

어안렌즈 터널영상의 경계선 왜곡 보정 Distortion Correction of Boundary Lines in a Tunnel Image Captured by Fisheye Lens

김기홍* · 정 수**
Kim, Gi Hong · Jeong, Soo

要 旨

어안렌즈는 사각이 넓어서 터널 내부 벽면의 영상을 취득하는 데 유용하다. 원통투영의 원리를 이용하여 어안렌즈 터널 영상을 우리의 눈에 익숙한 일반 영상으로 변환시킬 수 있는데, 이 과정에서 여러 종류의 왜곡이 발생하게 된다. 본 논문은 투영영상의 터널 바닥면과 벽면 사이 경계선에서 발생하는 왜곡을 다루고 있다. 경계선 왜곡의 발생 원인을 분석하고 모형을 제작하여 보정량 계산식을 유도하였다. Visual C++로 제작한 소프트웨어를 이용하여 계산된 보정량을 투영영상에 적용한 결과 경계선이 보정된 영상을 얻을 수 있었다. 투영영상에 나타난 다른 왜곡에 대한 연구가 추가된다면 어안렌즈 영상을 통해 실제 터널 벽면과 유사한 영상을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 어안렌즈, 원통투영, 왜곡 보정, 터널영상, 경계선

Abstract

Having a wide angle of view, a fisheye lens is useful for obtaining images of the inside wall of a tunnel. A circular fisheye tunnel image can be transformed into a familiar rectangular image by applying the concept of cylindrical projection. This projection transformation causes several types of distortions in the projected image. This paper discusses the distortion on the boundary lines between smoothly curved wall and flat ground. We analyzed the cause of this boundary distortion, developed transformation model, and derived a correction formular. A distortion correction software programmed in Visual C++ applied to projected image. Consequently, boundary-corrected image could be obtained. Research into other distortions of projected image will helpful in obtaining tunnel image that resembles real tunnel from fisheye tunnel image.

Keywords : Fisheye lens, Cylindrical projection, Distortion correction, Tunnel image, Boundary line

1. 서 론

터널 시공현장은 내부공간이 협소하며 시공관리 및 안전성 확보 차원에서 측량의 중요성이 크다. 측량분야에서 터널과 관련된 연구 성과로 토탈스테이션을 이용한 측량성과를 시공관리에 적용하는 연구(최석근 등, 2006; 배상호 등, 2006; 박경식 등, 2007)와 레이저스캐닝시스템을 이용한 측량성과를 활용하는 연구(이재원 등, 2007; 김인섭 등, 2007; 윤정숙 등, 2007; 조형식 등, 2008)가 발표되었다. 디지털 영상을 이용하는 연구로 김광엽 등(2007)은 영상계측을 이용하여 내공변위 계측단면 상에 위치한 광과 타겟의 변위를 측정하였고

박석균과 이강문(2008)은 콘크리트 터널 라이닝의 결함을 디지털 영상으로 조사하는 방법을 제안하였다.

터널과 같이 단면에 비해 길이가 긴 구조물 내부 벽면의 영상을 얻는 데는 사각(寫角)이 넓은 어안렌즈가 효과적이다. 그림 1(a)는 실제 터널 내부의 어안렌즈 영상이다. 본 연구에서 사용된 어안렌즈는 시그마 8mm 3.5 EX DG Circular 어안렌즈이며, 사양은 표 1과 같다. 이와 같은 원형의 어안렌즈 영상은 원통투영의 원리를 적용한 변환을 통해 그림 1(b)와 같이 일반 사진기의 영상과 유사한 직사각형 영상으로 변환될 수 있다(김기홍 등, 2009). 여기서는 이러한 변환과정을 ‘투영변환’, 투영변환 결과 생성된 영상을 ‘투영영상’으로 칭하겠다.

