

# 비드 형상에 따른 실린더 헤드 가스켓의 비선형 거동 특성

변철진\* · 유승현\*\* · 윤천한\*\*\* · 박종국\*\*\*

## Effects of the Bead Shape on the Nonlinear Behavior of Cylinder Head Gasket

Chul-Jin Byun, Seung-Hyun Yoo, Cheon-Han Yoon, Jong-Kuk Park

**Key Words :** Virtual Experiment (가상실험), Cylinder Head Gasket (실린더 헤드 가스켓), Bead Shape (비드 형상), Finite Element Analysis(유한요소해석), ABAQUS

### Abstract

Gasket of vehicle engine maintains airtight between cylinder head and engine block under high temperature and pressure, and plays important role in heat conduction of engine. And the characterization of the nonlinear behavior of metal gasket for various bead shapes is very important as basic research for estimation of gasket durability. But it is very difficult to analyze the behavior of gasket in real experiment. In this paper, to analysis effects of the bead shape on the nonlinear behavior of cylinder head gasket under uniform pressure, the virtual experiment using the nonlinear finite element method was performed. Results are analyzed with residual deformation and the sealing pressure. With the increase of the height and the width of bead, the residual deformation and the sealing pressure increase. And if the height is very high and the width is very narrow, the wrinkles are occurred in the gasket while working.

### 1. 서 론

자동차 엔진용 가스켓은 엔진 보어의 원형 형상을 훼손시키지 않으면서 동시에 엔진 부품들 사이에서 강한 실링압력을 영구적으로 제공해야 하므로, 보통 다양한 두께의 이중재료를 적층시켜 제작하게 된다. 따라서 가스켓은 고 비선형 거동 (Highly nonlinear behavior) 특성을 갖는다<sup>(1), (2)</sup>.

또한 실린더 헤드 가스켓은 고온·고압상태의 연소과정에서 엔진 블록과 실린더 헤드 사이의 기밀을 유지할 뿐만 아니라 엔진부의 열전달 측면에서도 중요한 역할을 한다<sup>(7)</sup>. 그러나 그 연결부에서 볼트 등의 체결 부분에 의한 불연속 부위는 열과 압력에 취약할 수밖에 없고, 그 연결부분의 미세 거동은 엔진의 효율 뿐만 아니라 자동차의 안전성에도 직접적인 영향을 미친다<sup>(3)</sup>. 또한 가스켓의

주요 부분인 비드(Bead)는 가스켓의 성능에 매우 중요한 영향을 미친다<sup>(5)</sup>. 따라서 다양한 형상의 비드를 적용하여, 비드의 폭과 높이가 실린더 헤드 가스켓의 비선형 거동에 미치는 영향을 해석할 필요가 있다.

그러나 엔진의 실제 운전 조건인 고온·고압의 환경에서 가스켓의 비선형 거동을 실험적으로 해석하기에는 많은 어려움이 있으므로 가상실험 (Virtual experiment)과 같은 수치해석을 통해 가스켓에서 발생할 수 있는 여러 가지 문제점들을 정확하게 예측할 필요가 있다.

가상실험은 제품의 기하학적 형상 데이터에 대한 표준화된 설계정보(Computer Aided Design; CAD)를 기반으로 공학해석 소프트웨어(현재는 주로 유한요소법[Finite Element Method; FEM] 패키지)를 활용하여 제품의 실제 거동에 대한 컴퓨터 시뮬레이션(Computer Aided Engineering; CAE)을 통해 제품의 기능성 및 내구성을 평가하고 각종 설계변수에 대한 최적조건을 제시하는 첨단 설계기법을 의미한다<sup>(6)</sup>.

