

7.0 12.0 %; 0.06 0.10 %; 5.0 15.0 %; 3.0 5.0 %;
 3.0 5.0 %; 3.0 12.0 %; 1.0 5.0 %; 0.0080 0.01
 %; 0 10.0 %; 2.0 6.0 %; 0 2.0 %; 0 3.0 %;
 0 2.0 %; 가 , - 가

가 (single crystal, SC) (Rene) N4
 SC N4 가 5,154,884 7 12 % Cr, 1 5 % Mo, 3
 5 % Ti, 3 5 % Al, 5 15 % Co, 3 12 % W, 10 % Re, 2
 6 % Ta, 2 % Cb, 3 % V, 2 % Hf
 , 7.0 8.0 % Co, 1.3 1.7 % Mo, 5.75 6.25 5,399,313 9.5 10.0 % Cr
 3.6 % Ti, 4.1 4.3 % Al, 0.4 0.6 % Cb, 0.1 0.2 % Hf, 0.05 0.0
 7 % C 0.003 0.005 % B SC N4

가 36 가 40

가

72,000

(gamma-prime precipitate) 60 80% 가
 0 130 ppm, 80 130 ppm, 80 100 ppm(0.0080 0.01
 %) 90 ppm(0.009 %)

1 , 7.0 12.0 %, 5.0 15.0 %, 0.06 0.10 %, 3.0
 5.0 %, 3.0 5.0 %, 3.0 12.0 %, 1.0 5.0 %, 0.00
 80 0.013 %, 0 10.0 %, 2.0 6.0 %, 0 2.0 %, 0
 3.0 %, 0 2.0 % 가 (large land-based utility gas turbine engine)

6 3 4 ;

7 가 .

50 ppm 130 ppm 가
 가 'M₅B₃' [, M
 Ni₅B₃ (eutectic) ((Auger Spectrometry) (grain boundary) Ni
)] ('M₅B₃' (Microdiffraction)
 ((2334 2301 ((Differential Therm
 al Analysis, DTA)). , 2320 (SC N4) , DS
 가 Ni₅B₃ (pool) () , DS
 , , 가
 (FPI) 가

50 ppm 가 - 30 , 2320
 , , ,
 , 130 ppm 2301 , ,
 , 2280 . 2280 2301 , - , 60 80%
 , 가 - 가 , 130 ppm -
 , 가
 130 ppm , ,
 5% .

80 100 ppm, , 90 ± 10 ppm
 , - , 60 80% 가
 (90 ppm) , 가 가 , 90
 ppm , 가 가

an)' , 4,169,742 (() . B Zr
 (C Hf) SC N4 , DSN4 ' (le
 , 3가 , 4가 (DOE) .
 (Zr) (Ti)

| DOE | 3가 | % | |
|-----|----------------|---------------|----------------|
| | 0.06 | 0.10 | 0.14 |
| | 0.25 | 0.45 | 0.65 |
| | 0.0075(75 ppm) | 0.01(100 ppm) | 0.015(150 ppm) |
| | 3,37 | 3.50 | 3.65 |

Hf Ti , B
 C B , (3x3x3x1x3 81), (0.65%-0.

25%=0.45%) (3.65%-3.37%=0.28%) (0.14%-0.06%=0.08%) (0.015%-0.0075%)

(Hf) FPI
 . 0.75% Hf DS N4(30 50 ppm 80 130 ppm)
 , 0.25 % Hf 0.45 % Hf
 Hf 0.15 % , DS
 N4 , Hf 0.15 0.45 %
 N4 가 가
 가 0.04 % C, 9.77 % Cr, 7.49 % Co, 5.92
 % W, 1.51 % Mo, 4.21 % Al, 3.37 % Ti, 0.45 % Nb, 4.71 % Ta, 0.16
 % Hf, 0.00 % B, 0.005 % Zr Ni (60) (120)
) 가

"주조성 시험에서의 균열 길이(인치)"

| | | 박막 Hf | | | | 후막 Hf | | | |
|---|-------|------------|-------------------|--------------|--------------|------------|--------------|-------------|--------------|
| | | 0.00 | 0.15 | 0.45 | 0.00 | 0.15 | 0.45 | | |
| B | 0.004 | 5.6 5.4 | 7.4 7.4 9.6 | 11.2 11.0 | 18.9 15.3 | 7.0 5.0 | 6.3 5.7 | 5.5 11.1 | 17.0 13.8 |
| | 0.009 | | 19.4 14.1 | | | | 10.4 13.3 | | |
| | 0.013 | | 13.8 13.9 | | 10.8 | | 15.2 12.2 | | 8.4 |

박스라 나타낸 데이터는 "스크래치" 열로부터 설정됨.
 다른 열은 마스터 빈열을 도핑하여 이루어진 것임.

