



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

A1/CFRP 적층구조물의 피로 수명
평가 기법 개발에 관한 실험적 연구



2021년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

양 성 진

공 학 석 사 학 위 논 문

A1/CFRP 적층구조물의 피로 수명 평가 기법 개발에 관한 실험적 연구

지도교수 권 오 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2021년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

양 성 진

양성진의 공학석사 학위논문을 인준함.

2021년 2월 19일



위 원 장 공학박사 신 성 우 (인)

위 원 공학박사 서 용 윤 (인)

위 원 공학박사 권 오 현 (인)

목 차

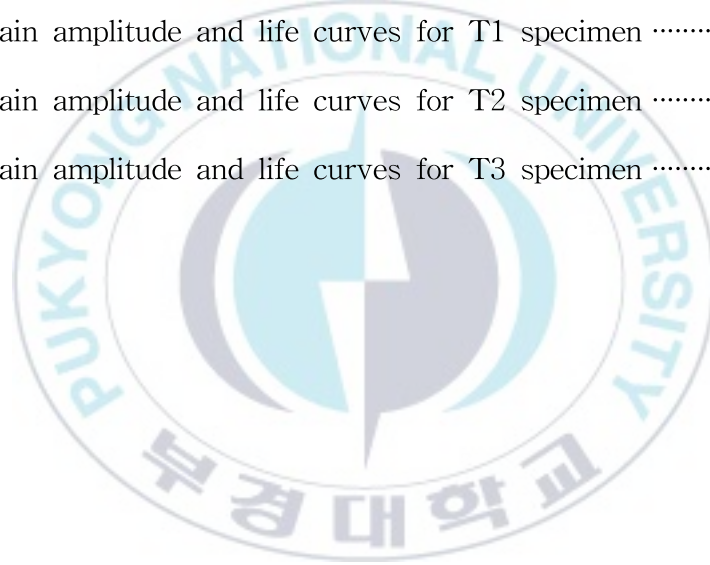
1. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	5
2. 이론적 배경	7
2.1 하이브리드 적층 구조물	7
2.1.1 금속재료 : Aluminum	10
2.1.2 비금속 복합재료 : CFRP	10
2.1.3 하이브리드 적층 구조물의 굽힘응력	13
2.2 피로 수명 평가 방법	18
2.2.1 응력-수명 방법	19
2.2.2 변형률-수명 방법	20
3. 실험 방법	24
3.1 실험 재료 및 시험편	24
3.1.1 실험 재료	24
3.1.2 CFRP 적층 구조	25
3.1.3 시험편 성형 및 노치 삽입	28

3.2 실험 방법	31
3.2.1 3점 굽힘 파단시험	31
3.2.2 3점 굽힘 피로시험	31
4. 결과 및 고찰	34
4.1 파단시험 결과	34
4.1.1 하중-변위 결과	34
4.1.2 응력-변형률 결과	42
4.2 피로시험 결과	45
4.2.1 변형률-시간 결과	45
4.2.2 변형률-수명 방법 적용	49
4.2.3 천이수명 예측	52
5. 결론	57
참고문헌	59

Figures

Fig. 1	Schematic diagram of type III hydrogen storage	3
Fig. 2	Form of hybrid laminated structure	9
Fig. 3	Structure of carbon fiber reinforced plastic prepreg	12
Fig. 4	Bending of a laminated structure with two materials	16
Fig. 5	Transform a section to an equivalent section	17
Fig. 6	S-N curve on logarithmic scale	19
Fig. 7	ε -N curve on logarithmic scale	22
Fig. 8	Fatigue specimen configuration	27
Fig. 9	Types of laminated CFRP	27
Fig. 10	Drop impact tester used to insert a notch	29
Fig. 11	Fatigue specimens with a drop impact notch inserted	30
Fig. 12	Specimen in the form of a three-point bending test	33
Fig. 13	Schematic diagram of experimental apparatus	33
Fig. 14	Load and displacement curve for T1 specimen	36
Fig. 15	Fracture shape of T1 specimen	36
Fig. 16	Load and displacement curve for T2 specimen	38
Fig. 17	Fracture shape of T2 specimen	38
Fig. 18	Load and displacement curve for T3 specimen	40
Fig. 19	Fracture shape of T3 specimen	40

Fig. 20 Stress and strain curve for T1 specimen	43
Fig. 21 Stress and strain curve for T2 specimen	43
Fig. 22 Stress and strain curve for T3 specimen	44
Fig. 23 Strain and time curve for T1 specimen	46
Fig. 24 Strain and time curve for T2 specimen	47
Fig. 25 Strain and time curve for T3 specimen	48
Fig. 26 Total strain amplitude and life curves for specimen	51
Fig. 27 Strain amplitude and life curves for T1 specimen	54
Fig. 28 Strain amplitude and life curves for T2 specimen	55
Fig. 29 Strain amplitude and life curves for T3 specimen	56



Tables

Table 1 Physical properties of CFRP and aluminum based alloy	24
Table 2 The lamination structure and number of CFRP prepregs and thickness of the each types	26
Table 3 Coffin-Manson's parameters of the each type	49



Experimental Study on the Development of Fatigue Life Evaluation Method for Al/CFRP Laminated Structures

Seong-Jin Yang

Department of Safety Engineering, Graduate School
Pukyong National University

Abstract

The laminated structures of Al/CFRP are attracting attention in industries such as aerospace and automobiles due to the excellent properties of CFRP. In particular, when Al/CFRP laminated structures are used as fuel storage containers, they are exposed to repeated fatigue conditions. In this case, the fatigue life evaluation for the working load becomes an important criterion for determining the safety of use and the availability of maintenance and repair. Among the existing evaluation methods for these structures, the burst test and hydraulic repeat test require expensive facilities, or the visual observation and analysis program is somewhat subjective. Therefore, this study experimentally conducted the fatigue life evaluation that improved the shortcomings of the existing evaluation to secure the safety of the Al/CFRP laminated hybrid structure. The test specimen was made using a curved mold in consideration of the liner shape of a Type III storage container. After the fracture and fatigue tests, the fatigue life evaluation method used the strain-life method, and the life prediction used the transition life value. The results of the study show that the static load value is lower in specimens where the orientation of the laminated structure became complicated. And the transition life value is higher in specimens where the orientation of the laminated structure became complicated, which can be predicted as a result of the longer life value as the laminated structure became more complicated. These are expected to be the basis for the development of a test method that ensures the

safety, economy and objectivity of real hybrid laminate structures.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현재 자동차, 항공기와 같은 여러 산업에서 제품의 소재로 사용되고 있는 금속재료 중 하나인 알루미늄 합금은 가볍고 뛰어난 내구성과 내식성을 가지고 있다. 그러나 금속재료만 단일재료로 사용하기에는 중량, 비강도 및 피로 특성에 한계가 존재한다. 또한 산업 발달로 인해 안정성과 환경-오염 문제가 국가적인 문제로 대두되면서 이상하중 및 피로하중에 대한 내성과 제품의 경량화를 모두 만족시키기 위한 노력이 계속 되고 있다. 이러한 금속재료의 한계점들을 보완하기 위해 최근 많은 산업분야에서는 가벼우면서도 고강도의 성능을 갖는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)와 같은 비금속 섬유강화 복합재료를 사용하고 있다. 특히, 비금속 복합재료 중에서 CFRP의 경우 우수한 비강도와 비강성 덕에 가장 널리 사용되고 있으며 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있는 재료이다.¹⁾ 하지만 CFRP와 같은 복합재료도 단독으로 사용하게 되면 연신율과 파괴강성이 낮은 단점이 있고 연결 및 접합의 어려움 때문에 제품의 적용에 많은 제약이 따른다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 금속재료와 결합한 금속재료/비금속 복합재료 구성의 하이브리드 적층 구조물의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

하이브리드 적층 구조물의 사용으로 단일재료의 한계점을 개선하기 위한 국내외 연구는 계속 보고되고 있다. 국내에서는 Kim 등²⁾이 하이브리드 적층 구조물을 접착제 없이 기계적 접합 및 용접을 통해 금속재료와 비금속 복합재료의 최신접합기술 향상을 위해 연구하였고 Myung 등³⁾은 변형률-수명 해

석을 통하여 알루미늄 합금에 GFRP를 적층한 구조물에 대한 피로수명을 평가하는 등 하이브리드 적층 구조물에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

대표적인 하이브리드 적층 구조물에는 자동차 산업에서 LPG 가스차량, 수소연료전지 자동차의 연료저장용기가 있다. 현재 기체연료를 가압하여 저장하는 용기로는 네 가지 Type의 용기가 있으며 일반 강재 구조물인 Type I을 제외하고 하이브리드 적층 구조물인 Type II, Type III, Type IV 로 총 4가지 형태로 구분된다. Type I은 강 또는 알루미늄 라이너로만 이루어진 용기로 저장용기의 가장 기본적인 형태이지만 구조적인 강화 없이 강재로만 이루어져 있어 금속재료만으로 압력을 견디기 때문에 강도와 경량화 및 효율성면에서 떨어지는 단점이 존재한다. 이를 보완하기 위해 이후 강재 라이너에 CFRP와 같은 섬유강화 복합재료로 보강한 것들이 Type II, Type III 이며 Type IV의 경우 비금속 라이너에 복합재료를 경화시켜 제작한 용기이다. 특히, 연료저장용으로 주로 사용되는 Type III 저장용기는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 알루미늄 라이너가 용기 형태를 이루고 CFRP 복합재층이 라이너 전면을 감싸 보강하는 형태의 가장 이상적인 하이브리드 적층 구조물이다. 이와 같은 하이브리드 적층 구조물은 급격한 파열 이전에 복합재층이 내압을 부담해주기 때문에 안전성이 증가한다. 하지만 이와 같은 하이브리드 적층 구조물의 경우 반복 사용으로 인해 피로하중에 인한 피로파괴의 위험에 여전히 노출되게 된다.

피로파괴는 반복적인 하중이 가해지면 원래의 인장강도보다 훨씬 낮은 하중에서 재료가 파괴되는 현상을 일컫는다. 이러한 현상은 파괴 거동이나 파괴시점을 예측하기가 어렵다는 특징이 있다. 하지만 피로파괴는 기계나 구조물의 파괴의 대부분이라고 할 정도로 구조물 설계 시 고려해야할 매우 중요한 사항이기 때문에 하이브리드 적층 구조물의 피로에 대한 연구의 중요성이 더욱 대두되고있다.

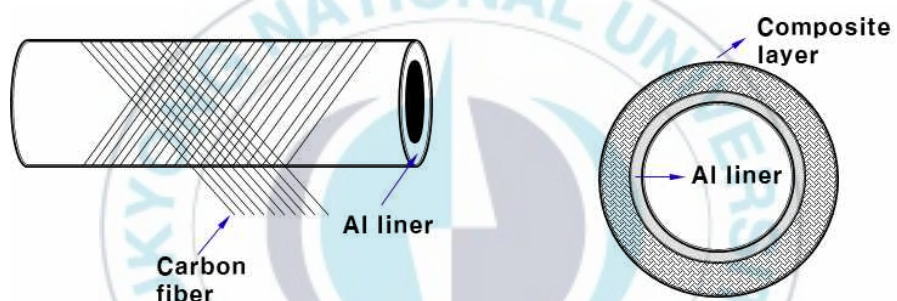


Fig. 1 Schematic diagram of type III hydrogen storage

기존 하이브리드 적층 구조물의 피로특성에 관한 연구들은 금속재료나 복합재료만을 평가하거나 응력해석을 기반으로 구조물 전체를 평가하여 설계에 반영하여 왔다. 하지만 전체 구조물 제작에는 비용이 많이 들며 해석 결과를 설계에 반영 할 때에는 파손해석의 추가 계산이 요구되는 실정이다. Jung 등⁴⁾은 차량용 하이브리드 적층 구조물을 시편화하고 구조물이 받는 하중 형태를 고려하여 굽힘 시험을 통해 피로특성을 평가하였으며, Kim⁵⁾은 항공기 주익용 하이브리드 복합재를 피로시험을 통해 피로균열전파를 평가하는 등 다양한 시험법이 연구되고 있다.

현재 Type III 저장용기의 기존 피로 안전기준은 가스안전공사에서 용기의 파열검사와 내압팽창시험, 수압반복시험 등을 통해 KGS AC118⁶⁾과 같은 국내 안전기준이 제정되어 있다. 한편 Cho 등⁷⁾이 알루미늄 라이너 부분의 파열검사와 용기내부에 압력을 가하는 수압반복시험을 통해 압력이 가해졌을 때의 용기의 거동을 해석하였으며 Kim 등⁸⁾은 수소연료탱크용 복합소재 압력용기에 관한 강도 안전성을 유한요소해석법에 의거하여 강도해석을 수행하였다. 이 외에도 Choi 등⁹⁾이 유한요소 해석을 통해 용기의 구조와 복합재층에 대하여 피로해석을 수행한 바 있다. 하지만 실험적 연구들은 고가의 설비가 요구되며 용기 전체에 내압을 가하기 때문에 실험여건을 마련하기에 쉽지 않다. 또한 해석적 접근의 경우에도 해석프로그램의 결과만을 반영해야하는 다소 주관적인 검사 방법이라는 단점도 존재한다. 따라서 Type III 저장용기의 안정성 개선은 물론 금속과 비금속 복합재료의 하이브리드 적층 구조물에 대한 기존의 주관적 검사방법이 갖는 단점들을 보완한 시험법이 요구되는 실정이다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 Al 금속재료와 CFRP 복합재료가 결합된 대표적인 하이브리드 적층 구조물인 Type III 저장용기를 모델 시편화 하여 간편한 설비의 실험을 통하여 응력과 변형률과 같은 객관적이고 정량적인 실험 데이터로 피로 평가를 수행하였다.

