

웹기반 재료 데이터베이스 구축 및 자동차 엔진폴리용 재료선정 예

천 두 만¹⁾ · 안 성 훈^{*1)} · 장 재 덕²⁾

서울대학교 기계항공학부¹⁾ · 한국파워트레인²⁾

Construction of Web-based Material Database and Case Study of Material Selection for Automotive Engine Pulley

Doo-Man Chun¹⁾ · Sung-Hoon Ahn^{*1)} · Jae-Duk Jang²⁾

¹⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Korea Powertrain Co., Ltd., 597-10 Daechun-dong, Dalseo-gu, Daegu 704-801, Korea

(Received 12 December 2005 / Accepted 1 February 2006)

Abstract : Material selection is one of the important activities in design and manufacturing. A selected material at the conceptual design stage affects functionality of the designed part as well as manufacturability and cost of the final product. Unfortunately there are not many accessible material databases that can be used for design. In this research, a web-based material database was constructed. In order to assist designers to compare different materials, two-dimensional and three-dimensional graphs were provided via the web browser. Using these graphical tools, multi-dimensional comparison was available in more intuitive manner. As a case study, this system was applied for material selection of an automotive engine pulley.

Key words : Material selection(재료선정), Performance index(성능지수), Material property chart(재료물성도), Engine pulley(엔진폴리), Web-based(웹기반), Material database(재료데이터베이스)

Nomenclature

- ρ : density, kg/m³
- σ : engineering stress, N/m²
- ϵ : engineering strain
- σ_y : yield strength, N/m²
- E : young's modulus, N/m²
- V : volume, m³
- U : stored strain energy, J
- M : performance index
- P : load, N

1. 서론

설계과정에서 개념 설계 단계에서부터 검토되는 재료 선정은 상세설계, 제품제작, 제품 사용단계에 이르기까지 많이 영향을 주는 중요한 작업이다. 오늘날 재료분야의 발전으로 약 100,000여개에 달하는 사용 가능한 재료들이 있으며 설계자들은 아주 많은 재료들 중에서 사용할 제품의 사용조건에 맞는 재료들을 선택하는 과정을 개념설계 단계에서 제품개발 시간을 단축시키고 품질을 향상시키기 위해서는 요구되는 재료의 물성을 잘 이해하는 것이 중요하며 이러한 작업을 지원하기 위해 많은 문헌, 논문들, 그리고 소프트웨어들이 만들어 지고 있다. 재료를 선정하는 방법에 대한 연구는 기존의 문서화된 재료자료

*Corresponding author. E-mail: ahnsh@snu.ac.kr

집을 이용하는 방법에서부터 지속적으로 발전하여 데이터베이스와 전문가 시스템을 이용한 다양한 자료 선정 소프트웨어들이 개발되고 있다.^{1,2)}

하지만 새로운 기법들이 적용된 자료 선택용 소프트웨어들 중 많은 부분이 비공개되어 있거나 상용화되어 있어 학교나 산업 현장에서 쉽게 접할 수 없는 것이 현실이다. 몇몇 소프트웨어는 높은 접근성을 제공하는 웹기반으로 개발되었지만³⁻⁷⁾ 상용화되지 않은 사이트의 경우에는 단순한 자료 물성치를 제공하거나 단순한 조건 검색기능만 제공하는 경우가 대부분이다.

따라서 본 연구에서는 누구나 접근이 가능하고 자료 선정에 도움을 줄 수 있는 웹기반 자료 데이터베이스를 개발하였다.

자료 선정을 위해 소프트웨어로 다룰 수 있는 데이터 들은 밀도, 인장강도, 열팽창 계수와 같은 숫자들로 이루어진 항목들과 예/아니오로 구분될 수 있는 불연산(Boolean)값들 그리고 자료간의 비교를 통해 알 수 있는 순위들이 있다. 여기에 전문가들의 지식을 데이터베이스화한 디자인 가이드나 케이스 스터디 등도 추가될 수 있다.⁸⁾ 또한 환경이 중요한 문제가 되면서 환경을 고려한 자료선정방법도 연구되었다.⁹⁾ 하지만 데이터베이스의 구현범위나 해당분야의 지식의 방대함으로 고려할 때 본 연구에서는 구현가능한 범위를 고려하여 기본적인 물성치를 가지고 자료 선정을 할 수 있도록 데이터베이스를 구축하였다.

