

석탄폐기물을 이용한 강화플라스틱 소재개발(III)

윤중수¹ · 이상우² · 최종문^{1,†}

¹경동대학교 임상병리학과, ²이선세라믹(주)

Development of Reinforced Plastic using Coal Waste (III)

Joong-Soo Yoon¹, Sang-Woo Lee², and Jong-Moon Choi^{1,†}

¹Department of Biomedical Laboratory Science, Kyungdong University, Wonju 26495, Korea

²Research Center, Leesun Ceramic Co. Ltd, Donghae 25745, Korea

Received July 8, 2018/Revised August 21, 2018/Accepted September 15, 2018

Reinforced plastics containing waste polypropylene, waste coal, and fly ash were manufactured, and the usefulness of reinforcing agents such as waste coal and fly ash was investigated from the physical properties of the manufactured reinforced plastics. The physical properties (tensile strength, tensile elongation, flexural strength, impact strength, and hardness) of the manufactured reinforced plastic using waste coal or fly ash as the reinforcing agent were superior to those of general particle-reinforced plastics but inferior to those of fiber-reinforced plastics. When increasing amounts of reinforcing agents were added, the physical properties of the reinforced plastic increased proportionally. In general, the efficiency of fly ash as a reinforcing agent is better than that of coal waste. Using a combination of the two reinforcing agents, improved the physical properties of reinforced plastic compared to those of the individual agents because of the homogeneity of the mixture. Because coal waste and fly ash may contain various harmful ingredients, their elution will be of concern in long term. However, harmful components such as cadmium, chromium, mercury, lead, and organic bromine were not detected in these wastes. The manufactured reinforced plastics investigated in this work may be used to replace the concrete rain storage systems, which have a high construction cost, weak shock-resistance, and are difficult to manage. Moreover environmental problems due to waste coal and fly ash can be minimized if they are reused as reinforcing agents.

Key words: reinforced plastic, physical property, reinforcing agent, coal waste, fly ash

1. 서 론

국내 에너지산업의 근간이 되어온 석탄은 국민 생활 수준 향상과 대체 화석연료 사용 증가 및 환경오염 문제로 인해 역할이 많이 감소되었다¹⁾. 무엇보다 큰 문제는 석탄 산업이 자연경관 파괴와 지반침하를 야기하고, 각종 폐석(굴진 및 선탄)을 다량 발생시킨다는 점이다²⁾. 정부통계에 의하면 지금까지 발생된 석탄폐석은 총 2억 톤 이상이며 가행되는 탄광으로부터 새롭게 적치된 양도 약 3,600만 톤에 이른다고 보고되어있다. 이렇게 적치된 석탄폐석을 그동안 제대로 처리하지 않아 이들의

처리 및 복구에 천문학적 비용이 소요될 것으로 보여 국가적으로도 이 문제가 대단히 심각함을 알 수 있다^{1,2)}.

지금까지 석탄폐석의 처리방법으로는 발생지역과 가까운 장소에 후처리를 위해 노천적재를 하거나 단순 매립법을 이용하였으나 유해침출수 처리³⁻⁵⁾가 완벽하지 않아 환경훼손의 정도가 너무 심한 문제가 있다⁶⁾.

한편 석탄산업 합리화정책에 의해 생산된 석탄은 화력발전이 활용되어 매년 약 490만톤의 석탄재가 폐기물로 발생되며 앞으로 석탄 화력발전이 증가될수록 이 양도 지속적으로 증가될 것으로 보인다. 특히, 석탄재 중에서 주성분이 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화철

[†]To whom correspondence should be addressed.

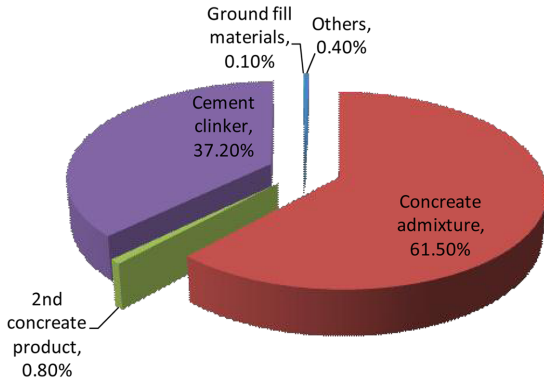


Fig. 1. Recycling status of fly ash⁹⁾.

(III)(Fe₂O₃) 등이고, 미량의 칼륨, 인, 붕소, 코발트, 마그네슘 등을 포함하는 가볍고 미세한 구형 입자를 Fly ash¹⁾라고 하는데 넓은 의미에서 이는 인공 포졸란(po-zolan)⁷⁾에 해당하므로 응용의 범위를 넓힐 수 있다면 석탄재를 경량골재 제작, 성토 및 농업용 골재로 활용이 가능하여 석탄재 처리에 큰 효과를 거둘 수 있다. 그러나 국내 석탄은 대부분 무연탄이기 때문에 생성된 석탄재는 평균입경이 크고, 미연 탄소량과 K₂O 등 알칼리 성분이 많아 포졸란 특성이 약해서 시멘트클링커로만 활용^{8,9)}되고, 그나마 이런 활용은 화력발전소 인근의 시멘트 생산업체에만 국한되고 있다.

