폐석분을 활용한 압출성형 콘크리트 패널의 내화성능 평가에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Fire-Resistant Performance of Extruding Concrete Panel using Crushed Stone Powder

박지선*

Park, jisun

Abstract

Crushed stone powder generated during processing of artificial stone plates and stone tiles is improperly disposed, owing to the fact that many stone processing companies are small and poor, and because of rising costs for disposal by consignment. An efficient recycling and disposal plan is therefore required to address this situation. In this study, extruding concrete panels were made using crushed stone powder as a means to utilize this unused recycled resource and then the fire resistance test was performed to verify application of building materials. Fire resistance performance testing was carried out according to the current provisions of KS F 2257-1, 8. Pilot testing provided primary confirmation of the fire resistance performance of crushed stone powder substituted silica powder, and based on these results a full scale specimen was tested. Test results showed that crushed stone powder substituted silica powder sufficiently satisfied current fire resistance requirements for non-loadbearing vertical separating elements.

Key words : Crushed stone powder, Extruding concrete panel, Fire resistance performance

요 지

석재가공 과정에서 발생하는 폐석분은 가공업체의 영세성과 위탁처리비용의 상승으로 적절한 처리가 이루어지지 않고 있으며 이에 국가 차원의 효율적인 재활용 대책 및 처리방안이 필요한 실정이다. 본 연구는 이와 같은 미활용 순환자원을 활용하고자 폐석분을 이용하여 압출성형 콘크리트 패널을 제작하였고 건축부재의 기본 성능 중 내화성능을 평가하였다. 내화성능 평가는 현행 KS F 2257-1, 8의 규정한 바에 따라 수행하였으며 파일럿 시험결과로부터 폐석분 치환 패널의 내화성능을 1차적으로 확인하였고 이 결과를 토대로 실험크기의 시험체를 제작하였다. 실험시험결과로부터 폐석분 치환 콘크리트 패널은 현행 건축 재료로서 수직 비내력 구획 부재의 내화성능을 충분히 만족하였다.

핵심용어 : 폐석분, 압출성형 콘크리트 패널, 내화성능

1. 서 론

국내 건축용 판재, 석조작품 등의 가공과정에서 발생하는 폐석분과 석분슬러지의 연간 발생량은 2003년 기준으로 각각 약 24만톤, 약 55만톤으로 톤당 처리비용(약 15,000원)고려하면 연간 처리비용이 약 120억원에 달한다(2012년 현재 폐석분 처리비는 약 20,000원).

그러나 폐석분의 처리는 현행 「폐기물 관리법」 기준에 따라 전량 환경처리업체에게 위탁처리 하도록 규정되어있다.

한편, 국내 석재 가공업체의 사업장 규모를 살펴보면 평균 생산액이 10.6억원, 평균 종업원수는 10명 내외로 영세하여

폐기물 처리비의 상승에 따른 처리 비용의 부담 증가로 폐석분 및 슬러비 발생시 즉시 처리하지 않고 사업장 내부에 존치하는 경우가 많아 가공업체의 대표가 법적인 체재를 받게 되는 등 현장에서의 어려움이 상존하고 있는 실정이다¹⁾.

따라서 폐석재 처리를 위해 가중되는 업계의 부담을 줄이고 국가 차원에서의 건설폐자재의 순환자원으로의 활용을 도모하고자 폐석분의 효율적인 처리방법과 현실적인 재활용 촉진의 위한 대안 제시가 필요하다.

선진국의 경우 폐석분 및 슬러지를 사용한 순환자원의 생산기술이 상당히 진척되어 건축용 인조석 판재 및 타일 등이 개발·상용화되어 있다²⁾.

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 전임연구원(Tel: +82-31-910-0109, Fax: +82-31-910-0713, E-mail: batsun@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology

1) KCM, Research and Development Planning of Advanced Eco Friendly Construction Materials, 2009

2) KCL, Development of Artificial Stone and Building Panels using Waste Stone Powder, Annual Report, 2012

국내의 경우 폐석분을 이용하여 콘크리트의 결점인 건조수축과 미세균열을 방지하는 원료로써 시멘트계의 각종 건축자재에 이용하여 미세균열을 줄이는 연구가 일부 진행되었다²⁾. 그러나 폐석분의 함유율에 따라 콘크리트 내부의 매트릭스 결정구조가 밀실한 구조로 생성되지 못하고 양생시 건조수축에 의한 변화로 인하여 강도의 저하가 나타나게 되는 단점이 있어 이에 대한 개선연구가 필요한 실정이다.

