

광산용 레디믹스트 재료를 사용한 슛크리트의 압축강도 및 공극구조에 대한 고찰 A Study on the Compressive Strength & Pore Structure of Shotcrete using for Mine Ready-mixed Materials

이흥수¹⁾, Heung-Soo Lee, 김동민¹⁾, Dong-Min Kim, 최승경²⁾, Seung-Kyung Choi, 이주호³⁾, Ju-Hoe Lee

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, KICT

²⁾ 한국광물자원공사 태백사업소 차장, Deputy General Manager, KORES Taebaek Branch Office

³⁾ 한국광물자원공사 태백사업소 사원, Staff, KORES Taebaek Branch Office

SYNOPSIS : A variation of pore structure of shotcrete matrix was experimented by Mercury Intrusion Porosimetry, and the relation with compressive strength was also examined. As a result of the Mercury Intrusion Porosimetry(MIP) test, RM-P1 Batch the macropore diameter of the RM-BFS2 and RM-BFS3 Batch than to have a relatively macropore can see a lot of long-term durability performance degradation. Also, K and N Batch the current is applied to the mine if the factors on shotcrete durability performance of the macropore volume of the entire appears to be a long-term durability performance in the fall.

Keywords : Ready-mixed Shotcrete, Porosity, Compressive Strength

1. 서론

최근 대형장비를 이용한 채광 및 대량 생산을 목적으로 하는 광산갱도에 대해 대규모갱도 형식이 적용되고 있으며, 갱도 안정성 및 채광 작업시 안전이 중요한 사항으로 제기되고 있다. 현재 일반적인 광산 지보재로서 록볼트 및 강지보재가 대부분 적용되고 있고, 일부 연약지반에서만 현장타설 슛크리트가 적용되고 있다. 그러나 광산 갱도 굴착 후 매번 슛크리트를 타설할 수 없는 국내 광산 여건상 경제성 및 부지확보의 문제로 인해 고정적인 현장 배치플랜트를 확보하지 못하고, 인근 레미콘 제조 공장에서 배합된 슛크리트 재료를 공급받아 시공하고 있다. 따라서, 광산에 적용된 슛크리트는 이동 거리 및 시간에 따라서 품질이 저하되고, 광산 현장에 상주하는 전문 품질관리자의 부재로 인해 시공 품질 관리가 이루어 지지 않는 실정이다. 슛크리트는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기 변위 제어 및 풍화 방지를 통한 굴착면의 안정도모를 목적으로, 구조물의 장기적인 사용성 및 안전성의 개념에서 그 역할이 더 중요하게 부각되고 있으나, 전술한 바와 같이 품질 저하로 인해 슛크리트 자체의 능력을 상실한 경우가 대부분이다.

레디믹스트 슛크리트란 기존 현장배합 슛크리트를 대체하는 공법으로서 터널시공 특성, 현장조건 및 사용용도에 맞게 생산할 수 있으며, 시공성 및 고품질 슛크리트를 확보할 수 있는 공법이다. 즉, 기존에 현장에서 배합되던 슛크리트의 고질적인 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해 슛크리트 재료의 배합 및 제조를 레미탈 제조 전문업체에서 사전에 미리 실시하여 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시킬 수 있게 제조되는 슛크리트 재료를 의미한다. 다양한 혼합물로 구성된 슛크리트는 성능과 효과에 영향을 미치는 변수들이 많이 있으며, 대표적으로 급결제, 혼화재, 보강재 등의 사용재료와 골재품질, 타설장비,

분사각도 및 거리, 타설방법, 양생방법 등을 들 수 있다. 이와 같은 변수들이 숏크리트가 사용된 구조물의 설계연한과 상관성을 가지며, 내구성에도 상당한 영향을 미치게 된다. 그러나 이러한 숏크리트의 다양한 변수 조건을 고려하여 분석하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 ASTM D 4284에 의거한 수은압입시험(MIP)을 통하여 광산에 적용되고 있는 현장배합과 분말형 레디믹스트 재료를 적용한 숏크리트 내부 공극구조를 분석하고, 결과를 토대로 숏크리트 조직의 치밀화에 따른 압축강도 및 내구성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 숏크리트 공극구조

