

족부보장구(A.F.O.) 판스프링용 Glass/Epoxy와 Aramid/Epoxy의 충격속도 변화에 따른 손상 거동

김철웅[†] · 송삼홍* · 오동준** · 정훈희***

(2004년 3월 11일 접수, 2004년 9월 3일 심사완료)

The Damage Behavior of Glass/Epoxy and Aramid/Epoxy in Leaf Spring of Ankle Foot Orthosis (A.F.O) due to the Various Impact Velocities

Cheol-Woong Kim, Sam-Hong Song, Dong-Joon Oh and Hoon-Hee Jung

Key Words : Ankle Foot Orthosis(족부보장구, A.F.O), Impact Load(충격하중), Impact Energy(충격 에너지), Aramid/Epoxy(아라미드/에폭시), Glass/Epoxy(유리섬유/에폭시), Impact Velocity(충격속도), Residual Strength Rate(잔류강도율, σ_R/σ_0), Delamination(층간분리)

Abstract

The needs of walking assistant device such as the Ankle Foot Orthosis (A.F.O) are getting greater than before. However, most of the A.F.O are generally imported rather than domestic manufacturing. The major reason of high import reliability is the lack of impact properties of domestic commercial products. Therefore, this research is going to focus on the evaluation of impact properties of the A.F.O which has the high import reliability. Unfortunately, these kinds of researches are not performed sufficiently. This research is going to evaluate impact energy behavior in composite materials such as the glass/epoxy (S-glass, [0/90]_{2S}) and the aramid/epoxy (Kevlar-29, woven type, 8 ply) of ankle foot orthosis. The approach methods were as follows. 1) The history of impact load and impact energy due to the various velocities. 2) Relationship between the deflection and damage shape according to the impact velocities. 3) The behavior of absorbed energy and residual strength rate due to the various impact velocities.

1. 서론

노령화와 함께 찾아오는 각종 질병중 중풍, 당뇨, 뇌경색, 심장기 질환 등으로 인한 편마비는 심각한 보행운동의 장애를 초래한다. 편마비는 족저근의 마비를 유발하고 보행운동시 탄성에너지를 저장하고 발산하는 족부기능을 저하시킨다. 이러한 족부기능을 돕기 위한 보조기구로 탄성에너지 저장 판스프링과 발목 지지대가 결합된 족부보장구(Ankle Foot Orthosis, A.F.O)가 활용되고 있다.^(1,2)

족부보장구는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 보행 특성상 무수히 반복되는 충격하중과 피로하중을 수반하게 된다. 일반적으로 족부보장구용 섬유강화 복합재료로는 보장구 부위의 특성에 따라 carbon/epoxy, glass/epoxy, aramid/epoxy가 혼용되어 사용된다. 그러나 주재료는 carbon/epoxy이다. carbon/epoxy는 강성도는 뛰어나지만 충격특성이 취약하다는 단점이 있다.⁽³⁾ 따라서, carbon/epoxy 대신 충격저항과 충격에너지 흡수율이 상대적으로 우수한 glass/epoxy 및 aramid/epoxy의 적용을 확대하고, 점차적으로 피로특성을 개선한다면 현재보다 내구성이 더욱 향상된 족부보장구를 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 aramid/epoxy 적층재와 glass/epoxy 적층재를 이용하여 충격속도에 따른 하중-에너지 이력, 하중-처짐량의 관계, 잔류강도의 변화 등을 평가해 보았다. 섬유강화 복합재료의 충격거동과 관련된 최근연구동향을 살펴본

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 공학기술연구소

E-mail : woong25@korea.ac.kr

TEL : (02)928-3608 FAX : (02)926-9290

* 회원, 고려대학교 기계공학과

** 회원, 안동대학교 기계교육과

*** SK Chemicals, 정밀화학연구소

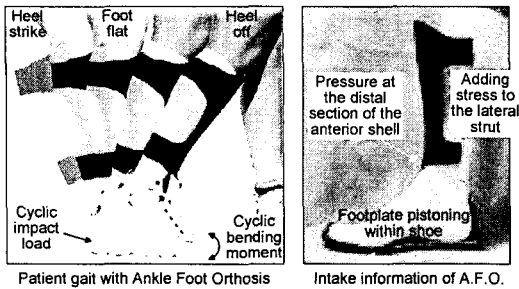


Fig. 1 Schematic view of patient gait with Ankle Foot Orthosis (A.F.O)

