



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 박 사 학 위 논 문

Type 2 복합재료 압력용기의 피로손상시 발생하는 음향방출



2013년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

지 현 섭

이 학 박 사 학 위 논 문

Type 2 복합재료 압력용기의 피로손상시 발생하는 음향방출

지도교수 이 종 규

이 논문을 이학박사 학위논문으로 제출함

2013년 2월

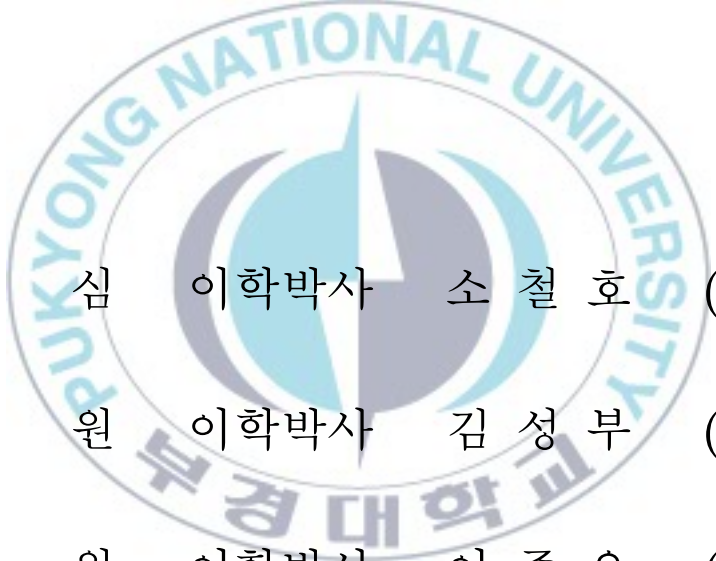
부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

지 현 섭

지현섭의 이학박사 학위논문을 인준함

2013년 2월 22일



주 심 이학박사 소 철 호 (인)
위 원 이학박사 김 성 부 (인)
위 원 이학박사 이 종 오 (인)
위 원 이학박사 정 성 수 (인)
위 원 이학박사 이 종 규 (인)

목 차

Abstract

제 1 장 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	8
1.3 연구목적 및 내용	10

제 2 장 복합재료 손상메커니즘과 음향방출

2.1 서론	11
2.2 실험장치 및 실험방법	13
2.3 결과 및 토의	20
2.4 결론	32

제 3 장 복합재료 압력용기의 초음파 신호전달 특성

3.1 서론	33
3.2 실험장치 및 실험방법	34
3.3 결과 및 토의	38
3.4 결론	44

제 4 장 복합재료 압력용기의 파열시험 및 피로시험

4.1 서론	45
4.2 실험장치 및 실험방법	47
4.3 결과 및 토의	54
4.4 결론	98

제 5 장 확률신경망을 이용한 복합재료 압력용기의 손상도 평가

5.1 서론	101
5.2 실험장치 및 실험방법	105
5.3 결과 및 토의	115
5.4 결론	118

제 6 장 결 론

참고문헌	121
------	-----

관련 학회지 게재 및 학회 발표	127
-------------------	-----

감사의 글

Abstract

In this study, evaluation of damages on type 2 composite pressure vessel using acoustic emission, including the specimen destruction test, pressure vessel signal transmission test, burst and fatigue comparative test according to the destruction and evaluation of damages on the pressure vessel through the probabilistic neural network.

The Amplitude of acoustic emission signal gets bigger as the cutting angle of knife increases. Accordingly, the number of hits in destruction of composite materials specimen have more in longitudinal direction (longitudinal direction to the fiber glass) than in hoop direction (horizontal direction to the fiber glass) while the amplitude of signals were bigger in hoop direction than longitudinal direction. Glass fiber It was found out that the amplitude where the glass fiber breakage is 40dB or more and that the amplitude of signal for matrix crack was 40dB or less. It was also found out that the source of acoustic emission signal during the destruction of specimen in the longitudinal direction is the glass fiber or main damage mechanism.

The transmission speed of acoustic emission signal of type 2 composite pressure vessel according to the transmission angle showed little difference between when the water is filled or not. As the transmission angle increases from acoustic emission source relative to the direction when the glass fiber is wound (0°), the speed is reduced from 5700 m/sec to 4500 m/sec and the damping effects get increases, showing the anisotropy.

The fracture mechanism of type 2 composite pressure vessel is follows; matrix cracking - delamination - glass fiber breakage - metal liner fracture. The Kaiser effect is observed when the pressure goes up to 60% of the bursting pressure. In more than 70%, the felicity effect is observed and the creep effect is found as the vessel is so much damaged. In addition, In 70% of bursting pressure, the matrix delamination and glass fiber breakage are found to be the key causes of damage. Just prior to the destruction of the vessel, the mass breakage of glass fiber bundle in the vessel and the rupture of metal liner occur.

The analysis of acoustic emission signal occurring when type 2 composite pressure vessel is holding the load shows that the total count and the signal strength are the AE factors, which can represent the damage of vessel and that the signal variables, such as mean amplitude, rise time and duration and the AE signal, which is 60 dB or more, are the sound transmission signal variables, which can estimate the damage mechanism of the vessel.

The pressure for destruction of type 2 composite pressure vessel which have the artificial defects, is not related to the defect of matrix but the direction of defect is related to the position of final leakage in the vessel. In the case of longitudinal direction, the thickness of wall of the wall around the vessel, where the defect is located, gets thin and thus become weak. So, it is likely that the leakage finally occurs where the crack appears on the metal liner though the acoustic emission source is located.

The acoustic emission signal occurring in the fatigue test of type 2 composite pressure vessel does not show any increase or decrease according to the number of accumulated fatigues of the vessel. But it shows the increase or decreases after the specific signal variables such as amplitude, rise time and count decreases or increases when the new damage source is found. There are four patterns in the acoustic emission parameters according to the increase in the number of fatigues; pattern of gradual rise up to a certain level before going down, pattern of decreasing and then increasing, pattern of gradual rise up to the leakage after the specific fatigue cycle and the pattern of reduction to a certain fatigue cycle.

As type 2 composite pressure vessel does not show any simple increase or decrease, it is effective to classify the pattern of acoustic emission variables coming from the fatigue damage using the probabilistic neural network. It shows that the learning input variables for the classification of signal pattern using the probabilistic neural network has better results when the features of AE parameters are more diverse, the more acoustic emission signals are included in the loading - holding - unloading zone and the single after 2nd cycles of collected signal is applied.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

복합재료 압력용기는 로켓 모터케이스 같은 항공 우주 산업에서부터 출발하여 최근에는 차량용 가스연료탱크까지 널리 사용되고 있다. 복합재료 압력용기는 라이너와 강화재료에 따라 표 1-1과 같이 Type 1에서 4까지 크게 네 가지로 구분된다.[1] 복합재료 압력용기의 복합재층은 탄소섬유 또는 유리섬유와 레진(resin) 에폭시(epoxy)로 구성되는데 라이너 위의 원통부만을 복합재료로 보강하는 hoop wrapping 방식과 라이너의 모든 부분을 둘러싸는 full wrapping 방식으로 나눌 수 있다. 특히 자동차용 가스연료탱크에 있어서 금속으로만 제작된 압력용기는 충전압력이 높아짐에 따라 고압에 견디기 위해 용기의 두께가 두꺼워져야만 하지만 최근 가스차량의 무게를 줄이고 연료탱크 내부의 가스 누설 방지와 용기의 형상 유지 그리고 경제성을 고려하여 용기 내부에 금속라이너를 두고 외부에는 내압에 견디는 강도를 갖도록 섬유강화 복합재료를 감은 Type 2 용기가 주로 사용되고 있는 실정이다.

Table 1-1. Classification of pressure vessels

Type	Material		Reinforcement wrapping method
	Liner	Reinforcement	
1	Steel	-	-
2	Steel	Composite	Hoop
3	Aluminum	Composite	Full
4	Plastic	Composite	Full

일반적인 고압가스 압력용기의 결함을 검출하기 위한 비파괴시험법에는 외관 및 내 외면의 검사로 육안검사, 내부 결함의 검출을 위해 방사선 투과시험, 초음파탐상시험이 사용되며, 표면의 결함을 검출하기 위하여 자분탐상시험, 액체침투탐상시험 등이 이용되고 있다. 특히 동적인 결함의 검출법인 음향방출(Acoustic Emission: AE)시험법이 수압시험 동안 성장되는 균열의 위치를 추정할 수 있다. 그러나 위의 검사법들은 주로 금속 라이나의 결함 검출을 위한 비파괴시험법으로 복합재료를 감은 완제품에는 적용하기가 용이하지 않다. 표 1-2와 같이 복합재료 압력용기에 대한 비파괴검사법은 제시되고 있으며[2-3], 복합재료가 감긴 Type 2, 3, 4 용기에서 음향방출시험법이 가장 유용한 검사방법으로 제시되고 있다.[4-5] 그러나 복합재료의 다양한 손상 기구와 이들 손상과 수명과의 관계가 정립되어 있지 않고 복합재료 내에서 전파하는 탄성파의 이방성 및 음향방출 변수의 선정, 신호의 해석 및 정량화가 어려움 등의 문제가 있다. 또한 1984년 이래 미국에서 80건 이상의 자동차용 가스연료탱크 사고가 발생하였으며[6], 우리나라에서도 천연가스 시내버스 등의 자동차용 압축가스 연료탱크 폭발사고가 수차례 발생하고 있어서 고압가스용기의 건전성 평가방법의 연구 및 기술개발이 요구되는 실정이다.

Table 1-2. Reaserch of NDE for composite pressure vessel

연구기관	내 용	검사방법	비 고
DOD & NTIAC NASA	제작 검사기술	VT, UT, AE, LT, MW RT, ECT, TG	NASA/TP-2002-210769,2002
DOT & NTIAC	제작 검사기술	VT, AE, UT	NTIAC/A7621-18:CRC-CD8.1
DOT & GM	사용중 검사기술	AE	FaAA-SF-R-97-05-04
KIMS	제작 검사기술	VT, UT, AE, LT, RT	UCN 554-1998.C(1994)

음향방출이란 매질내에서 급격한 탄성장의 변화에 기인하여 방출되는 탄성파로 정의하며 [7] 그 발생원으로는 전위[8], 쌍정[9], 고상변태[10], 자구의 생성, 이동, 소멸[11]과 같은 재료내의 미시현상과 미소균열의 생성, 성장[12], 부식, 용융, 응고 등이 있으며, 누설, 마모 등도 의사 음향방출원으로 볼 수 있다. 음향방출 신호의 관측은 지금까지 측정하기 어려웠던 재료내부에서 진행되는 미시적 현상에 대한 정보를 알아내는 재료시험이나 특성평가의 수단으로 이용되며, 균열의 탐지와 같은 비파괴시험이나 누설의 검출 등을 통한 설비진단에도 이용되고 있다. 비파괴시험의 관점에서 볼 때, 음향방출시험법은 외부에서 에너지를 주입하여 반응결과를 관측하는 초음파탐상시험이나 방사선투과시험과는 달리 음향방출은 외부에서 에너지를 주입할 필요 없는 자체 현상에서 발생하는 신호를 측정하는 점과 다른 비파괴시험이 기존에 존재하는 정적인 불연속을 검출하는데 반해 진행 중에 있는 동적인 현상을 관찰할 수 있다는데 특징이 있다.

음향방출원에서 발생한 신호는 매질을 지나 센서에서 검출되고 검출된 신호는 신호처리를 통해 인지할 수 있는데, 매질을 통해 전파하는 동안 매질 내에 흡수, 구조물의 형상에 따른 다중반사, 방해물에 의한 산란 및 분산 등에 의해 많이 왜곡된다. 이러한 복잡한 현상에 의해 왜곡된 정도를 일반적으로 전달함수(transfer function)라고 하며 음향방출 신호의 해석에 중요한 요소가 된다. 즉, 발생원에서 발생한 신호가 매질을 전파한 후 표면에 변위를 일으키고 이 변위를 센서를 통하여 검출하고 출력한다고 할 때 신호는 그림 1-1과 같이 여러 전달 함수를 포함하게 된다.

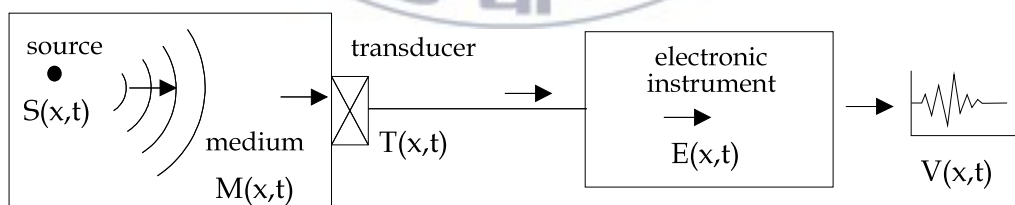


Figure 1-1. Transfer function of Acoustic emission

발생원의 함수를 $S(x,t)$ 라 하고 우리가 인지하기 전까지 신호의 왜곡에 영향을 줄 수 있는 물질 상수, 기하학적 형상, 변환자 및 다른 전자장치 등을 전달함수 $G(x,t)$ 로 표현한다면 $G(x,t) = E(x,t) * T(x,t) * M(x,t)$ 가 되고 우리가 인지할 수 있도록 표현되는 출력 $V(x,t)$ 는

$V(x,t) = G(x,t) * S(x,t)$ 로 표현된다. 여기서 전달함수 $G(x,t)$ 를 이론적으로 정확히 알기는 불가능하다. 그러나 이상적 매질이나 센서의 특성을 알고 있는 경우, 매우 복잡한 수식이기도 하나 $G(x,t)$ 를 알 수 있고 측정된 $V(x,t)$ 를 이용한다면 발생원의 함수 $S(x,t)$ 를 알 수 있다. 음향방출 시험의 궁극적 목적은 매질 내의 임의의 점에서 발생하는 음향 방출원의 발생원 함수 $S(x,t)$ 를 구하여 무슨 현상이 일어나고 있는지 규명하고자 하는 것이라 하겠다.

음향방출 신호는 크게 연속형과 돌발형 신호로 나눌 수 있다. 이러한 음향방출 신호는 위에서 언급한 발생원 함수를 정확히 구하고자하는 특별한 경우를 제외하고는 신호처리를 통해 발생 유무나 신호의 형상 등의 변수를 분석한다. 따라서 신호 처리기에서 신호를 처리하기 위해 임계전압을 설정하며 임계전압을 넘는 신호가 검출되면 음향방출 신호가 발생한 것으로 간주한다. 임계전압은 신호 발생 유무의 기준이 되는 것으로 임계전압이 너무 낮으면 잡음을 신호로 분석하려는 오류를 일으키고 너무 높으면 실제로는 음향방출 신호가 발생하고 있는데 신호가 검출되지 않은 것으로 인식하기 때문에 음향방출 시험에서 적절한 임계 전압의 설정이 매우 중요하다. 아래 그림 1-2는 전형적인 돌발형 음향방출 신호를 나타낸 것으로 threshold value(voltage), peak amplitude, rise time, duration, count, energy 등을 정의하고 있으며 신호 길이가 일정한 크기를 가지면 돌발형 신호로 볼 수 있고 무한히 길다면 연속형 신호로 볼 수 있다.

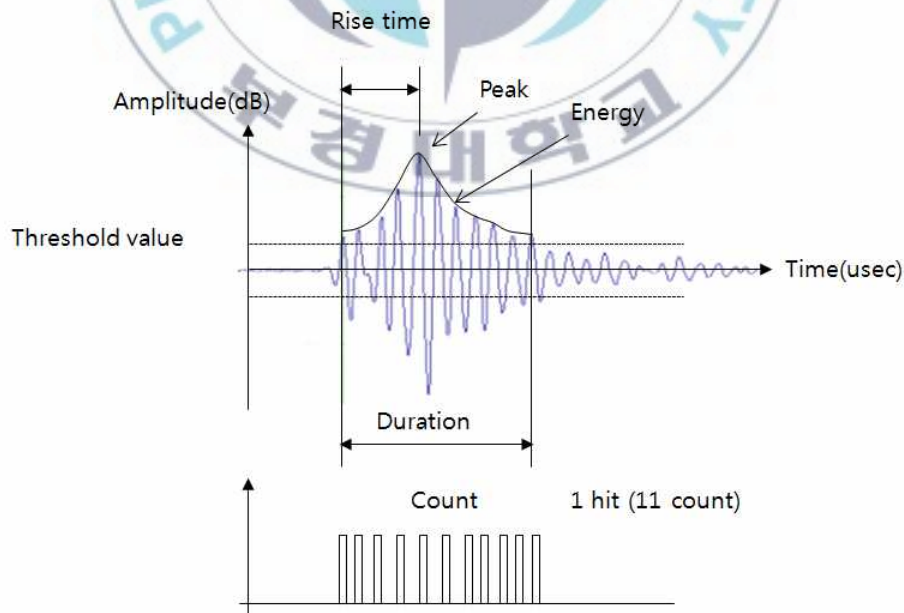


Figure 1-2. Parameters of AE signal

- threshold value(voltage)

임계전압은 음향방출 신호의 검출 유무를 결정하는 전압을 나타내는 것이다.

- hit 와 event

hit와 event는 음향방출 빈도를 나타내는 것으로 hit는 센서에서 검출한 돌발형 신호 하나하나를 나타내는 것이고, event는 발생원에서 음향방출 신호를 발생시키는 것을 나타내는 것이다. 따라서 여러 개의 센서를 사용하는 경우 하나의 event는 여러 개의 hit를 나타낼 수도 있다. 다만 방출원에서 하나의 음향방출 신호가 발생되면 음향방출 측정 장치에서 하나의 event만을 관찰할 수 있다는 가정하에서 신호를 해석하는 것이 일반적이다.

- peak amplitude

한 음향방출 event의 최대진폭을 나타내며, 발생원의 크기와 종류에 따라 달라지는 변수이다.

- count

설정된 임계전압을 넘는 파고의 수로 정의하며 AE 발생원의 빈도수 및 크기에 정성적으로 비례한다. 그리고 이 양은 매질의 전파특성이나 신호검출센서의 특징에도 크게 의존하므로 같은 조건하에서 상대적인 비교에 많이 이용된다.

- energy

한 개 event의 면적에 해당하는 것으로 발생원의 세기와 관련이 있다고 본다.

- rise time

한 event에서 임계전압을 통과한 시각부터 최대진폭에 도달할 때까지 걸린 시간을 나타내는 양으로 발생원의 오름 시간과 관계가 있다.

- duration

한 event에서 임계전압을 통과한 시각부터 event의 끝나는 시각까지 걸린 시간

- rising slope

최대진폭을 오름 시간으로 나눈 값이며 파형의 특성을 나타내는 변수로 이용된다.

- Frequency spectrum

AE 신호를 Fourier변환하여 초음파의 주파수 성분을 구한 것으로 발생원의 rise time 과 밀접한 관계가 있으며, 손상기구의 해석시 손상모드에 따라 주파수 성분이 달라진다고 알려져 있으며 파형해석에 이용된다.

음향방출신호의 해석은 음향방출원함수를 계산할 수 있다면 가장 좋은 방법이 되겠지만 특별한 경우를 제외하고 실제적이지 못하므로 음향방출 변수를 비교하는 상대적 비교법이 주로 이용되고 있다. 음향방출 신호의 해석은 크게 음향방출 신호의 과다로 표현되는 활성화도(activity) 및 신호의 모양과 관련된 파형분석 의한 방법으로 나눌 수 있다.

음향방출 활성화도에 의한 방법은 음향방출원의 크기 및 빈도수와 직접적 관계가 있는 event, count, amplitude, energy 등의 변수를 평가하는 것으로 건전성 평가에서 event 및 count를 이용한 평가의 예는 Kaiser 효과[13], Felicity ratio 및 creep 현상을 관찰 하는 것으로 Kaiser 효과는 응력이 기존에 받았던 응력에 도달하기 전까지는 음향 방출 신호를 방출 하지 않는 다는 것으로 시험편이 건전한 경우에 Kaiser 효과를 관찰 할 수 있다. 한편 Kaiser 효과와는 대조적으로 기존에 받았던 응력에 도달하기 전 음향방출이 일어나는 경우 기존에 받았던 응력과의 비율에서 음향방출이 나타나는가를 나타내는 것을 Felicity ratio라 한다. 그러므로 Felicity ratio 는 Kaiser effect와는 달리 기존에 받은 응력에 의해 얼마만큼의 손상을 입었는지의 척도로 이용될 수 있다. 또 일정한 응력을 받고 있는 시험편에서 event 또는 count가 증가하는 현상을 creep 이라고 하며 이러한 경우 시험편에는 손상의 진전이 일어나고 있다고 평가 할 수 있다.

파형 분석에 의한 방법은 어떤 특별한 변형기구에 의해 발생하는 음향방출 신호는 특별한 파형특성을 갖는 다는 생각에서 음향방출 신호의 파형이 어떻게 생겼는가를 비교하는 것으로 파형특성의 관찰은 rise time, duration, slope 및 주파수 스펙트럼이 이용되며, 이들을 통계적으로 처리하여 특별한 파괴기구에 대한 규명을 할 수가 있다. 한편 음향방출 신호 분석에 pattern 인식 이라고 불리는 방법이 이용되는데[14] 위의 파형분석 방법을 좀 더 정량적인 통계적 처리방법을 이용하는 것으로 특별한 손상메커니즘에서 발생한 음향방출 신호들에 대하여 신호 특징(feature)들을 추출하고 선택하여 신호를 분류한 후 알지 못하는 손상메커니즘에 의해 발생한 음향방출 신호의 손상메커니즘을 추정하고자 하는 것이다. 신호의 특징으로 사용되는 변수에는 앞에서 언급한 음향방출 신호분석 장비에서 이용하는 일반적인 음향방출 변수들뿐만 아니라 신호에서 특징이 될 수 있다고 생각되는 다양한 변수를 이용할 수 있다.

음향방출원의 위치표정(source location)이란 음향방출 발생원의 위치를 결정하는 것으로 음향방출 시험법의 중요한 목적 중의 하나라고 할 수 있다. 비파괴시험 측면에서 음향방출

시험은 방사선투과시험, 초음파탐상시험 방법과 달리 시험체내에서 발생하는 음향방출 신호를 음향방출 센서를 이용하여 검출 및 신호처리를 행함으로서 결함에 관한 정보를 파악하는 수동적인 방법(passive method)이다. 시험편 내에서 발생한 음향방출신호가 전파될 수 있는 곳이면 어느 곳이든 관계없이 음향방출 센서를 설치하여 감시할 수 있는 특징을 가지고 있으므로 시험 동안 음향방출 신호 발생위치에 대한 정보를 계산할 수 있다. 현재까지 대부분의 음향방출 시험에서는 감시 도중에 발생하는 음향방출 신호를 검출하여 음향방출 발생원의 위치를 결정하고, 방사선 투과시험과 초음파 탐상법을 이용하여 음향방출 발생원의 주위를 정밀히 평가하여 결함의 크기 및 종류를 파악하는 방법을 주로 사용하고 있다.

먼저 돌발형 신호의 위치표정방법은 센서별 신호의 도달 시간차를 이용하여 지진의 진앙을 찾는 것과 같은 방법으로 발생원의 위치를 결정하며, 연속형 신호의 경우 신호의 도달 시간을 결정할 수 없으므로 센서별 신호의 진폭으로 발생원의 위치를 결정한다. 또한 음향방출원의 대략적인 음향방출발생원의 위치를 어떤 영역내에 있다고 결정하는 위치표정의 방법을 영역표정(zone location)이라 하는데 이는 신호를 검출한 센서의 신호의 도달순서나 센서별 신호의 진폭으로서 대략적인 발생원 영역을 결정하는 것이다.

1.2 연구동향

복합재료의 압력용기의 내마모성, 내부식성, 경량성 등의 장점뿐만 경제성이 높아지면서 복합재료 압력용기의 관한 제작 및 설계에 관한 연구를 비롯하여 강도해석 및 손상연구도 꾸준히 진행되고 있다. 이 등[15]은 온도효과가 고려된 비선형 유한요소법을 이용한 각 층에서의 응력해석과 파손해석을 수행하여 라이너를 포함한 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 성능향상을 위한 최적설계방안을 제시하였고, 김 등[16-17]은 소성가공 이론 및 유한요소 해석을 통한 최적의 공정변수를 베이스로 구축하여 필라멘트 와인딩 압력용기의 최적설계와 용기개발에 관하여 보고하였다. 강 등[18]은 복합재료 압력용기 제작에 수반되는 각종 입력 변수들을 최적화하기 위한 알고리즘을 적용하여 수소저장 용기에 사용되는 type 3 복합재료 압력용기 설계프로그램을 제안하였고, 유 등[19]은 연료전지 차량용 고압기체수소 저장용기인 type 4 압력용기의 개발을 위한 강화섬유의 선택 및 와인딩 패턴 최적화를 위한 유한요소법을 보고하였다. 또한 복합재료 압력용기의 손상평가 및 응력해석에 관하여 도 등[20]은 복합재료 수소압력용기의 탄소성해석을 보고하였고, 황 등[21]은 카본 에폭시로 제작된 복합재 압력용기의 노화 특성과 구조 사용 수명 평가를 위해 자연노화된 링 시편을 채취하고 파괴시험을 실시하여 섬유와 수지 계면의 SEM을 이용하여 관찰하였다. 박 등[22]은 자긴처리에 의한 라이너의 압축잔류응력과 응력 거동을 예측할 수 있는 유한요소해석 기법을 제시하고, 복합재 압력용기의 반복 수명을 예측할 수 있는 방법을 제안하였고, 김 등[23]은 국내에서 제조된 Type 2, 3, 4 용기와 외국에서 생산된 Type 3 용기를 대상으로 결함깊이, 길이, 넓이에 따른 복합재료 결함 내구성시험을 수행하여 CNG용기의 내구성능을 평가하였고, 시험과 동일한 조건으로 복합재료 손상결함 조건을 컴퓨터로 전산모사하여 시험결과의 타당성과 유효성을 비교 검증하였다. 진 등[24]은 복합재 압력용기의 수명예측을 위하여 섬유에 대해서는 최대응력법을, 기지에 대해서는 등가응력법을, 섬유/기지 경계면에 대해서는 임계평면법을 사용하여 섬유와 기지의 물성값, 섬유체적비 및 와인딩 각도의 확률분포에 따른 복합재 압력용기의 피로수명 영향을 분석하였다. 또한 음향방출을 이용하여 복합재료의 건전성 평가에 관해 이 등[25]은 복합재료 연소관의 수압 시험시 낮은 압력 단계부터 높은 압력 단계까지 일정 압력 유지 상태(load-hold)에서 발생한 hit 수와 1분간 유지한 후 발생하는 hit rate(hit/sec)의 값의 크고 작음이 복합재 압력 용기의 결함수의 증감으로 나타났으며, 이

로부터 복합재 압력 용기의 파열 압력과 상관계 및 건전성을 예측할 수 있었다. 복합재 압력 용기의 파열 위치는 energy rate(energy/sec) 측정값을 분석하여 예측하였으며, 파열 압력의 30~50%에서 가능하다고 보고하였다. Maguire. 등[26]은 복합재료 압력용기(CRPV)와 LNG ship cargo containment의 제작 또는 사용중에 음향방출을 이용하여 건전성을 모니터링하고 음향방출원 map을 작성함이 유용하다고 보고하였으며, Blassiau. 등[27]은 장기 간동안 손상을 받는 CFRP 압력용기에서 발생하는 음향방출신호와 미세 손상 과정을 연관하여 설명하였다. 또한 용기의 손상위치 파악을 위하여 음향방출을 이용한 발생원 위치표정이 이용되는데 김 등[28]은 탄성파의 전파속도가 섬유 방향에 의존하는 이방성의 문제로 인하여 전통적인 방법을 그대로 적용할 경우 알고 있는 위치에 대해서도 정확도가 매우 낮으며, 발생원을 찾는 것은 거의 불가능하므로 이방성을 고려한 위치표정 방법을 통해 위치표정의 정확도를 향상시킨 결과를 보고하였고, 우 등[25]은 편측노치를 갖는 단일 Al판재 및 유리섬유/알루미늄 적층판에 대해 인장하중하의 발생하는 음향방출 신호의 도달시간차를 이용한 위치표정은 균열의 개시 및 진전과정의 특징을 보여주고 편측노치를 갖는 섬유/알루미늄 적층판의 파괴특성을 해명하였으며 이는 섬유층 배향 및 섬유/알루미늄층 구성비에 의존하여 변화한다고 보고하였다.

1.3 연구목적 및 내용

복합재료 손상평가에 대한 기존의 연구들은 주로 시편형태로 제작되어진 복합재료로 실험을 진행한 경우가 대부분이며 복합재료 압력용기에 대한 손상평가 연구가 부족한 실정이다. 또한 음향방출시험법을 제외한 기타 비파괴적 시험법의 적용과 만족할 만한 평가가 이루어지지 못한 점을 고려하여 본 연구에서는 음향방출을 이용한 Type 2 복합재료 압력용기의 손상평가를 위하여 다음과 같이 연구를 수행하였다.

Type 2 복합재료 압력용기의 주 강화재료인 glass fiber/epoxy composites의 파괴시 발생하는 음향방출 특성을 알아보기 위하여 용기에서 복합재료층을 분리-가공한 시편과 glass fiber bundle을 제작하였다. 제작된 glass fiber와 시편은 knife indentor와 loadcell를 이용하여 하중을 주어 압입하고 파괴시 발생하는 음향방출신호를 획득하고 분석하였다. (2장)

복합재료 압력용기는 금속재료로만 제작되어진 압력용기와는 다른 초음파전달특성을 나타낸다는 가정하에 복합재료 강화섬유의 감긴 방향과 용기내의 매질유무에 따른 전파속도 및 감쇠를 측정하였다. 또한 광대역과 공진형 음향방출센서를 사용하여 용기 전면에서 발생하는 음향발생원에 대한 신호감도 및 감쇠정도를 측정하고 실용기 실험에서 사용될 센서의 개수 및 부착위치를 결정하였다.(3장)

복합재료 압력용기는 다양한 환경에 노출되어 손상이 진행된다는 사실을 전제로 일반수 매질로 하여 용기를 가압하여 용기가 파열될 때까지 발생하는 음향방출 신호를 압력단계별로 분석하였고, 장시간 연료가 반복충전되면서 발생하는 피로환경을 고려하여 기계유를 매질로하여 용기가 누설파괴될때까지 반복 가압하여 피로주기에 따른 음향방출신호의 특성을 분석하였다. 또한 결함이 내재된 용기의 손상진전 및 파열특성을 알아보기 위하여 용기에 두가지 형태의 인공결함을 삽입하고 피로시험과 파열시험을 연속적으로 진행하여 발생한 음향방출신호를 분석하였다.(4장)

복합재료 압력용기의 음향방출 활성도가 손상초기에는 증가하지만 손상이 진행될수록 감소하는 특징을 나타내므로 음향방출신호의 변수는 피로주기에 따라 증가하거나 감소하는 경향을 뚜렷이 나타내지 않는다. 따라서 한 두 개의 특정 신호변수만으로 용기의 손상평가가 어려우므로 피로시험에서 추출한 신호변수의 특징을 다양하게 추출하여 확률신경망을 적용하여 용기의 손상정도를 분류해 보았다.(5장)

제 2 장 복합재료 손상메커니즘과 음향방출

2.1 서론

복합재료의 다양한 적용 분야와 경제성이 높아지면서 복합재료에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며 특히 음향방출을 이용한 복합재료의 손상 해석 및 결함 검출에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee 등[30]은 SiCp/A356 복합재료의 미시적 손상 축적을 모니터링하기 위하여 초음파와 음향방출기법을 적용하여 반복하중의 증가에 따라 초음파의 속도와 감쇠의 변화를 비교 분석하였고, Lee 등[31]은 음향방출의 해석과 함께 방사선 투과시험 및 현미경 관찰을 병행하여 실시하고 적층 탄소섬유강화 복합재료의 파손기구의 해석과 정량적 평가를 제안하였다. Lee 등[32]은 상수도관에 사용되는 GFRP관의 구조적 거동에 대한 실험적, 이론적 연구 결과를 제시하고 GFRP관의 하중-원주방향 변위에 대한 특성을 강성시험 결과와 비교, 분석하였으며, Park 등[33]은 임플란트용 복합재료의 계면물성과 미세파괴분해 메커니즘을 micro-mechanical 시험법과 음향방출시험법을 이용하여 평가하였다. Paik 등[34]은 복합재료 파손시 발생하는 음향방출 해석을 위해 3차원 유한요소법과 시간적분법을 이용하여 구현하고 적층 복합재의 강화섬유와 기지를 각기 모델링하거나 균질화한 모델링을 비교하였다. Park 등[35]은 보강된 복합적층 패널의 압축시험에서 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 누적 신호분포와 주파수 특성을 분석하여 복합재료의 파손모드의 주파수를 분류하였다. Kim 등[36]은 연속섬유강화 복합재료의 경우 섬유의 파괴, 모재의 파괴, 섬유와 모재의 분리, 층간분리 등의 파괴메커니즘이 복합적으로 발생하고 불규칙하게 반복되므로 주균열성장의 시작점과 파괴점에서의 인성치를 결정하기가 매우 어려우므로 파괴인성실험과 AE 시험 그리고 비디오 스코프를 이용하여 파괴인성측정법을 제시하였다. Yoon 등[37]은 음향방출을 이용한 loading - unloading 인장시험을 실시하고 하중단계에서 측정된 균열밀도는 누적 event counts와 매우 유사한 증가추세에 있음을 제시하고 AE 신호해석 결과로부터 적층 복합재료의 파괴거동 예측에 peak amplitude 분포보다는 signal energy 분포가 더 적합함을 제안하였다. Choi 등[38]은 직교형 복합재료적층판의 저온냉각시 형성되는 미세손상을 AE 거동의 해석을 통하여 검출하고 섬유파단과 모재파손을 초음파 C-스캔, 광학 및 주사현미경을 통해 관찰하였다. 저온냉각초기에 발생하는 거시적 파괴와 이에 수반되는 섬유파

단은 신호강도가 높고 고주파의 AE신호특성을 보이며, 후기에는 저주파의 AE 신호가 발생함을 관찰하였고, 미세파손 모드의 상대적 정도나 백분율의 평가방법을 제안하였고 이 등 [39]은 GFRP-알루미늄 하니컴 하이브리드 적층판의 압축하중 및 굽힘하중시험에서 발생하는 음향방출 특성을 분석하여 파손모드별 AE주파수 분포해석과 진폭분포 해석결과를 제시하였다. J. BOHSE 등[40]은 빔형태의 더블 캔틸레버 복합재료 시편의 파손모드와 음향방출의 특성을 비교하여 음향방출 시험법이 하중시험 전단계나 손상메커니즘의 실시간 모니터링에 매우 유용하며, AE hits와 energy의 상관관계 등을 통하여 복합재료 손상메커니즘을 설명하였고, R. W. Neu 등[41]은 titanium alloy matrix composites의 열응력 실험에서 하중인가시 발생하는 음향방출 신호와 강화섬유의 손상 단계 설명하였고, Wang 등[42]은 연속유리섬유와 폴리프로필렌 복합재료로 제작한 6종류의 시편으로 인장하중시험을 수행하고 그때 발생한 음향방출 신호의 누적 AE event와 누적 AE energy의 비교 특성을 제시하고 광학 현미경으로 관찰한 파손모드를 보고하였다. Bussiba 등[43]은 카본/에폭시와 카본/카본 복합재료의 굽힘시험에서 발생한 음향방출 신호를 분석하여 카본/에폭시 시편의 파손시 발생하는 음향방출신호의 특징주파수를 보고하였다.

본 장에서는 Type 2 복합재료 압력용기의 주 강화재료인 glass fiber/epoxy composites의 파괴시 발생하는 음향방출 특성을 알아보기 위하여 실제 용기에서 복합재료층을 분리-가공한 시편과 glass fiber bundle을 knife indenter와 loadcell를 이용하여 하중을 주어 압입하고 파괴시 발생하는 음향방출신호를 획득 분석하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험용기는 그림 2-1과 같은 형상과 크기를 가지도록 설계제작된 53 리터 압축천연가스 자동차용 연료탱크이다. 실제 용기의 몸통부에서의 금속라이너의 두께는 약 6 mm이며 재료는 34CrMo4 steel plate를 사용하여 Deep Drawing Ironing (DDI) 방식으로 제작되었고, 금속라이너의 화학 조성은 표 1-1과 같으며 용기의 사용압력은 20.7 MPa이다. 용기의 몸통부는 둘레방향으로 유리강화섬유가 그림 2-1의 A와 같이 epoxy를 matrix로 하여 감겨져 있으며 두께는 약 6.2 mm이다.

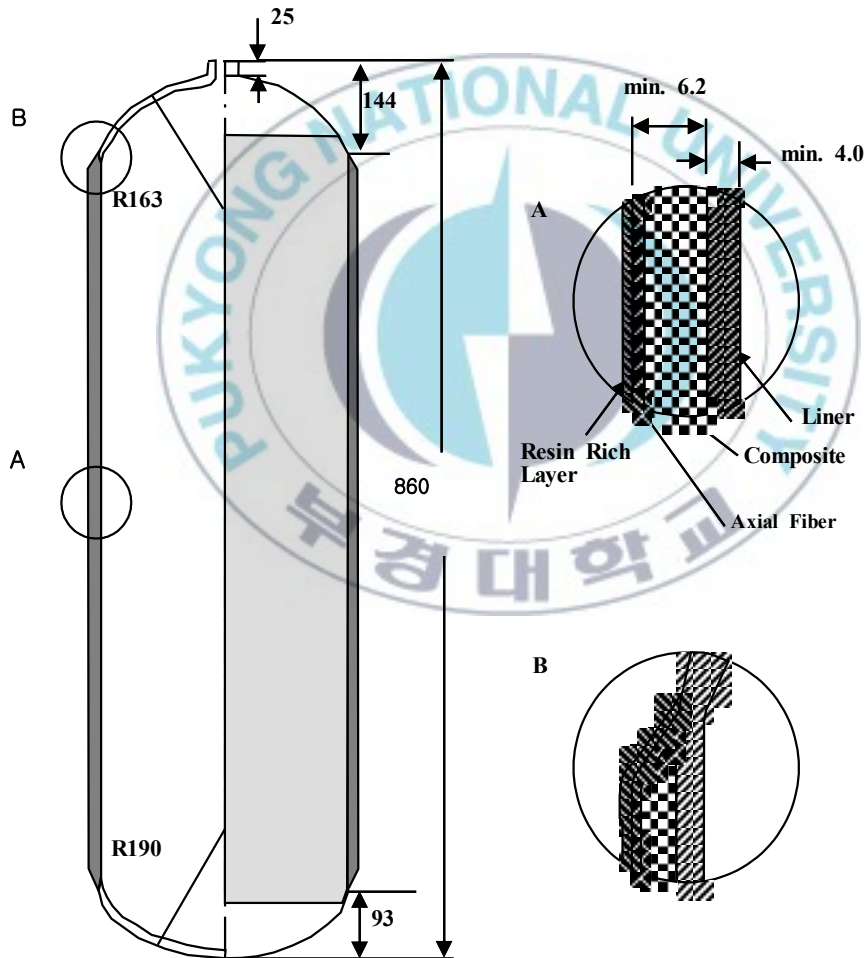


Figure 2-1. Shape of CNG fuel tank

Table 2-1. Chemical composition of metal liner (unit : wt.%)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
Max.	0.38	1.00	0.40	0.015	0.010	1.20	0.40
Min.	0.25	0.40	0.10	-	-	0.80	0.15
P+S	≤ 0.020						

Type 2 복합재료 압력용기에서 주 강화재인 Glass fiber composite의 파괴시 발생하는 음향방출신호의 특성 파악을 위해 그림 2-2와 같이 시편을 제작하여 가공하였다. 시편은 사용하지 않은 건전한 복합재료 압력용기의 복합재료층을 가로세로 각 200 mm 크기로 절단하였다. 그리고 그림 2-1에서 보면 용기의 복합재료층의 표면에 약 1 mm 두께의 longitudinal 방향 fiber와 resin 코팅층이 있어서, hoop 방향의 fiber와 matrix 파괴시 발생하는 음향방출신호만을 수집하기 위해 시편 중앙부 표면을 일부 제거하였다.



