

피로현상에 의한 광디스크의 파손

황효균[†] · 김남웅* · 단병주** · 김종만** · 김외열** · 이진우**

Fatigue failure of the optical disc

Hwang Hyo-Kune, Namwoong Kim, Byung Ju Dan, Jongman Kim, Wae Yeul Kim, and Jin Woo Lee

Key Words : Craze, Creep, dynamic fatigue, optical disc, PC(Polycarbonate), static fatigue, 내주, 외주

Abstract

CD-R disc drive is one of the basic options of personal computer today. In this trend, various CD-R discs can be purchased in every market. Even very low quality discs are in market too. Today's CD-R disc drive is being operated over 10,000 RPM. So the possibility of the disc fracture is growing faster. Sometimes, during the test of a new disc drive by various methods to confirm the quality of it, fracture of the disc happens. And it happens in end user's personal computer scarcely. In this reason, new methods to confirm the quality and the failure mechanism of the optical disc are studied in this paper.

1. 서 론

컴퓨터가 일반화되고 고속/고용량의 데이터 저장 요구가 증가하면서, 현재는 CD-ROM drive 가 기본으로 장착되어 있고, CD-RW 도 기본으로 장착되어 있는 경우도 증가하고 있다. 이에 따라 CD-R 디스크의 소비자 수요를 충족하기 위하여, 시장에는 저가 저 품질의 CD-R 디스크 또한 등장하고, 디스크 드라이브는 배속이 점점 빨라져 10,000 RPM 이상의 고속에서 동작을 하고 있다. 이와 같은 이유로 저 품질의 광디스크와 고속의 광디스크 드라이브가 함께 사용될 가능성이 증가하고 있다. 즉 광디스크가 사용 중에 파손될 수 있는 가능성이 증가하고 있는 것이다. 실제 현장에서는 신제품 광디스크 드라이브 개발 시, 다양한 동작 조건 및 환경 조건에서 다양한 제조사의 광디스크를 가지고 시험을 한다. 이러한 실제 품질인증 실험 중 종종 광디스크가 파손이 되는 현상이 보고 되었다. 그리고, 극히 드문 경우이지만, 소비자들이 사용하

는 광디스크 드라이브 내에서 광디스크가 사용 중에 파손된 경우도 보고되고 있다. 이러한 이유로 차츰 광디스크의 물성을 새롭게 평가하고, 광디스크가 고속회전 중 파손되는 메커니즘을 이해하려는 요구가 대두되고 있다. 이러한 요구의 근원은, 광디스크라고 통칭되는 CD, DVD, 그리고 BD Disc 모두가 거의 동일한 형상을 지니고 있으며, 같은 PC 재질로 제작되고 있고, 결국에는 모두 고속회전으로 빠르게 데이터를 읽고 써야 하기 때문이다.

이러한 요구에 맞추어 본 연구에서는 CD-R 디스크의 파손 메커니즘 인 피로 파손 문제를 연구를 하였다. CD-R 디스크에 반복하중으로 균열이 생기는 문제와, 반복적으로 bending 을 주었을 때 균열이 진전하는 dynamic fatigue 성능 비교와, 마지막으로 실제 CD-R 디스크에 가/감속을 주었을 때 나타나는 현상에 대해 연구를 하였다. 이러한 연구의 순서는 피로 파괴의 전형적인 순서인, 균열 발생, 진전, 파괴 의 순서를 따른 것이다.

2. CD-R 디스크 고배속 파손 실험

2.1 CD-R 디스크 파손 관찰

52 배속 드라이브 내에서 파손된 CD-R 디스크은 Fig. 1 과 같이 거의 온전한 조각을 찾기 어려울 정도로 깨어져 있다. Fig. 1 의 조각들을 모아서 재 조립하면, Fig. 2 와 같다. 이 조각들에서 알 수

[†] LG 전자 우면동 R&D Campus DM(연)

E-mail : xexex@lge.com

TEL : (02)526-4731 FAX : (02)526-4674

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** LG 전자 우면동 R&D Campus DM(연)

있는 사실은 CD-R 디스크의 내주에서 제일 큰 균열이 먼저 외주로 진전한 후, 몇 조각으로 광디스크가 깨어지고, 이러한 조각들이 내부에서 서로 부딪쳐서 조각이 나는 현상임을 확인 할 수 있다.

