

Suha ORAL

Y.Doç.Dr.
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
ANKARA

Bilgin KAFTANOĞLU

Prof.Dr.
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
ANKARA

Bileşik Malzemelerin Endüstriyel Kullanımı

Bu çalışmada fiber takviyeli bileşik malzemelerin katkı maddeleri olan fiber ve matris malzemeleri sınıflandırılarak kısaca tanıtılmakta ve bileşik malzemelerin yapı ve makina mühendisliğindeki uygulamalarına ait örnekler verilmektedir.

GİRİŞ

Bileşik malzemeler iki veya daha fazla katkı maddesinin, herbirinin istenilen özellikleri ön plana çıkartılarak, bir arada kullanılmasıyla elde edilen optimum malzeme formlarıdır. Bileşik malzemelerin en önemli özellikleri katılık/ağırlık oranlarının konvansiyonel malzemelere göre yüksek olması ve değişik yönlerde değişik dayanımlara sahip olacak şekilde tasarlanabilmeleridir.

İkinci Dünya Savaşı sırasında endüstriyel uygulama alanı bulan ve gemi gövdelerinde kullanılan bileşik malzemeler, günümüzde gemi, uçak, roket ve uzay araçlarının gövdelerinde, otomotiv endüstrisinde, elektronikte, takım tezgahlarında ve spor eşyalarında geniş çapta kullanılmaktadır [1-7]. Malzeme teknolojisindeki gelişmelerin bileşik malzemelerin maliyetini düşüreceği ve bu malzemelerin kullanımını daha da yaygınlaştıracığı açıktır. Bileşik malzemeler, sadece yüksek katılık/ağırlık oranına sahip olmalarından dolayı değil, aynı zamanda paslanma ve çürümeye karşı dayanıklı olmaları, çok iyi bir şekilde ses, ısı ve titreşim izolasyonu sağlamaları, yorulma ömürlerinin uzun olması ve yapısal sönümlerinin metalik malzemelere göre çok daha yüksek olması gibi nedenlerden dolayı da kullanılmaktadırlar.

Bir bileşik malzeme genellikle bir sürekli ortam ile bu ortam içerisinde yer alan bir veya birkaç çeşit takviye maddesinden oluşur. Bu çalışmada, sürekli ortam matris olarak anılacaktır. Takviye maddeleri parçacık veya fiber şeklinde olabilir. Parçacıklar genellikle matrisin işlenebilirliğini, katılığını, yüzey sertliğini, yüksek sıcaklıklara dayanımını arttırmak veya ısı ve elektrik iletkenliği özelliklerini değiştirmek amacıyla kullanılırlar. Bu fonksiyonların bir veya birkaçına ek olarak yüksek katılık/ağırlık oranlarına ihtiyaç duyulması halinde ve yöne bağımlı dayanım özelliğinin büyük önem taşıdığı minimum ağırlık

tasarımlarında ise fiber şeklinde takviye maddesi kullanmak gerekir.

Bu çalışmada bileşik malzemelerin taşıyıcı eleman olarak önemine ağırlık verilmiş ve dolayısıyla fiber-matris tipindeki bileşik malzemeler ve bu malzemelerin katkı maddeleri incelenmiştir. Fakat, parçacıklı bileşik malzemelerin yüksek hızlı kesici uçlarda, sıcaklık ölçme cihazlarında, ısı izolasyonunda, elektrik cihazlarında ve daha birçok uygulamada geniş çapta kullanıldıklarını ve mühendislik malzemeleri arasında çok önemli bir yer tuttıklarını belirtmek gerekir.

BİLEŞİK MALZEMELERDE MATRİSİN FONKSİYONLARI VE MATRİS MALZEMELERİ

Matris fiberleri birbirine bağlar ve fiberlerin istenilen yönde yerleştirilmelerini sağlar. Bileşik malzemeye etki eden dış yükler matris vasıtasıyla fiberlere iletilir. Matris aynı zamanda fiberleri birbirinden ayrı tutarak bir fiberde oluşan çatlağın diğer fiberlere yayılmasını önler. Fiberleri dış etkilere karşı koruyan ortam da matristir. Matris bileşik malzemenin tokluğunu da tayin eder.