기본적인 물성치를 가지고 빠르고 합리적으로 자료 선정을 할 수 있는 방법인 Ashby가 제안한 기법을 기반으로 구현하였다. 이 기법은 사용하고자 하는 제품의 성능지수(Performance Index)를 도출하여 재료물성도(Material Property Charts)를 그려 간단하고 직관적으로 재료를 비교할 수 있는 방법이다.¹⁰⁾

구현된 웹기반 자료 데이터베이스는 임의의 물성에 대한 Ashby의 2차원 재료물성도 뿐만 아니라 3차원의 재료물성도를 웹상에서 제공하여 다양한 재료의 세가지 물성을 쉽게 비교 할 수 있다. 따라서 제품 개념 설계단계(Conceptual Design Stage)에서 빠르고 간편하게 합리적인 재료 후보들을 선정할 수 있게 되었다.

2. Web-based Material Database 구현

웹개발 기술을 사용하여 자료정보를 조회하도록 웹기반 자료 데이터베이스를 구축하였다. 따라서 구현에 필요한 기술들과 시스템 구성, 데이터베이스 구성을 정리하였고 실제 구성된 사용자 인터페이스와 사용예시를 수록하였다.

2.1 시스템 구성

웹사이트 및 자료 DB를 구성할 때 사용한 기반기술들을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 List of tools used for implementation

Tool name	Usage
ASP.NET	Web page program
MS*SQL	Database
GDI+ Library	2D graphic library
X3D	3D graph file format
Octage or Venus	X3D player

기본적으로 웹 페이지는 서버측 프로그램이 용이하고 Database, XML지원이 뛰어난 ASP.NET으로 구성하였다. Database management system (DBMS)은 MS*SQL을 사용하였다. 2D, 3D 그래프를 그리기 위해서 2D는 MS사의 GDI+ Library를 이용하여 그림 파일을 생성하도록 구성하였다.¹¹⁾ 또한 3D Graph는 X3D를 사용하였다. X3D는 VRML의 기능을 확장한 차세대의 확장 가능한 3D 그래픽 규약으로 VRML이 가졌던 단점들을 보완하고 있다. X3D는 VRML과는 달리 표준 형식인 XML 문법을 가지고 있어 호환성이 높으며, 코드의 모듈화를 통하여 확장 가능하도록 정의되었다. 따라서 X3D가 사용되는 환경에 따라 필요한 기능들을 정의하여 효율적으로 사용할 수 있고, 새로 추가되는 기능 등을 자유로이 확장하여 사용할 수 있다.¹²⁾ 그러나 X3D는 3D 그래픽 규약이므로 이것을 보여줄 수 있는 Player가 사용자 측에 필요하다. 따라서 본 사이트는 2개의 Player를 링크시켜 놓았다.^{13,14)} Fig. 1은 사용기술과 구조를 보여주는 시스템 구성도이다.

2.2 데이터베이스 구성

제품 설계를 위해서 사용되는 재료물성은 그 용

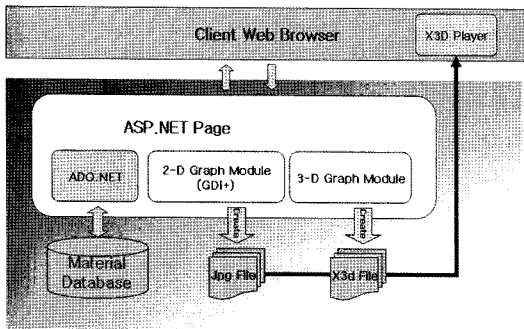


Fig. 1 System configuration

도에 따라 다양하다. 따라서 한번에 모든 물성을 고려하여 테이블을 작성하기 어려우며 재료에 따라 특정 물성이 필요 없을 수도 있다. 따라서 데이터베이스 테이블 구성시 재료이름 및 구분과 재료물성 항목을 위한 테이블을 따로 두어 필요시 추가 가능하도록 하였다.

