

論文

연속섬유강화 플라스틱 복합재료의 압축성형성에 관한 연구

-제보 : 니들핀칭횟수에 따른 물성치 및 컵형 압축성형성-

오영준* · 김형철** · 김이곤*

**A Study on the Compression Moldability for Continuous
Fiber-Reinforced Polymeric Composites**-Part I : The Mechanical Properties and the Cup-type Compression Moldability
for Numbers of Needling-

Y. J. Oh*, H. C. Kim** and E. G. Kim*

ABSTRACT

Glass-fiber reinforced polymeric composites provide the desirable properties of high stiffness and strength as well as low specific weight. Hence, they have become some of the most important materials in several industries. These composites can be grouped into thermoplastic and thermoset composites, with thermoplastic composites having several advantages over thermoset composites in mechanical properties and processing. As a result, the study of the material behavior and forming techniques of such composites has attracted considerable attention in recent years. When the continuous fiber-reinforced polymeric composites are molded by flow molding, the molded parts leads to be nonhomogeneity and anisotropic because of the separation and orientation of fibers. As the characteristics of the products are greatly dependent on the separation, it is very important to clarify the separation in relation to molding conditions, fiber mat structures and mold geometry. In this study, the effects of the mold geometry and the fiber mat structure on the compression moldability are studied using the cup-type molding.

초 록

최근에 플라스틱 복합재료는 고강도, 초경량이라는 재료의 우수한 성질과 높은 생산성으로 인해서 그 활용도가 급속히 증가하고 있고, 그 중 섬유강화 플라스틱 복합재료는 가장 각광받는 재료중 하나이다. 본 연구에서는 연속 섬유강화 플라스틱 복합재료를 열간 압축성형법을 이용하여 성형조건을 변화시켜 성형한 후 성형품의 성형성에 대하여 연구하였다. 연속섬유강화 플라스틱 복합재료를 압축 성형할 때 발생하는 문제점은 유동 속도차에 의한 섬유와 모재간의 분리현상이다. 이 분리현상으로 인해 성형품은 불균질해지고 이방성이 되어 기계적 특성 등에 영향을 받는다. 그러므로 분리에 영향을 미치는 섬유구조 및 기하학적 형상 등 성형조건을 연구할 필요가 있다. 니들핀칭

* 국민대학교 기계·자동차 공학부

** 인천전문대학 기계설계학과

횡수 $NP = 0$ punches/cm² 인 경우 성형시 모재와 강화재간의 분리현상이 증가하여 성형품의 성형성에 큰 영향을 미친다. 또한 펀치의 반경 $r_p = 1$ mm 일 경우 압축성형에 의한 큰 형상변화에 의하여 역시 분리현상이 증가한다. 본 논문에서는 성형공정 인자들이 제품의 성형성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 연속섬유강화 플라스틱 복합재료를 니들펀칭 횡수를 변화시켜 복합판을 제작한 후, 펀치의 반경을 변화시켜 고온 압축성형 하였을 때 일어나는 불균질도와 성형품의 두께를 측정하여 비교하고, 이에 미치는 금형 코너부의 반경 및 니들펀칭 횡수의 영향에 대해서 검토한 결과를 보고한다.

1. 서 론

복합재료란, 이질 이형의 재료를 조합시켜 소재 단일체로서는 발휘할 수 없는 특성을 갖게하고, 필요한 요구에 적합하며 우수한 성질을 갖는 재료를 총칭하고 있다.

이 복합재료는 모재인 플라스틱의 종류에 따라서 열경화성 플라스틱, 열가소성 플라스틱 복합재료로 나눌 수 있는데 종래의 플라스틱 복합재료는 열경화성 수지를 모재로 하는 성형품이 대부분이었으나 재생문제, 폐기물처리 등과 같은 환경문제가 대두되면서 소재에 대한 관점이 변화하고 있어 열가소성 수지를 모재로 하는 섬유강화 플라스틱 복합재료의 이용이 확대되고 있다. 또한 금속재료에 비해 비강도, 비강성 및 내식성 등이 우수하여 항공기 및 자동차 산업 등에서 경량화 플라스틱 구조부재로서 자리잡아 가고 있다. 특히 섬유강화 플라스틱 복합재료 중에서 일반적으로 이용되고 있는 스탬퍼블 시트(stampable sheet)는 열가소성 수지를 기지재료로 하고, 강화제로는 랜덤하게 배향된 유리 섬유매트 혹은 칩트 스트랜드(chopped strand) 유리 섬유매트를 사용하고 있기 때문에 강도의 방향성이 없는 것이 특징이다. 자동차 산업에서 이러한 소재가 사용되는 이유는 구조부재의 경량화 재료로서 다른 재료에 비하여 성형성 및 생산성이 우수하고 재료선택의 범위가 넓기 때문이다.

이와같은 복합재료의 성질은 모재인 플라스틱의 성질에 의존하는 것은 당연하지만, 특히 보강재인 섬유의 형태 즉 섬유의 형상, 치수, 배향, 분산상태, 엉킴상태 등에 크게 의존한다. 따라서 복합재료를 이용한 부품의 성형에 있어서는 강화재인 섬유의 구조 및 모재의 조성에 대하여 연구하고 섬유의 형태를 제어하는 것이 매우 중요하다.