Günümüzde matris olarak çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bir matris maddesi polyesterdir. Polyester bir termoset malzeme olup cam fiberler ile birlikte kullanılır. Diğer matris malzemelerine göre daha ucuz olan polyester 100°C sıcaklığın altında oldukça iyi mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptir, fakat ısı işlem sırasındaki çekme payı fazla olup fiberlerde burkulmaya neden olur.

Matris malzemeleri arasında en yaygın olanı epoksidir. Bir termoset malzeme olan epoksi her

rürlü mekanik ve ısıl işleme son derece uygun olup ısıl işlem sırasında çekme payı polyestere göre çok azdır. Birçok fiber çeşidi ile kuvvetli bir bağ sağlayan epoksinin kimyasal direnci de yüksektir.

Matris dayanımının yüksek olmasının gerektiği durumlarda metalik malzemeler de matris olarak kullanılabilir. Metal matrislerin tokluğu ve sıcaklığa dayanımında organik matrislerden fazladır. Metal matrislerin kullanımını sınırlayan en önemli etken, bu matrisler ile uyum sağlayabilecek fiber malzemelerinin azlığıdır. Bunlardan biri olan boron, en pahalı fiber malzemesi olmasından dolayı endüstride çok sınırlı bir şekilde kullanılabilir. En çok kullanılan metal matrisler 2024 veya 6061 alüminyumdur. Bir boron-alüminyum bileşik malzemenin 300°C civarındaki mekanik özellikleri, oda sıcaklığındaki özellikleri ile hemen hemen aynıdır. Karbon fiberleri de önceden nikel veya gümüş ile kaplanmak suretiyle alüminyum matris içerisinde kullanılabilirler.

Yüksek sıcaklığa dayanıklı matris malzemeleri arasında en çok kullanılanlar polimid, fenolik, silikon ve seramiklerdir. Polimid rezinler, 150-300°C arasında kullanılabilir. Üretimleri işlem kontrolünün hassas olmasından dolayı zordur. Fenolik rezinler asbest fiberler ile kullanıldığında geçici olarak 1000°C'nin üstündeki sıcaklıklara dayanabilir. Su ve oksidasyona çok dayanıklı olan silikon rezinler ise 250°C sıcaklıkta uzun süre kullanılabilir. Al₂O₃ fiberleri ile birlikte kullanılan SiC veya Si₃N₄ seramik matrisler 1300°C sıcaklığa dayanabilir. Çok özel uygulamalarda ise karbon matris içerisinde karbon fiber kullanılarak 4000°C sıcaklığa dayanabilen bileşik malzemeler elde edilmektedir.

BİLEŞİK MALZEMELERDE FİBERİN FONKSİYONLARI VE FİBER MALZEMELERİ

Fiberler, bileşik malzemelerin yük taşıyıcı elemanları olup, malzemenin yüksek katılık/ağırlık oranına sahip olmasını sağlayan ve elastik modüllerini asıl tayin eden bileşenleridir. modern uygulamada kullanılan fiberlerin başlıcaları, cam, karbon, boron, aramid ve seramiktir.

Cam fiberler, üretimlerinin kolay ve ucuz olması dolayısıyla halen en çok kullanılan fiber tipidir. Başlıca beş çeşit cam fiber vardır. Bunlardan E-cam ve S-cam olarak anılanlar takviye maddesi olarak kullanılırlar. S-cam'ın dayanımı ve elastik modülü daha yüksektir. C, D ve M-cam olarak bilinen diğer türler ise özel uygulamalarda kullanılırlar. C-cam'ın kimyasal direnci, M-cam'ın ise elastik modülü diğerlerine oranla oldukça yüksektir. D-cam ise çok düşük bir dielektrik sabite sahiptir.

