

MDO 통합 설계 시스템을 위한 근사기법의 활용

Integrated Design System using MDO and Approximation Technique

양 영 순* 박 창 규** 장 범 선*** 유 원 선****
Yang, Young-Soon Park, Chang-Kue Jang, Beom-Sun Ruy, Won-Sun

ABSTRACT

The paper describes the integrated design system using MDO and approximation technique. In MDO related research, final target is an integrated and automated MDO framework systems. However, in order to construct the integrated design system, the prerequisite condition is how much save computational cost because of iterative process in optimization design and lots of data information in CAD/CAE integration. Therefore, this paper presents that an efficient approximation method, Adaptive Approximation, is a competent strategy via MDO framework systems.

1. 서 론

다기능, 고성능, 다목적, 고부가가치의 제품의 설계를 위해서는 다수의 공학적 현상이 연관된 다분야 해석 및 설계기술이 필요하다. 즉, 다양한 공학적 원리, 지식, 기술 등을 동시에 고려하여 균형 있고 유기적인 방법으로 최적의 설계를 결정하는 체계적인 설계자동화기술인 다분야 통합 최적설계(Multidisciplinary Design Optimization, MDO) 기술이 요구된다. 최근 각 분야별 해석 기술의 눈부신 발전으로 인해 점차 그 정밀도는 높아졌으나, 이에 따른 설계의 복잡성의 증대로 인해 설계의 체계적인 다분야 통합 설계기술이 절실히 요구되고 있다.

특히, 산업 현장의 설계 프로세스에 있어서, 세부적인 분야로의 편중된 연구와 각 분야만을 위한 적정설계로 인한 분야간 상충현상이 발생하게 되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 분야간 혹은 부서간의 설계 타협을 효율적으로 해결하며, 관련 분야간 설계 요소를 동시에 고려하는 설계의 통합화 및 자동화를 구현해 줄 수 있는 MDO 기술을 도입함으로써, 제품 설계에 있어서 고효율 및 균형 있는 생산을 가능케 해준다.

즉, 조선, 기계, 항공 분야와 같이 복잡한 시스템의 효율적인 설계 기법으로 대두되고 있는 MDO 관련 연구 분야에 있어서 연구의 최종 목표는 다분야 설계를 통합화, 자동화시킬 수 있는 즉, MDO 통합설계 프레임워크를 구축[Fig. 1]하고자 하는 것이다.

MDO 프레임워크를 구축하기 위해서는 최적화 요소기법, 시스템 통합기술, 이러한 최적화 기법과 시스템

* 책임저자, 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과 교수
(Tel) 02-880-7330, (Fax) 02-888-9298, (E-mail) ysyang@sis1.snu.ac.kr

** 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

*** 삼성중공업 구조연구팀 책임연구원

**** 서울대학교 조선해양공학과 연구원

통합기술의 응용기술 구축이 필수적 이다. 그러나, MDO 통합 설계 시스템을 구축하는데 있어서, 최적화 과정에서 발생하는 수많은 반복 계산, 광범위한 다분야 간 설계 및 CAD/CAE와의 연계를 고려함으로써 발생하는 방대한 계산량 및 데이터의 정보량으로 인해 수반되는 계산 비용을 현저히 줄이지 않고는 통합설계 시스템을 실제로 구축한다 해도 그 효율성은 비현실적일 수밖에 없게 된다.

따라서, 본 연구에서는 MDO 통합설계 시스템 프레임워크의 목적을 위해, 필수적으로 선행되어야 하는 다양한 근사기법(Approximation)의 적절한 활용을 통해 MDO에서 적용가능한 근사기법의 활용에 대한 연구를 수행하였다.

