

유지보수용 스프레이 모르타르의 부착강도 및 내구성

Bond Strength and Durability of Spray Mortar Purposed for Repair

윤 경 구* 김 성 권** 이 완 성***
Yun, Kyong-Ku Kim, Seong-Kwon Lee, Wan-Sung

Abstract

The purpose of this study was to investigate bond strength between substrate and HES-LMS mortar, durability of HES-LMS mortar with latex content(0%, 5%, 10%). To measure the bond strength, the direct tensile test based on uniaxial tensile test was used, which was proposed by Kuhlman(1990). Also, Resistance for water permeability, water absorption and image analysis for air void system were conducted to estimating durability of HES-LMS mortar.

키워드 : 조강형 라텍스 개질 모르타르, 부착강도, 투수성, 수밀성, 화상분석
Keywords : *High Early Strength Latex Modified Spray Mortar, Bond Strength, Permeability, watertightness, image analysis*

1. 서론

현재 구조물 신설 및 보수·보강 공법에는 콘크리트를 사용한 스프레이 공법과 모르타르를 이용한 스프레이 공법이 주요 공법으로 인정되고 있으며, 특히 모르타르를 이용한 스프레이 공법은 하수관거 보수·보강 공법과 같은 수리 구조물에 대한 보수·보강 공법으로 주목받고 있다. 또한 스프레이 공법은 신 재료의 개발 및 스프레이 타설 장비의 발달로 그 기술의 발전이 지속적으로 이루어지고 있으며 최근 습식 스프레이 공법이 일반화되어 있다. 그러나 습식 스프레이 공법과 관련된 체계적인 연구의 부족, 시공기술의 취약 및 명확한 기준

정립의 미비 등으로 인하여 재료, 배합, 시공, 장비 및 공법 선정 등의 선택에 일관성이 없고 배합설계 또한 외국의 지방 및 기존 시공사례를 그대로 답습하고 있는 실정이다.

일반적인 스프레이의 공정은 리바운드로 인하여 고가의 보수 모르타르 사용에 따른 경제성이 맞지 않는다. 또한 건식 스프레이 공법의 경우 다량의 분진 발생으로 인하여 환경오염과 급결제의 사용에 따른 인체 유해문제 및 장기 공용성 저하를 유발한다. 스프레이를 이용한 구조물의 보수·보강 공법은 재료의 역학적 특성 및 내구성 등 보수체의 안전 및 기능면에서 매우 중요한 문제를 야기한다. 내구성의 증대가 확보되면 추가적인 작업의 요구 없이 장기 공용성이 증대됨으로 유지보수 비용을 절감할 수 있게 된다.

따라서 본 논문에서는 모르타르를 사용하여 기존의 일반 스프레이 콘크리트가 가지고 있는 급결제의 사용에 따른 장기강도 저하와 환경오염 등

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 박사후 연구원, 교신저자

*** 강원대학교 토목공학과 산업대학원 졸업

문제를 개선하고자 3종 포틀랜드 시멘트인 조강시멘트를 사용하였으며, 역학적인 특성 및 내구성을 증진시키고자 라텍스를 혼입하여 개질한 고성능·고기능성 습식 스프레이 재료인 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르(High Early Strength Latex Modified Spray Mortar: HES-LMS Mortar)에 대하여 연구하고자 하였으며, 현장 적용을 위하여 부착강도 및 기초 내구성을 평가하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료

(1) 시멘트

시멘트는 국내 S사에서 생산되는 포틀랜드 시멘트 3종인 조강 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 물리적인 특성은 <표 1>과 같다.

