

광물성 혼화재료를 혼입한 고성능 모르타르의 염해 및 화학저항성 평가

이겨레^{*}, 한승연¹, 최성용², 윤경구¹

¹강원대학교 토목공학

²대상이앤씨

Evaluation of Chloride and Chemical Resistance of High Performance Mortar Mixed with Mineral Admixture

Kyeo-Re Lee^{*}, Seung-Yeon Han¹, Sung-Yong Choi², Kyong-Ku Yun¹

¹Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

²Daesang E&C

요약 외부환경에 노출된 콘크리트 구조물은 사용기간 동안 시간의 경과함에 따라 여러 가지 환경적, 화학적, 물리적 요인들이 콘크리트 내부로 서서히 침투 및 확산되면서 콘크리트 초기의 우수한 내구성능을 저하시켜, 열화발생으로 인한 성능저하의 규명 및 유지관리에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 특히, 해안에 근접한 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받는 경우, 동결융해의 과정에서 콘크리트 조직이 팽창 수축을 반복하면서 콘크리트의 조직이 이완되고 이때, 해수에 존재하는 염화물이온이 콘크리트 내부에 침입하게 되면, 콘크리트 구조물의 철근부식으로 인한 열화를 가속화시키기 때문에 내륙 콘크리트 건축물에 비해 내구성능의 저하가 급속히 진행됨으로 특별한 주의가 필요하다. 본 연구에서는 해수에 접한 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위해 광물성 혼화재료를 혼입한 코팅용 고성능 모르타르의 개발을 목적으로 하고 있으며, 모르타르의 강도 및 내구 특성에 대한 실험적 연구가 진행되었다. 모르타르에 광물성 혼화재료인 실리카퓌름, 메타카올린, 초고분말 플라이에시를 혼입하였다. 혼입률은 실리카퓌름과 메타카올린은 각각 3, 7, 10%로 혼입하였으며, 초고분말 플라이에시는 5, 10, 15, 20%로 혼입하여 실험을 진행하였다. 혼화재료 혼입을 통해 제작된 모르타르 시험편을 재령 1일과 28일에 정적 강도 시험을 진행하였으며, 재령 28일에 염소이온 침투저항성 시험, 황산 저항성 시험, 염해 저항성 시험 등의 열화 촉진실험을 실시하여 내구 특성을 분석하였다. 촉진 염화물이온 확산 침투 시험 결과를 이용해 국내 콘크리트학회에서 제안하는 방법과 미국, 유럽의 방법으로 내구수명을 평가해 보았다. 메타카올린 혼입 시 모든 규정에서 우수한 내구 수명으로 평가 되었으며, 메타카올린 10%혼입 시 KCI를 기준으로 약 470년의 내구수명이 예측되었다.

Abstract With the passing of time, exposed concrete structures are affected by a range of environmental, chemical, and physical factors. These factors seep into the concrete and have a deleterious influence compared to the initial performance. The importance of identifying and preventing further performance degradation due to the occurrence of deterioration has been greatly emphasized. In recent years, evaluations of the target life have attracted increasing interest. During the freezing-melting effect, a part of the concrete undergoes swelling and shrinking repeatedly. At these times, chloride ions present in seawater penetrate into the concrete, and accelerate the deterioration due to the corrosion of reinforced bars in the concrete structures. For that reason, concrete structures located onshore with a freezing-melting effect are more prone to this type of deterioration than inland structures. The aim of this study was to develop a high performance mortar mixed with a mineral admixture for the durability properties of concrete structures near sea water. In addition, experimental studies were carried out on the strength and durability of mortar. The mixing ratio of the silica fume and meta kaolin was 3, 7 and 10 %, respectively. Furthermore, the ultra-fine fly ash was mixed at 5, 10, 15, and 20%. The mortar specimens prepared by mixing the admixtures were subjected to a static strength test on the 1st and 28th days of age and degradation acceleration tests, such as the chloride ion penetration resistance test, sulfuric acid resistance test, and salt resistant test, were carried out at 28 days of age. The chloride diffusion coefficient was calculated from a series of rapid chloride penetration tests, and used to estimate the life time against corrosion due to chloride ion penetration according to the KCI, ACI, and FIB codes. The life time of mortar with 10% meta kaolin was the longest with a service life of approximately 470 years according to the KCI code.

Key Words : Chloride penetration, Silica fume, Meta kaolin, Sulfuric acid resistance, Ultra fine fly ash

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(고압살수 및 고성능 셀룰러 스틱 리트를 이용한 해양 콘크리트 구조물 보수 공법 및 장비 개발)

*Corresponding Author : Kyeo-Re Lee(Kangwon National Univ.)

