

2단계 접촉정의와 내접체를 이용한 접촉 알고리즘과 3차원 불연속변형해석에의 적용

안태영, 송재준 (서울대학교)

1. 서론

3차원 불연속변형해석(DDA)은 개별요소법(DEM)과 함께 해석대상을 불연속체로 간주하여 접근하는 수치해석법이다. 따라서 해석 영역에서 불연속면에 의해 생성된 개별 블록들에 의한 접촉을 탐색하여 접촉력의 크기와 방향을 결정하는 접촉 알고리즘은 불연속변형해석 가장 핵심적인 부분이다. 개별요소법을 이용한 다면체 해석 코드인 3DEC의 경우 공통면(Cundall, 1988)을 이용한 접촉 알고리즘을 적용하고 있는 반면, 불연속변형해석의 경우, 3차원 연구로 확장된 2000년대 이후 다양한 접촉 알고리즘들이 제안되고 있는 실정이다. 본 연구는 2단계 접촉정의와 내접체를 이용한 새로운 접촉 알고리즘을 개발하고 이를 3차원 불연속변형해석에 적용하여 3차원 다면체들의 거동을 보다 효과적이고 안정적으로 모사하고자 하였다.

2. 2단계 접촉정의와 내접체를 이용한 접촉 알고리즘

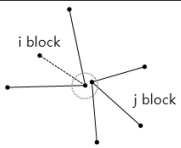
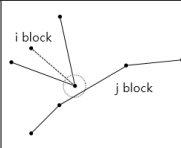
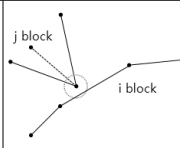
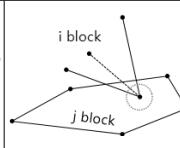
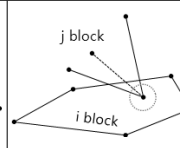
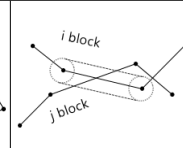
3차원 다면체 간의 접촉 처리를 보다 정확하게 하기 위하여 Liu and Lemos(2001)가 제안한 2단계 접촉정의 과정을 적용하였다. 본 연구에서는 두 단계 접촉을 각각 기하적 접촉(geometric contact)과 구조적 접촉(structural contact)으로 정의하고, 각 단계별 접촉 정의 과정을 새롭게 제시하였다. 이 과정에서 특정 절점과 모서리의 접촉면의 어려운 접촉은 내접구와 내접원기둥을 이용하여 가상의 접촉점 및 접촉면을 생성하는 알고리즘을 개발하였다.

2.1 2단계 접촉정의

2.1.1 기하적 접촉

기하적 접촉은 다면체의 절점, 모서리, 면들 간의 근접 여부를 탐색하여 정의되며, 아래의 표 1과 같이 여섯 가지 형태로 구분할 수 있다.

표 1. 기하적 접촉의 6가지 형태

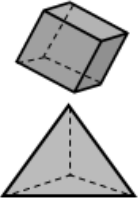
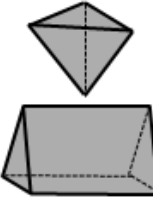
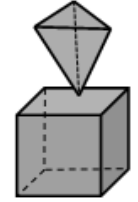
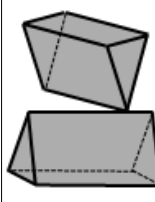
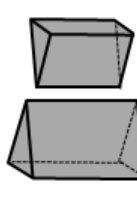
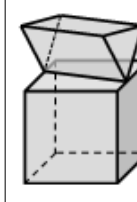
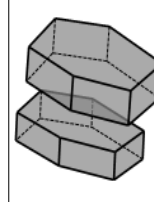
절점-절점 기하적 접촉	절점-모서리 기하적 접촉	모서리-절점 기하적 접촉	절점-면 기하적 접촉	면-절점 기하적 접촉	모서리-모서리 기하적 접촉
					

이는 기존의 3차원 불연속변형해석이 정의하는 네 가지 접촉의 형태와 유사하며(장현익, 2001), 접촉하는 두 다면체의 인덱스 순서에 따라 모서리-절점 접촉과 면-절점 접촉을 각각 절점-모서리 접촉 및 절점-면 접촉과 구분한 것이다. 탐색된 개별 접촉의 두 블록의 상대적 위치관계, 거리, 관입 여부 등을 비교하여 개별적인 접촉면을 결정하는 기존 접촉 알고리즘과는 달리, 새로운 접촉 알고리즘의 기하적 접촉은 절점, 모서리, 면들 간의 근접 여부만을 확인하여 해당 절점, 모서리 및 면의 인덱스만을 저장한다.

