

## 전위차측정법을 이용한 배관 감육 형태 분석

### An Analysis of Pipe Degradation Shape using Potential Drop Method

제갈성, 이성호  
한국전력공사 전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

FAC(Flow Accelerated Corrosion)에 의해 감육된 배관에서의 두께 분포를 분석하기 위해 비파괴검사 방법의 하나인 전위차측정법을 이용하였다. 직류전류를 이용하여 전위차를 측정하는 DCPD (Direct Current Potential Drop) 측정장치를 구성하였고, 직선형 결함과 원기둥형 결함을 가진 시편을 제작하여 전위차법의 이론을 실증하고 각 factor 별 영향을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 원기둥형 결함의 시편을 이용하여 결함분포 확인 실험을 수행하여, 전위차측정법으로 결함의 위치와 형태를 거의 정확히 확인할 수 있음을 확인하였다.

#### Abstract

The Potential Drop (PD) method, one of NDE (Non-Destructive Evaluation) method is used to analyze the thickness distribution of pipes degraded by FAC (Flow Accelerated Corrosion). A DCPD (Direct Current Potential Drop) system which can measure PD for direct current was made, and the specimens with line defects and cylinder type defects have been used for experiments to prove the theory of Potential Drop method and to find out the effects of each factors. The experiment to find out defect distributions has been performed and it is found that PD method can analyze almost correct position of defects.

#### 1. 서 론

배관 및 압력용기의 건전성저하는 항상 산업계의 중요한 문제로 대두되고 있다. 발전설비 기기손상의 주된 원인중의 하나가 침부식(FAC: Flow Accelerated Corrosion)이다. FAC는 탄소강 또는 저합금강에 존재하는 부식방지 산화층이 2상류(two-phase flow)나 turbulent flow에서 용해되는 과정을 말한다. 이 과정에 의해 산화층이 얇아지고 부식율이 증가하게 된다. 부식이 되면 다시 산화층이 만들어 지고 부식이 줄어들게 된다. 그리하여 결국에는 부식율과 용해율이 같은 부분에서는 정상상태를 이루게 되어 부식율이 일

정하게 유지된다. 하지만 어떤 부분에서는 모재(base metal)이 드러날 정도로 산화층이 얇아지기도 한다. 일반적으로 산화부는 magnetite 형태로 존재하게 되나, 이 부분이 1상류(single phase flow)와 2상류(two phase flow)에 대해 서로 다른 현상을 보인다. 즉, 1상류에 대해서는 크기가 작은 조개껍질 모양 또는 파도 모양의 손상형태가 보이며, 2상류에 대해서는 호랑이 무늬(tiger stripping) 모양의 마모 형태를 보인다. [1] 배관 마모율은 유체의 운전조건 및 화학조건, 그리고 배관의 재료에 따라서 달라지나, 일반적으로 FAC 조건에 노출된 부분에서는 연간 0.120 inch (3.0 cm) 정도의 마모율을 보인다. [2]

지난 십여년간 전세계의 여러 발전소에서 FAC 문제가 발생하였지만 1986년 미국 Surry 발전소의 복수계통(condensate system)에서 발생한 배관 elbow 부 파단사고에 의해 이 문제에 대한 관심이 증가하게 되었다. Surry 2호기의 복수계통 18 inch 배관이 출력과도기(power transient) 동안 파단되어 인명피해도 발생시켰다. 이 사건 발생이후 대부분의 발전사업자와 부식전문가들이 FAC에 관심을 갖게 되고, 설계변경, 운전조건 변경 및 검사 등을 통해 FAC에 의한 손상을 최소화하기 위한 노력을 기하고 있다.

