

3 차원 용접 잔류응력평가를 위한 비드플러시법의 개발

이형노[†] · 中村 春夫^{*} · 小林 英男^{**}

Development of the Bead Flush Method to Evaluate 3-Dimensional Welding Residual Stresses

Hyoungno Lee, Nakamura Haruo and Kobayashi Hideo

Key Words : Welding residual stresses(용접 잔류응력), Eigenstrain(고유변형률), The bead flush method(비드플러시법), Nondestructive evaluation(비파괴평가법), Inverse problem(역문제해석)

Abstract

Measurement of welding residual stresses is one of important tasks to assess the structural integrity of welded structures. For operating components, especially, nondestructive techniques are required. By now, authors have proposed a new residual stress evaluation method, the bead flush method, where residual stresses are calculated from eigenstrain distribution determined by surface removal of reinforcement. In this paper, a brief description of the bead flush method is given and its utility and problem to be overcome are discussed. And also stabilization method of solution set of eigenstrain in inverse analysis is proposed.

1. 서론

경년용접구조물의 구조건정성 확보에 있어서 용접 잔류응력의 평가는 중요하며, 그 평가법으로서 대부분의 경우 비파괴성과 실증성이 요구되고 있다. 그러나 현재 이러한 요구사항을 만족하는 평가법으로 X 선법이나 초음파법 등이 이용되고 있으나, 배관내표면부나 구조물 내부의 잔류응력평가가 불가능하다는 단점이 있고, 또한 적용가능재료 및 재료의 미시조직 등의 제한 등을 고려할 때, 보다 범용적으로 적용할 수 있는 평가방법이 요구되고 있다.

용접 시공시에 있어서 용접부에는 온도이력에 의해서 열변형률, 소성변형률 그리고 변태변형률 등의 비탄성변형률이 생성되게 되는데, 이들을 통틀어 고유변형률⁽¹⁾이라 부른다. 저자들은 지금까지 용접비드의 덧살부 제거과정에서 발생하는 해방변형률을 이용한 역문제해석을 통해서 고유변형률을 추정한 후, 추정된 고유변형률을 경계조건으로 입력한 순해석을 통해, 임의의 위치에서의 3 차원 잔

류응력을 평가하는 비드플러시법(The Bead Flush Method)⁽²⁻⁷⁾을 제안하였으며, 비드플러시법의 역학적 정식화 및 유효성을 제시하였다. 구조건정성 평가의 입장에서 고려하면, 비드의 덧살부는 오히려 제거하는것이 균열발생의 방지 등 기계적면에서 바람직하므로, 본수법은 본질적으로 비파괴평가법으로 분류된다.

본 연구에서는 먼저 비드플러시법의 개념과와 이론적 배경을 제시하며, 역문제해석에서의 해의 불안정성을 해결하기 위하여, 특이치분해법을 이용한 해의 안정화수법을 제안한다.

2. 비드플러시법의 제안

2.1 비드플러시법의 원리

물체에 고유변형률을 부하 할 경우, 물체 내부의 응력이 평형상태를 유지하기 위하여 탄성변형(잔류응력)을 하게 된다. 이러한 응력의 평형상태는 고유변형률을 이미 알고 있는 경우, 고유변형률을 초기변형률로 가정한 탄성유한요소해석에 의해 간단히 구해질 수 있다. 즉, 물체에 잔류하는 고유변형률을 어떤방법에 의해서 구할 수 있다면, 이를 이용한 수치해석으로 물체 내부의 3 차원 잔류응력분포를 구하는 것이 가능함을 의미한다.

[†] 동경공업대학 이공학연구과, 일본

^{*} 동경공업대학 공학부 제어시스템공학과, 일본

^{**} 동경공업대학 공학부 기계우주학과, 일본

그림 1 에 비드플러쉬법의 개념도를 나타낸다. 먼저, 부재표면의 용접선 근부에 부착한 스트레인 게이지에 의해 비드의 덧살부를 제거하는 과정에서 발생하는 해방변형률을 측정한다. 둘째, 측정된 해방변형률로부터 역문제해석을 통하여 고유변형률을 추정한다. 마지막으로 역문제해석에 의해 추정된 고유변형률을 이용한 탄성유한요소해석에 의해 3 차원 잔류응력분포를 추정한다.

