

論文

세라믹/FRP 하이브리드 복합재료의 접착향상

장정식* · 박노춘* · 윤영주** · 박종규**

Adhesion Promotion of Ceramic/FRP Hybrid Composites

Jyong-Sik Jang*, Roh-Chun Park*, Young-Joo Yoon** and Jong-Kyu Park**

ABSTRACT

Epoxy adhesive was used to fabricate high strength, high hardness ceramic and high strength polyethylene fiber-aramid fiber/Vinylester hybrid composite. Ceramic/FRP interfacial adhesion strength was investigated with different surface roughness, adhesive thickness, plasma treatment time, and curing temperature, and optimal conditions of interfacial adhesion strength were determined using above various factors.

Impact absorption energy of ceramic/adhesive layer was governed mainly by adhesive thickness rather than interfacial adhesion strength. In the case of maximum impact absorption energy, the adhesive thickness and interfacial adhesion strength of Ceramic/FRP hybrid composite were major factors.

초 록

에폭시 접착제를 사용하여 고강도 폴리에틸렌 섬유-아라미드 섬유/Vinylester 복합재료와 고강도, 고경도의 세라믹과의 이종 복합재료를 제조하였다. 표면 조도, 접착층의 두께, 플라즈마 처리 시간, 그리고 경화 온도에 따른 Ceramic/FRP의 계면 결합력을 고찰하였으며, 각 경우에 있어서 최적의 조건이 존재하였다.

Ceramic/Adhesive층의 충격 흡수에너지는 계면간의 결합력 보다는 접착제층의 두께에 더 큰 영향을 받으며, 최대 충격 흡수에너지는 접착제층과 계면 강도에 따라 최적 조건에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

고분자 복합재료는 경량화로 인하여 민첩성과 연료의 효율성을 증가시키고, 외부와 충돌시 더 적은 에너지와 하중을 받음으로 인하여 다른 재료들에 비해 충격 에너지 측면에서 상당히 유리하다. 이러한 복합재료의 우수한 내충격성과 세라믹의 경제성을 고려한 이종 복합재료가 고속 충격 용도로

널리 사용되고 있으며, 복합재료간의 adhesive bonding을 위해 접착제를 사용한다[1].

하이브리드 복합재료는 한 가지의 보강재료를 사용한 경우의 단점을 보완하여 줄 수 있으며, 하이브리드 복합재료의 기계적 성질은 보강 섬유의 구성비와 적층 순서, 그리고 하이브리드 형태에 따라서 달라지게 된다. 탄소 섬유의 내충격성 향상을 위한 탄소 섬유-유리 섬유 하이브리드 복합

* 서울대학교 공업화학과

** 국방과학 연구소

재료의 경우, 탄소 섬유와 부피 분율이 증가함에 따라 굴곡 강도는 증가하지만, 내충격성은 오히려 감소한다. 탄소 섬유의 부피 분율이 50%인 하이브리드 복합재료는 탄소 섬유만 사용한 경우보다 굴곡 강도는 10% 감소하지만 충격 강도는 100% 증가하게 된다. 즉, 적당한 부피 분율로 하이브리드 화함으로써 최적의 물성을 얻는 동시에 비용 절감의 효과도 기대할 수 있다[2].

충격에 뛰어난 특성 때문에 내충격용 재료로 널리 사용되는 고강도 폴리에틸렌 복합재료의 경우, 섬유와 매트릭스간의 결합이 매우 약하여 섬유가 가지고 있는 물성을 복합재료내에서 충분히 발휘할 수 없게 되어 다른 기계적 물성이 감소하게 된다. 섬유 표면에 반응기를 도입하거나, 조도를 주어 고강도 폴리에틸렌 섬유의 계면 결합력을 향상시키면 다른 기계적 물성은 증가하나, 충격 특성이 저하된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 인장, 압축등의 특성이 우수한 아라미드 섬유를 보강하여 고강도 폴리에틸렌 섬유의 내충격성을 감소시키지 않으면서 다른 기계적 물성이 우수한 복합재료의 개발이 가능하다. Intra-ply 형태의 고강도 폴리에틸렌 섬유-아라미드 섬유 복합재료의 경우, 한 laminar 내에 열적 성질이 다른 두가지 보강재가 존재하므로 thermal mismatch에 의해 상당한 양의 응력이 각 층 사이에 잔존하게 된다. 따라서 하이브리드화함에 따라 층간 전단력은 고강도 폴리에틸렌 섬유나 아라미드 섬유에 비해 낮아지며, 충격 흡수에너지는 낮은 층간 전단력에 의한 delamination의 증가로 인해 커진다[3]. 또한 아라미드 섬유와 고강도 폴리에틸렌 섬유의 부피 분율, 적층 순서의 변화를 통한 하이브리드 복합재료의 물성 변화를 고찰할 수 있으며, 하이브리드 복합재료의 물성 변화에 따라 이중 복합재료의 계면 강도와 내충격성은 영향을 받으리라 여겨진다.

