

겔방사에 있어 PE섬유의 물성에 미치는 가공변수의 영향 : 3. 연신방법

최 철 림 · 장 정 식 · 김 경 현

한국과학기술연구원, 고분자복합재료연구실

(1990년 11월 21일 접수)

The Effect of Processing Parameters on the Mechanical Properties of High Performance PE Fiber in Gel Spinning Process : 3. Drawing Method

Chul Rim Choe, Jyongsik Jang, and Kyeong Hyeon Kim

Polymer Composites Laboratory, Korea Institute of Science and Technology

P. O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

(Received November 21, 1990)

요 약 : 가공조건을 최적화함으로써 보다 우수한 물성을 지니는 PE섬유를 제조하기 위하여 Xerogel 섬유를 일단계 또는 이단계 연신하였을 때 섬유의 물성변화에 대해 고찰하였다. 5wt% 농도를 갖는 초고분자량 PE 용액을 원추형다이를 통하여 방사하여 겔 섬유를 제조하였으며, 이를 오븐에서 연신시켰다. 연신온도가 80°C 이상일 경우에는 섬유의 물성이 연신 온도에 상관없이 연신비에 의해 크게 좌우되었기 때문에, 겔 섬유를 최대로 연신시킬 수 있는 온도인 110°C에서 연신시킬 때 물성이 가장 우수한 PE 섬유를 제조할 수 있었다. 또한 섬유의 물성은 연신방법에 상관없이 연신비에 따라 직선적으로 증가하였다. 그러나 연신방법에 따라 최대연신비가 달라지게 되므로, 얻을 수 있는 최대물성은 겔 섬유를 이단계 연신할 경우에 가장 컸으며, 그 다음으로 겔섬유의 일단계 연신 그리고 Xerogel 섬유를 일단계 연신시킬 경우에는 가장 적었다.

Abstract : The effect of drawing methods on the mechanical properties of PE fibers was investigated to optimize the processing conditions in the semi-continuous gel spinning process. High density polyethylene used in this study was Hizex Million 340 M with molecular weight of 3,000,000 (g/mol) and 5wt% PE solution in paraffin oil was spun through a conical die and then these gel fibers were highly drawn in one or two hot ovens. The drawability of gel fibers was dependent on the drawing temperature. The maximum draw ratios were observed for the fibers drawn at 110°C. Tensile strengths and Young's moduli linearly increased with draw ratios regardless of the drawing temperatures of above 80°C. The best mechanical properties of PE fiber could be obtained at the drawing temperature of 110°C, because the highest maximum draw ratio of the gel fibers were observed at this temperature. The initial modulus and strength of PE fiber linearly increased with increasing overall draw ratios

regardless of the drawing methods : (1) one step drawing of the Xerogel fiber, (2) one-step drawing of the gel fibers, (3) two step drawing of the gel fibers. However, we could obtain the best mechanical properties(T.S.=3.1 GPa, E=120 GPa) in the two step gel drawing process.

서 론

초연신에 의해 제조된 PE 섬유는 비강도가 매우 우수할 뿐만 아니라 내화화성, 내마모성, 에너지 흡수성등이 뛰어나기 때문에 해양용로프, 고압용기, 방탄복, 건축·항공용 복합재료등에 이용될 수 있는 새로운 고강력 섬유로서 주목을 받고 있다. 이와같은 고강력 PE 섬유는 주로 초고분자량 PE 용액을 겔 방사한 뒤 초연신하여 제조하게 되는데, 이때 여러 가지 가공변수들에 따라 물성이 상당히 달라진다. 고강력 PE 섬유의 물성에 영향을 미치는 가공 변수로는 연신온도, PE 용액의 농도, PE의 분자량, 방사연신비, 섬유의 직경, 그리고 연신방법등을 들 수 있다.

실 험

제 료

높은 탄성율과 인장강도를 지니는 고강력 PE 섬유를 제조하기 위하여 분자량이 약 3,000,000 g/mol¹⁰인 Mitsui사의 HDPE, Hizex Million 340M을 사용하였다. 용매로는 Yakuri사에서 제조된 파라핀 오일을 사용하였으며, PE 용액의 산화분해를 방지하기 위하여 2,6-di-tert-butyl-p-cresol을 PE에 대해 0.5 wt% 첨가하였다.