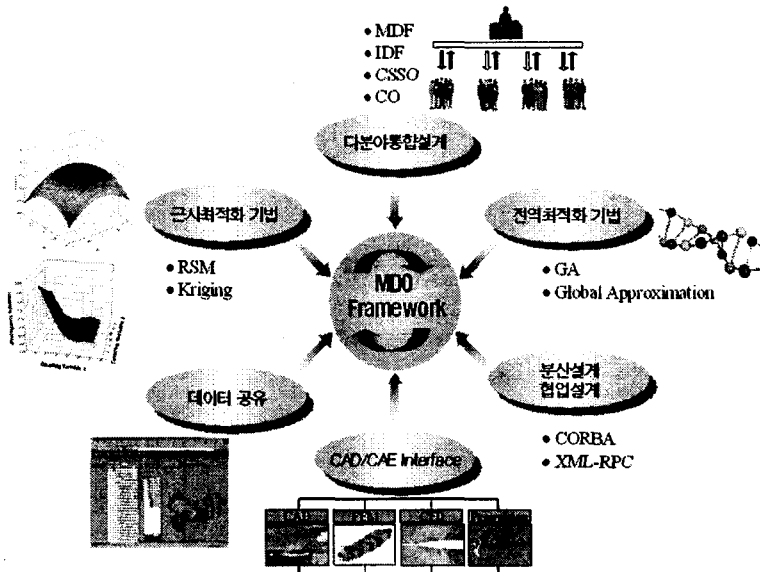


Fig. 1 MDO 통합설계 시스템 Framework

2. 통합설계 시스템을 위한 MDO 프레임워크

2.1 국내 연구동향

국내에서 통합 설계 시스템을 위한 MDO 관련 연구는 기계 및 항공분야를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 기계분야는 한양대학교 최적설계 신기술 연구센터⁽¹⁾를 중심으로 최적화기술, 정보기술, 통합설계기술 및 기존 CAD/CAE도구를 통합하여 MDO 프레임워크를 구축하고 있으며, 항공분야는 ADD 비행체 기술 특화 연구센터⁽²⁾ 중심으로 공력/구조 연계설계 기법, 스텔스 기술의 MDO 적용기법, 불확정성을 고려한 비행체 구조설계 기법, 초음속 무인비행체 최적 형상설계 기법 및 로터 특성을 고려한 MDO 기법을 연구하고 있다.

2.2 MDO 프레임워크 국내외 개발 연구 현황

MDO 프레임워크에 관한 연구는 미래 지향적 핵심기술로 분류하여 국가적 지원을 받고 있는 미국을 중심으로, 항공우주와 관련된 산업체, 대학, 자동차 및 정부기관 연구소등에서 수행되어 왔다⁽³⁾. 특히 1990년대 중반 이후 많은 MDO 프레임워크가 개발되어 사용되고 있다. 그 중에서 대표적으로 Engineous.com의 iSIGHT⁽⁴⁾ 및 Phoenix Integration⁽⁵⁾의 ModelCenter 및 한양대학교 최적설계 신기술 연구센터⁽¹⁾에서 개발된 EMDIOS의 MDO 프레임워크의 특성을 비교하였다[Fig. 2]. Fig. 2는 주로 이러한 MDO 프레임워크에서 사용된 각각의 최적화 기법, 근사기법, 샘플링 기법, 품질공학 기법 및 MDO 방법론의 관점을 통해 비교 하였다.

또한, 현재 본 연구가 진행 중인 서울대학교 InSDeL 연구실에서 MDO 프레임워크를 구축하기 위해 현재 보유하고 있는 기술도 함께 조사, 비교하였다. 그 중에서 특이할 만한 사항은 iSIGHT 및 ModelCenter는 자체적으로 MDO 방법론(Methodology), 즉, MDF(Multi Disciplinary Feasible), IDF(Individual Discipline

Feasible), CO(Collaborative Optimization)⁽⁶⁾등이 내재 되어 있지 않고 사용자(User)가 이러한 필요한 MDO 방법론을 직접 Formulation해야 하는 어려운 문제점이 내재 되어 있다는 것이다.

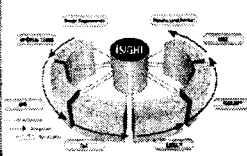
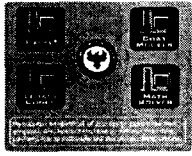

| | iSIGHT | ModelCenter | EMDIOS | Under Developing |
|----------------|---|---|--|--|
| 제품명 |  |  |  | |
| 개발사 | Engineous.com | Phoenix Integration | 한양대학교 최적설계 신기술 연구센터 (idot) | NAOE, SNU InSDeL(Prof. Yang) |
| 최적화 기법 | Exterior Penalty Hooke-Jeeves MFD SLP, SQP GA, SA | DOT Tool • MMFD • SLP • SQP | ADS Tool DOT Tool GA | BFGS, Hooke-Jeeves MFD SLP, SQP Hybrid GA, SA |
| 근사 기법 | RSM | RSM | Function-based Approximation • RSM based Gradient-based Approximation • 1-point/2-point/multi-point Approximation | RSM, NN GP, PGP Adaptive Approximation • AASO • AAMO • AAMDO |
| 샘플링 기법 | DOE | DOE | DOE | DOE |
| 품질 공학 기법 | Robust Design Reliability Analysis • FORM • MVFO • MCS • RBDO | - | - | Robust Design Reliability Analysis • FORM • SORM(개발 중) • MCS • RBDO |
| MDO 방법론 | User Defined Formulation | User Defined Formulation | MDO - Deterministic • MDF, IDF, CO | MDO - Deterministic • MDF, IDF, CO Probabilistic MDO |
| 참여 연구원 | - | - | • 교수 : 15명 • 연구교수/전임연구원 (3명/5명) • 박사과정, 석사과정 다수 | • 교수 : 1명 • 박사 후 과정 : 1명 • 박사과정 : 2명 • 석사과정 : 2명 |

