

승용차 코일 스프링의 부식피로강도 평가(II) - 쇼트피닝에 의한 잔류응력의 영향 -

이규영[†]·배동호[^]·박순철^{**}·정원욱^{**}

Evaluation of Corrosion Fatigue Strength of the Automobile's Coil Spring(Effect of Residual Stress by Shot Peening)

Gyouyoung Lee, Dongho Bae, Suncheol Park and Wonwook Jung

Key Words: Suspension(현가장치), Shot-peening(쇼트피닝), Coil spring(코일 스프링), Corrosion fatigue strength(부식피로강도), residual stress(잔류응력)

Abstract

Suspension part should have enough endurance during its lifetime to protect passenger. Therefore, the coil spring is one of the major suspension part of an automobile. Corrosion fatigue strength of the coil spring depends on many factors including mechanical and environmental properties. In this paper, residual stresses by shot peening was analyzed using finite element analysis, and evaluated its effect on corrosion fatigue strength.

1. 서론

자동차 현가장치(suspension system)는 자동차의 승차감과 핸들링(handling)에 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 현가장치란 차체에 대하여 차륜을 상하 이외의 방향에 대해 적당한 강성에 유지하며 지지하고, 상하방향은 스프링(spring)과 감쇠기구에 의해 지지하는 역할을 한다. 따라서 현가장치는 차륜과 노면사이에 발생하는 구동력, 제동력, 횡력 등의 전후, 좌우 하중을 확실히 차체에 전달하기 위해서 최적의 상태로 타이어를 노면에 접지 시키면서 목적하는 차량 운동 상태를 가능하게 해야 한다. 그리고 한편으로는 승객을 사

고로부터 보호하기 위해서, 현가장치의 부품은 사용 중 파손이 발생하지 않도록 충분한 내구성이 확보되어야 하고, 특히, 코일 스프링(coil spring)은 차량 현가장치의 매우 중요한 부품 중의 하나이므로 이 점이 충분히 고려되어야 한다. 그러나 운행도중 불안정한 도로사정으로 인하여 스프링 자체의 도색이 벗겨지게 되면 피로(fatigue), 부식(corrosion) 등과 같은 여러 형태의 손상기구에 의해 설계수명 이전에 파손되는 안전상의 문제점이 제기되고 있다. 따라서 코일스프링의 피로내구성(fatigue durability)을 개선하기 위해 쇼트피닝공정으로부터 재료표면에 인위적으로 가해지는 압축잔류응력의 존재에도 불구하고 운전 중 코팅 층의 탈락에 의한 손상을 이해하고 코일스프링의 부식피로강도(corrosion fatigue strength)에 미치는 영향을 평가하는 것은 코일스프링의 내구 신뢰성에 대해 기계적, 환경적 영향의 정보를 확보한다는 의미에서 필요성이 매우 크다고 하겠다.

그래서 본 연구에서는 차량구동에 의한 스프링의 변형거동과 응력분포 상황과 쇼트피닝에 의

† 성균관대학교 기계공학과

E-mail : yi902@skku.edu

TEL : (031)290-7479 FAX : (031)290-5849

* 성균관대학교 기계공학부

** 현대자동차 차량시험팀

한 압축잔류응력을 해석함과 아울러, 동결기 제설,제빙을 위해 노면에 뿌려지는 염화물 환경을 고려하여 염화물 부식 환경 하에서 소형 승용차용 원통형 코일스프링(coil spring, SAE9254)의 부식피로 내구성에 대한 영향을 평가하였다.

