

# 자동차용 PCV밸브내 유동특성에 의한 밸브응력 및 변형에 미치는 입출구 차압의 영향

권오현<sup>†</sup> · 이연원\* · 송상민 · 이종훈\* · 강지웅

부경대학교 안전공학과 · \*부경대학교 기계공학부

(2004. 10. 27. 접수 / 2005. 2. 3. 채택)

## The Effect of In-Outlet Differential Pressure on a Valve Body Stress and Deformation by the Blow-by Gas Flow Characteristic in the PCV valve for Automobile

Oh-Heon Kwon<sup>†</sup> · Yeon-Won Lee\* · Sang-Min Song · Jong-Hoon Lee\* · Ji-Woong Kang

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received October 27, 2004 / Accepted February 3, 2005)

**Abstract :** PCV(Positive Crankcase Ventilation) valve acts as a flow control valve to get a re-combustion of blow-by gas by having it flow from a crankcase to an inlet manifold suction tube. The blow-by gas of the crankcase should be eliminated or taken properly because it cause corrosion to critical parts, and contributes to increase crankcase pressure that can cause a drop in efficiency. The excessive stress and strain on the PCV valve that remove these harmful gas would be bring the difficult on the flow rate control and failure of the valve. Those condition inevitably induce the accident. Therefore, this study purpose is FEM evaluation of the stresses and deformation in the X3 PCV model according to the change of the differential pressure between inlet and outlet. From results, the maximum equivalent stresses increased linearly according to the increase of the differential pressure at the about 50mm from the inlet position and were under the yield strength of the valve. And the deformations were relatively small regardless of the in-outlet differential pressure variation.

**Key Words :** PCV(positive crankcase ventilation), blow-by, flow characteristic, differential pressure, FEM, stress distribution, deformation

### 1. 서 론

현대사회의 대기오염에 있어서 자동차의 배출가스는 환경에 매우 심각한 문제로 대두되고 있으며 블로우바이(Blow by) 가스처리장치로써의 자동차용 PCV(Positive Crankcase Ventilation)밸브는 전 차종에 사용되고 있다. 블로우바이가스는 로커커버에 장착되어 엔진 연소실에서 압축 또는 팽창 과정에서 피스톤과 실린더벽 사이로 빠져나온 유해가스를 말하며 배출가스의 약 25%를 차지한다. 한편, 크랭크케

이스로 유입되는 블로우바이가스를 적절히 배출하거나 처리하지 않으면 블로우바이가스의 주성분인 HC가스의 누출로 인해 심각한 대기공해를 야기할 수 있다. PCV밸브는 이 블로우바이가스를 대기로 방출하지 않고 재 연소시키기 위해 크랭크케이스에서 흡기다기관으로 흐르게 하여 재 연소 시킬 수 있도록 하는 유량조절 밸브이다<sup>1,2)</sup>. 흡배기관 사이에는 주어진 차압에 따라 적절한 유량조절이 이루어져야 하며 이때 블로우바이가스의 흐름에 의한 PCV 밸브내 압력의 영향에 의하여 밸브내 응력이 발생되며 변형이 발생할 수 있다. 과도한 변형은 블로우바이가스의 유량조절에 어려움을 가져다줄 수 있을 뿐만 아니라 밸브의 파손을 가져와 사고를 유발할

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
kwon@pknu.ac.kr

수 있다<sup>3)</sup>. 따라서 본 연구에서는 시판중인 PCV 양산모델에 대하여 밸브내 블로우바이가스 유동특성에 의해 작용되는 입출구 차압력에 의한 응력해석 및 변형값을 얻고자 한다. 얻어진 데이터는 향후 PCV 신개발모델의 최적화 설계 및 안전성평가의 기초자료에 적용될 것으로 사료된다.

## 2. 해석모델

해석모델은 국내 I사에서 생산중인 여러 가지 PCV 타입중에서 X3모델을 선정하였으며 유한요소 해석을 하였다. X3모델의 단면은 Fig. 1과 같으며 메인바디, 스푼, 유량제어 스프링, 쿠션스프링으로 구성되어 있다. 실제적으로 스푼이 밸브 양단의 차압에 의하여 동적으로 작동되지만 본 연구에서는 시간에 따라 변하는 스푼의 변위에 의한 유동특성을 준 정상상태로 가정하여 스푼 변위 1,2,6,8mm에서 유동해석하여 얻어진 압력결과<sup>4)</sup>를 작용하중으로 사용하였다.

