論 文 13-1-2

촙트 스트랜드 강화 ALS계 복합재료의 파괴인성 평가

Evaluation on The Fracture Toughness of Chopped Strand Reinforced ALS Matrix Composites

차 용 훈* · 김 덕 중** · 이 연 신*** · 성 백 섭**** · 채 경 수****
C.Y. Hoon · D.J. Kim · Y.S. Lee · B.S. Soung · K.S. Chae

(1997년 6월 30일 접수, 1998년 2월 27일 채택)

ABSTRACT

It is well known in the fracture mechanics community that the fracture toughness of brittle materials, such as ceramics, can be improved improves significantly when fibers are added into the material. This is because in presence of fibers the cracks cannot propagate as freely as it can in absence of them. Fibers bridge the gap between two adjacent surfaces of the crack and reduce the crack tip opening displacement, thus make it harder to propagate. Several investigators have experimentally studied how the length, diameter and volume fraction of fibers affect the fracture toughness of chopped strand reinforced matrix composite materials. In this paper, matrix used ALS, Arizona Lunar Simulant, types of fiber used carbon steels and stainless steels. To analyze quantitatively fiber reinforced ALS composites, experimental and analytical methods was progressed. Load-displacement curve is used to experimental method, and FEM analysis program using ABAQUS is used analytical method.

1. 서 론

Ward(1989) 등은 아크릴 섬유 강화 모르타르의 전단과 굴곡에 대한 파괴저항을 연구했는데 섬유의 체적함유율이 증가함에 따라 전단과 굴곡강도, 파괴에너지와 임계균열개구는 모두 증

* 조선대학교 기계공학과(수송기계부품 공장자동화 연구 센터)
** 동아전문대학 자동차정비과
*** 송원전문대학 자동차과
**** 조선대학교

가하며, 인장강도는 일정하고 압축강도는 약간의 감소를 보임을 밝혔다[1~3]. Luke, Waterhouse 그리고 Wooldridge(1974)는 강 섬유가 콘크리트의 굴절강도에 미치는 몇가지 영향을 조사했는데, 초기크랙강도와 콘크리트의 극한강도에 미치는 섬유의 길이, 반경, 형태 그리고 체적함유율의 영향을 연구했다. 그들은 실험을 통해 섬유길이, 섬유지름, 섬유형태 그리고 섬유체적함유율은 콘크리트의 굴곡강도에 영향을 미친다고 결론지었다. 또한 섬유의 길이가 길고, 지름이 작으며, 체적함유율이 더 크면 극한강도를 증진시킨다고 하였다[4,5].

그들은 또한 섬유형태의 영향을 연구했고 원형섬유보다 판섬유가 강도가 높음을 알아냈다. 원형섬유와 비교할 때 판 섬유의 극한강도 증가는 특이할 점이다[6~8]. 그리고 섬유의 체적함유율과 길이변화에 따라 30~100%까지 극한강도가 증가한다고 하였다[9,10].

본 연구의 최종 목표는 달의 암석이나 흙을 이용하여 일정한 강도를 갖는 새로운 형태의 복합재료를 제작하여 달에서의 구조물 재료를 생산하는데 있다.

따라서 본 논문에서는 그 기초 단계로서 달의 표토와 유사한 입자분포 및 화학적 성분을 지닌 ALS 매트릭스에 탄소강 및 스테인레스강 섬유를 함유시킨 ALS-CS 및 ALS-SS 시험편을 제작하여, 촙트 스트랜드 강화 ALS계 복합재료에 대한 3점 굽힘시험을 통해 정량적으로 파괴인성을 측정하고, ABAQUS 유한요소 프로그램을 이용하여 비교·분석하고자 한다.

