

터널 붕락특성과 시공 중 보강공법 선정방법 개발

김창용¹⁾ · 박치현²⁾ · 배규진³⁾ · 홍성완⁴⁾ · 오명렬⁵⁾

Development of Countermeasure Expert System for Tunneling Failure

Chang-Yong Kim, Chi-Hyun Park, Gyu-Jin Bae, Sung-Wan Hong and Myung-Ryul Oh

ABSTRACT Many Studies of tunnel and tunnelling safety have been developed continuously based on the increasing social interests in underground space since 1990's in Korea. Because the growth of population in metropolitan has been accelerated at a faster pace than the development of the cities, underground facilities have been created as a great extent in view of less land space available. In this study, a lot of types of tunnel failure were surveyed and the detail causes were studied after many cases of tunnel failure were collected. There were suggested brief countermeasure of tunnel failure through case study. An expert system was developed to predict the safety of tunnel and choose proper tunnel reinforcement system using fuzzy quantification theory and fuzzy inference rule based on tunnel information database. The comparison result between the predicted reinforcement system level and measured ones was very similar. In-situ data were obtained in three tunnel sites including subway tunnel under Han river. This system will be very helpful to make the most of in-situ data and suggest proper applicability of tunnel reinforcement system developing more reasonable tunnel support method from dependance of some experienced experts for the absent of guide.

Key word : Expert system, Fuzzy theory, Tunnel reinforcement, Tunnel construction, Safety evaluation,

초 록 지하공간 개발에 대한 관심이 높아지면서 국내에서도 안전한 터널시공에 대한 연구가 많이 진행되었다. 본 연구에서는 터널 시공 중 발생 가능한 터널의 붕락 사고의 특성을 조사하여 각종 터널의 붕락사고 유형을 파악하고, 이에 대한 구체적인 원인을 분석하였으며, 사례분석을 통해 터널 붕락의 주요 요인과 개략적인 대책도 함께 제시하였다. 또한, 국내·외 터널보강공법의 기준과 적용현황을 분석하여 세부적이고 합리적인 보강공법의 체계확립을 위한 기초를 마련하고자 하였다. 본 연구에서는 터널 막장의 안전성 등급을 결정하고, 적절한 보강공법을 선정을 위해 퍼지 수량화 이론과 퍼지추론 시스템을 기반으로 터널정보 데이터베이스를 구축하여 전문가시스템의 모형을 개발하였다. 개발한 시스템의 검증을 위하여 다양한 보강공법을 시공하였던 한강하저터널을 비롯한 국내·외 3곳의 터널 현장 자료를 이용하여 적용한 결과 실제 시행한 보강공법과 근접한 추론결과를 보였다. 정보화시공을 통해 터널 막장기록과 계측자료의 이용을 극대화하고 객관적인 기준의 부재로 인해 일부 전문가의 경험에만 의존하고 있는 국내 보강공법 시공기술을 보다 발전시켜 합리적인 보강공법을 제시하는데 도움이 되고자 하였다.

핵심어 : 전문가 시스템, 퍼지이론, 터널보강, 터널시공, 안전성평가

1. 서 론

지하공간 이용의 증가로 도심지 지하철과 경부 고속철도, 각종 도로터널 및 전력구, 통신구 터널 등과 같은 많은 터널과 지하구조물의 건설이 이루어졌고, 현재 진행 중이다. 이러한 터널시공의 증가와 함께 터널 붕락 사례도 늘어나면서 안정성 대책이 중요한 문제로 대두되고 있다. 전 세계적으로 발생된 시공 중 터널 붕락 사례를 종합해보면, 도심지역에서 발생된 사고가 전체의 67%이

상을 차지하고 있어서 각종 건물 및 구조물들이 산재해 있는 도심지공간에서의 터널 시공에 매우 세심한 주의를 기울여야 함을 보여주고 있다.

1)정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원
2)정회원, 한국건설기술연구원 연구원
3)정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원
4)정회원, 한국건설기술연구원 연구위원
5)삼성물산(주) 건설부문 토목공사팀 팀장
접수일 : 2000년 7월 31일
심사 완료일 : 2000년 8월 24일

이러한 지반의 불확실성을 극복하고 예상하지 못한 다양한 사고를 방지하기 위한 방법으로서 인공신경망이나 퍼지이론 등 인공지능과 전문가 시스템을 이용한 요소기술들을 터널공학 분야에서 접목하려는 시도가 진행되어 왔다(배규진 외, 1998, Fairhurst, 1985, Chikahisa 외, 1997). 따라서, 본 연구에서는 국내외적으로 발생되고 있는 시공 중 터널 붕락 사례들을 조사·분석하고, 이와 연계하여 불안정한 상황별로 보강공법체계를 분류하여 이를 통합할 수 있는 fuzzy 추론을 이용한 전문가 시스템 모형을 개발함으로써 시공 상황에 대한 정보를 토대로 미래에 발생 가능한 불안정한 상황에 대한 대책공법을 제시하고자 하였다.

2. 터널 붕락 사고의 특성

본 연구에서는 시공 중 발생 가능한 붕락 사고의 특성을 분석하고, 이를 미연에 방지하기 위해서 시공 중 불안정한 구간에 대한 적절한 보강 대책을 제시할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였다. 이를 위해서 먼저 각종 터널의 붕락사고 유형을 파악해 보고, 이에 대한 구체적인 원인을 분석하였다. 그리고, 문헌에 보고되었거나, 이미 발표된 국내외 터널 붕락사례들을 조사하고, 붕락 원인에 대한 통계적인 분석을 시도하였다. 한편, 국외 사례를 토대로 터널 막장의 불안정성에 미치는 영향인자들과 지보 등급과의 관계를 규명하고자 하였다.

2.1 국내·외 터널 붕락 현황

국내·외에서 발생된 터널 붕락 현황을 분석하기 위해서 우선적으로 국외의 경우 세계 각 국에서 발생된 NATM 터널 공법 시공 중 붕락사례 39건을 조사하여 그 원인과 메카니즘을 분석하였고, 국내의 경우는 제 2기 서울지하철 시공 중 발생한 사례와 도로터널, 철도터널 및 고속철도 터널을 중점적으로 분석하였다(HSE, 1996, 서울특별시 지하철건설본부, 1994, 1996, 한국지반공학회, 1993, 대한토목학회, 1992a, 1992b, 1992c, 송근백 외, 1996, 천병식 외, 1999, 문상조 외, 1995, 박성재 외, 1993, 서울대학교 공학연구소, 1991, 천병식, 1994). Table 1~Table 3은 39건의 사고사례를 붕락 유형별로 분류한 표로서 터널 시공 중 발생 가능한 세 유형에서의 사례들을 담고 있다.

- A-type 붕락 : 터널 굴착 직후 막장 및 주변지반 그리고, 벤치와 링폐합이 완료되지 않은 상반 슛크리트

부분에서의 붕락을 나타내는 것으로 Table 1과 같고, 가장 많은 사고 사례가 포함된다.

- B-type 붕락 : 링폐합이 완료된 슛크리트 타설 부분에서 발생하는 붕락 유형을 나타내는 것이고, Table 2와 같은 사례가 있다.

