

< 논문 >

## 공통설계변수를 고려한 독립적하부시스템에 의한 다분야통합최적설계

신정규<sup>†</sup> · 박경진<sup>\*</sup>

(2006년 9월 29일 접수, 2007년 1월 29일 심사완료)

### Multidisciplinary Design Optimization Based on Independent Subspaces with Common Design Variables

Jung-Kyu Shin and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Multidisciplinary Design Optimization(다분야통합최적설계), Common Design Variable  
(공통설계변수), Flow Pattern Design(유로안정기설계)

#### Abstract

Multidisciplinary design optimization based on independent subspaces (MDOIS) is a simple and practical method that can be applied to the practical engineering MDO problems. However, the current version of MDOIS does not handle the common design variables. A new version of MDOIS is proposed and named as MDOIS/2006. It is a two-level MDO method while the original MDOIS is a single-level method. At first, system analysis is performed to solve the coupling in the analysis. If the termination criteria are not satisfied, each discipline solves its own design problem. Each discipline in the lower level solves the problem with common design variables while they are constrained by equality constraints. In the upper level, the common design variables of related disciplines are determined by using the optimum sensitivity of the objective function. To validate MDOIS/2006, mathematical problem and NASA test bed problem are solved. The results are compared with those from other MDO methods. Finally, MDOIS/2006 is applied to flow patterner design and shows that it can be successfully applied to the practical engineering MDO problem.

#### 1. 서론

최근 들어 공학시스템은 거대해지고 복잡해졌다. 설계자는 이러한 공학시스템을 효율적으로 설계하고자 노력을 한다. 다분야통합최적설계는 거대한 공학시스템을 효과적으로 다룰 수 있는 설계방법론이라 할 수 있다.<sup>(1)</sup> 다분야통합최적설계는 다루는 분야(discipline)가 여러 개 존재하게 되므로 계산비용의 감소와 설계문제를 효율적으로 구성하는 것이 중요하다. 특히 효율적인 설계문제를 구성하고자 다양한 방법론들이 제안되었고 관련 연구가 진행 중이다.

기본적인 다분야통합최적설계 방법론으로는

MDF(multidisciplinary feasible)방법<sup>(2)</sup>이 있다. 기존의 단일분야의 최적설계와 유사하게, 고려하는 여러 분야를 거대한 하나의 분야로 다룬다. 이를 위하여 시스템해석(system analysis)을 구성하고 설계에 이용한다. 이 방법은 개념적으로 간단하지만, 시스템해석을 효율적으로 구성해야 하고 설계변경을 위해 매번 고가의 시스템해석을 수행해야 한다. MDF와 달리 고가의 시스템해석을 구성하지 않는 IDF(individual discipline feasible) 방법<sup>(3)</sup>이 있다. 각 분야간의 연성을 설계문제에 포함시켜 설계가 종료되는 시점에서 시스템해석을 수행한 것과 같이 각 분야간의 연성이 해결된다. 한편 AAO(all-at-once)방법<sup>(3)</sup>은 Haftka가 제안한 SAND(simultaneous analysis and design)를 다분야 통합최적설계에 적용한 것이다. 이 방법의 특징은 각 분야의 해석문제 및 시스템해석을 설계문제에 포함시킨 것이다.

앞서 설명한 방법들의 특징은 각 분야의 역할이

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 두산엔진(주) 기술연구소  
E-mail : comshin@doosanengine.com  
TEL.: (031)400-4065, FAX: (031)408-6190

<sup>\*</sup> 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

해석이나 평가(evaluation)라는 점이고, 각 분야의 설계문제는 통합되어 하나의 거대한 설계문제로 풀리게 된다. 거대한 설계문제를 나눠서 각 분야가 자신의 설계를 수행하도록 고려한 다분야통합최적설계 방법론들이 제안되었는데, CSSO(concurrent subspace optimization),<sup>(2)</sup> BLISS(bi-level integrated system synthesis),<sup>(4)</sup> CO(collaborative optimization)<sup>(5)</sup> 그리고 독립적하부시스템에 의한 다분야통합최적설계(multidisciplinary design optimization based on independent subspaces; MDOIS)<sup>(6)</sup>가 있다. 이러한 방법들에 대하여 원래 제안된 방법을 개선하려는 연구와 함께 실제 적용사례를 찾으려는 노력이 활발하다.

특히 MDOIS는 실용적인 다분야통합최적설계 방법으로 평가되고 있다.<sup>(7)</sup> 실제 공학문제에도 적용이 용이한 것으로 판단되며 그러한 예로 안전띠 일체형의자설계<sup>(8)</sup>와 박판주조를설계<sup>(9)</sup>가 있다. 안전띠일체형 의자설계문제는 구조분야와 충돌분야의 두 분야를, 박판주조를설계는 구조분야와 유동분야를 고려한 문제이다.

현재 제안된 MDOIS는 설계문제가 각 분야로 독립적으로 나뉜 경우를 고려한 방법이다. 실제로 많은 공학문제들이 물리적으로 나뉘어져 있으며 독립적으로 설계가 가능하다. 그러나 다분야통합최적설계문제는 이처럼 각 분야의 설계문제로 독립적으로 나뉘질 수 없는 경우가 있을 수 있다. 그 대표적인 예로 특정 분야들이 고려하고자 하는 설계변수가 같은, 즉 공통설계변수가 존재하는 경우를 들 수 있다. 공통설계변수가 존재하는 설계문제는 각 분야의 설계문제로 나누는 것이 쉽지 않으므로 이에 대한 개선이 필요하다.

다른 다분야통합최적설계 방법론인 MDF, IDF, AAO는 설계문제를 하나로 다루기 때문에 이러한 문제점은 발생하지 않는다. 이에 대하여 각 분야가 설계권한을 가지도록 허용한 다분야통합최적설계 방법론들 중에서 CO와 BLISS는 서로 다른 방식으로 이를 고려한다. 먼저 CO에서는 각 분야가 공통설계변수를 변화시킬 수 있으나, 상위단계의 설계문제에서 정해진 공통설계변수에 대한 목표치를 최대한 만족시키기 위해 노력한다. 이에 비해 BLISS는 각 분야에서 공통설계변수를 상수로 고정하여 설계문제를 풀고, 각 분야의 설계결과를 토대로 공통설계변수를 결정하는 상위단계의 문제를 풀게 된다.

본 연구에서는 기존의 MDOIS가 가지는 방법의 간단함을 유지하면서 공통설계변수를 고려할 수 있는 방법을 제안하고, 이전의 MDOIS와 구분하기 위하여 MDOIS/2006으로 부르기로 한다. MDOIS가 단단계(one-level)방법론인데 비하여 MDOIS/2006은 이단계(two-level)방법론이다. 즉 하위단계에서는 각 분야가 자신만의 설계문제를 풀고 상위 단계에서는

특정 분야의 공통설계변수를 취급하게 된다. 먼저 각 분야의 연성을 해결하기 위한 시스템해석을 수행한다. 수렴조건을 판단하고, 만족하지 않으면 각 분야는 자신의 설계문제를 푼다. 특히 공통설계변수와 관련된 각 분야는 공통설계변수를 지역설계변수처럼 다루되, 공통설계변수가 가졌던 초기값을 유지할 수 있도록 등제한조건을 추가한다. 이렇게 함으로써 공통설계변수를 다루게 되는 상위단계의 설계문제가 요구하는 최적민감도는 각 분야에 추가된 등제한조건에 대한 라그랑지승수만으로 표현되므로 최적민감도를 구하는 추가과정이 요구되지 않는다. 상위단계에서 결정한 공통설계변수와, 각 분야에서 결정한 지역설계변수는 다음 설계과정의 시스템해석에서 이용한다. 시스템해석의 결과로 목적함수의 변화에 대한 수렴조건을 판단하게 되며, 이러한 일련의 과정은 수렴조건을 만족할 때까지 반복된다.

