

샷크리트의 강도 특성과 분사압력에 대한 리바운드율 연구

전준태* · 문인기** · 이양규***

Jeon, Jun Tai*, Moon, In Gi**, Lee, Yang Kyu***

A Study on the Strength Characteristics and Rebound Ratio with Respect to Injection Pressure of Shotcrete

ABSTRACT

Steel Fiber Reinforced Wet-type Shotcrete improves the quality and stabilizes the tunnel by increasing the shear strength of the natural ground by constructing the concrete which attaches the fresh concrete to the predetermined position from the nozzle. The Steel Fiber Reinforced Wet-type Shotcrete improves and reinforces the strength and dynamic behavior characteristics of concrete to suppress the generation and growth of local cracks by increasing the tensile resistance ability. In addition, Steel Fiber Reinforced Wet-type Shotcrete is a shotcrete that improves tensile strength, bending strength, and crack resistance by dispersing discontinuous short steel fibers evenly in concrete. In this study, compressive strength test and bending strength test of shotcrete of NATM tunnel were measured and rebound reduction rate was measured by varying shotcrete putting pressure to 900 RPM, 1,000 RPM, and 1,100 RPM. Therefore, the data that can be applied to domestic NATM tunnel construction are presented.

Key words : Steel fiber reinforced wet-type shotcrete, Rebound rate, Structural behaviour, Injection pressure

초록

강섬유 습식Shotcrete는 굳지 않은 콘크리트를 노즐로부터 소정의 위치에 부착시키는 콘크리트를 시공함으로써 원지반 자체의 전단강도를 증가시켜 품질을 향상시키고 터널의 안정화를 도모한다. 강섬유 습식Shotcrete는 인장 저항능력을 증대시킴으로써 국부적인 균열의 생성·성장을 억제하는 콘크리트의 강도와 역학적 거동 특성을 개선 및 보강한다. 또한, 강섬유 습식Shotcrete는 불연속의 짧은 강섬유를 콘크리트 속에 균등하게 분산시켜 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성 등을 개선한 Shotcrete이다. 이 연구에서는 NATM 터널의 샷크리트에 대한 압축강도 시험과 휨강도 시험을 실시하고 샷크리트타설 압력을 900 RPM, 1,000 RPM, 1,100 RPM으로 변화시켜 리바운드 감소를 측정하였다. 따라서 국내 NATM 터널공사에 적용할 수 있는 자료를 제시하였다.

검색어 : 강섬유 습식Shotcrete, 리바운드율, 역학적 거동, 분사압력

1. 서론

1.1 목적

터널 굴착 후 주변지반의 역학적 거동이 지보재에 하중을 유발함에 따라서 재래식 터널공법은 굴착 후 주변지반의 상태에 따라 발생하는 하중을 지보재가 전부 부담하는 이론에 기초로 하는 반면에 NATM (New Austrian Tunneling Method) 터널공법은 암반역학의

* 종신회원 · 인하공업전문대학 토목환경과 정교수, 공학박사 (Inha Technical College · jtjeon@inhac.ac.kr)

** 정회원 · 두한종합건설(주) 부사장, 공학박사 (Doo Han Construction · mooningi@naver.com)

*** 종신회원 · 교신저자 · 대림대학교 토목환경공학과 정교수, 공학박사 (Corresponding Author · Daelim University College · yklee@daelim.ac.kr)

Received October 30, 2018/ revised November 16, 2018/ accepted November 22, 2018

발전으로 주변지반의 역학적 거동에 따라 지반자체의 지보능력을 최대한 활용하여 굴착 후의 안정상태를 이룰 수 있도록 하고, 지보재는 보조수단으로 활용하는 대표적인 터널굴착공법이다. 또한 터널을 굴착할 때 응력과 변형의 관계는 시간함수로서 탄성영역 → 강도약화영역 → 이완영역으로 진행되며, 굴착면에 발생하는 압력은 지보로서 대처하며 탄성영역 내 기간 내에 Rock와 shotcrete를 시공함으로써 원지반 자체의 전단강도를 증가시켜 품질을 향상시키고, 계측을 이용하여 정확한 평형상태를 유도하여 터널의 안정화를 도모한다(Gyungbu High Speed Railroad, 2001(a); Kwon, 2000).

