

BD-R 장기보존 특성 평가를 위한 가속 열화 실험 조건과 안정성 평가 기준에 관한 연구

A Study on Suitable Condition of Accelerated Aging Test and Evaluation Criteria of Data Stability for Archival Performance Analysis of BD-R media

이관용*, 박선주*, 김도현*, 조이형*, 김영주†

Kwan-Yong Lee, Sun-Joo Park, Do-Hyun Kim, Yi-Hyung Jo and Young-Joo Kim

(2014년 3월 14일 접수; 2014년 3월 19일 심사완료; 2014년 3월 22일 게재확정)

Abstract

The Blu-ray Disc Recordable(BD-R) is one of strong candidates for archival application among optical media formats, because of its large capability. However, the well-defined accelerated aging test conditions and evaluation criteria have not yet been fully confirmed for BD-R. In this study, the data stability and degradation aspect of BD-R were analyzed by the random-symbol error rate(R-SER) measurement after the accelerated aging test. And a reasonable test condition of accelerated aging for BD-R and the appropriate evaluation criterion using R-SER measurement were discussed.

Key Words : Archival application, BD-R, Accelerated aging test, R-SER, Long-term preservation

1. 서론

20세기 중반 디지털 시대가 시작된 이래로 다양한 형태의 데이터가 생산, 활용, 보존되고 있다. 특히 최근에는 인터넷의 발달과 함께 고화질 동영상 등의 디지털 데이터가 더욱 다양해 지면서 10년 이상 장기 보존되어야 할 정보가 급격히 증가하고 있다. 광디스크(Optical Disk)는 하드디스크(HDD)나 반도체 메모리 등의 다른 정보 저장 기기에 비하여 물리적, 전자기적 영향에 강한 저항성을 가지고 있고, 1회만 기록할 수 있는 포맷을 가지고 있기 때문에 매우 매력적인 장기 보존 매체임에 틀림 없다[1-4]. 특히 광디스크 중 가장 최근 개발되고 25GB 이상의 큰 용량을 저장할 수 있는 Blu-Ray Recordable (BD-R) 미디어의 장기

보존 특성에 대한 관심이 크게 증가하고 있다[5]. 이미 미디어와 드라이브 제조사들은 자체적인 평가를 통해서 BD-R 미디어의 기록 수명을 50년 이상으로 예측하고 있다. 그러나 아직 BD-R 미디어 만을 위한 장기보존 특성 또는 기록 수명 평가를 위한 국제 실험 규격이 없기 때문에, 현재는 광디스크의 이전 포맷인 Digital Versatile Disk Recordable(DVD-R, +R)의 장기 보존 수명 평가 국제 규격인 ISO/IEC 10995의 방법을 참고하여 실험하고 있다. 이 실험 규격은 인위적으로 구성된 고온, 고습의 환경에서 DVD-R, +R 미디어의 화학적 변화 촉진을 유도하는 방법으로 진행된다[6]. 그러나 DVD-R, +R 미디어의 경우 일반적으로 Cyanine 계열의 염료를 기록층으로 사용하는 한편, BD-R은 상변화 무기물을 사용한다. 구조적으로도 DVD-R, +R은 반사층과 기록층을 2장의 Poly Carbonate(PC)기판 사이에 두는 구조이나, BD-R의 경우 1장의 PC 기판에 기록층, 보호층을 두는 형태로 동일한 온도와 습도 조건에서도 기록층에 미치는 영향이 다를 수 있다[7]. 본 연구에서는 BD-R 미디어의 신뢰성 있는 장기 보존 특성 평가를

† School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.
E-mail : yjkim40@yonsei.ac.kr
TEL : (02) 2123 - 6852

* Graduate Program of Information Storage Engineering
Yonsei Univ.

위한 가속 열화 실험 조건 도출을 위하여, DVD-R 과 BD-R 미디어를 기록하고 여러 온도, 습도 조건에서 기록층의 열화 양상을 관찰하였다. 특히 각 실험 미디어를 Full track 기록하고, 기록 위치 별 오류율 변화를 DVD-R 의 Parity Inner Error(PI Sum 8)와 BD-R 의 Random-Symbol Error Rate(RSER) 를 측정하여 확인하였다. 또한 현재 규격화 되어 있지 않은 BD-R 의 신뢰성 있는 판단(Failure) 미디어 기준에 대하여 논하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 광디스크의 기록

