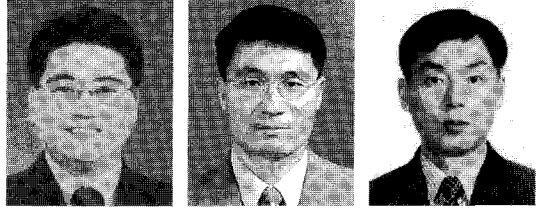


## 현수교 강상판 교면포장모델링을 통한 설계적정성 평가



최준성 | 정회원 · 편집기사 · 인덕대학 건설환경설학과 교수

장원호 | 정회원 · (주)서영엔지니어링 전무

김형수 | 정회원 · (주)서영엔지니어링 부장

### 1. 서론

경제성장과 함께 설계 및 시공기술의 발달은 초장대교 설치에 대한 욕구를 가중시켰으며 근래에는 연육교, 연도교 등에 긴 경간장을 가진 현수교, 사장교와 같은 강상판교를 설치하고 있다. 강상판교의 특성상 일반 교면포장을 사용하는 경우 내구성과 공용성에 문제가 발생할 수 있어 운전자에게는 쾌적한 주행환경을 제공하지 못하게 되고 교량에는 심각한 피해를 유발할 수 있어 강상판 교량에 적합한 교면포장 형식을 적용하여야만 한다.

본 평가에서는 현수교 강상판교량에 적용가능한 교면포장 형식들에 대한 유한요소 해석을 실시하였으며 교면포장 단면의 적용타당성을 검토하고, 다양한 교면포장형의 적용가능성 여부를 평가하였다. 또한 설계속도 및 포장능력 저하를 고려하여 교면포장 능력 감소시의 영향검토를 시행하였다.

강상판 교면포장에 사용되는 구스아스팔트와 개질아스팔트 복합교면포장과 여러종류의 개질아스팔트 교면포장등 교면포장공법별로 나누어 실제 설계속도에 대한 거동분석을 3차원 범용 유한요소 프로그램

인 ABAQUS로 해석을 실시하고 교면포장형식에 따른 포장거동을 비교, 검토하였다.

### 2. 강상판 교면포장 3차원 유한요소해석 모델링

강상판교는 윤하중에 의해 강상판에 국부적으로 생기는 변형에 추종할 수 있는 성능이 요구된다. 또한 강상판 포장체의 표층은 내균열성, 내유동성 등의 기능이 요구된다. 표층두께는 3~4cm 정도이며, 일반적으로 개질 아스팔트 혼합물이 사용된다. 기층은 표층과 일체화되어 포장의 안정성이나 내구성을 높이는 기능이 요구되며 주로 Guss 아스팔트 혼합물이 사용된다. 기층두께는 3~4cm 정도이며, 상판의 요철, 볼트 집합 및 용접접합 장소 등에 대한 레벨링 층으로서의 기능도 겸한다. 본 과업의 강상판상의 포장체 구성은 다음 그림 1과 같이 상·하부 교면포장의 두께를 각각 4cm로 고정하고 다양한 종류의 아스팔트 재료에 대한 3차원 유한요소해석을 실시하여 여러 가지 측면에서 가장 적합한 포장재료를 선정하기 위하여 6개의 단면을 선정하였다.

