

비약액계 급결성 슛크리트재의 강도특성과 친환경성

The Strength and Environmental Friendly Characteristics of Non-chemical Accelerating Shotcrete

천 병 식[†] · 박 덕 흠¹⁾ · 강 형 남²⁾ · 도 종 남²⁾

Chun, Byungsik · Park, Dukhyum · Kang, Hyoungham · Do, Jongnam

ABSTRACT : The shotcrete is a NATM technique as a major tunnel support for ground stability after tunnel excavation. Instead of a general concrete lining method, it is a trend for curtail of construction periods and reduction of construction expenses that required to use of the permanent shotcrete lining. This high-strength shotcrete is required to use as a permanent shotcrete lining. This brought out the solution of environmental pollution and harmfulness to human. Accordingly, in this study specimens for strength measurement were made to develop shotcrete possible to develop materials in early with cement mineral accelerator as NATM method construction. It was compared with existing shotcrete material, unconfined compression test, flexural strength test, antiwashout underwater test were experimented. The fish poison test was experimented to evaluate an influence of environment. As a results of the test, unconfined compressive strength and flexural strength were equivalent with 28-curing day strength of existing material. An antiwashout of research subject material was revealed excellently in antiwashout Underwater test. As a results of the fish poison, an evaluation research subject material was founded more environmentally friendly than existing shotcrete.

Keywords : Shotcrete, NATM, Environmental friendly characteristics, Antiwashout

요 지 : 슛크리트는 NATM공법에서 터널 굴착 후 지반안정을 위한 주요 지보재로서 시공기간의 단축과 시공비용 절감을 위해 일반콘크리트 라이닝을 대신하여 영구 슛크리트 라이닝의 사용이 요구되고 있는 추세이다. 이러한 영구 슛크리트 라이닝으로 사용하기 위해 고성능고강도 슛크리트가 요구되고 있으며, 인체에 대한 유해성 및 환경오염의 감소방안도 해결해야 할 문제로 부각되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 NATM공법 시공시 초기에 고강도 발휘가 가능한 슛크리트재료를 개발하기 위하여 시멘트광물계 급결재를 사용하여 강도측정용 공시체를 제작하여 기존에 쓰여지고 있는 슛크리트재료와 비교하여 일축압축시험, 휨강도시험, 수중불분리시험을 실시하였고, 환경영향성을 평가하기 위해 어독성시험을 실시하였다. 시험결과, 일축압축강도 및 휨강도는 연구대상재료의 재령 7일강도가 기존재료의 28일 강도와 대등하였으며, 수중불분리시험 결과 연구대상재료의 불분리성이 우수하게 나타났다. 환경영향성(어독성시험)평가 결과 기존스�크리트에 비해 연구대상재료가 친환경적인 것으로 나타났다.

주요어 : 슛크리트, NATM, 친환경적 특성, 수중불분리

1. 서 론

스�크리트(shotcrete)는 압축공기를 이용하여 굴착된 지반면에 뿜어 붙여지는 몰탈 혹은 콘크리트를 말하며, NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법에서 터널 굴착 후 지반안정을 위한 주요지보재로 사용된다. 또한, 슛크리트의 가장 중요한 역할은 굴착면에 밀착시켜 콘크리트 아아치를 형성함으로써 지반의 이완을 방지하여 원지반의 강도를 유지하고, 콘크리트 아아치로써 하중을 분담함으로써 국부적인 응력집중을 방지한다. 또한 암괴의 이동방지 및 낙반의 방지, 굴착면의 풍화방지를 하는 것이다(樓井春輔, 1992).

스�크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는

달리 초기강도 확보와 리바운드량 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결재를 사용하고 있다(이규필 등 2005). 현재 사용되는 급결재는 4가지로서 실리케이트계(물유리계), 알루미늄네이트계, 시멘트 광물계, 알카리프리계가 사용되고 있으나, 실리케이트계는 사용량 증가에 따른 장기강도 저하와 용출에 의한 환경오염이 되는 단점이 있으며, 알루미늄네이트계는 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있지만, 사용량이 초과되면 장기강도를 급격히 저하시키고 gel time이 길어지며 강알카리로 인한 작업자의 화상 등 취급상의 문제가 발생하고 있어 유럽의 일부 국가에서는 사용을 금지하고 있다(박해균 등 2004). 슛크리트는 급결제의 품질과 콘크리트의 제반 여건에 따라 리바운드량이 증가하고 시공

† 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

1) 비희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

능률이 저하되는 등 품질의 관리가 매우 까다롭고 장기강도가 감소하는 문제가 있어 대부분의 건설현장에서 해결책에 부심하고 있다. 이러한 문제 외에도 시공기간의 단축과 시공비용 절감을 위해 일반콘크리트 라이닝을 대신하여 고성능 고강도의 영구샷크리트 라이닝의 사용이 요구되고 있는 추세이며, 인체에 대한 유해성 및 환경오염의 감소방안도 해결해야 할 문제로 부각되고 있다(김대영 등 2006).

