

잔류응력 부과에 의한 광디스크의 임계속도 증가

김남웅¹, 나상식^{2*}

¹동양미래대학교 기계공학부, ²삼성전자

Critical-speed Increase of Optical Disk by Applying Residual Stresses

Nam Woong Kim¹ and Sang Sik Na^{2*}

¹School of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University

²Samsung Electronics Co., Ltd.

요 약 현재 광디스크 드라이브는 오랜 기간 지속된 산업계의 데이터 전송률 경쟁을 통하여 10,000 rpm 이상의 고속으로 구동되고 있다. 고속 구동은 필연적으로 시스템의 진동을 유발하여 픽업의 데이터 읽기/쓰기 서보 제어에 외란을 야기하는데, 통상 진동외란은 방진고무를 통한 진동의 절연 및 서보 제어의 강인성 개선을 통해 해결되고 있다. 본 연구에서는 산업계에서 일상으로 이루어지는 광디스크 드라이브 시스템의 동특성 개선에서 한걸음 더 나아가 광디스크의 동특성을 개선하는데 주목하였다. 이를 위하여 사출성형 공정해석을 수행하여 공정 조건(유량, 사출온도)이 잔류응력에 미치는 영향을 조사하였고, 이 잔류응력의 변화가 광디스크의 진동 모드 및 임계속도 즉, 동특성에 미치는 영향을 모달해석을 통해 살펴보았다. 이러한 일련의 과정을 통해 사출성형 시 발생하는 광디스크의 잔류응력을 제어하여 광디스크의 임계속도를 잔류응력이 없는 경우 대비 약 14.4% 높일 수 있음을 확인하였다.

Abstract Through the data transfer race in industry since 1990s, the operational speed of optical disk drive(ODD) becomes commonly over 10,000 rpm. Such high speed operation inevitably causes the vibration, which is also the disturbances in the read-write process of pick-up servo-controller. Generally the vibration disturbance problem can be solved by the vibration isolation using the rubber mount and the increase of robustness of the pick-up servo-controller. Optical disk itself has not been targeted for the vibration reduction, because it is manufactured under the standardized format. In this paper we focused on the increase of critical speed of optical disk, that is, the improvement of dynamic characteristics, with the control of residual stresses which are come from the injection molding process. To do this, first, the residual stresses induced from the injection molding process are calculated using finite element method. The major design parameters of the process conditions are flow rate and melt temperature, which control the residual stresses in optical disk. Second, the critical speed of optical disk is calculated with modal analysis considering residual stress distributions. It was found out that the critical speed can be improved by the control of operational parameters in the injection molding process.

Key Words : Optical disk, Optical disk drive, Residual stress, Critical speed, Injection molding

1. 서론

지난 1990년대 이래 광기록/재생 기기 업계에는 끊임 없는 배속 경쟁 즉, 전송률 경쟁이 지속되어 왔다. 현재는

배속 경쟁이 거의 수렴치에 달하여, CD계열 전송속도는 52배속, DVD계열은 16~22배속, BD계열은 10~12배속이 일반화되어 있다. 이들 광디스크 드라이브는 통상 200 rpm 에서 10,000 rpm 이상의 넓은 속도 범위에서 다배속

이 논문은 동양미래대학교의 2011년 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Sang Sik Na(Samsung Electronics Co., Ltd.)

Tel: +82-31-301-6912 email: s98sense@naver.com

Received February 27, 2013

Revised (1st April 1, 2013, 2nd April 12, 2013)

Accepted May 9, 2013

구동을 지원해야 하고, CD/DVD/BD의 다매체를 대응해야 하기 때문에, 광범위한 주파수 범위 내에서 동적 안정성을 확보해야 한다. 또한 시장에서 지속적으로 요구되고 있는 고속 데이터 역세스를 위해서도 드라이브의 동적 안정성을 높이는 노력 즉, 기계적인 진동저감이 반드시 필요하다.

그 동안 광디스크 연구자들은 진동저감을 위해 주로 드라이브 방진에 관한 대책을 연구하여 왔다. 광디스크 자체는 이미 규격화 되어 있어 재질이나 치수를 바꾸는데 제약이 있었다. 따라서 대부분의 진동 저감 연구는 주로 광디스크 드라이브 내의 슬레드 베이스(Sled Base)와 광픽업(Optical Pick-up)의 방진에 집중되었다[1,2]. 그러나 광디스크 드라이브 시스템의 동적 안정성을 보다 높이기 위해서는 광디스크의 강성을 증가시켜 진동 특성을 개선하는 연구가 함께 수행될 필요가 있다.

