

응력과 온도에 따른 아크릴(PMMA)의 크리프 특성

Creep Characteristic of the Polymethyl Methacrylate(PMMA) at Stresses and Temperatures

강석춘^{1,✉}
Suk Choon Kang^{1,✉}

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

Manuscript received: 2011.5.25 / Revised: 2011.7.25,8.20 / Accepted: 2011.8.31

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, Polymethyl methacrylate(PMMA) 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 PMMA at room temperature is 85 % of tensile strength. which is higher than that of PE (75%)at room temperature. Also the creep limits decreased to nil linearly as the temperatures increased, up to 120 ℃ of the melting point(267 ℃). Also the first and third stage among the three creep stages were non-existent nor were there any rupture failure which occurred for many metals at high temperatures.

Key Words: Polymethyl Methacrylate (PMMA, 아크릴), Creep (크리프), Creep Limit (크리프 한도), Tensile Strength (인장 강도), Secondary(steady) Stage Creep (2기 또는 정상단계크리프), Rupture (파단), Amorphous (비정질, 비결정질)

1. 서론

높은 온도나 연한 재료에 일정한 응력(공칭)을 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 Philips¹가 느린 변형으로 정의한 바 있다. 그 후에 Andrade²는 점성유동으로도 정의하였으나 지금은 크리프(creep)라고 통일하여 사용되며 폴리머나 고온에서 사용되는 금속의 기계적성질 중에서 매우 중요시 되고 있다. 즉 일반적으로 특정한 온도조건에서 손상없이 사용 가능한 최대응력의 크기 즉 재료에 대한 크리

프 한도를 알아야 하고 이는 주로 크리프시험을 통하여 결정한다. 이 시험에서는 재료에 일정한 온도에서 동일한 응력을 주면서 지속시간에 따른 변형(늘어남)량을 측정하지만 응력을 계산하기 위하여 변형 중에 순간면적의 크기를 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 변형이 크지 않고 일반적인 공학적 정보를 얻기 위한 대부분의 시험은 일정한 하중 하에서 행하여진다.³ 이때 변형률(늘어난 길이/본래의 길이)을 ϵ 라 하고, 동일한 응력에서 지속시간을 t 라 할 때 $d\epsilon/dt$ 를 최소 또는 정상 크리프속도라고 한다. 크리프율은 재료와 온도 및 응력에 지배 받으며, 금속의 경우에는 $0.3\sim 0.6T_m$ (T_m : 절대 융점)이상에서 크리프특성에 밀접한 관계를

보여 준다고 알려져 왔다.⁴ 금속은 비교적 낮은 온도에서는 응력에 의한 변형이 일어날 경우 결함의 이동이나 축적 등에 의한 가공경화가 발생하지만, 고온에서는 가공경화와 함께 회복연화가 진행되므로 이들의 상대적인 크기에 의해 전형적인 크리프 특성이 나타난다. 즉 실온에서의 강도가 크다 하더라도 고온에서는 연화현상이 두드러지면 동일한 응력에서 시간에 따라 변형이 가속적으로 이루어지게 된다.

따라서 비록 짧은 시간 동안에 크리프변형이 작은 재료라 하더라도 장기간 지속되면 변형률이 커지는 경우가 많다. 용융점이 비교적 낮은 금속, 즉 납, 주석, 구리 등의 순 금속 또는 연한 경합금이나 열가소성 폴리머는 상온에서도 크리프 현상이 나타나지만, 주철이나 강 등 강도가 크고 용융점이 높은 금속에서는 용융점의 절반 온도 또는 250 °C 이상의 온도가 아니면 기능에 영향을 줄 정도로 현저한 크리프현상은 나타나지 않는다. 최근에는 널리 활용되는 제트기관, 로켓, 증기터빈 및 가스터빈 등의 기계요소에서는 450°C 이상의 온도에서 사용되는 기계요소로서 강(steel)을 비롯한 특수 금속재료의 크리프연구는 매우 활발히 진행되어 왔다.^{5,6}

