

# 온도와 응력에 따른 폴리에틸렌(PE)의 크리프특성

## Creep Characteristic of the Polyethylene(PE) at Various Stresses and Temperatures

강석춘<sup>1,✉</sup>, 이용원<sup>2</sup>  
Suk Choon Kang<sup>1,✉</sup> and Young Won Lee<sup>2</sup>

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

Manuscript received: 2008.8.11 / Revised: 2009.2.9 / Accepted: 2009.3.24

*Creep characteristic is an important failure mechanism when evaluating engineering materials that are soft as polymers or used as mechanical elements at high temperatures. One of the popular thermo-elastic plastics, Polyethylene(PE) which is used broadly for engineering purposes, as it has good properties and merits compared to other plastics, was studied for creep characteristic at various level of stresses and temperatures.*

*From the experimental results, the creep limit of PE at room temperature is 75 % of tensile strength. Also the creep limits decreased exponentially as the temperatures increased, up to 50 % of the melting point. Also the secondary stage among the three creep stages was non-existent nor was there any rupture failure which occurred for many metals.*

Key Words: Polyethylene (PE, 폴리에틸렌), Creep (크리프), Creep Limit (크리프한도), Tensile Strength (인장강도), Secondary (Steady) Stage Creep (2기 또는 정상단계 크리프), Rupture (파단)

### 1. 서론

고체재료에 일정한 응력을 가하고 특정온도에 서 장시간 동안 유지하면 시간이 경과함에 따라 변형률(strain)이 점차 증가하게 되는데 이러한 시간의존성변형에 대한 정의는 Philips<sup>1</sup>가 느린 변형으로 정의한 바 있다. 그 후 Andrade<sup>2</sup>는 점성유동으로 정의하였으나 최근에는 크리프(creep)라고 정의하여 기계요소에서 설계에 고려되는 성질 중에 하나이며, 이러한 조건에서 재료의 변형률을 측정하여 크리프한도(creep limit)를 결정하는 시험이 크리프시험이다. 이때 동일한 하중에서 시간에 따른 길이의 변화(늘어남)를 측정하지만 변형과정에서 재료의 순간면적을 측정하는 것은 곤란하다. 따라서 변형이 크지 않은 경우에는 단면적의 변화를

무시하고 일정한 응력상태로 취급하며 변형률  $\epsilon$  라고 하고 같은 응력에서 유지시간을  $t$  라고 할 경우에  $d\epsilon/dt$  를 크리프률(creep rate)이라고 한다.

크리프률은 재료의 열적성질과 온도에 영향을 받으며 일반적으로 금속에서는  $0.3\sim 0.6T_m$  ( $T_m$ : 용해 온도)이상의 온도에서 크리프특성이 중요한 문제가 된다고 알려져 왔다.<sup>3</sup> 이것은 일반적인 재료의 경우에 비교적 낮은 온도에서는 변형에 따라 가공경화가 발생하지만 고온에서는 가공경화와 함께 회복연화가 진행되므로 크리프현상이 현저하게 나타난다. 그러므로 연화가 쉽게 일어나는 재료는 실온에서의 강도가 크다 하더라도 고온에서는 재료의 미세조직이 같은 응력에서 시간에 따라 변하는 것이 일반적인 현상이다. 비록 짧은 시간 동안에 측정하여 얻어진 크리프률이 작다 해도 시간이

경과되면 크리프변형률이 커지는 경우가 많이 있다. 용융점이 낮은 납, 주석 및 구리 등이나 연한 경합금 또는 열가소성플라스틱들은 상온에서도 크리프현상이 나타나지만 철강이나 금속합금 등에서는 용융점의 절반온도 또는 250℃ 이상의 온도가 아니라면 기계요소로서 기능에 영향을 줄 만큼 현저한 크리프현상이 나타나지 않는다.

