

# 아스팔트 콘크리트 채움재로 TDF Fly Ash 적용에 따른 아스팔트 혼합물 기초 물성 평가

최민주\* · 김혁중\*\* · 김용주\*\*\* · 이재준\*\*\*\*

Choi, Min-Ju\*, Kim, Hyeokjung\*\*, Kim, Yongjoo\*\*\*, Lee, Jaejun\*\*\*\*

## Fundamental Properties of Asphalt Concrete Mixture as Using TDF Fly Ash as Mineral Filler

### ABSTRACT

TDF (Tire derived fuel) Fly ash is an industrial by-product when scraped tire was used a fuel source at the power plant. TDF Fly ash has been classified as domestic waste at the workplace so far and has not been appropriately utilized. We conducted a fundamental physical property test of asphalt mixture to investigate the possibility of using TDF Fly ash as a mineral filler of asphalt mixture for exploring new usage strategies. TDF Fly ash meets KS F 3501 asphalt mixture mineral filler criteria. And the optimal asphalt binder amount was determined to be 4.5% by Marshall design. Mineral filler content was determined at 3% and analyzed by comparing using mineral filler as stone powder. The basic physical property test of the asphalt mixture was evaluated to the provision indicated in "Production and Construction Guidelines for Asphalt Mixture" published by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport. In the test, Marshall stability test, dynamic immersion test, tensile strength ratio test, wheel tracking test were carried out. As a result of the experiment, Marshall stability and dynamic stability satisfied the standards, and confirmed the stability and Dynamic immersion and tensile strength ratio test that TDF Fly ash is more effective for scaling and moisture resistance than stone dust. Therefore, in this research, it is expected that multilateral utilization of TDF Fly ash, and a positive effect can be also expected.

**Key words** : TDF Fly ash, Mineral filler, Marshall stability, Dynamic immersion, Tensile strength ratio, Wheel tracking test

### 초 록

TDF (Tire derived fuel) Fly ash는 폐타이어를 발전소의 연료원으로써 사용하고 발생된 분말형태의 산업 부산물이다. TDF Fly ash는 현재까지 국내에서 사업장 폐기물로 분류되어 적절하게 활용되지 못하고 있다. 새로운 활용 방안 모색을 위해 TDF Fly ash를 아스팔트 혼합물용 채움재(Mineral filler)로써 적용하여 사용 가능성을 알아보는 아스팔트 혼합물 기초 물성 시험을 실시하였다. TDF Fly ash는 국내 KS F 3501의 아스팔트 혼합물 채움재 기준을 만족하였으며 마샬 배합설계를 진행하여 4.5%최적아스팔트함량을 결정하였다. 채움재 함량은 3%로 결정하였으며 채움재로써 석분을 사용하여 비교·분석 하였다. 아스팔트 혼합물 기초 물성 시험은 국토교통부에서 발간한 "아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침"에서 제시된 규정으로 평가하였다. 시험은 마샬안정도 시험, 동적수침 시험, 인장강도비 시험, 휠 트래킹 시험을 실시하였다. 실험결과, 마샬안정도와 동적안정도는 국토교통부에서 제시된 기준에 만족하여 안정성을 확인하였고 동적수침과 인장강도비 시험은 TDF Fly ash가 석분

\* 전북대학교 토목공학과 석사 (Chonbuk National University · chlalswn1746@naver.com)

\*\* 정회원·금호석유화학 중앙연구소 수석연구원 (Kumho Petrochemical R&BD Center · ceasare@kkpc.com)

\*\*\* 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · yongjook@kict.re.kr)

\*\*\*\* 중신회원·교신저자·전북대학교 토목공학과 방재연구센터 부교수

(Corresponding Author · Chonbuk National University · lee2012@jbnu.ac.kr)

Received December 5, 2016/ revised January 19, 2017/ accepted January 22, 2017

보다 박리저항성 및 수분저항성에 효과가 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 TDF Fly ash의 다각적 활용이 예상되며 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

**검색어** : TDF Fly ash, 아스팔트 혼합물, 채움재, 마찰안정도, 동적수침시험, 인장강도비 시험, 휠 트랙킹 시험

### 1. 서론

경제성장으로 인하여 국내 차량 등록대수도 천만대를 돌파하였으며, 도로를 주행하는 교통량도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 자동차 증가와 함께 발생하는 것이 바로 폐타이어 발생량이다. Table 1은 한국타이어산업협회에서 보고한 국내 폐타이어 발생량 추이를 나타내고 있다. Table 1에서 설명하고 있는 것과 같이 폐타이어량은 30만톤이상 발생하고 있다. 환경부에서는 2012년까지 폐기물 처리를 위한 에너지화 시설을 확충하고 ‘폐기물 관리법 시행령’ 개정을 통하여 폐기물 재활용을 적극적으로 확대·적용하려는 노력을 진행하고 있다. 또한, 폐기물을 에너지원으로 활용함으로써 재활용 및 재사용, 재생 이용 등으로 폐기물 재활용을 높이려고 있다. 국내에서도 폐타이어를 산업체 연료로 적용하고 있으며, 그 중 Tire Derived Fuel (TDF)가 사용되고 있다. Fig. 1은 미국 포틀랜드시멘트 협회에서 보고된 자료로 TDF를 연료로 사용하는 시멘트 공장 증가수를 나타내고 있다(PCA 2008). Fig. 2는 미국 내에서 2013년도 TDF 시장 현황을 나타내고 있다. Fig. 2에서 나타내고 있는 것과 같이 시멘트산업에서 많이 사용되고 있음을 알 수 있었다.

