

건축·토목용 기포콘크리트 제조시 영향을 미치는 제반요인 연구

김경덕·성길모·노현승*·정민철

〈한일시멘트(주) 중앙연구소〉

1. 서 론

기포콘크리트는 기포제의 계면활성작용을 이용, 물리적으로 기포를 만들어 시멘트 슬러리에 혼입, 공기량을 65~85%까지 함유한 경량의 콘크리트를 제조하는 것으로 cellular concrete, 또는 insulating concrete라고도 한다.

기포콘크리트의 용도로 단열재 이외에 방음재, 방화벽과 터널 그라우팅 같은 작업에도 널리 쓰인다. 이 기포콘크리트는 시멘트 슬러리에 기포균을 섞어 사용장소와 용도에 따라 골재 또는 무기질 혼합재를 혼합할 수 있다. 본 연구에서는 국내외에서 사용되고 있는 기포제의 종류, 시멘트와 충전재료의 변화에 따른 특성을 폭넓게 살펴보고 이때 영향을 미치는 제반 영향인자를 고찰하였다.

2. 실 험

2.1 사용재료

- ① 시멘트 : 1종 보통포틀랜드시멘트
- ② 모래 : 금강사(0.6mm 이하, 비중 : 2.65)
- ③ 충전재 : fly ash(비중 : 2.23)
석회석분(비중 : 2.72)
혼분(비중 : 2.73)
EP/Dust(비중 : 2.72)

2.2 적용시험 항목과 관련규격 <표 1>

2.3 기포제(Foam Agent)

기포제란 기포콘크리트 제조시 기포균을 만드는 혼화제로서 제조과정에서 만든 기포균은 시멘트 슬러리(또는 시멘트 Mortar 슬러리)와 혼합되어 경량콘크리트 제품이 된다. 이 기포제는 원재료 성분에 따라 다음과 같이 나눌 수 있다.

- ㉠ 고분자(Copolymer Agent)
- ㉡ 동물성 단백질(Animal Protein)
- ㉢ 식물성
- ㉣ 아미노 황산염
- ㉤ 알콜 에테르(Alcohol Ether)
- ㉥ 계면 활성제
- ㉦ 알루미늄 파우더(ALC용)

1) 기포콘크리트 시공 용도

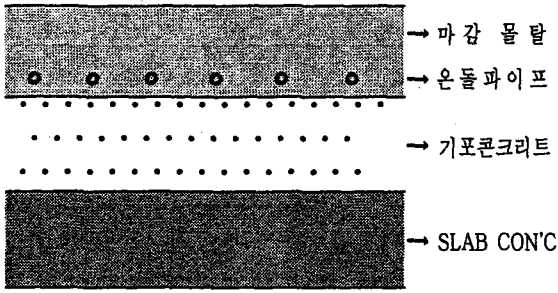
- ㉠ 온돌바닥과 아파트 실내바닥

<그림 1>에서 보는 바와 같이 국내 기포콘크리트는 약 90% 이상이 아파트 실내바닥의 단열, 방음과 방진같은 목적으로 시공하고 있으며, 제

시험항목과 관련규격

<표 1>

시험항목	규격	비고
비중	KS L 5110	전자비중계 이용
입도분석	KS L 5117 KS L 5112	Air jet sieve 이용
Flow		5×10cm 원통 이용
단위용적중량	KS L 5220	1ℓ 용기 이용
포이액울		5ℓ 용기 이용
밀도	KS M 3809	10×20cm 공시체 이용
압축강도	KS F 2701	10×20cm 공시체 이용
열전도율	KS L 9016	평판 비교법



〈그림 1〉 온돌바닥과 아파트 실내바닥 시공보기

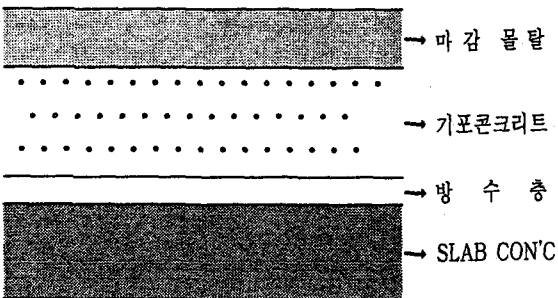
품 규격은 시멘트를 320kg/m^3 을 적용할 때 압축강도가 8kgf/cm^2 이상, 겉보기 비중 400kg/m^3 이하 정도로 규정하고 있는 추세이다. (보기: 주택공사 경량 기포콘크리트 시방서)

