

단품 압괴 시뮬레이션을 이용한 FMH 충격흡수부재의 설계방법에 관한 연구[§]

김지훈^{*†} · 전인기^{*} · 최재민^{*} · 김성훈^{*}

*브이피코리아㈜

Designing FMH Impact-Absorbing Structure by Using Subcomponent Collapse Simulation

Ji Hun Kim^{*†}, In Ki Jun^{*}, Jae Min Choi^{*} and Sung Hun Kim^{*}

* VP KOREA Inc.

(Received March 16, 2010 ; Revised July 1, 2010 ; Accepted July 2, 2010)

Key Words : FMH(Free Motion Headform 머리모형), FMVSS201(Federal Motor Vehicle Safety Standards : 미국 연방 자동차 안전규격 201 조), HIC(Head Injury Criteria : 머리상해치), Subcomponent Collapse Simulation(단품 압괴 시뮬레이션)

초록 : 차량의 내장부품 설계에 있어 내장 부품의 탑승자 보호를 위한 FMVSS 201 법규에 따른 FMH 충격성능 만족을 위한 충격흡수구조 설계 방법이 필요하다. 충격흡수구조 설계 과정에 있어 FMH 충격 성능은 헤드라이닝의 타격 위치 및 헤드폼의 접근각에 따라 위치별로 각각 다르게 설정되며, FMH 충격 흡수부재는 위치에 따른 차체의 강성 및 상관부품을 고려하여 각 타격 위치에 따른 적절한 충격 흡수 성능을 가져야 하며 차체 강성의 변화를 고려한 효율적인 설계 방법이 필요하다. 본 연구에서는 충격 흡수구조 설계 과정에 있어 초기 설계안에 대한 충격 강도 검토의 시간을 줄이기 위해 전차량 시뮬레이션에서 수행하던 FMH 충격흡수부재 설계를 단위 모델의 압괴 시뮬레이션을 통해 진행함으로써 보다 빠르고 효율적으로 타격 위치별 적합한 충격 흡수 구조를 설계하는 방법을 검토하였다.

Abstract: It is requested that the interior compartment of a passenger vehicle must be satisfied with the FMVSS201U regulation, FMH impact test. It is needed the design methodology to find the appropriate structure about the FMH impact. When designing the impact-absorbing structure for the FMH impact test, it is to be noted that the impact absorber must have different performance considering the stiffness of the vehicle as the impact position and approach angle of FMH. In this study, an efficient design methodology was developed by using subcomponent collapse simulation instead of conducting full-vehicle simulation, thereby reducing the time and resources spent. Further, this unit-model simulation helps optimize the impact absorbing structure.

1. 서 론

차량 내측상부의 내장부품에 대한 탑승자 보호 충돌 성능 법규인 FMVSS 201(Federal Motor Vehicle Safety Standards 201)에 따라 FMH(Free Motion Headform) 충격 성능 시험을 실시한다.^(1,2)

FMH 충격 성능 시험의 대상은 내장부품 중 헤드라이닝 어셈블리(Headlining Assembly) 및 필라

트림(Pillar Trim)이다. 헤드라이닝의 경우 주로 부가적인 충격흡수부재를 삽입하여 충격 흡수 성능을 향상시키며, 필라트림의 경우에는 기존의 강도 보강용 터치리브(Touch Rib)을 이용한 충격흡수 방법을 주로 사용한다. 이러한 내장 부품들은 차실내 공간의 미관을 좋게 하고 여러 기능들을 수행하는 역할을 한다. 차량 실내조명, 시트벨트 높이 조절장치 및 어시스트 핸들(Assist Handle)의 장착, 커튼 에어백의 장착 및 편의 시설의 제공 등이 그 기능이며, 또한 차 실내 공간에 대한 마감재로서의 중요한 역할이 있다. 최근에는 차량 외관의 스타일링을 슬림하게 디자인하는 추세에 따라 헤드

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임.