다음 장에서는 기존의 MDOIS를 간략히 살펴보고 이어 공통설계변수를 고려한 MDOIS/2006을 설명한다. 4장에서는 수학과제와 다분야통합 최적 설계 테스트베드문제를 통하여 기존의 다분야통합 최적설계방법론과 비교하고 MDOIS/2006의 특징을 살펴본다. 5장에서는 제안한 방법을 실제 다분야통합최적설계문제인 유로안정기설계에 적용하고 그 결과를 고찰하였다.

## 2. 독립적하부시스템에 의한 다분야통합최적설계

독립적하부시스템에 의한 다분야통합최적설계(MDOIS)는 시스템해석을 통하여 각 분야의 연성을 해결하고, 각 분야가 자신의 설계문제를 다루도록 한 방법이다. MDOIS를 간단히 설명하기 위하여 식 (1)의 설계문제를 고려하자.

$$\text{Find } \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2 \quad (1a)$$

$$\text{to minimize } f_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{z}_1) + f_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{z}_2) \quad (1b)$$

$$\text{subject to } \mathbf{g}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{z}_1) \leq 0 \quad (1c)$$

$$\mathbf{g}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{z}_2) \leq 0 \quad (1d)$$

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{h}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{z}_1^c) \quad (1e)$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{h}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{z}_1^c) \quad (1f)$$

여기서  $\mathbf{b}$ ,  $f$  그리고  $\mathbf{g}$  는 각각 설계변수벡터, 목적함수 그리고 제한조건벡터이다.  $\mathbf{z}_i$  는  $i$  분야의 해석기( $\mathbf{h}_i$ )로부터 얻을 수 있는 상태변수벡터(state variable vector)이다. 하첨자 1과 2는 1번 분야와 2번 분야를 의미한다. 위첨자 c는 연성을 의미하는데, 예를 들어  $\mathbf{z}_1^c$  는 1번 분야의 해석기  $\mathbf{h}_1$  에서 얻은 상태변수  $\mathbf{z}_1$  중에서 2번 분야의 해석기  $\mathbf{h}_2$  의 해석에 필요한 연성변수이다.

다분야통합최적설계문제가 식 (1)과 같이 구성되면 MDOIS를 적용할 수 있으며 그 흐름도를 Fig. 1에

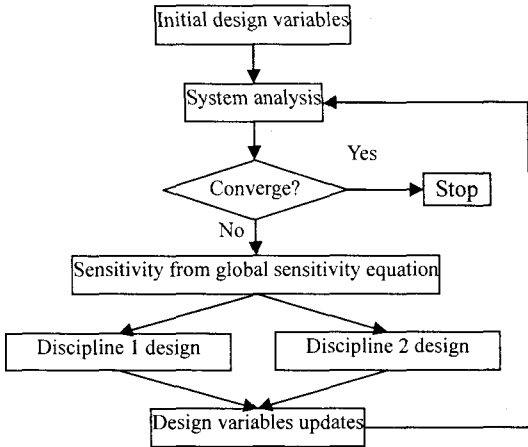


Fig 1. Flowchart of MDOIS

나타내었다. 먼저 시스템해석을 수행하여 두 분야의 연성변수를 찾는다. 수렴조건을 판단하여 계속 설계를 수행할 필요가 있으면 각 분야에서 설계를 수행한다. 전역민감도(global sensitivity)를 얻을 수 있다면 이를 이용하여 각 분야의 연성변수를 각 분야의 설계변수에 대하여 선형 근사화하여 고려한다. 그러나 이것은 MDOIS의 필요사항은 아니다.

시스템해석을 통하여 분야간의 연성변수를 해결하였다. 설계문제는 각 분야의 지역적인 특성을 가지고 있다. 따라서 식 (1)은 각 분야에 대하여 식 (2)와 같이 나뉘질 수 있다.

(1) 1 번 분야의 설계문제

$$\begin{aligned} \text{Given} & \quad \mathbf{z}_2^c & (2a) \\ \text{find} & \quad \mathbf{b}_1 & (2b) \\ \text{to minimize} & \quad f_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{z}_1) & (2c) \\ \text{subject to} & \quad \mathbf{g}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{z}_1) \leq 0 & (2d) \\ & \quad \mathbf{z}_1 = \mathbf{h}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{z}_2^c) & (2e) \end{aligned}$$

(2) 2 번 분야의 설계문제

$$\begin{aligned} \text{Given} & \quad \mathbf{z}_1^c & (2f) \\ \text{find} & \quad \mathbf{b}_2 & (2g) \\ \text{to minimize} & \quad f_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{z}_2) & (2h) \\ \text{subject to} & \quad \mathbf{g}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{z}_2) \leq 0 & (2i) \\ & \quad \mathbf{z}_2 = \mathbf{h}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{z}_1^c) & (2j) \end{aligned}$$

여기서  $\mathbf{z}_1^c$  과  $\mathbf{z}_2^c$  는 연성변수이다. 이 값은 각 분야의 설계과정에서 상수로 간주되는데, 앞서 언급하였듯이 전역민감도가 있다면 각 분야의 설계변수에 대하여 식 (3)과 같이 선형 근사화하여 다룰 수 있다.

$$\mathbf{z}_1^c = \mathbf{z}_{10}^c + (d\mathbf{z}_1^c / d\mathbf{b}_2) \Delta \mathbf{b}_2 \quad (3a)$$

$$\mathbf{z}_2^c = \mathbf{z}_{20}^c + (d\mathbf{z}_2^c / d\mathbf{b}_1) \Delta \mathbf{b}_1 \quad (3b)$$

여기서  $\mathbf{z}_{10}^c, \mathbf{z}_{20}^c$  는 시스템해석을 통하여 얻어진 값이며, 전역민감도  $d\mathbf{z}_1^c / d\mathbf{b}_2$  와  $d\mathbf{z}_2^c / d\mathbf{b}_1$  를 이용할 수 없다면, 각 분야는 시스템해석에서 얻어진 값인  $\mathbf{z}_{10}^c, \mathbf{z}_{20}^c$  를 이용한다. 한편 MDOIS는 최적해를 찾게 되면 MDF로 풀었을 때와 해가 같다는 것이 증명되었다.<sup>(6)</sup>

### 3. 공통설계변수를 고려한 독립적 하부시스템에 의한 다분야통합최적설계

식 (4)는 MDOIS/2006이 고려하는 설계문제이며 식 (1)과 달리 공통설계변수벡터  $\mathbf{b}_c$ 가 존재한다.

$$\text{Find} \quad \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c \quad (4a)$$

$$\text{to minimize} \quad f_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_1) + f_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_2) \quad (4b)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{g}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_1) \leq 0 \quad (4c)$$

$$\mathbf{g}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_2) \leq 0 \quad (4d)$$

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{h}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_2^c) \quad (4e)$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{h}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_1^c) \quad (4f)$$

식 (4)를 MDOIS/2006에서 다루기 위하여 각 분야의 설계문제는 식 (5)와 같다.

