

1종 경량골재콘크리트의 함수율과 내화특성

Relation Between Water Content Ratio and Fire Performance of Class 1 Structural Light Weight Aggregate Concrete

송 훈^{1*}

Hun Song^{1*}

(Received December 12, 2014 / Revised December 23, 2014 / Accepted December 24, 2014)

Structural light weight aggregate concrete are made with both coarse and fine light weight aggregates, but it is common with the high strength concrete to replace all or part with normal weight sand be called class 1 structural light weight aggregate concrete. Fire resistance of structural light weight aggregate concrete are determined by properties of high water content ratio and explosive spalling. Especially, structural light weight aggregate concrete is occurred serious fire performance deterioration by explosive spalling stem from thermal stress and water vapor pressure. This study is concerned with experimentally investigating fire resistance of class 1 structural light weight concrete. From the test result, class 1 structural light weight concrete is happened explosive spalling. The decrease of cross section caused by explosive spalling made sharp increasing gradient of inner temperature.

키워드 : 구조용 경량골재, 내화성능, 폭발, 함수율

Keywords : Structural light weight aggregate, Fire resistance, Explosive spalling, Water content ratio

1. 서론

최근 건축물의 고층화 및 대형화와 더불어 고강도콘크리트의 적용사례도 빈번하게 보고되고 있다. 철근콘크리트구조는 건축법에서 지정하는 피복두께를 유지하면 별도의 성능확인 절차 없이 내화구조로 적용이 가능하다. 하지만 고강도콘크리트의 경우 화재 초기에 단면손상을 유발하는 폭발이 발생하기 쉽다는 것이 알려지게 되어 성능확인 후 사용이라는 대책이 마련되었다(MOLIT 2008). 구조안정성에 대한 성능확인인 설계기준강도로 적용하며 국내는 압축강도가 50N/mm² 이상이며, 일본은 60N/mm² 초과하는 고강도콘크리트가 대상이다. 내화성능의 판정은 재하시험의 경우는 최대 축방향 수축량 및 수축속도로 판정하며, 비재하 시험의 경우는 내부강재의 온도상승 정도에 따라 판정하며 Table 1과 같다. 또한 콘크리트 종류에 대한 조건으로 고강도콘크리트와 더불어 경량골재콘크리트 2종을 사용한 경우도 포함된다. 경량골재콘크리트는 구조물의 자중경감을 목적으로 경량골재를 적용하여 제조한 콘크

리트로 건축물에의 적용이 빈번해짐에 따라 관심이 높아지고 있다. 경량골재콘크리트는 구조물의 고층화 및 대형화에 효과적으로 대응할 수 있고 가볍기 때문에 구조재의 응력감소로 단면을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 경량골재 제조방법이 다양해짐에 따라 단가를 낮출 수 있어 경량골재를 적용한 콘크리트 구조물의 적용 예도 증가할 것으로 예상된다. 경량골재는 팽창성 혈암, 점토, 플라이애시 등을 주원료로 고온에서 소성하여 제조한 것으로 천연 경량골재의 입형이나 강도 등의 단점을 극복할 수 있고 발포 소성의 정도에 따라 밀도를 제어할 수 있어 구조용 골재로서 사용이 가능하다. 또한 경량골재는 제조되는 주원료나 발포제의 종류에 따라 특성이나 발포정도가 달라지며 공극이나 밀도도 차이가 나므로 사용목적에 적합한 경량골재의 적용이 필요하다(ALA 1998). 구조용 경량골재로서 콘크리트용으로 제조되는 경우 함수율, 공극률 및 기공의 개폐정도의 확인이 필요하며 함수율이 낮은 골재를 적용하는 것이 유리하다.

경량골재콘크리트는 1종과 2종으로 구분하며, 1종은 굵은 골재

* Corresponding author E-mail: songhun@kicet.re.kr

¹한국세라믹기술원 에너지환경소재본부 (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Seoul, 153-801, Korea)

Table 1. Criteria of fire resistance test

	Fire test of concrete column		
	Load bearing condition	Non-load bearing condition	
		Japan	Korea
Load	Vertical load	-	-
Compressive strength	-	60 N/mm ² exceed	50 N/mm ² Over
Column	<ul style="list-style-type: none"> · Maximum axial deflection (mm) ≤ h/100 · Maximum axial deflection speed (mm/min.) ≤ 3 h/1,000 h : Initial height (mm) 	<ul style="list-style-type: none"> · Steel-concrete structure Maximum < 500°C 	<ul style="list-style-type: none"> · Steel-concrete structure Average < 538°C Maximum < 649°C
Heating condition	T=345log10(8t+1)+20 T : Temperature, t : Heating time (min.)		

