

맨홀뚜껑 이탈발생 역학 분석

Deviation occurrence mechanics analysis of a Manhole cover

우병수*, 한진우, 강왕규

(Byong-Soo Woo, Jin-Woo Han and Wang-Kyu Kang)

Abstract : 우리는 가끔 도로상에 설치되어 있는 맨홀뚜껑이 뒤집혀 있는 것을 보거나, 맨홀뚜껑 이탈로 인한 차량 파손 소식을 접할 수 있다.

맨홀뚜껑은 일반적으로 도로나 보도에 많이 설치되어 있고, 현재 사용중인 KS규격의 맨홀뚜껑은 마모 및 충격 등 여러 가지 복합적 요인으로 인하여 소음이 발생하고, 또한 극히 일부는 도로에서 이탈하여 인적, 물적 피해를 발생시키고 있는 실정이며 이를 방지하기 위해 많은 연구와 제품 등이 만들어 지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 KS규격 맨홀뚜껑의 정적 및 동적 특성을 각종 해석프로그램과 진동실험을 통해 분석하였고, 파라미터 해석을 통한 거동의 핵심 요소 등을 확인하였다. 이러한 분석결과는 보다 안전하고 경제적인 맨홀뚜껑을 개발하는데 중요한 기초자료로 활용될 것이라 판단된다.

Keywords: 맨홀뚜껑, 이탈, 역학분석

I. 서론

맨홀뚜껑은 일반적으로 차도나 보도, 주택가 등 장소를 가리지 않고 흔히 볼 수 있고, 맨홀작업을 위한 작업자의 출입을 위해 많이 사용되고 있다. 현재 사용되고 있는 맨홀뚜껑은 마모 및 충격 등 여러 가지 요인으로 인하여 소음이 발생하거나, 차량 통행으로 인한 이탈이 발생하여 많은 인적, 물적 피해가 발생되고 있는 실정이다. 맨홀뚜껑은 불순물의 유입, 외부 충격, 부식, 마모 등으로 인하여 초기 안정되어 있던 조건에서 불안정한 모드로 변화하여 소음, 이탈, 파손 등이 발생하는 것으로 추정되며 이를 예방하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며 맨홀뚜껑의 안전장치 등 여러가지 특허가 출원되고 있는 실정이다.

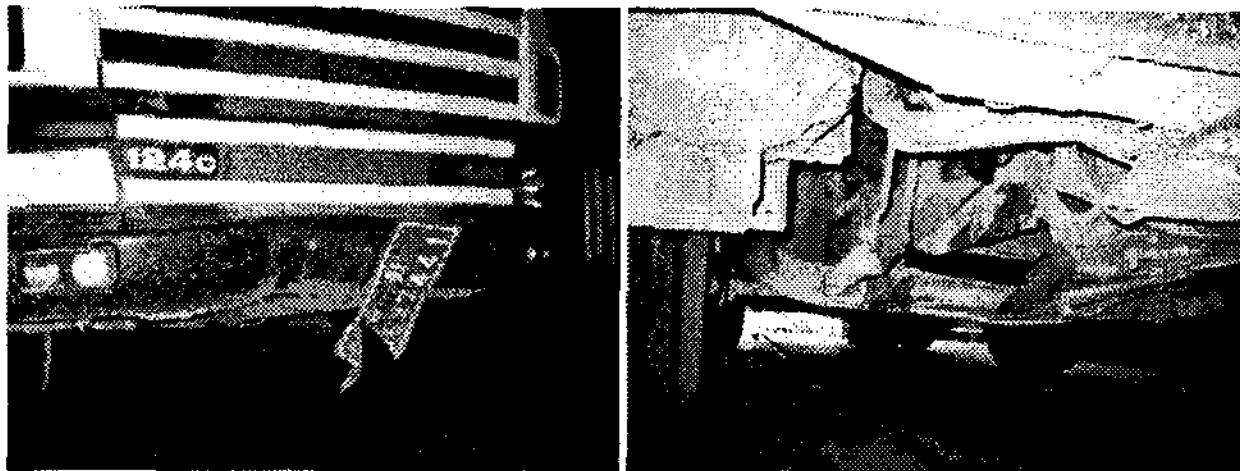


그림 1. 맨홀뚜껑 이탈로 인한 차량피해 사진

본 연구에서는 맨홀뚜껑의 정적 및 동적 특성을 파악하기 위하여 각종 해석프로그램을 이용하여 분석하였고, 진동실험을 통하여 검증 작업을 하였다.

이러한 분석결과는 보다 안전하고 경제적인 맨홀뚜껑을 개발하는데 중요한 기초자료로 활용될 것이라 판단된다.

II. 본론

1. 진동 해석

진동해석에 적용된 재질은 고무와 주철을 적용하였다. 고무의 탄성계수, 밀도, 포아송비는 각각 1.6 MPa, 1100 m³, 0.49을 적용하였다. 주철의 탄성계수, 밀도, 포아송비는 각각 160 GPa, 7150 m³, 0.3을 적용하였다. 진동해석에서 경계조건은 자유경계조건을 적용하였다.

그림 2.는 진동해석에 적용된 경계조건을 나타내고 있다.

진동해석에서는 ANSYS 10.0을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에서 사용한 요소는 Solid 185번 요소를 사용하였다. Solid 185요소는 3차원 8노드(node) 구조용 솔리드 요소이다. 진동해석에 사용된 맨홀뚜껑의 요소는 10236개, 노드(node) 수는 13908개이며, 받침대의 요소는 13016개, 노드수는 16732개 이다. 진동해석에서 사용된 해석방법은 subspace iteration을 적용하였다.

