

# 근거리 수치사진측량에 있어서 렌즈왜곡의 직접 보정 Direct Correction of Lens Distortions in Close-Range Digital Photogrammetry

안기원\* · 박병욱\*\* · 서두천\*\*\*

Ahn, Ki-Won · Park, Byung-Uk · Seo, Doo-Chun

## 要 旨

본 연구는 근거리 수치사진의 카메라 렌즈방사왜곡의 보정에 있어서, 기존 상용 소프트웨어의 최소제곱법에 의한 좌표변환방법인 기하보정틀을 사용하지 않고, 주변환식으로는 카메라 검정자료에서 제공되는 고차다항식을, 역변환에 있어서는 Newton-Raphson의 비선형 방정식의근의 해법을 직접 사용하여 렌즈방사왜곡을 보정함으로써 기하학적 정확도가 최소제곱법에 의한 좌표변환방법에 비하여 약 0.04~0.08화소 향상된 수치사진화상을 얻을 수 있었다. 또한 기존 소프트웨어에 있어서는 고차다항식의 최소제곱법 적용을 위해서 동일한 경중률의 많은 기준점의 선정작업을 필요로 하나, 본 연구에서 제시한 기법은 이 작업이 필요 없으므로 작업의 효율성을 높일 수 있었다.

## ABSTRACT

The lens distortions were corrected directly using the high-order polynomial which was offered in camera calibration data for the forward transformation and the root of Newton-Raphson's  $2 \times 2$  nonlinear system for the backward transformation. The 0.04~0.08 pixels increase in accuracy was indicated through the use of direct correction of lens distortions instead of least square methods of commercial software. The least square adjustment method of high-order polynomial requires many control points which has a same weight. But this suggested method which is unnecessary to determine control points was developed and applied. The algorithm showed improved efficacy.

## 1. 서 론

근거리 사진측량은 사진측량의 기본원리를 이용하여 근거리에서 촬영된 사진의 2차원 기하형상으로부터 대상물의 3차원 형상을 측정하는 기술이다. 전통적인 사진측량에 있어서는 아날로그형태의 사진으로부터 도화사가 도화기를 사용하여 3차원좌표를 획득하였으나, 최근에는 수치사진을 획득, 처리하는 수치사진측량기법의 적용을 통하여 아날로그 형태의 사진에 비해 많은 공정을 자동화할 수 있게 되었다.

수치사진을 획득하는 방법에는 측정용 카메라로 촬영된 필름이나 인화된 사진을 스캐닝하는 방법과 디지털

카메라로 촬영하는 방법을 들 수 있는데 디지털 카메라는 해상도가 떨어지고 카메라의 검정자료가 부족하여 정밀도가 낮을 수 있다. 측정용 카메라로 촬영된 필름을 스캐닝하여 사용하는 방법도 지상기준점 측량시의 오차, 스캐너의 기하왜곡오차, 카메라의 렌즈왜곡으로 인한 오차를 포함한 여러 가지 오차가 포함되어 있기 때문에 근거리 수치사진측량 방법에 의하여 높은 정밀도의 3차원 좌표를 획득하기 위해서는 적절한 수치사진측량기법의 개발과 적용이 필요하다.<sup>1)</sup>

스캐너의 왜곡오차나 디지털 카메라의 CCD 왜곡오차가 보정된 수치사진을 얻었다 하더라도 이 화상에는 렌즈의 왜곡으로 인한 기하학적인 오차가 포함되어 있다. 특히 근거리 수치사진측량과 같이 한 화소에 해당하는 사진상 또는 지상크기가 극히 작은 경우에는 렌즈왜곡의 영향이 크기 때문에 이를 정밀하게 보정하여 사용하여야 한다.<sup>2)</sup> 그러나 카메라의 렌즈왜곡은 사진기 렌즈마다 다

\*경상대학교 공과대학 토목공학과 교수  
(경상대학교 부속 생산기술연구소 연구원)  
\*\*한경대학교 토목공학과 조교수  
\*\*\*경상대학교 대학원 토목공학과 박사과정

르고, 제작시의 검정결과에 따라, 4차이상의 다항식을 사용하여 보정하는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 보다 높은 정밀도의 수치사진측득을 위해 고차다항식의 렌즈왜곡 오차보정식을 해석할 수 있는 기존의 상용소프트웨어의 기하보정방법을 조사하여, 그 문제점을 파악하고, 지상기준점을 사용하지 않는 렌즈방사왜곡의 직접 보정 알고리즘을 개발, 적용하고 평가해 보았다.