PE 용액의 제조방법

소량의 용매를 사용하여 분말상 PE 입자를 상온에서 팽윤처리한 다음, 이와는 별도로 PE에 대해 0.5wt% 산화 방지제가 첨가된 파라핀 오일을 230℃로 온도를 올려 용액제조 탱크에 넣은뒤 교반시키면서, 앞에서 기술한 팽윤처리된 PE-파라핀 오일 현탁액을 주입하였다.^{3,6} 균일한 용액을 제조하기 위하여 170℃에서 2시간 교반하여 용해시킨 후 방사하였으며, PE 용액의 농도는 5wt%로 일정하게 하였다.

방 사

PE 용액 제조 탱크에 질소로 가압하면서 기어 펌프로 PE 용액을 약 2 cc/min.의 속도로 다이에 토출 시킴으로 방사를 행하였다. 방사 온도는 200℃이었으며, 방사된 PE 용액을 다이(직경=1 mm, L/D=40, entrance angle=6°)로부터 5 cm아래에 있는 냉각조에서 수냉하여 겔 상으로 만들었다. 이 과정에서 PE 겔 섬유는 냉각조내에 있는 권취롤러에 의해 연신되는데, 이와 같이 방사과정에서 연신되는 연신비를 방사연신비(spin-draw ratio : λ_{sp})로 명명하였으며 이는 gel 섬유를 권취해 주는 속도와 실제 방사되는 속도의 비로 정의하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 제조된 겔 섬유를 연신 드럼위에 균일하게 감아 n-hexane으로 용매를 추출하거나, 곧바로 연신 오븐 속으로 주입하여 연신하였다.

일반적으로 PE 미연신사를 연신할 때 연신온도가 증가함에 따라 최대연신비가 증가하고 따라서 물성이 향상된다.^{1~3} 그러나 연신온도가 PE의 결정 용융 온도 근처인 경우에는 chain이 효율적으로 연신되지 못하고 분자 사슬간의 미끄럼이나 연신된 분자사슬의 recoiling 현상이 일어나기 때문에,⁴ 최적의 연신 온도가 존재하게 된다.

또한 우수한 물성을 지니는 PE 섬유를 제조하기 위해서는 연신비를 크게 해주어야 하는데, 최대 연신비는 PE 용액의 농도에 좌우된다. 농도가 아주 큰 용액으로 부터 제조된 미연신사는 분자사슬의 entanglement가 많아, 이들이 물리적인 가교점으로 작용하여 효과적인 연신이 어려워진다. 반면에 임계 농도이하의 희박용액으로 부터 제조된 미연신사는 결정과 결정사이에 overlap되지 못한 부분들이 많게 되고 이들이 연신응력을 전달시키지 못하므로 연신이 잘되지 않는다.^{5,6} 따라서 물성을 향상시키기 위해서는 소성흐름에 장애가 되는 분자쇄의 entanglement의 수를 줄이기 위해 용액의 농도를 낮게할수록

유리하지만 용액의 농도가 임계 농도보다 낮아서는 안된다. 분자량이 높은 PE를 사용할수록 이와같은 임계농도는 낮아지기 때문에,⁵ 좀 더 희박한 용액을 사용하면 보다 더 효과적으로 연신시킬 수 있게 된다. 또한 PE 분자량이 증가할수록 extended chain crystal에 결정 결함으로 작용하는 chain end의 수가 적어지기 때문에 보다 우수한 물성을 지니는 PE 섬유를 제조할 수 있다. 그리고 방사공정에서의 연신에 의해서는 겔 섬유가 거의 배향되지 않지만⁷ 섬유의 직경이 적어지기 때문에 hot drawing할 때 섬유 표면과 중심사이의 열전달이 균일하게 일어나 결함으로 작용하는 kink band가 적게 생기고,⁸ 따라서 방사연신비가 커지면 물성이 향상된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 여러가지 가공변수가 PE 섬유의 물성에 미치는 영향에 대해서 자세하게 밝혀져 있으나 연신방법에 대해서는 다단계 연신하는 것이 유리하다는 것만 알려져 있을 뿐,⁹ 자세하게 밝혀져 있지 않기 때문에 본 연구에서는 연신 공정을 변화시켰을 때에 최적의 연신 온도 및 최대 연신비 그리고 PE 섬유의 물성변화에 대해 고찰하여 보았다.

