

論文

유한요소 부영역 결합법을 이용한 열기계학적 접촉 해석

신의섭*, 진지만**

Thermomechanical Contact Analysis by Subdomain/Interface Finite Element Method

Eui Sup Shin* and Ji Man Jin**

ABSTRACT

A subdomain-interface finite element method is suggested to solve a class of fully-coupled thermomechanical problems with contact boundaries. The penalty method is used for connecting subdomains that satisfy interface compatibility conditions. As a result, effective stiffness matrices are always positive definite, and computational efficiency can be improved to a considerable degree. Moreover, any complex-shaped domain can be divided into independently modeled subdomains without considering the conformity of meshes on interfaces. Using a computer code based on the present method, these advantageous features are shown through a set of numerical studies.

초 록

접촉 현상을 포함하는 완전 연계된 열기계학적 문제에 대한 정확하고 효율적인 해석을 위하여 부영역과 공유면에 근거한 유한요소 정식화 기법을 제안하였다. 부영역과 공유면을 결합하기 위한 등식 적합 조건을 벌칙 함수로 처리함으로써 모든 유효 강성 행렬이 양정치화되며, 역행렬과 같은 각종 수치 연산이 매우 간편하다. 또한 전체 구조 형상이 복잡하더라도 대상 영역을 임의의 부영역으로 분할한 후, 공유면에서의 절점 연속성 등을 고려하지 않고 각 부영역을 독립적으로 유한요소 모델링할 수 있다. 컴퓨터 코드의 개발 및 수치 예제의 해석을 통하여 본 기법에 대한 기본적인 특성을 확인하였다.

Key Words : Thermomechanical Coupling(열기계학적 연계), Subdomain(부영역), Interface (공유면), Finite Element(유한요소), Penalty Method(벌칙 함수법)

1. 서 론

구조물 내부의 변위장과 온도장이 상호 영향을 미치는 열기계학적으로 완전 연계된 문제에 대한 정확한 해를 얻기 위해서는 운동 방정식(운동량 보존 법칙)과 열전달 방정식(에너지 보존

법칙)을 동시에 다루어야 한다[1,2]. 대변형과 같은 기하학적 거동 및 점소성과 같은 재료 비선형성이 강하고, 고온에서 하중이 반복적으로 가해지는 동적 환경에서 열기계학적 연계 효과가 크게 나타날 수 있다. 특히, 온도가 서로 다른 두 물체 사이의 접촉 또는 충격 현상은 비선형 경계 조건을 수반하는 대표적인 열기계학적 완전 연계 문제이다[3].

현재 사용되는 대부분의 범용 유한요소 프로그램은 구조 해석 및 열 해석 기능을 포함하고 있으나, 열기계학적 완전 연계 문제에 대하여 그다지 효율적인 통합 해석 환경을 제공하지 않는

† 2005년 7월 19일 접수 ~ 2005년 10월 6일 심사완료

* 정희원, 전북대학교 기계항공시스템공학부
연락처, E-mail : esshin@chonbuk.ac.kr

전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

** 전북대학교 항공우주공학과 대학원

다[4,5]. 접촉 현상을 예로 들면, 실제 접촉의 발생은 내부 영역이 아니라 일부 경계면에 국한되는데도 불구하고, 대부분의 수치 기법은 전체 영역을 대상으로 접촉과 관련된 각종 행렬과 수식을 다루기 때문에 효율성이 떨어진다. 이런 관점에서 가장 효과적인 개념은 해석 영역을 분할하여 유한요소법을 적용하는 것이다[6-13]. 즉, 부영역(subdomain)을 기준으로 정식화를 수행하면 접촉 경계면을 자유자재로 분할하여 임의의 부영역에 할당할 수 있으므로, 매우 효율적인 비선형 해석이 가능하다. 여기서 접촉 경계면 및 공유면(interface)에서의 구속 조건은 다양한 벌칙 함수법 또는 라그랑지 승수법을 적용하여 처리한다. 이와 같은 해석 기법을 이용하면, 터빈 블레이드와 디스크 사이의 다중 핀 또는 fir-tree 결합과 같은 복잡한 형상의 유한요소 모델링 문제까지 쉽게 해결할 수 있다.

본 논문에서는 접촉 현상을 포함하는 열기계학적 완전 연계 문제를 효율적으로 모델링하고 해석하기 위하여, 부영역 결합법에 근거한 변분 정식화 과정을 제시하였다. 접촉면에서의 부등식 구속 조건을 외부 벌칙 함수로 처리하였으며, 공유면에서의 구속 조건에도 벌칙 함수법을 적용하였다. 정식화에 따른 컴퓨터 코드의 개발과 수치 예제의 해석을 통하여 제안된 기법에 대한 기본적인 특성을 검토하였다.

