

# 충격성능 및 보행자 보호규제를 만족하는 범퍼 단면결정 설계기술 개발 (CAD/CAM 활용을 위한)

강형선<sup>1\*</sup>

## Development of Design Method for a Bumper Cross-section Satisfying Protection Requirements for Car Body and Pedestrian (Using CAD/CAM)

Hyung-Seon Kang<sup>1\*</sup>

**요 약** 자동차 범퍼시스템은 자동차의 외형을 결정할 뿐만 아니라 충격으로부터 차체와 보행자를 보호하는 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 범퍼시스템을 해석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션이나 충격테스트에 의존하지 않고 효과적으로 범퍼시스템을 설계하기 위한 설계기술을 개발하였다. 이를 위해서 차체를 외부 충격으로부터 보호하기 위해 충분한 강도 및 강성을 확보해야 한다는 것과 동시에 충돌 시 보행자 보호를 위해 충분한 연성을 확보해야 하는 조건을 만족시킬 수 있는 범의 단면과 폼의 두께 또는 물성을 결정해야 한다.

본 연구에서는 설계자가 설계 초기단계에서 위의 제약 조건들을 만족하는 최적의 범퍼구조를 신속하게 결정할 수 있는 신뢰성 있는 설계기술을 개발하였다.

**Abstract** The importance of bumper system lies not only in the styling of vehicles, but also in the protection of vehicles and pedestrians from reasonable impact. In this study, we proceed to search a method for efficient bumper system without using the impact test and the computer simulation to analyze the bumper system. In the process of the research, we proposed the each method that is used to search the shape that satisfy each regulations in first, because bumper's dimensions to satisfy 'vehicle protection' regulations and form's dimensions to satisfy 'pedestrian protection' regulations are difficult to exist together. After that we proposed the calculate method and design algorithm that is used to search a reasonable point satisfying the two regulations together.

**Key Words** : Bumper system, Pedestrian protection, Vehicle protection, Curved beam, 5 miles bumper, foam, pad

### 1. 서론

자동차 범퍼 설계시 차체를 외부 충격으로부터 보호하기 위해 충분한 강도 및 강성을 확보해야 한다는 것과 동시에 충돌시 보행자 보호를 위해 충분한 연성을 확보해야 하는 조건을 만족시킬 수 있는 범의 단면과 폼의 두께 또는 물성을 결정해야 한다. 따라서 설계자는 설계 초기 단계에서 위의 제약 조건들을 만족하는 최적의 범퍼구조를 신속하게 결정할 수 있는 신뢰성 있는 설계 기술을 필요로 하게 된다.

전후방 범퍼들이 만족해야 할 요건들을 보면<sup>[1]</sup>, 전방

범퍼의 경우는 미국규제에 의해 5mph속도로 평면 벽에 충돌했을 때 범퍼가 충돌에너지를 흡수하며 변형하여 차체부에 손상이 없어야 하고, 후방범퍼의 경우에도 5mph속도로 기둥에 충돌했을 때 범퍼에서 충돌에너지를 흡수 하되 차체부에 손상이 없어야 한다는 조건을 만족시켜야 한다. 한편 보행자 보호규제(유럽규제)에 의하면 전방범퍼는 보행자를 충돌했을 때 상해정도가 다음과 같은 범주 내에 들어야한다고 요구하고 있다<sup>[4]</sup>.

- ▶ 무릎 뼈 충돌 가속도 < 150g
- ▶ 무릎 관절 경사각 < 15°
- ▶ 무릎 관절 전단변형 < 6mm

따라서 이상과 같은 규제조건을 만족시킬 수 있는 설

<sup>1</sup>조선이공대 하이테크 CAD CAM과

\*교신저자: 강형선(mjsj5181@hanmail.net)

계방안을 제시하는 것이 본 연구의 목표로 다음과 같이 요약할 수 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 5마일 후방 기동 충돌조건만족

범퍼를 해석함에 있어 직선보로 간주하여 해석하는 것이 타당 할 것인가 곡선보(curved beam)로 가정하여 해석하는 것이 타당 할 것인가는 [그림 1]에서와 같이 보의 단면 높이를  $d$ 라 하고 중립선의 회전반경을  $R$ 이라 했을 때, 일반적으로  $R/d < 8$ 인 경우는 곡선보로 간주하고  $R/d > 8$ 인 경우는 직선보로 간주하여도 무방하다<sup>[1]</sup>. 문헌[2]에서는 범퍼를 직선보로 간주하여 이론해석을 했는데, 본 연구에서는 [그림 2]와 같은 실물범퍼와 같은 경우를 곡선보( $R/d \approx 8.3$ )로 간주하는 것이 더 타당할 것으로 보인다.