국내에서도 TDF를 산업체 연료로 사용되고 있으나, 이때 발생하는 ash는 재활용 되고 있지 않다. 석탄을 연료로 사용하는 경우 발생하는 Fly ash는 시멘트 대체재료 또는 아스팔트 혼합물용 채움재로 사용되고 있으나, 타이어를 연료로 사용할 때 발생하는 Fly ash는 현재 재활용되고 있지 못하다. TDF를 연료를 사용할 때 발생하는 Fly ash는 현재 국내에서는 친환경적인 처리 방법 및 재활용 관련 기준이 없어 폐기물 관리법에 의거하여 산업 폐기물로 분류되어 적정 처리되고 있다. 최근, 환경부의 “폐기물 관리법”

하위법령이 개정됨에 따라 TDF Fly ash는 폐기물 재활용 유형에서 ‘재생 이용할 수 있는 상태로 만들거나 재생 이용하는 활동’에

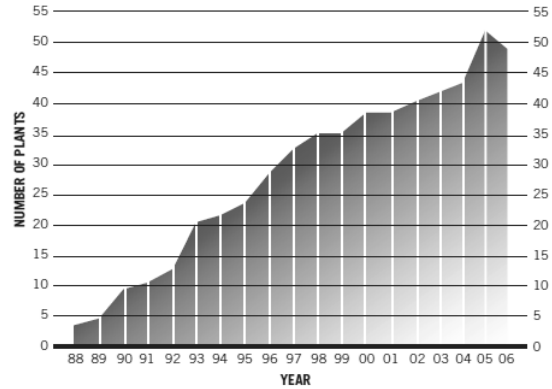


Fig. 1. U.S. Portland Cement Plants Utilizing Tire-derived Fuel (PCA, 2008)

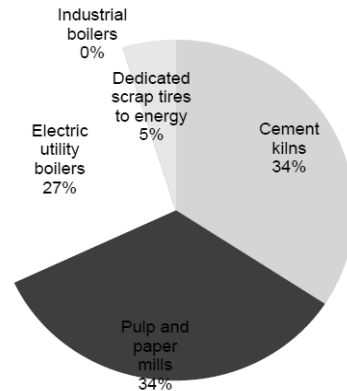


Fig. 2. 2013 Major TDF Markets (Gray, 2015)

Table 1. Trend of Amount of Wasted Tire by Route (KOTMA, 2016) (Unit : ton, %)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Change tire	249,749 (83.7)	253,170 (82.2)	235,701 (80.1)	260,233 (82.2)	245,300 (78.9)	244,013 (79.8)
Vehicle scrap tire	48,750 (16.3)	54,756 (17.8)	58,229 (19.9)	56,488 (17.8)	65,69 (21.1)	61,864 (20.2)
Total	298,499 (100)	307,926 (100)	293,930 (100)	316,71 (100)	310,991 (100)	305,877 (100)

- The amount of vehicle’s waste tire is calculated by multiplying the number of tires mounted on the number of scrapped vehicles per year  
 - Total wasted tire = Quantity of goods imported × 0.85 (Waste tire loss rate)

해당되어 R-4 (직접 재생 이용)의 시멘트, 콘크리트, 레미콘, 아스콘 및 아스팔트 등 기타 비금속광물 제품을 제조하는데 재활용할 수 있게 되었으며, ‘성토재, 복토재, 도로기층재 및 채움재 등으로 재활용하는 활동’으로 재활용이 가능하게 되어 향후 TDF Fly ash를 재활용 할 수 있는 활용처가 다양하게 확대 될 것으로 전망되고 있다(Choi et al., 2016). 이에 본 연구에서는 TDF Fly ash를 재활용 확대를 위하여 국내 아스팔트 혼합물 생산 시 사용되는 채움재로 TDF Fly ash 사용 적합성을 검토하기 위하여 TDF Fly ash 사용한 아스팔트 혼합물의 기초물성평가를 실시하여 적합성을 판단하고자 한다. 현재 국내에서 국토교통부에서 발간한 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”에서 정하고 있는 채움재 종류로는 석회석분, 소석회, 회수 더스트 등이 있으며, 채움재로의 품질기준을 정하고 있다(MLIT, 2015).

아스팔트 혼합물에서 채움재의 역할은 가열 아스팔트 혼합물의 골재 간 공극을 밀실하게 해주며, 아스팔트의 바인더로써 보조적인 역할을 수행하여 가열 아스팔트 혼합물의 안정성을 증가시킨다(Putman et al., 2012). 아스팔트 혼합물 채움재로 사용되는 재료들의 입도 특성과 TDF Fly ash의 입도가 유사하여 본 연구에서는 TDF Fly ash의 친환경적인 처리 방법, 새로운 제품으로써 순환자원의 발굴 및 재활용 기술 개발을 위해 TDF Fly ash를 가열 아스팔트 혼합물 채움재로써 활용성에 대한 기초 연구를 수행 하였으며, 이를 위해 현재 일반적으로 사용 되고 있는 석분을 채움재로 사용한 아스팔트 혼합물과 TDF Fly ash를 채움재로 사용한 아스팔트 혼합물의 물성을 비교 평가 하였다. 또한, 본 연구에서는 TDF Fly ash를 가열 아스팔트 혼합물에 채움재로써 사용하여 아스팔트 혼합물 배합설계를 통한 최적 아스팔트 함량 도출과 최적 아스팔트 함량을 사용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성, 간접인장강도 및 수분 저항성에 대하여 비교 분석하였다.