복합재료의 성형법 중 모재인 플라스틱을 용점 이상의 온도로 가열하여 열간에서 압축성형 하는 것이 일반적인 성형법이다. 이와 같은 유동성형법은 금형내에

서 재료가 유동하므로 성형품의 두께에 대한 활용도가 크다. 그러나 소재를 열간에서 압축성형하는 경우에는 유동 속도차에 의해 모재와 강화재의 분리가 일어남은 물론 섬유층간의 미끄럼 발생으로 성형품은 불균질하고 이방성인 성질을 지니게 된다. 또한 컵형 성형과 같이 코너부가 존재하는 성형품인 경우에는 섬유함유율의 분포상태가 더욱 불균일하게 될 뿐만 아니라, 굽힘(bending), 퍼짐(straightening), 인장(tension), 원주방향 압축변형(circumferential compression) 등의 복잡한 응력상태로 인하여 벽 두께의 감소, 주름현상 등이 발생한다.

압축성형된 섬유강화 복합재료의 섬유함유량은 각종 물성치의 지표가 되는 가장 기본적인 인자로서 사용될 수 있으므로, 제품의 기하학적인 변화 등과 같은 성형 조건과 섬유매트의 구조변화에 기인하는 니들펀칭 횡수와 같은 재료요인 등이 성형품의 섬유함유율 분포에 미치는 영향에 대해서 고찰하고 더 나아가 예측·제어하는 것은 뛰어난 성형품을 얻는데 있어서 매우 중요하다. 섬유강화 플라스틱 복합재료의 성형법 중에서 곡면을 갖는 성형품에 관한 연구는 다이아프램(diaphragm) 성형법[1-5]을 이용하여 반구형상의 성형품에 대한 두께와 곡면부위의 잔류응력에 대한 연구나, 오토클래브(autoclave)법을 이용한 성형시간과 수지의 경화반응[6-9] 등에 관한 연구들은 많이 있다.

본 연구에선 성형공정 인자들이 압축 성형성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 연속 섬유 매트 에 대하여 니들펀칭 횡수를 달리하여 복합판을 제작한 후, 열간 압축성형법을 이용하여 컵형 성형품에 대한 코너부 반경변화 및 니들 펀칭 횡수의 변화에 따른 성형품의 두께와 섬유함유율 분포를 비교·검토한 결과를 보고한다.

2. 이 론

2.1 섬유함유율비 Q_{fr} [10]

섬유함유율비 Q_{fr} 은 성형전의 중량 섬유함유율과 성형후의 중량 섬유함유율의 비로 다음과같이 정의하였다.

$$Q_{fr} = \frac{q_f}{q_D} \quad (1)$$

여기서 q_D 는 성형전의 중량 섬유함유율이고, q_f 는 성형후의 중량 섬유함유율이다.

2.2 불균질도 Γ [11]

복합재료의 열간 압축성형시 모재는 액체, 강화재는 고체로 성형이 진행되므로 둘 사이의 유동 속도차에 의해 분리가 일어나 성형품은 불균질하게 된다. Fig. 1은 압축 성형후 성형품의 중심으로부터 거리변화에 따른 섬유함유율 분포를 나타낸 예이며, 분리가 심해지면 성형품은 불균질해져 사선부분의 영역이 더 커지게 된다. 섬유함유율 분포곡선을 이차함수로 하고 계수 C_0, C_1, C_2 를 최소자승법에 의해서 구한후, 다음과 같은 식 (2)에 의해 불균질도 Γ 를 구한다.

$$\Gamma = \frac{\text{Shaded area}}{B} \quad (2)$$

여기서 불균질도 Γ 는 무차원 수이며, 0에 가까우면 성형품이 균질해짐을 의미한다.

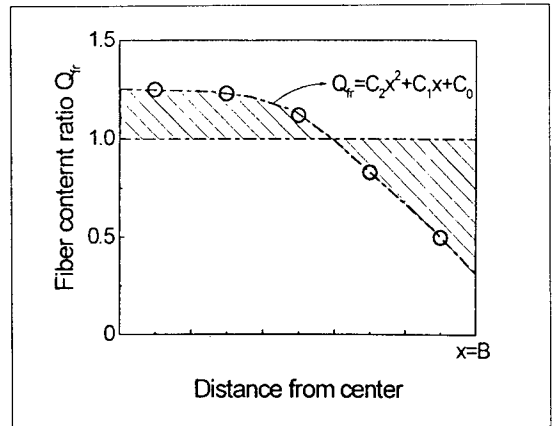


Fig. 1. Distribution of the fiber content ratio

3. 실험

3.1 복합판의 제작, 물성치 시험 및 압축성형

본 연구에 사용된 재료는 강화재로 베트로텍스(주)제의 연속 스트랜드매트(Continuous Strand Mat, 450g/m²)이며, 모재는 폴리프로플렌(PP)이다. 니들펀칭 공정을 거친 후 복합판을 제작하였다. Fig. 2는 복합판의 성형공정을 대략적으로 나타낸 것이다. 니들펀칭 공정에 이용한 펀칭기는 니들 수 5750needle/m · working width이고, 유효작업 폭이 600mm인 독일 DILO-Needle Loom, type ODII6이다. 섬유구조를 변화시키기 위하여 단위 면적당 니들펀칭 횟수 NP를 5, 10, 25, 50 punches/cm²로 변화시켰고, 여기에 폴리프로필렌을 함침시켜 시편을 제작하였다. Fig. 3은

