

고강도콘크리트용 내화피복재로 활용하기 위한 경량모르타르의 역학적 성상

Study on the Mechanical Properties of Lightweight Mortar for Fire Protection Covering Material in High Strength Concrete

임서형 · 유석형[†] · 문종욱*

Seo-Hyung Lim · Suk-Hyung Yoo[†] · Jong-Woog Moon*

경남과학기술대학교 건축공학과, *한국국제대학교 소방방재학과
(2011. 5. 23. 접수/2011. 9. 27. 수정/2011. 10. 7. 채택)

요 약

고강도 콘크리트는 화재 시 고온에 노출되어 폭발현상이 발생된다. 폭발은 철근노출과 함께 구조부재의 단면을 감소시키며, 이로 인하여 구조적 거동에 심각한 문제를 발생시킨다. 본 연구의 목적은 이러한 고강도 콘크리트의 내화피복재로 활용하기 것으로 퍼라이트와 폴리프로필렌 섬유로 경량모르타르를 제조하여 그 역학적 성상을 파악하는데 있다. 이에 따른 실험인자로는 물시멘트비, 골재시멘트비, 폴리프로필렌 섬유 첨가량이다. 연구결과 퍼라이트와 폴리프로필렌 섬유를 첨가함으로써 모르타르의 공극구조를 변화시킬 수 있었으며, 단위중량을 감소시킬 수 있었다. 또한, 고강도 콘크리트의 내화피복재로서 경량모르타르를 사용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

ABSTRACT

High strength concrete is the occurrence of explosive spalling associated with high temperature such as a fire. The spalling causes the sever reduction of the cross sectional area with the exposure of the reinforcing steel, which originates a problem in the structural behaviour. The purpose of this study is to investigate the mechanical properties of lightweight mortar using perlite and polypropylene fiber for fire protection covering material. For this purpose, selected test variables were the ratio of water to cement, the ratio of cement to perlite, contents of polypropylene fiber. As a result of this study, it has been found that addition of perlite and polypropylene fiber to mortar modifies its pore structure and reduces its density. And it has been found that a new lightweight mortar can be used in the fire protection covering material.

Key words : Spalling, Fire, Perlite, Polypropylene fiber, Lightweight mortar

1. 서 론

최근의 건축 및 토목 구조물은 초고층화, 초대형화의 추세로 인하여 고강도 콘크리트의 사용이 점차 증가하고 있으며, 국내에서는 최근 60층 정도 규모의 고층주거 복합기능 시설을 비롯한 초고층 건축물에 고강도 콘크리트가 활발히 적용되고 있다. 그러나 고강도 철근콘크리트 부재는 화재 시 폭발(spalling) 현상과 함께 부재가 취성적으로 붕괴되는 위험성이 있는 것으로

보고되면서 사회적으로 불안감이 조성된바 있다. 따라서 국토해양부에서 고강도 콘크리트 부재의 내화성능 관리기준을 고시하면서 향후 신축되는 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트 구조물은 반드시 폭발에 대한 검토와 대책을 마련하도록 하고 있다.¹⁾

고강도 콘크리트의 폭발을 저감 또는 억제시키는 방법으로는 일반적으로 4가지 방안을 들 수 있다. 첫째, 표층부의 온도상승 및 구배를 저감시킬 목적으로 부재에 내화도료를 도포하거나 내화모르타르 또는 내화보드를 피복하는 방법이다.²⁻⁵⁾ 둘째, 콘크리트에 합성섬유를 혼입하여 화재 시 콘크리트의 수증기압 저감과 내부수분

[†]E-mail: piter31@gntech.ac.kr

이동을 원활하게 하는 방법,⁶⁻⁸⁾ 셋째 부재에 강관을 부착하거나 메탈라스 등을 배치하여 폭렬에 의한 콘크리트의 비산을 방지하는 방법 마지막으로 부재의 코어부분은 고강도콘크리트를 사용하고 피복부분만을 폭렬이 발생하지 않는 재료로 치환하여 폭렬을 제어하는 방법이다.

