

잔골재 대체재로서 석탄회를 이용한 초속경 보수모르타르의 기초적 특성에 관한 연구

A Study on the Fundamental Properties of Ultra Rapid Hardening Mortar using Coal-Ash

(Received March 21, 2011 / Revised March 30, 2011 / Accepted March 31, 2011)

이건철^{1)*} 오동욱¹⁾ 김영근¹⁾ 조정기²⁾

¹⁾한국건설생활환경시험연구원, 방수방식팀, ²⁾(주)두영티엔에스

Lee, Gun-Cheol¹⁾ Oh, Dong-Uk¹⁾ Kim, Young-Geun¹⁾ Cho, Chung-Ki²⁾

¹⁾Korea Conformity Laboratories, Seoul, 137-707, Korea

²⁾DooYoung T&S Corporation, Eumseong-Kun, 369-901, Korea

Abstract

In this study, in order to develop ultra rapid hardening mortar(URHM) for tunnel repairs using bottom ash of low recycle ratio and Admixture as Eco concept, fundamental properties of URHM on temperature condition of construction field were performed. Test result, URHM of three types for fluidity and setting time were as in the following : B > C > A. Those for low temperatures were later than the standard condition. Compressive, bending and bond strength were similar with three types as follow. In compressive strength, initial strength of the low were smaller than the standard but the low in the long-term were similar with the standard. On the contrary to this, bending strength were similar in initial strength but the low in the long-term were smaller than the standard. The low in bond strength was average 35% less than the standard. Length changes was as in the following : A > C > B. the low is two times much as the standard but the case using blast furnace slag particles noticeably reduced length changes. Water absorption coefficient and water vapor resistance were as in the following : C > A > B. In case of URHM added bottom ash, water absorption coefficient and water vapor resistance were increased because bottom ash is porous material.

키워드 : 버텀애쉬, 잔골재, 초속경 시멘트, 보수모르타르

Keywords : Bottom ash, Fine aggregate, Rapid hardening cement, Repair mortar

1. 서 론

초속경 타입의 보수모르타르는 주로 도로, 교량, 터널, 항만 등의 긴급 보수공사 및 한중콘크리트 등 저온환경에서의 보수공사에 이용된다. 특히, 도로, 교량의 경우는 교통통제 시간의 제한 등으로 인하여 초속경 타입의 보수재료의 사용이 더욱 증가되고 있는 추세이다.

또한, 이러한 재료의 다양한 형태의 개발로 인해 합리화 시공기술도 현저히 발전하고 있으며, 최근에는 습식 스

프레이 공법^{1,2)}, 터널 내 프리캐스트 라이닝 보수 공법³⁾ 등 다양한 공법에 사용되고 있다. 구체적으로 터널 보수공사 시 프리캐스트 패널과 구체 콘크리트면의 충전, 수로터널 및 배수로의 구체 콘크리트와 거푸집 사이의 충전 등 비교적 유동성이 큰 그라우팅형태의 보수재료의 개발이 시도 되고 있다^{4,5)}.

실제로 보수공사에 프리캐스트 패널의 활용이 증가하면서 작업시간의 확보와 동시에 단시간에 높은 강도를 발휘할 수 있는 초속경 그라우트 모르타르 개발의 필요성이 요구되고 있다.

한편, 자원순환형 사회기반을 구축하고자 하는 세계적인 추세변화에 따라 건설업계의 경우도 산업 부산물의 유

* Corresponding author
E-mail : gcleee@kcl.re.kr

효이용에 대한 요구가 높아지고 있으며, 이러한 사회적 요구에 따라 전진환 등⁶⁾은 초속경시멘트에 재자원화 이용율이 낮은 석탄회 및 인공경량골재를 혼입한 급경성 보수 모르타르의 개발을 목적으로 한 연구 결과를 발표하였다. 기본적으로 이러한 기술은 산업폐기물을 재활용함으로써 원가를 절감하고 산업부산물을 유효 이용하고자 하는 것에 목적을 두고 있으나, 초속경 시멘트의 원료단가가 기본적으로 높기 때문에 경제성을 확보하게 위해서는 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 연구의 기반을 바탕으로 국내에서 발생하는 바텀애쉬 및 혼화재를 사용하여 목표 성능을 만족하면서 경제성 확보가 가능한 배합에 대하여 검토하였으며, 아울러, 실무 현장의 적용성을 확인하기 위하여 실시공 환경의 온도조건에서 초속경 그라우트 모르타르의 기초적 특성에 대하여 검토 하였다.

2. 자원순환형 초속경 그라우트 모르타르 개발의 개념

본 연구에서는 자원순환형 기능성 보수재료의 개발을 목적으로 Fig. 1과 같이 산업부산물로서 재이용율이 낮은 바텀애쉬를 이용하는 초속경 및 고유동성의 기능성 재료를 개발하고자 하였다.

