

조강형 라텍스개질 스프레이 모르타르의 특성

Characteristics of High Early Strength Latex Modified Sprayed-Mortar

윤 경 구* 이 봉 학* 이 진 범**
Yun, Kyong-Ku Lee, Bong-Hak Lee, Jin-Beom

Abstract

Shotcrete has been referred to as gunite, pneumatically applied mortar or concrete, sprayed concrete or mortar. There are sound reasons why sprayed mortar is one of the best portland cement based material for repairing old concrete structures. However, it is difficult to find the research results on the latex-modified mortar nevertheless on the impact of air onto the fresh and hardened properties of latex-modified mortar. So, the main experimental program included strength test, slump test, rapid chloride permeability test, image analysis for air void system, and chemical attacks with the main experimental variables of latex content, fine aggregate content, water-cement ratio, and air foamer content.

키워드 : 라텍스, 스프레이 모르타르, 샷크리트
Keywords : Latex, sprayed-mortar, shotcrete

1. 서론

현재 구조물 신설 및 보수·보강 공법에서 콘크리트를 사용한 스프레이 공법과 모르타르를 이용한 스프레이 공법은 주요공법으로 인정되고 있으며, 특히 모르타르를 이용한 스프레이 공법은 하수관거 보수·보강 공법과 같은 수리구조물 공법으로서 주목받고 있다. 또한 스프레이 공법은 신재료의 개발 및 스프레이 타설장비의 발달로 그 기술의 발전이 지속적으로 이루어지고 있으며 최근 습식스프레이 공법이 일반화되고 있다. 그러나 습식스프레이 공법과 관련된 체계적인 연구의 부족, 시공기술의 취약 및 명확한 기준 정립의 미비 등으

로 인해 재료, 배합, 시공, 장비 및 공법 선정 등의 선택에 일관성이 없고 표준배합 또한 외국의 시방 및 기존 시공사례를 답습하고 있는 실정이다.

우선 스프레이의 조기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(Accelerator)를 사용하고 있다. 지금까지의 연구결과에 의하면 기존의 범용 급결제를 사용한 스프레이의 장기강도는 급결제를 넣지 않은 것과 비교해 20~40%의 압축강도가 저하함을 알 수 있고, 급결제 첨가량이 증가할수록 장기강도의 저하와 강한 염기성으로 일부 제품의 경우 강한 자극성 때문에 작업자의 안전에 직접적인 영향을 미치고 있다.

곧지 않은 콘크리트가 공기압을 통해 타설되는 형태이므로 재료의 리바운드가 필연적인데 기존의 스프레이 습식공법의 리바운드가 비탈면에서는 15~20%, 천정면에서는 30~40%가 발생하고, 건식공법에서는 더 많은 리바운드가 있는 것으로 보고되고 있으며 이러한 문제점들은 곧 스프레이의 내구

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자(이봉학)

** 한국건설기술연구원, 공학석사

성과 직결되는 사항들이다.

또한 일반적인 스프레이의 공정의 리바운드량 때문에 고가의 보수모르타르 사용에 따른 경제성에 맞지 않는다. 또한 건식스프레이 공법의 경우 많은 분진 발생으로 인한 환경오염 그리고 인체유해문제와 보수단면에 생기는 공극이 내구성 감소에 영향을 준다.

따라서 스프레이용 구조물 보수·보강 공법은 역학적 특성 및 내구성 등 보수체의 안전 및 기능면에서 매우 중요한 문제를 야기 시킨다. 내구성의 증대가 확보되면 추가적인 라이닝의 생략과 장기 공용성이 증대됨으로 유지보수 비용을 절감 할 수 있게 된다. 즉 수리구조물의 보수·보강 시 내부 라이닝의 공사를 줄이기 위하여 역학적 특성이 우수하며 리바운드량이 적고 내구성이 뛰어난 재료의 개발은 전 세계적으로 요구되는 추세이다.

