

공리적 접근을 이용한 DVD용 초미세 발포 방진재 개발

정필중*, 차성운**

Developing Microcellular Foamed Vibration Isolator for DVD by Axiomatic Approach

Pil Jung Jeong*, Sung Woon Cha**

ABSTRACT

As the rotational speed of optical disk drive is increasing nowadays, the reliability to vibration and shock becomes more important. For this, various of rubber vibration isolators are being developed by varying the shape and hardness. But it is difficult for the hardness of common used rubber to be lowered below Duro 30 degrees, and because of the shape complexity of rubber vibration isolator there are difficulties of analysis. Microcellular foamed vibration isolator has various cell densities and cell sizes, so it can vary the stiffness and damping coefficient. In addition, its hardness can be lowered below Duro 30 degrees. Axiomatic Approach is very useful design method for designing new product or new process. Axiomatic Approach's character is scientific and analytical method. In this paper, developing process of microcellular foamed vibration isolator for DVD is presented with Axiomatic Approach.

Key Words : Axiomatic Approach (공리적 접근), Functional Requirement (기능적 요구), Design Parameter (설계 요소), Coupled Design (연성 설계), Decoupled Design (탈연성 설계), Uncoupled Design(비연성 설계), cell size(기포크기), cell density(기포밀도)

1. 서론

정보산업의 발달과 개인용 컴퓨터의 보급으로 인해 각 개인에게 쏟아지는 정보의 양은 기하급수적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 이를 일시에 기록, 재생 등의 처리를 할 수 있는 대용량 기록매체가 필요하게 되었다. 이러한 측면에서 기록, 저장 형태의 용이성, 데이터 손실의 최소화, 대용량화, 소형화, 경량화, 고밀도화 등이 뛰어난 광디스크가 산업계의 각광을 받고 있다.

이러한 광학식 기록 저장 장치는 컴퓨터의 발달과 더불어 그 회전속도가 지속적으로 증가하고 있으며, 32배속 CD-ROM의 경우 스피들 모터 회전속도가 7200 rpm에 이른다. 따라서, 진동과 충격에 대한 신뢰성이 중요시되고 있으나 기존의 광학식 기록 저장 장치는 이에 매우 약하다는 단점을 가지고 있다. 외란에 의해 광픽업부가 읽어야 할 트랙의 순서를 놓친다거나, 데이터를 읽지 못하는 오동작(skipping)을 할 가능성이 매우 높다. 이러한 오동작은 외부의 진동충격에 의해 발생할 뿐만 아니라,

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계전자공학부

고배속화에 따라 발생하는 내부 진동원에 기인한다. 따라서, 진동제어에 의한 광디스크 드라이브의 동적 안정성 확보는 신뢰성 있는 광디스크 드라이브의 개발에 필수적이다.

최근에는 디스크의 편심에 따른 내부 진동원을 감소시키기 위하여 방진고무와 별도로 자동 볼 평형장치(automatic ball balancer)를 채택하고 있는 추세이다. 그러나, 자동 볼 평형장치는 작동에 있어 신뢰성 있는 결과를 얻어내기가 상당히 어려우며, 특히 노트북과 같이 내부의 공간적 제약을 받는 컴퓨터의 경우 이 장치를 채용하기는 어렵다.

광디스크 드라이브의 데크 메커니즘은 드라이브 프레임, 픽업 베이스, 방진고무 등으로 구성되어 있으며, 이 중에서 방진고무는 데크 메커니즘의 진동특성에 영향을 끼치는 중요한 부품으로 기록 매체인 광디스크와 스핀들 모터, 광 픽업부 등을 지지하고 있는 픽업 베이스를 드라이브 프레임에 연결 및 고정시키는 동시에 진동절연을 하는 역할을 한다.

현재 광디스크 드라이브의 동특성 향상을 위해 다양한 고무 방진재가 개발되고 있으며, 이는 고무 방진재의 형상과 경도 변경을 통해 시도되고 있다. 그러나, 상용화된 고무의 경우 그 경도를 Duro 30 이하로 낮추기 어려우며, 고무 방진재의 형상이 복잡해 해석의 어려움이 있는 등 한계를 나타내고 있다.