검사 전문가들은 Surry 발전소 사건과 같은 예기치 못한 손상 및 불시정지를 막기 위해 여러 종류의 검사 방법을 사용하여 주기적으로 검사를 실시하고 있다. 이 주기검사의 궁극적인 목적은 해당 기기의 두께를 측정하고 이 두께를 이전 검사치와 비교하여 두께 감소율을 찾아내는 것이다. 다양한 손상 원인과 함께 비파괴평가 (NDE) 방법도 초음파검사 (UT), 방사선투과 검사 (RT) 및 와전류탐상 검사 (ECT) 등 다양하다. 비파괴평가의 새로운 방법으로 떠오른 것이 전위차 측정법 (Potential Drop method)이다. 이 방법은 원래 재료 내의 crack 발생 및 성장을 측정하기 위해 개발된 것이지만 재료의 두께 측정, 특히 연속적인 두께 측정을 위한 유용하고 실제적인 방법으로 사용되어질 수 있는 것으로 평가되고 있다. 여기서는 FAC 등에 의해 두께가 얇아진 배관의 두께를 측정하거나 배관에서 얇아진 부위(결함부)의 분포를 분석하는데 이 전위차 측정법을 적용할 수 있는지 여부를 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

## 2. 원리 및 실험 방법

### 가. 전위차법의 원리

전위차법은 최근에 개발된 방법으로, 전기전도체에 대한 비파괴평가 방법의 하나이다. 이 방법은 결함이 있는 전도체의 전기저항과 결함의 크기(또는 길이)간의 상관관계를 이용한다. 가장 보편적으로 사용하는 방법이 직류를 이용하는 Direct Current Potential Drop (DCPD) method이다. 이 방법은 일정한 직류전류를 결함이 있는 시편에 흘려주고 결함의 양쪽에 설치된 probe 양단에서의 전위차를 측정하는 것이다. 시편 내의 임의의 결함이나 crack이 있을 경우 전류의 흐름은 방해받게 되어 전류 분포가 변화하게 되며, 결함 주위에서 측정되는 전위차가 변화한다. (그림 1 참조) 직류전류가 시편에 가해지면 시편에는 균일한 전류분포를 형성하기 때문에 두 지점 사이의 전위차는 아래 식과 같이 두 지점간의 거리에 비례하고 전류가 흐르는 도체의 단면적에 반비례한다.

$$\Delta V = I \times \Delta R = I \times \Delta \left( \frac{\rho \times l}{A} \right), \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 재료의 전기저항도 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $l$ 은 측정 probe의 간격 (cm), 그리고  $A$ 는 도체 단면적 ( $\text{cm}^2$ )이다.

전위차법에서 사용되는 다른 방법은 교류전류(AC)를 사용하는 ACPD법이다. ACPD 기술은 "Skin effect"라 불리는 특징이 있다. 교류전류는 진동수가 증가함에 따라 재료내의 전류분포가, 균일한 전류분포에서 재료 표면에서 전류밀도가 증가하는 전류분포로 바뀌게 된다. 이는 진동수가 커지면 커질수록 심화된다. 이에 따라 일정한 probe 간격에 대해 probe간의 전위차는 표면의 전류밀도에 비례하여 증가하고, 이에 따라 ACPD 방법의 sensitivity가 실제 측정이 이루어지는 표면에서는 DCPD 방법에 비해 커진다. 하지만 ACPD 기술은 10 kHz 이상의 진동수에서 gain error와 noise가 증가한다는 단점이 있다. 이 문제는 lock-in amplifier의 사용으로 효과적으로 해결할 수 있다.

교류전류의 특성인 skin effect에 의해 ACPD 방법은 측정되는 표면에 결함이나 crack이 있는 경우에 효과적인 반면, DCPD 기술은 결함이 전위차를 측정하려는 표면의 반대쪽에 있는 경우에 더 효과적이다. DCPD 기술은 thermocouple 효과에 의해 발생하는 열 전자 간섭 현상 문제가 있는데, 이 영향을 단순 bias로 고려하여 제거할 수 있는 alternating DC 기술을 사용하여 효과적으로 없앨 수 있다. [45]

DCPD의 출력전압값 변화는 여러 가지 변수에 의해 영향을 받는데 이에는 입력전류값, 결함깊이 및 넓이 등 geometry, 입력전류 probe 및 측정 probe의 간격, 그리고 시편두께 등이 있다. 이 변수들은 DCPD 결과에 독립적으로 또는 복합적으로 영향을 미치는데 여기서 이 변수들의 변화에 따른 영향을 실험적으로 조사하였다.