2. 코일스프링의 변형과 응력분포해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 차량구동에 의한 스프링의 변형거동과 응력분포 상황을 해석하기 위해서 Tables 1, 2의 화학적 성분과 기계적 성질을 갖는 SAE9254 스프링 강으로 제작된 소형 승용차용 원통형 코일스프링을 해석대상으로 하였다. FEM 해석을 위한 코일스프링의 기하학적 형상은 Fig1과 같다. 차량구동 시 차체중량에 의한 원통형 코일 스프링의 변형거동으로부터 스프링 내측에서의 응력분포상황과 최대응력 발생위치를 면밀히 관찰할 수 있도록 스프링 소선 단면의 표면부 요소(element)는 8-node, 중심부는 6-node의 solid element를 사용하여 분할하였다. 스프링의 해석을 위한 변위(L)는 중심 축 방향으로 70mm 부터 156mm까지 6단계로 구분하였으며, 모델링과 해석에 사용된 프로그램은 I-DEAS 와ABAQUS 6.2-1이다. 해석에 사용된 요소 수는 17,916개, 절점 수(node number)는 28,812개이다.

2.2 해석결과

원통형 코일스프링에 Fig. 2와 같이 중심 축 방향으로 변위를 가하면, 스프링 소선(wire)의 단면에 작용하는 비틀림 모멘트(twisting moment)와 축력(axial force)의 조합에 의해 길이방향으로의 수축변형과 비틀림 변형(twisting deformation)이 동시에 발생하게 된다. 이러한 변형거동에 의해 코일스프링 소선의 단면에는 비틀림 변형에 의한 전단응력(shear stress) 이외에 코일 중심축방향의 압축응력(compressive stress) 및 굽힘응력(bending stress)등이 발생하게 되며, 여러 응력성분의 조합에 의해 원통형 코일스프링의 내측, 소선의 외표면에서 최대 전단응력이 발생하게 된다.) Fig. 2는 변위, D =122 mm 로 압축하였을 때, 원통형 코일

Table 1 Chemical composition(wt. %) of material

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,55	1,36	0,7	0,01	0,002	0,68

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
120	180	9,4

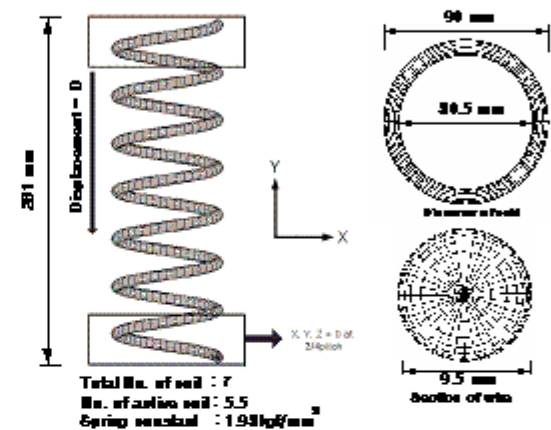


Fig. 1 FEA model of coil spring

스프링의 변형과 소선단면에서의 응력분포 상황을 나타낸 것이다. 코일 스프링의 내측 소선단면에 발생하는 응력분포는 중심부가 가장 적고 외 표면부에서 최대전단응력(maximum shear stress)이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 피로시험과정에서 피로 균열도 코일스프링의 내측 외 표면에서 발생하는 동일한 경향을 보였다. Fig3은 이상의 해석결과를 이론 및 실험 치와 비교 도시한 결과이다.

