

포장궤도구조 결정을 위한 실험적 연구

An Experimental Study for Determination of the Paved Track Structure

심낙훈¹, 이일화², 박영석³

Nak-Hoon Shim, Il-Hwa Lee, Young-Suk Park

Keywords : Paved Track Structure(포장궤도구조), Rapid Hardening Mortar(초속경모르타)

Abstract

The objective of this study is to confirm the field application of coarse aggregates technology mixed with high strength mortar under the rail.

In the present study, the field tests are performed to find the field state and aggregate gradations and the laboratory tests are performed to find the compressive strength of the prepacked concrete cylinder specimens and the core specimens obtained at the field.

1. 서론

현재 우리나라의 불유수송 및 교통은 도로 중심으로 편성되어 있지만, 최근 도로 교통이 점차 교통량 증가에 따른 한계를 드러냄에 따라 상대적으로 안정적인 불유수송을 수행할 수 있는 철도 교통에 대한 사회적 관심이 증가하고 있다. 이처럼 철도에 대한 사회적 관심이 증가하면서 여러 가지 문제점이 대두되고 있는데, 그 대표적인 것 중의 하나가 자갈도상궤도의 유지관리 문제이다. 최근 레도부담이 증가하면서 도상의 열화 진행속도가 증가하고 있다. 이에 다른 도상의 유지보수 비용도 증가하여 도상직업이 레도보선의 절반 이상을 차지하고 있다는 점을 감안하면, 이 문제점을 해결할 수 있는 근본적인 대책이 필요하다. 철도 산업의 선진국인 일본에서는 오래전부터 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안을 찾기 위하여 꾸준한 연구가 진행되어 실용화 단계에 있다. 하지만, 우리나라에서는 선진국에서 개발된 재료를 사용하여 지하철의 일부구간에 시공을 하고 있는 수준이다.

그러나, 이제는 사회적 관심을 고려하여 앞에서 언급한 문제점을 해결하기 위한 본격적인 연구가 필요한 실정이며, 그 대한 중의 하나로 제시되고 있는 것이 기존의 철도 자갈도상에 모르타를 주입하여 콘크리트 도상으로 만들어 지지력을 확보하고 도상세립화 및 노반관입 등의 문제점을 해결하는 방법이다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 자갈도상보다 유지관리 측면에서 유리한 콘크리트 도상으로 바꾸는데 있어서 기존의 재료를 사용하여 시공하는 경우에 유동성 모르타의 충전성을 파악하고, 열차 주행에 따른 지지력 확보와 직접 관련되는 콘크리트의 강도를 파악하기 위하여 실내시험과 현장시험을 수행하였다.

2. 현장시험

2.1 현장 시험체 제작 및 코어채취

현장에서 도상자갈의 상태가 보통 수준인 식선구간과 자갈상태가 양호한 것이라고 예상했던 곡선구간에서 각각 하나의 시험체를 제작하였다. 식선구간(Site 1)에서는 도상자갈을 교란시키지 않고 위상대로 시험하기 위하여 시험체 주변을 터파기한 후에 기구집을 설치하였다. 그리고, 한쪽 면에는 투명 아크릴판을 설치하여 모르타의 주입을 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다. 제

¹ 정회원, (주)도우엔지니어링 기술연구소, 공학박사

² 정회원, 한국철도기술연구원, 석학연구원

³ 비회원, 명지대학교, 도목환경공학사, 교수

직접 거꾸집에 배합 모르터를 타설한 후에 표면의 얇은 자갈층 아래에 있는 석분층 까지 모르터가 침투되지 않아 진동 다짐봉을 사용하여 모르터를 충전하였다.

꼭선구간(Site 2)에서는 당초 예상과 달리 직선구간보다 도상자갈의 입도분포가 양호하지 못하고 석분층이 두터워 자갈도상의 원상태로 시험을 한 것이 아니라 입도가 양호한 얇은 골재만을 선별하여 Photo 1과 같이 미리 제작된 가꾸집에 채워 넣었다. 그리고, 모르터 주입 시에는 다짐을 실시하지 않았고 Photo 2와 같은 시험체를 완성하였다.