한편, 시멘트 압출성형 공정은 시멘트 중의 CaO와 규석분에서 공급되는 SiO₂의 수열 합성을 통하여 강도 형성이 이루어진다. 여기에 1, 2차 촉진 양생을 통하여 이러한 반응을 가속화하며, 특히 2차 고온고압양생을 통하여 확실한 물질의 형성이 이루어지게 된다. 그러므로 적정 CaO/SiO₂ mole ratio(이하, C/S 몰비)가 생성되지 않으면 이러한 반응물질 공급원의 불균형으로 인하여 강도 형성에 문제가 발생하게 된다.

이에 본 연구에서는 폐석분 사용에 따른 SiO₂ 공급원의 부족을 보완하기 위하여 시멘트 사용량을 조절하여 미수화 시멘트량을 조절하고자 하였으며 나머지는 모래 등의 결정화된 충전재로 보완하는 방향으로 시험을 진행하였다.

강도저하로 인한 문제점을 개선하기 위하여 폐석분 사용시의 최적 C/S 몰비와 SiO₂, Al₂O₃와 시멘트 재료와의 반응을 통해 토버모라이트(tobermorite) 결정 생성을 촉진할 수 있는 효율적인 양생 환경을 도출하여 폐석분을 활용한 압출성형 콘크리트 패널을 개발하였다.

또한 개발한 폐석분 재활용 압출성형 콘크리트 패널의 건축자재로써의 사용성을 평가하기 위하여 기본적으로 갖추어야 할 요건인 내화성능을 평가하였다.

내화성능평가는 1차적으로 파일럿(pilot) 시험체를 제작하여 폐석분 치환에 따른 내화성능을 평가하고 이를 토대로 3,000×3,000 mm²의 실물크기 시험체를 제작하여 내화시험을 수행하였으며 현행 내화기준에서 제시하는 내화성능 확보여부를 평가하였다.

2. 폐석분을 활용한 압출성형 콘크리트 패널

2.1 패널제작

폐석분을 활용한 압출성형 콘크리트 패널은 일반적인 압출성형 패널 제작시 투입되는 규석분을 폐석분으로서 50% 비율로 치환하여 제작하였다(Fig. 1 참조).

폐석분 치환에 따른 강도저하 문제는 수열반응(Hydrothermal Reaction)을 이용하여 해결하고자 하였다. 이 반응은 고온고압의 물리 화학반응에 관여하는 것을 의미하며 반응을 이용하여 특정한 재료를 합성하는 경우, 이를 수열합성(Hydrothermal Synthesis)이라한다. 폐석분의 수열합성을 통한 강도증진의 메커니즘은 규산칼슘 수화물(CSH) 생성에 기인하며 수열합성에 의한 규산칼슘 수화물의 종류는 다양하나 주로 C/S 몰비, 수열합성 온도, 압력, 시간 등의 양생조건에 따라 달라지게 된다.

이에 본 연구에서는 수열합성반응이 주로 나타나는 범위 0.87, 0.89의 C/S 몰비가 유지될 수 있도록 배합인자의 비율

Fig. 1. Extruding concrete panel using crushed stone powder

Table 1. Mixing data

배합명	C/S 몰비 (%)	배합비(단위: kg/m ³)					배합수
		시멘트	규석분	모래	폐석분	실리카흙	
P*	0.89	226.8	134.4	61.0	0.0	0	80
C*-89	0.89	167.0	67.1	61.0	58.8	0	65

P: Plain 배합, C: 폐석분 50% 치환

Table 2. Main chemical compositions of crushed stone powder (unit: kg/m³)

성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	기타
폐석분	555.0	145.0	98.4	60.8	101.0	9.6	40.8
규석분	904.7	28.7	14.9	8.0	28.8	9.2	14.9
시멘트	204.8	48.8	11.3	634.7	30.4	35.6	34.4

을 조절하였으며 폐석분은 활성반응에 관여하지 않는다는 조건하에 배합계획을 작성하였다. 또한 사전시험을 통한 폐석분 사용에 따른 배합시 유동성 저하작용 예측에 따라 S사의 40,000 cps(centipoise) 증점제를 사용하였다.

시험체의 제작은 50Ø 크기의 배출 직경을 갖는 일본 I사의 파일럿 진공압출성형기를 사용하였다. 이를 이용하여 시험체의 단면이 두께 12 mm, 폭 110 mm로 배출 될 수 있도록 하여 휨강도 측정과 경도 측정을 수행할 수 있도록 5 kg의 용량으로 배합당 2회씩 압출시험을 실시하였다. 파일럿 압출성형기의 냉각수 온도는 20°C로 하였으며 오거 속력은 3 m/s, 압력은 2.2 km/cm²로 유지하였다.