† Corresponding Author, jhkim@vp-korea.co.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

클리어런스(Head Clearance)의 설계 기준을 만족하면서 헤드라이닝 내부에 최소의 충격흡수공간을 확보하여 충돌안전법규를 만족시키는 설계방법이 요구된다. 따라서 헤드라이닝의 다양한 기능에 부합하며 FMH 충격 성능 시험을 대비한 충격흡수부재를 효율적으로 설계하는 방법이 필요하다.^(3,4)

FMH 충격흡수구조를 설계함에 있어 타 분야 고려사항으로서 차량 전복사고를 대비한 루프 강도 시험에 따른 차체의 강성 향상, 측면 충돌 성능 향상을 위한 필라부 강성 향상, 어시스트 핸들 고정부의 축 하중 지지 구조 강화 및 커튼 에어백 전개 시 발생하는 필라 트림의 파손 이탈 방지를 위한 필라트림 상단부의 구조 강화 등이 있다. 이러한 강성 향상으로 차체 및 구조물의 강성이 높아지고 충격 흡수 성능이 저하되는 결과가 나타난다.

이러한 다분야의 설계 기준 이외에도 FMH 성능 육성과정에서 발생하는 어려움으로 성능 변동 및 FMH 타격 위치 별 편차 발생의 문제가 있다. 성능 변동은 주로 폴리프로필렌계 소재의 사출형 충격흡수재의 경우 제작상의 두께적용의 한계로 압력 특성의 변동이 심하며 HIC(d) (Head Injury Criteria for Dummy)의 산출방식이 감속도 변화에 민감한 원인에 있다. 타격 위치에 따른 편차는 FMH 충격 성능 시험이 차량 충돌사고 및 전복사고에서 발생할 수 있는 대부분의 가능성을 포함하고 있어 타격 위치가 거의 전체 내장재의 영역에 해당하며 헤드폼(Headform)의 접근각도 타격 위치에 따라 다양하게 적용되기 때문이다.⁽⁵⁻⁷⁾

헤드라이닝의 FMH 충격 성능 육성과정에 있어 타격 위치에 따른 단면 및 구성 부품에 따라 적절한 강도를 가지는 충격흡수재의 삽입이 필요하며, 보다 안정적이고 저렴하며 시험오차의 영향을 줄일 수 있는 설계 방법이 요구된다.

FMH 충격흡수부재로 사용되는 구조는 발포폼 성형 구조, 진공 성형 원추형 구조, 격자형 사출 리브 구조, 알루미늄 박판 중첩 구조 등이 있으며, 대부분 순차적인 굽힘 변형을 통해 충돌 에너지를 흡수하는 구조이다. 충격 흡수의 성능은 충격흡수 구조의 단위체적당 흡수에너지의 크기와 균일함에 좌우된다. 적용되는 차량의 특성은 차종에 따른 강성의 차이 및 타격 위치에 따른 차이로 충격 흡수구조의 성능을 쉽게 파악하여 설계에 반영하기에 난해한 문제점이 있으며, 전체 차량 구조물에서의 FMH 충격 흡수재의 성능을 검토하고 개선하기에는 시간과 자원의 소모가 많이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 충격흡수부재의 성능을 빠르게 분석하여 각 타격 위치에 따른 적절한 충격흡수성능을 가지는 단위모델 시뮬레이션 방법을 검토하였다. 충격흡수재의 고유한 충격흡수 구조를 분석하기 위한 단위모델의 압력 시뮬레이션은 각 차종의 레이아웃(Layout)에 따라 적합하게 적용할 수 있도록 시뮬레이션 모델을 구성하여 충격흡수구조물의 성능을 사전에 평가함으로써 구조물의 충격흡수구조 설계 과정에 있어 시간적, 경제적 효율을 높일 수 있다.

2. 단품 압력 시뮬레이션

2.1 FMH 단품 압력 시뮬레이션의 개요

현재 FMH 충격성능 시뮬레이션 과정은 전차량 상태에서 FMVSS201 법규기준에 따라 타격좌표 및 타격각도를 설정하고 Dummy 에 일정 속도를 부과하여 머리 상해치 HIC(d) (Head Injury Criteria for Dummy)를 산출한다.