연 신

겔 섬유의 연신 : PE 겔 섬유를 길이가 2m인 오븐속에서 연신하였는데, 연신은 일단계 또는 이단계로 하였다. 연신비는 오븐의 입구나 출구에 장치되어 있는 feeding roller와 take up roller의 속도비로 정의하였다. 겔 섬유를 일단계 연신할 경우에는 처음 오븐에서 연신되는 연신비를 DR_1 , 두번째 오븐에서 연신되는 연신비를 DR_2 , 그리고 이 두단계 연신을 함께 고려한 연신비를 $DR_0(DR_1 \times DR_2)$ 로 표시하였다. 연신 온도는 상온에서 130°C의 범위내에서 행하였으며 미연신사를 오븐속으로 주입시키는 속도는 0.5 m/min.로 하였다. 연신된 PE 섬유는 상당량의 용매를 포함하고 있기 때문에 n-hexane에서 용매를 완전히 추출하였다.

Xerogel 섬유의 연신 : Xerogel 섬유는 gel 섬유를 n-hexane으로 파라핀 오일을 추출시킨 뒤 건조시켜 만들어진 섬유를 의미하며, 이에 대한 자세한 설명은

다음과 같다. 방사과정을 거쳐 제조된 겔섬유는 드럼위에 균일하게 감겨지게 되며, 이 드럼을 n-hexane 속에 24시간 담구어 겔 섬유내에 있는 파라핀 오일을 추출하였다. 그 뒤 건조과정을 거쳐 Xerogel 섬유를 제조하였으며, 이를 길이가 2m인 오븐속에서 일단계 연신하였다. 다른 조건은 반연속 공정에서 겔 섬유의 연신과 같게 하였다.

물성측정

인장강도와 탄성율의 측정은 Instron 4201을 사용하였다. 시편의 길이는 25mm, crosshead speed는 12mm/min., 탄성율은 변형율이 0.1%일 때 응력-변형 곡선의 기울기로 부터 구하였으며, 섬유의 단면적은 밀도를 1 g/cm³로 가정하고 길이와 무게로부터 구하였다.¹⁰ 또한 겔 섬유와 Xerogel 섬유의 연신비에 따른 용융거동의 변화를 살펴보기 위하여 DSC(Rigaku thermoflex 8330B)를 사용하였으며 주사 속도는 10°C/min.로 하였다.

결과 및 고찰

겔섬유의 일단계 연신

연신온도에 따른 최대 연신비의 변화 : Fig. 1은 Xerogel 섬유와 겔 섬유의 용융온도 변화를 보여주고 있는데, 겔섬유내에는 다량의 파라핀 오일이 포함되어 있기 때문에 용융온도가 Xerogel 섬유보다 약 17°C정도 낮았다.

Fig. 2는 연신 온도에 따른 최대 연신비의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보면 겔섬유의 경우, 연신 온도가 80°C이하에서는 최대 연신비가 거의 일정하지만 연신 온도가 80°C 이상에서는 빠른 속도로 증가하고 110°C 경계로 급격하게 감소하였다. 이와같이 겔 섬유를 연신할 경우에는 Xerogel 섬유보다는 10°C 정도가 낮은 110°C에서 최대로 연신되었으며, 최대연신비도 Xerogel 섬유때 보다 다소 크게 나타났다.

인장강도 및 탄성율 : 방사 연신비가 5인 겔 섬유를 제조하여 오븐에서 연신시킨 뒤 n-hexane으로 용매를 추출하여 연신비의 변화에 따른 인장강도와 탄

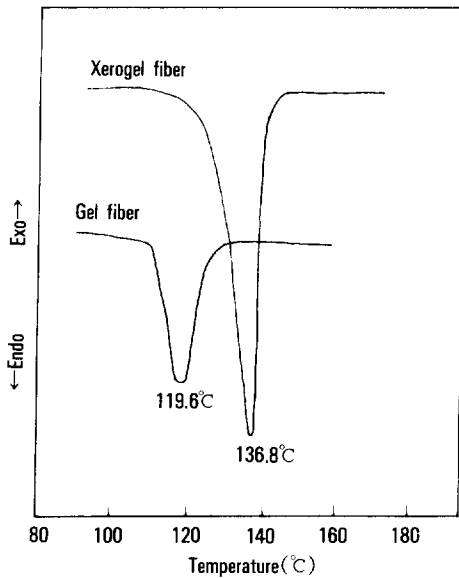


Fig. 1. DSC heating thermograms of undrawn gel fiber (before the extraction of paraffin oil) and Xerogel fiber (after the extraction of paraffin oil).

