

# 슬러리형 급결제를 활용한 현장적용 슛크리트의 역학적 성능 및 염해저항성 평가

## Evaluation on Mechanical Performance and Chloride Ion Penetration Resistance of On-Site Shotcrete Made with Slurry-Type Accelerator

김 현 욱<sup>1</sup>

유 용 선<sup>2</sup>

한 진 규<sup>3</sup>

정 철 우<sup>4\*</sup>

Kim, Hyun-Wook<sup>1</sup>

Yoo, Yong-Sun<sup>2</sup>

Han, Jin-Kyu<sup>3</sup>

Chung, Chul-Woo<sup>4\*</sup>

Senior manager, R&D Center, POSCO E&C, Yeonsu-Gu, Incheon, 22009, Korea <sup>1</sup>

President, Chemius Korea, Gonjiam, Gwang-ju, Gyeonggi-do, 12718, Korea <sup>2</sup>

Director, Chemius Korea, Gonjiam, Gwang-ju, Gyeonggi-do, 12718, Korea <sup>3</sup>

Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Nam-Gu, Busan, 48513, Korea <sup>4</sup>

### Abstract

The purpose of this research is to develop a slurry-type accelerator that contains various beneficial properties such as reduction of dust generation, lower alkalinity, early age strength development, etc., and uses such slurry type accelerator to produce high performance shotcrete that present excellent resistant against chloride ion penetration. In this work, shotcrete mixtures of 0.44 and 0.338 water-to-binder ratio (w/b) were produced at construction site using slurry-type accelerator. The mechanical properties and chloride ion penetration resistance of such shotcrete (including base concrete) were evaluated. According to the experimental results, the slurry-type accelerator was successfully used to produce both w/b 0.44 and 0.338 shotcretes. The 1 day and 28 day compressive strength of shotcrete were found to be closer to or higher than 10MPa and 40MPa, respectively. The w/b 0.338 shotcrete that used 40% replacement of blast furnace slag showed lower compressive strength than w/b 0.44 shotcrete without any mineral admixture at 1 day. However, the compressive strength with 40% blast furnace slag increased significantly at 28 day. Moreover, there was more than 50% increase in chloride ion penetration resistance with blast furnace slag, showing its strong potential for higher performance shotcrete application.

Keywords : shotcrete, ground granulated blast furnace slag, strength, chloride ion penetration

### 1. 서 론

스�크리트는 굴착 직후 지반의 이완을 억제하고 표면의 요철을 매끄럽게 마무리하여 응력집중에 의한 원지반의 균열을 방지하는 등 NATM (New Austrian Tunnelling

Method) 공법의 주요 지반 보강 재료로 널리 사용되고 있다 [1]. NATM은 현재 국내 대부분의 터널에 기본 개념으로 적용되고 있어 터널공사 시 슛크리트의 사용은 필수적인 것으로 여겨지며, 특히 슛크리트의 영구적 지반보강재료로서의 활용을 위해, 슛크리트의 고성능화 및 고내구성화를 위한 다수의 연구들이 진행되고 있는 상황이다[2,3,4,5,6,7].

스�크리트용 급결제로는 실리케이트계, 알루미늄에이트계 및 알칼리프리카제의 액상 급결제와 시멘트광물계로 분류되는 분말급결제가 사용되고 있다[8]. 일반적으로 알루미늄에이트 계열의 급결제를 사용하는 경우 높은 알칼리도로 인해 주변

Received : August 22, 2018

Revision received : September 17, 2018

Accepted : October 29, 2018

\* Corresponding author : Chung, Chul-Woo

[Tel: 82-51-629-6084, E-mail: cwchung@pknu.ac.kr]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

환경오염에 관련된 문제가 종종 발생하는 것으로 알려져 있으며, 실리케이트 계열의 경우 초기강도의 발현이 느린 것으로 보고되었다[8]. 또한 내구성 증진을 위한 고성능 숏크리트를 위해서는 실리케이트계나 알루미늄이테계가 아닌 알칼리프리계 또는 시멘트광물계 급결제를 적용하는 것이 유리하다고 보고되었다[4,5,6,7]. 그러나 시멘트 광물계 급결제의 경우, 강도발현 및 응결성상이 알칼리프리계의 급결제에 비해 우수하지만 분말형태인 관계로 시공시 분진 발생과 같은 환경적 문제를 필연적으로 일으키게 된다.

슬러리형의 급결제는 시멘트광물계의 장점인 우수한 초기 강도 발현을 그대로 가지면서도 액상의 형태로 제조되어 보편적인 숏크리트용 장비에서도 적용이 가능하며, 분진발생의 문제를 획기적으로 줄인 급결제이다[9,10]. 주로 비정질 또는 결정질의  $C_{12}A_7$  ( $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ ) 분말 및 응결지연제로 구성되어 있으며, 분말형 급결제를 물에 혼합하여 슬러리형으로 만든 후 활용하여야 한다. 이는  $C_{12}A_7$ 의 급격한 수화반응을 지연시킬 수 있는 응결지연제를 첨가한 물에 분말형 급결제를 혼입하여 슬러리형으로 제작한 후 이를 wet-mix 콘크리트에 뿌려 급결제로 활용하게 된다[9,10].