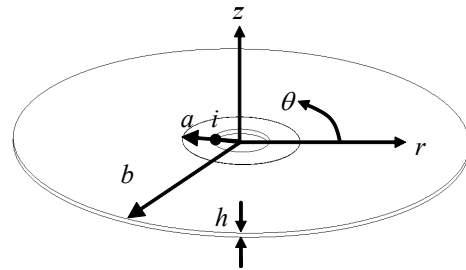
Park과 Kim[3]은 광디스크를 사출성형할 때, 의도적으로 잔류응력을 부과하는 공정을 제안하여 시편을 제작하고, 실험을 통해 디스크의 임계속도 증가를 확인하였다. 이 연구에서는 금형에 특정한 온도 구배를 강제하는 부가적인 냉각장치를 부착해야 하는 실용상의 난점이 있었다. Lee와 Kim[4]은 잔류응력에 의한 디스크의 고유 진동수 변화를 해석적으로 접근하여 계산하였다. 이 연구는 잔류응력이 디스크 전체에 걸쳐 균일하거나 혹은 선형적인 분포를 갖는 이상적인 경우만을 고려하였다. 그러나 광디스크는 박판 형태의 사출성형물로서 반경 및 원주 방향은 물론 두께 방향에서도 복잡한 잔류응력 분포를 갖기 때문에 동특성 개선을 정량적으로 계산하기 위해서는 실제적인 잔류응력 분포를 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 사출성형시 발생하는 광디스크의 잔류응력을 제어하여 광디스크의 임계속도를 높임으로써 동특성을 개선하는 연구를 수행하였다. 이를 위하여 먼저, 수치해석 기반의 사출성형 공정 해석을 통하여 디스크에 발생하는 잔류응력의 크기와 분포를 계산하였다. 공정 조건에서의 주요 디자인 변수는 유량과 사출온도로서 이들을 변화시킴으로써 잔류응력을 제어하였다. 다음으로 모달해석을 통해, 계산된 잔류응력과 사용시의 회전을 고려한 광디스크의 고유 진동수를 계산하고, 임계 속도(Critical Speed)를 구하여, 특정 공정조건에서 광디스크의 임계속도를 높일 수 있는 가능성을 제시하였다. 모달 해석시, 디스크의 반경 방향은 물론 두께 방향에서의 잔류응력 분포 모두를 고려하였다. 최종적으로 광디스크의 임계속도 증가에 대한 각 방향 잔류응력의 영향을 평가하여, 임계속도 증가를 위한 잔류응력 제어의 방향을 제시하였다.

2. 회전 디스크의 동적 거동

2.1 운동 방정식

회전하는 디스크의 진동은 Lamb와 Southwell 이래로 다양한 연구가 있어 왔고, 근간에는 하드 디스크 및 광디스크 분야 등 다양한 분야에서 중요시되고 있다[5-9]. Fig. 1은 내주가 고정된 채로 회전하는 광디스크 모델을 나타낸다. 여기서 내주반경 i 는 7.5 mm, 클램퍼(Clamper)에 의해 고정되는 반경 a 는 15.5 mm, 외주반경 b 는 60.0 mm, 그리고 두께 h 는 1.2 mm 이다. Table 1은 본 논문에서 고려한 PC (Polycarbonate) 재질 광디스크의 기계적 물성치를 나타낸다.



[Fig. 1] Schematic of optical disk

[Table 1] Material property of polycarbonate

| | Polycarbonate |
|------------------------------|---------------|
| Density (kg/m ³) | 1190 |
| Young's Modulus (GPa) | 2.319 |
| Poisson's Ratio | 0.3 |

디스크를 등방성 탄성체로 가정하고, Kirchoff의 판이론과 Von Kalman 변형을 이론을 적용하면, 원통좌표계에 대해 다음과 같은 운동방정식을 유도할 수 있다[7].

$$\rho h \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2\Omega \frac{\partial^2 w}{r \partial t \partial \theta} + \Omega^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) + \nabla^2 (D \nabla^2 w) - \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_r \frac{\partial w}{\partial r}) - \frac{\partial}{r \partial \theta} (\sigma_\theta \frac{\partial w}{r \partial \theta}) = F_z(r, \theta, t)$$

여기서 ρ 는 밀도, w 는 두께방향 변위, Ω 는 디스크의 회전속도, F_z 는 두께방향 힘, D 는 굽힘강성, σ_r 과 σ_θ 는 각각 반경 방향과 원주 방향의 응력, a , b , i 는 각각 클램핑 반경, 외경 및 내경을 나타낸다. 클램핑 반경 a 에서 광디스크는 클램퍼에 의해 구속되어 있고, 외경 b 에서는 자유로운 회전을 하고 있어 전단력과 굽힘모멘트가 없으므로 경계조건은 각각 다음과 같다.

$$w = \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r = a \quad (2)$$

$$V = \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 w + \frac{1-\nu}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right) = 0 \quad (3)$$

at $r = b$

$$M = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \left(\frac{\partial w}{r \partial r} + \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} \right) = 0 \quad \text{at } r = b \quad (4)$$

