

토출관 접합계면 평가를 위한 초음파 시험법 개발

김영환* · 송성진** · 박준수*** · 조현*** · 임수용**** · 윤남균**** · 박영주****

Development of Ultrasonic Testing Method for Evaluation of Adhesive Layer of Blaster Tube

Y. H. Kim* · S. J. Song** · J. S. Park*** · H. Cho*** · S. Y. Lim**** · N. G. Yun**** · Y. J. Park****

ABSTRACT

Ultrasonic testing method has been developed to evaluate flaw of adhesive layers in blast tube for the reliability of the rocket nozzle. The ultrasonic reflection from the interface between the steel sheet and the epoxy adhesive is measured with a high-frequency pulse-echo setup in order to identify contact debonding and missing adhesive in epoxy layer between steel and FRP layers. The steel sheet is resonated by low-frequency ultrasound, and the gap size underneath the measuring location is estimated from the resonance responses. For practical application in industry an automated testing system has been developed where the proposed approach is implemented. The performance of the proposed approach has been verified by actual measurement of gap sizes from the cross-sections of cut specimens using an optical microscope.

초 록

로켓 노즐부의 토출관에 대한 신뢰성을 위하여 접합계면의 결함유무를 평가하기 위한 초음파 시험법을 개발하였다. 본 연구의 주된 목적은 철판과 FRP 사이의 에폭시 접합계면에서 미접착 부위와 미충전 부위를 찾아내는 것이다. 미접착부나 미충전부를 찾아내기 위해서 고주파수 초음파 펄스-에코를 이용하여 철판과 에폭시 접착체 사이의 경계면에서 반사되는 초음파 신호를 측정하였다. 결함이 있는 부위의 gap의 크기를 평가하기 위해서 저주파 초음파를 이용하여 공진이 일어나도록 철판을 가진하였다. 이러한 기법을 이용하여 양산품을 검사하기 위한 자동화 장치를 개발하였다. 검사기법을 검증하기 위해서 초음파 시험을 수행한 토출관을 절단하여 현미경으로 gap을 측정하였다.

Key Words: Ultrasonic Testing(초음파 시험), Blast Tube(토출관), Adhesive Layer(접합계면)

1. 서 론

† 2003년 12월 1일 접수 ~ 2004년 2월 14일 심사완료

* 정회원, 성균관대학교 기계공학부

** 종신회원, 성균관대학교 기계공학부

*** 학생회원, 성균관대학교 기계공학부

**** 정회원, 국방과학연구소

연락처, E-mail: yhkim@skku.edu

구조물의 중요한 부분들에는 뛰어난 기계적 특성을 가지는 고성능 재료들이 사용된다. 단일 재료를 사용하여 고강도, 높은 절연성 그리고 내부식성과 같은 특성들을 동시에 만족시키기는

어렵지만, 다층접합 재료는 이러한 문제들을 해결할 수 있다. 로켓 노즐의 토출관의 경우에는 높은 온도와 압력을 견뎌 내야 하므로 고강도의 높은 절연성을 가진 재료를 사용하여야 한다.

FRP와 같은 복합재료는 절연성이 좋지만 토출관의 압력을 견디기에는 강도가 충분하지 못하고, 강재는 높은 강도를 가지나 연소관의 열을 절연할 수 가 없다. 그러므로 복합재료를 강으로 둘러싼 다층접합 재료는 연소관의 재료로 사용될 수 있는데, 복합재료 층은 연소열을 절연하며 강철 층은 연소관의 높은 압력을 견디어 낸다[1,2]. 이들의 두께는 연소가스로 인한 압력을 견딜 수 있는 범위 내에서 가급적이면 얇게 만들어서 그 무게를 감소시킨다.

이러한 다층재료가 제 기능을 발휘하기 위해서는 층간의 접합이 잘 이루어져야 한다[3,4].

토출관은 steel, epoxy, 그리고 FRP 복합재의 3층 구조물로 이루어졌는데, 이러한 이종재료의 접착 계면 중에서 steel과 FRP 접합계면에 결함이 존재할 경우에는 추진기관의 작동 중에 화염이 전파되어 토출관의 파손이나 추진기관의 폭발이 발생할 수 있기 때문에, 철저한 접착계면에 대한 품질보증시험이 요구된다.

