족부보장구(Ankle Foot Orthosis, A.F.O.)용 복합재료의 충격에너지 거동

김철웅† · 송삼홍* · 오동준**

Impact Energy Behavior in Composite Materials of Ankle Foot Orthosis (A.F.O.)

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

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

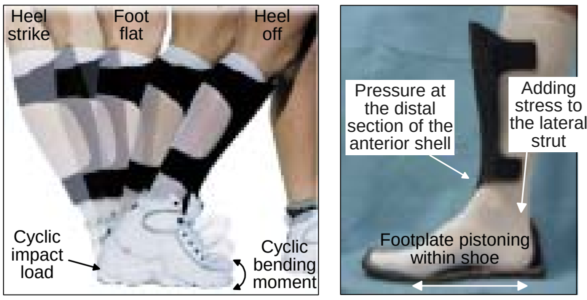
Abstract

The needs of walking assistive 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 rack 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. 서 론

최근 우리나라도 노령화 사회로 진입했다는 보도가 있었다. 그러나 아직까지 각종 노인성 질환에 대한 관심은 상대적으로 부족한 실정이다. 노령화와 함께 찾아오는 각종 질병 중 중풍, 당뇨, 뇌경색, 심장기 질환 등으로 인한 편마비는 심각한 보행운동의 장애를 초래한다. 편마비는 족저근의 마비를 유발하고 보행운동 시 탄성에너지를 저장하고 발산하는 족부기능을 저하시킨다. 이러한 족부기능을 돕기 위한 보조기구로 탄성에너지저장판스프링과 발목 지지대가 결합된 족부보장구(Ankle Foot Orthosis, A.F.O.)가 활용되고 있다.(1,2) 족부보장구는 Fig. 1 에 제시한 바와 같이 보행 특성상 무수히 반복되는 충격하중과 피로하중을 수반하게 된다. 일반적으로 족부보장구용 섬유강화 복합재료로는 carbon/epoxy 가 가장 널리 사용되고 부분적으로 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 가 사용된다. 그러나 carbon/epoxy 는 강성도는 뛰어나지만 충격특성이 취약하다는 단점이 있다.(3~5) 따라서, carbon/epoxy 대신 충격저항과 충격에너지 흡수율이 상대적으로 우수한 glass/epoxy 및 aramid/epoxy 로 대체하고, 점차적으로 피로특성을 개선한다면 현재보다 내구성이 더욱 향상된 족부보장구를 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 aramid/epoxy 적층재와 glass/epoxy 적층재를 이용하여 충격속도에 따른 하중-에너지 이력, 하중-처짐량의 관계 및 잔류강도의 변화 등을 평가해 보았다. 수행된 연구의 세부내용은 다음과 같

† 고려대학교 공학기술연구소
E-mail : woong 25@korea.ac.kr
TEL : (02)928-3608 FAX : (02)926-9290
* 고려대학교 기계공학과
** 안동대학교 기계교육과



Patient gait with Ankle Foot Orthosis Intake information of A.F.O.

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

다. 1) 충격속도 변화에 따른 충격하중과 충격에너지의 이력. 2) 충격속도 변화에 따른 처짐량과 손상형태. 3) 충격속도 변화에 따른 흡수에너지와 잔류강도률의 거동 등이다.

2. 충격시험편 제작 및 실험방법

2.1 충격시험편의 제작

충격시험은 ASTM D 3763 의 규정에 의거하여 수행되었다. 시험편의 재료로 사용된 glass/epoxy 는 S 계열 단방향 유리섬유 프리프레그를 $[0/90]_{2S}$ 형태로 적층한 것이고, aramid/epoxy 는 평직 케블라 프리프레그(Kevlar-29, woven type)를 8 플라이로 적층한 것이다. 적층된 시험편은 핫-플레이트 프레스(hot-plate press)를 이용하여 경화하였다. DSC (Differential Scanning Calorimeter) 측정결과를 반영하여 경화시 후가열 처리를 하였다. 시험편의 규격은 150 x 150 mm 이다.

