

EGR Valve의 구조 안전성 해석에 관한 연구

한문식*, 조재웅⁺

(논문접수일 2011. 03. 25, 수정일 2011. 07. 05, 심사완료일 2011. 08. 22)

Study on Structural Safety Analysis of EGR Valve

Moon Sik Han*, Jae Ung Cho⁺

Abstract

This study analyzes thermal stress and durability fatigue on the modelling of EGR valve. In case of 10% opening at its inlet, the minimum temperature gets cool as 3 times as inlet temperature. The maximum equivalent stress becomes lowest as the value of 2.6274×10^9 Pa and fatigue life becomes highest as 23.657 Cycle. But the minimum temperature gets cool as 2.2 times as inlet temperature in case of 50% opening at its inlet. The equivalent stress becomes higher and fatigue life becomes lower than in case of 10% opening. In case of 100% opening at its inlet, the minimum temperature gets cool as 0.2 times as inlet temperature. The equivalent stress becomes lower and fatigue life becomes higher than in case of 50% opening. Maximum equivalent stress and total deformation are shown at the closing of EGR valve by the pressure of inflow gas. The structural analysis result of this study can be effectively utilized with the design of EGR valve by investigating prevention and durability against its damage.

Key Words : EGR valve(배기가스재순환밸브), Opening and closing condition(개폐조건), Temperature(온도), Thermal stress(열응력), Fatigue life(피로수명), 내구성(Durability)

1. 서론

현재 자동차 업계에서는 소비자의 자동차 성능에 대한 요구와 시스템의 개선^(1,2) 등으로 엔진의 성능을 감소시키지 않으면서 배출가스 허용 규제를 만족시키는 것은 매우 중요하다. 직접 연료 분사 방식의 가솔린엔진의 경우에는 엔진의 연비나 배출가스 저감에 상당한 효과를 가져왔지만, 이러한 희박 연소 시 발생하는 NOx는 기존의 삼원 촉매로는 정화가 불충분한 현실이다^(3,4). 이에 대한 대안으로서, 연소 최고 온도를 낮추어 NOx 생성을 억제해주는 EGR에 대한 연구가 중요시 되고 있다. 특

히 공회전이나 저속 및 고속 rpm 및 고 부하 같은 상태일 때는 EGR을 적용하게 되면 연소안정성을 유지하는 것이 어렵게 된다. 따라서 EGR을 적용하기 위해서는 정밀하고 빠른 응답성을 충족시킬 수 있는 EGR 밸브의 사용으로 EGR양의 정확한 제어를 통해 엔진 성능을 최적화시킴과 동시에 실제 차량에 EGR 밸브를 장착 시에 엔진룸의 온도 상승으로 인한 고온의 열전달로 인하여 밸브 내 솔레노이드의 손상이 우려되므로 그에 대한 연구가 필요할 것이다⁽⁵⁻⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 EGR(배기가스재순환) 밸브를 CATIA를 통하여 모델링을 한 후 ANSYS로 내구성 해석을 하였다⁽⁸⁾. 연구의 조건은 엔진 rpm이 1500,

* 계명대학교 기계자동차공학과

+ 교신저자, 공주대학교 기계자동차공학부(jucho@kongju.ac.kr)
주소: 330-717 충청남도 천안시 공업대길 34

1800, 2000일 때 및 밸브입구의 개방을 완전 밀폐(Closing), 개방(Opening) 10%, 50%, 100% 4가지로 구분하여 해석을 하였다. 이에 대한 값의 엔진 제원은 1.5L DOHC 16 Valve를 기준으로 하였으며 제시한 조건들은 실제 제원으로 맞춘 것이다. 먼저 각각의 온도 분포에 대한 해석을 하였고, 이 결과를 토대로 열 변형, 열응력, 피로도에 대한 해석을 하였다. 마지막으로 EGR Valve의 입구가 완전 밀폐 시 입구에 전달되는 배기가스의 압력이 EGR Valve의 입구에서의 Control bar에 어떠한 영향을 끼치는가에 대해서도 해석을 하였다. 이러한 본 연구의 결과를 종합하여 EGR 밸브의 구조 안전설계에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

2. 모델 및 해석

2.1 연구 모델

본 연구에서는 치수를 임의로 설정하여 특정의 모델과 최대한 흡사하도록 CATIA로서 모델링을 하였다. 본 연구에서의 EGR Valve 모델은 Fig. 1에 나타내었다. EGR Valve의 입구를 개방에 따라 완전 밀폐(Closing), 개방(Opening) 10%, 50%, 100%의 4가지의 모델로 나누었고 각각의 절점 수와 요소 수는 Table 1에 나타내었고 밸브의 열린 위치에 따라 메시 작업을 하였다. Fig. 2는 완전 밀폐되었을 때의 메시를 나타내었다.