배합은 보강섬유로 사용된 펄프 및 PP섬유를 먼저 믹서에 투입 후 3분간 사전 배합 실시한 후 계량된 시멘트, 규석분, 폐석분, 규회석, MC(증점제)를 투입하여 3분간 배합하였다. 또한 재료간의 사전배합 후 교반믹서에 투입 후 배합수를 첨가하여 배합을 완료하였고(Table 1 참조) C/S 몰비는 Table 2의 성분별 조성비를 참조하여 계산하였다.

시험체 배출 후 표면경도 측정을 실시하고 양생을 실시하였다. 전양생은 25±3°C, 상대습도 60±5% 조건의 항온항습실에서 양생을 실시하였으며 상압증기양생은 65°C 조건의 워터바스(Water Bath)에서 6시간 실시하였다. 고압증기양생(Autoclave)은 180°C, 10기압 조건에서 승온 시간을 제외하고 6시간 동안 실시하였다.

Fig. 2. Comparison of bending strength

이러한 촉진양생이 종료된 후 7일간(촉진양생 및 전양생 기간 포함)을 경과한 후에 완성되었다.

2.2 휨강도

폐석분을 치환에 따른 압출성형 콘크리트의 강도저하 여부를 평가하기 위하여 KS F 4735에 따라 휨강도를 평가하였다³⁾.

휨강도 측정은 P와 C-89배합 시험체별 3회 측정된 결과의 평균값을 나타내었으며 결과는 Fig. 2와 같다.

휨강도 결과에서 배합설계시 14 MPa로 휨강도를 설정하였던 P배합 시험체는 14.9 MPa 수치를 나타내어 중점제 사용과 배합수, 양생과정이 정상적으로 진행되었음을 확인할 수 있었다. C-89배합 시험체 14 MPa의 휨강도를 발현하여 폐석분 치환에 따른 휨강도 저하가 P배합의 약 94% 수준을 나타내었다. 이는 폐석분에서 큰 비율을 차지하고 있는 SiO₂ 성분이 CaO와의 수열합성과정에서 토버모라이트 결정이 충분히 생성되어 압출성형 콘크리트 제품의 KS 기준의 현행 휨강도 유사하게 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통해 폐석분을 치환한 압출성형 콘크리트 제품의 강도 저하에 대한 문제는 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 내화성능 평가

폐석분을 치환하여 생산한 압출성형 콘크리트 패널이 건축용 재료로 활용되기 위해서는 물리적, 화학적, 방화 및 내화성능 등이 충분히 확보되어야 한다. 이중 내화성능은 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」 [별표 1]에서 규정한 바와 같이 건축물의 용도 및 규모에 따라 각각 1, 1.5, 2시간의 내화시간을 확보하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 압출성형 콘크리트 패널의 최대 요구 내화시간인 2시간 성능확보 여부를 파악하고자 내화성능 평가를 실시하였다.

성능평가는 1차적으로 파일럿 시험을 통해 폐석분 치환에 따른 내화성능 확보 가능여부를 파악한 후 최종적으로 실물 크기 시험체를 제작하여 건축자재료의 사용성을 검증하였다.

내화성능 시험은 KS F 2257-1에 따라 수행하였으며 성능

확보 여부는 KS F 2257-8에 따라 차염성과 차열성 기준에 근거하여 판정하였다^{4,5)}.

3.1. 파일럿(pilot) 시험

파일럿 시험은 3가지 배합에 따라 성능을 평가하였

다. 즉, 기존 압출성형 콘크리트 패널 시험체(A), 폐석분을 50% 치환한 시험체(B), 폐석분을 50%치환하고 내화성능 확보를 위하여 고로슬래그를 첨가한 시험체(C)를 제작하여 성능을 평가하였다(Table 3 참조).

여기서, C 시험체는 폐석분만을 치환하였을 경우 진공압출에 의한 성형과 강제 양생을 통하여 조직이 치밀해짐에 따라 공극 구조에 의한 열팽창 제어가 불리할 수 있으므로 원료 자체의 내화성이 높은 재료를 첨가하여 B시험체의 내화성능이 발휘되지 않을 경우를 대비하여 추가적으로 제작한 것이다.