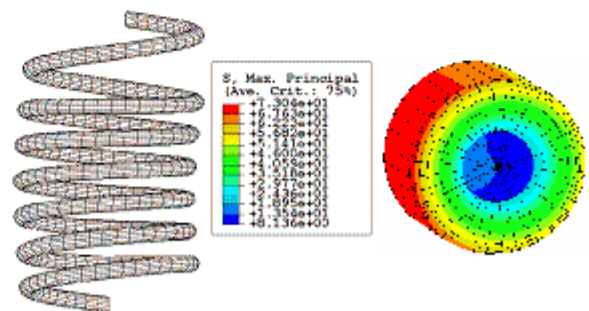


Fig. 2 Stress distribution and deformation of coil spring

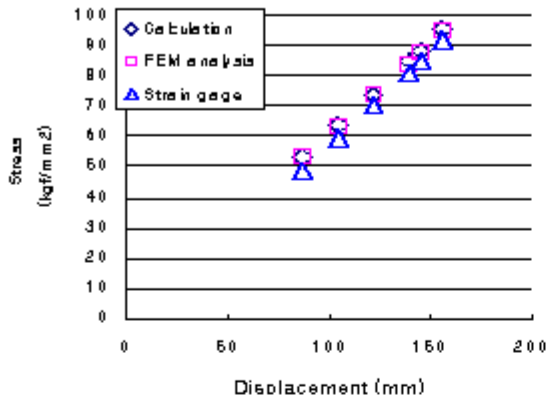


Fig. 3 Relation between stress and displacement

3. Shot Peening에 의한 잔류응력 해석

3.1 해석모델

차량용 원통형 코일 스프링은 피로내구성을 향상 시킬 목적으로 쇼트피닝(shot peening) 기술을 이용하여 스프링 소선의 표면에 압축잔류응력(compressive residual stress)을 인위적으로 부여하는 방법을 사용하고 있다. 따라서 차량의 주행 중 원통형 코일 스프링의 내구성에 영향을 미치는 구동력에 의한 응력해석을 위해서는 쇼트 피닝에 의한 압축잔류응력이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 수치해석적인 방법으로 쇼트피닝에 의한 잔류응력을 해석하고, 쇼트피닝 효과를 고려하지 않은 앞 절의 응력해석 결과와 중첩함으로써, 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력을 고려한 보다 실제적인 응력해석을 하고자 하였다. 쇼트 피닝공정은 원통형 코일스프링을 회전 시키면서 질량을 갖는 경질입자를 소선의 외 표면에 충돌시켜 충격에너지에 의한 소성변형(plastic strain)을 유도함으로써, 재료표면에 압축잔류응력을 발생시키는 것이다. 그래서 일정 폭률을 갖는 직경 9.5mm의 원통형 코일스프링 소선의 일부분을 Fig. 4와 같이 절단하여 모델링 하였다. 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력을 해석하기 위한 모델링은 I-DEAS를 이용하였고, ABAQUS Explicit 6.2를 사용하여 동적 탄소성 해석(dynamic elasto-plastic analysis)을 수행하였다. 절점수는 27679개, 요소 수는 24000개이고, 해석에 사용된 피닝재료는 Tables 1, 2와 같다. 쇼트 볼(shot ball)은 피닝 재료에 비하여 강도가 매우 크기 때문에 강체 요소

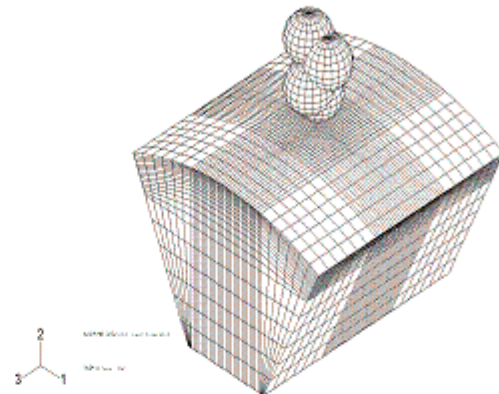


Fig. 4 FEA model for inclined shot peening analysis

(rigid element)로 하였으며, 쇼트 볼이 평판에 파고들지 못하도록 평판의 상면과 쇼트 볼 표면을 접촉(contact) 처리를 하였다.