## 2. 연구내용

### 2.1 렌즈 왜곡오차의 보정식

사진의 상은 대상물로부터 반사된 빛이 렌즈중심을 직진하여 평면인 필름면에 투영되어 나타난다. 이러한 투영을 중심투영(central projection)이라 하며, 중심투영된 대상물을 실제 대상물과 일치시켜야 한다. 그러나 필름 및 건판의 신축, 카메라 렌즈의 수차, 주점왜곡, 대기굴절, 지구곡률 등의 영향으로 피사체의 상이 정확한 위치에 맺히지 못하고 왜곡이 발생한다. 이 중 렌즈의 수차에 의해서 발생하는 왜곡으로는 방사방향의 왜곡과 접선방향의 왜곡으로 나누어진다. 방사방향의 왜곡은 주점을 기준으로 대칭형으로 발생하며, 카메라 렌즈마다 그 양이 다르고 렌즈왜곡에 가장 큰 영향을 미치며, 접선방향의 왜곡은 비대칭형이며, 렌즈의 제작 및 합성과정에서 각 렌즈들의 중심이 일치하지 않아 발생한다.

접선방향의 왜곡은 conrady model에 의해 식(1)의 보정식으로 보정한다.<sup>3,4)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta x &= P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ \Delta y &= P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x, y$  : 사진좌표

$\Delta x, \Delta y$  : 접선방향 왜곡보정량

$r$  : 주점으로부터 임의점까지의 거리

$P_1, P_2$  : 접선방향 왜곡항의 계수

방사방향의 왜곡은 주점으로부터 임의점까지의 길이  $r$ 에 대한 방사왜곡량( $\Delta r$ )을 고려한 사진좌표( $x, y$ )는 아래의 식과 같이 보정된다.

$$\begin{aligned} x_c &= x - \frac{x}{r} \Delta r \\ y_c &= y - \frac{y}{r} \Delta r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x, y$ : 사진좌표

$x_c, y_c$ : 방사왜곡이 보정된 사진좌표

$\Delta r$ : 식(3)에 의해서 계산된 방사 왜곡량

$k_1 \sim k_n$ : 방사왜곡계수

$$\Delta r = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + \dots + k_n r^{2n-1} \quad (3)$$

보통 접선방향의 왜곡은 방사방향의 왜곡에 비해 매우 작으므로 방사방향의 왜곡만을 주로 보정한다. 이러한 왜곡의 보정량은 각 렌즈에 대한 검정자료를 기초로 하여 보간식에 의해 계산한다.

### 2.2 상용 소프트웨어의 방사왜곡 보정방법

렌즈방사왜곡 보정은 일반적으로 식(3)과 같은 고차다항식을 사용하여 좌표변환한 후, 보정화상을 작성한다. 수치화상처리용 상용소프트웨어에서 다항식을 사용하여 좌표변환화상을 작성하는 방법으로는 기하보정(geometric correction)방법이 있다. 이러한 기하보정 기능을 갖고 있는 수치화상처리용 상용 소프트웨어는 여러 가지가 있으며, 이 중 국내에 널리 알려진 소프트웨어로는 IDRISI, ER-MAPPER, ERDAS IMAGINE, INTERGRAPH Image Analyst 등이 있다. 이들 대부분은 그림 1에서 보는 바와 같은 단계를 거쳐 임의의 좌표계에서 다른 임의의 좌표계로 변환이 가능하다.

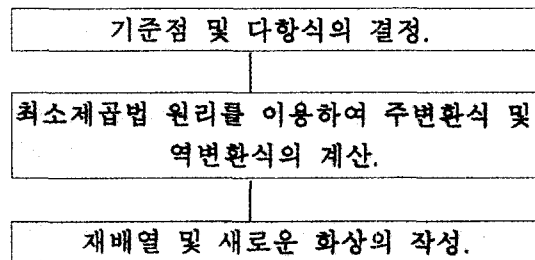


그림 1. 기하보정 흐름도

이들 상용소프트웨어에서의 좌표변환의 주목적은 인공 위성화상 또는 항공사진을 지도의 좌표체계와 일치시키는 것으로 식(4)와 같은 다항식을 많이 사용한다.

$$\begin{aligned} x_0 &= a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_6y^t \\ y_0 &= b_1 + b_2x + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + \dots + b_6y^t \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $a_i, b_i$ : 계수

$t$ : 다항식의 차수

본 연구에서 IDRISI(ver. window 2.1), ER-MAPPER(ver. 5.0), ERDAS IMAGINE(ver. 8.3.1), INTERGRAPH Image Analyst의 총 5가지 상용소프트웨어를 조사하였다. 이들 소프트웨어의 기하보정 기능을 사용하여 렌즈방사왜곡을 보정할 경우 다음과 같은 문제점이 있음을 알 수 있었다.

