

# 회전 중 원심력에 의한 광디스크의 피로 파손

황효균<sup>†</sup> · 김남웅\* · 단병주\*\* · 김종만\*\* · 김외열\*\* · 이진우\*\*

## Static fatigue failure of the rotating optical disc

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

**Key Words :** Amorphous polymer(비결정질 폴리머), Craze(크레이즈), Static fatigue, Optical disc(광 디스크), PC(Polycarbonate)

### Abstract

The base material of optical disc is the amorphous polymer, polycarbonate. So crack growth on the rotating optical disc could happen by the static centrifugal force. This phenomenon is called static fatigue. Today's CD-R disc drive is being operated over 10,000 RPM. This is increasing the possibility of the disc fracture when operating. In this reason, new method to measure the static fatigue threshold quality and the way to calculate the threshold J-integral value and the safe crack length of the optical disc are studied. Finally the environmental effect to optical disc is also 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 있어 광디스크가 사용 중에 파손될 수 있는 가능성이 증가하고 있다. 이러한 실태를 반영하기 위하여 신제품 광디스크 드라이브 개발 시, 다양하고 가혹한 동작 조건 및 환경 조건에서 다양한 제조사의 광디스크를 가지고 시험을 하므로, 품질인증 실험 중 종종 광디스크가 파손이 되는 현상이 보

고 되고, 극히 드문 경우이지만, 소비자들이 사용하는 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 쓰야 하기 때문이다.

이러한 요구에 맞추어 이전 논문<sup>(1)</sup>에서는 균열의 발생과 성장을 반복하중에 의한 dynamic fatigue의 관점에서 논하였고, 본 논문에는 정하중에 static fatigue 성능을 비교하고, 환경 영향을 평가하여 피로 현상에 의한 CD-R 디스크의 파손 메커니즘을 전반적으로 정립하였다.

## 2. CD-R 고속 회전시 static fatigue 현상

### 2.1 고속회전 시 파손된 CD-R 디스크 관찰

52 배속 드라이브 내에서 10,500RPM의 속도로 사용 중 파손된 CD-R 디스크는 Fig. 1과 같이 거의 온전한 조각을 찾기 어려울 정도로 깨어진다. 이러한 현상을 재현하기 위하여 Fig. 2(a)와 같이

<sup>†</sup> 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)

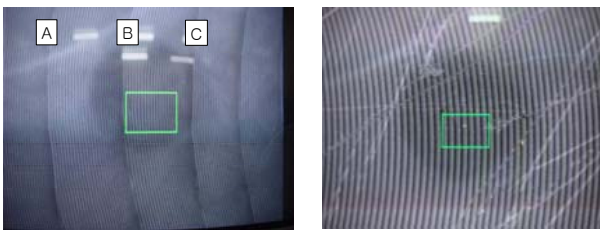
spindle motor 만을 회전시키는 장치를 구성하고 주위에 스피ن치를 대어 깨어진 조각을 수집하면 큰 조각 2 개와 여러 작은 조각을 얻을 수 있고, 이 조각들을 모아서 재 조립하면, Fig. 2(b)와 같이 CD-R 디스크의 내주에서 제일 큰 균열이 먼저 외주로 진전한 후, 주 균열의 반대 내주에 응력 집중으로 몇 조각으로 광디스크가 깨어진 후 조각들이 내부에서 서로 부딪쳐서 조각이 나는 현상임을 확인 할 수 있다.