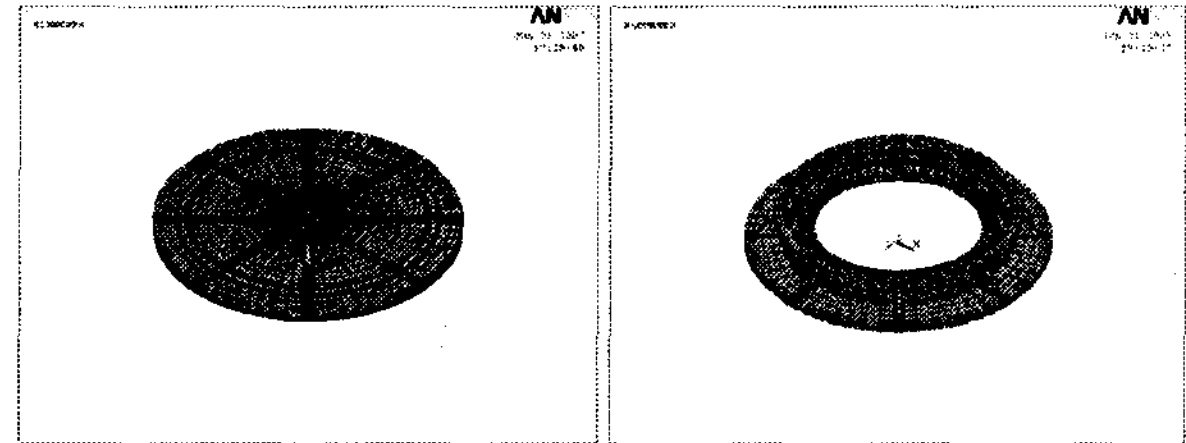


그림 2. 고유진동 해석 결과

그림3(a)는 맨홀뚜껑의 진동해석 결과를 나타내고 있다. 맨홀뚜껑의 진동해석결과 1차모드는 323.0Hz이며 원판의 전형적인 비틀림모드가 나타났다. 2차모드는 530.0Hz이며 원판의 굽힘모드가 발생하였다. 그림.3(b)은 받침대의 진동해석결과를 나타내고 있다. 받침대의 진동해석결과 1차모드는 162.4Hz이며 맨홀뚜껑과 같은 비틀림모드가 나타났다. 2차모드는 429.1Hz이며 실린더의 전형적인 1차모드를 발생하였다. 즉, 받침대는 판과 실린더의 복합적인 모드형상을 나타내었다.

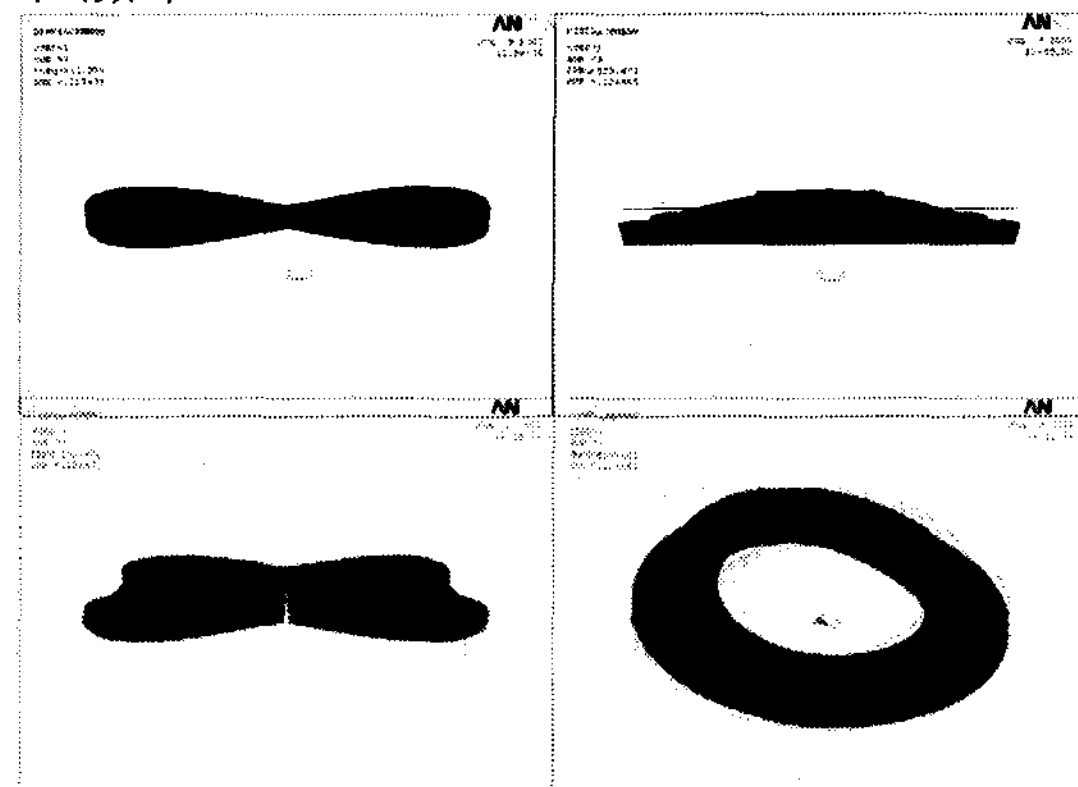


그림 3. 고유진동 해석 결과

2. 진동 실험

본 연구에서는 맨홀뚜껑 및 받침대에 대한 진동실험을 수행하였다. 진동실험에서 사용된 FFT (Fast Fourier Transformation)장비는 Bobcat 을 이용하여 실험을 수행하였다. Bobcat 장비는 임팩트 햄머를 이용하여 구조물의 동특성을 측정하는 장비이다. FFT 장비로부터 측정된 데이터는 Star system 이라는 프로그램을 이용하여 고유진동수를 분석하였다. 그림 4.는 실험에서 사용된 진동실험장비 및 분석프로그램을 보여주고 있다. 진동실험에서는 맨홀 뚜껑 120 kg,과 받침대 140 kg 에 대하여 진동실험을 수행하였다. 실험 조건은 FEM 해석과 동일하게 자유경계조건으로 수행하기 위하여 실험모형을 공중에 매단 상태로 각각 2 차례 해석을 수행하였다.