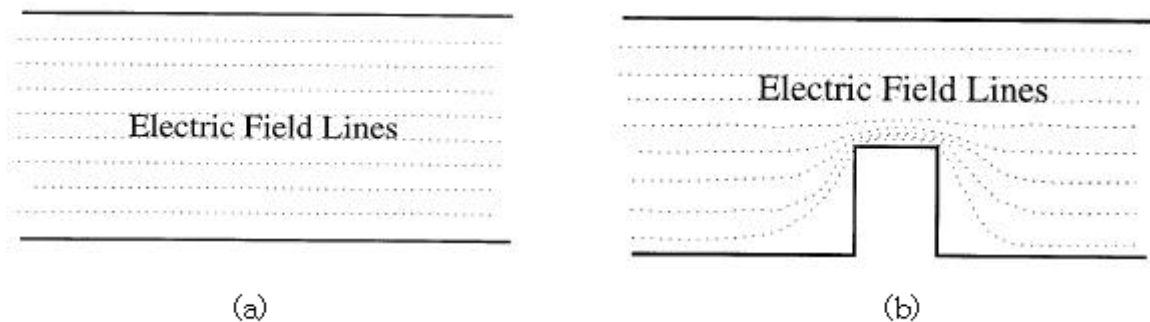


그림 1. 결함이 없을 경우(a)와 결함이 있을 경우(b)의 전기장의 분포

#### 나. Direct Current Potential Drop (DCPD) System

이번 실험을 위해 DCPD 측정장치를 사용하였다. 그림 2는 실험장치의 개략도로 주요 장비는 다음과 같다. 일정한 전류의 공급을 위한 DC power supply (Hewlett Packard 사 제품, Model HP-6632A), alternating DC 생산을 위한 Douglas relay set (Douglas Randall, Inc. 제품, Model K12B), 그리고 relay 제어를 위한 Switch/Control Unit (Hewlett Packard 사 제품, Model HP-3488A). 이 실험에서는 두께 0.5 인치 plate 시편에 대해서는 5 A의 전류를 사용하였다. 입력전류는 결과값의 비교를 위해 일정한 전류밀도를 공급하여야 하며, 이에 따라 단면적이 큰 시편에 대해서는 큰 전류를 흘려주어야 한

다. 일례로, 직경 20 인치, 두께 0.5 인치의 pipe 시편에 대해서는 20 - 30 A의 전류가 공급된다. Relay 작동을 위한 5V 전류는 다른 DC power supply로 부터 공급된다. Alternating DC 전류가 시편에 공급되며, 결과 PD 전압은 HP-3478A multimeter를 이용하여 측정하였다.

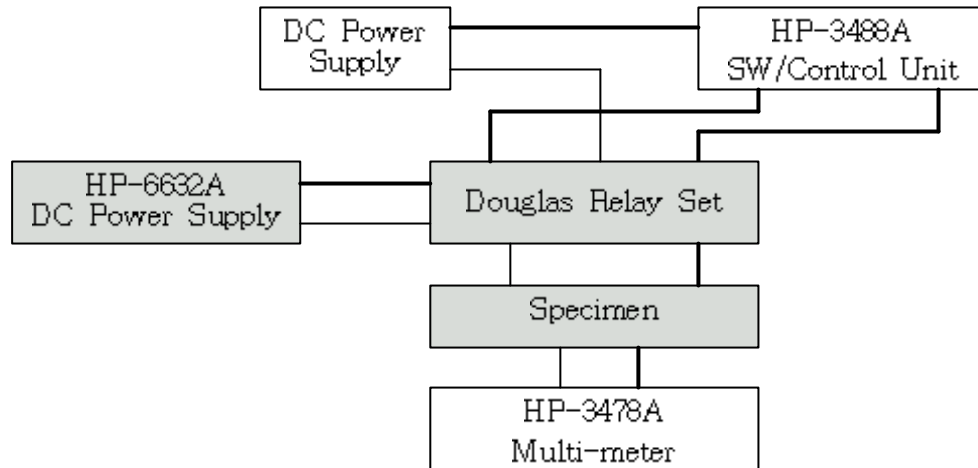


그림 2 DCPD 측정장치 개략도

#### 다. 실험 시편

이 실험의 시편 재료로 원자력발전소 및 기력발전소에서 많이 사용되는 탄소강을 이용하였다. 가장 널리 사용되는 탄소강인 ASTM A106을 이용하여 시편을 제작하였는데, 이 재료는 0.14 - 0.20% C 및 0.6 - 0.9% Mn을 함유하고 있다. [6]

