

# 적외선법을 이용한 콘크리트 空洞의 檢知한계에 관한 기초적 연구

## Fundamental Study on the Limit of Thermographic Survey Applied to Detection of Void in Concrete

權 五 鉉\*      谷 川 恭 雄\*\*

Kwon, Oh Hyun      Tanigawa Yasuo

---

### ABSTRACT

This study describes the results of experiment and numerical analysis for heating image by thermographic method when the size of void in concrete are changed.

By comparing analytical solution by finite element method with measured image by thermography, the relationships between the surface temperature which can be confirmed by this method, the size of void and optimum time for detection of void and the difference of temperature are cleared.

---

### 1. 서론

구조물 비파괴검사의 하나로서 근래에는 적외선(赤外線)을 이용한 비파괴시험법 연구<sup>1)~5)</sup>가 건설공학의 각 분야에서 활발히 진행되어지고 있으며, 실제로 건축물 외부마감재 박리(剝離)의 검지(檢知)<sup>6)7)</sup> 등에 일부 이용되고 있다. 이 시험법은 적외선 영상장치의 발전과 함께, 검사의 방법이 다른 시험법에 비하여 비접촉성으로서 안전하며, 고속으로 측정이 가능하고, 또한 기록의 보존 등이 가능하기 때문에 콘크리트 결함의 점검수단으로서 충분히 활용되어 질 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 주로 콘크리트의 시공불량이나 설비 배관의 설치 등에 따라 콘크리트의 구조체 내부

---

\* 정회원, 영남이공대학 건축학과 교수

\*\*名古屋大學 大學院 工學研究科 建築學專攻 教授

에 생기는 공동(空洞)을 검지하기 위한 목적으로서 콘크리트 공동의 크기를 변화시켜 열화상(熱晝像)의 실험과 해석을 실시한다. 그러나 적외선법은 콘크리트의 외부 표면온도에 대한 2차원적인 열화상 분포도로 부터 공동부와 건전부를 판단하는 수단으로, 수치적인 표면온도차 만으로는 내부공동을 알기가 쉽지 않다. 따라서 본 해석에서는 유한요소법에 의한 비정상(非定常) 열전도(熱傳導)해석<sup>8)</sup>의 결과를 穗坂의 식<sup>9)</sup>에 의한 표현기법에 따라 열화상을 작성하는 일련의 수법을 이용하여 실험과 같은 조건 하에서의 시뮬레이션을 실시하며, 적외선 영상장치에 의한 실측 화상과 비교·검토하여 공동의 검지한계에 대하여 고찰하고, 아울러 검지의 난이도에 영향을 미치는 인자에 대해서도 검토한다.

## 2. 실험의 개요

실험에 사용된 시험체의 모양과 크기를 그림1에 나타내었으며, 시험체 내부 공동의 크기와 치수는 4종류로서 표1과 같다. 실험은 맑은 날씨인 1998년 9월 8일의 오전7시부터 오후5시까지 옥외에서 실시하였으며, 시험체는 그림2와 같이 배치하였다.

실험방법은 매시간 변화하는 각 시험체의 표면온도분포를 적외선 영상장치를 이용하여 열화상을 측정하였고, 실험중 측정된 기온 및 일사량의 변화를 그림4에 나타내었다. 또한, 공동의 내부온도의 변화를 측정하기 위하여 공동의 중앙부 및 시험체 외곽 내부에 온도센서를 배치하여 표면온도와 상관성에 대해서도 검토하였다.