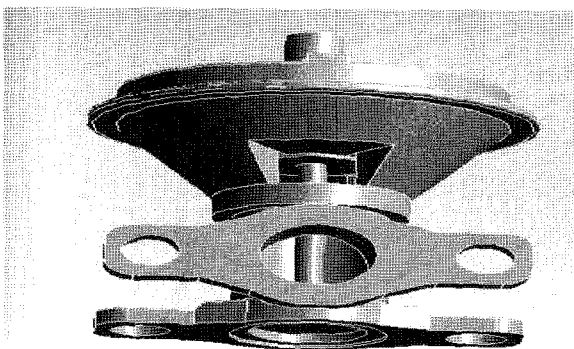


Fig. 1 Model of EGR Valve

Table 1 Numbers of node and element of model meshes

Inlet opening of EGR valve(%)	Node	Element
Closing(0%)	22,301	11,469
10%	26,129	13,259
50%	23,822	12,240
100%	22,187	11,403

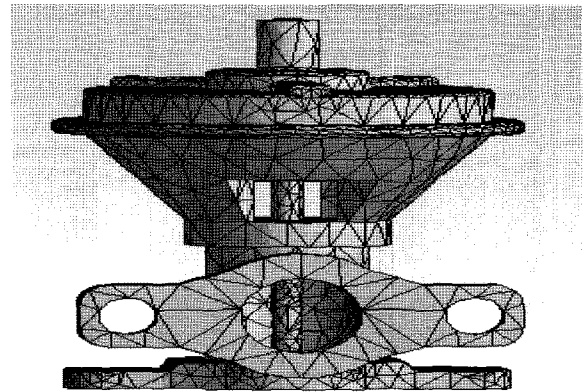


Fig. 2 Closing model mesh of EGR valve

2.2 열해석

EGR valve의 대류 열전달 계수는 $5W/m^2\text{C}$ 로, 대류 온도는 보통 주행 시 엔진룸 온도인 80C 로 설정을 하였다. 또한 이 연구에서는 3가지의 엔진 rpm을 적용하여 3경우의 EGR valve의 개방을 두고 해석 하였다. 이에 대한 입구 온도가 적용된 위치와 온도는 각각 Fig. 3 및 Table 2에 나타내었다. 그리고 물성치는 구조용 강으로 하였다.

대류와 온도 조건을 주고 온도 해석을 한 결과, 온도 분포의 모습은 EGR valve의 개방에 따라서는 차이를 보였지만 같은 개방에 따른 rpm의 차이에 따라서는 온도 분포 형상은 비슷하나 최저 온도와 최고온도가 다르게 나옴을 알 수 있었다. 대표적으로 엔진 회전수 1500rpm에서 완전 밀폐, 10, 50, 100%