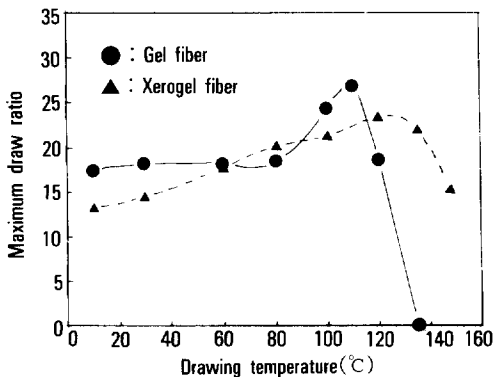


Fig. 2. Maximum draw ratio of gel fiber (before the extraction of paraffin oil) and Xerogel fiber (after the extraction of paraffin oil) with drawing temperature (feeding speed of undrawn fiber to hot oven=0.5m/min.).

성질의 변화를 Fig. 3과 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인장강도와 탄성율은 연신비가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하였는데 이는 연신비가 증가함에 따라 PE 분자쇄가 extended chain 형태로 펼쳐지고 응력을 담당하는 tie 분자의 수가 증가하기 때문으로 알려져 있다.¹¹ 또한 일정 연신

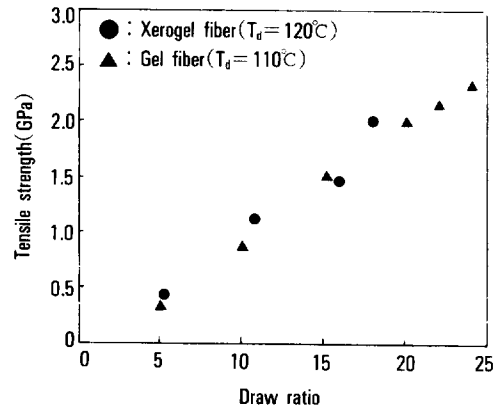


Fig. 3. Tensile strength with draw ratio in one step drawing process (feeding speed of as-spun fiber to hot oven=0.5m/min. ; spin-draw ratio=5).

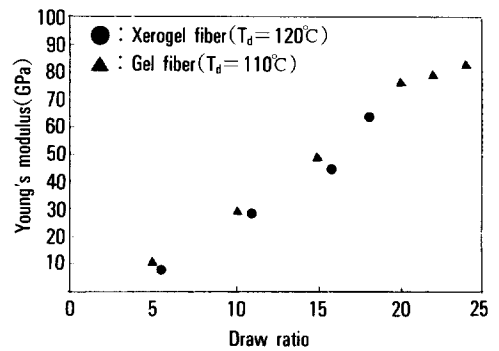


Fig. 4. Young's modulus with draw ratio in one step drawing process (feeding speed of as-spun fiber to hot oven=0.5m/min. ; spin-draw ratio=5).

비에서의 물성은 Xerogel 섬유를 연신시킨 경우나 겔섬유를 연신시킨 경우나 거의 같았다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 Xerogel 섬유를 120°C에서 연신시킬 때 보다 겔 섬유를 110°C에서 연신시킬 때 더 많이 연신시킬 수 있기 때문에, Xerogel 섬유를 연신시킬 경우에는 최대로 인장 강도 2GPa, 탄성율 65 GPa를 얻을 수 있는 반면에, 겔섬유의 경우에는 보다 우수한 물성을 지니는 섬유를 제조할 수 있었다 (인장강도 : 2.4GPa, 탄성율 : 85GPa).

Fig. 5와 6은 연신 온도의 변화에 따른 인장 강도 및 탄성율의 변화를 보여주고 있다. 본 실험의 온도 범위내에서 연신 온도가 80°C 이상일 경우에는 이전에 보고한 바와 같이,³ 연신된 섬유의 물성이 연신

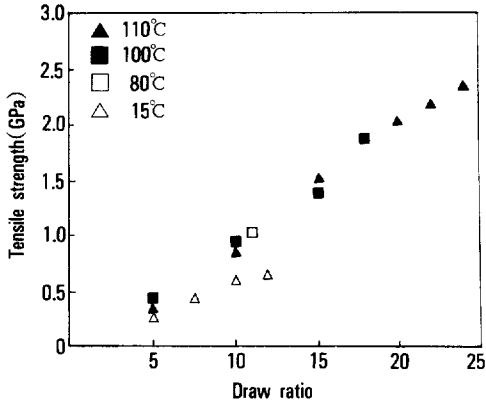


Fig. 5. Tensile strength with draw ratio in one step gel drawing process (feeding speed of gel fiber to hot oven=0.5m/min. ; spin-draw ratio=5).