실험에 사용될 미디어는 Maker 별 편차를 최대한 줄이기 위하여, DVD-R 과 BD-R 모두 생산하는 브랜드의 각각 Single Layer 미디어를 선정하여 사용했다. 또한 DVD-R 과 BD-R 미디어 기록을 위해서 두 미디어 모두 안정적으로 기록 할 수 있는 DVD-R, BD-R combo writer 를 사용하였다. 상용 광디스크 드라이브는 일반적으로 PC 에서 사용되는 Half-height type 과 노트북, 넷북 등에서 사용하는 Slim-type 으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 광디스크 드라이브의 주류를 이루고 있는 Slim-type 드라이브를 선정하였다. 각 실험 미디어는 광디스크 기록/평가 소프트웨어를 이용하여 모든 data address(full track)를 기록하였다. 실험 미디어의 기록 속도는 DVD-R 의 경우 선행 연구의 제안을 따라서 Constant Angular Velocity(CAV) 방식의 16 배속으로 기록 하였고[8], BD-R 은 기록 드라이브의 최고 배속인 Partial CAV 방식의 4 배속으로 기록하였다. 수집되는 열화 양상의 재현성 확보를 위하여, DVD-R 과 BD-R 각 실험군 별로 5 장씩 기록하였다.

2.2 가속 열화 실험 설계

광디스크의 수명 예측을 위한 국제 실험 표준, ISO/IEC 10995 에 따르면 DVD-R 을 위한 가속 열화 실험은 미디어를 온도와 습도를 조절한 가상의 열화 환경에 노출 시키는 방식으로 진행 된다. 현재 BD-R 미디어의 경우에는 가속 열화 실험 규격이 표준화 되어 있지 않기 때문에, DVD-R 미디어 가속 열화 조건을 기준으로 온도와 습도 조건을 선정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 DVD-R 과 BD-R 모두 3 가지의 온도/상대습도 조건, ① 85°C/85%, ②80°C/80%, ③65°C/80%에서 가속 열화

실험이 진행 되었다. 가속 열화 실험이 고온/고습의 환경에서 진행되기 때문에, 실험 미디어가 온도와 습도의 급격한 변화에 따라서 물리적으로 손상되는 것을 방지하기 위해서 상온/상습에서 고온/고습으로 변화하는 시간을 6 시간으로 정하여 영향을 최소화 하였고, 고온/고습 상태의 가속 열화 실험이 종료되면 상온/상습에서 24 시간 이상 평형화 기간을 가지도록 했다[6]. 또한 실험 미디어가 고온/고습의 환경에 노출되어 있는 동안 물방울 생성, 이물질 흡착 등 미디어 표면에서 생길 수 있는 문제를 방지하기 위하여 각각의 미디어 사이에 2mm 이상 공간을 두는 구조의 미디어 홀더를 테프론으로 제작하여 사용하였다.

2.3 데이터 안정성 평가

고온/고습 가속 열화 실험이 250 시간 진행 될 때 마다, 미디어의 데이터 안정성 평가를 위해서 DVD-R 과 BD-R 의 오류율 지표인 PI Sum 8 과 RSER 을 측정하였다. 또한 미디어의 물리적인 위치(내주, 중주, 외주)에 따른 오류율 변화를 관찰하기 위하여 실험 미디어의 전 기록 영역에서의 SER 을 측정했다. 판단(Failure) 미디어의 판단은, DVD-R 의 경우 DVD 규격인 ISO/IEC 16448:2002 를 참고하여 Max PI sum 8 값이 280 이상인 경우로 정의 하였다[9]. BD-R 의 경우, Blu-Ray Disc Specification 을 참고하여 Max RSER 값이 2.0×10^{-4} 이하는 최상의 상태(Best), 1.0×10^{-3} 이하는 드라이브와 미디어 모두 안정한 상태(Good), 4.2×10^{-3} 이하는 오류 상태(Bad), 그 이상의 값을 가질 경우 심한 오류 상태(Worst)로 구분하였다[7].

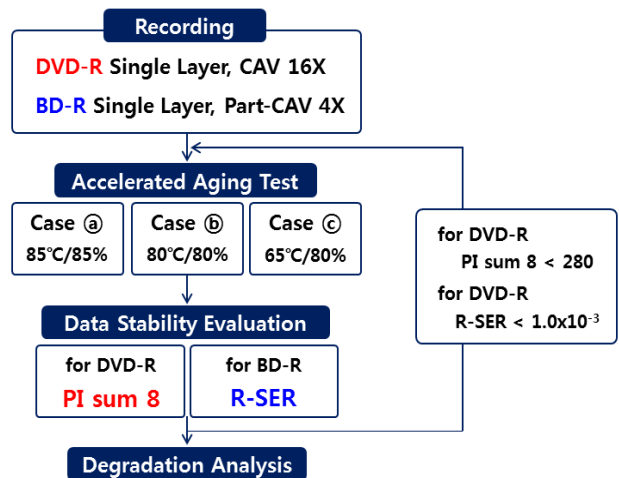


Fig. 1 Experimental procedure of this study for the data degradation analysis of DVD-R and BD-R by the accelerated aging test