이과정은 고유변형률을 역학적 경계조건으로 모델에 부하하여, 그 결과로써 발생하는 응력의 역학적 평형상태를 구하는 비교적 단순한 탄성해석으로, 본연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램 ANSYS 를 이용하여 해석하였다.

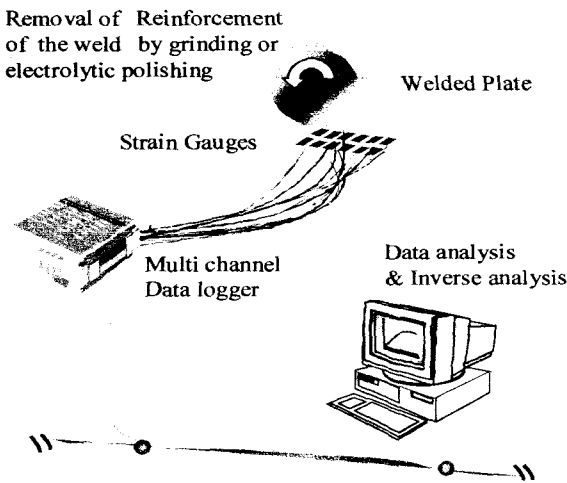


Fig.1 The proposed concept of the bead flush method

2.1.1 제목이론적 배경

용접잔류응력은 불균일한 고유변형률에 대해서 용접재가 역학적 평형상태를 유지하기 위한 탄성변형에 의해서 발생하게 된다. 그러므로, 고유변형률이 기지라고 하면, 잔류응력은 유한요소법 등을 이용한 수치해석에 의해서 간단히 구할수 있다. 결국, 잔류응력평가는 다음과 같은 역학적 계산에 의해 구할수 있다.

q 개의 변수에 의해서 표시되는 고유변형률 $\{\epsilon^*\}$ 이 존재하는 부재에서, 탄성변형률 $\{\epsilon\}$ 와 고유변형률 $\{\epsilon^*\}$ 과의 관계는 다음과 같다.

$$\{\epsilon^*\} = [H] \{\epsilon\} \quad (1)$$

여기서, 탄성응답행렬 H 의 j 성분은, j 번째의 성분만이 단위값으로 주어졌을 경우의 단위고유변형률

$$\{i\epsilon^*\} = \{0, \dots, 1, \dots, 0\}^T \quad (2)$$

가 존재하는 부재의 탄성변형률을 나타낸다. 그러므로 $[H]$ 는 단위고유변형률을 부하하는 탄성유한요소해석을 q 회 반복함으로써 구할수 있다. 비드부의 덧살제거 전후의 탄성응답행렬을 각각 $[H_b]$ 와 $[H_a]$ 라고 하면(여기서 첨자 b 와 a 는 각각 덧살제거 전후를 의미한다), 탄성응답관계는 식(1)에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\{\epsilon_b\} = [H_b] \{\epsilon_b^*\} \quad (3)$$

$$\{\epsilon_a\} = [H_a] \{\epsilon_a^*\} \quad (4)$$

부재표면에 k ($k > q$)개의 변형률변화 $\{m\Delta\epsilon\}$ 를 측정할 경우, 이때 측정치는 측정오차를 포함하고 있으므로, 이를 고려하기 위해서 이때의 측정오차를 $\{err\}$ 이라고 할 경우, 식(1)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{m\Delta\epsilon\} = [H] \{\epsilon^*\} + \{err\} \quad (5)$$

이때, 측정오차 $\{err\}$ 를 최소로 하는 고유변형률의 최적해를 $\{p\epsilon^*\}$ 라고 할 때, 다음의 식에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} \{p\epsilon^*\} &= ([H]^T [H])^{-1} [H]^T \{m\Delta\epsilon\} \\ &= [M]^{-1} [H]^T \{m\Delta\epsilon\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $[M] = [H]^T [H]$ 를 정보행렬이라 부르며, 최종적으로 구해진 최적해를 탄성유한요소해석의 경계조건(=초기변형률)으로 입력하여 순해석에 의해서 부재의 3 차원잔류응력분포가 구해진다.