여기서 V 와 M 은 각각 전단력과 모멘트, ν 는 포아송 비를 나타낸다. 식 (1)의 운동방정식에서 σ_r , σ_θ 는 반경 방향과 원주방향으로 작용하는 외부응력을 의미하며, 이는 또한 회전에 의해 발생하는 응력 성분 σ_r^{rot} , σ_θ^{rot} 과 디스크 제조시 발생한 초기잔류응력 성분 σ_r^{res} , σ_θ^{res} 으로 나누어 고려할 수 있다[4].

$$\sigma = \sigma_r^{rot} + \sigma_\theta^{rot} + \sigma_r^{res} + \sigma_\theta^{res} \quad (5)$$

$$\sigma_r^{rot} = \frac{\rho \Omega^2 b^2}{8} \left\{ A_1 + \frac{A_2}{(r/b)^2} - (3+\nu) \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta^{rot} = \frac{\rho \Omega^2 b^2}{8} \left\{ A_1 - \frac{A_2}{(r/b)^2} - (1+3\nu) \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$$A_1 = (1+\nu) \frac{(3+\nu) + (1-\nu)(a/b)^4}{(1+\nu) + (1-\nu)(a/b)^2} \quad (8)$$

$$A_2 = (1-\nu) \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{(3+\nu) - (1-\nu)(a/b)^2}{(1+\nu) + (1-\nu)(a/b)^2} \quad (9)$$

2.2 회전 디스크의 고유진동수와 임계속도

고유진동수를 구하기 위해 Rayleigh-Ritz 근사방법을 적용한다. 수직방향 변위는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$w_n(r, \theta, t) = \phi_n(r) \cos n\theta \cos \omega_n t \quad (10)$$

운동방정식 (1)에 변분을 취하여 (10)을 대입하면, 다음과 같은 변분식을 얻을 수 있다.

$$\delta \left[\int_0^{2\pi} \int_a^b \left(\rho \left(\frac{\partial w_n}{\partial t} \right)^2 + 2\rho \Omega \frac{\partial w_n}{\partial t} \frac{\partial w_n}{\partial \theta} + \rho \left(\Omega \frac{\partial w_n}{\partial \theta} \right)^2 - \sigma_r \left(\frac{\partial w_n}{\partial r} \right)^2 - \sigma_\theta \left(\frac{\partial w_n}{r \partial \theta} \right)^2 - \frac{D}{2h} \left((\nabla^2 w_n)^2 - 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w_n}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w_n}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w_n}{\partial \theta^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w_n}{\partial \theta} \right) \right)^2 \right) \right) h r dr d\theta \right] = 0 \quad (11)$$

한편 식 (10)을 기하학적 경계조건을 만족시키는 기구학적 가용함수(Kinematically Admissible Function)로 가정하면 다음과 같다.

$$\phi_n(r) = (r-a)^2 (1 + c_1 r + c_2 r^2) \quad (12)$$

여기서 c_1 , c_2 는 자연 경계조건 (3), (4)에 의해 결정된다. 상기 식들을 정리하면, 디스크 상의 회전하는 상대좌표계에서 정의된 고유진동수를 얻을 수 있다.

$$\omega_n^2 = \omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n) \quad (13)$$

여기서 ω_n 은 회전 디스크의 고유진동수, ω_{sn} 은 정지 디스크의 고유진동수, α_n 과 β_n 은 회전에 의해 생기는 응력항을 나타낸다[4]. 식 (13)에 따르면 회전하는 디스크의 고유진동수는 정지 상태 디스크의 고유진동수에 회전에 따른 고유진동수 상승효과가 반영되어 있음을 의미한다. 이 고유진동수 상승분은 디스크의 회전에 의한 편평효과(Flattening) 즉, 회전에 의해 발생하는 응력에 의해 강성이 상승하는 작용에 기인한다. 한편 일반적으로 원형 디스크의 진동 모드형상(Mode Shape)은 (m,n) 형태로 구분한다. 여기서 m과 n은 각각 절원(Nodal Circle)과 절지름(Nodal Diameter)의 개수를 나타낸다. 식 (13)의 n은 절지름 개수를 나타낸다.

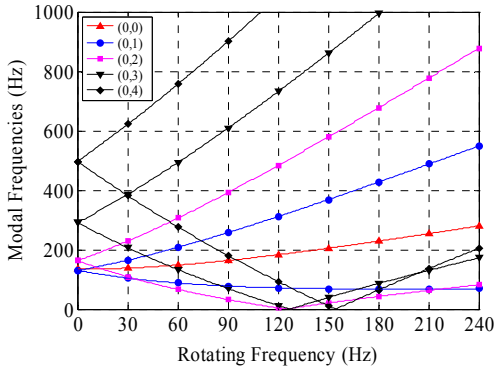
마지막으로 회전 디스크의 고유진동수를 정지된 고정좌표계에 대해서 나타내면, 디스크의 회전에 의해, 회전 방향으로 생성되는 순방향 진행파 (Forward Traveling Wave)와 회전 반대방향으로 생성되는 역방향 진행파 (Backward Traveling Wave)의 영향을 받아 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_n^f = \left| \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n^2 + n^2 \beta_n^2)} + n\Omega \right| \quad (14)$$

$$\omega_n^b = \left| \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n^2 + n^2 \beta_n^2)} - n\Omega \right| \quad (15)$$