Fig. 2는 스푼의 형상과 이동변위 및 차압의 기준을 나타내고 있다. 입출구 양단의 차압은 50~500 mmHg의 6가지 경우에 대하여 각각 해석하였으며, 해석영역은 메인바디에 대하여 한정하였다. Fig. 3에 해석 대상에 대한 2차원 유한요소모델의 유한요소분할의 예를 나타내고 있다. 요소수는 904개이며, 절점수는 1098개이다. 요소형태는 4절점 plane42 요소<sup>5)</sup>를 사용하였으며 탄성영역에서만 해석하였다.

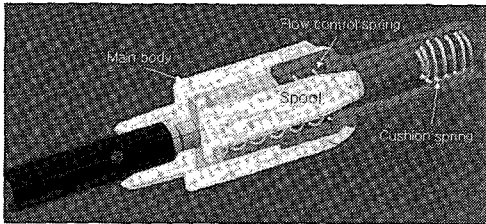


Fig. 1. PCV Valve X3 model for an analysis

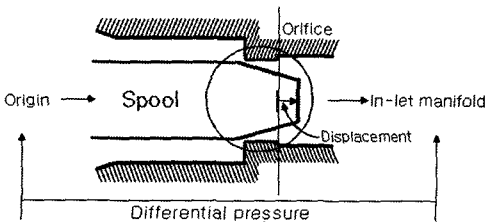


Fig. 2. The definition of the spool displacement and differential pressure



Fig. 3. The mesh generation of 2-D model

X3 양산 PCV 밸브 메인바디는 입구관의 쾌삭황동 BsBm( $\sigma_y = 215.6\text{MPa}$ )과 상부의 쾌삭강SUM22( $\sigma_y = 539\text{MPa}$ )재질로 구성되어 있으며 내압에 의해 탄성 변형하는 것으로 간주하였다. 스푼의 변위에 의한 유동특성에 의하여 밸브차압에 따라 밸브내부에 발생하는 압력은 스푼에 가해지는 압력과 밸브내면에 주어지는 압력에 차이가 발생된다. 밸브내면에 발생하는 압력은 밸브의 메인바디에 나타나는 응력의 크기를 결정하게 된다. 밸브에서의 응력 및 변형율은 균열의 발생 및 최악의 경우 폭발 등 밸브의 구조적 안전성에 크게 영향을 미치게 되며 유동흐름에도 영향을 주게 된다. 따라서 바디의 응력해석은 부품의 안전성 및 기능적 조건을 크게 향상시키는데 필요할 뿐만 아니라 최적화 설계에도 적용된다. 해석은 범용유한요소 프로그램인 ANSYS8.0을 사용하였으며 해석에 사용된 모델은 2차원 축대칭을 가정하였다. 3차원계산은 ANSYS code의 제한 및 PC 용량의 문제로 향후 정밀계산에 적용할 예정이며 현재로서 2차원 계산에 의해서도 기본적인 결과는 충분히 얻어질 것으로 여겨진다.

