

자동차용 LPG 봄베의 강도안전성에 관한 연구

이병관, 김청균, 이일권*

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

대림대학 자동차과*

A study on the strength safety of a LPG bombe for automobiles

Byoung Kwan Lee, Chung Kyun Kim, Il Kwon Lee*

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

*Department of Automotive Engineering, Daelim College**

1. 서론

1990년 초부터 무연가솔린의 사용 등 연료의 품질에 대한 관심을 가지기 시작하면서 가솔린 및 경유 대체연료로서 LPG의 사용이 증가하였고, 2007년 초 통계조사에 의하면 국내에 204만7,401대가 사용 중이며, 이는 전체 등록 차량 중 12.9%의 점유율을 차지하고 있다.

LPG는 휘발유와 비교하여 탄화수소 및 이산화탄소의 배출량과 입자상 물질, 질소산화물의 배출량이 적어 청정연료로 평가받고 있다. 하지만 LPG 가스의 밀도는 공기보다 크기 때문에 누출 시 바닥에 가라앉는 성질을 가지고 있고, 이로 인한 화재와 폭발 위험성이 크기 때문에 이를 방지하기 위한 LPG 봄베의 강도 안전성은 매우 중요하다고 할 수 있다.

현재 일반적으로 LPG 봄베의 소재는 탄소강 소재가 사용되고 있다. 경제성이 우수하고 견고한 장점으로 널리 사용되지만 산화에 따른 부식성 문제가 존재하고 있다. 또한 무게가 지나치게 많이 나가기 때문에 LPG 용기의 이동이나 차량에 설치 시 가해질 수 있는 국부적인 집중하중 등은 LPG 용기의 변형 등을 초래할 수 있어 자칫 가스 누설로 인한 대형사고로 이어질 수도 있다. 또한 무게로 인해 차량의 연비도 떨어지게 된다.

따라서 본 연구에서는 LPG 용기의 재질을 탄소강보다는 가벼우면서 우수한 강도를 가진 재질로 바꿔 경량화를 추구하는 동시에 강도 안전성을 확보하고자 한다. LPG 용기의 무게가 가벼워지면 용기의 이동 및 조립이 수월해지고, 차량의 무게 감소로 인한 연비 개선 효과도 유도할 수 있기 때문이다. 대체소재로는 섬유강화플라스틱과 스테인리스스틸 소재를 사용하였다.

LPG 가스에 의해 용기 내부에 발생하는 응력을 완화하기 위해 내부의 형상 설계를 수행하였다. 연구 방법으로는 FEA를 사용하였고, 인자 설계 시 직교배열표와 다구지법을 사용한 실험계획법을 통해 인자들에 대한 민감도를 분석하고, 각 인자들의 수준을 결정하여 목적함수인 강도안전성의 최적화를 유도하였다.

2. LPG 연료탱크에 발생하는 응력에 대한 고찰

2-1. 유한요소해석

유한요소해석에 사용한 모델은 LPG 연료탱크의 몸체만을 대상으로 선택하였고, 해석의 효율성을 위해 실린더 형태의 용기를 1/4모델로 줄여 해석하였다. 전체 길이 L에 대해 두께 T는 매우 작기 때문에 절점 4개의 shell 요소를 사용하였고, 경계면에는 1/4 축소에 따른 고정단 조건을 적용하였다.

고압가스 안전관리법 및 동력자원부 고시에 의하면 LPG 연료탱크는 $31\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 내압시험과 $18.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 기밀시험을 만족하도록 규정되어 있다. 또한 LPG를 차량에 주입하는 평균압력은 약 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고, 안전밸브는 $24\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상이 되면 작동하도록 설계되어 있다. 따라서 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 평균주입압력부터 시작하여 내압시험 압력인 $31\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 내압의 범위로 정하여 이 가스압은 내부의 모든 면에 균일하게 적용하였다.

