한국공작기계학회지 Vol.18 No.6 2009. 12. pp. 614~620
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

차량용 연료탱크의 내구도 평가에 관한 연구

홍민성+, 조은희*

(논문접수일 2009. 09. 04, 심사완료일 2009. 11. 30)

A Study on the Durability Estimation of Vehicle Fuel Tank

Minsung Hong+, Eunhee Cho*

Abstract

A fuel tank of a vehicle is an important part due to its flammable contents ant its importance during crash conditions. Therefore, the fuel tank's design should be assessed for durability and robustness to ensure safety during the early development phase. Previously, evaluation for the durability was done by testing in physical driving conditions which could only be done after the completion of the vehicle. Computation simulation is a more effective method to evaluate the strength and durability of the fuel tank during the early stage. In this paper, two outstanding computational simulation methods are studied. One evaluates PV cycle fatigue due to build up pressure in the fuel tank and the other evaluates the PSD vibration fatigue from modal characteristics. The results show that computational methods agree with physical tests and are thus suitable to analyze the strength and durability of the fuel tank at early development phase.

Key Words : Fuel Tank(연료탱크), Computational Method(전산기법), PV(정부압), PSD(파워스펙트럼밀도)

1. 서 론

차량용 연료탱크는 초기 연료를 엔진에 공급해주는 단순한 용기에서 발전하여 이제는 승객의 안전 및 소음에 대한 감성품질까지 요구되며 특히, 공해의 주범인 CO_2의 규제에 대해서까지 만족하는 복잡하고 어려운 차량부품이 되어있다. 안전과 관련된 부품으로 오랜 기간의 안정성을 확보하기 위해 차량 실차 테스트가 필요한데 이보다 먼저 해석적으로 검증하여 개발하는 것이 차량 개발기간 단축과 문제 발생 후 수정에 따른 비용을 절감할 수 있다.(1)

일반적으로 Power-train integration part 들은 엔진의 거동과 RLDA(Road Load Data Acquisition)시의 가속도에 지배적이지만, 연료탱크의 경우는 연료펌프 막힘 현상에 의한 내압 증가 및 감소로 탱크 용기 원래의 형상을 변형하게

+ 아주대학교 기계공학부 (mshong@ajou.ac.kr)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5
* 아주대학교 산업대학원 기계공학과

만들어 다양한 현상의 문제점을 야기하며, 차량운행시의 불규칙한 랜덤(Random) 가진에 의하여 피로문제가 발생하기도 한다. 따라서, 이와 같은 문제들은 연료탱크 개발단계에서 고려되어지기 위하여, PV(Pressure-Vacuum)해석 및 PSD (Power Spectrum Density) 진동 해석이 진행되어야 한다.

PV 해석은 연료탱크 의 정적 강성을 평가하기 위한 조건이다. 여기서의 정적 강성이란 가감압에 의한 강성을 말한다. OBD(On Board Diagnostic)에서는 탱크에 누유가 발생하는 지를 검증하기 위해 탱크의 모든 밸브 등을 잠그고 압력을 가하여 일정 시간 동안 압력이 감소하지 않는지 여부를 판단하게 된다.(1)

이와 더불어 펌프에 부착된 필터가 막힐 경우 연료를 연소하는 과정에서 부압이 발생하게 되는데 이때 탱크에 손상여부도 우려가 된다. 이를 검증하기 위해서 PV 사이클 내구테스트 항목이 필요하다.

실험조건은 탱크 내부에 특정 값의 압력을 일정주기로 반복시키면서 파손이 발생하는 시점까지의 사이클 수를 계산하는 것이다. 이런 문제는 해석 시 정적 선형에서 구한 응력과 단순한 일정 진폭의 반복 주기를 갖는 하중을 조합하여 사이클을 만족할 수 있는지를 쉽게 예측할 수 있다. 그러나, 차량 주행 조건하에서는 연료탱크가 넓은 주파수 범위의 랜덤하중을 받게 되므로, 시스템의 동적 특성이 영향을 미쳐 정적 강성을 만족하는 것만으로는 위험요소가 있다.