쇼트 볼은 실제 쇼트피닝 공정에서 사용하고 있는 직경, 0.8mm, 볼 속도, 61m/s, 볼의 질량, 2.132E-10Kg 으로 하였다. 실제 쇼트피닝 공정에서 볼이 소선의 표면에 충돌하는 것은 단발에 의한 1회 충돌이기 보다는 최초충돌 위치 또는 그 주변에 연속적으로 충돌하는 다중충돌로 봐야 하기 때문에, 본 해석에서는 다중충돌에 의한 잔류응력을 해석하였다. 쇼트 볼의 개수는 하나부터 총 다섯 개로 x(1) 방향으로 +0.2mm, -0.2mm, z(3)축 방향으로 +0.2mm, -0.2mm로 하나씩 늘려가면서 총 다섯 번의 해석을 하였으며, 또한 같은 위치에서의 반복충돌을 해석하기 위하여 각 볼의 위치를 y(2) 축 방향으로 0.2mm 씩 높이차를 갖게 한 후 각 쇼트 볼 간의 간섭을 없게 하였다.

각 단계의 해석은 하나의 스텝으로 실시하되, 코일 스프링을 87.26mm로 압축했을 때 나온 결과를 초기값(Initial condition)으로 사용하였으며, Initial condition으로 사용된 값은 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Initial value for residual stress analysis by shot peening

S11	S22	S33	S12	S13	S23
-53.38	-15.31	50.65	-40.79	27.24	-15.09

3.2 해석결과

5개의 쇼트 볼이 재료 표면에 고속으로 연속 충돌한 후의 잔류응력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 첫 번째 볼이 충돌 한 위치에서 x 축 방향으로 +0.2mm, -0.2mm, z 축 방향으로 +0.2mm, -0.2mm 떨어진 곳에 순서대로 쇼트 볼이 충돌하였을 때의 잔류응력분포를 도시한 결과이다.

Fig. 6에서 쇼트 볼의 연속적인 충돌횟수가 증가할수록 최초 충돌한 곳에서의 표면 잔류응력은 감소하며, 최대 압축 잔류응력은 표면으로부터 약0.08mm에서 나타났다. 또한 표면으로부터 약 0.37mm부터는 다중 충돌에 의한 쇼트 피닝의 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 4회와 마지막 5회 충돌 해석 결과로부터 다중충돌에 의한 최대 압축잔류응력은 표면 하 약 0.05mm 부근에서 발생되며, 전체적으로 회수에 관계없이 표면에 가까울수록 쇼트 피닝에 의한 잔류응력의 변화가 많은 것을 알 수 있다. 또 1회 충돌 해석 결과에 비해 다중충돌 해석의 최대 잔류응력이 작은 값을 나타내고 있는데, 이는 쇼트볼 간의 간섭이 최종적인 잔류응력에 많은 영향을 끼쳤음을 예측할 수 있다. 위의 해석을 통하여 쇼트볼의 다중 충돌에 의한 쇼트피닝 해석은 각 충돌간의 응력 간섭에 의한 잔류응력분포의 변화를 예측할 수 있으며, 쇼트볼의 속도와 크기뿐만 아니라, 쇼트볼 간의 거리, 충돌 순서 등에 의한 압흔의 형상과 압축잔류응력의 변화에 대한 예측도 가능할 것으로 판단된다.

4. 원통형 코일 스프링의 피로강도 평가

4.1 시편 및 실험장

시편은 소형차에 사용 중인 Fig1의 원통형 코일스프링을 사용하였으며, 재료 및 기계적 성질은 FEA해석에서와 동일하다. FEA에 의한 응력해석 결과를 바탕으로, 코팅 된 스프링 표면은 부식환경의 영향이 직접 가해지도록 에머리 페이퍼(emery paper)를 사용하여 부분적으로 벗겨내는 한편, 스트레인 게이지(strain gage)를 부착하여 코일스프링 중심 축 방향 압축하중에 의한 소선 표면의 응력을 실험적으로 구하여 FEA결과와 비교, 검토하였다. 부식피로 실험에 사용된 시험장치는 TS-MOTOR (출력 7.5Kw)를 이용하여 자체설계

