



전기화학적 전착기법을 활용한 콘크리트의 인공 균열치유에 관한 실험적 연구

이창홍^{1)*} · 송하원¹⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

Experimental Study on Artificial Crack Healing for Concrete Using Electrochemical Deposition Method

Chang-Hong Lee^{1)*} and Ha-Won Song¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT In this study, autogenous crack healing and artificial crack healing using electrochemical electro deposition method were conducted to compare in the aspects of corrosion monitoring. Furthermore, the analysis of impressed voltage characteristics, galvanic current and linear polarization resistance comparison, and photo image processing technique were performed for quantitative comparisons of healing ratio. As a result, it was found that, in view of impressed voltage of artificial crack healing, the measured voltage was increased as time goes by. From the galvanic test results of artificial crack healing, the current vs. potential distribution value were formed widely in comparison with autogenous crack healing. In this point, it was shown that artificial crack healing has more elastic resistance capacity than autogenous crack healing technique. Finally, it was found that artificial crack healing was 1.63 times higher than autogenous healing in view of crack healing ratio.

Keywords : crack, autogenous crack healing, artificial crack healing, electrochemical deposition, corrosion

1. 서 론

콘크리트구조물의 구조 안정 성능 및 내구특성에 대한 분석은 철근부식의 관점에서 서술이 가능하다.¹⁻⁶⁾ 이는 철근 부식 모니터링을 통해 콘크리트내의 미세균열의 발생 및 진행에 대한 판단이 가능하며 내구적 측면에서도 염해를 포함한 각종 열화인자의 거동 분석을 통해 구조물의 사용수명 및 유지관리시기의 예측을 가능하게 하기 때문이라고 할 수 있다.^{3,7)} 최근 콘크리트구조물내의 철근부식과 콘크리트의 부식임계치의 특성에 관한 연구가 상당부분 연구되어왔고, pH 저하 저항성과 콘크리트내의 물질이동에 관한 연구 및 이를 각종 혼합콘크리트의 경우와 비교한 연구도 진일보하여 왔던 것이 사실이다.^{8,9)} 또한, 균열이 도입된 콘크리트 시편에서의 내구성 연구를 통해서도 탄산화속도, 온도 및 공극변화 등에 대한 예측 해석모델의 제안과 관련된 연구를 수행하기도 하였다.¹⁰⁾

최근에 이르러서는 이러한 균열에 대항하기 위한 보수 및 보강분야에 대한 연구가 활발해지면서, 콘크리트 내

방청제의 혼입 및 콘크리트 외부 덮개의 도막 등을 통한 유지관리기법으로서의 연구도 활성화된 것이 사실이며, 한편 철근부식의 방지 측면에서도 철근의 갈바나이즈를 통한 내/외부의 부식 방청 억제 노력도 이루어지고 있다.^{7,8)}

한편, 콘크리트 내에 발생하는 균열은 그 원인과 종류가 방대하며, 따라서 이와 관련한 대처 방안도 다양한 것으로 알려져 있다.^{11,12)} 특히 최근에 연구가 집약적으로 되고 있는 염해 부식과 미세균열과의 상관관계,¹³⁾ 염해에 따른 균열의 자기균열치유,¹⁴⁾ 콘크리트 내 물질이동과 미세균열의 연관성 분석 및 균열 치유와 투수성과의 상관관계 분석¹⁵⁾에 대한 연구 등, 균열의 발생 원인으로부터 제어대책에 관한 연구 역시도 상당부분 진행이 되어오고 있는 실정이다.

콘크리트 내 발생된 균열의 자기균열치유(*autogenous crack healing*)와 관련된 연구는 다방면으로 입증되어 가고 있으며¹⁶⁻²⁴⁾ 이는 콘크리트를 하나의 유기체로 보는 관점에서 기원된 연구라 할 수 있다. 자기균열치유는 콘크리트가 시간의존적인 물질로서 수화 및 재생을 반복하는 특성에 기인하고 콘크리트의 양생기간 및 방법이 자기치유에 영향을 끼치며, 구조물의 내구성능에도 큰 영향을 미친다.²⁵⁻²⁷⁾ 콘크리트의 양생으로부터 콘크리트 내 매트릭스의 수분 투수성의 지연²⁵⁾ 등은 중국적으로 외부

*Corresponding author E-mail : lch1730@yonsei.ac.kr

Received December 8, 2008, Revised May 4, 2009

Accepted May 11, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

열화인자에 의한 철근부식 지연과 그로인한 콘크리트구조물의 내구수명 감소원인인 열화를 지연시키는 탁월한 효과로서 제시될 수 있다.^{26,27)} 특히 최근에는 이러한 자기치유와 관련하여서도 각종 열화인자와의 상관관계 분석을 통한 입증의 조급시도되고 있는 실정이며, 특정 균열 폭 및 온도의 함수로서 자기치유의 타당성 및 적용성이 심도 있게 논의되고 있음도 주지의 사실이다.²⁸⁾ 그러므로 콘크리트내의 미세균열의 발생으로 시작되는 열화 매커니즘의 초기단계를 사전에 억제시킬 수 있다면 영구적인 콘크리트구조물의 등장도 막연한 상상이 아닌 달성 가능한 일이 되며, 바로 여기에 미세균열 보수 및 자기 치유의 연구목적이 존재하게 된 것이라고도 할 수 있다.

최근에는 이러한 콘크리트의 미세균열에 대한 자기치유의 특성 분석에서 한 단계 더 나아가 전기화학적 특성을 결합한 응용 연구로서의 인공균열치유(artificial crack healing)가 시도되고 있다.²⁹⁻³¹⁾ 이는 콘크리트의 자기치유 특성을 시간에 대해 더욱 가속화하여 치유 효율을 극대화하고, 콘크리트내로의 외부 첨가이온의 공급에 따른 콘크리트 부식저항성 및 내구성능의 증대를 통한 구조물의 안전성능을 보강하기 위한 집약적 연구라 할 수 있다. 그러나 이와 관련해서는 해당 연구가 초동단계에 있을 뿐, 균열의 억제 및 지속적인 유지관리 기법으로서의 실용성에 대한 검증도 충분히 확보되지 않은 상태이므로 이와 관련된 상세한 연구가 필요한 것이 사실이다. 예를 들어 콘크리트 내 주입되는 가압전류의 최적량, 전기화학적 기법을 활용한 인공균열치유기법의 균열제어한계,

콘크리트 전지 형성 시 공급되는 전해질의 최적 몰농도 및 인공균열치유도의 정량화 문제 등 상당수의 연구 개선점이 존재하고 있는 것도 간과할 수 없는 사실이다.

