

## EEGR 밸브의 성능해석

김호상\* , 김덕진 , 최진경 (고등기술연구원) , 윤대호 , 박상권 (한국이엠에스)

### Performance Analysis of EEGR Valve

H. S. Kim, D. j. Kim, J. K. Choi (IAE), D. H. Yoon, S. K. Park (KEMSCO)

#### ABSTRACT

This paper presents a performance Analysis of electrically exhaust gas re-circulation valve using commercial electromagnetic simulation software, Flux2D. Under the assumption of 2D axi-symmetric magnetic field, the characteristics of EEGR valve by revising the design parameter, has been investigated by estimating the variation of thrust force with respect to the pintle position. The mode shapes and the frequency response functions were computed by using three dimensional finite element modeling of the whole EEGR valve and their accuracies were verified with experimental FFT analysis technique.

**Key Words** : Electrically Exhaust Gas Re-circulation valve(EEGR 밸브), Finite element method(유한요소법), Magnetic field analysis(자기장 해석), Frequency response function(주파수 응답곡선)

#### 1. 서론

자동차 엔진용 EEGR 밸브 (Electrically Exhaust Gas Re-circulation Valve; 배기가스 재순환)는 유해 배기가스 저감용 부품으로 연소가 끝난 배기가스의 20-30% 정도를 엔진 매니폴드에 재순환시켜 배기가스 중 NO<sub>x</sub>의 양을 감소시키는 장치이다. 본 논문에서 다루고 있는 EEGR 밸브는 종래의 EGR 밸브 (Exhaust Gas RE-circulation)의 부압에 의한 구동방식이 아니라 전기적인 코일에 의한 구동방식으로 밸브의 상측에 위치한 위치센서에 의해 가동자의 위치를 감지하여 작동하게 되므로 종래의 EGR 밸브에 비해 연속적인 위치제어가 가능하여 효율적인 배기가스 재순환 기능을 수행할 수 있다. 근래에 전세계적으로 환경오염 규제가 강화되고 있기때문에 이러한 배기가스 저감장치의 중요성은 날로 증가하고 있으며 향후 그 적용이 확대될 것으로 전망된다. 본 논문에서는 EEGR 밸브에 대해 기존 설계사양을 토대로 EEGR 밸브의 성능을 예측하고 각종 설계인자의 영향을 검토하였으며, 동적 취약구조를 확인하기 위하여 전체 구조의 모드 형상 및 고유진동수를 구하여 조립상태 및 조립위치의 안정성을 판별하여, 추후 독자 설계를 위한 설계데이터축적을 목표로 하였다.

#### 2. 직류자장의 지배방정식

지배방정식을 유도하기 위한 맥스웰 방정식과 보조방정식, 유한 요소법을 이용한 직류자장의 지배방정식은 다음과 같다.

$$B = \nabla \times A$$

$$\nabla \cdot A = 0$$

$$\nabla \times H = J_0$$

$$B = \mu \cdot H$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times (\nu \cdot \nabla \times \vec{A}) - \vec{J} = 0$$

여기서  $A$ 는 자기 벡터 포텐셜,  $J$ 는 입력전류밀도이다.

위의 방정식을 축대칭 2차원 정자계에서의 지배방정식으로 정리하기 위해서는 다음과 같은 조건이 필요하다. 자계가  $\theta$ 방향에 대해 일정하게 분포하기 위해서는 입력전류  $J$ 는  $\theta$ 방향성분 만이 존재하여

야 하며, 또한  $J_\theta$ 는  $\theta$ 방향의 변화가 없이 일정해야 한다.

$$J_r = J_z = 0$$

$$\frac{\partial J_\theta}{\partial \theta} = 0$$

위의 조건을 정리하면 다음과 같은 2차원 정자계 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{\nu_z}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_r \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = -J_\theta$$

### 3. 자기장 해석

해석에 사용된 EEGR 밸브는 현재 생산되고 있는 제품으로서 Table 1과 같은 제원을 갖고 있으며 대략적인 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 EEGR 밸브는 lower stator, upper stator, 보빈(bobbin), 코일(coil), 핀틀(pintle), 셸(shell), 아마추어(armature), 와셔(washer)등으로 구성되며 발생된 자기력과 이에 반대방향으로 작용하는 용수철풍력에 의해 인가하는 전류의 크기에 따라 핀틀이 상하운동을 하게 된다. 자기력이 용수철풍력보다 커지게 되면 밸브가 열리면서 배기가스가 흡입구 쪽으로 순환을 하게 된다. 배기가스의 양을 조절하기 위한 핀틀의 위치는 센서에 의해 제어된다.

