

단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따른 포장 콘크리트의 공극구조 특성

Characteristics of Air Void Structure for Pavement Concrete according to Unit Weight of Cement and Type of Additives

안상혁* · 김성권** · 최성용*** · 윤경구****

An, Sang Hyeok · Kim, Seong Kwon · Choi, Sung yong · Yun, Kyong Ku

1. 서 론

현재 고속도로에서 시멘트 포장 콘크리트가 60%정도를 차지할 정도로 많이 건설되었으나, 최근 포장 콘크리트에서는 여러 문제점들이 부각되고 있다. 그 중 건설된 후 조기 파손 문제, 사용재료의 저급화로 인한 파손발생 등 포장 콘크리트의 품질관리가 원활하게 수행되지 못하고 있다. 이로 인해 포장 콘크리트의 장기적 공용 수명을 제공하지 못하고 있으며, 많은 유지 관리 비용이 투입되고 있다.

국외의 경우 포장 콘크리트의 향상을 위하여 다양한 형태의 고성능 연구를 진행 중에 있으며, 그 중에도 고강도 포장 콘크리트 배합에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국내에서도 이에 맞추어 단위시멘트량 증가 및 잔골재율의 변동 혼화재료에 대한 평가하는 등 포장 콘크리트의 품질향상을 위한 연구진행중이나 아직 미흡한 실정이다. 특히 동결융해 저항성에 영향을 미치는 콘크리트 내 공극구조에 대한 연구 및 자료는 전무하다.

따라서, 본 연구에서는 고성능 포장 콘크리트에 대한 연구의 일환으로 단위시멘트량 및 혼화제 종류를 변수로 포장 콘크리트의 공극구조를 분석하여 내구성 평가 및 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 시멘트

시멘트의 분말도 차이에 따른 내부공극 구조 변화를 관찰하기 위하여 분말도 차이가 큰 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 보다 자세한 시멘트의 물리적·화학적 특성은 표 2.1과 같다.

표 2.1 시멘트의 물리적·화학적 특성

Cement Type	Chemical Composition (%)						Blaine (cm ² /g)	Specific Gravity
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
OPC	20.8	6.3	3.2	61.2	3.3	2.3	3200	3.15

* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-6240(E-mail : daynday@nate.com)

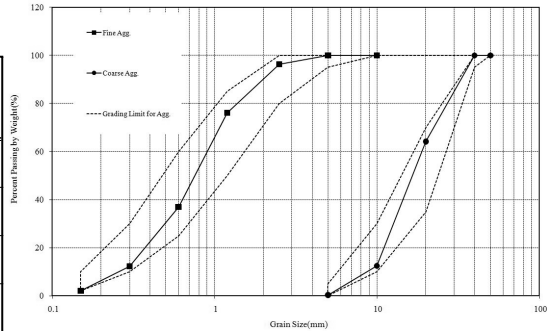
** 정희원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-6230(E-mail : kimskwon@kangwon.ac.kr)

*** 정희원 · 강원대학교 토목공학과 공학박사 · 033-250-6240(E-mail : choisy@kangwon.ac.kr)

**** 정희원 · 강원대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6236(E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr)

표 2.2 골재의 물리적인 특성

Type		Specific Gravity	F.M	원산지
Coarse Agg.	32mm	2.58	7.57	춘천
	25mm	2.57	6.72	춘천
	Comb.	2.58	7.23	
Fine Agg.	강모래	2.58	2.76	인제


그림 2.1 혼합 굵은 골재 및 잔골재의 입도 분포

2.1.2 골재

굵은 골재는 최대치수 32mm의 레미콘용 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 천연 강모래를 사용하였다. 표 2.2에 각각의 물리적 특성을 나타내었다.

굵은 골재의 경우 체가름 분석 결과 입도가 표준 입도에 맞지 않아 최대 치수 32mm의 레미콘용 쇄석을 1.24(32mm) : 1(25mm)로 혼입하여 사용하였다. 그림 2.1은 혼합 굵은 골재와 잔골재의 체가름 시험 결과를 나타낸 것이다.

2.1.3 혼화제

혼화제는 SLES계와 Vinsol Resin계의 공기 연행제를 사용하였다.