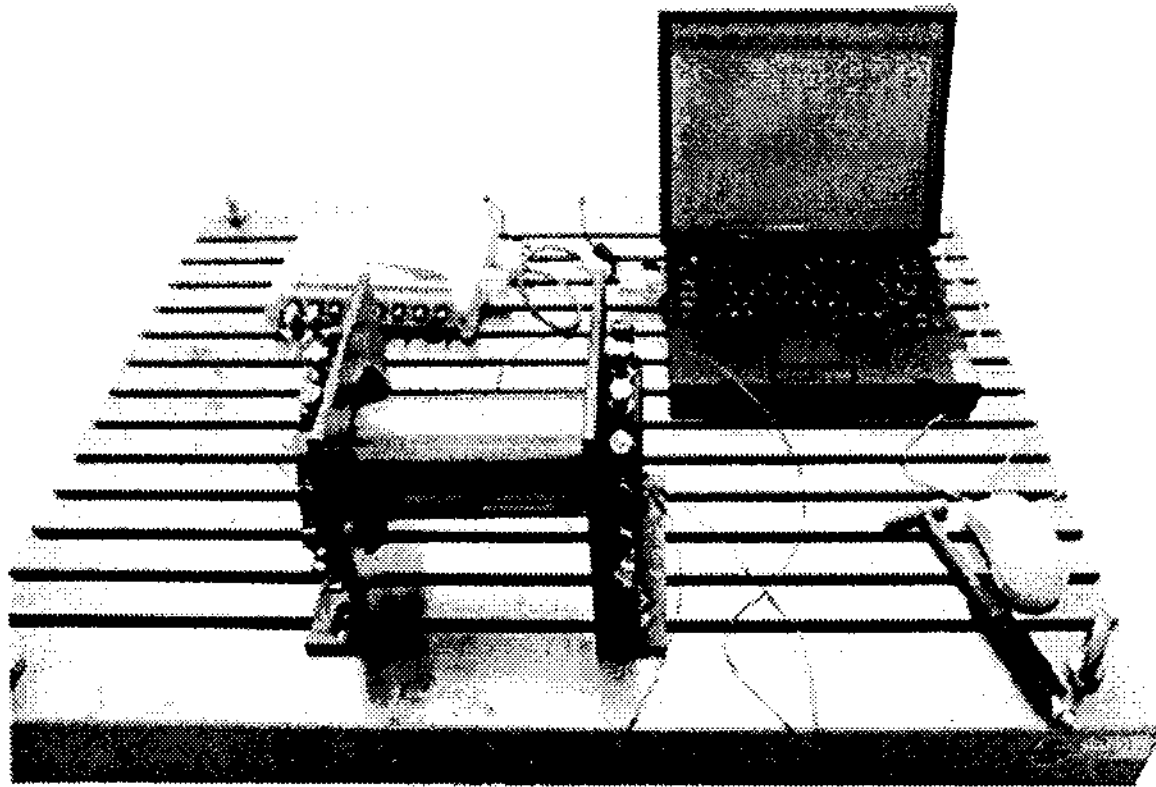


그림 4. 진동시험 장비 및 분석프로그램

표 1 은 진동실험을 통하여 획득된 결과를 나타내고 있다. 진동실험 및 해석을 통하여 분석한 결과 상대적으로 FEM 모델의 진동수가 조금 크게 발생하였다. 이는 해석모델의 단순화 하는 과정에서 질량이 감소하였기 때문이다. 해석모델과 실험모델의 약간의 차이가 있기 때문이다. 진동실험을 통하여 측정된 댐핑값은 0.17%~0.19%의 값이 측정되었다.

Part	Mode	1st	2nd	3rd	FEM	Error
뚜껑 (120 kg)	1	281	282	285	323	13.3
	2	518	519	519	530	2.1
받침대 (140 kg)	1	145	145	144	162	12.5
	2	370	371	370	429	15.9

표 1. 맨홀뚜껑 및 받침대의 진동시험 결과

3. 충격 해석.

맨홀뚜껑에 충격이 가해졌을 때의 거동을 분석하기 위하여 ABAQUS 6.5를 이용하여 충격해석을 수행하였다. 해석모델은 진동해석에서 사용된 ANSYS 모델을 사용하였다. 충격해석에서 적용된 요소는 3차원요소로서 8개의 노드를 갖고 각방향에 대해 선형보간법을 이용한 선형요소 C3D8R와 컨택에 대해 3차원 4개의 노드를 갖고 있는 R3D4를 사용하였다.

그림 5.는 맨홀뚜껑의 충격해석모델 형상을 나타내고 있다. 낙하충격물의 무게는 20 kg이며 맨홀의 정중앙에 떨어진다고

가정하였다. 이를 해석모델에서 낙하물의 속도는 낙하물과 맨홀뚜껑이 충돌하기 직전의 속도로 환산하여 7 m/s를 적용하였다. 낙하물과 맨홀뚜껑간에 조건은 컨택조건을 적용하였다. 또한 맨홀뚜껑과 받침대 사이의 조건 또한 컨택조건을 적용하였다. 해석모델의 모델의 대칭성을 고려하여 1/4 대칭경계조건을 적용하였다. 받침대의 끝면은 고정경계조건을 적용하였다. 충격해석에서 적용된 물성치는 진동해석에서 적용한 물성치와 같은 주철값을 적용하였다.

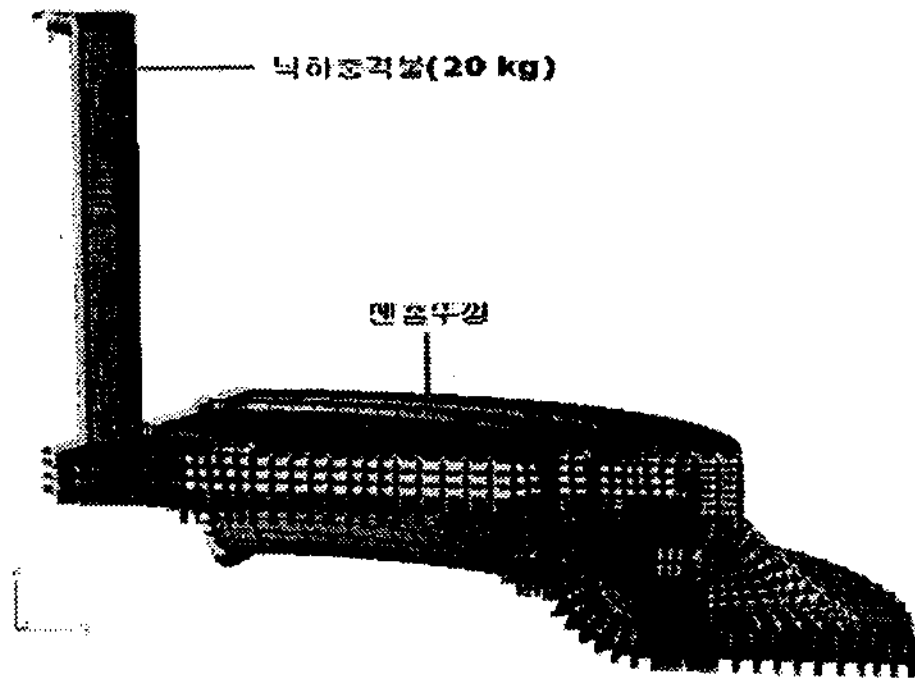


그림 5. 맨홀뚜껑 충격해석모델 형상

초기 맨홀뚜껑의 거동을 보기 위하여 3 E-3초동안의 거동을 분석하였다. 이는 충격이 짧은 시간에 일어나는 현상이며 이러한 현상을 확인하기 위해 진동해석을 수행하여 1차모드가 일어나는 시간을 확인할 수 있다. 진동해석을 통하여 1차 진동수가 332.3Hz임을 확인할 수 있었으며 이는 3E-3초에서 동적인 거동을 분석하면 되다는 근거가 된다. 그림6. 은 4.0 E-3초 일 때 맨홀뚜껑의 변위분포를 보여주고 있다. 그림 6.에서 나타난 것과 같이 맨홀뚜껑은 충격 후 일정하게 위로 움직이는 것을 보여주고 있으며 충격 후 맨홀뚜껑은 중심부에서 균일하게 변화하는 분포를 나타내고 있다. 그림 7.은 0~4.0 E-3초동안 거동하고 있는 맨홀뚜껑의 각 위치별 변위를 보여주고 있다. 분석된 각 점의 위치는 그림 7.(a)에서 나타난 것과 같이 맨홀뚜껑 하단부의 불연속부분에 대하여 해석값을 분석하였다.