- C-type 붕락 : 갱구부나 수직갱과 같이 특수한 부분에서 발생하는 붕락 유형을 표현한 것으로서 Table 3과 같다.

이들 사례는 주로 Lechnitz와 Schrewe(1987), Schrewe와 Maidl(1987), Muller와 Salzburg(1978), Kwang Joon Park와 In Keun Lee(1993), Kuhnenn(1995) 등의 논문을 참고로 하여 분류한 것이다.

상기의 붕락사례를 종합적으로 분석해 볼 때, 터널 붕락 위치와 원인은 19가지 경우(A1~A12, B1~B5, C1~C2)로 표현할 수 있으며, 가장 우세한 붕락 유형은 A1으로서 총 18건의 붕락 사고가 이 형태를 띄고 있다. 즉, 무지보 막장면에서의 붕락(A-type)이 링폐합 후의 슛크리트 붕락(B-type)이나 갱구부, 수직구의 붕락에 비해서 우세하게 발생되고 있다고 말할 수 있다.

국내에서 발표된 사례와 조사된 붕락사례를 정리하면 Table 4와 Table 5와 같다. Table 4는 제 2기 서울지하철 시공 중 발생한 붕락사례를 나타낸 것이고, 1993년 이후에 발생한 국내 도로터널, 철도터널, 지하철 및 고속철도 터널에 대한 붕락사고 사례를 Table 5에서 보여준다. Table 5의 사례는 붕락사례와 붕락 후 보강 대책에 관하여 개략적으로 정리하였다.

국내의 총 21건의 붕락 사례 중 지표면 함몰붕락(daylight)으로 이어진 사례는 제 2기 서울지하철의 경우 총 7건, 그 외 도로터널과 철도터널에서 각각 1건씩 전체 붕락 사례 중 약 43% 정도가 지표면 함몰 붕락으로 이어졌다.

1993년 이후 발생한 총 11건의 붕락사례 중 지표면 함몰붕락이 아니더라도 대규모 붕락(50 m³ 이상)이 발생한 현장은 5건이고, 도로터널, 지하철 터널, 철도터널 등 다양한 터널에서 대규모 붕락사례가 발생하였다. 터널 용도별 붕락 사례를 보면, 전체 21건 중 14건이 도심지 지하철 공사 중 붕락사고가 발생하여 전체대비 67% 정도를 차지하였고, 3건이 도로터널, 2건이 철도터널, 전력구 및 고속철도 터널이 각각 1건으로 나타났다.

Table 4의 제 2기 서울지하철의 경우는 대부분의 터널 붕락은 지하수위가 높은 충적층이나 매립층 하부에 3m

Table 1. Reported cause and type of collapse(A-type).

| 분류 | 터널 붕락 원인 | 붕락 지역 | 보고자 |
|-----|---|---|--|
| A1 | 굴착된 막장에서 불안정한 지반의 붕락 | Sao Paulo 83, Richtof, Bochum #2, Munich #3, Munich #4, Munich #5, Karawanken, Seoul #1, Seoul #2, Funagata, Seoul #4, Seoul #5, Chungo, Sao Paulo 93, Munich 94, Montemor #2, Galgenberg | Schrewe & Maidl(1987), Muller(1978), Lechnitz & Schrewe(1987), Kuhnenn(1995) |
| A2 | 보링공이나 우물, 압거 등 인위적인 지반 결합에 의한 불안정한 굴착막장의 붕락 | Seoul #3 | - |
| A3 | 과도한 침하나 침하수렴으로 인해 부분적으로 타설된 슛크리트의 붕락 | Kriberg, Weltkugel, (kehrnberg), Seoul #6, Seoul #7, Sao Paulo 93, Italy, Montemor #1 | Lechnitz & Schrewe(1987), Kuhnenn(1995) |
| A4 | 터널 종방향에 있는 벤치의 붕락 | Kaiserau | Schrewe & Maidl(1987). Lechnitz & Schrewe(1987) |
| A5 | 굴착 중 터널 중심방향으로 존재하는 벤치의 붕락 | Kaiserau, Lambach | Schrewe & Maidl(1987), Lechnitz & Schrewe(1987) Kuhnenn(1995) |
| A6 | 1차 슛크리트 타설부분의 터널 진행방향 cantilever 붕락 | Paris, Massenburg | Muller(1990) |
| A7 | 스�크리트 폐합전 과도한 상반부 진행에 따른 붕락 | Paris, Bochum #1, Sao Paulo 93 | Kuhnenn(1995) |
| A8 | 천정부 가인버트 파괴에 따른 붕락 | Landrucken | - |
| A9 | 천정부 지지력 부족에 의한 상반 인버트의 전단파괴 | Bochum 31 | Schrewe & Maidl(1987), Lechnitz & Schrewe(1987) Kuhnenn(1995) |
| A10 | 1차 슛크리트의 구조적 결합에 의한 붕락 | Landrucken, Kriberg, Michaels | Schrewe & Maidl(1987), Muller(1990) Lechnitz & Schrewe(1987) Kuhnenn(1995) |
| A11 | 스�크리트 타설전 작업정지에 의한 붕락 | Karawanken | Schrewe & Maidl(1987) Lechnitz & Schrewe(1987) Kuhnenn(1995) |
| A12 | 불확실한 시공품질에 기인한 붕락 | Munich #2, Munich #4, Munich #5, Munich #6 | Schrewe & Maidl(1987) Lechnitz & Schrewe(1987) |

Table 2. Reported cause and type of collapse(B-type).

| 분류 | 터널 붕락 원인 | 붕락 지역 | 보고자 |
|----|-------------------------------------|-----------|---|
| B1 | 일반적으로 과도한 터널 침하 및 침하수렴에 의한 슛크리트 붕락 | - | - |
| B2 | 예상치 못한 하중조건으로 국부적인 응력집중에 의한 슛크리트 파괴 | Bochum #1 | Kuhnenn(1995) |
| B3 | 치명적인 시공결함이나 규격에 벗어난 재료 사용으로 인한 붕락 | - | Lechnitz & Schrewe(1987) Muller(1990) Kuhnenn(1995) |
| B4 | 스�크리트 연결부(시공조인트부) 작업 정지로 인한 파괴 | - | Schrewe & Maidl(1987) Lechnitz & Schrewe(1987) |
| B5 | 스�크리트에 대한 비숙련공의 유지·보수로 인한 파괴 | - | Schrewe & Maidl(1987) Lechnitz & Schrewe(1987) |

이하의 얇은 상부암반의 두께를 갖고 PD-3나 PD-2 지보 패턴으로 굴착되던 복선터널에서 발생하였음을 알 수 있다. 또한, Table 4와 Table 5에서 파괴 유형을 보면, 지

반 절리가 터널 축과 거의 직교하고 경사가 20~45° 상향으로 발달된 지층을 굴진할 경우, 터널 굴착시 막장면 상부가 쏟아져 내려오는 sliding failure가 발생하기 쉽

Table 3. Reported cause and type of collapse(C-type).