## 2. 문헌 고찰

해외에서 TDF 발생과 적용사례를 조사한 결과, 북 유럽에서는 연간 약 2억 5,000만개 이상의 페타이어가 발생하고 있으며, 약 30억 개 이상의 페타이어가 축적되어 있는 것으로 추정되고 있다. 페타이어를 재활용하지 못하고 매립에 의존하는 국가가 많으며 매립불가에 따른 처리방법에 대한 대책이 필요하다. 세계 최대의 자동차 생산국가 중에 한 나라인 미국에서는 연간 2억 7000만개 이상의 페타이어 발생하고 있으며 약 60% (2005년 기준) 정도가 보조 연료원으로 재활용되고 있다. 미국의 대다수의 주에서는 페타이어 처리 시장을 육성하고 있으며 페타이어 발생량 전부를 충분히 활용할 수 있는 시설이 마련되어 있다. 일본의 경우, 세계 자동차 생산량이 미국 다음으로 많은 나라로써 일본의 페타이어 발생량은

꾸준히 증가하고 있으며 페타이어 발생량이 많은 만큼 페타이어의 효율적인 처리와 재활용을 위해 노력하고 있다.

캐나다의 경우, 발생되는 페타이어의 약 20%만 연료로 사용되고 있다고 알려져 있으며 공정과정에서 배출되는 배기가스의 환경영향을 평가하는 연구가 수행되었다(Pegg et al., 2007).

미국 테네시 대학에서는 가열 아스팔트 혼합물의 채움재에 대한 수분 저항성 연구를 수행하였다. 가열 아스팔트 혼합물의 아스팔트 바인더와 골재간의 수분손상으로 인한 파손을 완화시키는 역할로 TDF Fly ash와 플라이애시, 시멘트, 소석회를 사용하여 IDT (indirect Tension Test), TSR (Tensile Strength Ratio) 통해 수분저항성을 평가하였다. TDF Fly ash를 사용한 경우, 모든 결과가 품질 기준을 만족하였으며 채움재를 사용하지 않은 가열 아스팔트 혼합물보다 더 우수한 결과를 얻었다. 그 중 수분저항성 향상으로 널리 사용하고 있는 소석회는 분말도를 증가시키기에 따라 수분저항성이 더욱 개선되는 효과가 보고되었다(Huang et al., 2010).

Chandra (2013)의 1인은 Fly ash, marble dust등 다양한 재료들을 아스팔트 혼합물 채움재로 사용성에 대한 연구를 수행하였으며, 아스팔트 혼합물 생산 시 채움재를 최대 7.5%까지 사용함에 따라서 아스팔트 혼합물의 성능을 개선할 수 있으며, 폐기물을 재활용할 수 있는 길이 있음을 확인하였다(Chandra et al., 2013).

이와 같은 사례로부터 가열 아스팔트 혼합물에 사용되는 다양한 종류의 채움재들은 입자 모양, 표면면적, 질감, 광물의 구성과 같은 채움재의 물리적인 특성 및 성분에 따라 가열 아스팔트 혼합물의 내부적인 성질에 영향을 미친다. 또한, 아스팔트 바인더와 골재의 공극을 채우고 작업성을 향상시키는 효과를 나타내어 채움재의 양과 가열 아스팔트 혼합물의 비율을 조절하면 채움재와 가열 아스팔트 혼합물의 최적의 성능을 이끌어낼 수 있고, 가열 아스팔트 혼합물의 강도 및 소성변형 저항성을 향상시킬 수 있다.

## 3. TDF Fly Ash 특성

본 연구에서 사용한 TDF Fly ash는 페타이어 고품연료인 TDF를 원료로 사용하기 위하여 30~50 mm크기로 잘린 페타이어 시편으로 다른 원료들과 함께 효율적으로 혼합 후 보일러의 연료원으로 사용할 때 발생하게 된다. 본 연구에서는 국내 K사에서 연료로 TDF를 사용할 때 발생하는 TDF Fly Ash를 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용한 TDF Fly ash를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에서 나타내고 있는 것과 같이 외형적인 색상은 진한 회색 또는 흑갈색을 띄고 있으며, Fig. 3(b)의 SEM (Scanning Electron Microscopy) 사진을 보면 크기가 다양한 구형 입자들로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 국내에서 아스팔트 혼합물의 채움재로 사용하기 위해서는 KS F 3501 기준에서 제시하는 채움재 입도 기준을