Karbon fiberler, düşük özgül ağırlıkları ve yüksek elastik modülleri ile takviye maddeleri arasında çok önemli bir yer sahiptir. Karbon fiberlerin mekanik özellikleri üretildikleri sıcaklığa bağlı olarak değişir. 1500°C civarında üretilen karbon fiberlerin dayanımı, 2000°C'de üretilenlerin ise, elastik modülü yüksek olur. Elastik modülü yüksek olan tür, grafit fiber olarak da adlandırılır. Karbon fiberler hem termoset hem de termoplastik matrislerde kullanı-

labilir. Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi alüminyum ve karbon matrisler içerisinde karbon fiber kullanılan uygulamalar da mevcuttur.

Boron fiberler çekme ve basmaya karşı çok dayanıklı olup, yüksek elastik modüle sahiptirler. Her ne kadar çeşitli matrislerle uyum sağlamaktaysalar da günümüzdeki uygulama boron fiberleri genellikle alüminyum matris içinde kullanmak yolundadır. Maliyetin çok yüksek olması boron fiberlerin yaygın olarak kullanımını önlemektedir. Halen uzay mekiğinde ve bazı savaş uçaklarında boron-alüminyum kullanılmaktadır.

Aramid fiberler çekmeye karşı dayanıklı, basmaya karşı ise zayıftır. Bu türün en iyi bilinen örnekleri Kevlar 29 ve Kevlar 49 fiberleridir. Cam fiberlerden daha hafif ve katı olan aramid fiberlerin maliyeti karbon ve boron fiberlerden daha azdır. Bu durum aramid fiberlerin uygulama alanını arttırmaktadır.

Seramik fiberler ise yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılmaktadırlar. Bu tür fiberler 1000°C sıcaklıkta mekanik özelliklerini büyük ölçüde korumaktadırlar.

Çeşitli fiber malzemelerinin özellikleri, Çizelge 1'de karşılaştırılmaktadır [8].

Çizelge 1 Fiber malzemelerinin özellikleri

	Dayanım (GPa)	Elastik Modül (GPa)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Kırılma Birim Şekil Değiştirme Yüzdesi (%)
E-cam	3.50	73	2.54	4.5
S-cam	4.65	86	2.49	5.3
C-cam	2.80	70	2.49	4.0
D-cam	2.45	52	2.16	4.5
M-cam	3.50	111	2.89	3.1
Karbon	2.70	270	1.80	0.8
Grafit	2.00	400	1.95	0.5
Boron	3.00	370	2.70	1.0
Kevlar 29	2.60	62	1.44	4.2
Kevlar 49	2.70	130	1.45	2.0

TABAKALI FİBER-MATRİS BİLEŞİK MALZEMELERİN UYGULAMALARINA AİT ÖRNEKLER

Fiber-matris bileşik malzemeler, minimum ağırlıkta yapılar tasarlanabilmesi imkanı sağladıkları için, yapısal açıdan bileşik malzemelerin en önemli grubunu oluştururlar. Minimum ağırlık, yapıdaki gerilme dağılımına göre değişik bölgelerde gerektiği kadar tabaka ve her tabakada uygun fiber açılımları kullanmak suretiyle sağlanır. Bir ileri aşama ise, optimum ağırlık tasarımlarıdır. Bu yaklaşımda ağırlığın azaltılmasının yanı sıra malzeme performansının da yükseltilmesine çalışılır ve optimum çözüm melez bileşik malzemeler kullanılarak sağlanır. Bu tür malzemelerde, değişik cinsten fiberler aynı matris içerisinde kullanılır. Örneğin; yüksek elastik modüle sahip fakat kırılma olan karbon fiberleri ile

elastik modülü düşük fakat tokluğu fazla cam fiberlerin bir epoksi matris içerisinde uygun oranlarda ve açılarda kullanılması ile katılık ve darbe dayanımı açısından gerek karbon-epoksi gerekse cam-epoksi'den daha üstün olan bir melez bileşik malzeme elde edilebilir.

Bu açıklamalardan da anlaşılacağı gibi, bileşik malzemelerden maksimum yarar sağlanabilmesi için bu malzemelerin özelliklerini göz önüne alan tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi şarttır.

Günümüzde kullanılan belli başlı izotropik ve bileşik malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2'de gösterilmektedir [8].