물성을 비교할 때 모든 재료의 물성치를 한꺼번에 사용하면 재료선정을 위한 그래프가 너무 복잡하게 된다. 따라서 재료별 구분이 필요하게 되는데 Ashby가 구분한 방법을 이용하였다. Fig. 2와 같은 구분으로 Family, Class를 나누어 물성비교 그래프를 표시할 때 각 Family별, Class별로 구분하였다. 또한 각 그룹별 물성은 세부 재료의 물성치 전체의 최대, 최소값을 사용하였다.

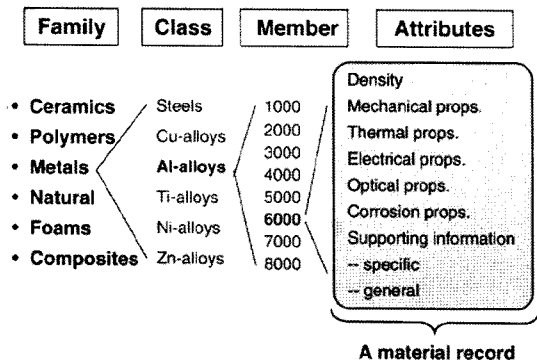


Fig. 2 Material classification⁹⁾

2.3 웹화면 구성

전체 웹화면 구성은 입력화면, 물성검색화면, 물성비교화면으로 구성되어 있다. 입력부분은 사용자

의 확장성을 위해 재료이름 및 구분 입력, 물성이름 및 단위입력, 해당재료의 물성입력을 할 수 있게 하였다. 물성검색 화면에서는 사용단어, 물성범위 등의 조건으로 만족하는 재료를 찾아 그 재료 물성전체를 제공한다. 그리고 물성비교부분에서는 2가지 또는 3가지 물성을 가지고 Group별 물성을 비교할 수 있게 구성하였다.

구현된 웹기반 재료 데이터베이스는 Keyword Search와 특정 물성값의 최대, 최소 검색을 가능하도록 Fig. 3처럼 구현되었다.

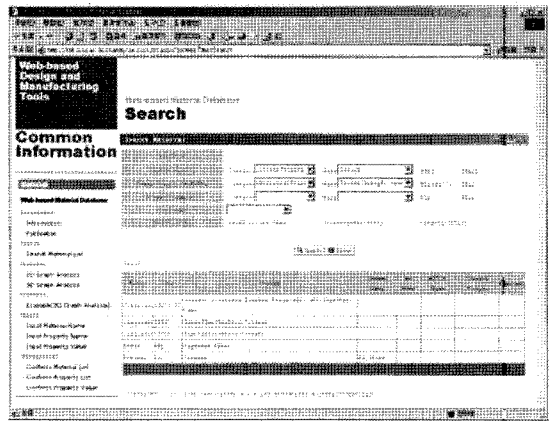


Fig. 3 Web interface for material search

물성비교화면에서는 Ashby의 2D 재료물성도도 뿐만 아니라 3D의 재료물성도가 추가되어 3가지 재료 물성으로 이루어진 성능지수를 적용할 수 있게 구성하였다. 그리고 비교하는 재료물성이 사용자가 임의로 선택할 수 있게 구성하여 다양한 비교가 가능하도록 하였다.

2.4 물성비교화면 사용례

물성비교화면에서는 사용자가 재료 선정시 중요하게 고려되어야 할 성능지수의 2~3가지 물성을 선택한 후 그래프생성을 요청하면 동적으로 선택된 물성이 기본 축이 되고 재료는 각 그룹별로 물성의 범위가 타원이나 공 모양으로 표시되는 2D 또는 3D 그래프를 보여준다. 좌표 스케일은 Log-Log로 되어 있는데 이는 재료별로 차이가 아주 많은 값들을 한꺼번에 표시하고 재료 선정시 사용되는 유용한 식을 그래프 내에 간단히 표시하기 위함이다.

