

초음파를 이용한 복합재료 하니컴 구조물의 Disbonding 검출에 관한 연구

조 경 식* · 이 주 석* · 이 종 오* · 장 홍 근* · 이 승 희**

A Study on the Disbonding Detection of FRP Honeycomb Sandwich Structure by Ultrasonic Methods

K. S. Cho, J. S. Lee, J. O. Lee, H. K. Chang and S. H. Lee

Abstract In this study the bonding quality evaluation of FRP honeycomb structure was performed by the ultrasonic C-Scan method and stress wave factor measurements. These NDT techniques could be well applied to the disbonding detection of FRP honeycomb structures. Especially, stress wave factor (SWF) measurement is expected to be a useful technique in field applications.

1. 서 론

하니컴 구조물은 가벼우면서도 고강도를 유지하기 때문에 오늘날 거의 모든 항공기나 유도병기에 널리 사용되고 있으며, 그 수요도 증가 되고 있다. 이에 따라 하니컴 구조물의 안정성이 크게 요구되어 제품의 품질검사 및 평가기술이 중요한 문제로 대두되는데, 특히 면재와 심재의 접착상태의 양부에 의해 기계적 성질이 크게 변하므로 접착상태를 평가하는 비파괴 시험기술의 개발이 요구되고 있다.

하니컴 구조물에 대한 비파괴시험법은 초음파를

이용한 방법^{1,2,3,4)} 홀로그래피를 이용한 방법⁵⁾, 적외선을 이용한 Thermography⁶⁾ 등 여러가지 방법^{7,8,9)}이 있으며, 현재 하니컴 구조물의 비파괴시험에 관한 몇가지 방법에 대하여는 Hagmaier에 의해 잘 요약되었다¹⁰⁾.

본 논문에서는 여러가지 복합재료 하니컴 구조물에서 초음파 C-Scan법과 응력파계수 측정법에 의한 면재/심재간 접착 상태의 양부에 대한 비파괴검사법의 개발과 그 사용의 유의성과 적용성 평가에 관해 연구하였다.

* 한국기계연구소 비파괴시험실

** 계명대학교 물리학과

접수 : 1991년 1월 28일

2. 실 험

2-1 시편 제작

면재 제작용 Prepreg는 상용으로 사용되는 Woven 형, Plain식의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastic)이며 준비된 Prepreg를 Lay-Up한후 Curing하여 면재를 제작했다. 심재는 Nomex, Phenol, Aluminum의 3가지가 사용되었으며, 준비된 면재와 심재를 접착필름 FMS-1013 Form III(Minnesota Mining & Mfg. Co.)를 사용하여 Table 1.과 같이 조합하여 모두 9종류의 시편을 제작하였다.

Table 1. Specification of specimens

구분 시편	면재 ply 수	면재 재질	심재 재질	Cell Size (mm)	시편크기 (L×W×t) (mm)
1	8	CFRP	Nomex	5	300×150×50
2	8	CFRP	Phenol	5	300×150×50
3	8	CFRP	Al	5	300×150×50
4	8	CFRP	Nomex	5	300×150×50
5	8	CFRP	Phenol	5	300×150×50
6	8	CFRP	Al	5	300×150×50
7	8	AFRP	Nomex	5	300×150×15
8	8	AFRP	Phenol	5	300×150×15
9	8	AFRP	Al	5	300×150×15

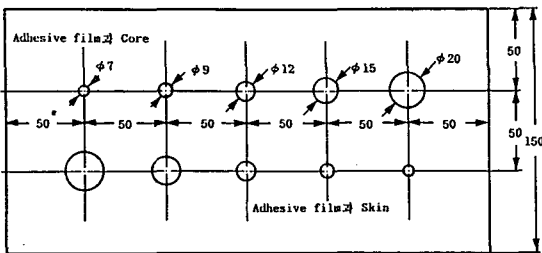


Fig. 1 The size and location of artificial disbonding defects

인공 Disbonding 결합은 면재/접착필름간 접착필름/심재간의 2종류로 Fig. 1과 같이 테프론 테이프를 여러가지 크기의 원형으로 절단하여 접착필름의 양면에 배열하고 Fig. 2와 같이 면재/접착필름/심재를 조합하였고 조합된 시편을 Autoclave를 사용하여 Curing하였다.