(2) 골재

잔골재는 스프레이 모르타르의 펌핑성과 작업성을 고려하여 강릉에서 생산되는 석영질 함량이 90% 이상인 규사를 사용하였으며, <표 2>는 규사의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

<표 1> 조강 포틀랜드 시멘트의 물리적 특성

		KS Standard	Measured
Fineness(cm^2/g)		above 3,300	4,400
Setting (Gilmore Test)	초결(분)	above 60	190
	종결(시간)	below 10	5:00
Compressive Strength (MPa)	1-day	above 13	17.5
	3-day	above 25	29
	7-day	above 28	37
	28-day	above 31	47

<표 2> 규사의 물리적 특성

SiO ₂ Content (%)	Effective Size (mm)	Uniformity Coefficient	Specific Gravity	Wear Ration (%)
90	0.45~0.7	1.7	2.58	1.7

(3) 라텍스

미국 D사의 DL470을 사용하였으며, Styrene-Butadiene 계열로 모르타르와 콘크리트용 라텍스로 생산된 제품이다.

2.2 배합설계

본 실험에서는 동일 작업성을 기준으로 라텍스 함량을 각각 0%, 5%, 10%로 선정하였다. 동일 작업성 기준 라텍스 함량 변화를 통하여 현장에서 작업 가능한 워커빌리티와 펌핑성에 의한 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 부착강도 및 내구성 평가와 더불어 적정 라텍스 함량 범위를 제시하고자 하였다.

<표 3>는 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 배합설계를 나타낸 것이다.

<표 3> HES-LMS 모르타르의 배합설계

구분	W/C (%)	C:S	C (kg)	S (kg)	W (kg)	Late x (kg)	비고
L/C=0 %	38	1:1.7	10	17	3.80	-	동일 작업성
L/C=5 %	29	1:1.7	10	17	2.41	1.042	
L/C=10 %	24	1:1.7	10	17	1.32	2.083	

2.3 실험방법

(1) 공기량 및 흐름시험

가. 공기량 시험

조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 압축강도 및 내구성에 영향을 미치는 공기량 시험은 KS F 2421(굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 준하여 수행하였다.

나. 흐름시험

조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 흐름 시험은 동일 작업성인 경우 라텍스 함량 변화에 따른 초기 작업성을 평가하기 위하여 KS L 5111(시멘트 시험용 플로우 테이블)을 이용하여 KS F 5105(수경성 시멘트의 압축강도 시험방법)의 '8. 플로우 결정'에 준하여 수행하였다.

(2) 압축강도 및 휨강도 시험

스프레이 모르타르의 압축강도와 휨강도 측정방법에는 여러 가지 성능기준을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 동일배합조건의 4가지로 압축강도 측정용 몰드를 제작한 후 실내시험을 통하여 최적의 성능기준을 나타내는 규격을 파악하고자 하였다.

실험결과 KS L 5105를 기준으로 KS L 5105

큐빅 몰드에 직접 스프레이하는 방법, 스프레이의 압축강도 시험용 공시체를 제작하는 방법인 KCI-SC 101 그리고 보에 의한 스프레이의 초기 압축강도 시험방법인 KCI-SC 104로 각각 제작하여 재령 3일의 압축강도 및 휨강도를 비교하였다.

일반적으로 널리 사용되는 방법은 KCI-SC 101에 의한 현장타설 된 스프레이 모르타르의 코어링이나 절삭된 몰드를 사용하여 강도를 측정하는 것이나, 제작방법의 어려움과 제작단계에 비해 강도발현 효과가 뚜렷하지 않으며, KCI-SC 104는 노출면의 속건도에 따라 몰드의 충전정도가 달라지기 때문에 정량적 평가가 곤란하다. 그에 비해 KS L 5105의 큐빅몰드에 스프레이하는 방법이 강도발현 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 현장 타설된 스프레이 모르타르와 유사한 특성을 지니므로, KS L 5105의 큐빅 몰드에 직접 스프레이 하는 방법으로 압축강도 및 휨강도 공시체를 제작하였다.

