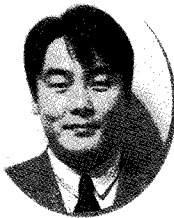


3차원 스캐너를 활용한 댐 안전관리 적용사례



임은상
한국수자원공사 K-water연구원
댐안전연구소 선임연구원
(esim89@kwater.or.kr)



김재흥
한국수자원공사 K-water연구원
댐안전연구소 선임연구원

1. 서론

우리나라는 약 18,000개소에 달하는 크고 작은 댐이 존재하며, 그중에는 대댐(높이 15m이상, 높이 10~15m로서 길이가 2,000m이상, 또는 저수용량 300만 m^3)으로 분류되는 댐도 1,213개소에 달하고 있다. 이처럼 우리주변에서 흔히 접할 수 있는 댐에 안전상의 문제가 발생할 경우에는 국민들에게 막대한 인적 물적 피해를 발생시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고 노후화된 댐 즉, 준공 후 상당한 시간이 경과한 댐에 대해서는 제체의 안정성을 판단하거나 관리하는 방법이 극히 제한적일 수밖에 없다. 다시 말하면, 최근에 건설된 댐에 대해서는 내부변위, 간극수압, 응력과 변형률, 침투수량 등의 다양한 측정치를 토대로 댐의 안정성을 판단하고 관리할 수가 있지만, 이러한 정보를 제공해 주는 매설기기가 일정기간이 경과하게 되면 폐기되기 때문에 결국에는 댐의 변형이나 누수량 등의 제한된 정보만을 가지고 댐의 안정성을 판단해야 하는 경우가 많다. 따라서 이러한 한계점을 보완하고자 다양한 거동 모니터링 기법이 제

안되었으며, 그 중에 3차원 스캐닝기법을 활용하여 댐에 대한 안전관리를 수행하였다. 최근에 발달된 3차원 스캐닝 기술과 컴퓨터 그래픽 기술을 결합하여 댐 구조물과 같은 큰 대상체를 3차원 공간상에 표현 및 분석이 가능할 수 있게 함으로써 원격 자동 측정방법인 3차원 스캐닝 기법을 활용하여 접근이 어려운 지역이나, 측정시간 및 조사인력 등의 한계성을 극복하고 고밀도로 대상물의 3차원 정보를 신속하고 효율적으로 얻을 수 있다.

이 스캐닝 시스템은 대상체에서 멀리 떨어진 위치에서 레이저를 투사하여 대상 표면상의 수많은 측정점의 3차원 공간좌표를 연속적으로 얻는 방법으로써, 장비특성에 따라 차이는 있지만 측정점간의 간격은 최소 1~3mm정도까지 측정할 수 있기 때문에 대규모 구조물의 정밀한 3차원 정보를 충분히 취득할 수 있는 방법이다. 그리고 측정시간이 비교적 짧으며, 접근이 불가능한 지역에서도 측량이 가능한 장점을 가지고 있으며 3차원 측정정보를 데이터베이스화하여 영구적으로 보관, 관리할 수 있어 데이터의 공유가 가능하므로 많은 연구자의 컴퓨터상에서 분석, 연구, 해석되어

최선의 결과를 도출할 수 있는 장점을 가지고 있다.

지금까지 외부변위의 관리는 일반적으로 댐에 설치된 침하계와 같이 1 point에 대한 변위를 분석하여 그 거동의 경시적인 변위특성을 파악하는데 주안점을 두었지만 댐 전체의 거동 특성을 파악하는데는 그 한계가 있으므로 상기의 3차원 스캐닝 기술을 이용함으로써 경시적인 거동 뿐만 아니라 댐의 공간적인 변형특성을 파악하도록 꾀하였다.

즉, 3차원 스캐닝 자료를 활용하여 측정된 댐의 변위와 슬라이딩에 의한 거동인지, 댐 자중에 의한 거동인지 등의 거동원인을 판단할 수 있을 뿐만 아니라 변위의 범위와 변위량 등의 거동에 대한 정량적인 정보를 획득할 수 있고, 이를 이용하면 보다 정확한 3차원적인 안정해석을 수행할 수 있는 장점이 있다.

2. 3차원 스캐닝 기법

3차원 Laser Scanning System은 상대적으로 짧은 시간 안에 대상물체 표면의 수많은 측정군(point-cloud)들의 3차원 공간 좌표를 기록한다. 이를 완성하기 위해서는 물체 표면위에 레이저 빔을 투사해야 한다. 이러한 스캐닝 효과는 일정량 굴절각의 증분에 따른 1개 또는 2개의 mirror를 사용하여 수행된다. 또한, 물체의 완전한 3차원 측정의 적용범위를 달성하기 위해 회전하기도 한다. 물체에 투사된 레이저 포인트의 위치를 결정하는 것은 거리와 각이므로 각 결정의 높은 정밀도는 매우 중요하다. 우리 공사가 보유하고 있는 레이저 스캐너는 Time-Of-Flight(TOF) 방식을 채택하고 있으며, 이 방식은 상대적으로 짧은 시간 안에 대상물체 표면을 3차원 공간 좌표를 가지는 수많은 측정군(point-cloud)들을 자동 기록하는 방식으로써 그 측정 방법은 그림 1에서 보는 것과 같이 대상체에 레이저 빔을 보내는 diode에서 물체 표면위에 레이저 빔을 투사하여 대상표면에서 반사되어 돌아오는 일부 레이저 광을 receiver로 측정하는 방법이다. 즉, Time-Of-Flight 방식은 레이저의 시간차를 이용하여 거리를 측정하는 방식으로 레이저의 송수신부와 전방 물체와의 거리를 R이라고 할 때, ΔT 는 송신 펄스와 수신 펄스의 시간차이다. 이 시간은 빛이 전방물체에

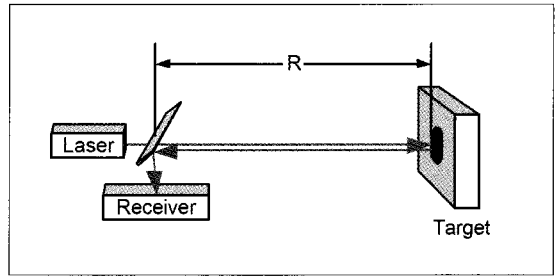


그림 1. Time-Of-Flight 측정방식

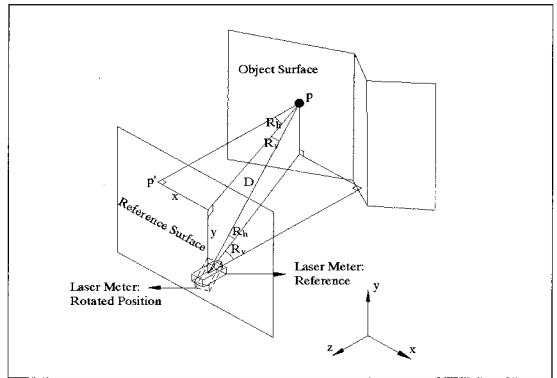


그림 2. 좌표치 계산 원리

반사되어 되돌아오는 왕복 시간이므로, 전방 물체와의 거리는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$R = \frac{C \cdot \Delta T}{2} \quad (1)$$

여기서, C: 빛의 속도($3 \times 10^8 \text{m/s}$),

ΔT : 송·수신 펄스간의 시간차

또한, 측정점의 위치는 그림 2에서 보인 것처럼 레이저가 반사되어 돌아오는 시간을 계산하여 거리를 결정하고 R_1 와 R_2 각도만큼 수평, 수직으로 회전하여 측정된 점 위치 P를 결정하는 방법으로써, 다음과 같이 삼각함수 계산에 따라 정의 될 수 있다.

$$\begin{cases} x = D \times \sin(R_1) \\ y = D \times \sin(R_2) \\ z = D \times \cos(R_1) \times \cos(R_2) \end{cases} \quad (2)$$

2.1 3차원 스캐닝의 신뢰성

2.1.1 측정 불확도

측정의 결과를 보고 받는 사람은 그 결과를 얼마나 믿어야 하는지 궁금하게 된다. 과거에는 이러한 궁금증 해결의 수단으로 오차나 오차분석을 사용해 왔다. 그러나 오차에 의한 분석은 그 평가 및 보정이 적정하다 하여도 결과값에 대해 100% 확신하는데는 의문이 남는 것이 사실이다. 이러한 불확실한 부분이 바로 오차부분까지를 포함한 결과의 신뢰도가 도대체 얼마나 될까하는 것이다. 이처럼 측정 불확도란 측정결과의 신뢰도를 나타내는 정량적인 지표로서 측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정하고 실 측정값과의 차이를 분산 상태로 나타내는 파라미터로 정의할 수 있다.

