

교량의 안전진단을 위한 3차원 변위해석 The 3D Displacement Analysis for the Safety Diagnosis of Bridge

강준목* · 주영은** · 임대용*** · 김위현***

Kang, Joon-Mook · Joo, Young-Eun · Um, Dae-Yong · Kim, Wee-Hyun

요 旨

본 연구에서는 수치근접사진측량기법을 이용, 교량의 안전진단을 위한 변위를 측정하고자 하였다. 이에 재하 경우별로 디지털 카메라와 CCD 카메라에 의한 동기영상을 획득, 분석하고 이를 동일조건에서 계측센서 및 정밀레벨에 의한 수직변위와 필름기반 영상해석 결과값과도 비교·분석을 수행하였다. 그 결과, 최대 0.83 mm 편차내의 근접한 변위성과를 도출하므로써 교량의 거동측정 및 안전진단에 그 적용 가능성을 확인 할 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, it is intended to measure the displacement of a bridge for the safety examination using Digital Close Range Photogrammetry(DCRP). The digital images which were obtained by a digital camera and a CCD camera in load cases was analyzed. In the same condition, the displacements were obtained respectively from sensor, precision level, and film-based images for comparison. As a result, it could be confirmed that the application of DCRP to the safety examination and the movement measurement of the bridge is possible.

1. 서 론

수치사진측량은 기하학적으로 충실도가 높은 영상의 실시간 취득 및 처리과정의 자동화가 가능해지고 그 정확성과 효율성이 입증됨에 따라 각종 구조물의 변형측량, 첨단기기의 정밀계측, 문화재의 보존·복원을 위한 형상 해석으로 공간분석의 활용에 그 응용범위가 점차 확대되고 있다. 그러나 이러한 수치사진측량의 가능성에도 불구하고, 구조물의 안정성 평가에 있어서 기존의 계측방법을 그대로 적용하거나 보다 효율적이고 능률적인 측정을 위한 다양한 시도가 결여되어 있는 것이 사실이다. 이에 기존 계측방법의 여러 제약조건이나 한계성을 탈피하여 비접촉 방식에 의한 보다 정확하고 효율적인 방법으로 대상물의 3차원 변위를 해석하고, 구조물에 대한 변형측정 및 안전진단 수행에 있어서 더욱 향상된 성과를

도출하기 위한 데이터를 제공하고자 수치근접사진측량기법을 교량에 적용, 수직변위는 물론 종합적인 3차원 변위를 산출하였다.

본 연구를 통하여 수치근접사진측량기법을 이용, 보다 효율적으로 교량의 하중 변화에 따른 3차원 변위 데이터 도출을 모색함으로써 구조물의 안전진단은 물론 순간변형 및 거동해석, 정밀측정을 요하는 각종 산업분야에의 폭넓은 응용 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 교량의 변위측정

2.1 대상물 선정

수치근접사진측량기법에 의한 교량의 재하 경우에 따른 3차원 변위를 해석하기 위해 서산시 성연면 오사리(지방도 617호)에 위치한 오사교를 실험대상으로 선정하였다. 본 대상물은 1969년에 준공된 RC T-Beam형식의 길이 30m, 폭 6m의 교량으로서, 심한 노후화로 인한 다량의 균열 및 변위가 발생하고 있어 보수 및 보강이 요구되고 있는 상태이다.

*충남대학교 토목공학과 교수

**충남대학교 토목공학과 박사수료

***충남대학교 토목공학과 박사과정

2.2 촬영 및 측정계획

하중의 재하에 의한 교량의 3차원 변위를 측정하기 위해 설계하중 32.4 ton의 90.4%수준인 총 중량 29.3 ton의 덤프트럭을 사용하였고, 재하 위치는 교량의 거동특성을 최대한 반영할 수 있도록 재하 경우를 달리 설정하여 Girder(G2)에 각 경우별로 2회씩 총 6회의 측정을 실시하였다. 재하 경우별 재하 위치는 그림 1과 같다.

