		굽힘성 ^a		용접부 인장 강도 N/mm ²
			11호시험편	굽힘 각도	안쪽 반지름 (D는 관의 바깥지름)	편평성 평판 사이의 거리(H) (D는 관의 바깥지름)	
STG800	800 이상	860 이상	10 이상	90°	6D	3/4D	860 이상
STG1100H	1100 이상	1300 이상	10 이상	90°	6D	3/4D	1300 이상

비고 1 바깥지름 50mm 이상의 관에 대하여 특별히 필요한 경우, 주문자·제조사 사이의 협의에 따른다.

비고 2 STG1100H의 경우 열처리 후 항복강도와 인장강도를 측정한다. 특별히 더 높은 항복강도와 인장강도가 필요한 경우 연신율 값은 주문자·제조사 사이의 협의에 따른다.

^a굽힘성은 50mm 이하의 관에 대하여 주문자의 지정이 있는 경우에 한하여 실시하며, 그 외의 경우에는 편평시험으로 대신할 수 있다.

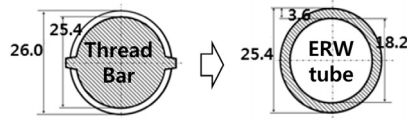
3. STG800 강관 적용 NATM터널 보강제

3.1 SP-록볼트

현재까지는 현장 공급이 용이하고 시공 실적이 가장 많은 이형봉강 록볼트를 주로 사용하고 있다. 하지만 이형봉강 록볼트는 중국산 자재의 시장진입으로 품질에 대한 신뢰도가 떨어지고 록볼트 주변 모르타르 충전시 흘러내림에 의한 밀실한 충전불량, 용수에 의한 부식 등 다양한 문제점이 나타나고 있다(신현강 외 2, 2017). 또한 NATM 터널의 록볼트는 인력시공으로 중량물인 이형봉강을 사용함에 따른 안전 및 시공성 개선에 대한 요구가 있었다.

STG800 강관을 이형봉강을 대체하여 록볼트 보강재로 사용한 SP-록볼트(Smart Pipe-Rockbolt)는 경량화에 따른 시공성 개선 및 그라우트 품질 향상을 기대할 수 있다.

그림 1은 SP-록볼트와 이형봉강 록볼트의 단면 투영도를 나타낸 것이며, 표 3은 SP-록볼트와의 기계적 성질을 이형봉강 록볼트와 비교한 것이다.



〈그림 1〉 이형봉강 록볼트와 SP-록볼트 단면 비교

〈표 3〉 이형봉강 록볼트와 SP-록볼트의 기계적 성질 비교

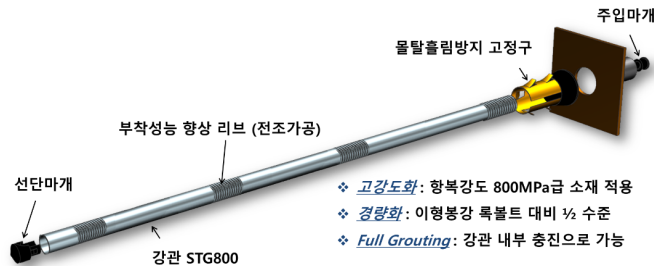
종류	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	연신율(%)
이형봉강	항복강도의 1.15 이상	350 이상	18 이상
STG800	860 이상	800 이상	10 이상

표 4는 SP-록볼트와 이형봉강 록볼트의 단면을 비교하여 표시하였으며, 직경은 모두 25.4mm로 동일하다. 하지만 단면적은 이형봉강 록볼트의 506.5mm²와 비교하여 약 1/2 정도인 246.4mm²로 50% 수준의 경량화가 가능하다.