만 2종은 모래 및 굵은골재 모두를 경량골재로 사용한 것으로 구분한다. 현재 건축공사표준시방서에서 정하는 경량골재콘크리트의 설계기준강도는 1종이 24N/mm²이며, 2종은 21N/mm²이다. 이와 같은 설계기준강도는 ACI의 강도 범위와는 유사하지만 일본의 설계기준강도인 1종 36N/mm², 2종 27N/mm²보다는 낮다.

본 연구는 구조용 경량골재 및 초경량 골재를 사용한 1종 경량골재콘크리트의 함수율에 따른 내화성을 확인코자 한다. 경량골재콘크리트는 비교적 화재에 안전하다고 인정되는 1종으로 한정하였고 설계기준강도의 최대값 이상의 고강도로 적용하여 함수율에 따른 폭발발생 및 내화특성 확인을 목적으로 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트이며, 잔골재 및 굵은골재는 일본산 구조용 경량골재를 사용하였다. 각 사용재료의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 굵은골재는 밀도가 1.67g/cm³, 1.64g/cm³인 경량골재와 0.90g/cm³인 초경량 골재를 사용하였고 골재의 입경은 평균 10~15mm이다. 경량골재콘크리트의 배합표는

Table 2. Properties of using materials

Cement	C	Ordinary portland cement Density : 3.16 g/cm ³ Blain surface area : 3,350 cm ² /g
Sand	S	River sand Density : 2.60 g/cm ³
Light weight aggregate	G	Expanded shale Density : 1.67 g/cm ³ Water absorption ratio (24 h) : 10.3 % Maximum size : 15 mm
	GL	Expanded shale Density : 1.64 g/cm ³ Water absorption ratio (24 h) : 9.7 % Maximum size : 15 mm
	GS	Expanded shale Density : 0.90 g/cm ³ Water absorption ratio (24 h) : 11.9 % Maximum size : 15 mm
Super plasticizer	SP	Poly carbonic acid (AE water-reducing agent)

Table 3과 같다. 경량골재콘크리트의 배합은 단위수량을 190 kg/m³로, 물시멘트비를 35%와 55%로 하였으며 슬럼프 210±30mm를 기준으로 고성능 AE감수제의 양을 정하였다. 콘크리트의 혼합은 100L 강제식 믹서를 사용하였고, 시멘트와 잔골재를 투입하여 먼

Table 3. Mix proportions of concrete

Series	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SP (%)	Air content (%)	Slump (mm)
			Water	Cement	Sand	Aggregate			
LWCG1-35	35	48.5	190	544	741	506	0.4	4.9	230
LWGL1-35	35	48.5	190	544	741	497	0.6	5.6	210
SLWC1-35	35	48.5	190	544	741	273	0.6	5.0	220
LWCG1-55	55	53.5	190	344	901	506	0.6	4.8	180
LWGL1-55	55	53.5	190	344	901	497	0.6	4.5	180

LWCG1-35 (S+G), LWGL1-35 (S+G), SLWC1-35 (S+GS), LWCG1-55 (S+G), LWGL1-55 (S+GL)