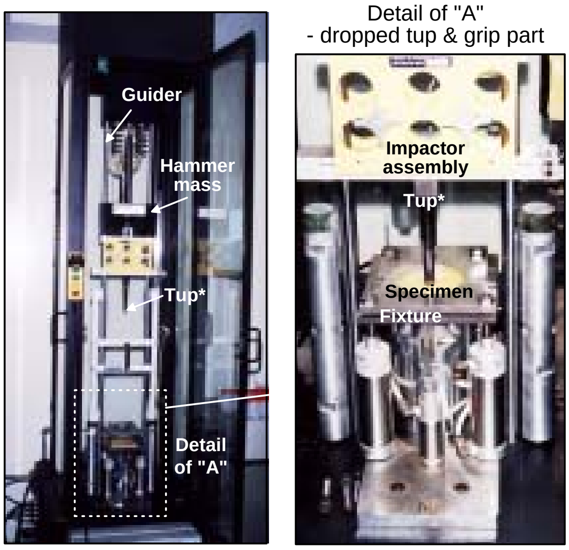
2.2 중량낙하식 충격시험기

본 연구에서는 Fig. 2 에 제시한 Dynatup 사의 중량낙하식 충격시험기(모델: 8250, 830-I)를 사용하였다. Fig. 2 의 텁(tup)은 충격헤드와 로드셀이 결합되어 있는 형태로 시험편 가격 순간의 인성, 충격하중, 처짐량, 총에너지 흡수량 등을 구할 수 있다. 또한, 낙하위치에 따라 충격속도를 조절할 수 있다. 해머의 무게는 2.61 kg 으로 고정하고 충격속도는 낙하높이를 조절하여 1.2 m/s 부터 3.4 m/s 까지 단계적으로 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격속도 변화에 따른 충격하중과 충격에너지의 이력

glass/epoxy 와 aramid/epoxy 의 충격속도 변화에 따른 충격하중 이력과 에너지 이력을 살펴 보기



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

Fig. 2 Impact test system (weight drop type, Dynatup 8250, 830-I)

위해 Fig. 3 과 같은 그래프를 제시하였다. 충격에너지 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(층간분리), 열, 음향방출 등으로 손실되는 에너지의 합을 의미한다. Fig. 3 에서 리바운드 에너지(E_{loss})는 충격 중에 비가역적으로 손실된 에너지와 충격 후 재료의 잔류진동에 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. 3 에서 충격속도가 증가될수록 압입이나 층간분리와 같은 영구변형이 심화되므로 E_0 와 E_{loss} 의 차이로 나타나는 탄성에너지는 점차로 저하됨을 볼 수 있다. 한편, Fig. 3 의 (a)~(c)를 살펴보면 충격속도 증가에 따라 충격하중과 충격에너지가 서서히 증가되며 환원된 탄성에너지는 조금씩 감소되어 감을 관찰할 수 있다. 그러나 Fig. 3 의 (d)~(f) 에서는 많은 변화가 관찰된다. 특히, Fig. 3 (d), (e) 에서 aramid/epoxy 의 급격한 하중감소는 충격하중에 의해 압입이 발생했기 때문이다. Fig. 4 (ii)를 통해 aramid/epoxy 의 압입을 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 3 (e), (f)의 glass/epoxy 하중이력을 살펴보면, 최대하중 부근에서 1 차 평행구간이 나타나고 이후 2 차 평행구간이 나타남을 관찰할 수 있다. 이는 aramid/epoxy 에서는 나타나지 않는 특징으

로 Fig. 4 의 (i) glass/epoxy 와 (ii) aramid/epoxy 의 충격손상 거동 차이를 비교해보면 그 이유를 알 수 있다. glass/epoxy 에서 1 차 평행구간은 충격 순간 발생된 충격에너지가 재료의 변형이나 압입으로 전환되지 않고 충격저항 에너지의 형태로 잔류했기 때문에 나타나는 구간이고, 2 차 평행구간은 충격저항 에너지로 인한 층간분리의 급격한 확장으로 인해 발생된 구간이라고 판단된다. 왜냐하면 Fig. 4 (i)에서 v= 2.7 m/s 및 v=3.1 m/s 인 경우에만 급격한 층간분리 확장현상이 발생했고 Fig. 3 (e) v=2.7 m/s, (f) v=3.1 m/s 에서 2 차 평행구간이 나타났기 때문이다.