다시 말해 불확도가 표시되지 않은 측정 결과는 신뢰도에 관한 정량적 지표가 없기 때문에 어느 정도 믿어야 하는지 알 수 없다고 할 수 있다. 따라서 높은 정확도가 요구되는 측정일수록 측정 불확도가 표시되지 않으면 측정의 의미를 상실할 수밖에 없다고 할 수 있다.

일례로 합격기준이 $100 \pm 0.1\text{mm}$ 인 제품의 측정 결과를 100.05mm 로 표현한 경우 그 측정 결과의 불확도가 같이 표시되지 않으면 그 제품이 합격품이라고 확신할 수 없게 되는 것이다. 반면에 측정 결과를 $100.05 \pm 0.02\text{mm}(U=1.96, \text{신뢰구간 } 95.45\%)$ 라고 표현한 경우는 해당 제품에 대해 100번 중 95번은 $100.03 \sim 100.07\text{mm}$ 범위에 있다고 고객에게 알려줌으로써 좀 더 구체적이고, 명확한 판단의 정보를

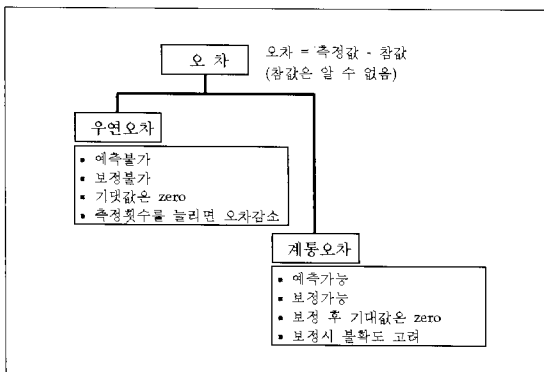


그림 3. 기존의 불확도 개념 : 오차와 보정

제공하게 되는 것이다.

2.1.2 불확도 개념의 변화 : 오차와 불확도

예전의 불확도 개념은 그림 3에서 보는 바와 같이 측정량의 추정값이 가질 수 있는 오차, 그리고 측정량의 참값이 속해있는 범위를 나타내는 추정값으로 정의되어 왔다. 즉 측정결과는 참값+오차의 관계에서 오차에 대응하는 부분으로 불확도가 사용되어 왔으며, 여기서 오차는 그 발생 요인에 따라 우연오차와 계통오차로 구분되어 있었고, 불확도 또한 마찬가지로 두 가지로 나뉘어 있었다. 하지만, 1993년 ISO에 의해 발행된 측정 불확도 표현지침서에 정리된 새로운 개념의 불확도 평가법은 불확도의 성분을 평가방법에 따라 A type 불확도와 B type 불확도로 구분하고, 측정결과의 가능한 오차에 대한 신뢰성 즉, 그림 4에서와 같이 가능한 오차의 범위를 나타내는 합성표준 불확도의 표현으로 발전하였다.

2.1.3 불확도의 원인 및 구성 요소

실제적으로 측정에서는 불확도의 요인이 수없이 많이 존재한다. 이러한 불확도의 원인은 샘플링에 의한 원인, 측정 장비에 의한 원인, 측정자에 의한 원인, 외부 환경에 의한 원인, 외부 참고 자료에 의한 원인 등 다양한 발생 원인이 존재한다. 이처럼 다양한 원인에 의해 발생하는 측정 불확도를 구성하는 요인은 수없이 많으나 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 첫 번째는 반복 측정한 결과의 통계적인 분포로부터 결정되는 실험 표준편차(BSDM)로 나타낼 수

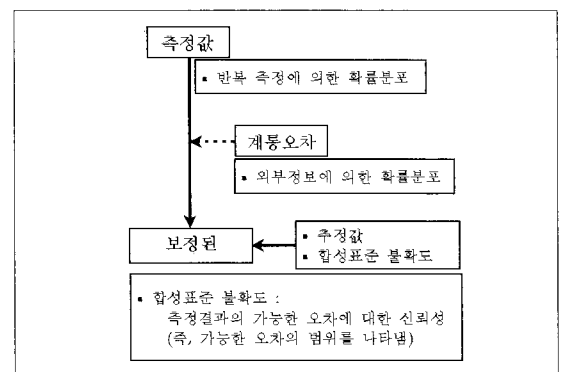


그림 4. 측정 불확도의 개념

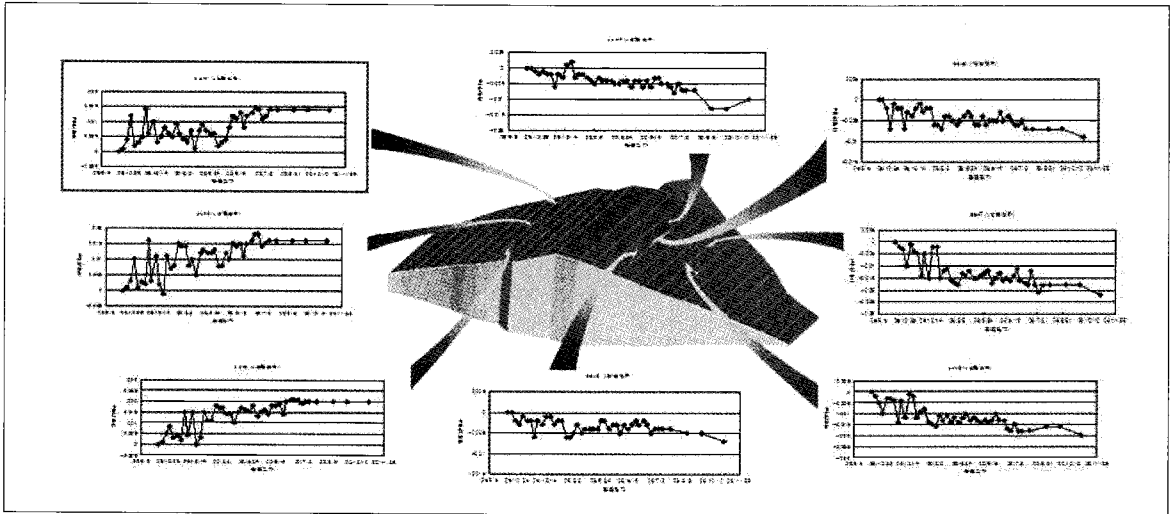


그림 5. 각 침하점에서의 침하측정자료

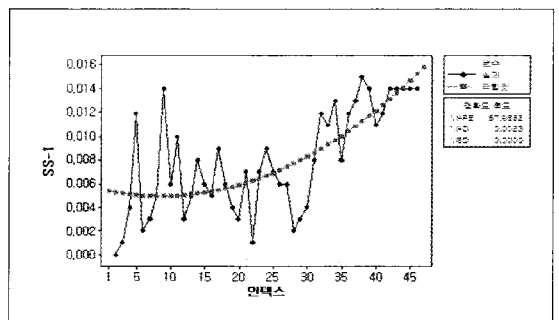
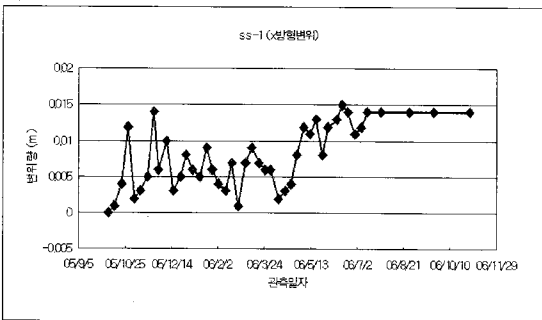


그림 6. 시계열 분석에 의한 경시 추세선

있는 A type 불확도이며, 두 번째는 표준편차로 나타낼 수 있지만, 경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 그 값이 결정되는 B type 불확도이며, B type 불확도의 발생 사례는 다양하므로 불확도 발생 가능한 요인을 최대한 찾아내고, 측정 결과에 반영하는 것이 측정 결과의 신뢰도를 높여가는 방법이다.