이에 대한 대안으로 1990년대 중반 유럽에서 알칼리프리계 액상급결제가 개발되어 기존 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 고강도 발현 및 작업자 안전을 확보하려는 환경친화적인 제품으로 각광받고 있다. 그러나 일부제품의 경우 용수부위에서 초기강도 발현이 다소 늦어지며 급결제 탱크, 압송펌프, 압송관에 대해서 부식방지를 위한 재료의 사용이 요구되어 사용이 까다로운 단점이 있다(마상준 등 2005).

샷크리트공법이 광범위하게 사용되기 시작한 것은 1950년대 후반 Austria의 L. V. Rabcewicz 박사가 NATM공법을 터널공사에 적용하고 부터이다(Franklin et al., 1989). 국내 NATM공법의 터널적용은 1980년대 서울 지하철 3호, 4호선이 처음 시작되면서 지하철, 도로터널, 철도터널, 고속전철, 지하 공동구 등에 급속도로 적용되고 있다. 샷크리트는 록 볼트(rock bolt)와 함께 NATM에 이용되는 중요한 지보공의 하나로 터널이나 큰 공동구조물의 라이닝, 비탈면, 법면, 벽면의 풍화나 박리(剝離) 박락(剝落)의 방지, 터널, 댐 및 교량의 보수·보강공사 등에 널리 사용되고 있다(이양규 등, 2004 ; 마상준 등, 2005).

1990년대부터 북유럽을 중심으로 한 국외에서는 샷크리트의 고성능화를 위하여 미분말 혼화재인 실리카흄(silica fume)을 필수적으로 사용하고 있다(Dim-mock, 1999). 그러나 실리카흄의 생산에 전력이 많이 소요되는 관계로 전력 비용이 비싼 국내에서는 생산이 전혀 이루어지지 않고 있으며, 가격 자체도 시멘트 단가의 최대 20배 이상까지 이르고 있다. 더욱이 실리카흄을 다량으로 사용할 경우 일반적으로 동일한 유동성을 얻기 위해 단위수량이 증가하여 초기 균열 발생 등의 문제점이 발생하기도 하며, 실리카흄을 혼입한 경우 블리딩이 작기 때문에 보수수량이 많게 되어 결과적으로 건조수축이 크게 발생하고 고가인 고성능 감수제의 사용량이 비례적으로 증가하게 되는 단점을 가지고 있다(박해균 등, 2004).

한편 최근 환경에 대한 관심이 증대되면서 샷크리트의 초기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않는 환경 친화적인 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 유럽에서 개발된 알칼리프리계 액상급결제와 일본에서 개발된 시멘트 광물계

(칼슘 알루미늄에이트) 분말급결제를 들 수 있다. 알칼리프리계 급결제는 기존 급결제의 단점을 보완하고 고강도 발현 및 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 각광받고 있다. 하지만 비교적 단가가 높으며, 급결제탱크, 압송펌프, 압송관에 대해서 부식방지 등의 부가적인 처리가 필요하다는 단점이 있다(박해균 등, 2004). 또한 노르웨이 도로국(NPRA)에서는 상품화된 여러 종류의 알칼리프리계 급결제에 대한 시험결과, 일부 제품의 경우 용수부위에서 초기강도의 발현이 다소 늦어진다고 보고하고 있다(Grov, 2001).

시멘트 광물계 급결제는 시멘트 중에 존재하는 급결성 광물인 칼슘알루미늄에이트 광물을 별도로 합성하여 분쇄한 분말형 급결제로서, 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도 발현이 안정적이기 때문에 특수시멘트가 발달한 일본에서는 급결제 시장의 90%를 차지하고 있다(박해균 등, 2004). 시멘트 광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 강하기 때문에 용수부위에서 샷크리트 타설이 용이하며 장기강도의 손실이 극히 적다는 점이다. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 산성도 수준을 가지고 있기 때문에 유해성이 적으며, 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화가 적어 현장에서 샷크리트의 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 NATM공법 시공시 초기에 고강도 발현이 가능한 샷크리트재료를 개발하기 위해 시멘트 광물계 급결제를 사용한 강도측정용 공시체를 제작하여 기존에 쓰여지고 있는 샷크리트재료와 비교하여 일축압축 시험, 휨강도시험, 수중불분리시험을 실시하였고, 환경영향성을 평가하기 위해 어독성시험을 실시하였다.

2. 시멘트광물계 샷크리트재의 특성

2.1 급결제의 특성

시멘트 광물계 급결제는 시멘트 중에 존재할 수 있는 급결성 광물인 칼슘알루미늄에이트 광물을 별도로 합성하여 분쇄한 분말형 급결제로서 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이기 때문에 특수시멘트가 발달한 일본에서는 급결제 시장의 90% 이상을 점유하고 있다(김대영 등 2006).

