

교류가 유도되는 매설배관에서 쿠폰을 이용한 교류 부식속도 측정에 관한 연구

송 홍 석, 김 영 근, 이 성 민, 고 영 태*, 박 용 수**
*한국가스공사 연구개발원, **연세대학교 금속공학과

Study on the measurement of corrosion rate at buried pipeline induced alternating current using coupon

H. S. Song, Y. G. Kim, S. M. Lee, Y. T. Kho, Y. S. Park*

*R&D Center of Korea Gas Corporation, Ansan, (425-790), Korea

**Department of Metallurgical Engineering, Yonsei Univ., Seoul (120-749), Korea

An alternating current (AC) corrosion using coupon has been studied. Coupons were applied in terms of AC voltage from high value to low value through the survey of AC voltages on buried gas transmission pipeline over the country. Parameters such as AC current density of coupon, AC voltage, cathodic protection potential, soil resistivity and frequency were monitored continually. Corrosion induced by AC was observed even under cathodically protected condition that met cathodic protection criterion (: below -850mV vs. CSE). Corrosion rate was affected mainly not by AC voltage but by both of frequency and AC current density. An experimental corrosion rate relationship could be obtained statistically, in which AC corrosion rate increased linearly with effective AC current density and its slope was 0.619.

Keywords : AC corrosion, corrosion rate, coupon, pipeline, interference

1. 서 론

강 재질로써 매설된 배관은 토양에 비하여 전기 전도도가 월등히 우수하여 지하에 미주전류가 흐를 때 전기가 흐르는 우선적인 통로로 작용하기 쉽다. 예를 들어 직류전원에 의하여 구동되는 전철에서 유출되는 미주전류가 인접한 매설배관에 유입되어 방식상태에 영향을 미치는 것은 널리 알려져 있으며, 오랜 경험으로써 대처방법이 마련되어 비교적 적절하게 운영되어 왔다.¹⁾ 그렇지만 교류에 의한

간섭 영향은 주로 작업자의 안전문제 측면에서만 국한되어 취급되었을 뿐,²⁾ 배관 부식 위험성 측면에서는 간과되어져 왔다.

배관에 교류가 유도되는 기구는 3가지가 있을 수 있다.³⁾ 즉, 배관이 송전선과 인접하여 병행하게 되면 전자기적 유도 (inductive coupling)에 의하여 배관에 전위가 유도되며, 접지로부터 교류전류가 주변 토양으로 유출되면 접지 주변에 전위분포를 만들게 되고 전위 분포 내에 배관이 위치하면 저항성 유도 (resistive coupling)에 의하여 배관에는 접촉

하는 토양에 대하여 전압차이가 발생하게 된다. 또한 배관이 매설 전 지표에서 송전선과 장구간 병행할 때 대기의 유전체를 통하여 capacitive 유도가 발생할 수 있으나 매설 후에는 무시될 수 있다. 이러한 유도기구들 중에서 배관에 주로 영향을 미치는 것은 전자기적 및 저항성 유도이다.

강에 있어서 교류에 의한 부식은 1960년대 Williams⁴⁾가 제시한 바에 의하여 교류에 의한 부식은 직류부식에 비하여 1%이하라고 일반적으로 인식되어 왔다. 이는 직류부식에 비하여 교류전류에 의한 부식의 전류효율이 낮은 것은 교류전류 흐름이 전기적 이중층의 capacitance를 통하여 주로 흐르며, charge transfer를 일으키는 전류는 상대적으로 적게 흐르기 때문인 것으로 보고되었다.⁵⁾ 교류전류가 부식을 일으키는데 있어서 비록 전류효율이 낮을지라도 교류전류의 크기가 커지면 교류에 의한 부식을 무시할 수 없게 된다. 외국에서는 1980년대 후반 독일 및 캐나다 등에서 교류에 의한 매설배관의 부식을 경험하였으며,⁶⁾ 독일 등지에서 비교적 다양한 연구가 진행되었다.⁷⁻¹¹⁾ Funk와 연구자들은 방식전류 크기가 증가함에 따라 교류에 의한 부식이 완화됨을 확인하였으며, 2mA/cm²이하에서는 교류에 의한 부식이 거의 없으며, 2mA/cm²~10mA/cm²이하에서는 교류에 의한 부식이 예상되고, 10mA/cm²이상에서는 가속된 부식이 진행되는 것으로 보고하고 있다. 현장 실험을 통하여 Kajiyama¹²⁾는 Off-potential 기준으로 -1.3V이하에서 교류전류밀도가 5mA/cm²이상인 경우에 1mpy 정도의 낮은 부식이 진행된 것으로 보고하고 있다. 그렇지만 아직까지 현장에서 교류전류밀도에 대한 연속적인 모니터링 결과를 통한 교류부식 영향 평가가 이루어진 바가 없고 특히 현장에서 주파수 파형에 따른 영향에 대한 보고가 없었다.