다층재료의 접합특성 평가는 오랫동안 많은 논의가 있어왔으며 초음파법을 비롯하여 많은 기술들이 개발되어왔다. 초음파 검사법은 시험편의 손상이 없이 각 층의 특성 뿐만 아니라 접합 상태를 평가할 수 있는 잠재력이 있다. 토출관의 경우에 방사선 투과 시험은 비용이나 검사 시간과 같은 현실적인 제약이 있고, 철피와 에폭시의 밀도차가 매우크기 때문에 방사선 투과 시험을 적용하기가 어려우며, 미접착의 간격이 방사선 투과시험의 해상력 이하일 경우에는 결함을 검출할 수 없다는 단점이 있다.

토출관의 접합계면 상태는 크게 정상접합, 미접합(debonding), 미충전(missing adhesive)의 3가지로 나눌 수 있다. 정상접합은 에폭시가 철피와 FRP면에 잘 접합된 경우이고, 미접합은 에폭시가 채워져 있으나 철피면에 접합되어 있지 않은 경우이며, 미충전은 에폭시가 채워져

있지 않은 경우이다. 토출관의 경우 미접합일 때에는 구조적으로 그리 큰 문제가 되지 않는다는 것이 알려져 있다. 따라서 미접합을 불량품으로 판정할 경우 생산원가가 상승하기 되기 때문에 미접합과 미충전은 필히 구별되어야한다. 일반적인 초음파 시험은 정상접합과 비정상접합(미접합, 미충전)을 구별할 수 있지만 미접합부나 미충전부에서 반사되는 초음파 신호의 크기가 같기 때문에 이들을 구별하기 힘들기 때문에 새로운 기법이 요구된다.

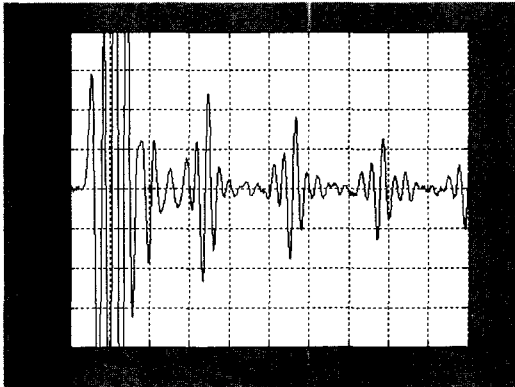
따라서 본 연구에서는 고주파수를 이용한 일반적인 초음파 펄스-에코 시험법을 사용하여 정상접합여부를 판별하였으며, 저주파수 초음파를 이용한 공진법을 사용하여 미접합과 미충전을 구별할 수 있는 기법에 대하여 연구를 수행하였다. 이들 기법을 바탕으로 자동초음파 탐상장치를 개발하였으며, 또한 파괴시험을 통하여 비파괴 탐상법의 신뢰성을 확인하였다

