

< 논문 >

충돌을 고려한 안전띠 일체형 의자의 다분야 통합최적설계

신문균* · 강병수** · 박경진†

(2004년 4월 9일 접수, 2005년 1월 26일 심사완료)

Application of a Multidisciplinary Design Optimization Algorithm to Design of a Belt Integrated Seat Considering Crashworthiness

Moon-Kyun Shin, Byung-Soo Kang and Gyung-Jin Park

Key Words : Multidisciplinary Design Optimization(다분야통합최적설계), System Analysis(시스템해석), Subspace Optimization(하부시스템 최적화), Multidisciplinary Design Optimization Based on Independent Subspaces(독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계), Belt Integrated Seat(안전띠 일체형 의자)

Abstract

Recently Multidisciplinary Design Optimization Based on Independent Subspaces (MDOIS), an MDO (multidisciplinary design optimization) algorithm, has been proposed. In this research, an MDO problem is defined for design of a belt integrated seat considering crashworthiness, and MDOIS is applied to solve the problem. The crash model consists of an airbag, a belt integrated seat (BIS), an energy absorbing steering system, and a safety belt. It is found that the current design problem has two disciplines - structural nonlinear analysis and occupant analysis. The interdisciplinary relationship between the disciplines is identified and is addressed in the system analysis step in MDOIS. Interdisciplinary variables are belt load and stiffness of the seat, which are determined in system analysis step. The belt load is passed to the structural analysis subspace and stiffness of the seat back frame to the occupant analysis subspace. Determined design variables in each subspace are passed to the system analysis step. In this way, the design process iterates until the convergence criterion is satisfied. As a result of the design, the weight of the BIS and Head Injury Criterion (HIC) of an occupant are reduced with specified constraints satisfied at the same time. Since the system analysis cannot be formulated in an explicit form in the current example, an optimization problem is formulated to solve the system analysis. The results from MDOIS are discussed.

1. 서론

구조물을 설계할 때에는 여러 분야의 이론들을 동시에 고려해야 하는 경우가 종종 있다. 이 때에는 각 분야의 이론을 만족하는 설계를 찾는 노력과 함께 각 분야들 사이의 연성관계(interdisciplinary relationship)를 처리하는 노력까지 동

시에 필요하다. 다분야통합최적설계(Multidisciplinary Design Optimization; MDO) 기술의 목표는 이 경우에 필요한 기법들을 확립하는데 있다. 다분야통합최적설계 기법은 문헌상으로 여러 방법이 소개되었지만^(1~6) 대부분 특정 유형의 문제에만 성공적으로 적용되었다. 그 이유로는 어떤 기법들은 문제를 해결하는데 필요한 수학적인 정보를 정확하게 얻을 수 있는 경우에만 잘 작동하는데 실제 공학문제에서는 그런 경우가 드물기 때문이다. 또 다른 이유로는 다분야통합최적설계 문제 속의 연성관계 유형이 매우 다양하여 하나의 형태로 단일화하여 표현하기가 어렵기 때문

* 한양대학교 BK21 연구교수

E-mail : mkshin@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-4065 FAX : (031)407-0755

** 회원, 한양대학교 최적설계신기술연구센터

† 책임저자, 회원, 한양대학교기계경영정보공학과

에 그 연성관계를 해결하는 일관된 방법도 개발하기 어려운 점도 있다.

최근에 독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계(Multidisciplinary Design Optimization Based on Independent Subspaces; MDOIS)라는 다분야통합최적설계 기법이 제안되었다.⁽⁷⁾ 이 논문은 독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계를 실제 공학 문제인 안전띠 일체형 의자의 설계에 적용하는데 그 목적이 있다. 안전띠 일체형 의자의 하중환경은 차량이 충돌할 때에 나타나는 하중환경을 사용한다. 이 연구에서 사용된 충돌 관련 부품들은 안전띠 일체형 의자, 에너지흡수 조향주, 안전띠, 에어백 등이다.⁽⁸⁾ 여기에 관계된 이론은 비선형 유한요소법을 이용하는 구조해석과 다물체동역학(multibody dynamics)을 이용하는 승객거동해석이다. 독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계가 제공하는 설계흐름을 적용하여 각분야간 연성관계를 시스템해석(system analysis) 단계에서 규정하고 그 결과를 이용하여 각 하부시스템에서 시트의 중량과 승객상해치를 동시에 최소화하였다.