\* 아주대학교 대학원 기계공학과

\*\* 아주대학교 기계 및 산업공학부

\*\*\* 동아공업㈜ 기술연구소 설계기술팀

따라서 본 연구에서는 임계조건 하에서도 제품의 실제 거동을 해석할 수 있는 CAD/CAE 를 활용한 가상실험 기법을 가스켓 디자인 공정에 도입하여, 비드의 형상에 따른 가스켓의 비선형 거동 특성을 이해하고 가스켓의 기초 설계자료를 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 가스켓의 기하학적 형상

본 연구에 사용된 실린더 헤드 가스켓은 4 기통 엔진에 사용되며, 가스켓 제작 업체(동아공업㈜)에서 양산중인 모델로서 형상은 Fig. 1 과 같다.

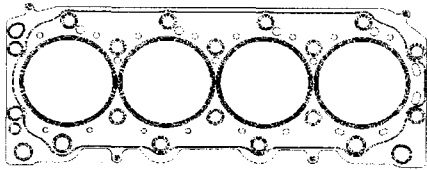


Fig. 1 Geometry of the cylinder head gasket

이 가스켓은 총 8 가지 형상의 비드를 갖는다. Fig. 2 는 가스켓의 연소링 부분의 기밀유지 능력을 향상시킬 목적으로 설계된 비드의 단면 형상이다. 그 특징은 적층된 중간판의 연소실측을 접어 꺾어 스톱퍼(Stopper)를 형성하여 면압의 증대와 비드의 소성변형을 억제하도록 한 구조이다.

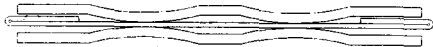


Fig. 2 Section of bead around combustion ring

Fig. 3 은 가스켓 비드 부분의 축대칭 모델로서 각 층의 표면처리 및 형상을 나타낸 그림이다. 가스켓은 Fig. 3 과 같이 3 개의 박판이 적층된 다중 적층구조물이며, 각 박판의 표면은 특수 코팅 처리하였다.

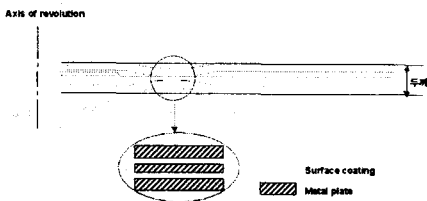


Fig. 3 Surface condition and section of the gasket

### 2.2 가스켓의 유한요소 모델링

엔진 가스켓은 기능성 때문에 보통 다양한 두

께의 이종재료를 적층시켜 제작하므로 고 비선형 거동 특성을 갖는다. 이러한 가스켓의 복잡한 특성 때문에 연속체 요소(Continuum element)를 사용하여 모델링할 경우 고가의 비용이 소요된다. 또한 비선형 응답을 정밀하게 구하기 위해서는 많은 양의 요소가 필요하며, 모델의 크기가 커지게 되므로 매우 비효율적이다. 따라서 본 연구에서 가상실험을 위해 사용된 ABAQUS/Standard 는 기본적인 비선형 거동 특성을 유지시키면서 가스켓 모델링을 단순화 시키기 위한 가스켓 요소(Gasket element)를 제공한다<sup>(6)</sup>. 이 요소를 사용하여 Fig. 3 과 같이 3 층 적층 구조를 Fig. 4 와 같이 단층으로 모델링할 수 있다.

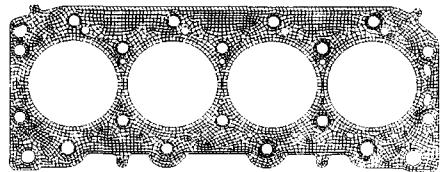


Fig. 4 Finite element model of the cylinder head gasket

본 유한요소 모델은 ABAQUS/Standard 에서 제공하는 8-절점 가스켓 요소(GK2D8; 8-node 3D gasket element)를 사용하였으며, 3,736 개의 요소와 9,429 개의 절점을 사용하였다. 또한 각 비드 부분의 비선형 거동 데이터를 구하기 위해 Fig. 5 와 같이 단면 형상을 모델링하였다.

