

팽창성 혼화제를 이용한 온돌단열용 경량기포콘크리트의 제조 및 생산 시스템에 관한 연구

A Study on the Development of the Prefoamed Lightweight Cellular Concrete using Expansive Admixture for On-Dol system Floor

정 성 철* 김 범 수** 김 기 동***
Jung, Sung Cheol Kim, Beom Su Kim, Ki Dong

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve overall performance of prefoamed lightweight cellular concrete for On-Dol system floor. This study includes 4 sections as follows.

- ① Analysis of the structural characteristics of On-Dol System focusing on the lightweight cellular concrete insulation layer.
- ② Establishment of the mixing design equations.
- ③ Development of some admixtures used with foaming agent.
- ④ Improvement of the equipment for onsite production.

This study has proven that, compared with the current existing one, the newly developed lightweight cellular concrete has been reduced the usage of cement by 20% and the cracks caused by cement drying shrinkage up to 80% but has shown the increased compression strength by 20% at 7 days curing period. The volume contraction of freshly prepared cellular concrete by the loss of foam was hardly found in newly developed lightweight cellular concrete.

1. 서론

경량기포콘크리트는 단열성, 경량성, 방음성, 경제성, 시공의 용이함 등의 여러 가지 특성으로 선진국에서는 건축, 토목 분야의 단열재, 부정형 공동의 충전재, 경량성토재, 연약지반 보강재 등의 다양한 용도로 사용되고 있는 우수한 건축 재료이다.

그러나 국내에서는 온돌바닥구조의 단열 및 채움재로만 주로 이용되고 있으며 그나마도 기술의 낙후성으로 인하여 타설 후 체적감소, 강도발현 미흡, 과도한 균열발생 등의 문제가 빈발하여 난방배관설치, 온돌미장 등의 관련 공정에 많은 하자를 유발시키고 있다. 또 낙후된 장비의 사용으로 품질이 불안정하고 재료의 초과 투입으로 원가 관리가 어려운 점등의 문제점도 발생하고 있다.

* 정희원, (주)대우건설 건축기술팀 차장

** (주)대우건설 건축기술팀 대리

*** 정희원, (주)대우건설 건축본부장

특히 당사를 중심으로 최근 그 적용 범위가 확대되고 있는 공동주택 상하층간 충격소음 방지 시스템의 경우 그림 1과 같은 뜬바닥 구조를 채택하는 것이 일반적인데, 이 경우 탄성재인 충격소음 방지재 위에 경량기포콘크리트를 시공하게 됨으로써 기존의 경량기포콘크리트의 문제점들이 더욱 증폭되는 등, 기술 개선이 시급한 상황이었다.

본 연구에서는 이와 같은 배경 아래 기존 온돌단열용 경량기포콘크리트의 문제점들을 구조, 배합설계, 재료, 장비의 측면에서 검토·개선하고, 나아가 우수한 채움재로서 경량기포콘크리트의 성능을 극대화하여 각종 건축, 토목 공사에 경제적이고 쉽게 적용하려는 목적으로 『Multi-Foam Concrete[®]』를 개발·상품화하였다.

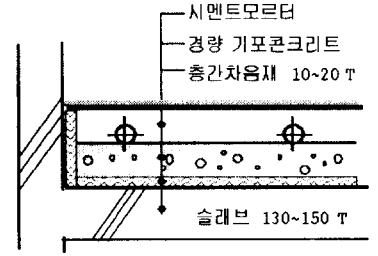


그림 1 충격소음 방지재 적용 온돌바닥구조

2. 기존 경량기포콘크리트의 문제점

국내 대형건설회사인 D사와 L사의 공동주택 현장 15개를 기준으로 조사한 결과에 의하면 기존의 국내에서 시공되고 있는 온돌바닥용 경량기포콘크리트는 대략 표 1과 같은 문제점을 지니고 있는 것으로 나타났다. 한편 기존 온돌바닥용 경량기포콘크리트의 배합설계 및 물성은 다음의 표 2와 같은 범위에서 시공되고 있는 것으로 나타났다.