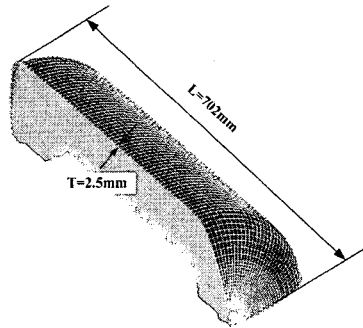


Fig. 1 FEA Model

| 탄소강 | |
|-----------------------|-------|
| 탄성계수, GPa | 205.8 |
| 프아송비 | 0.33 |
| 항복응력, MPa | 230 |
| 밀도, kg/m ³ | 7850 |

Table 1 Material Properties

탱크의 안전성과 크랙 등을 판단하기 위해 내부의 가스압으로 인해 발생하는 응력(von Mises stress)과 변위(displacement)를 관찰하였다.

2-2. 해석결과 및 고찰

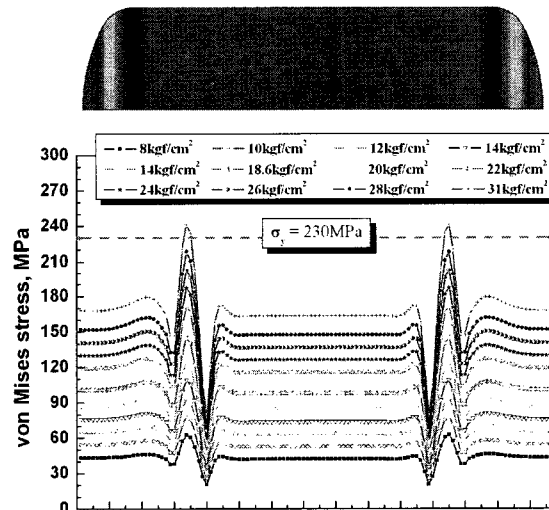


Fig. 2 von Mises stress of LPG fuel tank

Fig. 2는 주어진 압력에 따라 발생하는 응력을 관찰한 결과이다. 안전밸브가 작동하는 24 kg/cm²와 그 이상의 28kg/cm²까지는 탄소강의 항복응력인 230MPa를 넘지 않는다. 하지만 내압시험 압력인 31kg/cm²에 이르면 굴곡져 있는 부분에서 항복응력을 넘어가는 영역이 발생한다. 따라서 응력을 완화시키기 위한 설계가 필요하다. 또한 전체 분포를 살펴보면 굴곡져 있는 부분을 중심으로 응력의 편차가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이런 현상은 이 부분에 순간적인 집중하중이 가해졌을 경우 파손의 가능성을 갖고 있으므로 응력 분포를 보다 균일하게 만드는 것이 필요하다. 따라서 굴곡진 부분의 반경을 보다 크게 하여 집중된 응력을 줄이는 동시에 응력을 균일하게 분포하도록 하는 설계가 필요하다. 하지만 집중된 영역을 제외한다면 다른 부분은 31kg/cm²의 가스압에서도 항복응력의 약 74% 수준인 170MPa 응력이 균일하게 발생하고 있다. 그러므로 이 부분의 두께를 조금 줄이면 그만큼 소재 절감의 효과를 기대할 수 있다.

3. 다구찌 기법을 사용한 최적 설계

3-1. 설계인자 및 수준

| | | Variation Factor | | | |
|---|---|------------------|------|------|---|
| | | m | t | R | E |
| L | 1 | 탄소강 | 2 | 55.6 | - |
| E | 2 | FRP | 2.25 | 65 | - |
| V | 3 | STS | 2.5 | 75 | - |

