

고강도 콘크리트 내화피복용 경량 모르터의 온도이력 성상

임서형

경남과학기술대학교 건축공학과

Properties of Temperature History of Lightweight Mortar for Fire Protection Covering Material in High Strength Concrete

Seo-Hyung Lim

Dept. of Architecture Engineering, Gyeongnam National Univ. of Science and Technology

(Received October 11, 2012; Revised November 6, 2012; Accepted December 7, 2013)

요 약

폭렬은 철근노출과 함께 구조부재의 단면을 감소시키며, 이로 인하여 구조적 거동에 심각한 문제를 발생시킨다. 고강도 콘크리트에 내화 모르터를 피복함으로써 화재시 폭렬을 방지할 수 있으며, 콘크리트 내의 철근의 온도상승을 지연시킬 수 있다. 본 연구의 목적은 이러한 고강도 콘크리트의 내화피복재로 활용하기 위한 것으로 퍼라이트와 폴리프로필렌 섬유로 경량 모르터를 제조하여 온도이력 성상을 파악하는데 있다. 이에 따른 실험인자로는 폴리프로필렌 섬유의 첨가량과 길이이다. 연구결과 폴리프로필렌 섬유를 첨가함으로써 모르터의 공극구조를 변화시킬 수 있었으며, 이는 내부 온도 상승을 지연시킨다. 또한 고강도 콘크리트의 내화피복재로서 경량 모르터를 사용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

ABSTRACT

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. By coating surface of high strength concrete with fireproof mortar, the high strength concrete is protected from the spalling in fire and the method to constrain the temperature increase of steel bar within the concrete. The purpose of this study is to investigate the temperature history properties of lightweight mortar using perlite and polypropylene fiber for fire protection covering material. For this purpose, selected test variables were the contents and length of polypropylene fiber. As a result of this study, it has been found that addition of polypropylene fiber to mortar modifies its pore structure and this causes the internal temperature to rise. And it has been found that a new lightweight mortar can be used in the fire protection covering material.

Keywords : Lightweight mortar, High strength concrete, Spalling, Polypropylene fiber, Fire

1. 서 론

콘크리트 강도는 지금까지 꾸준히 증가되어 왔으며, 고강도 콘크리트를 사용할 경우 부재의 단면 감소와 이로 인한 자중 감소, 공기단축 등 여러 이점이 있지만 해결해야 할 단점도 지니고 있다. 콘크리트가 고온에 노출되면 자유수 및 결합수의 탈수, 수산화칼슘 및 탄산칼슘의 분해 그리고 강도 및 탄성계수의 저하 등 화학적, 물리적 변화가 일어난다. 심할 경우 균열, 탈락, 처짐 등 구조 내력을 저하시키는 현상도 발생되지만 일반적으로 콘크리트는 구조재료 중 내화성이 우수한 재료로서 지금까지 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나 고강도 콘크리트가 화재로 인한 급격한

온도 상승에 노출 되면 열응력이 발생되고, 조직이 치밀하여 내부에 높은 수증기압이 형성되어 부재 표면에 일정층이나 조각 등으로 파괴되는 폭렬현상이 쉽게 발생된다. 즉, 폭렬과 함께 콘크리트 부재가 취성적으로 붕괴되는 위험성도 내포하고 있다. 이에 따라 국토해양부에서 고강도 콘크리트 부재의 내화성능관리기준을 고시하면서 향후 신축되는 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트 구조물은 반드시 폭렬에 대한 검토와 대책을 마련하도록 하고 있다.

고강도 콘크리트의 폭렬을 방지 또는 저감시키는 가장 일반적인 방법은 콘크리트를 제조할 때 유기섬유를 첨가하여 화재 시 내부 수증기압을 낮추거나 그 배출을 원활히 하는 것이다. 유기섬유 중 가장 효과적인 것으로 알려진

것은 폴리프로필렌 섬유(이하, PP섬유)로서 길이 19 mm의 것이 주로 사용되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구도 상당히 진행되고 있다^(1,2).