하중이 재하 되었을 경우 교량과 지반의 진동에 의한 기준점들의 변위가 발생하지 않도록 내경 80 cm(H)×100 cm(V), 두께 4 cm의 강재로 틀을 제작하여 측정하고자 하는 교량의 Girder 전면에 고정하였고, Wire를 이용하여 교량하부에 견고히 고정시켰다. 이렇게 제작한 기준점 틀에 영상 스케일을 고려하여 제작한 직경 8 mm의 수직영상 해석용 원형 반사타겟 12점과 필름기반 영상해석용 십자형 타겟 10점을 기준점으로 배치하였다. 그리고, 카메라의 화각을 고려하여 기준점 틀 내부에 3열 8점씩 총 48점의 십자형 타겟과 원형 타겟을 타겟 플레이트에 등분포로 배치하였다. 이들 중 수직영상 해석용 원

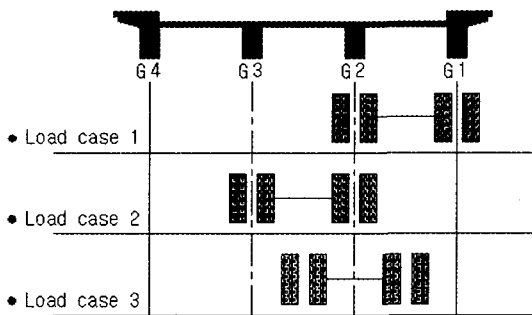


그림 1. 재하 경우별 재하 위치도



그림 2. 타겟 배치도

형 반사타겟은 선명도와 밝기값의 향상을 위해 배경과의 강한 대비를 유도하였다. Girder에 설치된 타겟 플레이트와 기준점 및 미지점의 배치양상은 그림 2와 같다.

수렴각 90°에 의한 수렴촬영으로 DCS200 카메라와 CCD 카메라에 의한 동기영상을 획득하고 이를 자체 개발한 수직영상 분석시스템에 의해 해석하여 교량의 변위를 측정하였다. 그리고, 교량의 응답치와 거동특성을 최대한 반영할 수 있는 최적의 위치에 계측센서를 부착하여 재하 경우별 변위를 측정하고 타겟 플레이트의 중앙 하단부에 스태프를 고정, 약 5 m전방에 정밀레벨을 거치하여 하중 변화에 따른 교량의 수직변위를 측정함으로써, 산출된 영상해석 결과와의 비교·검증을 위한 데이터로 활용하도록 하였다. 촬영 계획도는 그림 3에 도시된 바와 같고, 그림 4는 하중 재하에 의한 교량의 변위 측정 광경을 나타낸 것이다.