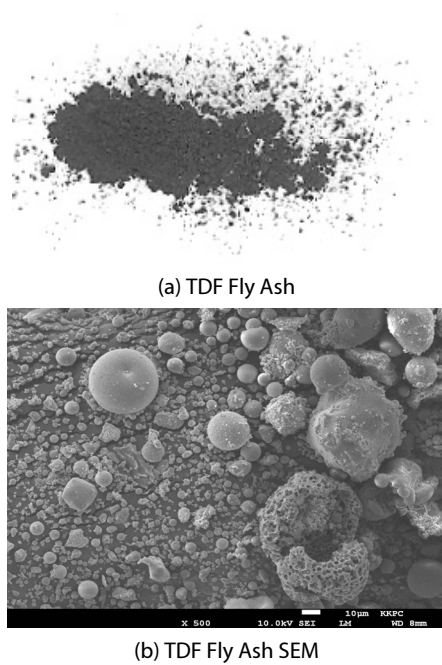


Fig. 3. TDF Fly Ash & Picture of SEM

Table 2. Gradation of Mineral Filler

Item		KS F 3501	TDF Fly ash	Stone dust
Sieve Size (%)	No. 30	100	100	100
	No. 50	95≤	100	100
	No. 100	90≤	95.5	93
	No. 200	70≤	73.5	78

만족해야한다. TDF Fly ash와 석분의 입도 기준을 확인해 본 결과 Table 2와 같으며 두 가지 채움재 모두 KS에서 제시하고 있는 입도 기준을 만족함을 알 수 있었다. Table 2는 KS F 3501에서 제시하고 있는 입도 기준과 본 연구에서 사용한 석분(Stone dust)과 TDF Fly ash의 입도 측정 결과를 나타내고 있다. Table 2에서 나타내고 있는 것과 같이 석분과 TDF Fly ash는 입도는 모두 기준에 만족 하는 것을 알 수 있었다.

Table 3은 TDF Fly ash와 석분의 화학조성을 나타내고 있다. TDF Fly ash의 화학 성분 중 CaO 성분은 간극수와 반응하여 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)을 생성하게 되고, 이 과정에서 방출되는 Ca<sup>2+</sup> 이온은 TDF Fly ash 성분에 포함된 규산염(SiO<sub>2</sub>)이나 알루

Table 3. Chemical Component of Mineral Filler

Material type	Chemical component							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	MgO
TDF Fly ash	25.4	4.03	36.4	5.59	0.57	0.76	3.21	-
Stone dust	2.89	0.71	95.1	-	-	0.97	-	0.28

민산염(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 반응하여 수화물을 생성하게 된다. 이러한 과정은 수화반응과정이며 수화반응을 보일 수 있는 성분들이 TDF Fly ash의 성분조성과 비슷하여 수분저항성에 좋은 영향을 보일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 TDF Fly ash의 수분에 대한 영향을 석분과 비교분석 하고자 한다.

#### 4. 실험방법

본 연구에서는 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침”의 표준용 WC-3의 골재입도에 만족한 아스팔트 플랜트에서 사용되는 부순돌을 사용하였다. 아스팔트 혼합물 제작에 사용한 아스팔트 바인더는 PG 64-22 (AP-5)를 사용하였다. 채움재 종류의 변화에 따른 아스팔트 바인더의 최적 함량을 도출하기 위하여 실내 마찰배합 설계를 실시하였으며, 최적 아스팔트 함량으로 제작된 아스팔트 혼합물은 마찰 다짐용 공시체로 제작하여 공용성을 평가하였다. 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침”에 준하여 마찰안정도 시험과 동적수침, TSR 실험, 휠트랙킹 시험을 통해 TDF Fly ash 채움재의 성능을 비교 평가하였다.

#### 4.1 배합설계

본 연구에서는 국내에서 주로 사용하고 있는 마찰 배합설계 방법으로 TDF Fly ash와 석분을 채움재로 사용하여 가열 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량을 선정하였다. 체가름 시험을 통하여 굵은 골재와 잔골재, 채움재의 골재별 입도 분포를 측정 후 합성입도를 결정하고 표준용 WC-3 입도범위에 만족하는 배합 비율을 선정하였다. 배합설계 결과 채움재의 비율은 3%로 결정되었다. Table 4와 같이 다짐 공시체 1개 당 골재 무게를 1200 g으로 결정한 후 아스팔트 함량 5.0%를 기준으로 ±0.5%씩 아스팔트 함량을 변화시키면서 다짐 공시체를 제작하였다. 다짐 횟수는 해당 포장에 요구되는 설계 교통량에 따라 등가단축하중(ESAL, Equivalent Single Axle Load) > 10<sup>6</sup>일 때 양면 75회, 등가단축하중(ESAL) < 10<sup>6</sup>일 때 양면 50회를 적용한다. 본 연구에서는 표준용 WC-3를 적용하여 등가단축하중(ESAL) > 10<sup>6</sup>로 설계하여 양면 75회로 마찰 다짐을 실시하였다. 공시체는 각각의 아스팔트 바인더 함량별로 3개씩 제작하여 평가하였다(MLIT, 2015).