⑥ 지하실

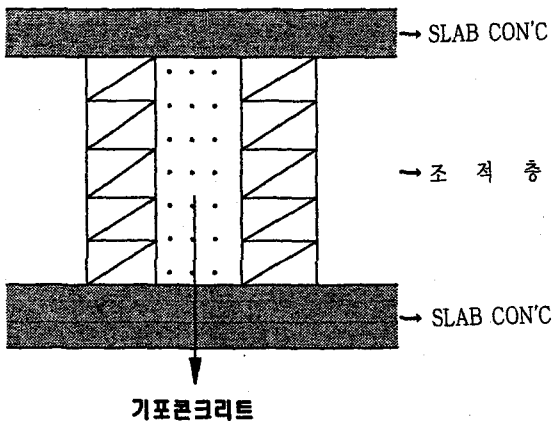
〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 지하실의 경우는 방수층 위에 타설하여 습기차단과 수분흡수를 목적으로 시공하고 있다.

⑦ 건물벽면

〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 건물벽면의 단열시공은 벽면에서 약 5cm 정도 띄워 조적한 뒤,



〈그림 2〉 지하실 시공보기



〈그림 3〉 건물벽면 시공보기

그 사이에 기포콘크리트를 주입하는데 시공이 간편하고 벽면과 조적면 사이의 접착이 좋아 벽면 자체의 내구력은 물론 습기차단, 방음과 단열효과를 동시에 얻을 수 있다. 이때의 압축강도는 $8\sim 10\text{kgf/cm}^2$ 정도이다.

⑧ 건물옥상

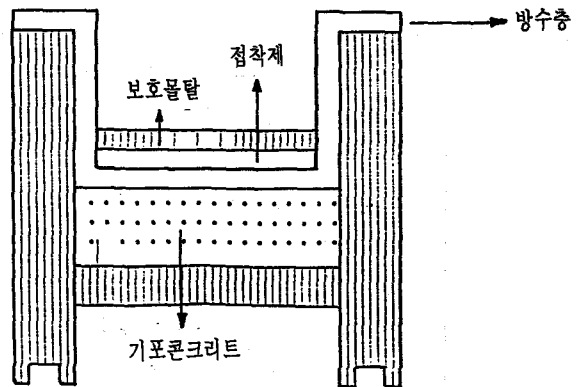
〈그림 4〉에서 보는 바와 같이 건물 옥상은 방수층 밑에 시공되며 단열, 습기차단과 방음효과를 목적으로 시공한다.

⑨ 빌딩 주위 메꿈

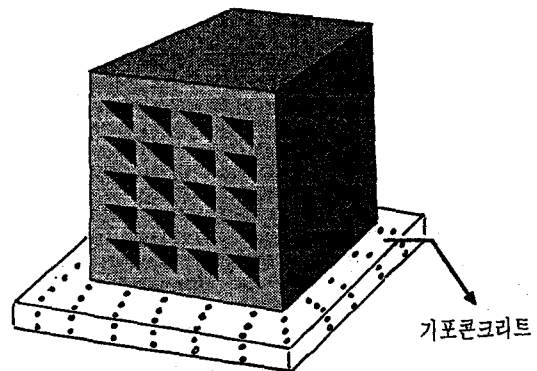
〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 건물을 완공한 뒤 건물주위를 되메울 때 일정두께의 경량 기포콘크리트로 시공하며 시공목적은 건물의 지하부 방수층 보호, 구조물의 안정감과 수분의 침투를 막아줌으로써 건물의 수명연장을 유도한다.

⑩ 터널 그라우팅

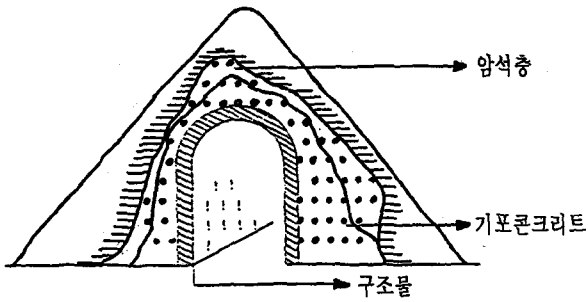
〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 터널 그라우팅 시공은 암벽과 콘크리트벽 사이의 공간을 메꾸어 넓은 면적에 균일한 하중을 받도록 유도하며 일



〈그림 4〉 건물옥상 시공보기



〈그림 5〉 빌딩주위 메꿈 시공보기



<그림 6> 터널 그라우팅 시공보기

중의 패드(Pad) 역할을 하도록 한다. 이때의 경량 기포콘크리트의 품질은 압축강도가 8kgf/cm² 이상을 필요로 한다.

