



LPG 충전기에서 다수 볼-실린더의 구름마찰운동에 따라 달라지는 접촉거동특성에 관한 유한요소해석

†김 청 균

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2006년 6월 5일 접수, 2006년 6월 20일 채택)

Finite Element Analysis of Contact Behavior Characteristics in LPG Filling Unit Depending on Multi-ball/Cylinder Rolling Friction Motions

†Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University
(Received 5 June 2006, Accepted 20 June 2006)

요 약

본 논문은 다수의 볼과 접촉하는 두개의 실린더 사이에서 발생하는 접촉응력과 마찰력을 유한요소법으로 해석하였다. LPG 충전기는 구름마찰 운동을 위해 다수의 볼이 평행한 두개의 실린더와 경사진 두개의 실린더 레이스에서 구름마찰 운동을 한다. FEM 해석결과에 의하면, SiC 볼과 SUS 304 볼은 주어진 수직하중, 즉 압축력에 대하여 높은 접촉응력과 마찰력 손실을 보여주고 있다. 반면에 PEEK 볼은 두개의 실린더에 대하여 구름마찰 운동을 유지하면, 대단히 낮은 접촉응력과 마찰력 손실을 나타내는 것으로 보아 폴리머 소재의 사용은 저마찰 접촉특성을 잘 구현하고 있다할 수 있다. 여기에 두개의 실린더가 평행하게 구름마찰 접촉운동을 하느냐, 또는 경사진 상태에서 구름마찰 운동을 하느냐에 따라 접촉거동특성이 크게 달라지므로 특히 두개 실린더 사이의 상대적 경사도는 극도로 억제되어야 우수한 설계가 된다.

Abstract - In this paper, the contact stress and friction force between multi-balls and rolling friction contact surfaces of two cylinders have been presented using a finite element analysis. The multi-balls for a rolling friction motion may be contacted with a reciprocating mechanism of a parallel cylinder and a misaligned cylinder in a LPG filling unit. The FEM computed results indicate that SiC ceramic and SUS 304 balls show a high contact stress and friction force on the contact spot of rolling balls. But the PEEK balls show a low contact stress and friction loss due to a high flexibility of a PEEK polymer. In this study, we may recommend SiC and SUS 304 balls for high compressive loadings between a multi-ball and a cylinder contact mechanisms and PEEK balls for a low compressive force. And the misalignment between two cylinders should be restricted for a low contact stress and friction loss, especially.

Key words : LPG filling unit, Multi-ball, Contact stress, Rolling friction, Sliding friction, Compressive force, FEM

I. 서 론

자동차는 전통적으로 가솔린, 경유와 같은 액상의 연료와 LPG나 CNG와 같은 기상의 연료 두 가지를 사용한다. 액상의 연료는 연료의 증발성이 나쁘기 때문에 주유기로 차량에 연료를 급유하는 방식이 간단하지만,

LPG와 같은 가스연료는 외부로 노출될 경우 쉽게 증발하므로 연료 공급기도 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 특별하게 제작되어야 한다. Fig. 1(a)처럼, 두개의 실린더를 겹쳐서 미끄럼마찰 접촉운동이 일어나도록 제작되어 있다. 한 손은 외측실린더(outer cylinder)의 외부를 잡아 뒤로 당기고, 다른 손은 내측실린더(inner cylinder)에 연결된 몸체를 잡아서 앞으로 밀어 이들 두 실린더 사이에서 축방향의 왕복운동이 원활하게 작동

†주저자:chungkyunkim@empal.com

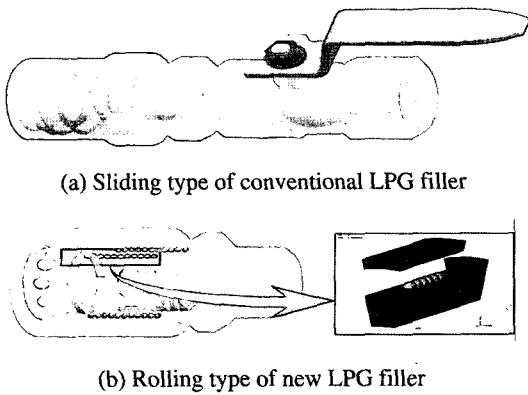


Fig. 1. LPG filling unit and FEM elements with a multi-ball contact system.