일반적으로 비중, 내부식성, 제작성과 가격 등에서 장점이 많기 때문에 기계요소의 소재로 널리 사용되는 열가소성 폴리머재료는 강도와 용융점이 낮아 크리프변형에 의해 많은 제약을 받는다. 따라서 기계요소로 활용되기 위해서는 크리프 특성을 이해하고 그 한계를 정의하여 기준으로 삼아야 하지만 아직도 각각의 폴리머에 대한 자세한 크리프특성에 관한 연구는 활발하지 않은 실정이다.^{7,8}

이미 가장 많이 활용되고 있는 범용 폴리머 중 PE 와 엔지니어링 폴리머인 PC 의 크리프 특성에 관하여 발표한 바 있다.^{9,10} 본 연구는 반투명으로 내열성, 내마모성이 뛰어나 기어나 베어링 또는 콘베어 부품의 소재로 널리 시용될 뿐만 아니라 건축, 조명, 방풍유리 및 의료기구 등으로 널리 사용되고 1956 년에 듀폰사에서 개발한 비정질(amorphous) 아크릴수지(Polymethyl methacrylate : PMMA)의 크리프특성에 관하여 시험하고 현상학적으로 그 결과를 고찰하였다.

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.

크리프곡선은 재료의 특성에 따라 다르지만 대부분의 금속들은 Fig. 1 과 같이 3 단계로 구분하여 나누어 해석하고 있다.¹¹ 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.

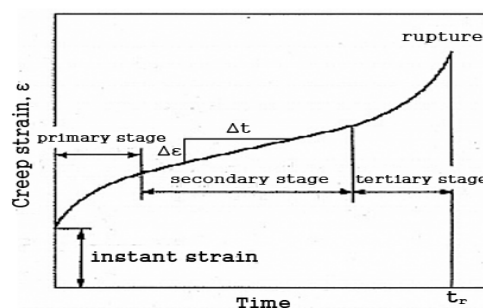


Fig. 1 Strain-time curve for creep stages

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 크리프 시험은 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 변형률의 증가는 더욱 커지게 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)이라고

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-시간($\epsilon - t$)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.^{12,13}

먼저 Tapsell¹⁴의 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 Institute의 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 특정 온도에서의 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 최대 응력을 크리프한도로 하며 본시험에서 이 방법을 적용하였다.

3. 크리프시험기 및 시편준비

3.1 시험기와 시험방법

시험은 Fig. 2 에 나타낸 폴리머수지 전용 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 얻고 매 시편에 3 회 시험한 결과를 바탕으로 시험자료를 분석하였다.

시험온도는 실온에서 300℃까지며 최대 작용하중은 3kN 으로 모든 열가소성 폴리머시편에 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 변형에 의한 길이증가에 의한 단면적 감소효

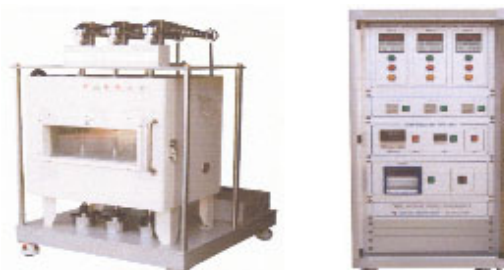


Fig. 2 Creep test rig for polymers

과의 응력의 감소를 보완하도록 설계 및 제작되었다(단 네킹이 안 일어난 경우).

3.2 크리프시험 준비

크리프시험에 사용되는 시편의 모양 및 명칭은 KSM3006 2 호형 시편으로 이 형상은 주로 응력을 받으면 변형이 쉽게 발생하는 열가소성폴리머의 성질에서 크리프변형 및 크리프파괴 측정에 주로 사용되며 판상제품을 정밀 기계가공하여 제작하였다. 시편의 치수와 형상은 Fig. 3 과 같다.

| | | | |
|---|----------------------------|---|------------------------------|
| A | total length : 175±1 | F | (in) dia. of curvature :25±2 |
| B | width of end specimen:25±1 | G | gauge length;66±2 |
| C | parallel area length:33±1 | H | holding length:80±5 |
| D | gauge width:6±0.4 | I | thickness:2±0.3 |
| E | (out)dia of curvature:14±1 | | |