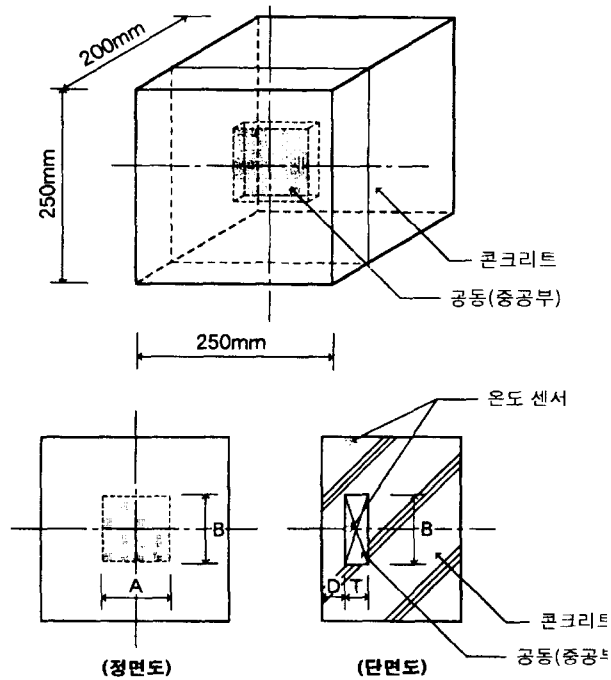


그림 1 실험에 사용된 시험체의 형상과 치수

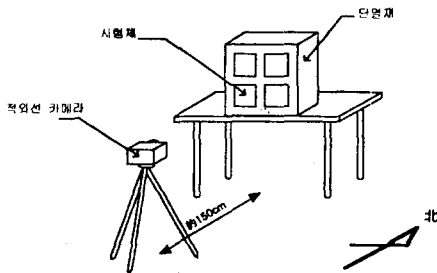


그림 2 실험의 계측 상황

표 1 시험체의 내부공동 크기

시험체 종류	공동의 크기 A×B(mm)	공동의 깊이 D(mm)	공동의 두께 T(mm)
V 11	100×100	25	25
V 12	75×75	25	25
V 13	50×50	25	25
V 14	25×25	25	25

### 3. 열화상해석의 개요

#### 3.1. 평활화에 의한 열화상형성

유한요소법에 의한 비정상 열전도해석의 결과는 각 절점에 있어서의 온도값으로 주어지므로 절점간의 온도의 기울기를 알기는 어렵다. 각 절점의 온도값으로 열화상을 작성하기 위해서는 각 절점의 온도값을 어떤 함수로써 연결해야 한다. 변수  $x, y$  함수간의 다항식의 표시는 Lagrange의 공식이 이용되며, 다음 (1)식으로 주어진다.

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{\pi(x)}{(x-x_k)\pi'(x_k)} y_k \quad \dots(1)$$

여기서  $\pi(x) \equiv (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n)$   
 $\pi'(x_k) \equiv \frac{d}{dx} \pi(x_k) = (x_n-x_0)\dots(x_k-x_n)$

그러나 위의 평활화 기법은 진동이 발생하므로 실용적이 못되며, 따라서 실용적인 평활화 기법으로써 다음의 Spline 보간함수를 사용한다.

절점의 위치벡터를  $P_0, P_1, \dots, P_n$ 로 하고  $P_{i-1}$ 과  $P_i$ 사이의 곡선을  $R_i$ 로 나타낸다.  $t_i$ 는 구간 파라메타로써 0과 1사이를 변화한다. 그림3에서와 같이  $A_i$ 는 현벡터,  $B_i, C_i$ 는 구간의 양단에 있어서의 접선벡터를 나타낸다. 전체곡선  $R_i(t_i)$ 는 곡률의 2승곡선을 따라 적분이 최소가 되도록 벡터  $B_i, C_i$ 를 결정하면 다음 (2)식으로 주어진다.