시멘트 광물계는 칼슘설퍼알루미늄에이트계와 칼슘알루미늄에이트계로 나눌 수 있다. 칼슘설퍼알루미늄에이트계는 칼슘알루미늄에이트계보다 알칼리 함유량이 낮아 인체 유해성이 낮고 환경적인 면에서 유리하며 장기강도 면에서는 더 우수하나 응결시간이나 초기강도에서 다소 떨어진다. 또한 칼슘알루미늄에이트계가 시멘트 중량 대비 5~10%를 사용하는데 비해 칼슘설퍼알루미늄에이트계는 시멘트 중량 대비

표 1. 국내 숯크리트 급결제의 장단점 비교

종 류	첨가량 (시멘트%)	장 점	단 점
연구 대상 급결제 시멘트 광물계 (칼슘설퍼알루미네이트계)	10~15	급결성이 우수. 수시간 고강도 발현 및 장기강도 우수. 인체에 유해성이 낮고 환경오염이 적음.	전용 장비가 필요. 칼슘알루미네이트계 보다 고가임.
시멘트 광물계 (칼슘알루미네이트계)	5~10	급결성이 우수. 용수부위 사용에 적합. 장기강도 저하가 적음.	전용 장비가 필요 고가임.
알카리 프리계	5~10	알카리 함유량이 낮음.	부식방지설비가 필요 용수부위에 초기강도 저하 고가임.
무기염계 (실리케이트계, 액상)	4~6	저첨가로 우수한 급결효과. 저가.	용수부위, 장기강도 및 내구성 저하, 강알카리성
무기염계 (알루미네이트계, 분말 또는 액상)	5~10	우수한 급결효과. 실리케이트계보다 장기강도 저하가 적음.	사용량 초과시 내구성 저하. 강알카리 사용시 환경오염.

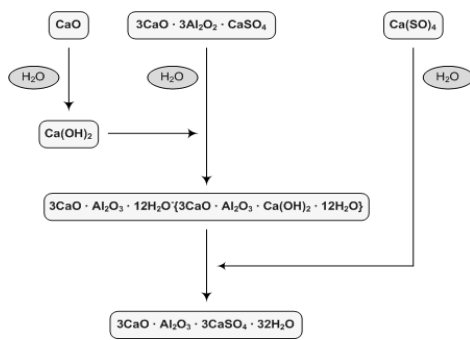


그림 1. 화학반응 플로우차트

10~15%로 더 많이 첨가해야 한다. 이외에도 현재 국내에서 사용되고 있는 숯크리트 급결제의 성능을 비교한 개략적인 특성은 표 1과 같이 요약할 수 있다(김대영 등, 2006).

본 연구에서 사용된 급결제는 칼슘설퍼알루미네이트계로 급결제의 주성분인 칼슘설퍼알루미네이트 성분과 시멘트계 성분이 물과 수화반응을 일으켜 칼슘설퍼이트수화물(CSH)와 수산화칼슘(Ca(OH)2)과 같은 수화물을 생성하게 된다. 이 수화물과 칼슘 알루미네이트 성분이 급격하게 반응하여 침상형결정구조인 에트링자이트(Ettringite, 3CaOAl2O3 · 3CaSO4 · 32H2O)를 다량 형성하게 된다(그림 1 참조). 이러한 결정은 초기에 우수한 급결력을 확보하고 장기강도 저하를 방지하게 된다. 또한 베이스 콘크리트에 사용되는 혼

표 2. 숯크리트 배합설계

구분	W/C(%)	S/a(%)	사용량(kg/m ³)					급결제
			W	C	S	G	CMC-SP (혼화제)	
기존 재료	47.6	63	214	450	1027	587	-	(무기염계) 40(C×11.2%)
개발 재료	47.5	60	190	400	1027	694	4.8 (C×1.2%)	(시멘트광물계) Natmic T10 : 40 (C×10%)

* 용어: W/C(물시멘트비), S/a(잔골재율), W(물), C(시멘트), S(잔골재), G(굵은골재)

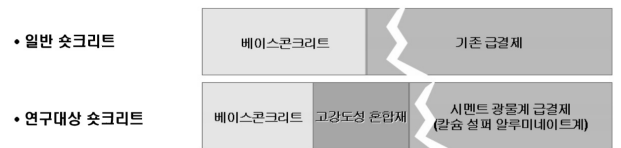


그림 2. 일반 숯크리트와 연구대상 숯크리트의 비교

합재는 콘크리트 내에 생성되는 수화물을 치밀하게 하여 안정적인 고강도 발현이 되도록 역할을 하게 된다.

일반적인 숯크리트와 연구대상 숯크리트의 특성은 그림 2와 같으며 베이스콘크리트에 급결제를 첨가하는 일반 숯크리트와는 달리 연구대상 숯크리트는 고강도성 혼합재가 첨가된 베이스콘크리트에 시멘트광물계 급결제를 첨가하는 것이 특징이다.