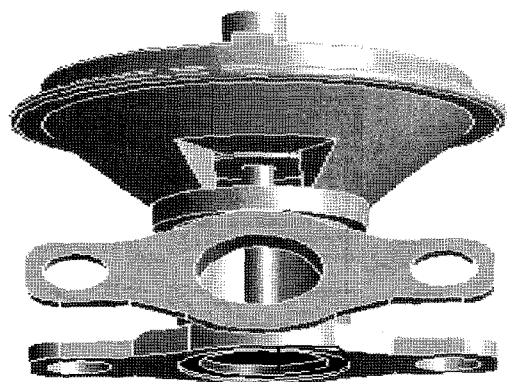


Fig. 3 Constraint condition applied on inlet temperature

Table 2 Inlet temperature according to engine revolution

Engine revolution(rpm)	Inlet temperature(C)
1,500	200
1,800	210
2,000	247

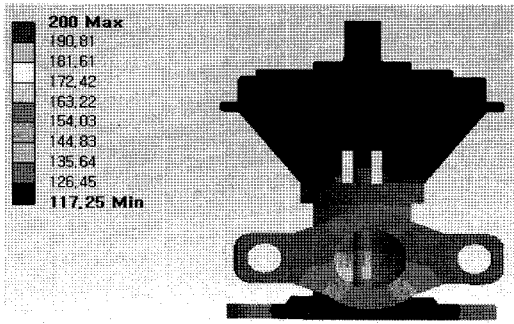


Fig. 4 Temperature(°C) at closing of inlet and 1500rpm of engine revolution

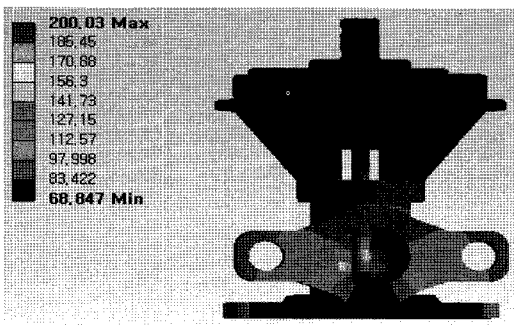


Fig. 5 Temperature(°C) at 10 % opening of inlet and 1500rpm of engine revolution

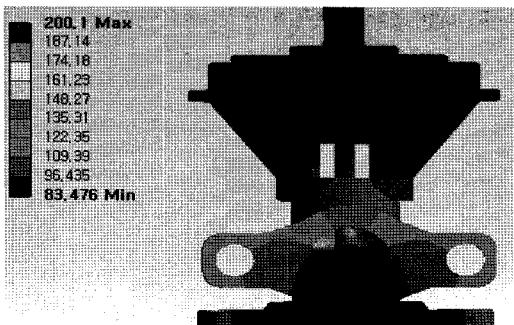


Fig. 6 Temperature(°C) at 50 % opening of inlet and 1500rpm of engine revolution

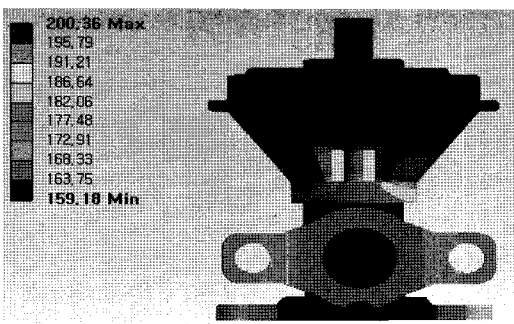


Fig. 7 Temperature(°C) at 100 % opening of inlet and 1500 rpm of engine revolution

Table 3 Minimum and maximum temperature according to opening degree(%) of inlet and engine revolution

Inlet opening of EGR valve (%)	Engine revolution (rpm)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)
Closing(0%)	1,500	117.25	200
	1,800	120.36	210
	2,000	131.84	247
10%	1,500	68.847	200.03
	1,800	71.479	210.03
	2,000	81.216	247.04
50%	1,500	83.476	200.1
	1,800	86.481	210.11
	2,000	99.359	247.13
100%	1,500	159.18	200.36
	1,800	165.78	210.76
	2,000	190.19	247.75

열린 상태에서의 온도 분포 값을 Fig. 4~7에 나타내었다. 또한 완전 밀폐, 10, 50, 100% 열린 상태에서의 엔진 회전수 1500, 1800, 2000rpm에서의 최고온도와 최저온도는 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서와 같이 전반적으로 엔진 속도가 1500, 1800 및 2000 rpm에서 EGR valve의 입구가 10%로 열려 있을 때 입구 온도인 최고 온도에 비하여 최저 온도가 3배가량 식어짐을 알 수 있었다.

그러나 EGR valve 입구가 50%로 열려 있을 때는 오히려 입구 온도에 비하여 최저 온도가 2.2배가량만 식어짐을 알 수 있었다. 더욱이 EGR valve 입구가 100%로 열려 있을 때는 오히려 입구 온도에 비하여 최저 온도가 0.2 배가량만 식어짐을 알 수 있었다. 따라서 EGR valve 입구가 10%로 열려 있을 때 그 온도 저하가 효율적으로 일어남을 알 수 있었다.