2011년 10월 14일 접수, 2011년 11월 11일 채택

* 종신회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 부교수(ghkim@gwnu.ac.kr)

** 교신저자 · 종신회원 · 안동대학교 토목공학과 부교수(soo@andong.ac.kr)



(a) 어안렌즈 원영상

투영변환



(b) 투영영상

그림 1. 어안렌즈 원영상과 투영영상

표 1. 시그마 8mm 3.5 EX DG Circular 어안렌즈 사양

화각	180°	최대지름×전체길이	Φ73.5mm×68.6mm
최대배율	1:4.6	영상 크기	4368pixel × 2912pixel
최단촬영거리	13.5cm	영상 반지름	약 1150pixel

원영상의 반지름은 약 1150픽셀이며, 중심으로부터의 거리가 500픽셀 이하인 중심부분은 해상도가 낮아 투영영상 제작에서 제외하였다. 투영영상의 가로 좌표는 원영상의 중심으로부터 6시 방향으로 그은 기준선으로부터의 시계방향 각거리(rad)에 1000을 곱한 값이다. 따라서 투영영상의 가로 폭은 6280픽셀이다. 투영영상의 세로 좌표는 원영상 중심으로부터의 거리를 의미하며, 원영상의 반지름 1150픽셀에서 제외되는 부분의 범위 500픽셀을 뺀 값인 650픽셀이 투영영상의 높이가 된다. 원영상의 반지름, 투영변환에 사용되는 부분의 범위, 투영영상의 높이는 어안렌즈의 사양에 따라 변할 수 있다.

투영영상에는 여러 종류의 왜곡이 포함되어 있다. 이러한 왜곡은 렌즈의 특성이나 촬영시 오차에서 기인하기도 하며 변환 과정에서 발생하기도 한다. 몇 가지 주요 왜곡 중 여기서는 터널 벽면과 바닥면의 경계선에

나타나는 왜곡의 원인을 분석하고 그 보정방법을 제시하고자 한다. 보정량 계산을 위한 모형을 소개하고, 보정량 계산식을 유도하였으며, Visual C++로 제작한 소프트웨어를 통해 계산된 보정량을 영상에 적용하였다.

2. 투영영상에 나타난 경계선 왜곡

원영상과 투영영상에 나타난 왜곡을 분석하기 위해 그림 2(a)와 같은 실험 영상을 촬영하였다. 촬영 진행방향(원영상을 뚫고 들어가는 방향) 및 촬영 단면에서 방사방향으로 나타나는 왜곡을 모형화 할 수 있도록 일정한 크기의 사각형이 반복하여 나열되어있는 면을 제작하여 실험장으로 활용하였다.

실험영상의 투영영상인 그림 2(b)에서 직선으로 나타나야 하는 선이 곡선으로 나타나거나 투영영상의 부분별로 축척이 상이한 등의 왜곡을 발견할 수 있다. 수직



(a) 실험 원영상



(b) (a)의 투영영상

그림 2. 실험 원영상과 투영영상

선으로 나타나야 할 바닥과 벽면의 경계선이 기울어진 곡선으로 나타난 것도 확인할 수 있다. 이러한 경계선의 왜곡은 실제 터널 투영영상에서 더욱 잘 나타나며 (그림 1(b)), 본 논문은 이러한 경계선의 왜곡을 다루고 있다.

3. 경계선 왜곡의 원인

터널의 진행방향과 촬영방향이 정확히 일치한다면 터널 진행방향에 평행한 모든 직선은 원영상의 중심을 향하게 되며, 이 경우 소실점은 원영상의 중심과 일치

하게 된다. 그러나 그림 3의 i 와 같이 촬영에는 오차가 수반되게 마련이고, 때문에 소실점과 영상의 중심이 일치하지 않게 된다.