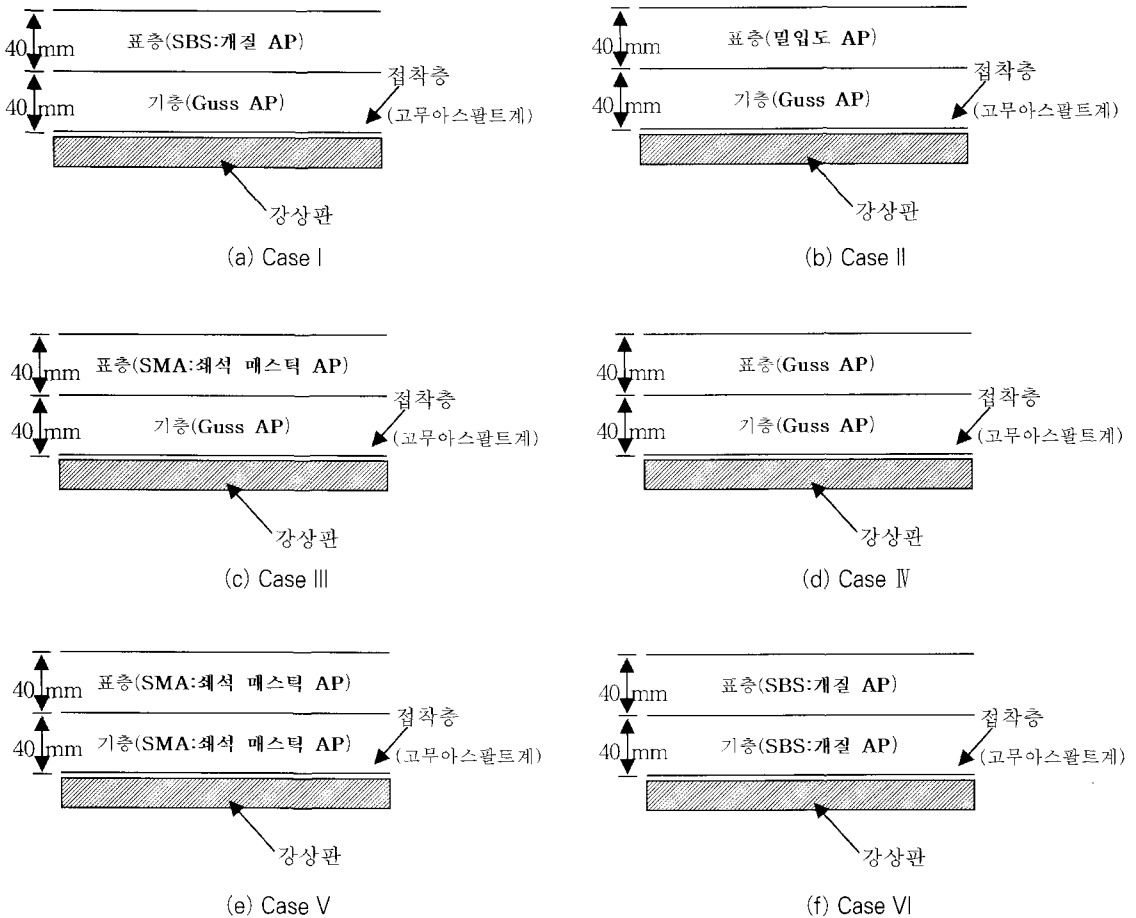


그림 1. 강상판상의 교면포장체

### 3. 수치해석시 해석물성

본 평가에 적용된 강상판 포장체의 개질아스팔트 및 구스 아스팔트의 물성을 산정하기 위해서 기존의 연구결과인 마찰 안정도 시방기준과 동적안정도 시방기준을 이용하였다. 각 개질 및 구스 아스팔트에 대한 탄성계수시험 및 진동삼축시험결과가 없으므로 일반 아스팔트 콘크리트와 비교하여 마찰 안정도 시방기준과 동적안정도 시방기준으로부터 물성을 추정하였다. 마찰 안정도시험은 경험적이며, 공용성과는 관련성이 없으므로 최근 개선된 시험법에 대한 논의가 활발하나 본 평가에서는 아스팔트 혼합물을 평가

하는 것이 아니므로 단지 비교대상으로서 사용하기로 한다. 개질과 구스 아스팔트 혼합물에 대한 판매사가 제공하는 기본 물성치와 각 시방기준으로부터 일반 아스팔트 혼합물과의 비교를 통하여 해석탄성계수를 추정하였다. 이러한 해석물성추정을 위해 일본의 本洲四國連結橋의 시험데이터를 이용하였다. 또한 개질아스팔트의 물성을 산정하기 위해서는 기존의 연구발표결과인 Creep 시험결과를 이용하였다. 문헌조사된 시험결과들의 Creep Compliance로부터 선형 점탄성 이론을 바탕으로 동탄성계수를 역산정한 기존 연구결과를 살펴보면, 골재의 입도에 관계없이 하중주기가 느릴 경우 일반 아스팔트에 비해

개질 아스팔트 혼합물의 강성이 거의 2배 이상 크며, 느린 하중속도에서 일반혼합물과 개질혼합물간의 강성의 차이는 하중주기가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다. 또한 하중주기가 10Hz 이상일 때 각 혼합물의 강성은 거의 동일함도 알 수 있었다. 이는 10Hz 이상의 하중주기에서 모든 혼합물은 거의 탄성에 가까운 거동을 보이고 있다는 것으로 판단된다. 따라서 본 과업에서는 기존연구에서 산정된 피로파괴기준식을 각종 아스팔트에 적용하기 위하여 실시한 시험 하중주기 10Hz인 경우로부터 산정된 각종 아스팔트의 물성을 설계탄성계수로 사용하였다. 이로부터 해석에 사용된 해석물성은 표 1과 같다. 표 1은 교면포장에 사용되는 아스팔트 재료인 밀입도 아스팔트, 개질 아스팔트(SBS), 쇄석 매스틱 아스팔트(SMA), 그리고 구스 아스팔트의 4가지 재료를 이용한 총 16가지의 경우의 수 중에 현실적으로 사용될 수 있는 6가지 단면상태를 보여준다. 교면포장 설계시 건교부 설계 기준을 살펴보면 표층 4cm, 기층 4cm의 총 8cm의 최소 포설두께를 보이며, 이러한 기준을 근거로 각

층의 두께를 산정하였고, 강상판의 경우 종리브의 영향을 유효두께 개념으로 환산하여 9cm의 두께를 갖는 셸(Shell) 요소로 해석을 실시하였다.

#### 4. 주행하중에 대한 포장구조체의 유한요소 해석

포장구조체를 평가할 수 있는 해석이론은 크게 정해석을 이용한 방법과 수치해석적인 방법으로 구분할 수 있다. 현재 대부분 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 해석에 사용되고 있는 방법은 크게 두가지로, 연속체역학을 기초로 하는 다층탄성이론과 유한요소 해석에 근거하고 있다.

일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 해석에는 다층탄성이론을 적용한 정해석이 이용되고 있으나 실제 차량의 주행시 가해지는 하중은 동적하중으로 포장구조체는 동적거동을 한다. 따라서 정해석에 의해 해석된 결과와 실제 포장구조체의 거동에는 서로 차이가 있다. 이는 정해석이 점탄성재료인 포장구조체의 관성, 감쇠 및 공진 등의 동적 거동특성을 반영하지 못하기 때문에 보다 정확한 포장구조체의 해석을 위해서는 동해석의 적용이 필요하다.

