

# 오염 입자 상태에 따른 레이저 충격파 클리닝 특성 고찰

강영재\*\* · 이종명\* · 이상호\*\* · 박진구\*\* · 김태훈\*

\*\*한양대학교 금속재료공학과

\*(주)아이엠티 레이저그룹

## Investigation of Laser Shock Wave Cleaning with Different Particle Condition

Y. J. Kang\*\*, J. M. Lee\*, S. H. Lee\*\*, J. G. Park\*\* and T. H. Kim\*

\*\*Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hanyang University

\*Laser Engineering Group, IMT Co. Ltd.

### Abstract

In semiconductor processing, there are two types of particle contaminated onto the wafer, i.e. dry and wet state particles. In order to evaluate the cleaning performance of laser shock wave cleaning method, the removal of 1  $\mu$ m sized alumina particle at different particle conditions from silicon wafer has been carried out by laser-induced shock waves. It was found that the removal efficiency by laser shock cleaning was strongly dependent on the particle condition, i.e. the removal efficiency of dry alumina particle from silicon wafer was around 97% while the efficiencies of wet alumina particle in DI water and IPA are 35% and 55% respectively. From the analysis of adhesion forces between the particle and the silicon substrate, the adhesion force of the wet particle where capillary force is dominant is much larger than that of the dry particle where Van der Waals force is dominant. As a result, it is seen that the particle in wet condition is much more difficult to remove from silicon wafer than the particle in dry condition by using physical cleaning method such as laser shock cleaning.

**Key Words** : laser shock cleaning, particle condition, silicon wafer, alumina, adhesion force

## 1. 서 론

반도체 소자가 고집적화 될수록 미세 오염이 수율 감소에 미치는 영향 때문에 세정 공정의 중요성은 더욱더 부각되고 있다. 반도체 제조 공정에서 웨이퍼 세정 공정은 크게 습식과 건식 방법, 두 가지로 나눌 수 있고, 이 두 가지 방법 중 습식 세정 공정은 1970년대 W. Kern에 의해 개발된 RCA 세정 방법이 현재까지도 반도체 제조 공정에 널리 적용되고 있다. 이러한 습식 세정 방법은 세정액의 고순도화, 웨이퍼의 대직경화에 따른 세정액의 사용량 증가, 세정 공정 후 발생하는 다량의 폐수로 인한 환경오염 등이 최근 큰 문제점으로 인식되고 있다<sup>1-3)</sup>. 이러한 문제점들을 극복하고자 최근에는 습식 세정 공정 대신 아르곤 에어로졸(Ar aerosol), 초임계유체(super critical fluid) 또는 레이저를 이용한 건식 세정 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

빛 에너지를 사용하는 레이저 세정 공정은 비접촉식 건식 세정 방법으로 공정 중 유해 화학물질을 전혀 배출하지 않는 청정 세정 공정으로 접촉에 의한 마모가 발생하지 않고 자동화가 용이하며 레이저의 단색성을 이용해 오염물질만을 선택적으로 제거할 수 있다는 장점을 가지고 있다<sup>4)</sup>. 그러나 작은 스폿 사이즈에 의한 클리닝 시간이 길며, 매우 민감한 표면의 경우 레이저 빔의 직접 조사에 의한 표면 손상 가능성이 있으며, 무기 오염 입자들의 제거가 어렵다는 단점 등이 지적되고 있다. 이러한 단점들을 극복하고자 다양한 레이저 클리닝 응용 기술들이 개발 중에 있으며, 그 중 레이저 충격파 클리닝 방법은 매우 빠른 클리닝 속도, 효과적인 나노 스케일 무기 오염 입자 제거 능력, 상대적으로 모재 손상 가능성을 낮출 수 있다는 특성으로 인해 현재 반도체와 같은 정밀, 민감 표면의 클리닝 방법으로 각광을 받고 있다<sup>4-6)</sup>.

현재 반도체 웨이퍼 생산에 있어 오염 입자가 흡착되는 경우는 크게 공기 중 혹은 건식 반도체 공정 중 건식 입자들이 웨이퍼 상에 오염되는 경우와 습식 환경 및 공정 중에 발생한 습식 입자들이 오염 되는 경우 두 가지 경우가 있다. 습식 상태의 입자가 반도체 표면에 오염되는 경우 대부분 초순수(DI water) 혹은 이소프로필알콜(IPA)의 상태에서 오염된다.