하도록 제작되어 있다.

두 손으로 실린더의 외측을 잡아서 왕복운동을 시키는 과정에서 실린더의 동심원은 실제로 유지하기 어렵다. 이것은 실린더의 한쪽이 다른 쪽 실린더의 미끄럼 마찰표면에 대하여 국부적으로 접촉하면서 마찰력이 증가되고, 마멸량이 발생하는 등의 문제점이 제기된다. 따라서 현재의 LPG 충전기(LPG filling unit)는 미끄럼 마찰작용에 따른 마찰력을 줄이고, 마멸발생을 억제하기 위해 마찰운동 계면에는 소량의 그리스를 공급하여 마찰접촉에 따른 마찰력과 마멸문제를 완화하고 있다. 미끄럼 마찰표면에 그리스를 공급하여 저마찰성을 달성하려는 노력은 이해되지만, LPG 연료의 공급에 따른 그리스나 마멸입자가 LPG 연료에 혼입되어 자동차 연료탱크에 잠시 체류하다 LPG 연료를 공급하는 과정에서 전자제어 연료분사 노즐구멍을 막는 현상이 발생하기 때문에 LPG 연료분사 계통의 문제점으로 지적되어 왔다[1-3].

LPG 충전기의 또 다른 사례로 Fig. 1(b)에서 보여주는 것처럼, 두개의 실린더가 서로 왕복운동을 하기 위해서 하나의 실린더가 다른 실린더에 대하여 상대적으로 미끄럼 마찰운동을 하거나 또는 구름마찰 접촉상태를 유지해야 한다. 실린더의 미끄럼 마찰운동이 원활하게 작동하기 위해서는 상대접촉 운동속도가 빠를 경우는 원칙적으로 넓은 접촉면에 대하여 유막을 형성하여 안정된 저마찰 상태를 유지하는 것이 필요하지만, 마찰접촉 운동속도가 느릴 경우는 실린더의 마찰접촉 간극을 크게 설계하여 마찰계수를 낮게 유지하는 것이 필요하다.

반면에 실린더 내부에 다수의 볼을 설치하여 구름마찰 접촉상태를 유지하면서 상대접촉 운동속도가 빠를

경우는 그리스를 공급하여 구름마찰 표면의 저마찰성을 유지하는 것이 필요하지만, 두 실린더 사이의 상대접촉 운동속도가 느리면 무급유 상태에서도 우수한 저마찰성을 확보할 수 있다.

따라서 기존의 미끄럼 마찰작용을 완화하기 위해 공급하는 그리스 윤활방식을 Fig. 1(b)처럼 구름마찰에 의한 무급유, 저마찰 운동방식으로 개량설계가 필요하다. 앞에서 언급한 그리스 급지에 따른 LPG 전자제어 분사시스템의 막힘 현상을 해결하기 위해 본 연구에서는 기존의 미끄럼마찰 운동방식 대신에 다수의 볼을 두개의 실린더 사이에 삽입한 새로운 구름마찰 운동을 하도록 마찰접촉 운동 메커니즘을 개량하였다. 두 실린더 사이에 다수의 볼을 삽입하여 LPG 충전기의 구름마찰 작동조건을 유지하는 것은 물론이고, 두 실린더의 동심원 왕복운동 메커니즘을 구현할 수 있도록 실린더 내부에 저마찰 그루브 레이스(groove race)를 제작하는 설계가 필요하다. 본 연구에서는 다수의 볼과 두개의 실린더 사이에서 발생하는 구름마찰 접촉거동특성을 유한요소법으로 해석하여 마찰접촉 운동에 따른 접촉응력과 마찰력 특성을 각각 해석하였다.