2. 실 험

2.1 재 료

복합재료 매트릭스는 Lunar simulants나 인공적 월석(moon racks)으로 만들어진다. 이러한 표토를 재현하기 위해 최근 몇 년간 두가지 형태의 Lunar simulants가 제작되고 있다. 이것들은 Arizona Lunar Simulant, ALS[Desai and Gordoner, 1992][11]와 Minnesota Lunar Simulant, MLS[Weiblein and Gordon, 1988][12]가 있다. ALS와 MLS 모두 달의 표토와 유사한 성질을 갖고 있으며, 본 연구에서는 ALS를 사용하였다. ALS는 워싱턴주, Hanford 근처 현무암 암석(Pomma Flow)으로 부터 생산된다. 그 암석은 분쇄한 후 걸러지며, 걸러진 파편들은 아폴로 호에 의해 취득한 실질적인 월토(lunar soil)의 결정립 분포와 거의 유사하다. 결정립 크기 분포 곡선은 Fig. 1에, 화학적 성분은 Table 1에 나타냈다.

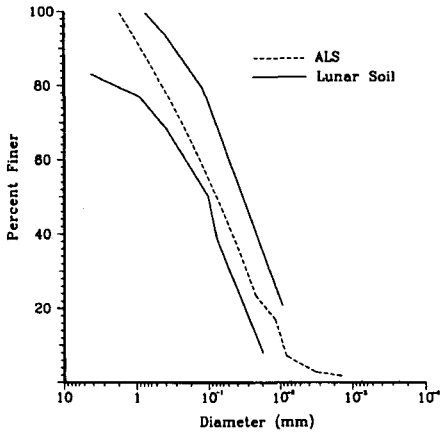

Fig. 1 Grain Size distribution of ALS

Table 1 Chemical composition for simulants and lunar soils (wt. %)

Compound	Simulants		Lunar soils	
	ALS	MLS	MARE	HIGHLANDS
SiO_2	48.0-50.0	43.86	45.4	45.5
Al_2O_3	13.5-16.0	13.68	14.9	24.0
TiO_2	1.6-3.2	6.32	3.9	0.6
FeO	7.0-12.5	13.4	14.1	5.9
MnO	0.2-0.25	0.198	—	—
MgO	4.3-6.5	6.68	9.2	7.5
CaO	8.3-10.3	10.13	11.8	15.9
Na_2O	2.7-3.0	2.12	0.6	0.6
K_2O	0.5-1.5	0.281	—	—
Fe_2O_3	1.9-4.6	2.6	—	—
P_2O_5	—	0.2	—	—
CO_2	—	0.0015	—	—

2.2 시험편

ALS분말은 특별하게 제작된 Fig. 2와 같은

주형(molds)에 넣고 1700℃ 용량의 용광로 속에서 1100℃까지 3℃/min로 가열하였다. 가열 및 냉각과정은 Fig. 3과 같으며, 150℃에서 3시간 유지하여 시료를 완전히 건조시킨 후 상온에서 서냉하였으며, 평균 47시간 걸린다. 준비된 ALS 벽돌(brick)을 6.2″×1.26″×0.67″크기로 자르고 Fig. 4와 같이 중앙에 크랙길이 0.63″를 가공한 3점 굽힘 시험편을 제작하였다. 이 시험편은 각 5인치 스팬에 지지하여 균열이 있는 중앙점에 하중을 가하게 된다. Carbon Steel(CS)섬유(섬유치수 1″×0.09″×0.02″)로 된 ALS-CS, Stainless Steel(SS)섬유(섬유치수 0.6″×0.03″×0.01″)로 된 ALS-SS 그리고 내부에 섬유가 없는 ALS 3가지 형태의 시험편을 제작하였다. 섬유의 중량은 ALS중량의 10%로 하였다.