| 분류 | 터널 붕락 원인 | 붕락 지역 | 보고자 |
|----|------------------------------------|----------------------------|---|
| C1 | 풍화 혹은 이완된 암반 및 지반으로 인해 발생하는 갱구부 붕락 | Carvalho Pinto, (Funagata) | Schrewe & Maidl(1987), Leichnitz & Schrewe(1987) |
| C2 | 과도한 지하수 유입 및 연약대 출현으로 인한 수직갱의 붕락 | Munich #1 | - |

Table 4. Collapse of domestic tunnel(Second stage of Seoul subway).

| 붕락지역 | 터널단면 (지보패턴) | 상부암반두께 (막장지반) | 지반조건 (지하수위) | 발생위치 | 붕락규모 | 파괴유형 | 비 고 |
|------|----------------|------------------|---------------------|------|------|------------------------------------|-------|
| A | 복선(PD-3) | 풍화암 4m(풍화암) | 층적토 10m(GL.-2m) | 막장 | 붕락 | 진행성 파괴 | 서울지하철 |
| B | 복선(PD-2) | 풍화토 3m(풍화암) | 층적토 21m(GL.-3m) | 막장 | 함몰붕락 | 진행성 파괴 | 서울지하철 |
| C | 복선(PD-2) | 풍화암 3m(풍화암) | 층적토 22m(GL.-7m) | 막장 | 함몰붕락 | Sliding Failure | 서울지하철 |
| D | 복선(PD-3) | 풍화암 3m(풍화암) | 층적토 16m(GL.-4m) | 막장 | 함몰붕락 | 진행성 파괴 | 서울지하철 |
| E | 복선(PD-2) | 연암 4m(연암) | 층적토 21m(GL.-9m) | 막장 | 함몰붕락 | 진행성 파괴 | 서울지하철 |
| F | 단선(PS-4) | 풍화암 5m(연암) | 층적토 15m(GL.-10m) | 막장 | 붕락 | Sliding Failure | 서울지하철 |
| G | 복선(PD-3) | 풍화암 2m(풍화암) | 층적토 10m(GL.-7m) | 막장 | 함몰붕락 | 진행성 파괴 | 서울지하철 |
| H | 단선(PS-3) | 풍화암 2m(풍화암) | 층적토 15m(GL.-6m) | 상반 | 함몰붕락 | Sliding Failure | 서울지하철 |
| I | 복선(PD-2) | 잔류토 4m(잔류토) | 매립토 6m(GL.-6m) | 하반 | 함몰붕락 | 전단파괴 | 서울지하철 |
| J | 단선(PS-4) | 경암 5m(경암) | 잔류토 2m(GL.-15m) | 상반 | 붕락 | Sliding Failure (Creep Failure) | 서울지하철 |

고, 이러한 붕락사례는 제 2기 서울지하철사례(Table 4 참조) 중 4건, 1993년 이후 발생한 터널 붕락사례(Table 5 참조)에서는 3건 등 총 7건이 sliding failure에 의해서 붕락이 발생하였다. 이러한 sliding failure가 발생하는 주요 원인은 첫째, 지반조사시 단층·파쇄대 층의 확인이나 지층의 절리 방향 확인이 이루어지지 않고 있기 때문이며, 둘째, 터널 굴착시 정확한 막장관찰에 따라 굴착방법과 지보패턴을 탄력적으로 변경하지 못함에 기인하며 셋째, 기능공의 숙련도 및 이해도가 낮아 지보순서와 지보방법을 정확히 이행하지 않은데 그 원인이 있다고 할 수 있다.

한편, 터널 막장면은 무지보 상태이기 때문에 지반이 연약하거나 지하수 유입이 과다하게 되면 시간이 지남에 따라 지반의 지지력이 저하되면서 수십분 내지 수시간에 걸쳐 진행성 파괴가 발생한다. 제 2기 서울지하철 붕락

사례(Table 4 참조)에서는 6건, 1993년 이후 발생한 터널 붕락사례(Table 5 참조)에서는 8건이 발생하여 전체 사례의 67%이상이 이러한 진행성 파괴에 의한 붕락사례로 분석되었다. 진행성 파괴가 발생하는 주된 원인으로서는 첫째, 굴착 지반의 자립시간이 지보설치 시간보다 짧을 경우, 둘째, 터널내 용수량이 과다하여 굴착지반의 지지력을 약화시키고 1차 지보재 설치를 곤란하게 할 경우, 셋째, 굴착 즉시 막장면숏크리트 타설이 제대로 이행되지 않는 경우, 넷째, 굴착방법과 지보패턴이 지반조건에 부적합하게 설계·시공되는 경우, 다섯째, 기능공의 숙련도와 이해도가 낮아 굴진장, 지보순서 및 지보방법을 제대로 이행하지 않은 경우 등을 들 수 있다.

2.2 국내외 터널 붕락 사례조사 및 통계적 분석
본 연구에서는 국내외적으로 발생한 터널 붕락사례를

Table 5. Collapse of domestic tunnel(rail, road and subway tunnel).

| 구분 | 터널단면 (지보패턴) | 암피복두께 (막장지반) | 지반조건 (지하수위) | 발생위치 | 붕락규모 (추정치) | 파괴유형 | 비고 |
|----|-------------------------------------|------------------|---------------------|------|-------------------------------|-----------------|-------|
| K | 터널폭: 8m 높이: 7m | 풍화암 11m(연암) | 층적토 15m(GL.-6m) | 막장 | 대규모붕락 (30m ³) | 진행성 파괴 | 철도터널 |
| L | 터널폭: 2.3m 높이: 3.2m | 풍화암 8m(풍화암) | 매립토 39m(GL.-12m) | 막장 | 대규모붕락 (35m ³) | Sliding Failure | 전력구터널 |
| M | 터널폭: 11.9m 높이: 8.1m (Type-VI) | 풍화암 3.2m(연암) | 봉적토 10m(GL.-7m) | 막장 | 대규모붕락 (20m ³) | Sliding Failure | 도로터널 |
| N | 터널폭: 16m 높이: 8.2m (Type-III) | 풍화암 3.2m(연암) | 층적토 18m(GL.-26m) | 막장 | 함몰붕락 (780m ³) | 진행성 파괴 | 도로터널 |
| O | 터널폭: 11m 높이: 9.6m | 풍화암 12m(풍화암) | 매립토 4.5m(GL.-4m) | 막장 | 대규모붕락 (50m ³) | Sliding Failure | 인천지하철 |
| P | 터널폭: 12m 높이: 8.2m (Type-V) | 연암 23m(연암) | 잔류토 2m(GL.-5m) | 막장 | 대규모붕락 (300m ³) | 진행성 파괴 | 도로터널 |
| Q | 터널폭: 8.1m 높이: 7m | 풍화암 8.3m(연암) | 층적토 18m(GL.-5m) | 막장 | 대규모붕락 (50m ³) | 진행성 파괴 | 광주지하철 |
| R | 터널폭: 14.2m 높이: 11.3m | 풍화암 6.7m(풍화암) | 층적토 20m(GL.-4m) | 막장 | 대규모붕락 (18m ³) | 진행성 파괴 | 고속철도 |
| S | 터널폭: 9.2m 높이: 11m (단선(PS-3)) | 풍화암 4.8m(풍화암) | 매립토 4.5m(GL.-5m) | 막장 | 붕락 (7m ³) | 진행성 파괴 | 서울지하철 |
| T | 터널폭: 10m 높이: 8.2m | 풍화암 1m(풍화암) | 층적토 13m(GL.-1m) | 막장 | 붕락 (5m ³) | 진행성 파괴 | 부산지하철 |
| U | 터널폭: 11.5m 높이: 8.2m | 연암 8.5m(연암) | 층적토 3.4m(GL.-3m) | 막장 | 함몰붕락 (300m ³) | 진행성 파괴 | 철도터널 |

대상으로 각 지반조건 및 지반 정수들과 붕락사례들과의 상관관계를 지어봄으로써 터널이 불안정한 상황에 처해 있을 때 적절한 보강공법을 선정하기 위해서 고려해야 할 주요 영향요인을 파악하고자 하였다. 특히, 일반적으로 많이 사용되고 있는 Bieniawski의 RMR 암반분류기준 항목들과의 상관 관계를 주로 나타내고자 하였다.

