

## 튜브탐상용 EMAT 제작 및 특성조사

안 봉 영 이 세 경  
한국표준연구소

1986년 3월 13일 접수

### Development and Characterization of the Electromagnetic Acoustic Transducer for Tubes

Bong young Ahn Se kyung Lee

#### ABSTRACT

Electromagnetic - Acoustic Transducers for the inspection of tubes were developed using permanent magnets and induction coils. The propagation velocity of ultrasonic waves in a tube wall was measured by the transducers. The position of a flaw in a tube and the relative size of flaws with different size were measured.

#### 1. 서 론

비파괴검사 방법중 초음파 탐상법은 현재 가장 널리 쓰이고 있는 방법중의 하나이다. PZT를 사용하는 초음파 탐촉자에 대하여는 많은 연구가 진행되고 있을 뿐 아니라, 실제 탐상에 많이 쓰이고 있으나, 경우에 따라서는 탐촉자와 탐상대상 재료간의 접촉이 어려운 경우가 많이 있다. 그러므로, 접촉시키지 않은 상태에서 초음파를 발생시킬 수 있는 방법이 필요하게 되었다. 1967년 Betjemann, Bohm, Meredith, Dobbs (1) 들은 고주파수의 와전류와 자기장의 상호작용으로 도체표면에서 초음파를 발생시킬 수 있

는 새로운 방법인 Electromagnetic - Acoustic Transducer (이하 EMAT라 함)에 대한 연구를 시작하였고, 이후 많은 연구가 진행되고 있다. EMAT는 도체표면 근처에 놓이는 유도코일에 의해서 도체표면에 유도되는 와전류와 외부의 자석으로 부터 가해지는 자기장과의 상호작용으로 도체표면 근처에 있는 이온들의 진동으로부터 초음파를 발생시키는 방법으로, 초음파의 발생 및 검출은 와전류 탐상법의 원리와 유사하며, 도체내의 에너지 전과, 결함검출, 재질 평가의 원리는 초음파 탐상법의 원리와 유사한 방법이다(2). EMAT를 이용한 탐상은 비접촉 방법이므로 열교환기 튜브와 같은 고온의 재

료에 대한 탐상이나 On-line에서의 신속한 탐상, 그리고 재료의 표면이 거친 경우의 탐상이 가능하며, 특히 물이나 기름등의 접촉매질에 의하여 손상받을 수 있는 재료의 탐상에는 효과적인 방법이다. 또한 와전류의 방향과 자기장의 방향을 조절함으로써 일반적인 초음파탐촉자로는 발생시킬 수 없는 SH-wave 등 여러가지 진동 mode 의 초음파를 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 튜브류의 탐상에 이용될 수 있는 내삽형 EMAT의 제작과 측정장비에 대하여 기술하였고, 제작된 EMAT를 이용하여 튜브에서 초음파의 전파속도를 측정 하였으며, 결함 검출능력에 대해 조사하였다.

## 2. 이 론

### 1) EMAT의 원리

도체가 전기장내에 놓이면 도체내의 이온들은 전기장에 의한 영향과 전자들과의 충돌에 의한 영향을 받는다. 전기장내에서 이온들은 전자들과 반대방향으로 운동하며, 전자들과의 충돌에 의하여 전자들이 갖고 있던 운동량을 전달받는다. 이러한 운동량 전달에 의한 힘은 전기장에 의해서 받는 힘과 크기는 거의 같고 방향이 반대이므로 이온들이 전기장내에서 받는 힘에 의한 효과는 무시할 수 있다. 그러나 자기장  $B_0$ 가 전기장내에 있는 도체에 가해지면 도체내의 전자들과 이온들은 식 1에 표시한 Lorentz 힘을 받게 된다. (Fig. 1)

$$F = qv \times B_0 \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $q$ 는 전하이며,  $v$ 는 전하의 속도이다.