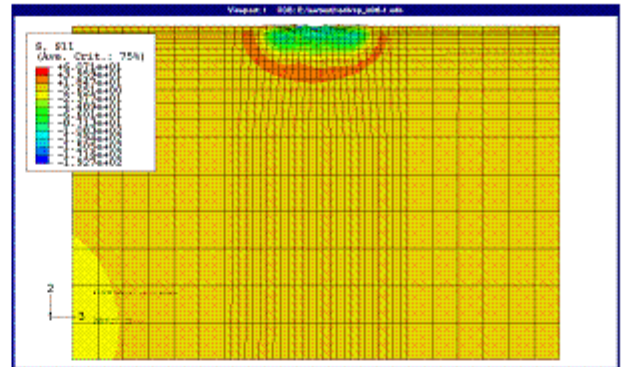


Fig. 5 Stress contour distribution after shot peening

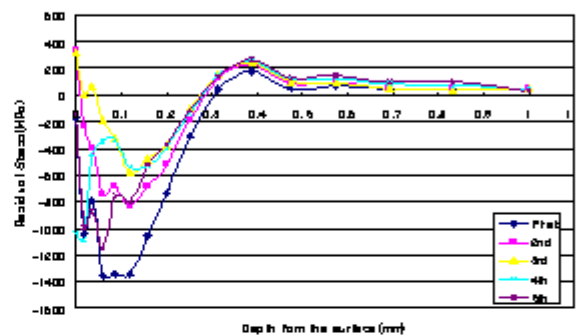


Fig. 6 Residual stress distribution by multiple shot peening

및 제작하였으며, 전동축에 크랭크를 설치하여 회전운동을 수직 왕복 운동으로 변환시켰다. 시편에 가해지는 변위(displacement, D)는 크랭크에 조정 볼트(bolt)를 설치하여 변위를 70mm 부터 156.3 mm 까지 제어할 수 있도록 하였다.

그리고 Twin-timer와 Relay, Counter, 펌프를 이용하여 인공해수에 해당하는 3.5wt.% NaCl 수용액을 주기적으로 스프링에 분무하였다.

4.2 시험조건 및 시험방법

실제 차량이 주행 중에 가장 많이 받는 원통형 코일 스프링의 부하 반복속도(frequency)는 2Hz 안팎으로 평가되고 있다.

본 실험에서는 실제 환경을 최대한 고려함과 동시에, 부식 환경 하에서 하중반복속도가 느릴수록 부식 발생 인자의 침투시간이 길어지고, 이에 따른 전기화학적 부식작용의 영향이 크므로 2) 부하속도를 2.7Hz로 설정하였다. 그리고 부식 환경의 영향을 고려하지 않은 코일스프링의 공기중 피로강도와 부식 환경의 영향을 고려한 부식 피로 강도를 평가하기 위한 부하방식은 변위제어

로 하였고, 변위(D)는 축 방향으로 70mm 부터 156mm 까지 6단계로 구분하여 부하하였다. 피로 수명(fatigue life)은 시험편이 완전히 파단 될 때 까지 수행하였으나, 106 사이클(Cycle)까지 파단 되지 않는 하중을 피로 한도(fatigue limits)로 정하였다. 스프링강의 부식피로강도를 평가하기 위한 염화물 부식 환경은 다양하겠으나, 동결기 제설, 제빙용으로 노면에 살포되는 염화칼슘 또는 소금이 용해되었을 때의 농도를 정확히 측정할 수 없고, 일정하지 않기 때문에, 본 실험에서는 인공해수에 해당하는 3.5wt.% NaCl 수용액을 사용하였다. 원통형 코일스프링의 피로내구성에 대한 부식 환경의 영향이 충분히 반영되도록 스프링 소선의 코팅 면을 앞에서 설명한 바와 같이 부분적으로 제거하고, 제거 면에 수용액을 일정한 주기로 분사 시켰다. 이외의 실험 조건들은 Table 4에 정리 하였다.