먼저, 국외 터널 붕락 자료는 Cecil이 1960년대 노르웨이, 스웨덴 등 북유럽을 중심으로 총 연장 67 km, 14 개 프로젝트를 조사 대상으로 97개 막장에서 터널 내 지반조사를 실시한 결과자료를 중심으로 재분석하였다. Cecil의 보고서에서 조사 항목은 첫째, 굴착시 막장면 거동과 주변 지반의 조건, 그리고, 지보재 설치 내용 위주로 조사되었으며 붕락 및 과대 여굴이 발생된 84개 현장을 중심으로 터널 막장 주변의 지반공학적 요소들과 터널 붕락 유형별로 비교·분석하였다(Cecil, 1964).

그리고, 국내 터널 붕락 자료는 본 연구원에서 수행한 G-7 고속철도 터널 기술개발 연구과제 수행 시에 조사하

였던 붕락 및 과대 여굴이 발생한 현장을 중심으로 지하철, 도로, 철도터널 등 총 52개 현장에 대한 터널 붕락 발생 시 조사된 지반조사자료, 지반보강자료 중심으로 자료를 수집하였으며 이들 중 자료의 정확성이나 신빙성 등을 분석하여 20개 현장에 대하여 터널심도, 암석종류, 암석 풍화도 등 터널 붕락에 영향을 줄 수 있는 주요 요소에 대한 분석을 수행하였다(한국건설기술연구원, 1999).

국내의 터널의 붕락현황을 상호 비교·분석한 결과, 국외 터널은 지하양수발전소 건설에 따른 도수터널이 많고, 터널지반의 암석 종류는 심성암류와 변성암류가 많이 분포해 있으며 지하수 상태는 RMR 분류기준에 골고루 분포하고 있다. 막장 주변부의 절리군은 무결암반부터 토사층까지 고루 분포하며 RQD는 50점 이상인 현장이 50%를 넘었고 심도는 50m 이상인 현장이 대부분이었다.

이에 비해 국내 터널은 지하철과 도로터널에 관한 자료가 많았으며 터널지반의 암석종류는 Cecil(1964) 자료

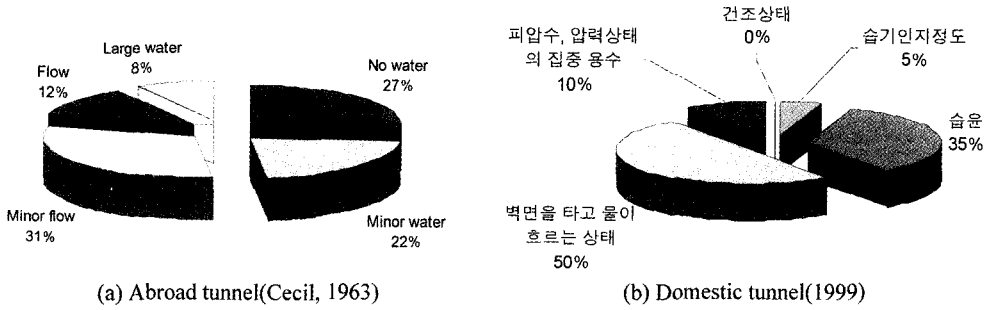


Fig. 1. Water inflow in the tunnel face(KICT, 1999).

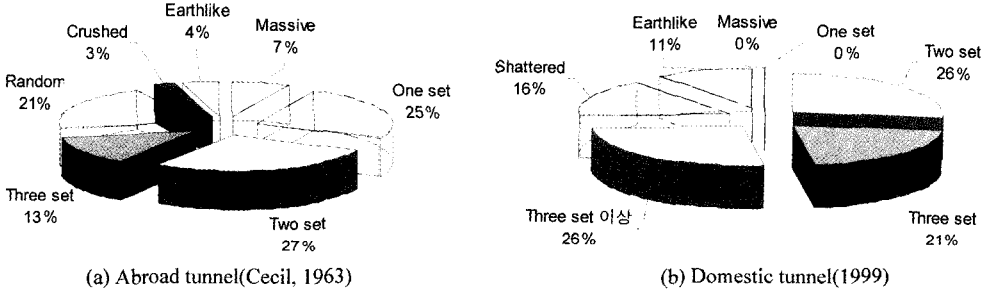


Fig. 2. Joint set of tunnel face(KICT, 1999).

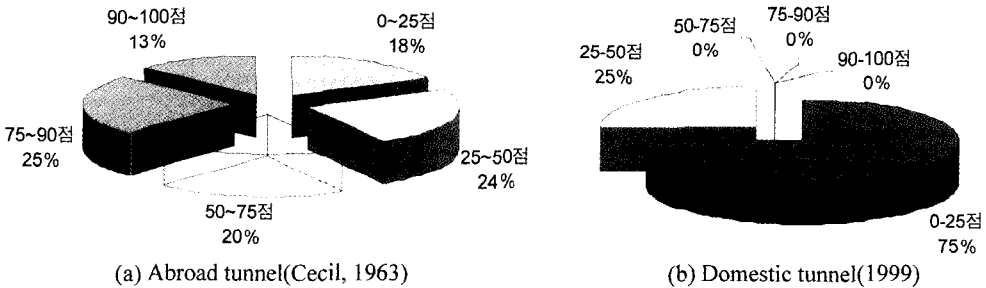


Fig. 3. RQD of tunnel face(KICT, 1999).

와 비슷하게 심성암류와 변성암류가 많았고, 같이 지하수 상태는 '습윤상태'와 '벽면을 타고 물이 흐르는 상태'가 주를 이루고 있고, 절리군은 두 개 이상이며 조사막장의 RQD는 모두 50점 이하로 암반 자체의 암질이 불량하였다(Fig. 1~Fig 3 참조). 특히, 25점 이하가 전체의 75%를 차지하였다. 터널심도는 30m 이하의 천심도가 주를 이루었고 암반을 풍화도에 따라 분류를 하면 풍화암과 연암이 대부분이며 절리상태와 절리간격은 RMR 분류기준에 의해 분류하면 4~5등급의 열악한 상태에서 붕락이 발생하였음을 확인할 수 있었다(Fig. 4와 Fig. 5 참조).