Table 4. Mix Design Information

Type	Weight (g)				
	Aggregate content (%)	Asphalt content (%)			
		4.0	4.5	5.0	5.5
20 mm	24	276.5	275.0	273.6	272.2
13 mm	43	495.4	492.8	490.2	487.6
Fine aggregate	30	345.6	343.8	342.0	340.2
Mineral filler	3	34.6	34.4	34.2	34.0
Aggregate weight (g)	-	1152	1146	1140	1134
Asphalt binder weight (g)	-	48	54	60	66
Total weight (g)	100	1200	1200	1200	1200

### 4.2 마샬안정도 측정

마샬안정도 시험은 아스팔트 혼합물의 기초 물성을 측정하는 시험방법이며 널리 사용된다. 아스팔트 혼합물의 배합설계와 품질 관리를 목적으로 하며 마샬안정도 측정은 국내 KS F 2337의 마샬 시험방법을 적용하였다. 60°C의 온도조건에 수침시켜 공시체의 소성흐름에 대한 최대 저항력과 흐름값을 측정하는 시험이다. 마샬 안정도는 Fig. 4의 장비로 그림과 같이 측정하였고 실험은 공시체를 60°C 수조에 30분간 수침시킨 후, 꺼내어 50.0mm/분의 속도로 하중을 재하 하여 측정하였다.

### 4.3 이론최대밀도

가열 아스팔트 혼합물의 이론최대밀도는 추정 아스팔트 함량을 실제 측정하여 결정한다. 이론최대밀도 시험은 골재와 아스팔트 바인더를 혼합한 혼합물의 상태에서 공극이 전혀 없을 경우를 가정한 밀도이다. 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 시 공극률을 결정하기 위해 사용된다. Table 4의 아스팔트 바인더 함량별 이론최대밀도를 구했으며, 아스팔트 바인더 함량별로 TDF Fly ash와 석분의 이론최대밀도를 측정한 결과는 다음 Table 5와 같다. 가열 아스팔트 혼합물 이론최대밀도는 KS F 2366 방법에 따라 평균값을 사용하였다.



Fig. 4. Measurement of Marshall Stability

Table 5. Theoretical Maximum Gravity

Asphalt content		4.5	5.0	5.5
Theoretical maximum specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	TDF Fly ash	2.500	2.482	2.463
	Stone dust	2.505	2.487	2.470

### 4.4 최적 아스팔트 함량 결정

공시체의 공기 중 무게, 수중무게, 표면건조포화상태의 무게를 측정하여 실측밀도를 구할 수 있으며, 위의 Table 5의 이론최대밀도 값을 통하여 공극률을 구하여 골재간극률 및 포화도와의 관계로 최적의 아스팔트 함량을 결정해야한다. 아스팔트 혼합물에서 아스팔트의 양을 조절하는 것은 경제성과 안정성의 측면에서 매우 중요하기 때문에 설계자는 아스팔트 함량과 혼합물의 특성을 잘 파악하여 최적 아스팔트 함량을 결정해야 한다. 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침”에서 제시한 기준은 Table 6과 같으며 일반적으로 공극률이 4±0.3%에 해당하는 아스팔트 바인더의 함량을 권장하고 있다(MLIT, 2015).

본 연구에서는 공극률 4%에 해당하는 최적아스팔트 함량이 TDF Fly ash는 4.5 %로 나타났으며 석분은 4.6%로 결정되었다. 또한 Table 6과 같이 마샬 안정도, 흐름값, 포화도, 골재간극률은 설계기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

Table 6. Optimum Asphalt Content

Item	Criteria	Value		Note
		TDF Fly ash	Stone dust	
Air void (%)	3~6	4.1	4.2	Pass
Stability (N)	7500 ≤	13,450	14,498	Pass
Flow (1/100 cm)	20~40	28.99	25.17	Pass
Saturation (%)	65~80	71.51	71	Pass
VMA (%)	13 ≤	14.59	15	Pass
Optimal asphalt content (%)		4.5	4.6	-

#### 4.5 인장강도비 측정

아스팔트 혼합물에서 사용되는 골재와 아스팔트간의 상호작용은 아스팔트 포장 시공 후에 발생하는 복합적인 물리·화학적 과정이다. 우수나 장마철시기에 아스팔트 내에 수분이 침투하고 차량의 반복적인 교통하중이 작용하면 도로포장에서 포트홀과 박리(습기로 유발된 손상)현상과 같은 결함 및 파손 현상이 발생한다. 혼합물 속의 골재 표면과 아스팔트 사이에 존재하는 수분으로 인하여 결합력이 약화되는 것이다. 즉, 골재 표면과 아스팔트간의 분리가 발생된다. 이것은 수분에 대한 영향 때문인 것으로 알려져 있다. 아스팔트 혼합물의 강도는 아스팔트와 골재간의 점착력과 아스팔트 혼합물의 90%이상을 차지하는 골재 입자간의 맞물림, 그리고 아스팔트 혼합물 내부의 상호작용 등으로 결정된다. 박리 현상은 혼합물의 이용형태, 아스팔트 및 골재의 특성, 주변 환경, 교통량, 시공조건, 박리 방지제(Antistripping Additive)의 사용 등과 같은 많은 변수들에 의해 좌우되지만 수분은 모든 박리 문제에 있어서 공통적인 요소이다.