Table 1 EEGR 밸브의 제원

정격 입력전압 [V]	13.5
턴수 [T]	928
코일경 [mm]	0.433
코일저항 [ $\Omega$ ]	8.0
인덕턴스 [mH]	80.0
스트로크 [mm]	5.0

본 논문에서 사용된 해석방법은 2차원 축대칭 해석으로서 EEGR 밸브의 형상이 축대칭임을 이용한 것이며, 해석 정확도의 확보와 계산시간의 감소를 위해 2차원 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 자장의 종류는 정자장해석으로서 핀틀의 상하운동시 각각의 위치에서의 추력을 가상변위방법을 이용하여 구하였다. 해석대상의 모델링은 자기장 해석을 위하여 EEGR 밸브를 구성하는 각 부품 중 자성체의 성질을 갖는 아마추어, upper stator, lower stator, 셸, 와셔 및 보빈과 코일, 핀틀에 대하여 2차원 축대칭 해석이 가능하도록 모델링을 수행하였으며 요소분할은

Fig. 2에서와 같이 상용 전자기장 해석 S/W인 Flux 2D의 자동메쉬기능을 사용하여 삼각형 요소로 요소수 6,000개, 절점수 12,000개로 설정하였으며 경계조건은 공기부분의 영역과 중심축에 고정경계조건(Dirichlet boundary condition)을 인가하였다.

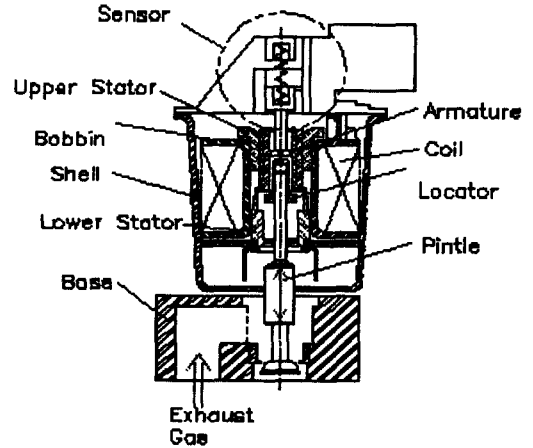


Fig. 1 EEGR 밸브의 형상

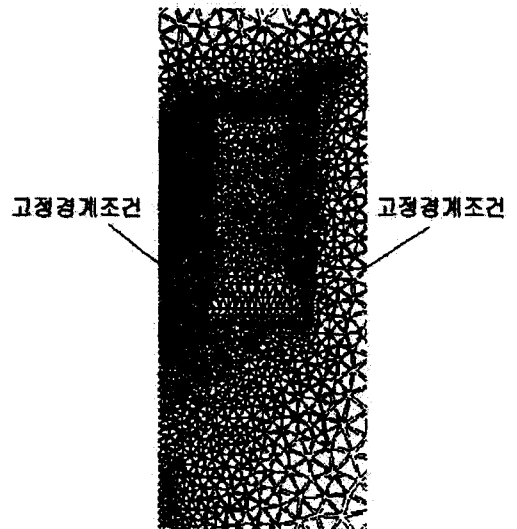


Fig. 2 유한요소메쉬 및 경계조건

EEGR 밸브는 인가된 전원에 의하여 발생된 자기력에 의해 핀틀이 상하운동을 하게 되는 구조로서 작동성은 발생추력의 크기와 용수철풍력에 의해서 결정된다. 따라서 2차원 축대칭 자기장 해석을 통하여 핀틀의 위치에 따른 발생추력을 계산하였다. Fig. 3은 핀틀의 위치에 따른 EEGR 밸브의 추력과 용수철풍력의 곡선을 나타낸다.

Fig. 3에서 변위가 0 [mm]일 때는 아마추어와 핀틀이 가장 높은 위치에 있을 때이고, 4.5 [mm]인 경우는 아마추어와 핀틀이 lower stator부분까지 거의 닿은 상태를 나타낸다. 자기력 곡선이 변위에 따라 감소하는 형태를 나타내는데 이는 변위가 작을 때 자속의 집중도가 크기 때문인 것으로 볼 수 있다. 용수철의 강성은 실제 측정을 하였으며 스프링 상수는 측정결과 0.3971 [N/mm]로 나타났으며, Fig. 4의 용수철력의 곡선은 이미 수축되어 있는 길이를 고려하여 구하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 자기력과 용수철력의 두 가지 곡선을 비교했을 때 발생추력의 크기는 2-5[N]의 여유가 전체 변위에서 존재하고 있음을 확인하였다.