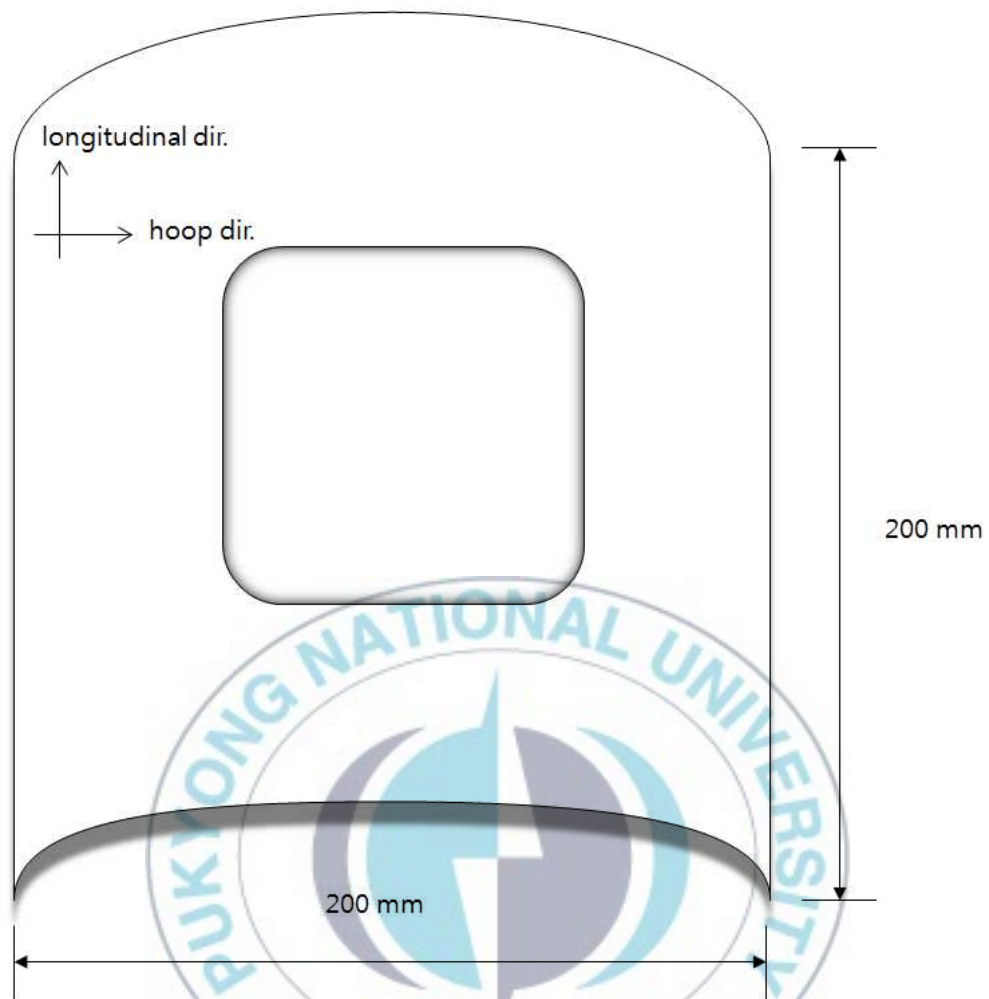


Figure 2-2. Specimen of Type 2 vessel composites

그림 2-3와 같이 그라인딩을 한 시편의 중앙부에 fiber가 감긴 방향 (hoop direction)과 수직방향 (longitudinal direction)으로 일정간격을 두고 각 각 11회씩 칼날을 하강시켜 2 kgf/min 속도로 5 kgf가 될 때까지 압입시켜 fiber와 matrix가 파괴될 때 발생하는 음향방출 신호를 획득하였다. 이 때의 신호문턱값은 40 dB로 설정하고 사용된 센서는 광대역 (WDI, 100~1000 kHz)였으며 감도는 센서로부터 25 mm이내 거리에서 평균 98 dB였다.

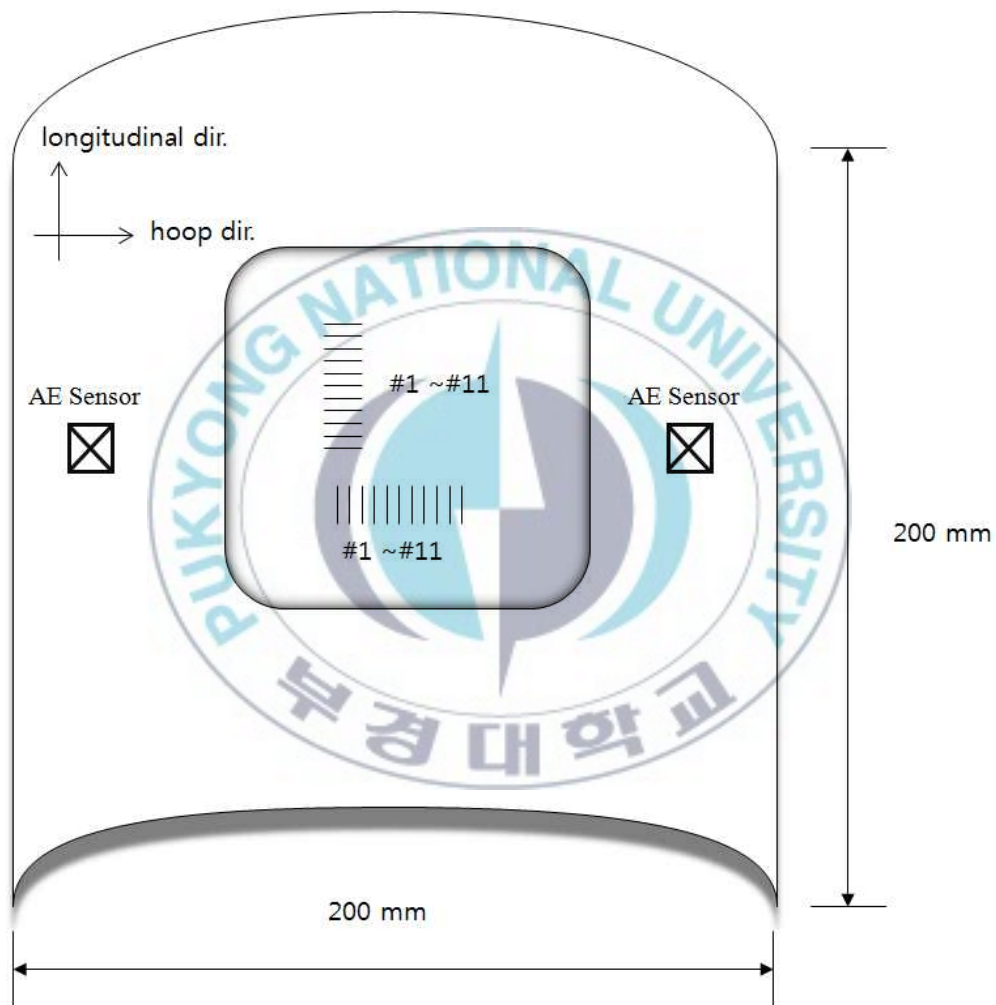


Figure 2-3. Position of Indentation (Threshold 40 dB)

그림 2-4는 앞의 그림 2-2와 같은 방법으로 그라인딩을 한 시편의 중앙부에 fiber가 감긴 방향과 수직방향으로 일정간격을 두고 각 각 5회씩 칼날을 하강하여 2 kgf/min 속도로 5 kgf가 될 때까지 압입시켜 fiber와 matrix가 파괴될 때 발생하는 음향방출 신호를 획득하였다. 이 때의 신호문턱값은 백그라운드 잡음이 없는 한도까지 낮추어 32 dB로 설정하고 사용된 센서는 광대역 (WDI, 100~1000 kHz)였으며 감도는 센서로부터 25 mm 이내 거리에서 평균98 dB였다.

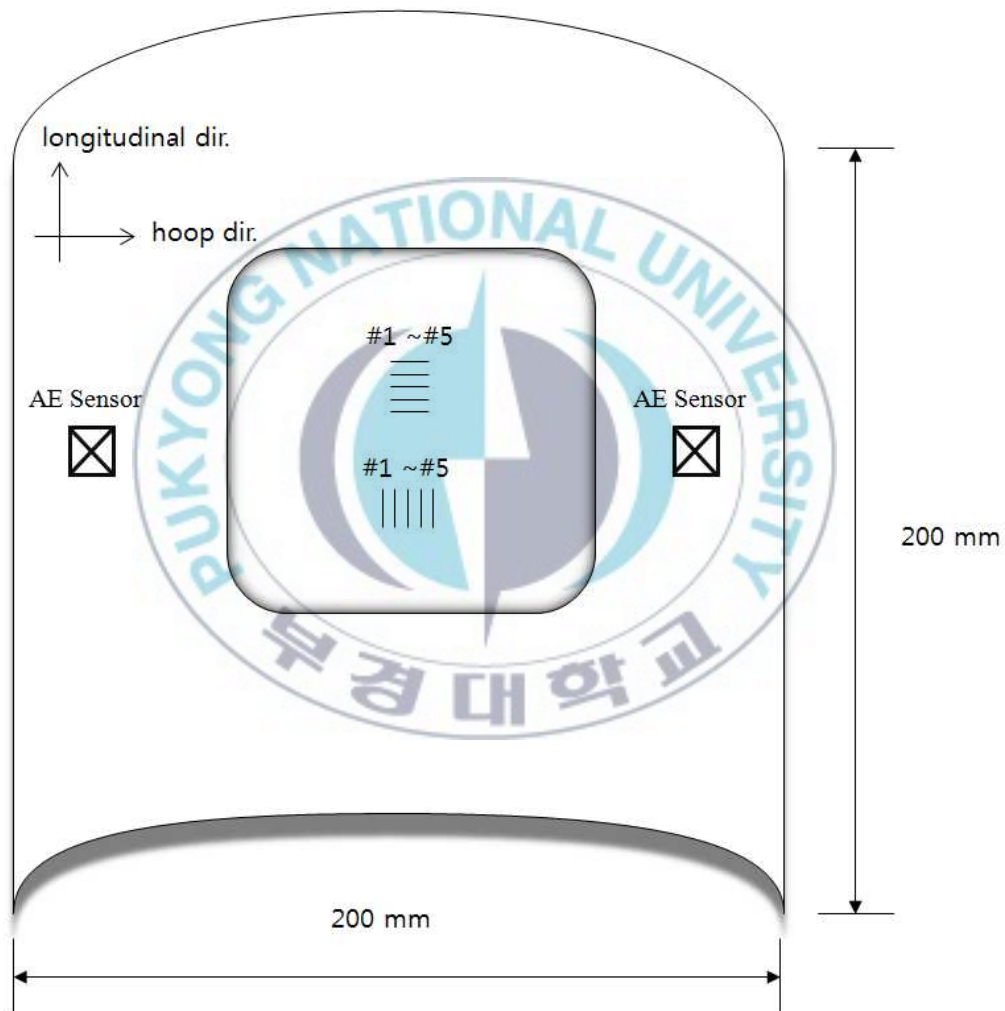


Figure 2-4. Position of Indentation (Threshold 32 dB)

실험장치는 그림 2-5과 같이 48 mm 강판위에 복합재료 시편을 위치시키고 fiber와 matrix 파괴를 위한 indenter는 칼날과 로드셀로 구성되어 있다. 칼날은 반원형이고 측정시편의 fiber와 수직 또는 수평하게 위치시키고 복합재료 파괴시 발생된 음향방출 신호는 Sensor 1과 2로 측정하였다. 이 때 획득된 신호 중에 linear source location 방법을 사용하여 파단위치에서 표정된 이벤트 신호만을 추출하여 분석하였다.

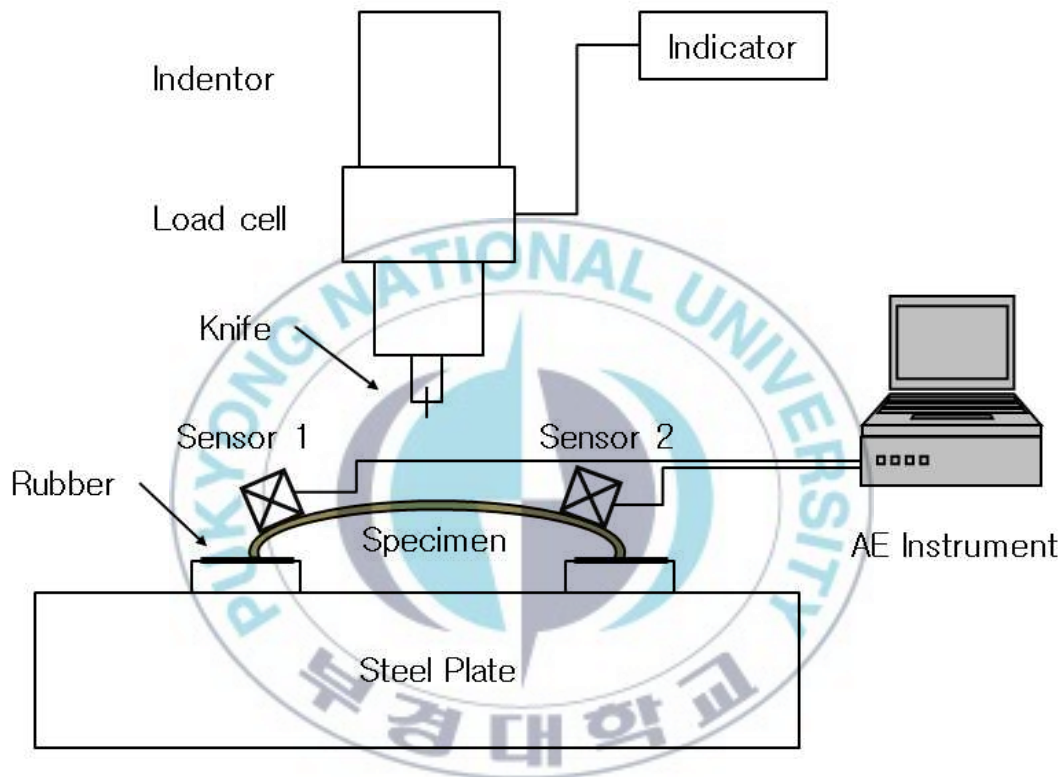


Figure 2-5. Schematic diagram of Experimental setup

실험용기 복합재료의 fiber 파단시 발생하는 음향방출신호 특성을 파악하기 위해 fiber를 그림 2-6과 같이 정렬하고 그림 2-5의 실험장치에서 칼날을 fiber의 길이방향에 대해 0°, 30°, 45° 그리고 60° 방향으로 절단각을 증가시켜 fiber를 절단시키고 그 때 발생하는 음향방출신호를 획득하였다.

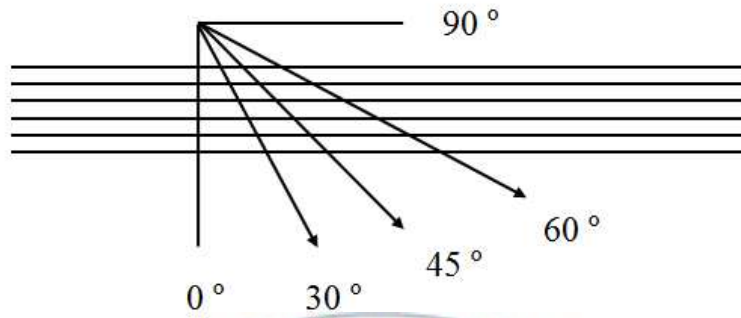
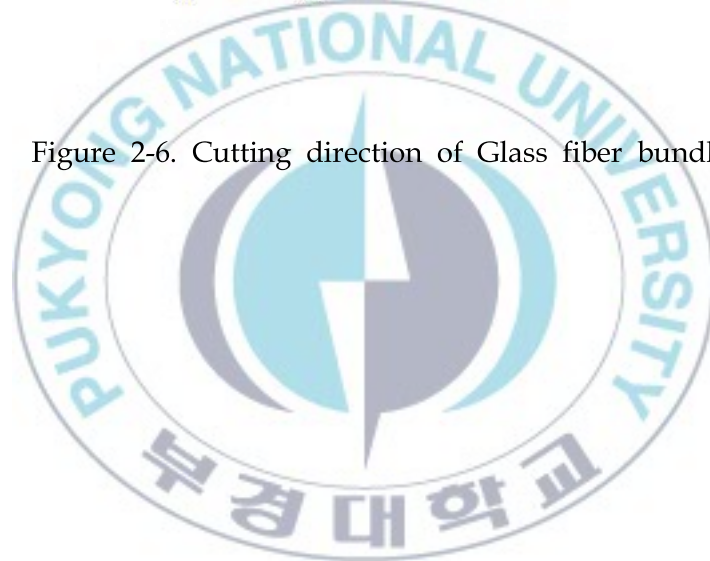


Figure 2-6. Cutting direction of Glass fiber bundle



2.3 결과 및 토의

그림 2-7은 그림 2-3과 같이 칼날의 압입하중을 증가시키면서 fiber bundle에 수직한 방향(0°)으로 압입시켜 fiber가 파단될 때 발생한 음향방출 신호의 하중-진폭 그래프이다. fiber는 놓인 위치에 따라 순차적으로 파단되었으며, 그 때의 압입하중은 1 kgf 이하였고 신호의 평균진폭은 43.6 dB였다.

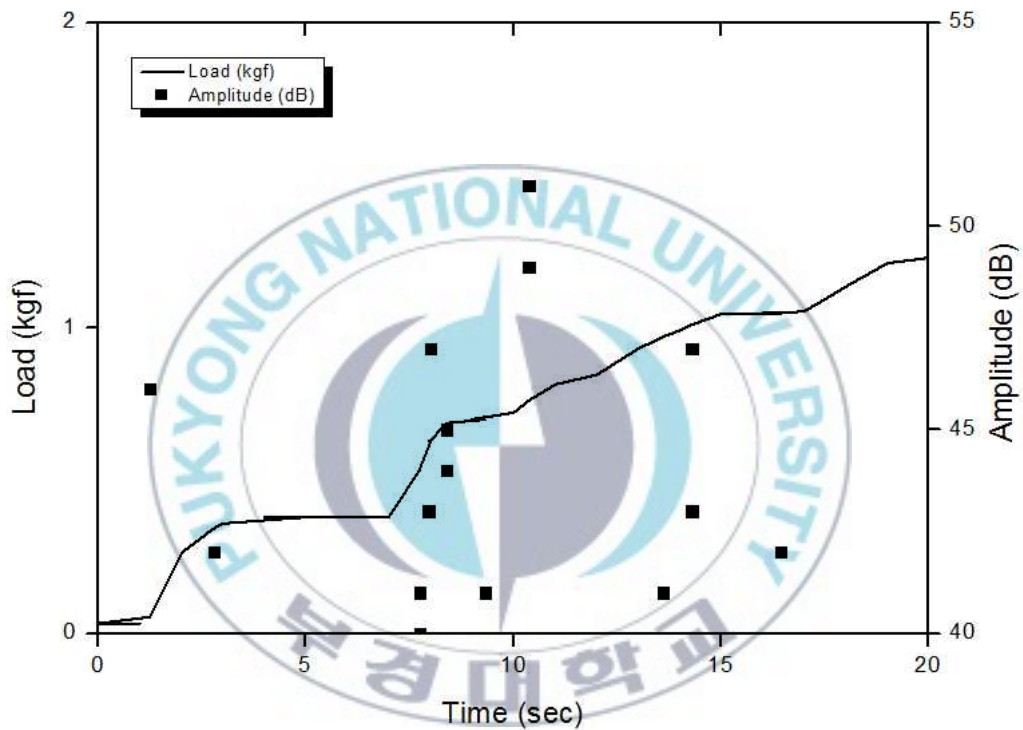


Figure 2-7. AE hits of glass fiber breakage : time dependence of load and amplitude

또한 그림 2-8은 앞의 그림 2-3과 같은 방법으로 fiber bundle에 절단각을 다르게 하여 fiber 파단시 발생한 음향방출 신호의 평균진폭을 나타내고 있다. 신호의 평균진폭은 섬유목음이 칼날과 수직방향(0°)으로 절단되었을 때 43.6 dB로 가장 낮았으며 점차 절단각도를 증가시킬수록 파단시 발생하는 음향방출신호의 진폭값이 증가함을 알 수 있다. 이는 fiber의 절단각도가 커짐에 따라 fiber의 파단면이 증가되어 음향방출신호의 amplitude가 증가되는 것으로 판단된다.

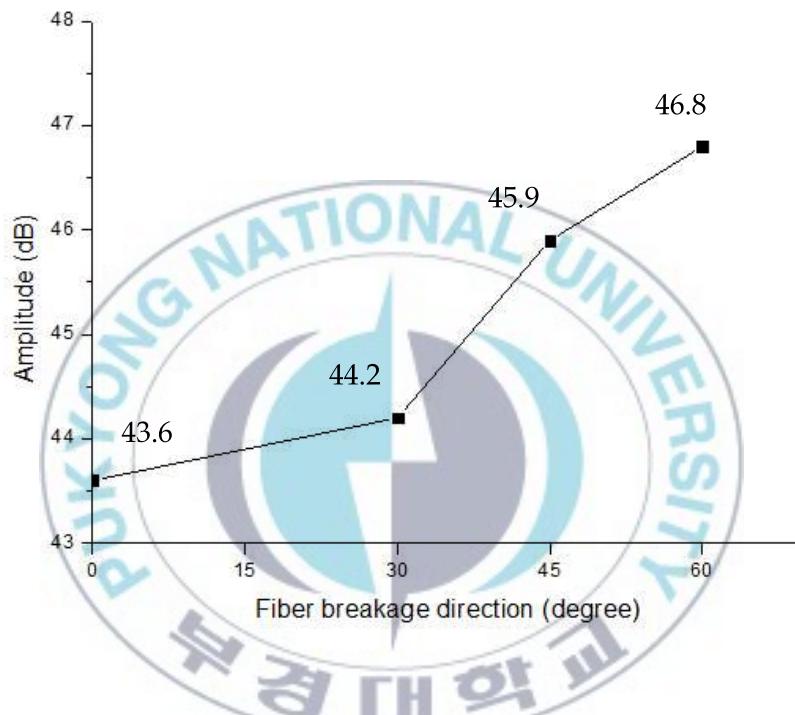


Figure 2-8. Amplitude of fiber breakage direction

그림 2-9는 그림 2-2의 시편을 fiber가 감긴 방향(hoop direction)으로 칼날을 압입하여 시편이 파괴될 때 발생하는 음향방출신호의 하중-진폭 그래프이다. 신호문턱값을 40 dB로 설정하였을 때는 시편이 파괴될 때의 주된 손상 메커니즘을 matrix cracking과 fiber breakage로 크게 나뉘어 볼 수 있으나, 압입하중이 증가함에 따라 matrix가 파괴됨에도 불구하고 신호의 진폭이 신호 문턱값보다 낮아 거의 나타나지 않는 것으로 보이며, 소수의 fiber가 압입되는 칼날에 비스듬한 방향으로 파괴될 때 발생하는 음향방출 신호만이 산발적으로 나타나는 것으로 판단된다.

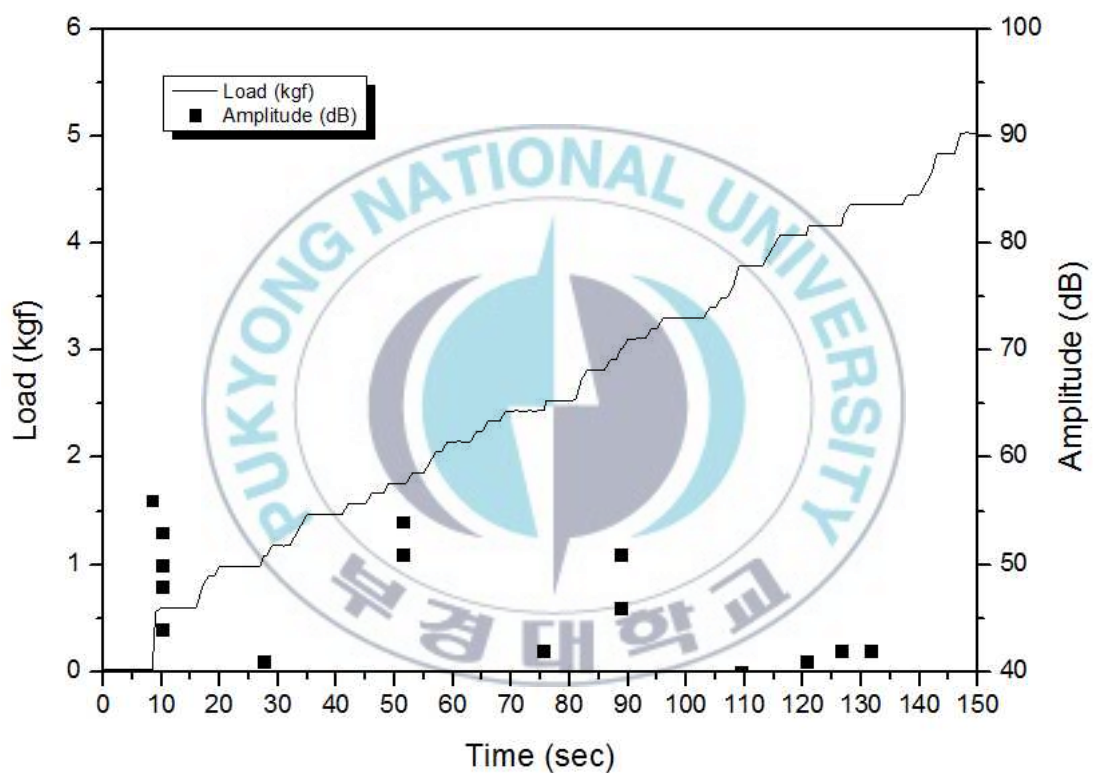


Figure 2-9. Load and Amplitude at hoop direction indentation (th:40dB)

그림 2-10은 그림 2-2의 시편을 유리섬유가 감긴 방향과 수직한 방향(longitudinal direction)으로 칼날을 압입하여 시편이 파괴될 때 발생하는 음향방출신호의 하중-진폭 그래프이다. 그림 2-9의 hoop 방향 절단에서는 압입하중이 증가함에 따라 matrix 파괴 신호의 진폭이 신호 문턱값보다 낮고 fiber의 파괴량이 작아 전체적인 신호수는 적었으나, longitudinal 방향에서는 hoop 방향과 비교하여 상대적으로 많은 fiber가 파괴되어 문턱값보다 높은 음향방출 신호가 지속적으로 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

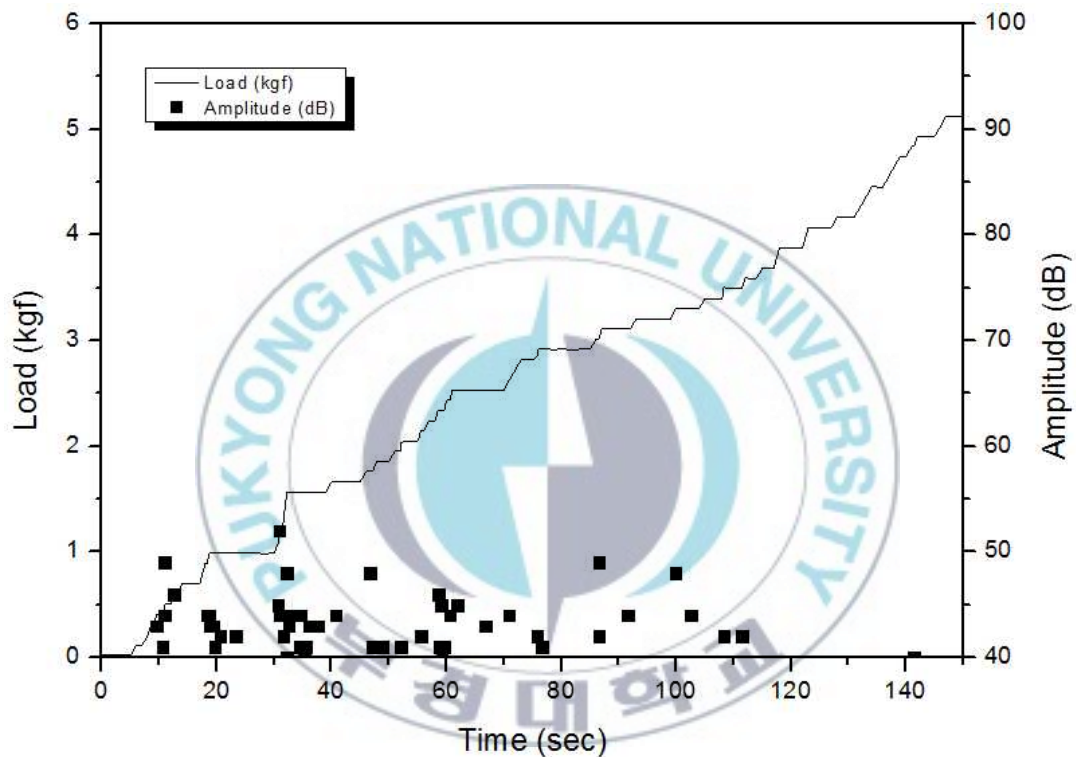


Figure 2-10. Load and Amplitude at longitudinal direction indentation (th:40dB)

그림 2-11은 신호문턱값을 32 dB와 40 dB로 설정하고 시편파괴시 칼날의 파단방향을 fiber에 수평한 방향(hoop dir.)과 수직한 방향(long. dir.)일 때의 발생된 음향방출신호의 최대진폭(peak amplitude)의 분포를 보여주고 있다. 표 2-2를 참고해서 보면 수평방향 신호의 평균 진폭이 수직방향보다 높게 나타나고 있는데 이는 그림 2-7과 2-8을 보면 시편의 fiber의 파괴량은 칼날의 압입방향이 수직방향일 때가 수평방향일 때 보다 많으며, matrix의 파괴량은 거의 비슷함을 볼 수 있으며 그에 따라 신호진폭의 차이를 나타내고 있다.

hoop 방향에서 진폭값이 fiber의 파괴가 적음에도 높게 나타나는 것은 앞의 그림 2-8에서 살펴본 바와 같이 fiber의 절단방향에 따른 절단각이 증가할수록 신호의 진폭이 증가되므로 fiber 파괴에 따른 신호수는 수직방향에 비해 작으나 신호의 진폭은 높음을 확인할 수 있었다. 또한 신호문턱값이 40 dB일 때는 matrix 파괴에서 나타나지 않았던 음향방출 신호가 문턱값을 32 dB로 설정하였을 때는 잘 나타나고 있음을 관찰할 수 있으며, longitudinal 방향으로 시편이 파괴될 경우 40 dB이하의 신호가 32 dB일 때와 비교하여 많이 증가함을 볼 수 있으며, 이는 본 실험에서 사용된 복합재료 압력용기 시편의 복합재료 matrix의 파괴시 발생하는 음향방출 신호의 진폭은 40 dB 이하이고 fiber 파괴시는 40 dB 이상임을 알 수 있다.

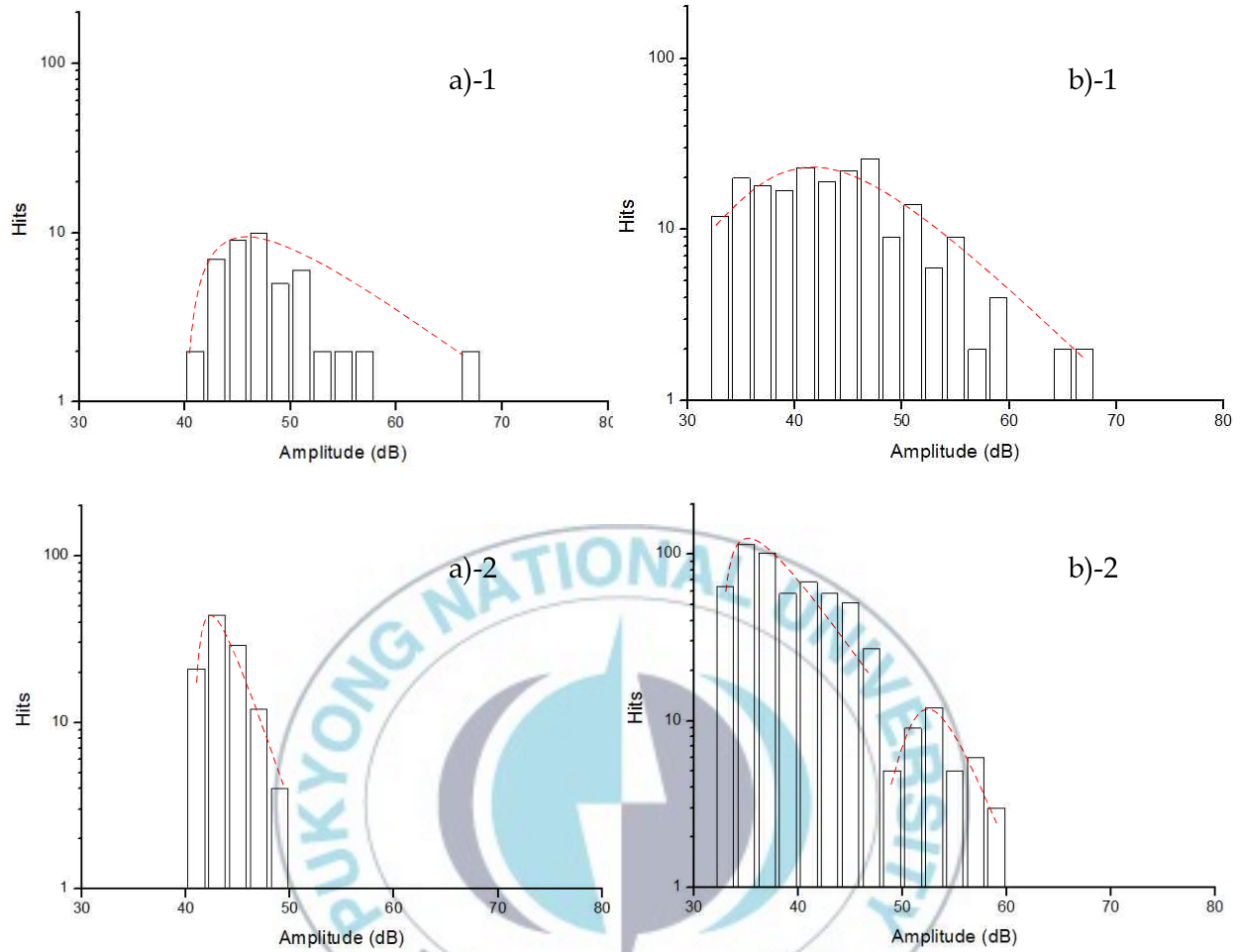


Figure 2-11. Amplitude distribution of specimen failure

: a) threshold value 40 dB - 1) hoop direction 2) longitudinal direction
b) threshold value 32 dB - 1) hoop direction 2) longitudinal direction

Table 2-2. Result of AE parameters (threshold value : 40 dB)

Direction	Hits	Risetime (μ s)	Count	Energy (μ V · sec/count)	Duration (μ s)	Amplitude (dB)
Hoop	48	23.8	10.7	1.96	107.7	48.0
Long.	110	12.7	2.4	0.02	40.3	43.2

Table 2-3. Result of AE parameters (threshold value : 32 dB)

Direction	Hits	Risetime (μ s)	Count	Energy (μ V · sec/count)	Duration (μ s)	Amplitude (dB)
Hoop	210	36.1	19.5	3.45	311.7	43.8
Long.	582	26.1	9.2	0.79	142.9	39.2



일반적으로 음향방출 신호의 진폭 기울기는 손상메커니즘과 관련이 있다고 알려져 있으며,[56-60] 그림 2-12, 2-13, 2-14를 보면 유리섬유의 수평방향으로 칼날을 압입했을 때는 그 기울기는 0.08이며 수직방향일 때는 0.16로 그 차이를 구분할 수 있으며, 특히 수직방향의 경우 fiber의 파괴시 나타나는 진폭 기울기와 같다. 따라서 수직방향 파괴시 발생하는 음향방출신호로 주 파괴 메커니즘은 fiber 파괴임을 알 수 있다.