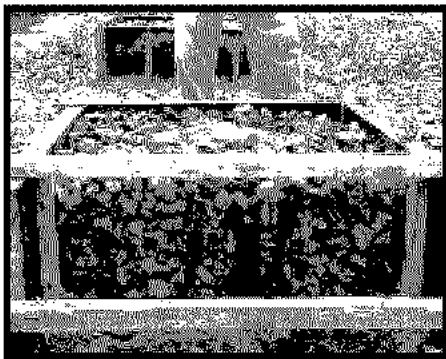


Photo 1. 골재충진 및 타설(Site 2)

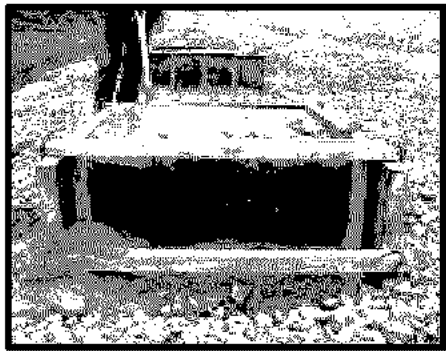


Photo 2. 시험체 제작 완료(Site 2)

현장 시험체의 재령 7일 콘크리트 압축강도를 측정하기 위하여 2개의 시험체에서 각각 5개의 코어를 채취한 후에 실내에서 만능시험기(U.T.M)를 이용하여 압축강도 시험을 실시하였다. 코어 채취 후의 구멍 내부를 관찰한 결과 모르터를 타설할 때 얇은 자갈층인 상부에는 진동 다짐봉을 사용해서 다짐을 했기 때문에 모르터가

주입되었지만, 그 아래층인 석분층에는 모르터가 주입되지 않아 코어를 채취하더라도 자갈층과 석분층의 경계면에서 코어가 끊어졌다.

2.2 시험 결과 및 분석

현장에서 채취한 코어 공시체는 시험체 제작 시에 모르터가 자갈도상 아래층에 있는 석분층에 주입되지 않아 충분한 길이를 채취할 수 없었다. 그래서, 본 시험에 사용된 공시체는 대부분 표준 공시체보다 길이가 다소 짧은 공시체이다. 모든 코어 공시체의 압축강도 시험 결과를 종합하여 Table 1에 나타내었다. 직선구간(Site 1)에서의 코어 공시체 압축강도는 평균값 부근에서 고른 분포를 나타냈을 뿐만 아니라 보통 시멘트를 사용한 재령 7일의 콘크리트 압축강도보다 다소 크게 나타났다. 반면, 같은 재료를 사용하여 타설 했음에도 꼭선구간(Site 2)에서의 코어 공시체 압축강도는 직선구간에 비해 상당히 작은 값을 나타냈다. 이것은 직선구간과 꼭선구간에서의 모르터 타설 방법이 달랐기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 직선구간에서는 당초에 예상한 것과는 달리 현장 도상자갈의 입도분포가 양호하지 못하여 진동 다짐봉을 사용하여 다짐을 실시하였지만, 꼭선구간(Site 2)에서는 다짐을 실시하지 않은 경우의 충전성과 압축강도를 파악하기 위하여 다짐을 실시하지 않았기 때문이다.

Table 1. 코어 공시체 압축강도시험 결과

위치	공시체	공시체 길이(cm)	재령 7일재 압축강도(MPa)
Site 1	S1#1	20	29
	S1#2	13	33
	S1#3	13	29
	S1#4	10	25
	S1#5	10	33
	평균값		29
Site 2	S4#1	20	16
	S4#2	20	17
	S4#3	10	21
	S4#4	7	5
	평균값		18

3. 골재의 입도분석시험

3.1 시험 방법

기존 철도 도상자갈의 입도를 철도 기준에서 제시하는 입도와 비교·분석하기 위하여 현장에서 골재용 채취하여 입도분석시험을 실시하였다. 실내에서 골재의

입도분석을 실시함에 있어서 10mm, 20mm, 25mm, 40mm, 50mm 표준체를 사용하였으며 한국산업규격 KS F 2502에 의거하여 시험을 실시하였다.