본 논문의 구성은 제 1장은 서론, 제 2장에서는 하이브리드 적층 구조물의

대한 이론적인 설명과 해당 구조물이 받게 되는 굽힘응력, 피로 수명 평가법에 대한 설명을 서술하였다. 실험에 사용된 평가 법은 변형률-수명 방법으로 전 변형률 진폭 관계식을 통한 천이수명에 대한 개념을 설명하였다. 제 3장에서는 실험재료에 대한 설명과 시험편 제작과정 및 실험 방법을 서술하였다. 제 4장에서 각 실험의 결과와 의미를 고찰하였고 제 5장에서 결론을 정리하였다.

1.2 연구 목적

본 연구의 대상은 하이브리드 적층 구조물인 Type III 저장용기의 일부를 모사한 Al/CFRP 적층 구조물이다. 저장용기의 경우 충전과 사용이 반복되므로 용기의 피로 상태는 구조물의 안전성에 있어서 가장 중요한 부분이지만 육안으로 확인하기 힘들고 객관적으로 피로 수명을 평가 할 수 있는 데이터가 부족하다.

따라서 본 연구의 목적은 Type III 저장용기를 모사한 Al/CFRP 하이브리드 적층 구조물 시험편을 이용하여 간편한 실험실 설비 수준의 실험을 통해 피로 수명을 예측하고 객관적인 수명 데이터를 확보할 수 있는 평가 기법을 개발하는 것이다.

이를 위하여 Type III 저장용기의 Al 라이너와 CFRP 복합재층을 모사한 반원형의 시험편을 제작하였다. 이때, 용기의 CFRP 복합재층의 경우 다양한 각도의 패턴으로 적층이 되는 점을 고려하여 시험편 제작 시 CFRP 프리프레그의 적층 방향을 다르게 하였고 원형의 용기가 시편화 되어 받는 하중 형태를 고려한 굽힘시험이 수행되었다. 이를 통해 비금속 복합재료의 방향성이 고려된 복합재층의 피로수명 비교가 가능하다.

피로평가를 위한 결과 데이터로 변형률을 측정하였으며 측정된 데이터는

변형률-수명 방법을 통해 변형률 진폭으로 변환되어 천이수명을 예측하는데 사용되었다.

본 연구에서 얻어진 결과들은 수소저장용기에 대하여 주관적인 검사가 아닌 변형률과 수명 값을 제시함으로 하이브리드 적층 구조물의 객관적인 피로 수명을 평가하는 기법의 개발을 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 하이브리드 적층 구조물

두 종류 이상의 재료를 조합함으로써 단일재료로는 얻을 수 없는 특성을 지니게 한 재료를 복합재료라 한다. 복합재료는 특성이 다른 재료와 함께 하나의 구조물로 제작되기도 하는데 이러한 구조물을 하이브리드 복합재료라 한다. 그리고 하이브리드 복합재료 중에서 프리프레그를 사용하여 제작되는 것을 일반적으로 하이브리드 적층 구조물이라고 부른다.¹⁰⁾

하이브리드 적층 구조물은 종류에 따라 복합재료/복합재료, 복합재료/금속 재료 형태로 구분되며 고강도화와 경량화를 이루기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 이 중 복합재료/복합재료 형태가 먼저 연구가 되어 응용되어 왔으며 미국과 유럽을 중심으로 국내외에서는 ARALL(ARamid ALuminum Laminates), CARALL(CARbon fiber reinforced Aluminum Laminates)와 같은 복합재료-금속재료 형태가 기존 복합재료의 중요결함인 열충격, 흡습성, 외부하중에 의한 충격 손상을 금속재료가 막아주며 우수한 피로 특성을 가지고 있어 항공기 구조용 등 연구 대상으로 주목받고 있다.¹¹⁾

하이브리드 적층 구조물의 대표적인 형태는 아직 명확하게 체계화 되어있지 않지만 일반적으로 Fig. 2와 같은 세 가지의 형태로 구분할 수 있다. 먼저 (a)의 경우 한 보강재로 이루어진 층을 다른 보강재로 이루어진 층으로 쌓는 형태이며 (b)의 경우 샌드위치의 형태로 중앙에 한 보강재로 이루어진 층을 두고 다른 보강재로 이루어진 층으로 위층과 아래층을 덮는 형태, (c)의 경우 두 가지의 보강재로 한 층을 이루는 형태이다. 일반적으로 (a)의 형태가 Type III 저장용기와 같이 기존 금속재료에 보강재를 덮은 구조로 많이 사용이 된

다. 본 연구에 사용된 하이브리드 적층 구조물 시험편 역시 이를 모사하여 (a)의 형태로 제작되었다.

이렇게 제작되는 하이브리드 적층 구조물은 기존의 재료보다 높아진 비강도와 비강성, 내식성 등 여러 물성의 향상의 효과를 얻을 수 있다. 하지만 섬유의 적층 수, 적층 방향, 구조물의 형태, 제작 시 결함 등 다양한 이유로 물성이 크게 달라질 수가 있기 때문에 설계 시 이러한 사항을 고려해서 제작되어야 한다.



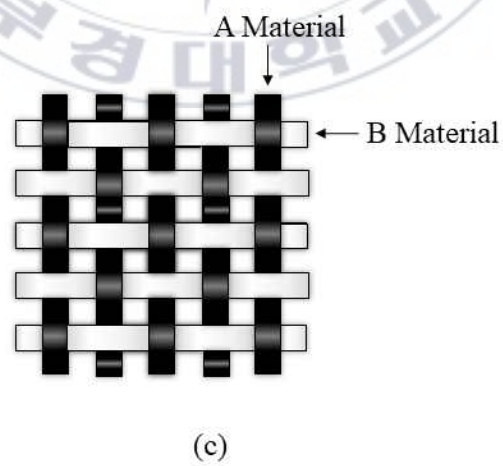
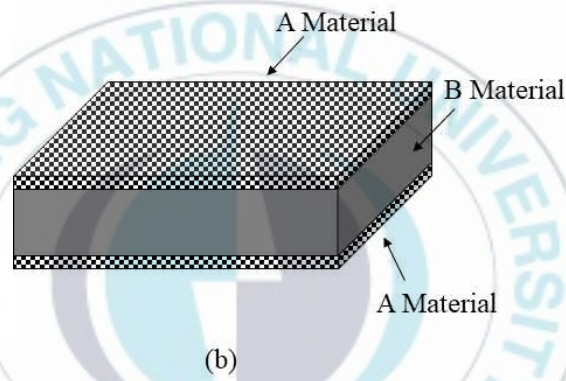
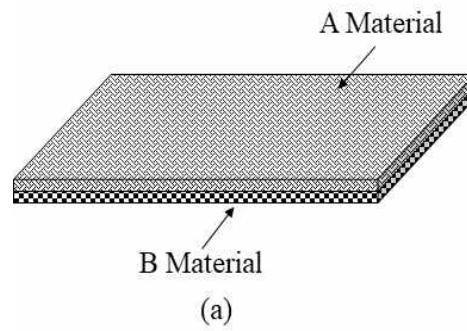


Fig. 2 Form of hybrid laminated structure

2.1.1 금속재료(Al)

금속재료는 높은 강도와 내식성, 내열성 및 전기 전도성을 가지고 있어 다양한 산업분야에서 재료로 사용되고 있다. 대표적인 금속재료로는 알루미늄, 마그네슘, 철, 구리, 티타늄, 니켈 등이 있으며 이 중에서도 알루미늄은 가벼운 중량과 높은 전기 전도성, 내식성 그리고 쉬운 가공성 덕에 다양한 금속들과의 합금으로 사용된다. 마그네슘 역시 알루미늄과 비슷한 특징을 지니지만 부식이 잘 된다는 단점이 존재하여 알루미늄이 대표적으로 가장 많이 사용되며 이렇게 합금이 된 알루미늄은 기존의 금속재료보다 가볍고 우수한 강도적 특성을 갖는다.

또한 알루미늄 합금은 합금되는 금속에 따라 종류가 달라진다. 1954년 미국 AAA(American Aluminum Association)의 규격에 따라서 총 9가지로 구분하며 1,000 ~ 9,000 계열의 4자리 숫자로 표시된다. 또한 열처리에 따라 열처리 합금과 비열처리 합금으로 구분할 수 있다.¹²⁾

이러한 우수한 물성과 다양한 종류 덕분에 알루미늄 합금이 하이브리드 적층 구조물에 금속재료로 많이 사용되어지고 있는데 대표적인 하이브리드 적층 구조물인 ARALL과 CARALL을 보면 금속재료로 알루미늄 합금이 사용되고 있으며 본 연구에서 다루고 있는 Type III 저장용기의 경우도 알루미늄 합금 라이너를 사용하고 있다.

2.1.2 비금속 복합재료(CFRP)

복합재료는 입자 강화 재료, 섬유 강화 재료, 구조 복합재료로 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 비금속 재료의 경우 일반적으로 내열성이 떨어지고 강도가 약하다는 단점이 있기 때문에 이를 탄소나 유리와 같은 섬유와 복합시켜

제작한 것이 섬유강화 재료로 대표적으로 Al/CFRP 하이브리드 적층 구조물에서 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)가 섬유 강화 재료로 제작된 탄소섬유 복합재료이다.

CFRP의 경우 Fig. 3을 보면 탄소 섬유와 열경화 수지가 복합된 재료이다. 이러한 점 때문에 CFRP는 섬유의 방향과 섬유의 직교 방향의 물리적 이방성을 갖는다. 이는 구조물에 있어서도 적층되는 섬유의 방향에 따라 강성과 강도 피로 저항이 달라짐을 뜻한다. 때문에, 복합재 구조물 제작 시에는 섬유의 방향과 수지의 함유량을 고려한 설계가 이루어져야 한다.

또한 CFRP는 높은 비 강도와 높은 비 탄성률을 가지는데 비강도는 철강의 약 6배, GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)의 약 2배이며 비 탄성률은 철강의 약 3배 GFRP의 약 4배 높은 특성을 가지고 있다. 또한 정적 강도뿐만 아니라 뛰어난 피로 특성을 지니고 있으며 내마찰, 내마모성 또한 매우 뛰어나다. 이 외에도 열수축, 열팽창이 거의 없기 때문에 치수 안정성이 뛰어나며 전기 전도성, 진동 흡수성, X선 투과성 등 다양한 방면에서 장점을 갖는다. 이러한 장점으로 CFRP는 항공우주, 건설, 의료기기, 산업기계, 스포츠 등 다양한 분야에서 사용이 되고 있다.¹³⁾ 하지만 CFRP는 이러한 탁월한 성능에도 불구하고 생산 비용이 너무 높은 단점으로 인해, 모든 제품 생산에 널리 사용되지 못하는 실정이다. 또한 우수한 전기 전도성으로 인해 CFRP를 사용하여 제작되는 제품 중 절연이 필요한 경우에는 사용이 어려우며 이러한 이유로 감전의 위험을 줄이기 위해 유리 섬유인 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)로 대체되기도 한다.

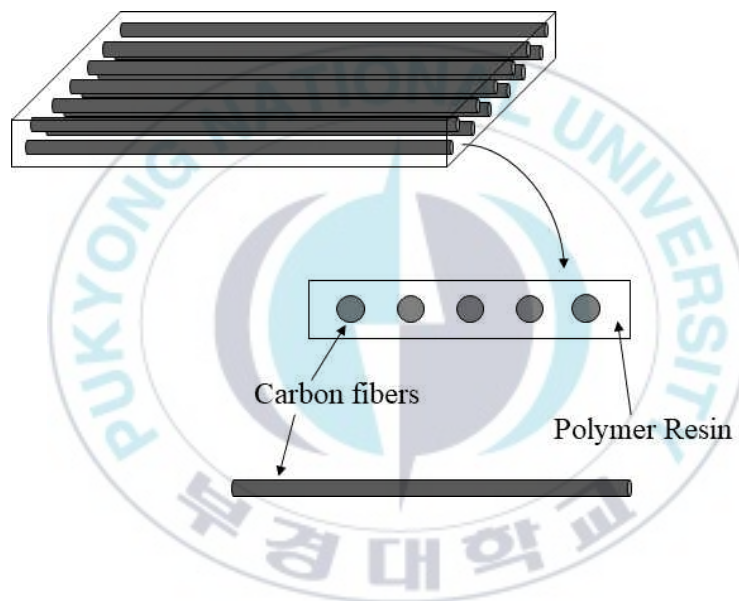


Fig. 3 Structure of carbon fiber reinforced plastic prepreg

2.1.3 적층 구조물의 굽힘응력

굽힘하중을 받는 적층 구조물의 경우, 두 재료로 적층되어진 구조물은 각 재료의 탄성계수와 단면적을 고려하여야 한다. Fig. 4 (a)는 두께가 다른 두 재료로 이루어진 구조물의 단면을 나타낸다. 단면이 평면을 유지한다고 가정하면, 적층 구조물에 대한 변형률분포는 $\varepsilon = -y/\rho$ 로 표현된다.

구조물의 횡단면에서 변형률 분포를 나타낸 Fig. 4 (b)를 보면 y 는 중립축상의 거리이고 ρ 는 구조물의 곡률반경이다. 이 두 재료에서의 굽힘응력은 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = -\frac{E_1}{\rho}y \quad (1)$$

$$\sigma_2 = -\frac{E_2}{\rho}y \quad (2)$$

이 굽힘응력들의 응력 분포는 Fig. 4 (c)와 같으며 중립축을 구하기 위해서 단면에 작용하는 축력이 0이라는 평형조건을 사용하며 식 (3)과 같다.

$$\int_{A_1} \sigma_1 dA + \int_{A_2} \sigma_2 dA = 0 \quad (3)$$

$$\int_{A_1} \frac{E_1}{\rho} y dA + \int_{A_2} \frac{E_2}{\rho} y dA = 0 \quad (4)$$

식 (3)에 식 (1)과 (2)의 응력을 대입하면 다음과 같은 식 (4)를 얻을 수 있다. 식 (4)에서 ρ 를 소거하고 $E_2/E_1 = n$ 으로 정리하면 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\int_{A_1} y dA + \int_{A_2} y(ndA) = 0 \quad (5)$$

식 (5)는 두 번째 재료의 단면적이 중립축의 위치를 결정할 때 계수 n 만큼 가중되는 것을 보여준다. 이러한 가중치를 고려하는 방법은 전체가 첫 번째 재료로 만들어진 Fig. 5와 같은 등가 또는 변환단면을 도입하는 것이다.

