한국정밀공학회지 제 27권 9호 pp. 78-85 September 2010 / 78
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 27, No. 9, pp. 78-85

응력과 온도에 따른 폴리카보네이트(PC)의 크리프특성

Creep Characteristic of the Polycarbonate(PC) at Various Stresses and Temperatures

강석춘 [1,✉], 이용원 [2]
Suk Choon Kang[1,✉] and Young Won Lee[2]

1 수원대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Suwon Univ.)
2 수원대학교 기계공학과 대학원 (Department of Mechanical Engineering, Suwon Univ.)
✉ Corresponding author: sckang@suwon.ac.kr, Tel: 031-220-2260

Manuscript received: 2010.3.17 / Revised: 2010.6.15 / Accepted: 2010.6.15

Creep characteristic is an important failure mechanism when evaluating engineering materials that are soft material as polymers or used as mechanical elements at high temperatures. One of the popular thermo-elastic polymers, Polycarbonate(PC) which is used broadly for engineering polymer, as it has excellent mechanical and thermal properties compared to other polymers, was studied for creep characteristic at various level of stresses and temperatures. From the experimental results, the creep limit of PC at room temperature is 85 % of tensile strength. which is higher than PE (75%)at room temperature. Also the creep limits decreased exponentially as the temperatures increased, up to 50 % of the melting point(267 ℃). Also the first and third stage among the three creep stages was non-existent nor was there any rupture failure which occurred for many metals.

Key Words: Polycarbonate (PC, 폴리카보네이트), Creep (크리프), Creep Limit (크리프한도), Tensile Strength (인장강도), Secondary(steady) Stage Creep (2기 또는 정상단계크리프), Rupture (파단)

1. 서론

높은 온도나 연한 재료에 일정한 응력을 가하고 긴 시간 동안 유지해 주면 시간이 경과함에 따라 변형량 즉 변형률(strain)이 점차 증가하게 되는데 이러한 응력과 온도에 따른 재료의 시간의존성 변형에 대한 정의는 Philips[1] 가 느린 변형으로 정의한 바 있다. 그 후에 Andrade[2]는 점성유동으로도 정의하였으나 지금은 크리프(creep)라고 통일하여 사용되며 폴리머재료나 고온에서 사용되는 금속의 기계요소설계에서 매우 중요시 되고 있다. 이때 일반적으로 특정한 사용조건에서 손상없이 사용가능한 최대응력 즉 재료에 대한 크리프한도를 알아야 하고 이는 주로 크리프시험을 통하여 결정한다. 이 시험에서 재료에 동일하중을 주면서 지속시간에 따른 변형(늘어남)량을 측정하지만 응력을 계산하기 위하여 변형 중에 순간면적의 크기를 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 변형이 크지 않은 경우에는 단면적의 변화를 무시하고 일정한 응력상태로 취급하여 변형률(늘어난 길이/본래의 길이)을 ε 라 하고, 동일한 응력에서 지속시간을 t 라 할 때 $d\varepsilon/dt$ 를 크리프률(또는 크리프속도, creep rate)이라고 한다. 크리프률은 재료와 온도 및 응력에 지배받으며, 금속의 경우에는 $0.3\sim0.6T_m$(T_m:용해점)이상에서 크리프특성에 밀접한 관계를 보여 준다고 알려져 왔다.[3] 금속은 비교적 낮은 온도에서는 응력에 의한 변형이 이루어짐에 따라 결함의 이동이나 축적 등에 의한 가공경화가 발생하지만, 고온에서

는 가공경화와 함께 회복연화가 진행되므로 이들의 상대적인 크기에 의해 전형적인 크리프특성이 나타난다. 즉 실온에서의 강도가 크다하더라도 고온에서는 연화현상이 두드러지면 동일한 응력에서 시간에 따라 변형이 가속적으로 이루어지게 된다. 따라서 비록 짧은 시간 동안에 크리프률이 작은 재료라 하더라도 장기간 지속되면 크리프변형률이 커지는 경우가 많다. 용융점이 비교적 낮은 금속, 즉 납, 주석, 구리 등의 순 금속 또는 연한 경합금이나 열가소성폴리머는 상온에서도 크리프 현상이 나타나지만, 주철이나 강 등 강도가 크고 용융점이 높은 금속에서는 용융점의 절반온도 또는 250℃이상의 온도가 아니면 기능에 영향을 줄 정도로 현저한 크리프현상은 나타나지 않는다. 최근에는 널리 활용되는 제트기관, 로켓, 증기터빈 및 가스터빈 등의 기계요소에서는 450℃이상의 온도에서 사용되는 기계요소로써 강(steel)을 비롯한 특수 금속재료의 크리프연구는 매우 활발히 진행되어 왔다.[4,5]