본 연구에서는 이러한 자기균열치유 및 인공균열치유의 특성을 부식모니터링의 관점에서 비교 분석하는 실험 연구를 수행하였다. 이를 위해 동일 배합된 콘크리트 시편에 대해 각각 자기균열치유 및 인공균열치유 시편의 두 등급으로 나누었으며, 인공균열치유 시편에 주입된 가압전류의 특성분석 및 전기저항 용량과의 관계 분석을 수행하였고, 갈바닉 전류의 비교를 통한 자기균열치유 시편과 비교되는 인공균열치유 시편의 부식저항성 비교, 선형 분극 저항 실험을 통한 자기균열치유에서 인공균열치유로의 성능향상도 분석 등을 수행하였으며, 치유전과 치유후의 균열의 치유향상도 분석을 위해 사진분석 프로그램을 사용한 사진 화상 분석기법⁹⁾의 적용을 통해 균열치유도의 정량적 분석을 수행하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서는 전기화학적 전착기법(electrochemical electro deposition technique)을 활용한 콘크리트의 인공적인 균열치유효과 분석을 위해 콘크리트 시편을 자기치유 시편 및 인공치유 시편의 두 등급으로 분류하여 실험을 수행하였다. Fig. 1에는 본 실험에서 수행한 전체적인 실험 개요도를 나타내었다.

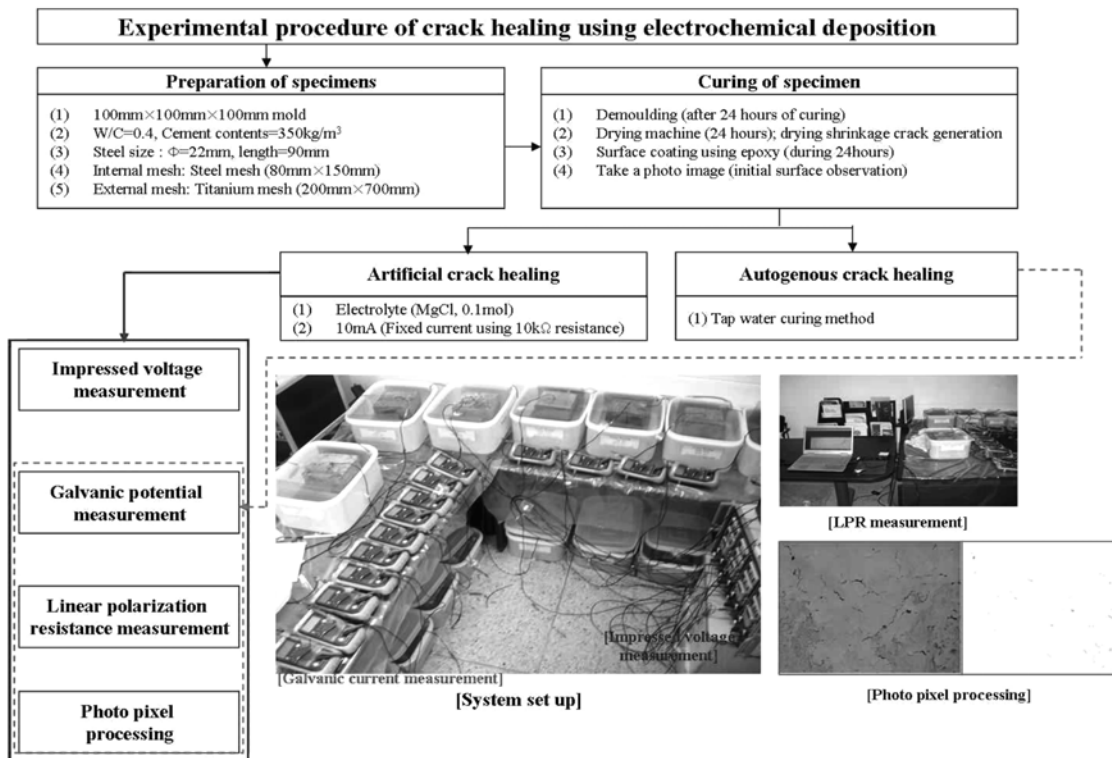


Fig. 1 Framework of experimental set-up (mm)

또한 사용된 시멘트는 S사 보통포틀랜드시멘트(OPC)이었으며, 분말도는 $3,250 \pm 300 \text{ cm}^2/\text{g}$, 안정도(%) 0.02 ± 0.02 , 초결 응결시간(분)의 경우 220 ± 50 , 종결 응결시간(시)의 경우 $6:40 \pm 1:00$, 내부 염소 이온량은 0.02% 이하이었다. OPC의 구성성분은 Table 1과 같다.

콘크리트의 배합은 인공균열치유용 시편 및 자기균열치유용 시편 각 3개씩을 제작하였으며, 잔골재의 밀도는 $2,500 \text{ kg/m}^3$, 굵은골재의 밀도는 $2,650 \text{ kg/m}^3$ 이며, $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ 규격의 시험체이고, 시편의 정중앙에 철근 및 전착을 위한 내부 메쉬의 용이한 삽입 및 최소 커버두께의 확보를 위해 최대치수 13 mm의 골재를 사용하여 타설을 수행하였다. 사용 배합은 Table 2와 같다.

한편, 콘크리트 시편 내부에는 직경 22 mm, 길이 90 mm의 원형철근을 몰드 외부에서 설치한 브릿지를 이용하여 정중앙에 설치하였으며, 갈바닉 전류 및 선형분극저항의 측정을 위해 철근의 상부에 납땜 용접을 통한 전선 연결을 수행하였고 균일한 통전 면적의 확보를 위해 철근 상부 및 하부의 면은 에폭시를 이용하여 도막 처리를 수행하였다.