본 평가에서는 1978년 미국의 Hibbit, Karlsson & Sorensen사에서 개발된 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 수치해석을 실시하였다.

##### 4.1 유한요소해석 방법

수치적인 해석을 하는 대표적인 방법의 유한요소법은 해석을 수행하는 영역에 따라 주파수영역과 시간영역으로 나뉘어진다. 주파수영역에서의 해석은 하중  $P(t)$ 를 Fourier 변환에 의한  $n$ 개의 주파수에 대하여 불연속적인 조화하중

표 1. 수치해석시 해석물성

구분	두께 (cm)	해석탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	포이송비	밀도 (kg/cm <sup>3</sup> )	비고
Case I	개질AP:SBS(표층)	4	52,800	0.3	2.35
	Guss AP(기층)	4	15,530	0.3	2.35
Case II	밀입도AP(표층)	4	26,400	0.3	2.35
	Guss AP(기층)	4	15,530	0.3	2.35
Case III	쇄석매스틱:SMA(표층)	4	8,000	0.3	2.35
	Guss AP(기층)	4	15,530	0.3	2.35
Case IV	Guss AP	8	15,530	0.3	2.35
Case V	쇄석매스틱 : SMA	8	8,000	0.3	2.35
Case VI	개질AP : SBS	8	52,800	0.3	2.35
공통	강상판 유효두께	9	2,000,000	0.15	7.85

※ 강상판 재료물성: 재료역학 (Timosenco)

$P_n$ 으로 가정하여 이에 따른 구조물의 응답요소  $dn$  을 구하며, 구조물의 주파수 응답계수  $H_n$ 에 의한 하중요소의 증첩으로 얻어진다. 이 해석방법은 선형거동을 하는 응답을 구할 때 유리하며, 해석대상에 대한 비선형거동을 고려하기가 힘들다는 단점을 갖고 있기 때문에 주로 구조물의 응답특성이나 하중에 의한 최대변위를 산정할 때 사용된다.

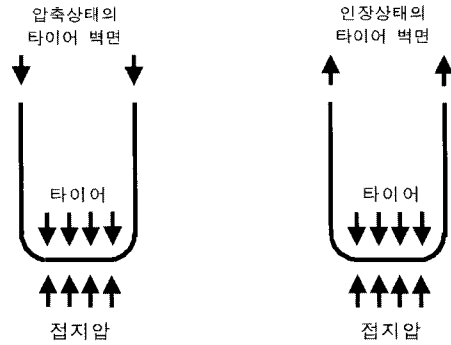
시간영역에서의 해석인 직접 시간적분법(direct time integration method)은 하중  $P(t)$ 를 작은 시간간격에 대하여 순간하중(impulse)의 연속으로 가정하여, 각 시간단계별 순간하중에 대한 해석이 최종 응답에 대하여 독립적으로 영향을 미치게 한다. 본 평가에서는 응답의 시간이력들을 쉽게 고찰하기 위하여 시간영역에서의 해석을 수행한다. 이 방법은 하중 및 응답의 이력들을 각 시간단계별로 나누어 계산하고 각 시간단계에서의 응답은 속도 및 변위에 대한 초기조건과 외부하중에 대한 조건으로부터 계산이 되며 하나의 독립적인 해석과정이기 때문에 응답의 증첩과정이 필요 없으므로 주행하중을 구현하기에 용이하다.

#### 4.2 주행하중의 구현

포장구조체의 해석을 하기 위해서는 타이어와 포장체사이의 접지면적을 알아야 한다. 접지면적은 접지압에 좌우된다. 축하중은 전 접지면적에 동일하게 분포된다고 가정한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 낮은 압력의 타이어는 타이어의 벽이 압축을 받고 있기 때문에 접지압이 타이어의 압력보다 크고, 높은 압력의 타이어는 인장을 받고 있기 때문에 접지압이 타이어의 압력보다 작다. 그러나 포장구조체의 해석에 있어서는 접지압이 타이어의 압력과 같다고 가정한다. 이는 큰 축하중이 가해질 경우 타이어압은 증가하고 포장체에 더 큰 영향을 끼치기 때문에 접지압을 타이어압이라 가정하고 해석하는 것이 안전측이기 때문이다(Kausel, 1981).

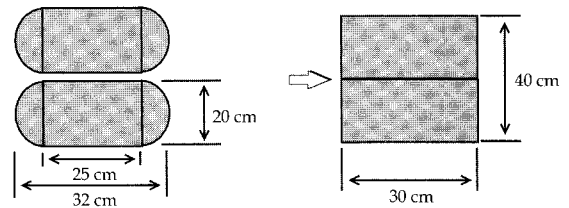
주행차량의 조향축은 단륜으로 구성되어 있고, 뒷

축은 복륜으로 되어있으며 정지상태에서의 접지면적은 복륜에서 약  $1200\text{cm}^2$ 이다. 수치해석시 실제 주행차량의 타이어모양을 구현하기 위해서는 그림 3과 같이 실제 타이어의 접지면적과 동일한 접지압을 받는 등가의 모델로 전환하여야 한다.