일반적으로 비중, 내부식성, 제작성과 가격 등에서 우수성 때문에 기계의 소재로 널리 사용되는 열가소성폴리머는 강도와 용융점이 금속에 비하여 낮아 상온에서도 영구변형이 일어나서 때문에 크리프성질에 의한 사용상 많은 제약을 받는다. 이러한 요소에 받는 응력의 크기가 비교적 증가하고 사용온도가 높아질수록 강도가 작아지는 것을 예측하고 있으나 실제로 어느 정도로 어떤 현상에 의해 감소하는지에 대한 연구는 비교적 많지 않다.[6,7] 따라서 최근에 기계소재로 널리 사용되는 열가소성폴리머에 대한 변형특성과 크리프한도 및 온도민감성에 관하여 연구하고 다양한 기계제품으로써 사용온도, 응력과 변형에 관한 자료를 고려하여 기계요소설계에 활용하는 것은 매우 중요하다. 특히 상온보다 높은 온도에서 크리프시험을 통하여 폴리머재료의 변형기구를 해석하고 크리프한도를 결정하여 설계에 활용하기 위해 널리 사용되는 폴리에틸렌(PE)의 크리프특성에 관한 연구를 이미 발표한 바 있고,[8] 본 논문에서는 고급 엔지니어링폴리머로 널리 활용되는 폴리카보네이트(이하 PC)의 크리프특성에 관하여 시험과 고찰을 하였다.

2. 크리프이론

2.1 크리프현상

크리프시험에서 고려되는 변수로는 온도와 응력이 있다. 시험에서는 일정한 하중과 온도의 유지와 함께 시간에 따라 변화되는 시편길이에 대한 정확한 변형량을 측정하는 것이 중요하다.

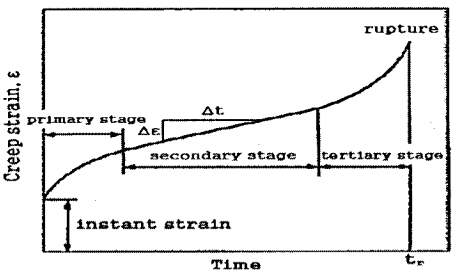


Fig. 1 Strain-time curve for creep stages

크리프곡선은 재료의 특성에 따라 다르지만 대부분의 금속들은 Fig. 1 과 같이 3 단계로 구분하여 나누어 해석하고 있다.[9]

그러나 단계적인 구분은 재료의 종류와 시험조건에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 시편의 온도를 일정하게 유지해 주고 응력크기를 다르게 하여 시편이 시험장치의 한계점까지 변형되도록 하면서 시험을 한다.

이때 하중이 동일한 상태에서는 변형에 의한 길이의 증가에 따른 시편의 단면적이 감소함에 따라 작용되는 응력은 점차 증가하게 된다. 따라서 일정한 하중을 가해 주는 시험방법에 의한 크리프시험은 시간에 대한 크리프변형률 곡선이 단면적의 감소로 실제 응력보다 점차 증가하는 응력에 대한 크리프곡선이 나타나게 된다.

시험 중에 길이의 증가에 따른 면적의 감소만큼 하중을 감소하여 응력을 일정하게 유지하는 것은 쉽지 않기 때문에 부하 하중을 지렛대(lever)로 가해주어 기울기의 변화로 하중을 감소시켜 보완해주는 방법에 의해 일정응력을 주는 것으로 가정하여 시험한다. 모든 재료들은 크리프시험에서 시험온도가 높을수록 그리고 작용응력이 클수록 크리프변형률의 증가는 더욱 빨라지게 된다.

재료의 크리프시험은 특정한 환경 및 시험온도로 가열된 시편에 단축응력을 가하는 방법에 의해 측정되며, 크리프 파단시험은 파단까지의 변형된 길이를 시간의 함수로 측정한다. 만일 파단되지 않고 장기간 변형이 작고 오래 유지되는 경우에는 재료가 파괴되기 전에 시험을 마치고 이 방법을 중단 크리프시험(interrupt creep experiment)이라 한다. 일반적으로 금속의 고온에서의 크리프속도는 응력의 3~7 승에 비례하여 증가하고, 시험온도에

지수함수로 증가하게 된다. 따라서 하중과 시편의 단면적 설정 및 시험온도의 제어에는 세심한 주의가 요구된다.

