

설계방법론을 이용한 보행자 보호 시스템의 최적설계[§]

윤 용 원* · 박 경 진**

* 한양대학교 기계공학과

An Optimal Design of a Pedestrian Safety System Using a Design Scenario

Yong Won Yun* and Gyung Jin Park**

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received April 10, 2014 ; Revised June 4, 2014 ; Accepted June 9, 2014)

Key Words: Design Flow(설계방법론), Active Hood(전개형 후드), Pedestrian Safety Airbag(보행자 보호 에어백), Head Injury Criteria(머리상해기준값), New Car Assessment Program(신차안전도평가)

초록: 차대 보행자 교통사고는 발생빈도에 비하여 사망률이 매우 높은 특징이 있다. 전세계적으로 정부 및 보험사에서는 보행자 보호를 위한 새로운 안전기준을 수립 및 강화하는 추세이다. 보행자 보호 성능을 향상시키기 위하여 한국정부는 2007년부터 신차안전도평가에서 보행자 안전을 평가하고 있다. 보행자 보호 성능은 점진적으로 향상되었으나 여전히 미흡한 상태이다. 전개형 후드 및 보행자 에어백 등으로 구성되어 있는 보행자 보호 시스템은 보행자 보호를 위한 대안이 될 수 있다. 보행자의 머리상해기준값을 감소시키기 위하여 새롭게 정의된 설계방법론을 바탕으로 보행자 에어백 설계 절차를 제안하였다. 제안된 설계방법론을 실용적인 측면에서 검토하였고 보행자 보호 시스템의 제작에 적용이 가능하다.

Abstract: Vehicle-into-pedestrian traffic accidents show a very high mortality rate compared to their frequency of occurrence. Throughout the world, governments and insurance companies tend to establish and implement new safety standards for pedestrian protection. In order to improve the performance of pedestrian protection, the Korean government has evaluated the pedestrian safety of vehicles under the Korea New Car Assessment Program (K-NCAP) since 2007. The pedestrian protection performance has improved gradually, but it remains insufficient. A pedestrian protection system consisting of a hood lift system and a pedestrian airbag can be a solution to pedestrian safety. A pedestrian airbag design procedure based on a newly defined design scenario is introduced to reduce the head injury criterion of pedestrians. The proposed design scenario is discussed from a practical viewpoint and applied to manufacture pedestrian protection systems.

1. 서론

2012년 국내에서 발생한 전체 교통사고에서 발생비율이 가장 높은 유형은 차대 차 교통사고로서 총 162,455건이 발생하여 전체 교통사고의 약 73%를 차지하였다. 차대 보행자 교통사고의 경우에는 총 50,111건이 발생하여 차대 차 교통사고 다음으로 높은 약 22%의 비율을 나타내었다. 그러나 사망률로 나타내면 차대 차 교통사고는 약

40%, 차대 보행자 교통사고는 약 37%로서 거의 차이가 없는 것으로 나타나고 있다.⁽¹⁾ 따라서 차대 보행자 교통사고는 발생빈도에 비하여 사망률이 매우 높은 특징이 있음을 알 수 있다.

자동차의 보행자 보호 성능을 향상시키기 위하여 1977년 국제자동차 안전기술회의(International Conference of Enhanced Safety of Vehicles, ESV)는 보행자 보호 성능 향상을 위한 연구를 시작하였고, 1994년 유럽자동차안전도개선위원회(European Enhanced Vehicle Safety Committee, EEVC)는 최초의 보행자 보호 평가방법을 개발하였다.⁽²⁾ EEVC에서 개발된 평가방법을 바탕으로 1996년 유럽신차안전도평가(European New Car Assessment Program, EURO-NCAP)는 최초

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, gjpark@hanyang.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 자동차의 보행자 보호 성능을 평가하기 시작하였고⁽³⁾ 우리나라는 2007년 한국신차안전도평가(Korea New Car Assessment Program, K-NCAP)에서 보행자 보호 성능의 평가를 시작하였다.⁽⁴⁾ 자동차의 보행자 보호 성능을 향상시키기 위한 설계방법에 대한 연구도 진행되었다. 1977년 Ashton, S.J. 등⁽⁵⁾은 보행자 상해와 자동차의 외형에 대한 연구를 시작하였다. 1998년 Clemo, K. 등⁽⁶⁾은 보행자 머리상해 감소를 위하여 샌드위치 구조의 후드를 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 재질이나 구조변경 등의 수동적 설계에 그쳐서 보행자 상해를 감소시키는데 한계가 있었다. 2003년 Krenn, M. 등⁽⁷⁾은 보행자 충격을 센서로 감지하여 순간적으로 후드를 위로 들어 올리는 액티브 후드 메커니즘을 제안하였다. 2005년 K-Nagatomi 등⁽⁸⁾은 액티브 후드 리프트 시스템을 제작하고 실차에 장착하여 보행자 머리 상해의 감소 효과를 증명하였다. 2006년 신문균 등⁽⁹⁾은 직교배열표를 이용한 액티브 후드 리프트 시스템을 설계하였다. 그러나 체계적인 설계방법론을 이용한 전개형 후드의 최적설계 사례는 아직 없다. 2012년 유완동 등⁽¹⁰⁾은 철도차량 접촉사고자 보호 에어백을 개발하였다. 그러나 이 연구는 철로에 침입한 보행자를 보호하기 보다는 철로 밖으로 내치는 것이 목적이었다.