Tel: +82-10-8255-0856 email: leekr@kangwon.ac.kr

Received February 8, 2018

Revised (1st March 7, 2018, 2nd April 6, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

대기나 해양환경 등 열화요인이 있는 외부환경에 노출된 콘크리트 구조물은 사용기간 동안 시간의 경과함에 따라 여러 가지 환경적, 화학적, 물리적 요인들이 콘크리트 내부로 서서히 침투·확산되면서 콘크리트 초기의 우수한 내구성능을 저하시켜 열화발생으로 인한 성능저하 가능성이 증가됨으로써 내구적 열화현상 규명과 유지관리에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다[1].

일반적으로 콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 주요 원인으로는 외부환경 노출에 따른 동결융해, 온도변화, 건조·습윤 등의 기상작용이 있다. 또 한 황산염 및 화학물질에 의한 침식작용, 중성화 및 염해에 의한 철근의 부식, 반응성골재 등의 영향, 기타 콘크리트의 사용상 발생하는 여러 조건에 의하여 발생한다.

콘크리트를 구성하는 복잡한 내부 미세구조의 건전성과 수밀성이 약화될 뿐 아니라 초기에 구조물의 결합을 초래하게 되어 결국은 구조물의 수명을 단축시키게 된다. 최근에는 환경열화작용에 의한 내구성능 확보 및 내구수명 평가를 위하여 콘크리트표준시방서 내구성편이 제정되어 내구수명 평가에 대한 관심이 높아지고 있다[2].

본 연구에서는 해수면에 접한 콘크리트 구조물의 장기 내구수명을 확보하기 위한 콘크리트 구조물 코팅용 고성능 모르타르의 염소이온 침투저항성 시험, 황산 저항성 시험, 염해 저항성 시험 등의 열화 촉진실험을 실시하고, 실험결과에 따라 고성능 모르타르의 강도 및 장기 내구수명을 평가 하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 시멘트

시멘트는 KS L 5201에서 규정에 의거, 규격에 만족하는 국내 S사 생산의 1종 포틀랜드 시멘트(분말도 3,289 cm³/g, 밀도 3.15 g/cm³, 강열감량 0.61 %, 안정도 0.08 %)를 사용하였다[3].

2.1.2 잔골재

잔골재는 현장에서 사용하는 부순 모래를 사용하였

다. 물리적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of Fine aggregate

| Type | Specific Gravity (g/cm ³) | Absorption rate(%) | F.M* |
|----------------|---------------------------------------|--------------------|------|
| Fine Aggregate | 2.62 | 0.54% | 2.87 |

* F.M : Fineness Modulus

2.1.3 고성능감수제

유동화제는 폴리카보산계의 고성능 유동화제를 선정하여 사용하였다. 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Physical properties of Superplasticizer

| Density (g/cm ³) | pH | Usage |
|------------------------------|---------|-------------------------|
| 1.05±0.03 (20℃) | 5.0±2.0 | Binder weight ×0.5-2.5% |

2.1.4 실리카폼

실리카폼은 각종 실리콘 및 페로실리온 등의 규소합금을 전기아크식 로에서 제조할 때 배출되는 가스에 부유하여 발생하는 미세한 분말이다. 비표면적이 약 20,000 m²/kg로서 보통 포틀랜드 시멘트의 50~60배이다. 입자의 90 % 이상이 구형으로 된 초미립자 분말로서, 시멘트 질량의 5 ~ 15 % 정도 치환하면 콘크리트 내부 구조가 치밀하게 되어 고강도를 발현할 수 있으며 재료분리 저항성, 수밀성, 내화학약품성이 향상되고 알칼리 골재반응의 억제효과 또한 기대할 수 있다[5]. Table 3은 본 실험에서 사용된 실리카폼의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

2.1.5 메타카울린

메타카울린은 실리카폼과 유사한 성질을 가지고 있으며, 실리카폼과 같은 포졸란 작용을 하는 재료로 장기강도를 증진시키고, 수밀성을 증대시켜 내구성 증진 효과가 있다[3]. Table 4는 본 실험에서 사용된 메타카울린의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

2.1.6 플라이애시

플라이애시는 현재 많이 사용되는 혼화 재료로 입자의 크기, 즉 비표면적에 따라 Fly Ash와 Ultra Fine Fly Ash로 구분된다. 일반 플라이애시보다 작은 입자로 구