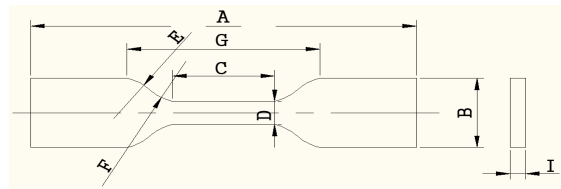


Fig. 3 Dimension of creep specimen(unit : mm)

3.3 실온에서 PMMA 의 인장시험

시험에 사용된 PMMA 의 실온에서 인장시험 결과를 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 그림의 열가소성 폴리머의 응력(공칭응력)-변형률선도에서 극한 응력(인장강도)한도를 지난 후에는 네킹(necking)이 발생하고 응력이 순간적으로 떨어지며 변형이 상당크기까지 지속되는 것이 보통이지만 비정질(amorphous)인 PMMA¹⁵ 는 일반적인 취성금속재료와 같이 최대응력 즉 극한강도를 지나면서 소성변형이나 네킹현상이 발생하지 않고 파단되었음을 보여준다.

파단에 이르기까지 최대변형률은 6~7% 정도이고 인장강도는 62MPa 으로서 표준 그라이드의 65MPa 에 근접함을 확인하였다.¹⁴ 특히 열가소성수지이지만 다른 재료와 달리 PMMA 는 실온에서 네킹의 발생이 없고 파단 이전에 변형이 매우 적게 발생하여 열경화성 폴리머나 취성금속재료와 유사함을 알 수 있다. 또 네킹이 발생하는 폴리머의 경우에는 신연이 전체적으로 일어나므로 신장계(extensometer)를 사용하여 진응력-변형률선도를 정밀하게 측정하지

않는 것이 일반적이다.

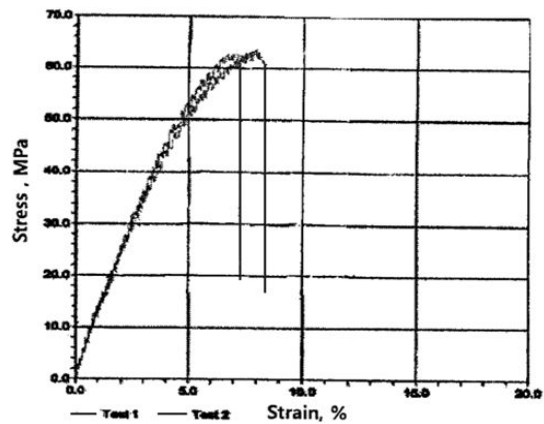


Fig. 4 Stress(nominal)-strain(%) curve of PMMA

3.4 PMMA 의 기계적 및 열적성질

일반적으로 교과서와 handbook 등의 문헌에 인용되고 있는 PMMM 의 기계적성질 및 열적성질은 다음과 같다.¹⁶

Table 1 Mechanical and thermal properties of PMMA

| | |
|----------------------------------|--------|
| Young's modulus(E) | 3 GPa |
| Tensile strength(σ) | 65 MPa |
| Elongation@break | 0.3~3% |
| Poisson's ratio(V) | 0.37 |
| Izod impact strength | 16J/m |
| Glass transition temperature(Tg) | 100oC |
| Heat distortion temperature | 85oC |

4. 시험결과와 고찰

크리프시험은 30℃, 60℃, 90℃와 120℃에서 여러 응력에 대하여 크리프시험을 하였다.

30℃에서 시험한 크리프곡선은 Fig. 5 와 같이 나타났고 여기에서 PMMA 의 크리프변형은 시험중에서 가장 낮은 응력인 41MPa 에서는 변형률이 초기 변형후에 일정한 비율로 증가하며 60 분간의 시험기간 중에 약 0.05%만 발생하였고 응력이 41MPa 보다 큰 응력에서 시험한 시편은 변형률이 약간 증가하다가 모두 파단되었고 이것보다 한 단계 아래의 응력에서는 초기변형이 거의 발생하지 않고 처음부터 일정한 기울기로 증가하고 있음을 보여준다.