Table 2 Factors & Levels

| 직교배열표 $L_9(3^4)$ | Variation Factor | | | | |
|---------------------|------------------|-----|------|------|---|
| | m | t | R | E | |
| M | 1 | 탄소강 | 2 | 55.6 | - |
| | 2 | 탄소강 | 2.25 | 65 | - |
| | 3 | 탄소강 | 2.5 | 75 | - |
| O | 4 | FRP | 2 | 65 | - |
| | 5 | FRP | 2.25 | 75 | - |
| E | 6 | FRP | 2.5 | 55.6 | - |
| | 7 | STS | 2 | 75 | - |
| L | 8 | STS | 2.25 | 55.6 | - |
| | 9 | STS | 2.5 | 65 | - |

Table 3 Orthogonal array table

of $L_9(3^4)$

2-2.의 결과로부터 응력을 줄이면서 균일한 분포를 유도하고, 소재 절감을 위해 곡률반경의 크기를 늘리고, 두께를 줄여야 함을 확인하였다. 따라서 Table 2와 같이 설계 인자로 두께 t와 곡률반경 R을 선정하였고, 대체소재의 영향을 관찰하기 위해 소재 m을 인자로 정하였다. E는 설계 과정에서 나타나는 오차항의 영향이다. Table 3은 4인자 3수준의 직교배열표를 나타내며 이 표를 이용하여 사용하여 81개의 모델을 9개의 모델로 축소하였다.

대체소재로는 FRP와 STS를 선택하였다. FRP, 즉 섬유강화플라스틱은 유리섬유로 강화된 플라스틱으로 가볍고, 단단하여 열이나 약품에 잘 견딜 수 있어 건축재료, 항공기, 차량 등의 2차 강도재료 등으로 널리 이용되고 있다. 특히 필라멘트감기법(filament winding method, FW)은 섬유의 타래(roving)에 수지를 침투시키고 심형에 감아 붙여서 성형한 강화플라스틱의 가공법으로 유리섬유의 인장강도를 최대한으로 이용할 수 있어 Al보다 가볍고, Fe보다 강한 FRP를 만들 수 있고, 압력탱크, 파이프 제조 등에 쓰인다. STS(스테인리스스틸)은 내구성 및 내식성이 우수, 제작공정에서 오염물질 배출이 적어 친환경성에서 유리한 소재이다.

| | 탄소강 | FRP | STS |
|--------------|-------|--------|------|
| 탄성계수, GPa | 205.8 | 61.781 | 200 |
| 프아송비 | 0.33 | 0.35 | 0.29 |
| 항복응력, MPa | 230 | 784.53 | 275 |
| 밀도, kg/m^3 | 7850 | 2000 | 8000 |

Table 4 Material Properties

3-2. 다구찌 기법

다구찌 기법은 특성치의 산포를 통해 설계와 실험의 최적조건을 결정하는 기준을 정한다. 이 때 특성치의 산포가 가장 적은 조건을 최적조건으로 결정하게 되며, 특성치의 산포는 SN비를 통해 알 수 있다. 본 연구에서는 LPG 연료탱크에서 발생하는 응력과 변위 그리고 무게를 특성치로 정했기 때문에 특성치 값이 작으면, 좋은 경우의 SN비를 사용하는 망소특성을 적용하였다. SN비는 큰 경우가 그 때의 설계인자들이 응력과 변위에서 안정되고, 우수한 설계임을 의미한다. 또한 SN비를 사용하여 설계 인자들이 최적설계에 미치는 영향을 간