2.1.2 구조적 접촉

구조적 접촉은 두 블록의 접촉을 세부 접촉, 즉 기하적 접촉의 조합으로 정의된 두 다면체의 거시적 접촉 패턴을 의미한다. 본 접촉 알고리즘에서는 구조적 접촉의 종류를 Liu and Lemos(2001)가 제시한 접촉형태와 동일하게 총 7가지로 구분하였다(표 2).

표 2. 구조적 접촉의 7가지 형태

점접촉				선접촉		면접촉
절점-절점 구조적 접촉	절점-모서리 구조적 접촉	절점-면 구조적 접촉	교차 모서리 구조적 접촉	평행 모서리 구조적 접촉	모서리-면 구조적 접촉	면-면 구조적 접촉
						

7가지의 구조적 접촉 형태는 접촉 영역에 따라 점접촉, 선접촉, 면접촉으로 세분화 할 수 있다. 점접촉은 두 다면체 사이에 하나의 기하적 접촉이 탐색된 경우이고, 선접촉은 양 끝점에 두 개의 기하적 접촉이 탐색된 접촉이다. 면접촉은 셋 이상의 기하적 접촉이 탐색된 두 다면체의 접촉형태이다.

탐색된 각각의 개별접촉의 접촉점과 접촉면을 결정하는 기존 불연속변형해석의 접촉 알고리즘과는 달리, 새로운 접촉 알고리즘은 다면체 간의 개별접촉 즉, 기하적 접촉의 개수 및 기하적 접촉들 간의 구조적 관계를 이용하여 구조적 접촉을 정의하고, 이를 이용하여 접촉점 및 접촉면을 결정한다. 이를 위하여 해석초기에 각 블록별로 저장된 절점, 모서리, 면들 사이의 위상학적 관계를 구조화하여 저장함으로써 매 스텝 해석 과정에서 효율적으로 적용할 수 있다.

2.2 내접체를 이용한 가상 접촉면 생성

7가지의 구조적 접촉 중 면(face)이 포함되어 해당 면이 접촉면으로 결정되는 세 접촉 형태인 절점-면 접촉, 모서리-면 접촉, 면-면 접촉을 제외한 나머지 네 접촉 형태는 접촉면을 결정하는 과정을 거쳐야 한다. 이때 기존의 접촉 알고리즘에서는 절점 및 모서리에 인접한 면들 중 하나의 면을 접촉면으로 선택하고, 이 과정에서 복잡한 블록의 거동 및 형상에 의해 잘못된 접촉면을 결정하는 경우가 빈번히 발생하였다. 또한 접촉의 이동과 함께 초기 접촉면이 다른 접촉면으로 급격

히 바뀌면서 발생하는 접촉거동의 불연속성(contact jump)도 존재하였다. 새로운 접촉 알고리즘은 이러한 수치적 불안정성을 개선하기 위하여 해당 절점 및 모서리에 내접하는 구(sphere)와 원기둥(cylinder)를 삽입하여 해당 내접체에 의한 가상의 접촉면을 생성하도록 하였다. 이는 Ahn and Song(2011)이 모든 절점에 내접구를 삽입한 것을 모든 모서리에 원기둥을 추가하여 확장한 것이다. 실제 블록의 날카로운 절점이나 모서리가 접촉할 경우, 해당 절점 및 모서리에 국부적인 파쇄가 발생하여 생성된 면에 의해 접촉한다는 점을 고려하면, 내접체에 의해 생성된 가상의 접촉면은 실제 블록의 절점 및 모서리에 작용하는 접촉력의 방향을 보다 사실적으로 모사할 수 있다.