따라서 본 연구에서는 전기방식조건은 만족되면서 교류가 유도되는 매설된 배관에 쿠폰을 연결하여 교류간섭에 따른 부식속도를 측정하고자 하였다. 또한 배관과 쿠폰사이에 흐르는 교류전류를 일정기간 연속적으로 측정하여 전류밀도를 모니터링하였으며, 주파수, 쿠폰 면적의 영향 등을 평가하여 부식속도에 미치는 영향인자를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

쿠폰은 API 5L X65에서 규정되어 있는 탄소강을 절단하여 가로, 세로 각각 1.5cm에 두께 0.5mm로 준비되었다. 쿠폰의 전처리에는 SiC paper #600을 이용하여 연마되고, 아세톤 초음파 세척 후 1cm²의 노출면적만을 남기고 상업용 에폭시 (Araldite, 3M)를 코팅되도록 하였다. Lead선은 무게감량을 통한 부식속도 측정을 위하여 coupon의 모서리에 직경 2mm의 구멍을 내고 단선의 구리선을 연결하여 전기적인 접촉이 이루어지도록 하였다. 쿠폰은 배관의 통상적인 매설깊이인 지하 1.5m에 매설하였다. 매설시 쿠폰의 노출면에는 굴착된 토양중에서 진흙에 가까운 고운 흙만을 선별하여 접촉시키기고 물을 적당히 부으면서 다져 주었다. 쿠폰은 전국적으로 20개소에 매설되었고, 최대 교류전위 유도지점에서부터 거의 유도되지 않는 지점을 선정하여 매설하였다.

쿠폰의 부식속도에 미치는 여러 가지 영향인자를 조사하기 위하여 교류전위, 방식전위, 교류전류밀도, 유도전위 주파수, 토양 비저항 등을 측정하였다. 교류전위, 방식전위 및 주파수 측정은 portable oscilloscope (Fluke 105B)를 이용하였으며, 전위측정용 기준전극은 포화 황산동 기준전극 (이하 전위기준은 CSE 기준)을 사용하였다. 또한 교류전류밀도 측정은 배관과 쿠폰의 리드선 사이에 자체 제작되어 교류전류를 직류전위로 변환하는 convertor (1~99mA 범위)를 사용하였으며, 출력된 직류전위는 DC 전위측정용 로거를 이용하였다. 교류전위 및 방식전위는 교류로거를 이용하고 기준전극은 매설된 아연을 이용하였다. 또한 토양비저항 측정은 Wenner 4전극법을 이용하였으며, 전극간격을 2m로 하여 지표로부터 지하 2m까지의 평균 비저항값을 측정하였다.

시간에 따른 부식속도를 측정하고자 동일한 매설 장소에 2개의 1cm²쿠폰을 매설하였으며, 6개월과 1년 경과 후 각각 한 개의 쿠폰을 굴착하였다. 굴착된 쿠폰은 clark 용액중에서 에칭하여 표면산화물을 제거한 후 무게를 측정하여 매설 전 무게 (0.1mg 단위)와의 차이를 구하여 부식속도를 계산하였다.

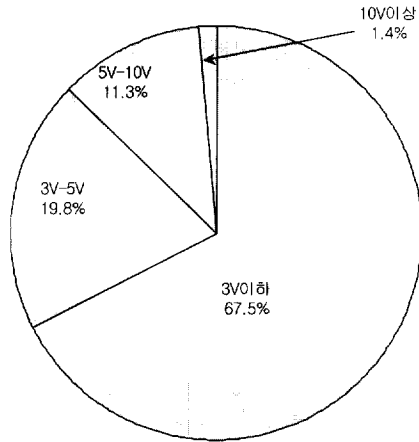


Fig. 1. Distribution of AC voltages measured in 3,823 test boxes.