또한, 콘크리트 시편의 덮개 20 mm 지점에는 철근과 평행하게 전기화학적 전착기법을 수행하기 위한 음극 대용으로서의 철근 메쉬를 삽입하였다. 메쉬 사이즈는 $80 \times 150 \text{ mm}$ 를 사용하여 메쉬의 일부가 콘크리트 시편의 상부로 돌출되게 하여 전지를 형성하도록 준비하였다.

2.2 실험 과정

타설 후 시편은 24시간의 기중양생을 거쳐 탈형하였으며, 건조수축에 의한 급격한 미세균열의 유도를 위해 100°C 의 건조로에서 24시간 양생하였다.

이후 시편은 향후 균열 관찰면이 되는 1면을 제외하고는 다른 5면을 모두 에폭시로 도포하여 향후 전해질 및 가압전류의 통전에 따른 외부이온의 침투 차단하였으며 에폭시가 경화되는 12시간동안 기중에서 양생하였다.

균열 치유면과 관련하여서는 인공균열치유의 정량분석을 위해서 디지털 카메라를 이용하여 건조양생 전, 건조양생 후, 에폭시 도포 후, 전기화학적 전착 시행 후 등의 4단계로 나누어 균열 면을 사진 촬영하였다.

이 후 총 6개의 시편은 각 3개씩 나누어 자기치유 및 인공균열치유용 시편으로 분류하였고 전해질의 유입에 따른 각 시편의 고유 전기 화학 반응을 유도하기 위해 $300 \times 400 \times 150 \text{ mm}$ 로 된 6개의 플라스틱 양생조에 각각 분리하여 양생 하였으며, 이때 양생조의 각 밑면에는 갈바닉 전류의 양극대용 메쉬인 외부 티타늄 메쉬가 각각 $200 \times 700 \text{ mm}$ 의 규격으로 적용되었고 양 측면의 150 mm를 양생조의 벽면에 평행하게 하여 콘크리트 시편과의

Table 2 Concrete mix

Binder	W/C (%)	Water (kg/m^3)	Mix proportion of concrete cement (kg/m^3)	Fine aggregates (kg/m^3)	Course aggregates (kg/m^3)
OPC	40	140	350	744	1,116

통전 면적을 평행하게 하도록 설치하였다.

자기균열치유의 경우는 해당 시편이 초기 수화 및 콘크리트의 경화가 급히 진행되고 있는 시점의 시편이므로 일반 수돗물을 사용하여 전류 모니터링을 수행하였다.

한편, 전기화학적 전착기법을 사용한 인공균열치유의 경우에는 0.1 mol의 MgCl 용액을 전해질로 선택하여 사용하였다. 여기서 본 실험 이전에 예비실험으로 사용된 ZnSO_4 시약의 경우 가압전류의 증가에 따른 hydrogen evolution이 발생되어 외부 티타늄 메쉬의 손상 및 황산염 침식에 따른 열화가 급속히 진행되었음을 확인하여, 상대적으로 메쉬손상이 극미한 MgCl 을 이용한 전해질 용액을 사용하였다.

실험을 통해 도출될 가압 전압 및 갈바닉 전류 모니터링, 선형 분극 저항 및 사진 화상 분석기법을 통한 균열 치유 향상도 분석을 위해서 각 시편은 다음과 같이 측정을 수행하였다.

먼저, 전기화학적 전착기법이 가해질 3개의 시편은 가압전류를 10 mA로 실험기간 내내 고정시켰다. 이를 위해 전원공급장치의 양 극을 $10 \text{ k}\Omega$ 의 저항을 이용하여 전류를 일정하게 조정하였으며, 콘크리트의 비저항 및 양생에 따른 전류손실로 인한 지속적인 전류의 고정을 위해서는 가압 전압의 양을 시간이 지남에 따라 조금씩 상향 조정하였다.

갈바닉 전류의 측정과 관련하여서는 멀티미터 측정기를 이용하여 자기균열치유 시편 및 인공균열치유 시편 모두에 대해 시편 내부의 철근 메쉬와 시편 외부의 티타늄 메쉬와의 전류, 저항, 전압 값을 시간에 따라 지속적으로 모니터링하였다.

갈바닉 전류의 모니터링 기간 동안에는 인공균열치유 시편의 경우 전원공급장치의 전류공급을 일시중단한 후 모니터링을 수행하였다.

선형분극저항 측정의 경우는 부식측정기를 사용하여 콘크리트 시편 내부의 원형 철근의 부식전류를 모니터링 하였다. 여기서 참조전극(reference electrode)으로는 포화 카로멜전극(SCE)전극을 사용하였고, 대극(counter electrode)으로는 탄소막대를 이용한 3면에 전극을 설치하여 치유 시편의 철근 부식전위 비교를 수행하였다.

사진 화상 분석과 관련하여서는 시편의 탈형 후에 건조로에서 건조수축 균열을 발생시킨 후 1면을 제외한 5면에 에폭시 도포양생을 하였고, 이후 초기 단면 사진과

Table 1 Chemical composition of ordinary Portland cement

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₃
OPC	64.7	20.7	4.6	1.0	3.0	3.0	0.65	0.13	-	-

10 mA의 고정전류를 7일간 통전한 치유 이후의 단면에 대해 사진 분석을 비교하였다.

사진 분석의 프로그램으로는 비트맵 256색의 분석을 주요 골자로 하고 있는 사진 분석 프로그램(프로그램명: Scion image beta 4.03)을 사용하여 해당 시편 사진의 contrast, resolution, thresholding의 처리과정을 거쳐 균열면의 치유 향상도를 도출하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 가압전류 모니터링

전원공급장치에 의한 가압전류의 경우, 인공균열치유 시편의 치유 향상도와 밀접한 관련을 가질 것으로 판단되는데 이는 시편의 부피, 콘크리트 시편의 가압 전압에 따른 전류 분포 면적, 사용 전해질의 물농도 등이 주요 인자로서 설명되어질 수 있다.²⁹⁻³¹⁾

또한, 균열 치유 메커니즘은 크게 다음의 4가지 원리에 의해 설명이 가능하다.

