

단지 내 아스팔트 콘크리트 포장 설계 개선 연구

A Study on Improvement of Asphalt Concrete Pavement in Apartment Complex

정 종 석 Jong Suk Jung
 심 영 종 Young Jong Sim
 안 제 신 Je Sin An
 박 용 부 Yong Boo park

정회원 · 한국토지주택공사 책임연구원 (E-mail : pobyasu@lh.or.kr)
 비회원 · 한국토지주택공사 책임연구원 (E-mail : yjsim@lh.or.kr)
 비회원 · 한국토지주택공사 차장 (E-mail : anjesin@lh.or.kr)
 정회원 · 한국토지주택공사 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : Parkyb@lh.or.kr)

ABSTRACT

The purpose of this study is to present the reasonable guideline of asphalt concrete pavements in apartment complex. To achieve this purpose was performed review of domestic and foreign guidelines, investigation of main distresses of asphalt concrete pavement, and structural analysis for the investigated cross-sections of the pavements in apartment complex. According to results of structural analysis, this study presented the standard cross-section of the pavement with subbase of 20cm, asphalt base of 5cm, and surface of 5cm in apartment complex. In urban areas, traffic is generally opened after asphalt base course is placed because of civil complaint by dust. Surface course is placed after all of work are completed. Considering these conditions, this study also presented the standard cross-section of the pavement with subbase of 20cm, asphalt base of 7cm, and surface of 5cm for urban areas that expect civil complaints by dust.

KEYWORDS

apartment complex, guideline, asphalt pavement, structural analysis

요지

본 연구는 합리적인 단지 내 도로포장의 표준단면을 제시하기 위해 국내외 단지 내 도로포장 설계기준, 주요 파손형태를 조사하고 다양한 포장설계 단면을 대상으로 구조해석을 수행하였다. 이때, 현장에서 사용된 보조기층재와 노상토의 시편을 채취하여 CBR 및 MR 시험을 실시하였으며, 측정된 물성치를 구조해석에 적용하였다. 다양한 현장조건을 고려한 구조해석 결과를 분석하여, 표준단면의 포장층 두께를 보조기층 20cm, 아스팔트기층 5cm, 그리고 표층 5cm로 제안하였다. 또한, 민원이 예상되는 도시지역에서는 일반적으로 아스팔트 기층을 포설한 후 공사차량을 개방하여 작업종료 후에 표층을 포설하게 되는데 이러한 여건을 고려하여 단지 내 아스팔트 콘크리트 포장 표준단면의 포장층의 두께를 보조기층 20cm, 아스팔트 기층 7cm, 그리고, 표층 5cm로 제시하였다.

핵심용어

단지, 아스팔트포장, 설계기준, 구조해석

1. 서론

현재 국내에서 수행된 포장에 관련된 대부분의 연구는 상위 등급 도로를 대상으로 하고 있으며, 단지 내 도로 포장에 대한 연구는 사례가 적다. 이것은 단지 내 도로에 대한 포장 설계에 대한 이론적인 근거가 미약하여 AASHTO 및 TA 설계의 일부

내용을 준용, 일률적인 두께를 적용하고 있는 실정이며, 이에 따라 과대 또는 과소 설계가 이루어지고 있다. 이는 단지 내 도로의 경우 일반 도로와 달리 교통량 추정이 어렵고 트럭 등 중대형차량의 통행비율이 상대적으로 낮아 파손 가능성이 낮기 때문이다. 또한, 주행속도가 상대적으로 낮아 다소 파손이 진

행되어도 평탄성 측면에서 승차감에 영향을 작게 주기 때문이다. 현재 각 관련기관의 단지 내 도로포장 설계기준은 최소두께의 개념으로 표준단면을 일률적으로 적용하고 있는데, 이는 시공성 및 공용성 관점에서 최적의 설계로 볼 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 국내의 다양한 단지 내 도로포장 설계기준의 조사 및 주요한 파손형태를 조사하였으며, 조사된 다양한 포장설계단면들을 대상으로 구조해석을 수행하였다. 보다 정밀한 구조해석을 위하여 현장에서 사용된 보조기층재 및 노상토의 시편을 채취하여 CBR 및 MR시험을 실시하여 측정된 물성치를 구조해석에 반영하였다. 이러한 구조해석 결과를 바탕으로 단지 내 아스팔트 콘크리트 포장의 표준단면을 제시하였다.

2. 국내외 설계기준

2.1. 국외 설계기준

현재 국외의 단지 내 도로의 형태를 파악하기 위하여 국외에서 사용되고 있는 소로 및 단지 내 도로의 설계기준을 조사하였다. 국외의 경우 개별 주거단지의 설계사례를 조사하기에는 자료 확보에 비교적 용이한 미국을 중심으로 조사하였다. 그 중에서도, 우리나라와 기후가 비슷한 주(state)와 대도시를 선택하여 해당 주 혹은 도시의 설계기준을 조사하였으며 우리나라의 지선 도로 개념과 유사한 미국의 Collector급 이하의 도로에 대한 설계 기준을 조사하였다.

우리나라와 비슷한 기후를 가지는 미국의 주로는 Illinois, Indiana, Ohio, Iowa, Kansas, Pennsylvania, New York, New Jersey, Washington, Virginia 등이 있으며 Chicago나 New York City 등은 우리나라와 비슷한 기후를 가지는 도시에 해당한다.

