

부식 저항성 평가에 따른 균열 콘크리트 보의 부식전위 연구

A Study on Corrosion Potential of Cracked Concrete Beam According to Corrosion Resistance Assessment

송 하 원* 이 창 흥** 이 근 주**
Song, Ha-Won Lee, Chang-Hong Lee, Kewn-Chu

Abstract

Development and use of blended cement concrete is gaining more importance in the construction industry with reference to durability mainly due to the pore refinement and reduction in permeability. Cracks play a major role on important parameters like permeability, rate of chloride ingress, compressive strength and thus affect the reinforcement corrosion protection. Furthermore, when a crack occurs in the cover concrete, the corrosion of the steel reinforcement may be accelerated because the deterioration causing factors can pass through the crack. In recent years the effect of cracking on the penetration of concrete has been the subject of numerous investigations. Therefore assessing the service life using blended concrete becomes obviously in considering the durability. In the present study, the corrosion assessment of composite concrete beams with and without crack with of 0.3mm using OPC, 30% PFA, 60% GGBS, 10% SF was performed using half cell potential measurement, galvanic potential measurement, mass loss of steel over a period of 60days under marine environmental conditions and the results were discussed in detail.

요 지

건설산업에서 혼합콘크리트의 개발 및 사용은 내구성 측면에서의 공극구조개선 및 투수성 감소등의 확장 연구를 통해 나날이 증가하고 있는 실정이다. 한편, 콘크리트내의 균열은 투수성, 염해 침투속도 및 압축강도등을 결정하는 중요한 인자이며, 이는 철근의 부식과도 밀접한 관련을 가지는 것으로 알려져 있다. 더욱이 콘크리트 구조물의 피복두께에 균열이 발생한 경우, 이를 통해 철근 부식이 가속화됨은 주지의 사실이다. 최근 콘크리트내의 침투를 고려한 균열효과와 관련하여 다수의 연구가 수행되어져 온 것이 사실이며, 그에 따라 내구성을 고려한 균열 혼합콘크리트의 사용수명 평가에 관한 연구도 필요한 것이 사실이다. 본 연구에서는 0.3mm의 균열을 변수로 두고, OPC, 30% PFA, 60% GGBS 및 10% SF의 결합재를 혼입하여 사용한 혼합콘크리트보의 부식평가를 자연 및 인공 환경조건에 맞추어 반전지전위측정시험, 갈바닉전류측정시험, 무게감량법등으로 측정 및 비교분석하였다.

Keywords : Blended concrete, Chloride attack, Chloride threshold level, Corrosion resistance, Crack

핵심 용어 : 혼합콘크리트, 염해, 임계염화물량, 부식저항성, 균열

* 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

** 학생회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사수료

E-mail : lch1730@yonsei.ac.kr 010-2333-6047

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근에 이르러 해양 환경 하에서의 기존 콘크리트 구조물의 열화 현상 및 문제점이 상당수 보고되고 있으며, 이에 따라 구조적 안전성뿐만 아니라 콘크리트의 내구성에 대한 관심이 현격히 높아지고 있는 실정이다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 고내구성 콘크리트에 대한 관심 및 수요증가와 이에 따른 콘크리트 구조물의 내구 잔존수명예측에 대한 연구도 나날이 증가되고 있는데, 이러한 내구적인 문제점은 콘크리트 구조물의 주위 노출 환경과도 밀접한 관계를 가지게 된다. 특히 해수중이나 염화물이 존재하는 비말대 부근의 구조물에는 염해에 의한 문제점이 대두되고 있는데, 요즘의 많은 건설 물량으로 인한 양질의 하천골재 부족으로 인하여 콘크리트용 골재로 많은 양의 해사를 사용하게 되었으며, 이는 철근콘크리트 구조물의 내구성을 크게 저하시키는 주요 원인이 되고 있다.

염화물의 콘크리트내로의 침입에 따른 철근 부식에 대한 문제점과 이로 인한 콘크리트 균열은 전체 철근 콘크리트 구조물에 대한 구조적인 문제점으로 진전되며, 추후 구조물에 대한 유지 보수비용에 대한 부담이 늘어나게 된다.⁽⁸⁾ 염화물에 대한 내구적인 문제점은 철근부식에 의한 균열로서 확인되지만, 이는 콘크리트 내의 철근에 도달한 염화물 이온의 부식임계염화물량에 따른 내구수명의 예측 및 부식의 발생 여부를 판정하고 있는 상황이다. 이미 각국에서는 콘크리트 내 철근 위치에서의 임계염화물량에 대한 규정을 두고 있으나, 상세 내구수명에 대한 예측 및 판정은 현재에도 초보적인 수준에 머무르고 있다.

