



알루미나계열 속경성 도로 보수재료 개발에 따른 경제성 분석

양희준¹⁾ · 김민재¹⁾ · 홍성인¹⁾ · 안기용^{1)*}

¹⁾한양대학교 건설환경공학과

Economic Analysis with Development of Rapid Setting Alumina-based Binder for Road Repair

Hee-Jun Yang,¹⁾ Min-Jae Yang,¹⁾ Sung-In Hong,¹⁾ and Ki-Yong Ann^{1)*}

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Rep. of Korea

ABSTRACT In case of Korea highways, about 60% of highways are paved by concrete and more than 50% of them were repaired due to reduction in required performance such as damage in pave or joint and delamination of cover pavement. However, repairing old material in such structure generally costs a lot of money and induces difficulty in maintenance. Thus, enhanced material for ensuring economic efficiency should be developed. The present study designed concrete mixtures with 3 levels of replacement using OPC (0, 10, 20%) in calcium aluminate cement and to evaluate material performance for load pavement, experimental works for setting time, compressive strength and flexural strength were carried out on those materials. As a result, 20% replacement for OPC was determined as an optimized material in terms of required physical performance and its unit price. Moreover, to determine cost in load pavement economy analysis using a program (CA4PRS) was conducted with widely used paving materials. Result showed that application for 20% replacement for OPC was the most efficient in economical aspect, arising from 4.052 and 1.577 billion won for total construction and user cost, respectively.

Keywords : repair material, calcium alumina cement, highway, material performance, economy analysis

1. 서 론

국내 고속도로의 콘크리트포장은 1984년 88고속도로를 시작으로 장기간 공용연수, 유지관리 및 보수의 편의성 등의 장점으로 인해 이후 중부선, 호남선, 영동선 그리고 외곽순환선 등에 지속적으로 적용되어 현재 전체 고속도로 중 콘크리트의 포장비율이 60%를 넘어섰다.¹⁻³⁾ 그러나 최근 콘크리트 포장의 설계수명 20년을 초과한 고속도로가 50%를 상회하고 재료의 성능저하에 따라 부분단면보수, 덧씌우기 등의 보수공법을 적용하여 그 수명을 이어가고 있는 실정이나 이를 해결하기 위해 전단면 보수, 확장공사 등과 같은 장기간 교통차단을 수반하는 대대적인 보수공사가 필요한 시점이다.²⁻⁴⁾ 또한, 시공 시 공용 중인 도로의 차단은 차량운행비용, 통행시간비용, 공사구간 지체비용 및 민원 발생 등 이용자 비용의 증가를 동반하므로 조기교통개방의 필요성이 대두되고 있다.¹⁻⁵⁾

현재 도로 보수재료로는 초속경 시멘트, 조강슬래그 시멘트, 초속경 아크릴계 개질 콘크리트, 라텍스 개질 콘크리트 및 폴리머 콘크리트 등 다양한 종류가 쓰이고 있다.^{1,2,4,6)} 특히 초속경 아크릴계 개질 콘크리트의 경우 CSA계를 다량 첨가하여 짧은 시간 내에 요구되어지는 강도를 발현하며 core-cell 중합반응을 통하여 부착강도 및 휨강도를 향상시킬 수 있다.⁴⁾ 그러나 위 재료는 작업성, 온도의존성 등 사용에 있어 어려움이 있으며 특히 대규모 공사 시 높은 재료단가로 인한 경제성 저하를 초래할 수 있다.^{4,6)}

칼슘 알루미네이트 시멘트(Calcium Aluminate Cement: CAC)는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement: OPC)와 달리 보크사이트(Bauxite)를 원료로 하여 생성된 수경성 무기질 재료로서 높은 화학적 침식저항성, 내마모성 및 우수한 강도 발현 등의 특징으로 특정 용도로 쓰이고 있다. CAC와 OPC를 일정한 비율로 혼합하여 사용하였을 경우 빠른 응결시간을 가지며 도로 보수재료로서 요구되는 강도 또한 만족할 수 있다.^{7,8)} Ping Gu 및 Önder Kirca의 연구 결과에 따르면 알루미늄 산화물의 함량이 높은 CAC와 함께 20% 미만의 OPC를 혼용하여 사용하였을 경우 4-8시간 내에 최대 25 MPa 이상의 강도발현을 하는 것을 알 수 있다.^{9,10)} 또한 유리 산화 알루미늄의 존재는 응축채움 효과로 인해 초

*Corresponding author E-mail : kann@hanyang.ac.kr
 Received June 24, 2016, Revised November 30, 2016,
 Accepted December 16, 2016
 ©2017 by Korea Concrete Institute

기강도발현에 긍정적인 영향을 보여 단기간 강도를 확보하기 위한 방법 중 하나로 알려져 왔다.¹¹⁾

이에 본 연구에서는 콘크리트 포장도로의 보수재료로서 산화알루미늄의 함량이 높은 CAC와 OPC를 혼입하여 초기 강도 증진의 효과를 통해 도로 보수재료의 기본 요구 성능(교통개방기준)을 만족하며 경제성을 고려한 최적 배합비를 산정하고 기존 재료를 사용하였을 경우와의 경제성 분석을 실시하여 개발된 보수재료의 경제성 및 현장 적용성을 검토하였다.

