

층간파괴시험을 적용한 자가손상보수 효율 평가

박희원*·여동진*·이종근**·윤성호***

Evaluation of Self-healing Efficiency Using Interlaminar Fracture Test

Hee Won Park*, Dong Jin Yeo*, Jong Keun Lee**, Sung Ho Yoon***

Key Words: Interlaminar fracture toughness, Self-healing Technique, Healing efficiency

Abstract

This study focused on the introduction of the self-healing technique for polymeric composites and evaluated the healing efficiency through the interlaminar fracture toughness tests. The DCPD and ENB were used for a healing agent and the Grubbs' catalyst as a catalyst. The healing efficiency was evaluated by the use of mode I and the mode II fracture toughnesses. According to the results, the DCPD-ENB mixture with a suitable ratio revealed better healing efficiency than DCPD only.

1. 서 론

폴리머 복합재는 외부의 과도한 하중이나 충격을 받게 되면 손상이 발생하고 이로 인해 구조적으로 매우 취약해지기 때문에 폴리머 복합재 내부에서의 손상을 탐지하고 보수하는 문제가 많은 관심사로 되어 왔다. 최근에는 이러한 폴리머 복합재의 손상을 보수하기 위해 자가치료제가 저장된 마이크로캡슐을 이용한 자가치료기법이 연구되고 있다[1-3].

기존의 자가치료제인 DCPD는 상온에서 액체 상태로 되어 자가치료제로 적용이 가능하지만 저온에서는 고체 상태로 되어 자가치료제로서의 역할을 할 수 없기 때문에 저온에서도 적용이 가능한 자가치료제의 제시가 필수적이다. 또한 촉매

와의 빠른 반응성과 충분한 치료효율을 갖는 자가치료제의 타당성이 체계적으로 검증되어야 한다.

본 연구에서는 자가치료기법에 효율적으로 적용할 수 있는 자가치료제를 제시하고 이에 대한 타당성을 검증하기 위해 자가치료제에 대한 모우드 I 및 모우드 II 층간파괴시험을 수행하였다. 이때 적용된 자가치료제는 DCPD, ENB, DCPD와 ENB의 혼합액을 고려하였으며 자가치료제를 반응시키기 위한 촉매는 Grubbs' Catalyst를 적용하였다.

2. 실험방법

2.1 자가치료제의 종류 및 시편의 제작

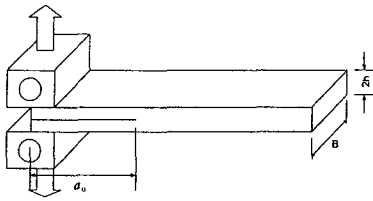
자가치료제는 DCPD와 ENB이며 Grubbs' catalyst를 촉매로 사용하였다. 자가치료제의 치료효율을 평가하기 위해 탄소섬유/에폭시 프리프

* 금오공과대학교 기계공학부 대학원

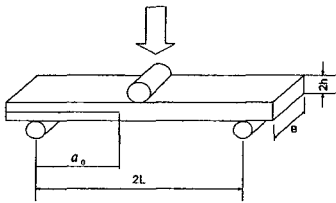
** 금오공과대학교 고분자공학과

*** 금오공과대학교 기계공학부
교신저자(shyoon@kumoh.ac.kr)

레그를 적층하여 만든 직조된 복합재를 이용하여 그림 1에 나타난 모드 I과 모드 II 층간파괴 시편을 제작하였다. 이를 위해 우선 규정된 크기로 절단된 프리프레그를 12층 적층하고 그 위에 원하는 크기의 준비된 테프론 필름을 규정된 위치에 삽입한 다음 다시 프리프레그 12층을 적층하여 오토클레이브 공법으로 성형하였다. 이때 12층과 13층 사이에 삽입된 12.5 μm 두께의 테프론 필름은 복합재에서의 초기균열을 형성시키는 역할을 한다.



(a) Mode I fracture test



(b) Mode II fracture test

Fig. 1 Interlaminar fracture specimens

2.2 시험방법

2.2.1 모드 I 층간파괴인성 평가

그림 2에는 모드 I 파괴인성을 평가하기 위한 실험장치의 구성이 나타나 있다. 모드 I 층간파괴인성을 평가하기 위해서는 시편의 한끝단의 규정된 위치에 알루미늄 블록을 부착하고 하중시험기(Zwick/Z100, Germany)에서 2mm/min의 변위제어상태로 핀 하중을 가하였다. 이때 작용하중에 따른 균열진전은 CCD 카메라가 장착된 동영상 자료수집장치를 사용하여 관찰하였으며 모드 I 층간파괴인성은 식(1)에 의해 구해진다 [4,5].

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2Ba} \quad (1)$$

여기에서 B 는 시편의 폭, a 는 균열길이, P 와 δ 는 각각 특정한 균열길이에서의 작용하중과 변위를 나타낸다.