이에 따라 자동차회사에서는 차량개발 단계에서 랜덤 하중을 이용한 PSD 진동실험을 통해 이를 보완하고 있으며, 이는 해석에서는 동 특성이 고려된 공진 내구해석기법을 통하여 검증할 수 있다.

2. 내구 해석기법에 관한 이론

2.1 개요

차량 시스템 설계에는 많은 설계기준들이 있으며, 이 중에서 차량이 주행하는 동안에 노면과 엔진으로부터 들어오는 가진으로 인하여 차량 시스템이 받게 되는 동 하중 이력에 의한 내구수명이 하나의 중요한 기준이 된다. 내구와 관련된 주요 설계 사항은 다음과 같다.

첫째는, 구조물의 형상에 따른 국부적 응력집중부위를 피하기 위한 설계방안을 들 수 있다. 구조물의 노치, 구멍, 용접 등의 응력집중부위를 어떻게 설계하느냐에 따라 구조물의 수명이 크게 바뀌므로 내구문제에서는 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

둘째로는 차량 강성측면에서의 설계가 있다. 다양한 주행조건하에서 구조물의 흔들림과 비틀림이 시스템의 내구 문제에 영향을 미친다는 사실은 이미 알려져 있다. 즉 전체 시스템의 적당한 굽힘 및 비틀림 강성은 내구문제 뿐만 아니라, 진동문제를 피하기 위한 필수 조건이다.

또한 내구 문제는 진동관점에서 평가된다. 차량에서 피로문제를 일으키는 주요 가진력은 노면에서 들어오는 하중이다. 이러한 노면 입력하중의 PSD는 노면 형태 및 주행조건에 따라 저주파수 혹은 고주파수의 특성을 가지며, 이 주파수 영역이 구조물의 주파수 영역과 일치하게 되면 심각한 피로문제를 일으키게 된다.(2)

이러한 이유에서 구조물의 동적 거동이 피로문제에 있어서 중요한 관점이 되기도 한다.

기계 부품의 내구성을 평가하기 위해서는 실험적인 실험 방법이 가장 정확하지만, 부품개발에 따른 시간과 비용 절감을 위하여 가상내구해석 기법이 개발되어 왔다. 이 중 가장 대표적인 방법으로 준정적 내구해석 기법(Quasi-Static Fatigue Analysis)이 있는데, 정하중 상태에서의 유한 요소모델 결과와 시간영역의 동하중 이력을 내구성평가에 이용하는 방법을 일컫는다. 이 방법은 비교적 복잡하지 않고 빠르게 결과를 얻어낼 수 있다는 장점을 가진다.

반면, 동적효과가 피로수명에 3차 혹은 4차의 기여도를 가지고 있어서 무시할 수 있다는 가정하에서 이루어지기 때문에, 구조물에 입력되는 동하중으로 인해 발생할 수 있는 구조물과의 공진을 고려하지 못하는 단점이 있으므로 피로수명이 부정확하게 나올 수 있다. 즉 준정적 내구해석 기법은 위에서 열거한 내구해석의 설계 사항 중 진동관련 조건을 평가할 수 없으며, 입력 동하중과 구조물의 주파수가 서로 근접하지 않는 경우의 내구평가에 합당하다.

내구성 평가에서 진동관련 효과를 고려하기 위해서는, 구조물의 주파수응답 해석 결과와 시간영역의 동하중이력이 아닌 주파수 영역의 동하중이력이 해석에 요구되며, 이러한 방법을 공진 내구 해석기법(Resonance Fatigue Analysis)이라 한다. 이 방법의 정확성은 유한요소모델의 주파수응답 해석에 있어서 얼마나 많은 모드를 선택하는가에 좌우된다. 해석에 요구되는 주파수 영역의 최소 2～3 배에 달하는 모드를 사용한다면 대체적으로 정확한 결과값을 얻을 수 있다.