최근에 널리 활용되는 제트기관, 로켓엔진, 증기터빈 및 가스터빈 등에서는 기계요소가 450℃ 이상의 온도에서 작동되는 경우가 많아 강을 비롯한 금속재료의 크리프연구는 매우 활발히 진행되어왔다. 그러나 비중, 내부식성 및 가격 등의 장점 때문에 기계요소로 널리 사용되고 있는 열가소성플라스틱은 강도와 용융점이 금속에 비하여 매우 작아서 상온이나 비교적 낮은 온도에서의 크리프현상이 발생하기 때문에 사용상 많은 제한을 받는다. 또 온도가 높아질수록 강도가 작아짐을 강조하고 있지만 실제로 크리프특성에 어느 정도의 영향을 받는지에 대한 연구는 많지 않다.<sup>4,5</sup> 따라서 현재 널리 활용되고 있는 열가소성플라스틱에 대한 크리프현상과 크리프한도 및 온도민감성에 대한 연구에 의해 충분한 자료를 바탕으로 설계에 활용하는 것은 매우 중요하다. 특히 상온보다 높은 온도에서의 크리프시험은 고온에서의 플라스틱 변형기구를 해석하고 크리프한도의 설정이 기계의 성능 및 수명관리에 많은 영향을 미치므로 플라스틱 중에서 가장 널리 활용되고 있는 폴리에틸렌(PE)의 크리프특성에 관하여 연구하고 기계요소의 설계자료를 제공하기 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 크리프이론

### 2.1 크리프

크리프시험에서 고려되는 변수로는 시간, 온도와 응력의 크기가 있다. 우선 특정한 응력(하중)과 온도를 유지하면서 정확한 길이의 변형을 측정하여 변형률을 계산하고 시간에 따른 크리프곡선을 분석해야 한다. 크리프곡선은 재료의 특성에 따라 다르지만 대부분의 금속들은 Fig. 1 과 같이 초기 변형과 3 단계 크리프영역으로 나누어 해석하고 있다.<sup>5,6</sup>

공학적인 크리프시험은 일정한 한도의 변형률이 발생할 때까지 동일한 하중을 가하는 것이 보통이다. 따라서 하중이 같은 상태에서 시편길이의 증가에 따른 단면적이 감소함에 따라 실제로 작용

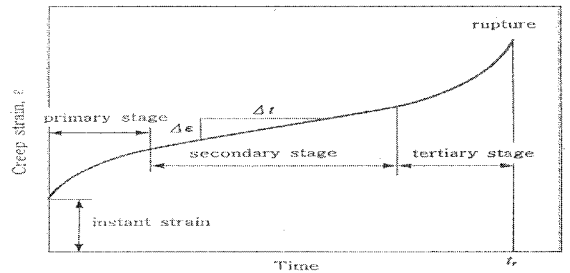


Fig. 1 General creep strain-time curve of metals

되는 응력은 점차 증가하게 된다. 하지만 동일한 응력이 가해질 수 있는 시험방법에 의하면 제 3기의 단계의 시작이 늦어져서 보다 낮은 변형률을 갖는 크리프곡선이 생기게 된다. 일반적으로 길이 증가에 따른 단면적의 측정은 쉽지 않기 때문에 일정한 하중을 가하고 길이변화를 측정하는 시험을 사용한다. 크리프시험은 작용응력이 크거나 시험온도가 높을수록 변형률의 증가는 더욱 빨라지게 된다.

공업재료의 크리프시험은 특정환경이나 온도에서 단축응력을 가하는 방법에 의해서 변형된 길이를 측정하고, 크리프파단시험은 파단될 때 까지 변형된 길이를 측정하여 분석한다. 만일 형률-시간(strain-time)의 거동이 측정될 때 재료가 파단되기 전에 시험을 마치는 것을 중단 크리프시험(interrupt creep test)이라고 한다.

상온보다 높은 온도로 시험할 경우에는 온도가 안정된 상태에서 하중을 가해주도록 하며 온도의 편차는 가능한 작게 해주도록 한다.