첫째, 이용 가능한 다항식의 차수에 한계가 있었다. 렌즈방사왜곡은 일반적으로 5차이상의 고차다항식을 사용하는데 IDRISI, ER-Mapper는 1차에서 3차 다항식까지, INTERGRAPH Image Analyst는 1차에서 5차까지 가능하였고, ERDAS IMAGINE만이 고차다항식의 차수에 한계가 없었다. 즉, 5차 및 그 이상의 고차다항식을 이용할 수 있는 소프트웨어는 제한적이며, 그 가격이 매우 고가이다.

둘째, 변환화상을 작성하기 위해서는 주변환식과 역변환식과 같은 두 개의 다항식이 필요하다. 이러한 다항식의 미지계수의 산출은 최소제곱법의 원리를 적용한다. 따라서, 다항식을 결정하기 위해서는 차수에 따라 다수의 기준점이 선정되어야 하며, 5차이상의 고차다항식을 이용할 경우 21점 이상이 필요하다. 즉, 많은 수의 기준점에 대하여 보정전 화상좌표와 보정후 화상좌표를 득취, 입력해야 하는 번거로움이 있음은 물론, 기준점 좌표들을 득취하는 사용자의 숙달정도에 따라 최종결과 화상의 정밀도가 크게 달라질 수 있다.

셋째, 보정될 화상의 임의점의 화소값 및 좌표는 최소제곱법으로 구한 다항식을 사용하여 산출한다. 따라서, 사진측량용 카메라의 검정자료에 제공되어 있는 카메라 렌즈의 왜곡보정식을 직접 적용하여 보정화상을 작성하는데는 어려움이 있다.

### 2.3 렌즈 방사왜곡의 직접 보정 알고리즘

측량용 카메라의 렌즈왜곡을 수치적으로 보정하는 방법으로는 카메라의 검정자료로서 제공되는 고차다항식(주로 5차 다항식)을 직접 사용하여 보정하는 방법이 엄밀한 방법일 것이다.

본 연구에서 개발한 렌즈 방사왜곡의 직접보정 알고리즘 주요내용은 다음과 같다.

1) 카메라 검정자료인 방사왜곡 보정식을 주 변환식으로 사용하여 출력화상(보정화상)의 크기와 범위를 결정한다.

2) 출력화상의 각 화소의 위치를 주변환식에 입력하고 이 화소에 대응하는 원화상(보정이전의 화상)의 위치를 “Newton-Raphson의 2x2 nonlinear system”으로 찾는다.

3) 구해진 원화상위치 주변의 화소값들로부터 출력화상의 화소값을 재배열(resampling) 기법으로 계산한다.

Newton-Raphson법은 방정식의 실근을 구하는데 많이 사용된다. 그림 2와 같이  $y = f(x)$ 상의 임의의 점 A에서 그은 접선과 x축과의 교점을 근사해의 반복값으로 택하는 방법이다.<sup>9)</sup>

그림 2에서 근의 초기가정을  $x_i$ 로 하면 점  $[x_i, f(x_i)]$ 에서 그은 접선이 x축과 만나는  $x_{i+1}$ 를 제 1 근사해로 취한다. 미계수(微係數)의 정의로부터,

$$f'(x_i) = \tan \theta = \frac{f(x_i) - 0}{x_i - x_{i+1}} \quad (5)$$

식(5)을 정리하면 다음과 같다.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (6)$$

위의 식(5)와 (6)은 기하학적으로 유도된 Newton-Raphson법이다.

Newton-Raphson법을 수치해석이 가능하도록 식(7)과 같은 n차의 다변량 방정식을 Taylor 급수 확장으로 전개하면 식(8)과 같다.

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$F_i(x + \delta x) = F_i(x) + \sum_{j=1}^n \delta x_j + \text{higher-order term} \quad (8)$$

식(8)에서 고차항을 무시하고,

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (J_{ij}: \text{Jacobian matrix}),$$

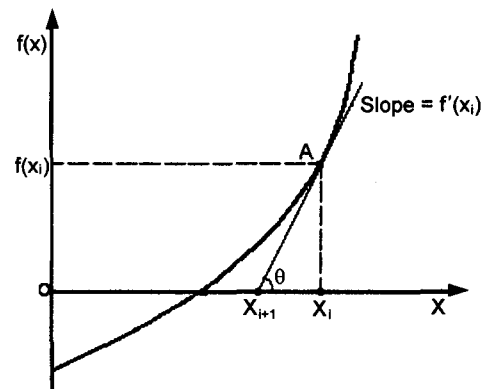


그림 2. Newton-Raphson법

$F_i(x + \delta x) = 0$ 으로 두고 식(8)을 선형화하면, 식(9)와 같이 된다.

$$F_i(x + \delta x) = F_i(x) + J_{ij} \cdot \delta x_j = 0 \quad (9)$$

식(9)를 간략화 하여,  $\delta x$ 로 정리하면 식(10)과 같이 된다.

$$\delta X = \frac{-F}{J} \quad (10)$$

식(10)에서 산출된  $\delta x$ 를 이용하여 식(11)과 같은 새로운 값을 계속 반복 산출하게 된다.

$$x_{new} = x_{old} + \delta x \quad (11)$$

반복하여 산출된  $\delta x$ 의 절대치가 초기에 가정한 값 이내 에 속하거나, 또는 계산된 근을 식(7)에 대입하여 산출된 F값이 초기가정값 이내이면 반복계산을 멈추게 된다.