수분 민감성 시험으로는 미국의 수분 민감성 시험 AASHTO T 283이 개발되었으며, 국내에서는 KS F 2398에 규정되어 있어, 본 연구에서는 국내 KS F 2398에 규정된 아스팔트 혼합물의 수분저항성 시험방법에 따른 인장강도비(TSR) 시험을 적용하였다. 수분 민감성 시험은 아스팔트 혼합물 공시체의 공극률을  $7\pm 0.5\%$ 가 되도록 다짐횟수를 조절하여 공시체를 제작하며, 제작된 공시체는 60°C 온도의 수조에 24시간 수침시킨 뒤 25°C에서 2시간 수침을 진행한 수분처리 공시체와 25°C의 수조에 2시간 물에 접촉하지 않도록 한 무처리 공시체로 인장강도를 각각 측정하여 두 값 사이의 비를 수분민감도(TSR)로 사용하였다. TSR은 다음 Eq. (1)을 활용하여 계산한다.

$$TSR (\text{Tensile Strength Ratio}) = \quad (1)$$

$$\frac{\text{수분 처리한 공시체의 간접인장강도}}{\text{무 처리 공시체의 간접인장강도}} \times 100$$

#### 4.6 동적 수침 시험

동적수침 시험은 아스팔트 바인더와 골재간의 점착력을 평가하기 위한 방법으로써 유럽기준인 EN 12697-11 (Determination of the affinity between aggregate and bitumen)에서 제시한 방법을 사용하였다. 동적 수침시험 시 사용을 위한 골재의 입지는 8.0~11.2 mm크기의 건조하고 깨끗한 것으로 준비하고, 일정량의 아스팔트와 혼합한다. 혼합된 아스팔트 혼합물은 실온에서 12~64 시간 동안 금속판 또는 실리콘 종이 위에 놓은 아스팔트 피복 재료를 상온에서 오염된 물질에 노출 없이 양생시킨다. Fig. 5는 동적수침용 시험 장비이며 동적수침용 유리병을 거치시킨 모습이

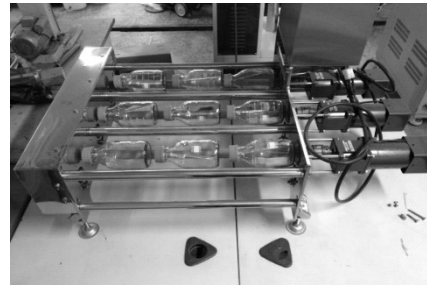


Fig. 5. Bottle Rolling Machine



Fig. 6. Coverage Ratio 20%



Fig. 7. Coverage Ratio 50%

다. 혼합물을 양생 후 아스팔트로 피복된 골재를 물과 함께 동적수침용 유리병에 넣는다. 아스팔트 혼합물이 들어 있는 유리병은 회전하게 되며, 회전하는 동안 유리병 안에 대각선으로 위치한 유리막대 (Glass Rod)의 동적인 마찰에 의해서 아스팔트 바인더의 피복이 벗겨진다. 본 시험은 24시간 동안 계속되어지며, 피복의 정도는 육안 평가를 통하여 진행된다. Fig. 6은 피복정도 20%일 때의 시편의 모습이며 Fig. 7은 채움재 비율 4%일 때 피복정도 50%인 시편의 모습이다.

#### 4.7 휠 트랙킹 시험

휠 트랙킹 시험은 여름철과 같은 고온의 포장조건 하에 실제 차량하중이 통과함에 따라 발생하기 쉬운 소성변형을 실내에 재현하여 평가하는 시험방법이다. 바퀴의 반복주행으로 인한 패임 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 동적안정도를 결정하고 있다. 도로가 차량으로 인한 교통하중을 받을 경우, 아스팔트혼합물이 이동하여 소성변형이 발생하고 영구 변형된다. 특히, 차량이

서서히 주행하거나 정차를 하게 되는 교차로에서 많이 발생한다. 이에 소성변형을 예측하기 위하여 현장거동을 실내에서 재현하는 아스팔트 혼합물의 반복주행(Wheel Tracking)시험이 널리 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 규정 KS F 2374의 휠트래킹 시험 방법을 적용하였다. 소성변형의 저항성 평가에 필요한 동적안정도는 재하 주행속도가 분당 42회 일 때 60분과, 45분 변형량으로 아래 Eq. (2)를 통하여 계산된다. 공시체는 실내에서 제작한 혼합물로 가로 30 cm 세로 30 cm 높이 5 cm인 공시체를 공극률 약 4±0.5%로 맞추어 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 60°C에서 휠트래킹 시험을 실시하며 60분(2520회) 까지 침하 깊이를 측정하여 기록한다. 휠트래킹 실험은 Fig. 8과 같이 진행되며 Fig. 9는 휠트래킹 실험에서 사용한 시편이다.

