

차량용 도어 힌지의 경량화를 위한 재질별 수명 예측

유기현^a, 김홍건^{b*}

Analysis on Life Prediction for Different Materials in Vehicle Door Hinge Lightweight Design

Ki Hyun Yu^a, Hong Gun Kim^{b*}^a Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Jeonju University, 1200 3-ga Hyoja-dong, Wansan-gu, Jeonju, Jeonbuk, Republic of Korea^b Department of Mechanical & Automotive Engineering Jeonju University, 1200 3-ga Hyoja-dong, Wansan-gu, Jeonju, Jeonbuk, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	6	May	2013
Revised	2	July	2013
Accepted	9	July	2013

Keywords:

Carbon fiber reinforced plastic
Vehicle door hinge
Composite
Fatigue analysis
Finite element method
Weight lightening

ABSTRACT

Environmental issues are attracting increasing interest worldwide, and accordingly, environmental regulations for vehicles are being made more stringent. As a result, the car industry is conducting studies focusing on fuel efficiency and lightweight vehicles. To manufacture lightweight vehicles, existing steel parts are replaced by composite materials and lightweight metals. In this study, the fatigue life of a new material for manufacturing lightweight car door hinges was predicted using a finite-element analysis program. The existing steel material was replaced by carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) and aluminum alloy 6061, and the test results were analyzed. The maximum stress decreased by approximately three times, whereas the fatigue life and safety factor increased. When only CFRP was used, its allowable stress, safety factor, and fatigue life were excellent, but the sagging of the product exceeded the allowable value, which posed a limitation in use. Therefore, it seems desirable to use an appropriate combination of steel, AA6061, and CFRP for this product.

1. 서론

최근 차량에 대한 무게로 인해 문제점이 나타나고 있다. 따라서 차량을 경량화 하기 위하여 일반 금속재료에 비해서 가벼운 탄소섬유 및 유리섬유를 이용한 고강도 복합소재에 대한 개발이 활발하게 이루어지고 있다^[1-4].

자동차에 대한 소비자들의 관심이 날로 높아져 가고 있으며, 자

동차에 대한 개념이 단순한 운송 수단에서 안락한 생활공간으로 인식이 바뀌어 가고 있다. 이제는 소비자들의 품질인지수준이 차량의 성능, 외관 품질은 물론 버튼의 조작감, 조작음, 차량 내부의 냄새 등 오감에까지 폭넓고 민감하게 변화하고 있다. 따라서 소비자들이 자동차를 선택할 때 스타일링, 가격, 연비와 더불어 감성 품질도 중요한 선택 기준의 하나가 되고 있다.

도어의 개폐 품질은 여러 가지 감성 품질 중에서도 매우 민감하

* Corresponding author. Tel.: +82-63-220-2613

Fax: +82-63-220-2959

E-mail address: hkim@jj.ac.kr (Hong Gun Kim).

고 중요한 요소이다. 그러나 수많은 인자들이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 개선이 어렵고, 정확한 품질 평가가 어려워 품질 개선 속도가 더딘 것도 사실이다. 또한 도어 개폐 품질은 팽잡음, 수밀 등의 주요 품질과는 상반된 특성을 가지고 있으며, 외관 품질과 밀접한 관계가 있으므로 개선 시 특히 유의해야 한다⁵⁾.

한정된 자원의 고 효율적 사용을 위해서 기계 장치들의 경량화 연구는 계속되고 있다. 또한 환경 문제가 세계적인 관심사로 대두되면서 자동차에 대한 환경 규제도 강화되고 있다. 이로 인해 자동차 업계는 연비개선 및 경량화⁶⁻⁷⁾에 비중을 두고 연구를 하고 있다. 자동차 부분에 있어서 경량화를 위해 기존의 철제 부품들은 복합재료와 경량의 금속으로 교체되고 있다⁸⁾. 조사된 바로는 도어 힌지에 대한 경량화 및 원가 절감을 위한 최적 설계는 연구는 시행된 바 없다⁹⁾.