⑧ 2차제품

시멘트를 이용한 경량 기포콘크리트는 톱질이나 드릴을 사용하여 작업하기가 쉬우므로 여러 용도로 시공할 수 있다. 따라서 선진국에서는 2차제품을 생산하여 경량 단열 기포콘크리트, P.C주택, 블럭, 벽돌, 판넬 따위에 폭넓게 적용하고 있다.

2) 기포제 특성

<표 2>는 기포제 종류와 제조회사에 따라 물리 특성을 측정한 결과이며, 기포제 종류는 식물성, 동물성과 고분자계 기포제로 구분하여 시험하였다.

① 비중은 식물성과 고분자 기포제가 1.00~1.05 정도인 반면 동물성 기포제는 1.18~1.20

정도로 높게 나타났다. 이는 동물성 기포제가 고형분 함량이 높기 때문이다.

② 기포제 점도는 제조회사에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 G사의 식물성 기포제와 F사의 고분자 기포제(동절기와 하절기) 점도가 가장 높게 나타났다. 기포제 점도가 높을 경우 기포콘크리트에 영향을 미치는지 확인한 결과 고분자계는 작업성이 떨어졌으나 G사의 식물성 기포제는 작업성에 큰 영향을 주지 않았다. 이는 기포제가 가지고 있는 계면활성 특성이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

③ pH는 D사의 식물성 기포제를 제외하고 모두 중성에 가깝고, 기포제가 알칼리성이면 기포균은 연질로서 소포율이 높으며, 산성에 가까울수록 기포균이 각질로 발포되어 소포율은 적어지나 기포콘크리트의 중성화를 촉진시켜 강도저하 같은 품질저하 원인이 된다. 따라서 기포제는 중성(pH=7)에 가까운 제품을 쓰는 것이 좋다.

④ 기포균의 단위용적중량은 기포액을 단위수량의 2%로 희석한 뒤 발포 공기압을 4.5kgf/cm²로 하여 시험한 결과, D사 기포제(동물성 단백질계)의 단위용적중량이 가장 높게 나타났다. 이는 기포제의 비중과 고형분이 높은 원인도 있지만 발포가 충분히 되지 않았기 때문이며, 같은 용량의 기포균을 형성하기 위해서는 기포제 소비량이 증가할 것으로 생각된다.

3. 시험결과

3.1 기포균의 포이액율(기포균의 소포율)

<그림 7>은 기포제 원재료 종류별 기포균의 시간경과에 따른 포이액율 시험결과이며, 기포균의 포이액율은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{포이액율(wt\%)} = \frac{\text{초기 기포균의 중량} - \text{시간 경과 후 기포균의 중량}}{\text{초기 기포균의 중량}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

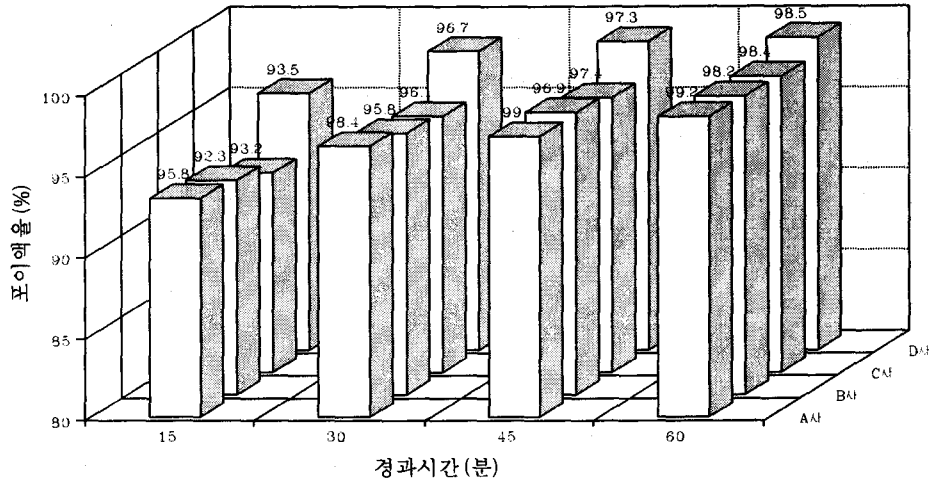
(※ 조건 : 기포제 희석율 : 단위수량의 2wt%, 발포압력 4.5kgf/cm², 온도 25°C, 습도 40%)

<그림 7>에서 보는 바와 같이 식물성 기포제나 고분자 기포제는 15분이 지난 뒤부터 포이액율이 높게 나타났으며 60분이 지난 뒤, 90wt% 이상의