### 2.2 크리프한도의 설정

크리프한도는 임의 온도에서 응력을 가해준 상태에서 임의 시간에서 변형률이 어느 범위내에 유지되는 최대의 응력을 크리프한도(creep limit)로 정의하며 연한재료나 고온에서 기계요소의 선정에 중요한 성질이며 다음과 같은 방법 중에 하나로 결정한다. 이것은 잡셀(Japsell)이 주장한 방법으로 전체 크리프과정 중에 변곡점, 혹은 제 2기 크리프변형이 없는 것으로 것은 제 1기 크리프변형 후의 변형속도 즉 최소변형속도를 측정하여 그것과 내구수명과 대수곡선이 직선이 된다. 또한 변형률이 일정한 값 이하가 되면 수명이 매우 길어진다는 사실로부터 40 일 후에 변형속도가 10<sup>-5</sup> %/day 일 때의 응력을 크리프한도라고 하고 있다. 평균 변형률속도에 의한 설정으로는 독일의 Kaiser-

Wilhelm Institute 의 방법으로 다음과 같은 3 가지 기준을 적용한다.

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

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

3) 크리프시험 시작 후 25~36 시간 사이의 평균 변형속도가 0.0015 %/hr 로 되는 응력을 크리프한도 라고 정한다(단 이경우는 500℃ 이하에만 적용함).

마지막으로 변형률을 기준으로 하는 방법으로 경과시간의 대수와 변형률과의 곡선을 기본으로 하여 100,000 시간에 0.1%의 변형률이 생기는 응력을 크리프한도로 하는 경우도 있다. 이 방법은 먼저 크리프곡선을 시간에 따른 대수곡선으로 바꾸고 0.1 %의 변형에 도달하는 시간을 구한다.다음에 시험온도와 0.1 %의 변형에 이르는 온도를정하고 마지막으로 시험온도와 크리프 제한응력의 관계를 찾아서외삽에 의해 특정온도에서의 크리프제한응력(한도)을 구하게 된다.

위와 같은 방법은 원자력발전소 등에서 장기간 사용되는 금속의 크리프특성을 연구하는 기준으로 삼고 있다.

플라스틱과 같은 연한재료의 크리프특성에 관한 시험은 보다 짧은 시간에 변형저항성을 알아보는 것으로 1 시간 이내에 일정한 변형률의 한도내에 있는 최대 응력의 크기를 알아보는 방법이 있으며 본 시험에 이 방법을 활용하였다.

### 3. 크리프시험기 및 시편

#### 3.1 크리프시험기

본 연구에서는 Fig. 2 에 나타낸 플라스틱재료 전용 크리프시험기인 KPM-300-AR 을 사용하였다. 이 시험기에서 시편을 일정한 온도에서 응력을 가하고 크리프변형량을 측정하며 시험개시부터 설정된 길이에 도달할 때까지 시간, 변형량 및 시험온도변화를 자동 기록장치로부터 얻을 수 있다.

시험온도의 한계는 300℃이며 최대 작용하중은 3kN(300kg)으로 모든 플라스틱재료들에 대한 크리프시험이 가능하다.

#### 3.2 크리프시험

시험전 시편은 20±2℃, 상대습도 50±5%에서

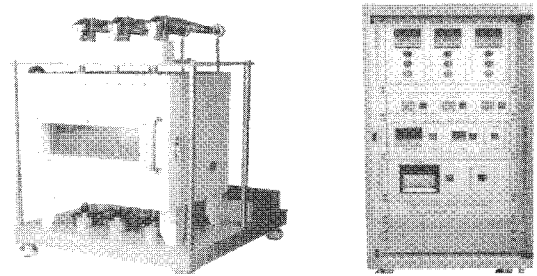


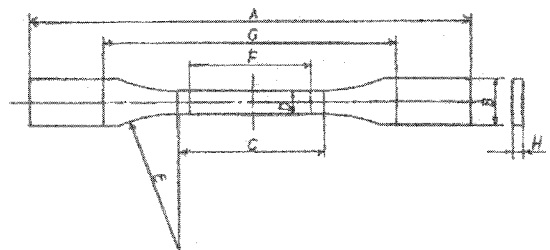
Fig. 2 Creep test rig for polymers

1 시간 동안 건조용기(desiccator)내에 보관한 다음 시험을 하였다.