### 3. 실험 및 결과

본 연구의 주목적은 렌즈왜곡 오차보정식을 해석할 수 있는 기존의 상용소프트웨어의 보정방법을 조사하여, 그 문제점을 파악하고, 지상기준점을 사용하지 않는 렌즈방사왜곡의 직접 보정 알고리즘을 개발, 이를 이용하여 렌즈 방사왜곡을 보정하는 것이다. 따라서, 직접 대상물을 촬영하고, 현상된 필름을 스캐닝하여 수치화상을 얻은

후, 상용소프트웨어에 의한 방법과 본 연구에서 개발한 직접보정방법을 각각 적용하여 수치화상의 렌즈왜곡을 보정하는 실험을 수행하였다.

선정된 촬영대상물로는 조경석(폭 75 cm, 높이 30 cm, 깊이 30 cm)을 선정하였다. 이 조경석은 그림 3에서 보는 바와 같이 나무기준(폭 95 cm, 높이 70 cm, 깊이 30 cm) 중앙 부분에 위치시킨 후 촬영하였다.

촬영카메라로는 Rollei Fototechnic GmbH & Co KG사의 측정용 카메라인 Rolleiflex 6006(focal length: 80.30 mm)을 사용하였다.

사용된 필름은 Kodak 칼리슬라이드 필름(ISO 64 또는 ISO 100), Kodak 흑백슬라이드 필름(ISO 25), Fuji 칼리슬라이드 필름(ISO 50) 등이며 이 중에서 현상 후 가장 선명한 필름을 택하여 사용하였다.

촬영된 사진을 컴퓨터 처리가 가능한 수치화상데이터로 만들기 위하여 필름전용 스캐너인 MICROTTEK 스캐너를 사용하여 스캐닝하였다. 스캐닝후의 화상은 약 6000 × 6000 화소크기(1화소는 사진상 약 0.01 × 0.01 mm크기)가 되도록 하였으며, 데이터 값은 0에서 255사이가 되도록 하였다.

스캐닝하여 얻어진 수치화상에 기준점(또는 검사점)으로 사용될 점들을 수치적으로 삽입, 배치하였으며, 배치 모습은 그림 3에서 보는 바와 같다. 기준점의 모양과 크기는 모니터에 확대된 화상으로부터 기준점의 화상좌표를 정확히 독취할 수 있도록 그림 4와 같이 설계한 후, 화상중심에서 상하 좌우 및 대각선방향으로 5 mm 간격