이 가중계수는 단면 A_2 의 너비에 n 을 곱하여 고려된다. 따라서, 원래 단면의 중립축은 변환된 단면적의 도심 C 를 지나게 된다. 응력분포의 합 모멘트가 단면에 작용하는 굽힘모멘트 M 과 같다는 평형조건은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{A_1} \sigma_1 dA + \int_{A_2} \sigma_2(ndA) = -M \quad (6)$$

식 (6)에서 $-$ 부호는 M 에 대한 부호 규약에 의한 것이며, 양의 M 은 $y > 0$ 에서 압축을 일으킴을 의미한다.

식 (1)에 응력을 대입하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (8)은 중립축에 대한 변환된 단면적의 관성모멘트이다. 본 연구에서 시험편의 중립축에 대한 변환된 단면적의 관성모멘트 값은 $I = 172.78 \text{ mm}^4$ 로 계산되었다.

$$\int_{A_1} \frac{E_1}{\rho} y^2 dA + \int_{A_2} \frac{E_2}{\rho} y^2 dA = M \quad (7)$$

$$I = \int_{A_1} y^2 dA + \int_{A_2} y^2 (ndA) \quad (8)$$

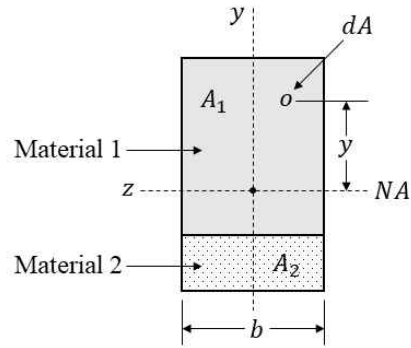
$1/\rho$ 는 $-M/E_1 I$ 로 변환할 수 있으며 이 $1/\rho$ 를 식 (1)과 식 (2)에 대입하면 다음 식 (9)와 식 (10)과 같은 수정된 굽힘 공식이 얻어진다.¹⁴⁾

$$\sigma_1 = -\frac{My}{I} \quad (9)$$

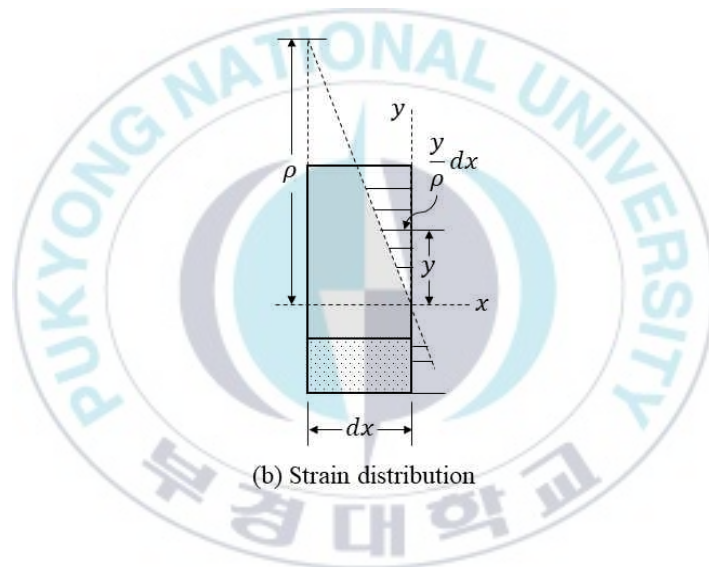
$$\sigma_2 = -n\frac{My}{I} \quad (10)$$

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 하중 이력을 위와 같은 공식을 통해 굽힘
응력으로 변환시켜 결과에 반영하였다.

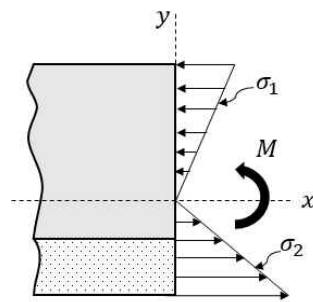




(a) Cross section



(b) Strain distribution



(c) Stress distribution

Fig. 4 Bending of a laminated structure with two materials

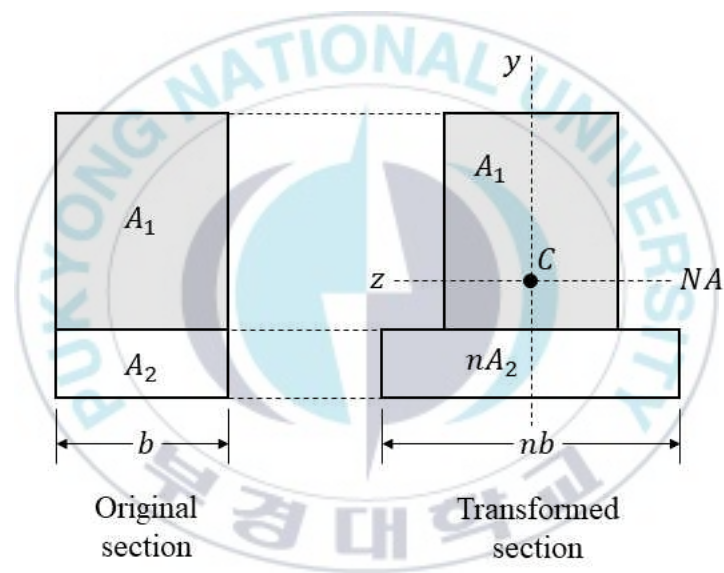


Fig. 5 Transform a section to an equivalent section

2.2 피로 수명 평가 방법

피로파괴는 기계 및 구조물 사용 시 반복하중 상태에서 반복응력이 재료의 정적 강도보다 작은 값이라도 발생할 수 있다. 반복응력 범위의 하중을 받을 때 재료가 피로파괴까지 견디는 반복횟수를 피로 수명이라 한다.

피로 수명은 육안으로는 확인할 수 없고 피로 수명까지 도달 시 구조물의 급격한 취성파괴가 일어나 위험을 유발할 수 있어 피로수명의 평가는 매우 중요하다. 이러한 피로수명을 평가하기 위한 피로시험법은 크게 2 가지로 저주기 피로시험과 고주기 피로시험이 있다. 저주기 피로시험은 피로응력의 반복 횟수가 $1 \sim 10^4$ 회 정도의 시험을 말하며 항복점을 넘는 소성영역의 피로시험으로 소성 피로시험이라고도 불린다. 고주기 피로시험은 피로응력의 반복 횟수가 10^5 회 이상인 시험을 말하며 주로 탄성한도 범위의 응력을 가하여 실시하기 때문에 탄성 피로시험이라고도 불린다.

피로시험의 결과를 해석하는 방법에는 응력 기반의 응력-수명(Stress-life) 방법과 변형률 기반의 변형률-수명 (Strain-life) 방법이 있다.¹⁵⁾ 일반적으로, 작용하는 응력이 탄성 영역에 있고 피로 수명이 상대적으로 길어 고주기 피로 시험을 수행하여야 하는 경우는 응력-수명 방법이 정확하고, 국부적인 소성 변형이 일어나며 피로 수명이 상대적으로 짧아 저주기 피로 시험을 수행하여야 하는 경우는 변형률-수명 방법이 더 정확하다.

2.2.1 응력-수명 방법

고주기 피로시험의 해석 방법으로 쓰이는 응력-수명 방법은 일정한 진폭의 하중이 구조물에 반복적으로 작용하여 피로 파괴가 발생하였을 때 반복횟수 (N)와 응력 진폭(S)의 관계를 나타낸 $S-N$ 선도를 사용하여 주어진 하중 이력에서 피로 수명을 평가하는 방법이다. $S-N$ 선도는 로그 스케일로 그려지며 Fig. 6과 같이 점으로 표시된 실험값의 중앙점을 지나도록 그려져 약 50% 정도의 확률로 피로 수명을 예측한다.

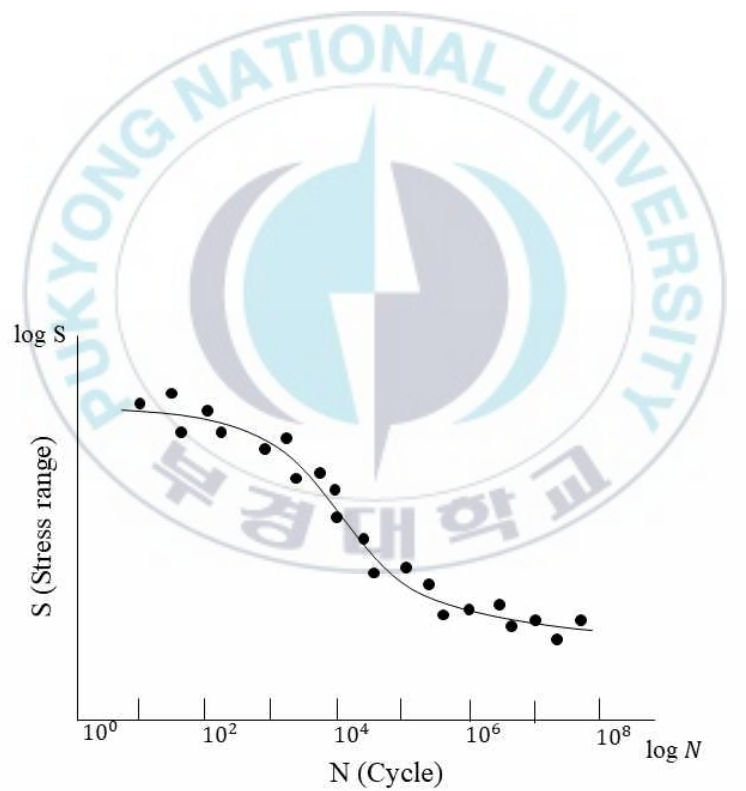


Fig. 6 S-N curve on logarithmic scale

2.2.2 변형률-수명 방법

저주기 피로시험의 해석 방법으로 쓰이는 변형률-수명 방법은 전변형률 진폭 관계식을 사용한다. 전변형률(ε_t)은 탄성변형률과 소성변형률로 구분되며 식 (11)과 같이 나타낸다.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (11)$$

탄성변형률(ε_p)은 단축응력 상태의 탄성계수의 함수로 다음 식 (12)와 같다.

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} \quad (12)$$

소성변형률(ε_p)은 변형률 경화 지수와 변형률 경화 계수의 함수로 나타낼 수 있으며 식 (13)과 같으며 곧 전 변형률은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n'} \quad (13)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n'} \quad (14)$$

식 (14)에 사용된 변수는 탄성 계수(E), 진응력(σ), 강도계수(K), 변형률 경화지수($1/n'$)가 있다. 이러한 전 변형률을 진폭 관계식으로 나타내기 위해서 Basquin이 $S-N$ 선도에 의거하여 피로 지수법칙을 설정하였고 전 변형률 진폭 관계식에서 탄성변형률 항을 식 (15)와 같이 나타냈다.¹⁵⁾

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (15)$$

식 (15)에 사용된 변수로는 탄성변형률 진폭($\Delta\epsilon_e/2$), 파괴까지의 피로 반복 수($2N_f$), 피로강도 계수(σ'_f), 피로강도 지수(b)가 있다. 피로강도 계수(σ'_f)는 반복 응력-변형률 선도에서 파괴응력을 의미하며 피로강도 지수(b)는 일반적으로 -0.05에서 -0.12 사이의 값을 갖는다.

그리고 Coffin 과 Manson¹⁶⁾은 소성변형률-수명 데이터를 로그 스케일의 좌표에 직선으로 나타낼 수 있음을 주장하였으며 소성변형률 진폭 항을 식 (16)과 같이 나타냈다.

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (16)$$

식 (16)에서 사용된 변수로는 소성변형률 진폭($\Delta\epsilon_p/2$), 피로연성 계수(ϵ'_f), 피로연성 지수(c)가 있다. 피로연성 계수는 반복 응력-변형률 선도에서 파괴 변형률을 의미하고 피로연성 지수는 -0.5와 -0.7 사이에 있으며 일반적으로 취성 재료인 경우 -0.5, 연성 재료의 경우 -0.6의 값을 갖는다.

식 (15)와 식 (16)을 바탕으로 전변형률 진폭 관계식을 탄성변형률 진폭 항과 소성변형률 진폭 항으로 나타내면 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (17)$$

여기서 식 (17)을 일반적으로 $\epsilon-N$ 선도, 즉 변형률-수명 관계식이라 부르며 Coffin-Manson 식으로도 잘 알려져 있다¹⁶⁾. 변형률 수명 법은 이 관계식을 사용하여 수명을 평가하는 방법으로 이 관계식을 로그 스케일의 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다.

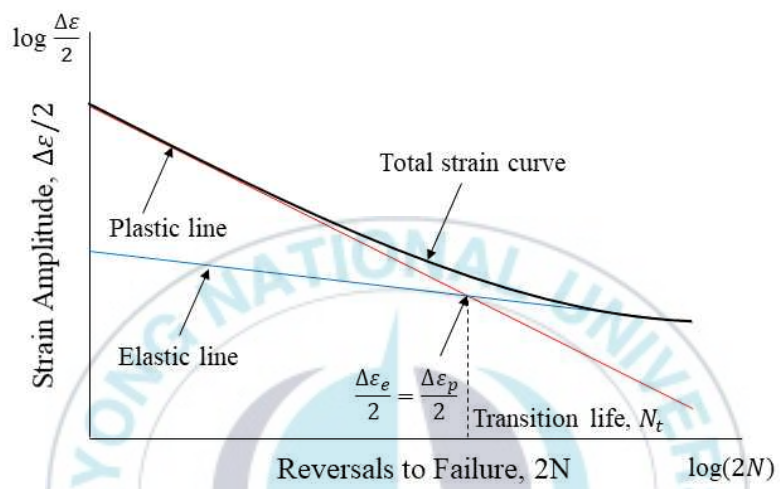


Fig. 7 ϵ - N curve on logarithmic scale

$\varepsilon-N$ 선도에서 높은 값의 변형률진폭은 소성변형률 진폭 곡선에 접근하며 낮은 값의 변형률진폭에서는 탄성변형률 진폭 곡선에 접근한다.