따라서 본 연구에서는 하이브리드 복합재료의 강화재로서 고강도 폴리에틸렌 섬유와 아라미드 섬유의 부피비가 50 : 50인 intra-ply 형태를 이용하여 고강도 폴리에틸렌 섬유-아라미드 섬유/Vinylester 하이브리드 복합재료를 사용하였다. 세라믹 복합재료와 접합을 위해 에폭시 접착제를 사

용하여, 세라믹/FRP 이중 복합재료의 고속 충격 응용을 위한 정적 및 동적 물성을 향상시키고자 하였다. 이를 위해 세라믹 복합재료와 FRP 복합재료의 표면 조도, 접착층 두께, 플라즈마 처리 시간, 그리고 접착제의 경화 온도의 변화에 따른 계면 접착 특성과 내충격성을 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

강화재는 경사는 아라미드 섬유, 위사는 고강도 폴리에틸렌 섬유를 이용하여 Kevlar 29와 Spectra 900의 전체적인 부피비가 50 : 50인 직물을 사용하였다. 매트릭스 수지는 내쇼날 합성(주)의 XSR-10 grade vinylester 수지를 사용하였으며, XSR-10 grade는 vinylester 말단에 CTBN rubber가 결합된 수지로서 내충격성이 우수한 수지이다. 개시제로서는 Kanto Chemical의 Benzoyl peroxide(BPO)를 사용하였으며, 3차원 망상구조의 형성을 위해 경화제로서 Kanto Chemical의 Diallyl phthalate(DAP)를 사용하였다. 사용된 접착제는 B.F. Goodrich의 A 1423 B1 및 B2로서, B1은 aliphatic 에폭시계 수지이며, B2는 경화제인 liquid polyamine이었다. 접착제 A1423 B1 및 B2의 물리적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Physical Properties of Two-Part Epoxy Adhesives

	A-1423-B1	A-1423-B2
Base	Aliphatic type epoxy	Aliphatic amine type curing agent
color	Black	Tan
Specific gravity	1.19	1.18
Pot life(at 75°F)	4 hrs.	4 hrs.
Shelf life(at 75°F)	1 yr.	1 yr.

2-2. 복합재료의 제조

Hybrid Fabric, Vinylester, DAP, 그리고 BPO를 무게비로 각각 200, 100, 20, 1.2 part가 되도록 한 다음, vinylester, DAP, 그리고 BPO를 혼합하여

프리프레그를 제조하였다. BPO는 아세톤에 녹여 매트릭스 수지에 첨가하여 수지의 점도를 조절하였다. 제조된 매트릭스 용액을 로울러를 사용하여 직물에 도포시킨 후, 2일 정도 상온에서 건조시켰다. 제조된 프리프레그를 90° 적층 순서로 impact의 경우 3 ply, lap shear의 경우 12 ply 적층한 다음 경화시켰다. 경화 cycle은 Fig.1에 나타내었다.

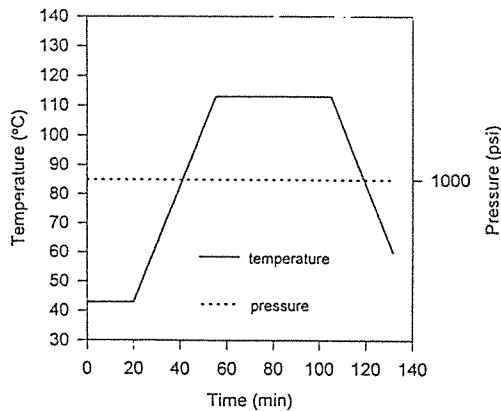


Fig.1. The curing cycle of vinyl ester resin.

2-3. 분석 및 평가

2-3-1. 기계적 물성 평가

접착제를 제조된 복합재료와 세라믹 복합재료에 도입하여 접착을 행하였다. 접착제 경화시 경화 온도, 표면 조도, 플라즈마 처리시간, 접착층 두께의 변화를 고려하였다. 각 변수의 종류 및 실험 조건을 Table 2에 나타내었다. B1과 B2를 무게비로 1.1 : 1로 정량한 다음, 점도를 낮추기 위해 50°C의 건조 오븐에 20분간 방치하였다. B1과 B2를 혼합한 후, 25°C, 25 torr로 유지되는 진공 오븐에서 약 20분간 기포를 제거한 다음 경화 반응을 행하였다. 접착제와 접착물 사이의 계면 접착력을 알아보기 위하여 standard testing method로 double lap shear joint를 사용하여 실험을 행하였다. ASTM D 3528-76에 의거하여 시편의 크기는 복합재료와 세라믹 모두 11.43cm×2.54cm로 하였고, 시편의 두께는 복합재료의 경우 0.64cm, 세라믹의 경우 0.85cm였다. United Calibration Corp.의 Universal Testing Machine(UTM)을 사용하였고, crosshead