## 3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 유동해석에서 구한 내압에서 밸브 내벽에 작용되는 압력의 분포를 추출한 예를 스푼변위

1mm에 대하여 나타내고 있다. 가로축은 스톱헤드 방향 쪽의 밸브 밀면에서 오리피스 쪽의 축 방향 거리를 나타내고 있다. 차압이 50mmHg일 때 입구 쪽 밀면에 작용되는 최대압력은 약 -0.9kPa로 주어져 음압으로 서서히 증가하다가 스톱헤드의 위치인 약 26mm에서 급작변화를 나타내어 약 -3.6kPa의 음압을 나타내고 있다. 이후 거의 일정한 변화를 가지다가 스톱 오리피스 부근에서 음압으로 거의 -10kPa까지 급락한 후 다시 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 내벽의 응력변화에 크게 영향을 미치게 된다. 차압이 100~500mmHg의 경우에도 유사한 경향을 나타내고 있으며 그 압력은 더 크게 주어진다. 스톱변위가 2,6 및 8mm 인 경우에도 유사한 압력분포형태를 나타내었다. Fig. 5는 Fig. 4에서 주어진 내압분포를 이용하여 유한요소 응력해석을 한 응력등고선 결과 예를 단면에 대하여 나타내고 있다. 차압이 50mmHg의 경우로서 스톱변위 1mm일 때 오리피스 부근에서 가장 높은 응력을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 내벽에서 밸브외부 표면으로 갈수록 응력이 점차적으로 낮아지고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에서는 Fig. 5의 결과를 토대로 밸브밀면에서 축 방향으로 밸브내벽을 따라 발생하는 등가응력의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 등가응력의 변화양상은 차압의 변화에 관계없이 14~26 mm 위치에서 약간의 돌출응력을 나타내다가 거의 정상상태를 유지한 후 46mm에서 급작스런 급격한 상승을 하면서 50mm근방에서 최대 등가응력을 나타내고 있다. 최대등가응력이 발생하는 위치는 스톱 변위 1mm의 오리피스 입구 1/2지점인 것으로 여겨지며 이곳은 차압 50mmHg에서 유속변화가 최대 65 m/s 가 되는 위치로서 밸브 내벽에 작용되는 압력이 최대로 작용되기 때문인 것으로 여겨진다<sup>6)</sup>.

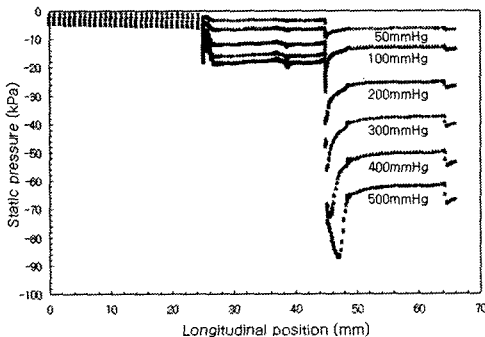


Fig. 4. The pressure distribution on the inner valve wall at a spool displacement 1mm

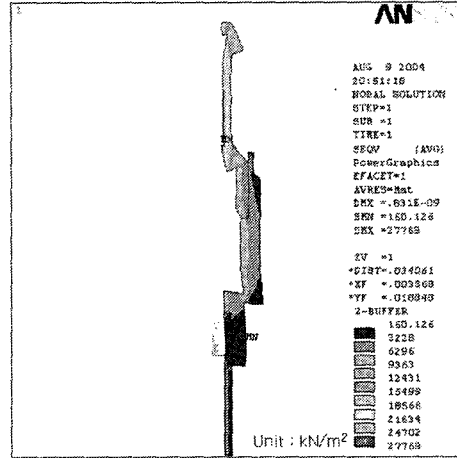


Fig. 5. 2-D equivalent stress contour for a spool displacement 1mm at a differential pressure 50mmHg

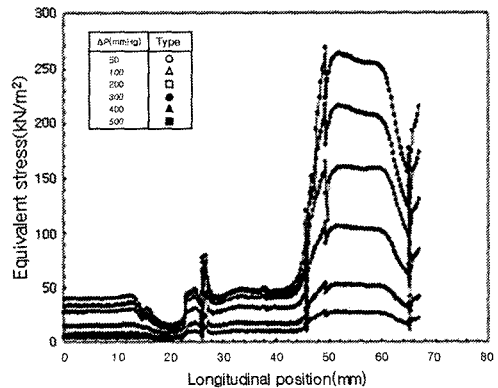


Fig. 6. The variation of the equivalent stresses on the inner wall of the valve body at the spool displacement 1mm