이들 방법 중에서 신축 되는 콘크리트 구조물의 가장 일반적인 폭렬저감 방안은 주로 길이 19 mm의 폴리프로필렌 섬유(이하, PP섬유)를 콘크리트 타설시 혼입하여 화재 시 내부 수증기압을 낮추거나 그 배출을 원활히 하는 것이며, 국내에서도 이에 대한 상당한 연구가 진행되어 왔다.^{9,10)} 그러나 이미 축조된 고강도콘크리트 건축물은 내화성능 확보를 위한 제도적 대책뿐 아니라 기초적인 연구조차 매우 부족한 실정으로서 이에 대한 연구가 시급한 상황이다. 이에 대한 대책의 하나는 내화모르타르를 고강도 콘크리트 부재에 피복하여 표층부의 온도상승 및 온도구배를 저감시키는 것이다.

따라서, 본 연구에서는 길이 3 mm의 PP섬유와 경량골재인 퍼라이트를 사용한 경량모르타르를 내화피복재료 활용하기 위한 기초 연구로서 경량모르타르의 배합, 시공성, 압축강도, 폭렬유무 등을 파악하여 궁극적으로 기존 고강도 콘크리트 부재의 내화성능을 향상시키고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 개요

모르타르에 첨가한 PP섬유는 화재시 160 °C 내외에서 용해되고 340 °C 근처에서 기화되므로 무기질 다공성 재료인 퍼라이트와 함께 새로운 공극구조를 형성하게 되며, 이러한 공극이 화재시 모르타르의 열적 성능을 향상시킬 것으로 기대된다. 따라서 이미 축조된 고강도 콘크리트 부재에 피복하면 표면부의 온도상승 및 온도구배를 저감시켜 폭렬을 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 연구 개념에 따른 실험인자는 PP섬유 첨가율, 물시멘트비 그리고 골재 시멘트비이며, 측정 항목은 단위중량, 압축강도, 중량감소율, 폭렬유무, 잔존압축강도율, 열전도율이다.

2.2 사용재료 및 배합

시멘트는 비중 3.15, 분말도 3302 cm²/g인 포틀랜드 시멘트 종을, 퍼라이트는 Table 1과 같이 비중 0.18, 흡수율 20%, 열전도율 0.03~0.06 W/m·k 그리고 피복재로서 미장마감을 고려하여 최대크기 2 mm의 것을 사용하였다. PP섬유는 Table 2와 같이 직경 0.04 mm, 길이 3 mm로 형상비 75의 것을 사용하였다.

콘크리트에 사용되는 PP섬유는 일반적으로 길이

Table 1. Physical Properties of Perlite

비중	흡수율 (%)	열전도율 (W/mk)	최대크기 (mm)	색상
0.18	20	0.03~0.06	2	백색

Table 2. Physical Properties of Polypropylene Fiber

형상비	길이 (mm)	직경 (mm)	밀도 (g/cm ³)	용해점 (°C)	기화점 (°C)
75	3	0.04	0.91	160	340



Figure 1. Polypropylene fiber.

19 mm의 것을 사용하지만 모르타르의 경우 시공성이 저하될 우려가 있고 또한 첨가량이 같을 경우 길이가 짧을수록 용융되면서 더 많은 공극을 형성할 수 있기 때문에 본 실험에서는 3 mm의 것을 사용하였다. 또한, 고성능감수제(이하, SP제)는 폴리카본산계 표준형을 사용하였다. 실험에 사용된 PP섬유는 Figure 1과 같다.

모르타르 배합은 기존연구^{11,12)} 및 예비실험을 통하여 혼합과 시공성 상태를 사전에 파악하였으며, 경량골재와 시멘트비(이하, s/c)는 1:0.15, 1:0.19, 1:0.24로, 모르타르 체적에서 경량골재가 차지하는 비율은 47%~57%로 각각 설정하였다. 시공성을 위한 모르타르의 반죽질기는 흐름시험의 플로우 값이 110 mm 정도가 되도록 설정하였다. 물시멘트비(이하, w/c)는 0.38, 0.45, 0.52로 하고, PP섬유의 사용량은 모르타르 체적의 0.3%, 0.6%, 0.9%로 변화시켰다. 이는 콘크리트에 사용되는 일반적인 섬유량에 비해 많은 양으로 화재 시 모르타르 내부에 다량의 공극을 형성하기 위한 것이다.