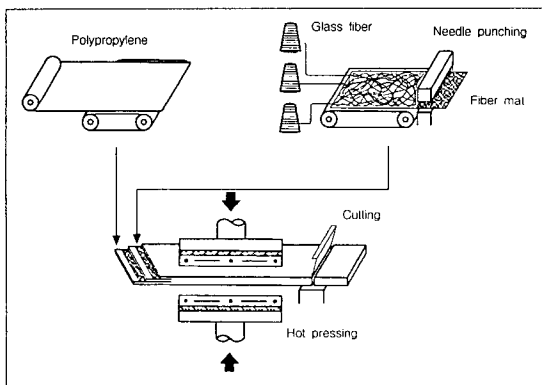


Fig. 2. Schematic illustration of manufacturing process for fiber composites

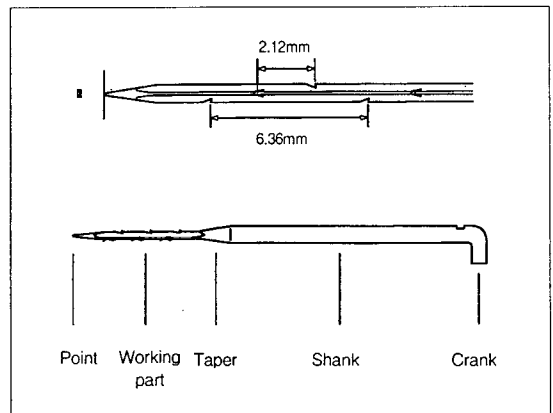


Fig. 3. Parts designation on felling needles

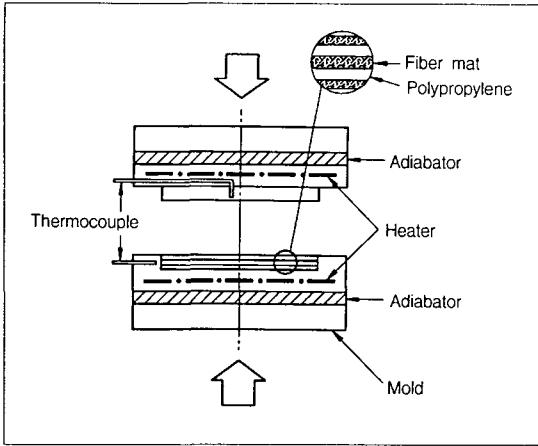


Fig. 4. Illustration of continuous fiber reinforced polymeric composites impregnation process

니들 펀칭기에 사용된 바늘의 형태를 도시화 한 것이다.

복합판 제작에 사용된 가압장치는 열프레스를 사용하였고, 프레스의 상하에 열전대를 부착하여 200℃에서 균일하게 가열·가압하였다. 이 때 수지가 섬유사이로 용이하게 함침이 되도록 약 20~30분간 가압과 함침의 공정을 거듭하였다. 이 가압·함침공정에 이용한 금형의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 제작된 복합판은 40wt%이며, 260mm(폭)×260mm(길이)×3.8mm(두께)의 정사각형으로 절단하여 시험편으로 하였다.

물성치 측정에 사용할 시험편은 니들펀칭 횟수를 0, 10, 25, 50, 125, 250 punches/cm²로 변화시켜 위와 같은 방법으로 제작된 시트에서 고르게 채취하여 인장시험은 ASTM D-3039, 충격시험은 ASTM D-256, 굽힘시험은 ASTM D-790 M-93 방법에 준해서 수행하였다. 인장시험 및 굽힘시험에 사용된 U.T.M은 일본 SHIMADZU 제품 Model AG25TG Auto Graph (Capacity 25ton)를 사용하였으며, Cross-head speed는 인장시험, 굽힘시험 공히 2mm/min로 하였다. 충격시험은 Capacity 153.3Kg·cm인 플라스틱용 Model DYD-103B Charpy Impact Testing Machine(대영정밀 제품)을 사용하여 충격치를 측정하였다.

앞에서 제작된 시험편을 가열용 전기로(200℃)에서 약 20분간 가열하여 Fig. 5와 같은 공동을 갖는 금형(200℃)에 충전하여 압축 성형하였다. 금형은 성형품

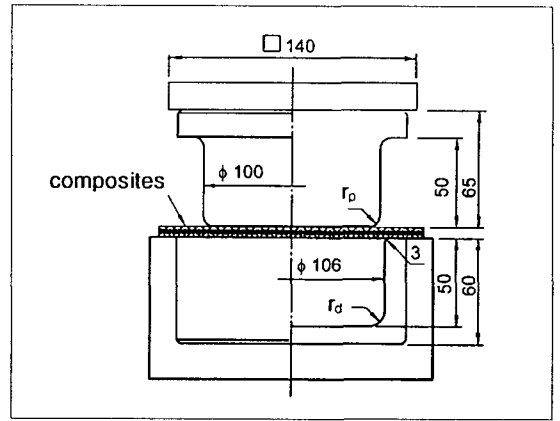


Fig. 5 Cup-type compression molding

Table. 1 Dimensions of the compression molding mould

| Mould No. | r _p (mm) | r _d (mm) |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 4 |
| 2 | 25 | 28 |
| 3 | 50 | 53 |

에 기하학적인 변화를 주기 위하여 펀치의 반경(r_p = 1, 25, 50mm) 및 다이의 반경(r_d = 4, 28, 53mm)을 변화시켰다. 압축성형은 30ton 유압프레스를 사용하였으며 금형에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉 및 판 히터를 사용하여 균일하게 온도를 유지시켰다.