그림 7.(b)에서 보여진 것과 같이 맨홀뚜껑의 1 point(중심부)는 충격직후 아래로 거동하며 약 1.4 E-3초에 반동 후 위로 솟아오르기 시작하였다. 2 point와 3 point는 상대적으로 1 point 보다 늦게 반동하였으며 4 point와 5 point는 2 point와 3 point와 비슷한 시간에서 반동하였으나 변위값은 상대적으로 적었다. 6 point와 7 point는 맨홀뚜껑의 끝단부로서 상대적으로 적은 시간에 요동치는 것으로 분석되었다. 또한 약 3.3 E-3초 이후 1 point는 다른 점 보다 많이 위로 변화하였으며 이는 진동해석에서 2차모드와 같은 형상을 나타내었다. 또한 위로 변화한 값 역시 순서대로 1 ~7 point 순으로 상승하였다. 이는 굽힘형상을 의미하는 것이다.

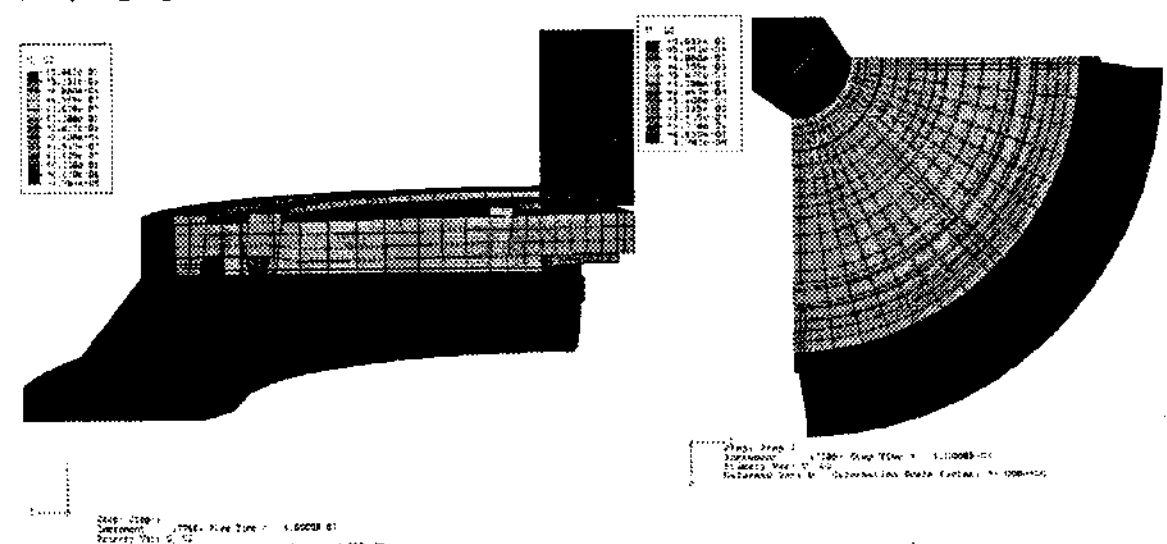


그림 6. 맨홀뚜껑 충격해석 변위분포 [4.0e-3 sec.]

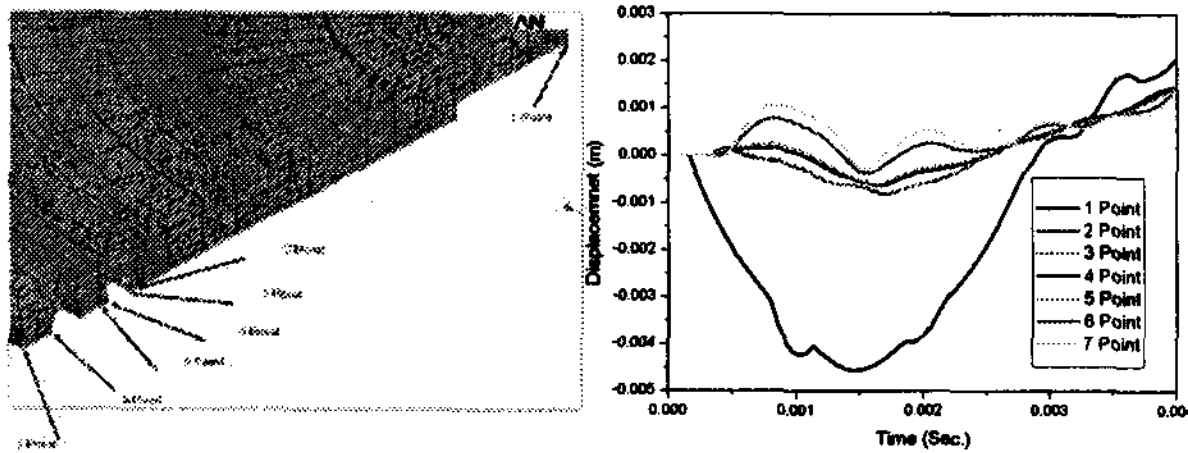


그림 7. 충격해석 각 위치별 변위변화 [0~4.0 E-3 sec.]

맨홀뚜껑은 충격을 받은 후 위로 거동하다가 다시 복원되었다. 이를 분석하기 위하여 5.000 E-1초까지 거동을 평가하였다. 그림 8은 0 ~ 5.000 E-1초까지 변위를 나타내고 있다. 낙하물이 맨홀뚜껑을 충격을 가한 후 2.250 E-2초에서 맨홀뚜껑의 변위는 2.189E-1 cm 상승하였다. 5.000E-2초에서는 4.541E-1 cm까지 상승하였으며, 7.500E-2초에서는 6.059E-1 cm 상승하였다. 1.000E-1초에서는 6.955E-1 cm까지 상승하였으며, 1.225E-1초에서는 7.231E-1 cm까지 상승하였다. 이후 맨홀뚜껑은 다시 하강하기 시작하여 2.000E-1초에서 4.339E-1 cm까지 하강하였다. 맨홀뚜껑은 2.450E-1초에서 -1.207E-2 cm까지 하강 후 다시 상승한다. 3.000E-1초에서는 2.889E-1 cm까지 상승하였으며 3.325E-1초에서 두번째 변곡점이 발생하며 그 상승높이는 3.381E-1 cm이다. 맨홀뚜껑은 다시 하강하며 4.000E-1초에서 1.498E-1 cm까지 하강하며, 4.225E-1초에서 다시 받침대와 접촉하여 -7.500E-1 cm까지 하강한다. 이후 다시 상승하여 5.000E-1초에서 1.615E-1 cm까지 상승한다. 그림 9는 그림7.(a)에서 나타낸 6 point에 해당되는 점에서 맨홀뚜껑 충격해석 시간에 따른 Y방향 변위결과 나타내고 있다