2.2 비결정질 플라스틱의 static fatigue 현상

열가소성 수지 중 비결정질 폴리머는 신타래의 형태로 엮어 있는 형태로 존재하며, 투명하고 사출성이 좋아 외관이나 광학 부품에 주로 사용된다. 신타래와 같은 형태로 존재하므로 Fig. 3(a)와 같이 내부에 수많은 void 들이 존재한다. 이러한 비결정질 폴리머로 이루어진 제품에 균열이 존재하고, 외력이 작용할 경우 균열 선단에 응력이 집중되며, 결국 Fig. 3(b)와 같이 균열 선단에서 폴리머 가닥들이 주응력방향으로 늘어서며, 신타래가 풀리기 시작하여 육안으로 성장한 void 를 확인 할 수 있게 되는데, 이러한 현상을 크레이즈라고 한다. 크레이즈 현상이 심해지면, Fig. 3(c)와 같이 폴리머 가닥이 하중을 견디지 못하고 끊어지면서, 균열이 일정량 진전하게 되고, 새로 생성된 균열 선단에서 이와 같은 메커니즘이 반복된다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 현상이 반복된 균열 진전 면에서는 반복하중에 의한 피로현상과 유사한 균열 진전 무늬가 관찰되므로, 이 현상을 static fatigue 로 부른다. 이러한 현상은 Donald A.M<sup>(3)</sup>이 Fig. 4 와 같이 촬영하였고, 폴리머 가닥의 엮인 정도를 측정하여, Table 1 과 같이 크레이즈 저항성을 정량적으로 계산하였다.

2.3 CD-R 디스크 균열 진전 파단면 관찰

광디스크의 가속과 감속 반복에 의한 피로 파손현상을 다루었던 기존의 논문<sup>(1)</sup>에서 밝혔듯, static fatigue 에 의한 파단면에는 Fig. 5(a)와 같이 원심력에 의한 정하중으로 생성되는 균열 진전 무늬가 생성되고, 여기에 가/감속의 반복하중이 더해지면 Fig. 5(b)와 같이 균열의 성장이 멈추고 재 성장하면서 굵은 균열 진전 무늬가 더해 진다.



(a) Dynamic/static fatigue failure surface (b) Static fatigue failure surface

Fig. 5 Fracture surface of the CD-R Disc



Fig. 1 Disc crushing in 52X disc drive



(a) Collecting disc debris



(b) Disc debris

Fig. 2 Disc failure mode

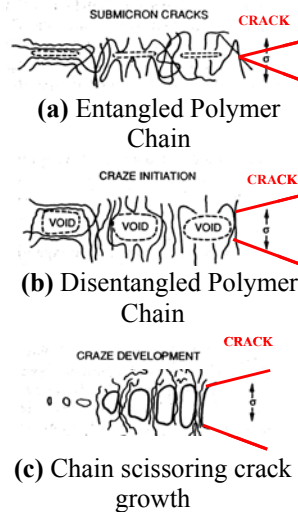


Fig. 3 Static fatigue mechanism

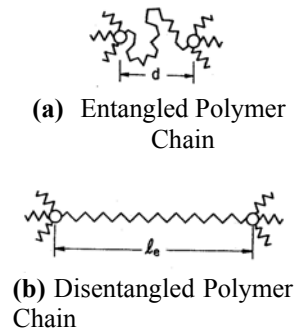


Fig. 4 Craze factors

| Polymer | $l_e(\text{Å})$ | $d(\text{Å})$ | $\lambda_{craze}$ |
|---------|-----------------|---------------|-------------------|
| PTBS    | 600             | 125           | 7.2               |
| PVT     | 470             | 107           | 4.5               |
| PS      | 140             | 96            | 3.8               |
| PSMLA   | 400             | 101           | 4.2               |
| PSAN1   | 270             | 82            | 2.7               |
| PMMA    | 190             | 73            | 2.0               |
| PSMMA   | 190             | 61            | 2.0               |
| PSAN2   | 180             | 67            | 2.0               |
| PPO (E) | 165             | 55            | 2.6               |
| PPO (M) | 284             | 72            | 2.6               |
| PC      | 110             | 44            | 2.0               |

Table 1 Craze resistance parameter

2.4 최종 파단면 관찰

고속회전에 의한 원심력으로 CD-R 디스크에서 static fatigue 에 의한 균열 성장 파손 현상이 발생하면, 과다하중에 의한 최종 파단면이 생성되는 것과 최종파단면을 측정하여 계산된 하중이 원심력에 의한 하중과 일치함은 이전 논문<sup>(1)</sup>에서 확인하였다.

최종파단면의 크기는 인장강도로 결정이 되며, 인장강도는 파괴인성치와 밀접한 관련이 있으므로, 본 연구의 후반부에서 파손된 광디스크의 최종 파단면의 크기를 직접 비교함으로써 상대적인 디스크의 재질 상태를 확인한다.