Çizelge 2 Bazı metalik ve bileşik malzemelerin özellikleri

	Çizgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastik Modül (GPa)
35 NCD16 Çelik	7.9	1.85	200
ASG(6061)T6 Alüminyum	2.7	0.35	70
AU4G1(2024)T4 Alüminyum	2.8	0.59	73
Boron-Epoksi	2.1	2.00	270
Boron-Alüminyum	2.7	1.25	225
Grafit-Epoksi	1.7	1.00	200
Karbon-Epoksi	1.5	1.30	140
Kevlar-Epoksi	1.35	1.50	80
Cam-Epoksi	2.2	1.09	39

Bileşik malzemelerin en geniş kullanım alanlarından biri gemi inşa endüstrisidir [1,2]. Cam takviyeli bileşik levhalar, paslanma ve çürümeye karşı çok dayanıklı olduklarından bu endüstrideki alışılmış malzemelerin yerini hızla almaya başlamışlardır. İmalat ve tamir kolaylığı, bağlantı elemanları sayısının çok azalması ve bakım ihtiyacının minimum olması bu malzemelerin tercih edilmesindeki diğer faktörlerdir. Cam takviyeli bileşik malzemeler, manyetik olmadıklarından dolayı özellikle mayın gemilerinin gövdelerinde kullanılmaktadırlar. Çizelge 3'de 1980-1984 yılları arasında çeşitli ülkelerde inşa edilen veya projesi yapılan mayın gemilerinin gövdelerinde kullanılan malzemeler gösterilmektedir [1]. Çizelgeden de görüldüğü gibi, cam takviyeli bileşik malzemeler önceden kullanılan tahtanın yerini almış durumdadır. Yapılan maliyet analizleri, kalıplar için gereken yatırımın, aynı kalıplar kullanılarak dört adet gemi inşa edildiği takdirde ekonomik olacağını göstermiştir. Bu arada, klasik gemi inşa yöntemlerinde çok sayıda kullanılan şablonlara bileşik malzeme kullanılması halinde ihtiyaç olmadığı da belirtilmelidir.

Karbon fiberli bileşik malzemelerin en büyük uygulama alanı ise, havacılık endüstrisidir. Önceleri giriş panelleri, hız frenleri ve kuyruk parçalarında kullanılan karbon-epoksi bugün gövde, kanat ve kuyrukta giderek artan bir oranda kullanılmaktadır. Bileşik malzeme miktarı ağırlık oranları F14A, F15, F16 ve F18 savaş uçaklarında sırasıyla % 0.8, % 1.6, % 2.5 ve % 9.5'tir. halen geliştirme safhasında olan AV-8B savaş uçağında ise bu oran % 26.3'e ulaşmıştır. Kar-

Çizelge 3

1980-1984 yılları arasında inşaatı veya projesi yapılan mayın gemilerinde kullanılan gövde malzemeleri. Tahta T, cam takviyeli bileşik levha B, manyetik olmayan çelik ise Ç ile gösterilmektedir

	İnşa Halinde	Proje Halinde
ABD	T	B
Avustralya	B	B
Batı Almanya	T	Ç
Belçika	B	-
Danimarka	-	B
Finlandiya	B	-
Fransa	B	-
Hindistan	-	B
Hollanda	B	-
İngiltere	B	-
İsveç	B	-
İtalya	B	-
Japonya	-	B
Malezya	B	-
Mısır	B	-
Norveç	-	B
Nijerya	B	-
Singapur	-	B
SSCB	?	B

bon-epoksi yapı elemanları, bu uçağın ön gövde, kanat, yatay kuyruk ve dümeninde yer almaktadır. Lear Fan uçağında ise, ağırlığın % 70'ini grafit-epoksi ve Kevlar-epoksi elemanlar teşkil etmektedir. Bileşik malzemelerin kullanımı bu uçağın işletme maliyetini % 50 oranında azaltmıştır [7].