성된 초고분말 플라이애시는 높은 비표면적을 가지고 있어 포졸란 반응이 빠르게 진행되며, 내구성을 증진 시켜 준다[1]. Table 5는 본 실험에서 사용된 초고분말 플라이애시의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

Table 3. Physical properties and chemical composition of silica fume

| Type | | Test |
|---------------------|------------------------------------|------------------------|
| Physical properties | Type | undensified |
| | Density(g/cm ³) | 2.2 |
| | ignition loss(%) | 3.45 below |
| | surface area(cm ² /g) | 150,000~300,000 |
| | Form | Sphericity 90% |
| | Particle size(μm) | 1 |
| | Unit weight (kg/m ³) | 250~300 |
| Chemical properties | Ingredient | Silicon(85% more than) |
| | SiO ₂ (%) | 85~95 |
| | Al ₂ O ₃ (%) | 1.5 below |
| | Fe ₂ O ₃ (%) | 3.0 below |
| | CaO(%) | 0.7 below |
| | MgO(%) | 2.0 below |
| SO ₃ (%) | 0.2 below | |

Table 4. Physical properties and chemical composition of Meta Kaolin

| Special Modifications | Dehydroxylated |
|-------------------------------------------|----------------|
| ISO Brightness (%) | 88 |
| Screen Residue, 325Mesh (%) | 0.03 |
| Free Moisture @ 105 deg C (%) as produced | 0.5 |
| pH (28% Solids) | 6.0 |
| Density (g/cm ³) | 2.63 |
| Particle Size (Less than 2μm) | ≥ 80 |
| Bulk Density, Loose (kg/m ³) | 260 |
| Bulk Density, Tamped (kg/m ³) | 480 |
| Oil Absorption, Rubout (ASTM D-281) | 70~80 |

Table 6. Mix design

| Designation | W/C (%) | Unit Weight(kg/m ³) | | | | |
|-------------|---------|---------------------------------|-------|--------|--------|-----|
| | | W | C | Admix. | S | SP |
| Control | 25.7 | 179 | 696.0 | 0.0 | 1572.0 | 8.4 |
| SF 3% | | | 675.1 | 20.9 | 1564.9 | |
| SF 7% | | | 647.3 | 48.7 | 1555.4 | |
| SF 10% | | | 626.4 | 69.6 | 1548.3 | |
| MK 3% | | | 675.1 | 20.9 | 1569.0 | |
| MK 7% | | | 647.3 | 48.7 | 1564.9 | |
| MK 10% | | | 626.4 | 69.6 | 1561.9 | |
| UFFA 5% | | | 661.2 | 34.8 | 1566.3 | |
| UFFA 10% | | | 626.4 | 69.6 | 1560.5 | |
| UFFA 15% | | | 591.6 | 104.4 | 1554.8 | |
| UFFA 20% | | | 556.8 | 139.2 | 1549.0 | |

Table 5. Physical properties and chemical composition of ultra fine fly ash

| Type | | Test |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------|
| Chemical properties | SiO ₂ (%) | 49.4 |
| | Al ₂ O ₃ (%) | 27.5 |
| | Fe ₂ O ₃ (%) | 8.43 |
| | MgO(%) | 1.621 |
| | SO ₃ (%) | 1.12 |
| Fineness(cm ² /g) | | 6,934 |
| Specific Gravity(g/cm ³) | | 2.58 |

2.2 배합설계

배합설계는 현장 조건에 맞추어 현재 원전 해수관 코팅용 기본 배합을 기준 배합으로, 혼화재료를 추가로 사용한 배합설계는 혼화재료의 치환률에 따라 수정하여 설계하였다. 배합설계는 Table 6에 나타내었다. 배합변수에 있어 실리카폼은 SF, 메타카올린은 MK, 초고분말 플라이애시는 UFFA로 명명하였으며, 혼입률을 함께 표현하였다. 또한 물-결합재비가 25.7%로 매우 낮아 작업성을 고려하여 고성능감수제를 사용하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 양생 방법

시험편 제작 후 온도 20 ℃, 상대습도 60 %에서 2시간 거치 후 항온항습기를 사용하여 온도 60 ℃, 상대습도 90 % 이상의 조건에서 11시간 동안 증기 양생을 수행하였다. 증기 양생이 끝난 후 시험편을 몰드에서 분리하여, 다시 온도 20 ℃, 상대습도 60 %에서 추가 양생을 진행하였다[4].