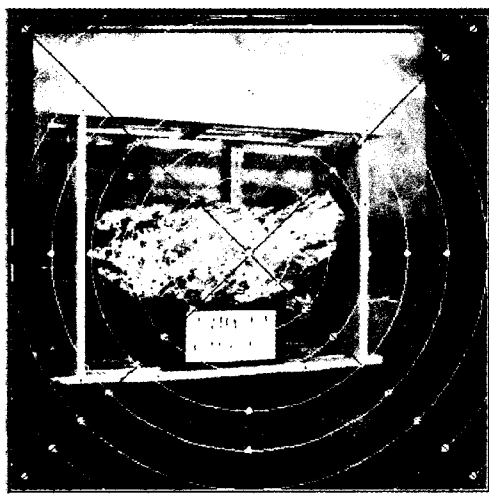


그림 3. 촬영대상물

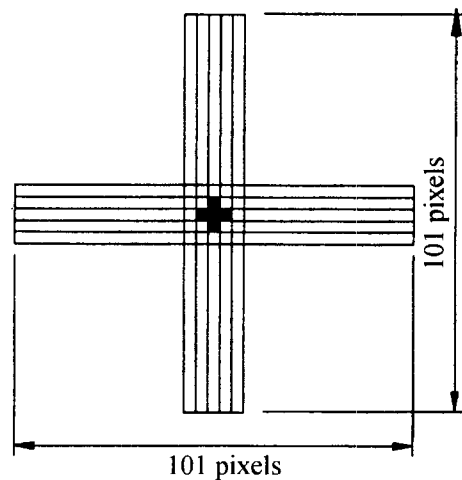


그림 4. 검사점의 모양과 크기

0	0	200	0	0
0	0	200	0	0
200	200	200	200	200
0	0	200	0	0
0	0	200	0	0

그림 5. 기준점내의 화소값

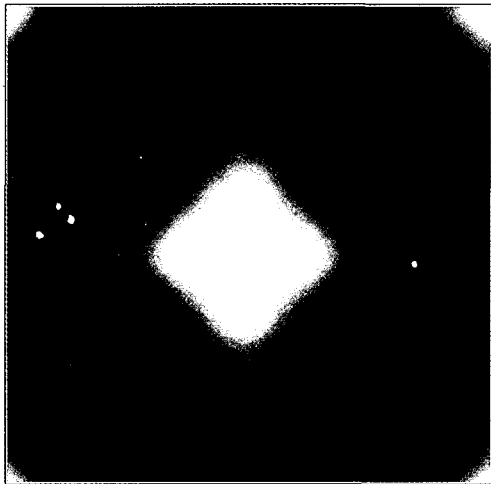


그림 6. 모니터상에 display된 기준점

마다 모두 53점을 배치하였다.

특히, 그림 4의 기준점 중앙부분(검은색 십자선 모습)은 그림 5와 같은 화소값을 부여하였으며, 나머지는 모두 화소값 0을 부여하였다.

그림 6은 설계된 기준점을 화상에 삽입한 후, 한 개 기준점의 중앙부분을 ERDAS IMAGINE(ver. 8.3.1)의 viewer상에서 cubic convolution 기법으로 확대시킨 모습이다.

렌즈 방사왜곡 보정식은 Rolleiflex 6006 카메라(Serial No.: 211 690 001)의 검정자료(calibration data)에 제시되어 있는 식(12)을 사용하였으며, 이 식에 의하여 작성

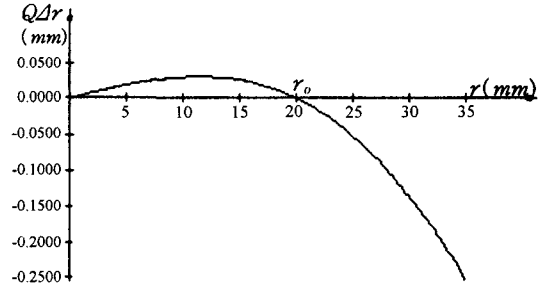


그림 7. 방사왜곡량 보정 그래프

된 보정그래프는 그림 7과 같다.

$$\Delta r = a_1 r(r^2 - r_0^2) + a_2 r(r^4 - r_0^4) \quad (12)$$

여기서,  $r_0 = 20.00$  mm

$$a_1 = -1.0280 \times 10^{-5}$$

$$a_2 = 9.1740 \times 10^{-10}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$\Delta r$  : 방사왜곡량

주점으로부터 임의점까지의 거리  $r$ 에 대한 방사왜곡량( $\Delta r$ )을 고려한 사진좌표( $x_c, y_c$ )는 식(2)와 같이 보정된다.

식(12)의  $\Delta r$ 과  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 을 식(2)에 대입하여 정리하면, 렌즈의 방사왜곡이 보정된 좌표( $x_c, y_c$ )를 구하는 식은 (13)와 같은 5차다항식이 된다.

$$\begin{aligned} x_c &= (1 + 400a_1 + 160000a_2)x - a_1x^3 - a_1xy^2 \\ &\quad - a_2x^5 - 2a_2x^3y^2 - a_2xy^4 \\ y_c &= (1 + 400a_1 + 160000a_2)y - a_1y^3 - a_1x^2y \\ &\quad - a_2y^5 - 2a_2x^2y^3 - a_2x^4y \end{aligned} \quad (13)$$

본 연구에서는 3차 다항식과 5차 다항식을 각각 적용하여 렌즈 방사왜곡의 차이와 그 형태를 파악해 보았는데 3차 다항식의 경우에 있어서는, 식(14)과 같은 식이 사용되었다.

$$\begin{aligned} x_c &= (1 + 400a_1 + 160000a_2)x - a_1x^3 - a_1xy^2 \\ y_c &= (1 + 400a_1 + 160000a_2)y - a_1y^3 - a_1x^2y \end{aligned} \quad (14)$$

### 3.1 최소제곱법에 의한 렌즈 방사왜곡보정

최소제곱법원리를 적용한 렌즈 방사왜곡의 보정에 있어서는 기존의 상용소프트웨어인 ERDAS IMAGINE

의 기하보정 툴(tool)과 본 연구에서 직접 작성한 3차 및 5차 다항식을 이용한 좌표변환 프로그램을 이용하였다.