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 흡수에너지는 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 충격속도 변화에 따른 하중과 처짐량의 관계를 고찰해보고자 한다. 충격속도에 따른 처짐량 거동을 관찰하기 위해 Fig. 5 와 같이 제시하고 그 결과를 검토해보았다. Fig. 5 의 (a) glass/epoxy 와 (b) aramid/epoxy 의 충격속도에 변화에 따른 처짐량 거동을 살펴보면, aramid/epoxy 는 충격속도 증가와 처짐량의 관계가 거의 비례적으로 나타났지만, glass/epoxy 는 충격속도와 처짐량의 충격속도와 처짐량의 관계가 불규칙적으로 나타났음을 알 수 있다. 이러한 원인은 Fig. 4 와 Fig. 5 를 비교해보면 알 수 있다. 충격속도에 비례적인 처짐량 거동을 보인 Fig. 5 (b) aramid/epoxy 는 Fig. 4 (ii)에 제시된 결과와 같이 충격속도 증가와 손상영역(압입)의 증가가 거의 비례적인 관계로 나타났고, 충격이 가해지는 영역에 국부적으로 손상이 발생했다. 그러나, 충격속도와 비의존적인 처짐량 거동을 보인 Fig. 5 (a) glass/epoxy 는 충격속도 증가와 손상영역(층간분리)의 증가가 매우 불규칙적이다. 일례로, Fig. 5 (a)와 Fig. 4 (i)의 관계에서 충격속도와는 무관하게 v=2.3 m/s 와 v=3.4 m/s 가 유사한 처짐량 및 층간분리 형상이 나타냈고, v=2.7 m/s 와 v=3.1 m/s 가 유사한 처짐량 및 층간분리 형상이 나타냈음을 알 수 있다. 따라서, glass/epoxy 의 경우는 충격속도보다는 충격저항 에너지에 의한 층간분리의 확장형태가 처짐량을 더 크게 좌우하는 인자라고 생각할 수 있다. 반면, Fig. 5 (b)를 살펴보면, aramid/epoxy 의 압입은 처짐량에 큰 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다. 특히, v=2.3 m/s 이하에서 발생된 압입은 약간의 처짐을 유발하긴 하지만 다시 복원할 수 있는 정도의 손상이다. 그러나 aramid/epoxy 는 v=3.1 m/s 이상에서 관통이 발생하고 영구적인 파손이 일어나므로 v=3.1 m/s 이상에서 얻어진 결과는 평가의 한계가 있다.