(1) 1 번 분야의 설계문제

$$\text{Given} \quad \mathbf{z}_2^c, \mathbf{p} \quad (5a)$$

$$\text{Find} \quad \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c \quad (5b)$$

$$\text{to minimize} \quad f_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_1) \quad (5c)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{g}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_1) \leq 0 \quad (5d)$$

$$\mathbf{b}_c - \mathbf{p} = 0 \quad (5e)$$

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{h}_1(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_2^c) \quad (5f)$$

(2) 2 번 분야의 설계문제

$$\text{Given} \quad \mathbf{z}_1^c, \mathbf{p} \quad (5g)$$

$$\text{find} \quad \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c \quad (5h)$$

$$\text{to minimize} \quad f_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_2) \quad (5i)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{g}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_2) \leq 0 \quad (5j)$$

$$\mathbf{b}_c - \mathbf{p} = 0 \quad (5k)$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{h}_2(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_c, \mathbf{z}_1^c) \quad (5l)$$

여기서 파라미터  $\mathbf{p}$  는 이전 설계과정(design cycle)에서 결정된 공통설계변수벡터 값이다. 식 (5e)와 (5k)는 공통설계변수가 이전 설계과정에서 결정된 설계변수 값을 가지도록 부여한 등제조건이다. 비록 등제조건과 공통설계변수가 각 분야에 추가되지만, 이로 인해 MDOIS/2006은 상위단계에서 요구되는 최적민감도를 구하는 별도의 과정이 요구되지 않으므로 기존의 MDOIS가 가지는 방법의 간단함이 유지된다. 각 분야의 설계문제인 식 (5)를 풀고 나면, 각 분야에서는 지역설계변수벡터의 최적값인  $\mathbf{b}_1^{opt}$ ,

$b_2^{opt}$  와 추가된 등제한조건인 식 (5e)와 (5k)에 대한 라그랑지 승수  $\lambda_1$  과  $\lambda_2$  를 얻을 수 있다.

상위단계에서는 하위단계에서 고정된 공통설계 변수를 변화시키며 이를 위해 식 (6)을 풀게 된다.

$$\text{Find } p \tag{6a}$$

$$\text{to minimize } f_1^{opt} + f_2^{opt} \tag{6b}$$

여기서  $f_1^{opt}$  과  $f_2^{opt}$  는 각 분야의 최적목적수이다.

식 (7)을 풀기 위하여 파라미터  $p$  에 대한 목적함수의 최적민감도가 요구된다. 제약함수의 민감도정리에 따르면 이 값은 식 (7)과 같이 추가된 등제한조건에 대한 라그랑지승수가 된다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{df_1^{opt}}{dp} = -\lambda_1 \tag{7a}$$

$$\frac{df_2^{opt}}{dp} = -\lambda_2 \tag{7b}$$

식 (7)의 최적민감도를 이용하여 식 (6)을 풀게 되면 공통설계변수에 대한 최적해를 얻을 수 있으며, 식 (5)의 결과인 지역설계변수와 함께 다음 설계과정의 시작인 시스템해석에 사용된다. 이러한 일련의 과정을 Fig. 2 에 나타내었다.

한편 모든 설계변수에 대하여 이동한계(move limit)가 요구된다. 그 이유는 각 분야의 설계 시, 다른 분야의 지역제한조건이나 목적함수를 고려하지 않기 때문에 특정 분야에서의 과도한 설계변수 변화는 다음 설계과정에서 제한조건의 과도한 위배 또는 설계해가 진동하여 수렴하지 못함을 방지하기 위함이다. 이동한계전략은 단일분야의 최적설계에서는 비교적 다양한 연구<sup>(11-13)</sup>가 수행되었다. 그러나 다분야통합최적설계에서는 이를 적절히 결정하려는 연구가

필요하다. 본 연구에서는 초기 이동한계 값에 대하여 시스템해석 후에 제한조건의 상태를 보고 제한조건이 활성화 근처에 도달하면 일정량 감소하도록 하였다. 수렴조건으로는 제한조건을 만족하면서 목적함수 변화율로 선정하였다.

#### 4. 수확문제 및 NASA 테스트 베드 문제

앞서 제안한 MDOIS/2006의 효율성을 알아보기 위하여 인위적으로 만든 수확문제와 NASA 테스트 베드 문제 2가지(감속기문제와 전력변환기 문제)를 풀어 보았다. 모든 예제에서 두 개 분야가 존재함을 가정하고 기존의 MDOIS와 비교하였다. 특히 전력변환기문제에서는 공통설계 변수를 다루는 다분야통합최적설계 방법인 CO와 BLISS의 결과도 비교하였다. 모든 예제들을 MDF로 풀어 보았으며 이는 다른 방법들이 풀어 놓은 해의 질을 판단하는 기준으로 삼았다. 모든 예제에서 이동한계는 특별히 언급이 없는 한 초기이동한계는 30%이며, 시스템해석 후에 제한 조건의 만족 또는 위배량이 30%보다 적으면 이동한계감소율을 30%로 하였다.<sup>(12)</sup> 수확문제는 IDESIGN<sup>(14)</sup>의 RQP방법으로, NASA 테스트 베드 문제는 DOT<sup>(15)</sup>의 SQP를 사용하였다.

##### 4.1 수확문제 1

식 (8)은 MDOIS/2006의 유용성을 보여주기 위하여 인위적으로 만든 수확예제이다.

$$\text{Find } b_1, b_2, b_c \tag{8a}$$

$$\text{to minimize } f = f_1 + f_2 = (z_{12} - 0.5)^2 + (z_{22} - 0.5)^2 \tag{8b}$$

$$\text{subject to } g_1 = 1.0 - z_{12} \leq 0.0 \tag{8c}$$

$$g_2 = 1.0 - z_{22} \leq 0.0 \tag{8d}$$

$$z_{11}^c = (b_1 - 2.5)^2 + (b_c - 2.0)^2 - 0.4z_{21}^c \tag{8e}$$

$$z_{12} = (b_1 - 2.5)^2 + (b_c - 2.0)^2 - 0.5z_{21}^c \tag{8f}$$

$$z_{21}^c = (b_2 - 3.0)^2 + (b_c)^2 - 0.6z_{11}^c \tag{8g}$$

$$z_{22} = (b_2 - 3.0)^2 + (b_c)^2 - 0.7z_{11}^c \tag{8h}$$

여기서  $z_{ij}$  는  $i$ -번째 분야에서의  $j$ -번째 상태변수이다. 위첨자  $c$ 와 아래첨자  $c$ 는 각각 연성변수와 공통설계변수를 의미한다.