II. 해석조건 및 사용소재

2.1. 해석조건

다수의 볼과 실린더의 상대접촉 마찰운동에 따른 압축력(compressive force), 즉 접촉하중은 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 볼에 1 kg가 균일하게 작용한다고 가정한다. Fig. 2에서, 외측실린더가 뒤로 이동하는 초기 작동과정에서 실린더와 볼은 앞쪽의 볼과 주로 접촉하고, 중간 작동과정에서는 실린더와 다수의 볼이 균일하게 접촉하고, 실린더가 완전하게 뒤로 이동한 최종 작동과정에서는 뒤쪽의 볼이 주로 접촉하는 운동 메커니즘을 보여준다. 이것은 실린더와 볼의 접촉운동이 국부적으로 일어나거나 실린더의 경사(misalignment)가 미세하게 형성되어 볼과 실린더의 접촉운동 패턴이 항상 균일하지 못하다는 것을 제시한 것이다. 즉, 볼과 실린더 사이의 마찰접촉 운동조건은 볼에 가해지는 압축력과 실린더의 경사각도에 의해 접촉응력이나 마찰력이 달라진다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 이 점을 고려하여 구름마찰 접촉운동에 따른 볼-실린더 구름마찰



Fig. 2. Progressive rolling contact mechanisms under uniformly distributed compressive forces.

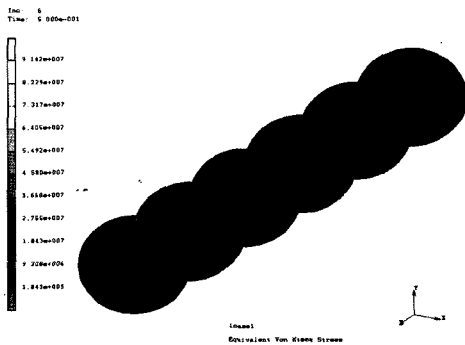
Table 1. Material properties of multi-balls.

Material property	SUS 304	SiC	PEEK	Brass
Density, kg/cm ³	8,000	3,100	1,650	8,500
Elastic modulus, GPa	200	330	3.45	97
Poisson's ratio	0.29	0.15		0.311

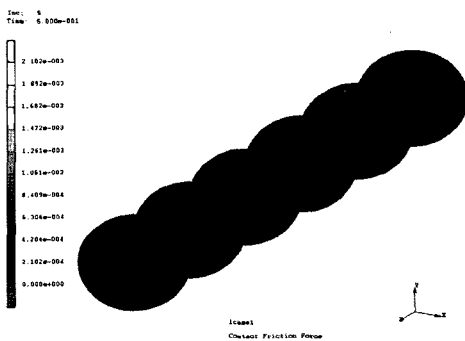
접촉운동 메커니즘에 대한 접촉거동 특성을 유한요소법으로 해석하였다.

2.2. 사용소재

본 연구에서 사용한 실린더 소재는 황동(brass)이고, 실린더의 내면에는 그루브 레이스를 가공하여 다수의 볼(ball)을 공급하여 구름마찰 작동조건을 달성한다. 여기서 사용한 볼의 소재는 구름 베어링에서 가장 많이 사용하는 SUS 304, 저마찰성을 더 확보하기 위한 PEEK 소재, 저마찰성과 내마멸성을 확보하기 위한 SiC 소재를 각각 선정하여 작동하중에 따른 응력과 저마찰성을 유한요소법으로 해석하였다[4].



(a) Von Mises contact stress



(b) Contact friction force

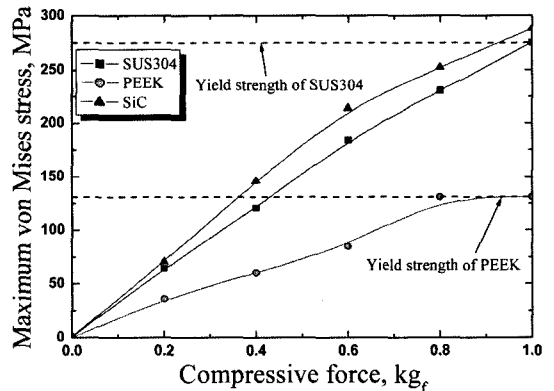
Fig. 3. Contact stress and friction force distributions of peek balls under a uniformly distributed compressive force of 1 kg_f.