(3) 부착강도 시험

조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 부착강도 평가를 평가할 수 있는 다양한 방법 중에서 일축인장에 의한 부착강도 평가 방법을 선정하였다. 이는 부착강도 평가 시험에서 신·구 구조체의 부착강도는 시험체의 인장강도에 의해서 실제적인 측정이 가능하고 파괴형상 또한 관찰이 가능하므로 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 부착강도 특성을 규명하기 위하여 일축인장시험을 바탕으로 Kuhlmann(1990)이 제시한 Nipple Pipe를 이용한 직접인장시험에 의하여 부착강도시험을 실시하였다. 직접인장에 의한 부착강도 측정시 시험체와 측정기의 연결장치를 360° 회전이 가능하도록 제작하여 시험체의 편심이 부착강도에 미치는 영향을 최소화하였다.

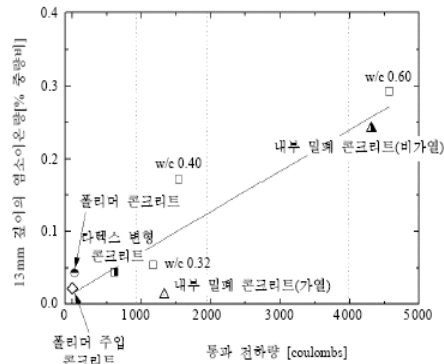


<그림 1> 부착강도 시험 연결 장비

(4) 투수저항성

콘크리트의 투수 저항성을 평가하기 위한 방법으로 KS F 2711(전기 전도도에 의한 염소이온의 침투 시험 방법)을 이용하였는데, 콘크리트의 염소이온 침투 저항성은 콘크리트의 조직 구조에 따라 결정된다. 이 시험 방법은 전위차를 작용시켜 염소이온이 콘크리트를 강제로 통과하도록 하여 그 통과 전하량으로 콘크리트의 침투 저항성을 평가할

수 있다. 따라서, 기존의 시험 방법에 비해 상대적으로 간단한 장비를 이용하여 매우 빠른 시간 내에 침투 저항성을 평가할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한, 이 시험 방법에 의한 침투 저항성 평가 결과는 <그림 2>과 같이 대부분 장기 침지에 의한 염소이온 침투 저항성 시험 결과와의 상호 연관성이 입증되었다.



<그림 2> 통과 전하량과 장기 침지 시험(90일) 결과 비교

결과의 해석은 시간(sec)에 따른 전류(amperes)의 변화를 도식한다. 측정 데이터를 연속된 곡선으로 그리고, 곡선의 아랫 부분의 면적을 계산하여 총 6시간 동안의 전하량(coulombs)을 결정한다. 그 대신에 시험이 진행되는 동안 혹은 시험이 종료된 후에 면적을 자동으로 계산하여 전하량을 결과로 제시하는 자동 데이터 처리 장치를 사용한다. 총 통과 전하량은 시험 기간 동안의 콘크리트의 전기 전도도를 나타내는 값이다.

만약 30분 단위로 전류를 측정하였다면, 면적을 계산하는 데 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$Q = 900 (I_0 + 2(I_{30} + I_{60} \dots + I_{300} + I_{330}) + I_{360}) \quad (1)$$

여기에서 Q : 통과 전하량(coulombs)

I_0 : 전압을 가한 직후의 전류(amperes)

I_t : 전압을 가한 후 t 분경과 후의 전류(amperes)

(5) 수밀성

조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 흡수 시험은 JIS A 1171에 준하여 재령 28일에서 건조양생(20℃, 50% RH) 직후의 공시체 및 건조양생 후 온도 80℃에서 무체가 변하지 않을 때까지 건조시킨 공시체를 20℃의 수중에 침적시켜 수행하였다. 수중 침적시간이 0, 1, 3, 5, 9, 24 및 48시간

인 공시체의 흡수율은 다음의 식에 의거하여 산출하였다.