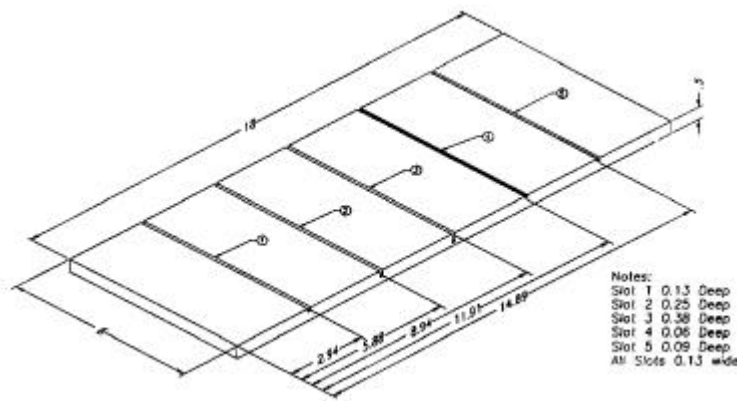
PD 원리를 입증하기 위한 실험을 위해 같은 넓이와 서로 다른 높이의 선형 결함들을 가진 시편을 제작했다.(그림 3-(a) 참조) 서로 다른 두께의, 결함이 존재하지 않는 11개의 시편도 준비하여 시편두께와 PD 전압값 간의 관계를 구하기 위한 실험에 이용하였다. 이 시편들은 두께 변화에 따른 효과를 구하기 위해 시편의 두께를 제외한 다른 모든 크기는 동일하다.

침부식에 의한 배관 감육시 생성되는 결함형태로 원기둥형 결함을 선정하였으며, 서로 다른 직경과 깊이의 결함을 가진 시편을 제작하여 결함의 직경과 깊이에 따른 영향을 조사하는 실험에 이용하였다.(그림 3-(b) 참조) 이 시편은 thickness mapping 기술개발을 위한 실험에도 사용하였다.

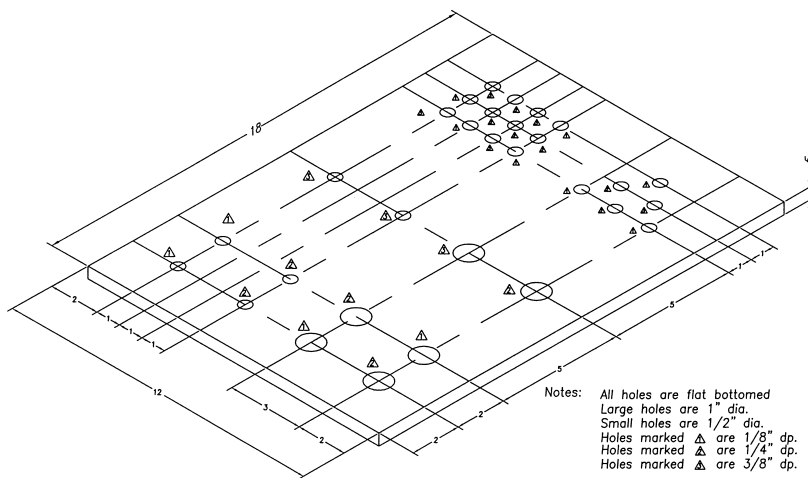
### 3. Factor별 영향 조사 실험 결과

#### 가. 이론의 실증을 위한 기초 실험

이번 연구에서는 이론을 입증하기 위한 한 방안으로 FAC 손상을 대표하는 일정한 크기의 결함을 가진 시편을 이용하여 실험하였다. 그림 4는 전류 입력 probe 및 측정 probe 간격을 일정하게 둔 상태에서 여러 시편두께에 대해 전류 변화에 따른 DCPD 변화 실험 결과이다. DCPD 결과 전압값은 입력 전류값과 시편 두께에 의해 변화한다. 원



(a)



(b)

그림 3. 높이가 다른 여러 선형 결함 시편(a)과 다양한 구조의 원기둥형 시편 (b)

리적으로 전압은 전류의 변화에 비례하여 변화한다. 이 실험 결과에서도 DCPD 전압값은 전류의 변화에 비례하여 변화되었다. 일반적으로 배관두께 감육은 1차원적인 문제로 귀결된다. 하지만 국부적인 감육이나 작은 손상에 대해서 전위해석 문제는 최소한 2차원 문제이거나 3차원 문제가 될 수 있다. 이번 실험결과는 손상깊이가 배관두께의 상당한 부분에 해당하거나 측정 probe 간격이 손상부의 넓이와 비슷한 경우에 대해서는 이 전위해석 문제가 다차원의 문제가 될 수 있음을 보여주고 있다.