내화시험은 KS F-2257-1에 준하여 소형 가열로를 이용한 시험을 실시하고 압출성형패널의 가열이면 온도측정과 특성 관찰로서 내화성능을 평가하였다(Fig. 3 참조). 시험에 사용된 가열로의 최대온도는 1,200°C이다. 시험체는 각 배합당 2세트(set)씩 시험하였으며 표준온도가열조건에 따라 120분 시험을 실시하였다.

차열성 분석을 위하여 각 시험체별로 외면 패널 중심에 열전대를 고정하여 온도를 측정하였다. 차염성은 패널의 폭렬여부 및 균열조사를 통해 분석하였다.

시험체는 각 배합에 따른 공장 성형품을 500×500 mm²의

Table 3. Mixing data of fire-resistant specimen

배합명	배합비(단위: kg/m ³)							
	시멘트	고로슬래그	규석분	폐석분	모래	펄프	P.P	M.C
A	464	0	313	0	140	60	13	10
B	464	0	145	168				
C	325	139	145	168

Fig. 3. Heating furnace

3) Korean Agency for Technology and Standards, KS F 4735 Extrusion Concrete Panels.

4) KS F 2257-1 Method of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements.

5) KS F 2257-8 Method of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-Specific Requirements for Non-Loadbearing Vertical Separating Elements.

Fig. 4. section detail

로 절단하여 내화시험 가열로에 거치하여 시험을 실시하였다. 각 시험체의 단면구조는 Fig. 4와 같이 복합구조로서 50 mm 압출성형패널 중심에 50 mm 유리섬유를 삽입한 구조로 하였다.

120분 가열후 시험체의 파괴양상은 Table 4와 같이 나타났다. 기본배합으로 제작한 A시험체에서는 패널의 중공부에 의한 길이방향으로의 균열을 확인할 수 있었다. 폐석분을 50% 치환한 B시험체에서는 표면부에서 사방으로 균열이 발생하였다.

C시험체인 폐석분 50%, 고로슬래그 30%가 치환된 배합에서는 길이방향과 사방방향으로의 균열이 발생하였다. 그러나 모든 시험체에서 폭발현상이나 갈라짐 등의 파손은 발생하지 않아 KS F 2257-1, 8에서 요구하는 차염성능을 만족하였다.

다만 C시험체에서 균열이 가장 많이 발생한 이유는 4,000 blain 분말도를 가진 고로슬래그 미분말을 치환한 배합의 경우, 슬래그를 사용한 무기물질의 특성상 수밀성이 향상되지만 상대적으로 건조수축에 불안정해진다. 따라서 고로슬래그 미

Table 4. Test results of pilot specimens

배합명	외측면 패널	내측면 패널
A		
B		
C

Fig. 5. Pilot specimens temperature distributions

분말을 함유한 배합의 균열이 심하게 나타난 것은 건조수축에 의한 미세 균열의 발생에 따라 이 부분을 통하여 열전달이 확산되었기 때문인 것으로 판단된다.

B시험체의 균열양상으로부터, 균열의 폭도 비교적 작고 외기에 접하는 외측면 패널에서는 균열이 거의 발생하지 않았다.

균열길이는 A 및 C시험체가 최대 약 500 mm까지 진전하였고 B시험체는 약 260 mm까지 발생하였다.

한편, 각 시험체별 배합에 따른 차열성 시험결과는 Fig. 5와 같다. 압출성형 콘크리트 패널의 최대 내화요구 성능시간 120분 동안 초기 온도보다 120°C 증가하여 기준값인 140°C 미만으로 기준 차열성을 만족하였다. 또한 구성재료의 조성비율에 따른 온도 상승의 차이는 크게 나타나지 않았다.

차열성과 차열성의 평가결과로부터 폐석분 치환 패널은 현행 KS F 2257-1, 8에서 요구하는 면패드의 착화나 게이지의 갈라짐 등이 발생하지 않아 차열성을 만족하였고, 차열성 또한 상승온도가 140°C 미만으로 기준을 만족하여 실제 건축 현장에 적용하여도 내화성능 확보가 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 실물시험

실물시험은 파일럿 시험결과로부터 폐석분을 50% 치환한 압출성형 패널만을 제작하여 2시간 내화성능 확보여부를 평가하기 위하여 실시하였다.

시험체 사용된 압출성형 패널은 P회사 음성공장에서 생산한 것으로 폭 600 mm, 두께 50 mm의 압출성형 패널 5개를 사용하여 크기 3,000×3,000 mm²로 실물시험체를 제작하였다.