따라서 본 논문에서는 실리콘 웨이퍼 표면 위에 건식 상태로 오염되어 있는 입자와 초순수 및 IPA 상태로 오염되어 있는 입자들을 레이저 충격파 클리닝 방법을 이용하여 그 제거 효율을 비교하였으며, 그 결과를 접촉 이론식을 이용해 비교 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 웨이퍼는 6" p-type (100) 실리콘 웨이퍼이며, 상기 웨이퍼에 오염되는 입자로는 지름의 크기가 1 $\mu$ m인 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 파티클(Buehler co.)을 사용하였다. 오염 입자 상태에 따른 레이저 충격파 클리닝 효율을 알아 보기 위해, 오염 입자를 건식 및 습식 방법으로 웨이퍼에 오염을 시켰다. 건식 상태의 오염 입자를 만들기 위해 밀폐된 챔버 안에 웨이퍼를 위치시킨 후,  $N_2$  가스 분사를 통해 알루미늄 오염 입자를 공기 중에 분산시켜 웨이퍼 상에 입자들을 오염 시킨 후, 오염된 웨이퍼 상에 다시 강력한  $N_2$  가스를 취입하여 느슨하게 붙어 있는 오염 입자들은 제거하였다. 또한 습식 상태의 오염 입자를 만들기 위해서는 용액에 오염 입자를 분산(dispersion) 시킨 후 스프레이건(spray gun)을 이용해 챔버 안에서 분사 시킴으로써 웨이퍼 상에 습식 입자들을 오염시켰다. 이때 사용된 용액은 반도체 공정에서 널

리 사용되는 초순수(DI water)와 이소프로필알콜(IPA: Iso-Propyl Alcohol), 두가지 용액을 사용하였다.

상기와 같이 오염 상태가 다른 입자들을 웨이퍼 표면에서 제거하기 위해 매우 일정한 물리적 힘을 가하는 레이저 충격과 클리닝 방법을 사용하였다. 사용된 레이저 장비로는 ㈜아이엠티에서 보유하고 있는 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저 충격과 클리닝 시스템(모델명: LSC-H)을 사용하였으며, 클리닝 시스템의 개략도는 Fig. 1와 같다.

레이저 충격과 클리닝의 원리는, 강력한 레이저 펄스를 클리닝 대상물 표면 위에 집속시키면, 공기 중에 존재하는 입자들이 레이저빔의 강력한 전자기장에 의해 브레이크다운(break-down)이 일어나 이온화가 되며 강력한 대기 중 플라즈마를 발생시킨다. 이렇게 순간적으로 발생 팽창하는 플라즈마는 주위에 충격파(shock wave)를 발생시키고 사방으로 전파하게 되는데, 그 충격

파의 힘이 오염물의 접착력(adhesion force) 보다 클 때 표면의 오염 입자들은 제거가 가능하게 되는데, 이를 레이저 충격과 클리닝(LSC: Laser Shock Cleaning)이라고 한다.<sup>5,7)</sup>

Fig. 1에서 레이저 소스에서 발진하는 레이저빔을 빔분할기(beam splitter) 혹은 스위칭 미러(switching mirror)를 이용해 빔의 방향을 분리 혹은 전환시켜 주파수 하모닉(harmonic) 장치를 이용해 자외선 레이저빔을 생성시켜, 레이저 유기 충격과 동시에 혹은 교대로 실리콘 표면에 입사 시킴으로써 다양한 방법의 클리닝을 수행할 수 있게 구성되어 있다.

레이저 충격과 클리닝에 의한 웨이퍼 표면 위 오염 입자들의 제거 효율을 정량적으로 분석하기 위해 KLA-Tencor사의 표면 스캐너(모델명: Surfscan 5500)를 사용하여 클리닝 전-후 표면에 존재하는 입자들의 개수를 측정 및 분석 하였다.