2.1.4 배합설계

콘크리트의 배합설계는 고속도로 콘크리트 포장 배합설계를 기준으로 하여 단위 시멘트량과 혼화제의 종류에 따라 각각 구분 하였으며, 적정 공기량을 만족하도록 혼화제의 혼입량을 조절하였다. 본 연구에서 사용한 콘크리트의 배합사항은 표 2.3과 같다.

표 2.3 콘크리트 배합설계

Designation	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				AEA(%)		
					W	C	S	G		SLES	Vinsol
								32mm	25mm		
330	< 4	6	45	36	148.5	330	637.84	679.05	452.70	0.017	0.02
350					157.5	350	623.59	663.87	442.58	0.017	0.02
370					166.5	370	660.11	618.28	412.19	0.017	0.02

2.2 실험방법

2.2.1 압력법에 의한 공기량 시험

굳기 전 콘크리트의 공기량 시험은 KS F 2421(굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법(공기실 압력 방법))에 준하여 수행하였으며 굳은 후 콘크리트의 공기량은 화상분석을 이용하여 측정하였다.

2.2.2 슬럼프

굳기 전 콘크리트의 슬럼프 시험은 KS F 2402(콘크리트 슬럼프 시험방법)에 준하여 수행하였다.

2.2.3 정적강도

콘크리트의 압축강도 및 휨강도 시험은 굵은 골재의 최대 치수를 고려하여 각각 $\phi 150 \times 300 \text{mm}$ 의 원형 공시체 및 $150 \times 150 \times 550 \text{mm}$ 의 각주형 공시체를 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 준하여 제작하였다.

압축강도 시험은 200ton급 UTM을 이용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여, 휨강도 시험은 Load Indicator를 이용하여 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 각각 재령 3일과 28일에 수행하였다.

2.2.4 화상분석 실험

화상분석은 ASTM C 457(Standard Test Method for Microscopical of Air Void Content and Parameters of the Air Void System in Hardened Concrete)의 리니어트래버스방법을 적용·응용한 자동화 측정방법으로 주어진 화상(Image)으로부터 정량적인 정보를 추출할 수 있으며, 컴퓨터에 의한 자동제어를 통하여 계측환경에 의한 오차를 줄여 인식 정밀도가 매우 높다. 화상분석을 이용하여 공극의 크기와 분포도, 높이, 면적, 위치, 형상 등을 분석한 후 전체 공기량, 간격계수, 비표면적, 공극 크기별 공기량, 공극 크기별 개수 등 콘크리트 내부 공극구조를 보다 신속하고 정확하게 파악할 수 있다. 또한, 장비의 구성 및 사용방법이 전문가적 기술을 요구하지 않으며 구조물의 시편을 통해 측정 면 연마만으로도 직접적인 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

3. 실험결과

3.1 공기량 측정 결과

단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따른 공기량 측정은 굳기 전 콘크리트를 대상으로 압력법을 수행하였으며, 굳은 후 콘크리트를 대상으로 화상분석을 수행하였다. 그 결과는 그림 3.1과 같다.

혼화제 혼입량은 SLES계와 Vinsol Resin계로 구분하여 시멘트 중량 대비 각각 0.017%와 0.02%로 동일하다. 압력식으로는 모든 배합변수에서 적정 공기량 $6 \pm 1\%$ 를 만족하는 것으로 나타났으며, 화상분석으로는 $4 \pm 0.5\%$ 로 유사하게 나타났으나 370-S의 경우에만 3% 이하로 측정되었다.

공기량을 측정하는 방법에 따라 압력법을 기준으로 화상분석에 의한 측정 결과가 다소 작게 나타났다. 화상분석은 콘크리트 시편 제작 후 재령 28일에 수행되어 지속적인 수화반응으로 공극이 채워진 것으로 판단된다.