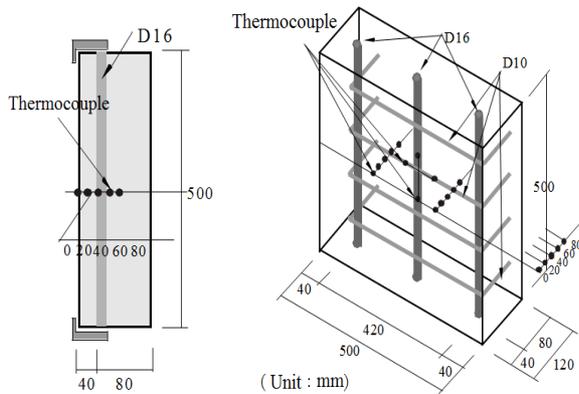


Fig. 1. Shape and thermocouple location of specimen

저 혼합 후, 물과 고성능 AE감수제, 경량골재의 순으로 투입하여 각각 90초간 혼합하여 공기량과 슬럼프를 측정하였다. 내화시험에 사용한 경량골재콘크리트 시험체의 크기 및 형태는 Fig. 1과 같다. 경량골재콘크리트 시험체의 피복두께는 40mm로 하였다. 일반적으로 40mm의 피복두께를 가지는 경우 폭렬에 의한 단면손상이 발생하지 않으면 약 2시간의 내화성능을 가지는 것으로 보고된다(AIK 2008). 또한 내부온도 변화를 측정하기 위하여 시험체 표면 및 표면에서 20mm 깊이로 8개의 열전대를 설치하였고 보조근 및 주근에 각각 2개의 열전대를 설치하였다. 제작된 경량골재콘크리트 시험체는 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 60%의 항온항습실에서 3개월간 기중양생을 실시하였다. 또한 LWCG1-35, SLWC1-35 시험체는 시차를 달리하여 수조와 기중에서 다시 건조하는 방법을 통해 함수율을 달리하여 양생하였다. 또한 함수율은 열전대 등이 설치되지 않은 같은 크기의 형태를 가진 모형 시험체를 제작하여 측정하였다.

2.2 실험방법

내화시험은 시험체를 1시간 내화성능을 예정으로, 일면을 가열하는 방식으로 측정하였고 시험체의 가열면에 입사하는 열량은 수냉식 열유속계를 사용하여 측정하였다. 또한 열유속계는 가열로의 온도조건이 상부와 하부가 약간은 다르게 나타나므로 상하좌우의 위치에 4개를 설치하여 각각에 입사되는 열량을 측정하였다. 열유속계에 의한 입사열량의 측정은 대류나 복사의 구분없이 측정되고 입사면의 온도에 의해 입사열의 값이 결정되므로 표면온도의 측정과 더불어 경량골재콘크리트 단면의 손상에 의한 급격한 내부온도 상승을 판단할 수 있다.

내화성능 평가는 KS F 2257-1 “건축구조 부재의 내화시험 방법”의 표준화재곡선을 적용하였다. 표준화재곡선은 ISO 834에서

규정하는 화재곡선과 동일하며 건축물 화재시의 플래시오버(Flash over)가 발생한 경우를 가정하여 내화성능을 확인한다. 본 경량골재콘크리트의 내화성능의 판정은 비재하 시험방법의 주근 및 늑근의 온도에 의한 판정방법을 응용하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도와 함수율

Fig. 2는 경량골재콘크리트 시험체의 압축강도와 함수율을 나타낸 것이다. 모래와 경량골재를 사용한 1종 경량골재콘크리트 시험체는 LWCG1-35가 59N/mm^2 , LWGL1-35가 68N/mm^2 , SLWC1-35가 51N/mm^2 이었으며, 물시멘트비 55%인 LWGL1-55가 44N/mm^2 , LWCG1-55가 49N/mm^2 의 압축강도를 나타냈다. 내화시험시의 경량골재콘크리트의 함수율은 4.8~6.9%의 범위였고 시