전자들과 이온들은 운동방향과 전하가 서로 반대이므로 같은 방향의 힘을 받게 된다. 이때 전자들은 이온들에 운동량을 전달하고 이온들은 Lorentz 힘과 전자들로부터의 운동량 전달에 의하여 한쪽방향으로 움직인다. 가해진 전기

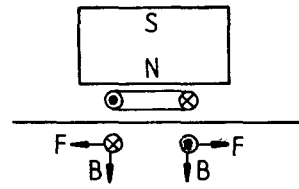


그림 1. Illustration of the ultrasonic wave generation mechanism

장이 시간에 따라 변하는 전류라면, 이온들의 운동도 시간에 따라 변하며, 이러한 이온들의 진동으로 부터 초음파가 발생된다. 초음파의 검출은 발생과 역과정이라 할 수 있다. 즉, 자기장  $B_0$ 가 있는 도체 표면에 초음파가 도달하면 전류가 형성되고 이 전류에 의해 도체표면 근처에 놓인 코일에 유도되는 기전력으로 부터 검출하게 된다. 전기장과 자기장에 의해 도체내의 이온들이 받는 힘은 결국 Lorentz 힘에 의한 것이므로 이때 이온들은 식 2의 운동방정식(3)을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - S^2 \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{c} |j \times B_0| \dots\dots\dots(2)$$

여기서  $u$ 는 이온들의 진동진폭이고,  $s$ 는 전파 속도이며, 식 2는 음향파장  $\lambda$ 가 skin depth  $\delta$ 보다 더 긴 경우에  $z > \delta$ 인 영역에서 적용될 수 있다.  $z > \delta$ 인 경우에 이온들의 운동에 대한 식 2의 해는 식 3과 같다.

$$U(z, t) = \frac{B_0 B}{4 \pi d s \omega (1 + \beta^2)^{1/2}} \exp(\omega t - kz) i \dots\dots\dots(3)$$

여기서  $d$ 는 도체의 밀도이고,  $k$ 는  $\frac{2\pi}{\lambda}$ 인 wave number이며,  $\beta$ 는  $\frac{(k\delta)^2}{2}$ 인 매개변수이다. 식 3에서 보면 이온들의 진동진폭은 자기장의 세기  $B_0$ 와 코일에 의한 교류 자기장의 세기  $B$ 에 비례하며, 도체의 밀도, 전파속도, 매개변수에 반비례 함을 알 수 있다. 전자기적 에너지를 역학적 에너지로 전환하는 효율은 식 4에 표시한

acoustic power  $p$ 에 의해 결정된다.

$$P = Ads u^2 \omega^2 = \frac{A B_0^2 B^2}{ds (1 + \beta^2)} \dots (4)$$

여기서  $A$ 는 도체의 모양에 따라 변하는 상수이다. 초음파를 검출할 때 검출된 power  $P_D$ 는 식 5와 같다.

$$P_D = \frac{B_0^4}{d^2 s^2 (1 + \beta^2)} \dots (5)$$

결국 검출되는 초음파는 자기장  $B_0$ 의 네제곱에 비례한다.

2) 튜브에서의 초음파 진행

튜브에서 축방향으로 진행하는 초음파는 Cylindrical coordinates에서 식 6(4)과 같다.

$$\begin{aligned} U_r &= A(r) \cos(\omega t + k_z) \\ U_\theta &= 0 \dots (6) \\ U_z &= c(\gamma) \cos(\omega t + k_z) \end{aligned}$$

여기서  $U_r$ 은 radial 방향의 변위이고,  $U_\theta$ 는 Azimuthal 방향의 변위이며,  $U_z$ 는 axial 방향의 변위이다.

식 6을 보면 튜브를 진행하는 초음파는 radial 방향과 axial 방향의 성분을 갖는다. 이런 두가지 성분의 초음파는 방향과 크기가 축에 대하여 대칭이며, axial 방향으로 진행한다. 튜브의 내경이 두께에 비하여 상당히 클 때에는 이러한 초음파는 Lamb wave로 간주할 수 있으므로 튜브를 진행하는 초음파의 진행속도는 튜브의 두께  $t$ 와 주파수  $f$ 의 곱인  $t \times f$ 에 따라 결정된다(5)

3. 실험

1) EMAT 제작

제작된 EMAT의 구조는 Fig. 2에 나타나 있다.

