

# 두 실린더 사이에 삽입된 멀티볼 접촉바디 시스템의 접촉거동에 관한 수치적 연구

한주현, 강현준, 김청균

홍익대학교 기계.시스템디자인공학과

## A numerical study on the contact behavior analysis of multi-ball contact body systems between two cylinders

Joo Hyun Han, Hyun Joon Kang, Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

### 1. 서론

우리나라는 자동차로 인한 대기오염 비중이 대도시의 경우 80%이상을 차지하고 있다. 더욱이 경유자동차 보유비율이 29%로 선진국 보다 월등히 높아 입자상물질과 질소산화물에 의한 대기오염이 증가하고 있다[1].

NO<sub>x</sub>의 배출 및 매연 등으로 인한 광학 스모그 현상의 주원인이 되고 있는 경유에 비해 LPG연료는 완전 기화되므로 공해가 적고 매연의 95% 이상을 저감시킬 수 있는 큰 장점을 가지고 있어 경유 자동차에 대한 대체 연료로서 가장 적당한 것으로 사료된다[2,3,4].

LPG 충전소에서 작업자들이 LPG를 충전할 때 보통 한 손으로 충전노즐 본체를 잡고 다른 한 손으로 슬리브를 당긴 후 차량 주입구에 체결을 한다. 이 때 슬리브와 충전노즐 본체 사이에는 금속접촉을 하는 미끄럼 마찰이 발생하게 되는데 이는 연료 주입 작업을 힘들게 하는 요인으로 작용하여 작업능률을 떨어뜨리게 된다. 따라서 본 연구에서는 작업자들이 LPG를 충전할 때 용이한 작업으로 일의 효율을 증가시킬 수 있도록 하는 방안으로 멀티볼 시스템을 고안하였다. 멀티볼 접촉바디 시스템이란 충전노즐의 슬리브와 본체 사이에 길이 방향으로 4개의 그루브를 만들고 그 사이에 다수의 스틸, 폴리머 또는 세라믹 볼을 넣어 미끄럼마찰방식을 구름마찰방식으로 변환시킨 시스템이다. 이는 에너지 손실을 줄여 작업자의 효율을 향상시키고 마찰저항성을 감소시킴으로써 제품 수명도 증가시키는 시스템이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 멀티볼 접촉바디 시스템의 모델을 선정한 후 슬리브, 본체, 그리고 두 부품 사이의 볼에서 발생하는 접촉력, 마찰력을 관찰하여 마찰손실을 줄이는 충전노즐 시스템을 설계하고자 한다.

### 2. 해석방법

#### 2-1. 유한요소 해석 모델

Fig. 1은 LPG충전노즐의 형상과 멀티볼 접촉바디 시스템의 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 모델링은 충전노즐 본체, 슬리브, 삽입되는 볼로 구성하였으며, 충전노즐의 4방향에 설치되는 멀티볼 시스템을 해석의 편리성과 신속성을 위하여 한 방향만 3차원 모델로 정의하였다. 모든 요소들은 8개의 절점을 가지는 육면체요소(Hexahedral element)를 사용하였고, 모델링과 해석은 각각 상용프로그램 MSC/MENTAT과 MSC/MARC를 사용하였다.

#### 2-2. 해석조건

Fig. 2는 멀티볼 접촉바디 시스템의 단면형상과 구름마찰을 위한 볼과 그루브 그리고 슬리브, 본체의 치수를 나타낸 그림이다. 슬리브는 평소 차량 주입구와의 체결시 안정성을 보장하기 위해 주입구가 삽입되는 충전노즐 앞부분으로 밀려 위치해있다. 이는 슬리브와 본체