Table 2. Experimental Conditions for Ceramic/FRP Hybrid Composites

Adhesive thickness(mm)	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3
Plasma treatment time(min)	0.50	0.75	1.00	3.00	5.00
Surface roughness(mm)	0.05	0.15	0.23	0.34	0.51
Curing temperature(°C)	25	40	55	70	

speed는 1.3mm/min이었으며, load cell 용량은 4.5 ton이었다. 내충격성 측정은 Servo-controlled hydraulic ram method를 사용하였는데, 측정에 사용된 기기는 Rheometric사의 RIT-4 high rate impact tester였다. 전면제로 15cm×15cm×0.2cm의 실리카 세라믹을 사용하였으며, 후면제로는 15cm×15cm×0.14cm의 복합재료를 사용하였다. 이때 probe diameter는 1.59cm였으며, impact speed는 7.0m/sec, 사용된 load cell의 용량은 5000 lb였다. Fig.2는 high rate impact tester의 개략적인 그림이다.

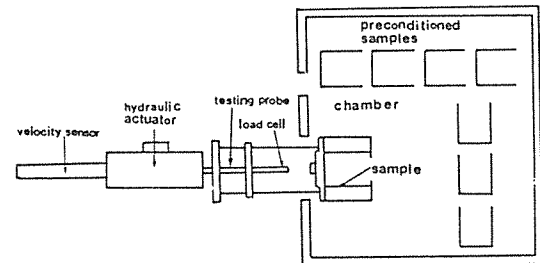


Fig.2. The scheme of high rate impact tester.

3. 결과 및 고찰

3-1. Lap Shear Test

Lap shear joint의 경우 응력은 접합면을 따라 균일하게 존재하지 않으며, 부착물의 differential strain과 bending으로 인해 접치는 끝 부위에 응력이 집중하게 된다. 일반적으로 접착제는 전단 응력을 받아서 변형이 일어나며, 가해진 하중은 부착물을 통하여 끝으로 전달되고, 접치는 끝 부위에서 전단 응력이 최대가 되어 이 지점에서 파괴가 일어나게

된다. 접합의 강도는 접침이 짧을 경우, 부착물이 두꺼울 경우, 그리고 접착층의 두께가 두꺼울 경우 증가하며, double lap의 경우가 single lap의 경우보다 약 2.8 배 더 높으므로 같은 규격에서는 symmetrical double lap이 유리하다[4~7].

Fig.3은 접착층의 두께를 1.3mm, 경화 온도는 25°C로 고정하였을 때 표면의 조도에 따르는 세라믹/FRP 이중 복합재료의 lap shear strength를 나타내었다. 표면 조도의 증가에 따라 FRP/접착제, 세라믹/접착제의 계면 접착강도는 증가하였으며, 0.23 μ m의 조도에서 최대의 접착 강도를 나타내고, 조도가 계속 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 추세를 나타내었다. 표면 조도가 증가할수록 mechanical interlocking 현상으로 인해 서로 상이한 탄성율을 가진 접착제와 부착물 사이의 응력 전달이 용이하게 일어나고, 부착물과 접착제 사이의 결합면적이 증가하여 결합의 세기가 높아지게 된다[8~9]. 또한 기계적 마모는 부착물 표면의 저분자 물질로 인한 약한 경계층을 제거하여 젖음성을 향상시킨다. 기계적 마모로 인해 부착물 위에 존재하는 미세 섬유들은 섬유 끝에 높은 응력을 집중시켜 초기에 파괴는 섬유 끝 부분에서 일어나며, 점차 접착층 내부로 이동한다. 이러한 과정에 의해 접착층의 더 큰 부피가 파괴동안 변형을 하여 응력 분배가 일어나며, 이에 따라 계면 접착 강도는 증

가한다. 그러나 0.23 μ m 이상의 조도를 가질 경우, 마모에 의해 복합재료 표면에 미세 섬유가 지나치게 많이 생겨나며, 이것은 섬유 자체의 물성을 저하시킬 뿐 아니라, 접착제와의 결합시 기포를 제공하여 interfacial flaw로 작용하여 강도가 점진적으로 감소하게 되는 것으로 여겨진다.