콘크리트구조물의 신설단계에서의 각종 원인에 의한 잠재미세균열 및 외부 환경에 의해 균열이 발생된 콘크리트는 염화물 침투에 취약하게 되며, 이에 따라 철근부식은 건전부 콘크리트에 비해 열화가 가속화된다. 이러한 균열은 장기적인 관점에서 콘크리트 구조물의 성능저하로 연결되며, 그 과정에서 염화물 침투에 의한 철근부식과도 밀접한 관계가 발생하게 된다.

본 연구에서는 보통포틀랜드 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그, 실리카퓌를 혼합한 콘크리트에 대한 부식저항성에 대해 혼합 콘크리트 균열 보를 이용한 부식

저항성 평가를 수행하였다. 또한, 내외부 염분침투조건에 따른 자연부식 및 인공부식의 부식저항성 평가도 수행하였다.

혼합 콘크리트 균열보에 대해서 반전위시험법, 갈바닉 전위시험법 및 철근질량 손실 시험을 통하여 혼화재별 내구성 및 부식저항성 평가를 수행한 후 시편의 파괴를 통한 육안확인검사를 수행하였고 한편, 내/외부의 염분침투조건을 달리한 자연부식 및 인공부식의 부식저항성 측정시험 및 임계염화물량의 평가를 통해 외부 환경인자에 따른 자연부식과 인공부식의 상관관계에 대해서도 결과 및 수치해석에 따른 분석 및 고찰을 수행하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료

2.1.1 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 국내 S사에서 제조, KS L 5201 규정에 적합한 보통 포틀랜드시멘트로서 그 물리적 성질은 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 골재

굵은 골재는 최대치수 13mm의 쇄석골재이고 표면 건조 상태로 조정하여 사용하였다. 잔골재는 비중이 2.54이고 5mm체를 전량 통과하도록 입도분포를 조정하여 사용하였다. 실험에 사용한 굵은 골재와 잔골재의 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of cement

비중	분말도	응결		안정도 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)		
		초결(분)	종결(분)		3일	7일	28일
3.15	3.235	293	384	0.09	202	273	361

Table 2 Material properties of coarse aggregate and fine aggregate

Agg- regate	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (ton/m ³)	Weight of passing No. 200 sieve(%)	F.M
Fine	2.60	2.72	1.66	2.06	2.51
Coarse	25	2.61	2.20	-	2.60

2.1.3 혼화재

본 실험에 사용한 혼화재는 플라이애시(PFA), 고로슬래그미분말(GGBS), 실리카퓌름(SF)을 사용하였으며, 물리적 성질 및 화학성분은 Table 3과 같다.

2.1.4 철근

본 실험에 사용된 철근은 직경 8mm의 원형철근으로, 콘크리트 타설 직전에 녹, 불순물, 기름성분 등을 제거하기 위하여 철근표면을 No.1000 샌드페이퍼로 연마하였으며, 아세톤으로 Millscale을 제거하였다. 또한, 1/10000 정밀저울을 이용하여 콘크리트 타설 전의 철근 질량 및 부식전류측정 이후 파괴된 시편에서 추출된 철근의 질량을 무게감량법에 의해 측정하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 균열 콘크리트보의 부식저항성 평가

OPC에 혼화재를 치환 혼입한 균열 콘크리트내 철근에 대한 부식전위 실험을 측정하고자 본 연구에서는 반전지 전위 측정시험, 갈바니 전위 측정 및 철근의 중량손실측정 실험을 수행하였다. 시험체의 설명은 Fig. 1과 같이 두 개의 동일한 실험체는 반전지 전위 측정 및 갈바니 전위측정의 다원 모니터링을 위해 콘크리트 인장부에 철근을 2열 배근 하였으며 피복두께는 외부염소이온의 침입시간을 단축시키고자 20mm로 유지하였다. 건전부와 균열부로 나뉜 동일 배합의 두 개 시험체 중 하나의 콘크리트에는 탈형 후 콘크리트 압축 시험기(UTM)를 이용하여 표면 균열폭이 0.03mm

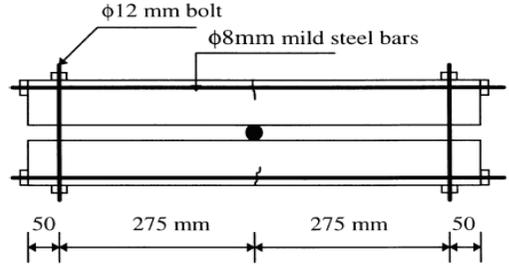


Fig. 1 Experimental set-up for cracked concrete

로 되도록 볼트로 조임을 하여 인공 균열을 두었으며, 균열 유·무, 물/시멘트비, 혼화재 종류에 대한 변수를 두어서 부식전위 측정 모니터링을 실시하였다. 양생 조건은 해수조건(0.4M NaCl)에서 수중 양생하였으며, 재령 60일 동안 반전위(Half cell)측정 장치 및 티타늄 메쉬를 이용한 갈바니 셀로 전위값을 일정한 시간간격에 따라 부식전위 모니터링을 실시하였다. 이때 양생실의 실내온도는 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였으며, 수중 양생시 0.4M NaCl 온도는 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰다.