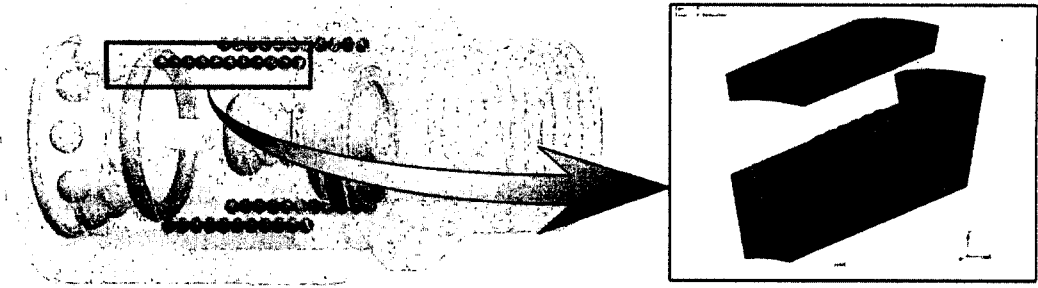


Fig. 1 3D model of LPG filling unit and the finite element model of the multi-ball system

사이에 삽입된 스프링에 의한 영향이다. 본 연구에서는 사실적인 슬라이딩을 표현하기 위하여 강성이 2231.4N/m인 스프링을 삽입하여 모델링하였으며, 스프링은 평소 약 10.7mm 압축되어 있으므로 이에 대한 반력 23.88N 또한 고려하였다.

충전노즐의 슬리브는 차량 주입구를 삽입할 때 6.5mm 뒤로 후퇴하게 된다. 슬리브의 운동이 진행되면 스프링이 압축되어 반발력이 증가하게 되는데 이 때 슬리브에 작용하는 수평력을 스프링 반력인 23.88N에서 38.5N까지 증가시켜 슬리브가 점진적으로 슬라이딩할 수 있도록 하였다.

#### (1) 압축력이 작용하는 미끄럼운동

작업자가 차량에 충전노즐을 체결하기 위해 슬리브를 뒤로 이동시키는 과정에서 수평력이 균일하게 전달되지 못하는 현상이 발생하면 슬리브 윗면에 수직방향으로 압축력이 작용하게 된다. 이 압축력은 슬라이딩의 원활한 운동을 방해하는 요소로 작용하게 된다. 따라서 슬리브 윗면에 0~1.0kgf의 힘을 가압하여 압축력이 슬라이딩에 의한 구름마찰에 미치는 영향을 관찰하였다.

#### (2) 경사진 슬리브의 미끄럼운동

슬리브에 균일한 수평력이 작용한다면 이상적인 미끄럼이 가능하다. 그러나 일반적인 경우 슬라이딩 과정 중 슬리브에 어느 정도의 경사가 발생하게 되고 이는 작업조건을 악화시키는 영향을 가져온다. 따라서 슬리브의 각도를 0°에서 0.05°로 변화시킨 후 슬라이딩 운동 유도하는 수평력을 작용하여 슬리브의 경사가 볼에 미치는 영향을 관찰하고 임계조건을 도출해 내고자 하였다.

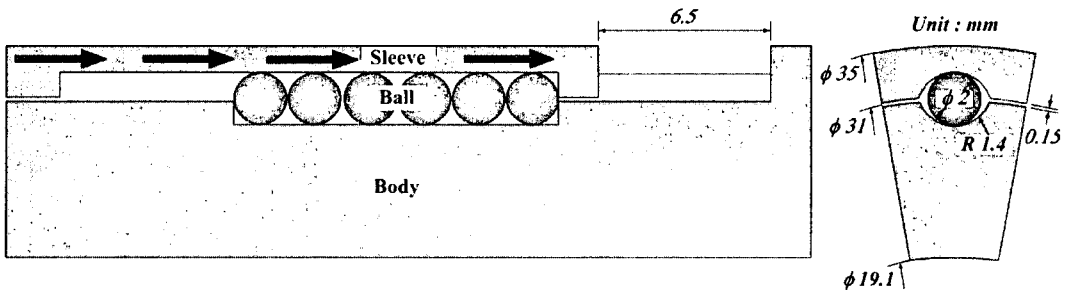


Fig. 2 The configuration and dimension of the multi-ball system

Table 1 Material properties

Properties	Brass	SUS304	PEEK	SiC
Modulus of elasticity, GPa	97	200	3.45	330
Density, kg/m <sup>3</sup>	8500	8000	1650	3100
Poisson's ratio	0.311	0.29	-	0.15