2. 실험 계획 및 방법

본 연구에서는 CAC와 OPC를 혼입한 콘크리트의 보수재료로서의 적용가능성에 대한 평가를 수행하고자 각 배합별로 응결시간과 압축강도 및 휨 강도를 측정하였으며 이 중 교통개방기준을 만족하면서 동시에 경제적인 배합을 선정하였다.

2.1 사용재료 및 배합설계

본 연구에서 사용하는 모든 배합에 해당하는 CAC와 1종 OPC의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

혼합시멘트 배합에서 급결작용을 피하고 높은 압축강도를 위해 CAC의 혼입량은 0, 80, 90 그리고 100%로 정하였으며 강도측정을 위한 콘크리트 시편이 아닌 모르타르

시편을 이용한 응결시간 측정 실험의 경우 시멘트 대 잔골재비는 1 : 2.45로 하였다. 본 연구에서 사용된 배합은 다음 Table 2와 같다.

2.2 응결시간

모르타르를 이용한 응결시간 측정 실험은 KS F 2436에 의거하여 15 × 15 × 55 cm 각주형 공시체 몰드에 타설 후 실험

실 조건 (온도 20 ± 3°C, 상대습도 60 ± 5%)에서 양생을 실시하였으며 초결 및 종결 시간은 관입 저항 값이 각각 3.5, 28.0 MPa일 때로 하였다.

2.3 압축강도

압축강도 측정 실험을 위해 콘크리트 공시체는 Ø10 × 20 cm의 원주형 몰드를 이용하여 제작하였으며 응결시간과 같은 조건 하에 기건양생을 실시하였다. 압축강도는 초기 강도 측정을 위해 재령 6시간, 1, 3, 7일에서 각각 측정하였으며 KS F 2405 규정을 따랐다.

2.4 휨강도

휨강도 시험을 위해 15 × 15 × 55 cm 규격으로 각주형 공시체 제작 후 압축강도와 마찬가지로 같은 조건, 재령일에 KS F 2408에 따라 측정하였다.

3. 경제성 분석

문헌조사를 통해 기존 재료와 개발된 재료를 사용하였을 경우에 대해 대규모 보강 또는 재시공에 있어 최적화된 캘리포니아 주정부 교통국(California Department of Transportation: Caltrans)에서 개발되고 미국연방도로관리청에서 승인한 경제성분석 프로그램(Construction Analysis for Pavement Rehabilitation Strategies: CA4PRS)을 이용하여 시공 및 이용자 비용을 비교분석을 실시하였다.^{3,5,12)} 또한, 이는 기존의 경제성 프로그램(RealCost, MicroBen-Cost, HDM-4)과 비교 시 도로 구조물의 유지관리에 있어 공사구간의 다양한 요소들을 고려할 수 있으므로,³⁾ 국내 고속도로를 예시로 보수 재료 간 경제성 분석에 적합한 것으로 판단되었다.

Table 1 Oxide composition of OPC and CAC

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂
OPC	64.45	19.82	4.39	2.57	3.50	3.59	1.21	0.13	0.09	0.25
CAC	32.01	0.11	67.25	0.21	0.08	0.01	0.01	0.28	0.02	0.03

Table 2 Concrete mix design

Type	Replacement ratio (%)	Water to binder ratio (%)	Water (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)
100% CAC	100.0	40.0	134.8	337.0	825.5	1068.1
10% OPC	CAC	90.0	134.9	303.5	826.2	1069.0
	OPC	10.0		33.7		
20% OPC	CAC	80.0	135.0	270.0	826.8	1069.8
	OPC	20.0		67.5		

3.1 적용대상 구간 설정

분석 대상은 공용기간 20년이 지난 영동고속도로 중 대표적으로 노후화된 구간인 문막IC부터 만중 JCT의 9.2 km 구간을 대상으로 하였다.³⁾

3.2 공시기간 설정

기존 도로에 콘크리트 재포장을 하는 경우 공사기간은 Fig. 1과 같이 크게 기존 콘크리트 철거를 포함한 준비기간, 포설기간, 양생 및 차선 도색기간으로 구분할 수 있다. 이 중 양생 기간을 제외한 나머지 공정은 사용 재료와 관계없이 모두 동일한 것으로 가정하였다.