2.3 EGR valve의 입구의 개방율(Opening) 100% 시 열변형, 열응력 및 피로 수명 해석

열변형 해석은 온도 분포 해석을 토대로 한 후, 아래 Fig. 8과 같이 2개의 변 측, EGR valve의 아래 입구 부분과 위쪽 출구 부분에 고정 지지를 하였다.

이와 같이 EGR valve의 입구와 출구에 고정 지지 작업을 한 후, 열변형율과 등가응력 및 피로 수명을 해석하였다. 피로하중의 조건은 Fig. 9에 나타내었다.

EGR valve의 밸브의 밸브 입구의 개방이 100%이고 엔진 회전수 1500 rpm에 대한 것으로 Fig. 10부터 13은 열 변형율, 열응력, 수명 및 안전계수를 보이고 있다.

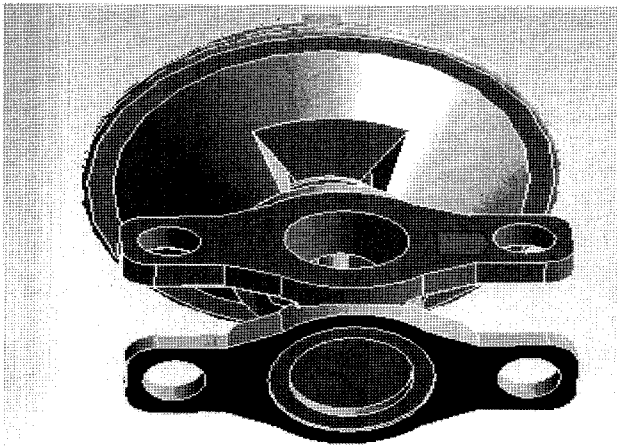


Fig. 8 Fixed support condition at lower inlet and upper outlet areas

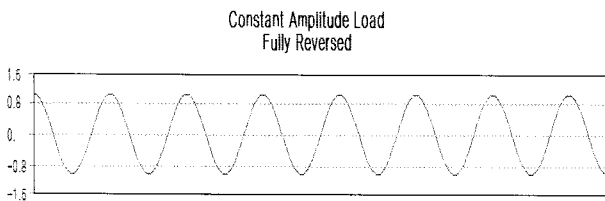


Fig. 9 Fatigue loading condition

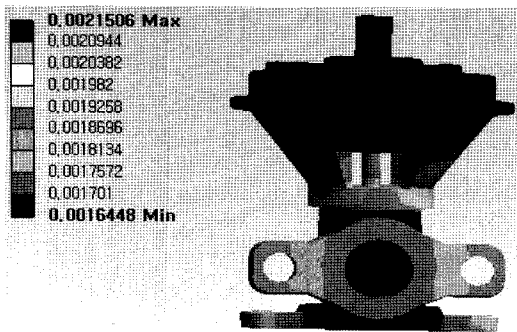


Fig. 10 Thermal strain at 100% opening of inlet and 1500rpm of engine revolution

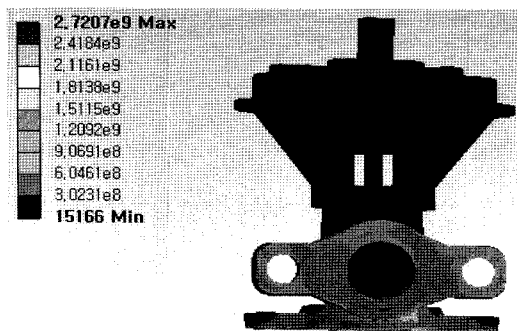


Fig. 11 Equivalent stress(Pa) at 100% opening of inlet and 1500rpm of engine revolution

