

색수차를 이용한 2차원 복굴절측정 장치의 개발에 관한 연구

김종선[†]·윤경환^{*}

One Image Analysis for 2-D Birefringence Measurements by Chromatic Aberration

Jongsun Kim and Kyunghwan Yoon

Key Words: Injection Molding(사출성형), Birefringence(복굴절), Plastic Lens(렌즈), chromatic aberration(색수차)

Abstract

Recently, Plastic optical products are widely used. Injection molding process has advantages of low cost and high productivity. However, it remains a residual birefringence and residual stress by difference cooling. The present study focused on measuring birefringence in optical plastic parts using interference color pattern. The main idea of an analysis comes from chromatic aberration which is caused by difference light wavelengths. As a result, a complete system measuring the high order 2-D birefringence pattern was built. Further investigation is under way to improve the accuracy of birefringence measurement system by diode laser.

기호설명

C	: 광탄성계수 (Pa^{-1})
D_{fs}	: 경로차 (nm)
n	: 굴절률
λ	: 광의 파장 (nm)
ϕ_{sf}	: 위상차 (rad)

1. 서론

현재 광 저장 장치의 급속한 확산에 따라 광학

용 렌즈를 플라스틱으로 대체하여 생산성을 높이고 생산비를 낮추는 작업이 진행되어 왔다. 하지만 사출성형 공정과 고분자 물질의 특성상 최종 제품에 남는 광학적 이방성, 즉, 복굴절의 분포는 피할 수 없다. 이러한 광학 렌즈 내부에 남는 복굴절의 분포는 광학 설계 단계에서 예측하지 못하는 결과들을 초래하게 된다. 품질이 우수한 광학용 렌즈를 생산하기 위해서 렌즈 내부의 잔류응력(residual stress)과 복굴절(birefringence)의 양을 줄이려는 시도는 많은 연구가 활발히 진행 중이다.^(1,2)

렌즈 전체에 분포하는 복굴절의 양을 줄이는 방법은 수지가 정해져 있는 경우 크게 두 가지 방법이 있으며 금형의 구조 또는 성형법을 개선하여 광로 상의 복굴절의 양을 줄이는 것이 하나의 방법이고 성형조건, 즉, 사출 속도 profile이나 금형의 온도 조절 등이 다른 하나의 방법이다.

금형의 구조는 잔류 응력이나 복굴절이 크게

[†] 단국대학교 대학원 기계공학과
E-mail : libra74@dankook.ac.kr
TEL : (02)799-1143 FAX : (02)709-2569

^{*} 단국대학교 기계공학과

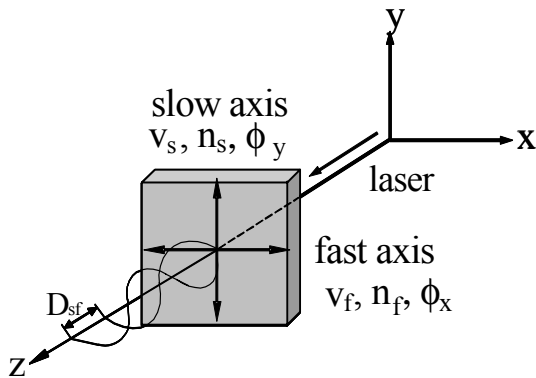


Fig. 1 A linear polarized light and path difference passing an anisotropic substance.

남지 않도록 냉각수로의 설계를 CAE를 이용하여 확인할 수 있고 성형법의 개선이란 현재 사용하는 단순 사출법 대신 압축 공정을 가미한 사출/압축 공정의 적용 등이다. CAE를 사용한 해석 시 렌즈의 측면에 온도차가 크게 발생하지 않게 냉각 수로를 조절하는 것이 필수적이다.