2.2 주균열이 진전한 상태의 CD-R 디스크의 응력분포

주 균열이 CD-R 디스크의 내주에서 외주까지 성장했을 경우 CD-R 디스크에 인가되는 응력상태를 확인하였다. 응력계산은 MSC 사의 MARC 를 통하여 수행하였다. 그 결과는 Fig. 3 과 같으며, 10,500RPM 에서 최대 Von-mises 응력은 56Mpa 로 일반적인 PC 의 항복응력인 65Mpa 보다는 낮다. 그러나 실제 CD-R 디스크는 내주에 육안으로 확인하기 어려운 수없이 많은 미세 균열이 존재하므로, 제 2,3 의 균열 성장에는 충분한 응력이다. 실제로 CD-R 디스크 파손 실험도중 주 균열만이 외부에 도달하고, 더 이상 2 차적인 균열이 발생하지 않아, Fig. 3 의 형태를 그대로 유지하는 경우도 발견된다.

2.3 CD-R 디스크 균열 진전 파단면 관찰

CD-R 디스크의 파단면을 육안으로 관찰하면, 균열이 진전한 듯한 진전 무늬가 확인 된다. 공구 현미경을 이용하여, CD-R 디스크의 파단면의 무늬를 좀더 정확하게 관찰하였다. 파단면에는 Fig. 4 와 같은, 반복 피로파괴현상에서 나타나는 beach mark 와 유사한, 피로 균열 진전 자국이 존재한다. 이것은, 플라스틱의 피로현상 연구⁽¹⁾에서는 균열 진전 무늬를 growth ring 이라고 표현하기도 한다. 그리고, 광디스크가 일정시간 서서히 균열이 진전하여 파손에 이른다는 점에서도 피로파괴현상과 상통한다. CD-R 디스크에 존재하는 트랙으로 오인될 가능성도 있으나, 파단면이 트랙면과 수직 방향이므로, 공구현미경에서는 관찰되지 않는다.

2.4 최종 파단면 관찰

CD-R 디스크의 최종 파단면을 측정하여 CAD 로 도식하면 Fig. 5 와 같다. 여러 제조사에서 생산된 CD-R 디스크로 실험을 하여도, 크기만 다를 뿐 같은 형태의 최종 파단면이 존재한다.

Overload failure 면의 크기는 CD-R 디스크 재질의 인장강도와 연관이 있다. CAD 로 측정된 평균면적은 대략 1.582 mm² 이다. PC 의 인장강도를 65Mpa 로 가정하고, elastic perfectly plastic 재질로 가정하여, 인가되는 하중을 계산하면 102.83N 이다. CD-R 디스크가 10,500RPM 으로 회전할 때, 내주에서 외주까지 인가되는 응력을 적분하면 165.69N 으로 측정치보다 크다. 즉, 10,500RPM 으로 회전하는 광디스크 파손의 주 인자는 원심력임을 알 수 있다. 이것은 막연히 원심력을 파손의 주 인자로 설정하여 연구를 진행한 논문들^(2,3)과 달리 최종 파단면 관찰에 의한 결과이다.



