FRP 박스부재의 결함평가를 위한 위상배열초음파 적용성 평가

Phased Array Ultrasonic Application for Defects Estimation of FRP Box Member

곽계환^{*†} · 양동운^{**} · 김호선^{***} · 이호현^{****} · 윤국현^{*****}

Kwak, Kae Hwan · Yang, Dong Woon · Kim, Ho Sun · Lee, Ho Hyun · Yun, Kuk Hyun

ABSTRACT

The structural material with the highest possibility of new materials that will be used in the future construction field is fiber reinforced polymer. The current studies on FRP members by using such excellent material characteristics mostly focused on stability, composite problem, and durability of FRP members. The initially constructed FRP members secure excellent stability and durability compared to reinforced concrete and steel materials, but measures for defections during the periodical inspection, methods for detecting breakages, and maintenance and reinforcement are not insufficient. Accordingly, this study proposed a measurement system using the FRP sensor to evaluate the safety of the FRP modular box member, and applied the phased array ultrasonic technique to detect the defects and damage likely to occur during the performance period.

Keywords: Phased array ultrasonic; FRP maintenance measurement; FRP defect evaluation

1. 서 론

초기 시공된 FRP (Fiber Reinforced Polymer) 부재의 경우 철근콘크리트나 강재에 비해 우수한 안전성 및 내구성을 확보하고 있으나 공용 기간 동안 발생하는 결함과 파손에 대한 검출 방법, 보수 및 보강에 관한 대책이 부족한 실정이다. 이러한 결함을 미연에 탐지하고 상시 감시가 가능해 진다면 FRP 부재의 수명 연장으로 인한 안전성 및 경제성을 확보할 수 있을 것이다. FRP 부재의 손상 검출에 관한 연구는 음파 방출을 통한 감지 초음파 속도를 이용한 검출, 적외선 열 조영술에 의한 검출, 광섬유에 의한 검출, 전자 기계 임피던스 스펙트럼을 이용한 검출, 전자화학적 임피던스 분광을 이용한 검출, 마이크로파를 이용한 검출 등이 있다 (KIMM, 1993). 그러나, 이러한 검출 방법은 경험이 풍부하거나 숙련된 기술자에 의해서만 가능하기 때문에 수집된 자료의 해석은 여전히 해결해야 할 부분이다. 계속적으로 구조물의 손실을 모니터링 하기 위해서는 기기

사용자의 불필요한 간섭을 줄이는 것과 자료 해석의 자동화가 중요하다. 다양한 시스템의 조작 여건과 시시각각 변하는 자연 환경은 구조물의 동적 반응의 해석에 있어 손상이라고 오인 해석될 수 있는 여지가 있으므로 구조물이 다양한 자연환경 및 시스템의 조작 여건에 노출될 경우 자료의 오인 해석을 최소화할 수 있는 비파괴 검사 (Non-Destructive Testing, 이하 NDT) 및 모니터링 방법 개발은 매우 중요하다.

다양한 NDT 방법 중 비파괴 초음파 탐상 기법은 현재 산업 구조물의 안전진단에 널리 사용되고 있는 기술로서 피검체에 손상을 주지 아니함은 물론 사용 중에 구조물에 내재하는 결함을 찾고 노후 상태를 비파괴적으로 파악함으로써 안전도를 평가하는 기술이다. 해외에서는 FRP에 초음파를 적용하고자 하는 연구가 활발히 수행 중에 있으나, 국내에서는 현재 상용중인 초음파 두께측정기만 조사되고 있다. 초음파 탐상기법 중 본 연구에서 적용 할 위상배열 초음파검사 기술은 몇 년 전까지만 해도 반향심전도기 (Echocardiography), 저체온마취법 (Hypothermia), 저체온심장수술기, 진단이미지, 그리고 OB 초음파 (OB Ultrasonography) 등 주로 의료분야에서만 활용되었으나, 많은 연구와 기술의 발달로 인하여 현재에는 비파괴 장비로의 응용 가능성이 높게 평가되고 있다 (Korea Expressway Corporation, 1997).