2.3.2 정적강도 시험

정적강도 시험은 압축강도와 휨강도로 구분하여 KS L 5105 "수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법"과 KS L ISO 679 "시멘트 강도 시험 방법"에 준하여 실험을 수행하였으며, 압축강도 시험은 50×50×50 mm의 정방형 시험편을 제작하여, 재령 1일과 28일에 압축강도를 측정하였다[6]. 휨강도 시험은 40×40×160 mm의 각주형 시험편을 이용하여 3점 재하 방법으로 휨강도를 측정하였다. Fig. 1은 정적강도 시험 모습이다.

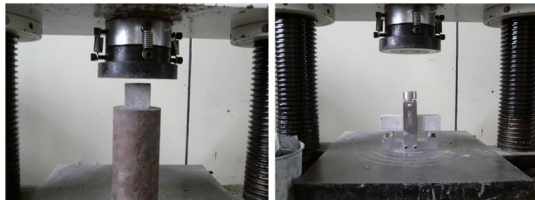


Fig. 1. Static strength test

2.3.3 염소이온 침투 저항성 시험

염소이온 침투저항성 시험은 재령 28일에 진행하였으며, KS F 2711 “전기 전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험방법”에 준하여 수행하였다[7]. 본 시험에 사용된 시험편은 Ø100×200 mm의 실린더형 공시체를 두께 50 mm로 커팅을 진행하여 실시하였다. 일반적으로 콘크리트의 투수시험은 높은 압력으로 물을 강제 투수시켜 Darcy의 법칙에 의하여 투수계수를 결정하는 방법이 있으나 조적이 치밀한 콘크리트의 경우 투수되는 수량이 극히 적으며 실험에 장시간이 요구되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 수압에 의한 촉진 실험보다 효율적인 염소이온의 투과를 전압 차에 의하여 촉진하는 시험법을 채택하였다.

산정된 총 전하량으로 염소이온 침투 저항성에 대하여 비교·분석한다. 다음 Table 7은 KS 규정에서 제시한 산정된 전하량으로 염소이온 침투 저항성과 비교하는 자료를 제시한 것이다.

Table 7. Resistance to chloride ion penetration

| Coulombs | Rating |
|---------------|------------|
| 4,000 < | High |
| 2,000 ~ 4,000 | Moderate |
| 1,000 ~ 2,000 | Low |
| 100 ~ 1,000 | Very Low |
| < 100 | Negligible |

2.3.4 황산 저항성 시험

황산 저항성 시험은 재령 28일에 진행하였으며, ASTM C 267 "Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concrete"에 준하여 실험을 진행 하였다[8]. 시험편을 제작하여 재령 28일에 실시하였으며, 5% 황산용액에 28일 동안 침적하여 수행하였다. 일주일 간격으로 용액을 교체하고 시험체 질량을 측정하여 질량 변화율을 측정하였다. 질량 변화율(%) 계산식은 다음과 같다.

$$\text{질량 변화율(\%)} = \left[\frac{A-B}{A} \right] \times 100$$

여기서, A는 초기 질량, B는 황산용액에 수침 후 질량

2.3.5 염해저항성 시험

염해저항성 시험은 NT Build 492에 준하여 Ø 100 × 200 mm의 원통형 시험편을 50±2 mm 두께로 바깥쪽으로부터 10 ~ 20 mm 두께정도로 축방향에 수직으로 잘라 시험편으로 실시하였다[9].

시험편의 표면을 세척, 건조한 후 진공 처리된 용기 안에 넣었다. 양 끝단 표면은 노출시키고 압력이 1 ~ 5 kPa가 되도록 진공 용기를 조절한 뒤 3시간 동안 유지한다. 3시간 경과 후 포화된 Ca(OH)₂ 용액으로 용기를 채운 후 18 ± 2시간 동안 공시체를 용액에 담가놓았다.

본시험에서 사용되는 용액은 음극용액은 10 % NaCl (물 900g, NaCl 100g, 약 2N)이고 양극용액은 0.3N NaOH(물 1L, NaOH 12g)이며 20 ~ 25 °C로 저장한다. 음극액 저장소에 10 % NaCl 용액을 채우고, 공시체에 고무관을 부착하고 조임쇠로 보호한 뒤 음극액저장소에 있는 플라스틱 지지대 위에 놓는다. 공시체를 싸고 있는 관을 300 mL의 양극용액(0.3M NaOH)으로 채우고 전원을 켜다. 전압을 30V로 하고 공시체에 통하는 초기전류와 각 양극용액의 초기 온도를 기록한다. 초기 전류에 따라 전압을 조정하고 시험시간을 선택하게 되며, 시험 종료 전에 전류와 온도를 기록한다. 공시체를 행구고 표면의 과잉수를 닦아낸 뒤 축방향 으로 쪼갬다. 할렬단면에 0.1M 질산은 용액을 뿌린다. 파단면에 하얀 염화는 침전물이 육안으로 관찰(약 5분 뒤)되면 슬라이드 캘리퍼 또는 적당한 측정자로 확산깊이를 측정한다. 7개 깊이를 10 mm 간격으로 0.1 mm 정확도로 측정한다.