시험은 설정된 온도에 도달 후 10 분을 유지시킨 다음에 하중을 걸고 부하받침을 제거하면서 시험이 시작하게 된다. 시편의 길이가 정해진 한도에 도달되면 시험을 종료되고 온도와 시간 및 변형길이가 자동적으로 기록되어 진다.

#### 3.3 크리프시편

시험에 사용된 시편의 모양 및 명칭은 KS M 3006 1 호형으로 Fig. 3 과 같고 크리프시편의 두께, 나비 및 표점거리는 오차한계 이내로 제작하였다.



- A: total length: 90mm
- B: width of end specimen: 14±0.5
- C: parallel area length: 22±0.5
- D: gauge width: 5±0.5
- E: dia of curvature: 60
- F: gauge length: 17±0.5
- G: holding length: 50±0.5
- H: thickness: 2±0.3

Fig. 3 Dimensions of creep specimen

#### 3.4 실온에서 PE 의 인장강도

시험에 사용된 폴리에틸렌의 인장시험에 의한 변형률-응력그림을 Fig. 4 에서 보여주고 있다.

열가소성 플라스틱인 PE 의 응력-변형률선도는 금속이나 취성재료와는 다르게 나타나며 극한강도

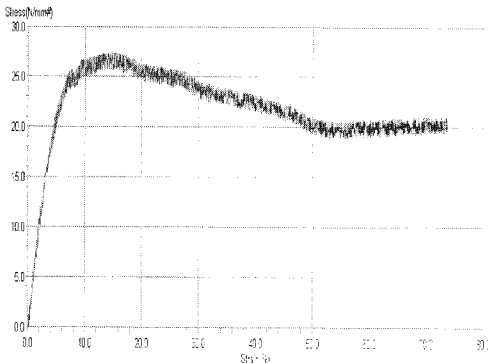


Fig. 4 Stress-strain curve of PE by tensile test

를 지나서 네킹(necking)발생 이후에도 작용응력은 낮아지지만 변형이 계속되며 소성변형에 의한 파단이 쉽게 발생하지 않는다. 그림에서와 같이 PE의 실온 인장강도는 27MPa 로써 범위내(22~31MPa)에 있다.<sup>9</sup>

#### 4. 시험결과와 고찰

시험온도는 예비시험에 의해 20℃, 40℃, 60℃ 및 80℃로 하였고, 시험응력의 범위는 6~19MPa 로 설정하였다. 각각의 조건에서 시험결과를 시간에 대한 각 응력과 온도에서의 크리프곡선이 Fig. 5~9에 나타내었고, 시험과정에서 최대 변형률의 한계를 0.6(변형량 13 mm)으로 하였다.

실온인 20℃에서의 시험의 결과는 Fig. 5 와 같고 PE 의 각 응력에 따른 크리프변형이 일반적으로 금속에서 나타나는 1 기와 2 기의 단계가 불분명하게 나타났다. 이것은 금속결합으로 이루어진 금속에서 각 단계의 발생원인으로 설명하는 분자의 전위이동과 결정립계의 축적에 따른 변형경화가 플라스틱에서는 분자의 결합이 공유결합과 반델발스결합으로 이루어져서 금속과 같은 현상이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 가장 낮은 응력인 16MPa 의 경우에는 초기변형 후 변형률의 증가가 거의 나타나지 않는다. 그러나 높은 응력인 19 MPa 에서는 3 기 변형만으로 이루어지고 짧은 시간에 네킹의 발생과 확대를 나타남을 보여주며 중간응력에서는 1 기 및 3 기의 단계만을 갖는다.

