

고성능 콘크리트의 화재시 폭렬성상에 관한 메카니즘 고찰

Investigation of Spalling Mechanism in High Performance Concrete Subjected to Fire

한민철* 김성환** 박용규** 허영선** 한천구***
Han, Min-Cheol Kim Seong-Hwan Park, Yong-Kyu Heo, Young-Sun Han, Cheon-Goo

Abstract

This paper reviews the relevant literatures and investigates spalling mechanism of high strength concrete, in order to clearly inform spalling problem in fire. Firstly, we studies literatures on spalling occurrence and resistance methods. Secondly chemical change of concrete components in elevated temperature was presented. Finally, mechanism of the spalling occurrence and spalling resistance were carried out with fiber content. In addition, our research team introduced spalling mechanism, being different from other points of view, which has been generally accepted. To secure this mechanism theory, we investigate spalling properties of certain specimens fabricated by roller spindle and made with mortar or concrete condition.

키워드 : 고성능 콘크리트, 폭렬방지, 폭렬 메카니즘

Keywords : High Performance Concrete, Spalling Resistance, Spalling Mechanism

1. 서 언

최근 사용량이 증대되고 있는 고성능 콘크리트는 화재시 폭렬에 의해 그림 1에서와 같이 구조체에 치명적인 손상을 초래한다¹⁾. 이러한 폭렬현상은 크게 두 가지 측면에서 콘크리트 구조체에 영향을 미치는데, 첫째, 콘크리트가 압축력을 지지하고 있는 경우는 화재시 구조체의 강성을 크게 저하시켜 부재의 상하부가 완전히 분리되는 파괴현상을 발생시키고, 둘째 기타 상황에서는 콘크리트의 피복탈락에 의해 고온에 직접적으로 노출된 철근이 급속하게 강성을 잃어 심각한 경우 역시 구조체가 붕괴하게 된다.

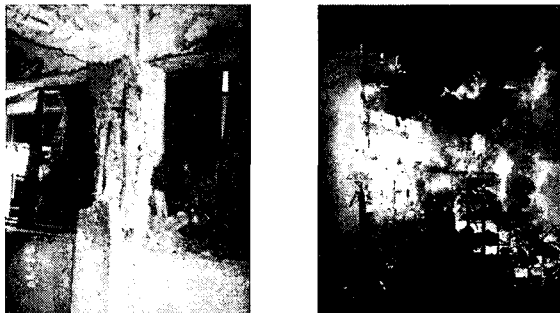


그림 1. 화재에 의한 건축물의 피해

화재시 폭렬현상의 범위를 예측하는 방법은 현재 보고된 바 없으나 폭렬발생의 위험률은 1) 압축강도 40MPa 이상, 2) 급속한 고열, 3) 3.0% 이상의 함수율, 4) 실리카폼의 사용, 5) 피복두께 50mm 이상, 6) 거대하중지지 등의 상황에서 커지는 것으로 알려져 있다¹⁾⁻³⁾. 이러한 폭렬발생의 위험률은 각각의 요소들이 동시에 발생할 때 높아지는데, 특히 1번과 함께 2, 3, 혹은 4번의 상황이 발생할 경우 파괴정도는 더욱 심해지고, 1번과 함께 5번 혹은 6번 중의 한 가지 상황에 처할 경우 화재시 폭렬에 의한 치명도는 조금 낮아질 수 있다. 그러나 현재 고성능 콘크리트의 폭렬발생에 대한 명확한 이해와 함께 제도적 기반 마련과 폭렬발생의 뚜렷한 원인 및 메카니즘 규명 등이 해결되지 않은 시점에 있다.

따라서 본 연구팀에서는 고성능 콘크리트의 다양한 폭렬발생의 영향요인을 변수로 내화시험을 실시해오고 있는데, 본고에서는 폭렬문제에 대한 명확한 인식을 돕기 위해 화재시 고성능 콘크리트의 내화성에 관한 이론적 고찰과 폭렬발생의 메카니즘에 대해서 소개하고자 한다.