위상배열 초음파 기법은 작은 요소들을 구성된 센서에 일정한 지연시간 간격으로 요소를 가동시키면 원하는 방향으로 음파를 보낼 수 있고 한 점에 음압을 집중시킬 수도 있다. 또한,

* 원광대학교 토목환경공학과 교수공학박사
** (주)한양 공학박사
*** 원광대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정
**** 원광대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정
† Corresponding author Tel.: +82-63-850-6720
Fax: +82-0505-850-6867
E-mail: kkh6720@wku.ac.kr

2010년 7월 8일 투고
2010년 8월 27일 심사완료
2010년 9월 2일 게재확정

위상배열 초음파 센서는 복잡한 단면형상을 갖는 큰 구조물의 비파괴 검사과정을 단순화 할 수 있고 합성음파의 유동적인 조향 (Steering)과 초점화 기능 (원하는 곳에 음압을 집중시키는 기능)으로 높은 정밀도 (Sensitivity)와 해상도 (Resolution)를 갖는 특징이 있다. 이에 본 연구에서는 FRP 부재의 유지관리를 위한 손상검출을 위해 위상배열초음파 기법을 적용하여 활용 가능성을 “ASME XI에 따른 초음파 탐상 검사 규격”을 이용하여 검증하고자 하였다.

II. 위상배열의 기본원리

1. 위상배열 초음파 탐상검사의 특징

위상배열 초음파 탐상검사 기법은 다수의 압전소자 (Piezo-electric Element)들을 배열하여 하나의 몸체로 가공된 것으로써 각 압전소자에 대하여 작용하는 펄스 (pulse)의 시간지연을 조절함으로써 재료 내부에서 전파하는 초음파 빔을 동적으로 조향할 수 있는 기법이다. 시간지연 형태에 따라 초음파 빔의 동적인 집속도 가능하며, 기존의 초음파 탐상법에 비하여 기계적 구동부 없이 재료의 단면부를 실시간으로 영상화하여 재료 내부의 상태를 나타낼 수 있다. 다수의 압전소자를 사용하는 위상배열 초음파 탐촉자는 압전소자를 배열하는 방법에 따라 선형 (Linear), 평면형 (Planar) 및 환형 (Annular) 형태가 있다. 위상배열 초음파 탐촉자는 펄스에 적용하는 시간지연을 어떻게 주느냐에 따라 주사형태를 구현할 수 있다. 아래 Fig. 1은 적용된 시간지연에 따른 초음파 빔의 생성 형태를 나타내고 있다.

2. 위상배열 초음파 탐상검사 이론

초음파는 전압에 의하여 구동되는 압전소자에 의하여 탄성체 내에서 일어나는 기계적인 진동이라고 볼 수 있다. 일반적으로 초음파의 진동 주파수는 0.2 MHz~50 MHz의 범위이며 산업적인 응용에서 사용되는 초음파는 0.5 MHz~20 MHz의 범위이다. 일반적인 초음파 탐상검사는 하나의 진동자를 가지고 진

Fig. 1 Shape of ultrasonic beam for time delay

행경로에 따라서 초음파 에너지가 분산하는 경향을 가지고 있고 경사진 미세한 결함을 검출하기 위하여 하나의 굴절된 각도를 사용하여 검사를 수행한다. 만일 하나의 진동자가 폭이 길이보다 아주 적은 여러 개의 진동자로 분리되어 있다고 가정하면 각각의 작은 진동자는 하나의 선으로 간주할 수 있으며 이것을 원통형 파 (Cylindrical Waves)의 선원 (Linear Source)으로 고려할 수 있다. 이 작은 각각의 파는 위상과 진폭에서 시간지연 (Time delay)을 가질 수도 있으며, 동기화 (Synchronization)될 수 있다. 이러한 시간지연과 동기화를 이용하면 초음파 빔의 집속 (Focused)하고 조향할 수 있는 능력을 가지게 된다 (Lee, 2008). Fig. 2는 위상배열 탐촉자의 각각의 압전소자에 주어진 시간지연에 따라 초음파의 송신과 수신이 어떻게 이루어지는 가를 나타내고 있다.