2. 본 론

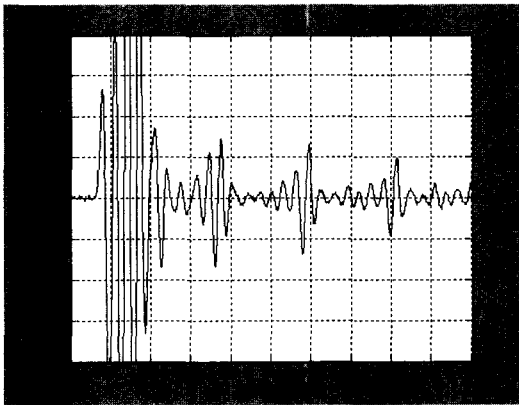
2.1 고주파수 초음파 펄스-에코 시험

20 MHz 수침용 초음파 탐촉자를 사용하여 고주파수 초음파 펄스-에코 시험을 수행하였다. Fig. 1 (a)는 비정상 접합인 토출관에서 획득한 RF 신호이고, (b)는 정상 접합인 토출관에서 획득한 RF 신호이다. $0.5 \mu s$ 이전의 신호는 초음파가 토출관의 표면에서 반사되어 되돌아온 신호이고, 그 이후의 신호는 철판과 에폭시의 접착계면 사이를 오가면서 다중 반사된 신호들이다. 토출관의 표면 조건과 탐촉자와 철판 사이의 거리 등에 따른 RF 신호의 진폭변화를 보정하기 위해 표면에서 나온 초기 펄스의 크기가 같도록 하였다. 정상접합인 토출관과 비정상접합 토출관의 표면에서 반사된 RF 신호의 진폭을 같도록 하였으며, 철판과 에폭시 계면에서 반사된 펄스의 진폭비를 고찰하였다. 비정상적인 토출관의 진폭비는 1:0.2 으로 이는 정상적인 토출관에서의 진폭비 1:0.1 보다 두 배정도 큰 값이었다. 이는 철판과 에폭시 계면의 접합이

잘 되었으면 철판으로 투과한 초음파 에너지의 일부가 에폭시 층으로 투과되어 흡수되기 때문에 진폭이 작아지는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 1 RF signal of 20MHz ultrasound for (a) an abnormal blast tube and (b) a normal blast tube

2.2 공진법

공진현상은 시험체에 가해진 초음파의 진동수와 시험체의 고유진동수가 일치할 때 진동의 진폭이 커지는 현상으로, 이를 이용하여 토출관의 미접합 및 미충전을 구별하는데에 적용하였다. 공진이 일어날 경우에 철판이 진동하는 진폭이 커지는데, 미접착의 경우에는 철판과 에폭시 사

이의 간격이 좁아서 철판이 자유롭게 공진할 수 없는 반면에, 미충전일 경우에는 에폭시와 철판의 간격이 크기 때문에 공진이 자유롭게 일어난다[5,6].

시험체 내에서 공진이 일어나 파가 정상파로 고정될 때 초음파 파장과 두께와의 관계를 살펴보면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{\lambda}{2} \times n \quad (1)$$

여기서, d 는 시험체의 두께, λ 는 초음파의 파장, n 은 반파장의 횟수이다. 두께 1.3 mm인 토출관의 철판에 대한 공진주파수는 2.27, 4.54, 6.81 MHz, ...이다.

공진법을 이용하여 미접합부와 미충전부를 구별할 수 있는지 알아보기 위해서 Fig. 2와 같이 pitch-catch 기법을 이용하였다. 두 탐촉자의 중심간 거리는 30 mm이고 접촉법을 사용하였다. 중심주파수가 2.25 MHz인 초음파 탐촉자를 이용하여 미충전 및 미접합 토출관에 대하여 초음파 공진 시험을 수행하였다.

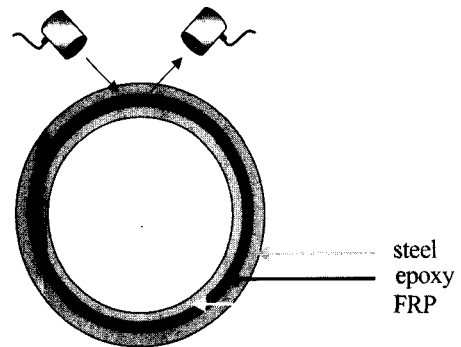
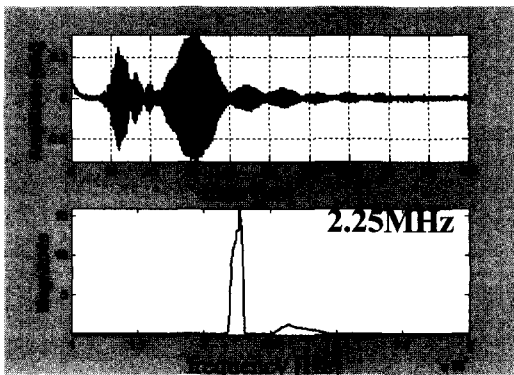