식 (8)은 공통설계변수가 존재하는 문제이므로 MDOIS/2006로 풀어본 결과와 기존의 MDOIS로 풀어본 결과를 비교한다. MDOIS와 MDOIS/2006 으로 문제를 풀기 위해서는 각 분야에 대한 설계문제를 구성해야 한다. 여기서는  $f_1, g_1$  그리고  $b_1$  은 1번 분야에서,  $f_2, g_2$  그리고  $b_2$  는 2번 분야에서 다루었다. 특히 MDOIS 적용시 공통설계변수  $b_c$  를 1번 또는 2번 분야의 지역설계변수로 다루어보고 그 결과를

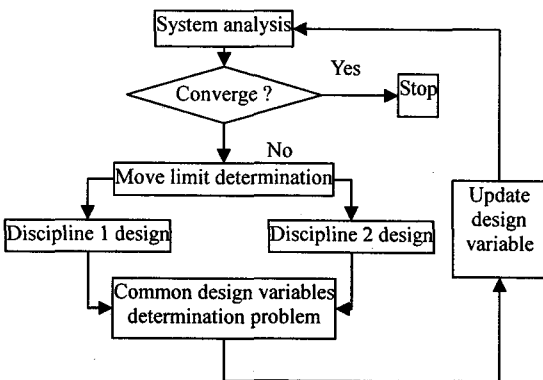


Fig. 2 Flowchart of MDOIS/2006

**Table 1** Optimization results in mathematical example 1 for MDO methods

	Initial	MDF	MDOIS <sup>1</sup>	MDOIS <sup>2</sup>	MDOIS/2006
$f$	6.348E+02	5.000E-01	2.380E+02	9.393E+00	1.143E+00
$f_1$	2.859E+00	2.500E-01	2.549E-01	9.141E+00	2.527E-01
$f_2$	6.319E+02	2.500E-01	2.378E+02	2.524E-01	8.900E-01
$b_1$	5.000E+00	3.296E+00	4.548E+00	4.548E+00	3.738E+00
$b_2$	5.000E+00	2.165E+00	3.000E+00	3.002E+00	3.000E+00
$b_3$	5.000E+00	1.039E+00	4.214E+00	1.888E+00	1.501E+00
Function calculation		1152	110	178	271

Remark: MDOIS<sup>1</sup> and MDOIS<sup>2</sup> mean that the common design variable is allocated to discipline 1 and 2, respectively.

비교하였다.

Table 1에 수학예제 1의 결과를 정리하였다. 이 문제의 최적목적함수는 0.5이며 MDF방법이 최적해를 찾았다. 이에 비해 MDOIS와 MDOIS/2006은 MDF방법 만큼의 최적해를 얻지는 못했으나, 초기 설계에 대해 개선된 해를 얻을 수 있었다. 기존의 MDOIS는 세가지 방법의 결과 중에 가장 나쁜 결과를 주었다. 그 이유는 공통설계변수를 1번 또는 2번 분야에서만 다뤘기 때문으로 보인다. Table 1에서 알 수 있듯이, 공통설계변수를 다른 분야의 목적함수는 MDF의 결과인 0.25에 가깝다. 그러나 다루지 않는 분야의 목적함수는 0.25에서 멀다. 이에 비하여 MDOIS/2006은 1번과 2번 분야를 모두 고려하여 최적화하기 때문에 두 분야의 목적함수를 MDOIS에 비해 효율적으로 고려할 수 있음을 알 수 있다. 함수호출수는 MDF가 가장 많았다. 이는 MDOIS와 MDOIS/2006은 MDF와 달리 설계 과정 중에 매번 시스템해석을 실시하지 않고 각 분야의 설계시에는 해당분야의 해석만 실시하고 이들의 결과를 취합하여 시스템해석을 수행함으로써 함수호출수가 낮게 나타난 것이다.

4.2 수학문제 2 - 기어감속기 설계문제

이 예제는 NASA 테스트 베드 문제로 기어감속기(speed reducer)설계문제<sup>(16)</sup>로 알려져 있으며 정식화는 식 (9)와 같다.

Find  $b_i, i = 1, 2, \dots, 7$  (9a)

to minimize (9b)

$$f_1 + f_2 = 0.7854b_1b_2^2(3.3333b_3^2 + 14.9334b_3 - 43.0934) - 1.5079(b_6^2 + b_7^2)b_1 + 7.477(b_6^3 + b_7^3) + 0.7854(b_4b_6^2 + b_5b_7^2)$$

subject to  $g_1 = 27 / b_1b_2^2b_3 - 1.0 \leq 0$  (9c)

$g_2 = 397.5 / b_1b_2^2b_3^2 - 1.0 \leq 0$  (9d)

$g_3 = 1.93b_4^3 / b_2b_3b_6^4 - 1.0 \leq 0$  (9e)

$g_4 = 1.93b_5^3 / b_2b_3b_7^4 - 1.0 \leq 0$  (9f)

$g_5 = \sqrt{(745^2b_4^3) / (b_2^2b_3^2) + 0.169 \times 10^9} / (1100 \times 0.1b_7^3) - 1.0 \leq 0$  (9g)

**Table 2** Optimization results in mathematical example 2 for MDO methods

	Initial	MDF	MDOIS	MDOIS/2006 <sup>1</sup>	MDOIS/2006 <sup>2</sup>
$f$	2.798E+03	2.816E+03	2.816E+03	2.855E+03	2.816E+00
$b_1$	3.000E+00	3.500E+00	3.500E+00	3.599E+00	3.501E+00
$b_2$	7.000E-01	7.000E-01	7.000E-01	7.000E-01	7.000E-01
$b_3$	1.700E+01	1.700E+01	1.700E+01	1.700E+01	1.700E+01
$b_4$	7.300E+00	7.300E+00	7.300E+00	7.300E+00	7.300E+00
$b_5$	7.715E+00	7.400E+00	7.400E+00	7.400E+00	7.400E+00
$b_6$	3.350E+00	3.352E+00	3.350E+00	3.350E+00	3.350E+00
$b_7$	5.287E+00	5.000E+00	5.000E+00	5.000E+00	5.000E+00
Function calculation		110	50	37	67

Remark: MDOIS/2006<sup>1</sup>: initial move limit = 0.5, move limit reduction ratio = 0.3  
MDOIS/2006<sup>2</sup>: initial move limit = 0.65, move limit reduction ratio = 0.2

$g_6 = \sqrt{(745^2b_4^3) / (b_2^2b_3^2) + 0.1575 \times 10^9} / (850 \times 0.1b_7^3) - 1.0 \leq 0$  (9h)

$g_7 = b_2b_3 / 40 - 1.0 \leq 0$  (9i)

$g_8 = 5.0b_2 / b_1 - 1.0 \leq 0$  (9j)

$g_9 = b_1 / (12.0b_2) - 1.0 \leq 0$  (9k)

$g_{10} = (1.5b_6 + 1.9) / b_4 - 1.0 \leq 0$  (9l)

$g_{11} = (1.1b_7 + 1.9) / b_5 - 1.0 \leq 0$  (9m)

1번 분야에서는  $b_2, b_3, f_1, g_1, g_2, g_7, g_8, g_9$  을, 2번 분야에서는  $b_4, b_5, b_6, b_7, f_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_{10}, g_{11}$  을 고려한다. 공통설계변수는  $b_1$  으로 하고 MDOIS에서는 이를 1번 분야에서 고려하였다. MDF, MDOIS, MDOIS/2006으로 풀이본 결과, 최적목적함수가 모두 동일하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

특히, MDOIS/2006은 초기 이동한계와 이동한계 감소율을 두 가지 경우(Table 2에서 MDOIS/2006<sup>1</sup>과 MDOIS/2006<sup>2</sup>)에 대하여 풀어보았다. 초기 이동한계를 0.65로 하고 이동한계 감소율을 0.2로 하면 MDF와 MDOIS의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 함수호출수는 MDF가 가장 많았다. 따라서 이동 한계가 MDOIS/2006의 최적목적함수에 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있었다. 앞서 언급하였듯이 이동 한계는 각각의 설계문제에 맞게 설계자가 결정할 필요가 있다.

