

페로니켈 슬래그를 사용한 밀입도 아스팔트 혼합물 특성평가

김경남¹, 이수형^{1*}, 조신행², 김연태³

¹한국건설기술연구원 도로교통연구본부

²(주)신창이앤씨 기술연구소

³한국건설기술연구원 도로교통연구본부 · 인하대학교 토목공학과

The Characteristics Evaluation of dense grade asphalt mixture using ferronickel slag

Kyeong Nam Kim¹, Soo Hyung Lee^{1*}, Sin Haeng Jo², Yeon Tae Kim³

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Shin Chang ENC Co. Ltd. R&D Center

³Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Civil Engineering Inha University

요약 건설산업에서는 자원순환을 목적으로 산업부산물 및 건설폐기물을 재활용하기 위한 노력이 계속되고 있다. 페로니켈 슬래그는 스테인리스 강 제조과정에서 발생하는 산업부산물로 밀도 자체가 높고 마모저항성 우수하여 골재로 사용할 경우 다양한 이점을 가져올 수 있으나 주로 저부가가치 자원으로 재활용되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 페로니켈 슬래그를 아스팔트 콘크리트용 골재로 활용하기 위해 0 ~ 40% 까지 신규골재를 치환하여 밀입도 아스팔트 혼합물 배합설계를 수행하고 공용성능 평가를 수행하였다. 연구결과 페로니켈 슬래그 혼입비율이 30%를 초과할 경우 아스팔트 바인더 사용량 증가 및 내유동성이 감소함에 따라 소성변형 저항성이 10% 이상 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 페로니켈 슬래그 중 SiO₂ 성분은 따라 TSR이 일반 배합 대비 1.3~7.7% 낮은 결과를 보여 수분민감성이 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이에 따라 페로니켈 슬래그를 아스팔트 콘크리트용 골재로 사용할 경우 수분민감성과 소성변형 저항성 확보를 위해 박리방지제의 사용과 혼입도 개선 및 아스팔트 바인더 등급 상향을 고려해야 할 것으로 보인다.

Abstract The construction industry is trying to recycle industrial by-products and construction waste to utilize resources fully. Ferronickel slag, an industrial by-product from the stainless steel manufacturing process, has various advantages as an aggregate due to its high density and excellent wear resistance. But, ferronickel slag is generally used only as a low-value supplementary material. Hence, this study performed a dense-grade mix design and performance test to evaluate the utilization of ferronickel slag aggregate. As a result, the previous mix design was improved with a new aggregate added in the proportion of 0 to 40 %, and moisture sensitivity and rutting resistance were evaluated. In addition, since ferronickel slag has SiO₂ among its components, the TSR test showed a value 1.3~7.7 % lower than that of a mix with natural aggregate, indicating the tendency of SiO₂ to decrease moisture sensitivity slightly. Accordingly, an anti-stripping agent, improved aggregate gradation, and uprating asphalt binder grade are necessary to achieve appropriate usability of ferronickel slag.

Keywords : Ferronickel Slag, Industrial By-products, Aggregate, Asphalt Pavement

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업인 “페로니켈 슬래그(FNS) 활용 아스팔트 혼합물 제조 및 적용 기술개발” 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Soo Hyung Lee(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: shlee1@kict.re.kr

Received December 27, 2021

Revised February 14, 2022

Accepted March 4, 2022

Published March 31, 2022

1. 서론

건설산업은 많은 자원을 사용하는 산업분야이나 천연 자원의 양은 한정되어 있다. 아스팔트 콘크리트 및 시멘트 콘크리트에 사용되는 골재도 석산 개발의 한계로 인해 공급 부족에 직면해 있으며 품질과 경제성 확보에 어려움을 겪고 있다. 정부와 산업계는 자원부족 문제를 순환자원의 활용을 통해 해결하고자 하는 다양한 노력을 기울여 왔으며 산업부산물을 골재로 활용하는 기술도 다양하게 시도되었다. 산업부산물의 건설자재 활용은 버려지거나 저부가 가치로 사용되는 부산물을 대량으로 재활용할 수 있고 건설산업에서도 재활용 재료의 사용을 통해 부족한 천연자원 대체, 원가절감, 친환경 기술 확보 등의 장점이 있어 매우 활발한 연구와 개발이 이루어지는 분야이다. 페로니켈 슬래그(FNS, Ferro-Nickel Slag)는 스테인리스강 제조과정에서 발생하는 산업부산물로 Fig. 1과 같이 스테인리스강 생산 증가에 따라 2015년 기준 연간 약 240만 톤이 발생하였고 해마다 그 발생량이 증가하고 있다[1].