Fig. 2 MDO Framework 국내외 개발 연구 현황

2.3 MDO 통합 설계 시스템 - Basic Concept

본 연구에서 제안하고자 하는 MDO 통합 설계 시스템의 기본 개념은 Fig. 3과 같이 개략적으로 나타낼 수 있는데, 기본 개념은 기본설계(Basic Design), 상세설계(Detail Design), 생산설계(Production Design) 및 생산(Production)의 설계 전반적인 과정 전체를 통합하는 것이다.

또한, MDO와 최적설계의 본질적인 수많은 반복과정 및 설계/해석 연계, 즉, CAD/CAE 와의 연계를 통해 설계 해의 반복과정 탐색과정에서 발생하는 다량의 설계정보의 부담 및 계산 시간의 부담을 최소화하기 위해 DOE(Design Of Experiment)를 기반으로 설계영역을 Screening하여 적절한 근사기법을 적용하여, 보다 빠르고 편리한, 통합 설계 시스템을 구축하는 것이다.

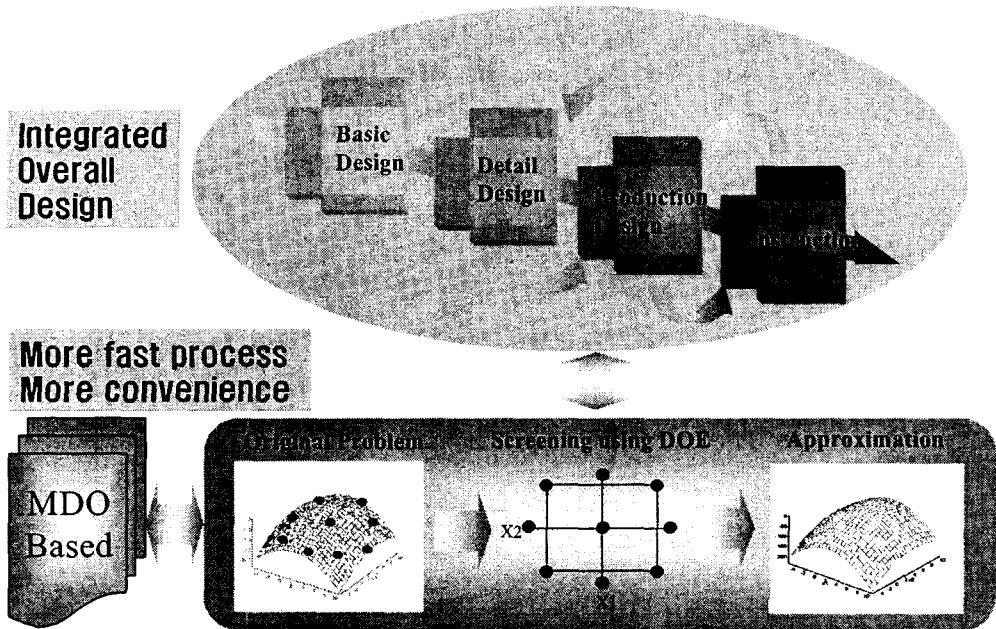


Fig. 3 MDO 통합 설계 시스템 - Basic Concept

3. MDO 통합 설계 시스템에서 근사기법의 활용

3.1 MDO 통합 설계 시스템에서 근사기법의 필요성

최적 설계에 있어서 많은 제약조건을 만족시키고 좀더 우수한 설계 점을 찾기 위해서는 크고 작은 반복과정은 피할 수 없다. 특히, MDO 통합설계 시스템에서는 단순히 최적설계 뿐만 아니라 설계/해석 정보의 통합화로 인해 반복적인 탐색과정의 증가가 불가피 하게 된다. 해석 과정, 즉, 유한 요소해석(FEM)에 있어서 해석 모델 수행은 과도한 계산 시간이 필연적으로 수반될 수밖에 없다. 본 연구에서는 실제로 이러한 해석과정에서 얼마나 많은 반복계산의 부담이 될 수 있는지 규명하고 실제로 이러한 MDO 통합 설계 시스템에서 근사기법의 필요성을 설명하기 위해 화재에 의한 보(Beam)요소의 구조 강도 평가에 있어서 파괴확률(Probability of Failure)을 구하는 예[Fig. 4]를 제시한다⁽⁷⁾. Fig. 4에 적용된 보요소의 모델 및 범용 유한 요소 해석프로그램(Ansys)과 확률적 기법(Probabilistic Approach)과의 연계를 도시하였다. 