3.2 시험 결과 및 분석

전체적으로 철도기준에서 제시하는 입도인 20mm ~ 70mm에 해당하는 골재는 약 60% 수준으로 약 40% 정도의 골재가 기준치 미만으로 나타났다. 이러한 상당량의 잔골재는 기존 자갈도상에 모르터를 주입하여 콘크리트화 하고자 할 때 시공성과 충전성 그리고 강도면에서 상당한 제약조건으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 철도기준에서 제시하는 골재의 최소치수가 20mm인 점을 고려하여 크기가 20mm 이상인 골재는 굵은 골재로 취급하고, 그 미만의 골재는 잔골재로 취급하였다. 그리고, 입도분석시험 결과 나타난 굵은 골재와 잔골재의 비율이 6:4인 점을 고려하여 4장에서 압축강도 시험을 위한 공시체를 만드는 과정에서 이 비율을 기준으로 적용하였다.

Fig. 1은 본 실험에서 나온 입도분석 결과를 철도 기준의 입도분포곡선과 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과, 5개의 시료 모두 기준 입도 범위를 벗어나는 것으로 나타났으며 이것은 기존 도상자갈의 교체 및 열차 주행 시 발생하는 진동에 의해 도상자갈이 파쇄되었기 때문인 것으로 판단된다.

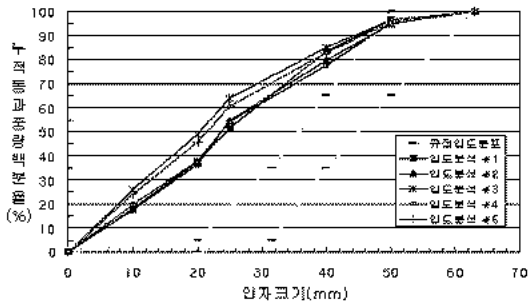


Fig. 1. 철도기준과 현장입도의 비교

4. 압축강도시험

4.1 공시체 제작 및 시험 방법

본 장에서는 2장의 현장시험에서 파악된 모르터의 충전성 및 콘크리트 코어의 압축강도와 3장에서 파악된 골재의 입도분석 결과를 바탕으로 실내에서 모르터 및 프리캐스트 콘크리트 표준 공시체를 제작하여 압축강도시

험을 수행하였다. 그리고, 공시체의 표면에 나타나는 골재 입도분포 상태와 파괴 후의 양상을 관찰하여 충전성을 파악하였으며, 이를 압축강도시험 결과와 연관하여 분석하였다. 공시체는 고유동성의 재료 I 과 상대적으로 저유동성의 재료 II를 사용하여 표준 공시체를 제작하였다. 재료 I의 탄성계수(E)는 2.6×10^4 MPa이고 포아송비(ν)는 0.18이다. 그리고, 공시체 제작 시 각 재료의 모르터 배합비를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 재료별 모르터 배합비

