

PVA 섬유와 실리카흄 첨가가 알칼리 활성화 슬래그의 염화물 침투 저항성에 미치는 영향

윤현노*

Effect of PVA Fiber and Silica Fume Addition on Chloride Penetration Resistance of Alkali-Activated Slag

Yoon, Hyun No*

Abstract: This study investigates the effect of polyvinyl alcohol (PVA) fiber and silica fume addition on the chloride penetration resistance of alkali-activated slag. Silica fume was added to replace slag at the dosage of 0, 5, 10, and 20% by weight of the binder, while PVA fiber was added at the dosage of 0, 1, and 2% by volume of the mixture. Samples were synthesized via alkali activator with 1.0 of silicate modulus and cured at room temperature for 28 days. Compressive strength test, permeable voids volume test, water absorption test, and rapid chloride penetration test were conducted for measuring the characteristics of alkali-activated slag. The results showed that increasing silica fume content up to 10% in alkali-activated slag improved compressive strength and chloride penetration resistance. Addition of PVA fibers up to 1% by volume enhanced strength and chloride penetration resistance, but exceeding this led to reduced strength and durability due to increased void formation in the matrix.

키 워 드: 알칼리 활성화 시멘트, 슬래그, 실리카흄, PVA 섬유, 염소이온 침투

Key Words: Alkali-activated cement, slag, silica fume, PVA fiber, chloride penetration

1. 서 론

수중 구조물에 사용되는 콘크리트는 가혹 조건(염화물 침투, 파랑 등)에 놓여있기 때문에 사용 전 내구성 측면에서의 많은 검토가 필요하다(Mehta, 1980). 따라서, 잠재적으로 발생 가능한 콘크리트의 열화를 방지하기 위해 내구성이 우수한 재료를 선택할 필요가 있으며, 특히 콘크리트에 대한 염화물 침투를 감소시키는 것은 이러한 가혹한 환경에서 콘크리트의 열화를 방지하는데 중요한 측면이다.

알루미노실리케이트 전구체(플라이애시 및 슬래그)의 알칼리 활성화를 통해 제조되는 알칼리 활성화 재료는 수중 구조물의 콘크리트로서 잠재적인 후보가 될 수 있다(Jang et al., 2014). 이들 재료는 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 비교하여 염화물 침투 저항성, 내산성, 내화성, 황산염 공격 등에서 우수한 내구성을 보인다고 알려져 있다(Lee et al., 2016). 이전 연구들에서 보통 포틀랜드 시멘트 페이스트와 혼합된 고로슬래그는 혼합되지 않은 포틀랜드 시멘트 페이스트에 비해 높은 압축 강도 및 염화물 확산 저항성을 포함하여 내구적으로 유리한 특성을 가지고 있었

다고 보고되었다(Roy et al., 2000). 또한, 알칼리 활성화 슬래그의 주 수화생성물인 C-(A)-S-H gel은 알칼리 활성화 플라이애시의 주 수화생성물인 N-A-S-H gel에 비해 결합되는 염화물의 비율이 적어 낮은 염소이온 침투 깊이를 가지며 플라이애시와 비교하여 염화물 침투 저항성을 개선하는데 기여한다고 보고되었다(Ismail et al., 2013). 따라서 알칼리 활성화 재료는 수중 구조물에 사용되는 기존 콘크리트의 대안이 될 수 있으며, 수중 구조물의 열화나 철근 부식 방지에 기여할 수 있다.

한편, 섬유 강화 시멘트 재료는 우수한 기계적 특성으로 인해 광범위하게 연구되어 왔다. 알칼리활성 슬래그에서 보강제로서 다양한 종류의 섬유(강섬유, 폴리프로필렌(PP) 섬유, 폴리에틸렌(PE) 섬유 및 폴리비닐알코올(PVA) 섬유)이 사용되고 있으며, 이러한 섬유는 알칼리활성 슬래그의 기계적 특성(압축 강도, 휨강도 등)을 향상시킬 수 있다(Aydin & Baradan, 2013). 또한, 마이크로 크기의 메타카올린, 실리카흄, 플라이애시 등의 포졸란 재료의 사용 또한 알칼리활성 슬래그의 기계적 성능 향상에 영향을 미친다고 연구되어 왔다(Rostami and Behfarnia, 2017).