〈표 4〉 이형봉강 록볼트와 SP-록볼트의 단면 비교

종류	직경(mm)	두께(mm)	단면적(mm ²)	단위중량(kg)		
				3m	4m	5m
이형봉강	25.4	-	506.5	11.93	15.90	19.88
STG800	25.4	3.6	246.4	5.80	7.74	9.67

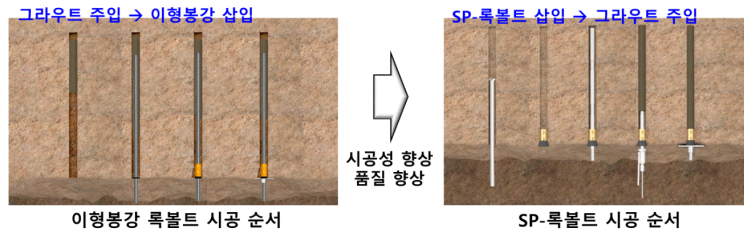
그림 2에 SP-록볼트의 구성 및 형상에 대해 제시하였다. 이형봉강의 대비 강관의 매끈한 표면은 그라우트와의 부착 강도 저하의 원인이 될 수 있다. 이를 개선하고자 전조가공을 통해 강관에 돌기 형상을 구현하였다(전조가공 : 강관의 표면을 롤러로 눌러서 단면 손실없이 형태를 변화시킬 수 있는 가공 방법).



〈그림 2〉 SP-록볼트의 구성 및 형상

이형봉강 록볼트의 경우, 천공 후 록볼트를 삽입하고 그라우트 또는 레진 등을 주입하는 것이 원칙이지만 시공상의 어려움으로 시공효율이 저하되는 문제가 있다. 이러한 시공효율 저하를 개선하고자 일부 현장에서는 그라우트 또는 레진을 주입한 후 록볼트 삽입하는 경우가 있으나 이는 그라우트 품질저하를 야기시킬 수 있다.

SP-록볼트는 천공 후 SP-록볼트를 먼저 삽입한 후 강관의 중공부를 주입관으로 사용하여 그라우트를 주입할 수 있다. 이를 통해 완전 충전에 따른 그라우트 품질 안정화 및 그라우트 주입량 확인도 가능하다. 그림 3에 이형봉강 록볼트와 SP-록볼트의 시공 순서를 비교하였다.



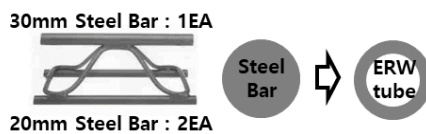
〈그림 3〉 이형봉강 록볼트와 SP-록볼트의 시공 순서

3.2 강관형 격자지보재

강지보재는 NATM공법에서 슛크리트와 록볼트와 함께 터널 굴착시 막장면의 안정성을 확보하기 위한 필수적인 지보재를 말한다. 터널 시공시 강지보재는 굴착한 직후, 록볼트가 설치되기 전, 슛크리트가 경화되기 전까지 굴착된 지반의 변형을 최대로 억제하여 터널의 안정성을 확보하기 위하여 사용된다. 구체적으로 강지보재는 터널 굴착 후 지반의 이완을 최소화하며 굴착면의 초기변형을 억제 할 뿐만 아니라 슛크리트와 강지보재가 일체 거동 할 수 있도록 인터페이스 역할을 한다(정희상 외 3, 2016).

일반적으로 강지보재는 제작된 형상에 따라 H형강, U형강, I형강, Y형 강관, 격자지보재 등으로 구분되는데 국내 NATM터널에서 가장 많이 사용되는 강지보재 중 하나가 격자지보재이다. 격자지보재는 상현재와 하현재의 봉강이 삼각형 또는 사각형의 단면 구조를 이루며 봉강은 스파이더와 결합되는 형태를 지닌다. 하지만 현장에서 격자지보재의 품질을 직접 확인하기 어렵고, 수입산의 저품질의 성능 미달 강재가 반입되면서 품질안정화에 대한 요구가 지속적으로 늘어나고 있다.

강관형 격자지보재는 그림 4의 개념도와 같이 격자지보재의 상현재와 하현재에 사용되는 봉강을 STG800 강관으로 대체하여 제작한다.



〈그림 4〉 봉강형 격자지보재와 강관형 격자지보재의 단면 비교

표 5와 6에는 기존 봉강형 격자지보재와 STG800 강관형 격자지보재의 제원 및 제원을 비교하였다. 봉강과 강관의 기계적 성질을 고려하여 기존 봉강과 동등이상의 부재력 확보가 가능한 STG800 강관의 직경 및 두께를 최적화하였다.