$$DS = \frac{N15}{d60 - d45} \quad (2)$$

DS Dynamic Stability. passes/mm

N15 : Loading passes in 15 minutes, passes

d60 : Rut depth at the 60 minute, mm and

d45 : Rut depth at the 45 minute, mm



Fig. 8. Wheel Tracking Machine

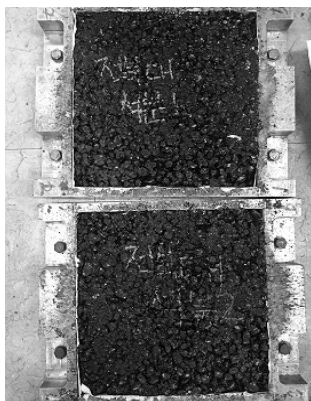


Fig. 9. Wheel Tracking Specimen

## 5. 실험 결과

### 5.1 마샬안정도 시험 결과

아스팔트 콘크리트의 소성흐름에 저항 할 수 있는 최대 저항력과 변형값을 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 배합설계와 품질관리를 위하여 널리 사용되는 마샬안정도를 TDF Fly ash를 채움재로 사용한 아스팔트 혼합물에 대하여 측정을 하였다. 또한 비교군으로 석분을 사용한 경우도 동시에 측정였으며, Fig. 10과 같은 결과가 도출되었다. 석분과 TDF Fly ash의 마샬안정도 측정값을 비교한 결과 석분을 사용한 아스팔트 혼합물이 다소 높은 값이 도출됨을 알 수 있었다. 하지만, TDF Fly ash를 사용한 아스팔트 혼합물의 경우도, 국토교통부에서 발간한 아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침에서 제시하고 있는 기준(7,500 N 이상)에 만족하는 결과를 나타내었다. 이는 TDF Fly ash를 아스팔트 혼합물 채움재로 사용하여도 품질관리기준을 만족하여 채움재로 사용이 가능하다고 판단된다.

### 5.2 인장강도비 시험 결과

인장강도비 시험은 수분으로 인한 아스팔트 혼합물의 내구성을 평가하기 위한 방법이다. 인장강도비는 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공”에서 제시한 평가기준으로 0.8이상의 값으로 규정하고 있는데 TDF Fly ash는 Fig. 11에서와 같이 0.82의 값을 나타내어 기준값에 만족함을 보였다. Fig. 11에서 석분과 TDF Fly ash의 인장강도비 결과를 비교한 결과 TDF Fly ash가 석분보다 수분저항성이 큰 것으로 나타났으며 이는 TDF Fly ash의 구성

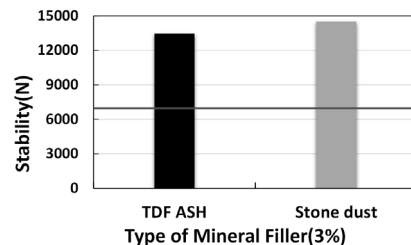


Fig. 10. Marshall Stability

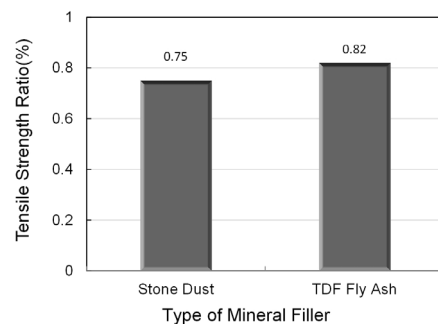


Fig. 11. Tensile Strength Ratio

성분중 CaO 성분이 간극수와 반응하여  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과  $\text{Ca}^{2+}$  이온이 생성되고 TDF ash 성분 내의 규산염, 알루미늄산염과 반응하여 수화물을 생성 시키는 수화반응으로 인하여 수분저항성이 향상된 것으로 판단된다.

### 5.3 동적수침 시험 결과

Fig. 12는 동적 수침 시험결과를 설명하고 있다. Fig. 12는 TDF Fly ash와 석분을 채움재로 활용 하였을 때 아스팔트 혼합물의 동적수침에 의한 골재의 피복과 무게 손실량을 측정된 결과를 나타내고 있다. TDF Fly ash를 아스팔트 혼합물 채움재로써 사용한 경우 석분을 사용한 경우보다 피복정도가 더 좋은 결과를 보였으며 석분의 경우 채움재 비율 4%의 경우 피복정도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 TDF Fly ash 채움재 입도의 크기가 다양하고 구형의 입자들이 많아 아스팔트와의 결합력이 석분을 사용한 경우보다 향상된 것으로 판단된다. 무게 손실을 또한 석분을 사용한 경우보다 TDF Fly ash가 손실이 더 적었으며 종합적으로 TDF Fly ash가 석분을 사용한 혼합물보다 박리저항성이 더 우수한 결과를 얻었다.

### 5.4 휠 트랙킹 시험 결과

차량하중에 의한 아스팔트의 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 휠 트랙킹 시험을 통하여 소성변형(Rut depth)과 동적안정도를 측정하였으며, 그 결과는 Figs. 13 and 14와 같다. Fig. 13은 시간에 따른 소성변형 깊이를 측정하였으며, TDF Fly ash를 사용한 아스팔트 혼합물이 소성변형이 석분을 사용하는 것보다 다소 높게 발생함을 알 수 있었다. Fig. 14는 동적안정도와 최종 Rut Depth를 나타내고 있다. Fig. 14에서 나타내고 있는 동적안정도는 5,000 이상으로 국토교통부에서 발간한 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”에서 규정하고 있는 기준인 750 (회/mm)을 초과하는 값이 측정하였다. 이는 소성변형 저항성이 충분히 확보됨을 의미한다.