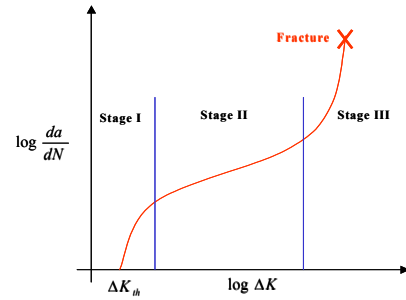


Fig. 6 Fatigue crack growth

3. 한계 J 적분 값 측정

3.1 한계 변위 하중 측정

반복하중에 의한 피로파괴현상은 Fig. 6 과 같이 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)로 분류되며, static fatigue 도 같은 단계로 분류된다.<sup>(4)</sup>

소비자의 입장에서 사용중에 파단이 일어나지 않는 것이 중요하므로, 본 연구는 균열이 성장하지 않는 한계 조건에 대해서 연구를 하였다.

본 연구에서는 균열이 성장하지 않는 한계값을 측정하기 위해서, 시장에서 주로 판매되고 있는 CD-R 중 대표적인 6 종의 제품을 선정하여, 균열 성장기<sup>(1)</sup>을 이용하여 20mm 의 균열을 각 디스크에 제작하여, 이 디스크에 Fig. 7 과 같이 양쪽에 변위를 일정시간 가한 후 균열 성장여부를 확인하여, 균열이 성장하지 않는 변위를 측정하여, 한계 변위 하중으로 Table 2 에 기록하였다.

| Displacement [mm] | J <sub>th</sub> |       | Crack propagation |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----------------|-------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   | Lower           | Upper | A                 | B   | C   | D   | E   | F   |
| 0.14              | 48.14           | 55.19 | -                 | -   | No  | -   | -   | -   |
| 0.15              | 55.26           | 62.79 | -                 | No  | Yes | -   | -   | -   |
| 0.16              | 62.87           | 70.89 | No                | Yes | Yes | -   | No  | No  |
| 0.17              | 70.98           | 79.48 | Yes               | Yes | Yes | No  | No  | No  |
| 0.18              | 79.57           | 88.57 | -                 | -   | -   | No  | Yes | Yes |
| 0.19              | 88.66           | 98.14 | -                 | -   | -   | Yes | -   | -   |

Table 2 Threshold displacement value

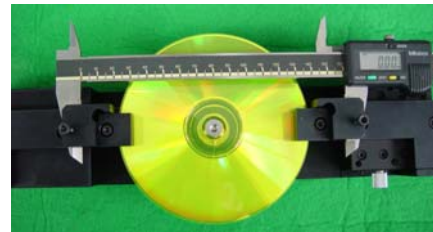


Fig. 7 Displacement control tester

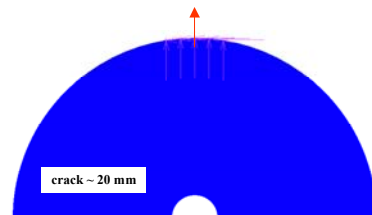


Fig. 8 CD-R Symmetric FE model with crack

3.2 원형 평판의 한계 J 적분 값

한계값을 파괴역학의 재료 물성치로 표시하기 위하여, CD-R 을 1.2mm 의 두께를 가진 원형평판으로 가정하고, 20mm 균열이 존재하는 CD-R 을 Fig. 8 과 같은 대칭 FEM 모델로 구성하여, Fig. 9 와 같이 외부변위하중과 균열 선단에서의 J 적분값의 2 차 함수관계를 얻었다. 이 함수 관계를 이용하여, 3.1 절에서 측정된 한계변위를 한계 J 적분값<sup>(5)</sup>을 계산하여 Table 2 에 표시하였다.

Table 2 의 결과와 같이 PC 로 제작되는 CD-R 의 경우도 제조사에 따라 static fatigue 한계 J 적분값에 차이가 존재하며, 심하게는 2 배 이상의 성능 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, 이 값을 실제 드라이브 설계에 적용하기 위해서는 디스크 별로 그 성능 값을 데이터 베이스화 해야 할 필요가 있다.