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 초기 기록 데이터의 안정성 평가 결과

DVD-R 과 BD-R 미디어의 가속 열화 실험을 진행하기 전에 초기 기록된 데이터의 품질을 확인할 필요가 있기에, 모든 실험 미디어는 초기 기록 직후 PI sum 8 과 R-SER 을 측정하였다. 먼저 DVD-R 미디어의 경우 앞서 서술한 바와 같이 16 배속의 CAV 방식으로 전 영역(4.7GB) 기록되었고, 실험 미디어의 평균 Max PI sum 8 값은 21 이었다. 또한 Fig.2(a)에서 볼 수 있듯이 기록된 전 영역에서 내주, 중주, 외주(Data address 가 높은 수 일수록 외주)에 상관 없이 모두 고르게 50 이하의 PI sum 8 값이 측정 되었다. 일반적으로 초기 기록 Max PI sum 8 값이 50 이하일 경우 최상의 기록 품질이라고 간주하기 때문에, 실험 미디어의 데이터 품질은 매우 좋다고 판단했다. 한편 BD-R 미디어의 경우 4 배속 partial-CAV 방식으로 전 영역(25GB) 기록되었다. R-SER 측정 결과 미디어 전 영역에서 1.0×10^{-3} 이하의 값이 측정되었고, 평균 Max R-SER 값은 3.4×10^{-4} 으로 DVD-R 과 마찬가지로 매우 안정적으로 기록된 것을 확인 하였고, 이 상태 그대로 가속 열화 실험을 진행 하였다.

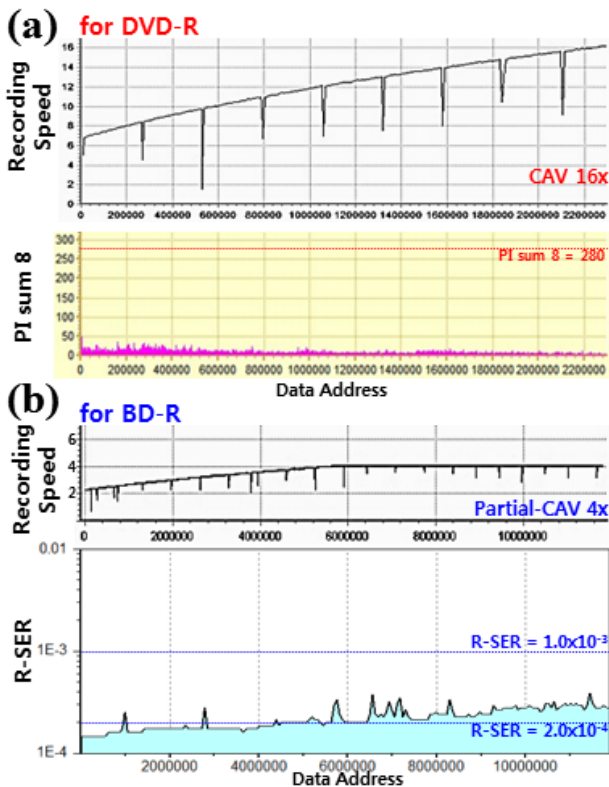


Fig. 2 Recording speed graph and initial data stability test results for (a) DVD-R, and (b) BD-R

3.2 열화 진행에 따른 평균 오류를 측정 결과

모든 DVD-R, BD-R 실험 미디어는 3 가지의 다른 온도/습도 조건의 가속 열화 환경에서 1 cycle 에 250 시간(65°C/80% 조건의 경우 500 시간)씩 총 1500 시간 동안 지속되었고, 각 cycle 이 끝날 때마다 오류율을 측정 하였다. 먼저 DVD-R 의 결과를 살펴보자. 85°C/85% 조건에서 실험한 미디어의 평균 Max PI sum 8 값은 500 시간 까지는 50 이하의 좋은 품질을 유지 하지만, 1000 시간 이후로 크게 증가하여 1500 시간 후에는 280 이상의 값을 가지게 되어 오류(Failure) 미디어로 확인 되었다. 80°C/80% 조건에서 실험한 미디어도 평균 Max Pi sum 8 값은 조금 작았지만 매우 유사한 경향을 보였고, 1500 시간 실험 후 대부분의 미디어가 오류 미디어로 확인 되었다. 65°C/80% 조건에서 실험한 미디어는 1000 시간 까지 50 이하의 평균 Max PI sum 8 값을 유지 하였으나, 마찬가지로 1000 시간 이후 오류율이 급격히 증가하는 경향을 보였다. Fig. 3(a)에서 확인 할 수 있듯이, DVD-R 의 경우 데이터 열화

