

# 건공에서 Super Tamping Material에 관한 연구

## A Study on Super Tamping Material for Dry Holes

강 추 원  
Choo-Won Kang  
조선대학교

### 초 록

최근 들어 산업용화약류의 사용이 급증하고 있으며, 발파작업시 화약의 효율적인 사용을 하기 위해서는 폭약이 장전된 공을 전색하여야 한다. 즉, 굵은 모래나 쇠석으로 채워야 한다. 조립질의 물질을 전색재료로 사용한 경우에 좋은 전색효과가 발휘된다 할지라도 흔히 천공시 발생하는 잔재물을 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 암석발파시 가장 효율적인 전색재료를 구하고, 국내 산업용 화약류에 적용하기 위하여 시도되었다. 시험발파에 의한 모래 전색물과 STM의 발파진동 및 암석 파쇄상태를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 모래 전색물을 사용한 경우에 암석 파쇄상태는 양호이상이 19%이었으나 STM은 91%로서 STM은 발파효율을 상승시킨다. 또한 STM은 발파진동의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

**핵심어** : 전색효과, 초전색재료(STM), 파쇄상태, 발파진동

### 1. 서론

산업용 화약류를 이용한 발파작업은 광석의 채굴, 석·골재의 채취, 도심지의 지하 터파기 작업등의 건설현장과 지하철 건설 등에 이용되고 있으며, 에너지 저장을 위한 유류 및 액화가스 비축시설, 양수지하발전소 및 농수축산물의 저장 등을 목적으로 한 지하 공간개발에도 그 사용성이 증대하고 있는 실정이며, 발파장소의 다양화에 따른 폭약, 화공품 개발 및 개선에 관한 연구는 큰 발전을 이룩하였으나 발파효과를 극대화시키는데 필요한 전색물<sup>1)</sup> 및 전색물이 발파효과에 미치는 영향<sup>2)</sup>과 전색상태에 따른 발파진동의 상호관계에 대한 연구는 미진한 상태이다.

본 연구는 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 모래 전색물과 화공약품을 재료로 한 전색물(Super Tamping Material, STM)을 이용하여 전색작업<sup>3)</sup>의 간소화를 통한 발파작업시간의 단축과 발파효과 및 발파진동에 미치는 영향을 상호 비교하여 연구하였다.

### 2. 이론적 고찰

#### 2.1 전색의 목적

전색작업이란 천공된 공에 폭약을 장전한 후 폭약의 에너지 방출을 방지하고, 폭발효과를 향상시키기 위하여 장약된 공을 모래나 점토 등의 재료로 막아 주는 작업으로 공 내부에 밀폐효과가 나타나 폭약의 위력을 충분히 발휘할

수 있도록 하는 작업을 말한다.

전색을 실시함으로써 폭약이 완전히 폭평하고, 발파효과<sup>4)</sup>의 상승과 동시에 발파 후 가스도 좋아진다는 것은 널리 알려진 사실이다. Hauser식  $L=CW^3$ 에 있어서  $C=f(n) \cdot g \cdot e \cdot d$ 로 표현한 경우 전색의 효과는 폭과계수 C중에서 d로 표현하고 있다.

Table 2.1은 경험적으로 구해진 전색상태 및 전색계수를 나타내지만 비교적 널리 인용되고 있다. 즉, 동일 암석을 동종의 폭약으로 같은 효과를 나타내려면 전색정도에 따라 폭약량을 적당한 범위에 걸쳐 가감할 필요가 있음을 알 수 있다. 전색물이 완전전색된 경우를 1로 하면, 발파에 끼치는 영향을 단적으로 표현한다고 할 수 있다.