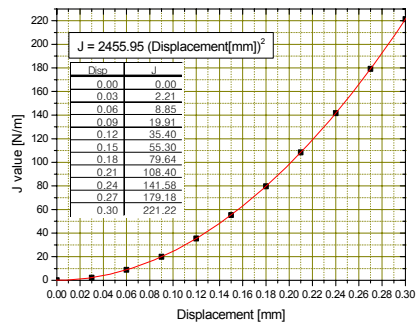


Fig. 9 J integral value / displacement

3.3 CD-R 실제 형상을 고려한 한계 J 적분 값

CD-R 디스크는 운반과 보관 시 디스크 간에 흡착 방지를 Fig. 10 과 같이 디스크 하면에 0.3mm 정도의 양각돌기가, 상면에는 이것을 보정하기 위한 위하여 0.3mm 정도의 음각돌기가 형성되어 있다. 이 돌기를 stacking ring 이라 통칭하며, 초기 음악용 광디스크는 이것이 없는 경우도 있었으나, 디스크가 대량 생산되면서 현재 대부분의 광디스크에 stacking ring 이 존재한다.

Stacking ring 을 고려하여, 회전 속도와 균열길이에 따른 J 적분 값을 계산하면, Fig. 11 과 같이 stacking ring 주위에서 J 적분값의 변곡부가 생긴다. 이것은 CD-R 의 두께 변화에 의한 것으로, 단일 원형평판으로 가정한 결과와 비교하면 stacking ring 주위에서의 값만 차이가 있을 뿐 stacking ring 에서 멀어지면 값이 같아진다. 한계 J 적분값을 측정하기 위하여 20mm 의 균열이 존재하는 디스크를 사용한 이유도 이와 같은 형상적인 영향을 배제하기 위함이다.

4. 한계 균열길이 정의

4.1 한계 균열길이 계산

광디스크의 회전 중 파손 문제를 광디스크 드라이브 설계인자로 적용하기 위해서는 한계 J 적분값으로부터 드라이브 내에서 검출이 가능한 한계 균열 길이를 회전 속도별로 계산하여야 한다. 한계 균열길이를 구하는 방법은 Fig. 11 의 균열 길이 당 J 적분 값 표를 이용하여, Table 2 에서 측정된 한계 J 적분 값에 해당하는 값을 찾는 방식이며, Table 2 의 A 사 제품의 값을 계산하면 Fig. 12 와 같다.

한계 균열길이는 CD-R 을 일정 두께의 원형 평판으로 가정했을 경우와 Fig. 12 와 같이 stacking ring 을 고려 했을 경우가 stacking ring 주변에서 차이를 보이며, 실제 사용중 문제가 되는 균열 길이는 10mm 이하로 stacking ring 의 영향을 고려한 결과를 이용해야 함을 알 수 있다.

4.2 한계 균열길이 검증

광디스크의 파손 현상은 정하중에 의한 피로현상으로, 본연구에서 균열이 있는 광디스크에 정하중을 가하는 방식으로 실제 회전 시 디스크가 견딜 수 있는 한계 균열길이를 계산하였다. 저하중을 이용한 한계 균열길이 측정법의 유용성을 증명하기 위하여, A 사의 CD-R 에 균열을 제작하여 회전 수 별로 파손여부를 확인하여 Fig. 13 에 4.1 절에서 계산된 값과 함께 표시하였다.

결과에서 확인 할 수 있듯 static fatigue 에 의한 CD-R 의 파손 현상은 stacking ring 의 영향을 받으며, FEM 을 적절히 사용하면 CD-R 을 회전시켜서 파손시키지 않고, 인장 실험만으로 한계 J 적분값을 구하여, 사용 중 디스크 파손이 생기지 않는 드라이브 설계 인자인 한계 균열길이를 구할 수 있음을 알 수 있다.