구분	시멘트량	물	용결조정제
재료 I	100	19.2	0.08
재료 II	100	16	-

프리캐스트 콘크리트 공시체는 총 48개를 제작하였으며 재료, 입도분포 그리고 계층을 고려하여 Table 3과 같이 제작하였다. 본 연구에서 크기가 20mm 이상인 골재를 굵은 골재로 취급한 것은 철도기준에서 제시하는 골재의 최소치수가 20mm인 점을 고려한 것이며, 그 미만의 골재는 잔골재로 취급하였다. 그리고, 3장의 입도 분석시험 결과 나타난 굵은 골재와 잔골재의 비율이 대략 6:4인 점을 고려하여 굵은 골재와 잔골재의 배합비를 6:4로 하였다. 골재가 채워진 공시체 몰드에 모르터를 주입할 때는 각 배합 방법에 따라 다른 방법으로 주입하였다. 고유동성의 재료 I을 사용하는 경우에 배합 I, 배합III 그리고 배합IV의 경우에는 파이프를 몰드의 내부에 꽂아서 파이프를 주입된 모르터가 공시체 몰드의 아래쪽부터 충전되도록 하였다. 그리고, 저유동성의 재료 II를 사용하는 경우에 배합 I, 배합III, 그리고 배합IV의 경우에는 파이프를 통하여 주입이 되지 않아 공시체 몰드 상부에 모르터를 타설하고 다짐봉을 사용하여 다짐을 하면서 충전하였다. 배합II의 경우에는 재료 I 과 재료 II 모두 파이프나 다짐봉을 사용하지 않고 충전되도록 하였다.

Table 3. 프리팩트 콘크리트 공사체 개수

재료	유동성	재령	골재 입도분포별 공사체 개수			
			배합Ⅰ	배합Ⅱ	배합Ⅲ	배합Ⅳ
재료Ⅰ	고유동	1일	3	3	3	3
		7일	3	3	3	3
재료Ⅱ	저유동	1일	3	3	3	3
		7일	3	3	3	3

* 굵은 골재 : 입자의 크기가 20mm 이상인 골재(20mm 미만은 잔골재로 가정)

- 배합Ⅰ : 현장에서 채취한 상태로 굵은 골재만 배합한 경우

- 배합Ⅱ : 굵은 골재를 세척하여 배합한 경우

- 배합Ⅲ : 현장에서 채취한 상태로 굵은 골재 : 잔골재 = 8 : 2인 경우

- 배합Ⅳ : 현장에서 채취한 상태로 굵은 골재 : 잔골재 = 6 : 4인 경우

4.2 시험 결과 및 분석

가. 모르타의 유동성

실내 압축강도시험을 위하여 공사체를 제작하는 과정에서 각 재료에 대한 모르타의 유동성시험을 실시하고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 재료Ⅰ은 타 연구에서 수행한 연구결과(참고문헌 2)에 따르면 유하시간이 약 4초 정도 되는 재료이지만, 본 시험에서 약 8초 정도의 낮은 수치가 나오는 것은 재료의 장기간 방치에 따른 성능저하 때문인 것으로 판단되며, 재료Ⅱ의 경우에는 2장의 현장에서 시험한 것보다 유하시간이 짧게 나타났다. 이는 현장과 실내의 온도 등에 따른 환경적 요인 때문인 것으로 판단된다. 여기서, 무엇보다 중요한 것은 두 재료에 대하여 배합 10분 후에 유동성시험을 다시 실시한 결과 재료Ⅰ의 경우에는 유하시간이 이전과 차이가 없었지만, 재료Ⅱ의 경우에는 유하시간이 상당히 크게 증가했다는 것이다. 따라서, 현장에서의 작업성을 고려할 때 재료Ⅰ은 일정 시간동안 경화되지 않아 작업성 확보가 가능하지만, 재료Ⅱ의 경우에는 모르타 배합 이후에 바로 경화되기 시작하기 때문에 작업시간을 확보할 수 없는 것으로 나타났다.

Table 4. 모르타의 유동성 시험 결과

모르타	유하시간 (sec)				배합 10분 후
	#1	#2	#3	평균	
재료Ⅰ	7.6	8.0	8.0	7.87	8.2
재료Ⅱ	9.37	9.56	9.48	9.47	14.58

나. 모르타 공사체의 압축강도

각 재료마다 재령별로 3개의 모르타 공사체를 만들어 압축강도시험을 실시하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 재료Ⅰ과 재료Ⅱ는 모두 고강도 재료이므로 예상할 바와 같이 높은 압축강도를 나타내었다.