2. 폭렬에 관한 기존의 연구

- 1) K.D. Hertz³⁾ 등은 고강도 콘크리트에 있어 실리카폼 사용에 따른 폭렬 발생 가능성과 폭렬방지 대책에 대한 범위를 다양한 각도에서 폭넓게 제시하였다.
- 2) G. Sanjayan⁴⁾ 등은 화재를 입은 고강도 실리카폼 콘크리트

* 청주대학교 건축공학부 전임강사, 공학박사, 정회원

** 청주대학교 대학원생, 정회원

*** 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사, 정회원

의 폭렬에 대한 실험을 통하여 고강도 콘크리트의 폭렬은 수분에 의한 것이며, 콘크리트의 피복 두께가 콘크리트 속의 수분 발산에 상당한 영향이 있으므로 폭렬 발생여부에 결정적인 작용을 한다고 보고하였다.

- 3) Pierre Kalifa⁵⁾ 등은 고온에서 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 콘크리트의 마이크로 구조에 대해 검토하였다. 즉, 섬유의 혼입량이 늘어날수록 마이크로 균열은 증가하고 폭렬은 시멘트와 골재사이의 계면에서 생기는 균열과 폴리프로필렌 섬유에 의해 생긴 공극과의 네트워크 형성에 의해 방지되며, 100MPa까지의 고강도에서는 폭렬방지를 위한 최적의 섬유 혼입량은 2kg/m³으로 결론지었다.
- 4) Long T. Phan⁶⁾ 은 NIST의 한 보고서에서 고성능 콘크리트의 폭렬방지 및 발생 메카니즘에 대하여 연구하였다. 실험 결과 플레인 콘크리트의 폭렬은 200±50° C에서 발생하는데, 폭렬발생의 주요한 원인으로 내부수증기 압력과 열응력을 들었다. 또한, 고강도 콘크리트의 수증기 압력을 낮추기 위한 방안으로는 PP섬유를 혼입하는 방법이 있는데, 수증기 압력의 저하 정도에 따라 PP섬유 혼입량이 달라질수 있으며, 1.5kg/m³을 혼입할 경우 충분히 폭렬을 방지할 수 있다고 보고하였다.
- 5) N. Khoylou⁷⁾ 등은 고온에 노출된 콘크리트의 폭렬거동을 묘사하기 위한 모델을 제시하였는데, 폭렬발생의 중요한 변수로 구조체 공극속의 함수율을 꼽았고, 기타 사항으로 모세관 공극사이, 수화물, 콘크리트 투수성 등을 고려대상으로 보고하였으나, 이러한 요소들을 폭렬 자체의 영향으로 판단하기는 어려운 것으로 결론지었다.
- 6) S.Y.N. Chan⁸⁾ 등은 콘크리트 슬라브를 대상으로 내화시험을 실시한 후 60MPa 이하에서는 폭렬이 발생하지 않는 것으로 보고하였다.
- 7) C.-M. Aldea⁹⁾ 등은 30mm 피복두께를 가진 콘크리트 기둥실험결과 20, 50MPa에서는 폭렬이 발생하지 않았으나, 90MPa에서는 폭렬이 발생하는 것으로 보고하였다.
- 8) F.A. Ali¹⁰⁾ 등은 총 18개의 콘크리트 기둥을 대상으로 내화시험을 실시하여 폭렬발생 정도에 따라 severe spalling, major spalling, minor spalling 및 no spalling 등으로 분류하였는데, 피복두께가 얇을수록 폭렬이 방지되고 (19mm<40mm), 5%이상의 함수율과 10%의 실리카폼의 사용이 주된 폭렬원인으로 보고하였다.
- 9) A. Meda¹¹⁾ 등은 플레인 콘크리트의 경우 300~350° C 범위에서 폭렬이 관찰된 것으로 보고하였고, 아울러 몇 가지 폭렬발생 사례를 제시하였다.
- 10) W.J. Copier¹²⁾ 등은 콘크리트 부재의 함수율이 6%이하에서는 폭렬이 발생되지 않으므로 외부로부터 연속적으로 수분을 공급받지 않는 구조물은 자연 상태에서 적정 함수율을 만족시켜 폭렬이 일어나지 않는다고 하였으며, 콘크리트 피복두께가 40mm 이상에서는 폭렬발생의 위험률이 커지는 것으로 보고하였다.