다른 금속 폐광석들은 산업전반에 활용되고 있는 원료소재들로 응용이 가능하여 지속적인 연구가 진행되고 있지만 석탄폐석과 석탄재는 재활용하기 위한 조건이 매우 까다롭기 때문에 다양한 분야에서 응용되기 어려운 한정된 재활용방법으로 처리되는 물량 이외는 대부분 노천 방치 및 매립되고 있다¹⁰⁾. 앞으로 환경보호에 대한 문제제기의 가능성이 크기 때문에 석탄폐기물(석탄폐석 및 석탄재) 처리장의 입지확보가 어려울 수 있어 석탄폐기물 처리방법에 획기적인 방향설정이 반드시 필요하다¹¹⁾. 이처럼 석탄폐석 및 석탄재의 안전한 처리 및 재활용은 폐기물의 무해화 및 새로운 자원의 확보차원에서 중요한 의의가 있으며 탄광주변 지역주민의 민원해결 및 삶의 질 향상이라는 사회적 문제를 고양시키는 효과가 있다. 따라서 석탄폐기물을 강화제로 사용하여 강화플라스틱을 제조하고, 제조된 강화플라스틱과 기존 강화플라스틱의 물리화학적 성질(인장강도, 신장률, 굴곡, 굴곡탄성율, 충격, 경도)의 비교를 통해서 석탄폐기물이 강화제로서의 활용 가능성 여부를 판단하고자 한다. 이

것이 가능하다면 제조된 강화플라스틱을 이전 연구에 의해 확보된 기술¹²⁾인 지하매설용 우수저류조의 단위 유닛에 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

대체 강화제 재료로 사용한 석탄폐석은 현재 가용되는 대한석탄공사 장성(JS), 도계(DG), 화순(HS)광업소, (주)태백광업 태백(TB)광업소, (주)흥진 태백(TM)광업소, (주)성진 마로(MR)광업소 등 6개 광업소에서 발생한 굴진폐석과 선탄폐석을 사용하였고, 석탄재는 D화력발전소에서 유동층 연소 후 발생된 석탄재(Fly ash)를 이용하였다.

강화플라스틱을 제조하기 위해 사용하는 연성 플라스틱은 (주)우현리사이클링에서 제조된 재활용 폴리프로필렌(polypropylene, MI: 12 g/min, 아이조드 충격강도: 8.4 kgf/cm)수지를 사용하였고, 강화제로 사용하는 탈크(talc)는 다원화학 PG-600, 유리섬유는 한국 Vetrotex(주)에서 생산된 폴리프로필렌 복합재료용 유리섬유를 사용하였다.

2.2. 기기

강화플라스틱의 하중강도를 알아보기 위해서 미국 Instron사(모델 FastTrack 8801) 만능재료시험기를 사용하였다.

석탄폐석과 석탄재의 화학적 조성을 알아보기 위해서 사용하는 X선 형광분석기(XRF)는 일본 Shimadzu사(모델 XRF-1700) X선 형광분광기를 사용하였다.

2.3. 시편제작

강화플라스틱 제조는 용융된 페폴리프로필렌 수지액에 전보¹³⁾와 같이 개질한 강화제를 첨가한 후 충분히 교반하여 균일한 상태로 만들고, 마무리로 PP(polypropylene) 처리를 하여 전체 구조는 샌드위치패널 형태로 제작하였다. 이를 이용하여 미국재료학회(ASTM)의 측정항목에서 요구하는 크기로 시편을 제작하여 시험¹³⁾하였다.

2.4. 강화플라스틱의 제조 및 물성평가

물성 평가용 강화플라스틱의 조성은 Table 1에 수록된 조성비로 제조하였고, 복합 강화플라스틱의 조성은 페폴리프로필렌 수지에 석탄재와 유리섬유의 함량을 20%

Table 1. Compositions of reinforced plastics

Sample	Composition(%)				
	Waste PP* plastic	Reinforcing agents			
		Talc	Glass Fiber	Waste coal	Fly ash
Standard A	100	0	0	0	0
B	90	10	10	-	-
C	80	20	20	-	-
D	75	-	-	25	25
E	70	30	30	30	30
F	65	-	-	35	35
G	60	40	40	40	40

*PP: Poly Propylene

Table 2. Ccompositions in component reinforced plastics (%)

Ingredients	Sample No.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
PP ^a	100	94	89	84	79	79	79	79	94	89	84	79	
G.F ^b						15	10	5	5	10	15	20	
FA ^c		5	10	15	20	5	10	15					
Other ^d		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Total						100							

a: poly propylene, b: Glass fiber, c: Fly ash, d. Other: Antioxidant (0.25%), Neutrants (0.25%), Mg-stearate (0.5%).

이내에서 첨가비율을 Table 2와 같이 변화시키면서 복합 강화플라스틱을 압출방식(∅ 47 mm, L/D = 40:1)으로 제조하였고, 제조된 복합 강화플라스틱의 물리적 성질을 측정¹³⁾하였다.

2.5. 유해 물질(카드뮴, 크로뮴, 수은, 납 및 유기 브로민)의 용출 및 측정

제조된 강화플라스틱 100.0 g을 0.05 N 염산용액 900 mL에 담구고, 진폭 4 cm, 분당 250회의 진탕조건으로 6시간 연속 진탕시킨 후 염산용액을 여과한 여과액을 유도결합플라즈마-질량분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)와 이온크로마토그래피(Ion chromatography)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄폐기물의 화학적 조성

전술한 바와 같이 본 연구는 석탄폐기물(석탄폐석 및 석탄재)과 같은 환경오염을 유발할 가능성이 큰 폐기물을 강화제로 이용하여 강화플라스틱을 제조함으로써 환경오염 저감과 폐기물의 재활용을 유도하고자 하는 목적이다.