Table 5. 모르타의 압축강도시험 결과

재료	재령	압축강도(MPa)			평균
		#1	#2	#3	
재료Ⅰ	1일	25.54	23.75	24.86	24.72
	7일	25.77	27.24	27.38	26.80
재료Ⅱ	1일	20.12	21.65	22.49	21.42
	7일	48.69	50.23	50.61	49.84

다. 프리팩트 콘크리트 공사체의 압축강도

자갈도상을 콘크리트화 했을 때의 콘크리트 강도를 파악하기 위하여 골재 입도와 재령을 고려한 프리팩트 콘크리트 공사체를 제작하여 압축강도시험을 수행하였다. 그 압축강도시험 결과를 종합하여 Table 6과 7에 나타내었다. 여기서, 공사체의 번호가 의미하는 바는 다음과 같다.

예 1) HC-C1-1

HC : 고유동 재료Ⅰ, C1 : 배합Ⅰ, 1 : 재령 1일

예 2) LC-C3-7

LC : 저유동 재료Ⅱ, C3 : 배합Ⅲ, 7 : 재령 7일

Table 6. 프리팩트 콘크리트 공사체의 압축강도시험 결과(재료Ⅰ)

공사체	재령	압축강도(MPa)			절정값
		#1	#2	#3	
HC-C1-1	1일	10.73	10.30	-	10.52
HC-C2-1	1일	12.73	14.12	13.13	13.33
HC-C3-1	1일	13.46	3.08	4.33	13.46
HC-C4-1	1일	11.25	4.30	10.36	10.81
HC-C1-7	7일	11.81	14.27	10.04	12.04
HC-C2-7	7일	19.53	18.89	16.84	18.42
HC-C3-7	7일	11.23	4.03	8.70	9.97
HC-C4-7	7일	11.48	2.86	5.43	11.48

Table 7. 프리캐스트 콘크리트 공시체의 압축강도시험 결과(재료II)

공시체	제형	압축강도(MPa)			결정값
		#1	#2	#3	
LC-C1-1	1일	18.50	16.93	17.53	17.65
LC-C2-1	1일	23.95	25.74	24.34	24.68
LC-C3-1	1일	12.69	10.79	-	11.74
LC-C4-1	1일	20.11	20.11	-	20.11
LC-C1-7	7일	22.50	27.20	24.26	24.65
LC-C2-7	7일	39.54	39.62	32.69	37.28
LC-C3-7	7일	11.64	12.13	-	11.90
LC-C4-7	7일	9.53	19.60	-	14.57

(1) 골재 입도분포별 결과 분석

Table 6과 7에서 굵은 골재와 잔골재의 배합에 따른 결과를 살펴보면, 굵은 골재를 세척한 후에 굵은 골재만을 배합하여 만든 HC-C2와 LC-C2 공시체의 압축강도가 제형에 관계없이 가장 크게 나타났다. 그리고, 골재 입도분포가 양호한 HC-C1 공시체의 압축강도가 HC-C3 또는 HC-C4보다 낮게 나타나는 경우가 있는데, 이것은 잔골재의 분포 양상에 따른 것이라 할 수 있다. 즉, 잔골재가 물드 내부에 고르게 분포되어 있는 경우에는 모르타르와 혼합되어 강도를 발휘할 수 있지만, 일부분에 집중되어 분포되어 있는 경우에는 강도 저하의 직접적인 요인으로 작용한다. 예를 들어, 굵은 골재만을 사용한 모든 공시체의 압축강도가 유사한 값을 나타내지만, HC-C3-1의 #2와 #3 공시체 및 HC-C4-1의 #2 공시체 압축강도는 다른 것에 비해 강도가 현저하게 낮게 나타났다. 이것은 Photo 3 및 Photo 4에서 보듯이 잔골재가 일부분에 집중되어 모르타르가 충전되지 못하고 재료분리가 발생했기 때문이라고 판단된다. 그리고, 재료 I 을 사용한 경우에 제형 7일의 압축강도도 역시 굵은 골재만을 사용한 경우에는 같은 배합에 대해서 모든 공시체의 강도가 유사한 값을 나타내지만, 잔골재가 배합된 경우에는 같은 배합일지라도 현저한 값 차이를 나타내고 있다.