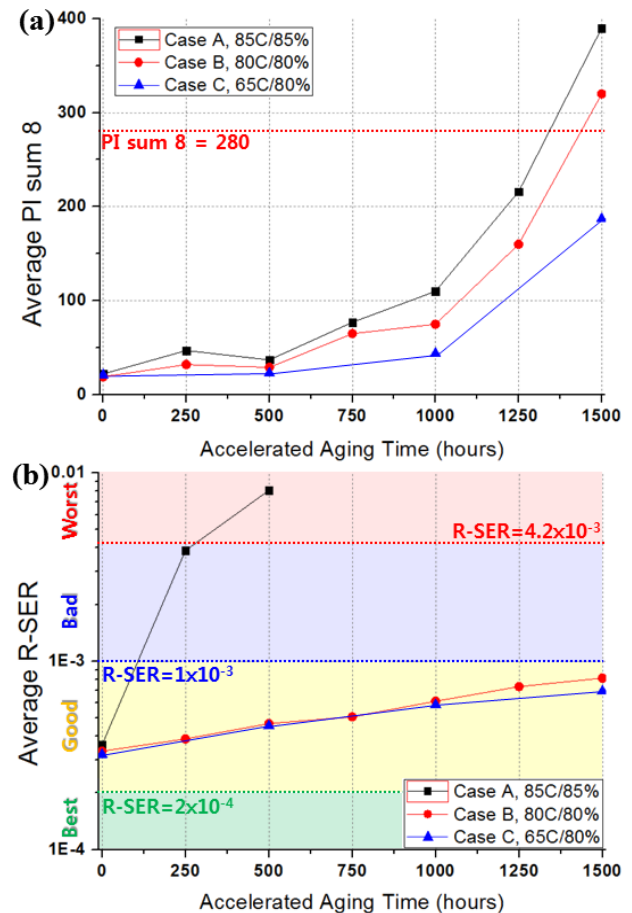


Fig. 3 Average (a) Max PI sum 8 value of DVD-R media and (b) Max R-SER value of BD-R media as a function of accelerated aging test time.

속도에 차이는 있지만 평균 Max PI sum 8 이 증가하는 경향은 매우 유사했다. 이렇게 경향이 유사한 이유는 고온/고습의 가속 열화 조건들의 영향이 정도의 차이는 있지만 동일한 메커니즘으로 DVD-R 미디어를 열화 시키기 때문으로 판단된다. 반면에 BD-R의 경우, Fig. 3(b)에서 확인 할 수 있듯이 DVD-R 과는 다르게 독특한 경향을 보였다. 먼저 85°C/85% 조건에서는 250 시간 후 평균 Max R-SER 값은 이미 R-SER 최대 한계치인 4.2×10^{-3} 에 근접했고, 500 시간 후에는 이 한계치를 크게 넘어선 8.0×10^{-3} 로 측정되었다. 80°C/80% 조건에서는 85°C/85% 조건과는 다르게 가속 열화 실험 시간이 흐름에 따라서 매우 천천히 오류율이 증가하는 양상을 보였으며, 1500 시간이 지난 후에도 평균 Max R-SER 값이 8.1×10^{-4} 로 측정되어 Good 미디어로 판단 되었다. 이보다 온도가 더 낮은 조건인 65°C/80% 에서 역시 동일한 경향을 확인 할 수 있었으며, 1500 시간이 지난 후의 평균 Max R-SER 값은 6.9×10^{-4} 로 측정 되었다. 따라서 우리는 BD-R 미디어의 경우 DVD-R 과 다르게 80°C 이상의 온도에 노출 될 경우 일반적이지 않은 메커니즘으로 치명적인 열화가 진행될 수 있다고 판단했다.