본 논문에서는 차량용 도어힌지의 경량화 및 강성을 위해 기존 Steel제품을 대체 할 수 있는 재질의 안정성을 파악하고자 도어 힌지를 유한요소해석프로그램인 ANSYS 12.0을 이용하여 경량화를 위하여 재질 변경에 따른 해석을 통해 수명을 예측하고 그에 따른 안정성을 확인하고자 한다.

2. 피로해석 이론

일반적으로 자동차 부품에 대한 피로수명 계산을 위해서는 응력-수명(Stress-Life)방법이나 변형률-수명(Strain-Life)방법이 이용되고 있다. 내구해석은 반복하중이 동일하게 진행된다는 가정 하에서 정적 응력해석 결과를 응력-수명선도나 변형률-선도에서 적용함으로써 수행된다. 즉 Load History (하중응력)와 Static Analysis Result (정적해석결과), Material Property (재료 물성치)정보를 바탕으로 한 피로해석이 수행되며, 피로해석 결과로부터 해당부품의 피로수명을 예측할 수 있게 된다.

응력-수명 접근방법은 일반적으로 작용응력이 재료의 탄성영역 내에 주로 있고, 그 결과로 인하여 수명이 긴 경우에 적용되는 기법이다.

응력-수명 방법을 통한 피로수명 평가를 하고자 하는 경우 파괴 시까지의 반복수(N_f)에 대한 교번반복응력(S)의 관계로 나타내어지는 응력-수명선도를 사용한다. 응력-수명 선도를 로그-로그 좌표계에 도시하면 대략적인 직선으로 표시되며 이를 수학적으로 표현하면 아래 식과 같다.

$$\sigma_a = AN_f^B \tag{1}$$

여기서 A와 B는 시험데이터로부터 추정되는 재료상수이며, 다음의 Basquin에 의해 변경된 형태로 많이 사용된다.

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \tag{2}$$

σ_f' : fatigue strength coefficient

b: fatigue strength exponent

설계 부품이나 부재에 작용하는 응력에는 부하에 의한 평균응력이 존재하는 경우가 많다. 이러한 경우 평균응력의 영향이 고려된 응력-수명선도 데이터는 부족하므로 기존의 응력-수명선도로부터 평균응력 효과를 평가하기 위하여 다양한 수식이 제안되었으며 일반적으로 많이 사용되고 있는 식은 다음과 같다.

Goodman: $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \tag{3}$

Soderberg: $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \tag{4}$

해석하고자 하는 도어힌지는 작용응력이 재료의 탄성영역 내에 주로 있는 재료로서 피로해석방법 중 응력-수명 방법으로 도어힌지의 예측수명을 파악하였다. 피로해석의 방법으로 CFRP는 Soderberg의 이론식을 Steel과 AA6061은 Goodman 이론식을 이용하여 해석을 수행 하였다¹⁰⁾.

3. 설계 및 해석

3.1 형상 설계 및 재질 선정

힌지는 도어를 차체에 장착하고 도어의 여닫음을 가능케 하는

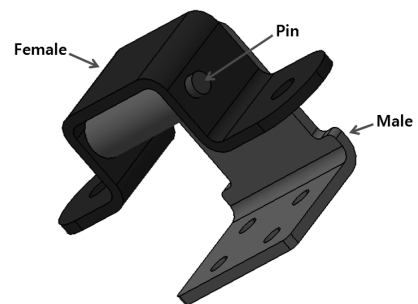


Fig. 1 Door hinge modeling

Table 1 Material properties

Materials	Density [kg/m ³]	Young's Modulus [MPa]			Poisson's ratio		
		E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23
Steel (SS400)	7,850	200,000	-	-	0.3	-	-
AA6061	2,849	68,948	-	-	0.33	-	-
CFRP (3K)	1,580	54,000	54,000	6,040	0.175	0.175	0.292

부품으로서 KS규격에 의거 하여 일정한 두께(5t)로 CATIA V5^[11]를 이용하여 설계 하였으며, 그 형상은 Fig. 1과 같다. 힌지는 차체에 고정되는 Female 부분과 도어에 고정 되는 Male로 이루어져 있으며 두 개의 Part는 일반적인 힌지와 같이 핀으로 연결 하였다.