본 예제에서 적용된 확률적 기법은 Hasofer-Lind의 AFOSM(Advanced First-Order Second-Moment)기법⁽⁸⁾이며, 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에는 유한 요소 해석 없이 AFOSM과 보 이론에서 유도된 식을 이용한 Analysis 1, AFOSM과 해석 프로그램(Ansys)과 연계한 Analysis 2 및 AFOSM과 해석프로그램(Ansys)의 과도한 계산 시간을 효과적으로 줄이기 위해 RSM의 근사기법을 연계한 Analysis 3의 각각의 반복(Iteration) 횟수, 계산 시간(Computing time) 및 파괴확률(Probability of Failure, P_f)의 결과를 나타내었다. Analysis 2의 결과에서 알 수 있듯이 총 40회의 반복계산을 무려 3일 동안 수행하여 중간에 실행을 정지할 수밖에 없었고 Analysis 3에서는 해석과정에서 발생하는 계산시간을 효율적으로 줄이기 위해 근사기법인 RSM을 이용하여 한계상태식(Limit State Equation, LSE)을 몇 번의 탐색과정을 통해 근사화 하여 최종 결과를 얻을 수 있었다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 해석과정과의 연계로 인해 발생하는 계산시간의 증가는 피할 수 없지만 적절한 근사기법을 적용함으로써 현저하게 계산비용의 부담을 줄일 수 있음을 확인 할 수 있었다.

따라서, 선박, 기계, 항공 등과 같은 대규모 설계 시스템의 경우에 있어서는, 다량의 설계변수와 제약조건을 만족하기 위한 반복 계산 과정 및, 설계/해석과의 연계로 인해 계산시간을 얼마나 줄일 수 있느냐가 중요한 관건이 될 수밖에 없다.

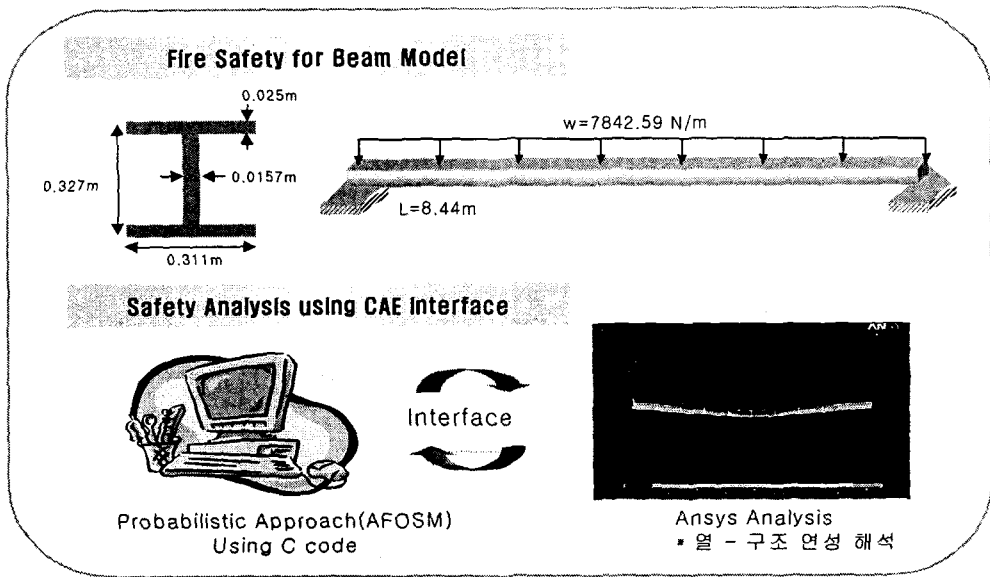


Fig. 4 Fire Safety Analysis Example

Table 1. Comparisons of Fire Safety Analysis Example

| | Analysis 1 (AFOSM + 보 이론에서 유도된 식) | Analysis 2 (AFOSM + Analysis Interface) | Analysis 3 (RSM + Analysis Interface) |
|-------------------------------|---|---|---|
| # of Iteration | 78 | 40회 이상 | 15 |
| Computing Time(sec) | 0.875 | 3일 후 Stop | 5978.4657 |
| Probability of Failure, P_f | 0.7459 | - | 0.8358 |