3.3 충격속도 변화에 따른 흡수에너지와 잔류강도률의 거동

aramid/epoxy 의 진동, 충격에 대한 감쇠능력은 충격에너지 흡수능력에 대한 정량적인 평가가 수

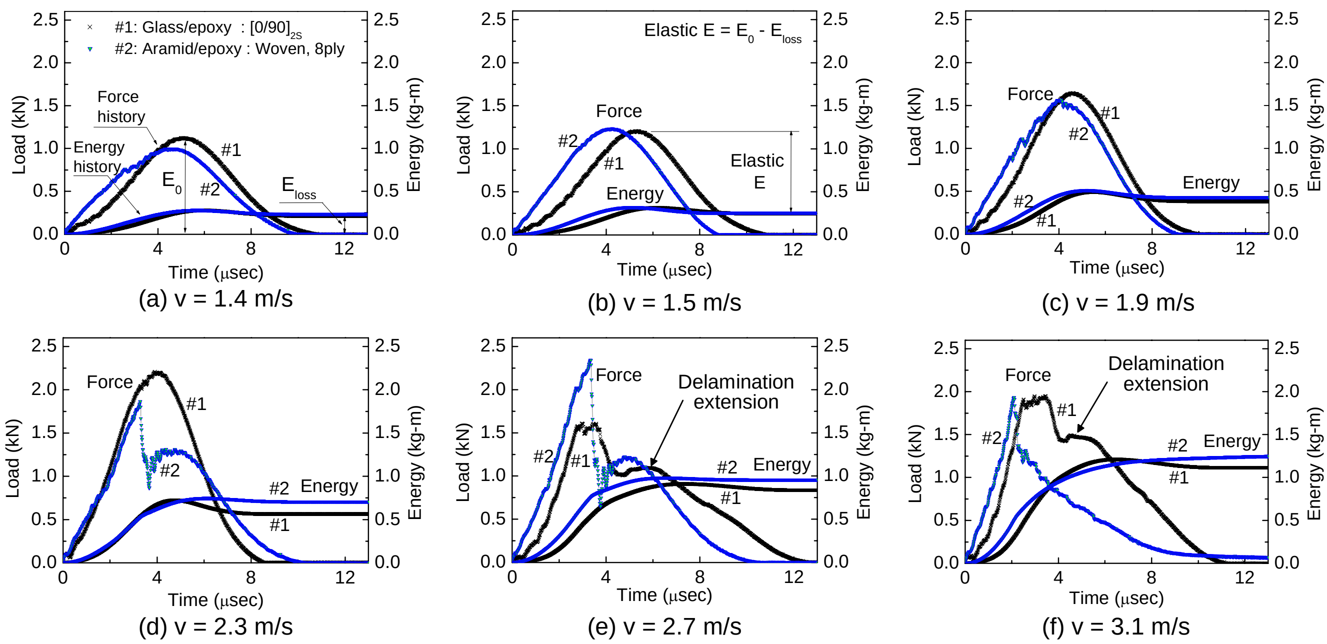
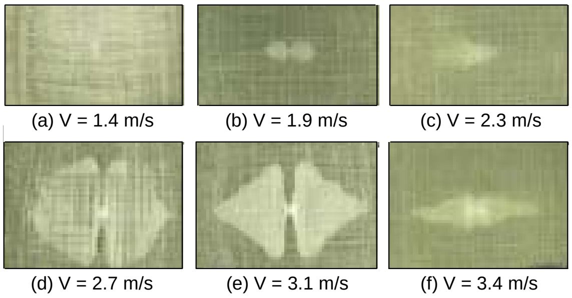
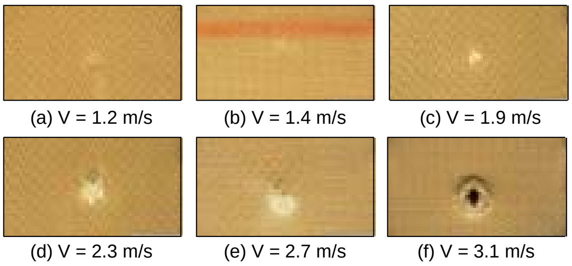


Fig. 3 The history of impact load and impact energy due to the various impact velocity



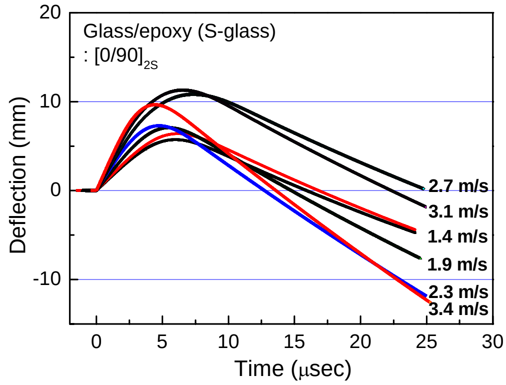
(i) Glass/epoxy (S-glass, $[0/90]_{2S}$)



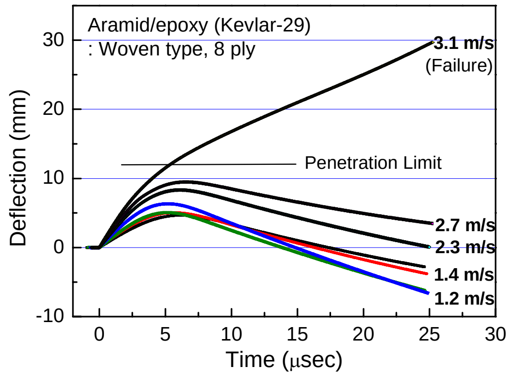
(ii) Aramid/epoxy (Kevlar, wowen type, 8 ply)