슬러리형 급결제는 먼저 분말로 이루어진 급결제와 물을 1:1~1:0.8의 비율로 혼합, 교반하여 슬러리를 제조한 후 기존의 일반적인 액상 숏크리트 장비를 이용하여 타설하게 된다. 이때, 슬러리형 급결제에는 물이 포함되어 있으나, 숏크리트에 사용되는 콘크리트는 슬러리에 포함된 물의 양을 빼고 생산하게 되므로 숏크리트의 물-결합재 비율은 변동되지 않도록 조절한다. 또한, 급결제의 반응을 지연시키기 위한 지연제에는 글루콘산, 구연산, 주석산 등의 유기화합물이 활용될 수 있는데, 이들의 작용 메커니즘은 대개 시멘트 입자와 C-S-H 상 표면에 흡착, 침전, 착염의 형성 및 결정핵 형성제어가 동시에 일어나는 것으로 알려져 있다[11]. 본 연구에서는 글루콘산 및 주석산 등의 유기산 이외에도,  $SO_4^{2-}$ ,  $F^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  등이 적절히 배합되도록 하여 많은 실험을 거쳐 최적화된 응결조절제를 개발하여 사용하였다.

숏크리트 제조를 위해 슬러리형 급결제를 베이스 콘크리트에 투입하면, 전체적인 pH레벨의 상승과 함께  $C_{12}A_7$ 의 급격한 수화반응이 발생하며, 시멘트 내부의 황산염 성분과 반응하여 에트링자이트 (Ettringite)를 생성하면서[12] 숏크리트의 초기강도 발현을 이끌어내게 된다. 특히 슬러리형 급결제는 시멘트 광물계 특유의 빠른 초기강도발현의 특성을 그대로 가지고 있어, 다량의 슬래그 치환과 같은 상황에

서도 충분한 수준의 압축강도발현을 이끌어낼 수 있다. 이러한 특성은 슬래그의 치환율이 상승할수록 증가하는 염해저항성과 같은 장기적인 내구성의 확보에 큰 역할을 담당할 수 있게 한다[9,13,14].

본 연구에서는 고성능 내염해성 숏크리트의 개발을 위해, 슬러리형 급결제를 활용한 숏크리트를 현장 타설하고, 이의 적용성을 평가하기 위하여 숏크리트의 제작에 사용된 베이스 콘크리트 및 숏크리트의 압축강도, 휨강도, 휨인성 등의 역학적 성능을 비교 평가하였다. 또한 현장타설 숏크리트의 내염해성을 확인하기 위해, ASTM C 1202에서 제시한 통과 전하량 및 NT-build 492 시험법에서 제시한 염화물 확산계수 측정을 진행하였다. 이를 통해, 슬러리형 급결제가 고성능 내염해성 숏크리트에 적용될 수 있는지의 여부를 확인하고, 슬러리형 급결제를 이용해 제작된 숏크리트의 물성을 분석하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험 계획 및 사용 재료

숏크리트 시험체 제작에 사용된 시멘트는 (주)쌍용시멘트사의 1종 포틀랜드시멘트(비중 3.14, 분말도  $3,400cm^2/g$ )를 사용하였다. 고로슬래그 미분말은 Y사의 3종 슬래그 미분말(비중 2.89 비표면적  $4,300cm^2/g$ )을 사용하였다. 또한, 슬러리형 급결제는 비정질  $C_{12}A_7$ 을 주원료로 하여 자체 개발한 급결제를 사용하였다. 본 연구에 사용된 OPC와 고로슬래그 미분말 및 슬러리형 급결제의 화학조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions of materials (units:%)

Chemical Component	Ordinary portland cement type I	Blast furnace slag	Slurry type accelerator
CaO	62.5	43.0	50.1
SiO <sub>2</sub>	22.1	32.5	4.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.4	15.2	32.1
SO <sub>3</sub>	2.2	1.3	8.7
MgO	2.1	3.6	0.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2	0.2	1.2
LOI	2.44	1.1	0.2

주원료의 화학조성 또한 Table 1에 나타내었다. 본 연구에 사용된 슬러리형 급결제는 기존의 연구[9,10]에서 사용된 슬러리형 급결제와 기본 재료는 동일하나, 비정질  $C_{12}A_7$

의 슬러리 상태에서의 자체수화를 방지시킬 수 있는 지연제의 첨가를 통해 슬러리의 안정성을 60분에서 2 시간 이상으로 개선시킨 제품으로, 시멘트와 혼합되는 순간 반응하여 에트링자이트를 급격히 생성하여 급결이 이루어지도록 개발된 응결조절제가 첨가되어 있다. KS F 2782의 숏크리트 응결시험 방법에 따라 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말 및 슬러리형 급결제를 혼합하여 제작한 숏크리트 페이스트 (w/b 0.338)의 응결은 초결이 80초, 종결이 320초로 나타났으며, 고로슬래그 미분말을 혼합하지 않은 숏크리트 페이스트의 응결은 초결이 135초, 종결이 690초로 나타났다.

## 2.2 배합 및 양생

숏크리트용 베이스 콘크리트 배합은 현장에서 설치된 batch plant의 twin-shaft 방식의 기계식 믹서를 활용하여 진행하였다. 숏크리트용 베이스 콘크리트의 배합설계표는 Table 2에 나타나 있다. 굵은골재의 최대치수는 13mm, 물결합재비 (water-to-binder ratio; w/b)는 0.44 및 0.338의 두 종류로 진행하였다. 물결합재비 0.44의 배합은 일반적으로 현장에서 활용되는 배합이며, 물결합재비 0.338의 배합은 고성능 내염해성 숏크리트를 위한 배합으로 고로슬래그 미분말 40%를 함유한 배합으로, 이전의 실험실 레벨의 연구[15]에서 검증된 배합이다. 해당 물결합재비를 0.338로 결정한 이유는 슬래그 다량 치환에 의한 발생할 수 있는 초기강도 (특히 1일강도) 저하의 문제를 보완하기 위해서이며, 이에 더하여 슬래그의 다량 치환을 통해 28일 재령 이후에서 장기 재령에서 강도 및 내구성의 상승효과를 동시에 얻고자 하였다. 숏크리트 및 베이스 콘크리트는 강섬유를 혼합한 배합 및 강섬유를 혼합하지 않은 배합의 두 종류로 제작하였다. 강섬유의 혼합률은 베이스 콘크리트 전체 체적의 0.54%로 고정하였다.