3.2 적응적 근사모델 기법

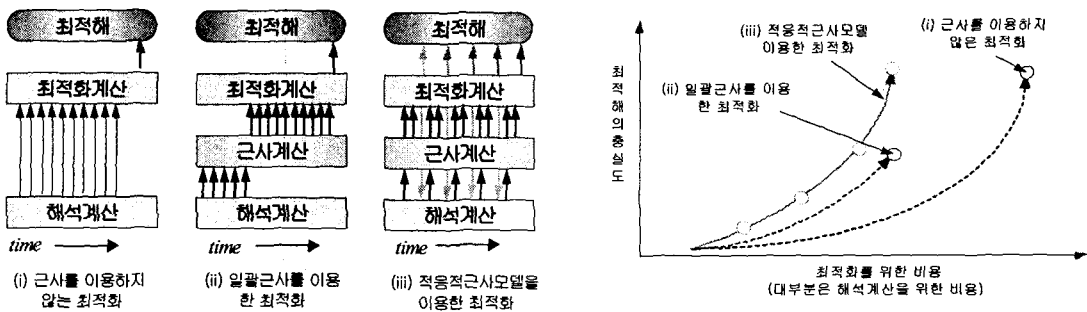


Fig. 5 최적화에 적용된 근사기법의 비교

일반적으로 근사기법(Approximation Method)은 크게 NN(Neural Network), GP(Genetic Programming)와 같은 전역 근사 기법(Global Approximation)과 RSM(Response Surface Method)과 같은 국부 근사 기법(Local Approximation)으로 분류되며 본 연구에서는 이러한 근사기법들에 비해 효율성을 부가하여 해의 정확성을 보

장하기 위한 근사기법으로 전역근사와 국부 근사가 조합된 적응적 근사모델(Adaptive Approximation)이다. 적응적 근사모델은 관심영역의 계속적인 수정을 통해 정확도를 향상시킴으로써 고성능(High-fidelity) 함수의 효율적인 평가를 통해 정확한 최적점 으로의 수렴을 목적으로 한다[Fig. 5]. 기존의 근사기법은 실제로 평가해본 결과 제한조건을 위배한다거나 실제 최적점과는 거리가 먼, 해로서 부적합한 경우 마땅히 대처할 일반적 전략이 없게 된다. 반면 적응적 근사모델의 경우, 최적화 모듈에 고성능(High-fidelity) 모델에 대한 정보를 제공하고, 반대로 최적화는 근사모델에 새롭게 추가될 표본점에 대한 정보를 제공하는 상호 보완적인 과정을 포함한다.

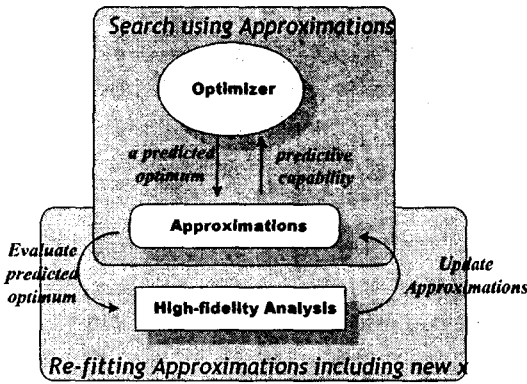


Fig. 6 AASO(Adaptive Approximation in Single Objective Optimization)

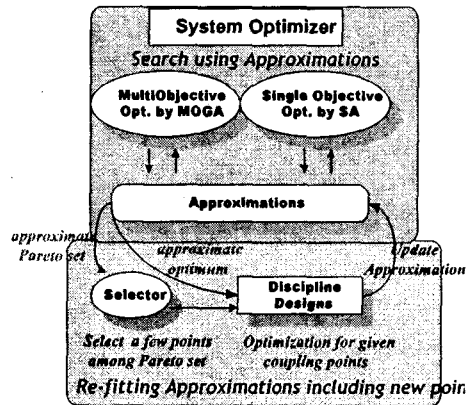


Fig.7 AAMO(Adaptive Approximation in Multi-Objective Optimization)