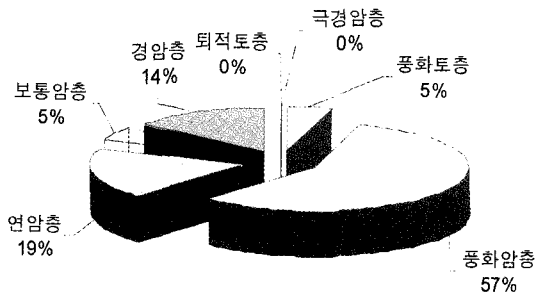


Fig. 4. Alteration of domestic collapsed tunnel(KICT, 1999).

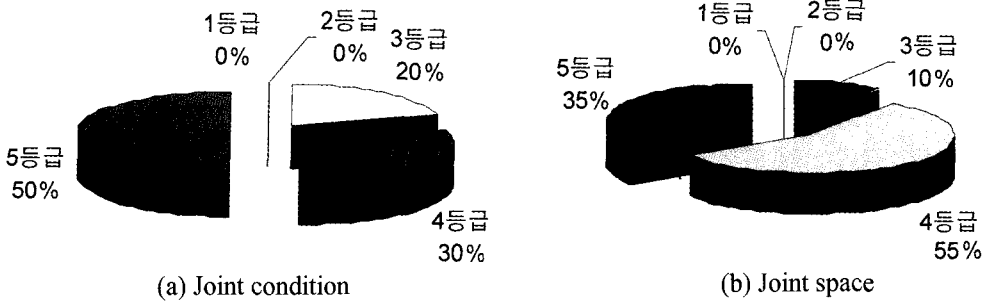


Fig. 5. Joint condition and space of domestic collapsed tunnel(KICT, 1999).

국내 터널 붕락자료를 지반의 풍화도와 붕락형태에 관해 분석해 보면 지반이 특히 풍화암일 때 연약대에 의한 붕락과 절리군에 의한 붕락이 우세하게 발생하는 경향을 보였다. 국내의 경우도 국외의 경우처럼 대심도 터널이 포함될 경우는 그 양상이 달라질 것으로 예상된다.

Cecil 자료에서는 대심도 터널이기 때문에 막장면 암반상태가 무결암이거나 1개의 절리군이 존재하는 경우에도 붕락이 상당수 발생하였지만 국내 터널에서는 절리군과 붕락규모와의 관계는 2개 절리군 이상일 경우 전체적으로 비슷한 빈도로 붕락이 발생하는 것으로 분석되었고 절리군이 없거나 하나의 절리군에 의해서 붕락된 경우는 조사된 자료 중 없었다.

조사된 국내·외 터널 막장을 RQD로 평가했을 때 RQD 점수 20점 이하일 때 대부분 붕락이 발생하는 것으로 조사되었지만, 붕락의 발생이 반드시 RQD가 20 이하일 경우만이 아니라, 본 연구에서 조사된 자료가 대부분 RQD 20이하의 경우에 많은 붕락 사례가 있기 때문으로 보인다.

20개 현장에서 RQD가 50점 이상인 경우는 없었으며 20점 이하일 경우 집중적으로 붕락이 발생하는 경향을 보였다. Cecil 자료에서 붕락현장의 RQD점수가 대부분 50점이상인 사실과 비교해 볼 때, 이는 국내 터널시공이 30m 이하 천심도의 풍화암과 연암에서 굴착이 이루어지는데 반해 Cecil 자료는 깊은 심도에서 굴착한 터널이기 때문에 암반이 상대적으로 풍화정도가 약하고, 절리가 밀착되어 높은 RQD 값을 보인 것으로 판단된다. 암석종류와 RQD 점수를 비교해 보면 암석종류가 심성암일 경우 RQD 점수가 평균 14점이고 편마암류가 평균 23점이다. 이는 심성암의 주 조암광물인 장석류가 풍화에 매우 약하기 때문이며 특히 수집된 대부분의 터널 자료가 천심도에서 굴착이 되었기 때문에 RQD 점수가 낮게 분석되었다.

붕락이 발생된 암반의 대부분이 편마암류와 심성암류가 주를 이루고 있고 붕락 유형은 암석의 종류가 편마암류일 때 천정부붕락과 연약대붕락이 우세하게 발생하는 것으로 분석되었다.

3. 퍼지전문가시스템을 이용한 보강대책공법 선정

3.1 보강공법 선정용 전문가 시스템 구성

위에서 조사한 바와 같이 터널의 붕락방지를 위한 보강공법에 대한 적절한 선정의 필요성이 요구되고 있으며, 지반상황과 보강공법 적용기준의 애매 모호함을 퍼지추론을 적용하여 적절하게 표현함으로써 터널 기술자가 보강공법을 선정하는 과정에서 보다 합리적인 결정을 내리는데 도움을 주고자 하는 시도가 진행되고 있다(Chikahisa 외, 1997, Yamagata 외, 1989). 본 연구에서도 터널의 붕락방지와 안정성확보를 위해 각 터널조사 항목과 막장상태를 퍼지집합으로 표현하여 보강공법의 적용성 정도를 추론하는 전문가 시스템을 구축하기 위한 단계로서 프로토타입 퍼지추론 시스템을 개발하였다.

퍼지이론의 적용을 위해서는 소속도 함수의 구성이 무엇보다 중요하다. 다양한 자료와 전문가의 의견을 종합하여 보다 객관적인 소속도 함수를 수립하여야 하지만, 시공현장 정보와 숙련된 전문가의 부족으로 인해 소속도 함수를 만드는데 어려움이 있었다. 퍼지 규칙을 만들기 위해서 필요한 전문가의 부재와 다양한 현장정보 수집의 어려움을 보완하기 위해 수량화이론II를 본 시스템에 적용하였다. 수량화이론II는 질적변수인 외적기준과 역시 질적변수인 설명변량을 모두 가변수를 이용하여 표현한 뒤, 외적기준 가변수들의 선형결합과 설명변량 가변수들의 선형결합 간의 상관계수를 최대화한다. 이 최적화를 통해 모든 질적 범주(category)에 수량화 값을 부여하게

된다(허명희, 1998). 수량화이론II를 이용하여 질적인 자료에 수량화값을 부여해 소속도 함수를 구성하므로써 보다 객관적인 기준의 적용이 가능해졌다(Watada, 1982). 먼저, 질적변수인 막장의 상태를 외적기준으로 하고 터널 정보 데이터베이스의 각 항목들을 설명변량으로 설정하여 질적 범주인 두 가변수에 수량화값을 부여한 다음, 퍼지 소속도함수를 구성하게 된다(허명희, 1998, 이광형, 오길록, 1995).