산업부산물의 재활용은 자원순환형 사회기반을 구축하고자 하는 정부정책에 있어 필수적이며, 이러한 사회적 배경을 고려해 볼 때, 산업부산물을 유효 이용함과 동시에 목표성능을 만족하는 건설재료를 개발하는 것은 향후 중요한 해결과제가 될 것으로 예상된다. 더욱이, 자원재활용은 천연재료의 단가를 저감 할 수 있어 보다 경제적인 친환경 재료가 될 수 있다.

한편, 기존 초속경 시멘트를 이용하는 보수모르타르는 현장타설시 충분한 가사시간을 확보하지 못해 작업의 효율성이 떨어지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 짧은 시간내에 경화가 일어나지만 충분한 가사시간을 확보할 수 있어야 하며, 충전개념의 그라우트 보수재료로서 활용하기 위해서는 높은 유동성의 확보가 필요하며, 본 개발에서는 다음과 같은 구체적인 목표물성을 설정하였다.

- 유동성 : 테이블플로(무타격) 250~300 mm
- 초기강도 : 3시간 강도 6 N/mm²이상
- 장기강도 : 28일 강도 40 N/mm²이상
- 부착강도 : 2 N/mm²이상

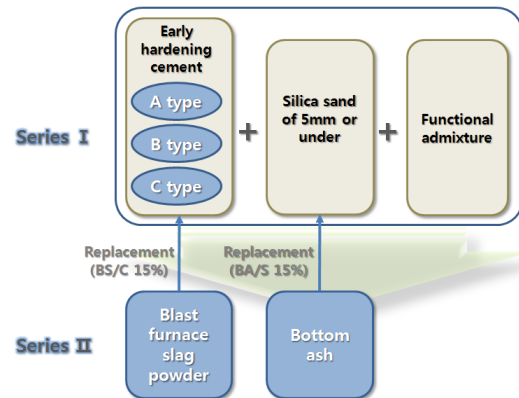


Fig. 1 Concept of experimental design

Table 1 Design of experiment

Factors		Variables	
Mixture factor	Cement	3	A type, B type, C type
	Replacement ratios of bottom ash (BS/C%)	2	0, 15
	BS powder (BA/C%)	2	0, 15
	Curing condition (°C)	2	5(Low), 20(Standard)
Test item	Fresh mortar	3	- Table flow - Time of flow - Setting time
	Hardened mortar	4	- Compressive strength - Bending strength - Bond strength - Length change

[Notes] BS powder : Blast furnace slag powder

Table 2 Mix proportion

Symbol	W/B (%)	S/B	Unit weight (kg/m ³)					SP (B×%)	
			W	C	S	BS	BA		
Series I	A	30	1.0	300	1000	1000	-	-	1.2
	B	30	1.0	300	1000	1000	-	-	1.2
	C	30	1.0	300	1000	1000	-	-	1.2
Series II	A-1	36	1.0	328	637	637	273	273	1.2
	B-1	36	1.0	328	637	637	273	273	1.2
	C-1	36	1.0	328	637	637	273	273	1.2

[Notes] W/B: Water binder ratio, S/B: Sand Bider ratio, BS: Blast furnace slag, BA: Bottom ash, SP:Super plasticizer

3. 실험개요

3.1 실험계획

Table 1 및 2는 본 연구의 시험계획 및 배합사항을 나타낸 것이다. 속경성 시멘트는 국내외에서 생산되는 3종류를 대상으로 하였으며, W/B 30 %, S/B 1 조건에 목표성능을 만족하기 위한 기능성 혼화제를 첨가한 것을 기본배합(Series I)으로 하였다. 여기에 Series II는 Series I의 3수준의 시멘트계 바인더에 질량비로 고로슬래그 미분말을 15 %치환, 바텀애쉬를 잔골재에 대한 질량비로 15 %씩 치환 사용하여 각 특성에 대하여 검토하였다. 시험체에 대한 양생조건은 실험실 표준조건을 가정한 20°C 및 실무 현장조건을 고려한 5°C로 실험계획 하였다. 측정사항으로 굳지않은 모르타르 특성은 테이블 플로, 유하시간 및 응결시간을 측정하였으며, 경화 모르타르 특성으로 압축강도, 휨강도, 부착강도(표준조건, 냉온 반복조건) 및 길이변화의 특성에 대하여 검토하였다.