(a) 낮은 압력을 받는 타이어 (b) 높은 압력을 받는 타이어

그림 2. 접지압과 타이어압과의 관계



(a) 실제 타이어 접지면적

(b) 등가 접지면적

그림 3. 타이어 모델

실제차량의 주행시 포장체 표면의 거칠기나 차량의 현가장치에 의해서 접지면적과 접지압은 변하게 된다. 그러나 본 평가에서는 일정한 접지면적과 접지압을 갖는 등가 직사각형 타이어 모델이 이동하는 것으로 가정하여 해석한다. 주행하중에 대한 다층포장체의 동적 응답을 해석하는 방법에는 각기 다른 시간에 여러 지점에 가해지는 순간하중에 대한 결과들을 증첩하는 방법을 사용한다.

해석구간을 하중이 움직이는 방향으로 길이  $4L$ 을 갖는 요소들로 나누고, 그림 4에서 보는 바와 같이 주행하중이 가해질 경우 1번 영역의 관점에서 본다

면 하중은 점진적으로 증가하다가 하중이 1번 영역 바로 위에 위치하게 되면 최대값에 이르게 된다. 하중의 크기는 영역을 벗어나기 시작할 때까지 일정하게 유지된 후 줄어들다가 하중이 완전하게 지나가게 되면 크기는 0이 된다. 이때 주행하중 구현의 신뢰성을 위해 요소의 길이( $\Delta L$ )은 하중 접지길이의 1/2 이하가 되도록 해야 한다. 본 연구에서는 하중 접지길이의 1/3인 10cm로 설정하였다.

순간하중의 형태는 그림 5와 같이 하중 크기의 증·감이 선형적인 변화를 갖는 모델을 사용하였다. 이 하중이 전 영역에 걸쳐 작용되고 각 요소에 하중 속도에 따른 시간차만 있을 경우 이 순간하중을 중첩하면 주행하중의 구현을 할 수 있다. 그러나 주행속도에 따라 하중의 변화는 연구된 자료가 부족하기 때문에 본 연구에서는 주행속도에 따라 하중의 크기는 일정하다고 가정하였다.

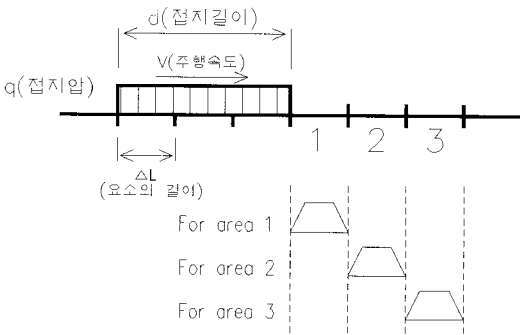


그림 4. 순간하중들의 조합에 의한 주행하중의 구현

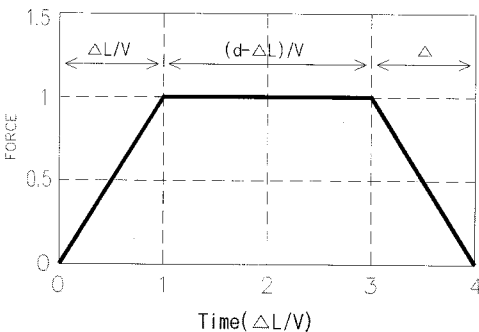


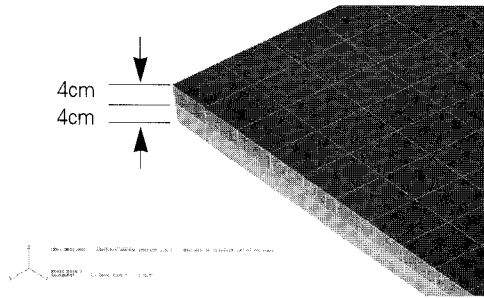
그림 5. 순간하중의 형태

### 4.3 3차원 유한요소망의 구성과 경계조건

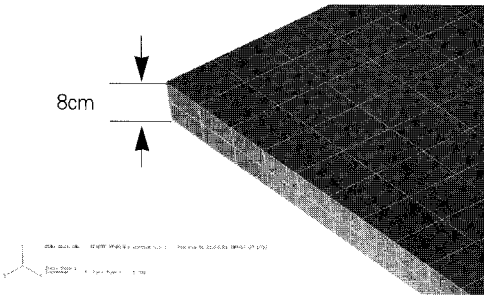
본 평가에서는 축하중 영향과 주행하중을 구현하고 포장구조체의 크기와 경계조건을 최적화하기 위해 3차원 유한요소망을 구성하였다. 해석대상인 교면포장 구조는 표층 4cm, 기층 4cm, 그리고 강상판으로 구성되어 있다. 유한요소해석에 있어서 요소의 크기는 작을수록 정확한 해석이 가능하나 총 요소수의 증가를 가져오고 이는 해석시간의 증가를 초래한다. 따라서 본 연구에서는 경제적인 해석시간과 보다 정확한 해석값을 얻기 위하여 최적의 요소망 크기를 선정하였으며, 또한 해석시간의 경제성을 고려하여 강상판 교량의 횡단면의 양 방향과 종단면을 대칭으로 모델링하였다.