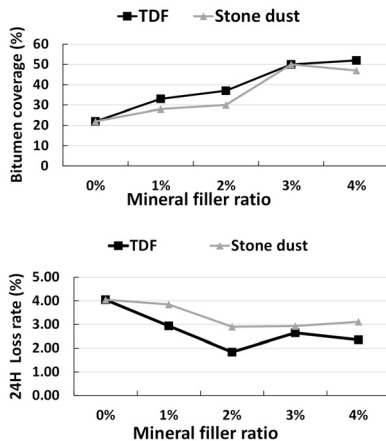


Fig. 12. Result of Dynamic Water Immersion

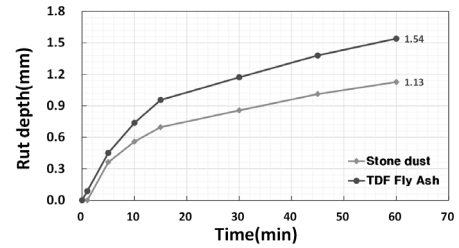


Fig. 13. Measurement of Rut Depth as Function of Elapsed Time

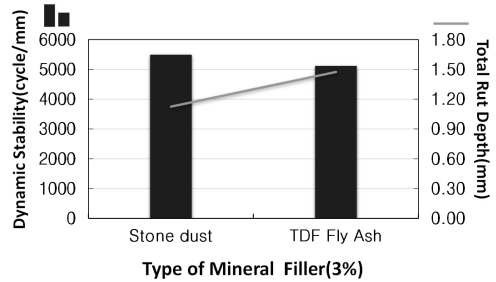


Fig. 14. Measurement of Rut Depth as Function of Elapsed Time

## 6. 결론

본 연구에서는 TDF Fly ash를 아스팔트 혼합물용 채움재로 이용하기 위한 가능성을 평가하기 위하여 배합설계를 통하여 결정된 3%의 TDF Fly ash를 사용하였다. 아스팔트 혼합물의 공용성을 평가하기 위하여 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침의 기준”에 적합성을 검토하였고 다음과 같은 결론들이 도출되었다.

- (1) TDF Fly ash 채움재를 사용한 아스팔트 혼합물의 마찰안정도 실험값이 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”의 기준 범위에 만족함을 확인하였다.
- (2) 동적수침 시험 결과, TDF Fly ash를 사용한 아스팔트 혼합물의 피복정도가 채움재 비율이 4%까지 증가함에 따라 석분을 사용한 경우보다 채움재 비율 3%경우를 제외 하고 피복정도가 약 5%이상 높은 값을 확인하였다. 따라서 TDF Fly ash가 석분보다 우수한 박리저항성을 가진 것을 확인하였고 이는 TDF ash의 구형입자가 아스팔트와 골재 사이에서 균일한 결합력을 발휘함에 따라 박리저항성이 개선된 것으로 판단된다.
- (3) 아스팔트 혼합물의 수분민감도(TSR) 측정 결과, TDF Fly ash를 첨가한 아스팔트 혼합물은 TSR KS F 2398기준인 0.8을 만족하는 값을 보였다. 석분을 사용한 경우와 비교하여 더 높은 값이 측정되어 Tdf Fly ash의 수화물 생성으로 인하여 강도가 발현된 것으로 판단된다. 이는 TDF Fly ash가 아스팔트 혼합물 채움재로 사용할 경우 수분저항성에 효과가 있는 것으로 보여진다.



- (4) 휠 트래킹 시험을 통하여 TDF Fly ash와 석분의 동적안정도를 평가한 결과 TDF Fly ash가 석분보다 총 변형량은 0.41 mm 많이 변형되었고 동적안정도는 300 (회/mm)더 낮은 값을 나타내었지만 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”에 규정된 기준 750 (회/mm) 값보다 훨씬 높은 3,932 (회/mm)의 값으로 만족하여 소성변형 저항성을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술사업화 지원사업인 “주행차량 중량측정을 위한 매트릭스 WIM 센서 시스템 실용화 연구”의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

## References

- Putman, B. J. and Kline, L. C. (2012). “Comparison of mix design methods for porous asphalt mixtures.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, No. 11, pp. 1359-1367.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2015). *Guide of Production and Construction of Asphalt mixture* (in Korean).
- Choi, M. J., Lee, J. J. and Kim, H. J. (2016). “Evaluation of properties of asphalt concrete that uses TDF ash as mineral filler.” *Int. J. Highw. Eng.*, Vol. 18, No. 4, pp.95-107.
- Korea Tire Manufacturers Association (KOTMA) (2016). Available at : [http://kotma.or.kr/m4\\_epr/page09.asp](http://kotma.or.kr/m4_epr/page09.asp) (Accessed : Oct 15, 2016).
- Pegg, M. J., Amyotte, P. R., Cumming, F. M., Crysta, R. R. and Poushay, J. (2007). “An assessment of the use of tires as an alternative.” Full, Final Report, *Minister of Environment and Labour Nova Scotia*, Canada.
- Portland Cement Association (PCA) (2008). *Portland Cement Association Sustainable Manufacturing Fact Sheet, Tire-Derived Fuel*.
- Gray, T. (2015). “Tire derived fuel - Past, present and future.”, *Colorado's 2015 waste Tire Conference*, Denver, Colorado, U.S.A.
- Chandra, S. and Choudhary, R. (2013). “Performance characteristics of bituminous concrete with industrial wastes as filler.” *Journal of Materials of Civil Engineering*, Vol. 25, No. 11.
- Huang, B., Shu, X., Dong, Q. and Shen, J. (2010). “Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp.667-673.