고온에서 하중은 가열시간 후에 일정한 시간을 유지하여 시편의 온도를 평형상태로 유지하고 있을 때 시험하중을 가해주고 그 후부터 일어나는 크리프변형과 시간을 측정하며 변형량을 시편의 표점 구간거리로 나누어 변형률(ε)-시간(t)곡선을 구한다.

2.2 크리프현상

크리프한도의 결정은 임의 온도와 응력에서 일정한 시간동안 크리프변형이 어느 범위 이내로 유지되는 최대응력을 크리프한도라고 정의하고, 기계 등의 공업용재료를 설계 및 제작하는데 매우 중요한 고려인자 중에 하나이며 일반적으로 다음과 같은 방법으로 결정한다.[10,11]

먼저 Tapsell[12] 의 방법에 의한 것으로 전체 크리프과정 중의 변곡점, 혹은 제 2 단계 크리프변형이 없는 것은 제 1 단계 크리프변형 후의 변형속도, 즉 최소 변형속도를 측정하여 그것과 내구수명과의 대수곡선이 직선이 되고, 또한 변형률이 일정한 값 이하이면 극히 긴 수명을 갖는다는 사실로부터 40 일 후에 변형속도가 10^{-5} %/day 일 때의 응력을 크리프한도로 하고 있다.

평균 변형률속도에 의한 설정으로 Kaiser-Wilhelm Institute 의 방법에는 다음과 같은 3 가지 기준이 있다.

1) 크리프시험 시작 후 3~6 시간 사이의 평균 변형속도가 0.005%/hr 로 되는 응력을 크리프한도로 한다.

2) 크리프시험 시작 후 5~10 시간 사이의 평균 변형속도가 0.003%/hr 로 되는 응력을 크리프한도로 한다.

3) 크리프시험 시작 후 25~35 시간 사이의 평균 변형속도가 0.0015%/hr 로 되는 응력을 크리프한도로 한다(단 이것은 500℃ 이하에만 적용한다).

마지막으로 변형률을 주로 한 설정방법이 있다. 이는 경과시간의 대수와 변형과의 곡선을 기본으로 하여 100,000 시간에 0.1%의 변형률이 생기는 응력을 크리프한도로 하였다. 이 방법으로 크리프한도를 구하려면 먼저 측정된 크리프곡선을 크리프시간에 대한 대수의 눈금으로 바꾸어 놓는다. 그 다음에 그림에서 규정해야 할 0.1%의 변형에 도달하는 시간을 구한 다음 시험온도와 0.1 %의 변형에 이르는 온도를 정하고 마지막으로 시험온도와 한계응력의 관계를 찾아서 외삽에 의해서 특정온도에서의 크리프한도를 구한다.

위와 같은 방법은 원자력발전소의 터빈 등에서 장기간 사용되는 금속의 크리프특성을 연구하는 기준으로 삼고 있다 그러나 폴리머와 같은 연한재료의 크리프특성에 관한 경향을 알아보기 위한 시험은 비교적 금속보다 짧은 시간에 대한 변형저항능력을 판단하는 방법으로 1 시간 정도의 시험에 의해 크리프특성이 1~2 단계만 발생하고 3 단계가 나타나지 않는 저항응력의 크기를 비교하고 최대응력을 크리프한도로 하며 본시험에서 이 방법을 적용하였다.

3. 크리프시험기 및 시편준비

3.1 시험기와 시험방법

시험에서는 Fig. 2 에 나타낸 폴리머전용 크리프시험기 KPM-300-AR 을 사용하였다.

이 시험기에서 크리프시편은 일정한 온도에서 장시간 일정한 인장하중을 가하고, 규격에서 규정한 조건하에서의 시편의 길이 변화를 측정하며 시험 개시로부터 시편이 규정된 조건(파단 또는 규정된 변형한계량)에 도달할 때까지의 시간, 변형 및 온도를 자동기록 장치로부터 얻을 수 있다.

시험온도는 실온에서 300℃까지며 최대 작용하중은 3kN 으로 모든 열가소성폴리머시편에 관한 크리프시험이 가능하도록 제작되어 있다. 또 하중은 시험기상부에 있는 지렛대(lever)에 의해 가해지며 시험의 한계변형을 최대변형 10.5mm 으로 한 경우 하중의 크기는 원래보다 약 2%정도가 감소하여 길이증가에 의한 응력의 감소를 보완하도록 하였다. 시편의 전처리는 시험 전에 온도 20±2℃, 상대습도 50±5%에서 10 시간 이상 건조용기(desiccator)내에 보관한 다음 시험을 하였다.