따라서 이들을 강화플라스틱 제조에 강화제로 활용할

가능성이 있는지를 판단하기 위해, 석탄폐석과 석탄 연소 후 발생한 석탄재(fly ash)의 화학적 조성을 X-선 형광분석을 통해 알아보았다(Figs. 2, 3).

Fig. 2에서 보는 바와 같이 장성과 마로지역을 제외한 대부분의 굴진폐석은 SiO₂ 함유량이 85 wt% 이상, Al₂O₃의 함유량은 9.0 wt%로 나타났다. 또한 Fe₂O₃의 함유량은 태백, 화순광업소의 경우 1.0 wt% 이하로 낮은 함유특성을 나타내었다.

이처럼 굴진폐석의 경우는 광업소의 위치에 따라 SiO₂나 Al₂O₃와 같은 주성분의 조성이 매우 다양하며 석탄 폐석에는 다양한 원소가 공존하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에 나타낸 선탄폐석의 조성 역시 굴진폐석처럼 SiO₂(~60 wt%)와 Al₂O₃(~20 wt%)가 주성분이며 다양한 성분이 혼합되어있음을 알 수 있었다. 이때 선탄폐석의 조성분포는 국내에서 산출되는 고령토, 도석, 납석, 건운모 등과 같은 요업원료 광물과 유사하므로 석탄폐석을 요업원료로 응용할 수 있을 것으로 보인다. 특히 일반적인 세라믹 분야에서는 SiO₂와 Al₂O₃의 비가 원료 소재로 사용할 때 가장 중요한 척도(2.0~4.0 정도)가 되기 때문에 굴진폐석은 불가능하지만 도계, 마로, 태백 및 화순광업소에서 채취된 선탄폐석의 경우에는 점토배합 토로의 활용이 가능한 SiO₂/Al₂O₃의 비를 갖는 것으로 보인다.

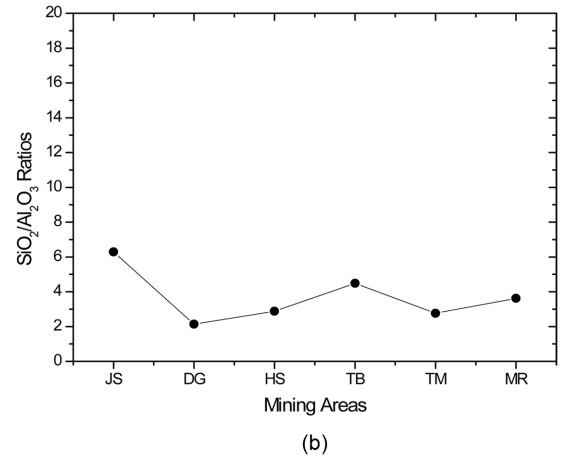
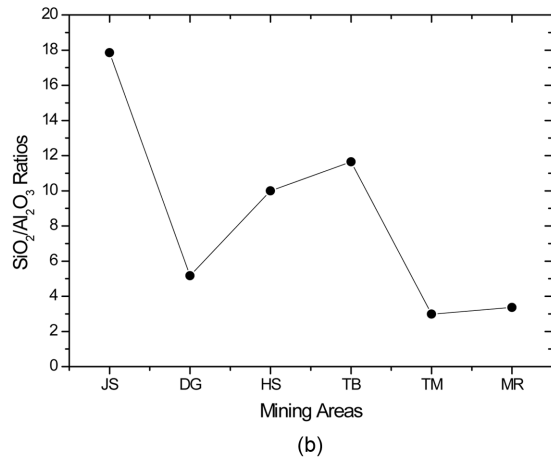
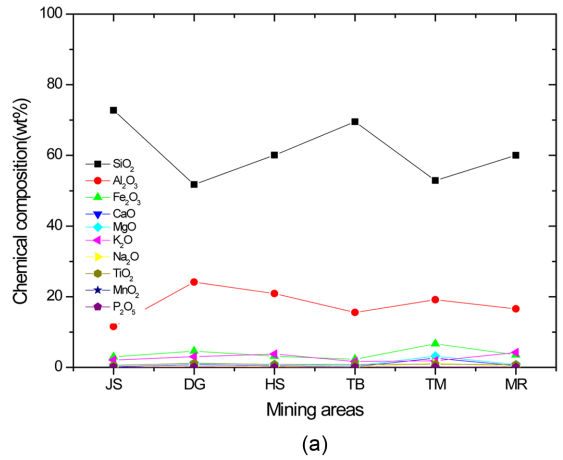
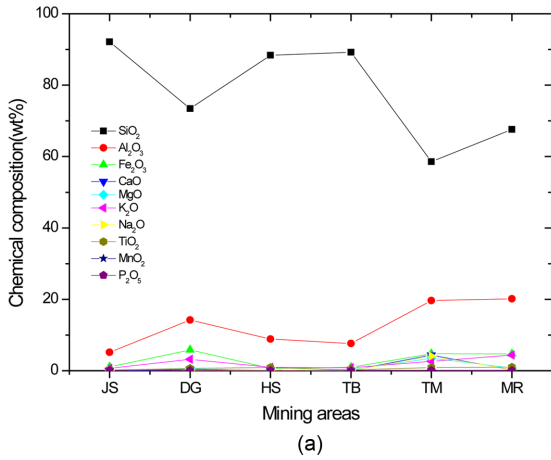


Fig. 2. Chemical compositions of mine wastes (a) and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios (b) according to mining areas. JS: Jang-sung, DG: Donghae, HS: Hwasun, TB: Taebaek, TM: Taemaek, MR : Maro mining station.