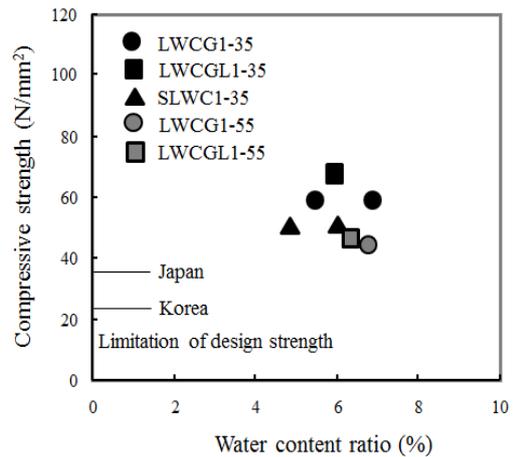


Fig. 2. Compressive strength vs. water content ratio of specimen

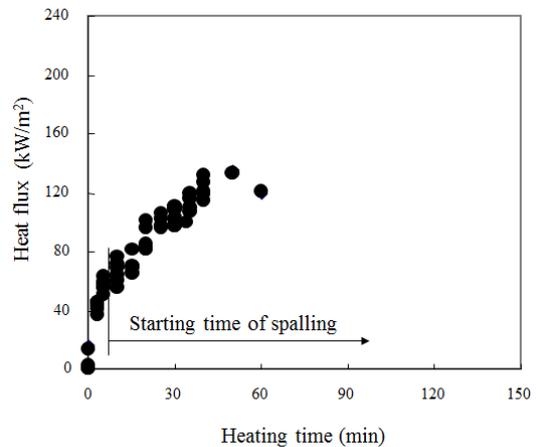


Fig. 3. Heat flux vs. Heating time of light weight aggregate concrete

험체의 함수율을 조절한 LWCG1-35와 SLWC1-35의 동일 시험체의 함수율 차는 1.4%, 1.3%로 거의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 시험체의 함수율에 따라 시험체의 내화성능도 큰 차가 발생하기 때문에 그 차를 줄이기 위해 항온항습 상태에서 시험체의 함수율을 조정한 결과이다.

3.2 입사열 및 온도변화

Fig. 3에 가열시간과 시험체에 입사하는 입사열과의 관계를 나타내었다. 입사열은 가열시간의 증가에 따라 점차로 증가하는 경향을 보였는데 이는 가열에 사용한 곡선이 표준화재곡선이며 초기

에는 급격하게 온도가 상승하고 점차로 완만하게 상승하므로 이와 유사하게 증가하였다. 일반적으로 실물화재의 경우 플래시오버의 발생에 따라 온도가 급격하게 증가하여 약 100kW/m^2 이상의 값을 나타내며 본 실험에서도 단시간에 입사열량이 증가하였다. 이러한 급격한 온도상승은 콘크리트 표층부에 급격한 온도구배를 형성하기 때문에 열응력이나 수증기압이 집중된다. 이에 따라 경량골재 콘크리트는 단면이 손실되는 폭렬이 발생하게 되며 내부온도가 급격하게 상승하게 된다.

경량골재콘크리트 시험체의 내부온도 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 경량골재의 밀도가 1.67g/cm^3 인 LWCG1-35 시험체의 경우