Table 2. Mix proportion of base concrete

w/b	S/a (%)	Unit weight of material(kg/m <sup>3</sup> )							AD (B×%)
		W	OPC	Slag	S	G	Fiber		
0.44	60	211	480	-	962	694	37	1.00	
0.338	59.7	186	330	220	934	630	37	0.80	

※ W: water, B: binder, OPC: ordinary portland cement, S: sand, G: gravel, AD: Additive(PCE)

현장에 설치된 믹서에서의 배합이 완료된 베이스 콘크리트는 레미콘 차량으로 투입되었으며, 레미콘 차량이 공사현장으로 이동 후, 기존의 습식 숏크리팅 장비를 이용하여 슬러리형 급결제를 혼합한 숏크리트의 현장 타설을 진행하였다. 숏크리트의 시공에 앞서 베이스 콘크리트 공시체의 제작이 이루어졌으며, 압축강도 및 염소이온 침투저항성 측정용으로 100mm (diameter)×200mm (height)의 원주형 공시체를 제작하였고, 휨강도 및 휨인성 측정용으로 150mm×150mm×550mm 의 각주형 공시체를 제작하였다. 공시체의 제작이 끝난 후, 공시체 표면을 방수포로 덮고, 1일간 양생을 진행한 후, 몰드를 제거하였고, 공시체를 상온의 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 수중양생을 진행하였다.

숏크리트용 공시체의 경우 대형 box mold를 제작하여, 이에 숏크리트를 타설하고, 방수포로 덮어 하루동안의 기건양생을 진행하였다. 이후, 직경 100mm의 코어링 장비를 이용하여, 압축강도 및 염소이온 침투저항성 측정용 공시체를 채취한 후 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 수중양생을 진행하였다. 휨강도 측정용 숏크리트 시험체의 경우, 50mm×150mm×550mm의 각주형 몰드에 숏크리트를 직접 분사하여, 각주형 시험체를 제작하였다. 방수포로 덮어 하루동안 양생을 진행하였고, 몰드를 제거한 후, 기계식 전기톱을 이용하여 50mm×150mm×550mm 기준에 맞도록 상부의 튀어나온 부분을 절삭시킨 후, 시험체를 상온의 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 수중양생을 진행하였다.

## 2.3 압축강도

압축강도는 KS F 2405 “콘크리트 압축 강도 시험방법”에 따라 100mm×200mm의 원주형 공시체를 이용하여 측정하였다. 베이스 콘크리트의 압축강도는 3일, 7일, 및 28일 재령에서 측정하였으며, 숏크리트의 압축강도는 1일 및 28일 재령에서 측정하였다.

## 2.4 휨강도

휨강도는 KS F 2566 “섬유보강 콘크리트의 휨성능 시험 방법”에서 제시한 4점재하 방법 (Four point bending)에 준하여, 150mm×150mm×550mm 의 각주형 공시체를 이용하여 측정하였다. 베이스 콘크리트의 휨강도는 28일 재령에서 측정하였으며, 숏크리트의 휨강도는 1일 및 28일 재령에서 측정하였다. 휨강도의 측정시 얻은 최대하중 P를 아래의 식 (1)에 대입하여 휨강도를 계산하였으며, 여기서 L은

지점간의 거리 450mm, b 및 h는 폭 150mm 및 높이 150mm를 의미한다.

$$MOR = \frac{PL}{bh^2} \quad \text{-----} \quad (1)$$

## 2.5 염소이온 침투저항성

본 연구에서는 염소이온 침투저항성 평가를 위해 ASTM C 1202의 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” 및 NT-BUILD 492의 “Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments” 측정법을 동시에 활용하였다.

ASTM 1202 규준에 따라 원주형 슛크리트 및 베이스 콘크리트 공시체를 규준에서 지정하는 크기 (100mm×50mm)로 절단하여 시험이 가능한 크기로 만들었다. 이후 염소이온 침투 실험을 위한 cell에 절단된 공시체를 끼운 후, 양극에 0.3N NaOH 용액을 투입하고, 음극에 3%의 NaCl 용액을 투입하여 전압의 차이를 60V로 유지하면서 (DC±30V) 6시간 동안 총 통과된 전하량을 측정하였다.

ASTM C 1202 방법은 시험시간 동안의 총 통과전하량으로 염소이온 침투저항성을 예측하는데, 강섬유 보강 콘크리트 시험체의 경우 상대적으로 일반 콘크리트에 비해 높은 전기전도성을 보이므로 전류를 흘릴 경우 강섬유가 존재하지 않는 경우보다도 더 많은 양의 전류가 통과할 수 있다. 따라서 ASTM C 1202법에 의한 통과전하량 실험결과를 시멘트-골재 매트릭스의 미세구조를 통해 이루어지는 실제 염소이온의 침투량과 직접적으로 연관시키기 어렵게 된다. 따라서 본 실험에서는 ASTM C 1202 방법을 보완하고자, NT Build 492 “Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments(for Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials)” 실험도 동시에 수행하여, 종합적으로 염소이온 침투저항성을 파악하고자 하였다.