이미 축조된 고강도 콘크리트 건축물의 내화성능을 확보하기 위한 연구는 표층부의 온도상승 및 구배를 저감시킬 목적으로 부재에 내화도료를 도포하거나 내화 모르터 또는 내화보드를 피복하는 방법과 부재에 강판을 부착하거나 메탈라스 등을 배치하여 폭렬에 의한 콘크리트의 비산을 방지하는 방법 등이 주를 이루고 있다^(3,4).

그러나 기존 고강도 콘크리트 건축물은 내화성능을 확보하기 위한 제도적 대책도 마련되지 않고 있으며, 이에 대한 연구도 미흡하다고 판단된다. 이에 따라 PP섬유와 퍼라이트를 사용한 경량 모르터를 내화피복재로 활용하기 위해 배합, 시공성, 압축강도, 폭렬유무 등의 연구를 사전에 실시한바 있으나, 온도이력 등에 관한 사항도 검토할 필요성이 제기되었다.

따라서 본 연구에서는 PP섬유와 경량골재인 퍼라이트를 사용한 경량 모르터를 내화피복재로 활용하기 위한 연구로서 PP섬유의 길이 및 혼입율에 따른 경량 모르터의 열전도율, 길이변화 등의 물성과 특히 고온 가열시 수열온도 성상을 파악하여 궁극적으로 이미 축조된 고강도 콘크리트 부재의 내화피복재로 활용하여 내화성능을 향상시키고자 한다.

2. 실험

2.1 실험개요

모르터에 첨가한 PP섬유는 화재시 160 °C 내외에서 용해되고 340 °C 근처에서 기화되므로 무기질 다공성 재료인 퍼라이트와 함께 새로운 공극구조를 형성하게 된다. 즉, 다공질의 퍼라이트와 PP섬유가 용융, 기화되면서 생긴 새로운 공극구조가 화재시 모르터의 내화성능을 향상시킬 것으로 기대된다. 또한 PP섬유가 용해되고 기화되면서 온도상승을 지연시킬 것으로 예상된다.

이미 축조된 고강도 콘크리트 부재에 피복하면 표면부의 최고 온도상승 및 온도구배를 저감시켜 폭렬을 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 따라 기존연구⁽⁵⁾에서는 경량골재와 PP섬유를 첨가한 모르터의 배합, 시공성, 압축강도 및 고온수열시 폭렬유무, 잔존압축강도, 중량감소를 등을 파악하였으며, 본 실험에서는 PP섬유의 길이 및 혼입율에 따른 수열온도 성상을 파악하고자 한다.

2.2 사용재료 및 배합

시멘트는 비중 3.15, 분말도 3302 cm²/g인 포틀랜드시멘트 중을, 퍼라이트는 비중 0.18, 흡수율 20%, 열전도율 0.03~0.06 W/m·k 그리고 피복재로서 미장마감을 고려하여 백색의 최대크기 2 mm의 것을 사용하였다.



Figure 1. Measure the temperature.

PP섬유는 직경 0.04 mm, 길이 3, 11, 19 mm로 형상비 75, 275, 475의 것을 각각 사용하였다. 또한 밀도는 0.91 g/cm³, 용해점은 160 °C, 기화점은 340 °C이다. 고성능감수제는 폴리카본산계 표준형을 사용하였다.

모르터 배합은 기존연구^(5,6) 및 예비실험을 통하여 시공성과 압축강도에 최적의 배합비를 사전에 파악하여 결정하였으며, 경량골재와 시멘트의 비는 1:0.14로서 모르터 전 체적에서 경량골재가 차지하는 비율은 47%이다.

시공성을 위한 모르터의 반죽질기는 흐름시험의 플로우 값이 110 mm 정도가 되도록 설정하였으며, 이때의 물시멘트비는 0.38이다. PP섬유의 사용량은 모르터 체적의 0.3%, 0.6%, 0.9%로 변화시켰다. 이는 콘크리트에 사용되는 일반적인 섬유량에 비해 많은 양으로 화재 시 모르터 내부에 다량의 공극을 형성하기 위한 것이다.