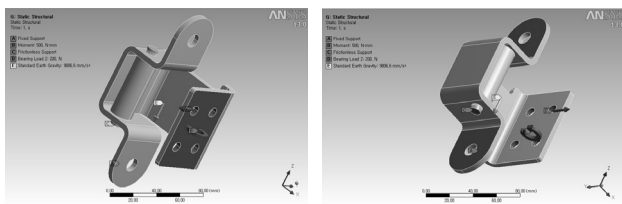
해석에 필요한 힌지의 Male, Female, Pin은 기존에 사용되어지고 있는 Steel과 제품의 경량화를 위해 SK 케미칼에서 구입한 WSN 3K인 CFRP와 Aluminium을 추가하여 3가지 재질을 여러 가지 방법으로 조합하여 해석을 진행 하였다. 힌지의 각 파트별 재질에 대한 물성은 Table 1과 같다. Table 1에서 CFRP의 경우 각각의 방향별로 기계적 성질이 다른 이방성 재질이기에 때문에 Young's Modulus와 Poisson's Ratio을 x, y, z 각각의 방향에 대한 값으로 부여하였다. Steel의 경우에는 보편적으로 사용되어지는 구조용 강을 기본 물성으로 선정하였고, Aluminium Alloy역시 기계적 성질을 고려하여 6061합금으로 선정하였다.

3.2 해석

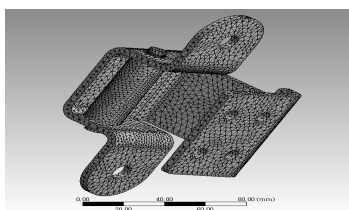
해석은 유한요소프로그램인 ANSYS Workbench^[12]를 이용하

Table 2 Combination of materials

	Male	Female	Pin
Case 1	Steel	Steel	Steel
Case 2	Steel	AA6061	Steel
Case 3	Steel	CFRP	Steel
Case 4	AA6061	Steel	Steel
Case 5	AA6061	AA6061	Steel
Case 6	AA6061	CFRP	Steel
Case 7	CFRP	Steel	Steel
Case 8	CFRP	AA6061	Steel
Case 9	CFRP	CFRP	Steel



(a) Load and boundary Condition



(b) Meshed model

Fig. 2 Load and boundary conditions and mesh

여 해석을 수행 하였다. 힌지의 Male과 Female에 대한 재질은 Table 2와 같이 총 9개의 Case로 하여 해석을 수행 하였다.

해석에 필요한 경계조건으로는 Fig. 2(a)와 같이 차량의 Body와 연결되는 부분인 Female을 Fixed Support를 적용하여 모든 방향에 대하여 완전고정 하였고, Door가 Male에서 볼트로 체결되는 부분인 4개의 hole에 Bearing Load를 300 N을 적용 하였다. 또한 Door가 회전할 경우를 가정하여 Door의 연결부에 500 N·mm의 Moment 조건을 추가하였고 Male과 Female을 고정시켜주는 Pin의 양 끝단에 Frictionless Support 조건을 부여하여 상·하로 미끄러지지 않고 회전만 할 수 있도록 하였다.

Fig. 2(b)는 Hinge의 요소망을 나타낸 것으로 ANSYS Workbench 상에서 주어진 Auto Mesh를 사용 하였고 Element 하나의 Size는 2 mm로 하였다. Mesh의 총 Nodes와 Element는 각각 57,191개와 28,897개의 요소망을 생성 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 구조해석

Table 3은 Male과 Female의 재질 변경에 따른 각 파트의 최대

Table 3 Equivalent stress of material types

	Equivalent Stress (MPa)		
	Pin	Male	Female
Case 1	211.27	226.06	146.47
Case 2	216.63	218.38	77.056
Case 3	218.19	216.08	62.376
Case 4	170.46	162.9	122.25
Case 5	173..26	159.84	67.119
Case 6	174.41	158.79	55.196
Case 7	163.72	153.72	122.65
Case 8	167.58	153.24	68.602
Case 9	169.06	152.99	51.536