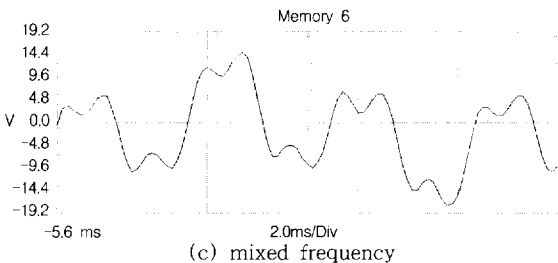
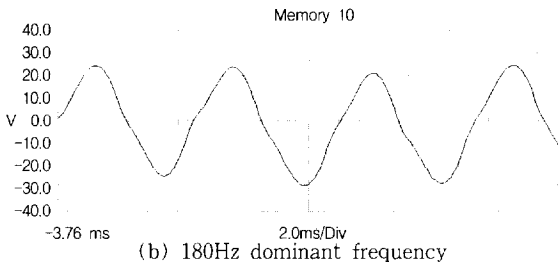
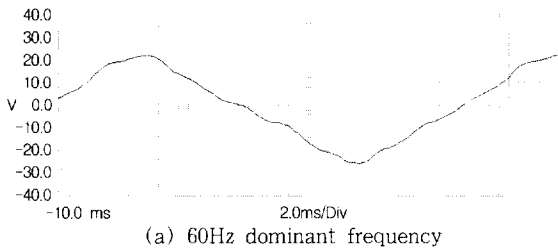


Fig. 2. On-site monitored AC voltage profiles.

3. 연구 결과 및 고찰

가. 교류 유입 실태 조사 결과

쿠포를 적용하기 위한 위치를 선정하기 위하여 먼저 매설배관에 대한 교류전위 유입 실태 조사로써 전국의 5천여개 중 3,823개소의 test box에서 순간적인 교류전위를 측정하였다. 측정결과 Fig.1에 구성비율을 나타낸 바와 같이 3V 미만은 67.5%, 3V이상 5V 미만은 19.8%, 5V이상 10V 미만은 11.3%, 10V이상은 1.4%의 분포로 나타났다.

유도되는 교류성분의 주파수를 측정된 결과 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 단독의 60Hz (Fig. 2 a), 단독의 180Hz (b) 그리고 이러한 파형이 혼합된 형태의 파형 (c)으로 측정되었다. 60Hz는 교통신호등 또는 가로등과 같은 소형의 단독접지 시설물의 누전에 의한 저항성 결합에 의한 경우와 송전선과 병행하는 구간에서 전자기적 결합에 의하여 유도되는 전위에서 측정되었다. 180Hz만 측정되는 경우는 고조파 성분이 원인이라고 판단되며, 혼합된 파형은 여러 간섭이 혼합되어 나타나는 것으로 판단된다.

나. 교류전류밀도에 따른 영향

Fig.3에는 현장에서 측정된 교류전위와 동시에 측정된 쿠포의 교류전류밀도, 방식전위 결과의 예를 보여주고 있다. 교류전위는 주야를 주기로 변화하며, 주간에 측정되는 전위가 야간에 측정되는 전위보다 높게 나타난다. 교류전위의 변화에 일치하여 교류전류밀도 값이 측정됨을 알 수 있다. 1cm^2 의

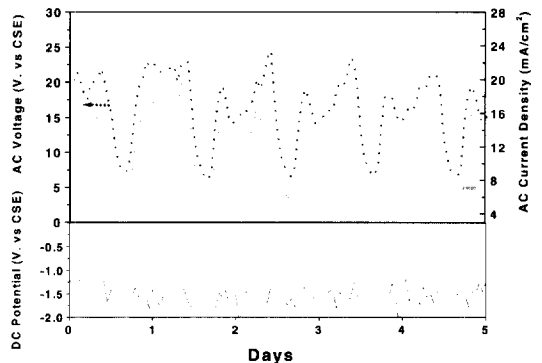
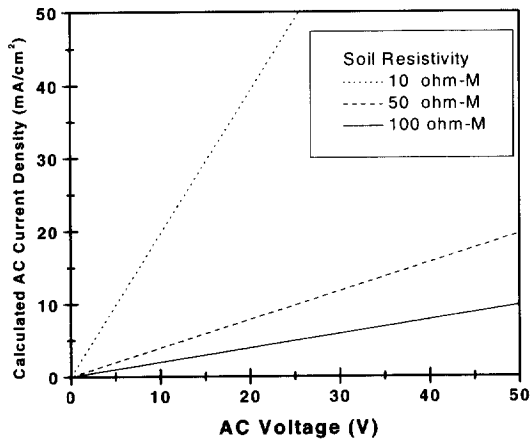


Fig. 3. An example of plot on measured AC voltage, corresponding AC current density and cathodic potential.