3.2 사용재료

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내 D사(B type), 일본 E사(A type) 및 C사(C type)의 속경성 타입 시멘트를 사용하였으며, 그 물리·화학적 성질은 Table 2와 같다. 고로슬래그 미분말은 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말) 3종에 합격하는 제품을 사용하였고, 잔골재는 국내 화순 이아산 규사를 사용하였으며, 바텀애쉬는 국내 태안 화력 발전소산을 이용하였는데 그물리적 성질 및 입도는 Table 3 및 Fig. 2와 같다. 또한, 혼화제로서 고성능 감수제는 멜멘트계 축합물을 주성분으로 하는 분말형태의 고성능 감수제를 사용하였고, 지연제는 일반적으로 시멘트와 석고계 분체 등의 지연제로 사용되는 백색 분말 형태의 주석산(Tartaric acid)을 사용하였다.

3.3 실험방법

굳지않은 모르타르의 플로시험, 유하시간 및 응결시험은 KS F 2476, KS F 4044 및 KS L 5207 시험방법에 따라 실시하였는데, 플로 시험은 테이블 플로의 무타격 조건으로 실시하였으며, 비빔직후, 15분 및 30분에서 경시변화를 측정하였다. 압축 및 휨강도는 KS F 2476, 부착강도는 KS F 4716, 길이변화는 KS F 2424에 따라 측정 하였다. Fig. 3은 유동성 측정 모습을, Fig. 4는 압축 및 휨강도, Fig. 5는 부착강도 시험 모습을 나타낸 것이다.

Table 2 Properties of URHC

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	SiO ₂	Ig. Loss	Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
A type	37.8	1.5	41	1.8	10.0	1.3	5.5	2.5	4 610	2.95
B type	36.0	2.0	41.5	1.8	9.5	1.3	7.3	2.1	4 715	2.80
C type	9.1	2.1	58.9	0.6	9.5	0.5	15.4	2.2	4 710	3.04

Table 3 Physical properties of bottom ash

Density (g/cm ³)	Soundness (%)	Abrasion ratio (%)	Blaine (cm ² /g)	Moisture content (%)
2.2	10.9	45	1 150	4.68