숏크리트 구조물의 외관에서 발견되는 이상 열화는 구조물의 제조시점에서 여러 가지 열화요인이 포함되어 있으며, 이중 사용재료에 기인하는 열화요인 이외에도 과잉으로 첨가된 물과 결합재의 수화생성물에 의해 콘크리트 조직이 다공질화 되는 등 시공관련 열화요인 역시 주된 요인으로 지적된다. 숏크리트의 공극은 물이 차지하는 공극과 배합 시 공기가 연행되어 발생하는 기포로 분류한다. 그 중 물이 차지한 공극은 시멘트 수화물에 의하여 그 크기가 계속 작아져 일반적으로 겔공극(Gel pore)과 모세관 공극(Capillary pore)으로 분류된다. 표 1은 Uchikawa의 연구를 정리한 것으로 콘크리트 내부의 공극구조는 강도뿐만 아니라 내구성에도 깊은 영향을 미침을 알 수 있다(Uchikawa, 1990).

표 1. Summary of relationship between pore sizes and properties

properties	factors
strength	pore size 5nm~2um increase : getting worse 30um~1mm increase : getting worse
freezing and thawing resistance	pore size 2nm~6nm increase : getting better 100nm~1um increase : getting worse 10um~90um increase : getting better
permeability of gas	pore size several hundreds nm or over increase : getting better volume of paste parts increase : getting worse
permeability of ion	total pore size volume increase : getting larger gel pore increase : getting smaller
drying shrinkage and creep	pore size 6nm~60nm increase : getting larger hydrates (C-S-H, C-A-H) increase : getting larger

Daimon은 1.2nm 이하를 층간 공극(intracrystallite pore)이라 하여 시멘트 수화물의 층간 공극에 해당한다고 하였다.(Daimon, 1991). Metha는 5nm 이하를 겔 공극, 5~100nm의 공극을 모세관 공극으로 분류하였으며, 모세관 공극을 다시 5~50nm의 마이크로 공극과 50~100nm의 매크로 공극으로 분류하였는데, 마이크로 공극은 시멘트 경화체의 건조수축 및 크리프에 영향을 크게 미치며, 매크로 공극은 강도와 이온의 침투성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다.(Metha 등, 1993) Mindess는 콘크리트 수화물의 형성과 관련한 공극평가를 제시하고 있으며 10nm~100um를 모세관 공극으로 분류하였다.

3. 실험방법 및 배합

3.1 실험방법

현장타설 실험은 강원도 삼척 △△광업소의 석회석 광산에서 실시하였는데, 타설 갱도는 15.0~20.0m 정도의 대규모 갱도로서 대형 장비 운행이 가능한 전형적인 비금속광산 갱도였다. 사전에 공장에서 제작된 레디믹스트 숏크리트와 광산 및 터널 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 현장배합 숏크리트의 품질을 비교하고자 하였다. 본 연구에서는 숏크리트 공극구조를 분석하기 위하여 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry : MIP)을 이용하였으며, 시험편은 수중 양생한 재령 28일 시험체를 파쇄한 후 ASTM D 4284에 의거 굵은 골재를 제외한 모르타르 부분 약 2.5g 정도를 채취하여 105℃로 항량조시킨 후 시험을 실시하였으며, 압축강도와 상관성을 검토하기 위하여 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 시험체를 코어 채취하여 1일, 3일, 28일에 KS F 2405에 따라 시험을 실시하였다.

3.2 배합

모든 배합의 설계기준강도는 21MPa로 설정하였으며, 유동성을 개선시키고자 혼화제로 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼입하였고 보강섬유는 합성섬유를 사용하였고, 단위배합량은 표 2와 같다. 그림 1은 레디믹스트 숏크리트 재료를 사일로에 충전하고 숏크리트 타설 및 MIP 시험 모습을 나타낸 것이다.