Fig. 1 Disc crushing in 52X disc drive

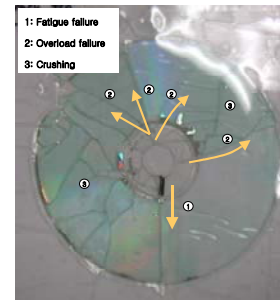


Fig. 2 Disc failure mode

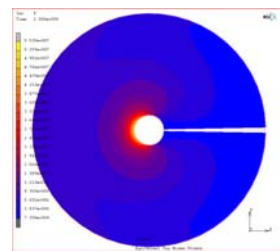


Fig. 3 Half crack growth stress distribution

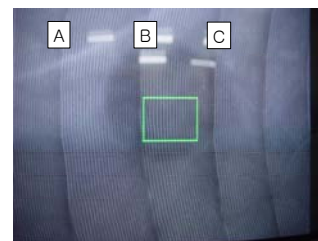


Fig. 4 Fracture surface of the CD-R 디스크



Fig. 5 Overload failure area

3. CD-R 디스크의 피로 균열 발생

3.1 피로파괴의 메커니즘

피로파괴현상은 일반적으로 Fig. 6 와 같이 3 가지 단계로 나누어 설명된다.⁽⁴⁾ 균열이 성장하지 않는 한계값(Threshold value)과 초기에 균열이 급격히 성장하는 1 단계(Stage I), 균열이 서서히 증가하는 2 단계(Stage II), 그리고 최종적으로 임계값(Critical value)에 도달하여, 급격한 균열 진전으로 파손되는 3 단계(Stage III)가 존재한다. 1,2 단계에는 균열의 반복하중에 의한 진전 무늬인 beach mark 가 관찰된다. 피로파괴의 메커니즘으로 CD-R 디스크의 파손을 순차적으로 연구하기 위하여, 1 단계부터 연구를 수행하였다.

3.2 PC의 초기 균열 발생 인자

광디스크에서 균열이 발생하는 원인은 크게 세 가지로 생각할 수 있다.

첫째는 생산 시에 생성되는 균열이다. Fig. 7 은 잔류응력이 심하게 인가되어 미세한 균열들이 생성된 경우이다.⁽⁵⁾ 이외에도 금형의 문제에 의해 광디스크에 미세한 균열이 존재하는 경우도 있을 수 있다.

둘째는 환경적인 영향에 의해서 생성되는 균열이다. Fig. 8 은 화학 반응에 의해서 균열이 생성된 경우이다.⁽⁵⁾ 이와 같은 화학 반응은 화학물질에 의해서 생성 될 수도 있으나, 플라스틱의 경우 습기 특히 수증기도 같은 효과를 낼 수 있다

셋째는 발로 밝거나, 사용 시 충격을 주거나, 휴대용 광디스크 드라이브에 지속적으로 장착하는 등의 물리적으로 발생하는 균열을 생각할 수 있다.

이 세가지 외에 많은 불량요의 예가 존재할 수 있어, 본 연구에서는 다 다루지 않는다. 다만, 본 연구에서는 세가지 경우 중, 광디스크 드라이브와 가장 밀접한 관련이 있는 휴대용 광디스크 드라이브에 CD-R 디스크를 반복적으로 장착할 때 생성되는 균열에 대한 연구를 수행 하였다.

3.3 CD-R 디스크 착탈 시 발생하는 균열

CD-R 디스크를 self chucking spindle motor 에 장착할 때, 광디스크에 인가되는 응력을 계산하였다. LG 에서 사용되는 spindle motor 의 형상은 Fig. 8 이다. Fig. 9 의 형상을 이용하여, Fig. 10 의 해석 모델을 구성하고, 광디스크가 장착될 때의 응력을 구하였다. 해석결과 Fig. 10 에 표기된 것과 같이, 국부적인 Von-mises 응력이 41Mpa 이다. 광디스크의 주 재질인 Polycarbonate 의 항복응력인 62Mpa 이하다. 하지만, 반복적으로 작용하는 응력임을 생각하면, 피로에 의한 균열 발생을 일으킬 수 있는, 상당히 큰 값을 알 수 있다. Self chucking spindle motor 의 돌기는 후부에 장착된 스프링에 의해서