구축된 웹사이트에서 제공하는 재료물성비교 그래프를 사용하는 방법을 소개하기 위해 스프링 재료 선정에 적용한 예를 아래에 보였다.¹³⁾

스프링은 탄성에너지를 저장하는 장치로, 저장 에너지는 스트레인에너지 식으로부터 구할 수 있다. 단순한 Axial Spring을 고려한다고 하면 식 (1)과 같이 된다.

$$U = \frac{1}{2} \sigma \epsilon V \tag{1}$$

여기서 식 (2)의 스트레스와 스트레인과 관계식을 이용하고 탄성영역($\sigma \leq \sigma_y$)의 조건을 만족시켜야 한다. 식 (1)을 정리하면 단위부피당 가질 수 있는 가장 큰 스트레인 에너지는 식 (3)과 같이 된다.

$$\sigma = E\epsilon \tag{2}$$

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_y^2}{E} \tag{3}$$

유사한 과정으로 Torsion Bar, Leaf Spring에 대해서 유도해 보면 각각 식 (4),(5)와 같이 유도되고 이를 일반화시키면 식 (6)과 같다.

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_y^2}{E} \tag{4}$$

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{4} \frac{\sigma_y^2}{E} \tag{5}$$

$$M_1 = \frac{\sigma_y^2}{E} \tag{6}$$

여기서 M_1 은 형상에 무관한 일반화된 성능지수가 된다. 일반화된 식 (6)에서 양변에 로그를 취하면 식 (7)과 같은 식이 도출된다.

$$\text{Log}(M_1) = 2\text{Log}(\sigma_y) - \text{Log}(E) \tag{7}$$

식 (7)에서 오른쪽 상수항에 임의의 값을 대입하여 Log-Log스케일의 이차원 그래프에서 그리면 Fig. 5와 같은 형태의 직선으로 표시된다. 이 직선을 기준으로 평행하게 위로 갈수록 저장되는 스트레인 에너지가 크고 아래로 갈수록 작게 된다. 이 그래프를 이용하여 재료를 선택하면 직선의 위쪽에 있는 Elastomers, 몇몇 금속류, Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP) 등이 가장 적합한 재료가 된다.

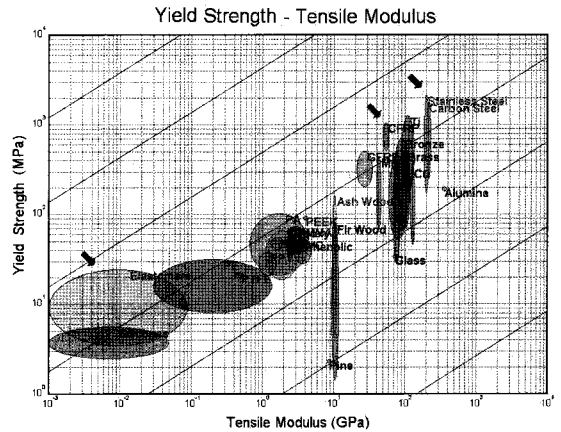


Fig. 4 Two-dimensional graph for material selection

여기서 단위부피당이 아닌 단위질량당 최대 스트레인 에너지로 조건을 바꾸면 식 (6)에서 밀도가 추가되어 세가지 물성의 성능지수 식 (8)이 도출된다.

$$M_2 = \frac{\sigma_y^2}{\rho E} \tag{8}$$

$$\text{Log}(M_2) = 2\text{Log}(\sigma_y) - \text{Log}(E) - \text{Log}(\rho) \tag{9}$$

식 (9)를 토대로 Log-Log Scale의 3D 그래프를 그리면 Fig. 5와 같이 표시된다. 재료의 물성범위가 계란형으로 보이고 유도된 식은 평면으로 표시된다. 여기서 X, Y, Z축은 각각 Young's Modulus, Yield Strength, Density이다.