이에 기존 콘크리트의 철거 및 준비기간은 2일, 포설기간은 기계를 이용한 콘크리트 포설속도가 약 1 m/분인 점과 장

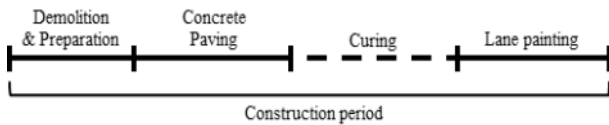


Fig. 1 Set-up of construction period

비 및 작업자의 효율(약 80%)을 감안하여 전체 공사 구간 9.2 km를 0.8 m/분으로 나눈 값인 약 8일로 가정하였고, 차선 도색기간은 마감 및 굳는 시간을 고려하여 1일로 두고 계산을 하였다. 다만, 포설과 동시에 철거가 이루어짐으로 추가적인 철거기간은 더하지 않았다.

마지막으로 양생 기간은 기존에 사용되는 보수재료와 본 연구에서 개발된 재료의 압축강도, 휨강도 결과를 바탕으로 교통개방기준을 만족하는 최소 양생기간을 산정하여 위의 기간에 더한 값을 각 재료별 총 공사기간으로 산정하였다.

3.3 시공비용 산출

콘크리트 1 km 재포장 시공비용 즉, 단위 시공비용은 한국건설기술연구원에서 제공하는 표준품셈을 기반으로 한 2016년 상반기 일위대가를 기준으로 하며 재료비, 노무비 및 경비에 따른 포장공과 폐기물 처리비용을 포함한 직접공사비에 제경비 50%을 가산하여 산정하였고 이에 총 구간 9.2 km를 곱하여 총 시공비용을 계산하였다.

특히, 폐기물 처리비용은 사용된 재료와 관계없이 고정된 금액이므로 포장공 비용에서 보수재료 별 레미콘 단가 차이에 따른 총 시공비용의 변화를 확인하였다.

Table 3 Input data for cost analysis in CA4PRS

Input variable		Input value	Note
Direction and number of lanes		One way, 2	14)
Vehicle velocity	Before construction	100 km/h	13, 15)
	After construction	80 km/h	
Total testing length of highway		9.2 km	14)
Unit period for closing traffic		In Section 4.4	Assumed
Number of closure		1	
Testing time and zone		Weekdays, City	
Vehicle driving cost	Car (+Bus)	18,121 Won/Number	15)
	Truck	15,636 Won/Number	
Traffic information	Traffic volume for truck	In Table 4	16)
	Growth rate for traffic volume	2.66%	
	Directional traffic volume	In Table 5	
	Hourly traffic volume		
Traffic reduction in construction	Rate for no show up	10%	3)
	Rate for detour	15%	
	Passing time for detour	20 min	
Adjusted capacity for load	Before construction	1,800 pcphpl	12, 13, 15)
	During construction	1,650 pcphpl	
Width of load	Before construction	3.4 m	3)
	During construction		
Top of load	Before construction	N/A	
	During construction		

3.4 이용자비용 산출

재료 별 양생시간 차이로 인한 공사기간에 따른 도로 이용자비용을 산출하기 위해 CA4PRS에서 사용된 입력변수는 다음 Table 3부터 Table 5에 나타내었다. 대상 구간인 영동고속도로 문막 IC부터 만중 JCT와 관련된 기본 정보는 건설교통부에서 제공하는 고속도로현황, 도로용량편람 및 도로교통량 통계연보를 이용하였고 교통량 정보 중 교통량 증감률은 2005~2014년도 10년간의 자료를 이용하여 산정하였다.

승용차 및 트럭의 차량운행비용(Vehicle Operating Cost: VOC)은 도로용량편람에서 제시된 값을 활용하였으나 CA4PRS 프로그램에서는 버스의 VOC를 고려하지 않기 때문에 이를 반영하기 위해 별도로 승용차의 VOC 입력부분에 대상 구간의 승용차와 버스의 VOC에 각 교통량 비율을 곱한 후 더한 값을 총 교통량 비율로 나눈 값을 이용하였다.³⁾

박권제¹²⁾와 이미리¹³⁾의 연구결과에 따르면 설계 속도가

Table 4 Traffic data of Yeong-dong high way, ranged from Mun-mak IC to Man-jong JCT¹⁷⁾

Year	Sum	Car	Bus	Truck
2005	52,260	34,551	7,798	7,711
2006	47,070	32,939	3,211	10,920
2007	52,450	38,866	3,477	10,107
2008	45,015	33,646	2,910	8,459
2009	43,786	32,135	2,891	8,760
2010	50,788	35,671	3,270	11,847
2011	50,874	35,789	3,997	11,088
2012	50,990	35,645	3,313	12,032
2013	58,187	46,135	3,218	8,834
2014	57,240	45,500	3,137	8,603

Table 5 Hourly traffic data of Yeong-dong high way, ranged from Mun-mak IC to Man-jong JCT¹⁵⁾