가 , 40 ppm(0.004%) 가 Hf DS N4,
 130 ppm(0.013%) 0.45% Hf OR 가 (sa
 ddle point)' . Hf
 . 0.15% Hf 90 ppm 0.15% Hf 130 ppm
 . Hf Hf (dross)
 HfO₂ (
)
 , Hf가 (0.15 0.45 %)

4가 : 가
 . HIP (2175 2225);
 . (2270 2290);
 . (35 / , 150 / 가
 , 2050 가);
 . (가).
 HIP ' ,
 HIP SC DS N4 2175 2225 15,000 psi
 2290 가 . 2290 2290
 (RAMP) 4 ,

| 2300 °F까지 전형적인 램프 4 용체화 열처리 사이클 | | | | |
|---------------------------------|---------|--------|---------|--|
| 램프 속도 | 유지 온도 | 유지 시간 | 가열 속도 | 목적/결과 |
| 25 °F/분 | 1400 °F | 10 분 | - | 안정화, 및 800 마이크론의 아르곤 가스 도입 개시. 이미 100% 아르곤 분위기에서 시행하는 경우에는 사용하지 않음 |
| 25 °F/분 | 2225 °F | 8 시간 | 증가 | 균질화 |
| 25 °F/시간 | 2250 °F | 4 시간 | 증가 | 균질화 |
| 30 °F/시간 | 2280 °F | 2 시간 | 증가 | 균질화 |
| 10 °F/시간 | 2290 °F | 2 시간 | 증가 | 균질화 |
| 10 °F/시간 | 2300 °F | 0.5 시간 | 실온으로 냉각 | 최종 감마-프라임 용체화 달성 |

가 , 4 (2290 /2) . 229
 0 , 2300 (RX) DS N4 . 229
 RX , 2290
 , 2270
 , -
 1 . 2270 ± 10 2260 2280 ,
 2290 ± 10 2280 2300 .
 ,
 ,
 HIP DS N4 , HIP , 2225 , HIP 2175
 , HIP , 가
 , 가 100 150 / 가
 , ,가 4
 () ,
 35 75 /
 , 가 가 400
 800 (backfill) () (4
) 100% () .
 , , (100%) DS N4 ()
 1 가 가 , 가
 (가) . 가 -HIP 가 - () .
 , 가 가 () .
 25 130 ppm DS N4 , 2175 22
 , 35 / 15,000 psi 4 HIP , 2270 2290
 , 2050 , 1200 가
 가 , 2280 ± 10 (, 2270 2290) ,

(RX)가 가 , 가 ,
 가 (Heat Treat Yield Transfer Function Equation) (1)
 :

| (%) | () | (B) (ppm) |
|-----|------|-----------|
| 100 | 2280 | 40 |
| 50 | 2292 | 130 |
| 50 | 2310 | 40 |
| 90 | 2280 | 130 |
| 0 | 2327 | 40 |
| 0 | 2310 | 130 |

:

$$= 5448 - 2.34() - (0.340)*() (1)$$

| | | | T | P | VIF |
|---|---------|--------|-------|-------|-----|
| | 5448.0 | 671.8 | 8.11 | 0.004 | |
| | -2.3353 | 0.2907 | -8.03 | 0.004 | 1.1 |
| B | -0.3398 | 0.1117 | -3.04 | 0.056 | 1.1 |

S = 11.59 R-Sq. = 95.6% R-Sq. (Adj) = 92.6% (R-Sq = R² R ; adj).
 . 100%

DS N4 :

| (%) | () |
|-----|------|
| 100 | 2320 |
| 90 | 2300 |
| 60 | 2280 |
| 40 | 2215 |

가 (t)

(2) (2 DS N4 가).