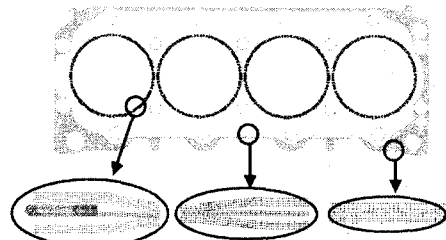


Fig. 5 Finite element models of the various bead

Fig. 6 는 연소링 부분에 존재하는 비드의 비선형 거동(압력-단형 관계)을 구하기 위해 단면을 축대칭 모델로 간략화 시킨 것이다.

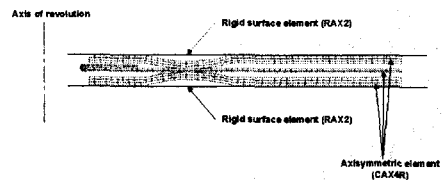


Fig. 6 Axisymmetric model of the bead

본 모델은 4-절점 축대칭 요소(CAX4R; 4-node axisymmetric quadrilateral, reduced integration, hourglass control element)를 사용하였으며, 엔진블록과 헤드는 강성요소 (RAX2; Rigid surface element)로 단순화 시켰다.

해석을 간략화 하기 위해 엔진블록과 실린더 헤드는 강성표면(Rigid surface)으로 모델링하였으며, 가스켓 표면의 코팅에 의한 영향은 무시하였다.

또한 비드 형상이 가스켓의 비선형 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 비드 형상의 높이와 폭을 증가시켜 가면서 5 개의 모델을 고려하였다. 먼저 현재 생산중인 모델을 초기모델로 하여, 일정간격으로 비드의 폭을 감소시켜 Case 1, Case 2 모델을 제작하였으며, 비드의 높이와 폭을 증가시켜 Case 3, Case 4 모델을 제작한 후 각각 해석을 수행하였다.

### 2.3 가스켓의 물성치

본 연구에서 고려된 실린더 헤드 가스켓은 Fig. 3 과 같이 3 개의 박판으로 구성된 적층구조물이다. 상·하판의 재질은 SUS304, 중간에 끼워진 박판의 재질은 SUS301 이다. 가스켓의 비선형 유한요소해석을 위한 재료의 물성치는 Table 1 과 같다.

Table 1 Stress-strain relationship

Internal layer (SUS301)	External layer (SUS304)
$\sigma_y = 275.8 + 1438\epsilon_p^{0.754} \text{ Mpa}$	$\sigma_y = 241.3 + 1108\epsilon_p^{0.612} \text{ Mpa}$

$\sigma_y$  = Yield stress,  $\epsilon_p$  = Effective plastic strain

### 2.4 하중 및 경계조건

하중은 실린더 헤드 부분에 해당하는 강성 요소에 160kN 의 정적하중을 가한 후 다시 제거하였다. 경계조건으로서 엔진 블록에 해당하는 강성 요소의 자유도를 완전히 구속하였다.

### 2.5 유한요소해석을 이용한 가상실험

가상실험에는 비선형 유한요소해석법이 사용되었으며, 범용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS Ver. 5.8 을 이용하였다. 또한 가스켓과 엔진블록/헤드 및 박판 사이의 접촉을 고려하여 비선형 접촉해석을 수행하였으며, 마찰에 의한 영향은 무시하였다.

## 3. 결과

### 3.1 가스켓 비드의 변형 형상

하중의 변화에 따른 비드의 변형 형상의 변화

과정을 Fig. 7 에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에는 연소링 부분에서 일정 간격을 유지하고 있다. 그러나 부하시 3 층의 박판은 서로 완전히 밀착되어 실링압력에 의해 기밀을 유지하게 된다. 그러나 하중이 완전히 제거되었을 경우 Fig. 7 과 같이 소성변형에 의한 잔류변형이 발생하여 초기의 간격을 유지하지 못하게 된다. 따라서 과도한 하중이 반복적으로 작용할 경우 이 부분에서의 잔류 변형은 증가되고, 또한 가스켓의 실링압력이 감소하게 되어 누설(Leak)의 원인이 될 것이다. 이 경우에도 스톱퍼의 작용으로 비드의 완전한 변형이 발생되지 않으므로 지속적인 탄성력을 유지할 수 있게 된다.