성형 조건의 조절도 CAE를 사용한 해석이 크게 도움이 될 수 있으며 특히 주의해야 할 사항은 잔류 응력이나 복굴절이 금형 내에서의 비등온 냉각에 의한 효과와 유동에 의한 효과가 복합적으로 남게되므로 렌즈의 유효 단면에서의 유동 방향을 주의해서 해석해야 한다. 실험적으로는 short shot test가 상당히 유용한 자료로 사용될 수 있으며, 특히, 단면적이 증가하는 부분에서의 유동 형태의 조절에 주의를 요한다.

본 논문에서는 이상에서 열거한 사항들을 평가하기 위하여 광학용 렌즈의 복굴절 분포를 측정하는 장치를 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 복굴절 측정 시스템

2.1 복굴절

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 1에서 보는 바와 같이 횡파인 빛이 z 방향으로 진행할 때 진동 방향에 따라 진행 속도가 다르게 된다. 이 때 가장 빠르게 진행하는 축을 fast axis, 가장 느리게 진행하는 축을 slow axis라 부르며 두 축 사이의 각도는 90°를 이룬다. Fast axis와 slow axis를

각 각 굴절률에 관한 주축이라 하며 직선 편광된 빛이 광학적 이방성인 물체를 통과할 때 fast axis와 slow axis로 성분이 분리되면 두 파형 사이에는 경로차 또는 위상차가 생긴다. 이러한 속도차에 의해 발생하는 두께 d를 통과하는 사이의 거리 경로차, D_{sf} 는 다음과 같은 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$D_{sf} = (t_s - t_f)c = \left(\frac{d}{v_s} - \frac{d}{v_f}\right)c = (n_s - n_f)d \quad (1)$$

여기에서 t는 매질 통과 시간, v는 매질 통과 속도, c는 진공 또는 공기중의 광속, n_s, n_f 는 각각 slow axis와 fast axis의 굴절률이며 그 차이를 복굴절의 값이라 부른다.

한편, 각도로 나타낼 수 있는 위상차는 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{sf} = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_s - n_f) \quad (2)$$

여기서 λ 는 진공 중의 파장이다.

2.2 광탄성 이론

1816년 David Brewster는 정상적으로 투과성이 있는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띄게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광탄성(photoelasticity)이라 하며 광학적으로 광축은 응력의 방향과 일치하고 이방성에 의한 복굴절은 주응력차에 비례한다.

선형 광탄성(Linear Photoelasticity) 이론에서는 등방성물질이 응력을 받으면 편광된 광학 주축 방향의 굴절률의 차이가 주응력의 차이에 비례하며 다음 식 (3)과 같다.

$$n_i - n_j = C(\tau_i - \tau_j) \quad (3)$$

여기에서 i, j, k = I, II, III 주축의 방향이며, $\tau_I, \tau_{II}, \tau_{III}$ 는 세 주축 방향의 주응력이다. 또한, n_i 는 주축 i 방향으로 편광된 횡파가 물질을 통과할때의 굴절률이며 C는 광탄성계수(stress-optical coefficient)이다. 이 선형 광탄성 관계식은 여러 고분자들에 대하여 상당히 넓은 범위에서 증명되어 있다.⁽³⁾ 많은 광학용 플라스틱 제품의 재료로

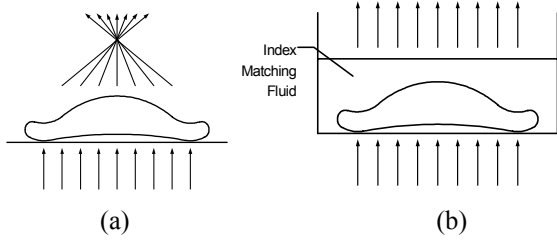


Fig. 2 A course of lay placed in the air (a) and immersed in the index matching fluid(b)