본 연구에서는 전개형 후드 및 보행자 보호 에어백 등 보행자 보호 시스템의 유한요소 해석모델을 개발하고 해석을 수행하여 보행자 보호 시스템의 보행자 보호 효과를 확인하였다. 개발된 해석 모델에 설계방법론(Design Scenario)을 적용하여 최적설계를 수행하였다. 제안된 설계방법론에는 실험계획법(Design of Experiment)에 의한 최적설계 기법이 포함되어 있다. 설계방법론의 적용으로 도출된 결과들을 비교하여 보행자 보호 시스템에 대한 최적해를 산출하였다.

2. 보행자 보호 평가방법

2.1 보행자 보호 평가방법

보행자 보호 시스템 해석은 K-NCAP의 "보행자 안전성" 평가방법에 의하여 수행되었다. K-NCAP의 보행자안전성 평가방법은 머리모형 및 다리모형을 이용하여 자동차에 충격시킨 후 인체상해 기준값을 산정한다. 성인 머리모형의 충격방법은 충격각도 65°, 충격속도 40km/h이다. K-NCAP의 보행자 보호 관련 자세한 평가방법을 다음의 Fig. 1에 나타내었다.

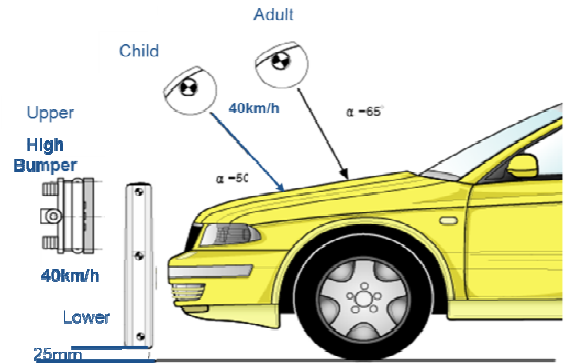


Fig. 1 Test methods for pedestrian safety(K-NCAP)

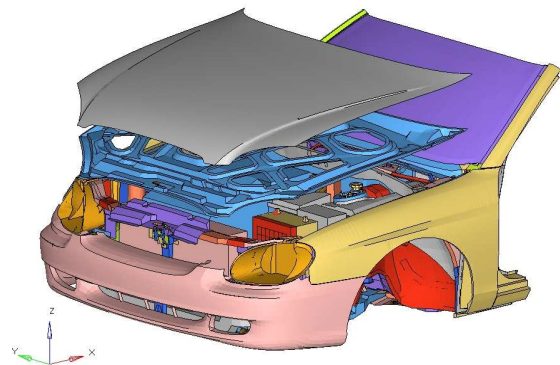


Fig. 2 Finite element model of a passenger car

2.2 머리상해기준값(HIC)

자동차의 보행자 보호 성능을 평가하기 위하여 머리상해기준값(Head Injury Criteria, HIC)을 적용한다. HIC는 아래의 식(1)에 의하여 산출되는 가속도계 이력의 계산 결과를 의미한다.

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

여기서, a 는 중력가속도의 배수로 표시되는 합성 가속도($1g=9.81m/s^2$), t_1 및 t_2 는 충격구간에서 HIC 값이 최대가 되는 임의의 두 순간을 의미한다. 산출된 HIC 값은 무차원 수이며 그 값이 작을수록 인체에 상해를 입히는 영향이 작아진다.

3. 해 석

3.1 유한요소해석모델 개발

전개형 후드 및 보행자 보호 에어백의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 자동차, 머리모형, 전개형 후드 및 보행자 보호 에어백을 모델링하였다. 평가대상 자동차의 유한요소 해석모델을 다음의 Fig. 2에 나타내었다. 자동차의 유한요소 해석

모델은 총 228 개의 부품과 총 105,237 개의 요소로 이루어져 있으며 모델의 무게는 345.8kg 이다.

해석에 사용된 성인 머리모형은 EASi-CRASH 에서 개발한 모델이며 질량은 4.5kg 이고 총 11,682 개의 요소로 구성되어 있다. 머리모형의 구조는 End plate, Sphere, Skin, Null shell 이렇게 4 가지로 이루어져 있다. 다음의 Fig. 3 에 머리모형의 유한요소 해석모델을 나타내었다.

전개형 후드는 자동차와 보행자가 충돌할 때 범퍼에 부착된 센서를 이용하여 보행자를 감지한 후 전개된다. 후드를 전개시키는 역할을 하는 액츄에이터(Actuator)는 차체와 후드가 체결되는 힌지(Hinge) 부위에 장착된다. 보행자 보호 에어백은 가스를 분출시켜 에어백 쿠션을 팽창시키는 인플레이터(Inflator)와 에어백 쿠션(Cushion)으로 구성되어 있으며 하우징(Housing)에 담긴 상태로 후드 상단의 아랫면에 장착된다. 전개형 후드의 액츄에이터 및 보행자 보호 에어백의 유한요소 해석모델을 각각 Fig. 4 및 Fig. 5 에 나타내었고 보행자 보호 에어백이 장착된 위치를 Fig. 6 에 나타내었다.

