

Polycarbonate와 Polyester Resin의 동적 균열전파속도와 동적 응력확대계수

이 익 섭 · 한 민 구

인하대학교 공과대학 기계공학과

(1992년 2월 27일 접수)

Dynamic Stress Intensity Factors and Dynamic Crack Propagation Velocities in Polycarbonate and Polyester Resin

Ouk-Sub Lee and Min-Ku Han

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received February 27, 1992)

요약 : 신소재로 알려져 있는 재료들 중 두가지 고분자재료들에 대한 동적 파괴특성을 동적 광탄성실험법과 동적 유한요소법을 이용하여 규명하였다. Thermoplastic재료인 Polycarbonate와 Thermoset재료인 Polyester Resin을 시편으로 사용하여 이들의 기계적인 성질, 시편의 기하학적인 형상이 이들 재료내에서 빠르게 전파하는 동적 균열의 전파속도와 동적 균열전파의 동적 응력확대계수와 상호관계에 미치는 영향을 체계적으로 연구하였다. 이들 고분자재료의 동적 균열정지인성치는 시편의 기하학적인 형상이나 동적 균열전파개시에 의존함을 밝히고 이들 재료내에서의 동적 균열전파속도의 최대값은 재료의 종류, 시편의 기하학적인 형상, 하중방법 등에 크게 의존됨을 확인하였다. 이들 고분자재료내에서의 동적 균열전파거동은 미소한 시간간격으로 보면 "전파-정지-전파-정지"의 과정이 계속적으로 진행되어 일어난다는 사실을 알 수 있었다. 또한 동적 응력확대계수와 동적 균열전파속도의 관계는 전형적인 "Γ"형으로 나타남을 확인하였다.

Abstract : Dynamic fracture characteristics of polycarbonate and polyester were investigated. The dynamic crack propagation velocities in these polymeric materials were measured by using both high speed camera system and silver paint grid method developed and justified in the INHA Fracture Mechanics Laboratory. The measured crack propagation velocities were fed into the INSAMCR code(a dynamic finite element code which has been developed in the INHA Fracture Mechanics Laboratory) to extract the dynamic stress intensity factors. It has been confirmed that both dynamic crack arrest toughness and the static crack arrest toughness depend on both the geometry and the dynamic crack propagation velocity of specimens. The maximum dynamic crack propagation velocity of polymeric materials was found to be dependent on the material property, geometry and the type of loading. The dynamic cracks in these polymers seemed to propagate in a successive manner, involving distinguished 'propagation-arrest-propagation-arrest' steps on the microsecond time scale. It was also found that the relationship between dynamic stress intensity factor and dynamic crack propagation velocities might be represented by the typical 'Γ' shape.

서 론

신소재로 알려져 있는 재료들 중 Polymer들에 대한 연구가 여러 측면에서 활기를 띄고 있다. 특히 고인성, 고탄성, 고충격성 등의 특성을 지닌 Polycarbonate와 Polyester Resin들은 공학적으로 우수한 재료들로 인정되고 있으며 그 응용분야가 넓어짐에 따라 이들의 기계적 성질들을 정확히 파악할 수 있는 실험적 및 이론적인 연구와 특히, 안전설계 및 정밀 설계를 하기 위한 여러가지 파손파라메타를 제공하는 파괴역학에 관련된 많은 연구가 필연적으로 요구되고 있다. Polymer의 파괴현상에 대해서는 여러가지 하중 및 경계조건이 파괴에 미치는 영향에 대해서 많은 이론적 연구와 실험적 연구들이 발표되고 있다.^{1,2} 또한, 국내에서는 Polymer내부에 존재하는 균열 Healing현상을 파괴역학의 파라메타를 사용하여 규명하려는 연구가 시도된 바 있고,^{3,4} 초음파를 이용하여 Polymer의 점성특성을 규명할 수 있는 연구결과가 발표된 바 있다.⁵

균열선단 부근의 응력장이나 변형장은 응력확대계수의 크기에 의해 지배를 받으므로 균열선단 주위의 응력장이나 변형장의 분포상태로부터 응력확대계수를 결정하는 것이 파괴역학의 중요한 연구분야 중의 하나인 것은 잘 알려져 있다. 응력확대계수를 측정하거나 결정하는 방법은 여러가지가 있으나 그중 광탄성방법으로 응력확대계수를 추출하고, 정적이나 동적인 하중을 받으면서 빠르게 전파하는 균열선단 주위의 동적 응력장을 동적 광탄성방법으로 사진을 찍어 동적 응력확대계수를 측정하는 방법들이 개발, 발전되고 있다.⁶⁻⁸ 또한 동적 균열전파속도와 동적 응력확대계수와와의 상호관계에 대해서도 많은 연구결과가 발표되고 있다.⁹⁻¹³

본 논문에서는 위에서 간단히 서술한 여러 연구자들의 연구결과에 대한 계속적인 연구의 일환으로서 근래 신소재의 일종으로 각광을 받고있는 고인성이거나 고탄성, 고충격성등의 특성을 지닌 Polycarbonate와 Polyester Resin의 파괴역학적인 거동을 체계적으로 규명하였다. 1초에 100만장을 찍을 수 있

는 빠르기를 가지고 있는 Multi-Spark Gap High Speed Camera System을 이용한 동적 광탄성실험으로 시편재료의 기계적인 특성 및 기하학적 형상들이 동적 응력확대계수와 동적 균열전파속도의 상호관계에 미치는 영향 등을 비교, 검토하여 이들 재료의 동적인 파손성질들을 공학적으로 이용 가능하게 기초자료화 하였다.