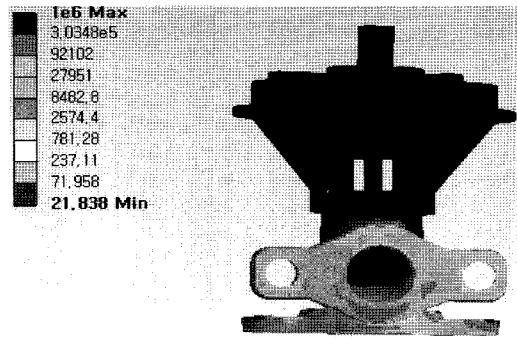


Fig. 12 Life at 100% opening of inlet and 1500 rpm of engine revolution

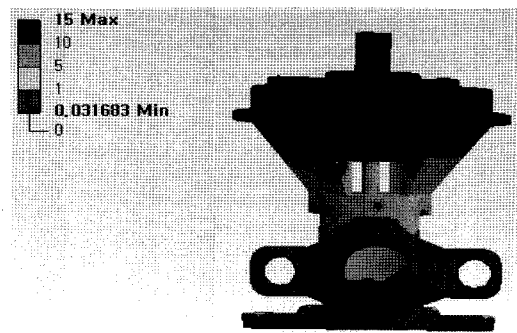


Fig. 13 Safety factor at 100% opening of inlet and 1500 rpm of engine revolution

Table 4 Analytical results according to engine revolution at 100% opening of inlet

Engine revolution (rpm)	Item	Minimum value	Maximum value
1,500	Maximum thermal strain	$1.6448 \times 10^{-3} \text{ m/m}$	$2.1506 \times 10^{-3} \text{ m/m}$
	Maximum equivalent stress	15166Pa	$2.7207 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Maximum life	21.838Cycle	
	Minimum safety factor	3.1683×10^{-2}	
1,800	Maximum thermal strain	$1.7239 \times 10^{-3} \text{ m/m}$	$2.2835 \times 10^{-3} \text{ m/m}$
	Maximum equivalent stress	16305Pa	$2.8448 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Maximum life	19.751Cycle	
	Minimum safety factor	3.0301×10^{-2}	
2,000	Maximum thermal strain	$2.0164 \times 10^{-3} \text{ m/m}$	$2.728 \times 10^{-3} \text{ m/m}$
	Maximum equivalent stress	20630Pa	$3.4148 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Maximum life	13.711Cycle	
	Minimum safety factor	2.5243×10^{-2}	

또한 Table 4는 엔진 회전수 1500, 1800, 2000rpm에 따른 열변형율, 열응력, 수명 및 안전계수를 나타내고 있다. 전반적으로 rpm이 증가함에 따라 열 변형율과 열응력은 증가하나 수명 및 안전계수는 감소함을 알 수 있다. 역시 EGR valve의 입구 개방을 완전 밀폐(Closing), 개방(Opening) 10%, 50%시에 도 이러한 경향은 Table 4에서와 같다. 그리고 Table 5는 엔진 회전수가 1500 rpm에서의 밸브의 입구 개방을 완전 밀폐(Closing), 개방(Opening) 10%, 50%, 100% 4가지로 구분하여 열 변형율, 열응력, 수명 및 안전계수를 보이고 있다. EGR valve 입구가 10% 개방 시에 최대의 등가응력이 2.6274×10^9 Pa로서 가장 작아지고 최대의 피로수명은 23.657Cycle로 가장 커짐을 알 수 있었다. 이후 50%개방 시에는 오히려 그 등가응력이 높아지고 피로수명도 작아짐을 알 수 있었다. 그러나

Table 5 Analytical results according to engine revolution at 1500rpm of engine revolution

Opening degree of inlet	Item	Minimum value	Maximum value
Closing of inlet	Maximum thermal strain	1.1425×10^{-3} m/m	2.1411×10^{-3} m/m
	Maximum equivalent stress	7184.4Pa	2.9022×10^9 Pa
	Maximum life	18.978 Cycle	
	Minimum safety factor	2.9702×10^{-2}	
10% opening of inlet	Maximum thermal strain	5.6159×10^{-4} m/m	2.1413×10^{-3} m/m
	Maximum equivalent stress	10733Pa	2.6274×10^9 Pa
	Maximum life	23.657Cycle	
	Minimum safety factor	3.2808×10^{-2}	
50% opening of inlet	Maximum thermal strain	7.3698×10^{-4} m/m	2.1466×10^{-3} m/m
	Maximum equivalent stress	12745Pa	2.8914×10^9 Pa
	Maximum life	19.119 Cycle	
	Minimum safety factor	2.9812×10^{-2}	
100% opening of inlet	Thermal strain	1.6448×10^{-3} m/m	2.1506×10^{-3} m/m
	Equivalent stress	15166Pa	2.7207×10^9 Pa
	Life	21.838Cycle	
	Safety factor	3.1683×10^{-2}	

100% 개방 시에는 등가 응력이 높아지고 피로수명도 작아짐을 알 수 있었다. 엔진 회전수 1800, 2000rpm에 따른 경향도 비슷한 양상을 보이고 있다.