따라서 본 연구에서는 모르타르를 사용하여 기존의 일반 뿔어붙이기 콘크리트가 가지고 있는 단결제를 사용함으로 가져다주는 장기간도 저감과 환경오염문제를 개선하고자 조강시멘트를 사용하여 조강시멘트가 지니는 내구특성의 취약함을 보완하고자 수성 라텍스(Latex)로 개질한 고성능·고기능 습식 스프레이를 개발하고자 한다. 또한 이 재료에 대한 건물 인력을 양성하므로 품질관리 및 우수한 현장 적용성 및 시공성을 갖는 재료를 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 HES-LMS 모르타르의 최적 배합을 찾고 기초물성 및 내구성을 평가하기 위하여 여러 가지 변수를 설정하였다.

동일 작업성을 기준으로 하여 라텍스 함량을 각각 0%, 5% 10%, 15%로 선정하였다. 동일 작업성 기준 라텍스 함량 변화가 갖는 의미는 현장에서 사용될 수 있는 워터빌리티와 펄프성에 의한 내구성 평가 및 라텍스함량 등의 적정범위를 찾을 수 있는데 있다.

물-시멘트 비 변화가 미치는 뿔어붙임성과 펄프성을 확인하고 재료의 물성변화에 어떤 영향을 주는지 파악하기 위해서 23%, 24%, 25%로 설정하였다.

변수요인은 뿔어붙임성과 펄프성에 직접적인 영향을 주는 C:S에 따른 역학적 특성을 분석하고 잔골재 함량에 의한 결함체의 저감은 장기적인 모르타르의 수축과 공사비용 절감을 고려하기 위해 동일 작업성 기준으로 하여 C:S비를 각각 1:1.4, 1:1.7, 1:2로 비율을 달리하여 실험을 실시하였다.

기포제함량 변화에 따라 공기량이 증가함으로

발생되는 작업성과 공기량 확보에 따른 스프레이의 역학적인 특성 및 내구특성을 분석하기 위해 실험 변수로 설정하였다.

2.2 시험체 제작 및 시험방법

라텍스함량변화, 잔골재함량 변화 그리고 W/C 변화, 기포제함량 변화에 따른 초기 작업성을 고려하기 위한 플로우 시험은 KS F 2474에 준하여 실험을 실시하였다.

모르타르의 압축강도 및 내구성에 영향을 미치는 공기량 시험은 KS F 2421에 준하여 실험을 실시하였다.

본 논문에서는 동일배합조건인 4가지 압축강도 측정 규격의 몰드를 제작하여 실내실험 시 최적의 성능기준을 나타낸 규격을 알차고 실험을 실시하였고, 실험결과 KS L 5105를 기준으로 KS L 5105 큐빅몰드에 직접 스프레이를 뿔어붙이는 방법, 스프레이의 압축강도 시험용 공시체의 제작방법인 KCI-SC 101 그리고 보에 의한 스프레이의 초기 압축강도 시험방법 KCI-SC104를 각각 제작하여 3일 압축강도를 비교한다.

스프레이를 골작면에 뿔으면 여러 요인에 의하여 어떤 비율을 가지고 일부분은 되튀어 바닥에 떨어지는데 이를 리바운드율이라 한다. 본 실험에서는 모형실험용 패널을 제작하였고 고정시킨 후 스프레이를 타설하는 실험을 수행하였다.

공극률을 분석하기 위해 본 연구에서는 HF-MA C01장비를 ASTM C 457에 준거하여 리니트레비스법을 자동화 측정하는 방법을 사용하여 콘크리트 내부 공극 분석기를 통하여 분석함으로써 측정 시간 또한 기준의 육안에 의한 분석 방법보다 약 1/100로 단축하여 빠르게 측정하였다.

투수저항성 실험은 염소이온의 투과를 전압차에 의하여 측정하는 시험법을 채택하였다. 염소이온 투과실험은 매 시편마다 6시간이 소요되고 30분 간격으로 전압값을 측정한다. 측정된 전압을 전류로 환산하고 이 값을 통과한 총 전하량을 산정한다.

3. 실험결과

3.1 굳지 않은 스프레이 모르타르의 특성

굳기 전 모르타르의 흐름 특성은 스프레이시 뿔어붙임성과 펄프성에 직접적으로 영향을 미치는 요소이다.