시편과 실험장치 및 절차

Multi-Spark Gap High Speed Camera System

Fig. 1은 Multi-Spark Gap High Speed Camera System의 개략도이다. 이 시스템은 Cranz와 Scharadin이 실험용으로 고안한 Cranz-Schardin Camera System¹⁴의 광학적 원리에 근간을 두고 광원의 광량과 회로자체의 전기적 안정성, 촬영속도 등에 대한 정확성과 간편성을 크게 향상시킨 것으로 국내에서 제작된 Camera System이다. 이 시스템은 16개의 Spark Gap을 가진 Multi-Spark Light Source와 Multi Camera를 포함하는 광학계와 High Voltage Power Supply 등으로 구성되어 있고, 순간적인 방전이 조명역할을 하기때문에 기계적인 셔터가 필요 없다. 또한 각각의 Interframe사이의 시간간격을 조정할 수 있기 때문에 동적 균열전파 등 동적인 현상들을 가시화할 수 있는 실험장치이다. 작동원리는 Light Source의 Spark Gap양단의 Capacitor에 먼저 전기에너지를 저장한 후, Control Unit에 미리 설정

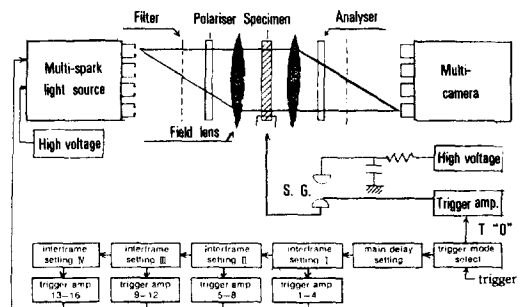


Fig. 1. Schematic diagram of multi-spark gap high speed camera system.

된 시간에 따라 출력되는 Trigger Pulse로 16개의 Spark Gap을 순차적으로 Trigger시키면 방전되는 전기에너지가 빛에너지로 전환되어 나오고, 이 빛이 Test Section(시편)과 Field Lens 등을 통과하여 광학계의 중심축에 대칭인 Multi Camera의 대물렌즈로 입사하게 되며 Multi-Camera의 필름면에 상이 맺히게 된다. 동적 균열전파의 속도측정을 위한 상세한 사항은 문헌¹⁵을 참고하기 바란다.

시편 및 하중장치

본 연구에 사용된 재료는 두께가 6mm와 10mm인 고인성재료인 Polycarbonate (Lexan Resin, General Electric Plastics Group, USA.)와 두께 5mm의 취성재료인 Polyester Resin (Homalite-100, General Electric Plastics Group, USA.)이다. 사용한 재료의 기계적인 특성과 물리정수를 Table 1에 나타내었다. 이들 판재를 Fig. 2와 같은 WL-RDCB (Wedge Loaded-Rectangular Double Cantilever Beam) 시편과 SEN (Single Edge Notched)시편으로 가공하여 상온에서 만능재료시험기(Toyo Baldwin, 10

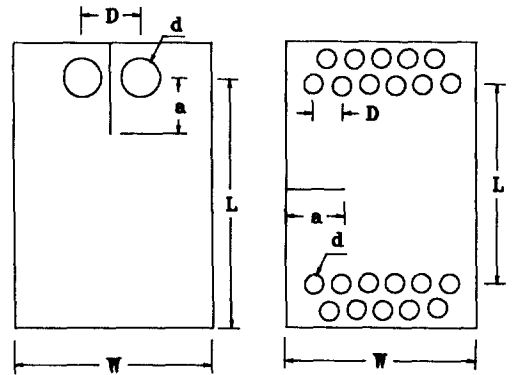
ton, Japan)로 하중속도를 20mm/min로 정적 하중을 가하였다. 이 하중에 의해서 균열선단이 동적으로 전파할 때 동적 균열선단 전파경로에 칠한 은분이 파손되어 발생하는 시그널이 카메라를 Trigger시키게 하였다.

2차원 동적 균열해석 프로그램 (INha Stress Analysis of Moving CRacks)

본 연구에서 사용한 2차원 동적 유한요소 프로그램인 INSAMCR (INha Stress Analysis of Moving CRacks)은 동적 균열의 전파 및 정지현상을 해석하기 위하여 미국 Maryland대학에서 개발한 동적 2차원 유한요소 프로그램을 본 연구의 목적에 적합하게 수정, 보완한 것으로서 4절점 아이소파라메트릭 (Isoparametric)요소들로 이루어져 있으며 가상일의 원리를 이용한 것이다. 또한 INSAMCR은 해석결과 처리를 용이하게 하기위하여 본프로그램의 실행후

Table 1. Mechanical and Physical Properties of Polycarbonate and Polyester Resin

Properties	Unit	Polycarbonate	Polyester Resin
Static Elastic Modulus	GPa	2.38	3.72
Dynamic Elastic Modulus	GPa	2.72	4.80
Static Poisson's Ratio		0.36	0.36
Dynamic Poisson's Ratio		0.36	0.36
Static Fringe Value	KN/m-fringe	7.20	21.5
Dynamic Fringe Value	KN/m-fringe	6.70	20.7
Density	Kg-sec ² /m ⁴	122.00	122.0
Dilatational Wave Velocity	m/sec	1960.00	2590.0
Distortional Wave Velocity	m/sec	910.00	1210.0
Plate Wave Velocity	m/sec	1620.00	2140.0