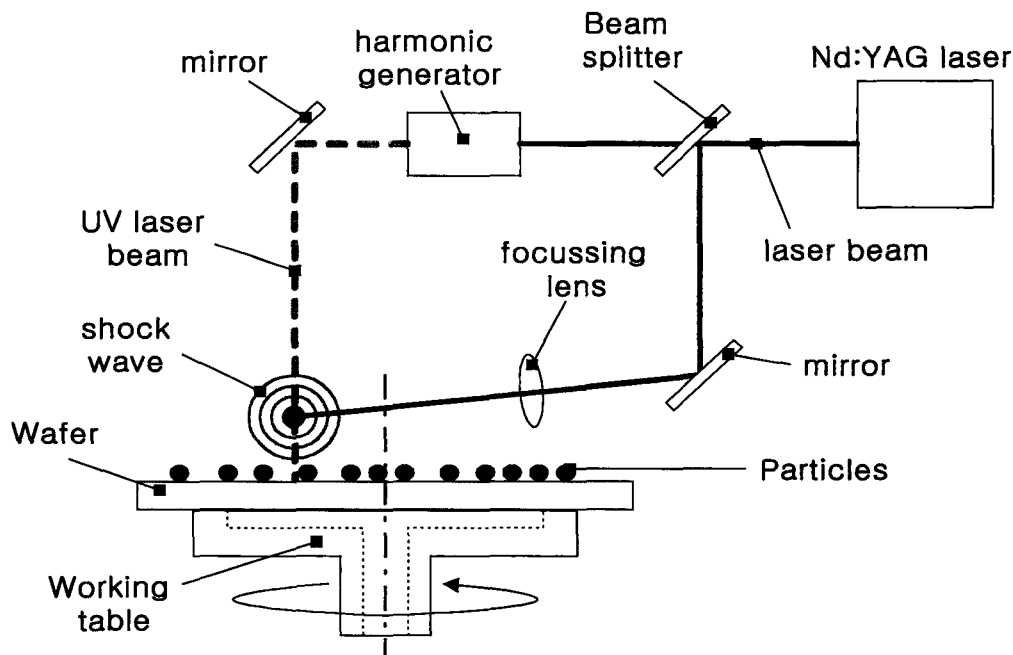
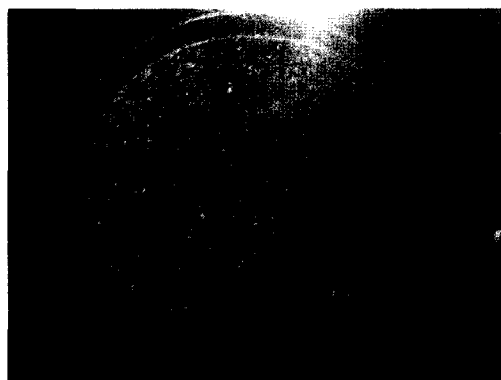


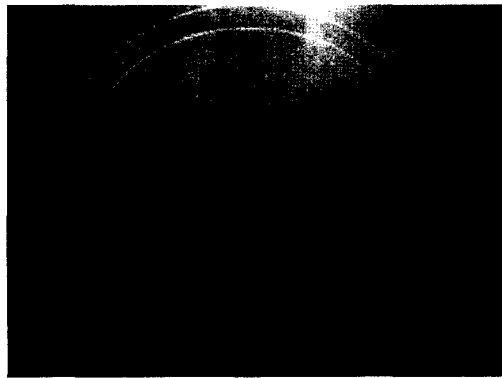
Fig. 1. Schematic diagram of the laser shock cleaning (LSC) system

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는  $N_2$  가스에 의해 오염 시킨 건식 알루미나 입자들을 레이저 충격과 클리닝 방법에 의해 제거 되기 전과 후의 웨이퍼 표면을 스캐너를 이용해 찍은 사진을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실리콘 웨이퍼 표면에 매우 많이 존재하고 있던 건식 알루미나 입자들이 레이저 충격과 클리닝 후 대부분 깨끗이 제거 되었음을 보여 주고 있다.