NT Build 492 시험법은 Germann Instruments사의 PROOVE<sup>®</sup> IT 장비 및 프로그램을 이용하여 진행하였다. Figure 1과 같이 시험체에 고무관을 부착하여 양극부분에는 0.3M NaOH 용액 300ml 채우고, 10% NaCl 용액 12l가 채워진 수조에 침지시켜 실험을 진행하였다. 이후 초기전압을 30V로(DC±30V) 고정하여 측정된 초기 전류량을 확인한 후, 측정된 초기 전류량에 따라 제안된 전압으로 30V(DC

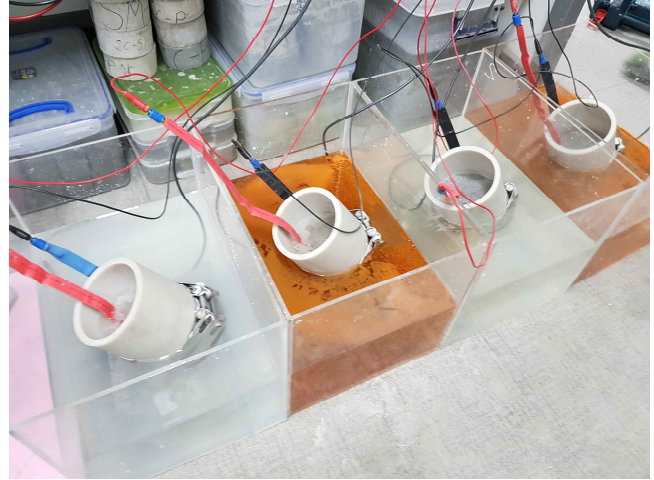


Figure 1. Experimental setup for NT-Build 492 test procedure

±30V) 고정하여 총 24시간 동안 시험하였다.

시험이 종료된 후 염소이온의 침투깊이를 측정하기 위해 시험이 끝난 시편을 할열 파괴한 후, 현상용액으로 0.1M의 질산은 용액을 절단된 공시체의 표면에 분무하였다. 슛크리트 내부에 존재하는 자유염소이온이 질산은 용액과 반응하여 질산 및 염화은 (은색)으로 바뀌게 되며 이때, 은색으로 변색된 부분의 침투깊이를 측정할 수 있다. 이때 각 위치에서의 평균값을 구하여 이를 염화물 확산계수의 계산에 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압축강도

섬유가 보강되지 않은 슛크리트용 베이스 콘크리트의 3일, 7일 및 28일 재령 압축강도가 Figure 2에 나타나있다. 베이스 콘크리트의 압축강도는 물결합재비 0.44의 경우 3일, 7일, 및 28일 재령에서 각각 17.5, 24.5, 34.2MPa의 압축강도를 보였으며, 물결합재비가 0.338로 떨어지는 경우 3일, 7일, 28일 재령에서 각각 13.2, 27.2, 59.4MPa의 압축강도를 보였다. 물결합재비 0.338의 베이스 콘크리트의 3일 강도가 물결합재비 0.44인 베이스 콘크리트의 3일강도보다 낮았을 보였지만, 이는 슬래그의 40% 치환으로 인한 초기재령에서 낮은 수화도로 인한 결과로 보이며, 이후 재령이 지나갈수록 물결합재비 0.338인 베이스 콘크리트의 강도가 크게 증가하는 것으로 관찰되었다. 28일 재령에서의 베이스 콘크리트 사이의 압축강도의 차이는 25.2MPa로 나타났다.

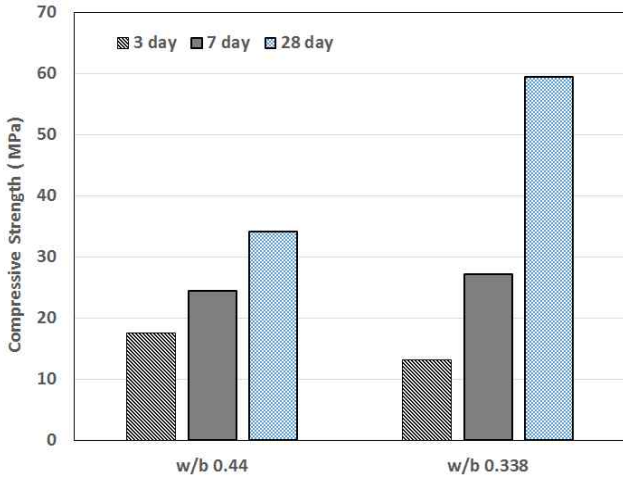


Figure 2. Compressive strength of base concrete without steel fiber reinforcement

섬유보강된 슛크리트용 베이스 콘크리트의 3일, 7일 및 28일 재령 압축강도는 Figure 3에 나타내었다. 섬유보강되지 않은 베이스 콘크리트의 경우와 마찬가지로, 물결합재비 0.338의 베이스 콘크리트의 3일강도가 물결합재비 0.44인 베이스 콘크리트의 3일강도 보다 낮은 값을 보였으나, 28일 재령에서 크게 역전하는 경향을 보였다.

Figure 2 및 3의 데이터를 비교해 보면, 물결합재비 0.44의 베이스 콘크리트에서는 섬유보강에 의한 압축강도의 상승 효과를 (섬유보강 전 3, 7, 28일 강도 17.5, 24.5, 34.2MPa에서 섬유보강 후 3, 7, 28일 강도 21.1, 26.3, 39.7MPa) 확인할 수 있었다. 그러나 물결합재비 0.338의 경우 섬유보강 전 후로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 낮은 물결합재비를 가지는 슛크리트의 경우, 높은 점도 및 항복응력을 가지므로 섬유 분산이 어려워지고, 이로 인해 현장 시공시 섬유의 엉김 등의 문제가 발생되었기 때문으로 사료된다.