2.2.2 자연 및 인공부식에 따른 부식저항성 평가

자연부식측정 및 인공부식측정을 위한 실험체 setting은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 인공부식측정의 경우 사용시편은 시멘트: 물: 잔골재의 비율이 1:0.4:2.45의 비율인 모르타르시편을 사용하였으며, 10단계의 내부염분(0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 % of cement weight)을 혼입하여 OPC, 60% GGBS, 30% PFA 및 10% SF를 사용하여 균열 콘크리트보의 사용재료와 동일한 혼화재를 사용하였고, 타펠 외삽법에 의한 분극저항측정으로써 부식전위를 측정하였다.

한편, 자연부식의 경우에는 OPC, 30% PFA, 60% GGBS 및 10% SF를 혼입한 150mm×150mm×150mm 콘크리트 시편에 대해 1면 염수침투를 위해 침투면을 제외한 다른 전 콘크리트면에 대해 예폭시크팅을 실시하여 1방향으로 염분침투를 유도하였으며, 갈바니 회로를 구성하여 시간에 따른 갈바니 전위를 측정하였다.

Table 3 Oxide composition of OPC, PFA, GGBS and SF used in this study (in %)

Oxide	OPC	PFA	GGBS	SF
CaO	64.7	1.7	41.2	0.31
SiO ₂	20.7	48.7	34.2	94.9
Al ₂ O ₃	4.6	18.8	11.7	0.23
Fe ₂ O ₃	3.0	7.7	1.43	0.07
MgO	1.0	1.0	8.81	0.04
Na ₂ O	0.13	0.4	0.29	0.15
K ₂ O	0.65	1.9	0.31	0.56
Mn ₂ O ₃	-	-	0.3	-
TiO ₃	-	0.9	0.58	-
SO ₃	3.0	0.64	-	-

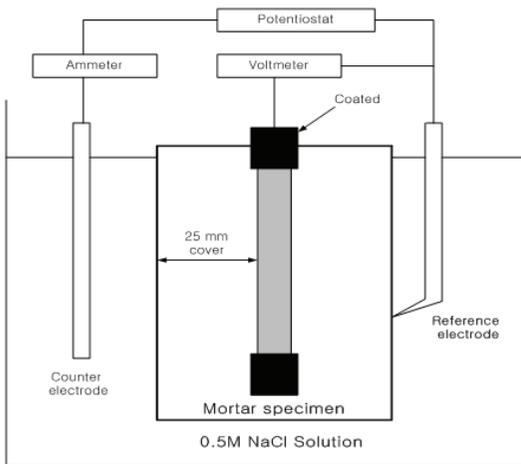


Fig. 2 Experimental set-up for internal chloride mixed mortar

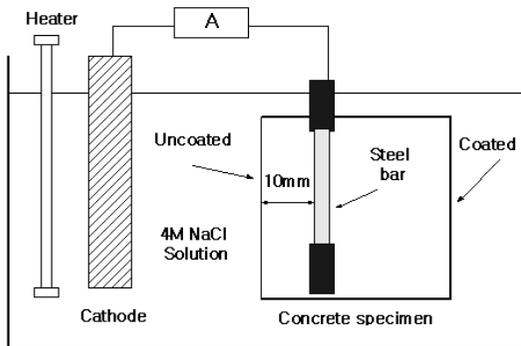


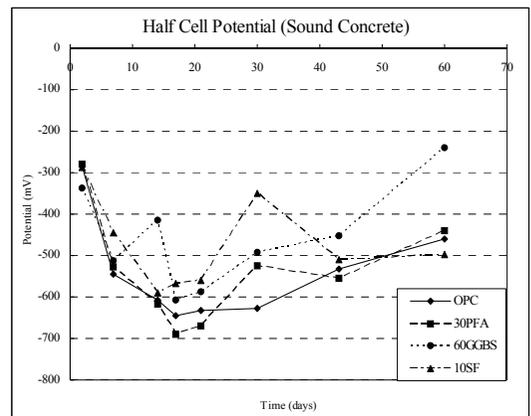
Fig. 3 Experimental set-up for external chloride concrete