2.2 기존 계측방법

기존 외부변위 계측자료에 대한 불확도를 파악하기 위하여 댐 축조 및 담수초기부터 지속적으로 3차원 스캐닝기법에 의하여 외부변위의 측정이 지속되어오고 있는 대상 댐의 상·하류 사면에 설치된 침하점을 얻은 침하 계측자

료를 그림 5에 나타냈다.

이 그래프들 중 SS-1에 자료를 산정하여 그림 6에서 보는 것과 같이 시계열 분석을 수행하여 계측자료의 2차 방정식 형태의 경시 추세선을 산정하였다.

이렇게 산정한 추정치와 측정치의 차이를 오차로 정의하고 이 오차가 정규분포를 따르고 있는지 알아보기 위하여 그림 7에서와 같이 Anderson-Darling 방법에 의하여 검증을 수행하여 이 오차가 평균 0, 표준편차 0.3107cm의 정규분포를 따르고 있다는 결과를 얻었다.

또한, 이 결과를 1급 측량기준인 $\pm 0.5\text{cm}$ 를 기준으로 어느 정도의 신뢰구간을 갖고 있는지 알아보기 위하여 그림 8에서와 같이 통계분석을 수행하여 추정치 $\pm 0.5\text{cm}$ ($U=1.24$, 신뢰구간 89.24%)의 불확도를 산정할 수 있었다. 다시 말

3차원 스캐너를 활용한 댐 안전관리 적용사례

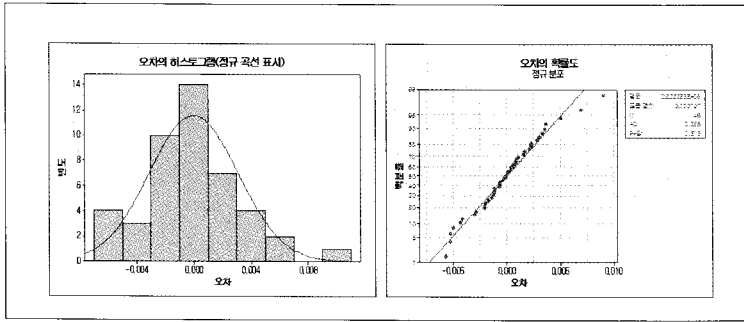


그림 7. 기준 계측자료의 오차에 대한 정규성 검증

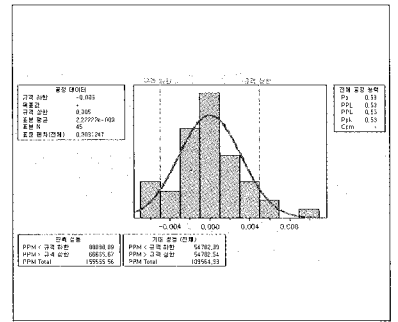
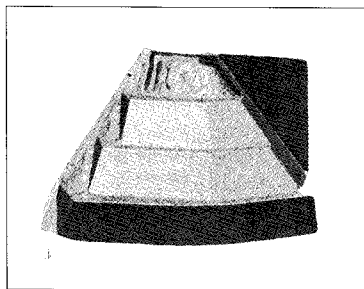
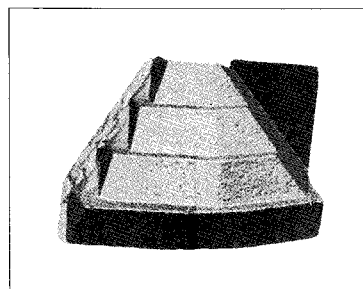


그림 8. 신뢰수준 분석



(a) 1차 측정



(b) 2차 측정

그림 9. 콘크리트 옹벽의 3차원 스캐닝 측정결과

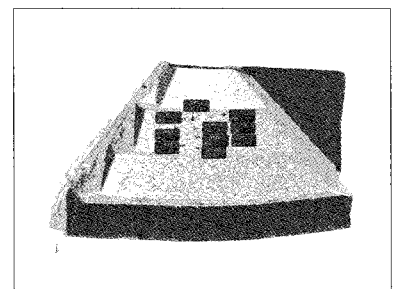
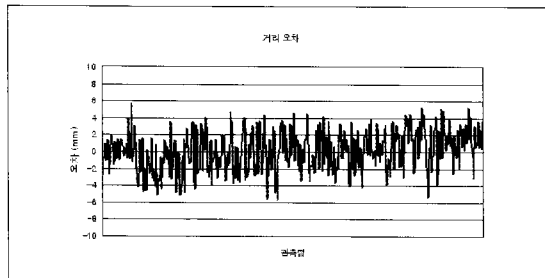
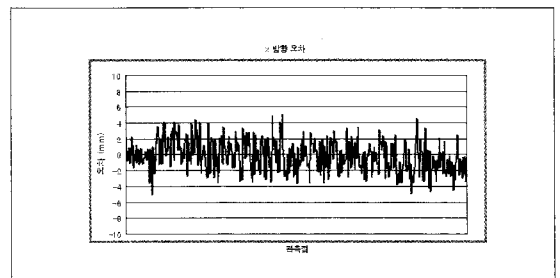


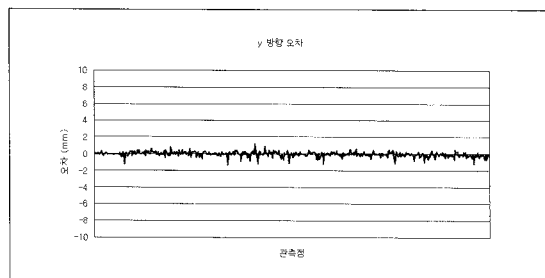
그림 10. 스캐닝측정 결과 비교



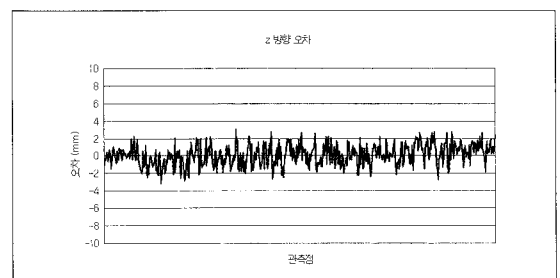
(a) 거리오차



(b) x 방향오차



(c) y 방향오차



(d) z 방향오차

그림 11. 1, 2차 스캐닝 측정 오차

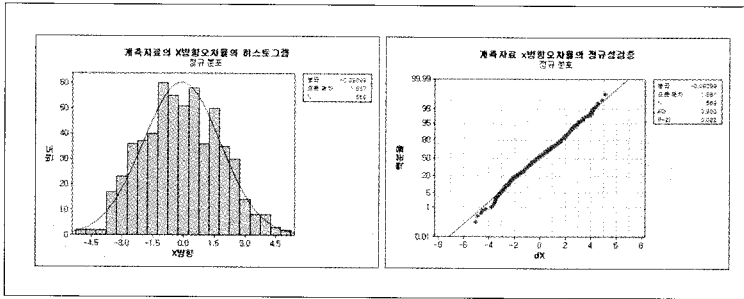


그림 12. 스캐닝 계측자료의 오차에 대한 정규성 검증

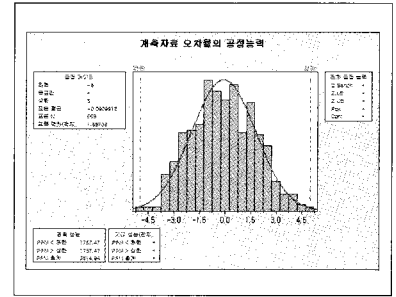


그림 13. 신뢰수준 분석

하면, 기존 측정방법에 의하여 수행한 계측은 100만번을 측정할 경우에 그 측정치가 참값(비록 알 수는 없지만)에 1급 측량기준인 $\pm 0.5\text{cm}$ 를 벗어나게 측정할 수 있는 가능성의 횟수가 109,561번이라는 것을 의미한다.