이 후 차압 300mmHg까지는 거의 일정한 값을 유지하다가 밸브 출구부위에서 밸브의 형상구조에 따른 감소, 증가변화를 나타내었다. 또한 차압이 증가함에 따라 전체적으로 유속이 증가하므로<sup>6)</sup> 등가응력은 더 큰 값을 나타내었다. 더욱이 차압이 커질수록 오리피스 입출구의 속도차가 크게 나타나는 영향으로 인하여 최대 등가응력 전후의 편차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 유속의 변화는 밸브의 응력변화에 밀접한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 차압변화에 따른 최대등가응력의 변화를 나타낸 것이다. 스톱변위 1mm의 경우에 차압 50mmHg에서 최대등가응력은 28kN/m<sup>2</sup>을 나타내며 차압이 500mmHg까지 증가함에 따라 비례적으로 270kN/m<sup>2</sup>까지 증가하고 있다. 이것은 현재의 해석이 탄성의 영역내에서 행하여지기 때문인 것

로 여겨진다. 또한 발생하는 최대 등가응력의 값은 밸브재료의 항복응력보다 훨씬 낮은값을 나타내어 강도면에서 안전성은 충분히 확보되는 것으로 여겨진다(안전계수( $S_f$ ) =  $1.855 \times 10^3$ 으로 나타났다). 또한 Fig. 7에서 알 수 있듯이 스푼변위가 1mm에서 8mm로 이동함에 따라서는 최대 등가응력의 차이는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이것은 스푼이동에 따른 유동해석이 미치는 벽면 차압력의 영향이 거의 없는 것에 기인하는 것으로 여겨진다. Fig. 8은 2차원 축대칭으로 해석한 등가응력결과를 ANSYS의 확장기능을 사용하여 3차원으로 표시한 50mmHg

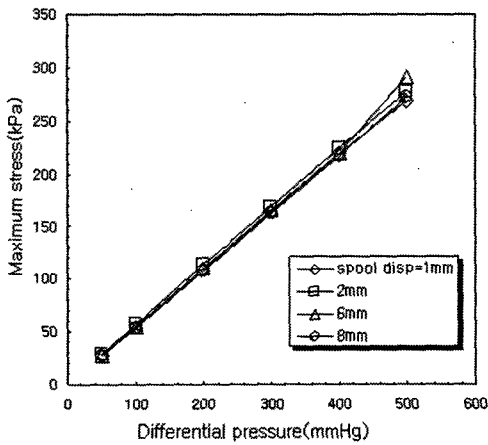


Fig. 7. The variation of the maximum equivalent stress according to the differential pressure and spool displacement

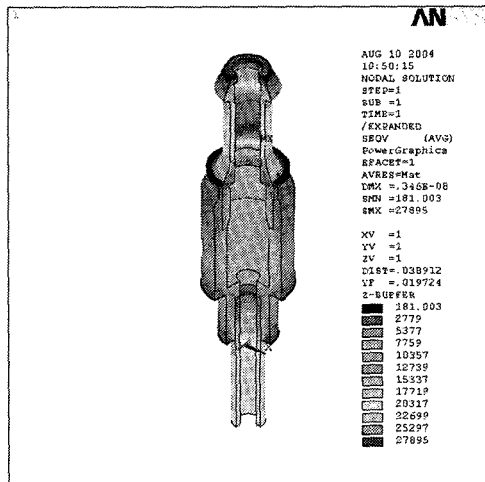


Fig. 8. The example of 3-D stress distribution contour display for spool displacement 1mm at differential pressure 50 mmHg

차압에서의 결과의 예를 표시한 것으로 밸브 전체적인 응력분포형태를 잘 나타내고 있다. 3차원 형상에 대한 보다 정밀한 해석은 차후 수행되는 보고서에서 보고될 예정이다.

Fig. 9는 스푼 최대변위 8mm에서의 등가변형률 변화를 나타낸 것이다. 전체적인 변화경향은 탄성범위내의 해석에 대하여 등가응력의 변화와 매우 유사함을 알 수 있다. 최대변형률의 값은 오리피스에서 차압의 증가에 따라 각각 약  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ 에서  $1.4 \mu\text{m}/\text{m}$ 까지 증가하고 있으며 그 변화율은 변형상태의 안전성 측면에서 충분히 작은 값으로 여겨진다. Fig. 10은 각 차압에 대한 축방향의 길이변화에 따른 두께방향의 변위를 나타낸 것이다. 전체적인 변화경향은 응력 및 변형률의 경우와 거의 유사함을 알 수 있으나 응력과 변형률의 결과에서 나타나는 것과 같은 초기부 발생 및 돌출변화는 보이지 않고 있으나 약 50mm의 밸브위치까지는 전체적으로 상