Fig. 2의 EMAT는 튜브내부에 들어갈 수 있도록 적당한 크기의 Disk형 영구자석을 사용하

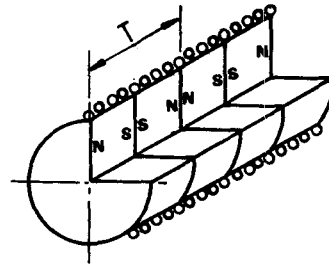


그림 2. Structure of EMAT for tube inspection

였다. 자석들의 크기는 모두 동일하며 같은 극끼리 주기적으로 접합하여 자석들이 만드는 자기장이 주기 T를 이룰 수 있도록 하였으며, 그 위에 축을 따라 코일을 감아서 튜브내면에 균일한 와전류가 형성될 수 있도록 제작하였다. 사용한 자석의 두께는 6mm이고, 직경은 15mm이었으며, 송신용 EMAT와 수신용 EMAT에 각각 4개씩 접합하였다. Fig. 2의 EMAT에 의해서 튜브에 생기는 와전류의 방향과 자기장의 방향, 그리고 이들의 상호작용으로 생기는 Lorentz 힘의 방향은 Fig. 3과 같다.

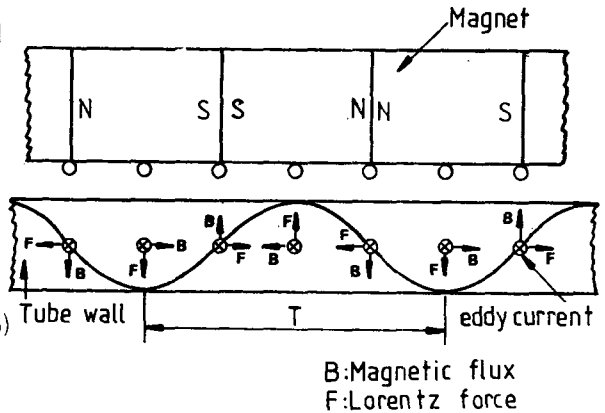


그림 3. Illustration of Lamb wave generation mechanism in the tube wall.

Fig. 3에서 보면 튜브내의 이온들이 받는 힘은 주기 T에 따라 변하므로, 튜브를 진행하는 초음파는 파장  $\lambda$ 를 가지며 축에 대하여 대칭방향으로 진행한다(4).

2) 측정장치  
 측정장치는 송신용 EMAT에 전기적 신호를 보내기 위한 pulse 발생 장치와 수신용 EMAT

로 받아들인 신호를 처리하기 위한 장치로 나눌 수 있으며, 그 대략도는 Fig. 4 와 같다.

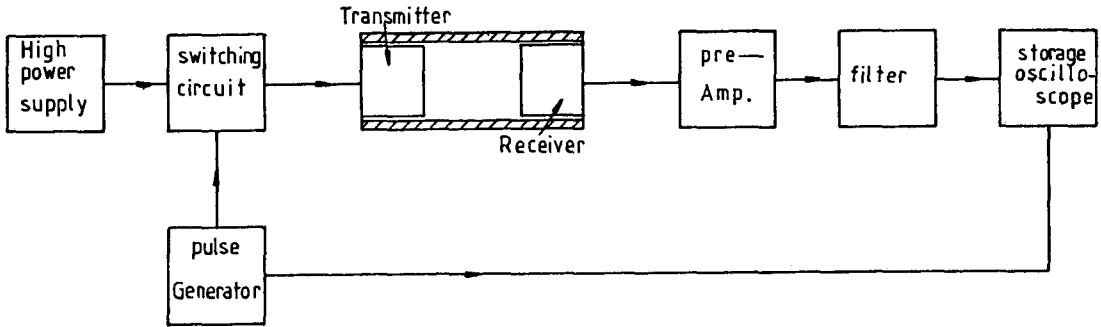


그림 4. Schematic diagram of measurement system

Pulse 발생 장치는 power supply와 pulse generator, 그리고 switching 회로로 나누어져 있다. Power supply로 부터 공급되는 직류전압을 pulse generator에서 나오는 신호의 시간간격만큼 switching 회로를 이용하여 switching 시킴으로서 비교적 짧은 시간간격을 갖고 진폭이 큰 pulse를 만들었다. 수신용 EMAT에서 받아들인 전기적 신호는 pre amp로 증폭한 후, filtering하여 storage oscilloscope에 보내어지고, storage oscilloscope에 내장된 기억장치를 이용하여 전달된 신호를 보관하고 분석하였다.