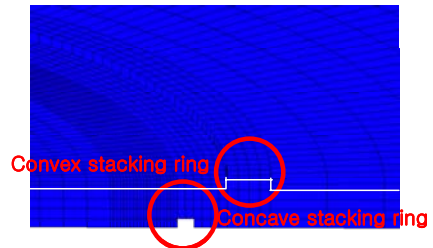


Fig. 10 Disc FE model with stacking ring

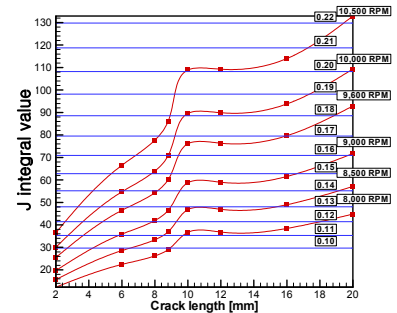


Fig.11 Bending fatigue crack increaser

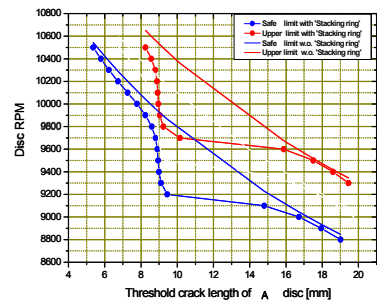


Fig. 12 Threshold crack length / cycles graph

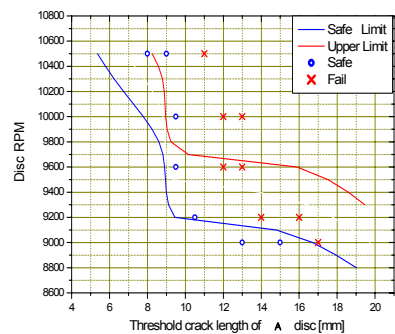


Fig. 13 Threshold crack length test results

5. 환경영향

5.1 8585 환경시험

광디스크는 재질이 PC 로 되어있으며, 이 재질은 가수 분해로 화학변화를 일으키므로 습도가 재질 열화에 주요 인자가 되고, 가수 분해는 온도에 의해서 가속되는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 이와 같은 이유로 PC 는 THB 실험(Temperature Humidity Bias test)을 주로 실시하며, 일반적인 광디스크의 환경 실험에는 40°C 90% RH 혹은 60°C 95% RH THB 조건을 주로 사용하지만, 본 연구에서는 이 THB 조건을 사용하지 않고 85°C 85% RH 를 사용하였다. 85°C 85% RH 조건은 주로 반도체의 신뢰성 평가를 위하여 사용되는 조건으로, 반도체의 THB 조건도 초기에는 광디스크와 유사하게 40°C 90% RH 나 60°C 95% RH 가 사용되었으나, 점점 반도체가 사용되는 환경 조건이 열악해지고 있어, 좀더 가혹한 조건인 85°C 85% RH 로 변경되어 현재 사용되고 있다. 광디스크도 점점 가혹한 환경 하에서 사용되는 빈도가 증가하고 있어 결국 환경시험 규격이 강화될 것을 예상할 수 있어, 본연구에서 85°C 85% RH THP 규격을 채택하여 실험을 수행하였으며, 이 규격은 IEC749<sup>(7)</sup>와 JIS C 7021<sup>(8)</sup>에 명확하게 규정되어 있다.

5.2 환경영향에 의한 한계 J 적분 값의 변화

환경 영향 실험은 85°C 85% RH THB 조건에 맞춰져 있는 항온조에 디스크를 1 일과 2 일간 보관한 후, 상온에서 3 장에서 소개된 변위 제어 방법을 이용하여 한계 변위의 변화를 확인하는 방식을 이용하였다. 시편으로 static fatigue 저항성능이 가장 좋은 D 사의 와 가장 저항성능이 낮은 C 사의 디스크를 사용하였으며, 그 결과를 Table 3 에 표기하였다.

Table 3 에서 알 수 있듯, 85°C 85% RH THB 에 1 일만 노출되어도 두 종류의 디스크 모두 한계 J 적분값이 반으로 낮아졌다. D 사 디스크의 경우 한계 J 적분 값이 THB 조건에 노출되지 않은 C 사의 값과 같아지고, 1 일 보관과 2 일 보관 간의 한계 J 적분 값에는 변화가 없었지만, 2 일 이상의 THB 조건 노출 시 한계 J 적분값이 변하지 않을지는 알 수 없으므로, 환경 조건이 디스크 물성 변화에 미치는 상세한 영향은 추후에 장기간 THB 조건 보관 실험을 통하여 확인하여야 한다.