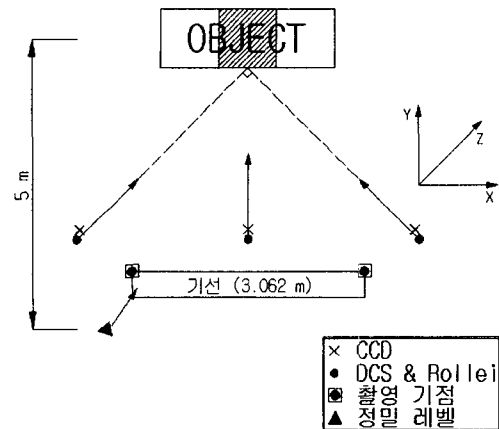


그림 3. 촬영 계획도



그림 4. 교량의 변위측정 광경

2.3 변위해석을 위한 데이터 획득

2.3.1 영상에 의한 자료획득

CCD영상의 경우, 6회의 경우별 재하 시험에서 재하를 하기 이전의 영상과 재하했을 경우의 영상을 포함하여 총 12프레임의 수치영상을 획득하였다. 그리고 Rollei 6008 Metric 카메라 및 DCS200 카메라의 경우, 수렴각 90°에 의한 수렴촬영에서 중앙부분의 영상을 하나 더 늘려 총 18프레임의 영상을 획득함으로써, 해석시 정확도의 향상을 도모하였다. 해석점들의 3차원 좌표를 얻기위한 기준점의 경우, 대상물과 평행한 방향으로 기준점 틀로부터 4 m 전방에 두 점의 기선점을 설치하여 기선방향을 X축으로 선정하고, 촬영방향을 Y축, 그리고 이에 직각방향을 Z축으로 하는 기선거리 3.062 m의 3차원 직교 좌표계를 설정하여 삼각측량 방법에 의해 3차원 좌표성고를 획득하였다. 그리고 이들 기준점의 상대적인 3차원 좌표성고를 사진좌표체계로 변환하였다.

2.3.2 센서에 의한 자료획득

교량의 응답치와 거동특성을 최대한 반영할 수 있는 최적의 위치에 계측센서를 부착하여 수치영상 획득과 동일하게 경우별 변위를 측정하였다. 또한 타겟 플레이트의 중앙 하단부에 스타프를 고정하고 Girder의 하단으로부터 약 5 m전방에 정밀레벨을 거치하여 하중 변화에 따른 교량의 수직변위를 1/100 mm 단위로 측정함으로써 산출된 영상해석 결과와의 비교·검증을 위한 데이터로 활용하도록 하였다. 표 1은 각 재하경우에 대한 계측센서 및 정밀레벨 측정에 의해 도출된 교량의 수직 변위량이다.

표 2. DCS200 & CCD카메라 렌즈왜곡계수 ($\times 10^{-6}$ mm)

카메라	왜곡계수			방사왜곡계수		
	K1	K2	K3	P1	P2	P3
DCS200	130.64060	-0.053000	-0.00030	-12.93500	-7.97100	0.03660
CCD 1	592.07261	134.71970	-12.21163	0.367880	1.45690	0.00001
CCD 2	11.027370	238.15066	-20.01266	-0.01656	-0.79755	0.00000

표 3. 각 방향별 평균 표준오차 (mm)

카메라	재하 경우	X 방향		Y 방향		Z 방향	
		초기	재하	초기	재하	초기	재하
Rollei		0.2488	0.251	0.3586	0.3689	0.7721	0.7895
DCS		0.3169	0.333	0.499	0.5115	1.0188	1.0632
CCD		0.7008	0.6939	0.9603	0.9535	1.2265	1.1939

3. 결과의 비교·분석

3.1 표준오차 및 3차원 위치오차

재하 경우별 6가지로 설정된 경우에 대하여, 각각 초기시와 재하시의 총 18프레임의 Rollei 6008 Metric 카메라 및 DCS200 카메라에 의한 영상과, 총 12프레임의 CCD 카메라에 의한 영상을 획득하였다. 그리고, 이들 모델들에 대하여 각각 수치영상 분석시스템에 의해 영상해석을 하고 도출된 표준오차 및 정확도를 바탕으로 교량의 3차원 변위해석을 실시하였다.

표 2는 Kodak DCS200카메라 및 두 대의 CCD카메라로부터 각각 획득한 카메라 렌즈왜곡계수로써, 영상해석 시 렌즈의 정오차를 보정하여 기하학적 충실도의 향상을 도모하였다.

교량에 하중이 가해졌을 경우, 교량의 양단이 교대에 의해 구속되어 있기 때문에 수직방향으로 작용하는 힘에 의한 수직변위 이외에도 X, Z방향으로의 복합적인 변위가 발생하게 된다. 이와 같이 공간상에서 발생하는 교량의 3차원적 변위 데이터를 재하 경우별로 영상획득 기기에 의해 획득된 영상을 해석하여 도출하고, 그 결과를 X, Y, Z방향 각각에 대하여 나타내었다.