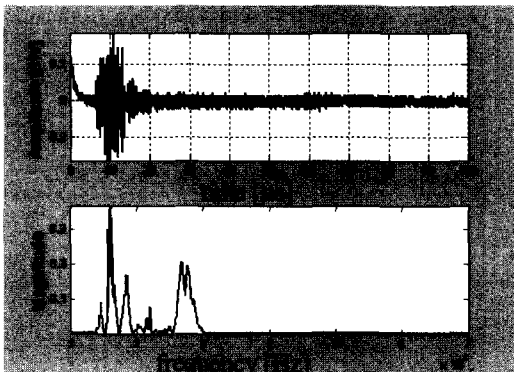
Fig. 2 Pitch-catch setup for the ultrasonic resonance inspection of blast tube

Figure 3은 2.25 MHz를 탐촉자를 이용하여 미충전 및 미접착 시험편에서 획득한 RF신호와 FFT의 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 미충전인 시험편에서 얻은 RF신호는 미접합 시험편에 비하여 매우 큰 공진 현상이 일어나고 있으며, FFT의 결과는 2.25

MHz에서 매우 뚜렷한 peak를 보이고 있다. 이는 앞에서 계산한 이론적인 공진주파수 중에서 가장 낮은 주파수(기본공진주파수)인 2.27 MHz와 잘 일치함을 알 수 있다. 미접합 계면에서 획득한 RF 신호에서 특별한 공진현상을 발견할 수 없었다. FFT 결과에서는 미접착에서도 peak가 나타난 것처럼 보이지만 진폭의 스케일이 미충전의 경우에 비하여 1/50정도이며, FFT 결과에서 뚜렷한 peak를 찾기가 어려웠다.



(a)



(b)

Fig. 3 RF signals and FFT results in the (a) uncharged state, and (b) debonding states using the 2.25 MHz

2.3 검사장비 개발

검사기법을 위한 연구 결과를 바탕으로 토출관 접합계면 평가를 위한 자동 초음파 탐상장치

를 개발하였다. 토출관 전용 초음파 검사장비는 Fig. 4에 보인 바와 같이 크게 제어부와 스캐너부로 구성되어 있다. 탐촉자는 20 MHz 수침형 탐촉자와 2.25 MHz 수침형 탐촉자를 이용하며, pulse-echo 기법을 사용한다. 20 MHz 수침형 탐촉자는 C-scan 이미지를 획득하여 토출관 외피와 예폭시 계면의 박리여부를 결정하는데 사용하고, 2.25 MHz 수침형 탐촉자는 초음파 공진현상을 이용하여 예폭시의 충전 상태(미접착 또는 미충전)를 검사하는데 사용한다.

토출관을 회전시키면서 초음파 탐촉자를 수평으로 이동시켜서 토출관 전 영역을 검사하였다. 토출관에 대하여 원주방향 및 수평방향 모두 0.5 mm 간격으로 초음파 데이터를 수집하였다. 고주파수 초음파 펄스-에코 시험을 수행한 후에 자동으로 초음파 탐촉자를 저주파수로 바꾸어 공진 시험을 수행하도록 하였다. 1개의 토출관을 검사하는 데에 약 30분이 소요되었다.

초음파 시험 데이터는 컴퓨터에 저장된 후에 FFT와 신호처리 프로그램을 통하여 토출관의 결함부위를 나타내주고 합격 여부를 판정한다.