- 1) 시멘트 매트릭스내의 박락과 시멘트페이스트의 수화
- 2) 칼사이트(calcite)의 첨가
- 3) 수분 혼합물에 따른 콘크리트내 시멘트 매트릭스의 공극차단
- 4) 콘크리트내 미세균열의 발생으로 인한 공극구조의 재형성 및 경화에 따른 수분 이동 통로(flow path)의 차단

Fig. 2에는 본 실험에서 모니터링 된 인공균열치유 및 자기균열치유 시편의 고정전류(10 mA) 가압에 따른 전압 모니터링의 결과를 도시하였다. 그림에서와 같이 인공 균열 치유시편의 경우는 초기 1.1 V의 가압 전압에서 시간이 증가함에 따라 전압이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 상기에서 제시한 균열치유의 이론적 메커니즘에서 1), 3) 및 4)항과 관련 있는 내용으로써 가압전류에 따라 콘크리트 시편 내부에서 전지를 형성하고 있는

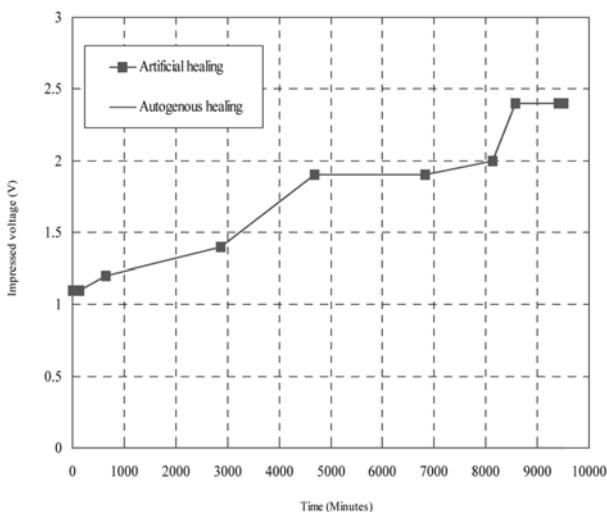


Fig. 2 Comparison of impressed voltage for crack healing

내부 철근 메쉬 및 외부 티타늄 메쉬 사이의 콘크리트 면적 구간에 대해 가압 전류에 의해 시간에 따른 매트릭스의 박락 및 공극구조의 재분배 등이 일어나고 그에 따른 손실 전류는 전기회로 내에서 평형의 원리에 의해 전압의 증가에 따른 보상으로 일어나고 있음을 뒷받침하고 있다.

여기서, 콘크리트내에 발생된 균열의 치유와 관련하여서는 콘크리트 내부에서도 인공균열의 치유가 수행되고 있음을 이해할 수는 있으나, 이의 증명과 관련하여서는 시편의 치유 전·후 내부에서의 비파괴 기법에 의한 내부 시뮬레이션의 전처리 과정을 수행하지 않고서는 인공 균열 치유 이후의 비교분석 및 정량화가 사실상 불가능하므로 이는 추후의 연구로써 남겨두고자 한다.

한편, Fig. 2에서와 같이 고정 가압전류에 따른 전압은 시간의 경과에 따라 증가하고는 있으나 면밀히 살펴볼 경우 일정 시간의 경과에 따라 증가기 및 휴지기를 가지면서 단계적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트를 하나의 전지로 볼 경우, 음전하의 보급에 따른 콘크리트 고유 비저항과의 마찰을 통해 콘크리트 시편이 반도체 상태가 되면서 일정 부분의 전기 충전과 저항 용량의 증가를 경험함에 따라 도체화 되어가는 과정으로 판단된다. 콘크리트 외부에서 전해질로 공급되는 MgCl 용액의 경우도 콘크리트 외부의 티타늄 메쉬와 콘크리트 시편 내부의 철근 메쉬 사이의 가교 역할을 수행하며 전기 분해 반응과 관련하여 일정부분 균열면으로 석출물이 삼입되는 것을 알 수 있으며, 이는 콘크리트 시편에 전류를 가할 때 전기 분해반응으로 인한 전해질 용액의 색변화를 통해서도 관측이 가능하였다.

3.2 갈바닉 전류 모니터링

갈바닉 전류의 측정을 위해 인공균열치유 시편의 경우는 모니터링 기간 동안에는 통전하지 않고 저항 10 kΩ을 사용하여 시편 내부의 철근 메쉬와 시편 외부에 설치된 티타늄 메쉬 사이의 이종 전위 및 전류 변화도를 모니터링하였다.

Fig. 3에는 본 실험에서 수행한 시간에 따른 자기 및 인공균열치유 시편의 갈바닉 전위 값을 도시하였다.

전위값에 있어서는, 전체 관측 시편의 경우에 대해 자기 및 인공균열치유 시편의 분류로 볼 때 약 100 mV의 차이를 보이고 있음을 알 수 있는데, 이를 통해서도 인공균열치유 시편의 전기저항용량이 자기치유시편에 비해 더욱 확보되고 있음을 증명할 수 있다. 또한, 해당 그래프에서 70시간에서의 인공균열치유시편의 경우, 전위차 변동이 급격하게 이루어졌는데 이는 콘크리트내의 철근의 pitting 발생에 따른 부식전위의 변동으로 추론된다.