최소제곱법원리를 적용하여 렌즈 방사왜곡을 보정하기 위해서는 먼저 기준점이 선정되어야 하므로, 화상전반에 걸쳐 고르게 분포된 25점을 기준점으로 선정하였다. 기준점들의 보정전 화상좌표는 기준점 배치시의 좌표를, 보정후 화상좌표는 검정자료의 방사왜곡 보정식으로 산출된 좌표를 입력하여 보정을 수행하였다. 재배열방법으로는 공1차내삽법(bilinear interpolation)을 적용하였으며, 보정화상은 6000×6000 화소크기(한 화소는 사진상 0.01 mm×0.01 mm 크기)가 되도록 하였다. 그림 8은 5차 다항식을 사용하여 ERDAS IMAGINE 소프트웨어로 렌즈왜곡을 보정한 화상이다. 그림 9와 그림 10은 본 연구를 위하여 최소제곱법 원리로 작성한 프로그램 중 5차 다항식 또는 3차 다항식을 사용하여 렌즈왜곡을 보정한 화상이다.

최소제곱법원리를 적용하여 렌즈 방사왜곡을 보정하기 위해서는 먼저 기준점이 선정되어야 하므로, 화상전반에 걸쳐 고르게 분포된 25점을 기준점으로 선정하였다. 기준점들의 보정전 화상좌표는 기준점 배치시의 좌표를, 보정후 화상좌표는 검정자료의 방사왜곡 보정식으로 산출된 좌표를 입력하여 보정을 수행하였다. 재배열방법으로는 공1차내삽법(bilinear interpolation)을 적용하였으며, 보정화상은 6000×6000 화소크기(한 화소는 사진상

0.01 mm×0.01 mm 크기)가 되도록 하였다. 그림 8은 5차 다항식을 사용하여 ERDAS IMAGINE 소프트웨어로 렌즈왜곡을 보정한 화상이다. 그림 9와 그림 10은 본 연구를 위하여 최소제곱법 원리로 작성한 프로그램 중 5차 다항식 또는 3차 다항식을 사용하여 렌즈왜곡을 보정한 화상이다.

### 3.2 Newton-Raphson법에 의한 렌즈 방사왜곡보정이 방법에 있어서는 기준점을 사용하지 않았으며, 2.3

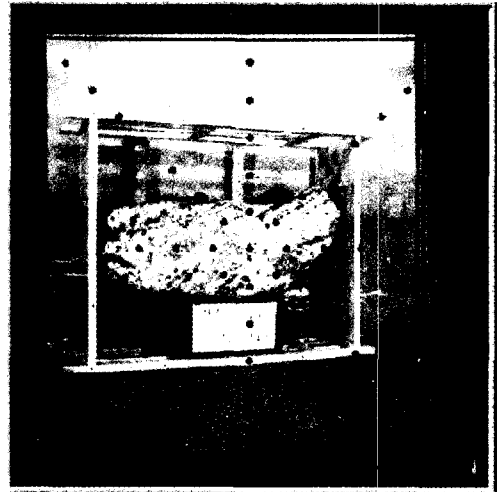


그림 9. 최소제곱법 원리로 작성된 프로그램의 5차다항식을 이용하여 렌즈왜곡을 보정한 화상

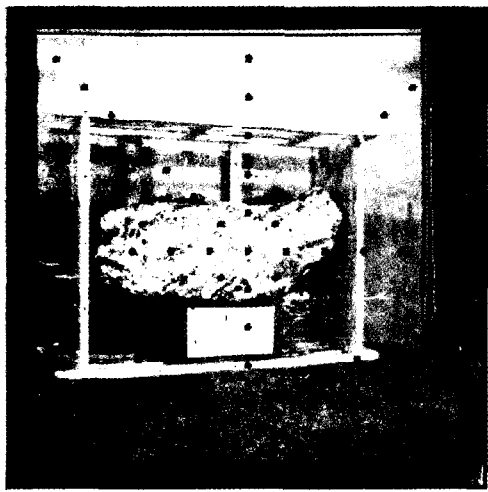


그림 8. ERDAS IMAGINE의 5차다항식을 이용하여 렌즈왜곡을 보정한 화상

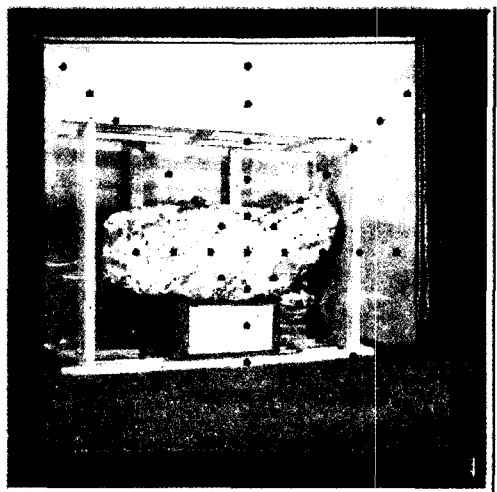


그림 10. 최소제곱법 원리로 작성된 프로그램의 3차다항식을 이용하여 렌즈왜곡을 보정한 화상

에서 설명한 바와 같이 카메라 검정자료의 방사왜곡 보정식을 주변환식으로 사용하여 보정한후 화상의 크기와 범위를 정하였다.