<표 4> 통과 전하량에 따른 염소이온 침투성

통과 전하량(C)	염소이온 침투성
> 4,000	높 음
2,000 ~ 4,000	보 통
1,000 ~ 2,000	낮 음
100 ~ 1,000	매우 낮음
< 100	무시할만함

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

여기서, W_0 : 수중 침적 전의 공시체 중량(g)

W_1 : 수중 침적 후의 공시체 중량(g)

(6) 화상분석

화상분석법을 이용할 경우 초기 콘크리트의 공기량 측정값을 통해 경화 후의 콘크리트 공기량과 비교·분석할 수 있으며, 특히 경화 콘크리트 내에 분포한 공극의 특성을 파악하여 열화의 원인에 공극의 분포 및 존재가 어떠한 영향을 주었는지 분석할 수 있다. 또한 이를 기초로 보다 정밀한 분석이 필요할 경우 국부적 미시적 부분에 대한 SEM 분석 및 XRD 연구를 통해 서로 연계시킬 수 있을 것이다.

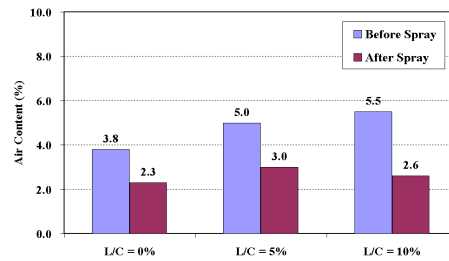
이러한 컴퓨터 장비를 사용하여 분석하기 위해서는 몇 가지의 장비를 갖추어야 한다. ASTM C 457의 경우 시편 표면을 관찰자가 육안으로 관찰하여 기록 분석하였으나, 화상분석은 시편 표면을 디지털 이미지 입력 자료로 전환하며, 이러한 디지털 입력자료를 컴퓨터를 이용하여 자동분석하며 분석된 결과를 소프트웨어 등을 활용하여 다양한 정보를 추출하게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공기량 및 흐름시험 결과

(1) 공기량 시험 결과

동일 작업성 평가 상태에서 라텍스 혼입률 변화에 따른 공기량 시험 결과는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 라텍스 혼입률에 따른 스프레이 전·후의 공기량 특성

라텍스 혼입률 0%, 5%, 10%에서 스프레이 전에는 각각 3.8%, 5.0%, 5.5%로 측정되었으며, 라텍스 혼입률 10%에서는 라텍스 혼입률 0%에 비하여 45% 정도의 공기 발생량이 증가하였다. 스프레이 이후 공기량의 감소는 스프레이 과정에서 대기중으로 소산되거나 재료가 충전되면서 상대적으로 큰 기포들이 깨지는 과정에서 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 흐름시험 결과

굳기 전 모르타르의 흐름특성은 스프레이시 뿔어 불입성과 펌핑성에 직접적으로 영향을 미치는 요소이므로 최적의 흐름특성에 관한 연구가 요구되어진다.

<표 5>는 라텍스 혼입률에 따른 굳기 전 스프레이 모르타르의 초기 흐름특성을 나타낸 것이다. 동일 흐름조건을 맞추기 위하여 초기 흐름을 $195 \pm 5 \text{mm}$ 로 고정하였다.

라텍스를 혼입하지 않은 경우 동일한 흐름 조건이지만 라텍스를 혼입한 경우에 비해 유동성이 다소 작게 측정되었으며, 이는 동일 흐름조건에서 라텍스 첨가로 인한 계면활성화 작용에 의한 유동성 증가로 작업성이 확보되었기 때문이다. 또한 유동성이 증가되므로 라텍스 혼입률이 10%인 경우 라텍스를 첨가하지 않은 경우에 비하여 물시멘트비를 14% 정도 감소시킬 수 있었다.

<표 5> 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 흐름특성

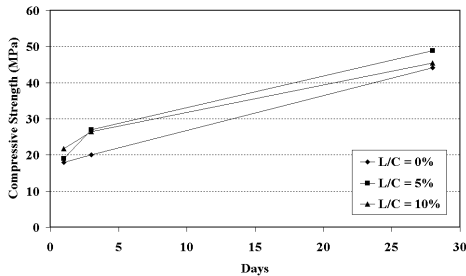
	W/C (%)	C : S	Latex (kg)	초기 흐름 (mm)
L/C=0%	38	1 : 1.7	-	200
L/C=5%	29	1 : 1.7	1.042	200
L/C=10%	24	1 : 1.7	2.083	190

3.2 압축강도 및 휨강도 시험 결과

(1) 압축강도 시험 결과

<그림 4>는 시멘트 함량과 잔골재 함량을 1:1.7로 고정한 후 라텍스 혼입률 0, 5, 10%로 변화를 주었을 때 재령에 따른 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다.

