



저수축 저반사 고강도 고내구성 콘크리트 포장재료 개발

A Development of Concrete Pavement Material with Low Shrinkage and Reflection, High Strength and Performance

김 효 성* 남 정 희** 엄 주 용*** 조 윤 호****
 Kim, Hyo Sung Nam, Jeong Hee Eum, Ju Yong Cho, Yoon Ho

Abstract

This study developed a high strength and performance concrete pavement material with low shrinkage and reflection of sunlight. Based on the literature review, a new mix-design of applying flash ash to improve the strength and performance of the concrete as well as to reduce the dry shrinkage is suggested. In addition, adding black pigment to reduce the reflection and technique of applying OAG (Optimized Aggregate Gradation) is also included. The result of the laboratory experiment indicates that the brightness and the reflection, which depends on the ratio of black pigment addition, did not deviate from the normal range. When OAG is considered for the mix-design, the strength and performance of the concrete improved greatly. In addition, the mix-design using fly ash reduced the dry shrinkage of concrete and improved the resistance to the permeation of chloride ion. Furthermore, the mix-design, which uses fly ash (25% replacement) and black pigment (3% addition) with the application of OAG, is found to be the most effective mix to reduce the shrinkage and reflection as well as improving the strength and performance of the concrete. The result of an economic analysis indicates that the initial construction cost of this proposed mix is more expensive than that of normal concrete pavement material. However, it can be more economic in the long run because the normal concrete pavement material is likely to cost more due to higher probability of maintenance and repair and higher social cost due to traffic accident, etc.

Keywords : low shrinkage, low reflection, high strength, high performance, optimized aggregate gradation, concrete, pavement

요 지

본 연구에서는 콘크리트의 건조수축을 저감시키며 강도와 내구성을 높임과 동시에 콘크리트의 주간 태양광에 의한 반사도를 줄인 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장재료를 개발하였다. 문헌조사를 바탕으로 건조수축 저감과 장기 강도 발현에 효과가 있는 플라이 애쉬와 반사도를 저감시키기 위하여 검은색 안료를 넣고 강도와 내구성을 좋게 하기 위해 최적입도를 고려하여 배합설계를 하였다. 실내실험을 통해 검은색 안료의 첨가율에 따른 명암값과 반사율은 차이가 없는 것으로 나타났으며 최적입도를 고려하면 강도와 내구성에서 좋은 것으로 평가되었다. 또한 플라이 애쉬를 사용한 배합이 건조수축 저감에 효과가 있었으며 염화이온 침투 저항성도 높은 것으로 드러났다. 플라이 애쉬(25% 치환)와 검은색 안료(3% 첨가)를 넣고 최적입도를 고려한 배합이 건조수축과 반사율 저감, 강도와 내구성 향상에 가장 적합한 배합으로 판단하였다. 경제성 분석을 통하여 일반 콘크리트 포장보다 저수축 저반사 고강도 고내구성 콘크리트 포장이 초기공사비는 많은 것으로 분석되었지만 장기적인 관점에서 유지보수비용과 사회비용 감소로 인하여 경제성으로 타당한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 최적입도, 콘크리트, 포장

* 비회원 · 통일기술공사 도로사업1부 사원
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 기술정책연구팀 팀장
 **** 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수



1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

기존 국내 콘크리트 포장은 획일적 두께와 단순한 포장형식, 일관된 포장재료의 사용, 기능성을 고려하지 않은 포장, 강도위주의 안전성만을 고려한 설계 등의 요인에 의해 매우 낙후되어 있다. 서해안 고속도로의 일부분에 ASR(Alkali-Silica Reaction) 문제나 여러 콘크리트 포장의 표면파손인 스케일링 문제 등이 발생되고 있으며 현재 콘크리트 포장 균열의 대부분이 건조수축균열 형태로 발생하여 내구성에 많은 문제를 가지고 있다(홍승호, 2005). 또한 콘크리트 포장은 태양 빛의 반사가 커서 여름철이나 주간 장거리 운행시 눈에 피로가 많아 사고위험이 높은 문제를 가지고 있다. 이용자 편리성을 중시한 도로가 이루어지지 않고 저반사 등과 같은 국민들의 삶의 질에 대한 변화된 요구를 반영하지 못하고 있는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 포장의 문제를 해결하기 위한 방법으로 플라이 애쉬를 이용하여 콘크리트의 건조수축을 저감시키고 해외에서 활발히 연구가 이루어지고 있는 최적입도를 고려하여 강도와 내구성을 높이며 동시에 콘크리트의 주간 태양광에 의한 반사도를 줄인 가능성을 향상시킨 저반사 포장재료를 개발하고자 한다.

본 연구를 통해 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장재료가 개발된다면 기존관리자들이 요구하는 구조적 안정성과 이용자들의 욕구를 동시에 만족시킬 수 있는 콘크리트 포장을 만들 수 있다.

2. 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성 콘크리트에 대한 고찰

저수축, 저반사, 고강도, 고내구성, 콘크리트를 만들기 위하여 건조수축 저감에 효과가 있는 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트, 고강도와 고내구성을 가지는

OAG 콘크리트, 그리고 반사도를 저감시키기 위한 방법인 안료를 사용한 콘크리트의 특성에 대해 알아 보았다.

플라이 애쉬란 석탄화력발전소에서 미분탄을 약 1,400~1,500℃의 고열로 연소시켰을 때 발생하는 분말로써 플라이 애쉬는 포졸란 반응이 극히 크며 입자의 비표면적이 시멘트와 거의 비슷하여 장기강도 확보, 내구성 증진 및 건조수축 저감에 좋은 재료이며, 알칼리 골재반응 억제, 내투수성 증가 및 작업성 개선에도 좋은 재료로 알려져 있다(산업자원부, 1999). 미국은 전기생산량 중 40% 이상이 약 7억 m³의 석탄을 연소시킴으로 가능한데, 이로 인해 발생하는 9천만m³의 막대한 부산물을 처리해야 하는 문제를 안고 있으며, 이 중 약 58%가 플라이 애쉬이다. 이런 엄청난 양의 플라이 애쉬를 포장재료에 사용하여 기층의 성능향상을 가져왔으며 환경적인 측면에서도 높게 평가받았다(David J. White and Kenneth L. Bergeson, 2001).