그러나 shotcrete타설 중 목적물에 부착되지 않고 리바운드량이 많이 발생함으로써 재료비, 배합, 타설시간 증가, 재료의 취급과 계량장치에 소요되는 인력 및 버력제거 등에 공사비 원가에 많은 영향을 주고 있다(Ahn, 1993; Korea Water Resources Corporation, 1993; Seoul Subway Corporation, 1983). 이 연구는 NATM 터널 일반 및 강섬유shotcrete에 대한 압축강도, 휨강도를 실시하고 shotcrete타설 압력을 900 RPM, 1,000 RPM, 1,100 RPM으로 실시하여 적정압력으로부터 리바운드 감소율을 제시함으로써 앞으로 국내 NATM 터널공사 시공에 유용한 자료를 제시하였다.

1.2 연구방법 및 범위

이 연구는 일반 습식shotcrete와 강섬유 습식shotcrete 시험결과로부터 압축강도, 휨강도시험을 실시하였다. 시험결과로부터 습식 shotcrete 리바운드율을 측정하기 위해 A공구 시료 1, 시료 2, 시료 3의 배합비 및 시료의 총중량은 동일조건하고 시료 1번 압력은 900 RPM, 시료 2번은 1000 RPM, 시료 3번은 1100 RPM으로 각각 다르게 시험을 실시하고자 한다. 시험결과로부터 shotcrete 리바운드율을 줄일 수 있는 적정압력(RPM)을 제시함으로써 shotcrete타설 시 시공기간이 문제가 되는 NATM 터널 건설공사에 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 이론적 고찰

2.1 NATM공법의 특성

2.1.1 설계상 특징

굴착 후 조기에 shotcrete를 원지반에 밀착 시공함으로써 풍화나 열화에 따른 원지반의 느슨함을 최소화하여 억제하며, 원지반 내에 Rock를 타설함으로써 틈이나 균열에 따른 위험한 움직임이나 전단면의 형성을 방지할 수 있다. shotcrete나 Rock Bolt를 시공함으로써 원지반의 내벽면에 구속압을 줌으로써 원지반의 항복내력을 증가시킨다. 또한 shotcrete, Rock Bolt, 경량의 지보재 등을 조합한 비교적 변형되기 쉬운 1차복공을 함으로써 원지반의 변형을 일부 허용하며 원지반의 지보능력을 최대한으로 발휘할 수 있으며, 토피가 많고 원지반이 불량할 때는 가변지보공을 사용하여 원지반의 변형을 다소 허용하여 큰 응력을 해방시킴에 따라 작은 지보로 터널을 안정하게 억제할 수 있다(Gyungbu High Speed Railroad, 2001a; Korea Concrete Institute, 2009).

2.1.2 시공상 특징

지질조건이 변화하면 막장은 분할굴착 시공하고 후방에서는 전단면을 정리하면서 얇은 shotcrete만 시행하며, 2차복공은 최후에 시공하고, 주요한 지보는 shotcrete와 록볼트로 지질에 따라 시공기간, 두께, 길이 등을 변경할 수 있으므로 지질변화에 대한 계측관리가 중요한 요소를 차지하고 있다. 그리고 용수량이 많은 지반, 유사현상을 일으키는 원지반, 록볼트의 정착이 어려운 지역, 막장이 자립할 수 없는 지반 등은 NATM 적용을 어렵게 하고 있다(Gyungbu High Speed Railroad, 2001a; Korea Water Resources Corporation, 1993).