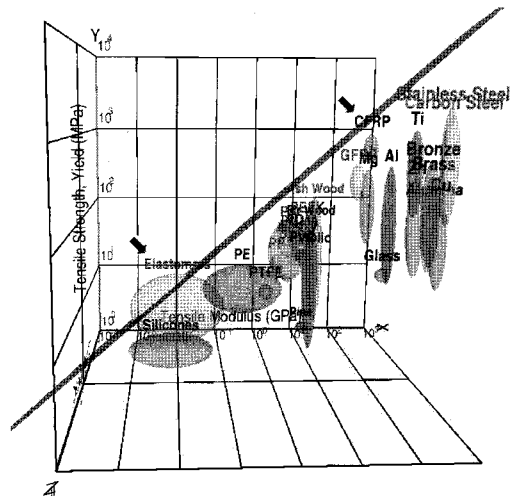


Fig. 5 Three-dimensional graph for material selection

결과를 살펴보면 2D 그래프에서와 다르게 여기에서는 밀도가 높은 금속류들은 적합하지 못하고 상대적으로 밀도가 낮은 Elastomer, CFRP가 더 좋은 스프링 재료가 됨을 알 수 있다.

3. 자동차 부품 선정 사례

3.1 재료 선정 사례 - 자동차 엔진 풀리

최근 자동차의 경량화를 통한 연비향상을 만족시키기 위해 다양한 부품에 대한 경량화가 진행 중이다. 기존에 스틸로 되어 있는 부품을 알루미늄 합금, 플라스틱 및 복합재로 재료를 바꾸고 있다. 자동차 엔진용 풀리의 경우도 대부분은 스틸로 제작되며, 경량화를 위해 스틸을 대체할 재료를 선정할 필요가 있다.

자동차 엔진용 풀리는 사용조건이 다른 부품에 비해 가혹하다. 엔진룸 온도가 100oC를 넘어가기도 하고 동하중이 많이 작용하고 특히 물, 연료, 엔진 오일 등에도 노출되는 경우가 많다. 따라서 이러한 조건중 재료물성과 관계된 항목을 기준으로 재료 선정을 하였다. 하중에 대한 성능지수를 문헌을 통하여 조사하였고, 중요한 온도조건은 사용온도와 재료의 무게당 단가를 2개 항목으로 정하여 재료물성도를 통해 검토하였다.

먼저 하중에 대한 성능지수를 고려하면 풀리가 받는 힘은 정하중에서 벨트장력의 압축응력으로 인해 발생하는 굽힘 응력이 가장 큰 영향을 미친다. 여기서는 개념설계 단계이므로 문제를 단순화하여 원판주위에 작용하는 정하중에 대한 강성(Stiffness)과 강도(Strength)의 성능지수를 구하였다.

바깥쪽 반지름이 a 이고 안쪽 반지름이 b , 두께가 t 인 중앙에 홈이 있는 원형 평판을 고려하면 전체

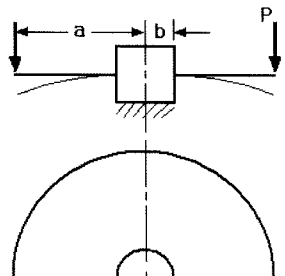


Fig. 6 modeling of pulley

무게는 식 (10)과 같이 된다.

$$m = \pi(a^2 - b^2)t \times \rho \tag{10}$$

풀리가 장착되는 곳은 휘어지는 변위가 커지면 벨트가 풀리거나 다른 부품에 닿기 때문에 강성은 중요한 부분이다. 따라서 최대변위는 조건으로 주어지게 되고 관계식은 식 (11)과 같다. 여기서 h 는 a 와 b 에 의해 결정되어지는 형상에 대한 계수이다.¹⁵⁾

$$w_{max} = h \times \frac{Pa^2}{Et^3} \tag{11}$$

보통 풀리에서 반경은 장착 위치에 따라 정해지는 값이므로 변경 가능한 값은 두께가 유일하다. 따라서 두께를 가지고 무게와 최대 변위에 대한 식 (10)과 식 (11)을 연립하면 식 (12)가 도출된다.