Fig. 6 은 20℃시험에 사용된 시편의 사진이다. 낮은 응력(17MPa)을 받고 긴 시간에 걸쳐서 변형이 되는 경우는 시편의 평행부에 균일한 변형이 생기며 네킹이 발생하지 않지만, 응력이 더 높은

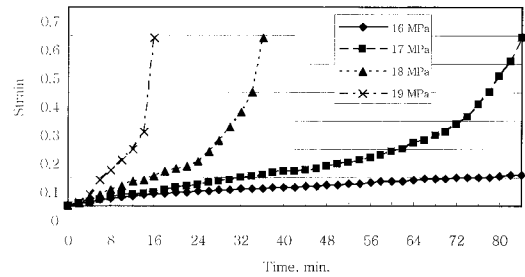


Fig. 5 Creep strain of PE at 20℃ at various stresses

경우에는 부분네킹이 먼저 발생한 후 네킹구역이 증가되는 것을 보여준다.

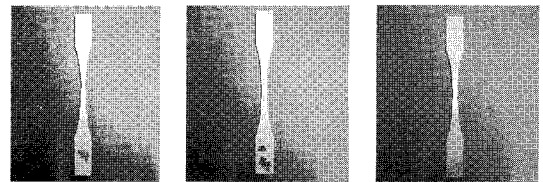


Fig. 6 Creep tested specimens of PE at 20℃

이러한 현상의 원인으로는 응력이 작을 경우에 변형속도가 작기 때문에 동일응력을 갖는 평행부분 전체에 응력이 분산되는 시간적 여유가 있으므로 네킹발생이 잘 일어나지 않는다. 그러나 응력이 더 크게 되면 변형속도가 증가하고 응력분산효과가 감소하므로 분자규모의 미소결합부위에 응력 집중현상이 발생하여 네킹현상으로 발전하며 공유결합에 의해 체인형상의 늘어남 한계에 도달되면 단면축소대신 네킹구역이 확대되는 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 20℃에서 크리프의 시간변화률( $d\epsilon/dt$ )을 나타낸 것이다. 이것은 Fig. 6 과는 세로축의 함수가 다를 뿐 거의 동일한 형태의 커브를 보여준다. 단지 크리프한도를 나타내는 16MPa 에서는 직선형을 갖고, 18MPa 과 19MPa 에서는 2 단계와 3 단계가 분명하게 구분된다.

Fig. 8 은 20℃에서 응력을 적게 하고 시험한 변형률-시간선도를 나타낸 것이다. 온도의 증가와 응력이 적어진 것을 제외하고 앞의 시험결과와 유사함을 보여 주고 있다. 그러나 14 와 15MPa 에서는 변형률 증가의 속도가 더욱 빨라짐을 알 수 있다. 이는 응력증분이 같을 경우 변형률이 온도증가에 더욱 민감함을 의미한다.

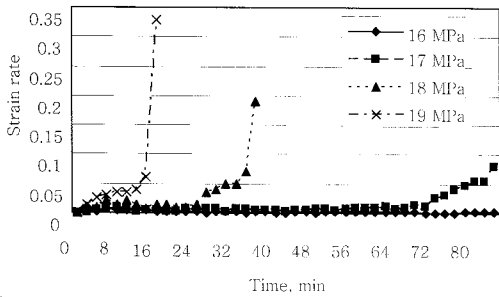


Fig. 7 Creep strain rate curve of PE at 20°C on the various stresses

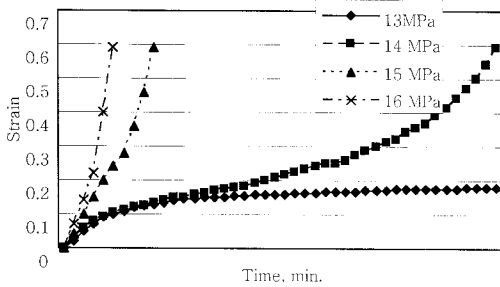


Fig. 8 Creep strain of PE at 40°C on the various stresses

또 이 모든 응력에서 크리프의 3 단계를 구분할 수 없음을 알 수 있고 크리프한계는 13MPa 로 결정된다.