2.1.3 건-습식shotcrete 타설공법

shotcrete의 배합은 압축된 shotcrete에 대하여 골재함량을 보정

Table 1. Comparison of Dry and Wet Shotcrete

Division	Dry System	Wet System
Advantage	<ul style="list-style-type: none"> - The initial investment is low. - Easy to clean after work. - Easy installation and operation of equipment. - Low water/cement ratio construction - Possible of abort work 	<ul style="list-style-type: none"> - Less rebound (less than 15 %). - Almost no dust. - The capacity of the compressor is low. - The remote control is not restricted by the operator's work. - Good quality shotcrete can be constructed - Less consumables. - Less work (2~3 people).
Disadvantage	<ul style="list-style-type: none"> - It is difficult to work with high quality shotcrete. - We need 7~8 workers. - There is a lot of rebound (more than 40 %). - It's dusty. - A lot of consumable parts are needed. - Compressor capacity is large. 	<ul style="list-style-type: none"> - High initial investment - Careful cleaning after cleaning is necessary. - Be careful with installation and operation. - It's hard to stop work. - Concrete transport is limited. - There is an operator's work limit in manual work.

하면서 일반 배합설계법에 의하여 실시할 수 있으며, 배합설계법에서 굵은 골재 함유량은 높을 수 있으나 일반적으로 타설에는 최대함유량을 사용하여야 한다. 또한 습식숫크리트의 슬럼프는 일반펌프에 사용 가능한 최소치 되도록 4-7.5 cm 범위가 적합하고, 습식배합 숫크리트의 공기량은 전체공기의 5-8 % 정도의 범위가 좋다. 그리고 일반 습식숫크리트 및 강섬유숫크리트 리바운드율은 10~20 % 범위로 시방서에 명기하고 있으며(Gyungbu High Speed Railroad, 2001a; Korea Water Resources Corporation, 1993; Kwon, 2000), 간: 습식숫크리트를 비교하면 Table 1과 같다.

2.2 타설장비

숫크리트 타설장비는 시험시공 시 사용한 장비를 사용해야 하며, 장비를 변경하고자 할 경우는 감독자·건설사업관리자의 승인을 받아야 하며 타설장비는 내압에 대한 안전성, 내구성, 기계적 특성, 현장여건에 적합해야 한다. 또한 배합재료를 연속하여 압송할 수 있어야 하며, 타설기계는 굴착면 인접부까지 접근이 가능해야 하고, 충분한 기능을 발휘할 수 있어야 한다(Gyungbu High Speed Railroad, 2001b; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2014).

2.2.1 숫크리트의 타설

숫크리트 작업 시 노즐선정은 시공의 정확성과 효율성을 고려한 장비를 선택하여 사용하며 노즐의 방향은 숫크리트 면에 직각이 되도록 하고, 노즐과 타설부위의 거리는 0.75~1.25 m 정도이나, 1.0 m일 때 리바운드량이 최소가 되므로 이 거리를 사용한다. 또한 습식숫크리트의 압송압력은 노즐선단에서 0.2~0.5 MPa 내외가 양호하며, 굴착위치에 따른 리바운드율 및 노즐과의 거리에 따른 리바운드율은 Fig. 1과 같다. 그리고 1회 숫크리트타설 두께는 5 cm 이내이며, 숫크리트시공은 측벽은 아래에서 위쪽으로 천장은 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝으로 연속하여 타설시공 한다(Kwon, 2001; Lee, Jeon and Kim, 2004; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2014).