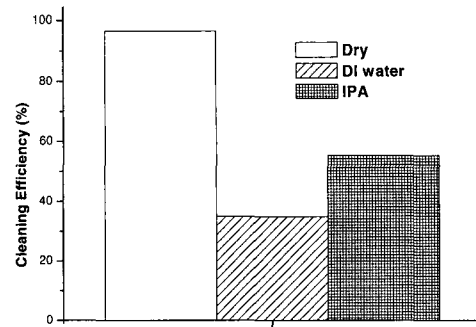


(a) Before cleaning



(b) After cleaning

**Fig. 2. Silicon wafer surfaces before and after laser shock cleaning of dry alumina particle, which are scanned images by Surfscan 5500**



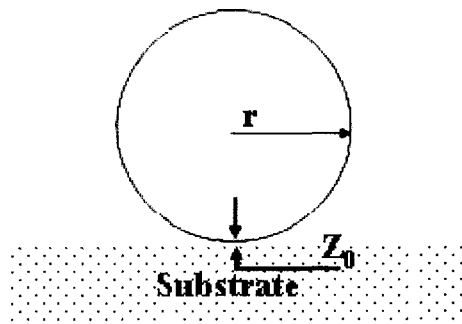
**Fig. 3. Cleaning efficiency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles at different conditions, i.e. dry, DI water, IPA**

Fig. 3은 입자들의 오염 상태에 따른 레이저 충격과 클리닝 후 제거 효율을 정량적으로 보여 주고 있다. 건식 알루미나 입자의 경우 제거 효율은 약 97%이며, 두가지 습식 상태 오염 입자, 즉 초순수에서 분산된 알루미나 입자의 경우 제거 효율은 약 35%, 이소프로필알콜에 분산되어 오염시킨 경우는 약 55%였다. 상기 결과는 동일한 웨이퍼, 동일한 오염 입자, 균일한 충격과 클리닝 힘이 가해진 상태에서 오로지 입자의 상태만이 다른 경우에 오염 입자의 제거 효율이 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 즉 건식 상태의 입자 경우 레이저 충격과에 의해 가장 제거가 잘 되었으며, 초순수에 분산시켜 오염시킨 습식 알루미나 입자의 경우가 가장 제거가 안된다는 결과를 얻을 수 있었다.

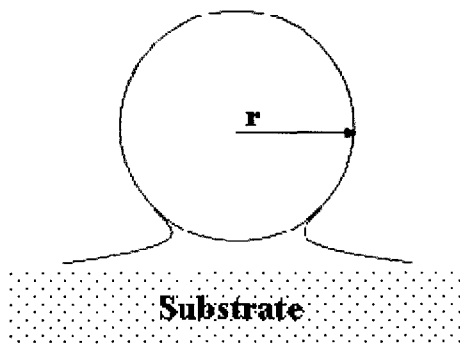
위와 같이 오염 입자의 상태에 따른 제거 효율의 차이를 이해하기 위해, 건식 및 습식 상태에서의 입자들의 접착력(adhesion force)을 고려해 보았다.

고체 표면 위에 존재하는 입자들의 접착력은 크게 3가지 힘으로 나누어지는데, 첫째가, 반데르 발스 힘(Van der Waals Force), 두 번째는 정전기 힘(Electrostatic Force), 세 번째는 모세관 힘(Capillary

Force)이다. 보통 건식 표면의 경우 입자의 크기가  $50\mu\text{m}$ 를 기준으로 그 이하인 경우 지배적인 힘은 반데르 발스 힘이며, 그 이상의 경우 지배적인 힘은 정전기 힘으로 알려져 있다.<sup>8-9)</sup> 또한 습한 환경 혹은 인위적으로 습식 공정을 거친 입자의 경우 모세관 힘은 매우 크게 작용한다.<sup>9)</sup> 따라서 본 실험에 사용된  $1\mu\text{m}$  크기의 알루미늄 입자의 경우 건식 상태의 경우는 반데르 발스 힘이 습식 상태의 경우는 모세관 힘이 지배적인 힘이 되리라는 것을 유추할 수 있으며, 이와 같은 입자 상태에 따른 표면에서의 모식도는 Fig. 4에 나타나 있다.