표 2. 현장타설 실험배합

배합명		Gmax (mm)	slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재				섬유 합성 섬유(kg)	혼화제		혼화제 유동화제 (분말)	
							S1	S2	S3	S4		BFS C*30%	F/A		
레디믹스트	1	RM-P1	8	12	45.6	212	465	560	347	332	347	5	-	-	1.67
	2	RM-BFS2				212	325	557	344	330	345	5	140	-	1.67
	3	RM-BFS3				212	325	535	323	308	323	5	140	75	1.94
현장배합	광산용	K	13	15	42.0	146	450	1124 (잔골재)		600 (굵은골재)	40 (강섬유)	-	-	1.67	
	터널용	N	13	12	34.6	129	489	1047 (잔골재)		617 (굵은골재)		-	-	1.67	

비고) BFS : 고로슬래그 미분말

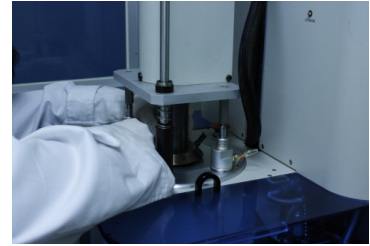
F/A : 플라이애쉬



(a) 사일로 재료 충전



(b) 숯크리트 현장 타설
그림 1. 현장 타설 실험



(c) MIP 측정

4. 실험결과 및 분석

그림 2는 배합별 MIP 시험 결과를 나타낸 것인데, 직경의 변화에 따른 공극량을 보여주고 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, RM-P1 배합의 경우 macropore 이상의 직경을 가지는 공극의 양이 RM-BFS2 배합과 RM-BFS3 배합에 비하여 상대적으로 많은 macropore를 가지고 있는 것을 알 수 있어 장기 내구성 측면에서 숯크리트 성능 저하가 예상되고, RM-BFS2 배합과 RM-BFS3 배합의 내부 공극구조가 치밀한 것을 확인 할 수 있다. 이는, 배합에 사용된 플라이애쉬의 포졸란 반응으로 인한 콘크리트 내부 조직구조가 치밀해지는데 기인한 것으로 판단되며, RM-BFS3의 경우 고로슬래그의 잠재수경성에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 현장배합용인 K배합과 N배합의 경우 레디믹스트 배합에 비하여 강도 및 건조수축에 영향을 미치는 macropore, large mesopore 및 small mesopore의 양이 상대적으로 많아 수축에 따른 균열이 우려된다. 또한, 현재 광산에 적용되고 있는 K배합의 경우 콘크리트 내구성능에 영향을 미치는 macropore의 양이 전체 배합 중 가장 많은 것으로 나타나 장기 내구성능이 가장 떨어질 것으로 판단된다.