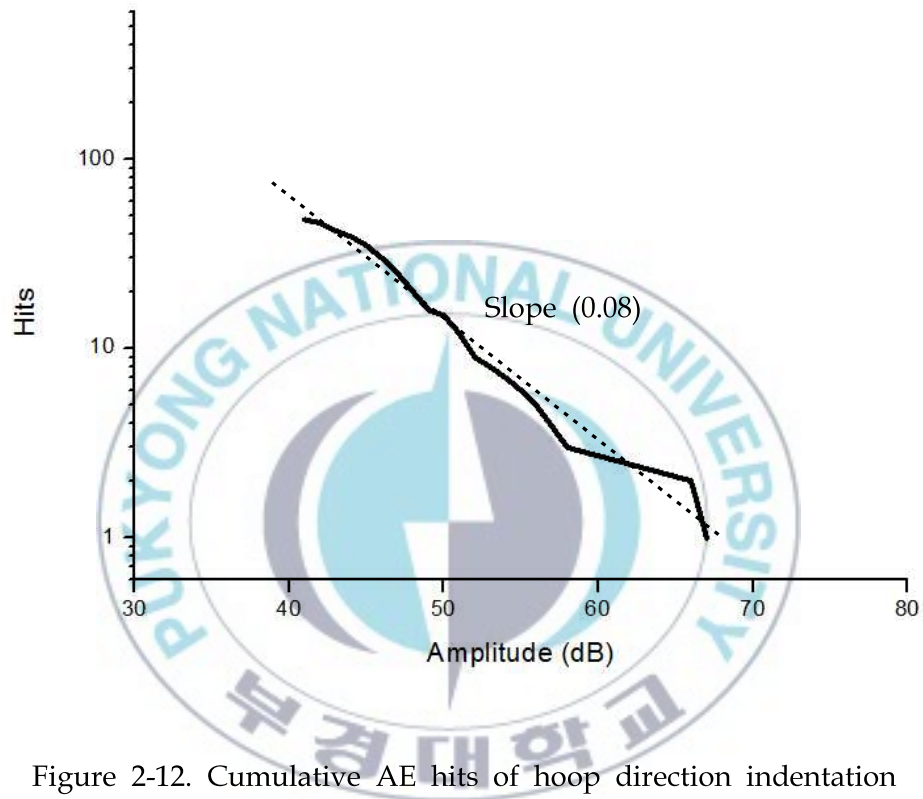


Figure 2-12. Cumulative AE hits of hoop direction indentation

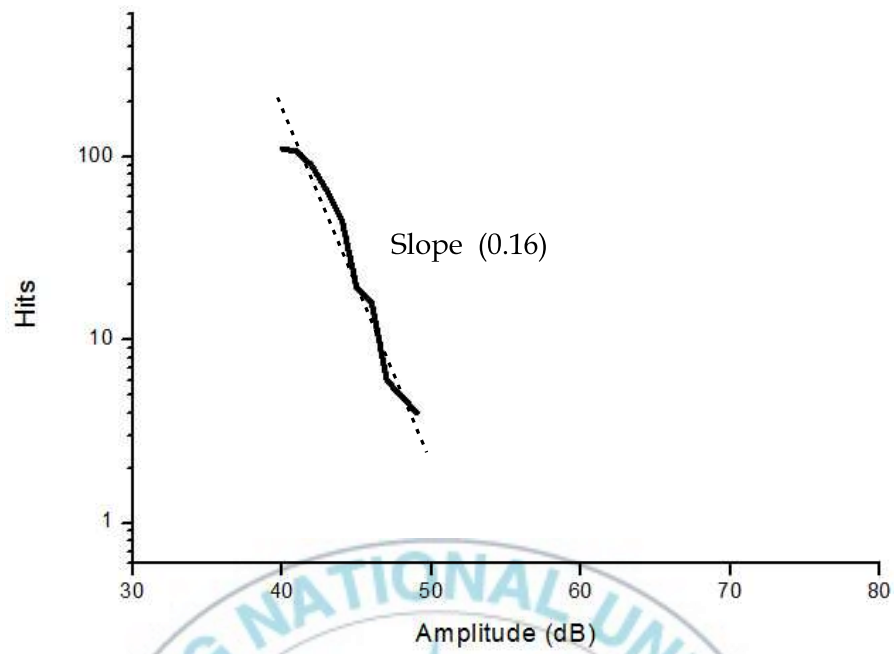


Figure 2-13. Cumulative AE hits of longitudinal direction indentation

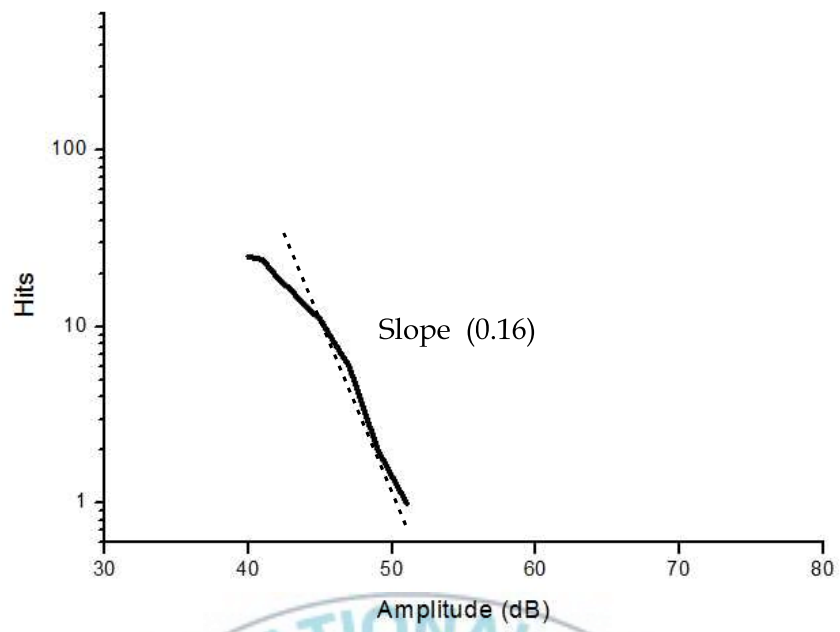


Figure 2-14. Cumulative AE hits of glass fiber breakage



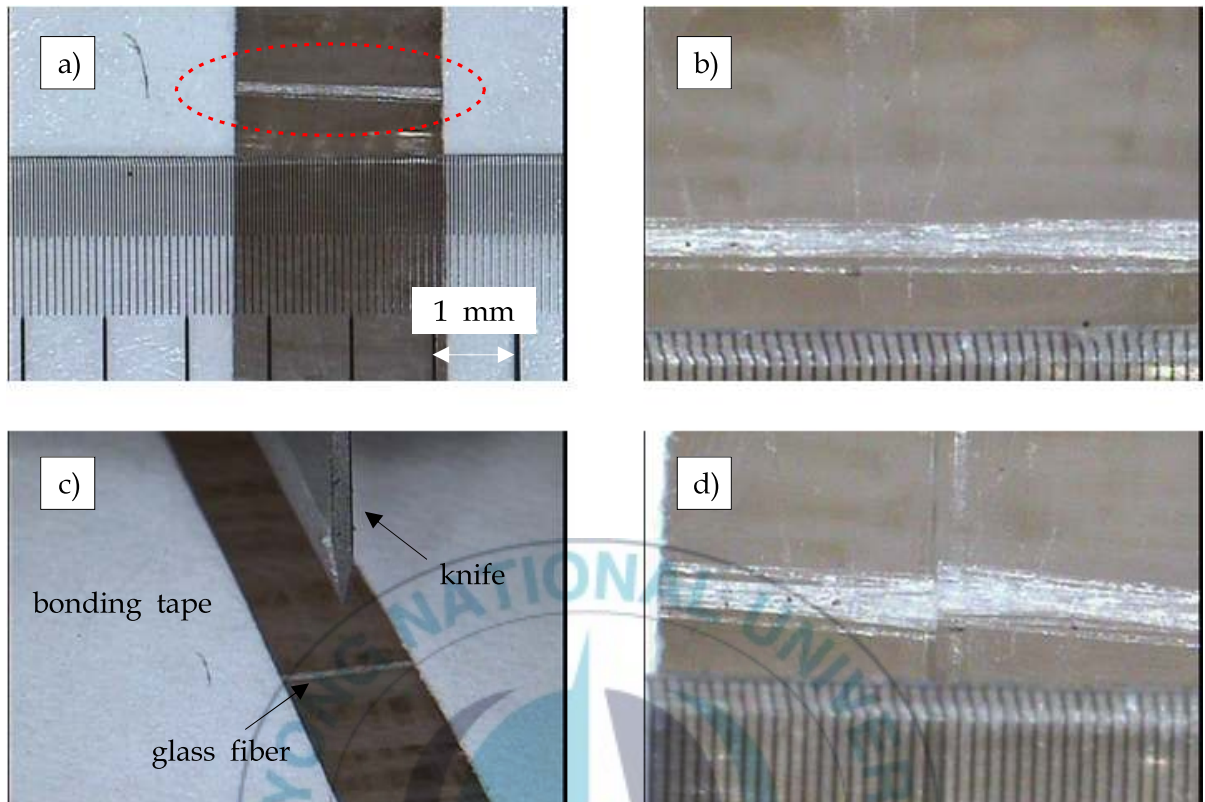
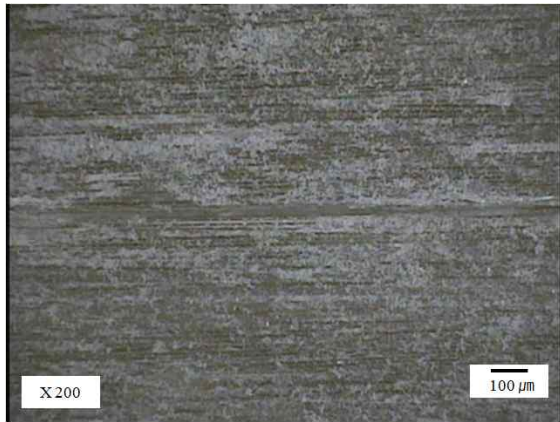
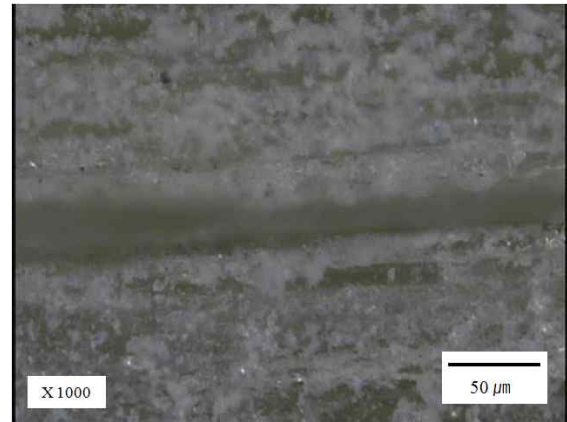


Figure 2-15. Photo of a) and c) glass fiber breakage experiments setup, b) before breakage, d) after breakage (scale : 50 μm)



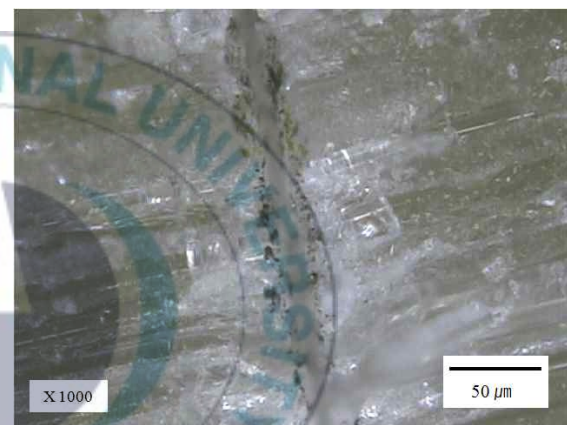
a)-1



a)-2



b)-1



b)-2

Figure 2-16. Optical microscopy of indentation

: a) hoop direction -1) $\times 200$ -2) $\times 1000$

b) longitudinal direction -1) $\times 200$ -2) $\times 1000$

2.4 결론

본장에서는 Type 2 복합재료 압력용기의 주 강화재료인 복합재료층을 분리하여 제작한 시편의 파괴시험시 발생하는 음향방출 신호를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유리강화섬유에 knife를 압입시켜 섬유가 파괴될 때 발생한 음향방출 신호의 amplitude는 섬유가 칼날과 수직방향(0°)으로 절단되었을 때 43.6 dB로 가장 낮았으며 점차 절단각도를 증가시켜 30° , 45° , 60° 로 절단 시킬수록 44.2 dB, 45.9 dB, 46.8 dB로 발생하는 음향방출신호의 진폭값이 증가함을 알 수 있다. 이는 유리섬유에 대한 칼날의 절단각도가 커짐에 따라 유리섬유의 파단면이 증가되어 음향방출신호의 진폭이 증가되는 것으로 판단된다.

2. 시편을 유리섬유가 감긴 방향(hoop direction)과 수직한 방향(longitudinal direction)으로 칼날을 압입하여 시편이 파괴될 때 발생하는 음향방출신호 hit는 longitudinal 방향이 hoop 방향보다 많이 나타났으나 신호의 amplitude는 hoop 방향이 longitudinal 방향보다 높게 나타나고 있다. 이는 섬유 파괴시 hoop 방향의 섬유 절단각이 longitudinal 방향에 비해 커서 비록 hit 수는 적지만 섬유 절단에 따른 신호가 포함되어 amplitude는 오히려 높게 나타나는 것으로 판단된다.

3. hoop 방향 시편파괴에서 신호문턱값을 32 dB로 설정하였을 경우에는 40 dB에서 나타나지 않았던 matrix 파괴신호가 급증하였음을 볼 때 유리섬유의 파괴시 신호의 진폭은 40 dB이상이고 matrix 파괴시 신호의 진폭은 40 dB이하임을 알 수 있었다.

4. 음향방출 신호의 amplitude 기울기는 음향방출원과 관련이 있으며, hoop방향으로 칼날을 압입했을 때 그 기울기는 0.08이며 longitudinal 방향일 때는 0.16로 그 차이가 구분되었다. 특히 longitudinal 방향의 경우 유리섬유의 파괴시 나타나는 진폭 기울기와 같으므로 longitudinal 방향의 주 손상메커니즘은 강화유리섬유임을 알 수 있었다.

제 3 장 복합재료 압력용기의 초음파 신호전달 특성

3.1 서론

본 장에서는 Type 2 복합재료 압력용기는 금속재료로만 제작되어진 압력용기와 달리 강화유리섬유의 감긴방향에 따른 복합재료의 신호전달은 이방성을 가지므로 복합재료 강화섬유의 감긴 방향과 용기내의 매질유무에 따른 전파속도 및 감쇠효과를 측정하였다. 음향방출원은 0.5 mm 2H 연필심 파괴(Pencil Lead Breakage)이고 광대역형과 공진형 음향방출센서를 비교하여 용기 전체에서 발생하는 음향발생원에 대한 신호감도 및 감쇠정도를 측정하고 실용기 실험에서 요구되는 AE 센서의 개수 및 부착위치를 결정하였다.

Dong[44]은 압전 필름을 이용한 음향방출 센서를 구성하고 연필심 파괴를 통해 음향방출 신호의 거리에 따른 감쇠를 측정하였으며 압력용기내에 유체가 있는 경우 음향방출 신호의 진폭의 감쇠가 있음을 제시하고, 센서와 신호발생지점이 가까운 경우에 감쇠영향이 더 크다고 보고하였다. 조 등[45]은 복합적층판의 고속충격에 의한 손상 개시와 전파를 모니터링하기 위해 PVDF 센서와 AE 센서를 사용하여 신호의 도달속도를 측정하고 웨이블릿 변환을 사용하여 신호의 주파수와 충격에너지와의 상관관계를 설명하였다. 충격에너지가 증가할수록 고주파 신호가 증가하였고 PVDF 센서와 AE 센서 신호에서 유사한 경향이 있음을 보고하였다. Czigany[46]은 GFRP 복합재료시편 파괴시 발생하는 음향방출 신호와 SEM관찰을 통하여 신호의 진폭과 파손모드를 설명하고 하중에 따른 음향방출 이벤트와 기계적 물성치의 관계를 제시하였다. Aberg[47]은 FEM을 이용하여 복합재료 파괴메커니즘을 섬유파단과 기지분열 두 가지로 구분하여 수치해석 결과를 제시하고 적층복합재료시편 파괴시험을 통해 시편파괴시 나타나는 신호의 속도측정과 주파수분석을 실시하였다. matrix와 fiber 파괴시 발생하는 음향방출 신호의 특정 주파수를 보고하였다.

3.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험용기는 그림 1-1과 같은 형상과 크기를 가지도록 설계된 53 리터 압축천연가스 자동차용 연료탱크이다. 용기의 몸통부에서의 금속라이너의 실제 두께는 약 6 mm이며 재료는 34CrMo4 steel plate를 사용하여 Deep Drawing Ironing (DDI) 방식으로 제작되었고, 금속라이너의 화학 조성은 표 1-1과 같으며 용기의 사용압력은 20.7 MPa이다.

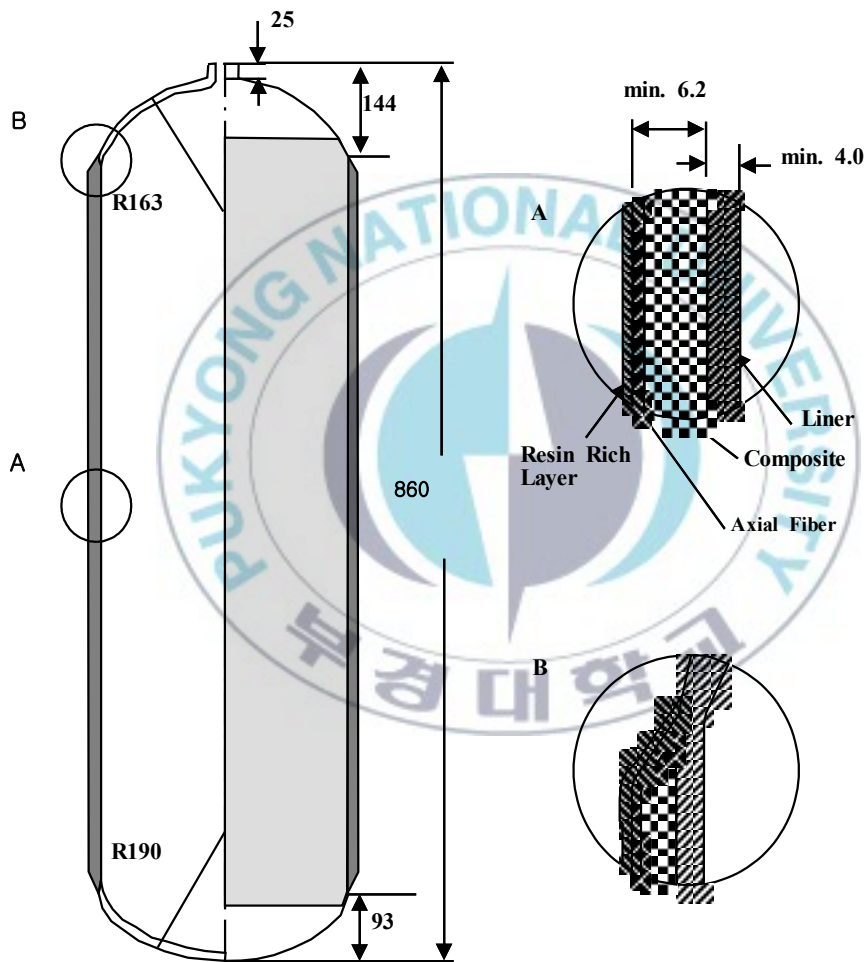


Figure 3-1. The shape of CNG fuel tank

Table 3-1. Chemical composition of metal liner (unit : wt.%)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
Max.	0.38	1.00	0.40	0.015	0.010	1.20	0.40
Min.	0.25	0.40	0.10	-	-	0.80	0.15
P+S	≤ 0.020						

그림 3-2와 같이 본 연구에 사용된 실험장비는 PCI Digital Signal Processing 보드 (16bit, 10MHz A/D converter)가 내장된 DiSP-52 (AE Workstation, model by PAC)이고 사용된 음향방출 센서는 프리앰프가 내장된 중심주파수 150 kHz 공진형(R15I, model by PAC)과 광대역(WDI, model by PAC)이다. 센서는 마그네틱 홀더를 사용하여 진공그리스 (Dupont)를 접촉매질로 하여 용기 표면에 부착하였고, 케이블은 길이 5 m의 RG58A/U를 사용하였다.



Figure 3-2. Schematic diagram of experiment

실험용기에서 초음파의 전파특성을 관찰하기 위해 유리섬유강화 복합재층은 이방성재료로 가정하여 그림 1-3과 같이 섬유의 감긴 방향을 0° 로 하여 30° , 60° , 90° 에서의 0.4 m 간격에서 속도와 감쇠를 측정하였고, 금속라이너에서는 등방성으로 가정하여 0.7 m 떨어진 위치에서 용기의 축방향으로 속도와 감쇠를 측정하였다. 장비의 시험문턱값(Threshold value)은 50 dB로 설정하고 센서의 감도측정을 위한 의사음향방출원은 직경 0.5 mm의 2H pentel 연필심 파괴였다. 이 때 센서의 감도는 센서의 외경 25 mm이내 거리에서 평균 98 dB를 나타내었다. 또한 실험에 사용된 용기가 압축천연가스용기임을 고려하여 초음파 전파속도 및 감쇠 측정은 용기내부에 물이 채워진 경우와 비어있는 경우로 나뉘어 실시하였다.

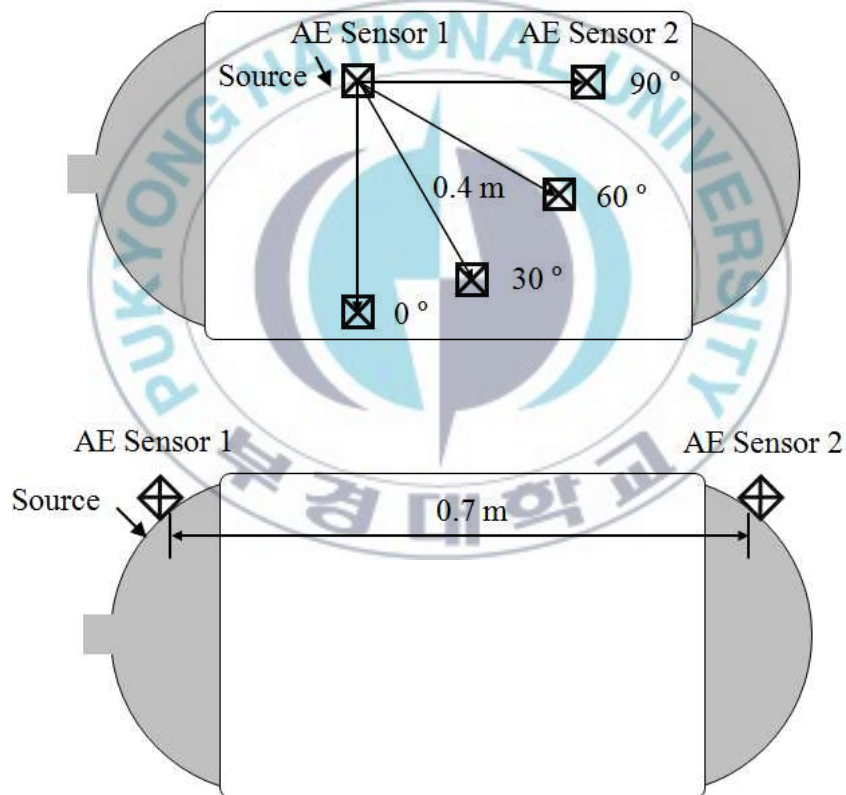


Figure 3-3. sensor location for measurement of propagation properties

그림 3-4는 가스압력용기의 음향방출 신호수집을 위한 적절한 AE센서의 위치 및 개수를 결정하기 위해 용기 전체에서 음향방출 신호가 발생하였을 경우를 가정하여 용기 중앙에 위치한 공진형 및 광대역 센서에서의 감도를 비교하기 위한 의사음향방출원의 위치를 보여 준다.

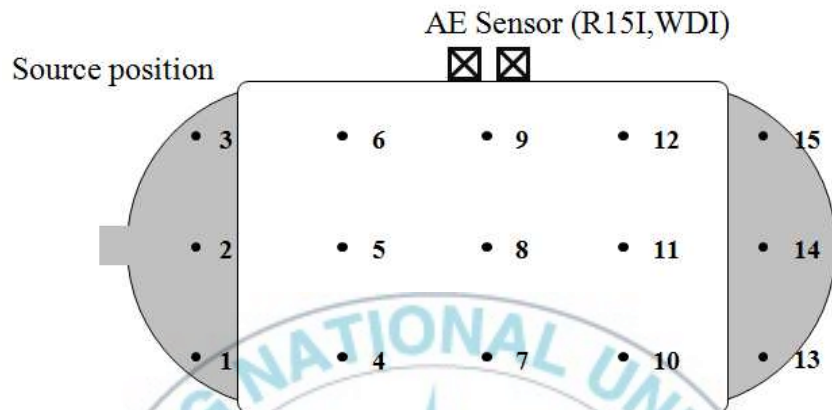


Figure 3-4. Sensitivity measurement position

3.3 결과 및 토의

그림 3-5는 위의 그림 3-3의 조건하에서 실험한 금속라이너 및 복합재료에서 전파 각도에 따른 의사음향방출 신호의 전파속도 측정 결과를 보여주고 있다. 복합재료 위에서는 물이 채워져 있는 경우와 없는 경우 측정된 속도 차이가 거의 없이 강화섬유가 감긴 방향에 대해 전파방향각이 증가할수록 5700 m/sec에서 4500m/sec로 속도가 감소하는 이방성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 금속라이너의 경우는 용기 안에 매질이 없을 때는 4300 m/sec, 물이 채워진 경우는 약 3000 m/sec의 전파속도를 관찰 하였다.

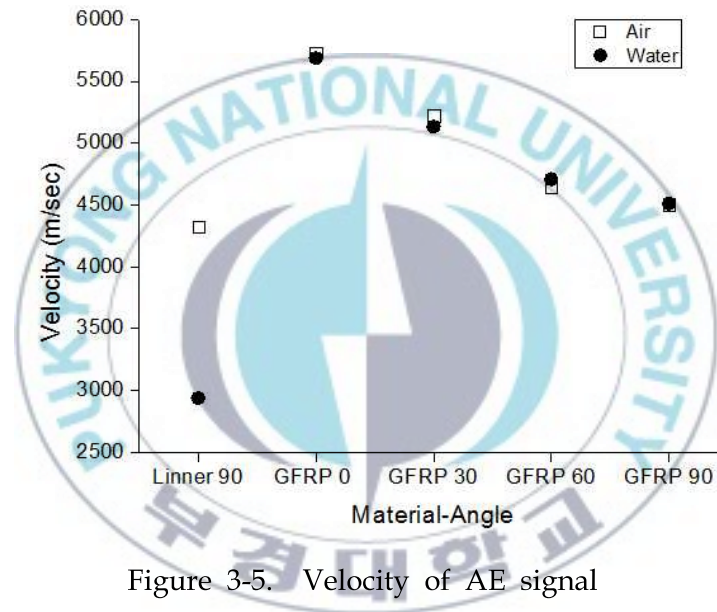


Figure 3-5. Velocity of AE signal

그림 3-6은 금속라이너 및 복합재료에서 전파 각도에 따른 의사음향방출 신호의 감쇠를 보여주고 있다. 이때 감쇠측정에 사용된 진폭은 검출 신호의 피크 진폭을 사용한 것으로 속도 측정에서 언급한 빠르게 전파하는 특정 모드나 특정 Wave packet의 감쇠를 의미하지는 않는다. 즉 측정위치에서 의사음향방출 신호의 하나의 이벤트에 대한 Wave train 전체를 고려한 것이다.

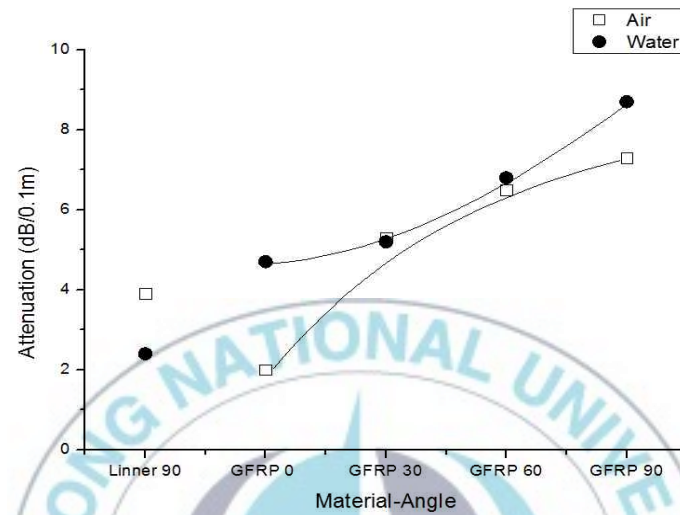


Figure 3-6. Attenuation of AE signal

Table 3-2. Velocity and attenuation of Wave propagation

Vessel filling	Material			Velocity (m/sec)	Attenuation (dB/0.1m)
Air	Composite	dir. (°)	0	5729	2.0
			30	5224	5.3
			60	4645	6.5
			90	4506	7.3
	Metal			4324	3.9
Water	Composite	dir. (°)	0	5689	4.7
			30	5134	5.2
			60	4710	6.8
			90	4512	8.7
	Metal			2938	2.4

금속라이너에서는 용기내에 물이 차 있는 경우가 없는 경우보다 감쇠가 적었고 복합재료에서는 물이 있는 경우가 물이 없는 경우보다 감쇠가 크거나 비슷하였으며, 강화섬유의 감진방향에 대하여 신호 전파 방향각이 증가할수록 감쇠가 심한 이방성을 나타내고 있다.

그림 3-7은 용기내에 물이 차 있는 경우와 없는 경우에 그림 3-3의 금속라이너에서 센서 1과 센서 2에서 검출한 전형적인 AE 신호 형태를 보여준다. 센서 1에서 검출한 Air-1과 Water-1의 신호는 발생원에서 25 mm이내에서 측정된 것으로 전파에 따른 신호의 왜 곡이 거의 없기 때문에 유사한 신호 형태를 보여 주고 있으나 Air-2와 Water-2는 Wave packet의 형태가 다르다. 이는 음향방출원에 발생한 탄성파가 금속라이너를 통하여 센서 2까지 이동하면서 금속라이너에서 다중반사 등에 의한 중첩과 용기 안의 매질로 인하여 에너지를 분산하여 감쇠가 일어나기 때문으로 보인다.

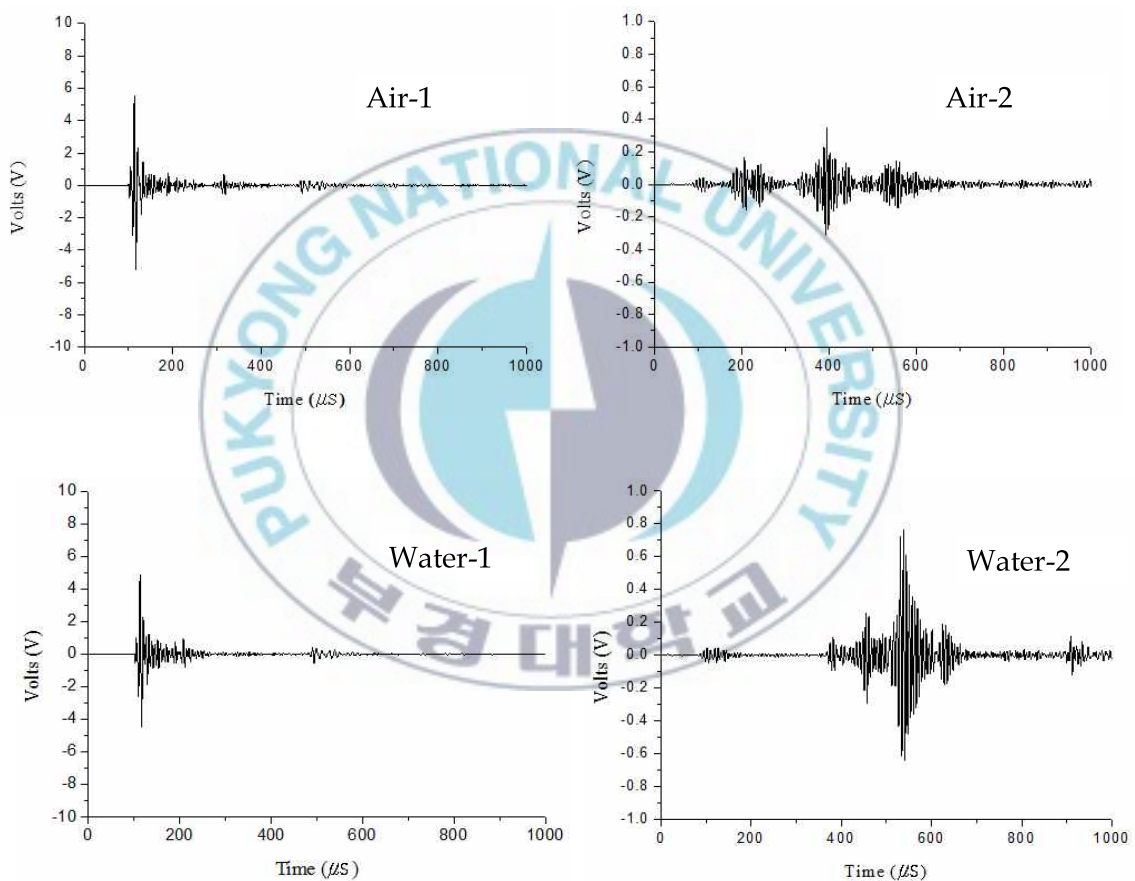


Figure 3-7. Typical AE signal

그림 3-8은 Air-2 신호에서 첫 번째와 두 번째 Wave packet을 확대하여 보여주는 것으로 첫 번째와 두 번째 Wave packet의 peak 사이 시간차는 약 $80 \mu\text{s}$ 이다. AE 신호의 검출은 실험장비에서 문턱값(Threshold value)을 설정하여 결정하는데, 용기에 물이 차 있는 경우는 첫 번째 Wave packet 신호의 감쇠로 인하여 장비에서 검출하지 못하고 두 번째 Wave packet 신호가 검출되었다면 약 3000 m/s 의 속도를 나타내므로 두 번째 Wave packet 이후의 신호 왜곡에 대해서는 정확하게 설명할 수 없으나, 앞에서 언급한 속도의 차이를 설명할 수 있다. 즉, Wave가 금속라이너를 전파할 때 용기내의 매질의 유무에 관계없이 일정한 속도로 전파하지만 매질이 있는 경우는 감쇠가 심해 특정모드의 신호가 문턱값 아래로 떨어져 측정되지 않으므로 속도 측정값에 변화를 보인 것으로 판단된다.

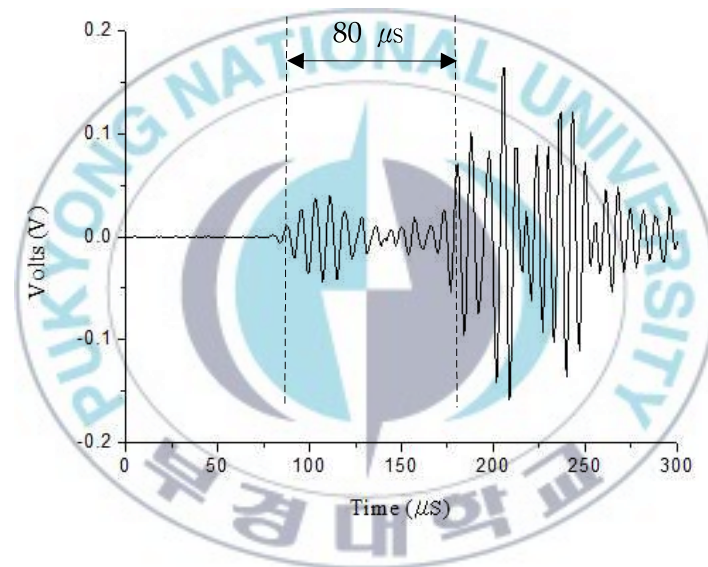


Figure 3-8. 1st and 2nd wave packet for air-2 signal

그림 3-9는 그림 3-4에 표시된 각 위치에서 발생한 의사음향방출 신호의 감도를 보여준다. 전체적으로 센서에 가까울수록 감도가 높으나 전달과정에서 금속라이너와 복합재료의 경계면을 통과해야 하는 1, 2, 3번 및 13, 14, 15번 위치에서는 감도가 떨어짐을 관찰하였다. 또한 광대역센서가 공진형보다 감쇠가 심하여 센서 근접구역을 제외한 대부분의 위치에서 60 dB이하의 감도를 나타내었다. 향후 용기의 수압파열시험이나 피로파괴시험에서 음향방출 신호의 수집을 고려할 때 용기 중앙부 복합재료 표면상의 150 kHz 공진형 센서 하나로 신호수집이 가능하다고 판단되며, 신호전달과정에서의 금속라이너와 복합재료의 경계면에서 감쇠 등을 고려하여 용기 바닥부에 추가적으로 하나 더 부착해 보는 것도 좋을 것으로 보인다.

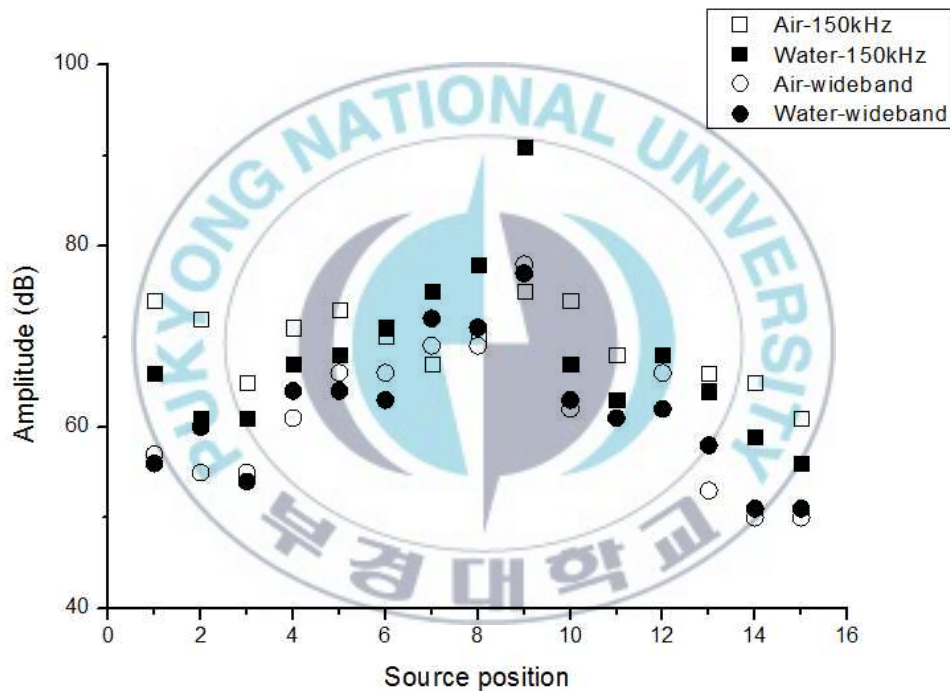


Figure 3-9. Sensor sensitivity with(without) water filing

3.4 결론

본 장에서 Type 2 복합재료 압력용기의 초음파신호전달 특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 금속라이너 및 복합재료에서 전파 각도에 따른 의사음향방출 신호의 전달속도 측정 결과 복합재료 위에서는 용기에 물이 채워져 있는 경우와 없는 경우 측정속도 차이가 거의 없이 강화유리섬유가 감긴 방향에 대해 전달방향각이 증가할수록 5700 m/sec에서 4500m/sec로 속도가 감소하는 이방성을 나타내고 있으며, 금속라이너의 경우는 용기 안에 매질이 없을 때는 4300 m/sec, 물이 채워진 경우는 약 3000 m/sec로서 전파속도의 차이를 나타내었다.

2. 용기의 전체표면에서 의사음향방출원의 신호는 용기중앙부에 놓인 AE 센서에 가까울수록 감도가 높으나 신호전달 과정에서 금속라이너와 복합재료의 경계면을 통과해야 하는 용기 상하부의 금속라이너 위치에서는 신호의 감도가 크게 떨어짐을 관찰하였다. 또한 광대역 센서가 공진형보다 감쇠가 심하여 센서 인접영역을 제외한 대부분의 위치에서 60 dB 이하의 감도를 나타내었다.

제 4 장 복합재료 압력용기의 파열시험 및 피로시험

4.1 서론

복합재료 압력용기의 사용이 급증함에 따라 용기의 시험, 제작검사 및 사용중 검사가 강조되고 있으며, 김 등[48]은 천연가스자동차 사고사례를 수집하고 사고원인을 용기의 형태별로 분석하여 전체 사고용기의 약 29%가 Type I 용기에서 발생하였고, Type IV가 약 24%, Type II가 16%, 그리고 Type III가 14%를 차지하고 있으며, 사고원인에 있어서는 원재료 및 제조과정의 오류에 의한 용기파열이 37%로 가장 높았고 용기의 반복사용으로 인한 응력부식균열이 16%로 위 두 가지 사고원인이 전체 사고용기의 절반을 차지하였다고 보고하였다. 또한 국내에서 제조된 Type 2 용기의 복합재료 결함 내구성시험을 수행하여 Type 2 용기의 경우, 11,250회의 최소반복가압 회수를 충족하였으나 외피손상부와 반복가압에 따른 실제누출부위가 일치하지 않아 실험조건을 달리한 추가실험이 요구된다고 보고하였다. 박 등[49]은 저속충격하중을 받은 필라멘트 와인딩 탄소섬유강화 복합재 압력용기의 잔류강도 저하특성에 대한 수치해석 및 실험을 통해 충격에너지는 외곽층 강화섬유 파단으로 흡수되고 외곽층 섬유파단이 한계치에 도달한 후 헬리컬 와인딩부의 층간분리 등에 의해 충격에너지가 흡수가 발생한다고 보고하였다. 김 등[50]은 차량용 복합소재 연료탱크의 탄소섬유 적층두께에 따라 달라지는 강도안전성에 미치는 기여율의 영향을 FEM 모델링 방법으로 해석하여 탄소섬유 연료탱크의 강도안전성은 탄소섬유 적층의 두께보다 와인딩 각도에 의해 더 많은 영향을 받는다는 계산결과를 보고하였다. 이 등[51]은 복합재 표준 시험용 평가 시편의 경우 음향방출 hit rate parameter를 이용하여 파열압력이 낮은 시편(2100psi이하)과, 파열압력이 높은 시편(2100psi이상)과의 구분이 가능하였으며, 파열압력이 낮은 시편은 파열압력의 50%범위내에서 파열위치의 탐지가 가능하였다. 금속재 압력용기 내부의 복합재료 내열튜브 및 추진기관 토출관의 시험 결과, 수압시험 중 크랙의 발생 압력, 초기 발생 위치, 및 진전과정의 탐지가 가능함을 보고하였다.

본 연구에서는 음향방출을 이용한 복합재료 압력용기의 손상정도 평가를 위하여 소형으로 제작된 일반적인 복합재료 시편 형태가 아닌 Type 2 복합재료 압력용기를 그대로 사용하여 다음과 같이 실험을 계획하였다.

첫째, Type 2 압력용기의 파열시 발생하는 음향방출 신호의 분석을 위하여 일반수를 펌프로 가압하여 파열시키는 파열시험

둘째, 결함이 내재된 복합재료 압력용기의 피로파괴 특성을 살펴보기 위한 인공결함을 삽입한 복합재료 압력용기의 피로시험과 피로손상 이후의 용기의 파열특성을 살펴보기 위한 파열시험

셋째, 용기의 사용시간에 따른 잔여수명과 손상정도를 파악하기 위하여 기계유를 매질로 하고 펌프로 용기가 누설될 때까지 진행하는 피로시험으로 나뉘어 각 실험별로 실험장치와 실험방법 등을 구분하여 작성하였다.