DS N4 100% 40% 가 2320

() . ,

:

| (%) | (ppm) |
|-----|-------|
| 50 | 40 |
| 100 | 80 |
| 80 | 130 |
| 90 | 100 |

3

(3)

$$Y = -40.7431 + 2.9113X - 1.54E-02X^2$$

()

다중 반응 최적화

실계 변수

| 항목 | 하한치 | 상한치 | 새 출발값 |
|--------|------|------|--------------|
| 용소 함량 | 40 | 130 | 40.0150419 |
| 용제화 온도 | 2280 | 2310 | 2280.0833178 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

제한조건(X 사이의 관계)

| 항목 | 식 f(X) | >>= <= | 필요조건(수) |
|----|--------|--------|---------|
| | 0 | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

용제화

| 항목 | 식 f(X) | >>= <= | 목표(값) | 최대값 |
|---------|-------------|--------|-------|-----|
| 수율 | 88.99983519 | >= | 99 | 100 |
| 크리프 | 84.75601253 | >= | 99 | 100 |
| 필방향 크리프 | 51.00135465 | >= | 99 | 100 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |



목표/전달 함수

| 항목 | 식 f(X) | >>= <= | 목표(값) | 최대값 |
|---------|-------------|--------|-------|-----|
| 수율 | 88.99983519 | >= | 99 | 100 |
| 크리프 | 84.75601253 | >= | 99 | 100 |
| 필방향 크리프 | 51.00135465 | >= | 99 | 100 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

최적화 우선순위

| | |
|-------------|-----------|
| 0.48059E-07 | 우선순위 수준 1 |
| 0.142049875 | 우선순위 수준 2 |
| | 우선순위 수준 3 |

COPYRIGHT 1997
Dr. Maurice L. Berry
All Rights Reserved

| | | | | | | | |
|--|---|-----|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | |
| | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| | | | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| | | | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| | B | ppm | 40 | 40 | 94.5 | 94.5 | 40 |
| | | | 2280 | 2280 | 2296 | 2280 | 2296 |

'1'

, '2'

'3'

94.5 +/- 10 ppm

2280 ± 20

4 . 5 SC DS N4

6 가 3 4 . 7

가 , 가

(57)

1.

7.0 12.0 %, 0.06 0.10 %, 5.0 15.0 %, 3.0 5.0 %, 3.0 5.0 %, 0.0080 0.013
 0 %, 0 10.0 %, 2.0 6.0 %, 0 2.0 %, 0 3.0 %, 0 2.0 %, 가

2.

1 ,
 가 0.008 0.010 %

3.

1 ,
 가 0.009 %

4.

1 ,
 0.015 0.45 %

5.

9.50 10.00 %, 7.00 8.00 %, 4.10 4.30 %, 3.35 3.6
 5 %, 5.75 6.25 %, 1.30 1.70 %, 4.60 5.00 %, 0.06
 0.10 %, 0.01 % , 0.008 0.010 %, 0.20 % , 0.20 %
 , 0.01 % , 0.10 % , 0.005 % , 0.003 % , 0.40
 0.60 %, 0.002 % , 0.0015 % , 0.10 % , 0.10 0.20
 %, 0.15 % , 0.10 % , + 6.25 % , 0.0035 % ,
 0.10 % , 가

6.

- (a) 1 ;
- (b) 가 60% ;
- (c) ,

7.

6 ,

2260 2300

25

가

8.

6 ,

35 / 2050

9.

6 ,

가 2050 100 150 /

10.

6 ,

가

11.

6 ,

b) (a) 가, (a) 25 / 1400 가 8 10 ; (b)
 25 / 2225 가 4 ; (c) (
 30 / 2250 가 2 ; (d) (c)
 2280 가 ; (e)

12.

11 ,

35 / 2050

13.

11 ,

가 2050 100 150 /

14.

6 ,

15.

6 ,

16.

6 ,

17.