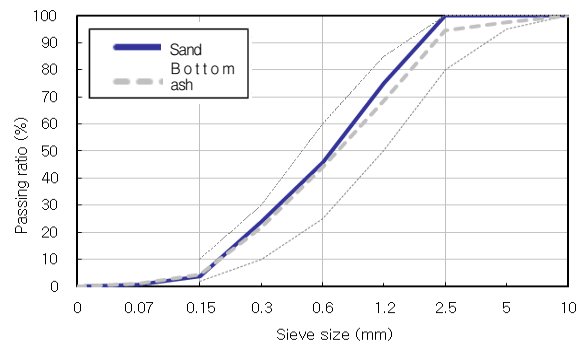


Fig. 2 Grading of sand and bottom ash

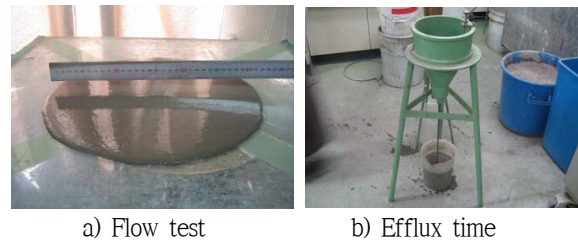


Fig. 3 Fluidity test



Fig. 4 Compressive and bending strength test

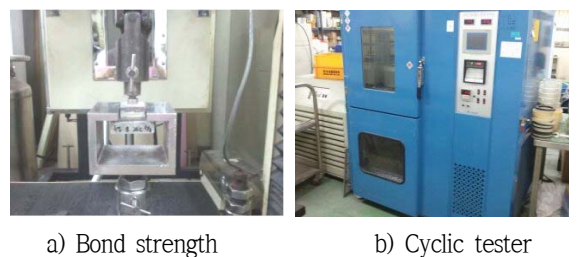


Fig. 5 Bond strength test

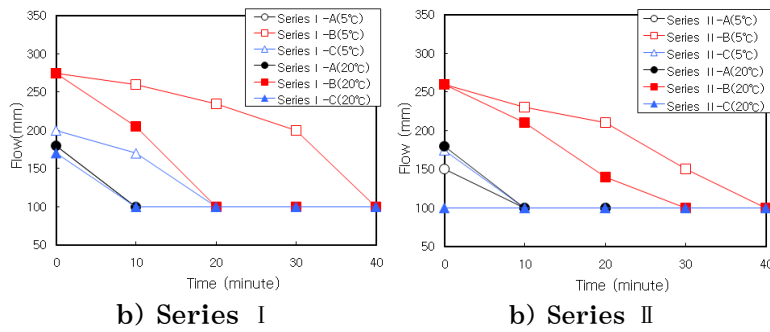


Fig. 6 Flow with elapsed time

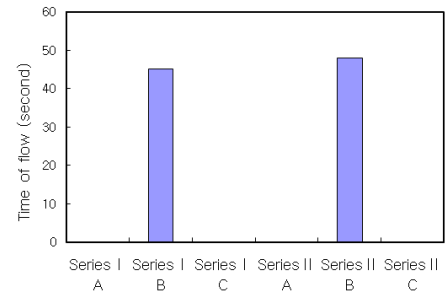


Fig. 7 Efflux time of flow by series

4. 실험결과 및 분석

4.1 굳지않은 모르타르의 특성

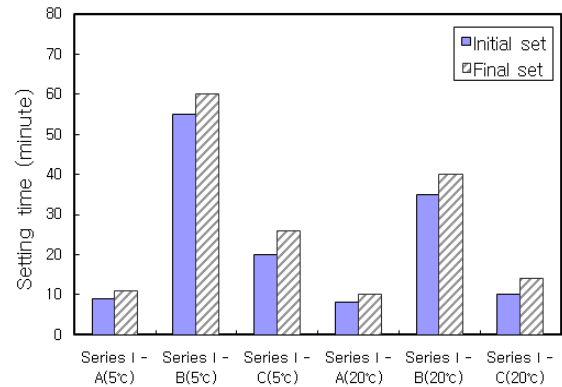
Fig. 6은 시리즈별 경시변화에 따른 플로를, Fig. 7은 유하시간 결과를 나타낸 것이다. 각 시멘트 종류별 플로는 그림에서 알 수 있듯이 다양한 양상을 나타내고 있는데, 전반적으로 A 타입 및 C 타입 시멘트의 경우 급격한 응결로 인해 10분 경과 후 대부분의 유동성을 상실하는 것으로 나타났다. 한편, B 타입 시멘트의 경우 다른 타입의 시멘트에 비해 양호한 유동성을 나타내고 있다. 특히, 시리즈 I의 5°C 조건의 경우 비빔직후의 플로가 275 mm로 가장 큰 것으로 나타났으며, 경시변화에 따른 유동성 저하 경향도 양호한 것으로 나타났다.

온도 조건 변화에 따른 유동성 변화 경향으로는 20°C 조건보다 5°C 조건의 경우가 양호한 경시변화 특성을 나타내었다.

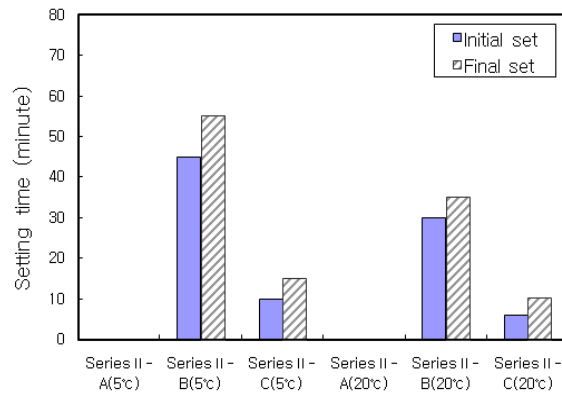
또한, 시리즈별 특성으로는 시리즈 I에 고로슬래그 미분말 및 바텀애쉬 잔골재를 치환한 시리즈 II의 경우 시리즈 I에 비해 전반적으로 유동성이 약간 저하하는 것으로 나타났는데, 이는 규사의 일부를 치환한 바텀애쉬의 높은 흡수율에 의한 배합수 감소 등을 원인으로 들 수 있다.

Fig. 7의 유하시간 측정결과는 B 타입의 시멘트를 제외한 모든 시료가 컨시스턴시의 확보가 어려운 것으로 나타났으며, B 타입 시멘트의 경우 시리즈 I, II 모두 KS 4044(수경성 시멘트 무수축 그라우트)의 기준인 60초 이내로 나타났다.

Fig. 8은 시멘트 종류, 양생조건 및 시리즈별 응결시간을 나타낸 것이다. 시멘트 종류별 응결시간은 전반적으로 A 타입, C 타입, B 타입 순으로 빠르게 나타났다. 특히, 시리즈 I의 B 타입의 경우 초결 55분, 종결 60분으로 가