3. 수치 시뮬레이션

3.1 해석모델

버드용접(맞대기용접)에 의한 평판을 대상으로, 제안수법의 범용성과 유효성을 실증하기 위한 해석실험을 실시하였다. 모델의 대칭성을 고려하여 평판의 1/4 을 해석대상($L=100\text{mm}$, $W=200\text{mm}$, $t=10\text{mm}$)으로 하였다. 본해석에 사용된 유한요소모델을 그림 2 에 나타낸다. 스테인레스강(SUS304)을 상정하여, 탄성계수 $E=2.0 \times 10^5 \text{MPa}$, 포아손비 $\nu=0.3$ 으로 하였다. 그림 3 과 같은 정해의 고유변형률을 가정하여, 본 제안수법에 의한 추정해와의 비교를 통하여 본 수법의 유효성을 검증하였다.

단, 고유변형률의 비드방향(x 방향) 분포의 경우, 용접 평판의 양단을 제외하고는 그 분포형상이 일정한 성질을 이용하여 일정하다고 가정하였다. 또한 부재의 두께가 충분히 얇은 경우, 두께방향(z 방향)의 고유변형률분포는 두께방향에 의존하지 않는다고 가정하였다.

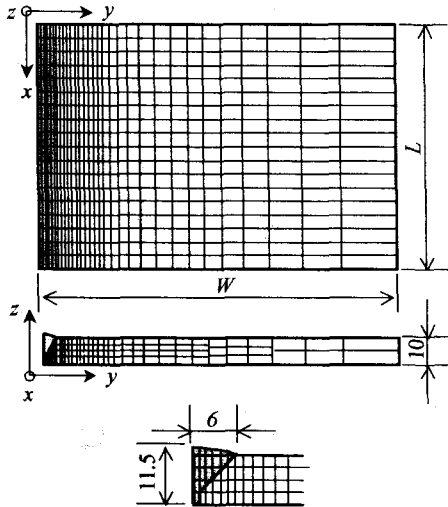


Fig. 2 FEM model of the Butt-welded plate

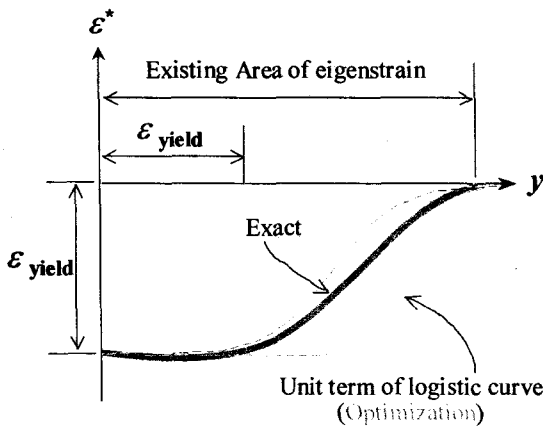


Fig. 3 Assume eigenstrain distribution and unit term of logistic function

3.2 해석방법

각요소의 고유변형율을 직접 추정하는 경우, 수많은 미지수 때문에 적절한 해를 구하기 힘들다. 그 해결책으로써 고유변형률이 용접선 근부에만 존재하는 성질을 이용하여, 고유변형율의 존재영역의 크기와 열영향부의 크기 등을 열탄소성해석

결과를 참조하여 미리 결정한 후, 이를 고려한 고유변형률분포의 관수화를 통해, 해의 존재공간을 한정하는 방법이 제안되어져 있다^(8,9). 그러나 이 경우, 관수를 구성하는 인자를 결정하기 위해서는 재료의 구성방식 등과 같은 역학적특성 및 재료의 온도의존성 등을 고려한 대규모적인 수치해석이 요구된다.

이러한 점에 착안하여 본수법에서는 해공간의 한정과 관수의 인자결정의 간편성을 목적으로, 고유변형률분포를 그림 3 과 같은 로지스틱관수를 이용함으로써, 미지수를 대폭 삭감하여 보다 간단히 해공간을 한정하는 수법을 제안하였다. 또한 실험계획법의 일종인 D 최적화수법을 이용하여 측정위치의 최적화함으로써, 측정정도를 향상시켰다.