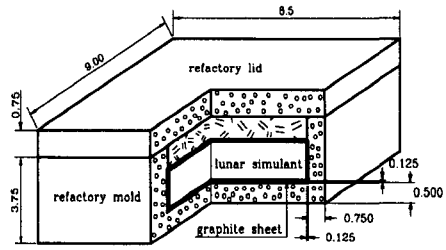

Fig. 2 Mold for Flat Specimen

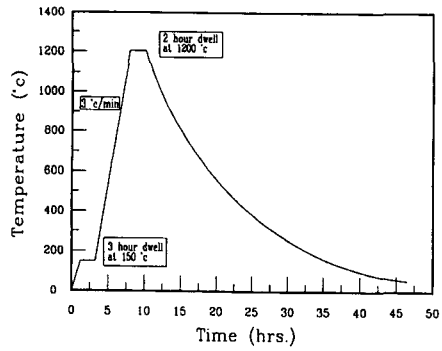

Fig. 3 Temperature history during heating andcooling

ALS 매트릭스에 섬유를 균일하게 분포하기 위한 시도에도 불구하고 ALS 분말과 섬유를 손으로 혼합하는데 어려움이 많기 때문에 시험편에 따라 약간의 차이는 항상 존재한다. 준비된 시험편들의 기계적 성질에 영향을 미치는 산포에 대한 검토를 위해 각각 두개의 시험편(A와 B)을 준비하여 실험하였다.

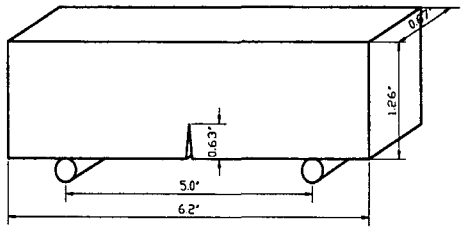

Fig. 4 Specimen geometry for the 3-point bending test

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 하중-변위 관계 고찰

섬유없는 ALS, ALS-CS 그리고 ALS-SS의 하중-변위선도는 간략하게 Fig. 5, 6, 7에 나타냈다. Fig. 6과 7은 각 그림에 2개의 선도가 있는데, 두 선도는 같은 양의 섬유를 포함한 두 시험편(A와 B)에 대한 결과를 나타낸 것으로서 이 두 선도는 동일해야 하나 실제로는 특히 최고응력에 도달한 후 차이점을 보이는데, 이 차이점들은 시험편속에 섬유와 공동(voids)의 불균일한 분포 때문에 발생한다. 이러한 점에도 불구하고 ALS 또는 ALS-CS에 비해 ALS-SS의 최고하중이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. CS섬유는 두 ALS-CS시험편의 경우 최고하중

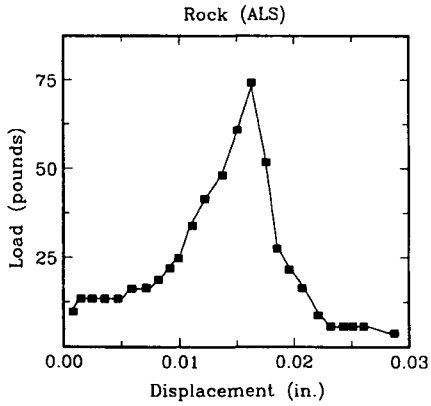

Fig. 5 Load-displacement diagram obtained from the 3-point bending of ALS specimen.

이 75 *lb*(순수ALS)에서 78 *lb*와 88 *lb*까지 약간만 증가했다. 그러나, SS섬유는 두 시편의 최고하중이 138 *lb*와 188 *lb*까지 증가했음을 알 수 있다.

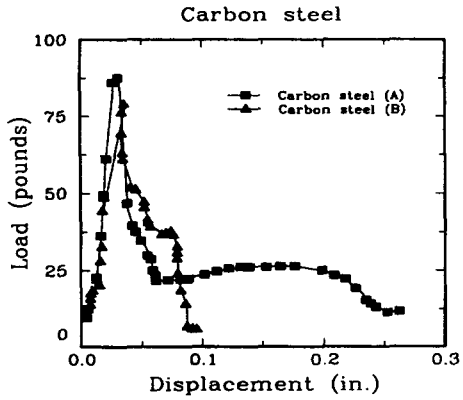

Fig. 6 Load-displacement diagram obtained from the 3-point bending of ALS-CS specimen.

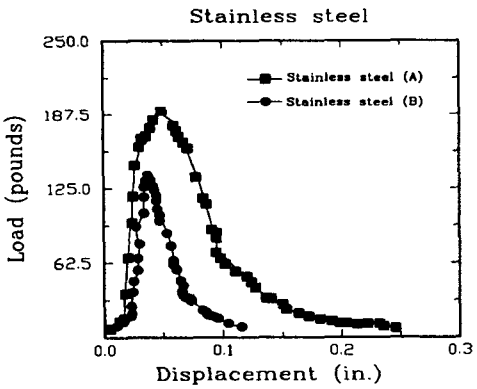

Fig. 7 Load-displacement diagram obtained from the 3-point bending of ALS-SS specimen

3.2 파괴인성 고찰

Fig. 4에 보여진 시험편형상에 대해 최고하중으로부터 계산된 파괴인성 또는 임계응력확대계수(K_c)를 최고하중치와 함께 Table 2에 나타냈다.