본 연구에서 개발한 터널 보강공법 선정용 전문가시스템은 크게 2부분으로 구성되어 있다. 전반부에서는 터널 주변 지반조건, 지하수, 절리, 지지력, 인접구조물 등으로 이루어진 터널 정보 D/B를 바탕으로 막장의 안정성을 나타내는 제 1 소속도 함수(first membership function)를 구성한다. 후반부에서는 터널 보강공법 D/B를 활용하여 각 터널의 등급에 따른 보강공법별 퍼지추론규칙(fuzzy inference rule)을 형성한다. 이 퍼지추론규칙은 터널 보강공법의 수량화값으로 형성한 터널 보강공법의 제 2 소속도 함수(second membership function)를 구성한다. 터널 정보 D/B를 바탕으로 구성된 1단계 소속도 함수를 통해 시공 현장의 터널정보를 입력하여 터널의 안정성 등급을 결정한다 다음, 이미 구성한 퍼지추론규칙을 이용해 비퍼지화(defuzzification)하면, 각 보강공법별 적용등급이 결정된다(Chikahisa, 1997). Fig. 6에서는 시스템의 구성과 각 모듈의 용도와 특징을 보여준다.

3.2 터널정보 D/B 및 터널 안정성 등급 평가를 위한 전반부 소속도 함수

터널 안정성에 미치는 영향인자를 크게 막장 관찰자료와 계측항목으로 구분하였으며, 본 터널 보강공법 선정을 위한 프로토타입 전문가시스템을 구축하기 위하여 구성한 데이터베이스는 막장 관찰자료만을 포함하였다.

터널 안정성 등급 결정과 보강공법 선정을 위해 필요한 막장 관찰자료를 5가지 범주(category)로 구분하여 현장에서 자료 수집이 용이한 최소 항목을 선택하였다. 5가지 범주는 터널의 막장의 풍화정도, 절리의 상태, 지하수상태, 지지력, 인접구조물 등이다. 5가지 조건 중 막장상태는 천정부, 측벽부 및 풍화정도로 세분화하였고, 절리항목은 절리간격, 절리모양, 절리상태, 절리방향 등으로 구분하였으며, 지하수는 유입량과 투수계수로, 지지력은 단축압축강도와 상부하중으로 나누었다. 항목선정 기준은 전문가의 의견과 터널현장에서 수집 가능한 변수를 선정하였으며, 앞으로 현장에서 필요한 항목과 관련변수

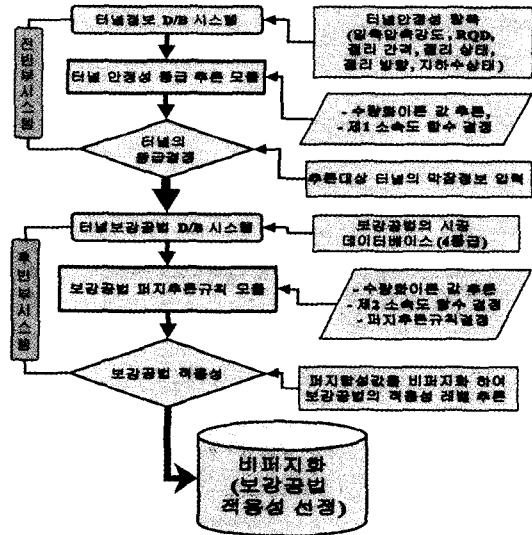


Fig. 6. Each module of expert system.

들을 데이터를 수집하면서 확장할 계획이다. 5가지 범주에서 프로토타입을 위한 데이터베이스의 항목은 일축압축강도, 풍화정도, 절리간격, 절리조건, 절리방향, 지하수조건 등 RMR 분류 기준과 같으며 총 6개의 변수로 구성되어 있다.

6개의 항목은 현재 국내 각 현장에서 일반적으로 관찰되고 있는 RMR 항목으로 현장에서 쉽게 얻을 수 있는 점을 고려하여 선택하였다. 각 변수는 주의등급을 RMR 항목의 등급을 바탕으로 A, B, C, D의 4단계로 구분하였다. A등급은 "안정", B등급은 "보통", C등급은 "주의", D등급은 "위험"을 나타낸다. 마찬가지로 방법으로 터널의 안정성도 같은 의미를 가지는 4단계의 등급으로 구분하였다.

3.3 터널 보강공법 D/B와 등급별 적합도를 위한 제 2 소속도 함수

이 모듈은 보강공법에 관한 데이터베이스를 입력, 수정, 저장 및 관리한다. 현재 수집한 데이터를 바탕으로 막장면 슛크리트, 막장면 록볼트, 링컷, 기계굴착, 강관보강형 다단 그라우팅, 막장 폐합, 굴진장 축소, 휘폴링 등의 항목만을 입력자료로 사용하였으며, 앞으로 다양한 항목의 추가가 이루어질 예정이다.

각 보강공법은 적합도를 "1", "2", "3", "4"의 4단계의 등급으로 구분하였다. 등급 "1"은 "필요 없음", 등급 "2"는 "가급적 피함", 등급 "3"은 "가급적 사용", 등급

"4"는 "필요"를 나타낸다. 전반부 소속도 함수를 이용한 퍼지추론에서 추론한 터널 안정성 등급(level)에 따른 보강공법 적용 데이터베이스를 바탕으로 수량화이론을 이용해서 터널의 각 주의수준에 해당하는 각 보강공법의 적용수준을 추론하였다. 이때, 외부기준은 보강공법의 적합성(applicability)이 되고, 설명변수는 터널의 주의수준이다. 전반부 소속도 함수와 같이 수량화이론 II분류를 활용하여 각 터널 안정성 등급에 대한 보강공법의 퍼지추론규칙을 찾는다. 각 변수의 등급별 수량화값 도표에서는 터널 안정성 등급과 보강공법 적합성간의 상관계수와 편상관계수를 제시해 준다. 이 상관계수는 각 터널 안정성 등급과 각 터널 보강공법의 관계를 나타내는 지표로서 터널 보강공법에 따른 각 터널 안정성 등급정도를 나타내 준다. 전반부 소속도 함수의 소속도와 후반부 소속도함수로 구한 퍼지추론규칙을 이용해서 퍼지 합성값을 구하고 이 값을 비퍼지화하여 보강공법 적용등급을 추론한다. 이때, 비퍼지화는 센트로이드(centroid) 방법을 이용하였다(이광형 외, 1995).

3.4 현장 적용성 평가

본 연구에서 개발한 시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 위에서 소개한 국내의 2개 현장과 국외의 터널현장의 터널 보강공법 데이터베이스를 이용하였다. 한강하저터널 검증에서 사용한 터널 보강공법 데이터베이스 변수는 모두 8가지 항목이다. 8가지 변수는 막장 슛크리트, 강관

보강형 다단 그라우팅, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, L.W 그라우팅, 굴진장 축소, 휘폴링으로 현장의 시공에서 사용했던 보강공법을 바탕으로 선택하였다(우종태, 서강천, 1996). 부산지하철의 경우는 6가지 공법으로 데이터베이스를 구성하였다. 막장안정을 위해 사용했던 주된 방법인 6가지 항목으로는 막장 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, 굴진장 축소가 해당 된다.

해외자료로 사용한 일본의 도로터널의 검증에는 막장에서 사용한 4가지 대책공법을 이용하여 터널대책공법 D/B를 구축하였다. 여기서 사용한 4가지 항목은 막장 슛크리트, 막장볼트, 링컷, 기계굴착으로 이 터널에서 사용했던 주요 보강공법을 선정하였다. 국내·외 보강공법 적용 사례를 바탕으로 본 시스템을 위한 보강공법 항목 선정은 현장에서 많이 적용하고 있는 보강공법들을 대상으로 하였다(Chikahisa, 1997).