Fig. 4 Results of damage zone according to the various impact velocities

반되어야 정확한 해석이 가능하다. 따라서, 충격속도 변화에 따른 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 의 충격에너지 흡수량을 평가해보기 위해 Fig. 6 과 같은 그래프를 제시하였다. 여기서, 하중-처짐량 곡선에 의해 형성되는 면적은 흡수된 충격에너지(E) 양을 나타낸다. v=1.4 m/s 와 v=1.9 m/s 인 경우는 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 가 거의 유사한 충격에너지 흡수량(E)을 나타낸다. 그러나 v=2.3 m/s 이상에서는 확연히 다른 거동을 보인다. Fig. 6 (c)에서 aramid/epoxy 는 압입에 의한 에너지 손실로 (a), (b)의 경우와 다른 형태의 곡선이 나타났다. v=2.7 m/s 이상부터는 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 모두 압입과 층간분리 등의 영구변형에 의해 곡선의 형태가 좌우되고, 특히, v=2.7 m/s 및 v=3.1 m/s 일 때의 glass/epoxy 는 Fig. 3 에 제시된 층간분리 영향에 의한 2 차 평행구간이 나타났음을 알 수 있다. aramid/epoxy 의 경우, v=3.1 m/s 이상(Fig. 6 (e), (f))부터는 시험편의 관통이 발생하고 그로 인해 에너지 일부의 영구적 방출이 일어났다. 이상과 같이 살펴본 Fig. 6 의 결과를 이용하여 잔류강도률(σ_R/σ_0)을 구하고자 하였다. Husman 등[6]은 손상이 존재하지 않는 재료의 변형률에너지 밀도(W_S)와 손상이 존재하는 재료의 변형률에너지 밀도(W_b)의 차이는 단위두께당 흡수 충격에너지(absorbed impact energy, E)에 비례한다고 가정 가정하였다. 또한, 3.1 절에서 충격 초기에 발생한 에너지(E_0)와 리바운드 에너지(E_{loss})의 차는 흡수된 충격에너지



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



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

Fig. 5 Relationship between deflection and impact time in glass/epoxy vs. aramid/epoxy

(E)와 같다고 정의하였으므로 이상의 관계로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E = E_0 - E_{loss} = W_S - W_b \tag{1}$$

또한, 변형률에너지 밀도와 손상길이와의 관계에 대한 임계에너지 해방률(G_{IC})은 다음과 같은 식으로 표현된다.

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

여기서, A 는 단면적이고 C_0는 손상영역의 계수, C 는 비손상영역(리가먼트)의 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[7]이 보고한 섬유강화 복합재료의 잔류강도와 관련된 실험결과를 인용하여, 식 (1)을 충격손상에 의한 잔류강도률(σ_R/σ_0) 관계식으로 변형하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