시험체 양단에는 50 mm 폐석분 압출성형패널을 사용하고 심재로 밀도 48 K의 글라스울을 사용하였다. 또한 상하부에 U-bar를 사용하였으며 고정틀에 3면을 구속하고 1면은 비구속으로 하여 틈사이는 화염이 전파되지 않도록 세라믹울로 채워넣었다(Fig. 6 참조).

온도 측정을 위한 열전대는 총 10개소에 설치하였다. 일반적으로 3000×3000 mm² 크기의 시험체는 수평연결을 하지 않으므로 KS F 2257-8에서 규정하고 있는 a) 시험체 상부 끝 부분 너비 중앙 지점, b) 스테드의 끝 부분 지점, c) 구속된 수직 끝 부분의 높이 중앙 지점, d) 구속되지 않은 수

Fig. 6. Full scale specimen details

Fig. 7. Full scale specimens temperature distributions

직 끝 부분의 높이 중앙 지점, e) 수직 조인트의 중앙 지점 으로서 가능한 조인트에 근접한 지점(양압 부문)과 평균 및 최고 상승 온도 측정이 예상되는 부위 5군데를 포함하여 총 10개소에 설치하였다(Fig. 6 참조).

차열성에 대한 성능결과를 살펴보면 비가열면 평균온도 및 최고온도가 각각 91, 132°C를 나타내어 현행 차열성 기준 157°C 이하 및 197°C 이하를 충분히 만족하였다(Fig. 7 참조).

또한 가열하는 동안 폭렬이나 갈라짐이 발생하지 않아 균열게이지의 관통은 나타나지 않았으며, 면패드의 착화 및 화

Table 5. Test results of non-heating side

시간(hour:min.)	관찰내용
00:48	상부 연기발생
01:35	우측 비 구속면 면색중
01:44	우측 비 구속면 연기발생
02:00	시험종료

Table 6. Comparison of test results and overseas standard

시험항목	성능기준		측정결과		성능
내화성능	차염성	균열게이지 관통 되지 않을 것	관통되지 않음	120분	120분
		면패드 착화 되지 않을 것	착화되지 않음		
		화염발생 없을 것(10초 이상)	발생되지 않음		
	차열성	초기 평균온도	-	17°C	-
		비가열면 평균온도	157°C	91°C	130분
		비가열면 최고온도	197°C	132°C	120분
		이동열전대	-	-	-

Fig. 8. Test results of real size specimens

염발생도 관측되지 않아 KS F 2257-1, 8에서 규정하는 차염성능을 만족하였다. Table 5와 Fig. 8에서는 가열후 패널의 상태를, Table 6에서는 전체 내화성능결과를 정리하였다.

실물시험체에 대한 내화성능 평가결과로부터 폐석분을 치환한 압출성형 패널은 건축 재료로서 수직 비내력 구획 부재의 내화 기준에서 요구하는 최대 내화성능 2시간을 충분히 만족하였다.

5. 결 론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 폐석분을 순환자원으로 활용하고자 기존의 압출성형 콘크리트 패널에 규석분 함량을 일부 폐석분으로 치환하여 압출성형 콘크리트 패널을 제작하였으며 폐석분의 치환에 따른 강도 저감의 문제는 수열합성 반응을 이용하여 제어하였다.
- 2) 폐석분을 치환한 압출성형 콘크리트 패널의 내화성능은 1차 파일럿시험과 2차 실물시험을 수행하여 평가하였으

며 1차 파일럿시험에서 기존 압출성형 패널과 폐석분 치환 패널의 내화성능은 거의 동등하였으며 외측부 패널에서는 오히려 균열이 더 적게 나타났다.

- 3) 실물시험결과로부터 폐석분 치환 콘크리트 패널은 현행 건축 재료로서 수직 비내력 구획 부재의 최대 내화성능 시간인 2시간을 충분히 만족하여 향후 제품의 상용화를 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010 건설기술혁신사업(과제번호: 10건설핵심 D10)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Korea Institute of Construction Materials, Research and Development Planning of Advanced Eco Friendly Construction Materials, 2009.
- Korea Conformity Laboratories, Development of Artificial Stone and Building Panels using Waste Stone Powder, Annual Report, 2012.
- Korean Agency for Technology and Standards, KS F 4735 Extrusion Concrete Panels.
- Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2257-1 Method of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements.
- Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2257-8 Method of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-Specific Requirements for Non-Loadbearing Vertical Separating Elements.

© 논문접수일 : 2012년 11월 13일

© 심사외뢰일 : 2012년 11월 15일

© 심사완료일 : 2012년 11월 29일