Fig.4는 표면 조도를 0.23 μ m, 경화 온도는 25°C로 고정하였을 때, 접착층의 두께에 따른 세라믹/FRP 이중 복합재료의 lap shear strength를 나타내고 있다. 접착층의 두께가 증가할수록 강도는 증가하였고, 두께가 1.3mm에서 최대값을 보였으며, 이 후의 두께에서는 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 접착층의 두께가 증가할수록 접착층 끝에 작용하는 최대 전단응력을 접착층 내부에서 흡수하여 실제 접착제층에 작용하는 응력은 감소하고 이에 따라 강도는 증가한다. 그러나, 접착층의 두께가 1.3mm 이상이 되면 잔류 응력의 증가로 인하여 파괴가 시작되는 flaw가 생성될 확률이 더 높아지므로 접착 강도는 감소하게 된다. 실제 접착제의 두께 증가에 따라 더 많은 flaw가 생성되는데, 이는 접착제의 수축으로 인한 변형의 증가와 크랙의 생성 때문이다. 보통이 변형은 접합의 자발적인 파괴를 일으키기에 충분히 높으며, 크랙 억제는 변형의 분배를 통해 가능하다.

Fig.5는 접착층 두께를 1.3mm, 표면 조도는

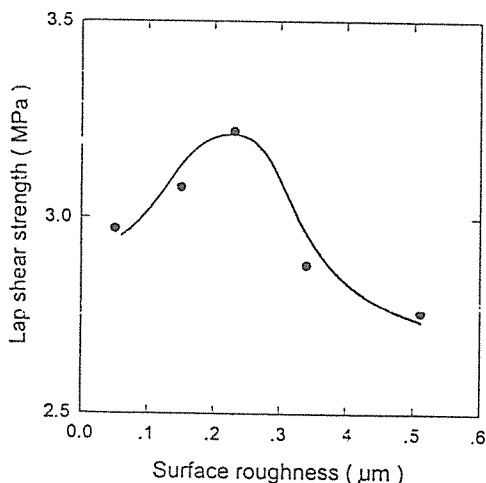


Fig. 3. The effect of surface roughness on lap shear strength at curing temperature 25°C, adhesive thickness 1.3mm.

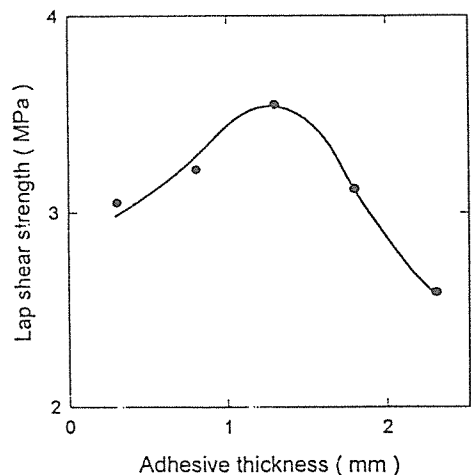


Fig. 4. The effect of adhesive thickness on lap shear strength at curing temperature 25°C, surface roughness 0.23 μ m.

0.23 μ m로 고정하였을 경우, 경화 온도에 따른 세라믹/FRP 이중 복합재료의 lap shear strength를 나타내고 있다. 40 $^{\circ}$ C에서 최대값을 나타내며, 55 $^{\circ}$ C, 70 $^{\circ}$ C로 경화 온도가 증가할수록 점진적으로 강도는 감소하였다. 접착제와 부착물의 서로 다른 열팽창 계수로 인해 냉각시 상당한 응력과 열적 변형이 계면에 도입될 수 있으며, 또한 접착제의 수축으로 인해 접착층내에 잔류 응력이 남아있게 된다.

25 $^{\circ}$ C와 40 $^{\circ}$ C에서의 강도 차이는 접착제의 점도의 관련이 있을 것으로 생각된다. 동일한 표면 조도에 대해 상대적으로 점도가 낮은 경우는 표면의 형태에 맞게 쉽게 확산이 가능하여 강한 계면을 형성할 수 있다. 반면에 점도가 높은 경우는 표면에 굴곡이 있더라도 확산의 어려움으로 인해 강한 계면을 형성할 수 없을 뿐 아니라, 계면에 기포를 형성하여 interfacial flaw로 작용하여 접착 강도가 감소하게 된다. 55 $^{\circ}$ C와 70 $^{\circ}$ C의 경우는 높은 점도로 인해 확산이 용이하지만, 경화 후 상온과의 큰 온도 차이로 인해 냉각 과정에서 심한 수축이 발생하여 접착층내에 잔류 응력이 증가하게 되며, 접착제와 부착물의 다른 열팽창계수로 인해 냉각시 상당한 응력과 열적 변형이 계면에 도입되어 접착강도는 감소한다.