$$R_i(t_i) = R_i(0) + A_i f(t_i) + B_i g(t_i) + C_i h(t_i) \quad \dots(2)$$

여기서  $f(t) = t^2(3-2t)$

$g(t) = t(t-1)^2$

$h(t) = t^2(t-1)$

$R_i(0) = P_{i-1}$

$R_i(1) = P_{i-1} + A_i = P_i$

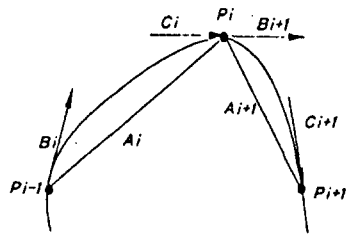


그림 3 절점군과 벡터의 관계

또한  $A_i, B_i, C_i$ 의 관계는

$$B_i + 2k_i(1+k_i)B_{i+1} + k_i^2 k_{i+1} B_{i+2} = 3(A_i + k_i^2 A_{i+1})$$

$$C_i = k_i B_{i+1} \quad \dots(3)$$

$$k_i = |A_i| / |A_{i+1}|$$

### 3.2. 열화상의 시뮬레이션

열화상 시뮬레이션을 위한 해석모델의 각부치수는 시험체와 동일한 250mm×250mm×200mm이며, 콘크리트 구조체의 중앙에 의사공동부로서 표면으로부터 25mm 깊이에 공동층의 두께 25mm, 가로×세로의 크기를 100mm~25mm로하여 전체의 1/4부분에 대해 10분할 121절점으로 요소를 분할하였다. 해석모델의 요소분할도를 그림4에 나타내었으며, 그림중에서 절점①의 표면온도를 공동부의 표면온도, 절점②의 표면온도를 콘크리트 건전부의 표면온도로 하고, 두점의 온도차를 공동부와 건전부의 표면온도차로 정의하였다.

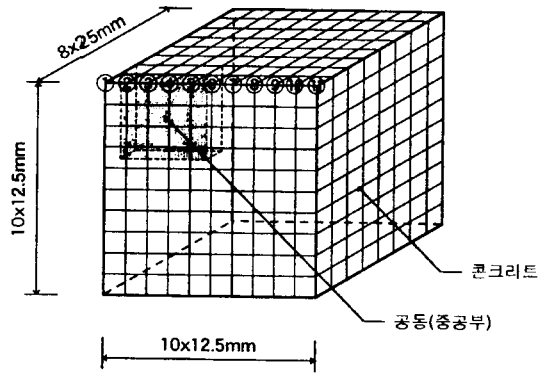


그림 4 해석모델의 요소분할도

해석은 7시부터 17시까지 그림5에 나타난 실험시의 일사량 및 기온을 외벽측의 외력에너지로서 입력하고, 실내측 표면에 대해서는 기온변화만을 주었다. 재료의 물성치는 표2에 나타난 값을 사용하였으며, 여기서 콘크리트의 일사흡수율은 일반적으로 사용되는 75%로 하였다. 또한, 절점온도의 초기치는 20 °C로써 균일한 것으로 하였으며, 해석시간의 증분은 1분으로 하고, 기상데이터를 경신하기 전 10분간은 외력에너지가 일정한 것으로 하였다.

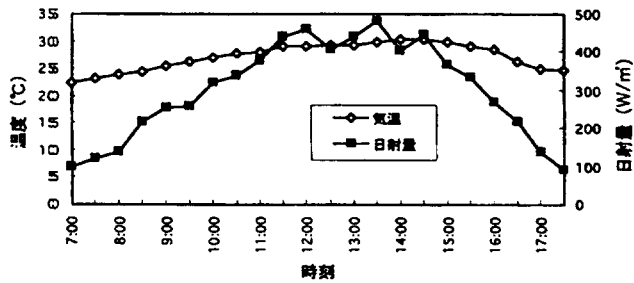


그림 5 일사량 및 기온변화

표 2 해석에 사용한 재료정수

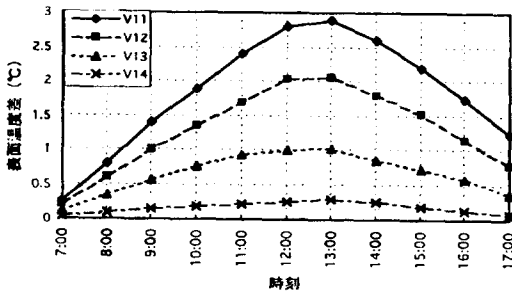
재료	열전도율 (W/m·K)	비열 (kJ/kg·K)	밀도 (kg/m³)	열전달율 (W/m²·K)	일사흡수율 (%)
콘크리트	1.590	0.882	2300	21.0	75
공기	0.022	1.010	1.3	-	-