Curing시 외압에 의한 시편 측면의 변형을 방지하기 위하여 콜크 Frame을 만들어 보호하였으며 Curing조건은 면재의 경우 130℃의 온도에서 압력 30 psi로 72분간 유지하였고 Curing온도까지의 승온율은 3℃/min.으로, 면재/심재 Bonding의 경우는 130℃의 온도에서 90분간 유지하였으며 Curing온도까지의 승온율은 2.5℃/min.로 하고 Autoclave내에서 Cooling하였다.

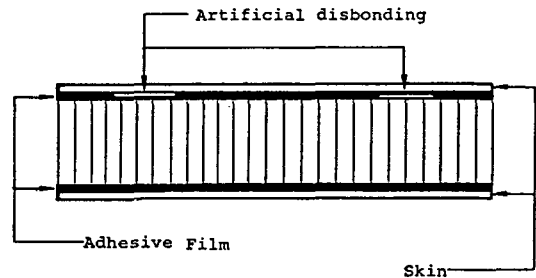


Fig. 2 The manufacturing process of FRP honeycomb specimens

2-2 실험방법

2-2-1 초음파 C-Scan법(Ultrasonic C-Scan Method)

본 실험에 사용한 장비는 MBS-8000 system(ME-TEC Instruments Inc.)으로 그 개략도는 Fig. 3과 같으며 시편에서 반사된 초음파를 Receiver로 수신하여 증폭한후 Peak Detector로 Peak치를 잡아 Interface를 통해 Computer로 전달하며 비 결함부와 면재/접착필름간, 접착필름/심재간 Disbonding 결합에서 반사된 초음파의 진폭변화가 Scan System Control 정보와 함께 Computer에 의해 처리되어 Plotter나 Printer로 출력하여 결함을 탐지한다. 이때 분해능 향상을 위해 Pulse폭을 최소화하고 작은 직경의 탐촉자와 음향렌즈가 사용되었다.

Scanning은 수침법을 이용하여 X-Y 평면을 Scanning 하였으며, 이때 탐촉자는 주파수 1, 2, 5MHz, 외경 $\phi 1/2"$ 및 $1/4"$ 의 Focused Immersion Type (KB-Aerotech Co.)이 사용되었다.

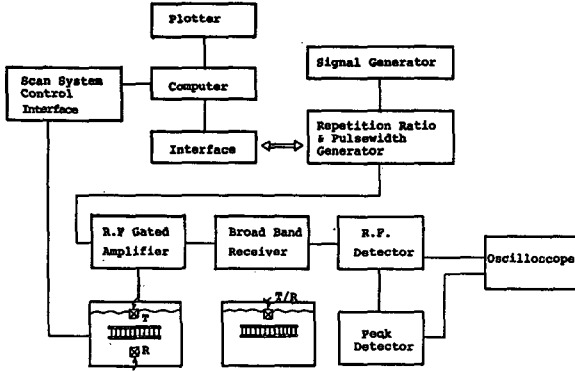


Fig. 3 Block diagram of MBS-8000 C-Scan system

2-2-2 응력파계수 측정(Stress Wave Measurements)

응력파계수 측정법은 시편에 의사 응력파를 전파시켜 Acoustic Emission현상의 해석기법에 의해 결함을 탐지하는 방법으로 사용한 장비는 Model 206 AU(AET Corp.)로 Transducer와 Receiver를 각각 양면에 배치하는 방법과 동일면에 배치하는 두가지 방법을 적용하였으며 Transducer는 각각 공명주파수가 375kHz, 대역폭 600kHz를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 초음파 펄스반사법