2.2 준정적 내구 해석기법

딱딱한 구조물의 내구도 평가에 있어서 정적 하중에 의한 유한요소모델 결과와 시간영역에 의해 정의된 동하중이력을 중첩하여 동응력 또는 변형률을 구하는 방법을 준정적 내구해석 기법이라고 한다. 내구 해석에 있어서, 출발점은 응력

또는 변형률로 표현되는 구조물의 응답이다. 따라서, 준정적 피로해석에서는 구조물의 응답을 구하기 위해 각 방향의 단위 입력하중에 대한 유한요소 모델의 선형 해석결과를 이용한다. 즉, 이 방법은 구조물의 동적 효과가 매우 미미하다는 가정하에서, 구조물의 정적 응답을 피로해석에 사용하게 된다. 이와 같이 구해진 선형 해석결과는 시점에 따른 동응력 이력을 구하기 위하여 실험 혹은 해석을 통하여 얻어진 하중 이력과 중첩되어 진다.[3]

불규칙한 동응력 이력은 Rainflow Cycle Counting에 의해 응력구간 당 작용 횟수가 계산되어 히스토그램 형태로 나타내어지며, 이 결과는 Minor's Rule에 적용되어 피로 손상률이 계산된다.[4]

2.3 공진 내구해석기법

전통적으로 피로 해석은 응력이나 변형률 형태의 하중 시계열 데이터를 이용하여 수행되는 것이 일반적이다. 시간영역에서 표현되는 시계열 하중 데이터는 일반적으로 데이터의 양이 크므로, 데이터 처리와 피로해석에서 많은 어려움과 제약이 있다. 또한 어떤 구조물 및 단품에서 받는 하중은 시간영역에서 표현하기 힘든 경우가 있다. 이런 경우는 구조물 및 단품이 받는 하중을 주파수 영역에서 PSD 의 형태로 표현하고, 시스템도 주파수 영역의 전달함수로 표현하여 구조물의 동적거동을 예측, 평가한다.

한편, 자동차에 사용되고 있는 연료탱크는 차량 주행 중에 동적인 진동하중을 받고 있으며, 이 진동하중은 넓은 범위의 주파수 영역을 포함하고 있으므로, 탱크의 공진 주파수가 가진 주파수 영역에 포함되는 경우가 있다. 이와 같은 경우에는 기존의 응력, 변형률 시계열 데이터를 이용하여 피로해석을 하는 것은 부정확하며, 동적하중에 의한 구조물의 공진을 고려한 피로해석 방법이 필요하다. 이러한 요구에 의하여 하중데이터를 시간 영역이 아닌 주파수 영역에서 표현하고, 피로 손상을 계산하는 진동 피로해석 기법의 절차를 간단히 살펴보도록 한다.

초기의 몇몇 연구자들은 주파수 영역에서 표현된 하중으로 피로해석을 하기 위해서, 역 Fourier 변환기법을 이용하여 주파수 영역의 하중데이터를 시간영역으로 변환하고, 전통적인 피로해석 방법을 그대로 적용하였다. 그러나, 주파수 영역에서 표현되는 하중들은 대부분 위상각의 정보가 없는 PSD형식으로 주어지기 때문에 시간영역으로 정확히 표현될 수가 없다. 그러나 랜덤하중 파형을 에르고딕(Ergodic) 정상 Gaussian 랜덤파형으로 가정을 하면, 랜덤 파형의 위상각이 랜덤하다고 가정할 수 있으므로, 변환 가능하다. 이러한 방법은 간단히 주파수 영역의 하중 데이터를 시간영역으로 변환하여 기존 피로해석 방법을 쓰기 때문에 간편한 점이 있지만, 생성된 시간영역에서의 하중데이터의 양이 커지므로, 데이터 처리가 힘들어 지고, 피로 해석시간도 많이 들게 된다. 따라서 주파수 영역에서 표현되는 하중을 시간영역으로 변환없이, 주파수 영역의 응력 PSD로부터 단품의 피로 손상을 계산해 내고자 하는 연구가 진행되었다. 그 결과, 구조물의 내구도 평가에 있어서 유한요소모델의 주파수응답 결과와 주파수영역에 의해 정의된 동하중이력을 중첩하여 동응력 및 변형률을 얻어내는 공진 내구해석 기법이 개발되었다.[5]