알칼리 활성화 슬래그의 반응 메커니즘, 강도, 내구성 등의 물리/화학적 특성은 그 동안 많은

* 한국화학융합시험연구원 선임연구원. 교신저자
(concrete@ktr.or.kr)

연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 추가적인 혼화재, 보강재를 통해 성능 향상을 위한 연구들이 수행 중이다. 섬유 및 실리카흙의 첨가가 알칼리 활성화 슬래그의 기계적 특성에 미치는 영향은 광범위하게 조사된 반면, 알칼리활성 슬래그의 내구성 측면에서의 영향은 잘 알려져 있지 않다. 이러한 배경에서 본 연구는 실리카흙과 PVA 섬유 첨가가 알칼리활성 슬래그의 강도 및 염화물 침투 저항성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

알칼리 활성화 슬래그 시험체 제조를 위하여 바인더 재료로 고로슬래그와 실리카흙을 사용하였다. Table 1은 슬래그와 실리카흙의 화학적 조성을, Figure 1은 슬래그와 실리카흙의 XRD 패턴을 나타낸다. 슬래그와 실리카 흙은 대부분 비정질 상으로 구성되어 있었으며 슬래그에서 åkermanite, anhydrite, gehlenite상과 실리카흙에서 quartz상 등 일부 결정질이 관찰되었다. 본 연구에 사용된 섬유는 PVA 섬유로 PE, PP 섬유와 비교하여 친수성으로 인해 시멘트계 매트릭스와의 부착이 우수하고, 우수한 내알칼리 성으로 알칼리 활성화 슬래그에 혼입하여도 섬유의 기계적 성능의 유지가 가능하다고 연구되었다(Shah et al., (2020).

실리카흙은 슬래그 바인더의 0, 5, 10 20%의 중량비로 대체되어 첨가되었으며, PVA 섬유는 혼합물의 0, 1, 2%의 부피비로 첨가되었다. 바인더와 모래의 비가 1 : 2인 모르타르 샘플로 제작되었으며 알칼리 활성화 용액은 1.0의 silicate modulus(SiO₂/Na₂O) 및 물-바인더 비가 0.4가 되도록 제조하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 재료가 Figure 2에 나타나 있다.

샘플의 제작은 바인더 재료, 모래 및 PVA 섬유를 1분간 건비빔한 후 알칼리 활성화 용액을 첨가하고 3분간 추가 교반하였다. 제작된 혼합물은 압축강도, 물흡수 시험을 위해 50mm×50mm×50mm 몰드에 성형되었고, 투과성 공극 부피 측정 및 염화물이온 침투시험을 위해 100φ×50mm 몰드에 성형 하였으며, 20℃의 실내 환경에서 28일 동안 양생하였다.

실리카흙 및 PVA 섬유 혼입 알칼리 활성화 슬래그의 특성을 분석하기 위하여, 압축강도 시험, 투과성 공극 부피 측정, 물흡수 시험, 염화물이온 침투시험을 실시하였다. 압축강도 시험은 3,000 kN의 만능재료시험기를 사용하였으며, 투과성 공극 부피 측정은 ASTM C642 기준에 따라 다음 계산식으로 계산되었다.

$$\text{Volume of permeable voids (\%)} = \frac{B-A}{B-C} \times 100$$

여기서 A, B, C는 각각 절대건조 상태에서의 샘플 무게, 샘플을 수중에서 5시간 끓인 후의 표면건조 상태에서의 샘플 무게, 수중에서의 샘플 무게를 나타낸다. 물흡수 시험, 염화물이온 침투 시험은 각각 ASTM C 1585, ASTM C 1202 기준에 따라 진행하였다.