2.4 EGR valve의 완전 밀폐(Closing)시, 입구 Control bar에 가해지는 변형 및 응력 해석

EGR valve의 완전 밀폐(Closing)시, 입구 부근의 Control bar에 가해지는 변형 및 응력 해석을 하기 위해서는 Fig. 14와 같이 EGR valve 입구면에 압력을 가하고, Fig. 15와 같이 입구와 압력이 가해지는 Control bar를 제외한 나머지 면에 고정 지지를 하여 등가응력과 전변형량 해석을 한다. 또한 이 같은 해석을 위와 같이 rpm에 따른 입구 압력 3가지 경우를 주어 응력 해석을 하였다. 그 조건은 Table 6에 나타내었다.

EGR valve가 완전 밀폐(Closing)시 입구에 있는 Control bar에 가해지는 영향을 고찰하고 Control bar의 고장으로 인한

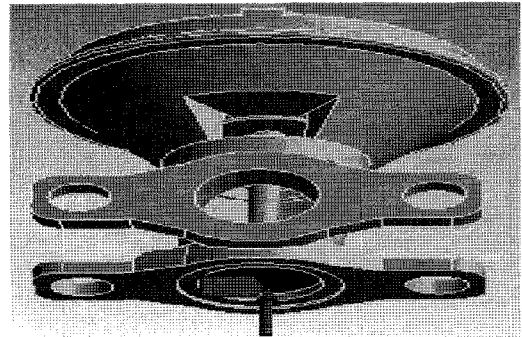


Fig. 14 Position applied on inlet pressure at closing of inlet

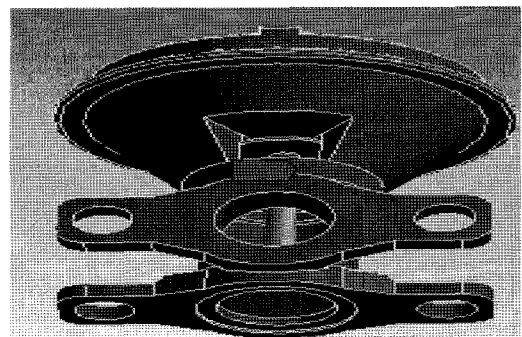


Fig. 15 Fixed condition at closing of inlet

Table 6 Applied pressure at closing of inlet according to engine revolution

Engine revolution(rpm)	Inlet pressure(Pa)
1,500	86,000
1,800	95,000
2,000	105,000

개방이 되지 않을 시를 가정으로 하여 유입 가스의 압력을 가하였다. EGR valve가 Closing 시 입구에 있는 Control bar에서의 등가응력과 전변형량 해석을 한 결과는 Fig. 16 및 17와 Table 7에 나타냈다.

Table 7에서와 같이 rpm이 높을수록 Control bar에 전해지

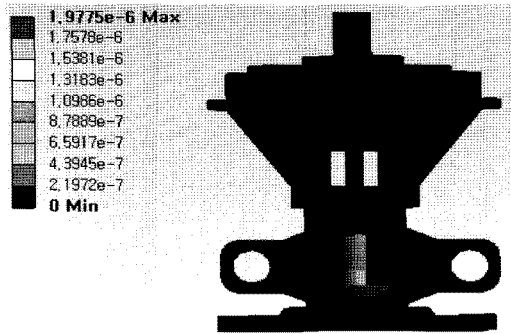


Fig. 16 Total deformation(m) at closing of inlet applied with pressure and 1500 rpm of engine revolution

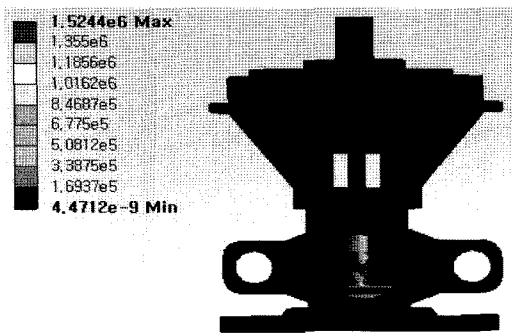


Fig. 17 Equivalent stress(Pa) at closing of inlet applied with pressure and 1500 rpm of engine revolution