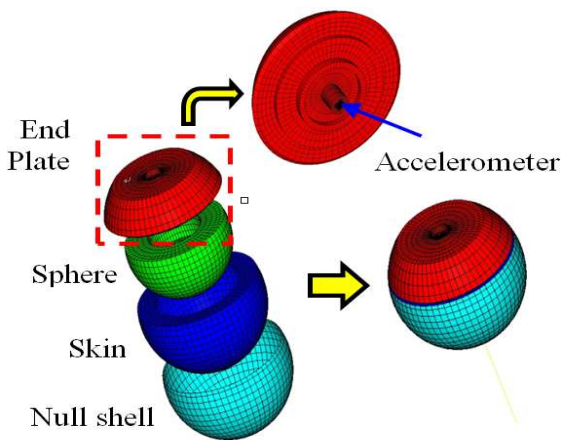


Fig. 3 Finite element model of an adult headform

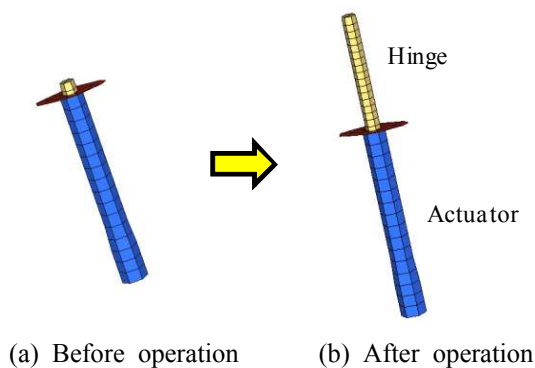


Fig. 4 Finite element model of an actuator

3.2 충격지점 선정 및 해석방법

전개형 후드 및 보행자 보호 에어백 등 보행자 보호 시스템에 대한 머리모형 충격 해석을 수행하기 위하여 충격지점을 선정하였다. 자동차의 보행자 보호 취약부위인 창유리 하단 및 A 필라에 대하여 총 6 개 지점이 선정되었다. 선정된 충격지점에 대하여 보행자 보호 시스템을 장착하지 않은 경우와 장착한 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA⁽¹¹⁾이며 충돌해석 방법은 앞 절에서 소개한 K-NCAP 의 평가방법에 의하여 수행하였다. Fig. 7 에 선정된 충격지점을 나타내었다.

3.3 해석 결과

해석결과 보행자 보호 시스템이 장착되지 않은 경우에는 모든 충격지점에서 HIC 2,000 이상의 높

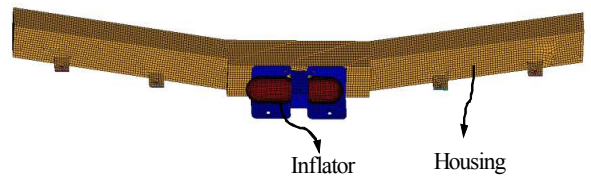


Fig. 5 Finite element model of a pedestrian airbag

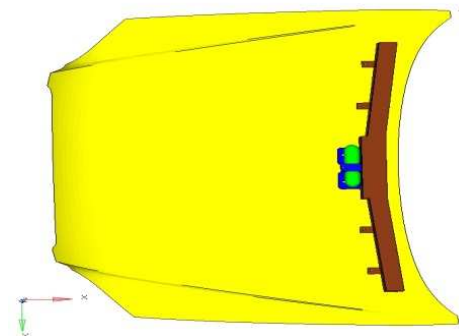


Fig. 6 Installation of finite element model

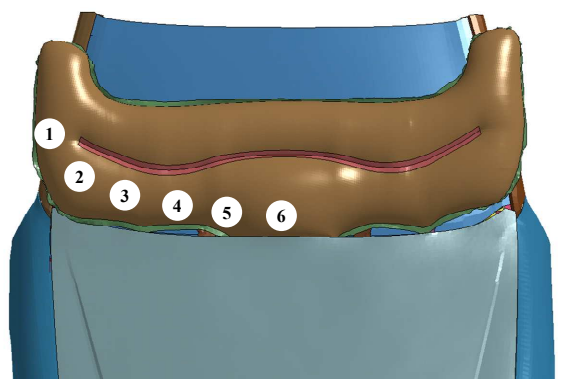


Fig. 7 Impact points of the simulation

Table 1 Results of simulation

Impact Point	HIC		Reduction ratio of HIC
	Without Protection system	With Protection system	
P1	8441	456	94.60%
P2	4082	586	85.60%
P3	2528	582	77.00%
P4	2133	686	67.80%
P5	2599	769	70.40%
P6	2701	739	72.60%

Table 2 Design parameters and levels(L₃₆)