(a)



(b)

Fig. 4. Schematic diagram of (a) dry and (b) wet particle on the solid substrate: (a) Van der Waals state, (b) capillary state

쌍극자간인력(dipole-to-dipole attraction)에 의한 반데르 발스 힘을 구하기 위해서는 Hamaker 상수의 값을 알아야 한다. A를 Hamaker 상수 값이라 놓고, Hamaker 상수 값은 각 물질이 가지는 고유의 상수 값이다.  $A_{11}$ 을 오염입자,  $A_{22}$ 를 웨이퍼,  $A_{33}$ 을 DI Water의 Hamaker 상수라고 한다면, 식 (1)로부터 A를 쉽게 계산해 낼 수 있다.<sup>9)</sup>

$$A = (A_{11}^{1/2} - A_{33}^{1/2})(A_{22}^{1/2} - A_{33}^{1/2}) \quad (1)$$

Table1. Hamaker constant of semiconductor material

Materia	
Si	25.6
SiO2	6.5
Polystyrene latex	6.3
Al2O3	15.5
Water	4.38
TEOS	6.5
Cu	28.4
TaN	25.9

Table 1은 반도체 재료로 사용 되는 다양한 물질들의 Hamaker 상수 값을 나열해 놓았다. 여기서는 Air상태에서 실험을 하였으므로  $A_{33}$ 값은 0으로 놓고 A값을 구하면 되며, 구한 A값을 반데르 발스 힘의 계산식인 (2)식에 대입 하여 계산 하면 건식 입자의 반데르 발스 힘을 쉽게 구할 수 있다.<sup>9)</sup>

$$F_v = \frac{Ar}{6Z^2} + \frac{Ar_c^2}{6Z^3} \quad (2)$$

여기서 A는 Hamaker상수, r은 입자 반경,  $r_c$  는 입자와 표면의 접촉 면적의 반경 (반지름의  $\approx 3\%$ 라고 가정), Z는 모세 표

면과 입자간 거리( $\approx 4\text{\AA}$ )이다.<sup>9)</sup>

반면에 모세관 힘은 식 (3)에서와 같이 표현 된다.<sup>9,10)</sup>

$$F_{capi} = 4\pi\gamma r \quad (3)$$

여기서  $\gamma$ 는 용액의 표면 장력(surface tension)을 의미 하며,  $r$ 은 편평한 표면에 흡착된 오염 입자의 반경이다. 위 식에서 보는 바와 같이 모세관 힘은 입자의 크기와 모세관 미디엄(medium)의 표면 장력에 의해 크게 좌우 되며, 입자의 종류와는 무관함을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 알루미늄 입자의 크기는  $1\mu\text{m}$ 이며, 모세관 미디엄인 초순수와 이소프로필알콜의 표면 장력은 각각  $72.0 \text{ dyne/cm}$ ,  $21.2 \text{ dyne/cm}$ 이다.

Fig. 5는 상기 (2)와 (3) 식으로 계산된 건식 입자의 반데르 발스 힘과 습식 입자의 모세관 힘을 계산한 그래프이다. 입자의 반경( $r$ ) 즉 크기가 증가함에 따라 전체적인 입자의 접촉힘은 증가함을 알 수 있다. 실리콘 웨이퍼 표면에서 입자 크기  $1\mu\text{m}$ 의 알루미늄 입자의 반데르 발스 힘은  $0.53 \times 10^{-2} \text{ dyne}$ , 초순수 및 이소프로필알콜을 사용한 경우의 알루미늄 입자의 모세관 힘은 각각  $4.52 \times 10^{-2} \text{ dyne}$ ,  $1.38 \times 10^{-2} \text{ dyne}$ 이다. 결과적으로 순수 건식 상태의 입자의 경우 지배적인 힘으로 작용하는 반데르 발스 힘은 습식 상태에서 지배적으로 작용하는 모세관 힘에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있다. 또한 습식 미디엄인 알코올과 초순수의 경우 초순수가 보다 큰 표면장력을 가짐으로 해서 모세관 힘이 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3에 나타난 오염 입자 상태에 따른 제거 효율의 차이는 오염 입자 상태에 따른 접촉력의 큰 차이에서 발생한다고 사료된다.