본수법은 2 차원적 해방변형률(결과)을 이용하여 3 차원의 고유변형률분포(원인)를 추정하는 역문제 해석(inverse analysis) 과정⁽¹⁰⁾과 추정한 고유변형률분포(원인)를 탄성해석의 초기변형률로 입력하여 잔류응력(결과)을 평가하는 순문제해석(forward analysis) 과정으로 이루어져 있다. 이때의 문제점은, 2 차원적 해방변형률로부터 3 차원의 고유변형률을 구하는 과정에 있어서의 해의 불안정성에 있다. 그러므로 해의 안정성 향상을 목적으로 특이치분해법에 의한 계수저하법을 이용하여 역문제해석에 있어서의 해의 불안정성을 해결하였다.

4. 해석결과

4.1 잔류응력의 추정

그림 3 의 고유변형률의 정해분포를 해석모델에 부하한 후, 비드부의 덧살 제거 시뮬레이션을 실시한 경우, 모델의 표면요소에서 측정된 해방변형률의 이론치 $\{\Delta\epsilon\}$ 를 그림 4 에 나타낸다.

한편, 실제 해방변형률을 측정할 경우에는 반드시 측정오차가 발생하기 마련이므로, 본 해석에서는 이론치의 해방변형률 $\{\Delta\epsilon\}$ 에 오차의 란수벡터 $(N(\text{평균치 } 0, \text{표준편차 } 20\mu))$ 의 정규분포) $\{err\}$ 를 부과함으로써 측정치 $\{m\Delta\epsilon\}$ 를 표현하였다. 그림에서 흰점과 흑점은 각각 이론적 해방변형률 $\{\Delta\epsilon\}$ 와 오차가 포함된 측정치 $\{m\Delta\epsilon\}$ 를 나타낸다.

$$\epsilon_x^* = \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{1 + \exp(p + q_i y)} \times f(z) \quad (7)$$

앞절에서의 설명처럼 정도높은 해를 얻기 위해서는, 해공간의 한정필수적이며, 이를 위하여

식(7)과 같은 로지스틱파수를 이용하여 고유변형률의 정해분포를 추정하였다. 그러나 식(7)에서 알 수 있는 바와같이 미지수가 많을 경우, 정해의 추정이 힘들게 된다. 그러므로 불필요한 혹은 기여율이 작은 미지수를 삭감함으로써 해공간의 한정을 시도하였다.

먼저 각각의 고유변형률성분 ε_x^* , ε_y^* , ε_z^* 가 단독으로 잔류응력생성에 어느정도 기여하는지를 조사하였다. 주어진 고유변형률하에서의 잔류응력 혹은 해방변형률의 계산문제는 단순한 탄성문제로서, 중첩원리에 의해서 각각의 성분의 합계로 나타낼 수 있다. 그러므로 다음식에 의해서 각 성분에 의한 잔류응력생성에 대한 기여율을 계산하였다.

$$\alpha_s(\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*) = \alpha_s(\varepsilon_x^*, 0, 0) + \alpha_s(0, \varepsilon_y^*, 0) + \alpha_s(0, 0, \varepsilon_z^*) \quad (8)$$

여기서 왼쪽 변의 \square_s 는 고유변형률의 3 성분이 모두 작용하였을 때의 전체 잔류응력을 나타내며, 오른쪽 변의 각 항들은 각각의 고유변형률 \square_x , \square_y , \square_z 가 단독으로 작용하였을 경우, 각각의 성분에 의한 잔류응력의 생성량을 나타내고 있다. 그림 5에 이에 대한 결과를 나타낸다. 그림에서 흰점과 흑점은 각각 전체의 잔류응력분포와 각 성분에 의한 잔류응력의 생성량을 나타낸다.

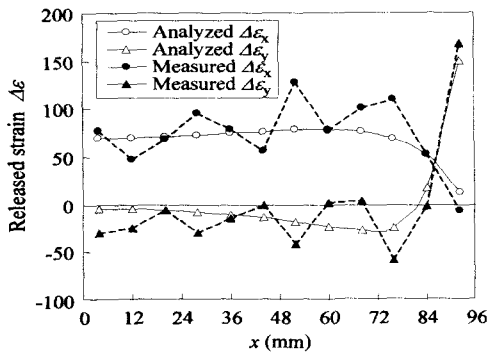
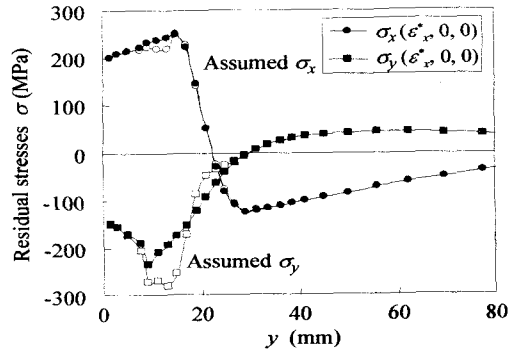