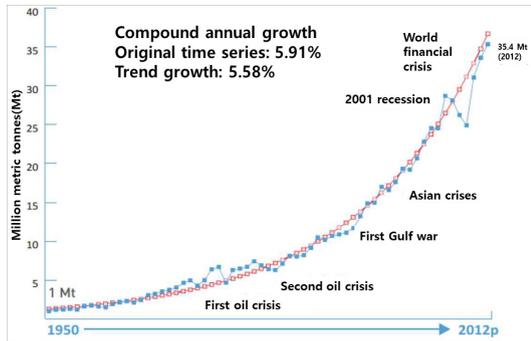


Fig. 1. Stainless Steel Output by Year(ME, 2016)

FNS는 물리·화학적으로 안정적인 특성이 있지만 주로 성토재, 보조기층재료 등 비교적 저부가가치 자원으로 활용되고 있다. 단순 성토·매립재로 활용하는 것도 산업부산물에 대한 부정적인 인식으로 어려움을 겪고 있다. 최근 들어 시멘트 재료의 일부를 대체하는 혼화재로 사용하고 있으나 별도의 가공 공정이 필요하여 활용이 제한적인 실정이다.

본 연구에서는 자원 재활용을 목적으로 산업부산물인 FNS를 고부가가치 자원으로 활용하고 만성적인 골재 공급 부족에 시달리는 아스팔트 콘크리트의 골재 자원으로 활용할 수 있는 방안을 검토하고자 한다. 이에 따라 본 연구에서는 FNS를 새로운 골재 대체재로 활용하기 위해

밀입도 아스팔트 혼합물 배합설계를 수행하고 혼합물 기초성능 및 수분민감성, 소성변형 저항성 평가를 통해 FNS 골재 사용에 따른 성능 영향을 검토하였다.

2. 페로니켈 슬래그

FNS는 스테인리스강 제조과정에서 페로니켈 생산을 위해 원료로 사용된 니켈광석, 유연탄 등이 고온에서 용융되어 페로니켈과 분리된 후 생산되는 일종의 산업부산물이다[2]. FNS는 주로 이산화규소(SiO_2)와 산화마그네슘(MgO) 등으로 이루어져 있으며 원석 출처, 생산공정에 따라 다소 차이가 있으나 이산화규소의 함량이 매우 높은 특징이 있다[3]. 일반적으로 생산과정 중 냉각방식에 따라 자연 공냉방식으로 생산되는 괴재 슬래그(Prime Stone)와 고압의 가압수를 분사시켜 급냉한 수재 슬래그(Prime Sand)로 분류되며 각 골재의 형상은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다[4].



Fig. 2. Prime Stone(FNS)



Fig. 3. Prime Sand(FNS)

FNS의 처리 방법은 과거에는 주로 매립이나 성토용 재료로 사용되었으며 최근 들어 시멘트 대체재로 활용되고 있다. 일본의 경우 연간 약 300만 톤씩 FNS가 발생하

고 있으며 1980년대 후반부터 시멘트 콘크리트의 모래를 대체하여 사용되었으며 품질규격 JIS A 5011-2을 마련하여 적극적으로 재활용하고 있다[5]. 또한, Wang et al.(2011)의 연구에 따르면 Micro Scanning을 통해 슬래그 입자 표면을 촬영한 결과 Fig. 4와 Fig. 5와 같이 수재 슬래그가 괴재 슬래그에 비해 입자가 크며 팽창성도 안정적인 것으로 조사되었다. FNS 골재는 재료 자체의 밀도가 크고 흡수율이 낮고 마모저항성이 우수하며 파쇄시 입형이 양호함에 따라 아스팔트 혼합물용 재료로 활용할 경우 다양한 이점을 갖는다. FNS 골재를 사용한 아스팔트 혼합물의 성능평가 연구결과 안정도가 증가하는 경향을 보였다[6,7]. Cosme et al.(2021)의 연구에 따르면 브라질에서 FNS 골재 사용 아스팔트 혼합물 연구를 수행한 결과 안정도가 20,000 N 이상, 인장강도 1.62 MPa 이상의 안정적인 성능을 보였다[8]. 또한, Bartzas and Komnitsas(2015)의 연구에 따르면 FNS 골재 사용에 따른 에너지 소비 및 탄소배출량 조사결과 FNS 사용을 통해 지구 온난화 및 산성화를 감소할 수 있는 것으로 조사되었다[9].