Fig. 7에 나타난 것과 같이 탄성변형률 곡선과 소성변형률 곡선의 교점을 천이수명(N_t)이라 정의하며 탄성변형률 진폭과 소성변형률 진폭이 같아지는 수명으로 천이수명이 높다는 것은 수명까지의 피로 주기에 있어서 탄성변형률이 지배하는 폭이 더 높다는 의미를 지닌다. 따라서, 천이수명 값이 크다는 것은 피로 수명 측면에서 우수하다고 볼 수 있다.¹⁶⁾

본 연구에서는 피로 평가의 데이터로 천이수명 값을 사용하였다.



제 3 장 시험편 및 실험방법

3.1 실험재료 및 시험편

3.1.1 실험재료

본 연구에서 사용하는 시험편은 TYPE III 저장용기를 모사하기 위하여 Al 라이너에 CFRP가 적층된 구조의 시험편이다. 시험편을 만들기 위해 CFRP와 Al 합금이 사용되었으며 탄소섬유는 국내 한국카본(주)에서 생산 및 시판되는 Carbon Unidirection 50NS를 사용하였다. 알루미늄 합금은 Al 6061-T6을 가공 후 사용하였다. Table 1에 시험편 제작에 사용된 CFRP 프리프레그와 알루미늄 합금의 물성치를 나타냈다.

Table 1 Physical properties of CFRP and aluminum based alloy

Carbon fiber prepreg				
Elastic modulus (GPa)	Resin Wt (g/m ²)	Fiber Wt (g/m ²)	Ultimate strength (GPa)	Thickness (mm)
130	34	55	2	0.055
Al 6061-T6				
Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Fatigue Strength (MPa)	Elongation thickness (1.6mm %)
68	2.50	2.24	30.51	7.00

3.1.2 CFRP 적층구조

적층 구조에 따른 시험편의 피로수명을 비교하기 위해 시험편을 세 가지 형태로 제작하였다. 적층에 앞서 실제 저장용기에서도 가장 많이 사용되며 보편적으로 시험편 제작이 가능한 0° , 45° , 90° 방향으로 규격 $10\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ (두께 : 0.055mm)의 CFRP 프리프레그를 제단하였다. 모든 시험편은 $10\text{ mm} \times 60\text{mm}$ 의 알루미늄 라이너(두께 : 1 mm)상부에 CFRP 프리프레그 100 ply를 적층하였으며 제작된 시험편의 형상은 Fig. 8에 나타내었다.

적층 구조는 제단한 0° , 45° , 90° 방향 CFRP 프리프레그를 각각 다르게 조합한 형태로 일방향 $[0^\circ]$, 이방향 $[0^\circ/45^\circ]$, 삼방향 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ]$ 총 3가지 형태로 적층하였다.

적층방식은 시험편 간 수명의 비교가 가능하도록 비교적 제작이 용이한 각기 다른 방향의 CFRP 프리프레그를 연속으로 적층하여 차이를 두는 방식을 선택했다. 적층방식에 따라 각 시험편은 각각 T1, T2, T3로 명명하였다. T1은 시험편의 길이방향에 대하여 $[0^\circ]$ 방향으로 제단한 CFRP 프리프레그만을 100 ply를 적층한 시험편이며 T2는 $[0^\circ/45^\circ]$ 순으로 1 ply 씩 총 100 ply를 번갈아 적층한 시험편이다. 마지막으로 T3는 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ]$ 순으로 1 ply 씩 총 100 ply를 번갈아 적층한 시험편이며 적층 형태를 Fig. 9에 나타내었다.

각 적층구조 안에서의 CFRP 프리프레그의 수와 두께는 Table 2와 같으며 모든 적층 시험편 두께는 $5 \pm 0.1\text{ mm}$ 로 동일하게 제작되었다.

Table 2 The lamination structure and number of CFRP prepregs and thickness of the each types

Type	Lamination structure	Carbon fiber prepeg plies (0°)	Carbon fiber prepeg plies (45°)	Carbon fiber prepeg plies (90°)	Thickness (mm)
T1	[0°]	100	0	0	5.05
T2	[0°/45°]	50	50	0	5.08
T3	[0°/45°/90°/45°]	25	50	25	5.07



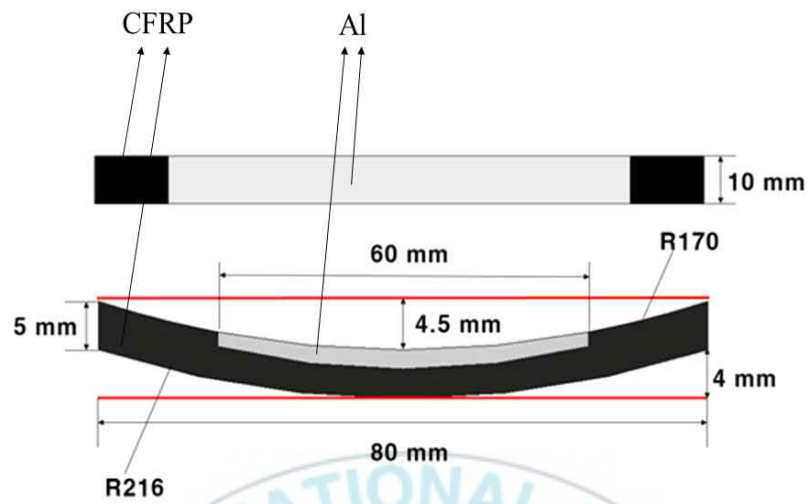


Fig. 8 Fatigue specimen configuration

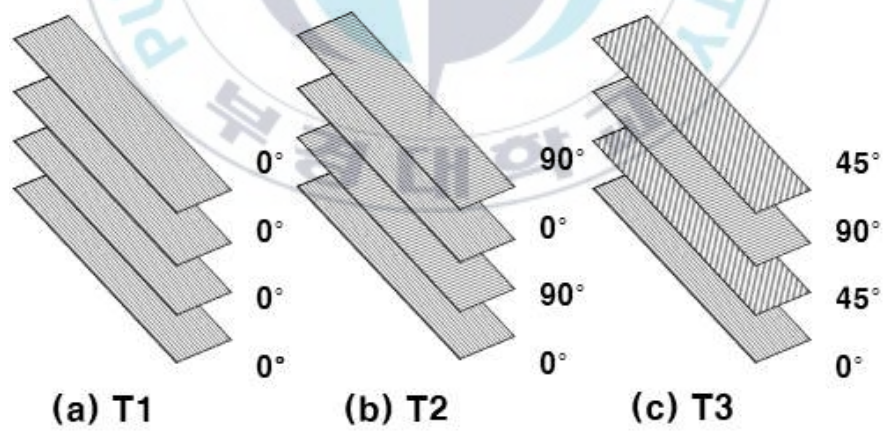


Fig. 9 Types of laminated CFRP

3.1.3 시험편 성형 및 노치 삽입

성형과정에서 Fig. 8과 같은 곡면 형상의 시험편 제작을 위하여 별도 제작한 금형을 사용하였다. 시험편 성형 시 수지와 금형 사이의 접착을 방지하고 쉬운 탈형을 위해 아세톤과 실리콘 오일(silicon oil KS 707)을 7:3 비율로 혼합한 이형제를 금형에 바른 후 열성형기(Hot press, 국내 D사)에 성형하였다. 성형 시 열만을 가하여 CFRP 프리프레그 속 수지가 경화되어 결합된 시험편을 제작하기 위해 열성형기의 온도는 130 ℃로 하였으며, 압력은 무가압으로 60 분간 성형하였다.

시험편 제작 완료 후 시험편 일부분의 하중 집중을 위해 노치를 삽입하였다. 노치의 삽입방법은 Fig. 10에 도시한 낙하충격시험기를 사용하여 시험편의 아랫면 중앙에 기계적 방법으로 삽입하였다. 시험편이 파괴되지 않고 노치를 삽입하기 위하여 예비 충격테스트를 수행하였으며 낙하높이 130.85 mm, 낙추의 무게 7.793 kg으로 총 충격에너지는 10 J을 가하였다. 노치의 길이는 0.5 mm 이다. Fig. 11에 성형 후 노치가 삽입된 시험편을 나타내었다.

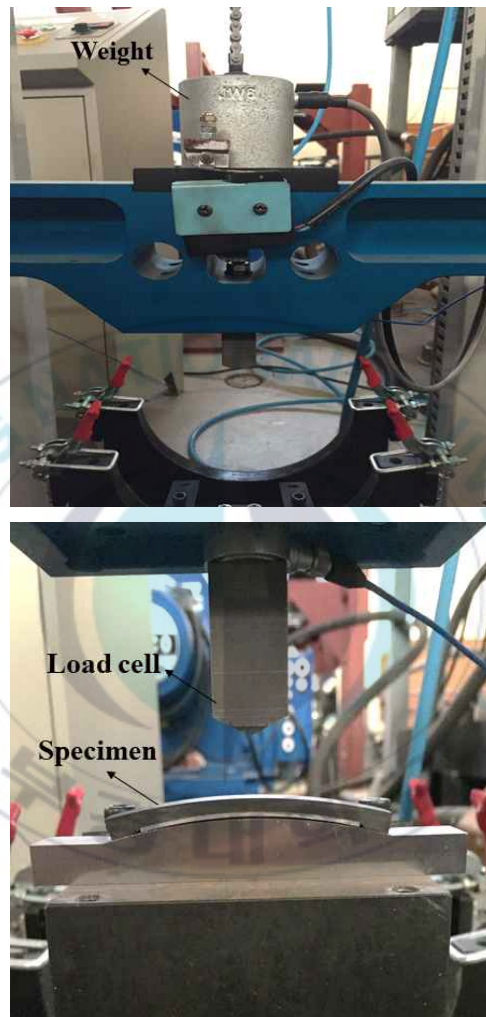


Fig. 10 Drop impact tester used to insert a notch



(a) Front



(b) Side



(c) Back

Fig. 11 Fatigue specimens with a drop impact notch inserted

3.2 실험방법

3.2.1 3점 굽힘 파단시험

파단시험은 파단 시까지의 하중-변형률 이력을 확보하여 피로시험의 하중 조건 결정 및 T1, T2, T3 시험편 각각의 파단 하중 비교 및 시험편의 파단 형태를 실제용기의 파단형태와 비교하기 위해 실시하였다.

시험편의 곡률 형태를 고려하여 ASTM D790¹⁷⁾ 기반인 3점 굽힘 시험으로 중앙부에 하중 집중을 가하며 Fig. 12와 같이 시험편을 지탱하고 있는 받침점 사이의 거리를 65 mm로 두고 치구에 시험편을 물린 형태로 시험이 진행되었다.

시험편의 하단 중앙 부위에 가로방향으로 저항 120 Ω 의 종횡 1축용 스트레인 게이지(KYOWA, KFEL-5-120-C1 L3M2R)를 부착하고 변형률의 측정은 변형률측정기(Vishay, Model 5100B Scanner)를 사용하고 전용 변형률 측정프로그램(Strain Smart)을 이용하여 파단이 일어날 때 변형률 이력을 측정하였다. 실험에 사용된 시험기는 중형 인장시험기(Tinus Olsen, H50KS)로 2 mm/min의 속도로 하중제어로 시험편이 파단 될 때까지 수행하였으며 파단형태의 관측은 실체 현미경을 이용해서 관측하였다.

3.2.2 3점 굽힘 피로시험

피로시험은 수소저장용기의 충전 횟수를 고려하여 저주기 피로 시험을 수행하였으며 피로시험에 사용된 시험기는 중형 인장시험기(Tinus Olsen, H50KS)로 시험조건은 파단시험과 같은 속도인 2 mm/min 하중제어로 수행

하였다.

파단시험과 같은 조건의 3점 굽힘의 형태로 시험이 수행되었으며 시험편의 하단 중심부에 저항 120 Ω 종횡 1축용 스트레인 게이지(KYOWA, KFEL-5-120-C1 L3M2R)를 부착하여 시간과 피로시험 주기 수에 따른 응력-변형률 이력을 측정하였다.

T1, T2, T3 각각의 시험편 모두 같은 주기에서 변형률 진폭의 변화를 관찰하고 비교하기 위해 약 300 회의 피로응력으로 동일하게 수행되었다.

Fig. 13은 실험장치의 개략도를 나타냈다.



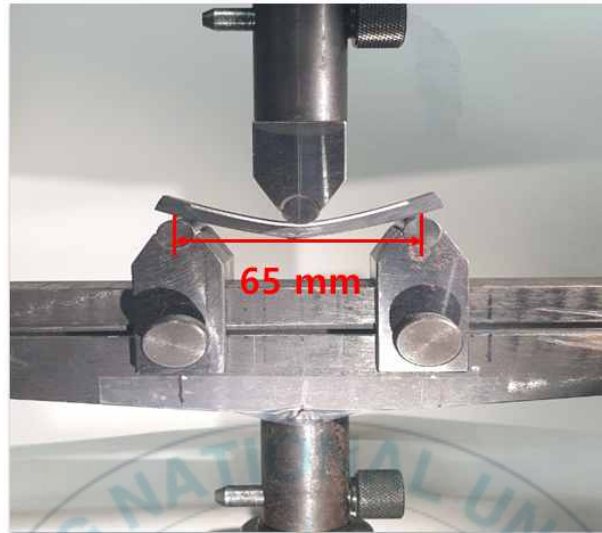


Fig. 12 Specimen in the form of a three-point bending test

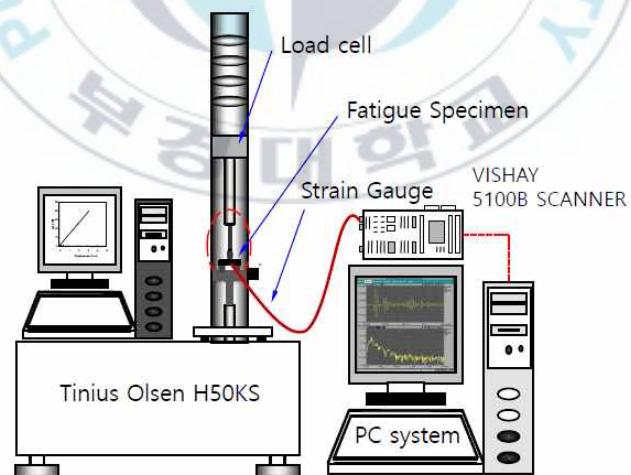


Fig. 13 Schematic diagram of experimental apparatus

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 파단시험 결과

본 연구의 파단시험은 내부압력을 받는 Type III 저장용기를 시편화한 하이브리드 적층 구조물의 파괴양상을 파악하고 이후 피로시험의 응력조건을 결정하기 위해 먼저 수행되었다. 파단시험의 구분은 시험편의 길이방향에 대하여 CFRP 프리프레그의 적층 방향을 구분한 T1, T2, T3 시험편 각각에 대하여 모두 수행되었다.