결과적으로 디스크의 운반 및 보관 시 온도와 습도를 상온에 가깝게 조절하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있으므로, 고배속 기록용 디스크는 운반과 보관에 더욱 신경을 써야 하고, 고배속 디스크는 환경 보관 성능 인정도 반드시 필요할 것으로 생각된다.

5.3 환경영향에 의한 최종 파단면 변화

본 절에서는 85°C 85% RH THB 환경에 노출된 디스크를 10,500RPM 으로 회전시켜 최종파단면인 overload failure 면을 관찰함으로써, 디스크의 상대적인 인장강도의 변화를 정성적으로 확인하였다.

시편은 비교적 static fatigue 성능이 좋은 A 사의 디스크와 상온 정속실험으로 파손된 C 사 디스크와 85°C 85% RH THB 조건에 1 일 보관 후 파손된 C 사 디스크의 최종파단면을 관찰하였고, 추가로 간이 금형으로 시제작된 Blue-Ray 디스크와 시중에 판매중인 C 사의 DVD-R 디스크의 최종파단면도 관찰하여 Fig. 14 에 나타내었다.

Fig. 14 에서 관찰되듯 상온에서 파손된 C 사 디스크의 파단면 크기가 1 일간 THB 조건에 노출된 파단면 보다 1/3 정도 작아진 것을 알 수 있으므로, 85°C 85% THB 에 의하여 디스크의 인장강도가 기존에 비해 1/3 정도 낮아진 것을 유추 할 수 있다. 따라서, THB 조건에 노출되면 디스크의 균열저항성 뿐만 아니라, 인장강도도 함께 낮아짐을 알 수 있다.

Blue-Ray 디스크의 경우는 THB 실험을 하지 않았음에도 THB 실험을 한 C 사 디스크보다 인장강도가 떨어진 다는 것을 알 수 있다. 제조업체에 확인한 결과 C 사 디스크와 Blue-Ray 디스크는 같은 상표의 수지로 제작되어 있다는 회신을 얻었으며, 따라서 디스크의 기계적인 성능을 저하시키는 가장 큰 원인으로 사출 조건을 추론할 수 있으며, 이와 같이 기계적 성능이 떨어지는 디스크가 시장에 존재할 가능성이 높다.

| Temperature<br>at limit | J <sub>th</sub> |        | Crack length w/o<br>mechanical ring |        | Crack propagation    |                    |                    |                       |                    |                    |
|-------------------------|-----------------|--------|-------------------------------------|--------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
|                         | lower           | higher | lower                               | higher | E AI Disc<br>control | D1 disc<br>control | D2 disc<br>control | D3 AI Disc<br>control | D1 disc<br>control | D2 disc<br>control |
| 010                     | 94.81           | 95.83  | -                                   | -      | -                    | No                 | No                 | -                     | -                  | -                  |
| 011                     | 92.72           | 92.81  | -                                   | -      | -                    | No                 | Yes                | -                     | -                  | -                  |
| 012                     | 95.87           | 91.85  | 0                                   | 0.89   | -                    | Yes                | Yes                | -                     | No                 | No                 |
| 013                     | 91.81           | 95.87  | 0.85                                | 0.89   | -                    | -                  | Yes                | -                     | No                 | No                 |
| 014                     | 92.74           | 95.78  | 0.81                                | 0.85   | No                   | -                  | Yes                | -                     | Yes                | Yes                |
| 015                     | 95.85           | 95.78  | 0.85                                | 0.87   | Yes                  | -                  | -                  | -                     | -                  | -                  |
| 017                     | 70.88           | 70.88  | 7.87                                | 0.82   | -                    | -                  | -                  | -                     | No                 | -                  |
| 018                     | 70.87           | 92.87  | 0.89                                | 11.85  | -                    | -                  | -                  | -                     | No                 | -                  |
| 019                     | 90.88           | 95.75  | 11.21                               | 13.85  | -                    | -                  | -                  | -                     | Yes                | -                  |