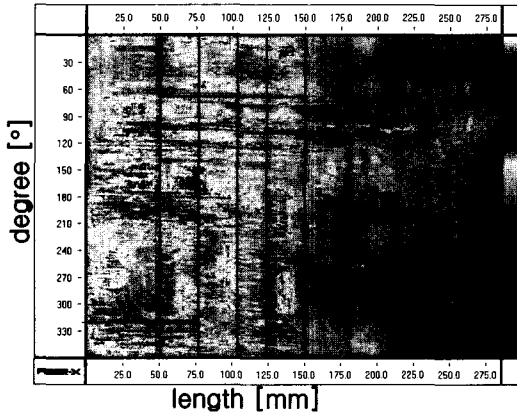


Fig. 4 Ultrasonic testing equipment for the blast tube

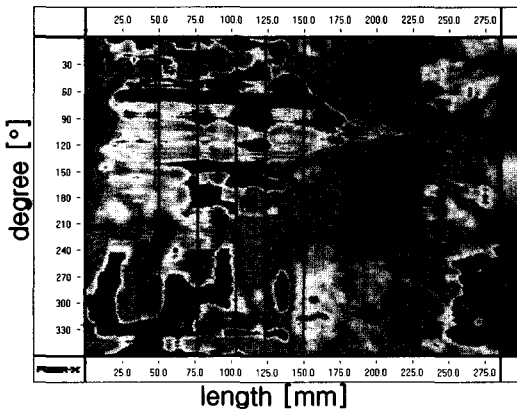
2.4 결함판정기준 설정

구조해석을 통하여 설정된 토출관의 접합계면 검사 결과의 합격 여부판정 기준은 “결합의 간격이 100 μm 이상인 예폭시 미충전부의 원주방향 길이가 10 mm를 넘지 않아야 한다”는 것이다. 이는 미접합과 미충전을 구분하는 경계값이

100 μm 로 결함의 간격이 100 μm 이내이면 “미접합”이고 100 μm 이상이면 “미충전”으로 분류한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 (a) C-scan and (b) resonance image, and (c) cutting position in blast tube

일반적인 초음파 탐상법으로는 접합여부를 쉽게 판정하지만, 접합계면의 간격을 평가하기는

어렵다. 따라서 본 연구에서는 공진이 일어날 때에 접합계면의 간격에 따라 그 공진량의 차이가 생기는 현상을 이용하여 미충전 부위를 판정하고자 하였다.

초음파 시험 결과를 정량화하고 그 결과를 이용하여 gap의 간격을 추정하기 위하여 고주파 초음파 펄스-에코 시험과 공진시험 결과를 기술하는 인자를 정의하였다. 고주파수(20 MHz) 초음파 펄스-에코 신호에 대하여 설정된 게이트에서의 최대 진폭을 측정하였다. 0.5 V를 100%로 하여 측정값을 환산하였으며 이를 amplitude percentage (AP)로 정의하였다. 또한, 2.25 MHz RF 신호에 게이트를 설정하고, 그 안의 신호를 FFT 한 후에 2.25 MHz 근처에서 발생하는 주파수 스펙트럼의 최대값을 FFT peak (FP)로 정의하였다.

이와 같이 정의된 AP 값과 FP 값을 검사 위치에 따라서 색상으로 표시하였고, 이를 각각 C-scan 이미지와 공진이미지라 하였다. Fig. 5는 토출관에서 얻어진 대표적인 C-scan 이미지와 공진 이미지를 각각 나타내었다.

이 결과로부터 토출관에서 AP 값과 FP 값의 정성적인 분포를 추측할 수는 있지만 이들 값으로부터 접합계면의 상태를 정량적으로 평가하기는 곤란하다. 따라서 이들 값으로부터 접합계면을 평가하기 위한 기준을 마련하기 위하여 토출관에 대하여 초음파 시험을 수행하고 절단하였다.

절단부위를 현미경으로 관찰하여 i) 정상부위, ii) 에폭시 밀 결합(토출관 외피부분에는 에폭시가 부착되어 있으나 결합이 존재), iii) 토출관 외피 밀 결합(토출관 외피부분에 밀에 결합이 존재)을 분류하여 각각의 경우에 대해서 결합 간격을 측정하여 “GAP”으로 정의하였다. 대표적인 결합부위의 단면사진은 Fig. 6과 같다. 정상부위에서 8개, 에폭시 밀 결합에서 13개, 그리고 토출관 외피 밀 결합에서 8개 등 29개에서 GAP, AP, FP 값을 얻었다.