Table 1. Chemical composition of slag and silica fume

Oxide composition (wt%)	Blast furnace Slag	Silica fume
SiO ₂	32.4	92.0
Al ₂ O ₃	11.5	0.53
CaO	47.7	0.48
MgO	3.0	1.18
Fe ₂ O ₃	0.6	0.97
SO ₃	2.7	0.23
K ₂ O	0.5	0.7
TiO ₂	0.5	-
P ₂ O ₅	0.6	-

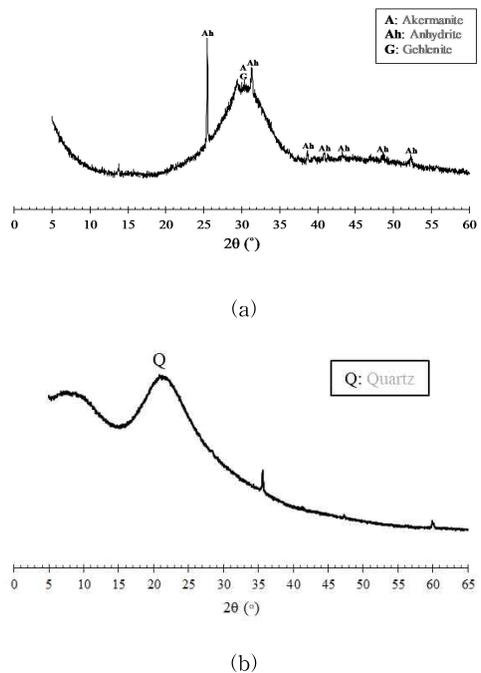


Figure 1. XRD patterns of (a) slag and (b) silica fume



Figure 2. Materials used in this study: (a) Blast furnace slag, (b) Silica fume, (c) PVA fiber and (d) Alkali activator

3. 결과 및 고찰

28일 경화된 알칼리 활성 슬래그 모르타르 샘플의 실리카흄과 PVA 섬유에 따른 압축강도 실험결과가 Figure 3에 나타나 있다. 전반적으로 실리카흄의 함량이 증가함에 따라 알칼리활성 슬래그의 압축강도는 증가하였다. 섬유가 첨가되지 않은 샘플에서 실리카흄 0%일때의 압축강도는 약 40MPa인 반면에 실리카흄이 20% 혼입된 샘플의 압축강도는 약 70MPa로 약 1.75배 증가하였다. 이러한 이유는 실리카흄의 포졸란 활성으로 인해 C-S-H 겔을 생성하여 압축강도를 증가시킬 뿐만 아니라, 샘플의 기공을 채워 알칼리활성 슬래그의 내구성을 향상시키기 때문이다(Rostami and Behfarina, 2017). PVA 섬유가 1% 혼입된 샘플에서도 동일한 경향을 보였으며, 섬유가 혼입되지 않은 샘플과 비교하였을 때 섬유보강의 효과로 더 높은 강도를 나타냈다. 하지만 2%의 PVA 섬유가 혼입된 샘플에서는 오히려 강도가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 다량의 섬유 혼입으로 알칼리활성 슬래그의 워커빌리티에 영향을 미치고, 섬유의 뭉침 현상으로 인해 매트릭스 내의 많은 공극을 형성하였기 때문이다(Puertas et al., 2003). 따라서 알칼리 활성 슬래그의 강도 측면에서 PVA 섬유를 1%까지 혼입하는 것이 압축강도를 높이는 데 기여가 가능하다.

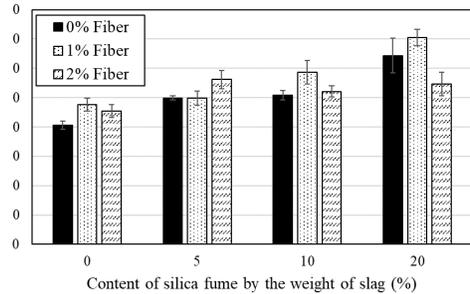


Figure 3. Compressive strength of the samples

28일 경화된 알칼리 활성 슬래그 모르타르 샘플의 실리카흄과 PVA 섬유에 따른 투과성 공극 부피의 측정결과가 Figure 4에 나타나 있다. 샘플의 투과성 공극 부피는 실리카흄의 함량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 앞선 강도 결과와 유사하게 실리카흄 혼입으로 인한 C-S-H 겔 형성 및 기공 밀실 효과로 인한 것으로 볼 수 있다. PVA 섬유가 혼입된 샘플에서는 PVA 섬유가 혼입되지 않은 샘플보다 투과성 공극 부피가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 섬유의 혼입이 매트릭스 내에 많은 공극을 형성시키기 때문인 것으로 보인다.