4.2 실험장치 및 실험방법

4.2.1 복합재료 압력용기 파열시험

압력용기의 파열시 발생하는 손상메커니즘과 음향방출 신호의 분석을 위해 그림 4-1과 같이 장치를 구성하고 가압매질로는 일반수를 사용하였다. 150kHz 공진형 센서를 용기의 중앙몸통부에 부착하고, 가압조건은 그림 4-2와 같이 예상파열압력을 60 MPa로 예상하여 그 예상파열압력의 30, 50, 60% 등의 크기로 10%씩 올라가면서 가압하고 가압 후 해당 압력에 도달함을 압력계를 통하여 확인한 후 10 분간 압력유지 시간을 두어 그 때 발생하는 신호를 획득하였다.

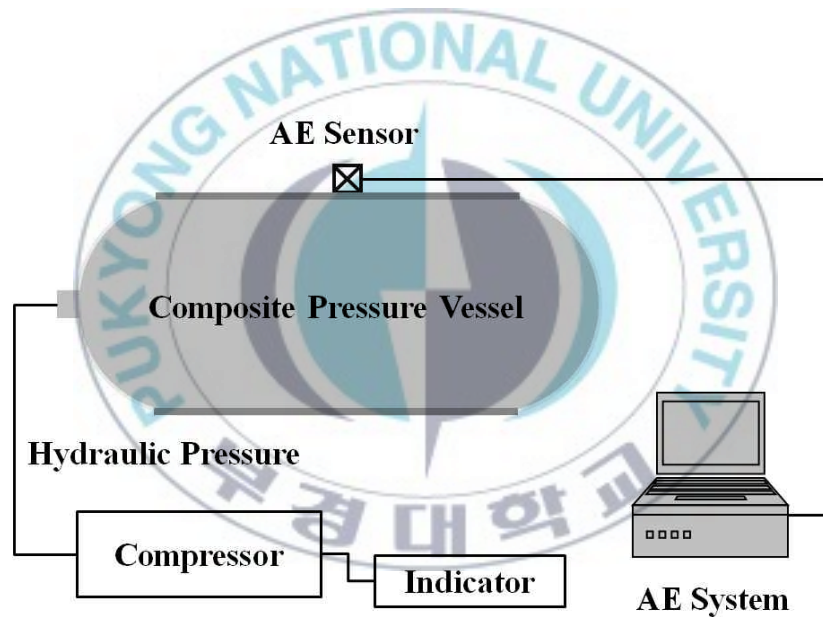


Figure 4-1. Schematic diagram of experimental setup

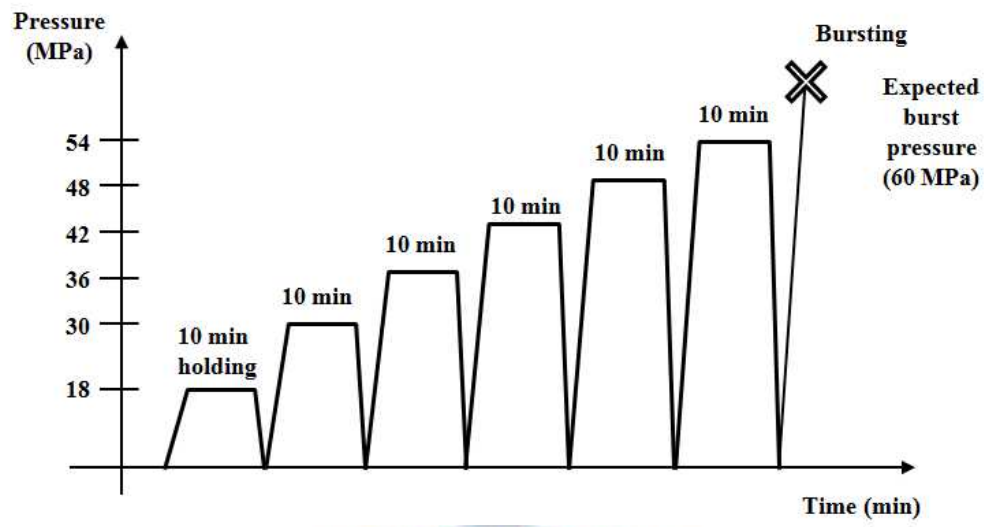
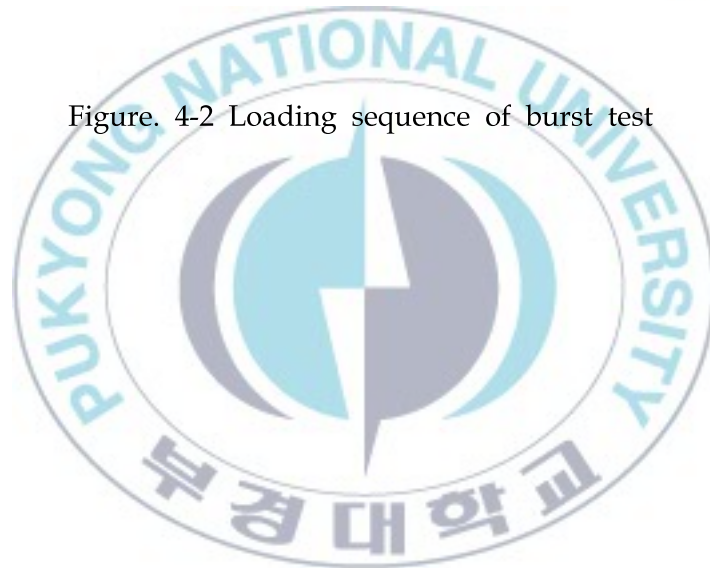


Figure. 4-2 Loading sequence of burst test



4.2.2 인공결합 복합재료 압력용기 피로 후 파열시험

Type 2 압력용기의 주 강화재료인 몸통부에 감긴 유리강화섬유의 손상과 방향성에 따른 용기의 피로주기와의 상관관계를 살펴보기 위하여 복합재료 압력용기의 복합재료층 위에 그림 4-3과 같은 위치에 길이 50 mm, 폭 3 mm, 깊이 복합재료 두께의 50 %인 3 mm 크기의 인공결합을 제작하였다. 결함의 방향은 압력용기의 축방향(longitudinal)과 원주방향(hoop)으로 2가지 형태로 구현하였다.

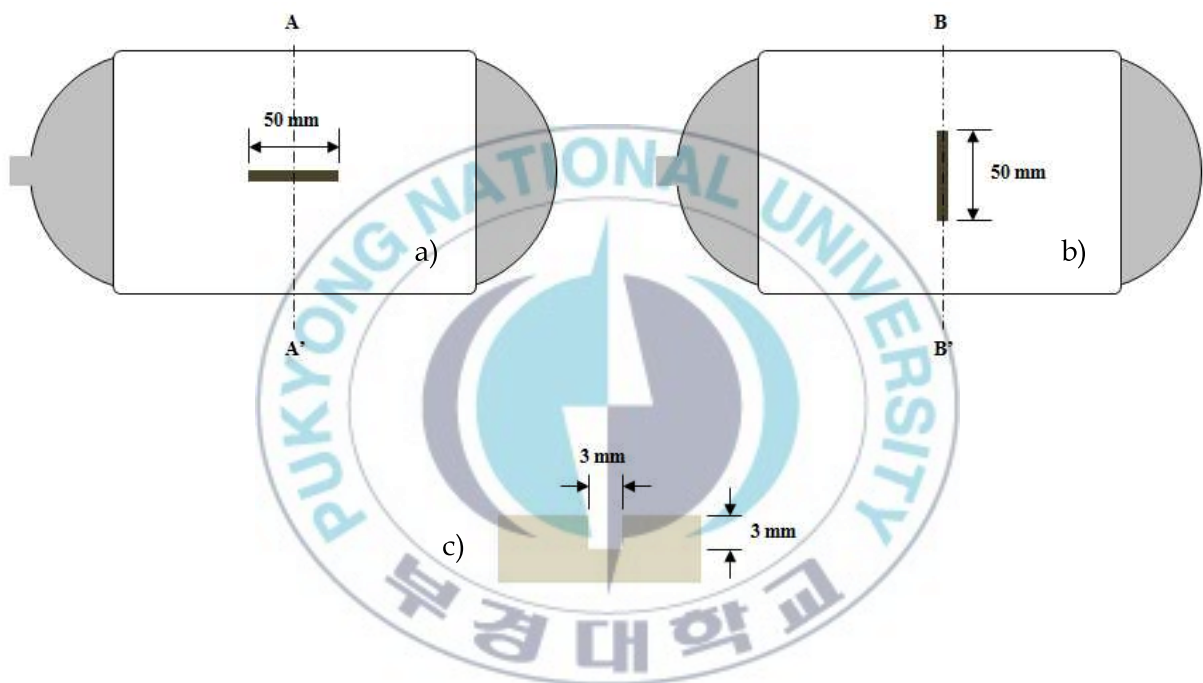


Figure 4-3. Schematic diagram of artificial defect : position and dirfection of a) longitudinal b) hoop c) shape of defect

그림 4-4는 인공결합 압력용기의 피로시험시 음향방출 시험을 위한 실험장치의 개괄도를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 압력을 조절할 수 있는 펌프로 용기를 가압하면서 용기에 부착된 음향방출 센서로 음향방출 신호를 검출하여 분석하였다.

피로시험은 0에서 사용압력인 20.7 MPa 사이를 2만 회 반복하였으며, 이후 연속적으로 압력을 증가시켜 파열시험을 실시하였다. 그림 4-5는 시험에서 가압조건을 보여주고 있다.

음향방출시험은 피로시험 중 0 ~ 20,000 회까지 4,000 회 간격으로 20.7 MPa에서 10 분 간 3회 동안 음향방출 신호를 획득하였다. 복합재료위에 음향방출원의 위치표정을 위하여 부착된 4개의 센서에 의해 검출된 음향방출신호는 PAC사의 DiSP-52 Acoustic Emission workstation에 입력되어 신호처리 되었다. 센서는 지그와 마그네틱 홀더를 사용하여 압력용기에 부착시켰고 신호의 전달효율을 높이기 위해 접촉매질로 진공 그리스가 사용되었다. 시험에는 중심주파수 150 kHz 공진형 R15I(PAC) 센서가 사용되었고, 케이블은 RG58A/U를 사용하였다. 가압 매질은 피로시험 시는 기계유가 사용되었고 최종 파열시험시 가압매질은 일반수가 사용되었다. 감도측정을 위한 의사음향방출원은 직경 0.5 mm의 2H 연필심 파손 이었고 센서의 감도는 센서에서 거리 25 mm이내에서 평균 98 dB 였다.

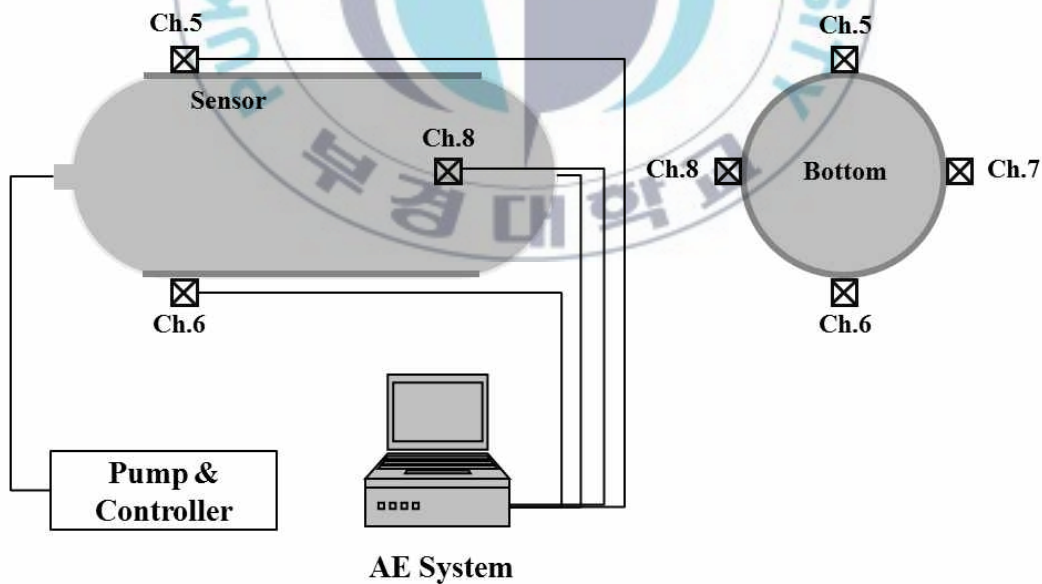


Figure 4-4. Schematic diagram of experiment setup

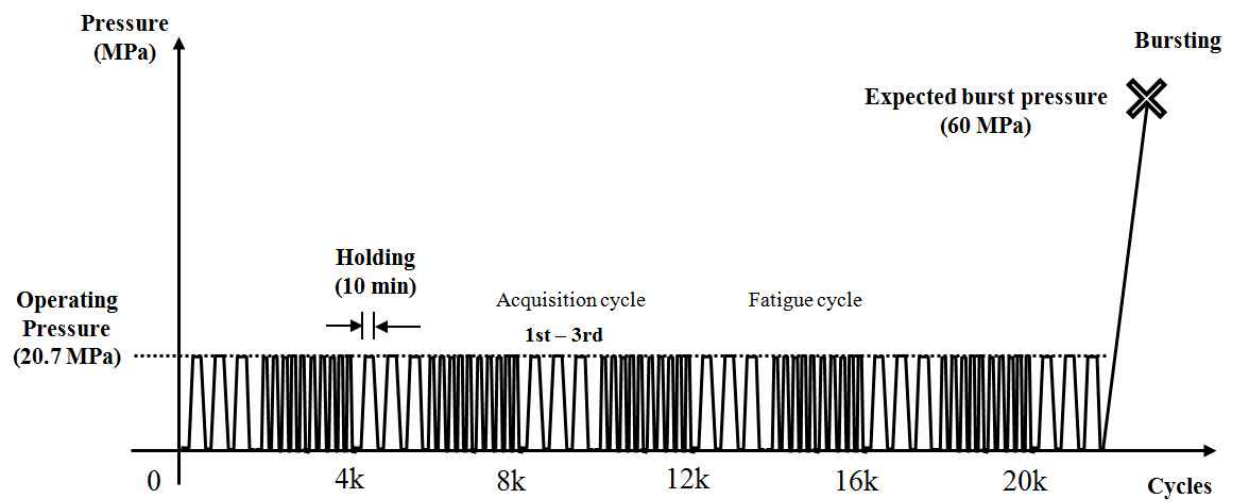


Figure 4-5. Loading sequence of fatigue test



4.2.3 복합재료 압력용기 피로시험

Type 2 복합재료 압력용기의 피로시험시 발생하는 음향방출 변수의 분석을 통한 압력용기의 손상도를 알아보기 위하여 그림 4-6과 같이 압력을 조절할 수 있는 펌프로 용기를 가압하면서 용기의 몸통부와 바닥부에 각각 150 kHz 공진형 센서를 부착하고 그림 4-7과 같이 매 10,000회의 피로주기마다 10분간의 압력유지구간을 두어 5회씩 음향방출신호를 수집하였다. 피로시험은 7 cycles/min 속도로 용기 누설시까지 진행하였다. 또한 신호획득을 위한 압력유지구간은 음향방출원의 특성을 고려하여 그림 4-8과 같이 initial(loading), hold(holding), final(unloading) stage로 구분하여 신호를 수집하고 분석하였다.

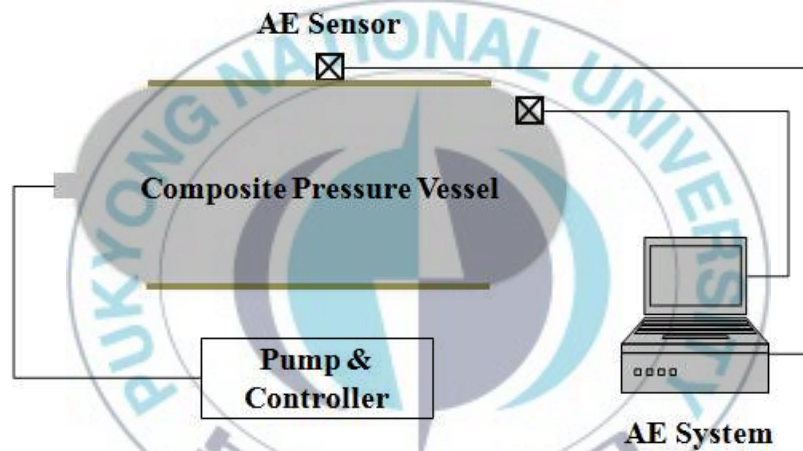


Figure 4-6. Schematic diagram of experiment setup

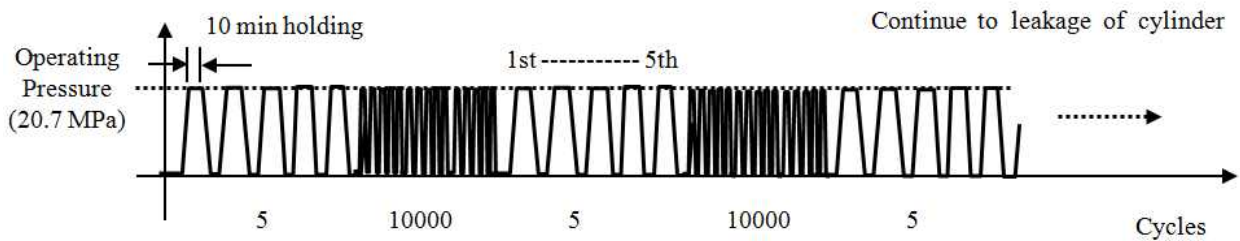


Figure 4-7. Loading sequence of experiment

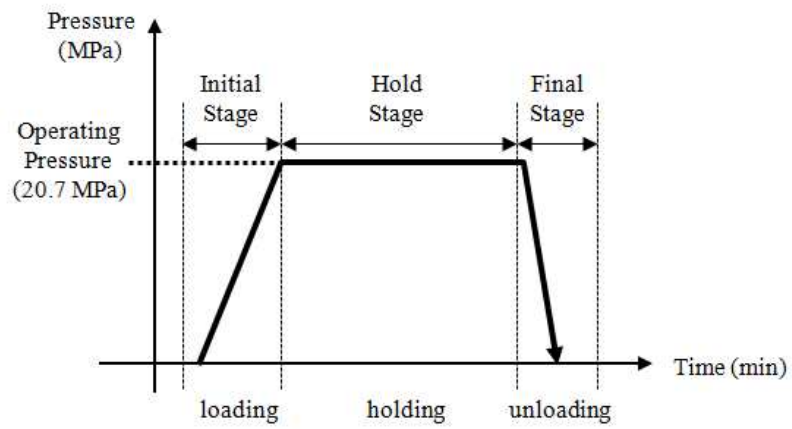
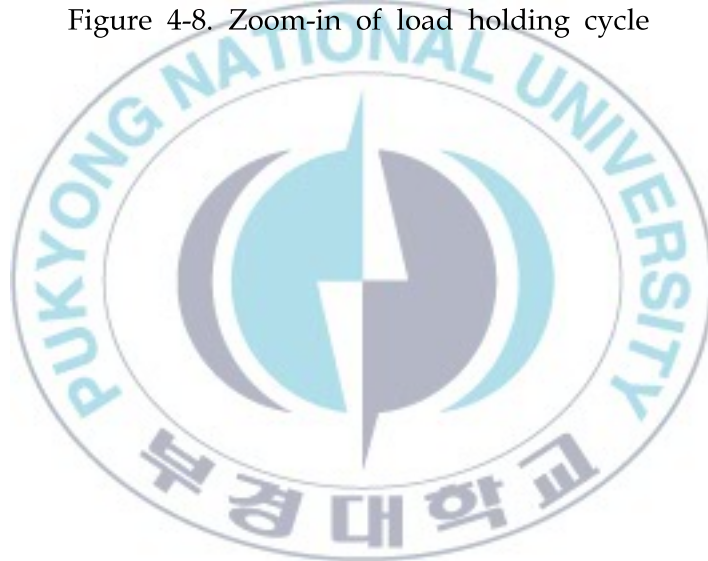


Figure 4-8. Zoom-in of load holding cycle



4.3 결과 및 토의

4.3.1 복합재료 압력용기 파열시험

파열시험에서 가압조건은 파열압력을 60 MPa로 예상하고 그림 4-1과 같이 예상파열압력의 30%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% 등으로 10%씩 압력을 상승시키면서 각 단계에서 10분씩 압력을 유지하고 그 때 발생하는 음향방출신호를 획득하였다. 그림 4-9는 파열시험을 통해 파손된 연료탱크의 형상으로 압력용기의 손상 메커니즘은 먼저 금속라이너에 감겨있는 복합재료에서 기지의 균열이 발생하고 분리되어 층간박리 현상이 일어나고, 이후 계속해서 압력이 증가할수록 강화유리섬유의 절단과 금속라이너가 파괴되어 최종적으로 용기가 파열된 것으로 추정되며, 파열단계에서 용기 파열 직전에 섬유묶음들이 끊어져 나가는 소음을 들을 수가 있었다.



Figure 4-9. Vessel after burst test

Table 4-1. Load holding and unloading time

Stage	Pressure (MPa)	Holding (min:sec)	Unloading (min:sec)	Remark
30%	18	02:06	12:08	
50%	30	04:50	14:55	
60%	36	06:36	16:37	
70%	42	10:12	20:18	
80%	48	13:03	23:04	
90%	54	19:30	29:31	
	58	22:27	-	Bursting 24:19

각 단계별 압력의 유지시간에 획득한 신호중에서 압력유지 후 2분간은 유체 유입잡음 등을 감안하여 평가에서 제외하고 이 후 8분간의 신호를 평가대상으로 하였다. 일반적으로 용기의 건전성을 평가하는 하나의 방법으로 가압한 후 압력을 유지하고 일정시간 이후에 발생하는 음향방출신호의 활성도를 평가하는 creep 효과를 이용하는데 그림 4-10을 보면 예상 파열압력의 60%인 36 MPa까지는 creep 효과가 미약하게 나타나므로 아직까지는 용기에 큰 손상은 입지 않은 것으로 볼 수 있으며, 70% 압력 상승 이후는 60 dB이상의 신호가 연속적으로 발생된 것을 볼 수 있어 현저한 creep 효과가 나타나므로 용기의 손상이 상당히 진행되었다는 것을 알 수 있다. 압력이 80%, 90%로 상승할수록 압력유지 후에도 더 높은 진폭의 신호가 계속적으로 발생하는 것으로 보아 좀 더 심한 손상을 입었다고 말할 수 있으며, 파열이 예상되는 54 MPa이상 가압단계에서는 파열이 되기 전부터 80 dB ~ 100 dB 사이의 진폭을 갖는 신호가 계속 발생하다가 1352초에서 1361초까지는 지속적인 누설신호가 발생하였으며 압력이 58 MPa에서 40 MPa로 급강하 된 직후 파열되었다.

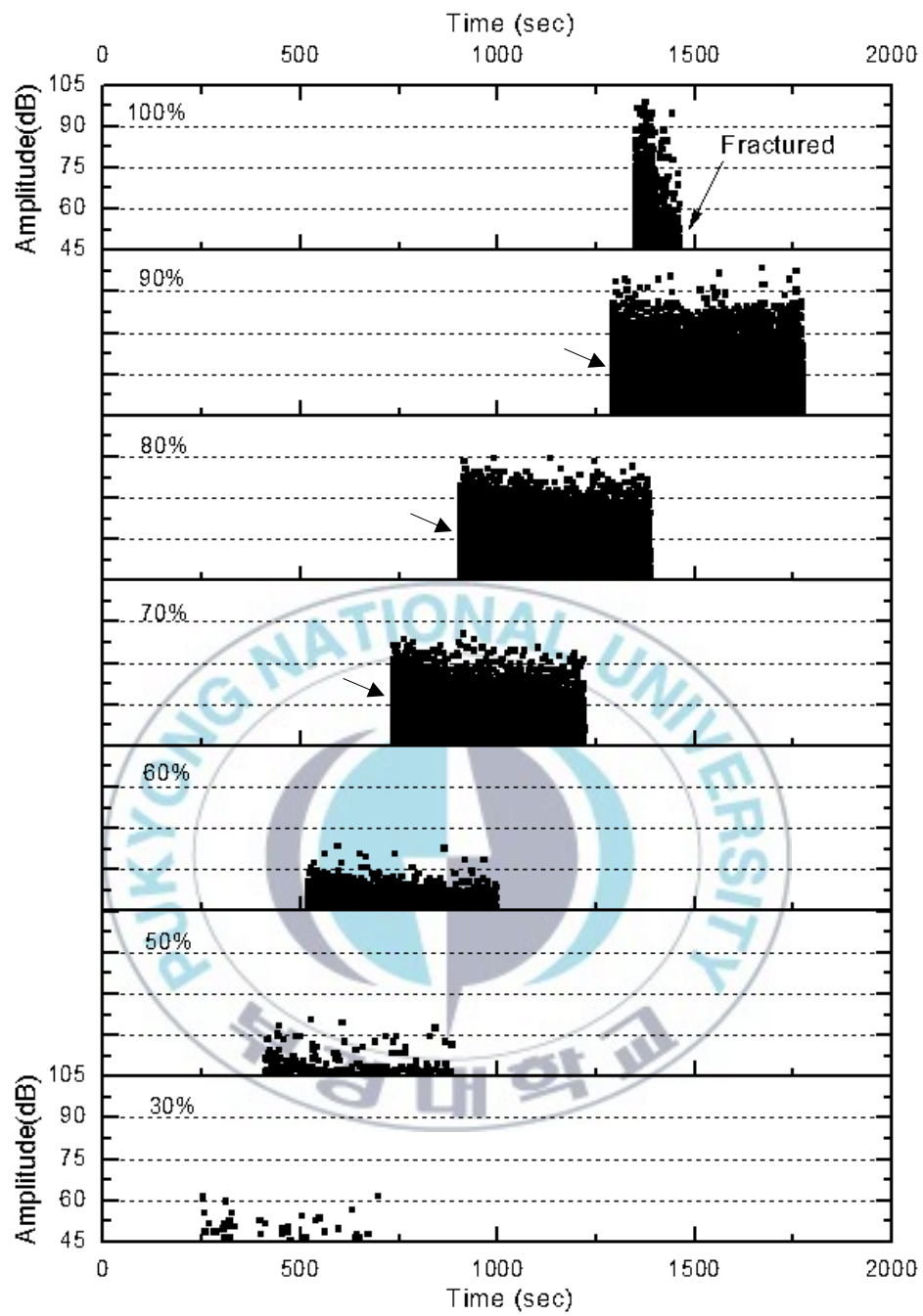


Figure 4-10. Amplitude during load holding

그림 4-11은 각 가압단계에서 압력유지 2분 후부터 발생한 총 히트수를 나타낸 것으로 손상이 많이 진행된 것으로 볼 수 있는 가압 70% 이후에서 히트수가 급격히 증가하고 90%에서는 약간 감소한 것을 볼 수 있으며, 최종 파열에서는 Felicity ratio와 파열까지의 시간이 짧았기 때문에 총 히트수가 적었다.

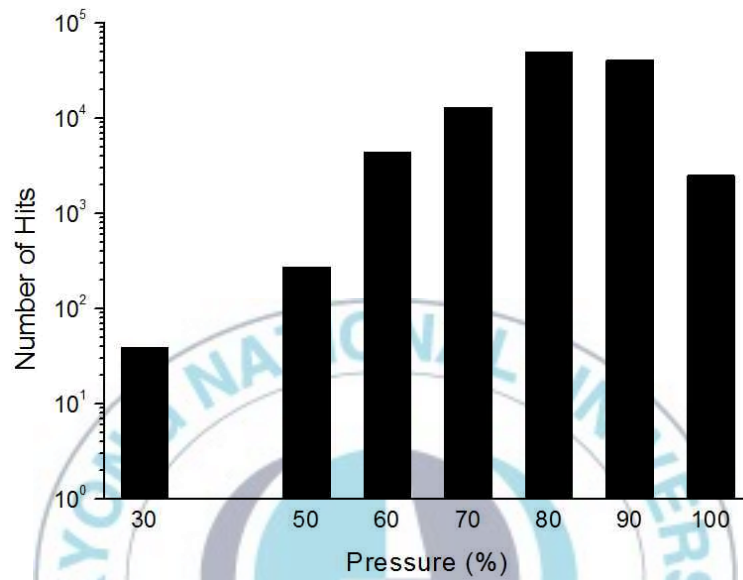


Figure 4-11. Total hits during load holding

그림 4-12는 파열시험 각 가압단계별로 시간에 따라 검출된 누적 hit수를 나타낸 것이다. ↓는 압력을 유지한 시점을 표시한 것으로 30, 50, 60%에서는 압력 유지 후 hit 수의 증가가 급격하게 증가하지 않았으나 70%에서는 압력을 유지한 후에도 계속적으로 hit 발생이 증가하는 creep 현상을 볼 수 있다.

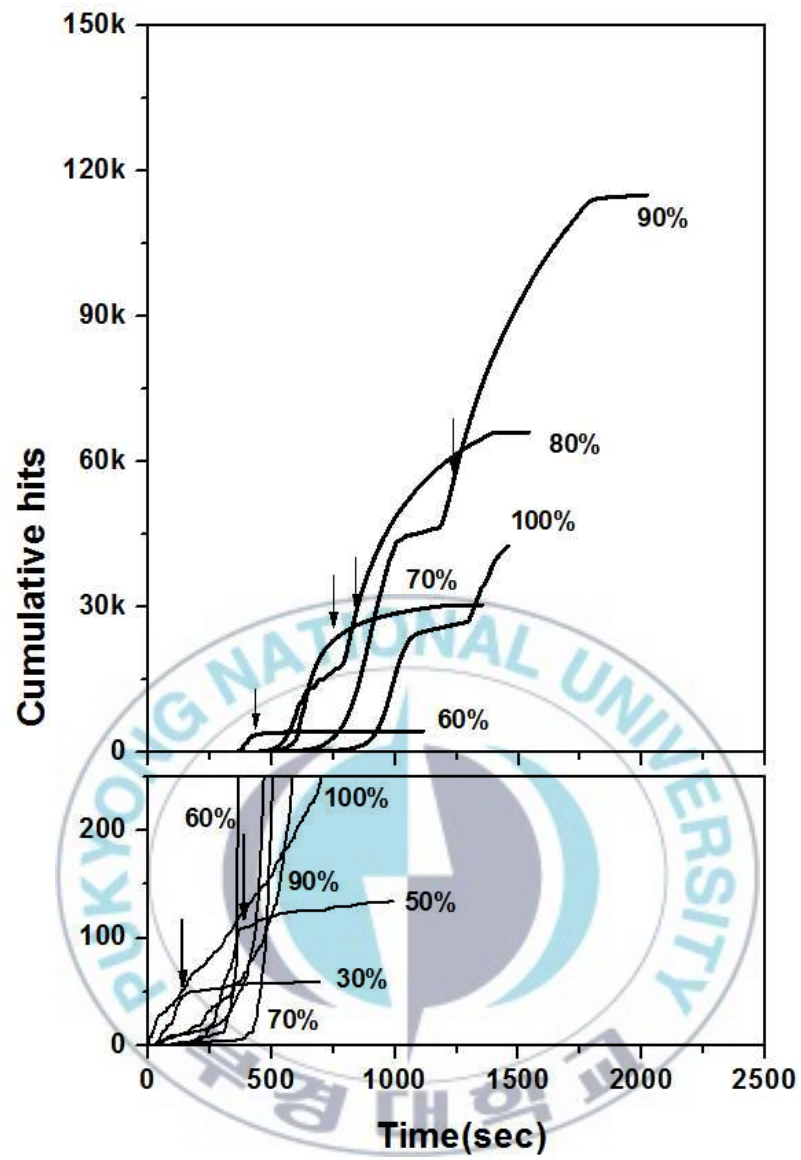


Figure 4-12. Total hits each pressure loading stage

복합재료 압력용기는 금속용기와 달리 음향방출신호 발생원인이 기지균열의 생성, 균열의 성장, 복합재료의 층간 분리, 강화섬유의 절단 및 금속라이너의 파괴 등 다양한 손상 메커니즘이 포함되어 있으며, Type 1과 같은 금속압력용기는 손상이 증가하면 음향방출 활성도가 증가하나 섬유강화 복합재료로 제작된 압력용기는 손상의 정도가 더욱 심해지면 음향방출 활성도가 도리어 감소하는 것으로 알려져 있다.[52-53]

그림 4-13에서는 가압 30%단계에서는 복합재료의 기지균열에 의한 음향방출 활성도가 증가하여 신호의 진폭이 상승한 것으로 보이며, 가압 50~60%단계에서는 복합재료의 손상도가 증가함에 따라 음향방출 활성도가 오히려 감소하여 신호 진폭이 감소한 것으로 생각된다. 가압 70%단계에서는 복합재료의 층간분리와 강화유리섬유의 절단이 시작되어 신호의 진폭이 다시 증가하고 이후에서는 유리섬유의 대량 절단과 금속라이너의 파괴가 일어나면서 진폭이 약간 증가된 것으로 보여진다.

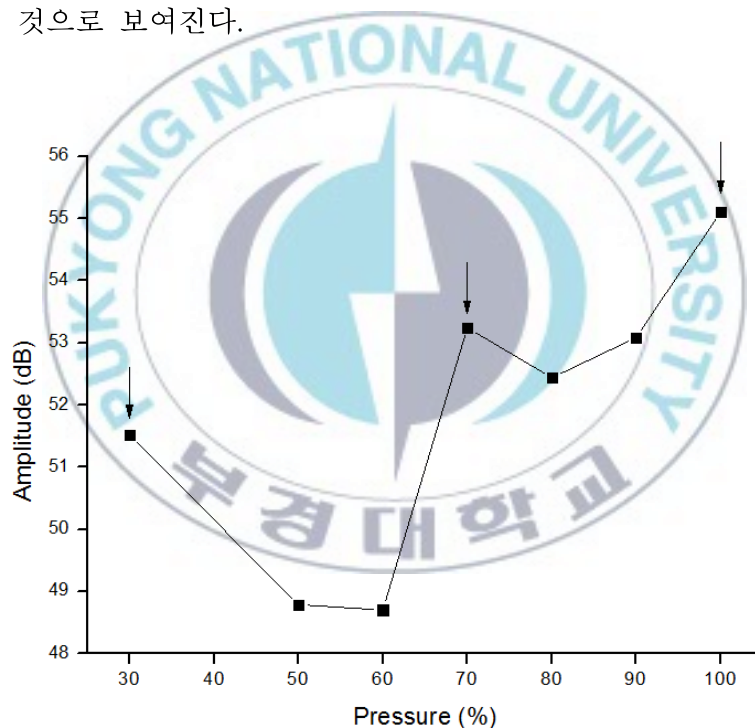


Figure 4-13. Amplitude each loading stage

압력유지기간에 발생한 음향방출신호에서 각 가압단계에서 신호의 최대 에너지 30개의 평균값으로 압력유지 후 2분 경과한 신호들과 압력 유지기간의 마지막 9분 경과시의 에너지를 살펴보면 압력유지시 손상이 지속적으로 발생되거나 손상정도가 급격히 상승할수록 발생하는 음향방출신호의 에너지가 증가함을 알 수 있다. 초기 30% 가압단계에서는 유지시간중 발생한 신호수가 수 개에 지나지 않고 또한 마지막 100% 가압단계에서는 설정압력에 도달하기 전에 파열되어 분석에서 제외하였고 나머지 단계 50%~90%단계의 신호만을 분석하였다. 압력이 증가하여 손상이 늘어날수록 에너지가 점차 증가되고 또한 각 단계에서 2분 이후 신호와 비교하여 9분 이후 신호의 에너지가 점차 증가하여 0.36에서 1.05배까지 상승함을 볼 수 있다.

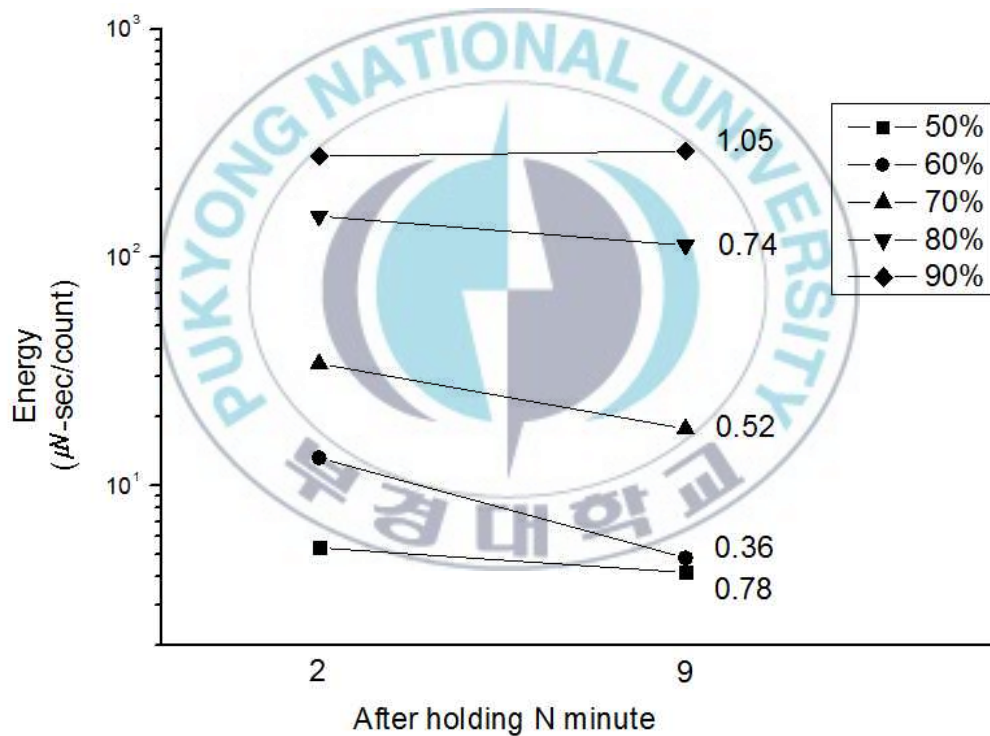


Figure 4-14. Mean high energy 30 hits after holding N minutes

파열 시험동안 각 단계에서 발생한 hit수 중에서 60 dB가 넘는 hit의 비율을 살펴보면 그림 4-15와 같이 초기 가압 30% ~ 60% 까지는 7%에서 1%정도로 감소하다가 이후 loading 70%에서는 20% 로 60 dB 이상의 신호가 급격히 증가하고 이 후 loading 100%에서는 30% 까지 증가한다. 초기에 60 dB가 넘는 신호들은 복합재료 matrix 균열의 생성에 의한 것으로 판단되며 이후 약간 감소하는 것은 생성된 균열의 성장 시는 균열의 생성보다 진폭이 낮기 (60 dB 이하) 때문으로 판단된다. 한편 70% 이상에서는 matrix 균열뿐 만 아니라 강화섬유 파단과 같은 새로운 손상 메커니즘에 의해 손상이 급격히 일어나 60 dB 이상의 신호비율이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 60 dB를 기준으로 총 hit 수에서 60 dB 이상의 hit 수의 비율은 압력용기 손상정도를 파악하는 유용함을 알 수 있다.