$$m = \pi(a^2 - b^2) \left(\frac{hPa^2}{w_{max}} \right)^{1/3} \frac{\rho}{E^{1/3}} \tag{12}$$

형상이 주어지고 풀리에 작용하는 하중에 대해 최대변위를 만족시키기 위해서는 식 (12)에서 재료 물성을 제외하고 일정하게 된다. 따라서 무게가 최소가 되기 위한 강성에 대한 성능지수는 식 (13)이 된다. 이 성능지수의 값이 크면 클수록 적은 무게를 가지게 된다.

$$M = \frac{E^{1/3}}{\rho} \tag{13}$$

하중이 작용하는 원판의 단면을 보면 스트레스가 작용한다. 이 스트레스의 최대값은 식 (14)와 같이 유도된다. 여기서 k 는 a 와 b 에 의해 결정되어지는 형상에 대한 계수이다.¹⁵⁾ 그리고 최대 스트레스는 탄성영역에 있어야 하므로 식 (15)와 같이 표현된다.

$$S_{max} = k \times \frac{P}{t^2} \tag{14}$$

$$\sigma_y = k \times \frac{P}{t^2} \tag{15}$$

여기에 무게에 대한 식 (10)과 연립하여 정리하면 식 (16)이 된다.

$$m = \pi(a^2 - b^2)(kP)^{1/2} \frac{\rho}{\sigma_y^{1/2}} \tag{16}$$

따라서 형상을 고려하지 않고 탄성영역내에서 최

대 모멘트를 견디고 무게가 적게 나가기 위한 강도에 대한 성능지수는 식 (17)이 된다.

$$M = \frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho} \quad (17)$$

강성과 강도에 해당되는 2차원 재료물성도를 식 (13)과 식 (17)을 이용하여 그리면 각각 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

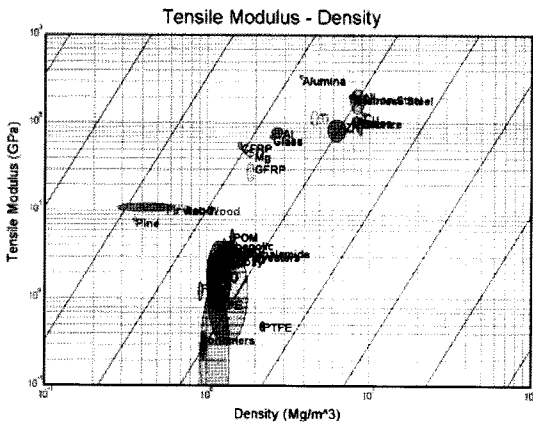


Fig. 7 Modulus - Density graph

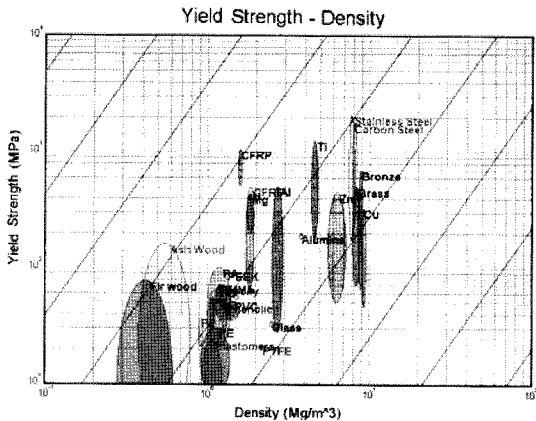


Fig. 8 Strength - Density graph

Fig.7에서는 목재류와 CFRP, Glass Fiber Reinforced Plastics(GFRP), 일부 플라스틱류 및 경량 금속이 다른 재료보다 뛰어나다는 것을 알 수 있고 Fig. 8에서도 Fig. 7과 유사하게 목재류, CFRP, GFRP, 일부 플라스틱류, 경량 금속이 무게 대비 좋은 성질을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

재료물성도에서 사용 환경에 적합하다고 판단된 재료를 대상으로 설계자가 직접 사용할 재료 물성 값을 나타내면 Table 2와 같다. 페놀, 에폭시는 강성과 강도면에서 다른 재료보다 약하고 알루미늄, 티타늄, 마그네슘과 같은 경량금속은 높은 강성과 강도를 가지지만 밀도가 높다. 한편 목재류는 강도의 범위가 아주 넓은데 이는 목재 조직의 방향성이 있기 때문이다. 따라서 목재는 균질하지 못하여 사용하기 부적합하다. CFRP, GFRP는 가벼우면서 좋은 강성과 강도를 가지고 있다.