2.3 3차원 스캐닝 계측방법

기존 외부면의 계측자료에 대해서는 경시경향을 추정하여 불확도를 추정하였지만, 3차원 스캐닝 기법은 이러한 경시적인 경향을 추정할 수 있을 만큼의 자료가 축적되지 않았기 때문에 계측자료의 신뢰도를 확인하다는 의미에서 변형이 거의 발생하지 않을 것으로 기대되는 담체일부의 콘크리트 구조물에 대한 공간적인 측정자료를 가지고 3차원 스캐닝 계측방법의 불확도를 파악하였다.

즉, 구조물의 변형이 거의 없을 것으로 기대되는 감포담 우안 상류부에 설치된 콘크리트 옹벽을 그림 9에서와 같이 2차 측정하여 이 두 측정 자료를 그림 10에서와 같이 569 개소를 비교한 자료를 바탕으로 그림 11의 결과를 얻을 수 있었다.

이 비교 결과들 중, x 방향에 대한 오차를 대상으로 정규 분포에 대한 검증을 수행하여 그림 11에서와 같이 평균 0, 표준편차 0.1887cm 정규분포를 따른다는 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과 역시 기존 계측자료에 대한 통계분석과 동일하게 1급 측량기준인 $\pm 0.5\text{cm}$ 를 기준으로 통계분석을 수행하여 추정치 $\pm 0.5\text{cm}$ ($U=2.61$, 신뢰구간 99.55%)의 불확도를 산정할 수 있었다. 이는 100만번의 계측을 수행하면 그 측정치가 참값(비록 알 수는 없지만)에 1급 측량기준인 $\pm 0.5\text{cm}$ 를 벗어나게 측정할 수 있는 가능성이 있는 횟

수가 3,515번이라는 것을 알 수 있으며 또한 이 결과는 기존의 계측방법과 비교해 보면, 약 96.7%의 측정정확도에 대한 성능이 향상되었다는 것을 의미한다.

3. 3차원 모델링

구조물과 같은 복잡한 기하학적 형상을 3차원 포인트 좌표로 측정 후 이를 실제 3차원 모델로 만들기 위해서는 그림 14와 같은 과정을 거쳐야 완성될 수 있다. 3차원 곡면 모델을 만들기 위해서는 주로 다각형 망을 이용하는데, 특히 삼각망 형태가 주로 사용되고 있다. 이는 간결성, 수치적 안정성에 효과적이며 쉽게 표현이 가능한 장점을 가지고 있다.

3.1 3차원 Point Data 획득

3.1.1 대상물의 계측

스캐너의 장비 특성상 물체 정면에서 측정해야 하기 때문에 담 전체 형상을 한번에 측정하기는 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고자 담체(그림 15)를 그림 16과 같이 스캐너의 위치를 4군데 옮겨가며 측정하였다. 측정된 데이터들은 정합(Registration)이라는 방법을 이용하여 전체 형상을 복원하였는데 이 방법을 이용하기 위해서는 스캐너의 위치를 옮길 때 마다 기준점이 되는 타겟볼(Targeting ball)을 설치하여 대상체와 함께 측정해야 한다. 본 구조물에서는 정상부에 6개의 구를 설치하였으며, 첫 번째 측정 후 다음 단계 측정시에는 반드시 전단계의 볼을 측정하여 중첩이 되게

3차원 스캐너를 활용한 댐 안전관리 적용사례

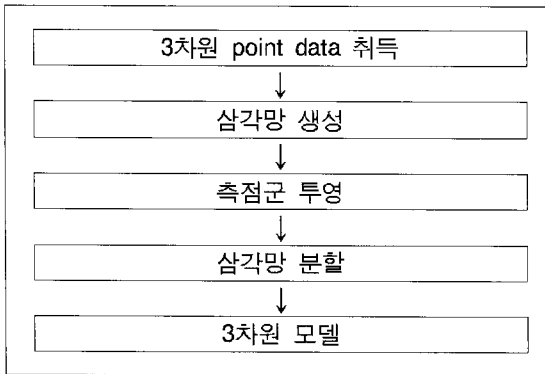


그림 14. 3차원 모델생성 과정



사진 1. 3차원 스캐닝 측정 광경

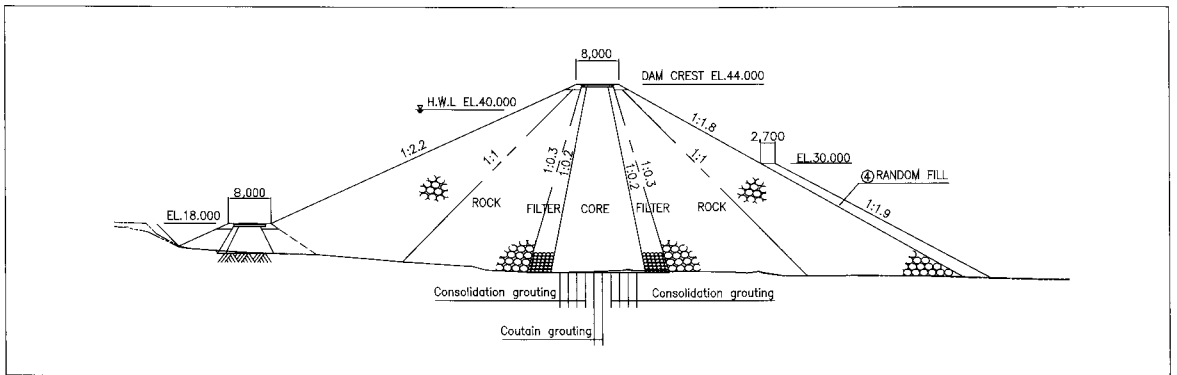


그림 15. 댐의 단면 구성

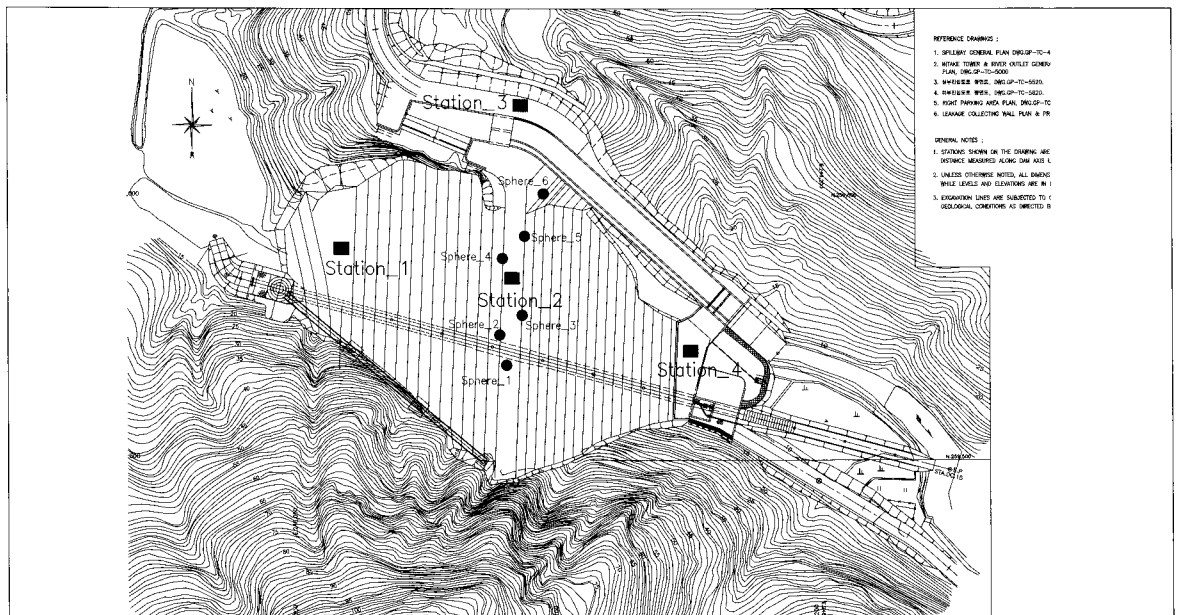
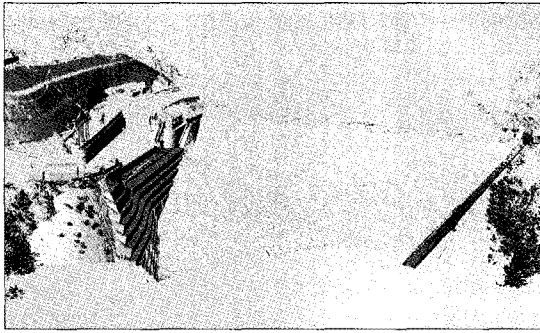
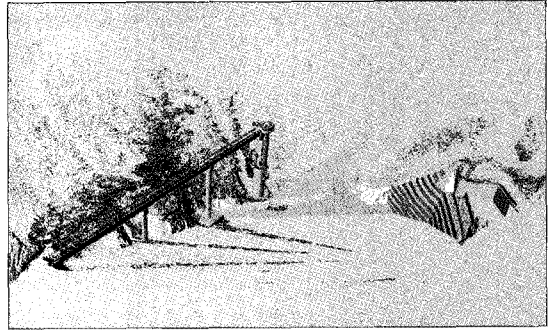