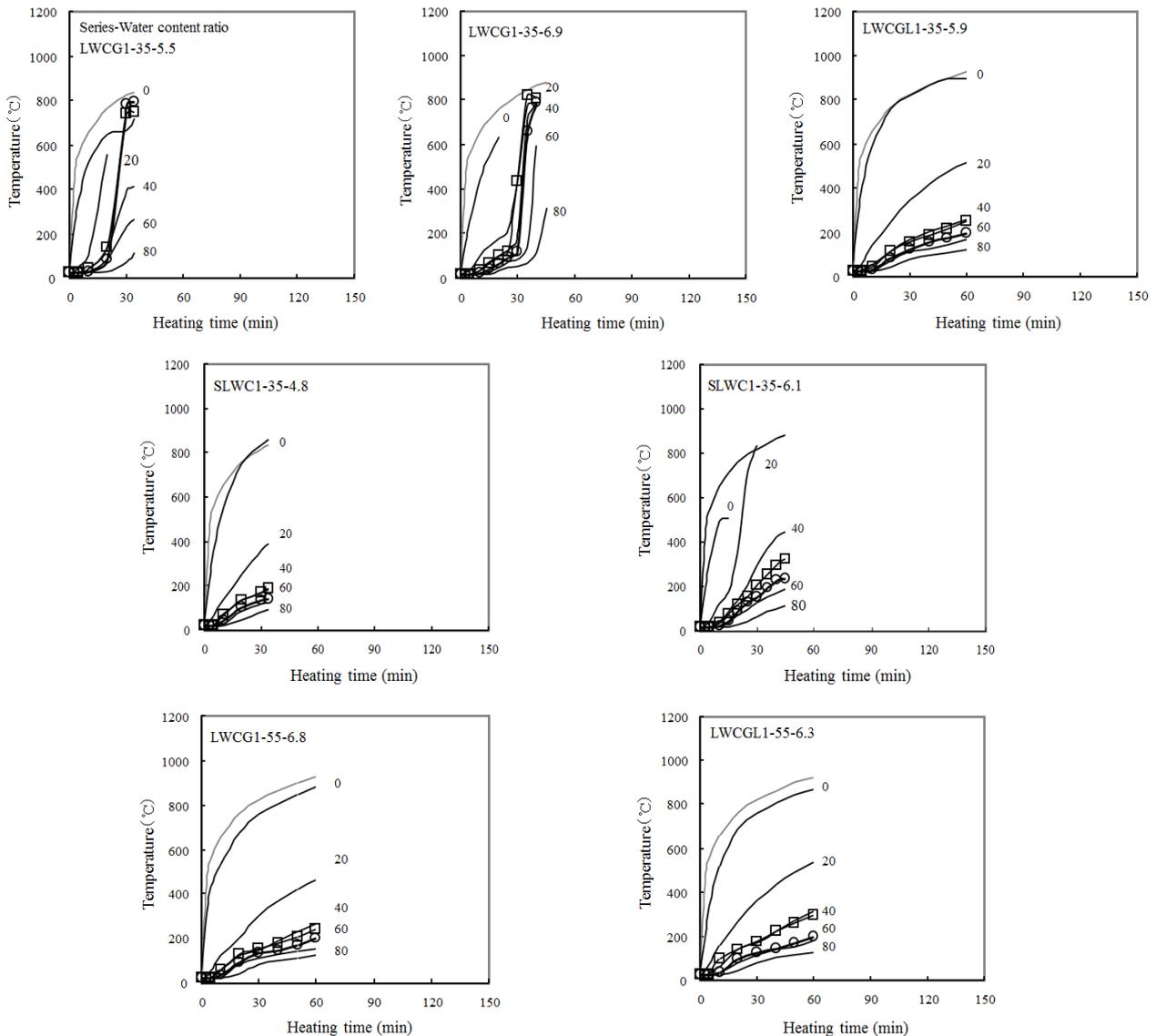


Fig. 4. Internal temperature of light weight aggregate concrete

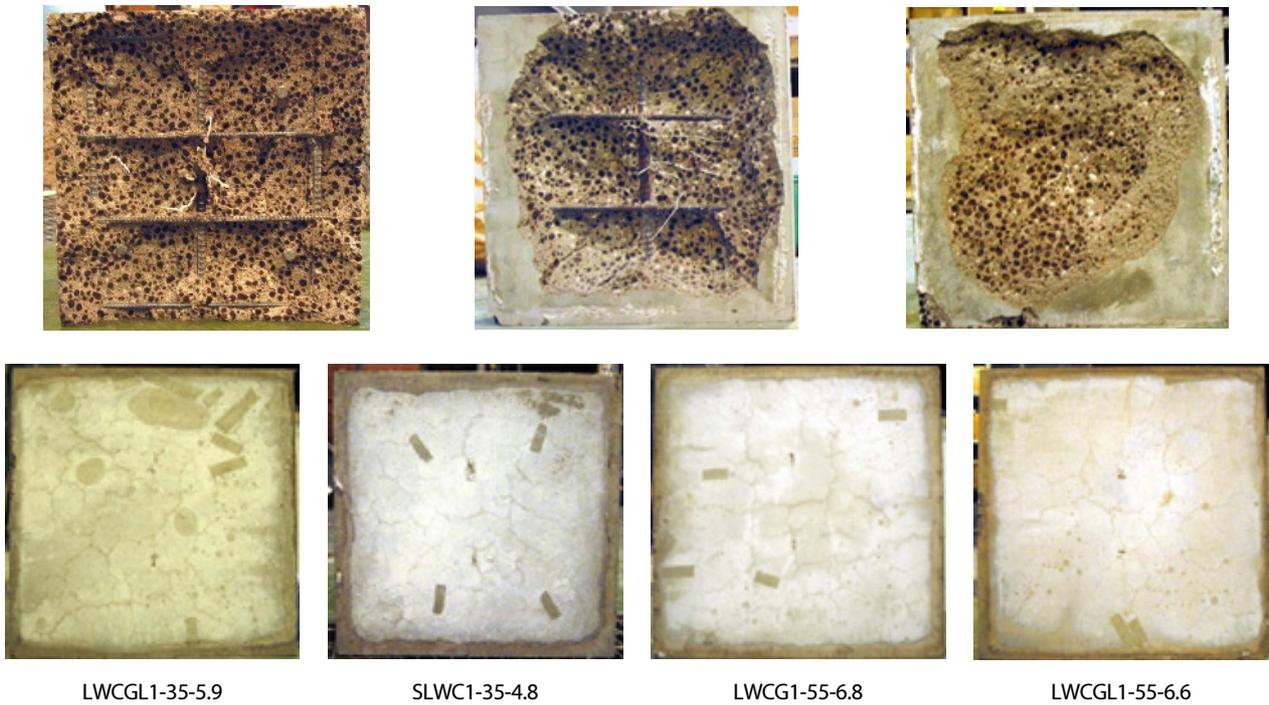


Fig. 5. Concrete surface after fire resistance test

가열초기부터 폭발에 의한 단면손실이 발생하였고 이에 따라 가열면으로부터 순차적으로 내부온도는 급격하게 상승하였다. 이에 따라 시험체 모두 주근이 화염에 노출되어 가열 후 30분경에 538℃를 초과하였고 철근의 깊이까지 단면손상이 발생하였다. 이와 같은 양상은 일반의 콘크리트에서 보이는 단면손상과는 또 다른 형태이며 보다 급격하게 온도가 상승하였다. 일반적으로 콘크리트의 내부온도는 표층부부터 점차적으로 온도가 상승하게 되며 100℃ 부근에서 수분의 증발에 의한 온도정체가 발생하며 폭발이 발생하더라도 대부분 표층부에 한정되는 것이 일반적이다(JCI 2002). 또한 시험체 내부의 온도상승은 먼저 폭발한 시험체가 온도상승의 폭도 컸고 동일 시험체에서도 함수율이 높은 쪽이 내부온도 상승의 폭도 크게 나타났다. 경량골재의 밀도가 0.90g/cm³인 SLWC1-35 시험체의 경우는 함수율이 높은 시험체에서 마찬가지로 폭발이 발생하였지만 표층부에 한정되었고 내부온도의 상승도 한정되었다. 