각 주 혹은 대도시의 교통국 설계기준 조사결과, New York 주의 포장설계기준인 「COMPREHENSIVE PAVEMENT DESIGN MANUAL」은 일평균교통량(AADT: Annual Average Daily Traffic)에 따라 포장 설계기준을 분류하고 있으며, Pennsylvania주의 경우 「GUIDELINES FOR THE DESIGN OF LOCAL ROADS AND STREETS」에서 포장형

표 1. 일반적인 포장두께 지침

기관	지역	구분	교통량(AADT)	아스팔트 층(mm)				골재 층(mm)			비고	
				표층	중간층	기층	총두께	쇄석기층	보조기층	총두께		
해외	New York State DOT	미국 뉴욕	소로급	4,000 이하	80	-	75	155	-	300	300	
					90	-	-	90	150	150	300	
	Pennsylvania DOT	미국 펜실베이니아	Local Road	-	90	-	-	90	130	150	280	
					40	-	110	150	-	150	150	
					40	-	130	170	-	150	150	

태의 포장층에 따라 최소 및 최대두께를 규정하고 있다. 이 중 우리나라의 단지 내 도로에 해당하는 설계기준인 교통량 4,000 이하 및 Local Road의 포장설계기준을 표 1에 나타내었다.

2.2. 국내 설계기준

(구)대한주택공사 도로포장 설계기준의 경우 교통량 예측이 가능한 도로는 미국의 AASHTO 설계법을, 교통량 예측이 불가능한 도로는 일본의 TA법을 사용하고 있으며, 추가적으로 필요한 사항은 국토해양부 도로포장 설계시공지침을 따르도록 규정하고 있다. 이에 따라 교통량 예측이 어려운 단지 내 도로포장은 TA법에 따라 설계하고 있는 실정이다. TA법의 단지 내 도로포장에서 교통량은 L교통량이며, 표층과 기층을 합한 두께는 층별 최소두께를 고려하여 5cm로 설계하고 있다. 그러나 단지 내 도로포장은 페이버 및 다짐장비의 진입이 어려워 평탄성 및 다짐부족에 의한 침하 때문에 표 2와 같은 표준설계 기준을 적용하고 있다(대한주택공사, 2006). 동상방지층은 국토해양부에서 제정한 동결지수선도를 기준으로 전국을 A~F구역으로 나누어 동상방지층의 두께를 10~45cm까지 고려하고 있다.

표 2. (구)대한주택공사 단지 내 도로포장의 설계기준

표층	기층		보조기층
	역청안정기층	입도조정쇄석기층	
5cm	5cm	20cm	10cm

(구)한국토지공사에서는 1994년 『단지 내 도로포장단면 결정기법에 관한 연구』를 수행하여 「Koland 설계기법 공사 설계편람」을 제시하였다. 이 설계편람에 나타난 단지 포장 설계기법을 살펴보면, 단지 내 도로의 포장구조 설계 시 왕복 4차로 이상의 도로는 AASHTO 설계법에 의해 구조 설계하고, 왕복 2차로 이하의 도로는 『단지 내 도로 포장단면 결정기법에 관한 연구』에서 제시한 표준단면을 적용한다고 명시하였다(한국토지공사, 1994). 『단지 내 도로 포장단면 결정기법에 관한 연구』에 나타난 포장단면은 표 3과 같다. 여기서, 동상방지층은 별도의 기준에 따르도록 하고 있으며 보조기층의 두께는 노상의 CBR 값에 따라 결정하고 있다. 표 4는 서울도시공사 '전문가 인터뷰 조사'와 경기도시공사(2010)의 경우 현재 소로 및 단지 내 도로에 적용하고 있는 포장단면구성을 나타내고 있다.

표 3. 소로 및 2차선도로의 포장 표준단면도

구분	기층재료: 입도조정 기층				기층재료: 아스콘기층			
	표층	쇄석기층	보조기층	계	표층	아스팔트 안정기층	보조기층	계
6~8m 소로	7cm	15cm	15cm	37cm	5cm	5cm	15~25cm	15~25cm
	표층	쇄석기층	보조기층	계	표층	아스팔트 안정기층	보조기층	계
10m 소로	8cm	15cm	15~20cm	38~43cm	5cm	6cm	15~35cm	26~46cm
	(4+4)							

주) 동상방지층은 별도이며 보조기층은 노상 CBR에 따라 달라짐.

표 4. SH 공사와 경기도시공사의 소로 및 단지내 포장 설계 단면

구 분	SH 공사	경기도시공사	
		중1류	중2,3류, 소로
아스팔트 표층	5cm	5cm	5cm
아스팔트처리기층	5cm	6cm	-
쇄석기층	15cm	19cm	10cm
보조기층	25cm	30cm	20cm
동상방지층	15cm	20cm	40cm

3. 현장조사

강원도, 충청도, 경상남도에 있는 도시지역을 중심으로 단지 내 도로 구성단면을 조사하였으며, 지역별 설계단면을 표 5에

표 5. 지역별 단지 내 도로단면

지역	도시	년도	도로 등급	단면구성 (cm)					계 (cm)
				표층	중간층	입도조정 기층	보조 기층	동상 방지층	
충청도	청주	2002	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	15	15	45
	대전1	2003	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	25	15	55
			대전2	2002	통합	5	5	20	30
대전3	2008	통합	5	5	20	30	25	85	
대전4	2008	통합	5	5	20	30	25	85	
강원도	속초	1993	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	15	5	35
	강릉1	2002	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	15	5	35
	강릉2	1994	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	15	5	35
	강릉3	1995	간선	5	0	15	20	5	45
			지선	4	0	10	15	5	34
강릉4	2006	간선	4	5	20	30	0	59	
		지선	4	0	10	15	5	34	
원주1	2008	통합	5	5	20	10	45	85	
원주2	2004	간선	4	5	20	30	5	64	
원주3	2008	지선	4	0	10	15	25	54	
원주3	2008	통합	5	5	20	10	45	85	
경상도	진해1	1994	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	4	0	10	15	0	29
	진해2	2006	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	4	0	10	15	0	29
	김해1	2002	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	15	0	30
	김해2	2004	간선	4	5	20	30	0	59
			지선	5	0	10	15	0	30
	김해3	2008	통합	5	5	20	10	10	50
	부산1	1999	간선	5	5	20	30	0	60
지선			5	0	20	20	0	45	
부산2	1999	간선	4	5	20	30	0	59	
		지선	4	0	10	15	0	29	