b) Series I

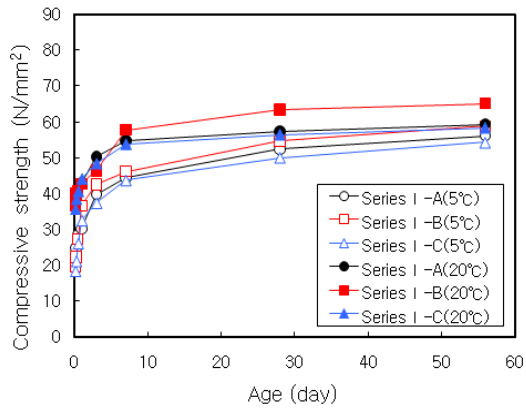


b) Series II

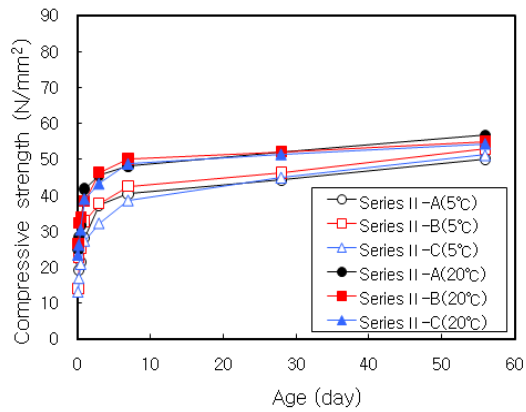
Fig. 8 Setting time by series

장 늦은 것으로 나타나, 본 연구의 목표 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

온도 조건 변화에 따른 응결시간은 당연한 결과로 20°C 조건보다 5°C 조건의 경우가 응결시간이 지연되는 것으로 나타났다. 그러나, 20°C 조건의 경우도 B 타입 시멘트는 본 연구의 목표값인 20°C 조건 초결 30분을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 시리즈별 응결시간은 시리즈 II의



a) Series I



b) Series II

Fig. 9 Compressive strength by series

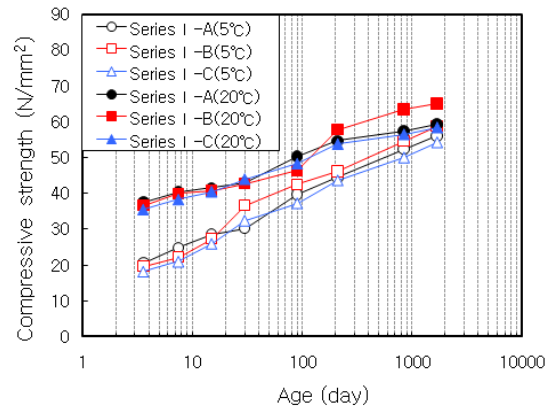
경우가 시리즈 I 보다 빨라지는 것으로 나타났는데 이는 유동성 감소와 다소 연관이 있을 것으로 판단된다.

4.2 경화 모르타르의 특성

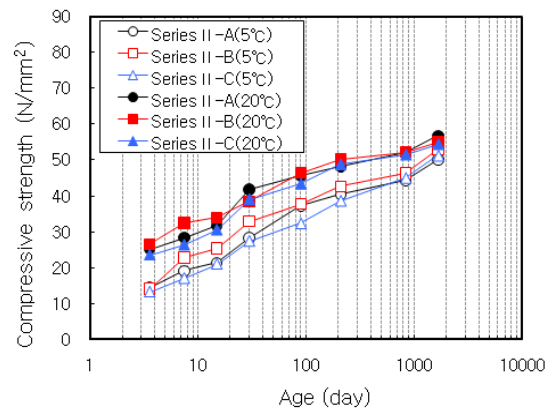
Fig. 9는 시리즈별 재령경과에 따른 압축강도 특성을 나타낸 것이고, Fig. 10은 동일 결과를 적산온도로 나타낸 것이다.

시멘트 종류별 압축강도는 전반적으로 B 타입, A 타입, C 타입 순으로 나타났다. 양생온도 조건별로는 5°C 조건보다 20°C 조건의 경우가 다소 높은 강도를 나타냈다. 그러나, Fig. 10의 적산온도 그래프에 알 수 있듯이 장기 재령으로 갈수록 저온양생 조건인 5°C의 경우도 지속적인 강도 증진 경향을 나타내어 56일 재령에서는 20°C 양생조건과 유사한 강도를 나타내고 있다.

한편, 시리즈별 압축강도는 시리즈 II의 경우 시리즈 I 보다 전반적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러



a) Series I



b) Series II

Fig. 10 Compressive strength by series (maturity)

나, 강도증진 경향은 시리즈 I 과 유사하며 56일 재령에서는 본 연구의 목표치인 50 N/mm²를 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 앞서 압축강도와 동일한 방법으로 시리즈별 재령경과에 따른 휨강도 특성을 나타낸 것이다. 전반적으로 휨강도는 압축강도와 유사한 경향을 나타내었으며, 시멘트 종류별 휨강도는 근소한 차이로 대동소이한 것으로 나타났으나, 양생온도 조건별 차이는 명확한 차이를 나타내었다. 특히, 시리즈 I의 경우 양생온도 조건별 차이가 현저한 것으로 나타났다. 그러나, 고로슬래그 미분말 및 바텀애쉬를 일부 치환 사용한 시리즈 II의 경우 온도조건별 차이가 미소하며, 25일 재령에서는 거의 유사한 강도를 나타내었다.