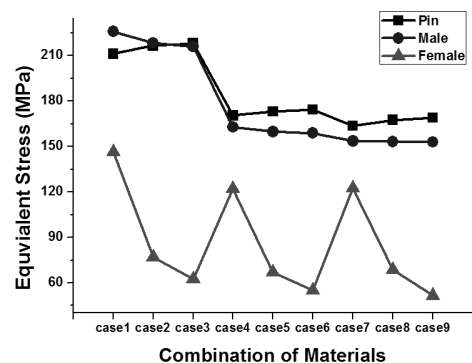


Fig. 3 Equivalent stress of material types

응력을 나타낸 것으로 Steel과 AA6061, CFRP 3가지 재질을 이용하여 해석을 수행한 결과이다. 3가지 파트 중에서 먼저 Pin에 걸리는 최대응력을 각 Case 별로 확인해 보면 3가지 파트 중 Male의 재질이 Steel로 구성된 경우 Pin이 받는 응력이 상대적으로 큼

을 알 수 있었다. Male의 재질을 AA6061과 CFRP로 하여 해석을 진행하면 Pin이 받는 응력이 상대적으로 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 반면 Female의 재질을 변경하였을 때에는 응력의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

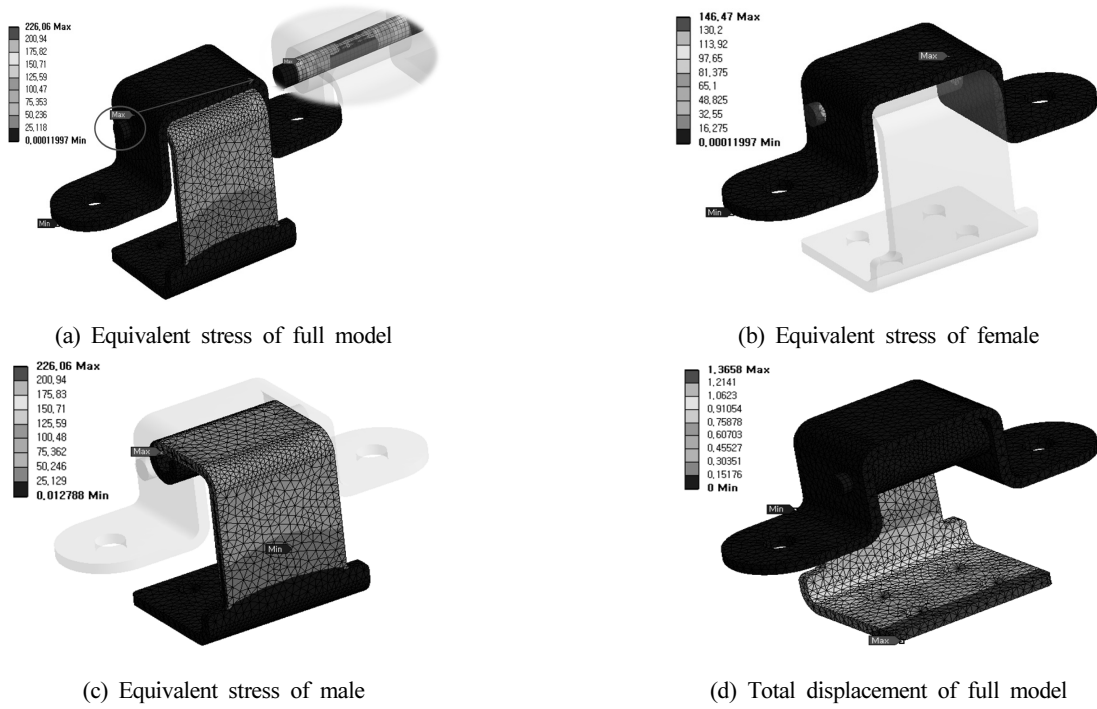


Fig. 4 Static structural of case 1

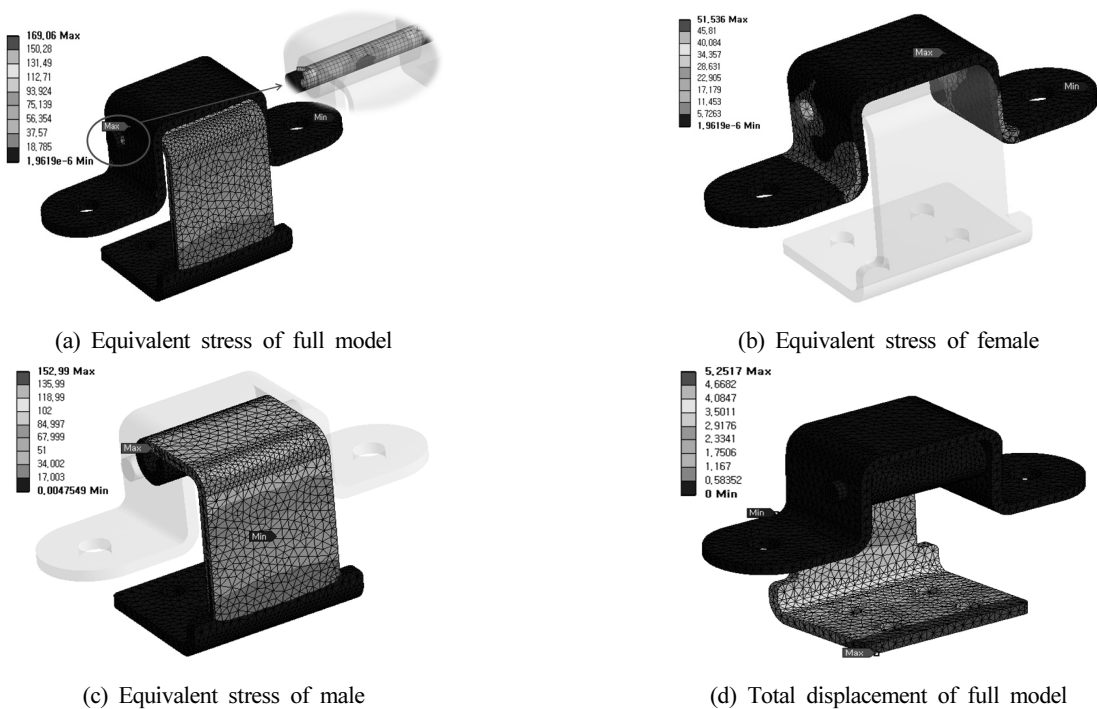


Fig. 5 Static structural of case 9

Pin의 해석 결과를 확인 한 것과 같은 방법으로 Male 과 Female 의 응력을 확인 해 보면 Pin의 해석 결과와 마찬가지로 Male의 재질이 Steel 보다는 AA6061이, AA6061보다는 CFRP가 더 우수한 결과를 확인 할 수 있었다. 또한 Female의 재질 변경시 발생하는 응력값에 대해서는 Pin, Male과 마찬가지로 상대적으로 줄어들었지만 응력에 직접적인 영향을 주는 것은 Female을 어떤 재질로 사용하느냐에 따라서 차이가 큰 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4과 5는 Case 1와 9에 대한 등가응력을 나타낸 그림으로 기존 Steel 만으로 이루어진 Case 1과, 9가지 Case중에 가장 우수한 결과를 나온 것을 선정하여 그림으로 나타내었고, 각각의 Part 별로 최대응력이 받는 위치를 나타내 주고 있다. 다른 7가지 Case의 응력분포는 최대하중이 받는 위치가 비슷하여 생략 하였으며 Pin, Male, Female의 최대응력 값은 Table 3에 나타내었다.