현재 상용화된 자동차 헤드라이닝 부품의 충격흡수부재인 리브(RIB)를 Fig. 1 에 나타내었다. FMH 충격 성능을 향상시키기 위해 정적 압력시험 평가방법과 충격 압력시험 평가방법으로 리브의 충격성능을 검토한 후 단품 압력시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 정적 압력시험 평가방법은 각각의 시험편에 대한 정적 축 방향 압력실험을 행하여, 압력이 진행되는 동안의 하중-변위 선도와 압력 후의 충격흡수재의 형상을 검토하는 방법이다. 반면에 충격 압력시험 평가방법은 각각의 충격흡수재 시험편에 낙하시험장치를 이용하여 충격압력시험을 실시한 후 압력과정에서의 하중 및 변형을 측정하고 압력 후의 충격흡수재의 형상을 검토하는 과정으로 진행한다.

정적 압력을 통해 얻어진 하중-변위 선도의 면적을 단품의 흡수에너지로 보고 하중-변위선도를

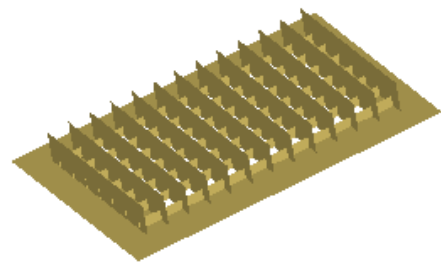


Fig. 1 The Shape of RIB

아래 식 (1)과 같이 적분하여 단품 부재 내에 흡수된 에너지량을 구한다.

$$E_a = \int_0^S PdS \quad (1)$$

E_a : 단품에 의해 흡수된 에너지
 P : 압괴 하중
 S : 압괴된 길이

단위 체적당 에너지는 흡수 에너지를 압괴된 부분의 체적으로 나눈 값이며, 단위 질량당 흡수 에너지는 흡수 에너지를 압괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식 (2),(3)과 같이 구할 수 있다.

$$E_v = \frac{E_a}{A \cdot S} \quad (2)$$

$$E_m = \frac{E_a}{\rho \cdot A \cdot S} \quad (3)$$

충격 압괴에서는 동일한 충격 에너지를 가했더라도 압괴 길이가 충격흡수재의 특성에 따라 각각 다르기 때문에 흡수 에너지를 정량적으로 고찰하여야 한다. 단품의 전체 길이가 압괴되었다고 가정하고 그 값을 전체 흡수 에너지 E_L 이라 하고 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$E_L = E_a \bar{J} \quad (4)$$

E_L : 전체 흡수 에너지

$$\bar{J} = \left(\frac{L}{S}\right) \quad \text{: 역 스트로크 효율}$$

L : 압괴 전 충격흡수재의 높이

S : 압괴 후 충격흡수재의 높이

두 가지 시험의 차이는 변위제어 방식과 하중제어 방식의 차이로 할 수 있다. 하중제어 방식에 따른 충격 압괴시험에서는 반발에너지, 마찰에너지, 열에너지 등으로 소실되는 에너지를 헤드폼의 운동에너지에서 충격흡수재의 흡수 에너지를 제한으로서 구할 수 있다. 헤드폼의 운동에너지 E_t 는 아래 식 (5)와 같이 표현된다.

$$E_t = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

m : Mass of FMH

v : Initial Velocity of FMH

Fig. 2 에 리브의 정적 및 충격압괴 시험에 따른 하중-변위 선도를 나타내었다. 구간 (A)는 리브가

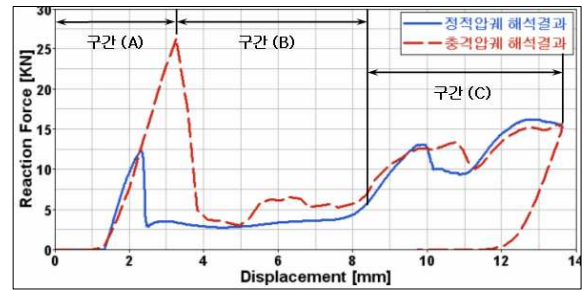


Fig. 2 F-D Curve of RIB Collapse Tests (Quasic-Static & Impact)