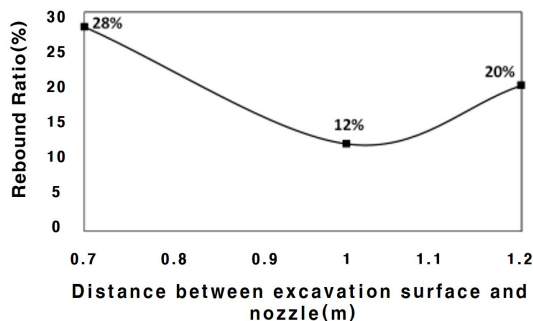


Fig. 1. Rebound Ratio According to Nozzle Distance

3. 숫크리트의 재료배합과 시공

3.1 숫크리트 일반

숫크리트에 작용하는 외력을 지반에 분산시키고 터널주변의 떨어지기 쉬운 바윗덩어리를 지지하며, 굴착면 가까이에 지반아치가 형성될 수 있도록 하여야 한다. 강지보재, 록볼트에 지반압을 전달하는 기능을 발휘하도록 연속적으로 타설하여야 하며, 굴착된 지반의 굴곡부(flexures)를 채우고 틈 사이를 접촉시켜 응력집중현상을 피하도록 한다. 또한 굴착면을 피복(coating)함으로써 풍화, 누수 및 세립자 유출 등을 방지할 수 있다. 그리고 숫크리트공법 선정은 터널연장, 굴착단면크기, 굴착방법, 용출수, 작업효율, 품질관리, 작업환경 및 공해, 리바운드량 등을 고려하여 선정하여야 하며, 숫크리트는 일반숫크리트와 고강도숫크리트로 구분하여 숫크리트의 설치목적에 맞게 성능과 품질을 확보해야 한다. 실제 벽면에 타설된 강섬유혼입량은 30 kg/m³ 이상이 되며, 설계휨강도와 휨인성을 만족해야 한다. 이때 재령 28일의 강섬유보강 휨강도는 4.5 MPa 이상, 휨인성 등가휨강도는 3.0 MPa 이상으로 한다(Gyungbu High Speed Railroad, 2001a; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2014).

3.2 숫크리트 배합

굵은 골재, 잔골재의 규격 및 입도기준과 재료별 배합비율은 설계시방배합에 따라서 현장 배합시험 결과에 따라 조절 한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2014). 재료별 배합은 중량배합으로 해야 하며, 습식방식은 급결제 첨가전의 숫크리트용 시멘트는 굵은 골재 최대치수, 슬럼프 및 배합강도를 정하며 숫크리트용 시멘트를 펌프로 압송할 경우 슬럼프는 120 mm 이상으로 한다. 또한 숫크리트시공 전에 공사에 사용할 동일한 재료로 현장 시험배합하여 숫크리트 시험시공을 하며, 시험결과 설계도 및 공사시방서에 명시된 소요강도 이상까지 반복 시험시공을 한다(Gyungbu High Speed Railroad, 2001b). 그리고 시공자는 숫크리트 시험시공 성과에 따라 급결제를 선정하고, 숫크리트시공 전에 시험성과에 따라 현장배합, 사용골재의 입도분포, 급결제, 사용장비, 숫크리트시공법 등의 시험성과서를 작성하여 감독자·건설사업관리자의 승인을 받아야 한다.

3.3 골재

숫크리트에 배합설계에 사용되는 일반적인 잔골재율(S/a)은 55~75 % 범위 내에 있어야 한다. 조립률 2.5~3.3 정도이며, 0.2 mm 이하의 미분의 첨가는 시공면에 잘 부착되도록 하고, 리바운드도 적어 비교적 두꺼운 층의 시공은 가능하지만 미분이 많으면 물의 소요량이 많아 건조수축량을 증대시키고 시공기계 내부나

호스 내부에서 막힘을 가져온다(Jeon et al., 2012; Korea Concrete Institute, 2009).

습식-shotcrete공법인 경우 표면수량은 3~5 % 정도가 적당하며, 7 %가 넘으면 -crete타설 전에 시멘트와 수화작용이 시작되고, 특히 분말형 급결제를 사용하는 경우에는 시멘트와 급결제가 반응을 시작하여 호스폐쇄 및 사고의 원인이 되므로 굵은 골재 최대치수는 최종 시험시공에서 리바운드율과 노즐의 지름을 고려하여 결정하여야 하며, 19 mm 이하 또는 노즐지름의 1/3 이하이어야 한다 (Korea Concrete Institute, 2009). 실제 NATM공법은 굵은 골재 10~15 mm 범위이며, 이 연구에서는 13 mm를 사용하였다.