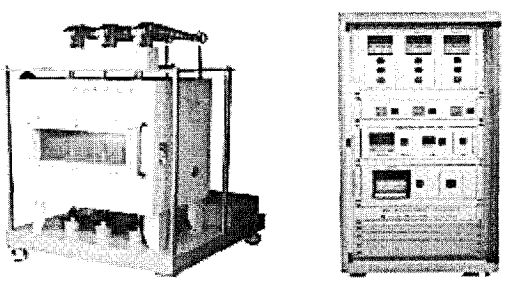


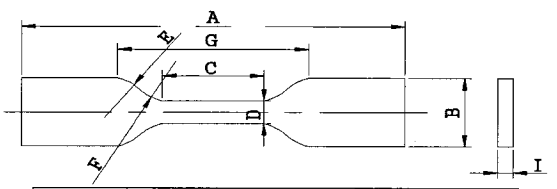
Fig. 2 Creep test rig for polymer

시험온도는 실온에서부터 300℃이며 최대 작용하중은 3kN 으로 모든 열가소성폴리머시편에 관한 크리프시험이 가능하도록 제작되어 있다. 또 하중은 시험기상부에 있는 지렛대(lever)에 의해 가해지며 시험의 한계변형을 최대변형 10.5mm 으로 한 경우 하중의 크기는 원래보다 약 2%정도가 감소하여 길이증가에 의한 응력의 감소를 보완하도록 하였다.

시험은 설정된 온도에 도달된 후 20 분간 유지하면서 시편과 시험기내의 온도를 평형을 유지시킨다. 또 미리 하중을 시험기에 걸고 시험시작 전에 변형 측정기록계를 작동시키고 나서 부하받침을 제거하면서 시험이 시작하도록 한다.

3.2 크리프시편 준비

크리프시험에 사용되는 시편의 모양 및 명칭은 KSM3006 2 호형 시편으로 이 형상은 주로 응력을 받으면 변형이 쉽게 발생하는 열가소성폴리머의 시험에서 크리프변형 측정 및 크리프파괴측정에 주로 사용되며 시편의 모양과 치수는 Fig. 3 과 같다.



A	total length	175 mm
B	width of end specimen	25±1
C	parallel area length	33±2
D	gauge width	6±0.4
E	(out) dia of curvature	14±1
F	(in) dia of curvature	25±2
G	gauge length	25±1
H	holding length	80±5
I	thickness	2±0.3

Fig. 3 Dimension of creep specimen(unit : mm)

3.3 실온에서 PC 의 인장시험

시험에 사용된 PC 의 인장시험결과를 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 연강이나 취성금속재료와 달리 열가소성폴리머의 응력-변형률선도에서 극한응력(실온에서의 인장강도)점을 지난 후에는 네킹(necking)이 발생하고 응력이 순간적으로 떨어지며, 그 다음에는 거의 일정한 하중에서 변형률이 점차 증가하면서 네킹의 길이가 계속 증가하였다. 즉 한번 네킹이 발생하면 영구변형으로 원래상태로 회복될 수 없으며 기계 요소로써의 기능을 하지 못하는 손상이 된다. 그림에서 가로축은 변형률 ε (%)이고 세로축은 응력(강도) σ 로써 실온에서의 평균인장강도(극한강도)는 63.5MPa 이고 문헌자료의 65MPa 에 근접함을 확인하였다.[13]

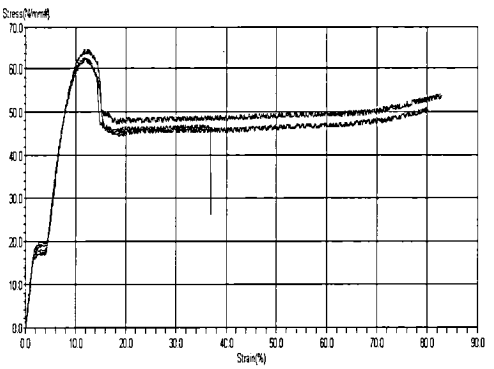


Fig. 4 Stress-strain curve of PC from the tensile test

3.4 PC 의 일반적인 기계적 및 열적성질

일반적으로 통용되는 PC 의 기계적, 열적성질은 다음과 같다.[14]

Table 1 Mechanical and thermal properties of PC

Mechanical and Thermal Properties	
Young's modulus (E)	2-2.4 GPa
Tensile strength (σ_t)	55-75 MPa
Compressive strength (σ_c)	>80 MPa
Elongation (ε) @ break	80-150%
Poisson's ratio (ν)	0.37
Izod impact strength	600-850 J/m
Melting temperature (T_m)	267 °C*
Glass transition temperature(T_g)	150 °C
Upper working temperature	115-130 °C

4. 시험과 고찰

크리프시험은 30℃, 60℃ 90℃, 120℃ 와 150℃ (T_g:유리전이온도)[13] 에서 응력의 크기를 실온에서의 0.4MPa ~ 56.7MPa 까지 시험을 하였고 그 결과를 분석하였다.