2. 독립적하부시스템에 기초한

다분야통합최적설계

독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계를 설계문제에 적용하려면 그 설계문제는 여러 개의 하부시스템으로 분리될 수 있어야 한다. 또한 분리된 각 하부시스템은 다음과 같은 가정을 만족하여야 한다.⁽⁷⁾

- 가. 연성변수는 각 하부시스템의 입력이다. 이 입력은 각 하부시스템의 최적화 과정에서 일시적으로 불변값이 된다.
- 나. 한 하부시스템에 입력되는 연성변수는 다른 하부시스템에는 입력되지 않는다.
- 다. 각 하부시스템은 자신의 목적함수, 설계변수, 제한조건을 가지며 다른 하부시스템과 자신의 것을 공유하지 않는다.
- 라. 각 하부시스템은 부등제한조건만을 가지며, 목적함수는 연성변수의 함수가 아니다.
- 마. 가중치를 사용하여 각각의 하부시스템의 목적함수들을 더하면 원래 시스템의 목적함수가 된다.

즉, 각 하부시스템의 목적함수, 제한조건, 연성변수 및 설계변수는 서로 독립적이어야 한다. 여기서 연성변수라 함은 각 하부시스템들 간의 연성관계를 나타내는 변수로서 3.2절에서 그 예를

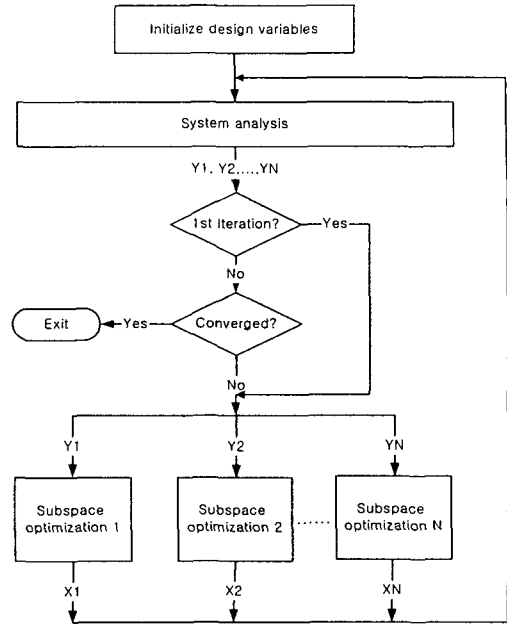


Fig. 1 Multidisciplinary Design Optimization based on Independent Subspaces (MDOIS)

보일 것이다.

독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계의 설계흐름이 Fig. 1에 있다. 먼저 전체 시스템을 여러 개의 하부시스템으로 분리하고 연성관계를 표현할 수 있는 수단인 등제한조건을 시스템해석 단계에 배치한다. 시스템해석 단계에서는 현재 설계를 만족하는 연성변수들의 값을 결정하여 각각의 하부시스템에 전달한다. 각각의 하부시스템은 전달받은 연성변수를 입력으로 하여 독립적인 최적화를 다음과 같이 수행한다.

$$\text{Find } \mathbf{x}^k \text{ for a given } \mathbf{y}^k \quad (1a)$$

$$\text{to minimize } f^k(\mathbf{x}^k) \quad (1b)$$

$$\text{subject to } g_j^k(\mathbf{x}^k) \leq 0, j = 1, p^k \quad (1c)$$

$$\mathbf{x}^k_l \leq \mathbf{x}^k \leq \mathbf{x}^k_u \quad (1d)$$

여기서 \mathbf{x}^k 와 $f^k(\mathbf{x}^k)$ 는 k 번째 하부시스템에서의 설계변수와 목적함수이다. 연성변수 \mathbf{y}^k 는 식 (1)의 최적화과정에서 변하지 않는 입력이 된다. 각 하부시스템은 부등제한조건만을 가져야 하며 등제한조건은 시스템해석 단계에서 다룬다.

식 (1)에 의해 갱신된 각 설계를 만족하는 연성변수값을 시스템해석 단계에서 다시 결정하여 각 하부 시스템에 전달한다. 설계변수의 변화가

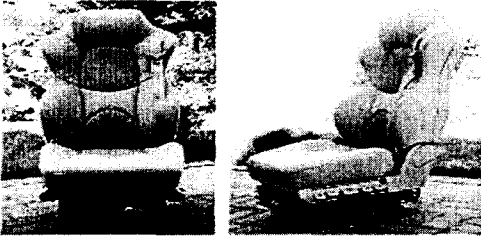


Fig. 2 Belt integrated seat that has an attached belt

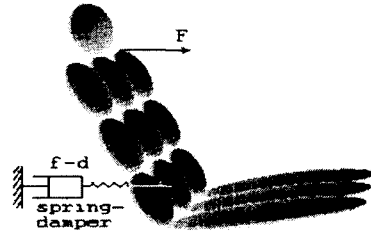
일어나지 않을 때에 수렴한 것으로 한다. 시스템해석에서 출발하여 각 하부시스템의 최적화까지 한 설계 사이클(design cycle)을 이룬다. 이 방법을 통해 얻은 해는 원래 문제의 해와와 같다는 것을 참고문헌 (7)에서 보였으며 수치적인 검증을 실시한 바 있다.