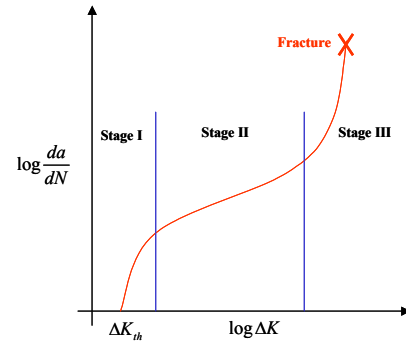


Fig. 6 Fatigue crack growth

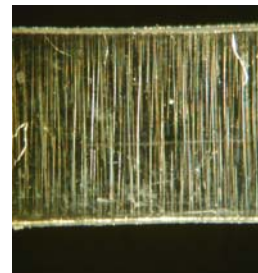


Fig. 7 Sterilization(craze) by residual stress



Fig. 8 Chemical chain scission cracking

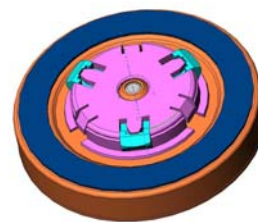


Fig. 9 LG self chucking spindle geometry

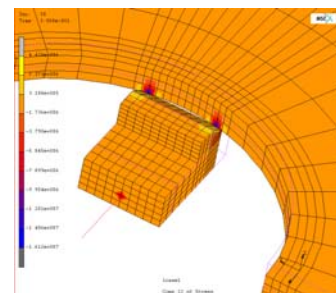


Fig. 10 Self chucking simulation results

제어가 되는 구조이다. 따라서, 돌기를 제어하는 스프링의 상수가 광디스크에 인가되는 응력의 크기를 변화 시킬 것이라는 것을 쉽게 예측 할 수 있다. 이와 같은 이유로 스프링 상수를 바꾸어 가면서 해석을 하여, Von-mises 응력을 계산하고, Fig.11 에 표시 하였다. 해석은 선형 탄성을 기초로 수행 되었으므로, 스프링 상수와 Von-mises 응력은 선형의 관계가 있다. 특이할 사항은, 현재 LG self chucking spindle motor 에 사용되는 스프링보다 1.5 배 이상의 스프링 상수를 가지는 스프링을 사용할 경우, 광디스크에 국부적으로 소성역이 생기는 것이다. 이 값은 Fig. 11 에 제한선으로 표시가 되어 있다. 국부적인 소성은 Fig. 10 에 표시된 곳과 같은 부분이다. 소성이 광디스크에 국부적으로 발생할 경우, 광디스크가 지속적으로 장착될 때, 광디스크에 마모가 생기거나, 균열이 생길 수 있음을 의미한다.

4. 초기 균열 제작

4.1 초기균열 제작의 필요성

3 장에서 피로파괴의 1 단계의 원인을 명확히 하기 어려움을 밝혔다. 따라서, 1 단계를 제외하고 2 단계와 3 단계의 피로균열 진전 메커니즘을 실험하고 관찰하기 위해서는 인위적으로 원하는 크기의 균열을 제작하여야 한다. 그리고 균열의 sharpness 또한 보장되어야 된다. ASTM 에 규정된 compact fracture specimen 은 이러한 sharp 균열을 규정하기 위하여, 균열 선단에 피로로 균열을 일부 진전시키도록 하고 있다. 그리고, 균열 진전 후 그립에서 피로에 의하여 새로 발생한 균열 선단까지 균열 길이로 규정하고 있다.⁽⁶⁾

고속 회전하는 CD-R 디스크의 실제 파손 실험을 위해서 본 연구에서도 원하는 크기의 균열을 sharp 하게 발생시키는 것이 중요하게 되었다. 균열이 존재하는 광디스크 시편을 제작하는 방법은 ASTM 에 규정된 방식과 유사하게 수행하였다. 먼저 3mm 정도의 notch 를 일정하게 실패를 이용하여, 제작한 후 Fig. 12 과 같이 CD-R 디스크에 반복적으로 bending 응력을 줄 수 있는 지그에 장착하여 제작하였다.

4.2 균열진전 실험 결과

4.1 절에서 제시된 방법으로, 각기 다른 6 개의 제조사의 디스크에 균열을 성장시켰고, 각기 균열진전 길이와 반복하중 회수를 기록하였다. 각 제조사 별로 정해진 개수의 CD-R 디스크에 균열을 진전시키고 균열길이를 측정하여, 근사곡선을 Fig. 13 에 표시하였다. 이 기록된 데이터는 추후에 원하는 길이의 균열을 지속적으로 발생시키는 데 사