16 ,

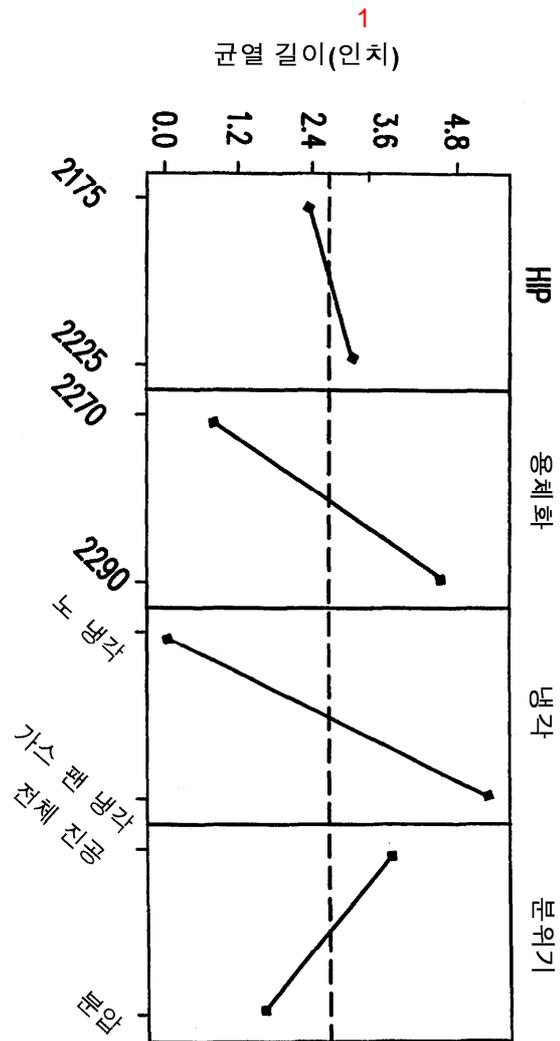
18.

16 ,

16 19.

16 20.

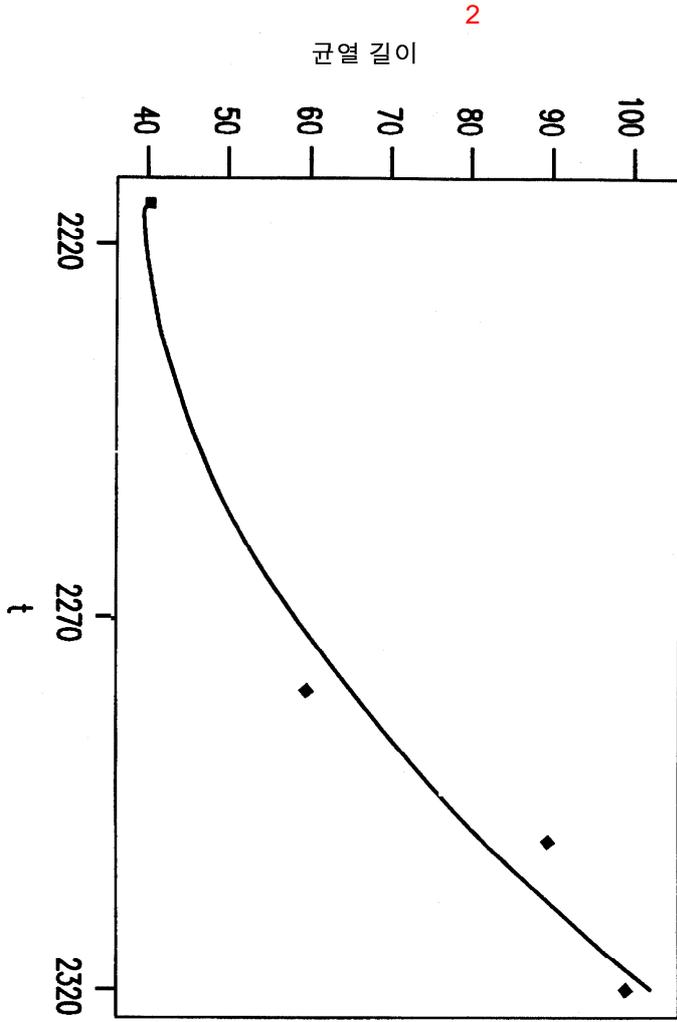
가



주요 영향 인자 플롯-균열 길이에 대한 평균 데이터(인치)