재료II를 사용한 공시체의 압축강도를 나타낸 Table 7에서는 Table 6과는 달리 현저하게 강도 차이가 나는 경우가 없다. 이것은 공시체 제작 시에 재료 I 을 사용한 것은 파이프를 사용하여 주입하였을 뿐 다짐은 하지 않았지만, 재료II를 사용하여 제작한 공시체는 제작 시 다짐봉을 이용하여 충분히 다짐을 했기 때문에 잔골재의 분포를 고르게 할 수 있었던 것으로 판단된다. 그리고, LC-C4의 공시체 압축강도가 LC-C3보다 크게 나타나는 것은 잔골재가 모르타르와 잘 혼합되었거나 또는

석분의 함유량이 더 적었기 때문인 것으로 판단된다. 참고로, 본 시험에서 굵은 골재와 잔골재의 배합비를 결정할 때, 20mm 이상의 굵은 골재와 그 미만의 잔골재를 중량비로 배합한 것이지 석분의 함유량을 배합비로 결정한 것은 아니다. 따라서, LC-C4의 공시체는 LC-C3 공시체보다 잔골재량은 많지만 석분의 양이 상대적으로 적게 함유되었기 때문에 압축강도가 더 크게 나올 수도 있다는 것이다. 그리고, 재료II에서 압축강도시험 결과가 없는 공시체는 물드를 탈형했을 때 재료분리가 심하게 발생하여 압축강도시험을 할 수 없었던 경우이다. Photo 5는 모르타르의 충전상태가 상당히 양호한 배합II의 공시체를 나타낸 것이다. 그리고, Fig. 2는 재료 I 을 사용한 경우의 골재 입도분포별 압축강도를 나타낸 것이고, Fig. 3은 재료II에 대한 골재 입도분포별 압축강도를 비교하여 나타낸 것이다.

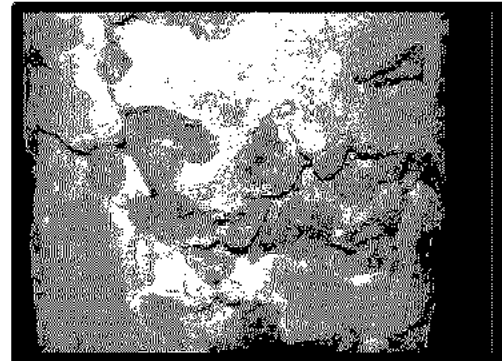


Photo 3. 공시체 표면의 재료분리

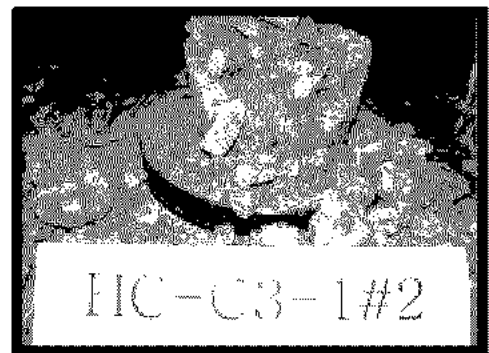


Photo 4. 공시체 내부의 재료분리



Photo 5. 충전상태가 양호한 공시체의 예

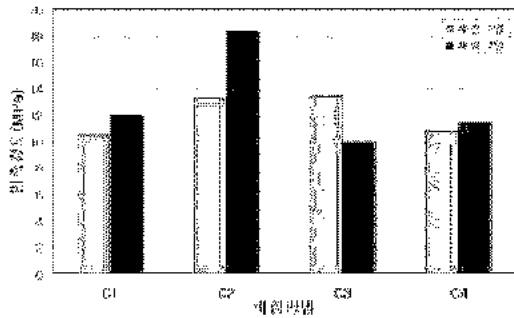


Fig. 2. 골재 배합비에 따른 압축강도(재료 I)

