

# Mechanical finger를 이용한 배관결함 검사에 관한 연구

유휘룡 · 김동규 · 조성호 · 박승수 · 박대진 · 구성자 · 노용우  
한국가스공사 연구개발원

## A Study of Inspecting Pipeline defect Using Mechanical finger

H.R.Yoo, D.K. Kim, S.H. Cho, S.H. Park, S.S. Park, D.J. Park,  
and Y.W. Rho

R&D Division, Korea Gas Corporation

### 1. 서론

배관의 PIG 시스템은 배관 내부에 삽입되어 내부를 흐르는 매체에 의하여 추진되는 장치로써 처음에는 매체의 흐름을 방해하는 퇴적물 등을 제거하기 위해서 사용되었다. 그러나 오늘날에는 배관을 건설, 유지·보수, 해체하는 작업, 즉 배관을 운용하기 위한 모든 단계에서 사용되고 있을 만큼 PIG의 활용범위가 매우 넓어지고 있으며, 이에 따라 배관을 이용하는 석유, 가스등의 수송에 필수적인 요소가 되었다.

현재 사용되는 PIG는 용도에 따라 Utility PIG와 Inspection PIG로 분리할 수 있으며, Inspection PIG는 배관 내부의 상태나 손상(예:Dent, Metal loss 등)을 조사하기 위한 PIG를 의미하며 용도에 따라 Geometry PIG, MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG, Ultrasonic PIG등으로 구분할 수 있다<sup>(1)</sup>.

Geometry PIG는 배관 자체의 위치 변동, 배관 내부의 덴트(Dent) 및 주름(Wrinkle)의 형태·크기와 위치, buckle의 여부와 위치, 배관의 난형도(Ovality) 및 배관의 곡률(Curvature)을 결정하기 위하여 사용된다<sup>(2)</sup>. 그리고 이러한 기능을 수행하기 위해서 배관 내에서 PIG의 이동경로를 결정하여 GIS(Geometric Information System)상의 맵핑(Mapping)을 위한 INS(Inertial Navigation System)과 덴트의 형태와 크기 및 난형도를 결정하기 위한 캘리퍼(Caliper) 시스템, 주행거리계 그리고 데이터 처리 시스템으로 구성된다.

현재 Geometry PIG에 탑재되어 운용되고 있는 캘리퍼 시스템은 초음파를 이용하는 소나링(Sonar Ring) 시스템과 Mechanical Finger 시스템으로 구분된다. 소나링 시스템은 배관내의 매체가 액체인 경우에만 적용이 용이하다는 단점 때문에 Mechanical Finger가 주로 사용되고 있다.

Mechanical Finger 시스템은 Finger Arm들이 전부 요동판(Wobble Plate)에 연결되어 있어서, 배관벽의 덴트에 따라 운동하는 요동판의 변위를

LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 사용하는 형태가 있다. 그리고 각각의 Finger Arm의 회전 부위에 포텐쇼미터 (Potentiometer), RVDT(Rotating Variable Differential Transformer) 혹은 Optical Encoder와 같은 회전각 측정 센서를 부착하여, 상기한 바 있는 배관 내부의 손상을 찾고 크기와 형상을 결정하는 시스템도 있다. 전자는 Finger Arm들이 전부 요동판에 연결된 일체형이므로 배관의 난형도 및 곡률 측정이 불가능한 것이 단점이고 센싱부가 1개이므로 데이터 처리가 쉬워진다는 장점을 가진다. 그리고 후자는 각각의 Finger Arm에 센서들이 부착되어 있어 Finger Arm 각각의 움직임을 측정할 수 있으므로 일체형의 단점을 보완할 수 있고, Finger Arm들이 독립되어 있으므로 제작 및 유지·보수에서 유리하다. 단점은 Finger Arm들이 많아질수록 데이터 처리 시스템의 부하가 증가한다는 것과 센싱부에 여러 가지 문제가 있다는 것이다. 즉, Finger Arm에 부착 가능한 센서 중 Optical Encoder는 분해능이 낮고, 포텐쇼미터는 접촉부가 있어 내구성이 문제이고, RVDT는 분해능도 좋고 비접촉이지만 고가이고 구동드라이버의 소비전력이 많다는 문제를 안고 있다.