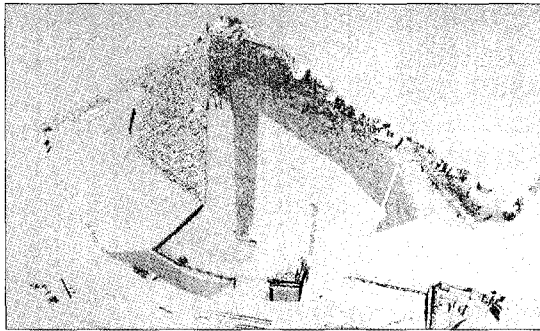
그림 16. 스캐너 위치(■) 및 타겟볼(●) 위치



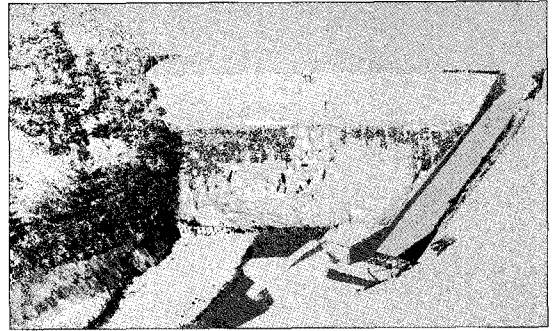
(a) Station_1



(b) Station_2



(c) Station_1



(d) Station_1

그림 17. 각 스테이션별 측정결과

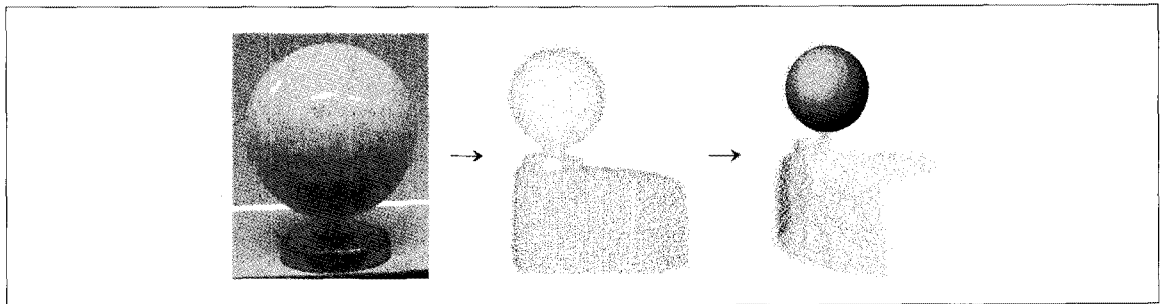


그림 18. 스캐너에서 타겟볼(Tooling ball)의 인식

측정해야 한다. 그림 17은 4군데에서 측정된 점군(point-cloud)이며, 측정격자 간격은 평균 5cm로 측정하였으며, 총 취득 포인트 수는 약 100만 포인트가 측정되었다.

3.1.2 정합 (Registration: Merging)

상기의 계측결과처럼 측정 대상이 크거나 거리가 멀 경우 측정 방향을 바꾸어 여러번 측정해야 대상물의 3차원 정보를 모두 획득할 수 있는 경우가 많다. 이때 측정기를 물

체 주위로 일정 각도씩 회전하는 위치로 옮겨가며 측정해야 하는데 측정 3차원 형상 전체를 완성하기 위해서는 여러개의 국부 좌표계가 필요하며, 각각의 국부 좌표계를 기준으로 얻어진 점군(point-cloud)으로 3차원 형상 전체를 표현하기 위해서는 각 국부 좌표계를 하나의 좌표계로 일치시키는 좌표변환과정이 필요하다. 이와 같이 3차원 변환 행렬을 구하고 이것을 이용해 각 국부 좌표계를 일치시키는 과정을 정합(Registration)이라 한다.

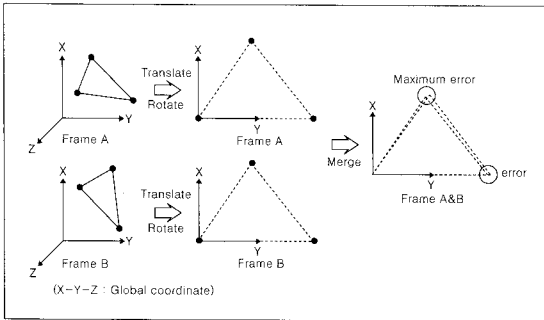


그림 19. 타겟볼(Tooling ball)을 이용한 정합 방법

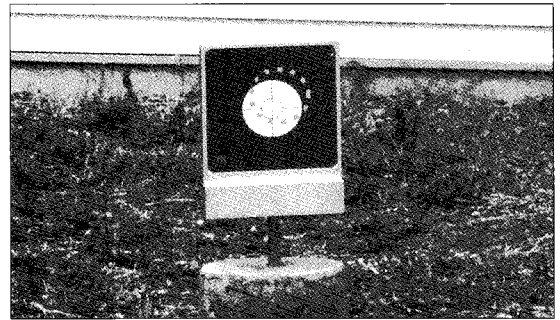


사진 2. 절대좌표 변환용 타겟판(레이저 조준경)

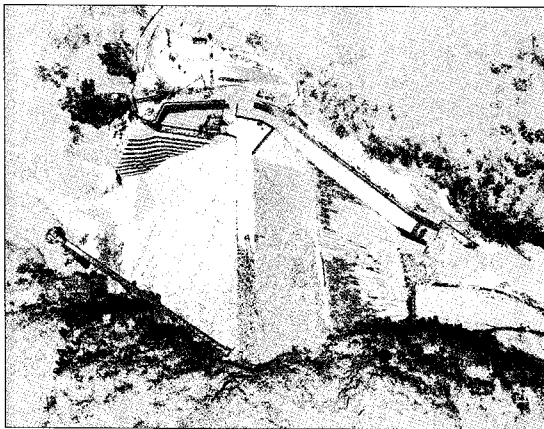


그림 20. 정합결과

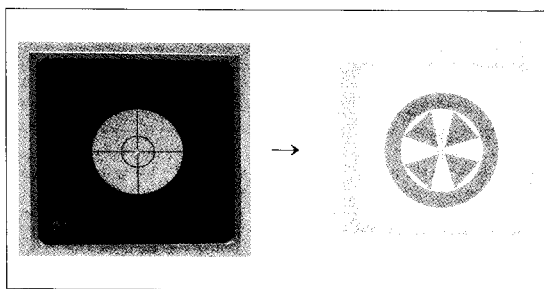


그림 21. 레이저 스캐너를 이용한 타겟 인식

본 스캐너는 그림 18에서와 같이 타겟볼(Tooling ball)을 이용하여 정합하는 방식으로 어느 방향에서 측정하더라도 동일한 형상을 가지며 일부분만 측정되더라도 구의 중심을 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다.