### 2-3. 소재

Table 1은 해석에 사용된 소재의 물리적 특성을 나타낸 표이다. LPG 충전노즐의 본체와 슬리브는 황동으로 이루어져 있으며, 삽입되는 볼은 메탈재질과, 폴리머 그리고 세라믹과의 접촉으로 인한 영향을 고찰하기 위해 SUS304, PEEK, SiC를 사용하였다. SUS304는 비용이 저렴하여 경제성을 확보하고 있는 소재로서 우수한 강도성과 내부식성을 지니고 있으며, PEEK(Polyetheretherketone)는 열가소성의 고기능 플라스틱 재료로서 우수한 열적 안정성과 자기 윤활성, 내마모성, 내식성을 지니고 있기 때문에 베어링과 미끄럼 운동소재로 많이 사용된다[5,6]. 또한 SiC(Silicon Carbide)는 세라믹중에서 내마모성과 경도, 내약품성이 가장 뛰어난 소재로 부식에 대한 저항이 높고 열전도성이 뛰어나며, 제작과정에서 응축이 발생하지 않아 가공성이 우수하기 때문에 경제적인 소재이다[7].

본 연구에서 황동과 SUS304사이의 마찰계수는 0.4를, 황동과 PEEK와의 마찰계수는 황동과 나일론과의 마찰계수인 0.3을, 그리고 황동과 SiC와의 마찰계수는 0.5로 적용하였다[8,9].

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3-1. 압축력이 작용하는 미끄럼운동

Fig. 4는 1kgf의 압축력이 작용할 때 PEEK소재에서 발생한 von Mises응력과 접촉마찰력을 나타낸 그림이다. Fig. 5는 압축력이 작용하는 슬라이딩 운동 과정을 나타낸 그림이다. 압축력이 작용함과 동시에 수평력에 의해 슬라이딩이 일어나는 과정은 단순히 슬리브가 볼을 수직으로 누르는 과정보다 가혹한 조건이다. 이는 이동 초기와 말기에 슬리브에 약간의

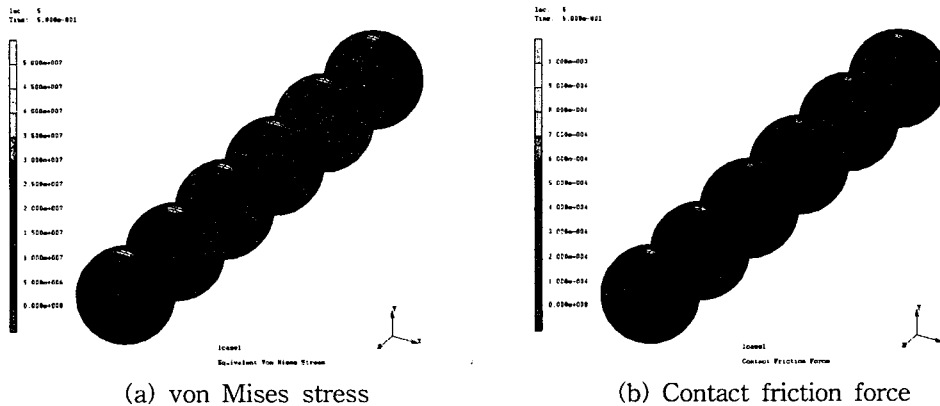
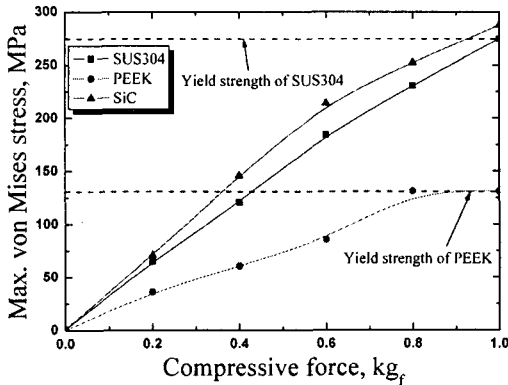