3. 실내시험

3.1 시료의 배합비

본 연구에서 사용된 공시체의 배합비는 표 2와 같으며 시멘트는 보통포틀랜드시멘트로 비중 3.15이고, 모래는 한강하류에서 채취하여 공기 중에서 햇빛에 건조시켜 사용하였으며 비중 2.62, 건조단위중량 1.68t/m³, 조립율(F.M)

2.85로 통일분류법상 SP로 분류되었다. 색상은 최대 치수 13mm, 비중 2.66이며 혼화제로 고성능감수제를 시멘트 중량의 1.2% 첨가하였다. 급결제는 시멘트광물계(칼슘설퍼알루미늄이트계)를 시멘트 중량의 10% 사용하였다. W/C는 47.6%로 고정하였고 공기량은 3%로 제한하였다.

3.2 일축압축강도 시험

숏크리트재에 대한 대표적인 평가기준은 일축압축강도 시험이다. 터널표준시방서와 터널설계기준에는 숏크리트의 재령 1일 압축강도 100kgf/cm² 이상, 재령 28일 180kgf/cm² 이상 되도록 배합하여야 한다고 규정하고 있으며 일본토목학회 콘크리트 표준시방서(뽀칠콘크리트용 급결제 품질규격안 시험방법 JSCE-1986)에서는 표 3과 같이 초결 5분 이내, 종결 15분 이내, 재령 1일 압축강도 90kgf/cm² 이상, 재령 28일 급결제가 첨가되지 않는 콘크리트 강도의 75% 이상으로 규정하고 있다. 이외에도 한국도로공사에서는 재령 28일 기준 200kgf/cm² 이상, 서울시지하철 건설본부는 재령 28일 기준 210kgf/cm² 등으로 대동소이하다.

현재 가장 많이 사용되는 무기염계 급결제를 사용한 숏크리트와 시멘트광물계를 혼합한 숏크리트의 3시간, 1일, 7일, 28일 재령에서 일축압축강도를 비교하기 위해 만능재하시험기를 이용하여 일축압축강도시험(KS F 2405)을 실시하였다.

일축압축강도 시험을 위한 공시체는 직경 10cm, 길이 20cm로 하였는데, 이는 KS F 2403(콘크리트의 강도시험용 공시체의 제작방법)을 참고하여 Ø10cm×20cm로 제작하였다. 공시체는 원형시편으로 제작되었으며(KS F 2425, 시험실에서 콘크리트 시료를 만드는 방법), 원형몰드에 재령 3시간, 1일, 7일, 14일, 21일, 28일 별로 공시체를 제작한 후 일축압축강도시험을 실시하였다.

3.3 휨강도 시험

콘크리트 구조물에서 작용하는 주요 응력은 압축력, 전단력, 그리고 휨모멘트력이 있는데, 이 중에서 콘크리트의 안정성에 가장 취약한 것은 휨모멘트력이다. 콘크리트 공시체에 대하여 휨모멘트를 가하여 휨, 즉 압축력과 함께 상대적으로 연약한 인장력에 대한 내인장성을 확인한다.

공시체의 휨강도시험을 위한 공시체의 치수는 KS F 2403(콘크리트의 강도시험용 공시체의 제작방법)을 참고하여

15cm×15cm, 길이 55cm로 하였다.

휨강도는 사각형 강제 빔몰드(15×15×55cm)를 사용하여 으며 숏크리트 공시체를 제작한 후 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법, 중앙점재하법)규정에 의거 3시간, 1일, 7일, 28일 재령의 휨강도를 측정하였다.

3.4 환경영향성 평가(어독성시험)

3.4.1 시험개요

일본에서는 약액주입공법에 의한 지반개량시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈되어 주변의 토양 및 지하수를 오염시킨 사례가 종종 보고되고 있으므로, 주입공사를 수행해야 할 경우 주변 환경에의 영향을 고려하여 적절한 공법과 재료를 선택하도록 법적으로 규제하는 등 환경오염 방지를 위해서 노력하고 있다. 그러나, 국내에서는 지금까지 약액주입공법에 의한 피해사례가 보고된 적이 없어 외국의 사례를 통해 추정만 할 뿐이다(원종필 등, 2005).

1974년 일본 건설성에서 제정한 「약액주입공법에 의한 건설공사 시공에 관한 잠정지침」에 의하면 주입 시공 후 주변의 수질기준인 pH를 8.60이하(공사 직전의 측정치가 8.60을 초과할 때에는 해당 측정치 이하)로 제한(천병식, 2005)하고 있으므로 본 시험에서는 기존숏크리트재료와 연구대상숏크리트재료를 대상으로 pH 상승에 의한 어독성을 측정함으로써 환경영향성을 평가하였다.