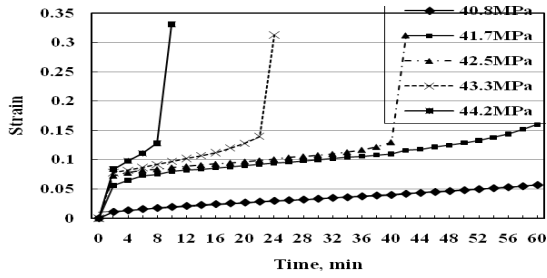


Fig. 5 Creep strain of PMMA at 30 °C for stresses

Fig. 6 의 (a)는 30°C 시험에 사용한 형상으로 실온인장강도의 65.6%인 가장 낮은 응력 41.7MPa 에서는 표점거리 전체에 변형이 매우 작으면서 일정하게 발생하였으나 이보다 높은 응력에서는 시간이 경과하면서 약간의 변형이 일어나다가 네킹 현상이 발생하지 않고 Fig. 6 의 (b)와 같이 순간적인 파단(rupture)이 발생하였다.

또 파단은 응력이 클수록 빨리 발생하지만 모두 변형률이 0.13~0.15 근처에서 이루어짐을 보여 준다. 이러한 현상의 원인으로서는 낮은 온도에서는 체인간의 결합력인 2 차결합력과 공유결합력인 체인의 강도가 큰 차이가 없이 비슷하므로 변형이 일어나지 않고 응력에 견딜 수 없을 때까지 유지하다가 파단되는 것으로 판단된다.

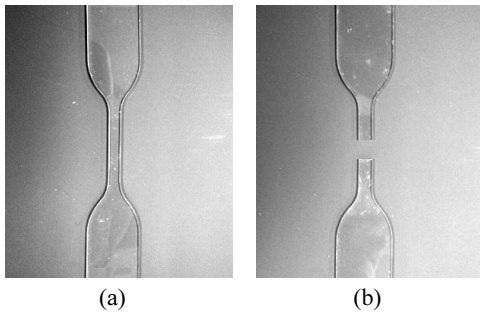


Fig. 6 Creep tested specimen of PMMA at 30°C, (a) Specimen at low stress without rupture, (b) Specimen at high stress by rupture

또 파단은 응력이 클수록 빨리 발생하지만 모두 변형률이 0.13~0.15 근처에서 이루어짐을 보여 준다. 이러한 현상의 원인으로서는 낮은 온도에서는 체인간의 결합력인 2 차결합력과 공유결합체인 체인의 강도가 큰 차이가 없이 비슷하므로 변형이 일어나지 않고 응력에 견딜 수 없을 때까지 유지하다가 파단되는 것으로 판단된다.

일반적 열가소성폴리머는 공유결합으로 이루어진 사슬들을 2 차 분자간의 결합인 사슬간의 반델발스결합력으로 형태를 이루고 이 결합력은 실온에서도 체인 자체의 강도보다 작다. 따라서 폴리머에 힘이 가해지면 사슬간의 결합력이 풀려나고 공유 결합된 사슬이 정렬되고 국부적으로 강화되며 응력은 정렬되지 않은 부분으로 집중되어 네킹 영역의 확대가 발생하는 것으로 나타난다. 즉 폴리머의 크리프는 2 차 결합력의 항복현상에 의한 것이다. 따라서 2 차 결합력은 작용응력의 크기와 해당 온도에서의 결합력과의 상호관계를 결정하게 되며 30°C에서 결합력의 크기는 파단이 발생하지 않는 즉 크리프한도로 41.7MPa 가 됨을 알 수 있다.

Fig. 7 은 30°C 에서 정상 크리프속도($d\epsilon/dt$)를 보여준다. 이 그림에서 응력이 작거나 큰 경우를 제외하고 C 자형을 이루고 있음을 알 수 있다.