그림 5는 여러 전류값에 대해 시편두께의 역수값에 대한 정규화(normalized)된 DCPD 값의 변화를 보여준다. 이는 시편두께의 차에 따른 data 변화가능성을 없애기 위해 초기 두께의 시편에서 측정된 전압값에 대해 정규화하였다. 이 결과는 선형적인 분포를 보이고 있다. 이들 결과에 따라 배관두께가 DCPD 방법에 의해 측정되어질 수 있음을 보여준다.

#### 나. 신뢰성있는 측정 data를 구하기 위한 probe 간격 검증 실험

전류가 금속시편에 흐를 경우 전기장은 그림 6과 같이 분포되며 균일한 전기장이 형성되기 전의 일정한 간격( $d_{opt}$ ) 내에서는 변화하게 된다. 이 실험의 목적은 균일한 전기장

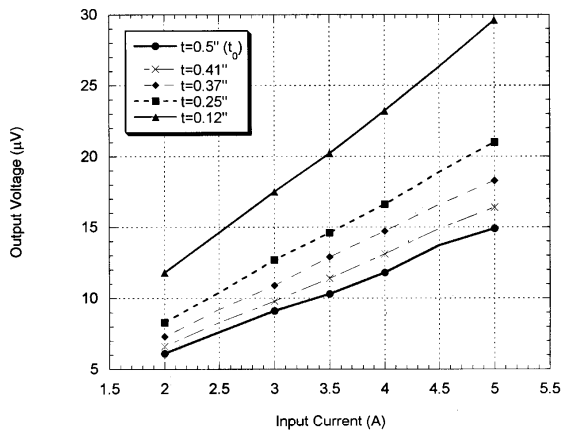


그림 4 입력전류의 변화에 따른 DCPD 변화

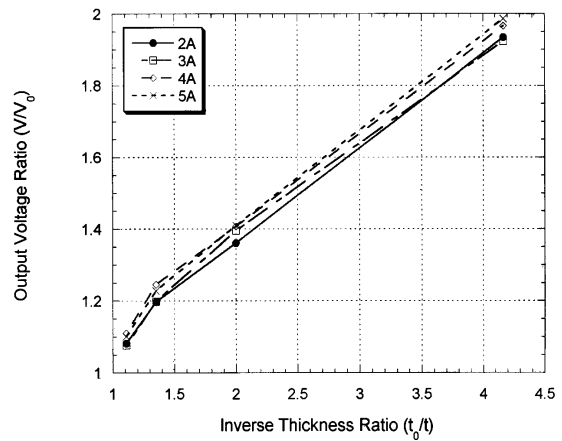


그림 5 시편두께 변화의 역수에 대한 정규화된 DCPD 변화

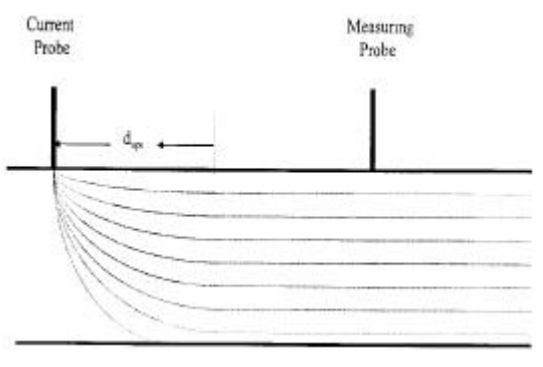


그림 6 도체에서의 전기장 분포

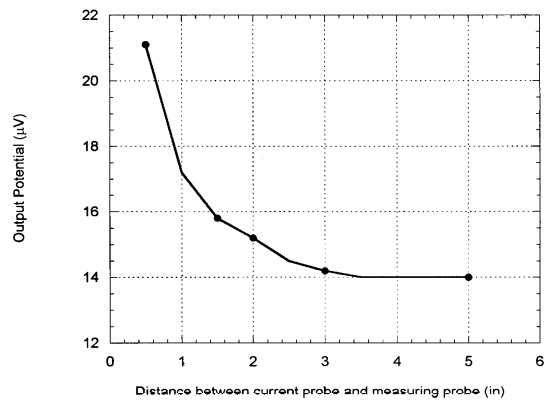


그림 7. 전류 probe와 측정 probe 간격에 따른 DCPD 변화