공진 내구해석 기법은 시간영역이 아닌 주파수 영역에서 이루어 질 뿐, 전체적인 프로세스는 준정적 내구해석 기법과 평형적인 구조를 이룬다.[6]

3. 연료탱크의 내구도 평가

본 장에서는 차량 연료 시스템에 2장에서 언급한 준정적 내구해석 기법과 공진 내구해석 기법을 적용하였다. 정적 강성을 평가하는 가감압 해석에는 준정적 내구해석기법을 적용하여 해석을 수행하였으며, 동적 강성을 평가하는 PSD 진동해석에는 공진 내구해석 기법을 적용하여 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다.

3.1 준정적 내구해석 기법

3.1.1 선형 정적 해석

상세한 피로해석에 대한 조건들은 Table 1에 나타내었다. 또한, Table 2 및 Fig. 1의 피로 물성치를 입력하여 준정적 내구해석을 수행하였다.

응력이 피로해석의 입력 데이터로 사용되므로 ABAQUS를 이용하여 부품에 대한 정적해석을 수행하였다. 압력조건으로는 탱크 내에 내압을 정압 15KPa과 부압 -4.7KPa를 가

Table 1 Conditions for the quasi-static fatigue analysis

Analysis type	Strain life
Mean stress effect	Goodman
Certainty of survival	50%
Stress/Strain combination	Max. principle
Material	CR3
Surface finishing condition	No finish cold roll

Table 2 Material and fatigue properties

GMW2M-ST-S-CR3/4	E-N
Yield strength [MPa]	183
Ultimate Tensile strength [MPa]	302
Elastic modulus [MPa]	2.07E+05
Fatigue strength coefficient [MPa]	796
Fatigue strength exponent	-0.13
Fatigue ductility exponent	-0.153
Fatigue ductility coefficient	0.424
Cyclic strain-hardening exponent	0.21
Cyclic strength coefficient [MPa]	716
Cut-off [reversals]	2.00E+08

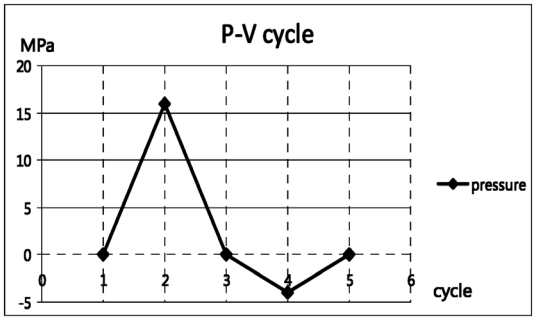

Fig. 1 Pressure-Vacuum input profile

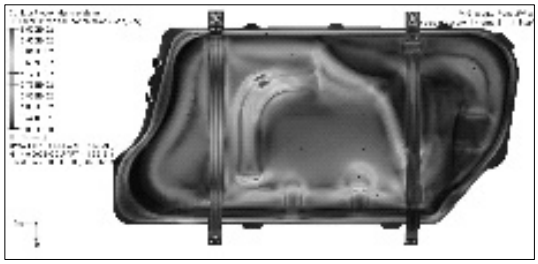

Fig. 2 Stress plot at 15KPa pressurizing: 850MPa

하여 변형률을 구하였으며, Fig. 2～5는 가감압력에 의한 응력 및 변형률 결과를 보여주고 있다.