4.3 수학문제 3 - 전력변환기 설계문제

이 예제는 NASA 테스트 베드 문제로 전력변환기(power converter)설계문제<sup>(16)</sup>이다.

Find  $b_i, i = 1, \dots, 6$  (10a)

to minimize  $f = f_1 + f_2$  (10b)

$$= \{0.78 \times 10^4 z_6(6b_6 + z_7) + 6.764 \times 10^4 b_4b_5b_6\} + \{25b_5 + 5.6818(1/z_2 - 1)\}$$

subject to (10c)

$g_1 = -2b_6|b_6| + 2.5b_2b_3 + 4 \times 10^{-3}b_6 \leq 0$  (10c)

$g_2 = -10^{-2} + 3.39 \times 10^{-10}(1 - z_3) / (b_4b_5) \leq 0$  (10d)

$g_3 = -0.3 + b_4(100 + 2.825 \times 10^{-5}(1 - z_4) / b_4) / (b_2z_6) \leq 0$  (10e)

$g_4 = -b_4 + 2.825 \times 10^{-6}(1 - z_4) \leq 0$  (10f)

**Table 3** Optimization results in mathematical example 3 for MDO methods

	MDF	BLISS	CO	MDOIS	MDOIS/2006
$f$	1.553E+00	1.509E+00	1.568E+00	1.503E+00	1.496E+00
$b_1$	1.908E-02	1.813E-02	1.936E-02	1.772E-02	1.939E-02
$b_2$	5.000E+00	5.237E+00	4.787E+00	5.473E+00	4.663E+00
$b_3$	7.290E-08	8.045E-06	7.290E-08	8.008E-06	9.991E-06
$b_4$	4.628E-06	4.990E-06	1.265E-06	5.000E-06	4.982E-06
$b_5$	5.034E-03	4.025E-03	9.834E-03	4.004E-03	3.247E-03
$b_6$	1.001E-02	9.981E-03	6.874E-03	1.000E-02	9.965E-03
Function calculation	636	107	1811	147	124

여기서 상태변수 및 파라미터는 다음과 같다.

$$z_2 = 500 / (500 + PQ + PD + POF)$$

$$PQ = 4.53025 + z_3 (19.53125 + 5.1957 \times 10^{-13} (1 - z_3)^2 / (b_4^2))$$

$$PD = 67.9622 + 1.19554 \times 10^{-7} (1 - z_3) / b_4$$

$$POF = 7.9806 \times 10^{-15} \frac{(1 - z_3)^2}{b_4^2 b_5} + 10^4 z_5 + 2.6602 \times 10^{-10} \frac{z_5 (1 - z_3)^2}{b_4^2} + 8.19619 \times 10^7 z_6 (6b_6 + z_7) \frac{z_4}{2} \Big|^{2.6}$$

$$z_3 = 0.4923 / z_2, \quad z_4 = 0.37647 / z_2, \quad z_6 = b_1^2$$

$$z_5 = 1.31024 \times 10^{-7} b_1 b_2 / b_3, \quad z_7 = b_1 \times \pi / 2$$

$$z_8 = 5.65 \times 10^{-5} (1 - z_3) / (b_2 z_6)$$

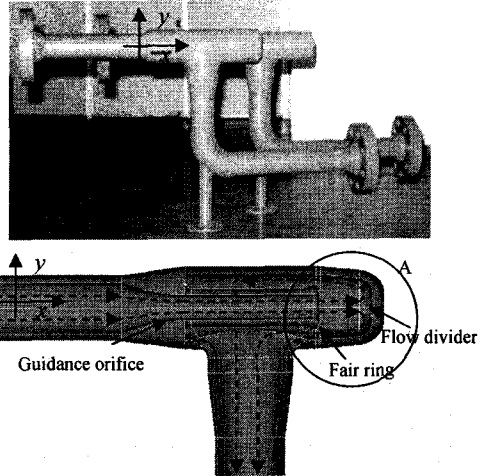
이 문제에 대하여 MDF, MDOIS, MDOIS/2006의 방법 및 BLISS, CO방법을 이용하여 풀어보았다. 1번 분야에서는  $f_1, g_1, g_3, g_4, b_1, b_2, b_3$  를, 2번 분야에서는  $f_2, g_2, b_6$ 를 다루었다. 그리고 공통설계변수는  $b_4, b_5$ 를 지정하고 MDOIS에서는 이를 2번 분야에서 고려하도록 했다. Table 3에 이 결과를 나타내었다. 이 문제에서는 MDOIS/2006이 MDF보다 좋은 목적함수 감소를 보였다. 함수호출수는 CO가 가장 많은 것으로 나타났다. 본 예제에서는 MDOIS/2006이 함수호출수도 적으면서 목적함수 감소율이 비교한 다른 다분야통합최적설계 방법에 비해 우수한 것으로 판단된다.

### 5. MDOIS/2006 을 이용한 유로안정기 설계

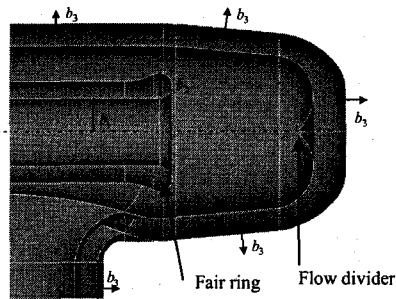
#### 5.1 유로안정기의 소개

펌프와 같은 고압의 유압장치와 연결된 배관에서 유압장치의 작동시 배관내부에는 순간적인 충격이 발생한다. 또 다른 문제는 맥동의 흐름이 발생하므로 이를 안정화시켜야 한다는 것이다. 이러한 문제점은 유압장치의 안전에 치명적인 영향을 주거나 성능 저하를 가져오는데, 이를 완화하기 위하여 오리피스를 채택한 유로안정기(flow patterner)가 개발되었다.<sup>(17,18)</sup>

Fig. 3 에는 유로안정기의 실제 제품 사진과 그 개념을 나타내었다. 점선 화살표로 유동을 표현하였고 왼쪽에서 들어와 아래쪽으로 나간다. 맥동을



**Fig. 3** Real flow patterner model (upper) and its section along x-y plane (lower)



**Fig. 4** Selection of design variables (enlargement of A in Fig. 3)

잡아 주기 위하여 안내용 오리피스(Guidance orifice)가 입구쪽에 있다. 이를 통과하면 유체의 속도가 증가하게 되며, 속도가 증가된 유체는 출구로 나가기 위하여 유체분배돌기(flow divider)를 따라서 유체가 부드럽게 흐르도록 하였다. 유체분배돌기로 인해 유체가 180 도 역회전하면서 생기는 급속한 와류현상을 완화하기 위하여 페어링(fare ring)을 장착한다. 이는 압력손실을 줄이는 효과도 얻는다.<sup>(18)</sup>

유로안정기의 용도는 열연공장에서 후판(slab)에 열을 가할 때에 생기는 산화물의 박편(scale)을 제거하기 위해 주로 사용한다.<sup>(19)</sup> 유로안정기를 펌프 토출부에 설치하여 고압의 박편제거용 물(descaling water)을 일정 감압과 함께 안정화시켜 수로로 배출시키게 된다.