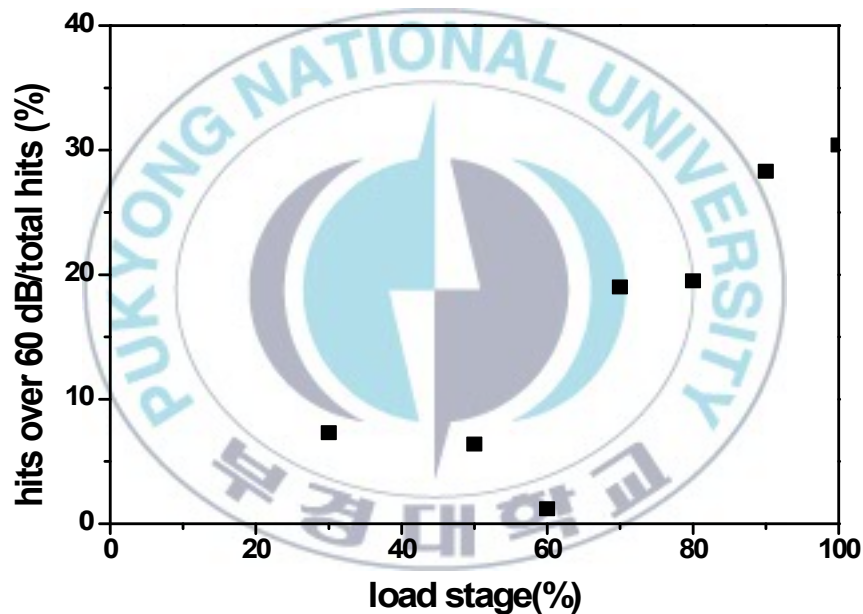


Figure 4-15. Ratio of hits over 60dB/total hits during each loading stage

각 압력유지 단계에서 발생된 신호들의 평균 risetime과 duration을 보여준다. 가압 70% 단계까지는 신호의 risetime과 duration이 점점 짧아지다가 손상이 크게 증가한 것으로 판단되는 80% 단계부터 파열시까지의 신호의 평균 risetime과 duration이 길어진 것을 볼 수 있다.

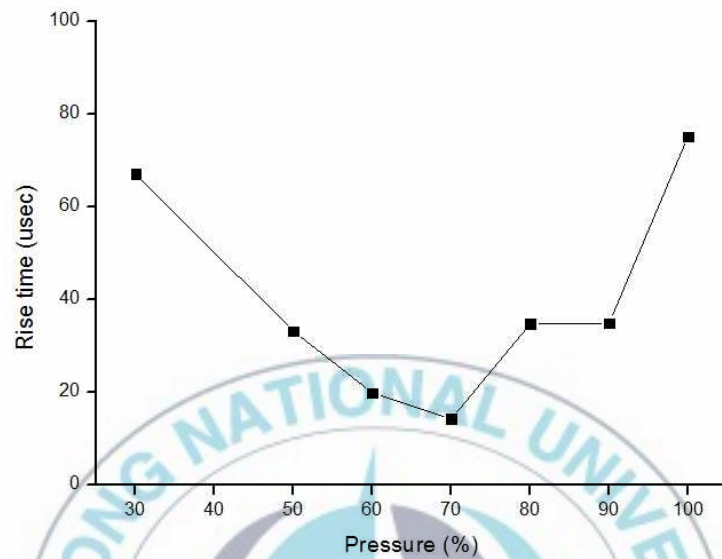


Figure 4-16. Mean rise time during holding stage

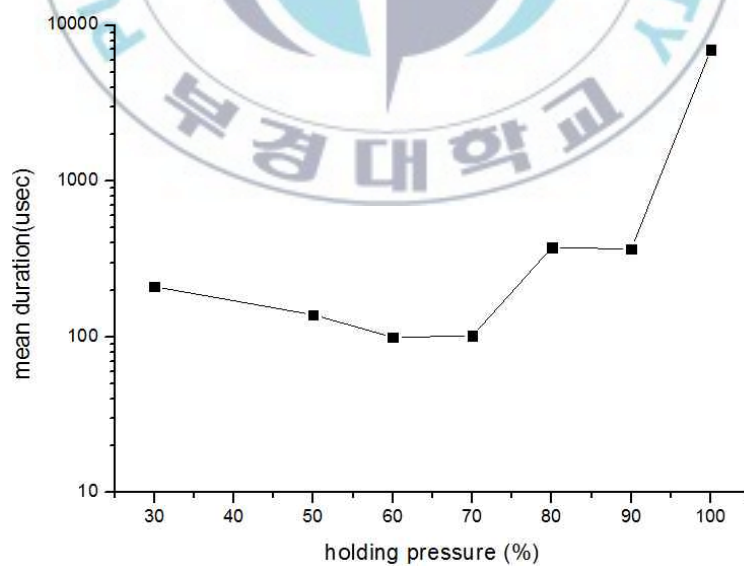


Figure 4-17. Mean duration during holding stage

각 가압 단계동안 용기의 손상이 진행됨에 따라 여러 가지의 손상 메커니즘에 따른 음향 방출 발생도와 용기의 손상도를 Mean amplitude, Total hit, Mean risetime나 Mean duration 등으로 평가하기 어려운 점이 있으며, 압력유지시 동안 발생한 음향방출신호의 Total count, Total signal strength는 용기의 손상정도를 잘 나타낼 수 있는 변수임을 알 수 있었다.

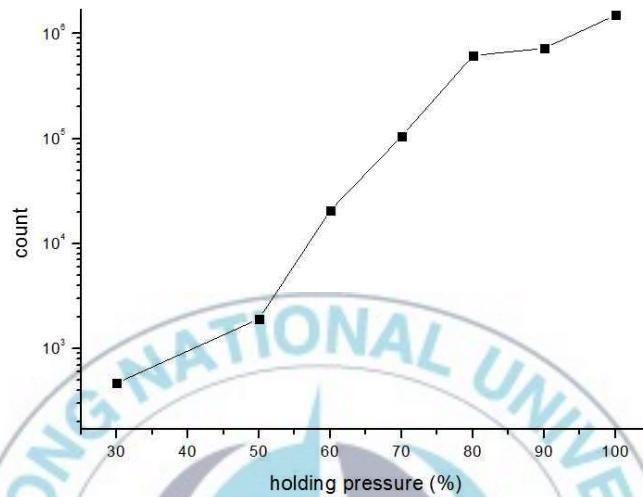


Figure 4-18. Total counts during load holding stage

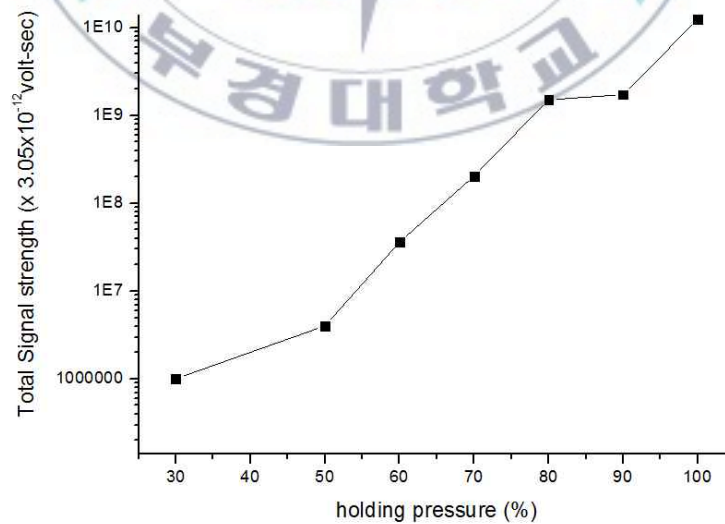


Figure 4-19. Total signal strength during load holding stage

위와 같이 복합재료 압력용기는 여러 가지 손상 메커니즘이 포함되어 있으며, 초기에는 응력에 의한 matrix의 균열과 이 균열의 성장이 주된 손상메커니즘으로 추정할 수 있다. risetime은 음향방출원과 관련이 있다고 알려져 있으며[66-67], 그림 4-20의 (a)에서와 같이 30%단계에서는 rise time이 10 μ s 부근과 100 μ s 부근으로 구분되어 나타나고 있으며, 이는 matrix균열의 생성과 이 균열의 성장을 나타내고 있는 것을 보인다. 손상메커니즘과 이 후에 발생된 신호의 설명을 위해서는 rise time이 100 μ s 부근의 신호가 matrix균열의 발생과 관련이 있고, 10 μ s 부근의 신호는 이 균열의 성장과 관련이 있는 것으로 보인다.

50 ~ 60%단계까지의 AE신호로 보아 추가적인 손상원인보다는 matrix균열의 발생과 성장이 증가하고 있는 것으로 보여지며, 70%단계에서는 발생된 AE신호의 rise time이 이전과는 다른 500 μ s 영역에서 추가적으로 많이 나타나는 것으로 보아 강화섬유의 절단과 같은 새로운 손상요인이 나타나고 있는 것으로 보여지며, 10 μ s 부근에서 급격한 AE신호의 증가로 보아 기존 균열의 성장과 증간분리와 같은 matrix균열의 성장이 급격히 증가한 것으로 보여진다. 이후 80 ~ 90%단계에서는 이전에 발생된 matrix균열의 성장 및 여러 가닥의 강화섬유의 절단과 같이 급격한 손상이 일어나는 것으로 추정되며 실제 여러가닥의 강화섬유의 절단음을 들을 수 있었다. 이 단계에서 보이는 rise time이 800 μ s 이상인 신호는 여러가닥의 강화섬유가 동시에 절단될 때 발생하는 것으로 추정되며, 이 후 마지막 100% 단계에서는 여러 가지 손상메커니즘이 복합적으로 일어나고 용기의 손상이 급격히 증가하여 마지막 금속liner가 파열되었다.

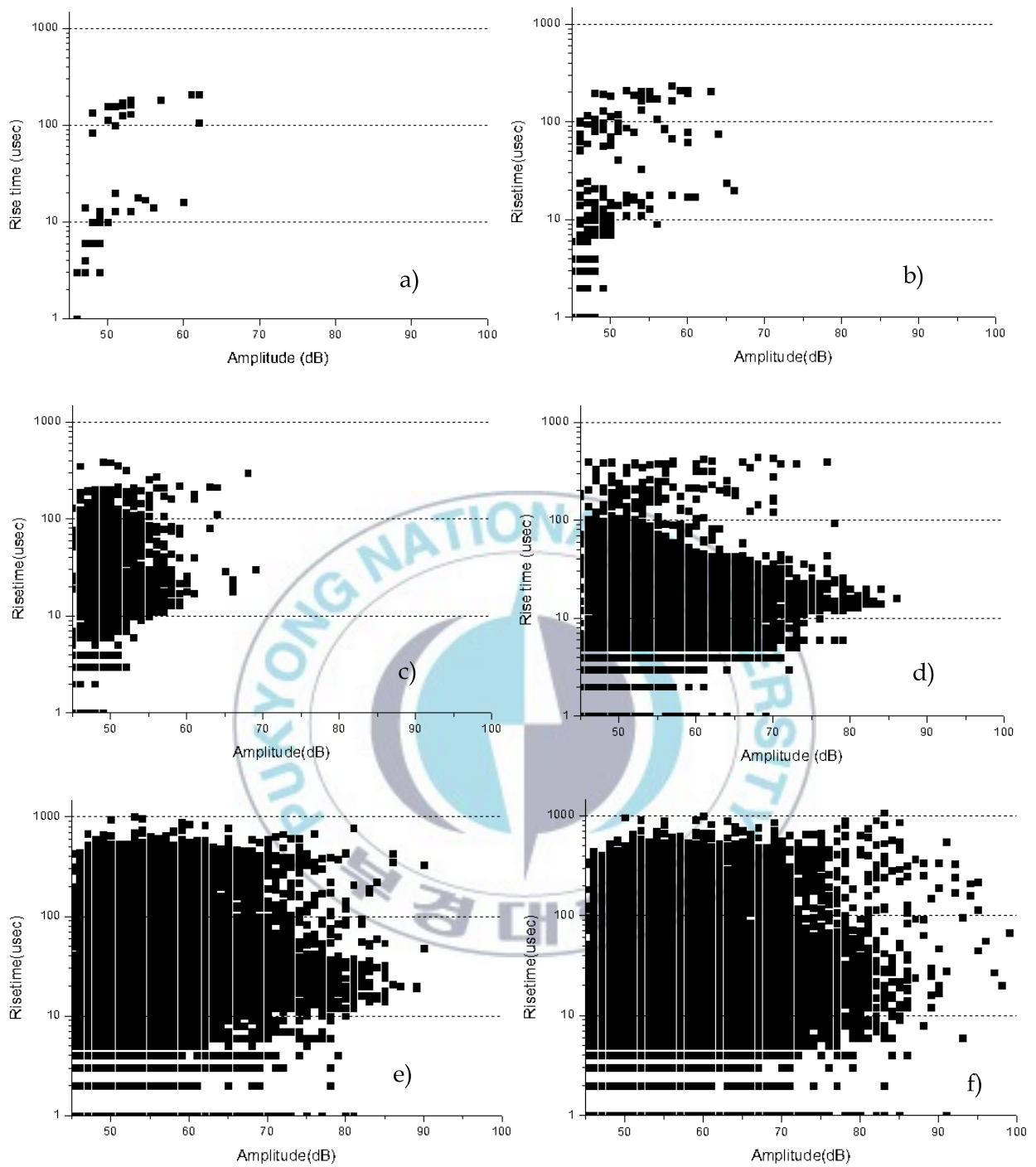


Figure 4-20. Rise time vs Amplitude plot during load holding stage

: a)30% b)50% c)60% d)70% e)80% f)90%

표 4-2는 인공결합을 갖는 용기 및 건전한 용기의 파열시험에서 파열압력을 보여준다. 표에서 볼 수 있는 것처럼 두 종류의 인공결합을 갖는 용기와 건전용기에서 2만회 피로시험 후 압력을 지속적으로 상승시켜 파열시켰으며, 그 때의 파열압력은 59.0 ~ 61.5 MPa로서 용기들의 압력 차이는 5 %이내로 결합의 유무와 크게 상관은 없었다.

일반적으로 2만 회의 피로는 용기를 1일 1회 가압한다고 하면 50년 이상 사용한 용기에 해당하는데, 물론 실제로는 가스압력용기의 경우 가스가 가압매질로 사용되기 때문에 본 실험에서처럼 기계유를 가압매질로 사용한 경우와 다를 수 있지만, 건전용기와 인공결합을 갖는 용기가 동일 조건에서 실험된 경우 파열압력이 거의 동일한 것으로 나타나 본 연구에서는 인공 결합 크기의 경우 결합의 방향에 관계없이 수명에 영향을 거의 주지 않는 것으로 볼 수 있다.

그림 4-21은 인공결합을 갖는 용기에서 파열 위치를 보여주는 사진이다. 그림에서 보여주는 것처럼 횡방향(Transverse direction) 결합 용기의 경우 최종 파열위치가 결합의 위치와 무관하게 잘 설계된 Type 2 용기의 일반적인 파열 위치(몸통부와 헤드부에 걸침)에서 파열되는 것을 알 수 있다. 그러나 종방향(longitudinal direction) 결합용기의 경우 두 용기 모두에서 최종 파열위치가 결합이 위치한 원주방향의 원통부 내에서 일어나는 것을 알 수 있다.

이는 종방향 결합의 경우 용기의 몸통에 감긴 강화섬유를 3 mm 깊이로 50 mm 길이만큼 끊어 놓았기 때문에 복합재의 두께가 얇아지는 효과가 크게 나타나지만 횡방향 결합 용기의 경우 3 mm 깊이로 3 mm 길이 만큼만 섬유를 끊어 놓아 복합재의 두께가 얇아지는 효과가 작기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 결합의 깊이가 얼마일 때 최종파열압력이 변하는 지는 정확히 알 수 없으나 결합의 방향과 최종 파열 위치와는 상관관계가 있고 종방향 결합이 용기의 최종파열 위치에 더 큰 영향을 미친다고 추론할 수 있다.

Table 4-2. Bursting pressure by defect type

Defect type	ID	bursting pressure (MPa)	Remark
Longitudinal	A	59.0	source location
	B	61.0	-
Transverse	C	60.5	source location
	D	59.0	-
Sound	E	60.5	-
	F	61.5	-

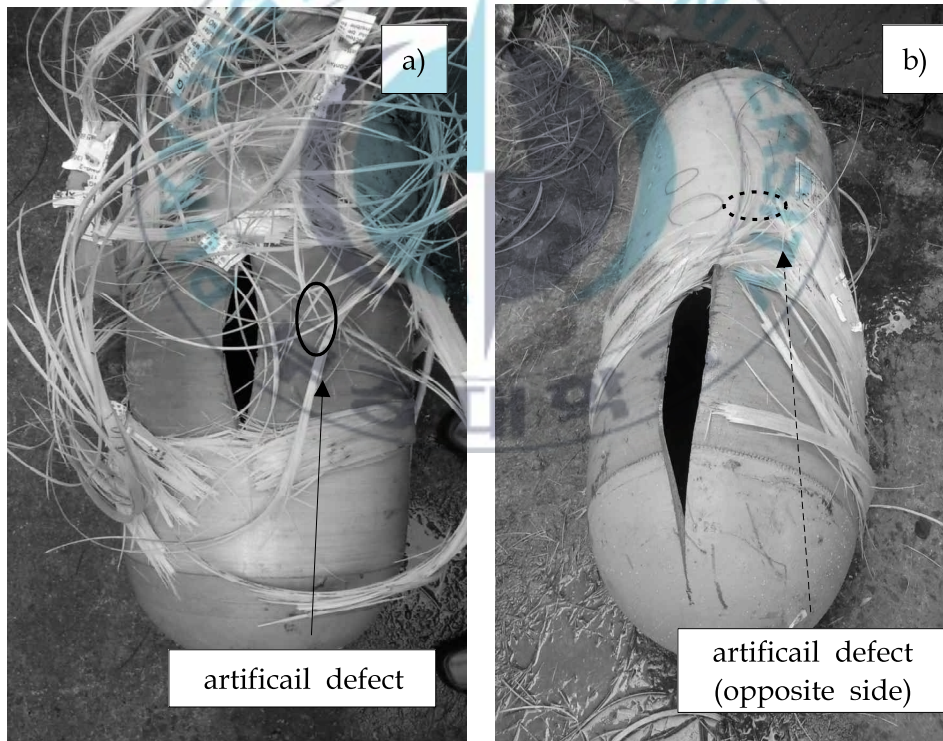


Figure 4-21. The position of artificial defect
: a) longitudinal, b) transverse and final fracture.

그림 4-22는 용기 A, C, E에 대하여 피로시험동안 센서당 평균 hit 수를 표시한 것이다. 인공결합용기가 진전용기에 비해 상대적으로 신호수가 많으며 그 증감의 경향을 보면 용기 C와 용기 E는 반복횟수가 증가할수록 신호수가 감소하는 경향을 보이는데 반해 용기 A는 4,000 회에서는 감소하였다가 8000, 12000 회에서 다시 증가하였다가 감소하는 경향을 보인다. 초기에 신호수가 많은 것은 용기내의 상대적으로 약한 부위에서의 기지 균열의 생성, 성장과 관련이 있고 이후 새로운 균열의 생성과 성장을 일으킬 만한 충분한 탄성에너지가 축적되기 전까지 균열의 생성과 성장은 상대적으로 둔화되며 신호수도 감소한다. 용기 A와 같은 종방향 결함의 경우 결함의 진전(균열의 성장)을 일으키기 위해 필요한 탄성에너지가 다른 용기에 비해 상대적으로 적기 때문에 8000회 및 12000회 피로시험에서 다른 용기에 비해 신호수가 많으며 16000회 이후는 추가적인 균열의 생성 및 성장을 위한 탄성에너지의 축적이 필요하기 때문에 신호수가 감소한 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 서론에서 언급한 것처럼 복합재료에서 뚜렷하여 초기손상에서 신호수와 같은 활성도가 증가하고 어느 정도 손상이 증가하면 이후 활성도가 상대적으로 낮다.

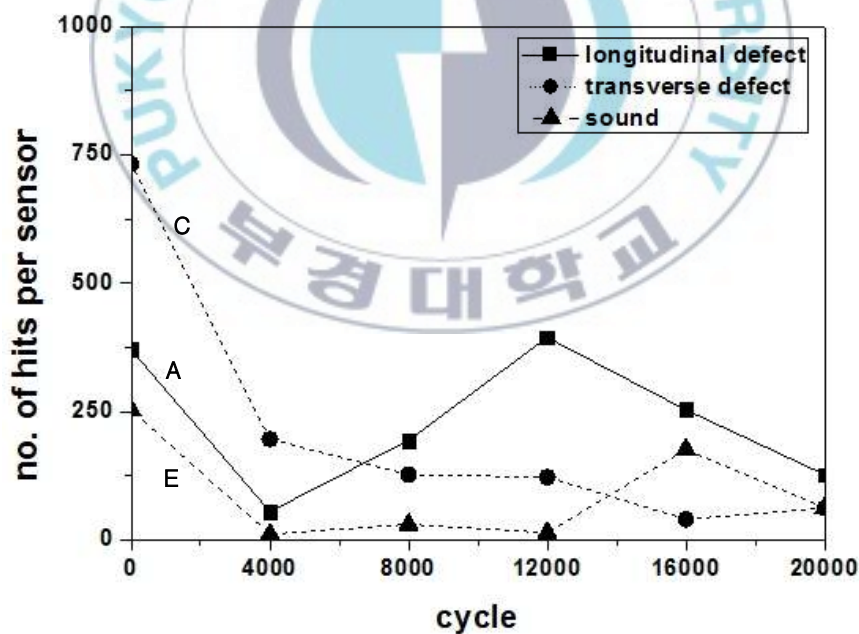


Figure 4-22. The number of hits per channel during fatigue test for artificial defect(A,C) and sound(E) fuel tank.

용기 A, C에 대하여 피로시험동안 검출한 이벤트수를 나타낸다. 이벤트란 센서에 전달된 음향방출 신호를 이용하여 용기내의 음향방출 발생원의 위치를 계산한 발생원 수를 나타내는 것으로 횡방향 결함을 포함하는 용기 C의 경우 이벤트 수가 반복횟수의 증가에 따라 현저히 감소하고 있으나 종방향 결함을 갖는 용기 A에서는 8000 회에서 크게 증가하였고 반복횟수의 증가에 따라서는 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

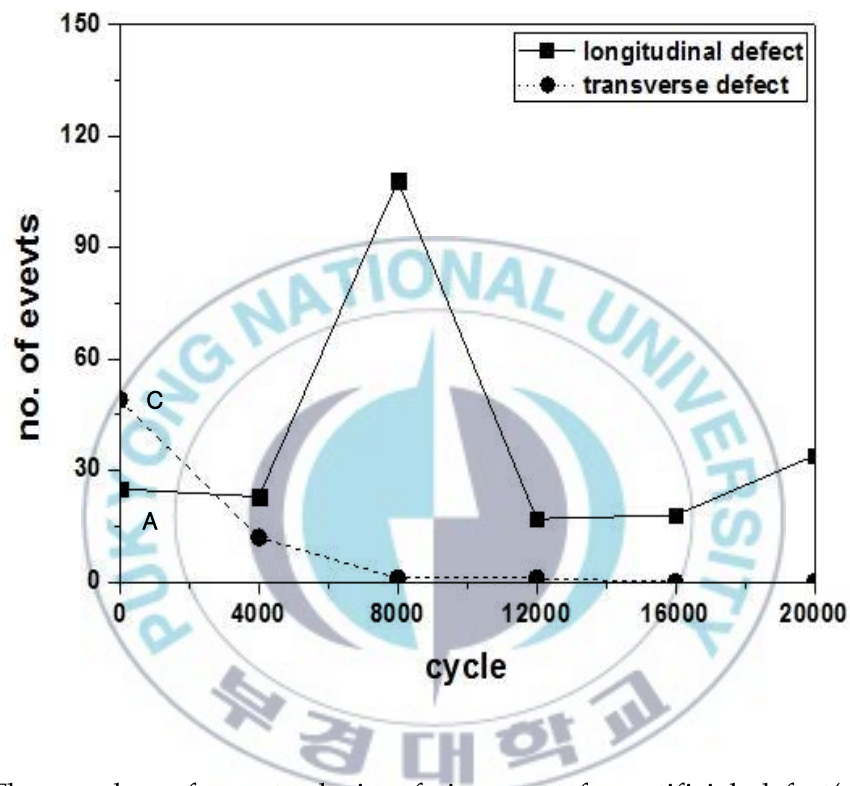


Figure 4-23. The number of events during fatigue test for artificial defect(A,C) fuel tank.

그림 4-24는 센서당 가압반복횟수 증가에 따른 신호 대 이벤트 비를 나타낸 것이다. 이것은 발생된 총 hit 수에서 발생원을 정확히 알 수 있는 hit의 비율을 보여주는 수치인데 용기 A의 경우 4000, 8000 반복횟수에서는 발생한 신호의 41.8% 및 55.7%가 발생원의 위치를 알 수 있는 신호였다.

이벤트는 발생원에서 발생한 음향방출 신호(탄성파)가 용기의 벽면을 따라 전달되어 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 계산할 수 있으며 최소 3개 이상의 센서에 적절한 시간차를 두고 검출되어야 한다. 이 조건에 맞지 않은 신호들은 이벤트를 계산할 수 없으며, 의사 음향방출 신호에 의해 위치표정을 확인한 경우 신호가 미약하거나 잡음인 경우 이벤트로 기록될 수 없다. 종방향 결함을 갖는 용기 A의 경우 4000 회나 8000 회에서 hit 수는 적지만 균열의 성장을 일으키기 위해 필요한 탄성에너지가 다른 건전부위에 비해 상대적으로 적기 때문에 균열의 성장이 쉬워 3개 이상의 센서에 전달될 만한 충분한 진폭을 갖는 신호를 발생하여 신호 대 이벤트의 비율이 증가하였다.

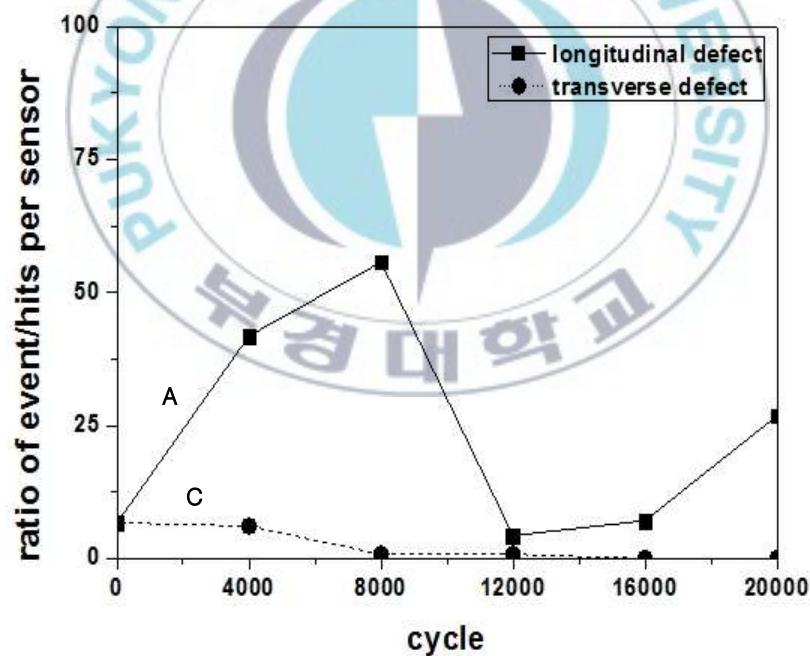


Figure 4-24. The raio of events / hits per channel during fatigue test for artificial defect(A,C) fuel tank.

그림 4-25는 강화섬유가 감긴 복합재료 표면위에서 음향방출 위치표정을 위해 의사 음향 방출원의 탄성과 속도를 측정한 결과를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 섬유가 감긴방향에 수직방향으로 탄성과 속도는 4512 m/sec, 섬유가 감긴 방향으로 탄성과 속도는 5689 m/sec 으로 비등방의 특징을 보여주고 있다. 따라서 음향방출 신호의 시간도달차를 이용한 비등방성 위치표정(anisotropic cylinder source location)방법을 이용하였다.

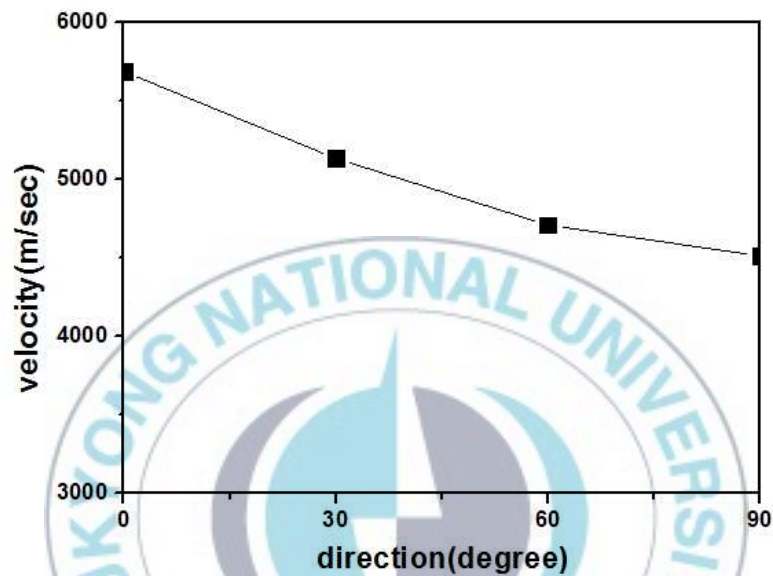


Figure 4-25. The elastic wave velocity with degree between propagation and wrapping direction.

그림 4-26은 센서의 위치와 의사 음향방출원을 이용한 위치표정의 확인시험 결과이다. 센서는 5, 6, 7, 8 번 채널을 서로 엇갈리게 부착되었고 7번 채널은 8번 채널의 반대쪽을 의미한다. 5번 채널과 8번 채널 사이와 6번 채널과 8번 채널 사이의 대각선 방향으로 등간격의 의사음향방출원은 그림과 같이 위치표정이 잘 되고 있다.

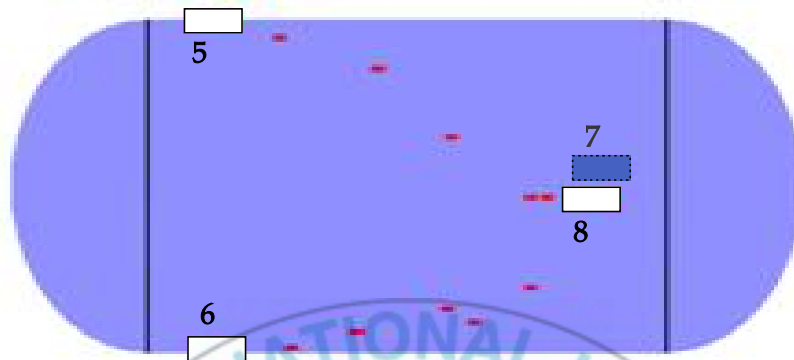


Figure 4-26. Source location confirm.

그림 4-27은 종방향 결함을 갖는 용기 A의 피로시험 동안 음향방출 시험에 의한 위치표정 결과이다. a)는 최초 피로 3회 동안 25개 이벤트의 위치표정을 보여주는데 인공결함의 위치를 보여주지 못하고 용기 전면에 산재된 양상을 보여준다. 그림으로 보여주지는 않았지만 횡방향 결함을 갖는 용기 C에서도 49개 이벤트가 용기 전면에 산재된 a)와 같은 양상을 보여주며 이는 최초 가압시 용기 전면의 가장 약한 부위에서 신호가 발생한 것으로 보여진다. b)의 경우 4000회 반복피로 이후 3회의 피로시험에서 23개의 이벤트가 인공 결함근처에 군집(cluster)되어 나타나는 것을 알 수 있다. 횡방향 결함을 갖는 용기의 경우 4000회 반복 피로 이후 3회의 피로시험에서 12개의 이벤트가 발생하였으나 용기 전면에 산재하여 인공결함의 위치를 표시하지 못하였다. c)의 경우는 8000회 반복피로 이후에는 108개의 이벤트가 인공결함 주변에 군집되어 나타나고 용기에서 발생된 신호의 50 %이상이 인공 결함과 관련이 있는 신호였다. 이후 d)~f) 에서도 발생된 이벤트는 대부분 인공결함 근처에서 발생한 것으로 인공결함 주변에서 복합재료 손상이 진전되는 것을 알 수 있다.

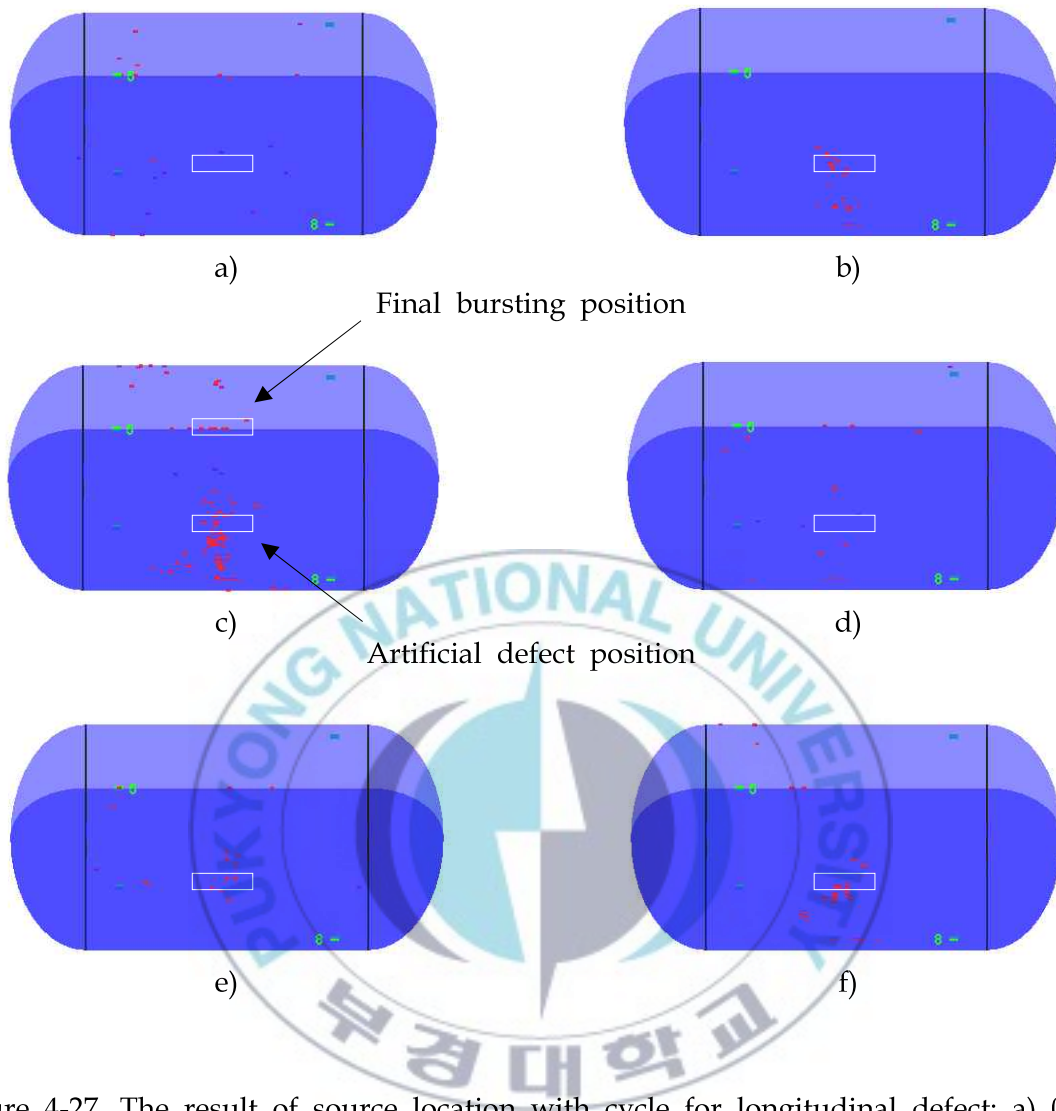


Figure 4-27. The result of source location with cycle for longitudinal defect: a) 0 , b) 4000, c) 8000, d) 12000, e) 16000, f) 20000 cycle.

그림 4-28는 20000 회 이후 종방향 인공결합 주변을 보여주는 것으로 결함 끝단에서 강화섬유의 감긴방향으로 기지균열이 성장되어 있는 것을 보여주고 사진에서 잘 구별하기 어렵지만 인공결합 깊이 방향 끝이 결함 전 길이에서 층간분리 현상이 관찰되었다. 횡방향 결함을 갖는 용기의 경우 8000 회 반복피로 이후는 1개 미만의 이벤트만을 발생하였고 인공결합의 위치를 잘 나타낼 수 없었다.

한편 20000 회 반복피로 이후 파열 시험에서 파열의 위치는 그림 4-27 c)에 표시되어 있는데 a), d), e), f)에서도 이벤트가 관찰 되고 있다. 이때의 음향방출 신호의 발생원은 복합재료에서 보다는 금속라이너의 약한 부위에서의 피로균열이라고 추정된다. 최종 파열은 종방향 결함의 경우 피로시험과 파열시험 동안 위에서 언급한 기지 균열과 층간분리를 수반하고 이 때문에 결함 길이에 해당하는 원통부 전면이 결함 깊이 만큼의 두께가 얇은 효과로 다른 부위보다 취약하고 금속라이너의 피로균열이 발생하였던 최종파열위치에서 파열된 것으로 판단된다.

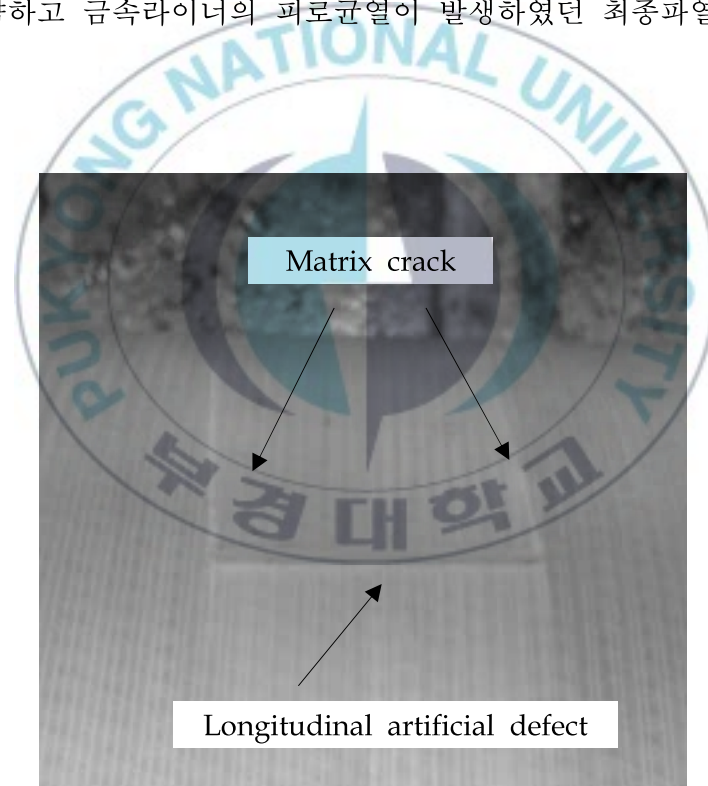


Figure 4-28. Longitudinal defect and matrix crack after 20000 cycle fatigue test.

그림 4-29는 건전용기에서 초기 3회 cycle 동안 발생한 신호의 진폭과 rise time과의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 10 μs 근방과 100 μs 이상으로 뚜렷이 구별되며 회색 표시는 3회 cycle 중 load를 holding하는 동안을 보여주는 것으로 load가 holding 되는 동안은 90% 정도인 대부분이 10 μs 근방의 rise time을 갖는다. 일반적으로 load holding 동안은 새로운 matrix 균열의 생성보다는 생성된 균열의 성장이 일어날 것이라는 것을 추론할 수 있고 따라서 10 μs 근방이 균열의 성장임을 알 수 있다. 그리고 matrix 균열의 생성 시에 발생하는 AE 신호의 rise time은 100 μs 이상이라고 할 수 있다. 이는 파열시험에서 matrix 균열 생성 시 발생하는 AE 신호의 rise time이 100 μs 근처이고 균열의 진전 시 발생하는 AE 신호의 rise time이 10 μs 근방이라는 결과와 잘 일치한다.[55] 한편 건전용기의 경우 4000회 피로 시험 이후부터는 평균 rise time은 현저하게 감소하여 20000 회 피로 시험까지 약간 증가하고 있다. 4000 회 피로시험 이후는 새로 생성되는 matrix 균열의 생성은 많지 않으며 초기에 생성된 균열이 성장하는 것으로 볼 수 있다. 한편 결함을 갖는 용기의 경우 초기 3회 피로시험 시 발생한 event와 관련된 hit의 평균 rise time은 56 μs 였고 8000 회 cycle 후 34 μs 로 감소하였다가 12000 회 cycle 후 82 μs 정도로 상승하고 이후 다시 감소한다.