Parameter (units)	Symbol	Values for the following levels		
		Level 1	Level 2	Level 3
Inflator	b_1	0.8	1	1.1
Fabric leakage	b_2	0.92	0.96	1
Time to Fire(ms)	b_3	0	1	2
Shape X	b_4	0.9	1	1.1
Shape Y	b_5	0.9	1	1.1
Hood Lift Height(mm)	b_6	80	90	100
Tether Height(mm)	b_7	99	110	121
Cushion Thickness(mm)	b_8	0.297	0.33	0.363

은 값을 나타내었다. 특히 매우 강한 구조로 제작되어 있는 A 필라의 경우에는 HIC 값이 8,000 이상으로 매우 높은 것으로 나타났다. 그러나 보행자 보호 시스템을 적용한 경우에는 모든 충격지점에서 HIC 800 이하의 낮은 값을 나타내었다. 해석상으로 확인한 보행자 보호 시스템의 HIC 감소효과는 P1 지점에서 최대 94.6%인 것으로 확인되었다.

4. 설계방법론

4.1 설계방법론

본 연구에서는 보행자 보호 시스템의 최적설계를 위한 설계방법론을 제시하였다. 설계방법론의

프로세스는 총 2 단계로 구성되어 있다. 1 단계에서는 설계변수들을 정의하고 수준수를 결정한다. 결정된 설계변수와 수준수에 따라 직교배열표를 구성하여 확인실험을 실시한 후 도출된 결과를 비교하여 첫번째 해를 구한다. 평균분석(Analysis of Means, ANOM)을 실시하여 두번째 해를 구한다. 마지막으로 반응표면법(Response Surface Method, RSM) 및 크리깅(Kriging) 방법들을 이용하여 연속 공간 내에서의 최적설계를 실시하여 세번째 해를 구한다. 2 단계에서는 1 단계의 결과에 대하여 분산 분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 실시하여 보다 영향력 있는 설계변수들을 추출한다. 추출된 설계변수에 대하여 다시 수준수를 선정한다. 이후의 절차는 1 단계와 동일하다. 설계방법론에 의하여 도출된 총 6 개의 해를 비교하여 최적해를 찾는다. 다음의 Fig. 8 에 설계방법론의 절차를 나타내었다.

4.2 설계변수 및 수준수 선정

본 연구에서 선정한 설계변수는 Inflator, Fabric Leakage, Time to Fire, Shape X, Shape Y, Hood Lift Height, Tether Height, Cushion Thickness 이렇게 총 8 가지이고 수준수는 총 3 단계이며 아래의 Table 2 에 자세한 내용을 나타내었다.

4.3 설계정식화

총 8 개의 설계변수들에 대한 설계 정식화를 다음의 식 (a)~(j)에 나타내었다. 목적함수는 HIC 의 최소화이다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } b_i \quad i=1, \dots, 8 && \text{(a)} \\
 &\text{to minimize HIC} && \text{(b)} \\
 &\text{subject to} && \\
 &0.8 \leq b_1 \leq 1.1 && \text{(c)} \\
 &0.92 \leq b_2 \leq 1.0 && \text{(d)} \\
 &0 \leq b_3 \leq 2 && \text{(e)} \\
 &0.9 \leq b_4 \leq 1.1 && \text{(f)} \\
 &0.9 \leq b_5 \leq 1.1 && \text{(g)} \\
 &80 \leq b_6 \leq 100 && \text{(h)} \\
 &0.8 \leq b_7 \leq 1.1 && \text{(i)} \\
 &99 \leq b_7 \leq 121 && \text{(j)} \\
 &0.297 \leq b_8 \leq 0.363 && \text{(k)}
 \end{aligned}$$