유한요소모델의 해석시 경계조건은 그 응답을 예측하는데 매우 중요한 영향을 주기 때문에 포장체의 거동에 알맞은 경계조건의 부여가 필요하다. 그러므로 유한요소 경계에 의한 오차를 줄이기 위해서 모델의 크기와 해석시간을 조절하여 해석을 실시하였다. 해석결과 최적의 모델 크기와 경계조건을 확립하였다. 다양한 크기의 모델을 이용하여 해석한 결과 최적의 모델 크기는 4m 간격의 횡리브에 의하여 총 5개의 구간으로 나누어진 16m 길이의 강상판형 교량을 해석대상으로 선정하였다. 또한 표층과 기층사이, 그리고 기층과 강상판 사이의 이질적인 크기를 가지는 요소들의 연결은 Tied Contact의 개념을 사용하여 연결하였다. Tied Contact 개념은 Tied Contact면을 이루는 요소들이 완전히 접촉되므로 접합면의 회전은 구속시키지 않고 각 방향의 변위만을 구속하는 원리이다. 또한 각 포장층의 표층과 기층은 각각 구성하여 Tied Contact 개념으로 묶였으며, Case I~III는 그림 6의 (a)와 같이 표층과 기층이 다른재료인 합성포장재료로 이루어져 있고, Case IV~VI는 그림 6의 (b)와 같이 표층과 기층이 같은 재료인 단일포장재료로 모델을 구성하였다.

이와 같이 모델링된 교면포장 구조체에 차량의 하중 증가에 따른 응력 및 변형관계를 살펴보기 위한



(a) 합성 포장재료(2층, Tied Contact)



(b) 단일 포장재료(2층, Tied Contact)

그림 6. 강상판의 포장단면 구성

주행하중 재하시의 해석을 실시하였다. 차량하중은 일반적인 공용성 평가에 사용되는 ESAL 하중인 8.2톤 단축 축중량의 일반주행시 하중과 제동시의 하중, 일반적인 조건에서 최대 하중이라고 예상되는 15톤 덤프트럭의 만차시의 하중, 그리고 극한조건이라고 예상되는 DB-24 하중의 4가지 하중조건에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 7을 살펴보면 주행차량에 의한 최대거동은 DB-24 하중 및 15톤 덤프트럭의 경우 두 번째 축이 정중앙에 위치할 경우와, 8.2톤 단축하중이 정중앙에 위치할 경우 나타남을 알 수 있었다.

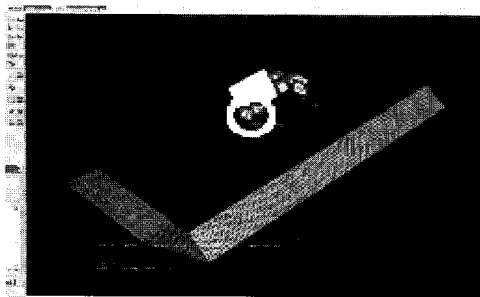
## 5. 교면포장의 유한요소 해석결과 및 분석

본 평가에서는 범용 유한요소해석을 이용한 수치 해석적 방법을 사용하여 주행하중에 따른 강상판위의 아스팔트 종류의 변화에 따른 교면포장체의 거동을 분석하고자 3차원 동해석을 실시하였다. 주행차량의 하중에 따른 포장구조체의 거동은 설계속도 하에서 선형탄성범위를 벗어나지 않는다고 가정하여 선형탄성 모델을 이용하였다. 평가에 사용된 6개의 단면에 4가지 하중조건(등가단축하중 및 등가단축하중의 제동하중, 15톤 덤프의 만차시 하중, DB-24 하중), 그리고 각 단면 표층물성의 초기상태(100% 물성)와 손상상태(85% 물성)의 조합으로 총 48개의 단면에 대한 해석을 수행하였으나 결과는 15톤 덤프의 만차시 하중, DB-24하중만 명시하였다.

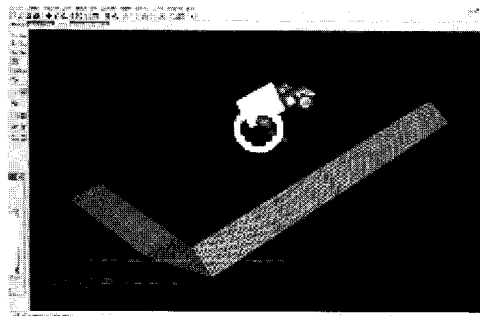
### 5.1 차량 주행에 따른 수직변위 분석

그림 8(a)는 유한요소 해석 결과 DB-24 하중의 이동에 따른 도로 표면의 처짐형상을 나타낸 것이고, 그림 8(b)는 유한요소 해석 결과 15톤 덤프트럭 차량의 이동에 따른 도로 표면의 처짐형상을 나타낸 것이다.