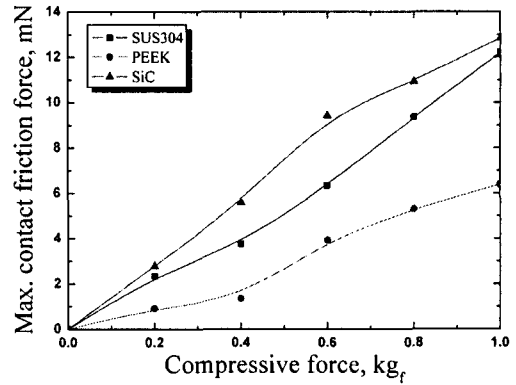
Fig. 4 von Mises stress and contact friction force distribution of Peek balls operated on compressive force 1kgf



Fig. 5 Sliding process operated on compressive force



(a) Max. von Mises stress



(b) Max. contact friction force

Fig. 6 Max. von Mises stress and contact friction force according to compressive force

편심이 발생하기 때문이다. 슬리브 상부에는 균일한 압축력이 가해지게 되는데 슬리브가 이동을 시작하는 초기에는 볼이 뒤편으로 몰려있으므로 슬리브가 균형을 유지하기 못하고 약간의 편심이 발생하게 된다. 따라서 앞부분의 볼들에서 접촉현상이 발생한다. 또한 미끄럼이 진행됨에 따라 모든 볼이 균일하게 압축되다가 이동의 마지막 과정에서 볼들이 슬리브의 앞부분으로 몰려있게 되므로 슬리브가 마지막 볼을 중심으로 편심이 발생하게 되며 뒷부분의 볼들만 접촉이 일어나게 된다. 따라서 실제 작업에서 발생할 수 있는 조건을 반영함으로써 더욱 신뢰성 있는 데이터를 추출하고자 하였다.

Fig. 6(a)는 슬리브 상단에 압축력이 가해질 경우 볼에서 발생하는 최대 von Mises 응력을 관찰한 그래프로 데이터는 슬라이딩 과정에서 발생하는 응력 중 가장 큰 값을 추출하였다. 여기서 최대 von Mises 응력을 볼을 중심으로 관찰한 이유는 슬리브나 본체에 비해 볼에 걸리는 응력이 크며, 황동은 전 압축력 영역에서 항복값 이하의 안정적인 응력상태를 나타내기 때문이다. 해석결과에 의하면 SiC에서 가장 큰 응력이, PEEK에서 가장 작은 응력이 발생하며 압축력의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

SiC는 경도가 매우 높아 큰 하중에서도 변형이 거의 발생하지 않는 취성재료이고, SUS304도 비교적 높은 탄성계수를 갖는 소재이다. 탄성변형에너지는 가해진 하중과 신장률 또는 압축률에 비례하는데 변형이 작은 소재는 외부의 영향을 재료 내부에 탄성변형에너지로 저축하는 능력이 떨어진다. 따라서 외부의 에너지를 감당하지 못하고 큰 응력이 발생하게 된다. 그러나 PEEK와 같이 낮은 탄성계수를 지닌 소재는 변형되려는 성질이 우수하여 외력에 의한 영향을 탄성변형에너지로 충분히 저축하므로 응력이 비교적 낮게 발생한다. 그러나 PEEK는 탄성이 우수하지만 항복강도가 낮으므로 0.8kgf의 압축력을 감당하지 못하고 항복(131MPa)이 발생하게 되며, SUS304 또한 1.0kgf에서 항복강도인 275MPa에 도달하게 되므로 충전노즐의 사용이 불가능해진다. 반면 SiC는 높은 응력이 발생함에도 불구하고 강도가 매우 우수하기 때문에 1.0kgf의 압축력이 작용하는 상황에서도 항복강도의 약 11.5% 정도의 응력만이 발생한다. 따라서 압축력이 작용하는 슬라이딩 조건에서 가장 안정적인 거동을 보이는 소재라고 할 수 있다.