4.1.1 하중-변위 결과

CFRP 프리프레그가 시험편 길이방향에 0° 로 적층된 T1 시험편에 대한 파단시험 결과는 다음과 같다. Fig. 14는 T1-1과 T1-2, T1-3의 파단시험 결과를 하중과 변위의 관계로 나타낸 그래프이다. 하중-변위 곡선의 초기 직선거동은 시험편의 파단없이 인가되는 하중을 저항하는 영역이다. 이후, 일정 변위가 지나 노치가 삽입된 CFRP 복합재층 하단부가 최초 파단될 때 시험편의 하중이 낮아지며 하단부의 지속적인 파단 후 변위가 3 mm 이상 넘어간 이후에는 복합재층의 중심부가 파단되면서 하중이 큰 폭으로 낮아지는 현상이 나타났다. 이는 하이브리드 적층 구조물은 외부하중의 대부분을 복합재층에서 부담한다는 사실을 의미한다. 즉, 복합재층의 안전성이 결여될 때 하이브리드 적층 구조물의 안전성 역시 저하된다.

T1 시험편의 파단이 시작되는 위치는 T1-1 시험편의 경우 최대하중 2,113 N 에서 개시하였으며 이때 변위는 2.15 mm 로 나타났다. T1-2 시험편의 경

우 최대하중 2,614 N에서 개시하였으며 이때 변위는 2.5 mm로 나타났다. T1-3 시험편의 경우 2,085 N에서 개시하였으며 이때 변위는 2.63mm로 나타났다.

T1 시험편의 최초 파단 발생은 CFRP 복합재층 하단부의 노치에서부터 발생하였다. 이후 시험편의 중심을 따라 중앙부를 거쳐 균열이 지속적으로 진전되어 알루미늄 접착부까지 파단이 발생되었다. 파단시험 종료 후 T1 시험편의 파단형태를 Fig. 15에 나타냈다.



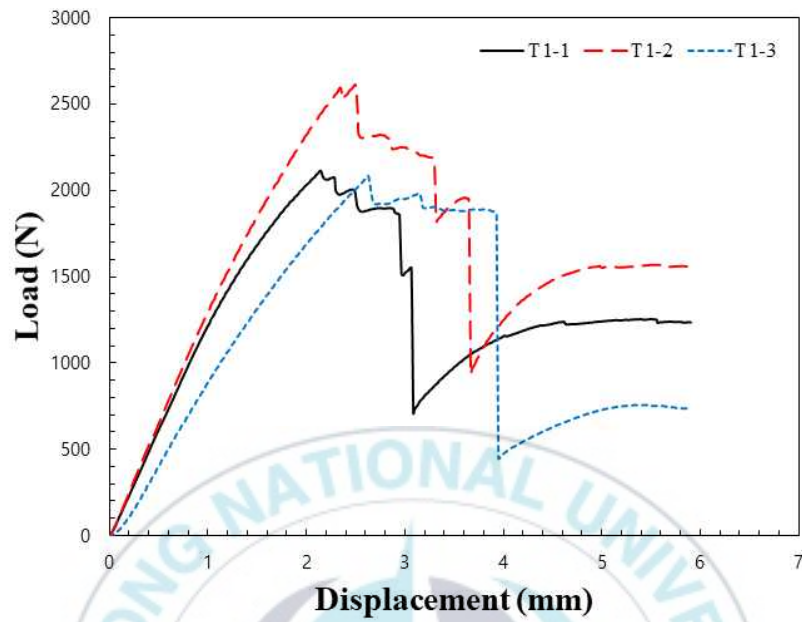


Fig. 14 Load and displacement curve for T1 specimen



Fig. 15 Fracture shape of T1 specimen

CFRP prepreg가 시험편 길이방향에 0°와 45°로 적층된 T2 시험편에 대한 파단시험 결과는 다음과 같다. Fig. 15는 T2-1과 T2-2, T2-3의 파단시험 결과를 하중과 변위의 관계로 나타낸 그래프이다. T1 시험편의 결과와 마찬가지로 하중-변위 곡선의 거동은 시험편의 파괴 없이, 인가되는 하중에 저항하는 직선구간이 먼저 나타나고 있으며 일정 변위가 지나 노치가 삽입된 CFRP 복합재층 하단부가 최초 파단할 때 시험편에 인가되는 하중이 떨어졌다. 이후, 파단이 지속됨에 따라 하중이 지속적으로 낮아지다 복합재층의 중심부가 파단되어 큰 폭으로 하중 값이 떨어지는 현상이 나타났다.

T2 시험편의 최초 파단 발생은 T2-1 시험편의 경우 최대하중 1,903 N 에서 개시하였으며 이때 변위는 2.67 mm 로 나타났다. T2-2 시험편의 경우 최대하중 1,879 N에서 개시하였으며 이때 변위는 2.87 mm로 나타났다. T2-3 시험편의 경우 최대하중 1,516 N에서 개시하였으며 이때 변위는 2.88 mm로 나타났다.

T2 시험편의 최초 파단은 CFRP 복합재층 하단부의 노치에서부터 발생하였다. 이후 시험편의 중심을 따라 중앙부까지 균열이 진전되었고 중앙부에서 층간 박리가 일어났다. 이후 균열이 계속해서 진전됨에 따라 알루미늄 접착부까지 파단이 발생되었다. 파단시험 종료 후 T2 시험편의 파단형태를 Fig. 17에 나타냈다.

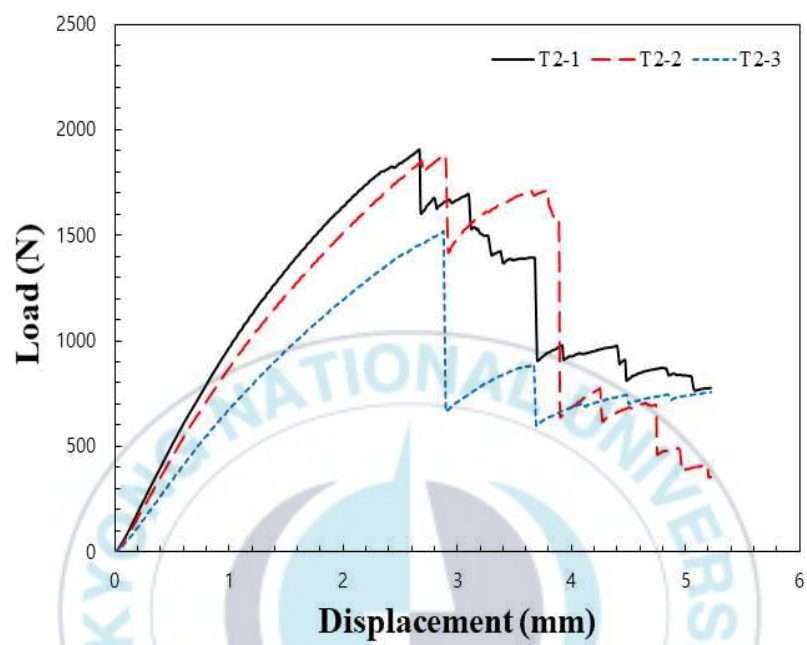


Fig. 16 Load and displacement curve for T2 specimen

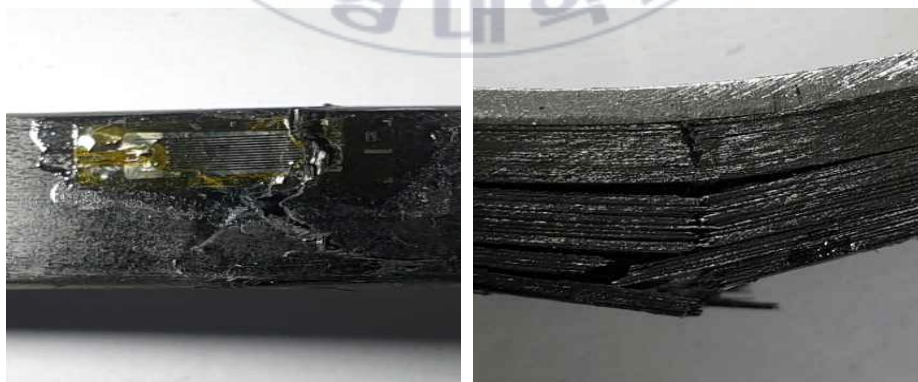


Fig. 17 Fracture shape of T2 specimen

CFRP prepreg가 시험편 길이방향에 0° , 45° , 90° 로 적층된 T3 시험편에 대한 파단시험 결과는 다음과 같다. Fig. 16은 T3-1과 T3-2, T3-3의 파단시험 결과를 하중과 변위의 관계로 나타낸 그래프이다. T1, T2 시험편의 결과와 유사하게 하중-변위 곡선의 거동은 시험편의 파괴 전, 하중저항 구간인 직선 구간이 먼저 나타나고 있으며 일정 변위가 지나 노치가 삽입된 CFRP 복합재층 하단부가 최초 파단할 때 시험편에 인가되는 하중이 크게 떨어졌다. 하단부가 파단된 이후에 중심부에서 파괴가 지속됨에 따라 하중 값이 계속 떨어지며 지속적인 파단 이후 하중 값이 상승하다 복합재층 중심부가 파단이 되어 다시 큰 폭으로 하중 값이 떨어지는 현상이 나타났다.

T3 시험편의 최초 파단은 T3-1 시험편의 경우 최대하중 1,211 N에서 개시하였으며 이때 변위는 2.1 mm로 나타났다. T3-2 시험편의 경우 최대하중 1,218 N에서 개시하였으며 이 때 변위는 2.02 mm로 나타났다. T3-3 시험편의 경우 최대하중 1,183 N에서 개시하였으며 이때 변위는 2.27 mm로 나타났다.

T3 시험편의 파단은 CFRP 복합재층 하단부의 노치에서부터 발생하였다. 이후 시험편의 중심을 따라 중앙부까지 균열이 진전되었고 중앙부에서 약간의 층간 박리가 일어났다. 이후 균열이 계속해서 진전됨에 따라 알루미늄 접착부까지 파단이 발생되었다. 파단시험 종료 후 T3 시험편의 파단형태를 Fig. 19에 나타냈다.

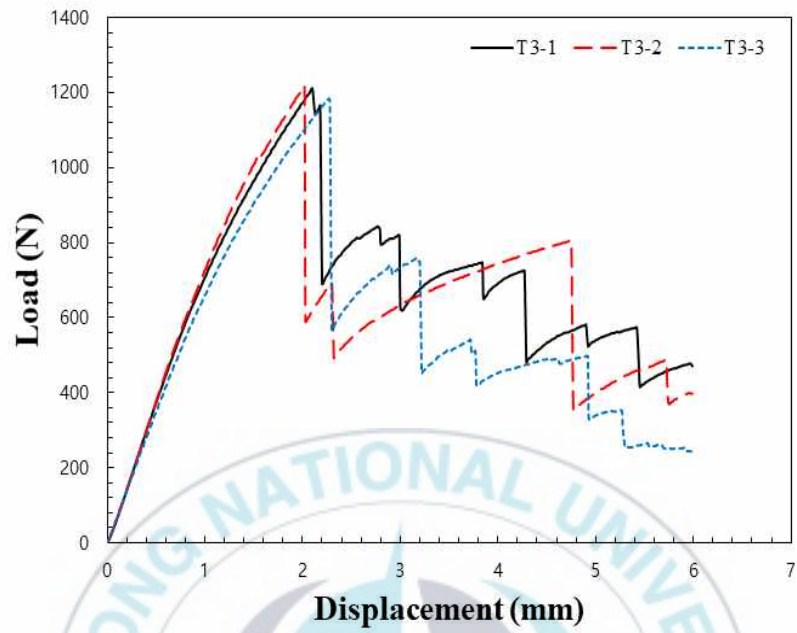


Fig. 18 Load and displacement curve for T3 specimen

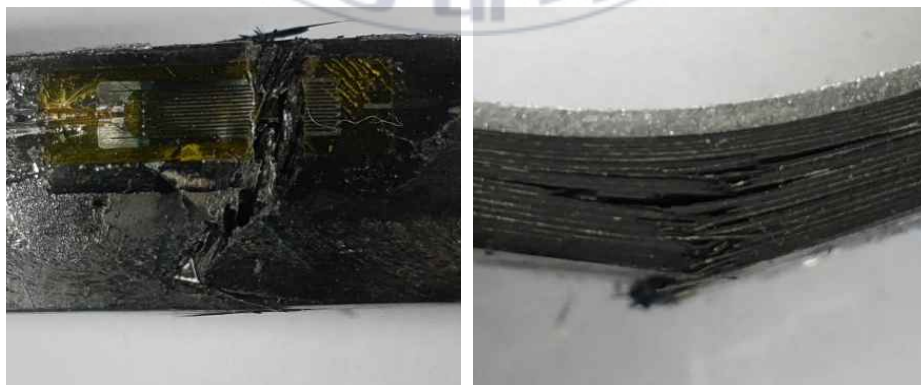
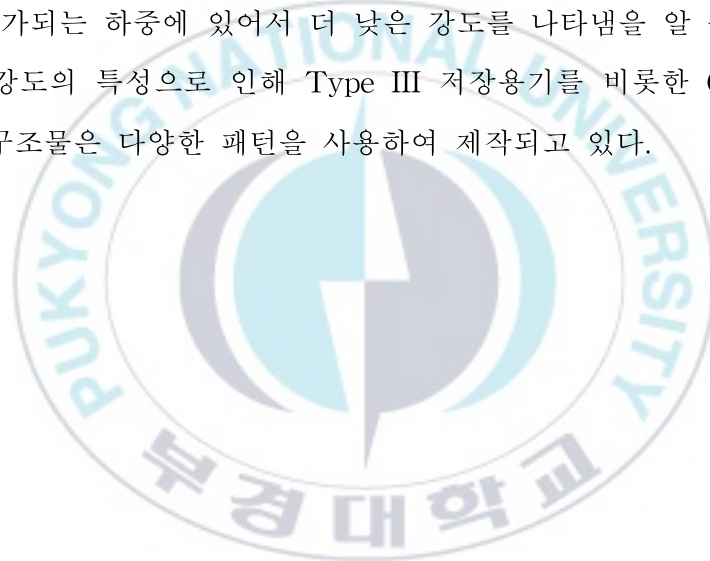