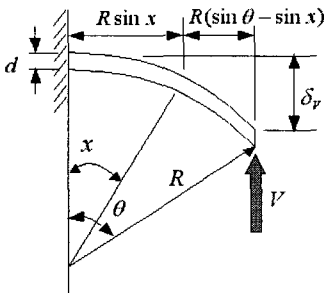


그림 1. 곡선보의 개략도



그림 2. 범퍼의 단면

따라서 곡선보로 간주하여 이론해석 하는 과정을 검토해보면 다음과 같다. 카스틸리아노 제2정리(Castigliano's 2nd theorem)를 이용한 곡선보(curved beam)의 탄성처짐에 의한 변위는 식(1)과 같다.

$$\delta_v = \frac{VR^3}{EI} \alpha \quad (1)$$

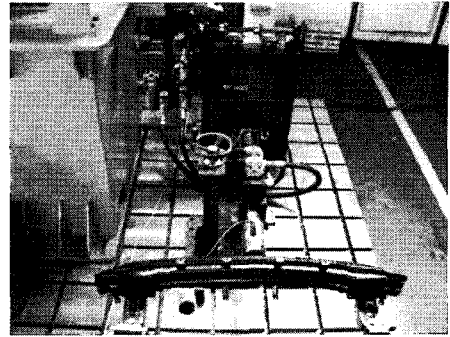


그림 3. 범퍼 충돌실험장치

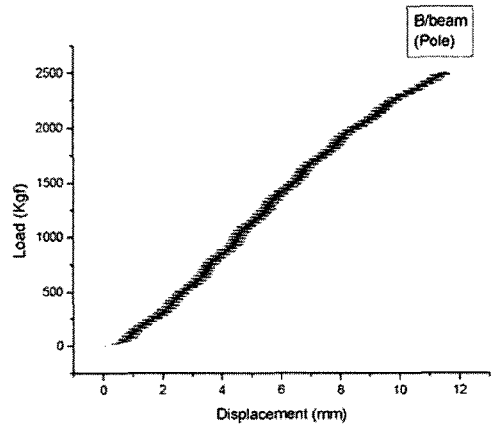


그림 4. 하중-변위선도(중앙에 집중하중 작용시)

이상과 같은 이론 계산 과정의 정확성을 검토해보기 위해 탄성구간 내에서의 변형량을 [그림 3]에 보인 범퍼 실험 장치를 제작하여 하중 변위선도를 구해본 결과 [그림 4]와 같았다. 대표적인 탄성구간 내에서의 값인 1Ton 하중상태에서 실험값과 이론값을 검토해보면 [표 1]과 같다. 그 결과 직선보와 곡선보에서의 이론값이 거의 같기 때문에 범퍼를 직선보로 간주해도 됨을 알 수 있고, 이론 해석값에 비해 실험값의 변위량이 더 큰 것은 실험시 접촉부의 국부 변위량이 동반되기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 이론 계산값과 유한요소해석, 실험값의 변화 추이가 매우 유사한 결과를 보이므로 해석기법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

한편 소성 변형 상태까지의 최대 흡수에너지를 계산해보기 위해 중앙 고정단에서 항복이 시작되는 연직하중을  $V_y$ , 모멘트를  $M_y$ , 이때의 처짐량을  $\delta_{yy}$ 라 하면,

$$\delta_{yy} = \frac{\sigma_y R \alpha}{E_y R \sin \theta} \quad (2)$$

**표 1.** 범퍼빔과 폼재의 강성계수  
 ( $P=1000Kg, E=200GPa, l=1m, I=5.06 \times 10^{-7}m^4$ )

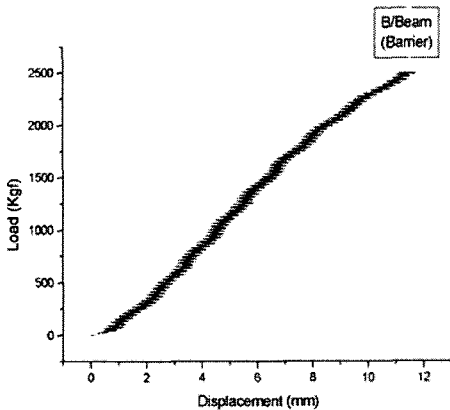
구 분	최대 처짐
직선보의 경우	$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} = 2.07mm$
곡선보의 경우	$\delta_v = \frac{VR^3}{EI} \alpha = 2.03mm$
FEM결과	$\delta = 2.1mm$
실험결과	$\delta = 3mm$