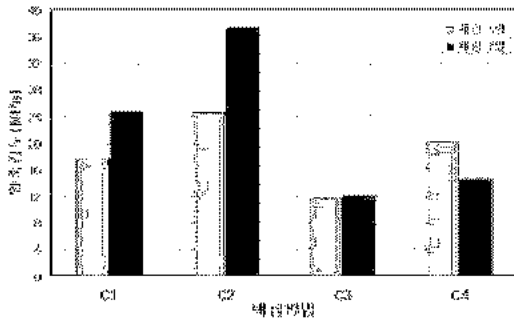


Fig. 3. 골재 배합비에 따른 압축강도(재료 II)

(2) 세령별 결과 분석

같은 골재만을 사용한 배합1의 경우에 재료II에서는 세령 7일 압축강도가 세령 1일 압축강도에 비해 40% 이상 증가하였지만, 재료 I에서는 15% 증가하는 것에

불과했다. 이는 모르터 유동성시험에서 언급한 바와 같이 재료의 성능저하로 인하여 예상한 만큼 모르터가 충전되지 않았거나 강도성능이 떨어지기 때문일 것으로 판단되며, 재료II에서는 다짐을 하여 공기체를 제작했기 때문에 저유동성의 재료이기는 하지만 상대적으로 충전이 잘 되었기 때문으로 판단된다.

(3) 재료별 결과 분석

본 연구에서 고유동성과 저유동성의 두 가지 재료를 사용한 것은 실제 현장 적용 시 다짐을 하지 않고도 충전할 수 있는 방안을 마련하기 위함이었으나, 재료 I이 장기간의 방지로 인하여 그 성능을 상실하였기에 기대한 만큼의 효과를 거둘 수는 없었다. 하지만, 타 연구 보고서와 본 연구에서의 충전성 및 압축강도를 고려해 볼 때, 자갈의 입도분포가 양호한 경우라면 효과가 있을 것으로 판단된다. 그리고, 저유동성 시멘트인 재료 II의 경우에는 공기체 제작 시 다짐봉을 사용하지 않고서는 충전이 되지 않았기 때문에 다짐을 사용하여 모르터를 충전하였다. 그래서, 재료 I보다는 충전성이나 압축강도가 양호하게 나타난 것으로 판단되지만, (가)항의 모르터 유동성 시험결과에서 언급한 바와 같이 타설 후에 바로 경화가 시작되기 때문에 작업시간을 확보할 수 없다는 것이 문제라고 판단된다. Fig. 4는 세령 1일에 대한 두 재료의 골재 입도분포별 압축강도를 나타낸 것이고, Fig. 5는 세령 7일에 대한 두 재료의 골재 입도분포별 압축강도를 나타낸 것이다.

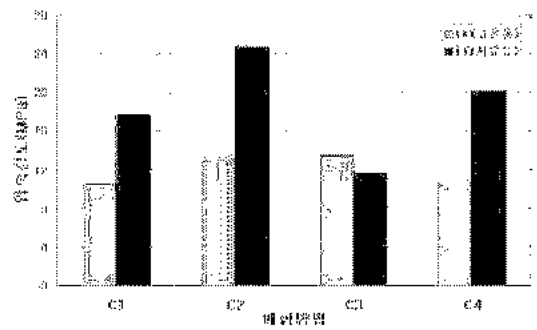


Fig. 4. 골재 배합비에 따른 압축강도(세령 1일)