그림 8. 충격해석 변위결과 - Y 방향 변위

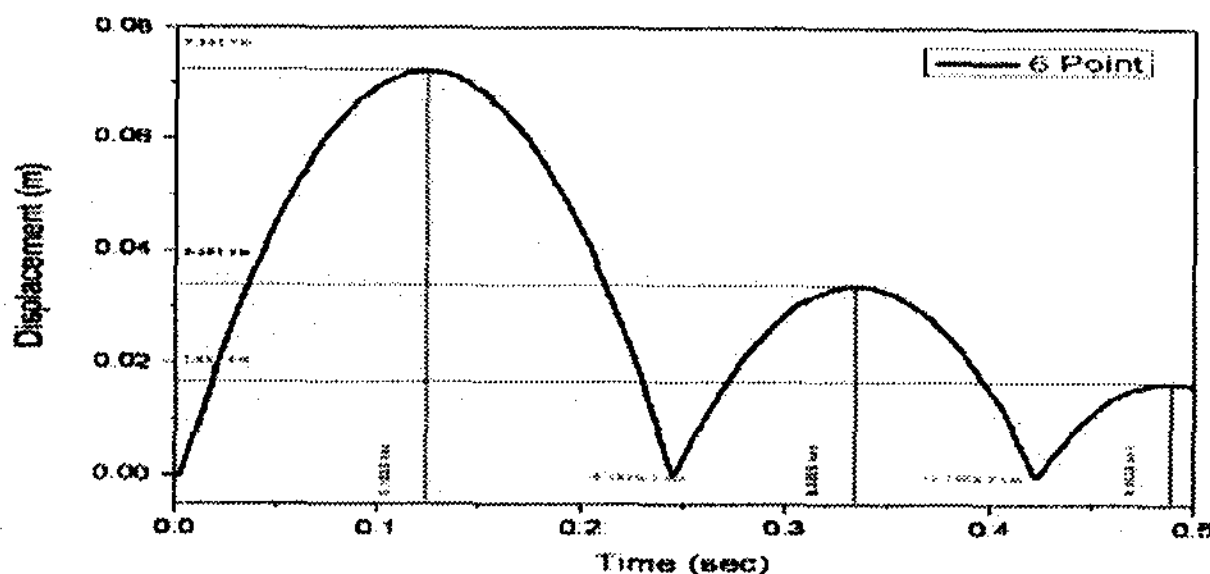


그림 9. 충격해석 시간에 따른 변위결과 -Y방향 변위

4. 맨홀뚜껑 및 받침대의 파라미터 해석

맨홀뚜껑 및 받침대의 기하학적 특성을 평가하기 위하여 맨홀뚜껑에 대한 파라미터 해석을 수행하였다. 맨홀뚜껑 및 받침대의 파라미터 해석은 ANSYS 10.0을 이용하였다. 적용

된 요소는 2차원 4절점요소인 Plane 42을 적용하였다. 또한 축대칭조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 맨홀뚜껑의 파라미터 해석을 수행하기 위하여 그림 10.에서 나타낸 것과 같이 각각의 변수를 정의하였다.