Time	Traffic (High)	Time	Traffic (High)
0-1	547	12-13	3,778
1-2	419	13-14	3,777
2-3	396	14-15	3,917
3-4	517	15-16	4,033
4-5	835	16-17	3,989
5-6	1,311	17-18	3,869
6-7	2,092	18-19	3,442
7-8	2,595	19-20	2,921
8-9	2,983	20-21	2,563
9-10	3,570	21-22	2,146
10-11	3,876	22-23	1,643

80 km/h인 공사구간의 1차로 용량의 값은 약 1,650 pcphpl이므로 공사 시에는 이 값을 적용하였으며 공사 전 용량은 도로용량편람에서 제시한 2,200 pcphpl을 입력하였다. 또한 공사 조건을 1개 차로로 한정하여 양쪽 모두 길어깨가 존재하지 않으며 차로폭은 3.4 m로 가정하였다.³⁾

또한 본 연구에서는 재포장을 위해 24시간 차단하여 시공함에 있어 사용자의 불편함이 발생할 수 있으므로 박지원¹⁾의 연구 결과를 참고하여 나타나지 않은 비율 10%, 우회비율 15% 및 우회로 인한 통행시간을 20분으로 가정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 응결시간

Fig. 2는 OPC의 혼입량을 0, 10, 20%로 증가시키면서 응결시간을 측정된 결과를 나타낸 것이다. OPC를 10% 혼입한 경우 초결시간은 26분으로 가장 빠른 것으로 나타났고 OPC 혼입량이 많아질수록 초결반응이 일어나기까지의 시간은 증가하는 것을 알 수 있다. 이에 대한 원인으로 적은 함량의 OPC (20% 이내 혼입)를 갖는 배합은 CAC 내 칼슘 알루미늄 이트와 OPC 내 석회와의 원활한 C4A 생성에 따른 수화반응 속도를 증가시키는 역할을 한다.⁷⁾ 또한 Fig. 2의 데이터는 기존 문헌 내용과 부합하는 결과임을 알 수 있다.^{7,8)} 응결시간 결과에서 알 수 있듯이 10% 치환한 경우 작업성을 고려한 KS기준인 초결반응 25분 이상¹⁷⁾을 만족하므로 도로보수재료로서의 사용가능성이 있다고 판단할 수 있다.

한편, 중결시간과 초결시간의 차이는 공사 중 작업성과 관련이 깊는데 이 차이가 적을 경우 작업 중 응결 및 경화가 일어나 작업에 어려움을 겪을 수 있다. 응결시간 실험 결과에 따르면 10% 치환율은 45분, 20% 치환율은 77분이며 CAC 100%의 경우 55분으로 OPC 10%를 제외한 모든 경우 약 한 시간 정도의 초결 후 여유시간을 갖는 것으로 나타났다.