표 3은 재하 경우에 따른 영상획득 기기별 X, Y, Z

표 1. 교량의 수직변위(mm)

측 정	재하 경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
계측센서	3.98	4.08	4.02	3.97	4.16	4.30
정밀레벨	4.00	4.11	4.25	4.22	4.38	4.40

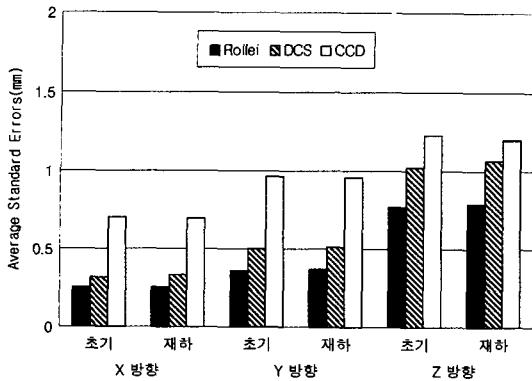


그림 5. 영상획득 기기별 각 방향 평균 표준오차 분포

방향 평균 표준오차 결과로서, Rollei 6008 Metric의 경우 X방향으로 0.26 mm, Y방향으로 0.38 mm, Z방향으로는 0.82 mm이내의 표준오차 분포를 나타내었고, DCS의 경우 X방향으로 0.37 mm, Y방향으로 0.58 mm, Z방향으로는 1.17 mm이내의 표준오차 분포를 나타내었다. 그리고 CCD의 경우 X방향으로 0.77 mm, Y방향으로 1.06 mm, Z방향으로는 1.36 mm이내의 표준오차 분포를 나타내었다.

이와같은 결과를 그림 5에 도시하였다.

재하 경우에 따라 획득된 영상에 대하여 영상획득 기기별로 해석된 3차원 위치오차를 종합 비교·분석해 본 결과, Y방향 위치오차가 X방향보다 상대적으로 큰 표준오차를 나타내었고, 3차원 위치오차 중 Z방향의 표준오차가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 영상을 해석하는 과정에 있어서의 내재되어 있는 기하학적인 오차 요인에 근거한다고 판단된다.

이와 같이 도출된 X, Y, Z방향 각각에 대한 표준오차를 바탕으로, 하중이 재하되기 이전의 초기상태와 재하되었을 경우의 교량에 대한 X, Y, Z방향의 표준오차 각각의 제곱의 합을 구하여 이 값의 제곱근을 구해 3차원 위치오차를 산출하였다. 표 4는 영상획득 기기별 재하 경우에 따른 초기상태의 6가지 경우에 대한 교량의 영상을 해석하여 각 경우별 3차원 위치오차를 나타낸 것이고, 이의 오차분포를 그림 6에 도시하였다.

교량에 하중을 재하하기 이전의 초기상태에 대한 3차원 위치오차의 분석 결과, 재하 경우별로 평균 Rollei 6008 Metric의 경우 0.88 mm, DCS의 경우 1.17 mm, CCD의 경우는 1.70 mm의 오차분포를 나타내었다.

표 5는 하중을 재하 한 6가지 경우에 대한 교량의 영

표 4. 초기시 3차원 위치오차(mm)

카메라	재하 경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
Rollei	0.9275	0.8744	0.9038	0.8593	0.8571	0.8994
DCS	1.2407	1.1259	0.9711	1.2445	1.3259	1.1597
CCD	1.6903	1.8333	1.8517	1.6730	1.8951	1.3054

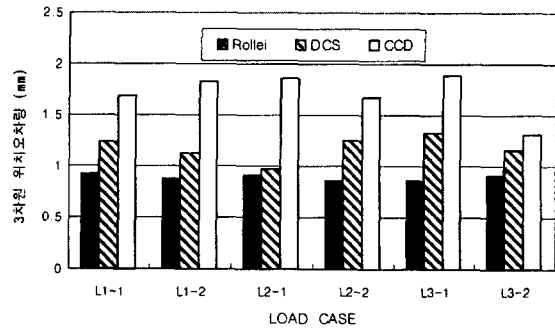


그림 6. 초기시 3차원 위치오차 분포

표 5. 재하시 3차원 위치오차(mm)