Table 2 Material properties of selected materials

Material	Density (Mg/m ³)	Tensile Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)
CFRP	1.55 ~ 1.6	50 ~ 60	500 ~ 1050
GFRP	1.75 ~ 1.95	21 ~ 35	200 ~ 500
Al	2.5 ~ 2.95	68 ~ 88.5	30 ~ 510
Ti	4.36 ~ 4.84	90 ~ 137	172 ~ 1245
Mg	1.73 ~ 1.95	40 ~ 47	65 ~ 435
Phenol	1.24 ~ 1.32	2.76 ~ 4.83	27.6 ~ 49.68
Epoxy	1.11 ~ 1.4	2.35 ~ 3.08	36 ~ 71.68
Ash wood	0.38 ~ 0.8	9.65 ~ 11.4	4.07 ~ 161
Fir wood	0.28 ~ 0.62	9.51 ~ 11.9	1.4 ~ 78

강성과 강도를 밀도로 나누어 계산하면 Fig.9와 Fig. 10과 같다. 재료물성도를 이용한 것과 유사하게 CFRP, GFRP, 경량금속이 높은 값을 가진다.

다음은 사용온도와 가격에 대한 그래프를 그려보면 Fig. 11과 같다. 먼저 사용가능 온도가 120°C이상 되는 재료들은 PEEK, CFRP, GFRP, 에폭시, 페놀 및 유리, 금속들이 있다. Fig. 7, Fig. 8의 재료물성도를 고려하면 CFRP, GFRP, 경량금속을 우수한 재료로