표 1 기존 경량 기포콘크리트의 문제점

품질저하 요인	발생되는 문제점	품질에 미치는 영향
경험에 의한 배합설계	기포의 소포에 의한 타설 후 체적감소	- 단열성능 저하, 경제성 저하 - 불균등 수축에 따른 압축강도, 내균열저항 저하 - 상부 온돌미장모르타의 추가 투입 빈발
재료 개발 미흡	강도발현 미흡	- 편칭파괴, 지압파괴, 인장에 의한 균열 발생 • 난방배관 고정 불량, 상부 온돌미장의 소성수축, 불균등수축 유도 • 충격소음방지재 위에 시공시 파괴 및 균열 발생이 더 늘어남 - 난방배관 따라 상부 온돌미장층에 침강균열 발생 - 조기강도 발현 부족으로 후속 공사 지연됨 - 강도를 높이기 위해 과량의 시멘트 추가 사용
낙후된 장비	건조수축균열 발생	- 균열이나 파괴가 일어나기 쉬운 조건이 됨 - 시공 품질에 대한 신뢰도 떨어뜨리고 감리 및 발주처와 마찰 발생
	높은 흡수율 및 투수성	- 온돌미장모르타 소성수축 균열 및 과다 투입의 주요 원인

표 2 기존 경량기포콘크리트의 배합 및 물성

	재료 및 항목	현장 실시 내용	재료 및 항목	현장 실시 내용
배합설계	시멘트(kg/m ³)	300~400	물/시멘트비(%)	55~70
	기포제(ℓ/m ³)	1.2 이상 (40~55배 희석사용)	스티로폼 치환율(%)	0~20%
물성	7일 압축강도(kg/cm ²) ¹⁾	3~10	소포 깊이(mm) ²⁾	20~42
	균열발생율(m/m) ³⁾	0.433~0.577	평균 균열발생 시기	10일 (31평형 60T)

- (1) 경량기포콘크리트는 시공현장에서 채취
- (2) 소포깊이는 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 물드를 제작하여 초결 후 소포된 깊이를 측정함
- (3) 균열발생율은 1세대 단위면적당 발생한 양이며 충전차음재를 사용하지 않은 경우임

3. 기술 개요

3.1 온돌구조의 구조 거동 해석

기존 경량기포콘크리트의 성능을 향상시키기 위한 기술 개발의 첫 단계로 온돌바닥구조에서 경량기포콘크리트 층에 요구되는 구조적 성능을 알기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 이를 위해 R.C 슬래브, 충전 차음재, 경량기포콘크리트, 모르타르의 네 개 층으로 이루어진 복합구조를 경계면 요소와 Solid 요소를 사용하여 분석하였으며, 충전차음재가 생략된 일반적인 온돌바닥구조의 경우에 대해서도 경량기포콘크리트 층에 작용하는 응력에 대해 해석을 실시하였다.

이 해석 결과에 의하면 경량기포콘크리트 층에 가장 불리하게 작용하는 조건은 경량기포콘크리트를 타설한 후 그 위에서 난방배관 설치 등의 작업을 할 때 발생하는 동하중에 의한 지압응력이다. 이 때 지압에 의한 파괴가 일어나지 않는 후속 작업 개시 시점은 경량기포콘크리트가 약 $4.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압축강도를 발현하는 시점 이후가 되어야 한다고 판단하였다.¹⁾

표 3 경량기포콘크리트층에 작용하는 응력

검토항목	재하조건	작용하는 응력
등분포하중	등분포활하중($250\text{kg}/\text{m}^2$) + 온돌구조자중	허용인장응력의 60% 이하
집중하중	$5.0\text{kg}/\text{cm}^2$	인장강도 $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하
편칭전단응력	$5.0\text{kg}/\text{cm}^2$	$2.25\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하(압축강도 $4.19\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하)
지압응력	$5.0\text{kg}/\text{cm}^2$	$5.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하 (압축강도 $4.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하)