II. 유한요소 부영역 결합법

2.1 열기계학적 연계 정식화

전체 영역 Ω 를 Fig. 1과 같이 N_s 개의 독립적인 부영역 $\Omega^{(k)}$ 와 공유면 $\Gamma_i^{(k-)}$ 의 집합으로 생각한다. $\Gamma_D^{(k)}$, $\Gamma_F^{(k)}$, $\Gamma_T^{(k)}$, $\Gamma_H^{(k)}$ 는 각각 변위, 분포 하중, 온도, 열 유량 경계면이다. 접촉면 $\Gamma_C^{(k)}$ 의 부등식 구속 조건은 외부 벌칙 함수로 처리한다[13].

$$t_{C_i}^{(k)} = -\frac{1}{\varepsilon_C^{(k)}} \left(u_j^{(k)} n_j^{(k)} - s^{(k)} \right)^+ n_i^{(k)} \quad (1)$$

여기서 $t_{C_i}^{(k)}$ 는 접촉 하중, $\varepsilon_C^{(k)}$ 는 벌칙 상수, $s^{(k)}$ 는 접촉 간극이다. 공유면에서의 변위 및 온도 연속 조건을 위한 벌칙 함수 표현은 다음과 같다.

$$t_{I_i}^{(k+)} = -t_{I_i}^{(k-)} = \frac{1}{\varepsilon_{DI}^{(k)}} (v_i - u_i^{(k+)}) \quad (2)$$

$$q_{I_i}^{(k+)} = -q_{I_i}^{(k-)} = \frac{1}{\varepsilon_{TI}^{(k)}} (\varphi_i - \theta_i^{(k+)}) \quad (3)$$

아래 첨자 중 D는 변위, T는 온도, I는 공유면에

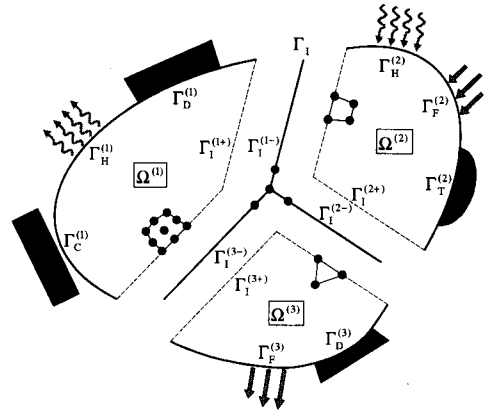


Fig. 1. Schematic of subdomain and interface

관련되며, 변위 v_i , 온도 φ_i 는 $\Gamma_i^{(k-)}$ 에서 정의된다. 각 부영역에서 만족하는 운동 방정식과 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}^{(k)} + \bar{f}_i^{(k)} = \rho^{(k)} \ddot{u}_i^{(k)} \quad (4)$$

$$\rho^{(k)} c_v^{(k)} \dot{\theta}_i^{(k)} = -\theta_0 C_{ijk}^{(k)} \alpha_{ij}^{(k)} \dot{\varepsilon}_{kl}^{(k)} + (\kappa_{ij}^{(k)} \theta_{i,j}^{(k)})_{,j} + \rho^{(k)} \bar{r}^{(k)} \quad (5)$$

여기서 $\bar{f}_i^{(k)}$ 는 체적력, $\rho^{(k)}$ 는 질량 밀도, $c_v^{(k)}$ 는 비열, θ_0 는 기준 온도, $C_{ijk}^{(k)}$ 는 탄성 계수, $\alpha_{ij}^{(k)}$ 는 열팽창 계수, $\kappa_{ij}^{(k)}$ 는 열전도 계수, $\bar{r}^{(k)}$ 는 열원이다. 식 (4), (5)의 시험 함수(test function)로 가상 변위와 가상 온도를 도입하면, 전체 부영역과 공유면에 대한 지배 방정식의 약형(weak form)을 유도할 수 있다.

$$\delta \Pi_D = \sum_{k=1}^{N_s} \delta \Pi_D^{(k)} + \delta \Pi_{DI} = 0 \quad (6)$$

$$\delta \Pi_T = \sum_{k=1}^{N_s} \delta \Pi_T^{(k)} + \delta \Pi_{TI} = 0 \quad (7)$$

재료 거동이 온도에 의존하지 않는 경우, 열기계학적 완전 연계 효과는 다음과 같다.

$$\delta \Pi_D^{(k)} = \dots + \int_{\Omega^{(k)}} C_{ijkl}^{(k)} \alpha_{ij}^{(k)} \theta_{,k}^{(k)} \delta \varepsilon_{ij}^{(k)} dV + \dots \quad (8)$$

$$\delta \Pi_T^{(k)} = \dots + \int_{\Omega^{(k)}} \theta_0 C_{ijk}^{(k)} \alpha_{ij}^{(k)} \dot{\varepsilon}_{kl}^{(k)} \delta \theta_i^{(k)} dV - \int_{\Gamma_C^{(k)}} q_C^{(k)} \delta \theta_i^{(k)} dS + \dots \quad (9)$$

식(8)은 온도 변화 θ_i 에 따라 열 하중이 발생함을 의미한다. 또한 식(9)는 변형도 속도(strain rate) $\dot{\varepsilon}_{kl}$ 에 비례하는 에너지의 가역 변환 및 접촉면을 통한 열의 이동을 의미한다. 일반적으로 접촉면에서의 열 유량 $q_C^{(k)}$ 는 실제 접촉 여부와 접촉 하

중 $\sigma_n^{(k)}$ 에 좌우되므로, 열기계학적으로 완전 연계된 비선형 해석을 통해서 구할 수 있다.