Fig. 6은 접착층 두께를 1.3mm, 경화 온도는 25 $^{\circ}$ C로 고정하였을 때, 플라즈마 처리 시간에 따른 세라믹/FRP 이중 복합재료의 lap shear strength를

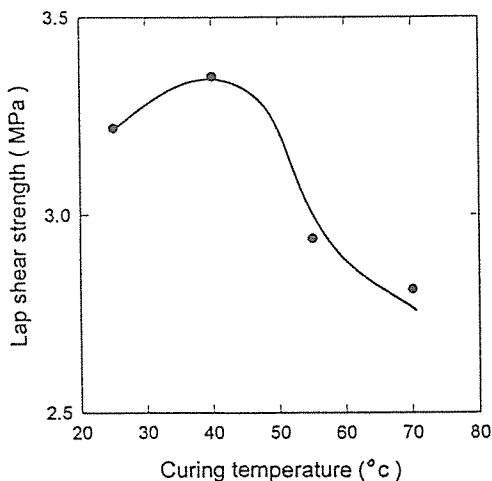


Fig. 5. The effect of curing temperature on lap shear strength at adhesive thickness 1.3 mm, surface roughness 0.23 μ m.

나타내었다. 플라즈마 처리 시간이 증가할수록 계면 접착력이 증가하였으며, 0.75분의 처리 시간에서 최대의 강도를 나타내었으며, 처리 시간이 계속적으로 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 추세를 나타내었다. 복합재료 표면의 vinylester 수지에 산소 플라즈마 처리를 할 경우 극성 관능기인 hydroxyl, carboxyl, carbonyl기 등이 생겨날 것으로 여겨진다[10~12]. 플라즈마 처리 시간에 따라 새롭게 형성된 hydroxyl기와 carboxyl기가 접착제의 epoxy ring 또는 -OH기와 공유 결합을 형성하여 미처리 시보다 높은 계면 접착력을 나타내는 것으로 생각된다. 또한 플라즈마 처리로 인해 복합재료 표면의 roughness도 변화하며, 일반적으로 표면 조도는 처리 시간에 따라 증가하다가 감소하는 형태를 나타내며, 새롭게 형성된 관능기의 농도는 처리 시간에 따라 증가하다가 일정하게 된다. 따라서 도입된 관능기와 표면 조도의 증가에 의해 계면 접착 강도는 증가하게 된다. 그러나 플라즈마 처리 시간이 0.75분을 지날 경우, 플라즈마 처리로 인한 관능기와 표면 조도의 효과 보다는 복합재료 표면의 손상으로 인한 물성 감소가 더 큰 요인으로 작용하여 강도의 감소가 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 접착층의 두께를 1.3mm, 표면 조도를 0.23 μ m, 그리고 경화 온도를 25 $^{\circ}$ C로 유지하였을 경우, 플라즈마 처리 시간에 따른 세라믹/FRP 이

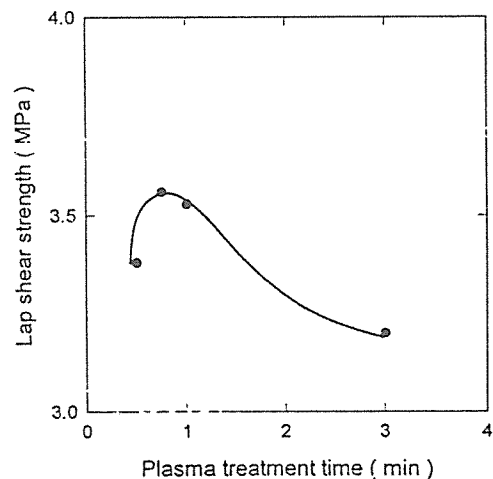


Fig. 6. The effect of plasma treatment time on lap shear strength at curing temperature 25 $^{\circ}$ C, adhesive thickness 1.3mm.

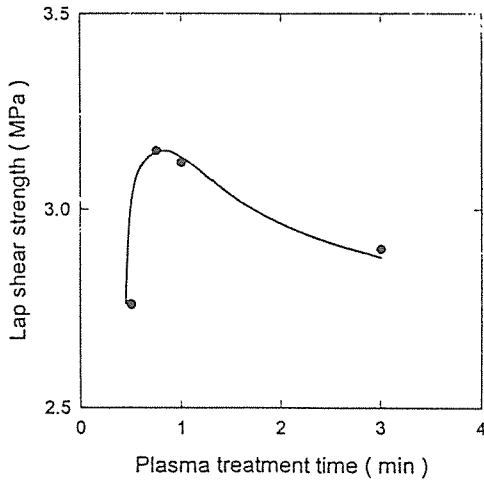


Fig. 7. The effect of plasma treatment time on lap shear strength at curing temperature 25°C, adhesive thickness 1.3mm, and surface roughness 0.23 μ m.