3.2 배합설계 프로그램의 개발

다양한 성능의 경량기포콘크리트를 제조하기 위해서는 그 성능을 예측할 수 있는 배합설계 프로그램의 개발이 필수적이라 할 수 있다. 이를 위해 본 기술에서는 ASTM C 796-87a "Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam"에서 제안된 배합설계 개념을 기본으로 하여 기포 슬러리(굳지 않은 경량기포콘크리트)의 단위체적중량, 물시멘트비, 기포의 비중, 코팅 스티로폼비드의 혼입율 등을 기본 변수로 하는 그림 2와 같은 기본 모델을 설정하고 이를 바탕으로 경량기포콘크리트의 배합설계식을 도출하였다.²⁾

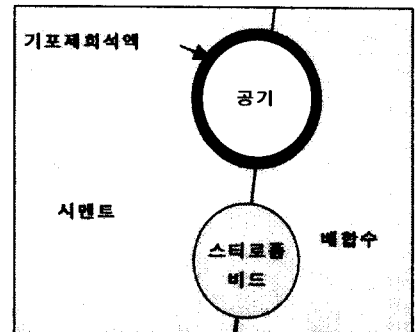


그림 2 경량기포콘크리트 배합설계 모델

3.3 팽창성 혼화제(Add-Foam[®])의 개발

기존 경량기포콘크리트에서 나타나는 기포의 소포에 의한 체적감소, 건조수축 및 흡수율 과다와 같은 문제들은 경량기포콘크리트를 구성하는 재료 자체의 특성에 기인하여 발생하는 경우가 많아 배합 설계나 장비 등의 물리적 요소만으로는 극복할 수 없는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 모르터에 적용되던 팽창성 혼화제의 개념을 도입한 액상 혼화제를 개발하였다.

본 혼화제는 골재가 없어 높은 건조수축율을 나타내는 기존 경량기포콘크리트의 문제점을 해결하기 위해 주요한 재료로 $Al_2(SO_4)_3$ 를 사용하였다. 또 발포된 기포의 안정성을 도모하는 동시에 그 크기를 제한할 수 있는 보호콜로이드 및 Hydro-phobbing agent 등을 재료로 하여 조강성, 건조수축 보상, 소포율 조절, 흡수율 조절 등의 기능을 발휘하도록 하였다.

동일한 단위체적중량의 ($D_{ex} = 400kg/m^3$) 기포슬러리가 경화되면서 발현하는 강도를 본 혼화제를 적용한 경우와 기존 경량기포콘크리트를 비교한 결과는 그림 3, 그림4와 같으며 혼화제를 적용한 경우 후속 작업 개시 시점인 5~10일 사이에서 15% 정도의 조강성이 발휘되고 있음을 볼 수 있다.

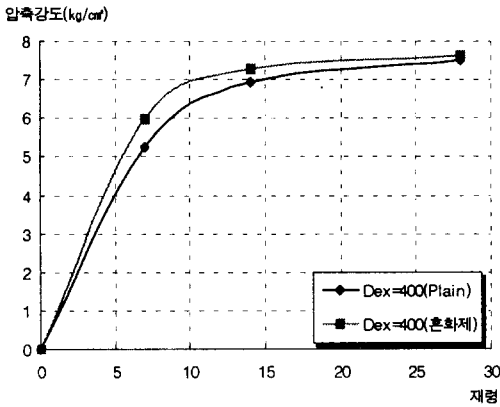


그림 3 재령에 따른 압축강도 비교

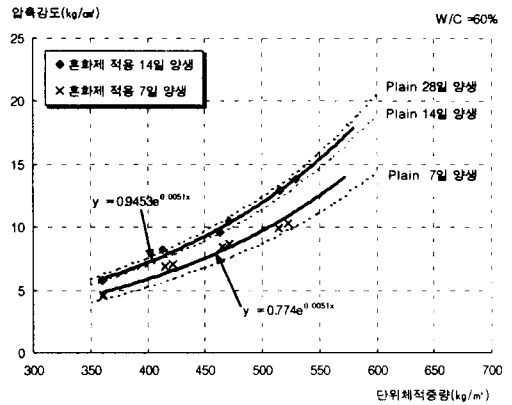


그림 4 단위체적중량에 따른 압축강도 비교

그림 5와 그림 6은 재령 28일의 경량기포콘크리트에서 본 혼화제를 적용한 경우와 적용하지 않은 우의 셀 구조(X50)와 수화조직(X4,000)에 대한 SEM 사진이다. 개발된 혼화제를 적용한 경량기포콘크리트의 셀 조직은 그 크기가 균일하고 모양이 일정하여 응력을 분산시키기 쉬운 구조로 되어 있음을 알 수 있다. 또 셀과 셀 사이의 시멘트 수화조직을 찍은 그림 5에서는 에트링가이트(Ettringite)가 생성되어 있음을 확인할 수 있는데 28일이 지난 시점에서 여전히 에트링가이트가 남아 있는 것은 기포제에 의한 지연 작용 등에 의한 것으로 판단된다.