카메라	재하 경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
Rollei	0.9479	0.8946	0.9005	0.8954	0.8975	0.9059
DCS	1.2866	1.1857	1.1153	1.2385	1.3702	1.1599
CCD	1.7245	1.7932	1.7586	1.5661	1.7711	1.4560

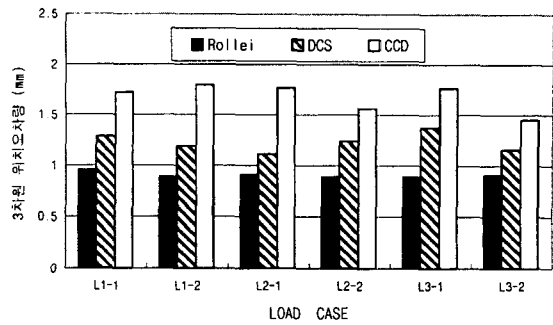


그림 7. 재하시 3차원 위치오차 분포

상을 해석하여 각 경우별 3차원 위치오차를 나타낸 것이고, 이의 오차분포를 그림 7에 도시하였다.

교량에 하중을 재하 한 이후의 상태에 대한 오차 분석 결과, 평균 Rollei 6008 Metric의 경우 0.90 mm, DCS의 경우 1.22 mm, CCD의 경우 1.67 mm의 오차분포를 나타내었다.

3.2 3차원 변위해석

하중이 재하되기 전 교량의 초기상태와 재하된 후 수직 변위가 발생한 모델들에 대하여, 영상획득 기기에 따른 해석점들의 영상좌표를 측정하고, 좌표성과를 추출하였다. 그리고 기하학적 위치변화 관계를 비교·분석하여 이에 대한 상대적 위치의 변위량을 도출하였다. 이러한 해석 결과를 바탕으로, DCS200카메라 및 CCD카메라에 의한 수직변위의 평균치와 필름기반의 Rollei 6008 Metric카메라에 의한 수직방향(Y방향) 변위의 평균치를 각각 산출하고, 이를 정밀레벨 및 계측센서에 의한 측정결과와 비교하여 표 6에 나타내었다.

교량에 하중이 재하되었을 경우, 대략 4mm 내외의 수직변위가 발생함을 알 수 있고, 영상획득 기기별로 산출된 교량의 평균 수직변위를 정밀레벨과 계측센서에 의한 교량의 수직 변위와 비교한 결과, 매우 접근된 변위 양상을 나타내고 있다.

그림 8은 영상획득 기기별로 도출된 교량의 평균 수직 변위를 계측센서와 정밀레벨에 의해 측정된 수직변위와 상호 비교하여 이를 도시한 것이다.

각 영상획득 기기에 의해 획득된 영상을 해석하고, 해석점들의 수직 변위량의 평균치와 정밀레벨에 의해 측정된 재하 경우별 변위량과의 상호편차를 구해본 결과, 표

표 6. 교량의 평균 수직변위량(mm)

측정값	재하 경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
정밀레벨	4.00	4.11	4.25	4.22	4.38	4.40
계측센서	3.98	4.08	4.02	3.97	4.16	4.30
Rollei	4.19	4.07	4.30	4.28	4.45	4.49
DCS	4.38	4.61	4.61	4.85	4.83	4.81
CCD	4.69	4.80	4.92	4.92	5.22	4.93

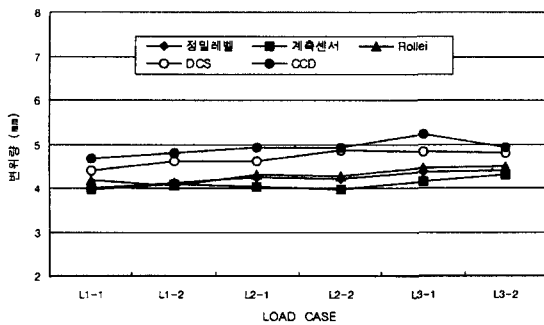


그림 8. 교량의 평균 수직변위 비교도

7과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 9는 이러한 정밀레벨 측정치와의 상호편차를 도시한 것이다.