III. 해석결과 및 고찰

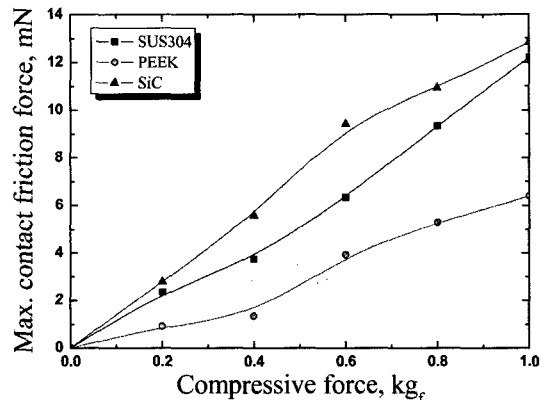
본 연구에서는 다수의 볼과 실린더 사이의 구름마찰 접촉운동 과정에서 발생하는 접촉응력과 마찰력을 볼에 작용하는 압축력과 여러 가지 볼 소재(SUS 304, PEEK, SiC)에 대하여 FEM으로 해석하였다[5].

Fig. 3은 다수의 볼과 실린더 사이의 구름마찰 접촉운동이 서로 평행한 작동상태에서 일어난다고 가정할 경우에 PEEK 소재를 사용한 볼에서 발생하는 접촉응력과 접촉 마찰력 분포를 각각 보여주고 있다. 볼에 가해지는 압축력은 항상 균일하게 작용하므로 볼과 실린더의 마찰접촉 운동에 따른 접촉응력과 마찰력이 모든 볼에 균일하게 형성되므로 가장 이상적인 마찰접촉 운동 메커니즘을 보여준다.

Fig. 4는 볼의 사용재질이 서로 다른 경우, 볼에 가해지는 압축력 정도에 따라 달라지는 볼의 최대 von Mises



(a) Maximum von Mises stress



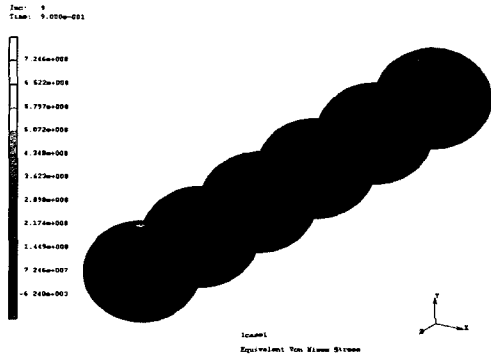
(b) Maximum contact friction force

Fig. 4. Contact stress and contact friction force for various values of ball materials as functions of compressive forces.

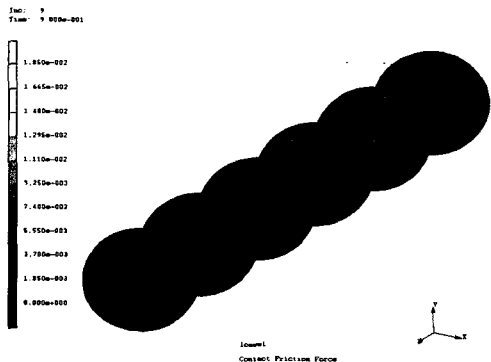
응력과 최대 접촉 마찰력을 각각 보여준다. Fig. 4에서 SiC 볼의 경우는 가장 높은 접촉응력과 마찰력을 각각 제시하지만, SiC는 경도가 아주 높고 내마멸 특성이 우수하므로 볼에 작용하는 접촉응력이 높아도 아무런 문제가 없다. 그러나 볼 소재로 널리 사용하는 SUS 304의 경우에 발생하는 최대응력과 마찰력은 SiC 볼에 비하여 약간 낮지만, SUS 304 소재의 항복강도가 275 MPa임을 고려하면 볼에 가하는 압축력이 1 kg_f 정도에 도달하면 SUS 304 볼은 국부적으로 손상을 받아 사용하기 어려울 수도 있다는 결론에 도달한다. 또한 볼의 소재를 PEEK로 선정할 경우는 SiC 볼이나 SUS 304 볼에 비하여 접촉응력이나 마찰력이 크게 낮아지기 때문에 우수한 거동특성을 나타내지만, 볼에 작용하는 압축력이 0.8 kg_f 정도를 넘어서게 되면 PEEK 소재의 항복강도가 131 MPa로 낮기 때문에 볼은 접촉운동 과정에서 손상을 받아 더 이상 사용할 수 없게 된다. 볼의 사용소재에 따라 서로 다른 특성결과를 제시한 Fig. 4의 접촉응력 및 마찰력 데이터에 의하면, SiC 볼은 높