Fig. 2는 식 (14)-(15)를 통해 계산된 광디스크의 (0,1)~(0,4) 진동 모드의 캠벨 선도(Campbell Diagram)를 나타낸다. 각 진동모드의 고유진동수는 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 서로 분기하여 순방향 고유진동수는 점점 커지고, 역방향 고유진동수는 점점 작아지게 된다. 특히 역방향 고유진동수는 그 크기가 작아지다가 특정 회전 속도에서 0의 값을 갖게 된다. 이 회전속도를 해당 모드의 임계속도(Critical Speed)라 한다. 이 값은 각각

의 진동모드마다 서로 다른 값을 갖는데 그중 가장 낮은 회전속도를 일반적으로 해당 디스크를 대표하는 임계속도(Critical Speed)라 한다. Fig. 2의 광디스크의 경우에는 (0,2) 모드에서 임계속도가 나타난다. 디스크의 회전속도가 임계속도에 달할 경우, 디스크는 정하중이 작용하는 경우에도 불안정하게 되어 가제어성(Controllability)을 잃게 된다.



[Fig. 2] Modal Frequencies of a Rotating Optical Disk

한편 임계속도 이상으로 회전속도가 높아지면 공기와 디스크의 공탄성 효과에 의해 디스크가 불안정해지는 플러터(Flutter) 현상이 나타난다[10-11]. 이 경우, 디스크가 대단히 큰 진폭으로 진동하게 되고, 기록 및 재생에 치명적인 오류를 야기한다. 따라서 광디스크 드라이브의 안정적인 동작을 위해서는 가능한 임계속도를 높이는 것이 유리하다.

3. 수치 해석 및 결과

본 연구에서는 사출성형 공정시 광디스크에 발생하는 잔류응력의 변화에 따른 광디스크의 동특성 변화를 살펴보기 위하여 두 단계를 취하였다. 첫째 광디스크에 균일한 값의 초기 잔류응력이 있는 이상적인 경우에 대하여 광디스크의 임계속도를 계산하였다. 이는 Park과 Kim[3]의 방법론과 유사한 것으로, 동특성 개선의 가능성을 살펴보는 의미가 있다. 둘째 사출성형 공정 수치해석을 통해 광디스크에 잔존하는 잔류응력을 계산한 후, 이를 반영한 광디스크의 임계속도를 계산하여 광디스크에서 실제 발생할 수 있는 동특성의 변화를 정량적으로 살펴보았다.

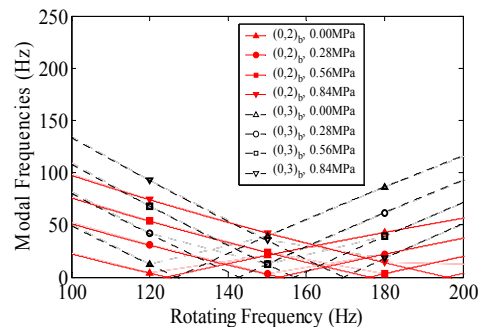
수치해석의 흐름을 설명하면 다음과 같다. 먼저 점탄

성 효과를 고려한 Leonov 모델의 구성방정식을 적용한 자체 개발된 사출성형 공정해석 전용 코드를 사용하여 디스크에 잔존하는 잔류응력을 계산하였다. 다음으로 광디스크의 동특성변화를 계산하기 위해서는 범용 유한 요소 해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 초기 잔류응력이 부과된 회전 광디스크의 모달해석을 수행하였다. 최종적으로는 식 (13)을 이용해 고정좌표계에서의 순방향과 역방향의 고유동수를 계산하였다.

3.1 균일한 초기 잔류응력을 고려한 광디스크의 동특성

이상적인 조건으로서, 디스크에 반경방향으로 0.28 ~ 0.84 MPa의 균일한 초기 잔류응력 σ_r^{res} 을 부과하여, 고유 진동수와 임계속도에 대한 초기 잔류응력의 영향을 확인하였다. 따라서 이 경우 사출성형 공정해석은 포함되지 않았다. 디스크의 회전속도는 0 ~ 240 Hz 범위 내에서 고려되었다. 모달해석에는 평면응력 셀 요소가 사용되었다.