정리하였다. 2008년 이전의 단지 내 도로설계 단면은 대부분 간선 및 지선도로로 구분하여 단면 구성을 달리하여 설계하고 있으며, 2008년 이후는 간선 및 지선도로 구분 없이 표준단면으로 설계하고 있다. 지선도로는 단지 내 주차장 및 단지연결 도로를 의미하며, 간선도로는 단지 내 교통량이 잦은 주요 도로이다. 충청도 지역에서 단지 내 포장두께는 59~85cm이며, 공용상태는 양호한 것으로 파악되었으나, 지선도로의 경우 대부분 시공다짐부족에 의한 부분적인 침하와 종방향 균열이 대부분 발생하였다. 경상도 지역의 단지 내 도로 포장두께는 29~60cm이며, 공용상태는 양호한 편이지만 지선도로에서는 다짐부족에 의한 부분침하와 종방향 균열이 대부분 발생하였다. 그림 1과 그림 2는 아스팔트 기층이 없는 단지 내 지선도로에서 대표적인 파손형태를 보여준다.



그림 1. 부분 침하(충청북도, 청주)



그림 2. 종방향 균열(경산남도, 부산 1)

강원도 지역의 단지 내 포장두께는 35~85cm이며 포장두께가 차이가 나는 것은 강릉지역보다 원주지역이 동결깊이가 깊기 때문이다. 강릉3의 간선도로는 아스팔트 기층을 생략하고

시공하였으나, 피로균열에 의한 파손이 대부분 구간에서 진행 중이었다(그림 3). 또한 강원도 지역에서는 폭설로 인한 차량의 스노우체인 부착으로 표면손상이 빈번히 발생하였다(그림 4).



그림 3. 피로균열(강원도, 강릉 3)



그림 4. 표면마모(강원도, 속초)

지선도로에서 시공다짐부족에 의한 평탄성 불량 및 부분 침하를 방지하기 위해서는 아스팔트 기층을 포함시키는 것이 필요하다고 판단된다. 2008년 이후의 단지 내 포장은 공용연수를 고려하더라도 전반적인 공용성은 매우 양호하지만 2008년 이전의 단지 내 포장두께보다 많이 두꺼워진 것으로 나타났다. 2008년 이전의 간선도로의 공용성은 양호한 것으로 판단되기 때문에 2008년 이후의 단지 내 포장 표준단면에 대한 적정성 검토가 필요한 것으로 판단된다.

4. 단지 내 교통량 추정

대부분의 포장 설계는 중차량이 많이 소통되는 고속도로나 일반 국도에 초점이 맞춰져 있으나, 단지 내 도로는 일반 고속

도로나 국도와는 달리 교통량이 매우 작으며 1종 차량인 승용차가 대부분 소통된다. 이에 본 연구는 단지 내 도로 단면 설계를 위해 승용차(1종), 버스(2종), 기타 배달차량(3종), 이사차량 및 쓰레기 수거 차량(4종) 등으로 차량을 분류하여 실제 아파트 단지 주변에 소통되고 있는 교통량을 추정하였다.

4.1. 승용차(1종)

소로 및 단지 내 도로에 소통하는 승용차 대수를 산정하기 위하여 주택건설기준 등에 관한 규정(시행 2010.7.13, 대통령령 제22273호) 중 공동주택(아파트, 연립주택, 다세대주택 및 다가구주택, 오피스텔) 부대시설에 관한 규정을 적용하여 1000세대 아파트 단지에서의 교통량을 산정하면 다음과 같다.

$$1) 1000세대 기준 1종 교통량 : 1,000세대 \times 1대 \times 2회/일 = 2,000대/일$$

4.2. 버스(2종)

버스는 단지주변으로 운행되는 노선버스, 마을버스, 학원버스 등을 고려하였다. 단지 내 도로는 주로 중로에서 소통되고 있는 노선버스 등은 소통되지 않고 있지만 다소 보수적인 기준을 적용하여 단지별로 1개의 노선버스가 20분 간격으로 운행하는 것으로 예상하였다. 그리고 단지 내 도로에 주로 소통되고 있는 마을버스는 5개 노선의 마을버스가 10분 간격으로 운행될 것으로 감안하였다. 이 외에도 단지 주변의 상가 등에 분포하고 있는 학원은 주로 소형버스를 이용하여 학생들의 출입을 담당하고 있는 경우가 많으므로 10개의 학원버스가 30분 간격으로 운행되고 있다고 가정하여, 단지 내 도로에서 통행할 것으로 예상되는 버스 교통량은 아래와 같다.

- 1) 노선버스(중형버스) : 1개 노선, 16시간 운행, 20분 간격 = 48대/일
- 2) 마을버스(소형버스) : 5개 노선, 16시간 운행, 10분 간격 = 480대/일
- 3) 학원버스(소형버스) : 10개 학원, 6시간 운행, 30분 간격 = 120대/일
- 4) 1000세대 기준 2종 교통량 : 648대/일

4.3. 기타 배달차량(3종)

단지 내 도로에 통행할 것으로 예상되는 또 다른 차량으로 택배 차량을 예상할 수 있다. 그러나 택배 차량은 그 빈도를 예측하기가 곤란하지만 단지 내 택배의 이용빈도가 증가하고 있으므로 아래와 같이 추정하였다.

$$1) 1,000세대 기준 3종 배달차량 교통량 : 50대/일$$

4.4. 이사차량 및 쓰레기 수거차량(4종)