4.2 압축강도

결합재로써 CAC에 OPC 함량을 0, 10, 20% 혼입하여 사

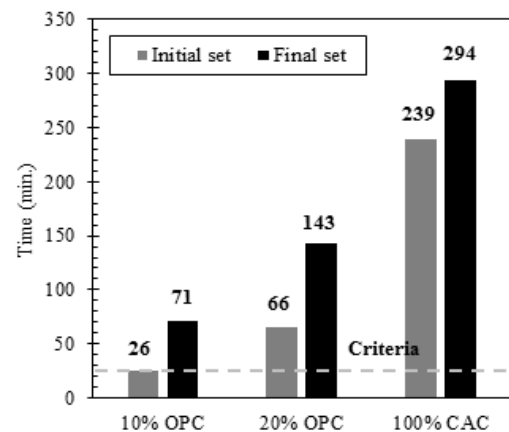


Fig. 2 Penetration resistance of fresh concrete

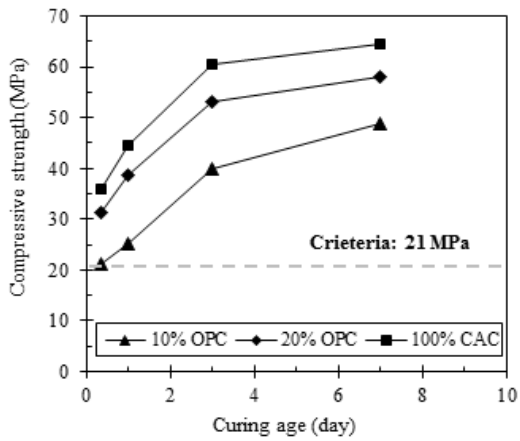


Fig. 3 Compressive strength of concrete with time

용한 혼합 콘크리트의 압축강도 결과 값을 Fig. 3에 나타내었다. 재령 8시간에서의 실험결과 CAC 100%의 경우가 35.85 MPa로 강도측면에서 가장 우수한 성능을 보였고 OPC를 10% 혼입한 경우 21.33 MPa로 최저값을 갖는 것으로 나타났다. 재령 1, 3, 7일의 경우도 OPC의 혼입량이 증가할수록 강도가 높아지는 비례적인 관계를 보이거나 CAC 100%의 경우 이들보다 높은 강도를 나타내었다. 이는 CAC에 20% 이하 OPC 치환된 재료(100% CAC 포함)의 수화물 발현은 주로 규산칼슘 수화물 계열이며, 그밖에 에트링가이트 및 칼슘 설포 알루미늄이 트가 발생⁸⁾되어 초기 높은 강도를 이루었다고 판단된다. 이는 100% CAC의 경우가 OPC를 치환한 경우보다 강도에 필요한 수화물들을 초기에 많이 발생시킨 것으로 사료된다.

압축강도 21 MPa 이상인 교통개방기준은 혼입량에 관계없이 모두 만족하는 것을 확인하였고 CAC 사용량이 증가함에 따라 결합재 비용 또한 증가하므로 경제성을 고려한 최적의 배합비는 OPC를 20% 치환하였을 경우로 산정하였다.

4.3 휨강도

앞선 결과를 통해 경제적인 혼입비율은 OPC 20%임을 확인하였고 이에 대한 휨강도 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었

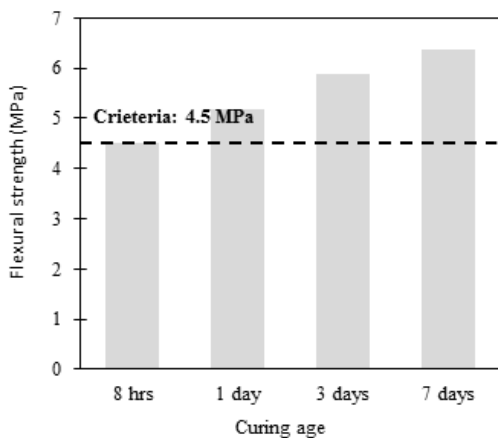


Fig. 4 Flexural strength of 20% OPC concrete

다. 한국도로공사의 고속도로공사 전문시방서 및 고속도로 공사용 건설재료 품질 및 시험기준에 따르면 교통개방을 위한 휨강도의 기준은 4.5 MPa 이상의 강도가 필요한데 상기 재료를 이용한 실험 결과 재령 8시간 경우에 4.51 MPa로 압축강도와는 마찬가지로 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 위의 결과를 통해 8시간 양생 후 교통개방이 가능하다는 것으로 판단된다.

4.4 공사 기간

기존 문헌의 자료에서 사용된 보수재료 및 본 연구에서 개발된 시멘트의 도로교통개방 기준을 만족하는 최소 양생 기간을 Fig. 5에 나타내었다. 초속경 아크릴계 폴리머 시멘트의 경우 4시간 만에 기준을 웃도는 압축강도와 휨강도를 발현하는 것으로 나타났고 다음으로 20% OPC 경우 8시간으로 그 뒤를 이었다. 조강슬래그 시멘트를 사용한 경우는 24시간이 걸렸고 3종 포틀랜드 시멘트의 경우 압축강도는 24시간이 지난 후 기준을 만족하였지만 휨강도는 그에 미치지 못하여 도로교통개방은 48시간 이후에나 가능한 것으로 확인되었다.

이 결과를 토대로 각 보수재료 별로 기존 도로에 콘크리트 재포장을 하는 경우 총 공사기간은 268, 272, 288, 312 hr 순으로 각각 초속경 아크릴계 폴리머 시멘트, 20% OPC, 조강슬래그 시멘트, 3종 보통 포틀랜드 시멘트에 해당된다.

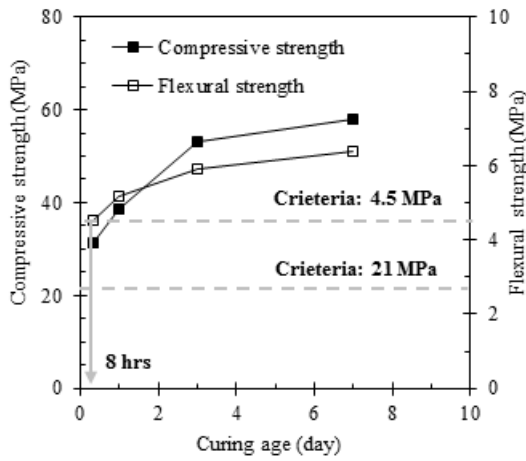
4.5 총 비용

사용 재료별 레미콘 단가의 차이를 고려하여 영동고속도로 내 문막IC부터 만죽JCT까지 총 9.2 km 구간의 총 시공비용을 계산한 결과를 Table 6에 나타내었다. 초속경 아크릴계 폴리머를 보수재료로 사용한 경우에는 평균 43.74억 원으로 가장 높은 수치를 보였고 그 뒤를 이어 20% OPC, 조강슬래그 시멘트, 3종 포틀랜드 시멘트 순으로 각각 40.52, 40.15, 40.10억 원으로 비슷한 수준을 보였다. Table 7에서 알 수 있듯이 CA4PRS 프로그램을 이용하여 사용 재료별 이용자 비용을 산정한 결과 가장 높은 비용을 나타낸 시멘트는 총 공사기간이 48시간으로 가장 긴 3종 포틀랜드 시멘트로 그 금액은 18.31억 원이었다.