자가치료제의 치료효율은 임계응력확대계수 또는 임계에너지방출률에 의해 식(2)와 같이 나타낸다.

$$\eta = \frac{K_{IC}^{healed}}{K_{IC}^{virgin}} = \sqrt{\frac{G_{IC}^{healed}}{G_{IC}^{virgin}}} \quad (2)$$

이때 K_{IC}^{virgin} 과 G_{IC}^{virgin} 은 각각 자가치료제가 적용되지 않은 경우의 임계응력확대계수와 임계에너지방출률을 나타내고 K_{IC}^{healed} 와 G_{IC}^{healed} 는 각각 자가치료제가 적용된 경우의 임계응력확대계수와 임계에너지방출률을 나타낸다.

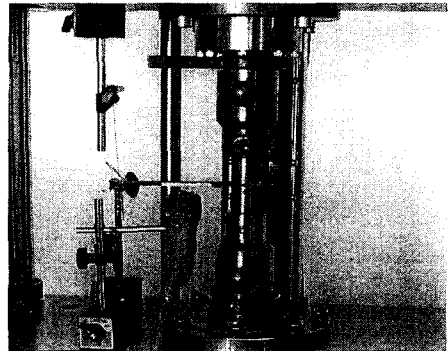


Fig. 2 Experimental set-up for Mode I interlaminar fracture test.

2.2.2 모드 II 층간파괴인성 평가

그림 3에는 모드 II 파괴인성을 평가하기 위한 실험장치의 구성이 나타나 있다. 모드 II 층간파괴인성을 평가하기 위해서는 균열을 가진 보 형태의 시편을 3점 굽힘치구에 장착한 다음 2mm/min의 변위제어상태로 연속적인 하중을 가하고 작용하중에 대한 변위 및 균열진전길이 등을 측정하였으며 모드 II 층간파괴인성은 식(3)에 의해 구해진다[5,6].

$$G_{IIC} = \frac{9a^2P_c\delta}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (3)$$

여기에서 P_c 는 임계하중, δ 는 변위, B 는 시편의 폭, a 는 균열길이, L 은 스패의 1/2를 나타낸다.

자가치료제의 치료효율은 임계응력확대계수와 임계에너지방출률에 의해 식(4)과 같이 나타낸다.

$$\eta = \frac{K_{IIC}^{healed}}{K_{IIC}^{virgin}} = \sqrt{\frac{G_{IIC}^{healed}}{G_{IIC}^{virgin}}} \quad (4)$$

이때 K_{IIC}^{virgin} 과 G_{IIC}^{virgin} 은 자가치료제가 적용되지 않은 경우의 임계응력확대계수와 임계에너지방출률을 나타내며 K_{IIC}^{healed} 와 G_{IIC}^{healed} 는 자가치료제가 적용된 경우의 임계응력확대계수와 임계에너지방출률을 나타낸다.

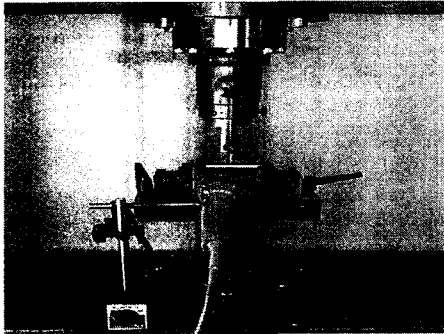


Fig. 3 Experimental set-up for Mode II interlaminar fracture test.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모드 I 층간파괴인성 및 치료효율

그림 4에는 0.5%wt의 촉매에 혼합된 순수한 DCPD를 균열부에 주입한 경우의 하중-변위 선도가 나타나 있다. 이 경우는 자가치료제와 촉매의 혼합비율을 고려하여 D1E0로 칭하였다. 여기에서 보면 첫 번째 사이클의 ①에서 자가치료제와 촉매의 혼합액을 균열선단까지 주입한 후 해중한다. 그런 다음 하중시험기에서 시편을 제거하고 60°C에서 2시간 경화 후 다시 장착하여 두 번째 사이클이 끝나는 ②까지 하중을 작용한다.

뒤이어 촉매와 혼합된 자가치료제를 첫 번째 사이클에서와 동일한 방법으로 균열선단에 주입한 다음 변위가 25mm될 때까지 반복하여 수행한다. 자가치료제의 층간파괴인성은 ③-④ 구간과 ③-⑤ 구간에서의 균열길이, 하중, 변위를 이용하여 평가하였다.

그림 6에는 각각 첫 번째 사이클과 두 번째 사이클에서의 균열길이에 따른 모드 I 층간파괴인성이 자가치료제가 적용되지 않은 경우와 자가치료제가 적용된 경우에 대해 나타나 있으며 표 1에는 모드 I 층간파괴인성과 이때의 치료효율이 나타나 있다.

3.2 모드 II 층간파괴인성 및 치료효율

그림 6에는 모드 II 층간파괴시험을 통해 얻은 하중-변위 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 작용하중에 대한 변위의 증분은 균열진전이 시작되는 ⑥에 도달하게 되면 비선형적으로 나타난다. 이때 균열은 ⑦에 도달할 때까지는 서서히 진전하지만 ⑦에 도달하면 급격하게 진전된다.