Table 7 Stress and deformation according to pressure applied on control bar and engine revolution at closing of inlet

Engine revolution (rpm)	Item	Minimum value	Maximum value
1500	Total deformation	0 m	1.9775×10^{-6} m
	Equivalent stress	4.4712×10^{-9} Pa	1.5244×10^6 Pa
1800	Total deformation	0 m	2.1845×10^{-6} m
	Equivalent stress	4.9392×10^{-9} Pa	1.6839×10^6 Pa
2000	Total deformation	0 m	2.4144×10^{-6} m
	Equivalent stress	5.4591×10^{-9} Pa	1.8611×10^6 Pa

는 변형량 및 응력이 컸다. 이 또한 혹시라도 있는 고장에 대비하여 각 차량에 있어서 가장 높은 rpm에서도 견딜 수 있도록 Control bar가 만들어져야 될 것으로 사료된다.

2.5 종합해석결과

다음은 1500, 1800 및 2000rpm의 각 경우의 최대 열변형율, 최대 열응력, 최대 수명 및 최소 안전계수를 개방비율 즉 완전 밀폐, 10%, 50% 및 완전 개방(100%)에 따라 어떠한 관계를 가지는지를 그래프로서 각각 Fig. 18, 19, 20 및 Fig. 21 에

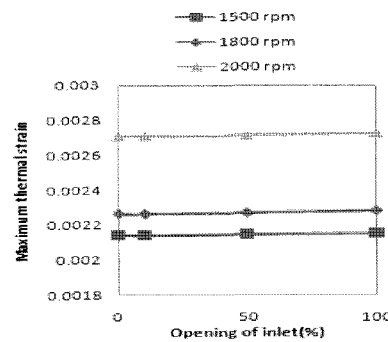


Fig. 18 Maximum thermal strain according to opening of inlet at 1500, 1800 and 2000rpm

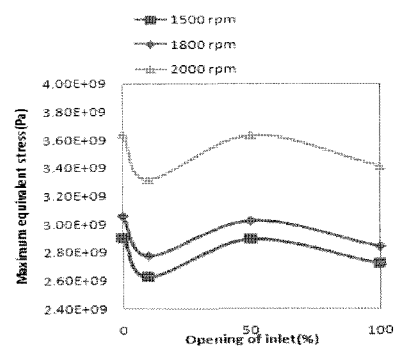


Fig. 19 Maximum equivalent stress according to opening of inlet at 1500, 1800 and 2000rpm

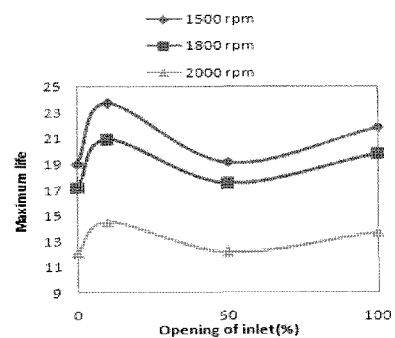


Fig. 20 Maximum life according to opening of inlet at 1500, 1800 and 2000rpm

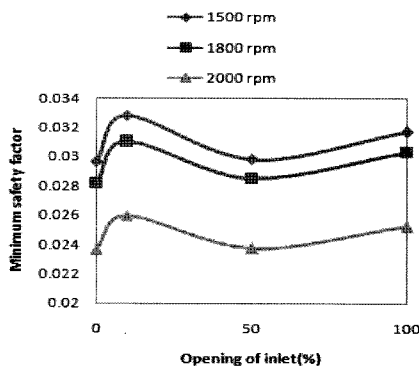


Fig. 21 Minimum safety factor according to opening of inlet at 1500, 1800 and 2000 rpm

나타내었다.