#### 5.2 유로안정기의 설계 문제 정의

유로안정기의 설계문제를 유동분야와 구조분야의 두 관점에서 살펴보았다. 먼저 유동분야에서 고려할 사항은 유로안정기의 효율이며, 이를 유로안정기의 입출구 압력차로 정하였다. 이 압력차가 크면

유로안정기 내부에서 에너지손실이 크다는 것을 말하며, 또한 실제 사용에 있어서도 입구에서 가해주는 압력이 상대적으로 높아야 함을 의미한다. 구조분야에서 고려해야 할 사항으로 구조물에 작용하는 응력이 있다. 즉 유체흐름으로 인해 발생하는 압력이 하중조건이 되고 이로 인한 응력이 설계의 관심이 된다. 또 다른 고려사항은 구조물의 질량을 줄이는 것이다. 설계변수는 Fig. 4 와 같이 3 개로 선정하였다. 설계변수  $b_1$  은 오리피스에의 내경이고  $b_2$  는 페어링의 높이이다.  $b_3$  는 유로안정기의 두께를 나타낸다.

유로안정기의 설계문제는 식 (11)과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{Find } b_1, b_2, b_3 \quad (11a)$$

$$\text{to minimize } [f_1 \ f_2]^T \quad (11b)$$

$$\text{subject to } \sigma_{von} - \sigma_a \leq 0 \quad (11c)$$

$$0.019 \leq b_1 \leq 0.021 \quad (11d)$$

$$0.032 \leq b_2 \leq 0.038 \quad (11e)$$

$$0.012 \leq b_3 \leq 0.014 \quad (11f)$$

여기서  $b_1, b_2, b_3$  는 Fig. 4에 나타낸 설계변수를 의미한다.  $f_1$  은 유동분야의 목적함수로 입출구 압력차이고,  $f_2$  는 구조분야의 목적함수로 유로안정기의 질량이다.  $\sigma_{von}, \sigma_a$  는 유로안정기에 걸리는 최대응력과 현재 모델의 허용응력을 의미한다. 식 (11d)-(11f)는 설계변수의 하한치와 상한치이다.

### 5.3 시스템해석 및 설계변수의 할당

유로안정기는 유동분야와 구조분야가 서로 연성된 시스템으로 시스템해석(system analysis)을 정의해야 한다. 먼저 각 분야의 해석조건은 다음과 같다. 유동분야의 해석은 유로안정기 내부로 입구조건은 작동유체인 물이 6 m/s로 x방향으로 균일하게 들어오는 것으로 하고 출구 조건은 200기압으로 가정했다. 유로안정기의 벽면에는 속도를 0으로 하였다. 구조분야의 해석대상은 유로안정기의 외형으로 입구와 출구는 고정하고 하중조건은 유동해석에서 구한 압력분포이다. 유로안정기 재질은 고온배관용 탄소강관으로 탄성계수는 201 GPa, 포아송비는 0.3, 밀도는 7850 kg/m<sup>3</sup>이다.

각 분야의 해석을 정의하고 시스템해석을 구성하였다. 구조해석에 필요한 압력분포는 유동해석에서 구한 압력이 된다. 구조분야의 해석으로 얻어지는 변형을 유동분야에서 고려해야 한다. 그러나 현재 모델의 최대변형량이 0.02 mm으로 매우 적어, 구조해석으로 인한 변형은 유동해석에서 고려하지 않았다. 따라서 유동해석의 결과인 압력이 구조해석에 필요하게 되므로 유로안정기의 연성변수는 압력이 된다. 구조해석의 결과로 얻어지는 변형은 유동해석에서 필요하지 않으므로 시스템해석은 한번에

**Table 4** Results of full factorial experiment for the objective function in each discipline

Analysis number	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$f_1/f_{10}$	$f_2/f_{20}$
1	0.019	0.032	0.012	0.988	0.917
2	0.019	0.032	0.014	0.988	0.995
3	0.019	0.038	0.012	1.000	0.922
4	0.019	0.038	0.014	1.000	1.000
5	0.021	0.032	0.012	0.540	0.903
6	0.021	0.032	0.014	0.540	0.982
7	0.021	0.038	0.012	0.568	0.908
8	0.021	0.038	0.014	0.568	0.987

완료된다.

유동분야의 해석은 3차원 정상 비압축성 난류 유동을 해석하기 위하여 상용코드인 ANSYS9.0<sup>(20)</sup>에 있는 Flotran모듈을 사용하였다. 구조분야의 해석은 3차원 정적해석을 수행하였으며 역시 ANSYS9.0의 구조해석모듈을 이용하였다. 두 분야의 해석을 위해 ANSYS를 도입한 것은 연성변수인 압력을 ANSYS의 자체 프로그램 언어인 APDL<sup>(20)</sup>을 이용하면 간단히 처리할 수 있기 때문이다.

시스템해석을 정의한 뒤에 3개의 설계변수는 각 분야의 지역설계변수와 두 분야에서 다뤄야 할 공통설계변수로 구분하였다. 이들을 지역설계변수와 공통설계변수로 나눌 때, 설계자의 직관이나 현재 설계점에서의 민감도 정보를 이용할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 각 분야의 목적함수에 대한 분산분석<sup>(21)</sup>을 통하여 설계변수를 할당했다. 분산분석은 각 설계변수의 변화에 따른 목적함수의 변화로 구간민감도를 의미한다. 분산분석을 위하여 각 설계변수의 상한치와 하한치의 2수준을 고려하면 설계변수가 3개이므로 총 8회의 해석 결과를 바탕으로 분산분석을 수행할 수 있다. 이때 각 분야의 목적함수는 크기가 다르므로 8번의 해석의 결과 중에서 최대값으로 정규화 하였다.

Table 4의 결과를 토대로 각 설계변수의 변동에 대한 유동분야와 구조분야의 목적함수의 분산을 구하면 Table 5와 같다. 여기서  $s_i^f$  와  $s_i^s$  는  $i$ 번째 설계변수 변동에 대한 유동분야와 구조분야의 목적함수에 대한 분산이다. 설계변수의 분야별 할당은 상대적인 값으로 판단할 필요가 있으므로 식 (12)를 이용한다.

$$D_i = s_i^f / s_i^s \quad (12)$$

여기서  $i$  번째 설계변수에 대한  $D_i$  가 큰 경우는  $s_i^f$  가  $s_i^s$  보다 큰 경우로  $i$  번째 설계변수가 유동분야에 더 큰 영향을 준다는 의미이다. 반대로 0 에 가까운 경우에는 구조분야에 더 큰 영향이 있다는 것을 의미한다. 3 개의 설계변수에 대해  $s_i^f$ ,

**Table 5** Allocation of design variables to each discipline

	$s_f$	$s'_f$	$D_i$	Allocation
$b_1$	3.875E-01	3.600E-04	1.077E+03	Fluid
$b_2$	7.889E-04	4.954E-05	1.593E+01	Fluid and structure
$b_3$	0.000E+00	1.223E-02	0.000E+00	Structure

$s'_f$ ,  $D_i$ 를 구하면 Table 5 와 같다.

Table 5에서 알 수 있듯이 유동분야의 지역설계변수는  $b_1$  이고 구조분야의 지역설계변수는  $b_3$  이다.  $b_3$  은 유로안정기의 외부두께를 의미하므로 이 설계변수가 변하더라도 유동분야에는 영향을 주지 않게 된다. 따라서  $s'_f$  는 0이 되었다.  $D_2$  가  $D_1$  에 비해 작고,  $D_3$  에 비하여 크므로  $b_2$  를 두 분야에서 함께 고려해야 할 공통설계변수로 선정하였다.