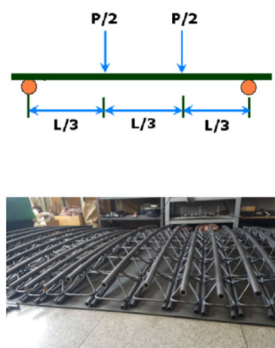
<표 5> 봉강형 격자지보재와 강관형 격자지보재의 제원 비교

종류	화학성분			기계적 성질		
	C	Si	Mn	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	연신율(%)
봉강형 격자지보재	0.16~0.24	0.15~0.24	0.8~1.0	598 이상	520 이상	14 이상
강관형 격자지보재	0.18 이하	0.40 이하	2.0 이하	860 이상	800 이상	10 이상

<표 6> 봉강형 격자지보재와 강관형 격자지보재의 단면 비교

종류		직경(mm)	두께(mm)	단면적(mm ²)	부재력(ton)
상부	봉강형 격자지보재	30.0	-	706.5	22.5
	강관형 격자지보재	31.8	5.6	460.7	22.5
하부	봉강형 격자지보재	20.0	-	314.0	10.0
	강관형 격자지보재	22.2	3.6	210.3	10.3

격자지보재는 스파이더(강연선)와의 용접을 통해 제작이 되므로 사용되는 재료의 탄소당량($C_e = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/15 + Cr/5 + Cu/13 + Mo/4$) 값이 0.5% 이하를 만족해야 한다. 이는 탄소당량이 높을 경우 용접부의 품질이 저하되므로 이를 방지하기 위함이다. 기존 봉강형 격자지보재와 강관형 격자지보재의 성능 및 용접부 품질을 비교하고자 50type, 70type, 95type 별로 각 3개씩, 총 18개의 조건에 대해 4점 휨시험을 실시하였다. 그림 5에는 4점 휨시험 전경을 그림 6에는 4점 휨시험결과를 나타냈다. 4점 휨시험결과 모든 시험조건에서 강관형 격자지보재가 봉강형 격자지보재에 비해 동등 이상의 하중에서 항복하는 것을 확인하였다. 이를 통해 기존 봉강과 스파이더의 용접성을 STG800 강관과 스파이더 용접에서 충분히 확보할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