3. 사면 붕괴 해석 예제

그림 1과 같이 세 절리군에 의해 생성된 암반 사면 모델을 생성하고 이를 개별요소법을 이용한 다면체 해석 코드인 3DEC 및 새로운 접촉 알고리즘을 적용한 불연속변형해석을 이용하여 해석을 수행하였다. 절리면의 마찰각을 5°로 낮게 설정하여 사면 블록들의 파괴시 발생하는 다양한 형태의 접촉을 안정적으로 모사할 수 있는지 살펴보았다. 해석에 사용된 입력 물성은 표와 같다.

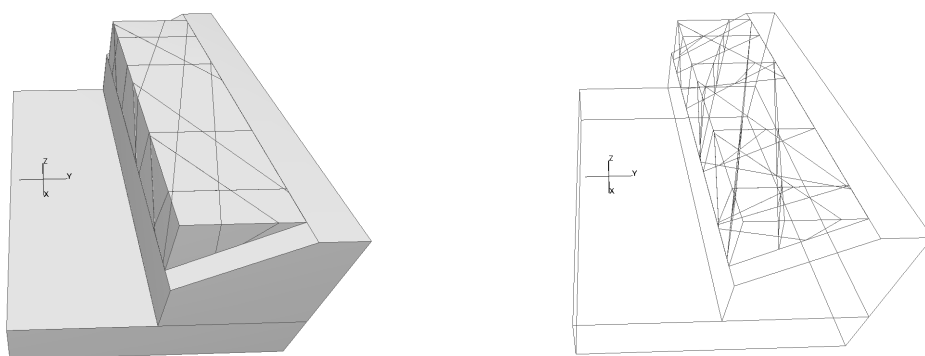
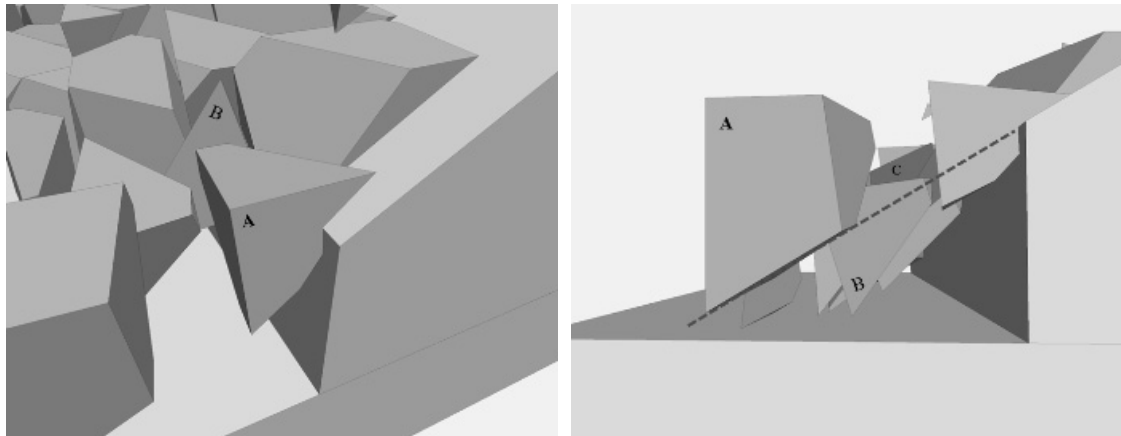


그림 1. 암반 사면 모델

표 3. 암반 사면 모델 해석을 위한 입력 물성

구분	암석물성			절리물성		접촉 물성 (for 3DEC)		접촉 물성 (for DDA)	
	E (GPa)	ν	ρ (t/m ³)	ϕ (°)	c (MPa)	kn (GPa/m)	ks (GPa/m)	pn (GPa/m)	ps (GPa/m)
적용값	50	0.2	2.7	5	0	50	20	10	5

그림 2는 3DEC 해석과정에서 발생하는 문제점의 예이다. 그림 2(a)는 접촉 탐색 오류로 인하여 블록 간 관입이 발생한 예이다. 그림에서 A블록은 하부 사면 및 B블록에 관입하였다. 그림 2(b)의 A블록의 경우, 지면으로 수직으로 낙하하는 B블록과는 달리 점선으로 표시한 가상의 공통면 상에서 미끄러짐이 발생하고 있다. 이는 A블록과 하부 암반사면 간의 접촉면을 올바르게 설정하지 못했기 때문이다.