즉, 철근 부식이 개시될 경우 이후 철근의 부식 진전 가능성은 현격하게 높아지게 된다. 한편, 부식개시 이전에는 큰 전위변화가 없음은 갈바닉 전류 모니터링 측면에서는 당연한 일이다. 따라서, 본 시편의 경우는 초기

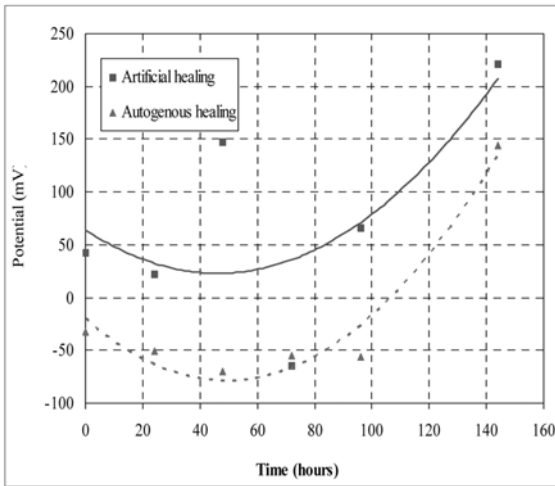


Fig. 3 Galvanic potential with time

재령의 상태이고 음전하의 공급을 통한 음극보호 및 전해질의 외부 양이온의 침적에 따른 전착의 원리가 가미된 전기화학적 치유방식이 적용되었으므로 시편내 철근의 부식가능성이 매우 희박하다고 볼 수 있다. 이는 부식이 개시된 이후의 전류 및 전위 값의 부정확성과 비교하여 매우 안정된 값이며 장기재령 모니터링의 관점에서는 구조물의 사용수명을 연장시키는 유지관리기법으로서의 타당성도 뒷받침 할 수 있다.

한편, Fig. 4에는 인공균열치유 및 자기균열치유시편의 전류와 전위의 값을 비교하여 나타내었다.

그림에서와 같이 인공균열치유 시편의 경우는 전류 vs. 전압값의 분포 범위가 자기치유 시편에 비해 훨씬 넓게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이는 다시 말해 인공균열치유 시편의 경우가 더욱 큰 전기적 저항용량을 가지고 있음으로 인해 치유능력을 확보하는 것으로 대변할 수 있다.

여기서, 자기균열치유 시편의 경우는 전류값이 $-24.7 \sim -32.9 \mu\text{A}$ 인데 반해 인공균열치유 시편의 경우는 전류값이 $-15.1 \sim -50.2 \mu\text{A}$ 의 범위를 보였다.

또한, 전위값의 경우도 이와 비슷한 거동을 보이는 데 자기균열치유 시편의 경우는 전위값이 $-69.5 \sim 144 \text{ mV}$ 의 범위인데 반해 인공균열치유 시편의 경우는 $-64.7 \sim 221.2 \text{ mV}$ 의 거동을 보였다.

또한, 초기 갈바닉 측정 시편의 조건과 관련하여 자기균열치유 시편 및 인공균열치유 시편의 매질의 차이가 근소하므로 최대값의 측면에서 볼 때 전원공급장치의 가압전류 영향으로 인한 전기 에너지 저항 용량이 약 $17.8 \mu\text{A}$ 증진되었다고 할 수 있으며, 일반적인 철근의 부식기준 $1 \sim 2 \text{ mA/m}^2$ 와 비교할 때 전기화학적 전착기법에 의한 전기 저항용량의 증가는 상당히 괄목할 만한 일임을 반증하고 있다. 여기서 물론 전원공급장치에 의한 고정 가압전류 10 mA 의 공급전류 증가에 따른 철근의 음극보호 활성화 효과를 더욱 확고히 할 수도 있으나, 예비실험을 통해 사전에 수행한 가압 전류의 양을 500 mA/m^2 로 수행

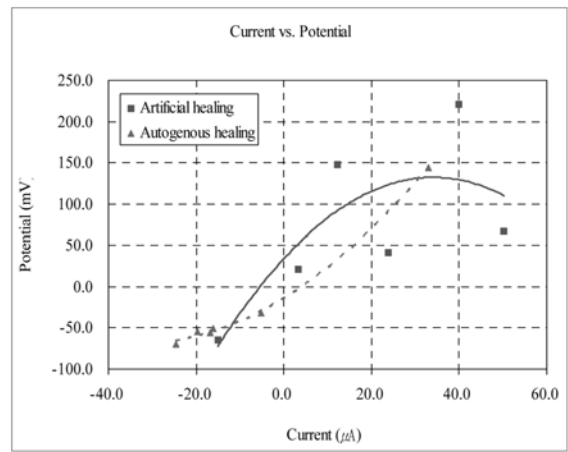


Fig. 4 Comparison of galvanic current vs. galvanic potential

한 Ryu and Autuki²⁹⁻³¹⁾의 연구를 토대로 수행하였을 경우, 1차적으로 1~5 V의 변동 범위내 가압 전압의 유지가 불가능하였으며, 더욱이 가압 전류에 따른 외부 메쉬의 전기분해반응에 따른 손상으로 인해 소기의 연구목표를 제대로 달성할 수 없었기에 최적 가압 전압에 대한 연구도 반드시 필요하다고 사료된다.

3.3 선형분극저항 측정 결과

선형분극저항 측정⁴⁾¹⁰⁾의 경우는 측정 시편내에 기 삽입되어진 원형 철근의 분극저항성을 측정하였다.

Fig. 5에는 본 실험을 통해 수행된 자기치유 시편 및 인공균열치유 시편의 선형분극저항 측정 실험 결과를 도시하였다.

그림에서와 같이 0.1 mA/m^2 의 스위프율(sweeping ratio)을 적용한 철근의 선형 분극 저항곡선 그래프를 비교해보면, 자기균열치유 시편과 인공균열치유 시편 간에 큰 차이를 보인다. 이는 앞서 설명한 갈바닉 전류 측정의 경우와는 다르게 순수 철근과 참조전극 사이의 전기적 거동을 관측하는 것이므로 전류의 분포거동 값이 작은

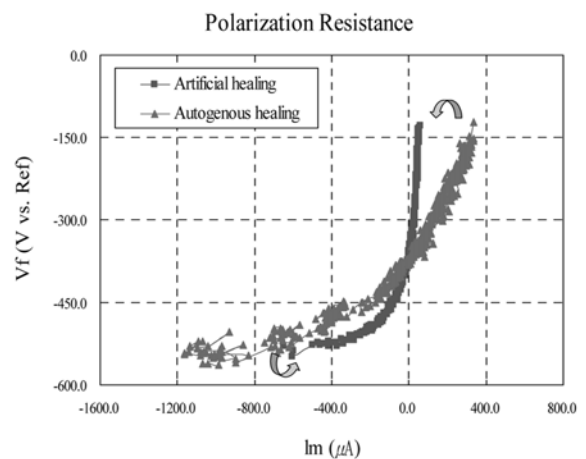


Fig. 5 LPR (linear polarization resistance) results

경우가 부식저항성 면에서 더욱 큰 전기저항용량을 가지고 있다고 할 수 있겠다.