보정 후 화상의 각 화소의 원화상(보정 이전 화상) 위치를 Newton-Raphson법으로 찾은 후, 재배열기법으로 화소값을 계산하였다. 그림 11은 본 연구에서 개발된 직접 보정 방법에 의하여 렌즈 방사왜곡을 보정한 결과 화상으로서 화상크기와 한 화소의 크기는 앞의 경우와 같다.

#### 4. 평가 및 고찰

본 연구에서 적용한 최소제곱법원리를 적용한 방사왜곡의 보정법과 Newton-Raphson의 2×2 nonlinear system 근의 해법에 의한 방사 왜곡의 직접 보정기법의 결과를 상호 비교하기 위하여 보정전의 화상에 수평, 수직 및 대각선 방향의 5 mm간격으로 삽입한 53개의 기준점에 대해서 화상좌표를 조사하였다.

보정후의 화상좌표를 독취하기 위하여 본 연구에서는 ERDAS IMAGINE viewer상에

- ① ERDAS IMAGINE 소프트웨어의 5차 다항식을 이용한 보정화상
- ② ERDAS IMAGINE 소프트웨어의 3차 다항식을 이용한 보정화상
- ③ 최소제곱법원리로 작성한 프로그램의 5차 다항식을 이용한 보정화상
- ④ 최소제곱법원리로 작성한 프로그램의 3차 다항식을

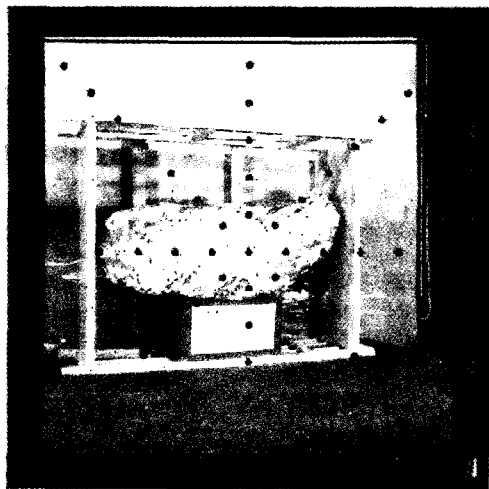


그림 11. Newton-Raphson법에 의한 보정화상

이용한 보정화상

- ⑤ 본 연구에서 개발한 직접 보정방법 중 5차 다항식을 이용한 보정화상
- ⑥ 본 연구에서 개발한 직접 보정방법 중 3차 다항식을 이용한 보정화상

의 6개 보정화상을 고해상도 모니터(해상력 1600×1200 dpi)상에서 이 점들의 화상좌표를 화소이하 2자리까지 읽었다.

이와 같은 방법으로 읽은 53개점들의 보정후 화상좌표와 정확한 좌표(보정전 화상위치를 검정자료의 방사왜곡 보정식에 넣어 계산한 이상적인 보정 후 화상좌표)간의 오차(거리)를 비교한 결과, 표 1 및 그림 12와 같은 정확도를 파악할 수 있었다.

표 1의 정확도는 식(4.1)로 계산한 결과이다.

$$\text{정확도} = \frac{\sum d_i}{n} \quad (15)$$

여기서, n=53(기준점수)

d<sub>i</sub>는 식(13)로 계산된 정확한 화상좌표와 보정결과 화상의 화상좌표간의 오차로서 다음 식으로 계산하였다.

$$d_i = \sqrt{(\text{Row}_i - \text{Row}'_i)^2 + (\text{Column}_i - \text{Column}'_i)^2}$$

여기서, (Row<sub>i</sub>, Column<sub>i</sub>) ... 식(13)에 의한 계산결과 (Row'<sub>i</sub>, Column'<sub>i</sub>) ... 보정화상에서 독취한 화상좌표

표 1. 각 방법별 렌즈 방사왜곡 보정 정확도(단위: 화소)

적용다항식	ERDAS IMAGINE 소프트웨어	최소제곱법 원리로 작성된 프로그램	Newton-Raphson 법에 의한 직접 보정방법
5 poly.	0.18	0.14	0.10
3 poly.	3.55	3.57	3.33

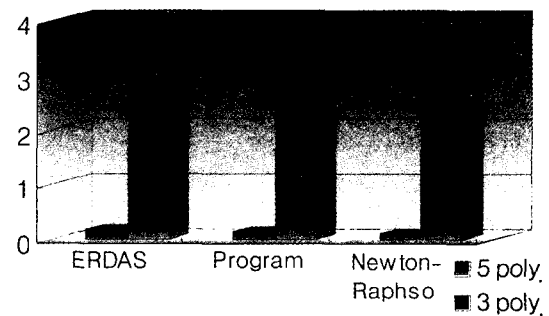


그림 12. 각 방법별 렌즈 방사왜곡 보정 정확도(단위: 화소)