Fig. 2은 15KPa까지 압력을 증가시켰을 때 탱크에 발생하는 응력 분포를 보여주며 실제 실험에서 파손이 있었던 바닥면 리브(Rib) 모서리에서 발생하며 850MPa의 응력이 나타났다. 이 해석에 사용된 물성치는 내구해석을 위한 선형

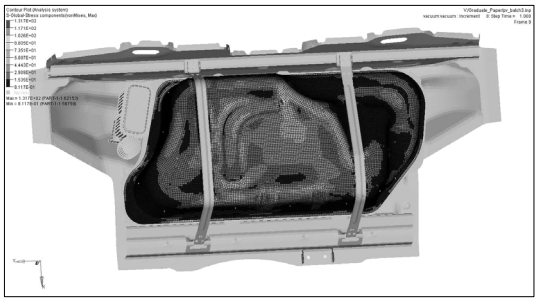

Fig. 3 Stress plot at 3.7KPa vacuum: 131.7MPa

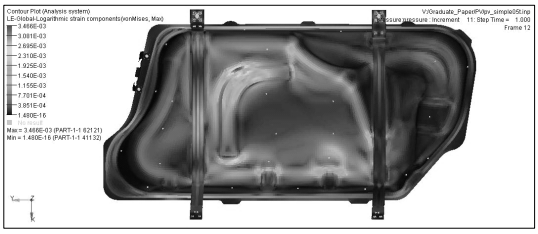

Fig. 4 Strain plot@ 15KPa Pressurizing: 0.003

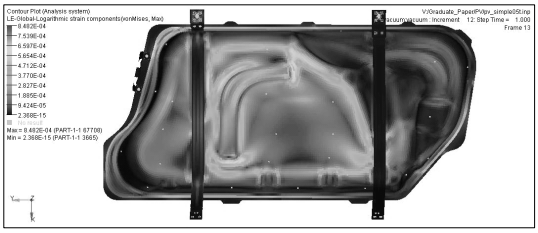

Fig. 5 Strain plot@ 3.7KPa Vacuum: 0.0008

물성치이며 항복응력 280MPa을 초과한 값으로 비선형 물성에서 발생하는 응력과는 차이가 있다.

Fig. 3는 부압 3.7KPa로 압력을 감소시켰을 때 발생하는 응력분포를 보여준다. 가압에 비해 낮은 응력 값을 보여주며 발생하는 위치 또한 리브 끝단으로 이동하였다.

Fig. 4와 5는 변형률에 대한 결과값이며 응력이 높게 발생하는 부분에서 3.4%의 변형률을 보여주며 이 결과값을 이용하여 내구해석을 진행하게 된다.

3.1.2 준정적 내구해석

연료탱크에 Fig. 6의 압력 프로파일과 같은 하중이 가해졌을 때의 동응력이 계산되어질 수 있도록 앞서 선형 정적 해석에서 구한 가감압 상태의 변형률과 이력곡선을 FE-Fatigue

에서 비교하였다.

해석과 실험 모두 탱크 바닥 리브 코너 부위가 가장 취약한 것으로 나타났으며, Fig. 7과 같이 내구 수명 결과는 해석의 경우가 7000회로 Fig. 8에서의 실험의 5800회와 20% 가량의 차이를 보였다. 이는 Stamping 된 연료 탱크의 Thinning 현상을 반영하지 못한 것에서 기인된 것으로 보여진다.