3.4.2 시험장치 및 조건

고결체로부터 용탈된 알칼리에 의한 어독성을 평가하기

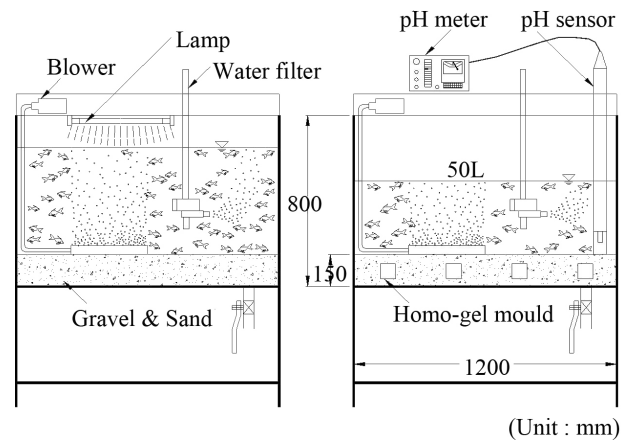


그림 3. 어독성 시험 장치(천병식, 2005)

표 3. 뽀칠콘크리트용 급결제 품질규격(안) 시험방법 JSCE-1986

항목	응결시간(분)		압축강도(kgf/cm ²)		
	초결	종결	12시간	24시간	28일
품질규격	5 이내	15 이내	10이상	90이상	무첨가 콘크리트의 75%이상

위하여 「KS M 0111」에 규정된 「어류에 의한 급성 독성시험」(한국표준협회, 1993)과 어류에 대한 주입재 영향 평가 시험방법 등에 근거하여 시험장치를 그림 3과 같이 구성하였다(천병식, 2005).

3.4.3 시험방법

시험수조는 깨끗한 유리 및 스테인레스틸로 용량이 약 50ℓ 이상 되도록 설계하고, 공기송풍이 가능하고 수온은 25℃로 지정온도를 유지할 수 있도록 자동온도조절장치를 부착하였다. 또한, 공시어의 급격한 환경변화에 대한 대책으로 수조에서 순응할 수 있도록 7일간 방치하였다.

공시어는 수온, 먹이, 취급 등 시험실 내의 생존조건에 적합한 것으로 크기가 고르고 건강하며 구입하기 쉬운 금붕어로 하였다.

pH meter는 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 Portable pH meter를 사용하였으며, 충분한 산소를 공급하기 위해 blower를 부착하였다. 또한 본 시험의 시험조건 결정을 위해 사용된 공시어는 길이 6~8cm의 금붕어 20마리를 1조로 하였다.

본 시험의 시험조건을 결정하기 위해서 실리케이이트계 급결제와 시멘트광물계 급결제를 혼합한 숯크리트 공시체를 표면적이 일정하게 유지되도록 물로 채워진 수조에 넣고 시험하였다.

3.5 수중불분리 및 pH시험

3.5.1 시험개요

터널 굴착시 지하수위는 대개 장기간에 걸쳐 저하되지만 숯크리트, 라이닝은 지하수에 노출되어 있게 된다. 이렇게 지하수에 침수되어 있는 경우를 가정하여 숯크리트는 수중에서도 흐트러지거나 분리됨이 없이 경화되어야 한다. 현재 국내 재료시험 방법에서는 모르타르 재료의 수중불분리 특성의 유무를 판별할 수 있는 정확한 시험방법 및 기준이 없는 실정이며, 일반적으로 수중불분리 특성을

분석하기 위해 적용되고 있는 것은 수중불분리성 혼화제를 사용한 콘크리트의 품질규준이다(김진철 등 1998). 본 연구에서는 연구대상 숯크리트의 수중불분리성능을 평가하기 위해 pH시험을 수행하여 그 결과를 평가하였다.

3.5.2 시험장치 및 시험방법

물은 신선한 증류수를 사용하는데 이는 이산화탄소를 제거하기 위해 사용하기 바로 직전에 증류한 것, 또는 다른 방법으로 준비한 것으로서 최소한 동등한 순도의 물을 의미한다. 물은 내약품성 유리로 제작된 용기에서 사용 바로 직전에 증류하고 냉각하여 사용하였다. 유리 용기는 용량 50mL 내약품성 유리로 만든 것으로서 연마된 고무마개가 부착된 것을 사용하였다.

pH값의 측정은 실온에서 2회에 걸쳐 시행하였고, 증류수를 사용하여 유리 용기에 시료 물질 10% 현탁액을 혼합한 후 현탁액의 pH값을 0.1 단위까지 정확하게 측정하였다.