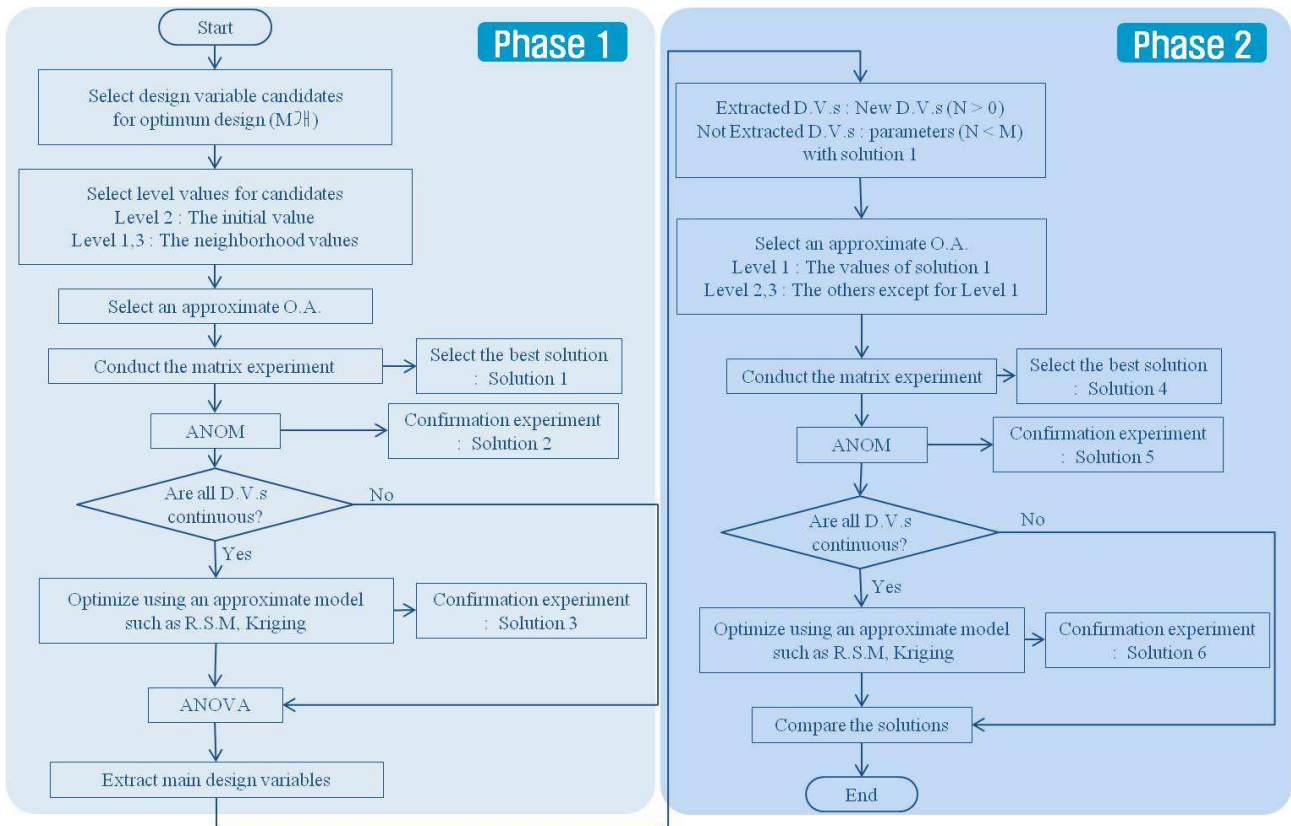


Fig. 8 Design flow

4.4 설계방법론 적용 결과

총 8 개의 설계변수들과 3 가지의 수준수를 이용하여 L_{36} 직교배열표(Orthogonal Array)를 구성하였다. 여기서 보행자 보호 에어백의 전개성에 대한 벌칙함수를 적용하였다. 본 설계방법론의 적용 목적은 가장 낮은 HIC 를 찾는 것인데 이것은 에어백이 정상적인 전개를 전제조건으로 한다. 그러나 경우에 따라서 에어백이 정상적으로 전개되지 않았는데도 불구하고 HIC 값이 낮게 나타나는 경우가 있다. 따라서 에어백의 전개성과 낮은 HIC 를 동시에 고려하기 위해서 벌칙함수를 적용하였다. 방법은 에어백이 정상 전개되면 0 으로, 전개가 불량한 경우에는 1 로 설정하고 전개가 불량한 경우에는 도출된 HIC 값에 매우 큰 값(예를 들어 5,000)을 적용하여 자연적으로 최적해에서 제외시키는 방법이다. 다음의 Table 3 에 L_{36} 직교배열표 결과를 나타내었다. 총 36 회 실험들에 대한 최적해는 6 번째 실험이고 그때의 HIC 최소값은 847 이다. 이 결과를 솔루션 1 로서 정의한다.

솔루션 2 는 L_{36} 직교배열표 결과에 대한 ANOM 결과에 의하여 얻게 되고 일원배치표(One Way Table)가 사용되었다. 확인실험을 수행한 결과 HIC 최소값은 1,123 이며 이 결과를 솔루션 2 로서

정의한다. ANOM 결과를 Table 4 에 나타내었다.

다음 절차는 설계방법론 1 단계의 마지막 과정으로 연속공간에서의 최적설계가 근사함수(Approximate Function)에 의하여 수행되었다. 디자인 프레임워크 도구인 Process Integration Automation and Optimization(PIAnO)^(12,13)이 RSM 및 Kriging⁽¹⁴⁾ 방법을 위한 최적화 프로세스로 적용되었다. 근사함수들의 최적화 솔루션은 각각 Evolutionary Algorithm(EA)과 Micro-Genetic Algorithm(MGA)을 이용하여 얻을 수 있다. 본 절차에서 도출된 솔루션은 근사함수에 의하여 얻어진 결과이기 때문에 확인실험을 수행한 결과 Kriging 방법에서 HIC 최소값은 1,196 이며 이것으로 솔루션 3 으로 정의하고 그 결과를 Table 5 에 나타내었다.

2 단계에서는 보다 영향력 있는 설계변수들이 ANOVA 를 이용하여 추출되었다. 이후의 전체적인 프로세스는 1 단계와 동일하다. 1 단계에서 적용되었던 총 8 개의 설계변수들에 대한 영향력 분석결과 가장 영향력 있는 설계변수는 후드 리프트 높이(27.8%), Time to Fire(20.6%), Shape X(17.2%), Shape Y(16.7%)의 순서로 나타났으며 자세한 결과를 Table 6 에 나타내었다.