2.3 실험 방법

모르터의 시험체는 KS L 5105에 따라 제작하였으며, 재령 28일의 압축강도를 측정하였다. 길이변화는 KS F 2424에 따라 시험체를 제작하고 contact strain gauge로 재령 120일까지 측정하였다. 모르터의 열전도율은 크기 300×300×30 mm로 시험체를 제작하여 재령 28일 이상 양생시킨 후 K연구원에 의뢰하여 측정하였다.

모르터의 수열온도 측정을 위한 시험체는 직경 100 mm, 높이 200 mm의 몰드 중앙에 K형 열전대를 설치하여 제작하였다. 이후 재령 28일까지 양생시킨 후 Figure 1과 같이 전기로에서 가열개시 후 2시간까지 또는 시험체의 중심온도가 500 °C에 도달될 때 까지 5분 간격으로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

PP섬유의 길이 및 혼입율에 따른 모르터의 압축강도, 길

Table 1. Mixture Proportions of Mortar and Results of Test

W/C	S/C	C : S	Unit water (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)		Fiber length (mm)	Fiber contents (%)	Compressive strength (MPa)	Drying shrinkage ($\times 10^{-4}$)	Thermal conductivity (W/m · K)	Heated Temperature (°C)
				C	S						
0.38	0.47	1 : 0.14	234	617	85	3	0.0	19	16.7	0.23	494
							0.3	18	15.9	0.22	
							0.6	19	15.1	0.21	462
							0.9	19	14.7	0.21	
						11	1.2	19			478
							0.6	18			464
						19	1.2	19			466
							0.6	19			503
						1.2	20			478	

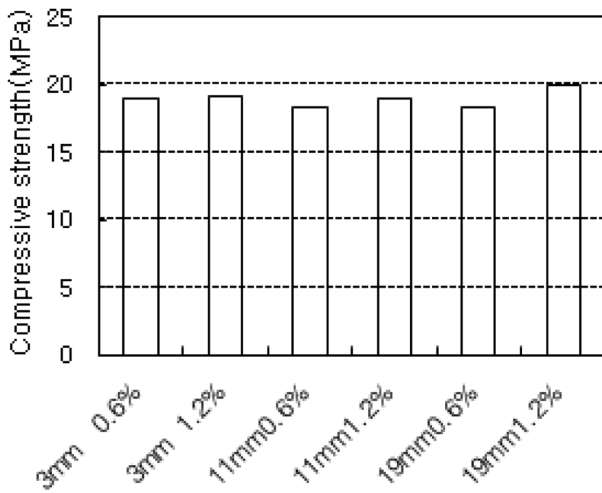


Figure 2. Variation of compressive strength versus polypropylene fiber length and content.

이변화, 열전도율 그리고 2시간 후의 수열온도의 실험결과는 Table 1과 같다.

PP섬유의 길이 및 혼입율에 따른 모르터의 재령 28일 압축강도는 Figure 2에서와 같이 18~20 MPa이며, PP섬유의 길이와 혼입율에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

모르터의 길이변화는 Figure 3에서와 같이 재령 120일에서 $14.7\sim 16.7 \times 10^{-4}$ 의 범위에 있으며, 섬유 혼입율이 많을수록 건조수축으로 인한 길이변화량은 적은 것으로 나타났다. 즉, PP섬유 혼입율이 0.3%에서 0.9%로 늘어남에 따라 건조수축량은 약 4.8%씩 감소되는 것으로 나타나 시공시 건조수축 균열을 방지하는데 유효할 것으로 판단된다.