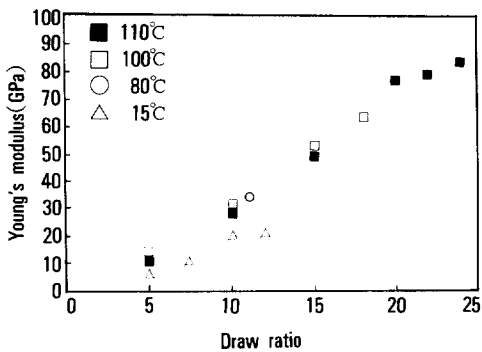


Fig. 6. Young's modulus with draw ratio in one step gel drawing process (feeding speed of gel fiber to hot oven=0.5m/min. ; spin-draw ratio=5).

온도에 상관없이 연신비에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 다만 상온에서 연신된 섬유는 물성이 다소 저하되었는데 이는 분자쇄의 mobility가 좋지 못한 상태에서 연신되었기 때문에, chain extension이 효율적으로 되지 못했기 때문으로 생각된다.

겔 섬유에 이단계 연신

두번째 오븐의 연신온도 설정 : 겔섬유를 일단계 연신할 경우에는 앞에서 살펴 본 바와 같이 연신온도가 110°C일 때 최대로 연신되지만, PE 섬유는 연신됨에 따라 용융 온도가 증가되기 때문에,^{12, 13} 이 단계 연신할 때 두번째 오븐의 최적 연신 온도를 설

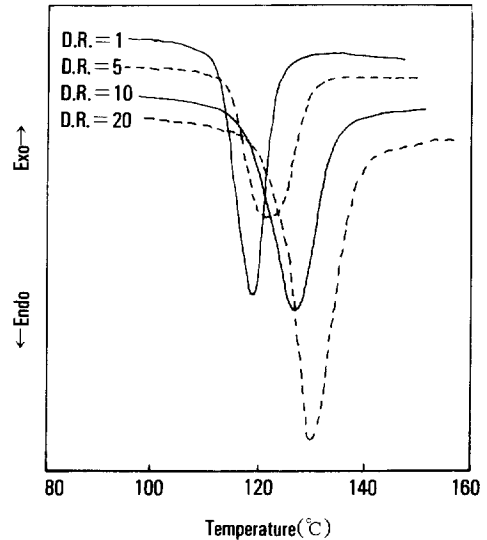


Fig. 7. DSC heating thermograms of drawn gel fibers with draw ratio (scan rate : 10°C/min.).

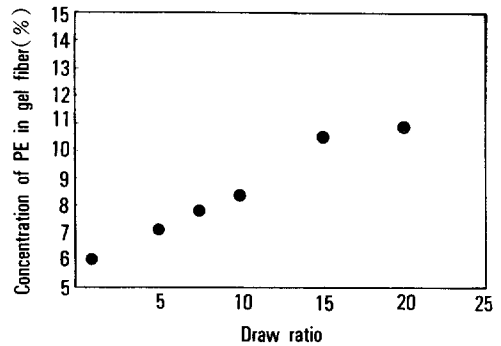


Fig. 8. Weight fraction of PE in gel fibers with draw ratio (spin-draw ratio=5).

정하기 위한 실험을 행하였다.

Fig. 7은 일련의 연신비로 일차 연신시킨 겔 섬유의 용융거동을 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연신비가 증가함에 따라 용융 온도가 증가하여, 연신비가 20일 경우에는 용융 온도가 약 10°C가량 증가함을 알 수 있다. Fig. 8은 연신비에 따른 겔 섬유내의 PE 함량 변화를 보여 주고 있다. 방사연신비(λ_{sp})를 5로 하여 방사한 시료이기 때문에, 방사 과정에서 파라핀오일이 압착되어 섬유 표면으로 밀려나오기 때문에 농도가 약 6%로 증가하였다.

Table 1에서 보면 연신비가 20일 경우에 겔섬유의

Table 1. The Melting Temperature Change with Draw Ratio for Gel Fibers and Extracted Gel Fibers(Scanning rate = 10°C/min.)

Draw Ratio	T_m of Gel Fiber(°C)	T_m of Extracted Fiber(°C)
1	119.2	134.1
5	121.1	134.5
7.5	125.1	135.9
10	126.8	136.7
15	128.4	138.3
20	129.9	139.3

Table 2. Variation of $(DR_2)_{max}$ with the Drawing Temperatures of the Second Oven(T_d) (feeding speed of gel fiber to the first and the second oven = 0.5m/min.)