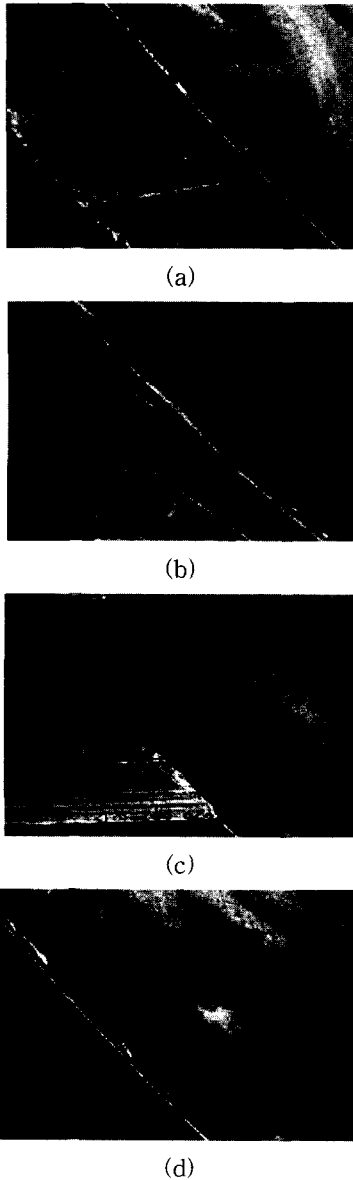


Fig. 6 Microphotographs of the typical defects, (a) missing adhesive under the epoxy, (b) debonding under the epoxy, (c) missing adhesive under the steel sheet, and (d) debonding under the steel sheet

Figure 7에는 FP에 대한 GAP을 나타내었다. 그결과 GAP이 변함에 따라 FP 값이 특정한 경향을 가지고 변하는 것을 알 수 있다. FP 값의 범위가 5,000 - 18,000 사이에 분포하나 결함에

서의 FP 값은 주로 12,000 이상이므로 12,000 - 18,000 사이를 색상값 0-255로 변환하여 그 값을 "FFT 색상값"으로 정의하고 이를 이용하여 Fig. 5의 (b)와 같은 공진이미지를 나타내었다.

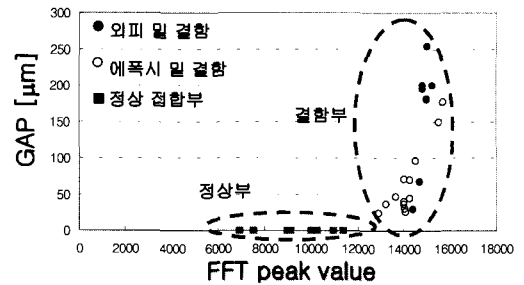


Fig. 7 FFT peak value versus GAP size

2.4.1 토출관 외피 밀 결함과 에폭시 밀 결함 구별

미접합/미충전 판정을 위해서는 먼저 결함이 토출관 철판 밀 결함 또는 에폭시 밀 결함인지를 분류해야 한다. 토출관을 절단하여 관측한 각각의 결함부위에 대하여 앞에서 정의된 FFT 색상값과 AP 값 사이의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과로 토출관 철판 밀 결함과 에폭시 밀 결함은 20MHz 시험으로부터 분류할 수 있었다. 즉, 토출관 철판이 박리되면 AP 값이 55 이상이고, 에폭시 밀 결함은 AP 값이 55 미만인 것으로 절단시험결과 확인되었다.

2.4.2 토출관 외피 밀 미충전의 판단

Figure 9는 Fig. 7에 표시한 결함에 대한 데이터 중 토출관 철판박리가 일어난 경우에 대해 회귀분석을 실시한 결과이다. 회귀곡선은 2차원 포물선으로 선택하였으며, 그 결과 획득한 회귀선은 다음 식과 같다.

$$y = -501.94237 + 5.49009x + 0.0001x^2$$

위의 회귀선으로부터 미충전 간격이 100 μm 일 경우에 대한 FFT 색상값은 109로 확인되었다. 따라서, FFT 색상값이 109 이상이면 미충전 간격이 100 μm 이상으로 판정한다. 그리고 이

값에서의 표준오차 (standard error)는 $\pm 20 \mu\text{m}$ 이다.

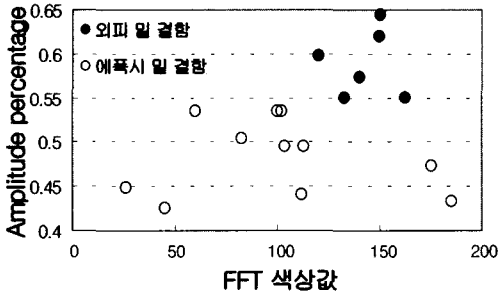


Fig. 8 FFT color value color value versus 20MHz amplitude percentage

2.4.3 에폭시 밀 미충전의 판단

Figure 10은 Fig. 7에 표시한 결함부에 대한 데이터 중 에폭시 밀 박리가 일어난 경우에 대해 회귀분석을 실시한 결과이다. 회귀곡선은 2차원 포물선으로 선택하였으며, 그 결과 획득한 회귀선은 다음식과 같다.