한강하저터널 검증을 위해 현장의 시공에서 사용했던 보강공법을 근거로 모두 8가지 항목변수를 선정하여 보강공법 데이터베이스를 구성하였다. 한강하저터널에서 사용된 8가지 보강공법의 적용성을 추론한 결과 막장면 슛크리트, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, 굴진장축소, 휘폴링 공법은 터널 안정성에 높은 상관성을 보이며, 강관 보강형 다단 그라우팅, L.W 그라우팅 공법 등은 터널 안정성 등급과 낮은 상관성을 보였다. 낮은 상관관계를 보인 항목은 지반의 상태가 매우 열악했던 현장의 상황이나

Table 6. Fuzzy inference results of the subway below Han river.

| 막장 번호 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 제1 소속도 함수에서의 소속도 | | | | | | | | |
| 주의레벨 A | 0.96 | 0.09 | 0.81 | 0.78 | 0.64 | 0.93 | 0 | 0 |
| 주의레벨 B | 0.04 | 0.91 | 0.19 | 0.22 | 0.36 | 0.07 | 0.98 | 0.01 |
| 주의레벨 C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0.99 |
| 주의레벨 D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 퍼지추론결과 | | | | | | | | |
| 막장 슛크리트 | 0.18 | 0.63 | 0.35 | 0.36 | 0.43 | 0.23 | 0.67 | 0.88 |
| 강관 보강형 다단 그라우팅 공법 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.88 |
| 링 컷 | 0.14 | 0.33 | 0.22 | 0.22 | 0.27 | 0.16 | 0.34 | 0.87 |
| 기계식 굴착 | 0.14 | 0.33 | 0.22 | 0.22 | 0.27 | 0.16 | 0.34 | 0.87 |
| L.W 그라우팅 | 0.35 | 0.74 | 0.41 | 0.42 | 0.47 | 0.37 | 0.86 | 0.12 |
| 막장폐합 | 0.18 | 0.63 | 0.35 | 0.36 | 0.43 | 0.23 | 0.67 | 0.88 |
| 굴진장 축소 | 0.18 | 0.63 | 0.35 | 0.36 | 0.43 | 0.23 | 0.67 | 0.88 |
| 휘폴링 | 0.16 | 0.78 | 0.31 | 0.33 | 0.42 | 0.2 | 0.89 | 0.89 |

Table 7. Fuzzy inference results of Pusan subway.

| Sample 번호 | 10 | 65 | 75 | 90 | 180 |
|----------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| 제1 소속도 함수에서의 소속도 | | | | | |
| 주의레벨 A | 0.001 | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| 주의레벨 B | 0.998 | 0 | 0.999 | 0.999 | 0 |
| 주의레벨 C | 0.001 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.999 |
| 주의레벨 D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 |
| 퍼지추론결과 | | | | | |
| 막장 슛크리트 | 0.33 | 0.11 | 0.33 | 0.33 | 0.56 |
| 강관 보강형 다단 그라우팅 공법 | 0.44 | 0.11 | 0.44 | 0.44 | 0.33 |
| 링 컷 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.67 |
| 기계식 굴착 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.67 |
| 막장폐합 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.67 |
| 굴진장 축소 | 0.89 | 0.44 | 0.89 | 0.89 | 0.44 |

시공의 어려움으로 인해서 막장의 상태에 따라 변화를 주기보다는 안전성을 많이 고려하여 시공한 것으로 추정된다. Table 6은 한강하저터널의 막장별 퍼지추론 결과이다.

부산지하철의 경우는 6가지 보강공법으로 데이터베이스를 구성하였다. 링컷, 기계굴착, 막장폐합은 터널의 안정성과 비교적 높은 상관성을 가지지만, 막장면 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 굴진장 축소 항목은 터널 안정성 등급과 낮은 상관성을 보였다. 낮은 상관성을 갖는 공법은 터널상태에 따라 다양한 보강공법을 적용하기보다는 안전성을 고려하여 보수적인 측면에서 시공한 것으로 보인다. 본 데이터베이스를 구성했던 시공자료를 보면, 강관 보강형 다단 그라우팅과 굴진장의 축소는 막장안정성을 의미하는 RMR평점의 변화에 따른 큰 변화가 없었다. Table 7에서는 부산지하철의 막장별 퍼지추론 결과를 보여준다.

Table 6에 나타난 한강하저터널의 추론 결과를 보면, 제1막장의 경우 막장의 안정성 소속도가 주의레벨 A는 0.96, 주의레벨 B는 0.04, 주의레벨 C와 D는 0으로 나타나 안정함을 보여준다. 이 막장에 대해 추론한 보강공법의 적용성은 각각 막장 슛크리트 0.18, 강관보강형 다단 그라우팅 0.67, 링컷 0.14, 기계식 굴착 0.14, L.W 그라우팅 0.35, 막장폐합 0.18, 굴진장 축소 0.18, 휘폴링 0.16이 된다. 막장이 안정하므로 다른 항목들은 낮게 나타났지만, 강관 보강형 다단 그라우팅과 L.W 그라우팅은 비교적 높게 나타났다.

이는 한강하저터널 시공시 일부 보강공법의 경우 막장 변화에 따라 보강정도를 변경하지 않고 안전을 위해 일정한 보강을 했기 때문으로 사료된다. 실제의 현장의 시공정보를 보면, 강관 보강형 다단 그라우팅과 L.W 그라우팅은 막장이 비교적 안정되었다라고 일정한 수준 이상으로 보강을 실시하였다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 퍼지 수량화 이론과 퍼지 추론 시스템을 기반으로 터널 정보 데이터베이스를 구축하여 터널 현장의 안전성을 분석하고, 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 프로토타입 전문가시스템을 개발하였다. 먼저, 시공 중 발생 가능한 터널의 붕락 사고의 특성을 조사하여 각종 터널의 붕락사고 유형을 파악하고, 이에 대한 구체적인 원인을 연구하였으며, 사례분석을 통해 터널 붕락의 주요 요인과 개략적인 대책도 함께 제시하였다. 또한, 국내·외 터널 보강공법의 기준과 적용현황을 분석하여 세부적이고 합리적인 보강공법의 체계확립을 위한 기초를 마련하고자 하였다. 정보화시공을 통해 터널 막장기록과 측정자료의 이용을 극대화하고 객관적인 기준의 부재로 인해 일부 전문가의 경험에만 의존하는 국내 보강공법 기술을 보다 발전시켜 합리적이고 세부적인 보강공법을 제시하는데 도움이 되고자 하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시공 중 발생 가능한 터널의 붕락 사고의 특성을 조사하여 각종 터널의 붕락사고 유형을 파악하고, 이에 대한 구체적인 원인을 연구하였으며, 사례분석을 통해 터널 붕락의 주요 요인과 개략적인 대책도 함께 제시하였다.
- (2) 퍼지 수량화 이론과 퍼지 추론 시스템을 바탕으로 터널 정보 데이터베이스를 구축하여 터널 현장의 안전성을 분석하고 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 프로토타입 전문가시스템을 개발하였다.
- (3) 국내·외 터널 보강공법의 기준과 적용현황을 분석하여 세부적이고 합리적인 보강공법의 체계 확립을 위한 기초를 마련하고자 하였다.
- (4) 개발한 시스템의 검증을 위하여 다양한 보강공법을 시공하였던 한강하저터널을 비롯한 국내 2곳의 터널현장에서 적용한 결과 실제 시행한 보강공법과 근접한 추론 결과를 보였다.