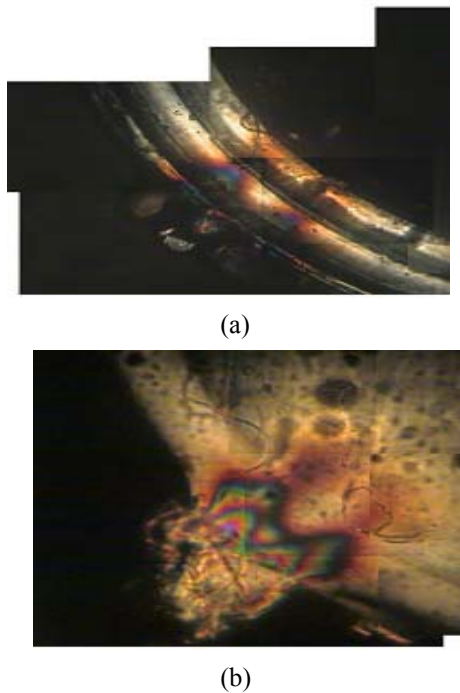


Fig. 3 A lens's birefringence pattern in the air (a) and immersed in the index matching fluid (b)

사용되는 폴리카보네이트(PC)의 광탄성계수는 유리전이온도(T_g) 이상에서 약 3,600 Br ($1 \text{ Br} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$)이고, 유리전이온도 이하에서는 60~70 Br로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 또 요즘 많은 광학용 제품에 사용되는 Zeon Chemical사의 Zeonex의 경우 10~1000 Br를 가지고 있다.

2.3 침액법

렌즈와 같은 복잡한 구조를 가지는 성형품을 평행광 상태에서 복굴절의 분포를 측정하는 경우 fig. 2(a)와 같이 중심 부근에서는 초점 거리가 짧아 검게 보이며 필요한 데이터를 관찰할 수 없다.

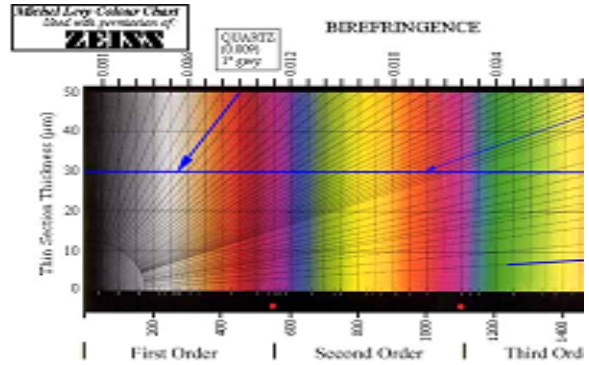


Fig. 4 Levy's interference chart

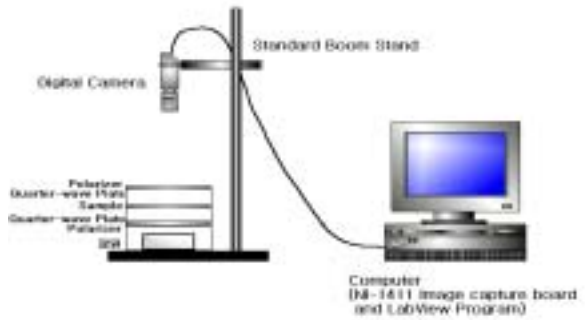


Fig. 5 2-D measurement system by ccd camera

이러한 경우에 사용할 수 있는 방법이 바로 침액법으로 Fig. 2(b)와 같이 굴절률이 같은 액체 속에 렌즈와 같은 측정품을 넣어서 평행광 상태로 광로를 만든 후 Fig. 3(b)와 같이 복굴절 이미지를 촬영할 수 있다. 이와 같은 방법은 측정물의 성형 구조에 따른 영향을 배제하고 가공중에 형성된 복굴절의 구조만을 측정할 수 있다. 침액법에 사용되는 index matching fluid는 굴절률 0.002 간격으로 구할 수 있으며 광학용 플라스틱 제품에 사용하는 거의 모든 수지에 맞는 index matching fluid를 구할 수 있다. Fig. 3(b)는 Zeonex