(a) 블록 관입 (b) 잘못된 접촉면 설정
그림 2. 3DEC을 이용한 사면 붕괴 해석시 발생하는 문제점의 예

그림 3과 그림 4는 새로운 접촉 알고리즘을 적용한 3차원 불연속변형해석 결과를 각각 x축을 기준으로 앞과 뒤에서 바라본 것이다. 해석결과와 같이, 새로운 접촉 알고리즘을 적용한 3차원 불연속변형해석은 암반사면 붕괴 해석 과정에서 발생하는 다양한 형태의 접촉들을 정확하게 탐색하고 처리하여 접촉 탐색 오류나 잘못된 접촉면 설정에 의해 발생하는 블록의 관입이나 비현실적인 블록 거동 등이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

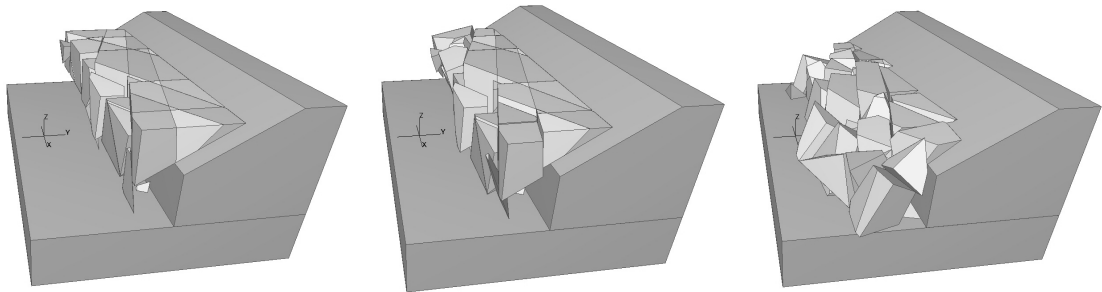


그림 3. 새로운 알고리즘을 적용한 3차원 불연속변형해석 결과 1.

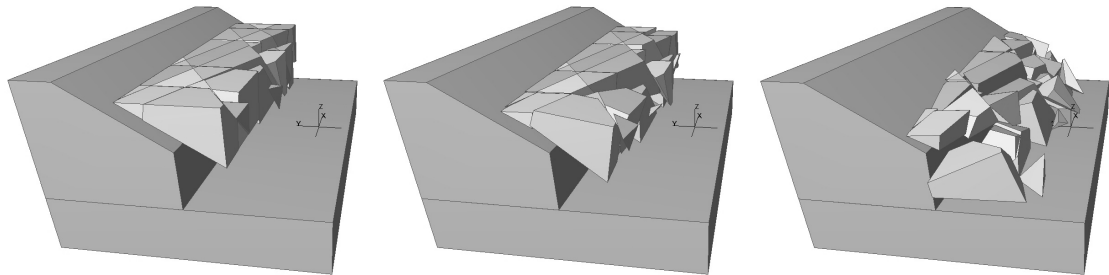


그림 4. 새로운 알고리즘을 적용한 3차원 불연속변형해석 결과 2.

4. 결 언

본 연구를 통해 3차원 불연속변형해석의 새로운 접촉 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 기하적 접촉과 구조적 접촉의 2단계 접촉형태를 제안하고, 접촉면의 결정이 어려운 구조적 접촉은 내접구와 내접원기둥을 삽입하여 접촉면을 생성하여 안정적인 접촉처리가 가능하도록 하였다. 새로운 알고리즘을 적용하여 암반 사면의 붕괴거동을 해석한 결과, 블록들의 대변위시 발생하는 접촉들을 안정적으로 해석할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 장현익, 2001, 삼차원 불연속 변형 해석기법의 개발과 붕괴 사면에의 적용, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
2. Cundall P.A., 1988, Formulation of a 3D distinct element model- Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 25, No. 3, pp. 107-116.
3. Liu X.L., Lemos J.V., 2001, Procedure for contact detection in discrete element analysis, *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, pp. 409-415.
4. Tae-Young Ahn, Jae-Joon Song, 2011, New contact-definition algorithm using inscribed spheres for 3D discontinuous deformation analysis, *International Journal of Computational Methods*, Vol. 8, No.2, pp. 171-191.