3.3 Data Address에 따른 오류율 변화

평균 Max PI sum 8 과 Max R-SER 을 가속 열화 실험 시간에 따라 측정 함으로서, 각각의 미디어가 얼마나 열화 되었는가를 확인 할 수 있었다. 그러나 Max PI max8 과 Max R-SER 값은 기록된 데이터 영역 중 최대 오류율 이라는 특성 상 대표값은 될 수 있지만 정확히 미디어의 어느 영역이 열화 되었는지는 알 수 없다. 이를 관찰 하기 위하여 DVD-R 과 BD-R의 data address 에 따라서 측정된 PI sum 8 과 R-SER 을 확인해 볼 필요가 있다. 마찬가지로 DVD-R 의 경우부터 살펴보자. 우리는 Fig. 4 를 통해서 data address 에 따른 PI sum 8 값을 초기 기록한 미디어와 각각의 가속 열화 조건에서 1500 시간 노출시킨 미디어를 비교 할 수 있다. 먼저 Fig. 4(a)의 경우, 초기 기록한 미디어의 Max PI sum 8 값은 21이며 0 번 data address 부근에서 측정되었다. 초기 기록한 미디어는 전 영역에서 50 이하의 PI sum 8 값이 측정되어 매우 안정적으로 기록된 것을 알 수 있으나, data address 가 작을수록 오류율이 미량 증가하는 것을 알 수 있다. 85°C/85% 조건에서 1500 시간 노출된 이후의 Max PI sum 8 값은 411로 35000 번 data address 주변에서 측정 되었다. 이 미디어는 또한 외주 영역(160000~)영역 보다는 내주 영역(~60000)과 중주

영역(60000~160000)의 오류율 증가 추이가 두드러지며, 특히 35000 번 data address 주변의 내주 영역에서 크게 열화가 진행 된 것을 관찰 할 수 있다. 외주 영역의 경우 1500 시간 가속 열화를 진행 했음에도 불구하고 PI sum 8 값이 50 부근으로 측정되어 고온, 고습 열화 환경에의 강한 저항성을 가지고 있음을 확인했다. Fig. 4(b)와 (c)에서 확인 할 수 있듯이, 이러한 열화 양상은 80°C/80%, 65°C/80% 조건에서 가속 열화 한 미디어 역시 매우 유사하게 일어났다. 80°C/80% 조건에서 1500 시간 노출 시킨 미디어의 Max PI sum 8 값은 308로 35000 번 data address 주변에서 측정 되었고, 65°C/80% 조건에서 1500 시간 노출 시킨 미디어의 Max PI sum 8 값은 199였고, 마찬가지로 35000 번 data address 에서 측정되었다. 즉, 3 가지의 다른 온도/습도 조건이 정도의 차이는 있지만 실험 미디어의 기록층 열화에 주는 영향이 매우 유사하다는

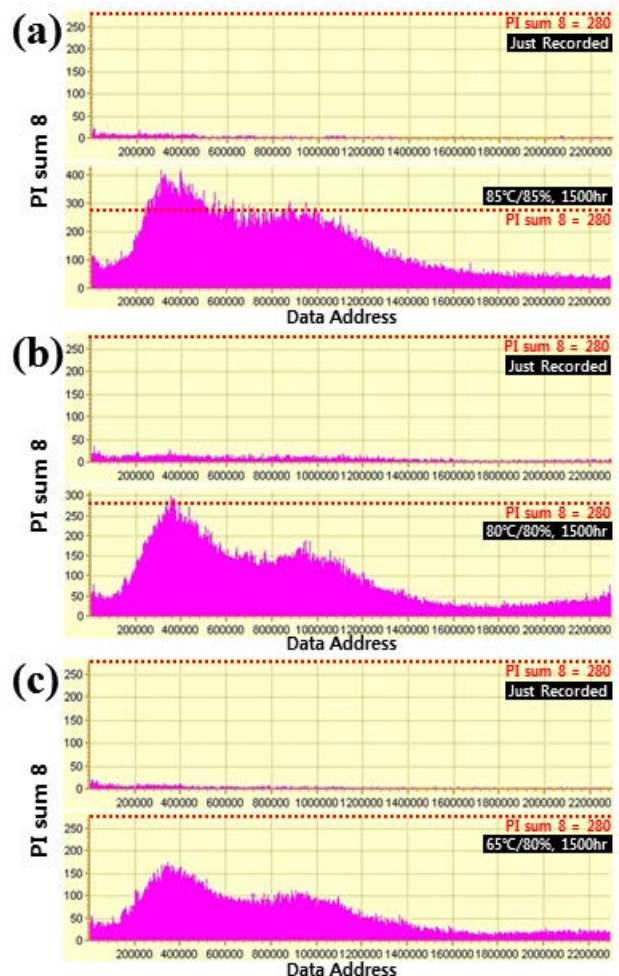


Fig. 4 PI sum 8 value as a function of data address for DVD-R media accelerated aged under (a)85°C/85%, (b)80°C/80%, and (c)65°C/80%.