PP섬유를 혼입하지 않고 퍼라이트를 사용한 모르터의 열전도율은 Figure 4에서와 같이 0.23 W/m · K이며, PP섬유를 0.3~0.9% 첨가한 열전도율은 0.21~0.22 W/m · K으로 각각 나타나, PP섬유를 혼입함에 따라 열전도율은 다

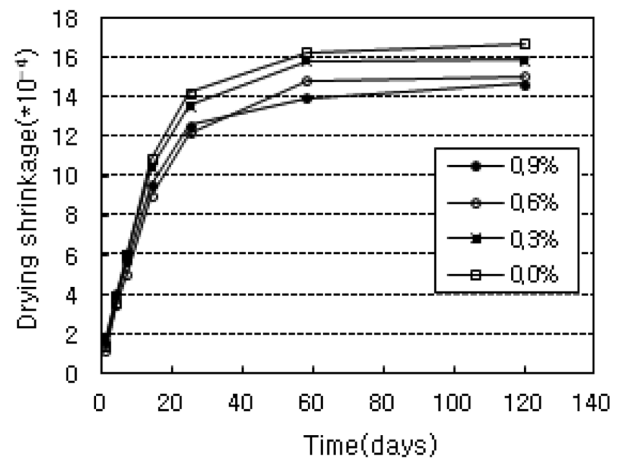


Figure 3. Drying shrinkage with time.

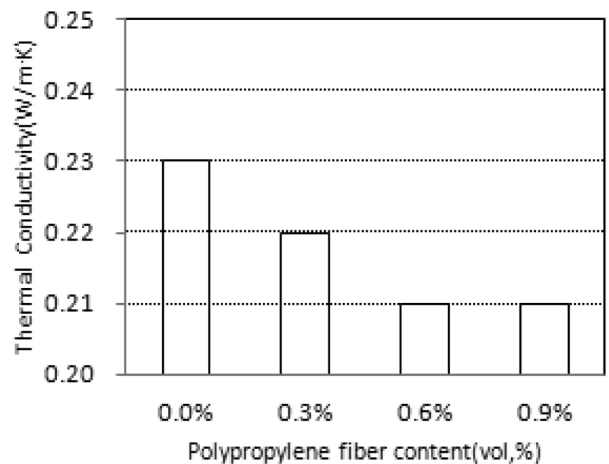


Figure 4. Variation of thermal conductivity versus polypropylene fiber content.

소 저하되는 경향을 보이고 있다. 모르터의 열전도율을 향상시키는 주재료는 다공질의 퍼라이트이지만 PP섬유도 미

소하나 열전도율을 향상시키는 것을 알 수 있다. 그러나 보통 모르터의 열전도율이 1.4 W/m·K 전후임을 감안하면 퍼라이트와 PP섬유를 혼입한 모르터의 열전도율은 매우 뛰어나 열적성능이 우수한 것으로 판단된다.

PP섬유의 각 길이별 그리고 PP섬유 혼입율 0.0%, 0.6%에 대한 수열온도 분포는 Figure 5와 같으며, 이는 가열시간 40분 이후부터 100분까지 수열온도 분포를 상세히 표현한 것이다.

Figure 5에서와 같이 가열시간 45분까지는 PP섬유의 길이 및 혼입율에 관계없이 동일한 수열온도 상승곡선을 보이고 있으나, 이후 PP섬유의 첨가 유무 및 길이에 따라 수열온도는 서로 다른 상승을 나타낸다. PP섬유를 첨가하지 않은 모르터는 가열시간 75분까지 그리고 수열온도 약 200°C까지 비슷한 기울기로 상승하지만 그 후부터 급한 상승으로 전환된다. PP섬유 혼입율 0.6% 그리고 섬유길이 3~19 mm의 경우 가열시간 45분 후부터 온도상승의 변

곡점이 분명히 나타나 가열시간 75~90분까지, 수열온도 145~165°C까지 완만한 상승을 보이다 그 후부터 급격한 상승으로 전환되고 있으며, 이때에는 PP섬유의 길이와 혼입율에 관계없이 비슷한 상승 기울기를 나타내고 있다. PP섬유의 각 길이별 그리고 PP섬유 혼입율 0.0%, 1.2%에 대한 수열온도 분포는 Figure 6과 같으며, 이는 가열시간 40분 이후부터 100분까지 수열온도 분포를 상세히 표현한 것이다. PP섬유 혼입율 1.2%의 수열온도 상승 형태는 가열시간 45분까지 거의 비슷하지만 가열시간 70~85분까지, 수열온도 145~160°C까지 완만한 상승을 나타내다가 그 후부터는 급격한 상승을 보이고 있다.