경량골재콘크리트의 경우 표건상태에서 배합되기 때문에 작은 함수율의 차로도 수증기압이 다공체인 골재부분에 집중하기 쉽기 때문에 내화성능에 커다란 영향을 미치는 것으로 보고되고 있고 SLWC1-35의 경우 함수율이 높은 쪽에서 폭발이 발생하였다(Song 2013). 콘크리트 내부에 수분이 많고 시멘트 매트릭스의 조직이 밀실하여 내부에 형성된 수증기의 배출이 원활하지 않을 경우 수증기가 응축되어 폭발이 발생하게 되고 함수율이 높은 경우 경향

성이 크다. 특히, 경량골재콘크리트와 같이 골재의 강도가 낮고 다공성이며, 열전도율이 낮기 때문에 수증기압 및 급격한 온도변화에 따른 열응력이 축적되기 쉬우므로 골재 주변에서 폭발이 발생하기 쉽다.

한편 LWCG1-35, LWCG1-55 및 LWCG1-55 시험체는 고강도로 적용하였음에도 불구하고 폭발이 발생하지 않아 급격한 온도상승은 없었다. 특히, LWCG1-35의 경우 압축강도나 함수율이 비교적 높았음에도 불구하고 폭발이 발생하지 않았는데 사용된 경량골재의 표층부의 일부가 코팅되어 열린 기공의 존재하는 부분이 적어 골재 자체의 흡수율이 작아 발생된 수증기의 응축이 적어진 결과로부터 기인한다. 또한 LWCG1-55 및 LWCG1-55 시험체는 함수율은 높더라도 물시멘트비가 높아 압축강도가 상대적으로 낮았기 때문이다. 하지만 폭발은 발생하지 않아 급격한 온도상승은 발생하지 않더라도 시험체 모두에서 표층부에 균열이 발생하였으며 일부는 눈에 보일 정도의 균열이 발생하였다.