Table. 1은 압축성형에 사용된 금형의 펀치와 다이의 크기를 나타낸 표이다.

3.2 섬유함유율비 Q_{fr} 및 두께비 T_r 측정

복합판을 Fig. 5와 같은 금형사이에 끼우고 압축성형을 할 경우 섬유를 고체, 모재를 액체로 한 고액 혼상류는 성형이 진행됨에 따라서 섬유와 모재와의 유동속도 차이에 의해서 분리가 생기며 이로 인해 성형품은 불균질하게 된다. 섬유함유율비 Q_{fr}은 성형전후의 중량섬유 함유율을 이용하고, Q_{fr} 분포곡선으로부터 성형품 내의 섬유와 모재와의 분리의 척도인 불균질도 J를 구할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 이와 같은 압축성형의 소성변형거동은 매우 복잡하여 원주 방향으로 압축응력이 작용하여 주름이나 파단과 같은 결함이 종종 발생한다. 이와 같은 현상은 제품의 성형성에 매우 큰 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에선 성형품의 측벽 두께에 대한 박육현상을 예측하기 위해 두께비 T_r을 구하였다.

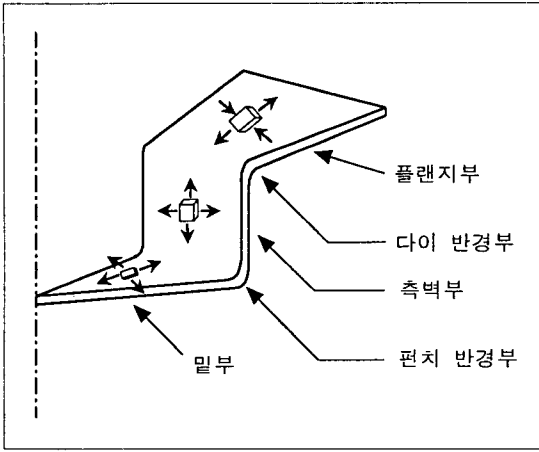


Fig. 6. Compression molded part

불균질도를 구하기 위한 시험편의 연소는 시험편의 중립면에서 x, y 축을 따라 10mm×10mm를 채취하여 연소용 전기로 내 600℃에서 20분간 가열 연소하고, 연소전후의 무게를 전자저울을 이용하여 측정하여 섬유함유율 분포를 구하였다. 이 섬유함유율 분포로부터 섬유함유율비와 불균질도 I 를 구하였다. 시험편 채취는 성형품이 대칭이고, 섬유가 랜덤매트이므로 한쪽 방향으로 하였다. 그리고, 성형전후의 성형품에 대한 두께를 측정하여 두께비 $T_r = (t/t_0)$ 을 구하였으며, Fig. 7에는 섬유함유율비 Q_r 과 두께비 T_r 의 측정을 위한 시험편을 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기계적 물성치 시험

섬유강화 플라스틱 복합재료의 기계적 물성치는 섬유함유율, 섬유배향, 섬유와 모재와의 계면상태 등에 의해서 영향을 받는다. 따라서 니들펀칭 횟수의 변화는 수지의 함침정도나 유리섬유의 얽힘에 영향을 주게 되어 물성치가 달라진다. 즉 니들펀칭 횟수가 많아지면 유리섬유 매트 내로 수지 함침이 용이해져 함침성이 양호하나 니들펀칭에 의한 섬유매트의 손상으로 기계적 성질에 많은 영향을 미치게 된다. 이 분야에 대한 연구[12-14]는 다수 보고되었으나, 본 연구에선 종전과 약간 다른 결과를 얻을 수 있었다. 그 이유는 본 실험에 사용된 연속 스트랜드매트가 섬유간의 얽힘, 강성과 취성이 매우 강하여 니들펀칭으로 인해 두께방향의

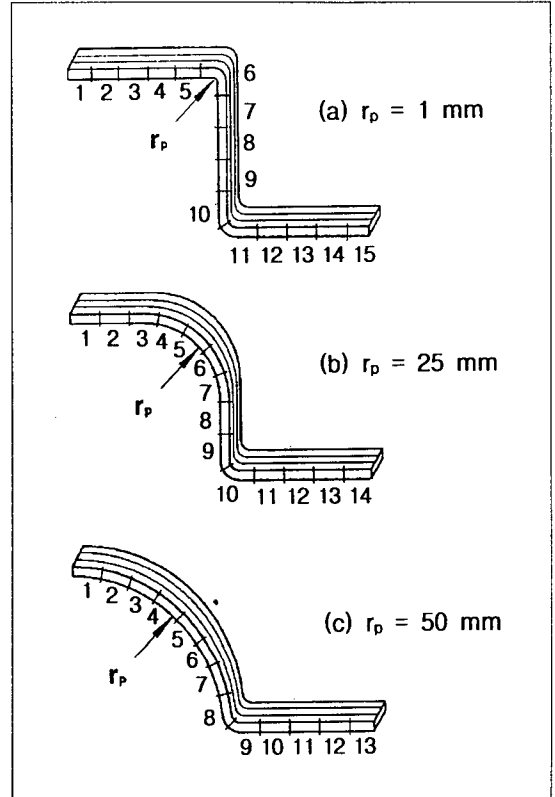


Fig. 7. Positions for measuring Q_r and T_r of specimen

섬유간의 결합력은 강화시키나 길이, 너비방향으로는 오히려 강화재간의 결합을 저하시키는 요인으로 작용했기 때문인 것으로 여겨진다.