이에 대한 결과로서, 역방향의 (0,2) 및 (0,3) 즉, (0,2)_b 및 (0,3)_b 모드를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 첨자 b는 역방향을 의미한다. Table 2는 잔류응력 크기의 변화에 따른 (0,2)_b, (0,3)_b 모드의 주파수가 0이 되는 회전속도 즉, 임계속도를 나타낸다. 잔류응력이 없는 경우에는 Fig. 3에서 보듯이 (0,2)_b 모드의 임계속도가 (0,3)_b 모드의 임계속도에 비해 더 낮지만, 잔류응력이 존재하는 모든 경우에 대해서는 (0,3)_b 모드의 임계속도가 (0,2)_b 모드의 임계속도에 비해 낮아 임계모드가 (0,2)_b에서 (0,3)_b으로 바뀌게 됨을 확인하였다. 이 현상은 3.2절에서 기술될 실제 사출성형 공정시 발생하는 잔류응력을 고려하는 경우에도 일관되게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 잔류응력의 변화에 따른 광디스크 동특성 변화를 확인하는 지표로서 (0,3)_b 모드의 임계속도를 고려하였다.



[Fig. 3] (0,2)_b and (0,3)_b Mode with Constant Radial Stress

[Table 2] Critical Speed of a Disk with Constant Radial Residual Stress

| Radial Residual Stress [MPa] | Critical Speed [Hz] | |
|------------------------------|---------------------|-----------|
| | $(0,2)_b$ | $(0,3)_b$ |
| 0.00 | 125 | 127 |
| 0.28 | 153 | 143 |
| 0.56 | 176 | 157 |
| 0.84 | 196 | 170 |

한편 잔류응력이 증가할수록 임계속도는 점점 증가하여 0.84 MPa에서 최대 34 % 이상 증가하였다. 그러나 이 동특성 개선 결과는 이상적인 잔류응력 분포를 상정한 경우에 한정되므로, 사출성형 공정해석을 통하여 실제 디스크에서 발생할 수 있는 초기 잔류응력 분포를 확인할 필요가 있다.

3.2 사출성형 공정해석

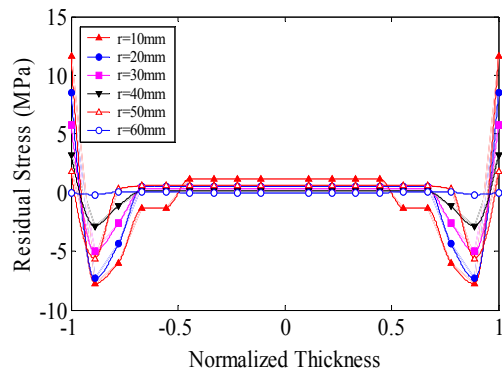
사출성형 공정은 충전(Filling), 보압(Packing), 냉각(Cooling)의 과정으로 이루어진다. 최종 사출성형품에 잔존하는 잔류응력은 크게 두 종류로 대별되는데, 그 첫째는 충전과정에서 발생하는 수지의 분자배열에 의해 나타나는 유동유발 잔류응력이며, 둘째는 불균일한 냉각과정에서 수지의 점탄성 특성에 의해 발생하는 열유발 잔류응력이다. 본 연구에서는 자체 개발된 사출성형해석 전용 코드를 사용하여, 중심 단일 게이트(Center-gated) 디스크에 존재하는 잔류응력 분포를 계산하였다. Table 3은 사출성형 공정 조건으로서, GE Plastics의 광디스크용 수지인 Lexan OQ1020의 공정조건 범위 내에서 결정되었다. 잔류응력을 제어하기 위한 주요 변수는 유량(Flow Rate)과 사출온도(Melt Temperature)로서 사출성형 공정에서 일반적으로 용이하게 제어할 수 있는 공정 조건이다. 잔류응력은 두께 방향과 반경 방향 분포만을 고려한다. 광디스크는 기본적으로 축대칭의 박판 구조이므로 원주방향의 응력 분포는 무시하였다.

[Table 3] Operating Conditions for Injection Molding Process

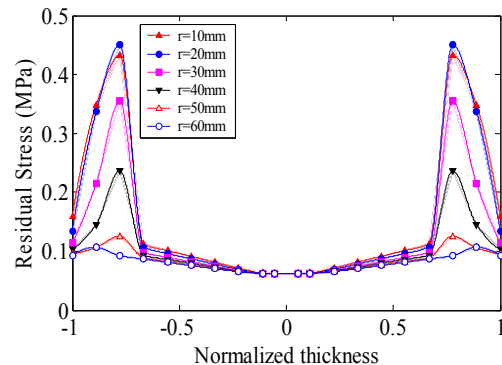
| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| Mold temperature (°C) | 70.0 | 70.0 | 70.0 |
| Melt temperature (°C) | 290.0 | 270.0 | 250.0 |
| Flow rate (cm ³ /s) | 16.0 | 23.8 | 47.6 |