중복합재료의 lap shear strength를 나타내었다. 플라즈마 처리 시간에 따라 강도는 증가하였으며, 0.75 분에서 최대를 나타내고 처리 시간이 길어짐에 따라 점진적으로 감소하는 추세를 보였다. 미처리시 강도는 3.22MPa이었으며, 처리 시간이 짧은 경우에는 미처리시보다 낮은 강도를 나타내었다. 이는 플라즈마 처리 시간이 짧은 경우 관능기의 도입 효과는 상당히 작고 오히려 플라즈마 처리에 따라 이미 형성된 표면의 조도가 감소하여 강도의 감소를 나타내는 것으로 사료된다. 0.75분의 처리 시간에서는 표면 조도의 효과 보다는 관능기의 유도가 우세하여 최대값을 보여주며, 그 이후의 처리 시간에서는 복합재료의 물성 감소가 더 큰 요인으로 작용하여 점진적으로 강도가 감소하는 것으로 여겨진다. 일반적 플라즈마 에칭 방법으로 복합재료의 표면을 개질화할 경우 일정시간까지는 표면에 관능기가 효과적으로 도입되면서 micro pitting이 생겨나지만, 처리시간이 증가할수록 표면은 다시 smoothing 현상으로 인해 mechanical interlocking에 의한 역할을 잃게 되는 경우가 많이 있다. 특히 FRP 복합재료의 표면에 조도를 준 경우에는 이와 같은 영향이 더 크게 나타나게 된다.

3-2. Impact Test

충격에 의한 물질의 대응은 세가지 단계로 이루어져 있으며, 이는 충격으로 인한 표면 압력, 표면 압력에 의한 내부 응력, 그리고 충격을 받는 물체의 파괴이다. 충격 대응과 파괴는 섬유와 매트릭스의 성질, 섬유 배향, 적층 순서, 물체의 두께에 의해 영향을 받는다. 충격 손상 영역을 최소화하기 위해 고강도, 저탄성율의 매트릭스가 사용되어야 하며, 섬유의 배향은 bidirectional layup 일때가 가장 좋은 충격성을 나타낸다[13]. 충격 에너지를 흡수하는 기구는 fiber breakage, fiber pullout과 delamination, 그리고 debonding의 세가지 과정이며, 충격시 가해지는 하중을 보다 넓은 영역에서의 변형을 통해 흡수한다면 내충격성은 증가하게 된다. 따라서 계면 결합력이 강할 경우는 좁은 영역에서 파괴가 일어나며 그로 인해 충격 에너지의 흡수는 작아지며, 반대로 약한 계면 결합력의 경우는 보다 넓은 영역에서 변형이 일어나서 충격 흡수 에너지는 증가하게 된다.

Table 3은 25°C, 1.3mm의 접착제 두께로 제조된 Ceramic/FRP 이중 복합재료의 Ceramic/Adhesive 층의 표면조도에 따른 충격 에너지 변화를 나타내고 있다. 이중 복합재료의 표면 조도에 따른 접착강도는 lap shear strength로 고찰해 볼 때 0.23 μ m의 표면 조도에서 가장 높은 값을 나타내었으며 그 이상에서는 감소하였다. 그러나 Ceramic/Adhesive 층의 충격에너지 측면에서는 표면조도가 0.15 μ m 일때 최대값을 나타내고 있으며, 접착강도가 가장 좋은 0.23 μ m의 표면 조도에서는 최대값의 83.6% 정도로 낮은 충격에너지를 제시하고 있다. 이는 계면 결합력의 영향 때문이며, 계면 결합력이 좋은 0.23 μ m의 경우 충격시 가해지는 에너지를 쉽게

Table 3. The Effect of Surface Roughness for Ceramic/Adhesive Absorption Energy at Curing Temperature 25°C. Adhesive Thickness 1.3mm.

Surface Roughness(μ m)	Absorption Energy(J)
0.05	1.33
0.15	1.34
0.23	1.12
0.34	1.33
0.51	1.23

접착제층으로 전달하여 충격 흡수에너지는 상당히 적게 된다. 그러나, 계면 결합력이 좋지 않은 0.15 μm 의 경우 계면에 가해지는 전단 응력으로 인해 넓은 영역에 걸쳐 계면이 분리되며 이러한 계면분리(debonding) 시에 많은 충격에너지가 흡수된다.