그림 4와 그림 5는 CAD를 이용하여 터널 모형을 제작하고 터널의 입구에 위치하여 안쪽을 바라보는 사진기를 작성한 뒤 그 위치와 각도를 변화시켜가며 대상물을 바라본 그림이다. 영상 중심의 점이 사진기의 위치이다. 그림 4는 사진기의 촬영방향이 터널진행방향과 평행한 상태이다. 이 상태에서는 (b)와 같이 사진기의 위치가 한쪽으로 치우쳤다 해도 소실점과 영상의 중심이 일치한다. 그림 5는 사진기의 위치가 그림 4(a)와 동

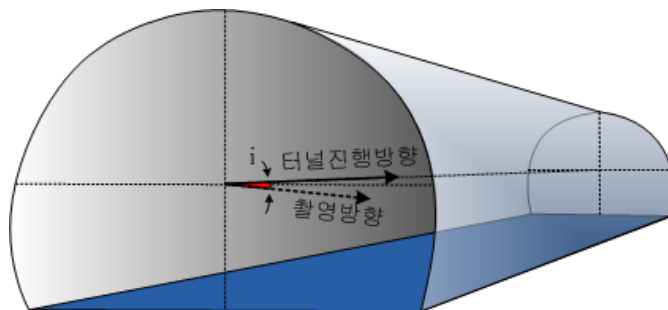
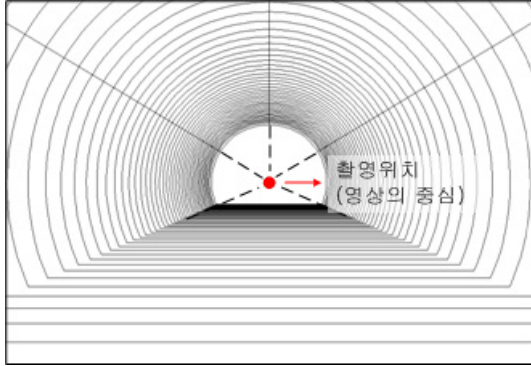
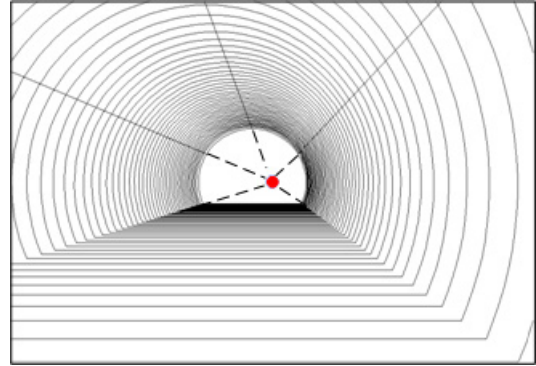


그림 3. 터널 진행방향과 촬영방향

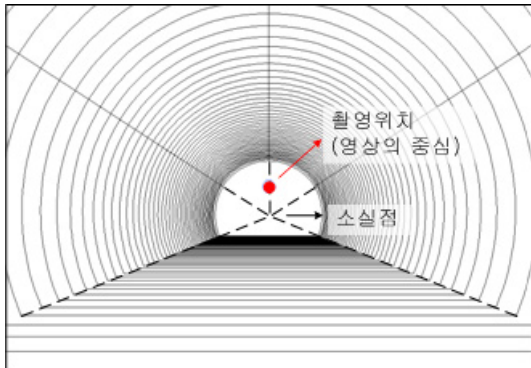


(a) 촬영 위치가 터널 단면의 중심부인 경우

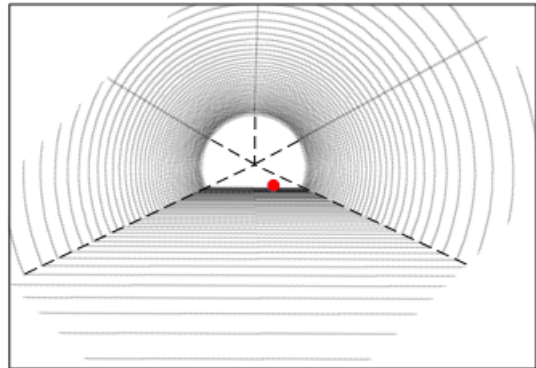


(b) 촬영 위치가 터널 단면의 우측으로 치우친 경우

그림 4. 촬영방향이 터널 진행방향과 평행한 경우($i=0$)