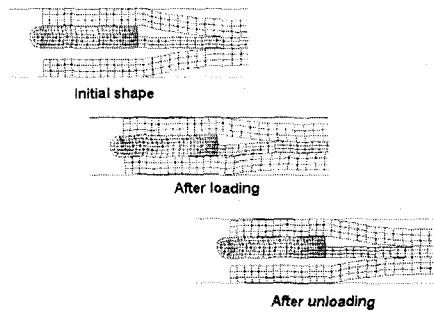


Fig. 7 Deformed shape of the cylinder head gasket

### 3.2 가스켓 압력 분포

Fig. 8 은 엔진 부하 조건을 가정한 분포하중 하에서 실린더 헤드 가스켓 내의 가스켓 압력 (Gasket pressure) 분포를 도시한 것이다. 이 값은 가스켓 표면의 정방향(Normal direction) 응력으로서, 전체적으로 가스켓 비드의 끝 부분에서 집중되는 분포를 보였다. 따라서 실제 엔진의 운전 조건과 같이 반복적인 하중을 고려할 경우 이 부분에서의 파손을 예측할 수 있다.

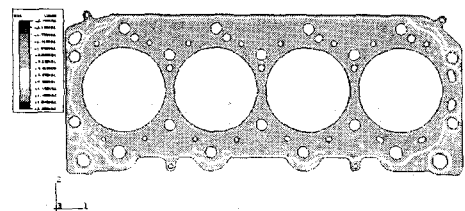


Fig. 8 Distribution of gasket pressure under load

### 3.3 가스켓의 접촉압 분포

Fig. 9 는 실린더 헤드 가스켓의 표면에서의 접촉압(Contact pressure) 분포를 나타낸 것이다. 이 값은 가스켓과 실린더 헤드가 접촉하는 부위에서 발생하는 실링압력(Sealing pressure)을 의미한다. 그

림에서 알 수 있듯이 접촉압은 가스켓의 연소링(Combustion ring)으로 인해 이 부분에서 집중적으로 분포하며, 비드의 끝 부분에서도 집중적으로 분포하였다. 따라서 연소링으로 인해 엔진 작동 시 실린더 헤드 부분에서 발생하기 쉬운 누설의 가능성을 가스켓이 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

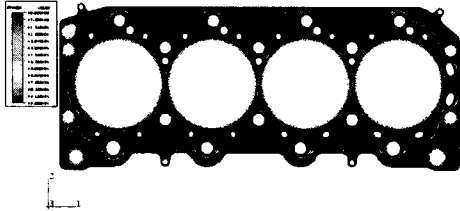


Fig. 9 Distribution of contact pressure under load

### 3.4 가스켓의 유효소성변형을 분포

Fig. 10 은 실린더 헤드 가스켓의 유효소성변형률(Effective plastic strain)의 분포를 나타낸 그림이다. 이 값은 과도한 부하에 의해 가스켓 내에서 발생하는 실제 소성 변형량을 의미하며, 3 축 방향의 소성 변형을 동시에 고려한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 연소링 주위의 비드에서 최대 소성 변형이 분포하였으며, 비드의 끝 부분에서도 소성 변형이 집중적으로 발생하였다. 따라서 연소링 주위의 비드 부분에서는 하중을 제거하였을 경우 잔류 변형이 발생하게 되며, 실제 운전 조건과 같이 하중이 반복적으로 가해질 경우 잔류 변형이 증가하여 이 부위에서의 누설을 유발시킬 가능성이 있음을 예측할 수 있다. 또한 이처럼 유효소성 변형이 크게 발생하는 부분에서는 피로하중에 의한 파단(Break or fracture)의 가능성이 크므로 가스켓 설계 시 비드의 형상을 설계 변수로 하여 유효소성변형과 가스켓 압력을 고르게 분산시킬 수 있도록 해야 할 것이다.