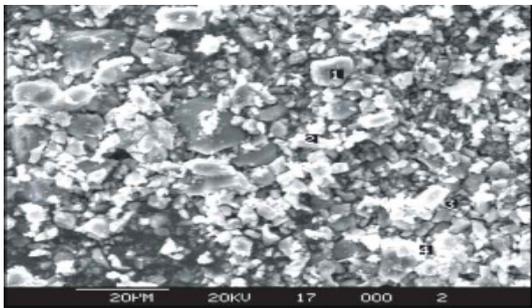


Fig. 4. Particle Surface of Prime Stone(Wang et al.,2011)

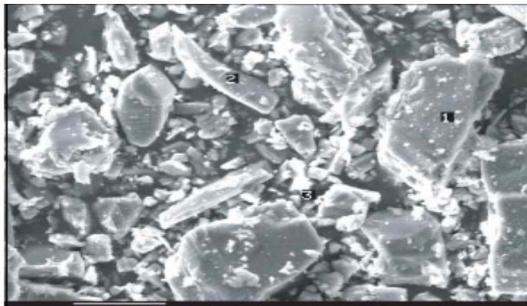


Fig. 5. Particle Surface of Prime Sand(Wang et al.,2011)

이처럼 다양한 방법으로 FNS를 재활용하는 기술이 있으나 아스팔트 혼합물용 골재로 사용하는 연구는 초기

단계에 있다. 특히, 국내의 경우 시멘트 혼화제로 활용하는 최근 기술연구를 제외하고 FNS의 아스팔트 콘크리트 혼합물 적용 연구는 미미한 수준으로 조사되었다.

3. FNS 재활용 아스팔트 혼합물 배합설계

본 연구에서는 FNS 적용처 확대를 위해 FNS를 골재로 활용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 기초물성 평가 및 공용성능 평가를 수행하였다.

3.1 페로니켈 슬래그 골재의 기본물성

FNS는 처리 방식에 따른 괴재와 수재 슬래그의 입도와 성상에 큰 차이가 있다. 본 연구에서는 아스팔트 콘크리트용 골재로 활용하기 위해 입도와 입형이 비교적 일정한 수재 슬래그를 사용하였다. 연구에 사용된 FNS의 입도 시험결과는 Table 1과 같으며 기본물성 평가결과 Table 2와 같이 측정되었다. 아스팔트 콘크리트용 골재로 일반적으로 가장 많이 사용되는 천연골재인 화강암의 밀도가 2.7 g/cm³ 전후인 것을 감안할 때 천연골재와 유사한 수준인 것으로 나타났다[10].

Table 1. Ferro-nickel Slag Gradation

Sieve Size(mm)	Percent Passing(%)
13	100.0
10	100.0
5	91.4
2.5	43.5
0.60	1.3
0.30	0.3
0.15	0.1
0.08	0.0

Table 2. Specification of Ferro-nickel Slag

Item	Requirements	Prime Sand	Test Method
Density(g/cm ³)	Min. 2.5	2.8	KS F 2503
Absorption(%)	Min. 3.0	1.1	KS F 2503

3.2 환경성 평가

FNS 활용은 산업부산물 처리 천연자원 대체 등 다양한 이점이 있으나 산업부산물의 특성 상 환경안정성에 대한 의문이 있을 수 있다. 이에 본 연구에서는 FNS 골

재의 활용을 위한 환경성 평가로 폐기물공정시험과 토양 오염시험을 수행하였다. 시험결과 Table 3과 Table 4와 같이 환경성 기준을 모두 만족하여 FNS를 아스팔트 콘크리트용 골재로 사용하는 것에 문제가 없는 것으로 나타났다.