(a) $i =$ 상향 1.5°



(b) $i =$ 우하향 1.5°

그림 5. 촬영방향이 터널 진행방향과 평행하지 않은 경우

일한 상태에서 방향을 각각 위쪽으로 약 1.5° , 오른쪽 아래로 약 1.5° 기울여 바라본 모습이다. 영상의 중심과 소실점이 일치하지 않는 것을 확인할 수 있다. 여기서 i 는 그림 3의 i 를 의미한다.

그림 6은 소실점이 원영상의 중심보다 아래에 있는 경우를 나타낸 모형이다. O 는 원영상의 중심, B 는 소실점이다. \overline{PO} 와 같이 원영상의 중심을 향하는 직선 위의 점들은 원점으로부터의 거리에 관계없이 기준선 (\overline{OM})으로부터의 각거리 θ 가 일정하므로 투영영상에서 수직선으로 나타난다. 반면 \overline{PB} 와 같이 원영상의 중심이 아닌 다른 지점을 향하는 직선들은 원점으로부터의 거리에 따라 θ' 이 변한다. \overline{PB} 위의 한 점 A 를 보면, P 에서 B 로 다가감에 따라, 즉 원점까지의 거리 $b(=d+500)$ 가 작아짐에 따라 θ' 또한 작아짐을 알 수 있다. 따라서 투영영상 중 $0 \leq \theta < \pi$ 인 좌측부분을 기준으로 볼 때, 아래로 갈수록 θ' 이 줄어드는 “/” 형태의 비스듬한 곡선으로 나타나게 된다. 우측부분에서는

“\” 모양으로 나타난다. 반대로 초점이 원영상의 중심보다 위쪽에 위치하는 경우에는 진행방향에 평행한 선이 “\”(좌), “/”(우) 형태의 비스듬한 곡선으로 나타나게 될 것이다.

3. 왜곡 보정량 계산

그림 6에서

$$\theta = \theta' + e_d \tag{1}$$

임을 알 수 있다. b 의 변화에 따른 정확한 보정량 e_d 를 알기 위해 그림 6의 $\triangle OAB$ 를 살펴보자. $\angle OAB = \alpha$, $\angle OBA = \beta$ 이고 세 변의 길이를 a , b , c 라 하면, 사인법칙에 의해