면 다음과 같다. 임광희와 양인영⁽⁴⁾은 적층수 및 적층배향이 같고 매트릭스 수지가 다른 CFRP 직교이방성판에 충격손상을 가한 후 적층판의 정적 및 피로 3점 굽힘강도를 평가한 바 있다. 김문생과 박승범⁽⁵⁾은 횡방향 충격을 받는 CFRP 적층복합판을 이용하여 고차진단변형이론에 기초한 응력 해석과 모재균열 및 층간분리 손상에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 최익현 등⁽⁶⁾은 준등방성 graphite/epoxy 및 graphite/PEEK 복합적층판의 저속충격으로 인한 손상 특성과 잔류 압축강도를 연구하였다. 이영신 등⁽³⁾은 graphite/epoxy 와 glass/epoxy를 혼합한 적층복합재를 이용하여 저속충격에 대한 응답을 유한요소 해석을 통하여 수행하고 단일적층판과 혼합적층판의 충격거동을 비교하였다. 김정규와 강기원⁽⁷⁾은 두께가 다른 평직 glass/epoxy 복합재료의 충격손상 및 잔류강도의 관계를 규명해 보았다. 또한, 탄성일인자⁽⁸⁾ 및 에너지해방률을 이용한 평가⁽⁹⁾ 수행, 동적하중과 변형률주파수에 대한 대응특성 예측모델 개발⁽¹⁰⁾ 등을 하였다. 그러나 glass/epoxy 및 aramid/epoxy적층재료의 충격속도 변화에 따른 충격거동을 정량적으로 비교 평가한 연구는 아직 사례가 없다. 따라서, 본 연구에서는 족부보장구(A.F.O.) 판스프링용 glass/epoxy 및 aramid/epoxy적층재를 이용하여 충격속도 변화에 따른 다양한 충격거동 인자들의 변화를 살펴보았다. 수행된 세부내용은 다음과 같다. 1) 충격속도 변화에 따른 충격하중과 충격에너지의 이력. 2) 충격속도 변화에 따른 치짐량과 손상형태. 3) 충격속도 변화에 따른 흡수에너지와 잔류강도율의 거동 등이다.

2. 충격시험편 제작 및 실험방법

2.1 충격시험편의 제작

충격시험은 ASTM D 3763의 규정에 의거하여 수행되었다. 시험편의 재료로 사용된 glass/epoxy는

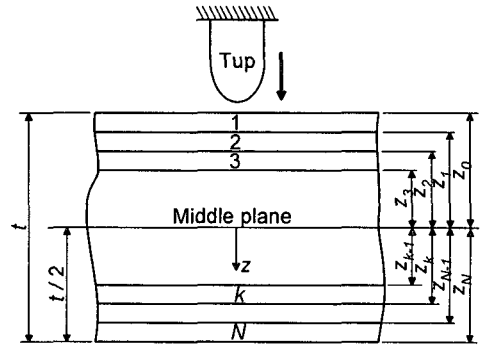
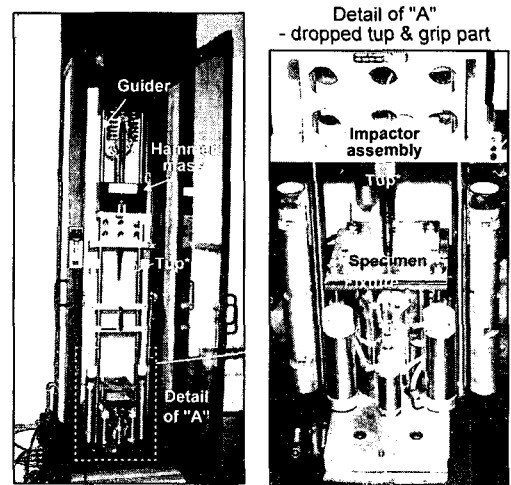


Fig. 2 Laminate configuration system for the impact test in glass/epoxy and aramid/epoxy specimen



Tup* : incorporates an impact head and a load cell
Weight drop type impact test system (Dynatup 8250, 830-I)

Fig. 3 Impact test system (weight drop type, Dynatup 8250, 830-I)

S계열 단방향 유리섬유 프리프레그를 [0/90]_{2S} 형태로 적층한 것이고, aramid/epoxy는 평직 케블라 프리프레그(Kevlar-29, woven type)를 8 플라리로 적층한 것이다. 두 가지 타입 모두 현재 A.F.O에 적용되고 있는 형태이다. 시험편 두께는 1.6 mm, 부피분율은 45 %이다. 적층된 시험편은 핫-플레이트 프레스(hot-plate press)를 이용하여 경화하였고 추가로 후가열 과정을 채택했다. 시험편의 규격은 150 x 150 mm이고, Fig. 2에 시험편의 적층배열과 충격해머(tup) 형태 등을 소개하였다.

2.2 중량낙하식 고속충격시험기

본 연구에서는 Fig. 3에 제시한 Dynatup 사의 중량낙하식 충격시험기(모델: 8250, 830-I)를 사용하

었다. Fig. 3의 텡(tup)은 충격헤드와 로드셀, 각종 센서가 결합되어 있는 형태로 시험편 가격 순간의 인성, 충격하중, 처짐량, 충에너지 흡수량 등을 구할 수 있다. 또한, 낙하위치를 따라 충격속도를 조절할 수 있다. 해머의 무게는 2.61 kg으로 고정하고 충격속도는 낙하높이를 조절하여 1.2 m/s, 1.4 m/s, 1.5 m/s, 1.9 m/s, 2.3 m/s, 2.7 m/s, 3.1 m/s, 3.4 m/s까지 단계적으로 적용하였다. 충격 직후 시험편의 탄성에 의해 해머가 리바운드되고, 2차 가격이 발생할 수 있으므로 주의하여야 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격속도 변화에 따른 충격하중과 충격에너지의 이력