측정된 두 초음파 펄스의 시간분해능은 사용 펄스의 폭에 의존하며 펄스의 폭의 최소한계는 사용주파수 f 에 의해 제한된다. 사용 Pulse의 폭 T 를 Half Sine Wave로 보면 $f=1/2T$ 이고 시편내의 초음파의 속도를 V 라 할때, 두 반사파의 거리분해능 S 는

$$S \approx V \cdot T = V/2f$$

로 주어지며 두께 ℓ 인 면재의 표면반사 Pulse와 저면반사 Pulse의 분리를 위해서 사용될 주파수의 제한은

$$f \geq V/2S = V/4\ell$$

로 주어진다. 한편 FRP에서 초음파속도는 그 전파 방향에 따라서 크게 변하지만 본 실험에서 사용된 조건과 같이 섬유배열 방향에 수직으로 전파할 경우 1,400m/sec. 정도로 알려져 있고⁸⁾, 본 실험에서의 면재두께 $\ell = 1.4\text{mm}$ 를 대입하면 이론적 주파수 한계는 250kHz 이상으로 제한된다. 그러나 Pulse폭을 Half Sine Wave로 할 수 없고 적어도 3개 이상의 Sine Wave를 포함하고 있으므로 실제 사용 주파수의 한계는 1MHz 이상이다. 다만 사용 주파수를 높이면 분해능은 증가되지만 사용된 FRP면재의 높은 감쇠 및 분산효과로 5MHz 이상의 주파수를 사용한

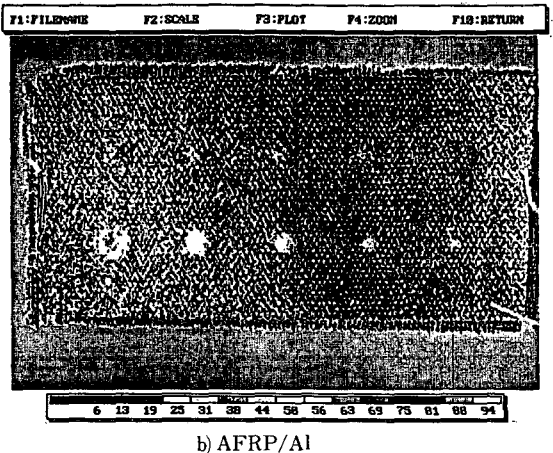
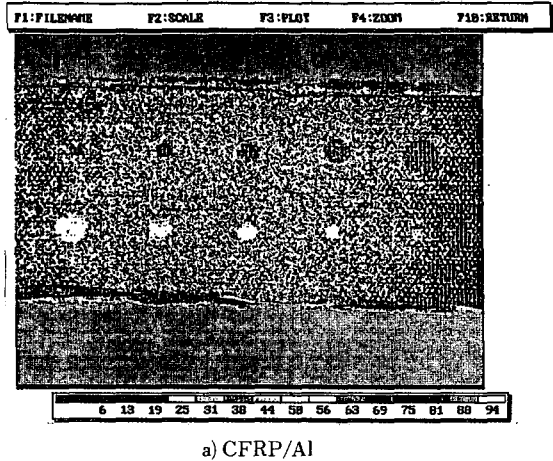
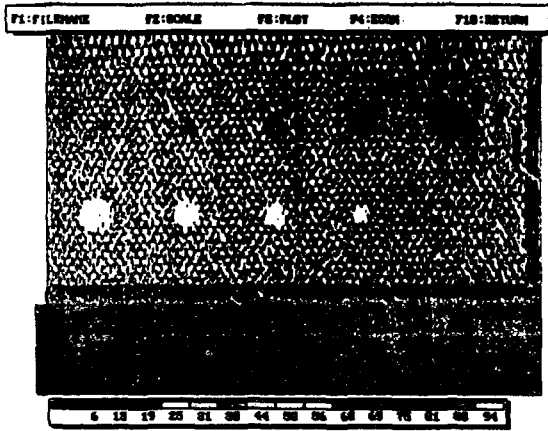


Fig. 4 Ultrasonic C-Scan of honeycomb structures by pluse-echo method(5MHz)



c) AFRP/Phenol

Fig. 4 continued

경우 분해능 향상효과는 관측되지 않았다. 특히 하니컴 시편에서 심재(Core)와 면재(Skin) 사이의 접착층(Adhesive Layer)은 Fillet형성부를 제외하고는 그 두께가 0.1mm 이하로 매우 얇아 면재-접착층 및 심재-접착층에서의 계면반사 신호를 시간분해에 의해 구분하기가 어려웠기 때문에 각 계면에서의 반사파의 진폭에 의해 구분했다.