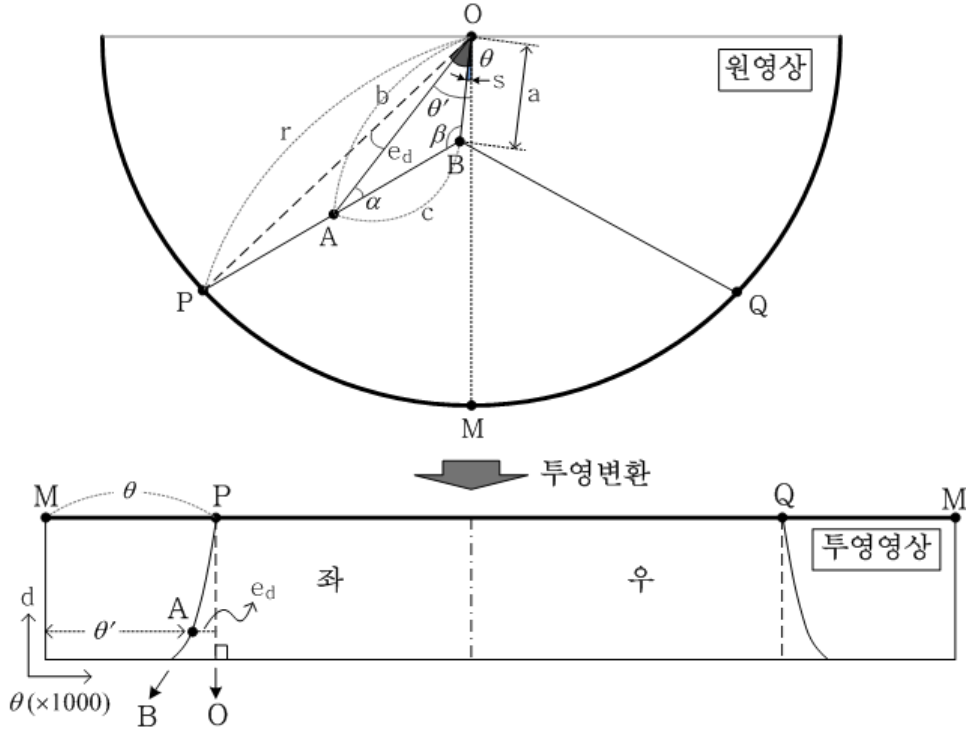


그림 6. 원영상의 중심과 소실점이 일치하지 않는 경우의 모형

$$\frac{b}{\sin\beta} = \frac{a}{\sin\alpha} \quad (2)$$

a와 $\angle\beta$ 는 소실점의 위치에 따라 원영상에서 이미 결정된 값이므로, α 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sin\alpha = \frac{a \cdot \sin\beta}{b} \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \frac{a \cdot \sin\beta}{b} \quad (3)$$

$\theta' = (\pi - \beta - \alpha) + s$ 이므로, 식 (1)과 (3)으로 부터

$$\begin{aligned} e_d &= \theta - \theta' = \theta - (\pi - \beta - \alpha + s) = \theta - \pi + \beta + \alpha - s \\ &= \theta - \pi + \beta - s + \sin^{-1} \frac{a \cdot \sin\beta}{b} \end{aligned} \quad (4)$$

한편 그림 7은 실제 터널의 세 지점에서 촬영한 각각의 원영상에서 α 의 최대값을 개략적으로 측정한 그림이다. α 는 그림 6의 \overline{PB} 위의 한 점 A를 중심으로 원영상의 중심 O와 소실점 B가 이루는 사잇각이다. 사진기의 위치와 자세를 점검하지 않고 촬영한 영상이라 촬영방향과 터널진행방향의 오차가 비교적 크지만 α 의 최대값은 17° 에 머물렀다. 촬영과정부터 주의를 기울인

다면 α 는 훨씬 작은 각을 유지할 것이라는 점에 착안하여 식 (4)의 간략화를 시도하였다.

$\sin\alpha$ 를 Maclaurin 급수로 전개하면 $\sin\alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} \dots$ 와 같이 표현되며 충분히 작은 α 에 대해 $\sin\alpha \approx \alpha$ 이 성립하게 된다. $\sin\alpha$ 를 α 로 보았을 때 발생하는 오차를 계산하여 표 2에 정리하였다. 투영영상 가로축의 단위가 (각거리(rad) $\times 1000$)이므로, $\alpha = 17^\circ$ 일 때 약 4픽셀, $\alpha \leq 10^\circ$ 인 경우에는 1픽셀 미만의 오차가 발생한다고 볼 수 있다. 터널 내부 어안렌즈 영상의 용도를 고려해 볼 때 이 정도의 오차는 허용할 수 있다고 판단된다. 따라서

$$\sin\alpha = \frac{a \cdot \sin\beta}{b} \approx \alpha \quad (5)$$

이를 적용하여 식 (4)를 다시 쓰면,

$$e_d = \theta - \pi + \beta - s + \frac{a \cdot \sin\beta}{b} \quad (6)$$

θ 는 투영영상에서 점 P의 좌표로부터 계산할 수 있

그림 7. 실제 터널 원영상에서의 $\angle \alpha$ 의 최대값표 2. $\sin \alpha$ 와 α (rad)의 오차

	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 17^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$\sin \alpha$	0.342020	0.292372	0.258819	0.173648
α (rad)	0.349066	0.296706	0.261799	0.174533
오차($\alpha - \sin \alpha$)	0.007046	0.004334	0.002980	0.000885