와이오밍 대학에서 플라이 애쉬로 처리한 기층의 강도실험 결과 최대 55% 사용해도 시멘트 재료만을 사용한 기층의 강도와 같다는 연구결과를 발표하였으며, 아스팔트 표층을 사용하였을 경우에도 반사 균열 억제에 좋은 효과가 있다고 보고하였다(K. Ksaibati, 1994).

“시멘트 경화체의 건조수축 저감방안에 관한 실험적 연구”에서 플라이 애쉬 치환율 0, 10, 20, 30, 40%로 변화시켜 길이변화를 측정하였다. 이 연구에서 플라이 애쉬 치환율이 증가할수록 건조수축량은 감소하며 플라이 애쉬 무치환시 재령 7주에서 약 900μm의 길이변화율을 나타내었으나 플라이 애쉬 40% 치환 시 약 620μm의 길이변화율을 나타내어 모르타르의 건조수축량을 약 30%정도 줄일 수 있었다. 또한 15주동안 길이변화를 측정결과 플라이 애쉬 치환율이 10% 증가 시 마다 약 10%씩 건조수축량을 저감시켜 건조수축 저감방안으로 플라이 애쉬의 사용이 효과적이었다(이승한, 1996).

와이오밍 도로국(WTD)에서 CTB에 플라이 애쉬



를 이용한 안정처리기층을 도로에 적용하면서 플라이 애쉬가 시멘트와 같은 강도를 나타내면서 현격한 경제적, 환경적 효과를 보이고 고속도로 및 일반도로에서 25% 적용 후에도 공용성이 매우 좋다고 평가하였다(K. Ksaibati, 2001).

저수축 시멘트 기층재료 개발에 관한 연구에서 강도와 수축 저감률을 고려할 때 플라이 애쉬 치환량이 25%가 합리적이라고 제시하였다(강성철, 2004).

최적 배합 (OAG, Optimized Aggregate Gradation)은 콘크리트 포장에 사용되는 일반적인 재료에 굵은 골재를 최대한 사용한 것을 말한다. 이는 기존의 아스팔트 콘크리트 포장에서 사용하는 다양한 입도의 골재를 이용한 재료배합을 콘크리트 포장에 도입·적용함으로써 콘크리트 포장의 내구성 및 공용성을 극대화 하고자 개발하는 것이다. 최적배합은 콘크리트 포장 내에 차지하고 있는 시멘트 페이스트를 줄일 수 있고 시멘트 페이스트의 감소로 인해 낮은 열팽창계수, 적은 건조수축, 적은 발열량을 가지게 됨으로 최적배합 콘크리트는 부피 변화에 대한 민감성이 적은 특성을 띤다. 또한 시멘트를 줄임으로써 콘크리트 포장재료 중 시멘트 부분을 가격이 상대적으로 저렴한 골재로 치환하여 경제적으로 유리한 장점이 있다(Moon Won, 2005).

최적배합을 콘크리트에 적용할 경우 골재의 맞물림과 더불어 공극을 최소화하므로 강도가 증가하고 이는 내구성의 증가를 가져온다. 실제 텍사스 교통국(TXDOT)에서 압축강도 실험을 실시한 결과 최적배합을 고려하였을 경우 재령 28일 기준으로 최대 15%까지 강도가 증가하였다. 그림 1은 텍사스 교통국(TXDOT)에서 실험한 내용으로 콘크리트 재령 56일과 100일에 대한 건조수축을 보여주는데 최적배합(CG-13-WG, CG-14-WG)이 일반배합(CG-12-Normal Grade)보다 적은 건조수축을 나타냄을 알 수 있다.

콘크리트에 색을 부여한 컬러콘크리트의 제조방법에는 콘크리트 표면만을 착색시키는 방법과 착색제를 첨가하여 콘크리트를 착색시키는 방법 및 백색시

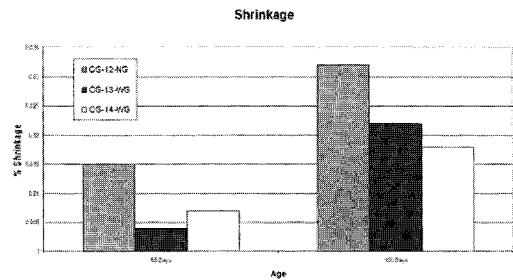


그림 1. 골재입도에 따른 콘크리트 건조수축 비교 (일반배합(CG-12-Normal Grade), 최적 배합(CG-13-WG, CG-14-WG))(Moon Won, 2005)

멘트에 2%~10%의 안료를 포함시켜 사용하는 방법 등이 있다(A.M Neville, 1996).

혼화재 중 착색제는 콘크리트 혹은 모르타르에 채색되는 혼화재로써 착색제를 혼합한 콘크리트는 전체를 착색하여 콘크리트 본래의 특성과 함께 마무리로서의 기능도 가진 것으로 착색 콘크리트 또는 컬러 콘크리트라고 불려진다(대한주택공사, 1991).

착색제로는 염료와 안료로 구별되나 염료는 물에 용해되는 착색제로 콘크리트에 사용하면 빗물 등으로 녹아서 변색하거나 주위를 오염시키므로 적당하지 않다. 안료는 물이나 용매에 녹지 않는 색깔 있는 미립자 분말체로 콘크리트의 착색재로서 사용된다. 안료는 무기 안료와 유기안료로 분류되며 무기안료는 일반적으로 열, 빛(光), 알칼리 등에 대해 화학적으로 안정되어 골재의 색을 보이지 않게 하는 능력이 크지만 그 색조는 유기안료에 비하면 선명하지 못한 단점이 있다. 유기 안료는 색조가 선명하고 착색력도 크지만 열이나 빛에 대해 내구적이지 못한 것이 많아 색이 옅어지기 쉬운 단점이 있다. 따라서 착색제로는 일반적으로 무기안료가 바람직하다고 말할 수 있다고 하였다(한국콘크리트학회, 2001). 컬러콘크리트에 대한 연구에 따르면 여러 컬러 안료 중 적색, 황색 및 흑색 안료를 첨가한 콘크리트의 응결시간은 다소 빨라지고 압축강도는 약간 증가하는 경향이었으며 슬럼프 및 공기량은 거의 같거나 감소하였다고 하였다(최재진, 2006).