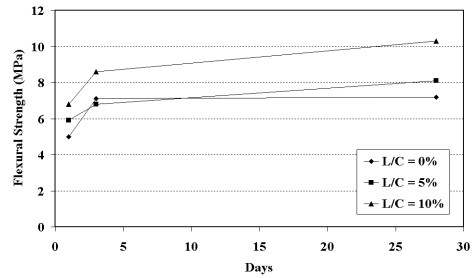
라텍스를 혼입하지 않은 경우 재령 1일의 압축강도는 18MPa로 측정되었으며, 라텍스 혼입률이 5%, 10%일 때 재령 1일의 압축강도가 각각 19MPa, 21.8MPa로 측정되었다. 또한 재령 28일의 압축강도는 라텍스 혼입률에 따라 각각 44.1MPa, 48.9MPa, 45.4MPa로 측정되었다. 이것은 라텍스의 계면활성제 작용에 의하여 동일 흐름조건 195±5mm를 맞추기 위한 단위수량을 현저히 감소시킬 수 있어 압축강도의 증진효과가 나타났다.



<그림 4> 라텍스 혼입률에 따른 압축강도 측정 결과

(2) 휨강도 시험 결과

<그림 5>는 시멘트 함량과 잔골재 함량을 1:1.7로 고정한 후 라텍스 혼입률 0, 5, 10%로 변화를 주었을 때 재령에 따른 휨강도 측정결과를 나타낸 것이다. 압축강도 측정결과와 동일하게 라텍스 혼입률이 증가할수록 강도가 증진되는 결과로 나타났으며, 모든 재령에서 라텍스 혼입률이 10%일 경우 가장 우수한 휨강도 측정결과를 보이고 있다. 또한 재령 28일의 경우 라텍스를 혼입하지 않은 경우에 비하여 라텍스 혼입률이 10%일 때 43%의 휨강도 증진효과가 나타났으며, 이는 재령의 증가에 따른 라텍스 필름막 강화에 의한 결과로 판단된다.



<그림 5> 라텍스 혼입률에 따른 휨강도 측정결과

(3) 부착강도 시험 결과

<표 6>은 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 부착강도 결과를 나타낸 것이다. 총 12개의 시편 중에서 8개의 시편이 상부 니플 파이프에서 슬라이딩이 발생하여 정확한 부착강도의 평가는 불가능하였다. 그러나 라텍스 혼입률이 증가함에 따라 상부 니플 파이프와 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 마찰력이 증대하는 것으로 나타나 라텍스 첨가에 따른 부착력이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 라텍스 혼입률 10%에서 스프레이 작업을 통하여 부착력이 증대하는 것으로 나타났으며, 그 결과는 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 또한 파괴가 이루어진 4개의 시편을 살펴보면 모든 파괴가 구 콘크리트에서 이루어져 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 재료적 특성이 우수하게 평가되었다.

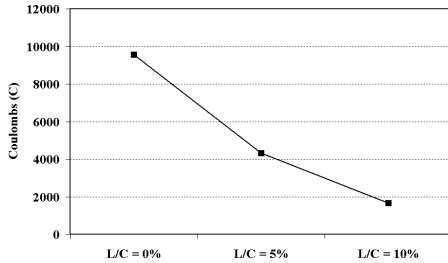
<표 6> 라텍스 혼입률에 따른 부착인장 강도시험 결과

L/C	Spray or Non-Spray	최대하중 (N)	부착인장 강도 (MPa)	비고	
0%	Spray	6693.4	0.85	0.62	Sliding
		5832.4	0.74		Sliding
		2185.3	0.28		Sliding
5%	Spray	9611.9	1.22	0.99	Sliding
		7993.9	1.02		Sliding
		5697.3	0.73		Sliding
10%	Spray	19267.0	2.45	2.17	Fracture
		16785.0	2.14		Fracture
		14939.0	1.90		Fracture
	Non-Spray	13413.0	1.71	1.57	Fracture
		12299.0	1.57		Sliding
		11186.0	1.42		Sliding