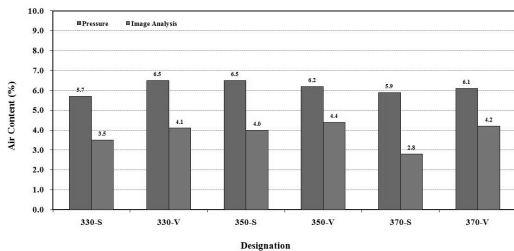


그림 3.1 공기량 측정 결과

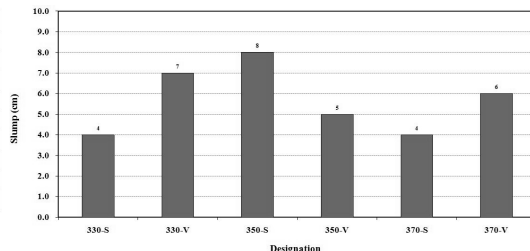


그림 3.2 슬럼프 측정 결과

3.2 슬럼프 측정 결과

단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따른 굳기 전 콘크리트의 슬럼프 시험 결과는 그림 3.2에 나타내었다.

3.3 정적강도 측정 결과

3.3.1 압축강도

압축강도는 단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따라 재령 3일과 28일에 측정하였으며, 측정 결과는 그림 3.3에 나타내었다.

재령 3일의 압축강도 측정 결과 단위시멘트량 370kg/m³의 경우가 가장 크게 측정 되었으며, 단위시멘트량 350kg/m³의 경우가 가장 작게 측정되었으나 그 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 재령 28일의 압축강도 측정 결과 단위시멘트량이 증가할수록 크게 측정되는 경향을 보이고 있으나 350-V에서 가장 낮게 측정되었다.

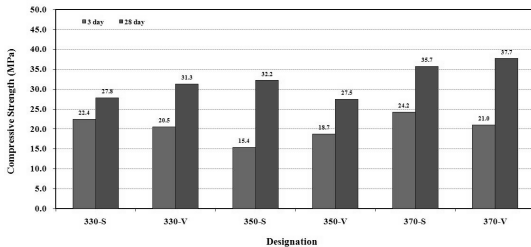


그림 3.3 압축강도 측정 결과

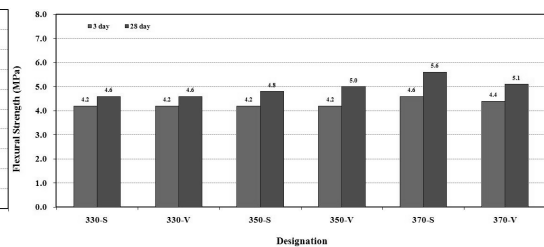


그림 3.4 휨강도 측정 결과

3.3.2 휨강도

휨강도는 단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따라 재령 3일과 28일에 측정하였으며, 측정 결과는 그림 3.4에 나타내었다

재령 3일의 휨강도가 단위시멘트량이 330kg/m³, 350kg/m³인 경우에는 동일하게 측정되었으나 단위시멘트량이 370kg/m³인 경우에는 다소 증가하였다.

재령 28일의 휨강도의 경우에도 단위시멘트량이 증가할수록 크게 측정되는 경향을 나타내고 있다.

3.4 화상분석 결과

3.4.1 공극 크기별 공기량 및 공극 개수

그림 3.5는 공극크기별 공기량 분포를 나타낸 그래프이고, 그림 3.6은 공극 크기별 공극 개수 분포를 나타낸 그래프이다. 단위시멘트량 350kg/m³은 적정 공기량을 유지할 수 있도록 SLES계의 혼화제를 다양하게 혼합하여 다소의 공기량 분포의 차이를 나타내고 있으며, 대부분의 변수에서 50~250 μ m 사이의 공극 크기에 공기량이 집중되어 있다. 공극크기별 공극 개수는 비슷한 분포를 나타내고 있다.

단위시멘트량 350kg/m³의 그래프는 단위시멘트량 330kg/m³의 공극크기별 공기량 분포에 비해 모든 변수에서 공극 크기에 따라 다양하게 공기량이 분포되어 있는 것으로 나타났다.