Fig. 6(b)는 압축력이 가해질 경우 볼에서 발생하는 최대 접촉마찰력을 나타낸 그래프이다. 접촉마찰력은 슬리브와 본체사이의 볼들이 구름마찰을 하면서 발생하는 마찰력을 측정하는 것이다. 마찰력은 볼에 가해지는 수직력과 마찰계수에 비례하기 때문에 von Mises 응력과 비슷하게 선형적으로 증가하는 것으로 보인다. 따라서 최대 접촉마찰력은 마찰계수와 응력이 가장 큰 SiC가 가장 높게 발생되며, 자기 윤활성이 우수한 PEEK소재가 가장 낮은 것

으로 관찰된다. 따라서 작동조건이 소재의 거동안정성을 유지하고 있는 상태라면 PEEK가 가장 바람직한 마찰특성을 지니고 있다고 할 수 있다.

### 3-2. 경사진 슬리브의 미끄럼운동

Fig. 7은  $0.04^\circ$  경사진 슬리브가 슬라이딩 운동을 할 때 SiC소재에서 발생한 von Mises 응력과 접촉마찰력을 나타낸 그림이다. 압축력이 가해지는 경우와는 달리 슬리브가 경사지면 첫 번째 볼만 집중적으로 영향을 받게 된다.

Fig. 8은 경사진 슬리브에 의해 볼 그리고 황동소재인 슬리브, 충전노즐 본체에서 발생하는 최대 von Mises 응력을 관찰한 그래프이다. 볼과 상대접촉운동을 하는 슬리브와 충전노즐 본체는 동일한 황동소재이므로 둘 중 큰 응력값을 추출하여 관찰하였다. 경사진 슬리브가 슬라이딩을 하여 볼을 가압하는 과정은 일정 힘이 작용하는 압축력 조건과는 달리 일정한 변형을 강제한다고 할 수 있다. 일정각도 경사진 슬리브가 6.5mm 이동하는 동안 볼과 맞닿아 있는 부분의 높이가 점차 낮아지기 때문이다. 결과에 의하면 최대 von Mises 응력은 SiC에서 가장 크고, PEEK에서 가장 작은 값이 발생하며 각도 증가에 따라 상승하는 것으로 관찰된다. 높은 탄성계수를 지닌 SiC와 SUS304는 변형이 매우 작으므로 탄성변형에너지가 외부에너지를 흡수하지 못하고 높은 응력이 발생하며 경사각의 미세한 변화에 응력이 크게 증대된다. 따라서 SUS304와 같은 경우  $0.04^\circ$ 의 경사각에서 항복값인 275MPa의 응력이

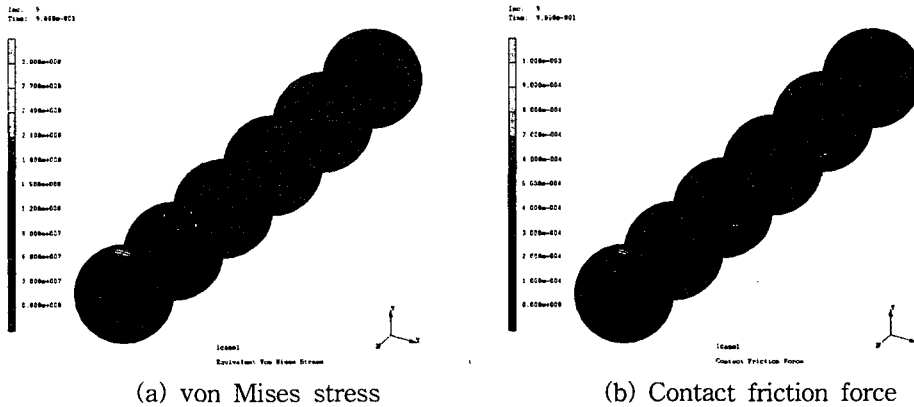


Fig. 7 von Mises stress and contact friction force distribution of SiC balls at tilt angle  $0.04^\circ$