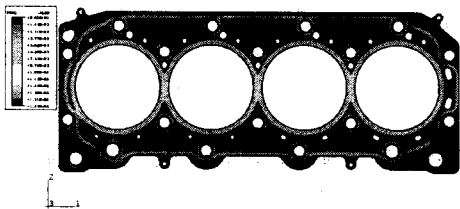


Fig. 10 Distribution of effective plastic strain under load

### 3.5 가스켓의 소성 닫힘 분포

Fig. 11 은 실린더 헤드 가스켓의 소성 닫힘(Plastic closure)의 분포를 나타낸 것이다. 이 값은

Z-축 방향(Normal direction)의 소성 변형률을 나타낸 것으로서 비드 부분의 잔류 변형을 예측할 수 있는 판단의 근거가 된다.

분석해보면, 연소링 주위의 비드에서 소성 변형률이 가장 크게 분포였으며, 소성변형에 의한 잔류 변형이 가장 크게 발생하였다.

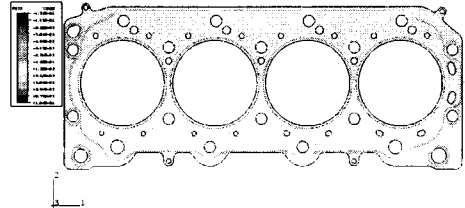


Fig. 11 Distribution of plastic closure under load

### 3.6 가스켓의 변위 분포

Fig. 12 는 실린더 헤드 가스켓 내의 변위 분포를 나타낸 것이다. 파란색 부분은 하중에 의해 눌러서 변위가 발생한 부분이며, 빨간색 부분은 비드의 영향으로 인해 상대적으로 하중의 역방향으로 변위가 발생한 부분이다.

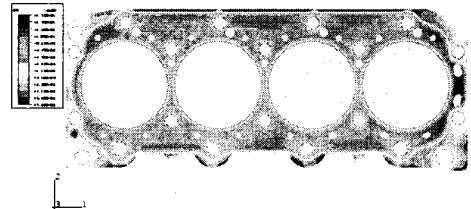


Fig. 12 Distribution of displacement under load

### 3.7 비드의 형상에 따른 가스켓의 비선형 거동 특성

비드의 형상에 따른 가스켓의 비선형 거동은 Fig. 13 과 같다.

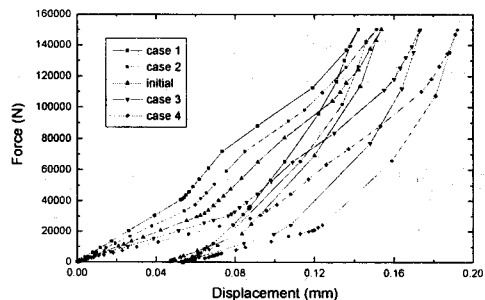


Fig. 13 Nonlinear behavior of the cylinder head gasket

하중이 가해짐에 따라 가스켓이 변형하는 것을

분석해보면, 일차적으로 비드에 의한 각 박관 사이의 간격이 좁혀져 연소링에 밀착되는 과정이다.

이 과정 동안은 미소한 접촉압을 유지하면서 선형적인 거동을 하게 된다. 그러나 연소링에 완전히 밀착된 상태에서 부하가 계속되면 접촉압은 급격히 증가되면서 소성변형을 유발시킨다. 따라서 이후부터는 비선형적으로 변형을 일으키게 된다. 최종적으로 하중을 제거하는 과정 역시 비선형적이다. 따라서 가스켓의 비드 부분에서 소성변형이 발생하게 되므로 일정 간격의 잔류변형이 발생하게 된다.