컬러 콘크리트 기초물성 연구에서 검은색 안료의 경우 첨가량이 1~2%일 경우 압축강도가 감소하였



다가 그 이상일 경우 7%까지는 증가하였다고 하였다(박종호, 2008).

3. 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성 콘크리트 포장 재료 개발

포장용 일반 콘크리트보다 건조수축과 반사도를 저감시키며 강도와 내구성을 향상시킨 재료개발을 하기 위해 플라이 애쉬를 통해 건조수축을 저감시킬 수 있고 검은 색 안료를 통해 반사율을 저감시킬 수 있으며 최적입도를 통해 강도와 내구성을 증진시킬 수 있음을 알 수 있었다. 먼저 1차 실험으로 산화철 계열 안료를 선택하여 첨가량에 따른 강도와 반사정도를 평가하였으며 2차 실험에서는 안료와 플라이 애쉬의 첨가여부와 최적입도의 적용여부를 통해 길이변화와 강도와 내구성을 평가하였다. 그림 2는 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성 콘크리트 포장재료 개발을 위한 다양한 기준을 보여주고 있다.

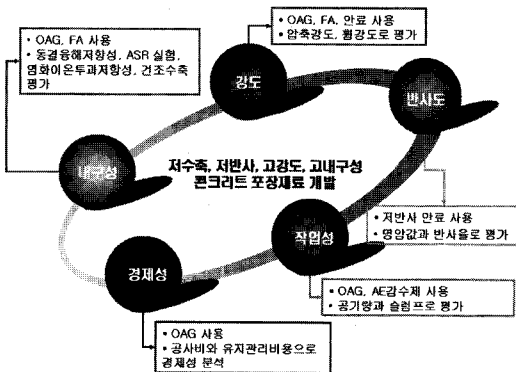


그림 2. 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장 재료 개발을 위한 개요도

3.1 실험방법

3.1.1 작업성 평가

콘크리트의 슬럼프 시험은 KS F 2402(포틀랜드

시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421(굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험방법)에 준하여 시험을 실시하였다.

3.1.2 강도평가

강도는 압축강도와 휨강도 실험으로 평가하였으며 KS F 2403(콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법)에 따라 배합당 각각 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 공시체 12개와 $150 \times 150 \times 550\text{mm}$ 공시체 6개를 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수조에서 양생시키며 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 양생기간 3, 7, 14, 28일마다 3개씩 측정하였으며 휨강도는 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 따라 양생기간 7, 28일마다 3개씩 측정하였다.

3.1.3 내구성 평가

(1) 동결융해 저항성

압축강도 측정용 공시체 제작방식과 동일한 방법으로 동결융해 저항성 측정용 공시체를 제작하였다. 콘크리트 동결융해 저항성 평가는 KS F 2456(급속 동결융해에 대한 콘크리트 저항 시험방법)에 따라 수행되었다. 동결융해장비를 이용하여 $-18^\circ\text{C} \sim +4^\circ\text{C}$ 의 온도조건 하에서 동결융해 저항성을 평가하였다. KS규정에는 수중 급속동결융해 시험방법(방법 A)와 기중 급속동결 후 수중융해 시험방법(방법 B)이 있는데 이번 실험에서는 방법 A로 수행하였다. 동결융해주기를 30cycle로 하여 중량측정과 비파괴 전단파를 이용하여 전단탄성계수를 측정하였다.

(2) 건조수축

건조수축시험은 KS F 2424(모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험방법)에 제시된 방법 중 다이얼 게이지 방법으로 실시하였다. $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 공시체를 만들어 온도 20°C , 습도 60%의 항온항습실에서 양생시키며 측정하였다.



(3) 염소이온 침투저항성

염소이온 침투저항성 시험은 KS F 2711(전기 전도도에 의한 콘크리트 염소이온 투과저항성 시험방법)에 의해 실시하여 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 공시체를 만든 후 14일 양생 후 컷팅하여 각 배합의 염소이온의 침투저항성을 평가하였는데 표 1은 통과전하량에 따른 콘크리트 염화이온 침투저항성 판단기준이다.

표 1. 통과전하량에 따른 콘크리트 염화이온 침투저항성 판단 기준(KS F 2711, 2005)

기 준	
통과전하량(C) >4000	염소이온 침투성 높음
2000~4000	보통
1000~2000	낮음
100~2000	매우 낮음
<100	무시할만함

(4) 알칼리 실리카 반응성

알칼리 실리카 반응성을 평가하기 위해 ASTM C 1293 (콘크리트의 알칼리 실리카 반응성 판정 시험방법)에 의하여 $76.2 \times 76.2 \times 280\text{mm}$ 공시체를 만들어 온도 38°C , 습도 100%에서 양생시키며 길이변화를 측정 한 후 팽창률로 반응성 여부를 판정한다. 1년간 팽창률이 0.04% 이하이면 반응성이 없다고 판단한다.

3.1.4 반사도평가

빛에 대한 반사도를 판단하기 위하여 M사의 CM-2500D 분광색계를 이용하여 반사율과 명암값을 측정하였다. 반사율은 물체에 빛을 비추는 다음 반사되어 돌아오는 빛의 양을 측정하여 나타낸 것으로 실제 빛의 반사정도를 나타내는 것이고, 명암값은 콘크리트에 광원에서 나오는 빛을 비추어 색의 밝고 어두운 정도를 수치화하여 표현하여 나타낸 값이다.

3.2 실험계획 및 재료, 배합설계

본 실험은 2차례로 나누어 실시하였다. 1차 실험은 일반배합 콘크리트와 최적입도 콘크리트에 저반사 안료의 첨가량을 달리하여 그에 따른 압축강도와 반사율, 명암값을 평가하였다. 1차 실험재료는 비중이 3.14인 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재는 비중이 2.67인 바다 모래를 사용하였고 굵은 골재는 비중이 2.69인 최대골재치수 25mm 쇠석골재를 사용하였으며 최적입도로 조정하기 위하여 최대골재치수 13mm 쇠석골재를 혼합하여 사용하였다. 저반사 혼화재로는 독일 B사의 Black 318 안료를 이용하였다. 첫 번째 실험에 적용한 콘크리트 배합설계는 표 2와 같다.