Fig. 4 a)~c)는 CFRP 및 AFRP 면재로 제작된 하니컴 시편에 대해 5MHz 주파수를 사용한 C-Scan 결과이다. 접착층에서의 반사펄스 진폭은 반사면의 깊이와 시편의 재질 그리고 반사면의 임피던스에 따라 변하게 되는데 같은 재질, 같은 깊이일 경우 Disbonding 부와 정상 접착부에서 반사파는 임피던스 차에 의해 진폭이 달라질 것이고 이들 진폭의 변화를 형상화 함으로서 Disbonding의 종류 및 형상의 해석이 가능함을 볼수있다. 특히 심재로 Phenol이나 Al의 경우 심재의 Cell형상까지도 관측이 가능한 것을 알 수 있어 심재의 건전성 여부 및 Fillet 형성상태의 평가에도 적용이 가능하다.

GFRP면재의 경우, 5MHz의 주파수를 사용할 경우 높은 감쇠에 의하여 반사파 신호의 검출이 어려워¹¹⁾ 2MHz의 주파수를 사용했는데, 낮은 주파수의 한계로 진폭 구분이 어려운 점이 있으나 Fig. 5처럼 미세한 파형변화를 Gate조절을 통해 Disbonding에 대한 영상화가 어느정도 가능했는데 심재로 Al의 경우 Fig. 6 a)~c)에 보듯이 거의 완벽한 결합 검출이

가능했다.

이처럼 복합재료 하니컴 구조물을 Pulse 반사법으로 탐상할 경우 Al/Al 하니컴 구조물에 대한 결과⁴⁾와 비교할 때 반사체의 불균일성이 크기 때문에 주파수 선정뿐만 아니라 반사진폭의 변화에 영향을 미치므로 탐상감도 및 증폭을 조정에 주의해야 할 필요가 있다.

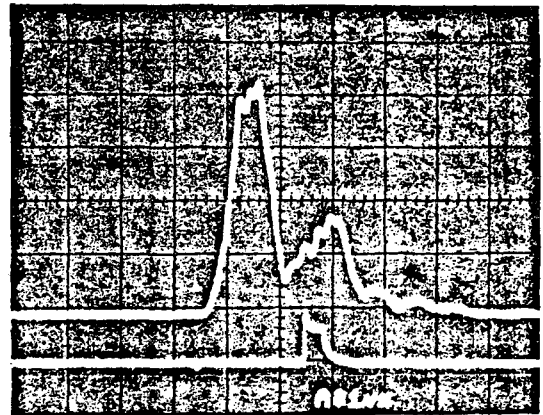


Fig. 5 Pulse echo waveform from GFRP skin

3-3-2 응력파계수 측정

광대역 수신 탐촉자에 의해 '시편내에 초음파 Pulse를 입사시키면 재료내에 응력파가 여기되며 이 응력파가 시편내를 전파할 때 시편의 기하학적 형상 및 미시구조에 의존하여 Mode Conversion, Reverberation, Dispersion, Attenuation 등에 의해 그 파형이 크게 왜곡되기 때문에 수신된 응력파의 파형은 재료의 변형 및 파괴시 수반되는 응력파 방출시의 파형과 매우 흡사하고 Acoustic Emission(AE)시험의 신호처리기법에 의해 해석이 가능하며 이 방법중의 하나가 일종의 초음파 투과율을 측정하는 것으로 응력파계수(Stress Wave Factor : SWF)를 이용하는 것이다. 응력파계수는 측정된 신호중 AE시험에서의 Ring-Down Count와 유사한 것으로 설정된 Threshold를 넘는 Count N, 입사파 Pulse 반복 주파수 R 및 측정 시간간격 G의 곱으로 주어진다^{12,13)}.