Table 3. Environmental Evaluation(Waste)

Item	Specification	Result
Pb	≤ 3 mg/L	non-detect
Cu	≤ 3 mg/L	0.09
As	≤ 1.5 mg/L	non-detect
Cd	≤ 0.3 mg/L	non-detect
Hg	≤ 0.005 mg/L	non-detect
Organophosphorus compound	≤ 1 mg/L	non-detect
PCE	≤ 0.1 mg/L	non-detect
TCE	≤ 0.3 mg/L	non-detect
CN-	≤ 1 mg/L	non-detect
Cr+6	≤ 1.5 mg/L	non-detect
Oil component	≤ 5 %	non-detect

Table 4. Environmental Evaluation(Soil)

Item	Specification	Result
Cd	≤ 60 mg/kg	non-detect
Cu	≤ 2,000 mg/kg	non-detect
As	≤ 200 mg/kg	non-detect
Hg	≤ 20 mg/kg	non-detect
Pb	≤ 700 mg/kg	non-detect
Cr+6	≤ 40 mg/kg	non-detect
Zn	≤ 2,000 mg/kg	104.4
Ni	≤ 500 mg/kg	329.6
F	≤ 800 mg/kg	non-detect
Organophosphorus compound	≤ 30 mg/kg	non-detect
PCBs	≤ 12 mg/kg	non-detect
cyanide	≤ 120 mg/kg	non-detect

3.3 배합설계

FNS 아스팔트 콘크리트 배합설계는 표층용 밀입도 13 mm(WC-1) 합성입도를 기준으로 수행하였다. 배합설계는 FNS 혼입률에 따른 공용성능 변화를 평가하기 위해 10%부터 40%까지 4종류 배합과 비교를 위해 천연골재를 사용한 Control 배합을 수행하였으며 각 배합의 골재 합성입도는 Table 5와 Fig. 6과 같다. 또한, FNS 골재 혼입에 따른 혼합물 성능 비교 검토를 위해 일반적으로 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물에 적용하는 공용성 등급 PG 64-22의 일반 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용하였다.

Table 5. Gradations of Aggregate(WC-1)

Sieve Size(mm)	Percent Passing(%)				
	Control	Case 1 (10%)	Case 2 (20%)	Case 3 (30%)	Case 4 (40%)
20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
13	98.6	98.9	98.9	98.9	99.1
10	80.4	85.3	85.3	85.3	87.8
5	58.4	66.7	66.7	66.7	70.8
2.5	39.6	43.6	41.7	39.8	40.9
0.60	18.4	18.3	15.7	13.2	11.9
0.30	12.0	11.8	10.3	8.7	7.8
0.15	7.1	7.0	6.2	5.4	4.9
0.08	4.0	4.0	3.6	3.3	3.1

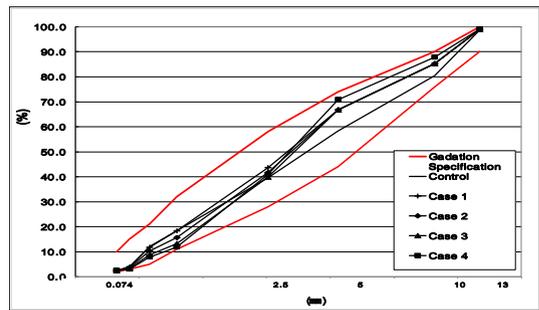


Fig. 6. Gradation Graph of Aggregate(WC-1)



Fig. 7. Specimens of FNS Asphalt Concrete

Table 6. Mixture Properties due to FNS Proportion

Item	AP Contents (%)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (N)	Flow (1/10 mm)
Control	5.4	3.9	16.2	75.8	8,842	30
Case 1	5.4	3.9	16.4	76.2	8,724	29
Case 2	5.7	4.1	17.2	76.3	8,864	31
Case 3	6.0	4.1	18.0	77.4	8,465	38
Case 4	5.9	3.9	17.7	77.9	8,682	38

각 배합에 대해 공시체 제작 후 기초물성 평가를 수행하였다. Fig. 7은 FNS 아스팔트 콘크리트 시편이며 기초

물성 평가결과 Table 6과 같다. 시험결과 표층용 아스팔트 콘크리트의 품질기준을 만족하며 FNS 비율 증가에 따라 흐름값이 증가하는 경향을 나타내었다.