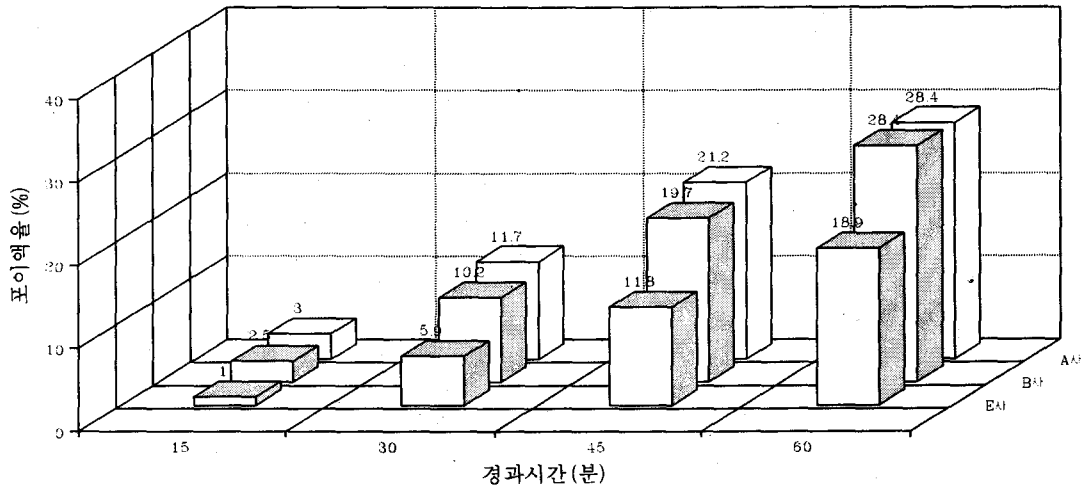
기포제 종류와 제조회사별 물리특성

<표 2>

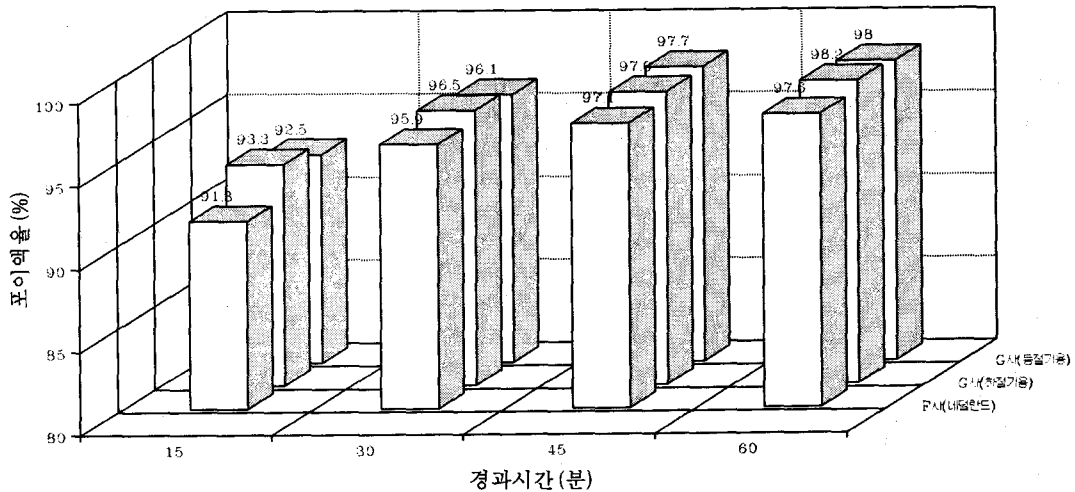
구 분		비중	점도 (cP)	고형분 (%)	pH	기 포 균 단위용적중량 (kg/m ³)
종 류	제 조 회 사					
식물성	A사	1.02	46.8	16.6	8.49	40.0
	B사	1.04	31.4	18.4	3.03	47.4
	C사	1.04	23.9	18.4	6.53	42.1
	D사	1.06	2286	30.2	7.08	58.4
동물성	A사	1.18	35.5	37.1	5.92	50.4
	B사	1.20	57.7	40.9	6.51	85.8
	E사	1.18	37.3	39.1	6.29	54.1
고분자	F사(동절기)	1.04	2200	21.8	5.63	44.8
	F사(하절기)	1.04	948.7	22.4	7.56	39.1
	G사(네덜란드)	1.06	45.7	26.7	7.20	34.6



A. 식물성 기포제



B. 동물성 기포제



C. 고분자 기포제

<그림 7> 기포제 원재료 종류별 기포군의 포이액울

기포콘크리트 배합비(1m³ 기준)

<표 3> (단위 : kg)