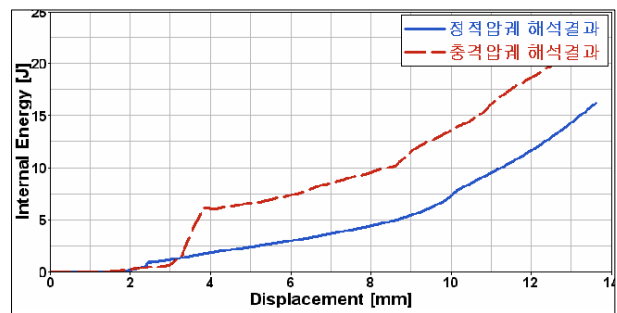


Fig. 3 Energy Curve of RIB Collapse Tests (Quasic-Static & Impact)

좌굴 이전에 과도한 반력을 받는 구간으로 정적압괴 상태에 비해서 충격압괴 시 초기 반력이 크게 나타났으며, 충격흡수 특성이 불안정한 구간이다. 구간(B)는 리브의 좌굴에 의하여 충격이 분산되는 구간이며, 충격 에너지 흡수가 저하되는 구간이다. 구간(C)는 리브가 충격에 의해 파단 되면서 충격 에너지를 흡수하는 특성을 나타내었다.

Fig. 3 에 정적압괴와 충격압괴에 따른 리브의 내부에너지 선도를 나타내었다. 리브의 변형 발생 시점인 3mm 지점에서의 내부에너지가 충격압괴에 있어 더 크게 나타났으며, 리브를 압괴하는데 더 많은 힘이 필요함을 알 수 있다. 리브의 좌굴시점인 4mm 지점 이후에서부터는 정적압괴 및 충격압괴의 그래프 기울기가 비슷하게 나타났으며, 리브를 압괴시키는데 거의 동일한 힘이 사용되어졌다. Fig. 2 와 Fig. 3 으로부터 충격흡수재의 강도를 결정하는데 있어 리브의 초기 압괴 특성이 중요함을 알 수 있다.

2.2 FMH 단품 압괴 시뮬레이션 모델의 구성

아래 Fig. 4 에 FMH 전차량 해석모델을 Fig. 5 에 단품 압괴 해석모델을 나타내었다. Fig. 4 과 같이 전차량 모델에서 시뮬레이션을 수행할 경우 각 타격 위치 및 접근각에 대한 해석을 수행하기 위해

많은 해석 기간이 소모된다. 이러한 문제의 대안으로 Fig. 5 와 같이 단순화된 시뮬레이션 모델을 구성하고자 하며, 모델 구성시에는 요구되는 타격 위치에 대한 차체 강성을 표현해 주어야 한다.

FMH 충격 성능에서 상해치 HIC(d)에 영향을 주는 인자는 루프판넬의 강도, 루프레일의 강도 및 루프판넬과 내장재 사이의 공간 그리고 충격흡수부재 충격흡수성능이다. 단품 압제 시뮬레이션을 수행하기 위한 서브시스템에서 차체의 강성을 나타내기 위해 루프(Roof)판넬과 커튼에어백(CAB : Curtain Air Bag) 및 레인포스(Reinforced)판넬을 삽입하여 모델을 구성하였다.