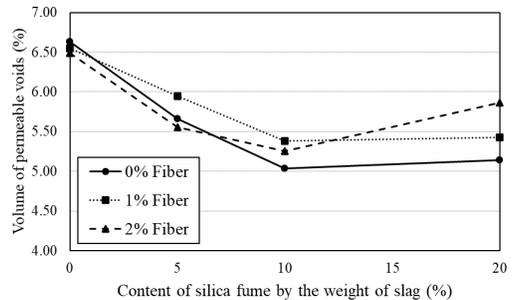


Figure 4. Volume of permeable voids of the samples

28일 경화된 알칼리 활성 슬래그 모르타르 샘플의 실리카흄과 PVA 섬유에 따른 물흡수계수 실험결과가 Figure 5에 나타나 있다. 투과성 공극 부피의 결과와 유사하게 샘플의 물 흡수율은 실리카흄 함량이 증가에 따라 감소한 반면, PVA 섬유 함량의 증가에 따라 증가하였다. 실리카흄의 첨가는 알칼리활성 슬래그의 공극을 줄여 물흡수계수를 감소시키는 데 기여했지만, 섬유의 첨가는 섬유의 뭉침 등으로 인한 공극 형성으로 오히려 물흡수 계수가 증가하는 것으로 나타났다.

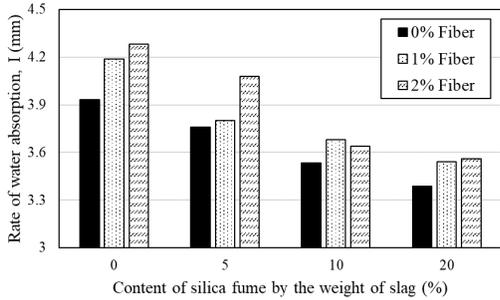


Figure 5. Rate of water absorption of the samples

28일 경화된 알칼리 활성 슬래그 모르타르 샘플의 실리카흙과 PVA 섬유에 따른 염화물이온 침투시험 결과가 Figure 6에 나타나 있다. 전반적으로 실리카흙의 함량이 증가함에 따라 샘플의 전하 통과 값이 감소하였다. 이는 앞선 투과성 공극 부피, 물흡수 시험 결과와 일치한다. 또한, PVA 섬유가 혼입되지 않은 샘플과 비교하여 1%의 PVA 섬유가 혼입된 샘플에서의 전하 통과값은 실리카흙 함량에 따라 감소 또는 증가하는 경향이 있는 반면 2%의 PVA 섬유가 혼입된 샘플에서의 전하 통과 값은 대부분 증가하였다.

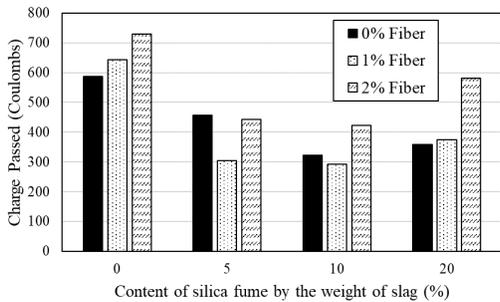
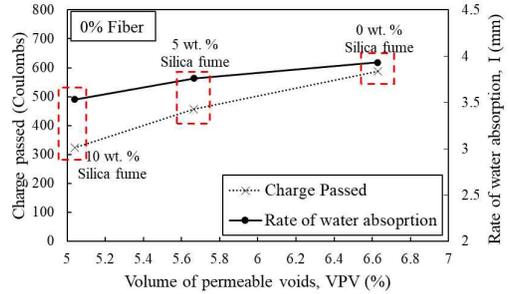
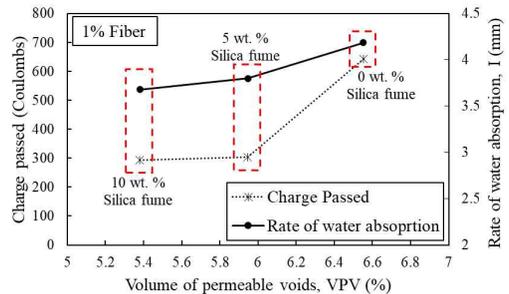