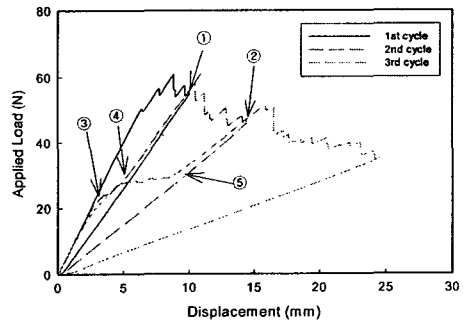


Fig. 4 Load-displacement curve for D1E0.

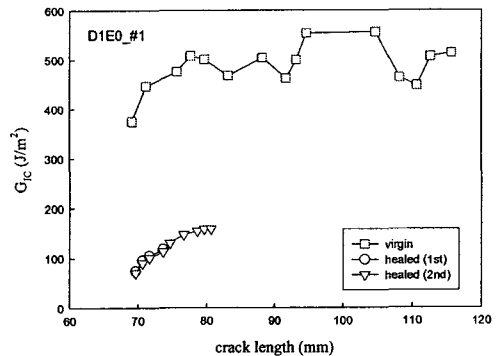


Fig. 5 R-curves of D1E0 for two healed cycles.

자가치료제의 치료효율을 평가하기 위해서는 균열진전이 완료된 시편의 균열선단에 자가치료제를 주입하여 경화시킨 다음 두 번째 사이클 시험을 수행한다. 이러한 경우에는 자가치료제가 주입되기 전보다 낮은 하중에서 서서히 균열진전이 일어나다가 ©'에 도달하면 급격하게 발생한다. 표 2에는 모우드 II 층간파괴인성과 이때의 치료효율이 나타나 있다.

4. 결 론

자가치료기법에 효율적으로 적용할 수 있는 자가치료제를 제시하고 자가치료제의 치료효율을 평가하기 위해 모우드 I 및 모우드 II 층간파괴시험을 수행하였다. 연구결과에 따르면 DCPD와 ENB를 적절한 비율로 혼합된 자가치료제가 DCPD만을 적용한 경우에 비해 높은 치료효율을 나타냄을 알 수 있다.

Table 3. Mode I interlaminar fracture toughness and healing efficiency.

	Toughness (G_{Ic})					Efficiency (%)	
	virgin			healed		1st cycle	2nd cycle
	1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	1st cycle	2nd cycle		
Base	364.9	383.6	394.4	-	-	-	-
D1E0	396.2	445.0	474.6	92.0	123.8	48.2	51.07
D3E1	381.8	449.1	469.3	220.4	181.6	80.0	63.6
D1E1	381.1	430.6	467.7	172.5	170.4	67.3	62.9

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00522-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) White, S.R., et al., "Autonomic Healing of Polymer Composite Materials," *Nature*, Vol. 409, pp. 794-797, 2001.
- (2) Kessler, M.R. and White, S.R., "Self-Activated Healing of Delamination Damage in Woven Composites," *Composites: Part A*, Vol. 32, pp. 683-699, 2001.
- (3) Yoon, S.H., et al., "Manufacturing Process of Microcapsules for Autonomic damage Repair of Polymeric Composites," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 4, No. 15, pp. 32-39, 2002.
- (4) ASTM D5528-94a, "Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites," *Annual Book of ASTM Standards*, 2001.
- (5) Hodgkinson, J.M., "Mechanical Testing of Advanced Fibre Composite," *Woodhead Publishing*, Cambridge, pp. 170-210, 2000.
- (6) Compston, P., Jar, P.Y.B., Burchill, P.J.K., and Takahashi, "The Effect of Matrix Toughness and Loading Rate on the Mode-II Interlaminar Fracture Toughness of Glass-fibre/vinyl-ester Composite," *Composite Science and Technology*, Vol. 61, pp321-333, 2001.

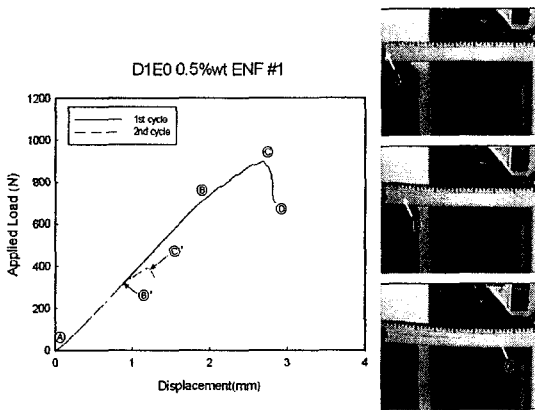


Fig. 6 Load-displacement curves for mode II interlaminar fracture test.

Table 4. Mode II interlaminar fracture toughness and healing efficiency.

	Toughness (G_{IIc})		Efficiency (%)
	virgin	healed	
D1E0	711.5	193.6	52.16
D3E1	697.1	237.1	58.32
D1E1	700.7	213.6	55.21