3. 충돌을 고려한 안전띠 일체형 의자의 설계

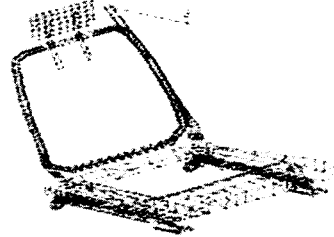
3.1 안전띠 일체형 의자

충돌을 감안하여 안전띠 일체형 의자(belt integrated seat; BIS)를 설계하기 위해 안전띠 일체형 의자, 에어백, 안전띠, 에너지 흡수 조향계로 구성된 충돌 모델을 선정하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 안전띠 일체형 의자는 Fig. 2와 같이 안전띠가 의자에 부착되어 있다. 안전띠 일체형 의자는 승객 착석위치와 의자의 위치에 따라 안전띠의 성능이 달라질 가능성이 기존 의자에 비해 적다. 그리고 충돌 시에도 의자의 프레임이 변형하여 에너지를 흡수하기 때문에 승객의 상해를 줄이는 효과가 있다. 또한 후방 추돌 시 승객이 의자에 부딪힌 후에 생기는 반동을 효과적으로 구속하여 승객이 차량 내부와 부딪힐 확률도 줄여준다. 그런데 기존의 의자는 안전띠에 의한 하중이 차체에 작용하는 반면, 안전띠 일체형 의자에는 안전띠에 의한 하중이 의자에 직접 작용한다. 이 특별한 하중 환경에서 구조적 안전성을 확보하기 위해 안전띠 일체형 의자는 대개 기존 의자보다 무겁다. 따라서 구조최적화를 통해서 안전띠 일체형 의자를 경량화하면서 우수한 안전도 성능을 유지하는 설계가 필요하다.

안전띠 일체형 의자를 설계하려면 비선형 구조해석과 승객거동해석을 수행해야 한다. 승객거동해석용 모델은 Fig. 3(a)와 같다. 등받이와 쿠션프레임 및 머리지지대를 각각 9개, 3개, 1개의 세그먼트로 구성하였다. 세그먼트들은 조인트와



(a) Seat model of occupant analysis that is based on multibody dynamics



(b) Seat model of structural analysis that is based on nonlinear structural analysis

Fig. 3 Seat models of the BIS for system analysis and subspace optimization

스프링-댐퍼로 연결하였다. 그리고 사각형에 가까운 접촉 엘립소이드를 각 세그먼트에 추가하여 충돌 시에 인체모형과 의자가 좀더 잘 접촉하도록 하였다. 등받이와 쿠션프레임을 연결하는 리클라이너 부분은 핀 조인트로 처리하였으며 회전강성은 스프링-댐퍼 특성으로 대체하였다. 인체모형은 Hybrid III 50%를 사용하였으며 충돌시 속도는 44.65km/h로 하였다. 감속도 파형은 참고문헌 (8)의 것을 사용하였으며 안전띠는 하니스벨트이다. 이 모델에 감속도 파형을 가하면 안전띠에 의해 안전띠 장착점에 가해지는 하중을 구할 수 있다. Fig. 3(b)의 구조해석용 모델은 보와 셸요소로 이루어져 있다. 등받이와 쿠션프레임을 연결하는 리클라이너는 회전스프링과 선형스프링으로 연결하여 실제 리클라이너의 거동과 유사하게 동작하도록 하였다. 이 모델의 안전띠 장착점에 승객거동해석에서 얻은 안전띠에 의한 하중을 가한다. 이 모델들을 이용하여 수행한 해석들은 참고문헌 (8)에서 볼 수 있다.

3.2 각 분야들간의 연성관계 규명

비선형 구조해석과 승객거동해석을 통해 의자의 거동을 점검할 수 있다. 비선형 구조해석을 통해서 안전띠 일체형 의자의 안전성과 전체 중량을 점검할 수 있다. 승객거동해석을 통해서 승객의 머리상해치(Head Injury Criteria; HIC)를