$$SWF = G \cdot R \cdot N$$

응력파계수의 값은 응력파의 감쇠, Dispersion, 및

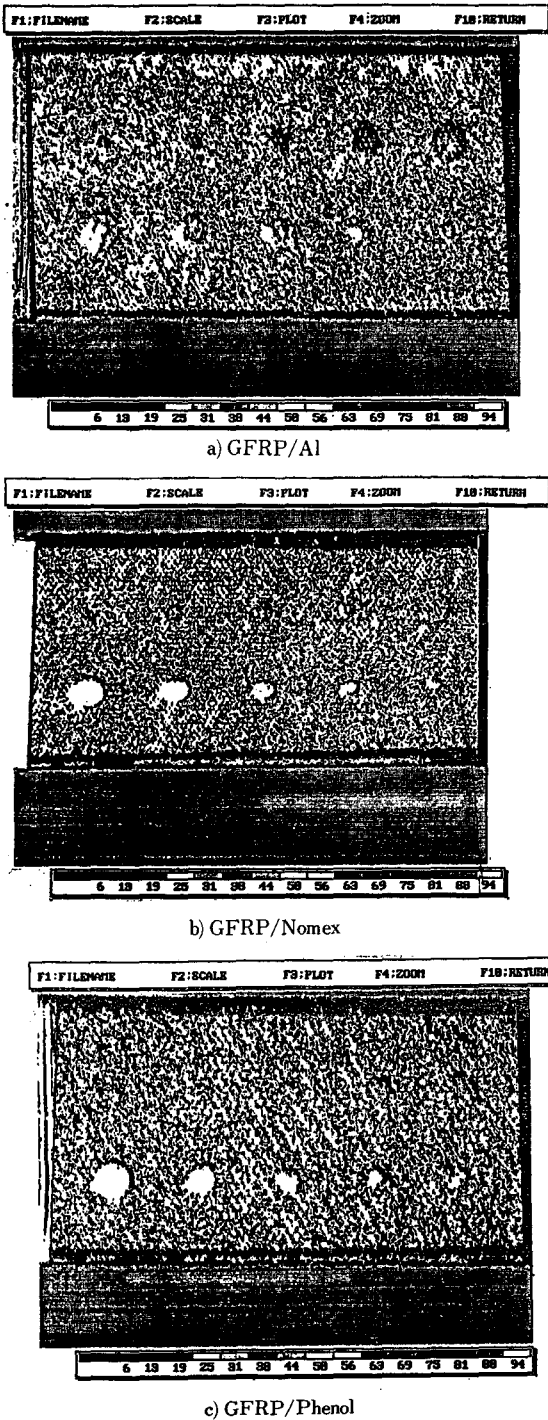
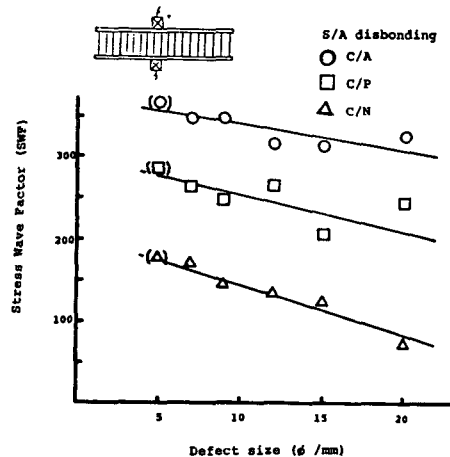


Fig. 6 Ultrasonic C-Scan of GFRP honeycomb structures by pluse-echo method(2MHz)

공명주파수 등에 따라 달라지게 되는데 이러한 값들은 복합재료의 Resin함량, 기공함량, Delamination, Fiber Orientation 또는 다른 결함들에 따라 변화된다.

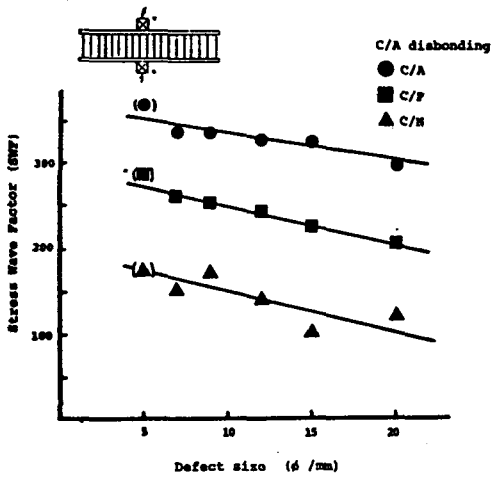
Fig. 7에서 보는 바와 같이 측정된 SWF는 Disbonding의 크기가 커짐에 따라 감소하였으며, a)와 b), c)와 d), e)와 f)를 비교해 보면 Disbonding 부위(S/A, C/A)에 관계없이 비슷한 값을 나타내었다. 이결과는 초음파 투과진폭이 Disbonding의 크기에 의존하며 Disbonding부위에는 별 영향이 없는 것이라는 예측이 일치하고 있다. 또한 SWF값은 면재와 심재의 종류에 의해 크게 좌우되는 것을 볼 수 있는데 면재의 경우 CFRP, AFRP, GFRP의 순으로, 심재의 경우 Al, Phenol, Nomex의 순으로 초음파투과율이 낮아지는 것으로 생각된다.