3.3 내화성능 평가

Table 4는 경량골재콘크리트의 폭발의 발생 유무에 따른 내화 시험결과이며 Fig. 6은 폭발이 발생한 시험체의 평균 및 최고깊이를 나타낸 것이다. LWCG1-35 시험체의 경우 함수율에 상관없이 폭발이 발생하였으며 단면의 손상깊이도 비교적 큰 것을 알 수 있

Table 4. Result of fire resistance test

	LWCG1-35		LWCG1-35	SLWC1-35		LWCG1-55	LWCG1-55
Compressive strength (N/mm ²)	59		68	51		44	49
Unit weight (kg/m ³)	2,030		1,929	1,896		1,967	1,942
Water content (%)	5.5	6.9	5.9	4.8	6.1	6.8	6.6
Explosive spalling or not	○	○	-	-	○	-	-
Maximum temp. of main bar (°C)	744	809	200	188	188	202	196
Maximum temp. of stirrup (°C)	794	827	248	141	141	242	294
Heating time (min.)	35	45	60	35	45	60	60

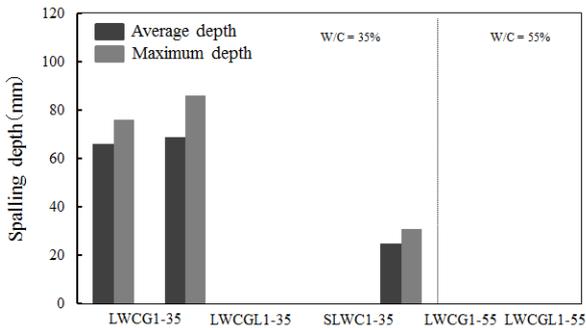


Fig. 6. Spalling depth after fire resistance test

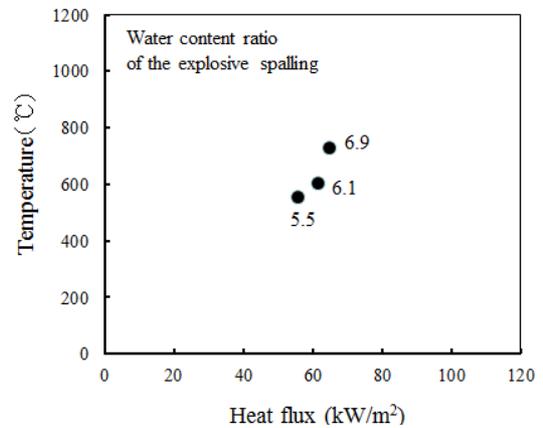


Fig. 8. Temperature and heat flux in explosive spalling

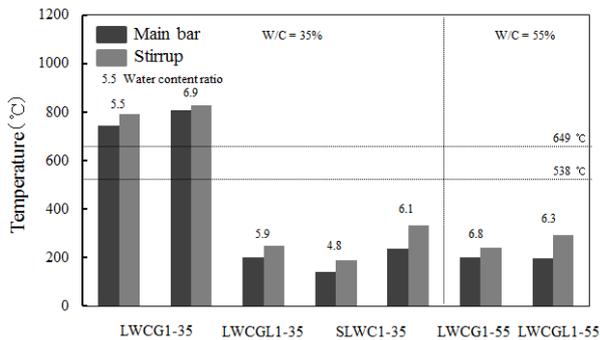


Fig. 7. Internal temperature of light weight aggregate concrete

다. 또한 폭발이 발생한 SLWC1-35 시험체의 경우 폭발이 발생하더라도 표층부에 한정되어 폭발깊이도 제한되었다. Fig. 7은 시험체의 주근 및 늑근의 최고온도를 나타낸 것으로 폭발깊이와도 연관된다. 폭발이 발생하여 표층부의 단면손실 정도에 따라 주근 및 늑근의 온도도 급격하게 변화하는 것을 알 수 있으며 LWCG1-35 시험체는 판정기준에서 정하는 평균 538°C와 최고온도 649°C를 넘어 1시간의 내화성능도 가지지 못하는 것으로 나타났다. 또한 SLWC1-35와 같이 폭발이 발생하더라도 표층부에 한정되면 주근이나 늑근이 고온에 노출되지 않아 내부온도의 상승도 완만하게 된다. 이러한 완만한 온도상승은 내화성능의 예측이 가능하다. 또한 SLWC1-35는 폭발이 발생했지만 비재하 시험에서 규정하는 평