Fig. 3. Chemical compositions of coal wastes (a) and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios (b) according to mining areas. JS: Jang-sung, DG: Donghae, HS: Hwasun, TB: Taebaek, TM: Taemaek, MR: Maro mining station.

한편, 석탄의 연소 후 발생하는 석탄재는 형상이 기본적으로 구형이고, 비교적 큰 입자일 때는 내부에 공극을 갖는다. 이 때문에 석탄재는 광물질이지만 상대적으로 비중이 작다. 즉, 석탄재 평균입경은 20~30 μm 으로 시멘트 입경과 거의 비슷하지만 비중은 1.9~2.3 정도로 시멘트 비중의 약 2/3 정도이고, 철분의 함량이 많을수록 비중은 커진다. 일반적으로 비중이 작으면 석탄재의 분말도가 거칠고, 시멘트에 혼합할 경우 소기의 강도가 나오지 않는 단점이 있다. 또한 석탄재 분말도는 SiO_2 의 함유량과 함께 포졸란 활성을 지배하는 중요한 인자이며, 콘크리트의 가공성에 큰 영향을 준다. 따라서 석탄재의 활용도를 평가하기 위해 국내 화력발전소(D화력 발전소)에서 배출하는 석탄재의 성분분석을 실시하였다

(Fig. 4). 이때 사용한 석탄재는 입경이 균일하지 못하기 때문에 이를 분쇄하여 입자의 입경차이를 최소화하였다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 석탄재에 함유된 주성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 등으로 앞에서 살펴본 석탄폐석의 조성 and 유사함을 알 수 있다. 따라서 이들의 조성으로부터 판단할 때 이들은 요업원료로 사용이 충분히 가능할 것으로 보여 플라스틱 강화제로 활용이 가능하다고 볼 수 있다.

3.2. 석탄폐기물의 강화제 대체가능성 분석

석탄폐기물이 플라스틱 강화제로 이용될 가능성을 판단하려면 플라스틱에 직접 이들을 첨가하여 만든 강화 플라스틱의 물리적 특성을 평가해야 한다. 이를 위해 석

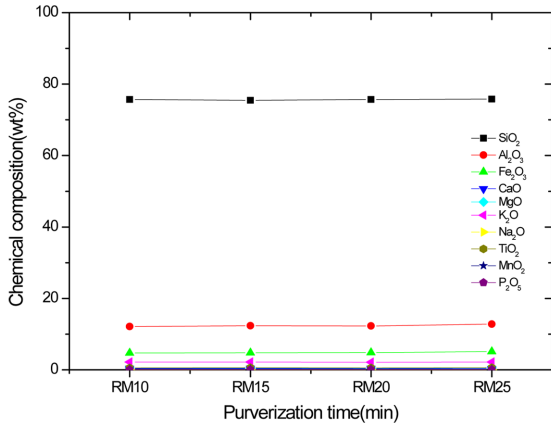


Fig. 4. Chemical composition of fly ash.

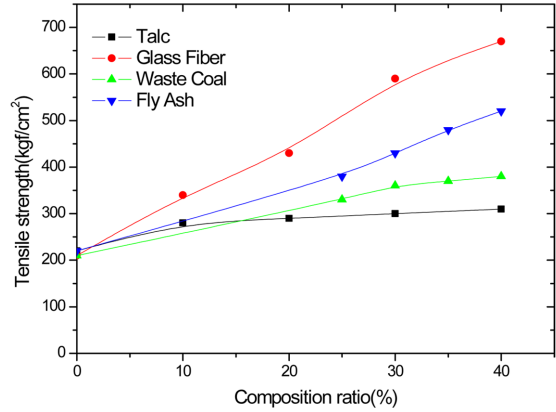


Fig. 5. Variation of tensile strength according to type of reinforcing agent and its amounts.

탄폐석들 중에서 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 비율이 2~4의 범위에 들고, 점토의 특성과 유사한 1가지 종류(DG)와 석탄재를 선택하여 각각에 대해 입자의 표면을 개질시켜 첨가량을 0~40%까지 변화를 주었다. 아울러 물리적 성질의 대조를 위해 강화제가 포함되지 않은 기준 시료, 탈크와 유리섬유 강화제를 Table 1에 표시된 조성비에 따라 강화플라스틱을 제조하였고, 이에 따른 시편을 제작하여 물성변화(인장강도, 신장률, 굴곡, 굴곡탄성을, 충격, 경도)를 고찰하였다(Fig. 5~10).

이때 사용된 석탄폐석과 석탄재는 입자상 강화제와의 특성차를 알아보기 위한 것이므로 분쇄기를 이용하여 325 mesh까지 균일하게 분쇄시켜 기존 탈크와 비교하여 입자크기 편차가 발생하지 않도록 하였다.