자기치유 시편의 전기저항성을 컨트롤 시편으로 본다면 전기화학적 인공치유에 의해 부식저항성이 화살표와 같이 수정되면서 확보된 것이라 할 수 있다.

3.4 사진 화상 분석

사진 화상 분석 기법은 특정 이미지 파일을 화학 및 정밀기계 계측분야에서 활성화되어 사용되고 있는 Scion image program을 이용하여 비트맵 256색의 색도로 구분하고 resolution, contrast, thresholding의 처리과정을 통해 균열면을 정의한 후 해당 화소(pixel)의 수로 정량화 시키는 기법⁹⁾이다.

한편, 치유가 되어진 균열의 정량화 도출을 위해서 본 연구에서는 실험의 준비과정에서 건조로를 통해 급속 건조수축 균열을 야기시킨 단면의 사진을 초기 값으로 설정하고, 자기치유 및 전기화학적 전착기법에 의해 일정 기간 전기를 통전한 후 치유된 시편의 두가지 경우에 대해 사진분석을 수행하였다.

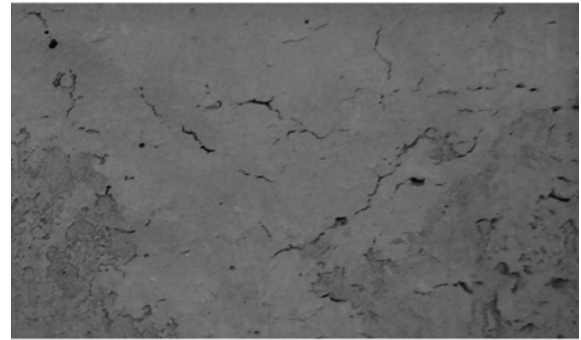
이를 위해서 초기 자기치유 시편 및 인공균열치유 시편에 대해 디지털 카메라에 의한 사진촬영이 이루어지고, 여기서 관찰 균열면을 선정하는 작업이 중요한데, 초기 실험계획상의 1면만을 관찰면으로 고정하였고, 100 × 100 × 100 mm의 정육면체 몰드를 사용하였음에도 불구하고 시편의 각 모서리부에는 운반, 건조, 양생등의 내/외부적 손상으로 인한 정사각 단면의 구성이 어렵다는 단점이 있다. 이는 화상분석과 관련하여 매우 중요한 사항이므로 촬영사진을 동일 배율로 관찰면에 대해서만 고정하는 작업이 필요하다.

Figs. 6과 7에 이러한 이미지 처리과정을 통해 도출된 자기치유 및 인공균열치유의 치유 전후의 사진을 나타내었다.

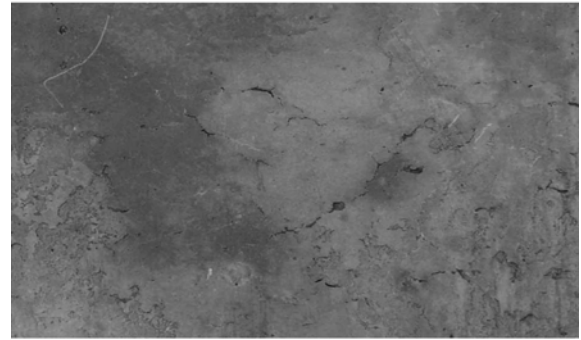
한편, Figs. 8 및 9에는 이미지 분석기법을 통해 수행되어진 contrast 및 thresholding 작업에 의한 resolution 단면의 비교 분석 그림을 도시하였다. 여기서, Figs. 8 및 9에서 제시한 바와 같이 관찰단면의 흑백대조 이후 thresholding을 통한 resolution의 처리 이후에 화상단면의 픽셀 이미지는 Scion image 프로그램에 의해 정량적으로 계산되어 나타나게 되는데 이의 결과를 Table 3에 정리하였다.

실험 결과로부터 자기균열치유 시편의 경우는 총 632,400의 픽셀로서 28,963의 균열부분에 대해 검출이 된 것으로 분석되어 전체 면적에 대해 4.58%의 균열이 존재하는 것으로 계산되었으며, 이를 치유후의 치유 균열면적과 비교하면 2.43% 균열차지 면적을 발생시켜 치유가 되고 있음을 입증하고 있다.

한편, 인공균열치유의 경우에는 전체 관측면적에 대해 2.32%의 균열이 존재하고 있었고, 전기화학적 전착기법에 의한 치유 후 0.54%의 균열차지 면적으로 획기적으



(a) Autogenous crack healing section (before)

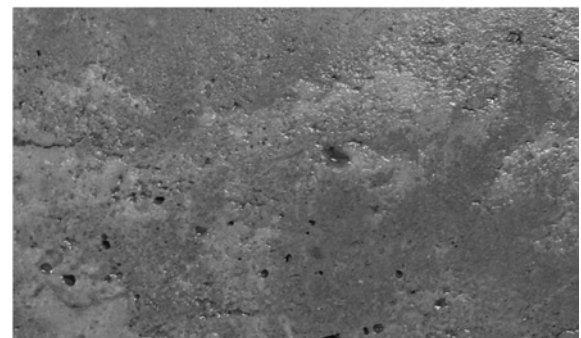


(b) Autogenous crack healing section (after)

Fig. 6 Comparison of autogenous healing surface



(a) Artificial crack healing section (before)

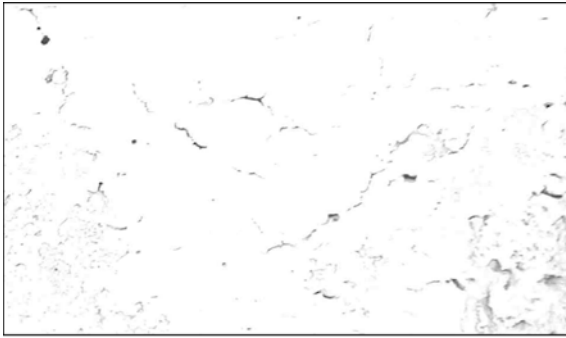


(b) Artificial crack healing section (after)