2.3 실험 방법

모르타르의 시험체는 KS L 5105에 따라 제작하였



Figure 2. Fire-resistance test.

으며, 압축강도는 재령 3, 7, 28일에 각각 측정하였다. 내화시험은 Figure 2와 같이 전기로에서 1,000 °C로 1 시간 동안 가열한 후 균열 유무 또는 폭발 유무를 각각 관찰하였다. 이 때 가열 전후의 중량과 압축강도로 중량감소율과 잔존압 축강도율을 각각 측정하였다. 열 전도율은 크기 300 × 300 × 30으로 시험체를 제작하여 K연구원에 의뢰하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

PP섬유 혼입율, w/c 및 s/c에 따른 모르타르의 단위 중량, 압축강도, 중량감소율, 폭발유무 등의 실험결과를 Table 3과 같다.

모르타르의 반죽질기를 맞추기 위한 SP제의 사용량은 PP섬유의 혼입율이 커질수록 많아지며 특히, 혼입율 0.9 %에서 SP제의 사용량이 2.5 %로 높아져 경량골

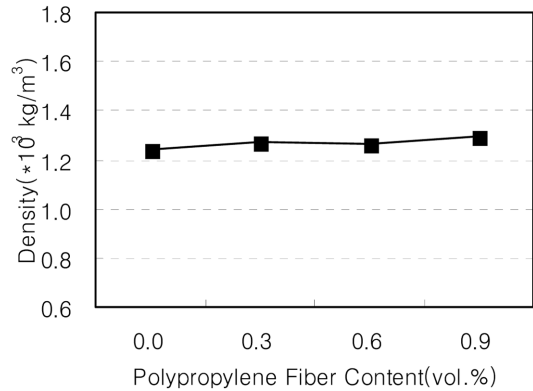


Figure 3. Variation of density versus polypropylene fiber content.

재의 사용과 더불어 시공성 확보에 주의할 필요가 있다. 퍼라이트와 PP섬유를 사용한 모르타르의 단위용적 중량은 Figure 3과 같이 1.2 t/m³ 정도이며, PP섬유의 혼입율에 따른 중량변화는 매우 작은 것으로 나타났으며 또한 보통골재를 사용한 모르타르의 2.1 t/m³보다 낮아 경량골재를 사용함으로써 다량의 공극을 확보한 것으로 나타났다.

w/c에 따른 모르타르의 압축강도는 재령 28일의 경우 Figure 4에서와 같이 w/c가 0.52에서 0.38로 낮아짐에 따라 각각 17 %, 11 %씩 증가하였다. 재령 3일, 7일의 경우에도 w/c가 낮아짐에 따라 비슷한 경향을 보이고 있다. 재령 3일의 압축강도는 재령 28일 압축강도의 64~70 %의 범위에 있으며, 재령 7일의 압축강도는 75~90 %의 범위에 있어 초기 재령에 강도가 발현됨을 알 수 있다.

Table 3. Mixture Proportions of Mortar and Results of Test

인자	수준	단위 수량 (kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)			SP제 (%)	압축강도(MPa)			열 전도율 (W/m · K)	단위 중량 (t/m ³)	중량 감소율 (%)	잔존 압축 강도율 (%)	폭렬 유무	비고
			시멘트	잔골재	PP 섬유		3일	7일	28일						
골재 시멘트 비	0.24	193	428	103	0	2.0	6.5	7.6	10.1	-	-	-	-	-	w/c = 0.45
	0.19	226	501	93	0	0.8	8.2	9.4	12.2	-	-	-	-	-	
	0.15	253	562	84	0	0.3	10.2	11.3	14.8	-	-	-	-	-	
물시멘트 비	0.52	205	394	102	0	1.0	6.0	7.2	8.6	-	1.24	-	-	-	s/c = 0.24
	0.38	178	469	103	0	1.8	7.7	10.1	11.2	0.24	1.28	30.6	26	무	
PP섬유 혼입율 (vol.%)	0.3	178	469	103	2.7	1.9	6.6	7.3	9.6	0.21	1.27	32.4	21	무	w/c = 0.38, s/c = 0.24
	0.6				5.4	2.1	7.0	8.8	10.4	0.20	1.29	32.5	22	무	
	0.9				8.1	2.5	6.7	8.5	11.4	0.22		33.4	22	무	