3. 결함 평가 이론

가. 음압 감소 (Sound Pressure Drop)를 이용하는 방법

음압 감소를 이용하는 dB 감소 (Drop)법에는 최대 높이법 (Maximum Amplitude), 12 dB 감소법 또는 6 dB 감소법 등 여러 가지로 나누어 적용되고 있다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 6 dB 감소법은 결함에서 반사되는 최대 신호 진폭 값을 얻을 수 있는 위치에서 초음파 탐촉자를 최대 신호 진폭이 반

Fig. 2 Principle of phased array

A=Position of probe index for maximum echo signal
B & C = Position of probe index for 6 dB drop signal

Fig. 3 Principle of 6 dB drop signal

으로 강해지는 지점까지 이동하고 또 반대쪽으로 최대 진폭 값의 반으로 강해지는 지점까지 이동하여 그 거리를 결함의 길이로 정하는 방법이다. 또한, 최대 신호의 진폭이 발생하는 위치에서 탐촉자를 전 후로 전진시켜 진폭이 절반으로 떨어지는 위치에 대하여 각각 삼각함수를 이용한 위치를 계산하여 결함의 깊이를 측정하게 된다. Fig. 3은 6 dB 감소법의 원리 및 음압감소법에 의해 결함의 깊이를 측정하는 원리를 나타내고 있다.

나. ASME XI 에 따른 초음파 탐상 검사 규격

위상배열 기법에 의한 초음파를 통하여 측정된 FRP 박스부재의 결함 검출 성능을 평가하고자 하였으나, 조사된 바로는 정립된 비파괴 검사 결과 오차율을 비교·검토할 방안이 없는 실정이므로, 기존의 초음파탐상검사에 적용되는 규격을 이용하여 검출 성능을 평가하였다.

본 연구에서 초음파탐상검사에 적용하고자 하는 규격은 ASME (American Society of Mechanical Engineers) 및 ASTM (American Society of Testing Materials) 규격 중 초음파탐상 관련 규격이다. 현재 국내 전력 산업기술기준은 미국 규격을 바탕으로 하고 있고, 현재까지 건설 운전되고 있는 거의 모든 발전 설비는 ASME 또는 ASTM 규격/표준에 따라 제작, 건설, 설치, 운전, 보수유지 및 검사되고 있기 때문이다.

최근의 초음파탐상검사 관련규격을 선도하고 있는 ASME sec. XI의 Appendix VII 기량검증 요건은 원전의 가동중검사 초음파 탐상검사에 적용토록 미국에서 1999년 9월 22일 법으로 제정되었고, 이는 2000년 5월 5일부터 적용준비가 된 것부터 순차

Table 1 Performance demonstration detection test acceptance criteria

Type	Supplements 2	Supplements 4
Detection	■ Performance demonstration detection test acceptance criteria	
	-	■ $NFC \leq A/10$ (integer)
Length Sizing	■ $ L_m - L_t \leq 0.75"$ (19 mm)	■ $-1/4" \leq L_m - L_t \leq 1"$
Depth Sizing	■ $RMSE \leq 0.125"$ (3.2 mm)	① $d_m \leq d_t - 0.2"$ ② $d_{md} < 0.25"$
Note	1. N_{FC} : False call number 2. A : Scan area (ft^2) 3. L_m : Measure length 4. L_t : True length 5. d_m : Measure depth 6. d_t : True depth 7. $RMSE$: Root Mean Square Error 8. d_{md} : Mean deviation of depth	

적으로 3년 이내에 모두 적용토록 요구하고 있다 (Kim, 2000). 그 동안의 초음파탐상검사에 대한 규격이 서술형으로 탐촉자 크기, 주파수, 장비, 등에 대한 사항을 기술하였지만, 그런 규정을 엄격히 따르다 하여도 결함을 정확히 검출 평가한다는 측면에서는 정확성과 신뢰성이 없기 때문에 새로운 규격 형태인 기량검증으로 바뀌어 가고 있다. 이는 어떤 탐촉자, 장비, 기법을 사용하든 기술에 관한 사항은 전혀 명시하지 않고 단지 사용하고자 하는 절차서에 검사에 미치는 모든 필수 변수를 포함한 검사기술을 명시하고 그 절차서, 장비, 검사자를 결함 있는 시험편으로 시험하여 일정 이상의 결함을 검출하는 것이 바로 기량검증 요건이다. Table 1은 보완요건 2와 4에 대한 기량검증 시험 결함평가 합격기준을 나타냈다.

III. 실험 장치 및 방법

1. 실험용 시편

위상배열 초음파 검사에 사용된 FRP 박스 부재의 시편은 Fig. 4와 같이 Kwak et al. (2008)이 수행한 2 m, 3 m 4점 휨 파괴 시험체 중 결함이 육안으로 확연히 검출 가능한 시험체 10개를 선정하여 실험을 수행하였다 (Fig. 5). FRP 부재의 휨 파괴 특성에 따라 중공 FRP 박스 부재의 경우 응력 집중 부위인 중앙 상부 플랜지와 충전된 FRP 박스 부재의 경우에는 지점부 웹 부분에 대하여 각각 위상배열 초음파 검사를 수행하였다.