또한, Hinge의 경량화 적인 면에서는 기존 Steel로 구성되어진 경우에는 전체 무게가 0.925 skg에서 재질의 변경으로 인해 최소 33%에서 76%까지 경량화 되는 것을 확인 할 수 있었다.

Hinge의 구조해석 결과 최대 변형은 Male 부분에서 발생 하였고, CFRP, AA6061, Steel 순으로 변형이 많이 일어나는 것을 확인 할 수 있었다. 그 원인으로는 각 재질에 대한 Young's Modulus

Table 4 Mass of combination of materials

	Mass (kg)	(%)
Case 1	0.924	0
Case 2	0.677	26.7
Case 3	0.618	33.1
Case 4	0.604	34.5
Case 5	0.358	61.3
Case 6	0.298	67.7
Case 7	0.528	42.8
Case 8	0.281	69.5
Case 9	0.222	76.0

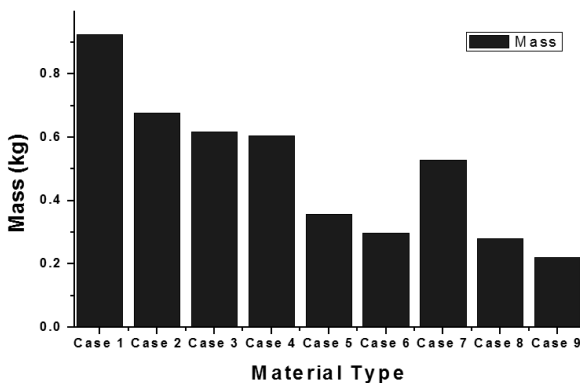


Fig. 6 Mass of combination of materials

가 Steel이 가장 높고 CFRP가 가장 낮아 CFRP에서 많은 변형이 일어나는 것으로 판단된다. 변형량에 대한 자세한 값은 Table 5를 통하여 표시하였고, Fig. 7은 그에 대한 값을 그래프로 나타낸 것이다.

4.2 피로해석

Fig. 8은 사용 재질의 Stress - Life 선도로, 피로해석은 Steel, AA6061, CFRP의 피로시험을 통하여 Stress - Life 선도를 도출해 내고 그 값을 ANSYS Workbench 프로그램에 대입해 해석을

Table 5 Total deformation of material types

	Total Deformation (mm)
Case 1	1.365
Case 2	1.394
Case 3	1.439
Case 4	3.704
Case 5	3.733
Case 6	3.778
Case 7	5.178
Case 8	5.206
Case 9	5.251

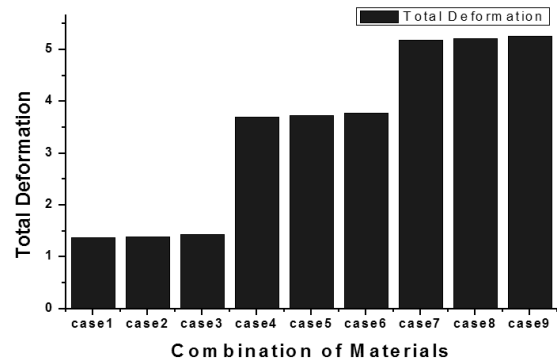


Fig. 7 Total deformation of material types

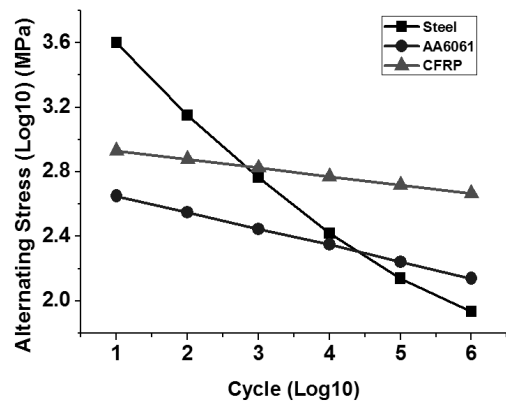


Fig. 8 Stress - life curve of materials

수행 하였다. Pin과 Male, Female의 구조해석 결과를 토대로 응력-수명의 방법으로 피로해석을 수행하였으며 그 결과는 Table 6에 나타내었다. 구조해석의 결과를 토대로 하여 피로해석을 수행하였기 때문에 구조해석의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