Proje safhasında olan savaş uçaklarında ise, karbon-epoksi ağırlık oranının % 40-65 arasında olacağı, bunun ağırlıkta % 25, maliyette ise, % 5-10 azalma sağlayacağı tahmin edilmektedir.

Kevlar basmaya karşı zayıflığından dolayı birinci derecede önem taşıyan yapı elemanlarında kullanılmamakta bununla beraber iç paneller, giriş kapakçıkları, döşeme, bazı dümen ve gövde parçaları gibi ikinci derece yapı elemanlarında karbon-epoksi'den daha ucuz olduğu için uygulama alanı bulmaktadır.

Bileşik malzemeler, gemi ve uçak endüstrileri dışında otomotiv endüstrisinde ve yüksek hızlı mekanizmaların kullanıldığı makinalarda da metalik malzemelere karşı güçlü bir seçenek oluşturmaktadırlar. Bileşik malzeme kullanımı ile otomobil gövdelerinde % 70'e varan ağırlık tasarrufu sağlandığı [3], doku-ma tezgahlarında ise üretimin % 10 arttığı, mekanizma ömrünün altı kat uzadığı ve gürültünün 3 dB azaltıldığı şeklinde gelişmeler rapor edilmiştir [9]. Özellikle yüksek hızlı mekanizmalarda, matris malzemesinin metallere göre çok daha fazla yapısal sönümlenme özelliği olmasından dolayı, ani manevralar sonucunda oluşan mekanik titreşimler daha kısa sürede sönümlenmekte ve yüksek katılık/ağırlık oranının bir sonucu olarak mekanizma hareketinin hassasiyeti artmaktadır.

INDUSTRIAL USE OF COMPOSITE MATERIALS

In this study, the fiber and matrix materials which are the constituents of fibrous composites are classified and the composite materials applications in structural and mechanical engineering are discussed.

SONUÇ

Bileşik malzemeler özellikle yapı ve makina mühendisliğinin çeşitli uygulamalarında konvansiyonel malzemelere güçlü bir seçenek oluşturmaktadır. Tasarımcılara büyük bir esneklik kazandıran bu malzemelerin verimli bir şekilde kullanılması, uygun çözümlene ve tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Bileşik malzemelerdeki gerilme-şekil değiştirme bağlantılarının karmaşıklığı, kayma şekil değiştirme etkilerinin göz önüne alınmasının gerekliliği, tabaka sayısının ve fiber açılarının tayini ve seçeneklerin fazlalığı, bu malzemelerin kullanıldığı yapılar için sonlu eleman ve optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir.

KAYNAKÇA

- 1 deVaal, L.P., GRP and Other Materials for Use in MCMVS, *Military Technology*, 8 (1984), 130-136.
- 2 Fantacci, G., FRP Used as a Construction Material for Military Craft, *Military Technology*, 8 (1984), 138-142.
- 3 Poesch, J.G., Graphite Fiber Composites for the Automotive Industry, *Composite Materials in the Automobile Industry*, Kulkarni, S.V., Zweben, C.H. ve Pipes R.B., ASME Book HOO115, 1978.
- 4 Evans, P.R., Composite Motor Case Design, AGARD-LS-150, Section 4, 1987.
- 5 Thompson, B.S., Zuccaro, D., Gamache, D. ve Gandhi, M.V., An Experimental and Analytical Study of a Four-Bar Mechanism with Links Fabricated from a Fiber Reinforced Composite Material, *Mech.Mach.T.*, 18 (1983), 165-171.
- 6 Thompson, B.S. ve Sung, C.K., A Variational Formulation for the Dynamic Viscoelastic Finite Element Analysis of Robotic Manipulators Constructed from Composite Materials, *J.Mech.Trans.ASME*, 106 (1984), 183-190.
- 7 Hadcock, R. ve Huber, J., Specific Examples of Aerospace Applications of Composites, AGARD-LS-124, Section 12, 1982.
- 8 Bunsell, A.R., Characteristics and Selection of Fibres for Aerospace Laminates, AGARD-LS-124, Section 2, 1982.
- 9 Magnamite Graphite Fiber Composites-Applications and Technical Information, Hercules Inc., Magna, Utah.