3.4 현장 품질관리

-crete는 설계기준강도가 발휘되어야 하며, 리바운드율을 적게 하고, 양호한 작업성을 가지도록 관리하여야 한다. 또한 현장 코어채취로부터 압축강도 및 강섬유 보강-shotcrete의 시험은 1회 시험당 3개의 시료를 채취하고, 채취한 시료의 시험강도는 설계강도의 75 % 보다 커야 하며, 산술평균강도는 설계강도의 85% 이상으로 한다. 또한 시료를 성형은 3개의 시험결과 중 2개는 설계강도 이상으로 하며, 나머지 1개는 설계강도의 85 % 보다 커야 한다. 그리고 NATM 터널에 -crete 1 m³를 -crete타설을 시행하여 시트위에 리바운드 된 콘크리트량을 계량하여 다음의 Eq. (1)로 산출하였다(Jeon et al., 2012; Korea Water Resources Corporation, 1993; Gyungbu High Speed Railroad, 2001b).

$$\text{리바운드율} = \frac{\text{리바운드재의 중량}}{\text{-crete 재료의 전중량}} \times 100(\%) \quad (1)$$

4. 시험 및 고찰

4.1 재료의 배합

4.1.1 시방배합

습식-shotcrete공법은 사전에 시멘트, 강섬유, 골재, 물을 혼합하여 운반하고 노즐에서 급결제는 시멘트중량의 8 %와 혼합하여 분사하는 공법이다. 일반 습식-shotcrete 배합설계 및 강섬유-shotcrete 배합설계는 조건은 다음과 같다.

4.1.2 현장배합

설계상의 시방배합을 현장의 골재 표면수 및 입도시험을 통한 조건에 적합하도록 현장배합으로 설계하였다.

4.1.2.1 일반 습식-shotcrete 배합

일반 습식-shotcrete 배합은 세척사 비중(S1) 2.65,부순 모래 비중(S2) 2.67, 굵은 골재 비중 2.61, 혼합 잔골재 조립율 2.90(세척

사(S1) 2.76, 부순모래(S2) 3.10) 및 자갈이 No.4체를 통과하는 양(b)=11.1 %의 조건은 Table 2와 같다.

4.1.2.2 강섬유 습식-shotcrete 배합

강섬유 습식-shotcrete 배합은 모래의 표면수량(c)=2.3 %, 자갈의 표면수량(d)=0 %, 모래가 No.4체에 남는 양(a)=3.3 %, 자갈이 No.4체를 통과하는 양(b)=11.1 %의 조건은 Table 3과 같다.

습식-shotcrete 현장배합을 설계하기 위해 입도를 고려하여 골재

Table 2. General Shotcrete Formulation and Field Mixing

Item	Mix		
	Specific mix	Field mix	
Specified design strength (MPa)	21	21	
Max of coarse aggregate (mm)	10	10	
Slump (mm)	100	100	
Air content (%)	2.0	2.0	
Water-Binder Ratio (W/B)	43.7	43.5	
Absolute fine aggregate ratio (S/a)	60	60	
Unit quantity (kg/m ³)	Water	192	192
	Cement	438	441
	Sand	Wash sand 610 Water sand 416	Wash sand 609 Water sand 415
	Aggregate	678	677
Steel fiber (kg/m ³)	-	-	
Superplasticizer (kg/m ³)	4.38	4.41	

Table 3. Steel Fiber Shotcrete Formulations and Field Mixing

Item	Mix		
	Specific mix	Field mix	
Specified design strength (MPa)	4.5	4.5	
Max of coarse aggregate (mm)	10	10	
Slump (mm)	100	100	
Air content (%)	2.0	2.0	
Water-Binder Ratio (W/B)	41.6	42.4	
Absolute fine aggregate ratio (S/a)	60	60	
Unit quantity (kg/m ³)	Water	200	203
	Cement	482	479
	Sand	Wash sand 589 Water sand 401	Wash sand 587 Water sand 400
	Aggregate	654	652
Steel fiber (kg/m ³)	40	37	
Superplasticizer (kg/m ³)	4.82	4.79	

량을 설계하면 다음 Eqs. (2) and (3)와 같다.

$$X = \frac{100S - b(S + G)}{100 - (a + b)} \quad (2)$$

$$Y = \frac{100G - a(S + G)}{100 - (a + b)} \quad (3)$$

다시 표면수를 수정한 골재와 공급수량을 환산하면 다음 Eqs. (4)~(6)와 같다.