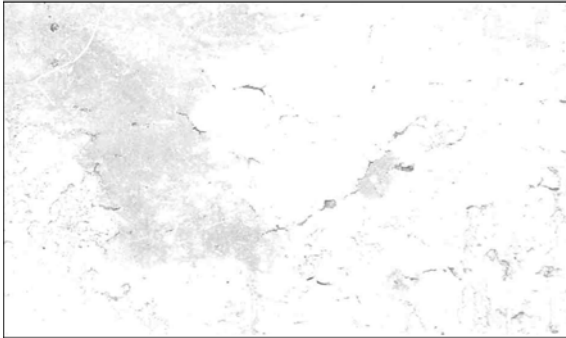
Fig. 7 Comparison of artificial healing surface

로 균열면이 치유되고 있음을 알 수 있다(Table 3).

한편, 자기균열치유 및 인공균열치유기법의 방법상의 균열치유 향상도를 분석해보면 자기균열치유의 경우는 (28963-15403)/(28963)46.82%, 인공균열치유의 경우는 (13342-3140)/(13342)76.47%의 결과를 나타내어 인공균열치유가 자기균열치유에 비해 1.63배의 치유향상 효과를

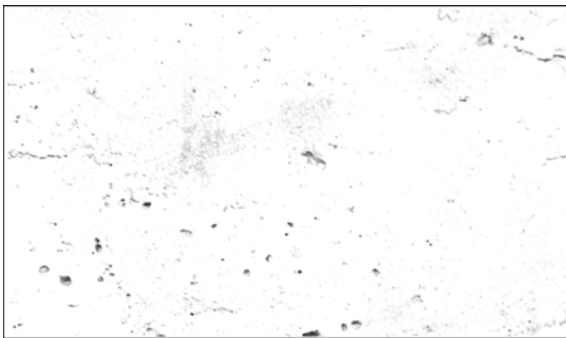


(a) Autogenous crack healing section (before)



(b) Autogenous crack healing section (after)

Fig. 8 Comparison of autogenous healing image process



(a) Artificial crack healing section (before)



(b) Artificial crack healing section (after)

Fig. 9 Comparison of artificial healing image process

Table 3 Image processing results of healing

	Area (no. total fixel)	Min. of resolution	Max. of resolution	No. target fixel	Crack area (%)	Healing ratio (%)
Autogenous healing (before)	632400	28.00	254.00	28963	4.58	-
Autogenous healing (after)	632400	28.00	254.00	15403	2.43	46.82
Artificial healing (before)	574200	28.00	254.00	13342	2.32	-
Artificial healing (after)	574200	28.00	254.00	3140	0.54	76.47

가지는 것으로 나타났다.