4. 시험결과

4.1 일축압축강도시험 결과

무기염계와 칼슘설퍼알루미네이트계에 대해서 재하속도

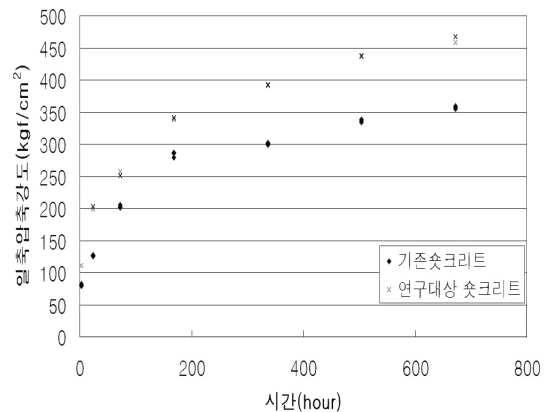


그림 4. 일축압축강도시험 결과

표 4. 일축압축강도 측정 결과(kgf/cm²)

재 령		3 hour	1일(24 hr)	3일(72 hr)	7일(168 hr)	14일(336 hr)	21일(504 hr)	28일(672 hr)
기존 숯크리트	1	26.1	125.8	143.3	166.0	195.8	208.5	226.1
	2	20.3	105.2	132.5	175.3	201.2	216.3	234.0
	3	20.5	112.0	155.6	189.2	215.9	224.2	249.3
	평균	23.3	114.3	143.4	177.2	204.6	216.3	236.1
개발대상 재료	1	25.2	216.3	294.1	340.2	376.2	418.2	437.7
	2	35.0	167.2	284.5	362.3	412.5	442.0	462.4
	3	29.0	157.7	319.6	359.6	432.8	463.6	475.1
	평균	30.1	180.4	299.4	360.4	406.5	443.3	458.4

1.0mm/min로 수행한 일축압축시험을 실시한 결과는 그림 4 및 표 4와 같으며, 무기염계와 칼슘설퍼알루미네이트계 슛크리트 모두 국내 기준인 재령 1일강도 100kgf/cm²을 상회하였다. 칼슘설퍼알루미네이트계의 강도는 무기염계보다 재령 3시간 강도는 약 1.30배, 재령 1일 1.60배, 7일 2.00배, 28일 1.94배 더 크게 나타났다.

강도발현 경향을 살펴보면 칼슘설퍼알루미네이트계의 초기 강도는 예상치보다 낮았으나 재령 1일 이후부터 강도는 두드러지게 증가하여 7일강도가 이미 국내 28일 강도 기준인 200kgf/cm²을 초과하였다. 1일부터 14일까지 지속적으로 증가하다 14일부터 28일까지는 완만히 증가함을 알 수 있었다.

무기염계 또한 일축압축강도가 지속적으로 증가하였으나 재령 3일부터는 칼슘설퍼알루미네이트계 일축압축강도의 50%정도의 강도가 발현 되었으며, 칼슘설퍼알루미네이트계의 재령별 강도발현 경향과 같이 재령 14일 이후부터는 일축압축강도가 완만히 증가하였다.

4.2 휨강도시험 결과 및 분석

무기염계와 칼슘설퍼알루미네이트계의 휨강도를 비교하기 위해 휨강도시험을 실시하였고, 그 결과는 그림 5 및

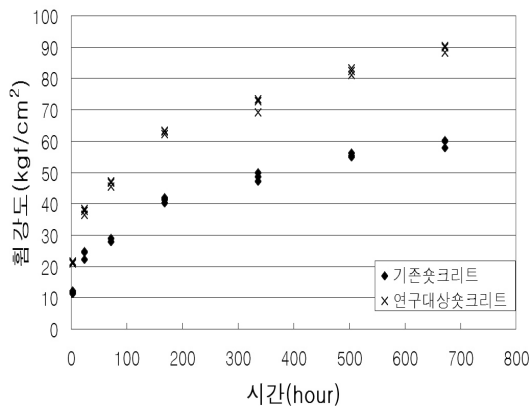


그림 5. 휨강도시험 결과

표 5. 휨강도 측정 결과(kgf/cm²)

재 료	재 령	3 hour	1일(24 hr)	3일(72 hr)	7일(168 hr)	14일(336 hr)	21일(504 hr)	28일(672 hr)
	기존 슛크리트	1	12.2	21.5	26.9	41.8	48.7	54.3
2		11.3	22.8	27.9	40.2	47.8	52.5	58.6
3		12.0	20.3	28.8	39.5	45.6	53.4	55.7
평균		12.0	22.3	28.8	39.5	45.6	53.4	57.2
개발대상 재료	1	20.9	37.7	45.6	63.0	72.7	82.5	89.9
	2	21.2	38.4	46.7	65.5	71.2	80.2	90.0
	3	21.7	36.5	47.2	63.3	69.6	77.8	86.1
	평균	21.3	37.5	46.5	63.9	71.2	80.2	88.7

표 5와 같다. 칼슘설퍼알루미네이트계 슛크리트의 재령 28일 평균휨강도는 88.7kgf/cm²였고 무기염계스츛크리트의 재령 28일 평균휨강도는 57.2kgf/cm²로 나타났다.

강도 증가경향은 두 재료 모두 재령 7일까지의 증가기울기가 재령 7일 이후보다 더 컸으며 무기염계의 경우 14일~28일 구간에서 60kgf/cm²에 수렴하였으나 칼슘설퍼알루미네이트계의 휨강도는 동일 구간에서 꾸준히 증가하는 경향으로 나타났다.