2. 위상배열 초음파 탐촉자 및 장비

위상배열 초음파 탐촉자는 여러 개의 압전소자를 배열하여 하나의 몸체에 가공한 것으로써 각 압전소자의 형상이나 간격

Fig. 4 FRP module box member

(a) Upper hollow specimens

(b) Upper filled specimens

Fig 5. Cracks of FRP box member (Kwak at al., 2008)

에 따라 초음파의 음장 (Sound Field) 또는 조향 (Steering) 특성이 다르게 나타나므로 검사대상 및 검사목적에 맞도록 위상배열 초음파 탐촉자를 사용하여야 한다.

Udaya at al. (2007)은 FRP 부재에 균열 검출에 초음파 기법의 적용 가능성을 확인하였으며 초음파 기법의 경우 주파수 범위가 약 1 MHz를 사용하는게 적절하다. 본 연구에서 사용된 측정장치의 주파수는 1.5 MHz로서 FRP 부재의 결함판정에 적합하도록 설계되었으며, 소자 수는 FRP 박스부재의 두께에 따라 적용할 수 있도록 다양하게 적용하였다. 본 연구에서는 사용 제품으로써 시스템조작과 이동이 간편한 위상배열초음파 장비인 OMNISCAN에 복합재료에 적합한 보드를 장착하고 실험을 실시하였으며, Fig. 6에 사용 장비를 나타내었다.

3. 실험 방법

FRP 박스부재의 검사영역은 ASME Code Sec. XI에 따라

FRP 박스부재 두께의 1/3 영역과 결함영향부위를 중점적으로 하였다. Fig. 7과 같이 검사부위에 Ultragel을 도포한 뒤 탐촉자를 종방향으로 밀착시킨 후 0.5mm/sec의 속도로 결함부위를 탐상하여 균열 깊이와 함께 균열 길이를 조사하였다. 결함영향부위는 FRP 박스부재의 파괴실험 시 지점부의 파괴가 주를 이루었으므로, 하중 재하지점 및 지점부를 중심으로 결함부위를 모니터링 한 뒤, Fig. 8과 같이 시험체를 절단하여 결함 깊이를 측정하였다.

Fig. 6 Phased array ultrasonic apparatus

Fig. 7 Testing view of phased array ultrasonic

Fig. 8 View of cut specimens

IV. 결과 및 고찰

음압감소를 이용하여 결함의 깊이를 평가하는 방법 중 일반적으로 많이 사용되는 평가 방법으로는 6 dB 감소법 (6dB Drop Method), 12 dB 감소법 (12 dB Drop Method), 전체 감소법 (Fully Drop Method)이 있다. 본 절에서는 위상배열 초음파 탐촉자에 의해 취득된 신호를 이용하여 각 방법을 적용하여 평가를 수행하고 FRP 박스 부재의 결함 깊이를 측정하는데 ASME Sec. XI를 이용하여 최적의 평가방법을 결정하였다.

1. 실험 결과

취득된 신호를 토대로 결함 신호가 최대가 되는 위치를 선정하여 최대 신호 값으로부터 좌우로 6 dB, 12 dB씩 감소할 때까지 움직여서 그 깊이를 평가하는 6 dB 감소법, 12 dB 감소법을 적용하여 분석하였으며, 또한 최대값으로부터 좌우로 잡음 신호 수준까지 움직여서 그 깊이를 평가하는 전체감소법도

Table 2 Result using 6 dB drop method

Specimens No.	Specimens thickness (mm)	Test length (mm)	Test depth (mm)	Real depth (mm)
1	14	16	9	12
2	14	28	5	7
3	10	25	8	10
4	10	31	6	8
5	25	36	5	7
6	25	22	14	20
7	27	29	12	16
8	27	34	10	15
9	10	16	7	8
10	14	23	6	8

Table 3 Result using 12 dB drop method

Specimens No.	Specimens thickness (mm)	Test length (mm)	Test depth (mm)	Real depth (mm)
1	14	16	12	12
2	14	28	10	7
3	10	25	9	10
4	10	31	6	8
5	25	36	10	7
6	25	22	19	20
7	27	29	18	16
8	27	34	11	15
9	10	16	9	8
10	14	23	10	8