PP섬유의 길이 및 혼입율에 따라 다소 차이는 있지만 PP섬유의 첨가유무에 따라 온도상승의 지연효과가 분명히 나타나고 있다. 이는 PP섬유의 용융과 기화의 상변화 때문에 생긴 결과로 판단된다.

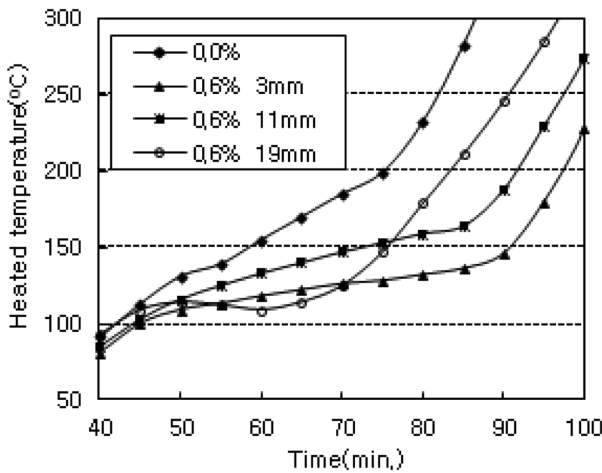


Figure 5. Heated temperature with time (polypropylene fiber content vol.0.6%).

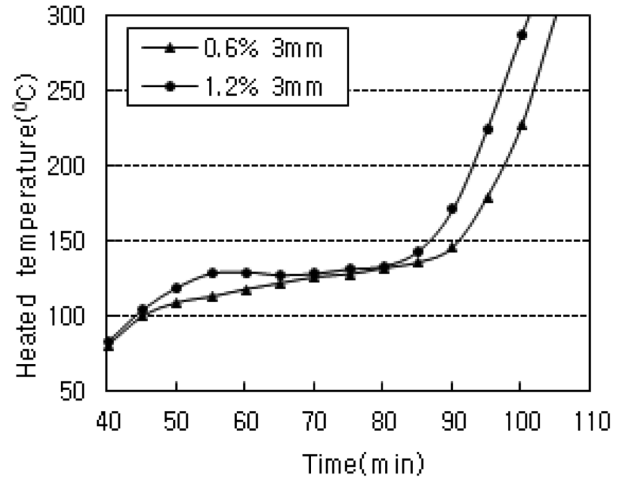


Figure 7. Heated temperature with time (polypropylene fiber length 3 mm).

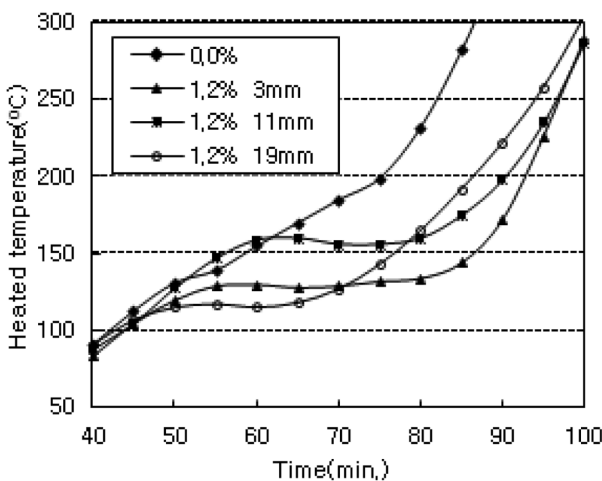


Figure 6. Heated temperature with time (polypropylene fiber content vol.1.2%).