glass/epoxy와 aramid/epoxy의 충격속도 변화에 따른 충격하중 이력과 에너지 이력을 살펴보기 위해 Fig. 4와 같은 그래프를 제시하였다. 여기서, #1은 glass/epoxy의 충격거동을 나타내고 #2는 aramid/epoxy의 충격거동을 나타낸다. 충격 에너지 곡선은 초기에 발생한 에너지(E_0)와 충격과정 중에 발생한 에너지의 차이를 나타낸 것으로 충격과정 중에 손실 또는 흡수되는 충격에너지의 변화량과 같다. 이러한 변화량은 충격시 재료의 변형 및 진동에 의해 흡수되는 에너지와 재료의 소성변형(압입, 손상(충간분리), 열, 음향방출 등으로 손실되는 에너지의 합을 의미한다. Fig. 4에서 리바운드 에너지(E_{loss})는 충격 중에 비가역적으로 손실된 에

너지와 충격 후 재료의 잔류 진동에 의한 운동에너지를 합한 것이다. 또한, 탄성에너지(elastic E)는 E_0 와 E_{loss} 의 차이로 표현되며, 변형이나 진동으로 재료에 흡수된 에너지 중 충격 후 다시 환원된 에너지를 나타낸다. Fig. 4에서 충격속도가 증가될수록 압입이나 충간분리와 같은 영구변형이 심화되므로 E_0 와 E_{loss} 의 차이로 나타나는 탄성에너지는 점차로 저하됨을 볼 수 있다. 한편, Fig. 4의 (a)-(c)를 살펴보면 충격속도 증가에 따라 충격하중과 충격에너지가 서서히 증가되며 환원된 탄성에너지는 조금씩 감소되어 감을 관찰할 수 있다. 그러나 Fig. 4의 (d)-(f)에서는 많은 변화가 관찰된다. 특히, Fig. 4의 (d), (e)에서 aramid/epoxy의 급격한 하중감소는 충격하중에 의해 압입이 발생했기 때문이다. Fig. 5의 (ii)를 통해 aramid/epoxy의 압입을 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 4의 (e), (f)에서 glass/epoxy 하중 이력을 살펴보면, 최대하중 부근에서 1차 평행구간이 나타나고 이후 2차 평행구간이 나타남을 관찰할 수 있다. 이는 aramid/epoxy에서는 나타나지 않는 특징으로 Fig. 5의 (i) glass/epoxy와 (ii) aramid/epoxy의 충격 후 손상거동 차이를 비교해보면 그 이유를 알 수 있다. glass/epoxy에서 1차 평행구간은 충격 순간 발생한 충격에너지가 재료의 변형이나 압입으로 전환되지 않고 충격저항 에너지의 형태로 잔류했기 때문에 나타나는 구간이고, 2차 평행구간은 충격저항 에너지로 인한 충간분리의 급격한 확장으로 인해 발생한 구간이라고 판단된다. 그 이유는 Fig. 5(i)에서 $v = 2.7$ m/s 및 $v = 3.1$

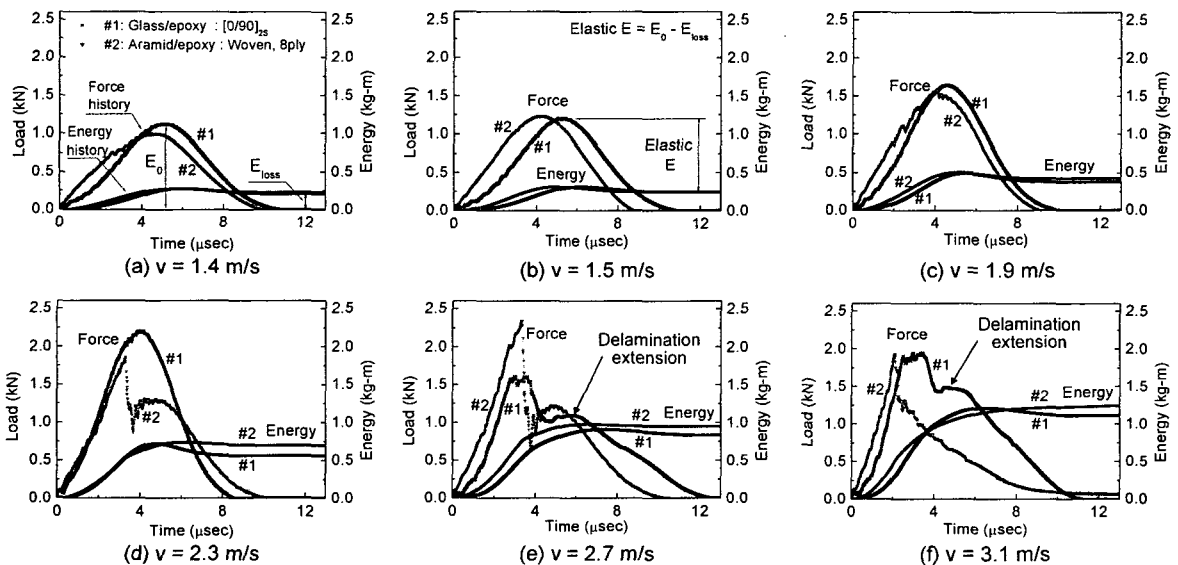


Fig. 4 The history of impact load and impact energy due to the various impact velocities