정합 방법은 그림 19에서 보듯이 최소 3개의 동일한 점이 필요하며, 첫번째 점을 원점으로 일치시키고 두번째 점

을 x축에 일치시키고 세 번째 점을 xy 평면에 일치시킨 후 정합한다. 그런데 이때 타겟볼간의 오차가 발생하는데 주로 3번째 볼에서 최대 오차가 발생한다.

그림 20은 정합한 결과이며, 그림에서 보듯이 구조물의 3차원 형상을 실제 모습으로 표현하였다. 정합이 끝난 데이터들은 포인트 데이터만으로 이루어졌으며, 각각의 포인트마다 3차원 공간좌표를 가지고 있기 때문에 3차원 모델링 및 구조물 표면 변형 분석 등 여러 분야에서 활용이 가능하다.

3.1.3 측정군(point-cloud) 절대좌표 변환

정합이 끝난 측정군은 상대좌표를 가지고 있기 때문에 이를 절대좌표로 변환하여 측정된 모든 점들이 실제 댐체의 좌표값으로 표현할 수 있다. 이 절대좌표를 이용하면 기존의 측량 방법으로 이루어지던 침하량, 설계편차 등 단지 몇 개의 점으로만 분석이 이루어지던 것을 레이저 스캐너를 이용하면 댐체 전체적인 계측 및 분석이 가능하다.

변환 방법은 그림 21에서 보듯이 레이저 스캐너 타겟(target)을 이용하여 변환하는 방법을 이용하였다. 최소 3개의 타겟을 설치한 후 레이저 스캐너를 이용하여 타겟을 정밀하게 측정하면 녹색 바탕과 검정색 선은 측정이 안되고 흰색 바탕의 중심원은 측정이 된다. 이렇게 반사강도의 차이와 중심원의 지름을 이용하면 타겟판의 중심을 정확하게 측정이 가능하게 된다. 3개의 타겟의 중심을 현장에 설치된 측량좌표점을 이용하여 측정한 후 이 값을 스캐너 전용 프로그램을 이용하여 입력하면 정합이 끝난 측정군은 3개의 좌표값을 중심으로 모두 변환이 된다.

3.1.4 삼각망 생성

일반적으로 다각형망 모델은 꼭지점(vertex), 모서리(edge), 면(face) 등의 집합과 이들 사이의 위상학적 연결관계(topology connectivity) 등으로 이루어져 있다.

하나의 다각형 망은 면과 꼭지점들의 집합으로 구성되어 있으며, 하나의 면(그림 22(a))은 3개의 꼭지점(v_1, v_2, v_3)에 의해 삼각형 형상을 정의하며, 동시에 이웃 요소로서 3개의 면(f_1, f_2, f_3)을 가리키고 있다. 단, 경계(Boundary) 부분에 위치하고 있는 면은 1개 혹은 2개의 면을 이웃 요소로서 가지게 되며, 경계 부분의 면을 찾는 데 이웃한 면의 개수가 중요한 단서로서 사용된다. 그리고 하나의 꼭지점(그림 22(b))은 형상 정보로서 3차원 좌표값(x, y, z)을 가지고 있으며, 동시에 이웃 요소로서 m 개의 면(f_1, f_2, \dots, f_m)을 가리키고 있다. 더불어, 하나의 모서리(그림 22(c))는 두 개의 꼭지점에 의해 정의하며 필요에 의해 이웃 요소로서 2개의 면을 탐색하여 가지고 있게 된다.

다각형망 생성 기법 중 Delaunay-Watson의 삼각화 알고리즘이 널리 이용되고 있다. 이 방법은 주어진 포인트의 집합으로 형성할 수 있는 삼각형의 집합 중에서 삼각형의 가장 작은 내각들의 합이 최소가 되기 때문에, 주어진 포인트를 연결하여 삼각형을 만드는 방법 중 가장 널리 사용되는 방법이다. 따라서 Delaunay 방법은 얇은 요소의 생성을 가능한 배제하는 방법이다.

전형적인 Delaunay Triangulation Algorithm은 Voronoi 도형 또는 Dirichlet 격자(Green and Sibson, 1978)로부터 시작한다. N 개의 포인트의 집합 $P_i(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 로 형성되는 Voronoi 도형은 N 각형(3차원의 경우 다면체)으로 구성되는데, 각 V_i 는 중심이 P_i 이고 어떤 다른 점보다 P_i 에 가까운 평면상의 영역(3차원의 경우 공간)을 나

타낸다. 수학적으로 V_i 로는 다음과 같이 표현된다.

$$V_i = \{x : |x - P_i| < |x - P_j| \text{ for all } j \neq i\} \quad (3)$$

여기서, $| \cdot |$ 는 내부 벡터의 크기를 의미하며, 각 V_i 는 점 P_i 와 이웃하는 점들을 잇는 선분의 수직이등분선(면)으로 경계가 지워진 블록 다각형(다면체)이다. 이러한 V_i 의 집합을 Dirichlet 격자라고 한다. 각 Voronoi 다각형(다면체)은 하나의 절점과 연관되어 있는데, Voronoi 도형을 생성한 후 각 절점을 이웃하는 Voronoi 도형과 연관된 절점을 연결함으로써, 삼각형(3차원의 경우 사면체)을 생성할 수 있다. 측정된 포인트 좌표들을 위의 삼각화 알고리즘을 이용하여 면 처리 후 3차원 모델을 생성하였다.

3.1.5 축점군 투영

삼각망 생성 기법으로 연구 대상 구조물을 3차원 모델로 할 경우, 대상 구조의 크기가 너무 크고 포인트 데이터 수가 너무 많기 때문에 실제 형상과 같이 표현하기란 거의 불가능하다. 그래서 본 연구에서는 축점군 투영(fit shell to point cloud) 방법을 이용하였는데, 이 방법은 초기 포인트 수를 일정하게 줄인 후 이를 삼각망을 생성한 다음 실제 포인트 데이터를 삼각망에 투영하여 삼각망 모델을 포인트 데이터의 모양으로 변환하는 방법을 이용하였다.

3.1.6 삼각망 분할

삼각망 분할(subdivision)이란 삼각망 모델의 면을 혹은 꼭지점을 반복하여 매끄러운 곡면을 생성해내는 알고리즘을 말한다.

Delaunay 알고리즘을 통하여 생성된 편평한 삼각데이터들을 기존 주변의 삼각 데이터들과 부드럽게 연결될 수 있도록 메쉬 분할법을 적용한다. Catmull & Clark과 Doo & Sabin이 스플라인에 근거한 사각 메쉬 분할법을 최초로 소개한 이후 많은 메쉬 분할법이 개발되었다. 근래에 들어서 메쉬 표면의 굽은 정도를 에너지로 계산하고 에너지가 최소가 되도록 분할된 메쉬의 점들의 위치를 정하는 변형 메쉬분할법(variational subdivision)이 활발히 연구되고 있다.