즉, 근사계산 및 해석계산의 과정에서 일괄적인 근사를 하지 않고 근사계산과 해석계산의 계속적인 수정을 하게 된다. 이 두 기법은 단일 목적[Fig. 6] 및 다목적 최적화 [Fig. 7]과정에서 근사모델의 계속적인 개선(Update)을 통해 고성능(High-fidelity) 근사 해석을 수행함으로써 최적점을 얻을 수 있는 가능성을 부가한 기법이다^{(9),(10)}

3.3 MDO에서 근사모델 기법의 활용

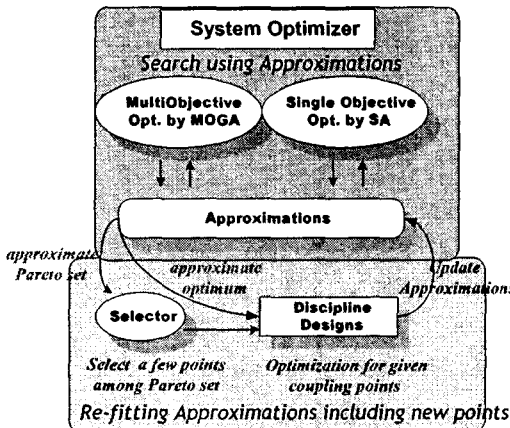


Fig. 8 AAMDO(Adaptive Approximation in MDO)

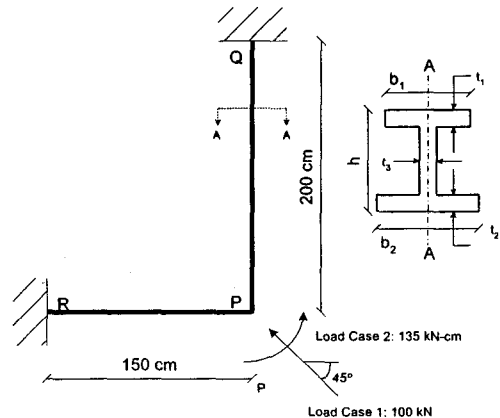


Fig. 9 Two-member hub frame

앞 절에서 최적화 과정에서 많은 계산을 요하는 해석에 의존한 최적화 문제에서 근사기법을 효과적으로 관

리하는 방안을 제시했다. 그 목적은 계산비용과 시간을 줄임과 동시에 거의 정확한 최적점에 도달하도록 하는데 있다. 그 방안들은 근사모델을 사용한 최적화를 통해 얻은 정보를 이용해 근사모델을 재구성하는 과정을 반복하게 된다. 이로써 그러한 재구성 과정이 없이 단순하게 근사모델을 이용하는 최적화에 비해 더 적은 표본점으로 더 정확히 최적점에 다다를 수 된다.

본 연구에서 제안하고자 하는 Adaptive Approximation in Multi-Disciplinary Optimization, AAMDO)[Fig. 8]는 MDO기법 중에서 CO⁽⁶⁾의 시스템 단계의 최적화에 이 기법을 적용하게 하는 것이다.

이로써 최적화에 필요한 하위분야의 최적화의 회수를 줄이면서 동시에 정확한 최적점이나 Pareto set에 최대한 근접할 수 있게 된다.

3.4 MDO에서 근사모델 기법의 적용 예

본 예제는 Fig. 9와 같은 two-member hub frame의 단면 치수를 결정하는 것이며 MDO정식화는 Fig. 10과 같다. 세 분야간의 연성변수 중 부재 PQ와 PR의 부재력은 분야 0을 분야 1, 2 보다 선행 수행함으로써 제거될 수 있다⁽¹¹⁾. 목적함수로는 전체 부피와 절점 P에서의 병진변위를 최소화하는 것이다. 설계제한조건으로는 P에서의 변위 제한조건과 각 부재의 허용응력과 좌굴에 대한 조건이 있다. 절점 P에서의 병진변위와 각 분야의 제한조건 위배량인 d_1 과 d_2 는 각각 네 연성변수, 즉 두 부재의 단면적(A_1, A_2)과 2차관성모멘트(I_1, I_2)의 함수로 근사된다. Fig. 11은 AAMDO 방법에 의한 결과가 Weighting method로 다목적을 처리한 Standard Optimization 과 CO의 결과와 일치하는 것을 보여주고 있다.