(a) Calculated AC current density plot on AC voltage with constant soil resistivity, coupon area.

(b) Plot for comparison of measured current density with calculated AC current density.

Fig. 4. Comparison of measured AC current density of coupon with calculated current considering on-site measured AC voltage and soil resistivity.

쿠폰에 흐르는 교류전류는 이론적인 관계식 $i_{ac} = 8V_{ac}/(\rho \pi d)^{1/2}$ 에 의하면 토양비저항이 일정할 때 교류전압에 따라 선형적으로 증가하여야 한다. 즉, Fig. 4 (a)에 도시된 것과 같이 일정 교류전압 조건에서 토양 비저항이 작은 토양에서의 교류전류가 높은 토양에서 교류전류보다 보다는 많이 흘러야 한다. 그렇지만 Fig. 4 (b)에서 확인할 수 있듯이 실측된 교류전류밀도 값은 현장에서 측정된 교류전압, 토양 비저항을 대입하여 계산된 교류전류밀도 값

(Fig. 4 (b)의 점선)과 차이를 나타낸다. 전위가 낮고 전류밀도가 비교적 작은 경우에도 scattering이 상당히 나타나며, 특히 3,000 Ωcm 이하로 토양 비저항이 낮고 전류가 크게 유입되는 지점에서 차이가 아주 커진다는 것을 알 수 있다. 차이의 원인은 토양 비저항 값이 지표로부터 2m 깊이까지의 평균 값을 의미하므로 쿠폰 매설 위치의 실제 비저항 값을 대표하지 못하기 때문이라고 판단된다. 즉, 지표에 가까운 지점의 토양은 건조하며, 반면에 지표로부터 먼 지점은 상대적으로 수분이 많거나 지하수가 존재하게 된다. 따라서 토양중의 전도성 이온의 양이 많이 존재하는 매설 깊이에서의 토양 비저항이 상대적으로 낮게 되며, 교류전류의 흐름은 쿠폰 표면이 비저항이 낮은 지하수로 wetting되는 경우에 최대로 된다. 한편 약간의 수분만이 존재하는 토양환경에서는 쿠폰 표면의 wetting이 용이하지 못하여 쿠폰의 유효 노출 면적을 작게 하는 효과가 나타나기 때문에 계산된 전류밀도보다 낮은 전류가 측정되는 것이라고 판단된다. 따라서 계산과 측정된 전류밀도간의 차이의 결과로부터 살펴볼 때 교류전위와 토양 비저항 측정으로 예측된 전류밀도만으로 부식의 위험성을 판단하는 것은 상당한 오차를 내포할 수 있는 것으로 해석할 수 있다.

Table 1에는 매설위치에서 관찰된 교류전위, 전류밀도, 토양비저항, 방식전위 결과와 함께 일정기간 매설에 따른 교류부식속도 결과를 보여주고 있다. 표로부터 확인할 수 있듯이 현장에서 관찰된 교류전위는 부식속도와 직접적인 상관관계를 찾기 어렵다. 여러 연구자가 제안하였듯이 교류전류밀도 관점에서 부식속도를 평가하는 것이 적절하다고 볼 수 있다. 높은 부식속도를 보이는 곳은 60Hz의 주파수를 갖고 높은 교류전류밀도를 보이는 CC1과 KN3의 위치이며, 도시가스사업법에 의한 방식 관리기준인 -850mV를 만족시키고 있음에도 불구하고 각각에 해당되는 부식속도는 24, 15mpy였다. 반면에 KN3에 비하여 유사한 전류밀도를 보이는 KII 지점은 상대적으로 훨씬 낮은 부식속도 (5mpy내외)를 보여주고 있다. 이러한 원인은 주파수의 차이에 기인한다. 즉, Fig. 5에 도시된 주파수 의존성의 결과에서와 같이 180Hz 주파수를 나타내는 경우에 비하여 60Hz의 주파수를 나타내는 경우가 같은 교

Table 1. Results of AC corrosion rate using coupon and monitored parameters.