3. 실험결과

3.1 정적강도 시험결과

SF에서는 재령 1일 압축강도는 SF3%에서 55.20 MPa로 측정되었으며 SF10%에서는 57.76 MPa로 변수에 따라 조금씩 차이는 있으나, 기본 배합보다 높은 강도 값을 보였다. 재령 28일 압축강도는 SF혼입량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 28일 강도에서는 기본배합과 SF 10%를 비교 하였을 때 20 MPa의 강도 증진 효과를 나타냈다. 휨강도 측정 결과, 재령 1일과 재령 28일 모두 SF의 혼입량 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.

MK를 사용하였을 때 재령 1일 압축강도는 MK 3%와 7%에서 기본배합보다 조금 작은 강도 값을 보이나 그 차이가 크지 않고, MK 10%에서는 63.44 MPa로 우수한 강도 값이 측정되었다. 재령 28일 압축강도는 혼입량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으나, MK 3% 기본강도보다 작은 강도 값이 측정되었다. 하지만 거의 비슷한 강도 값을 보였다. 재령 28일의 압축강도는 혼화 재료 사용에 따라 증가하는 경향을 보였으며, MK 10% 혼입에서는 68.97 MPa로 기본 배합에 비해 10 MPa의 강도 증진 효과가 나타났다. 휨강도 측정 결과 재령 1일과 재령 28일 모두 기본배합과 비슷한 강도를 보였다.

UFFA는 재령 1일의 압축강도 시험에서 UFFA 혼입에 따라 초기 강도가 비슷하거나 작은 강도 값을 보였으나, 재령 28일의 압축강도는 혼입량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 강도 증감 효과는 크지 않으나 기본 배합에 비해 UFFA 20%에서는 5 MPa정도 강도 증진 효과가 있었다. 또한 휨강도 측정결과는 혼입률에 따라 다소 차이는 있으나 기준배합보다 높은 강도 값을

Table 8. Static strength test Results

| Designation | Compressive Strength (MPa) | | Flexural Strength(MPa) | |
|-------------|----------------------------|--------|------------------------|--------|
| | 1Days | 28Days | 1Days | 28Days |
| Control | 50.29 | 59.02 | 9.32 | 12.01 |
| SF 3% | 55.20 | 65.94 | 9.77 | 11.99 |
| SF 7% | 57.22 | 76.52 | 10.66 | 13.05 |
| SF 10% | 57.76 | 79.08 | 12.93 | 13.63 |
| MK 3% | 47.98 | 58.57 | 8.98 | 12.62 |
| MK 7% | 49.97 | 65.29 | 10.12 | 11.05 |
| MK 10% | 63.44 | 68.97 | 12.07 | 12.07 |
| UFFA 5% | 54.41 | 61.08 | 8.20 | 13.67 |
| UFFA 10% | 47.00 | 57.77 | 9.69 | 13.98 |
| UFFA 15% | 48.56 | 64.24 | 10.25 | 12.34 |
| UFFA 20% | 50.72 | 64.36 | 10.49 | 13.40 |

보였다.

Table 8은 변수별 정적강도 시험 결과이다.

3.2 염소이온 침투저항성 시험결과

SF 혼입에 따라 염소이온 침투저항성이 크게 개선되었으며, 기본배합은 시험결과 “Low“ 등급에 만족하고 있었으나, SF를 혼입한 모든 변수에서 “Very Low” 등급을 만족하고 있다.

MK를 혼입에 따른 염소이온 침투저항성은 크게 개선되었으며, MK3%에서는 1056.21C으로 "Very Low" 등급에 조금 모자란 저항능력을 보였으나, 기본배합에 비하여 40%가량 저항능력이 상승하였다. 또한 MK10%의 경우 "Negligible" 등급을 판정 받았다.