$$\text{모래 } X' = \frac{X(100 + c)}{100} \quad (4)$$

$$\text{자갈 } Y' = \frac{Y(100 + d)}{100} \quad (5)$$

$$\text{물 } Z' = \frac{100W - (cX + dY)}{100} \quad (6)$$

4.2 압축강도 시험결과 및 분석

4.2.1 일반shot크리트 압축강도시험

이 연구의 시험을 실시하기 위해 급결제 8 %, 공시체규격 10-21-100과 공시체크기 10×20을 제작하여 A공구, B공구 및 C공구의 3가지 Case에 대하여 각 3회씩 시험한 평균압축강도 결과는 Table 4와 Fig. 2와 같다. 각 공구당 시료들의 압축강도

Table 4. General Shotcrete Compression Strength Test

Site	Specimen Test No.	10-21-100			Specimen Size		10 × 20		
		W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)	air content (%)	Ages (day)	Strength (MPa)		
							Breaking Load	Strength	AverageStrength
A Site	1 - 1	38.0	59.0	90.0	2.6	28	226000	28.79	28.93
	1 - 2						224000	28.54	
	1 - 3						231200	29.45	
	2 - 1	43.0	60.0	95.0	2.9	28	198000	25.22	25.01
	2 - 2						196800	25.07	
	2 - 3						194200	24.74	
	3 - 1	48.0	61.0	110.0	2.8	28	165000	21.02	20.66
	3 - 2						159400	20.31	
	3 - 3						162200	20.66	
B Site	1 - 1	38.0	59.0	85	2.1	f28	216600	26.75	26.57
	1 - 2						208100	25.70	
	1 - 3						220600	27.25	
	2 - 1	43.0	60.0	95	2.0	f28	193300	23.87	23.70
	2 - 2						190400	23.52	
	2 - 3						191900	23.70	
	3 - 1	48.0	61.0	105	1.9	f28	176600	21.81	21.91
	3 - 2						178000	21.98	
	3 - 3						177600	21.93	
C Site	1 - 1	38.0	59.0	80	2.1	f28	215200	26.58	26.89
	1 - 2						219100	27.06	
	1 - 3						218800	27.02	
	2 - 1	43.0	60.0	100	2.0	f28	189500	23.40	23.70
	2 - 2						192000	23.71	
	2 - 3						194200	23.98	
	3 - 1	48.0	61.0	110	2.0	f28	171700	21.21	21.48
	3 - 2						172400	21.29	
	3 - 3						177400	21.93	

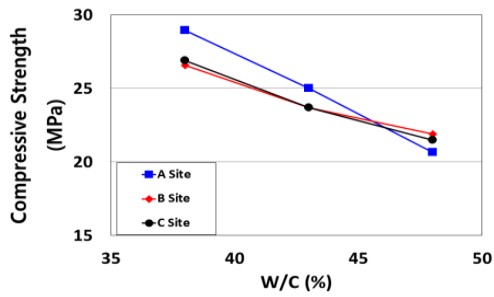


Fig. 2. Compressive Strength Curve of General Shotcrete

평균치는 강도의 85 % 이상을 나타내고 있으며 재령 28일 평균압축강도를 살펴보면 A공구, B공구 및 C공구의 경우 모두 20.0 MPa 이상을

나타내어 습식shotcrete 혼합물의 강도에 만족하고 있으나, shotcrete는 품질과 강도에 좌우되므로 강도는 골재배합의 영향에 따라 다르므로 변경배합 시 사전에 시험을 실시한 후 시공하여야 한다.

4.2.2 강섬유shotcrete 휨강도시험

이 연구의 시험을 실시하기 위해 급결제 8 %, 공시체 규격 10-4.5-100과 공시체크기 15×15×55를 제작하여 A공구, B공구 및 C공구의 3가지 Case에 대하여 각 3회씩 시험한 평균휨강도 결과는 Table 5와 Fig. 3과 같다. 각 공구당 시료들의 휨강도 평균치는 강도의 85 % 이상을 나타내고 있으며 재령 28일 평균휨강도를 살펴보면 A공구, B공구 및 C공구의 경우 모두 5.0 MPa 이상을 나타내어 shotcrete 혼합물의 강도에 만족하고 있다.