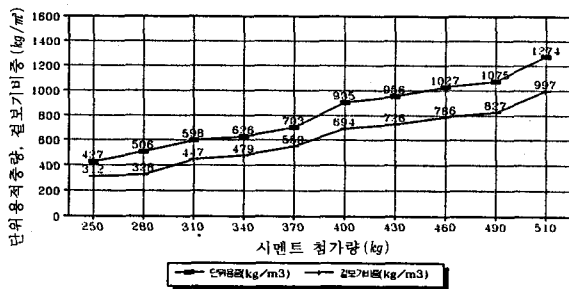
원재료		No.									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
슬러리	Cement	250	280	310	340	370	400	430	460	490	510
	단위수량	125	140	155	170	185	200	215	230	245	255

포이액율을 나타냈다. 반면, 동물성 기포제는 15분이 지난 뒤부터 60분까지 30wt% 미만의 낮은 포이액율을 나타내고 있는데 이는 기포군의 계면활성 특성으로 나타난 결과이다. 동물성 기포군은 각질로 응집력이 큰 반면, 식물성과 고분자 기포군은 연질이며, 응집력보다는 약간의 분산력을 갖고 있어 높은 포이액율을 나타낸 것으로 추정된다.

3.2 기포콘크리트의 원재료와 사용량 변화에 따른 물성비교

1) 시멘트 사용량 변화에 따른 제반특성

단열과 방음을 목적으로 하는 주택 바닥용 기포콘크리트의 배합비는 타설 현장마다 약간의 차이는 있으나, 기존 기포제 제조업체에서 선정하여 사용하고 있는 배합은 대부분 시멘트 단독으로 사용량이 290~330kg(1m³ 기준) 정도이다. 현재 기포콘크리트로 쓰이고 있는 배합비를 참고로 시멘트 사용량 범위를 250kg에서 30kg씩 증가시켜 510kg까지 시험하였다. 이때 flow는 기포 레미탈 제품 flow를 기준하였으며, 현장 시험 결과, 평균 flow는 18~20cm 정도에서 작업이 원활하게 진행되므로 본 시험에서도 flow를 18~20cm로 하여 시험하였으며 기포제는 D사의 식물



<그림 8> 시멘트 사용량 변화에 따른 단위용적중량과 겉보기 비중

성 기포제를 사용하였다.

<그림 8~9>에서 보는 바와 같이 시멘트의 사용량이 증가함에 따라 제품의 단위용적중량이 증가하고 있는데 이는 슬러리와 기포군의 혼합비율에 따라 제품 물성도 크게 달라짐을 나타내는 것이다. 곧 슬러리가 차지하는 용적비율이 커져 기포군의 용적이 적어지면 겉보기 비중과 압축강도가 증가하고, 제품에 기공분포율이 적어지기 때문에 열전도율도 증가한다.

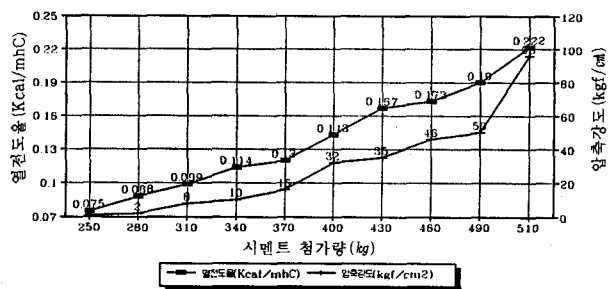
그러나 슬러리의 용적이 적어지고 기포군의 용적이 커지면 이와 반대의 현상이 나타난다. 따라서 시멘트 사용량이 증가할수록 제품 가운데 만들어진 기포군의 분포율이 점점 감소됨을 확인할 수 있었다.

한편, 국내 주택공사 시방서에서 제시한 바닥용 경량 기포콘크리트 규격은 시멘트 단독 사용량이 320kg/m³일 때 압축강도 8kgf/cm² 이상, 겉보기 비중 400kg/m³ 이하로 규정하고 있고, 네덜란드 Tillman사 기준으로는 시멘트 단독 사용량이 300kg/m³일 때 압축강도 6kgf/cm², 겉보기 비중 400kg/m³와 열전도율 값이 0.07kcal/mh°C로 규정하고 있다.

2) 모래 첨가량 변화에 따른 제반특성

<표 4> 배합은 시멘트 사용량을 줄이고 모래를 첨가, 슬러리 용적을 증가시켜 시험을 하였다. 이때 시멘트는 280kg(1m³ 기준)에 모래는 시멘트 중량의 25%, 50%, 75%, 100%, 150%씩 증가시켜 시험하였다.