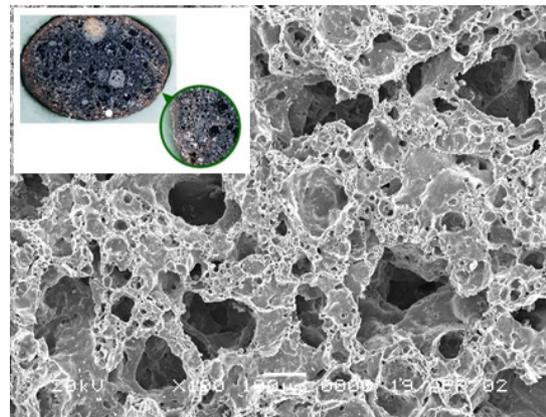


Fig. 9. Micro structure and surface of light weight aggregate

균온도 및 최고온도에 도달하지 않았기 때문에 1시간 이상의 내화 성능을 가진다. 폭발이 발생하지 않은 시험체의 경우는 콘크리트 내부의 온도상승 정도가 작아 충분히 성능을 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 폭발이 발생한 시점에서의 로내온도 및 입사열을 나타낸 것으로 556~730°C와 55.4~64.7kW/m²의 범위였다.

경량골재콘크리트의 경우 Fig. 9와 같이 골재 자체가 다공성을 가지고 초경량 골재의 경우 60% 정도까지 공극으로 형성되므로

흡수율이 크다. 이러한 특성은 콘크리트 제조시 혼합수를 흡수하게 되며 배합에 어려움이 따른다. 그러므로 표건상태로 조절하여 혼합하는 것이 일반적이고 내부에 수분을 많이 가지고 있으므로 양생 중에도 균열 등의 하자가 발생하기도 한다. 또한 콘크리트 내부에 포함된 수분은 화재와 같이 급격한 온도변화가 생기는 경우 폭발이 발생할 수 있다. 경량골재콘크리트도 함수율의 정도에 따라 폭발의 정도의 차는 발생하지만 단면손상이 크고 지속적으로 발생하므로 고강도콘크리트의 내화성능 판정과 연관 짓기에는 어려움이 따른다. 하지만 경량골재콘크리트가 함수율에 민감하며 폭발의 정도가 크다는 것을 확인할 수 있으며 고강도콘크리트와 동등한 폭발의 경향성을 가지므로 성능검증 및 확인절차가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

1종 경량골재콘크리트의 내화성능을 확인하기 위한 본 연구의 범위에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1종 경량골재콘크리트 폭발 발생시의 로내온도 및 열유속은 $556\sim 730^{\circ}\text{C}$ 와 $55.4\sim 64.7\text{kW/m}^2$ 의 범위이며 실제 규모의 화재에서도 충분히 발생할 수 있고 폭발의 발생정도가 일반 콘크리

트에 비해 크다.

2. 경량골재콘크리트와 같이 골재의 강도가 낮고 다공질인 경우 함수상태에 따라 폭발이 발생할 가능성이 크기 때문에 함수율이 작은 경량골재의 사용이나 폭발방지를 위한 대한 대책이 필요하다.

References

- AIK, (2008). Fire resistance design guidelines for high strength concrete structures, 178-179.
- ALA, (1998). ALA Concrete, High strength concrete, Technical report of light weight concrete, 1 [In Japanese].
- JCI, (2002). Committe report for fire safety of concrete structures [In Japanese].
- MOLIT, (2008). Management criteria of high strength concrete in column and beam, MOLIT Notification No, 2008-334.
- Song, H., Jo, Y.K, Chu, Y.S, and Lee, J.K, (2013). Fire resistance of light-weight concrete using structural light-weight aggregate, Journal of the construction and environment research institute, **8(2)**, 146-153.

1종 경량골재콘크리트의 함수율과 내화특성

경량골재콘크리트는 구조물의 자중경감을 목적으로 경량골재를 적용하여 제조한 콘크리트로 구조물의 고층화 및 대형화에 효과적으로 대응할 수 있는 장점이 있다. 하지만 경량골재는 다공체이므로 화재와 같은 고온에 노출되는 경우 수증기압이나 열응력에 의해 골재 주변으로 응력이 집중될 가능성이 커 폭발이 발생하기 쉽다. 본 연구는 구조용 경량골재를 사용한 1종 경량골재콘크리트의 함수율과 내화특성과의 관계를 검토코자 하며, 실험결과 압축강도와 함수율이 높은 경량골재콘크리트는 폭발의 가능성이 높기 때문에 함수율이 작은 골재의 사용이나 폭발방지를 위한 대책이 필요하다.