Fig. 19 Fracture shape of T3 specimen

파단시험의 최대하중 값의 결과를 적층 구조에 따라 비교해보았을 때 T1 시험편의 경우 T1-1 : 2,113 N, T1-2 : 2,614 N T1-3 : 2,085 N으로 세 가지 적층 구조의 시험편 중 가장 큰 하중 값이 나타났다. T2 시험편의 경우 T2-1 : 1,903 N, T2-2 : 1,879 N, T2-3 : 1,516 N 으로 T1 보다 다소 낮은 하중 값이 나타났다. 마지막으로, T3 시험편의 경우 T3-1 : 1,211 N, T3-2 : 1,218 N T3-3 : 1,183 N으로 세 가지 적층 구조의 시험편 중 가장 낮은 하중 값이 나타났다. 이 결과들은 시험편의 CFRP 복합재층 적층 방향성이 다양해질수록 정적으로 인가되는 하중에 있어서 더 낮은 강도를 나타냄을 알 수 있다. 실제로 이러한 강도의 특성으로 인해 Type III 저장용기를 비롯한 CFRP 프리프 레그 적층 구조물은 다양한 패턴을 사용하여 제작되고 있다.



4.1.2 응력-변형률 결과

파단시험의 하중 결과를 바탕으로 피로시험의 응력 조건 선정을 위해 T1, T2, T3 각 시험편별 3번씩의 파단시험 하중 값을 각각 산술 평균값으로 도출했다. 이후 2장의 식 (8)로부터 얻어진 시험편의 변환된 단면의 관성모멘트 값과 3점 굽힘모멘트, 단면의 도심 값을 식 (9)를 이용하여 굽힘응력 값으로 변환하였다. 그리고 변환된 응력을 바탕으로 응력-변형률 관계의 곡선으로 나타냈다. 곡선의 거동은 응력이 증가함에 따라 변형률도 선형적으로 상승하는 직선 형태를 나타냈으며 파단이 가까워지는 지점에서 미세한 응력의 변화가 나타났다. 곡선은 스트레인 게이지의 파단 되기 전 상태를 고려하여 시험편의 파단 전 변형률 값인 0.16까지의 결과를 나타내었다. 각 시험편의 응력-변형률 곡선은 Fig. 20에서 Fig. 22에 나타내었다.

응력-변형률 곡선을 통해 피로시험에 적용할 응력조건을 선정함에 있어서 각 시험편에 인가되는 응력 값의 일관성을 반영하기 위해 곡선에서 변형률 값이 0.09가 되는 지점의 응력 값을 선정하였다. 그 결과 피로시험에 적용할 응력 값은 T1 - 458 MPa, T2 - 289 MPa, T3 - 178 MPa로 각각 선정되었다.

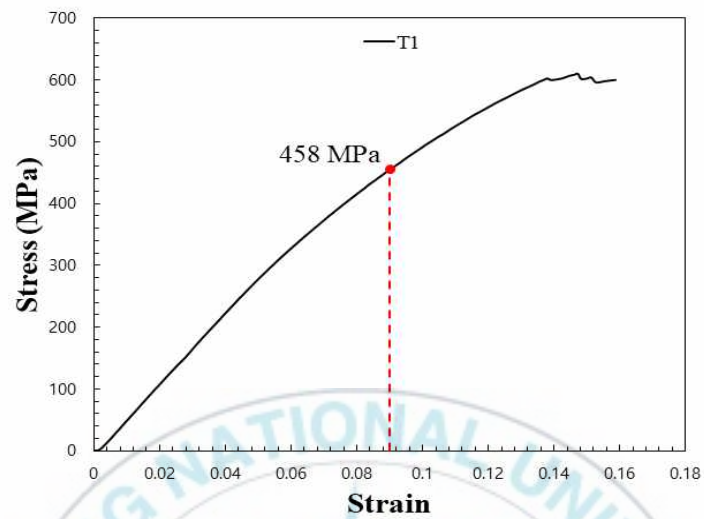


Fig. 20 Stress and strain curve for T1 specimen

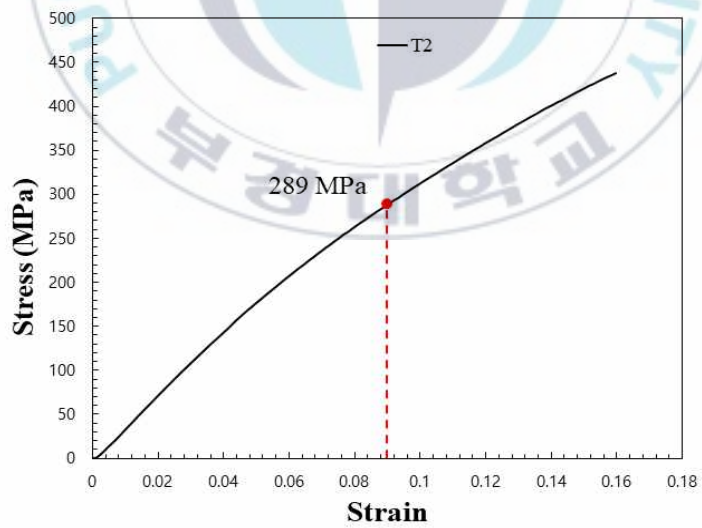


Fig. 21 Stress and strain curve for T2 specimen

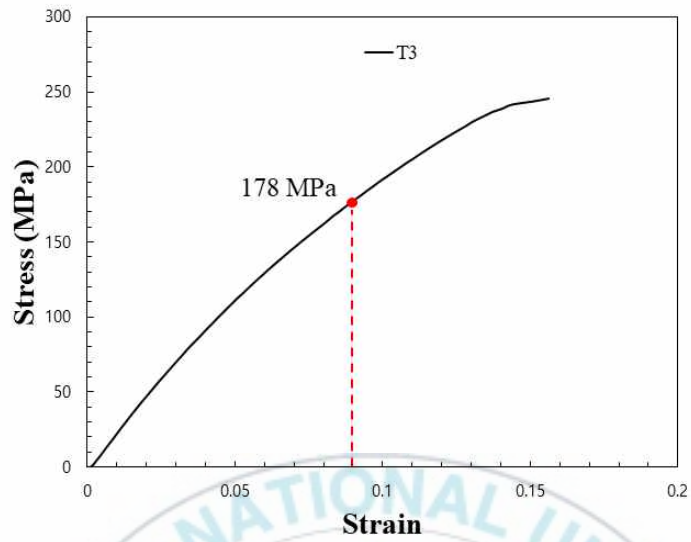


Fig. 22 Stress and strain curve for T3 specimen

4.2 피로시험 결과

피로시험은 4.1의 파단시험에서 결정된 피로시험의 하중조건으로 시험편의 길이방향에 대하여 CFRP 프리프레그의 적층 방향을 구분한 T1, T2, T3 시험편 각각에 대하여 모두 수행되었다. 피로조건으로 사용된 피로응력은 각각 T1 - 458 MPa, T2 - 289 MPa, T3 - 178 MPa의 응력으로 적용되었다. 피로 주기 수는 약 300회로 각 응력조건에 대해 2 mm/min의 속도로 모든 시험편이 동일하게 수행되었다.

4.2.1 변형률-시간 결과

약 300회의 피로응력 인가에 따른 각 시험편 별 시간-변형률 곡선은 Fig. 23에서 Fig. 25와 같이 나타냈다. 300회까지 경과된 피로시간은 T1의 경우 약 25,000초, T2의 경우 약 22,000초, T3의 경우 약 18,000초의 시간이 경과 되었다. 각 곡선을 보면 피로시간이 지속됨에 따라 최대 변형률이 지속적으로 상승됨을 확인할 수 있으며 피로응력이 완전히 제거되더라도 최소 변형률 값이 0으로 돌아가지 않고 미세한 변형이 발생되며 상승되고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 피로 응력이 지속적으로 인가됨에 따라 시험편에 영구적인 소성 변형이 일어나고 있음을 의미한다.

시간에 따른 변형률의 상승폭은 T1, T2, T3 순으로 높았으며 시험편 별 자세한 변형률 상승폭 비교를 위해 각 곡선의 마지막 주기의 값에서의 최대 변형률 값과 최소 변형률 값을 비교하였다. 결과로 나타난 최대 변형률 값은 T1 - 0.094, T2 - 0.092, T3 - 0.087으로 나타났으며 최소 변형률 값은 T1 - 0.012, T2 - 0.010, T3 - 0.008으로 나타났다. 이 결과들은 하이브리드 적층구조물 시험편의 CFRP 프리프레그 적층 방향이 다양해질수록 피로 강도에 있어서 우수한 특성을 나타냄을 보여준다.