<그림 10~11>에서 보는 바와 같이 시멘트 사용량 280kg(1m³ 기준)에 모래 첨가량을 늘리면 시험한 결과, 시멘트(280kg/m³)만 사용한 것



<그림 9> 시멘트 사용량 변화에 따른 압축강도와 열전도율

기포콘크리트 배합비

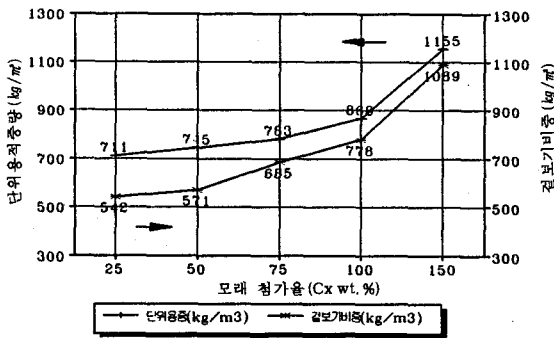
〈표 4〉 (단위 : kg)

원재료		No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15
슬러리	Cement	280				
	모래 (Cxwt. %)	25	50	75	100	150
	단위수량	174	184	189	183	207

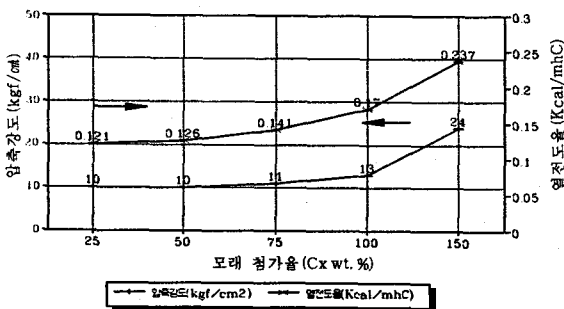
에 비해 모래가 증가될수록 겉보기 비중, 압축강도, 열전도율이 증가되었는데 이는 기포콘크리트 제조시 슬러리량 증가에 따른 기포균량이 상대적으로 감소하였기 때문으로 생각된다.

모래의 첨가량은 시멘트 사용량에 따라 달라지며 시멘트 사용량이 증가하면 모래 사용량을 증가해도 침하현상은 나타나지 않았다. 열전도율을 필요로 하지 않는 토목용의 경우 모래 첨가가 유리할 것으로 생각되며, 시멘트 중량의 50wt% 이내에서는 침하 현상없이 사용할 수 있었다.

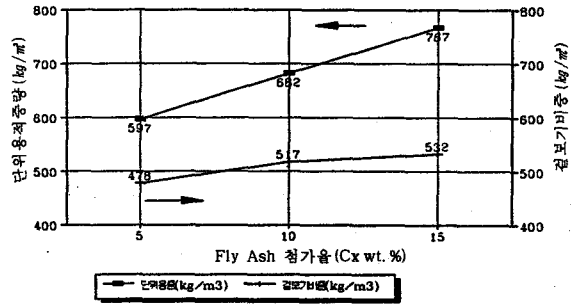
3) F/A, 석회석, 혼분, EP/Dust 첨가량 변화에 따른 제반특성



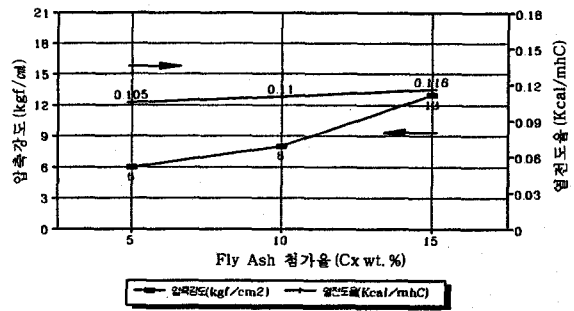
〈그림 10〉 모래 첨가량 변화에 따른 단위용적중량과 겉보기 비중



〈그림 11〉 모래 첨가량 변화에 따른 압축강도와 열전도율



〈그림 12〉 F/A 첨가량 변화에 따른 단위용적중량과 겉보기 비중



〈그림 13〉 F/A 첨가량 변화에 따른 압축강도와 열전도율

본 혼합재 첨가시험에서는 시멘트 사용량 280 kg/m³을 기준으로 설정하고 시험하였다. 한편, 기포콘크리트의 물리특성을 개선하려고 모래보다 입경이 작은 재료를 일부 첨가하는 방법으로 fly ash, 석회석, 혼분, EP/Dust를 사용하였고, 모래량은 앞서 시험한 모래 첨가량 변화 시험결과 가운데 안정된 값을 나타낸 시멘트 중량의 25wt%를 선정하였으며, fly ash, 석회석, 혼분, EP/Dust는 시멘트 중량에 5%, 10% 및 15%를 모래량에서 치환 첨가하였다.