1980년대 초, 미국의 MIT에서는 초미세 발포 기술을 개발하였으며, 기포의 직경이 10 μ m 이하이기 때문에 초미세라고 명명되었다. 초미세 발포공법은 가스를 포화시킨 뒤 열역학적 불안정 상태를 야기해 제품 전체에 기포가 발포되도록 하여 소재의 기계적 특성을 변화시킨다. 또한 환경에 무해한 이산화탄소 및 질소를 사용하기 때문에 환경 친화적이라고 할 수 있으며, 고분자 물질의 재료를 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문의 목적은 이러한 초미세 발포 방진재를 개발하는 과정을 공리적 접근을 통해 설계하는 것이다. 공리적 접근을 통해 요구되는 기능을 달성할 수 있는 설계요소의 선정과 물리적 구현 가능성 여부를 고찰하는데 있다.

2. 이론

2.1 공리적 설계

2.1.1 설계의 공리

공리적 설계는 '좋은'설계를 선택하기 위하여 쓰는 도구라고 정의된다. Suh(1990)에 의하면, 두가지 설계의 공리는 새로운 설계의 창조에 도움이 되는 도구라고 한다. 첫 번째 공리는 기능적 요구의 선택에 대하여 서술한다. 두 번째 공리는 어느 설계가 더 좋은지 질적으로 판단할 수 있는 방법을 제시해 준다. 설계의 공리는 다음과 같이 정의되어진다.

공리 1 : 독립의 공리

기능적 요구의 독립성 유지

공리 2 : 정보의 공리

정보량의 최소화

이 논문에서 설계과정의 과정을 평가하는 수단은 독립의 공리이다. 기능적 요구와 설계 요소사이의 관계를 가장 명확하게 나타내는 방법은 설계행렬을 이용한 독립적 공리의 만족 여부를 확인하는 것이다.

공리적 설계에서는 기능적 요구들(FRs)들을 만족시키는 설계와 이러한 기능적 요구를 만족시키는 설계 요소들(DPs)의 적절한 선택이 좋은 설계의 요건이라고 할 수 있다. 공리적 설계에서 설계과정은 여러 영역사이에서 각 영역을 관계 지워주는 - 매핑(mapping)이라고 정의되어지는 과정 - 작업이라고 정의된다. 설계자의 관점에 의존하여, 설계과정은 다음과 같은 4가지의 영역으로 나누어진다. 소비자 영역, 기능적 영역, 물리적 영역, 과정적 영역이 그것이다.

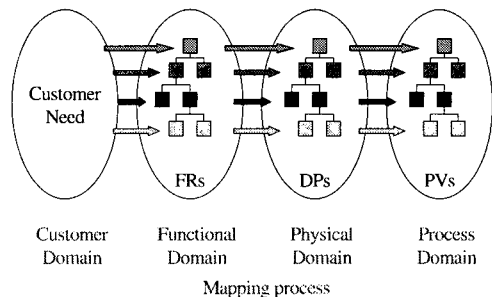


Fig. 1 Domain and mapping

2.1.2 설계 행렬

기능적 요구와 설계요소간의 관계는 설계행렬 [A]를 이용하는 상징적인 방법으로 나타낼 수 있다. 비슷한 방법으로 설계 행렬들을 이용하여 서로 다른 영역사이의 관계를 상징적으로 표시할 수 있다.

$$\{FRs\} = [A]\{DPs\}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

각 행렬성분 Aij는 DPj와 FRi사이의 관계를 나타낸다. 설계행렬은 관계가 깊은 요소끼리는 X로 표시하고 관계가 없거나 약한 요소는 O로 표시한다. 이러한 설계방정식은 기능적 독립성을 확인하는 간단한 방법이다.

독립적 공리가 만족된다면 설계 행렬은 대각행렬이나 삼각행렬 형태로 나타나게 된다. 대각행렬은 완벽하게 연성되지 않은 설계를 나타내고, 삼각행렬은 탈연성화 설계를 나타낸다. 이러한 설계도 적합한 설계이지만 설계요소들은 기능적 요구를 만족시키기 위하여 반드시 특별한 순서로 재배치되어야 한다. 일반적인 설계행렬에서 나타나는 결과는 대부분이 삼각행렬이다. 세 번째 설계형태는 연성된 설계이다. 이러한 형태의 설계는 독립의 공리를 위배하게 되므로 적합하지 않은 설계이다.

2.2 초미세 발포 공법

초미세 발포공법은 고분자 재료에 이산화탄소를 포화시킨 뒤 압력 및 온도를 조절하여 열역학적 불안정 상태를 유발하여 발포시키는 공법으로 1982년 MIT의 Suh와 Martini에 의해 개발되었다.