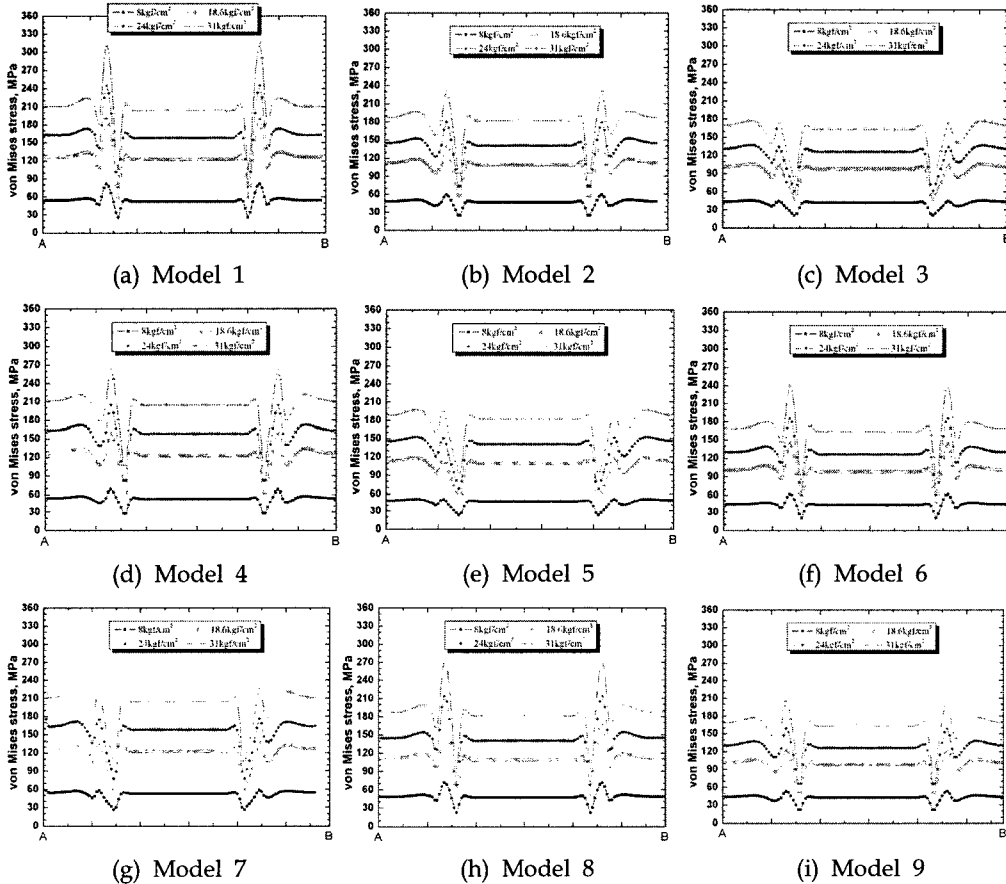
이분석법을 통해 관찰하였고, 각 인자들이 특성치값에 미치는 기여율을 계산하였다.

3-3. 유한요소해석

유한요소해석은 2-1.와 동일한 방법으로 진행하였다. 내부의 가스압도 고압가스 안전관리법 및 동력자원부 고시에 따라 LPG를 차량에 주입하는 평균압력은 약 8kg/cm²에서 부터, 내압시험압력인 31kg/cm²까지 적용하였다. 그러나 관찰한 지점의 가스압은 응력의 경우 8, 16.8, 24, 31kg/cm²로 축소하였고, 최종 판단을 위한 임계압력은 31kg/cm²로 하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4-1. von Mises stress



(j) Distribution of stress

| von Mises stress SN 비 | |
|-----------------------|--------|
| 모델번호 | SN비 |
| 1 | -50.00 |
| 2 | -47.28 |
| 3 | -44.97 |
| 4 | -48.41 |
| 5 | -45.90 |
| 6 | -47.58 |
| 7 | -47.06 |
| 8 | -48.81 |
| 9 | -46.22 |

(k) The ratio of SN

| Factors | Affecting ratio, % |
|---------|--------------------|
| m | 2.304 |
| t | 42.453 |
| R | 53.513 |
| E | 1.730 |

(l) Affecting Ratio

Fig. 3 The Results of Finite Element Analysis(von Mises stress)