이러한 설계변수 할당을 토대로 유로안정기의 최적설계문제는 식 (13)과 같다.

Find  $b_1, b_2, b_3$  (13a)

to minimize  $[f_1(b_1, b_2) \quad f_2(b_2, b_3)]^T$  (13b)

subject to  $\sigma_{von} - \sigma_a \leq 0$  (13c)

$0.019 \leq b_1 \leq 0.021$  (13d)

$0.032 \leq b_2 \leq 0.038$  (13e)

$0.012 \leq b_3 \leq 0.014$  (13f)

$z_1 = h_1(b_1, b_2)$  (13g)

$z_2 = h_2(b_2, b_3, z_1^c)$  (13h)

여기서 식 (13g)와 (13h)는 유동분야와 구조분야의 해석기를 의미한다.  $z_1$  은 유동해석에서 얻어지는 상태변수로 유로안정기의 압력분포이고,  $z_2$  는 구조분야의 상태변수로 유로안정기의 질량과 응력이다. 특히  $z_1^c$  는 유동분야의 상태변수 가운데 구조분야의 하중조건에 필요한 압력으로 다분야 통합최적설계에서 말하는 연성변수이다. 유동해석과 구조해석에 각각 ANSYS의 Flotran과 구조해석모듈을 사용하였으므로 식 (13g)와 식 (13h)는 이 두 모듈을 의미한다.

식 (13)은 유로안정기 설계를 다분야통합 최적설계의 관점에서 본 최적설계 정식화이다. 이를 본 연구에서 제안하는 MDOIS/2006을 이용하여 풀어보고자 한다. 유동분야와 구조분야가 풀어야 할 문제 정식화는 다음과 같다.

(1) 유동분야

Given  $p, \alpha_1, b_{10}$  (14a)

find  $b_1, b_2$  (14b)

to minimize  $f_1(b_1, b_2) / f_{10}$  (14c)

subject to  $b_{10}(1 - \alpha_1) \leq b_1 \leq b_{10}(1 + \alpha_1)$  (14d)

$0.019 \leq b_1 \leq 0.021$  (14e)

$b_2 - p = 0$  (14f)

$z_1 = h_1(b_1, b_2)$  (14g)

(2) 구조분야

Given  $p, z_{10}^c, \alpha_3, b_{30}$  (15a)

find  $b_2, b_3$  (15b)

to minimize  $f_2(b_2, b_3) / f_{20}$  (15c)

subject to  $\sigma_{von} / \sigma_a - 1.0 \leq 0$  (15d)

$b_{30}(1 - \alpha_3) \leq b_3 \leq b_{30}(1 + \alpha_3)$  (15e)

$0.012 \leq b_3 \leq 0.014$  (15f)

$b_2 - p = 0$  (15g)

$z_2 = h_2(b_2, b_3, z_{10}^c)$  (15h)

여기서  $p$  는 공통설계변수  $b_2$  에 대한 파라미터,  $z_{10}^c$  는 시스템해석을 통해 얻은 연성변수로 유동분야에서 구한 유로안정기 벽면의 압력분포이다.  $\alpha_1, \alpha_3$  은 각각 설계변수  $b_1, b_3$  의 이동한계(move limit)이고,  $b_{10}, b_{30}$  는 설계변수  $b_1, b_3$  의 초기값이다. 식 (14c)와 식 (15c)는 첫 번째 시스템해석 후에 얻어지는 각 분야의 목적함수값( $f_{10}, f_{20}$ )을 이용하여 각 분야의 목적함수( $f_1, f_2$ )를 정규화하였다. 식 (14d)와 (15e)는 공통설계변수에 대한 목적함수의 최적민감도를 얻기 위하여 추가된 등제한조건이다.

각 분야의 최적설계가 완료되면 공통설계변수를 결정하기 위해 상위수준의 설계문제를 식 (16)과 같이 구성할 수 있다.

Given  $\alpha_2, b_{20}$  (16a)

find  $b_2$  (16b)

to minimize  $f_1^{opt} / f_{10} + f_2^{opt} / f_{20}$  (16c)

subject to  $b_{20}(1 - \alpha_2) \leq b_2 \leq b_{20}(1 + \alpha_2)$  (16d)

$0.032 \leq b_2 \leq 0.038$  (16e)

식 (16c)는 두 분야의 최적설계 결과 얻어진 최적목적함수이다. 식 (16)을 풀기 위해서는 설계변수  $b_2$  에 대한 목적함수의 최적민감도가 필요하며 이는 각 분야의 최적해에서 식 (14f)와 식 (15g)의 라그랑지승수가 된다.

5.4 유로안정기 설계의 결과 및 검토

MDOIS/2006을 이용하여 유로안정기 설계를 수행하였으며, 식 (14)-(16)을 풀기 위하여 DOT<sup>(15)</sup>를 사용하였다. 5번의 설계과정을 수행한 결과 목적함수의 변화가 수렴조건(1%)을 만족하여 설계가 종료되었으며 목적함수의 변화는 Fig. 5와 같다. 이때 설계변수  $b_1, b_2, b_3$  에 대한 초기 이동한계는 3%, 5%, 4%이며, 시스템해석 후에 제한조건의 만족 또는 위배량의 절대값이 2%보다 작으면 30%, 30%, 15%씩 감소하도록 하였다.

Fig. 5에는 두 분야의 목적함수를 첫 번째 시스템해석에서 구한 목적함수로 정규화한 다음에 이를 합한 것이므로 초기값은 2가 되었다. 최적해



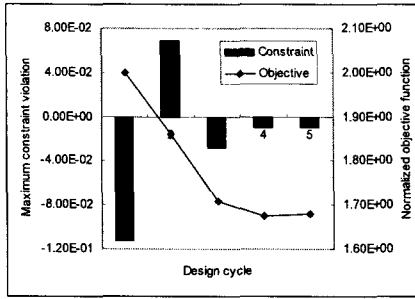


Fig. 5 History of the objective function and maximum constraint violation

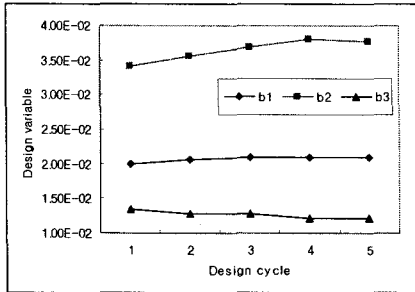


Fig. 6 History of the design variables

에서 유동분야의 목적함수인 입출구 압력차는 초기 설계에 비하여 25.8% 줄었으며, 구조분야의 목적함수인 질량은 6.25% 감소하였다. 한편 제한조건은 최적해에서 -0.096으로 만족하였다. Fig. 6에는 설계변수의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 보듯이 공통설계변수에 대한 목적함수의 최적민감도의 크기가 구조분야보다 유동분야에서 더 크다. 유동분야에서는 최적민감도가 음수인 의미는 공통설계변수  $b_2$  를 늘리면 유로안정기의 입출력 압력차가 줄어든다는 의미이다. 구조분야에서 최적민감도가 양수인 의미는 공통설계변수를 줄이면 유로안정기의 질량이 줄어드는 것으로 해석할 수 있다. 유동분야의 최적민감도가 구조분야의 최적민감도보다 크므로 결국 유동분야가 주로 고려되어 공통설계변수의 높이는 초기 설계에 비해 높아진 것으로 나타났다. 만일 구조분야만을 고려하여 유로안정기를 설계하였다면 페어링의 높이가 낮아졌을 것이며, 유동분야만 고려한 경우에는 페어링이 높아졌을 것이다. 또는 설계자가 각 목적함수에 부여한 가중치에 따라 다른 설계를 얻을 수 있다. 이러한 점은 다분야통합최적설계를 통하여 얻을 수 있는 강점이다. Fig. 8에는 최대응력이 발생하는 부분을 원으로 나타내었다.