초미세 발포의 첫 단계는 이산화탄소, 질소와 같은 불활성 기체를 고분자 재료 내부로 용해시키는 것이다. 고압으로 유지되는 기체 환경에 고분자 재료가 놓이게 되면 고분자 내부와 외부 사이의 기체 농도 차이에 의해 가스가 고분자 내부로 용해되어 들어간다. 다음 단계는 수십억 개의 초미세 기포들의 급속한 핵생성이다. 핵생성은 열역학적 불안정에 의해 생겨난다. 열역학적 불안정은 가스의

용해도를 급격히 낮춤으로써 가능하다. 일반적으로 가스의 용해도는 온도가 높아지면 낮아지고 압력이 높아지면 증가한다. 따라서, 초미세 발포공법에서 수십억 개의 초미세 기포들을 만들기 위해서는 압력을 낮추고 온도를 높여주어서 용해도를 급격히 낮추어야 한다. 이 용해도 변화에 의해서 생긴 열역학적 불안정 상태를 열역학적 안정 상태로 바꾸기 위하여 고분자 재료 내부에서 발포가 일어나게 된다. 초미세 발포의 마지막 단계는 기포 성장단계이다. 핵생성된 기포를 성장시키기 위해서 고분자/가스 용액은 낮아진 유리전이온도 이상의 온도로 가열된다. 열에 의해 고분자 재료의 저항력이 작아지고 가스가 기포 속으로 확산이 쉽게 되어 기포가 성장하게 된다.

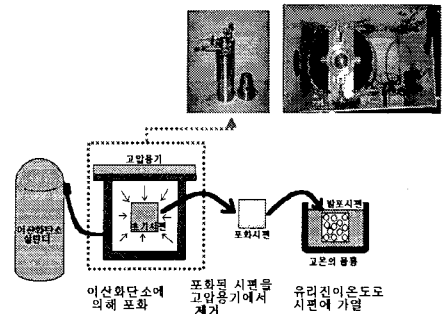


Fig. 2 Diagram of Batch Process

초미세 발포공법에는 일괄 처리 공법(Batch Processing)이 있으며 작업 변수의 정확한 제어, 실험 결과의 반복성, 실험의 간단함 때문에 초미세 발포의 기초연구에 널리 이용되고 있다. 일괄 처리 공법에 대한 다이어그램을 Fig. 2에 나타내었다.

3. DVD용 초미세 발포 방진재 개발을 위한 공리적 접근

3.1 초미세 발포 방진재

본 논문에서 제안하는 초미세 발포 방진재는 미국 Dow Chemical사에서 INSITE™ 공법을 이용해 개발한 엘라스토머인 Engage를 그 재료로 사용하고 있다. 재료의 물성치는 Table 1. 에 나타내었다. 재료의 듀로 경도는 72로서 통상 방진재로 사

용되는 고무의 경도보다 약간 높으나 발포과정을 통해 그 경도값이 고무보다 훨씬 다양하게 변할 수 있다. 즉, 생성된 기포의 크기와 개수를 조절함으로써 경도값과 댐핑계수를 변화시켜 다양한 동특성을 갖는 방진재를 만들 수 있다. 또한 재료의 유동성이 뛰어나 사출성형에 유리하다는 장점을 가지고 있다.

Table 1 Properties of Engage 8400

property	unit	value
Density	g/cm ³	0.870
Melt Flow Index	g/min	30
Hardness	degree	72
Tensile Yield	MPa	1.3
Tensile Elongation	%	> 1,000
Vicat Softening Point	℃	41

3.2 공리적 설계의 적용

이러한 초미세 발포 방진재의 개발에 있어 요구되는 각 기능적 요구들(FRs)과 설계요소들(DPs)을 선정하여 프로세스 설계를 공리적 접근을 이용하여 하도록 한다.

최상위 기능적 요구조건과 그에 따른 설계요소를 다음과 같이 선정하였다.

FR1 : 우수한 동특성

FR2 : 좋은 초미세 발포 사출 성형성

DP1 : 기포의 형상(Cell morphology)

DP2 : 초미세 발포 사출 시스템

초미세 발포 방진재는 진동에 강인하기 위하여 우수한 동특성을 가져야 하며 이는 기포의 형상을 조절함으로써 얻을 수 있다. 또한 초미세 발포 사출을 안정적으로 이루어 내야 하며 이는 사출 시스템의 개조 및 조절을 통해 달성할 수 있다. 이들 기능적 요구와 설계요소 사이의 관계를 설계행렬로 분석해 보면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix}$$

이것은 비연성 설계(uncoupled design)이며 하나의 FR이 다른 FR에는 영향을 끼치지 않는다는 것을 의미하며, 따라서 하위 단계의 기능적 요구와 설계요소들로 설계를 진행시킬 수 있다는 것을 말한다.