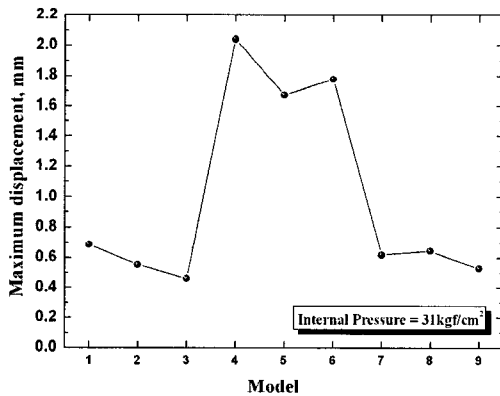
Fig. 3은 LPG 연료탱크에 발생한 von Mises stress에 대한 해석결과이다. 먼저 Fig. 3(i)의 표를 보면 응력이 발생함에 있어 가장 큰 기여를 하는 인자는 53.513%의 기여도를 가지는 곡률반경으로 반경이 클수록 집중되는 응력을 넓게 분포시키므로 응력을 완화시키는 역할을 한다. 또한 두께도 42.453%의 기여도를 가지는데, 이는 두께가 증가하면서 탱크 벽의 관성모멘트가 두께의 세제곱 크기로 비례하여 증가하므로, 발생하는 응력이 감소하는데 매우 큰 영향을 준다.

따라서 분포 형태는 Fig. 3(j)에 나타난 바와 같이 원래 모델과 비슷하지만 두께가 두꺼울수록 또한 반경이 클수록 응력에 대한 저항성은 증가하는 경향을 나타내며, 각 모델에 대한 SN비를 계산한 결과는 Fig. 3(k)의 표처럼 3번 모델이 가장 크고, 그 다음으로는 5번 모델이 가장 크다. 이 두 모델의 공통점은 반경이 가장 크다는 점으로 그래프를 보면 31kg/cm²를 기준으로 했을 때 최대 응력과 최소 응력의 차가 각각 약 107MPa(3번)과 127MPa(5번)로 원래 모델의 170MPa에 비하면 상당히 균일해졌음을 알 수 있다. 좀 더 살펴보면 각 그래프를 비교해 봤을 때 반경이 75mm인 모델들의 응력분포가 매우 균일함을 알 수 있으므로 반경은 적어도 75mm 이상이 되어야 한다.

그 다음으로 SN비가 큰 모델은 9번 모델로 9번 모델은 두께가 가장 두껍고, 반경을 중간인 모델이다. 이 모델의 응력은 높지 않게 나타났지만, 응력의 편차는 반경이 65mm이기 때문에 약 140MPa로 다소 높게 나타나고, 분포가 균일하지 못 하다.

결과적으로 탱크에 발생하는 응력을 기준으로 판단한 결과 3, 5번 모델이 우수한 모델이라고 할 수 있다.

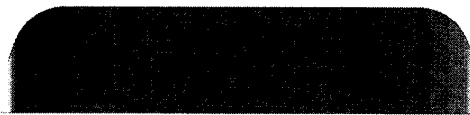
4.2. Maximum displacement



(a) Maximum Displacement

| Maximum displacement SN 비 | |
|---------------------------|---------|
| 모델번호 | SN비 |
| 1 | 3.2608 |
| 2 | 5.1455 |
| 3 | 6.7448 |
| 4 | -6.1926 |
| 5 | -4.4595 |
| 6 | -4.9937 |
| 7 | 4.1662 |
| 8 | 3.8088 |
| 9 | 5.5473 |

(b) The ratio of SN



(c) distribution of Maximum displacement

| Factors | Affecting ratio, % |
|---------|--------------------|
| m | 74.606 |
| t | 14.690 |
| R | 10.600 |
| E | 0.104 |