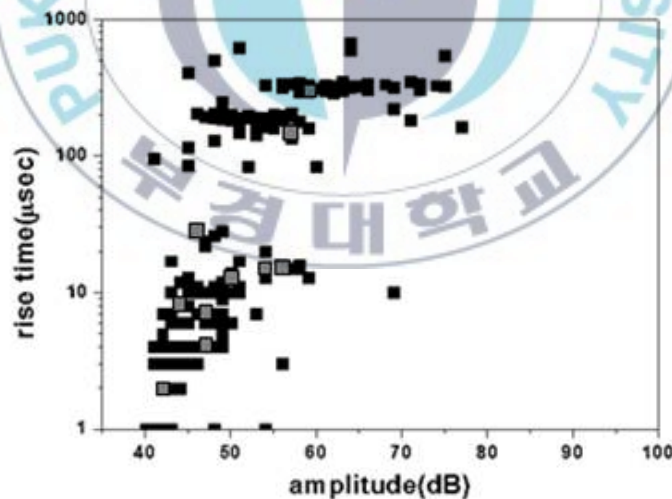


Figure 4-29. The rise time distribution during initial 3 cycle for sound cylinder

그림 4-30 a)는 결함을 갖는 용기의 초기 3회 cycle 동안 발생한 event와 관련된 hit 들에 대한 신호의 amplitude와 rise time과의 관계를 나타낸 것으로서 그래프에서 보면 $10\ \mu\text{s}$ 부근에서는 군집을 이루고 $100 \sim 800\ \mu\text{s}$ 근방까지 산재되어 있다. 용기의 전면의 약한 부위에서 matrix 균열의 생성과 생성된 균열의 성장이 일어날 것으로 판단된다. 특히 그림 4-27의 b), c), e), f)에서처럼 발생원이 결함주위에 군집을 형성하는 경우보다 a)나 d)처럼 발생원이 용기전면에 산재해 있는 경우 높은 rise time이 관찰됨을 알 수 있어 결함주위의 균열의 성장은 균열의 생성보다 낮은 rise time을 갖는 것을 확인할 수 있다.

한편 4000회 피로 cycle 이후 결함용기에서 발생한 신호의 평균 rise time이 건전용기에서 발생한 신호의 평균 rise time 보다 크게 나타나고 있다. 이는 matrix 균열의 생성에 필요한 탄성에너지가 상대적으로 작아지고 균열의 성장이 건전용기의 경우 서로 다른 위치에 서 개개의 균열이 성장한다면 결함을 갖는 용기의 경우 결함주변에서 동시에 여러 개의 성장으로 발생한 신호가 중첩에 의한 것으로 추정된다.



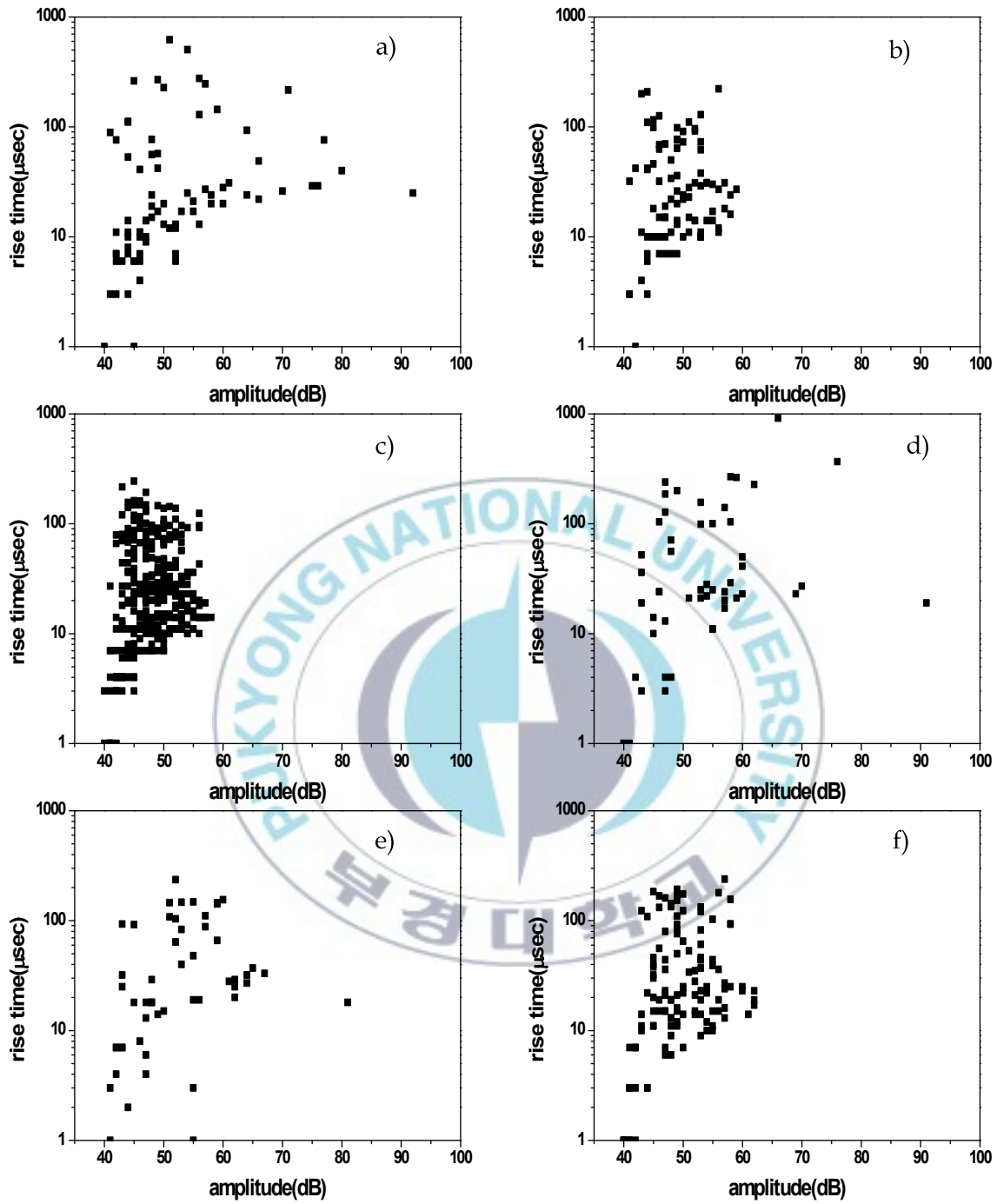


Figure 4-30. The rise time distribution of hits connected with event during fatigue cycle for longitudinal defect cylinder: a) 0, b) 4000, c) 8000, d) 12000, e) 16000, f) 20000 cycles

일반적으로 음향방출시험에서 주파수 분석은 광대역 센서를 이용하여 신호를 수집하고 고속 푸리에 변환(FFT)에 의해 분석한다. 그러나 광대역 센서가 공진형에 비하여 감도가 떨어지기 때문에 공진형 센서를 이용하여 신호를 수집하고 rise time, duration 및 count를 이용하여 계산에 의하여 주파수를 계산하기도 한다. 본 연구에서는 음향방출원의 source location을 위해 공진형 센서를 사용하였기 때문에 계산에 의한 주파수를 사용하여 분석하였다. 그림 4-31은 피로 시험 횟수에 따라 진폭에 대한 initial frequency의 분포를 나타는데 피로 횟수와 무관하게 100 ~ 200 kHz 근방에 분포하고 있다. 공진형 센서를 사용한 파열시험에서 matrix 균열 및 성장에 의해 발생하는 신호의 평균 주파수가 100 kHz 근방이라는 결과와 잘 일치하고 있다.[54]



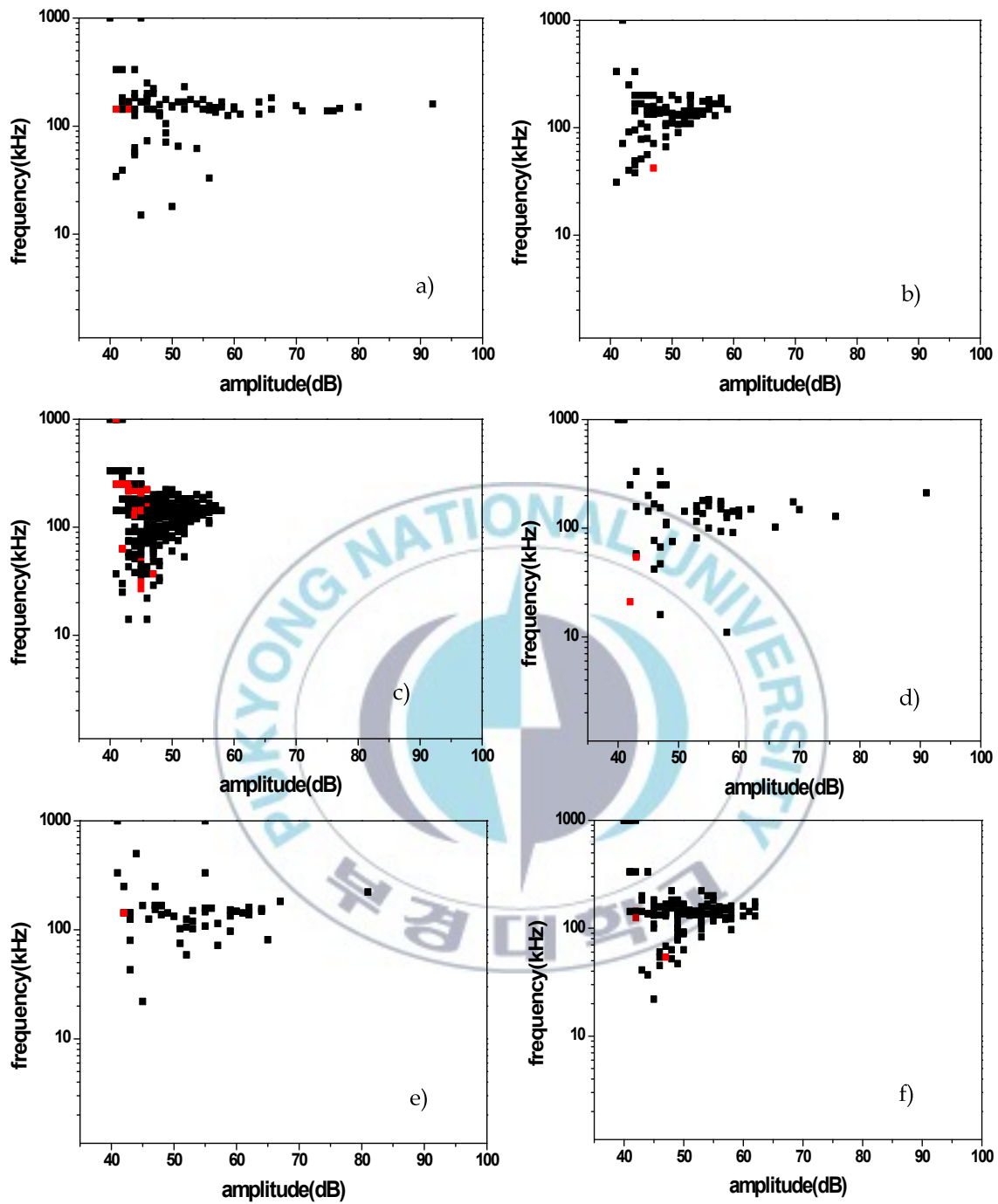
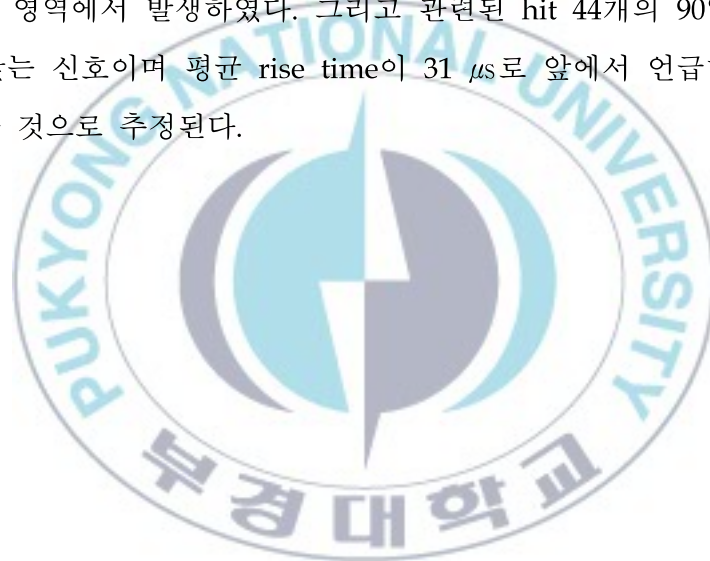


Figure 4-31. The initial frequency distribution of hits connected with event during fatigue cycle for longitudinal defect cylinder : a) 0, b) 4000, c) 8000, d) 12000, e) 16000, f) 20000 cycles

그림 4-32는 피로시험 횟수에 따라 진폭에 대한 reverberation frequency의 분포를 보여주고 있는데 8000 회 피로시험 후 결과인 c)에서 타원 부분을 제외하고 대부분 150 kHz 이하에 분포하고 있다. c)의 모든 event 관련 신호에 대한 평균 reverberation frequency는 73 kHz로 파열시험의 경우 복합재의 손상기구를 모두 포함하는 파열의 전 구간에서 평균 reverberation frequency는 50 ~ 75 kHz 사이라고 알려져 있는 것과 잘 일치하고 있다.[54] 한편 동일 용기의 파열시험에서 reverberation 주파수는 150 ~ 350 kHz 영역에 걸쳐 파열시험의 전 구간에서 발생하는 것으로 알려져 있으며[54] 이 경우는 모든 손상의 메카니즘이 포함되어 있기 때문에 주파수로서 손상 기구를 구별하기 어려운 점이 있었다.

c)에서 150 ~ 350 kHz 영역의 reverberation frequency를 갖는 event 신호는 23개가 발생하였으며 그 중 70%에 해당하는 16개가 2000회 피로 시험 후 인공결함을 관찰한 그림 4-28의 matrix 균열 영역에서 발생하였다. 그리고 관련된 hit 44개의 90% 이상이 100 μ s 이하의 rise time을 갖는 신호이며 평균 rise time이 31 μ s로 앞에서 언급한 것처럼 matrix 균열의 성장에 기인한 것으로 추정된다.



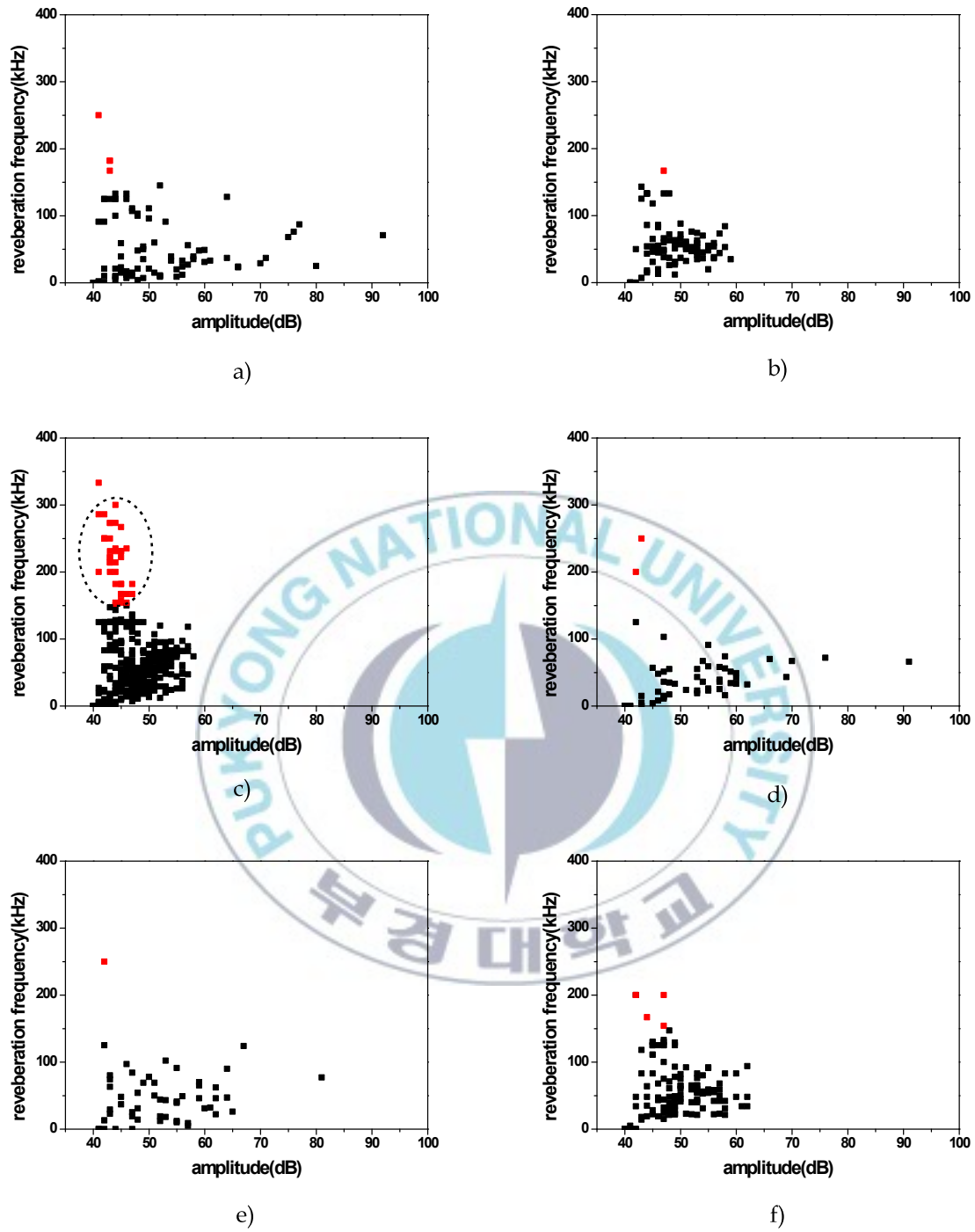


Figure 4-32. The reverberation frequency distribution of hits connected with event during fatigue cycle for longitudinal defect cylinder: a) 0 , b) 4000, c) 8000, d) 12000, e) 16000, f) 20000 cycle

그림 4-33은 피로 횡수에 따른 누적 hit의 진폭분포를 나타낸 것으로 그 기울기는 3가지 형태를 갖는다. 일반적으로 누적 hit의 진폭 분포에서 기울기는 발생원의 메커니즘과 관련이 있는 것으로 알려져 있고[56-60] 실험에 사용된 결함을 갖는 용기에서는 앞에서 언급된 것처럼 matrix 균열의 생성, 생성된 균열의 성장(delamination 포함) 및 라이너 피로균열의 생성과 성장 등의 메커니즘을 포함하고 있다. 라이너 피로균열의 생성과 성장은 다음절에 언급할 것이고 앞 절에서 설명한 피로 횡수에 따른 손상의 메커니즘 추정 결과 따르면 matrix 균열 생성의 경우 ①의 기울기는 0.04, 균열의 성장은 ②의 기울기 0.12를 갖는 것을 추정할 수 있다.



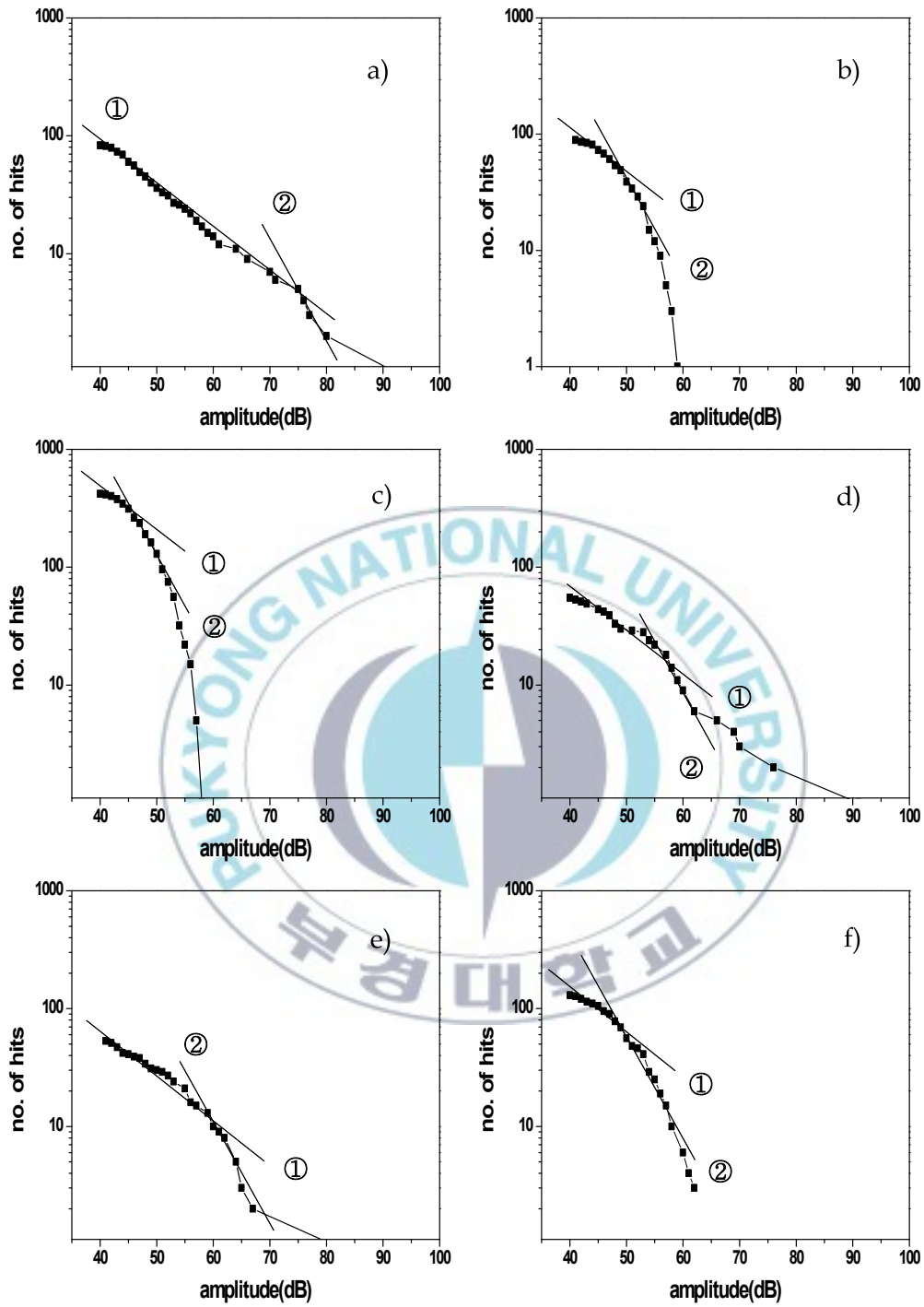


Figure 4-33. The amplitude distribution of accumulated hits connected with event during fatigue cycle for longitudinal defect cylinder : a) 0 , b) 4000, c) 8000, d) 12000, e) 16000, f) 20000 cycles

최종파열위치에서 발생한 음향방출 신호의 특성을 분석하기위하여 그림 4-27에 표시한 길이방향으로 200 mm, 용기의 원주방향으로 20 mm 이내의 최종파열위치 근방에서 관찰된 event 신호를 분석하였다. 20000회 피로 cycle 동안 18개의 event가 발생되었고 관련 hit 수는 59개 였다. 그림 4-35는 누적 진폭분포를 나타낸 것으로 60 dB 이상이 3개뿐이고 49개가 50dB 이하이다. 기울기를 ③ 하나로 볼 수도 있지만 자세히 보면 그림 4-33의 ①과 같은 기울기가 존재함을 알 수 있고 matrix 균열의 생성을 포함하고 있다고 볼 수 있다. 만약 ③의 기울기를 나타내는 하나로 본다면 단일 손상메커니즘에 의한 신호로 금속라이너의 손상과 관련이 있을 것으로 추정되며 크기는 0.06이다.

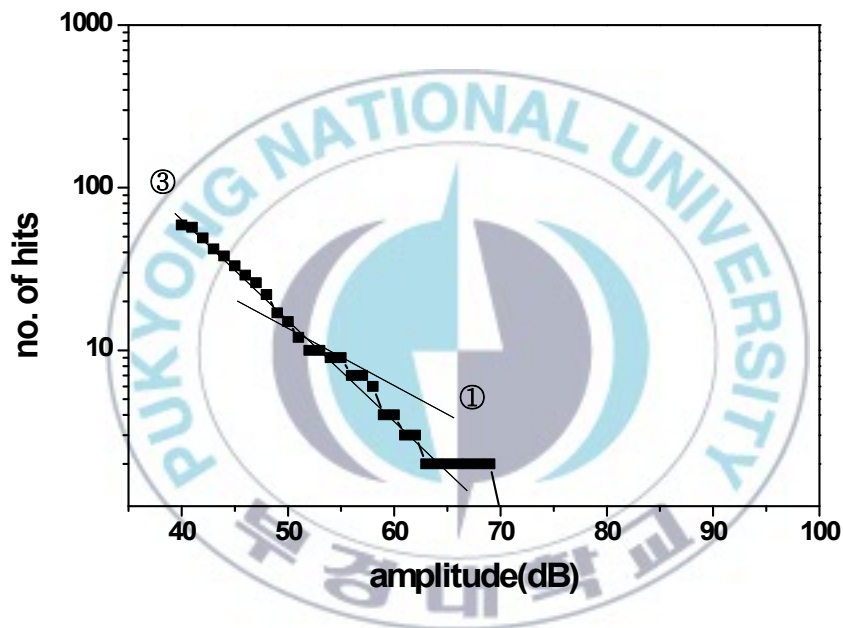


Figure 4-34. The amplitude distribution of accumulated hits connected with event during fatigue cycle for longitudinal defect cylinder

그림 4-35는 최종파열위치에서 발생한 신호의 진폭에 대한 rise time의 분포를 나타낸 것이다. rise time이 $100\ \mu\text{s}$ 이상인 신호는 거의 없고 $10\ \mu\text{s}$ 부근에 많이 분포한다. 따라서 금속 라이너의 피로균열 성장시 발생하는 rise time은 matrix 균열의 성장과 유사한 것으로 볼 수 있다.

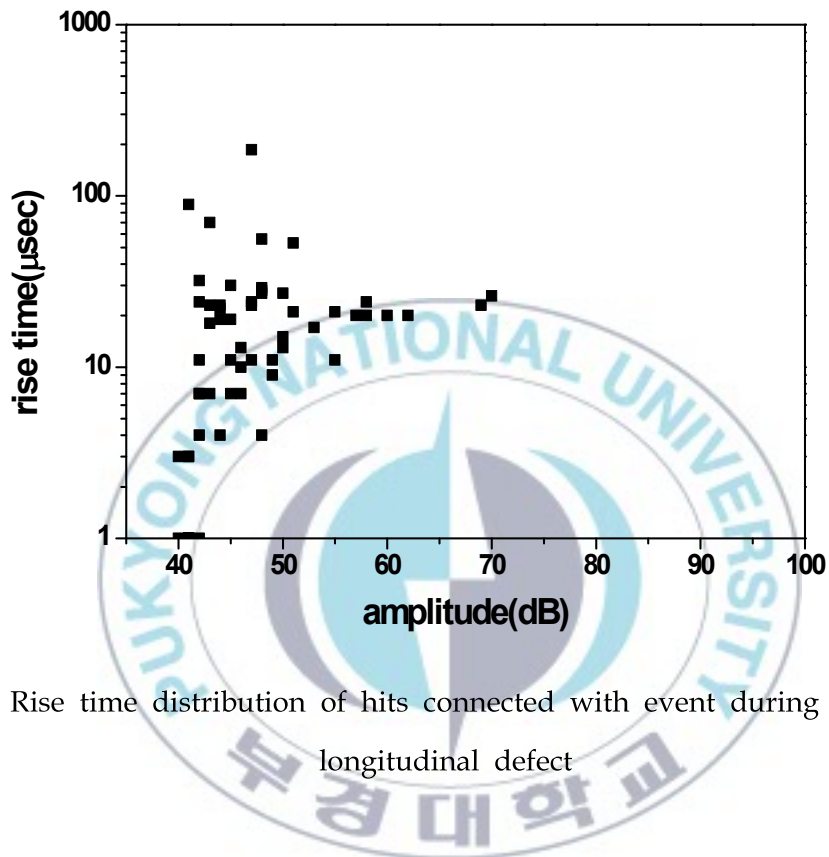


Figure 4-35. Rise time distribution of hits connected with event during fatigue cycle for longitudinal defect

4.4.3 복합재료 압력용기 피로시험

그림 4-36은 압력용기의 피로시험시 10000 회 간격으로 5번 시험한 첫번째 cycle의 음향 방출 신호의 hit를 나타낸 것이다. 10000 회에서 hit 수가 증가하였다가 cycle 수가 증가함에 따라 hit 수가 감소하고 70000회에서 다시 증가하여 마지막에 감소하는 경향을 보인다.

그림 4-37은 각각 신호의 평균 count를 나타낸 것으로 초기에 130 정도로 크게 나타나고 10000 ~ 50000 회까지는 30 이하를 나타내다가 이후 60000 및 70000 회에서는 증가하였다가 다시 감소한다. 이러한 경향은 평균 rise time이나 평균 energy 등에서 동일하게 나타난다. 그리고 이러한 경향은 hit수와는 상반된 경향을 보이는 것으로 60000 이나 70000 회에서 hit 수가 상대적으로 적은데 비하여 count, energy 및 duration은 커지는 경향을 보이고 있다.

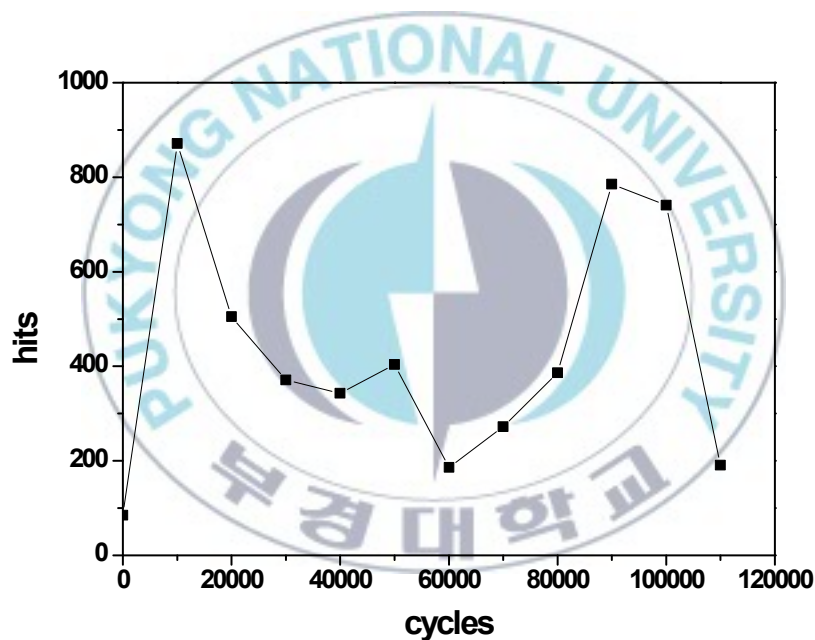


Figure 4-36. The number of hits with fatigue cycles

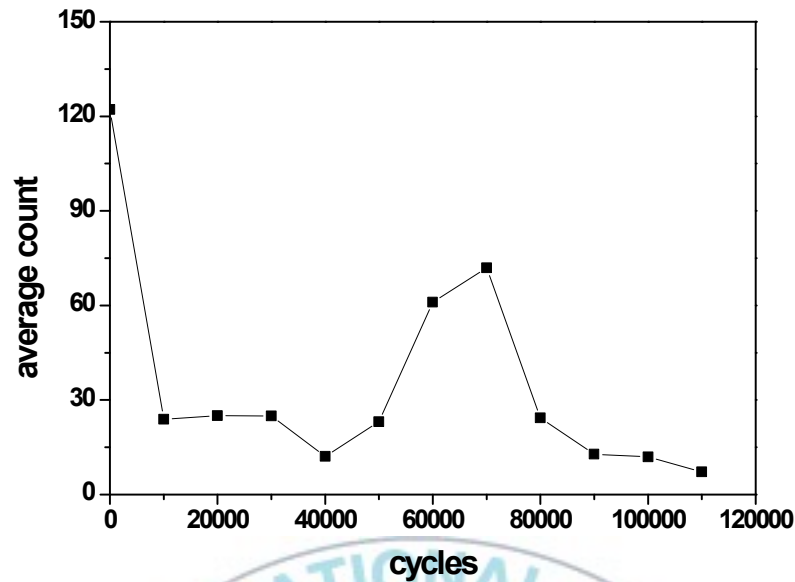


Figure 4-37. Average count with cycle

그림 4-38은 피로회수의 증가에 따른 평균 rise time을 나타낸 것이다. 초기에는 평균 rise time이 $60 \mu s$ 에서 60000회까지 점차적으로 감소하여 $25 \mu s$ 를 나타내다가 70000회에서 일시적으로 증가하고 누설시까지 다시 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. rise time은 음향방출 신호 발생원의 메커니즘과 관련이 있는 것으로 알려져 있으며[54], 이는 60000나 70000회 근방에서 새로운 메커니즘에 의해 음향방출 신호가 발생하는 것으로 판단 된다. 일반적으로 Type 2 용기의 손상 메커니즘은 파열시험의 경우 기지 균열의 생성과 성장, matrix의 박리, 섬유층의 파단 및 금속용기의 갑작스러운 파열 등으로 알려져 있으며[55], 피로 시험의 경우 약 20000회에서 기지 균열이 관찰되며 이후 기지균열의 점차 증가하고 피로회수가 증가하면서 최종적으로 기지균열 사이로 금속라이너의 누설을 관찰할 수 있다. 즉 matrix의 박리현상이나 강화섬유의 파단은 크게 일어나지 않는 것으로 보인다. 다만 압력용기가 누설이 되기 위해서는 금속 라이너가 손상되어야 하며 피로시험을 통한 금속라이너의 손상은 라이너의 피로균열의 성장으로 균열이 용기를 관통하여 일어난다고 할 수 있다. 따라서 60000 ~ 70000 회 부근에서 라이너의 피로 균열의 성장이 일어나는 것으로 추정된다.

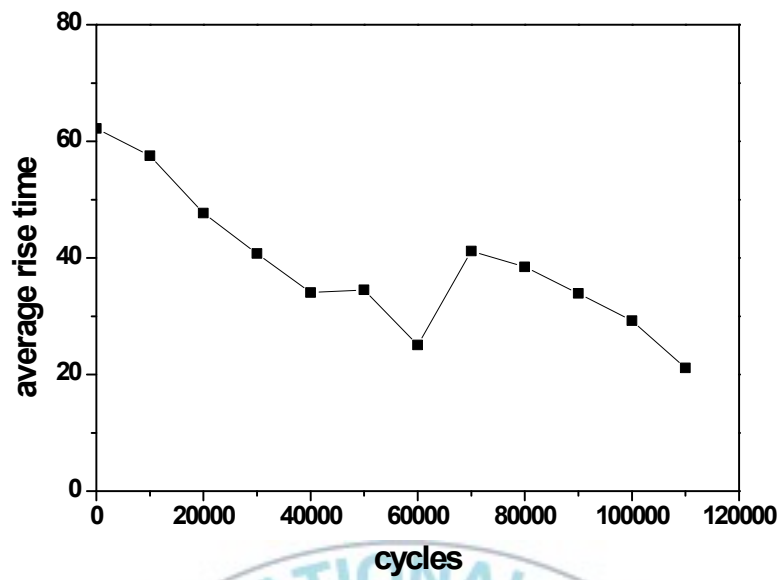
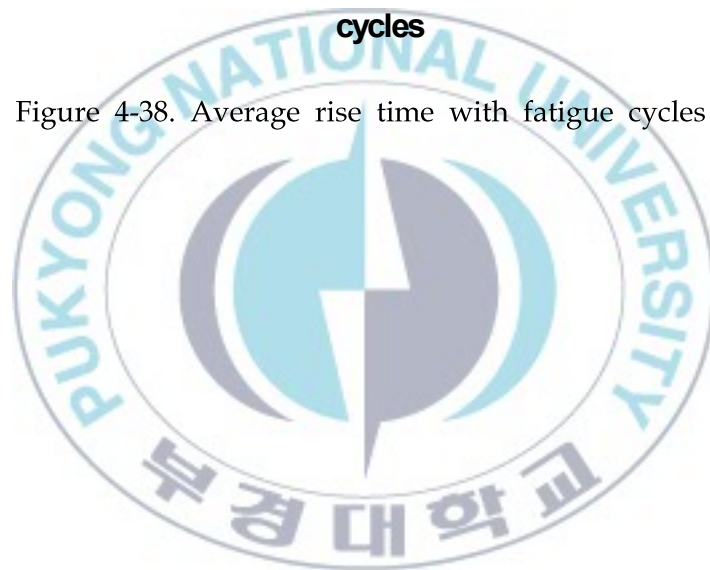


Figure 4-38. Average rise time with fatigue cycles



가스용기의 피로시험시 음향방출 신호를 획득하고 음향방출 변수의 분석을 통하여 용기의 손상정도를 평가하려고 하나 용기의 반복피로 횟수에 따른 음향방출 변수들의 변화가 단순히 증가하거나 감소하는 경향을 나타내지 않으므로 특정의 음향방출 변수만으로 평가하기가 어려운 경향이 있음을 살펴보았다. 일반적으로 용기의 압력시험에서는 가압기간 동안에는 flow noise 등의 잡음을 포함하게 되므로 본 연구에서는 한 cycle의 압력 유지 시간을 가압구간(loading stage)과 유지기간(hold stage)으로 구분하여 음향방출 신호변수를 분석하였다. 그림 4-39는 가압단계의 피로회수에 따른 hit 수를 나타낸다. 가압과 유지시간을 합한 그림 4-36과 비교하여 보면 10000회보다 90000회에서 hit 수가 많다는 것을 제외하고 전체적으로는 유사한 경향을 보인다. 그림 4-40과 그림 4-41은 가압단계에서 피로 회수에 따른 평균 count와 평균 rise time을 나타낸 것으로 가압기간과 유지기간을 합한 시간동안의 그것과 유사한 경향을 보인다.