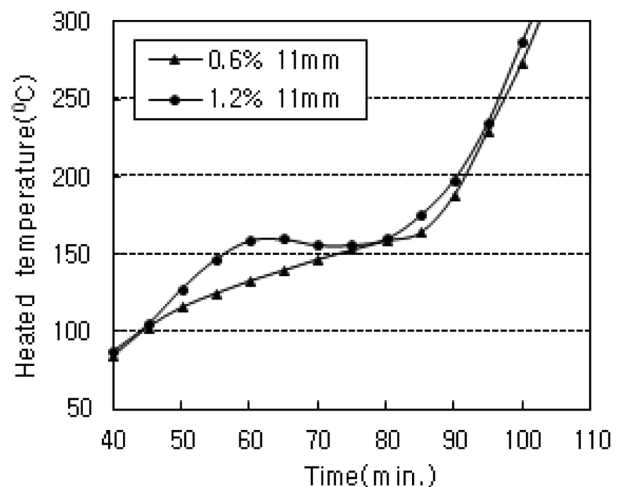


Figure 8. Heated temperature with time (polypropylene fiber length 11 mm).

유기섬유의 용융 및 기화에 따른 고강도 콘크리트의 폭발 특성을 연구한 결과에서도 내부 온도분포에 따른 섬유 기화량을 파악하고 있으며, 일정 시간 이후 전체 섬유량의 60% 이상이 기화되어 일정 수증기압을 유지할 수 있는 충분한 공극이 형성됨을 알 수 있다. 그러나 섬유의 기화에 따른 공극형성은 가열조건, 섬유 종류 및 사용재료 등에 따라 각기 다르다⁽⁷⁾.

Figure 7~Figure 9는 PP섬유의 각 혼입율별 PP섬유의 길이 3 mm, 11 mm, 19 mm의 수열온도 상승을 나타낸 것이다. PP섬유 길이 3 mm와 19 mm의 경우 혼입율에 관계없이 수열온도에는 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 또한 이 구간은 PP섬유 혼입을 보다는 길이의 영향을 더 받으며, PP섬유 19 mm에 비해 3 mm가 온도상승을 더 많이 지연시킨다. 단, PP섬유 11 mm의 경우 Figure 8에서와 같이 혼입율 0.6%에서 뚜렷한 변곡점 없이 온도상승을 보이고 있으나 이는 실험적 오차에 의한 것으로 판단된다.

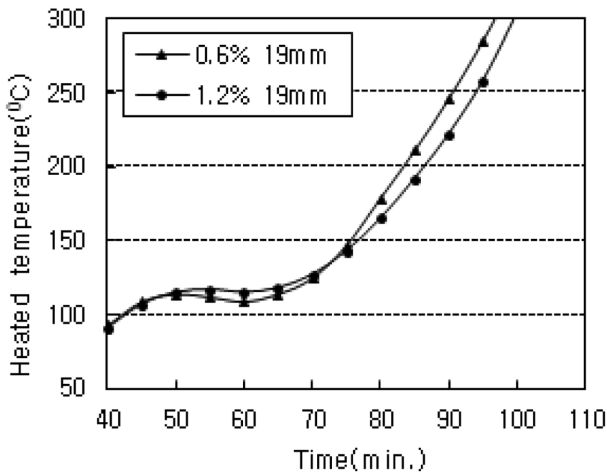


Figure 9. Heated temperature with time (polypropylene fiber length 19 mm).

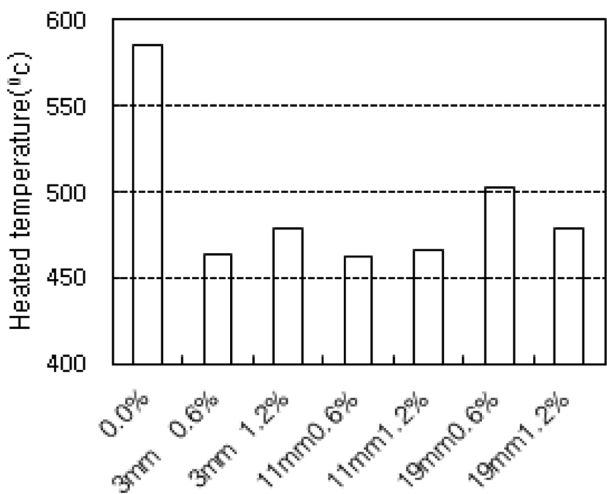


Figure 10. Heated temperature after 2 hours.