(d) Affection Ratio

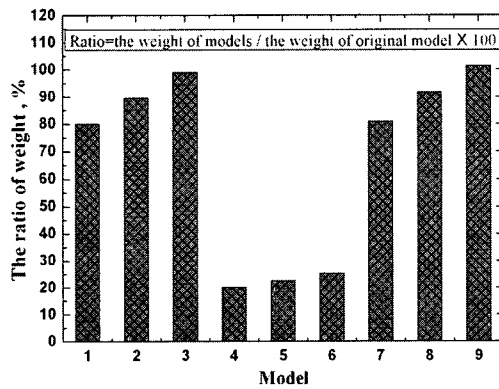
Fig. 4 The Results of Finite Element Analysis(Maximum displacement)

Fig. 4는 LPG 연료탱크에 발생한 Maximum displacement에 대한 해석결과이다. 먼저

Fig. 4(d)의 표를 보면 변위가 발생함에 있어 가장 큰 기여를 하는 인자는 74.606%의 기여도를 가지는 소재로 소재의 연성이 변위에 큰 영향을 주고 있다. 그 다음으로는 관성모멘트에 큰 기여를 하는 두께지만 미치는 영향력은 10.6%에 불과하다. 따라서 소재의 취성이 클수록 발생하는 변위를 줄일 수 있다. 그러므로 플라스틱 계열의 FRP 보다는 스틸 계열의 탄소강과 스테인리스 스틸이 우수하며, 두께와 반경을 클수록 유리하다. 하지만 FRP의 항복응력은 스틸 계열의 소재보다 3배정도 크기 때문에 변형에 대한 저항이 매우 우수하다. 그리고 Fig. 4(a)의 그래프에서 발생한 변위를 보면 4, 5, 6번 모델에서 각각 2.040mm, 1.671mm, 1.777mm가 발생하였기 때문에 그 수치는 매우 작다고 할 수 있다. 그러므로 FRP 소재가 부적절하다고는 판단하기는 매우 힘들고, 다른 관찰값을 같이 고려해야 한다.

하지만 일단 변위의 관점에서는 이 결과로부터 각 모델 중에서는 3번 모델이 가장 우수하며, 2, 9번 모델이 다음으로 우수하다.

4-3. weight



(a) The ratio of weight

| 모델번호 | SN비 |
|------|----------|
| 1 | -21.2666 |
| 2 | -22.2387 |
| 3 | -23.1067 |
| 4 | -9.3539 |
| 5 | -10.3241 |
| 6 | -11.3082 |
| 7 | -21.3488 |
| 8 | -22.4443 |
| 9 | -23.3108 |

(b) The ratio of SN

| Factors | Affecting ratio, % |
|---------|--------------------|
| m | 85.744 |
| t | 13.666 |
| R | 0.569 |
| E | 0.022 |

(c) Affection Ratio

Fig. 5 The Results of Finite Element Analysis(weight)

Fig.5는 LPG 연료탱크의 무게에 대한 결과값이다. 소재 절감을 확인하기 위해서는 각 모델의 무게를 파악해야 하기 때문이다. 먼저 Fig. 5(a)의 그래프는 원래 모델과 다구찌 모델 사이의 무게의 비에 100을 곱해 백분율로 표현한 그래프이다. 그래프를 살펴보면 밀도가 스틸계열의 약 1/4에 불과한 FRP 소재의 비율이 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 무게가 작다는 것은 곧 추락이나 가속 등에 의한 충격의 크기가 작은 것을 의미하고, 설치 및 주행시에 매우 유리하며, 경량화는 차량의 무게를 줄이기 때문에 연비 및 가속성능, 주행성 등에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. Fig. 5(b)의 SN비를 살펴보면 단연 FRP 소재가 적용된 4, 5, 6번 모델이 우수하게 나타난다.

각 인자의 기여도를 살펴보면 소재가 약 85%로 압도적인 부분을 차지하고 있다. 그리고 그 다음으로는 두께가 약 13.66%를 차지하고 있다. 이 두 인자의 총 기여도는 약 98.66%로 이 두 인자가 무게를 결정한다고 할 수 있다.

이로부터 무게의 관점에서 가장 우수한 모델은 4, 5, 6번 모델이다.