(4) 투수저항성 시험 결과

조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 공극 구조는 라텍스 혼입으로 인하여 폴리머 입자와 연속적인 폴리머 필름막 형성으로 치밀해진다. 일반적으로, 이러한 미세 공극의 충전 효과는 폴리머 용적과 폴리머-시멘트비의 증가와 함께 증진된다.

<그림 6> 는 동일 작업 조건에서 라텍스 혼입에 따른 재령 28일의 염소이온 투수저항성 측정결과를 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 판단되다.



<그림 6> 라텍스 혼입률에 따른 염소이온 침투저항성 측정 결과

(5) 수밀성 시험 결과

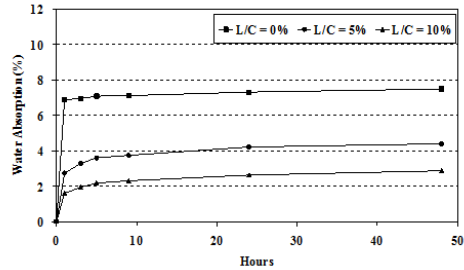
<그림 7>은 28일 건조양생 직후의 공시체를 온도 80℃에서 무게가 변화하지 않을 때까지 건조시킨 공시체를 20℃의 수중에 48시간 동안 침적시켜 수중침적시간과 흡수량과의 관계를 나타낸 것이다. 흡수율은 수중침적시간의 경과에 따라 서서히 증가하고, 라텍스 혼입률이 증가할수록 현저히 감소하는 경향을 나타내었다.

라텍스 혼입률이 증가할수록 흡수성은 급격히 감소하는 경향을 나타내는데, 이러한 원인은 라텍스 고형분의 미세공극 충전효과와 라텍스 필름막 형성에 의한 다수의 공극을 차단하기 때문에 방수성이 증진된 것으로 판단된다.

(6) 화상분석 결과

연행공기 분포와 모르타르 내부에 산재되어 있는 공기량을 분석하였다. 또한 화상분석 결과 간격계수에 의한 정량적인 내구성의 상관성을 얻을 수 없었지만 공극직경에 따라 공극 개수와 공기량을 통해서 정성적인 평가를 수행할 수 있었다.

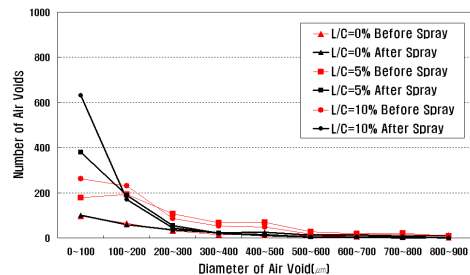
<그림 8>은 라텍스 함량에 따른 직경별 공극의



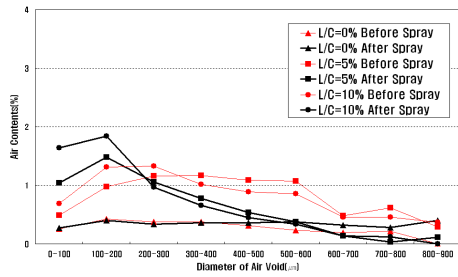
<그림 7> 라텍스 혼입률에 따른 수밀성 시험결과

수를 <그림 9>은 라텍스 함량에 따른 직경별 공기량을 정리하여 나타낸 것으로 이를 살펴보면 라텍스 함량이 증가 할수록 100~500µm의 비교적 미세한 공극이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