해석된 미지점 들의 수직 변위량의 평균치와 정밀레벨 측정값과의 편차는 평균 Rollei 6008 Metric의 경우 0.07 mm, DCS200의 경우 0.45 mm, CCD의 경우 0.68 mm를 나타내었다.

정밀레벨 측정과 마찬가지로 영상해석에 의해 도출된 수직변위 결과를 계측센서에 의한 수직변위와 비교하여

표 7. 정밀레벨 측정값과의 편차(mm)

편 차	재하 경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
Rollei - 정밀레벨	0.19	-0.04	0.05	0.06	0.07	0.09
DCS - 정밀레벨	0.38	0.50	0.36	0.63	0.45	0.41
CCD - 정밀레벨	0.69	0.69	0.67	0.70	0.85	0.53

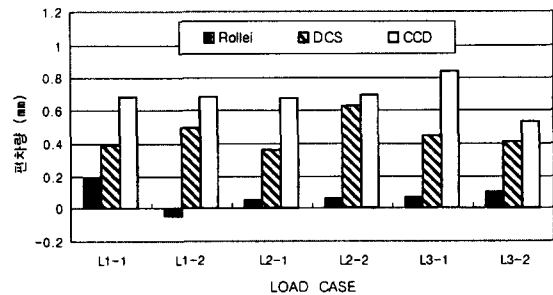


그림 9. 정밀레벨 측정치와의 편차

표 8. 계측센서 측정값과의 편차(mm)

편 차	재하 경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
Rollei - 계측센서	0.21	-0.01	0.28	0.31	0.29	0.19
DCS - 계측센서	0.40	0.51	0.59	0.88	0.67	0.51
CCD - 계측센서	0.71	0.72	0.90	0.95	1.07	0.63

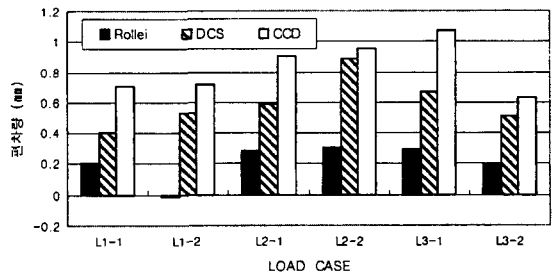


그림 10. 계측센서 측정치와의 편차

상호편차를 구해본 결과, 표 8과 같은 성과를 얻을 수 있었다. 그림 10은 이러한 계측센서 측정치와의 상호편차를 도시한 것이다.

분석 결과, 해석된 미지점들의 수직 변위량의 평균치와 계측센서 측정값과의 편차는 평균 Rollei 6008 Metric의 경우 0.21 mm, DCS200의 경우 0.59 mm, CCD의 경우 0.83 mm를 나타내었다.

영상획득 기기 중 CCD카메라에 의한 영상의 해석치가 다른 것보다 상대적으로 큰 편차량을 보이는 원인은, 고정된 두 대의 CCD카메라에 의해 계획된 촬영점은 2 점으로서 3점의 촬영점으로 계획된 Rollei 6008 Metric 카메라 및 DCS200카메라보다 적은 매수로 획득된 영상의 해석과, 안정성이 확보되지 않은 낮은 해상도에 기인한다고 사료된다.

정밀레벨 측정치와 보다 더 객관적인 상호 비교를 위해서, Girder에 설치한 타겟 플레이트의 중앙에 고정시킨 표척과 나란하게 수직방향으로 배치한 해석점들의 변위를 산출하여 비교하였다.