Table 2.1 Relation between charged state and charged coefficient<sup>5)</sup>

전 색 상 태	전 색 계 수	
적당히 깊은 장약공	전색완전	d = 1.0
	전색불완전	1.0 < d < 1.25
	전색없음	d = 1.25
장약만 장약실에 있음	위에 성토	d = 1.5
	성토 없음	d = 2.0
외부장약	많은 경우	2.0 < d < 4.5
	때때로	d = 9

## 2.2 발파진동의 특성

지반진동<sup>6-8)</sup>의 측정은 그 방향에 수직방향성분(vertical), 진행방향성분(longitudinal or radial), 접선방향성분(transverse)의 세 가지 성분으로 측정되며, 이들의 상대적 크기는 대상암반의 지질방향으로 이루어진다. 발파 진동의 측정시 주로 종파는 진행방향성분으로, 횡파는 접선방향성분으로, 표면파는 수직방향성분으로 측정되며, 이들의 상대적 크기는 대상암반의 지질

구조 및 발파에 의해 생성된 탄성파들은 상호 간섭에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 세 성분의 크기를 통합적으로 고려할 수 있는 벡터합(실벡터합)을 연구대상으로 설정하였다.

복잡한 지반을 대상으로 한 발파진동식<sup>9,10)</sup>의 이론적 전개는 아직 완전히 이루어지지 않고 있지만 현재까지의 연구 결과를 종합하면 발파진동식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^n \quad (2-1)$$

여기서 V : particle velocity(mm/sec)  
 R : distance(m)  
 W : charge per delay(kg)  
 K : 발파진동 상수  
 n : 감쇠지수  
 b : 장약지수

## 3. 현장의 지질 및 사용재료의 성분

### 3.1 현장의 지질

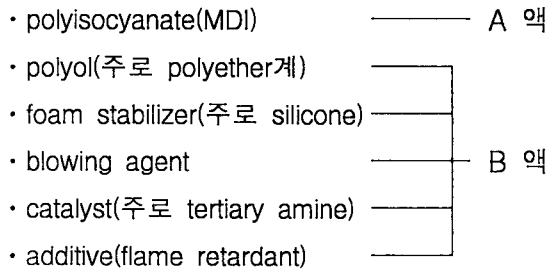
본 연구는 전라북도 군산의 D석산으로 풍화를 심하게 받은 안산암이 상부에 분포하고 있으며, 시험발파가 실시된 지역의 암석은 구성성분 및 조직형태상 중립질 및 조립질의 석영, 장석류 등이 주구성 광물로 이루어진 화강섬록암이다.

심한 변질작용으로 장석류는 일부 견운모나 고령토 등으로 변질되었으며, 사장석은 알바이트쌍정을 나타내며 방해석이 결정사이의 관입상으로도 관찰된다. 편광현미경으로 관찰한 결과 석영, 장석류, 각섬석, 흑운모, 백운모, 저어콘, 방해석, 녹니석, 견운모, 점토광물류 등으로 구성되어 있다.

### 3.2 STM의 성분

사용재료는 polyurethane<sup>11)</sup> foam의 두 가지

성분 즉, polyol을 주성분으로 하는 premix(B액)와 polyisocyanate를 주성분으로 하는 MDI(A액)를 일정비율로 혼합, 교반함으로써 만들어진다. 본 연구에서는 이를 STM(Super Tamping Material)이라 칭한다. STM의 A액과 B액은 다음과 같이 구성되어 있다.



#### 4. 측정장치 및 실험방법

##### 4.1 측정장치

본 연구에 사용된 발파진동 측정기는 THOMAS사의 VMS-500, VMS-100과 Nitro Consult사의 UVS1504 및 Canada InstanTel사 제품인 DS077로서 총 4대의 진동측정기를 이용하여 측정하였다.

##### 4.2 실험방법

STM을 사용하여 소구경 및 대구경 발파공의 전색물로 사용할 경우 천공장의 변화에 따른 최적의 전색높이를 알아보기 위해 실내실험에서 STM 각 성분의 점도, 팽창비 및 반응전물과의 반응에 대한 실험을 실시하였으며, 또한 실내실험을 통해 얻어진 A액과 B액의 혼합비율에 따른 팽창높이를 현장에 적용하여 일반전색물(모래)과 발파효과 및 발파진동의 상호관계를 비교하도록 하였다.