4.3 시험결과 및 고찰

Fig. 7은 25℃, 3.5wt.% NaCl 수용액의 부식환경 하에서 부식피로시험을 수행하여 얻은 스프링강(SAE9254) 의 하중범위(ΔP)와 피로수명관계(Nf)를 공기 중 결과와 비교 도시한 것이다. 부식 피로의 경우 특정한 피로강도 추세곡선의 형태가 얻어지며, 여기서 무한수명(106 cycles)에 대한 부식피로한도는 206.95kgf 이다, 공기 중 피로수명은 최대변위156.3mm (308.9kgf)에서450,500cycle이 었으나, 변위 145mm (287.1 kgf) 에서는 3,500,000cycle이상에서도 파괴가 일어나지 않았다.

특히, 공기 중에서 코일스프링에 피로하중이 작용하는 경우, 최대변위에서 원통형 코일 스프링 내측 소선의 외 표면에서 피로 균열이 발생되어 파단에 이르는 결과를 나타내었는데, 이것은 FEM 해석 결과에 있어서 최대전단응력이 역시 코일 스프링 내측 소선의 외 표면에서 발생하는 결과와 일치하였다. 그리고 공기 중에서 상재적으로 양호한 피로내구성을 보이는 것은 Fig8에 제시한 바와 같이 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 영향 때문인 것으로 간주된다. 즉, 쇼트피닝을 고려한 코일 스프링의 FEA해석 결과에서는 쇼트 피닝을 고려하지 않은 경우에 비해 최대전단응력의 크기는 최소변위 86.3mm에서 30% 정도 감소하였고, 변위가 증가 할 수록 그 차이는 감소하며

Table 4 Corrosion fatigue test condition

Condition	Content	
Displacement Condition	Displacement range	70mm ~156.3mm
	Displacement frequency	2.7 Hz
Environment Condition	Temperature	RT
	Solution	3.5wt.% NaCl soluti
	Solution injection interval	5/30 sec

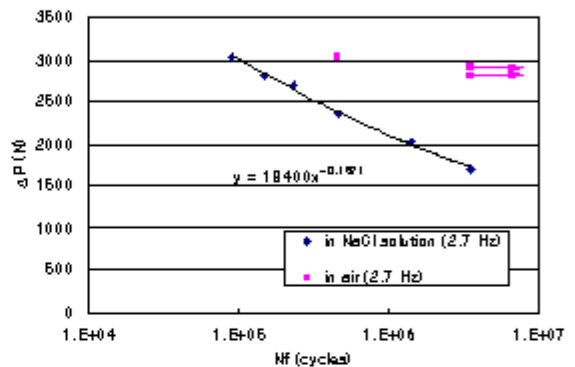


Fig. 7 ΔP-Nf curve of coil spring in 3.5wt.%NaCl solution and in air

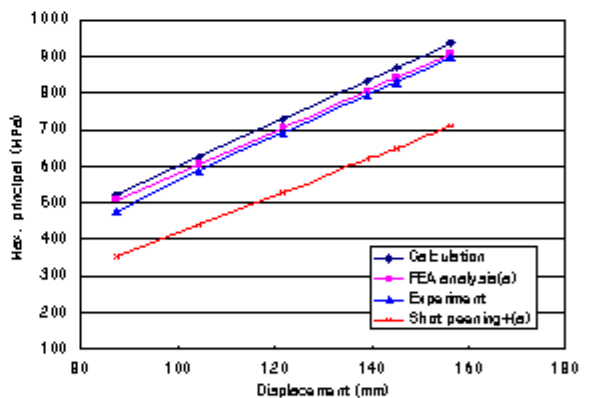


Fig. 8 Relation between stress and displacement

최대 156.3mm에서 20%로 감소하는 것으로 나타났다.