이 시험방법은 탐촉자의 상대적 위치, 탐촉자의 접촉조건, Threshold의 설정, 증폭비 등에 의해 SWF 값이 차이가 날 수 있으므로 주의해야 할 필요가 있으므로 표준결함이 포함된 시편과 비교 보정을 한다면 Disbonding의 정량적 평가에도 적용 가능할 것이라 생각된다. 특히 수침법에 의하지 않고 수행이 가능하며 비교적 간단한 시험장치를 사용하므로 현장 적용성이 양호하다.

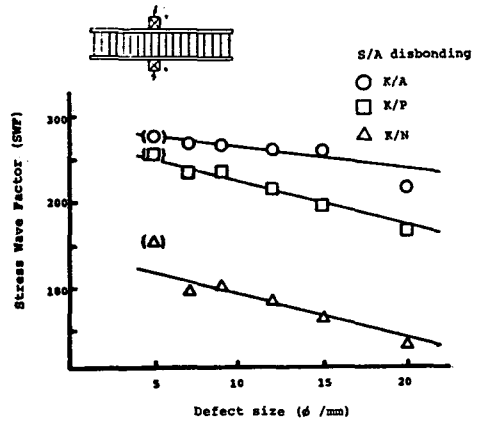


a) CFRP skin(S/A disbonding)

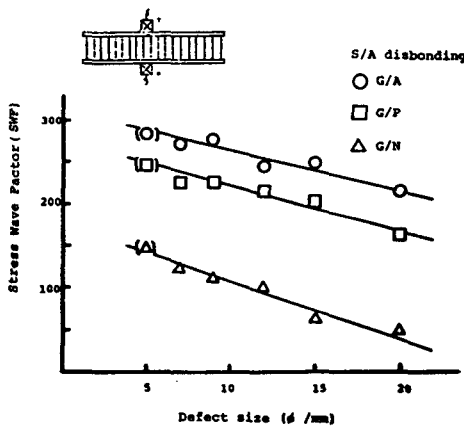
Fig. 7 Measured stress wave factor(SWF) of transmitted waves through the disbonded core of honeycomb specimens



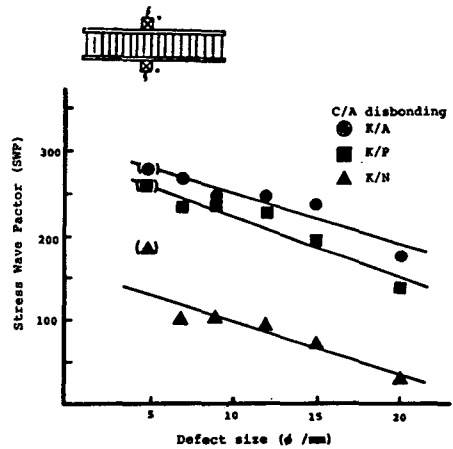
b) CFRP skin(C/A disbonding)



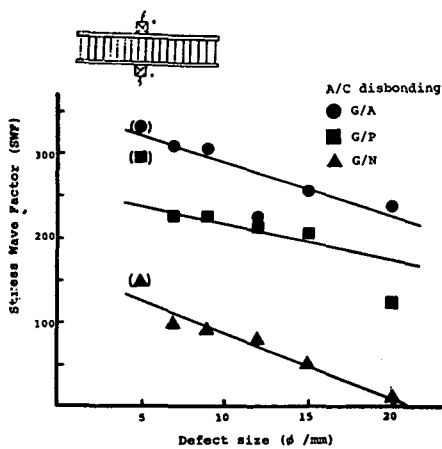
e) AFRP skin(S/A disbonding)



c) GFRP skin(S/A disbonding)



f) AFRP skin(C/A disbonding)



d) GFRP skin(C/A disbonding)