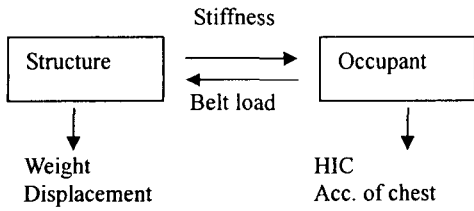


Fig. 4 Dependency diagram of a BIS design considering crashworthiness

계산할 수 있다. 그런데 구조분야에서 설계변경이 일어나면 등받이의 회전 강성이 변한다. 등받이의 회전 강성은 승객거동해석에서 사용되는 중요한 특성치이다. 따라서 구조분야의 설계변경은 승객거동해석의 결과를 변경시킨다. 한편, 승객거동분야의 설계변경은 안전띠에 의한 하중의 변화를 가져온다. 안전띠에 의한 하중은 안전띠 일체형 의자의 구조해석에 사용되는 하중조건이다. 따라서 승객거동분야의 설계변경은 구조해석의 하중조건을 변화시킨다. 그러므로 안전띠 일체형 의자의 구조해석과 승객거동해석 사이에는 연성관계가 있다. 그 연성관계는 Fig. 4와 같이 등받이의 회전강성과 안전띠에 의한 하중으로 규정할 수 있다. 이 연성관계를 처리하는 것은 4장에서 논한다.

3.3 충돌을 고려한 안전띠 일체형 의자의 설계를 위한 정식화

식 (2)는 충돌을 고려한 안전띠 일체형 의자의 설계를 위한 정식화이다. 의자의 중량(W)과 승객의 머리 상해치(HIC)를 동시에 감소시켜야 하므로 가중치를 이용한 다목적함수를 사용하였다.

Find x_O, x_S (2a)

to minimize $F = \alpha_1 W + \alpha_2 HIC$ (2b)

subject to $g_1 = \Delta d_{anchor} \leq 200mm$ (2c)

$g_2 = \Delta d \leq 120mm$ (2d)

$g_3 = HIC \leq HIC^0$ (2e)

$g_4 = G_{chest} \leq G_{chest}^0$ (2f)

여기서 x_O 는 승객거동분야의 설계변수벡터로서 그 요소는 안전띠의 힘-변형 곡선, 조향계의 에너지 흡수부의 힘-변형 곡선, 에어백에서는 에어백에 유입되는 가스의 유량의 확장계수들이다. x_S 는

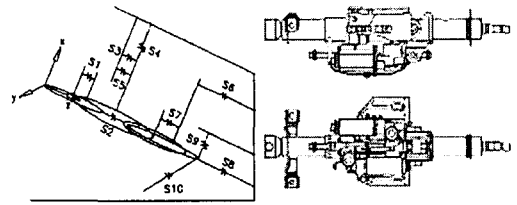


Fig. 5 Energy absorbing steering system and its mathematical model that is utilized in occupant analysis

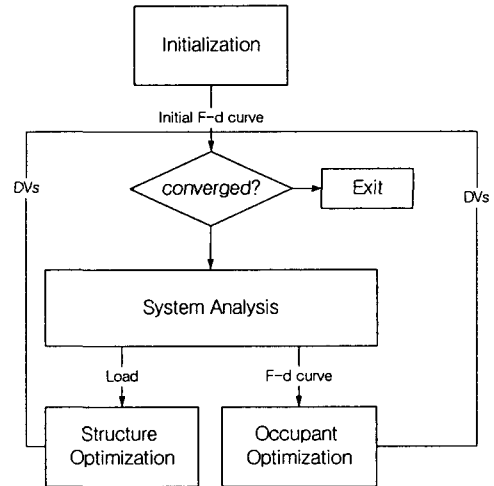


Fig. 6 A flow chart of MDOIS that is applied to BIS design considering crashworthiness

구조분야의 설계변수벡터로서 의자 여러 부분의 두께들이다. Δd_{anchor} 는 안전띠 장착점의 변위이고 Δd 는 Fig. 5의 조향주가 더미와 충돌 하였을 때에 길이방향으로 접혀지는 변위이다. G_{chest} 는 더미의 가슴 가속도의 크기이다. HIC 는 더미의 머리상해치로서 다음과 같이 정의하는 값이다.

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

식 (2)의 정식화에서 설계변수벡터(x_S vs x_O), 제한조건(g_1 vs g_2, g_3, g_4), 목적함수(W vs HIC)가 승객거동분야와 구조분야의 두 영역으로 명확하게 분리되었다. 따라서 식 (2)의 정식화는 2장의 가정들을 만족하도록 분리될 수 있으므로 이 문제에 설계에 독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합 최적설계를 적용할 것이다. Fig. 6은 독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합 최적설계에 의해 안전띠 일체형 의자를 설계하기 위한 설계흐름이다.