##### 4.2.1 점도실험

전색물은 공벽과의 접착정도가 전색의 효과를 향상시키는 중요한 요인이 되므로 STM의 A액과 B액의 혼합전의 점도를 상온에서 측정하였다. 실험에 사용한 점도계는 Brookfield 점도계 DV-III를 사용하여 점도를 측정하였으며, MDI(A액)와 Premix(B액)의 평균점도는 각각 250.6cP와 2125cP이다.

##### 4.2.2 팽창비 시험

STM은 두 액의 혼합에 의한 자연팽창을 이용한 전색물로 A액과 B액의 혼합비에 따른 팽창정도를 육안으로 확인하기 위하여 내경  $\phi$  45mm의 투명 아크릴 관을 이용하였으며, 투명 아크릴 관 밑부분은 테이프 및 비닐팩을 이용하여 완전 밀봉시켜 화학반응에 의한 팽창시 약액의 유출을 방지하도록 하였다.

내경  $\phi$  45mm의 투명 아크릴 관에는 실내온도 25°C에서 A액과 B액의 무게 비를 1:1로 하여 premix인 B액을 넣고 MDI의 A액을 부은 후 혼합될 수 있도록 충분히 교반시켜 반응이 완료되었을 때 팽창높이를 측정하였다. 약액의 무게 및 팽창높이는 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 Expansion height of STM( $\phi$  45mm)

시료 번호	A 액 (g)	B 액 (g)	반응 후의 높이 (cm)
1	30	30	20
2	40	40	27
3	50	50	35
4	60	60	41
5	70	70	47
6	100	100	66
7	110	110	74
8	120	120	79
9	140	140	85
10	160	160	98

STM은 혼합한 두 액체, 즉 MDI(A액)와 Premix(B액)의 화학반응에 의한 전색물이므로 두 액을 혼합했을 때 혼합비율 및 물의 유무에 따라 팽창높이는 다양하게 변화되어질 수 있다. 따라서 약액의 혼합비율 및 물의 유무가 화학반응 전에 미치는 영향을 파악하기 위하여 직경 15cm, 높이 30cm의 공시체에 직경 30mm의 공을 뚫은 후 A액과 B액의 비율을 1:1.5, 1:1, 1.5:1의 비율로 혼합하여 이들의 경화정도 및 팽창정도를 조사하였다. 또한 약액의 비를 1:1로 하여 두 액을 혼합하기 전 물 10ml를 첨가하여 팽창비 및 경화정도를 조사하였다. 그 결과 팽창비 및 경화정도는 약액의 비가 1:1인 경우가 가장 양호하게 나타났으며, 물이 첨가된 액의 화학반응 때 팽창비는 수 배 증가하나 공벽과의 접착정도는 떨어지는 것으로 나타났다.

STM은 Premix(B액)에 첨가된 catalyst의 양에 따라 반응시간을 수초에서 수분까지 자유롭게 변화시킬 수 있으므로 사용 장소 및 목적에 따라 catalyst의 양을 조정하여 사용할 필요가 있다.

#### 4.3 발파조건 및 측정방법

종래 전색물(모래)과 STM의 발파효과 및 진동 상호관계를 알아보기 위해 Table 4.5의 조건으로 실험을 실시하였다.

모래 전색물을 사용하여 전색하는 경우 polyethylene film에 담겨진 전색물을 사용하지 않고 전색효과를 극대화 할 수 있도록 모래를 30cm정도 전색한 후 다짐봉을 이용하여 충분히 다져준 후 공구부분까지 전색하였다.

STM을 사용하여 전색하는 경우 실내 팽창비 실험에서 충분한 전색효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단되는 A액과 B액의 혼합비를 1:1로 하여 각각 240g을 혼합하여 전색하였다. 매 회 발파가 끝난 후 발파지역의 파쇄압을 정리

하고 파쇄상태를 확인하였으며, 파쇄상태는 파쇄범위 및 파쇄깊이를 측정하여 5등급으로 나누어 매우 양호, 양호, 보통, 불량, 매우 불량으로 구분하여 점수를 산출하였다. STM은 전술한 바와 같이 MDI의 isocyanate가 H<sub>2</sub>O와 반응하면 급속한 화학반응을 일으켜 팽창높이가 급속히 증가하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이를 최대한 방지하기 위하여 polyethylene film에 두 액을 혼합한 다음 발파공 외부에서 충분히 흔들어 준 후 공 내부로 충전하였다.