표 2. 1차 실험 배합설계

종별	w/c	s/a	단위재료량(kg/m ³)						
			C	W	S	A		AE	BP
						25mm	13mm		
일반 콘크리트	0.45	0.37	333.43	149.54	674.95	1150.27		1.0003	시멘트량의 3.5.7%첨가
최적입도 콘크리트	0.45	0.36	300.09	134.59	674.95	584.44	677.65	0.9003	시멘트량의 3.5.7%첨가

표 3. 2차 실험 골재의 물리적 성질

구 분	최대치수 (mm)	마모율 (%)	비중	흡수율 (%)	조립률
잔골재	<5	-	2.567	1.45	3.4
굵은골재	32	12.2	2.737	0.78	8.7

표 4. 2차 실험 배합설계

배합	최대골재치수	w/c (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)									
				W	C	S	A1	A2	FA	BP	AE		
1	32mm	45	38	147	326	692	1203						0.96
1H	32mm	45	33	135	300	605	862	421					0.9
1L	32mm	45	38	147	326	692	1203					9.78	0.96
1L1H	32mm	45	33	135	300	605	862	421				9	0.9
2L	32mm	45	38	147	244.5	692	1203			81.5	9.78		0.96
2L2H	32mm	45	33	135	225	608	862	421	75	9			0.9

- * 1: 일반 콘크리트 배합, 1H: 최적입도 콘크리트 배합, 1L: 저반사 일반 콘크리트 배합, 1L1H: 저반사 최적입도 콘크리트 배합, 2L: 저수축 저반사 일반 콘크리트 배합, 2L2H: 저수축 저반사 최적입도 콘크리트 배합



2차 실험은 1차 실험을 바탕으로 주요인자를 선정하여 압축강도, 휨강도, 동결융해저항성, 염화이온투과저항성, 건조수축, 알칼리 실리카 반응, 열팽창계수 실험을 수행하였다. 플라이 애쉬는 보령화력발전소에서 발생된 것으로 H사에서 생산된 것을 사용하였으며 굵은골재는 충북 음성군 감곡면 오향리에서 채취한 최대골재치수 32mm 골재를 사용하였다. 최적입도를 고려한 배합은 3~6mm 골재와 혼합하여 사용하였고 잔골재는 충남 태안산 바다모래를 세척하여 사용하였다. 혼화제는 D사의 AE감수제를 사용하였다. 표 3은 골재의 물리적 성질을 보여주고 있으며 배합설계는 표 4와 같이 총 6개의 배합으로 구성하였다. 여기서 각각 1은 일반 콘크리트 배합이며, 1H는 최적입도를 고려한 콘크리트 배합, 1L은 안료를 넣은 저반사 일반 콘크리트 배합, 1L1H는 안료를 넣고 최적입도를 고려한 저반사 최적입도 콘크리트 배합, 2L은 안료와 플라이 애쉬를 넣은 저수축 저반사 일반 콘크리트 배합, 2L2H는 안료와 플라이 애쉬를 넣고 최적입도를 고려한 저수축 저반사 최적입도 콘크리트 배합이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 1차 실험결과

그림 3은 일반 콘크리트와 최적입도 콘크리트에 안료첨가량에 따른 7일, 14일, 28일 압축강도 시험 결과를 보여주고 있다. 그림 3에서 보듯이 안료첨가량이 증가할수록 압축강도는 증가하고 있으며 최적 배합 콘크리트의 경우 일반 콘크리트와 비교하였을 때 양생기간 초기에는 강도면에서 별 차이가 없다가 양생기간이 길어질수록 높은 강도를 나타내는 것으로 나타났다.

그림 4는 일반 콘크리트와 저반사 안료를 첨가한 콘크리트의 반사율 값을 보여주고 있다. 일반 콘크리트보다 저반사 안료를 첨가한 콘크리트에서 50% 이

상 반사율이 저감된 결과를 보여주고 있으나 안료첨가량에 따른 반사율은 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트의 색정도를 나타내는 명암값에서도 그림 5를 보면 알 수 있듯이, 일반 콘크리트에서 보다 저반사 안료를 첨가한 콘크리트에서 약 30% 정도 어두운 것으로 나타났다. 그리고 명암값에서도 저반사 안료첨가량에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. 반사율과 명암값에 있어 안료첨가율에 따라 차이가 없는 것은 양에 있어서 그 차이가 적기 때문인 것으로 판단된다.

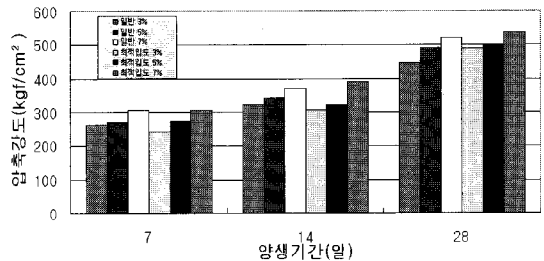


그림 3. 저반사 안료를 첨가한 콘크리트 압축강도
* 3%, 5%, 7%는 시멘트량에 대한 안료 첨가율

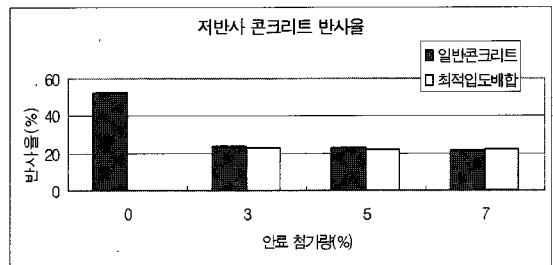


그림 4. 반사율 측정결과

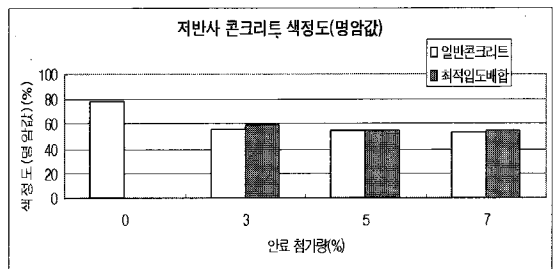


그림 5. 색정도(명암값) 측정결과

4.2 2차 실험 결과

1차 실험에서 최적입도가 일반입도에 비해 강도가 5%이상 높음을 알 수 있었고, 안료첨가량은 3%이상되어도 반사율과 명암값에서 차이가 없음을 알 수 있었다. 본 2차 실험에서는 이를 근거로 다양한 배합을 정의하였고 이들의 물리적 성격을 살펴보았다.