3. 실험결과 및 분석

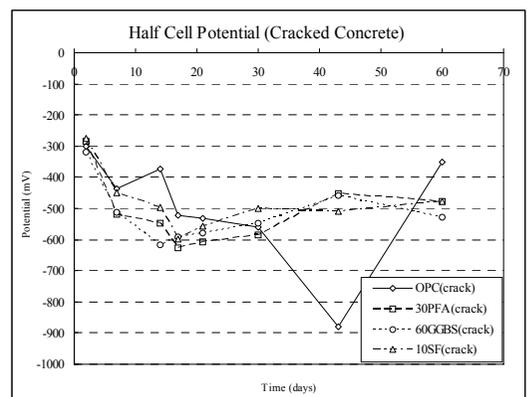
3.1 반전지 전위 분석결과

채령 2, 7, 14, 17, 21, 30, 43, 60일로 하여 OPC 및 혼화재별 시험체에 대한 반전지 전위 측정시험을 수행하였다. 결과 전위값은 균열 존재 유·무의 콘크리트 보 시험에 대하여 Fig. 4에 나타내었다. 반전지 전위 측정시 포화황산동전극을 사용한 부식개시의 판단은 -350mV 이상으로 90% 이상의 부식 확률 여부를 판단하며, 본 실험의 경우에 초기 채령의 대한 부식 모니터링을 실시한 결과 채령 60일까지의 전위

측정 그래프를 보면 건전부 및 균열부 콘크리트가 공히 외부염분침투에 의한 3~10일의 범위에 부식임계 전위인 -350mV 를 초과하여 나타나는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 건전부 및 균열부 콘크리트의 경우에 보 내부의 사전 균열의 제어에 의한 염분침투경로가 쉽게 확보되고, 초기채령에서의 콘크리트 시멘트 매트릭스 내부역시 시멘트의 수화발달에 따른 콘크리트 양생, 그에 따른 염분확산, 모세관 응집, 이항으로의 용이성등으로 인해 부식개시시간이 빠르게 나타난 것으로 분석되었으며, 그에 따른 혼화재별 부식임계전위곡선의 기울기는 다르게 나타나 부식저항성의 순서를 확인이 가능하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 Comparison of half-cell potential: sound concrete(a) and cracked concrete(b)

3.2 갈바닉 전위 측정비교

두 개의 서로 다른 전도체가 용액 속에 침지되면 전도체 간의 전위차가 존재하게 되고, 두 전도체 사이에 전자의 이동이 발생하게 된다. 그리하여 전위를 가진 귀전도체의 부식 속도는 감소되고, 활성전위를 가진 전도체의 부식속도는 촉진된다. 즉, 전자는 음극이 되고 후자는 양극이 된다. 이러한 형태의 부식을 갈바닉 부식 또는 이종금속접촉부식이라 한다. 본 실험을 통하여 전해질 내에 존재하는 철근과 참조전극인 티타늄 메시를 통하여, 이들 전도체 사이의 전위차를 알 수 있는 갈바닉 부식으로 부식 경향을 예측하였다.

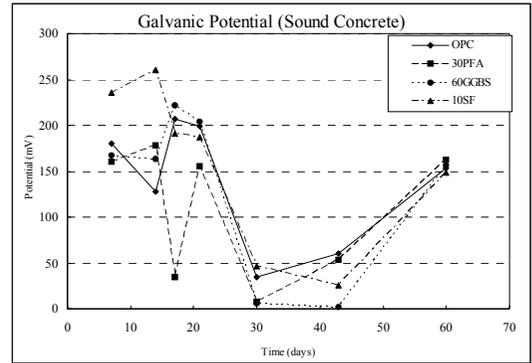
본 실험에서는 갈바닉 부식을 방지하는 것을 막기 위하여 두 금속 사이에 절연물질을 사용하거나 전해질

Table 4 Galvanic potential result of sound concrete (mV)

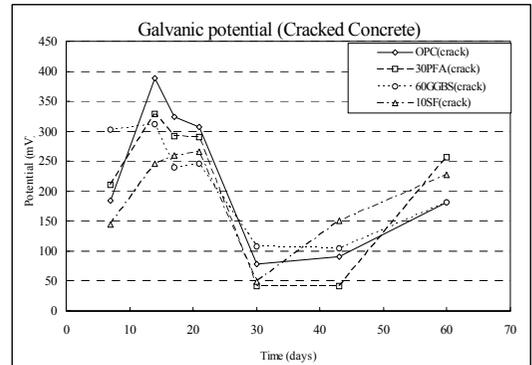
균열 무	7일	14일	17일	21일	30일	43일	60일
OPC (w/c=0.4)	-44	-282	-173	-182	-109.6	-117.5	-324
	-184	-389	-324	-307	-78.6	-90.8	-181
OPC (w/c=0.5)	-376	-425	-315	-322	-103.4	-137	-289.3
	-250	-365	-256	-231	-91.2	-58	-82.6
OPC (w/c=0.6)	-	-78	-29	-53	-120	-230	-273.3
	-	-356	-42	-190	-105.5	-120.1	-372.7
30% PFA	-160	-203	-142	-162	-34	-33.1	-164.3
	-160	-178	-35	-155	-8.2	-53.7	-162.8
60% GGBS	-358	-411	-324	-302	-90.4	-103.3	-276.5
	-167	-163	-222	-204	-5.5	-2.3	-156.2
10% SF	-292	-315	-235	-206	-87.9	-104.3	-272.4
	-236	-260	-191	-187	-46.3	-26.2	-148.2