만일 이 보에  $\delta^*$ 만큼의 변형이 발생되었을 경우 축적되는 에너지를 구한 다음 범퍼가 고정기둥과 충돌시 차량의 운동에너지와 범퍼의 변형에너지가 같다고 간주하고 허용 최대 변위  $\delta_{max}$ 와 흡수되어야 할 운동에너지에 대한 단면계수는 식(3)과 같으며 차중에 따라 질량이 정해지고, 범퍼 최대 허용 변위를 설정한다면 단면2차모멘트 크기를 알 수 있다.

$$I = \frac{3MV^2 E \bar{y}^2 R \sin^2 \theta}{9E \sigma_y \bar{y} \delta^* \sin \theta - 8 \sigma_y^2 R^2 \alpha} \quad (3)$$

**2.2 5마일 정면 벽 충돌조건만족**

5마일 속도로 강제벽에 차량이 충돌 시 범퍼는 곡선보인 상태에서 직선보의 상태로 퍼질 것이다. 이때 흡수되는 에너지를 계산해 보는 것이 쉽지 않기 때문에 우선 먼저 앞서 보인 [그림 3]의 실험장치를 이용하여 단단한 평판으로 실물 범퍼를 압축해 본 결과 [그림 5]와 같은 하중-변위선도를 얻을 수 있다.



**그림 5.** 하중-변위 선도 (벽면충돌시)

곡선보가 완전히 평평해 지는데(중앙부 반경변위 10mm) 가해진 하중은 20000N으로 거의 선형 변형구간의 경계점으로 보이며 플라스틱 힌지가 발생할 한계는 아니므로 참고문헌[1]에서와 같이 해석하는 것이 바람직하다고 판단된다. 즉 이 결과는 곡선보가 변형하여 평평한 상태로 유지되는 경우를 평평한 보가 곡선보의 초기 곡률만큼 휘어지는데 소요되는 변형에너지와 같다고 보는 것이다. 따라서 강제벽에 충돌했을 때 운동에너지를 흡수하기 위한 소요 단면계수는 참고문헌[1]과 같이 다음 식으로 구할 수 있다. 이 경우 차량의 기종이 선정되어 흡수되어야 할 운동에너지가 정해지면 범퍼의 초기 곡률에 따른 소요 단면계수를 계산할 수 있게 된다.

$$I_{flat\_barrier} = \frac{MV^2 \bar{y}}{2l \sigma_y \kappa_{init}} \left( \frac{3}{2} - \frac{\left( \frac{\sigma_y}{E \bar{y}} \right)^2}{2 \kappa_{init}^2} \right)^{-1} \quad (6)$$

**2.3 보행자 충돌조건만족**

보행자 충돌의 경우를 묘사해 보기 위해서는 범퍼 빔 표면에 완충재를 충진 시켜 하중에 따른 변위 거동을 보기 위하여 본 연구에서는 앞서 [그림 3]에 보인 범퍼시험기를 사용하여 완충재가 보완된 합성보의 굽힘 실험을 시도해 보았다. 사용한 완충재는 100L×100L×30t 크기의 폴리프로필렌(PP)계 폼 패드(foam Pad)를 사용하였다. 이 패드를 범퍼의 중앙부위에 부착한 상태에서 평판으로 하중을 가하여 변형 거동을 고찰하였다. [그림 6]은 밀도가 비교적 큰 15배 팽창 폼이 부착된 범퍼의 거동을 보인 것으로 초기 폼 패드의 압축단계에서는 폼의 변형거동이 우선 진행되고 폼이 완전히 압축 밀착된 뒤부터는 (변위가 약 25mm 이상 진전된 경우) 범퍼의 강성에 의존하여 거동하는 것을 볼 수 있다. [그림 7]은 45배 팽창한 폼의 경우로서 폼의 밀도가 낮아지면 강성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그런데 각각의 경우의 하중-변위 거동 형태는 매우 유사하며 특히 변위가 25mm 이상이 되면 폼은 완전히 밀착되고 범퍼의 강성이 하중-변위 선도를 지배한다고 볼 수 있다. 실험 결과를 보면 주로 5mm에서부터 25mm의 변형구간 사이에서 폼이 압축되면서 합성된 기울기가 폼의 밀도에 따라 변화함을 볼 수 있다. 실험 결과 폼 패드를 제거한 범퍼만의 강성은 매우 큰 값 (2254N/mm)임을 알 수 있다. 또한 보행자 충돌을 묘

사해 보기 위해서는 폼과 빔의 합성된 강성이 중요하며, 실험적으로 보았을 때 두께 30mm의 폼 패드를 사용했을 경우 폼이 완전히 밀착되어 기능을 상실하게 되는 25mm정도의 변위까지가 보행자 안전에 기여할 것으로 보인다. 이를 좀 더 고찰하여 보기위해 15배 팽창된 폼의 경우를 보면, 폼이 초기 5mm정도 압축되는데 3200N의 하중이 작용하였고 25mm까지 변형하는 데는 6300N의 하중이 작용되었으며 0~5mm 변형 구간사이의 초기강성은  $k_{bi} = 640 \text{ N/mm}$ 이었고 5 ~ 25 mm 변형 구간에서의 강성은  $k_{bi} = 155 \text{ N/mm}$ 이었다.