4.2.1 슬럼프 및 공기량

각각의 배합의 슬럼프 및 공기량을 측정한 결과는 표 5와 같다. 모든 배합이 3~5cm 사이의 슬럼프 값으로 나타났으며 공기량은 2~4% 사이의 값을 나타냈다. 최적입도를 고려한 배합이 슬럼프와 공기량이 낮게 나타났으며 전반적으로 플라이 애쉬를 사용한 배합이 공기량이 낮게 나타났다. 이것은 모르타르의 사용량이 줄어들고 골재의 양이 늘어 전체적인 체적에서 미세공극이 있을 수 있는 체적이 줄었기 때문이다. 또한 플라이 애쉬를 사용한 배합들이 낮은 이유는 플라이 애쉬가 미세공극을 채운 것이거나 배합과정에서 AE제를 흡착한 결과라고 판단된다.

표 5. 각 배합의 슬럼프와 공기량 측정결과

	슬럼프(cm)	공기량(%)
1	5	3.8
1H	4.7	3.5
1L	4.4	3.6
1L1H	4.3	3.1
2L	4.3	2.9
2L2H	3.8	2.6

4.2.2 압축강도 및 휨강도

그림 6은 각 배합당 재령 3, 7, 14, 28일 압축강도를 측정하여 정리한 것이다. 28일 강도기준으로 최적입도를 고려한 배합들이 고려하지 않은 배합들 보다 약 9~22%정도 높은 압축강도를 보였으며 플라이 애쉬를 사용하지 않은 저반사 최적배합이 가장 높은 34.6MPa를 보였으며 일반배합이 24.5MPa로

가장 낮은 압축강도를 보였다. 최적배합의 특성상 시멘트량이 줄어들므로 단위수량이 줄어들어 강도가 높게 발현되기 때문이다. 2L, 2L2H배합이 다소 낮은 강도를 보이는 이유는 플라이 애쉬를 치환한 콘크리트의 특성으로 장기간에 걸쳐 강도가 발현되기 때문이라고 판단된다. 그림 7은 각 배합당 재령 7, 28일 휨강도를 측정된 결과를 보여주고 있다. 압축강도와 비슷한 결과를 보이며 모든 배합이 도로용 콘크리트 28일 휨강도 기준인 약 4.5MPa를 넘고 있다.

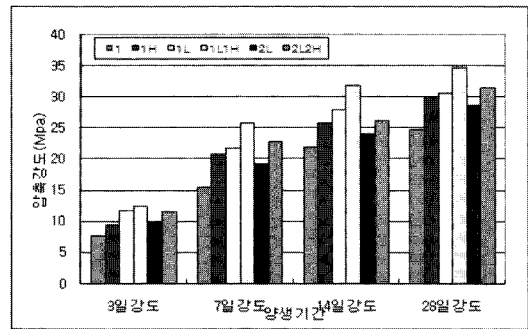


그림 6. 압축강도실험 결과

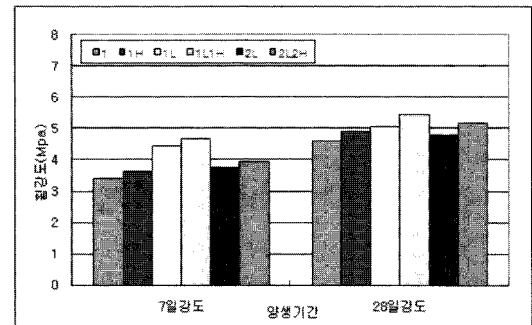


그림 7. 휨강도실험 결과

4.2.3 동결융해 저항성

동결융해 30사이클마다 중량측정과 탄성계수를 측정하였으며 총 150사이클 동안 수행하였다. 그림 8은 각 배합에 대한 30 사이클마다 중량을 측정하여 초기 무게를 100으로 하였을 때 무게의 변화율을 나타낸 것으로 2L2H가 무게변화율이 가장 적었고 일반배합이 무게변화율이 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 전체적으로 무게변화율이 0.1~0.3% 이내 정



도로 큰 차이를 보이지는 않았다. 일반적인 동결융해 저항성 시험시편은 40cm 길이의 각주형 시편이나 본 실험에서 사용한 시편은 길이가 20cm 정도의 원형 시편이기 때문에 무게변화율로 동결융해 저항성을 판단하기는 어렵다.

그림 9는 동결융해주기에 따른 상대동탄성계수 변화율을 나타낸 것이다. 처음 동결융해시험 전 탄성계수를 100으로 나타냈을 때 30사이클 후의 탄성계수를 상대적으로 나타낸 것으로 2L2H배합이 150사이클 후 91.7%로 가장 낮은 변화율을 보였고 일반배합 보다 약 10%정도 적은 변화율을 보이고 있다. 최적입도를 고려한 배합들이 그렇지 않은 배합보다 5%~10%정도 적게 나타났다.