그림들에서도 볼 수 있는 바와 같이 전반적으로 rpm이 증가함에 따라 열 변형율과 열응력은 증가하나 수명 및 안전계수는 감소함을 알 수 있다. EGR valve 입구가 10% 개방 시에는 최대의 등가응력이 $2.6274 \times 10^9 \text{Pa}$ 로서 가장 작아지고 피로수명은 23.657 Cycle로 가장 커지고 안전계수도 가장 커짐을 알 수 있었다. 이후 50% 개방 시에는 오히려 등가응력이 높아지고 피로수명도 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나 100% 개방 시에는 등가 응력이 높아지고 피로수명도 작아짐을 알 수 있었다. 본 연구의 결과를 종합하여 EGR 밸브의 설계에 있어서 부분적인 또한 100%개방에 따른 배기가스의 영향에 대한 응력 해석을 한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는 데에 활용이 클 것으로 사료된다.

3. 결론

본 연구에서는 EGR valve를 모델링을 한 후 열응력 및 내구 안전성 해석을 하였다. 이에 대한 연구한 결과는 다음과 같다.

- (1) 전반적으로 EGR valve 입구가 10%로 열려 있을 때 입구 온도에 비하여 최저 온도가 3배가량 식어짐을 알 수 있었다. 그러나 EGR valve 입구가 50%로 열려 있을 때는 오히려 입구 온도에 비하여 최저 온도가 2.2배 가량만 식어짐을 알 수 있었다. 더욱이 EGR valve 입구가 100%로 열려 있을 때는 오히려 입구 온도에 비하여 최저 온도가 0.2배가량만 식어짐을 알 수 있었다. 따라서 EGR valve 입구가 10%로 열려 있을 때에 그 온도의 저하가 효율적으로 일어남을 알 수 있었다.
- (2) EGR valve 입구가 10% 개방 시에 최대의 등가응력이 $2.6274 \times 10^9 \text{Pa}$ 로서 가장 작아지고 피로수명은 23.657 Cycle로 가장 커지고 안전계수도 가장 커짐을 알 수 있었다.

- 이후 50% 개방 시에는 오히려 등가응력이 높아지고 피로수명도 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나 100% 개방 시에는 등가 응력이 높아지고 피로수명도 작아짐을 알 수 있었다.
- (3) EGR valve가 완전 밀폐되어 유입 가스의 압력이 작용하는 경우, 입구에 있는 Control bar에서 등가응력과 전변형량이 가장 컸다.
- (4) 본 연구의 결과를 종합하여 EGR 밸브의 설계에 있어서 개방율에 따른 배기가스의 영향에 대한 응력 해석을 한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는 데에 활용이 클 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Park, C. W., and Kim, C. G., 2008, "A Study on the Characteristics of the Electronic EGR Valve for Gasoline Engine", *Trans. of KSAE*, Vol. 16, No. 1, pp. 127~133.
- (2) Moon, B. C., Oh, Y. S., Park, K. Y., Kang, K. W., and Lee, T. Y., 2005, "A Performance Prediction of Diesel Engine with a CR-DPF and Cooled-EGR," *Trans. of KSMTE*, Vol. 14, No. 2, pp. 95~100.
- (3) Yoo, D. H., Nishida, O., and Lim, J. K., 2009, "Effects on Exhaust Gas Emission in Combined EGR System of Gas Engine and Diesel Engine," *Journal of the KOSME*, Vol. 33, No. 6, pp. 896~902.
- (4) Jang, S. H., and Koh, D. K., 2005, "The Effect of EGR on Exhaust Emissions in a Direct Injection Diesel Engine," *Trans. of KSAE*, Vol. 13, No. 5, pp. 188~194.
- (5) Park, C. W., and Kim, C. G., 2007, "A Study on Performance and Emission Characteristics for Gasoline-Hybrid Engine with EGR," *2007 Spring Conference Proceeding of KSAE*, Vol. 4, pp. 2320~2326.
- (6) Chung, J. E., Jin, Y. W., Kang, W., Chung, J. W., and Kang, J. H., 2005, "A Study on the Characteristics of the Electric EGR Valve for Small Diesel Engines," *2005 Fall Conference Proceeding of KSAE*, Vol. 1, pp. 510~515.
- (7) Kim, C. W., Seo, B. J., Chae, T. H., Oh, M. S., Kim, D. H., Lee, J. J., and Lee, B. H., 2006, "An Experimental Study on Combustion Characteristics by the Effects of EGR in SI Lean Engine", *2006 Spring Conference Proceeding of KSME*, pp. 107~118.
- (8) Swanson, J., 2009, *AUTODYN 12.0*, ANSYS Inc., U.S.A.