Male의 경우에는 Steel을 제외한 CFRP와 AA6061로 재질을

Table 6 Life and safety factor of material types

	Pin		Male		Female	
	Life	Safety Factor	Life	Safety Factor	Life	Safety Factor
Case 1	45,145	0.567	3.26E+4	0.530	2.61E+5	0.818
Case 2	40,055	0.553	3.85E+4	0.549	1.00E+6	2.347
Case 3	38,690	0.549	4.05E+4	0.555	1.00E+6	7.492
Case 4	1.22E+5	0.703	1.00E+6	1.110	8.81E+5	0.981
Case 5	1.13E+5	0.692	1.00E+6	1.131	1.00E+6	2.695
Case 6	1.10E+5	0.687	1.00E+6	1.139	1.00E+6	9.068
Case 7	1.45E+5	0.732	1.00E+6	3.040	8.62E+5	0.977
Case 8	1.31E+5	0.715	1.00E+6	3.050	1.00E+6	2.637
Case 9	1.26E+5	0.709	1.00E+6	3.054	1.00E+6	9.068

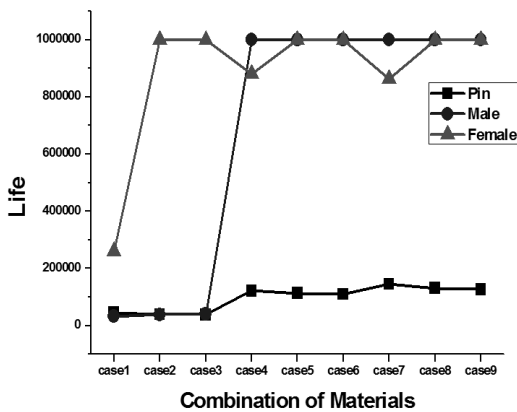


Fig. 9 Life of material types

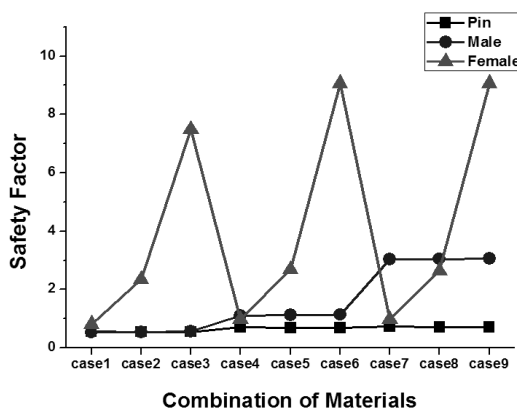


Fig. 10 Safety factor of material types

선정할 경우 피로수명이 우수하게 나온 것을 확인 할 수 있었고, Female의 경우에는 자동차의 Body에 고정되어 있는 형태이기 때문에 Female의 재질을 Steel이 아닌 경우 안전율 2 이상의 값으로 피로수명에 충분한 결과값을 나타내는 것으로 판단된다. Pin의 경우에는 Male의 재질을 Steel로 사용할 경우 피로수명이 약 4만회 정도의 수명으로 상대적으로 낮은 결과를 확인하였고, AA6061이나 CFRP를 사용할 경우에는 11만회에서 14만회 정도의 수명을 확인할 수 있었다.

안전율의 경우에는 모두 100만회를 기준으로 하여 나타낸 것으로 Pin을 제외한 Male과 Female의 재질을 Steel로 사용하는 것보다는 CFRP나 AA6061의 재질로 사용하는 것이 높은 안전율을 나타내는 것으로 확인 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차 Door Hinge의 경량화를 목적으로 Hinge의 Male과 Female의 재질을 Steel, AA6061, CFRP조합의 9가지 Case로 하여 기존 Hinge와의 응력, 처짐, 피로수명 및 안전율을 비교하고 자동차 Door Hinge에 사용 가능 여부에 대하여 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용해 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출 하였다.