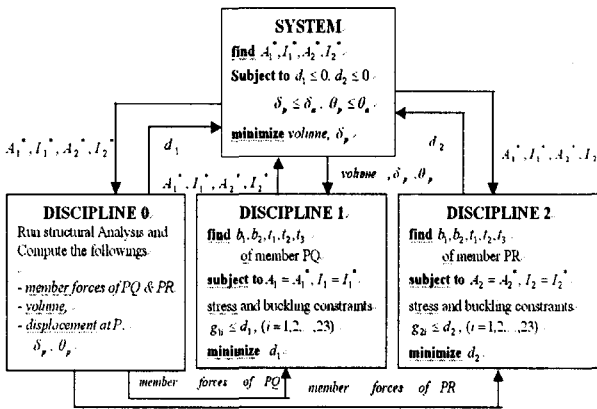


Fig. 10 MDO formulation for two-member hub frame problem

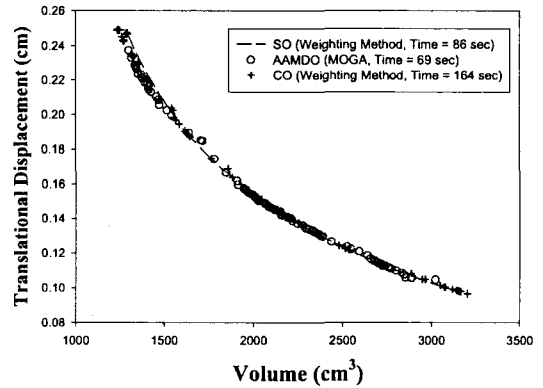


Fig.11 Result of two-member hub frame problem

4. 결론 및 향후 전망

본 연구에서는 MDO 통합설계 프레임워크를 구축하기 위해 MDO와 관련된 국내 기계, 항공분야의 연구센터를 통해 향후 MDO 통합 설계 프레임워크를 구축하기 위해 필요한 기술이 무엇인지를 살펴보고, 국내외에서 개발된 다양한 MDO 프레임워크의 개별적인 특성을 살펴보았다. MDO 프레임워크에서는 본질적으로 다양한 CAD/CAE와의 연계를 구축해야 하므로 최적화 및 MDO의 반복계산과정 및 설계/해석 정보에서 발생하는 과도한 계산시간을 효율적으로 줄이는 것이 무엇보다도 중요한 기반 기술이 됨을 보 요소의 화재 시 구조강도 평가방법을 근거로 확인 할 수 있었다. 또한, MDO에서 이러한 근사기법을 효율적으로 적용하기 위한 일환으로 적응적 근사기법을 적용한 AAMDO의 활용을 two-member hub frame의 단면 치수를 결정하는 예를 통해 증명하였다.

MDO 프레임워크를 단지 학계만의 연구가 아닌 실제로 산업현장에서 응용할 수 있을 정도로 구축하기 위해서는 아직도 해결해야 될 문제점이 산적한데 그중의 하나가 다분야 전문지식을 효과적으로 교환하고 응용

될 수 있도록 지원하는 협동 설계 작업환경, 즉, 분산 설계 구현 기술이다. 기존의 분산설계를 위한 연구는 CORBA(Common Object Request Broker Architecture), DCOM(Distributed Component Object Model), RMI(Remote Method Invocation)를 이용한 통신방법이 연구되어 왔다. 그러나, 이러한 방법들은 방화벽(Firewall)으로 인해 인트라넷(Intranet) 환경에 적합하며[Fig. 12], 분산된 다양한 플랫폼 및 다른 언어로 개발된 프로그램들을 통합하고, 기업 내의 부서 간 또는 기업간의 협업설계를 위한 XML-RPC(eXtensible Mark-up Language - Remote Procedure Call)^{(12),(13)}를 기반으로 한 웹기반MDO프레임워크[Fig. 13]의 기술이 향후 필요할 것으로 기대된다.