총 48개 단면에 대해 해석을 수행하였으며 그 결

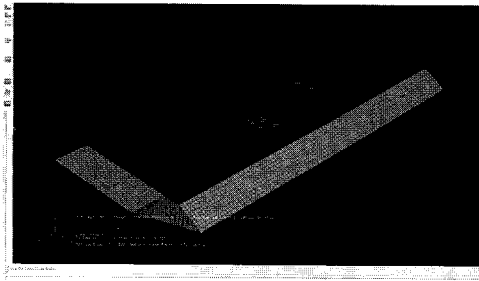


(a) 하중재하위치(DB-24 하중 및 15톤 덤프트럭 만차시)

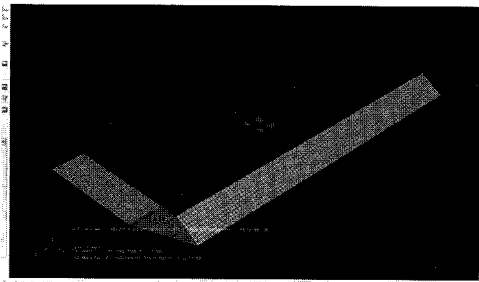


(b) 하중재하위치(8.2톤 표준축 중량 재하시)

그림 7. 강상판 교면포장과 최대거동을 보이는 하중재하위치



(a) DB-24 만차하중 재하시 처짐형상



(b) 15톤 덤프트럭 만차하중 재하시 처짐형상

그림 8. 주행하중에 의한 포장표면의 처짐형상

과는 15톤 덤프트럭 만차하중과 DB-24 만차하중에 대한 표층에서의 처짐과 기층에서의 처짐을 정리하여 표 2와 표 3에 나타내었다. 표 2와 3에서 보는 바와 같이 DB-24하중, 15톤 하중에서 각각 최대 4.57mm, 3.17mm를 보임을 알 수 있고 아스팔트 재료의 강성이 커질수록(SBS > AP > Guss > SMA) 적은 변형을 유발함을 알 수 있다. 그러나 6가지 아스팔트 재료변화에 따른 변위의 변화율은 5% 내외

표 2. DB-24 만차시 교면포장 재료에 따른 각 층에서의 최대 변위(mm)

각 층의 구성		표 층		기 층		
Case	표층	기층	물성100%	물성85%	물성100%	물성85%
I	SBS	Guss	4.26	4.31	4.28	4.32
II	밀입도 AP	Guss	4.42	4.44	4.43	4.46
III	SMA	Guss	4.54	4.55	4.55	4.56
IV	Guss	Guss	4.49	4.51	4.50	4.52
V	SMA	SMA	4.55	4.56	4.56	4.57
VI	SBS	SBS	4.22	4.27	4.23	4.28

로 재료변화가 수직변위 변화에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있었다.

표 3. 15톤 덤프트럭 만차시 교면포장 재료에 따른 각 층에서의 최대 변위(mm)

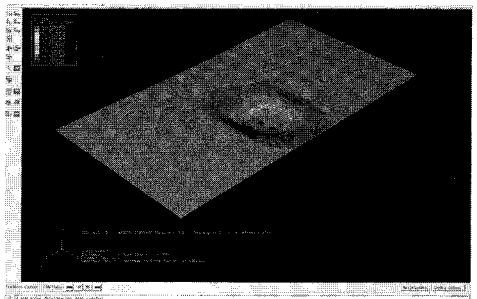
각 층의 구성		표 층		기 층		
Case	표층	기층	물성100%	물성85%	물성100%	물성85%
I	SBS	Guss	3.07	3.09	3.08	3.09
II	밀입도 AP	Guss	2.96	2.99	2.97	3.00
III	SMA	Guss	3.15	3.16	3.16	3.17
IV	Guss	Guss	3.12	3.13	3.13	3.14
V	SMA	SMA	3.16	3.17	3.17	3.17
VI	SBS	SBS	2.93	2.96	2.94	2.97

## 5.2 차량 주행에 따른 응력거동 분석

그림 9는 최대 응력을 보이는 DB-24 하중의 주행 하중에 의한 아스팔트 표층과 기층표면의 응력등고선 결과이다.



(a) 수직응력 등고선



(b) 주행 직교방향 응력 등고선

그림 9. 주행하중에 의한 아스팔트 표층에서의 응력 등고선 (일례)

15톤 덤프트럭 만차하중과 DB-24 만차하중에 대한 표층과 기층에서의 최대 연직응력을 정리하여 표 4와 표 5에 나타내었다. (-) 부호는 압축력을 의미한다. 표 4와 표 5에 보이는 바와 같이 DB-24하중, 15톤 하중에서 각 각 최대 941kPa, 654kPa을 보임을 알 수 있고, 6가지 아스팔트 재료변화에 따른 연직응력의 변화율은 2% 내외로 재료변화가 연직응력 변화에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있었다. 이는 강상판의 큰 물성에 비하여 아스팔트 재료의 물성은 매우 작으므로, 아스팔트 재료변화가 연직응력의 변화에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

표 4. DB-24 만차시 교면포장 재료에 따른 각 층에서의 최대 연직응력(kPa)

각 층의 구성			표층상단		기층하단	
Case	표층	기층	물성100%	물성85%	물성100%	물성85%
I	SBS	Guss	-923.27	-921.89	-876.44	-876.79
II	밀입도AP	Guss	-916.36	-914.46	-876.79	-876.61
III	SMA	Guss	-920.85	-921.54	-873.50	-872.99
IV	Guss	Guss	-917.05	-918.09	-875.58	-875.06
V	SMA	SMA	-922.92	-923.27	-874.02	-873.16
VI	SBS	SBS	-941.93	-937.27	-883.35	-884.56

표 5. 15톤 덤프트럭 만차시 교면포장 재료에 따른 각 층에서의 최대 연직응력(kPa)