Fig.12는 시멘트 종류 및 시리즈별 부착강도 특성을 나타낸 것이다. 부착강도 시험은 그림과 같이 표준조건(5°C, 20°C)과 냉온 반복조건으로 구분하여 시험을 진행하였으며, 그림과 같이 시리즈 I의 경우 시멘트 종류별 부착강도는 전반적으로 대동소이하나 양생온도 조건별 및 냉온

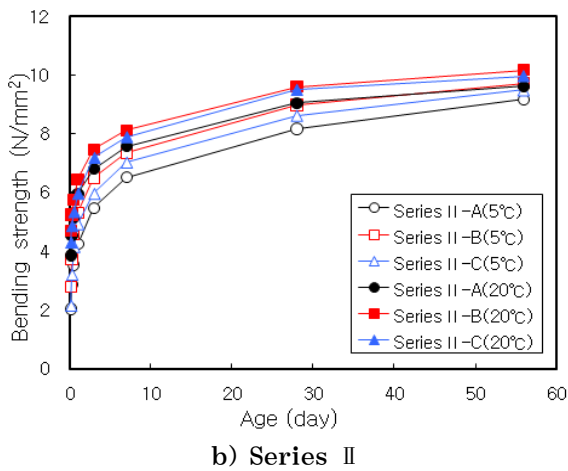
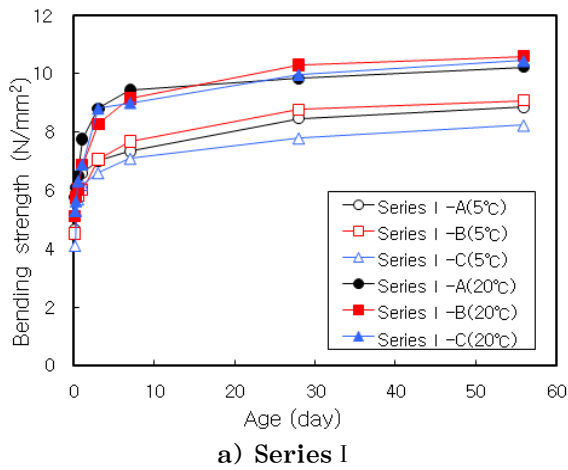


Fig. 11 Relation bending strength and age by series

반복후의 시험결과와 차이가 큰 것으로 나타났는데, 20°C 양생조건에 비해 5°C의 양생조건이 평균 35% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 냉온 반복 후의 경우 평균 57% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

반면, 시리즈 II의 경우 양생온도 조건 및 냉온 반복후의 부착강도 차이가 시리즈 I에 비해 미소한 것으로 나타났다. 20°C 양생조건인 경우 평균 2.8 N/mm²로 나타났고, 이에 비해 5°C 양생조건인 경우 평균 31% 이하 하였으며, 냉온 반복 후의 경우가 평균 19% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이처럼 고로슬래그 미분말 및 버팀애쉬를 치환 사용함에 따라 부착능력이 개선된 것은 버팀애쉬 치환에 따른 접촉 단면적의 증가에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 13은 시멘트 종류 및 시리즈별 길이변화 특성을 나타낸 것이다. 시멘트 종류별 건조수축 특성으로는 전반적으로 A, C, B 타입 순으로 나타났으며, 시리즈별로는 시리즈 II가 시리즈 I보다 수축이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트의 일부를 고로슬래그 미분말로 치환함에 따

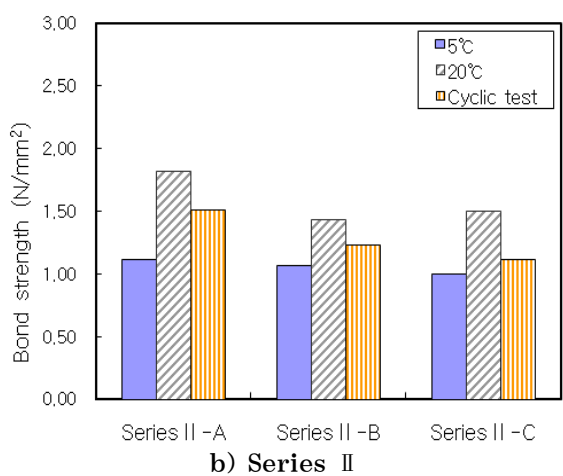
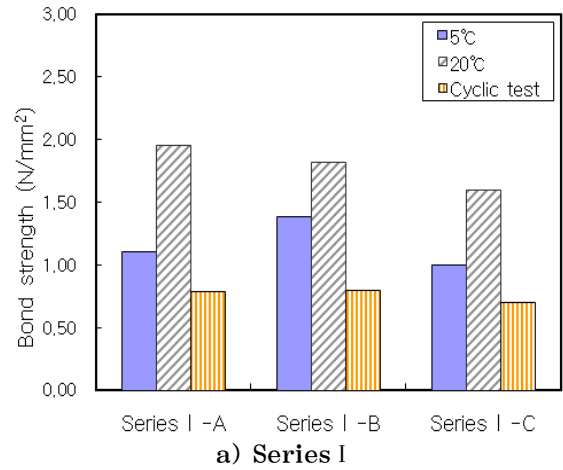