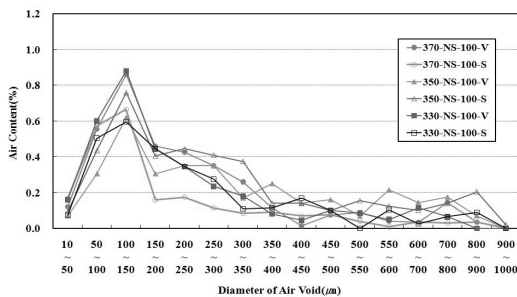


그림 3.5 공극 크기에 따른 공기량 분포

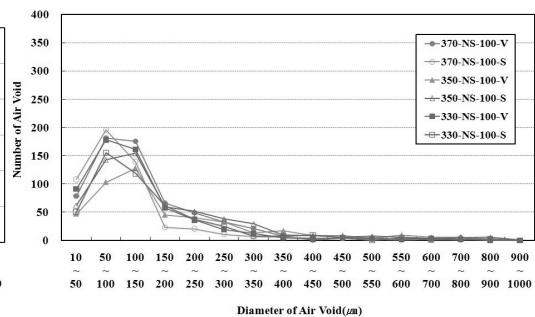


그림 3.6 공극 크기에 따른 공극 개수 분포

단위시멘트량 370kg/m³의 그래프는 단위시멘트량 330kg/m³, 350kg/m³의 공극크기별 공기량과 공극 개수 분포와 비슷한 경향을 나타냈다.

3.4.2 간격계수 측정 결과

콘크리트의 간격계수는 콘크리트 내부에 산재하고 있는 공극을 동일한 크기와 동일한 간격으로 배부하였을 때, 시멘트 페이스트 속의 가장 먼 점으로부터 가장 가까운 공극벽에 대한 거리로서 정의된다. 이는 입방체의 반대편에 위치한 두 공극의 외주 사이의 거리를 반으로 나눈 것과 같다. 이러한 간격계수는 간접적으로 콘크리트 내구성을 평가하는 지수로 사용되어 지고 있다.

단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따라 재령 28일에 화상분석을 통하여 간격계수를 측정한 결과는 그림 3.7에 나타내었다.

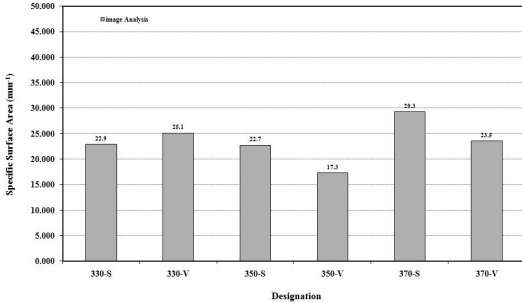


그림 3.8 비표면적 측정 결과

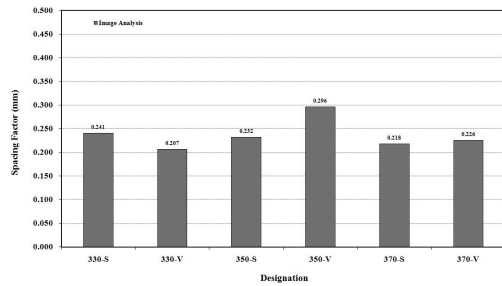


그림 3.7 간격 계수 측정 결과

3.4.3 비표면적 측정 결과

단위시멘트량 및 혼화제 종류에 따라 재령 28일의 굳은 후 콘크리트를 대상으로 화상분석을 수행하였다. 그 결과는 그림 3.8에 나타내었다.

3.5 Kansas DOT와 Mindess에 의한 내구성 평가

굳은 후 콘크리트를 대상으로 화상분석을 수행한 후 공극구조를 분석하여 간격계수와 비표면적으로 콘크리트의 내구성을 간접적으로 평가할 수 있다. 표 3.1은 Kansas DOT와 Mindess가 제안한 간격계수와 비표면적에 따른 내구성을 간접적으로 평가하는 방법이다.

표 3.1 Kansas DOT와 Mindess의 제안

	Air	Spacing Factor	Specific Surface Area
Mindess	-	< 200 μm	> 25.0 mm^{-1}
Kansas DOT	$\geq 5\%$	< 250 μm	-

내구성을 간접적으로 평가하기 위하여 Kansas DOT와 Mindess가 제안한 공기량, 간격계수 그리고 비표면적과의 상관관계를 그림 3.9와 3.10에 나타내었다.