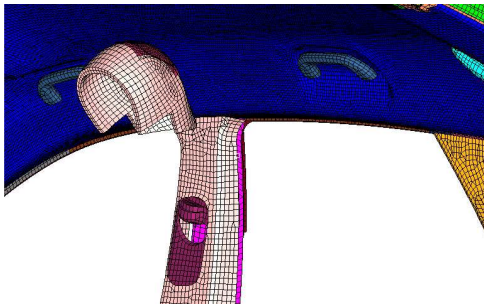


Fig. 4 FMH Simulation model

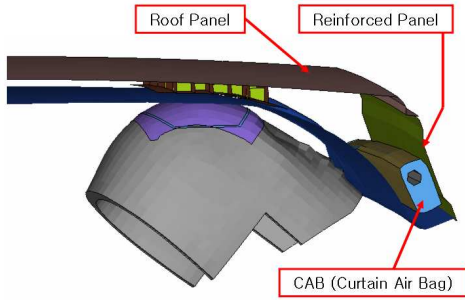


Fig. 5 FMH Subcomponent collapse system

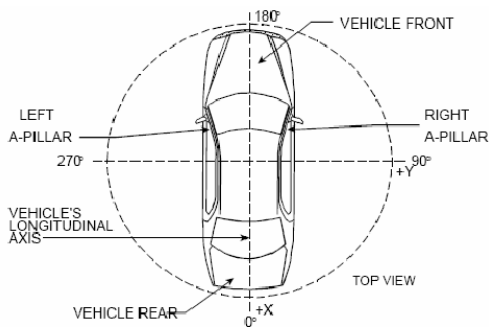


Fig. 6 Horizontal Approach Angles for Headform Impacts

먼저 단품 압제시뮬레이션을 위한 서브시스템 모델에 적용한 머리모형의 충돌속도 및 접근각도를 Table 1 에 나타내었다. 전차량 시뮬레이션과 동일하게 속도는 24.1KPH, Fig. 6 에서와 같이 차량의 측면방향인 수평각도 90°, 수직각도 50°를 적용하였다. FMH 는 항상 타격 방향이 최대 50° 미만으로 설정되므로 타격 각도에 대해 경사 타격의 방법을 사용하는 것이 적절하다.

위와 같이 단품 시뮬레이션 모델을 구성하여 수행함으로써 해석시간을 현저히 단축할 수 있으며, 선형설계단계에서 각 타격위치에 따른 최적화된 충격흡수부재를 적용하기 위한 충격강도 만족 기준을 설정할 수 있다.

3. 단품 압제 시뮬레이션 수행

3.1 FMH 충격 흡수 성능의 기준

단품 시뮬레이션 모델을 통해 충격흡수부재의 형상 및 두께를 다양하게 적용하여 최적화 하는 과정에서 설계된 부재를 전차량에 적용했을 때 같은 결과를 나타낼 수 있는가를 검증하기 위한 충격흡수성능 분석 기준이 필요하다. 단품 압제 시뮬레이션을 통한 충격흡수재 최적화를 수행하기 위해 Fig. 7 과 같이 충격강도 만족기준을 설정한다.

Table 1 Impact conditions of Subsystem Model

Approach Angle of FMH Headform		Initial Impact Velocity
Horizontal Angle: 90degree	Vertical Angle: 50degree	24.1KPH

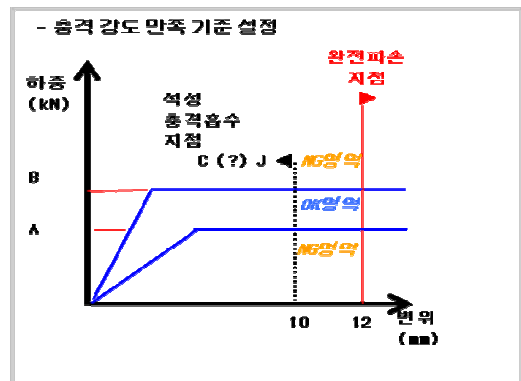


Fig. 7 Recommended Criteria for Impact Absorber

충격강도 만족 기준을 설정하기 위하여 먼저 FMH 헤드폼으로 전차량에 타격하여 시뮬레이션 했을 때 합격한 리브와 폼(foam) 충격흡수부재를 서브시스템에 적용하여 해석하였으며, 해석결과에 대한 F-D 선도를 작성하고 이 F-D 선도를 적분하여 일정구간 안에서의 충격흡수부재의 에너지 커브를 Fig. 8 에 나타내었다. 폼의 충격흡수부재를 사용하였을 때 초기 반력이 과도하지 않으면서 체적당 에너지의 흡수 성능이 좋으며, HIC(d)가 낮게 나타났다.

목표 상해치 이하의 합격한 사양의 F-D 선도 커브를 기준으로 합격 기준을 책정하였다. 성능향상의 기준으로는 2 가지 방법을 제안할 수 있다. 먼저 첫 번째는 FMH 충격 흡수재의 성능을 변위에 대한 하중의 평형구간 영역인 4mm~17mm 로 책정한 후 F-D 선도의 기준구간을 17mm 압괴시까

지의 에너지 흡수량을 계산하여 최고의 모델을 선정하는 방식의 충격흡수부재 최적기준을 설정하도록 한다. 두 번째는 실차 시뮬레이션과 마찬가지로 HIC(d)를 산출하여 우위를 가리는 방법이다.