Table 1은 각 변수에 따른 굳기 전 모르타르의 초기 플로우를 나타낸 것이다. 라텍스를 첨가하지 않은 경우 동일 플로우 조건이지만 라텍스를 첨가한 변수에 비해 유동성이 작는데 이는 동일 슬럼프 조건에서 라텍스 첨가에 의한 유동성 증가로 단위수량이 감소시킬 수 있어 작업성 확보를 위한 단위수량이 상대적으로 감소하였기 때문이라고 판

된다.

Table 1 HES-LMS Mortar의 플로우

구분	w/c (%)	C:S	Latex (kg)	초기 플로우 (mm)
L/C=0%	38	1:1.7	-	20
L/C=5%	29	1:1.7	1.042	20
L/C=10%	24	1:1.7	2.083	19
W/C 23	23	1:1.7	2.083	14
W/C 24	24	1:1.7	2.083	19.5
W/C 25	25	1:1.7	2.083	22
C:S=1.4	23	1:1.4	2.083	20
C:S=1.7	24	1:1.7	2.083	19
C:S=2	25	1:1.7	2.083	19.5
기포제 0%	24	1:1.7	2.083	19
기포제 0.25%	24	1:1.7	2.083	20.5
기포제 0.5%	24	1:1.7	2.083	22

라텍스 혼입률, 잔골재 혼입률, 물-시멘트 비 그리고 기포제함량 변화에 의한 공기량 시험의 결과를 나타내었다. Figure 2은 동일 작업성 평가 상태에서 라텍스 혼입률변화에 의한 공기량이다. 실험 결과 라텍스 혼입률 0%, 5%, 10%에서 빨아붙이기 전 각각 3.8%, 5%, 5.5%를 나타내어 라텍스 혼입률 10%에서는 31% 정도 기포 발생량이 증가하였다. 스프레이 이후 공기량은 스프레이 과정에서 대기 중으로 소산되거나 재료가 충전되면서 상대적으로 큰 기포들이 깨지는 과정에서 소산되기 때문에 공기량이 줄어든다고 판단된다.

또한 Figure 3과 4의 잔골재 함량변화나 물-시멘트 비 변화에서의 공기량 차이는 특정한 상관관계 없이 유사한 값을 나타내었고 3~5%안에 드는 적절한 공기량을 갖는 것으로 나타났다. 기포제를 첨가했을 경우 혼입률 0%, 0.25%, 0.5%에서 스프레이 전 각각 5.5%, 14%, 17%를 나타내어 기포제 혼입률이 증가할수록 공기량이 매우 크게 증가하였는데 배출 후 3분 경과 시 0.25% 첨가 시 11% 그리고 0.5% 첨가 시 13%로 스프레이 전 공기 소산되는 경향을 나타냈으며, 스프레이 후 공기량은 2.8%, 4.5%, 5%로 나머지 변수와 비교 했을 때 2%정도 높은 공기량을 나타냈으며, 기포제 함량 0.5%에서의 스프레이 전후의 공기량이 71%가량 감소하게 되었는데 이러한 현상은 모르타르가 노즐을 통과하는 과정에서 대부분 공기가 소산되는 것으로 판단되어진다.