Table 5 Galvanic potential result of cracked concrete (mV)

균열 유	7일	14일	17일	21일	30일	43일	60일
OPC (w/c=0.4)	-420	-415	-356	-351	-118.5	-112.7	-256.9
	-180	-128	-207	-199	-34.2	-60.5	-153.5
OPC (w/c=0.5)	-430	-413	-374	-381	-17.7	-121.5	-224.1
	-104	-237	-250	-220	-24.6	-92.3	-17.5
OPC (w/c=0.6)	-	-138	-132	-136	-95	-135.2	-183.5
	-	-225	-75	-201	-172	-98.9	-275.6
30% PFA	-49	-43	-22	-48	-125	-94	-11.2
	-210	-328	-292	-291	-42.2	-41.8	-255.9
60% GGBS	-400	-397	-325	-299	-137.4	-170.2	-251.6
	-302	-312	-239	-246	-106.9	-104.2	-180.9
10% SF	-404	-458	-400	-398	-167.9	-163.3	-276.4
	-145	-245	-260	-266	-49.1	-151.2	-227.2



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of galvanic potential; sound concrete(a) and cracked concrete(b)

이 금속에 접촉되지 않도록 도장하는 방법을 시험체 내에 부분적으로 사용하였다. 이러한 갈바닉 전위 시험을 통하여 부식의 위험도를 판단하는데 있어서 부식 개시 시기에 근거하여 판단하였다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

본 갈바닉 전위 측정 시험의 재령별 측정값을 Table 4와 Table 5에 균열 존재 유·무에 따라서 나타내었으며, Fig. 5에는 혼화재별 분류를 실시하여 전위값을 역상하여 도시를 하였다.

Fig. 5에서 균열 유무에 따른 혼화재별 콘크리트보에 대한 재령에 따른 갈바닉 측정 전위는 모든 혼합 콘크리트에 대해 초기 전위값은 다양하게 분포되지만, 5~15일 이르는 구간에서 부식전위 peak값이 관찰되어 부식이 개시되는 것으로 평가되어졌다. 이는 반전지전위 측정의 경우와 비교하여, 갈바닉 전위 측정의

경우가 부식개시시기가 5일 정도 느린 것으로 관측되었는데, 이후의 전위값의 측정결과는 일정하게 재령 30일까지 전위가 상승하다가 재령 43일 전후로 하여 일정하게 지속됨을 알 수 있었다.

3.3 무게 감량법에 의한 부식량 비교

본 연구에서 수행하여 파괴된 시편의 철근에 대한 질량 손실 실험 결과를 Table 6에 나타내었다. 본 연구 결과로부터 균열을 의도적으로 발생시킨 콘크리트보의 철근은 건전부 콘크리트 시편의 철근에서의 질량 손실률이 재령 60일의 짧은 기간의 무게 측정이었지만, 손실률이 균열 콘크리트에서 크게 나타남을 알 수 있었다.

혼합콘크리트의 철근 질량 손실 결과로부터 물-시멘트비의 경우에 (W/C=0.5 > W/C=0.6 > W/C=0.4)로 부식저항성이 나타나 물시멘트비와 철근의 부식저항성의 관계가 W/C증가에 따라 일치하지 않음을 확

인하였다.

한편, 혼화제별 비교에 있어서는 OPC > 10% SF > 30% PFA > 60% GGBS의 부식저항성 순서를 가져서 OPC의 경우가 부식저항성측면에서는 가장 우수한 것으로 나타났다. 한편, 균열시편과의 부식저항성 비교에 있어서는 OPC > OPC(crack) > 10% SF > 30% PFA > 10% SF(crack) > 30% PFA(crack) > 60%GGBS > 60%GGBS(crack)의 순으로 나타나고 있음을 확인하였다. 특히, W/C=0.4인 경우에 10% SF의 경우 다른 OPC, 30% PFA, 60% GGBS의 혼화제 포함 시험체 보다 많은 손실률 차이를 가져옴이 확인되었는데, 이것은 실리카폼의 미세입자가 미세 균열 유도 후에도 자기수축에 따른 수화양생을 거치면서 균열을 메워줌으로써 철근의 부식 발생을 억제하는데 기여했다고 판단된다. 그 외 OPC, 30% PFA, 60% GGBS 시험체에서는 근소한 차이의 질량 손실률을 보여줌으로서 철근 주위에 균열이 발생하여 철근 표면까지 영향을 미쳤을 경우, 부식 발생을 억제하는데 미비한 효과를 보여줬다고 판단된다. 한편, 60% GGBS와 30% PFA는 낮은 수화도로 인해 콘크리트 내 미세균열에 대한 저항을 보여주고 있지 못함을 확연히 보여주고 있다고 할 수 있겠다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