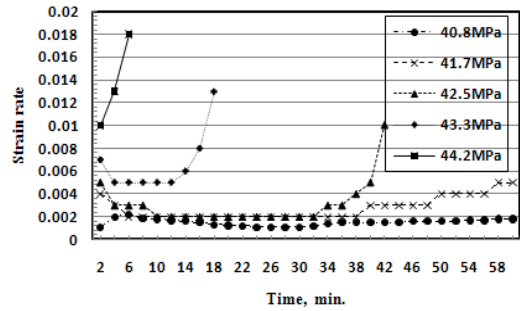


Fig. 7 Creep strain rate of PMMA at 30 °C for stresses

또 정상상태에서는 일반적으로 크리프속도가 거의 무시할 정도로 작고 시간과 응력에 따른 차이가 거의 없으며 낮은 응력에서는 변화가 없이 지속되나 응력이 큰 경우 파단이 되며 응력이 클수록 속도가 급격히 발생하였다. 따라서 실온에서는 폴리머의 크리프현상인 즉 2 차 결합력이 시간에 따라 변화가 없음을 보여 준다.

또 시험에서 모든 크리프변형이 3 단계로 구분되지 않는다. 42.5MPa, 43.3MPa 와 44.2MPa 의 응력은 1 단계와 3 단계가 구분이 더욱 분명하고 네킹의 형성단계와 전파단계전이가 곡선이 아닌 각을 이루는 형태로 나타남을 보여 준다.

Fig. 8 은 60°C 에서는 30°C 의 경우보다 절반의 응력범위에서 시험하였고, 4 개의 서로 다른 응력에 대한 시간에 따른 크리프변형률을 나타낸 것이다.

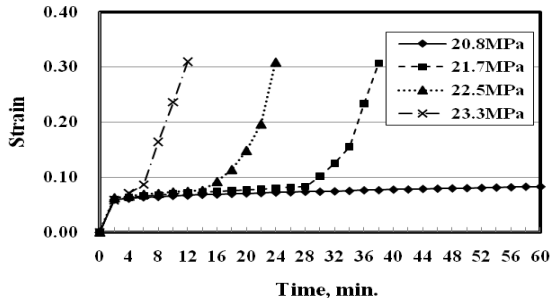


Fig. 8 Creep strain of PMMA at 60°C for stresses

이 시험에서 가장 낮은 응력인 20.8MPa 에서는 변형률의 변화(증가)가 거의 발생하지 않았다. 그러나 21.71 와 22.5MPa 에서는 전형적인 1, 2 와 3 단계를 갖는 크리프곡선 형태를 보여 준다. 이 응력과 온도에서 PMMA 의 반넬발스력이 외부응력에서 시간에 따라 서서히 약화됨을 알 수 있다. 그러나 응력이 큰 23.3MPa 에서는 3 단계의 형태로 연속적인 변형이 일어나면서 짧은 시간 내에서 급격하게 증가됨을 보여준다. 따라서 PMMA 는 60°C 에서는 저항능력이 30°C 보다 급격히 감소하였고 또 3 종류의 서로 다른 형태를 가진 변형이 나타남은 매우 흥미있는 현상이다.

Fig. 9 는 열변형온도(HDT :heat deflection temperature) 인 85°C 를 초과한 90°C 에서 응력에 대한 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 이들 응력은 30°C 의 응력에 비하여 1/10 정도의 우로 저항능력이 무시할 정도로 감소되었다. 가장 낮은 응력인 1.7MPa 에서 변형률은 2 단계에 준하며 거의 선형적으로 증가하지만 이보다 큰 응력에서는 단계구분 없이 선형적인 3 단계인 항복단계만으로 이루어 지고 응력이 클수록 더 빠르게 일어날 뿐 같은 변형의 형태를 갖는다.