3) 측정방법

튜브내를 진행하는 초음파의 진행속도를 측정하기 위하여 튜브의 양끝에 송신용 EMAT와 수신용 EMAT를 각각 위치시키고 양끝에서 반복되는 신호의 도달시간을 측정하였다.

또한, 제작된 EMAT의 결함에 대한 반응을 조사하기 위하여 튜브외면에 인공결함을 가공하여, 앞에서 측정된 진행속도로 부터 결함의 위치를 측정하였으며, 결함 신호의 크기를 비교하여 결함의 크기를 상대적으로 비교해 보았다. 측정에 사용된 튜브의 길이는 500mm, 두께는 1 mm, 내경은 17mm이었고, 제작된 EMAT에 의해

서 발생된 초음파는 250kHz의  $S_0$ -mode였다. (6).

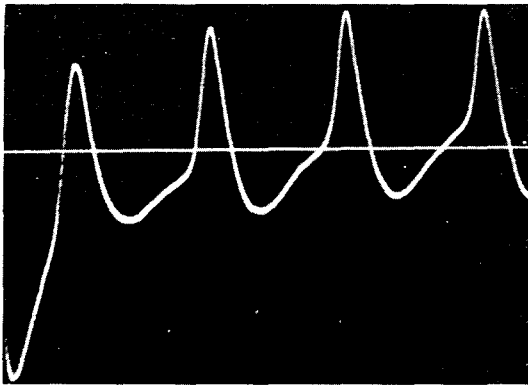
4. 결 과

1) 진행속도 측정

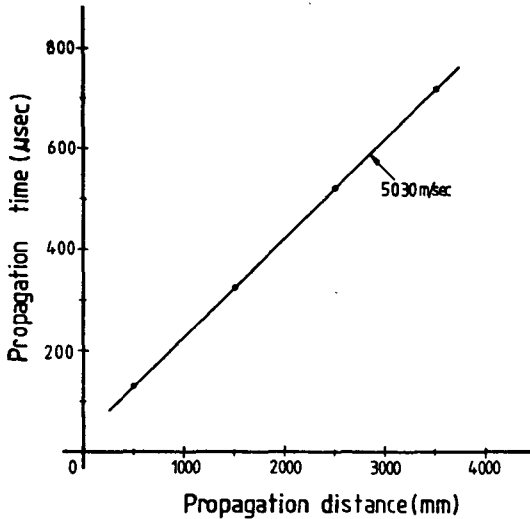
Fig. 5(a)는 송신용 EMAT와 수신용 EMAT를 길이가 500mm인 튜브의 양끝에 위치하였을 때 CRT상에 나타난 신호들이다.

여러개의 신호들이 반복하여 나타나는 것은 튜브의 양끝에서 반사된 초음파가 튜브를 여러번 반복하여 진행하기 때문에 나타난 신호들이다. 그러므로 신호들 사이의 시간간격은 진행되는 초음파가 튜브를 한번 왕복하는데 걸리는 시간이라고 해석할 수 있다. Fig. 5 (b)는 각 신호들의 진행시간과 진행거리를 직교좌표에 나타낸 그림이다. 이들의 관계는 그림에서 처럼 직선으로 나타나며 이 직선의 기울기로 부터 초음파의 진행속도를 계산하였다.

Fig. 5의 결과로 부터 계산된 튜브에서 초음파의 진행속도는 5030m / sec였다. 또한 초음파는 수십m까지 진행한 것이 관찰되어, 낮은 진폭 감소로 진행된다는 것도 알 수 있었다. 그러므로 이와같은 EMAT를 사용하면 긴 튜브의 탐상을 한번에 수행할 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. Results of the propagation velocity measurement.

(when the distance between two EMATs is 500 mm)

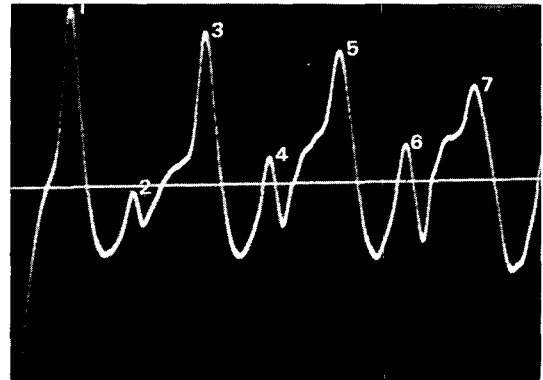
- (a) Photograph of the detected signals on CRT display.
- (b) relationship between propagation distance and propagation time.