Fig. 5~10에서 보는 바와 같이 폴리프로필렌에 석탄 폐기물을 강화제로 사용했을 경우 일반 강화제를 사용할 때와 같이 대체적으로 배합률이 증가할수록 인장강도, 굴곡강도, 굴곡탄성을, 표면경도가 개선되는 반면 신율과 충격강도는 약화되는 경향을 보였다(Table 3).

3.2.1. 석탄폐기물과 일반강화제의 차이

연성 플라스틱인 폴리프로필렌에 석탄폐기물을 첨가

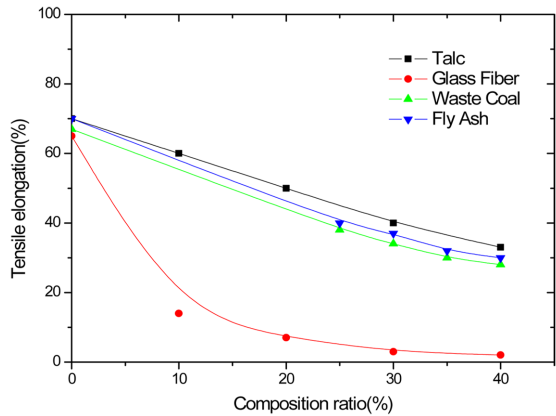


Fig. 6. Variation of tensile elongation according to type of reinforcing agent and its amounts.

하여 강화플라스틱을 제조하면 플라스틱 수지의 비율이 감소하여 플라스틱 특성이 경질화되어 신율과 충격강도가 약화된다. 그러나 플라스틱의 경질화는 오히려 플라스틱의 굴곡강도와 굴곡탄성 및 인장강도를 증가시켜 플라스틱의 물리적 강도를 보다 강화시키는 경향을 보였다(Fig. 5~10).

Table 3. Comparisons of the physical properties of reinforced plastics according to reinforcing agents

Properties	Tendence
Tensile strength	Glass Fiber > Fly ash > Waste Coal > Talc
Tensile elongation	Talc > Fly ash > Waste Coal > Glass Fiber
Flexural strength	Glass Fiber > Fly ash > Waste Coal > Talc
Impact strength	Glass Fiber > Fly ash > Waste Coal > Talc
Hardness	Glass Fiber > Waste Coal > Talc > Fly ash

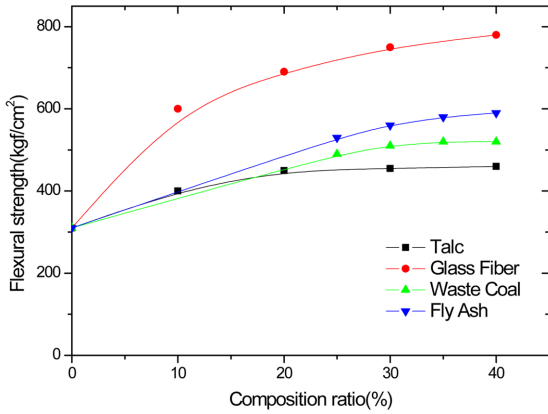


Fig. 7. Variation of flexural strength according to type of reinforcing agent and its amounts.

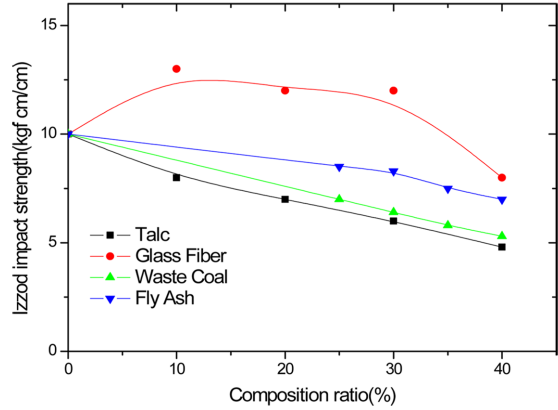


Fig. 9. Variation of Izzod impact according to type of reinforcing agent and its amounts.

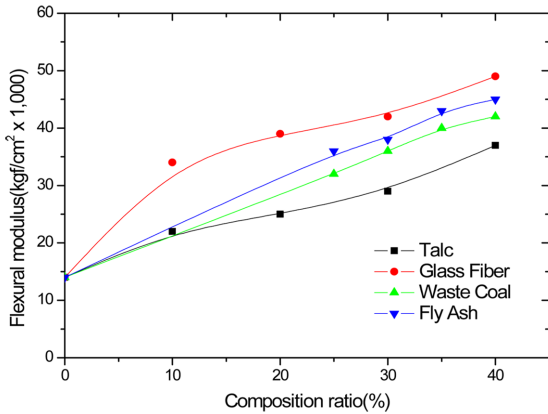


Fig. 8. Variation of flexural modulus according to type of reinforcing agent and its amounts.

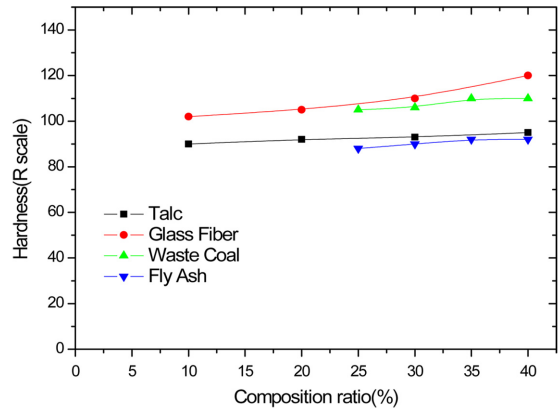


Fig. 10. Variation of hardness according to type of reinforcing agent and its amounts.