슬러리형 급결제를 이용하여 현장 타설된 슛크리트의 1일 및 28일 재령 압축강도가 Figure 4에 나타나있다. 슛크리트의 1일 재령 압축강도는 물결합재비 0.44의 경우 9.5MPa로 나타났으며, 28일로 재령이 증가하는 경우 35.7MPa로 상승하였다. 물결합재비 0.338의 슛크리트는 1일재령 압축강도가 10MPa로 나타났고, 28일 재령에서 48.5MPa로 나타났다. 이는 한국 도로공사의 표준시방서에서 제시하는 고강도 슛크리트의 기준 (1일강도 10MPa, 28일 강도 35MPa)을 만족시키는 값 (물결합재비 0.44의 1일강도 9.5MPa 제

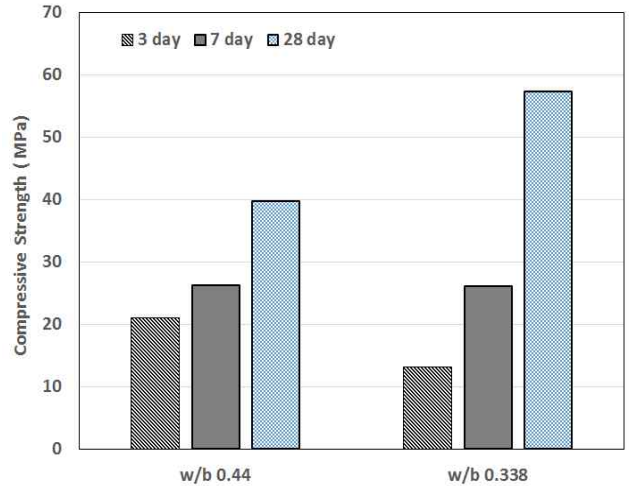


Figure 3. Compressive strength of base concrete with steel fiber reinforcement

외)으로, 슬러리형 급결제를 이용한 고성능 슛크리트의 제조 가능성을 확인할 수 있었다.

베이스 콘크리트의 3일 재령 압축강도의 결과와 유사하게 슛크리트의 1일 재령에서는 물결합재비의 차이로 인한 압축강도에서의 큰 차이를 (0.44에서 9.5MPa, 0.338에서 10.0MPa) 보이지 않았다. 또한 물결합재비 0.44의 슛크리트에서 섬유보강의 효과가 물결합재비 0.338의 슛크리트보다 더욱 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

주목할 만한 사실은, 슬러리형 급결제의 사용으로 제조된 슛크리트의 경우, 물결합재비 0.44에서는 28일 재령 압축강도가 베이스 콘크리트의 28일 재령 압축강도와 유사하게 나타났으나 (34.2에서 35.7MPa로 변화함), 물결합재비 0.338에서는 28일 재령 압축강도가 베이스콘크리트에 비해 상당히 낮게 나타났다는 (59.4에서 48.5MPa로 변화함) 점이다 (Figure 2 및 4 참조). 초기재령에서의 강도상승효과 및 장기재령에서의 강도상승률 감소는 급결제의 특성과 관련이 있는 것으로 보고되어져 있기 때문에[8,10] 물결합재비 0.44의 결과는 다소 예외적인 경우로 사료되나, 상대적으로 높은 물결합재비를 사용하는 경우, 재료의 고른 분산을 이끌어 낼 수 있다는 점을 감안하면, 물결합재비 0.44의 슛크리트는 급결제로 인한 장기 강도 감소의 영향을 상대적으로 적게 받았을 것으로 추정된다. 그러나 물결합재비 0.338에서 28일 재령 강도 감소효과가 두드러지게 나타났는 점은, 고성능 슛크리트의 제조시 재료의 분산에 문제가 발생할 가능성이 있다는 것을 의미하므로, 이에 대한 대책을 확보하는 것이 필요하다고 사료된다.



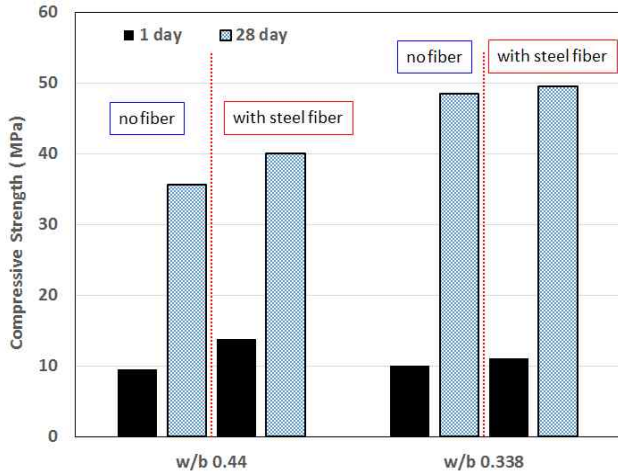


Figure 4. Compressive strength of shotcrete with and without steel fiber reinforcement

### 3.2 휨강도

28일 재령에서의 슛크리트용 베이스 콘크리트의 휨강도를 Figure 5에 나타내었다. 베이스 콘크리트의 경우 28일 재령에서는 물결합재비의 감소로 인한 강도증진 효과를 확인할 수 있었다. 물결합재비 0.44에서는 휨강도가 3.4MPa로 나타났고, 섬유보강시 4.8MPa로 증가하였으나, 물결합재비가 0.338로 감소하는 경우 휨강도는 6.8MPa 및 7.2MPa로 거의 2개에 가까운 상승효과를 보였다. 압축강도의 경우와 마찬가지로, 낮은 물결합재비에서 슬래그 40%의 치환효과는 재령 28일 이후부터 극대화되는 것으로 판단된다.