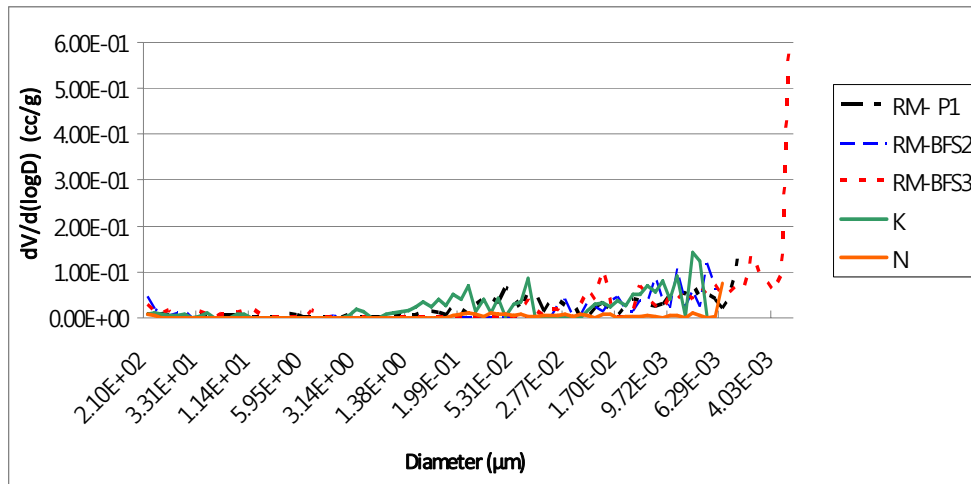


그림 2. 현장 타설 실험

표 3은 재령 28일에서의 배합별 압축강도를 나타낸 것이다. 모든 배합의 경우 28일 기준 터널 설계기준(21MPa)은 상회하는 것으로 나타났는데, 광산용 및 터널용 현장배합에 비해 레디믹스트 숯크리트의 압축강도가 상대적으로 약 45% 이상 크게 나타났다. MIP 시험 결과와 비교시 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었으나, 공극구조에 따른 압축강도 값이 유사한 정확도를 나타냄을 알 수 있었다.

표 3. 배합별 압축강도 결과

배합명	재령	압축강도 (MPa)		
		1일	7일	28일
레디믹스트 숏크리트	RM-P1	20.03	33.08	42.55
	RM-BFS2	21.09	33.43	45.20
	RM-BFS3	21.11	33.57	46.00
광산용	K	10.81	19.69	28.60
터널용	N	7.88	15.54	25.80

5. 결론

본 연구에서는 숏크리트 공극구조에 따른 압축강도의 상관성을 분석하기 위해 수은압입시험을 통한 결과와 타설실험을 통한 결과를 비교하였으며, 본 연구의 종합적인 연구요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장배합과 분말형 레디믹스트 재료를 적용한 숏크리트 내부 공극구조를 분석하고, 결과를 토대로 숏크리트 조직의 치밀화에 따른 압축강도 및 내구성에 미치는 영향을 평가하고자 ASTM D 4284에 의거 수은압입시험(MIP)을 실시하였다.
- (2) RM-P1 배합의 경우 large mesopore가 공극의 많은 양을 차지하고 있으며 C-S-H내에 존재하는 small mesopore도 확인할 수 있다. 또한, 숏크리트 내구성능에 영향을 미칠 수 있는 공극인 macropore의 존재를 확인할 수 있다.
- (3) RM-BFS2와 RM-BFS3 배합의 경우 숏크리트 내구성능에 영향을 미칠수 있는 공극인 macropore의 양은 전체 공극의 약 1% 정도만을 차지하고 있음을 확인할 수 있다.
- (4) 현장 배합인 K와 N배합의 경우 레디믹스트 배합에 비하여 전반적으로 조직구조가 치밀하지 않음을 확인할 수 있었으며, 콘크리트 강도 및 동결융해 저항성에 영향을 미치는 macropore 이상의 직경을 가지는 양도 약 20%이상으로 나타났다.
- (5) MIP 시험 결과와 현장타설에 의한 압축강도 결과를 비교해 본 결과 공극구조에 따른 압축강도 값이 유사한 정확도를 나타냄을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국광물자원공사의 2009 광물공 위탁연구의 지원으로 수행된 것으로 연구를 가능케 한 한국광물자원공사에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1999), 도로설계편람(터널편)
2. 김기철, 정계동(1998), “경화 콘크리트 내부의 기포분포상태 분석에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, pp.791~796.
3. 마상준, 최재석, 김동민, 김재신(2005), “고성능 숏크리트 적용 가능성 파악을 위한 숏크리트 품질특성 검토”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp.131~133.
4. 임정호(1997), “플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성 및 기포조직에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, pp72~79
5. 한국콘크리트학회(2001), “최신 콘크리트 공학”, pp.110~117.
6. EFNARC(1996), *European Specification for Sprayed Concrete*
7. Cook, R.A. and Hover, K.C. (1993), “Mercury porosimetry of cement-based material and associated correction factor”, ACI Materials journal, Vol. 90, No. 2, pp.152~161.