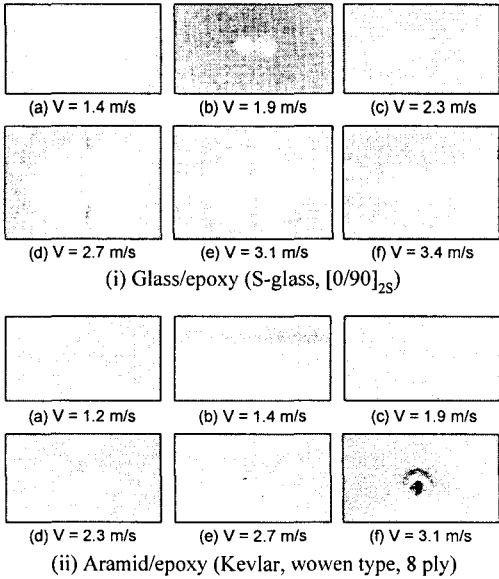
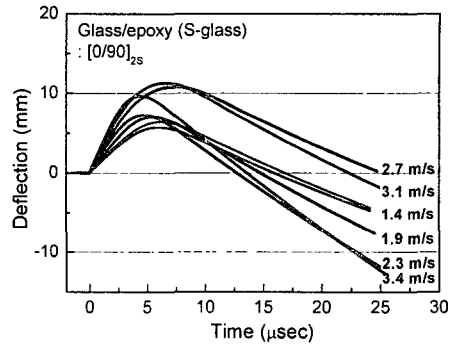


Fig. 5 Results of damage zone according to the various impact velocities

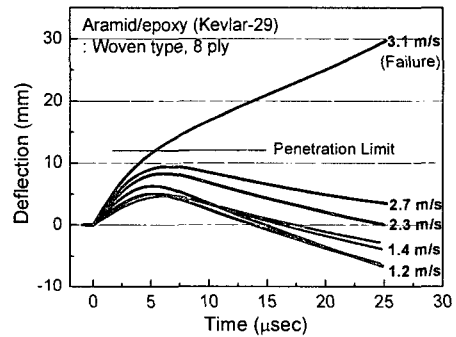
m/s인 경우에만 급격한 층간분리 확장현상이 발생된 것과 Fig. 4 (e) $v=2.7$ m/s, (f) $v=3.1$ m/s에서 2차 평행구간이 발생된 것이 잘 일치되어 나타났기 때문이다. 본 절을 요약하면 다음과 같다. 2 m/s 이하의 충격속도에서는 aramid/epoxy와 glass/epoxy가 유사한 충격하중-충격에너지 이력을 나타낸다. 그러나 2 m/s 이상에서는 충격하중-충격에너지 이력이 달라진다. $V=2$ m/s 이상에서 aramid/epoxy는 압입이 발생되고 그로 인한 하중이력의 급격한 저하 현상이 나타난다. 그러나 glass/epoxy는 충격저항에 의한 하중이력의 1차 평행구간, 급격한 층간분리 확장에 의한 2차 평행구간이 형성된다. 따라서, 재료의 영구변형이 유발되는 $v=2$ m/s 이상에서는 충격속도의 변화보다는 압입 및 층간분리 등과 같은 재료의 손상특성이 충격하중-충격에너지 이력에 더 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

3.2 충격속도 변화에 따른 처짐량과 손상형태

앞 절에서 충격속도 변화에 따른 충격하중 및 충격에너지의 이력을 살펴 본 결과, 충격속도가 증가할수록 압입, 층간분리 등과 같은 대변형이 E_{loss} 값을 증가시켜 결국, E_0 와 E_{loss} 의 차로 나타나는 탄성에너지 값이 작아지고 재료 내의 흡수 에너지는 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 충격속도 변화에 따른 하중과 처짐량의 관계를 고찰해보고자 한다. 충격속도에 따른 처짐량 거동을 관찰하기 위해 Fig. 6과 같이 제시



(a) Glass/epoxy (S-glass, [0/90]_{2S})



(b) Aramid/epoxy (Kevlar-29, Woven, 8 ply)

Fig. 6 Relationship between deflection and impact time in glass/epoxy vs. aramid/epoxy