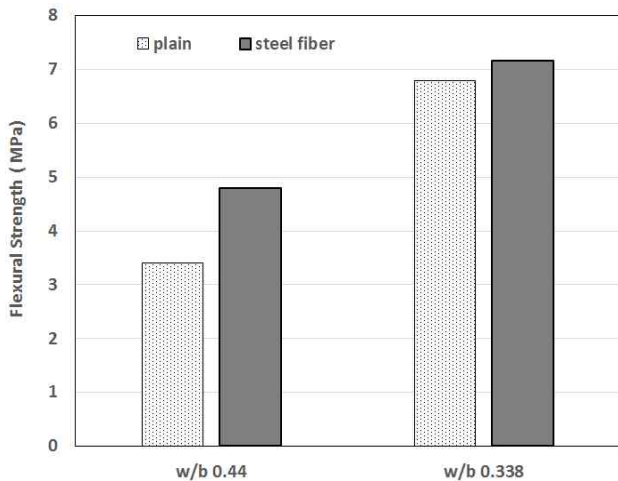


Figure 5. The 28 day flexural strength of base concrete with and without steel fiber reinforcement

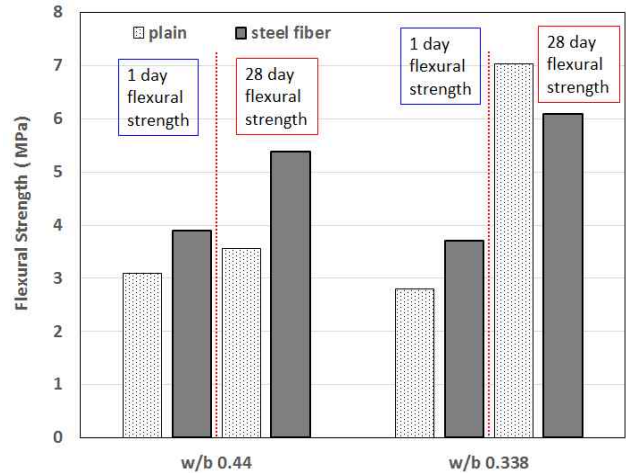


Figure 6. Flexural strength of shotcrete with and without steel fiber reinforcement

1일 및 28일 재령에서의 슛크리트의 휨강도는 Figure 6에 나타내었다. Figure 6에 따르면, 강섬유 보강 유무와 관계없이 1일 재령에서는 물결합재비 0.338인 슛크리트의 휨강도가 물결합재비 0.44인 슛크리트의 휨강도에 비해서 낮게 나타났다. 이는 압축강도 시험에서의 결과와 같은 것으로, 다량의 슬래그 혼입 (40% 치환)으로 인한 초기 수화반응의 지연으로 인한 결과로 사료된다. 그러나 Figure 6의 28일 재령 휨강도 데이터에 따르면, 이러한 슬래그 다량치환으로 인한 초기강도 저하의 약점이 28일 재령에서는 완전히 극복되는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6에 따르면, 물결합재비 0.338인 슛크리트의 경우 28일 재령 휨강도가 강섬유의 혼입에 의해 감소하는 경향을 보인 것을 확인할 수 있다. 이는 시멘트 및 슬래그의 반응 부족으로 인한 문제이기 보다는 슛크리팅 과정에서 강섬유의 배분이 적절하게 이루어지지 못해 발생한 문제일 수 있다. 특히 결합재량이 높은 경우에 재료 각 부위에서의 급결재의 반응 차이, 슛크리팅 중의 재료 각 부위에서의 압력 차이로 인한 재료의 밀도 차이 등과 같은 원인들이 혼재되어 있으므로 이에 대한 명확한 이유를 제시하기는 어렵다.

본 연구에서 사용된 현장적용 슛크리트의 데이터는 현장의 여건상 많은 양의 시험체를 제작하기 어려워 제한적인 수량의 시험체를 활용해 진행되었음을 밝히는 바이다. 그러므로 슛크리트 타설에 의한 데이터 편차는 필연적으로 발생할 수밖에 없으며, 특히 직접 타설에 의한 각주형 공시체 제작에 있어 그 편차가 크게 나타났다. 따라서 28일 재령의 강섬유 혼입 슛크리트의 휨강도 저하는 제작된 공시체의 불

균질성에서 비롯된 것으로 사료된다.

### 3.3 염소이온 침투저항성

ASTM C 1202 및 NT-BUILD 492 시험방법을 이용하여 측정된 염소이온 침투저항성 시험 중 특이사항을 Table 3에 정리하여 나타내었다. Table 3에 따르면, 물결합재비 0.44인 베이스 콘크리트 및 슛크리트의 경우 RCPT 시험이 최종 6시간동안 진행되지 못하고 조기종료된 것으로 나타났다. 이는 시멘트 페이스트에 비해 상대적으로 절연 재료에 해당되는 골재의 부피[16] 및 최대치수[17]에 영향을 받는 통과전하량 시험의 특성에 의한 것으로, 슛크리트의 경우 일반콘크리트에 비해 작은 크기의 굵은골재를 사용하기 때문이다. 또한 강섬유로 보강된 모든 시험체의 경우 물결합재비 0.338의 슛크리트 시험체만 제외하고 모두 ASTM C 1202 시험이 조기 종료되었다. 이는 전도성 재료의 혼입에 의한 과다전류의 영향으로[18,19] 강섬유를 혼입하는 경우 ASTM C 1202의 급속평가방법에 의해 염해저항성을 판별할 수 없음을 의미한다. 이에 대한 대안으로 NT-BUILD 492 시험법을 함께 활용하게 되었다.

Figure 7에 NT-Build 492 시험법으로 측정한 28일 재령 베이스 콘크리트 및 슛크리트의 염화물 확산계수를 나타내었다. 섬유보강의 유무와 상관없이 물결합재비 0.338의 베이스 콘크리트 및 슛크리트가 물결합재비 0.44의 베이스 콘크리트 및 슛크리트에 비해 현저히 낮은 염화물 확산계수를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 낮은 물결합재비로 및 슬래그 40%의 혼입으로 인한 치밀한 미세구조의 형성을 통한 염소이온 침투저항성의 상승으로 인한 결과이다 [13,14].