전체적으로 볼 때 석탄폐기물은 입자강화제인 탈크보다 우수한 인장강도 특성을 보였는데 이는 균질의 탈크 입자와 비교하여 석탄폐광물의 경우 다양한 조성물과 각 조성물(SiO₂/Al₂O₃ 등)의 물리화학적 특성이 인장강도의 상승으로 작용했음을 알 수 있었다.

3.2.2. 석탄폐기물 종류에 따른 차이

석탄폐석과 석탄재에 따라 강화플라스틱의 물성변화에 어떤 영향을 주는지 비교해 보았다. Table 3에서 보듯이 전반적으로 석탄폐석보다 석탄재가 더 우수한 물성을 나타내었다. 이는 석탄폐석을 가능한 균일한 입자 크기를 갖도록 파쇄했지만 석탄폐석보다는 석탄재 입자가 훨씬 구형이므로 플라스틱 수지와와의 친화도가 더 좋

기 때문에 판단된다.

3.2.3 석탄폐기물 강화제 사용의 문제점

이상과 같은 실험결과에 의해 석탄폐기물을 입자상 강화제 대신 사용할 수 있음을 알게 되었다. 일반적으로, 입자상 강화제의 물리적 특성은 플라스틱과 접촉면적을 높이고, 플라스틱과의 친화력을 보다 강하게 하기 위해서는 강화제의 크기를 초미립자 수준을 유지해야한다. 그러나 석탄폐석의 경우 입자의 크기분포가 일반 입자상 강화제인 탈크보다 큰 입자크기를 가질 뿐만 아니라 입자간 성분분포가 균일하지 못하여 비중차가 발생하므로 석탄폐석의 입자를 인위적으로 더 분쇄시켜 플라스틱 수지 내에서 분산이 잘 되는 입자크기와 균질도를 갖

게 해야 한다. 이런 문제점을 보완하기 위해 분쇄기술은 물론 입자크기의 단점을 보완하기 위한 배합기술 역시 선행되어야 할 것이다. 이에 비해 석탄재의 경우는 입자의 크기가 구형이고, 이들의 비중이 거의 균일하므로 플라스틱 수지 입자와의 친화도가 크고, 배합의 문제가 전혀 없기 때문에 입자상 강화제로 활용이 충분함을 알 수 있었다.

결론적으로 상기의 실험결과에서 확인한 바와 같이 석탄폐기물이 기존 플라스틱 강화제를 대체할 수 있으나 개선점을 찾기 위한 연구가 더 필요하다고 본다.

3.3. 복합 강화제를 이용한 플라스틱의 기본 물성 변화

상기의 석탄폐기물을 강화제로 사용하면 강화제로서의 특성이 기존 입자상 강화제인 탈크보다는 우수하였으나 섬유상 강화제보다는 열악하였다. 따라서 환경적으로 처리가 곤란하고, 플라스틱 수지 내에서 균일하게 분산시키기가 곤란한 유리섬유의 사용량을 줄이면서 대체 입자상 강화제로 석탄폐기물을 사용한 복합 강화제를 사용하여 플라스틱의 물성을 개선시키는 방법을 고려하였다.

이는 입자상 강화제의 특성인 폴리프로필렌 base에 강화제가 고르게 분산된다는 장점이 있는 반면 입자상이 플라스틱 단위체의 접점에 유기적 역할을 하기 어렵다는 단점, 또 섬유상 강화제는 플라스틱 단위체의 접점에 유기적 역할을 할 수 있는 반면 플라스틱 base에 고르게 분산되기 어렵다는 단점이 있으므로 이를 보완한다면 더욱 우수한 강화플라스틱의 제조가 가능할 것으로 기대된다.

따라서 유리섬유와 석탄재의 혼합비율(Table 2)에 따른 강화플라스틱의 기계적 물성에 대한 비교 실험하였다. 이때 어떠한 강화제도 첨가되지 않은 순수한 폴리프로필렌을 기준시료(Sample 1)로 설정하였다. 또 본 연구에서 실시한 석탄재만을 함유한 PP 시료(Sample 2~5), 유리섬유와 석탄재가 함유된 PP 복합재료(Sample 6~8) 및 유리섬유만 함유된 PP 시료(Sample 9~12)를 각각 준비하여 각 혼합성분과 비율에 따른 기계적 특성을 고찰하였다.

3.3.1. 인장강도 시험

석탄재와 유리섬유 함유량에 따른 강화플라스틱의 인장강도를 평가하기 위해서는 Table 2와 같은 조성으로 혼합된 물질을 압출방식으로 강화플라스틱을 제조한 후 인장강도 시험을 실시해야 한다. 그런데, 압출기의 압출

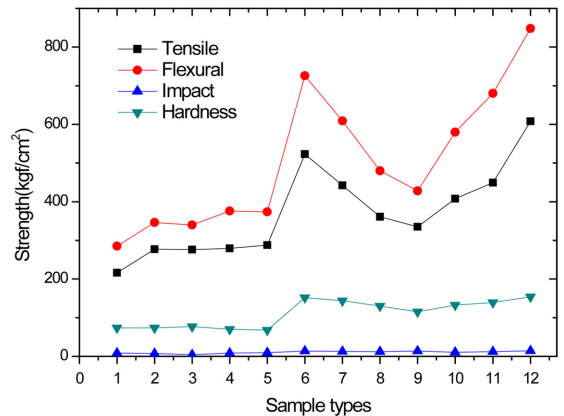


Fig. 11. Variations of the physical properties (tensile, flexural, and impact strengths and hardness) according to added amounts of fly ash and glass fiber in waste polypropylene. Composition ratios to sample numbers are mentioned in Table 2.