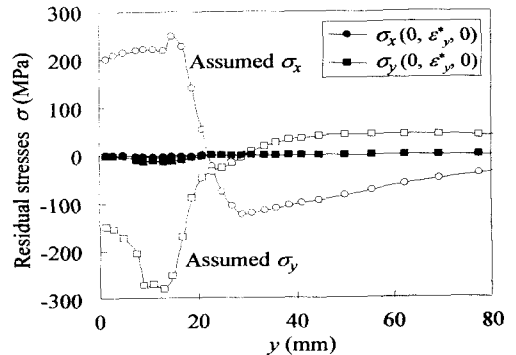
Fig.4 FEM model of the Butt-welded plate

그림에서 알 수 있는바와 같이, 비드성분(x 성분)의 고유변형률에 의한 잔류응력생성이 전체 잔류응력의 대부분을 차지하여 y 성분의 고유변형률은 거의 잔류응력을 생성하지 않는다는 것을 알 수 있으며, z 성분의 경우도 비드 근부에서 약간의 잔류응력을 생성하고 있으나, 비드방향의 성분에 비교할 때 그 생성량이 극히 적음을 확인할 수 있다. 이같은 결과는 y 방향의 구속이 없는 용접평

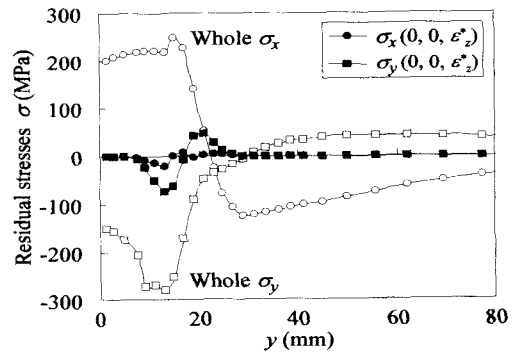
판의 경우, 잔류응력을 생성하는 고유변형률 성분이 x 성분이라는 것을 의미한다. 그러므로 잔류응력 생성에 기여하지 않는 고유변형률성분 y 와 z 를 무시함으로써, 미지수 수를 삭감하여 해공간을 한정하였다.



(a) Distribution of $\sigma_x(\varepsilon_x^*, 0, 0)$



(b) Distribution of $\sigma_x(0, \varepsilon_y^*, 0)$



(c) Distribution of $\sigma_x(0, 0, \varepsilon_z^*)$

Fig.5 Residual stresses produced by single component of eigenstrain (Open symbol: exact value)

4.2 SVD에 의한 해의 안정화

시뮬레이션에 의해 구해진 해방변형률의 이론

치(그림 4의 흰점)를 이용하여 고유변형률을 추정하는 역문제해석을 실시하였을 경우에는 그림 6의 점선으로 표시된 정해분포에 대해서 좋은 일치를 보인다. 그러나, 실제 해방변형률의 측정에 있어서, 측정오차는 피할수 없는 현상으로 어떤식으로든 이를 고려하지 않으면 안된다. 그림 6의 세 선들은 측정오차의 오차시드만을 15회 바꿔서 해석하였을 경우의 고유변형률분포를 나타내고 있다. 그림에서 알수 있는바와 같이, 해방변형률에 측정오차가 더해졌을 경우에는 정해분포의 추정이 불가능함을 알수 있다.