Figure 6. Charge passed value of the samples

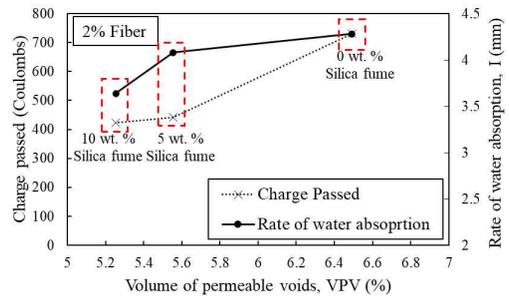
Figure 7은 측정된 투과성 공극부피, 물흡수계수, 염화물이온 침투시험 결과의 상관관계를 나타낸다. 대부분의 샘플(실리카흙 20%인 샘플 제외)은 투과성 공극 부피가 증가함에 따라 전하 통과 값과 물 흡수율이 증가함을 보여준다. 이를 통해 알칼리 활성 슬래그의 염화물 침투 저항과 물흡수계수는 주로 투과성 공극 부피의 변화에 의해 결정될 수 있으며, 실리카흙의 혼입으로 더 밀실한 매트릭스를 구성하여 알칼리활성 슬래그의 내구성 향상에 도움을 줄 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 일정 함량의 PVA 섬유



(a)



(b)



(c)

Figure 7. Correlations between chloride penetration, water absorption and permeable voids of the samples: (a) 0% Fiber, (b) 1% Fiber and (c) 2% Fiber

유의 혼입도 알칼리 활성 슬래그의 강도 및 염소이온 침투 저항성 향상에 기여할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수중 구조물에 사용되는 콘크리트의 내구성 향상과 관련하여, 실리카흙과 PVA 섬유 첨가가 알칼리활성 슬래그의 강도 및 염화물 침투 저항성에 미치는 영향을 조사하였다. 실험결과 알칼리활성 슬래그의 압축강도 및 염화물 침투저항성은 실리카흙의 함량이 최대 10%까지 증가함에 따라 증가하였다. 1% 부피비까지의

PVA 섬유 첨가는 강도 및 염화물 침투저항성 향상에 기여할 수 있지만 그 이상의 첨가는 오히려 매트릭스 내에 많은 공극을 형성시켜 강도와 내구성을 감소시킬 수 있다는 것으로 관찰되었다. 따라서 알칼리활성 슬래그의 기계적 성능을 향상시키기 위한 실리카흙과 PVA 섬유의 최적 함량은 각각 바인더의 10% 중량비와 혼합물의 1% 부피비였다. 마지막으로, 알칼리활성 슬래그의 염화물 침투 저항성은 매트릭스 내의 투과성 공극의 부피에 의해 지배되는 것을 알 수 있었다.

REFERENCES

- ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org.
- ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org.
- ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, www.astm.org.
- Aydin, S., & Baradan, B. (2013). The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 63-69.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., ... & van Deventer, J. S. (2013). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 48, 1187-1201.
- Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K. (2014). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 50, 169-176.
- Lee, N. K., & Lee, H. K. (2016). Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste. *Cement and concrete composites*, 72, 168-179.
- Mehta, P. K. (1980). Durability of concrete in marine environment--A review. *Special Publication*, 65, 1-20.
- Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and concrete research*, 33(12), 2031-2036.
- Rostami, M., & Behfarnia, K. (2017). The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and building materials*, 134, 262-268.
- Roy, D. M., Jiang, W., & Silsbee, M. R. (2000). Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1879-1884.
- Shah, S. F. A., Chen, B., Oderji, S. Y., Haque, M. A., & Ahmad, M. R. (2020). Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkali-activated mortar. *Construction and Building Materials*, 243, 118221.