는 상수이고, β 와 s , a 는 고정값이므로, 식 (6)은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$e_d = \frac{C_1}{b} + C_2 \quad (C_1, C_2 \text{는 상수}) \quad (7)$$

영상에서 소실점의 위치를 추정하고 β , s , a 를 계산하는 것도 가능하지만, 이 경우 소실점의 위치에 따라 각도의 부호와 적용될 식이 변하며 계산량이 많다는 단점이 있다. 때문에, 식 (7)에 투영영상 상, 하단의 조건을 대입하여 C_1 , C_2 를 직접 계산하는 방법을 이용하였다. 본 연구를 위해 개발한 소프트웨어는 투영변환 과정에서 사용자로부터 입력받은 두 바닥 경계선의 식을 이용하여 투영영상 하단에서의 e_d 를 계산하도록 작성되었다. 따라서 투영영상 상단의 조건인 $b = 1150$, $e_d = 0$ 와, 하단의 조건인 $b = 500$, e_{d0} 를 식 (7)에 대입하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$0 = \frac{C_1}{1150} + C_2 \quad (8)$$

$$e_{d0} = \frac{C_1}{500} + C_2$$

여기서 e_{d0} 는 투영영상 하단에서의 e_d 이다. 두 식을 연립하면,

$$C_1 = 884.6154 e_{d0}, \quad C_2 = -\frac{C_1}{1150} = -0.76923 e_{d0} \quad (9)$$

그러므로

$$\begin{aligned} e_d &= \frac{884.6154}{b} e_{d0} - 0.76923 e_{d0} \\ &= \left(\frac{884.6154}{b} - 0.76923 \right) e_{d0} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $b = d + 500$ 이다.

4. 보정식의 영상 적용

그림 8은 소실점이 영상의 중심보다 아래인 경우의 투영영상 모형이다. [L1], [R2] 구역의 영상은 가로로 늘어나며, 늘어나는 폭은 영상하단에서 최대, 영상상단에서 최소가 된다. [L2], [R1] 구역의 영상은 가로로 압축되며, 압축폭은 영상 하단에서 최대가 된다. 각 구역에서 변화된 좌표를 계산하는 방법은 표 3과 같다.

그림 9는 소실점이 영상의 중심보다 위인 경우의 투영영상 모형이다. 위의 경우와 계산식은 동일하지만 d 의 부호가 반대이다. 따라서 압축되는 부분과 늘어나는 부분도 반대이다. 각 구역에서 변화된 좌표를 계산하는 방법은 표 4와 같다.

이러한 방식으로 경계선을 보정한 결과는 그림 10, 그림 11과 같다.