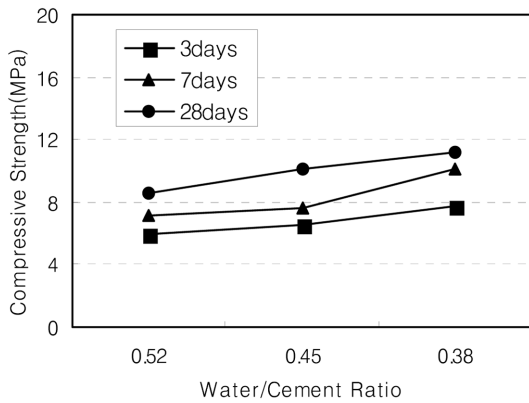


Figure 4. Variation of compressive strength versus water/cement ratio ($s/c = 0.24$).

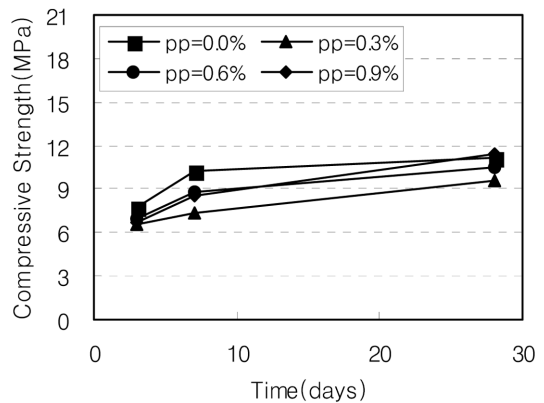


Figure 6. Gain of compressive strength with time ($w/c = 0.38, s/c = 0.24$).

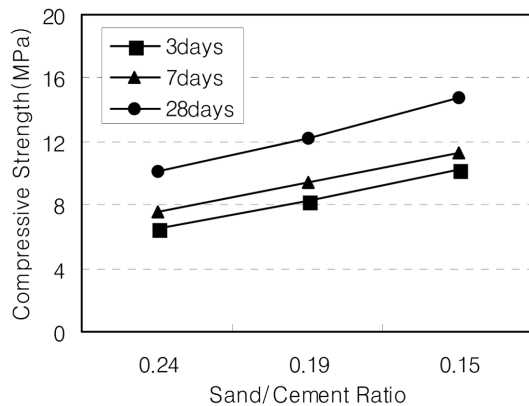


Figure 5. Variation of compressive strength versus sand/cement ratio ($w/c = 0.45$).

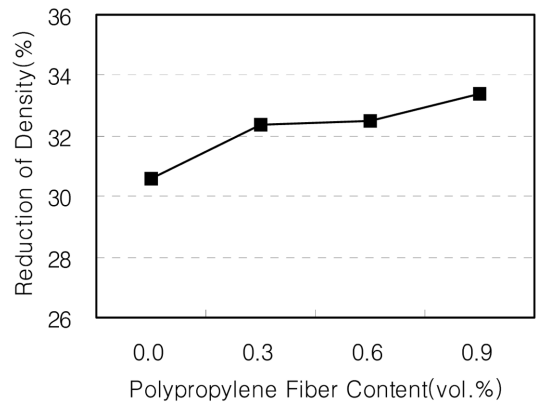


Figure 7. Variation of reduction of density versus polypropylene fiber content ($w/c = 0.38, s/c = 0.24$).

s/c 에 따른 모르타르의 압축강도는 재령 28일의 경우 Figure 5와 같이 s/c 가 0.24에서 0.15로 낮아짐에 따라 21%씩 각각 증가하였다. 재령 3일과 7일의 압축강도 역시 비슷한 경향을 보이고 있다.

재령 3일의 압축강도는 재령 28일 압축강도의 64~69%, 재령 7일의 압축강도는 재령 28일의 75~77%의 범위에 분포되어 있다.