3.2.1 두께 방향의 잔류응력 분포

일반적으로 광디스크와 같은 박판 구조물은 평면응력 상태로 가정한다. 한편 정상적인 사출 성형을 거친 광디스크에서는 두께방향의 응력 분포 $\sigma_r^{res}(z)$ 가 나타난다. 따라서 두께 방향 잔류응력 분포에 따른 디스크의 동특성 변화를 확인할 필요가 있다. Table 3의 Case 1의 공정 조건에 따라 계산된 열유발 및 유동유발 잔류응력 분포를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다. 여기서 x축의 정규두께(Normalized Thickness)는 광디스크의 실두께 1.2 mm를 정규화한 것이며, r은 광디스크의 중심에서 외주방향으로의 반경방향 거리를 나타낸다. 열유발 잔류응력 분포의 경우에 두께방향으로 평균값이 0에 가까우나, 유동유발 잔류응력의 경우에는 유체의 유동에 따라 치우친 평균값을 갖게 된다. 이 결과는 광디스크의 사출성형 시에 나타나는 전형적인 잔류응력 분포에 해당한다.



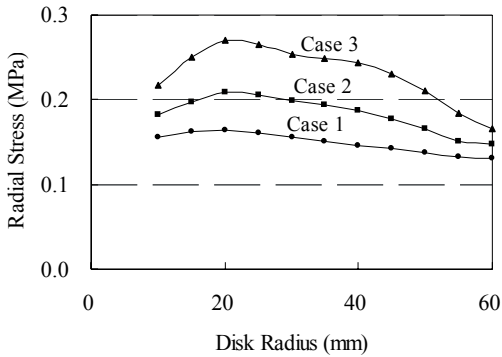
[Fig. 4] Thermally Induced Radial Residual Stress Distribution along z-direction



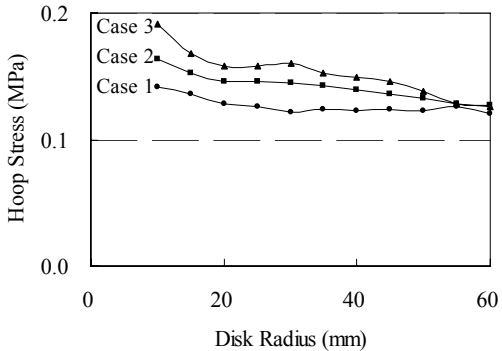
[Fig. 5] Flow Induced Radial Residual Stress Distribution along z-direction

3.2.2 반경 방향의 잔류응력 분포

광디스크는 통상 중심 단일 게이트를 사용하여 사출성형되므로 중심으로부터 충전이 시작된다. 따라서 내주 부근에서는 용융수지의 속도가 빨라 잔류응력이 크게, 외주 부근에서는 속도가 느려 잔류응력이 보다 작게 발생하는 양상을 보인다. 여기서 유량(충전속도)과 사출온도를 조절하면, 잔류응력의 크기를 조절할 수 있다. Table 3의 Case 1 ~ 3의 공정조건을 기준으로 사출성형 공정 해석을 통해 광디스크의 내주에서 외주에 걸쳐 분포하는 반경 방향 응력 $\sigma_r^{res}(r)$ 과 원주 방향 응력 $\sigma_\theta^{res}(r)$ 을 계산해 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다. 유량 및 온도 등에 대한 잔류응력의 민감도는 $\sigma_r^{res}(r)$ 이 $\sigma_\theta^{res}(r)$ 에 비해 큰 것으로 나타났다.



[Fig. 6] Radial Residual Stress Distribution along r-direction



[Fig. 7] Hoop Residual Stress Distribution along r-direction

3.3 실제 공정조건에서 발생하는 초기 잔류응력을 고려한 광디스크의 동특성

3.3.1 두께방향에서의 잔류응력 분포의 영향

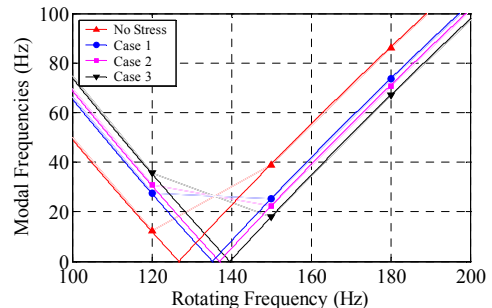
사출성형 해석에서 계산된 두께 방향에서의 잔류응력 분포를 고려하기 위해, ANSYS에서 제공하는 선형 적층

헬요소(Linear Layered Shell Element)를 사용하여 모달 해석을 수행하였다. 이 요소는 일반적으로 복합재료 박판의 구조해석에 사용하는 것으로서, 각 층(Layer)의 잔류응력을 독립적으로 고려할 수 있다. 해석 결과, 두께 방향의 잔류응력 분포는 광디스크의 동특성에 거의 영향을 주지 않았고, 단지 두께방향의 평균값만이 영향을 주는 것으로 나타났다. 이에 따라 두께방향으로 평균값이 0에 가까운 열유발 잔류응력은 광디스크의 임계속도에 큰 영향을 주지 않고, 유동유발 잔류응력이 지배적인 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