배합설계 결과 편중된 골재 입도와 구형에 가까운 입형의 FNS 사용에 따라 아스팔트 혼합물 용적 특성 (Volumetric Characteristic)에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실험 결과 Fig. 8과 같이 FNS 혼입률 증가로 골재 간극률(VMA)이 커지며 이는 5 ~ 0.6 mm 골재 비율이 높고 입방형 입형에 따라 많은 공극을 형성하기 때문인 것으로 분석되었다. 또한, Fig. 9와 같이 공극률 확보를 위해 바인더 함량이 증가하여 포화도(VFA)도 증가하는 것으로 나타났다.

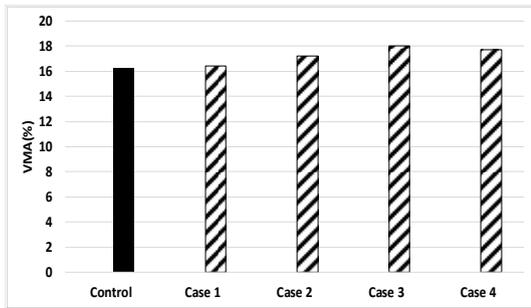


Fig. 8. Comparison of VMA

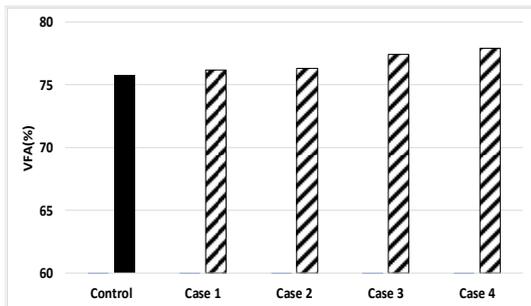


Fig. 9. Comparison of VFA

4. 실내 실험

아스팔트 혼합물용 골재로 FNS의 사용성 검토를 위해 FNS 재활용 아스팔트 혼합물의 간접인장강도, 인장강도비, 동적안정도 등 실내실험을 수행하였다.

4.1 간접인장강도(ITS, Indirect Tensile Test)

FNS 사용 아스팔트 콘크리트 포장의 균열저항성을 평

가하기 위해 간접인장강도 시험을 수행하였다. 시험방법은 KS F 2382(아스팔트 혼합물의 간접인장강도 시험방법) 기준에 따라 Fig. 10과 같이 간접인장강도 시험을 수행하였다[11].



Fig. 10. Indirect Tensile Test

Table 7. Results of ITS Test

Item	Spec.	ITS (MPa)	Disp. (mm)
Control	0.8≥	1.08	1.59
Case 1		0.96	1.56
Case 2		1.03	1.72
Case 3		0.98	1.67
Case 4		1.01	1.64

시험결과 FNS 사용에도 천연골재를 사용한 아스팔트 혼합물과 유사한 수준의 간접인장강도를 나타내었다.

4.2 인장강도비(TSR, Tensile Strength Ratio)

아스팔트 콘크리트 포장은 골재를 피복하고 있는 아스팔트 바인더 박리현상에 의해 수분에 노출되어 점차 내구성을 잃게 된다[12]. FNS는 친수성 재료인 실리카 성분을 다량 함유하고 있어 아스팔트 혼합물용 골재로 사용시 포장 내구성 저하의 우려가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 FNS 골재를 사용한 아스팔트 혼합물의 수분민감성 평가를 수행하였다. 수분민감성 평가는 수침 전, 후의 간접인장강도를 비교하는 인장강도비 시험을 수행하였다.

시험결과 Table 8과 같이 FNS 아스팔트 콘크리트가 천연골재만 사용한 일반 아스팔트 콘크리트에 비해 다소 낮은 인장강도비를 나타내었다. FNS의 경우 Silica 성분이 많아 수분민감성에 대한 우려가 있었으나 일반 아스팔트 콘크리트의 약 92~99% 수준으로 우려했던 만큼의 성능 저하는 나타나지 않았다. 이는 배합과정에서 공극

를 확보를 위해 바인더 함량이 증가하여 피복두께가 증가하였기 때문으로 분석되었다.