Fig. 12 Bond strength by series

른 단위 시멘트량 감소의 영향으로 판단된다.

또한, 양생온도 조건별 길이변화 특성으로 시리즈 I의 경우 5°C 양생조건과 20°C 양생조건 간에 차이가 큰 반면 시리즈 II의 경우 양생온도 조건 변화에 따른 차이가 매우 작은 것으로 나타났으며, 모든 시료가 KS F 4042(콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르)의 기준인 $\pm 0.15\%$ 범위내에 포함되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 자원순환형 터널보수용 고성능 보수 모르타르의 개발을 목적으로 개발한 무기질계 바인더를 포함한 3종류의 시멘트와 여기에 고로슬래그 미분말 및 버팀애쉬를 치환 사용한 3종류의 제품을 대상으로 기초적 특성에 대하여 검토하였다.

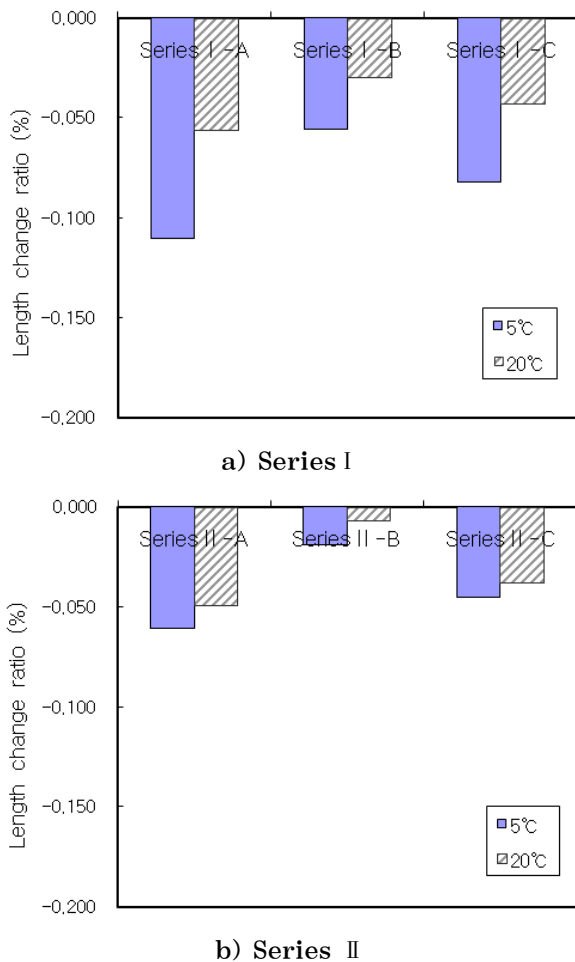


Fig. 13 Length change by series

- 1) 초속경 시멘트 종류별 유동 특성은 A 타입 및 C 타입 시멘트의 경우 급격한 응결로 인해 10분 경과 후 대부분의 유동성을 상실하는 것으로 나타났으며, B 타입 시멘트의 경우 다른 타입의 시멘트에 비해 양호한 유동성을 나타내고 있다. 또한, 바텀애쉬 치환에 따른 유동성은 골재의 입형 및 내부 공극에 따른 배합수의 흡착으로 인하여 치환 전에 비해 약간 저하하는 것으로 나타났다. 온도조건별로는 5°C 조건의 경우가 20°C의 경우에 비해 유동성이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 온도 조건 변화에 따른 응결시간은 20°C 양생온도 조건보다 5°C 양생온도 조건의 경우가 응결시간이 지연되는 것으로 나타났다. 또한, 초속경 시멘트 종류별로는 B 타입의 경우를 제외한 모든 종류가 본 연구의 목표치인 초결 30분 이상을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

3) 강도 특성으로 압축강도는 시멘트 종류별로 B 타입, A 타입, C 타입 순으로 나타났으며, 양생온도 조건별로는 5°C 조건 보다 20°C 조건의 경우가 다소 높은 것으로 나타났다. 그러나, 장기 재령으로 갈수록 저온양생 조건인 5°C의 경우도 지속적인 강도 증진 경향을 나타내어 56일 재령에서는 20°C 양생조건과 유사한 강도를 나타내었다. 또한, 3일 강도의 경우 본 연구범위의 목표치인 6 N/mm²를 만족하는 것으로 나타났다.