4.4. 최종모델선정

지금까지의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- * 응력 - 3, 5번
- * 변위 - 3, 2, 9번
- * 무게 - 4, 5, 6번

여기서 가장 우수한 모델을 선정하면, 먼저 LPG 연료탱크에서 가장 중요한 것은 안전성의 문제이므로, 응력이 가장 중요한 판단 기준이다. 그 다음으로는 무게라고 할 수 있는데, 이유는 연료탱크에 가해지는 충격을 미리 예방하는 관점에서 무게를 줄이게 되면 충격을 약 1/4 수준으로 줄일 수 있기 때문이다. 또한 발생하는 변위의 크기는 FRP라는 소재에게 치명적인 영향을 줄만큼 큰 값이 아니기 때문에 실제로 안전성의 측면에서는 주어진 가스압에 대해 스틸계열이나 FRP 모두 안전하다고 할 수 있다. 따라서 가장 우수한 모델은 응력도 낮으면서 무게도 낮은 5번 모델이 가장 우수하다고 할 수 있다.

5번 모델의 각 인자에 대한 수준은 다음과 같다.

- * 소재 : FRP , 두께 : 2.25mm , 반경 : 75mm

4.5. 최종 모델과 기존 모델과의 비교

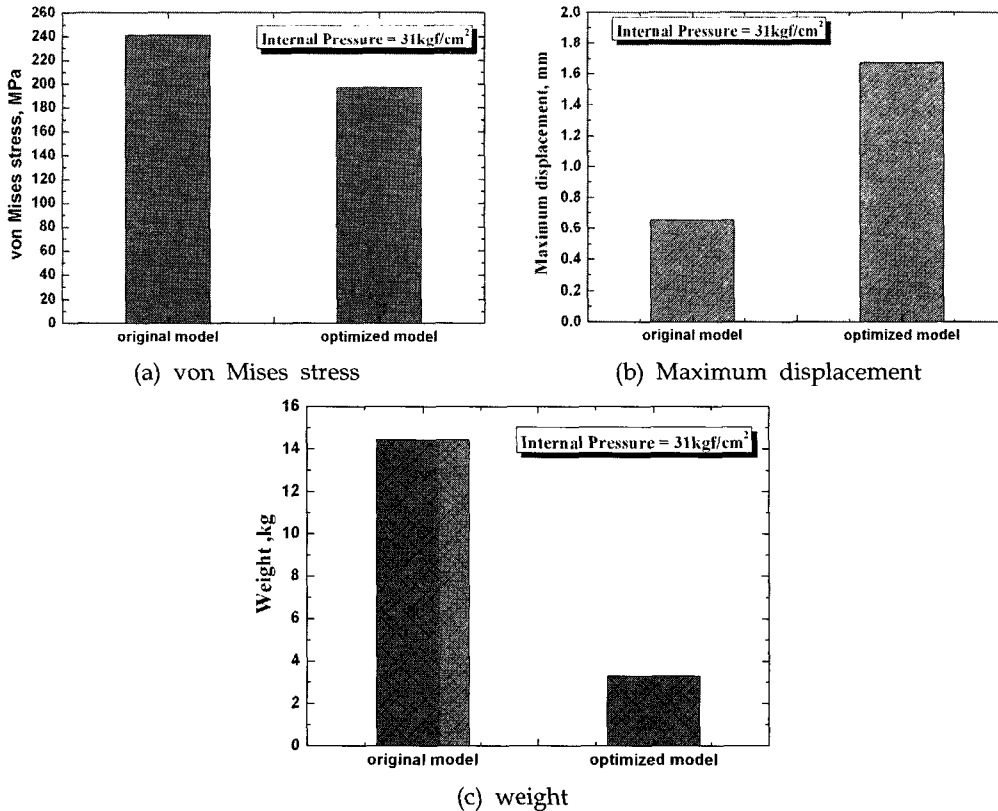


Fig. 6 The Comparison of optimized model & original model

Fig. 6은 기존의 LPG 연료탱크와 다구찌 기법을 통해 결정한 최적 모델을 서로 비교한 결과이다. 발생한 Maximum von Mises stress는 약 16% 정도 감소하였고, 변위는 약 37% 정도 증가하였다. 그리고 무게는 약 75% 정도 감소하였다. 응력과 무게의 측면에서 감소한 결과를 얻게 되었고, 응력은 특히 수치적으로 감소시키는 동시에 발생한 최대 응력값을 주변의 응력값과 비슷한 수준으로 줄여 균일한 분포를 유도하는 초기 목적을 달성하였다. 또한 무게는 기존 모델과 비교하여 상당히 크게 감소시켰다. 비록 발생한 변위가 기존 모델에 비해 다소 증가하였지만, 그 절대적인 수치로 봤을 때 약 1mm의 상승에 불과해 탱크의 강도안전성에 미치는 영향은 거의 미비하다고 판단할 수 있다. 결론적으로 기존 모델의 문제점으로 제기됐던 부분들을 상당 부분 해결할 수 있게 되었다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 LPG 연료탱크의 강도안전성 향상 및 소재절감에 대한 설계를 수행하였다. 기존 모델에 대한 해석을 통해 문제점을 파악하고, 이 문제점을 해결할 수 있도록 섬유강화플라스틱과 스테인리스스틸을 대체소재로 선택하고 유한요소해석과 다구찌 기법을 적용하여 원하는 목적을 달성할 수 있도록 최적설계를 진행하였다.