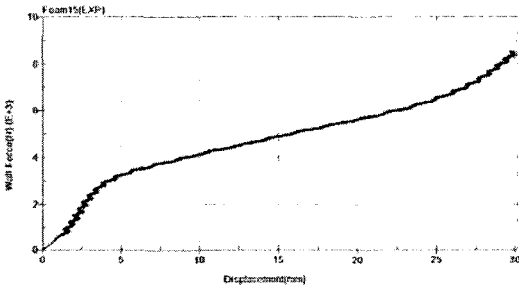


그림 6. 하중-변위 선도(폼 15의 경우)

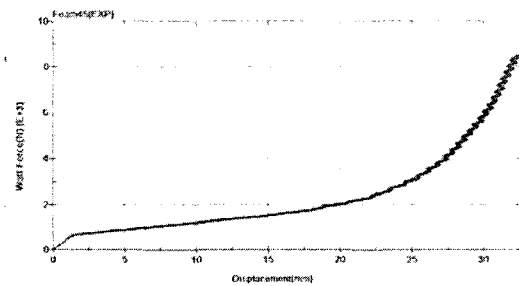


그림 7. 하중-변위 선도(폼 45의 경우)

[표 2]는 각 경우의 강성 값들을 실험값으로부터 추출한 값들이고 각 변형구간에서의 작용하중도 명기하였다. 40kph의 속도로 달려온 보행자가 범퍼에 충돌한 후 정지될 때까지의 운동에너지가 모두 합성 스프링의 변형에너지로 흡수된다고 보면,

$$\frac{1}{2} k_f \delta_f^2 + \frac{1}{2} k_b \delta_b^2 = \frac{1}{2} mv^2 \quad (7)$$

여기에서,  $k_f$ 는 폼의 강성계수,  $k_b$ 는 범퍼의 강성

계수,  $m$ 은 충돌시의 보행자의 체중,  $v$ 는 충돌속도 이다. 보행자 충돌 시 가해지는 하중은  $F_{max} \leq 150W$ 이다. 특히 충돌이 시작되는 단계에서는 대부분의 충돌에너지를 폼에서 흡수할 것이고, 따라서 식(7)로부터 빔의 강성계수 값을 구할 수 있다.

표 2. 범퍼빔과 폼재의 강성계수 (N/mm, N)

구 간(m m)	0~2	2~5	5~25	25~30
15배	Force	0~3200	3200~6300	6300~8500
	Kform	640	155	440
	Kbeam	2254		
	Kform.beam	498	145	369
45배	Force	0~600	600~3100	3100~6000
	Kform	300	108	580
	Kbeam	2254		
	Kform.beam	265	103	462

$$k_b = \frac{EI}{2\alpha R^3} \quad (8)$$

따라서 앞서 검토한 기둥 및 고정벽 충돌시의 요건을 만족시키는 범퍼의 강성이 주어진 경우에는 충돌에너지를 흡수하는데 필요한 폼 두께를 산출하는 식으로 아래 식(9)과 같다. A는 충돌 접촉부의 면적이며,  $\beta$ 는 폼의 변형구간별로 적분한 적분상수의 합이다.

$$d = \frac{1}{2A\beta} (mv^2 - F_{max}^2/k_b) \quad (9)$$

한편 기하학적인 제한 때문에 폼 두께가 한정된 경우의 폼 강성과 범퍼의 강성을 계산하기 위해서는 폼 두께와 빔 강성이 정해진 경우에는 식(10)을 만족하도록 폼 재료의 소요강성을 계산하고, 폼 강성과 두께가 정해지고 상해조건을 만족시켜야 하는 빔의 강성은 식(11) 이용하여 구할 수 있다. 이때 구해진 범퍼의 강성은 기둥 및 고정벽 충돌 시 흡수되어야 할 에너지를 축적할 수 있는지 재검토하여 보행자 우선이나 차량보호 우선이냐에 따라 강성값을 정해야 할 것이다.

$$\beta = \frac{1}{2Ad} \left( mv^2 - \frac{F_{max}^2}{k_b} \right) \quad (10)$$

$$k_b = \frac{F_{max}^2}{(mv^2 - 2U_{foam})} \quad (11)$$

### 3. 결과 및 토론

차중에 따른 범퍼를 설계할 때는 어떤 제한조건을 우선적으로 만족시켜야 할 것인가를 먼저 정하는 것이 순서라 할 수 있다.