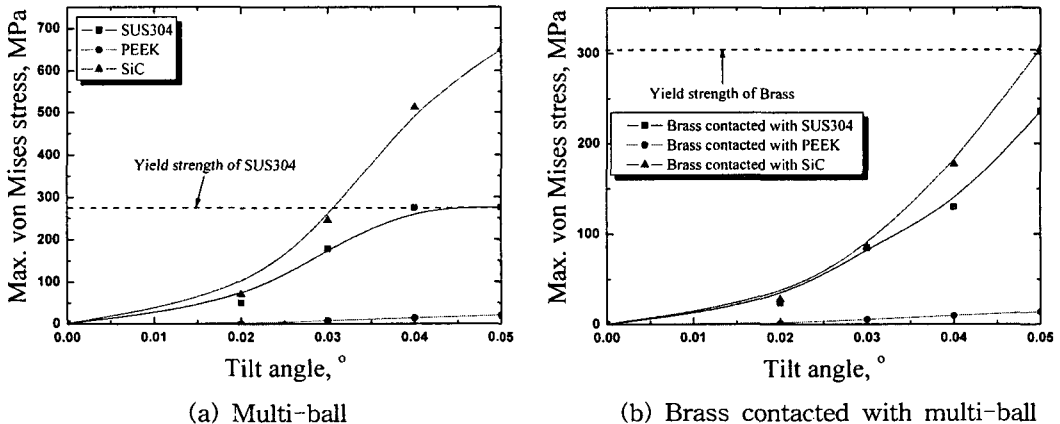


Fig. 8 Max. von Mises stress and contact friction force according to tilt angle

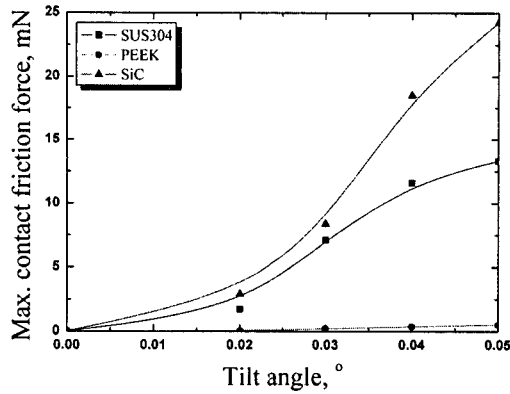


Fig. 9 Max. contact friction force according to tilt angle

발생한다. 또한 SiC는 0.05°의 경사각에서 항복값의 26%인 약 650MPa의 응력이 발생하지만 Fig. 8(b)에서 나타낸 것과 같이 황동소재인 상대재 슬리브에서 응력이 항복강도인 305MPa의 도달하므로 LPG 충전노즐을 통한 작업수행이 불가능하게 된다. 반면 PEEK소재와 같이 탄성이 우수한 소재는 높은 탄성변형에너지로 인해 외력이 축적되므로 매우 낮은 응력이 발생한다. 또한 슬리브의 경사각이 증가함에 따라 변형이 가중되므로 응력은 상승하지만 상승률이 다른 소재에 비해 매우 작다. 따라서 경사진 슬리브가 슬라이딩 운동을 하는 경우 PEEK를 사용한 볼이 가장 안정적인 거동특성을 보인다고 할 수 있다.

Fig. 9는 슬리브의 경사각이 증가됨에 따라 볼에서 발생하는 최대 접촉마찰력 나타낸 것이다. 경사가 없는 경우에는 3가지 소재 모두 매우 작은 마찰력이 발생하나 경사가 증대됨에 따라 SiC가 가장 높은 상승률로 마찰력이 증가하며, PEEK가 가장 작은 기울기로 상승한다. SUS304의 임계사용조건인 0.04°의 경사조건에서 PEEK는 SUS304의 약 3.1%, SiC의 약 2%에 해당하는 매우 낮은 최대 접촉마찰력이 관찰된다. 따라서 슬리브가 경사진 약조건에서 슬라이딩 운동을 하는 충전노즐 시스템은 PEEK가 가장 적합한 접촉 마찰거동을 보이는 것으로 판단할 수 있다.