2) 결함신호 검출

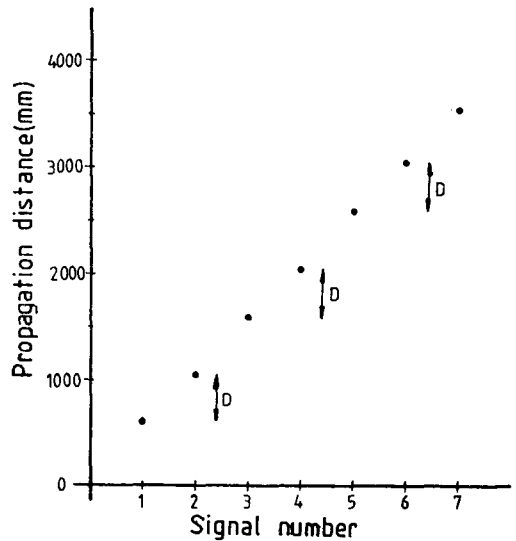
앞에서 계산된 초음파의 진행속도를 이용하여 결함으로부터 반사되어 수신용 EMAT에 도달하는 신호를 분석함으로써 결함의 위치와 결함의 상대적인 크기를 측정하였다. 결함은 인공적으로 튜브외면에 가공하였으며, 결함의 길이는 원주를 따라 길이 60mm의 결함과 30mm의 결함

을 0.5mm두께로 가공하였다. Fig. 6은 길이 60mm의 결함에 대한 측정결과이다.

Fig. 6(a)는 측정된 결함 신호이며, Fig. 6(b)는 앞에서 구한 진행속도를 이용하여 (a)의 신호들의 위치를 나타낸 그림이다. 또한, Fig. 7은 Fig. 6(a)의 각 신호들의 위치에서 나타날 수 있는 초음파의 경로를 설명한 그림이다. 결함의 위



(a)



(b)

그림 6. Results of the flaw position measurement. (flaw length is 60 mm)

- (a) Photograph of the detected signals on CRT display.
- (b) relationship between measured signals and flaw position Dis the distance from tube end to a flaw.

치가 튜브길이의 절반되는 곳이므로 Fig. 6 (a)의 신호 1은 튜브를 한번 진행한 신호이며, 나머지의 신호들은 여러개의 신호들이 합쳐진 형태로 나타난 신호이다. 그러나, 신호 2, 4, 6 과 같이 튜브길이의 짝수배 만큼의 경로를 진행한 신호의 위치는 결함에서 반사된 경우에만 나타날 수 있는 신호이므로, 이들의 위치를 계산하여 튜브의 한쪽 끝으로부터 결함까지의 거리를 알 수 있다.

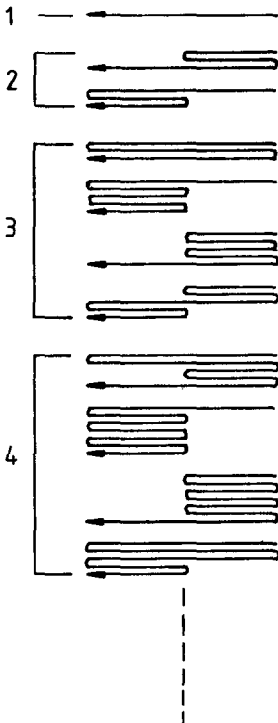
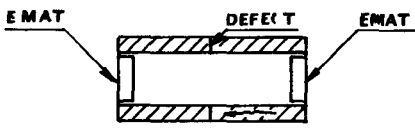


그림 7. Paths of ultrasonic wave reflected from tube ends and the flaw in tube.

결국 Fig. 6 (b)에 나타난 D는 모두 동일한 크기였으며 이들의 크기는 약 250mm였다. 그러므로 튜브에 가공한 인공결함의 위치와 일치하였다.