종래의 전색물로 전색한 경우와 STM으로 전색한 경우, 발파진동의 상호관계를 알아보기 위해 동일 암반 내에 진동측정기를 설치하여 SD를 변화시키며 진동측정을 실시하였다.

Table 4.5 Conditions of blasting

	SAND	STM
drilling depth(m)	3.0	3.0
diameter of hole(mm)	45	45
number of hole	1~3	1~3
detonator	instantaneous detonator	instantaneous detonator
hole spacing(m)	0.4~1	0.4~1
explosive	Emulite 150S	Emulite 150S
cartridge diameter(mm)	32	32
max. charge weight per delay(kg)	1.44~3.24	1.44~3.24

## 5. 실험결과 및 고찰

### 5.1 암석의 파쇄상태

발파에 사용한 기폭제는 8호 순발전기뇌관과 정확한 화약량의 산출을 위해 Emulite 150S(약

경  $\phi 32\text{mm}$ , 약장 200mm)를 사용하여 시험발파를 실시하였다. Fig. 5.1, Fig. 5.2는 종래의 전색물(모래)과 STM을 사용하여 발파했을 때 암석의 파쇄상태를 백분율로 표시한 것이다. 모래를 전색물로 이용한 발파 횟수 26회, STM을 이용한 발파 횟수 23회의 결과이며, 암석의 파쇄상태는 STM를 사용했을 때 우수한 것으로 평가되었다.

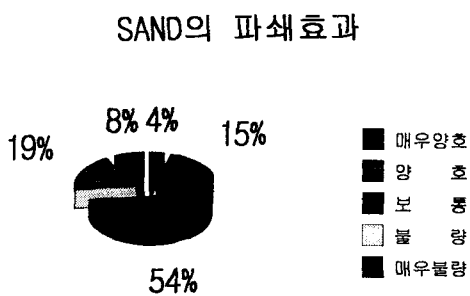


Fig. 5.1 Fragmentation state of sand

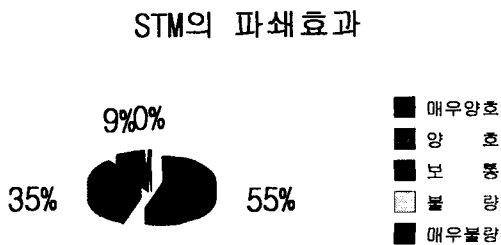


Fig. 5.2 Fragmentation state of STM

## 5.2 시험발파

### 5.2.1 모래 전색물

최근 노천 및 터널발파에서는 재료의 구입이 용이한 모래를 전색물로 널리 이용하고 있다. 본 연구에서도 모래 전색물을 이용하여 공당장 약량 1.08~1.44kg, 지발당 총장약량 1.44~

3.24kg으로 Table 4.5의 조건으로 시험발파를 실시했을 때 최대진동속도의 실백터합은 2.50~15.30mm/sec로 측정되었으며, 폭원과 측정까지의 거리는 40~62m이다.

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 지발당 장약량(kg)과 거리(m)에 의해 결정되고 기타의 요인들은 지반의 성질이나 발파조건에 의해 결정되었다. 따라서 발파설계를 위해서 시험발파를 통해 입지상수 K와 감쇠지수 n 등을 결정하기 위하여 식 (2.1)을 이용하여 log-log scale로 좌표 상에 도시하였을 때 기울기(n)와 절편(log K)으로부터 결정하였다.

식 (2.1)에 의한 시험발파의 발파진동식은 다음과 같다.

$$V = 1547.015 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.404} \quad (5.1)$$

$$V = 4658.567 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.667} \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Super Tamping Material(S.T.M)

Table 4.5의 발파조건에 A액과 B액의 혼합비율 1:1로 하여 각각 240g을 polyethylene film에 혼합하여 전색작업을 실시하였다. 시험발파시 측정된 최대진동속도의 실백터합은 2.30~16.0mm/sec로 측정되었으며, 폭원과 측정까지의 거리는 30~61m이다.