회귀 플롯

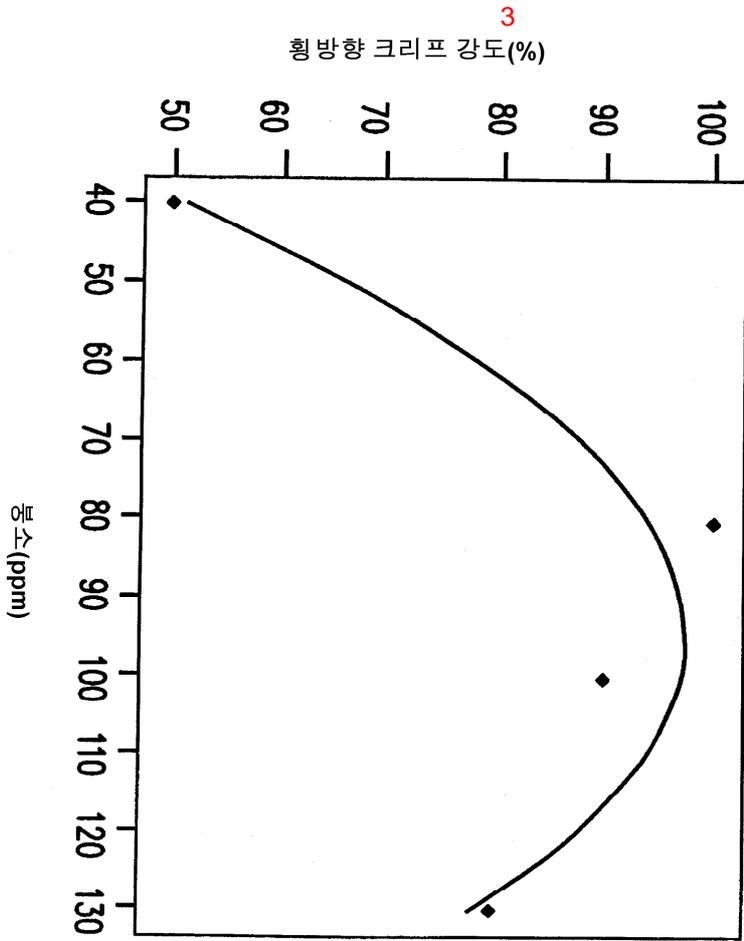
크리프 강도 = $25912 - 23.4 (t) + 0.0053 (t^2)$
 $R^2 = 95.6\%$



회귀 플롯

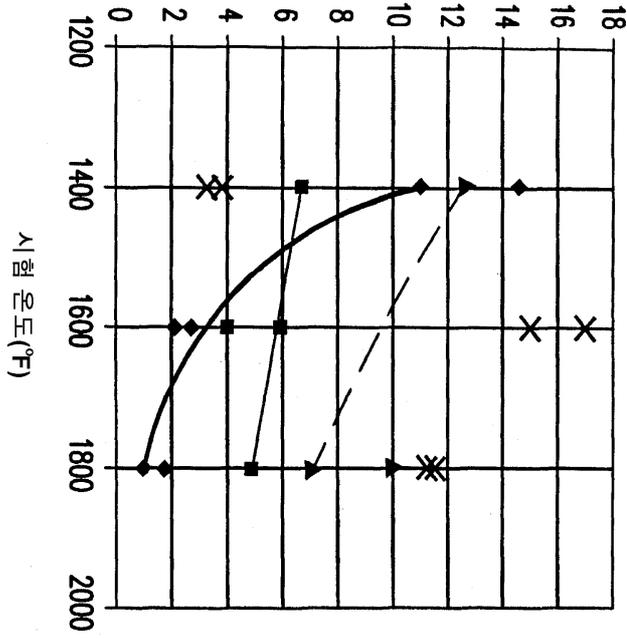
$$Y = -40.7431 + 2.91123X - 1.54E-02X^2$$