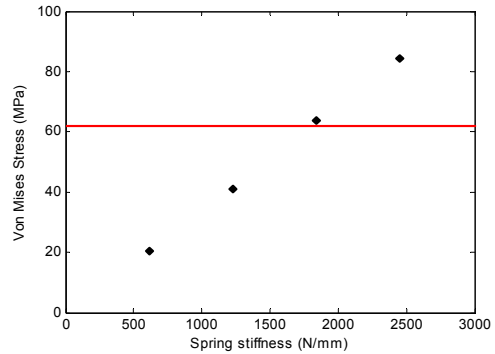


Fig. 11 Spring constant/ Von-mises stress relation

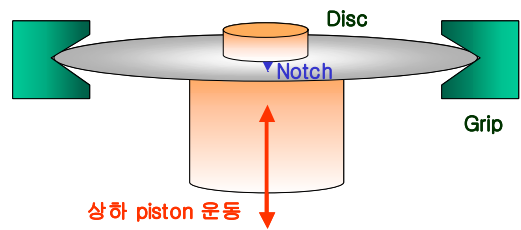


Fig. 12 Bending fatigue crack increaser

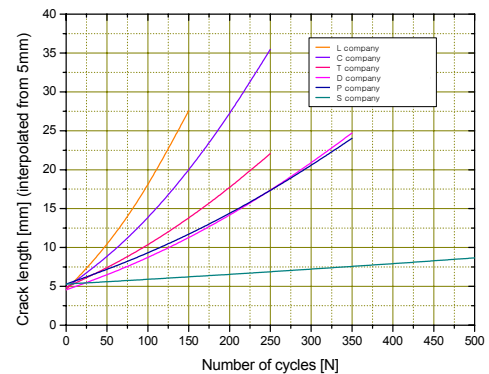


Fig. 13 Crack length / cycles graph

용되었다. 이 결과는 각 제조사의 CD-R 디스크의 반복 피로에 대한 저항 능력을 측정된 것과 같다. Fig. 13 과 같이 같은 PC 로 제작이 되는 CD-R 디스크 이라 하여도, 제조사 마다 그 성능의 차이가 심한 것을 알 수 있다.

5. 반복하중에 의한 균열진전

5.1 CD-R 디스크에 생성되는 반복응력

2.4 절에서 최종 파단면을 관찰하여, CD-R 디스크 파손의 주요 인자는 10,500 RPM 의 원심력 임을 확실히 하였다. 그러므로, 정지상태에서 최대

속도로 가속하는 것을 반복하면, 광디스크의 피로 파손의 주요 인자의 영향을 확인 할 수 있다.

5 장에서는 CD-R 디스크를 정지상태에서 가속하고, 10,500 RPM 에 다다르면, 전원을 제거하는 방식으로 다시 정지시키는 순서를 반복하여, 이때 CD-R 디스크 상의 균열의 움직임을 관찰하였다.

5.2 CD-R 디스크 가/감속 실험

CD-R 디스크에 30mm 균열을 4 장에서 제시된 방법으로 만들고, 가/감속을 반복하였다. 그리고 반복회수에 따른 균열 길이를 측정하였다. 그 결과 Fig. 14 와 같이 가/감속 1 회당 0.1mm 정도의 일정 길이씩 균열이 성장하다가 35mm 이상에서 급격하게 균열이 성장하여 파손에 이르는 모습을 보였다. 30mm 균열이 22.5mm 성장하는데 대략 70 번의 반복하중이 필요하였다.

본 절의 실험에서 가/감속이 반복하중으로 작용하는, CD-R 디스크의 피로파손의 한 원인이며, 가/감속 반복으로 CD-R 디스크가 파손 될 수 있음을 밝혔다.

5.3 CD-R 디스크 정속 유지 실험

CD-R 드라이브는 가속 후 정속에서 데이터를 읽고 난 후 속도를 낮추는 일련의 작업을 반복한다. 따라서 실제 CD-R 디스크는 일정시간 정속상태로 유지된 후 정지하게 된다. 이와 같은 이유로 정속 유지 실험을 추가로 수행하였다. 실험은 CD-R 디스크를 정지상태에서 10,500 RPM 으로 가속한 후, 20 초간 정속을 유지하고 전원을 제거하여 정지시키는 방법을 이용하였다. 정속유지 실험을 21 번 반복하자 CD-R 디스크이 파손되는 현상이 나타났다. 즉, 15mm 의 초기 균열이 37.5mm 성장하는데 21 번의 반복으로 충분하였다. 5.2 절의 결과인 30mm 에서 70 번 정도 반복했던 결과의 1/3 이하에서 파손되었다.