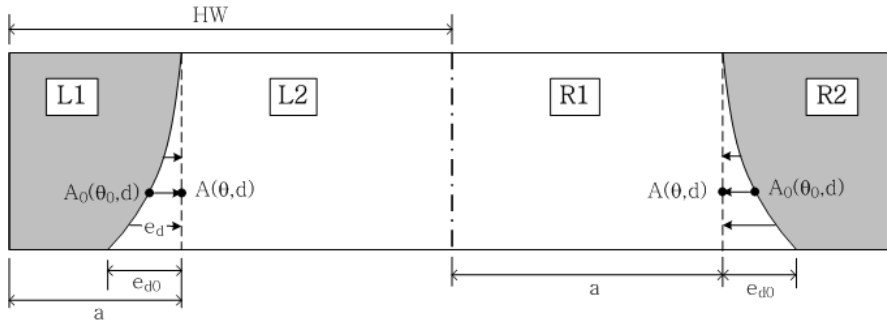


그림 8. 각도보정 : 소실점이 영상의 중심보다 아래인 경우

표 3. 각도보정 좌표계산식 : 소실점이 영상의 중심보다 아래인 경우

구역		좌표 계산식	조건
좌	L1 ($\theta < a$)	$\theta_0 = \frac{a+e_d}{a}\theta$	$e_d > 0$
	L2 ($\theta \geq a$)	$\theta_0 = \frac{HW-(a+e_d)}{HW-a}(\theta-HW) + HW$	
우	R1 ($\theta < a$)	$\theta_0 = \frac{a+e_d}{a}\theta$	$e_d < 0$ $\theta = \theta - HW^*$
	R2 ($\theta \geq a$)	$\theta_0 = \frac{HW-(a+e_d)}{HW-a}(\theta-HW) + HW$	

* 좌, 우 따로 보정이 이루어지기 때문에 우측 보정시에는 영상의 중심을 원점으로 본다.
(HW=6280/2=3140)

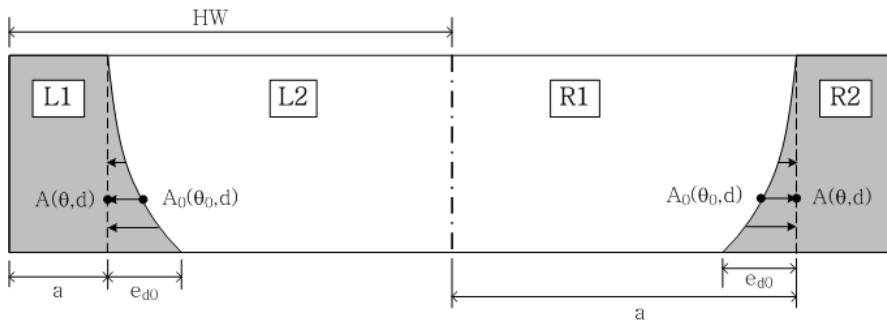


그림 9. 각도보정 : 소실점이 영상의 중심보다 위인 경우

표 4. 각도보정 좌표계산식-소실점이 영상의 중심보다 위인 경우

구역		좌표 계산식	조건
좌	L1 ($\theta < a$)	$\theta_0 = \frac{a+e_d}{a}\theta$	$e_d < 0$
	L2 ($\theta \geq a$)	$\theta_0 = \frac{HW-(a+e_d)}{HW-a}(\theta-HW) + HW$	
우	R1 ($\theta < a$)	$\theta_0 = \frac{a+e_d}{a}\theta$	$e_d > 0$ $\theta = \theta - HW$
	R2 ($\theta \geq a$)	$\theta_0 = \frac{HW-(a+e_d)}{HW-a}(\theta-HW) + HW$	

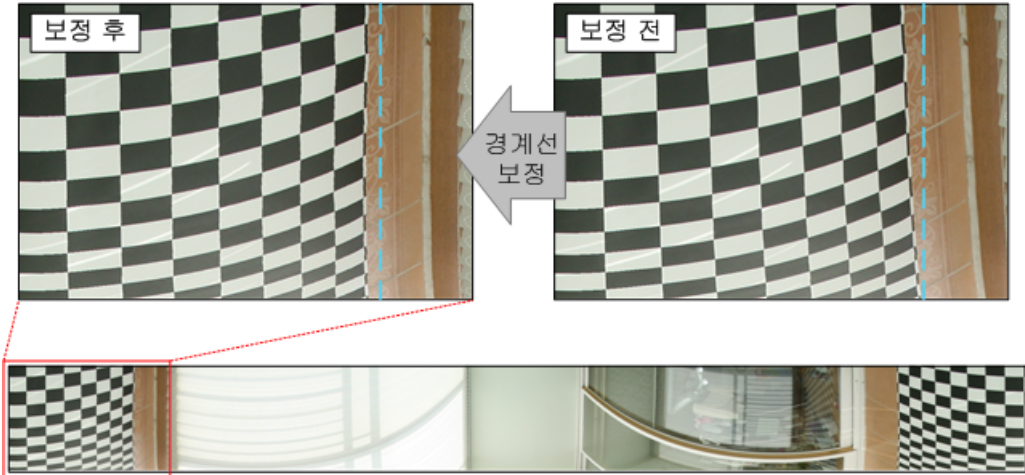


그림 10. 경계선 보정 결과 (실험영상)