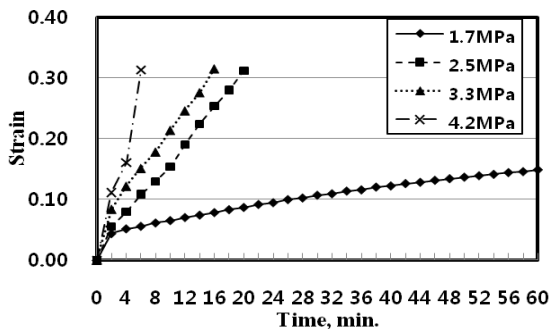


Fig. 9 Changes of strain of PMMA at 90°C for stresses

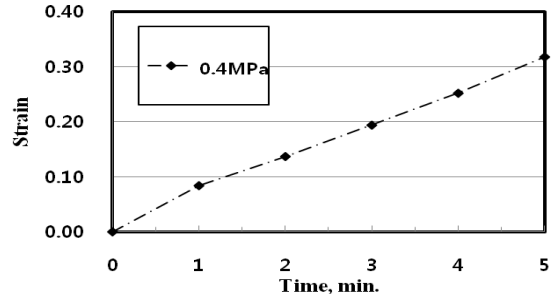


Fig. 10 Creep strain -time curve at 120°C for 0.4 MPa

Fig. 10 은 유리전이온도(Tg)인 100°C 를 초과한 120 °C 에서 시험한 결과를 보여 준다. 인장강도의 6% 수준인 시험가능 최소 응력인 0.4MPa 에서도 5 분 이내에 한계이상의 변형이 발생하여 이 온도에서 응력저항력이 거의 무시할 정도임을 알 수 있다.

응력을 22.5 MPa 로 일정하게 하고 온도에 따른 변형률의 변화곡선을 Fig. 11 에 나타내었다. 응력이 일정하고 10°C 씩의 온도변화를 준 경우에도 앞에서 온도를 일정하게 하고 응력을 증가시킨 경우와 유사한 형태의 변형률 변화의 현상을 보여 주고 있다.

이 그림에서 PMMA 의 크리프한도의 온도 민감성과 정의와 응력에 따른 사용 한계온도의 관계를 분명하게 보여 주고 있다.

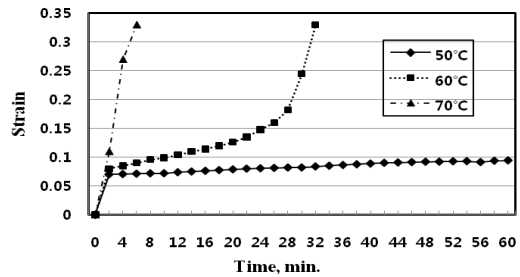


Fig. 11 Creep strain of PMMA on 22.5MPa for temperatures

온도에 따른 PMMA 의 크리프한도를 60 분간의 시험에서 최대 변형률(maximum strain) 0.2% 이내로 설정한 결과가 Fig. 12 에 나타내었다.

상온에서의 인장강도가 62MPa 에 비하여 크리프한도는 상온(30°C)에서의 인장강도의 65% 수준인 41.7MPa 로 나타났고 60°C 에서는 33%정도, 90°C 에서는 3%정도 급격하게 감소하여 온도상승에 따른 민감성이 매우 큰 것을 알 수 있다.

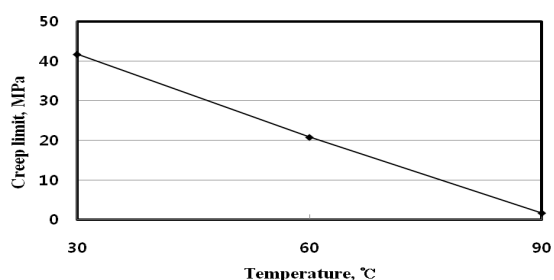


Fig. 12 Creep limit of PMMA for temperatures within 0.2% strain for 1hour test

특히 온도가 60°C 이하에서는 공유결합한 사슬의 강도와 고분자 사슬간의 반델발스(2 차)결합력이 차이가 없어 크리프변형이 발생하지 않고 과단되지만 60°C 이상에서는 반델발스결합력의 급격한 감소로 크리프변형의 형태를 가지며 응력이 크면 1 단계만으로 항복이 발생함을 보여준다. 즉 PMMA 를 기계요소 등의 응력을 받는 부품의 재료로 사용하려면 상온에서는 소성변형이 없는 취성성질을 고려해야 하고, 상온보다 높은 온도에서는 응력에 대한 저항능력의 급격한 감소로 하중부담능력을 잃게 되므로 가능한 응력을 받지 않는 요소로 사용되어야 함을 보여준다.