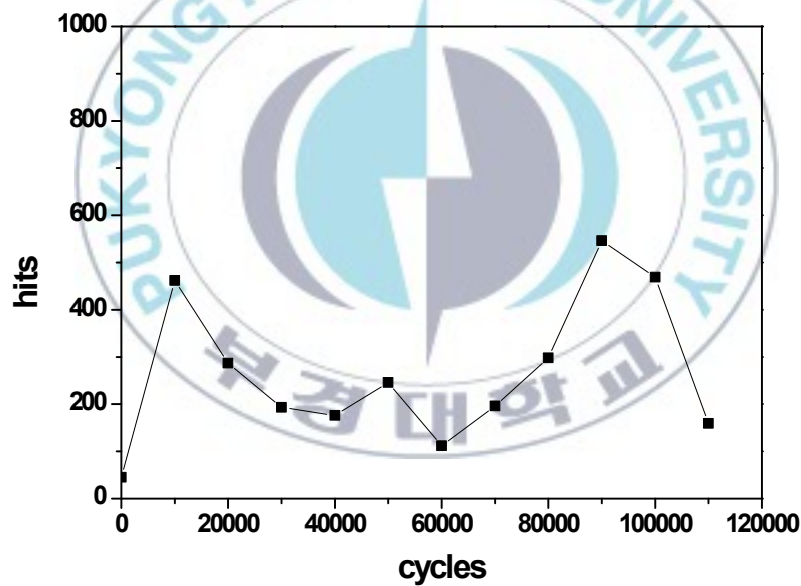


Figure 4-39. The number of hits with cycle during loading stage

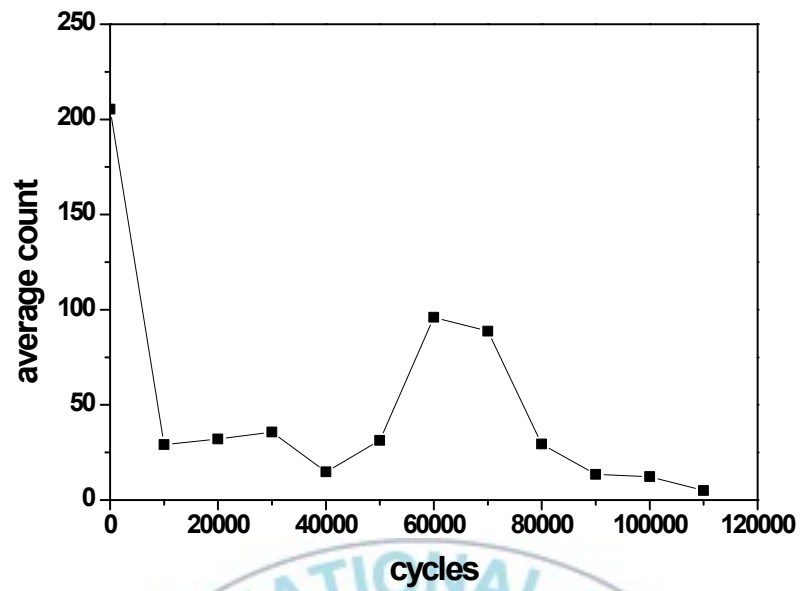


Figure 4-40. Average count with cycle during loading stage

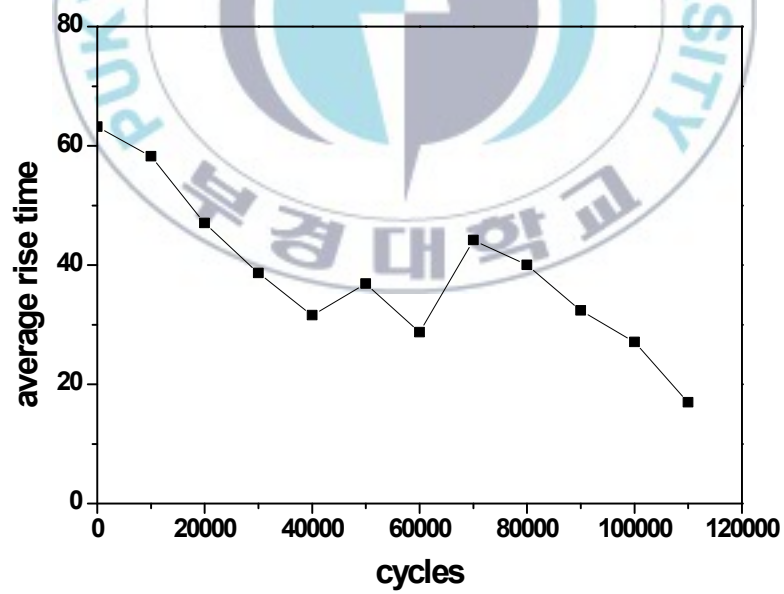


Figure 4-41. Average rise time with cycle during loading stage

그림 4-42는 압력유지기간 동안 피로 회수에 따른 hit 수를 나타내는데 그림 4-36과 그림 4-39에서의 히트수와 유사한 경향을 보이거나 60000 ~ 80000회에서 hit 수가 매우 적은 것이 특징이다. 그림 4-43은 압력유지기간 동안 피로 회수에 따른 평균 count를 나타낸 것으로 가압기간의 평균 계수를 나타내는 그림 4-40과 비교하면 가압 기간에는 60000 ~ 70000 회에서 적은 hit 수에 상대적으로 많은 count를 나타내는데 압력유지기간에는 hit 수도 적고 평균count도 적은 특징을 타나내며 이는 음향방출 발생원인 손상메커니즘의 변화에서 오는 것으로 판단되며, 그림 4-44는 압력유지기간 동안 피로 회수에 따른 평균 rise time을 나타낸 것으로 count와 같이 가압기간과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

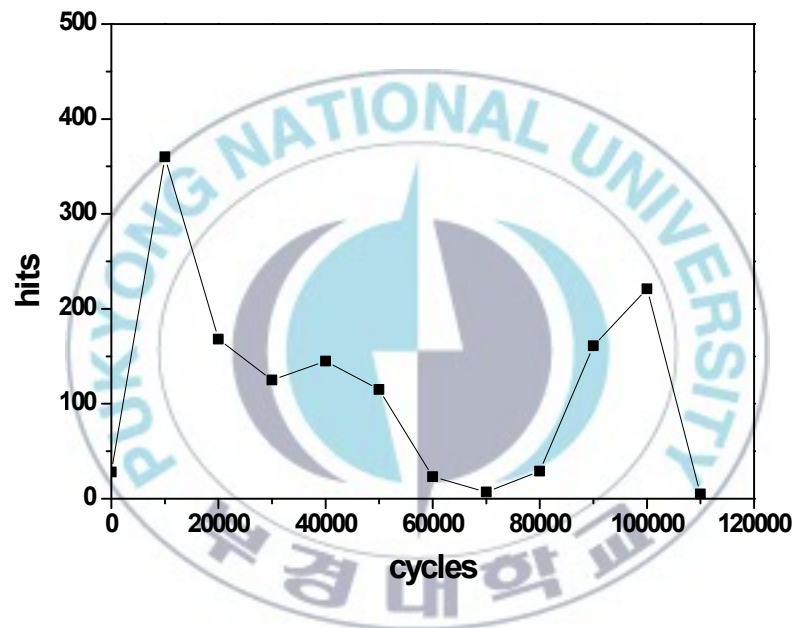


Figure 4-42. The number of hits with fatigue cycles during holding stage

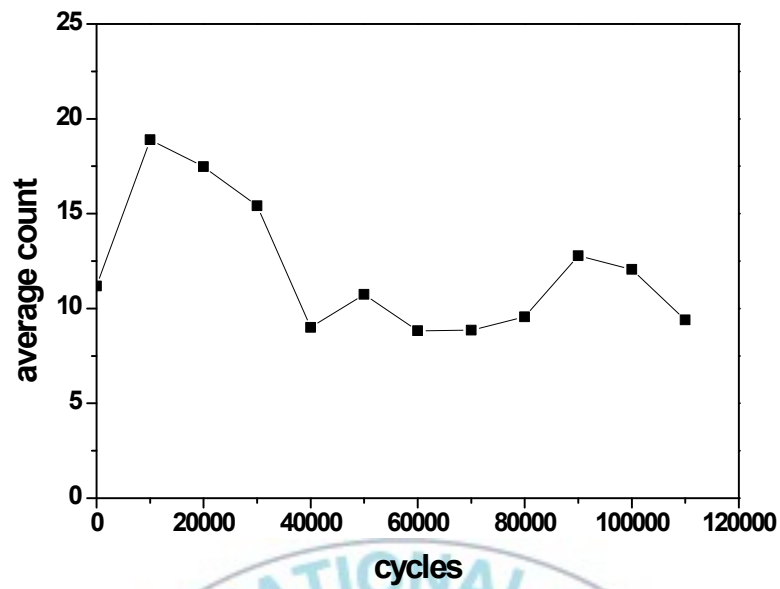


Figure 4-43. Average count with cycle during holding stage

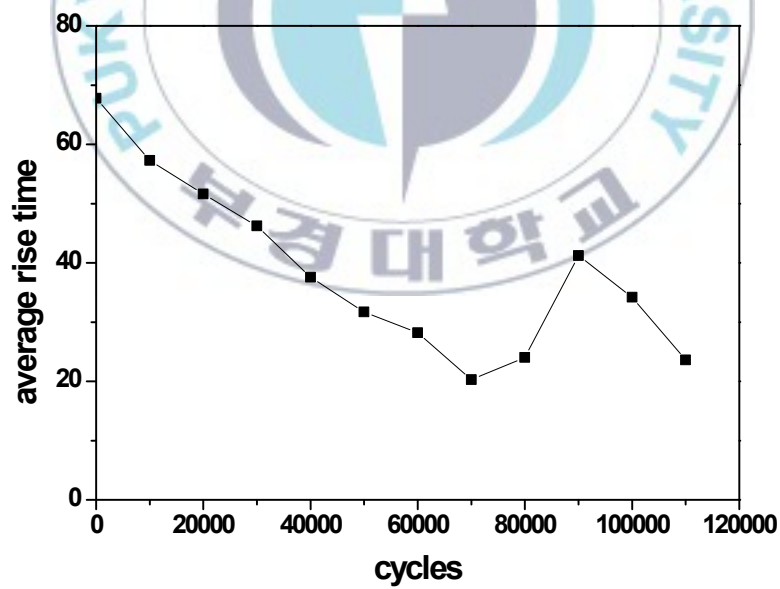


Figure 4-44. Average rise time with fatigue cycles during holding stage

피로시험시 연속 5회의 음향방출 신호획득 구간에서 첫 번째 cycle과 두 번째에서 다섯 번째 cycle간의 큰 차이를 보이는 음향방출 변수를 발견할 수 있었으며 여러 가지 변수 중 아래 그림 4-45와 같이 hit 수가 대표적으로 10000회의 반복시험 후 첫 번째 cycle에서는 나머지 cycle보다 전체적으로 큰 값을 나타내며 이 후 다른 cycle에서는 작은 값을 나타내고 있다. 이는 피로시험을 통한 용기의 손상도 평가를 위해서 음향방출 변수에서도 특정변수가 아닌 여러 가지 변수를 고려하여 피로회수의 증가에 따라 일정한 거동을 보여주는 특성 변수를 찾아내는 것이 중요하고 또한 신호획득 cycle의 구분이 필요하다는 것을 나타낸다고 할 수 있다.

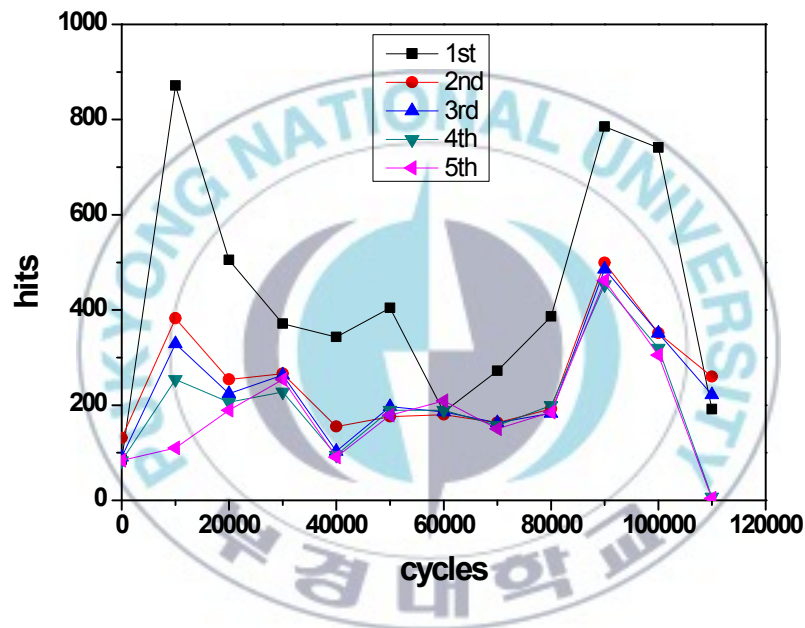


Figure 4-45. The number of hits during 5 continues cycles

그러나 그림 4-46과 4-47은 연속 5회 피로 시험 시 피로 횟수에 따른 평균 count와 평균 rise time의 변화를 보여주는 것으로서 앞의 hit수에서의 분포와는 달리 10000회 피로 이후의 연속 5회 시험에서는 거의 일정한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

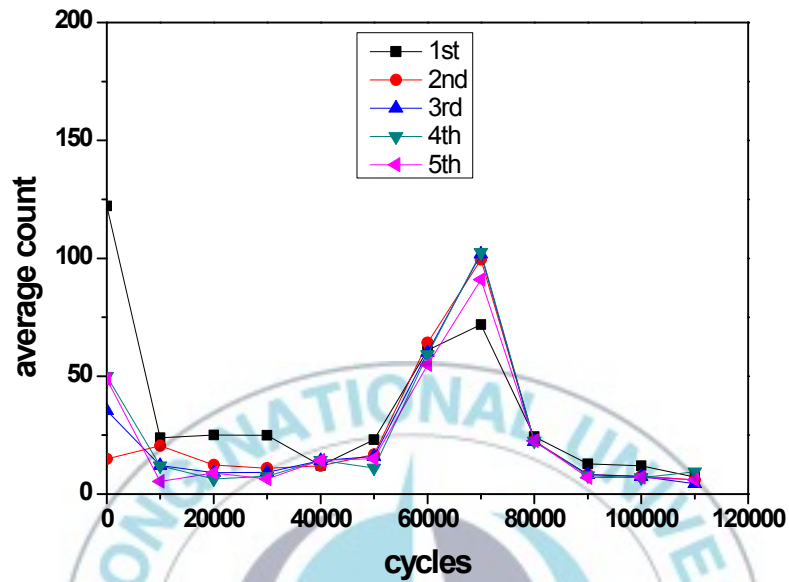


Figure 4-46. Average count during 5 consecutive fatigue with cycle

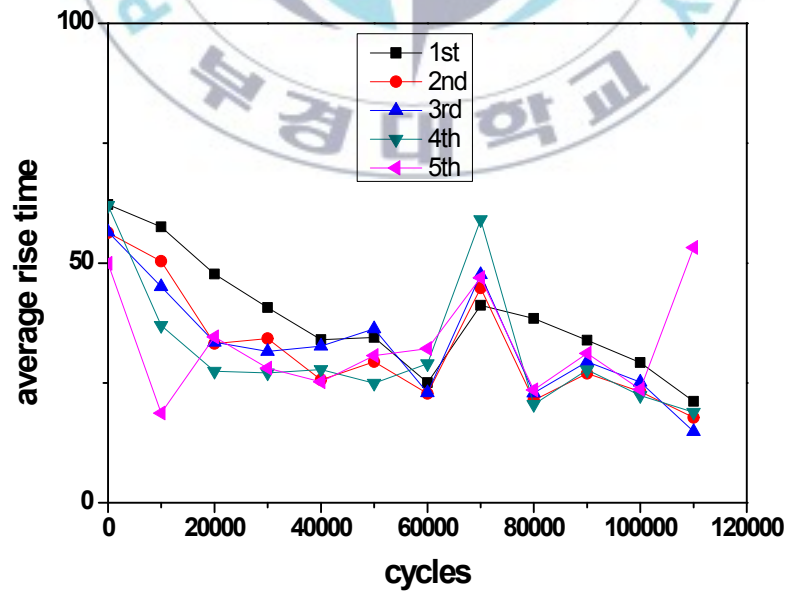
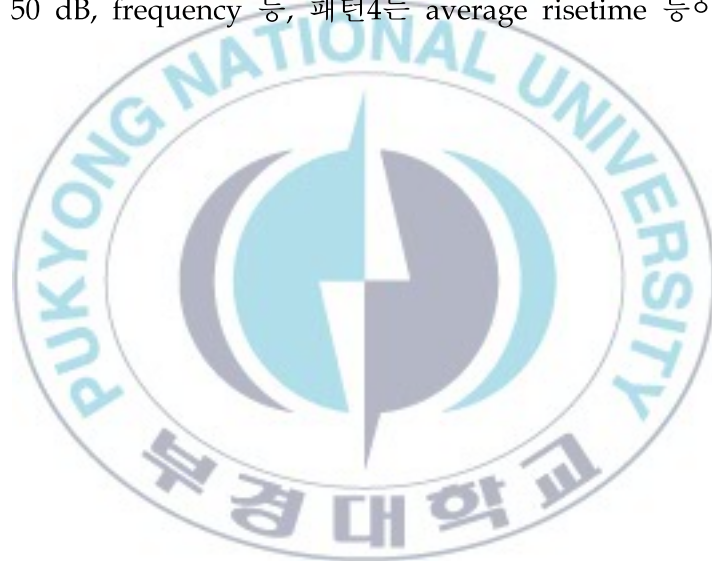


Figure 4-47. Average rise time during 5 consecutive fatigue with cycle

피로시험을 통한 압력용기의 손상도를 평가하기 위해서는 앞에서 언급한 것과 같이 피로 횟수와 일정한 거동을 보이는 음향방출 변수를 찾는 것이 중요하므로 본 연구에서는 음향방출 신호변수를 이용한 신호의 특징추출과 그 패턴의 분류를 살펴보고자 한다. 아래의 그래프들은 음향방출신호 변수 중 활성도와 손상메커니즘과 관련이 있는 amplitude, count, rise timr, duration, energy 등의 변수들의 분포경향을 살펴보았다. 음향방출변수들의 피로횟수에 따른 분포 경향은 그림 4-48과 같이 4가지 형태의 패턴으로 분류되었다. 금속라이너의 피로균열이 시작된 것으로 판단되는 70000회에서 최고와 최저를 나타내는 패턴1과 패턴2, 피로 40000회 이후로 같이 증가하는 경향을 보이는 패턴3, 그리고 70000회까지는 감소하는 경향을 보이는 패턴4로 분류할 수 있었다. 패턴1의 경향을 보이는 음향방출 변수로는 average count, average energy, average duration 등이 있고, 패턴2는 number of hit, 패턴3는 hits ratio above 50 dB, frequency 등, 패턴4는 average risetime 등이 있다.



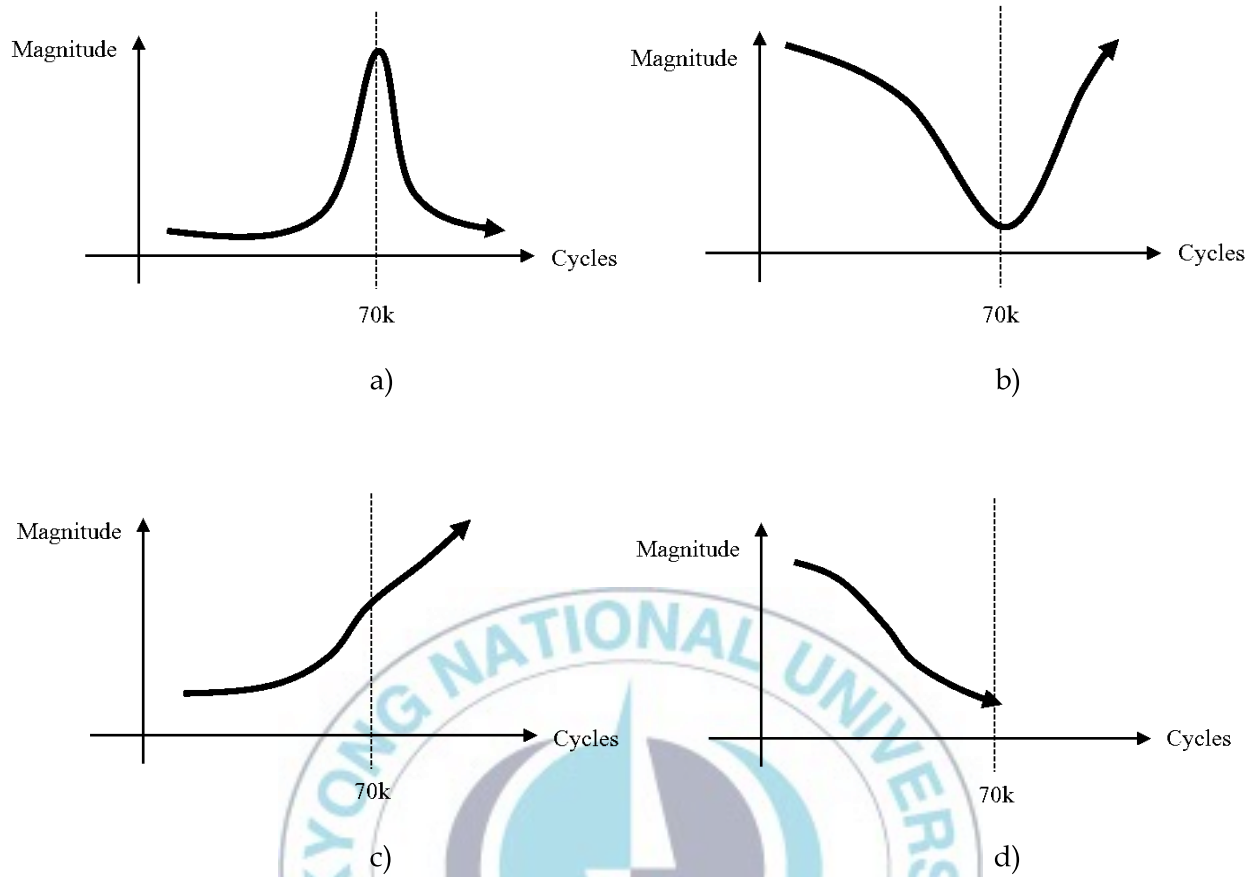


Figure 4-48. Classification of AE patterns :

a) Pattern 1, b) Pattern 2, c) Pattern 3, d) Pattern 4

Table 4-3. AE parameters Classification of patterns

AE parameters	Initial stage		Hold stage		Final stage	
number of hit		●	●			●
sum of count			●		●	
average count	●				●	
average energy	●				●	
average rise time				●		
average duration	●				●	
average signal strength	●				●	
Pattern type	P-1	P-2	P-2	P-4	P-1	P-3

4.4 결론

복합재료 압력용기의 파열시험 및 피로시험과 병행한 음향방출시험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 파열시험을 통해 파괴된 복합재료 압력용기를 관찰한 결과 용기의 손상 메커니즘은 먼저 금속라이너에 감겨있는 복합재료에서 기지의 균열이 발생하고 분리되어 층간박리 현상이 일어나고, 이후 계속해서 내압이 증가할수록 강화유리섬유의 절단과 금속라이너가 파괴되어 최종적으로 용기가 파열된 것으로 추정할 수 있었다.

2. Type 2 복합재료 압력용기의 사용압력(20.7 MPa)의 약 1.8 배에 해당하는 36 MPa (예상파열압력의 60%)까지 가압하였을 경우에는 음향방출신호의 Kaiser 효과를 관찰할 수 있었으며 용기의 손상정도가 적어 Creep 효과가 적게 나타나고, 42 MPa (예상파열압력의 70%) 이상의 압력이 가해질 때에는 Felicity 효과가 관찰되고 용기의 손상이 심하여 Creep 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3. 가압 30% 단계에서는 복합재료의 기지균열에 의한 음향방출 활성도가 증가하여 신호의 진폭이 상승한 것으로 보이며, 가압 50~60% 단계에서는 복합재료의 손상도가 증가함에 따라 음향방출 활성도가 오히려 감소하여 신호 진폭이 감소한 것으로 생각된다. 가압 70% 단계에서는 복합재료의 층간분리와 강화유리섬유의 절단이 시작되어 신호의 진폭이 다시 증가하고 이후에서는 유리섬유의 대량 절단과 금속라이너의 파괴가 일어나면서 진폭이 증가된 것으로 보여진다.

4. 파열시험에서 압력유지시간동안 발생한 음향방출 신호의 total count와 total signal strength는 압력용기의 손상정도를 잘 나타낼 수 있는 변수임을 알았으며, mean amplitude, mean rise time, mean duration 및 총 hit 중 진폭이 60 dB 이상인 hit가 차지하는 비율 등으로 용기의 손상 메커니즘을 추정할 수 있었다.

5. 복합재료 표면에 종방향 및 횡방향으로 인공결합을 갖는 용기를 2000회 피로시험 후 압력을 지속적으로 상승시켜 파열시켰을 때 파열압력은 59 ~ 61.5 MPa로 건전용기의 파열 압력과의 차이는 5 % 이내로 나타나 예상과는 달리 용기의 복합재료 matrix의 결합 유무와 크게 상관이 없음을 알 수 있었으며, 결합의 방향이 최종 파열 위치와는 상관관계가 있고 종방향 결합이 횡방향의 결합보다는 최종파열 위치에 더 큰 영향이 있음을 알 수 있었다.

6. 인공결합 피로시험시 발생하는 음향방출신호는 건전용기보다는 결합용기에서 많이 발생하였고, 피로시험횟수가 누적될수록 종방향 결합용기가 횡방향 결합용기보다 hit 수가 더욱 증가함을 알 수 있었다. 또한 종방향 인공결합 용기에서 발생하는 음향방출 이벤트는 인공결합에 집중되어 발생하고 신호의 위치표정이 결합위치에 정확하게 표정되었으나, 횡방향 인공결합용기는 이벤트가 거의 발생하지 않거나 발생하더라도 결합에 해당되는 위치와 일치하지 않았다.

7. 용기의 종방향 결합은 피로시험과 파열시험 동안 복합재료의 matrix 균열 성장과 층간 분리현상을 일으키며 결합의 길이만큼 결합이 위치한 용기의 몸통부 전둘레의 두께가 얇아지는 효과가 발생하여 용기의 다른 건전 부위보다 취약하게 되므로, 위치표정을 통하여 나타난 금속 라이너의 피로균열 위치에서 최종적으로 파열된 것으로 판단된다.

8. 복합재료 압력용기의 반복피로시험시 발생하는 음향방출 신호를 살펴보면 용기의 반복피로 횟수에 따른 음향방출 변수들의 변화가 단순히 증가하거나 감소하는 경향을 나타내지 않으며, 새로운 손상메커니즘이 관찰되는 시점에서 amplitude, rise time, count 등의 음향방출 변수가 증가-감소 또는 감소-증가의 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

9. 피로시험시 연속 5회의 음향방출 신호획득 구간에서 1 st cycle의 음향방출 데이터는 2nd~5th cycle의 데이터와 큰 차이를 보이는 hit 수 등의 음향방출 변수를 발견할 수 있었다. 이는 피로시험을 통한 용기의 손상도 평가를 위해서 음향방출 변수에서도 특정변수가 아닌 여러 가지 변수를 고려하여 피로회수의 증가에 따라 일정한 거동을 보여주는 특성 변수를 찾아내는 것이 중요하며, 음향방출 신호변수의 특징을 추출해 보면 특정 피로 cycle까

지 증가하였다가 감소하는 패턴, 감소하였다가 증가하는 패턴, 특정 피로 cycle 이후 파괴시
까지 일정하게 상승하는 패턴 그리고 특정 피로 cycle 까지 감소하는 패턴으로 크게 분류
할 수 있었다.



제 5 장 확률신경망을 이용한 복합재료 압력용기의 손상도 평가

5.1 서론

앞서 4장에서 살펴본 바와 같이 복합재료 압력용기의 피로시험시 발생하는 음향방출 변수들은 피로 cycle의 증가에 따른 단순증가나 단순감소의 경향을 보이지 않는다. 또한 데이터 획득시 압력의 인가, 유지 및 해제에 따라 구간별 음향방출 원인이 다양하게 존재하므로 피로회수 증가에 따른 음향방출 변수의 변화와 압력용기의 수명과 음향방출 변수와의 상관관계를 살펴볼 필요성이 있다. 본 장에서는 이러한 이유를 모두 고려하여 피로시험시 발생한 음향방출 변수들을 확률신경망을 이용하여 그 패턴을 학습하고 분류하여 압력용기의 손상도를 평가하고자 하였다.

Hill. 등[61]은 흑연/에폭시 복합재료 용기의 과열시험에서 예상과열압력의 25%까지의 발생한 음향방출신호의 진폭분포 데이터를 입력변수로 하여 인공신경망을 이용하여 건전용기의 예상과열압력을 추측하였으며, S. Huguet 등[62]은 GFRP 파이프의 축인장시험시 발생하는 음향방출 신호의 peak amplitude, duration, energy 분포를 Kohonen' map으로 적용하여 클러스터링할 수 있는 방법을 제시하였다.

5.1.1 신경회로망

신경회로망은 인간 두뇌를 구성하는 신경세포의 작용을 소프트웨어적으로 모사하여 형상 인식에 적용하는 기법으로 복잡한 구조를 가진 데이터들 사이의 관계나 패턴을 찾아내는 기법이다. 경험으로부터 학습해가는 인간 두뇌의 신경망 활동으로부터 착안한 것으로서 자신이 가진 데이터로부터 반복적인 학습과정을 거쳐 패턴을 찾아내고 이를 일반화하여 특히 향후 예측하고자 하는 문제에 있어서 유용하게 이용된다.

일반적인 분류기법들은 과정이 시작부터 끝까지 단계별로 진행되지만 신경회로망 분류는 어떤 목표치를 주고 목표치에 도달할 때까지 반복하여 연산자를 훈련시키는 과정을 거친다.

대부분의 신경망들은 훈련규칙을 가지며 연결가중치(weights)를 데이터에 기초하여 조정한다. 신경망들은 입력자료들로부터 학습하여 일반적인 원리를 찾아내며 신경망모델은 위상, 활성화함수 및 학습규칙 등에 의해 결정된다.

신경회로망의 장점으로는 복잡한 수식의 고려없이 예측이 가능하고 결과의 신뢰성을 향

상시킴을 위해 적절한 입력자료를 사용하여 훈련시킨다. 자료들의 선형성, 비선형성에 관계 없이 모델을 만들 수 있으며 불명확하거나 일관성이 없는 자료를 처리하는데 유용하다.

반면에 인간이 어떠한 현상을 인지하는 것처럼 쉽게 설명되지 않는 내부적인 작업을 수행하고 이를 통해 얻어진 결과물만 제공할 뿐 어떠한 변수가 중요한지 어떤 상호작용이 이루어져 결과물을 생성하는지에 대한 설명은 하지 못하며 이러한 설명보다는 더욱 정확한 예측이 더욱 중요할 경우 이용이 가능한 제한점이 있다. 또 신뢰성이 높은 신경망 모델을 만들기 위해서는 광범위한 변수를 포함한 훈련자료를 필요로 하며, 훈련자료 범위밖의 자료가 입력될 경우 결과의 신뢰성이 크게 떨어지는 단점이 있다.

5.1.2 확률론적 신경회로망 [63-65]

어떤 개체가 어느 Class에 속하는지를 판별하는 분류자로서 두 개 이상의 훈련패턴들에서 학습된 알고리즘을 모현화하며 입력 개체간의 거리행렬에 근거하여 개체가 속한 Class를 결정한다. Batesian 의사결정론과 확률밀도함수 추정을 위한 Parzen Window 방법을 조합하여 어떤 개체가 어떤 Class에 속하는지를 판별하는 분류기로서 Radial-basis function network 또는 kernel regression의 한 분류이다. 다차원 공간에서의 interpolation 문제에 대하여 Radial-basis function을 활용하는 의사결정 방법의 하나이며, 적용분야로는 문자인식, 영상인식, 의학, 생명공학, 신호처리, 금융, 토목공학, 비파괴평가 분야 등 매우 다양하게 적용이 가능하다. 확률신경망의 장점으로서는 신경망을 구성할 때 훈련패턴을 Class 별로 은닉층을 분포시키므로 다층신경망과는 달리 신경망을 학습시키기 위한 반복과정이 필요하지 않으므로 학습시간이 다층신경망에 비해 훨씬 짧고 은닉층의 수와 뉴런의 수 등 신경망 구조에 대한 불확실설이 없다. 또한 훈련패턴으로부터 Class에 속하는 누적확률분포를 먼저 결정하므로 어느 Class에 속하는가 뿐 만 아니라 훈련패턴들이 Class에 속할 확률을 구할 수 있으며 이들은 병렬처리가 가능하다. 단점으로는 오차역전파신경망처럼 일반적이지 않으며, 처리를 위한 큰 메모리가 필요하며 훈련 set이 반드시 필요하다는 점이 있다.

확률신경망의 구조는 아래 그림 5-1과 같이 4개의 층으로 구성되며, 먼저 입력층은 각 표본의 특징 벡터를 공급하고 학습층은 입력층에서 공급된 표본의 특징값에 가중치를 곱한 결과의 합을 받아들여 그 값에 지수함수를 적용한 값을 출력한다. 합산층은 패턴층의 노드들 중 자신과 같은 범주에 속한 노드들에만 연결되어 있는데, 연결된 패턴층의 노드들의 출력

의 합을 입력으로 받아들이는 후 여기에 사용자가 정의한 파라미터를 곱하여 그 결과를 출력하고 최종적으로 출력층에서는 최종적인 출력이 분류과정에 사용되어지는 구조를 가진다.

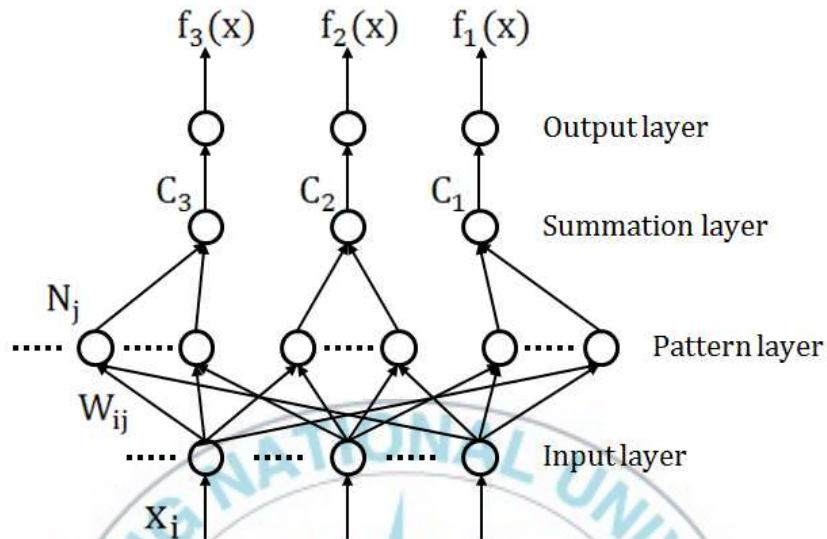


Figure 5-1. Architecture of PNN

Training Set은 분류알고리즘의 적합화를 위한 훈련 학습 data이며, Test Set은 최종 선택한 분류알고리즘이 새로운 데이터에 대한 성과를 평가하기 위한 data이다.

수집한 데이터로부터 특징을 추출하고 추출된 특징으로부터 분류에 적합한 특징을 선택하고, 선택된 특징을 이용하여 분류를 실시하는 알고리즘을 개발하는 과정을 거친다.

특징추출단계에서는 일반적으로 같은 범주에 속하는 표본들이 지니고 있는 특성으로서 다른 범주와 구별할 수 있는 측정함수를 의미하며, 분석대상이 되는 패턴의 복잡성을 줄여서 분류알고리즘을 간단히 하고 분류의 정확도를 향상시키는데 목적이 있다. 만약 추출된 특징이 패턴분류에 소용이 없다면 아무리 좋은 분류기를 사용해도 좋은 분류성능을 얻기 어렵다. 특징선택단계는 패턴분류에 유용한 정보인 민감한 특징만을 선택하는 과정으로 분석을 위해 충분한 정보를 가지고 있으며, 물리적인 시스템이 지니고 있는 종류 간 이질성을 특징공간에서도 일관성 있게 유지하여야 하며, 사용하고자 하는 특징이 모든 표본에 대해서 일관성이 있어야 한다. 분류단계에서는 특징을 이용하여 각 표본을 가장 적합하다고 판단되

는 범주로 분류하는 과정으로 분류기는 적절한 알고리즘을 사용하여 학습표본으로부터 분류 알고리즘을 만드는데 이용하여 분류에 필요한 지식을 학습하고 시험표본으로 만든 분류 알고리즘을 적용하여 분류기의 성능을 평가한다.

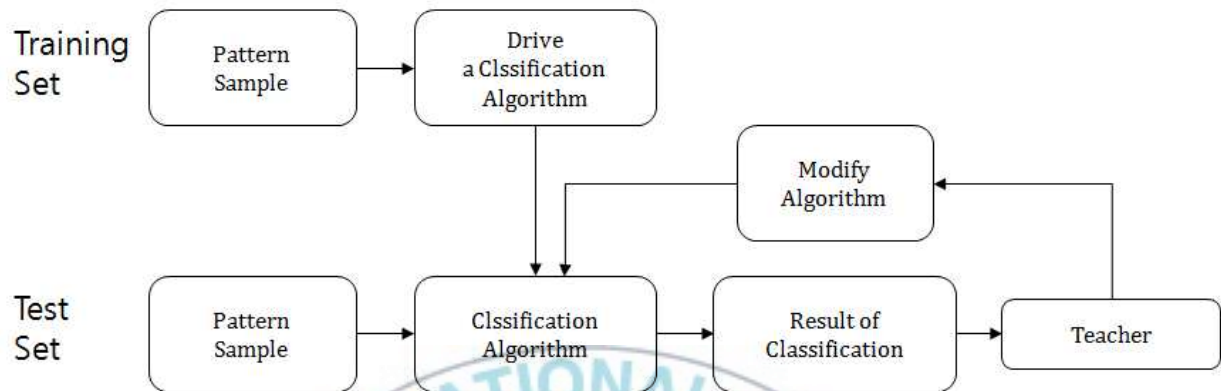


Figure 5-2. Proceeding of PNN

5.2 실험장치 및 실험방법

확률신경망을 이용하기 위한 음향방출 변수의 학습데이터와 분류데이터를 생성하기 위하여 그림 5-3과 같이 압력용기에 음향방출신호의 전달특성이 다른 점을 고려하여 각각 복합재료와 금속라이너에 음향방출센서를 부착하고 그림 5-4와 같은 방법으로 누설시까지 각 10000 회마다 10분간씩 총 5번의 음향방출신호를 획득하였다.

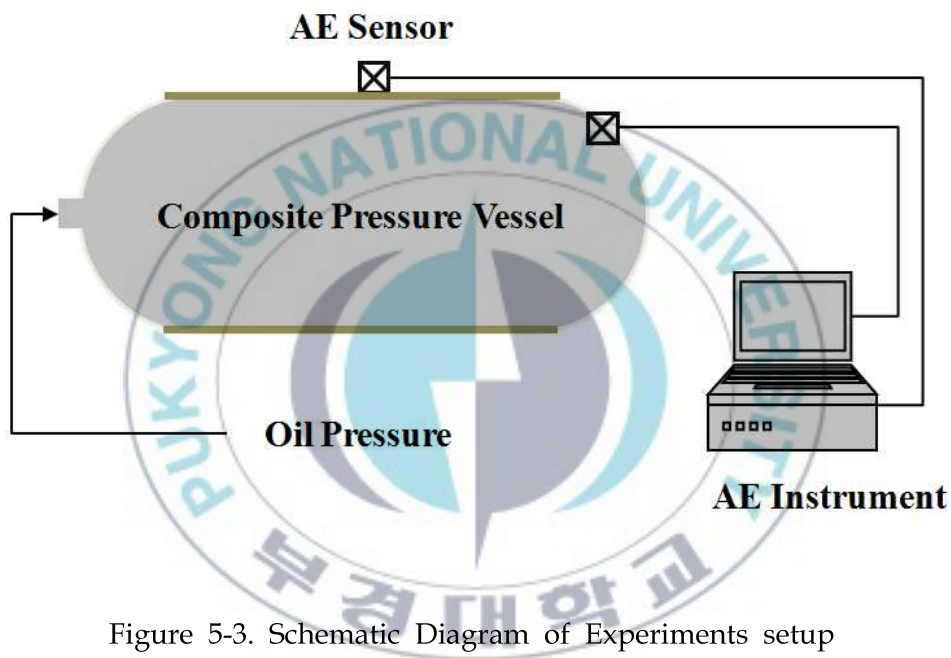


Figure 5-3. Schematic Diagram of Experiments setup

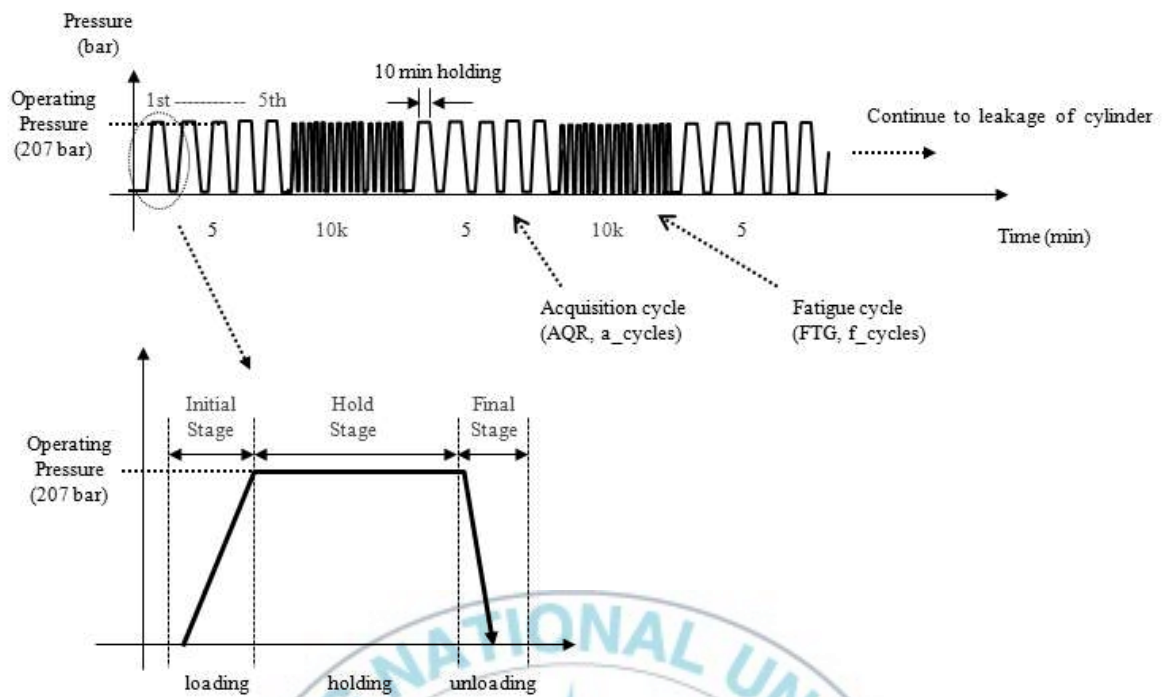


Figure 5-4. Test cycle of fatigue and acquisition

획득한 음향방출신호는 복합재료 압력용기의 복합재료층과 금속라이너의 신호전달 특성 차이로 2개 채널로 나누고 신호수집구간의 loading-holding-unloading 구간에서 noise flow (loading, unloading), matrix cracking initiation and propagation (loading), matrix cracking (holding), friction (unloading) 등의 음향방출원의 차이에 따라 Initial stage, Hold stage 및 Final stage 3개로 구분하여 데이터 파일로 생성-저장하였다. 또한 그림 5-5와 5-6에서와 같이 복합재료 압력용기의 음향방출 신호변수는 피로횟수의 증가와 함께 수집된 5개의 acquisition cycles에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 이를 고려하여 추가로 acquisition cycles의 신호를 분리하여 학습 및 분류데이터 set로 구성하였다.