(a) 경계선 보정 전의 투영영상



(b) 경계선 보정 후의 투영영상

그림 11. 경계선 보정 결과(실제 터널 영상)

5. 결론

본 논문에서는 어안렌즈 터널 영상의 투영영상에 나타난 바닥-벽면 경계선 왜곡을 보정하기 위하여 실험영상을 분석하고 모형을 제작하였다. 이러한 과정을 통하여 경계선 왜곡의 원인을 분석하고 보정식을 유도할 수 있었다. 또 유도된 보정식을 실제 터널영상에 적용하여 경계선 왜곡이 사라진 영상을 얻을 수 있었다.

투영영상에 나타난 왜곡은 이 밖에도 몇몇 종류가 더 있다. 이 중 일부 왜곡은 렌즈의 특성에서 기인하기도 하는데, 이러한 종류의 왜곡은 모형을 통한 분석과 보정량 계산이 어렵다. 이 경우 사례별로 영상 상 기준점들을 통해 회귀식을 세워 적용하는 방법을 이용할 수 있을 것이다. 향후 연구를 통해 적절한 촬영 위치와 촬영 간격 결정 방법이 규정되고 기타 왜곡에 대한 보정이 추가된다면, 보다 효율적으로 터널 내부의 모자이크 영상을 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형 국토정보기술혁신 사업과제의 연구비원(07국토정보 CO4)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김광엽, 김창용, 이승도, 서용석, 이정인, 2007, "디지털 영상을 이용한 터널 3차원 계측", The Journal of Engineering Geology, 제17권 제4호, pp.567-576.
2. 김기홍, 송영선, 김백석, 2009, "어안렌즈 카메라를 이용한 터널 모자이크 영상 제작", 한국지형공간정보학회지, 제17권 제1호, pp.105-111.
3. 김인섭, 임수봉, 2007, "터널굴착시 3차원 레이저스캐너에 의한 내공단면 측량에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제27권 제4D호, pp.541-546.
4. 박경식, 함창학, 이재기, 2007, "터널계측을 위한 1인 무프리즘 측량시스템의 효율성 평가", 한국지형공간정보

- 학회지 제15권 제4호, pp.89-96.
5. 박석균, 이강문, 2008, "콘크리트 터널 라이닝의 외관조사를 위한 자동화 결함인식 시스템 개발", 대한토목학회 논문집, 제 28권 제6A호, pp.873-880.
 6. 배상호, 이형석, 2006, "3차원 측량에 의한 노후 터널의 건축한계 확보 해석", 한국측량학회지, 제24권 제3호, pp.251-259.
 7. 윤정숙, 사공명, 이준석, 이규성, 2007, "레이저 스캐닝 데이터를 이용한 터널 시설물 및 손상부위 검측 알고리즘" 한국터널공학회논문집, 제9권 제1호, pp.19-28.
 8. 이재원, 윤부열, 2007, "3차원 레이저 스캐닝을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측", 한국지형공간정보학회지, 제15권 제2호, pp.67-75.
 9. 조형식, 손홍규, 김종석, 이석균, 2008, "지상 LiDAR를 이용한 터널의 Reverse Engineering", 대한토목학회논문집, 제28권 제6D호, pp.931-936.
 10. 최석근, 안원태, 2006, "현장측량시스템을 이용한 터널 공사의 효용성 향상", 한국지형공간정보학회지, 제14권 제3호, pp.31-37.