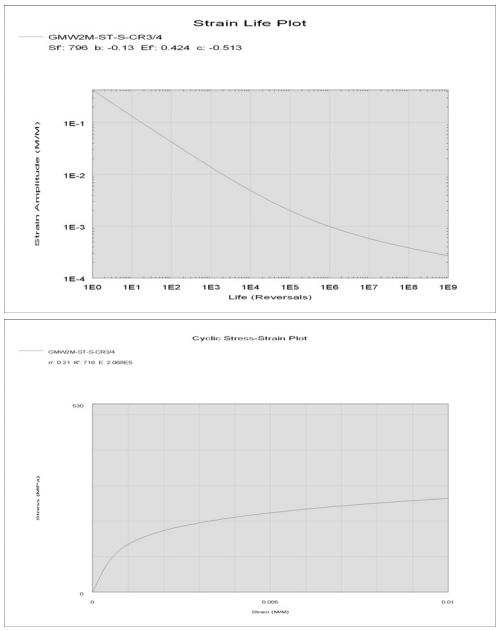

Fig. 6 Strain life & cyclic stress-strain plot of CR3

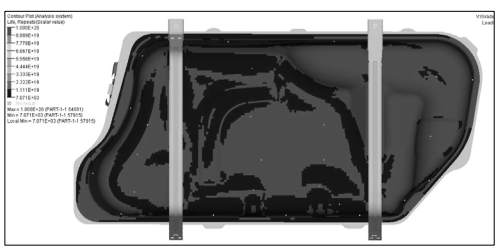

Fig. 7 Contour of Fatigue Life

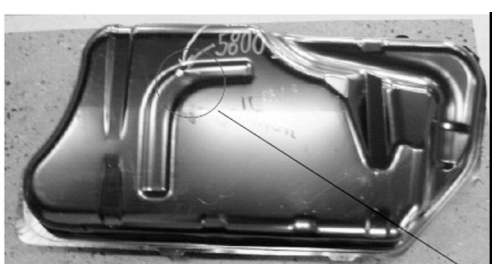

Fig. 8 Crack Picture of Test

3.2 연료탱크의 공진 내구해석 기법

본 절에서는 Fig. 9와 같은 PSD 형태의 랜덤파형이 연료탱크의 체결 부위에 상하로 가진되는 실험조건에 대하여 모달 특성을 고려한 공진 내구해석을 수행하여, 실험 결과와 비교 예측해보고자 한다.

3.2.1 고유 진동 해석

해석에 사용된 연료탱크 유한요소 모델은 총 55000개의 절점과 56000개의 요소로 구성되어 있다. 고유진동 해석을 위하여 차체에 체결되는 4지점을 완전 구속하였으며, 셀 요소에 Nonstructural Mass를 입력하여 연료 탱크에 채워진 70%의 물의 무게를 고려해 주었다. 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하여 고유진동해석을 수행하였으며, 1차 Mode Shape을 Fig. 10에 나타내었다.

연료탱크의 1차 고유진동수는 35Hz로 Fig. 9의 PSD 입력 실험 조건의 주파수 영역 0～100Hz에 들어오므로 실험

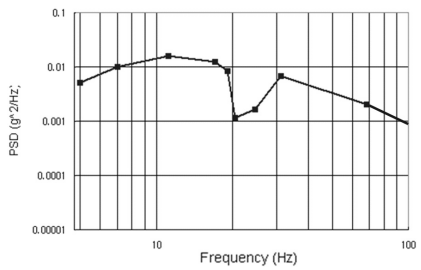

Fig. 9 PSD input test condition

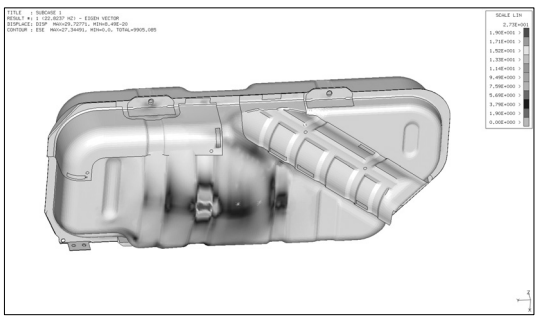

Fig. 10 First Mode Shape of Fuel Tank

시 공진이 발생하게 된다. 따라서, 공진에 의한 동응력 증폭을 고려하기 위해 2절에서 기술한 공진내구 해석기법을 사용해야함을 알 수 있다.

3.2.2 랜덤 주파수 응답 해석

공진 내구해석 기법에 있어서 가진을 받는 구조물의 정확한 응력 PSD를 얻는 것은 매우 중요하다. 가진 주파수가 구조물의 고유진동수와 근접할 때 응답치는 피크를 이루며, 이 결과값이 내구해석에서 피로 수명에 그대로 반영되기 때문이다.

랜덤 주파수 응답 해석의 결과물인 주파수별 각 절점의 응력 PSD는 전달함수와 PSD 형태의 가진 하중의 곱에 의해 구해지며, 그 정확성을 확보하기 위해선 포함할 모드수, 주파수 증분, 감쇠 등에 주의하여야 한다.

본 해석에서는 각 주파수별 최대한 정확한 응력값을 구하기 위하여, 연료탱크에 적용될 수 있는 모든 하중을 고려하여 적용하였다.