점을 알 수 있고, 최 내주(0 부근)와 최 외주(2280000 부근)의 오류율 증가가 거의 없는 것으로 보아, 이 미디어는 가속 열화 실험이 진행되는 동안 기판 봉합(sealing)에 따른 문제는 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 5(a-c)는 초기 기록된 BD-R 미디어의 data address에 따라 측정된 R-SER 값이 3 가지 가속 열화 실험에 따라서 어떻게 변화하는 가 보여 준다. 초기 기록된 BD-R 미디어들의 평균 Max R-SER 값은 앞서 서술한 대로 3.4×10^{-4} 이지만, 모든 미디어의 내주 영역(~4000000) R-SER 값은 2.0×10^{-4} 보다 낮았다. 단, 중주 영역(4000000~8000000)과 외주 영역(8000000~)의 R-SER 값은 2.0×10^{-4} 보다 높은 경우가 많았다. 특히 이전 연구에서 논의한 바 있는 국부적으로 높은(Peak) 오류 역시 초기 기록 결과에서 관찰 할 수 있었으며[5], 대부분의 초기 기록 미디어의 Max R-SER 은 이러한 국부 오류에서 측정 되었다. 이미 평균 Max R-SER 분석에서 확인한 바와 같이 85°C/85% 조건에서 500 시간 노출된 미디어의 Max R-SER 값은 8.4×10^{-3} 로 허용 최대 한계인 4.2×10^{-3} 를 크게 넘었으며, 최 외주(11900000 부근)에서 측정 되었다. 80°C/80% 조건에서 1500 시간 노출된 미디어의 Max R-SER 값은 9.7×10^{-4} 로 역시 최 외주에서 측정되었고, 85°C/85% 조건에 노출된 미디어와 다르게 1500 시간 후에도 전 data address 에서의 R-SER 값이 Good 등급으로 확인되었다. 이와 비슷하게 65°C/80% 조건에서 1500 시간 노출된 미디어의 Max R-SER 값은 6.3×10^{-4} 로 국부 오류 영역에서 측정되었다. 이러한 BD-R 의 오류 양상으로 확인 할 수 있는 가장 중요한 점은 85°C/85% 조건에서 외주 영역의 오류율이 비 이상적으로 급격히 증가한다는 점이다. 앞서 확인한 바와 같이, 500 시간 노출 후 외주 R-SER 은 8.4×10^{-3} 로 내주 R-SER 4.0×10^{-4} 의 약 20 배나 된다. 80°C/80% 조건 또는 65°C/80% 조건에 노출된 미디어들의 내주와 외주의 R-SER 차이는 1.4 배~2 배 수준이며, 이와 더불어 80°C 이하 조건들 에서는 전 기록 영역의 R-SER 이 유사한 속도로 증가하는 것을 알 수 있다. 85°C/85% 조건에 노출된 미디어에서 이러한 현상이 발생하는 이유는 BD-R 미디어의 외주 영역에서 보호층 또는 코팅층 재료의 온도 저항성의 한계와 외주 봉합(sealing) 방식의 문제라고 생각된다. 국제 실험 규격에서 알 수 있듯이, 광디스크의 가속 열화 실험 조건은 상온/상습(25°C/50%) 조건에서 미디어 내부의 기록층이 열화 되는 것을 가속화 하는 것이 목적이다. 즉 85°C/85% 조건은 BD-R 미디어

의 비이상적인 외주 오류를 일으키기 때문에 가속 열화 조건으로서는 부적당하다고 판단되며, 이 때문에 BD-R 의 장기보존 특성 평가를 위한 가속 열화 실험 조건은 반드시 80°C 이하로 설계되어야 한다고 생각된다.