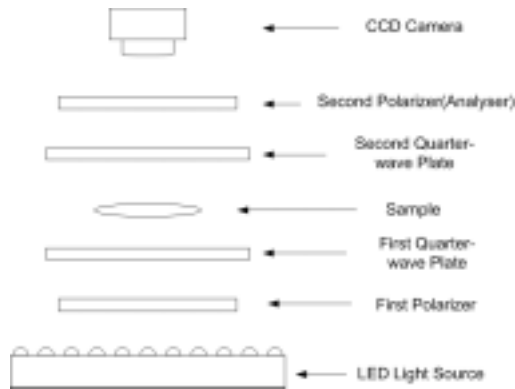


Fig. 6 Optical train used

로 만든 렌즈이므로 굴절률 1.530인 index matching fluid에서 찍은 사진이다.

이와 같이 광학용 렌즈를 통과하여 보이는 컬러를 interference color라 하며, Fig. 4에서 하단의 숫자로 표시된 것과 같이 경로차가 증가할 때 이에 비례하여 interference color가 변화하게 된다.

2.4 시스템 구성도

본 논문에 사용한 시스템은 Fig. 5와 같이 Edmund Industrial Optic사의 Polarizer 필름 2장, retarder 필름 2장, 그리고 LED 평면 광원으로 구성된 광학계를 가지고 있으며, 복굴절 이미지의 촬영을 위하여 썸텍의 비디오 현미경 시스템인 iCamscope-305를 사용하였다. 또한 촬영한 복굴절 이미지 해석을 위해서 National Instruments사의 NI-1411 이미지 캡처보드와 LabView 프로그램을 사용하였다.

2.5 해석이론

본 논문에 사용한 광학 시스템 구성은 다음 Fig. 6과 같다. 기본적으로 원평광 시스템을 사용하고 있다. 본 시스템에서 ccd 카메라에 들어오는 신호를 해석하기 위해서 Jones (or Muller) Matrix를 이용했으며 이는 Maxwell방정식을 만족하는 x-y 평면내에서 진동하며 z 축 방향으로 진행되는 횡파의 전기장의 크기만을 따로 떼어 내서 복소표 형태로 만든 것이다.

본 논문에 사용된 시스템의 Jones Matrix는 다음의 식 (4)와 같다. 또한, 식(4)의 Jones Matrix를 이용하여 검출기의 신호를 계산하면 식(9)와 같이 sin의 제곱항으로 나타나게 된다.

$$\begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$E_{y'} = \frac{1}{2} \{ i \cos \theta e^{-i\theta} - \sin \theta e^{i(\phi-\theta)} + \sin \theta e^{-i\theta} - i \cos \theta e^{i(\phi-\theta)} \} E_x \quad (5)$$

$$= \alpha |E_{0x}| e^{i\phi_s} \exp i(kz - \omega t) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} [\sin 2\theta + \sin(\phi - 2\theta) + i \{ \cos 2\theta - \cos(\phi - 2\theta) \}] \quad (7)$$

$$|\alpha|^2 = \frac{1}{4} [\{ \sin 2\theta + \sin(\phi - 2\theta) \}^2 + i \{ \cos 2\theta - \cos(\phi - 2\theta) \}^2] = \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (8)$$

$$I^V = \frac{C_0}{2} |E_{y'}|^2 = \frac{C_0}{2} E_{0x}^2 \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (9)$$

$$I_0 = \frac{C_0}{2} E_{0x}^2 \quad (10)$$

또한 최종 Intensity I^V 의 I_0 에 대한 비는 다음의 식 (11)로 요약될 수 있다.

$$\frac{I^V}{I_0} = \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (11)$$

원평광 시스템은 Isoclinic의 상태가 나타나지 않게 되어 주축에 관계없이 경로 차 D_{fs} 만의 함수로 나타난다는 점이 크게 다르며 백색광을 쓰면 Interference color pattern으로 샘플의 2차원적인 경로 차 D_{sf} 의 분포를 알 수 있게 된다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 ϕ 대신 D_{sf} 를 주어진 파장 λ 의 함수로 표시하면

$$\frac{I^V}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda} \right) \quad (12)$$

로 최종식을 나타낼 수 있다.