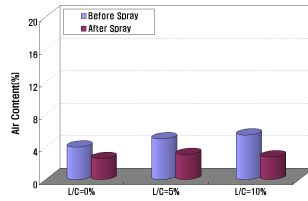


Figure 2 라텍스 혼입률에 따른 공기량

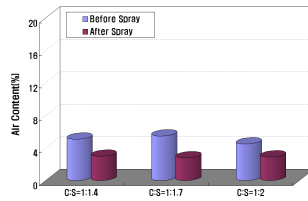


Figure 3 잔골재 함량 변화 시의 공기량

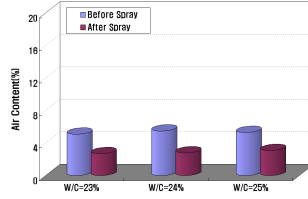


Figure 4 W/C 변화에 따른 공기량

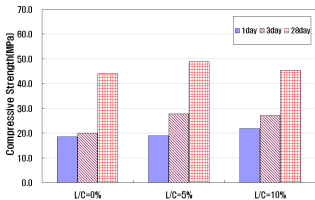
3.2 강도발현 특성

Figure 5의 (a)는 시멘트함량과 잔골재 함량을 1:1.7로 고정된 상태에서 라텍스 혼입률을 0, 5, 10%로 변화를 주었을 때 재령 경과에 따른 강도 특성을 나타낸 것이다. 라텍스를 혼입하지 않았을 경우 1일 압축강도는 라텍스 혼입률이 증가함에 따라 각각 18MPa, 19MPa, 21.8MPa로 압축강도 증진을 나타내었고, 28일 압축강도는 44.1MPa, 48.9MPa, 45.4MPa로 5%혼입 시 가장 높은 강도를 나타냈다. 이것은 라텍스의 계면활성제 작용에 의해서 동일 작업성 조건 19510mm를 맞추기 위한 단위 수량을 원치히 감소시킬 수 있어 압축강도가 증진된 것으로 판단된다.

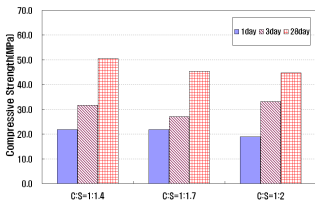
10%의 동일 라텍스 함량과 동일 작업성 조건에서 잔골재 함량을 달리하여 실험을 실시하였고 Figure 5의 (b)를 얻었다. 일반적으로 시멘트 함량

이 많은 C:S=1:1.4가 모든 재령에서 가장 높은 강도를 나타냈다. 이는 강모래와 비교 했을 때 골재 사이 내부공극이 많은 규사의 공극을 결합제가 충분히 충전하게 되어 골재사이의 결합력이 증가됨으로 높은 강도를 나타내는 것으로 사료된다.

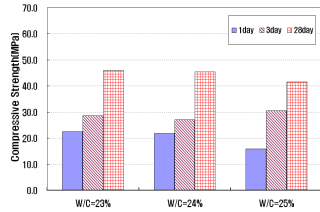
W/C 변수에서는 압축강도의 경우 물 함량이 증가하면 강도가 작아지고 물 함량이 감소하면 강도가 커지는 일반적인 강도경향을 나타냈으며 1일 압축강도의 경우 물량의 증가에 따라 22.5MPa, 21.8MPa, 15.9MPa가 나타났다. 모든 강도가 크크리트 표준시방서에서 제시하는 1일강도 5~10MPa 이상의 강도를 발현하며, 압축강도의 경우 물함량이 증가할수록 강도발현에 민감한 반응을 보였으나 상대적으로 쥘강도는 소폭의 강도변화만을 나타냈다. 이러한 원인은 물-시멘트비가 증가할수록 작업성은 개선되는 반면 시멘트의 수화작용에 필요한 단위수량 이외의 여분의 물이 많게 되어 경화된 콘크리트 내부에 잔류 후 증발하여 내부에 공극을 형성하게 된다. 따라서 이런 공극에 의해서 압축강도 및 쥘강도가 저하된다고 판단된다. Figure 5의 (c)는 W/C에 따른 재령별 강도를 표로 나타낸 것이다.



(a) with L/C



(b) with C:S



(c) with W/C
Figure 5 압축강도 발현

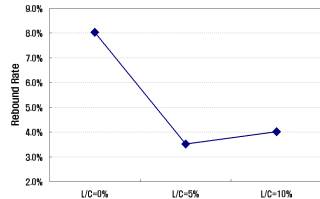
3.3 리바운드율 특성

리바운드율은 실제 타설된 양과 타설된 후 바닥면에 떨어진 양을 환산하여 계산하였다.

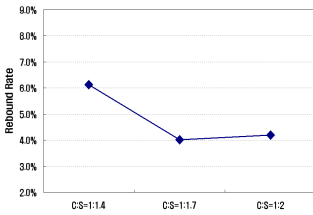
라텍스가 첨가 되지 않은 변수는 리바운드율이 가장 높은 8%이며 라텍스 함량이 10%첨가 되었을 때보다 200%증가된 양이다, 이는 라텍스 첨가로 재료가 높은 점성을 갖게 되어 개질되지 않은 재료에 비하여 리바운드량이 절반 이하로 감소되었음을 Figure 6의 (a)를 통해 확인할 수 있다.