Materials	Specimen No.	Specimen Type	T	a	W	L	D	d
Polycarbonate	D-P-06	WL-RDCB	6	35	158	224	46	25
Polycarbonate	D-P-10	WL-RDCB	10	45	164	216	46	25
Polyester Resin	D-H-05	WL-RDCB	5	50	140	225	35	25
Polycarbonate	S-P-06	SEN	6	30	98	196	20	6

Fig. 2. Geometry and dimension of specimens : (a) Wedge loaded-rectangular double cantilever beam (WL-RDCB) specimen. (b) Single edge notched (SEN) specimen. (c) Dimension of specimens(unit : mm, T : thickness).

상용프로그램인 AutoCAD Release 10(혹은 Quattro-Pro)과 연결하여 수치적으로 출력된 결과를 가시화시킬 수 있는 후처리(Post Processing)용 프로그램을 포함하고 있다.

INSAMCR내에서의 동적인 계산을 위하여 일반적인 정적 유한요소해석 프로그램에 의한 시편의 유한요소들의 절점의 초기변위와 속도를 입력해야한다. 본 논문에서는 "NISA II/DISPLAY III"를 사용하여 정적 상태의 유한요소의 절점들의 변위를 초기조건으로 입력하였다.

실험결과 및 고찰

Multi-Spark Gap High Speed Camera System으로 얻은 각각의 시편에 대한 총 16컷트의 동적 균열선단 주위의 동적 응력장의 영상중 동적 등색선의 경향이 뚜렷이 나타난 8개의 사진을 Fig. 3에 각각 나타내었다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 두께 6mm와 10mm Polycarbonate로 만든 WL-RDCB시편의 경우이고 (c)는 두께 6mm Polycarbonate로 만든

SEN시편에 대한 동적 응력장이다. 등색선의 Fringe Order 및 임의 Loop들의 극좌표 r , θ 값과 동적 응력장을 동적 응력확대계수로 표시한 이론식을 이용하고 Least Square Fitting의 수치적 방법을 이용하여 동적 응력확대계수 등을 추출할 수 있지만 이 방법은 재료가 광탄성재료이어야하는 한계성이 있으므로 본 논문에서는 Fig. 3의 결과로부터 동적 균열전파속도를 측정하여 INSAMCR Code에 의해 동적 응력확대계수 및 각종 Data를 추출하였다.

Fig. 4에는 동적 균열해석 유한요소 프로그램인 INSAMCR을 사용하여 계산한 두께 6mm와 10mm의 Polycarbonate로 만든 WL-RDCB시편과 두께 5mm인 Polyester Resin으로 만든 WL-RDCB시편 그리고 두께 6mm인 Polycarbonate로 만든 SEN시편들에 대한 균열전파길이에 대응하는 각종 에너지의 변화를 나타내었다. 여기서 각 시편의 파괴에너지(Fracture Energy)가 균열전파길이에 따라 초기에는 직선적으로 증가하는 경향을 보이는 반면, 변형에너지(Strain Energy)는 직선적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 전체에너지(Total Energy)값은 균열



Fig. 3(a). Dynamic isochromatics in 6mm thick polycarbonate WL-RDCB specimen.

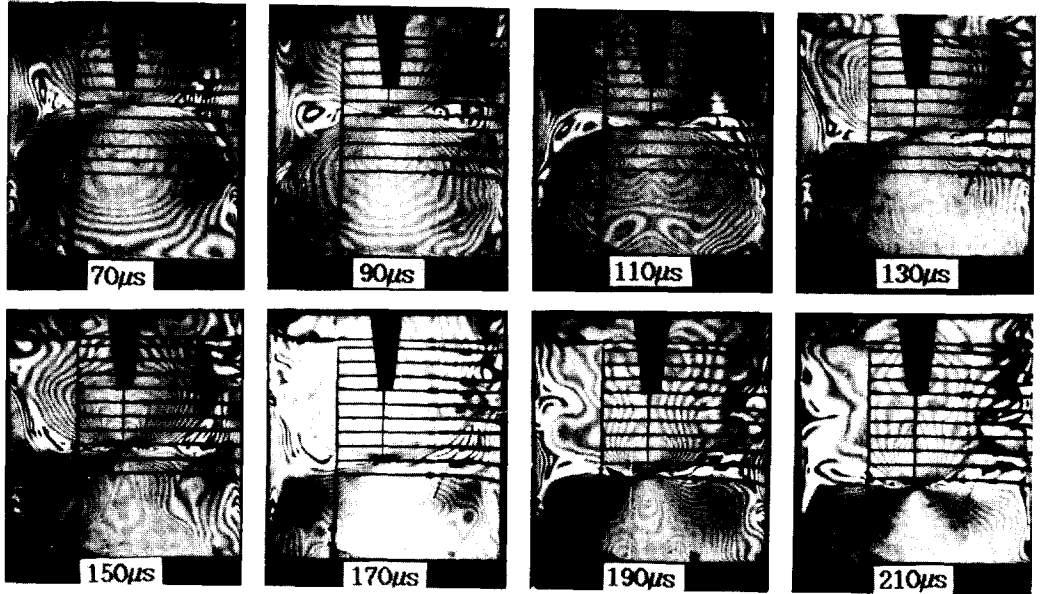


Fig. 3(b). Dynamic isochromatics in 10mm thick polycarbonate WL-RDCB specimen.