Table 3 Results of the orthogonal array(L₃₆)

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Deployment	Result
exp1	1.1	0.92	0	0.9	0.9	100	99	0.297	625	1096	692	933	1077	1063	0	1096
exp2	1	0.96	1	1	1	90	110	0.33	1883	769	760	1359	1239	908	1	6883
exp3	0.8	1	2	1.1	1.1	80	121	0.363	341	850	674	922	998	1037	0	1037
exp4	1.1	0.92	0	0.9	1	90	110	0.33	839	1076	1408	1188	1133	1059	0	1408
exp5	1	0.96	1	1	1.1	80	121	0.363	1058	821	978	1154	1178	870	1	6178
exp6	0.8	1	2	1.1	0.9	100	99	0.297	594	809	645	796	847	726	0	847
exp7	1.1	0.92	1	1.1	0.9	90	121	0.363	770	1435	1025	1092	986	917	0	1435
exp8	1	0.96	2	0.9	1	80	99	0.297	624	1362	992	1138	1230	1160	0	1362
exp9	0.8	1	0	1	1.1	100	110	0.33	112	747	431	645	742	1003	0	1003
exp10	1.1	0.92	2	1	0.9	80	110	0.363	1318	1685	794	1302	1240	1191	1	6685
exp11	1	0.96	0	1.1	1	100	121	0.297	850	1061	1007	697	588	798	0	1061
exp12	0.8	1	1	0.9	1.1	90	99	0.33	349	680	692	882	899	903	0	903
exp13	1.1	0.96	2	0.9	1.1	90	99	0.363	481	485	1431	1295	916	1005	0	1431
exp14	1	1	0	1	0.9	80	110	0.297	605	1188	711	1182	1232	1128	1	6232
exp15	0.8	0.92	1	1.1	1	100	121	0.33	3515	355	552	679	822	671	1	8515
exp16	1.1	0.96	2	1	0.9	100	121	0.33	623	1282	1002	1366	944	1042	0	1366
exp17	1	1	0	1.1	1	90	99	0.363	813	945	621	1184	849	814	1	6184
exp18	0.8	0.92	1	0.9	1.1	80	110	0.297	446	618	860	882	1163	1228	1	6228
exp19	1.1	0.96	0	1.1	1.1	80	99	0.33	988	1278	984	946	1339	979	0	1339
exp20	1	1	1	0.9	0.9	100	110	0.363	865	1191	748	731	844	751	0	1191
exp21	0.8	0.92	2	1	1	90	121	0.297	489	503	1144	1052	1207	1181	0	1207
exp22	1.1	0.96	1	1.1	1.1	100	110	0.297	638	1144	807	1032	536	717	0	1144
exp23	1	1	2	0.9	0.9	90	121	0.33	5227	896	1112	1484	1276	1007	1	10227
exp24	0.8	0.92	0	1	1	80	99	0.363	3.23	1084	584	1004	1159	1423	1	6423
exp25	1.1	1	1	0.9	1	80	121	0.297	1240	634	677	1176	1350	1427	1	6427
exp26	1	0.92	2	1	1.1	100	99	0.33	418	427	455	579	1194	819	0	1194
exp27	0.8	0.96	0	1.1	0.9	90	110	0.363	566	853	642	893	818	1085	0	1085
exp28	1.1	1	1	1	1	100	99	0.363	535	609	772	937	847	957	0	957
exp29	1	0.92	2	1.1	1.1	90	110	0.297	560	1127	998	1224	919	900	0	1224
exp30	0.8	0.96	0	0.9	0.9	80	121	0.33	544	975	765	989	1298	1508	0	1508
exp31	1.1	1	2	1.1	1	80	110	0.33	401	1272	909	1164	871	881	0	1272
exp32	1	0.92	0	0.9	1.1	100	121	0.363	480	378	500	492	1114	704	0	1114
exp33	0.8	0.96	1	1	0.9	90	99	0.297	3436	632	867	993	995	820	1	8436
exp34	1.1	1	0	1	1.1	90	121	0.297	581	953	1120	1065	1118	843	0	1120
exp35	1	0.92	1	1.1	0.9	80	99	0.33	666	510	1186	1158	1356	980	0	1356
exp36	0.8	0.96	2	0.9	1	100	110	0.363	206	495	1212	704	1109	828	0	1212

Table 4 One Way Table of orthogonal array(L₃₆)

	Level 1	Level 2	Level 3	Result
x1	2140.0	3683.8	3200.3	1.1
x2	3157.1	2750.4	3116.7	0.96
x3	2464.4	4137.8	2422.0	2
x4	2842.3	3973.7	2208.2	1.1
x5	3455.3	3575.9	1993.0	1.1
x6	1725.0	3462.0	3837.3	100
x7	2627.4	2963.9	3432.9	99
x8	3032.0	3081.2	2911.0	0.363
P1	1031			
P2	1123			
P3	351			
P4	826			
P5	709			
P6	801			

Table 5 Kriging and RSM of the orthogonal array(L₃₆)