단지 내에서 통행하는 이사차량을 추정하기 위하여 통계청의 국내인구이동에 관한 통계자료를 사용하였다. 국내인구이동률을 지난 9년 평균 18.8%로 보았을 때 전체 세대수 중 매년 약 20%가 이동한다고 가정할 수 있다(국가통계포탈, 2010). 이사에 필요한 차량은 이사 1회당 2.5톤 트럭(4종) 2대, 사다리차(4종) 1대를 사용한다고 가정하였다. 또한 아파트 단지 주변의 트럭(4종) 중에 쓰레기 수거 차량을 고려할 수 있다. 쓰레기 수거 차량의 경우 1일 2회 주5일 운행 가정하여 교통량을 산정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 1,000세대 기준 4종 교통량(이사) : 1,000세대×20%×3대÷365일 = 1.6대/일
- 2) 1,000세대 기준 4종 교통량(쓰레기 수거) : 1대×2회×52주×5일÷365 = 1.4대/일

4.5. 총 교통량 산정

이상과 같이 총 세대수 1,000세대를 기준으로 하여 단지 내 도로 포장 설계에 적용될 총 교통량을 산정한 결과는 표 6과 같다.

표 6. 총 교통량(AADT-Annual Average Daily Traffic)

차종	1종 승용차	2종 버스		트럭		합계
		소형	중형	3종	4종	
교통량(대/일)	2,000	600	48	50	3	2,701

5. 실내 CBR 시험 및 회복탄성계수 시험

5.1. 실내 CBR 시험

포장단면의 구조해석을 위한 설계변수 입력치를 결정하기 위하여 보조기층재료에 대한 CBR 시험을 실시하였다. 경기지역에 위치한 이천, 안산, 오산의 3개의 현장에서 시료를 채취한 CBR 시험결과를 표 7에 나타내었다. 경기지역의 단지 조성 중 단지 내 도로에 사용되고 있는 보조기층재는 품질 규정(수정 CBR 30 이상) 이상으로 좋은 양질의 보조기층재를 사용하고 있는 것을 알 수 있다.

최근 폐콘크리트는 매년 급격하게 증가하고 있고 천연골재 수급 불안정으로 순환골재의 가치가 높아지고 있는 상황이다. 이에 따라 정부는 2004년 12월 「건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」을 제정·시행하면서 순환골재를 도로공사 보조기층용 재료에 10% 의무사용토록 하는 등 자원 재활용 차원에서 순환골재 사용을 확대하고 있다(국토해양부, 2009). 따라서 본 연구는 도로공사용 순환골재 품질인증을 획득한 업체 중 한 곳을 선정하여 순환골재 샘플을 채취하여 CBR 시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 8과 같다.

표 8의 시험 결과에서도 알 수 있듯이 실제 사용되고 있는 보

조기층재에 비하여 그 강도가 85~92% 정도 수준에 불과하지만, 품질기준인 CBR 30을 훨씬 상회하는 수준이므로 충분히 도로 포장용 보조기층재로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 보조기층재로 사용되고 있는 일반골재의 최적함수비는 5.5% 정도이지만, 순환골재의 최적함수비는 12%가 넘기 때문에 두 배 이상 큰 것을 알 수 있다. 따라서 실제 보조기층을 시공할 때에는 최적함수비에 맞추어 다짐을 실시하여야 하므로 순환골재를 이용한 보조기층의 다짐 시 최적함수비가 일반 보조기층재에 비하여 매우 큰 것을 고려하여 시공해야 한다.

표 7. 보조기층재의 시험 결과

시료명	항목	최대건조밀도 (g/cm³)	최적함수비 (%)	수정 CBR (%)
	2	2.216	5.5	60
	3	2.219	5.4	64
	평균	2.216	5.5	62
오산	1	2.216	5.9	68
	2	2.221	6.0	67
	3	2.223	6.0	67
	평균	2.223	6.0	67
안산	1	2.221	5.6	66
	2	2.224	5.7	67
	3	2.225	5.5	63
	평균	2.223	5.6	65

표 8. 채취된 순환골재의 수정 CBR 값

시료명	항목	최대건조밀도 (g/cm³)	최적함수비 (%)	수정 CBR (%)
	2	1.938	12.2	57
	3	1.940	12.1	58
	평균	1.937	12.3	57

5.2. 회복탄성계수(MR) 시험

국내에서 사용되고 있는 노상토는 대부분 모래 또는 실트질 모래로서 CBR과 노상지지력계수가 양호한 것으로 평가되고 있다. 국내에서 노상토의 품질 기준은 엄격하게 설정되어 있지만 노상토를 확보하는데 있어 큰 어려움이 없는 것은 국내의 지반이 대부분 화강 풍화토로서 역학적으로 대단히 우수한 특성을 보이기 때문이다. 본 연구에서는 포장단면의 구조해석을 위하여 보조기층재를 채취한 같은 경기도 지역에 위치한 3개의 현장에서 시료를 채취하여 회복탄성계수 시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 9와 같다.

한국도로공사와 한국건설기술연구원에서 수행한 연구결과에 따르면, 실제 포장체의 구속응력은 21kPa(3psi)를 초과하지 않

고, 윗하중에 의해 노상면에서 발생하는 수직응력의 크기도 41kPa(6psi)를 초과하지 않으므로 구속응력 21kPa(3psi)과 축차응력 41kPa(6psi)에 해당하는 MR치를 단일 설계 MR치로 결정하는데 무리가 없다고 보고되었다(한국도로공사 외, 1994). 따라서, 포장단면의 구조해석을 위한 노상토의 회복탄성계수는 가장 낮은 오산세교의 값을 사용하여 62MPa로 결정하였다.