따라서 본 논문에서는 이방성 자석을 이용하여 비접촉이면서 구동드라이버의 제작이 쉽고, 정밀도가 높고, 부착이 쉬운 Mechanical Finger 시스템을 개발하였고, 유한요소법에 의해서 이방성 자석 및 홀센서가 결합된 회전각 측정 시스템의 자기장을 분석하여 최적의 설계 방법을 제안하였고, 성능실험을 통하여 개발된 Mechanical Finger 시스템의 유용성을 검증하였다.

## 2. 시스템 구성 및 회전각 측정 원리

### 2.1 시스템 구성

본 연구에서 개발된 Geometry PIG는 Fig. 1과 같이 구동컵, INS, 캘리퍼 시스템, 주행거리계, 데이터 처리 시스템 등으로 구성된다. 배관 내로 삽입된 PIG는 구동컵에 가해지는 차압으로 앞으로 이동한다. Mechanical Finger 시스템은 24개로 구성되어 30° 배관을 원주방향으로 9.91 [cm], 즉, 15[°]간격으로 검사한다.

Driving Cup

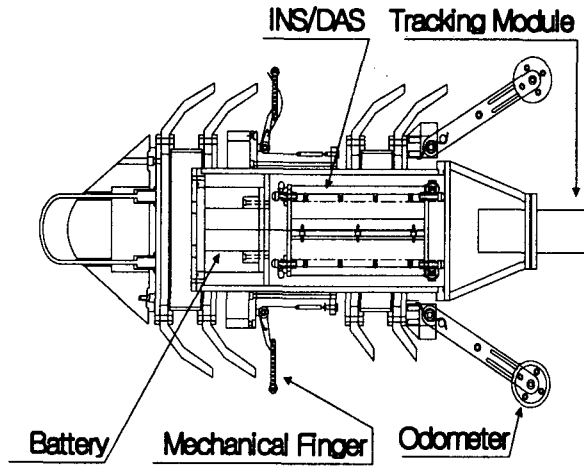


Fig. 1 Schematic diagram of a geometry PIG

Fig. 3은 개발된 Mechanical Finger의 구성을 보이고 있다. Fig. 3에서 스프링은 Wheel을 배관 벽에 밀착시킨다. 그리고 PIG의 진행에 따라 Mechanical Finger의 Wheel은 배관벽을 따라 회전하면서 이동한다. 이때 Fig. 3과 같은 텐트를 지나면, Finger Arm에는 각변위가 발생하고 이 회전각 변위를 센싱모듈에서 측정하여 텐트의 크기와 길이를 측정할 수 있게 한다.

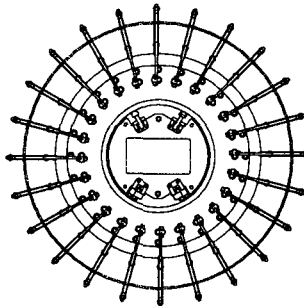


Fig. 2 Profile of developed geometry PIG

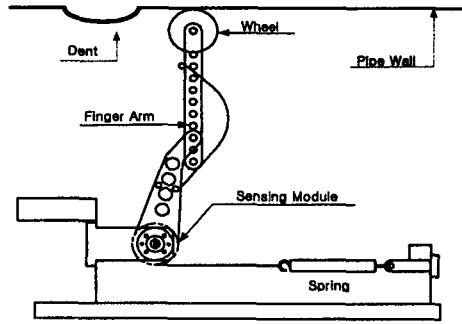


Fig. 3 Schematic diagram of the mechanical finger

## 2.2 회전각 측정원리

Fig. 3의 센싱모듈은 Fig. 4와 같이 이방성 자석(Anisotropic magnet)의 내부에 홀(Hall)센서가 설치되어 있다. 내부 공간이 있는 원형자석을 Fig. 4에서와 같이 착자하면, 자석 내부 공간의 자기장은 Fig. 5와 같이 균일하게 된다. Fig. 5는 유한요소법에 의한 이방성 원형 자석 내부 공간의 자기장 해석 결과이다. 자석 내부공간에 설치된 홀센서에서 측정되는 자기장은, 내부공간에 형성되는 자기장의 최대치를  $H_{\max}$ 라 두면  $H_{\max} \cos(\theta)$ 이 된다. 따라서 홀센서의 출력전압의 변화를 측정함으로써 Finger Arm의 회전각 변위를 계산할 수 있는 것이다.