Table 3 Threshold J integral value with THB test

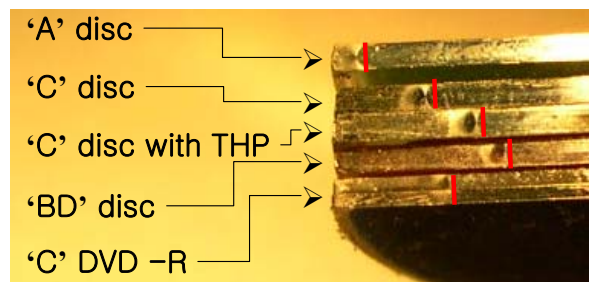


Fig. 14 Ultimate tensile strength comparison

## 6. 결 론

## 참고문헌

본 연구에서는 디스크의 정속회전 파손의 직접적인 원인인 비결정질 폴리머의 static fatigue 에 관하여 설명을 하였고, static fatigue 이론을 바탕으로 디스크의 한계값의 측정 방법을 소개하고 실제 측정하여 검증하였다. 본 연구의 결과는 아래의 3가지로 정리 될 수 있다.

첫째 디스크의 파손 메커니즘은, 고배속으로 정속 회전할 때 인가되는 원심력에 의하여 비결정질 폴리머로 구성되어 있는 디스크의 균열 선단에 응력집중이 발생하므로, 한계 길이 이상의 균열이 존재할 경우, 크레이즈에 의한 static fatigue 현상이 발생하여 균열이 단속적이고 지속적으로 성장하여 파단에 이르는 현상이다.

둘째 20mm 의 균열이 존재하는 디스크의 양단에 변위를 가하는 변위제어 실험을 통하여 한계 J 적분값을 측정하였다. 이 한계 J 적분값을 이용하여, 각 제조사 별 디스크의 한계 균열길이와 한계 회전 속도를 계산하였고, 이를 정속 회전 파손실험을 통하여 검증하였으며, 변위 제어실험을 이용하여 디스크의 회전 속도 대비 한계 균열길이를 계산하는 프로세스를 정립하였다.

셋째 디스크의 재질인 PC 의 물성치는 생산, 운반, 보관에서 나타나는 환경적인 영향에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있어, 이를 검증하기 위하여 85°C 85% RH THB 보관 후 변위 제어 실험을 수행하여, 디스크의 한계 J 적분값이 절반이하로 감소하는 것을 확인하였다. 그리고, 파단면의 크기를 측정하여 85°C 85% RH THB 에 노출되면, 디스크의 인장강도도 함께 낮아지는 것을 확인하였고, 같은 수지로 제조된 디스크라 할지라도 사출 조건에 따라서 기계적 성능이 크게 변하는 것도 관찰하였다.

결론적으로 본연구에서는 디스크 파손의 주 메커니즘을 밝히고, 이 메커니즘을 정량적으로 측정하여 설계에 사용할 수 있는 프로세스를 확립함으로써 고배속 기록, 재생 중에 디스크의 파손이 일어나지 않는 디스크 드라이브 설계의 기초 이론을 확립하였다. 추후에는, 파손형태만 소개한, 0.6mm 의 디스크 두 장을 접착한 형태인 DVD-R 의 한계 J 적분 값에 대해서도 연구가 심도 있게 진행되어야 할 것이다.

- (1) 황효균, 김남웅, 단병주, 김종만, 김외열, 이진우, 2003, '피로현상에 의한 광디스크의 파손', 대한기계학회, 추계학술 대회
- (2) Nielsen and Landel, 'Mechanical properties of polymers and composites, 2<sup>nd</sup> edition'
- (3) Donald A.M., 1982, 'Effect of Molecular Entanglements on Craze Microstructure in Glassy Polymers', J. of Polymer Science, Vol.20, 899-909
- (4) Richard Chung, 2002, 'Fracture Mechanics', Dep. of Chemical and Materials Eng. Univ. of San hose state, 11.20
- (5) 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
- (6) Andi Clements, 'Medical device failure modes, presentation by RAPRA Tech. LTD'
- (7) IEC749, Semiconductor Device mechanical and Climatic Test Method
- (8) JIS C 7021, Type Designation System for Discrete Semiconductor Device
- (9) MSC MARC manual, 'Fracture mechanics analysis with the J-integral', chapter 19