4. 독립적 하부시스템에 기초한 다분야 통합최적설계를 이용한 안전띠 일체형 의자의 설계

4.1 연성변수 처리를 위한 시스템 해석

3.2절에서 기술하였듯이 이 문제의 연성변수는 안전띠에 의한 하중과 등받이의 회전 강성(혹은 힘-변위 곡선)이다. 연성변수들의 상호 관계를 비선형방정식 형태의 등제조건으로 표현할 수 있어으면 고정점 반복법 등으로 연성변수들의 값을 구할 수 있다. 그러나 이 문제의 경우에는 연성변수들의 상호 관계를 방정식의 형태로 나타낼 수 없기 때문에 이 같은 방법으로는 연성변수들의 값을 구할 수 없다. 따라서 다른 접근법을 시도해야 한다. 더불어 시스템해석에 드는 비용을 줄이는 것도 중요하다. 그런데 다물체동역학계에서는 대수방정식을 풀어서 조인트나 기타 구속조건에 의해 생기는 반력을 먼저 구할 수 있다. 여기에 사용되는 행렬의 크기는 유한요소법에 의한 행렬의 크기보다 훨씬 작다. 그 이유는 강체다물체동역학에서는 모든 부재를 강체로 다루기 때문에 다루는 자유도의 수가 일반 유한요소법에 비해 매우 작기 때문이다. 또한 강체의 가속도와 각속도는 반력들의 명시적인 함수로 나타낼 수 있으므로 이들을 구하는 시간 역시 오래 걸리

지 않는다.⁽¹¹⁾ 따라서 강체다물체동역학 소프트웨어인 ATB를⁽¹²⁾ 사용하는 승객거동해석은 비교적 저렴하다고 할 수 있다. 반면 LS-Dyna⁽¹³⁾를 사용하는 유한요소 기반 비선형 과도응답해석은 일반적으로 고가이다. 따라서 시스템해석에서는 비선형 구조해석의 횟수를 줄이는 것이 바람직하다.

Fig. 7은 연성변수인 안전띠에 의한 하중과 등받이의 회전 강성을 결정하기 위해 수행하는 시스템 해석의 흐름이다. 먼저 구조해석에서 얻은 안전띠 장착점의 변위를 목표값으로 정한다. 그리고 승객거동해석에서 얻은 안전띠 장착점의 변위가 이 목표값이 되도록 등받이의 회전 강성(힘-변위 곡선)을 결정한다. 회전 강성을 나타내는 힘-변위 곡선의 개형은 이미 사전에 결정되어 있으므로 이것의 확장계수만으로 회전 강성을 조절한다. 구체적인 순서는 다음과 같다.

- 단계 1. 승객거동해석에서의 등받이 회전강성 곡선을 초기화한다.
- 단계 2. 승객거동해석을 수행하여 구조해석에서 사용될 안전띠에 의한 하중을 구한다.
- 단계 3. 구조해석을 통해 안전띠 장착점의 변위 ($\delta^s(t)$)를 구한다. 하중조건은 단계 2에서 구한 것을 사용한다.
- 단계 4. 단계 3에서 얻은 구조해석에서의 안전띠 장착점 변위 ($\delta^s(t)$)에 승객거동해석에서 얻은 안전띠 장착점의 변위 ($\delta^o(t)$)를 일치시키기 위해 등받이의 회전 강성 곡선의 확장계수를 결정한다. 이 때 다음의 값을 최소화하는 최적화문제를 풀어서 두 해석에서 얻은 변위의 차를 최소화할 수 있다.

$$E = \int_0^T [\delta^s(t) - \delta^o(t)]^2 dt \quad (4)$$

즉, 구조해석에서 얻은 변위 ($\delta^s(t)$)를 고정된 목적값으로 하고 승객거동해석에서 얻은 안전띠 장착점의 변위 ($\delta^o(t)$)를 조절하여 식 (4)의 값을 줄여나간다.

단계 5. 수렴조건을 만족하면 멈추고 그렇지 않으면 단계 2로 간다.

위의 시스템해석이 수렴했을 때 얻는 것들이 연성변수들로서 단계 2에서 계산된 안전띠에 의한 하중과 단계 4에서 결정된 등받이의 회전 강성이다. 여기서 주목할 것은 단계 2에서 단계 5까지의 흐름에서 고가의 비선형 구조해석은 단 한 번 수행되고 저렴한 승객거동해석이 여러 번 수행되는 점이다. 이렇게 되면 시스템해석의 전