은 접촉응력에서 안전하게 작동하지만 마찰손실이 크고, PEEK 볼은 접촉응력이나 마찰력 손실이 가장 작지만 볼에 가하는 압축력이 0.8 kg_f 이내로 제한되어야 하므로 큰 하중을 감당해야 하는 경우는 사용하기가 곤란하다. 그러나 작은 하중이 작용하는 구름마찰 접촉운동에서는 대단히 효율적인 볼-실린더 마찰접촉 운동 메커니즘이다. 여기에 SUS 304 볼은 높은 압축력에서는 SiC와 유사한 응력과 마찰력 특성을 나타내지만, 낮은 압축력에서는 PEEK 볼과 유사한 특성을 제시한다.

Fig. 5는 다수의 볼과 0.04° 경사진 실린더 사이에서 구름마찰 접촉운동이 일어난다고 가정할 경우, SiC 볼에서 발생하는 접촉응력과 접촉 마찰력 분포를 각각 보여주고 있다. 여기서 제시한 von Mises 접촉응력 및 접촉 마찰력은 실린더의 구름마찰 운동을 시작하는 초기에 이미 0.04°나 경사진 실린더에 의해 접촉하는 왼쪽의 볼 한개에 집중적으로 발생하므로 접촉하는 볼에는

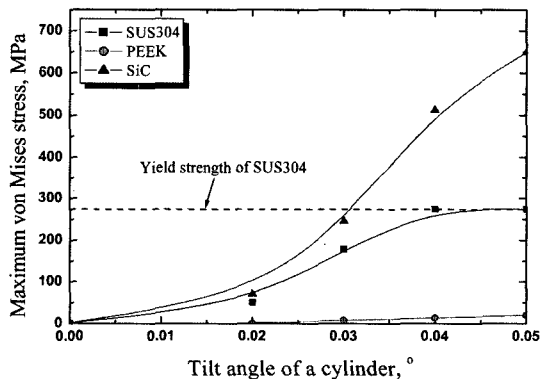


(a) Von Mises contact stress

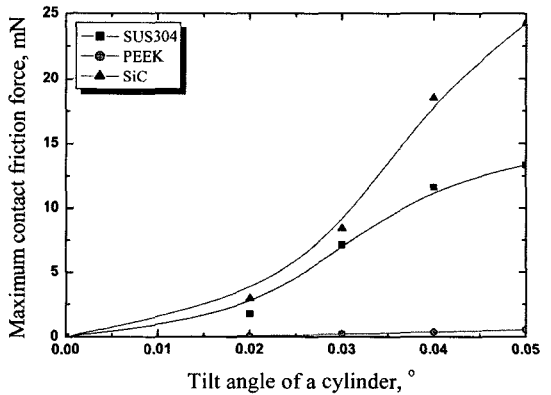


(b) Contact friction force

Fig. 5. Contact stress and friction force distributions of SiC balls with a misaligned cylinder under a uniformly distributed compressive force of 1 kg_f.