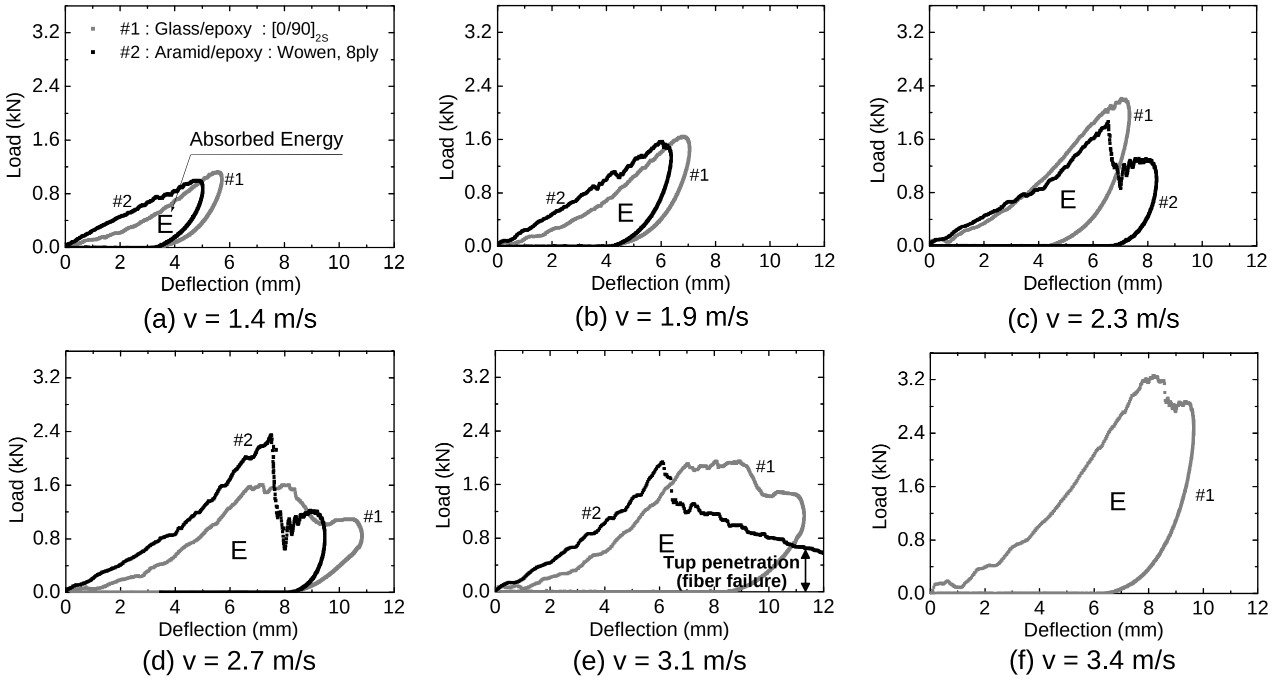


Fig. 6 Relationship between impact load and deflection due to the various impact velocity

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

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

식 (4)에서 E 는 Fig. 6 의 곡선에 의해 형성된 E 의 면적과 같다. 따라서 이미지 분석 프로그램 (SigmaScan Pro 5)을 이용하여 Fig. 6 의 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 의 E 면적을 구했다. 또한, W_S 는 Fig. 3 에 제시한 E_0 와 같다고 생각되므로 Fig. 6 에서 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 의 최대하중과 최대처짐량으로 이루어지는 직사각형의 면적이 W_S 와 같다고 할 수 있다. 이상의 내용을 정리하여 충격속도의 변화에 따른 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 의 잔류강도률(σ_R/σ_0) 변화를 살펴보면 Fig. 7 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 전체적으로 충격속도가 증가할수록 잔류강도률(σ_R/σ_0)은 서서히 감소했다. 그러나 aramid/epoxy 가 glass/epoxy 에 비해 감소의 폭이 더 크다. 그 이유는 v=1.9 m/s 이상부터 나타나는 압입으로 인해, 에너지의 방출이 충격속도 증가에 따라 비례적으로 커졌기 때문이라고 생각된다. 그러나, 흡수 충격에너지를 평가하는데 있어서 압입 및 층간분리와 같이 전혀 다른 손상거동을 보인 두 재료를 Fig. 8 의 결과로만 평가하는 것은 한계가 있다. 따라서 충격속도 증가에 따른 총에너지의 변화를 그래프로 나타내면 Fig. 8 과

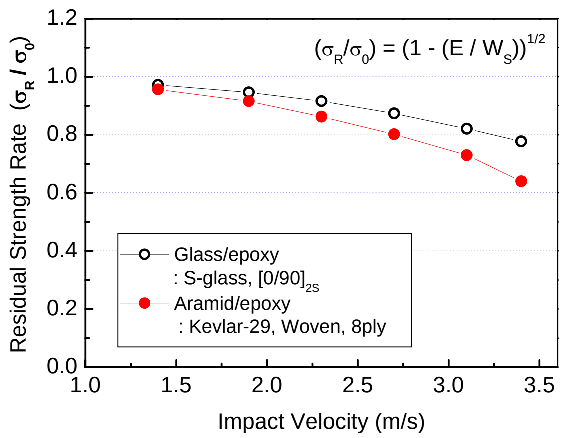


Fig. 7 Relationship between residual strength rate and impact velocity in glass/epoxy vs. aramid/epoxy