$$R^2 = 93.7 \%$$



4

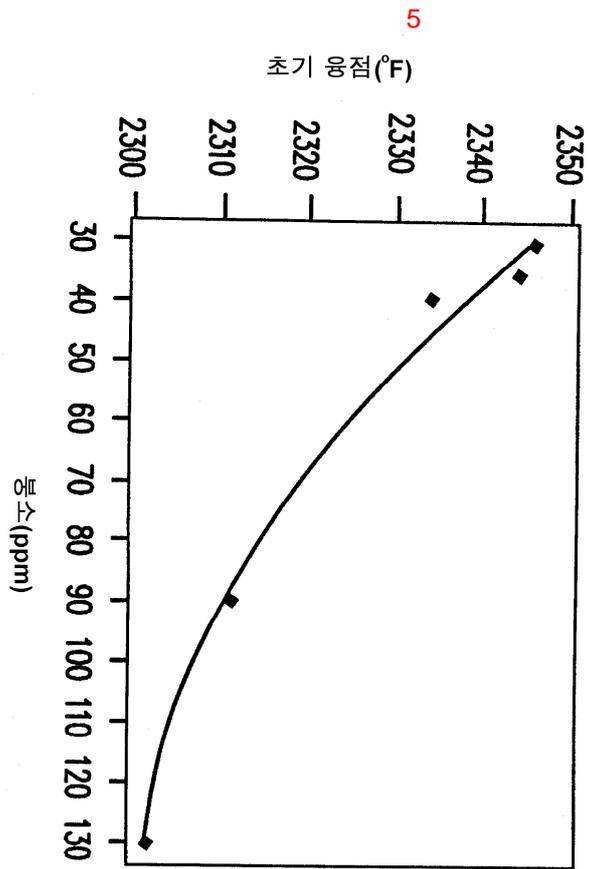
크리프 연신율(%)



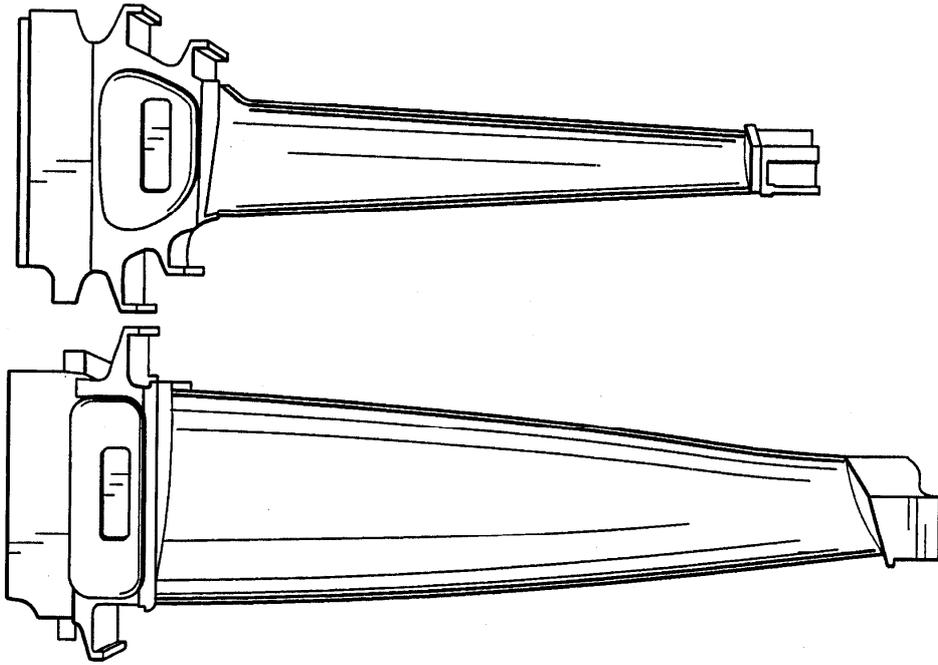
DS GTD444 평균항 크리프 연성

| | |
|-------|------------------------|
| ◆ | 40 ppm B (2320F) |
| ■ | 90 ppm B (2280F) |
| ▲ | 130 ppm B (2320F) |
| × | 130 ppm B (2280F) |
| - - - | 응력 (130 ppm B (2320F)) |
| - - - | 응력 (40 ppm B (2320F)) |
| - - - | 응력 (90 ppm B (2280F)) |

GTD444 에 대한 초기 응점 대 불소 함량
 $Y = 2374.17 - 1.05130X + 3.77E-03X**2$
 $R^2 = 98.4 \%$



6



DS 렌 N4(GTD444)로부터 제조된
MS7001H 3단 및 4단 터빈 장치

MS7001H 가스 터빈

MS7001H 터빈은 3600 rpm 으로 회전할 것이다