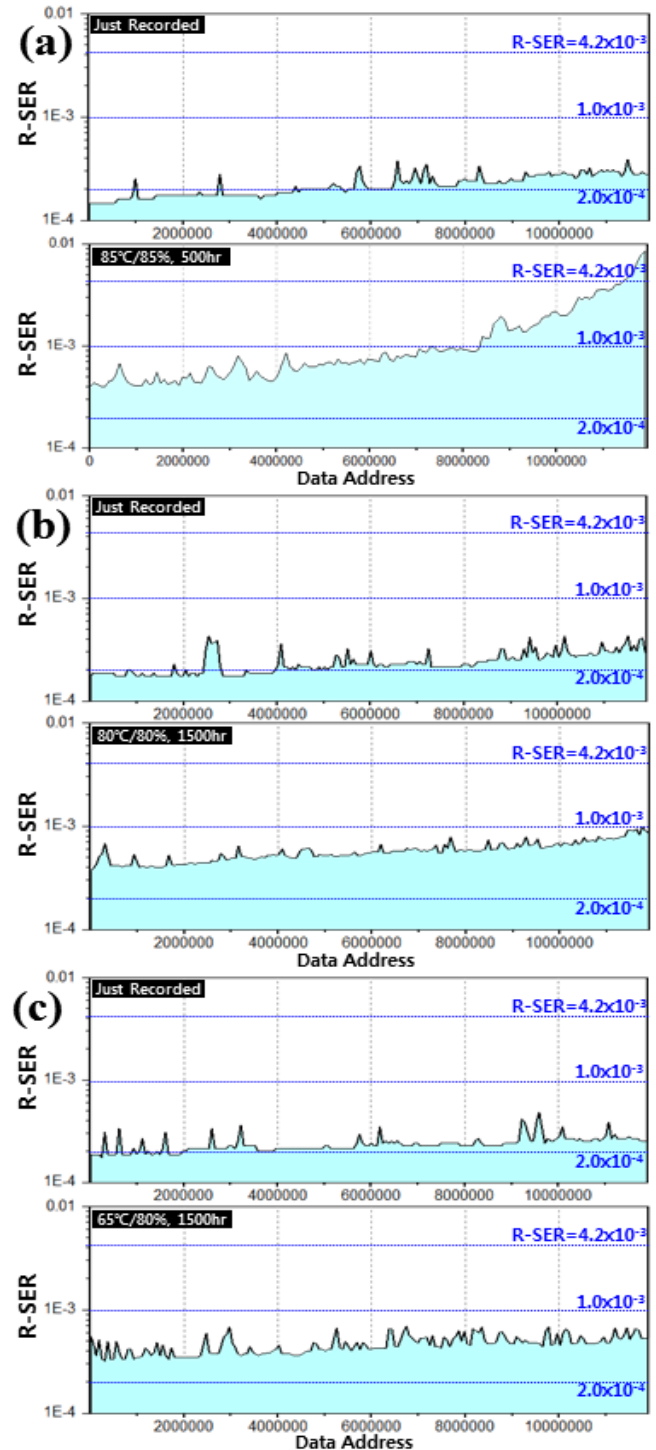


Fig. 5 R-SER value as a function of data address for BD-R media accelerated aged under (a)85°C/85%, (b)80°C/80%, and (c)65°C/80%.

3.4 BD-R 파단(Failure) 기준에 관한 고찰

현재 BD-R의 장기보존 특성 혹은 수명 평가를 위한 가속 열화 실험에서 미디어의 파단 기준이 정확하게 정해 지지 않았다. 때문에 본 연구에서도 BD-R Specification에서 정하는 여러 가지 요구 조건을 기준으로 분석하였다. 극도로 신뢰성 있는 드라이브와 미디어를 장기 보존용으로 사용하기 위하여 가장 가혹한 조건을 파단 기준으로 사용하는 것이 타당한 것은 사실이지만, 터무니 없이 높은 기준은 충분히 재생 가능한 미디어조차도 쉽게 버려 지도록 할 수 있다. 논의에 앞서 Table 1을 참고하여 BD-R specification에서 상황 별로 요구하고 있는 R-SER 기준을 살펴보도록 하자. 먼저 미디어가 BD-R을 충족하기 위해 필요한 요구 조건은 Tester로 측정할 때 R-SER 2.0×10^{-4} 이하이다. 드라이브가 BD-R을 충족하기 위해서는 Test Media를 드라이브로 재생 할 때 R-SER 1.0×10^{-3} 이하이다. 이 두 요구 조건은 열화가 진행된 상태의 최소 조건이 아니라, 최고 상태의 미디어와 드라이브의 기준이다. 다시 말하자면, 최고의 상태로 기록된 Test Media를 드라이브로 재생했을 때의 R-SER 기준이 1.0×10^{-3} 인 것이다. 이렇게 가혹한 조건을 장기 보존 특성 평가의 파단 기준으로 보기는 어려운 것이 사실이다. BD-R specification의 R-SER을 이용한 또 다른 기준으로 충격 테스트와 인위적 지문 테스트를 거친 미디어의 기준이 있으며, 이 때의 요구 조건은 R-SER 4.2×10^{-3} 이하로 위의 두 조건 보다는 평이한 조건으로 설정되어 있다. 이 때문에 4.2×10^{-3} 은 BD-R 재생 특성 평가 항목으로서의 R-SER 최대 한계치로 통용되고 있다. 엄밀한 의미로 가속 열화 실험은 충격 혹은 지문 보다 훨씬 더 가혹한 고온/고습 환경에 노출시키는 재생 특성 평가라고 볼 수 있다. 따라서 현재 우리가 가지고 있는 기준 중에서는 R-SER 4.2×10^{-3} 이 현실적으로 타당한 장기 보존 파단 기준이라 생각된다.