이것은 쇼트피닝의 영향으로 코일스프링의 중심 축 방향 압축하중에 의한 소선 외 표면의 최대전단응력이 감소됨으로 인해 피로내구성이 향상되는 것으로 판단된다.

3.5wt.% NaCl Solution의 부식 환경에서 피로하중이 작용하는 경우, 재료의 파단은 부식 환경의 영향을 직접 받는 코팅면이 제거된 위치의 내측

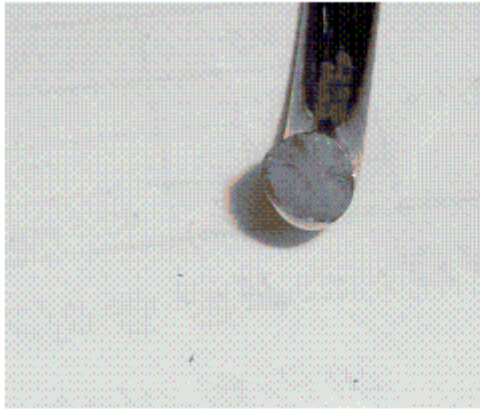


Fig. 9 Failure surface by corrosion fatigue

면(inner surface)에서 발생하였다. 이것은 코일 스프링 내측의 소선 외 표면에 발생하는 최대 전단응력과, 재료와 수용액의 전기화학적 부식작용(electro-chemical corrosion reaction)으로 인한 국부적인 공식(pitting corrosion) 현상이 중첩되어 파단된 것으로 판단되며, 이러한 현상은 Fig.9로부터 확인할 수 있었다. 3) 따라서 원통형 코일스프링의 경우, 공기 중에서는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 영향으로 피로내구성이 효과적으로 개선됨을 알 수 있으나, 사용 중에 소선의 코팅 층이 벗겨지게 되면, 동결기 제설, 제빙용으로 노면에 살포되는 염화물 등에 의해 쉽게 판단될 수 있음을 의미하므로 특별한 주의가 요구된다.

그리고 부식 환경을 고려한 원통형 코일스프링의 설계에 있어서는 Fig. 7의 결과가 충분히 고려되어야 할 것으로 판단되며, Fig 7로부터 코일스프링의 부식피로설계를 위한 하중 범위와 피로수명의 관계는 다음의 식으로 나타내어진다.

$$\Delta P = 1877.6 N_f^{0.1569} \text{-----}(1)$$

5. 결론

본 연구에서는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 승용차용 원통형 코일스프링(SAE9254)의 부식피로강도에 미치는 영향을 검토하기 위해, 운전 중 구동력을 고려한 응력해석과 25℃, 3.5wt.% NaCl 수용액 분위기에서 부식피로강도를 평가하

였다. 이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 승용차용 원통형 코일스프링의 공기 중 피로내구성은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 영향으로 효과적인 개선이 가능함을 확인하였다.

2) 승용차용 원통형 코일스프링의 25℃, 3.5wt.% NaCl 수용액 분위기에서 부식피로강도는 공기 중에 비해 매우 감소하는 경향을 보였다. 이는 부식열화에 의해 표면층에 존재하는 압축잔류응력의 영향이 상당히 감소됨을 의미한다.

3) 25℃, 3.5wt.% NaCl 수용액 분위기에서 코일스프링의 무한수명(10⁶ cycles)에 해당하는 피로하중은 206.95kgf로 평가되었다

4) 25℃, 3.5wt.% NaCl 수용액 분위기에서 부식피로설계를 위한 하중 범위와 피로수명 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta P = 1877.6 N_f^{0.1569}$$

후 기

본 연구는 (주) 현대자동차와 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터에 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 鄭善謨, 韓東哲, 1996, "機械設計學", 東明社, pp 481~484
- (2) ASTM, 1993 "Standard Practice for conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", E466~82, pp 567~571
- (3) Denny A. Jones, 1996, "Principles and prevention of corrosion", Prentice-Hall, inc. pp.244~245