Fig. 8에는 충격에너지에 미치는 니들펀칭 횟수의 영향을 나타내었다. 니들펀칭 횟수가 많아짐에 따라 충격 에너지는 감소한다. 이는 니들펀칭 횟수가 적은 NPO인 경우 많은 NP250인 경우보다 충격에 의한 시험편의 변형이 적게 일어나는 대신 시험편이 받는 하중이 크게 나타났기 때문이다. 인장시험에서는 Fig. 9 (a)~(c)에서 보듯이 연신률, 인장강도, 탄성계수 등이 니들펀칭 횟수가 증가함에 따라 점차 감소하는데, NP10 부근에서 인장강도와 연신율은 NPO보다 우수하게 나타났고, NP50이상에서는 니들펀칭 횟수가 증가함에 따라 서서히 감소함을 볼 수 있다. 이는 니들펀칭 횟수가 증가하면 섬유매트의 절단이나 손상이 증가하게 되어 일어난다.

Fig. 10 (a)~(b)는 굽힘시험에 대한 결과치를 나타낸 것이다. 보듯이 굽힘강도의 경우 인장시험 결과치가

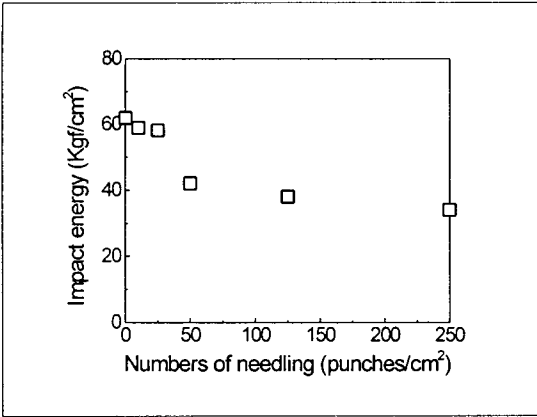


Fig. 8. Variation of impact energy as a function of numbers of needling

우수한 NP10에서 가장 저조하나 NP25 부근까지 증가하다 감소하는 경향을 볼 수 있다. 굽힘강도에서는 NP25가 가장 양호하였고 충격에서는 NP25이상에서 급격히 감소됨을 보여주고 있어 니들펀칭 횟수의 증가와 함께 수지함침과 섬유손상의 관계가 가장 양호한 최적의 펀칭횟수는 NP10에서 25사이라 판단된다.

4.2 섬유함유율비 Q_{fr} 및 두께비 T_r

니들펀칭 횟수와 코너부의 치수에 변화를 주었을 때 성형품의 중심으로부터 거리변화에 따른 성형품의 두께비를 Fig. 11 (a)~(c)에 나타내었다. 니들펀칭 횟수의 의미는 단위면적당 니들통과 횟수이므로 이 횟수가 적은 NP5인 경우보다는 NP50이 두께비 T_r 의 변화가 작다는 것을 알 수 있다. 이는 횟수가 많은 NP50인 경우에는 NP5보다 함침상태가 양호하고, 니들펀칭으로 인해 섬유매트에 많은 변화가 일어나 압축 성형시 유동이 잘 진행되므로 변화가 작게 나타난다. 또한 이 그림에서 펀치의 반경 r_p 가 작은 경우에는 성형품의 직선부와 곡선부의 교차가 심하게 나타나고 있으므로 니들펀칭 횟수간의 두께비 변화는 펀치의 반경 $r_p = 1mm$ 인 경우가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 펀치의 반경 $r_p = 50mm$ 인 경우보다 $r_p = 1mm$ 인 경우 압축성형에 의한 형상변화가 크므로 두께비의 변화도 크게 나타난다.

성형품 내의 섬유함유율비에 미치는 니들펀칭의 횟수와 펀치의 반경별로 Fig. 12 (a)~(c)에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 니들펀칭 횟수가 많은 NP50인 경우가 섬유함유율비의 변화가 작은 것을 알 수 있다. 이