일반적인 피로파괴에서는 지속시간의 영향이 본 실험과 같이 주요하게 나타나지 않는다. 즉 정속을 유지하는 것이 중요한 인자라는 것 외에, 기존의 반복하중에 의한 피로현상 외에 또 다른 파손 메커니즘에 눈을 돌리게 되었다.

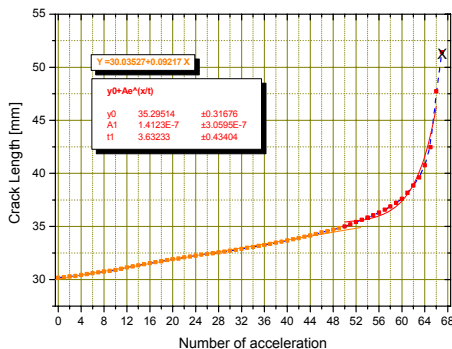


Fig. 14 Crack length / cycles

6. CD-R 디스크의 재질 고찰

6.1 PC의 정하중에 의한 피로현상(static fatigue)

Static fatigue 라는 명칭은 상온의 비결정질 물질에 정하중이 인가되었을 경우, 균열이 서서히 진전하는 현상을 일반적으로 통칭한다.^(4,7,8) 폴리머에서 균열이 서서히 진전하는 현상에 집중하여 creep rupture 라고 부르기도 하며, 정하중에서 균열이 진전하므로 stress rupture 라고 부르기도 한다.^(4,7,8) Static fatigue 의 주 원인은 비결정질 열가소성 수지에서 나타나는 크레이즈(craze) 현상이다. Creep 과 craze 현상은 일반적으로 각각 고온과 상온에서 일어난다는 차이가 있다. 그러나, 크레이즈 현상은 폴리머의 체인의 실타래가 풀리는 것이 주 원인으로 상호 관련이 깊다. 상온 크리프(9)라고 불리기도 하는 이러한 현상은 Schapery. R.A.^(10,11)와 Donald A.M.⁽¹²⁾에 의하여 많은 부분 밝혀 졌으며, static fatigue 라는 명칭은 Mould R.E.⁽⁷⁾와 같은 유리의 상온 정하중 피로현상을 연구하는 분야에서 주로 사용되었다. 이러한 현상은 정하중 상태에서, 반복하중에 의한 피로와 같은 3 단계의 파손 단계를 거치고, 균열이 서서히 진전한 파단면에 균열이 진전한 무늬가 생기므로 static fatigue 라는 명칭으로 불린다.

6.2 크리프와 피로의 상관 현상(Creep-fatigue interaction)⁽¹³⁾

2.3 절의 Fig. 4 에 표시된 균열진전면을 재 관찰하면, A,B,C 로 표기된 굵은 무늬와 그 사이에 균열 진전 무늬가 존재하는 것을 알 수 있다. 이것은 static fatigue 의 개념을 도입하여 설명할 수 있다. 즉 가속을 시작하면 어느 순간부터 static fatigue 가 발생하여, 균열이 성장하고 성장 무늬가 생긴다. 가속이 멈추면, 균열의 성장이 정지한다. 그리고, 다음 가속 시 균열이 정지했던 자리에서 성장하므로 그 주위가 무늬가 진해져서 육안으로 확인 할 수 있는 무늬로 발전한다. 이 무늬가 Fig. 4 의 A,B,C 이다. 가/감속과 정속이 함께 작용할 경우, fatigue 현상은 dynamic 과 static 이 함께 일어난다. 따라서, 균열의 성장이 단순히 정속 회전만을 하거나, 가/감속만을 반복할 때 보다 광디스크가 쉽게 파괴된다. 이 결과는 5.3 절에서 가/감속에 정속을 더했을 때 더 쉽게 광 디스크 파손되는 실험 결과와 일치한다.

7. 결론

본 연구에서는 CD-R 디스크의 피로 파손 문제를 연구를 하였다.