그리고 송수신 탐촉자를 시편의 한쪽에만 장착하여 수행한 결과도 Disbonding 부위에서의 SWF값이 건전부에 비해 감소함을 관측하였는데 Disbonding의 크기가 작을 경우 측정결과의 재현성이 낮아 실제 결함 평가에 적용하기 어려웠지만, Disbonding의 크기가 송수신 탐촉자 간격보다 클 경우 건전부위의 SWF 값을 100으로 하였을 때 Disbonding 부위에서의 각 시편에 대한 SWF값을 Fig. 8에 나타내었다. 그결과 Disbonding부의 SWF 값의 감소가 현저하고 시편들 사이에도 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있다. 즉 이 방법은 비교적 큰 Disbonding의 검출에 현장 응용성이 아주 좋은 것으로 판단된다.

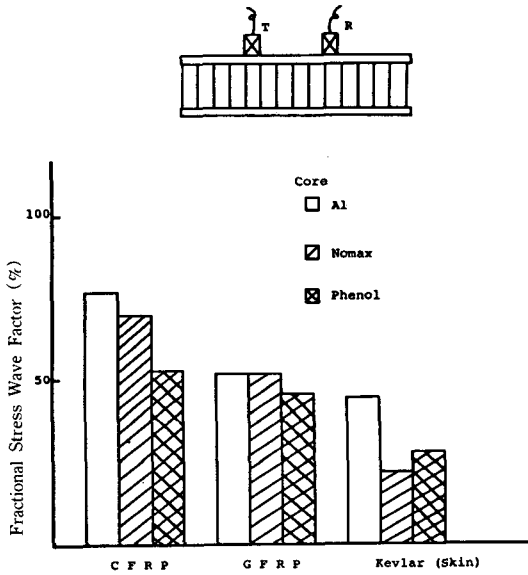


Fig. 8 Reduction of stress wave factor of the wave propagated through the skin due to the disbonding

4. 결 론

복합재료 하니컴 구조물에서 면재/심재간 접착상태의 양부에 관하여 초음파 C-Scan법과 응력파 측정에 의한 비파괴시험기술의 개발과 그 적용성 평가에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 사용면재에 대한 반사신호의 분리를 위해 2-5MHz의 주파수가 적합하였고 Pluse Width를 최소화 하는 것이 계면신호 분리에 유리하였다.

(2) 반사 Pluse의 진폭은 Disbonding의 유무, 종류에 따라 차이가 났으며 Disbonding의 종류, 형상 및 크기의 해석이 가능하였고 탐상 조건을 적절히 할 경우 심재의 Cell형상까지도 관측할 수 있어 심재의 건전성 여부 및 Fillet 형성상태를 평가하는데 적용될 수 있다.

(3) 심재를 투과한 의사응력파(Simulated Stress Wave)의 응력파계수를 측정된 결과 Disbonding의 크기가 증가함에 따라 응력파계수가 감소하였으며 상관관계가 비교적 양호하여 표준시편에 의한 Calibration을 통해 Disbonding 크기의 정량적 평가가