First Draw Ratio	$(DR_2)_{max}$		
	$T_d = 110^\circ\text{C}$	$T_d = 115^\circ\text{C}$	$T_d = 120^\circ\text{C}$
$DR_1 = 5$	6.7	6.1	6.7
$DR_1 = 7.5$	5.1	5.1	5.4
$DR_1 = 10$	4.3	4.4	4.7
$DR_1 = 15$	3.2	3.3	3.5

용융점은 약 10°C가량 증가함을 알 수 있으며, 파라핀 오일을 제거한 섬유의 경우에는 즉 PE 섬유의 구조 변화의 의해서는 약 5°C가량 용융점이 증가함을 관찰할 수 있다. 이상의 결과로부터 연신비가 증가함에 따라 겔 섬유의 용융 온도가 증가되는 것은 (1) 겔 섬유내의 포함된 PE의 함량변화 (2) chain orientation, extension에 의한 섬유의 구조 변화에 의해 일어난다는 것을 알 수 있다. 이와같이 연신비에 따라 겔 섬유의 용융온도가 증가하기 때문에 두번째 오븐의 온도를 110°C보다 다소 높여 주는 것이 바람직할 것으로 생각되며, 실제로 두번째 오븐에서의 최대연신비가 Table 2에서 보는 바와 같이 연신온도 120°C로 할 때 다소 증가하였기 때문에 이단계 연신할 경우에 두번째 오븐의 온도를 120°C로 하였다.

DR_1 에 따른 최대연신비의 변화 : Fig. 9는 DR_1 에 따른 $(DR_2)_{max}$ 의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 DR_1 이 증가함에 따라 DR_2 가 감소하였으나 $DR_0(DR_1 \times DR_2)$ 는 증가하는 경향을 나타내었다.

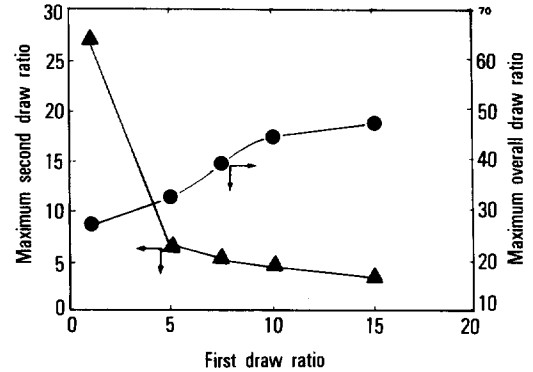


Fig. 9. Maximum second and overall draw ratio vs. first draw ratio in semi-continuous, two step gel drawing process (spin-draw ratio = 5, feeding speed of gel fiber to oven = 0.5m/min.).

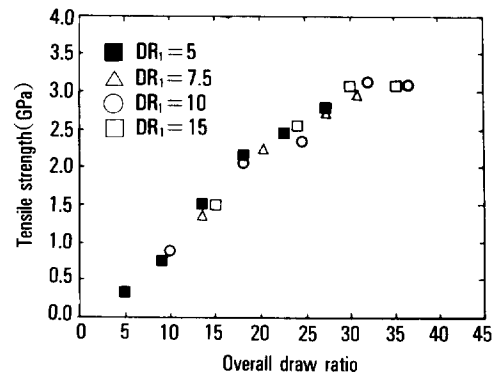


Fig. 10. Plot of tensile strength vs. overall draw ratio with the variation of DR_1 in a semi-continuous, two step gel drawing process ($\lambda_{sp} = 5$, feeding speed of gel fiber to oven = 0.5m/min.).

인장강도 및 탄성율 : DR_1 과 DR_2 를 변화시켜 가면서 겔 섬유를 제조하여 파라핀 오일을 추출시킨뒤 인장 강도와 탄성율을 측정하였다. Fig. 10과 11은 DR_0 에 따른 인장 강도와 탄성율의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 물성은 DR_0 에 따라 거의 직선적으로 증가하였으며, 일정연신비에서 섬유의 물성은 DR_1 에 따라 증가하게 된다. DR_1 을 5로 한 경우에는 인장강도 2.7GPa, 탄성율 90GPa을 지니는 섬유를 제조할 수 있는 반면에, DR_1 을 15로 한 경우에는 인장강도 3.1GPa, 탄성율 120GPa인 섬유를 얻을 수 있었다. 따라서 이단계 연신할 경우에는

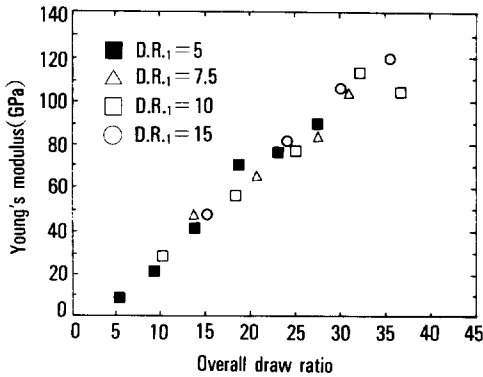


Fig. 11. Plot of Young's modulus vs. overall draw ratio with the variation of D.R.₁ in a semi-continuous, two step gel drawing process ($\lambda_{sp}=5$, feeding speed of gel fiber to oven=0.5m/min.).