(a) Maximum von Mises stress



(b) Maximum contact friction force

Fig. 6. Contact stress and contact friction force for various values of ball materials as functions of misaligned angles of two cylinders.

가장 큰 접촉응력과 마찰력이 집중되어 트라이볼로지 문제를 제기하게 된다.

Fig. 6은 볼에 가해지는 압축력이 1 kg로 일정하지만 실린더의 경사도를 달리하면서 왕복운동을 하는 경우, SiC, SUS 304, PEEK로 제작한 볼의 최대 von Mises 응력과 최대 접촉 마찰력을 각각 보여준다. Fig. 6에서 SiC 볼을 사용하는 구름마찰의 경우는 실린더의 경사도가 높아질수록 접촉응력과 마찰력이 급격하게 증가하는 현상을 보여준다. 특히, 실린더의 경사도가 0.03° 이상을 유지하면 볼에 걸리는 접촉응력과 마찰력 손실은 빠르게 증가한다. 또한, 실린더의 경사도가 0.05°일 경우 볼에 걸리는 최대 von Mises 응력은 650 MPa로 높게 나타나지만 SiC 항복강도의 약 26% 수준으로 아직은 안전하다. 그러나 650 MPa의 접촉응력은 실린더의 경사도가 없이 평행한 경우 볼에 걸리는 최고응력 290 MPa에 비하여 2.3배나 높은 응력으로 볼의 강도 위험성은 크게 증가하였다고 볼 수 있다. 또한, SUS 304 소재를 사용한 볼에서 발생하는 최대응력과 마찰력은 실린더의 경사도가 0.03° 정도까지는 SiC 볼과 거의 유사한 응력과 마찰손실 패턴을 보여주지만, 0.03° 이상에서는 SUS 304 소재의 항복강도인 275 MPa 부근으로 급격하게 수렴하여 볼의 손상을 유발하는 결과를 보여준다. 변형률과 마찰특성이 우수한 폴리머 소재인 PEEK를 볼 소재로 선정한 경우는 실린더의 경사도에 무관하게 접촉응력이나 마찰력이 SiC 볼이나 SUS 304 볼에 비하여 대단히 낮고 안정된 거동특성을 나타낸다.

Fig. 6는 접촉응력과 마찰력을 실린더의 경사도에 대한 유한요소 해석결과를 제시한 것으로, 두개의 실린더가 왕복운동을 하는 경우에 가능한 동심원축을 유지하면서 작동성을 유지하는 것이 볼에 걸리는 응력이 낮고, 마찰력 또한 크게 줄어든다는 사실이다. 따라서 LPG 충전기에서 두개의 실린더가 미끄럼 마찰운동을 하는 과정에서 두 실린더의 동심원축 운동을 유지하기 어려운 기존의 LPG 충전기보다는 본 연구에서 제시한 다수의 볼을 두개의 실린더 사이에 삽입하여 구름마찰 운동 상태를 유지하도록 설계하는 것이 대단히 중요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 다수의 볼과 구름접촉 운동을 하는 두개의 실린더 그루브 레이스 표면에서 발생하는 최대 von Mises 접촉응력을 실린더의 경사도에 따라 FEM으로 계산하였다. 볼에 가해지는 압축력이 1 kg일 경우의 해석결과에 의하면, 황동소재로 제작된 실린더와 구름마찰 접촉운동을 하는 볼의 소재(SiC, PEEK, SUS 304)에 따라 실린더의 레이스에 걸리는 응력이 다르게 나타남을 알 수 있다. 실린더의 경사도가 높을수록 SiC와

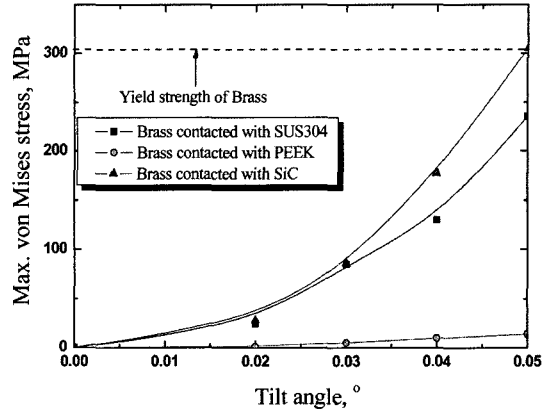


Fig. 7. Maximum von Mises stress of a brass cylinder contacted with multi-balls as functions of misaligned angles of two cylinders.