본 연구를 토대로 하여 프로토타입 프로그램을 현장에

서 적용 가능한 시스템으로 발전시키고, 국내 각 현장의 터널정보 데이터베이스를 확장하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- 배규진, 김창용, 신효성, 문현구., 1998, 터널 굴착 현장에 인접한 지상구조물의 안전성 평가용 전문가 시스템의 개발(I), 한국지반공학회지, 14. 12, 107-123
- Fairhurst, C. and Lin, D., 1985, Fuzzy Methodology in Tunnel Support Design in Research and Engineering Applications in Rock Masses(ed. Ashworth, E.), Proc. 26th U.S. Rock Mechanics Symposium, Accord MA: International Publishers Service Inc., 269-278.
- Chikahisa, H., Matsumoto, K., Nakahara, H. and Tsutsui, M., 1997, Measurement Control Method and Expert System for Tunneling by Fuzzy Set Theory, Environmental and Safety Concerns in Underground Construction, Lee, Yang & Chung(eds), Balkema, Rotterdam, 261-266.
- HSE., 1996, Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) Tunnels, 15-28
- 서울특별시 지하철건설본부., 1994, 제 2기 서울지하철 터널 및 시공감리 종합보고서, 530p.
- Cecil, O.S., 1964, Correlations of Rock Bolts-Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels, Ph.D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 415p.
- Kwang Joon Park and In keun Lee., 1993, Moes and Causes of Collapse of Subway Tunnels, Proceeding of March 1993 National Conference of Geotechnical Engineering and Tunnelling Technology, Seoul Korea, 41-48.
- 한국건설기술연구원, 1999, 고속 전철 교량/터널 구조 및 유지관리 시스템 개발(터널부분), 46-72.
- 대덕공영(주), 1995, 서울지하철 5호선 5-18공구 한강 하저터널 막장 지반조사, 113p.
- 서울특별시 지하철건설본부, 1996, 한강 하저터널 지반 분석 및 보강 공법, 1-243.
- 한국지반공학회(사). 1993, 345KV 당인리-중계 펄프장 간 지중 T/L 전력구 건설공사 봉락지역 사고원인 및 보강방안 연구 검토, 1-122.
- 대한토목학회(사). 1992, 지하철 5호선 5-14 공구 터널 사고원인 및 복구대책 연구 용역 보고서, 1-214.
- 대한토목학회(사). 1992, 전철분당선 제 8공구 송과천교 보강대책 수립 연구보고서.
- 대한토목학회(사). 1992, 지하철5호선 5-14공구 터널 사고원인 및 복구대책 연구 용역 보고서.
- 서울특별시 지하철건설본부, 1996, (주)대우엔지니어링, 5-18공구 시공감리 종합보고서, 658-711.
- 송근백, 우종태, 이용재, 1996, 한강 하저터널 소규모 봉락(낙반) 사례, 대한토목공학회 학술발표회 논문집, 379-382.
- 천병식, 정덕교, 한기식, 정진교, 1999, 고속도로 터널 막장 천단부의 봉락구간에 대한 지반보강, KGS '99 National Conference, 323-330.
- 문상조, 황제돈, 오길영, 1995, 안양천 합수 미고결 토사지반에서의 NATM 적용 사례, KGS '95 National Conference, 143-152.
- 박성재, 정두희, 우병재, 정경환, 안상덕, 김재영, 1993, NATM 터널의 시공 사례(I), 대한 토목학회 학술발표회 논문집, 314-318.
- 서울대학교 공학연구소, 1991, 과천시 금정-사당간 복선 전철 제7공구 안정성 검토에 대한 연구보고서.
- 천병식, 1994, 서울지하철 5호선 5-37공구 터널 안전시공을 위한 지반보강공법 연구, 한양대 부설 산업과학연구소.
- Leichnetz W and Schrewe F, 1986, Analysis of collapses on tunnel construction sites on the new lines of the German Federal Railways, Felsmechanik-Symposium, Aachen, Germany.
- Schrewe F and Maidl R, 1987, Tunnelling with difficult rock behaviour-analysis of possible cause of damage and collapse, Bachum Conference Proceedings.
- Muller-Salzburg L, 1978, The reasons for unsuccessful applications of the New Austrian Tunnelling Method, Proceedings International Tunnelling Symposium, Tokyo, 67-72.
- 한국건설기술연구원, 1999, Neural Network을 이용한 터널설계 적정성 평가용 Expert System(II), 63-68.
- Yamagata, S., H. Chikahisa, S. Kurosaka, Y. Arai & H. Nakahara, 1989, Development of measurement control system for tunneling. Tobishima Eng. Report, 40, 103-1171.
- Watada, J., H. Tanaka & K.Asai, 1982, Fuzzy Quantification theory type II. J. Measurement of Action, 9. 2, 24-32.
- 허명희, 1998, 수량화방법 I·II·III·IV, 자유아카데미.
- 이광형, 오길록, 1995, Fuzzy 이론 및 응용 I, II, 홍릉과학출판사.
- 우종태, 서강천, 1996, 한강 하저터널 지반 분석 및 보강공법.
- 지하철건설본부, 1993, 터널의 설계·시공현황 및 개선 방안, 3-225.

김 창 용



1990년 한양대학교 공과대학 자원
공학과, 공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원
공학과, 공학석사
1999년 한양대학교 공과대학 자원
공학과, 공학박사

Tel : 031-9100-224

E-mail : cykim@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹
선임연구원

박 치 현



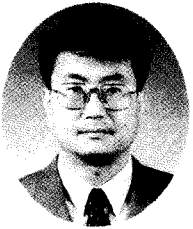
1996년 전남대학교 자원공학과, 공
학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사

Tel : 031-9100-231

E-mail : chichi@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹
연구원

배 규 진



1980년 경북대학교 농공학과, 공학
사
1982년 연세대학교 대학원 토목공
학과, 공학석사
1990년 연세대학교 대학원 토목공
학과, 공학박사

Tel : 031-9100-092

E-mail : gjbae@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹
수석연구원

홍 성 완



1966년 서울대학교 공과대학 토목
공학과, 공학사
1976년 Illinois 대학 지반공학 석사
1994년 Illinois 대학 지반공학 박사

Tel : 031-9100-485

E-mail : swhong@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹
연구위원

오 명 렬



1980년 연세대학교 공과대학 토목
공학과, 공학사
1982년 연세대학교 공과대학 토목
공학과, 공학석사

Tel : 02-527-8337

E-mail : woni1114@samsung.co.kr

현재 삼성물산(주) 건설부문 토목공사팀 팀장