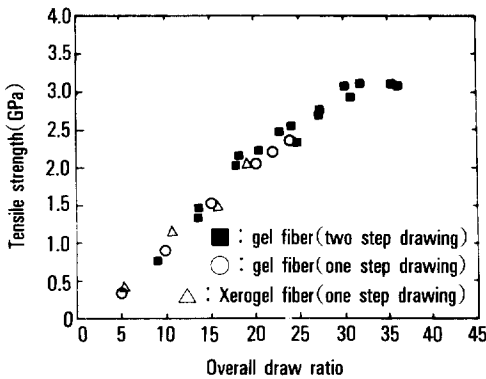


Fig. 12. Plot of tensile strength vs. overall draw ratio with the variation of the drawing methods in semi-continuous process (feeding speed of as-spun fiber to oven=0.5m/min.).

첫번째 공정에서 보다 많이 연신시키는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12와 13은 Xerogel 섬유를 일단계 연신하였을 때와 겔 섬유를 일단계 또는 이단계 연신하였을 때 연신비에 따른 인장 강도와 탄성율의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연신 공정을 변화시켜 주었을 때 물성이 증가하는 폭은 연신공정에 거의 상관없이 직선적으로 증가하였다. 그러나 미연신사를 최대로 연신시키는 최대연신비는 Fig. 2와 9에서와 같이 달라지므로, 얻을 수 있는 섬유의 최대 물성은 연신공정에 따라 상당히 다르게 나타났다.

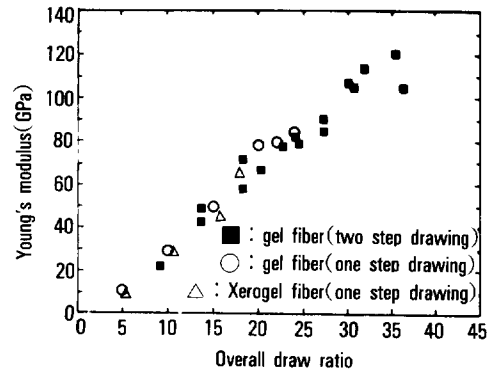


Fig. 13. Plot of Young's modulus vs. overall draw ratio with the variation of the drawing methods in semi-continuous process (feeding speed of as-spun fiber to oven=0.5m/min.).

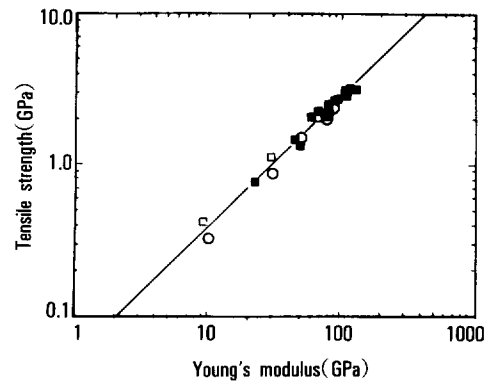


Fig. 14. The relation of tensile strength and Young's modulus for drawn PE fiber.

Xerogel 섬유를 일단계 연신하였을 때에는 인장 강도 2GPa, 탄성율 65GPa을 지니는 섬유를 제조할 수 있는 반면, 겔 섬유를 일단계 연신할 경우에는 인장 강도 2.4GPa, 탄성율 85GPa, 그리고 겔 섬유를 이단계 연신하였을 때에는 인장강도 3.1GPa, 탄성율 120GPa을 지니는 우수한 물성을 지니는 섬유를 제조할 수 있었다.