### 3.8 비드의 형상에 따른 가스켓의 응력 및 변형 특성

비드의 형상에 따른 가스켓의 응력 특성은 Table 2 와 같다. 비드의 폭과 높이가 증가할수록 가스켓 압력과 접촉압이 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Effects of the bead shape on the stresses

[Mpa]					
Model Stress	Case 1	Case 2	Initial	Case 3	Case 4
Gasket pressure	205.9	211.3	213.0	268.8	304.3
Contact pressure	201.2	202.6	229.0	254.4	290.5

Table 3 은 비드의 형상에 따른 가스켓의 변형 특성이다. 초기 모델에서 최소 잔류변형이 발생하며, 비드의 폭과 높이가 증가할수록 최대 변위와 잔류변형이 증가함을 알 수 있다.

Table 3 Effects of the bead shape on the displacements

[μm]					
Model Disp.	Case 1	Case 2	Initial	Case 3	Case 4
Max. disp.	142.0	152.2	153.7	173.35	192.07
Residual disp.	52.8	53.9	47.0	52.9	53.4

## 4. 결론

본 연구에서는 자동차 엔진에 사용되는 실린더 헤드 가스켓의 비선형 거동을 해석하기 위해 가상 실험을 수행하였으며, 비드의 형상이 가스켓의 비선형 거동에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비드의 높이가 높고 폭이 넓을 수록 잔류변형과 가스켓 압력이 커진다.
- (2) 비드의 높이가 제한되어 있을 경우 폭을 증가시키면 가스켓 압력은 증가시킬 수 있으며, 잔류 변형을 고려한 내구성 향상을 기대할 수 있다.
- (3) 비드의 형상을 설계할 때 높이와 폭을 증가시킬 경우 가스켓 압력은 증가하지만 상대적으로 잔류변형도 증가한다.
- (4) 비드의 높이가 너무 높으면 가스켓에서 주름이 발생하게 된다.
- (5) 초기 모델은 잔류변형과 가스켓 압력을 동시에 고려했을 때 수정된 모델에 비해 비교적 효율적이며, 내구성이 우수한 모델이라 할 수 있다.
- (6) 비드의 폭과 높이를 동시에 증가시킨 Case4 모델이 잔류변형과 가스켓 압력을 동시에 고려했을 때 가장 적절한 모델이라 할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Robinson, M. H., Whitham, G. P., Tronel, T., and Schulze, S. A., 1996, "Application of advanced finite element techniques to the design and development of automotive gaskets", SAE Technical Paper 960218
- (2) Jones, P. A., 1995, "Gasket design the way forward", SAE Technical Paper 950319
- (3) Willis, H., Stasiak, A., and Shuster, M., 1995, "Using finite element analysis and metallographic analysis to understand field forces on an industrial head gasket", SAE Technical Paper 950321
- (4) Ina, E., Yamanouchi, K., and Tanoue, M., 1998, "Predicting the seal pressure distribution of cylinder head metal gasket and bore deformation of engine cylinder block", Proceedings of 1998 ABAQUS Users' Conference, Newport, Rhode Island, pp. 387-394
- (5) Soua, A. and Touratier, M., 1999, "Computations of an engine to analyze cylinder distortion", Engineering Computations, V. 16, No.1, pp. 9-25
- (6) ABAQUS/Standard Version 5.8 User's Manual, HKS Inc., 1998
- (7) 박정규, 주원식, 김광현, 1999, "가솔린 엔진의 헤드와 블록의 열적 및 기계적 거동에 관한 연구", 한국자동차공학회는문집, 제 7 권, 제 2 호, pp. 19-30
- (8) 한성배 외, 1997, "산업지원 가상실험 소프트웨어 개발 연구", 최종연구개발결과보고서, 한국전자동신연구원