우선, 랜덤 주파수응답해석을 수행하기에 앞서 예력(Pre-Load)으로 펌프 체결력 3.5kgf를 탱크 바닥 면의 펌프 체결 3지점에 분할하여 적용하였으며, 탱크 용량의 70%를 물로 채웠을 때 그에 따른 탱크 바닥면 압력을 계산하여 입력하였다. 그 다음으로 차체에 체결되는 지점에서 Fig. 9의 PSD 입력함수로 가진하며 랜덤 주파수 응답 해석을 수행하였다.

Fig. 11는 해석 결과로 얻어진 Critical Element의 응력인 응력 X, Y, 그리고 전단응력 XY의 PSD 곡선을 보여준다. 결과에서 보듯이 첫 모드인 35Hz 영역에서 응력이 크게 증가하며, 이는 공진효과인 모달 특성이 내구성에 크게 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다.

3.2.3 공진 내구 해석

위의 랜덤 주파수응답해석에서 얻어진 각 요소의 PSD 응력과 재료 피로 물성치, 표면처리 조건 등을 입력하여 FE-Fatigue에서 공진 내구해석을 수행하였으며, 해석조건은 준정적 내구해석과 동일하다.

Fig. 12는 공진 내구해석으로 구한 피로수명의 분포도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 탱크 바닥 중심 부위가 가장 취약한 것으로 나타나며 이는 Fig. 13과 Fig. 14의 실험결과와 일치한다.

피로 수명 결과는 해석의 경우가 36.3시간으로 실험의 40시간과 약 10%의 오차를 보였다. 본 해석에 준정적 내구해석기법을 적용할 경우, 공진효과를 고려하지 못해 오차는 더욱 커질 것이므로, 이와 같이 구조물의 고유진동수와 가진하중의 주파수 영역이 일치하는 경우에는 공진내구해석기법을 적용하는 것이 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

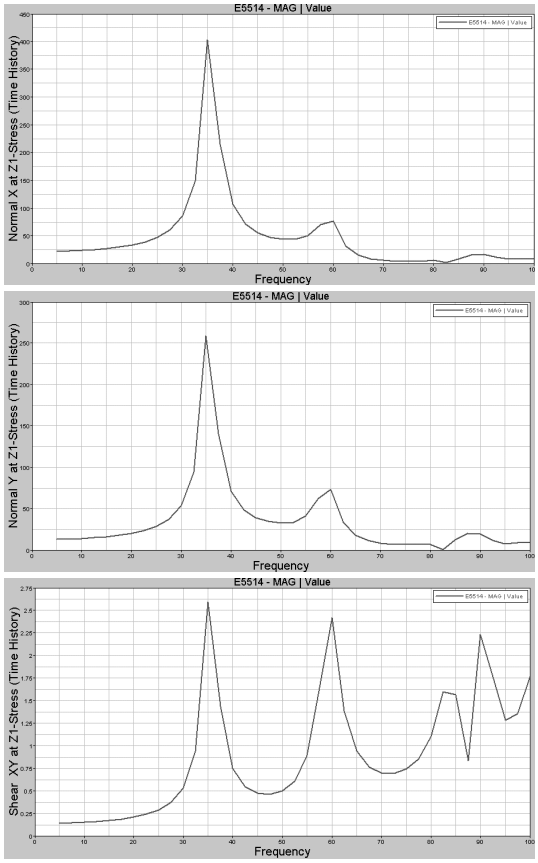

Fig. 11 Stress PSD Curves of Critical Element

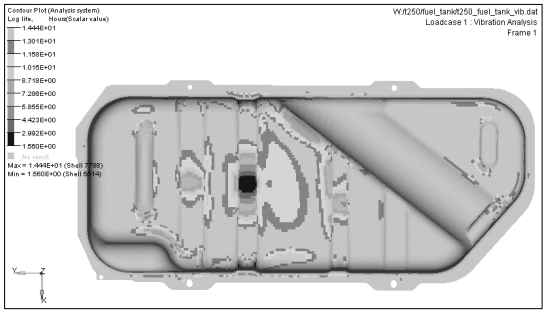

Fig. 12 Contour of Fatigue Life (Log)