Test Site	Corrosion Rate (mpy)			Results of Monitored Parameters				
	Burial Time (mon.)			AC Voltage (V)	Cathodic On-Potential (V)	AC Current Density (mA/cm ²) (min.~max.)	Soil Resistivity (Ω cm)	Coefficient converted to 60Hz
	1	6	12					
KI1		2.98	5.69	8~24	-1.2~-1.6	2~24	6180	0.40
KI2		3.27	2.31	3~8	-1.2~-1.6	1~3	8101	0.43
KI3		0.45	1.93	3~8	-1.1~-1.8	0.5~2	6280	0.41
KI4		3.19*	1.23	<1	-1.2~-2.4	<1	1948	0.43
S2		5.51	2.78	10~20	-1.3~-2.5	1~3	15072	0.79
S3		1.51	1.17	6~20	-1.0~-3.3	1~8	2763	0.64
CC1		24.44		12~15	-0.9~-1.6	20~40	2323	0.88
CC2		5.08	3.52	4~12	-1.2~-1.7	<0.5	15028	0.59
CC3		1.67	1.43	<2	-1.1~-1.8	0.5~2	4772	0.55
CC4		5.25*	2.14	<2	-1.1~-1.6	0~4	3328	0.59
HN2	4.32	5.12		3~12	-1.1~-1.8	2~10	9734	0.46
HN3		2.39	6.59*	<2	-1.0~-1.5	<1	5228	0.82
HN4		2.47	3.76	<1	-1.3~-1.7	<0.5	11930	0.74
KN1	6.37	1.47	2.65	14~22	-1.4~-2.1	1~22	10048	0.50
KN2		1.93	1.95	3~8	-1.0~-1.5	1~8	2951	0.33
KN3	15.32	17.78		3~5	-1.6~-2.2	10~20	600	0.96
KN4		2.46		<1	-1.0~-2.1	<0.5	1381	0.33
KP2	2.33	2.14	3.16	6~11	-1.1~-1.8	1~8	16328	0.43
KP3	2.44	2.41	3.13	2~5	-1.5~-1.7	0.2~4	8792	0.61
KP4		1.08	7.78*	<1	-1.7~-2.4	<2	2575	0.55

* : 미생물에 의한 부식이 게재됨

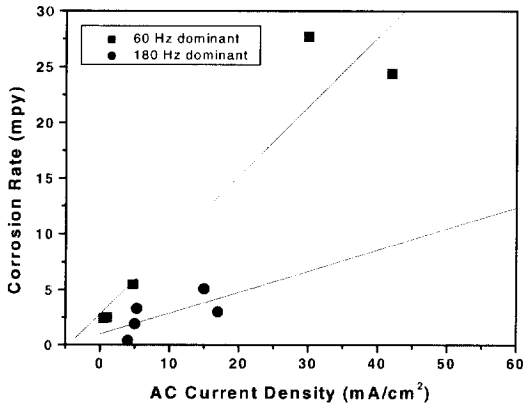


Fig. 5. Dependence of corrosion rate on AC frequency.

류전류밀도에서 3배의 부식속도를 보여준다. 이는 일반적으로 capacitance의 리액턴스가 주파수에 반 비례하는데 기인한다. 즉, Randle 회로로 단순화하여 전극표면을 고려해 본다면 교류전류가 쿠폰의 전극표면에서 흐를 때 주파수가 크면 capacitance의 리액턴스가 작아져서 전기적 이중층을 통한 교류전류 흐름이 증가하고 반면에 전자 전달반응을 수반하여 부식반응에 참여하는 전류는 상대적으로 감소하기 때문이다.¹⁴⁾ 따라서 부식속도에 대한 전류밀도의 영향은 Table 1에 제시하는 바와 같이 측정되는 주파수의 harmonics를 분석하여 60Hz 및 60Hz의 정수배에 해당하는 성분들의 구성비율을 나누어 고려하였다. 즉, 다음의 관계식으로부터 얻어진 유효전류밀도에 의하여 부식속도에 미치는 영향

을 평가하는 것이 타당하다고 판단된다.

$$\text{유효 전류밀도 (I}_F\text{)} = \text{측정 전류밀도 (I}_M\text{)} \times \Sigma(\text{주파수 구성 비율}/60\text{Hz 기준 정수})$$

비교적 낮은 전류밀도를 나타내는 지점에서 미생물 부식이 게재되지 않은 경우 대략 5mpy 내외의 부식속도를 보이며, 굴착 시기에 따라 약간의 오차를 갖는다. 이러한 오차의 원인은 다양한 것으로 추정할 수 있다. 즉, 관찰된 주파수의 파형이 계절에 따라 약간의 차이가 나며, 방식전위 값도 시간에 따라 다소 변하고, 또한 coupon 표면의 wetting 상태가 적용된 도양의 종류 및 매설깊이에서의 수분함량 유지여부 등에서 차이가 날 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

쿠펀에 의한 부식속도는 교류전류밀도가 1mA/cm²내외로 아주 낮은 경우에도 1~3mpy의 부식속도를 보여주고 있는데 이러한 값은 부식 생성물 제거시 사용되는 예칭용액 침적중에 모재 자체가 부식되어 1~2 mpy 정도의 오차를 포함할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 Table 1에 제시된 부식속도는 주어진 조건에서 교류에 의한 최대 부식속도를 나타내는 것으로 간주할 수 있으며, 쿠펀을 이용하여 낮은 부식속도를 측정하는데 있어서 쿠펀법의 한계를 보여주는 것이라 판단된다.