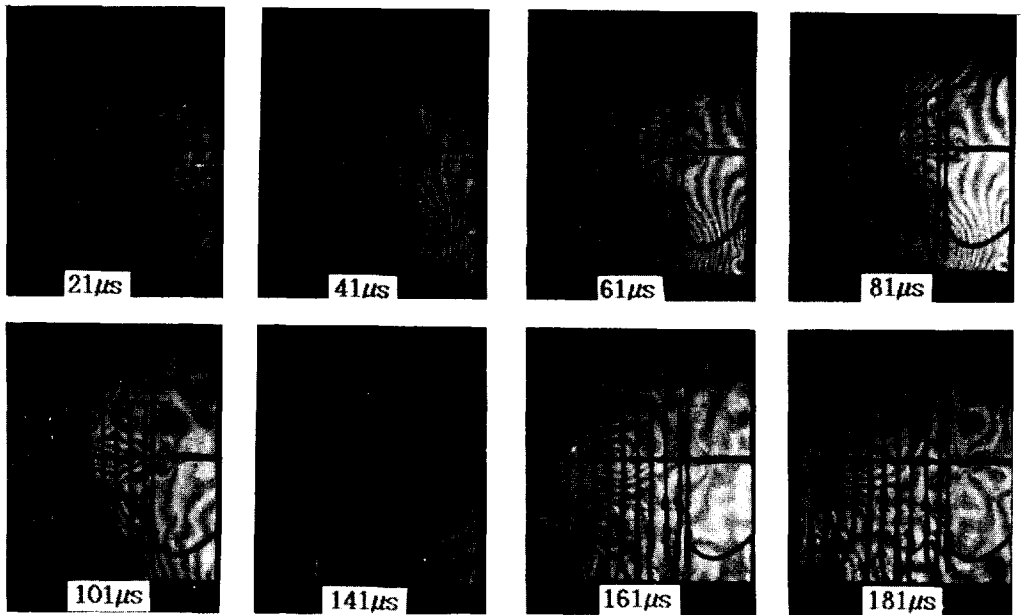


Fig. 3(c). Dynamic isochromatics in 6mm thick polycarbonate SEN specimen.

이 전파하는 시간동안 거의 일정한 값으로 유지되는 것이 확인됨으로 동적 균열전파 실험데이터를 이용

한 동적 유한요소 해석방법 및 과정의 신뢰성을 확인할 수 있다.

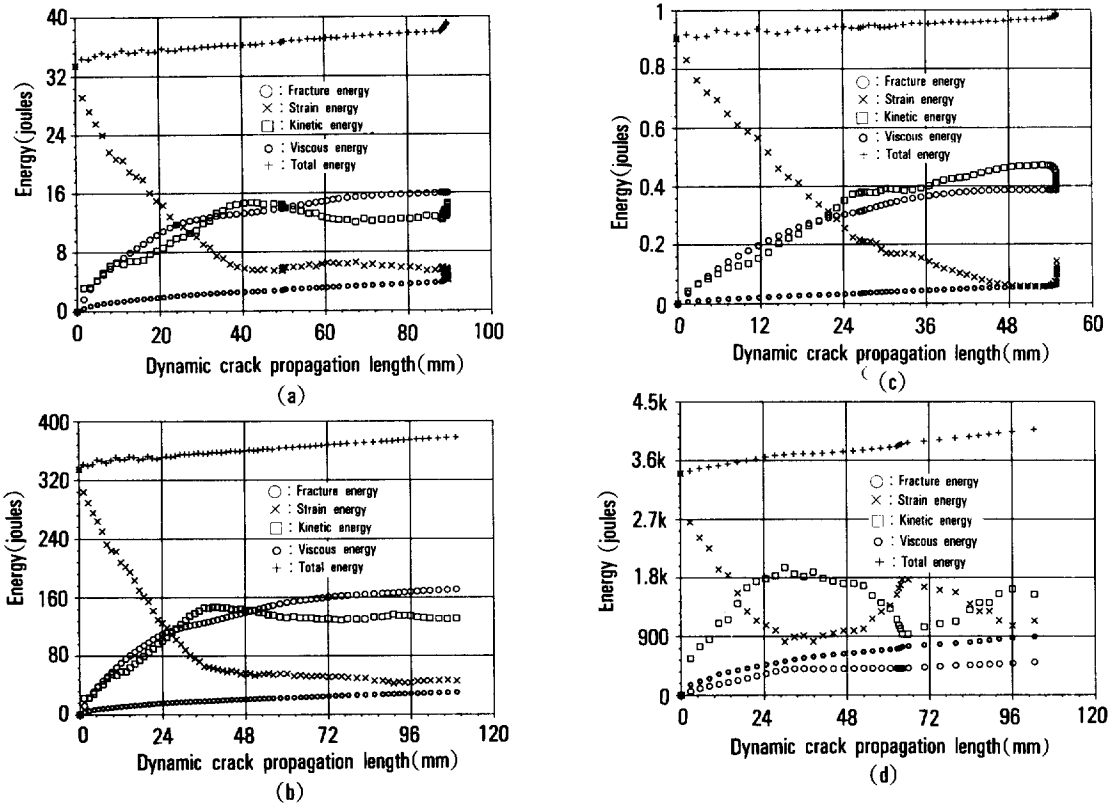


Fig. 4. Calculated strain, fracture, kinetic and total energy as a function of crack propagation length : (a) Polycarbonate, 6T, WL-RDCB specimen. (b) Polycarbonate, 10T, WL-RDCB specimen. (c) Polyester resin, 5T, WL-RDCB specimen. (d) Polycarbonate, 6T, SEN specimen.