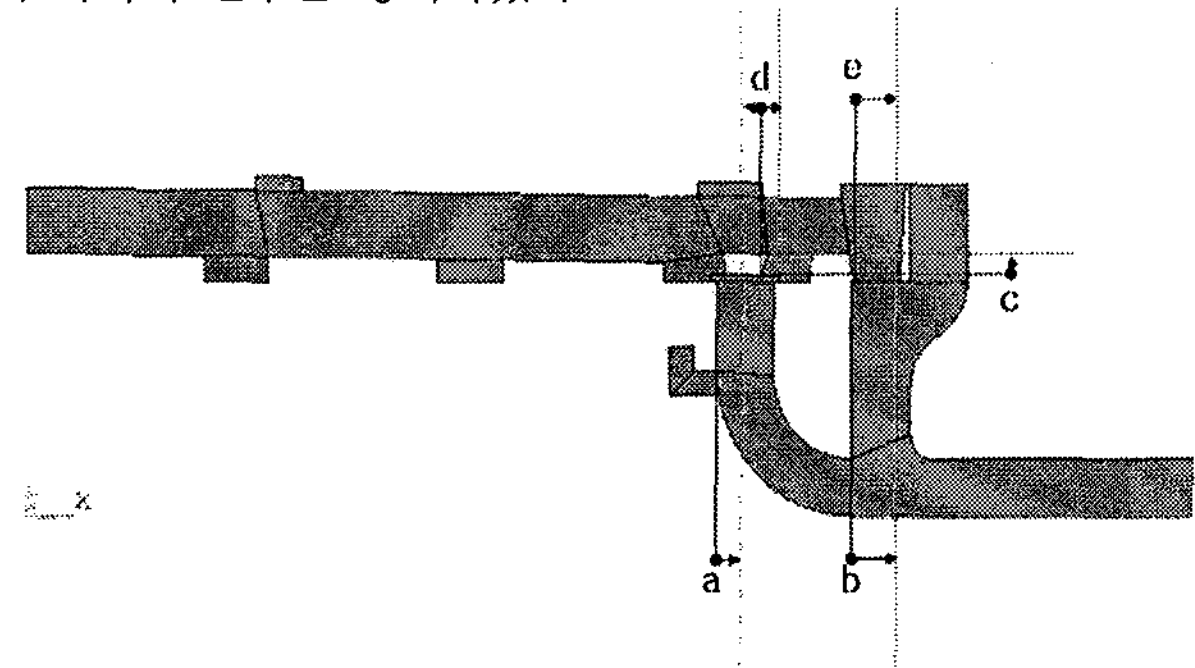


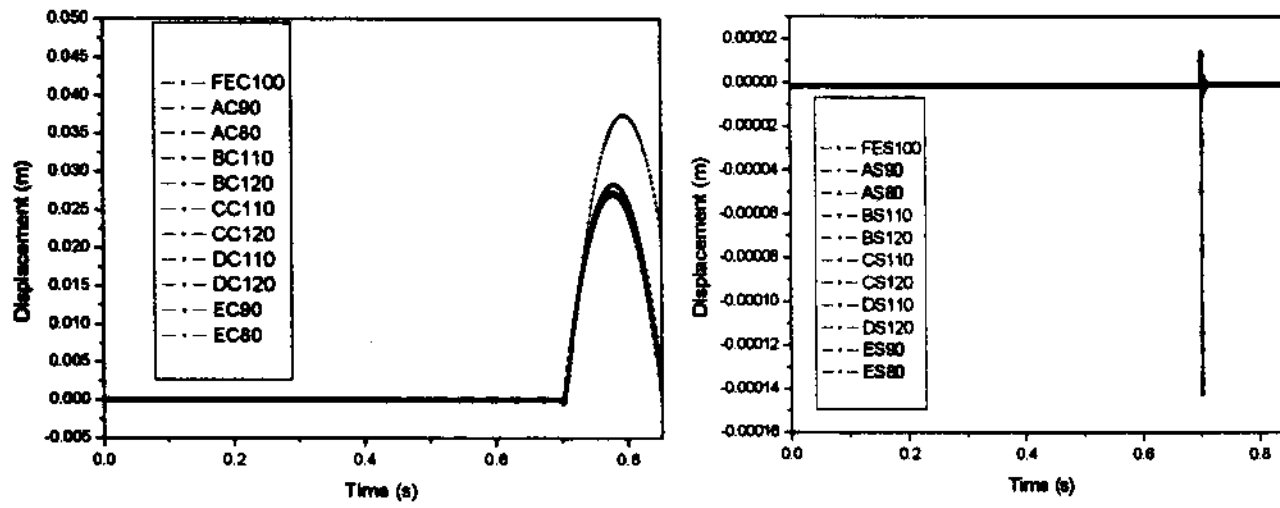
그림 10. 맨홀뚜껑 및 받침대의 변수

표 2는 맨홀뚜껑과 받침대에서 정의된 변수의 변화범위에 결과값을 분석하기 위해 정의된 기호를 보여주고 있다. 변수 a는 받침대가 맨홀뚜껑과 접촉하는 부분으로써 그림 7(a)에서 3 ~ 4 point 사이의 접촉부분이며 변수의 범위는 이 접촉부가 90 %와 80 % 감소하는 값이다. 변수 b는 받침대 접촉부분에서 바깥쪽 접촉부의 내경이며, 바깥쪽 접촉부 내경이 110 %와 120 % 커졌을 때이다. 변수 c는 고무의 두께이며 두께가 110 %와 120 % 커졌을 때이다. 변수 d는 그림7(a)에서 4 ~ 5 point 사이의 접촉부분이며 접촉부의 표면이 110 %와 120 % 커졌을 때이다. 변수 e는 그림7(a)에서 6 ~ 7 point 사이의 접촉부분이며 접촉부의 표면이 90 %와 80 % 감소하였을 때이다.

Parameter	Symbol	
	Cover	Support
Default	FEC	FES
a(80%,90%)	AC	AS
b(110%,120%)	BC	BS
c(110%,120%)	CC	CS
d(110%,120%)	DD	DS
e(80%,90%)	EC	ES

표 2 맨홀뚜껑 및 받침대의 변수정의

그림 11. 은 맨홀뚜껑 및 받침대의 변수 변화에 따른 변위 값을 보여주고 있다. 낙하물의 충격은 맨홀뚜껑에 전달되어 받침대로 전해진다. 이때 전해진 충격력은 낙하물의 기하학적 형상 뿐만 아니라 물리적 특성과 관계가 있다. 기하학적 특성에 의해 정해진 변수중 e는 앞장 초기충격에서 보여준 것처럼 맨홀뚜껑의 끝 단의 변화가 큰것으로 나타났다. 맨홀뚜껑의 바깥쪽 접촉부의 표면은 바깥쪽 안쪽보다 상대적으로 내.외경변화가 같더라도 표면적 변화량이 크기 때문에 전달되는 충격력은 더 크게 표면적에 영향을 받는 것으로 평가 된다.



Parameter	Cover			Frame		
	100%	110%	120%	100%	110%	120%
b [mm]	27.152	26.942	26.874	-0.142	-0.138	-0.135
c [mm]	27.152	27.204	27.256	-0.142	-0.142	-0.141
d [mm]	27.152	27.067	27.054	-0.142	-0.142	-0.122

Parameter	Cover			Frame		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%
a [mm]	27.152	27.178	27.274	-0.142	-0.244	-0.143
e [mm]	27.152	28.304	37.354	-0.142	-0.142	-0.142

그림 11. 변수변화에 따른 맨홀뚜껑의 변위

5. ADAMS를 이용한 동적 해석

그림 12는 ADAMS를 이용한 동적해석 모델형상을 나타내고 있다. 해석모델에서 타이어의 직경은 100 cm이며, 폭은 20 cm이다. 타이어의 속도는 60 km/h, 100km/h, 140 km/h의 3가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 타이어에 가해지는 무게는 10t이고, 타이어의 접촉조건은 굴림접촉이며, 타이어는 맨홀뚜껑의 정중앙 및 측면을 지나가도록 해석을 수행하였다. 맨홀해석 모델은 Solidwork에서 모델링된 모델을 ADAMS에 적용시켜 해석모델을 생성하였다. 동적해석의 경계조건은 노면 타이어와 맨홀뚜껑 및 받침대의 접촉경계조건을 적용하였으며, 맨홀뚜껑과 받침대의 조건도 접촉경계조건을 적용하였다

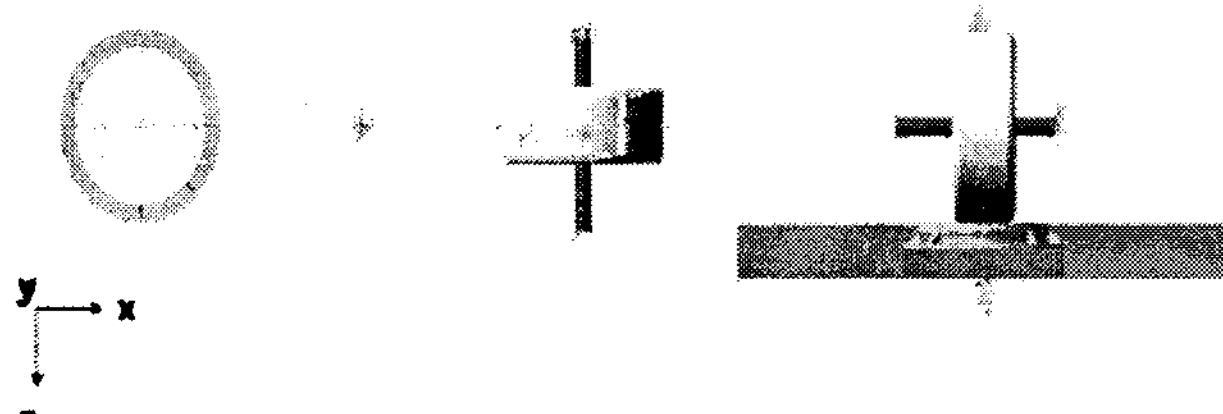


그림 12. ADAMS를 이용한 동적해석 모델형상

또한, 해석 방법으로는 진입하는 바퀴가 1개인 경우 (Case 1), 진입하는 바퀴가 2개인 경우(Case 2), 진입하는 바퀴가 맨홀 중심부에서 200 mm 떨어진 점을 지나가는 경우 (Case 3), 맨홀이 도로보다 1 cm 낮은 경우(Case 4), 맨홀이 도로보다 2 cm 낮은 경우(Case 5) 총 5가지로 수행하였다

해석결과 가장 변위가 크게 나타난 경우는 진입하는 바퀴가 2개인 경우(Case 2)로 본 논문에서는 이에 대한 해석결과만 기술하였다.