함께 적용하였다. Table 2~Table 4는 6 dB 감소법, 12 dB 감소법, 전체 감소법에 의해 FRP 박스 부재의 결함 깊이를 평가한 결과이다. 평가 결과 측정 길이는 감소법에 무관하게 같은 값으로 조사되었고, 6 dB 감소법은 전반적으로 실제 결함 깊이에 비해 다소 작게 측정되는 경향이 나타나고 있으며, 12 dB 감소법은 실제 결함 깊이와 가장 유사히 나타났다. 또한, 전체 감소법에 의해 평가한 결과 값은 실제 결함 깊이에 비교하여 다소 큰 값을 평가하는 것으로 분석되었다.

Fig. 9와 같이 6 dB 감소법이 다소 낮게 평가되었으나 감소 폭은 일정하게 조사되었으며, Fig. 10~Fig. 14는 각 시험체의 평가 결과를 실제 깊이와 비교하여 나타내었다.

2. ASME XI에 따른 결과 분석

위상배열 기법에 의한 초음파를 통하여 측정된 FRP 박스 부재의 결함 검출 성능 평가 결과 값은 세가지 감소법에 의해 구해진 결과 값을 이용하였으며, 결함평가 기준은 ASME (American Society of Mechanical Engineers)의 ASME Code Sec. XI, App, VIII의 기량검증 보완요건 2 및 4에 적용하여 평가하였다 (Cho et al., 2004).

Table 4 Result using Fully drop method

Specimens No.	Specimens thickness (mm)	Test length (mm)	Test depth (mm)	Real depth (mm)
1	14	16	13	12
2	14	28	12	7
3	10	25	10	10
4	10	31	6	8
5	25	36	15	7
6	25	22	20	20
7	27	29	20	16
8	27	34	14	15
9	10	16	9	8
10	14	23	12	8

Fig. 9 Result analysis of each drop method

Fig. 10 Result of No. 1 specimens

Fig. 12 Result of No. 5 specimens

Fig. 11 Result of No. 3 specimens

Fig. 13 Result of No. 7 specimens

보완요건 2에 의한 깊이 시험 결함평가 합격 기준은 RMS (Root Mean Square) 계산법에 따른 값의 허용 범위와 비교하여 합격기준을 판정하는 것으로 RMS는 식 (1)에 의하여 산정한다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n}} \quad (1)$$

여기서, m_i : 검사에서 측정한 결함 깊이

t_i : 실제 결함 깊이

n : 측정한 결함의 수

FRP 박스부재의 위상배열 초음파 측정결과 RMS 값은 6 dB 감소법은 3.27 mm, 12 dB 감소법은 2.21 mm, 전체 감소법은 3.58 mm로 계산되었다. 이에 보완요건 2에 12 dB 감소법이 미소결함 합격기준인 0.125" (3.2 mm)보다 작게 조사

Table 5 Pass standard of Flaw using ① method of supplements 4

Specimens	d_m (mm)			d_t (mm)	$d_t - 0.2"$ (5.08 mm) (mm)	$d_m \leq d_t - 0.2"$ (5.08 mm)		
	6 dB drop	12 dB drop	Fully drop			6 dB drop	12 dB drop	Fully drop
1	9	12	13	12	5.92	O.K	O.K	O.K
2	5	10	12	7	1.92	O.K	O.K	O.K
3	8	9	10	10	4.92	O.K	O.K	O.K
4	6	6	6	8	2.92	O.K	O.K	O.K
5	5	10	15	7	1.92	O.K	O.K	O.K
6	14	19	20	20	14.92	N.G	O.K	O.K
7	12	18	20	16	10.92	O.K	O.K	O.K
8	10	11	14	15	9.92	O.K	O.K	O.K
9	7	9	9	8	2.92	O.K	O.K	O.K
10	6	10	12	8	2.92	O.K	O.K	O.K

Fig. 14 Result of No. 9 specimens

되었다.

또한, Table 1의 보완요건 4의 ①식에 의한 결함평가 합격 기준을 판명하기 위하여 각 측정지점별 d_m 과 d_t 의 비교를 다음 Table 5에 나타냈으며, Table 5에서 나타나는 것과 같이 12 dB 감소법 및 전체 감소법의 모든 시험체가 ‘합격’으로 조사되었다.