#### 4. 결과 및 고찰

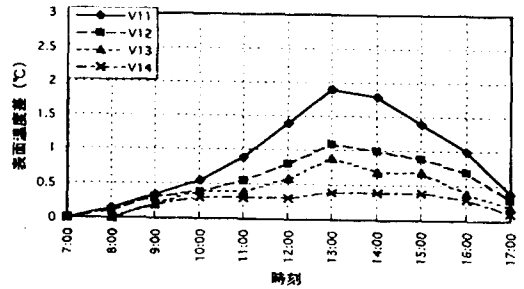
##### 4.1. 표면온도차

각 시험체에 따른 표면온도차의 실험 및 해석의 결과를 그림6에 나타내었다. 시험체 중앙의 공동부의 표면온도차에서 양자의 결과는 전체적으로 잘 일치하고 있는 것으로 나타나고 있으나, 실험에 따른 표면온도차가 해석에 의한 표면온도차보다는 전반적으로 작게 나타나고 있다. 그리고 그림7에 있는 표면온도의 분포를 보면 14시 이후의 실험결과치가 해석치에 비하여 크게 나타나고 있는데, 이것은 실험 시의 자연환경조건의 변화와 시험체 제작시의 시공정도(精度)상의 오차, 콘크리트 재료의 비균질성에 따른 열전도율의 차이 등에 따른 것으로 생각된다.

또한, 본 실험의 경우, 공동의 깊이가 최적인 시각은 하루중의 최고기온 시간대보다 약간 이른 12시~14시경으로 나타나고 있는데, 이 시각은 일사량과 외부기온의 변화에 따라 약간의 차이가 날 수 있는 것으로 생각된다.

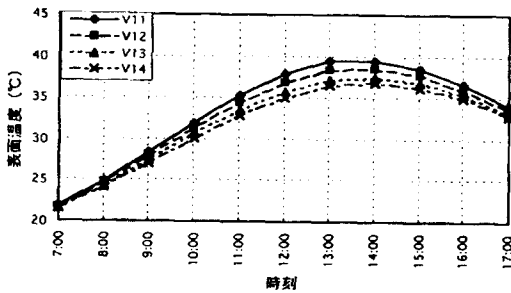


a) 해석 결과

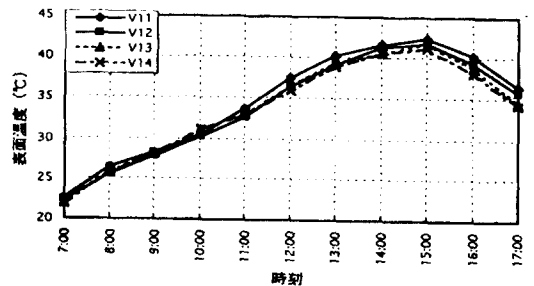


b) 실험 결과

그림 6 공동의 크기에 따른 표면온도차



a) 해석 결과



b) 실험 결과

그림 7 공동의 크기에 따른 표면온도

## 4.2. 표면과 내부의 온도차

공동의 표면과 내부온도와의 온도차의 변화를 측정된 실험결과를 그림8에 나타내었다. 여기서 시험체 중앙 공동부(절점①)의 표면온도와 내부온도와의 차이는 시험체에 따라 약간씩 차이가 있으나, 시간적으로 볼 때 12시~13시의 온도가 최대가 나타나고 있고, 이것은 표면온도차가 제일 큰 시각과 거의 일치하고 있는 것으로 볼 수 있다. 또한 시험체 외곽부(절점②)의 표면과 내부(깊이:25mm)와의 온도차는 중앙 공동부에 비하여 작게 나타나고 있는 것을 그림9를 통하여 알 수 있다.

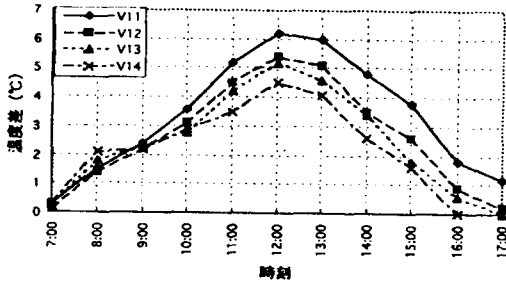


그림 8 공동부의 표면과 내부의 온도차(실험)

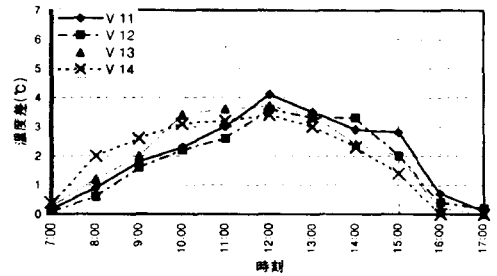
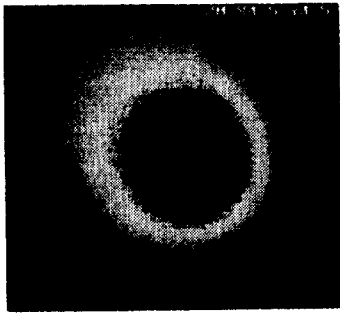