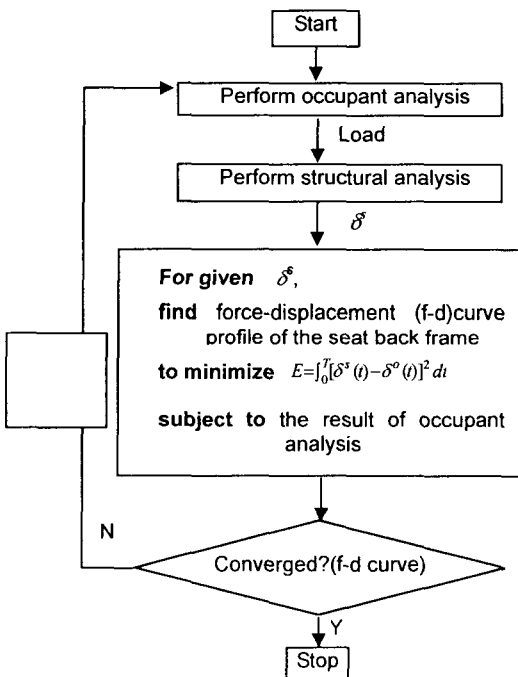


Fig. 7 Flow chart for the system analysis in MDOIS that is applied to a BIS design considering crashworthiness

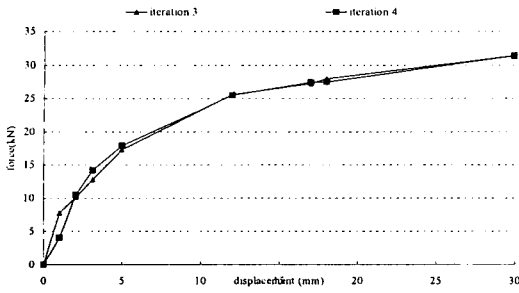


Fig. 8 Determined force – displacement curve profile in the system analysis at the first cycle of MDOIS

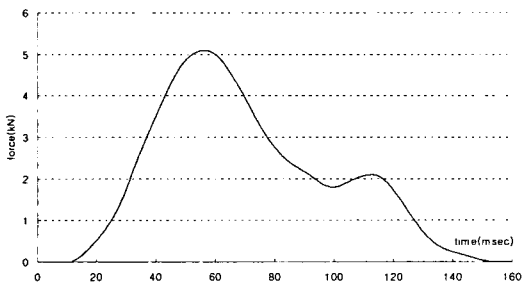


Fig. 9 Determined belt load in the systems analysis at the first cycle of MDOIS

체 비용이 전체 설계비용에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

시스템해석은 5번의 반복을 통해 수렴하였다. 첫번째 사이클에서의 시스템해석 결과가 Fig. 8과 Fig. 9에 있다. 각각 등반이의 회전 강성과 안전띠에 의한 하중을 나타낸다. 식 (4)를 최소화하기 위해 민감도 기반 최적화를 사용하였으며, 이를 위해 승객거동해석의 결과들은 순차적 반응표면법(incrementally refined Response Surface Method)으로 근사화하였다.⁽¹⁴⁾ 결정된 등반이의 회전 강성은 승객거동 하부시스템으로 전달되고 안전띠 장착점의 변위는 구조 하부시스템으로 전달되어 각 분야의 입력으로 사용된다.

4.2 구조분야와 승객거동분야에서의 독립적인 최적설계

4.2.1 각 하부시스템의 최적화를 위한 정식화

각 하부시스템은 시스템해석에서 전달받은 연성변수값을 고정된 입력으로 하여 각각의 최적화를 독립적으로 수행한다. 구조 하부시스템에서의 설계는 다음과 같은 문제를 푸는 것이다.

Find x_S for a given belt load (5a)

to minimize weight (5b)

Table 1 Details of the design variables in structure subspace and occupant subspace

	Structure subspace	Occupant subspace
DV1	Thickness of lower right recliner	Scale factor for the force-displacement curve profile of a shear capsule
DV2	Thickness of upper right recliner	Scale factor for the force-displacement curve profile of a ball sleeve
DV3	Thickness of upper left recliner	Scale factor for the force-displacement curve profile of an energy absorbing steering column
DV4	Thickness of lower left recliner	Scale factor for the mass-flow rate of an airbag
DV5	Thickness of left back frame	Scale factor for the force-displacement curve profile of a seat belt
DV6	Thickness of right back frame	

subject to $g_1 = \Delta d_{\text{anchor}} \leq 200\text{mm}$ (5c)

승객거동 하부시스템에서의 설계는 다음과 같은 문제를 푸는 것이다.