Fig. 5는 INSAMCR을 사용하여 추출한 동적 균열전파시간에 따른 동적 균열전파거리와 동적 응력확대계수를 각 시편에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에는 균열전파길이에 대응하는 정적 응력확대계수도 표시하였으며, 동적 응력확대계수와와의 차이를 뚜렷하게 인지할 수 있다. Fig. 5(a)(b)(c)(d)의 결과를 고찰해 보면 다음과 같은 사실을 규명할 수 있다.

(a) : 두께 6mm Polycarbonate WL-RDCB시편의 경우 동적 균열이 전파개시한 후 약 150 μ s에서 동적 균열이 정지하는 현상이 나타났다(1차 균열정지). 동적 균열전파개시후 약 48 μ s동안에는 동적 응력확대계수가 정적인 경우보다 낮은 값을 가지게 되며 그 이후부터 1차 균열정지를 일으킨 전파시간동안에는 정적 응력확대계수가 동적인 경우보다 낮은 값을 가

짐을 알 수 있다. 동적 응력확대계수의 시간에 따른 변화양상은 대체적으로 1.7MPa \sqrt{m} 의 균열개시인성치를 최대값으로 시작하여 감쇠진동하며 1차 균열정지를 일으킨 시간에서 약 0.48MPa \sqrt{m} 의 동적 균열정지인성치를 나타낸다. 정적인 경우에는 동일한 균열개시인성치로부터 서서히 감소하여 1차 동적 균열정지가 일어난 이후부터는 일정한 값인 약 0.2MPa \sqrt{m} 의 정적 균열정지인성치를 나타내며 동적 균열정지인성치가 정적 균열정지인성치의 2.4배가 되는 사실을 알 수 있다. 따라서 정적 실험데이터를 사용하여 정적 해석으로 결정한 정적 균열정지인성치를 공학적인 데이터로 사용하면 너무 보수적인 결과를 초래하게 된다.