60°C에서 PE 의 크리프 변형률곡선을 Fig. 9 에 나타내었다. 이 경우는 40°C에서 보다 시험 최소 응력을 5MPa 낮추었고, 역시 4 개의 응력범위를 측정 한 것으로써 모든 응력에서 시험 초기 변형이 0.1 정도로 이전의 온도 시험에서보다 크게 높아졌다.

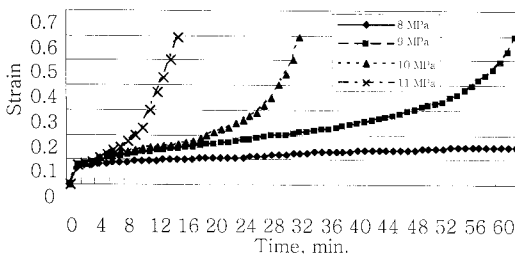


Fig. 9 Creep strain of PE at 60°C on the various stresses

이것은 시험 전에 온도증가에 따라 PE 의 체인 결합력이 매우 약해져 있음을 보여준다.

Fig. 10 은 80°C에서 시험에서 응력의 크기에 따른 변형률(strain)의 변화를 나타낸 것이다. 가장 높은 시험온도로써 초기 변형이 다른 낮은 시험온도보다도 더욱 크게 나타났으며 같은 응력의 간격(1 MPa)이지만 1~3 단계를 갖는 곡선이 존재하지 않는다. 6MPa 의 응력에서는 2 기 단계만 있고 그 이상의 응력에서 1 기에서 3 기 단계로 직접 연결되며, 더욱 빠르게 파단에 이르는 형상을 보이고 있다. 또 6MPa 의 낮은 응력(인장강도의 25%수준)에서는 거의 수평에 가깝게 직선적으로 변형이 느리게 진행하였음을 알 수 있다.

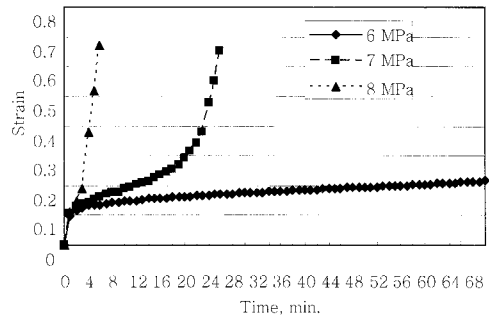


Fig. 10 Creep strain of PE at 80°C on the various stresses

응력을 8MPa 로 일정하게 하고 온도변화에 따른 크리프곡선을 Fig. 11 에 나타내었다. 응력이 일정하고 10°C 씩의 온도변화를 준 경우에 앞서 응력에 따른 동일한 시험온도의 커브들과 거의 유사한 형태이고 급속의 크리프 특성과 같이 온도나 응력에 따른 전형적인 크리프현상을 보여 주고 있다.

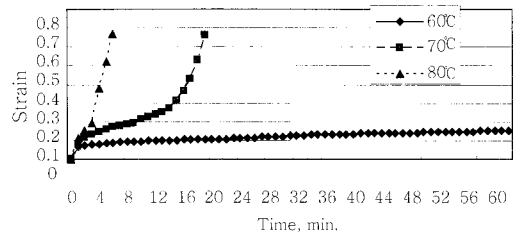


Fig. 11 Creep strain of PE at 80°C on the various stresses

온도에 따른 PE 의 크리프한도를 60 분 시험에서 변형률(strain)을 0.2 로 설정하여 Fig. 12 에 나타내었다. 실온(20°C)에서의 실온에서의 인장강도(변

형속도: 10mm/min)가 25MPa 에 비하여 크리프한도는 실온에서의 인장강도의 60% 수준인 16MPa 로 나타났고 40°C 에서는 50%정도, 그리고 60°C 에 이르면 30% 또 80°C 의 경우에는 20%수준으로 감소하였다.