Figure 6의 (b)는 잔골재 함량의 경우 기준변수인 C:S=1:1.7에서 가장 작은 리바운드율을 나타냈다. C:S=1:1.4인 경우 재료가 노즐 끝 부분에서 패널에 스프레이 되지 않고 바닥으로 흘러내리는 양이 증가되어 6.1%라는 비교적 높은 리바운드율을 나타냈다.

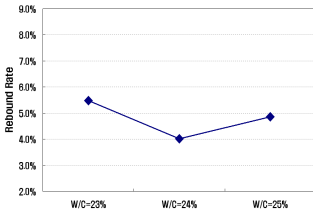
W/C변화에서도 기준변수인 W/C=24%에도 가장 적은 리바운드율을 나타냈다. 이와 같은 특성은 모르타르의 Flow가 작은 경우 재료 자체 내에 수분 함유량이 적어 표면과의 부착성이 작게 나타나고, 한편 높은 경우 스프레이 직후 표면으로부터 흘러내리는 현상으로 리바운드율이 높게 나타나고 있다. Figure 6의 (c)는 W/C에 따른 리바운드율 변화를 나타낸 것이다.



(a) with L/C



(b) with C/S



(c) with W/C

Figure 6 리바운드 비율

3.4 공극직경에 따른 기공분포 특성

Figure 7은 라텍스 함량에 따른 직경별 공극의 수를 정리하여 나타낸 것인데, 이를 살펴보면 라텍스 함량이 증가 할수록 100-500의 비교적 미세한 공극이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 스프레이 이전의 공기체에서는 300-600사이의 공극수가 스프레이 이후 줄어들며 300이하의 미세공극 개수가 증가하는 것을 나타냄으로 자유동결 시에 대한 저항성이 높아질 것으로 판단되어지며, 모든 변수에서 스프레이 이후 대부분의 공극직경별 공기량과 공극개수가 줄어들고 300이하의 미세공극에서는 증가하는 경향을 나타내는데 이는 스프레이 이후 공극이 소산되고 또한 스프레이 당시 재료와 재료사이의 충격으로 사이즈가 큰 공극이 미세공극으로 개지는 현상이라고 판단되어진다.

Figure 8는 잔골재 함량변화에 의한 공극특성을 나타낸 것인데, 보는바와 스프레이 이후 나타나는 사이즈가 상대적으로 큰 공극개수의 감소와 미세공극의 개수와 공기량이 증가하는 형상을 Figure 9을 통해 확인 할 수 있다. 즉 스프레이 이전의 재료에 비해 스프레이 이후 모르타르의 내동결성을 확보하고 있음을 확인 할 수 있다.

Figure 10을 통해서 물함량이 증가 할수록 공극사이즈에 따른 모든 공극 개수가 증가한다는 사실을 확인 할 수 있다. 이는 수화반응 이후 남게 되는 여분의 물은 공극으로 남아있게 되기 때문이

다.

기포제를 첨가하여 제조한 공기연행 모르타르에서 내동결용해성에 있어서 중요한 인자는 연행된 기포의 형태 외에도 기포의 크기 분포 등이 있다. Figure 11에서 확인 할 수 있듯이 기포제 함량이 증가함에 따라 공극 개수와 공기량이증가하는 경향을 보이고 있으며, 스프레이 이후의 대체로 공기량이 줄어드는 경향을 보이거나 200 이하의 미세공극이 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 기포제의 첨가로 100-500의 연행공기량이 2-7배로 증가 분포하여 모르타르 내부 압력 완화에 기여함을 알 수 있다.