이 간단한 식은 우리가 편광판 사이에 샘플을 두고 백색광하에서 볼 경우 발생하는 interference color pattern을 이해할 수 있는 기본이 된다.

우선 백색광을 R(red, λ_R), G(green, λ_G), B(blue, λ_B)의 삼색광이라 가정하여 샘플의 x-y plane상의 한 점에 의해 발생하는 경로 차 D_{sf} 를 고정하면 각각의 intensity는 다음의 세 식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\frac{I'_R}{I_0} = \sin^2\left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda_R}\right) \quad (13)$$

$$\frac{I'_G}{I_0} = \sin^2\left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda_G}\right) \quad (14)$$

$$\frac{I'_B}{I_0} = \sin^2\left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda_B}\right) \quad (15)$$

이와 같이 같은 경로차를 가져도 빛의 파장에 따라 검출기에 들어오는 신호의 강도가 달라지는데 이것은 빛이 파장에 따라 굴절률이 달라지는 색수차 현상 때문이다. 본 논문에서는 이 색수차를 이용하여 각각의 R, G, B성분의 비율에 따라 높은 오더의 복굴절도 측정 할 수 있는 시스템을 구성하였다.

본 논문은 광학 시스템에 촬영된 이미지는 일차적으로 R(red, λ_R)의 성분으로 분리해낸 후 식 (13)을 이용하여 R(red, λ_R)의 intensity 위치를 찾는다. 신호의 강도가 sin의 제곱에 향으로 변하기 때문에 주기에 따라서 R(red, λ_R)의 intensity가 일치하는 경로차가 다수 발생한다. 이와 같이 다수의 intensity가 일치하는 부분중에 실제의 경로차를 찾기 위하여 식 (14), 식 (15)를 이용한다.

각각 분리된 G(green, λ_G), B(blue, λ_B)의 신호 강도의 비가 가장 유사한 지점을 찾아 실제 경로차의 오더를 결정하게 된다. 이와같은 방법을 각각 pixel에 적용하여 전체 이미지를 처리하여 촬영한 광학용 렌즈의 경로차를 결정한다.