- (1) Male은 힘에 직접적인 영향을 받기 때문에 재질 선정에 있어 신중히 고려해야 하고 Female은 힘에 직접적인 영향을 받지 않는 부분이지만 Female에 걸리는 응력을 줄이기 위해서 재질을 Steel 보다는 AA6061 또는 CFRP를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
- (2) Male에 CFRP의 재질을 이용할 경우 자동차 Door Hinge의 처짐 기준인 5mm를 넘어 사용에 제한이 있을 것으로 판단된다. 하지만 Female과 Pin의 변형은 거의 없어 어떠한 재질을 사용하더라도 무방할 것으로 판단된다.
- (3) 피로 수명과 안전율은 Male과 Female의 물성을 Steel보다는 기계적 물성이 뛰어난 AA6061 또는 CFRP를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

위의 3가지 결과를 토대로 하여 최종적으로 Pin과 Male, Female의 재질을 각각 Steel, AA6061, CFRP를 사용한 Case 6의 경우가 Hinge가 받는 하중, 처짐, 수명 및 안전율에서 가장 우수하고 기존에 사용되어지고 있는 Steel 만으로 구성된 Hinge보다 약 67%의 경량화가 가능하여 본 연구에 있어 가장 적합한 경우로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(No. 2012H1B8A2026147) 및 일반연구자지원사업(No. 2011-0014149)에 의해 지원을 받아 수행된 연구결과임.

References

- [1] Kim, J. S., Yoon, H. J., Lee, H. S., Kwon, T. S., 2009, A Study on Failure Mechanic of Composite Tubes with Woven Fabric Carbon, Glass and Kevlar/epoxy Under Compressive Loadings, Journal of The Korean Society for Railway, 12:4 590-596.
- [2] Ghoo, B. Y., 2004, Development of Non-isothermal Forming Technology of Aluminum-alloy Sheet Panel for Light Weight Autobody, Spring Conference of Korea Society of Automotive Engineers, 1323-1328.
- [3] Park, D. O., Seo, C. H., Ji, S. W. 2006, The Experimental Study on Improvement the Pump Sending of the Light Weight Concrete Using the Light Weight Aggregate, Journal of KIC, 6:1 23-26.
- [4] Kim, H. G., Oh, S. Y., Kim, K. C., Kim, H. W., 2012, A Study on the Structural Design of Effective Composite Joint and Light Weight in Body Floor, Journal of KSMTE, 21:6 855-1025.
- [5] Lee, Y. B., 2000, Analysis of Hard Top Door Seals to Predict Door Closing Effort using the Door Seal Shape Design System, A Thesis for a Master, Kangwon University, Republic of Korea.
- [6] Moon, Y. R., Cha, S. W., and Yoon, P. Y., 1999, Weight Reduction in Automobile Design Through Axiomatic Approach - Development of Integrated Air Fuel Module, Journal of KSAE, 7:6, 106-114.
- [7] Kim, S. K., Park, J. H., Choi, B. I., Lee, H. J., Lee, Y. H., Kim, J. S., Kim, K. J., 2009, Optimization of rear link component of automobile for light-Weight, Journal of KSME, 18:5, 100-102.
- [8] Kim, Y. S., Kim, I. K., Kim, D. S., 1999, A Study of Light Weight of Auto Supplies I, Journal of KSPSE, 3:3 174-178.
- [9] Ranjit, K. R., 2001, Design of Experiments using the Taguchi Approach, Wiley-Interscience.
- [10] Lee, H. J., 2006, Figure Life Prediction Algorithm and Durability Analysis Programming of Vehicle Components, A Thesis for a Master, Kookmin University, Republic of Korea.
- [11] Lee, S. S., Hwang, Y. J., Kim, H. J., 2005., CATIA V5 Release 14, Cyeongsang National University Press.
- [12] Taesung SNE., 2010, ANSYS Workbench, ANSYS Inc.