만일 5마일 충돌 에너지를 흡수하는 것이 우선인 경우에는 전후방 범퍼의 단면2차모멘트를 계산한 후  $k_b$  값을 결정하고 다음으로 보행자 충돌에 따른 충격 조건을 만족시키기 위한 폼 재질의 강성과 두께를 결정하면 될 것이다.

보행자 우선의 경우에는 폼에서 흡수될 수 있는 에너지가 클수록 유리하다고 할 수 있는데, 40Kph속도에서 충돌 시 부상의 정도가 폼에서 흡수되는 에너지 값의 크기에 따라 어떤 차이가 있는지가 명료하게 밝혀져 있지 않기 때문에 근거 있는 치수 결정이 쉽지 않으나 폼이 두꺼울수록 접촉부에서의 응력이 분산될 것이므로 향후 충돌해석을 묘사해서 부상정도를 예측하여 참고 자료로 삼고 기준을 잡는 것이 타당할 것으로 보인다.

따라서 본 연구의 5마일 충돌에너지를 흡수하는 조건을 우선적으로 만족하는 경우의 전방 범퍼의 설계과정을 정리해 보면

- 차중에 따른 총충량 산정
- 범퍼 재질 및 기본 치수 선정(두께, 길이, 높이)
- 5마일 충돌 에너지 흡수를 위한 단면 2 차모멘트 산정
- 범퍼 치수 확정
- 폼 재질 선정 및 폼 두께 산정 (두께가 적합하지 않은 경우에는 폼 재질을 바꾸면서 반복 계산)
- 가공성을 고려한 범퍼의 최종형상 및 치수 결정

### 4. 결론

본 연구에서는 설계자가 설계초기단계에서 위의 제약 조건들을 만족하는 최적의 범퍼구조를 신속하게 결정할 수 있는 신뢰성 있는 설계기술을 개발 하였다. 또한 실험과 유한요소 해석을 통하여 연구결과의 타당성을 입증 하였다.

- 1) 고정벽 및 가동에 5mph 충격이 가해질 때의 성능을 만족하는 범퍼 단면을 결정할 수 있는 계산식 및 프로그램의 개발
- 2) 보행자 보호 규제를 만족하는 에너지흡수 폼의 두께 또는 물성을 결정하는 계산식 및 프로그램의 개발

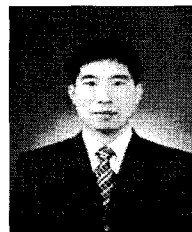
연구 결과 5마일 충돌 에너지를 흡수하는 것이 중요한 가 아니면 보행자 보호가 우선 인가를 먼저 정하고 우선 순위에 따라 각부의 치수와 강도를 정해가는 것이 바람직할 것이다. 특히 보행자 충돌의 경우에는 보행자의 부상정도를 예측할 수 있는 연구를 선행한 다음 설계과정을 정립하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

### 참고문헌

- [1] Ho Kim and Seok Gil Hong "Optimization of bumper system under various requirements", SAE 2001 World Congress Detroit, Michigan March 5-8,2001
- [2] Warren C Young "ROARK,S Formulas for Stress & Strain
- [3] LS/DYNA3D, Livermore Software Inc., Livermore, Michigan,1991
- [4] Automotive Plastics Report-93. Vol.1,2,3. Market Search Inc., 1993
- [5] Cook, R. D., and W. C. Young: "Advanced Mechanics of Material", Macmillan Publishing Company, 1985
- [6] Sang-Ha Kim, Myung Hoon Kin, Sung Kyu Ha, "Design and Structural Analysis of Bumper for Automobiles", 1998 SAE Conference, Paper No.980114
- [7] Chris Johnston, "Comparative Performance of a Compression-Molded I-Section Bumper Beam with Integrated Mounting Stays vs. Other GMT Bumper Designs", 1998 SAE Conference, Paper No.980111

### 강 형 선(Hyung-Seon Kang)

[정회원]



- 1991년 2월 : 조선대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 조선대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 전남대학교 기계공학과(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 조선이공대학 하이테크CAD CAM과 겸임교수

<관심분야>

CAD CAM, 공작기계 주축설계, 자동차사고분석 ...