4.3 환경영향성평가(어독성시험) 결과

본 시험에서는 무기염계와 칼슘설퍼알루미네이트계 슛크리트를 대상으로 pH상승에 의한 어독성을 측정함으로써 환경영향성을 평가하였다(그림 6 참조).

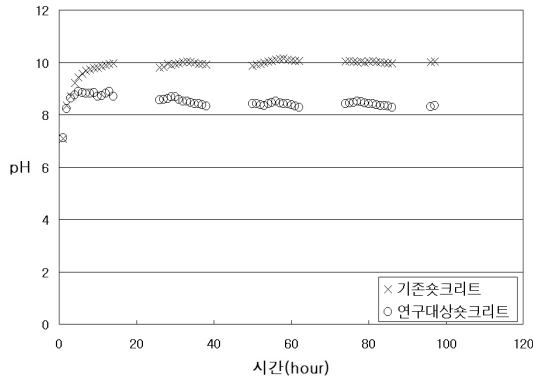
무기염계 슛크리트의 경우 시험시작 초기에 pH가 급격히 증가하여 수침 30분후 pH 10에 이르고, 이후 시간이 지남에 따라 pH가 일정하게 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 칼슘설퍼알루미네이트계 슛크리트의 경우 pH 9까지 증가하다가 서서히 감소하여 약 pH 8.3에 수렴하는 경향을 보였다.

또한, 공시어수는 무기염계의 경우 시험 시작 10분 이내에 2마리가 폐사하였고 지속적으로 감소하여 1시간 경과 후엔 11마리가 폐사하였는데 이는 pH 상승에 의한 수조속 물의 알칼리화 때문인 것으로 판단된다. 이에 비해 칼슘설퍼알루미네이트계 슛크리트의 경우 공시어는 초기 숫자인 30마리를 유지하였으며 이는 알칼리 용탈량이 적기 때문인 것으로 판단되었다.

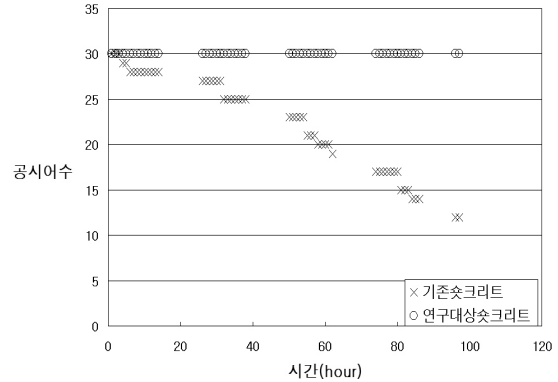
4.4 수중불분리 및 pH시험 결과

본 시험에서는 무기염계와 칼슘설퍼알루미네이트계 슛크리트를 대상으로 pH를 측정하여 수중불분리성을 평가하였다.

시험결과는 표 6과 같으며 무기염계의 경우 수침 1분 후



(a) pH 변화 비교



(b) 공시어 생존률 비교

그림 6. 어독성시험 결과

표 6. 수중불분리 및 pH시험 결과

	1분	10분	20분	40분	60분
기존재료	9.23	9.84	9.98	10.04	10.13
개발대상재료	7.83	8.22	8.45	8.46	8.45

의 현탁액에 대해 pH가 9.23, 10분 후 9.84에 이르렀으며 40분 후는 pH 10.10 전후에서 수렴되는 경향을 보였고 이는 어독성시험 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 칼슘설퍼알루미늄에이트계의 경우 수침 1분후 현탁액은 pH 7.83, 10분 후는 pH 8.22였으며 20분 이후는 pH 8.45 전후에서 수렴되는 경향을 보였다. 이는 칼슘설퍼알루미늄에이트계 재료의 알칼리 함유량이 낮기 때문인 것으로 판단되며 어독성시험 결과와도 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 NATM공법 시공시 초기에 고강도 발현이 가능한 숯크리트 재료를 개발하기 위하여 시멘트광물계 급결제를 사용하여 강도촉정용 공시체를 제작하여 기존 숯크리트 재료와 비교하여 강도시험 및 환경영향성 평가를 실시 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 재령별 일축압축강도시험 결과 무기염계와 칼슘설퍼알루미늄에이트계 숯크리트 모두 국내기준인 재령 1일 강도 100kgf/cm^2 을 상회하였다. 칼슘설퍼알루미늄에이트계 재료의 강도는 무기염계 재료보다 재령 3시간 강도는 약 1.30배, 재령 1일 1.60배, 7일 2.00배, 28일 1.94배 더 크게 나타났다. 또한, 재령 28일 강도는 평균 458.4kgf/cm^2 으로 국내 기준치(200kgf/cm^2)보다 2배 큰 강도가 발현되었음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구대상재료를 현장에 적용시 상당한 공기단축 효과가 있을 것으로 사료된다.