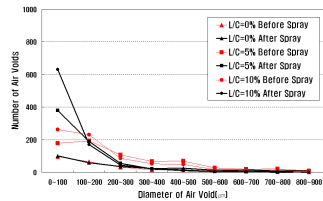


Figure 7 라텍스함량에 따른 직경별 공극특성

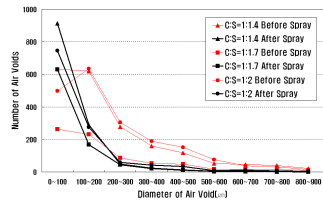


Figure 8 잔골재 함량변화에 의한 공극특성

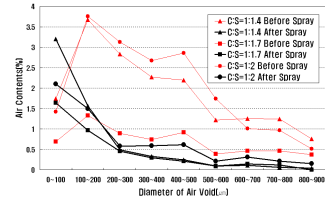


Figure 9 스프레이 전과 후의 공극특성

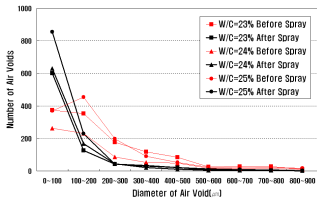


Figure 10 W/C에 따른 공극특성

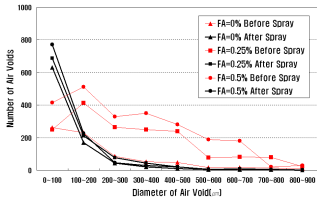


Figure 11 기포제 함량에 따른 공극특성

3.5 투수저항성

HES-LMS 모르타르의 공극구조는 폴리머 입자와 연속적인 폴리머 필름을 가지고 분해된다. 일반적으로, 이러한 미세 공극의 충전 효과는 폴리머 용적과 폴리머-시멘트비의 증가와 함께 증진된다.

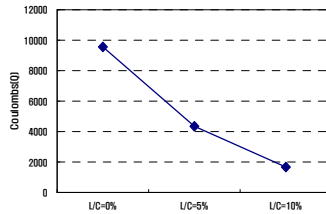
Figure 12의 (a)는 동일 플로우 조건에서 라텍스 혼입에 따른 제령 28일의 염소이온투수특성을 나타내었다. 라텍스 혼입률이 증가할수록 투수특성은 혼입률에 비례하여 감소하는 경향을 나타내었다. 라텍스를 혼입하지 않았을 경우 9560 Coulomb을 나타내었고, 라텍스 10%혼입한 경우 1666 Coulomb을 나타내어 83%의 투수성 감소를 나타내었는데 이는 라텍스 수지의 필름막 형성에 의한 시멘트 페이스트와 골재사이의 부착력 향상과 균열증진의 최소화 및 폴리머 입자에 의한 미세공극 충전효과에 따른 침투성 감소에 의한 것으로 판단된다.

동일작업성 잔골재 함량이 C:S=1:1.7일때 가장 우수한 투수저항성(1666 coulombs)을 나타냈다. 이는 ASTM C 672에서 규정하는 "Low" 수준에 들고 있다 따라서 수리구조물 보수·보강시 특성상 4개월 내내 물과 접해 있는 구조물이므로 투수저항성이 가장 우수한 배합인 잔골재 함량 C:S=1:1.7을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

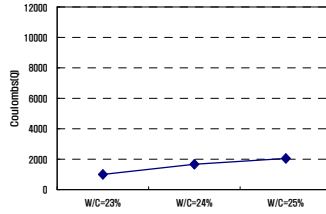
일반적인 모르타르의 투수특성에서와 마찬가지로 W/C가 증가할수록 투수계수가 커지는 양상을 나타내고 있다. 수화작용에 필요한 단위수량 이외

의 여분의 물이 많게 되어 경화된 콘크리트 내부에 잔류 후 증발하여 내부에 공극을 형성하게 되는데, 열화물이 이 공극을 통하여 투수저항성을 약화시키는 요인으로 작용한다고 판단되어지며 물시멘트비 23%, 24%, 25%에서 각각 1301, 1666, 2050 Coulomb가 측정되었고 Figure 12의 (b)는 다음의 결과에 대한 그래프이다.

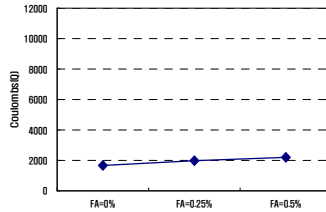
기포제 함량이 증가 할수록 내부 공극수와 공극량의 개수가 많아지기 때문에 발생한 공극 사이로 열화물이 침투하여 투수저항성이 저하시킨다는 것을 Figure 12의 (c)로 부터 얻을 수 있다. 기포제 0.5%가 첨가했을 때 투수계수가 2200coulomb 임으로, 4개월 내내 물과 접해있어야 할 재료이기 때문에 배합설계 시 기포제 함량을 0.25%이하로 제한하는 것이 바람직하다.