### 6. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 기존의 독립적하부시스템에 의한

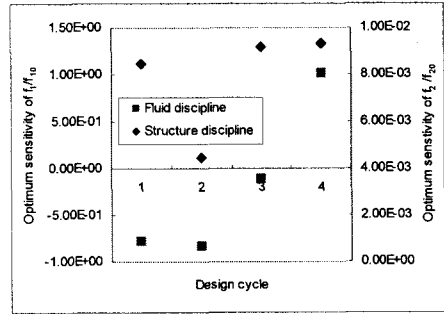


Fig. 7 History of the optimum objective function

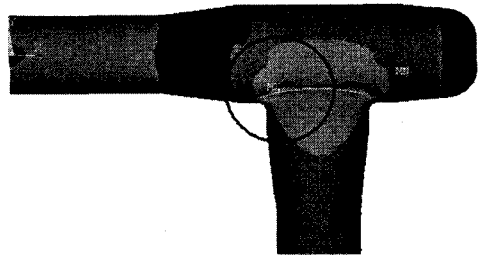


Fig. 8 Stress distribution in the optimized model

다분야통합최적설계(MDOIS)가 고려하지 않았던 공통설계변수를 다루면서도 기존 방법이 가지는 간단함을 유지한 MDOIS/2006을 제안하였다. 이 방법의 효용성을 판단하기 위하여 3가지 예제를 풀었으며 동일 문제들에 대해 기존의 다분야통합 최적설계방법인 MDF, CO, BLISS와도 비교하였다. 다분야통합최적설계의 적용 사례로 유로안정기 설계문제를 개발하였으며 본 연구에서 제안한 방법을 적용하였다.

(1) 기존의 MDOIS와 비교했을 때에 공통설계변수가 존재하는 설계에서는 MDOIS/2006이 MDOIS 보다 효과적이다.

(2) 공통설계변수를 다루는 이단계방법인 BLISS에 비해 전역민감도나 최적민감도를 따로 구하는 과정이 필요 없다. CO에 비해서는 함수호출수가 월등히 적음을 알 수 있다.

(3) MDOIS/2006을 이용하여 구조-유동 연성문제인 유로안정기를 다분야통합최적설계의 관점에서 설계하였다. 유동분야에서는 입출구의 압력차를 초기모델 대비 25.8%를 줄이고 구조분야에서는 질량이 6.25% 감소한 최적의 유로안정기를 설계할 수 있었다. 설계변수 경향은 오리피스 반경이 넓어지고 오리피스 페어링이 높아지는 것이 좋은 것으로 나타났다. 한편 유로안정기의 외곽두께는 감소하였으며 허용응력을 만족하고 있다.

MDOIS/2006이 도출하는 최적해는 이동한계의 영향을 많이 받음을 알 수 있었는데 다분야통합 최적설계에 실용적으로 쓸 수 있는 이동한계전략에

대한 추가 연구가 필요하다. 본 예제들은 하나의 컴퓨터에서 연속적으로 설계가 이뤄졌다. 그러나 실제로 분산환경을 이용하여 MDOIS/2006을 적용하는 연구가 이어져야 한다.

### 후 기

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00097).

### 참고문헌

- (1) Sobieszczanski-Sobieski, J. and Haftka, R.T., 1996, "Multidisciplinary Aerospace Design Optimization - Survey of Recent Developments," *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV.
- (2) Sobieszczanski-Sobieski, J., 1988, "Optimization by Decomposition: A Step from Hierarchic to Non-hierarchic Systems," *NASA CP-3031*.
- (3) Cramer, E.J., Dennis, J.E., Frank, P.D. Jr., Lewis, R.M. and Shubin, G.R., 1994, "Problem Formulation for Multidisciplinary Optimization," *SIAM Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 754~776.
- (4) Sobieszczanski-Sobieski, J., Agte, J. and Sandusky, R. Jr., 1998, "Bi-level Integrated System Synthesis," *AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, MO.
- (5) Kroo, I., Altus, S., Braun, R., Gage, P. and Sobieski, I., 1994, "Multidisciplinary Optimization Methods for Aircraft Preliminary Design," *AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Panama City Beach, FL.
- (6) Shin, M.K. and Park, G.J., 2005, "Multidisciplinary Design Optimization based on Independent Subspaces," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 64, pp. 599~617.
- (7) Lee, S.I., 2005, "Comparison of MDO Methodologies with Mathematical Examples," *Master Dissertation, Department of Mechanical Design and Production Engineering*, Hanyang University, Seoul, Korea.
- (8) Shin, M.K., Kang, B.S. and Park, G.J., 2005, "Application of the Multidisciplinary Design Optimization Algorithm to the Design of a Belt-Integrated Seat While Considering Crashworthiness," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineerings, Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol. 219, pp. 1281~1292.
- (9) Park, C.M., Kang, T., Shin, J.K. and Park, G.J., 2004, "Design of a Strip Casting Roll using Multidisciplinary Design Optimization Methodology," *AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Albany, NY.
- (10) Arora J.S., 2004, "Introduction to Optimum Design," 2nd ed., Academic Press, Boston.
- (11) Fadel, G.M. and Cimalay, S., 1993, "Automatic Evaluation of Move-Limits in Structural Optimization," *Structural Optimization*, Vol. 6, pp. 233~237.
- (12) Thomas, H.J., Vanderplaats, G.N. and Shyy, Y.K., 1992, "A Study of Move Limit Adjustment Strategies in the Approximation Concepts Approach to Structural Synthesis," *AIAA-1992-4750*.
- (13) Wujek, B.A. and Renaud, J.E., 1998, "New Adaptive Move-Limit Management Strategy for Approximate Optimization, Part 2," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 10, pp. 1922~1934.
- (14) Arora, J.S. and Tseng, C.H. 1986, *IDESIGN User's Manual* Version 3.5, Optimal Design Laboratory, College of Engineering, The University of Iowa, Iowa city, Iowa 52242
- (15) *Dot user's manual* version 5.4, Vanderplaats Research & Development, Inc., 2001
- (16) <http://mdob.larc.nasa.gov/mdo.test/Problems.html>.
- (17) Lee, J.S. and Lee, K.B., 2000, "An Experimental Study on the Control of Shock in the Hydraulic Actuator System Using the Orifice," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 24, No. 11, pp. 1506~1512.
- (18) Min, K.H., Yoon, J.Y. and Byun, S.J., 2001, "Fluid Flow Control Apparatus," Patent number 10-2001-0023120 (in Korean).
- (19) Kim, Y.S. and Kim, Y.G., 2002, "Numerical Analysis for the Pressure and Flow Fields Past a Two-Stage Conical Orifice," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 26, No. 2, pp. 278~287.
- (20) *ANSYS User's manual* version 9.0, ANSYS Inc., PA, USA, 2005.
- (21) Park, S.H., 2005, "Design of Experiments," Min-young Sa. (In Korean)