이 때의 발파진동식은 다음과 같다.

$$V = 2611.304 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.561} \quad (5.3)$$

$$V = 6042.803 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.746} \quad (5.4)$$

#### 5.4 노모그램을 통한 결과 해석

발파현장에 적합한 발파 진동식을 구하는 것은 발파 작업장의 주변구조물에 피해를 발생시키지 않는 범위에서 발파작업이 안전하게 이루어질 수 있도록 지발당 장약량을 합리적으로 조절하기 위한 것이다. 발파현장에 적합한 발파 진동식을 도출하고 발파작업장의 주변 구조물에 피해를 발생시키지 않을 한계 진동치를 결정 한 후, 이를 기준으로 폭원과 구조물간의 거리에 따라 지발당 최대 허용장약량을 구할 수 있다. 발파작업이 진행됨으로써 발파작업장 주변의 구조물과 폭원과의 거리가 변하게 되고 발파진동식에서 산출된 최대 허용장약량도 변하게 된다.

발파진동속도는 지발당 최대 허용장약량과 폭원으로부터의 거리를 변수로 하는 환산거리의 함수로 표시 될 수 있는데 그 관계식은 식 (5.5)과 같다. 이 식에서 진동속도와 환산거리의 비선형적 관계이나 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 선형의 식으로 만들 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log(SD) \quad (5.5)$$

본 연구를 위해서 발파현장의 안전 진동치를 10mm/sec로 설정하여 95%의 신뢰수준을 갖는 식을 이용하여 폭원과 구조물간의 거리에 따른 지발당 최대 허용장약량을 산출하였으며, Fig. 5.3과 Fig. 5.4는 자승근 및 삼승근에 의한 지발당 최대 허용장약량과 거리와의 관계를 나타내는 노모그램이다.

#### 5.5 STM과 모래 전색물의 취급상의 비교

STM과 모래 전색물을 이용한 발파작업의 큰 차이점은 가지고 있지 않으나 다음과 같은 사항들에 있어 차이점을 찾을 수 있다.

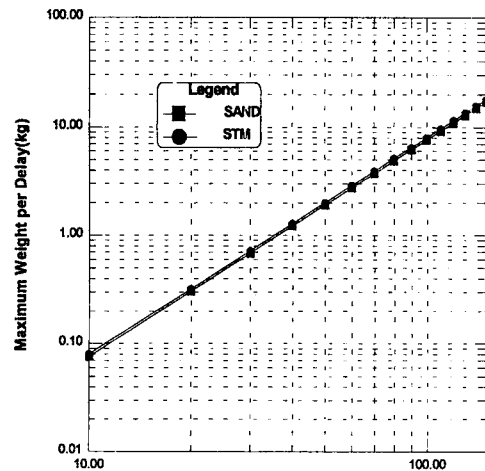


Fig. 5.3 Maximum charge weight per delay vs. distance from blasting point to sensor by square root scaled distance (10mm/sec, confidence level 95%)

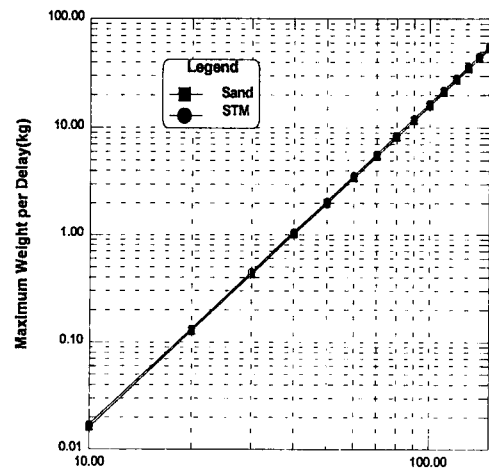


Fig. 5.4 Maximum charge weight per delay vs distance from blasting from blasting point to sensor by cube root scaled distance (10mm/sec, confidence level 95%)