Table 1 R-SER requirements for various situations.

Description	R-SER Requirement	Measuring Equipment
R-SER required for Disc with a Tester	< 2.0×10^{-4}	Tester
R-SER required for Drive with a Test Disc	< 1.0×10^{-3}	Drive
R-SER requirement for Impact Resistance Test	< 4.2×10^{-3}	Drive
R-SER requirement for Artificial Finger Print Test	< 4.2×10^{-3}	Drive

4. 결론

여러 도서관과 기록물 보존소에서 광디스크를 장기 보존을 위한 매체로 주목하는 지금, 최신 포맷인 BD-R 미디어의 장기 보존 특성을 정확하게 평가할 수 있는 가속 열화 실험을 설계하는 것은 매우 중요한 일임이 분명하다. 본 연구에서는 이미 수명 평가를 위한 국제 실험 규격이 있는 DVD-R의 가장 가혹한 실험 조건인 85°C/85%를 참고하고, 추가로 80°C/80%, 65°C/80% 조건을 추가하여 BD-R의 가속 열화를 위한 온도/습도 조건을 찾아 보았다. 그 결과 85°C/85% 조건에서는 BD-R의 외주 영역에서 비이상적으로 오류율이 높아지는 현상을 R-SER 측정을 통해서 관찰했으며, 다른 두 조건에서는 전 기록 영역에서 열화가 정상적으로 진행 되는 것을 확인했다. 따라서 BD-R 미디어의 보호층과 코팅층을 이용하는 구조적인 특성상 기록층의 정상적인 열화를 유도하기 위해서는 반드시 80°C 이하의 온도로 가속 열화 실험을 설계해야 한다고 판단된다. 추가로 현재 정해지지 않은 장기 보존 평가에서의 BD-R 미디어의 파단 기준에 대해서도 논의 하였으며, 그 결과 드라이브에서의 재생 특성 평가 기준 중 가장 가혹한 R-SER 1.0×10^{-3} 보다는 충격 실험 또는 지문 실험에 이미 사용되고 있는 R-SER 4.2×10^{-3} 이 가장 타당한 기준이라 판단된다.

후기

이 연구는 교육과학기술부 핵심연구사업인 ‘고분자 매트릭스 내 무기 나노입자의 분산도 제어를 통한 고성능 나노하이브리드 개발’(과제번호: 2011-0029118) 과 산업통상자원부 산업원천기술개발 사업의 ‘고효율 나노형광체 구조 설계 및 미세 도포 기술’(과제번호: 10035274)의 일환으로 진행되었습니다.

REFERENCES

[1] O.Slattery, R. Lu, J. Zheng, F. Byers. and X. Tang, 2004, "Stability Comparison of Recordable Optical Discs — A Study of Error Rates in Harsh Conditions", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol.109, pp.517-524

[2] Kwan-Yong Lee, Dong-Soo Lim, Ki-Hyun Kim, Won-Ik Cho, and Young-Joo Kim, 2012, "Evaluation of Data Stability and Analysis of Degradation Factors

- of Digital Versatile Disk Recordable for Archival Application", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, No. 8, 08JC01
- [3] M. Irie, Y. Okino, and T. Kubo, 2007, "Investigation on Life Expectancy of High-Speed Recordable Optical Disks", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, pp.3939-3941
- [4] Kwan-Yong Lee, Won-Ik Cho and Young-Joo Kim, 2011, "Long-term storage features of optical disks according to recording conditions", Proceeding of iPRES 2011 - 8th International Conference on Preservation of Digital Objects, pp. 271-273
- [5] Kwan-Yong Lee, Sun-Joo Park, Yi-Hyung Jo and Young-Joo Kim, 2012, "Long-Term Data Stability Evaluation of BD-R according to Recording Speed for Archival Application", Trans. Soc. Inf. Storage Syst., Vol.8, No.2
- [6] ISO/IEC 10995, 2008, "Information technology - Digitally recorded media for information interchange and storage - Test method for the estimation of the archival lifetime of optical media"
- [7] Blu-Ray Disc Specification, 2010, "System Description of Blu-ray Disc – Recordable Format"
- [8] Jae-Yong Lee, Kwan-Yong Lee, Sun-Joo Park and Young-Joo Kim, 2012, 'Data Stability Evaluation of DVD-R Media according to the Recording Speed for Archival Application', International Symposium on Optical Memory, Tu-I-22.
- [9] ISO/IEC 16448, 2002, "Information technology – 120mm Digital Versatile Disc".