표 9. 표척과 나란하게 수직방향으로 배치한 측정점들의 수직 변위(mm)

타겟번호	재하경우					
	L1-1	L1-2	L2-1	L2-2	L3-1	L3-2
정밀레벨	4.000	4.110	4.250	4.220	4.380	4.400
9	4.078	4.208	4.433	4.404	4.617	4.713
10	4.179	4.243	4.475	4.446	4.652	4.733
11	4.248	4.240	4.476	4.448	4.645	4.711
12	4.269	4.185	4.424	4.396	4.582	4.631
13	4.273	4.114	4.356	4.329	4.502	4.534
14	4.240	4.002	4.244	4.218	4.377	4.391
15	4.163	3.842	4.082	4.056	4.199	4.193

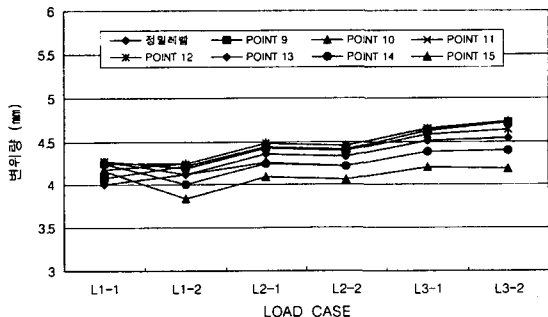


그림 11. 표척과 나란하게 수직방향으로 배치한 측정점들의 수직변위도

표 9는 표척과 나란하게 수직방향으로 배치한 측정점들의 수직변위 성과를 나타낸 것이고, 그림 11은 이를 도시한 것이다.

정밀레벨 측정치와 타겟 플레이트의 중앙에 고정시킨 표척과 나란하게 수직방향으로 배치한 미지점 타겟들의 변위는, 하중의 변화에 따라 유사한 변위양상을 나타낼 수 있다.

일반적으로 교량에 하중이 가해졌을 때, 수직방향으로 가장 큰 힘이 전달되므로 수직변위가 가장 뚜렷하게 나타나지만, 교량의 양단이 교대에 의해 구속되어 있기 때문에 교량의 휨 변형으로 인한 힘의 분배로 인하여 X방향으로도 미량의 변위가 발생하게 된다. 재하 경우(Case 2)에 대한 이러한 X방향으로의 변위를 DCS200카메라에 의해 획득한 수직영상의 해석점들에 대하여 변위량을 산출하였다. 그리고 필름기반의 Rollei 6008 Metric카메라에 의해 획득된 영상에서도 동일한 측정점들을 추출하고 이를 해석·비교하여, 표 10과 같은 결과치를 얻었다.

그림 12는 Rollei 6008 Metric카메라와 DCS200카메라에 의한 교량의 X방향 변위를 초기 상태와 재하 상태로 구분하여 상호 비교하고 이를 도시한 것이다.

DCS200카메라에 의해 산출된 X방향으로의 변위를 Rollei 6008 Metric카메라에 의한 영상에서 산출된 결과

표 10. 교량의 해석점들에 대한 X방향 변위 (mm)

미지점	Rollei		DCS	
	L2-1	L2-2	L2-1	L2-2
12	0.347	0.366	0.146	0.567
13	0.650	0.684	0.404	0.736
14	0.957	1.005	0.678	0.908
15	1.233	1.294	0.946	1.080
16	1.517	1.593	1.217	1.251