3.2 FMH 단품 압괴 시뮬레이션을 통한 최적화

최적화 수행을 위한 프로세스를 Fig. 9 에 나타내었다. 초기 단품 압괴 시뮬레이션 모델을 구성하고 설계 변수의 선정과 파라미터화 과정을 수행한 후 네오타이드 최적화 프로그램을 통해 설정된 실험계획으로 반복 시뮬레이션을 수행하는 과정으로 진행된다.

Table 2 에 인자의 수준별 설정값에 따른 실험계획표(DOE : Design of Experiment)를 결정하고 단품 압괴 시뮬레이션을 수행하였다.

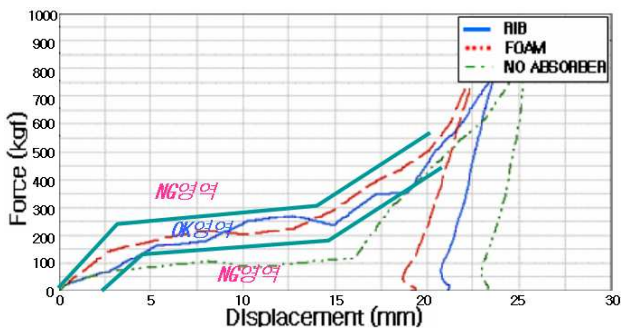


Fig. 8 Impact Strength Criteria by Energy Curve of Subcomponent system

Table 2 The DOE by Design parameter

Run	Design Parameters			
	두께	재질	Slot	Pitch
#1	A	A	0	C
#2	A	B	small	B
#3	A	C	large	A
#4	B	A	small	A
#5	B	B	large	C
#6	B	C	0	B
#7	C	A	large	B
#8	C	B	0	A
#9	C	C	small	C

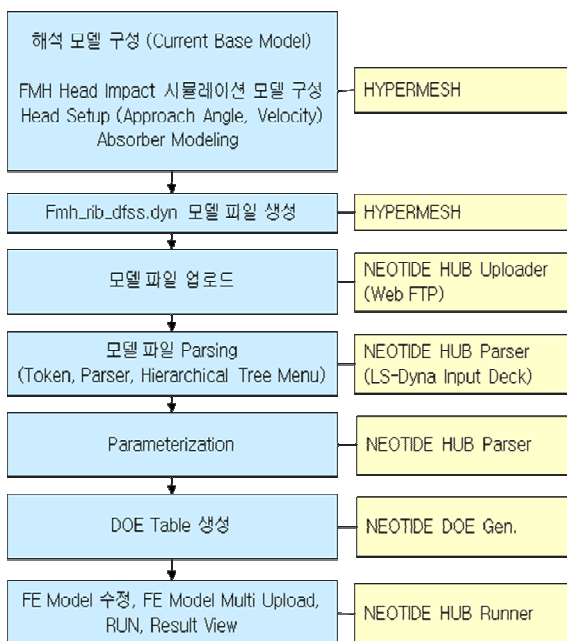


Fig. 9 Design Process of Subcomponent Simulation

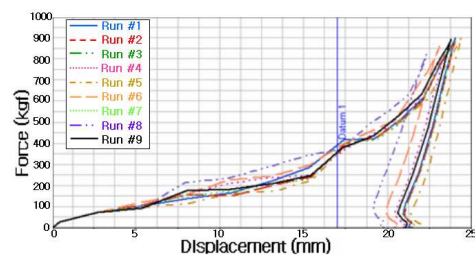


Fig. 10 F-D Curve of Subcomponent collapse system

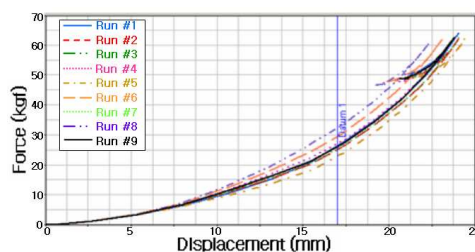


Fig. 11 Energy Curve of Subcomponent collapse system

Table 3 Results of Subcomponent collapse system

No.	HIC(d)	Energy (J)
1	826	27.7
2	813	26.5
3	808	26.8
4	784	28.5
5	836	24.4
6	767	30.5
7	820	26.6
8	745	33.2
9	818	27.1