Table 8. Results of TSR

Item	Spec.	TSR
Control	0.80≥	0.78
Case 1		0.75
Case 2		0.77
Case 3		0.72
Case 4		0.74

4.3 동적안정도

FNS 사용 아스팔트 콘크리트 포장의 소성변형 저항성 평가를 위해 동적안정도 시험을 수행하였다. 동적안정도 시험은 KS F 2374(아스팔트 혼합물의 휠 트래킹 시험방법) 기준에 따라 Fig. 11의 동적안정도 시험기를 사용하여 시험온도 60±0.5℃에서 가로 30 cm, 세로 30 cm, 높이 5 cm의 시편에 686 N의 차륜 하중, 628±15 kWh 차륜 접지압을 가하며 발생하는 변형량을 측정하고 식 (2)에 따라 분석한다[13].



Fig. 11. Wheel Tracking Test

$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C \quad (2)$$

Where, DS : Dynamic Stability(number/mm)
 d_1 : Deformation in t_1 (45 minutes)(mm)
 d_2 : Deformation in t_2 (60 minutes)(mm)
 C : Calibration Constant(1.0)

FNS 사용률에 따른 아스팔트 혼합물의 동적안정도 실험 결과는 Table 9와 같다. FNS 사용에 따라 아스팔트 혼합물의 동적안정도가 감소하는 경향을 보였다. 특히 혼입률이 30% 이상일 경우 품질기준에 미치지 못하는

것으로 나타났다. 이는 FNS의 입도 및 입형 영향도 있으나 아스팔트 바인더 함량 증가의 영향이 지배적인 것으로 분석되었다. 아스팔트 함량 증가 영향을 최소화 할 수 있도록 FNS 아스팔트 혼합물용 전용입도의 개발과 개질 아스팔트 바인더의 적용을 검토할 필요가 있는 것으로 나타났다.

Table 9. Results of Wheel-Tracking Test

Item	Spec.	DS(no./mm)
Control	750≥	1,175
Case 1		1,057
Case 2		835
Case 3		730
Case 4		580

5. 결론

본 연구에서는 산업부산물 재료 FNS를 아스팔트 혼합물용 골재로서 사용성을 검토하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 아스팔트 혼합물용 골재로 FNS 사용성 검토를 위해 혼입률 10~40% 범위의 밀입도 아스팔트 혼합물 배합설계를 수행하였다. 배합설계 결과 혼입률 20%까지 배합에 어려움이 없는 것으로 나타났다. 반면 혼입률이 30% 이상 증가함에 따라 공극률 확보를 위해 아스팔트 바인더 사용량 증가를 초래하여 내유동성이 감소하는 것으로 나타나 밀입도 적용시 혼입률 제한이 필요할 것으로 보인다.
2. FNS는 구성 성분 중 SiO₂에 따라 TSR 시험결과 일반 배합 대비 1.3~7.7% 낮은 결과를 보여 수분 민감성이 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이에 따라 FNS를 아스팔트 콘크리트용 골재로 사용할 경우 박리방지제 사용을 통해 수분민감성 보완이 필요한 것으로 나타났다.
3. 또한, 아스팔트 바인더 함량 증가로 내유동성이 감소함에 따라 일반 배합 대비 10% 이상 소성변형 저항성이 낮아짐으로 FNS 아스팔트 포장의 사용성 확보를 위해서는 입도 개선 및 아스팔트 바인더 등급 상향 등의 대안이 필요할 것으로 나타났다.
4. FNS 골재를 단독으로 사용할 경우 제한된 혼입비율에서 신규 골재의 대체가 가능한 것으로 나타났으며, 향후 골재 입도개선, 박리방지제 사용 등을