보완요건 4의 ②식에 의한 결함평가 합격기준을 평가하기 위해 다음 식 (2)를 이용하여 깊이의 평균 편차를 구하였다.

$$d_{md} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_t - d_m| \quad (2)$$

여기서, d_m : 측정 깊이

d_t : 실제 깊이

d_{md} : 깊이의 평균편차

보완요건 4의 ②식에 의한 깊이의 평균편차 값은 6 dB 감소법은 2.9 mm, 12 dB 감소법은 1.9 mm, 전체 감소법은 2.6 mm로 계산되어 0.25" (6.35 mm)보다 작게 측정되어 결함평가가 합격기준인 것으로 조사되었다.

V. 결 론

위상배열 초음파 기법을 이용한 FRP 박스부재의 결함을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 위상배열 초음파 탐상결과 6 dB 감소법에 의한 깊이는 실측치보다 낮게 나타나는 경향이 조사되었으며, 12 dB 감소법은 가장 비슷한 경향이 조사되었다. 또한 전체 감소법은 비교적 큰 값을 나타내는 경향이 조사되었다.

2. 6 dB 감소법과 12 dB 감소법 및 전체 감소법에 의하여 구해진 결함깊이를 ASME XI의 보완요건 2에 의한 깊이 시험 결함평가가 합격 기준인 RMS를 이용하여 평가한 결과 12 dB 감소법이 2.21 mm로서 가장 낮게 평가되었다.

3. ASME XI의 보완요건 4에 ①식에 의한 깊이 시험 결함평가 결과 12 dB 감소법 및 전체 감소법의 모든 시험체가 ‘합격’으로 조사되었다.

4. ASME XI의 보완요건 4에 ②식에 의한 깊이 시험 결함평가 결과 모두 ‘합격’으로 조사되었으며, 12 dB 감소법이 1.9 mm로서 가장 낮게 평가되는 것을 확인할 수 있었다.

5. FRP 박스부재에는 12 dB 감소법에 의한 평가가 비교적 가장 정확한 것으로 분석되었으며, 6 dB 감소법에 의해 평가된 결함은 실제의 결함보다 항상 작게 평가되는 것으로 분석되었으나 감소 경향이 비교적 일정한 경향을 나타내고 있었다. 추

후 연구를 통하여 보완계수를 적용할 경우 더욱 정확한 방법이 될 수 있을것이라 사료된다.

6. FRP 박스 부재에 위상배열 초음파를 적용한 결과 초음파 탐상규격과 비교했을 때, FRP 박스 부재의 결함 위치 및 크기 정보의 비교적 정확한 검출 성능을 확인할 수 있었다.

본 연구는 2010년도 원광대학교 교비 지원에 의해 연구되었습니다.

REFERENCES

1. ASME B & Code. Sec. XI, 1999, Rules for inservice inspection of nuclear power plant components.
2. ASTM Specification SA 578/A, 578M-92, Standard Specification for Straight-beam Ultrasonic Examination of Plain and Clad steel Plates for Special Applications.
3. Cho, Y. S., Jung, G. J., Park, S. K., Kim, J. H., 2004, A Study on a Crack Evaluation Technique for Turbine Blade Root Using Phased Array Ultrasonics, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing* 24 (2): 151-157 (in Korean).
4. Kim, H. M., Assessment of Statistical Reliability of Ultrasonic Nondestructive Inspection, Seoul National University a master dissertation (in Korean).
5. KIMM., 1993, The study on the Development of Quality Evaluation Techniques for Composite materials (III), Ministry Of Education, Science And Technology (in Korean).
6. Korea Expressway Corporation, 1997, Development and Application of Bridge Management System, Expressway & Transportation Research Institute (in Korean).
7. Kwak, K. H., Chung, S. M., Sung, B. K., Jang, H. S., 2008, A Study on Fracture Behavior for FRP Composite Girder Filled with Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute* 20(1): 59-66 (in Korean).
8. Lee, H., 2008, Phased Array Ultrasonic testing technique, Korea Association of Machinery Industry, *Machinery Industry* 38(6): 372: 71-77, (in Korean).
9. Udaya, B. H., Hota, G. R., Hema, J. S., Powsiri, K., 2007, Review of Nondestructive Evaluation Techniques for FRP Composite Structural Components, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West virginia.