(b) : 두께 10mm Polycarbonate WL-RDCB시편

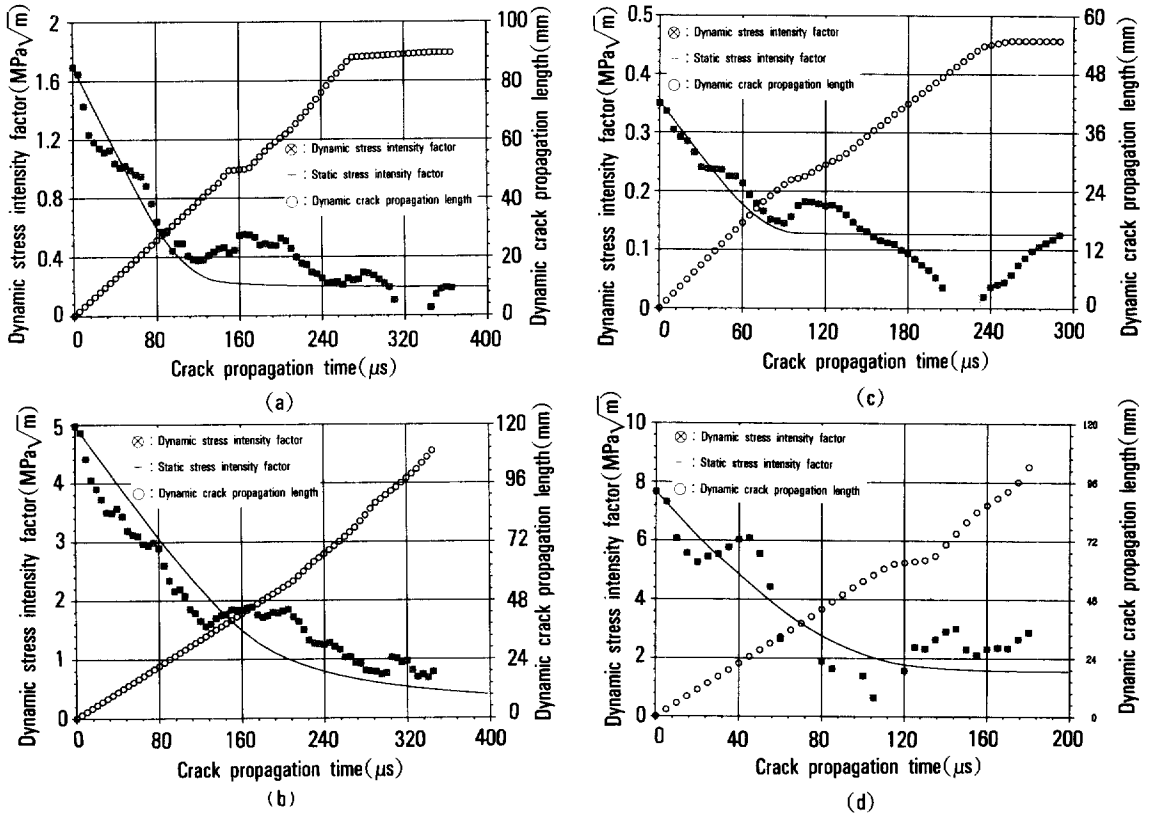


Fig. 5. Extracted values of dynamic stress intensity factor and dynamic crack propagation length as a function of crack propagation time : (a) Polycarbonate, 6T, WL-RDCB specimen. (b) Polycarbonate, 10T, WL-RDCB specimen. (c) Polyester resin, 5T, WL-RDCB specimen. (d) Polycarbonate, 6T, SEN specimen.

의 경우는 균열정지를 일으키지 않고 완전파단되었음을 알 수 있다. 동적 균열전파개시후 약 $144\mu\text{s}$ 까지는 동적 응력확대계수가 정적인 경우보다 낮은 값을 가지며 그 이후부터 해석종료시까지 정적 응력확대계수가 동적인 경우보다 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 전체적인 경향을 살펴보면 동적 응력확대계수는 $5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 동적 균열개시인성치를 시작으로 감소진동하여 약 $0.8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 동적 균열정지인성치를 갖게되며 정적인 경우에는 동일한 균열개시인성치로부터 서서히 감소하여 약 0.4MPa m의 정적 균열정지인성치를 갖게된다. 이 경우에도 동적 균열정지인성치가 정적 균열정지인성치보다 크며 약 2배가 되는 사실을 알 수 있다.

(c) : 두께 5mm Polyester Resin WL-RDCB시편

의 경우 동적 균열이 전파개시한 후 약 $94\mu\text{s}$ 에서 1차 균열정지를 일으켰으며, 전파개시후 약 $36\mu\text{s}$ 까지는 동적 응력확대계수가 정적인 경우보다 낮은 값을 가지게되며 그 이후부터 1차 균열정지를 일으킨 전파시간까지는 정적 응력확대계수가 동적인 경우보다 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 전파시간에 따른 동적 응력확대계수는 $0.35\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 균열개시인성치를 시작으로 감소진동하여 1차 균열정지가 일어난 이후 약 $0.175\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 동적 균열정지인성치를 갖게되며 정적인 경우 동일한 균열개시인성치로부터 서서히 감소하여 일정한 값인 약 $0.123\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 정적 균열정지인성치를 갖게됨을 알 수 있다. 이 경우에는 동적 균열정지인성치와 정적 균열정지인성치의 비가 1.4이며 Polycarbonate보다 낮은 값을 나타내고 있

다.

(d) : 두께 6mm Polycarbonate SEN시편의 경우에는 동적 균열이 전파개시한 후 약 114 μ s에서 1차 균열정지를 일으켰으며, 전파개시 후 약 30 μ s까지는 동적 응력확대계수가 정적인 경우보다 낮은 값을 가지게되고 30~56 μ s의 전파시간동안은 동적 응력확대계수가 정적인 경우보다 크지만 WL-RDCB시편의 경우와는 달리 56 μ s 이후부터 1차 균열정지를 일으킨 전파시간까지는 동적 응력확대계수가 정적인 경우보다 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 동적 균열전파시간에 따른 동적 응력확대계수는 7.7MPa \sqrt{m} 의 동적 균열개시인성치를 시작으로 감소진동하여 약 2.4MPa \sqrt{m} 의 동적 균열정지인성치를 갖게되며 정적인 경우 동일한 균열개시인성치로부터 서서히 감

소하여 1차 균열정지가 일어난 이후부터는 일정한 값인 약1.5MPa \sqrt{m} 의 정적 균열정지인성치를 갖게 됨을 알 수 있다. 이 경우의 동적 균열정지인성치와 정적 균열정지인성치와의 비는 1.6이다. 여기에서 Fig. 5(a)(d)의 결과를 비교하여 보면 Polycarbonate의 균열정지인성치는 시편의 형상이나 초기 동적 균열전파개시인성치의 크기에 관련된다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 6에는 INSAMCR 프로그램에 의해 예상되는 동적 균열전파시간에 따른 동적 균열전파거리와 동적 균열전파속도와의 관계를 나타내었다. Fig. 6(a)(b)(c)(d)의 결과를 보면 다음과 같은 경향을 알 수 있다. (a) : 두께 6mm Polycarbonate WL-RDCB시편에서는 균열이 전파개시한 후 150 μ s에서 즉, 균열