통해 대체 비율을 증가시킨다면 친환경 아스팔트 혼합물용 재료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] ME(Ministry of Environment), "Development of eco-friendly process and practical manufacturing technology for recycling of waste from Nickel ore refining process," KEITI(Korea Environmental Industry & Technology Institute), Final Report, R&D / 2013000150010, 2016. (in Korean)
- [2] G. H. Lee, "Characterization of Flowable Fill with Ferro-Nickel Slag Dust," *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 18, No. 5 pp. 16-21, 2017. (in Korean)
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.16>
- [3] N. Lemonis, P. E. Tsakiridis, N. S. Katsiotis, S. Antiohos, D. Papageorgiou, M. S. Katsiotis, M. Beazi-Katsioti, "Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan," *Construction and Building Materials*, Vol. 81, pp. 130-139, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.046>
- [4] Y. U. Kim, D. B. Kim, S. J. Kim, "An Experimental Study on the Setting Time and Compressive strength of Mortar using Ferronickel Slag Powder," *J. Korea Inst. Build. Constr.*, Vol. 18, No. 6, pp. 551-558, Dec, 2018. (in Korean)
DOI: <https://doi.org/10.5345/IKBC.2018.18.6.551>
- [5] A. K. Saha, P. K. Sarker, "Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 162, pp. 438-448, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.035>
- [6] G. Wang, R. Thompson, Y. Wang, "Hot-Mix Asphalt That Contains Nickel Slag Aggregate Laboratory Evaluation of Use in Highway Construction," *Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies*, No. 2208, pp. 1-8, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.3141/2208-01>
- [7] G. Wang, R. Thompson, "Slag Use in Highway Construction - the Philosophy and Technology of its Utilization," *Int. J. Pavement Res. Technol.* Vol. 4, No. 2, pp. 97-103, 2011.
- [8] J. Cosme, G. Fernandes, D. P. Fernandes, "Utilization of ferronickel slag in hot mix asphalt," *REM-International Engineering Journal*, Vol. 74, pp. 19-26, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1590/0370-44672019740068>
- [9] G. Bartzas, K. Komnitsas, "Life cycle assessment of ferronickel production in Greece," *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, vol. 105(PA), pp. 113-122, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.016>
- [10] K. N. Kim, S. H. Jo, N. S. Kim, H. Y. Kim, "A Study on a Steel Slag Asphalt Concrete Design Method Considering Density and Absorption," *Int. J. Highw. Eng.*, Vol. 20, No. 1, pp. 59-67, 2018. (in Korean)
DOI: <https://doi.org/10.7855/IJHE.2018.20.1.059>
- [11] KS F 2382, "Standard Test Method for Indirect Tension of Asphalt Mixtures," 2018. (in Korean)
- [12] Y. J. Jo, J. M. Han, Y. J. Noh, S. H. Choi, "Characteristics of Rutting and Moisture Susceptibility of R-EPDM Modified Asphalt Mixtures," *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 87-92, 2010. (in Korean)
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO201014654457730>
- [13] KS F 2374, "Standard Test Method for Wheel Tracking of Asphalt Mixtures," 2017. (in Korean)

김 경 남(Kyung Nam Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 경기대학교 토목공학과(공학사)
- 2016년 2월 : 경기대학교 토목공학과(공학석사)
- 2020년 8월 : 경기대학교 토목공학과(공학박사)
- 2020년 9월 ~ 2022년 2월 : 경기대학교 토목공학과 박사후연구원
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원

<관심분야>

아스팔트 포장, 건설재료, 자원재활용 등

이 수 형(Soo Hyung Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경기대학교 토목공학(공학석사)
- 2013년 2월 : 경기대학교 토목공학(공학박사)
- 1993년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 수석연구원

<관심분야>

도로포장관리시스템(PMS), 차선도색, 아스팔트 등

조 신 행(Sin Haeng Jo)

[정회원]



- 2001년 2월 : 경기대학교 토목공학(공학학사)
- 2004년 2월 : 경기대학교 토목공학(공학석사)
- 2014년 2월 : 경기대학교 토목공학(공학박사)
- 2017년 4월 ~ 현재 : ㈜신창이엔씨 기술연구소 이사

<관심분야>

아스팔트 포장, 건설재료, 자원재활용 등

김 연 태(Yeon Tae Kim)

[정회원]



- 2012년 3월 : 인하대학교 토목공학(공학사)
- 2014년 3월 : 인하대학교 토목공학(공학석사)
- 2019년 3월 ~현재 : 인하대학교 토목공학과(박사과정)

- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원

<관심분야>

도로포장관리시스템(PMS), 차선도색, 아스팔트 등