해석결과를 살펴보면, X 방향 변위는 그림 13.에서 보는 바와 같이 맨홀뚜껑은 타이어가 2개가 계속 뒤로 밀어주기 때문에 바퀴가 1개인 경우보다 더 많이 뒤쪽으로 밀리는 현상이 보였으며, 타이어의 진입속도가 커 질수록 변위가 커지는 것을 알 수 있다

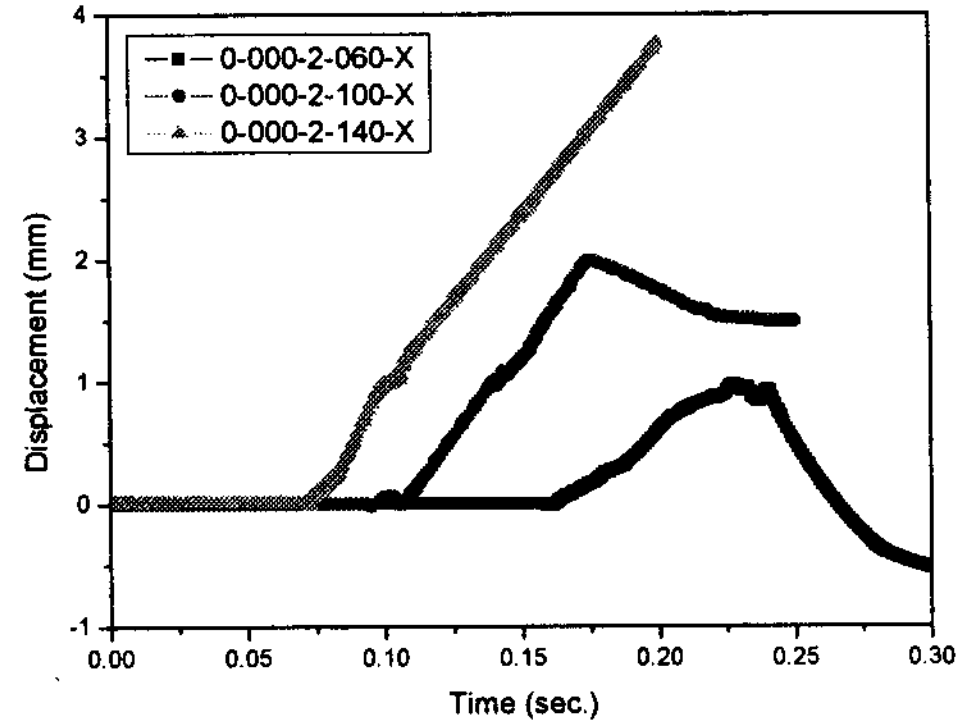


그림13. Case 2에 대한 맨홀뚜껑의 시간에 따른 X 방향 변위

Y방향 변위는 그림 14.와 같이 타이어가 2개이므로 회전성분을 어느 정도 잡아주기 때문에 1개 일때 보다 적게 나타났으며, 타이어의 진입속도에 따라 Y방향 성분의 커지고 2차 충격에 의해 더욱 커지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

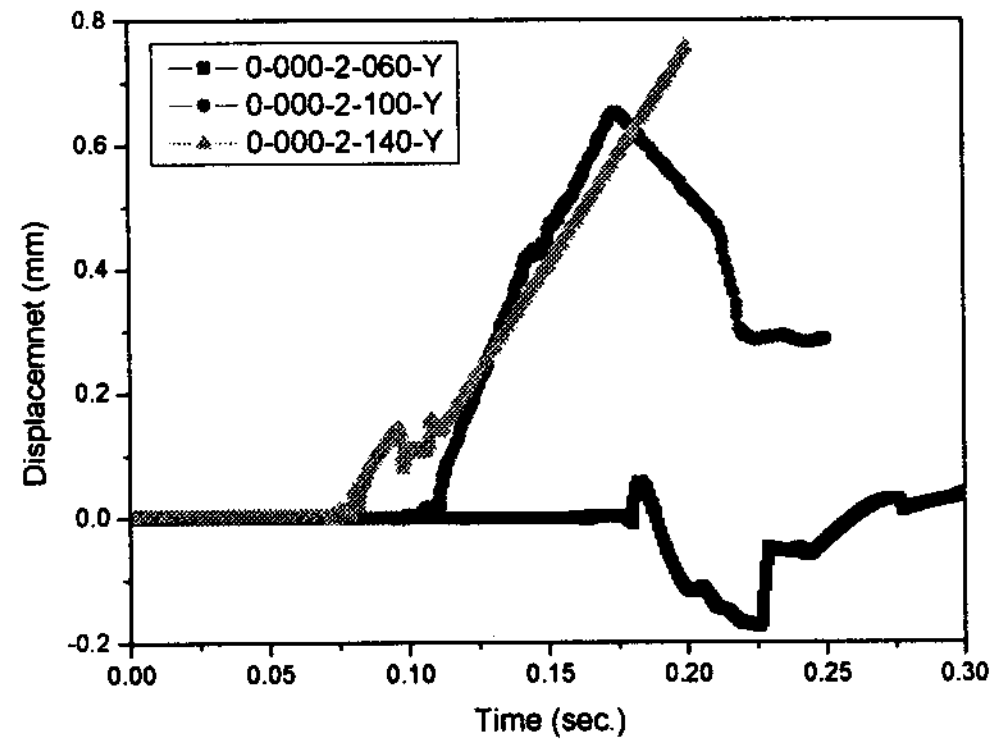


그림14. Case 2에 대한 맨홀뚜껑의 시간에 따른 Y 방향 변위

Z 방향 변위는 그림 15.와 같이 타이어가 2번의 충격이 가해져 맨홀뚜껑이 위아래로 2번 거동하는 형상이 나타났고, 최대 변위는 약 25mm정도 튀어오르는 것으로 나타났다. 타이어의 속도가 증가하면서 맨홀의 Z 방향 변위가 증가했는데 이는 속도뿐만 아니라 맨홀의 구조적 특성 영향에 기인된 것임을 알 수 있다.