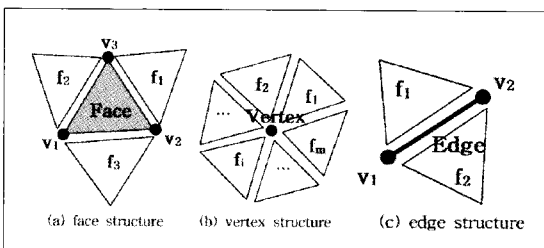


그림 22. 삼각망 구성 조건

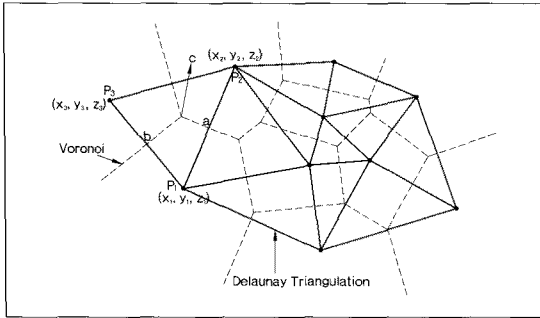


그림 23. Delaunay 삼각화 알고리즘

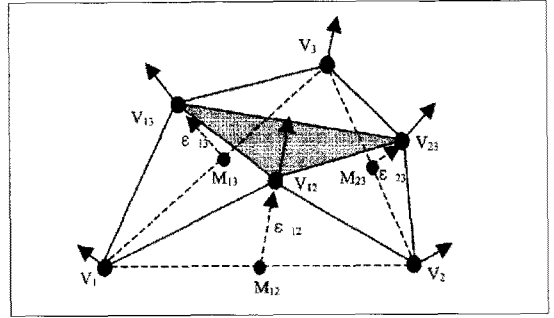


그림 24. 새로운 4개의 삼각망으로 분할

여기서는 Hausler 와 Karbacher에 의해 제안된 원호보간(circular arc interpolation)을 이용한 방법을 사용하였다. 이 방법은 모서리(edge) 분할을 통해 생성되는 새로운 점 데이터의 이상적인 위치를 결정하는 과정을 반복하여 수행한다.

이 방법은 그림 24와 같이 삼각형 $\Delta(V_1, V_2, V_3)$ 의 세 모서리(edge)를 가운데 점(M_{ij})으로 각각 분할한다. 이 과정을 통해 원래의 삼각형은 4개로 나뉘고 원호보간 법칙을 이용하여 새롭게 생성된 에너지의 가운데 점을 새로운 위치(V_{ij})로 옮긴다.

4. 적용사례

4.1 단면해석에 의한 변형분석

그림 25는 A땀의 하류사면에 대한 스캐닝에 의한 3차원



그림 25. A땀 하류사면 단면도 설정

모델링 결과를 보인 것이며, 여기서 사면의 하부(점선부분)에서 외부변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이를 좀 더 정확히 확인하기 위하여 그림 26에서와 같이 경사면에 대한 단면을 추출하였고 이 단면을 그림 26에서와 같이 설계 경사와 비교하여 변형정도를 확인하였던 사례이다.

그림 27과 그림 28은 스캐닝 결과로부터 단면을 추출하여 현 시점에서의 단면 형상을 산정하여 거동 특성을 분석한 사례이다.

4.2 3차원 설계도면에 대한 변형분석

그림 29는 C땀에 대한 3차원 설계도면과 스캐닝 측정결과를 분석하여 땀체 전체에 대한 변형분석을 수행한 것이며, 이 분석결과는 설계도면과 측정결과를 비교분석한 것이기 때문에 여기서 표현된 변형이 시공상 오류인지 아니면 실질적인 거동인지를 정확히 판별할 수 없지만 거동분석을 수행한 결과, 하류사면의 우안부에서 상대적인 변형

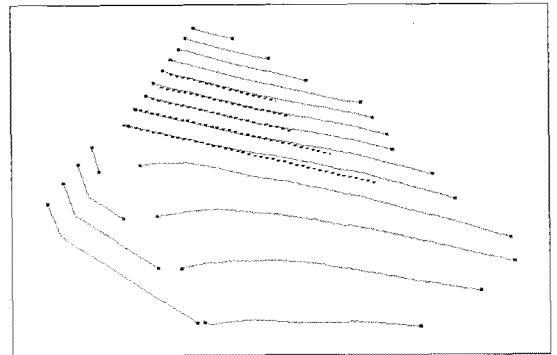


그림 26. A땀 설정단면과 설계경사 비교

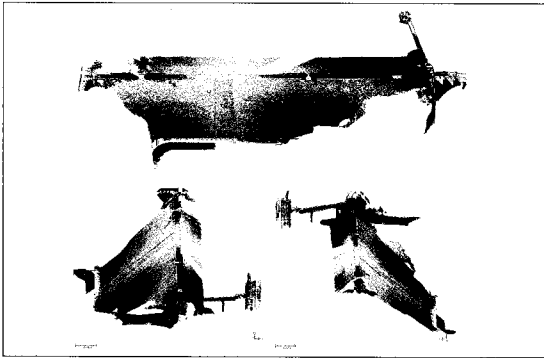


그림 27. B댐 스캐닝결과

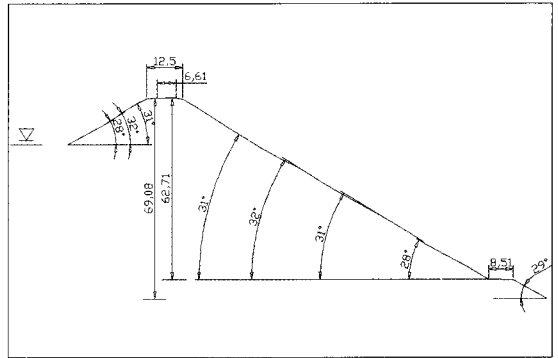


그림 28. B댐 추출단면 분석결과

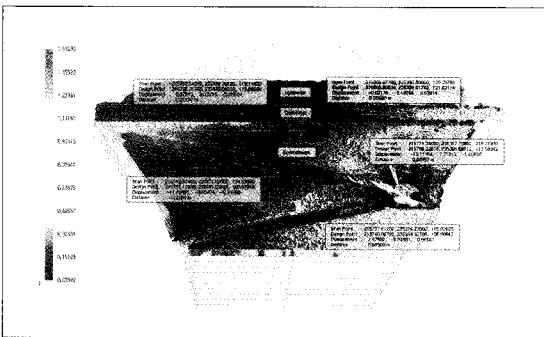


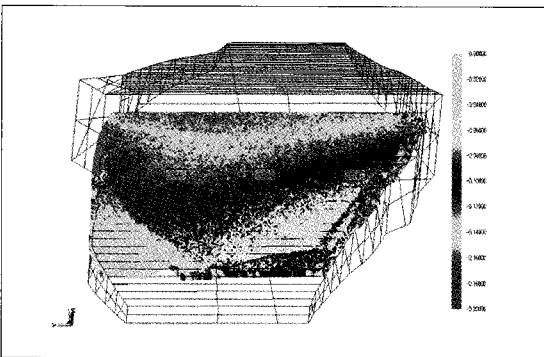
그림 29. C댐의 3차원 설계도면 및 측정군과 변형분석 결과

을 보이고 있는데 이는 기반암과 댐체 경계부라는 관점에서 상호연관이 있다고 할 것이며, 이 부위에 대한 주기적인 계측관리 등 중점적인 안전관리가 수행되고 있다.

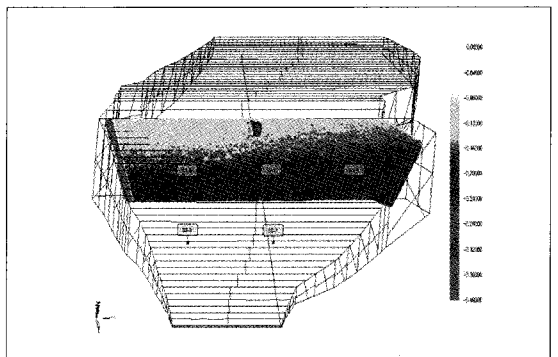
4.3 모니터링에 의한 거동분석

기존의 3차원 스캐닝자료가 있는 경우에는 기존의 스캐닝자료와 새롭게 얻은 3차원 데이터를 직접 비교함으로써 두 측정기간 동안에 발생한 변형량을 산정할 수 있으며, 1차 측정과 2차 측정은 10개월간의 차이를 두고 수행되었던 측정결과와의 비교·분석 결과를 그림 30에 나타냈다.