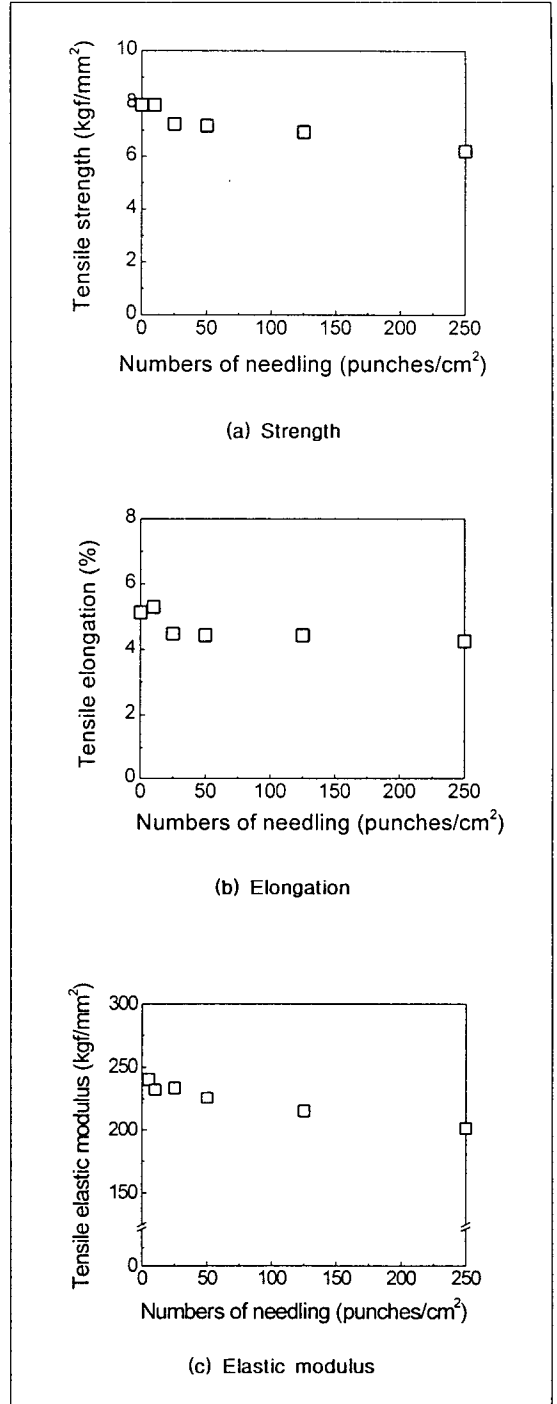


Fig. 9. Variation of (a)strength, (b)elongation and (c)elastic modulus as a function of numbers of needling

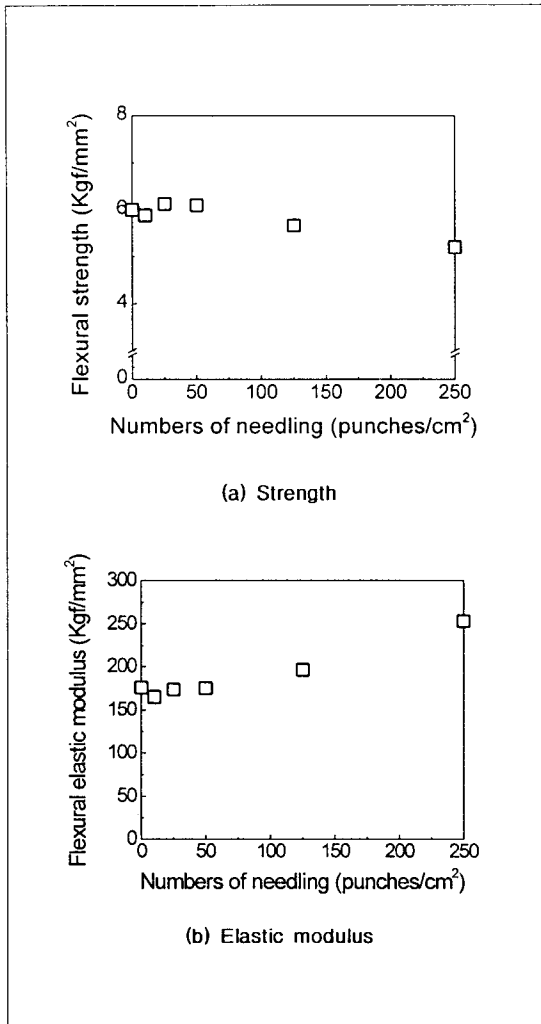


Fig. 10. Variation of (a) strength, (b) elastic modulus a function of numbers of needling

는 양호한 함침상태와 성형시 원활한 유동에 의한 것이다. 또한 압축 성형시 형상변화가 크게 나타나는 펀치의 반경이 적은 $r_p = 1\text{mm}$ 인 경우가 $r_p = 50\text{mm}$ 인 경우보다 섬유함유율이 심하게 변화하고 있음을 알 수 있다.

또한 니들펀칭 횟수가 많으면 매트 구조를 변화시켜 수지의 함침상태를 양호하게 하므로 펀치의 반경 r_p 가 작을지라도 섬유함유율의 변화가 작게 나타나며, 펀치의 반경 r_p 가 클지라도 니들펀칭 횟수가 적으면 섬유함유율의 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