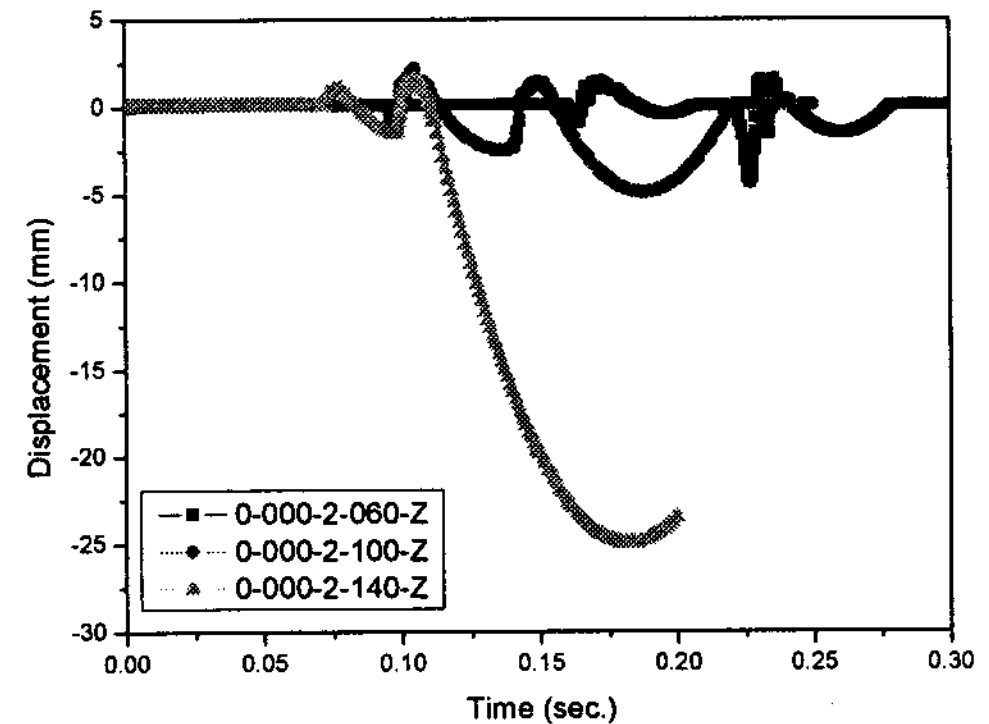
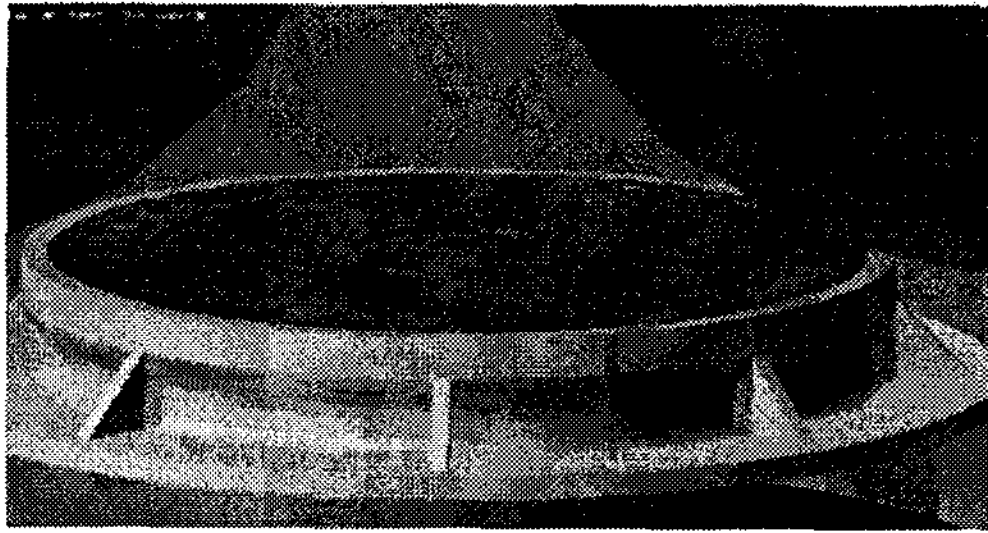


그림15. Case 2에 대한 맨홀뚜껑의 시간에 따른 Z 방향 변위



(c) 140 km/h

그림15. Case2 시뮬레이션 모습

참고문헌

“없음”

III. 결론

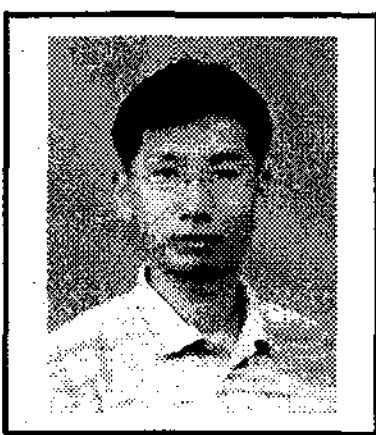
맨홀뚜껑의 정적 및 동적 특성을 평가하기 위하여 진동해석 및 실험, 충격해석, 파라미터해석, 동적해석 등을 수행한 결과 다음과 같은 구조적 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 진동해석 및 진동 실험 결과 1차 고유진동수는 각각 323 Hz, 283 Hz임을 확인하였다. 이때 해석값과 실험값의 차이는 13.3 % 발생하였으나 이는 해석모델의 차이로 평가된다.

(2) 충격해석을 수행한 결과, 초기 맨홀뚜껑의 거동은 3.0E-3초에서 충격에 의한 맨홀뚜껑의 압축이 다시 복원되는 것을 확인할 수 있었으며 이는 1차 고유진동수와 같은 시간 영역에서 발생하였다. 또한 맨홀뚜껑의 최대변위는 0.1225초에서 7.231 cm 발생하였다.

(3) 맨홀뚜껑 및 받침대의 파라미터 해석을 수행한 결과 맨홀뚜껑의 바깥쪽 접촉부가 맨홀뚜껑의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 동적해석을 통하여 속도에 따라 충격력이 크게 발생하며 이로 인해 변위 뿐만 아니라 회전력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



우 병 수

1995년 단국대학교 토목공학과 졸업.
1995년~현재 KT 인프라연구소 재직중



한 진 우

1986년 부산대학교 토목공학과 졸업
1989년 부산대학교 토목공학과 (석사, 구조공학 전공)
1990년~현재 KT 인프라연구소 재직중



강 왕 규

1995년 충남대학교 토목공학과 졸업
1997년 충남대학교 토목공학과 (석사, 구조공학 전공)
1998년~현재 KT 인프라연구소 재직중