표 9. 노상토에 대한 회복탄성계수 시험 결과

구속 응력 (kPa)	축차 응력 (kPa)	체적 응력 (kPa)	탄성계수(MPa)											
			이천				오산				안산			
			1	2	3	평균	1	2	3	평균	1	2	3	평균
0	14	14	128	121	123	124	67	96	97	87	147	259	239	215
	28	28	104	100	99	101	43	61	55	53	96	147	141	128
	41	41	84	94	97	92	33	48	43	41	71	124	124	106
	55	55	84	97	98	93	33	46	43	41	69	121	111	100
	69	69	80	94	97	90	29	40	41	37	64	111	105	93
10	14	44	170	138	127	145	67	118	108	98	179	226	282	229
	28	58	115	115	113	114	51	71	64	62	114	169	156	146
	41	71	95	107	112	105	38	52	50	47	81	134	124	113
	55	85	93	108	111	104	37	52	49	46	79	127	121	109
	69	99	89	109	110	103	35	48	47	43	73	117	114	101
21	14	77	195	144	155	165	101	138	151	130	181	294	282	252
	28	91	172	125	137	145	77	79	82	79	119	179	173	157
	41	104	136	121	131	129	62	62	63	62	88	135	138	120
	55	118	133	122	130	128	60	61	62	61	85	133	136	118
	69	132	112	123	129	121	52	57	57	55	74	124	125	108
41	14	137	223	158	221	201	132	173	179	161	224	365	322	304
	28	151	166	145	196	169	87	108	107	101	132	209	212	184
	41	164	134	142	164	147	65	81	79	75	91	159	156	135
	55	178	133	142	165	147	64	79	76	73	87	153	151	130
	69	192	117	142	156	138	55	71	70	65	73	134	133	113

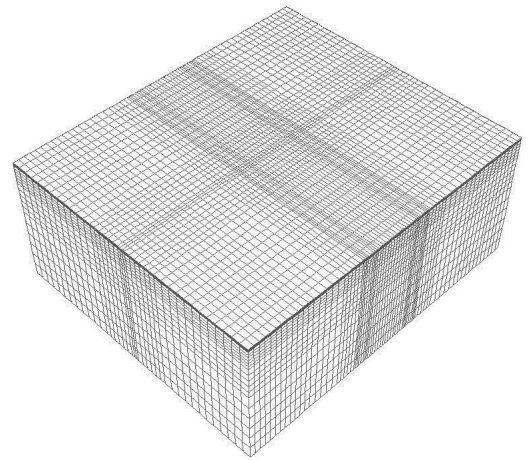


그림 5. 유한요소 모델

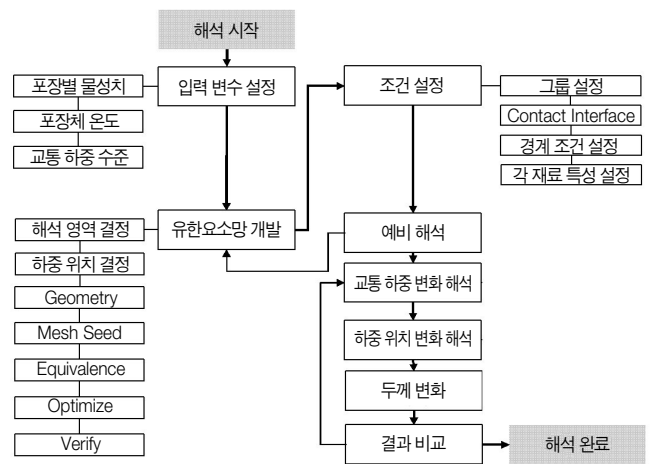


그림 6. 3차원 유한요소 해석 과정

6. 3차원 구조해석

6.1. 구조해석 절차

아스팔트 구조해석을 위한 유한요소모델은 교통하중에 의해서 발생하는 응력의 영향 반경이 통상적으로 하중 크기의 약 20배 정도인 것을 고려하여 길이방향 10m, 횡방향 9m에 대한 정방형 메쉬를 사용하였으며 측구 가드레일 등 포장의 거동에 직접적인 영향을 미치지 않는 요소 등은 해석의 효율성을 위하여 제외하였다. 포장체의 거동을 상세하게 모사하기 위하여 교통하중에 따른 응력 분산의 대부분이 이루어지는 아스팔트 포장층에는 메쉬 밀도를 높였고, 하부 지지층의 역할을 하는 노상 이하에서는 메쉬 밀도를 낮추어 모델을 구성하였다. 그림 5는 완성된 아스팔트 포장의 유한요소 모델이며 구조해석 프로그램은 국내외에서 범용적으로 사용되고 있는 ABAQUS를 사용하였으며, 각 단계별 해석 방법은 그림 6과 같다.

6.2. 구조해석 단면

1차 구조해석에 적용된 단면은 표 10과 같이 총 5가지 설계 단면에 대하여 해석을 수행하였다. 일반적으로 도시지역 단지 내 도로는 분진 및 소음에 의한 민원때문에 아스팔트 중간층(기층)을 시공한 후에 공사차량을 개방한다. 따라서 Case 1과 2는 이러한 상황을 고려하여 표층이 시공되지 않은 상태로 모사하였고, Case 1, 2 및 3의 경우 동상방지층 재료의 물성을 보조기층의 물성과 같은 값을 적용하였다. Case 4와 5는 동상방지층 물성치를 현재 통용되고 있는 보조기층의 물성치에 비해 낮은 물성치를 적용하여 구조해석을 실시하였다. 총 포장 두께는 현재 한국토지주택공사에서 적용 중인 동결깊이 70cm(C 구역: 서울 등)를 가정한 70cm를 적용하였다.