2.2 유한요소 해석 알고리즘

식(6), (7)을 공간과 시간에 대하여 유한요소로 이산화하면, 블록 행렬 형태의 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{K}}_D^{(1)} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} & -\mathbf{P}_{D12}^{(1+)} \\ \mathbf{0} & {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{K}}_D^{(2)} & \mathbf{L} & \mathbf{0} & -\mathbf{P}_{D12}^{(2+)} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{K}}_D^{(N_S)} & -\mathbf{P}_{D12}^{(N_S+)} \\ -\mathbf{P}_{D12}^{(1+)^T} & -\mathbf{P}_{D12}^{(2+)^T} & \mathbf{L} & -\mathbf{P}_{D12}^{(N_S+)^T} & \hat{\mathbf{K}}_{DI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(1)} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(2)} \\ \mathbf{M} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(N_S)} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{v} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_D^{(1)} \\ {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_D^{(2)} \\ \mathbf{M} \\ {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_D^{(N_S)} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_D^{(1)} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\theta}^{(1)} \\ \mathbf{A}_D^{(2)} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\theta}^{(2)} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{A}_D^{(2)} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\theta}^{(N_S)} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{K}}_T^{(1)} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} & -\mathbf{P}_{T12}^{(1+)} \\ \mathbf{0} & {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{K}}_T^{(2)} & \mathbf{L} & \mathbf{0} & -\mathbf{P}_{T12}^{(2+)} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} & {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{K}}_T^{(N_S)} & -\mathbf{P}_{T12}^{(N_S+)} \\ -\mathbf{P}_{T12}^{(1+)^T} & -\mathbf{P}_{T12}^{(2+)^T} & \mathbf{L} & -\mathbf{P}_{T12}^{(N_S+)^T} & \hat{\mathbf{K}}_{TI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\theta}^{(1)} \\ {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\theta}^{(2)} \\ \mathbf{M} \\ {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\theta}^{(N_S)} \\ {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\varphi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_T^{(1)} \\ {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_T^{(2)} \\ \mathbf{M} \\ {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_T^{(N_S)} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_T^{(1)} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\omega}^{(1)} \\ \mathbf{A}_T^{(2)} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\omega}^{(2)} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{A}_T^{(2)} {}^{t+\Delta t}\boldsymbol{\omega}^{(N_S)} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $\hat{\mathbf{K}}^{(k)}$, $\hat{\mathbf{f}}^{(k)}$, $\mathbf{A}^{(k)}$ 는 유효 강성 행렬, 하중 벡터, 열기계학적 연계 행렬이다. 또한 $\mathbf{P}_{12}^{(k+)}$ 는 부영역과 공유면을 결합하는 벌칙 함수에서 기인하는 행렬 중 하나이며, 정확한 값을 얻기 위하여 충분한 개수의 Gauss 적분 점을 선택해야 한다.

변위와 온도 해를 구하는 과정을 Fig. 2에 도

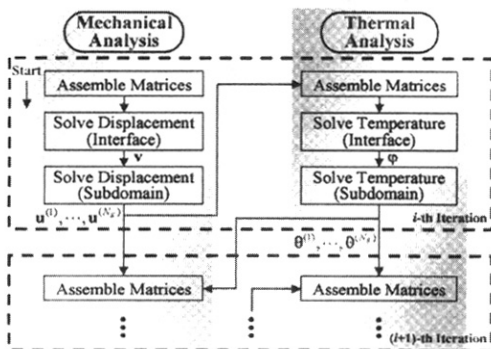


Fig. 2. Main solution process

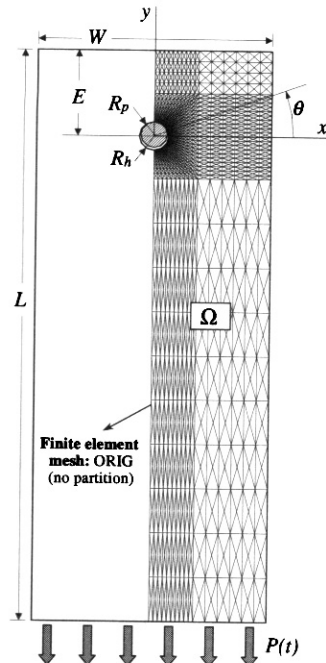


Fig. 3. Composite laminate with a pin joint: ORIG

시하였다. 행렬 조립과 역행렬 계산 등을 부영역과 공유면을 기본 단위로 하는 병렬화된 알고리즘으로 처리할 수 있다. 이는 공유면의 연속 조건을 벌칙 함수로 처리함으로써 모든 유효 강성 행렬이 양정치화되기 때문이다.