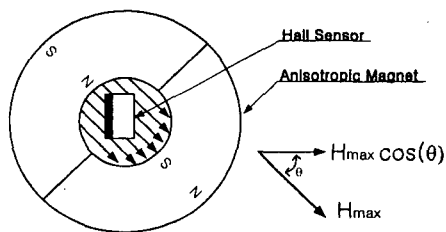


Fig. 4 Measurement principle of finger arm's rotation angle

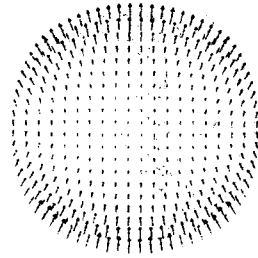


Fig. 5 Magnetic field of the anisotropic magnet hall

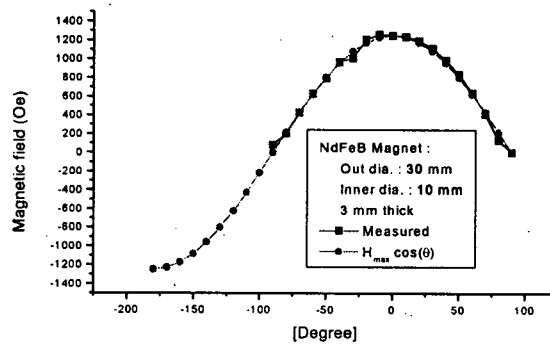


Fig. 6 Field dependence on the tilted angle between hall sensor plane normal and inner field of Anisotropic magnet.

### 3. 유한요소법에 의한 자기장 해석 및 최적 설계

Mechanical Finger의 회전각을 측정하기 위한 센싱모듈의 구조는 Fig. 7과 같다. 즉, 센싱모듈은 이방성자석, 홀센서 그리고 Finger Arm과 연결되어 자석을 회전시키는 back-yoke로 이루어져 있다. 여기에 사용되는 홀센서는 그 감도가 결정된 상용품을 사용하여야 하는 실정이다. 따라서 Finger Arm의 변위에 대한 정보를 정밀하게 측정하기 위해서는 측정과정에서 발생하는 Noise에 비하여 Hall Sensor에 가해지는 자기장의 크기를 키워야 하며 이를 위해서는 자기장의 자석의 외경, 내경, 두께 및 Pin Hole 위치의 최적 설계가 필수적이다.

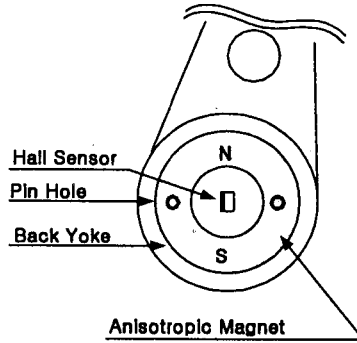


Fig. 7 Structure of Sensing Module

### 3.1 지배방정식<sup>(3)</sup>

이방성 영구자석에 의하여 발생하는 자기장을 해석하기 위하여 유한요소법 (Finite Element Method)을 도입한다. 변위전류와 유도전류를 무시할수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \mu_0 (H + M') \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

여기서  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율(permeability), A는 자기 벡터 포텐셜이다. 히스테리시스 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율  $\chi$ 로서

$$M' = \chi H \quad (4)$$

와 같이 표현되지만 해석 영역내에 히스테리시스 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량  $M'$ 은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항(reversible component :  $\chi H$ )과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비 가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼수 있다.

$$M' = \chi H + M \quad (5)$$

식(5)를 식(2)에 대입하면

$$H = vB - v_r M \quad (6)$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서  $v = 1/\mu$ ,  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $v_r = 1/\mu_r$ ,  $\mu_r = 1 + \chi$  이다. 이것을 식 (1)에 대입하면 식 (6)의 관계로부터

$$\nabla \times (v \nabla \times A) = J + v_r \nabla \times M \quad (7)$$

회전에 의한 벡터 관계식과 coulomb 게이지 조건에서 식 (8)과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot v \nabla) A = J + v_r \nabla \times M \quad (8)$$

### 3.2 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정 경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가중함수  $W$ 를 식 (8)에 곱한후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W \{ (\nabla \cdot v \nabla) A + J + v_r \nabla \times M \} d\Omega = 0 \quad (9)$$

Green 정리와 경계조건으로부터

$$\int_{\Omega} \{ -v \nabla W \nabla \cdot A + W J - v_r \nabla W \times M \} d\Omega = 0 \quad (10)$$

해석영역을 유한개의 요소로 나누고 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있다.