모래 전색물의 경우 작업장과 떨어진 곳에서 재료를 구입하여 polyethylene film에 40~50cm 크기로 담은 후 작업장소까지 이들을 운반하여 장약작업이 끝난 후 공구 부분까지 다짐봉을

이용하여 전색작업을 실시하는 반면 STM은 현장에서 약액을 혼합하여 전색작업이 이루어질 수 있으며, 자연팽창에 의하여 공의 상부 부분을 충전하게 되므로 다짐봉에 의한 다짐이 필요 없다. 모래 전색물의 경우 재료의 구입이 용이하고, 수평천공 작업시 STM에 비하여 전색작업이 용이하나 작업과정에서 전색물의 손실이 많고, 다짐봉을 사용하여 전색작업을 실시하므로 각선의 절단 가능성이 높다. 그러나 STM은 모래 전색물에 비하여 공의 밀폐효과가 우수하여 발파효과 및 암석의 파쇄효과가 우수하며, 액의 자연팽창에 의하여 공을 충전하게 되므로 각선의 절단 위험성이 없으며, 장공 발파시 전색장을 감소시킬 수 있는 장점이 있으나 발파풍압은 10~15dB정도 높게 계측되었다.

## 6. 결 론

본 연구는 STM이라는 전색물과 종래의 전색물(모래)을 이용하여 발파했을 때, 발파효과 및 발파진동에 미치는 영향을 규명하기 위해 실내실험 및 시험발파를 통한 결론은 다음과 같다.

1) STM의 MDI와 premix의 혼합비율은 1:1의 조건이 팽창정도 및 공시체의 공벽과 접촉정도가 가장 양호하며, 화학반응 전에 물이 혼합되게 되면 팽창비는 증가하나 천공 벽과의 접촉정도가 떨어진다.

2) 시험발파를 통한 암석의 파쇄상태는 모래의 경우 양호 이상이 19%, STM의 경우 양호 이상이 91%를 나타냈다. 이는 STM의 전색효과가 양호하여 종래의 전색물보다 파쇄효과가 우수한 것으로 판단된다.

3) 허용한계 진동치를 10mm/sec로 설정하였을 때 시험발파시 100m거리에서 자승근의 경우 모래는 7.615kg, STM은 7.994kg으로 동일거리에서 약 5%의 장약량을 증가시켜 발파작업이 가능하므로 STM을 이용하여 발파를 실시했을 때 발파진동의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

4) STM은 약액의 혼합에 의한 자연팽창에 의하여 공을 충전하고 점착력을 갖는 물질이기 때문에 장약공을 완전 밀폐하므로 종래 전색물(모래)을 이용하여 발파하는 경우 보다 발파풍압이 10~15dB 정도 높게 계측되었으며, 이에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 준 조선대학교에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 전택수 외, 1995, 건물발파해체의 비밀(3), 한국암반공학회지, 5, 390
2. Bollinger, G.A., 1979, Effect of blasting vibrations on curing concrete, The 20th U.S Symposium on Rock Mechanics in Austin, Texas, 455-458
3. Per-Anders Persson, 1994, Rock blasting and Explosives Engineering, CRC press, 190-191, 517-519.
4. 장원일, 김재극, 1980, 노천굴 발파장에서의 장약의 위치가 파쇄에 미치는 영향에 관한 모델 연구, 대한광산학회지, 17, 190-197.

5. 橋本清, 김용수, 1977, 암석발파에 있어서의 표준장약량 산정에 관한 연구, 대한광산학회지, 13, 10-18.
6. U. Langefors, B. Kihlstrom, 1978, The modern technique of rock blasting, third edition, 258-293
7. Charles H. Dowing, 1984, Blast vibration monitoring and control, 24-40.
8. 강추원, 1997, 시가지 발파에서 공저전색물이 발파진동에 미치는 영향, 한국암반공학학회지, 7, 51-57.
9. 김대상 외, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학학회지, 28, 444-454.
10. 양형식, 주재성, 1990, 노천굴 발파의 진동 특성과 입지상수 결정에 관한 연구, 한국자원공학학회지, 27, 316-323
11. 정기현, 1991, 석유화학공학, 보진제, 262-277.