단순히 스테인레스강 섬유 파편 중량이 10% 증가하면 파괴인성이 거의 150% 증가될 수 있다. 그러나 시험편들의 영계수는 그렇게 큰 변화를 나타내지 않는다. ALS, ALS-CS 그리고 ALS-SS 시험편은 대략 3500~4000ksi로 거의 3500ksi에 가까운 영계수를 갖는다.

Table 2 Peak loads and Kc for five specimens made of lunar simulant matrix

Specimen	ALS	ALS-CS(A)	ALS-CS(B)	ALS-SS(A)	ALS-SS(B)
Peak load(lb)	75	88	78	188	138
K_c ($lb/in^{3/2}$)	1029.6	1208.0	1070.8	2580.9	1894.4

여기서 주목할 점은 SS-섬유 단면이 CS-섬유 단면의 1/6이며, SS-섬유 길이는 CS-섬유 길이의 60%라는 것이다. 이러한 치수 차이로 인해 파괴인성이 약간 달라질 수 있으나 차이점의 주된 원인은 섬유치수의 변화가 아니라 섬유 매트릭스의 접촉조건이다. 고용해온도(high liquefaction temperature)에서 녹(rusts)은 섬유 매트릭스의 접착약화를 일으키며 CS섬유 경계부에서 형성된다. 반면 SS섬유는 섬유 매트릭스 접착이 이 경우에 훨씬 더 강해지기 때문에 녹의 발생 경향이 상대적으로 더 적어지게 된다. 녹 이외에 ALS-CS 복합재료에 부정적으로 영향을 미치는 또다른 인자는 불균일한 섬유분포이다. CS섬유가 SS섬유에 비해 더 크고, 더 무겁기 때문에 CS섬유의 무게중심은 시험편의 절반이하 근처가 된다. 그러므로 균열선단의 상단중간, 정면에서 CS섬유는 훨씬 더 낮은 중량함유율(weight fraction)을 가지고 있으며, 이 보다 작고 가벼운 SS섬유는 훨씬 더 균일한 섬유분포를 보이고 있다.

중앙 균열은 최고하중에 이를 때 전파하기 시작한다. 그러므로 시험편 형상과 최고하중으로부터 임계 J-적분값을 계산할 수 있으며, ABAQUS 유한요소 프로그램을 이용하여 J_c값을 계산하였다. 이 분석에 사용되어진 유한요소 메시(mesh)는 Fig. 8에 나타냈다.

J_c와 K_c(임계응력확대계수)는 연관성이 있으므로 J_c로 부터 K_c를 다음식으로 구할 수 있다.

$J_c = \alpha K_c^2 / E$

$\alpha = 1$: 평면응력 상태

$\alpha = (1-\nu^2)$: 평면변형률 상태

여기서, ν는 포와송비이며, 이렇게 구한 J_c와 K_c값을 Table 3에 나타냈다.

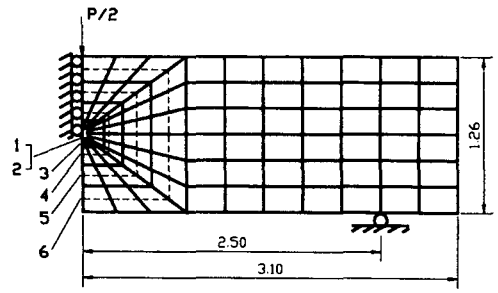

Fig. 8 Finite-element mesh and six J-integral paths

Table 3 Jc and Kc for the five specimens

Specimen type		ALS	ALS-CS		ALS-SS	
			A	B	A	B
Peak load P(lb)		75	88	78	186	138
J_c(lb/in) computed by ABAQUS	Path 1	.1317	.1813	.1424	.2999	.1651
	2	.1288	.1773	.1393	.2934	.1615
	3	.1292	.1779	.1398	.2944	.1620
	4	.1296	.1780	.1399	.2946	.1621
	5	.1298	.1783	.1401	.2950	.1623
	6	.1303	.1794	.1410	.2969	.1634
Average J_c(lb/in)		.1299	.1787	.1404	.2957	.1627
K_c(lb/in$^{3/2}$)		702.37	823.81	730.21	1160.86	861.09