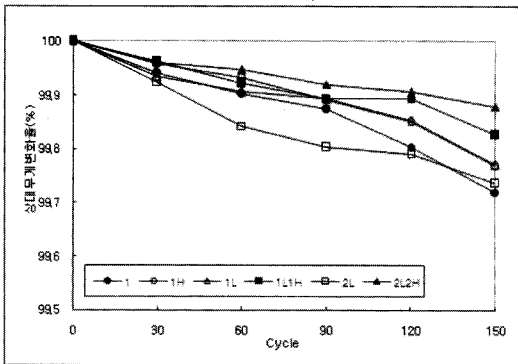


그림 8. 상대무게 변화율

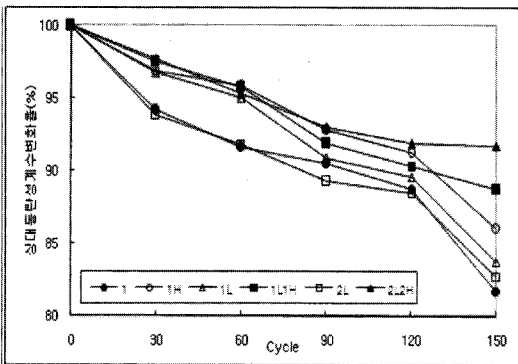


그림 9. 상대동탄성계수 변화율

4.2.4 염화이온 침투저항성

그림 10은 각 배합의 공시체를 재령 14일동안 20 ± 2℃ 수중양생 후 컷팅하여 염화이온 침투저항성을

실험한 결과를 나타낸 것이다. 모든 배합의 통과전하량이 1644C와 3624C 사이로 표 1에 따르면 1L1H 배합과 2L2H 배합은 염화이온 침투성이 낮은 것으로 나타났으며 나머지 배합은 보통인 것으로 나타났다. 최적입도를 고려한 배합이 낮은 이유는 시멘트의 사용량을 줄이고 그 사이를 골재들이 채워 염화이온이 침투할 수 있는 단면적을 줄였기 때문이다. 또한 플라이 애쉬를 사용한 배합들이 침투성이 낮은 이유는 플라이 애쉬에 의한 2차반응(Pozzolanic Reaction)에 의해서 밀실한 콘크리트가 생성된 것에 기인한 것으로 보인다.

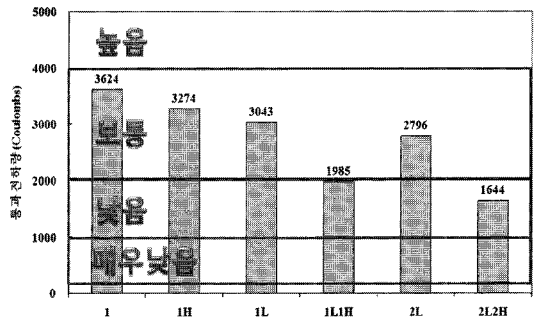


그림 10. 염화이온 침투저항성 실험결과

4.2.5 건조수축

그림 11은 각 배합당 길이변화를 보여주고 있다. 항온항습실에서 약 40일간에 걸쳐 측정한 결과 플라이 애쉬를 사용한 2L2H배합이 일반배합인 1보다 23%정도 감소효과가 있었으며 최적입도를 고려한 배합들이 고려하지 않은 일반배합들보다 약 3~7%

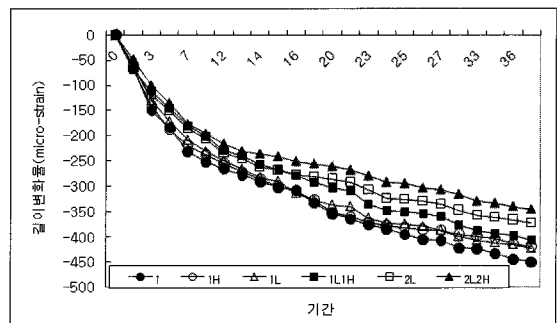


그림 11. 건조수축 실험결과



정도의 건조수축 저감효과가 있었다. 최적입도를 고려할 경우 그렇지 않은 경우보다 적은 건조수축 결과를 나타내는데 이것은 최적배합으로 인하여 모르타르의 사용량이 줄어들고 골재의 양이 늘어 전체적인 체적에서 건조수축이 일어날 수 있는 시멘트와 물이 차지하는 체적이 줄어들기 때문이다

4.2.6 알칼리 실리카 반응성

각각의 배합의 알칼리 실리카 반응성을 실험한 결과는 그림 12와 같다. 총 6주간에 걸쳐 실험을 실시하였고 플라이 애쉬를 사용한 2L, 2L2H배합의 팽창률이 0.01%와 0.008%로 가장 낮았으며 최적입도를 고려한 배합들이 더 낮은 팽창률을 보였다. 장기간 관찰이 필요하나 플라이 애쉬와 최적입도를 고려하는 것이 알칼리 실리카 반응성을 낮추는 데 도움이 된다고 판단된다.

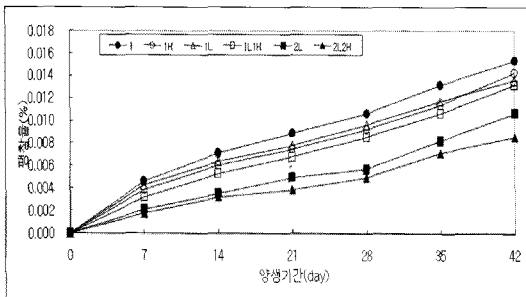


그림 12. 알칼리 실리카 반응성 실험 결과

4.3 실험결과 분석

각 배합들의 작업성을 평가한 결과 모든 배합이 콘크리트 포장을 시공하는데 무리가 없을 정도의 슬럼프 값을 보였다. 공기량은 보통 포장용 콘크리트의 공기량 기준인 4~6% 사이의 값보다 모두 적은 값을 나타냈으나 공기량은 AE제를 좀 더 첨가한다면 늘어날 것으로 생각된다.

강도에 있어 28일 강도기준으로 미국 텍사스 주의 사례와 같이 최적입도를 고려한 배합들이 고려하지 않은 배합들보다 높은 압축강도를 보인다. 그리고 저

반사 최적배합의 경우 강도발현속도가 빨라 7일 강도가 일반배합의 28일 강도보다 높다. 이것은 교통 개방을 조기에 할 수 있는 장점이 생겨 공사기간을 단축시킬 수 있을 것으로 판단된다.

동결융해저항성을 평가하는 기준인 상대동탄성계수 변화율은 공기량이 적음에도 불구하고 저수축, 저반사 최적배합이 가장 낮은 변화율을 보였고 일반배합보다 비교하여 약 10%정도 적은 변화율을 보여 동결융해저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 비록 공기량이 기준에 만족하지는 못하지만 탄성계수가 적어 동결융해저항성이 좋은 것으로 생각된다. 따라서 공기량과 더불어 다양한 요인에 따른 동결융해저항성 연구가 필요할 것이다. 최적입도를 고려한 배합들이 그렇지 않은 배합보다 변화율이 적은 것으로 보아 최적입도가 동결융해저항성에도 좋은 것으로 생각되며 강원도 산간지방과 같이 온도가 영하 이하로 떨어지는 기간이 긴 지역에 최적입도를 고려한 배합을 사용할 경우 D-cracking을 막아 공용성에 유리할 것으로 생각된다. 그리고 각 배합의 염화이온침투저항성 평가결과 앞으로 해안도로나 바닷가 구조물에 최적배합과 플라이 애쉬를 사용할 경우 염화물에 대한 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 플라이 애쉬를 사용한 저수축, 저반사 최적배합을 사용할 경우 일반배합보다 실내실험에서 23%정도 건조수축 감소효과가 있는 것으로 비추어 볼 때 현장에 적용할 경우 건조수축에 의한 균열이 생겨 포장 공용성에 문제가 생기는 것을 막을 수 있을 것으로 판단된다. 플라이 애쉬가 알칼리 실리카 반응을 억제하는데 효과가 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 현재 국내 포장에서 알칼리 실리카 반응성에 따른 포장 파손이 여러 차례 보고되고 있는데 앞으로 국내 콘크리트 포장에 플라이 애쉬를 사용한다면 ASR을 사전에 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