첫번째로 균열이 발생할 수 있는 메커니즘 분

석을 위하여, 논문에서 PC 에 외부적인 영향에 의하여 발생하는 균열의 존재에 대하여 논하였다. 그리고, 여러 원인 중 광디스크 드라이브와 직접적인 관련이 있는, 휴대용 디스크 드라이브에 CD-R 을 반복 장착하는 경우를 연구하였다. 그 결과 CD-R 디스크를 휴대용 광디스크 드라이브에 반복 장착하면 균열이 발생할 수 있음을 FEM 해석 결과를 이용하여 제시하였다.

두번째로 반복적인 bending 에 의해서 CD-R 디스크의 notch 에서 균열이 발생하여, 진전할 수 있음을 보였다. 이 실험은 ASTM 과 유사한 방식으로 CD-R 디스크에 균열을 만들기 위한 실험이고, 같은 PC 로 만들어진 CD-R 디스크이라 할지라도 각 제조사마다 반복 피로성능이 크게 차이가 남을 알 수 있다.

세번째로 광디스크에 가장 큰 반복 응력이 발생하는 가/감속 실험을 하였다. 실험 결과 광디스크를 정지 상태에서 52X 로 회전을 시키는 순서를 반복하면, 균열이 진전하는 것을 알 수 있었다. 또한 급격한 균열 진전이 일어나기 전에는 1 회 가/감속에 진전하는 균열의 길이가 거의 일정한 것을 알 수 있었다. 그러나 여기에 52X 정속이 함께 가해지면, 균열의 진전 속도는 더욱 가속이 되는 것도 관찰 되었다. 이러한 현상의 원인은 dynamic fatigue 와 static fatigue 가 함께 발생하기 때문이다.

위와 같은 연구에 대한 질문으로 '균열이 태초에 진전하지 않도록 조건을 잡으면 안 되는가?' 를 생각할 수 있다. 따라서, 이와 같은 물음에 해답을 찾기 위하여, CD-R 디스크의 주요 파손 메커니즘인 static fatigue 에 대한 자세한 연구가 진행 중이다. 그리고, 이와 함께 균열의 성장을 CD-R 드라이브 내에서 확인하여, 균열이 존재하는 디스크의 사용 자체를 막는 방법에 대한 연구도 함께 진행되고 있다.

참고문헌

- (1) RAPRA Tech. LTD, 'Crazing and Cracking in Air'
- (2) David Nowell and D. Phil, M.A., 2001, 'Structural integrity of CD-R 디스크 OMs in high speed drives', RM report
- (3) 조은형, 좌성훈, 정진태, 2001, '회전속도 증가에 의한 광디스크의 파괴현상에 관한 연구', 한국소음진동학회지, 제 11 권, 제 3 호, pp.437~442
- (4) Richard Chung, 2002, 'Fracture Mechanics', Dep. of Chemical and Materials Eng. Univ. of San hose state, 11.20
- (5) Andi Clements, 'Medical device failure modes, presentation by RAPRA Tech. LTD'
- (6) 엄윤용, 1996, '파괴역학의 역사와 응용', KAIST
- (7) Mould R.E. and Southwick R.D., 1959, 'Strength and static fatigue of abraded glass under controlled ambient conditions', J. of the America ceramic society, Vol. 42, No. 12,582-592
- (8) Wiederhorn S.M. and Bolz L.H., 1970, 'Stress corrosion and static fatigue of glass', J. of the America ceramic society, Vol. 53, No. 10,543-548
- (9) Nielsen and Landel, 'Mechanical properties of polymers and composites, 2nd edition'
- (10) Schapery. R.A., 1975, 'A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media', Int. jour. of Fracture, 11
- (11) Schapery. R.A., 1990, 'On some path independent integrals and their use in fracture on nonlinear viscoelastic media', Int. jour. of Fracture, 42, 189-207
- (12) Donald A.M., 1982, 'Effect of Molecular Entanglements on Craze Microstructure in Glassy Polymers', J. of Polymer Science, Vol.20, 899-909
- (13) Norman E. Dowling, 'Mechanical behavior of materials'
- (14) Anderson T.L., 'Fracture mechanics, 2nd edition'
- (15) MSC MARC manual, 'Fracture mechanics analysis with the J-integral', chapter 19