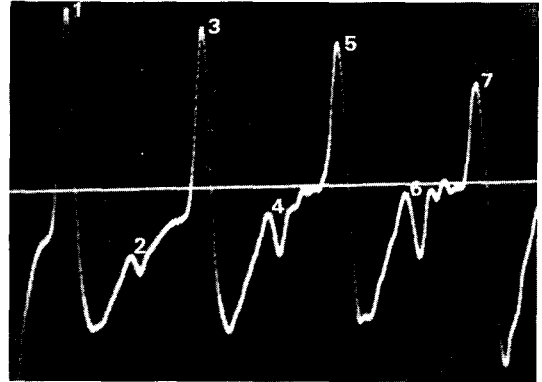


그림 8. Results of the flaw position measurement. (flaw length is 30mm.)

Fig. 8 은 결함의 길이가 30mm 경우의 신호이다. Fig. 6 (a)의 신호들과 Fig. 8의 신호들을 비교해보면, 신호 1, 3, 5, 7의 크기는 Fig. 8의 신호들이 더 크며, 신호 2, 4, 6의 크기는 Fig. 6 (a)의 신호들이 더 크다. 이는 진행하는 초음파에 대한 결함의 크기는 결함의 단면적에 거의 비례하기 때문이다(4). 즉, Fig. 6 (a)의 결함이 Fig. 8의 결함 보다 단면적이 더 크므로 결함이 있는 튜브에서만 나타날 수 있는 신호 2, 4, 6은 Fig. 6 (a)에서 더 크게 나타났으며, 상대적으로 신호 2, 4, 6의 크기가 커짐에 따라 튜브의 끝에서 반사되는 초음파의 영향이 지배적인 신호 1, 3, 5, 7의 크기는 작아지게 되므로, Fig. 8의 신호 1, 3, 5, 7은 Fig. 6 (a)의 같은 신호들에 비하여 더 크게 나타났다.

### 5. 결론 및 평가

튜브탐상용 EMAT를 자석과 코일을 이용하여 제작하였다. 제작된 EMAT로 두께가 일정한 튜브속을 진행하는 초음파의 진행속도를 측

정한 결과 5030m/sec로 측정되었다. 인공적으로 가공한 결함에 대한 신호를 측정한 결과, 가공된 위치와 일치된 신호를 얻었고 결함의 크기에 따라 신호의 크기가 변하여 상대적 크기를 비교할 수 있었다. 본 실험으로 부터 위와 같은 결과를 얻었으나 좀 더 진폭이 큰 pulse를 만들어 S/N비를 높이고, 식5에서 나타나 있는 것처럼 검출되는 power가 Bo의 네제곱에 비례하므로, 자기장의 세기를 높여서 탐촉자의 검출능력을 높이는 연구가 필요하며, 고온재료의 탐상을 수행할 수 있는 탐상장치의 개발과 판형 재료의 탐상등도 앞으로 계속 되어야 할 연구과제이다.

### 6. 참고문헌

1. A. G. Betjemann, H. V. Bohm, D. J. Meredith and E. R. Dobbs, Physics Letters, Vol. 25A(1967) pp. 753-4.
2. Katsuhiko Kawashima and R. W. Mc Clung, Material Evaluation, Vol. 34 (4) (1976) pp. 81-90
3. E. R. Dobbs and J. D. Llewellyn, Nondestructuve Testing, February (1971) pp. 49-56.
4. K. Morimoto, N. Arioka, S. Fukui and Y. Watanabe, The Nondestructuve Testing Journal, Vol. 2(2) (1984) pp. 89-95.
5. R. B. Thompson and R. K. Easley, A prototype EMAT System for Inspection of Steam Generator Tubing, EPRI NP-2836, (1983).
6. J. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer International Student Edition.

### \* 안 내 \*

1986년도 부터 우리학회 회원명단을 별책으로 발간코자하오니 근무처 및 현주소가 변경된 회원께서는 다음 양식에 의거 한국 비파괴검사학회 사무실(전화 583-7564)로 연락주시기 바랍니다.

아울러 당학회에서는 대체구좌 및 온라인을 개설하여 회비 납부에 편의를 도모토록 하였으니 많은 이용을 바라오며 온라인 이용시 전화나 서신으로 연락하여 주시기 바랍니다.

성 명 (영 문)	근 무 처 (전화번호)	현 주 소

온라인 구좌번호 : 348 - 4 - 046590

(조흥은행 서초동지점)

우편대체 구좌번호 : 013086 - 31 - 2004695

보내실곳 : 서울특별시 강남구 서초동 산62-3

한국비파괴검사학회 : 직원: 임 상 석  
박 영 희