(2) 재령별 휨강도시험 결과 칼슘설퍼알루미늄에이트계 숯크리트의 재령 28일 평균휨강도는 88.7kgf/cm^2 였고 무기염계의 경우 28일 평균휨강도는 57.2kgf/cm^2 로 나타났다. 강도 증가경향을 보면 두 재료 모두 7일까지의 증가기울기가 7일 이후보다 더 컸으며 무기염계의 경우 14일에서 28일 구간에서 60kgf/cm^2 에 수렴하였으나 칼슘설퍼알루미늄에이트계는 동일 구간에서 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

(3) 어독성시험 결과 무기염계 숯크리트의 경우 시험시작 초기에 급격하게 pH가 증가하여 수침 30분후 pH 10에 이르고, 이후 시간이 지남에 따라 pH가 일정하게 수렴하였다. 칼슘설퍼알루미늄에이트계 숯크리트의 경우 pH 9까지 증가하다가 서서히 감소하여 약 pH 8.3에 수렴하였다. 또한 공시어수는 무기염계의 경우 시험 시작 10분이내에 2마리가 폐사하였고 지속적으로 감소하여 1시간 경과 후엔 11마리가 폐사하였는데 이는 알칼리 성분이 강하기 때문인 것으로 판단되었다. 이에 비해 칼슘설퍼알루미늄에이트계 숯크리트의 경우 공시어가 초기 숫자인 30마리를 유지하였으며 이는 알칼리 용탈량이 작기 때문인 것으로 판단되었다.

(4) 수중불분리 및 pH시험 결과 무기염계의 경우 수침 1분 후 현탁액은 pH가 9.23, 10분 후 9.84에 이르렀으며 40분 후는 pH 10.1 전후에서 수렴되었고 이는 어독성시험 결과와 유사함을 알 수 있었다. 칼슘설퍼알루미늄에이트계의 경우 수침 1분 후 현탁액은 pH 7.83, 10분 후 pH 8.22였으며 20분 이후는 pH 8.45 전후에서 수렴되었다. 이는 알칼리 함유량이 낮기 때문인 것으로

어독성 시험의 결과와도 일치하였다.

- (5) 향후 뽑어부치는 슛크리트의 특성을 반영하기 위하여 현장적용 후 채취한 코어에 대한 다양한 시험 및 일반 슛크리트재 외에 기존 급결 슛크리트재와의 공학적 비교도 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김대영, 신영균, 유용선, 장용진(2006), 용수지반에서 슛크리트타설 시험을 위한 일본DENKA OMI 특수시멘트 공장내 연구소 방문기, *한국지반공학학회지*, Vol. 22, No. 5, pp. 51~57.
2. 김진철, 정용, 문한영(1998), 수중불분리 콘크리트의 기초적 물성에 관한 연구, *대한토목학회논문집*, 18권 1-3호, pp. 313~321.
3. 마상준, 김동민(2005), 지하공동 보강을 위한 수중불분리 충전재의 개발과 경제적 충전공법의 적용성 평가, *대한토목학회논문집*, 25권 1C호, pp. 43~53.
4. 박해균, 이명섭, 원종필, 김재권(2004), 시멘트광물계 분말형 급결제를 사용한 습식 슛크리트의 성능평가, *대한토목학회논문집*, 24권 1C호, pp. 65~69.
5. 원종필, 성상경, 박해균, 이명섭(2005), C12A7계 광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 내구특성, *대한토목학회논문집*, 54권 3C호, pp. 235~240.
6. 이규필, 김동규, 배규진, 장수호(2005), 슛크리트 품질관리를 위한 슛크리트와 암석의 부착력 평가 기법 비교, *대한토목학회논문집*, 25권 2C호, pp. 125~131.
7. 이양규, 전준태, 김종열(2004), NATM 터널의 건·습식 Shotcrete 강도시험에 관한 연구, *대한토목학회논문집*, 24권 2D호, pp. 239~245.
8. 천병식(2005), 약액주입-이론과 실제, 원기술, pp. 159~168.
9. 한국표준협회(1993), 어류에 의한 급성 독성시험, *한국공업규격 KS M 0111*.
10. 樓井春輔, 足立紀尙(1992), NATM工法の調査 設計から施工まで, *日本土質工學會*, pp. 131~135.
11. Dimmock, R.H.(1999), Permanent Sprayed Concrete for UK Tunnels, Proc. 3rd Int. Symp. on Sprayed Concrete, pp. 186~195.
12. Franklin, John and Maurice B. Dusseuault(1989), *Rock Engineering*, McGraw-hill, pp. 321~335.
13. Grov, E.(2001), Active Design in Civil Tunnelling with Sprayed Concrete as a Permanent Support, International Conference on Engineering Development in Shotcrete, Australia, pp. 123~133.

(접수일: 2008. 3. 6 심사일: 2008. 3. 21 심사완료일: 2008. 6. 19)