만약 응력부재로 사용된다면 크리프한도를 고려하여 단면적 크기를 충분히 크게 하여 결정하여야 하며 온도변화가 없는 경우에 안전율을 크게 하여 설계해야 함을 확인 할 수 있다

5. 결론

공업용 열가소성폴리머 중에서 비교적 우수한 기계적성질을 갖고 있어 기계요소로 널리 사용되는 아크릴(PMMA)에 대한 응력 및 온도변화에 따른 크리프시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열가소성수지인 아크릴(PMMA)은 비정질(amorphous) 재료로서 상온에서는 체인의 공유결합력과 체인간의 2 차 결합력 즉 반델발스력의 크기가 비슷하므로 크리프한도를 초과하면 변형이 일어나지 않고 과단됨을 알 수 있었다.

2) PMMA 의 크리프현상은 60°C 에서만 22~23 MPa 의 응력을 받을 경우 전형적인 1, 2 및 3 단계의 크리프변형이 일어나지만 다른 응력이나 온도에서는 연속적인 변형이 발생하든지 또는 과단되는 현상을 나타낸다.

3) 열변형온도(HDT :heat deflection temperature)인 85°C 이상에서 크리프응력에 대한 저항이 급격히 감소하므로 응력을 지속적으로 받는 경우에는 온도에 대한 저항성이 작기 때문에 부재로 사용되기에는 부적합함을 보여주었다.

4) 비정질형 폴리머인 PMMA 는 온도증가에 따른 열저항력이 급격히 감소하였고, 상온에서 충분히 큰 응력을 받을 경우 경우에는 취성재료의 과단손상과 같은 성질을 가지고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- Philips, F., "The Slow Stretch in India Rubber, Glass and Metal Wire Subjected to a Constant Pull," *Philos. Mag.*, Vol. 9, pp. 513-531, 1905.
- Andrade, E. N., "The Viscous Flow in Metals and Alloyed Phenomena," *Proc. R. Soc.*, Vol. A84, pp. 1-13, 1910.
- ASTM Standard E 139, "Standard Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials," pp. 283-297, 1984.
- 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.
- Woodfold, D. A., "Design for High Temperature Application," *Materials Selection and Design, ASM Handbook*, Vol. 20, pp. 573-588, 1977.
- 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.
- Hauck, J. E., "Long-Term Performance of Plastics," *Materials in Design Engineering*, pp. 113-128, 1965.
- 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.
- 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.
- Kang, S. C. and Lee, Y. W., "Creep Characteristic of the Polycarbonate(PC) at Various Stresses and

- Temperatures,” J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 9, pp. 78-85, 2010.
11. Park, J. C., Chung, J. C., Song, G. B. and Namgung, J. K.,” Machine Design,” Chyungmoongak, pp. 101-103, 2001.
 12. Callister, W. D. Jr., “Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive, e-Text,” Wiley, pp. 249-250, 2000.
 13. Budinski, T. G., “Engineering Materials, Properties and Selection,” Prentic Hall, Inc., pp. 152-154, 1996.
 14. Tapsell, H. J., “Fatigue Tests at Elevated Temperature,” Symp. High-Temperature Steels and Alloys for Gas Turbines, Iron and Steel Institute, Special Rep., No. 43, p. 169, 1952.
 15. Callister, W. D. Jr., “Materials Science and Engineering An Introduction,” John Wiley & Sons, Inc., p. 515, pp. 532-537, 2000.
 16. <http://enc.daum.net/dic100/contents.do?query1=20XX536313>