Table 3. Summary note for chloride ion penetration test

w/b	type	steel fiber	ASTM C 1202	NT-Build 492
0.44	base	×	terminated	O.K
		○	terminated	terminated
	shot	×	terminated	O.K
		○	terminated	O.K
0.338	base	×	3297 coulomb	O.K
		○	terminated	O.K
	shot	×	5633 coulomb	O.K
		○	8441 coulomb	O.K

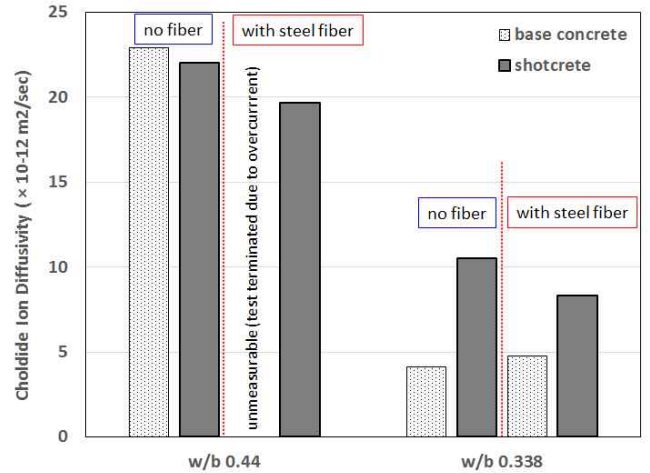


Figure 7. Chloride ion diffusivity of 28 day old base concrete and shotcrete with and without steel fiber reinforcement

Figure 7에 따르면, 물결합재비 0.44인 경우 베이스 콘크리트에 비해 슛크리트의 염화물 확산계수가 다소 낮은 것을 알 수 있다. 본 연구에 활용된 급결제의 경우 시멘트 광물계로 칼슘알루미늄네이트 계열의 수화생성물을 형성하게 되는데, 이때 염소이온이 이동하게 되면 Friedel's salt의 형태로 내부의 분자구조에 염소이온을 포함시키는 상의 전이가 발생하여 (chloride ion binding), 염소이온의 이동을 억제할 수 있기 때문이다[20,21,22,23]. 그러나 현장적용 슛크리트를 활용한 본 연구에서는 물결합재비가 0.338로 떨어지는 경우 베이스콘크리트에 비해 슛크리트의 염화물 확산성이 공통적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 28일 재령 압축강도의 경우 (베이스 콘크리트에 비해 슛크리트가 낮은 압축강도를 보임)와 마찬가지로, 낮은 물시멘트비의 고성능 슛크리트의 타설시에는 재료의 균질분산과 같은 문제의 해결이 필수적으로 요구된다는 것을 의미한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고성능 슛크리트의 제조를 위해 개발된 슬러리형의 급결제를 활용하여, 시공현장에서 슛크리트를 타설하였고, 이의 베이스 콘크리트 및 슛크리트의 역학적 성능 및 내염해성을 평가하여, 슬러리형 급결제의 고성능 슛크리트 제조 가능성을 확인하고자 하였다. 본 연구의 결과에 따르면 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 물결합재비 0.338의 베이스 콘크리트 및 슬러리형 급결제를 활용해서 제조된 슛크리트의 초기강도 (1일 및

3일재령)는 물결합재비 0.44의 베이스 콘크리트 및 슬러리형 급결제를 활용해서 제조된 쏫크리트의 초기강도에 비해 유사하거나 다소 낮게 나타났다. 이는 물결합재비 0.338 배합에서 활용된 다량의 슬래그 치환(40%)에 의한 느린 초기강도의 발현에 의한 영향으로 사료된다.

- 2) 물결합재비 0.338 및 슬래그 40%를 혼입한 베이스 콘크리트 및 슬러리형 급결제를 활용해서 제조된 쏫크리트는 강섬유의 보강 유무와 관계없이 28일 재령에서 물결합재비 0.44의 베이스 콘크리트 및 슬러리형 급결제를 활용해서 제조된 쏫크리트에 비해 우수한 역학적 성능 및 염해저항성을 보였다.
- 3) 물결합재비 0.338의 슬러리형 급결제를 활용해서 제조된 쏫크리트의 경우, 강섬유가 혼입된 공시체의 휨강도가 낮게 나타났는데, 이는 현장 타설 시 쏫크리트 공시체 제작에 문제가 있었기 때문으로 사료된다.
- 4) 슬러리형 급결제를 활용하여 1일강도 10MPa 28일강도 40MPa급 이상의 고성능 쏫크리트의 타설이 가능한 것으로 나타났다.

## 요 약

본 연구의 목표는 쏫크리트 타설시의 분진 발생 문제, 낮은 알칼리도의 유지를 통한 환경부하 감소 및 시멘트 광물계가 가지는 빠른 초기강도 발현의 특성을 동시에 가지는 슬러리형 급결제를 개발하고, 이를 활용하여 고성능 내염해성 쏫크리트의 현장 타설에 적용하는 것이다. 본 연구에서는 물결합재비 0.44 및 0.338의 두 종류의 쏫크리트 배합에 대하여 슬러리형 급결제를 현장 적용시켰으며, 현장에서 얻은 쏫크리트 및 쏫크리트용 베이스 콘크리트 시험체의 강도 및 내염해성을 비교 분석하였다. 실험 결과에 따르면, 슬러리형 급결제는 두 종류의 쏫크리트 배합에 모두 성공적으로 적용 되었으며, 이를 이용하면 1일 강도 10MPa 28일 강도 40MPa급의 고성능 쏫크리트의 제조가 가능한 것을 확인하였다. 물결합재 0.338의 쏫크리트 배합에서, 고로슬래그 미분말의 활용시 1일강도는 물결합재비 0.44의 쏫크리트 배합보다 다소 낮게 나타났으나, 28일 재령에서의 강도가 현저히 역전되었으며, 염해저항성이 크게 개선되는 것을 확인하여, 고로슬래그 미분말이 고성능 내염해성 쏫크리트의 개발에

성공적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

**키워드** : 쏫크리트, 슬러리형 급결제, 칼슘 알루미늄네이트, 강도, 염소이온 침투

## Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 13 Construction Research T01).