Table 6 Mass loss result of cracked concrete

시편 종류	시편 타설 전 무게(g)	60일 재령 후 무게(g)	무게 감소율(%)	감소율 (보정, %)
OPC(w/c=0.4) (균열부)	269.69	269.641	0.01817	0.00931
	269.452	269.396	0.02078	0.01192
OPC (w/c=0.4)	269.765	269.737	0.01038	0.00152
	269.5	269.469	0.01150	0.00264
30% PFA (균열부)	269.716	269.164	0.20466	0.19580
	267.638	267.275	0.13563	0.12677
30% PFA	269.746	269.266	0.17795	0.16908
	266.95	266.588	0.13561	0.12674
10% SF (균열부)	266.621	266.513	0.04051	0.03164
	269.755	268.997	0.28100	0.27213
10% SF	274.97	274.91	0.02182	0.01296
	274.458	274.333	0.04554	0.03668
OPC(w/c=0.5) (균열부)	274.117	273.561	0.20283	0.19397
	274.96	273.7	0.45825	0.44939
OPC (w/c=0.5)	274.495	273.696	0.29108	0.28222
	274.352	273.469	0.32185	0.31299
60% GGBS (균열부)	274.143	273.497	0.23564	0.22678
	274.008	273.308	0.25547	0.24660
60% GGBS	274.631	274.011	0.22576	0.21689
	274.454	273.893	0.20441	0.19554
OPC(w/c=0.6) (균열부)	274.910	274.729	0.06584	0.05698
	274.795	274.577	0.07933	0.07047
OPC (w/c=0.6)	274.359	274.146	0.07764	0.06877
	274.708	274.134	0.20895	0.20009
Control steel	274.398	274.366	0.01166	
	274.883	274.86	0.00836	
	274.439	274.421	0.00655	

3.4 자연부식 및 인공분석 상관관계 비교

Fig. 6에는 인공부식조건을 설정한 내부염분혼입 모르타의 염분농도에 따른 부식전위측정결과를 도시하

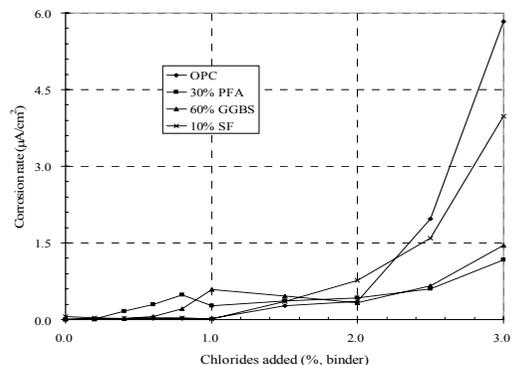


Fig. 6 Comparison of corrosion rate; Internal chloride

였다. 실험결과로부터 모르타르내의 내부염분 농도에 따라 철근의 부식률이 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있으며, 각 혼입 혼화재별로도 부식률이 다르게 나타나 임계부식치가 결정되고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서의 자연전위 측정은 티타늄 매쉬에 의한 비교전극 사용시 철근부식전위의 급상승 시점을 부식 개시시점을 적용하였다. 따라서 Fig. 7에는 인공 및 자연부식에 의해 도출된 부식임계치의 누적오차막대 그래프를 도시하였다.

그림으로부터, 자연부식에 해당하는 External chloride의 침투의 경우는 오른쪽은 Internal Chloride에 비해 각 혼화재종류에 따라 10% 범위내로 임계염화물량 값이 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 인공부식조건에 따른 내부염소이온이 자연부식에 따른 외부염소이온에 비해 임계염소이온농도가 항상