FR1 에 대한 하위 단계의 기능적 요구와 그에 따른 설계요소는 다음과 같다.

FR11 : 다양한 경도값

FR12 : 다양한 댐핑계수

FR13 : 방진재 형상의 간단

DP11 : 기포의 크기(Cell size)

DP12 : 기포의 밀도(Cell density)

DP13 : FEM을 이용한 형상 해석

초미세 발포 방진재가 우수한 동특성을 갖기 위해서는 발포 재료가 다양한 경도값을 가질 수 있어야 한다. 현재 방진재로 사용되고 있는 고무의 경우 듀로 경도가 30~60 정도이며 특히 30 이하로 낮추는 것이 불가능하여 다양한 동특성을 갖기가 어렵다. 발포 재료의 경도에 영향을 끼치는 주된 인자는 성형된 기포의 크기이다. 또한 초미세 발포 방진재는 다양한 댐핑계수를 가져야 하며 이는 내부 기포의 개수를 조절함으로써 가능하다. 방진재의 형상은 현재 FEM을 이용하여 설계하고 있으며 형상의 단순화를 시도하고 있다. 이들 기능적 요구와 설계요소 사이의 관계를 설계행렬로 분석해 보면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \end{Bmatrix}$$

이것은 탈연성 설계(decoupled design)이며 기능적 요구를 만족시키는 적절한 순서를 통해 요구를 만족시킬 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 실제로 구현할 수 있는 설계라는 것이다.

FR2 에 대한 하위 단계의 기능적 요구와 그에 따른 설계요소는 다음과 같다.

- FR21 : 사출기로의 가스 주입 가능
- FR22 : 높은 핵생성율
- FR23 : 많은 기포 성장

- DP21 : 가스 공급 장치 설치
- DP22 : 핵생성 장치 설계
- DP23 : 금형 형상

엘라스토머 재료를 초미세 발포 사출하기 위해서는 초미세 발포 사출 시스템이 요구되며 그 구조는 Fig. 3 과 같다.

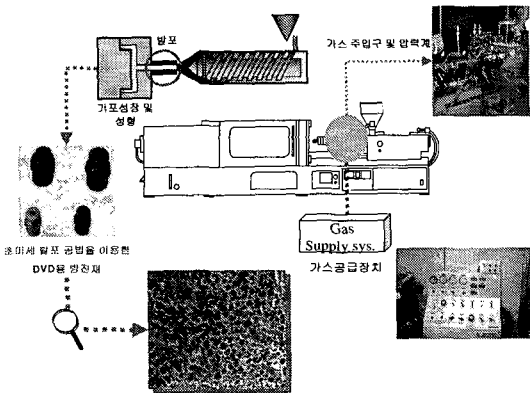


Fig. 3 Structure of Microcellular Foaming Injection System

초미세 발포 사출 시스템에는 가스를 주입할 수 있는 가스 공급장치가 있으며 핵생성을 위한 핵생성장치, 기포성장을 위한 적절한 금형 시스템이 있다. 이들 기능적 요구와 설계요소 사이의 관계를 설계행렬로 분석해 보면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \end{Bmatrix}$$

이것은 비연성 설계(uncoupled design)이며 각 기능적 요구를 대응되는 설계요소 변화를 통해서 다른 기능적 요구에 영향을 끼치지 않고 만족시킬 수 있다. 따라서 하위 단계의 기능적 요구와 설계요소들로 설계를 진행시킬 수 있다.

FR21 에 대해 하위 단계로 설계를 진행시키고

그에 대한 기능적 요구와 설계요소를 살펴보면 다음과 같다.

- FR21 : 사출기로의 가스 주입 가능
- FR211 : 가스 주입의 안정화
- FR212 : 고분자와 가스와의 좋은 혼용

- DP21 : 가스 공급 장치 설치
- DP211 : 배럴내 가스 주입 위치
- DP212 : 스크류 설계

가스 주입시의 안정화는 배럴내 가스 주입 위치를 좀 더 호퍼부로부터 멀리 이동시킴으로써, 고분자와 가스의 혼용을 스크류에 혼용 설계를 함으로써 가능하다. 이에 대해 설계행렬을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{211} \\ FR_{212} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{211} \\ DP_{212} \end{Bmatrix}$$

FR22 에 대해 하위 단계로 설계를 진행시키고 그에 대한 기능적 요구와 설계요소를 살펴보면 다음과 같다.