Table 4는 25°C, 표면 조도 0.23 μm 인 Ceramic/FRP 이중 복합재료의 접착제층 두께에 따른 Ceramic/Adhesive 층의 충격 흡수에너지의 변화를 나타내고 있다. Ceramic/FRP 이중 복합재료의 접착제층 두께에 따른 접착강도는 1.3mm에서 최대값을 나타내고 증가할수록 감소하는 추세를 보여주는 반면, Ceramic/Adhesive 층의 충격에너지 흡수의 경우 접착 강도가 가장 좋은 1.3mm에서 가장 낮은 값을 나타낸다. 이는 접착층의 두께에 따르는 효과와 계면 강도의 효과를 동시에 고려하여야 한다. 먼저, 접착층의 두께는 파괴가 시작되는 지점에 영향을 미치며, 얇은 두께의 경우 손상 영역은 충격을 받는 부분의 반대 면에서 시작되며 이는 plate bending stress의 영향 때문이다. 두께가 증가할수록 plate bending stress는 작아지고, 손상 영역은 가해지는 국부적 응력 때문에 표면 근처에서 일어난다. 이 두가지 효과 때문에 두께의 증가에 따라 충격 강도는 증가하다가 다시 감소하는 현상을 보인다. 또한 계면 강도의 영향은 앞서 기술한 바와 같이 계면 결합력이 좋지 않을 경우 계면의 분리로 인하여 보다 많은 에너지가 흡수된다. 그러므로 본 실험에서는 이 두가지 효과로 인해 계면 결합력이 좋은 1.3mm에서 가장 낮은 충격 흡수энер지를 나타내며, 이는 충격을 가하는 물질이 세라믹 표면에서부터 접착제층으로 통과시 충격 에너지의 많은 부분을 접착층에 의해 분산시키게 되는데 이때 충격

Table 4. The Effect of Adhesive Thickness for Ceramic/Adhesive Absorption Energy at Curing Temperature 25°C. Surface Roughness 0.23 μm .

Adhesive Thickness(μm)	Absorption Energy(J)
0.3	1.24
0.8	1.18
1.3	1.12
1.8	1.41
2.3	2.55

흡수는 접착 강도 보다는 접착층의 두께에 의존한다고 볼 수 있다.

Ceramic/Adhesive 층의 흡수 에너지는 접착제층의 역할을 주된 변수로 본 실험결과로서 최대 흡수 에너지는 접착층의 두께와 접착강도에 따라 최적 조건에 의해 결정됨을 알 수 있다.

Table 5는 두께 1.3mm, 표면 조도 0.23 μm 인 Ceramic/FRP 이중 복합재료의 경화 온도에 따르는 Ceramic/Adhesive 층의 충격 흡수에너지 변화를 나타내고 있다. 경화 온도에 따른 접착 강도는 40°C에서 최대가 되는 반면, 충격에너지 흡수의 경우는 접착 강도가 좋지 않은 70°C에서 최대값을 보인다. 접착층의 두께는 일정하므로 계면간의 접착 강도가 중요 변수이며, 계면 결합력이 좋을 경우 충격시 가해지는 에너지를 쉽게 접착제층으로 전달하여 계면 부분에서 흡수되는 에너지는 상당히 적게 된다. 그러나, 접착 강도가 작을 경우는 계면에 작용하는 전단 응력으로 인해 에너지 분산(splitting)이 일어나 충격 에너지가 흡수되며, 이러한 에너지 분산은 크랙의 응력 집중을 줄여 크랙을 무디게 하는 작용을 한다. 즉, 계면 결합력이 작은 경우 분산 현상으로 인한 계면간의 분리시에 보다 많은 에너지가 흡수된다.

Table 5. The Effect of Curing Temperature for Ceramic/Adhesive Absorption Energy at Adhesive Thickness 1.3mm, Surface Roughness 0.23 μm .

Curing Temperature(°C)	Absorption Energy(J)
25	1.12
40	1.29
55	1.90
70	1.82

Table 6은 두께 1.3mm, 경화 온도 25°C인 Ceramic/FRP 이중 복합재료의 플라즈마 처리 시간에 따르는 Ceramic/Adhesive 층의 흡수 에너지는 변화를 나타내고 있다. 처리 시간에 따르는 접착 강도는 0.75분에서 최대가 되지만, 충격 흡수에너지는 상대적으로 접착 강도가 좋지 않은 3분에서 최대값을 나타낸다. 충격 에너지 흡수에 가장 큰 기여를 하는 접착층의 두께가 일정하므로 계면간의 결합

Table 6. The Effect of Plasma Treatment Time for Ceramic/Adhesive Absorption Energy at Curing Temperature 25°C, Adhesive Thickness 1.3mm

Plasma Treatment Time(min)	Absorption Energy(J)
0.50	1.24
0.75	1.65
1.00	1.74
3.00	1.89

력에 의해 충격에너지의 흡수 정도가 결정된다. 복합재료의 경우는 섬유와 매트릭스의 계면에서 일어나는 fiber pullout으로 인한 delamination에 의해 대부분의 충격 에너지가 흡수되지만, 취성 소재의 경우는 계면간의 분리에 의해 많은 충격 에너지가 흡수된다. 충격 에너지의 흡수는 계면이 분리될 때, 그리고 분리로 인해 계면에서의 마찰을 흡수할 때 일어난다. 계면간의 결합력이 좋지 않을 경우 분산 현상으로 인해 에너지가 흡수되며, 계면에서의 분리와 계면 분리로 인한 마찰력 흡수로 인해 충격에너지의 흡수는 증가한다.