3. 해석결과

Fig. 7은 레이저 프린터에 사용되는 F-theta 렌즈의 복굴절을 촬영한 이미지이다. 이미지를 각

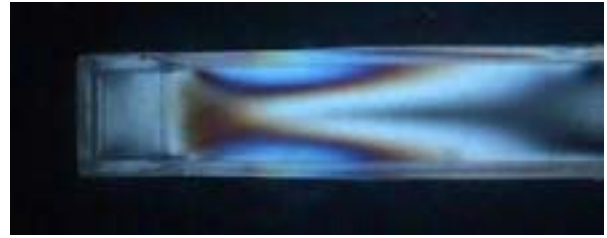


Fig. 7 A birefringence photo of F-theta lens

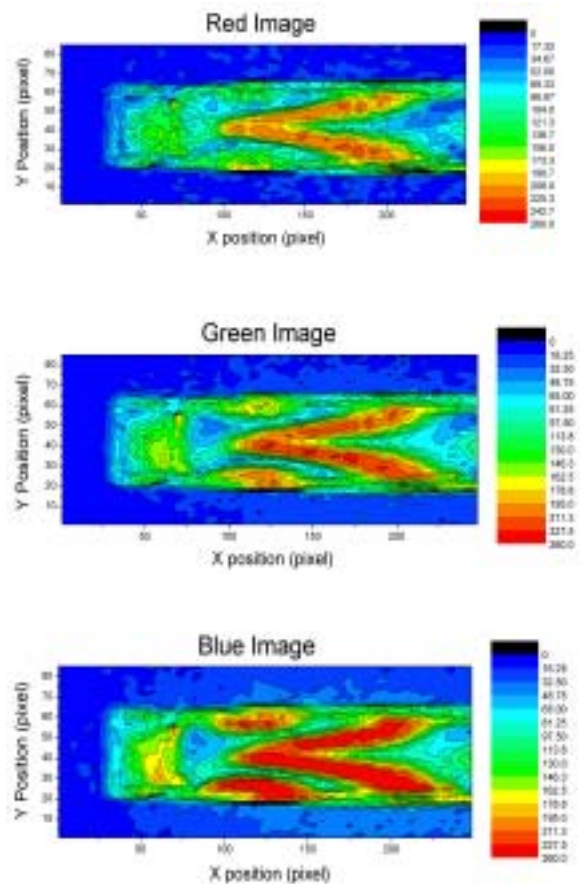


Fig. 8 RGB intensity image

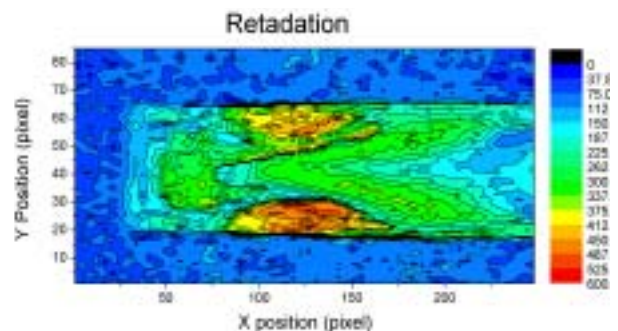


Fig. 9 The distribution of calculated retardation length

각의 R(red, λ_R), G(green, λ_G), B(blue, λ_B)의 삼색광의 성분으로 분해하면 Fig. 8과 같이 나타나며 각각의 이미지를 식 (13), (14), (15)를 이용하여 Fig. 9와 같이 F-theta 렌즈의 경로차를 정량화할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 높은 오더의 복굴절을 가지는 플라스틱 제품의 복굴절을 정량적으로 평가하기 위하여 색수차를 이용하는 방법을 제시하였다. Fig. 9에서 보는 것과 같이 짧은 시간에 300 nm 이상의 하이 오더의 경로차를 결정할 수 있는 결과를 얻어냈다. 하지만 아직 광원의 백색성이 떨어지기 때문에 좀더 정확한 결과를 얻기 위하여 다이오드 레이저를 이용한 장치를 구성중에 있다.

후 기

이 연구는 2003학년도 2010 생산기반 혁신기술 개발사업 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- (1) Lee, Y. B., Kwon, T. H. and Yoon, K. H., 2002, "Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression molded Center-Gated Disk. Part I and Part II", Polym. Eng. Sci., Vol. 42, No. 11, pp. 2246 ~ 2272 & 2273 ~ 2292.
- (2) Kim, J. S. and Yoon, K. H., 2003, "A Study on the Prediction of Thermally-Induced Residual Stress and Birefringence in Quenched Polystyrene Plate Including Free Volume Theory", KSME (A), Vol. 27, No. 1, pp.77 ~ 87.
- (3) Hecht, E. 1987. Optics. Berlin, Massachusetts, Addison-Wesley
- (4) Janeschitz-Kriegl, 1983, Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence., Springer-Verlag, Berlin
- (5) Zhu, Y. C., Takehiro, Tatsuo K, Tatsuo T and Yoshihiro M, 1999, "Two-dimensional measurement technique for birefringence vector distributions: measurement principle", Applied Optic, Vol. 38, No. 11, pp. 2225 ~ 2231
- (6) E. A. Patterson, W. Ji and Z.F. Wang, 1997, "On Image Analysis for Birefringence Measurement in Photoelasticity", Optics and Lasers in Engineering, Vol 28, pp. 17 ~ 36
- (7) Otani H., 1998, "2-D Birefringence measurement using Phase Shift", J. J. of Optics., Vol. 27, No. 12, pp. 698 ~ 703.