### 3.3 자기장 해석결과

Finger Arm 의 이방성 영구자석의 구조는 두께가 납작하여 2차원 근사 해석 조건이 성립하지 않기 때문에 본 연구에서는 3D로 해석하였다.

#### 3.3.1 back-yoke유무에 따른 해석

본 연구의 Finger Arm 에 사용되는 영구자석의 구조상 일반적인 경우와 달리 back-yoke가 있는 경우 오히려 Hall Sensor부분의 자기장이 절반이하로 감소함을 fig. 8에서 알 수 있다. 이것은 영구자석과 back-yoke의 구조상 영구자석에서

생성되는 자기장이 Hall Sensor로 집중되지 않고 back-yoke로 자로가 생성되기 때문이다.

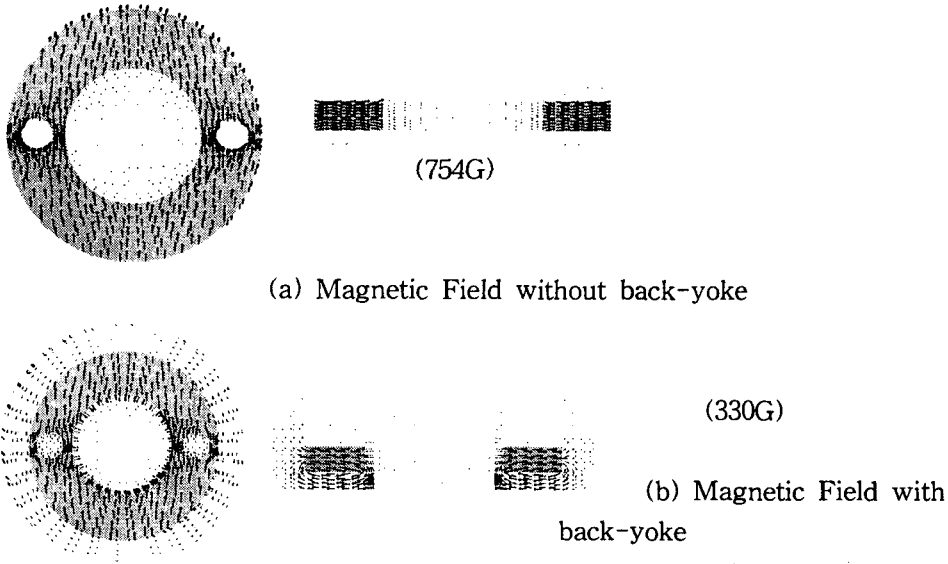


Fig. 8 Effects of the back-yoke

### 3.3.2 Magnet 크기에 대한 해석

Hall sensor 부위의 자기장의 크기를 키우기 위하여 마크네트의 내경은 16mm로 일정하게 하고 외경의 크기를 바꿔가며 해석한 결과 Table 1과 같다.

Table 1의 결과에 의하면 외경이 큰 영구자석의 경우 Hall Sensor 부위의 자기장이 오히려 작은 것을 알 수 있는데, 이것은 Finger Arm의 구조상 영구자석의 크기가 커짐에 따라 발생하는 역자계(Demagnetizing Field)도 함께 커지기 때문이다.

Table 1 Effects of the Magnet Size

| 외경의 크기  | 26mm | 30mm | 40mm |
|---------|------|------|------|
| 자기장의 크기 | 354G | 330G | 293G |

### 3.3.3 Magnet 위치에 대한 해석

앞 절에서 해석한 결과 back-yoke가 없는 경우가 있는 경우보다 더 큰 자기장이 나타남을 알 수 가 있었다. 이것은 magnet와 back-yoke가 너무 가까워서 자로가 magnet와 back-yoke로 형성되기 때문이다. 그러나 Finger Arm의 구조



상 back-yoke를 제거할 수 없으므로 본 연구에서는 magnet를 back-yoke에서 일정한 거리로 띄운 구조를 설계하였다. 이 경우 유한요소법에 의한 해석결과 띄우기 전보다 Fig 9와 같이 Hall Sensor 부위의 자기장을 3배정도 큰 값으로 얻을 수 있었다. 이것은 magnet와 back-yoke의 거리를 띄움으로써 Hall Sensor 부위로 자료가 형성되기 때문이다.