Table 7은 두께 1.3mm, 표면 조도 0.23 μ m, 그리고 경화 온도 25°C인 Ceramic/FRP 이중 복합 재료의 플라즈마 처리 시간에 따르는 Ceramic/Adhesive 층의 충격 흡수에너지는 변화를 나타내고 있다. 처리 시간에 따르는 접착 강도는 0.75분에서 최대이지만, 충격에너지 흡수의 경우는 1분에서 최대값을 나타낸다. 마찬가지로 계면간의 분리에 의해 흡수 에너지의 증가가 일어나며 계면간의 접착 강도가 좋지 않을 경우, 에너지 분산이 크랙의 응력 집중을 저하시키는 동시에 계면 분리에 의해 흡수 에너지의 증가가 일어난다.

Table 7. The Effect of Plasma Treatment Time for Ceramic/Adhesive Absorption Energy at Curing Temperature 25°C, Adhesive Thickness 1.3mm, and Surface Roughness 0.23 μ m.

Plasma Treatment Time(min)	Absorption Energy(J)
0.50	1.21
0.75	1.30
1.00	1.71
3.00	1.65

4. 결 론

세라믹/FRP 이중 복합재료의 접착특성을 증진 시킬 목적으로 Alumina와 고강도 폴리에틸렌 섬유-아라미드 섬유 복합재료의 이중 복합재료를 에폭시 접착제를 이용하여 제조하였으며, 이중 복합 재료의 계면 접착력과 충격 흡수에너지에 영향을 주는 표면 조도, 접착층의 두께, 플라즈마 처리 시간, 그리고 경화 온도의 변화에 따른 lap shear test, impact test를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Lap shear test의 결과 표면 조도, 접착층의 두께, 플라즈마 처리 시간, 그리고 경화 온도가 Ceramic/FRP의 계면 접착력에 영향을 미쳤으며, 표면 조도의 경우는 0.23 μ m일때, 접착층의 두께는 1.3mm, 그리고 경화 온도는 40°C일때가 가장 좋은 결합 강도를 나타내었다. 플라즈마 처리의 경우는 0.75분에서 최대의 결합 강도를 나타내었다.

2. Impact test의 결과 Ceramic/Adhesive층의 충격 흡수에너지는 계면간의 결합력 보다는 접착 층의 두께에 더 큰 영향을 받으며, 최대 충격 흡수에너지는 접착제층과 계면 강도에 따라 최적 조건에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. Morton, *Structural Impact and Crashworthiness*, Vol.2, Elsevier Applied Science Publishers, New York(1984).
2. N.L. Hancox, *Fibre Composite Hybrid Materials*, Applied Science Publishers Ltd., London(1981).
3. 육종일, 이승구, 강태진, "이중 복합재의 정적 물성 및 동적물성 연구(I)", 국방과학 연구소(1994).
4. Souheng Wu, *Polymer Interface and Adhesion*, Marcel Dekker, Inc., New York(1982).
5. N.A. De Bruyne and R. Houwink, *Adhesion and Adhesives*, Elsevier Publishing Company, New York(1951).

6. R. Houwink and G. Salomon, *Adhesion and Adhesives*, Vol.2, Elsevier Publishing Company, New York(1967).
 7. D.D. Eley, *Adhesion*, Elsevier Publishing Co. Ltd, New York(1970).
 8. S.R. Hartshorn, *Structural Adhesive*, Plenum Press, New York(1986).
 9. A.J. Kinloch, *Adhesion and Adhesives*, Chapman and hall Ltd, London(1987).
 10. Su San B. Bentjen, David A. Nelson, Barbara J. Tarasevich. and Peter C.Rieke.. *J. Appl., Polym, Sci.*, 44, 965(1992).
 11. Chee Chan Wang and Ging Ho Hsiue, *J. Polym, Sci.*, 31, 1307(1993).
 12. Sellitti, J.L. Koenig, and H. Ishida, *Interfaces in Polymer, Ceramic, and Metal Matrix Composites*, Elsevier Science Publishing Co., Inc. (1988).
 13. Jonas A. Zukas, Theodore Nicholas, Hallock F. Swift, Longin B. Greszczuk, and Donald R. Curran, *Impact Dynamics*, John Wiley and Sons, New York(1982).
-