방식에 따라 구성 재료의 혼합 균질도에 많은 차이가 있기 때문에 폴리프로필렌 수지에 먼저 석탄재만을 가하여 폴리프로필렌의 가공을 진행 후 유리섬유를 다시 혼합하여 재가공을 실시하여 폴리프로필렌 복합재료를 제조하였다. 마지막으로 제조된 복합재료는 사출성형기를 이용하여 시편을 만들어 인장강도 시험을 실시하였다 (Fig. 11).

Fig. 11에 나타낸 인장강도 실험결과, 폴리프로필렌에 석탄재만을 5%, 10%, 15%, 20%로 혼합(sample 2~5)하면 폴리프로필렌의 결정화를 높여 소폭의 인장강도 개선을 보이지만 실용화할 수 있을 정도는 아니었다. 이에 기계적 물성 보완(유리섬유강화제 첨가)에 따른 비교시험을 실시하기 위하여 유리섬유만을 5%, 10%, 15%, 20%를 혼합한 재료(sample 9~12)와 유리섬유와 석탄재를 혼합(sample 6~8)한 폴리프로필렌의 기계적 특성을 비교하였다.

Fig. 11에서 보듯이, 유리섬유가 단독으로 혼합했을 때보다 일정량의 석탄재가 더 첨가되면 물성이 10~15% 가량 개선되었음을 알 수 있었다. 이는 폴리프로필렌에 유리섬유만을 단독으로 사용하면 유리섬유가 폴리프로필렌 내에서 매우 불규칙하게 분포하여 강화제의 역할을 100% 발휘하기 힘들지만 석탄재가 첨가됨으로서 미세입자인 석탄재가 폴리프로필렌 내에 균일하게 분산됨으로서 폴리프로필렌의 결정화를 상승시키기 때문에 물성이 개선되는 것으로 판단된다.

3.3.2. 굴곡시험

인장강도를 측정했던 것과 같은 조성을 갖는 시편들을 이용하여 실시한 굴곡강도의 결과는 Fig. 11에서 보는 바와 같이, 인장강도 시험처럼 석탄재만을 강화제로 사용한 플라스틱의 굴곡강도는 강화제를 첨가하지 않은 경우에 비해 소폭 증가하였다. 이에 비해 섬유상 강화제인 유리섬유를 첨가한 강화플라스틱의 굴곡강도는 크게 증가하였다. 그러나 유리섬유를 사용하더라도 석탄재를 혼합한 복합 강화제를 사용한 강화플라스틱은 굴곡강도의 향상 효과가 크게 나타났다. 이는 석탄재가 폴리프로필렌 결정화에 긍정적인 효과를 주는 것으로 판단된다.

3.3.3. 충격시험

일반적으로 플라스틱의 결정화도가 높아질수록 압력과 관련된 강도는 상승하지만 충격에는 취약해진다. 즉, 플라스틱의 충격강도는 인장강도 및 굴곡강도와 서로 반비례한다¹⁴⁾. 따라서 강화제의 종류에 따라 강화플라스틱의 충격강도가 어떻게 변화하는지를 검토하였다. Fig. 11의 충격시험 결과에서 볼 수 있듯이, 폴리프로필렌에 석탄재만을 혼합하여 제조한 강화플라스틱(sample 2~5)의 경우 충격강도 물성은 크게 개선되지 않았고, 불규칙적인 경향을 보였다. 다만 sample 3에서 충격강도가 급격히 저하되는 점이 보였는데 이는 제조과정에서의 입자상 강화제의 균질분포 문제 또는 석탄재의 일정하지 않은 입자구조 및 입자 크기로 인한 결정화도 차이에서 발생한 것으로 보인다. 이는 탈크 입자의 크기에 따라 합성수지의 결정화도의 차이가 발생한다는 것으로부터 유추해 볼 수 있다.

그러나 유리섬유를 혼합하여 사용하였을 경우(sample 6~8) 물성이 크게 변화했는데 이는 석탄재가 포함됨으로써 균질도가 증가하고, 또 유리섬유가 폴리프로필렌 수지 내부에서 서로 교차결합을 형성하여 충격강도가 증가하는 특성 때문으로 보인다.

3.3.4. 경도시험

일반적인 플라스틱은 내마모성과 밀도가 상승할수록 수명이 길어진다. 따라서 본 연구에서 개발된 복합 강화 폴리프로필렌의 경도를 평가하여 내마모성을 알아봄으로써 기대수명의 상승효과를 알아보고자 하였다. Fig. 11의 경도시험 결과에서 보듯이 앞의 실험결과와 동일하게 석탄재 단독으로 사용하여 제조된 재료(sample 2~5)는 경도에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 하지만

유리섬유와 혼합하여 제조된 경우(sample 6~8) 약 10% 정도의 상승효과를 보임을 알 수 있다. 이로서 2가지 강화제를 사용하여 제조한 복합강화플라스틱의 경도는 한 가지 성분을 강화제로 사용한 강화플라스틱에 비해 우수하여 내마모성이 증가함을 알 수 있었다.