4) 초속경 시멘트 종류별 건조수축 길이변화는 시리즈 I, II 모두 B < C < A타입 순으로 나타났다. 또한, 양생온도별 길이변화는 20°C 양생조건에 비해 5°C 양생조건의 경우가 증가하는 것으로 나타났으며, 바텀애쉬 치환 여부에 따라서는 치환의 경우가 길이변화율이 작은 것으로 나타났다.

5) 이상을 종합한 결과 일부 속경성 시멘트는 초기에 설정한 목표값을 만족하는 것으로 나타났고, 고로슬래그 미분말 및 바텀애쉬 치환의 경우도 양호한 성능을 나타내었으나, 현장실무 적용을 위해서는 내구성능을 포함한 종합적인 검토가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 건설교통 R&D 정책·인프라사업(국내 석탄회를 이용한 터널 보수보강 모르타르 개발) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 건설교통부, 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르 및 구조물 보수/보강 신기술 개발, 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, 2001
- 2) 이진철외, 습식 스프레이용 섬유복합 모르타르의 기초적 특성, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, pp.305-308, 2006
- 3) 국토해양부, 신개념 NATM Composite 라이닝 공법 개발, 국토해양부, 2008
- 4) 鹿島技術研究所, 副産物を有効利用した新機能材料報告書, 2005
- 5) 중소기업청, 터널 일체형 거푸집 제작 및 이를 이용한 보강기술, 중소기업기술혁신개발사업 보고서, 2010
- 6) 전진환외, 석탄회 조분을 유효이용한 보수 모르타르의 개

발, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, pp.1017~1022, 2003

- 7) 長谷川聖史외, 高強度・超速硬グラウトモルタルの基礎物性, 콘크리트工学년次論文集, Vol. 26, No.1, pp.2085-2090, 2004
- 8) 鄭然植외, 超速硬セメントを利用したコンクリートの物性に関する研究, 콘크리트工学년次論文集, Vol.21, No.2, pp.217-222, 1999
- 9) 강인석외, 마그네시아 인산염 시멘트를 사용한 초속경 보수모르타르의 기초적 특성분석에 관한 연구, 대한건축학회 구조계논문집, Vol.23, No.8, pp.139-148, 2007
- 10) 신상현외, 표면피복재 및 단면수복재로 보수된 콘크리트의 염화물 침투 특성에 관한 연구, 대한건축학회 구조계논문집, Vol.29, No.1, pp.527-530, 2009
- 11) 유조형외, 보수시공용 저온경화 시멘트모르타르 개발에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 구조계논문집, Vol.27, No.10, pp.455-458, 2007
- 12) 김완기외, 양생조건 및 보수방법에 따른 폴리머 시멘트 모르타르의 강도 성장, 콘크리트학회논문집 Vol.19, No.4, pp.457- 465, 2007
- 13) 황태하외, 콘크리트 단면복구용 무기성 모르타르의 특성에 관한 연구, 구조물진단학회지 Vol.14, No.3, pp.171-177, 2010

잔골재 대체재로서 석탄회를 이용한 초속경 보수모르타르의 기초적 특성에 관한 연구

본 연구에서는 산업부산물로서 재활용율이 낮은 바텀애쉬와 혼화재를 이용하는 에코개념의 터널 보수용 초속경 그라우트 모르타르 개발을 목적으로 실시공 환경조건의 온도하에서 초속경 그라우트 모르타르의 기초적 특성에 대하여 검토하였다. 실험결과, 유동성 및 응결시간은 B > C > A type 순으로 크게 나타났으며, 온도조건별로는 상온보다 저온에서 더 지연되었다. 압축강도, 휨강도, 부착강도는 3 type 모두 비슷하게 나타났는데, 압축강도는 저온조건에서는 초기에 강도가 작았지만 장기재령에서는 상온조건과 유사한 강도가 나타났고, 휨강도는 초기에는 강도가 유사했지만 장기재령에서는 상온조건이 크게 나타났으며, 부착강도는 상온조건보다 저온조건이 평균 35 % 저하되었다. 길이변화는 A > C > B 순으로 저온조건이 상온조건보다 2배로 나타났으며 고로슬래그 미분말을 취환한 경우 현저히 감소되었다. 물흡수 계수 및 습기투과 저항성은 C > A > B 순으로 크게 나타났고 바텀애쉬를 치환할 경우 다공질의 영향으로 크게 증가되었다.