PP섬유 혼입율에 따른 재령 28일의 압축강도는 Figure 6과 같이 9.6~11.4 MPa의 범위에 있으며, 혼입율이 많을수록 압축강도가 다소 증가되는 경향이 있으나, 이는 섬유 자체가 강도에 미치는 영향이라기보다는 다량의 섬유가 혼입됨으로써 배합수 일부가 섬유 표면에 접촉되어 나타난 현상으로 판단된다.

경량모르타르의 압축강도는 본 연구의 범위 내에서 w/c 보다는 s/c 의 영향을 더 받는 것으로 판단된다.

경량모르타르의 1000 °C 가열 후의 중량감소율은 Figure 7처럼 PP섬유를 혼입하지 않은 경우 30.6%이며, PP섬유를 혼입한 경우 32.4~33.4%이다. PP섬유의 혼입량이 많아질수록 중량감소율도 커지는 경향이 있으며, 이는 PP섬유가 160 °C 전후에서 용융되고 340 °C 내외에서 기화되기 때문이다. 따라서 섬유량이 많을수록 중량감소율도 커지면서 모르타르 내부에 미세한 공극이 다량으로 형성되는 것으로 추정된다. 따라서 경량골재 내부에 분포되어 있는 공극과 고온 상태에서 섬유가 용융·기화되어 형성된 공극으로 인하여 열적 성능이 향상될 것으로 기대된다.

PP섬유를 혼입하지 않고 퍼라이트를 사용한 모르타르의 열전도율은 0.24 W/m·K이며, PP섬유를 0.3~0.9% 첨가한 열전도율은 0.20~0.22 W/m·K으로 각각 나타났다. PP섬유를 혼입함에 따라 열전도율은 다소 저하

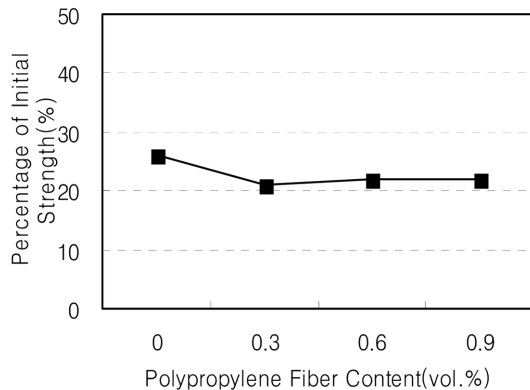


Figure 8. Variation of percentage of initial strength versus polypropylene fiber content ($w/c = 0.38$, $s/c = 0.24$).

되는 경향이 있으나 첨가율에 따른 차이는 명확하게 나타나지 않고 있다. 그러나 보통 모르타르의 열전도율이 $1.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 전후임을 감안하면 퍼라이트와 PP섬유를 혼입한 모르타르의 열전도율은 매우 뛰어난 열적성능이 우수할 것으로 기대된다.

또한 가열 후의 잔존압축강도율은 Figure 8과 같이 PP섬유를 혼입하지 않은 경우 26%이며, PP섬유를 혼입한 경우 21~22%이다. 가열 후 PP섬유량 만큼 공극이 많이 형성되어 강도가 낮아진 것으로 판단된다. 그러나 PP섬유의 혼입량에 따른 잔존압축강도율의 차이는 나타나지 않고 있다. 퍼라이트와 PP섬유로 제조한 경량모르타르를 내화피복재로 사용할 경우 화재 후 강도가 낮기 때문에 이를 지속적으로 사용하기에는 문제가 있다고 판단된다.

또한, 굵은골재를 사용하지 않은 일반 모르타르의 경우 시험체 축방향의 직각방향으로 전단폭렬 현상이 나타나는 것이 일반적이나,^{13,14} 본 연구의 경우 폭렬현상이 나타나지 않았다. 이와 같은 이유는 퍼라이트와 PP섬유를 사용하여 모르타르를 제조하였고 또한, 크기 50 mm 입방체의 시험체로 가열하였기 때문에 내부 수증기압이 상승될 구조가 아니기 때문이다.