각 층의 구성			표층상단		기층하단	
Case	표층	기층	물성100%	물성85%	물성100%	물성85%
I	SBS	Guss	-636.36	-635.04	-608.88	-608.76
II	밀입도 AP	Guss	-641.16	-640.20	-608.64	-608.88
III	SMA	Guss	-639.48	-639.96	-606.60	-606.24
IV	Guss	Guss	-636.84	-637.56	-608.04	-607.68
V	SMA	SMA	-640.92	-641.16	-606.96	-606.36
VI	SBS	SBS	-654.12	-650.88	-613.44	-614.28

DB-24하중, 15톤 하중 단면에 대한 표층과 기층에서의 최대 수평응력을 정리하여 표 6과 표 7에 나타내었다. + 기호는 인장력을 의미한다. 표 6과 표 7에서 보이는 바와 같이 DB-24하중, 15톤 하중에서

표 6. DB-24 만차시 교면포장 재료에 따른 각 층에서의 최대 수평응력(kPa)

각 층의 구성			표층상단		기층하단	
Case	표층	기층	물성100%	물성85%	물성100%	물성85%
I	SBS	Guss	+441.85	+389.84	+34.85	+32.73
II	밀입도 AP	Guss	+253.32	+220.15	+39.92	+42.30
III	SMA	Guss	+86.30	+73.99	+50.41	+51.11
IV	Guss	Guss	+158.92	+137.15	+46.00	+47.35
V	SMA	SMA	+83.39	+71.82	+24.30	+24.94
VI	SBS	SBS	+500.77	+436.15	+140.97	+146.71

표 7. 15톤 덤프트럭 만차시 교면포장 재료에 따른 각 층에서의 최대 수평응력(kPa)

각 층의 구성			표층상단		기층하단	
Case	표층	기층	물성100%	물성85%	물성100%	물성85%
I	SBS	Guss	+175.92	+152.88	+27.72	+29.38
II	밀입도 AP	Guss	+306.84	+270.72	+24.20	+22.73
III	SMA	Guss	+59.93	+51.38	+35.00	+35.50
IV	Guss	Guss	+110.36	+95.24	+31.94	+32.88
V	SMA	SMA	+57.91	+49.87	+16.87	+17.32
VI	SBS	SBS	+347.76	+302.88	+97.90	+101.88

각 최대 500kPa, 347kPa을 보임을 알 수 있었다.

교면포장의 상부에서 발생하는 최대 수평응력의 수준을 검토하여 교량상부의 균열(Top-Down Cracking) 가능성을 파악할 수 있다. 일반적으로 아스팔트포장의 경우 교량상부에서 14kgf/cm<sup>2</sup>(약 1300kPa) 이상의 수평응력이 발생하면 Top-Down Cracking이 발생할 수 있으며, 이와같은 균열은 수분침투 가능성을 높게 하기 때문에 공용성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 15톤 덤프트럭 만차하중과 DB-24 만차하중에 대한 표층상단의 수평응력과 기준응력(약 1300kPa)과의 비를 강도대비 응력수준(%)로 정리하여 표 8에 나타내었다. 표 8을 살펴보면 SBS 8cm 포장을 실시한 Case VI에서 최대 38.52%를 보여 극한하중으로 예상되는 DB-24 하중에서도 Top-Down Cracking이 발생할 가능성은 높지 않음을 알 수 있었다.



표 8. 포장상부의 강도대비 응력수준 (%)

각 층의 구성			DB-24 하중		15Ton 하중	
Case	표층	기층	100%	85%	100%	85%
I	SBS	Guss	33.99	29.99	23.60	20.82
II	AP	Guss	19.49	16.93	13.53	11.76
III	SMA	Guss	6.64	5.69	4.61	3.95
IV	Guss	Guss	12.22	10.55	8.49	7.33
V	SMA	SMA	6.41	5.52	4.45	3.84
VI	SBS	SBS	38.52	33.55	26.75	23.30

표 9. 포장하부의 강도대비 응력수준 (%)

각 층의 구성			DB-24 하중		15Ton 하중	
Case	표층	기층	100%	85%	100%	85%
I	SBS	Guss	2.68	2.52	1.86	1.75
II	AP	Guss	3.07	3.25	2.13	2.26
III	SMA	Guss	3.88	3.93	2.69	2.73
IV	Guss	Guss	3.54	3.64	2.46	2.53
V	SMA	SMA	1.87	1.92	1.30	1.33
VI	SBS	SBS	10.84	11.29	7.53	7.84

교면포장의 하부에서 발생하는 최대 수평응력의 수준을 검토하여 교량하부의 균열(Bottom-Up Cracking) 가능성 및 부착력 파손가능성을 파악할 수 있다. 일반적으로 아스팔트포장의 경우 교량 하부에서 14kgf/cm<sup>2</sup>(약 1300kPa) 이상의 수평응력이 발생하면 포장하부에서 상부로 전이되는 균열(Bottom-Up Cracking) 및 부착력의 파손이 발생할 수 있다. DB-24하중, 15톤 하중 단면에 대한 기층하단의 수평응력과 기준응력(약 1300kPa)과의 비를 강도대비 응력수준(%)로 정리하여 표 9에 나타내었다. 표 9를 살펴보면 SBS 8cm 포장을 실시한 Case VI에서 최대 11.29%를 보여 극한하중으로 예상되는 DB-24 하중에서도 Bottom-Up Cracking 및 부착력이 파손될 가능성은 매우 낮음을 알 수 있었다.