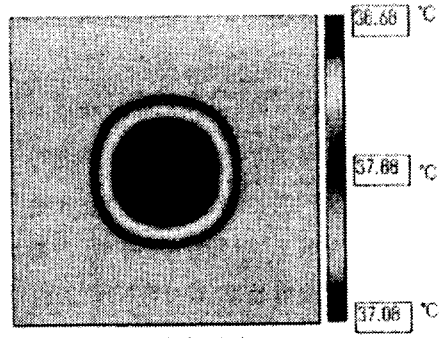
그림 9 외곽부의 표면과 내부의 온도차(실험)

## 4.3. 열화상의 시뮬레이션

유한요소법을 이용한 비정상 열전도해석에 따라 행하여지는 박리검지의 난이도<sup>2)</sup>에서는 표면온도차라고 하는 수치만을 근거로 하고 있는것에 반하여, 실험 및 시뮬레이션 열화상에 의한 공동검지의 난이도의 평가에서는 공동부 윤곽의 선명함이라고 하는 시각적인 정보가 더해진다. 아래의 그림10~그림13은 각 시험체에 있어 표면온도차가 최대가 되는 시각인 13시경에 있어 실험시의 열화상 및 해석에 따른 시뮬레이션 열화상을 나타내고 있다. 여기에서 알 수 있는 것은, V11(공동:100mm×100mm)~V13(공동:50mm×50mm)시험체에서는 실험 및 해석상에 있어 양측 모두 선명한 공동부의 윤곽을 볼 수 있어 가정한 공동과 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나, V14(공동:25mm×25mm)시험체에서는 실험에 의한 공동부의 검지가 거의 불가능하지만, 해석에서는 공동부의 존재가 희미하게나마 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 공동의 깊이가 25mm의 경우, 공동부의 윤곽이 선명하게 나타나는 표면의 온도차는 0.5°C 이상, 공동의 검지가 가능한 공동부의 크기는 50mm×50mm 이상으로 생각된다. 그렇지만, 표면온도차이의 크기와 공동검지의 난이도는 꼭 일치하지 않으며, 경우에 따라서는 해석에서 충분히 검지 가능한 온도차가 생기는데도, 열화상에서는 공동의 인식이 곤란한 때도 있다. 또한 시각적인 정보를 근거로 하는 공동의 판정에는, 측정자의 주관적 평가가 개입되기 때문에 측정자의 경험과 지식수준의 차이가 검지 결과의 평가에서 중요하다는 것을 간과해서는 안될 것이다.

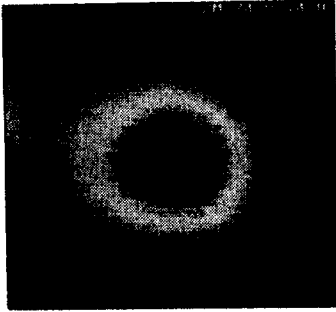


a) 실험 결과

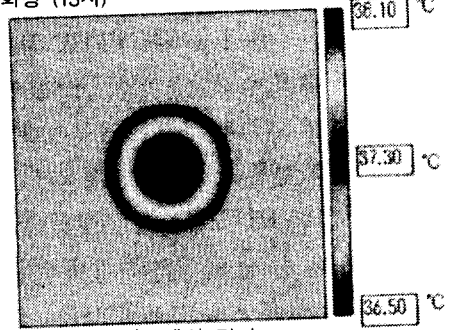


b) 해석 결과

그림 10 V11의 열화상 (13시)



a) 실험 결과

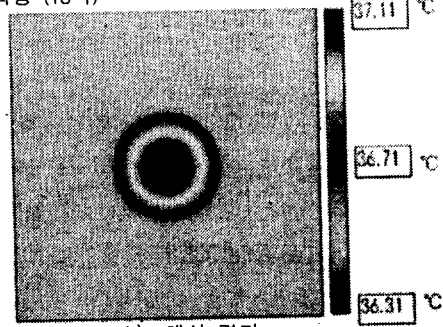


b) 해석 결과

그림 11 V12의 열화상 (13시)