UFFA 혼입이 5%에서는 기본배합보다 높은 결과값을 얻을 수 있었으나, 10% 이상 혼입에서 저항성이 증가하는 경향을 보였다 또한 UFFA15 ~ 20% 혼입률에서는 “Very Low” 등급을 보였다.

Table 9와 Fig. 2는 변수별 염소이온 침투저항성 시험 결과이다.

Table 9. RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) Results

| Designation | Coulombs (C) | relative permeability (%) |
|-------------|--------------|---------------------------|
| Control | 1761.67 | 100.00 |
| SF 3% | 661.29 | 37.54 |
| SF 7% | 301.55 | 17.12 |
| SF 10% | 127.95 | 7.26 |
| MK 3% | 1056.21 | 59.96 |
| MK 7% | 306.93 | 17.42 |
| MK 10% | 97.94 | 5.56 |
| UFFA 5% | 1981.97 | 112.51 |
| UFFA 10% | 1392.24 | 79.03 |
| UFFA 15% | 982.60 | 55.78 |
| UFFA 20% | 631.06 | 35.82 |

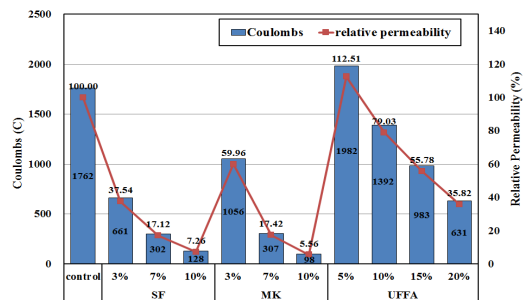


Fig. 2. RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) Results Graph

3.3 황산 저항성 시험결과

SF 혼입에 따른 황산 저항성 시험결과, 혼입률이 증가함에 따라 저항능력이 개선되었으며, 28일 경과 후 기본배합의 질량 변화율과 비교 하여 2 ~ 5%의 변화율이 감소하는 효과를 얻을 수 있었다.

MK 혼입에 따른 황산 저항성 시험은 기본배합보다 높은 질량감소를 보였다.

UFFA 혼입에 따른 황산 저항성 시험 결과 기본배합보다 낮은 질량감소를 보였다.

Table 10은 변수별 황산 저항성 시험결과이다.

Table 10. Resistance of sulfuric acid test Results

| Designation | Weight Change Ratio(%) | | | |
|-------------|------------------------|---------|---------|---------|
| | 7 Days | 14 Days | 21 Days | 28 Days |
| Control | -5.156 | -15.000 | -25.859 | -37.961 |
| SF 3% | -3.973 | -13.346 | -23.744 | -35.594 |
| SF 7% | -4.661 | -13.485 | -23.106 | -34.389 |
| SF 10% | -4.245 | -12.703 | -22.063 | -32.916 |
| MK 3% | -8.430 | -18.463 | -30.098 | -41.507 |
| MK 7% | -7.512 | -17.372 | -29.512 | -41.118 |
| MK 10% | -7.095 | -16.350 | -27.236 | -38.312 |
| UFFA 5% | -5.450 | -15.315 | -23.496 | -31.677 |
| UFFA 10% | -5.178 | -14.781 | -22.867 | -30.954 |
| UFFA 15% | -5.262 | -15.527 | -23.578 | -31.629 |
| UFFA 20% | -4.661 | -15.199 | -23.727 | -32.256 |

3.4 염해저항성 시험결과

3.4.1 변수별 입력 변수

내구수명 평가 시 초기 염화물 이온농도는 국내 KCI에서 최대값으로 제시하고 있는 0.3 kg/m³으로 적용하였으며, 표면염화물이온농도는 KCI에서 제안하고 있는 동해 해안선 안쪽 100 m로 적용하였다. 국내 규정에서 재령 지수를 플라이애시와 슬래그에 대한 보정값만 존재하여 재령지수에 대한 보정은 하지 않았다. 임계 염화물 이온 농도는 결합재량의 0.4%로 국내에서 규정하고 있

Table 11. Input variable

| division | Initial chloride concentration (kg/m ³) | Surface chloride ion concentration (kg/m ³) | Critical chloride ion concentration (kg/m ³) | material age index | sheath thickness (mm) |
|----------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| KCI | 0.3 | 4.5 | 2.784 | 0.2 | 40 |
| ACI | 0 | | | | |
| FIB | 0.3 | | | | |

는 값을 적용하였다. 각 규정에 따른 입력 변수는 Table 11에 나타내었다.