## 6. 결론

강상판 교량의 복합교면포장과 여러 종류의 개질아스팔트 포장에 대해서 실제 설계속도에 대한 거동분석을 3차원 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 해석으로부터 포장체거동을 비교분석하였다. 이를 위하여 먼저, 각 교면포장 포장체에 대하여 제시된 물성이 없는 바 이를 설계기준자료 및 기존연구자료로부터 추정하였고, 6가지 표층과 기층의 아스팔트 재료 조합과, 4가지의 하중조건, 그리고 2가지의 물성저하 상태를 고려하여 해석대상 단면의 3차원 유한요소 모델링을 수행하였다. 3차원 모델링으로 구축된 강상판에 놓인 교면포장에 대하여 실제 교량을 통과하는 차량의 설계속도에 대한 포장체 영향을 분석하였다. 또한 3차원 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 포장체 능력저하에 따라 분석된 거동으로부터 기존연구에서 발표된 피로균열의 파괴기준에 근거하여 공용수명을 예측하여 비교하였다.

동적유한요소 모델링분석으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 평가결과 해석단면의 교면포장에서 표면처짐이 DB-24하중, 15톤 하중, 8.2톤 일반하중 및 제동하중에서 각각 최대 4.57mm, 3.17mm, 1.23mm와 1.30mm를 보였으며 아스팔트 재료의 강성이 커질수록(SBS > AP > Guss > SMA) 적은 변형을 유발함을 알 수 있다. 그러나 6가지 아스팔트 재료변화에 따른 변위의 변화율은 5% 내외로 재료변화가 수직 변위 변화에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있었다. 또한 주행하중에 의한 교면포장의 하부처짐 즉 강상판처짐은 표면처짐과 거의 동일한 처짐을 보인다. 이는 차량의 주행하중에 대한 아스팔트 재료 자체의 변형은 매우 미미하여, 강상판 구조의 처짐이 전체 처짐을 대변하는 것으로, 일반적으로 강상판의 처짐 추종성을 위하여 구스 아스팔트포장을 하부에 사용하는 이유를 보여주는 것이다. 즉, 교면포장체 하부의 포장체가 강상판의 처짐량의 변형에 대한 순응성을 가지고 있어 인장균열이 발생하지 않을 수 있

느냐 하는 것이 장기공용성의 초점이 될 것이다.

② 해석단면에 대한 표층과 기층에서의 최대 연직 응력은 DB-24하중, 15톤 하중에서 각각 최대 941kPa, 654kPa을 보임을 알 수 있고, 6가지 아스팔트 재료변화에 따른 연직응력의 변화율은 2% 내외로 재료변화가 연직응력 변화에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있었다. 이는 강상판의 큰 물성에 비하여 아스팔트 재료의 물성은 매우 작으므로 아스팔트 재료변화가 연직응력의 변화에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

③ 해석단면의 표층과 기층에서의 최대 수평응력은 DB-24하중, 15톤 하중에서 각각 최대 500kPa, 347kPa을 보였다. 표층상단의 수평응력과 기준응력(약 1300kPa)과의 비를 강도대비 응력수준(%)로 나타내면 SMA 8cm 포장을 실시한 Case VI에서 최대 38.52%를 보여 극한하중으로 예상되는 DB-24 하중에서도 Top-Down Cracking이 발생할 가능성은 높지 않음을 알 수 있었다. 또한 기층하단의 수평응력과 기준응력(약 1300kPa)과의 비를 강도대비 응력수준(%)로 정리하여 나타내면 SMA 8cm 포장

을 실시한 Case VI에서 최대 11.29%를 보여 극한 하중으로 예상되는 DB-24 하중에서도 Bottom-Up Cracking 및 부착이 파손될 가능성 또한 매우 낮음을 알 수 있었다.

④ 또한, 기층하단에서의 인장변형률을 이용하여 아스팔트 교면포장구조체의 공용성 평가를 실시하였다. 공용성 분석결과 가장 큰 물성을 가지는 개질아스팔트 단면(SBS 8cm: Case VI)의 공용성이 가장 좋게 나타났으나, 그 다음으로 큰 물성을 가지는 Case I 이나 Case II 및 Case IV에 비하여 Case III의 공용성이 가장 높게 나타나 하나의 재료로 이루어지지 않은 복합단면의 경우 SMA 복합단면 포장의 공용성이 가장 높게 나온다는 것을 알 수 있었으며, 전체적으로 파괴기준식에 의한 공용성 수명은 설계교통량보다 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 아스팔트 하부에 물성이 큰 강상판이 놓이기 때문에 강상판위의 포장포설시 시공중 접착문제 및 아스팔트 재료자체의 기준미달에 의한 문제가 발생하지 않는다면 공용성 측면에서는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

### 학회지 광고접수 안내

본 학회지에 게재할 광고를 모집합니다. 우리 학회지는 계간으로 매회 1,800부를 발간하여 회원과 건설관련 기관에 배포하고 있습니다. 회사 영업신장과 이미지 제고를 원하시는 업체는 우리 학회지를 이용하시기 바랍니다.

광고료 : 표2 · 표3 · 표4(300만원) · 간 지(200만원)

※ 상기금액은 연간(4회)광고료임.

사단법인 **한국도로학회**

전화 (02) 3272-1992 전송 (02)3272-1994