Fig. 6에서는 교류에 의하여 생성된 부식생성물에 대한 SEM 사진을 보여주고 있는데, 표면에 부

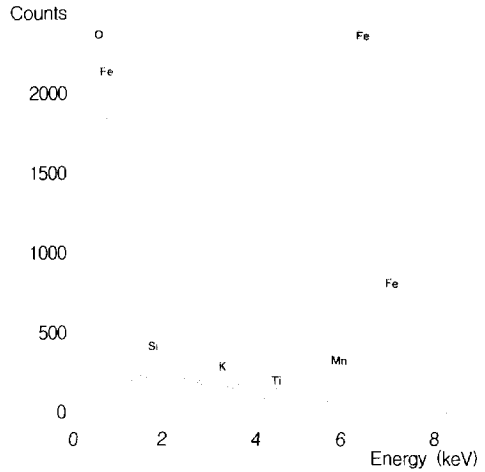


Fig. 7. EDX result on the corrosion products in Fig. 6.

Fig. 6. SEM photograph showing corrosion products formed at AC interference field.

Fig. 8. Photographs showing corroded surface after removal of corrosion products in Clark solution ([] : exposed area to AC interference).

식 생성물이 치밀하게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 부식생성물에 대한 성분분석 결과 Fig. 7에서 확인할 수 있는 바와 같이 모재의 성분외에 산소만이 존재함을 알 수 있으며, 이들을 통하여 치밀한 철 산화물을 형성하면서 교류에 의한 부식이 진행함을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 부식생성물을 예칭 용액중에서 제거한 후 시험기간 노출된 표면을 점선의 사각형으로 표시하여 보여주고 있다. 교류 전류밀도가 낮게 유지된 KP4의 6개월 경과 쿠폰에 대한 결과를 (a)에서 보여주고 있는데, 거의 부식이 진행하지 않았음을 확인할 수 있다. 반면에 KI1지점에 같은 기간 동안 매설된 쿠폰 (b)에서는 방식전위가 포화 황산동 전극기준 $-1.2V$ (on-potential) 이하로 유지되었음에도 교류에 의한 약간의 부식이 진행되었음을 보여주고 있다.

다. 면적 영향

매설된 천연가스 수송배관은 폴리에틸렌 피복이 되어 있으며, 피복 결함 형태는 편홀 형태의 국부적 피복 결함보다는 건설시 건설장비에 의한 충격으로 생긴 큰 손상부가 대부분이다. 따라서 실제 배관의 상태에서와 같이 $1cm^2$ 보다 큰 피복 손상부의 크기를 모사하여 평가해 보고자 하였다. 이러한 평가를 위한 장소로써 CH1지점을 선정하였는데 이 지점에서는 배관과 인접한 지역에서 교통 신호등의 접지로 부터 누설전류가 배관주변의 토양으로 유출됨을 확인하였다. 즉, 신호등과 가까운 지점의 배관 위치로부터 점차 교류전압이 낮아지는 지점에 대하여 3개의 시험장소 (A, B, C site) 각각에 면적을 달리한 세 종류의 쿠폰 (각각 $1, 4, 9cm^2$)을 6개월간 매설하여 면적의 영향을 평가하였다. Fig. 9에서는 A, B, C site에서 관찰된 배관의 교류전위, $1cm^2$ 의 쿠폰을 통한 교류전류밀도, 방식전위 결과를 보여주고 있다. 방식전위는 시험장소에 관계없이 전체 시험구간 약 30M에 걸쳐 $-1.5V$ 를 유지되고 있음을 알 수 있으나, 교류전위 및 교류전류밀도는 간섭원으로부터 멀어질수록 점차 낮아짐을 알 수 있다. 즉, A site에서 교류전위 및 교류전류밀도는 각각 최대 $23V, 80mA/cm^2$ 로 측정되었으나 점차 낮아지면서 C site에서는 $7V, 10mA/cm^2$ 의 값들로 측정되었다.