한편, 이 연구에서 적용한 가압전류의 양이 10 mA였고 사용 MgCl 전해질의 몰농도가 0.1 mol인 작은 값을 적용하였으므로, 가압전류의 증가 및 Mg 혹은 첨가 양이온의 증가에 따라 인공균열치유의 성능향상효과는 더욱 커질 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트 시편의 자기 균열치유 및 전기화학적 전착기법을 이용한 인공 균열치유의 부식저항성 비교 및 균열치유 향상효과에 관한 실험 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인공균열치유의 가압 전류 측면에서 고정 가압전류에 따른 전압의 결과는 시간의 경과에 따라 증가하고 있었으며 특히, 일정 시간 경과에 따른 콘크리트 저항 용량의 증가기 및 휴지기의 반복을 통해 부식 저항 용량을 조금씩 확보해나가고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 갈바닉 전류측정의 실험 결과로부터 인공균열치유 시편의 경우는 자기균열치유 시편에 비해 전류 vs. 전압값의 분포 범위가 훨씬 넓게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이는 인공균열치유 시편의 경우가 더욱 큰 전기적 저항 용량을 가지고 있기 때문으로 사료된다.
- 3) 선형 분극 저항 측정실험을 통해 전기화학적 전착기법을 사용한 인공 균열 치유기법이 기존의 자기 균열치유시편과 비교하여 부식저항성을 효과적으로 증가시키는 결과를 나타내고 있음을 확인하였다.
- 4) 사진 화상 분석 기법을 통해 도출된 균열치유 정량화분석결과 인공균열치유 기법의 경우가 자기균열치유 기법의 경우에 비해 1.63배 균열치유 향상효과를 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화연구단 및 콘크리트코리아 연구단 (Concrete Corea)의 재정적 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 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.
- Song, H. W., Lee, C. H., Jung, M. S., and Ann, K. Y., "Development of Chloride Binding Capacity in Cement Pastes and the Influence of the pH of Hydration Products," *Can Civ Eng J.*, Vol. 35, No. 12, 2008, pp. 1427~1434.
- Ann, K. Y., Song, H. W., Lee, C. H., and Lee, K. C., "Build-up of Surface Chloride and Its Influence on Corrosion Initiation Time of Steel in Concrete," *EASEC-10, The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, Bangkok, Thai, August 3-5, 2006, pp. 767~772.
- Song, H. W., Ann, K. Y., Lee, C. H., and Lee, K. C., "Corrosion of Steel in Mortars Containing OPC, PFA, GGBS and SF with Chlorides in Cast," *The 4th Civil Engineering Conference in the Asian Region*, Taipei, Taiwan, June 25-28, 2007, pp.71~78.
- Song, H. W., Ann, K. Y., and Kim, T. S., "Assessing the Resistance of Cementitious Binders to Chloride-Induced Corrosion of Steel Embedment Via Electrochemical and Microstructural Studies," *International Corrosion Engineering Conference*, May 20-24, 2007, pp.72~80.
- Saraswathy, V. and Song, H. W., "Evaluation of Corrosion Resistance of Portland Pozzolana Cement and Fly Ash Blended Cements in Pre-Cracked Reinforced Concrete Slabs under Accelerated Testing Conditions," *Mat. Chem. Phys.*, Vol. 104, No. 2-3, 2007, pp. 356~361.
- Song, H. W. and Saraswathy, V., "Analysis of Corrosion Resistance of Inhibitors in Concrete Using Electrochemical Studies," *Met. and Mat. Int.*, Vol. 12, No. 4, 2006, pp. 323~329.
- Saraswathy, V. and Song, H. W., "Performance of Galvanized and Stainless Steel Rebars in Concrete under Macrocell Corrosion Conditions," *Mat. Corros.*, Vol. 56, No. 10, 2005, pp. 685~691.
- Ann, K. Y. and Song, H. W., "Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete," *Corros. Sci.*, Vol. 49, 2007, pp. 4113~4133.
- Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete," *Cem. Concre. Res.*, Vol. 36, 2006, pp. 979~989.
- ACI Committee Report No.2241.R-84, "Causes Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures," *ACI J.*, May-June, 1984, pp. 211~230.
- Jacobsen, S., Marchand, J., and Boisvert, L., "Effect of Cracking and Healing on Chloride Transport in OPC Concrete," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 26, No. 6, 1996, pp. 869~881.
- Samaha, H. R. and Hover, K. C., "Influence of Micro Cracking on the Mass Transport Properties of Concrete," *ACI Mater. J.*, Vol. 89, No. 4, 1992, pp. 416~424.
- Lim, C. C., Gowripalan, N., and Srivivatnanon, "Micro Cracking and Chloride Permeability of Concrete under Uniaxial Compression," *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 2, No. 5, 2000, pp. 353~362.
- Aldea, C. M., Shah, S. P., and Karr, A., "Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 11, No. 1, 1999, pp. 181~197.
- Hannant, D. J. and Keer, J. G., "Autogenous Healing of Thin Cement Based Sheets," *Cem. Conc. Res.*, Vol. 13, No. 3, 1983, pp. 357~365.
- Edvardsen, C., "Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete," *ACI Mat. J.*, Vol. 96, No. 4, 1999, pp. 448~454.
- Laur, K. R. and Slate, F. O., "Autogenous Healing of Cement Paste," *ACI J., Proc.* Vol. 27, No. 10, 1956, pp. 1083~1098.
- Neville, A., "Autogenous Healing-a Concrete Miracle?," *Concrete International*, No. 11, 2002, pp. 76~82.
- Jacobsen, S. and Sellevold, E., "Self Healing of High Strength Concrete after Deterioration by Freeze/Thaw," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 26, No. 1, 1996, pp. 55~62.
- Liu, X. Y., Yao, W., Zheng, X. F., and Wu J. P., "Experimental Study on Self-Healing Performance of Concrete," *Chin. J. Build. Mater.*, Vol. 8, No. 2, 2005, pp. 184~188.
- LiH, X., Tang, C. A., Zeng, S. H., and Li, S. N., "Research on Self-Healing of Concrete Cracks," *Chin. J. Wuhan. Univ. Technol.*, Vol. 26, No. 3, 2004, pp. 27~29.
- Wieland, R. and Michaela, B., "Autogenous Healing and Reinforcement Corrosion of Water-Penetrated Separation Cracks in Reinforced Concrete," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 179, No. 2, 1998, pp. 191~200.
- Reinhardt, H. W. and Jooss, M., "Permeability and Self-Healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 33, No. 4, 2003, pp. 981~985.
- Ramezani-pour, A. A. and Malhotra, V. M., "Effect of Curing on the Compressive Strength Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume," *Cem. Concr. Comp.*, Vol. 17, No. 2, 1995, pp. 125~133.
- Ballim, Y., "Curing and the Durability of OPC, Fly Ash and Blast-Furnace Slag Concretes," *Mat. Struct.*, Vol. 26, No. 158, 1993, pp. 238~244.
- El-Sakhawy, N. R., El-Dien H. S., Ahmed, M. E., and Bendar, K. A., "Influence of Curing on Durability Performance of Concrete," *Mag. Concre. Res.*, Vol. 51, No. 5, 1999, pp. 309~318.
- Dry, C., "Matrix Cracking Repair and Filling Using Active and Passive Modes for Smart Timed Release of Chemicals from Fibers into Cement Matrices Smart," *Mater. Struct.*, Vol. 3, No. 2, 1994, pp. 118~123.
- Ryu, J. S. and Otsuki, N., "Crack Closure of Reinforced Concrete by Electro Deposition Technique," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 32, No. 1, 2002, pp. 159~164.
- Ryu, J. S. and Otsuki, N., "Electro Deposition as a Rehabilitation Method for Concrete Materials," *J. Civ. Eng.*, Vol. 31, No. 1, 2004, pp. 776~781.
- Ryu, J. S. and Otsuki, N., "Application of Electrochemical Techniques for the Control of Cracks and Steel Corrosion in Concrete," *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 32, No. 6, 2002, pp. 635~639.

요 약 이 연구에서는 인공균열치유방법으로서 전기화학적 전착기법을 활용한 균열치유에 관한 실험연구를 통해 부식모니터링의 관점에서 자기균열치유 및 인공균열치유의 비교분석을 수행하였다. 이를 위해 가압전류의 특성 분석, 갈바니 전류의 비교분석, 선형분극저항의 비교분석 및 치유전과 치유후의 균열 치유 향상도를 사진화상 분석기법을 통한 정량화 비교로서 수행하였다. 연구결과로부터, 가압전류 모니터링에서 고정 가압전류에 따른 전압의 결과는 시간의 경과에 따라 일정부분까지 증가하다가 수렴하는 것을 알 수 있었고, 갈바니 전류 측정에 의해 인공균열치유의 경우가 자기균열치유에 비해 더욱 넓은 범위의 전류 vs. 전압 범위 분포를 보여 부식저항성을 안정화하고 있음도 확인하였다. 한편 사진 화상 분석기법을 통해서 인공균열치유 기법의 경우가 약 1.63배 자기균열치유에 비해 균열치유 향상효과를 가지는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 균열, 자기균열치유, 인공균열치유, 전기학적 전착, 부식