향후, PP섬유와 퍼라이트를 사용한 경량모르타르에 대한 수열온도 특성 등 제반 열적 성질은 물론 실제 고강도 콘크리트 부재에 대한 실물 실험 등을 통하여 내화 피복재로 활용하기 위한 다양한 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 PP섬유와 경량골재인 퍼라이트를 사용한

경량모르타르를 내화피복재로 활용하기 위한 사전 연구로서, 경량모르타르의 배합, 시공성, 압축강도, 폭렬유무, 열전도율 등을 파악한 것으로 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. PP섬유와 경량골재를 사용한 모르타르의 시공성은 PP섬유 혼입율 0.9%, 골재 시멘트비 0.24 이상부터 급격히 저하된다.

2. PP섬유와 경량골재를 사용한 모르타르의 단위용적중량은 1.2 t/m^3 정도로서 경량성이 우수하며, 열전도율은 평균 $0.21 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로서 열적성능이 우수하다.

3. PP섬유와 경량골재를 사용한 모르타르의 압축강도는 물시멘트비 0.52에서 0.45, 0.38로 낮아짐에 따라 각각 17%, 11% 증가하지만, 골재 시멘트비 0.24에서 0.19, 0.15로 낮아짐에 따라 각각 21%씩 증가하였다. 따라서 본 연구의 범위에서 모르타르의 압축강도는 물시멘트비보다 골재 시멘트비의 영향을 더 받는다.

4. 경량골재와 PP섬유를 사용한 모르타르는 내화시험에서 폭렬이 발생되지 않았으며, 잔존압축강도율 22% 정도, 중량감소율 32% 정도이다.

5. PP섬유와 퍼라이트를 사용한 경량모르타르를 내화피복재로 사용하기 위해서는 시공성과 압축강도를 고려하여 물시멘트비 0.4, 시멘트골재비 0.2 이하로 설정하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부·지식경제부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학 육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. 신성우 외 9명, “고강도콘크리트 구조내화설계”, 대한건축학회(2008).
2. 송영찬 외 5명, “고강도 콘크리트 내화성능 확보를 위한 내화피복공법 연구”, 대한건축학회학술발표대회논문집, Vol.28, No.1, pp.423-426(2008).
3. 장기현 외 5명, “고강도 콘크리트의 내화특성에 미치는 방화석고보드의 두께 및 접착 보강 방식의 영향”, 대한건축학회학술발표대회논문집, Vol.28, No.1, pp.427-430(2008).
4. 이문환, “무기 폴리머 내화보드의 성능개선에 관한 실험 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.11, pp.119-126(2008).
5. 한민철, 이동규, 이재호, “경량기포 콘크리트를 이용한 석재패널 부착 고강도 콘크리트의 폭렬 방지”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.12, pp.107-114(2008).
6. 한천구, 양성환, 한민철, 배장준, “고강도 콘크리트의

- 폭렬방지에 미치는 폴리머수지의 형태 및 혼입율의 영향”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.5, pp.93-100(2008).
7. 이주선, 배장춘, 지식원, 한창평, 양성환, 한천구, “복합 유기섬유 혼입율 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬방지”, 대한건축학회학술발표대회논문집, Vol.28, No.1, pp.415-418(2008).
 8. 한천구, 김성수, 김상식, 장기현, “NY과 PP섬유의 길이조합 및 혼입율 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬방지 특성”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.11, pp.69-76(2008).
 9. 고정원, 류동우, 이문환, 이세현, “화재가열환경하에 있는 콘크리트중의 열과 수분이동에 의한 세공구조의 거동 및 폭렬메카니즘에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.23, No.12, pp.107-116(2007).
 10. 이문환, “고강도 콘크리트 내화성능 보강인자의 폭렬억제 특성 및 기여도 분석”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.11, pp.109-118(2008).
 11. 정동학, 서치호, “퍼라이트를 이용한 경량물탈의 강도에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회학술발표논문집, Vol.8, No.2, pp.703-706(1988).
 12. 전현규, 서치호, 김대희, “팽창펄라이트를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.19, No.5, pp.71-78(2003).
 13. 한천구, 한민철, 허영선, “고강도 콘크리트의 폭렬발생 메커니즘 규명”, 대한건축학회논문집, Vol.23, No.11, pp.109-117(2007).
 14. 이재승, 정경수, “고강도 콘크리트의 폭렬발생 원인 조사에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.5, pp.101-108(2008).