III. 수치 예제 해석 및 고찰

접촉 현상을 포함하는 열기계학적 완전 연계 정식화 및 해석 기법에 적합한 유한요소 코드를 개발하였다. 이어 실제 수치 예제를 해석함으로써, 본 논문에서 제안한 유한요소 부영역 결합법의 기본적인 특성을 고찰하였다.

3.1 강제 핀 체결

Fig. 3과 같이 강제 핀 체결 부위를 갖는 복합재료 적층판을 해석하였다. 적층판의 치수는 $L=400$ mm, $W=160$ mm, $E=60$ mm, $R_h=10$ mm, $t=10$ mm, 무차원 접촉 간극은 $\lambda=(R_h-R_p)/R_h=0.05\%$ 이다. 복합재료 물성 값은 $E_1=131.1$ GPa, $E_2=7.84$ GPa, $\nu_{12}=0.2893$, $G_{12}=3.90$ GPa, $\rho=1,560$ kg/m³, $\alpha_1=0.045 \times 10^{-6}$ K⁻¹, $\alpha_2=20.2 \times 10^{-6}$ K⁻¹, $c_v=679$ J/kg·K, $\kappa_1=48.1$ W/m·K, $\kappa_2=0.93$ W/m·K, 적층 순서는 $[0/\pm 45/90]_s$ 이다.

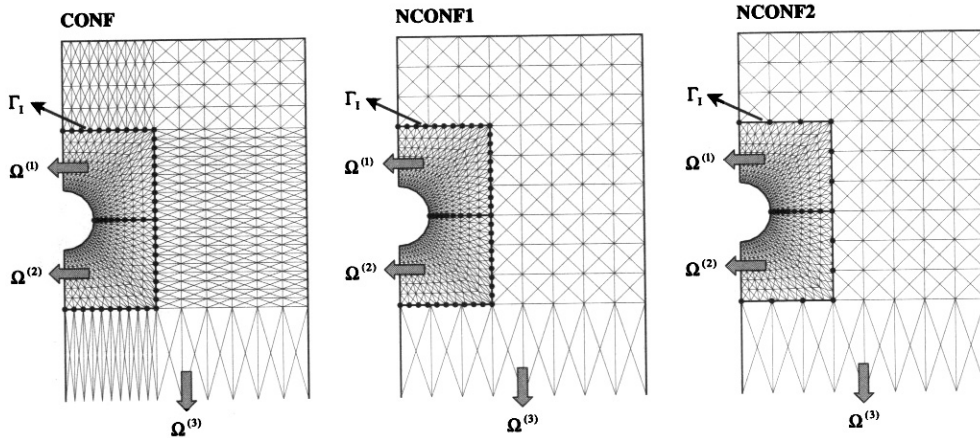


Fig. 4. Finite element meshes: CONF(conforming), NCONF1(nonconforming, fine interface), and NCONF2(nonconforming, coarse interface)

적층판의 초기 온도 θ_0 는 300 K, 핀의 온도는 350 K로 설정하였다. 적층판의 밑면에 동적 하중 $P(t) = P_M \sin 2\pi t / T_C$, $P_M = 8,000$ N, $T_C = 500$ ms가 균일하게 분포되며, 시간 증분 간격 Δt 는 1 ms이다. 대칭성을 고려하여 적층판 우측 영역을 대상으로 1,478개의 절점과 2,816개의 삼각형 요소로 유한 요소 모델 ORIG를 구성하였다. 접촉이 발생하는 핀 주위에 세밀한 요소를 사용하였다.

한편 부영역과 공유면의 개념을 도입하여 영역 분할된 유한요소 모델 형상을 Fig. 4에 도시하였다. CONF는 각 부영역의 경계면과 공유면에서 절점이 연속적으로 배치되어 있다. NCONF1은 내부의 $\Omega^{(1)}$ 과 $\Omega^{(2)}$ 를 기준으로 공유면을 모델링한 반면, NCONF2는 외부의 $\Omega^{(3)}$ 을 기준으로 공유면을 모델링하였다. 벌칙 상수 $\epsilon^{(k)}$ 는 각 부영역별로 해당 강성 행렬 $\mathbf{K}^{(k)}$ 의 대각 성분 최대 값의 10^7 으로 고정하였다.