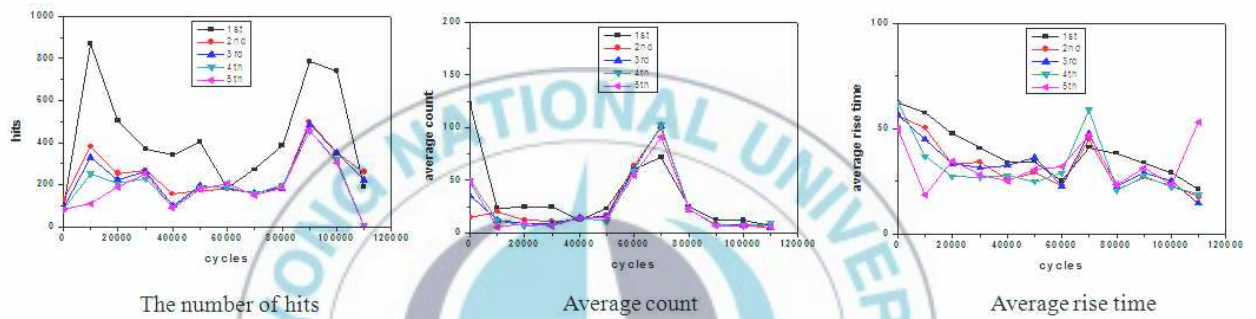


Figure 5-5. AE parameters each data acquisition cycles

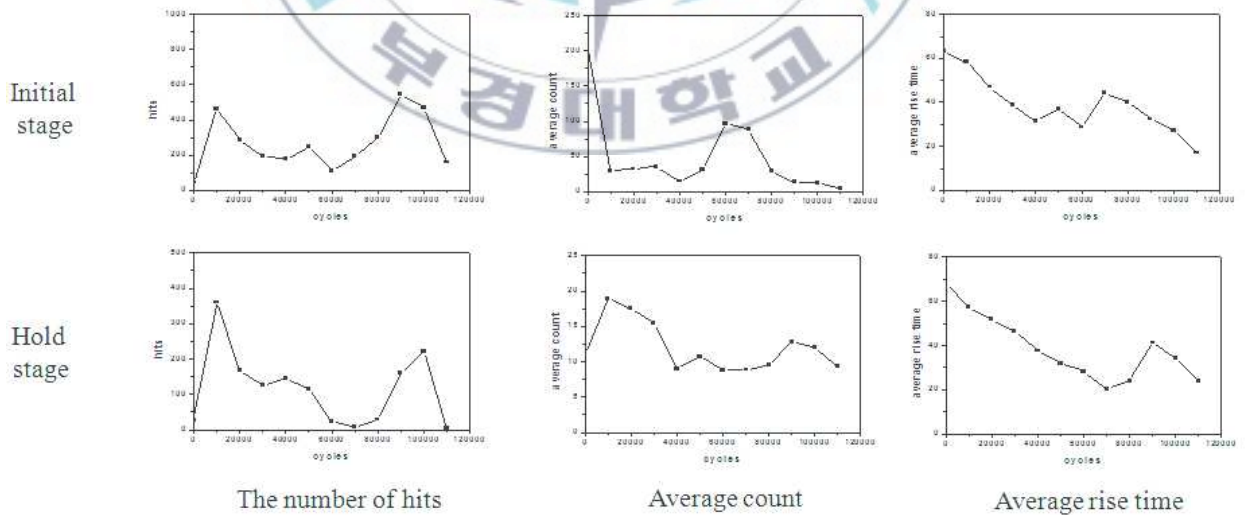


Figure 5-6. AE parameters each loading stage

1장 서론에서 설명한 바와 같이 음향방출신호의 해석은 크게 amplitude, count, energy, signal strength 등의 신호의 활성화도(파형크기)에 의한 분석과 Duration, Risettime, RA Value 등의 신호의 파형모양에 의한 분석 그리고 RMS, ASL 등의 연속적인 신호크기에 의한 분석 방법 등으로 나뉘어 볼 수 있다. 따라서 확률신경망을 적용하기 위하여 실험에 사용된 Feature Set(FTS)의 AE feature를 다음과 같이 정의하고 특징값들을 추출하였다.

■ 신호의 활성화도(파형크기)에 관련한 Feature

- num_amp_band(CH,lowV,highV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Amplitude의 지정한 값(lowV)부터 최고값(highV) 사이의 hit 수를 구한다.

- max_amp(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Amplitude의 최대값(진폭)을 구한다. (highV) 사이의 amplitude distribution(x축 진폭, y축 log hit수)에서 기울기를 구한다.

- max_eng(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 최대 Energy를 구한다.

- sum_eng(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Energy의 합계를 구한다.

- num_of_hit(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Energy가 발생한 hit수를 구한다.

- avr_eng(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Energy가 1 이상인 hit 들의 평균에너지를 구한다.

- num_eng_over(CH,lowV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Energy의 지정한 값(lowV)부터 최대값(max) 사이의 hit수를 구한다.

- ratio_eng(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 총 hit들에서 Energy가 1 이상인 것의 비율을 구한다.

- top10_avr_eng(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Energy가 높은순으로 10개의 평균을 구한다. (10개가 안될 경우는, 그 개수의 평균을 구한다.)
- top20_avr_eng(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Energy가 높은순으로 20개의 평균을 구한다. (20개가 안될 경우는, 그 개수의 평균을 구한다.)
- sum_count(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 count의 합계를 구한다.
- avr_count(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 count의 평균을 구한다.
- max_count(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 최대count를 구한다.
- num_count_over(CH,lowV)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 count의 지정한 값(lowV)부터 최대값(max) 사이에 있는 hit 수를 구한다.
- ratio_count(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 총 hit 들에서 count가 6이상인 hit의 비율을 구한다.
- over6_avr_count(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 count가 6 이상인 hit들의 평균 count를 구한다.
- sum_strength(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 strength의 합계를 구한다.
- avr_strength(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 strength의 평균을 구한다.
- top20_avr_strength(CH)
: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 strength가 높은순으로 20개의 평균을 구한다. (20개가 안될 경우는, 그 개수의 평균을 구한다.)

■ 신호의 파형모양에 관련한 Feature

- max_Rtime(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 최대 Rise Time을 구한다.

- avr_Rtime(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Rise Time의 평균을 구한다.

- num_Rtime_over(CH,lowV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Rise Time의 지정한 값(lowV)부터 최대값(max) 사이에 있는 hit 수를 구한다.

- ratio_Rtime(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 총 hit들에서 Rise Time이 6 이상인 것의 비율을 구한다.

- top20_avr_Rtime(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Rise Time이 높은순으로 20개의 평균을 구한다. (20개가 안될 경우는, 그 개수의 평균을 구한다.)

- over6_avr_Rtime(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Rise Time이 6 이상인 것의 평균을 구한다.

- max_duration(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 최대 duration을 구한다.

- avr_duration(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 duration의 평균을 구한다.

- num_duration_over(CH,lowV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 duration의 지정한 값(lowV)부터 최대값(max) 사이에 있는 hit 수를 구한다.

- ratio_duration(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 총 hit 들에서 duration이 51이상인 hit의 비율을 구한다.

- top20_avr_duration(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 duration이 높은순으로 20개의 평균을 구한다. (20개가 안될 경우는, 그 개수의 평균을 구한다)

- band_avr_duration(CH,lowV,highV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 duration의 지정한 최저값(lowV)부터 최고값(highV) 사이에 있는 hit 들에 대한 평균duration을 구한다.

- avr_duration_over(CH,lowV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 duration이 지정한 값(lowV) 이상인 hit의 평균을 구한다.

- slop_amp(CH,lowV,highV)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 Amplitude값 중에 최저값(lowV)부터 최고값

■ 계속적인 신호의 크기에 관련한 Feature

- avr_sl(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 Signal Level의 평균을 구한다.

- avr_rms(CH)

: 선택한 범위내에서 원하는 채널(CH)의 DB중에서 RMS의 평균을 구한다.



Table 5-1. Feature of AE parameters and Classification of patterns (○ : matching case)

no.	AE Features	Full stage		Initial stage		Hold stage		Final stage	
1	num_amp_band		○		○	○			○
2	max_amp								
3	max_eng		○					○	
4	sum_eng	○				○		○	
5	num_of_hit		○		○	○			○
6	avr_eng	○		○				○	
7	num_eng_over				○	○			○
8	ratio_eng								
9	top10_avr_eng	○						○	
10	top20_avr_eng	○						○	
11	sum_count					○		○	
12	avr_count	○		○				○	
13	max_count	○						○	
14	num_count_over		○		○	○			○
15	ratio_count								
16	over6_avr_count	○		○				○	
17	sum_strength	○				○		○	
18	avr_strength	○		○				○	
19	top20_avr_strength	○						○	
	Pattern type	P1	P2	P1	P2	P2	P4	P1	P3

(뒷 페이지 계속)

(앞 페이지 계속)

no.	AE Features	Full stage		Initial stage		Hold stage		Final stage	
20	max_Rtime								
21	avr_Rtime						○		
22	num_Rtime_over		○		○	○			○
23	ratio_Rtime								
24	top20_avr_rtime								
25	over6_avr_Rtime			○			○		
26	max_duration							○	
27	avr_duration	○		○				○	
28	num_duration_over		○		○	○			○
29	ratio_duration								
30	top20_avr_duration	○						○	
31	band_avr_duration	○		○				○	
32	avr_duration_over	○		○				○	
33	slop_amp		○		○	○			○
34	avr_sl	○							
35	avr_rms	○						○	
	Pattern type	P1	P2	P1	P2	P2	P4	P1	P3
	no. of matching	16	7	8	7	10	2	18	7

학습 및 분류 data set의 구조는 2 channel $\times$ 3 stage $\times$ 35 features = 210를 1 set로 하여 각각의 Vessel에 대하여 피로시험은 0 cycle에서 시작하여 110,000 cycles의 누설 때까지 실시되고 같은 피로조건을 파라미터로 하여 5번의 신호수집 cycles을 가진다.

분류기는 H_CORE Algorithm을 갖는 PNN을 사용하고 준거 데이터와 시험 데이터 모두 규격화 한 후 최대값으로 1번 시행하였다. 분류기의 Weighting factor는 모두 1로 설정하였으며 평활인자 σ 의 default value는 0.5로 설정하였다. 학습 및 분류 data set는 표 5-2와 같다.

Table 5-2. Training and test data set

No.	Training data Set	Classification	Test data set 1	Test data set 2
1	1st cycle	A, B, C, D, E	I, H, F	I, H
2	2nd cycle	A, B, C, D, E	I, H, F	I, H
3	1st cycle	AB, CD, E	I, H, F	I, H
		AB, C, DE		
4	2nd cycle	AB, CD, E	I, H, F	I, H
		AB, C, DE		
5	1st cycle	A, B, C, DE	I, H, F	I, H
6	2nd cycle	A, B, C, DE	I, H, F	I, H

(A:0~20k, B :30~50k, C:60~70k, D:80~90k, E:100~110k, I:initial, H:hold, F:final stage)

5.3 결과 및 토의

확률신경망을 이용하여 용기의 등급분류 결과 표 5-3과 같이 학습 데이터는 2nd cycle를 사용하고 등급은 3등급(AB, C, DE)으로 분류하였을 경우 85.42%로 가장 높은 판별도를 보였다. 또한 표 5-4, 5-5와 같이 학습 데이터는 2nd cycle의 데이터로 하였을 경우가 73.17%로 1st cycle의 데이터를 학습데이터로 하였을 경우의 63.01%보다 높게 나타났으며, 또한 시험 데이터는 initial, hold, final stage를 모두 포함하는 경우가 70.83%로 final stage를 제외하였을 경우의 65.36%보다 높게 나타났다. 따라서 확률신경망을 이용한 복합재료 압력용기의 손상도 평가에 있어 학습 data의 구성에 따라 분류결과에 영향을 주며, 특히 1st acquisition cycle 음향방출변수 feature와 final stage의 포함 여부에 따라 판별도의 차이를 나타낸다. 학습 입력변수는 변수 특징이 많을수록, loading - holding - unloading stage의 신호가 모두 포함될수록, 첫 번째 이 후 cycle의 신호를 적용할수록 좋은 결과를 나타낼 수 있었다.



Table 5-3. Result of classification on Vessel

Case	Training set	Test set	Classification	Result(%)
1	1st cycle	I, H, F	A, B, C, D ,E	52.08
2	1st cycle	I, H, F	AB, CD, E	72.92
3	1st cycle	I, H, F	AB, C, DE	77.08
4	1st cycle	I, H, F	A, B, C, DE	58.33
5	2nd cycle	I, H, F	A, B, C, D ,E	66.67
6	2nd cycle	I, H, F	AB, CD, E	81.25
7	2nd cycle	I, H, F	AB, C, DE	85.42
8	2nd cycle	I, H, F	A, B, C, DE	72.92
9	1st cycle	I, H	A, B, C, D ,E	45.83
10	1st cycle	I, H	AB, CD, E	60.42
11	1st cycle	I, H	AB, C, DE	77.08
12	1st cycle	I, H	A, B, C, DE	60.42
13	2nd cycle	I, H	A, B, C, D ,E	62.50
14	2nd cycle	I, H	AB, CD, E	77.08
15	2nd cycle	I, H	AB, C, DE	77.08
16	2nd cycle	I, H	A, B, C, DE	62.50

Table 5-4. Result of classification by training data set

Case	Training data set	Test data set	Result(%)
1~4 9~12	1st cycle	I, H, F	63.01
		I, H	
5~8 13~16	2nd cycle	I, H, F	73.17
		I, H	

Table 5-5. Result of classification by test data set

Case	Training data set	Test data set	Result(%)
1~8	1st cycle	I, H, F	70.83
	2nd cycle		
9~16	1st cycle	I, H	65.36
	2nd cycle		

5.4 결론

확률신경망을 이용한 확률신경망을 이용한 압력용기의 손상도 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 단순증가나 단순감소의 경향을 보이지 않는 복합재료 압력용기의 피로누적시 발생하는 음향방출 변수들은 확률신경망을 이용하여 패턴을 분류하는 것이 효과적이다.
2. 입력변수의 결정을 위한 학습 data set은 압력용기의 신호전달 특성을 고려한 채널 설정, 신호 수집 cycle, 피로 cycle 등을 모두 고려하여 구성하는 것이 적절하였다.
3. 신호특징 추출을 위하여 결정한 35개의 음향방출 변수 특징들은 분류 결과값의 향상을 위하여 학습 데이터 및 분류 데이터 set 구성시 Case 별로 나누어 구분해 보는 것이 효과적이다.
4. 압력용기의 피로시험 data에서 학습 data는 2nd cycle 사용하고 결과등급 분류를 AB, C, DE의 3등급으로 분류하였을 경우가 85.42%로 가장 높은 판별도를 보였다.
5. 데이터 분류 결과 학습 data의 구성에 따라 분류결과에 영향을 주며, 특히 1st acquisition cycle 음향방출변수 feature와 final stage의 포함 여부에 따라 판별도의 차이를 나타낸다.
6. 확률신경망을 이용한 압력용기의 손상도 평가를 위한 학습입력변수는 AE parameters의 feature가 많을수록, loading-holding-unloading stage의 신호가 모두 포함될수록, 2nd cycles 이후의 신호를 적용할수록 좋은 결과를 나타낸다.

제 3 장 결 론

음향방출을 이용한 Type 2 복합재료 압력용기의 손상평가를 위한 복합재료 시편파괴시험, 압력용기의 신호 전달특성 실험, 용기의 결함유무에 따른 파열 및 피로 비교실험, 확률신경망을 이용한 압력용기의 손상도 평가 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Glass fiber에 대한 knife의 절단각도가 커짐에 따라 음향방출신호의 amplitude가 증가됨을 실험으로 확인하였으며, 따라서 복합재료 시편파괴시 hit 수는 longitudinal 방향(유리섬유에 수직방향)이 hoop 방향(유리섬유에 수평방향)보다 많이 나타났으나 신호의 amplitude는 hoop 방향이 longitudinal 방향보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. Glass fiber 파괴에 따른 신호 진폭은 40 dB이상이며 matrix 파괴에 따른 신호 진폭은 40 dB 이하임을 알 수 있었고, longitudinal 방향으로 시편파괴시 발생하는 음향방출신호의 발생원은 주 손상메커니즘인 glass fiber이다.

2. Type 2 복합재료 압력용기의 전파 각도에 따른 음향방출신호의 전달속도는 용기에 물이 채워져 있는 경우와 없는 경우 복합재료 위에서는 측정속도 차이는 거의 없으며, glass fiber가 감긴 방향(0°)에 대해 음향방출원으로부터 전파 각도가 증가할수록 5700 m/sec에서 4500m/sec로 속도가 감소하고 감쇠효과가 증가하는 비등방성을 나타내고 있다.

3. Type 2 복합재료 압력용기의 과압으로 파열될 때의 손상 메커니즘은 matrix cracking - delamination - glass fiber breakage - metal liner fracture 이며, 용기 파열압력의 60%까지는 kaiser effect가 관찰되어 용기의 손상은 적은 것으로 보이며, 70% 이상에서 용기의 손상이 심하여 felicity effect가 관찰되고 Creep 현상이 발견된다. 또한 파열압력의 70%에서 matrix delamination과 glass fiber breakage가 주 손상원인으로 판단되며, 용기의 파열직전에는 용기의 glass fiber bundle의 대량파괴와 metal liner의 파괴로 용기는 최종적으로 파괴된다.

4. Type 2 복합재료 압력용기의 load holding중에 발생하는 음향방출 신호를 분석한 결과 total count와 total signal strength가 용기의 손상도를 잘 나타낼 수 있는 AE 변수이고 Mean amplitude, mean rise time, mean duration등의 신호변수와 60 dB 이상의 AE 신호가 전체신호에서 차지하는 비율은 용기의 손상 메커니즘을 추정할 수 있는 음향방출신호변수임을 알 수 있다.

5. 인공결함을 내재한 Type 2 복합재료 압력용기의 파열압력은 matrix의 결함 유무와 상관없이 없으며, 결함의 방향이 용기의 최종파열 위치와 상관관계가 있다. 이는 용기의 수직방향결함의 경우 결함길이만큼 결함이 위치한 용기몸통부의 전둘레 두께가 얇아지는 효과로 다른 부위보다 취약하게 되므로, 음향방출원 위치표정을 통하여 나타난 금속 라이너의 피로균열 위치에서 최종적으로 파열된 것으로 판단된다.

6. Type 2 복합재료 압력용기의 피로실험에서 발생하는 음향방출 신호는 용기의 누적피로회수에 따라 단순 증가하거나 감소하는 경향을 나타내지 않으며, 새로운 손상원이 관찰되는 시점에는 amplitude, rise time, count 등의 특정 신호변수가 증가 후 감소하거나 감소 후 증가하는 경향을 나타낸다. 피로회수의 증가에 따라 일정한 거동을 보여주는 음향방출변수를 살펴보면 특정 피로 cycle까지 증가하였다가 감소하는 패턴, 감소하였다가 증가하는 패턴, 특정 피로 cycle 이후 파괴시까지 일정하게 상승하는 패턴 그리고 특정 피로 cycle 까지 감소하는 패턴 등의 4가지 분류할 수 있다.

7. 단순증가나 단순감소의 경향을 보이지 않는 Type 2 복합재료 압력용기의 피로손상으로 발생하는 음향방출 변수들은 확률신경망을 이용하여 패턴을 분류하는 것이 효과적이며, 확률신경망을 이용한 신호패턴 분류를 위한 학습입력변수는 AE parameters의 feature가 다양할수록, 가압-유지-해제 전구간의 음향방출 신호가 모두 포함될수록, 수집신호의 2nd cycles 이후의 신호를 적용할수록 좋은 결과를 나타낸다.

참고문헌

- [1] ANSI/AGA NGV2 "American National Standard for Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicle (NGV) Fuel Containers, 2000
- [2] "Composite Overwrapped Pressure Vessels", NASA/TP-2002-210769, 2002
- [3] "F/W FRP 압력용기의 시험평가 기술개발", 보고서, UCN 554-1998.C 1994
- [4] "Examination of The Nondestructive Evaluation of Composite Gas Cylinders" NTIAC/A7621-18:CRC-CD8.1, 2002
- [5] "Development of Inspection Technology for NGV Fuel Tanks", FaAA-SF-R-97-05-04, final reports, 1997
- [6] Henry E. Seiff, "Some Things to be Learned from the Other Compressed Gas Fuel System", CVEF, 2008
- [7] ASTM-E610, "Standard Definition of Terms Relating to Acoustic Emission"
- [8] Simmons, J.A. and R.B. Clough."Theory of Acoustic Emission." Proc. Int. Conf. on Dislocation Modelling of Physical Systems, J.Hirth and M.Ashby, eds. Pergamon Press, 1981
- [9] D. Millard, "Twinning in Single Srrystal of Cadmium." Ph.D. thesis, Bristol , England, Univ. of Bristol, 1950
- [10] J.K. Lee and H.C. Kim, J. Mater. Sci. Lett., Vol.7, p722, 1988
- [11] H.C.Kim and C.G. Kim, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 21, 1988
- [12] T.Ohira and T. Kishi, Proc. 6th Int. AE Symp., Japan, p208, 1982
- [13] Kaiser, J., "Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zngbeanspruchig von Metallische Werkstoffen", Archiv fur das Eisenhutten Wesen, vol.24, no.1-2, p.43 1953
- [14] 주영상, 정현규, 심철무, 임형택, "형상인식법을 이용한 음향방출신호의 분류 ", 비파괴 검사학회지, vol.10, no.2, p.15, 1990
- [15] 이동건, 윤영복, 신돈수, "헬리컬 및 직각 적층두께를 고려한 알루미늄-복합재료 압력용기의 최적설계", 한국추진공학회 제11회 학술강연회논문집, p.19, 1998

- [16] 김의수, 김지훈, 박윤소, 김철, 최재찬, “필라멘트 와인딩 압력용기의 최적설계와 CNG 자동차 연료 충전용기 개발”, 한국정밀공학회 2002년도 추계학술대회 논문집, p.933-937, 2002
- [17] 김의수, "A Study on the Optimal Design of Laminate for CNG composite vessel using ANSYS RSM", Journal of the Korean institute of gas, vol.13 no.4, p.15-21, 2009
- [18] 강상국, 김명곤, 김철웅, 김천곤, "Development of Optimization Code of Type 3 Composite Pressure Vessels Using Semi-geodesic algorithm", Journal of the Korean Society for Composite Materials, vol.21 no.1, p.1-7, 2008
- [19] 유계형, 주용선, 허석봉, 전상진, 김종열, 이중희, "Development of the High Pressure Hydrogen Gas Cylinder(Type4) for Fuel Cell Vehicle ; Design Qualification Tests", 한국신재생에너지학회 2007년도 추계학술대회 논문집, p.193-196, 2007
- [20] 도기원, 한훈희, 하성규, "Elasto-plastic Analysis of a hydrogen pressure vessel of Composite materials", 대한기계학회 2008년도 추계학술대회A, p.275-280, 2008
- [21] 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, "Natural Aging Effect on the Fiber Tensile Strength of Carbon Epoxy Pressure Vessel", Journal of the Korean Society for Composite Materials, vol.20 no.2, p.1-9, 2007
- [22] 박지상, 정상수, 정재한, "Cycling life prediction method considering compressive residual stress on liner for the filament-wound composite cylinders with metal liner", Journal of the Korean Society for Composite Materials, vol.19 no.1, p.22-28, 2006
- [23] 김영섭, 김래현, 양동주, "Assessment of Composite Cylinder Flaw for Compressed Natural Gas Vehicles", 한국에너지공학회 2010년도 춘계학술 발표회, p.43-43, 2010
- [24] 진교국, 하성규, 김재혁, 한훈희, 김성중, "Life Prediction of Composite Pressure Vessels Using Multi-Scale Approach", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.11 no.9, p.3176-3183, 2010
- [25] 이상호, 최용규 “음향방출을 이용한 복합재 연소관의 건전성 평가”, 한국추진공학회 97 제9회 학술강연회논문집, p.32 - 32, 1997

- [26] Maguire John R, "Acoustic emission monitoring of composite containment systems", Journal of physics. Conference series vol.305 no.1, p.12-44, 2011
- [27] Blassiau, S., Bunsell, A.R. and Thionnet, A., "Damage accumulation processes and life prediction in unidirectional composites", Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 463, p.1135-1152, 2008
- [28] 김정곤 원용구 권오양, "Acoustic Emission Source Location in Filament Wound CFRP Pressure Vessel", Journal of the Korean society for nondestructive testing, vol.23 no.5, p.439-444, 2003
- [29] 우성충, 최낙삼, "음향방출법을 이용한 편측노치를 갖는 유리섬유/알루미늄 적층판의 파괴거동 해석", Journal of the Korean Society for Composite Materials, vol.18 no.2, p.1-12, 2005
- [30] J. K. Lee, J. H. Lee, "a study on fatigue damage accumulation of MMC using ultrasonic wave and acoustic emission", Journal of KSCM, vol.13 no.4, p.1-10, 2000
- [31] J. O. Lee, J. S. Lee, K. S. Cho, S. H. Lee, and S. K. Oh "The analysis of failure mechanism during tensile test of CFRP", Journal of KSCM, vol.5, no.2, p.11, 1992
- [32] B. B. Lee, S. Lee, H. J. Joo and S. J. Yoon, "Characteristics of structural behavior and safety estimation of water supply GFRP pipe", Journal of KSCM, vol.22 no.3, p.1-8, 2009
- [33] J. M. Park and D. S. Kim, "Micro-failure degradation mechanism and interfacial properties of bio-absorbable composites for Implant materials using micromechanical technique and acoustic emission", Journal of KSCM, vol.14 no.4, p.15-26, 2001
- [34] S. H. Paik, S. H. Park and S. J. Kim, "Three dimensional FE analysis of acoustic emission of composites plate", Journal of KSCM, vol.18 no.5, p.15-20, 2005
- [35] J. S. Park, K. S. Kim and H. S. Lee, "A study on the acoustic emission characteristics of laminated composite structures", Journal of KSCM, vol.16 no.6, p.16-22, 2003
- [36] S. T. Kim, Y. T. Lee and K. S. Kim, "Evaluation of fracture toughness for CFRP by using AE method", Journal of KSCM, vol.10 no.1, p.23-33, 1997

- [37] D. J. Yoon, O. Y. K and J. R. Lee, " Fracture behavior of CFRP in loading-unloading tensile tests by acoustic emission", Journal of KSCM, vol.3 no.2, p.22-30, 1990
- [38] N. S. Choi, Y. B. Kim and D. B. Lee, "Detection and evaluation of microdamages in composite materials using a thermo-acoustic emission technique", Journal of KSCM, vol.16 no.1 p.26-33, 2003
- [39] K. H. Lee, J. U. Ju and N. S. Choi, "Acoustic emission characteristics and fracture behaviors of GFRP-Aluminum honeycomb hybrid laminates under compressive bending loads" : Journal of KSCM, vol.22 no.6, p.23-31, 2009
- [40] J. Bohse, "Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites", Composites science and technology, p.1213-1226, 2000
- [41] R.W.Neu and I.Roman, "acoustic emission monitoring of damage in metal-matrix composites subjected to thermomechanical fatigue", composite science and technology 52, p.1-8, 1994
- [42] Yantao Wang, Qingzhi Dong, Degang Zhang and Yougjun Xu, "an acoustic emission study on the fracture behavior of continuous glass fiber/polypropylene composites based on commingled yarn", polymer composites, p.728-735, 2008
- [43] A. Bussiba, M. Kupiec, S. Ifergane, R. Piat and T. Bohlke, "damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique", Composites science and technology, p.1144-1155, 2008
- [44] L. Dong and J. Mistry, "Acoustic emission monitoring of composite cylinders", Composite Structures, vol.40 no.1, p.43 - 53, 1997
- [45] 조상규, 김인걸, 이석제, 유원영, "Study on the Damage Characteristics Under the High-Velocity Impact of Composite Laminates Using Various Sensor Signals", 한국복합재료학회지, vol.24 no.6, p.49-55, 2011
- [46] T. Czigany, "Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: Mechanical properties and acoustic emission study" Composites Science and Technology, vol.66 no.16, p.3210-3220, 2006

- [47] Mats Aberg, "Numerical modeling of acoustic emission in laminated tensile test specimens", International Journal of Solids and Structures, vol.38 no.36 - 37, p.6643-6663, 2001
- [48] 김영섭, 조은구, 김래현, "A Case Study and Analysis of the Causes for Natural Gas Vehicle Accidents", Journal of the Korean institute of gas, vol.13 no.2, p.41-48, 2009
- [49] 박재범, 김동륜, 김형근, 황태경, "Evaluation of Residual Strength of CFRP Pressure Vessel After Low Velocity Impact", Journal of the Korean Society for Composite Materials, vol.21 no.3, p.9-17, 2008
- [50] 김청균, 김도현, "The Effects of Affecting Ratios on the Strength Safety of a Composite Fuel Tank for FEV Vehicles", Journal of the Korean institute of gas, vol.15 no.1, p.35-39, 2011
- [51] 이상호, "acoustic emission application for aerospace composite materials", Journal of the Korean society for nondestructive testing vol.21 no.3, p.313-318, 2001
- [52] J.O.lee, J.S.lee, U.H.Yoon and S.H.Lee, "Evaluation of adhesive bonding quality by Acoustic emission", Journal of KSNT, vol.16 no.2, p.79-85, 1996
- [53] A. Akhtar, D. Kung and D.R. Westrook, "Acoustic Emission from FRP Damaged Hoop Wrapped Cylinders", Materials Evaluation, vol.58 no.3, p.462-469, 2000
- [54] H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju, J. K. Lee and C. H. So, " Damage Evaluation for High Pressure Fuel Tank by Analysis of AE Parameters", Journal of KSCM, vol.24 no.4, p.36, 2011
- [55] H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju and J. K. Lee, "Study of acoustic emission parameters during a burst test for CNG vehicle fuel tank", Journal of KSME, vol.35 no.9, p.1131, 2011
- [56] Gutenberg B and Richter C F, " Seismicity of the earth and associated phenomena", Princeton university press, p.310, 1954
- [57] A.A. Pollock, "Acoustic emission - 2: Acoustic emission amplitudes", Non-Destructive Testing, vol.6 no.4, p.264 - 269, 1973
- [58] S. Yuyama, T. Kishi and Y. Hisamatsu, "Detection and Analysis of Crevice

- Corrosion-SCC Process by the Use of AE Technique", The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ), vol.64 no.14, p.2019-2028, 1982
- [59] D. Short and J. Summerscales, "Amplitude distribution acoustic emission signatures of unidirectional fibre composite hybrid materials", *Composites*, vol.15 no.3, p.200-206, 1984
- [60] Mitsuo Ozawa, Shinya Uchida, Toshiro Kamada and Hiroaki Morimoto, "Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission" *Construction and Building Materials*, vol.37, p.621-628, 2012
- [61] Hill, E.V.K., Walker II, J.L. and Rowell G.H., "Burst pressure prediction in graphite/epoxy pressure vessels using neural networks and acoustic emission amplitude data", *Materials Evaluation* vol.54 no.6 , p.744-754, 1996
- [62] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard, "Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester", *Composites Science and Technology*, vol.62 no.10, p.1433-1444, 2002
- [63] Parzen, E., "On estimation of a probability density function and mode", *Ann. Math. Stat.*, vol.33, p.1065-1076, 1962
- [64] D.F. Specht, "Probabilistic Neural Networks for Classification, Mapping, or Associative Memory", *IEEE International Conference on Neural Networks*, vol.1, p.525-532, 1988
- [65] D.F. Specht, "Probabilistic Neural Networks", *Neural Networks*, vol.3, p.109-118, 1990
- [66] H.N.G. Wadley and C.B. Scruby, "A study of deformation and fracture processes in a low-alloy steel by acoustic emission transient analysis", *Acta Metallurgica*, vol.27 no. 4, p.613-625, 1979
- [67] G. Deuster, C. Sklarczyk and E. Waschkes, "Detection and analysis of defects in reactor pressure components by location and interpretation of acoustic emission sources", *Nuclear Engineering and Design*, vol.129 no.2, p.185-190, 1991

본 연구와 관련한 학회지 게재 및 학회 발표

1. 학회지 게재 (6편)

- 1) 한국복합재료학회지 (24권 4호, 2011.05) 고압가스 연료탱크의 손상평가를 위한 음향방출 변수의 분석
- 2) 대한기계학회지 (35권 9호, 2011.07) 자동차용 CNG 연료탱크의 파열시험시 발생하는 음향방출변수 분석
- 3) 한국물리학회 새물리 (61권 7호, 2011.07) 유리 Fiber 파괴시 발생한 음향방출 신호에 대한 1-3 압전복합 변환자의 응답특성
- 4) 한국재료학회지 (21권 11호, 2011.11) CNG 연료탱크의 내압상승시 발생하는 음향방출 변수들의 분포
- 5) 한국비파괴검사학회지 (32권 1호, 2012.02) 광대역 탐촉자를 이용한 자동차용 CNG 탱크의 음향방출신호 분석
- 6) 한국가스학회지 (16권 2호, 2012.04) Type II Gas Cylinder의 피로시험시 발생하는 음향방출신호

2. 학회 발표 (15회 - 국내10회, 국외5회)

- 1) 2011 춘계 대한기계학회 : 자동차용 CNG 연료탱크의 파열시험시 발생하는 음향방출 변수 분석, 2011.04
- 2) 2011 춘계 한국가스학회 : 자동차용 type-II 용기의 가동중 검사방법에 대한 연구, 2011.05
- 3) 2011 춘계 한국복합재료학회 : 고압가스 연료탱크의 손상 평가를 위한 음향방출 변수의 분석, 2011.05
- 4) 2011 춘계 한국비파괴검사학회 : 광대역 탐촉자를 이용한 자동차용 CNG 탱크의 음향방출 신호 분석, 2011.05
- 5) 2011 춘계 한국재료학회 : CNG 연료탱크의 내압상승시 발생하는 음향방출 변수들의 분포, 2011.05
- 6) 2011 추계 한국비파괴검사학회 : 자동차용 연료탱크의 피로시험시 발생하는 음향방출 신호변수의 분석, 2011.10

- 7) 2011 추계 한국비파괴검사학회 : Type-II gas cylinder의 피로시험시 발생하는 음향방출 신호 특성, 2011.10
- 8) 2011 추계 대한기계학회 : CNG 연료탱크의 피로시험시 발생하는 음향방출 신호 위치 표정, 2011.11
- 9) 2011 추계 대한기계학회 : 인공결함을 가진 CNG 연료탱크의 피로시험시 발생하는 음향방출 신호변수의 분석, 2011.11
- 10) 6th International Workshop NDT in Progress : Acoustic emission source location of type- II composite pressure vessel with artificial defect, 2011.10
- 11) 6th International Workshop NDT in Progress : The characteristic of type- II composite pressure cylinder with artificial defect by analysis of acoustic emission parameters, 2011.10
- 12) 18th WCNDT : Determine of Damage Grade for Vehicle CNG Cylinder by the Analysis of AE Features during Fatigue, 2012.04
- 13) 2012 춘계 한국가스학회 : 음향방출을 이용한 Type 3 용기의 손상 평가 연구, 2012.05
- 14) 7th International Conference on Acoustic Emission : Damage Evaluation for Type-II CNG Cylinder by the Analysis of AE parameters During Fatigue Test, 2012.09
- 15) 7th International Conference on Acoustic Emission : Determinants of damage grade for vehicle CNG cylinder by the analysis of AE features during fatigue test, 2012.09

감사의 글

이렇게 박사학위 논문을 완성하고 보니 논문을 무사히 마칠 수 있도록 도와주신 모든 분들께 지면을 통해서라도 그 고마움에 대한 마음을 글로써 전하고 싶습니다.

끝까지 기다려 주시고 작은 부분까지 꼼꼼히 보살펴주신 이종규 지도교수님께 가장 먼저 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 바쁘신 가운데 많은 조언을 해주신 동신대학교의 소철호 교수님, 그리고 격려를 아끼지 않으셨던 김성부 교수님, 한국표준과학연구원의 정성수 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 음향방출이란 단어조차 낯설던 저에게 지금 이렇게까지 발전할 수 있도록 많은 격려와 지도를 해주신 이종오 박사님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한 인생의 선배로서 많은 격려와 조언을 해주시고 실험을 진행하는데 있어서 많은 도움을 주신 주노희 선생님께도 감사 드립니다.

연구소에 입사한 이후 지금까지 물심양면으로 도와주신 재료연구소의 모든 분들께도 다시 한 번 감사 드립니다.

저를 낳아주시고 길러주신 아버지 어머니, 그리고 저의 한쪽을 낳아주시고 길러주신 장인 장모님, 멀리 떨어져 있어 자주 찾아뵙지도 못하고 어려운 일이 있을 때마다 부탁만 드리는 못난 자식이지만 한없이 보내주신 믿음과 사랑 때문에 지금의 제가 있을 수 있음을 느끼며 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한 어린 저의 두 자식을 너무나도 이빠해 주는 수정 처형 그리고 미국생활 후 돌아온 동생 윤주와 우영 매제, 동원 지원 두 조카들과도 지금 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

무엇보다도 지금 내가 살아가고 존재할 수 있는 가장 큰 이유인 나의 나머지 반쪽인 아내 수미, 딸 정민과 아들 정현이에게 사랑과 고마움의 마음을 전합니다.

논문을 마치면서 돌아보니 힘들었던 시간들은 정말 한 순간이며, 그 시간속에서 많은 것을 보고 배웠음을 느끼게 됩니다. 이제 다시 시작이며 앞으로의 많은 일들에 있어서 후회와 미련이 남지 않도록 최선을 다 할 것입니다. 저를 도와주신 모든 분들께 다시 한 번 고마움의 마음을 전하며 감사의 글을 마칩니다.