고압가스 안전관리법 및 동력자원부 고시에 의하면 LPG 연료탱크는 $31\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 내압시험과 $18.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 기밀시험을 만족하도록 규정되어 있다. 이 규정을 제한조건으로 하고, 해석대상을 LPG 연료탱크의 몸체만으로 제한하여 해석을 진행하였고, 내부의 LPG 가스압은 내부의 모든 면에 균일하게 적용하였다.

강도안전성을 관찰하기 위해 LPG 연료탱크에 발생하는 응력과 변위를 측정하였으며, 무게를 계산하여 소재 절감 효과를 추적하였다.

그 결과 주어진 가스압에 대해 9개의 모델 중 5번 모델을 가장 우수한 모델로 선정하게 되었다. LPG 연료탱크에 발생하는 응력은 균일하게 분포하였으며, 무게도 크게 줄어들었다. 특히 FRP 소재는 주어진 가스압에 대해 충분히 안정된 응력 거동을 나타내고 있으며, 무게를 줄이는 데 매우 유리한 소재임을 연구를 통해 확인하였다. 또한 최적화된 5번 모델과 기존 모델과의 비교에서도 최적화된 모델은 매우 우수한 거동을 나타내어 충분히 지금의 연료탱크의 문제점을 상당 부분 보완되었음을 알 수 있었다.

그렇지만 본 연구에서는 FEA만을 통한 연구가 수행되었기 때문에 실제 실험을 통한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 LPG 연료 탱크는 여러 가지 환경에서 사용되기 때문에 외부의 온도에 의한 거동과 여러 LPG 가스와의 접촉에 의한 화학적 반응 문제 등을 실제 실험을 통해 관찰하여 FEA 연구의 한계를 보완하는 연구가 앞으로 진행되어야 한다.

6. 참고문헌

1. 임재석, 임평, 재료공학과 물성화학, 내하출판사, (2006), pp.381-386
2. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, (2003), pp.459-462, pp.631-638
3. 이강용, 응력해석 및 재료거동학, (2003), pp.169-187
4. 김용석 외 3인 공역, William D. Callister, Jr. "재료공학과 공학", (1999), pp. 598-599, pp.608-609
5. 이상복, 알기쉬운 다구찌기법, 상조사 (2000),
6. MARC Analysis, Version K7.3(1999)