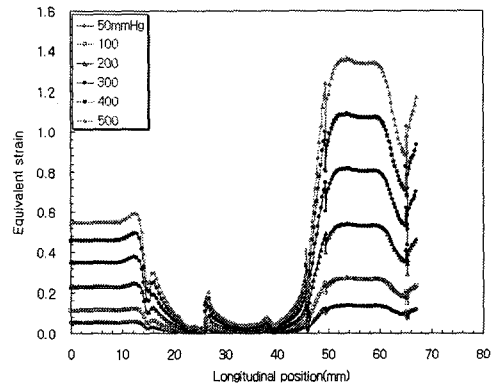


Fig. 9. The variation of the equivalent strain according to the differential pressure at the spool displacement 8mm

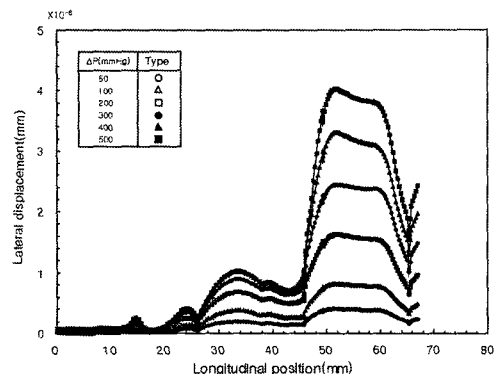


Fig. 10. The lateral displacement variation along the longitudinal direction at spool displacement 1mm

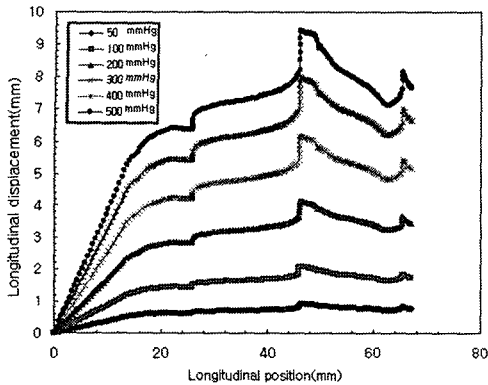


Fig. 11. The longitudinal displacement change along the longitudinal position at spool displacement 6mm

승하는 경향을 나타내다가 이후 약 10mm범위 정도에서 안정적인 값을 유지한 이후 급속히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 스톱변위에 따른 압력 분포형태에 기인하는 것으로 여겨진다. 또한 차압이 높을수록 거의 비례적으로 측면변위가 커지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 스톱변위가 6mm인 경우에 대하여 축길이 방향의 변위를 축방향에 따라 나타낸 것이다. 초기에서부터 약 14mm 위치까지는 거의 선형적인 변화를 나타내다가 26mm위치에서 변곡점을 거쳐 오리피스 입구에서 최대변위를 형성할 때까지 증가하고 있음을 알 수 있다. 오리피스를 지나면서 축방향

변위는 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 경향은 차압의 변화에 관계없이 거의 유사한 형태를 나타내지만 차압이 증가함에 따라 변위의 증가 변화율은 더 크게 나타나고 있다. 특히 300mmHg의 차압이후부터는 증가율의 변화는 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 차압이 300mmHg 이후의 유량증가가 유동속도의 급격한 증가로 더욱 가속되기 때문인 것으로 여겨진다.

또한 측면변위가 차압 500mmHg에서 최대  $4 \times 10^{-6}mm$ 인 것에 비하여 축방향 최대변위는 2배 가까이 나타나고 있으나 현재의 결과에 의하면 안전성 측면에서 볼 때  $9 \times 10^{-6}mm$ 정도의 변화량은 PCV밸브의 사용조건에 충분히 적합한 것으로 사료된다.