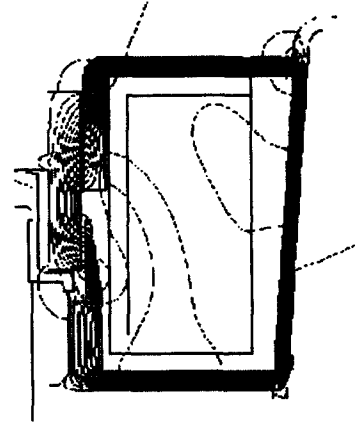


Fig. 5 등자속선도  
( 변위 = 4.5 [mm] )

### 3. 동특성 해석

해석대상인 EGR 밸브의 동적 취약구조를 확인하기 위하여 전체 구조의 모드형상 및 고유진동수를 구해 조립상태 및 조립위치의 안정성을 판별하였다. 조립 이후에 각 부품간의 상호 연계 조건으로 낮은 주파수에서 고유진동수가 생성될 수 있기 때문에 이에 대한 해석이 선행되어야 한다. 해석결과 예상한 바와 같이 1차 고유진동수는 작은 영역에서 생성됨을 확인할 수 있었다. 모드 형상 해석에서 1, 2차 진동 모드는 중심선 대칭구조를 갖는 EGR 밸브의 특성상 낮은 주파수에서 나타나며 4, 5차 진동모드 형상도 같은 양상을 갖는다. 1, 2차 모드 형상은 베이스 상부의 셸 구조가 좌우로 흔들리면서 진동하는 모습을 보이며, 3차 진동모드는 셸부가 상하 방향으로 이동하는 형태를 갖는다. 본 논문에서는 EGR 밸브의 구동대역 (2,000 Hz 이하)에 해당하는 1, 2, 3차 고유진동에 대한 요소의 진동수별 취약구조를 확인하였다. Fig. 6은 전체 구조의 1차 고유진동수에 의한 진동형상을 나타낸다.

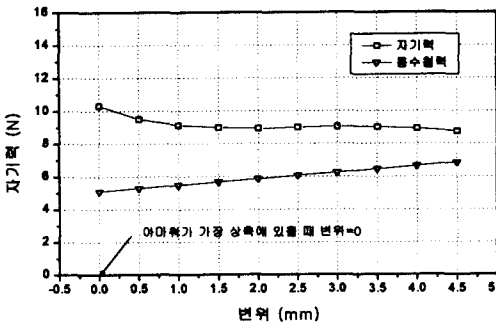


Fig. 3 위치에 따른 추력 곡선

Fig. 4는 변위가 0 [mm]인 경우로 아마추어와 핀틀이 가장 높은 위치에 있을 때의 등자속선도를 나타낸 것이고, Fig. 5는 변위가 4.5 [mm]인 경우로 아마추어와 핀틀이 자기력에 의해 하강하였을 때의 등자속선도를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 변위가 0 [mm]일 경우 lower stator와 아마추어에 보다 많은 자속선이 집중됨을 확인할 수 있다.

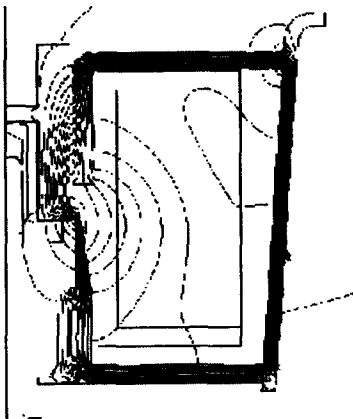


Fig. 4 등자속선도  
( 변위 = 0.0 [mm] )