특이한 것은 온도가 60°C 이상에서는 감소율이 점차 작아지고 있어 PE 의 반델발스결합력이 온도와 하중에 민감하지만 그 변화율은 일정하지 않음을 알 수 있다. 즉 PE 를 기계요소 등의 응력을 받는 부품의 재료로 사용하려면 크리프를 고려한 설계에서는 실온에서의 인장강도를 기준으로 한 경우보다 온도에 따라 강도가 50~20% 감소하므로 단면적의 크기를 2~5 배 이상으로 증가시켜 주어야 하며, 크리프한도의 시간과 변형률을 기준으로 하더라도 안전율(계수)을 충분히 크게 하여 설계하여야 함을 보여준다.

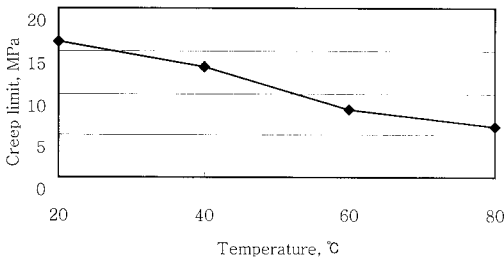


Fig. 12 Creep limit of PE at various temperatures on 0.2 strain-1 hr

**5. 결론**

범용 열가소성 플라스틱 중에서 기계소재로 가장 많이 사용되는 폴리에틸렌(PE)의 크리프시험을 하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폴리에틸렌(PE)이 크리프응력을 받는 경우에는 실온(20°C)에서의 인장강도(25MPa)보다 60% 정도 더 낮았다.
- 2) 플라스틱의 크리프현상은 1 기 과정에서 3 기 과정으로 직접 연결되어 금속에서의 크리프현상인 2 기 단계과정 즉 전위이동에 의한 강화와 회복이 평형을 이루는 단계가 존재하지 않음을 보여주었다.
- 3) 온도증가에 따른 크리프한도는 비선형적으로 감소하고, 용해점의 1/2 정도 이상에서 응력저항이 매우 적어(실온강도의 30%정도) 응력부재로의 사용에 부적합함을 알 수 있었다.

4) 실온에서나 낮은 하중에서는 플라스틱재료의 변형은 표점길이 전체에서 발생하지만 높은 응력이나 고온에서는 네킹(necking)이 발생하며, 하중이 계속 유지되면 네킹부분의 확장에 의해 변형률이 증가하였다

5) 온도가 일정한 경우나 응력이 일정한 경우 크리프곡선의 형상은 각각 서로 유사하고 이것은 금속재료의 크리프특성과 같이 나타났다.

**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., "On the Viscous Flow in Metals, and Alloyed Phenomena," *Proc. Royal Society of London Series A*, Vol. 84, Issue 567, pp. 1-12, 1910.
3. Hauck, J. E., "Long-Term Performance of Plastics," *Materials in Design Engineering*, pp. 113-128, 1965.
4. 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.
5. Park, J. C., Chung, J. C., Song, G. B. and Namgung, J. K., "Machine Design," *Chungmoongak*, pp. 101-103, 2001.
6. Woodfold, D. A., "Design for High-Temperature Application," *Materials Selection and Design, ASM Handbook*, Vol. 20, pp. 573-588, 1977.
7. Lee, T. S., "Materials Testing," *Hyungsyul Publishing Co.*, pp. 225-244, 1988.
8. Norton, R., "Machine design an Integrated Approach," *Prentic Hall International Editions*, p. 69, 1996.
9. Callister, W. D. Jr., "Materials Science and Engineering an Introduction," *Wiley*, pp. 530-537, 2000.