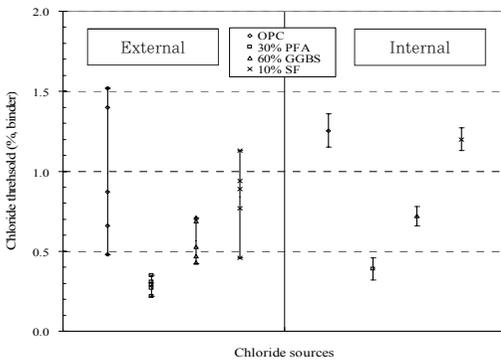


Fig. 7 Comparison of CTL; Internal chloride

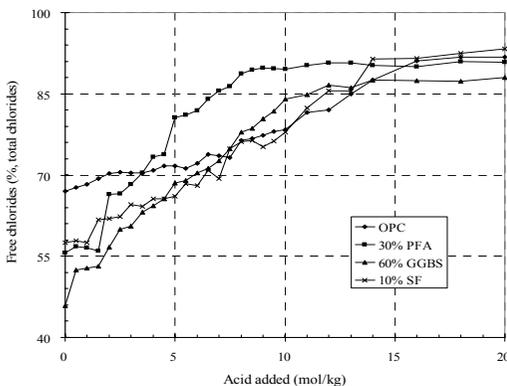


Fig. 8 Acid Neutralization Capacity test result

10% 상회하면 그에 따른 혼화재의 치환첨가는 큰 영향인자가 될 수 없음을 단적으로 나타내는 예라 할 수 있다.

Fig. 8에는 앞의 자연 및 인공부식으로 나타난 10%의 임계염화물량 값 차이의 원인으로서 외부염소이온의 콘크리트 매트릭스내에서의 화학적/물리적 흡착에 따른 고정염소이온의 생성효과를 증빙하고자 추가로 실시된 실험결과를 도시하였다. 가용성 산 첨가에 따른 모르타르 내부염분혼입시편으로 질산용액의 첨가에 따른 pH 결과를 측정된 후 이를 수분추출법에 의한 자유염소이온으로 추출하여 도시한 결과이다.

그림에서와 같이, 각종 혼합콘크리트의 경우 자유염소이온농도는 88~92% 범위에서 수렴하고 있는 것으로 나타나고 있으며, 이는 총 염소이온중 10% 가량이 시멘트 매트릭스내에서 고정염소이온으로 고착화 되고 있음을 알 수 있었다.

즉, 자연 및 인공 환경 조건에 따른 부식상관성은 내부의 경우가 외부에 비해 10%가량 임계염화물량 값을 상회하지만, 인공부식의 경우 실제 유입되어 소실되는 자유염소이온의 수렴 값 역시 10% 범위이므로 결국 자연 및 인공의 철근부식상관성은 임계염화물량 측면에서는 동등한 결과를 나타나는 것으로 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 균열 유무를 변수로 둔 혼합 콘크리트보의 부식전류측정 및 비교분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구를 통해 피복두께 20mm 지점에서의 염화물농도가 1.2kg/m^3 인 경우를 임계기준으로 설정할 때, 부식에 대한 저항성이 OPC > 10% SF > 30% PFA > 60% GGBS의 순서로 나타나고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 혼합콘크리트의 반전지 전위 측정시험의 경우, 균열이 없는 60% GGBS 콘크리트 보의 반전위 측정값이 -350mV 이상으로 나타나 부식저항성이 가장 낮게 나타나는 것을 확인하였는데, 이는 GGBS 콘크리트 보의 경우 잠재수경성 반응에 의해 수화 발현시 공극구조의 재분배등으로 입자의

충진성은 OPC에 비해 우위적으로 확보되지만 첨가 OPC의 실질량이 확연히 감소되어 소실되는 수산화칼슘의 영향이 다른 혼화제에 비해 월등히 높아서 그에 따른 낮은 부식저항성을 보이는 것으로 보인다.