2차 구조해석에서 Case 4-1은 동상방지층의 물성치를 노상의 물성치와 동일하게 설정하여 구조해석을 실시하였으며, Case 4-2는 앞서 실시한 순환골재의 CBR 값을 이용하여 보조기층의 탄성계수를 추정하여 구조해석을 실시하였다. Case 6과 7의 경우 동상방지층의 물성치와 보조기층의 물성치를 동

일하게 사용하였으며 국토해양부 도로포장설계지침서 작성 및 축하중 조사연구에서 제시한 화물차(4종)의 축하중을 적용하였다(국토해양부, 1988). 화물차(4종)의 축하중은 복륜의 최대 축하중(4.023ton)이며, 표 11은 2차 구조해석에 적용된 단면을 나타내고 있다.

표 10. 1차 구조해석단면

단위(cm)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
아스팔트 표층			5	5	5
아스팔트 기층	5	7	5	5	5
보조기층	20	20	20	30	20
동상방지층	40	38	40	30	40
총 두께	70(예정)	70(예정)	70	70	70

표 11. 2차 구조해석단면

단위(cm)	Case 4-1	Case 4-2	Case 6	Case 7
아스팔트 표층	5	5	5	5
아스팔트 기층	5	5	5	7
보조기층	30	30	30	20
동상방지층	30	30	30	38
총 두께	70	70	70	70

6.3. 구조해석에 적용된 포장층의 물성치 및 적용 하중

제안된 단면의 아스팔트 표층 및 기층의 물성치는 국토해양부(2006)의 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 결과 값을 사용하였으며, 보조기층 및 동상방지층의 물성치는 본 연구에서 시험한 결과를 바탕으로 산출하여 표 12에 정리하였다. Case 1~Case 5의 단면 구조해석에 적용된 하중은 AASHTO 포장 설계법에서 적용되는 등가단축하중 환산계수(ESALF: Equivalent Single Axle Load Factor)의 표준 하중인 8.2ton 등가단축하중이며, Case 6과 7에 적용된 하중은 기 서술한 바와 같이 화물차(4종)의 축하중을 적용하였다.

표 12. 구조해석 시 포장층의 물성치

구 분	표층	아스팔트기층	보조기층	순환골재	동상방지층	노상
탄성계수 (MPa)	4,774.17	3723.88	122.6	90.2	88.3 (Case 4,5) 122.6	62.0
포아송비	0.35	0.35	0.40	0.40	0.40	0.40

6.4. 3차원 유한요소 해석 분석 결과

아스팔트 포장의 경우 주 파괴 모드가 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장응력에 의해 나타났다. 바퀴 측면에서 나타나는 전단응력의 경우 인장응력에 비해 상대적으로 낮기 때문에 전단 거동에 의한 파손 가능성은 미미하다. 따라서 아스팔트 혼합물 내에서 파괴 시에 발생하는 약 1.37MPa의 인장강도를 대표적인 평가지표로 사용하였다(국토해양부, 2008). 해석 결

과 횡방향에 비해 종방향으로 응력이 크게 발생하여 전반적으로 단면 하부로부터의 균열 발생 가능성이 높을 것으로 추정된다. 표층이 시공되지 않은 경우인 Case 1, 2의 경우 거의 파괴 수준에 근접하였으며, Case 3, 4, 5는 균열 발생 가능성이 낮은 것으로 판단된다. 표 13은 1차 구조해석 결과 Case 별로 인장응력과 변형률을 나타낸 것이다.

표 13. 1차 구조해석 결과

구 분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	
인장응력 (MPa)	횡방향	1.30	1.15	0.83	0.86	0.86
	종방향	1.32	1.28	0.97	1.00	1.00
변형률	횡방향	2.43×10^{-4}	2.07×10^{-4}	1.45×10^{-4}	1.50×10^{-4}	1.50×10^{-4}
	종방향	2.55×10^{-4}	2.52×10^{-4}	2.00×10^{-4}	2.07×10^{-4}	2.06×10^{-4}
최대인장응력/강도	96.4%	93.2%	70.7%	73.4%	73.0%	

표 14는 2차 구조해석 결과를 나타내고 있다. 그 결과 동상방지층의 물성치를 노상의 물성치와 동일하게 설정한 경우 (Case 4-1)와 동상방지층의 물성치를 현재 사용되고 있는 물성치(88.3MPa)를 이용한 경우와 비슷한 정도의 인장응력이 발생하였으며 순환골재를 보조기층에 적용한 경우(Case 4-2) 역시 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 동상방지층은 노상이나 보조기층과 같은 물성치를 사용하면 최대인장응력/강도 비율이 비슷하게 나타나고 있는 것을 볼 때 동상방지층의 구조적 역할이 크지 않다고 볼 수 있다. 또한 순환골재의 CBR 값이 매우 양호하게 나타나고 있어 적용된 탄성계수 값이 기존의 보조기층에 적용된 탄성계수 값과도 비슷하게 적용되고 있어 구조해석 결과도 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다.

단지 내 포장의 경우 소로 및 단지내 도로의 경우에는 8.2ton 등가단축하중을 보유하는 차량의 통과확률은 거의 없다. Case 6과 7의 구조해석에 적용된 4종 화물차 축하중은 실제 포장의 설계에 사용되는 8.2ton 등가단축하중에 비하여 작은 수준의 하중이라고 할 수 있다. 따라서, 4종 화물차 축하중을 적용할 경우 8.2ton 등가단축하중이 적용된 경우의 48.8~51.0%의 인장응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 단지 내 도로에 주로 소통하게 될 것으로 예상되는 4종 화물차나 1종 승용차의 경우 단지 내 도로에 높은 수준으로 통과하더라도 Case 6과 7의 단면들은 인장응력이나 인장변형률에 의한 파괴는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

표 14. 2차 구조해석 결과

구 분	Case 4-1	Case 4-2	Case 6	Case 7	
인장응력 (MPa)	횡방향	0.89	0.87	0.42	0.32
	종방향	1.05	1.02	0.49	0.38
변형률	횡방향	1.56×10^{-4}	1.52×10^{-4}	0.72×10^{-4}	0.55×10^{-4}
	종방향	2.15×10^{-4}	2.10×10^{-4}	0.99×10^{-4}	0.79×10^{-4}
최대인장응력/강도	76.2%	74.4%	35.0%	27.2%	