	Kriging (MGA)	Kriging (EA)	RSM (MGA)	RSM (EA)
x1	0.95	0.94	0.847	0.95
x2	0.964	0.965	0.92	1
x3	1.5	1.5	0	0.01
x4	0.922	0.922	0.9	0.9
x5	1	0.99	0.9	1.1
x6	92.18	92.24	80	80
x7	99	99.2	99	99.2
x8	0.297	0.297	0.297	0.297
P1	926	926	5257	376
P2	970	970	669	713
P3	1141	1141	1008	1088
P4	1196	1196	1246	1086
PS	1063	1063	1169	1179
P6	977	977	1165	1339

ANOVA 분석결과 가장 영향력 있는 4 개의 설계변수들은 2 단계에서 다시 3 개의 수준수를 가지는 설계변수로서 사용되었다. 나머지 설계변수들은 1 단계에서의 최적해인 솔루션 1 의 수준으로 고정시킨다. 2 단계 직교배열표 구성을 위한 설계

Table 6 Results of ANOVA

Design variables	Effect
Inflator(<i>b</i> ₁)	13.2%
Fabric Leakage(<i>b</i> ₂)	1%
Time to Fire(<i>b</i> ₃)	20.6%
Shape X(<i>b</i> ₄)	17.24%
Shape Y(<i>b</i> ₅)	16.7%
Hood Lift Height(<i>b</i> ₆)	27.8%
Tether Height(<i>b</i> ₇)	3.3%
Cushion Thickness(<i>b</i> ₈)	0.2%
Total	100%

Table 7 Design parameters and levels((L₁₈)

Parameter (units)	Symbol	Values for the levels		
		Level 1	Level 2	Level 3
Time to Fire(ms)	<i>b</i> ₃	0	1	2
Shape X	<i>b</i> ₄	0.9	1	1.1
Shape Y	<i>b</i> ₅	0.9	1	1.1
Hood Lift Height(mm)	<i>b</i> ₆	80	90	100

변수들과 수준수를 Table 7 에 나타내었다.

Table 8 에 L₁₈ 직교배열표 결과를 나타내었다. 총 18 회 실험들에 대한 최적해는 5 번째 실험이고 그때의 HIC 최소값은 580 이다. 이 결과를 솔루션 4 로서 정의한다. 2 단계에서의 솔루션 4 의 결과가 1 단계에서 가장 좋은 결과였던 솔루션 1 보다 더 좋은 결과라는 것에 의미가 있다. Table 9 에 나타낸 것처럼 2 단계에서의 ANOM 결과 HIC 최소값은 775 이며 이것을 솔루션 5 로 정의하였고 그 결과를 Table 9 에 나타내었다. 현재까지 최적해인 솔루션 4 보다는 좋지 않은 결과이다.

마지막으로 연속공간에서의 설계가 근사 방법들을 이용하여 수행되었고 근사화를 위한 후보점들은 Table 8 의 L₁₈ 직교배열표로부터 얻어졌다. 1 단계와 마찬가지로 총 4 가지의 근사방법이 적용되었고 그 결과를 Table 10 에 나타내었다. 이때의 HIC 최소값은 845 이며 이것을 솔루션 6 로 정의하였다.

1 단계 및 2 단계의 모든 설계방법론 적용결과

Table 8 Results of the orthogonal array(L₁₈)

	x3	x4	x5	x6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Deployment	Result
exp1	0	0.9	0.9	100	361	599	649	918	830	833	0	918
exp2	1	1	1	90	3866	459	840	966	775	1008	1	8866
exp3	2	1.1	1.1	80	685	638	668	1005	896	1169	1	6169
exp4	0	0.9	1	80	4011	631	876	942	1206	1381	1	9011
exp5	1	1	1.1	100	252	473	372	502	527	580	0	580
exp6	2	1.1	0.9	90	2027	858	767	905	743	762	1	7027
exp7	0	1	0.9	80	2005	657	1182	959	1124	992	1	7005
exp8	1	1.1	1	100	478	962	470	709	615	683	0	962
exp9	2	0.9	1.1	90	295	710	1016	958	913	1289	0	1289
exp10	0	1.1	1.1	100	1616	771	698	557	758	844	1	6616
exp11	1	0.9	0.9	90	349	563	577	875	851	817	0	875
exp12	2	1	1	80	3619	1153	722	1121	1076	1415	1	8619
exp13	0	1	1.1	90	460	453	533	647	947	706	0	947
exp14	1	1.1	0.9	80	1016	1190	857	914	914	1332	1	6332
exp15	2	0.9	1	100	302	456	511	616	659	837	0	837
exp16	0	1.1	1	90	546	625	641	811	877	1102	0	1102
exp17	1	0.9	1.1	80	431	414	591	988	1165	1119	0	1165
exp18	2	1	0.9	100	604	692	663	886	812	790	0	886

Table 9 One Way Table of the orthogonal array (L₁₈)

	Level 1	Level 2	Level 3	Result
x3	4266.4	3144.9	4137.9	1
x4	2349.2	4498.6	4701.4	0.9
x5	3840.5	4899.6	2809.1	1.1
x6	1814.7	3351.0	6383.5	100
P1	361			
P2	400			
P3	626			
P4	531			
P5	594			
P6	775			

Table 10 Kriging and RSM of the orthogonal array(L₁₈)