적층판 원공의 위 점(Point A)과 아래 점(Point A)에서의 변위, 접촉 응력, 온도 이력을 Fig. 5~7에 도시하였다. ORIG와 CONF 결과는 서로 일치하며(CONF로 표기), NCONF1과 NCONF2 결과도 서로 일치하였다(NCONF로 표기). NCONF 결과는 CONF 결과와 약간 차이가 있으나, 이는 부영역 $\Omega^{(3)}$ 에서 상대적으로 세밀하지 않은 요소를 사용하였기 때문이다. 벌칙 함수법에 의하여 공유면에서의 변위와 온도는 세밀하지 않은 부영역의 보간 함수에 주로 좌우된다. Fig. 7은 열기계학적 완전 연계 해석에 따른 온도 상승 효과를 나타낸 것이다. 강체 핀의 온도가 50 K 높으므로, 접촉이 반복됨에 따라 적층판의 온도가 지속적으로 상승하고 있음을 확인할 수 있다.

부영역 $\Omega^{(1)}$ 의 경계면 절점에 작용하는 힘 벡터

분포($t = 125$ ms)를 Fig. 8에 도시하였다. CONF와 NCONF1의 결과는 거의 차이가 없다. NCONF1 모델의 온도 변화 θ_* 에 대한 등고선($t = 250$ ms)을 Fig. 9에 도시하였다. 열 에너지가 접촉면에서 적층판 내부로 전달되는 과정을 볼 수 있다.