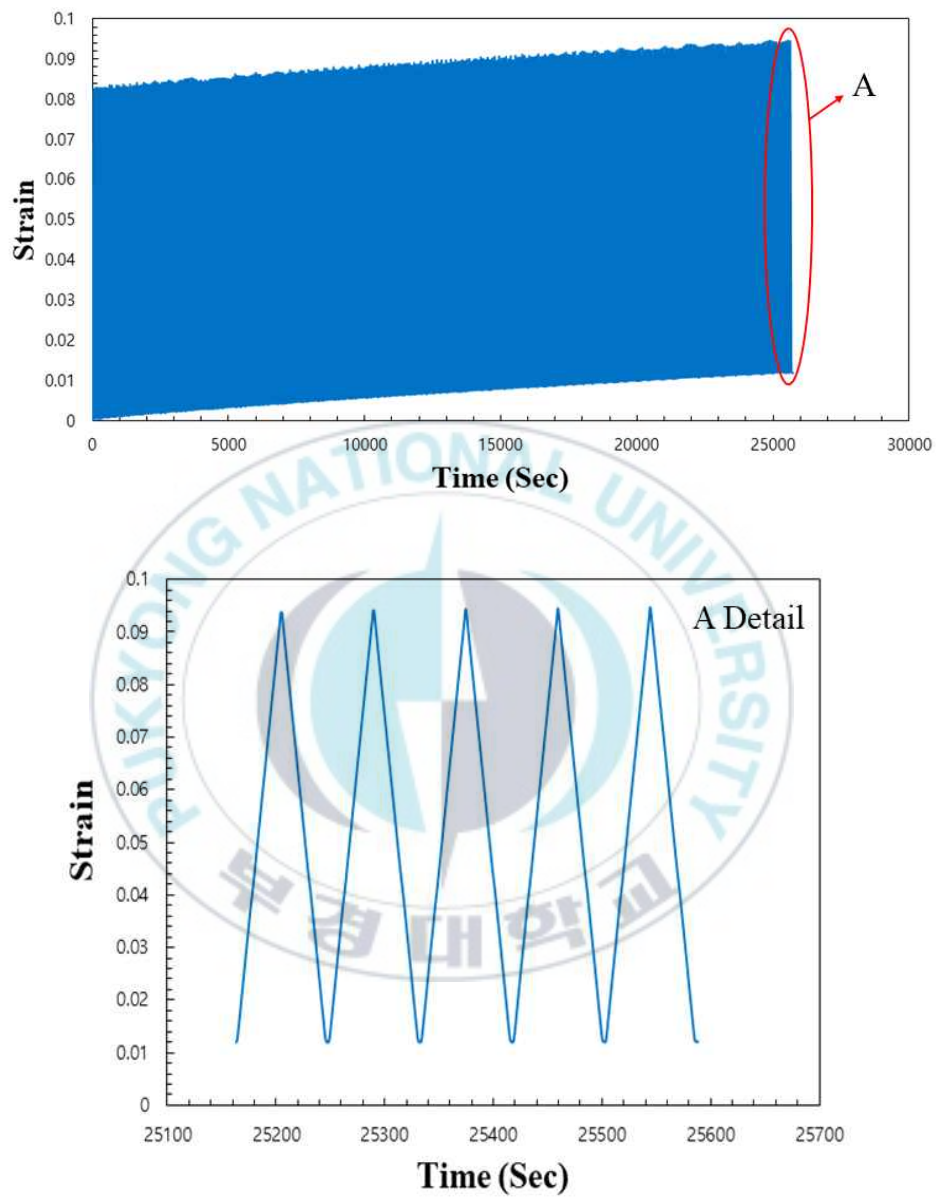


Fig. 23 Strain and time curve for T1 specimen

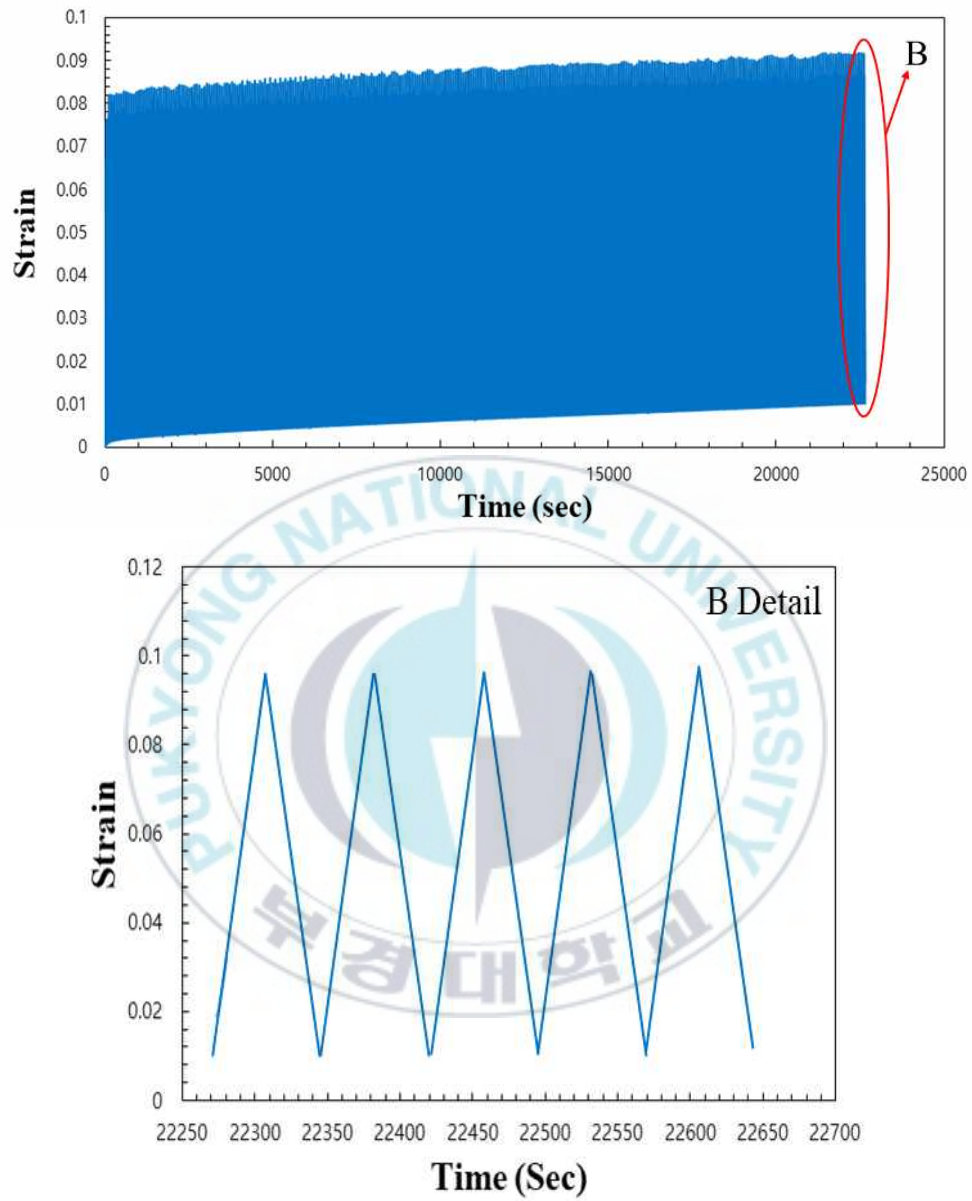


Fig. 24 Strain and time curve for T2 specimen

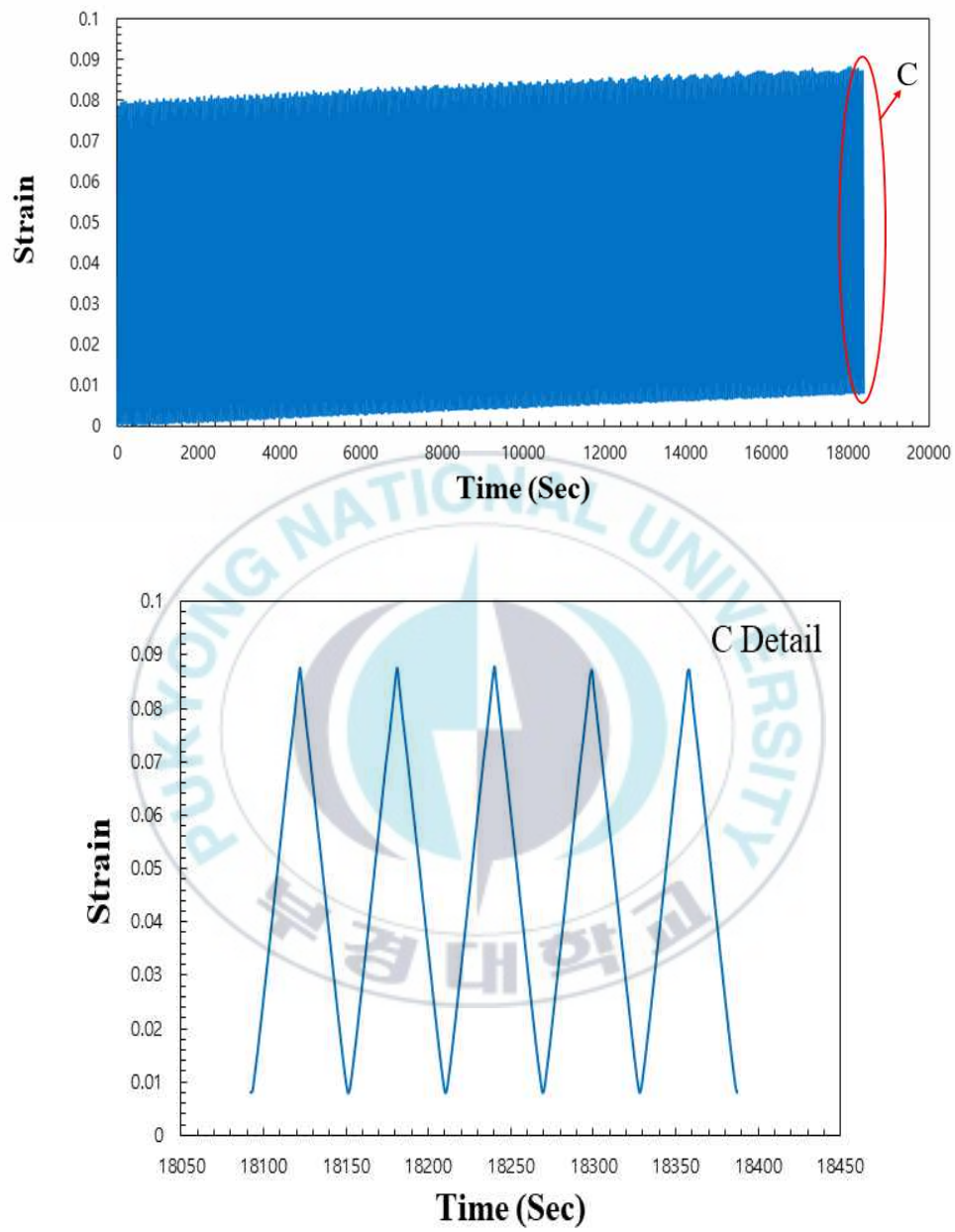


Fig. 25 Strain and time curve for T3 specimen

4.2.2 변형률-수명 방법 적용

피로시험의 결과들을 변형률 수명-방법을 적용하기 위해 2장의 식 (17)에서 사용되는 피로 변수들의 값을 구하였다. 변수들의 값은 Coffin-Manson¹⁸⁾의 피로 변수들의 추정 방법으로 사용되는 Muralidharan-Manson 실험식을 사용하여 산정하였다. 이 실험식에서 피로강도 지수(b)의 값은 -0.09 , 피로연성 지수(c)의 값은 -0.56 으로 동일한 값을 사용하며 피로강도 계수(σ'_f)와 피로연성 계수(ϵ'_f)는 식 (18)과 식 (19)를 통해 계산한다.

$$\sigma'_f = 0.623E \left(\frac{S_U}{E} \right)^{0.832} \quad (18)$$

$$\epsilon'_f = 0.0196 \left(\frac{S_U}{E} \right)^{-0.53} \quad (19)$$

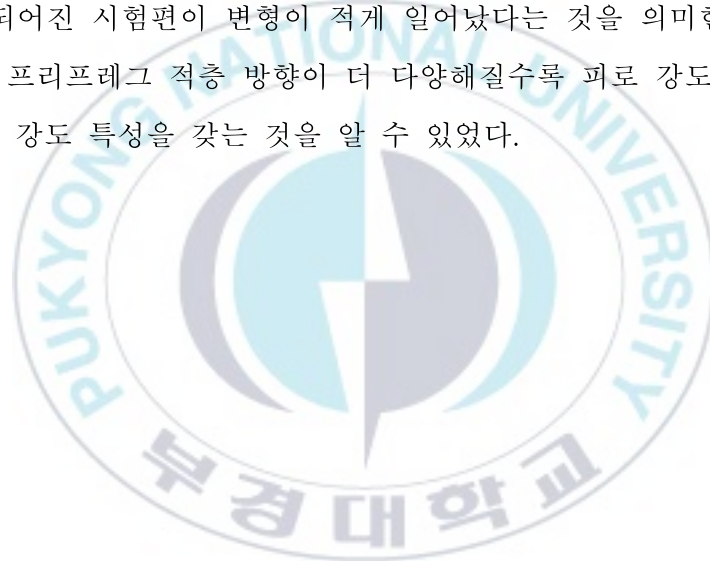
식 (18)과 식 (19)의 값은 각 시험편의 극한강도(S_U)와 탄성계수(E) 값이 요구된다. 극한강도의 값은 각 시험편 별 파단시험에서 파단 시 최대 하중의 값을 넣어 계산하였다. 계산된 각 피로변수들의 값은 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Coffin-Manson's parameters of the each type

Type	Fatigue ductility coefficient ϵ'_f	Fatigue strength coefficient σ'_f (MPa)	Fatigue ductility exponent c	Fatigue strength exponent b
T1	0.3364	608.94	-0.56	-0.09
T2	0.3753	495.3	-0.56	-0.09
T3	0.4755	316.91	-0.56	-0.09

변형률-수명 방법의 적용을 위해 계산된 피로 변수들의 값을 식 (17)에 대입하고 각 시험편 별 25회의 피로 주기 간격으로 300회까지의 피로시험의 결과 값들을 사용하였다. 변형률-수명 방법을 통해 피로시험의 결과 값들은 전변형률 진폭과 수명의 관계 선도로 Fig. 23과 같이 로그스케일의 그래프에 직선으로 나타낼 수 있다.

Fig. 23의 동일한 전변형률 진폭 값에서 T1, T2, T3의 피로 주기 수를 비교해보면 T3가 가장 높으며 T1과 T2의 차이는 미미하지만 T2가 조금 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 주기 수의 피로가 작용되어도 적층 방향이 더 혼합되어진 시험편이 변형이 적게 일어났다는 것을 의미한다. 즉, 시험편의 CFRP 프리프레그 적층 방향이 더 다양해질수록 피로 강도에 있어서 더 우수한 피로 강도 특성을 갖는 것을 알 수 있었다.



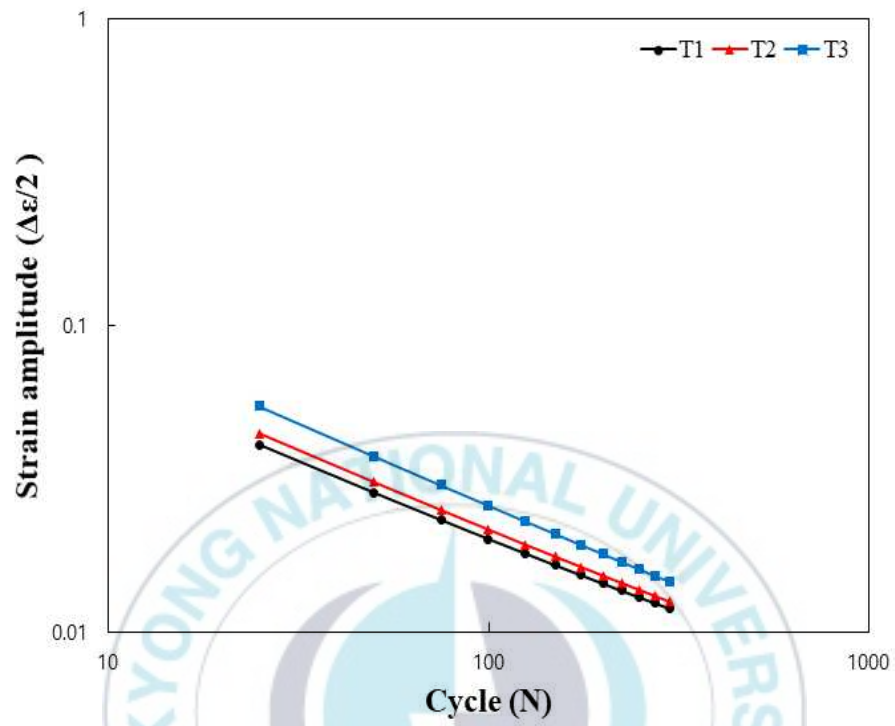


Fig. 26 Total strain amplitude and life curves for specimen

4.2.3 천이수명 예측

더 정확한 시험편의 피로수명 평가를 위한 천이수명 계산을 위해, 피로 주기 25회의 간격으로 300회까지의 각 시험편 별 피로시험의 실험값을 사용하였다. 각 실험값을 2장의 식 (15), (16), (17)을 통해 변형률 진폭-수명 선도에서 전변형률 진폭, 탄성변형률 진폭, 소성변형률 진폭으로 모두 나타내었다. 이후 로그스케일의 변형률 진폭-수명 선도에서 실험값은 직선 형태로 나타나기 때문에 이 직선의 추세선 예측을 통하여 탄성변형률 진폭과 소성변형률 진폭이 같아지는 천이수명 값을 예측하였다. 탄성변형률 진폭은 사각형, 소성변형률 진폭은 삼각형, 전변형률 진폭은 원으로 각 시험편의 천이수명 예측 결과를 Fig. 24에서 Fig. 26에 나타내었다.