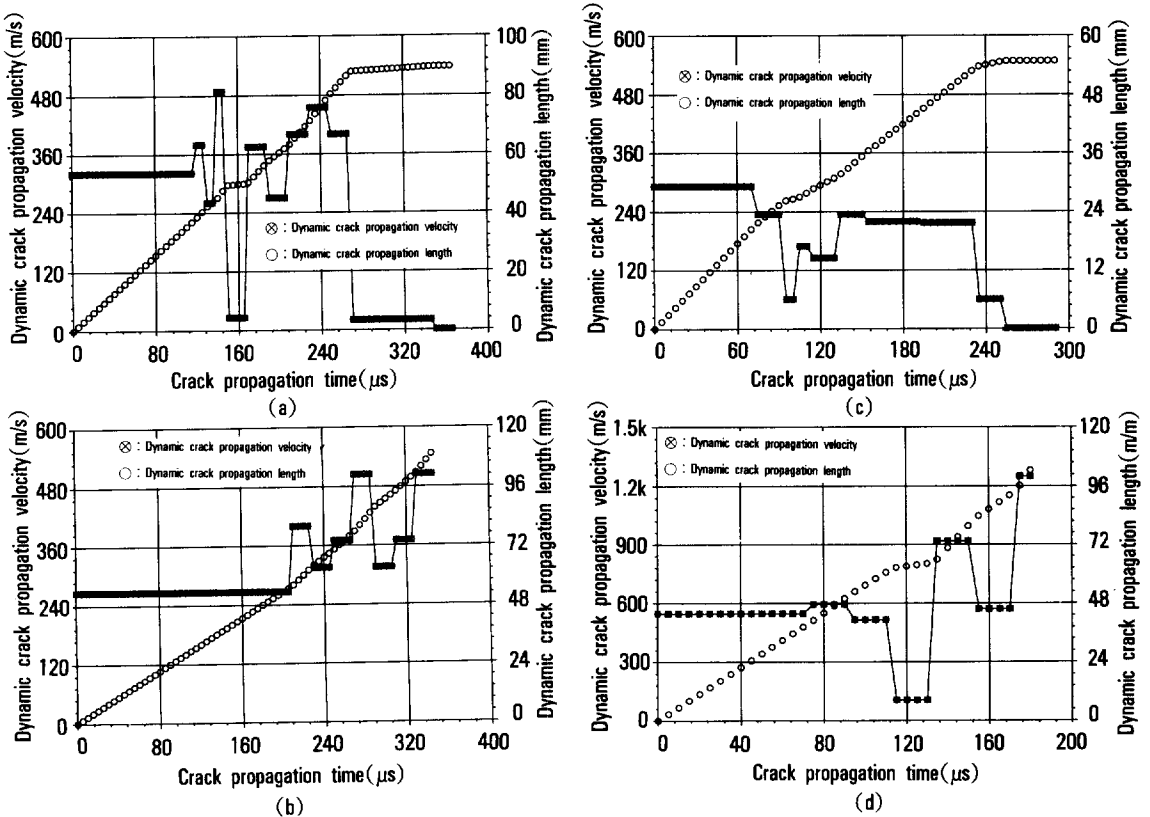


Fig. 6. Predicted dynamic crack propagation velocity and dynamic crack propagation length as a function of crack propagation time ; (a) Polycarbonate, 6T, WL-RDCB specimen. (b) Polycarbonate, 10T, WL-RDCB specimen. (c) Polyester resin, 5T, WL-RDCB specimen. (d) Polycarbonate, 6T, SEN specimen.