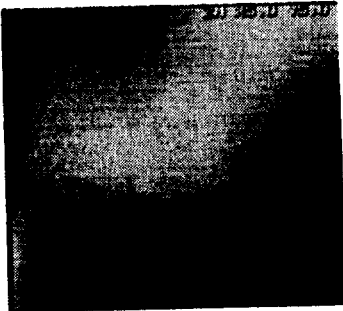


a) 실험 결과

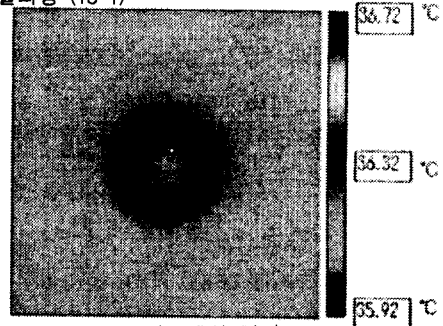


b) 해석 결과

그림 12 V13의 열화상 (13시)



a) 실험 결과



b) 해석 결과

그림 13 V14의 열화상 (13시)

## 5. 결론

적외선법에 의한 콘크리트 구조체의 내부공동의 검지는 공동부와 건전부 간에 생기는 표면온도차를 측정하는 것으로서, 공동부와 건전부의 판정은 열화상에서의 표면온도 분포를 측정자가 육안으로 확인하기 때문에 공동검지의 난이도는 표면온도에 따른 수치적 정보 이외에도 공동부 윤곽의 선명도라고 하는 시각적인 정보에도 좌우된다. 특히, 평활화 기법에 의한 열화상 시뮬레이션은 적외선에 의한 콘크리트 구조물의 공동현상을 검지하는데 있어 난이도를 평가하는 유효한 수단이 된다. 따라서 본 연구의 결과, 공동의 깊이가 25mm의 경우,

- 1) 육안에 의한 공동부의 인식이 가능한 표면의 온도차는 0.5℃ 이상,
- 2) 공동의 검지가 가능한 공동부의 크기는 50mm×50mm 이상,
- 3) 공동의 검지가 최적인 시각은 하루 중의 최고기온 시간대보다 약간 이른 12시~14시라고 생각된다. 또한 일사량 등의 변화에 따른 공동부의 표면과 내부의 온도차, 건전부에서의 내·외부 온도차는 공동부 표면의 열화상 형성과 윤곽의 선명도에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되어 진다.

본 연구 결과는 콘크리트 구조물의 결함조사방법의 하나로서 적외선법의 적용 가능성에 대한 기초적인 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 아울러 측정의 정도(精度)를 향상시키고 신뢰성을 확보할 수 있는 방안 마련이 시급히 요구된다.

## 참고 문헌

- 1) 込山, 谷川, 中野 : サーモグラフィ-法による外壁仕上げ材の剝離検知の適用限界に関する實驗的研究, 日本建築學會構造系論文集, No.484, pp.13-21, 1996.6
- 2) 込山, 谷川 : 스무-징그技術を用いた熱畫像シミュレーションの有用性と問題点, 日本建築學會構造系論文集, No.486, pp.15-22, 1996.8
- 3) T.Watanabe, H.Mori, Y.Tanigawa : Analytical Study on Estimation of Internal Defect in Concrete Wall by Thermography, Trans. of Japan Concrete Institute, Vol.15, pp.281-287, 1993
- 4) 柳内, 魚本 : 熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内の空隙·鐵筋の判讀に關する基礎的研究, 日本土木學會論文集, No.442, V-16, pp.91-100, 1992. 2
- 5) 山田, 勝見, 桃木 : 逆解析手法を適用したサーモグラフィ-法によるコンクリートの内部探査, 日本コンクリート工學年次論文報告集, Vol.19-1, pp.1315-1320, 1997
- 6) 新井 : タイル仕上げ等の剝離検知器の開発, 建設省技術評價書, pp.36-42, 1983
- 7) 日本コンクリート工學協會 : 콘크리트의非破壞試驗法研究委員會報告書, pp.280-297, 1992.3
- 8) 失川 : 流れと熱傳達の有限要素法入門, 培風館, pp.223-225, 1983
- 9) 穂坂 : コンピュータグラフィックス, 産業圖書, pp.87-93, 1974