3. 폭렬발생의 메카니즘 분석

3.1 고온시 콘크리트 구성 재료의 변화와 폭렬 메카니즘

화재와 같은 고온하에서의 콘크리트 부재는 여러 가지 복합적인 요소들에 의해 내부 미세 구조가 바뀌게 된다. 먼저, 화학적 변화를 동반하는 물의 탈수가 진행되고, 골재의 경우는 화열에 의해 광물 결정구조가 변화하게 되며, 가스와 수증기 등이 방출된다. 이는 각각의 수열온도 범위에 따라 다르게 나타나는데, 일반적으로 약 100° C에서는 콘크리트 부재 내에 잉여수(Free water)가 빠르게 증발하기 시작하여 부재 안과 밖으로 이동한다. 이후 화학적 결합수(Chemically bound water)가 증발하기 시작하는데, C-S-H계 수화물은 100~130° C 범위에서 수분을 잃게 되고, 에트린자이트는 160~180° C 범위, 모노설페이트는 100, 200, 300° C에서 단계적 탈수하게 된다. 또한, 알루미네이트는 270~330° C, 칼슘 실리케이트는 250~350° C 범위에서 수화생성물의 일부가 각각 수증기로 발생하는데¹³⁾⁻¹⁵⁾, 이때 각각의 수열온도에서 발생된 수증기는 그림 2에서와 같이 일부는 외부로 방출되어 증발되어 버리고, 나머지 대부분은 내부로 이동하게 된다.

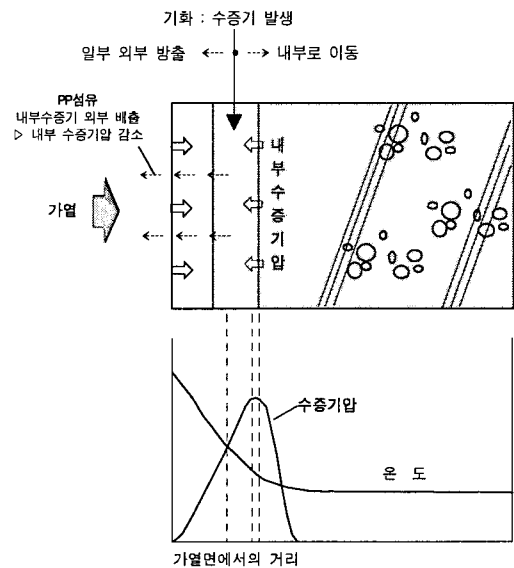


그림 2. 폭렬발생 및 방지방안 모식도

한편, 시멘트의 경우는 100° C 전후까지는 팽창하고, 그 이상에서는 Al₂O₃나 Fe₂O₃ 등의 화합물 및 실리케이트의 탈수에 의해서 수축작용이 일어난다. 그러나 골재는 규암질 골재 등에 포함되어 있는 석영이 570° C에서 변태되고, 석회암의 주성분인 탄산칼슘이 600~700° C 범위에서 분해되면서 팽창작용을 일으킨다. 이때 시멘트의 수축과 골재의 팽창작용은 골재를 둘러싸고 있는 시멘트 등과의 접촉면, 즉 계면 천이지대(ITZs)의 균열을 유발하게 되는데, 이러한 균열은 궁극적으로 부재 내부에 존재하던 수증기를 외부로 배출시키는 통로의 역할을 하게 된다. 그러나 고강도 배합에서는 골재량이 줄어들면서 ITZs가 얇아지고¹⁶⁾, 또한 시멘트량이 증가함에 따라 조직이 치밀해진다. 이러한 환경에서는 고온시 앞서 언급한 그림 2의 내부로 이동한 수증기가 일반 콘크리트와 달리 외부로 빠져나가지 못

하고 가열 면에서 일정한 거리 떨어진 영역에서 축적되면서 수증기 압력을 증가시키는데, 이때 최고조로 상승했을 때의 수증기 압력이 콘크리트의 인장력을(압축강도 75MPa 조건일 때 약 2.1MPa⁶⁾) 상회할 때 콘크리트는 급격히 항복하여 폭발이 발생 되는 것이다.

3.2 PP섬유에 의한 폭발방지 메카니즘

그림 3은 고성능 콘크리트(PP섬유 혼입)의 수증기 배출통로를 위한 네트워크 형성 모습을 도식화하여 나타낸 것이다.