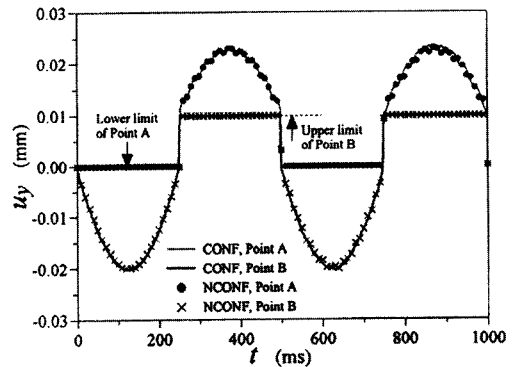


Fig. 5. Time response of displacement

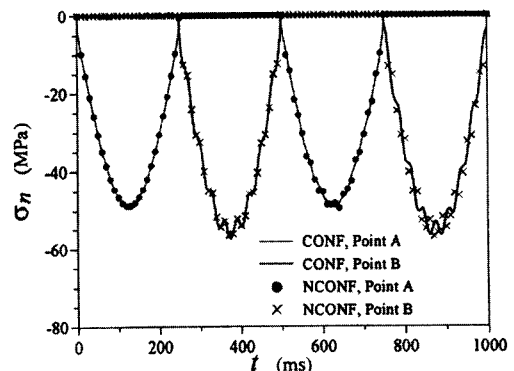


Fig. 6. Time response of contact stress

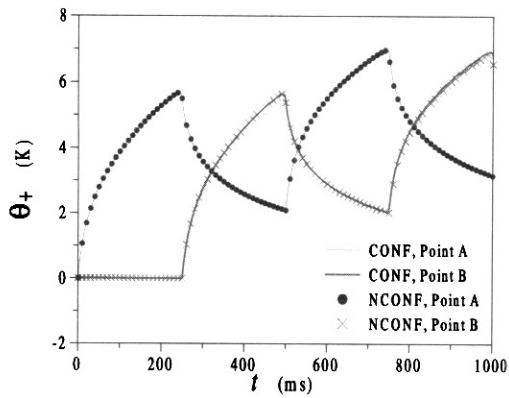


Fig. 7. Time response of temperature

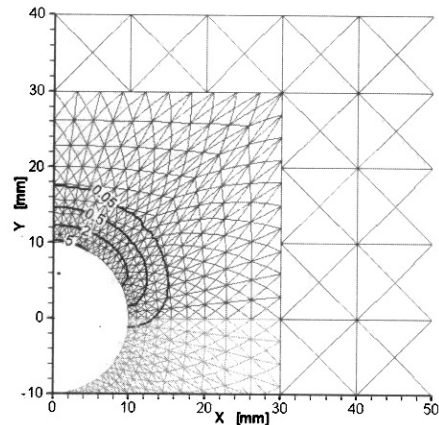


Fig. 9. Contour of temperature change

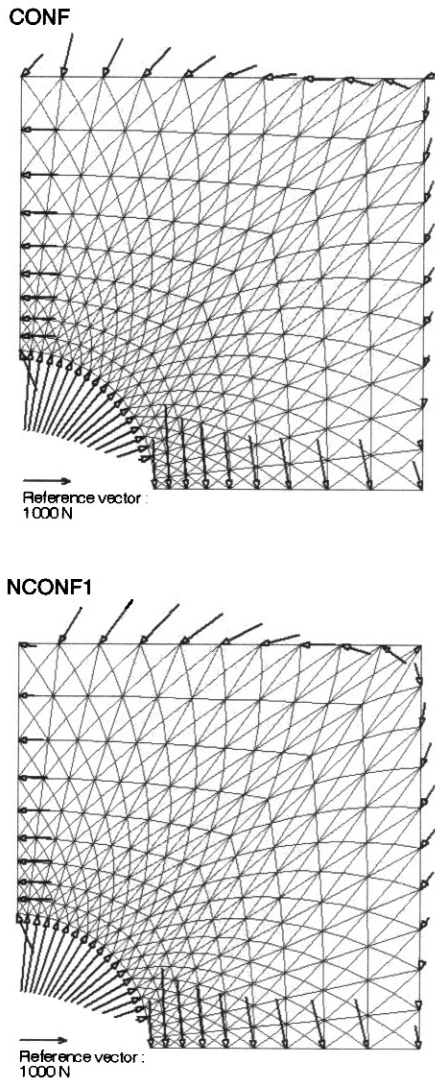


Fig. 8. Force vectors on contact boundary and interface

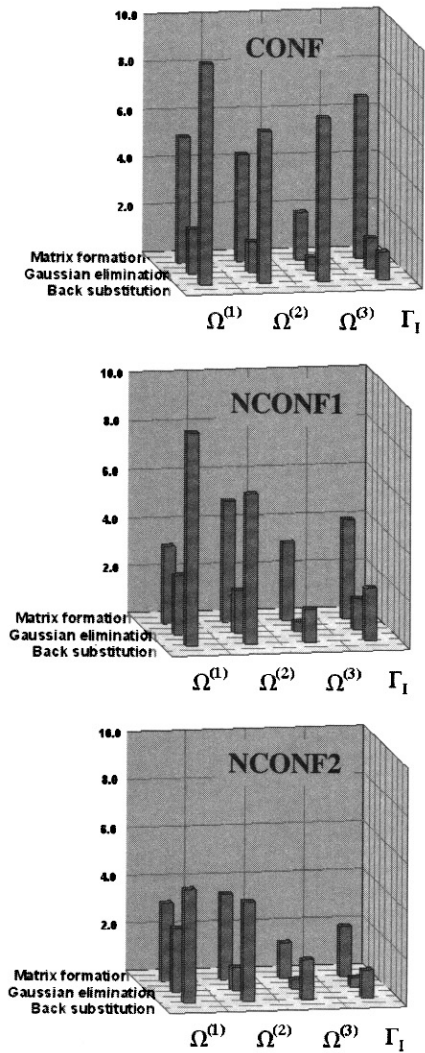


Fig. 10. Comparison of computational time

실제 계산에 소요된 시간을 Fig. 10에 제시하였다. ORIG를 1000으로 잡았을 때 CONF 47.5, NCONF1 40.7, NCONF2 26.9이며, 계산 시간이 획기적으로 단축되었다. 이는 영역 분할의 효과가 매우 두드러진 경우에 해당하며, ORIG 모델의 밴드 폭이 크게 작아져서 가우스 소거 등에 걸리는 시간이 크게 감소하기 때문이다.

3.2 터빈 블레이드의 fir-tree 결합

가스 터빈 엔진의 터빈 디스크와 블레이드 사이의 결합 메커니즘은 엔진의 안전성과 긴 운용 수명을 확보하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 그 중 fir-tree 결합은 과도한 응력 집중을 다중 접촉 영역에서 효과적으로 분산시킬 수 있으므로, 일반적으로 많이 이용되는 방식이다.

본 논문에서는 Fig. 11의 유한요소 모델 SUB8과 같이 이차원 형상으로 이상화시킨 fir-tree 결합 부위의 터빈 디스크에 대한 정밀 해석을 수행하였다. 주요 치수는 $a = 10 \text{ mm}$, $b = 18.2145 \text{ mm}$, 접촉 간극은 $s = 0.02 \text{ mm}$ 이다. 블레이드는 강체이며, 디스크는 Inconel 720 계열의 초합금으로서 $E = 220 \text{ GPa}$, $\nu = 0.29$, $\rho = 8,510 \text{ kg/m}^3$, $\alpha = 11.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $c_v = 439 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $\kappa = 48.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 디스크 초기 온도는 298 K , 블레이드 온도는 $1,229 \text{ K}$ 이다. 디스크 밑면에 수직 응력 $\sigma_v(t) = \sigma_M \sin 2\pi t / T_C$, $\sigma_M = 100 \text{ MPa}$, $T_C = 100 \text{ ms}$ 가 작용한다.

터빈 디스크의 주기성과 대칭성을 고려하여 우측 부위를 8개의 부영역 및 공유면으로 분할하였다. 총 2,797개 절점과 4,893개 요소가 포함되어 있으며, 모든 부영역의 경계면과 공유면에서 절

점 배치가 연속이다. 다중 접촉이 발생하는 블레이드 주위에 상대적으로 세밀한 요소를 사용하였다. 한편 Fig. 11의 ABAQ 모델은 상용 프로그램 ABAQUS를 이용하여 영역 분할되지 않은 형상을 모델링한 경우이다.