〈그림 12~13〉에서 보는 바와 같이 단위시멘트량을 280kg으로 고정하고 모래 중량 가운데 F/A량을 치환 첨가하면서 시험한 결과, F/A가 증가됨으로 인한 미연 탄소분의 증가로 소포작용이 일어나 기포균의 혼합용적을 감소하기 때문에 기포미탈의 단위용적중량과 겉보기 비중이 증가하게 된다. 그러므로 F/A가 증가될수록 압축강도가 증가하며 재료분리에 따른 모래의 가라앉음 현상이 약간 발생된다.

시멘트와 모래만 첨가된 시험에 비해 모래를 일부 F/A로 대체할 경우 압축강도와 열전도율이

기포콘크리트 배합비

<표 5>

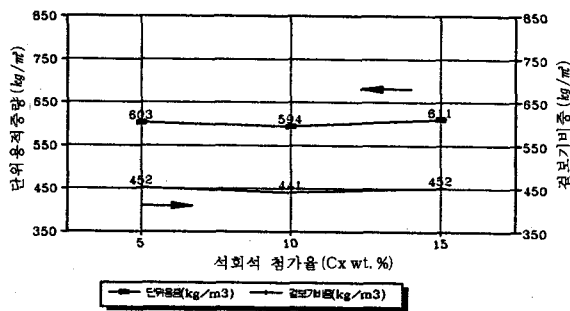
단위 : kg

원재료		No.		
		16	17	18
슬러리	Cement	280		
	모래 (Cxwt. %)	25		
	F/A, 석회석, 혼분, EP/D (Cxwt. %)	5	10	15

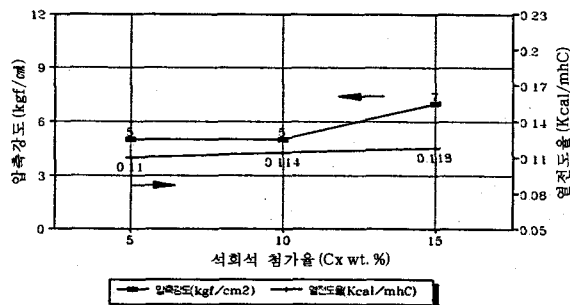
낮아지는 경향으로 나타나 F/A 치환 첨가시 열전도율에서는 유리하게 작용하나 압축강도 측면에서는 불리함을 알 수 있다.

4) 석회석 첨가량 변화에 따른 제반특성

<그림 14~15>에서 보는 바와 같이 단위시멘트량을 280kg으로 고정, 모래 중량 가운데 석회석량을 치환 첨가하면서 시험한 결과, 석회석 첨가량 5%에서는 F/A와 비슷한 경향을 보였고 석회석 첨가량 10%, 15%에서는 F/A 첨가보다 단위용적중량과 겉보기 비중, 압축강도가 낮게 나타났다. 이는 F/A보다 석회석이 소포율에 영향이



<그림 14> 석회석 첨가량 변화에 따른 단위용적중량과 겉보기 비중

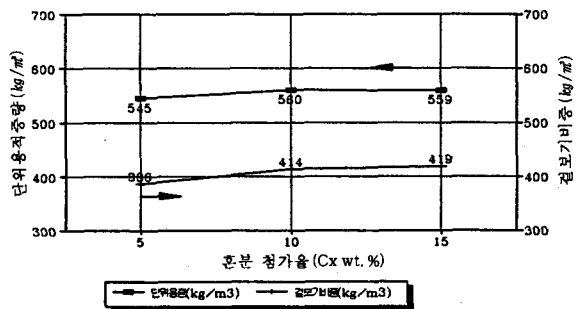


<그림 15> 석회석 첨가량 변화에 따른 압축강도와 열전도율

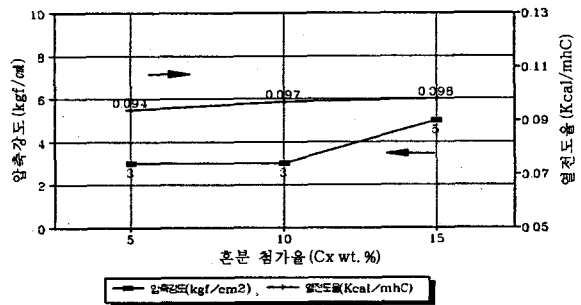
적음을 나타내고 있다.