6.5. 공용수명 검토

아스팔트 포장 하부의 수평인장변형률은 피로파손에 의하여 발생하는 균열과 직접적인 상관관계를 갖고 있다. 이러한 상관관계는 공용성 예측 모델에 의하여 변형률의 크기에 의해서 결정되는 허용 가능한 반복하중 횟수(포장의 공용수명)로 정량화가 가능하다. 일반적으로 아스팔트포장의 구조적 파손은 반복적인 교통하중의 재하에 의한 피로균열로 정의할 수 있기 때문에 산출된 변형률 값을 사용하여 포장의 공용수명을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 공용수명을 추정하기 위해서 세계적으로 신뢰성을 검증받아 적용되고 있는 미국 아스팔트 협회(AI), SHELL, 영국의 TRRL, 및 일리노이주 교통국(Illinois Department of Transportation)에서 개발한 피로 파손 예측 모델과 소성변형 모델을 적용하여, 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

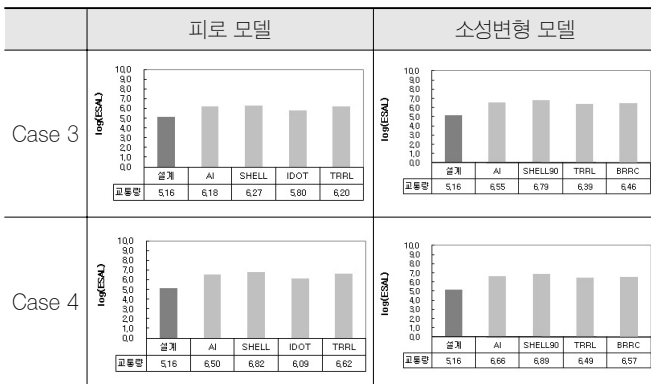


그림 7. 피로 및 소성변형 모델 적용 결과

단지 내 도로는 고속도로 및 일반국도에 비해 상대적으로 추정 교통량이 낮아 모든 경우에 대해 10년 동안 소성변형 및 피로 균열 가능성이 낮게 나타나고 있다. 따라서 구조해석에 적용된 단면들은 10년 동안 피로파괴 혹은 소성변형으로 인한 파괴가 나타날 가능성이 낮음을 알 수 있다.

7. AASHTO 설계법 및 TA법을 이용한 단면 검토

7.1. AASHTO 설계법을 이용한 단면 검토

AASHTO 설계법을 이용한 검토는 공용수명 10년을 기준으로 실시하였으며, 4절에서 추정된 교통량을 이용하여 10년 후의 누가등가환산 교통량을 추정하여 표 15에 나타내었다. 또한, 이때 사용된 물성치는 구조해석에 적용한 것과 같은 값을 사용하였으며, 단지 내 포장에 소통될 것으로 판단되는 교통량을 이용하여 단면(case 3과 4)을 검토하였다. 6절 구조해석에 적용된 case 3(보조기층 20cm)과 case 4(보조기층 30cm)로 포설한 경우 설계 SN은 각각 2.355와 2.865이며, 소요 SN은 1.455로 나타나 모두 설계 SN이 소요 SN보다 크게 나타나 안전하게 설계된 것임을 알 수 있다.

표 15. 설계차로 교통하중

계획년도	일교통량	환산누계교통량 ($\times 10^6$)	설계차로교통하중 ($\times 10^6$)
10년후	2,701	0.141	0.071

단지 내 포장에 대하여 아스팔트 표층이 시공되지 않고 아스팔트 기층이 시공된 후 교통개방이 된 경우(case 1과 case 2)에 대한 단면검토를 실시한 결과, Case 1(아스팔트 기층 5cm)과 Case 2(아스팔트 기층 7cm)의 설계 SN은 각각 2.08과 2.38로 소요 SN 2.30보다 작거나 약간 큰 것으로 나타나 포장 파손의 가능성이 높거나 근접한 것으로 나타났다. 따라서 기층이 시공된 후 일정 시간이 지난 후 표층의 시공이 진행된다면 가능한 아스팔트 기층을 7cm 이상의 두께로 시공하는 것이 파괴 가능성을 낮출 것으로 판단된다.

또한, 단지 내 포장의 동상방지층은 보조기층재를 이용하여 시공되고 있고 동상방지층 역시 보조기층의 역할을 할 것이라는 가정 하에 동상방지층에 해당하는 두께를 보조기층의 두께와 합산하여 단면을 검토하였다. 표 16에서 보여주는 바와 같이 동상방지층의 두께에 해당하는 포장층이 보조기층의 역할을 하므로 동상방지층이 보조기층의 역할을 하지 않은 경우와 비교하면 보조기층의 두께 20cm, 30cm에 비해 각각 최소 34% 이상, 10% 이상의 강도 증대 효과를 나타내고 있다(SN3 비교). 보조기층의 상대강도계수(SN2)만 비교해 보더라도 최소 19% 이상의 강도가 증대됨을 알 수 있다.