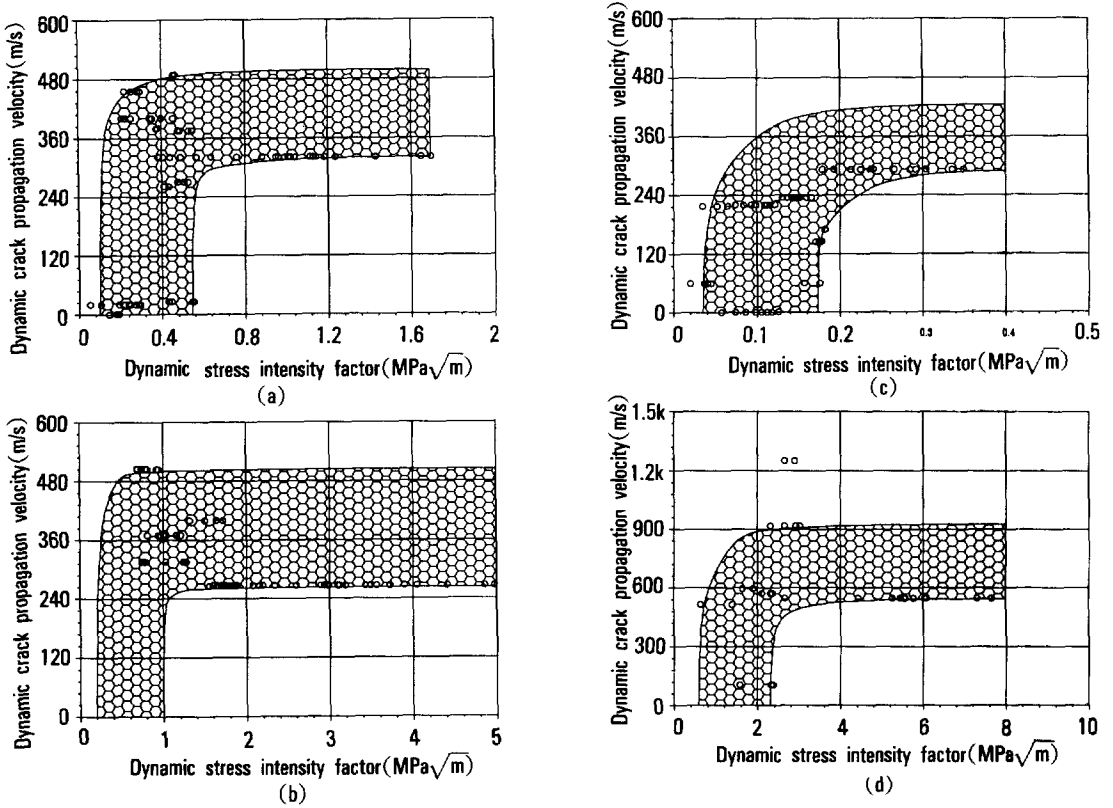


Fig. 7. Relationship between dynamic stress intensity factor and dynamic crack propagation velocity ; (a) Polycarbonate, 6T, WL-RDCB specimen. (b) Polycarbonate, 10T, WL-RDCB specimen. (c) Polyester resin, 5T, WL-RDCB specimen. (d) Polycarbonate, 6T, SEN specimen.

전파거리가 약 50mm인 점에서 동적 균열이 1차정지를 했다가 다시 전파개시한 후 350μs에서 즉, 동적 균열전파거리가 약 90mm인 지점에서 동적 균열이 2차정지한다는 사실을 알 수 있다. 또한 두께 6mm Polycarbonate WL-RDCB시편에서는 동적 균열전파속도의 최대치가 이 재료의 Dilatational Wave Velocity C_1 (1960m/s)의 약 25%인 490m/s정도로 나타났으며, (b) : 두께 10mm Polycarbonate WL-RDCB시편의 경우 C_1 의 25.8%인 505m/s, (c) : 두께 5mm Polyester Resin WL-RDCB시편의 경우는 C_1 (2590m/s)의 11.4% 정도인 295m/s, (d) : 두께 6mm Polycarbonate SEN시편의 경우 C_1 의 62.8%인 1230m/s임을 알 수 있다.

Fig. 7은 INSAMCR 프로그램으로 해석한 동적

균열전파속도의 변화에 따른 동적 응력확대계수의 변화양상을 나타낸 것이다. 데이터가 산포된 구간을 해칭하여 도시하였는데 전형적인 “T” 형으로 나타남을 알 수 있고 이것을 참고로 두께 6mm 와 10mm의 Polycarbonate WL-RDCB시편의 동적 균열정지인성치가 각각 대략 $0.28 \pm 0.18 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $1.0 \pm 0.5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 임과 두께 5mm Polyester Resin WL-RDCB시편과 두께 6mm Polycarbonate SEN시편의 동적 균열정지인성치가 각각 $0.085 \pm 0.065 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $1.5 \pm 0.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 임을 알 수 있다.

결론

Thermoplastic재료인 Polycarbonate와 Thermo-

set재료인 Polyester Resin재료의 동적 균열전파양상을 동적 광탄성실험과 동적 유한요소법으로 해석한 결과 본 연구의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 이들 두 고분자재료의 동적 균열정지인성치와 정적 균열정지인성치는 시편의 기하학적 형상이나 초기 동적 균열전파개시인성치에 의존한다.
2. 이들 두 고분자재료의 동적 균열전파속도의 최대값은 Polymer의 종류, 시편의 기하학적 형상, 하중방법 등에 크게 의존한다.
3. 이들 두 고분자재료의 동적 균열전파는 미소한 시간간격으로 보면 “전파-정지-전파-정지” 과정이 계속하여 일어남으로서 진행된다는 사실을 알 수 있다.
4. 동적 응력확대계수와 동적 균열전파속도의 관계는 전형적인 “I”형으로 나타난다.

감사의 말 : 본 논문은 한국과학재단 '90년도 일반 기초 연구비지원(901-0910-013-2)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. E. H. Andrews, "Fracture in Polymers", American Elsevier, 1968.
2. J. G. Williams, "Stress Analysis of Polymers", Ellis Horwood Limited, 1980.
3. 이억섭, 한국정밀공학회지, **3**, 40~49 (1986).
4. O. S. Lee, et al., *KSME Journal*, **1**(1), 65~69 (1987).
5. O. S. Lee and J. H. Williams, Jr, *Materials Evaluation*, **49**(3), 351~355 (1991).
6. M. Ramulu, et al., *Experimental Mechanics*, **4**, 344~353 (1985).
7. A. S. Kobayashi, "Experimental Techniques in Fracture Mechanics", pp. 126~145, Society for Experimental Stress Analysis, Westport, Connecticut, 1973.
8. J. W. Dally, et al., *Experimental Mechanics*, **12**, 441~448 (1978).
9. T. Kobayashi and J. W. Dally, "Fast Fracture and Crack Arrest", ASTM STP 627, pp. 257~273, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1977.
10. A. Shukla and H. Nigam, *Engineering Fracture Mechanics*, **25**, 1, 91~102 (1986).
11. A. J. Rosakis, *Engineering Fracture Mechanics*, **13**, 331~347 (1980).
12. J. W. Dally, W. L. Fourney and G. R. Irwin, *International J. of Fracture*, **27**, 159~168 (1985).
13. S. N. Atluri and T. Nishioka, *International J. of Fracture*, **27**, 245~261 (1985).
14. W. F. Riley and J. W. Dally, *Experimental Mechanics*, **9**, 27N~33N (1969).
15. 이억섭, 한민구, 대한기체학회 논문집, **13**(5), 947~951 (1989).