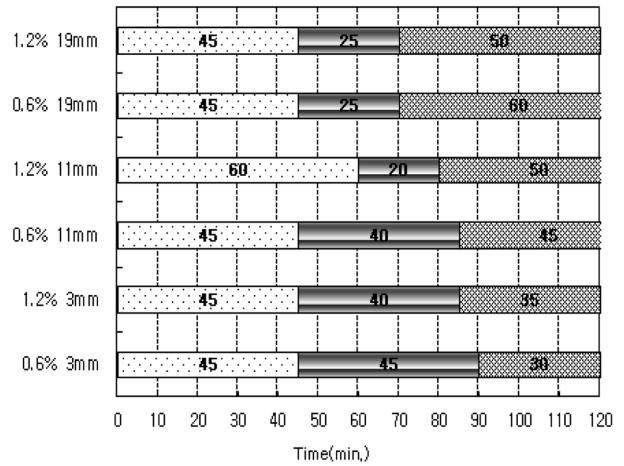


Figure 11. Point of inflection with time.

그러나 Figure 7~Figure 9에서도 가열시간 45분부터 약 80분까지 그리고 수열온도 약 100~160°C까지 완만하게 상승되는 구간이 명확히 나타나고 있다.

가열 2시간 후의 수열온도는 Figure 10과 같다. PP섬유를 첨가하지 않았을 경우의 수열온도는 최고 586°C이며, PP섬유를 첨가한 경우에는 약 460~500°C의 분포를 나타내고 있다. 즉 PP섬유를 첨가함으로써 수열온도가 최대 120°C 차이가 나타난다.

PP섬유를 첨가한 고강도 콘크리트 기둥부재의 내부온도 분포특성을 연구한 기존 연구에서도 부재의 평균내부온도는 PP섬유의 혼입율이 증가할수록 저하되는 것으로 나타나고 있다⁽⁸⁾.

Figure 11은 PP섬유의 혼입율 및 길이에 따른 수열온도의 상승 특성을 나타낸 것이다. 초기 45분까지는 PP섬유의 혼입율 및 길이에 관계없이 일정한 기울기로 상승하며, 이후 PP섬유의 용융과 기화로 온도상승이 지연되는 구간이 나타난다. 이 구간은 PP섬유의 혼입율보다는 길이의 영향을 많이 받으며, 3 mm의 경우 40~45분, 11 mm의 경우 20~40분, 19 mm의 경우 25분 정도이다.

단, 이와 같은 현상은 퍼라이트를 사용하여 모르타를 제조하였기 때문에 PP섬유를 첨가한 고강도 콘크리트의 수열온도 성장과는 다르다. 즉, 퍼라이트의 다공성 때문에 보통의 고강도 콘크리트보다 온도 상승이 지연될 것으로 추측된다.

즉, 퍼라이트로 강모래를 75% 치환한 모르타로 내화피복용 보드를 제작하여 실시한 기존연구⁽⁹⁾를 보면 보드두께 20 mm 이상에서 폭발을 방지할 수 있었으며, 이 때 접촉부위의 보강은 메탈라스와 앵커볼트로 하였고 내화실리콘으로 마감 처리하였다. 그러나 퍼라이트를 사용하여 제조한 모르타로 고강도 콘크리트 기둥부재를 습식으로 마감 처리한 연구결과⁽¹⁰⁾에서는 일부를 제외한 시험체에서 폭발이 발생되어 내화성능을 발휘하지 못하고 있다. 그러나 콘크리트 내부온도 상승을 일정 시간 지연시키는 효과는 나

타나고 있다. 이는 고온수열시 모르터와 모체와의 탈락이 큰 원인으로 판단되고 있다.