- 3) 갈바닉 전위 측정 시험의 경우 재령일이 증가할수록 갈바닉 측정 전위가 안정화됨을 보여주었으며, 5-15일 범위에서 부식 임계치에 도달한 것으로 나타났다. 특히, 재령 60일에 이르러 콘크리트 보에 대한 갈바닉 전위 모니터링은 균열 유·무에 따라서 반전위 시험과 달리 콘크리트의 안정화가 서로 다르게 나타나는 것으로 확인 할 수 있었다.
- 4) 철근 질량 손실 시험의 경우 10% SF 콘크리트에서는 실리카폼(입경: $0.15\mu\text{m}$)의 혼입으로 인하여 잔골재와 시멘트겔 사이에 존재하는 모세관 공극의 충전효과를 보여줌으로서 철근의 부식 저항성을 나타냈으며, 균열이 진행된 경우 6.13배에 달하는 질량 감소를 보였다. OPC 및 30% PFA, 60% GGBS는 평균적으로 균열 유·무에 따른 부식발생으로 인한 질량 손실률이 0.01~0.03%의 차이를 보여준다. 이는 PFA와 GGBS의 경우 높은 C3A으로 염화물 고정화 능력이 높지만, 늦은 수화반응을 통해서 침투하는 염화물량에 대해서 낮은 부식 저항성을 보여준다고 판단된다.
- 5) 본 60일 재령 동안의 부식 모니터링을 통하여 혼화제 종류 및 균열 유·무에 대한 비교 분석 결과를 도표화 하면 다음 Table 7과 같고, 이를 통하여 본 연구에서 수행된 반전위 측정 시험법, 갈바닉 전위 시험법, 염화물 침투 시험법, 철근 질량 손실 시험법, 철근 표면 부식 확인 등의 시험을 통한 철근에 대한 재령 60일시의 부식 저항성에 대한 평가를 부식 개시 기준에 따라서 나타내었다. OPC 및 혼합 콘크리트에 대한 실험적 평가를 통하여 구조물내 부식 확인시 비파괴시험법으로 사용되는 반전위 측정 시험법과 갈바닉 전위 측정에 대한 실험방법의 경우는 실제 철근의 유관검사결과 갈바닉 전위 측정이 실제 유관확인결과와 일치함을 알 수 있었으므로 향후 갈바닉 회로 구성에 따른 부식평가가 유용히 사용될 수 있음을 입증할 수 있었다.

Table 7 Corrosion resistance assessment of blended concrete

결합재 종류	균열 유무	반전위 측정 시험	갈바닉 전위 측정 시험	염화물 침투 시험	철근 질량 손실 시험	철근 표면 부식 확인
OPC (w/b=0.4)	무	O ¹⁾	X	X	X	X
	유	O	O	O	X	O
OPC (w/b=0.5)	무	O	O	O	O	O
	유	O	O	O	O	O
OPC (w/b=0.6)	무	O	X	O	X	X
	유	O	X	O	X	O
30% PFA (w/b=0.4)	무	O	O	X	X	X
	유	O	X	O	O	X
60% GGBS (w/b=0.4)	무	X ²⁾	O	O	O	O
	유	O	O	O	O	O
10% SF (w/b=0.4)	무	O	O	O	X	O
	유	O	O	O	O	O
부식 판단 기준		-350 mV 이하	갈바닉 전위밀도 상승	1.2kg/m ³	손실율 0.15% 이상	균열부 부식 확인

주1) (표시: O) 철근 부식이 발생됨

주2) (표시: X) 철근 부식이 발생되지 않음

- 6) 한편, 자연 및 인공부식에 따른 부식저항성 분석에서 내부 및 외부염분침투조건에 따른 임계염화물량 값은 외부환경조건에 민감하게 반응하지 않고 있음을 알 수 있었고, 내부 및 외부의 경우 10%의 임계염화물량 차이를 보이나 외부에서 유입되는 총 염화물이 시멘트 매트릭스 내부로 유입됨에 따라 10%의 고정염화물로 변동되어 자연 및 인공부식상의 임계염화물량 값은 동등한 것으로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 “건설교통R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화과제 및 콘크리트 코리아 연구단 (Concrete Corea)의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 실험과 관련하여 도움을 주신 한국 건자재시험연구원에도 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 송하원, 이창홍, 이근주, 안기용, "삼성분계 혼합콘크

-
- 리트의 염해부식저항성에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, 2007, pp. 485-488.
2. 송하원, 이창홍, 이근주, 안기용, “균열 콘크리트에서의 부식저항성에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술발표회, 2008, pp. 130-133.
 3. 송하원, 이창홍, 이근주, 김재환, 안기용, “삼성분계 혼합콘크리트의 염화물 침투 저항성 및 내구성에 대한 고찰,” 한국콘크리트학회 논문집, V.20, N.4, 2008, pp. 439-449.
 4. Arya, C. and Vassie, P.R.W., “Effective cathode to anode ratio and reinforcement corrosion in concrete,” In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, eds., Cambridge, V.26, pp. 851-861.
 5. Gowripalan, N. and Mohamed, H.M. “Chlorideion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete”, Cem Concr Res, V.28, pp. 119-1131.
 6. Song, H.W., Lee C.H. and Ann, K.Y., “Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environment,” Cem Concr Comp, Vol. 30, I. 2, 2008, pp. 113-121.
 7. Ann, K.Y. and Song, H.W., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete,” Corros Sci., Vol. 49, 2007, pp. 4113-4133.
 8. Saraswathy, V. and Song, H.W., “Evaluation of corrosion resistance of Portland cements in pre-cracked reinforced concrete slabs under accelerated testing conditions,” Mat Chem Phy, Vol. 104, I. 2, 2007, pp. 356-361.
- (접수일자 : 2008년 6월 2일)
(심사완료일자 : 2008년 9월 22일)