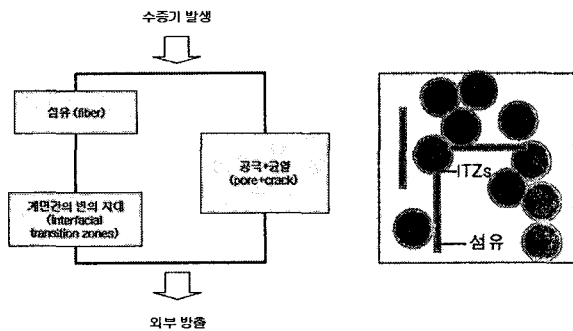


그림 3. 섬유의 혼입을 통한 조직 내의 네트워크 형성^{5),16)}

콘크리트 내부에 혼입된 PP섬유는 일반적으로 약 170° C 범위에서 녹아 시멘트 매트릭스의 네트워크 공극사이로 일부 혹은 전체가 흡수된다⁵⁾. 이는 콘크리트 내부에 섬유의 길이와 사이즈가 같은 공극을 만들게 되며, 이러한 크기는 모세관 공극의 100~400배 큰 공극구조를 형성하게 된다. 고강도 배합에서는 보통 콘크리트와 달리 내부에 존재하는 공극과 고온시 발생한 균열공극 단독으로는 내부에서 발생한 수증기를 원활하게 배출시킬 수 없으나, 이러한 적정량의 PP 섬유 혼입은 그림 2, 3에서와 같이 모세관 공극과 기타 균열에 의한 공극과의 네트워크 형성을 최적화하여 내부에서 축적된 수증기를 외부로 배출시켜 고성능 콘크리트의 폭발방지를 가능하게 해준다^{5),16)}. 이때 폭발방지를 위한 섬유의 적정혼입률은 섬유의 형상비 (aspect ratio) 조건에 따라 달라지는데, 형상비가 50:1일 경우 섬유의 적정 혼입률은 1.5%의 섬유를 필요로 하며 형상비가 100:1 및 200:1로 증가할수록 원활한 네트워크를 형성하기 위한 적정 필요량은 각각 0.7, 0.3%로 감소하게 되는데¹⁶⁾, 지나치게 높은 형상비 조건에서는 오히려 굳지않은 콘크리트의 유동성 저하와 섬유의 분산성이 문제될 수 있으므로 이를 고려하여 배합이 결정되어야 한다.

3.3 본 연구팀에서 고안한 폭발 메카니즘

본 연구팀에서는 이러한 폭발 메카니즘을 또 다른 측면에서 분석하였다. 그림 4는 a)원심성형 후 내부공간의 채움 여부와 b)굵은골재 사용 유무에 따라 제작한 시험체의 폭발성상을 나타낸 것이다.

먼저, 그림 3-a)에서 내부공간을 채운 원심성형 시험체는 폭발에 의해 상부가 파괴되었으나, 원심성형 후 내부공간을 채우지 않은 고성능 콘크리트 시험체의 경우는 폭발이 방지되는 것으로 나타났다. 이는 그림 2에서와 같이 콘크리트 내부에서 발생한 수증기가 내·외부로 이동하여 나타난 결과로 폭발이 발생

한 그림 4-a)-①의 내부공간 채움 시험체는 내부로 이동한 수증기가 밖으로 빠져나가지 못하고 고압으로 작용하여 폭발이 발생된 것이며, 4-a)-② 시험체의 경우는 그림 5의 모식도에서와 같이 내부로 이동한 수증기가 외부 안쪽과 바깥쪽으로 배출되어 내부 수증기 압력이 낮아지고, 원심성형시 발생한 블리딩수의 물질이 수평으로 형성되어 더욱 빠른 수증기의 증발이 폭발을 방지한 것으로 분석된다. 또한, 수증기 압력은 일반성형한 고강도 콘크리트의 경우 그림 2에서 나타난 바와 같이 가열 면에서 멀어질수록 증가하다가 일정한 거리이상에서는 다시 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 부재의 피복두께가 높을수록 커지게 된다. 따라서 원심성형에 의해 제조된 시험체와 같이 내부가 비워진 조건의 시험체는 부재의 안과 밖을 동시에 고려할 때 피복두께가 얇아 고압이 걸리지 않게 되는 것이다.