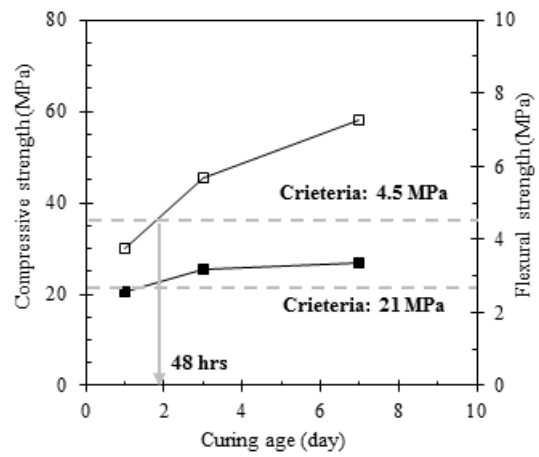
다음으로 조강슬래그 시멘트를 사용한 경우 16.79억 원, 20% OPC 및 초속경 아크릴계 폴리머 시멘트 순으로 각각 15.77, 15.52억 원이었다. 이를 통해 총 공사기간 즉, 교통개방기준을 만족하는 양생기간이 적을수록 이용자비용 또한 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

총 시공비용에 이용자비용을 더한 값을 총 비용으로 정의하였을 때 20% OPC를 사용하였을 경우가 56.29억 원이며 조강슬래그 시멘트, 3종 포틀랜드 시멘트, 초속경 아크릴계 폴리머 시멘트 순으로 각각 56.94, 58.41, 59.25억 원이었다.

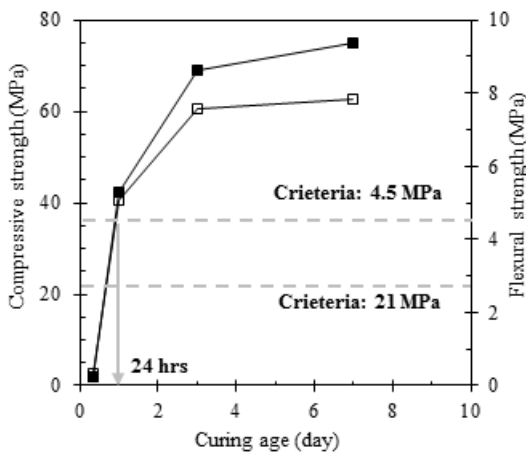
총 시공비용만을 비교하였을 경우 3종 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것이 가장 경제적인 것으로 나왔으며 또한 이용



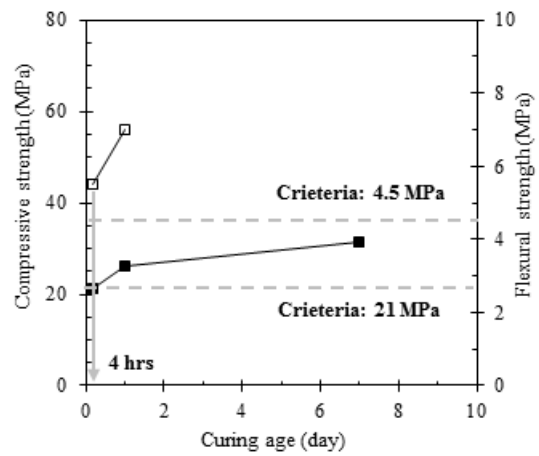
(a) 20% OPC



(b) Type III portland cement⁶⁾



(c) Rapid hardening slag cement¹⁾



(d) Very rapid hardening acrylic polymer modified cement⁴⁾

Fig. 5 Compressive and flexural strength with various binder types

Table 6 Total construction cost starting from various binder types

Type		Material cost (Billion won)	Labor cost (Billion won)	Expense (Billion won)	Total (Billion won)
Paving work	20% OPC	0.122-0.127	0.068	0.024	0.214-0.219
	Type III portland cement	0.121-0.122			0.213-0.214
	Rapid hardening slag cement	0.122			0.214
	Very rapid hardening acrylic polymer modified cement	0.145-0.151			0.237-0.243
Waste disposal		0	0	0.077	0.077
Cost per construction	20% OPC	0.183-0.190	0.102	0.152	0.437-0.444
	Type III portland cement	0.181-0.183			0.435-0.436
	Rapid hardening slag cement	0.183			0.436-0.437
	Very rapid hardening acrylic polymer modified cement	0.218-0.226			0.541-0.479
Total construction cost	20% OPC	1.688-1.751	0.938	1.394	4.020-4.083
	Type III portland cement	1.674-1.681			4.006-4.013
	Rapid hardening slag cement	1.679-1.685			4.012-4.017
	Very rapid hardening acrylic polymer modified cement	2.004-2.078			4.336-4.410