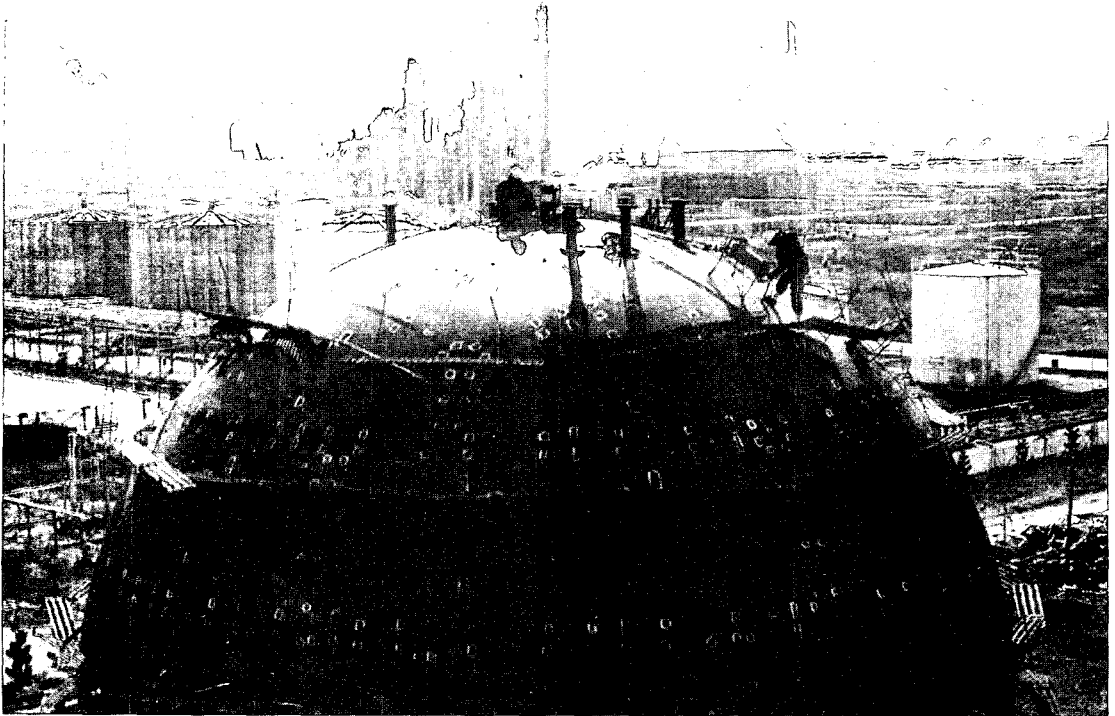
가능할 것이다.

(4) 면재를 통과한 의사응력파의 응력파계수는 편차가 비교적 커서 결함의 정량적 평가에는 적용하기 어려우나 Pulsar/Receiver 간격보다 큰 Disbonding의 검출방법으로서는 현장적용이 가장 간편한 방법으로 판단된다.

References

1. J. F. Moore, "Development of Ultrasonic Testing Techniques for Saturn Honeycomb Heat Shields", Materials Evaluation, February, 1967, pp. 25~31.
2. William J. Harris, "Air-Coupled NDT of Composites and Homecombs", Lockheed Missiles & Spaces Company, Inc. Report, pp. 771~782.
3. H. L. Bertoni and S. K. Park, "Propagation of Elastic Waves in Honeycomb Panels for Application to Rapid Inspction Techniques", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 2, Nos. 3/4, 1981, pp. 209~217.
4. K. S. Cho, J. S. Lee, H. K. Chang and S. H. Lee, J. of the Korean Soc. for Nondes. Testing, Vol. 10, NO. 1, 1990, pp. 29.
5. D. Wells, Materials Evaluation, Vol. 27, No. 11, 1969, pp. 225.
6. A. T. Intrieri, Materials Evaluation, July, 1970, pp. 153.
7. D. O. Thompson, R. B. Thompson and G. A. Alers, Materials Evaluation, April, 1974, pp. 81.
8. 섬유 강화 복합재료의 비파괴 시험 기법 개발, KIMM 연구보고서 UCN 039-721. C, 1986, pp. 127 과학기술처.
9. D. J. Hagemaiier, "Bonded joints and non-destructive testing, Bonded honeycomb structures -1", Non-destructive testing, December, 1971, pp. 401~405.
10. D. J. Hagemaiier, "Bonded joints and Non-destructive testing, Bonded honeycomb structure -2", Non-destructive testing, February, 1972, pp.

- 38~48.
11. 하니컴 구조물의 비파괴시험·평가기법 개발 (II), KIMM 연구 보고서 UCN252-1431·1, 과학기술처, 1990, pp. 55.
12. A. Vary, *Materials Evaluation*, Vol. 40, 1982, pp. 650.
13. J. E. Green and J. Rodgers, "Acousto Ultrasonic Evaluation on Impact-Damaged Graphite Epoxy Composites, 27th National SAMPE Symposium, 1982, pp. 428.



RT of spherical tank