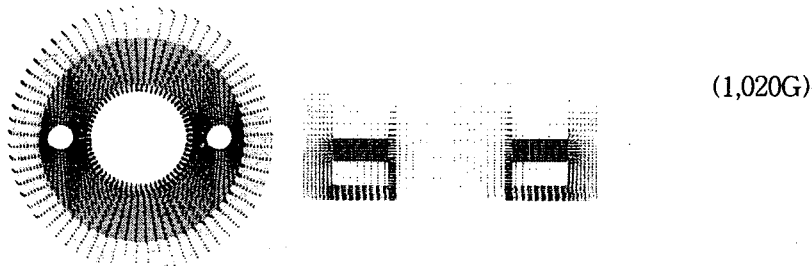


Fig. 9 New design of the magnet system

### 3.3.5 Finger Magnet의 최적설계

Hall Sensor 부위의 자기장을 크게 하기 위한 Finger Magnet의 최적설계 결과 영구자석의 크기는 내경이 16mm, 외경이 30mm이며, back-yoke가 영구자석과 3mm 떨어져 있을 경우 최적설계 이전에 비하여 약 3배정도 큰 값인 1,020[G]의 자기장을 얻을 수 있었으며 Hall sensor 부위에서 이정도 자기장이 얻어지면 Hall sensor의 출력값을 증폭할 필요가 없기 때문에 신호 증폭에 따르는 noise도 대폭 감소시킬 수가 있었다.

## 4. 성능 평가 실험 및 분석

제 3장의 최적 설계에 의해서 Photo. 1과 같은 캘리퍼 시스템이 제작되었다. 감도가 5 [mV/G]인 Hall Sensor를 사용한 결과 90~10[ ]의 각 변위에 대하여 증폭기 없이 0.3~4.9 [V]의 출력을 보이므로 제 3장의 해석결과 및 최적설계가 유효적절함을 보여준다. Fig. 10은 Finger Arm의 회전에 따른 Wheel의 높이 변화와 출력 전압과의 관계를 보이고 있다.  $H_D$ 는 식(11)과 같이 표현된다.

$$H_D = L \sin(\theta) + D \quad (11)$$

여기서  $L$ 은 Finger Arm의 길이이고,  $D$ 는 Wheel의 반경이다. 그리고 텐트의 크기  $S_D$ 는 Fig. 11에서의 각 채널의 Fitting 식  $f_i$ 를 이용하여 식(11)로 결정된다

$$S_D = f_i(V_2) - f_i(V_1) \quad (12)$$

캘리퍼 시스템의 성능은 임의의 덴트를 측정하였을 때 덴트의 실제 크기와 측정값( $S_D$ )의 오차로 평가된다. 따라서 캘리퍼 시스템의 성능 평가를 위해서는, 임의의 높이를 가지는 덴트와 이를 캘리퍼 시스템에 PIG가 임의의 속도로 주행하면서 작용시키는 것을 모사할 수 있는 시뮬레이터를 Photo. 2와 같이 제작하였다. 그리고 덴트는 2, 3, 5, 7, 10 [mm]의 크기로 제작되었다.

Table 2는 각각의 덴트에 대한 실험결과와 오차를 정리한 것이다. 실험은 시뮬레이터 Wheel을 일정한 속도로 회전시킨 상태에서 수행되었다. 시뮬레이터 Wheel의 회전속도를 선속도로 환산하면 1.9 m/sec]이었다. Table 2에서 확인할 수 있듯이 오차는  $\pm 1$  [mm]이내인 것을 알 수 있다. 현재 운영되고 있는 캘리퍼 시스템 중 성능이 우수하다고 인정받는 것의 오차는  $\pm 2.0$  [mm] 정도인 것을 생각하면 개발된 캘리퍼 시스템의 성능은 매우 우수하다고 판단된다..