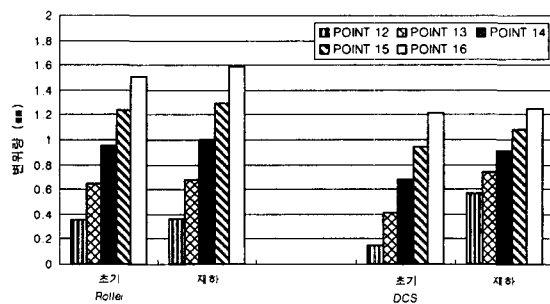


그림 12. 교량의 X방향 변위 비교

와 비교해 본 결과, 유사한 변위 양상을 보였다. 해석된 미지점들은 타겟 플레이트의 중앙 라인에 일렬로 분포되어 있는 지점들로서, 재하된 하중으로 인한 휨 변형으로 인해 수직 변위보다는 상대적으로 작지만 각각 휨 방향으로의 변위가 일어남을 알 수 있다. 또한, 하단 부위로 갈수록 휨에 의한 인장력의 증가로 인해 그 변위량이 점차 증가한다는 사실을 확인할 수 있다.

4. 결 론

구조물의 효율적인 변위해석을 위해 수치근접사진측량 기법을 교량에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다양한 하중재하에 대하여 수치영상을 해석한 결과, DCS200의 경우 4.38~4.85 mm, CCD의 경우 4.69~5.22 mm의 평균 수직 변위량을 도출할 수 있었다.

2. 수치영상 해석에 의한 교량의 수직 변위를 필름영상 해석 및 계측에 의한 수직 변위와 비교·분석한 결과, 최대 0.83 mm의 편차 내에서 근접한 변위 성과를 나타내었다.

3. 수치영상 해석의 정확도 향상과 함께 향후 보다 구체적인 이의 실용화 방안에 대한 심도있는 연구를 수행한다면, 구조물의 안전진단을 수행하는데 있어서 더욱 향상된 성과를 도출하기 위한 데이터를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 교량의 순간거동 해석, 그리고 여러 산업분야의 정밀측정에 있어서 보다 효율적인 방법으로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원 '99산학협력연구'(과제번호 : 1999-31100-002-2) 성과의 일부로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강준목, 한승희, 배상호, 주영은, "DPS를 이용한 구조물의 순간거동 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집 IV, pp. 361-364, 1998.
2. 강준목, 배연성, 주영은, 임대용, "CCD 영상획득 시스템에 의한 피사체의 변위 측정", 한국측량학회지 제18권, 제1호, pp. 25-32, 2000.
3. 배상호, "구조물 변위해석을 위한 수치사진측량의 컴포넌트 개발", 충남대학교 박사학위논문, 2000.
4. S. F. El-Hakim, "Photogrammetric Measurement of Microwave Antennae", PE & RS, Vol. 51, No. 10, pp. 1577-1581, 1985.
5. S. F. EL-Hakim, "Real-Time Image Metrology with CCD Cameras", PE & RS, Vol. 52, pp. 1757-1766, 1986.
6. Alberto L. Geraci, Antonio Risitano, and Giovanna A. Fargione, "Study of deformation in objects under stress digital image analysis", SPIE, Vol. 2646, 1990.
7. Li Weiqian, Ki Guangwen, and Xu Tianning, "Determination of the deformation of the bridge model in real time with CCD solid state camera", SPIE Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, Vol. 1395, 1990.
8. Alberto L. Geraci, Antonio Risitano, and Giovanna A. Fargione, "Study of deformation in objects under stress digital image analysis", SPIE, Vol. 2646, 1990.
9. J. C. Trinder, Y. Huang, "Edge detection with subpixel accuracy for a flexible manufacturing system", SPIE Conference, Videometric, 1993.
10. C. W. Urquhart, J. P. Siebert, "Towards Real-Time Dynamic Close Range Photogrammetry", SPIE Videometric II, Vol. 2067, pp. 240-251, 1993.
11. T. A. Clarke, M. A. R. Cooper, J. Chen, and S. Robson, "Automated Three Dimensional Measurement Using Multiple CCD Camera Views", Photogrammetry Record, pp.27-42, 1995.
12. K. B. Atkinson, "Close Range Photogrammetry and Machine Vision", Whittles Publishing, 1996.