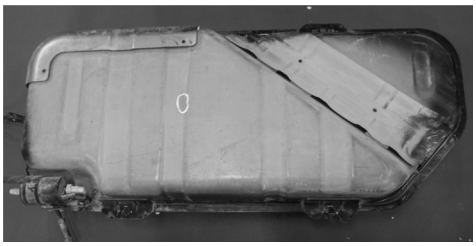

Fig. 13 Crack Picture of Test

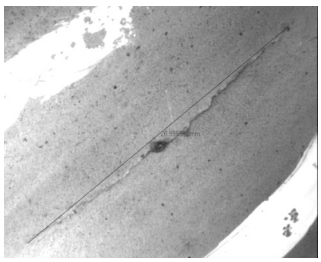

Fig. 14 Magnified View of Crack

4. 결 론

차량용 연료탱크는 실제사용 조건하에서 다양한 하중을 받으므로, 컴퓨터 시뮬레이션으로 이러한 내구성을 평가하기 위해선 조건에 따른 적절한 해석기법을 적용해야 한다.

기존의 피로수명을 예측하는 방법 중 하나인 시간 영역 피로 수명 평가 기법을 이용하면 주기적인 하중이 가해지는 경우에는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으나, 임의의 불규칙한 동하중을 받는 경우에는 부정확한 결과를 얻게 된다. 즉, 진동 특성을 고려하려면 주파수영역에서 피로수명을 평가하는 새로운 기법이 요구되어진다. 따라서, 본 논문에서는 차량용 연료탱크의 실험조건 별 내구수명 예측을 위한 두 가지 전산해석 기법을 제시하였으며 수행된 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 시간영역 및 주파수영역에서 구조물의 동하중 이력, 재료 물성치 및 피로 물성치를 이용하여 내구도를 평가할 수 있는 준 정적 내구해석 및 공진 내구해석기법을 제시하였다.

(2) 본 연구에서 제안된 피로수명 예측 기법을 정·부압 조건 및 PSD 진동 실험 조건에 적용하여 피로해석을 수행하였으며, 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 본 논문에서 제시한 해석방법의 타당성을 검증하였다.

(3) 정·부압 조건의 경우 단순 반복 하중이 입력되므로 준정적 내구해석기법을 적용하였으며, 결과는 실험과 해석이 약 20%의 오차를 보였다. 이는 생산단계에서 발생할 수 있는 Stamping에 의한 연료탱크 철판의 Thinning 현상에 의한 것으로 보인다.

(4) PSD 진동 실험 조건의 경우 모달 특성을 고려하기 위해 주파수영역에서 피로수명을 계산하는 공진내구해석기법을 적용하였으며, 결과는 실험과 해석이 약 10%의 오차를 보였다. 이는 해석모델의 유체의 튀어 오름(Slosh) 효과를 고려하지 않은 것이 중요 이유로 보인다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

(1) Hong, M. and Cho, E., 2009, “Durability Estimation of Vehicle Fuel Tank by Fatigue Analysis,” *Proceedings of the KSMTE Autumn Conference 2009*, pp. 321~326.

(2) Kuo, E. Y. and Kelkar, S. G., 1995, “Vehicle Body Structure Durability Analysis,” *Automotive Engineering*, Vol. 103, pp. 73~77.

(3) Rice, R. C., 1988, *Fatigue Design Handbook*, SAE, U.S.A., pp. 120~122.

(4) Kamal, M. M. and Wolf, J. A., 1987, *Modern Automotive Structural Analysis*, Van Nostrand Reinhold Co., U.S.A., pp. 302~310.

(5) MSC/NASTRAN, 2004, *FE-Fatigue 7 ISR 1 Documentation*, MSC Software Co., U.S.A., pp. 94~95.

(6) MSC/NASTRAN, 1999, *Fatigue Quick Start Guide*, MSC Software Co., U.S.A., pp. 247~302.