이를 해결하기 위해서 본수법에서는 탄성응답행렬에 특이치분해법(SVD)을 실시하여 응답행렬의 최적 rank를 구함으로써 정해분포를 추정하였다. 특이치분해법에 대해서는 다양한 방법들이 알려져 있으나 본수법에서는 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 먼저 본수법에서의 탄성응답행렬의 열(column)의 수는 4개이므로, 전체 rank의 수는 4가 되며, 이미 rank=4에 대해서는 그림 6에서 보듯, 정해분포 추정이 불가능함을 확인하였다. 그러므로 각각의 rank = 3, 2, 1에 대한 응답행렬을 구하여 정해분포의 추정하였다.

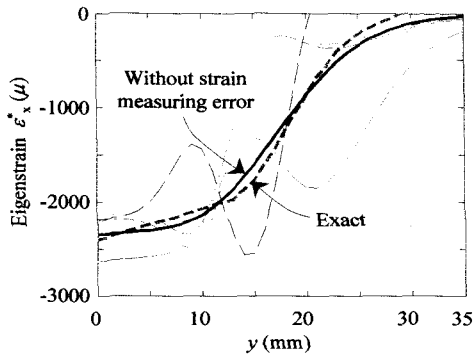


Fig.6 Estimated eigenstrain distribution ($sd_{err}=20\ \mu$, without regularization)

그림 7은 rank=2 경우의 고유변형률의 추정분포로서, 측정오차의 란수시드에 관계없이 정해분포에 대한 추정분포가 좋은 일치를 보이고 있음을 알수 있다.

또한 다양한 용접조건을 고려한 열탄소성해석을 통해 고유변형률의 분포특성에 관한 해석과 실험계획법의 D 최적화수법(D-optimality)에 의한 해방변형률의 측정위치의 최적화 방법등을 제안하였고, 실험및 수치해석을 통하여 유효성을 증명하였다.

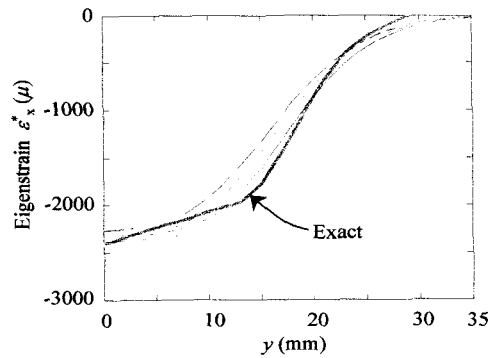


Fig.7 Estimated eigenstrain distribution ($sd_{err}=20\ \mu$, with regularization)

5. 결론

본 연구는 경년열화 용접구조물의 구조건전성 평가에 있어서 중요시되고 있는 잔류응력평가를 위한 새로운 비파괴적 평가법의 개발 및 제안을 목적으로 진행하였으며, 다음과 같은 내용으로 요약될 수 있다.

1. 용접구조물의 비파괴적 잔류응력평가를 위한 비드플러쉬법을 제안하였다. 본수법은 부재 표면의 비드의 덧살부를 제거하는 과정에서 발생하는 해방변형률을 이용한 역문제해석을 통하여 고유변형률을 추정한 후, 이를 탄성해석에 입력하여 3차원 잔류응력을 평가하는 방법이다.
2. 역문제해석에서 발생하는 해의 불안정성을 극복하기 위해서 본수법은 특이치분해법에 의한 계수저하법을 이용한 해의 안정화수법을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Murakawa H., 외 2명, Inherent Strain as an Interface Between Computational Welding Mechanics and Its Industrial Application. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena*, IOM Communications, (1998), 597-619
- (2) Nakamura H., 외 3명, Current Topic in Computational Mechanics, ASME PVP, 305 (1995)
- (3) 熊谷, 외 2명, JSME(A 偏), 65-634(1999-6), 1397-1404
- (4) Lee, 외 2명, M&m 2000 conference, JSME,

(2000), 587-588

- (5) Lee, 외 2 명, Symposium on Fatigue, JSMS, (2000), 83-86
- (6) Lee, 외 2 명, Material Science Research International, JSMS, (2001), 194-199
- (7) Lee, 외 2 명, Advances in Fracture and Damage mechanics II, Hoggar, (2001), 283-289
- (8) 上田, 외 2 명, 일본용접학회논문집, 11-4(1993), 555-562
- (9) 上田, 외 1 명, 일본용접학회논문집, 2-12-4(1994), 554-560
- (10) Kubo S., Inverse problems, 계산역학과 CAE 시리즈, (1992), 31-40