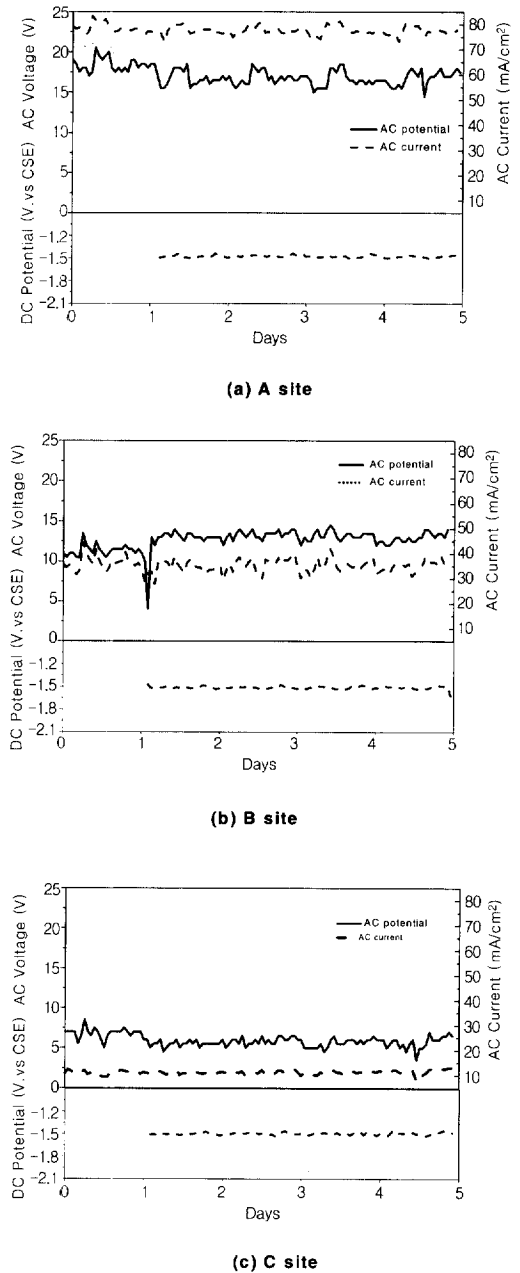


Fig. 9. Monitored results of AC voltage, AC current density and cathodic potential at CH1 place (A, B and C site is denoted position from AC interference source).

면적을 달리하는 쿠폰의 부식속도 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 동일장소에 매설된 쿠폰들중에서 $1cm^2$ 면적의 쿠폰이 가장 높은 부식속도를 나타낸

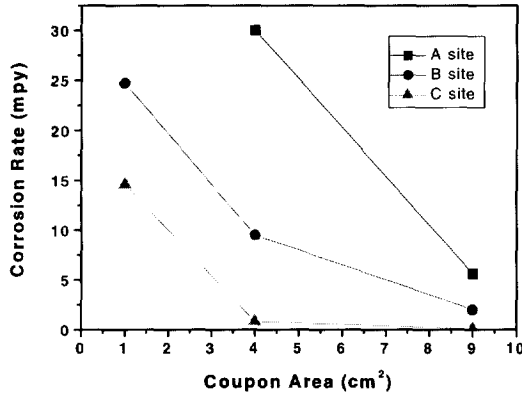


Fig. 10. Corrosion rates with different coupon area after 6 month test.

다. 예를 들어 B site에서 쿠폰 1cm²의 부식속도는 24.7mpy로 나타났지만, 쿠폰 면적이 커짐에 따라 부식속도는 낮아져서 4cm²의 쿠폰과 9cm²의 쿠폰 각각의 부식속도는 9.5, 2mpy로 현저히 낮아짐을 확인할 수 있었다. 교류간섭 정도가 상대적으로 가장 약한 C site에서는 1cm² 쿠폰에서만 14.7mpy의 부식속도가 나타나는 것에 비하여 4 및 9cm² 쿠폰에서는 상대적으로 1mpy이하로 낮아졌다. 이러한 원인은 쿠폰 면적이 두 배 증가한다고 하더라도 교류전류가 두 배로 증가하지 않는 데 있다. 실제 측정 결과 1cm² 쿠폰의 교류전류에 비하여 9cm² 쿠폰의 교류전류가 최대 200% 이내로 증가되는 것이 관찰되었다. 따라서 쿠폰의 면적이 증가함에 따라 단위 면적당 교류전류밀도는 감소하게 되므로 부식속도는 낮아지게 된다. 가스 배관의 피복손상부가 통상적으로 1cm²보다 훨씬 크기 때문에 부식 위험성이라는 측면에서 살펴볼 때 교류간섭의 정도가 심한 환경에서도 실제 운영되는 배관에서는 교류에 의한 부식 위험성이 상대적으로 낮아질 것으로 예상된다. 상기의 결과는 Heim의 연구결과에서 1~3cm² 면적에서 최대로 부식이 진행된다는 결과와도 일치하고 있다.