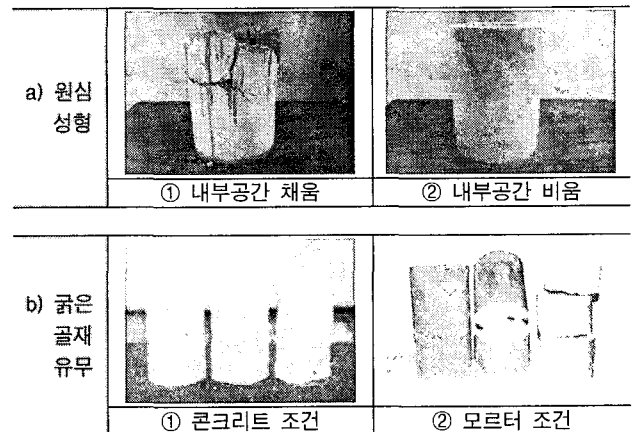


그림 4. 1시간 비가력 내화시험 후 폭발성상

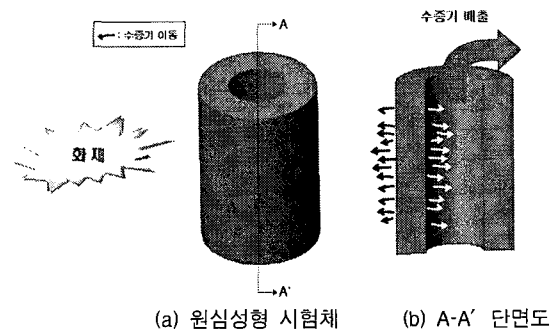


그림 5. 원심성형 부재의 폭발방지 메카니즘

한편, 그림 3-b)의 경우는 굵은골재 유무에 따라 폭발성상에서 큰 차이를 보였는데, 콘크리트 조건에서는 표면이 탈락되는 박리폭렬을 나타낸 반면, 모르터 조건에서는 시험체가 수평으로 절단되는 전단폭렬을 나타내었다.

이러한 폭발성상은 골재의 영향에 의한 것으로 굵은골재를 함유한 콘크리트 조건에서는 그림 6-a)와 같이 콘크리트 타설시 블리딩수에 의해 생긴 물질(이하 WPB)이 굵은골재에 의해 영향을 받게 되는데, 이는 고온시 발생한 일부 수증기의 이동 경로 역할을 하게 된다. 때문에 계속적으로 고온의 환경에 노출될 경우 골재 밑에서 축적된 수증기가 고압으로 작용하여 부재 표면방향으로 박리 및 탈락하는 폭발성상을 나타내게 되는 것이다. 그러나 모르터 조건에서는 그림 6-b)에서 나타난 모식

도와 같이 블리딩수가 골재의 영향을 받지 않고 시험체의 상하를 관통하여 WPB가 존재하게 된다. 즉, 고온의 환경에서 발생된 수증기는 콘크리트 조건에서와 달리 골재의 영향을 받지 않고 WPB를 따라 이동하다가 일정구간에서 축적된 수증기 압력이 상하 인장력으로 발생하여 전단폭렬현상을 나타내는 것이다. 이는 Pierre Kalifa⁵⁾²⁰⁾, Dale P. Bentz¹⁶⁾ 등 국외 여러 문헌에서 다루고 있는 수증기 이동통로 메카니즘과는 다른 견해로 고온의 조건에서 ITZs의 균열공극이 후기에 주요한 수증기 이동통로라면, 고온 초기에는 이러한 WPB가 모세관 공극이나 기타 미세한 균열공극보다 우선하여 수증기를 이동시키는 것으로 분석된다.