표 16. 동상방지층이 구조적인 성능을 발휘하는 경우에 대한 설계 검토

포장층 구분	소요 SN	상대강도 계수	적용두께(cm)	설계 SN
표층		0.157	5.0	0.785
기층		0.110	5.0	0.550
소계(SN2)	0.913		15.0	1.335
보조기층 (동상방지층 두께 포함)		0.051	62.0	3.162
계(SN3)	1.649		72.0	4.497

7.2. TA 설계법을 이용한 단면 검토

TA 설계법을 이용한 포장두께 설계는 노상의 설계 CBR과 설계교통량의 구분에 따라 표 17에서 정한 TA(등치환산두께)보다 적지 않도록 포장의 각 층의 두께를 결정한다. 본 연구에서는 시험을 통한 노상의 MR값을 AASHTO 93에서 제시된 보조기층에 대한 CBR, 상대강도계수, 탄성계수 간의 전환 그래프를 이용하여 CBR 값을 추정하면 CBR 값은 7을 얻게 된다. 만약, 노상의 설계 CBR 값이 6이고 단지 내 포장에 주로 소통될 것으로 예상되는 L교통량일 경우 등치환산두께는 12이다. TA 설계법 중 설계교통량을 주행차량의 율하중에 의한 방법으로 결정하는 경우, 아스팔트포장의 구조설계에 필요한 두께는 누적 5ton 율하

중 환산교통량(N)에 따라 식(1)을 사용하여 구한다. 위의 식을 이용하면 단지 내 포장에서 등치환산두께는 10.2로 계산되었다.

표 17. 노상의 설계 CBR에 따른 포장두께 TA

설계 CBR	L 교통	A 교통	B 교통	C 교통	D 교통
(2)	(17)	(21)	(29)	(39)	(51)
3	15	19	26	35	45
4	14	18	24	32	41
6	12	16	21	28	37
8	11	14	19	26	34
12	11	13	17	23	30
30	11	13	17	20	26

주) ()는 보수공사 등에서 기존의 노상 설계 CBR이 20이고, 노상의 개량이 곤란할 경우에 적용한다.

$$T_A = \frac{3.84N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \quad (1)$$

여기서,

T_A : 포장 각 층을 표층용 가열 아스팔트 혼합물로 설계할 때의 소요 두께(cm)

N : 설계기간(n년)에 있어서 누적 5ton 이하중 환산 교통량(대/방향)

CBR : 노상의 설계 CBR

구조해석에 적용된 Case 3의 등치환산두께(TA')가 14.0로서 TA값 12보다 크고 최소두께 기준을 모두 만족하였다. 따라서 구조해석에 적용된 단면은 TA 설계법을 이용한 검토에서 만족한 결과를 나타내었다.

8. 결론

1. 단지 내 도로에 작용할 것으로 예상되는 교통량의 경우 실제 설계적용사례를 구할 수 없어 1,000세대를 기준으로 추정하였으며 이를 기준으로 소로 및 단지 내 도로에 소통될 것으로 예상되는 연평균 일교통량을 2,701대로 산정하였다.
2. 경기지역 단지 내 도로에 사용되고 있는 노상토와 보조기층재에 대하여 각각 회복탄성계수 시험과 CBR 시험을 실시한 결과, 노상토와 보조기층재 모두 기준을 넘는 양질의 재료가 사용되고 있음을 알 수 있었다. 시험 결과는 구조해석과 AASHTO 설계법을 이용한 단면 검토에 적용되었다.
3. 현재 우리나라에서 도로포장용으로 사용되고 있는 순환골재의 CBR 값은 평균 57 정도로 일반적으로 사용되는 보조기층재에 비하여 85~92% 정도 수준에 불과하지만, 품질기준인 30을 훨씬 상회하는 수준이므로 충분히 도로 포장용 보조

기층재로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 순환골재의 최적함수비가 12%가 넘기 때문에 순환골재를 이용한 보조기층의 다짐을 실시할 때에는 최적함수비가 일반 보조기층재에 비하여 매우 큰 것을 고려하여 시공해야 할 것이다.

4. ABAQUS를 이용한 구조해석 결과에 의하면 표층이 시공되지 않은 경우는 거의 파괴수준에 근접함을 알 수 있었으며, 표층까지 모두 시공된 경우 보조기층의 두께에 상관없이 10년 공용수명에 대하여 파괴가능성이 낮을 것으로 판단되었다. 또한 한국형 포장 설계법 연구 결과인 아스팔트 피로모델과 소성변형 모델을 적용하면 공용수명 10년 동안 피로 파괴 혹은 소성변형으로 인한 파괴가 나타날 가능성을 낮음을 알 수 있다.
5. 본 연구를 통하여 제안하는 포장의 단면을 요약하여 표 18에 나타냈다.

표 18. 제안하는 단지 내 포장설계 단면

구 분	단지 내 포장 단면 제안 1	단지 내 포장 단면 제안 2
표층(cm)	5	5
기층(cm)	5	7
보조기층(cm)	20	20
비 고	표층과 기층이 동시에 시공될 경우	기층 시공 후 기층이 개방되고 이후 표층이 시공 될 경우 기층을 19mm 혼합물을 이용할 것을 추천

참고 문헌

- New York State Department Of Transportation(2008) "COMPREHENSIVE PAVEMENT DESIGN MANUAL"
- Pennsylvania Department Of Transportation(2002) "GUIDELINES FOR THE DESIGN OF LOCAL ROADS AND STREETS"
- 대한주택공사(2006) "토목설계지침"
- 한국토지공사(1994) "단지내 도로포장단면 결정기법에 관한 연구"
- SH 공사(<http://www.i-sh.co.kr>), 전문가 인터뷰 조사
- 경기도시공사(2010), "광역시구택지개발사업 기본 및 실시설계보고서"
- 국가통계포털(2010), "국내인구이동 통계"
- 국토해양부(2009) "순환골재 품질기준"
- 한국도로공사 외(1994) "노상토의 유효 회복탄성계수 결정에 관한 연구"
- 국토해양부(1988) "도로포장 설계지침서 작성 및 자동차 축하중 조사연구, 최종보고서"
- 국토해양부(2006) "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구"
- 국토해양부(2008) "장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계시공기술 개발 3차년도 보고서"

접 수 일 : 2010. 6. 16

심 사 일 : 2010. 6. 28

심사완료일 : 2010. 8. 19