(a) with L/C



(b) with W/C



(c) with Foamer

Figure 12 투수저항성

4. 결론

본 연구는 접근이 어려운 콘크리트구조물 보수·보강에 사용할 목적으로 조기강도 발현 및 내구성을 지닌 조강형 라텍스개질 스프레이 모르타르(HES-LMS)를 개발하고자 최적배합을 제시하였으며, 그 역학적 특성과 내구특성을 평가하였다. 이를 위해 라텍스 함량, 잔골재 함량, 물-시멘트 비, 그리고 기포제함량을 주요 실험변수로 설정하여 염소이온 투과를 통한 투수성 검토, 화상분석을 통한 내부공극 구조 특성 검토, 화학용액에 침지실험을 내구특성을 검토 하였다. 그 연구결과는 다음과 같다.

1) 스프레이 공법의 작업성을 고려한 최적의 흐름 조건을 본 논문 연구에서는 195±10mm로 제안하였으며, 펌프성을 좋게 하기 위해서 단위물량을 증가시키는 것보다는 적정량의 기포제를 첨가하여 재료의 유동성을 확보하여야 한다.

2) 리바운드를 실험 결과 라텍스가 첨가된 모르타르는 첨가되지 않은 모르타르에 비해 리바운드율이 최대 50%이상 감소한 것으로 나타났는데, 이는 라텍스 첨가로 인한 점착 및 부착력이 현저히 증가하였기 때문이다.

3) 모든 변수에서 1일과 28일에 압축 및 휨 강도가 콘크리트 표준시방서에서 제시한 강도기준(1일: 5~10MPa, 28일:24~36MPa)을 만족하는 것으로 나타났고, 라텍스 첨가로 인한 필름막 형성이 휨강도 증진을 동반하였다.

4) 화상분석 결과 스프레이 이후의 모든 변수에서 300µm~600µm 사이의 공극 개수와 공기량이 줄어드는 반면 300µm이하의 미세공극의 개수와 공기량이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 스프레이 과정에서 유발된 압축으로 인해 공기의 소산 파쇄에 의한 것으로 미세공극의 공기량이 증가되어 결과적으로 내구성 증진에 영향을 줄 것이라 예상된다.

5) 라텍스 함량이 10%일 때 첨가되지 않은 모르타르와 비교할 경우 최대 83%의 투수성이 감소되어 ASTM 기준의 투과성이 'High'에서 'Low'로 감소하였다.

참 고 문 헌

[1] 건설교통부 한국건설기술연구원, “습식 숏리트 공법 고성능화 연구”, 2001, 11.

[2] 김기현, 이종명, 홍창우, 윤경구, “라텍스개질 콘크리트의 투수성 및 동결융해 저항 특성”, *한국콘크리트학회 논문집*, Vol.13, No.5, pp.484-490, 2001.

[3] 건설교통부, 습식 숏리트 공법 고성능화 연구, 2001.

[4] 정원경, 홍창우, 윤경구, “화상분석법에 의한 콘크리트 공극의 평면간격계수 제안 및 평가”, 2005, 11.

[5] 정원경, 김동호, 윤경구, “평면간격계수에 의한 콘크리트 동결융해 내구성 평가”, 2005, 09.

[6] 정현식, “숏리트의 내구성과 품질관리”, *한국터널공학회 정기학술발표회*, pp.37~52, 2002.

[7] 안사기, “숏리트 리바운드 감소에 대한 재료개별 연구시험”, *기술동아*, 1992.

[8] 한국도로공사 도로연구소, 강섬유보강 숏리트의 성능향상 및 품질기준 정립(I), 2000, 12.

[9] 한국도로공사 도로연구소, 강섬유보강 숏리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II), 2001, 12.

[10] Chapman, G., “High Strength Shotcrete for NATM in Bolu Tunnel”, *the 3rd International Symposium*, Norway, pp.403-410, 1999.

[11] Morgan, D. M., “High Early Strength Blended-Cement Wet-Mix Shotcrete”, *Concrete International, Composites*, Vol.13, pp.113-121, 1982.

[12] Marc Jolin, “Mechanisms of Placement and Stability of Dry Process Shotcrete”, 1999, 10.