하고 그 결과를 검토해보았다. Fig. 6의 (a) glass/epoxy와 (b) aramid/epoxy의 충격속도 변화에 따른 처짐량 거동을 살펴보면, aramid/epoxy는 충격속도 증가와 처짐량의 관계가 거의 비례적으로 나타났지만, glass/epoxy는 충격속도와 처짐량의 관계가 불규칙적으로 나타났음을 알 수 있다. 이러한 원인은 Fig. 5의 충격손상 이미지와 Fig. 6의 그래프를 비교해보면 알 수 있다. 충격속도에 비례적인 처짐량 거동을 보인 Fig. 6 (b) aramid/epoxy는 Fig. 5 (ii)에 제시된 결과와 같이 충격속도 증가와 손상영역(압입) 증가가 거의 비례적인 관계로 나타났고, 충격이 가해지는 영역에 국부적으로 손상이 발생했다. 그러나, Fig. 6 (a) glass/epoxy는 충격속도 증가와 손상영역(층간분리) 증가의 관계가 매우 불규칙적인 거동을 나타냈다. 일례로, Fig. 6 (a)와 Fig. 5 (i)의 관계에서 충격속도와는 무관하게 $v=2.3$ m/s와 $v=3.4$ m/s가 유사한 처짐량 및 층간분리 현상을 나타냈고, $v=2.7$ m/s와 $v=3.1$ m/s가 유사한 처짐량 및 층간분리 현상을 나타냈음을 알 수 있다. 따라서, glass/epoxy의 경우는 충격속도보다는 충격저항 에너지에 의한 층간분리의 확장형태가 처짐

량을 더 크게 좌우하는 인자라고 생각할 수 있다. 반면, Fig. 6 (b)를 살펴보면, aramid/epoxy의 압입은 처짐량에 큰 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다. 특히, $v = 2.3 \text{ m/s}$ 이하에서 발생한 압입은 약간의 처짐을 유발하긴 하지만 다시 복원할 수 있는 정도의 것이다. 그러나 aramid/epoxy는 $v = 3.1 \text{ m/s}$ 이상에서 관통이 발생하고 영구적인 과손이 일어나므로 $v = 3.1 \text{ m/s}$ 이상에서 얻어진 결과는 평가의 한계가 있다. 관통현상은 충격에 대한 인성이 낮다는 것을 의미하지만, 충격과파가 넓게 퍼지지 않고 충격 부위에 국한되었다는 것도 의미한다. 그러므로, aramid/epoxy가 $v = 2.3 \text{ m/s}$ 이하에서는 충격에 대한 흡수능력이 상대적으로 뛰어나다고 할 수 있다.

3.3 충격속도 변화에 따른 흡수에너지와 잔류강도율의 거동

3.2절에서 언급한 glass/epoxy 및 aramid/epoxy의 충격에 대한 흡수능력은 충격에너지 해석 인자를 통한 정량적인 평가가 수반되어야 한다. 따라서, 충격속도 변화에 따른 glass/epoxy와 aramid/epoxy의 충격에너지 흡수량을 평가해보기 위해 Fig. 7과 같은 그래프를 제시하였다. 여기서, 하중-처짐량 곡선에 의해 형성되는 면적은 흡수된 충격에너지(E) 양을 나타낸다. $v = 1.4 \text{ m/s}$ 와 $v = 1.9 \text{ m/s}$ 인 경우는 glass/epoxy와 aramid/epoxy가 거의 유사한 충격

에너지 흡수량(E)을 나타낸다. 그러나 $v = 2.3 \text{ m/s}$ 이상에서는 확연히 다른 거동을 보인다. Fig. 7 (c)에서 aramid/epoxy는 압입에 의한 에너지 손실로 Fig. 7 (a), (b)의 경우와 다른 형태의 곡선이 나타났다. $v = 2.7 \text{ m/s}$ 이상부터는 glass/epoxy와 aramid/epoxy 모두 압입과 층간분리 등의 영구변형에 의해 곡선의 형태가 좌우되고, 특히, $v = 2.7 \text{ m/s}$ 및 $v = 3.1 \text{ m/s}$ 일 때의 glass/epoxy는 Fig. 4에 제시된 층간분리 영향에 의한 2차 평행구간이 나타났음을 알 수 있다. aramid/epoxy의 경우, $v = 3.1 \text{ m/s}$ 이상 (Fig. 7 (e), (f))부터는 시험편의 관통이 발생하고 그로 인해 에너지 일부의 영구적 방출이 일어났다. 본 절에서는 이상과 같이 살펴본 Fig. 7의 결과를 이용하여 잔류강도율(σ_R/σ_0)을 구하고자 하였다. Husman 등⁽¹¹⁾은 손상이 존재하지 않는 재료의 변형률에너지 밀도(W_S)와 손상이 존재하는 재료의 변형률에너지 밀도(W_b)의 차이는 단위두께당 흡수되는 충격에너지(absorbed impact energy, E)에 비례한다고 가정하였다. 또한, 3.1절에서 충격 초기에 발생한 에너지(E_0)와 리바운드 에너지(E_{loss})의 차는 흡수된 충격에너지(E)와 같다고 정의하였으므로 이상의 관계로부터 다음과 같은 식을 제안할 수 있다.