일반 콘크리트보다 저반사 안료를 첨가한 콘크리트에서 50% 이상 반사율이 저감되고 색의 진한 정도를 나타내는 명암값에서도 약 30% 정도 진한 색을 띄는 것으로 비추어 볼 때 반사도저감에 효과가 있어 아스



팔트 포장에 비해 반사도가 큰 콘크리트 포장이 운전하는 운전자들에게 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 경제성 검토

저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장 재료의 국내 시공사례는 없기 때문에 유지보수비용을 추정할 수 없으며 시공방법은 같기 때문에 시공비나 운반비를 제외한 초기 재료비용만을 비교하였다. 또한 해체 및 폐기비용의 경우는 같다고 가정하고 분석하였다.

5.1 재료비 분석

일반 콘크리트 포장과 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장에 대하여 차선평폭 3.5m, 포장 두께 30cm인 무근 2차로를 기준으로 1일 포설량을 864m³로 계산하였다. 잔골재와 굵은골재의 양은 배합시에는 kg단위이지만 가격산정시 m³으로 변환이 필요하므로 단위중량을 각각 2.6t/m³, 2.5t/m³으로 가정하여 계산하였다. 표 6은 한국도로공사에서 일반적으로 사용하는 배합표와 저수축, 저반사, 고강도, 고내구성, 콘크리트의 배합표이며 이를 토대로 경제성 분석을 실시하였다.

단가는 표 7과 같이 조달청의 정부 구매물자 가격 정보 검색시스템(2007년 11월기준)과 사단법인 한국물가정보의 인터넷 사이트를 이용하였다. 굵은골

표 6. 한국도로공사에서 제시하는 배합표와 새로 개발된 재료의 배합

구분	굵은골재 최대치수	시멘트	물	굵은골재	잔골재	플라이 애쉬	AE 감수제	검은색 안료
일반 콘크리트	32	326	147	1122	692		0.963	
저수축 저반사 고강도 고내구성 콘크리트	32	225	135	32 mm 3-6 mm 862 421	608	75	0.9	9

표 7. 재료비 산정기준

(2007년 11월 현재 : 서울·경기 채취장 상차도)

항 목	단위	단 가 (원)	단가산출 기준
시멘트	ton	69,630	정부 구매물자 가격 정보 기준
굵은골재:32mm	m ³	12,000	정부 구매물자 가격 정보 기준(쇄석골재)
굵은골재:13mm	m ³	14,000	정부 구매물자 가격 정보 기준(쇄석골재)
잔골재	m ³	12,500	정부 구매물자 가격 정보 기준(강모래)
플라이애쉬	ton	30,000	업체 문의
AE감수제	kg	650	사단법인 한국 물가정보 (Serapon SP-121)
검은색안료	kg	2,100	업체 문의 (블랙산화철계열Fe3O4)

재와 잔골재의 경우 정부 구매물자 가격정보를 기준으로 서울·경기지역의 단가를 산정하였다. 플라이 애쉬, 저반사 안료의 가격의 경우 2007. 11월 업체에 문의한 가격을 기준으로 산정하였다.

표 8과 표 9는 두께 30cm, 무근 2차로 동시포설 시 일반 콘크리트와 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장 표층의 재료비를 나타낸 것이다. 일반 콘크리트 포장을 실시하였을 때 1m³당 비용은 32,038원으로 계산되었다. 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장의 경우 1m³당 비용은 46,820원으로 계산되었다.

표 8. 30cm 일반 콘크리트 포장 표층의 재료비

(단위 : 원)

항목	수량	단위	단가	금액
시멘트	282	ton	69,630	19,612,264
굵은골재	388	m ³	12,000	4,653,158
잔골재	230	m ³	12,500	2,874,462
AE감수제	832	kg	650	540,821
계				27,680,705
1m ³ 당 비용				32,038

* 콘크리트 포장(무근 2차로 동시포설:T=30cm)-1일 포설량 864m³ 기준

** 2007년도 국토건설공사 설계실무요령 단가산출서-건설교통부



표 9. 30cm 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트포장의 재료비

(단위 : 원)

항목	수량	단위	단가	금액	
재료비	시멘트	194	ton	69,630	13,536,072
	굵은골재: 32mm	298	m³	12,000	3,574,886
	굵은골재: 13mm	145	m³	14,000	2,036,966
	잔골재	202	m³	12,500	2,525,538
	플라이애쉬	65	ton	30,000	1,944,000
	AE감수제	778	kg	650	505,440
	검은색안료	7776	kg	2,100	16,329,600
계				40,452,503	
1m²당 비용				46,820	

* 콘크리트 포장(무근 2차로 동시포설: T=30cm)-1일 포설량 864m² 기준

** 2007년도 국토건설공사 설계실무요령 단가산출서-건설교통부

5.2 경제성 분석결과

30cm두께의 일반 콘크리트 포장에 비하여 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장이 재료비에 있어서 1m³당 14,782원 정도 비싼 것으로 나타났다. 1km를 폭 8m로 시공한다고 하였을 경우 각각 76,891,200원과 112,368,000의 재료비 차이가 발생하고 1995년부터 2004년까지의 우리나라의 고속도로 유지보수비용을 현재가치로 환산하여 연간 11,068,000원/km이며 35년간의 유지보수비용을 현재가치로 환산하면 206,579,939원인 것을 고려하였을 때 유지보수비용을 17%이상 줄일 경우 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장이 유리한 것으로 나타났다. 실내 실험결과 일반 콘크리트의 보다 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트가 강도와 내구성 면에서 좋기 때문에 충분히 유지보수비용을 줄일 수 있을 것이라고 예상되며 기능성의 향상으로 인하여 사회비용 감소분을 고려하면 충분히 경제성이 있다고 판단된다.