Table 5. Steel Fiber Shotcrete Bending Strength Test

Site	Specimen Test No.	10-4.5-100			Specimen Size		10 × 20		
		W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)	air content (%)	Ages (day)	Strength (MPa)		
							Breaking Load	Strength	AverageStrength
A Site	1 - 1	39.0	59.0	90	2.7	28	52600	7.01	7.25
	1 - 2						56400	7.52	
	1 - 3						54200	7.23	
	2 - 1	44.0	60.0	95	2.1	28	44640	5.95	5.99
	2 - 2						46000	6.13	
	2 - 3						44200	5.89	
	3 - 1	49.0	61.0	110	2.9	28	34200	4.56	4.60
	3 - 2						34600	4.61	
	3 - 3						34800	4.64	
B Site	1 - 1	39.0	59.0	90	2.1	f28	46500	6.20	6.32
	1 - 2						46600	6.21	
	1 - 3						49100	6.55	
	2 - 1	44.0	60.0	105	1.9	f28	39900	5.32	5.45
	2 - 2						41600	5.55	
	2 - 3						41100	5.48	
	3 - 1	49.0	61.0	110	2.0	f28	36900	4.92	4.87
	3 - 2						36900	4.92	
	3 - 3						35800	4.77	
C Site	1 - 1	39.0	59.0	95	2.1	f28	49300	6.57	6.62
	1 - 2						48500	6.47	
	1 - 3						51100	6.81	
	2 - 1	44.0	60.0	105	1.9	f28	39600	5.28	5.50
	2 - 2						43300	5.77	
	2 - 3						40900	5.45	
	3 - 1	49.0	61.0	110	2.2	f28	34700	4.63	4.75
	3 - 2						36100	4.81	
	3 - 3						36100	4.81	

4.3 슛크리트 리바운드의 결과 분석

습식스�크리트 리바운드를 측정하기 1번~3번까지 급결제 8%, 배합비 및 시료의 총중량은 동일조건하고 시료 1번 유압은 900 RPM, 시료 2번은 1,000 RPM, 시료 3번은 1,100 RPM으로 각각 다르게 시험한 결과 시료 1번 리바운드는 9.6%, 시료 2번은 10.8%, 시료 3번은 15.8%로서 시료 1번 유압은 900 RPM일 때 가장 리바운드가 적게 나타나고 있다(Table 6 참조). 유압 900 RPM일 때 리바운드의 양이 적음을 알 수 있으나 저속으로 슛크리트타설 시 시공시간이 문제가 됨으로 이 현장의 경우에는 시료 2인 적정유압 1,000 RPM으로 사용하는 것이 타당하다고 사료되며, 또한 리바운드의 상한치 설정은 20~30%인데 비해 리바운드는 9.60~15.8%로 양호하게 나타나고 있으며, Fig. 4와 같다.

5. 결론

이 연구의 NATM 터널의 리바운드감소 실험결과는 네 가지 항목으로 도출하였고, 그 결과는 다음과 같다. 또한 이 결과는 향후 NATM공법 슛크리트시공 시 이 실험기준을 적용할 경우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

- (1) 압축강도 시험결과 압축강도 평균치는 강도의 85% 이상을 나타내고 있으며 재령 28일 평균압축강도는 A공구, B공구 및 C공구 모두 20.0 MPa, 이상을 나타냄으로서 습식스�크리트 혼합물의 강도에 만족하고 있다.
- (2) 휨강도 시험결과 휨강도 평균치는 강도의 85% 이상을 나타내고 있으며 재령 28일 평균 휨강도는 A공구, B공구 및 C공구 모두 5.0 MPa, 이상을 나타냄으로서 습식스�크리트 혼합물의 강도에 만족하고 있다.
- (3) 분사압력에 따른 습식스�크리트 리바운드를 측정은 배합비 및 시료의 총중량을 동일하게 하고 분사압력을 900 RPM, 1,000 RPM, 1,100 RPM으로 시험한 결과 리바운드는 9.60%, 10.80%, 15.80%를 나타내어 900 RPM일 때 리바운드량이 감소하나 저속으로 슛크리트 타설 시 시간이 길어져 이 경우 적정유압 1,000 RPM을 사용하는 것이 타당하다.
- (4) 습식스�크리트의 리바운드는 저속압력(RPM)일 때 적게 나타나고 있으나, 저속으로 슛크리트 타설시 공사기간 및 시공관리 등 현장여건을 고려하여 적정압력을 결정함으로써 리바운드를 최소화하여 기술력과 경제성을 제고할 수 있다고 사료된다.
- (5) 향후 연구 방향으로는 터널시공 시 바윗덩어리 이완에 의해 발생하는 응력을 지지하는 주지보체인 슛크리트의 골재 최대치수에 대한 문제점을 해결함으로써 국내의 기준 및 현장실험으