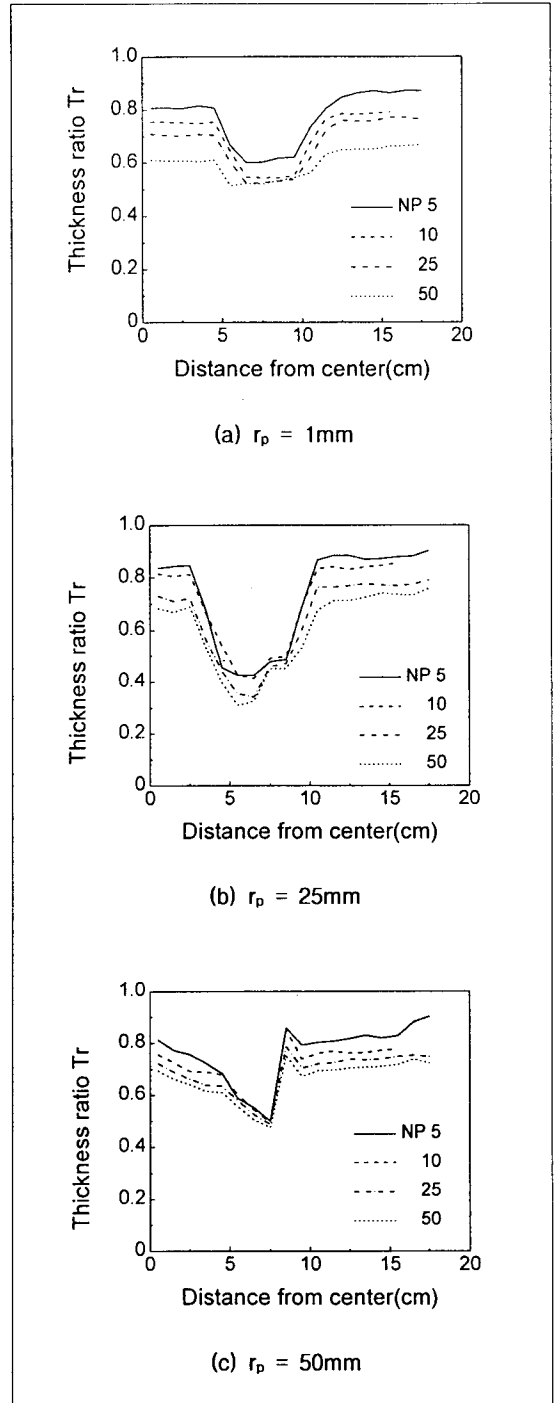


Fig. 11. Variation of thickness ratio T_r , as a function of distance from center

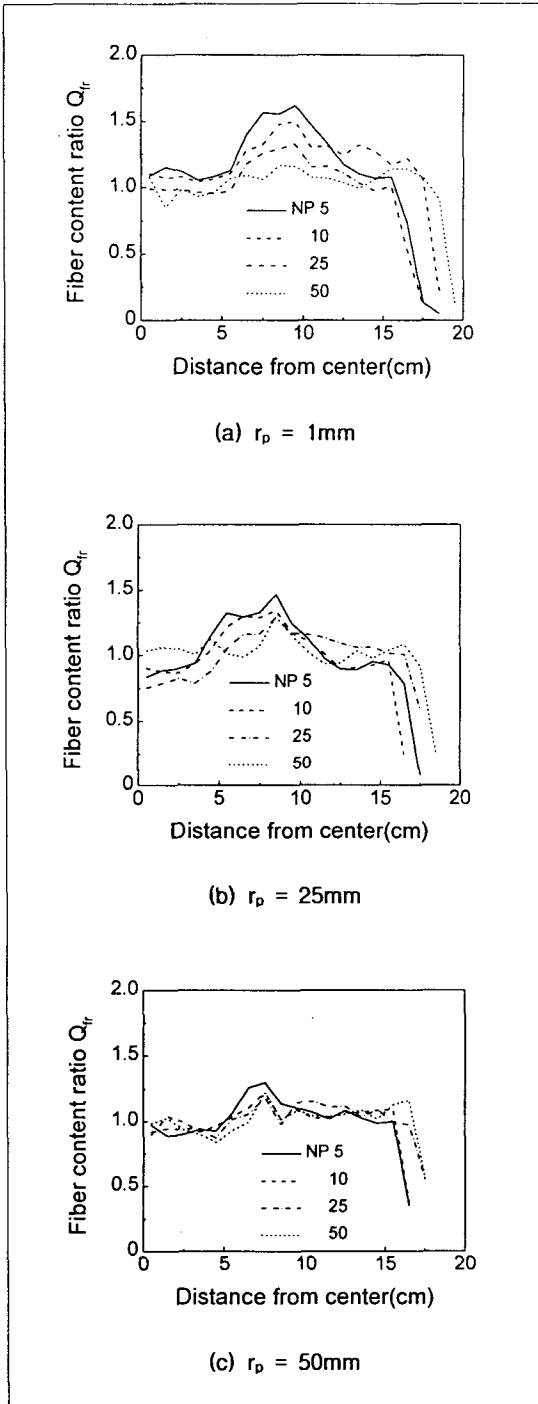


Fig. 12. Variation of fiber content ratio Q_{fr} as a function of distance from center

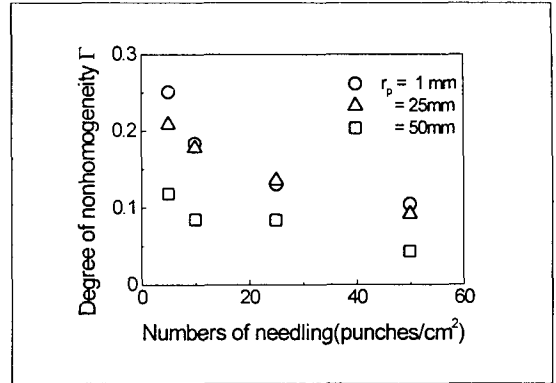


Fig. 13. Relationship between numbers of needling and degree of non-homogeneity Γ