Fig. 11에는 주파수를 고려하는 유효 교류전류밀도에 따른 부식속도를 도시하였다. 방식전위 -1.0V 이하에서 교류에 의한 부식속도는 유효 교류전류밀도에 따라 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 이때 기울기는 0.619였다.

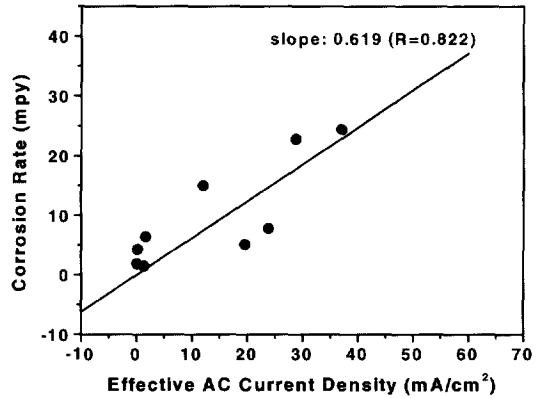


Fig. 11. AC induced corrosion rates with effective AC current density under cathodically protected condition.

4. 결 론

1) 고압가스 공급용 매설배관에 대한 전국규모의 교류전위 실태조사 결과 거의 대부분이 10V미만으로 측정되며 10V 이상은 전체 3,824개소 중에서 1.4%로 조사되었다. 또한 측정되는 주파수는 60Hz, 180Hz, 또는 여러 파형이 혼합된 형태로 나타났다.

2) 토양비저항이 3,000Ωcm로 낮고 전류가 높게 흐르는 지점에서 쿠폰을 통하여 실측된 교류전류밀도는 각 위치에서 측정된 교류전위 및 토양비저항을 고려한 이론적 관계식 $i_{ac} = 8V_{ac} / (\rho \pi d)$ 으로부터 큰 차이를 나타내었다.

3) 쿠폰 면적이 1cm²에서 9cm²으로 증가함에 따라 교류전류는 최대 200% 증가하는 것으로 관찰되었으며, 이에 따라 쿠폰면적이 커지면 단위 면적당 교류전류밀도는 현저히 감소하여 교류에 의한 부식속도는 크게 감소하였다.

4) 교류부식속도는 주파수 파형을 고려한 유효 교류전류밀도에 의하여 평가하는 것이 타당하다고 판단되었으며, 유효 교류전류밀도 (I_e)는 측정 전류밀도 (I_M)과 Σ (주파수 구성 비율/60Hz 기준 정수)의 곱으로 제안되었다.

5) -1.0V 이하로 방식되고 있는 상태에서 교류에 의한 부식속도는 유효 교류전류밀도에 따라 직선적으로 증가하였으며, 이 때 기울기는 0.619를 나타내었다.

Reference

1. A. W. Peabody, Control of Pipeline Corrosion, NACE (1967)
2. NACE standard RP0177 (1983)
3. Working Group 36.02, Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on the Metallic Pipelines, CIGRE (1995)
4. J. F. Williams, *Materials Protection*, **5**, 52 (1966)
5. U. Bertocci, *Corrosion*, **35**(5), 211 (1979)
6. R. A. Gummow, R. G. Wakelin and S. M. Segall, *International Pipeline Conference*, ASME, **1**, 443, (1996)
7. P. Hartmann, *3R International*, **30**(10), 1991
8. G. Helm, T. Heim, H. Heinzen, W. Schwenk, *3R Interantional*, **32** (1993)
9. G. Peez, *Gas Erdgas*, **134**(6) (1993)
10. G. Heim and G. Peez, *Gas-Erdgas*, 133(3) (1992)
11. D. Funk, W. Prinz and H. G. Cshoneich, *3R International*, **31**(6) (1992)
12. F. Kajiyama, Y. Nakamura, *Corrosion*, 55(2), 200 (1999)
13. R. A. Gummow, R. G. Wakelin and S. M. Segall, *CORROSION98*, paper no. 566, NACE (1998)
14. M.. A. Pagano and S. B. Lalvani, *Corrosion Science*, **36**(1), 127 (1994)