#### 4. 결론

LPG 충전노즐의 작업 효율을 증대시키기 위해 마찰손실을 줄이는 방안으로 미끄럼마찰을 구름마찰방식으로 변환시키는 밀티볼 접촉바디 시스템을 고안하였다. 압축력이 작용하는 슬라이딩운동과 경사진 슬리브의 슬라이딩운동으로 정의된 두 가지의 경우에 대해 유한요소법을 적용하여 수치적으로 해석하였으며, 최대 von Mises응력, 최대 접촉마찰력을 관찰함으로써 작동조건 상에서 발생하는 임계조건을 도출해 내하고자 하였다. 그 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 압축력이 작용하는 미끄럼운동을 하는 경우 최대 von Mises응력은 SiC에서 가장 큰 응력이, PEEK에서 가장 작은 응력이 발생하였다. 또한 PEEK는 0.8kgf에서, SUS304는 1.0kgf에서 임계 압축력 조건으로 판명되었으며, 응력면에서는 SiC소재가 가장 안정적인 거동을 보였다.

최대 접촉마찰력 또한 SiC가 가장 높고, 자기 윤활성이 우수한 PEEK소재가 가장 낮았다. 응력면에서 안정성을 유지하고 있다면 PEEK가 가장 우수한 마찰특성을 지니는 것으로 판단되었다.

- 2) 경사진 슬리브가 미끄럼운동을 하는 경우의 최대 von Mises응력은 SiC에서 가장 크고,

PEEK에서 가장 작았으며, 탄성에너지가 낮은 SUS304는 0.04°가, SiC는 0.05°가 임계 경사각으로 판명되었다. 또한 PEEK볼이 가장 안정적인 응력특성을 보였다.

최대 접촉마찰력 또한 SiC가 가장 크고, PEEK가 가장 낮았으며, 따라서 PEEK소재가 우수한 접촉마찰거동을 하는 것으로 판단되었다.

위의 결과와 같이 멀티볼 접촉바디 시스템의 두 해석조건에서 발생하는 von Mises응력과 접촉마찰력, 임계조건들은 매우 중요한 설계요소이다. 따라서 LPG 충전노즐 시스템의 효율적인 사용과 수명 증가를 위해 설계자는 적절한 소재선정 및 안전설계에 고심해야 하며 작업자는 안정적인 사용환경을 유지할 수 있도록 노력해야 한다.

## 5. 참고문헌

1. 김종춘, 엄명도, 박용희, 이종태, "LPG자동차의 연료성분에 따른 오염물질 배출특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 179~183, (2002)
2. 윤재건, "LPG자동차의 안정성에 대한 고찰", 한국자동차공학회지 Vol.19, No.4 , pp. 10~15, (1997)
3. 선우명호, 백안선, 송정훈, "LPG 자동차에서의 LPG 누출 검사 방법에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 423~429, (1995)
4. Eric Johnson, "LPG: a secure, cleaner transport fuel? A policy recommendation for Europe", Energy policy, pp. 1573~1577, (2003)
5. C. J. Lin, J. G. Duh, "Elemental redistribution in coloured films on SUS304 stainless steel produced by current pulse method", Surface & Coatings Technology, pp. 175~182, (1996)
6. G. Zhang, H. Liao, H. Li, C. Mateus, J.-M. Bordes, C. Coddet, "On dry sliding friction and wear behavior of PEEK and PEEK/SiC-composite coatings", WEAR, (2005)
7. Berroth, K. E., "Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Applications", *Journal of STLE*, pp.770~773, (1990)
8. Ernest Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials", 2nd edition, John Wiley and Sons, p. 100, (1995)
9. I. M. Hutchings, "TRIBOLOGY : FRICTION AND WEAR OF ENGINEERING MATERIALS", CRC Press, pp. 44~48, pp. 248~250, (1992)
10. "MARC Analysis", Version K7.3, (1999)