Fig. 12는 스톱변위 및 차압에 따른 등가변형률의 변화를 등고선으로 나타낸 것이다. a,b,c,d는 각각 스톱변위가 1mm일 때 차압 50,100,300,500mmHg에서의 등가변형률이며 e,f,g,h는 각각의 차압에 대하여 스톱변위가 8mm까지 이동했을 때의 변화를 나타내고 있다. 동일변위에서 등가변형률은 차압의 증가에 따라 거의 비례적으로 증가하고 있으며 최대 등가 변형률은 모든 경우에 있어서 오리피스 부근에서 발생되고 있다. 또한 같은 차압의 크기에서 스톱변위의 진전은 등가변형률의 변화에 감소경향을 나타내지만 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 여겨진다.

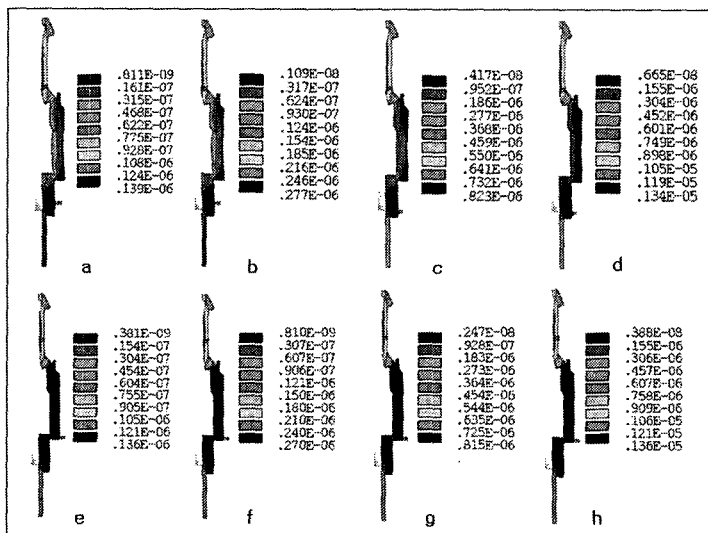


Fig. 12. The equivalent strain contour variation according to the spool displacement(u) and the differential pressure(dp). (a : u=1mm, dp=50mmHg, b : u=1mm, dp=100mmHg, c : u=1mm, dp=300mmHg, d : u=1mm, dp=500mmHg, e : u=1mm, dp=50mmHg, f : u=1mm, dp=100mmHg, g : u=1mm, dp=300mmHg, h : u=1mm, dp=500mmHg)

#### 4. 결 론

자동차 배기가스감소에 큰 영향을 미치는 X3 모델 PCV 밸브의 입출구 차압에 의한 유한요소 응력 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 주어진 밸브벽면에 작용되는 내압에 의한 등가 응력발생은 재료의 항복강도보다 충분히 낮은 값을 나타내며 또한 충분히 작은 등가변형율을 얻어 재료 강도적인 측면에서는 안전한 상태를 나타내었다.
- 2) 최대응력과 변형율은 차압의 변화에 따라 선형적으로 증가하였으며 스프링의 변위에는 그다지 영향을 받지 않았다.
- 3) 길이방향과 측면방향의 변위에서는 길이방향에 따른 수축량이 측면 방향에 비하여 다소 큰 값으로 나타나 향후 재료 및 유동 특성을 고려한 보다 나은 수정설계가 요구되나 현재로서는 안전성면에서는 만족되는 것으로 여겨지며 새로운 PCV밸브의 개발에 기초적 자료로 유용히 사용될 것으로 사료된다.

**감사의 글 :** 본 논문은 산업자원부와 한국산업기술평가단에서 시행한 2003년도 지역혁신 인력양성사업의 결과이며 관계자에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 조기현, 김덕호, 자동차기관공학, 동진, 2001.
- 2) 문병천, 한홍국, 자동차공학, 현대, 1998.
- 3) R. L. Hoekstra, K. olier, N. Mulligan and L. Chew, "Experimental Study of a Clean Burning Vehicle fuel", Int. Jour. Hydrogen Energy, Vol. 20, No. 9, pp. 737~745, 1995.
- 4) 이종훈, 이연원, "PCV 밸브의 유동특성에 관한 연구", 제3회 한국유체공학학술대회, 2004.
- 5) ANSYS Element Reference.
- 6) 이연원 외 5인, PCV밸브최적화설계기술 개발에 관한 연차보고서, 2004.