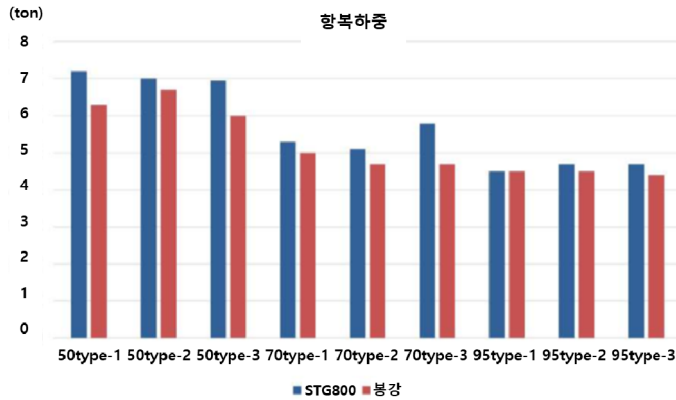


< 4점 휨시험체 제작 >



< 4점 휨시험 전경 >

<그림 5> 성능 및 용접부 품질 비교를 위한 4점 휨시험



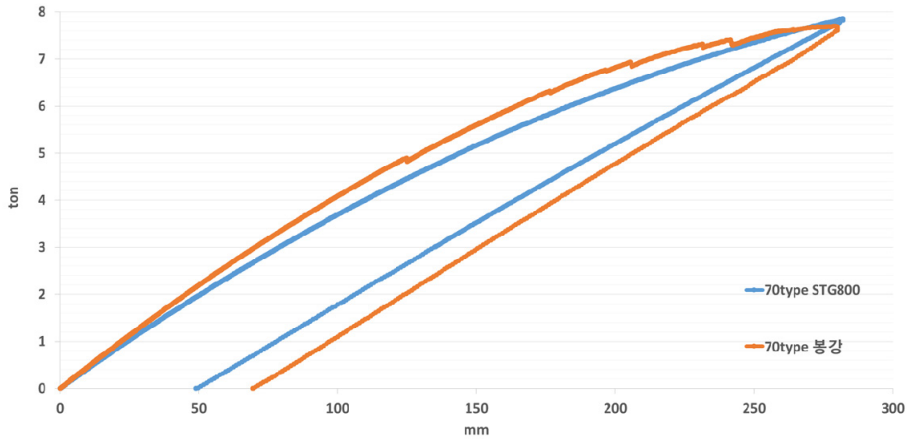
〈그림 6〉 4점 휨시험 결과

격자지보재의 경우, 터널 현장에 시공후 구조성능평가를 하는 것이 불가능하여 지금까지는 대부분 4점 휨시험을 실시하여 성능을 평가하였다. 강관형 격자지보재의 성능을 조금 더 확실하게 판단해보고자 70type으로 봉강형과 강관형의 실물 구조시험체를 제작하여 각각의 성능을 비교해보았다. 그림 7에 실물 구조성능시험 전경을 나타내었고, 그 결과는 그림 8과 같다.



〈그림 7〉 격자지보재 실물재하시험 전경

70Type의 설치 간격을 1.2m로 하여 3열을 설치하였고, 항복될때까지 가력하였다. 그 결과 봉강형 및 강관형 격자지보재 모두 약 7.7ton 수준에서 항복하였고, 이때의 변위도 약 280mm 수준으로 유사하였다. 다만 잔류변위는 강관형 격자지보재(약 49mm)가 봉강형 격자지보재(약 69mm) 보다 20mm 가량 작게 나타났다. 이에 대한 원인은 그림 8의 결과 그래프에서 확인할 수 있는데, 봉강형 격자지보재는 하중의 증가에 따라 변위값이 일시적으로 떨어진 후 다시 상승하는 현상을 볼 수 있다. 이는 봉강과 스파이더의 용접부가 탈락하면서 발생하는 현상이다. 반면, 강관형 격자지보재의 경우 하중 증가에 따른 용접부의 탈락이 없이 항복까지 진행이 되었다. 이를 통해 기존 봉강에 비해 STG800 강관의 용접성이 향상되었다는 것을 파악할 수 있었다.



〈그림 8〉 격자지보재 실물재하시험 결과

4. 맺음말

굉장히 보수적인 건설분야에서 20년 이상 안정적으로 사용해오던 자재를 새로운 자재인 강관으로 대체하여 사용하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 경제성이 기존 제품보다 향상되었다고 하더라도, 규격화 및 설계기준이 뒷받침 되지 않으면 사용하기 어려운 것이 현실이다.

STG800 강관은 기존의 봉강 대비 항복강도가 약 2배 향상되므로 동일한 부재력을 확보하는데 단면적을 줄일 수 있으므로, 단면 최적화에 따른 경제성 확보가 가능하다. 사용되는 자재의 중량을 절감할 수 있기 때문에, 톤당 단가는 봉강보다 비싸지만 m당 단가는 봉강보다 약 10% 경제적으로 공급이 가능한 것이다. 또한 KS 규격화 및 설계기준화도 마련되어 있는 상황이다. 이를 바탕으로 현재 SP-록볼트는 터널 본선 및 수직구 보강용으로 4개 현장에 시공이 완료되었으며, 강관형 격자지보재는 초도 현장 공급을 진행중이다.

향후 10년 이내에 GTX사업, 인덕원-동탄 복선전철, 신안산선 등 많은 지하터널의 시공이 예상된다. 이렇게 국내 대심도 도시 철도망의 건설이 지속적으로 증가하고 있기 때문에, 더 가볍기 때문에 시공이 편리하고 안전하며, 더 강해서 튼튼하게 지반을 보강해줄 수 있는 고강도의 강재를 사용한 터널 보강 솔루션의 적용을 기대해 본다.

참고문헌

1. 정혁상, 신영완, 송기일, 신중호, 2016, 강재 품질에 따른 격자지보재의 성능평가, 한국터널지하공간학회논문집, 18(2)165-173(2016).
2. 신현강, 정혁상, 안동욱, 2017, 고강도 강관을 적용한 SP-록볼트 개발 및 현장 적용을 위한 연구, 한국터널지하공간학회논문집, 19(4)651-668(2017).

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]