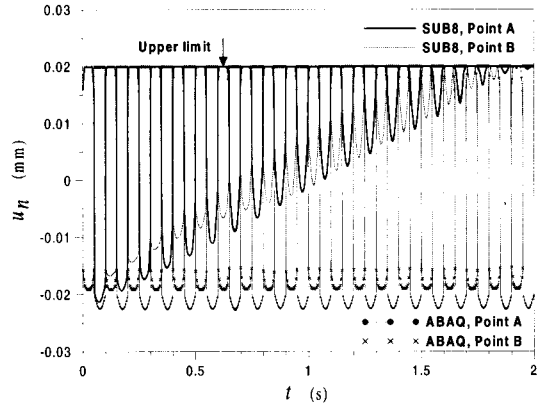


Fig. 12. Time response of displacement

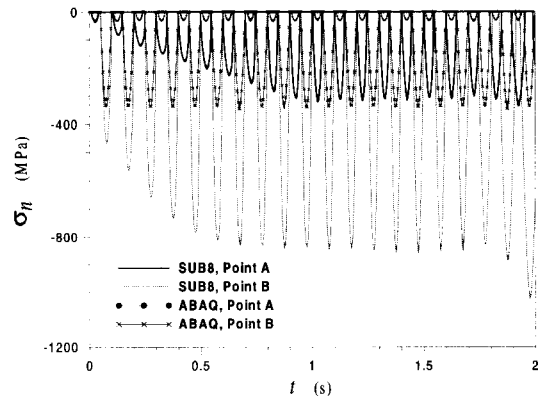


Fig. 13. Time response of contact stress

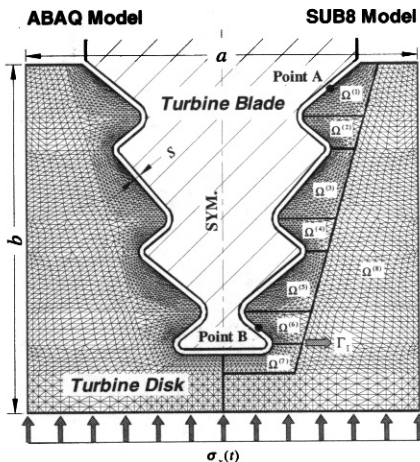


Fig. 11. Fir-tree region in turbine disk: ABAQ and SUB8

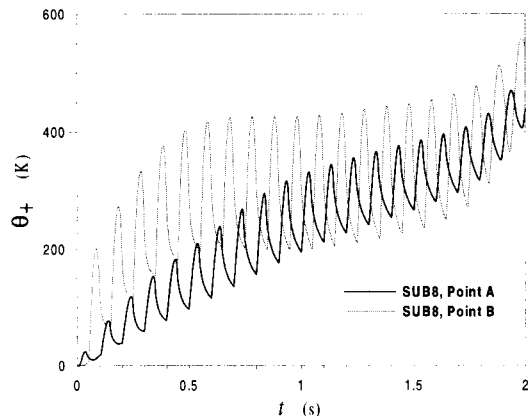


Fig. 14. Time response of temperature

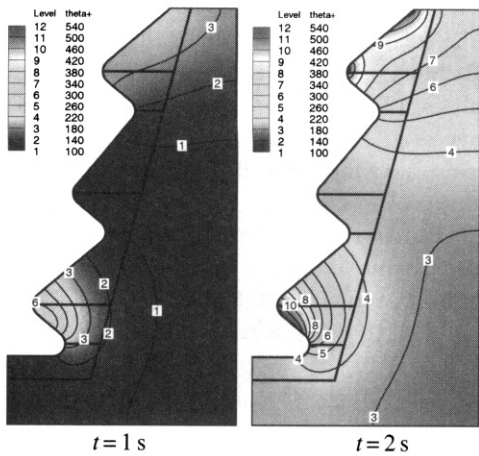


Fig. 15. Contour of temperature change

먼저 접촉면에 놓인 두 점(Point A, Point B)에서의 변위 및 접촉 응력 이력을 Fig. 12, 13에 도시하였다. ABAQUS는 동적 하중 환경에서의 열기계학적 완전 연계 해석 기능을 제공하지 않으므로, ABAQ는 터빈 디스크의 온도 변화를 무시한 상태의 동적 접촉 해석 결과를 의미한다. 반응 초기에는 SUB8 결과와 ABAQ 결과의 차이가 크지 않지만, 시간이 경과할수록 열기계학적 연계 효과에 의하여 그 차이가 두드러진다. SUB8의 경우 접촉 발생 영역에서의 순간적인 열 에너지 유입에 의하여 디스크 온도가 전체적으로 상승하고, 열 팽창 변형이 증가한다. 이에 따라 변위 진폭은 지속적으로 감소하며, 최대 접촉 응력은 증가한다. 이러한 열 팽창 효과에 의하여 2초가 경과하면 디스크의 Point A, Point B는 블레이드 벽면에 완전히 달라붙게 됨을 알 수 있다.