## References

1. Lee SP, Kim DH, Ryu JH, Lee SD, Choi MS. Development of high performance shotcrete for PCL method, Conference of Korean Society of Civil Engineers; 2004 Oct 21–22; Pyungchang, Korea, Seoul (Korea): Korean Society of Civil Engineers; 2004, p. 3665–70.
2. Song YS, Ryu JH, Lim HD. An experimental study on early strength of shotcrete, Journal of Korean Tunnelling Association, 2010 Jul;12(4):285–94.
3. Won JP, Sung SK, Park CK, Cho YJ, Choi SW, Park HG. Evaluation of durability performance of wet-mixed shotcrete with powder types cement mineral accelerator, Conference of Korean Concrete Institute; 2004 Nov 6; Suwon, Korea, Seoul (Korea): Korean Concrete Institute; 2004, p. 254–7.
4. Lee SP, Ryu JH, Lee SD, Jeon SW, Lee CI. Performance improvement and durability evaluation of shotcrete for permanent tunnel support, Tunnel & Underground Space, 2007 Aug;17(4):266–84.
5. Choi HS, Kim DM, Jang PS, Seo SS. A experimental study on the ready-mixed shotcrete using granulated blast furnace slag. Journal of the Korean geotechnical society, 2009 Jun;25(6):31–45.
6. Han SY, Yun KK, Nam KG, Lee KR, Eum YD. Mechanical properties and chloride penetration resistance of shotcrete according to mineral admixture types and supplemental ratio, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 2015 Jul;16(7):4960–8.
7. Kim DY, Lee HK, Jung JH, Her CM. Applicability of slag shotcrete by field test, Conference of Korean Society of Civil Engineers; 2014 Oct 22–24; Daegu, Korea, Seoul (Korea): Korean Society



- 
- of Civil Engineers; 2014, p. 343–4.
8. Prudencio Jr. LR. Accelerating Admixtures for Shotcrete. *Cement and Concrete Composites*. 1998;20(2–3):213–9.
  9. Kim HW, Moon H, Kim JH, Chung CW. Influences of slag replacement on the properties of shotcrete using a slurry-type accelerator. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2014 Oct;14(5):389–96.
  10. Kim HW, Moon H, Kim JH, Chung CW. Using modified ASTM C403 test procedure to evaluate set time and admixture compatibility of shotcrete mortar. *Advances in Civil Engineering Materials*. 2017 Jul;6(2):38–52.
  11. Saito T. A study on concrete retardation using organic and inorganic retarders [Dissertation]. [Okayama (Japan)]: Okayama University; 2014. 156 p.
  12. Heble AS, Viswanathan K, Chatterjee AK. Blends of basic cements of different phase compositions: hydraulic behaviour study. *Proceedings 10th ICCO*; 1997 June 2–6; Gothenburg, Sweden. Gothenburg (Sweden): 10th International Congress on the Chemistry of Cement; 1997. p. 2ii039.
  13. Lee HH, Kwon SJ. Evaluation of chloride penetration in concrete with ground granulated blast furnace slag considering fineness and replacement ratio. *Journal of Recycled Construction Resources*. 2013 Jun;1(1):26–34.
  14. Song HW, Kwon SJ, Lee SW, Byun KJ. A study on resistance of chloride ion penetration in ground granulated blast-furnace slag concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2003 Jun;15(3):400–8.
  15. Kim HW, Lee CJ, Shon CS, Moon H, Chung CW. Mechanical performance and chloride ion penetration of polyolefin fiber reinforced concrete designed for shotcreting at marine environment. Accepted for the publication in *Journal of the Structural Integrity and Maintenance*. 2018.
  16. Wee TH, Suryavanshi AK, Tin SS. Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability test. *Cement and Concrete Research*. 1999 21(1):59–72.
  17. Oh BH, Cha SW, Jang BS, Jang SW. Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. *Nuclear Engineering and Design*. 2002 Mar;212(1–3):221–31.
  18. Moon H, Kim JH, Lee JY, Chung CW. Evaluation of chloride attack resistibility of heavyweight concrete using copper slag and magnetite as aggregate. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2017 Dec;17(6):483–92.
  19. Moon H, Jang BK, Kim JH, Chung CW. Using copper and steelmaking slag as sources of heavy weight aggregates for marine concrete structure. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2017 Dec;5(4):345–53.
  20. Hirao H, Yamada K, Takahashi H, Zibara H. Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2005 3(1):77–84.
  21. Suryavanshi AK, Scantlebury JD, Lyon SB. Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. *Cement and Concrete Research*. 1996 May;26(5):717–27.
  22. Balonis M, Lothenbach B, Le Saout G, Glasser FP. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research*. 2010 Jul;40(7):1008–22.
  23. Chung CW, Jung HY, Kwon JH, Jang BK, Kim JH. Use of calcium aluminum layered double hydroxide to control chloride ion penetration of cement based materials. Accepted for the publication in *Journal of the Structural Integrity and Maintenance*. 2018.