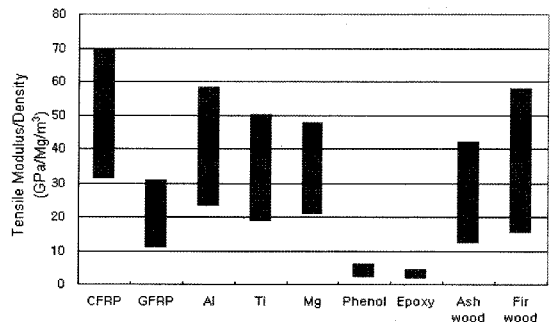


Fig. 9 Chart for modulus/density value

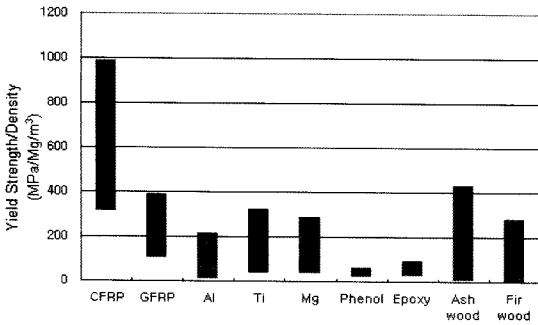


Fig. 10 Chart for strength/density value

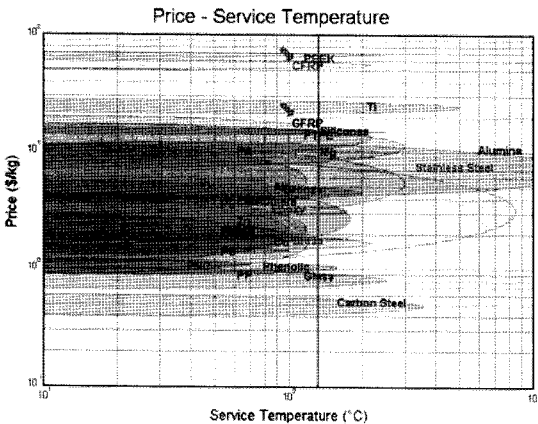


Fig. 11 Price - Service Temperature graph

선정할 수 있다. 여기에 생산공정을 고려하여 대량 생산에 경제적인 사출성형이 가능한 플라스틱이 적합하다고 판단된다. 따라서 CFRP, GFRP가 우수한 재료로 선정된다. 하지만 CFRP 경우에는 가격이 상대적으로 높아 경제적인 측면을 고려하면 GFRP가 자동차 엔진 폴리의 경량화 재료로 더 적합할 것이다. 또한 가격을 더 중요한 인자로 보았을 때 강성이나 강도는 아주 뛰어나지는 않았지만 가격 경쟁력이 있는 페놀이나 에폭시의 성능을 개선한 재료도 적합한 재료가 될 수 있다.

여기서 고려된 재료인 GFRP는 국내업체에서 자동차 엔진용 폴리로 개발중에 있고 페놀을 기반으로 제조된 GFRP가 실제 엔진의 에어컨 컴프레셔용 폴리의 경량 재료로 개발된 사례가 있다.¹⁶⁾

4. 결론

설계 공정에서 중요한 작업중 하나인 재료선정

작업을 지원하기 위해 3D 그래프를 사용한 웹기반 물성 비교 Tool 및 재료 DB를 구축하였다.

기존 재료 DB시스템에서 찾아볼 수 없었던 2D, 3D 그래프 물성비교 기능을 인터넷에 연결된 설계자들이 사용할 수 있도록 웹으로 구현하였다. 그리고 2D, 3D 그래프를 이용하여 재료물성을 비교하여 스프링 설계에 적용하여 유용성을 확인할 수 있었고 실제 자동차 엔진용 폴리 경량화를 위한 재료선정 과정에 적용할 수 있음을 보였다.

하지만 재료 물성 데이터의 방대함 때문에 지속적인 데이터업력이 필요하고 현재 구축되어 있는 데이터베이스로는 개념설계이후의 상세설계단계에서의 지식을 지원하기에는 부족하다. 따라서 추가적인 데이터와 재료간의 비교기법의 개발과 구현이 필요하다고 판단된다.

본 논문에서 구축된 재료DB, 물성비교 웹사이트 의 주소는 <http://fab.snu.ac.kr/matdb>이다.

후 기

이 연구는 한국과워트라인(산업자원부 과제 No. 10016432) 지원과 BK21의 연구비 지원 및 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) D. H. Jee and K. J. Kang, "A Method of Optimal Material Selection for Automobiles Aided with Database," KSAE J., Vol.7, No.2, pp.398-407, 1999.
- 2) M. F. Ashby, Y. J. M. Brechet, D. Cebon and L. Salvo, "Selection Strategies for Materials and Processes," Materials and Design, Vol.25, pp.51-67, 2004.
- 3) <http://cybercut.berkeley.edu/mas2>
- 4) <http://www.nist.org>
- 5) <http://www.matweb.com>
- 6) <http://www.grantadesign.com>
- 7) <http://fact.kisti.re.kr>
- 8) M. F. Ashby and K. Johnson, Materials and Design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- 9) L. Holloway, "Materials Selection for Optimal

- Environmental Impact in Mechanical Design,”
Materials and Design, Vol.19, pp.133-143,
1998.
- 10) M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design 2nd, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- 11) E. White, C. Garrett and S. Robinson, “GDI+ Programming,” Wrox, 2003.
- 12) <http://www.web3d.org>
- 13) <http://www.octaga.com>
- 14) <http://www.vcom3d.com>
- 15) A. C. Ugural, “Stresses in Plates and Shells 2nd,” McGraw-Hill, New York, 1999.
- 16) H. Oka, Y. Tabuchi and H. Yazawa, “Development of Plastic Pulley for Automotive Air Conditioner Compressor,” SAE 2002-01-0603, 2002.