30℃에서 시험한 크리프곡선은 Fig. 5 에 제시하였다. 여기에서 PC 의 크리프변형은 1 단계 크리프에서 발생하는 전위이동, 결정경계의 축적에 따른

변형경화의 과정을 갖는 금속에서의 크리프현상이 발생하지 않았고, 크리프발생은 네킹현상으로 나타나며 이것은 2 단계 이후 마지막 3 단계 크리프에 해당하는 가속단계와 직접적으로 연결됨을 보여준다. 또 시험 중에서 가장 낮은 응력인 54.2MPa 에서는 변형률이 일정하게 증가하며 그 증가율은 초기변형 후인 시험시작부터 변화가 거의 없었다. 더 높은 응력인 55MPa 이상에서는 2~3 단계 변형이 발생하였으며 응력의 증가에도 변형량의 크기는 거의 차이가 없고 발생시간만 빨라짐을 보여 준다.

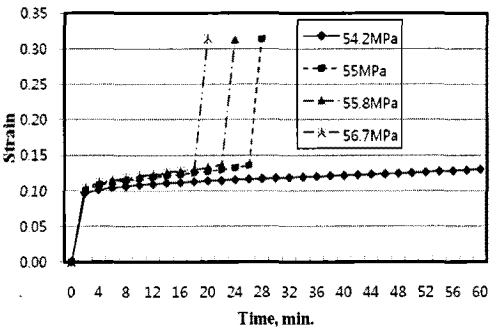
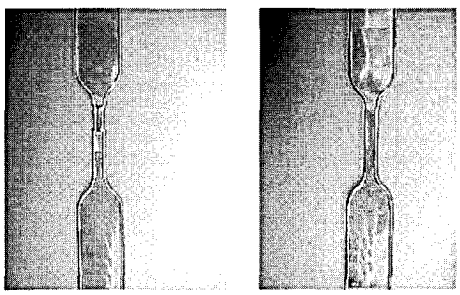


Fig. 5 Creep strain of PC at 30℃ on the various stresses

이러한 현상의 원인으로는 낮은 응력에서는 변형속도가 작기 때문에 응력을 받는 부분의 전체에 응력이 골고루 분산되어 국부적 응력집중현상이 잘 발생되지 않는다. 또 응력집중이 발생되더라도 진행이 느려서 주변으로의 분산이 가능하지만 응력이 크거나 변형속도가 빨리 진행되면 재료의 미소결함이나 표면 거칠기 등의 영향으로 국부적 미소응력집중현상이 쉽게 발생하고 분산되기 이전에 네킹으로 발전된 다음에 시간이 경과함에 따라 영역이 점차 확대되는 것으로 사료된다.

Fig. 6 은 30℃시험에 사용한 형상으로 54.2 MPa 에서는 표점거리 전체에 변형이 일정하게 이루어져 있으나, 이보다 높은 응력에서는 시편의 중간부분에 변형이 집중적으로 발생하는 네킹현상이 생겼으며 시간이 경과하면서 네킹부분의 길이가 증가하였다.

여기에서 열가소성 폴리머재료의 크리프성질을 이해할 필요가 있다. 보통 열가소성 폴리머는 공중합으로 이루어진 사슬들을 2 차 분자간결합인 사슬간의 반델발스 결합력으로 형태를 이루고 이 힘은 사슬 자체의 강도보다 작다. 따라서 폴리머



(a) (b)

Fig. 6 Creep test specimens of PC at 30℃, (a) necked specimen by high stress, (b) not necked specimen by low stress

에 힘이 가해지면 사슬간의 결합력이 풀려나고 공유결합된 사슬이 정렬되고 국부적으로 강화되며 응력은 정렬되지 않은 부분으로 집중되어 네킹 영역이 전파가 이루어지는 것으로 나타나게 된다. 즉 폴리머의 크리프는 2 차 결합력의 항복현상으로 나타나는 것이다. 따라서 2 차 결합력은 작용응력의 크기와 해당 온도에서의 결합력과의 상호관계를 결정하게 되며 30℃에서 결합력의 크기는 네킹이 발생하지 않는 즉 크리프한도로 54.2 MPa 가 됨을 알 수 있다.