Table 7 User cost with various binder types

Type	User cost (Billion won)
20% OPC	1.577
Type III portland cement	1.831
Rapid hardening slag cement	1.679
Very rapid hardening acrylic polymer modified cement	1.552

자비용에서는 초속경 아크릴계 폴리머 시멘트의 경우가 15.52억 원으로 가장 낮은 결과를 보였다. 하지만 총 비용으로 비교할 경우 본 연구에서 개발된 20% OPC를 사용하였을 때 가장 경제적인 시공임을 알 수 있었다.

4.6 현장 적용성

이용자 비용 및 시공비용의 합산결과 CAC에 20% OPC를 첨가한 경우 가장 유리한 결과를 나타내었으나, 실제 현장에서 사용 시 우려되는 결과는 다음과 같다.

일반적으로 CAC 혼입 시멘트 특성상 상온에서의 상변화(CAH₁₀ → C₃AH₆)로 인한 강도저하 및 공극량 증감⁷⁾을 야기시켜, 콘크리트 도로구조물로서 성능문제를 발생시킬 수 있다.

시간에 따른 높은 비율의 상변화를 겪는 재료라 해도 OPC 20% 이내의 경우 28일 기준 40 MPa 이상의 강도를 나타내어⁸⁾ 장기 재령 후 요구강도(21 MPa) 이하로 강도가 감소하는 경우는 발생하지 않으나, 공극량 증감으로 인해 도로구조물 적용 시 제설염에 따른 내장 철근의 부식 가속화로 인한 재 보수비용이 발생할 수 있다.

이용자 비용 분석 결과, 목표 요구강도를 발현할 때까지 도로도포 양생기간은 위 내용에서 알 수 있듯이 비용발생과 선형적인 관계를 나타낸다. 이는 높은 함량의 SiO₂를 갖는 고 내구성 콘크리트 재료를 사용할 경우 재 보수 위험률은 낮으나, 긴 도로차단 기간에 따른 추가 비용발생은 피할 수 없으므로, 적정 내구성을 갖으며 단기간 응결작용을 갖는 재료의 선택이 적합하다고 판단된다.

이에 대해 CAC를 혼입한 콘크리트의 현장 적용 시 온도에 민감한 상변화 특성을 고려하여, 동결기 기간에 공사를 추진하는 방안이 있다. CAC 특성상 시간 당 약 38 J/g 초기 수화열⁷⁾을 발생시켜, 초기 높은 상변화율과 함께 건조수축 및 블리딩으로 인한 내구성 저하를 일으킬 수 있으므로, 가 급적 기온이 낮은 시기에 타설하는 것이 적합하다고 판단된다. 더불어, OPC만을 사용한 경우와 비교 시 CAC 혼입 시멘트를 사용한 콘크리트는 풍부한 Al₂O₃로 인한 높은 염분흡착능력(binding capacity)과 pH 10.5-11.5에서 존재하는 산중화능력(acid neutralisation capacity)을 가지므로¹⁸⁾ 기본적으로 제설염에 의한 염해부식 저항성이 우수한 재료이다.

그러므로 기본적으로 갖는 고 내구성능을 기반으로 동결기에 CAC 혼입 시멘트(OPC 20%)를 사용한 보수재료의 적용은 기타 우수한 보수재료와 비교 시 경제적이며 유지관리 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 CAC와 OPC를 혼입한 시멘트의 고속도로 보수 재료로서의 현장 사용성을 알아보기 위해 압축강도, 휨강도, 응결시간 측정이 이루어졌다. CAC에 20%의 OPC를 혼입한 시멘트가 규정상의 압축강도와 휨강도를 만족하며 가장 빠른 응결을 보여, 도로 보수재료로서 가장 높은 사용성을 보였다. 또한 개발 재료의 경제성 분석을 통해 현장 적용성을 검토하였고, 검토 결과 시공비용에는 큰 차이가 없으나 사용 재료별 이용자 비용에서 경제적인 것으로 나타났다. 이는 개발 재료의 단가 대비 짧은 공사 기간으로 도로 차단 시간이 줄어드는 것에 그 원인을 찾을 수 있다. 결론적으로, 개발 재료인 20% OPC를 혼입한 CAC 콘크리트는 우수한 강도 발현과 응결 그리고 저렴한 단가로 인해 재료비 절감 및 공기 단축이 가능하여 우수한 도로 보수보강 재료로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548)