한편 본실험에서 제조된 섬유가 지니는 물성치를 여러 문헌에 보고된 값과 비교하여 보았다. Fig. 14는 인장강도와 탄성율의 관계를 log scale로 나타내었다. Van Krevelen은 인장 강도와 탄성율 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 밝혔다.¹⁴

$$\sigma = mE^n (\text{여기서 } n=0.8)$$

m = 상수, σ = 인장강도, E = 탄성율

Fig. 14로 부터 n 값, m 값 그리고 PE의 이론 탄성율의 하나인 250GPa^{15} 로 외삽했을 때의 인장강도 값을 구해보면 $n=0.863$, $m=0.054$ 그리고 외삽한 인장강도 값은 6.33GPa 이었다. n 값은 Krevelen의 값 0.8와 비교적 잘 일치하였으며, 외삽한 인장 강도 6.33GPa 은 Smith와 Lemstra 그리고 Matsuo 등이 보고한 값과 잘 일치하고 있다. Smith와 Lemstra는 Fig. 14에서와 같이 외삽에 의해 탄성율이 250GPa 일때 구한 인장 강도가 $5\sim 10\text{GPa}$ 로 보고하였으며,¹⁵ Matsuo는¹⁶ 초고분자량 PE 0.5wt% 용액을 사용하여 건조 겔 필름을 제조한 뒤 초연신한 결과를 보고 하였는데, 연신비가 300일 때 탄성율이 216GPa , 인장 강도가 6GPa 이었다.

또한 본 실험결과를 살펴보면 PE 섬유의 물성은 연신공정에 상관없이 DR_0 에 크게 좌우되었는데, PE의 이론탄성율의 250GPa 를 얻기 위해서는 어느 정도 연신시켜 주어야 하는가 예측하여 보았다. Fig. 12와 13으로 부터 인장 강도 및 탄성율과 연신비의 관계를 구하여 보면 아래와 같다.

$$\text{인장강도} = 0.094 \times \text{연신비} + 0.014$$

$$\text{탄성율} = 3.551 \times \text{연신비} + 4.651$$

이 식들로 부터 인장강도 6.33GPa , 탄성율 250GPa 을 얻기 위해서는 약 70배 가량 연신시켜 주어야 함을 알 수 있다.

결 과

Xerogel 섬유의 경우에는 연신온도가 120°C 일 때 최대로 연신되는 반면에, 겔 섬유의 경우에는 연신 온도를 110°C 로 하였을 때 최대로 연신되었다. 그리고 연신온도가 80°C 이상일 경우에는 섬유의 물성이 연신온도에 상관없이 연신비에 의해 크게 좌우되었기 때문에, 겔 섬유를 최대로 연신시킬 수 있는 온도인 110°C 에서 연신시킬 때 물성이 가장 우수한 섬유를 제조할 수 있었다. 섬유의 물성은 연신방법에

상관없이 연신비에 따라 직선적으로 증가하였다. 그러나 연신 방법에 따라 최대 연신비가 달라지게 되므로, 얻을 수 있는 최대 물성은 겔 섬유를 일단계 연신할 경우에 가장 컸으며 그 다음으로 겔 섬유의 일단계 연신 그리고 Xerogel 섬유를 일단계 연신시킬 경우에는 가장 적었다.

참 고 문 헌

1. P. Smith and P. J. Lemstra, *Polymer*, **21**, 1341 (1980).
2. P. J. Lemstra and C. W. M. Bastiaansen, *Polymer J.*, **19**, 85 (1987).
3. K. H. Kim, K. H. Lee, and C. R. Choe, *Polymer (Korea)*, **14**, 76 (1990).
4. P. J. Barham and A. Keller, *J. Mat. Sci.*, **20**, 2281 (1985).
5. P. Smith, P. J. Lemstra and A. M. Kiel, *Colloid & Polymer Sci.*, **259**, 1070 (1981).
6. C. Sawatari, T. Okumura, and M. Matsuo, *Polymer J.*, **18**, 741 (1986).
7. K. H. Kim, K. H. Lee, and C. R. Choe, *Polymer (Korea)*, **13**, 752 (1989).
8. J. Smook, W. Hamersma, and A. J. Penning, *J. Mat. Sci.*, **19**, 1359 (1984).
9. S. Kaveshi, U. S. Pat. 4,413, 110 (1983).
10. J. Smook and A. J. Penning, *J. Mat. Sci.*, **19**, 31 (1984).
11. R. W. Nune, J. R. Martin, and J. F. Johnson, *Polym. Eng. Sci.*, **22**, 205 (1982).
12. P. Smith and P. J. Lemstra, *J. Mat. Sci.*, **15**, 505 (1980).
13. B. Kalb and A. J. Penning, *Polymer Bulletin*, **1**, 871 (1979).
14. D. W. Van Krevelen, "The Properties of Polymers", 2nd Ed., Elsevier amsterdam, 1976.
15. P. Smith and P. J. Lemstra, *J. Polym. Sci.*, A2, 1007 (1981).