3.4.2 변수에 따른 염해저항성 시험결과

SF 혼입에 따라 내구 수명은 크게 증가 되었으며, 혼입률이 증가 함에 따라 저항능력이 향상 되는 경향이 있다. 확산계수는 기본배합에 비해 크게 감소하였으며, 혼입량에 따라 1.638×10⁻¹² ~ 3.475×10⁻¹² m²/sec로 측정되었다. 염화물 침투 깊이 또한 감소하였으며, 5.30 ~ 9.14 mm로 측정되었다.

MK 혼입에 따라 염화물 확산 계수가 크게 감소함을 알 수 있었다. 모든 변수 중 MK 10%에서 가장 낮은 확산계수를 얻을 수 있었으며, 혼입률이 증가 함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 확산계수는 0.610×10⁻¹² ~ 4.693×10⁻¹² m²/sec로 측정되었으며, 염화물 침투 깊이는 5.76 ~ 9.17 mm로 감소하는 경향을 보였다.

UFFA의 혼입은 염해저항성능 향상에 별다른 경향을 보이지 않았다. 혼화재료를 혼입에 따라 내구 수명 및 확산계수, 침투 깊이의 변동은 있었으나, UFFA 5%는 기본배합과 비슷하거나 낮은 결과를 얻었고, 10%이상 혼입시에 증가하는 경향을 보였으나, SF과 MK의 혼입 결과에 미치지 못하고 있다. 확산계수는 2.781×10⁻¹² ~ 7.45×10⁻¹² m²/sec의 분포를 보였으며, 침투 깊이는 8.43 ~ 16.29 mm의 분포를 나타내고 있다.

Table 12와 Fig. 3은 변수별 염해 저항성 시험결과이다.

Table 12. Diffusion coefficients, Depth of penetration and Life Cycle Prediction

| Designation | Diffusion Coefficients (10 ⁻¹² m ² /sec) | Chloride Depth (mm) | Life Cycle Prediction (year) | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|------|------|
| | | | KCI | ACI | FIB |
| Control | 6.973 | 13.03 | 35 | 55 | 55 |
| SF 3% | 3.475 | 9.14 | 77 | 131 | 149 |
| SF 7% | 1.802 | 5.77 | 154 | 303 | 388 |
| SF 10% | 1.638 | 5.30 | 170 | 341 | 444 |
| MK 3% | 4.693 | 9.17 | 55 | 90 | 97 |
| MK 7% | 2.198 | 7.00 | 125 | 232 | 286 |
| MK 10% | 0.610 | 5.76 | 469 | 1149 | 1781 |
| UFFA 5% | 7.452 | 16.29 | 32 | 51 | 50 |
| UFFA 10% | 2.781 | 8.43 | 97 | 173 | 204 |
| UFFA 15% | 4.934 | 11.20 | 52 | 93 | 100 |
| UFFA 20% | 5.585 | 12.55 | 45 | 80 | 100 |

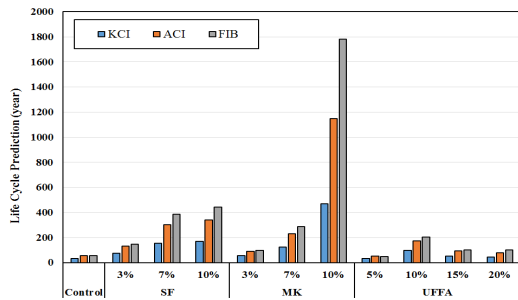


Fig. 3. Life Cycle Prediction Graph

4. 결론

본 연구는 해수에 접한 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위한 외부 코팅용 고성능 모르타르의 강도 및 내구성 평가를 위해 진행 되었으며, 기준배합에 광물성 혼화재료를 변수별로 각각 혼입하여 강도 및 내구성 증진 실험을 수행하였다. 1일과 28일 정적강도 시험을 진행하였고, 내구성 실험은 재령 28일에 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 압축강도 시험결과, 동일한 광물성 혼화재료를 사용하였을 경우 혼입율이 증가함에 따라 강도가 증진되는 효과를 얻을 수 있었으며, SF의 경우 재령 28일 압축강도가 79 MPa로 나타나 강도 증진 효과에 있어서는 SF가 가장 우수한 혼화재료로 판단된다.
- 2) 휨강도 시험결과, 재령 1일에서는 9±1 MPa, 재령 28일에서는 12±1 MPa로 범위로 나타났으며, MK의 경우 재령 28일에서의 휨강도가 SF와 UFFA에 비하여 다소 떨어지는 것으로 나타났다.
- 3) 염소이온 침투저항성 시험결과, 기본 배합에서 “Low”등급으로 판정되었으며, 동일한 혼화재료의 경우 혼입률이 증가 함에 따라 저항성이 증가하였다. SF 혼입 결과 “Very Low”등급을 나타냈다. MK의 경우 MK10%에서 “Negligible”등급으로 판정되었으며, UFFA 혼입 시 5%는 다소 낮은 저항능력을 보였으나, 10% 이상 혼입 시 효과가 증진되어 15, 20%에서는 “Very Low”등급에 만족하고 있다. UFFA는 SF와 MK에 비해 염소이온 침투저항성 성능 증진 효과가 다소 떨어지는 것으로