Fig. 7 은 30℃ 에서 변형률의 시간(분)변화율(d ε /dt)을 보여준다. 이 그림에서 일반적으로 변형률이 시간과 응력에 따른 차이가 거의 없고 네킹 발생시에만 순간적으로 증대되어 변형률이 비교적 일정함을 즉 2 차 결합력의 변화가 없음을 보여준다.

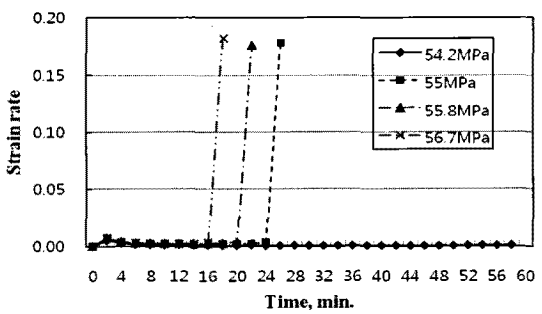


Fig. 7 Creep strain rate curve of PC at 30℃ on the various stresses

또 시험에서 모든 크리프변형이 3 단계로 구분되지가 않았다. 55MPa, 55.8MPa 와 56.7MPa 의 응력

은 1 단계와 3 단계가 구분이 더욱 분명하고 네킹의 형성단계와 전파단계전이가 곡선이 아닌 각을 이루는 형태로 나타남을 보여 준다.

Fig. 8 은 60°C 에서 4 개의 응력상태에 대한 변형률의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다.

이 경우에서도 1 에서 3 단계의 전이가 곡선이 아닌 각을 이루며 변화되었고 크리프한계가 30°C 에서 보다 약 86%(46.7 MPa)가 감소하였음을 보여준다. 또 2 단계과정이 나타나지 않고 초기 변형 후 일정한 증가율을 보이다가 3 단계로 전이 되든지 또는 1 단계를 유지하고 있음을 보여준다.

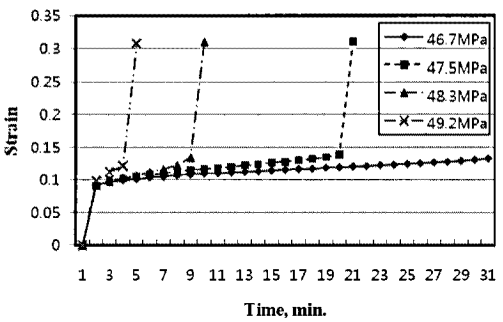


Fig. 8 Creep strain of PC at 60 ℃ on the various stresses

Fig. 9 는 90°C 에서 각 응력에 대한 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 시험온도와 작용응력의 크기기 증가하였을 뿐 상대적인 차이가 없고 앞의 시험 결과와 유사함을 보여 주고 있다. 역시 2 단계과정은 나타나지 않고 있다.

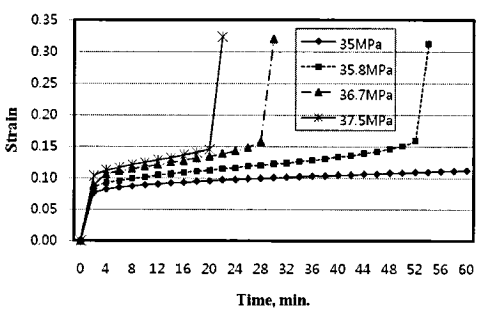


Fig. 9 Changes of strain of PC at 90oC on the various stresses

Fig. 10 에서는 일반적으로 전문교재에서 제시하는 연속사용온도의 한계인 [11] 120°C 에서의 응력의 크기에 따른 변형률(strain)의 변화를 보여준다. 그림에서 네킹(크리프현상)이 발생하는 경우에는 1 단계에서 3 단계로의 전이가 곡선적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이 온도에서는 크리프한도가 22.5MPa 로써 항복강도의 35%가 되고, 1 단계에서 3 단계로의 전이는 응력이 클수록 빠르게 곡선적인 변화를 나타낸다. 따라서 PC 는 열가소성재료가 120°C 에서 열에 민감해지며 연화과정을 거친 후 크리프현상이 일어남을 의미한다.