다음 Fig. 10 에 총 9 개의 단품 모델에 대한 F-D 선도를 나타내었다. 본 9 개의 모델도 비교적 수평 구간을 17mm 변위까지 나타내고 있으며, 17mm 변위에서의 흡수 에너지의 정도를 관찰하여 비교 우위의 모델을 선정할 수 있었다. Fig. 11 의 그래프에서 보는 바와 같이 각각의 충격흡수부재가 흡수하는 에너지는 설계변수로 책정된 형상 및 두께에 따라 각기 다르게 나타나며, Run #8 모델의 설계변수 적용 시 압력 초기시점에 가장 큰 힘을 필요로 하였다. 시뮬레이션 결과로 HIC(d)와 에너지 흡수율을 관찰하였으며 그 결과는 Table 3 에 나타내었다. 결과는 Run #8 모델이 17mm 변위 발생시 까지 에너지 흡수율 33.2J 로서 HIC(d) 745 로 상해치가 가장 적게 나타났다. 이로서 단품 압력 시뮬레이션의 결과로 기준 변위까지의 에너지 흡수율을 관찰하는 것이 적정강도를 가지고 있는 모델의 최적 모델을 선정하는 기준이 될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 FMH 단품 압력 시뮬레이션을 통해 충격 구조를 분석하여 차량개발 단계에서 충격흡수부재를 효율적으로 선행 설계할 수 있는 방법을 제시하였고, 전차량 시뮬레이션에서 수행하기 난해한 최적화 과정에 대한 방법론을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시뮬레이션을 통해 충격흡수부재의 에너지

흡수율이 상해치에 미치는 영향을 분석하였다. 상해치를 낮추기 위해서는 헤드폼의 운동에너지에 대해 차체 또는 타 부재보다 적용되는 충격흡수부재의 역할이 필요하며, 헤드폼의 변위에 따른 반력이 균일하고 적절 변위 발생시 전에 에너지의 흡수율이 높은 모델이 우수한 충격흡수부재라 할 수 있다.

(2) 차량개발단계에서 FMH 시험은 헤드폼의 타격위치와 각도가 일정치 않아 실제 시험 시 편차가 심하고 차체의 강성 및 여러 설계 기준에 영향을 받으므로, 선행 설계를 통해 최적 흡수구조를 적용할 필요가 있다. 시간과 자원의 효율적 사용을 위해 단품 설계 단계에서 단품 압력 시뮬레이션을 통해 효율적인 충격흡수부재의 성능평가기준 및 설계 방법을 제시하였다.

참고문헌

- (1) NHTSA, 1998, FMVSS 201U Occupant Protection in Interior Impact Upper Interior Head Impact Protection, Federal Motor Vehicle Safety Standard, TP201U-01, Safety Assurance Office of Vehicle Safety Compliance, Washington, DC.
- (2) Balasubramanyam, S., 1999, "Head Impact Characterization Of Generic A-Pillar of an Automobile" Mechanical Engineering, West Virginia University.
- (3) Rathi, K., Lin, T. C. and Mazur, D., 2003, "Evaluation of Different Countermeasures and Packaging Limits for the FMVSS201U," SAE 2003-01-0329.
- (4) Haque, E., Kamarajan, J. and Yang, G., 2000, "Development and Characterization of New Headliner Material to Meet FMVSS 201 Requirements" SAE 2000-01-0624.
- (5) Park, G. O., Lee, Y. H., Beom, H. K. and Kwon, O. S., 2005, "Numerical Implementation for Effect of Forehead Impact Zone in FMH Impact," *KSAE 05-S0103*, pp. 645~649.
- (6) Lim, J. S., Lee, J. W., Bae, Y. S. and Yim, T. K., 2008, "A Study on the Optimization of FMH performance of A-Pillar Structure," *KSAE 08-S0196*, pp.1183~1186.
- (7) Jun, I. K., Choi, J. M., Ka, M.R., Kim, H. W. and Lee, Y.W., 2009, "A Study About a Method of Restart Crash Simulation Considering the Repeatable Use of the Testing Car for the FMH Test." *KSME09-CA062*, pp.273~278.