판단된다.

- 4) 황산저항성 시험결과, 모든 질량 변화율이 감소하는 경향을 보이며, 광물성 혼화재료의 혼입율이 증가함에 따라 조금씩 저항력이 증가하는 경향을 보였다. MK의 경우 다소 높은 질량변화율을 보였는데, 이는 황산용액의 침식에 의해 Gypsum 및 Thaumassite의 생성이 주요 원인으로 판단된다. MK 혼입 시 황산의 침식에 주의가 요망된다.
- 5) 염해저항성 시험결과를 통한 내구수명 평가에 있어서 국내 콘크리트표준시방서를 포함, 미국, 유럽의 코드를 통해 이루어졌다. 각 코드는 기본적인 산출 방법은 비슷한 형태를 이루고 있으나, 코드에 따라 약간의 특징을 보였다. 염화물 촉진 시험 결과 MK 10%를 혼입한 배합에서 가장 낮은 확산계수와 침투 깊이를 얻을 수 있었으며, KCI기준으로 약 470년의 내구수명으로 평가되는 결과를 얻어 모든 변수에서 가장 우수한 내구 성능을 나타내었다. 또한 UFFA 혼입의 경우 10%이상 혼입시 내구수명이 향상되지 않아 다른 재료에 비해 염해저항 성능은 떨어지는 것으로 판단된다.

KCI, ACI, FIB등 각각의 규정에 따른 내구수명의 차이가 큰 편이었다. 내구수명은 FIB에서 가장 높게 평가되며, KCI에서 가장 낮게 평가되었다. 염해저항성 평가에서 혼화재료를 혼입함에 따라 KCI를 기준으로 20년~400년의 내구수명이 향상되었으며, FIB에서는 40년~1700년의 내구수명 향상효과를 보였다. 변수별 입력 변수에서 초기 염화물 이온 농도를 국내 최대값을 적용하였기 때문에 ACI, FIB 규정에 비해 KCI기준이 다소 낮게 평가된 것으로 판단된다.

References

- [1] S. H. Ahn, “Strength and Durability of High Performance mortar for Prestressed Concrete Cylinder Pipe”, Kangwon National University, 2011.
- [2] Y. D. Eum, “Shotcrete Salt Damage Resistance According to Types and Supplement ratios of Mineral Admixture”, Kangwon National University, 2013.
- [3] KS L 5201, KS, Portland cement, 2017.
- [4] K. R. Lee, “Durability Assessment for Crushed Sand Wet-mix Shotcrete mixed with Mineral Admixtures”, Kangwon National University, 2013.

- [5] Y. B. Kim, "Durability Evaluation and Improvement of Prestressed Concrete Cylinder Pipe for Water Intake/Drainage in Nuclear Power Plant", Kangwon National University, 2012.
- [6] KS L 5105, KS, Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortar, 2007.
- [7] KS F 2711, KS, Testing method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 2002.
- [8] ASTM C 267, ASTM Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concrete.
- [9] NT Build 492, NT Build. CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS.

최 성 용(Sung-Yong Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2009년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학박사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : 대상이앤씨(주) 상무이사 재직

<관심분야>
구조공학, 콘크리트공학

이 겨 레(Kyeo-Re Lee)

[정회원]



- 2011년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2013년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장

윤 경 구(Kyong-Ku Yun)

[정회원]

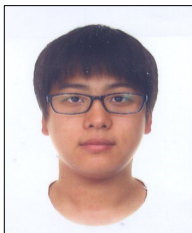


- 1992년 2월 : 미국미시간주립대학 토목공학석사
- 1995년 2월 : 미국미시간주립대학 토목공학박사
- 2000년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장

한 승 연(Seung-Yeon Han)

[정회원]



- 2012년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2014년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>
토목, 숏크리트, 콘크리트 구조물, 도로포장