Find x_O for a given force-displacement curve profile of the seat back frame (6a)

to minimize HIC (6b)

subject to $g_1 = \Delta d_{\text{steering}} \leq 120\text{mm}$ (6c)

$g_2 = HIC \leq HIC^0$ (6d)

$g_3 = G_{\text{chest}} \leq G_{\text{chest}}^0$ (6e)

두 하부시스템에 사용된 설계변수와 제한조건은 3.3절에서 설명하였다. 여기서 각 하부시스템이 독립적으로 각각의 목적함수를 최소화하기 때문에 식 (2b)와 같은 가중치를 사용할 필요가 없는 것을 주목할 만하다. 각 하부시스템을 실제로 최적화하기 위해 순차적 반응표면법을 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 각 해석에서 얻은 결과는 미분가능할 정도로 매끄럽지가 않기 때문에 해석 결과를 직접 민감도 기반 최적화에 이용할 수 없다. 이 경우 실험계획법이나 기타 민감도에 기반하지 않은 설계법을 선택할 수 있다. 하지만 민감도 기반의 최적화는 일단 정식화가 의미있게 되어있고 미분가능한 반응을 사용할 수 있다면 매우 빠른 답을 준다. 때문에 이 연구에서는 반응표면법을 사용하여 응답을 매끄럽게 근사화한 후 민감도 기반 최적화를 통해 최적설계를 수행하였다.

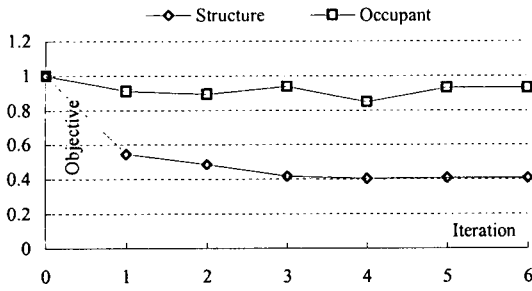


Fig. 10 Design histories of each objective functions

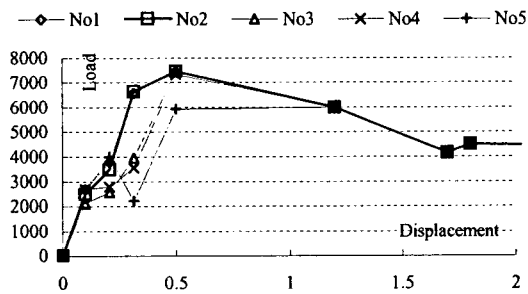


Fig. 11 Force-displacement curve profile history of the seat back through the entire cycles of MDOIS

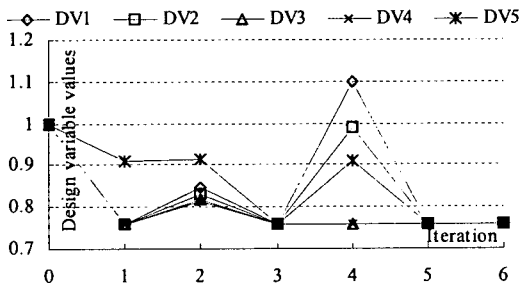


Fig. 12 Design variable history of occupant subspace

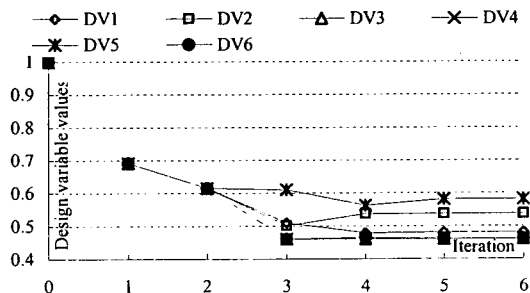


Fig. 13 Design variable history of structure subspace

4.2.2 안전띠 일체형 의자의 설계 결과

6사이클만에 해는 수렴하였다. Fig. 10은 각 하부시스템의 목적함수의 수렴이력이다. 목적함수값의 크기가 서로 다른 범위에 있기 때문에 초기치를 1로 정규화하였다. Fig. 11은 등받이의 회전 강성의 이력을 보이고 있다. Fig. 12와 Fig. 13은 각 하부시스템의 설계이력으로 초기치를 1로 정규화하였다. 자세한 설계변수는 Table 1에 있다. Fig. 12에서 승객거동 하부시스템의 모든 설계변수가 0.75로 수렴하였는데 이는 설계변수의 하한치에 도달했기 때문이다. 설계 결과는 승객의 머리 상해치와 의자의 중량을 동시에 줄이면서 명시된 제한조건을 모두 만족하였다