먼저 Fig. 24에서 T1의 천이수명 예측은 다음과 같이 계산된다. 탄성변형률 진폭과 소성변형률 진폭의 교차점의 피로 주기 수를 계산하면 4,448회로 나타났다. 이는 피로 주기가 4,448회를 넘어서게 되면 이후의 피로 주기에서 소성변형에 의해 피로파괴에 노출될 위험이 있음을 의미한다. T1의 천이수명 값은 모든 시험편 중 가장 낮은 결과가 나타났다.

다음으로 Fig. 25에서 탄성변형률 진폭과 소성변형률 진폭의 교차점인 T2의 천이수명 값은 8,607회로 T1보다는 높은 값으로 예측되었으며 이는 피로 주기가 8,607회를 넘어서게 되면 이후의 피로 주기에서 소성변형에 의해 피로파괴에 노출될 위험이 있음을 의미한다. 즉, T1 시험편에 비하여 T2 시험편의 피로수명이 더 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 26에서 T3의 천이수명 값은 9,853회로 모든 시험편 중 압도적으로 가장 높은 값이 예측되었다. 이는 피로 주기가 9,853회를 넘어서게 되면 이후의 피로 주기에서 소성변형에 의해 피로파괴에 노출될 위험이 있음을 의미하며 모든 시험편 중 가장 피로수명이 더 우수한 것으로 나타났다.

이 결과는 CFRP 프리프레그 적층 방향이 더 혼합되어진 시험편일수록 더

높은 천이수명 값이 예측됨을 보여주며 즉, 피로 응력의 저항에 있어서 더 우수함을 의미한다.



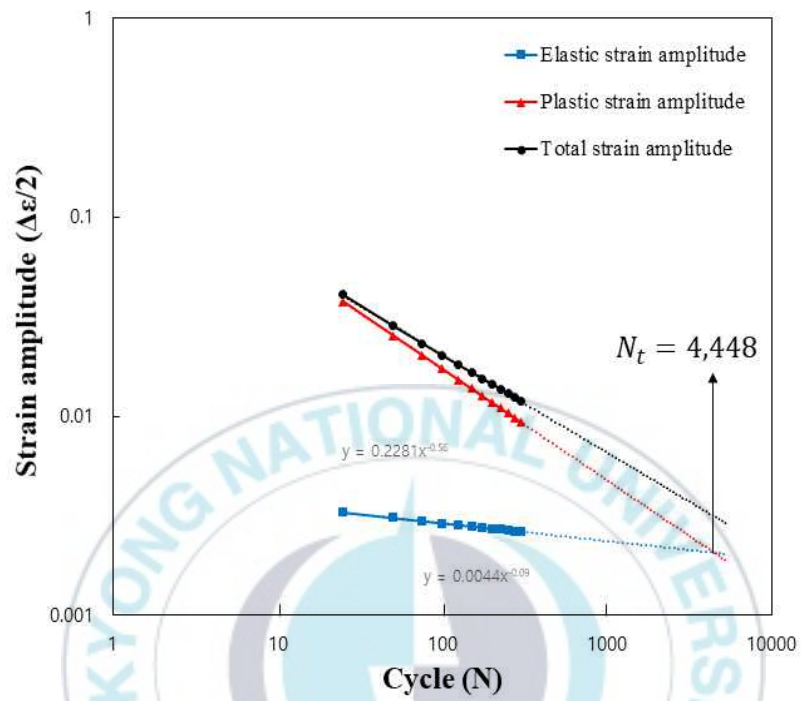


Fig. 27 Strain amplitude and life curves for T1 specimen

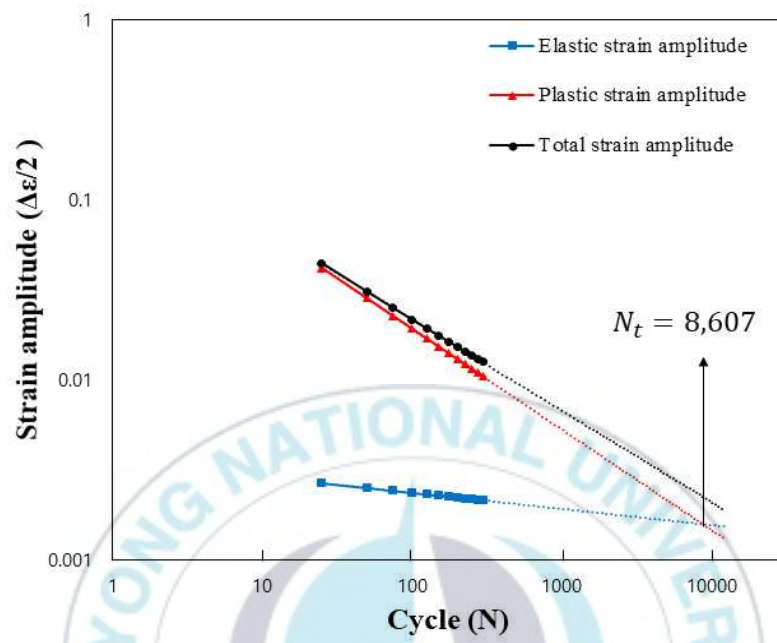


Fig. 28 Strain amplitude and life curves for T2 specimen

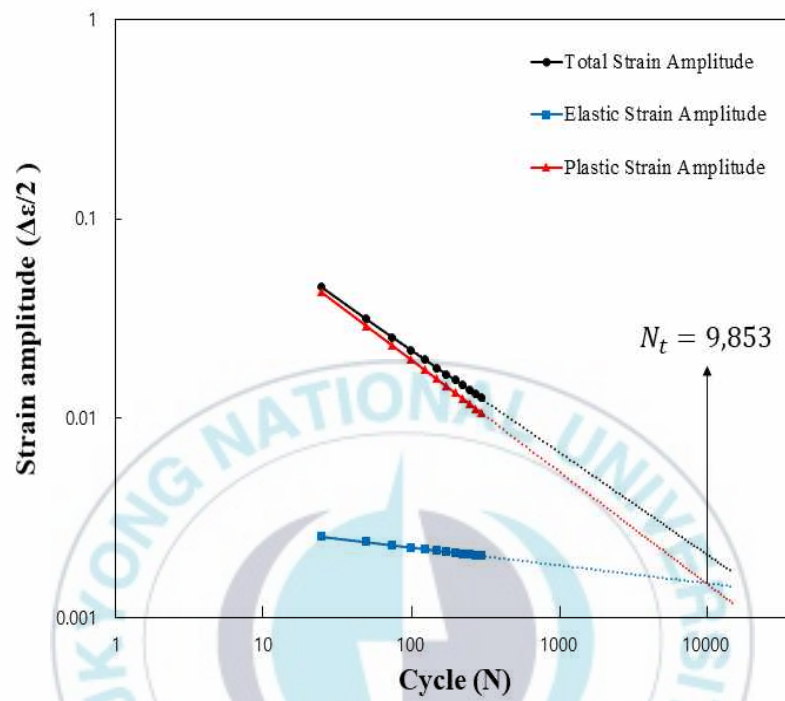


Fig. 29 Strain amplitude and life curves for T3 specimen

제 5 장 결 론

본 연구에서는 하이브리드 적층 구조물의 피로 수명 시험법 개발을 위해 Type III 저장용기를 모사한 알루미늄 합금과 CFRP의 하이브리드 적층 구조물에 대하여 파단시험과 피로시험을 수행하여 CFRP 프리프레그 적층 방향성에 따른 3점 굽힘 파단하중과 피로 수명 특성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, Al/CFRP 하이브리드 적층 시험편의 3점 굽힘 파단 시 최대하중은 평균 T1의 경우 2,270 N으로 얻어졌다. 동일한 시험조건에서 T2는 평균 1,766 N. T3의 경우 평균 1,204 N으로 얻어져 CFRP 프리프레그 적층 방향이 다양한 시험편일수록 낮은 파단하중이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 CFRP 프리프레그 적층 방향이 더 복잡할수록 하이브리드 적층 구조물이 정적 하중에는 취약해짐을 의미한다.

둘째, Al/CFRP 하이브리드 적층 시험편의 피로시험 결과, 시간에 따른 변형률의 증가 폭은 CFRP 프리프레그 적층 방향이 더 혼잡될수록 낮게 나타났다. 즉, CFRP 프리프레그 적층 방향성이 더 혼잡되는 하이브리드 적층 구조물이 피로 응력에 더 강한 성능을 가짐을 확인했다.

셋째, 피로시험의 결과를 변형률-수명 평가법에 적용하여 전 변형률 진폭-수명 선도를 작성하였다. 진폭-수명 선도는 동일 전 변형률 진폭에서 각 시험편의 피로 주기 값을 평가하였다. 평가결과, CFRP 프리프레그 적층 방향이 더 혼잡되는 시험편일수록 더 높은 피로 주기의 값이 나타났다. 이는 CFRP 프리프레그의 방향성이 더 복잡할수록 더 우수한 피로수명을 가짐을 의미한

다.

넷째, 더욱 정확한 피로수명 특성 평가를 위하여 각 시험편의 탄성변형률 진폭과 소성변형률 진폭의 교차점인 천이수명 값을 예측하였다. 예측결과 T1, T2 및 T3가 각각 4,448 회, 8,607 회, 9,853 회로 계산되었다. 적층 하이브리드 구조물에서 CFRP 프리프레그 적층 방향이 더 혼합될수록 높은 천이수명 값이 계산되었다. 이러한 결과 역시 방향성이 복잡할수록 피로 수명의 특성이 우수해 짐을 의미한다.

전체적인 연구 결과는 혼합되는 방향성을 지닌 적층 하이브리드 구조물이 단순 적층과 비교하여 파단에 대한 저항은 취약하나 피로내성에 있어서는 더욱 우수해짐을 확인할 수 있었다. 적층 하이브리드 구조물은 대부분의 사용처에서 지속적인 피로하중에 노출되게 된다. 때문에 이러한 결과는 일정한 두께를 만족하되 혼합되는 방향성을 갖도록 구조물을 설계해야 하는 필요성을 입증한다. 실제 본 연구의 모사대상인 Type III 저장용기의 경우도 필요한 최소한의 두께를 유지하면서 다양한 패턴의 와인딩 각도를 사용하고 있다. 본 연구는 실제 저장용기가 아닌 모사 시험편을 사용했기 때문에 필연적으로 절단면이 발생한다. 따라서 본 연구의 파단시험은 실제 용기의 파괴 형태와 비교함이 아닌 피로시험의 조건을 선정하기 위해 수행되었기 때문에 실제 용기와 파괴 형태와 다소 차이가 있다는 한계점이 존재한다.

이상 얻어진 본 연구의 결과는 하이브리드 적층구조물에 적용되는 기존 검사방법이 갖는 실험 설비 마련의 어려움과 육안검사와 같은 주관적인 한계를 극복하고 간편한 설비로 변형률과 같은 객관적인 데이터를 사용하는 새로운 평가법의 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) <https://www.chemidream.com/2449?category=450709> (Jan. 16, 2019)
- 2) Y. S. Kim, S. C. Kil, "Latest Joining Technology of Metal and Plastic", Journal of Welding and Joining, Vol. 34, No. 3, pp. 227-235, 2016.
- 3) N. J. Myung, J. H. Seo, E. K. Lee, N. S. Choi, "Low Cycle Fatigue Life Behavior of GFRP Coated Aluminum Plates according to Layup Number", Composite Research, Vol. 31, No. 6, pp. 332-339, 2018.
- 4) D. W. Jung, "Fracture Analysis and Statistical Fatigue Life Evaluation of the Hybrid Composite Joints for Car Body", Hanyang University, Theses Ph.D., 2010.
- 5) T. S. Kim, "The Effect of Fiber Stacking Angle on the Crack Propagation and Delamination Behavior in Hybrid Composite Material on an Aircraft Main Wing", Korea University, Theses Master, 2004.
- 6) "Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Composite Pressure Vessels for Compressed Hydrogen Gases", KGS AC118, 2020.
- 7) S. M. Cho, S. H. Lee, Y. G. Kim, "Study on Behavior of Ambient Hydraulic Cycling Test for 70MPa Type3 Hydrogen Composite Cylinder", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 16, No.1, pp. 46-50, 2012.
- 8) C. K. Kim, D. H. Kim, "Strength Safety Evaluation of Composite Pressure Container for Hydrogen Fuel Tanks", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 15, No. 1, 2011.
- 9) S. I. Choi, "Structural and Fatigue Analysis of High Pressure Vessel Using FEM", Kunsan National University, Theses Master, 2017
- 10) D. G. Lee, "Composite Materials-Mechanics and Manufacturing Technology", Sigmapress, 1998.

- 11) J. H. Lee, Y. H. Kim, H. K. Yoon, "Fabrication and Characteristics of Hybrid Composite Materials (ARALL, CARALL) for Aircraft Structures", Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 38, No. 1, 2000.
- 12) <http://www.technoa.co.kr/news/articleView.html?idxno=44334> (Mar. 12, 2001)
- 13) <https://www.meetyoucarbide.com/ko/advantages-and-disadvantages-of-carbon-fiber-composites-cfrp/> (May. 22, 2019)
- 14) J. M. Gere, B. J. Goodno, "Mechanics of Materials 9th Edition", Cengage Learning, 2018.
- 15) J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- 16) R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim, M. H. Kim, "Evaluation of Fatigue Life on Alloy 617 Base Metal and Alloy 617/Alloy 617 Weld Joints under Low Cycle Fatigue Loading", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 122-128, 2014.
- 17) "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", ASTM D790-17, ASTM Annual Book of Standards, 2017.
- 18) M. A. Meggiolaro, J. T. P. Castro, "Statistical Evaluation of Strain-Life fatigue Crack Initiation Predictions", International Journal of Fatigue, Vol. 26, pp. 463-476, 2004.