Fig. 13은 압축 성형된 성형품내 섬유와 모재간의 불균질함의 척도인 불균질도 Γ 에 미치는 니들펀칭 횟수의 영향을 r_p 의 변화에 대해서 나낸 것이다. 그림에서 보듯이 니들펀칭 횟수가 증가하면 불균질도 Γ 는 감소하고 있으며, $r_p = 50$ 인 경우가 가장 작은 불균질도 Γ 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 니들펀칭 횟수가 많아지면 모재와 강화재간의 함침상태가 양호해져 성형시 유동이 원활해지며, 펀치의 반경 r_p 가 증가하면 성형에 의한 형상변화가 작아짐으로 불균질도 Γ 는 감소한다.

5. 결론

본 연구에서는 연속섬유로 강화된 복합재의 강화재 구조를 변화시키는 니들펀칭 공정을 한 후 이 복합재를 이용하여 기계적 물성치를 구하였고, 성형성을 검토하기 위하여 컵형 압축성형을 한 후 비교 검토하였다. 또한 니들펀칭 횟수와 같은 재료요인(NP = 5, 10, 25, 50 punches/cm²), 펀치의 반경과 같은 기하학적 요인($r_p = 1, 25, 50$ mm) 등의 성형조건을 변화시켜 압축성형 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 성형품의 두께비 T_r 의 변화는 니들펀칭 횟수 NP가 적은 경우 크며, 동일한 펀치 반경에 대한 NP간의 두께비 변화는 펀치반경 r_p 가 작은 경우 크다.
- (2) 압축 성형품의 섬유함유율비 Q_{fr} 의 변화는 니들펀칭 횟수 NP가 많고 펀치의 반경 r_p 가 큰 경우가 작다.

(3) 성형품의 불균질함의 척도인 Γ 는 니들펀칭 횟수가 증가하면 감소하며, 펀치반경이 작은 성형품일 수록 성형품의 Γ 는 증가 한다.

후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chapman, T. J., Gillespie Jr, J. W., Pipes, R. B., Manson, J.A.E. and Seferis, J. C., "Prediction of process induced residual stresses in thermoplastic composites", *J. Compos. Mater.*, 24, June, 1990, pp. 616.
2. Lawrence, J. E., Okine, R. K., "Blow molding and thermoforming of plastics", *Proc. 5th A. S. C. Tech Conf.* 1990, pp. 50.
3. Gilmore, S. D. and Guceri, S. I., "Solidification in anisotropic thermoplastic composites", *Palm. Compos.*, 11, 1990, pp. 406.
4. Zahlen, N. and O' Neill, J. M., "Design and fabrication of composite components : The spring-forward phenomenon", *Composites*, 20, 1989, pp. 77.
5. Okine, R. K., "Analysis of forming parts from advanced thermoplastic composite sheet materials", *J. Therm. Compos. Mater.*, 2, 1989, pp. 50.
6. Mallon, P. J. and O' Bradaigh, C. M., "Development of a pilot autoclave for polymeric diaphragm forming of continuous fibre reinforced thermoplastics", *Composites*, 19, 1988, pp. 37~47.

7. O' Bradaigh, C. M. and Mallon, P. J., "Effect of forming temperature on the properties of polymeric diaphragm formed thermoplastic composites", *Compos. Sci. Technol.*, 35, 1989, pp. 235.

8. O' Bradaigh, C. M., Mallon, P. J. and Pipes, R. B., "Effect of forming temperature on the properties of polymeric diaphragm formed APC-2 components", *Center for Composite Materials Report No. 87-57*, University of Delaware, 1987.

9. O' Bradaigh, C. M., Mallon, P. J., "Design and Manufacture of a Composite Trailer", *Center for Composite Materials Report No. 88-08*, University of Delaware, 1988.

10. Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K., "The Fibre Content Distribution of Compression Molded Long Fibre-Reinforced Thermoplastic Products", *International Polymer Processing*, Vol. I, Issue 2, 1987, pp. 60~65.

11. Hojo, H., Yaguchi, H., Onodera, T., Kim, E. G., "Simulation of Compression Molding with Matrix Fibre Separation and Fibre Orientation for Long Fibre-Reinforced Thermoplastics", *International Polymer Processing*, Volume III, 1988, pp. 54~61.

12. 이승호, 강태진, 육종일, "스티칭에 의한 Spectra/비닐에스테르 적층복합재료의 내충 격성 변화에 관한 연구", *한국섬유공학회지*, 제31권, 제1호, 1994, pp. 32~36.

13. 이승호, 강태진, 김종섭, "Textile Composite의 구조와 물성(1)-스티칭 복합재료의 충격 손상거동", *한국복합재료학회지*, 제8권, 제1호, 1995, pp. 58~65.

14. 이승호, 강태진, "Textile Composite의 구조와 물성(2)-부직포 복합재료의 기계적 물성과 충격특성에 관한 연구", *한국복합재료학회지*, 제9권, 제3호, 1996, pp.58~66.