3.3.2 반경방향에서의 잔류응력 분포의 영향

본 절에서는 반경 방향에서의 잔류응력 분포 중, 먼저 $\sigma_r^{res}(r)$ 과 $\sigma_\theta^{res}(r)$ 각각이 독립적으로 존재하는 경우에 대해 모달해석을 수행하였다. 물론 정상적인 사출성형 공정을 거친 광디스크에서 $\sigma_r^{res}(r)$ 과 $\sigma_\theta^{res}(r)$ 이 독립적으로 존재할 수는 없으나, 동특성 변화에 대한 각각의 영향 민감도를 살펴보기 위하여 독립적으로 다루었다. 마지막으로 $\sigma_r^{res}(r)$ 과 $\sigma_\theta^{res}(r)$ 이 동시에 함께 존재하는 경우에 대해 모달해석을 수행하였다.

반경방향의 잔류응력 분포 $\sigma_r^{res}(r)$ 과 회전을 고려한 해석 결과를 Fig. 8에 나타냈고, 이에 따른 임계속도를 Table 4에 정리하였다. Table 3에서 제시된 세 가지 Case의 공정 조건에 대해서 $\sigma_r^{res}(r)$ 의 영향으로 인한 광디스크의 임계속도 증가를 살펴본 결과, Case 3가 잔류응력이 없는 경우 대비 12.0 % 증가, Case 1 대비 3.7 %의 증가를 보여, 임계속도가 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.

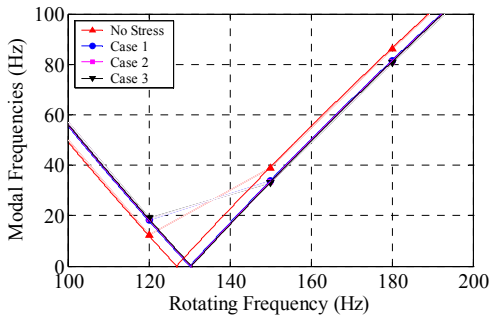


[Fig. 8] $(0,3)_b$ Mode with Radial Residual Stress

[Table 4] Critical Speed of an Optical Disk with Radial Residual Stress

| Radial Residual Stress | Critical Speed | |
|------------------------|----------------|----------------------|
| | Frequency [Hz] | Rate of Increase [%] |
| No Stress | 125 | - |
| Case 1 | 135 | 8.0 |
| Case 2 | 137 | 9.6 |
| Case 3 | 140 | 12.0 |

한편 원주 방향의 잔류응력 분포 $\sigma_{\theta}^{res}(r)$ 과 회전을 고려한 해석 결과는 Fig. 9와 같고, 이에 따른 임계속도는 Table 5에 보였다. 전반적으로 임계속도 증가는 Case 3의 경우가 가장 높았는데 잔류응력이 없는 경우 대비 최대 5%, Case 1 대비해서는 1% 미만의 증가를 보여, 공정조건에 따른 임계속도의 변화가 미미하였다. 따라서 일반적인 사출성형 공정 조건에서 제작된 광디스크의 경우, $\sigma_r^{res}(r)$ 이 동특성 변화에 대해 지배적인 성분임을 확인할 수 있었다.



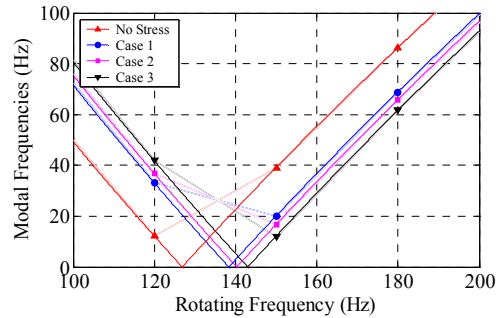
[Fig. 9] $(0,3)_b$ Mode with Hoop Residual Stress

[Table 5] Critical Speed of an Optical Disk with Hoop Residual Stress

| Hoop Residual Stress | Critical Speed | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| | Frequency [Hz] | Rate of Increase [%] |
| No Stress | 125 | - |
| Case 1 | 130 | 4.0 |
| Case 2 | 130 | 4.0 |
| Case 3 | 131 | 5.0 |

마지막으로 $\sigma_r^{res}(r)$ 과 $\sigma_{\theta}^{res}(r)$ 및 회전을 모두 고려한 결과를 Fig. 10에 나타내고, 이에 따른 임계속도 증가

를 Table 6에 정리하였다. 여기서도 각 방향의 잔류응력을 독립적으로 고려했을 때와 마찬가지로 사출온도가 낮고, 충전속도가 빠른 Case 3가 잔류응력이 없는 경우 대비 14.4%, Case 1 대비 3.6%의 최대 임계속도 증가를 보였다. 이는 반경 방향 잔류응력 분포만을 고려했을 때와 큰 차이가 없는 결과다. 따라서 광디스크의 임계속도를 높이기 위해서는 원주 방향보다는 반경 방향의 잔류응력을 조절하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.