6. 결론 및 향후 연구과제

6.1 결론

본 연구에서는 기존 포장용 콘크리트의 문제점을 개선하고자 저수축 저반사 고강도 고내구성 콘크리트 포장재료에 대해 연구하였다. 건조수축과 반사도가 저감되며 강도와 내구성을 향상시킨 콘크리트 재료를 개발하기 위해 다양한 실험을 수행하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- (1) 반사도를 감소시키기 위해 검은색 안료를 3%, 5%, 7% 증가시켜 실험한 결과 최적입도를 고려한 경우나 고려하지 않은 경우나 안료가 증가할수록 약 10% 정도 강도증가효과가 있으나 명암값과 반사율에서는 차이가 없는 것으로 보아 경제성을 고려하여 안료의 첨가량은 3%가 적당하다고 판단된다.
- (2) 재령 28일 압축강도를 기준으로 최적입도를 고려한 배합들이 고려하지 않은 배합들보다 약 9~22%정도 높았으며 저반사 최적배합이 일반 배합보다 40%정도 높은 강도를 보였으며 플라이 애쉬를 치환한 저반사 저수축 최적배합은 27%정도 높았다. 각 배합 휨강도는 압축강도와 비슷한 결과를 보이며 모든 배합이 도로용 콘크리트 28일 휨강도 기준인 약 4.5MPa를 넘고 있다.
- (3) 동결융해저항성을 평가한 결과 저수축, 저반사, 최적배합이 무게변화율이 가장 적었으나 무게변화율이 0.1~0.3% 이내 정도로 큰 차이를 보이지는 않았지만 저수축, 저반사 최적배합의 150 사이클 후 상대동탄성계수 변화율이 가장 낮았으며 일반배합 보다 약 10%정도 적은 변화율을 보였다. 또한 최적입도를 고려한 배합들의 변화율이 그렇지 않은 배합보다 5%~10%정도 적게 나타난 결과를 통해 최적입도를 고려한 경우 동결융해저항성이 뛰어난을 알 수 있었다.
- (4) 염화이온 침투저항성을 평가한 결과 저반사 최적배합과 저수축, 저반사 최적배합이 염화이온



침투성이 낮은 것으로 나타났으며 저수축, 저반사 최적배합이 가장 뛰어난 염화이온 침투저항성을 보였다.

- (5) 건조수축실험을 실시한 결과 저수축, 저반사 최적배합이 일반배합보다 23%정도 감소효과가 있었으며 최적입도를 고려한 배합들이 고려하지 않은 일반배합들보다 약 3~7%정도의 건조수축 저감효과가 있었다. 플라이 애쉬와 최적입도가 건조수축을 저감하는 효과가 있다고 판단된다.
- (6) 알칼리 실리카 반응성을 평가한 결과 6주간이라는 짧은 기간의 측정으로 각 배합의 반응성 여부를 판단할 수는 없으나 플라이 애쉬와 최적입도를 고려하는 것이 알칼리 실리카 반응성을 낮추는 데 도움이 된다고 판단된다.
- (7) 본 연구를 통해 플라이 애쉬(25% 치환)와 검은색 안료(3% 첨가)를 넣고 최적입도를 고려한 배합이 건조수축과 반사율 저감, 강도와 내구성 향상에 가장 적합한 배합으로 판단된다.
- (8) 경제성 분석을 통하여 일반 콘크리트 포장보다 초기공사비는 많은 것으로 분석되었지만 장기적인 관점에서 유지보수비용과 사회비용 감소로 인하여 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 콘크리트 포장의 경제성이 있는 것으로 나타났다.

6.2 향후 연구과제

본 연구는 저반사, 저수축, 고강도, 고내구성, 포장재료 개발을 위한 연구이다. 실내실험으로 각각의 배합의 특성을 살펴보았다. 향후 굵은 골재의 최대치수를 변화시키고 플라이 애쉬 치환량을 변화시키며 실내실험을 수행하여야 할 것이다. 또한 시험시공을 통해 실제 현장에서의 콘크리트 거동을 관찰하여 실제 포장적용 타당성 및 장기적인 모니터링을 통해 경제적인 타당성을 평가하여야 할 것이다.

참고 문헌

- 강성철, 2004, "저수축 시멘트 안정처리 기층 재료개발", 중앙대 대학원 석사논문
- 대한주택공사, 1991, "시멘트, 콘크리트용 혼화재료"
- 박종호, 2008, "콘크리트용 안료의 종류 및 첨가율에 따른 칼라콘크리트 기초물성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회논문집 vol.20 no.1
- 산업자원부, 1999, "High Volume 플라이 애쉬 콘크리트 기술개발에 관한 연구"
- 이승한, 1996, "수축저감제의 건조수축 저감특성", 대한토목학회논문집 제16권 1~4호
- 최재진, 2006, "안료를 첨가한 칼라콘크리트의 유동성 및 강도에 대한 실험적 연구", 대한토목학회논문집 제26권 3A호,
- 한국콘크리트학회, 2001, "최신콘크리트공학", pp113~114
- 홍승호, 2005, "콘크리트 포장의 알칼리-골재 반응 기준 검토 및 대책방안에 대한 연구", 한국도로공사 도로교통기술원 연구보고서
- David J. White and Kenneth L. Bergeson, 2001, "Long term strength and durability of hydrated fly-ash road bases", *Transportation Research Board Washington, D.C*
- K. Ksaibati, 1994, "Field performance evaluation of cement treated bases with and without fly-ash", *Transportation Research Record*
- K. Ksaibati, P.E and Melinda. M. Bowen, 2001, "Evaluating the performance of cement treated bases in Wyoming", *2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavement and Technological Control*,
- Moon Won, 2005, "Pilot Implementation of Optimizaed Aggregate gradation for Concrete paving", *Research Management Commitee 1 Meeting, Corpus Chrisit, November 9*
- Neville, A.M. 1996, "Properties of Concrete", *Fourth Edition, Longman, pp 78-79*

접 수 일: 2008. 7. 17
 심 사 일: 2008. 7. 24
 심사완료일: 2008. 12. 2