References

1. Lee, B. C., Kim, J. C., Uhm, J. Y., and You, T. E., “A Experimental Study on Concrete Pavement for Early Traffic Opening”, *Proceeding of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2, 1996, pp.17-20.
2. Won, J. P., Kim, H. H., and Anh, T. S., “Mechanical Properties of High-Early-Strength Concrete for Early Traffic Opening”, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 3, No. 2, 2001, pp. 123-130.
3. Park, J. W., “Case Studies of Life Cycle Cost Analysis for Rehabilitation of Deteriorated Expressway Concrete Pavements”, Master Thesis, Hanyang University, Ansan, Korea, 2016.
4. Lee, S. W., Kim, Y. K., and Lee, P. H., “A Study on the Application of Very Rapid Hardening Acrylic Polymer Modified Concrete for Bonded Concrete Overlay Method”, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 13, No. 1, 2011, pp. 139-148.
5. Han, D. S., Do, M. S., Kim, S. H., and Kim, J. H., “Life Cycle Cost Analysis of Pavement Maintenance Standard Considering User and Socio-Environmental”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers D*, Vol. 27, No. 6, 2007, pp. 727-740.
6. Lee, S. H., “The Study of Mix Proportions of Early-Strength Bridge Deck Pavement Concrete”, Master Thesis, 2009, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea.

7. Neville, A. M., *Properties of Concrete - Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Inc. 2012, pp. 91-102.
8. Lea, F. M., and Hewlett, P. C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete - Fourth Edition*, Elsevier, 2007, pp. 713-775.
9. Ping, G., James, J. B., Admond, H. Q., and Robert, E. M., "Early Strength Development and Hydration of Ordinary Portland Cement/Calcium Aluminate Cement Pastes", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, No. 2, 1997, pp. 53-58.
10. Önder, K., "Temperature Effect on Calcium Aluminate Cement Based Composite Binders", Doctoral Thesis, Middle East Technical University, 2009.
11. Salim, B., Shaswata, M., and Hamid, N., "Effects of Nano-Al₂O₃ on Early-age Microstructural Properties of Cement Paste", *Construction and Building Materials*, Vol. 52, 2014, pp. 189-193.
12. Park, K. J., "A Decision-Making System with Dual Stages for Rehabilitation Method Considering the Transportation Management on Expressways", Doctoral Thesis, Chung Ang University, Seoul, Korea, 2014.
13. Lee, M. R., Kim, D. G., Kim, H. S., and Lee, C. W., "Capacity of Urban Freeway Work Zones", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, 2013, pp. 1123-1130.
14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Yearbook of Road Statistics", 2014.
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Korea Highway Capacity Manual", 2013.
16. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Annual Traffic Volume Report", 2005-2014.
17. Lee, H., Ann, K. Y., and Sim, J. S., "Experimental Study on Performance of MgO-based Patching Materials for Rapid Repair of Concrete Pavement", *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 18, No. 1, 2016, pp. 43-55.
18. Jin, S. H., Yang, H. J., Hwang, J. P., and Ki, Y. A., "Corrosion behavior of steel in CAC-mixed concrete containing different concentrations of chloride", *Construction and Building Materials*, Vol. 110, No. 1, 2016, pp. 227-234.

요 약 국내 공용중인 고속도로의 60%는 콘크리트로 포장되어 있으며, 그중 50% 이상의 도로가 설계 수명 이상 사용으로 인해 포장 손상, 줄눈부 파손, 부분 탈락 등의 다양한 문제가 발생하고 있다. 하지만 기존 도로 구조물의 보수보강은 높은 비용과 그로인한 복잡한 유지관리가 발생하므로 경제적인 보수보강 재료의 개발이 시급하다. 본 연구에서는 도로보수재료로서 기초물성 평가를 위해 칼슘 알루미늄 시멘트에 OPC를 무게 대비 0, 10, 20%로 혼입한 재료를 적용하여 응결시간, 압축강도, 휨강도를 측정하였다. 그 결과, 최소물성 기준 및 재료 단가 측면을 고려하였을 때 20% OPC의 경우가 최적배합임을 도출하였다. 또한 일반적인 보수재료들을 이용한 특정 도로의 공사비용 산정을 위해, 상용 프로그램(CA4PRS)을 사용하여 경제성 분석을 실시하였다. 그 결과 20% OPC의 경우 총 시공 및 이용자 비용으로 각각 40.52, 15.77억 원이 발생하였으며, 총합으로 비교 시 가장 경제성이 높은 재료로 판단되었다.

핵심용어 : 보수재료, 칼슘 알루미늄 시멘트, 고속도로, 기초물성, 경제성 분석