같다. Fig. 7 과 Fig. 8 을 연관지어 검토해보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, aramid/epoxy 는 충격속도가 증가함에 따라 압입의 영향으로 잔류 강도률은 감소하였지만 총에너지는 glass/epoxy 보다 증가하였다. 둘째, aramid/epoxy 의 압입으로 손실된 에너지 량은 Fig. 7 에 제시한 잔류강도률 차이와 Fig. 8 에 제시한 총에너지 차이의 합이라고 판단된다. 셋째, 잔류강도률은 압입 및 층간분리와 같은 충격손상의 영향이 충분히 고려된 결과를 제시하지만, 총에너지는 충격손상이 고려되지 않은 순수한 에너지의 관계만을 제시한다. 이상의 내용을

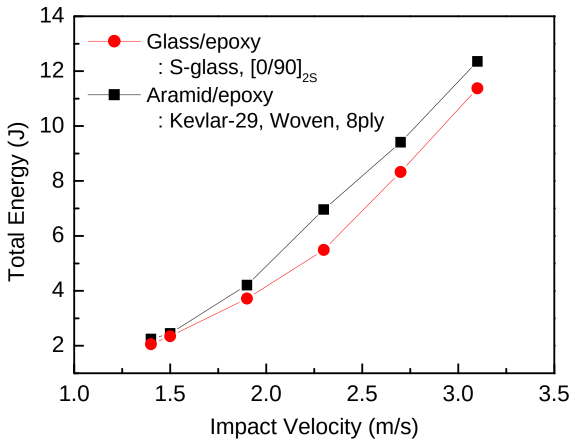


Fig. 8 Relationship between total energy and impact velocity in glass/epoxy vs. aramid/epoxy

정리하면, 족부보장구(A.F.O.)용 재료로 glass/epoxy 와 aramid/epoxy 를 적용할 경우, 충격을 받는 부위에는 glass/epoxy 를 적용하는 것이 적합하고, 대변형과 큰 탄성에너지를 필요로 하는 부위에는 aramid/epoxy 를 적용하는 것이 적합하다.

4. 결 론

(1) v = 2 m/s 이하의 충격속도에서는 aramid/epoxy 와 glass/epoxy 가 유사한 충격하중-충격에너지 이력을 나타낸다. 그러나 v= 2 m/s 이상에서, aramid/epoxy 는 압입이 발생되고 그로 인한 하중이력의 급격한 저하현상이 발생하는 반면, glass/epoxy 는 충격저항에 의한 하중이력의 1 차 평행구간과 급격한 층간분리 확장에 의한 2 차 평행구간이 형성된다. 따라서, v=2 m/s 이상에서는 충격속도의 변화보다는 압입 및 층간분리 등과 같은 재료의 손상특성이 충격하중-충격에너지 이력에 더 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

(2) aramid/epoxy 는 충격속도와 처짐량의 관계가 거의 비례적으로 나타났으나, glass/epoxy 는 불규칙적으로 나타났다. 그 이유는 aramid/epoxy 에서 손상으로 나타나는 압입은 충격속도와 비례하여 성장했지만, glass/epoxy 에서 손상으로 나타나는 층간분리는 충격속도와 무관한 거동을 보였기 때문이다. 또한, aramid/epoxy 의 압입은 처짐량의 변화에 크게 기여하지 못했지만, galss/epoxy 의 층간분리는 처짐량을 크게 좌우하는 인자로 작용하였다.

(3) 충격속도 변화에 따른 흡수에너지와 잔류강도률의 거동을 평가하기 위해 다음과 같은 잔류강도률 식을 제안하였다.

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

위의 식을 이용하여 충격속도 증가에 따른 잔류강도률을 평가해 본 결과, aramid/epoxy 가 glass/epoxy 보다 감소의 폭이 더 큼을 알 수 있었다. 그 이유는 aramid/epoxy 의 압입발생으로 충격속도 증가에 따라 에너지의 방출이 커져갔기 때문이다.

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

(5) 족부보장구(A.F.O.)용 재료로 두 재료를 적용할 때 큰 충격을 받는 부위에는 glass/epoxy 를 적용하는 것이 적합하고, 대변형과 큰 탄성에너지를 필요로 하는 부위에는 aramid/epoxy 를 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 *et al*. 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) 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.

(7) 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.