	Kriging (MGA)	Kriging (EA)	RSM (MGA)	RSM (EA)
x3	0.875	0.87	1.39	1.411
x4	1	1	0.903	0.9
x5	1.1	1.1	0.902	0.96
x6	98.75	98.71	99.75	100
P1	228	228	389	389
P2	416	416	623	623
P3	431	431	659	659
P4	443	443	810	810
P5	885	885	845	845
P6	799	799	833	833

산출된 총 6 개의 솔루션들을 Table 11 에 요약하였다. 결과적으로 2 단계에서의 모든 솔루션들이 1 단계보다 더 좋게 나왔으며, 2 단계에서 직교배열

표에 의하여 도출된 솔루션 4 가 HIC 580 으로서 이산공간에서의 최종해로 고려되어질 수 있다.

Table 11 Final Results

	HIC	Classification	Description
Solution 1	847	Discrete design	Orthogonal array (L ₃₆)
Solution 2	1,123	Discrete design	One-way table (L ₃₆)
Solution 3	1,196	Continuous design	Kriging (L ₃₆)
Solution 4	580	Discrete design	Orthogonal array (L₁₈)
Solution 5	775	Discrete design	One-way table (L ₁₈)
Solution 6	845	Continuous design	RSM(L ₁₈)

5. 결 론

본 연구에서는 전개형 후드 및 보행자 보호 에어백 등 보행자 보호 시스템의 유한요소 해석모델을 개발하고 해석을 수행하여 보행자 보호 효과를 확인하였다. 개발된 해석 모델에 설계방법론을 적용하였다. 설계방법론은 총 2 단계로 구성되어 있으며 이산공간에서는 물론 연속공간에서도 최적설계를 수행하였다. 제안된 설계방법론에는 실험계획법, 일원배치표, RSM 등의 최적설계 기법들이 포함되어 있다. 제안된 설계방법론의 적용 결과 총 6 개의 솔루션을 도출하였고 최종 결과를 비교하여 최적해를 선택할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 설계방법론의 적용으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보행자 머리상해를 감소시키기 위한 새로운 설계방법론을 제안하였다. 제안된 설계방법론을 적용한 결과 적용 전보다 더 좋은 결과를 얻었다.

(2) 제안된 설계방법론은 보행자 보호 에어백과 같은 높은 비선형 특성을 가지는 문제에 적용할 수 있다.

(3) 보행자 보호 에어백은 보행자의 머리상해를 감소시키는 측면에서는 탁월한 효과가 있는 반면, 운전자의 시야를 가리는 문제가 발생할 수도 있기 때문에 이 부분에 대한 기술적합성에 대하여 논의될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 연구비지원(12PTSI-C054118-04)으로 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) 2013, Road Traffic Authority, Traffic Accident Statistical Analysis.
- (2) Construction and Transportation Research Report, 2008, "Development of Advanced Vehicle for Pedestrian Safety," *R&D/03-Safety-11*, Ministry of Land Transport and Maritime Affairs.
- (3) 2014, European New Car Assess Program, <http://www.euroncap.com/home.aspx>, European Commission.
- (4) 2014, Korea New Car Assessment Program, <http://www.car.go.kr/jsp/kncap/introduction>, Ministry of Land Transport and Maritime Affairs.
- (5) Ashton, S. J., Pedder, J.B. and Mackay, G M., 1977, "Pedestrian Injuries and the Car Exterior," SAE, 770092.
- (6) Clemo, K. and Davies, R., 1998, "The Practicalities of Pedestrian Protection," *16th ESV Conference*, 98-S10-P-16.
- (7) Krenn, M., Mlekusch, B., Wilfling, C., Dobida, F. and Deutscher, E., 2003, "Development and Evaluation of a Kinematic Hood for Pedestrian Protection," *World Congress & Exhibition*, 2003-01-0897, Detroit, MI, USA.
- (8) Nagatomi, K., Hanayama, K., Ishizaki, T., Sasaki, S. and Matsuda, K., 2005, "Development and Full-scale Dummy Tests of a Pop-up Hood System for Pedestrian Protection," *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, pp.6~9.
- (9) Shin, M. K., Park, K. T., Lee, K. B., Bae, H. I. and Park, G. J., 2006, "Design of the Active Hood Lift System Using Orthogonal Arrays," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.4, pp.123~131.
- (10) Yoo, W. D., Ham, J. S. and Cho, K. S., 2012, "Development and Feasible Study of Train to Pedestrian Protection Airbag," *Transactions of KSAE*, Vol. 20, No. 4, pp. 82~91.
- (11) 2012, "LS-DYNA Keyword User's Manual," Livermore, California : Livermore Software Technology Corporation, USA.
- (12) 2011, "PIAnO User's Manual," PIDOTECH Inc., Seoul, Korea.
- (13) Yoon, S. J. and Choi, D. H., 2010, "Process Integration and Design Optimization Using PIAnO Software," KSME Spring Annual Meeting.
- (14) Kim, J. H., Lee, K. H. and Joo, W. S., 2004, "Optimization of a Driver-side Airbag Using Kriging and Tabu Search Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 19, No.1, pp.1035~1040.