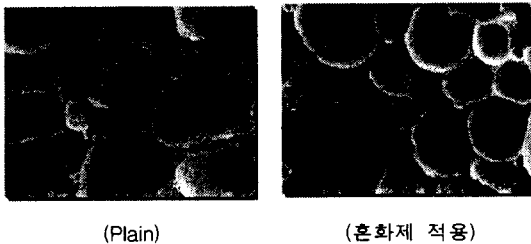


그림 5 경량기포콘크리트의셀(Cell) 구조 비교

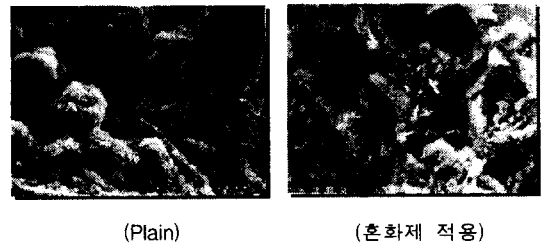


그림 6 셀(Cell) 사이의 수화조직 비교

에트링가이트 생성에 의한 팽창성이 경량기포 콘크리트의 건조수축균열 방지에 어느 정도 효과가 있는지를 판단하기 위하여 당사의 천안 지역 공동주택 32평형 300여 세대에 적용하여 균열발생 결과를 조사한 결과를 비교한 데이터는 표 4와 같다.

표 4 건조수축균열 발생률 조사

제품	최초 균열 발생	45일 경과 균열 길이
기존	타설 후 7~9일	38~41 m
혼화제 적용	타설 후 15~20일	8~10 m

주) 기포 슬러리의 단위체적중량은 450kg/m³, 물시멘트비는 60%를 기준으로 하였다.

한편 기포의 소포에 의한 경량기포콘크리트의 체적감소 문제는 지금까지는 간과되어 왔으나 후속 온돌미장모르타가 설계 물량 이상 과량 투입되게 하는 주요 원인이 된다는 점에서 볼 때 기존 경량기포콘크리트의 가장 큰 문제점 중의 하나로 지적될 수 있겠다. 개발된 혼화제는 기포의 소포 혹은 증포를 막기 위해 Foam Stabilizer와 계면장력을 조절하는 성분을 사용하여 기포의 사이즈가 작게 유지되면서도 쉽게 소포되지 않도록 하였다.

3.4 전용시공장비의 개발

경량기포콘크리트의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 단위체적중량이며 이는 경화체 내부의 공극량에 반비례한다.³⁾ 그러므로 경화체 내부의 공극은 기포에 의해 형성되는 것이므로 재료 배합시 투입된 기포의 양이 곧 공극량이 될 것이라 생각할 수도 있다.

그러나 실제 경량기포콘크리트를 생산하는 과정에서는 기포가 기타 다른 재료들과의 관계에 의해 소포(消泡)되거나 증포(增泡)되는 경우가 대부분이다. 따라서 배합설계에 의해 단순히 재료의 양을 계량 투입하는 것은 의미가 없으며 기포와 각 재료의 상관관계를 미리 알고 이를 보정하여 정밀하게 계량 투입할 수 있어야만 원하는 성능의 경량기포콘크리트를 자유롭게 생산할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 배합설계식과 혼화제를 통해 각 재료의 상관 관계를 파악하는 것과 동시에 이를 바탕으로 정밀한 성능제어가 가능하도록 그림 7과 같은 개념의 전용시공장비를 개발하였다. 본 전용시공장비의 기본 개념은 각 재료의 투입량을 정밀하게 조절하여 투입할 수 있도록 각종 펌프와 피더를 계량 및 조절 가능하도록 하여 배합설계 프로그램과 연동할 수 있도록 한 것이다.