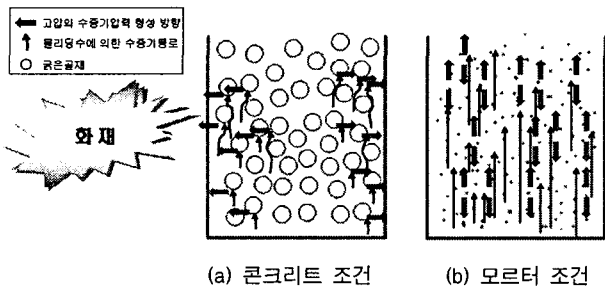


그림 6. 골재유무에 따른 폭렬 메카니즘

4. 결론

본고에서는 그동안 본 연구팀에 의해서 진행되어온 내화시험 중 고성능 콘크리트의 폭렬발생 메카니즘에 대해서 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 폭렬은 콘크리트 구성재료와 내화시험 조건에 따라 발생 시기와 범위가 달라질 수 있는데, 일반적으로 40MPa급 이상의 고강도 콘크리트의 경우 가열시험 후 45분 이내에서 내부온도가 190~250°C 범위에 도달할 경우 발생한다.
- 2) 국외 여러 학자들에 의해 주장되어온 폭렬발생 및 방지 메카니즘의 주된 사항으로 고온의 환경에서 발생한 수증기는 모세관 공극, ITZs 균열공극 및 기타 미세 균열공극에 의해 외부로 빠져나가는데, 고강도 배합에서는 이러한 공극에 의해서는 수증기가 원활히 배출되지 못하고, PP섬유 혼입에 의한 공극들과의 네트워크 형성에 의해 가능해진다.
- 3) 본 연구팀에서는 폭렬발생의 주요한 원인으로 수증기의 이동 통로 메카니즘에 대해서 분석하였는데, 고온의 환경에서 발생한 수증기는 콘크리트 타설시 발생한 WPB를 따라 이동한다. 따라서 원심성형에 의해 제작된 시험체는 WPB의 방향이 수평으로 존재하여 수증기가 쉽게 외부로 배출되어 폭렬이 방지되었고, 모르타르 조건에서 실험한 콘크리트의 폭렬성상은 콘크리트 조건과 달리 전단파괴폭렬이 발생되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 '콘크리트 코리아 연구단'에서 주관하여 시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업 「05- CCT-D11, 고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술」 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

참고 문헌

1. 한천구; 비폭열성 콘크리트, 콘크리트 학회지, 1998.12, pp.5-10
2. J.G. Sanjayan; Design against spalling of concrete in fire, Proceeding of the First Korea-Australia Workshop on Recent Advances in High Performance Concrete, 2005.1, pp.155-169
3. K.D. Hertz; Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal 38, 2003, pp.103-116
4. G. Sanjayan, L. J. Stocks; Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire, ACI Materials Journal, 1993.3, pp.170-173
5. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle; High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure, Cement and Concrete Research 31, 2001, pp. 1487-1499
6. Long T. Phan; High performance concrete at high temperature - an overview, 2002, NIST report
7. N. Khoylou, G.L. England; The effect of moisture on spalling of normal and high strength concretes, Proceedings of the CCMS symposium, Chicago Illinois, 1996.4
8. S.Y.N. Chan, G.F. Peng, M. Anson; Fire tests on ribbed concrete slabs, ACI Materials Journal, 1992. 7-8, pp.345-347
9. C.-M. Aldea, J.-M. Franssen, J.-C. Dotreppe; Fire test on normal and high strength reinforced concrete columns, International workshop on fire performance of high-strength concrete, National institute of standards and technology special publication 919, 1997, pp.109-124
10. F.A. Ali, D.O. Connor, A. Abu-Tair; Explosive spalling of high-strength concrete columns in fire, Magazine of concrete research, 2001.6, pp.197-204
11. A. Meda, P.G. Gambarova, M. Bonomi; High-performance concrete in fire exposed reinforced concrete sections, ACI Structural Journal, 2002.5-6, pp.277-287
12. W.J. Copier; The spalling of normal-weight and light-weight concrete on exposure to fire, Herson, 1979, pp.92
13. X.S. Wang, B.S. Wu, Q.Y. Wang; Online SEM investigation of microcrack characteristics of concrete at various temperatures, Cement and Concrete Research, 2005.7, pp.1385-1390
14. 송훈; 화재시 고강도 콘크리트의 내화성능에 관한 연구, 동경대학 박사학위 논문, 2003
15. P.B. Zdenek, F.K. Maurice; Concrete at high temperature, Material properties and Mathematical Models, Prentice Hall, 1996
16. P.B. Dale; Fibers, Percolation, and Spalling of High-performance concrete, ACI Materials Journal, 2000.5-6, pp.351-359
17. Cheon-Goo Han, Yin-Seong Hwang, Seong-Hwan Yang, N. Gowripalan; Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, Cement and Concrete Research, 2005, pp.1747-1753
18. 이병열; 화재시 고성능 콘크리트의 폭렬방지에 관한 연구, 청주대학교 박사학위논문, 2001.12
19. 황인성; 화재시 고성능 콘크리트의 폭렬에 미치는 재료 및 배합 요인의 영향, 청주대학교 석사학위논문, 1999.12
20. Pierre Kalifa, Francois-Dominique Menneteau, Daniel Quenard; Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, 2000, pp.1915-1927