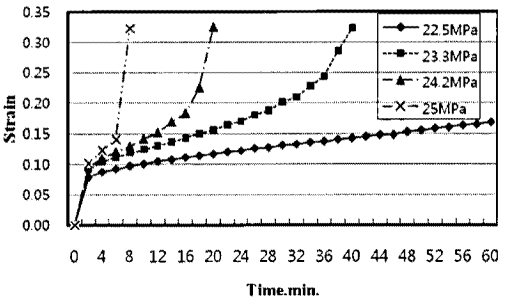


Fig. 10 Changes of strain of PC at 120oC on the various stresses

Fig. 11 은 시용한계온도를 초과한 유리전이온도에 해당하는 150°C 에서 응력의 크기에 따른 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 시험한 것 중에 가장 높은 시험온도로써 역시 초기변형이 1 단계에서 직접 3 단계로 전이되어 일반적으로 크리프특성을 갖는 형태를 이루지 않는다.

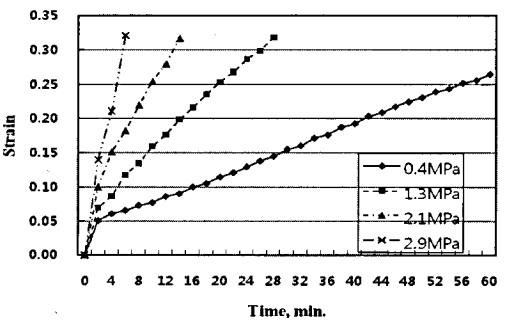


Fig. 11 Changes of strain of PC at 150℃ on the various stresses

따라서 2 차결합력의 변형저항이 극히 약해지고 변형저항능력은 거의 없다는 것을 의미한다. 즉 PC 의 2 차결합력의 온도한계는 150°C 로 유리

전이온도(T_g)에 해당됨을 입증하였다.[13]

응력을 50MPa 로 일정하게 하고 온도에 따른 변형량의 변화곡선을 Fig. 12 에 나타내었다. 응력이 일정하고 10°C 씩의 온도변화를 준 경우에도 앞에서 온도를 일정하게 하고 응력을 증가시킨 경우와 유사한 형태의 변형률 변화현상으로 온도 민감성을 잘 보여 주고 있다.

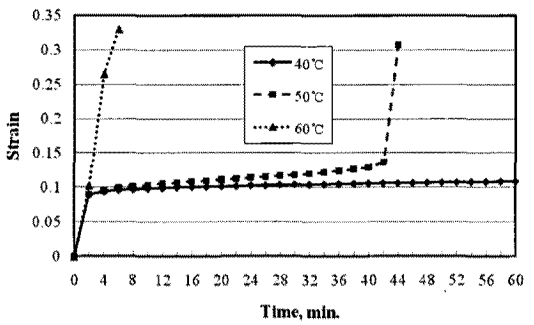


Fig. 12 Creep strain of PC on 50 MPa at various temperatures

이 그림에서 크리프한도의 정의와 응력에 따른 사용 한계온도의 관계를 알 수 있으며 온도에 대한 민감성을 분명하게 나타낸 것이다.

온도에 따른 PC 의 크리프한도를 60 분간의 시험에서 최대변형률(strain) 0.25 로 설정한 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. 상온에서의 인장강도(변형속도 : 10 mm/min) 63.6MPa 에 비하여 크리프한도는 상온(30°C)에서의 인장강도의 85 % 수준인 54.2 MPa 로 나타났고 60° C 에서는 73 %정도, 90°C 에서는 55%정도에, 그리고 120°C 에 이르면 35% 이고 150°C 의 경우에는 0.6% 수준으로 급격하게 감소하였다.

특히 온도가 90°C 이상에서는 감소율이 점차 커지고 있어 공유결합한 고분자사슬간의 반델발스(2 차)결합력이 온도와 하중에 민감하며 그 변화율은 120°C 이상에서 급격히 감소함을 알 수 있다. 즉 PC 를 기계요소 등의 응력을 받는 부품의 재료로 사용하려면 크리프한도를 고려한 설계에서는 실온에서의 인장강도를 기준으로 한 경우보다 온도에 따른 강도가 급격히 커지므로 이 결과를 고려하여 단면적의 크기를 결정하여야 하며, 상온 크리프한도의 시간과 변형률을 기준으로 하더라도 안전율(계수)을 충분히 크게 하여 설계해야 함을 보여준다.