$$y = 51.63495 - 1.04053x + 0.01164x^2$$

위의 회귀선으로부터 미충전 간격이 $100 \mu\text{m}$ 일 경우에 대한 FFT 색상값은 122로 확인되었다. 따라서, FFT 색상값이 122이상이면 미충전 간격이 $100 \mu\text{m}$ 이상으로 판정한다. 그리고 이 값에서의 표준오차는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이다.

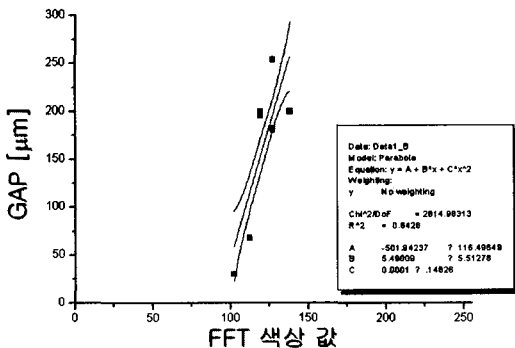


Fig. 9 Regression curve for defects under blast tube out covering

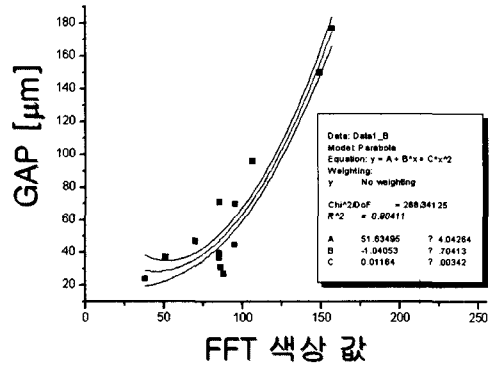


Fig. 10 Regression curve for defects under epoxy

3. 결론

본 연구에서는 토출관에 대한 초음파를 이용한 계면의 접합상태를 검사할 수 있는 기법을 개발하였다. 20 MHz 초음파를 이용하여 정상접합 및 비정상접합(미접합, 미충전)을 구별할 수 있고, 2.25 MHz 초음파의 공진법을 이용하여 미접합, 미충전을 구별할 수 있는 기법을 개발하였다.

또한, 이 기법을 바탕으로 실제 토출관 검사를 위한 자동초음파탐상 장치를 개발하였다. 검사결과는 20 MHz C-scan과 2.25 MHz 공진이미지로 나타내었으며 결함부위에 대해 절단시험을 수행하였다. 절단시험 결과를 이용하여 미충전 부위의 간격을 평가하는 지침을 마련하였다.

참고문헌

1. 이상호, “항공용 복합재료에 대한 음향방출의 활용,” 비파괴검사학회지, 제 21권 3호, 2001, pp. 313-318
2. 박준수, 송성진, 김영환, 임수용, 윤남균, 조정표, “연소관 조립체 접합계면의 평가를 위한 비파괴시험에 관한 연구,” 한국추진공학회 제 17회 학술발표회 논문초록집, 2001, pp. 90-93
3. G. B. Champman, Jr., 1981, “A Non-

- destructive Method of Evaluating Adhesive Bond Strength in Fiberglass Reinforced Plastic Assemblies", *Joining of Composite Materials*, ASTM STP 749, K. T. Edward, Ed., American Society for Testing and Materials, pp.32-60
4. H. Aglan, L. Kennebrew, D. Hsu, and T. Patton, "Correlation of NDE Parameters with Fatigue Lifetime of Aircraft Adhesive Bonds", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp.1611-1618
 5. J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Edition, New York: Springer-Verlag, 1990 pp.125-131
 6. Maeva, E. Yu., Severina, I. A., O'Neill, B., Severin, F. M., Maev, R. Gr., Some approaches of ultrasonic evaluation of metal sheets adhesive bonds, in *The 30th Annual Review of Progress in Quantitative NDE*, Green Bay, WI, USA, July 26 - August 1, 2003