상기한 연구결과를 비교하여 보면 내화피복용 모르터의 마감두께가 최소 20 mm 이상일 경우 고강도 콘크리트의 폭렬을 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 기존 고강도 콘크리트부재의 폭렬방지를 위해 내화 모르터를 피복할 경우 모르터 자체의 내화성능도 중요하지만 모체와의 접착력을 유지할 수 있는 공법 개발도 매우 중요하며 향후 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PP섬유와 경량골재를 사용한 경량 모르터를 고강도 콘크리트의 내화 피복재로 활용하기 위해 PP섬유의 길이 및 혼입율에 따른 압축강도, 건조수축, 열전도율 특히 수열온도에 관한 실험을 하였으며, 본 연구의 범위 내에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. PP섬유와 경량골재를 사용한 경량 모르터의 압축강도는 18~20 MPa이며, PP섬유의 길이와 혼입율에 영향을 받지 않는다.

2. 건조수축은 $14.7\sim 16.7\times 10^{-4}$ 의 범위에 있으며, 섬유 혼입율이 많을수록 건조수축으로 인한 길이변화량은 적은 것으로 나타나 시공시 건조수축 균열을 방지하는데 유효할 것으로 판단된다.

3. PP섬유를 첨가한 모르터의 열전도율은 $0.21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 정도이며, 모르터의 열전도율을 향상시키는 주재료는 경량골재인 펄라이트이지만 PP섬유도 열전도율을 향상시키는 것을 알 수 있다.

4. PP섬유를 첨가하지 않은 모르터의 수열온도는 변곡점 없이 상승되지만, PP섬유를 첨가한 모르터는 PP섬유의 용융 및 기화의 상변화로 온도상승이 지연되는 구간이 나타나며, 가열 2시간 후의 내부온도도 낮아진다. PP섬유를 첨가함으로써 발생하는 온도상승 지연 효과는 동일 첨가량에서 길이가 짧을수록 크다.

후 기

본 논문은 2011년도 경남과학기술대학교 기성회연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. C. G. Han, S. H. Yang, M. C. Han and C. C. Pei, "The Influence of Polymer Contents and Appearance on Spalling Prevention of High Strength Concrete", Journal of

Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 24, No. 5, pp. 93-100 (2008).

2. J. S. Lee, C. C. Pei, S. W. Jee, C. P. Han, S. H. Yang and C. G. Han, "Prevention of Spalling of High Performance Concrete Depending on the Contents of Hybrid Organic Fiber", Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 28, No. 1, pp. 415-418 (2008).

3. Y. C. Song, Y. R. Kim, J. K. Oh, O. J. Kim, D. B. Lee and Y. J. Kwon, "A Study on Fire Protection Covering Method to Secure Fire Resistance Performance of High Strength Concrete", Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 28, No. 1, pp. 423-426 (2008).

4. M. H. Lee, "A Study of Test on the Improvement of the Performance of Fire-Resistance Board made of Inorganic Polymer", Journal of Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 24, No. 11, pp. 119-126 (2008).

5. S. H. Lim, S. H. Yoo and J. W. Moon, "Study on the Mechanical Properties of Lightweight Mortar for Fire Protection Covering Material in High Strength Concrete", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 8-13 (2011).

6. D. H. Jung and C. H. Seo, "An Experimental Study on the Strength of Lightweight Mortar Using the Perlite", Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 8, No. 2, pp. 703-706 (1988).

7. G. Y. Kim, G. C. Choe, J. H. Lee, S. H. Lee and T. G. Lee, "Evaluation on Spalling Properties of Ultra High Strength Concrete with Melting and Vaporization of Fiber", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 24, No. 2, pp. 173-183 (2012).

8. J. P. Won, C. I. Jang, H. Y. Kim and W. Y. Kim, "Spalling and Internal Temperature Distribution of High Strength Column Member with Polypropylene Fiber Volume Fractions", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 6, pp. 821-826 (2008).

9. S. H. Yang, "Combined Effect of Fiber Addition and Fireproofing Protection Board on Residual Strength and Fire Resistance of High Strength Concrete", Journal of Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 27, No. 12, pp. 155-162 (2011).

10. S. H. Yoo and S. H. Lim, "Spalling Reduction Method of High-Strength Reinforced Concrete Columns Using Insulation Mortar", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 8-13 (2011).