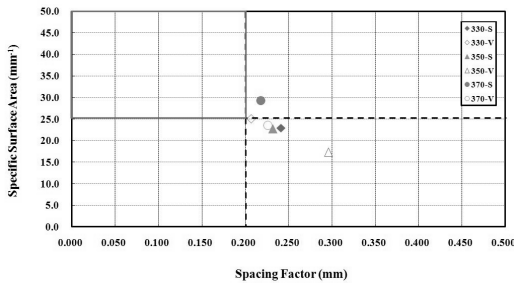


그림 3.9 간격계수와 비표면적의 상관관계

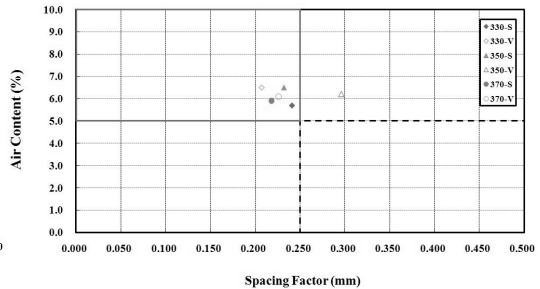


그림 3.10 간격계수와 공기량의 상관관계

간격계수와 비표면적의 상관관계에서는 330-V와 370-S는 Misdess 저서에 제시된 비표면적 적정기준에 만족하였지만 간격계수는 만족하지 못하였다. 하지만 모든 변수에서 Kansas DOT가 제시한 기준에는 간격계수 기준에는 만족하고 있다.

간격계수와 공기량의 상관관계에서는 350-V를 제외한 모든 변수에서 Kansas DOT가 제시한 적정 공기량과 간격계수를 만족하고 있다. 350-V는 적정 공기량은 만족하였으나 간격계수에서 만족하지 못하고 있다.

4. 결론

본 연구는 단위시멘트량 및 혼화제에 따른 포장 콘크리트의 공극구조 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 적정 공기량을 만족시키기 위하여 혼합된 공기연행체의 혼입량이 서로 다르므로 직접적으로 비교하기에는 다소 무리가 따르나 굳기 전 콘크리트의 공기량과 채령 28일의 굳은 후 콘크리트의 화상분석을 통한 공기량을 비교 하여 보면 1.8~3.1%의 공기량이 감소하는 것으로 나타났다. 공기량이 감소하는 원인은 타설 후 시간이 경과함에 따라 지속적인 수화반응으로 인하여 콘크리트 내부공극이 채워져 공기량이 작게 측정된 것으로 판단되어진다.
- (2) 단위시멘트량에 따른 간격계수와 비표면적의 변화는 크게 나타나지 않지만, 혼화제 종류에 따라 간격계수와 비표면적을 비교 하여 보면 간격계수는 같은 단위시멘트량에서 Vinsol Resin계를 사용하였을 때 작은 수치를 나타 내고 있으며 비표면적은 Vinsol Resin계의 혼화제를 사용하였을 때 동일 단위시멘트량에서 높은 수치를 가지고 있지만 전반적으로 비슷한 수치를 나타냈다.
- (3) 화상분석의 결과를 통하여 Kansas DOT와 Misdess제안에 비교하여 보면 350-V를 제외한 모든 변수에서 Kansas DOT의 제안(간격계수 $250\mu\text{m}$ 이하)을 만족하고 있으나, Mindess의 제안(간격계수 $200\mu\text{m}$, 비표면적 25mm^{-1})을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 권혁찬, “화상분석법을 통한 경화 콘크리트의 내부 공극 구조 분석”, 강원대학교 토목공학과 석사학위논문, 2004
2. 서계열, “잔골재 종류 및 혼입률이 포장 콘크리트의 공극 구조에 미치는 영향”, 강원대학교 일반대학원 토목공학과 석사학위논문, 2010
3. 정원경, “콘크리트 동결융해 내구성 평가를 위한 평면간격계수 제안”, 강원대학교 일반대학원 토목공학과 박사학위 논문, 2005
4. 윤경구 외, “화상분석을 통한 기계타설 콘크리트의 내구특성 분석 실험”, 한국도로공사 도로기술원 연구보고서, 2009
5. Powers T. C. “The Air Requirement of Frost Resistant Concrete”, Research Laboratories of the Portland Cement Association, Vol. 29, 1949