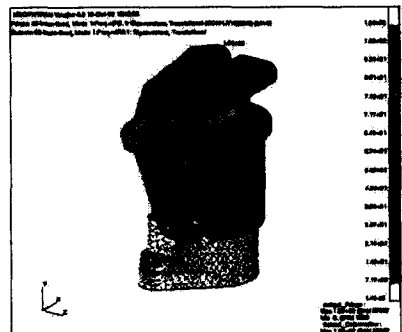
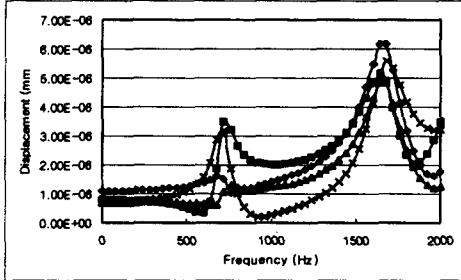
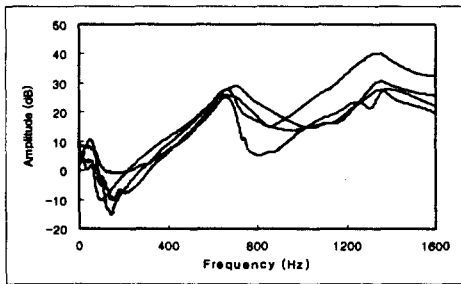


Fig. 6 1차 모드형상 (615 Hz)

진동해석을 통하여 얻을 수 있는 결과에는 전체 구조물의 모드 형상뿐만 아니라, 주파수 응답곡선 (FRF : Frequency response function)을 구할 수 있는데 이는 해석뿐만 아니라 FFT 주파수 분석기를 사용하여 실험을 통해서도 얻을 수 있다.

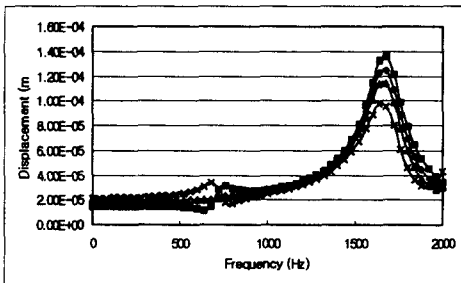


(a) 해석결과

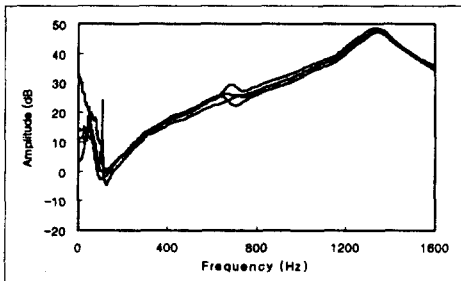


(b) 실험결과

Fig. 7 하부를 반경방향으로 가격한 경우



(a) 해석결과



(b) 실험결과

Fig.8 상부를 축방향으로 가격한 경우

Fig. 7은 하부를 반경방향으로 가격한 경우이고, Fig. 8은 상부를 축방향으로 가격한 경우의 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다.

Table 2 해석결과와 실험결과와의 비교

고유진동수	해석결과(Hz)	실험결과(Hz)	오차(%)
1차	615, 619	650	5.3
2차	1,496	1,350	10.8
3차	2,039	-	-
4차	2,288	-	-

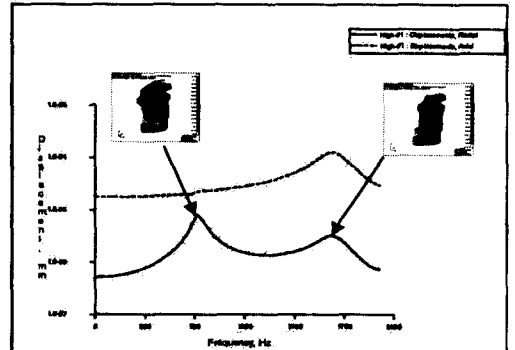


Fig. 11 EGR 밸브의 FRF 곡선과 모드형상 비교

Table 2와 Fig. 11은 EGR 밸브의 해석 및 실험결과를 비교한 것으로 해석 및 실험결과가 5-10% 내외의 근소한 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

현재 생산중인 EGR 밸브의 성능해석을 수행하기 위하여 자기장 해석 및 동특성 해석을 수행하였다. 아마추어의 위치에 따른 정자장 해석을 통해 발생추력을 계산하여 용수철에 의한 복원력과 비교한 결과 발생추력이 2-5[N]정도의 여유를 갖고 있었으므로 EGR 밸브의 양호한 작동성을 확인할 수 있었다. 동특성에 대한 해석결과와 실험결과 역시 근소한 오차를 가지는 것을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers, 1995.
2. 임달호, "전기계의 유한요소법," 동명사, 1986.