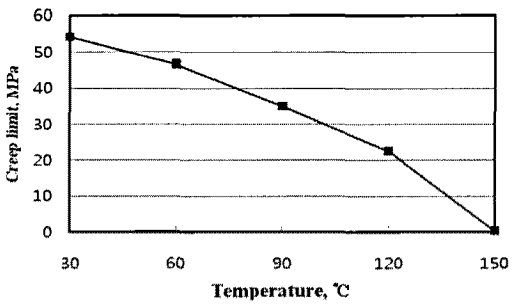


Fig. 13 Creep limit of PC at various temperatures on 0.25% strain for 1 hr

5. 결론

공업용 열가소성폴리머 중에서 우수한 기계적 성질을 갖고 있어 기계요소로 가장 많이 사용되는 폴리카보네이트(PC)에 대한 크리프시험을 하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열가소성인 PC 는 응력을 지속적으로 받을 경우 2 차결합력 즉 반델발스결합력의 크기가 그 온도에서 크리프한도임을 보여 주었다.

2) PC 의 크리프현상은 1 단계에서 3 단계전이가 120°C 이하에서는 짧은 시간 내에 네킹형태로으로 발생되나 그 이상의 온도에서는 점진적(곡선)으로 발생하여 사슬간의 결합력이 매우 느슨해짐을 알 수 있다

3) 온도증가에 따른 크리프한도는 비선형적으로 감소하고 유리전이온도(T_g)에서는 응력저항이 급격히 감소하여 응력을 지속적으로 받는 부재로는 부적합함을 보여주고 있다.

4) 장시간 하중을 받는 상태에서는 폴리머재료의 변형은 부재의 전체에서 발생하고 높은 응력이나 고온에서는 2 차 결합력이 저항을 잃게 되어 네킹(necking)이 발생한다. 만약 하중이 계속 유지되면 네킹부분은 국부적으로 강화되어 다른 영역으로 확장에 의해 변형률이 증가하였다. 또한 파단현상(rupture)은 공유결합한 사슬의 강도가 크므로 발생하지 않았다.

5) 사슬간의 2 차 결합력만으로 초기응력에 대한 저항을 받으므로 온도에 의해 연화는 발생하지만 금속의 경우에서와 같이 회복단계가 없으므로 크리프곡선은 2 단계 과정이 나타나지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Philips, F., "The Slow Stretch in India Rubber, Glass and Metal Wire Subjected to a Constant Pull," Philos, Mag., Vol. 9, p. 513, 1905.
2. Andrade, E. N., "The Viscous Flow in Metals and Alloyed Phenomena," Proc. R. Soc., Vol. A84, pp. 1-13, 1910.
3. Cook, R. H. and Skelton, R. P., "The Influence of Environment on High Temperature Mechanical Properties of Metals and Alloys," Int. Met. Rev., Vol. 19, p. 199, 1974.
4. Woodfold, D, A., "Design for High-Temperature Application," Materials Selection and Design, ASM Handbook, Vol. 20, pp. 573-588, 1977.
5. Chambers, W. L., Ostergren, W. J. and Wood, J. H., "Creep Failure Criteria for High Temperature Alloys," J. Eng. Metal. Technol., Vol. 101, No. 4, pp. 374-379, 1979.
6. Hauck, J. E., "Long-Term Performance of Plastics," Materials in Design Engineering, pp. 113-128, 1965.
7. Reif, S. K., Amberge. K. J. and Woodford, D. A., "Creep Design Analysis for a Thermoplastic from Stress Relaxation Measurement," Mater. Design, Vol. 16, No. 1, pp. 15-21, 1995.
8. Kang, S. C. and Lee, Y. W., "Creep Characteristic of the Polyethylene(PE) at Various Stresses and Temperatures," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 99-104, 2009.
9. Park, J. C., Chung, J. C., Song, G. B. and Namgung, J. K., "Machine Design," Chyungmoongak, pp. 101-103, 2001.
10. Lee, T. S., "Materials Testing," Hyungsyul Publ. Co., pp. 225-244, 1988.
11. Budinski, T. G., "Engineering Materials, Properties and Selection," Prentic Hall, Inc., pp. 152-154, 1996.
12. Tapsell, H. J., "Fatigue testes at Elevated Temperature," Symp. High-Temperature Steels and Alloys for Gas TurbinesIron and Steel Institute, London, Special Rep. No. 43, p. 169, 1952.
13. Callister Jr, W. D., "Materials Science and Engineering an Introduction," John Wiley & Sons, Inc, pp. 532-537, 2000.
14. http://enc.daum.net/dic100/contents.do?query1=20XX536313