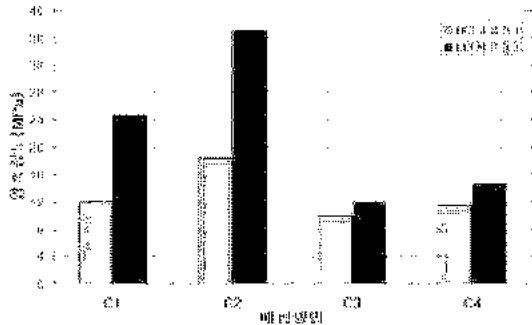


Fig. 5. 콘재 배합비에 따른 압축강도(재령 7일)

5. 결론

본 연구에서는 기존 철도 자갈도상의 콘크리트화에 대한 적용성을 파악하기 위하여 현장시험, 콘재의 입도 분석시험, 모르타의 유동성시험 그리고 모르타와 프리캐스트 콘크리트 공시체의 압축강도시험을 수행하였다. 이러한 시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

i) 기존 자갈도상에 모르타를 주입하여 콘크리트 도상으로 만드는 경우에 콘크리트의 강도도 중요하지만, 그보다 더 중요한 것이 도상의 아래층에 분포되어 있는 석분층의 처리방법이다. 이 석분층에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

ii) 입도분석시험 결과, 같은 콘재의 잔골재의 비율이 6:4로 나타났다. 그리고, 5개의 시료에 대한 입도분석시험 결과 5개의 시료 모두 철도기준에서 제시하는 입도범위를 벗어나는 것으로 나타났으며, 이는 기존 도상자갈의 교체 및 열차 주행 시 발생하는 진동에 의해 도상자갈이 미세되었기 때문이다.

iii) 같은 콘재만을 사용하여 공시체를 제작한 경우에 압축강도가 잔골재와 혼합한 경우의 압축강도보다 전체적으로 크게 나타났다. 그리고, 같은 콘재만을 사용한 경우에는 3개의 공시체에 대한 압축강도가 모두 비슷한 값을 나타냈지만, 잔골재가 혼합된 경우에는 압축강도가 일정치 않아 신뢰성 확보가 어려운 것으로 나타났다. 특히, 자갈이 파손되어 생긴 석분의 함유량은 공시체의 압축강도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

iv) 재료II의 경우에는 다짐을 했기 때문에 충전성이나 압축강도가 양호하게 나타났지만, 타설 직후부터 경화가 시작되기 때문에 약 10분 후에는 유동성이 상당히 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서와 같이 기존 자갈도상에 모르타를 주입하여 콘크리트 도상화하는 경우에는 일정 작업시간 동안 유동성을 확보할 수 있도록 재료의 성능 개선이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 본 연구를 지원해 주신 한국철도기술연구원 및 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김화중, 정재홍 "고성능 콘크리트의 개념 및 배합설계" 콘크리트학회지 제7권 5호 1995. 10. pp5~14
2. 명지대학교 "초속성 무수축 모르타를 사용한 궤도 자갈도상의 콘크리트화에 대한 연구" 2002. 2.
3. 박기청, 신봉수, 이윤배, "초유동 고성능 콘크리트의 현장 적용 사례보고" 콘크리트학회지 제7권 1995. 10. pp83~89
4. 박영석, 이명우, 최익창, 정양욱 "초속성 무수축 모르타를 사용한 궤도 자갈도상의 콘크리트화에 대한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.477-480, 2000.
5. 박철림, 권영호, "고성능 콘크리트의 개발 및 실용화 연구" 콘크리트학회지 제7권 5호 1995. 10. pp42~49
6. 吉田弘道 編, "鐵筋コンクリートの解析と設計" (銀葉社建築設計法の考え方と適用), 丸善株式會社.
7. Oh, B. H. and Lee, H. T. , "Fatigue characteristic of Concrete" Proceedings of APSC-86 , Seoul , 1986
8. Oh, B. H. "Fatigue Analysis of plain Concrete in Flexure" Journal of Structural Engineering, ASCE, V.112, No.2 Feb. 1986 pp 273~288