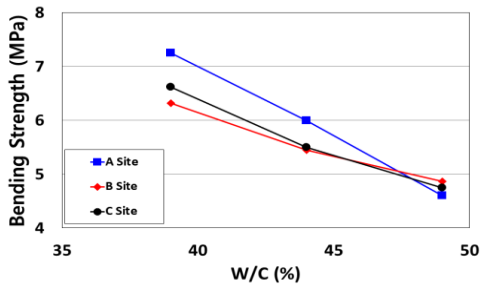


Fig. 3. Bending Strength Curve of Steel Fiber Shotcrete

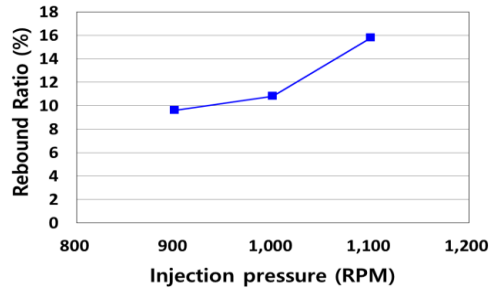


Fig. 4. Hydraulic and Rebound Curves of Steel Fiber Shotcrete

Table 6. Rebound Rate of Steel Fiber Shotcrete

Mixing ratio														
Vol. (m ³)	Max agg. (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	S1 (kg)	S2 (kg)	G (kg)	Superplasticizer (kg)	Steel fiber (kg)	Accelerating agent (kg)	Unit weight (kg)
1	10	100	2.0	41.6	60.0	200	482	589	401	654	4.82	40	39	2331
Rebound Ratio														
① Specimen weight (kg)						2331			2331			2331		
② Rebound weight (kg)						223			251			367.8		
③ Rebound Ratio(%) : ①/②×100						9.60 %			10.80 %			15.80 %		
④ Injection pressure :						900 RPM			1000 RPM			1100 RPM		

로부터 입도개선을 제시하고, 관련 품질기준이 불합리한 부분을 조정함으로써 시공성 향상과 고품질을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Ahn, S. K. (1993). "Study on material development test for reducing rebound of shotcrete." *Magazine of the Korean Concrete Institute*, KCI, Vol. 5, No. 1, pp. 54-61 (in Korean).
- Gyeongju High Speed Railroad (2001a). NATM tunnel construction and measurement, pp. 3-14 (in Korean).
- Gyeongju High Speed Railroad (2001b). NATM Tunnel Construction and Measurement Specification, pp. 43-54 (in Korean).
- Jeon, J. T., Park, H. T. and Lee, Y. K. (2012). "Experimental study on reduce amounts of rebound in wet process shotcrete works by accelerator contents." *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 6D, pp. 615-622 (in Korean).
- Korea Concrete Institute (2009). Standard Specification of Concrete, p. 429 (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation (1993). Design and construction of shotcrete. NATM Technical (in Korean).
- Kwon, I. H. (2000). Revised NATM Tunneling Method. One technology, pp. 169-175.
- Lee, Y. K., Jeon, J. T. and Kim, J. Y. (2004). "A study on the strength test of dry and wet shotcrete in NATM tunnel." *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 2D, pp. 239-245 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2014). Tunnel Standard Specification (in Korean).
- Seoul Subway Corporation (1983). *NATM Technical Performance Report for Subway Lines 3 and 4* (in Korean).