Fig. 14는 열기계학적 완전 연계 효과에 의한 온도 상승 효과를 나타낸 것이다. 블레이드 온도가 931 K 높으므로, 하중이 반복됨에 따라 접촉 여부에 의존하여 디스크의 온도가 지속적으로 상승하고 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로 SUB8 모델의 온도 변화 θ_4 에 대한 등고선($t=1s, 2s$)을 Fig. 15에 도시하였다. 열 에너지가 접촉면에서 디스크 내부로 전달되는 실제 과정을 자세히 점검할 수 있다. 또한 모든 공유면을 기준으로 온도장이 연속적으로 분포되어 있으므로, 벌칙 함수를 이용한 본 유한요소 부영역 결합법이 매우 정확함을 의미한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 접촉 현상을 포함하는 열기계학

적 완전 연계 문제를 효율적으로 해석하기 위하여 부영역과 공유면에 기반을 둔 유한요소 부영역 결합법을 제안하였다. 공유면에서 변위장 및 온도장에 관련된 연속 조건을 벌칙 함수로 직접 처리함으로써, 추가적인 라그랑지 승수의 도입이 필요하지 않다. 모든 부영역의 유효 강성 행렬이 항상 양정치화되며, 비선형 해를 구하기 위한 반복 계산에서 접촉 경계가 변하는 부영역의 강성 행렬만 다시 조립하면 된다.

또한 형상이 복잡한 구조물의 모델링 과정에 있어서는 공유면과 경계면에서 절점 연속성을 별도로 고려하지 않고 전체 영역을 자유자재로 유한요소 분할한 후, 할당된 부영역을 기준으로 각종 수치 연산을 독립적으로 수행할 수 있다. 열기계학적으로 완전 연계된 최종 지배 방정식이 블록 행렬 형태로 유도되므로, 적절한 병렬 알고리즘에 의한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산 소요 시간을 획기적으로 절감할 수 있다.

후 기

이 논문은 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(R05-2004-000-10537-0).

참고문헌

- 1) Nicholson, D. W., Finite Element Analysis: Thermomechanics of Solids, CRC Press, 2003.
- 2) Odabas, O. R. and Sarigul-Klijn, N., "Thermomechanical Coupling Effects at High Flight Speeds", AIAA Journal, Vol. 32, No. 2, 1994, pp. 425-430.
- 3) Delhelay, D. S., Nonlinear Finite Element Analysis of the Coupled Thermomechanical Behaviour of Turbine Disc Assemblies, M.A.Sc. Thesis, Univ. of Toronto, 1999.
- 4) MSC.MARC User's Manuals and Catalogs, MSC Software Co.
- 5) ABAQUS User's Manuals and Catalogs, ABAQUS, Inc.
- 6) Farhat, C. and Roux, F. X., "A Method of Finite Element Tearing and Interconnecting and its Parallel Solution Algorithm", Int. J. Numer. Meth. Eng., Vol. 32, 1991, pp. 1205-1227.
- 7) Aminpour, M. A., Ransom, J. B., and McCleary, S. L., "A Coupled Analysis Method for Structures with Independently Modelled Finite Element Subdomains", Int. J. Numer.

Meth. Eng., Vol. 38, 1995, pp. 3695-3718.

8) Park, K. C. and Felippa, C. A., "A Variational Framework for Solution Method Developments in Structural Mechanics", ASME J. Applied Mech., Vol. 65, 1998, pp. 242-249.

9) Dureisseix, D. and Farhat, C., "A Numerically Scalable Domain Decomposition Method for the Solution of Frictionless Contact Problems", Int. J. Numer. Meth. Eng., Vol. 50, 2001, pp. 2643-2666.

10) Cho, M. H. and Kim, W. B., "A Coupled Finite Element Analysis of Independently Modeled

Substructures by Penalty Frame Method", KSME Int. J., Vol. 16, 2002, pp. 1201- 1210.

11) Shin, E. S. and Kim, S. J., "Finite Element Analysis of Pin-load Composite Laminates by Connecting Independently Modeled Subdomains", Composites B: Engineering, Vol. 31, 2000, pp. 47-56.

12) Pantano, A. and Averill, R. C., "A Penalty -Based Finite Element Interface Technology", Compu. & Struct., Vol. 80, 2002, pp. 1725-1748.

13) 신의섭, "유한요소 부영역의 결합을 통한 복합재료 구조물의 동적 접촉 해석", 한국항공우주학회지, 제31권 제5호, 2003, pp. 55-62.