이 형성되기까지의 최적거리를 찾아내고 안정된 DCPD 결과를 얻기 위함이다. 그림 7은 전류 probe와 측정 probe 간의 간격에 따른 전압값의 변화를 보여준다. 이 결과로 두 probe 간의 간격이 0.5 인치 시편에 대해서는 최소한 3 인치 이상되어야 안정된 전압값을 구할 수 있음을 알게 되었다. 이 결과로 PD 방법이 실제 적용이 될 때 probe의 위치선정 시 유용한 정보를 제공할 수 있게 되었다.

#### 다. 측정 probe 간격 효과 검증 실험

그림 8은 전위차에 대한 측정 probe 간격의 영향을 보여준다. 실제 배관에 대한 PD 방법의 적용시에는 측정 probe의 간격이 고정되어야 한다. 실 적용시의 probe 간격 결정에는 요구되어지는 분해능과 예상 손상의 형태가 중요하다. 한 예로써 tiger striping을 검출하기 위해서는 수 cm 정도의 분해능이 요구되어지나, 일반적 배관마모를 검출하기 위해서는 probe 간격이 조밀할 필요는 없다. 균일한 배관두께 감소의 경우에 대해서는 전

류, 전압 및 두께와의 관계는 간단하게 정의할 수 있다. 이러한 이유로 측정 probe 간격의 영향을 조사할 필요성이 있다. 결과는 예상대로 선형적인 변화를 보였으며 이로서 측정 probe 간격의 유연성을 확보할 수 있었다.

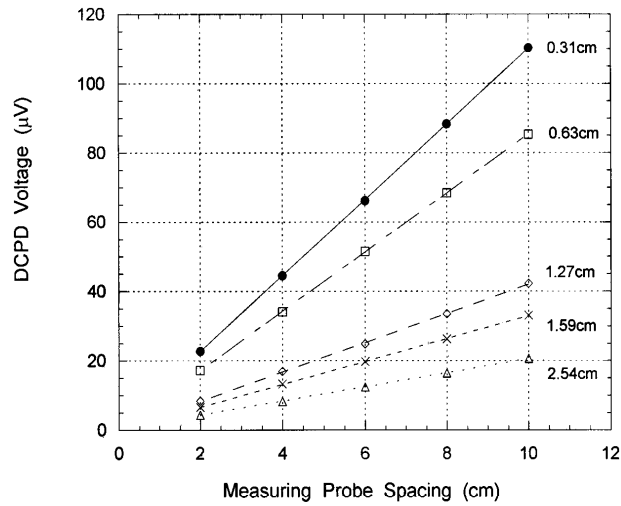


그림 8. 측정 probe 간격 변화에 따른 DCPD 변화

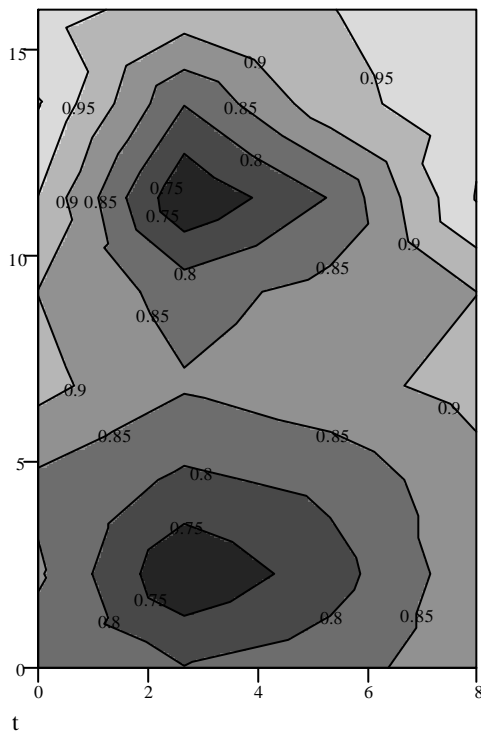


그림 9. 두 개의 원기둥형 결함 시편에 대한 측정결과를 이용하여 분석한 두께분포 지도 (단위 : cm)