상류사면에서는 상부로 갈수록 침하가 커지는 경향을 볼 수 있는데 이는 댐체 자중에 의하여 발생한 변형으로 판단되며 하류사면 역시 같은 현상의 변형으로 판단되었으며, 침하거동이 댐의 중앙부에서 상대적으로 많이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 댐의 종방향으로 존재하는 계곡의 형상이 반영된 침하패턴으로 댐에 대한 해석시 계곡형상을 고려한 3차원 해석의 필요성을 말해주는 것이라고 할

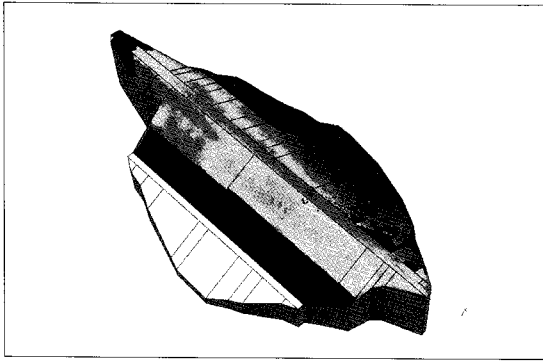


(a) 상류사면

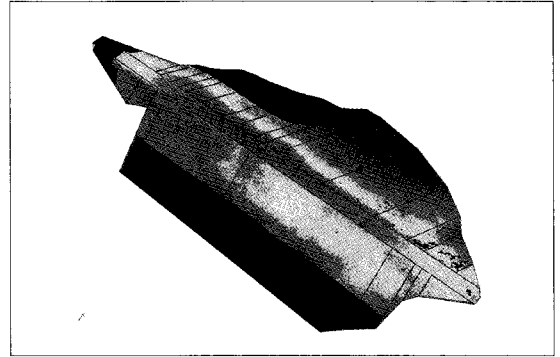


(b) 하류사면

그림 30. D댐에서의 기존 스캐닝 데이터에 대한 측정결과분석



(a) 1차 측정



(b) 2차 측정

그림 31. E댐 스캐닝결과에 대한 거동 분석 결과

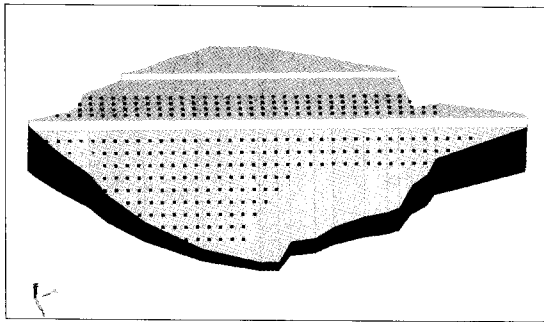


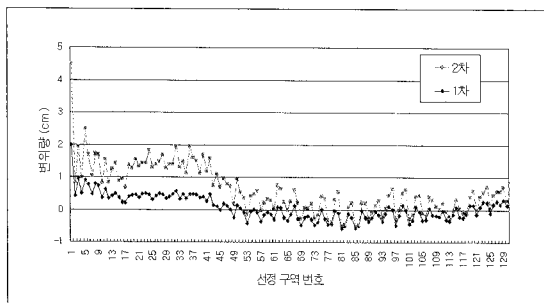
그림 32. 정량적 변위량 산정을 위한 구역 추출

수 있다.

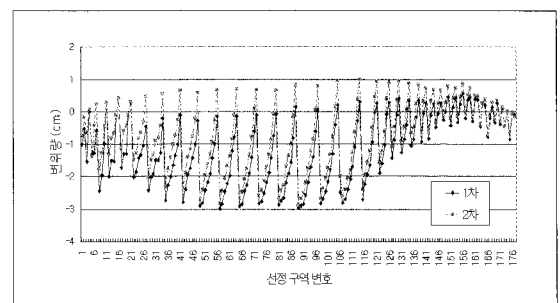
그림 31은 E댐의 1, 2차의 스캐닝 결과를 3차원 설계도와 비교·분석하여 구한 상대 변위 contour이며, 각 스캐닝 결과에 대한 거동 특성을 살펴보면, 상류사면의 좌안에서 contour 색이 변하고 있다는 것을 관찰할 수 있는데, 이

는 약 8개월동안에 이 부위에서 다소의 변위가 있는 것을 의미한다고 하겠다. 이 변위를 정량적인 비교를 하기 위하여 그림 32에서와 같이 그 변위를 직접 산정할 수 있도록 상류사면 130개, 하류사면 177개의 구역을 추출하여 그 구역의 평균 변위를 산정하였다.

그 결과, 그림 33에서 보는 바와 같이 하류사면은 사면의 상부부위에서 수 mm의 변위가 발생했다는 것을 알 수 있다. 이는 스캐닝 장비의 정확도를 고려하였을 때 변위가 오차이하로 발생한 것이기 때문에 특이할 만한 거동은 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 하지만 상류사면의 경우에 사면좌안에서 약 1~1.5cm의 미소한 변형이 발생했다는 것을 알 수 있으며 이 부위에 대해서는 비록 미소량의 변형이라 할지라도 다른 부위와 상이한 변형이 있었다는 의미에서 지속적인 관심을 갖고 모니터링을 추가적으로 수행하고 있는 중이다.



(a) 상류사면



(b) 하류사면

그림 33. E댐 정량적 변위량 분석 결과

5. 맺음말

3차원 스캐너를 활용한 댐 안전관리 기법은 이상에서 언급한 것처럼 외부변위에 대한 모니터링을 지속적으로 수행하여 그 자료를 축적함으로써 댐 타입별 및 운영기간 등에 의한 거동특성을 파악하는데 유용한 기법임을 확인하였고, 더 나아가 이러한 자료를 바탕으로 각 댐의 집중관리 부위 및 공간적 형상으로부터 분석한 것으로서 보다 구체적인 분석과 그 진행성을 판정하는 등 적극 활용되기를 기대한다.

참고문헌

1. 김영경, 손호웅, 임은상, 임정열, 김기영 (2006), "지상 레이저 스캐닝 자료를 활용한 댐체의 변형해석", 지구물리학회지, 제 9권, 제4호, pp.333-341.
2. 박세연, 신하용, 박언진(2004), "쾌속조형을 위한 점집합 기반의 단면 곡선 생성" 한국 CAD/CAM학회 학술발표논문집, pp.493-501.
3. 박정대(2005) "구축과 관련된 디지털 기법의 특성에 관한 연구" 대한건축학회논문집 제21권 제12호, pp. 183-192.
4. 손호웅, 이성민(2003) "석조구조물의 효율적 유지관리를 위한 지질공학적 및 구조동역학적 특성 연구" 지구물리학회지, 제6권, 제4호, pp.277-294.
5. 이승호, 황영철, 김세현, 심석래, 정태영 (2004) "3D-Laser scanner를 이용한 암반 절리의 정밀측정에 관한 연구" 대한 화약발파공학회, 제22권, 제3호, pp. 103-111.
6. 임은상, 신동훈, 김재홍, 김영경 (2007) "3차원 스캐닝 기법을 활용한 암반사면의 거동모니터링" 대한토목공학회 학술발표논문집, pp.2794-2799.
7. 허성민, 김호찬, 이석희 (2001) "역공학에서의 Dalaunay 삼각형 분할에 의한 점 데이터 감소", 대한기계학회논문집, 제 25권, 제8호, pp.1246-1252.
8. 홍성균, 김연술, 이회관, 김형찬, 양균의 "레이저 스캐너를 이용한 측정 및 레지스트레이션시 오차감소에 관한 연구" 한국정밀공학회지 제20권, 제9호, pp.197-204.
9. Blais, F., Beraldin, J.-A., El-Hakim, S., Godin, G., September (2003) "New Development in 3D Laser Scanners: From Static to Dynamic Multi-Modal Systems", Proceeding of the 6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, National Research Council of Canada, Zurich, Switzerland, Vol.4037, pp.1-8.
10. Blais, J.-A. Beraldin, and S.F. El-Hakim (2000), "Range Error Analysis of an Integrated Time-of-Flight, Triangulation, and Photogrammetry 3D Laser Scanning System" SPIE Proceedings, AeroSense, Orlando, Vol.4035, pp.24-28.
11. Green, P. J. and Sibson, R. (1978), "Computing Dirichlet tessellations in the plane", The Computer Journal, Vol 21, pp.168-173.
12. Vollmer, J., Mencl, R. and Muller, H.(1999), "Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes," In Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), Vol.18, No.3. pp.236-247.