- FR22 : 높은 핵생성율
- FR221 : 높은 압력강하
- FR222 : 높은 압력강하율

- DP22 : 핵생성 장치 설계
- DP221 : 핵생성 노즐의 형상
- DP222 : 빠른 사출 속도

초미세 발포를 얻기 위해서는 높은 핵생성율이 필요하며 이에 높은 압력강하와 높은 압력강하율이 요구된다. 이에 대한 설계행렬을 분석해 보면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{221} \\ FR_{222} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{221} \\ DP_{222} \end{Bmatrix}$$

이것은 탈연성 설계(decoupled design)이며 구현할 수 있는 설계임을 의미한다.

4. 초미세 발포 방진재의 성형

앞서 공리적 접근을 통해 살펴본 설계를 기반으로 하여 Fig. 3 과 같은 초미세 발포 사출 시스템을 구현하였다. 시스템은 기본 사출성형기에 가스를 공급하기 위한 가스 공급장치, 핵생성을 위한 핵생성 장치등을 포함하고 있다. 이 시스템을 이용하여 미국 Dow Chemical 사에서 INSITE™ 이라는 공법을 이용해 개발한 엘라스토머 계열의 폴리올레핀 (Engage 8400)을 재료로 방진재를 성형하였다. 방진재의 기포 형상을 볼 수 있는 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

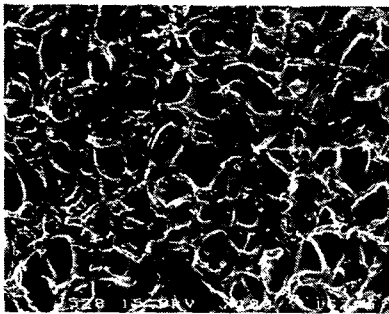


Fig. 4 SEM of Microcellular Foamed Vibration Isolator

5. 결 론

본 논문에서는 공리적 접근을 이용하여 DVD용 초미세 발포 방진재를 개발하기 위한 사출 시스템의 설계과정을 평가하여 보았고, 실제 방진재를 성형하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 공리적 설계는 기존의 없던 새로운 개념의 제품이나 프로세스를 개발함에 있어 요구되는 기능 및 그 기능을 만족시킬 수 있는 설계요소들을 설계자가 체계적으로 선정할 수 있게 해 주었다. 따라서, 설계자는 기존의 직관적 설계에서 벗어나 소비자가 요구하는 제품을 시간의 낭비없이 설계할 수 있다.

② 공리적 접근을 통해 제안된 초미세 발포 방진재 개발 프로세스는 실제 물리적으로 구현할 수 있으며 요구되는 기능을 연성됨 없이 만족시킬 수

있음을 설계행렬을 통해 살펴보았다.

③ 본 논문에서는 초미세 발포 방진재 개발을 독립의 공리, 즉 설계행렬을 통해서 평가하였다. 실제 제품의 생산과정에서는 가능한 여러 가지 공정이 있을 수 있으며 이러한 공정들 중 가장 최선의 공정을 찾아내는 방법은 정보의 공리를 이용하는 것이다. 정보의 공리의 적용은 본 논문에서 다루지 않았다.

④ 초미세 발포 방진재는 발포배율에 따라 각각 다른 기포 크기와 밀도를 갖으며, 초미세 발포된 방진재는 내부의 기포에 의해 듀로 경도 72인 원재료에서 경도값이 감소하고 댄핑계수는 증가한다. 이에 대한 모델링에 좀 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

후기

본 논문은 한국과학재단 산업화 과제 (1999-0851) 의 일환으로 연구되었습니다.

참고문헌

1. S.W.Cha, "A Microcellular Foaming/Forming Process Performed at Ambient Temperature and a Supermicrocellular Foaming Process," Ph.D Thesis, MIT, pp. 12-15, 1994.
2. Nam P. Suh, "The Principles of Design," The Oxford University Press, pp. 25-154, 1990.
3. 오세웅, 차성운, "초미세 발포공법을 이용한 방진재의 개발," 정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, Vol. 2, pp. 612-616, 1999.
4. 김남용, 김국원, 홍구, 정문채, 김외열, "슬림형 광 디스크 드라이브의 방진 설계," 한국소음진동 공학회지, 제9권, 제2호, pp. 324-330, 1999.
5. 윤재동, "가스의 용해량에 따른 고분자의 유리전이온도 및 점도," 석사논문, 연세대, pp. 7-15, 1999.
6. 문용락, "공리적 접근을 이용한 설계평가 도구의 개발," 석사논문, 연세대, pp. 15-23, 1999.
7. 정필중, "DVD용 초미세 발포 방진재 개발," 한국 과학재단 산업화과제 보고서, pp. 19-59, 1999.