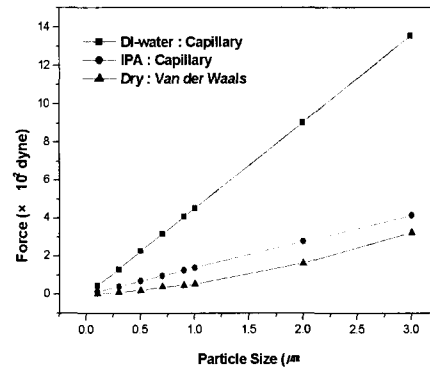


Fig. 5. Van der Waals and capillary force of alumina particle on silicon wafer as a function of the particle size

참고로 레이저 충격파 클리닝 시 제거 효율이 상대적으로 작게 나오는 습식 오염 상태 입자 제거의 경우, 레이저 충격파와 함께 자외선 레이저 빔을 함께 사용할 경우 획기적인 제거 효율의 향상을 얻을 수 있었으며, 구체적인 결과 및 분석 내용은 다음 논문에 게재할 예정이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 레이저 충격파 클리닝 방법을 이용해 실리콘 웨이퍼 상에 존재하는 오염 입자들의 상태에 따른 제거 효율을 비교해 보았다. 순수 건식 오염 입자의 경우 가장 높은 제거 효율을 나타냈으며, 초순수에 분산되어 웨이퍼에 오염된 습식 입자의 경우 가장 낮은 제거 효율을 나타내었고, 이소프로필알콜(IPA)에 분산되어 오염 시킨 습식 입자의 경우는 중간 정도의 값을 나타내었다. 결과적으로 동일한 웨이퍼, 동일한 입자 종류, 균일한 클리닝 힘의 작동 시 오염 입자의 상태에 따라 매우 큰 제거 효율의 차이가 발생하였으며, 이를 해

석하기 위해 실리콘 웨이퍼 표면에서 알루미늄이나 오염 입자의 접촉힘을 계산해 보았다. 계산 결과 반데르 발스 힘이 지배적인 힘으로 작용하는 건식 입자의 경우, 모세관 힘이 지배적인 힘으로 작용하는 습식 입자의 경우 보다 상대적으로 매우 작은 접촉힘을 가짐을 알 수 있었다. 또한 표면 장력 값이 이소프로필 알코올 보다 큰 값을 가지는 초순수가 보다 큰 모세관 힘을 발휘하며, 이와 같은 큰 모세관 접촉력으로 인해 레이저 충격파에 의한 초순수 습식 입자의 제거 효율이 가장 낮다고 판단된다.

### 참고문헌

1. 이종명, 이종명의 반도체 기술 핸드북, 한림원 (2003)
2. 이종명, 조성호, “차세대 반도체 표면 클리닝 기술들의 특성 및 전망”, 레이저가공학회지 4 (3), pp. 22-29 (2001)
3. S. Y. Lee, S. H. Lee, J. G. Park, “Interaction force between the silica particles and wafer surfaces during chemical mechanical planarization of copper” Journal of The Electrochemical Society 150 (5) G327-G332 (2003)
4. 이종명, 레이저와 청정가공, 한림원 (2002)
5. J. M. Lee, K. G. Watkins, “Removal of smallparticles on silicon wafer by laser-induced shock wave”, Journal of Applied Physics 89 (11), pp. 6496-6500 (2001)
6. S. H. Lee, J.G. Park, J. M. Lee, S. H. Cho, H. K. Cho, “Si wafer surface cleaning using laser-induced shock wave: a new dry cleaning methodology”, Surface and Coatings Technology 169-170, pp. 178-180

(2003)

7. 이종명, 조성호, “레이저 유기 충격파를 이용한 웨이퍼 표면 미소입자 제거”, 레이저가공학회지 5 (2), pp. 9-15 (2002)
8. J. M. Lee, K. G. Watkins, C. Curran, “Laser removal of copper particles from silicon wafers using UV, visible and IR radiation”, Applied Physics A 73 (2), pp. 219-224 (2001)
9. R. A. Bowling, K. L. Mittal ed., Particles on Surfaces, Vol. 1, Plenum, New York (1988)
10. Werner Kern, Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology, Noyes publications (1993)

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 ‘청정생산기술 개발사업’에 의한 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사의 마음을 전한다.