SUS 304 볼과 접촉운동을 하는 실린더는 급격하게 접촉응력이 증가하지만, 황동소재의 항복강도인 305 MPa 이하를 유지하므로 아직은 안전하다. 그러나 실린더의 경사도가 접촉거동 특성에 큰 영향을 미치고 있다는 사실을 감안할 때 실린더의 동심원축 유지에 신경을 써야한다. 반면에 PEEK 볼과 접촉하는 황동 실린더의 레이스에 작용하는 응력은 실린더의 경사도에 대단히 작은 영향을 받는 것으로 나타났다. 이것은 폴리머 소재인 PEEK 볼의 변형거동 특성이 대단히 우수하기 때문에 Fig. 6(b)의 저마찰 특성과 유사하게 von Mises 접촉응력도 낮게 유지되고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

LPG 충전기의 두개 실린더가 왕복운동을 하는 과정에 발생하는 접촉응력과 마찰력 손실문제를 볼의 사용 소재에 따라 유한요소법으로 해석하였다. LPG 충전기는 동심원축을 유지한 상태에서 운동을 해야 볼이나 마찰접촉 표면에서 발생하는 접촉응력 및 마찰손실이 줄어들므로 두개의 실린더 사이에 기울어진 경사도가 중요한 설계변수로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 다수의 볼과 실린더 사이에서 발생하는 접촉응력과 마찰력 특성을 볼에 사용된 소재와 실린더의 경사도에 대하여 해석하였다.

FEM 해석결과에 의하면, 볼의 소재로 SiC를 사용할 경우는 접촉응력이나 마찰력이 높게 나타나지만, 세라믹 소재의 특성이 우수하기 때문에 아무런 문제가 없고, 볼의 소재로 PEEK를 사용할 경우는 접촉응력이나 마찰손실이 대단히 낮게 유지되어 가장 우수한 데이터

를 제시하지만 볼에 가해지는 압축력이 제한을 받아야 하므로 범용으로 사용하기는 곤란하다. 그러나 PEEK 볼에 낮은 압축력이 가해지는 경우는 대단히 우수한 접촉거동 특성을 보여준다. 반면에 SUS 304 소재를 사용한 볼의 경우는 세라믹 소재와 폴리머 소재의 중간적 특성을 나타내는 소재로 LPG 충전기의 구름마찰 운동 조건에 적합한 결과를 도출하였다.

특히 두개 실린더의 왕복운동을 하는 경우 실린더가 동심원을 유지하지 못하고 경사진 상태에서 작동을 하면 접촉응력이나 마찰력이 급격하게 증가하는 것은 물론이고, 이들 응력이나 마찰력이 일부의 볼에 집중되어 볼의 수명을 급격하게 떨어뜨리는 원인으로 작용한다. 따라서 LPG 충전기는 다수의 볼과 실린더의 그루브 레이스가 항상 평행한 동심원축에서 작동하도록 마찰접

촉 운동조건을 찾아야 한다.

참고문헌

- [1] 김종춘, 엄명도, 박용희, 이종태, "LPG 자동차의 연료성분에 따른 오염물질 배출에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, 179-183, (2002)
- [2] 김청균, "자동차엔진공학", 복두출판사, (2004)
- [3] 김청균, "자동차전기전자제어공학", 복두출판사, (2005)
- [4] Zhang, G., H. Liao, H. Li, C. Ateus, J.M. Bordes, and C. Coddet, "On Dry Sliding Friction and Wear Behavior of PEEK and PEEK/Sic-Composite Coatings", WEAR, (2005)
- [5] Marc Analysis Program, Ver. 7.3, MARC USA, (1999)