5) 혼분 첨가량 변화에 따른 제반특성

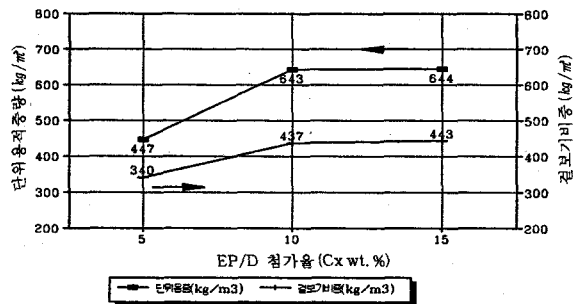
<그림 16~17>에서 보는 바와 같이 혼분 첨가량이 증가됨으로 단위용적중량, 겉보기 비중과 압축강도가 증가하는 경향이며, F/A와 석회석을 첨가할 때보다 겉보기 비중, 열전도율과 압축강도가 감소하였기 때문에 압축강도보다는 열전도율을 중요시하는 곳에 적용하면 유리할 것으로 생각된다.



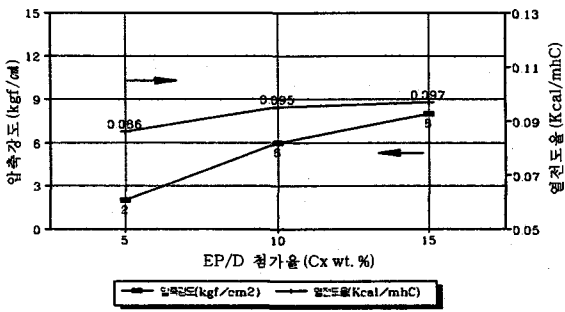
<그림 16> 혼분 첨가량 변화에 따른 단위용적중량과 겉보기 비중



<그림 17> 혼분 첨가량 변화에 따른 압축강도와 열전도율



<그림 18> EP/Dust 첨가량 변화에 따른 단위용적중량과 겉보기 비중



〈그림 19〉 EP/Dust 첨가량 변화에 따른 압축강도와 열전도율

6) EP/Dust 첨가량 변화에 따른 제반특성

〈그림 18~19〉에서 보는 바와 같이 EP/Dust 첨가량이 증가함에 따라 단위용적중량, 겉보기 비중, 압축강도와 열전도율이 증가하는 경향이며, F/A와 비슷한 물리특성으로 나타났다.

4. 결론

4.1 기포제 물성비교

① 기포제는 제조업체별 물성 차이보다는 기포제 제조 Lot별 품질 차이가 더 크기 때문에 시공업자가 현장에서 제품을 입수할 때, pH(6.5~7.5)와 기포군의 포이액율(10% 미만)을 확인한 뒤 사용해야 기포콘크리트 제조시 품질에 영향을 주지 않을 것이다.

② 기포제 원재료 종류별 기포군의 포이액율 시험결과, 식물성과 고분자 기포제는 60분 경과 후 98wt% 이상의 포이액율을 나타냈고, 동물성 기포제는 30wt% 미만으로 가장 좋은 포이액율을 나타냈다.

4.2 기포콘크리트의 원재료 변화에 따른 물성비교

① 시멘트 첨가량 변화에 따른 기포콘크리트의

특성시험은 시멘트 단독 사용량을 250~510kg (1m³ 기준)까지 시험한 결과, 시멘트 사용량 280~310kg (1m³ 기준)이 단열과 방음을 목적으로 하는 바닥용 기포콘크리트에 적합한 경향으로 나타났다.

② 모래 첨가량 변화시험은 시멘트 중량의 25~150% (Cxwt. %)까지 시험한 결과, 적정사용량 25~50% (Cxwt. %)가 좋은 경향으로 나타났으며 그 이상 첨가시 침하현상이 나타날 수 있다.

③ Fly ash 첨가량 변화 시험은 fly ash 사용량을 시멘트 중량에 5~15% (Cxwt. %)를 모래양에 치환 첨가한 결과, 5% (Cxwt. %)일 때 양호한 물성을 나타냈다.

④ 석회석, 혼분과 EP/Dust 첨가량 변화 시험은 시멘트 중량에 5~15% (Cxwt. %)를 모래양에 치환 첨가한 결과, 5% (Cxwt. %)일 때 양호한 물성을 나타냈으며 기포콘크리트용 원재료로서 사용가능성을 확인하였다.

〈참고 문헌〉

- Short, A. and Kinniburgh, W., "Lightweight Concrete", 3rd Ed., Applied Science Publishers Ltd., London, 1978, pp.1~14.
- Chandra, S. and Berntsson, L., "Determination of Mixture of Structural Lightweight Aggregate Concrete" Real World Concrete 1995, pp.209~219.
- 서치호, "경량 콘크리트의 상태에 관한 실험적 연구", 박사학위 논문, 한양대학교, 1985, pp. 72~87.
- Zhang, M.H. and Gjorv, O.E., "Mechanical Properties of High Strength Lightweight Concrete", ACI Material Journal, Vol. 88, No. 3, 1991, pp. 240~247.