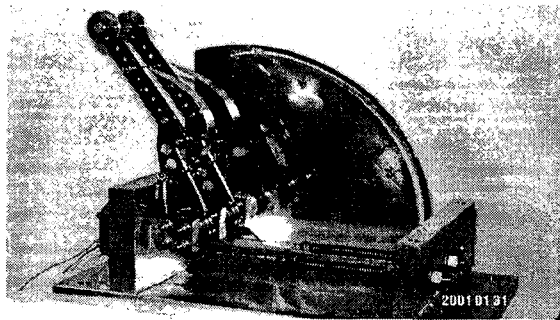


Photo. 1 Developed mechanical finger

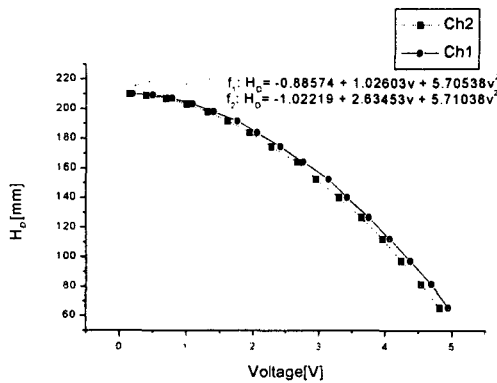


Fig. 10 Relations between sensor output and height of wheel

## 5. 결론

본 논문에서는 이방성 자석을 이용하여 비접촉이면서 탈부착이 쉽고, 구동드라이버 혹은 증폭기의 제작이 쉽고, 정밀도가 높은 캘리퍼 시스템을 개발하였고, 유한요소법에 의해서 이방성 자석 및 홀센서가 결합된 회전각 측정 시스템의 자기장을 분석하여 최적의 설계 방법을 제안하였고, 성능실험을 통하여 개발된 Mechanical Finger 시스템의 유용성을 검증하였다.

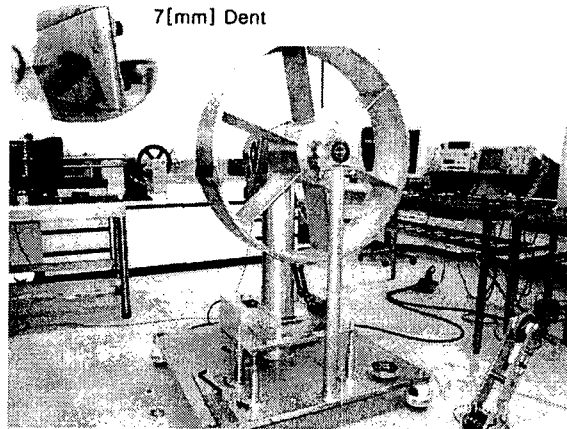


Photo. 2 Simulator for estimating the performance of the caliper system

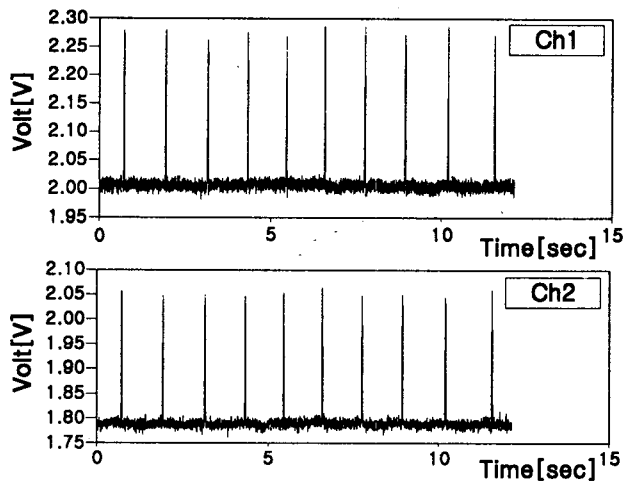


Fig. 11 Experimental results for 7[mm] dent

Table 2 Experimental results and errors

| Dent Size | Measured Value(Ch1) | Error | Measured Value(Ch2) | Error  |
|-----------|---------------------|-------|---------------------|--------|
| 2         | 2.1099              | +0.10 | 2.3881              | +0.38  |
| 3         | 3.1988              | +0.19 | 3.1728              | +0.17  |
| 5         | 4.9859              | -0.01 | 4.9359              | -0.06  |
| 7         | 6.8244              | -0.17 | 7.1401              | +0.14  |
| 10        | 9.8342              | -0.16 | 10.230              | +0.223 |

## 6. 참고문헌

- (1) Jim Cordell, C.Eng, M.I.Mech.E, F.Inst.Pet and Hershel Vanzant, 1999, "In-line inspection pigging", All about pigging., chapter 8, pp. 1~28.
- (2) Crouch A. E., 1993, "In-Line Inspection of Natural Gas Pipelines", Gas Research Institute Topical Report GRI -91/0365, pp. 12~16.
- (3) 박 관수, 한 송엽, 이 기식, 정 현교, 1992, "영구자석기기의 히스테리시스 특성해석을 위한 Preisach 모델", 한국자기학회지, 제 2권 2호, pp. 140~144.