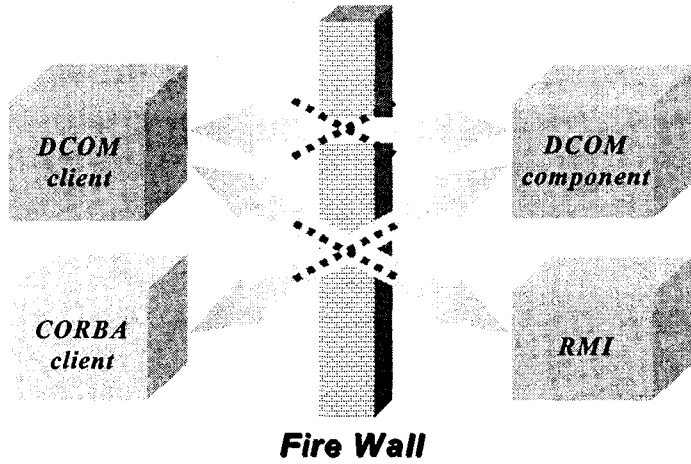


Fig. 12 기존의 분산설계의 문제점

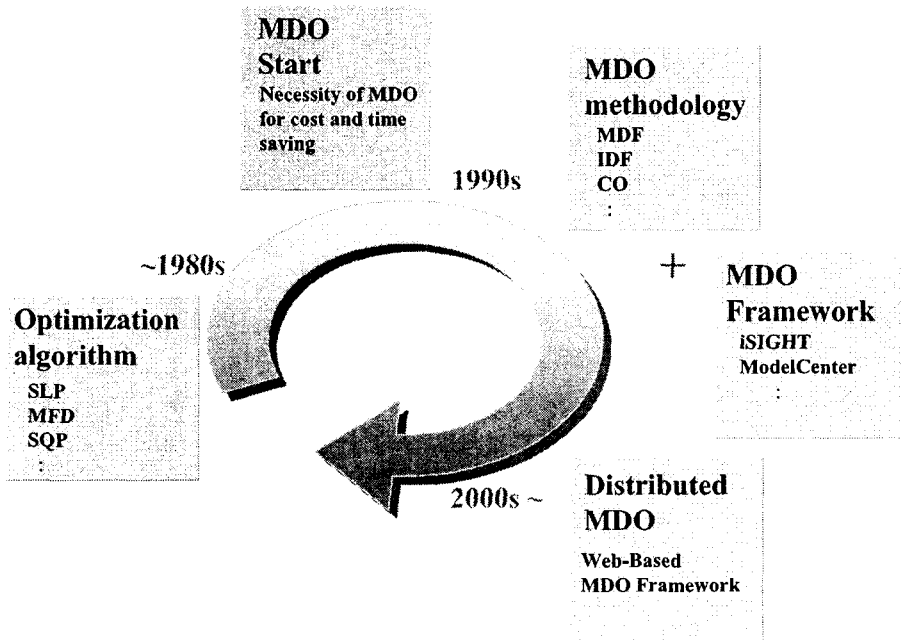


Fig. 13 MDO의 변천 과정 및 향후 전망

5. 후기

본 논문의 내용은 한국과학재단의 첨단조선공학 연구센터 지원과제의 일부로 수행된 것을 정리한 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한양대학교 최적설계 신기술 연구센터(iDOT) : <<http://idot.hanyang.ac.kr>>
2. ADD 비행체 기술 특화 연구센터(FVRC) : <<http://fvrc.snu.ac.kr>>
3. 조상오, 황진용, 정주영, 이재우, "통합적 환경하의 다분야간 설계를 위한 프레임워크 및 데이터 베이스 연구 동향", 2001, 한국항공우주학회지.
4. Engineous.com : <<http://www.engineous.com/index.htm>>
5. Phoenix Integration : <<http://www.phoenix-int.com>>
6. Braun, R., D., "Collaborative Optimization: An Architecture for Large-Scale Distributed Design", Ph.D. Dissertation, 1996, Stanford University.
7. 이상엽, "화재에 의한 구조부재의 구조강도 평가방법 연구", 서울대학교 조선해양공학과 석사학위 논문, 2004.
8. 양영순, 서용석, 이재욱, "구조 신뢰성 공학", 1999, 서울대학교 출판부.
9. Y. S. Yang, B. S. Jang et al, "Managing approximation models in Multiobjective optimization", Structural and multidisciplinary Optimization, Vol. 24, 2002.
10. 장범선, "다분야 협동 최적화에서의 근사기법의 활용", 서울대학교 조선해양공학과 박사 학위 논문, 2002.
11. Balling, R. J., and Sobieszczanski-Sobieski, J., "An Algorithm for Solving the System-Level Problem in Multilevel Optimization", Structural Optimization, vol. 9, 1995, pp. 168-177.
12. XML-RPC Homepage : <<http://www.xml-rpc.com>>
13. St. Laurent, J. Johnston, E. Dumbill, "Programming Web Services with XML-RPC", 2001, O'Reilly.