5. 결론

다분야통합최적설계 알고리즘 중의 하나인 독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계기법을 차량을 충돌을 고려한 안전띠 일체형 의자의 설계에 적용하였다. 저자들은 설계문제를 구성하는 여러 하부시스템들이 서로 독립적으로 작용하고 오직 연성변수만이 각각의 독립된 하부시스템을 연결하는 설계문제를 종종 발견하였다. 이 논문의 예도 그런 경우이다. 설계문제에 포함된 연성문제를 해결하기 위해 시스템해석 단계를 도입하였다. 전체 설계 비용 중에서 시스템해석의 비용이 차지하는 부분을 줄이기 위해 고가의 비선형 구조해석 횟수는 가급적 줄이고 저렴한 승객거동해석을 자주 수행하였다. 연성변수값을 구하기 위해 고정점 반복법이나 뉴턴-랩슨 방법을 사용하기가 현실적으로 어렵기 때문에 민감도에 기반한 최적화 기술을 사용하였다. 시스템해석에서 결정된 연성변수값들은 각 하부시스템에 전달되어 각 하부시스템의 고정된 입력구실을 한다. 각 하부시스템의 최적화는 해석 결과의 성격상 미분가능하지 않기 때문에 반응표면법을 사용하여 미분가능하도록 근사화하였다.

독립적 하부시스템에 기초한 다분야통합최적설계기법은 다른 다분야통합최적설계 알고리즘에 비해 비교적 간단한 구조를 가지고 있어 적용이 편리하다. 그러나 본문에서 지적하였듯이, 이 기법을 사용하기 위해서는 다루고자 하는 설계 문제가 만족해야할 선결 조건들이 있어 그 적용성의 한계가 분명히 있다. 그런데 본문에서 언급한 조건들을 만족하지 않는 설계문제도 수치적으로는 좋은 해를 얻는 경우를 저자들은 종종 경험하였다. 따라서 본문에서 언급한 조건들을 만족하지 않는 설계 문제에 대한 이론적인 연구가 필요

하다. 또, 이 연구에서의 최적해를 얻는 과정이 다른 다분야통합최적설계기법과 비교하여 어느 정도 효율적인지를 가늠할 수 있는 척도가 아직 없다. 그러므로 이 연구에서 사용된 기법의 효율성을 측정할 수 있는 척도를 개발하는 것도 필요하다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Cramer, E. J., Dennis J. E. Jr., Frank, P. D., Lewis, R. M. and Shubin, G. R., 1993, "Problem Formulation for Multidisciplinary Optimization," *Center for Research on Parallel Computation, Rice Univ.*, Rept. CRPC-TR93334.
- (2) Hulme, K. F. and Bloebaum, C. L., 1997, "A Comparison of Solution Strategy for Simulation-Based Multidisciplinary Design Optimization," *Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 38th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA-97-4977.
- (3) Sobieszczanski-Sobieski, J., 1988, "Optimization by Decomposition: A Step from Hierarchic to Non Hierarchic Systems," *Recent Advances in Multidisciplinary Analysis and Optimization*, NASA CP 3031.
- (4) Braun, R.D., 1996, "Collaborative Optimization: An Architecture for Large-Scale Distributed Design," Ph.D. Dissertation, Stanford University.
- (5) Sobieski, I.P. and Kroo, I., 1996, "Collaborative Optimization Applied to an Aircraft Design Problem," *Proceedings of AIAA Aerospace Sciences Meeting*, AIAA-96-0715.
- (6) Sobieszczanski-Sobieski, J., Agte, J. and Sandusky, R. Jr., 1998, "Bi-Level Integrated System Synthesis," *Proceedings of AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, AIAA-98-4916.
- (7) Shin, M.K. and Park, G.J., 2004, "Mathematical Validation of Multidisciplinary Design Optimization Based on Independent Subspaces," *Transactions of KSME(A)*, Vol. 28, No. 2, pp. 109~117.
- (8) Yang, W. H., Park, Y. S., Park, G. J., Park, S. H. and Lee, H. J., 1999, "Frontal and Rear Crash Analyses and Design of a Belt Integrated Seat for Occupant Safety," *Transactions of KSAE*, Vol. 7, No. 4, pp. 295~310.
- (9) Shin, M.K., Park, K. J. and Park, G.J., 1999, "Occupant Analysis and Seat Design to Reduce the Neck Injury for Rear End Impact," *Transactions of KSAE*, Vol. 7, No. 9, pp. 182~194.
- (10) Shin, M.K., Hong, S.W. and Park, G.J., 2001, "Axiomatic Design of the Motor Driven Tilt/Telescopic Steering System for Safety and Vibration." *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part D, J. Automobile Engineering*, Vol. 215, No. D2, pp.179~187.
- (11) Lim, J. M., 1997, "Software Development for the Occupant Crash Analysis and Recommendation for the Related Part Design," *Ph.D. Thesis*, Hanyang University.
- (12) Harry, G., 1998, *Articulated Total Body Model Enhancements: User's Guide*, Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory.
- (13) Livermore Software Technology Corporation, 1998, *LS-Dyna User's Manual*.
- (14) VR&D, 2001, *VisualDOC User's Manual*.