$$E = E_0 - E_{loss} = W_S - W_b \quad (1)$$

또한, 변형률에너지 밀도와 손상길이와의 관계에

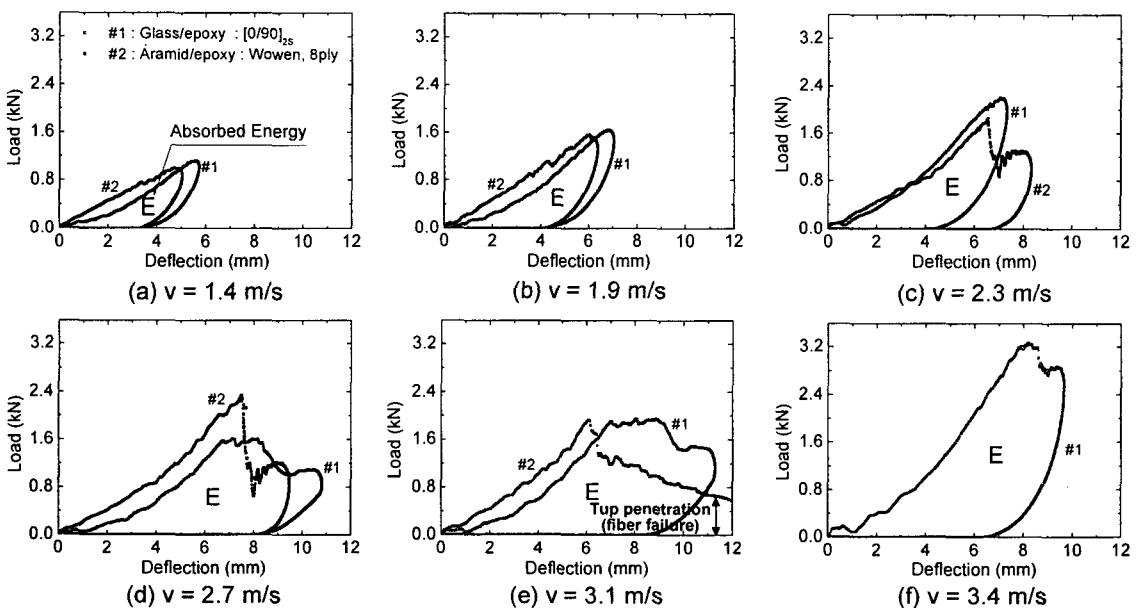


Fig. 7 Relationship between impact load and deflection due to the various impact velocities

Table 1 Results of weight drop impact test in glass/epoxy laminates (S-glass, [0/90]_{2S})

Spec. No.	Impact velocity (m/s)	Impact energy (kg-m)	Max. load (kN)	Total time (m-s)	Energy to Max. load (kg-m)	Total energy (kg-m)	Deflection at Max. load (mm)	Impact height (mm)
1	1.4	0.26	1.12	10.71	0.26	0.21	5.56	100
2	1.5	0.30	1.21	10.90	0.30	0.24	6.25	115
3	1.9	0.47	1.65	9.95	0.46	0.38	6.83	182
4	2.3	0.70	2.21	8.56	0.66	0.56	7.05	270
5	2.7	0.88	1.61	12.76	0.43	0.83	7.11	337
6	3.1	1.18	1.95	11.19	0.83	1.11	8.91	453
7	3.4	1.50	3.26	8.04	1.09	1.33	8.21	576

Table 2 Results of weight drop impact test in aramid/epoxy laminates (Kevlar-29, woven, 8 ply)

Spec. No.	Impact velocity (m/s)	Impact energy (kg-m)	Max. load (kN)	Total time (m-s)	Energy to Max. load (kg-m)	Total energy (kg-m)	Deflection at Max. load (mm)	Impact height (mm)
1	1.2	0.19	0.83	10.49	0.19	0.17	4.49	74
2	1.4	0.27	1.00	9.91	0.26	0.23	4.77	103
3	1.5	0.31	1.24	8.77	0.30	0.25	4.83	118
4	1.9	0.49	1.56	9.07	0.46	0.43	6.03	190
5	2.3	0.72	1.86	10.22	0.53	0.71	6.56	277
6	2.7	0.96	2.34	10.41	0.75	0.96	7.51	366
7	3.1	1.29	1.94	10.01	0.50	1.26	6.11	494

대한 임계에너지 해방률(G_{IC})은 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽⁷⁾

$$G_{IC} = A C_0 W_S = A (C + C_0) W_b \quad (2)$$

여기서, A 는 단면적이고 C_0 는 손상영역의 계수, C 는 리가먼트의 계수이다. 식 (2)를 정리하면 $W_b/W_S = C_0 / (C + C_0)$ 이므로 결국, 전체영역에 대한 손상영역의 관계로 생각할 수 있다. 한편, Waddoups 등⁽¹²⁾이 보고한 섬유강화 복합재료의 잔류강도와 관련된 실험결과를 인용하여, 식 (1)을 충격손상에 의한 잔류강도율(σ_R/σ_0) 관계식으로 변형하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\sigma_R / \sigma_0) = (W_b / W_S)^{1/2} \quad (3)$$

따라서, 식 (1)~(3)의 내용을 정리하면, 식 (4)와 같은 잔류강도율(σ_R/σ_0) 계산식을 제안할 수 있다.