이 장비를 통하여 물시멘트비 50~80%, 기포슬러리의 단위체적중량 300~700kg/m³의 범위 내에서 다양한 성능의 경량기포콘크리트를 용이하게 생산할 수 있으며 또한 비숙련 작업자들도 안정적인 품질을 유지할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 기존 온돌바닥용 경량기포콘크리트의 문제점을 진단하고 이에 대한 대책으로 경량기포콘크리트의 배합설계식 정립, 성능 보안을 위한 혼화제의 개발 및 배합설계식과 연동하는 전용시공장비의 개발 등을 통해 현장 생산용 경량기포콘크리트의 성능 개선에 대한 종합적인 대책을 마련하였다.

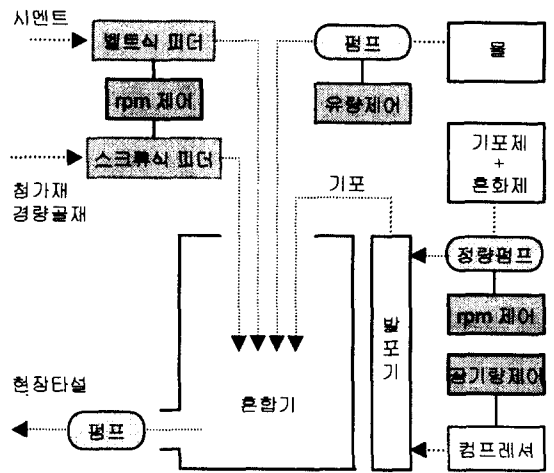


그림 7 전용시공장비의 개념도

이 연구 성과를 이용한 경량기포콘크리트를 시공하면 온돌바닥의 시공 품질을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 특히 상하층간 충격소음방지재가 설치되는 온돌바닥 구조에서 경량기포콘크리트와 관련하여 발생하는 문제들에 우수한 개선 효과를 기대할 수 있다.

본 기술에 의해 개선된 성능을 종합하여 정리하면 표 5와 같으며, 제조 및 시공단가는 기존 경량기포콘크리트의 약 95~98% 정도이므로 경제성도 양호한 것으로 판명되었다.

표 5 Multi-Foam Conc.의 성능 개선 사항

검토항목	기존 제품	Multi-Foam Conc.
시멘트 사용량	8.5포/m ³ 이상	7포/m ³ 내외
균열발생량 (32평형세대당)	40m 이상	10m 내외
압축강도(7일)	5kg/cm ² 이하	7kg/cm ² 내외
기포의 소포에 의한 체적감소	10% 이상	없음
몰탈의 소성수축 균열	빈 발	없음
품질 안정성	경험에 의함	정량적 조절

주) 단위체적중량 450kg/m³의 기포슬러리에 대한 비교

본 연구를 통하여 경량기포콘크리트의 성능을 다양하게 제어하고 안정적으로 생산하는 것을 가능하게 함으로써 지금까지 국내에서 경량기포콘크리트가 온돌바닥용 채움 및 단열재 등의 비교적 단순한 분야에만 적용되던 것을 벗어나 토목, 건축 분야의 채움, 기반성토, 연약지반 개량 등의 다양한 분야에 사용될 수 있는 계기가 되기를 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) 대우건설, 『온돌단열용 경량기포콘크리트의 구조거동에 관한 해석적 연구』, 1998.11; 여기에서 작업자의 난방배관 설치작업을 지면반력계 위에서 시물레이션 하여 최대 동하중을 5.0kg/cm²으로 보고 해석을 실시한 결과임.
- 2) 본 배합설계식에 대한 구체적인 내용은 정성철 외, 『온돌단열용 경량기포콘크리트의 배합설계에 관한 연구』, 대한건축학회논문집 구조계, 1998. 12. 또는 대우건설, 『온돌구조용 경량기포콘크리트의 재료 개발 및 생산시스템 개선에 관한 연구』, 1998. 10.을 참조 바람
- 3) 건설교통부, 『경량기포 콘크리트의 재료 개발에 관한 연구』, 1997, pp.23~35