4. 결 론

취성 매트리스 복합재료의 극한강도에 관한 섬유의 여러 파라메터의 영향은 많이 연구되어 실험적 결과와 비교되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 새로운 형태의 세라믹 매트릭스 복합재료인 ALS, ALS-CS 그리고 ALS-SS 시험편에 대한 파괴인성, 극한강도에 대한 섬유의 영향을 연구하기 위해 실험적 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

하중-변위 관계를 보면 ALS-SS시험편의 경우가 ALS 및 ALS-CS 시험편에 비해 강도상 가장 우수한 것으로 나타났다.

또한, 파괴인성은 ALS 시험편에 비해 ALS-CS 및 ALS-SS 시험편 모두 증가하였으며, ALS-CS의 경우 평균 10.6% 증가하였고, ALS-SS의 경우 평균 43.9% 증가함을 알 수 있었다.

매트릭스와 섬유가 양호하게 결합된다면 현저하게 ALS계 복합재료의 파괴인성과 강도를 증가시키며, 매트릭스-섬유의 결합이 양호할 때 섬유의 증가와 함께 복합재료의 파괴인성이 증가함을 알 수 있다. 이러한 결합강도가 양호하지 않은 상태에서, 섬유의 증가에 따른 파괴인성의 증가는 무의미하다.

참 고 문 헌

1) Ward, R. J., Yamanobe, K, Li, V. C., and Backer, S., "Fracture Resistance of Acrylic Fiber Reinforce Mortar in Shear and Flexure", in Fracture Mechanics: Application to Concrete, Eds. V. C. Li and Z. P. Bazant, Pub.ACI, Vol. SP 118-2, pp. 17~68, 1989.

2) Evans, A. G., "Mechanical Performance of Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites", Proceedings of the 9-th Riso International Symposium on Metallurgy and Materials Science, Pub. Riso Natl. Lab., Riso Library, Roskilde, Den., pp. 13~34, 1988.

3) Evans, A. G., "High Toughness Ceramics and Ceramic Composites", Proceedings of the tenth Riso International Symposium on Metallurgy and Materials Science, Pub. Riso. Natl. Lab., Riso Library, Roskilde, Den., pp. 51~91, 1989.

4) Luke, C. E., Waterhouse, B. L., and Wooldridge, J. F., "Steel Fiber Reinforced Concrete Optimization and Applications", An Inteneational Symposium on Fiber Reinforced Concrete, Pub. American Concrete Institute, Detroit, Michigan, SP-44, pp. 393~413, 1974.

5) Evans, A. G., "Mechanical Properties of Reinforced Ceramic, Metal and Intermetallic Matrix Composites", Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, Vol. A143, pp. 63~76, 1991.

6) Evans, A. G., Zok, F. W., "Physics and

Mechanics of Fiber-Reinforced Brittle Matrix Composites", Journal of Materials Science, Vol. 29, pp. 3857~3896, 1994.
7) Tada, H, Paris P. C., and Irwin, G. R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Pub. Del Research Corporation, Hellertown, PA, USA, 1973.
8) Majumdar, A. J., and Nurse, R. W., "Glass Fiber Reinforced Cement", BRE Building Research Series, Vol. 2, pp. 77~94, Pub. The Construction Press Ltd., Lancaster, England, 1978.
9) Toth, J. C., and Desai, C. S., "Development, Testing and Modeling of Ceramic Composites for Lunar Applications", Proceedings of ASCE Space '94 Conference, Albuquerque, New Mexico, 1994.
10) Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th Edition, Pub. Martinus Nijhoff, 1986.