$$(\sigma_R / \sigma_0) = (1 - (E / W_S))^{1/2} \quad (4)$$

식 (4)에서 E 는 Fig. 7의 곡선에 의해 형성된 E 의 면적과 같다. 이미지 분석 프로그램(SigmaScan Pro 5)을 이용하여 Fig. 7의 glass/epoxy와 aramid/epoxy의 E 면적을 구했다. 또한, W_S 는 Fig. 4에 제시한 E_0 와 같으므로 Fig. 7의 glass/epoxy와 aramid/epoxy

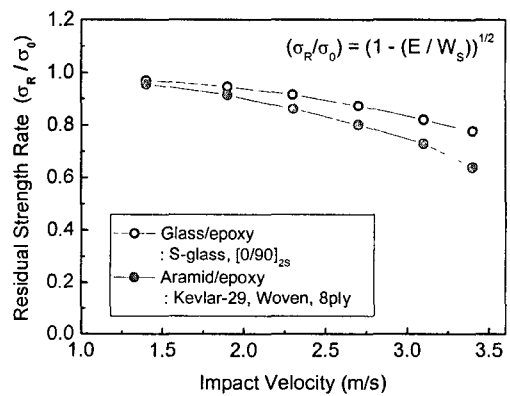


Fig. 8 Relationship between residual strength rate (σ_R/σ_0) and impact velocities in glass/epoxy vs. aramid/epoxy

의 최대하중과 최대처짐량으로 이루어지는 직사각형의 면적이 W_S 와 같다고 할 수 있다. 이상의 내용을 정리하여 충격속도의 변화에 따른 glass/epoxy와 aramid/epoxy의 잔류강도율(σ_R/σ_0) 변화를 살펴보면 Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 전체적으로 충격속도가 증가할수록 잔류강도율(σ_R/σ_0)은 서서히 감소했다. 그러나 aramid/epoxy가 glass/epoxy에 비해 감소의 폭이 더욱 크다. 그 이유는 $v = 1.9$ m/s 이상부터 나타나는 압입으로 인한

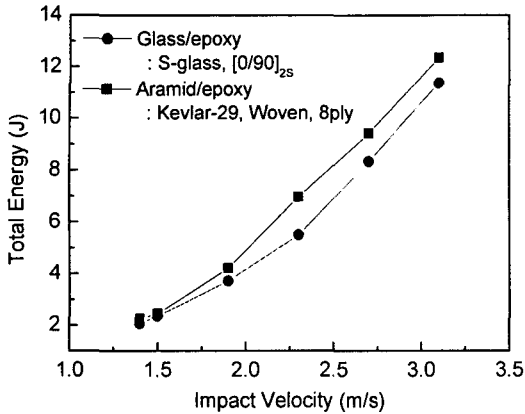


Fig. 9 Relationship between total energy and impact velocities in glass/epoxy vs. aramid/epoxy

에너지의 방출이 충격속도 증가에 따라 비례적으로 커졌기 때문이라고 생각된다. 그러나, 충격 흡수 에너지를 평가하는데 있어서 전혀 다른 손상 거동을 보인 두 재료를 Fig. 8의 결과로만 평가하는 것은 한계가 있다. 따라서 충격속도에 따라 흡수된 총에너지의 거동도 함께 검토해 보았다. 본 연구에서는 충격실험을 통해 Table 1, 2와 같은 포괄적인 결과 데이터를 얻을 수 있었다. 그 중에서 충격속도 증가에 따른 총에너지의 변화를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 8과 Fig. 9를 관련지어 검토해보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, aramid/epoxy는 충격속도가 증가함에 따라 압입의 영향으로 잔류강도율은 감소하였지만 총에너지는 glass/epoxy보다 증가하였다. 둘째, aramid/epoxy의 압입으로 손실된 에너지량은 Fig. 8에 제시한 잔류강도율 차이와 Fig. 9에 제시한 총에너지 차이의 합이라고 판단된다. 셋째, 잔류강도율은 압입 및 층간분리와 같은 충격손상의 영향이 충분히 고려된 결과를 제시하지만, 총에너지는 충격손상이 고려되지 않은 순수한 에너지의 관계만을 제시한다. 따라서, glass/epoxy는 충격에 대한 변형저항 특성이 우수하기 때문에 잔류강도율도 aramid/epoxy보다 높게 나타난다. 그러나 총에너지는 aramid/epoxy가 더 우수하게 나타났으므로 압입이 발생하지 않는 충격속도 이내에서의 에너지 흡수능력은 aramid/epoxy가 glass/epoxy보다 더 우수하다고 할 수 있다. 따라서 족부보장구(A.F.O) 판스프링용 재료인 aramid/epoxy와 glass/epoxy를 실제 적용할 때, 큰 충격을 받는 부위에는 cross-ply의 glass/epoxy를 적용하는 것이 적합하고, 대변형과 높은 탄성 에너지를 필요로 하는 부위에는 woven 타입의 aramid/epoxy를 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 족부보장구(Ankle Foot Orthosis, A.F.O) 판스프링용 glass/epoxy 및 aramid/epoxy 적층재를 이용하여 충격속도 변화에 따른 충격하중-충격에너지 이력, 처짐량과 손상형태, 흡수 에너지와 잔류강도율의 거동 등에 대해 고찰해 보았다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) $v=2$ m/s 이하의 충격속도에서는 aramid/epoxy와 glass/epoxy가 유사한 충격하중-충격에너지 이력을 나타냈지만 $v=2$ m/s 이상에서는 전혀 다른 손상거동을 나타냈다. $v=2$ m/s 이상에서 aramid/epoxy는 압입이 발생되고 그로 인한 하중이력의 급격한 저하현상이 발생하는 반면, glass/epoxy는 충격저항에 의한 하중이력의 1차 평행구간과 급격한 층간분리 확장에 의한 2차 평행구간이 형성된다. 따라서, 재료의 영구변형이 유발되는 $v=2$ m/s 이상에서는 충격속도의 변화보다는 압입 및 층간분리 등과 같은 재료의 손상특성이 충격하중-충격에너지 이력에 더 지대한 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