또한 스프레이 이전의 공시체에서는 300~600µm 사이의 공극수가 스프레이 이후 줄어들며 300µm이하의 미세공극 개수가 증가하는 것으로 나타나므로 자유 동결시 이에 대한 저항성이 높아질 것으로 판단되어진다. 또한 모든 변수에서 스프레이 이후 대부분의 공극직경별 공기량과 공극개수가 줄어들고 300µm이하의 미세공극에서는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 스프레이 이후 공극이 소산되고 또한 스프레이 당시 재료와 재료사이의 충격으로 사이즈가 큰 공극이 미세공극으로 깨지는 현상이라고 판단되어진다.



<그림 8> 라텍스 혼입률에 따른 직경별 공극 개수



<그림 9> 라텍스 혼입률에 따른 직경별 공기량 분포

4. 결론

본 연구는 콘크리트 구조물 보수·보강에 사용할 목적으로 조기강도 발현 및 내구성을 지닌 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 부착강도 및 내구성을 평가하고자 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 라텍스 혼입률 0, 5, 10에서 스프레이 전에는 각각 3.8, 5.0, 5.5로 측정되었으며, 라텍스 혼입률 10에서는 라텍스 혼입률 0에 비하여 31 정도의 공기 발생량이 증가하였다. 또한, 스프레이 공법의 작업성을 고려한 최적의 흐름조건을 195±5로 제한하였다.

(2) 라텍스 혼입률이 5, 10일 때 재령 1일의 압축강도가 각각 19, 21.8로 측정되었다. 또한 재령 28일의 압축강도는 라텍스 혼입률에 따라 각각 44.1, 48.9, 45.4로 측정되었다. 휨강도 측정결과는 혼입률이 증가할수록 강도가 증진되는 결과로 나타났으며, 모든 재령에서 라텍스 혼입률이 10%일 경우 가장 우수한 결과를 보이고 있다. 또한 재령 28일의 경우 라텍스를 혼입하지 않은 경우에 비하여 라텍스 혼입률이 10일 때 30의 휨강도 증진효과가 나타났다.

(3) 라텍스 혼입률이 증가할수록 부착력이 증가하는 것으로 나타났으며, 라텍스 혼입률 10%에서 스프레이 작업을 통하여 부착력이 증대하는 것으로 나타났다.

(4) 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 나타냈다.

(5) 라텍스 혼입률에 따른 화학저항성 시험 결과 조강형 라텍스 개질 스프레이 모르타르의 중량변화율의 절대치는 감소하는 경향을 나타냈다.

참 고 문 헌

- [1] 김기현, 이종명, 홍창우, 윤경구, “라텍스개질 콘크리트의 투수성 및 동결융해 저항 특성”, *한국콘크리트학회 논문집*, Vol.13, No.5, pp.484-490, 2001.
- [2] 건설교통부 한국건설교통기술평가원, “터널 지보특성 개선을 위한 보강합성섬유 습식 슛크리트 공법 개발”, 2004, 01.
- [3] 권혁찬, “화상분석법을 통한 경화 콘크리트의 내부 공극 구조 분석”, 강원대학교, 석사학위 논문, 2004.
- [4] 정원경, “콘크리트 동결융해 내구성 평가를 위한 평면간격계수 제안” 강원대학교 박사학위 논문, 2005.
- [5] 한국도로공사 도로연구소, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(I), 2000, 12.
- [6] 한국도로공사 도로연구소, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II), 2001, 12.
- [7] Beaupre, D., “Rheology of High Performance Shotcrete”, PH.D Thesis, University of British Columbia, 1994, 02.
- [8] Chapman, G., “High Strength Shotcrete for NATM in Bolu Tunnel”, *the 3rd International Symposium*, Norway, pp.403-410, 1999.
- [9] Morgan, D. R., “High Early Strength Blended-Cement Wet-Mix Shotcrete”, *Concrete International, Composites*, Vol.13, pp.113-121, 1982.