[Fig. 10] $(0,3)_b$ Mode with Radial and Hoop Residual Stresses

[Table 6] Critical Speed of an Optical Disk with Radial and Hoop Residual Stresses

| Hoop Residual Stress | Critical Speed | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| | Frequency [Hz] | Rate of Increase [%] |
| No Stress | 125 | - |
| Case 1 | 138 | 10.4 |
| Case 2 | 140 | 12.0 |
| Case 3 | 143 | 14.4 |

4. 결론

본 연구에서는 사출성형 공정에서 발생하는 잔류응력을 제어하여 광디스크의 임계속도를 증가시키는 연구를 수행하였다. 이에 따라 공정 조건 중 유량과 사출온도를 설계 변수로 선택하여 세 가지의 전형적인 공정조건 조합을 설정하고 사출성형 공정 해석을 수행하여 잔류응력을 계산하였다. 최종적으로 계산된 잔류응력을 초기 응력 조건으로 반영한 회전 광디스크의 모달해석을 수행하여 광디스크의 임계속도를 계산하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 사출성형 공정에서 발생하는 잔류응력을 적절히

제어함에 따라 광디스크의 임계속도를 잔류응력이 없는 경우 대비 약 14.4% 정도 높일 수 있었다. 이 결과는 이미 규격화되어 있는 광디스크에서도 사출성형 공정조건을 변경하는 것만으로 동특성을 향상시킬 수 있고, 따라서 광디스크 드라이브의 동작 안정성을 보다 높일 수 있음을 의미한다.

(2) 광디스크의 반경 방향에 분포하는 잔류응력 중, 반경 방향 잔류응력 $\sigma_r^{res}(r)$ 이 원주 방향 잔류응력 $\sigma_\theta^{res}(r)$ 에 비해 광디스크의 임계속도를 증가시키는데 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 임계속도를 증가시키기 위해서는 반경방향 잔류응력을 높이는 쪽으로 사출성형 공정조건을 제어하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

References

- [1] N. W. Kim, K. W. Kim, H.-C. Sin, "A Design of a Dynamic Vibration Absorber for a DVD±RW Drive", IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 53, No. 3. pp. 956-961, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCE.2007.4341572>
- [2] J. Chung, D.-S. Ro, "Dynamic Analysis of an Automatic Dynamic Balancer", J. of Sound and Vibration Vol. 231, No.2, pp. 375-391, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1999.2718>
- [3] S. J. Park, S. K. Kim, C. Y. Lee, "Vibration Characteristics and Birefringence of Optical Disk Considering Initial Stress," Proceedings of SPIE, Vol. 3786, pp. 106-166, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.363787>
- [4] S.-Y. Lee, S. Kim, "Design and Vibration Analysis of a New Optical Disk with Initial Stress," J. of Information Storage and Processing Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 177-184, 2001.
- [5] H. Lamb, R. V. Southwell, "The Vibration of a Spinning Disk," Proceeding of the Royal Society, Vol. 99, pp.272-280, 1921.
- [6] C. D. Mote, Jr., "Free Vibration of Initially Stressed Circular Disks," ASME J. of Engineering for Industry. Vol. 89. pp.258-265, 1965.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3670808>
- [7] J. T. Chung, N. C. Kang, J. M. Lee, "A Study on Free Vibration of a Spinning Disk," KSME Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 138-145, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.10.2583>
- [9] W.-C. Park, J.-K. Lee, I.-G. Kim, Y.-S. Park, "Study on

Vibration Induced by Fluid at a Water Pressure Reducing Valve through Structure-Fluid Coupled Analysis," J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 10 pp. 4371-4377, 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.10.4371>

- [10] A. A. Renshaw, C. D'Angelo, C. D. Mote, "Aerodynamic Excited Vibration of a Rotating Disk", J. of Sound and Vibration, Vol. 177, No. 5, pp. 577-590, 1994.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1994.1454>

- [11] S.-Y. Lee, D.-W. Yoon, K. Park, "Aerodynamic Effect on Natural Frequency and Flutter Instability in Rotating Optical Disk", Microsystem Technologies, Vol. 9, pp. 369-374, 2003.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-002-0280-9>

김 남 응(Nam Woong Kim)

[정회원]



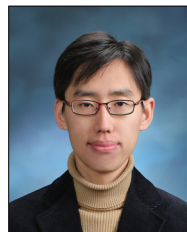
- 1995년 2월 ~ 2003년 8월 : LG 전자 디지털미디어연구소 선임연구원
- 2008년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 동양미래대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

전산역학, 나노생산공정, 진동학

나 상 식(Sang Sik Na)

[정회원]



- 2009년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
- 2009년 8월 ~ 현재 : 삼성전자 책임연구원

<관심분야>

전산역학, 사출성형