3.4. 중금속 용출시험

재활용 플라스틱을 사용할 경우 그 내부에 유해한 성분이 외부로 용출이 되어 수질, 토양 등을 오염시킬 수 있다. 또한 대체 강화제로 활용한 석탄폐석과 석탄재에도 광물형성과정에서 유입되는 각종 유해 중금속이 포함될 수 있다. 따라서 본 연구에서 제조한 복합 강화플라스틱에 가혹 조건을 부과하여 유해 성분 용출여부를 확인해 본 결과 용출가능성이 있을 것으로 판단된 5가지 유해중금속 및 유해성분(카드뮴, 크로뮴, 수은, 납 및 유기 브로민)이 전혀 검출되지 않았다¹⁵⁾. 이로서 본 연구결과와 제조된 강화플라스틱으로부터 어떠한 유해성분도 검출되지 않아 이를 다양한 형태로 응용이 가능하다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

연성 플라스틱인 폴리프로필렌 수지에 입자상 강화제로 석탄폐기물을 사용하여 제조한 강화플라스틱의 물리적 성질 변화를 평가하여 처리 곤란한 산업폐기물인 석탄폐기물(석탄폐석 및 석탄재)의 부가가치와 활용도를 높이기 위한 타당성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 언급한 강화플라스틱 제조방법은 비교적 공정이 간단하여 쉽게 강화플라스틱을 제조하는 방법을 제시하였다.
2. 대표적인 입자상 강화제인 탈크(talc)보다 석탄재를 강화제로 활용하면 강화제로서의 효과가 더 향상되었다.
3. 섬유상 강화제와 석탄재를 혼합한 복합 강화제를 사용하면 섬유상 강화제만을 사용할 때보다 물성 강화가 더 향상되었다.
4. 제시된 방법으로 석탄재를 강화제로 이용하여 제조된 강화플라스틱은 용출실험을 통해 유해 중금속 및 원소가 전혀 검출되지 않아 처리 곤란한 산업폐기물인 석탄폐기물의 처리 대안과 활용가치를 높이는 방법이 될 수 있었다.

참고문헌

1. Ministry of Knowledge Economy, Knowledge Economy Paper, **2010**, 11-1411000-000570-10.
2. M. E. Ozga and G. Borowski, "The use of granulation to reduce dusting and manage of fine coal", *J. Ecol. Eng.* **2018**, 19, 218-224.
3. C. Barton, D. Marx, D. Adriano, B. J. Koo, L. Newman, S. Czapka and J. Blake, "Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste", *Environmental Geosciences*, **2005**, 12, 251-265.
4. Management of Mining, Quarrying and Ore-Processing Waste in the European Union, Study made for DG Environment, European Commission, **2001**, BRGM/RP-50319-FR.
5. T. Stuczynski, G. Siebielec, W. L. Daniels, G. McCarty and R. L. Chaney, "Biological aspects of metal waste reclamation with biosolids", *J. Environ. Qual.*, **2007**, 36, 1154-1162.
6. M. H. Lee, I. S. Paik, I. S. Kim, H. M. Kang and S. H. Lee, "Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate", *J. Hazardous Materials* **2007**, 144, 208-214.
7. W. Stevens, T. Robl and K. Mahboub, "The cementitious and pozzolanic properties of fluidized bed combustion fly ash", World of Coal Ash (WOCA) Conference, **2009**, 5, 4-7, <http://www.flyash.info>.
8. A. Sato and S. Nishimoto, "Effective reuse of coal ash as civil engineering material", World of Coal Ash (WOCA) Conference, **2005**, 4, 11-15, <http://www.flyash.info>.
9. T. Robl, A. Oererlink, J. Brien and J. Pagnotti, "The utilization potential of anthracite CFBC spent bed fly ash as a concrete additive", World of Coal Ash (WOCA) Conference, **2011**, 5, 9-12, <http://www.flyash.info>.
10. B. Lokeshappa and D. A. Kumar, "Disposal and management of fly ash", International Conference on Life Science and Technology, **2011**, 3, 11-14.
11. S. M. Mackiewicz and E. G. Ferguson, "Stabilization of soil with self-cementing coal ashes", World of Coal Ash (WOCA) Conference, **2005**, 4, 11-15, <http://www.flyash.info>.
12. S. W. Lee, D. K. Nam and J. M. Choi, "Simulation on loading strength of rainwater storage tank unit", *Journal of the Korean Society of Safety*, **2013**, 28, 107-113.
13. S. W. Lee, H. J. Lee, J. S. Yoon and J. M. Choi, "Assessment of physical properties for reinforced plastics with waste plastics" *J. Korean Soc. Environ. Analysis* **2017**, 20, 183-191.
14. J. S. Mun, H. A. Kim, J. B. Park, J. H. Lee and R. H. Kim, "Evaluation of tank capacity of rainwater harvesting system to secure economic feasibility and sensitivity analysis", *J. Korean Soc Water and Wastewater* **2012**, 26, 191-199.
15. 정다위, 이지영, 윤철우, 유혜영, 이미영, 신선경, 오길중, "석탄재 중 유해물질 용출특성에 관한 연구", 한국폐기물자원순환학회 춘계학술연구발표회 발표논문집, **2012**, 164-165.