(2) aramid/epoxy는 충격속도와 처짐량의 관계가 거의 비례적으로 나타났으나, glass/epoxy는 불규칙적으로 나타났다. 또한, aramid/epoxy의 압입은 처짐량의 변화에 크게 기여하지 못했지만, glass/epoxy의 층간분리는 처짐량을 크게 좌우하는 인자로 작용하였다.

(3) 충격속도 변화에 따른 흡수 에너지와 잔류강도율의 거동을 평가하기 위해 다음의 식을 제안하였다.

$$(\sigma_R / \sigma_0) = (1 - (E / W_S))^{1/2}$$

본 식을 이용하여 충격속도 증가에 따른 잔류강도율을 평가해 본 결과, aramid/epoxy가 glass/epoxy보다 잔류강도율의 감소 폭이 더 크음을 알 수 있었다. 그 이유는 aramid/epoxy의 압입이 에너지의 방출을 증가시켰기 때문이다. 그러나, 흡수된 총에너지는 aramid/epoxy가 glass/epoxy보다 크게 나타났다.

(4) aramid/epoxy의 압입으로 손실된 에너지량은 잔류강도율 차이와 총에너지 차이의 합이라고 판단된다. 또한, 잔류강도율은 압입 및 층간분리와 같은 충격손상의 영향이 충분히 고려된 결과를 제시하지만, 총에너지는 충격손상이 고려되지 않은 순수한 에너지의 관계만을 제시한다.

(5) 족부보장구(A.F.O) 판스프링 재료인 aramid/epoxy와 glass/epoxy를 실제 적용할 때는 큰 충격

을 받는 부위에는 cross-ply의 glass/epoxy를 적용하는 것이 적합하고, 대변형과 높은 탄성에너지를 필요로 하는 부위에는 woven타입의 aramid/epoxy를 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2003-000-10567-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Shamp, 1999, "The Neurophysiological Ankle-Foot Orthosis," *Journal of Clinical Prosthetics and Orthotics*, 10 (1), pp. 15~23.
- (2) Shamp, 2000, "Neurophysiologic Orthotic Designs in the Treatment of Central Nervous System Disorders," *Journal of Prosthetics and Orthotics*, Vol. 2, No. 1, pp. 14~32.
- (3) Young-Shin Lee, Kun-Hee Kang and Oung Park, 1991, "Low-Velocity Impact Response of Hybrid Laminated Composite Plates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 21, No. 2, pp. 317~326.
- (4) Kwang-Hee Im and In-Young Yang, 1996, "Damage Behavior and Residual Bending Fatigue Strength of CFRP Composite Laminates Subjected to Impact Loading," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 20, No. 6, pp. 1836~1842.
- (5) Moon-Saeng Kim and Seung-Bum Park, 1997, "Matrix Cracking and Delamination in Laminated Composite Plates Due to Impact," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 21, No. 2, pp. 317~326.
- (6) Choi, I. H., Choi, Y. R. and Hong, C. S., 1993, "Experimental Analysis on Residual Compressive Strength of Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK Composite Laminates After Low-Velocity Impact," *Journal of the KSCM*, Vol. 6, No. 2, pp. 69~79.
- (7) Jung-Kyu Kim and Ki-Weon Kang, 1999, "Impact Damage Behavior and Evaluation of Residual Strength in Plain Woven Glass/Epoxy Composite," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 23, No. 2, pp. 294~303.
- (8) Rhee, K. Y. and Ernst, H. A., 1992, "Method for Computing Energy Release Rate Using the Elastic Work Factor Approach," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 14, pp. 2029~2043.
- (9) Ki-Weon Kang and Jung-Kyu Kim, 2000, "An Analysis for Delamination Using Energy Release Rate in CFRP Laminates," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 8, pp. 2115~2122.
- (10) Ki-Weon Kang and Jung-Kyu Kim, 1999, "An Analysis of Impact Force I Plain Woven Glass/Epoxy Composites Subjected to Transverse Impact," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 23, No. 4, pp. 687~696.
- (11) Husman, G. E., Whitney, J. M. and Halpin, J. C., 1975, "Residual Strength Characterization of Laminated Composite Subjected to Impact Loading," *ASTM STP 568*, pp. 92~113.
- (12) Waddoups, M. E., Eisenmann, J. R. and Laminski, B. E., 1971, "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, pp. 446~454.