**라. 두께분포 지도 그리기 (Thickness Mapping)**

그림 9는 식 (1)의 원리를 이용하여 직경 0.75 inch, 길이 0.375 inch 결함 및 직경 1 inch, 길이 0.375 inch 결함의 두 개의 원기둥 모양의 결함을 가진 시편에 대해 두께분포

지도를 그린 결과이다. 이 결과, 전위차법으로 원 형태의 결함을 분석할 수 있었으며, 결함의 위치를 상당히 정확히 분석할 수 있음을 확인하였다. 하지만 결함의 정확한 위치별 두께값을 보여주지는 못하고 있어 보다 정확한 두께값 분석을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 이상의 결과로, 전위차측정법을 이용하여 감육된 배관에서 감육의 형태(결함)를 찾아낼 수 있음을 확인하였다. 또한 결함의 구조를 분석할 수 있는 방법을 개발하면 감육된 배관의 위치별 두께도 구할 수 있어 전위차법을 이용하여 감육된 배관의 두께를 구할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

FAC(Flow-Accelerated Corrosion)에 의한 탄소강 배관의 두께를 분석하기 위하여 DC 전위차 (Potential Drop) 측정장치를 개발하였다. FAC에 의해 생성되는 결함과 유사한, 일정한 크기의 선형 결함을 가진 시편을 사용하여 먼저 이론 입증 연구를 수행하였다. DCPD 결과에 영향을 미치는 각 factor별 영향조사를 실시하였다. 입력전류에 따른 결과 DCPD 전압은 이론에서 예측한 것과 같이 선형적으로 변화하였고, 시편두께의 역수값 변화에 DCPD 값의 변화는 거의 선형적이었다. 이 두 결과로부터 DCPD 방법을 이용하여 배관두께를 합리적으로 측정할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 측정 probe와 입력 probe간의 간격에 따른 효과를 알아보기 위한 실험이 수행되어 두 probe간의 간격이 최소한 3 인치 이상되어야 안정된 DCPD 값을 구할 수 있다는 결론을 얻었다. 측정 probe 간격 변화에 따른 효과도 조사되어 선형적인 변화 결과를 구하였으며, 이 결과로 실제 이 방법이 적용될 때 측정 probe 간격이 변화될 수 있는 가능성을 확인하였다.

직경 0.75 inch, 길이 0.375 inch 및 직경 1 inch, 길이 0.375 inch의 두 개 원기둥 모양의 결함을 가진 시편에 대해 두께분포 지도를 구하였다. 이 결과로, 전위차측정법을 이용하여 감육된 배관에서 감육의 형태(결함)를 찾아낼 수 있음을 확인하였고, 결함의 구조를 분석할 수 있는 방법을 개발하면 감육된 배관의 위치별 두께도 구할 수 있어 전위차법을 이용하여 감육된 배관의 두께를 구할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참고 도서

1. B. Chexal, et. al., "Flow-Accelerated Corrosion in power plants", EPRI TR-106611 (1996).
2. R.J. Potter, "Characterization of flaws in erosion corrosion by ultratesting", Materials Performance, Vol. 33, No. 2, (Feb. 1994) pp. 64-67.
3. Ducreux, J., "Theoretical and experimental Investigation of the effect of chemical composition of steels on their erosion-corrosion resistance", Paper 19 presented to the Specialists Meeting on "Corrosion-Erosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam", Les Renardières (May 1982).



- 4 I.S. Hwang and R.G. Ballinger, " A multi-frequency AC potential drop technique for the detection of small cracks", *Measurement Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, (Jan. 1992) pp. 62-74.
- 5 B. Kluttig, H. Steinmill, W. Stropler, and H.P. Keller, "Crack growth measurements on Components under cyclic loading: comparison of different methods", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 151, (1994) pp. 523-530.
- 6 H.E. Boyer and T.L. Gall, "Metals Handbook: Desk Edition", American Society for Metals, (Sep. 1992).