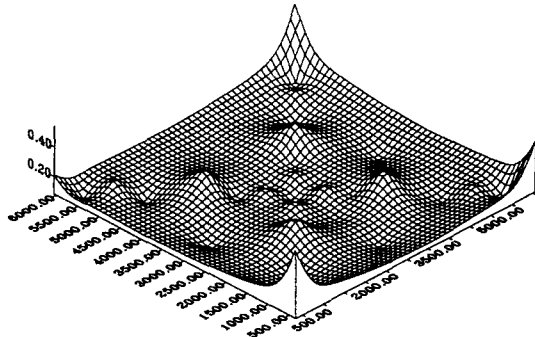


그림 13. 최소제곱법(5차다항식)으로 보정한 화상에서의 각 기준점별 화상좌표 오차

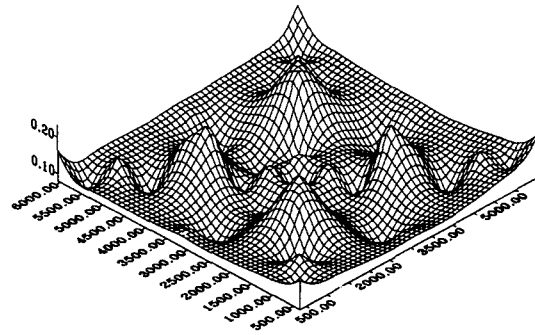


그림 14. Newton-Raphson법(5차다항식)으로 보정한 화상에서의 각 기준점별 화상좌표 오차

그림 13과 그림 14는 최소제곱법과 Newton-Raphson법의 보정화상에 있어서의 기준점별 보정오차를 나타낸 것이다.

위의 결과를 살펴보면 5차 다항식을 적용한 경우 Newton-Raphson법이 최소제곱법으로 렌즈왜곡을 보정한 화상에 비하여 0.04~0.08화소정도 정확도가 향상됨을 알 수 있었으며, 특히 최소제곱법으로 보정한 화상에 있어서는

화상중심에서 멀어질수록 오차가 점차 증대되며, 화상 중심에서  $r=40$  mm정도 떨어진 곳에서는 Newton-Raphson기법에 비하여 약 2배정도의 오차가 발생됨을 알 수 있었다.

3차 다항식을 적용한 경우의 정확도는 3.33~3.55 화소 크기로서 오차가 매우 크므로 고해상도의 수치사진

처리에 있어서는 3차보다는 5차 다항식 또는 그 이상의 고차 다항식을 적용해야 함을 알 수 있었다.

이는 그림 7의 방사왜곡량 보정 그래프에서 나타난 것처럼 사진중심으로부터 35 mm이상 떨어진 거리에서 보정량이 급격히 증대됨을 나타내고 있다. 이 때 최소제곱법에 의한 방법들은 기준점 화상좌표의 고차제곱항 때문에 입력되는 화상좌표에 작은 오차만 포함되어 있어도 결정되는 변환식 계수에 큰 영향을 미치므로 결국 변환식 계수산정의 부정확성으로 인한 결과라고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 높은 정밀도의 수치사진획득을 위해 기존 소프트웨어의 좌표변환방법을 사용하지 않고 직접 렌즈 왜곡을 보정하는 방법을 제시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제시한 직접 보정방법은 주변환식으로는 카메라 검정자료에서 제공되는 고차다항식을, 역변환은 Newton-Raphson방법을 직접 사용하여 렌즈 방사왜곡을 보정하였으며 기하학적 정확도가 향상된 수치사진 화상을 얻을 수 있었다.

(2) 기존의 소프트웨어는 최소제곱법의 적용을 위해 다수의 기준점선정과 기준점의 화상좌표를 읽어야 하는 번거로운 작업을 필요로 하나, 본 연구에서 제시한 기법은 이 작업이 필요없으므로 작업의 효율성을 높일 수 있었다.

## 참고문헌

1. 안기원, "CCD Camera Scanner의 스캐닝 왜곡 보정 기법 연구", 한국측지학회지, 제12권, 제2호, 1994, 173-180.
2. 안기원 외, "비측정용 사진의 측정을 위한 수치화상처리 기법의 적용", 한국측지학회지, 제13권, 제2호, 1995, 199-208.
3. 유복모, "사진측정학", 문운당, 1995, 203-207.
4. Moffitt, W. H., Mikail, E. D., "Photogrammetry", Happer Row Publishers, 1980, 275-30.
5. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., "Numerical Recipes in Fortran", Cambridge University Press, 1992, 372-375.